

博 士 論 文

避難者の特性を含む避難シミュレーションによる
避難誘導に関する研究

A Study of Guide of Evacuee Using Emergency Simulation Including
Characteristics of Evacuees

2019 年 1 月

杉 浦 啓 太

目次

1 章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.2	既往研究	3
1.2.1	アンケートや施設を利用した避難に関する研究	3
1.2.2	シミュレーションによる避難に関する研究	5
1.2.3	仮想現実による避難に関する研究	7
1.2.4	避難誘導に関する研究	8
1.2.5	過去の研究の問題点	9
1.3	研究目的	11
1.4	本論文の構成	12
2 章	マルチエージェントシミュレーション(MAS)を用いた避難シミュレータの開発	15
2.1	本章の目的	15
2.2	エージェントの特徴	16
2.2.1	移動のための判断の特性	16
2.2.2	視野範囲	17
2.2.3	障害物の存在に対する移動方法	19
2.3	フィールド	20
2.3.1	避難領域	20
2.3.2	エージェントの初期配置	21
2.3.3	誘導灯の概要	23
2.3.4	シミュレータ上における誘導灯のモデル	24
2.4	エージェントの行動フローチャート	26
2.5	シミュレーションの基本モデル	27
2.6	まとめ	29
3 章	避難誘導灯の最適配置問題の数理モデルの構築と有効性の検証	31
3.1	本章の目的	31
3.2	誘導灯の最適配置問題に対する数理モデルの検討	32
3.3	数理モデルの構築	33

3.4	誘導灯の最適配置問題の数理モデルの数値実験及び考察.....	35
3.5	単純構造を用いた避難誘導灯の最適配置問題の数理モデルの有効性検証.....	37
3.5.1	避難領域	37
3.5.2	単純構造を用いたシミュレーションによる有効性検証	38
3.6	実在する店舗のレイアウトを用いた避難誘導灯の最適配置モデルの有効性検証..	40
3.6.1	避難領域	40
3.6.2	最適配置モデルの効果.....	42
3.7	混雑発生時に予測される避難者の行動.....	43
3.8	数値実験	44
3.8.1	実在する店舗のデータを用いた数値実験	44
3.8.2	フィールド内の空間に対する集団の変化による影響.....	45
3.9	まとめ.....	49
4 章	仮想現実ゲームによる避難者判断の分析と シミュレーションによる評価	51
4.1	本章の目的	51
4.2	仮想現実ゲーム	52
4.2.1	エージェントの特徴	52
4.2.2	フィールドの特徴.....	53
4.3	避難実験の概要	55
4.4	避難者の特徴分析.....	56
4.4.1	実験条件	56
4.4.2	実験結果	58
4.5	避難時の視点の分析.....	61
4.5.1	実験条件	61
4.5.2	実験結果	64
4.6	避難時に避難者が参考にする物体の分析.....	65
4.6.1	実験条件	65
4.6.2	実験結果	67
4.7	仮想ゲームから得られた避難者の判断特性のシミュレータへの導入	69
4.8	単純構造のレイアウトを用いたシミュレーション	71
4.8.1	避難領域	71

4.8.2	避難時に参照する物体の優先順位が避難に与える影響	72
4.8.3	視野範囲が避難行動に与える影響	74
4.9	実在する店舗のレイアウトを用いたシミュレーション	76
4.9.1	避難領域	76
4.9.2	避難時に参照する対象の優先順位が避難に与える影響	77
4.9.3	視野範囲が避難行動に与える影響	79
4.10	まとめ	81
5 章	避難誘導を効果的に行うための新しい避難誘導灯の提案	85
5.1	本章の目的	85
5.2	補助誘導灯の提案と導入	86
5.3	避難シミュレータ上における補助誘導灯のモデル	87
5.4	補助誘導灯導入の効果	89
5.4.1	避難領域	89
5.4.2	補助誘導灯の設置台数が避難に与える影響	90
5.4.3	避難の参考にする物体の優先順位が異なる避難者への効果	92
5.4.4	異なる視野範囲を持つ避難者への効果	94
5.5	フィールド内の空間に対する集団の変化による影響	96
5.6	まとめ	102
6 章	障害物の発生を考慮する避難誘導法の検討	105
6.1	本章の目的	105
6.2	避難誘導灯の最適配置問題の数理モデルが抱える問題点と対策	106
6.3	障害物を考慮した避難誘導灯の最適配置問題のモデル化	107
6.4	障害物発生を考慮した誘導灯の最適配置問題の数理モデルの構築	109
6.5	数値実験に利用するフロアのレイアウトの特徴	111
6.6	シミュレーションによる障害物の考慮による誘導灯配置の特性評価	113
6.7	障害物が発生する環境における誘導灯による避難者誘導制御法の提案	117
6.7.1	誘導制御法の特徴	117
6.7.2	数値実験による評価	120
6.8	まとめ	127
7 章	結論と今後の課題	129

7.1 本研究のまとめ	129
7.2 結論	131
7.3 今後の課題	132
謝辞	135
参考文献	137
Appendix	145
A1. 避難シミュレータの構成	145
A1.1 システムのモデル	145
A1.2 システムの構成	148
A2. 仮想現実ゲームの構成	151
A2.1 システムのモデル	151
A2.2 システムの構成	154

1 章 序論

1.1 研究背景

日本国内は毎年台風や地震などの自然災害や火災などの人為的な災害が頻繁に発生している。近年の自然災害による被害を調査すると、台風による豪雨や地震・津波による被害が記憶に新しい。気象庁によると、台風は毎年平均 11.4 件が日本に接近[1]しており、台風による大規模被害は毎年のように発生している。平成 27 年 9 月関東・東北豪雨では鬼怒川の堤防が決壊し、床上浸水約 4,400 棟、床下浸水約 6,600 棟の浸水被害が発生した。また、地震については最大震度 4 以上を観測した地震は 2017 年に 40 回、2016 年には 192 回[2]と毎年多数発生している。近年、国内で発生した大地震には東日本大震災、新潟県中越沖地震などが挙げられる。2011 年 3 月 11 日の東日本大震災では地震だけでなく、津波も大きな被害をもたらした。岩手県の大槌町では人口 16,058 人のうち、約 8%にあたる 1,256 人が死亡・行方不明[3]となった。

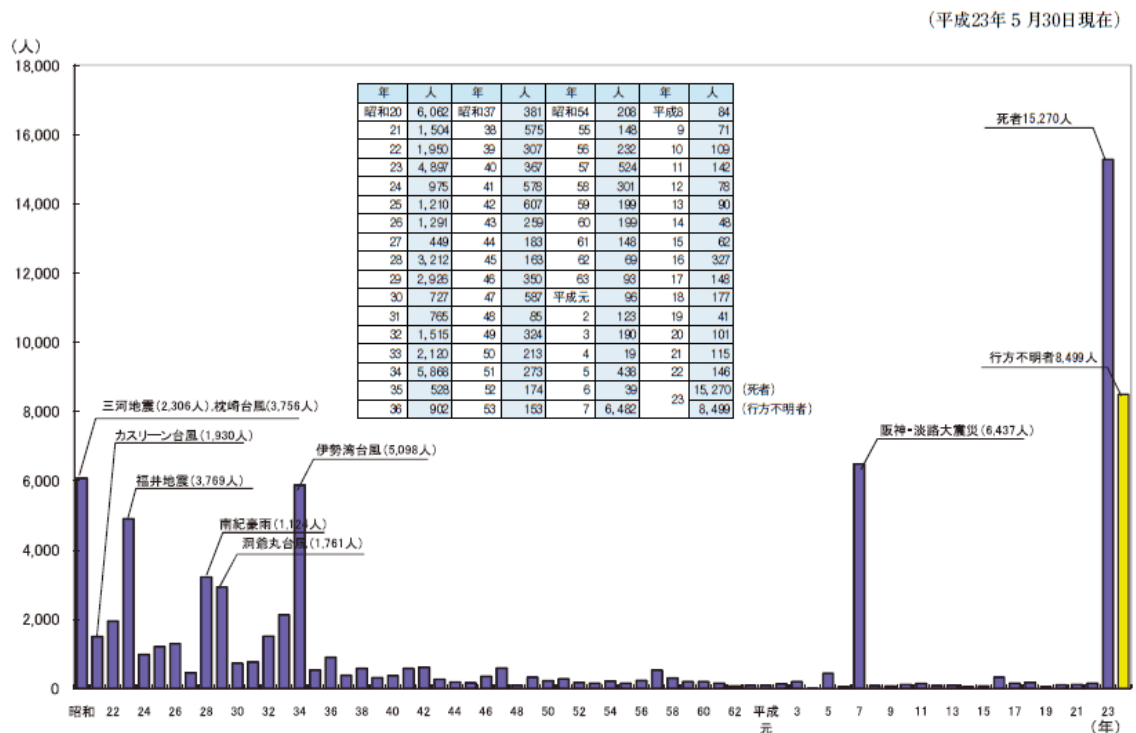
このように近年でも自然災害が多発しているが、1 つの自然災害は他の異なる多くの災害を同時に引き起こす。例えば、地震では、建物の倒壊や火災、津波による水害が挙げられる。また、台風では風による倒木や建物の一部倒壊、大雨による土砂崩れが挙げられるこのように自然災害が発生した際には人的・物的問わず被害が大きくなる。とくに多くの人間が都市に集中する現代では、都市部の建設物が大規模・複雑化しているため、被害が大規模化する傾向がある。

図 1-1 は日本における自然災害の死者・行方不明者数の推移である。死者・行方不明者数は昭和 35 年以降、それ以前と比較して大きく減っていることがわかる。これは防災対策や予報・情報通信システムの充実が要因となっており、昭和 36 年に制定された災害対策基本法による貢献が大きいとされている。この法律は、昭和 34 年に発生し、愛知・岐阜・三重県及び紀伊半島一体を中心に大きな被害をもたらした伊勢湾台風(死者・行方不明者 5098 人)を契機に制定された法律[5]で、従来の防災体制の不備が指摘され、総合的かつ計画的な防災行政体制を目的として制定された。

以上のことから、災害による被害を減らすためには計画的な防災計画を検討することが非常に重要であることがわかる。自然災害に伴う津波や火災などといった災害・緊急時において、建物内等の閉鎖空間での歩行者の避難行動をあらかじめ予測することは、避難計画や安全性の考慮といった面で施設設計に重要な役割を持つ。無計画な避難順路

や避難出口では、避難者の混雑から生まれる将棋倒しのような状況や、避難出口に十分な広さが確保されていない状況、避難誘導灯が確認できずに避難出口の位置が把握できない状況が発生し、死傷者を増やす要因となり得る。

しかしながら、地震や火災、水害などの大規模災害における防災対策のための実験は、大規模な装置や多くの費用が必要になるのに加え、被験者に危険が伴う可能性があるため困難である。建物内における集団の避難行動について実際に実験を行うとなると、建物内のレイアウトや避難者集団の偏り、避難者個人の特性、避難者の災害時の再現することは物理的・経済的にも現実的とはいえない。そのため、避難者の行動分析はシミュレーションによる分析、もしくは仮想現実を用いた実験で分析されることが多い。



資料：昭和20年は主な災害による死者・行方不明者（理科年表による）。昭和21～27年は日本気象災害年報，昭和28年～37年は警察庁資料，昭和38年以降は消防庁資料による。

(注) 平成7年の死者のうち、阪神・淡路大震災の死者については、いわゆる関連死919名を含む（兵庫県資料）。

平成22年の死者・行方不明者は速報値。

平成23年の死者・行方不明者については、東北地方太平洋沖地震のみ（緊急災害対策本部資料）。

図 1-1 自然災害による死者・行方不明者(平成 23 年度防災白書[4]より引用)

1.2 既往研究

避難に関する既往研究は以下の 4 つに分類できる。本項では下記の避難に関する既往研究の内容をまとめる。

- アンケートや施設を利用した避難に関する研究
- シミュレーションによる避難に関する研究
- 仮想現実による避難に関する研究
- 避難誘導に関する研究

1.2.1 アンケートや施設を利用した避難に関する研究

自然災害の分析や避難時の避難者行動分析はこれまでに多数の研究で取り扱われてきた。研究毎に様々なアプローチが採用されてきたが、多くの研究で採用されているアプローチが、実際に発生した自然災害についての住民へのアンケートや各種情報を用いた調査研究や迷路などの大規模な設備を用いた避難実験に関する研究である。

実際に発生した自然災害をテーマとした研究としては東日本大震災で発生した大地震と津波をテーマに地形・まちの履歴と避難行動(初動)・コミュニティと集落環境の避難行動への影響を調べた研究[6]や 1998 年に発生したホテル天山閣で発生した火災におけるホテル従業員の対応行動に関するアンケート調査[7]、北薩豪雨災害をテーマに被救助者が多かった地域での被救助者の避難行動の背景意識と今後の水害に対する潜在意識を調査した研究[8]、過去の洪水災害経験が避難行動に与える影響に関する調査[9]などが挙げられる。

これらの研究では実際に発生した自然災害で被災した避難者にアンケート調査をしているため、避難者の災害時の心理状況を再現しているといえるが、実際に発生した時点とアンケートを行った時点では時間的な乖離が大きい。

迷路などの実験施設を利用した研究としては実際の災害発生に似せた状態で実験を行う研究が多い。火災をテーマとした研究としては、向光性を利用した避難誘導を行うために壁面の輝度による経路選択実験[10]や避難経路に関して情報を持っていない環境での猛煙下での避難行動実験[11]、照明と煙を利用した迷路下での実験によって緊急時の判断力や行動力の関係を分析した研究[12]が挙げられる。また、洪水をテーマとした研究としては実物大の階段や扉を利用した浸水時の地下室からの避難に関する研究[13]や建設省土木研究所(現：国立研究開発法人 土木研究所)の大型直線水路を用いた水害想定

時の水中歩行実験[14]などが挙げられる．これらの実験による避難行動を分析する研究では大規模な装置や設備，多くの費用が必要になるのに加え，被験者に危険が伴う可能性があるため，容易に実験を行うことは困難である．

1.2.2 シミュレーションによる避難に関する研究

前項で述べたように、火災や水害、地震などの大規模災害における防災対策に関する実験は、被災当時と同じ状況を再現するほど被験者に危険が伴うため困難であり、そもそも被災時と同一な条件の再現が難しい。とくに建物内における集団の避難行動について実機で実験を行うとなると、建物内のレイアウトや避難者集団の偏り、避難者個人の特性、避難者の災害時の心理状況を再現することは物理的・経済的にも現実的とは言い難い。

そのため、一般に避難者の行動はシミュレーションによって分析される。シミュレーションの先行研究としてはセルラ・オートマトン(以下、CA と略記)やマルチエージェント(以下、MA と略記)を用いた研究が挙げられる。CA は小売店舗内の消費者の購買行動に関するシミュレーション[15]や流体解析[16]といった研究に利用されている。MA は都市交通に関するシミュレーション[17]や市場解析[18]、強化学習[19]などに利用されている。このようにシミュレーションは様々な分野の研究に幅広く用いられており、とくに避難に関する研究では、避難者が他の避難者などの周囲の状況と互いに影響し合いながら避難していることが知られていることから、避難者間の相互作用を考慮に入れた MA を用いた研究が増えている。

シミュレーションを用いた研究例としては、火災を扱った避難シミュレーションの研究としては避難に影響を与える対象物やその数について調査した研究[20]やシミュレーション上に火災という現象を取り入れた研究[21]が挙げられる。また、水害を扱った避難シミュレーションの研究としては津波避難行動を MA によってモデル化し、徳島県海陽町に適用して避難の傾向を調査した研究[22]や地下空間浸水時の建築空間における個々の避難に関する分析を行った研究[23]が挙げられる。他にも、地震を扱った避難シミュレーションとしては神戸市やつくば市のデータを用いて地震発生時のシミュレーションを行い、結果を比較することで地域性を考慮した避難シミュレーションを構築した研究[24]や狭い街路を持つ街区や地下鉄駅、大規模地下街を対象に地震発生時を想定した群集の行動をモデル化する避難シミュレーションの開発に関する研究[25]、東日本大震災で被災した石巻市を対象に実施したアンケートから得られた避難行動特性に基づくシミュレーションを構築し、避難訓練の強化等に用いた研究[26]が挙げられる。このようにシミュレーションを用いた研究についても自然災害毎に多様なアプローチによる研究が行われている。また、シミュレーションに関する研究については特定の災害に着目

しない研究も見られる．具体的には被災時に避難経路が一部通行不能となった場合の避難状況を分析可能な避難シミュレーションシステムの開発に関する研究[27]や個別要素法(DEM)を用いた群衆避難行動シミュレーション手法の提案[28]，避難誘導法に関して，杉万らの実験によって有効性が確認された吸着誘導法[29]をシミュレーション上で再現し，有効性を確認した研究[30]が挙げられる．また，シミュレーション結果を基に実際に実験を合わせて行うことで群衆歩行に関する分析をより詳細に行う研究[31]なども存在する．

1.2.3 仮想現実による避難に関する研究

近年は PlayStation VR[32]や Oculus Rift[33]などの仮想現実に関する技術が進歩しており、避難者の行動分析にまで利用される研究が見られている。これは仮想現実を実現する装置である PlayStation VR や Oculus Rift などが安価で購入できるようになったことが要因である。仮想現実はゲームだけに留まらず、触角を利用した手術シミュレーション[34]などの医療分野や製造業の様々な技術の伝承[35]などの人材育成といった広い範囲で用いられている。

とくに避難に関する分野では、被験者の安全を確保しつつ、被災当時の環境に近い状況を作成できるため、多くの研究で取り入れられている。具体例としては、映像装置だけでなく、煙発生装置やヒーターを用いることで視覚以外の感覚もより被災当時に近づけた火災の疑似体験システム[36]や実際の自動車を利用して実験するためには安全性や場所の確保が難しい自動車運転者の津波避難実験用ドライビングシミュレータの開発[37]、1人称視点で操作ができるウォークスループログラムを利用して地下空間浸水時の行動分析を行う研究[38]などが挙げられる。これらの特定の災害に着目した研究以外にも、被験者の視界を大画面の映像で囲んだ大掛かりな設備を用いた没入型の避難シミュレータによる行動分析[39]やヘッドマウントディスプレイや各種センサーを用いて、視線の動きなどの導入した VR システムによる行動分析[40]などの研究も存在する。

1.2.4 避難誘導に関する研究

災害の被害を削減するためには効率的な避難が必要となる．効率的な避難のために避難誘導に関する研究が数多く行われている．具体例としては，MA を用いたシミュレーションによって，避難者間の情報伝達が避難の効率化に重要であることを明らかにした研究[41]や多くの人が所持しているスマートフォンの光を用いて停電した地下街を想定した避難誘導方法の提案[42]，大きな駅などに存在するデジタルサイネージを用いることで避難を効率化する研究[43]などが挙げられる．

このように避難を効率的に行うための方策が様々検討されているが，代表的な避難誘導法の一つに避難誘導灯がある．避難誘導灯は室内において非常口・避難通路を示す標識で，避難をする上で非常に重要な要素である．1975年に(社)日本照明器具工業会から避難誘導灯の認定が出されて以来，避難誘導灯は点滅誘導灯や誘導音装置付き誘導灯，高輝度誘導灯というように効率的な避難のために発展を続けてきた[44]．避難誘導灯に関する研究としては，前述の点滅機能が付いた誘導灯や音声誘導ができる誘導灯について，誘導効果を調査し，わかりにくい出口や誘導したい出口への誘導に有効性があることを検証した研究[45]や五感の中で最も重要な視覚に着目し，どのような環境で誘導灯を設置することが最も認識しやすいのかを調査した研究[46]が存在する．また，シミュレーションを用いて，避難誘導灯の配置場所について，「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」という手法を提案した研究[47]も存在する．

1.2.5 過去の研究の問題点

本節では前節までの既往研究を踏まえ、これまでの避難に関する研究が抱える問題点を整理する。

従来から災害時での避難行動特性に関する研究ではマルチエージェント・シミュレーション(以下 MAS と略記)を利用した研究が行われてきた。これまでに地震時の緊急避難行動を予測するシミュレーション手法に関する基礎研究[48]がある。この研究では、高層ビルや大規模地下街での緊急避難行動を予測するための MAS が開発された。しかし、開発された MAS において、避難者の行動は「他の避難者が多い方向、もしくは出口の方向へ移動する」という単純な判断で構成されている。

他に津波群衆避難の解析のための MAS の利用方法に関する基礎的検討[49]がある。この研究では東日本大震災の宮城県石巻市門脇町・南浜町での津波避難の事例を用いて群衆避難の解析を実施するために MAS を利用した。しかし、利用した MAS における避難者間の相互作用は「他の避難者を発見した場合は衝突を回避する」という単純な判断で構成されている。このように避難者行動は単純な判断をルール化したシミュレーションによって分析している研究が多いが、避難者の潜在化した行動分析に関する意思決定が十分評価されているとは言えない。さらに、MAS のみによる分析だけでは避難者の一般的な行動パターンしか分析することができないが、避難者の行動分析を十分に行うためにはシミュレーションでは表現できない避難者の複雑な行動パターンを考慮する必要があると考えられる。また、避難シミュレーションを用いた研究では避難者の行動分析が行われているものの、その分析結果を基に避難シミュレーションの再現性の向上や効率的な避難誘導法に言及する研究は少ない。

これまでの研究には実験による避難時の行動特性の調査などがある。具体的には、火災時における歩行経路の記憶に関する分析をするために視界を制限する帽子を利用した実験[50]や自宅から指定避難所まで移動する際に交差点毎に避難経路の選択理由を聞き取るという方法による経路選択の要因調査[51]、アンケートによる津波時の避難行動についての住民の環境認知に着目した分析[52]などが行われている。しかし、これらの実験での環境は前節で述べたように災害時の逼迫した状況を再現しているとは言えない。仮想現実技術を用いた避難時の行動特性に関する分析などが多数存在する。仮想現実を用いることでアンケート調査等では難しいとされる災害時の周囲の状況を再現することが可能となる。具体的な先行研究としては、PC 向けの液晶ディスプレイを用いた没入型

避難シミュレータによる避難経路選択に関する分析[53]やジョイパッドを利用した避難シミュレータによる火災時の地下鉄駅構内での避難経路探索に関する実験[54]などが行われている。これらの研究を始めとして、仮想現実を用いた避難に関する研究では被験者の行動特性を分析する研究が多く、避難環境の変化の下で被験者の“避難時の意思決定のプロセス”に着目して調査分析した研究は見られない。

また、本研究では避難誘導方法として、避難誘導灯の利用を考える。避難誘導灯に関する研究では前項で述べたように特殊な誘導灯の有効性の検証を始め、多岐に行われている。避難誘導灯の配置方法については前項で述べたように「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」という手法を提案した研究が存在するが、この研究で設定した誘導灯の配置には消防法に準拠した配置をベースに特定の出口へ向けて誘導灯を偏らせる配置となっている。しかしながら、この誘導灯の偏らせ方については議論がされておらず、誘導灯を設置する建物やフロア全体のレイアウトに対して、一意に決定する配置にはなっていない。他にも誘導灯の配置場所についての研究は矩形領域分割を用いて誘導灯自動配置アルゴリズムを構築した研究[55]がある。この研究では誘導灯の配置を決定する問題を扱っているが、シミュレーションなどによって有効性の評価が十分行われていない。また、ネットワークモデルを用いて誘導灯の配置を決定する研究[56]が存在する。この研究では MAS を用いて、有効性の検討はされているが、単純なモデルでの有効性検討に留まっており、実際の建物内での有効性までは検証されていない。

1.3 研究目的

前節の問題を踏まえ、本研究では効率的な避難誘導について、以下の事項を検討する。

- ① 誘導灯の最適配置問題の数理モデルの構築と有効性の検証
 - (ア) フロア内に存在する避難者ができる限り確認しやすく、効果的な誘導を行うための誘導灯の配置を調べるために、数理モデルの構築を行う。
 - (イ) 実際に存在する建築物のデータを利用して数値実験を行う。
 - (ウ) 数値実験により得られた結果は MAS を用いた避難シミュレーションに入力し、最適配置モデルの効果の検証を行う。

- ② 避難誘導に効果的な設備の開発や新しい誘導法の提案と有効性の検討
 - (ア) 避難シミュレーションの結果を利用した仮想現実ゲームを通して、避難者の行動に関する情報を抽出し、顕在化されている避難者の意思決定のプロセスを分析する。
 - (イ) (ア)での分析結果をエージェントの行動ルールとして組み込むことで、複雑な環境下でのより高精度な避難者行動を模擬する MAS を構築する。
 - (ウ) 分析した行動の特性から避難者の誘導に効果的な設備の開発や新しい誘導法を提案し、避難シミュレーションにより検証を行う。

1.4 本論文の構成

本研究では前節の研究目的を踏まえて、MAS を用いた避難シミュレータと仮想現実ゲームを構築し、避難行動の分析を行う。また、避難誘導灯の最適配置問題を定式化し、避難シミュレータを用いて有効性について検討する。本論文の構成は次のとおりである。

第 1 章では、日本における自然災害による被害を調査し、本研究の背景と既往研究、目的、論文の構成を示した。

第 2 章では、既往研究からの分析結果を踏まえて、本研究で構築した避難シミュレータの特徴、仕組みについて述べる。とくに本シミュレータの 2 大構成要素となる避難者(エージェント)と避難対象領域(フィールド)について、それぞれ述べる。

第 3 章では、誘導灯の設置場所について、避難誘導灯の最適配置という言葉の定義を明確にした上で、災害時の被害軽減に繋がる誘導灯の配置場所を求める数理モデルを構築し、数値実験とシミュレーションにより有効性の検証を行う。シミュレーションでの有効性検証では第 2 章で構築した避難シミュレータを用いて、単純な構造のレイアウトと実在する店舗のレイアウトの双方を用いたシミュレーションを用いる。また、初期配置の影響を調査するためのシミュレーションについても併せて実施し、避難の傾向を分析する。

第 4 章では、本研究で開発した仮想現実ゲームを利用した実験について説明する。最初に Unity によって開発した仮想現実ゲームの構成や操作方法、第 2 章で構築した避難シミュレータと仮想現実ゲームを連携させるための特徴について述べる。次に仮想現実ゲームを用いた実験を行うことで、避難者の潜在化している意思決定についての調査を行う。とくに避難時の視界が関わる実験については、アイマークレコーダを併用することで、より詳細な分析を行う。最後に実験結果に基づいた特性を持つ避難者を MAS に導入してシミュレーションを行うことで、それらの特性が避難行動に与える影響や集団内で相互に与える影響について調査する。

第 5 章では、第 3 章で検証した初期配置の影響を調査したシミュレーション結果から、混雑を解消するための補助誘導灯を提案する。この補助誘導灯は、出口の混雑を判断して別の出口へ誘導する機能を持つ。この補助誘導灯の有効性については、第 2 章で構築した避難シミュレータを用いたシミュレーションを通じて、補助誘導灯の有効性を調査する。

第 6 章では、災害発生時に起こりうる建物内での障害物の発生を踏まえて、第 3 章で

構築した避難誘導灯の最適配置問題の数理モデルを拡張し、その有効性について検証する。また、第4章で提案した補助誘導灯についても障害物の発生を踏まえて拡張し、その有効性をシミュレーションによって評価する。

最後に、第7章では、本研究の総括を行うと共に各章で得られた知見を述べる。また、今後の研究課題について述べる。

2 章 マルチエージェントシミュレーション(MAS)を用いた避難シミュレータの開発

2.1 本章の目的

本章では第 1 章で説明した研究目的の 1 つである「MAS と仮想現実ゲームを組み合わせたゲームによる災害時の避難者行動を分析するシステムの開発」における MAS を用いた避難シミュレータの特徴や各構成要素について説明する。

本研究においてオブジェクト指向言語である Java 言語を用いて MAS を用いた避難シミュレータを構築した。開発したシミュレータの構造は Appendix1 に示している。本研究で構築する避難シミュレータは下記の 2 つの目的を満たすために構築されている。

- ・ 避難者の行動分析や避難者集団の群衆行動の分析
- ・ 分析結果を基に効率的な避難誘導方法の提案とその有効性検証

2.2 エージェントの特徴

本項では本シミュレータの中核となるエージェントの特徴について詳しく説明する。

2.2.1 移動のための判断の特性

開発したシミュレータのエージェント（避難者）は下記の 3 つの特徴を有する。

- ① 避難者の初期配置や人数は任意に設定できる。
- ② 避難者は領域内の情報を取得し、移動方向等を判断できる。
- ③ 避難者は初期状態では出口の位置を知らず、視野内の最優先の目標へ移動する。

次に、視野内のオブジェクトに対する優先順位を以下に示す。

- ① 出口
- ② 誘導灯
- ③ 直近の避難者の移動方向
- ④ ①~③が存在しない場合、その時点の進行方向

災害時において、とっさに他者の行動を判断の基準とする追従行動が起こることが知られており、この動きをシミュレータに組み込むことは自然である。これらの避難者の視野内の優先順位を図 2-1 に示す。

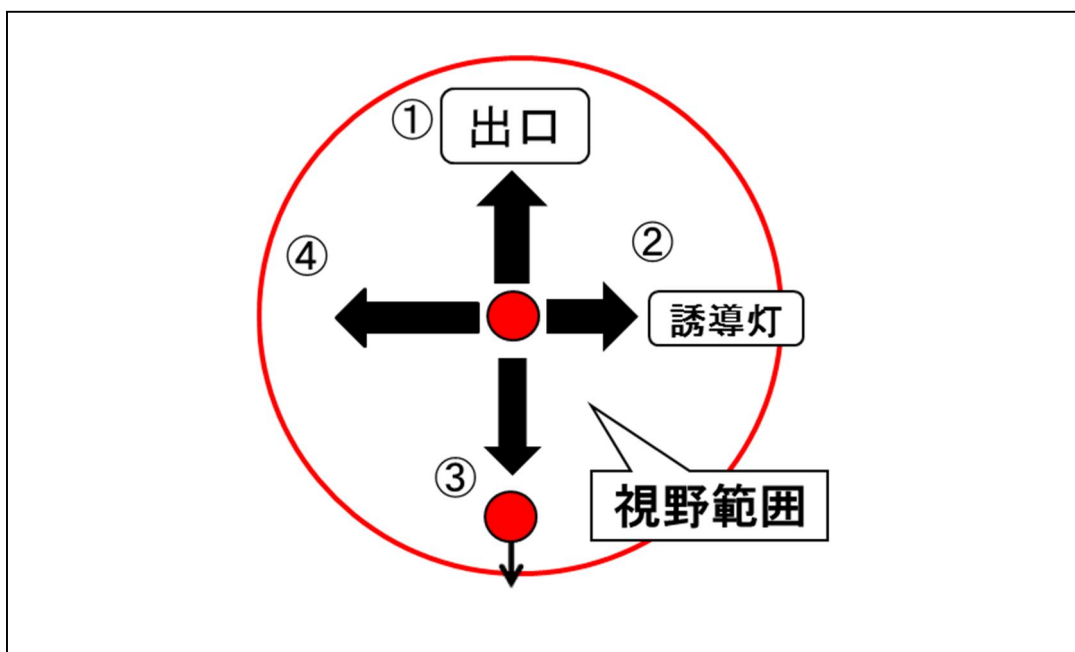


図 2-1 避難者の移動優先順位

2.2.2 視野範囲

避難者の持つ視界の範囲は避難者を中心とする 360 度に展開される任意の円領域内に設定する。現時点では避難者の視界は 360 度で設定しているが、後章で視界が避難行動に与える影響が評価され、360 度以外の視野範囲がシミュレータに組み込まれる。避難者はこの視界範囲の中で移動の目標とする対象を探索するため、避難者にとっては視野範囲の情報が移動に大きく影響を及ぼす。

本シミュレーションでは障害物を領域内に配置している。視野範囲内に障害物があった場合、その障害物の背後に死角が生じる。本シミュレータでは避難者と視野範囲内の障害物との相対的な位置関係から視野範囲に死角を形成する。死角の形成領域の形状には、次のように分類する方法[57]を用いた。

- i) 避難者の縦横の直線上
- ii) 避難者の斜め 45 度方向
- iii) 避難者の横軸から斜め 45 度にかけての領域
- iv) 避難者の縦軸から斜め 45 度にかけての領域

以上の 4 分類から形成される死角領域を図 2-2 に示す。図中の赤い丸はエージェント、黒く塗りつぶされた部分は障害物、青く塗りつぶされた部分は生じた死角を示している。各エージェントは任意に設定された視野の円形領域内にて、自らの現在位置情報と円領域内で取得した壁の位置情報から相対的な位置関係を計算し、上記の 4 種類に分類を行う。分類した後に、図 2-2 のような死角領域を決定し、円領域の視野内において死角判定を行っていく。死角判定された箇所ではそこに障害物があるかどうかを再度確認するが、無ければその領域を探索することは無い。

このような死角処理により形成された具体的な視野の例を図 2-3 に示す。図中の赤い丸がエージェントを示し、エージェントを中心とした赤い円が最大視野範囲、水色で塗りつぶされた部分が死角と障害物を除いた、エージェントが見渡すことのできる視野範囲を示す。まず円領域の視野内において、視野探索を行い見渡せる視野を決定。その後この視野範囲の中で他の避難者や出口の探索を行う。死角となった領域は視野外と見なし、探索の対象外とする。

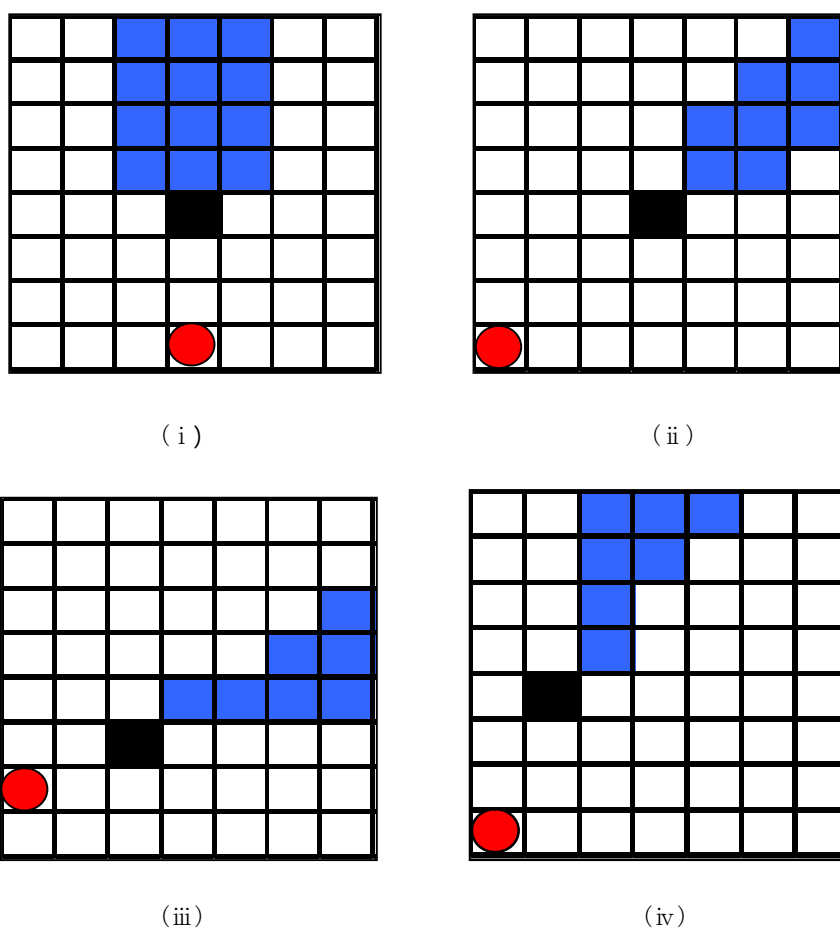


図 2-2 形成される死角領域

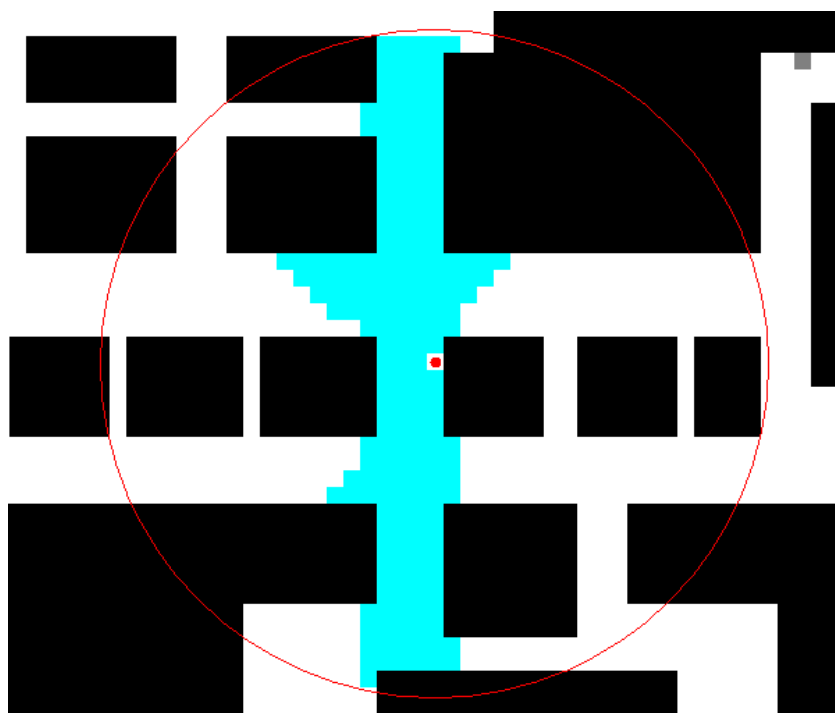


図 2-3 シミュレータ上で形成された避難者の視野範囲

2.2.3 障害物の存在に対する移動方法

避難者の進行方向に障害物が存在する場合は、障害物の外形に沿って移動する。外形に沿う方向は次の様に設定される。例えば進行方向に垂直に障害物が存在する場合、左右どちらに移動するかは進行方向に先に壁がなくなる方向を選択する。図 2-4 は以上のような移動の一例を示す。

また、避難者の移動速度および初期位置は任意の実数値を設定できる。各避難者間は 2 次元空間上で一定距離までしか近づくことができず、移動先に他の避難者が存在する場合は障害物と同様に手前もしくは左右等に回避した位置に移動する。この手法は[57], [58], [59]においても用いられているセルオートマトンの考え方を導入した。このことから、移動速度の遅い人間が移動速度の速い人間の移動を阻害するといった現象も起こり得る。これは現実的にも起こり得ることであり、建物内という閉鎖空間でシミュレーションにおいてこの制約を組み込むことは自然であると考ええる。例えば狭い通路や避難出口の付近に移動速度の遅い人間が溜まれば、そこで人の流れが停滞することも結果として表現されることになる。

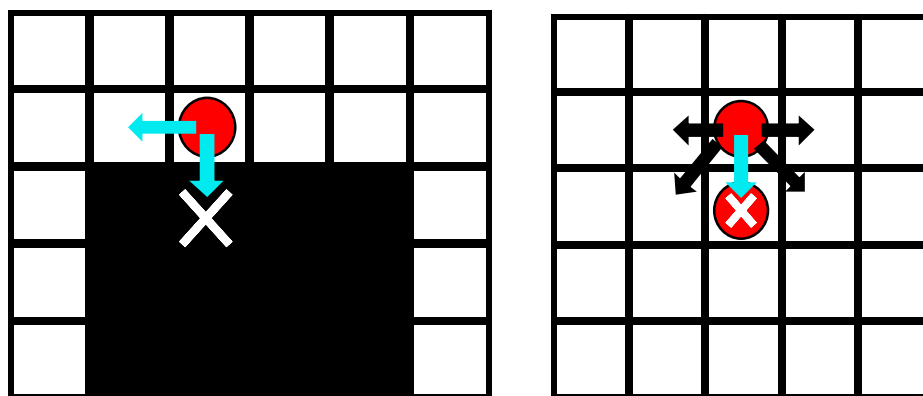


図 2-4 進行方向に障害物があった場合の移動

2.3 フィールド

2.3.1 避難領域

図 2-5 は本研究で用いる領域の構造の一例を示す。構造レイアウト、障害物、出口の位置・階段の位置は任意で変更することが可能である。避難シミュレータを構成するクラス(Appendix 1)について、領域に関する情報は全て **Location** クラスで設定され、**HinanDisp** クラスにおいて、図 2-5 のように表示を行う。図 2-5 内の黒色塗りつぶしの領域は壁又は障害物とする。避難者は出口から外部に避難できる（図 2-5 中の赤丸内の灰色部分）。エージェントが出口から外部に避難するとそのエージェントについては避難完了とし、本シミュレーションでは全エージェントの避難完了までに要した時間と避難を完了した人数を主な評価項目とする。

各階段・出口はそれぞれ独立であり、異なる出口や階段間で干渉することは無い。本研究で行うシミュレーションではどの出口・階段においても、パラメータ・条件に位置情報以外に差異は無いものとした。

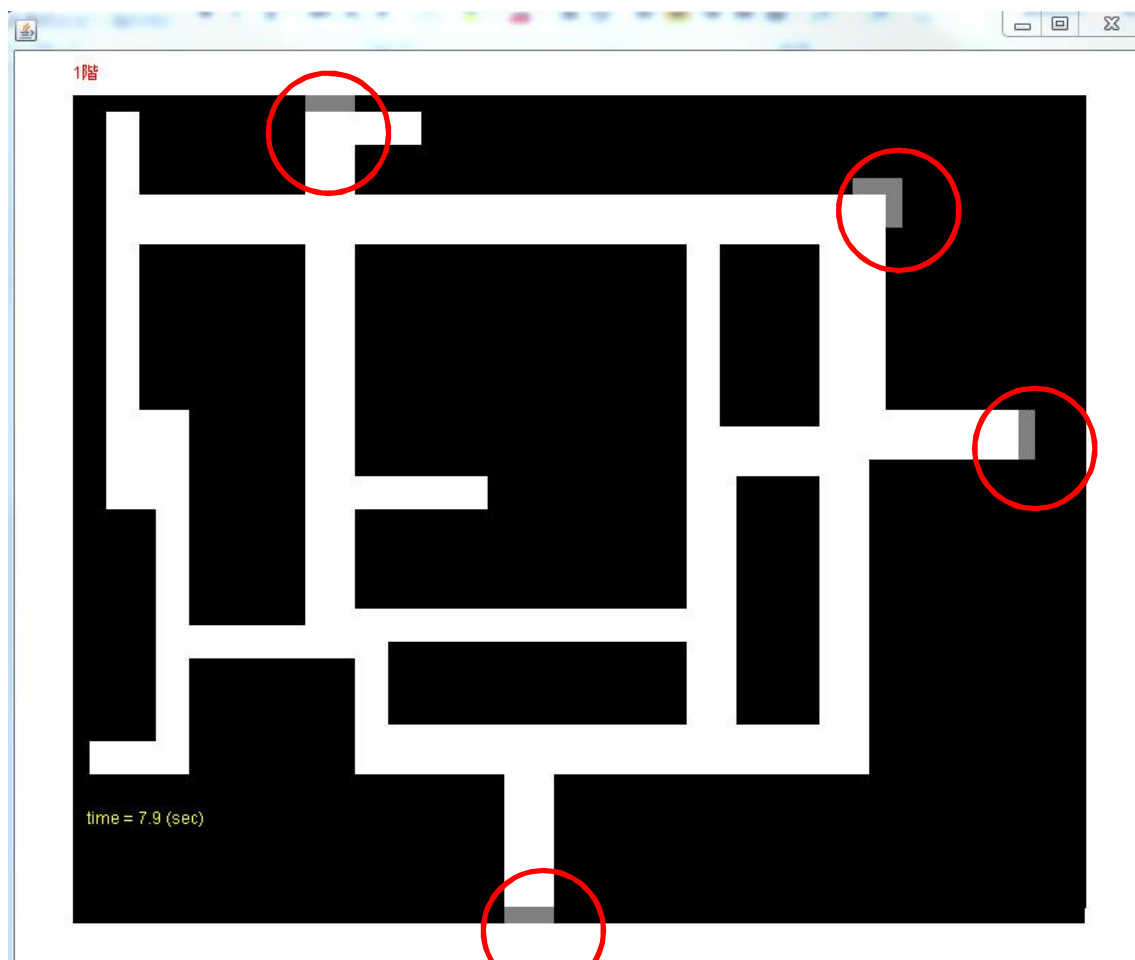


図 2-5 シミュレータ上の避難領域例

2.3.2 エージェントの初期配置

各階の領域内を縦横共に 3 等分し、図 2-6 に示すような 3×3 の 9 セルに分割する。このセル 1 つに対してどれだけの人数のエージェントを発生させるかは任意で決定することが可能である。そして、セル内においてどの位置にエージェントを配置するかは一樣乱数（プログラム上では Java の関数 `Math.random()` を利用）を使って配置箇所を決定する。もちろん障害物や壁の位置には配置されない。

初期配置を一樣に配置する場合には、エージェント一人の配置において、分割された 9 セルの各セルについて、エージェント数を設定後、避難者がセル内に一樣乱数を用いて初期配置座標を決定している。

避難者の初期配置について偏りを持たせる場合の初期配置の方法としては、次の例のような処理を実行することで配置を行う。領域下部に避難者を集める場合は、領域の 9 セルのうち下部の 3 セル内にその領域で配置する人数の半分以上を割り振り、残りの半分以上を上部 3 セル内と中段の 3 セル内に一樣分布に従って割り振る。下部 3 セルに割り振られた後、その 3 セルに対して一樣乱数を用いて領域内での初期配置の座標を決定する。こうして領域内の下部に全体の半分以上の避難者が、残りの上中部に半分以上の避難者が配置され、全体的に下部に集中して配置されることになる。

避難者は視野探索から出口を発見し、その出口へ向かうといった行動ルーチンであるため、初期配置の位置情報には左右されない。しかし、配置によってどの個所の出口を視野内に捉えやすくなるか、また避難者が視野内にいた場合にはその避難者に追従するため、結果として初期配置における直近の出口に向かいやすい傾向が生まれる。もちろん、避難者や避難誘導灯の存在、障害物によって視野内に死角が生じる等の問題から必ずしも直近に向かうとは限らない。

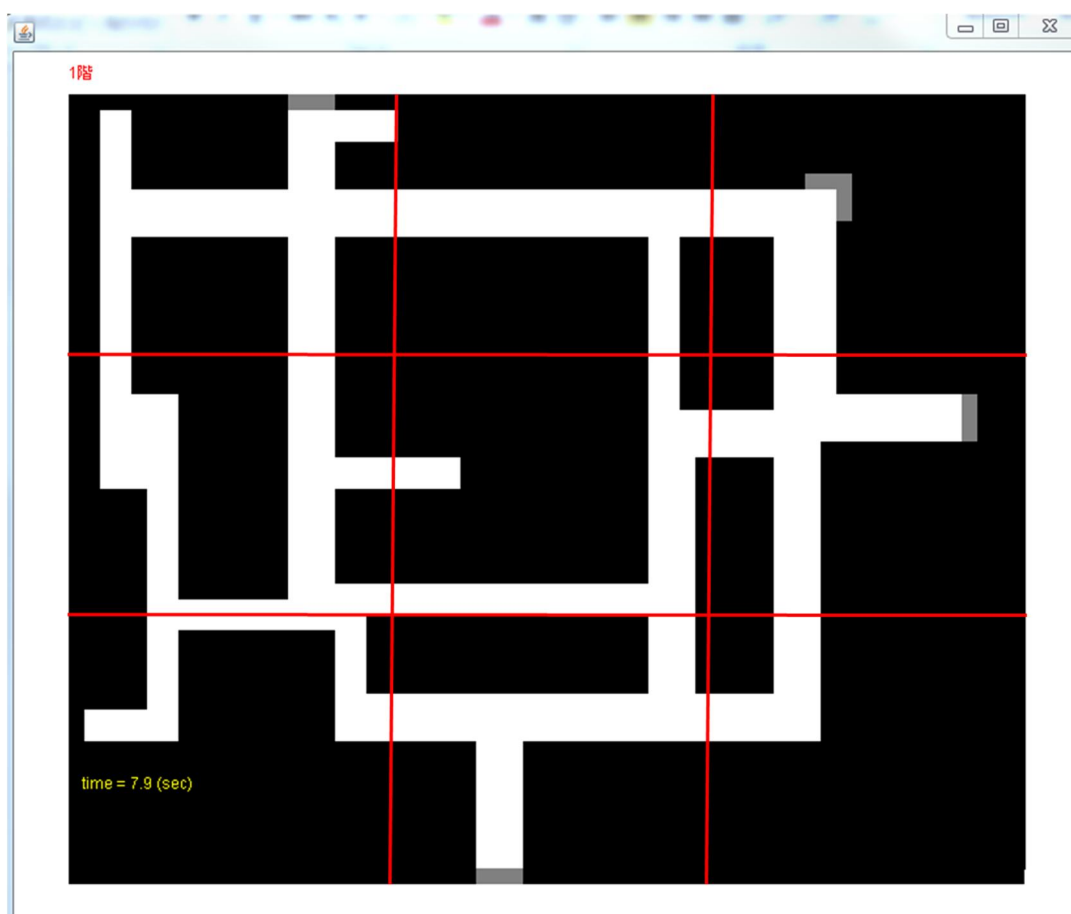


図 2-6 3×3 の分割領域

2.3.3 誘導灯の概要

避難者が出口の位置を知る手段は視野探索で出口を確認するか、出口の位置を知る避難者に追従することで辿り着くといった方法しか無い。また、避難者がその建物の構造に詳しくない者であっても、出口の位置を知る手助けができるような仕組みがあれば避難時間の短縮が期待できる。現実世界において、その役割を果たすものが避難誘導灯である。

本項では実際に用いられているものと同等の機能を持つ避難誘導灯をシミュレーションに組み込む。避難誘導灯は、室内において非常口・避難経路を示すための、発行する標識のことである（図 2-7）。ビルや劇場・ホテル、航空機といった閉鎖空間では、火災や地震といった災害時に迅速かつ安全に避難する必要がある。そのために、最寄りの非常口へ誘導する緑色と白色で非常口の誘導灯が設置されている。

非常口には緊急時のみ使用することを目的とした出口だけでなく、恒常的に使用する出入り口（正面玄関等）も指定される。また、誘導灯の設置は消防法[60]により規定されている。

最寄りの出口へと案内してくれる誘導灯は、出口を知らない避難者を避難させるための有効な方法である。以上の事を踏まえ、シミュレータに避難誘導灯の機能を実装する。本研究では次章では誘導灯の最適配置問題に関する数理モデルを構築する。



図 2-7 実際の誘導灯の写真

2.3.4 シミュレータ上における誘導灯のモデル

シミュレータにおいて、誘導灯はフィールド内の該当箇所において、誘導灯であることと出口への方向の情報を配置する。これらの情報を具体的に **Location** クラスに持たせる。誘導灯の配置箇所、誘導する方向は任意に変更することが出来る。その情報を **Location** クラスが読み取り、シミュレーションにおける情報として利用する。図 2-8 はシミュレータ上における誘導灯の表示を示す。この表示は **HinanDisp** クラスが処理を担当し、視覚的にどの方向に誘導するかが解るように、図のように矢印で表示させている。エージェントは情報処理を行う視野内にこの誘導灯を捉えたと、まずこの誘導灯の側まで近寄り、その次にこの誘導灯が持つ誘導方向先へと移動を開始する。このシステムの流れを図 2-9 に示す。実際の誘導灯と同等の情報のみを持たせており、あくまで誘導灯は移動すべき方向の情報を持つだけで、出口の位置を直接知らせるものではない。

図 2-8 における誘導灯の配置箇所は現実フロアの誘導灯の位置に一致し、消防法による規定にも準拠している。エージェントについては視界内に誘導灯が存在する場合は第一優先に当該誘導灯に対して移動する。

以後、この誘導灯を「従来型誘導灯」と略記する。

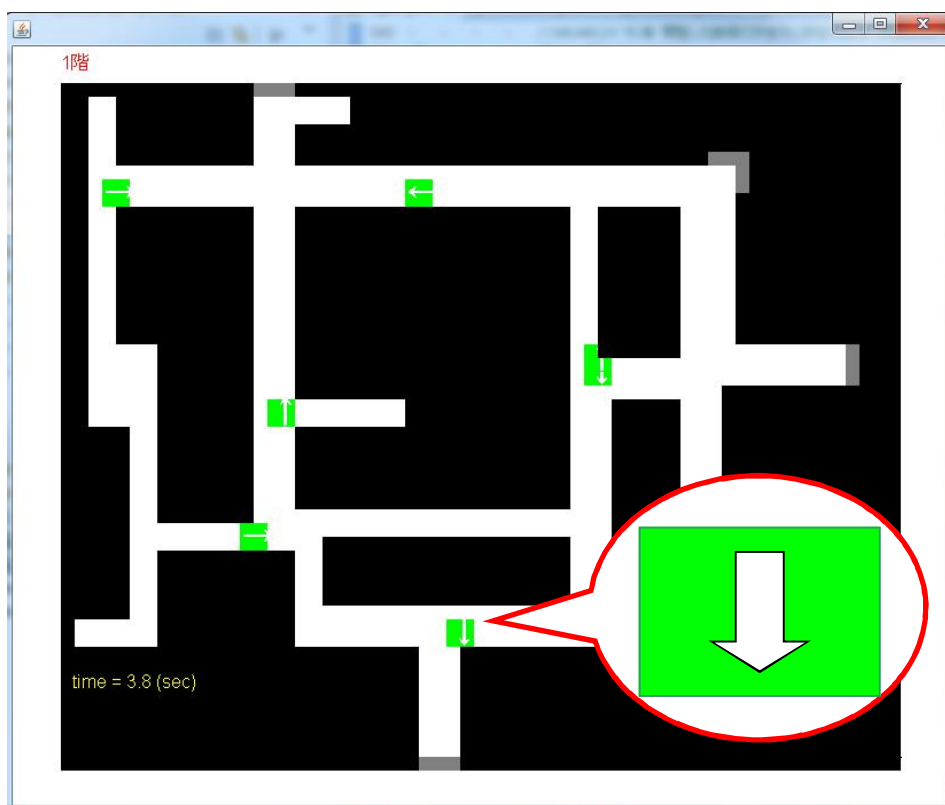


図 2-8 シミュレータ上における従来型誘導灯例

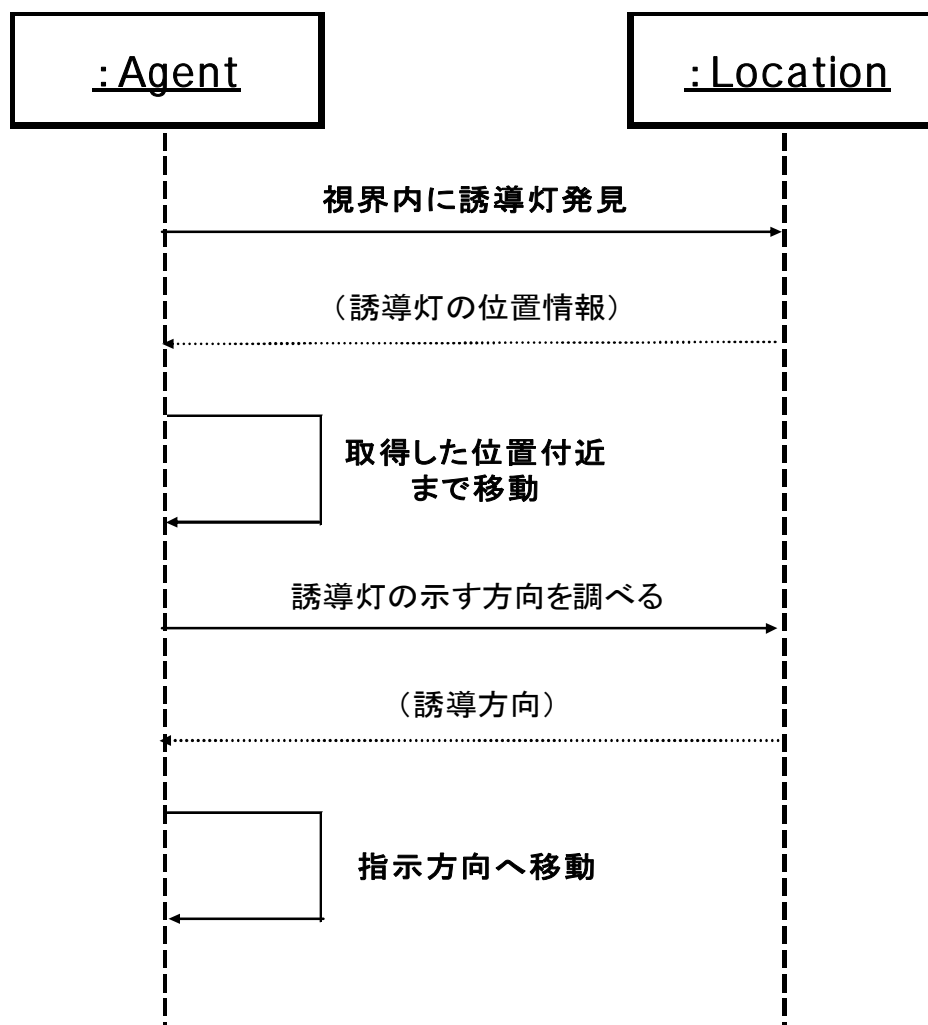


図 2-9 エージェントが誘導方向へ移動するまでのシステムの流れ

2.4 エージェントの行動フローチャート

図 2-10 は避難者に関するシミュレーション開始から終了までの大まかな行動フローチャートを示す。まず初期条件が与えられ、自分の移動速度や開始位置、開始階等の情報を格納する。避難者は出口の位置情報と移動目標は与えられておらず、移動目標の設定はあくまで視野探索によって視野内に捉えた目標に限られる。そして視野探索を行っても移動目標となる対象が見つからなかった場合には現在までの進行方向に移動する。移動目標は出口・誘導灯・避難者であるが、これらの目標の側まで近寄るか、もしくは優先度の高い他の移動目標（例えば避難出口）を捉えた場合には移動目標を更新し、新たな移動目標に対して移動する。こうして出口から外へ避難することでエージェントは行動を終える。

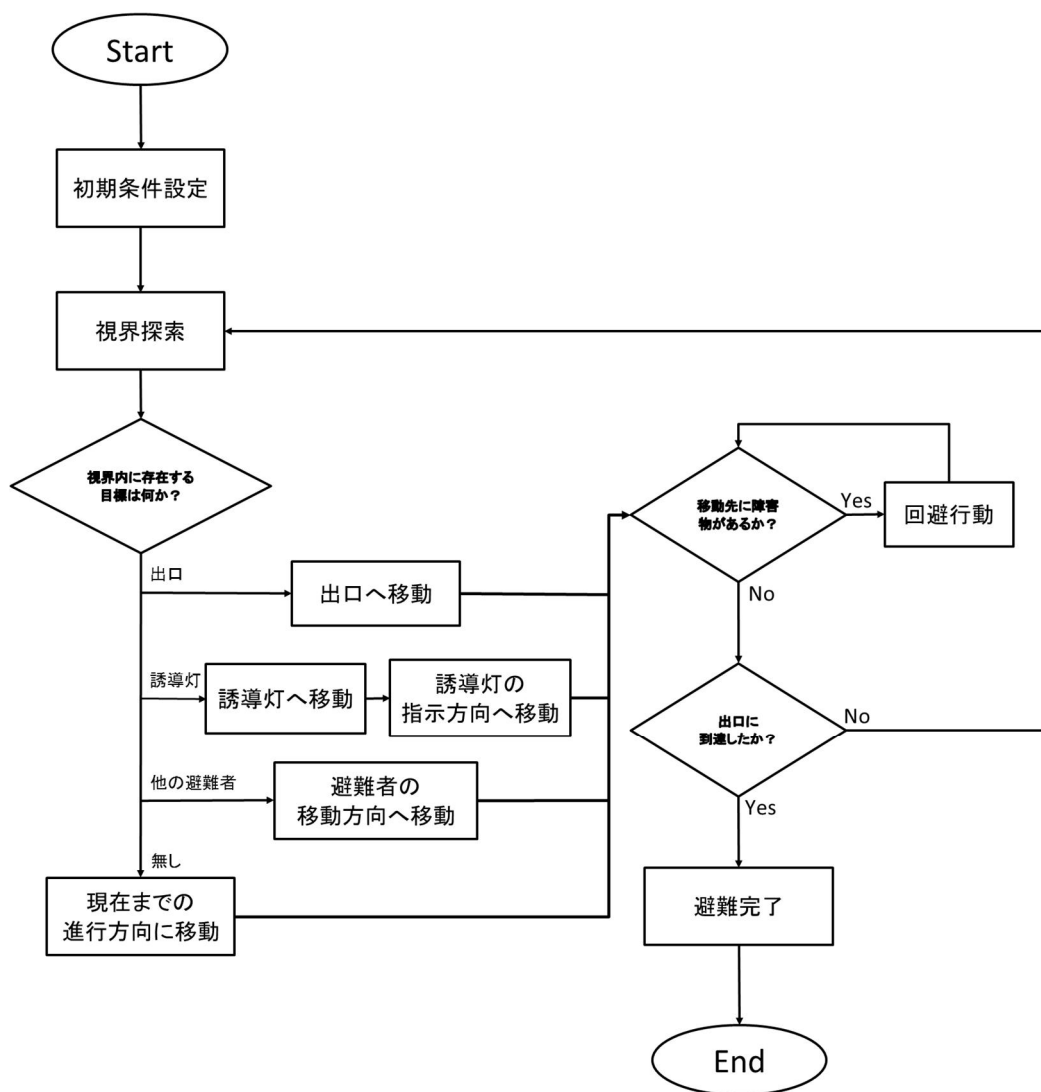


図 2-10 避難者の行動フローチャート

2.5 シミュレーションの基本モデル

本シミュレータではエージェントの諸条件を任意に変更することが可能である。本研究のシミュレーションでは、エージェントの移動速度は避難者 1.0m/s とし、視野範囲の円領域の半径は 20m とし、この中で死角処理を行うものとする。

避難領域は格子幅 1m のセルによって領域内を分割する。図 2-11 は実際に領域をグリッド状に分割した一例を示す。シミュレータでは、画面上の描画表示においてエージェントはこの 1 セル単位で移動する。これはあくまで見かけ表示で、内部では領域の位置情報についてはセル単位ではなく数値で計算されており、その数値に基づく移動処理がなされている。この画面上の描画表示のウィンドウの大きさや、分割する格子幅等の情報も変更することが可能である。これらは直接シミュレーションの計算に影響を及ぼさないが、例えばウィンドウを大きくすれば現在エージェントがどの位置にいるのかという情報の確認や、格子幅を小さくすればエージェントの動きをなめらかに表示することができる。しかし、コンピュータの処理速度等にも影響を及ぼすので無意味に画面表示を大きくしたり、分割数を増大させたりすることは計算時間を増加させるため、あまり好ましくない。

また、シミュレータ上のエージェントの 1 行動ステップにおける時間も設定できる。本研究においては 0.1 秒とし、エージェントはこの 1 ステップ毎に移動や視野の更新といった情報のやり取りを行う。表 2-1 にシミュレーションの条件を示す。

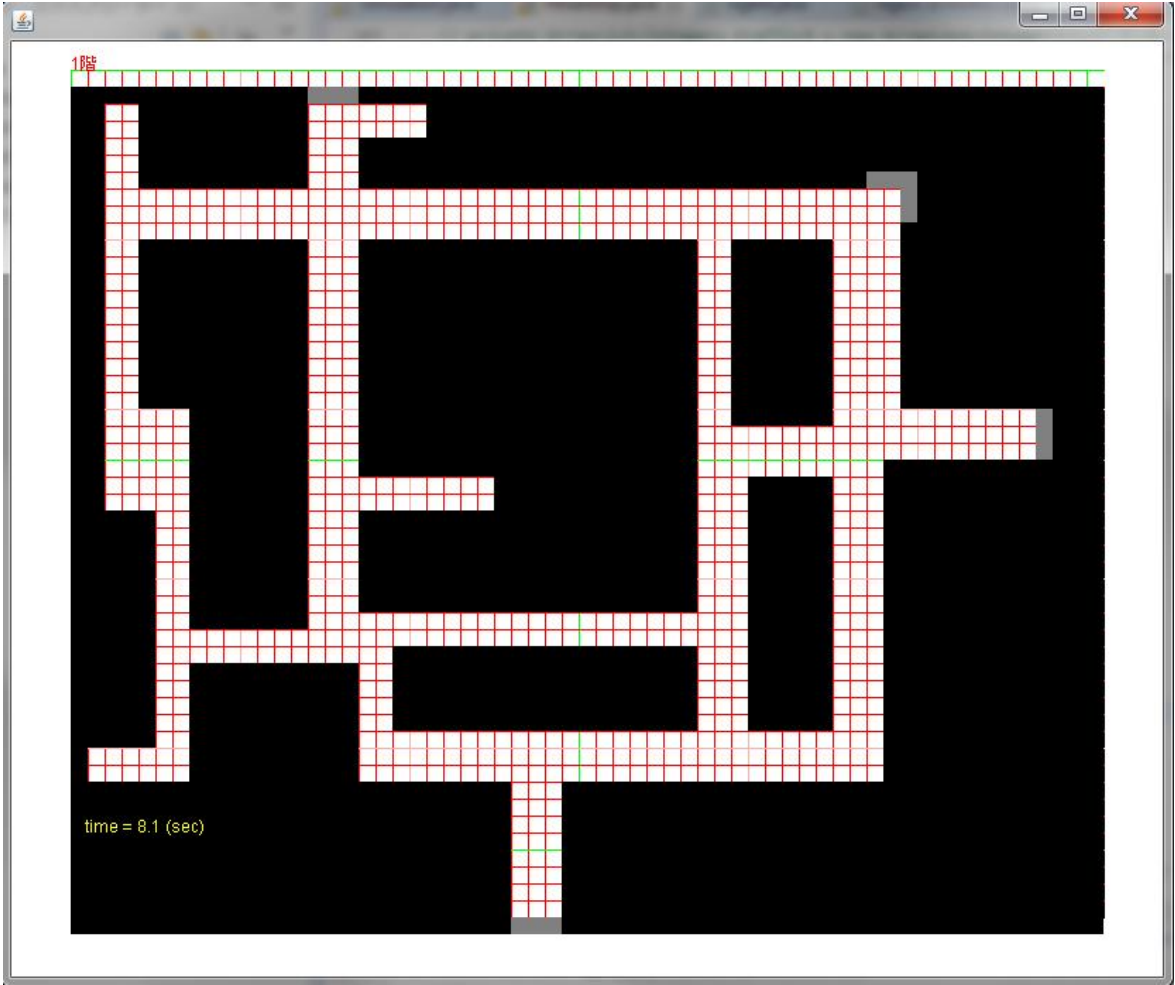


図 2-11 グリッド状に分割した領域

表 2-1 シミュレーションの基本モデル

シミュレーション条件	
階層数	1 階層
移動速度	1.0m/s
出口の位置	視野内を探索
視野範囲の直径	半径 20m

2.6 まとめ

本章では MAS を用いた避難シミュレータを開発し、シミュレータの特徴を示した。

【MAS を用いた避難シミュレータの開発】

本章で構築した避難シミュレータの下記のような特徴を持つ。また、避難シミュレータを独自で開発したことにより、エージェントや誘導灯の操作に関する多様な条件を設定できるメリットを持ち、現実の特徴に従ったシミュレーションが実行できるものと考えている。

■避難シミュレータの特徴

- ・ 先行研究で明らかになった避難者特性が導入されている。
- ・ 避難者を表すエージェントと建物内を表すフィールドの 2 つで構成されている。
- ・ エージェントは死角のある視野範囲内の情報を基に独自に判断して避難を行う。
- ・ 避難者の初期配置をフィールドに任意に偏らせることができる。
- ・ 新たな避難者特性が判明した場合に避難者特性の導入が可能である。
- ・ 避難者の移動速度などのパラメータが変更可能であるため、高齢者などの避難者を導入することが可能である。

3 章 避難誘導灯の最適配置問題の数理モデルの構築と有効性の検証

3.1 本章の目的

本章では第 1 章で説明した研究目的の 1 つである「誘導灯の最適配置問題の定式化と効果の検証」について説明する.

災害発生時の効率的な避難誘導灯方法の 1 つである避難誘導灯は先行研究からその最適な配置場所についてはほとんど議論されていない. 本章では最適な配置場所の定義とその配置の決定方法について検討し, その有効性を数値実験と第 2 章で構築した避難シミュレータを用いて検証する.

また, 避難の現実問題として, 避難開始時点で避難者がフロアの 1 か所に固まって存在している場合も十分に考えられる. そのため, 避難誘導灯の最適配置の有効性の検証後に, 避難者の初期配置が偏った場合の避難への影響について調査する.

3.2 誘導灯の最適配置問題に対する数理モデルの検討

避難誘導灯が災害発生時に効率的な避難に重要な役割を果たすことは明らかである。本節では、効率的な避難誘導を行うための避難誘導灯の設置場所について検討する。

災害による避難者の被害を少しでも軽減するには、安全な場所へ避難するために要する時間を短縮する必要であると考えられる。そこで、避難者の避難時間を短縮するための効率的な避難誘導灯の設置場所を求める数理モデルを構築する。以後、この数理モデルを誘導灯の最適配置モデルと呼ぶ。

本研究の指す「誘導灯の最適配置」とは、避難するために必要な移動距離を最小化する誘導灯配置として定義する。これは、災害時の被害軽減に必要な避難時間を短縮するためには、避難者が現在位置から最短距離で避難する必要があるからである。そのため、誘導灯の最適配置モデルの目的関数は避難に必要な移動距離の最小化とする。

また、誘導灯の最適配置モデルを構築する上での条件として、以下の4点を設定する。

- ① 避難者の移動経路は図 3-1 の様に、直近の誘導灯の付近まで移動した後で、誘導灯の指し示す出口へ向かう。
- ② 避難者の参照する誘導灯は1つだけとする。
- ③ 避難者の死角になる箇所までの距離はパラメータ内で大きな値を代入することで、選択されにくくなるようにする。
- ④ 設置する誘導灯は消防法[60]のA級の誘導灯とする。

図 3-1 はフロア上に誘導灯が配置された場合の避難者の誘導灯の移動パターンを示す。この時、避難者は参照した誘導灯に向けて移動する。そして、その後、誘導灯の指示する方向に移動して、最終的には出口から脱出するといった流れとなる。

なお、参照する避難誘導灯を1台としたのは消防法上、誘導灯の有効範囲内には別の誘導灯、もしくは出口が存在しているため、1つの誘導灯を発見することができれば、その後はその指示に従って問題なく避難が可能だと判断できるためである。

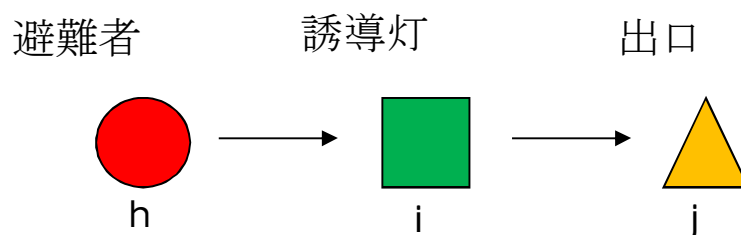


図 3-1 避難者の移動パターン

3.3 数理モデルの構築

前節では避難誘導灯の最適配置について検討し、最適配置の定義と最適配置モデルの特徴を検討した。本節では前節の検討結果を踏まえて、誘導灯の最適配置問題に対する数理モデルの定式化を行う。

定式化において、フィールド内の任意の位置から参照対象となる誘導灯が最も近くなるような場所に誘導灯の位置を決定する。避難者が存在する場所の集合 $H=\{1,\dots,h\}$ 、誘導灯の設置可能な場所の集合 $I=\{1,\dots,l\}$ 、出口の集合 $J=\{1,\dots,j\}$ とすれば問題は以下のよう

パラメータ

d_{hi} : 避難者 h と誘導灯 i 間の直線距離

d_{ik} : 誘導灯 i と k 間の直線距離

d_{ij} : 誘導灯 i と出口 j の直線距離

$MAXDISLAMP$: 誘導灯から出口までの最大距離

$MAX2LAMP$: 2 つの誘導灯間の最大距離

$MAXLamp$: 誘導灯の最大設置数

決定変数

x_i : 位置 i に誘導灯を設置する場合 1, それ以外は 0

x_{hi} : 位置 h から位置 i に向かって移動するならば 1, それ以外は 0

x_{ij} : 位置 i から出口 j に向かう場合は 1, それ以外は 0

目的関数

$$\sum_{h \in H} \sum_{i \in I} d_{hi} x_{hi} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} d_{ij} x_{ij} \quad (3.1)$$

制約式

$$\sum_{i \in I} x_{hi} = 1 \quad \forall h \in H \quad (3.2)$$

$$\sum_{i \in I} x_i \leq MAXLamp \quad (3.3)$$

$$x_{hi} \leq x_i \quad \forall h \in H, i \in I \quad (3.4)$$

$$\sum_{j \in J} x_{ij} = x_i \quad \forall i \in I \quad (3.5)$$

$$d_{ij} x_{ij} \leq MAXDISLAMP \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.6)$$

$$d_{ik} + M(x_i - 1) + M(x_k - 1) \leq MAX2LAMP \quad \forall i, k \in I \quad (3.7)$$

式(3.1)は目的関数であり，フロア上の全グリッドに避難者を配置させた条件を仮定した場合における避難者全員の総避難距離の最小化を表す．これは避難者全員の総距離を最小化することで安全な場所へ避難する時間を最短にするためである．ここで，総避難距離とは“各避難者が現在位置から誘導灯，誘導灯から出口までに移動する距離の合計値”と定義する．

式(3.2)は避難者が必ず 1 台の誘導灯を見て，移動することを保障する制約式である．避難者が 1 台の避難者を発見することができた場合，その後は発見した誘導灯の有効範囲内に次の参照物が存在していることは消防法に定義されている．このことから，この誘導灯の最適配置問題では 1 台の誘導灯を参照し，出口へ向かうと定義している．式(3.3)は誘導灯の設置個数がパラメータで設定した最大設置数以下になることを表す制約式である．式(3.4)は設置した誘導灯のみを参考にできることを示す制約である．式(3.5)は 1 台の誘導灯は 1 つの出口を指し示していることを示す制約式である．式(3.6)は出口と誘導灯間の距離は消防法[10]が規定する有効範囲以内になることを保障する制約である．式(3.7)は 2 つの通路誘導灯間の距離は消防法[10]が規定する 1 台の誘導灯の効果範囲の 2 倍以内とする制約である．異なる場所のあいだに障害物が存在する場合は距離を計算対象の領域(フロア)の最大値に設定する．

なお，数理モデルの計算には October Sky 社の Gurobi Optimizer を利用した．

3.4 誘導灯の最適配置問題の数理モデルの数値実験及び考察

本節では前節で定式化した誘導灯の最適配置問題の数理モデルについての数値実験を行い、その有効性について検討する。数値実験には図 3-2 のような格子状の単純モデルを利用する。単純モデルでは出口(図 3-2 の橙色)を 2 か所、避難者が存在する位置と誘導灯が設置できる位置(図 3-2 の白色)を 24 か所とする。また、格子間距離を 1m と設定する。また、単純モデルにおいて誘導灯の設置数は 1 台とする。

計算結果から、目的関数である避難者の総移動距離は 55.8 となった。図 3-3 は計算結果から誘導灯の最適配置を示したものである。配置結果から、フロア内のどの位置に存在する避難者でも誘導灯を確認することが可能な位置に誘導灯が配置されていることがわかる。このことから前節で定式化した誘導灯の最適配置問題の数理モデルはどの位置からでも誘導灯を確認しやすい配置という目的に沿った数理モデルが構築できたと言える。

また、本モデルの特徴から、避難者は必ず誘導灯へ移動するので目的関数である総移動距離を短くするためには誘導灯の数を増やすことが考えられる。現実問題としては誘導灯を導入するコストの問題から最も効率的な設置数についても検討が必要である。また、本モデルの問題点は、避難者が出口を直接確認できる位置にいたとしても、一度誘導灯に向かって移動する点や災害時に発生するような障害物が考慮されていない点である。

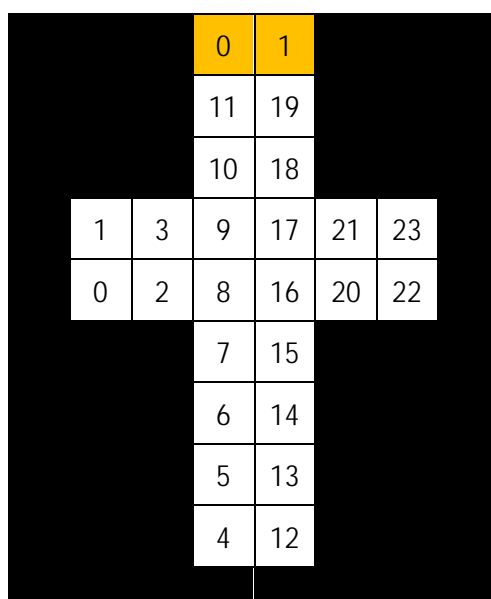


図 3-2 単純モデルのレイアウト

			0	1		
			11	19		
			10	18		
	1	3	9	17	21	23
	0	2	8	16	20	22
			7	15		
			6	14		
			5	13		
			4	12		

図 3-3 計算結果

3.5 単純構造を用いた避難誘導灯の最適配置問題の数理モデルの有効性検証

3.5.1 避難領域

前節までに避難誘導灯の最適配置問題について、数理モデルを構築して、数値実験によって想定している配置になっていることを検証した。本節では本研究で開発した避難シミュレータを用いて、単純な構造のレイアウトを用いたシミュレーションで避難誘導灯の最適配置モデルの有効性を検証する。本節のシミュレーションで用いる単純構造の避難領域を図 3-4 に示す。この避難領域は 4 本の直線通路と 2 つの長方形の通路を交差させた単純構造のレイアウトである。このフロアレイアウト配下の特徴を有する。

- ① 出口に到達するために複数の異なるルートが存在する。
- ② 直線で構成されているレイアウトのため、避難者の移動と誘導灯の配置が明確であり、避難者の死角の評価がしやすい。
- ③ ①と②の特徴から避難者の行動が事前に予測しやすいため、シミュレーションの結果及び、効率的な避難誘導法の提案の評価がしやすい。

モデルに関して、フロアを格子状に分断、各点に通路・出口を配置し、座標を与える。格子間距離は 1m とする。図中の白色・黒色・灰色・緑色はそれぞれ通路・壁・出口・誘導灯を表す。

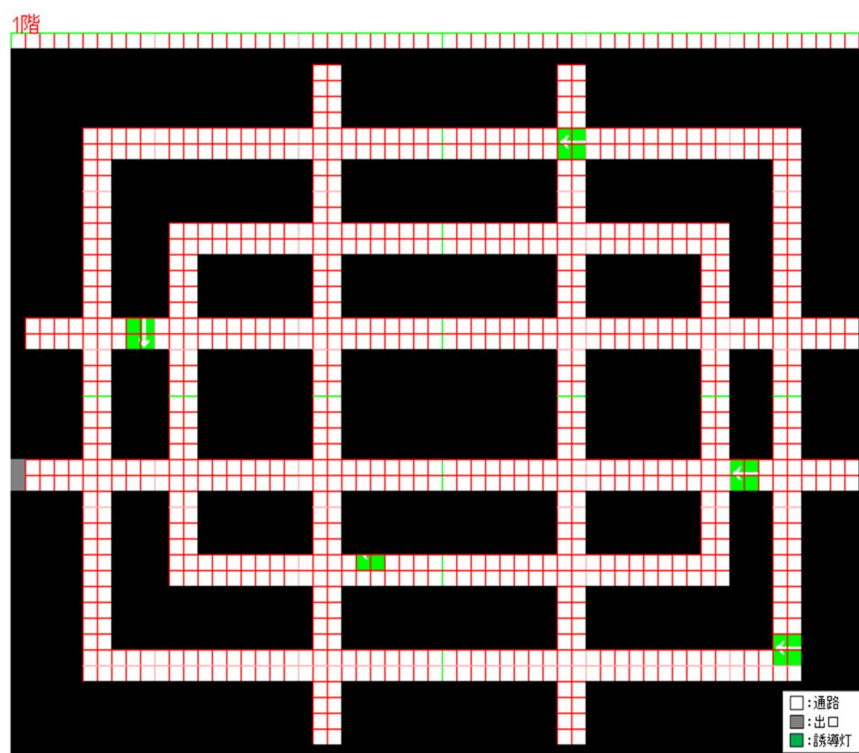


図 3-4 フロアレイアウト

3.5.2 単純構造を用いたシミュレーションによる有効性検証

本項では前節で説明した単純構造のフロアを用いて、避難誘導灯の最適配置問題の数理モデルの有効性を検証する。表 3-1 はシミュレーションの条件を示す。本節では避難誘導灯の最適配置問題の数理モデルの有効性を検証するために台数別の避難完了人数の比較とランダムに誘導灯を配置した場合の条件との比較を行う。誘導灯の設置個数については表 3-2 に示す。また、単純構造のレイアウトにおける誘導灯と出口の配置図を図 3-5 に示す。図 3-5 の番号は誘導灯の番号を示し、表 3-2 の配置に関連する。なお、各シミュレーションは 10 回実施している。図 3-6 は 10 回のシミュレーションの平均値を、エラーバーは標準偏差を示す。この図から、時間経過に対する避難人数の差がグラフから読み取れる。

図 3-6 から、誘導灯 5 台の最適配置の条件が表 3-2 の全条件下で避難完了者数の推移が最も良い結果となったことがわかる。この結果は、多数の誘導灯が最適な場所に配置されていても避難者が効率的に避難できるとは限らないことを示している。誘導灯が 10 台の条件では、避難者は避難の過程で多くの誘導灯を参考にするために避難者同士が衝突する現象が見られた。また、避難者は視界内の誘導灯を移動してから出口に移動するため、出口までの移動経路が遠回りで移動する避難者が発生した。上記の理由から、10 台の誘導灯の条件は 5 台の条件に比べて避難者数が減少したものと考えられる。また、通路端数が出口数に比べて多いため、時間内に避難できなかった避難者が存在した。これらの結果は、誘導灯の設置台数は避難に影響を与えることを示している。適切な設置台数は建物のレイアウトによって異なるため、シミュレーションにより設置台数を決めることが必要となる。

表 3-1：シミュレーション条件

試行回数	10
避難者数	50
避難者の初期位置	全体に一様分布

表 3-2：単純構造の誘導配置

誘導灯数	誘導灯配置(図 3-5)
1 (最適配置)	1
5 (最適配置)	2, 3, 4, 5, 6
10 (最適配置)	4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13
5 (ランダム)	14,15,16,17,18

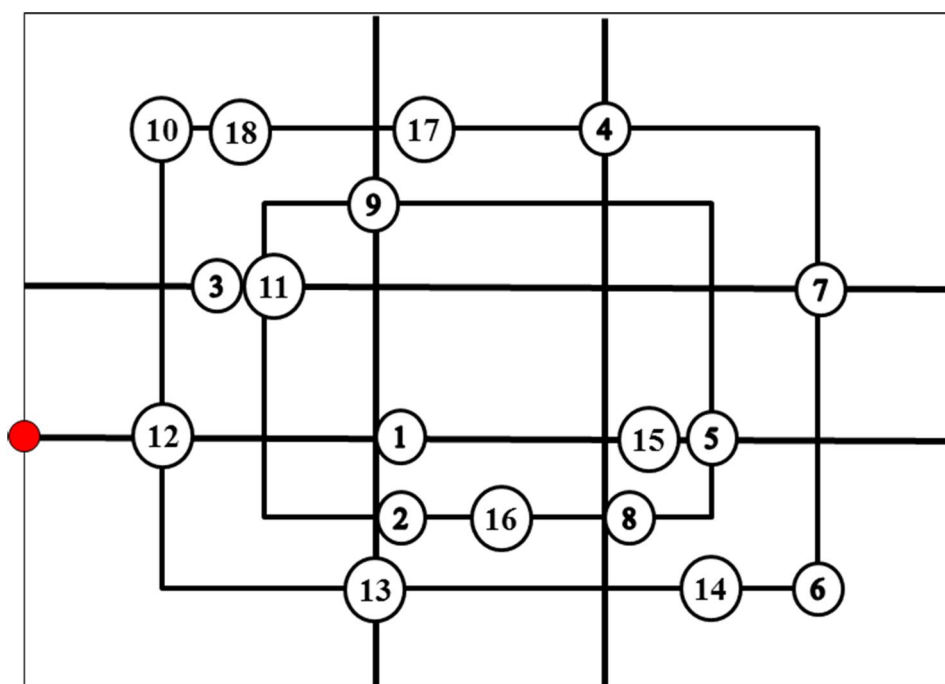


図 3-5 誘導灯の配置場所

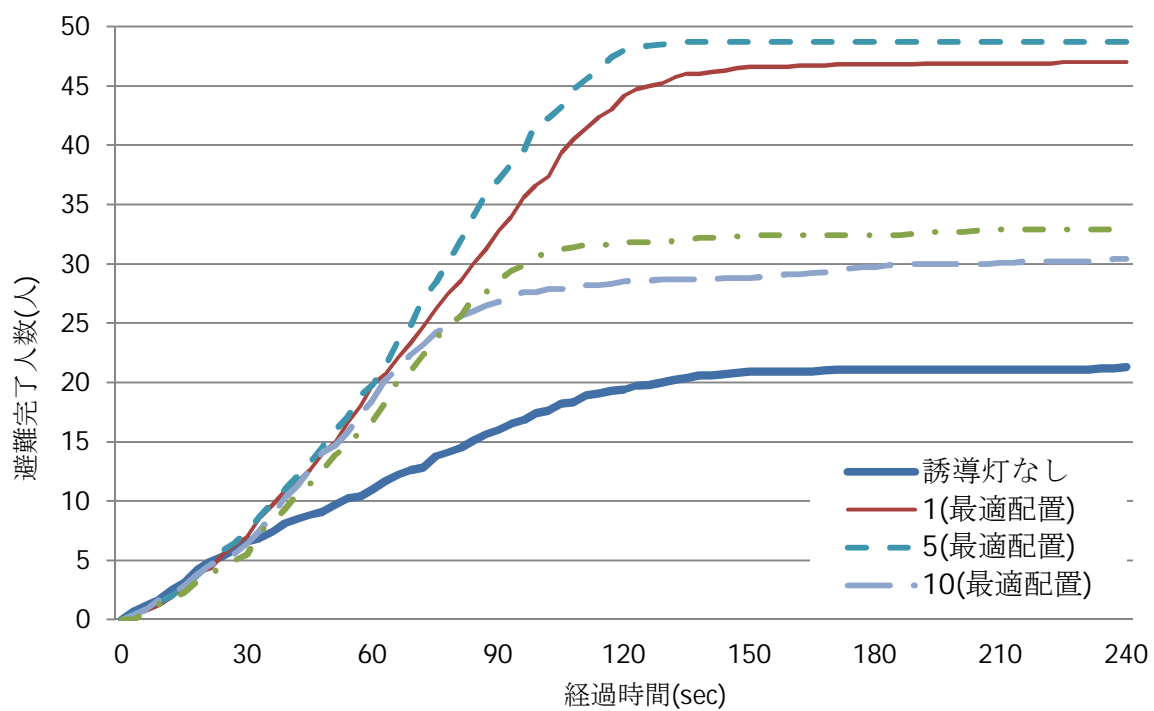


図 3-6 単純構造レイアウトにおける避難者数のシミュレーション結果

3.6 実在する店舗のレイアウトを用いた避難誘導灯の最適配置モデルの有効性検証

3.6.1 避難領域

本研究で利用するデータは、名古屋市にある電機量販店の1階のレイアウトを用いる。モデルに関して、フロアを格子状に分断、各点に通路・出口を配置し、座標を与える。なお、出口は4か所(格子数では14か所)、通路は750か所とする。各点の距離は直線距離を用い、格子間距離は1mとする。図3-7に従来の誘導灯配置を示したものである。図3-8は誘導灯の最大配置数を従来誘導灯の個数と同じ8台として計算した結果を図に示したものである。計算結果より、目的関数である総配送距離は5628.12mとなった。図3-7、図3-8内の矢印は誘導灯の誘導方向を示す。

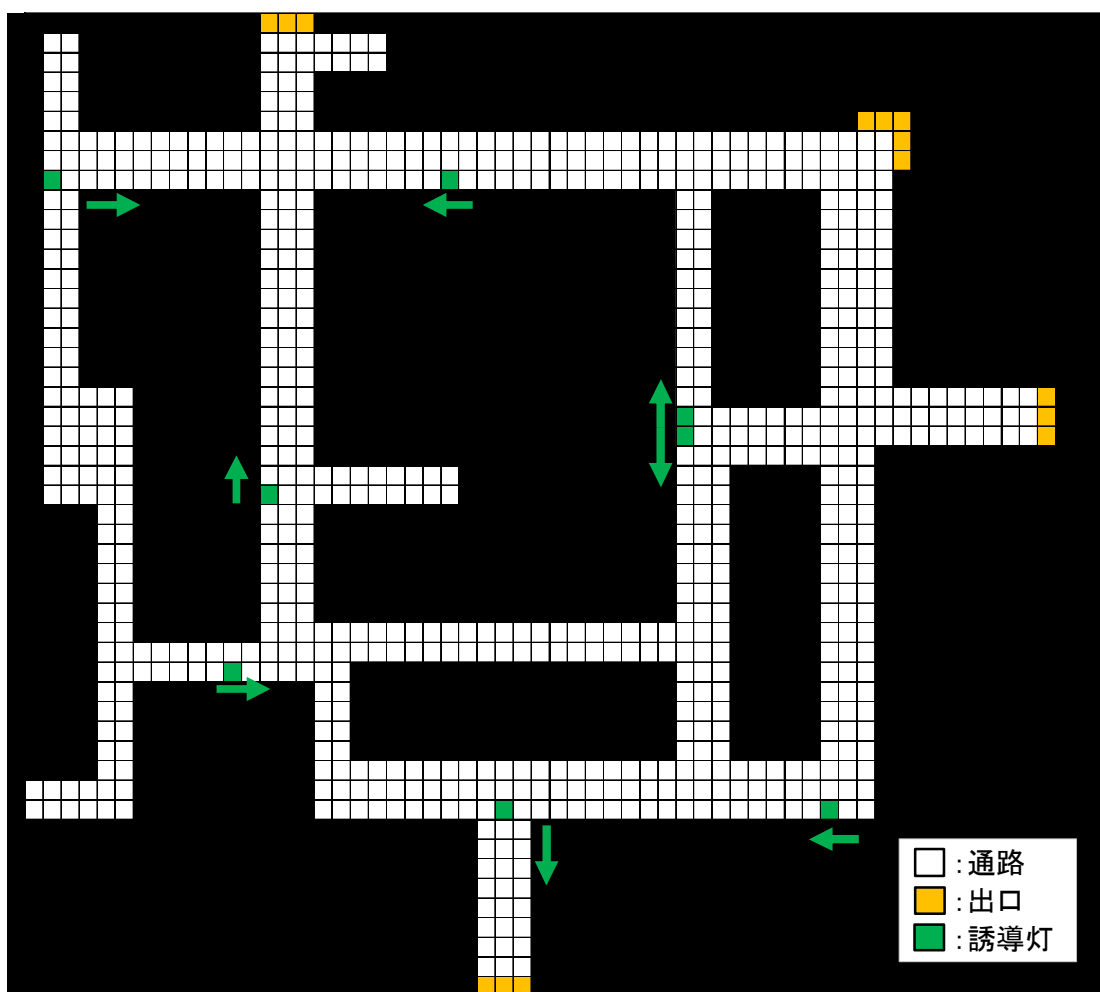


図 3-7 従来の誘導灯配置

3.6.2 最適配置モデルの効果

本節では表 3-3 に示す条件で従来型誘導灯を店舗通りの配置と最適配置モデルの計算結果の配置の 2 種類の方法で設置したシミュレーションを行う。

以下の図 3-9 は各シミュレーション 10 回における結果の平均のグラフである。店舗配置の避難完了人数が約 87.7 人となった。それに対して、最適配置モデルの避難完了人数は約 95 人であった。両者を比較すると、最適配置モデルの結果の方が店舗配置の結果よりも避難完了人数が約 10%増加した。また、グラフから最適配置モデルの方が早い段階で避難完了している避難者が多いことがわかる。以上の 2 点から最適配置モデルには有効性があると考えられる。

表 3-3 シミュレーションの条件

	避難者数	初期配置	誘導灯	誘導灯設置数
条件	100	一様	従来型誘導灯	8 台

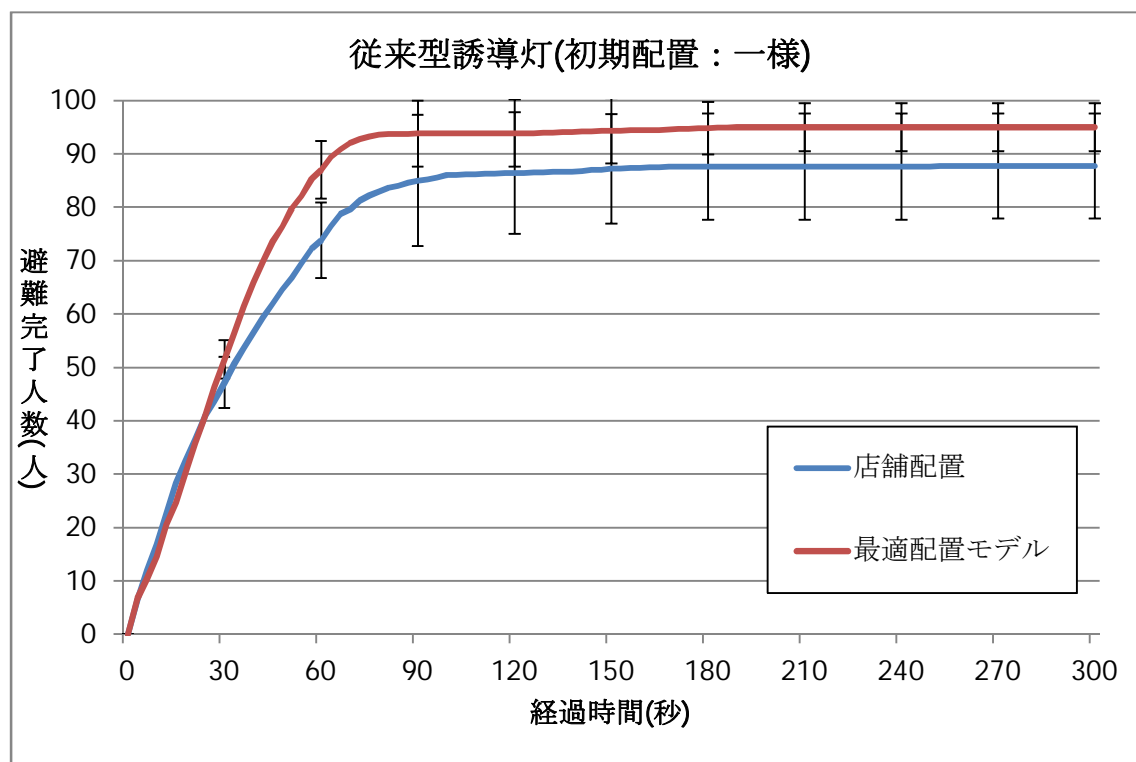


図 3-9 従来型誘導灯を考慮したシミュレーション結果

3.7 混雑発生時に予測される避難者の行動

前章では本研究で開発した MAS を用いた避難シミュレータと避難誘導灯の最適配置問題に対する数理モデルについて、避難シミュレータの再現性と避難誘導灯の最適配置問題に対する数理モデルの有効性について検証した。

シミュレーションでは避難者がフロア全体に一様に分布している状態を想定してシミュレーションを行った。しかし、実際には災害発生時に避難者の分布が偏っている状態が容易に想像できる。そこで次節では、災害発生時に避難者の配置が偏っていた場合の避難者行動の特徴について、シミュレーションを用いて分析する。

避難者の分布が偏っていた場合に考えられる事象としては、「避難者が集中している場所では、混雑が発生しやすく、避難者の行動が阻害されるため、避難に時間がかかる」という現象や「出口から同時に避難できる人数が少ない場合は出口付近で混雑が発生しやすい」という現象は一般的に容易に想像できる。次節ではこの「避難者が集中している場所では、混雑が発生しやすく、避難者の行動が阻害されるため、避難に時間がかかる」や「出口から同時に避難できる人数が少ない場合は出口付近で混雑が発生しやすい」という一般論について、実在する店舗のレイアウトを用いて、シミュレーションを行う。結果から一般論の妥当性の検証とレイアウトに依存した特徴について分析する。

3.8 数値実験

3.8.1 実在する店舗のデータを用いた数値実験

本節のシミュレーションに使うレイアウトを図 3-10 に示す．図 3-10 の誘導灯配置は従来の誘導灯配置を示したものである．なお，このレイアウトは 3.6 節で用いた店舗配置のシミュレーションと同じレイアウトである．

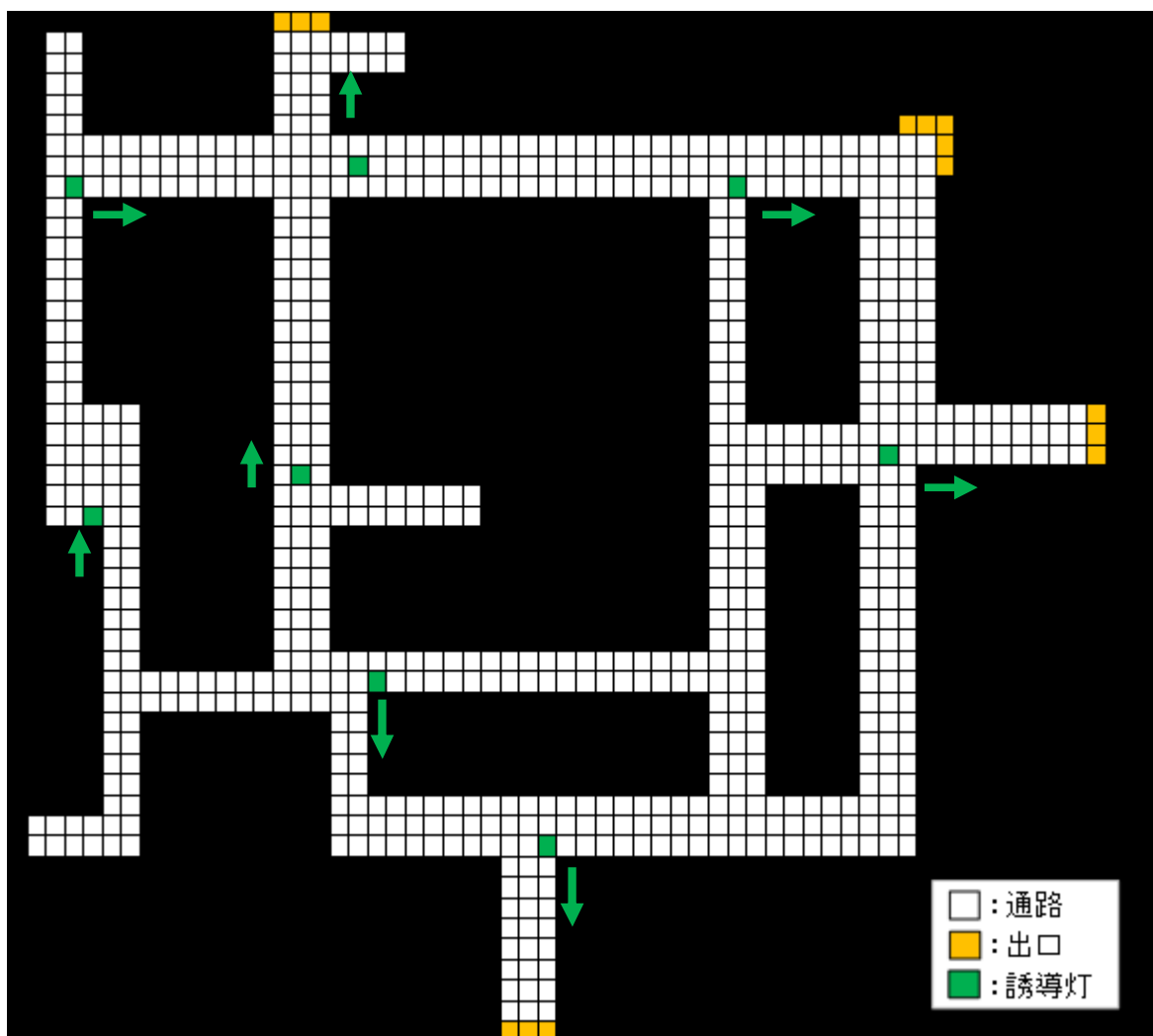


図 3-10 店舗配置のレイアウト

3.8.2 フィールド内の空間に対する集団の変化による影響

本節では、前節のシミュレーション条件に加え、初期配置の変更による影響をシミュレーションで評価する。初期配置の変更条件を含めたシミュレーションの条件を表 3-4 に示す。異なる初期配置によるシミュレーション 10 回の実行結果を図 3-10、図 3-11、図 3-12、図 3-13 に示す。

図 3-10、図 3-11、図 3-12 から、誘導灯があっても、集団の偏り次第では避難領域に一樣に避難者が分布している条件に比べ、避難時間の長期化や避難できなかった避難者の増加が発生することがわかる。

図 3-11 から出口が 2 か所存在する上部に避難者が集中した場合のシミュレーションにおいても、避難時間が長期化していることがわかる。これは直近の出口にのみ誘導するという従来型誘導灯の特性から、多くの避難者を 1 つの出口に集めてしまう。出口から同時に避難できる人数が少ない場合、1 つの出口に避難者が集中する場合には、避難に要する時間が長くなるために一樣に分布した条件に比べて、結果が悪化したと考えられる。

図 3-12 から、集団の偏りが大きくなると避難にかかる時間が長くなる傾向があることから、出口が無い場所に避難者が集中する場合に避難完了までの時間が長期化しやすいことがわかる。

図 3-13 において、集団の偏りが大きくなるほど、短い時間で多くの避難者が避難することができた。これは、条件 7 と条件 8 で避難者が多数存在しているフロアの右側に出口が 2 つ存在することやフロア右下の誘導灯がフロア中央下の出口を指し示しているために避難者を分散できたことが要因と考えられる。

以上の結果から、前節で予測した「避難者が集中している場所では、混雑が発生しやすく、避難者の行動が阻害されるため、避難に時間がかかる」や「出口から同時に避難できる人数が少ない場合は出口付近で混雑が発生しやすい」という現象がシミュレーションでも確認できたと言える。

表 3-4 初期配置変更条件

共通条件		
避難者数	誘導灯	誘導灯配置
100	従来型誘導灯	最適配置モデル
初期配置における集団の偏り		
条件 1	下部 4 セルに 50 名	
条件 2	下部 4 セルに 75 名	
条件 3	上部 4 セルに 50 名	
条件 4	上部 4 セルに 75 名	
条件 5	左部 4 セルに 50 名	
条件 6	左部 4 セルに 75 名	
条件 7	右部 4 セルに 50 名	
条件 8	右部 4 セルに 75 名	

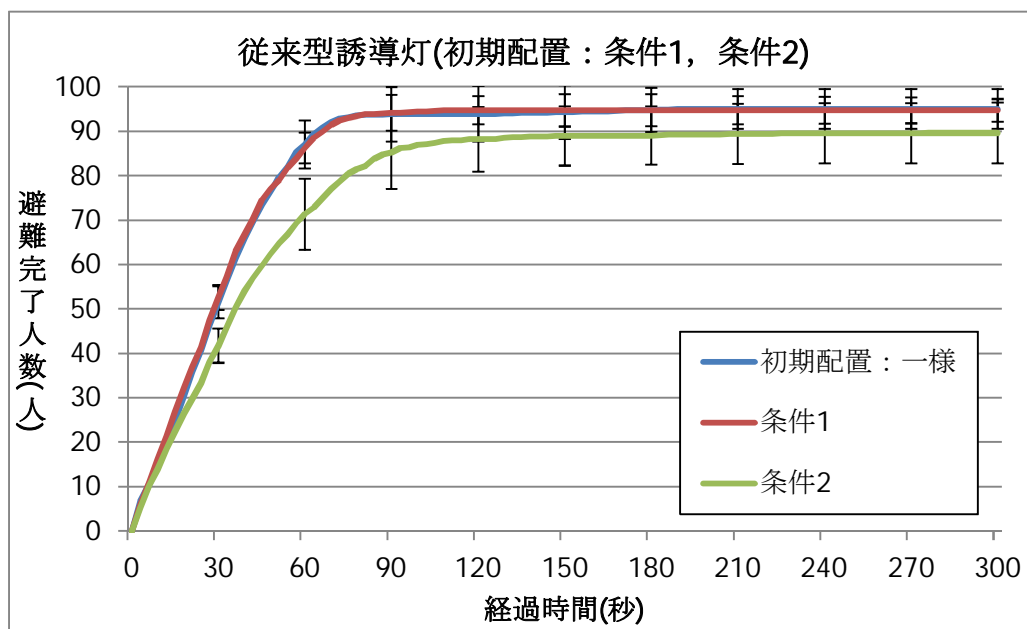


図 3-10 条件 1 と条件 2 のシミュレーション結果

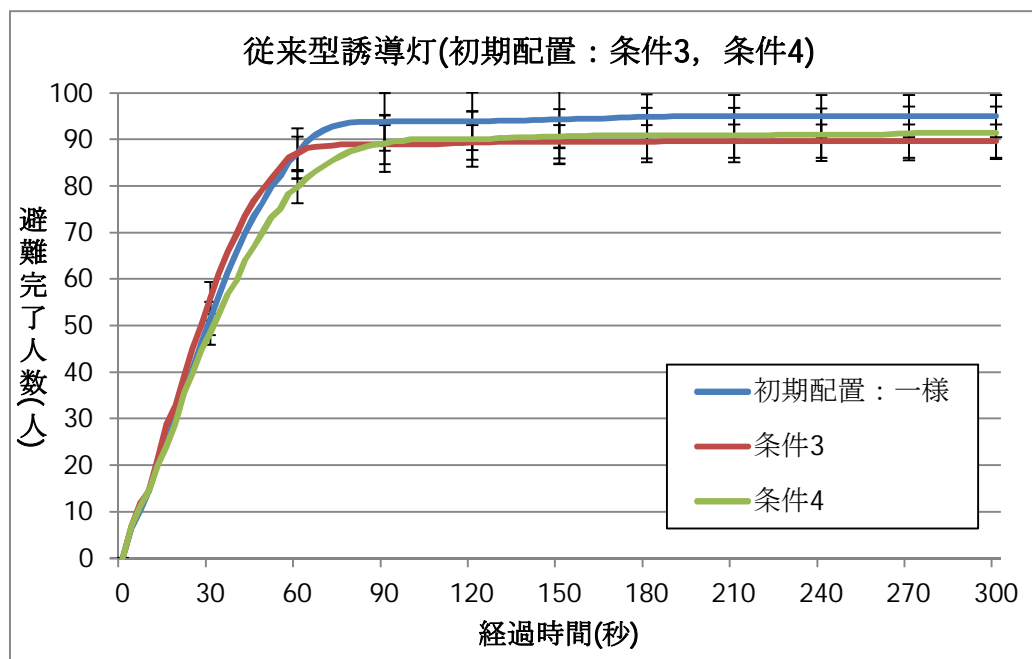


図 3-11 条件 3 と条件 4 のシミュレーション結果

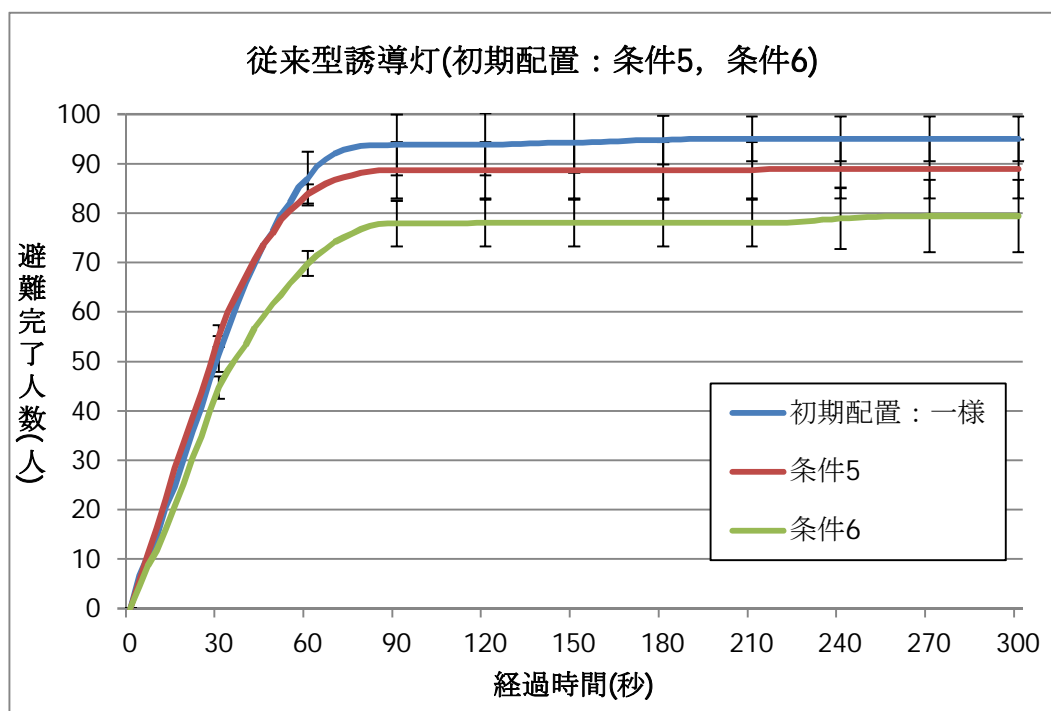


図 3-12 条件 5 と条件 6 のシミュレーション結果

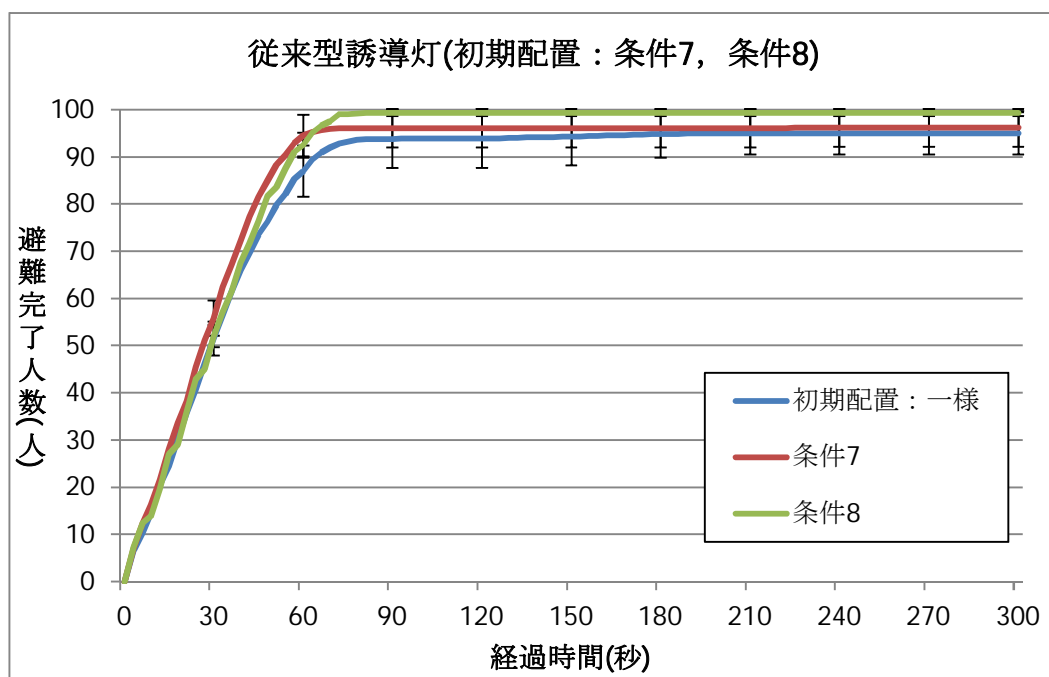


図 3-13 条件 7 と条件 8 のシミュレーション結果

3.9 まとめ

本章では避難誘導灯の最適配置問題に対して、以下の内容を調べた。

- ・ 誘導灯の最適配置問題に対する数理モデルの構築と有効性の検証
- ・ 避難者の初期配置が偏った場合の避難者行動の特徴の分析

【誘導灯の最適配置問題に対する数理モデルの構築と有効性の検証】

誘導灯の最適配置問題に対する数理モデルとして、下記の特徴を持つモデルを構築し、数値実験とシミュレーションから有効性を示した。また、結果から下記の改善点が必要であることが分かった。

■ 誘導灯の最適配置問題に対する数理モデルの特徴

- ・ 誘導灯の最適配置とは避難者全員の避難に必要な移動距離を最小化する配置とする。
- ・ 避難者は必ず避難誘導灯を 1 台参照して避難を行う。
- ・ 避難者の死角を考慮している。

■ 誘導灯の最適配置問題に対する数理モデルの抱える改善点

- ・ 災害発生時に発生する障害物によって通路が使用不能になる状況は想定していない。

【避難者の初期配置が偏った場合の避難者行動の特徴の分析】

避難者の初期配置が偏った場合の避難者行動を分析するため、実在する家電量販店のフロアを用いたシミュレーションを行い、下記の特徴が明らかとなった。

■ 避難者の初期配置が偏った場合に発生する現象

多数の避難者が同一の出口に集中した場合では全避難者が避難するためには異なる出口に分散して避難者が利用する状況に比べて長い時間が必要となる。

■ 発生原因

直近の出口にのみ誘導するという従来型誘導灯の特性は集団の偏りを助長し、一部の出口に避難者が集中する傾向を生じさせる。

■ 対処方法

避難者をより早く避難完了させるには偏った避難者の集合を全体の出口に分散させ、全避難者が完全に避難する時間を削減させることが必要である。

■ 対処方法の問題点

集団の偏りに依った避難者の配置を予測し、出口に集中する避難者を他の出口に移

動させることは従来の誘導灯による出口の指示だけでは困難である.

4 章 仮想現実ゲームによる避難者判断の分析と シミュレーションによる評価

4.1 本章の目的

第 1 章で述べた研究目的の一つである「避難誘導に効果的な設備の開発や新しい誘導法の提案と有効性の検討」について、効率的な誘導法提案のために必要となる避難者行動を分析するために仮想現実ゲームを開発した。ゲームは Unity[61]を用いて構築した。本章では、仮想現実ゲームの特徴とそれを用いた実験について説明する。

さらに、仮想現実ゲームを用いた複数の実験から得られた分析結果から得られた新たな避難者特性を避難者シミュレータに導入することで、シミュレーションが現実の減少に近い結果が得られるよう改良した。避難シミュレーションを模擬の精度を高くすることで、避難者の行動を高い精度で分析ができるようになると共に、本研究で提案する効率的な避難誘導法を正確に評価できることが考えられる。

4.2 仮想現実ゲーム

4.2.1 エージェントの特徴

仮想現実ゲームの避難者はエージェントとプレイヤーの2種類に分けられる。エージェントは避難シミュレータで行われたシミュレーションにおいて、各避難者がファイルに保存した移動記録に基づいて初期配置が決定する。移動は AgentTranslate クラス (Appendix 2)によって行われる。処理の流れとしては、ファイルの移動記録と Timer クラス (Appendix 2)が持つ仮想現実ゲーム中の現在時間を照らし合わせることで移動を行う。脱出時の処理については、脱出が完了した時点で自分自身を削除し、それまでの移動記録を外部ファイルに出力するという流れになっている。

また、プレイヤーは AgentFileRead クラス (Appendix 2)で任意に指定したエージェントを操作可能にしたもので、初期位置はエージェントと同様にして決定する。プレイヤーが可能な操作は直進と視点の変更となっている。操作方法はキーボードとマウスで行う、もしくはコントローラーを利用して行う。表 4-1、図 4-1 に操作の方法を示す。また、プレイヤーの移動と移動時の視点は毎秒記録しており、脱出後にファイルに保存され、それを用いることでエージェントとプレイヤーの比較が可能となっている。

表 4-1 キーボード操作

直進	W / ↑
視点変更	マウス移動

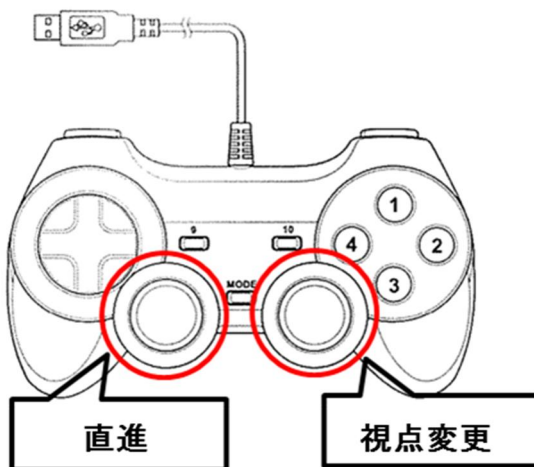


図 4-1 コントローラー操作

4.2.2 フィールドの特徴

仮想現実ゲームでは避難シミュレータで行ったシミュレーションのフィールドデータを読み込み，シミュレーションと同等の避難領域を自動で構成する．この実装により避難シミュレータと仮想現実ゲームを容易に連携させることができる．図 4-2 は本研究で実施する実験で用いる領域の構造を俯瞰視点で表示したものを示す．これは前章までに利用した店舗のレイアウトと同等である．

図 4-3 は避難者視点でフロアの構造を表示した一例を示す．構造レイアウト，障害物，出口の位置・階段の位置は避難シミュレータ行われたシミュレーション通りであるため，変更したい場合は避難シミュレータ側のフロアデータを変更する必要がある．図内の橙色の塗りつぶしの領域は障害物や壁，灰色の塗りつぶしの領域は通路，黄色の塗りつぶしの領域(黒丸の領域)は出口を表す．プレイヤーは出口を目指して移動を行い，出口に接触した時点で避難完了とする．本ゲームではプレイヤーの避難完了までに要した時間，避難経路，視点を主な評価項目とする．

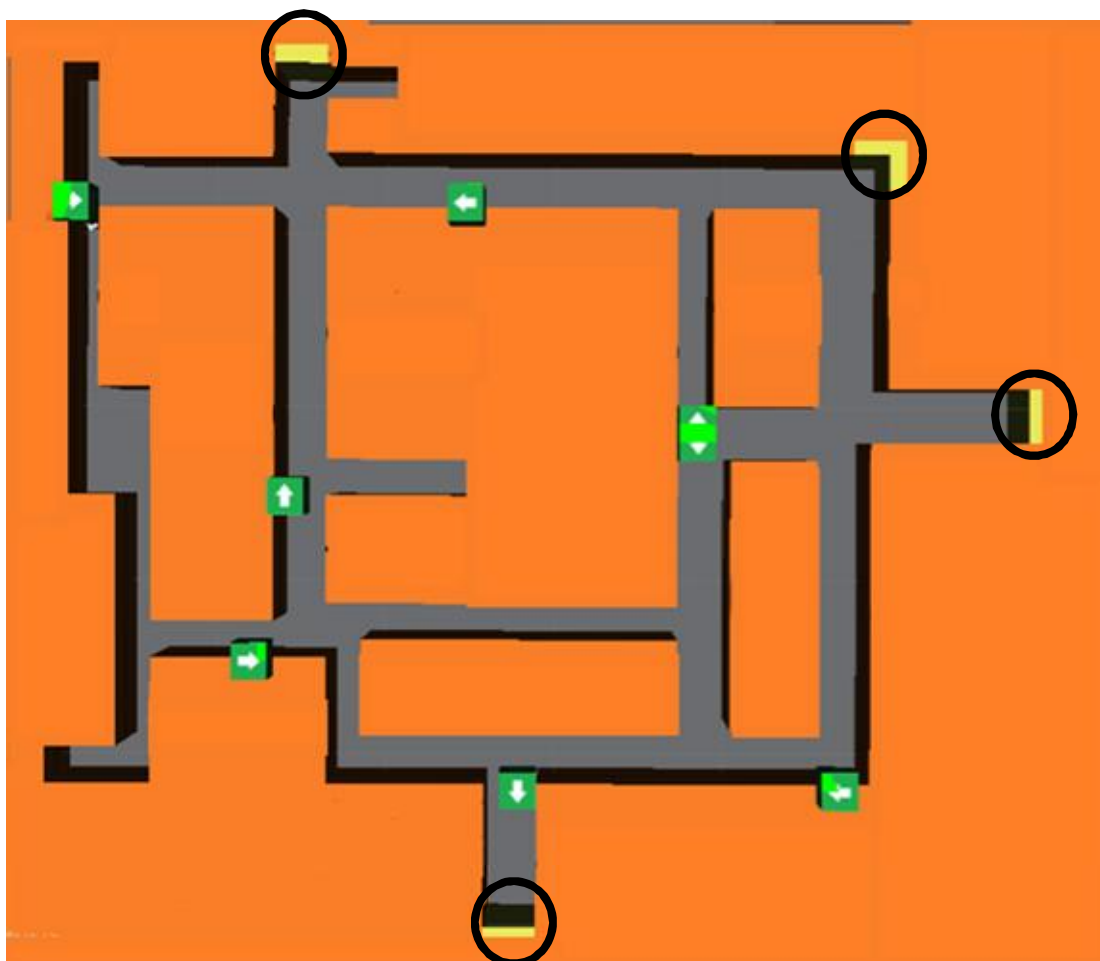


図 4-2 フロアの俯瞰図

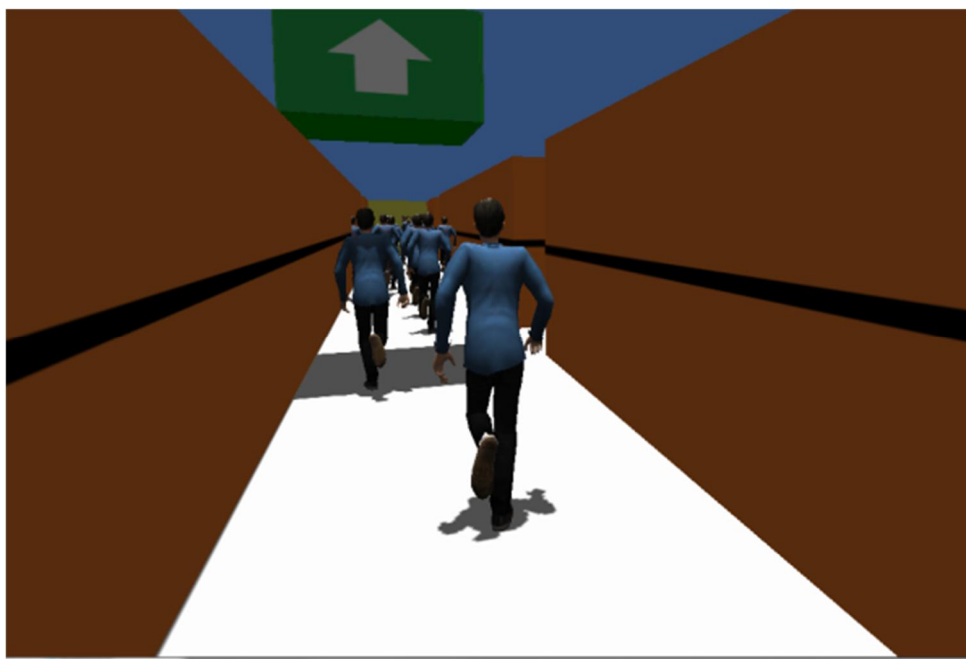


図 4-3 避難者の視点から見たフロアの一例

4.3 避難実験の概要

本節では前節までに説明した仮想現実ゲームを用いた避難者行動の分析を行う。避難者の行動分析においては、エージェントシミュレーションなどのシミュレーション技法が利用されており、これまでに避難者の群集合による移動特性や誘導者の導入効果などがシミュレーションにより調べられている。しかしながら、シミュレーションは避難者の行動をパターン化し、ルールを適用しているため、避難者の潜在化した意思決定に基づく行動に関する意思決定が十分考慮されているとは言えない。

そこで、避難時における避難者の潜在化した行動に関する意思決定の特徴を想定される複数のエージェントの特性量を変化することによって調べる。具体的には以下の2点に注目して仮想現実ゲームを用いた実験を行う。

- 1) 避難時の視点の動き
- 2) 避難時に参照する物体

4.4 避難者の特徴分析

4.4.1 実験条件

本項では避難者の避難行動の特徴を分析するための実験について説明する。避難行動を実施する際に視界は非常に重要な役割を持つことは広く知られている。本実験ではその視界が避難者の行動や避難経路にどのような影響を与えているのかを仮想現実ゲームを用いて分析する。本実験では通常の誘導灯に加えて、被験者がより誘導灯を発見しやすくするために音付誘導灯を導入する。音付誘導灯とは音を発生する機能を付加した誘導灯のことであり、誘導灯に近いほど大きな音が発生される。音付誘導灯を導入することで、通常の誘導灯とは違い、誘導灯を発見しやすくなる状況下で避難行動がどう変化するのかも同時に分析する。図 4-5 はフロアのレイアウトと誘導灯の配置を示す。図の A 点に音付誘導灯を設置した。本実験では通常の誘導灯とは区別するために赤色で表示している。その他の実験条件を表 4-3 に示す。本実験では条件毎に結果を比較する都合上、比較するためのデータについては同じ場所で取得することが必要である。しかし、被験者が同じ実験開始位置から実験回数を重ねるとフロアの構造を記憶してしまい、正確なデータを取ることができないことが生じうる。このため、実験データの取得方法については、本実験では以下の 3 点に留意して実験開始位置を設定した。

- 1) 1 つの誘導灯設置条件で行われる 3 回の実験のうち、データの取得は 1 回とする。
- 2) データを取得する際の実験開始位置は全被験者共通である。
- 3) その他の 2 回の実験の実験開始位置はランダムに設定する。

表 4-3 実験条件

被験者数	6 人
避難者数	80 人(被験者を含む)
実験回数	9 回(条件毎に 3 回)
誘導灯設置条件	
条件 1	誘導灯無し
条件 2	通常誘導灯あり
条件 3	音付誘導灯あり

4.4.2 実験結果

図 4-6, 4-7, 4-8 は条件毎に被験者が避難した避難経路を示す。図 4-6, 4-7, 4-8 中の S 点が実験開始位置(被験者のエージェントの初期位置)である。条件 1 では全ての被験者が周囲の避難者に従い、図 4-6 中の同じ赤色の経路で避難した。これは、条件 1 ではフロアに誘導灯を設置していなかったため、避難者と出口以外に避難の参考にできる物体がなかったことが要因であると考えられる。条件 2 では被験者は図 4-7 中の赤色の経路で 2 人、青色の経路で 1 人、緑色の経路で 3 人が避難した。避難経路が異なった要因としては、実験開始時に周囲を確認する行動の有無が挙げられる。周囲を確認する行動を取った被験者は誘導灯に気付き、緑色の経路で避難した。それに対して、周囲を確認しなかった被験者は条件 1 の場合と同様に周囲の避難者を参考に赤色の経路で脱出した。また、青色の経路を取った被験者は図 4-8 上の G 点のゴール周辺に避難者が集中して混雑が発生していたために周囲を確認して遠い出口を選択した。条件 3 では図 4-8 中の赤色の経路で 1 人、緑色の経路で 5 人が避難した。多くの被験者は音付誘導灯が発する音に反応して、周囲を確認することで誘導灯を発見して避難した。以上の結果から避難時には周囲の状況を確認するという行動が効率的な避難につながる可能性があることが分かった。また、実験を通じた被験者の傾向としては、実験開始後の最初に視界に入った誘導灯や避難者に従う傾向が多く見られた。

図 4-9 は異なった条件下での被験者の避難時間の平均値と標準偏差を示す。図中の棒グラフがプレイヤーの避難時間の平均値を、エラーバーは標準偏差を示している。この図から、表 4-3 の条件 1 と条件 2, 条件 3 を比較すると、誘導灯を設置した場合は避難時間が短縮されていることから避難誘導灯は避難時間を短縮させるのに効果があることが仮想現実ゲームからも確認できた。しかし、音の出ない通常の誘導灯を設置した条件 2 では条件 3 と比較して標準偏差が大きい。これは被験者が誘導灯を発見できた場合は短時間で避難できたのに対して、発見できなかった場合は避難経路が長くなり、避難に時間がかかったからだと考えられる。それに対し、音付避難誘導灯を設置した条件 3 の結果では標準偏差が小さくなっている。これは、音付誘導灯の出す音によって避難者が誘導灯を発見しやすくなるため、通常の避難誘導灯よりも避難を効率的に行うことができるためだと考えられる。つまり、視界内の避難者の行動といった他の情報に惑わされずに誘導灯のみを参考にできれば短時間での避難が可能であることが示された。

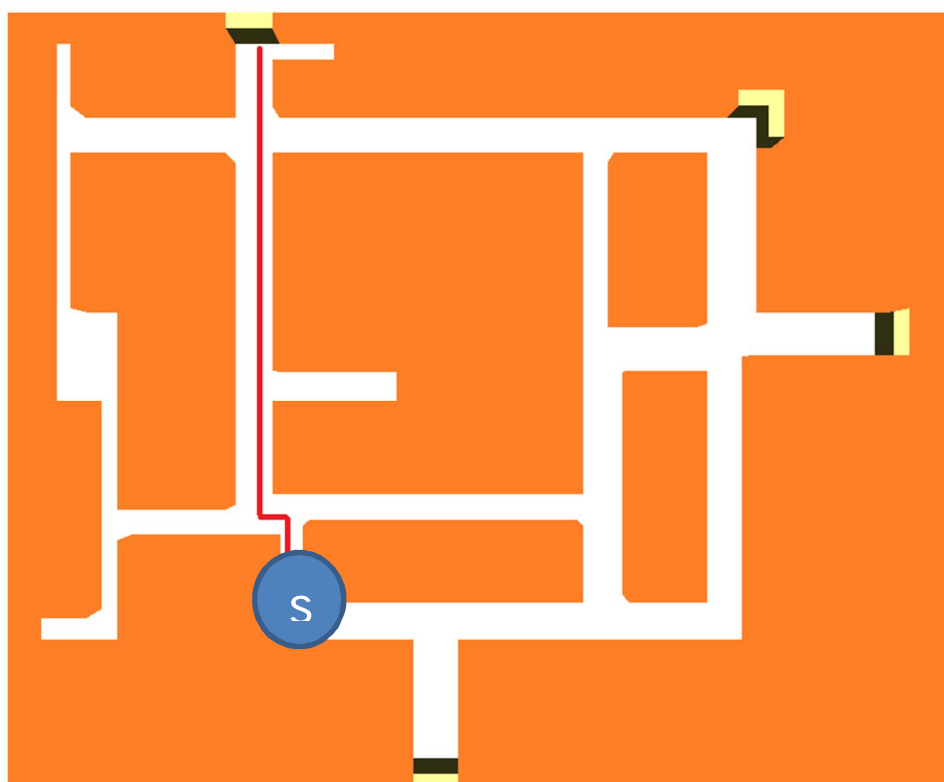


図 4-6 表 4-3 の条件 1 における被験者の避難経路

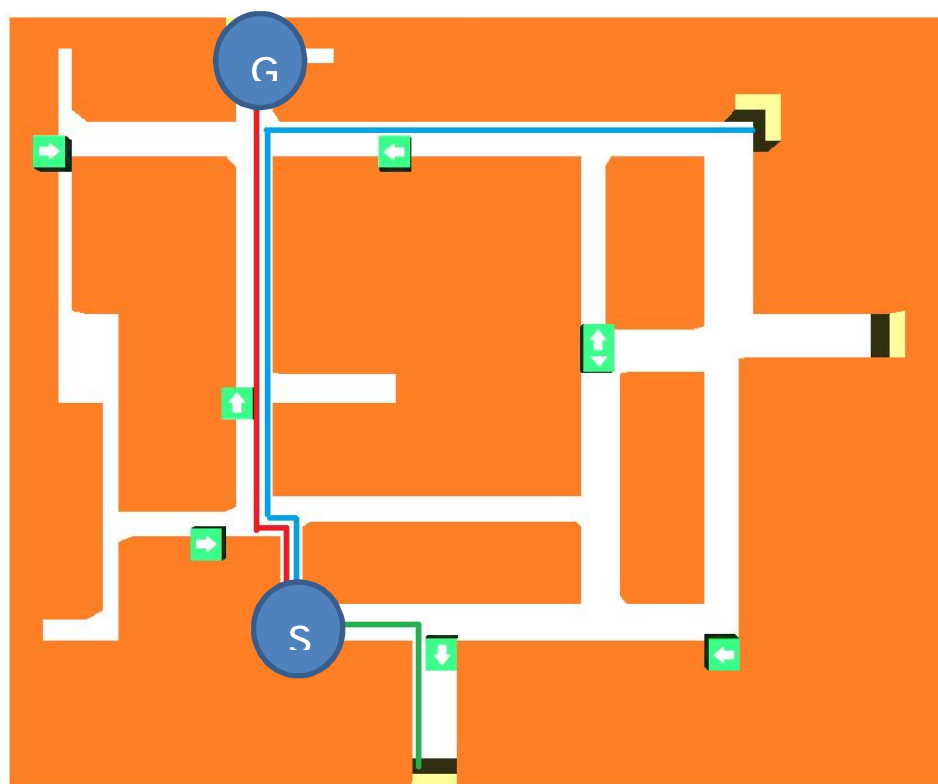


図 4-7 表 4-3 の条件 2 における被験者の避難経路

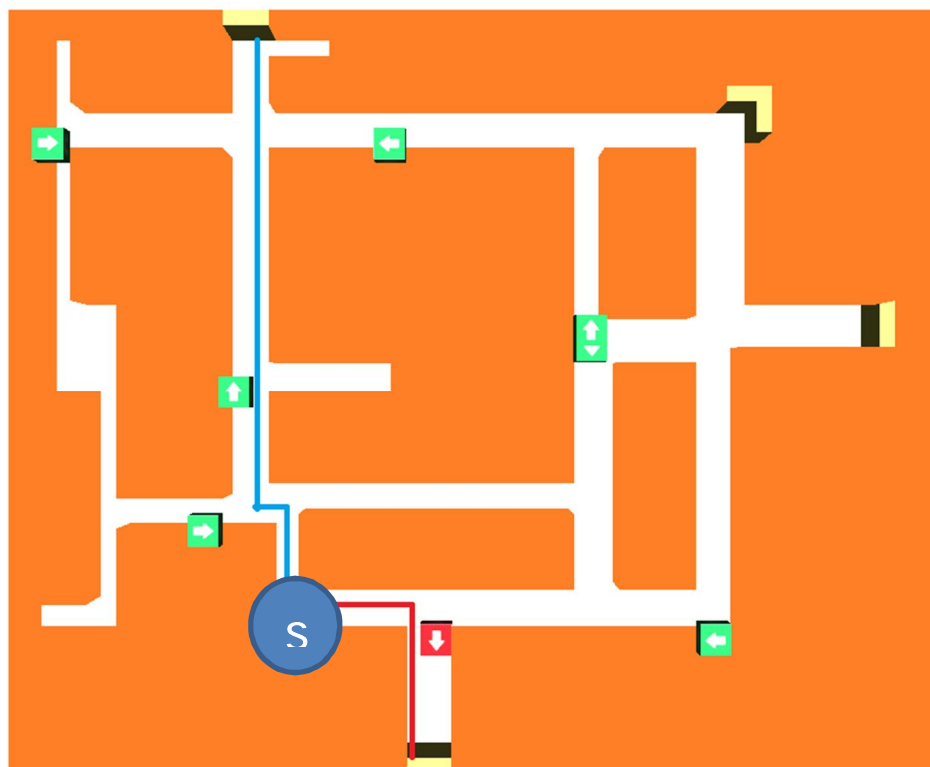


図 4-8 表 4-3 の条件 3 における被験者の避難経路

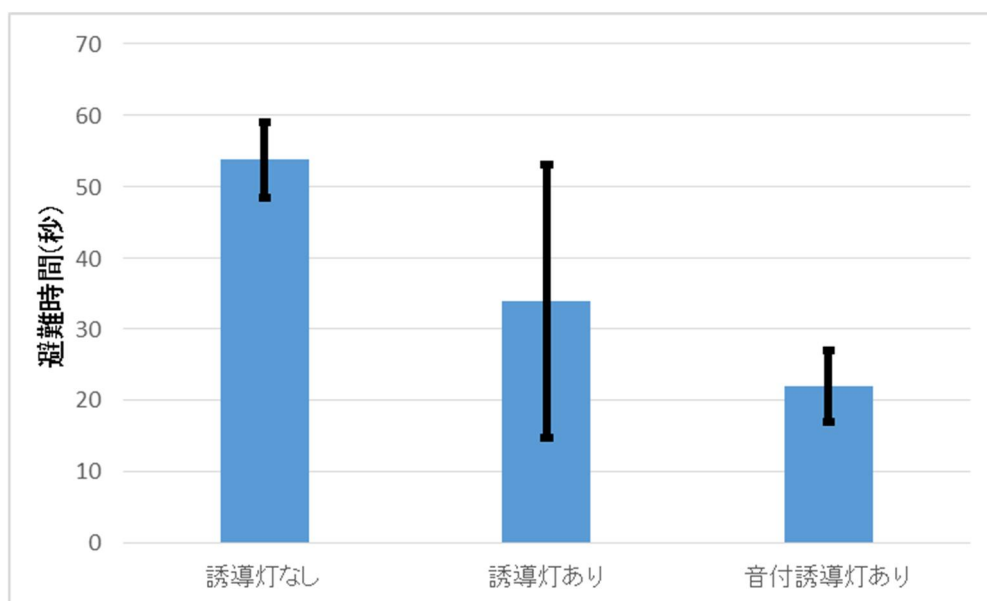


図 4-9 条件別の平均避難時間

4.5 避難時の視点の分析

4.5.1 実験条件

前節の実験から避難をする際に避難者は周囲を確認して発見した誘導灯を参考にするか、周囲を確認せずに視界内の避難者を参考にするといった 2 つの傾向が見られた。そこで、避難者が実際に何を見て避難経路を選択しているのかを詳細に調べるためにアイマークレコーダを用いた実験を行う。本実験で利用したアイマークレコーダは View Tracker (株式会社 ディテクト)を使用した。

表 4-4 は本実験の実験条件を、図 4-10 は実験開始位置を、図 4-11 と図 4-12 は実験環境を示す。本実験では、正確な視点の位置を取得するためにアイマークレコーダのカメラの位置を固定する必要がある。そのために、被験者の顔を固定する固定台を設置した。仮想現実ゲームの操作方法については前項の実験と同様である。また、前項の実験では、被験者が誘導灯を発見しやすくするために音付誘導灯を設置した。本実験では前節の実験よりもより視覚のみに注目した実験を行うために聴覚が関係する音付誘導灯の代わりに誘導灯自体が発光・点滅する機能を持つことで通常の誘導灯よりも気が付きやすくなるようにした点滅誘導灯を図 4-10 中の A 点に設置した。なお、点滅型誘導灯の特徴に関しては実験前に被験者に説明をした上で実験を行っている。

表 4-4 実験条件

被験者数	3 人	
避難者数	80 人(被験者を含む)	
	誘導灯設置条件	実験開始位置
条件 1	誘導灯無し	1
条件 2	通常誘導灯あり	2
条件 3	点滅誘導灯あり	3

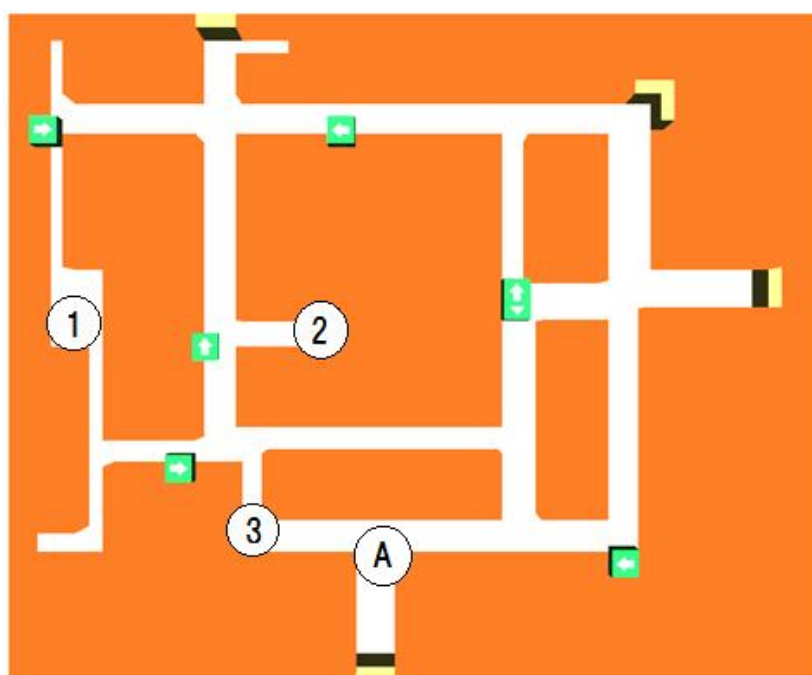


図 4-10 本実験のフロアレイアウト

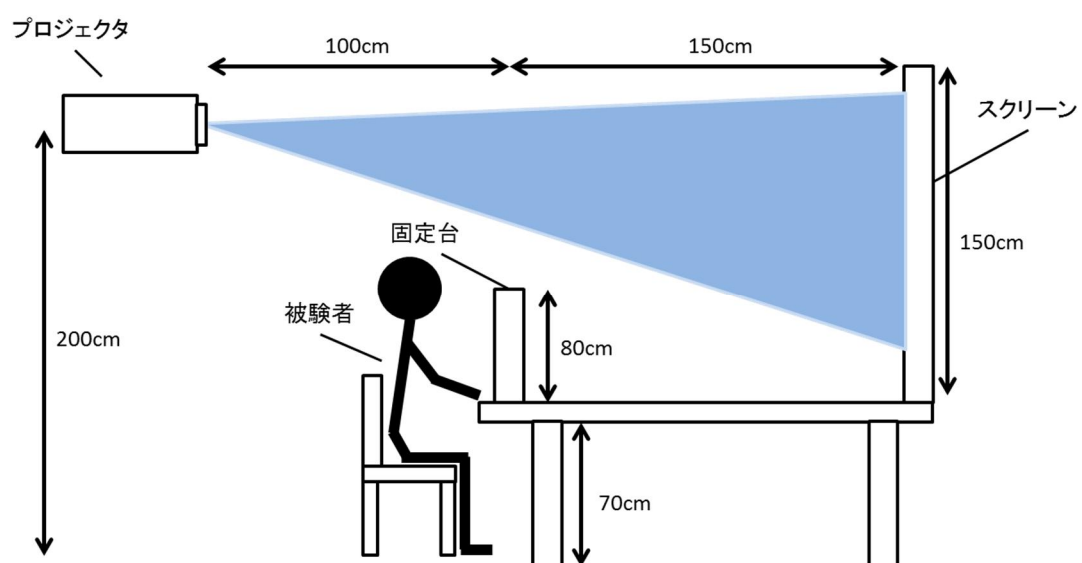


図 4-11 実験環境(横から見た図)

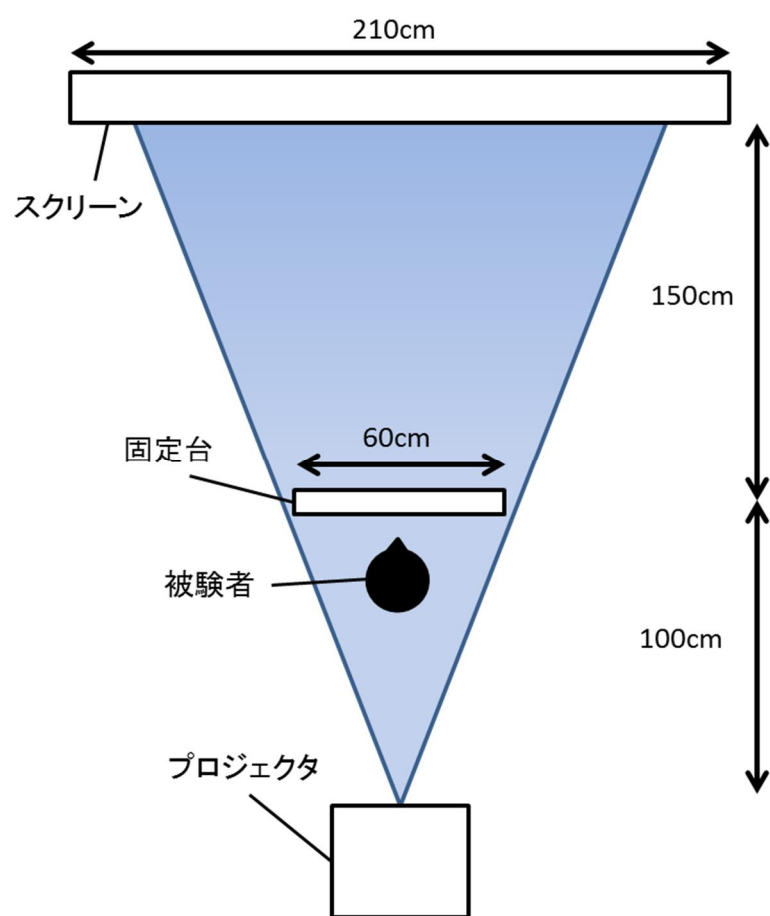


図 4-12 実験環境(上から見た図)

4.5.2 実験結果

表 4-4 の条件 1 では、避難の参考になる情報が被験者自身の視界に存在する出口や他の被験者に限られる。被験者の傾向としては、避難者は周囲の避難者に従って行動する傾向が見られた。

表 4-4 の条件 2 では、図 4-13 の様に誘導灯に視点が移動していたことから被験者は誘導灯を認識できていると考えられる。しかし、最終的には被験者は避難者の行動を参考にして移動しているように見受けられた。被験者が誘導灯よりも周囲の避難者を参考にした際の視点移動の特徴として、誘導灯よりも避難者の方に視点がある時間が長いことが分かった。しかし、今回の実験では被験者以外の避難者全員が誘導灯の指示する方向へ移動した。誘導灯を認識している被験者も存在することから誘導灯と周囲の避難者の避難方向が同じであったために周囲の避難者を参考にしたことも考えられる。そのため、被験者の周囲の避難者の移動方向と誘導灯の指示方向が異なる場合に被験者のふるまいを調査する。

表 4-4 の条件 3 では、点滅誘導灯を認識した場合は近くの避難者が誘導灯と異なる方向に進んでいても、誘導灯に従う傾向が見られた。この結果から被験者が周囲の避難者よりも誘導灯を優先して参考にしながら避難する要因として、異なる特徴を持つ誘導灯であることが挙げられるのかどうかを調査する必要があると考えられる。

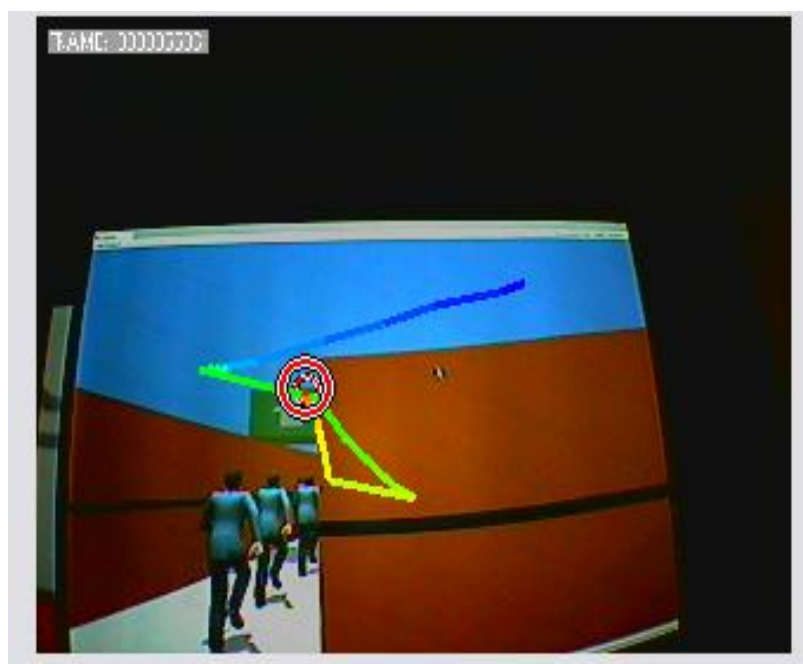


図 4-13 実験時に避難誘導灯が視界に入った際の視点の動き

4.6 避難時に避難者が参考にする物体の分析

4.6.1 実験条件

前節の実験から、被験者は周囲の避難者に視点が向いている時間が長い場合に誘導灯よりも周囲の避難者に従う傾向があるように見られた。しかし、この実験からは避難者と誘導灯の指示する方向が同じであることから、避難者を参考にしていただけなのか、進行方向を見ていただけなのか明らかになっていない。また、誘導灯を参考にしたケースでは参考にした誘導灯が点滅型誘導灯という特殊な誘導灯であったため、そちらを優先したと考えることもできた。このため、周囲の避難者よりも誘導灯を優先する条件は明らかにならなかった。そこで本節では、避難者が避難時に優先的に参考にする物体を明らかにするための実験を行う。具体的には、避難者の進行方向と誘導灯の指示方向が異なる場合に被験者の避難経路の意思決定がどちらに依存しているのかをアイマークレコーダを用いて実験する。この実験で使用した機材は前節の実験と同じく View Tracker (株式会社 ディテクト)で、実験環境も前節と同じである。表 4-5 は本実験の実験条件を示す。本実験では被験者が誘導灯か周囲の避難者の進行方向のどちらを優先するのかを明らかにするため、誘導灯に従って移動する避難者と従わない避難者の割合を段階をつけて条件分けすることで、避難者の人数によって避難の際に参考にする物体の変化を調査する。図 4-14 は実験開始位置を示す。

表 4-5 実験条件

被験者数	7 人	
誘導灯	通常の誘導灯のみを設置	
条件	誘導灯に従う避難者：従わない避難者の比率	実験開始位置
1	0 : 10	1
2	5 : 5	2
3	2 : 8	3

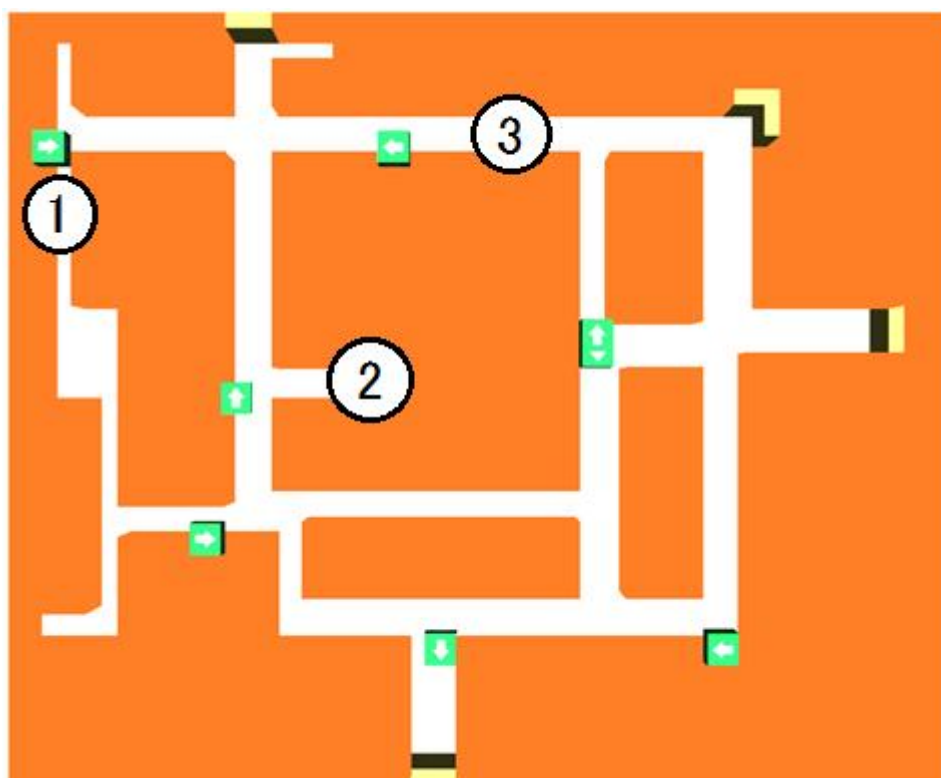


図 4-14 実験開始位置と出口番号

4.6.2 実験結果

図 4-15 は被験者が最初に参考にした物体を示している。図 4-15 から避難時に参考にする物体選択の傾向として、表 4-5 の条件 1 や表 4-5 の条件 2 の様に基本的には誘導灯を参考にするが、周囲の避難者の行動の方を優先して参考にする避難者が常に存在することも分かった。また、表 4-5 の条件 3 のように誘導灯に従わない避難者が多数存在する場合には周囲の避難者を参考にする被験者が多くなることが分かった。この原因は、誘導灯とは逆方向に移動している避難者が多数存在するために避難者の行動からそちらに出口があると判断したと考えられる。

図 4-16 は被験者が避難した出口を示している。図 4-15 と図 4-16 を比較すると条件 1 と条件 3 では、最初に避難の参考にした誘導灯・避難者が誘導する出口と被験者が実際に避難した出口が一致しなかった。この原因は避難の途中で参考にする物体が変化することが挙げられる。また、被験者の特徴として途中から避難者に従うケースは多かったが、途中から誘導灯に従うケースは少なかった。被験者が避難者に従うケースでは、進路が二手に分かれていた場合に人数の多い方向へ移動する傾向が見られた。

また、実験を通じた被験者全体の傾向としては、出口が視野に入ると、多くの被験者は自分の正面の方向を主として、周囲を見渡す行動や他の物体を参考にする行動を取らず、これにより直近の出口を見落とすケースも見られた。この結果から、避難者が移動している場合では視野が狭くなる傾向があることが考えられる。

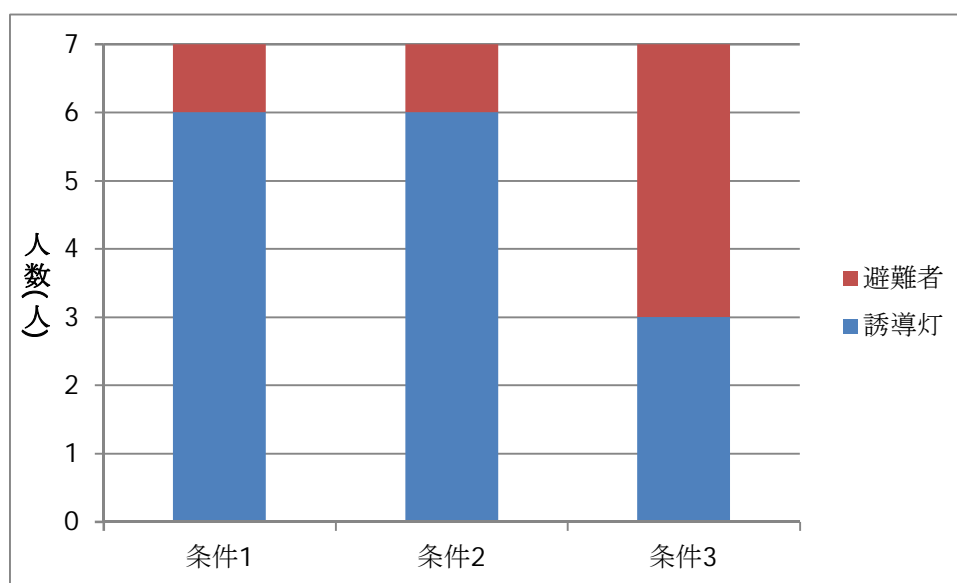


図 4-15 避難時に最初に参考にした物体

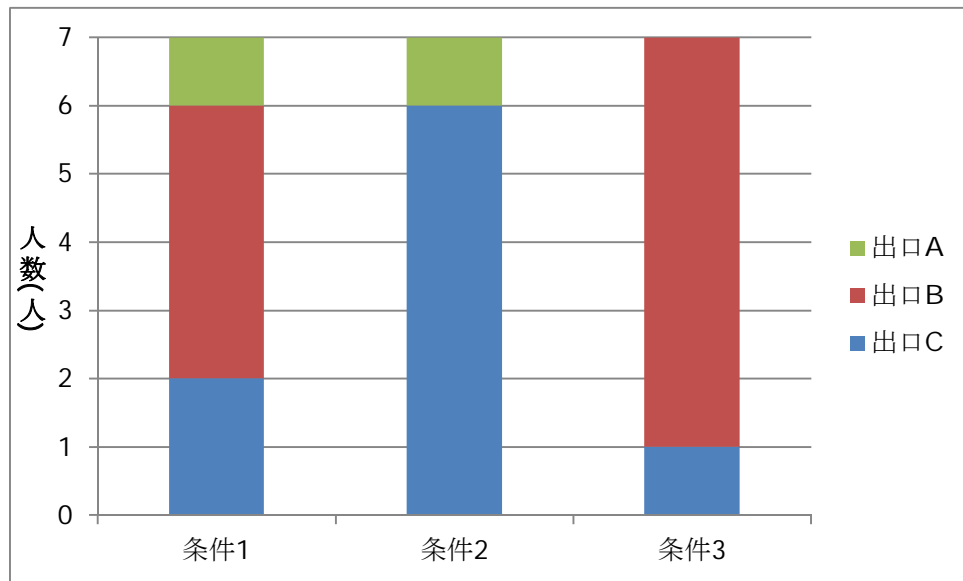


図 4-16 実際に避難した出口

4.7 仮想ゲームから得られた避難者の判断特性のシミュレータへの導入

前節までの仮想現実ゲームを用いた避難実験では、避難時に誘導灯よりも避難者を参考にする避難者の存在や被験者は自分の正面方向を主として、周りの状況を見渡す行動を取らない傾向が見られた。本節では、それらの実験結果を踏まえて、以下の判断特性を持つ避難者を避難シミュレータに導入することを考える。

特性 1：避難時に参考する物体の優先順位が異なる特性

特性 2：避難時の視野範囲が異なる特性

避難時において誘導灯よりも避難者を参考にする避難者が存在したことから、現在、シミュレータに導入しているエージェントの参照対象とは異なる優先順位を持たせる。表 4-6 は現在導入されている避難者が持つ優先順位(以降、誘導灯優先と表記)と導入する優先順位(以降、避難者優先)を示す。

表 4-6 避難者が持つ優先順位

優先順位	誘導灯優先	避難者優先
1	出口	
2	誘導灯	直近の避難者の進行方向
3	直近の避難者の進行方向	誘導灯
4	1～3 が存在しない場合、その時点での進行方向	

また、避難時に周囲を見渡さない傾向から、現在導入している避難者の持つ避難者自身を中心とした 360° の視野範囲とは異なる視野範囲を持たせる。現在導入されている視野範囲と導入する視野範囲を以下に示す。

i) 避難者自身を中心に 360°

ii) 避難者の進行方向を中心に 180°

iii) 避難者の進行方向を中心に 90°

視野範囲 i は常に注意深く周囲を確認しながら避難する避難者の視界、視野範囲 ii は周囲を確認しながら避難するものの進行方向のみしか確認しない避難者の視界、視野範囲 iii は避難時の環境によって視野が狭まってしまっている避難者の視界と考えることができる。図 4-17 は避難シミュレータ上でのエージェントが持つ視野範囲のパターンを上記の視野範囲の i)～iii)毎に視覚化した図を示す。

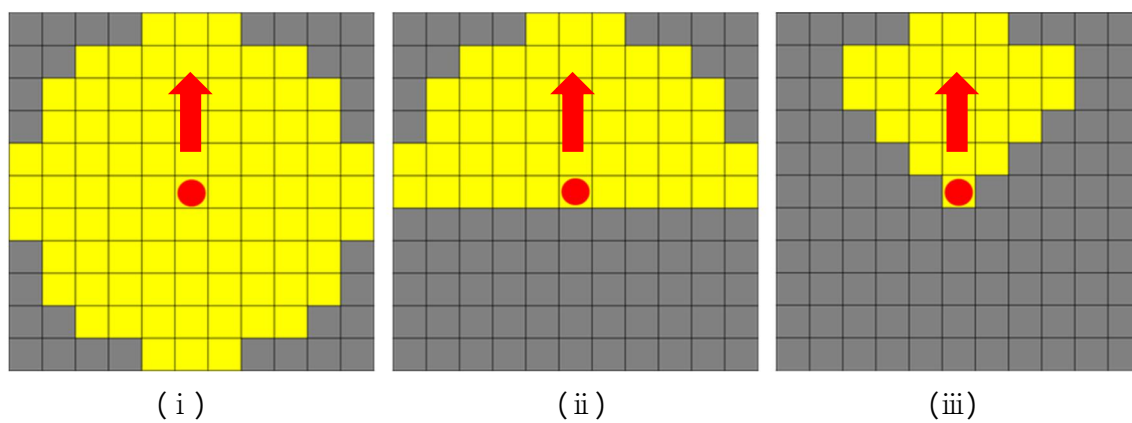


図 4-17 避難者の視野範囲

4.8 単純構造のレイアウトを用いたシミュレーション

4.8.1 避難領域

前節では仮想現実ゲームを用いて行った実験から得た結果を基に避難シミュレータのエージェントに2つの特性を新たに追加した。本節では単純な構造のレイアウトを用いたシミュレーションによって、追加した2つの特性が避難に与える影響を調査する。本節のシミュレーションで用いる単純構造の避難領域を図4-18に示す。設置された誘導灯は5台とし、設置場所は本研究で考案した誘導灯の最適配置モデルによって算出した配置となっている。このレイアウトは、3章で用いたフロアレイアウトと同様である。

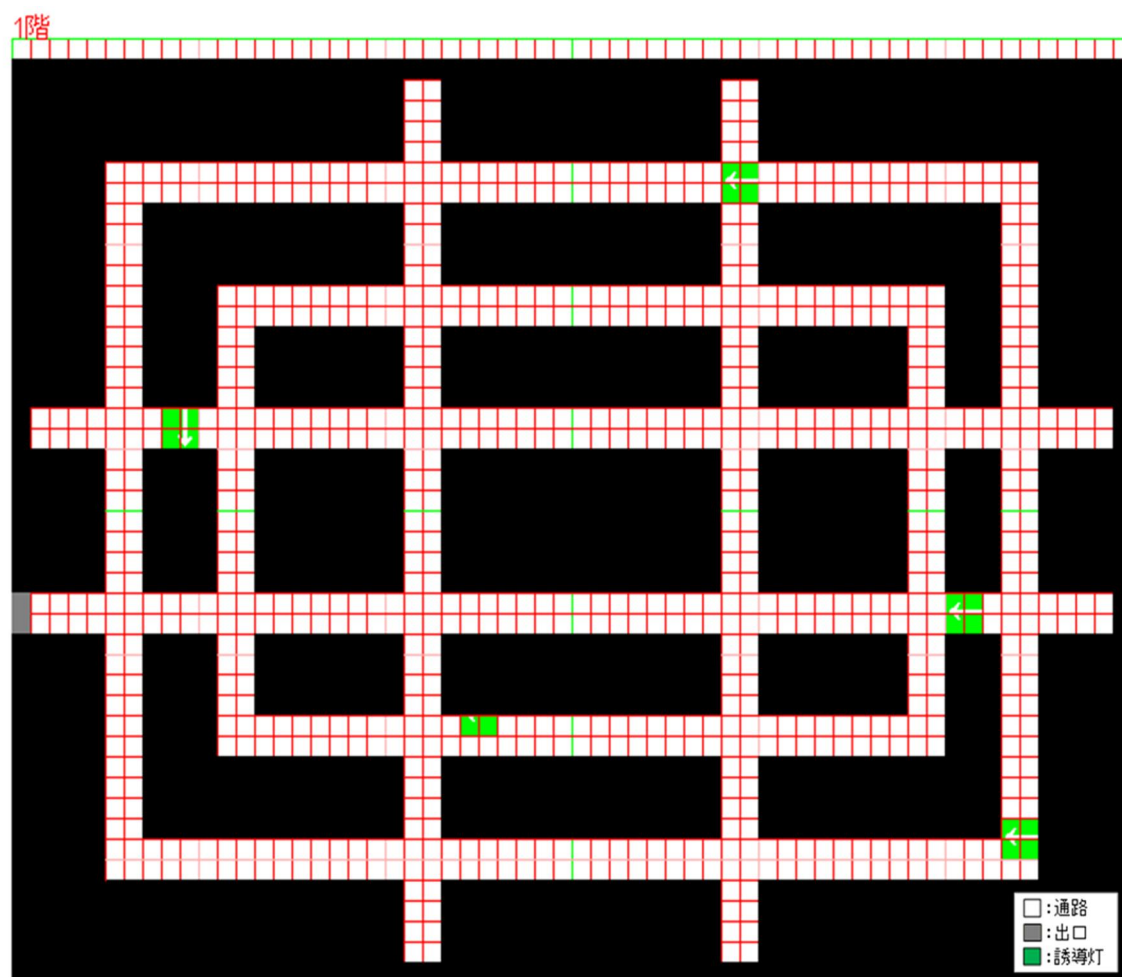


図 4-18 フロアレイアウト

4.8.2 避難時に参照する物体の優先順位が避難に与える影響

本項では前節で避難シミュレータに追加した 2 つの特性の内、避難時に参照する物体の優先順位の異なる避難者について、複数の条件でシミュレーションを 10 回行った。表 4-7 はシミュレーションの条件を示す。表 4-7 の条件 1 から条件 4 によって参照する物体が異なる避難者の割合を変化させることで、避難において参照する対象として、誘導灯が有効であることを示す。図 4-19 は 10 回のシミュレーションの平均値を、エラーバーは標準偏差を示す。この図から、避難の参考にする対象物の優先順位の違いにおける時間経過に対する避難人数の差がグラフから読み取れる。

表 4-7 の条件 1 と条件 2 を比較すると、シミュレーション終了時の避難完了人数は同様の数値となった。これは避難者優先の避難者が誘導灯優先の避難者を参照して移動することで、出口まで到達できる避難者が増加したことを示唆する。

条件 2 と条件 3 を比較すると、条件 3 の避難完了人数は条件 2 の避難完了人数よりも約 10% 少ない。同様に標準偏差を比較すると、避難完了人数の増加によって条件 3 における標準偏差が大きくなる。これらは誘導灯優先の避難者が早期に脱出した後では他の避難者を優先して参照する避難者が誘導灯を参照しないために出口を発見しにくくなってしまったことが原因であると考えられる。

表 4-7 の条件 1 と条件 4 を比較すると、条件 4 の避難完了人数は条件 1 の約 60% になっている。この原因としては、誘導灯よりも周囲の避難者を優先して避難の参考にした場合には、誘導灯を参考に避難をしないために避難者優先の避難者の方が誘導灯優先の避難者よりも出口を発見しにくい場合があることが考えられる。これにより避難領域内において、避難者が集中して混雑が発生し、避難者が反対方向から衝突することで移動ができなくなる現象が多くなってしまう。また、標準偏差を比較すると、120 秒を超えると条件 1 に比べて条件 4 の方が大きい。これは誘導灯優先の場合に比べて、避難者優先の場合は避難時に参照する避難者の減少や避難者を参照するために混雑している場所への移動が発生しやすい。そのため、避難の可否が避難者の現在位置に左右されることが原因と考えられる。

条件 1 から条件 4 の比較から、誘導灯を参照することが避難では非常に重要であること、また、多くの避難者が他の避難者を参照して移動していても、少人数でも誘導灯を参照している避難者が存在すれば、多くの避難者が短時間で避難することがわかる。

表 4-7 シミュレーションの条件

共通条件			
避難者数	避難者の初期配置	視野範囲	誘導灯数
50 人	一様	180°	5 台
優先順位別の避難者数			
条件 1	誘導灯優先 : 50 人		
条件 2	誘導灯優先 : 25 人, 避難者優先 : 25 人		
条件 3	誘導灯優先 : 10 人, 避難者優先 : 40 人		
条件 4	避難者優先 : 50 人		

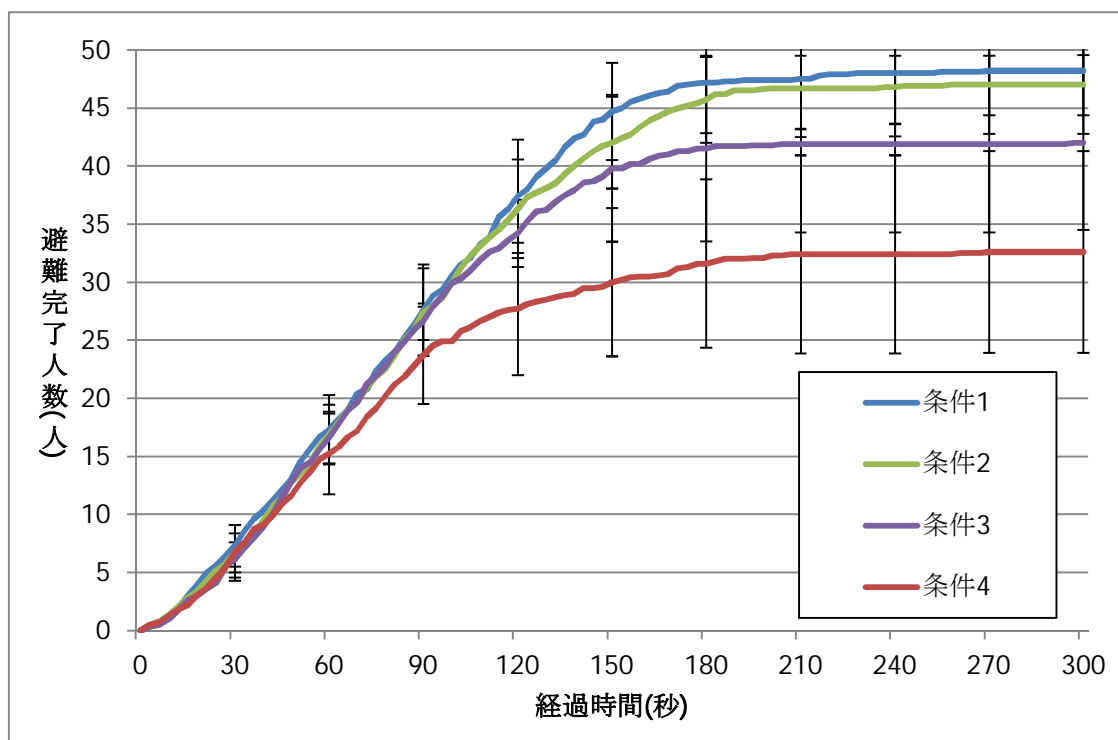


図 4-19 避難の参考にする対象物の優先順位が避難に与える影響

4.8.3 視野範囲が避難行動に与える影響

仮想現実ゲームによる実験から、避難者が移動中は視野範囲が狭くなる特徴が見られた。本項では視野範囲が避難行動に与える影響を調べるため、前節で避難シミュレータに追加した2つの特性のうち、視野範囲の異なる避難者について、シミュレーションを10回行った。表4-8はシミュレーションの条件を示す。図4-20は10回のシミュレーションの平均値を、エラーバーは標準偏差を示す。この図から、避難時の視野範囲の違いにおける時間経過に対する避難人数の差がグラフから読み取れる。

脱出完了人数の推移から、表4-8の条件1と条件2の場合では避難者のほぼ全員が脱出できている。これは誘導灯や出口といった避難に有効な対象物を早期に発見することができたことが原因と考えられる。また、表4-8の条件1と条件2を比較すると、早期に避難完了した避難者数については、条件2での避難者完了人数が条件1の場合と比べて数人少ない。これは条件2の方が条件1の場合と異なり、避難者が自分の背後の対象物を参照できないことが原因と考えられる。これは周囲の確認ができていないために近くの誘導灯などに気が付かず避難に時間を要するといった仮想現実ゲームによる実験で確認できた現象が再現できていると言える。

表4-8の条件3の場合は他の2つの条件と比較して、脱出完了人数が大幅に減少するという結果となった。これは視野範囲が狭いために他の条件よりも避難に有効な対象物の発見が困難であることが原因と考えられる。また、標準偏差を比較すると、視野範囲が狭くなるほど標準偏差が大きくなることが分かった。これは視野が狭くなると避難時に参照できる対象物が発見しにくいため、発見できた場合とできなかった場合で避難完了人数が変動しやすくなることが原因と考えられる。

表 4-8 シミュレーションの条件

共通条件			
避難者数	避難者の初期配置	避難時に参考する 対象物の優先順位	誘導灯数
50 人	一様	誘導灯優先	5 台
避難者の視野範囲			
条件 1		360°	
条件 2		180°	
条件 3		90°	

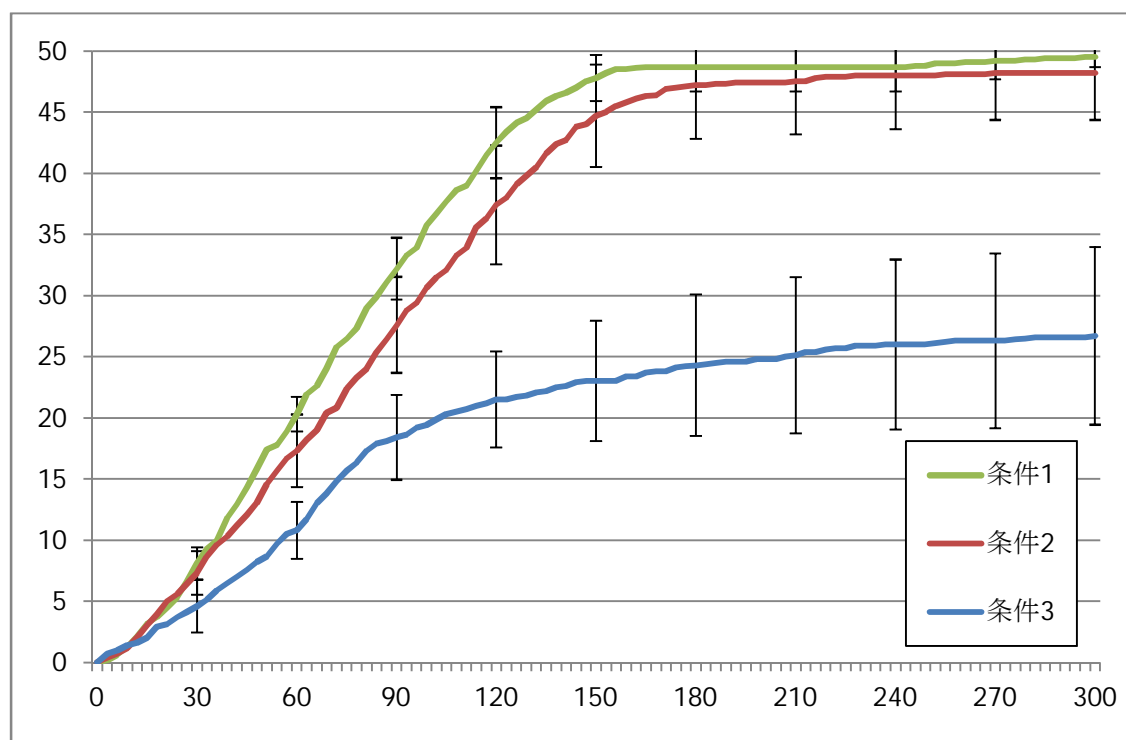


図 4-20 視野範囲が避難行動に与える影響

4.9 実在する店舗のレイアウトを用いたシミュレーション

4.9.1 避難領域

前節で単純な構造を利用し，導入した避難者特性が避難に与える影響をシミュレーションによって分析した．本節では，実在する店舗のレイアウトを利用して，前節と同様に導入した避難者特性が避難に与える影響を調べる．図 4-21 は，本節のシミュレーションに利用したフロアレイアウトを示す．このレイアウトは，実在する電気製品量販店の 1 階をモデルにしており，3 章で用いたフロアレイアウトと同様である．誘導灯の配置場所は実際の店舗と同じ誘導灯配置とする．

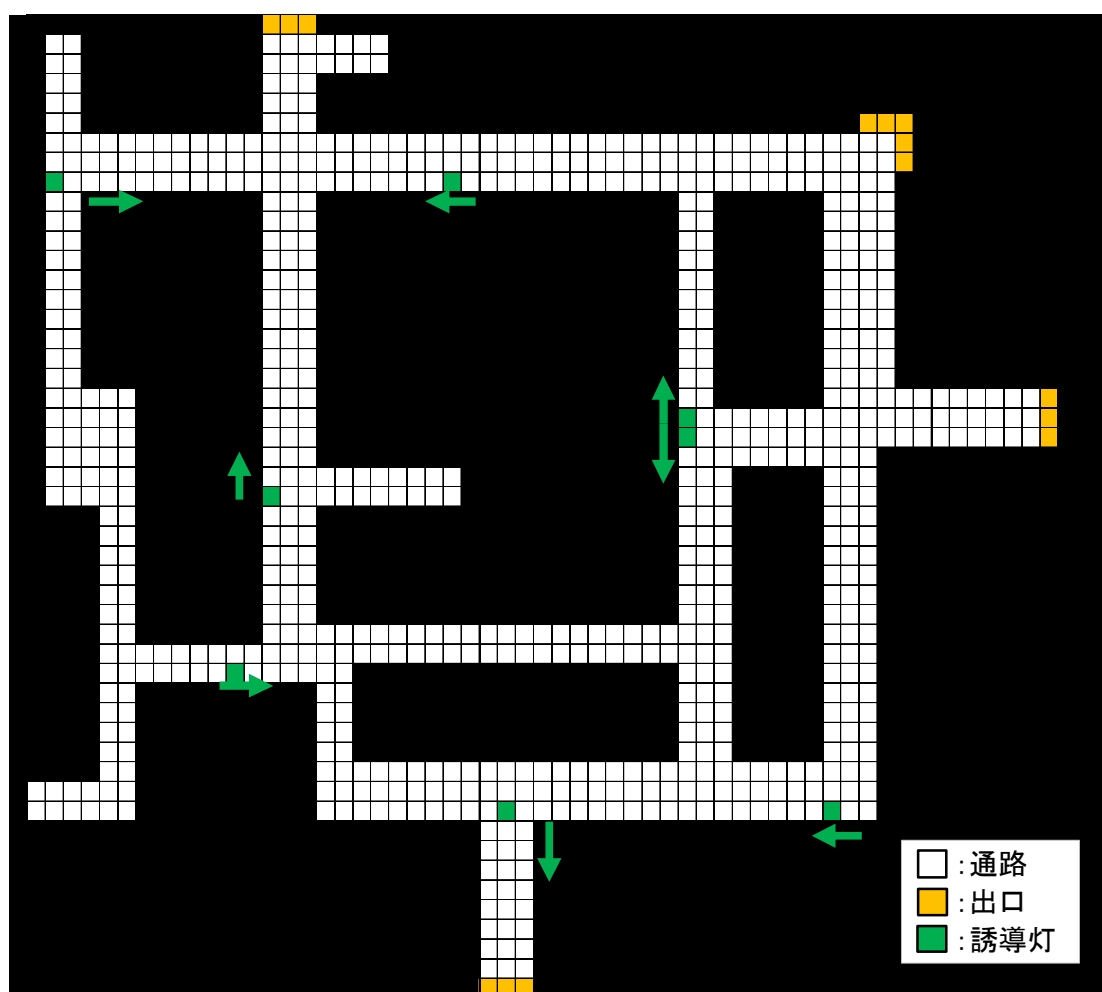


図 4-21 店舗と同じ誘導灯配置をしたフロアレイアウト

4.9.2 避難時に参照する対象の優先順位が避難に与える影響

本項では避難時に参照する物体の優先順位の異なる避難者の人数割合を変化させて、10回のシミュレーションを行った。表 4-9 はシミュレーションの条件を示す。表 4-9 の条件 1 から条件 5 によって参照する対象の優先順位が異なる避難者の割合を変化させることで、参照する対象による影響を調べる。図 4-22 は 10 回のシミュレーションの平均値を、エラーバーは標準偏差を示す。この図から、避難時に参照する対象物の優先順位の違いにおける時間経過に対する避難人数の差がグラフから読み取れる。

表 4-9 の条件 1 と条件 2、条件 3 の結果から、シミュレーション終了時の避難完了人数はほとんど同様の数値となった。これは前節の単純構造でのシミュレーション結果からもわかるように表 4-9 の条件 2 と条件 3 のシミュレーションでは避難者優先の避難者が誘導灯優先の避難者を参照して移動することで、出口まで到達できる避難者が増加したことを示唆する。また、表 4-9 の条件 4 と条件 5 の結果と比較して、避難者優先の避難者が誘導灯優先の避難者を参照して移動するために、通路が混雑して移動不能になる場合が減少したことも原因である。

表 4-9 の条件 4 と条件 5 の結果では、最終的な避難完了人数が減少した。とくに表 4-9 の条件 5 は条件 1 の避難完了人数の約 80%になっている。これは前節の単純構造のシミュレーション結果と同様に、周囲の避難者を参照して避難した場合には、誘導灯を参照して避難を行わないために避難者優先の避難者の方が誘導灯優先の避難者よりも出口を発見しにくい場合があることが原因と考えられる。また、これにより避難領域内において、避難者が集中して混雑が発生しやすくなるために避難者が移動不可能になることが増加することも前節の単純構造のシミュレーション結果と同様と考えられる。

また、表 4-9 の各条件の標準偏差を比較すると、シミュレーション後半では条件 3 と条件 4、条件 5 の標準偏差の値は条件 1 と条件 2 の標準偏差より大きい。前節のシミュレーション結果とこの結果から、避難者優先の避難者の割合が増加すると避難時に参照すべき誘導灯優先の避難者の減少や混雑している場所へ移動する状況が発生しやすくなるため、避難の可否が避難者の初期位置に左右されると考えられる。

表 4-9 の条件 1 から条件 5 の比較から、誘導灯の参照が避難では非常に重要であること、また、多数の避難者が他の避難者を参照して移動していても、誘導灯を参照している避難者が少数でも存在すれば、多くの避難者が短時間で避難可能であることが明らかになった。

表 4-9 シミュレーションの条件

共通条件			
避難者数	避難者の初期配置	視野範囲	誘導灯数
100 人	一様	180°	8 台
優先順位別の避難者数			
条件 1	誘導灯優先：100 人		
条件 2	誘導灯優先：25 人，避難者優先：75 人		
条件 3	誘導灯優先：50 人，避難者優先：50 人		
条件 4	誘導灯優先：75 人，避難者優先：25 人		
条件 5	避難者優先：100 人		

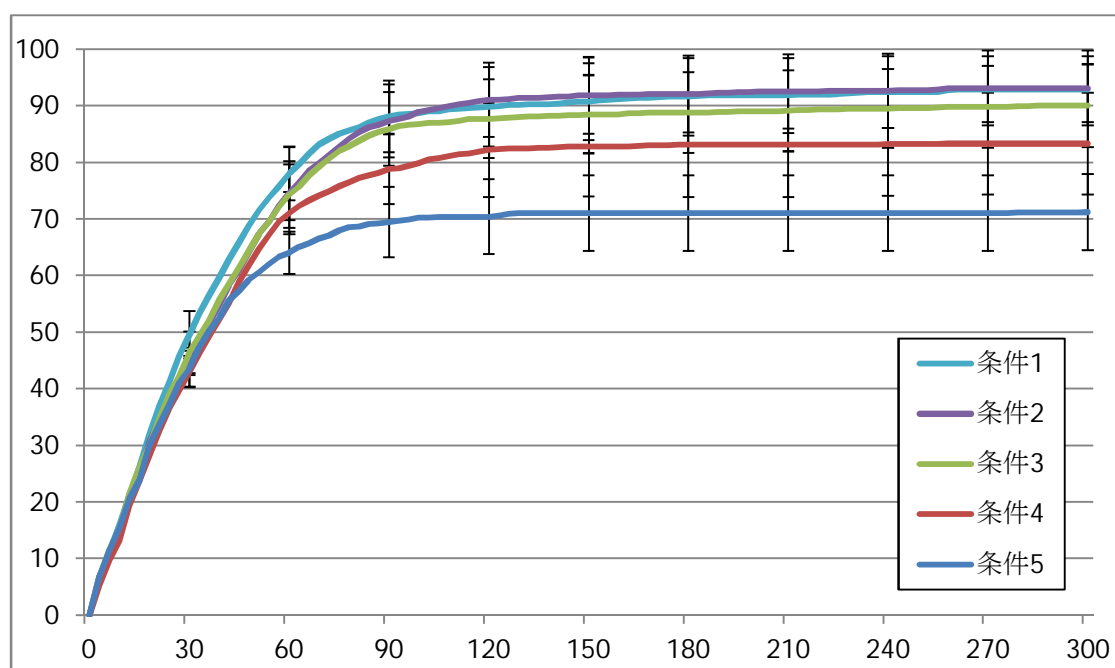


図 4-22 避難の参考にする対象物の優先順位が避難に与える影響

4.9.3 視野範囲が避難行動に与える影響

前項の結果に加えて、前節と同様に実在する建築物での避難の際に視野範囲が避難に与える影響を調べるために視野範囲が異なる避難者の割合を変化させて、シミュレーションを10回行った。表4-10はシミュレーションの条件を示す。図4-23は10回のシミュレーションの平均値を、エラーバーは標準偏差を示す。この図から、避難時の視野範囲の違いにおける時間経過に対する避難人数の差がグラフから読み取れる。

脱出完了人数の推移から、表4-10の条件1から条件5を比較すると、視野の狭い避難者の割合が増加するほど、避難完了人数が少なくなった。とくに条件1と条件5では、条件5の避難完了人数は条件1の約70%となった。これは視野の狭い避難者には避難に有効な対象物の発見が困難であったことや出口や誘導灯を発見しにくいために避難者を参考に避難した結果、混雑が発生し移動不能になったことが原因と考えられる。これは前節の単純構造のシミュレーション結果と同様に仮想現実ゲームによる実験で確認できた減少が再現できていると言える。

また、条件別に標準偏差の値を比較すると、視野の狭い避難者の割合が増加するほど標準偏差の値も大きくなった。これも前節のシミュレーション結果と同様に視野が狭くなると避難の参考になる対象物が発見しにくいため、発見できた場合とできなかった場合で避難完了人数が変動しやすくなることや視野の狭い避難者が視野内の避難者を参考に移動することで混雑が発生し、通路が通行不能になってしまう状況が発生しやすくなることが原因と考えられる。

表 4-10 シミュレーションの条件

共通条件			
避難者数	避難者の初期配置	避難時に参考する 対象物の優先順位	誘導灯数
100 人	一様	誘導灯優先	8 台
避難者の視野範囲			
条件 1		180° : 100 人	
条件 2		180° : 25 人, 90° : 75 人	
条件 3		180° : 50 人, 90° : 50 人	
条件 4		180° : 75 人, 90° : 25 人	
条件 5		90° : 100 人	

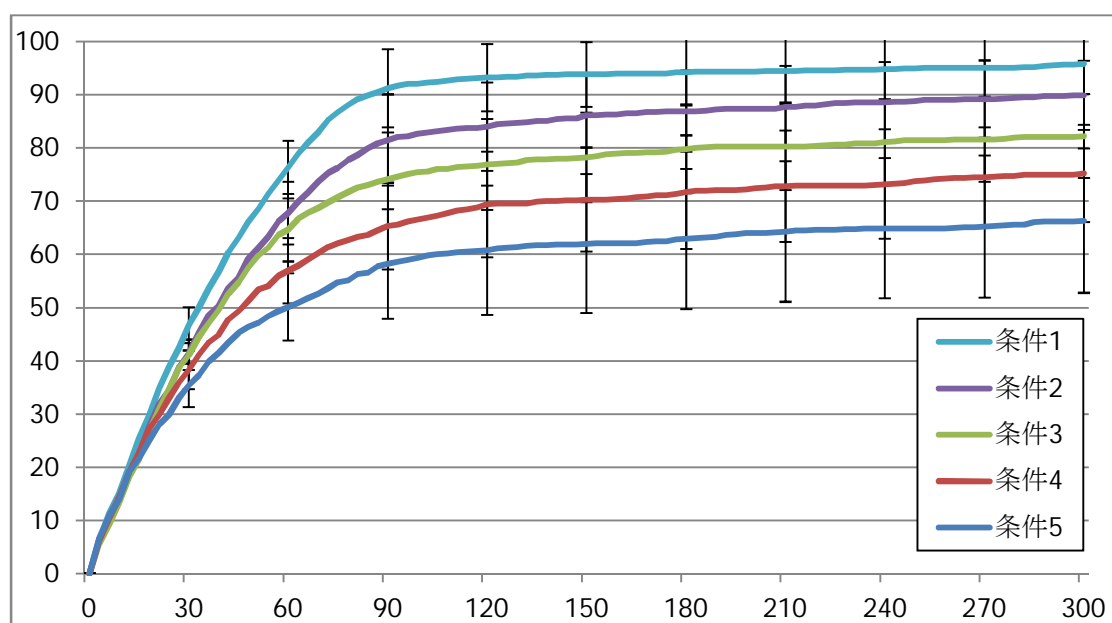


図 4-23 視野範囲が避難行動に与える影響

4.10 まとめ

本章では仮想現実ゲームを開発し，被験者による避難者行動を分析するための実験を行った．実験の結果から行動の特徴を分析し，シミュレータにエージェントのルールとして導入することで多様な条件における避難の特徴を示した．具体的には以下について検討した．

- ・ 仮想現実ゲームの構築
- ・ 仮想現実ゲームを用いた実験
- ・ 実験結果から得られた避難者特性の避難シミュレータへの導入

【仮想現実ゲームの構築】

本章で開発した仮想現実ゲームは MAS を用いた避難シミュレータと仮想現実ゲームを組み合わせたシステムである．災害時の避難者行動を分析するためにシステムには下記の機能を導入した．

■ 仮想現実ゲームが持つ機能

- ・ 避難シミュレータと連携して避難シミュレータのシミュレーション結果を仮想現実上に再現できる機能
- ・ 被験者の避難行動を分析するために仮想現実ゲーム上の避難者を操作することができる機能

【仮想現実ゲームを用いた実験】

仮想現実ゲームを用いた実験を行い，結果から下記に示す被験者の傾向が見られた．

■ 仮想現実ゲームを用いた実験から得られた被験者の傾向

- ・ 避難時に参考にする物体は基本的に誘導灯であるが，逆方向に移動する避難者が多い場合には周囲の避難者を参考にする傾向
- ・ 出口が視野に入ると，多くの被験者は自分の正面方向を主として，周囲を見渡す行動や他の物体を参考にする行動を取らない傾向
- ・ 実験開始後の最初に視界に入った誘導灯や避難者に従う傾向
- ・ 少数ではあるが，誘導灯ではなく，避難者を参考にする避難者が存在する傾向

【実験結果から得られた避難者特性の避難シミュレータへの導入】

仮想現実ゲームから得られた傾向から下記に示す避難者特性を新たに導入してシミュレーションを行った。シミュレーションの分析結果と避難を効率的に行うための方策としては下記の方策を得た。また、これまでのシミュレーションの課題を下記に示す。

■新たに導入した避難者の特性

- ・避難時に参考する対象物の優先順位が異なる避難者
- ・避難時の視野範囲が異なる避難者

■シミュレーションの分析結果

- ・避難誘導灯を参考に避難する場合よりも周囲の避難者の行動を参考にした場合が避難に時間を要する。これは現実の避難を考えた場合や避難者が家族や友人と避難する場合では避難誘導灯よりも家族や友人と一緒に行動することに想定すると考えられる。
- ・避難者は急いで避難することで視野範囲が狭くなる。これにより、避難に有効な対象物を発見するのが遅れるため、避難に悪影響が生じる。
- ・これらのシミュレーションの結果は仮想現実ゲームを用いた実験にも表れていた現象であることから、対象物の優先順位や視野範囲をエージェントのルールとして導入することでシミュレーションでも再現したことからシミュレーションの模擬の精度が示された。

■避難を効率的に行うための方策

方策①：避難時に避難誘導灯を優先的に参考にすることを教育し、周知すること

この方策はシミュレーションから、避難者が誘導灯を優先して避難することによって効率的に避難できることや誘導灯を参考にして避難する避難者が多い方が効率的な避難ができることが示されているため、有効であると考えられる。

方策②：避難誘導灯を発見しやすい様に音などを利用した避難誘導灯の設置

現在、音を発する誘導灯や点滅する誘導灯は販売されており、消防法にも適応しているため、実施可能な方策である。しかし、この方法は現在設置されている誘導灯を新たに置き換える必要があるため、コストが大きいことが欠点となる。

■開発したシミュレータが抱える課題

これまでのシミュレーションや仮想現実ゲームでは災害が発生した場合に柵などの様に通路を塞ぐような障害物の検討がされておらず、災害発生状況を十分に検討することができていない。

このため、現実の減少を模擬するためには障害物が動的に生じる条件をシミュレータに含めることが必要と考えられる。

5 章 避難誘導を効果的に行うための新しい避難誘導灯の提案

5.1 本章の目的

3 章では，単純なレイアウトと実在する建物のレイアウトを利用して，フロアに存在する避難者の人口密度や偏りによる避難の特徴を分析した．その結果，集団の偏り次第では避難者が 1 つの出口に集中してしまう状況が発生して，誘導灯の導入の効果が小さくなることがわかった．つまり，誘導灯はフロア全体に均等に避難者が分布している場合にはより高い効果を発揮するが，常にフロアに均等に避難者が分布しているとは限らない．とくに百貨店などの店舗の建物では一か所に避難者が集中しているというような状況も十分に想定できる．

そこで本章では，避難時に集団の偏りがあっても効率的な避難誘導が可能な方策として補助誘導灯を提案し，2 章で構築した避難シミュレータによるシミュレーションによって有効性を検証する．

5.2 補助誘導灯の提案と導入

本節では前節で説明したように、避難時に集団の偏りがあった場合でも効率的な避難誘導が可能な方策として補助誘導灯を提案する。

図 5-1 は補助誘導灯の概要図を示す。具体的には、本研究で構築した避難シミュレータに当該出口に集まっている避難者が少数であることを示す機能（A）と避難者が直近の出口に比べて当該出口を選択する規則（B）を導入する。機能（A）は避難領域において、避難の状況に応じて動的に情報変更する機能であり、各出口で待つ避難者が少数である場合に提示（点灯）するという新しい避難誘導灯を配置する。もし、出口で待つ避難者数が多い場合は誘導灯は提示（点灯）しない。機能（A）に関しては、今後は「補助誘導灯」と略記する。区別のために一般に利用されている避難誘導灯を「従来型誘導灯」と略記する。規則（B）は各避難者自身が判断する規則である。当該出口が混雑している場合に他の出口の位置がわかり、なお当該の出口が空いていることが判断できるならば、空いている出口に移動しようとする動きは十分に考えられることである。

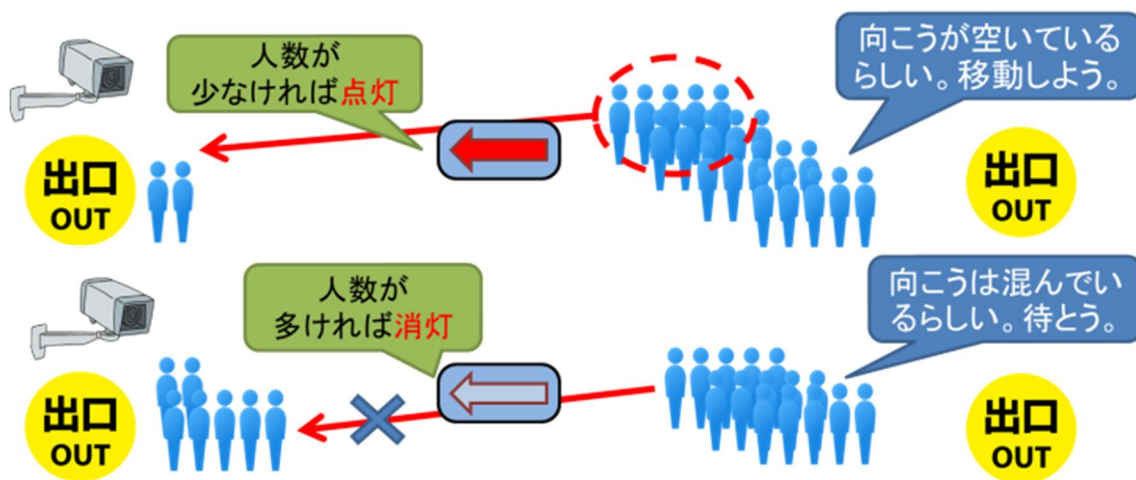


図 5-1 補助誘導灯の概要図

5.3 避難シミュレータ上における補助誘導灯のモデル

本研究で用いる避難シミュレータ上で、前節で述べた機能を有した補助誘導灯と、それに応じたエージェントの判断機能を組み込む。

エージェントには、直近 s (秒) 間で現在位置から移動できなかった場合に、エージェントは直近の出口よりも前節で述べた機能 (A) を有する補助誘導灯の表示を確認、優先する条件を新たに加える。

本研究で用いるシミュレーションの条件では、補助誘導灯は出口で待つ人数が 8 名以下のとき、出口方向の指示を表示する。また、避難者が直近の出口よりも補助誘導灯の指示を優先する条件である移動停止時間の閾値 s を $s = 5.5$ (s) とする。補助誘導灯が指示方向を変更するための出口で待つ避難者の人数や避難者の判断条件としての移動停止期間の閾値といったパラメータはシミュレータのプログラムを変更することで任意に変更することが可能である。

補助誘導灯の情報は従来型誘導灯と同じように、Location クラス(Appendix 1)が外部ファイルから読み取り、領域情報の 1 つとして保存する。しかし、今回組み込む補助誘導灯は動的に領域の情報を判断し、他の出口方向への点灯・消灯を切り替える機能を持つ。この機能を実現するためには領域情報だけを保持している Location クラス単独では実現不可能である。そこでこの補助誘導灯が指示している誘導先出口の人数を Simulation クラス(Appendix 1)が Location クラスに通知する。Location クラスは通知された誘導先出口の人数を混雑の有無を判断することで点灯・消灯の切り替えを行う。図 5-2 は処理の流れの具体例として、補助誘導灯が消灯する場合の避難シミュレータの処理の流れを示す。図 5-3 は避難シミュレータ上での補助誘導灯の具体的な画面上表示の例を示す。従来型の誘導灯と区別するために便宜的に異なる色を用いた。

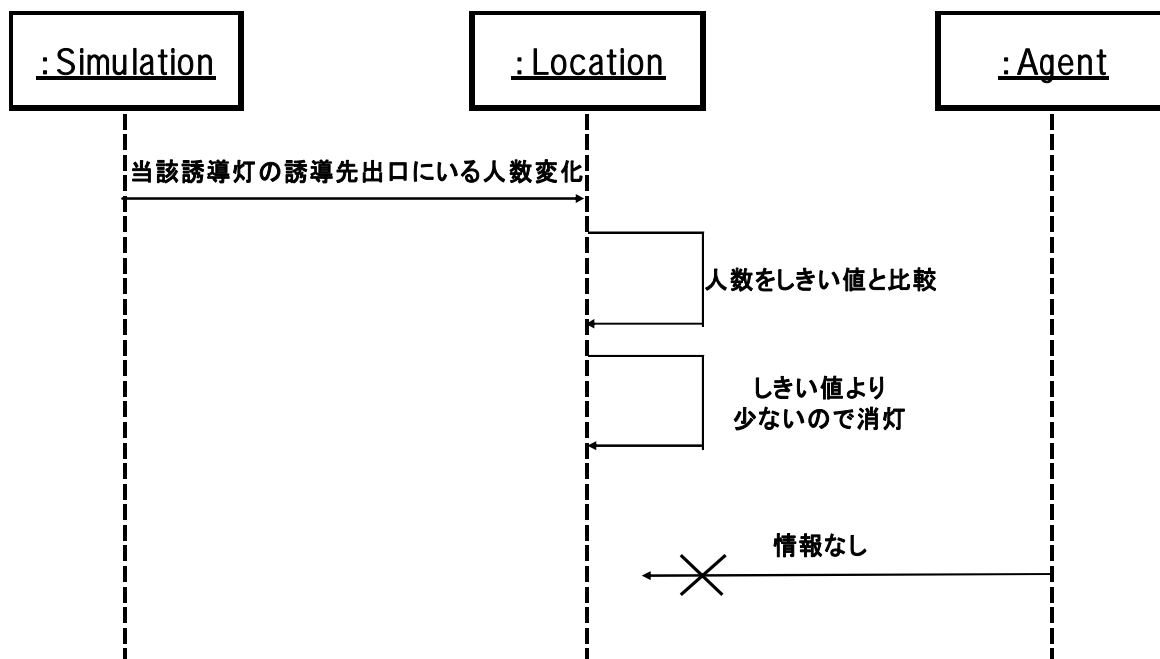


図 5-2 補助誘導灯の消灯時のシステムの流れ

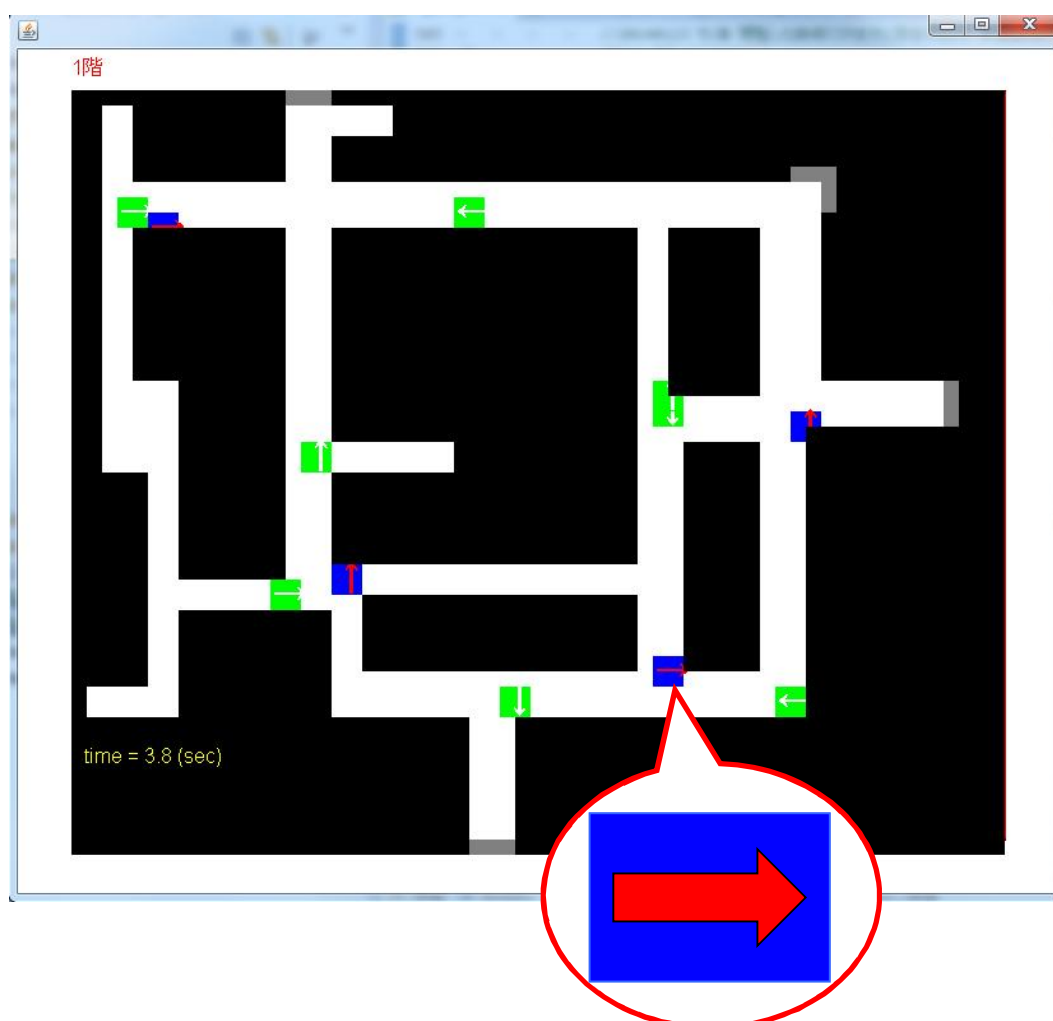


図 5-3 避難シミュレータ上で表現される補助誘導灯例

5.4 補助誘導灯導入の効果

5.4.1 避難領域

本節では、実在する店舗のレイアウトを利用して、前節までに説明した補助誘導灯の有効性を調べる。図 5-4 は、本節のシミュレーションに利用したフロアレイアウトを示す。このレイアウトは、実在する電気製品量販店の 1 階をモデルにしており、3 章で用いたフロアレイアウトと同様である。誘導灯の配置場所は実際の店舗と同じ誘導灯配置とする。なお、補助誘導灯の配置場所は、第 3 章で構築した誘導灯の最適配置問題の数理モデルにより決定した。

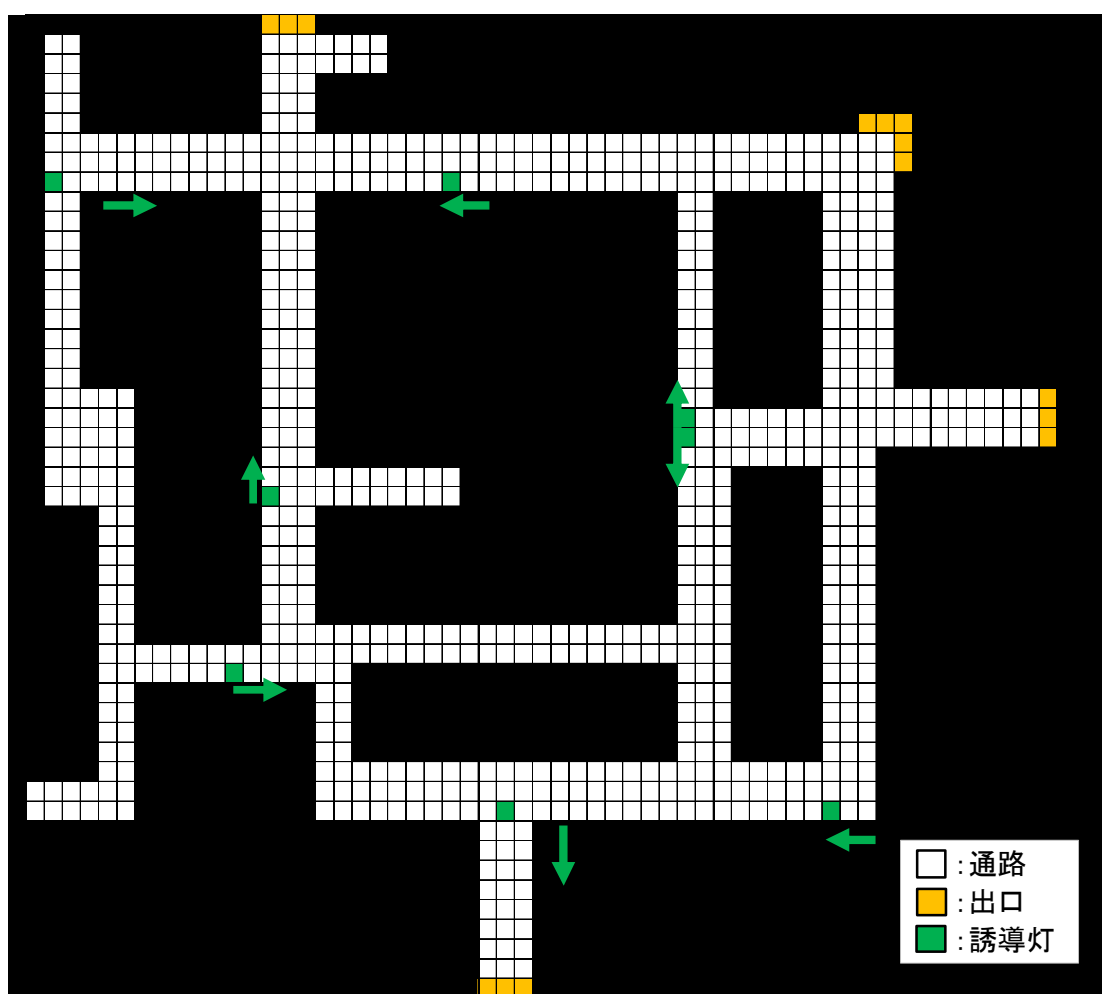


図 5-4 店舗と同じ誘導灯配置をしたフロアレイアウト

5.4.2 補助誘導灯の設置台数が避難に与える影響

前節に述べた仕組みを持った補助誘導灯と新たな避難者特性をシミュレータに新たに組み込み、シミュレーションを 10 回行った。表 5-1 にシミュレーションの条件を示す。本項のシミュレーションによって、補助誘導灯の有効性と設置台数による影響を調査する。図 5-5 にはシミュレーション 10 回における平均の値のグラフを示す。この図から補助誘導灯導入・未導入において時間経過に対する避難人数の差がグラフから読み取れる。

図 5-5 から、補助誘導灯が 4 台の場合は従来型誘導灯のみを導入した条件に比べて、避難完了人数の値が増加していることがわかる。これは避難時に発生した混雑を補助誘導灯が解消できていることが要因であると考えられる。それに対して、6 台あるいは 8 台の補助誘導灯を設置した条件では避難完了人数の値は補助誘導灯を設置しなかった場合とほぼ同じ数値となった。補助誘導灯は混雑している避難者を出来るだけ空いている出口に分散させて、効率良く出口を利用できるように促すものである。このことから、混雑の発生場所以外では効果を発揮しにくいことが補助誘導灯のデメリットと考えられる。それを踏まえると、6 台あるいは 8 台の補助誘導灯を設置した場合には設置箇所周辺で混雑があまり発生しなかったために補助誘導灯を設置しなかった場合と避難完了人数の推移が同じであったと考えられる。以上の結果から補助誘導灯は混雑が発生しやすい場所に配置することが必要であると言える。

表 5-1 シミュレーションの条件

	避難者	視野範囲	優先順位	初期配置	誘導灯
条件	100	360°	誘導灯優先	一様	補助誘導灯 + 従来型誘導灯 8 台

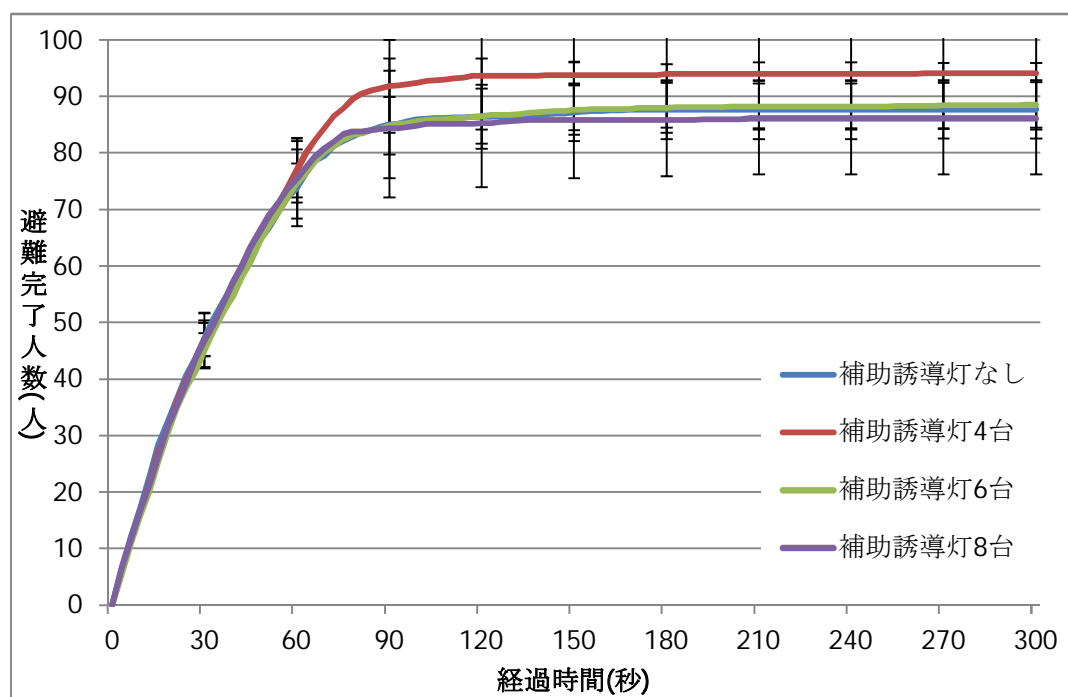


図 5-5 補助誘導灯を考慮したシミュレーション

5.4.3 避難の参考にする物体の優先順位が異なる避難者への効果

前項では補助誘導灯の有効性と設置台数による影響を分析した。本項では、避難の際に誘導灯、もしくは周囲の避難者などの避難の際に参考にする物体の優先度が補助誘導灯にどのような影響を与えるのかを分析する。表 5-2 はシミュレーション条件を示す。なお、避難領域としては前章でシミュレーションに用いた実際の建物のレイアウトを用いた。また、本シミュレーションでは、視野範囲の条件を実際の人間に最も近い 180°とした。前項のシミュレーションでは誘導灯優先の避難者に対しては補助誘導灯の有効性を検証できたことから、本項のシミュレーションでは避難者優先の避難者に対して、シミュレーションを行う。補助誘導灯の設置台数については実際に導入を考えた場合のコスト面を考慮して 4 台とした。図 5-6 はシミュレーション 10 回における平均値のグラフを示す。図から補助誘導灯導入・未導入において時間経過に対する避難人数の差がグラフから読み取れる。

図から補助誘導灯の設置の有無に関わらず、避難完了人数に大きな差は見られなかった。この要因としては補助誘導灯を導入した条件 2 において、避難者が誘導灯よりも周囲の避難者を優先して避難したために補助誘導灯を参照するケースが少なかったためだと考えられる。

その一方で、標準偏差は条件 2 の方が大きくなった。これは避難者が補助誘導灯を発見し、それを参照できた場合があるために避難できた避難者が条件 1 よりも増加したためであると考えられる。以上の結果から避難者優先の避難者に対して、補助誘導灯の効果は非常に低い。補助誘導灯を避難の参考にさせるケースを増やすことができれば一定の効果が挙げられる可能性を示している。そのためには、補助誘導灯に注意が向くようにする方法が考えられるが、そのための補助誘導灯の改善点としては、既存の誘導灯の機能に存在する音を発する機能や点滅する機能を付加することが有効であると考えられる。

表 5-2 シミュレーションの条件

避難者	視野範囲	優先順位	初期配置	誘導灯
100	180°	避難者優先	一様	補助誘導灯 4 台 + 従来型誘導灯 8 台
条件				
条件 1			補助誘導灯なし	
条件 2			補助誘導灯あり	

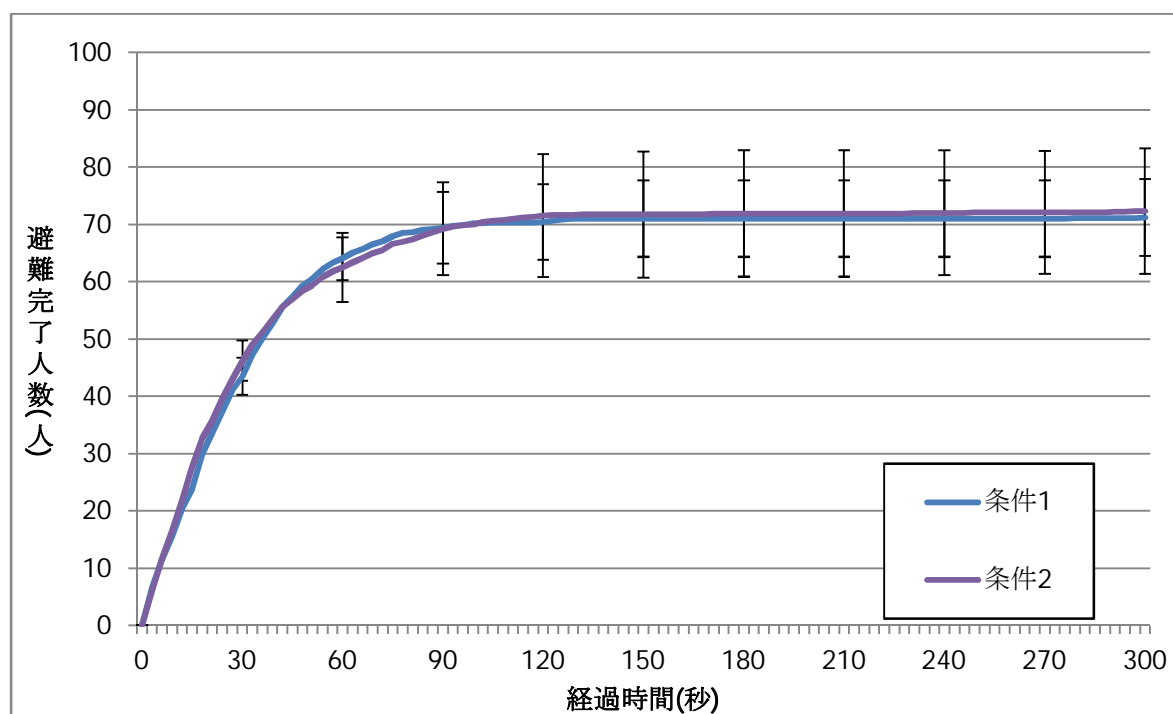


図 5-6 誘導灯優先の避難者を導入した場合の補助誘導灯を考慮したシミュレーション

5.4.4 異なる視野範囲を持つ避難者への効果

前項では避難時に参考にする物体の優先順位が補助誘導灯に与える影響と補助誘導灯の有効性を検証した。本項では本研究で導入した異なる視野範囲の避難者に対して、補助誘導灯の有効性とその影響を分析する。表 5-3 はシミュレーション条件を示す。なお、避難領域としては前章でシミュレーションに用いた実際の建物のレイアウトを用いた。補助誘導灯の設置台数については前節と同様の理由から 4 台とした。図 5-7 にはシミュレーション 10 回における平均の値のグラフを示す。図から補助誘導灯導入・未導入において時間経過に対する避難人数の差がグラフから読み取れる。

図から、視野範囲が 180° の場合には、最終的な避難完了人数は条件 1, 条件 2 でほぼ同一であるが、早期に脱出した避難者数は条件 1 の方が多い結果となった。これは、直近の出口が空いているにも関わらず、補助誘導灯によって 2 番目に近い出口へ誘導されたことが原因であることが考えられる。一方、標準偏差は開始から 90 秒までは補助誘導灯設置前の方が小さく、90 秒以降では常に条件 2 の値が小さくなった。これは、補助誘導灯が設置されたことによって、直近ではない出口に誘導されたケースと混雑が発生しなかったためにスムーズに避難できたケースの両方が発生したことで混雑が解消されやすくなったことが原因であると考えられる。

視野範囲が 90° の場合には、条件 4 が避難完了人数と標準偏差の両方で良い結果が得られた。これは補助誘導灯を導入したことにより、混雑が解消されるケースが生まれたことが原因であると考えられる。また、標準偏差でも条件 4 の方が条件 3 の約半分となった。以上の結果から、異なる視野範囲を持つ避難者が存在しても補助誘導灯を設置することで避難者の視野が狭くても安定した避難を行うことができることを示している。

表 5-3 シミュレーションの条件

避難者	優先順位	初期配置	誘導灯
100	避難者優先	一様	補助誘導灯 4 台 + 従来型誘導灯 8 台
条件			
		視野範囲	補助誘導灯
条件 1		180°	なし
条件 2		180°	あり
条件 3		90°	なし
条件 4		90°	あり

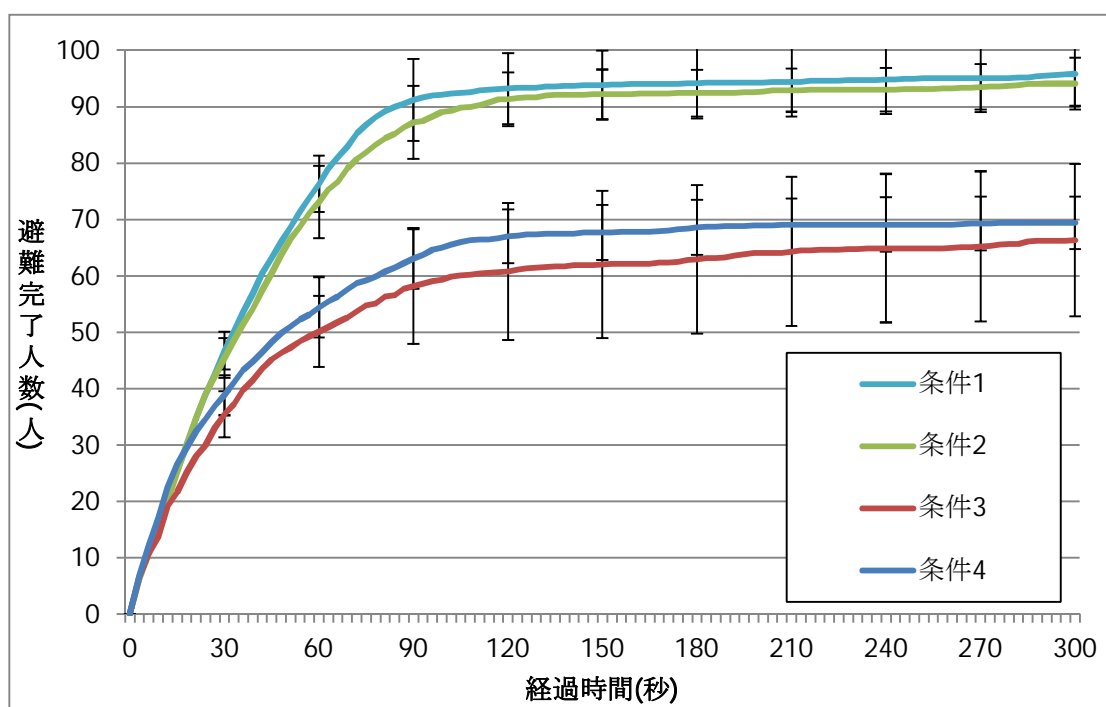


図 5-7 異なる視野範囲の避難者を導入した場合の補助誘導灯を考慮したシミュレーション

5.5 フィールド内の空間に対する集団の変化による影響

前節では初期配置分布がフロア領域全体に対して一様に配置するという条件でシミュレーションを行った。補助誘導灯は従来型誘導灯では対応できなかったエージェントの偏りに対して避難誘導に時間がかかる問題を解決するために導入したものである。本節では表 5-4, 表 5-5, 表 5-6 に示す条件の下で初期配置分布を変更し, 補助誘導灯の効果を示す。評価にあたり, シミュレーションを各条件について 10 回行った。図 5-8, 図 5-9, 図 5-10, 図 5-11, 図 5-12, 図 5-13, 図 5-14, 図 5-15 は, 異なる初期配置の分布におけるシミュレーション結果を示す。10 回のシミュレーションから得られた平均避難完了人数を縦軸, 経過人数を横軸とし, 避難者数の時間的推移が定常になるまでの経過時間をプロットしている。

図 5-8～図 5-15 から, 表 5-5 に示す配置 a, 配置 b, 配置 e, 配置 g, 配置 h では, どの視野範囲においても補助誘導灯を導入した場合の結果が従来型誘導灯のみの結果に比べて優れており, 最終的な避難完了人数が増加していた。これは混雑している避難者を分散させることができたことが要因である。一方, 配置 c, 配置 d, 配置 f では, 補助誘導灯を導入したにもかかわらず, 避難完了人数に大きな変化が見られなかった。これは, 補助誘導灯周辺で混雑が発生していなかったことや補助誘導灯の誘導先の出口も同時に混雑していたことから補助誘導灯が上手く機能していなかったことが要因と考えられる。また, 条件によっては補助誘導灯を導入した場合に避難完了人数が増加して, 避難完了人数が定常になるまでの経過時間が従来型誘導灯のみの場合よりも遅くなるケースが見られた。これは, 直近の出口ではなく, 補助誘導灯が誘導する現在位置から 2 番目に近い出口へ移動したことが要因と考えられる。

本シミュレーションの結果から, 補助誘導灯の設置は避難者が偏って分布していた場合に効果的である。その一方で, 避難者の偏り方が少ない場合では, 補助誘導灯導入の効果は小さい。避難者の偏りが小さい場合でも, 補助誘導灯の導入の効果を高めるためには, 補助誘導灯の示す出口を 2 つ以上にすることや混雑しやすい箇所の予測を正確に行うことが必要であると考えられる。

表 5-4 シミュレーションの共通条件

共通条件		
避難者数	誘導灯	優先順位
100 人	補助誘導灯(4 台)：最適配置モデル + 従来型誘導灯：店舗配置	誘導灯優先

表 5-5 初期配置条件

初期配置条件	
配置 a	下部 3 セルに 50 名
配置 b	下部 3 セルに 75 名
配置 c	上部 3 セルに 50 名
配置 d	上部 3 セルに 75 名
配置 e	左部 3 セルに 50 名
配置 f	左部 3 セルに 75 名
配置 g	右部 3 セルに 50 名
配置 h	右部 3 セルに 75 名

表 5-6 配置別のシミュレーション条件

シミュレーション条件		
	補助誘導灯の有無	視野範囲
条件 1	なし	90°
条件 2	なし	180°
条件 3	なし	360°
条件 4	あり	90°
条件 5	あり	180°
条件 6	あり	360°

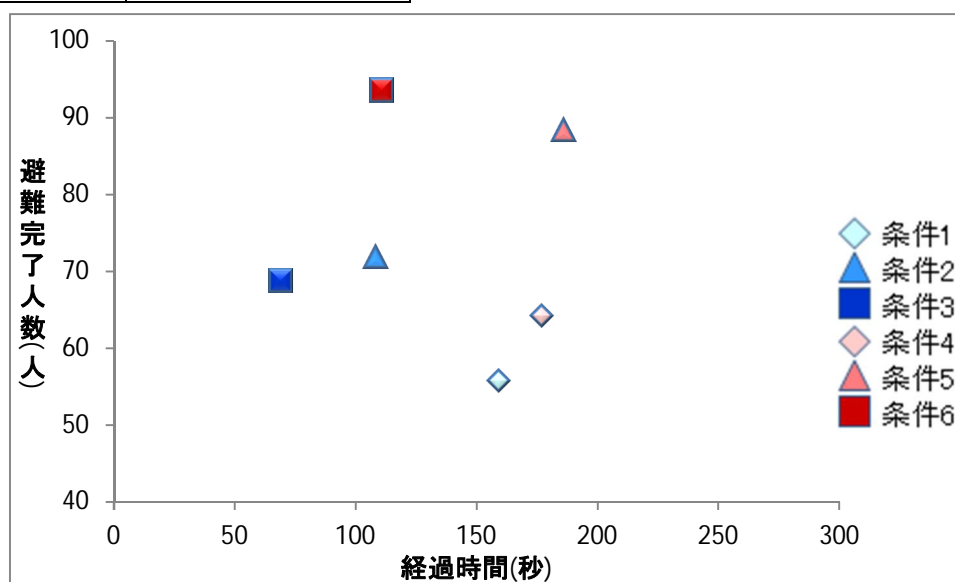


図 5-8 配置 a のシミュレーション結果

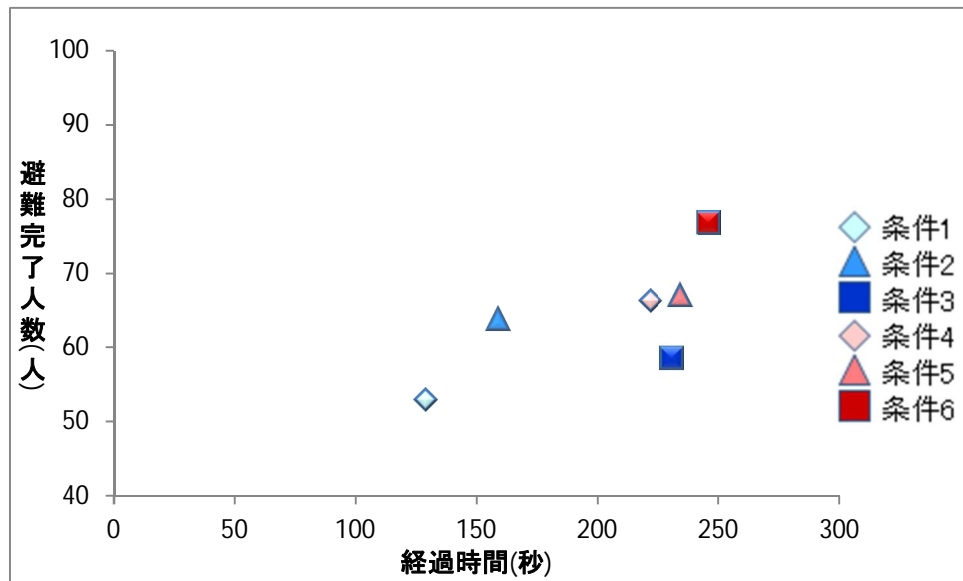


図 5-9 配置 b のシミュレーション結果

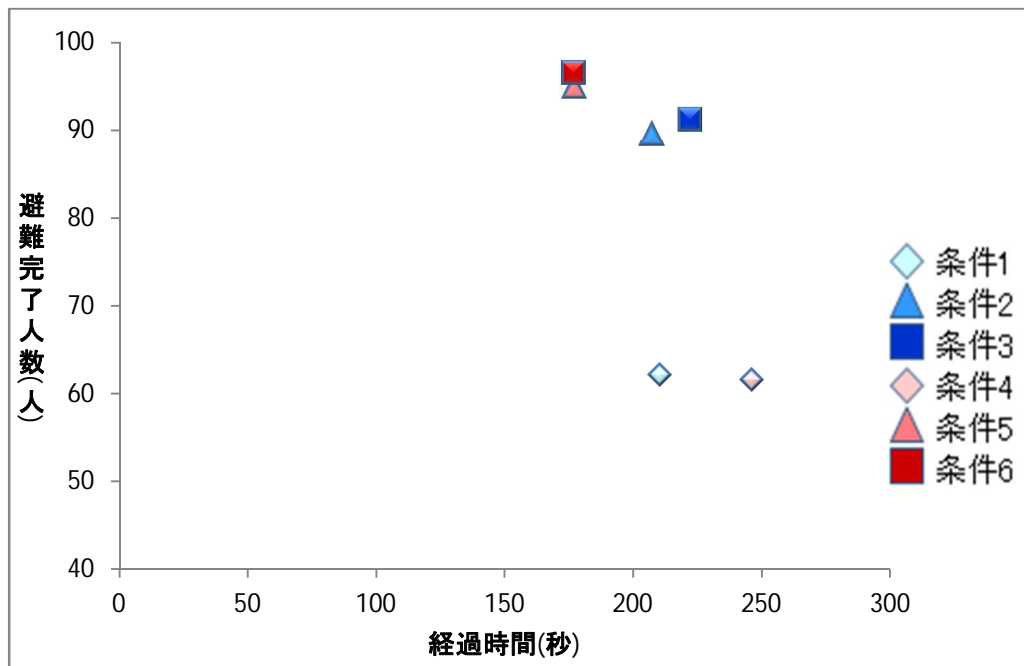


図 5-10 日 配置 c のシミュレーション結果

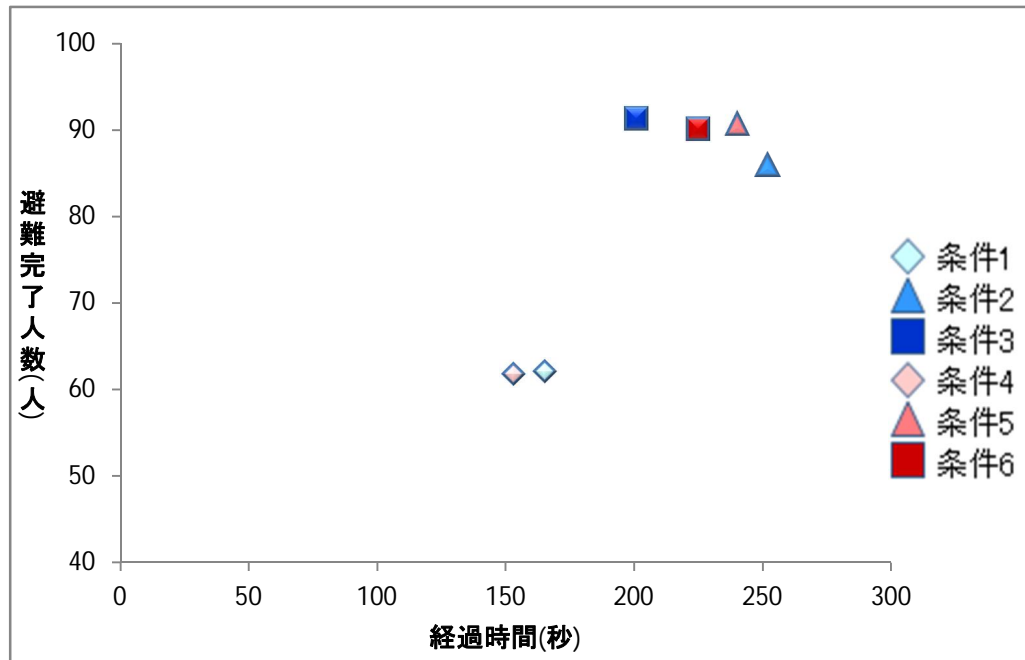


図 5-11 配置 d のシミュレーション結果

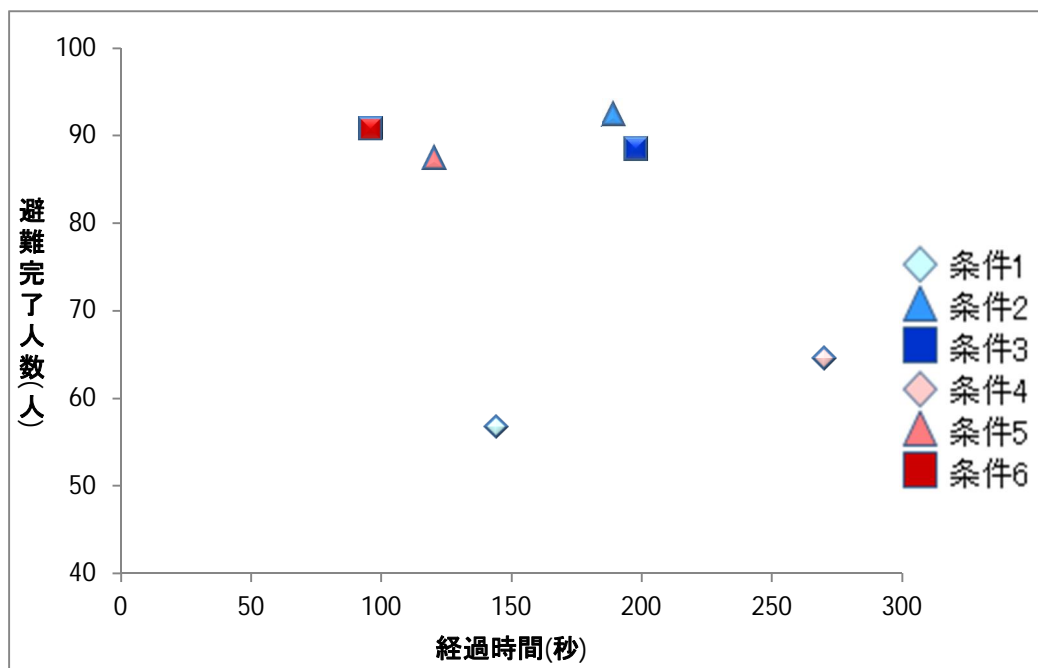


図 5-12 配置 e のシミュレーション結果

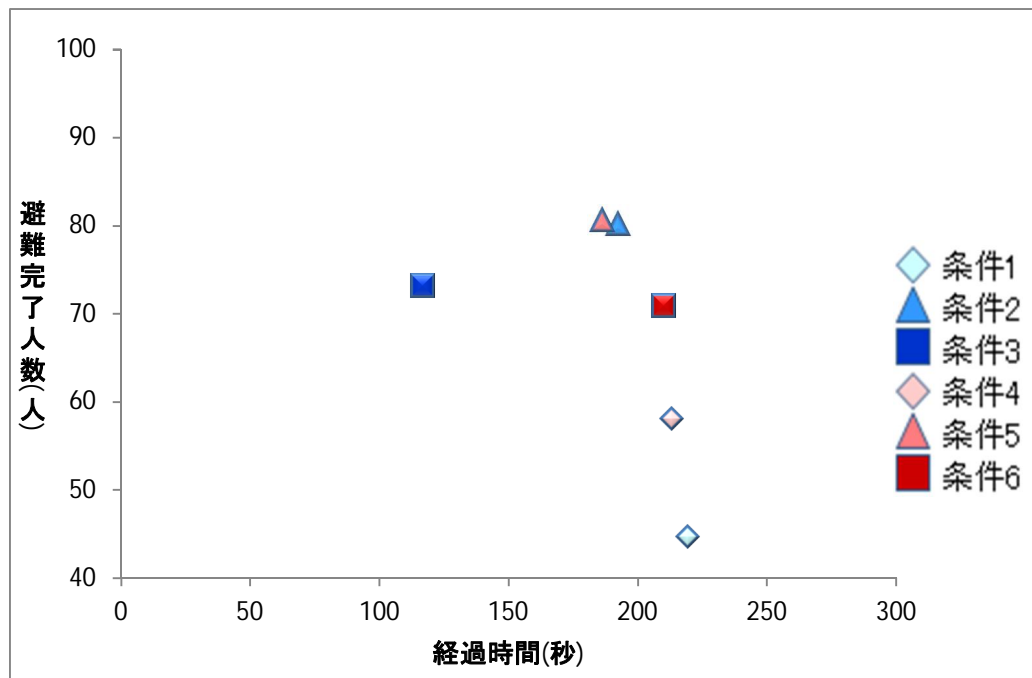


図 5-13 配置 f のシミュレーション結果

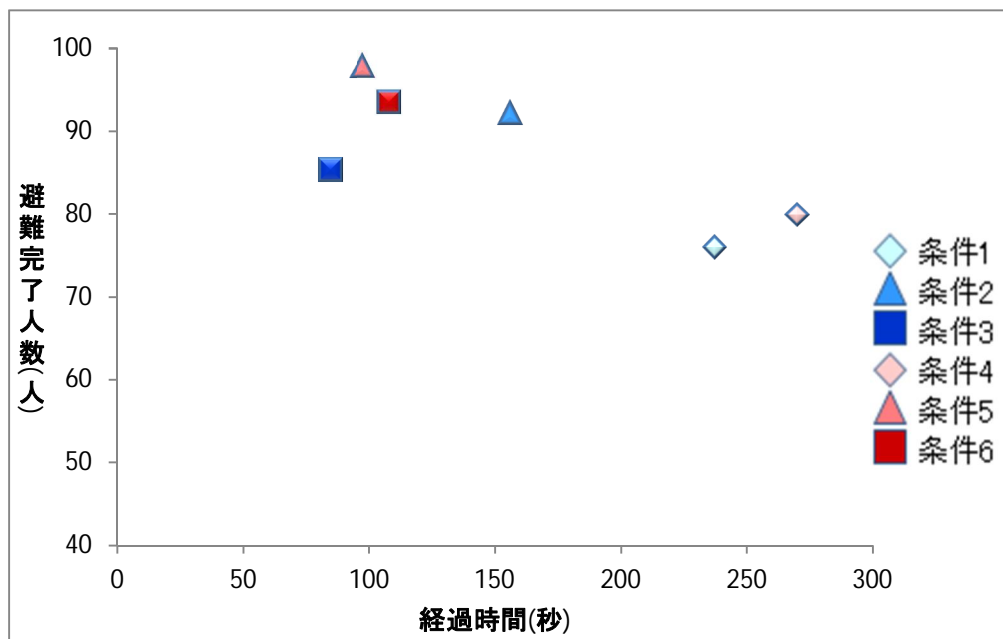


図 5-14 配置 g のシミュレーション結果

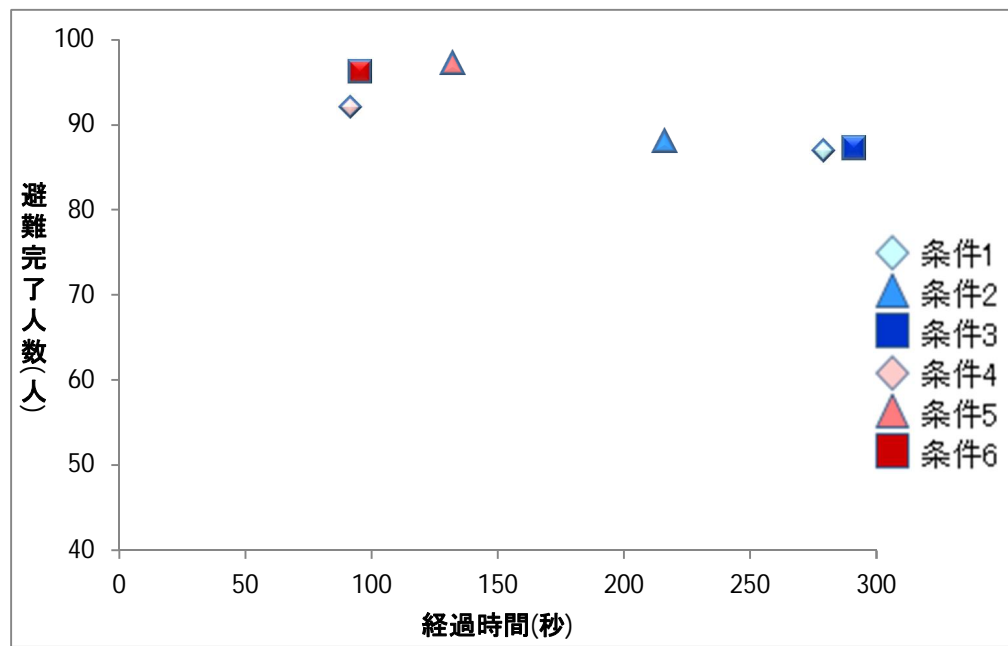


図 5-15 配置 h のシミュレーション結果

5.6 まとめ

本章では領域内に避難者の偏りがある場合に効率的な避難を行うための補助誘導灯を提案し、シミュレーションによって効果を示した。具体的には下記の内容を検討した。

- ・ 補助誘導灯の提案と導入
- ・ 補助誘導灯の有効性の検証

【補助誘導灯の提案と導入】

本章では前章で判明した避難者集団の配置に偏りが発生した場合に発生する混雑の解消のために補助誘導灯を提案した。補助誘導灯の特徴と実現可能性を下記に示す。

■ 補助誘導灯の特徴

誘導先の出口で待つ避難者が少数である場合に点灯する。

■ 補助誘導灯の実現可能性

誘導先の避難口にカメラを設置し、その出口に人間が何人いるかを判定・点灯させるかを判断するといったシステムなどが必要だが、AI を使った画像認識技術が向上しているため、十分実現可能である。

【補助誘導灯の有効性の検証】

本章で提案した補助誘導灯について、避難シミュレータによるシミュレーションで有効性を検証した。シミュレーションの分析結果と補助誘導灯の課題を下記に示す。

■ シミュレーションの分析結果

- ・ 補助誘導灯の導入に有効性が見られた。
- ・ とくに集団の偏りに対して、避難者に他の出口を知らせることが避難者を分散させることで、避難完了人数に強い有効性が見られた。
- ・ 補助誘導灯が混雑の発生地点周辺に設置されていない場合や避難者が補助誘導灯を避難の参考にしない場合には効果がほとんど見られなかった。
- ・ 補助誘導灯が示す出口が同時に混雑している場合には補助誘導灯未設置の場合と結果がほとんど変化しないことも示された。
- ・ 誘導先の出口が混雑するまでは補助誘導灯が点灯しているため、混雑が大規模になる前に回避する場合が見られた。

■補助誘導灯の課題

- ・ 補助誘導灯を有効に機能させるためには混雑が発生しやすい場所を予測する手段.
- ・ 補助誘導灯に避難者の注意が向くようにする手段.
- ・ 誘導先の出口が複数存在することから生まれる避難者の混乱を防ぐために補助誘導灯の機能と効果についての周知徹底が必要である.

6章 障害物の発生を考慮する避難誘導法の検討

6.1 本章の目的

3章では避難誘導灯の最適配置問題の数理モデルを構築し、避難シミュレータによって、その有効性と避難者の初期配置の偏りから避難者の避難行動の傾向を分析した。現実の状況をモデル化してMASに組み込み、現象を高い精度で模擬することは優れた避難の誘導法を提案することになる。しかしながら、これまでに3章で構築した避難誘導灯の最適配置問題の数理モデルには「障害物が発生し、通路が塞がれる」現象が考慮されていない。本章ではこの問題についての解決策を検討し、数理モデルを改善することでより現実的な問題に即した誘導灯の最適配置を提案する。

さらに、4章で提案した混雑が発生した場合に効率的な避難誘導を行うための補助誘導灯についても障害物を考慮して設計されていないという問題がある。そのため、本章では障害物が発生した場合でも効率的な避難ができるような誘導方法について検討し、シミュレーションによって有効性を検証する。

さらに、障害物の発生に対して、避難者の分布を評価することで誘導灯の指示方向を動的に制御する方法を提案し、エージェントシミュレーションによって、提案する誘導の制御法の有効性を示す。

6.2 避難誘導灯の最適配置問題の数理モデルが抱える問題点と対策

障害物が発生した場合を考慮した避難誘導灯の最適配置問題を考えるにあたって、障害物発生によって、フロアの避難状況がどう変化するかを検討する必要がある。災害発生時に建物内に障害物が発生するケースとしては下記のケースが挙げられる。

- ・火災発生時に火や煙が通路まで達し、通路が利用不能になる場合
- ・地震発生時にフロア上の物(棚など)が倒れたことで、通路が利用不能になる場合
- ・地震発生時にフロアの一部が崩れ、通路が利用不能になる場合

これらのケースは火災発生時や地震発生時にどのような場合でも発生し得ることで確実に発生を阻止することは一般的に困難である。障害物が発生した場合、当初予定していた避難経路が利用できなくなることが考えられる。障害物が発生しやすい箇所などに避難誘導灯が配置されていた場合には、誘導灯が避難者の誘導に悪影響を与えることが想定される。このため、障害物の発生といったより現実の問題に即した誘導灯配置にすることが必要となる。本章では、3章で構築したモデルに対して、障害物が発生した場合の状況を含めるモデルを構築する。

次節では3章で構築した避難誘導灯の最適配置問題のモデルを基にして、障害物の発生を考慮する誘導灯の配置を決定する数理モデルを構築するとともにシミュレーションによって有効な誘導法を検討する。

6.3 障害物を考慮した避難誘導灯の最適配置問題のモデル化

本節では前節で提起した障害物の発生を考慮した避難誘導灯の最適配置問題の数理モデルについて、3章で構築した避難誘導灯の最適配置問題の数理モデルを基に検討する。

災害によるフロア内に生じる障害物の状況は複数の障害物の組み合わせによって表現できる。すなわち、複数の場所で障害物が発生するならば、該当する場所における障害物の発生の有無の組み合わせ毎に別のマップが作成され则认为る。ここで作成される全てのマップに共通して有効な誘導灯配置ができれば、障害物が発生した場合にも効率的な避難が可能となる。しかし、障害物の組み合わせについては発生しやすいパターンとしにくいパターンが存在する。これに対しては発生し得る障害物毎に発生確率を定義することでマップ別の発生確率を計算する。これにより、各マップの計算結果を発生確率に合わせて重み付けすることで、障害物のすべての組み合わせに配慮しつつ、発生しやすい障害物の組み合わせにより有効な誘導灯の配置を決定する。

具体的な計算方法としてはフロアに障害物が発生する可能性のある場所(N か所)と各場所における障害物の発生確率を定義する。その場合、障害物の発生パターンは障害物の組み合わせは 2^N で表すことができ、そのパターン数のマップが数理モデルでの計算対象となる。各マップの発生確率は各場所の障害物の発生確率から計算する。得られたマップとその発生確率を数理モデルに与えることで障害物の発生を考慮した誘導灯の最適配置が可能となる。

上記の計算方法の具体例を図 6-1 に示す。図 6-1 は障害物を A,B,C が発生すると仮定し、それぞれの発生確率を定義して計算した結果である。通路が利用可能か否かを 1 か 0 で表しており、マップ 0 はすべての通路が利用可能な場合、マップ 7 はすべての通路が利用不可能な場合を示している。

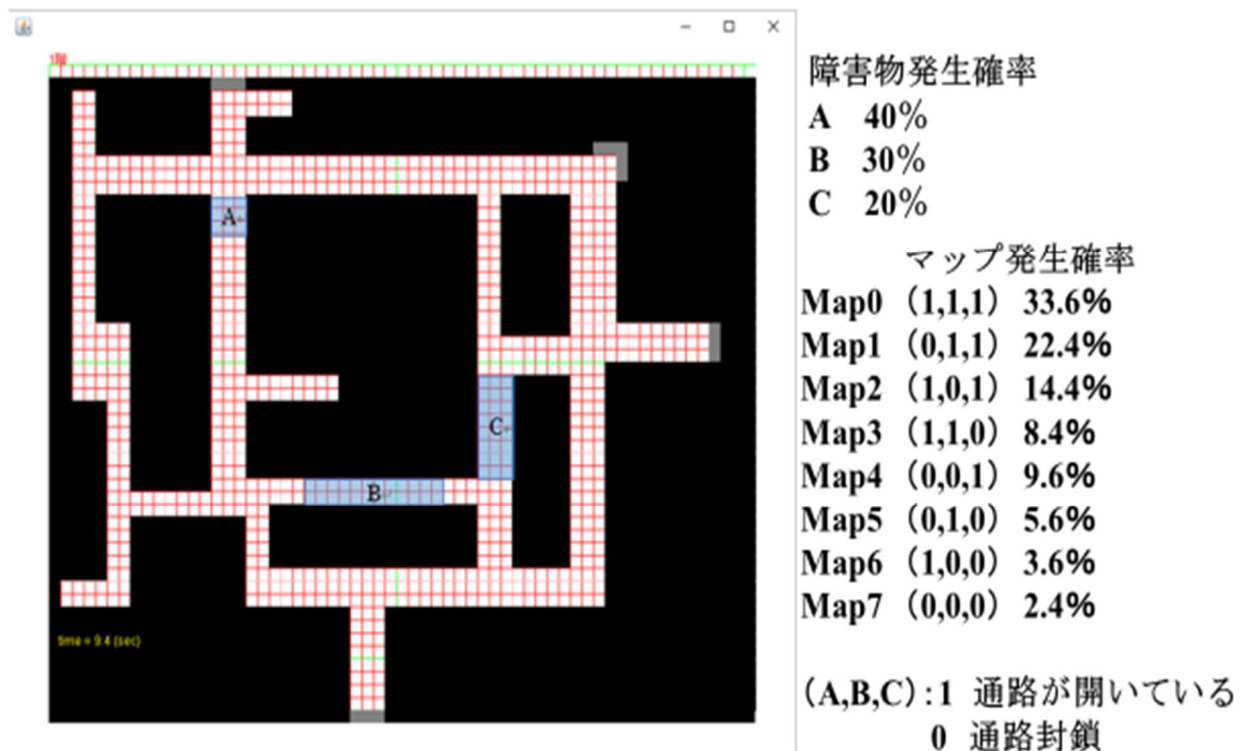


図 6-1 障害物の発生を考慮した場合の具体例

6.4 障害物発生を考慮した誘導灯の最適配置問題の数理モデルの構築

前節で検討した内容を踏まえて、本節では災害時に障害物の発生を想定した避難誘導灯の最適配置問題の数理モデルを定式化する。

本モデルでは、障害物の発生時におけるフロアの通路のレイアウトを複数のマップで表現し、各地点における障害物が発生する確率から各マップの発生確率を見積もる。使用するマップ番号の集合を $G=\{1,\dots,g\}$ 、避難者が存在する場所の集合を $H=\{1,\dots,h\}$ 、誘導灯の設置可能な場所の集合を $I=\{1,\dots,l\}$ 、出口の集合を $J=\{1,\dots,j\}$ とする。これらのパラメータと決定変数、マップの発生確率を用いることで、障害物の発生を考慮した避難誘導灯の最適配置問題の数理モデルを定式化を以下に示す。

パラメータ

d_{ghi} : マップ g における避難者 h と誘導灯 i 間の距離

d_{gik} : マップ g における誘導灯 i と k 間の距離

d_{gij} : マップ g における誘導灯 i と出口 j の距離

$MAXDISLAMP$: 誘導灯から出口までの最大距離

$MAX2LAMP$: 2つの誘導灯間の最大距離

$MAXLamp$: 誘導灯の最大設置数

P_g : 各マップの発生確率

決定変数

x_i : 位置 i に誘導灯を設置する場合は 1、それ以外の場合は 0

x_{hi} : 位置 h から位置 i に向かって移動する場合は 1、それ以外の場合
は 0

x_{ij} : 位置 i から出口 j に向かう場合は 1、それ以外の場合は 0

目的関数

$$\sum_{g \in G} \sum_{h \in H} \sum_{i \in I} P_g d_{ghi} x_{hi} + \sum_{g \in G} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} P_g d_{gij} x_{ij} \quad (6.1)$$

制約式

$$\sum_{i \in I} x_{hi} = 1 \quad \forall h \in H \quad (6.2)$$

$$\sum_{i \in I} x_i \leq MAXLamp \quad (6.3)$$

$$x_{hi} \leq x_i \quad \forall h \in H, i \in I \quad (6.4)$$

$$\sum_{j \in J} x_{ij} = x_i \quad \forall i \in I \quad (6.5)$$

$$d_{gij} x_{ij} \leq \text{MAXDISLAMP} \quad \forall i \in I, j \in J, g \in G \quad (6.6)$$

$$d_{gik} + M(x_i - 1) + M(x_k - 1) \leq \text{MAX2LAMP} \quad \forall i, k \in I, g \in G \quad (6.7)$$

$$\sum_{g \in G} p_g = 1 \quad (6.8)$$

$$d_{gij} + M(1 - x_i) \geq 5.0 \quad \forall i \in I, j \in J, g \in G \quad (6.9)$$

式(6.1)は目的関数であり、全マップの避難者全員の総避難距離の最小化を表す。ここで、総避難距離とは“各避難者が現在位置から誘導灯、誘導灯から出口までに移動する距離の合計値”とする。目的関数は2章のモデルが障害物の発生していない1つのフロアを対象にしているのに対し、障害物が発生する複数の組み合わせを全て作成し、各マップの発生確率を重みづけ係数とし避難者の総移動距離と掛け合わせた総荷重移動距離の総和を最小化しているという点で変更されている。このようにすることでフロア上に存在する障害物を考慮した誘導灯の最適配置を算出することができる。

式(6.2)は避難者が必ず1台の誘導灯を見て、移動することを保障する制約式である。式(6.3)は誘導灯の設置個数が最大設置数以下とする制約式である。式(6.4)は設置した誘導灯のみを参考にできることを示す。式(6.5)は1台の誘導灯は1つの出口を指し示していることを示す。式(6.6)は出口と誘導灯の距離は消防法が規定する有効範囲以内になることを保障する制約式である。式(7)は2つの通路誘導灯間の距離は消防法が規定する1台の誘導灯の効果範囲の2倍以内とする制約式である。これらの制約式は2章で構築した数理モデルと同一である。

式(6.8)はマップの発生確率の合計値が1であることを表す制約式である。この制約式は発生する複数のパターンのフロアの発生確率を合計した場合に1になることを保証するための制約式である。式(6.9)は誘導灯と出口との距離を一定量離すことを示す制約式である。

数理モデルの計算には2章と同様にOctober Sky社のGurobi Optimizerを利用した。

6.5 数値実験に利用するフロアのレイアウトの特徴

図 6-2 は本数値実験で利用するフロアのレイアウトを示す．表 6-1 はレイアウトの特徴を示す．レイアウトは以下の構造を有する．

- (1) 2 重構造の周回通路を有する．
- (2) 長手方向と短手方向に各 2 つの直線通路を有する．
- (3) 長手方向の直線通路の両側面に出口が 1 か所存在し，その他の直線通路の側面は終点である．

上記の特徴から，いずれの領域で障害物が発生した場合ではエージェントは迂回するルートを選択することで出口に到着することができるため，誘導灯の効果を評価しやすいと考えた．

図 6-2 の A,B,C は障害物を指し，図(a)では複数の障害物が空間に上下左右に広がって発生する場合(パターン A)を，図(b)では障害物が空間内に偏って発生する場合(パターン B)を仮定している．障害物の A,B,C の発生確率は 40%，30%，20%とする．図内の格子はエージェントの移動できる配置を示している．表 6-2 は障害物の発生確率から計算される異なるマップの発生確率を示す．表 6-2 において，(A,B,C)の記号内の 1 は当該の障害物が発生していない状態を，0 は発生している状態であることを示す．シミュレーションでの評価回数は当該マップに対して，シミュレーションを志向する回数を示す．なお，各市工でのエージェントの初期配置はランダムに設定する．

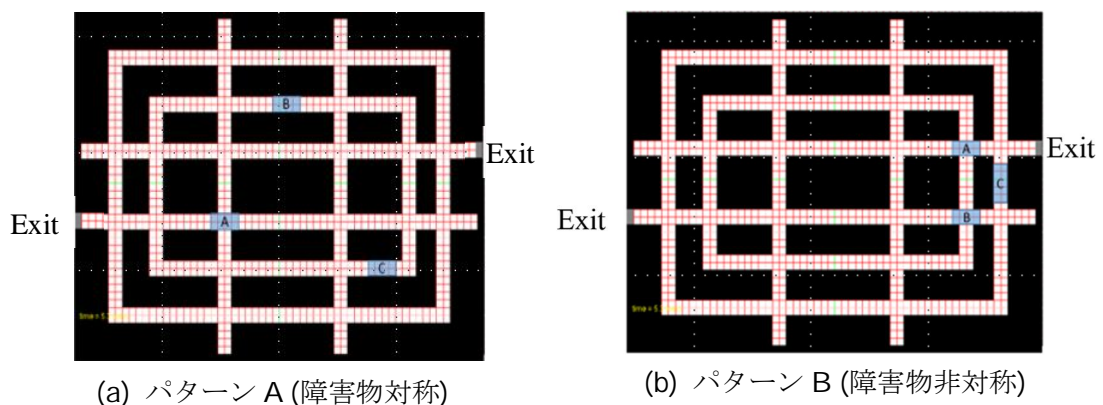


図 6-2 数値実験に利用するフロアのレイアウト

表 6-1 レイアウトの特徴

構造	2 重回廊，長手方向 2 直線通路，短手方向 2 直線通路 (行き止まり端部：6 か所)
出口	2 か所 (長手方向両端(右左端)各 1 か所)
領域	60m×45m
通路幅	2m

表 6-2 異なるレイアウトに対する発生確率

マップ	(A, B, C)	発生確率(%)	シミュレーションでの評価回数
0	(1, 1, 1)	33.6	38
1	(0, 1, 1)	22.4	21
2	(1, 0, 1)	14.4	14
3	(1, 1, 0)	8.4	7
4	(0, 0, 1)	9.6	10
5	(0, 1, 0)	5.6	4
6	(1, 0, 0)	3.6	3
7	(0, 0, 0)	2.4	3

6.6 シミュレーションによる障害物の考慮による誘導灯配置の特性評価

数理モデルから得られた誘導灯の配置を図 6-3, 6-4, 6-5, 6-6 に示す. 図 6-3, 6-4 は誘導灯の数が 8 の場合, 図 6-5, 6-6 は誘導灯の数が 12 の場合の結果である. また, 図 6-3, 6-5 は障害物の配置がパターン A(上下左右に広がって障害物が発生)の場合, 図 6-4, 6-6 は障害物の配置がパターン B(偏って障害物が発生)の場合での誘導灯の配置を示している. 図中の矢印部が誘導灯を指し, また矢印の方向を指している. 図 6-3, 6-5 では障害物が領域内に対称に生じるため, 誘導灯は左右対称の位置に存在する. 図 6-4, 6-6 では障害物が右側に多く存在するため, 誘導灯も右側に多く存在する. これは障害物が存在するため, 障害物近傍では出口までの移動には障害物を避けることが必要なため, 誘導灯が多数必要であると考えられる. 数理モデルでは, エージェントが存在する位置から誘導灯を経路して出口まで結ぶ直線上に障害物が存在するため, 障害物の近傍では多数の誘導灯が必要となる.

エージェントシミュレーションを利用して, 誘導灯の配置や障害物の発生に対する誘導の効果とともに特性を調べる. 表 6-3 はシミュレーションにおけるエージェントの条件を示す. ここで, エージェントの初期配置は領域内に一様分布させる. 具体的には, 一様乱数を用い, 領域内の任意の位置を決定する. 表 6-4 は数値実験に利用する誘導数量とレイアウトの条件を示す. 誘導灯配置モデルにおいて, 「障害物未発生」は障害物が発生していない条件での数理モデルを求解して得られた配置を示し, 「障害物発生」は発生確率を考慮したモデルを求解して得られた配置(図 6-3, 6-4, 6-5, 6-6)を指す. 異なる障害物の組み合わせのレイアウトが発生する回数及びシミュレーションの試行回数は表 6-2 の値を利用する.

図 6-7, 6-8 は, 100 回のシミュレーションから得られた避難が完了した人数の平均値を示す. エラーバーは避難者数の標準偏差を示す. 図 6-7 は障害物の発生位置が領域内に対称である条件(パターン A)下で得られたシミュレーション結果を示す. 誘導灯数が 16 である条件(条件 5 と 6)では誘導灯数が 8 の場合に比べて誘導の効果が高い. とくに, 障害物の発生を考慮した誘導灯の配置(条件 6)の効果が最も優れている. 一方で, 誘導灯数が 8 である条件(条件 1 と 2)では誘導灯を考慮した配置の効果は得られていない.

図 6-8 は障害物の発生位置が非対称の条件(パターン B)下で得られたシミュレーション結果を示す. 図 6-8 より, 誘導灯数が 12 では, 障害物の発生を考慮・未考慮の条件(条件 7,8)の結果はほぼ一致する. また, 誘導灯数が 8 であり, 障害物の発生を考慮した条

件(条件 4)では全経過時間について条件 7,8 の結果とほぼ一致する。一方で、誘導灯数が 8 であり、障害物の発生が未考慮の条件(条件 3)では、全経過時間で避難が完了した人数は他の条件に比べて大きく劣る。

これらの結果は、障害物の発生を考慮する数学的モデルから得られた誘導灯の配置によって効果的に避難者を出口に誘導できることを示している。その一方で、優れた結果が得られる誘導灯の数や配置は障害物が発生する位置やレイアウトに影響する。そして、誘導灯数が多ければ誘導の効果を得ることを示している。

これらの結果は、障害物の発生を考慮した数理モデルによって、障害物の発生に対して、優れた誘導灯の配置を求められることは明らかであるが、効果の程度はレイアウトや障害物の発生条件に影響される。これより、動的に変化するレイアウト条件下では避難者の行動をシミュレーションによって評価する必要があると考えられる。

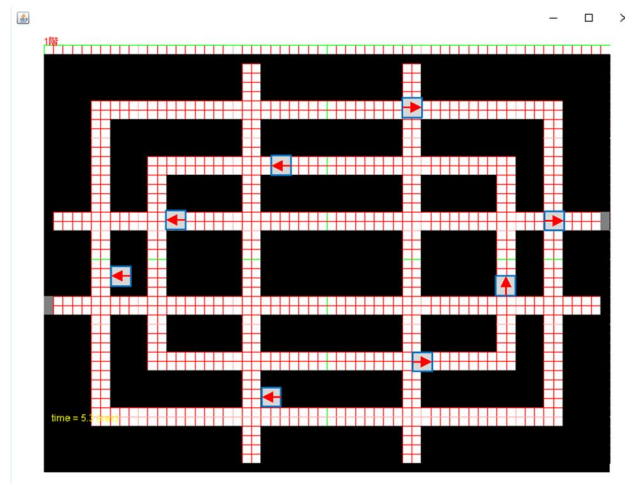


図 6-3 障害物がパターン A における誘導灯の配置結果(誘導灯数 8)

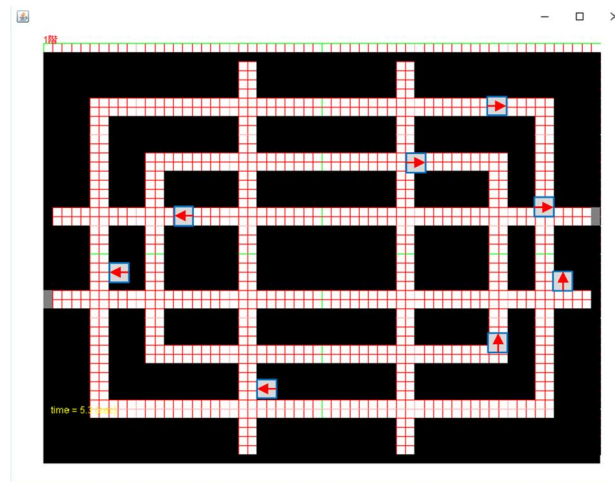


図 6-4 障害物がパターン B における誘導灯の配置結果 (誘導灯数 8)

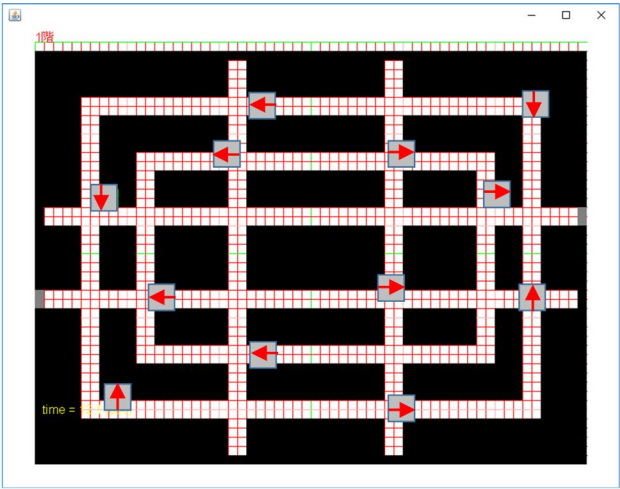


図 6-5 障害物がパターン A における誘導灯の配置結果(誘導灯数 12)

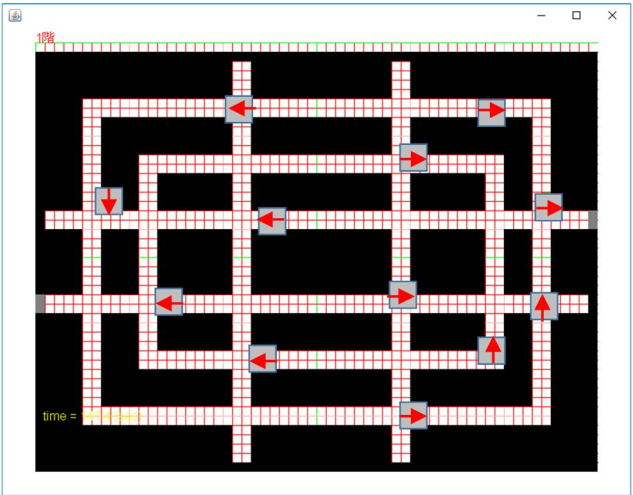


図 6-6 障害物がパターン B における誘導灯の配置結果 (誘導灯数 12)

表 6-3 シミュレーションにおけるエージェントの条件

エージェント数	100
エージェントの初期配置	全領域内に一様分布
シミュレーションの試行回数	100 回(表 6-2)

表 6-4 数値実験に利用する誘導灯数と障害物の配置の条件

条件	誘導灯数	場外物の配置	誘導灯配置モデル
1	8	対称	障害物未発生
2		(パターン A)	障害物発生 (図 1)
3		非対称	障害物未発生
4		(パターン B)	障害物発生 (図 2)
5	16	対称	障害物未発生
6		(パターン A)	障害物発生 (図 3)
7		非対称	障害物未発生
8		(パターン B)	障害物発生 (図 4)

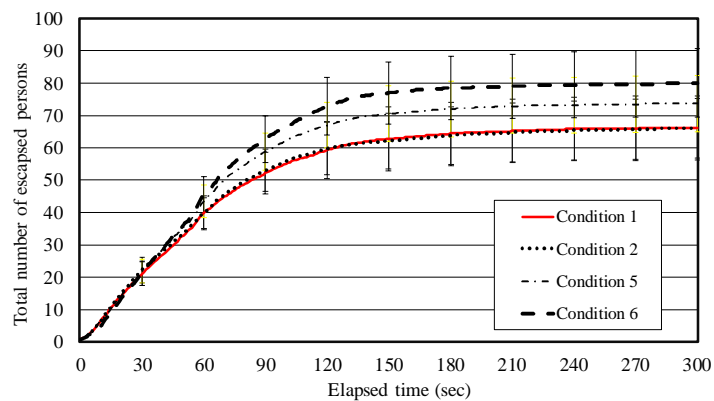


図 6-7 数理モデルから得られた誘導灯の配置における時間推移に対する避難完了人数の変化 (パターン A)

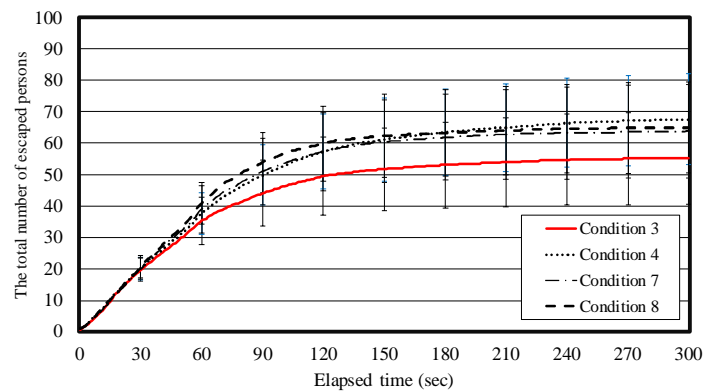


図 6-8 数理モデルから得られた誘導灯の配置における時間推移に対する避難完了人数の変化 (パターン B)

6.7 障害物が発生する環境における誘導灯による避難者誘導制御法の提案

6.7.1 誘導制御法の特徴

前節までに、障害物の発生を考慮する数理モデルから計算された誘導灯の配置の有効性がエージェントシミュレーションによる数値実験によって示された。

また、過去の研究から、避難者の初期配置が空間内で偏る場合では、偏りが無い条件に比べて時間に対する避難者数は小さいことが示された[62]。これは、分布に偏りが存在する場合では多くの避難者が特定の出口に集中するため、出口に達するまでに時間がかかることが原因である。この問題に対して、著者らは誘導灯の付近の避難者数を考慮し、空いている出口に誘導するように誘導灯の行き先を変更するしくみを提案し、エージェントシミュレーションによって有効性が示された[62]。避難経路に障害物が発生する場合には、障害物に避難者がぶつかり、停止してしまうことで混雑が生じる現象が発生する。避難者の初期配置に偏りがあれば障害物の発生により、避難者は障害物や他の避難者にぶつかる機会が増えるため、混雑が増え、短時間での避難は困難となる。このような状態では混雑が発生した誘導灯の近傍の避難者数のみを評価して、当該の誘導灯の誘導方向を変更するだけでは効果的な誘導が行えるとは限らない。

本研究では、複数の誘導灯の近傍の避難者数を評価することでフロア全体の避難者の分布を予測することにより、混雑が発生する前に避難者を避難者の少ない出口に誘導するように誘導灯の指示方向を制御する方法を提案する。ここで、提案する制御のしくみを「誘導灯制御システム」と呼ぶ。本節では、前章の誘導灯数が8であり、障害物の発生を考慮する誘導灯の配置(図6-4)に対して、誘導灯制御システムの特徴を示し、シミュレーションにより有効性を評価する。

フロア全体の避難者の分布を予想するため、本モデルではフロアを四分割する。図6-9に分割した領域を示す。分割数は出口数に依存する。すなわち、領域 Q_1, R_1, R_2, Q_2 について、それぞれ出口1近傍の領域(誘導灯含む)、出口1から離れているが出口1に誘導する誘導灯が存在する領域、出口2から離れているが出口2に誘導する誘導灯が存在する領域、出口2近傍の領域(誘導灯含む)を示す。各領域に存在する誘導灯が近傍の避難者数を調べ、式(6.10)から単位面積当たりの人数を算出する。そして、計算した単位面積当たりの避難者数(すなわち、避難者数の密度。避難者密度と略記)が同一領域に存在すると仮定する。

避難者密度の分布から誘導指示を以下の判断の順序で誘導灯の方向を操作する。

- (1) 領域 Q_1 と Q_2 内に存在する誘導灯の指示方向は固定する.
- (2) 領域 Q_1+R_1 の避難者数の密度が他の領域に比べて極めて大きい場合は領域 R_1 の誘導灯の方向を変化させる. (本モデルでは Q_2 の方向に指示する)
- (3) 領域 Q_2+R_2 について, (2)と同様の操作を行う. すなわち, 領域 R_2 の誘導灯の方向を変化させる. (本モデルでは Q_1 の方向に指示する)
- (4) 領域 Q_1+R_1 の避難者数の密度が他の領域に比べて大きく, かつ, 領域 Q_1 の避難者数の密度が領域 R_1 の避難者数の密度より大きい場合は領域 R_1 の誘導灯の方向を変化させる. (本モデルでは Q_2 の方向に指示する)
- (5) 領域 Q_2 と領域 R_2 について(4)と同様の操作を行う. (本モデルでは Q_1 の方向に指示する)

ここで, 操作の優先順位は(1), {(2),(3)},{(4),(5)}とする. (() 内は同時に判定する.)

$$D_k = \frac{\sum_i N_{i,k}}{\sum_i A_{i,k}} \quad \forall k \quad (6.10)$$

D_k は領域 k の避難者密度を指す. そして, k は領域, i は誘導灯番号を示し, $N_{i,k}$ は領域 k 内に存在する誘導灯 i 付近の避難者数, $A_{i,k}$ は領域 k 内に存在する誘導灯 i が避難者を認識する範囲の面積である. 領域 k に誘導灯 i が存在しなければ, $N_{i,k}$ と $A_{i,k}$ は 0 とする. 領域 R_j の範囲は出口から半径 r とする.

操作(2), (3)の判定では, 下記条件を満たした場合に領域 $R_{j\max}$ 内の誘導灯の方向を $D(Q_j+R_j)_{\min}$ の領域内の誘導灯が指す出口方向に向ける. ここで $D(Q_j+R_j)_{\min}$ は領域 Q_j+R_j における避難者密度を指す. $D(Q_j+R_j)_{\min}$ は $D(Q_j+R_j)$ の最小値を指す.

条件①: 領域 Q_j+R_j の避難者密度 $D(Q_j+R_j)$ について, 最大値 $D(Q_j+R_j)_{\max}$ と最小値

$D(Q_j+R_j)_{\min}$ の比 α を計算し, α が一定値を超えた場合

操作(4), (5)の判定では, 下記の 2 条件を満たした場合に領域 R_j の誘導灯を $D(Q_j+R_j)_{\min}$ の出口方向に変化させる.

条件①: 領域 Q_j+R_j の避難者密度 $D(Q_j+R_j)$ について, 最大値 $D(Q_j+R_j)_{\max}$ と最小値

$D(Q_j+R_j)_{\min}$ の比 β を計算し, β が一定値を超えた場合

条件②: 出口近傍の領域の避難者密度 $D(Q_j)$ に対する出口から離れた領域の避難者密度

$D(R_j)$ の比 γ を設定し, γ が一定値を超えた場合

なお，操作(2)，(3)，(4)，(5)では比で評価するため，適用する出口近傍の領域の避難者数 d を設定し， α ， β ， γ の条件を満たすとともに， d が所与の値を超えた場合に操作を行う．

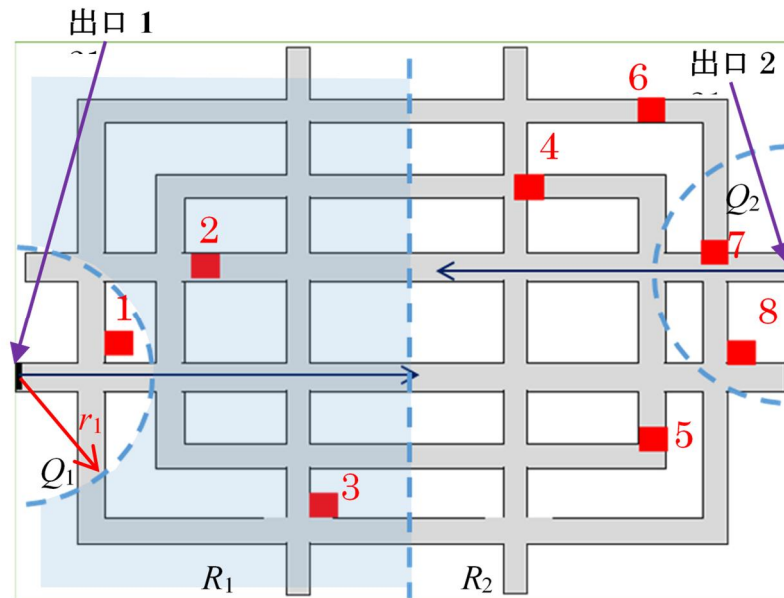


図 6-9 誘導灯制御システムでの評価のための誘導灯と領域の関係

6.7.2 数値実験による評価

提案する誘導灯制御システムの有効性を評価するため、マルチエージェントシミュレーションにより数値実験を行う。表 6-5 と表 6-6 に数値実験の条件を示す。また、表 6-7 は誘導灯制御システムでの操作の実行条件を示す。フロアのレイアウトは障害物が偏って存在するパターン B を利用する。評価にあたり、通常誘導灯と誘導灯制御システムについて実験を行う。また、エージェントの初期配置については、全領域、(長手方向の領域を 1/2 し、)右側と左側に分類し、全エージェントを一様分布させる。一様分布の利用では、対象とする領域内について一様乱数から決定した位置を決定する。

図 6-10, 6-11, 6-12 は条件 1 と条件 4 による実験結果を示す。図は時間の推移に対する避難完了者数を示す。図 6-10 は全試行回数に関する結果を、図 6-11, 6-12 はそれぞれ、全試行回数の中で障害物が発生していない試行と障害物が発生した試行に関する結果を示す。全ての図について、誘導灯制御システムの導入の効果が得られているが、その効果は時間推移の分布の過渡期において僅かである。図内の値の標準偏差値を示すエラーバーから、全領域内に避難者が一様分布で配置される場合では誘導灯制御システムの導入の効果はほとんど得られないと考えられる。

図 6-13, 6-14, 6-15 は条件 2 と条件 5 による実験結果を示す。これらの結果は全避難者が領域の右側に分布している場合を仮定している。図 6-13 は全試行回数に関する結果を、図 6-14, 6-15 はそれぞれ、全試行回数の中で障害物が発生していない試行に関する結果と障害物が発生した試行に関する結果を示す。全ての図について、誘導灯制御システムの導入の効果が得られている。その効果は時間推移の大部分で得られており、実験の終了時刻(300 秒後)では、通常誘導灯では避難できていない避難者数が多い。この結果は、障害物の発生により避難者が障害物に直面して移動できなくなることと他の避難者により障害物と挟まれることにより、移動ができなくなることが原因である。また、障害物が発生していない、図 6-14 では、避難者が移動方向や背後から複数の避難者に挟まれることで移動できなくなるため、避難完了人数が少ない。図 6-14, 6-15 において誘導灯制御システムの導入の効果が得られていることは、障害物の発生の有無に限らず、複数の避難者が狭い領域に集まることで避難者同士や障害物によって移動ができなくなるため、早い時期に避難者を分散させることで避難の効果を高めることを示しており、領域内の避難者の分布から誘導を動的に制御する方法が有効であることを示している。なお、開発したシミュレーションでは、エージェントが移動できなくなった場合では、移

動停止時間を判断して逆方向に移動させることで出口に向かう処理を含めている．このため、時間が十分経過すれば、全エージェントが避難できることが予想される．

図 6-16, 6-17, 6-18 は条件 3 と条件 6 による実験結果を示す．これらの結果は全避難者が領域の左側に分布している場合を仮定している．図 6-16 は全試行回数に関する結果を、図 6-17, 6-18 はそれぞれ、全試行回数の中で障害物が発生していない試行に関する結果と障害物が発生した試行に関する結果を示す．図 6-17 では、誘導灯制御システムの導入の効果が得られている．しかしながら、図 6-18 では、誘導灯制御システムの導入によって、避難が遅れている結果が得られている．シミュレーションによるエージェントの移動の目視評価から、この結果は初期に全避難者が領域の左側に分布しているため、避難開始の初期時点で誘導灯制御システムによって、多くの避難者は障害物がある右側に誘導されてしまうことが原因である．すなわち、避難者が右側方向に移動することで、複数の避難者や障害物によって移動が困難になるため、避難完了の時間が遅れてしまう．また、右側方向に移動し、避難者が滞ってしまう状態になり、誘導灯制御システムによって左方向に誘導を出した場合では避難者の混雑は解消されるが移動に時間がかかるため、避難が遅れている現象が見られた．図 6-19, 6-20 は、条件 6 の数値実験における、マップ 2 上の誘導灯の方向が切り替えの時間推移を示している．なお、誘導灯番号との配置の関係は図 6-9 に示す．縦軸は試行回数に関する切り替え数の割合を示す．図 6-19, 6-20 から、誘導灯 2,3 と誘導灯 4,5,6 の間で方向が交互に切り替わっている．この結果は、出口近傍の誘導灯の指示方向は固定し、初めに避難者を右側に、その後、左側に誘導する状況を示している．

領域の長手方向の長さは 60m であることから、誘導灯の方向の切り替えによって往復の移動で最大 120m が必要となる．エージェントの移動速度(1m/s)から往復の 120 秒の移動時間が必要となる．図 6-19, 6-20 より、誘導灯の方向の切り替わりは 60 秒程度であり、避難者の領域内の分布を判定して方向の切り替わりは妥当な結果が得られている．しかしながら、図 6-18 では 120 秒では、条件 3 と条件 6 の避難完了者数に差が大きい．これは図 6-17 おいて、90 秒程度で条件 3 と条件 6 の避難完了者数が逆転する特徴とは異なる．これらの結果は、障害物の発生によって、複数の避難者が狭い領域に集まり移動できない状態から、誘導灯が切り替わって他方向に避難者が移動するためには、移動できる避難者から順序を持って移動するため、避難完了者数が増加するには時間がかか

る現象が見られる。しかしながら，図 6-18 における実験の終了時刻(300 秒後)には，誘導灯制御システムによって避難完了者数を短時間で通常誘導灯と同程度に達成している。

以上より，全結果から，提案する誘導灯制御システムは避難者の初期配置に強く影響し，初期配置に偏りがある場合の効果が大きい。ここで，障害物の発生は避難者の移動を停止するだけでなく，複数の避難者による移動が困難な状況が発生させるため，多くの避難者が狭い領域に集まる前に分散させる操作が必要であることが考察された。

表 6-5 数値実験条件

試行回数	100 回 (表 2 の障害物発生確率に依存)
レイアウト	パターン B (障害物の発生：偏り)

表 6-6 避難者の初期配置と誘導灯制御の有無の条件

	誘導灯	エージェントの初期配置
条件 1	通常誘導灯	全領域に一樣分布
条件 2		右側に一樣分布
条件 3		左側に一樣分布
条件 4	誘導灯制御システム (提案)	全領域に一樣分布
条件 5		右側に一樣分布
条件 6		左側に一樣分布

表 6-7 誘導灯制御システムでの操作の実行条件

α	$\alpha \geq 5.0$
β	$\beta \geq 1.5$
γ	$\gamma \geq 1.0$
r	10 m (領域 Q_j の出口からの距離)
d	$d \geq 15$ 名

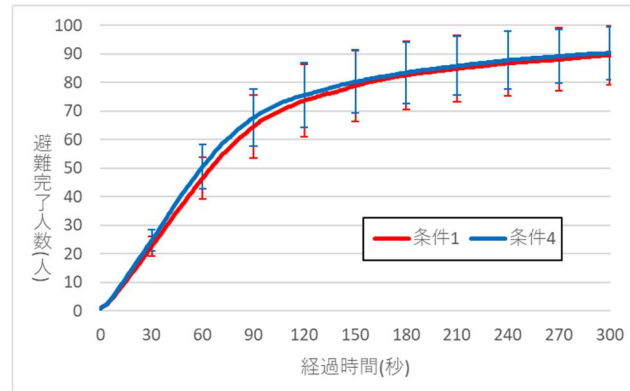


図 6-10 シミュレーションの全試行による時間経過に関する避難完了者数の変化 (条件 1,4 : 避難者が全領域に分布)

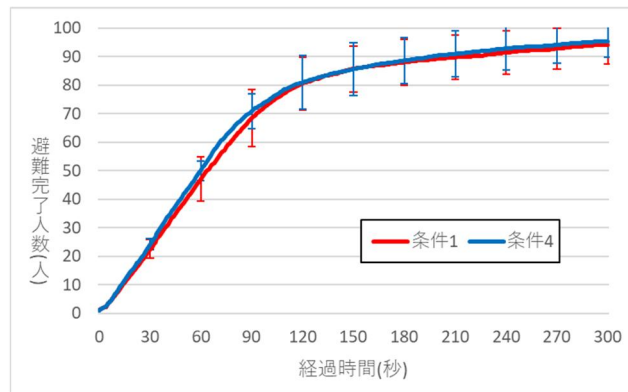


図 6-11 障害物の未発生条件でのシミュレーションの試行による避難完了者数の変化 (条件 1,4 : 避難者が全領域に分布)

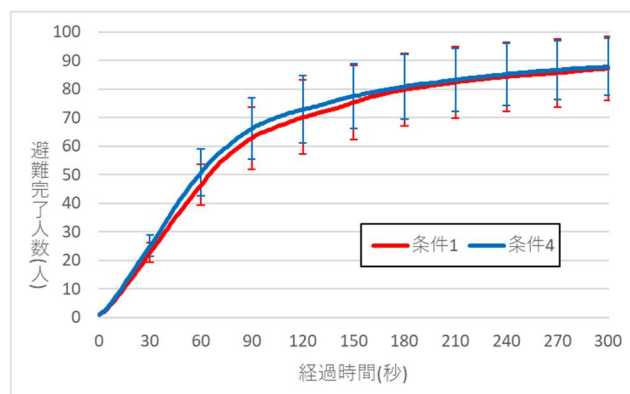


図 6-12 障害物の発生条件でのシミュレーションの試行による避難完了者数の変化 (条件 1,4 : 避難者が全領域に分布)

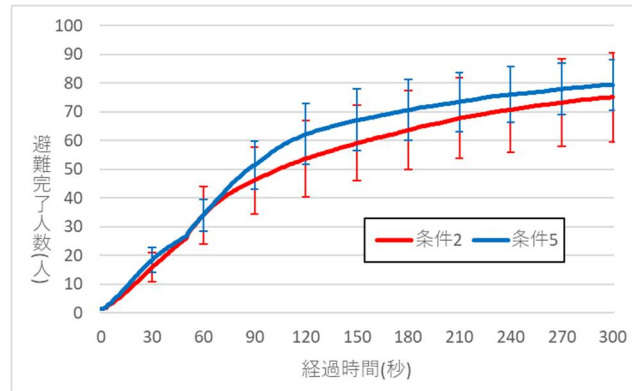


図 6-13 シミュレーションの全試行による時間経過に関する避難完了者数の変化 (条件 2,5 : 避難者が右側に分布)

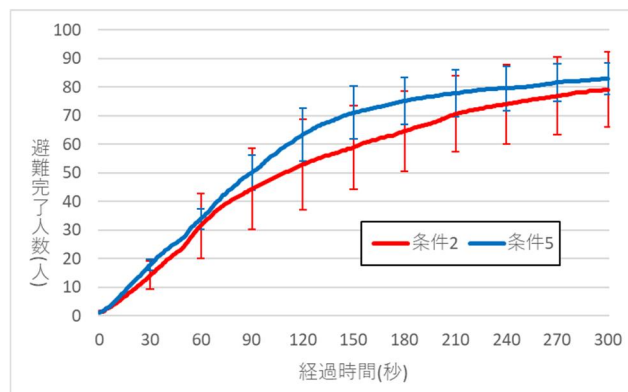


図 6-14 障害物の未発生条件でのシミュレーションの試行による避難完了者数の変化 (条件 2,5 : 避難者が右側に分布)

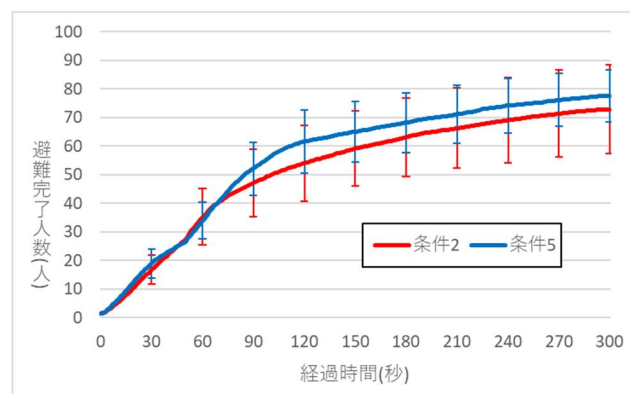


図 6-15 障害物の発生条件でのシミュレーションの試行による避難完了者数の変化 (条件 2,5 : 避難者が右側に分布)

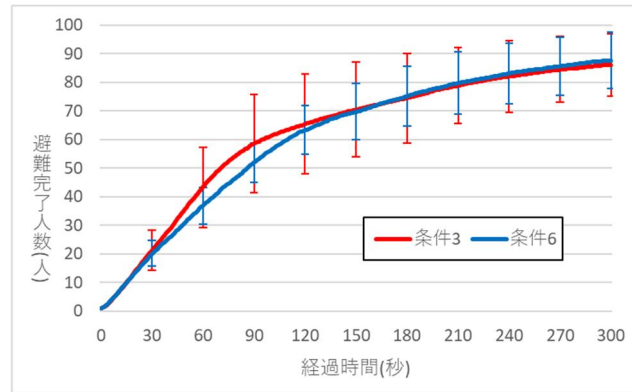


図 6-16 シミュレーションの全試行による時間経過に関する避難完了者数の変化 (条件 3,6 : 避難者が左側に分布)

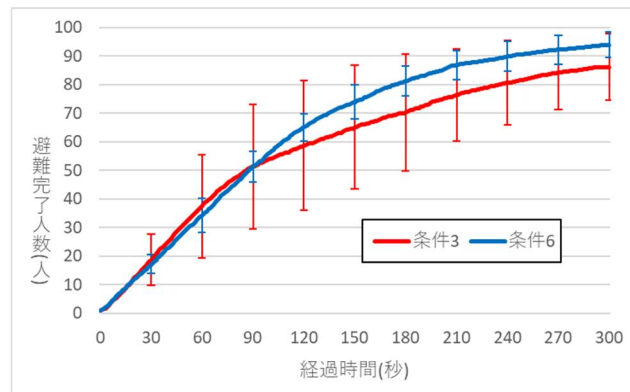


図 6-17 障害物の未発生条件でのシミュレーションの試行による避難完了者数の変化 (条件 3,6 : 避難者が左側に分布)

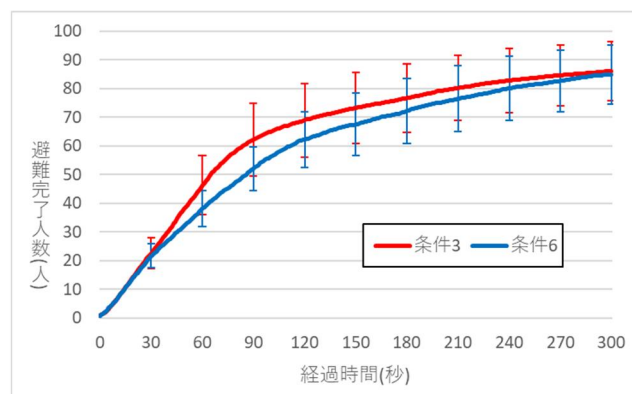


図 6-18 障害物の発生条件でのシミュレーションの試行による避難完了者数の変化 (条件 3,6 : 避難者が左側に分布)

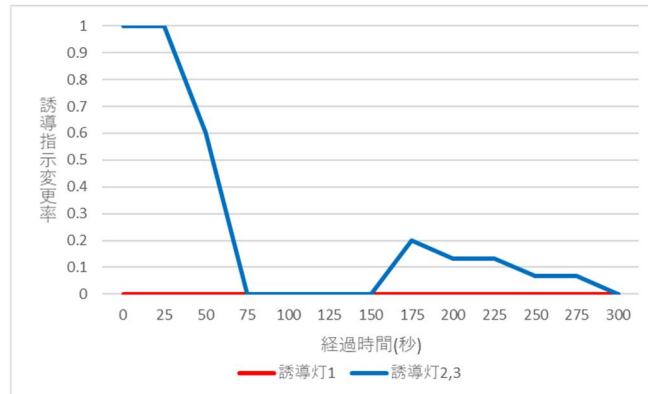


図 6-19 マップ 2 における誘導指示変更率 1 (条件 6)

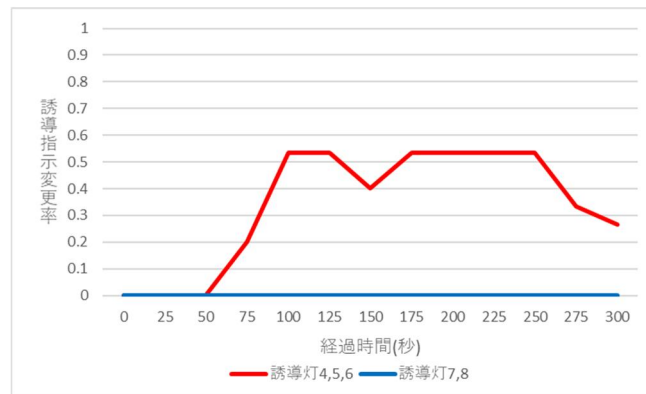


図 6-20 マップ 2 における誘導指示変更率 2 (条件 6)

6.8 まとめ

本章では障害物の発生を考慮した領域における誘導灯配置問題を取り扱った。また、障害物を考慮した領域において有効な誘導法として、避難者の分布を評価し、誘導灯の方向を制御する「避難者誘導制御法」を提案した。具体的には以下の事項を検討した。

- ・ 障害物を考慮した誘導灯の最適配置問題の数理モデルの構築と有効性の検証
- ・ 誘導灯による避難者誘導制御法の提案と有効性の検証

【障害物を考慮した誘導灯の最適配置問題の数理モデルの構築と有効性の検証】

第3章で構築した誘導灯の最適配置問題の数理モデルを基に障害物の発生を考慮した誘導灯の配置のために、下記の特徴を持つモデルを構築し、シミュレーションによって有効性を示した。

■障害物を考慮した誘導灯の最適配置問題の数理モデルの特徴

- ・ 障害物の発生するパターン毎に別のマップを生成し、各マップに対して発生確率を設定する。
- ・ フロアに発生する障害物別に設定されている発生確率と障害物が発生する組合せから、各マップの発生確率を決定する。
- ・ 障害物を考慮した誘導灯の最適配置は各マップの発生確率と各マップの避難に必要な移動距離の積を全マップに対する総和の最小化から決定する。

■シミュレーションによる有効性検証

- ・ 障害物の発生を考慮するモデルから得られた誘導灯配置によって、効果的に避難者を出口に誘導できる。しかしながら、優れた結果が得られる誘導灯の設置数は障害物の発生位置に影響する。
- ・ 誘導灯の設置数を増やすことで効率的な避難誘導が可能となる傾向が見られた。
- ・ 動的に変化する環境下では、誘導灯の配置を数学的なモデルから算出していても、配置の有効性の検証をシミュレーションによって評価する必要がある。

【誘導灯による避難者誘導制御法の提案と有効性の検証】

障害物が発生する環境下ではフロア全体の避難者の分布を考慮しなければ効率的な避難が行えるとは限らない。第4章で提案した混雑する避難者を空いている出口に誘導す

るための仕組みを発展させることで下記の特徴を持つ避難者誘導制御法を提案し、有効性をシミュレーションにより検証した。

■避難者誘導制御法の特徴

- ・ 出口の数に合わせてフロアの領域を分割して、フロア内の誘導灯の周囲の避難者数からその領域内の避難者密度(単位面積当たりの避難者数)を設定する。
- ・ 移動するよりも待機したほうが早期の避難が可能であるため、出口付近の領域では誘導灯の指示方向を変更しない。
- ・ 出口付近以外の領域では、各領域の密度を比較して、密度の高い領域から密度の低い領域に避難者を誘導する。

■シミュレーションによる有効性検証

- ・ 避難者の分布がフロア全体に一樣の場合、通常誘導灯のみを設置した場合と提案法の避難誘導の効果は変わらない。
- ・ 障害物が発生している領域に避難者の初期位置が偏っている場合には、通常誘導灯のみを設置した場合と比較して、提案法の方が効率的な避難が可能である。
- ・ 障害物が発生していない領域に避難者の初期位置が偏って存在する場合、誘導先に障害物が存在すれば、その領域で混雑が発生する。このため、再度、別の出口へ誘導されてしまうため、早期に避難完了できない場合がある。
- ・ 障害物の発生は避難者の移動を停止するだけではなく、複数の避難者による移動が困難な状況が発生させるため、多くの避難者が狭い領域に集まる前に分散させる操作が必要である。このような操作を実現するために、「避難者誘導制御法」は有効な方法と考えられる。

7章 結論と今後の課題

7.1 本研究のまとめ

第1章では本研究の背景と既存研究とともに、研究目的を示した。

第2章では本研究で開発したマルチエージェントシミュレーションの概要を示した。

第3章では避難誘導灯の最適配置問題に対する数理モデルを構築し、本研究で開発した避難シミュレータでシミュレーションを行った結果、以下の知見を得た。

- (1) 避難者の死角を考慮し、必ず誘導灯を参照するという特徴を持ったモデルの有効性。
- (2) 多数の避難者が同一の出口に集中した場合では全避難者が避難するためには異なる出口に分散して避難者が利用する状況に比べて長い時間が必要となる。
- (3) 集団の偏りに依った避難者の配置を予測し、出口に集中する避難者を他の出口に移動させるには従来の誘導灯による出口の指示だけでは困難である。

第4章では本研究で開発した仮想現実ゲームとアイマークレコーダを併用した実験から、実際の人間の避難時の行動について調べた。また、実験結果を踏まえて、新たな行動ルールを避難シミュレータに導入してシミュレーションを行い、その結果、以下の知見を得た。

- (1) 避難時間を短縮する手段として、視界内の他の情報に惑わされずに誘導灯のみを参考にさせることが有効である。
- (2) 被験者の傾向として、避難時に参考にする物体は基本的に誘導灯であるが、逆方向に移動する避難者が多い場合には周囲の避難者を参考にする傾向がある。
- (3) 被験者の傾向として、出口が視野に入ると、多くの被験者は自分の正面方向を主として、周囲を見渡す行動や他の物体を参考にする行動を取らない傾向がある。
- (4) 被験者の傾向として、実験開始後の最初に視界に入った誘導灯や避難者に従う傾向がある。
- (5) 誘導灯ではなく、避難者を参考にする避難者が少数ではあるが存在する。
- (6) 避難者を参考に避難するよりも避難誘導灯を参考に避難する方が短時間で多くの避難者を避難させることができる。
- (7) 避難者が直線の通路を早く進んだ場合では視野範囲が狭くなるにつれて、避難に有効な対象物を発見するのが遅れるために避難に悪影響が生じる場合がある。

第5章では3章のシミュレーション結果を踏まえて、人間の混雑を評価する補助誘導灯を提案・評価し、以下の知見を得た。

- (1) 避難者に他の出口を知らせるという補助誘導灯の機能が避難者を分散させることで、避難完了人数に対する有効性が示された。しかしながら、混雑の発生地点周辺に設置されていない場合は効果がほとんど見られない。
- (2) 補助誘導灯が示す出口が同時に混雑している場合には補助誘導灯が未設置の場合と避難誘導の効果は同じである。

第6章では障害物の発生を考慮した領域について、効果的な避難誘導の方法を検討するため、障害物の発生を考慮した誘導灯の配置モデルを提案し、避難シミュレータを拡張した。さらに、フロア全体の混雑状況から誘導方向を動的に操作する誘導灯の仕組みである「避難者誘導制御法」を提案し、シミュレーションにより提案法の有効性を調べた。これらの実験から以下の知見を得た。

- (1) 障害物の発生を考慮した数理モデルから得られた誘導灯の配置は、障害物の発生時に避難者を効果的に誘導させることができる。
- (2) 避難誘導の効果は障害物の発生位置や誘導灯の個数に影響する。
- (3) 障害物の発生する環境下で、障害物の発生を考慮した数理モデルから得られた誘導灯の配置を利用し、避難者の分布を評価して誘導灯の方向指示を制御する方法を導入することで、優れた避難誘導が行える。

7.2 結論

本研究では、下記の2点を研究目的として定義し、研究を進め、目的を達成した。

○ 誘導灯の最適配置問題の数理モデルの構築と有効性の検証

○ 避難誘導に効果的な設備の開発や新しい誘導法の提案と有効性の検証

「誘導灯の最適配置問題の数理モデルの構築と有効性の検証」については、数理モデルによって、誘導灯の適切な配置決定を提案し、その有効性を検証した。とくに障害物の発生パターンと発生確率を考慮することで、障害物が発生する環境下においても効率的な避難が可能となる誘導灯配置を導出する方法を提案した。また、数理モデルを用いているため、どのような建物に対しても効率的な避難ができる柔軟な誘導灯配置を提案することが可能となった。

「避難誘導に効果的な設備の開発や新しい誘導法の提案と有効性の検証」については、避難者の初期配置がフロア上で偏っていた場合に混雑が発生しやすく、効率的な避難が行えないことが避難シミュレーションで判明した。混雑を解消し、効率的な避難を行うための新たな誘導方法として、出口の混雑を検知して他の出口へ分散させる補助誘導灯とフロア全体のリアルタイムな避難者分布を評価して動的に誘導方向の制御する誘導灯制御システムを提案した。シミュレーションにより得られた結果から補助誘導灯、誘導灯制御システム共にその有効性を検証できた。とくに誘導灯制御システムでは柔軟で汎用性の高い誘導法であることがわかった。補助誘導灯や誘導灯制御システムの実現性については、人数を検知する機能については画像認識技術、誘導方向の変更についてはIoT技術の活用で実現可能である。

本研究を通して、避難者の行動分析や各提案法の有効性の検証にはMASを用いた避難シミュレーションと仮想現実ゲームを併用した。避難シミュレーションの結果を用いた仮想現実ゲームにより、避難者行動を分析して新たな避難者特性を発見した。その避難者特性を避難シミュレーションに導入することでシミュレーションの再現性が向上させることができた。

7.3 今後の課題

本研究の今後の研究課題としては、下記の5点が挙げられる。

- 障害物の発生個所と障害物の発生確率の予測方法の検討
- 仮想現実ゲームを利用した補助誘導灯や誘導灯制御システムの有効性の検証と補助誘導灯や誘導灯制御システム利用時の避難者行動の分析
- 混雑解消による避難効率化のための避難誘導員の活用
- 避難シミュレーションと仮想現実ゲームを組み合わせた災害時の避難者行動を分析するシステムの構築と改善
- 大規模範囲での避難者行動の分析と避難効率化のための方策の検討

「障害物の発生個所と障害物の発生確率の予測方法の検討」については、本研究で構築した障害物を考慮した誘導灯の最適配置問題の数理モデルについて、誘導灯配置を決定するために障害物が発生し得る場所とその発生確率に関する情報が必要となる。これらの情報の精度が誘導灯の最適配置の有効性に直結するため、これらの情報を正確に予測する手段を検討する必要がある。

「仮想現実ゲームを利用した補助誘導灯や誘導灯制御システムの有効性の検証と補助誘導灯や誘導灯制御システム利用時の避難者行動の分析」については、本研究で提案した補助誘導灯や誘導灯制御システムは避難シミュレーションによって有効性を検証した。しかし、実際の人間がどのような判断を行って行動するかについては検証できているとは言えない。そのため、仮想現実ゲーム上に補助誘導灯と誘導灯制御システムを再現し、実験を行うことで避難者行動を検証する必要がある。検証結果を踏まえて、新たな避難者行動が発見された場合には避難シミュレータに導入し、シミュレーションを行う必要がある。

「混雑解消による避難効率化のための避難誘導員の活用」については、本研究では効率的な避難誘導法として、誘導灯に着目して補助誘導灯や誘導灯制御システムを提案した。しかしながら、誘導灯以外にも避難誘導員などの避難誘導法も存在する。それらの避難誘導法についても避難者行動を踏まえた効率的な避難誘導法を検討し、本研究の提案法と組み合わせることでより効率的な避難が可能となる。

「避難シミュレーションと仮想現実ゲームを組み合わせた災害時の避難者行動を分析するシステムの構築と改善」については、本研究では MAS を用いた避難シミュレーションと仮想現実ゲームを用いて避難者行動の分析を行った。目標とするシステムは図 7-1

のシステム概要図が示すように避難シミュレーションと仮想現実ゲームを組み合わせ、分析を繰り返すことによって、高精度な避難者行動の分析とその分析結果を基に効率的な避難誘導法を提案できるシステムである。本研究では、避難シミュレーションと仮想現実ゲームによる実験を行い、その結果を踏まえて効率的な避難誘導法を提案した。しかし、提案法を導入した上で仮想現実ゲームによる実験とその結果を踏まえた新ルールの導入による被験者がゲームの実験による効果の検証を行っていない。今後は提案法について、仮想現実ゲームによる実験を行い、その結果を避難シミュレーションにフィードバックする組み合わせを容易に行える情報システムの構築を行い、高精度な避難者行動の分析を行う必要がある。

「大規模範囲での避難者行動の分析と避難効率化のための方策の検討」については、本研究では建物の1フロアを例に避難者行動を分析した。しかしながら、実際の建築物は1フロアだけではなく多階層の建物が多い。また、地震などの災害避難には屋内だけでなく屋外での避難も想定される。このように災害避難を考えた場合、単階層だけではなく、多階層の建物や屋外などの大規模範囲での避難者行動を分析する必要がある。

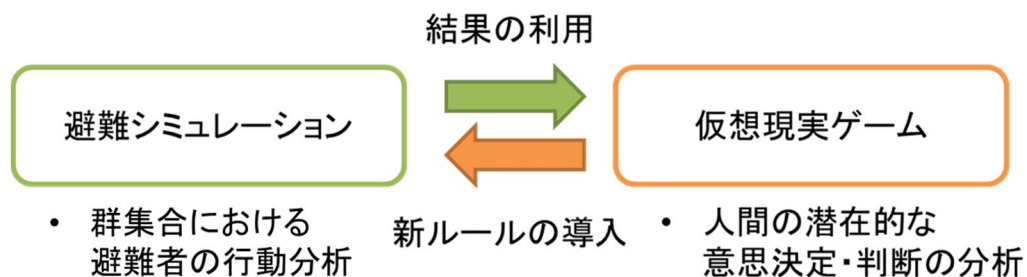


図 7-1 システム概要図

謝辞

本論文は筆者が名古屋工業大学大学院 工学研究科 社会工学専攻 博士後期課程に在籍中の研究成果をまとめたものである。同専攻教授 荒川 雅裕先生には指導教官として本研究の実施の機会を与えて戴き、多面にわたり有益な助言、批判、激励を戴いた。ここに深く御礼申し上げる。また、同専攻教授 横山 淳一先生、並びに、同専攻教授 徳丸 宜穂先生には副査としてご助言を戴くとともに本論文の細部にわたりご指導を戴いた。ここに感謝の意を表する。

さらに、専門課程において、経営工学一般および専門分野に関して、同専攻 諸先生方ご指導、ご教示を承った。ここに感謝の意を表する。また、的確なご指導、ご協力をいただきました生産システム工学研究室の諸先輩方、大学院生、4年生及び3年生の皆様、その他ご協力頂いた全ての方々に深く御礼申し上げる。

また、学外にも関わらず副査を引き受けて頂きました仁科健教授(愛知工業大学・名古屋工業大学名誉教授)に感謝致します。

本研究の遂行にあたり、公益財団法人科学技術融合振興財団 平成 25 年度調査研究助成の助成を受けた。公益財団法人に深謝いたします。

平成 31 年 1 月 9 日

杉浦 啓太

参考文献

- [1] 気 象 庁 : 台 風 の 平 年 値 , <
<https://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/typhoon/statistics/average/average.html> > ,
 2018 年 8 月 22 日アクセス.
- [2] 気象庁:平成 29 年の日本の地震活動,平成 29 年 12 月の地震活動及び火山活動につ
 いて, 2018/1/12
- [3]岩手県大槌町:大槌町東日本大震災津波復興計画(基本計画), 岩手県大槌町, 2011
- [4]内閣府:平成 23 年度版防災白書, 2011
- [5] 内 閣 府 : 報 告 書 (1959 伊 勢 湾 台 風) ,
 <http://www.bousai.go.jp/kyoiku/kyokun/kyoukunnokeishou/rep/1959_isewan_typhoon/index.html>, 2018 年 8 月 22 日アクセス.
- [6]神原康介, 窪田亜矢, 黒瀬武史, 萩原拓也, 福士薫, 田中暁子:東日本大震災時にお
 ける高齢者の緊急避難行動の実態と集落環境による影響ーリアス式海岸沿い集落・
 赤濱のケーススタディー, 日本建築学会計画系論文集 第 79 巻 第 701 号,
 p1593-1602, 2014
- [7]大宮喜文, 水野雅之, 中野美奈:ホテル火災時における従業員対応行動に関するアン
 ケート調査ー和歌山県白浜温泉で発生したホテル火災事例ー, 日本建築学会技術報
 告集 第 10 号, p.125-128, 2000
- [8]安達貴浩, 小橋乃子, 齋田倫範, 加治賢祐, 安部剛:北薩豪雨災害における住民の避
 難行動の意識調査, 土木学会論文集 B1(水工学)vol.72,No.4, p.l_1321-l_1326, 2016
- [9]及川康, 片田敏孝:河川洪水時の避難行動における洪水経験の影響構造に関する研究,
 自然災害科学 00018(00001), p.103-116, 1999
- [10]久保田勝明, 室崎益輝, 高橋一郎:モデル空間における壁面木戸が避難経路選択に
 及ぼす影響ー建物内火災時の避難経路選択時の向光性に関する研究, 日本建築学会
 計画系論文集 第 500 号, p1-7, 1997
- [11]北後明彦:煙の中における人間の避難行動実験ー避難経路選択及び歩行速度に関す
 る実験的研究ー, 日本建築学会計画系論文報告集 第 353 号, p.32-38, 1985
- [12]山崎文雄, 永田茂, 横山秀史, 大槻明:避難行動の迷路実験結果, 土木工学論文集
 No.441/I-18, p203-206, 1992

- [13]石垣泰輔, 戸田圭一, 馬場康之, 井上和也, 中川一: 実物大模型を用いた地下空間からの避難に関する実験的検討, 水工学論文集 第 50 巻, p.583-588, 2006
- [14]須賀堯三, 上坂恒雄, 吉田高樹, 浜口憲一朗, 陳志軒: 水害時の安全避難行動(水中歩行)に関する検討, 水工学論文集 第 39 巻, p.879-882, 1995
- [15]森下信, 山本英臣, 大高善光, 中野孝昭: セルラオートマトンによる小売店舗内購買シミュレーション, 日本計算工学会論文集 1999 巻, p.149-154, 1999
- [16]山本和弘, 小沼義昭: 格子ガスオートマトン法による燃焼場の数値計算, 日本機械学会論文集 (B 編) 67 巻 663 号, p.2871-2876, 2001
- [17]秋山孝正, 奥島政嗣, 和泉範之: マルチエージェント型ファジィ交通行動モデルの提案, 土木計画学研究・論文集 Vol.24 no.3, p.489-498, 2007
- [18]下村貴裕, 最所祐一, 藤井康正: マルチエージェントモデルを用いた電力市場における価格形成過程の分析, 電学論 B 124 巻 2 号, p.281-291, 2004
- [19]宮崎和光, 荒井幸代, 小林重信: Profit Sharing を用いたマルチエージェントと強化学習における報酬配分の理論的考察, 人工知能学会誌 Vol.14 No.6, p.224-232, 1999
- [20]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, No.1, p.7-12, 2007
- [21]近田康夫, 濱政洋, 城戸隆良: マルチエージェントを用いた避難行動シミュレーション, 土木情報利用技術論文集 Vol.17, p.29-38, 2008
- [22]渡辺公次郎, 近藤光男: 津波防災まちづくり計画支援のための津波避難シミュレーションモデルの開発, 日本建築学会計画系論文集 第 74 巻 第 637 号, p.627-634, 2009
- [23]安福健祐, 阿部浩和, 山内一晃, 吉田勝行: メッシュモデルによる避難シミュレーションシステムの開発と地下空間浸水時の避難に対する適用性, 日本建築学会計画系論文集 第 589 号, p.123-128, 2005
- [24]村木雄二, 狩野均: 地域性を考慮した広域災害避難シミュレーションのためのマルチエージェントモデル, 人工知能学会論文誌=Transactions of the Japanese Society for Artificial Intelligence : AI 22, p.416-424, 2007
- [25]堀宗朗, 宮嶋宙, 犬飼洋平, 小国健二: 地震時避難行動予測のためのエージェントシミュレーション, 土木学会論文集 A Vol.64 No.4, p.1017-1036, 2008

- [26]木村圭祐, 小林健一郎: マルチエージェントシミュレーションによる西宮広域津波避難訓練の再現と考察, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.71 No.4, p.1375-1380, 2015
- [27]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 73 巻 第 626 号, p.721-727, 2008
- [28]清野純史, 三浦房紀, 滝本浩一: 被災時の群衆避難行動シミュレーションへの個別要素法の適用について, 土木学会論文集 No.537/I-35, p.233-244, 1996
- [29]杉万敏夫, 三隅二不二, 佐古秀一: 緊急避難状況における避難誘導方法に関するアクション・リサーチ(I), 実験社会心理学研究 Vol.22 No.2, p.95-96, 1984.
- [30]岡田裕作, 竹内則雄: 避難時における指差し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 20, p.55-62, 2007
- [31]岡崎甚幸, 松下聡: 避難計算のための群衆歩行シミュレーションモデルの研究とそれによる避難安全性の評価, 日本建築学会計画系論文集 第 436 号, p.49-58, 1992
- [32]Sony Corporation(2018)「PlayStation VR | プレイステーション」, <<https://www.jp.playstation.com/psvr/>>, 2018 年 8 月 26 日アクセス.
- [33]Oculus VR (2018)「Oculus Rift | Oculus」, <<https://www.oculus.com/rift/#oui-csl-rift-games=star-trek>>, 2018 年 8 月 26 日アクセス.
- [34]鈴木直樹: バーチャルリアリティ技術を援用した手術シミュレーション技術の変遷, 日本コンピュータ外科学会誌 3 巻 1 号, p.5-16, 2001
- [35]綿貫啓一: バーチャルリアリティ技術による匠の技の伝承と人材育成, 精密工学会誌 72 巻 1 号, p.46-51, 2006
- [36]飯田明彦, 山田常圭, 阿部伸之, 山田茂, 須賀昌昭, 鈴木修: バーチャルリアリティー技術を用いた火災疑似体験システムの開発, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), p.101-102, 2003
- [37]榊想太郎, 丸山喜久: 自動車運転者の津波避難実験のためのドライビングシミュレータの構築, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学) Vol70 No.4(地震工学論文集第 33 巻), p.I_384-I_392, 2014
- [38]安福健祐, 阿部浩和, 吉田勝行: ウォークスルーシステムによる避難シミュレータの開発と地下空間浸水時の避難行動に関する分析, 日本建築学会計画系論文集 第 609 号, p.85-90, 2006

- [39]目黒公郎，芳賀保則，山崎文雄，片山恒雄：バーチャルリアリティの避難行動シミュレータへの応用，土木学会論文集 No.556/I-38, p.197-207, 1997
- [40]安福健佑：没入型避難シミュレータによる避難経路把握の分析，図学研究 42(Supplement2), p.71-76, 2008
- [41]村木雄二，狩野均：マルチエージェントモデルを用いた広域災害避難シミュレーションにおける情報伝達の有効性，情報処理学会研究報告数理モデル化と問題解決 (MPS) 2004(130(2004-MPS-052)), p.69-72, 2004
- [42]富永拓也，柴田直樹，孫為華，伊藤実：地下街におけるスマートフォンの光を用いた避難誘導方式の提案，マルチメディア、分散協調とモバイルシンポジウム 2014 論文集, p.266-277, 2014
- [43]市之瀬克己，高橋友一，森島小央里：避難シミュレーションを用いたサイネージによる避難誘導効率の検証，人工知能学会全国大会論文集 第 31 回全国大会(2017), 312-OS-13b-1, 2017
- [44]神忠之：誘導灯の歴史「黎明期から現在まで」，照明工業会報, p.17-23, 2015
- [45]山本勝也，佐藤友紀：平常・非常照明家での音声誘導・点滅機能のある誘導灯の誘導効果，日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), p.223-224, 2011
- [46]宮本隆弘，十亀昭人：瞬間判断力からみた有効な誘導灯の計画手法に関する研究～視野角、色、設置位置を考慮したシミュレーションによる検証～，日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), p.1011-1012, 2010
- [47]辻優介，尾崎昭剛，原尾正輝：“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”，情報科学技術フォーラム講演論文集 9(2), p.477-482, 2010
- [48]堀宗朗，犬飼洋平，小国健二，市村強：“地震時の緊急避難行動を予測するシミュレーション手法の開発に関する基礎的研究”，社会技術論文集(3), p.138-145, 2005
- [49]田上直樹，堀宗朗，マッデゲデラ・ラリス，市村強，田中聖三：津波群衆避難の創発解析のための MAS の利用方法に関する基礎的研究，土木学会論文集 A1(構造・地震工学) No.71 No.4(地震工学論文集第 34 巻), I_600-I_610, 2015
- [50]渡部勇市：“迷路における人間の避難行動実験: 第 1 報歩行経路の記憶”，日本建築学会論文報告集(322), p.157-161, 1982
- [51]鈴木介，今村文彦：“住民意識・行動を考慮した津波避難シミュレーションモデル”，自然災害科学 23(4), p.521-538, 2005

- [52] 諫川輝之，大野隆造：住民の地域環境に対する認知が津波避難行動に及ぼす影響—千葉県御宿町の事例から—，日本建築学会計画系論文集 第 79 巻 第 705 号，p.2405-2413，2014
- [53] 安福健祐：“高精細没入型避難シミュレータの開発と避難経路選択に関する分析”，日本建築学会径角形論文集 74(640)，p.1265-1270，2009
- [54] 山田常圭，阿部伸之，須賀昌昭：バーチャルリアリティー技術を用いた火災疑似体験システムの開発—その 3.地下鉄駅構内での避難経路探索に関する実験研究—，日本建築学会大会学術講演梗概集，p.309-310，2006
- [55] 尾崎昭剛，原尾政輝：矩形領域分割による誘導灯自動配置アルゴリズム，電子情報通信学会論文誌 D Vol.J98-D No.6，pp.916-925，2015
- [56] 尾崎昭剛，原尾政輝：避難経路ネットワークモデルを用いた自動誘導灯配置，情報処理学会研究報告，オンライン <<https://www.ipsj-kyushu.jp/page/ronbun/hinokuni/1004/3C/3C-4.pdf>>，2018 年 9 月 8 日アクセス
- [57] 森下信，山本英臣，大高善光，中野孝昭：“セルラオートマトンによる小売店舗内購買シミュレーション”，日本計算工学会論文集(1)，p.149-154，(1999).
- [58] 大鑄史男，伊藤義弥：“高層ビルにおける避難流動のシミュレーション—各フロアの歩行者人数の分布，階段幅，避難計画—”，日本オペレーションズ・リサーチ学会春季研究発表会アブストラクト集 2010，p.232-233，(2010-03-04).
- [59] 大鑄史男，小野木基裕：“セルオートマトン法による避難流動のシミュレーション”，日本オペレーションズ・リサーチ学会和文論文誌 51，p.94-111，(2008-12).
- [60] 総務省 (2015) 「消防法」，<<http://law.e-gov.go.jp/htmldata/S23/S23HO186.html>>2016 年 1 月 14 日アクセス.
- [61] Unity Technologies Japan(2016)「Unity – Game Engine」，<<http://japan.unity3d.com/>>2016 年 1 月 14 日アクセス.
- [62] 杉浦啓太，荒川雅裕：最適配置問題とエージェントシミュレーションを利用する建物内の最適誘導法の研究，システム制御情報学会論文誌，Vol.28，No.5，pp.213-220 (2015)

博士論文に係る業績リスト

査読付き論文

1	Masahiro Arakawa, Keita Sugiura, Shingo Muramatsu, Keiichi Kitazume: Development of Mixed Reality Game System Linking Multi-Agent Simulation to Evaluate Behavior of Evacuees, International Journal of Current Research, Vol.6, Issue.12, pp.11004-11012 (2014)	(第2章, 第3章,) 第4章 (参考)
2	杉浦啓太, 荒川雅裕: 最適配置問題とエージェントシミュレーションを利用する建物内の最適誘導法の研究, システム制御情報学会論文誌, Vol.28, No.5, pp.213-220 (2015)	(第2章, 第3章,) 第5章 (参考)
3	Keita Sugiura, Masahiro Arakawa: Evaluation of Behavior of Evacuees on a Floor in a Disaster Situation Using Multi-Agent Simulation and Mixed Reality Game: Effectiveness of The Field of Vision and Priority of Referred Objects, Computer Technology and Application , Vol. 7, issue 5 227-235 (2016) [DOI: 10.17265/1934-7332/2016.01.000]	(第2章, 第3章,) 第4章
4	Keita Sugiura, Masahiro Arakawa and Naoto Yokoi: Evaluation of the Behavior of Evacuees on Dynamic Floor Condition by Using Multi-agent Simulation, Journal of Electrical Engineering 5 , 275-287 (2017)[DOI: 10.17265/2328-2223/2017.06.001]	(第2章, 第3章,) 第6章

第2章, 第3章はシミュレーションの特徴を示しているため, 全論文で共通な部分である.

国際学会発表論文

1	Keita Sugiura, Masahiro Arakawa: Evaluation of Behavior of Persons on a Floor in Disaster Situation by Multi-Agent Simulation, Proceedings of the Asia Pacific Industrial Engineering & Management Systems Conference 2014 (APIEMS2014), 査読有, 12-15 October, 2014, Jeju, Korea, 1179-1186 (2014)	(第2章, 第3章,) 第5章 (参考)
2	Keita Sugiura, Masahiro Arakawa, Miduki Ohashi: Evaluation of Behavior of Evacuees on a Floor in a Disaster Situation Using Multi-Agent Simulation and Mixed Reality Game , Conference Proceedings, APCEAS (Asia-pacific Conference on Engineering and Applied Sciences) (ISBN 978-986-90827-1-6) , 査読有, Aug.25-27, Tokyo, Japan, 148-158 (2016)	(第2章, 第3章,) 第4章
3	Keita Sugiura, Masahiro Arakawa, Naota Yokoi, Evaluation of the Behavior of Evacuees on Dynamic Floor Condition by Using Multi-Agent Simulation, Conference Proceedings of ISEAS (International Symposium on Engineering and Applied Science), ISBENS(International Symposium on Biological Engineering and Natural Science), MIPE (International Symposium on Mechanical, Industrial and Power Engineering), 査読有, 14-16 August, 2017, Osaka, Japan 20-33 (2017)	(第2章, 第3章,) 第6章

国内学会発表

1	村松 真悟, 杉浦 啓太, 荒川 雅裕: エージェント・シミュレーションと仮想現実ゲームの複合による避難者行動の分析, 平成 26 年度秋季研究大会予稿集, 日本経営工学会, Nov 8-9, 42-43 (2014)	(参考)
2	杉浦啓太, 荒川雅裕: 最適配置問題とエージェントシミュレーションを利用する建物内の最適誘導法の研究, 第 58 回システム制御情報学会研究発表講演会, システム制御情報学会, May 21-23, 133-2 (2014)	(参考)
3	杉浦 啓太, 村松 真悟, 荒川 雅裕: エージェントシミュレーションの利用による効果的な避難誘導の研究, 平成 26 年度秋季研究大会予稿集, 日本経営工学会, Nov 8-9, 44-45 (2014)	(参考)
4	杉浦 啓太, 荒川 雅裕: エージェントシミュレーションによる建物内の最適誘導法の研究 — 避難者の特性を考慮した避難の特徴分析 —, 平成 27 年度春季研究大会予稿集, 日本経営工学会, May 16-17, 226-227 (2015)	(参考)
5	杉浦 啓太, 荒川 雅裕: エージェントシミュレーションと仮想現実ゲームを利用した避難者の行動分析 — 異なる特性を持つ避難者が混在する場合の避難の特徴 —, 平成 27 年度秋季研究大会予稿集, 日本経営工学会, Nov 28-29, 98-99 (2015)	(参考)
6	荒川 雅裕, 杉浦 啓太, 大橋 美月: エージェントシミュレーションと仮想現実ゲームを利用した避難者の行動分析 — 避難者の対象とするターゲットの混在による効果 —, 平成 28 年度春季研究大会予稿集, 日本経営工学会, May 28-29, 94-95 (2016)	(第 2 章, 第 3 章,) 第 4 章
7	荒川 雅裕, 杉浦 啓太, 横井 直人: 動的に変化する環境に対する効率的誘導法の研究, 平成 29 年度春季研究大会予稿集, 日本経営工学会, May 26-27, 122-123 (2017)	(第 2 章, 第 3 章,) 第 6 章

表彰

Best Student Paper Award : Keita Sugiura: Evaluation of Behavior of Persons on a Floor in Disaster Situation by Multi-Agent Simulation, the Asia Pacific Industrial Engineering & Management Systems Conference 2014 (APIEMS2014) (参考)

Appendix

A1. 避難シミュレータの構成

A1.1 システムのモデル

前節で説明したように本研究では避難シミュレータは Java 言語を用いて、自作しているため、避難行動の分析結果を踏まえて、新たに機能追加等が容易に可能となっている。本シミュレータは様々な先行研究でも用いられてきたマルチエージェントモデルを用いており、エージェントは自分の置かれた環境下でルールに従って判断を行い、行動する。本項では、本研究で開発したシミュレータの全体のモデルについて説明する。

図 1 は本シミュレータのクラス図を示す。HinanDisp クラスと Location クラスはセットで用いることで、大きさや壁の位置といった領域情報の格納とその情報を画面上に描画するといった役割を果たす。またこの 2 つのクラスは、Simulation クラスと Stairs クラスから個々にいくつも生成される。またいくつも生成された Location に対し、エージェントがどの Location を参照すべきであるかという情報は、Simulation クラスが Agent に対して告知する。

この Simulation クラスを更に管理しているのが Manager クラスであり、この Manager クラスは Main クラスによって唯一つのみ生成される。Manager クラスは任意の数だけ Simulation と Stairs を生成し、Stairs に対して Simulation と関連付けるよう命令する。

避難者については Agent クラスが書く避難者の行動や情報を保持している。Agent クラスには先行研究を踏まえた避難行動のルールが記載されており、各避難者はそのルールに基づいて避難行動を行う。避難者を表す Agent クラスの概要については次項で詳細に説明する。図 2 はシミュレーション開始から終了までのシステム全体の流れのシーケンス図を示す。

本シミュレーションに必要な階層数や出口の位置、壁情報や誘導灯の設置位置やエージェント生成数から移動速度といった諸情報は外部ファイルに入力する。プログラム開始時に必要な情報を読み取り、シミュレーションにパラメータとして反映される。

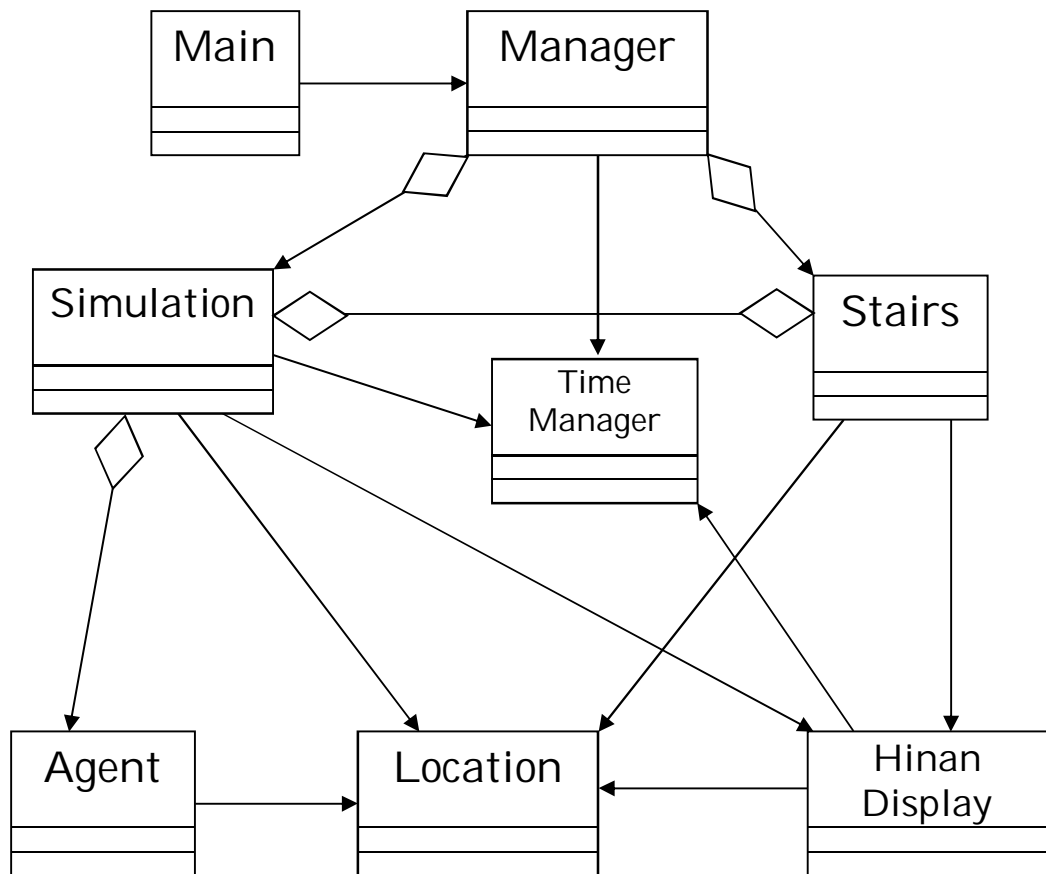


図1 マルチエージェントシステム

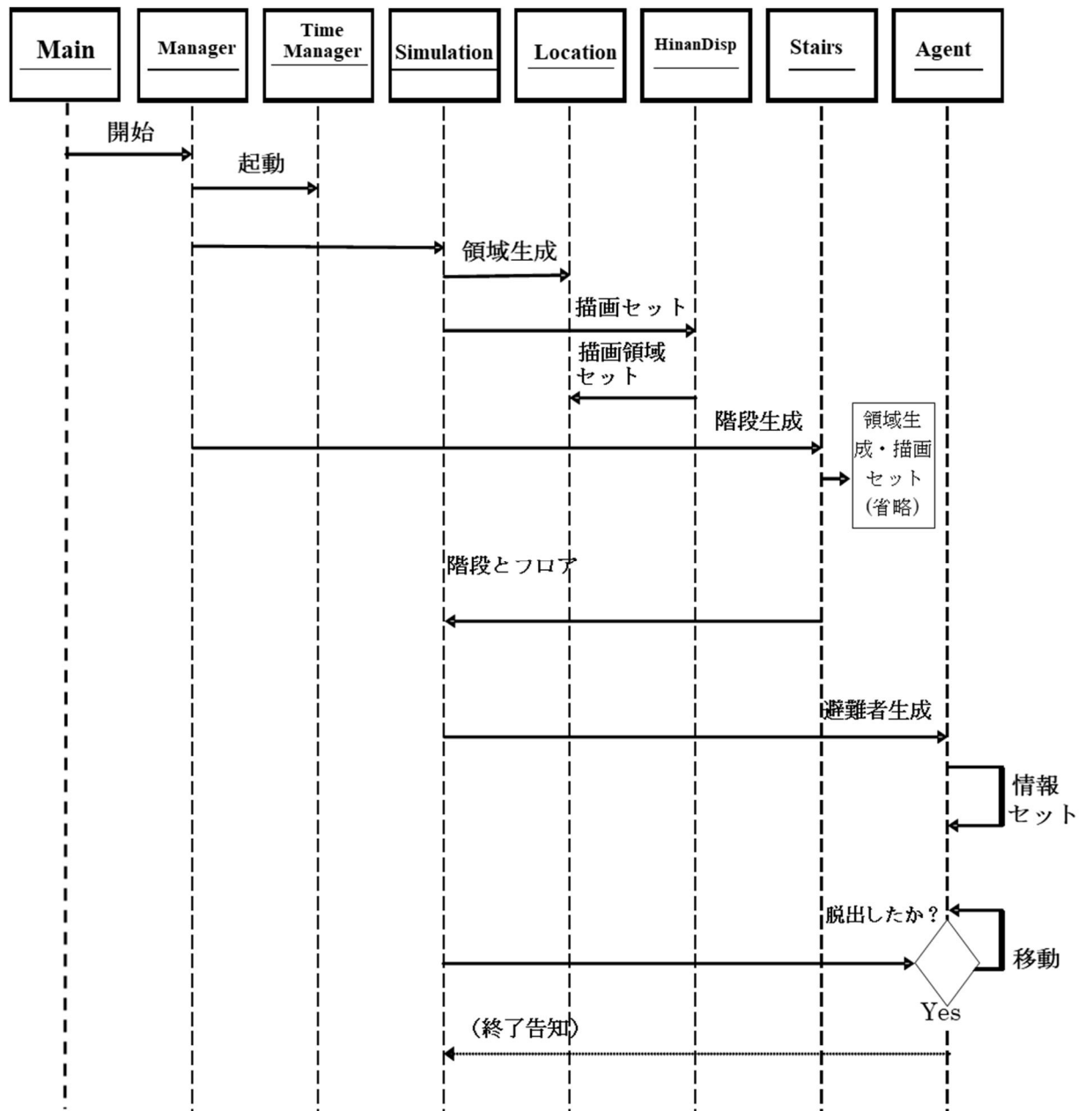


図2 システム全体の流れ

A1.2 システムの構成

ここでは本研究で開発したシミュレータのシステム構成について説明する。
本シミュレータのマルチエージェントシステムは以下のクラスの特徴を以下に示す。

①Main クラス

シミュレーションを実行するためのクラス。
プログラムを実行した際にはこのクラスから処理が開始される。
このクラスから Manager クラスを呼び出すことでシミュレーションを開始する。

②Manager クラス

避難シミュレータ全体を管理するクラス。
TimeManager クラスや Simulation クラス, Stair クラスに指示を出してシミュレーションの開始を指示する役割を持つ。
また, 多階層の場合には階段とフロアを関連付けし, 多階層構造を作り上げる。

③TimeManager クラス

シミュレーションに用いる時間を処理するクラス。
このクラスが管理している時間を基にエージェントはそれぞれ行動を行う。
また, 画面上に記載される時間やシミュレーション結果に記載される時間もこのクラスが保持している時間を用いている。

④Simulation クラス

1フロアの実環境設定クラス。
Manager クラスによって任意の数だけ生成される。
出口・階段・壁等を設定し, シミュレータ上にデータとして反映させる。
エージェントをリストでまとめて保持し, 実行・管理する。
エージェントが出口に到達したか, また次に行くべき領域は何か等を管理し, このシミュレータの中核とも言える, 多階層の移動を実現している。

⑤Stairs

階段の環境設定クラス。

Simulation クラスと同じく Manager クラスによって任意の数だけ生成される。

Simulation クラスに対して自分が下の領域であること伝え、エージェントがフロアから階段へ降りていくという構造を実現する。

また、階段の幅や下の階はどこに繋がっているか等を管理する。なお、出口も 1 階から 0 階に繋がる階段として処理している。

⑥Location クラス

フロアや階段のフィールド情報を格納するクラス。

環境設定ファイルから情報を読み取って保持する。

エージェントの位置情報、壁の位置情報、誘導灯の位置情報などの領域上に置かれる情報を格納し、またエージェントの移動や視野探索等の際に参照される。

また、フロアの情報を後述する仮想現実ゲーム用に変換し、専用のファイルに出力することで仮想現実ゲームにおいても避難シミュレータの結果を再現できるようにしている。

⑦HinanDisp クラス

プログラムが計算している内容を視覚的にわかるように、画像表示するクラス。

Java 言語の API である Graphics クラスによる描画処理を中心とする。

Location クラスの壁や誘導灯の位置情報を最初に参照し、画面上に描画する。

また Simulation クラスからは描画を担当する領域内のエージェント情報を渡され、逐一描画処理されることでエージェントの動きを表現している。

⑧Agent クラス

マルチエージェントモデルの肝であるエージェント（避難者）のクラス

移動速度、視野範囲といったエージェント固有の情報を持つ。

エージェント固有の情報については必要に応じてパラメータの追加が可能になっており、移動速度の変更などの行うことにより、先行研究のような高齢者などの避難者[6]を再現できるように拡張が可能なプログラムとなっている。

障害物の回避，出口に向かう，他者に追従する等の移動に関する処理も行う．

Simulation クラスによって生成・管理され，下の階層へとフロアを降りていく

Simulation クラスから自分がどの領域の Location を移動しているのかを知らされ，自分の位置に応じた Location を参照し，壁やエージェント同士の干渉（追従や衝突等）といった処理を実現する．また，必要に応じて位置情報，初期位置は何階から開始したか等の諸情報を外部ファイルに出力していくことが可能である．

A2. 仮想現実ゲームの構成

A2.1 システムのモデル

本節では本研究で開発した仮想現実ゲームの全体のモデルについて説明する。仮想現実ゲームの開発環境にはユニティ・テクノロジーズ社の開発した統合型のゲーム開発環境である Unity を用いた。本ゲームは避難シミュレータの結果ファイルを読み込んで、立体表示するシステムである。

図 3 は仮想現実ゲームのクラス図を示す。MainMenu クラスはゲームに必要な避難者数やフロアを選択等の設定を行う。GameStarter クラスはゲームの起動を担当し、StageMaking クラスや AgentFileRead クラスにフロア生成やエージェントの生成の指示を出す。StageMaking クラスは GameStarter クラスからの指示で避難シミュレーションに用いたファイルからフロアを自動的に生成するための機能を持つ。Timer クラスはゲーム内の時間を管理しており、エージェントは Timer クラスが持つ時間を参照して行動する。AgentFileRead クラスは GameStarter クラスからの指示でフロア上に行動するエージェントやプレイヤーを作成する機能を持つ。AgentTranslate クラスはエージェントの移動を Timer クラスは各エージェントの移動を担当すると併用することでファイル内の指定された時刻にエージェントの位置移動を行うことができる。これにより、避難シミュレータで行ったシミュレーションと同じ環境を再現することが可能である。PlayerController クラスはプレイヤーの操作を仮想現実ゲームに反映させるためのクラスで、視点の操作や移動ができるようになっている。図 4 はこれらを含むシステム全体の流れのシーケンス図を示す。

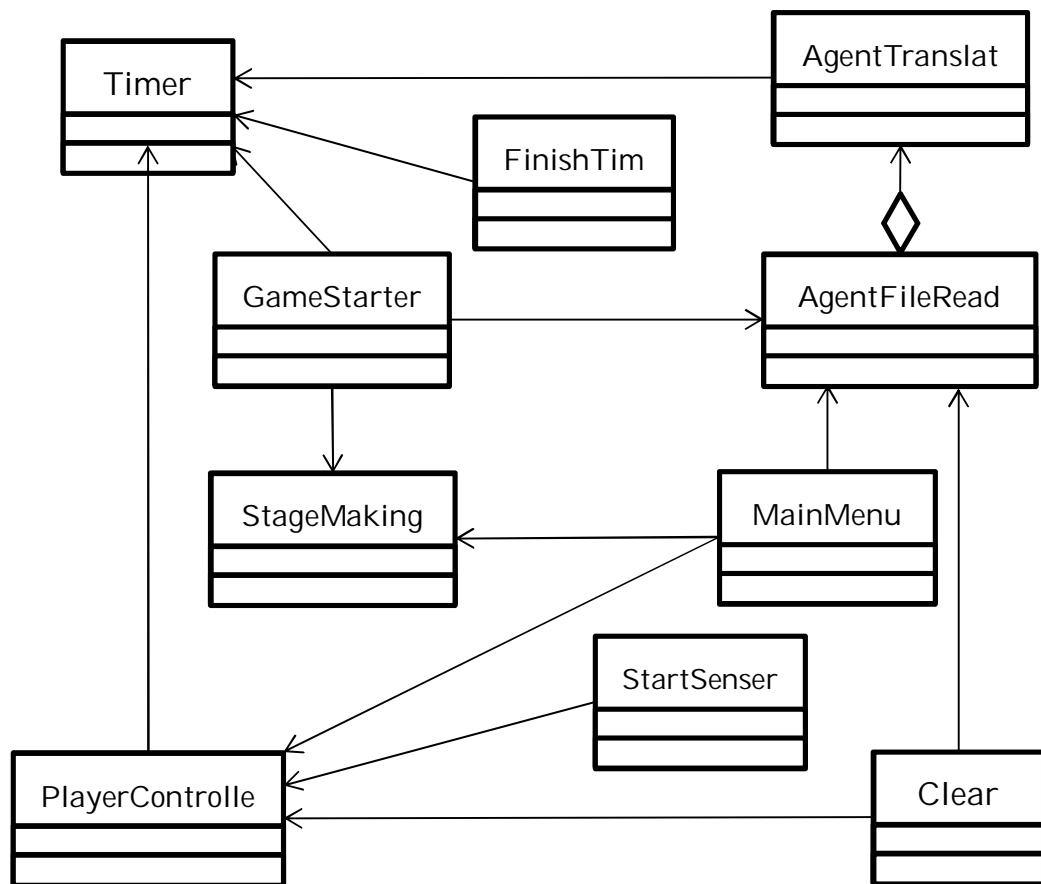


図3 仮想現実ゲームのクラス図

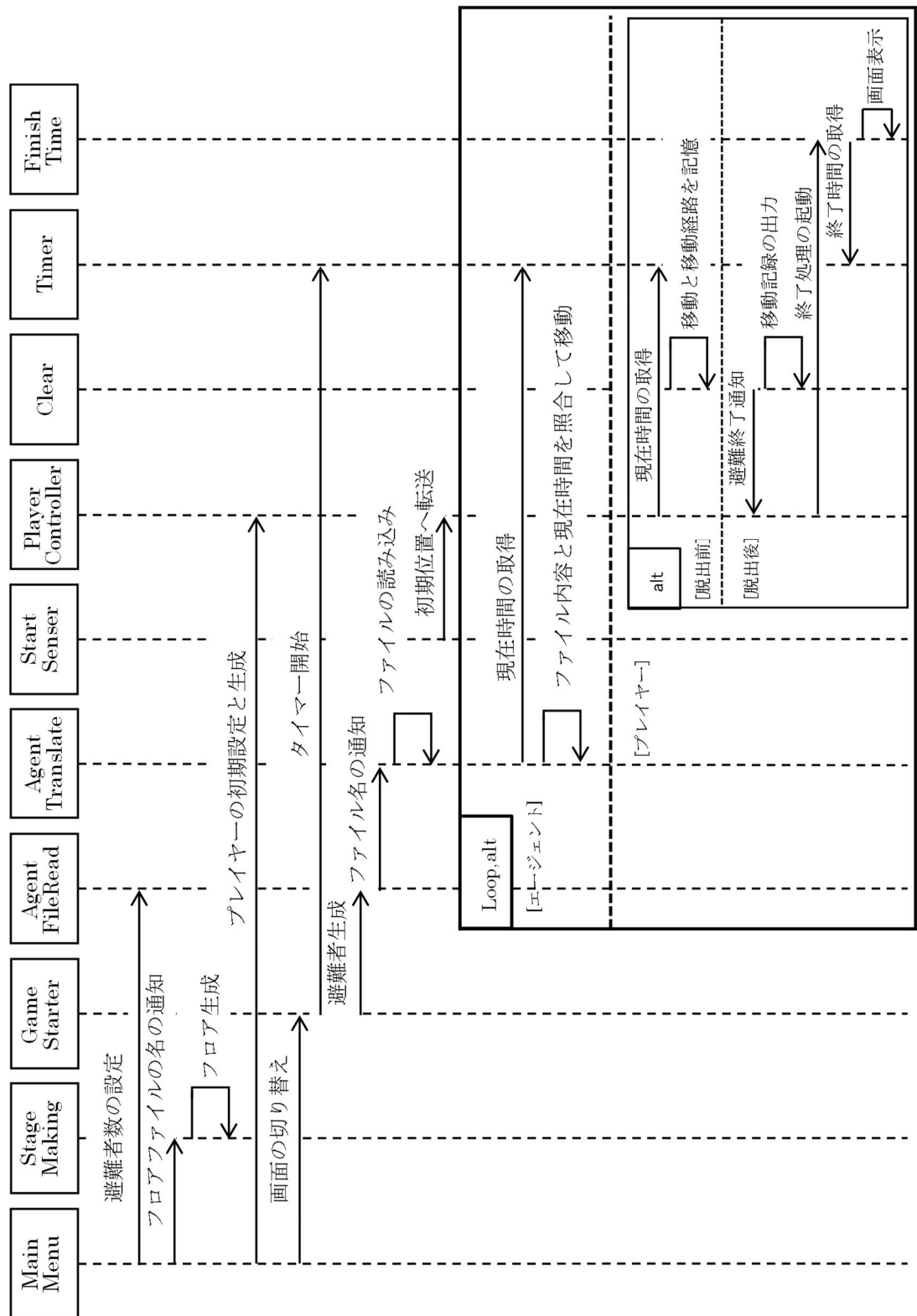


図 4 仮想現実ゲームのシーケンス図

A2.2 システムの構成

本項では開発した仮想現実ゲームのシステム構成について、クラスごとに内容を説明する。本ゲームシステムは避難シミュレータの結果を読み込み、シミュレーションを立体表示するシステムである。この仮想現実ゲームはC#を用いて開発を行われており、以下のクラスから構成されている。

MainMenu クラス

ゲームの設定を担当するクラスである。

避難者数の設定やファイル生成の有無、フロアの選択、プレイヤーの操作するエージェントの指定を行い、StageMaking クラスや AgentFileRead クラス、PlayerController クラスに必要な情報を登録するクラスである。

GameStarter クラス

ゲームの開始を指示するクラスである。

StageMaking クラスに対して、フロアの作成の指示や AgentFileRead クラスに対して、エージェントの生成の指示、Timer クラスに対して、タイマーの起動の指示を行うためのクラスである。

StageMaking クラス

フロアの作成を担当するクラスである。

MainMenu クラスから入力された情報を基にして、避難シミュレータで作成されたファイルを選択し、GameStarter クラスの指示でフロア内の通路、壁、出口、誘導灯などの仮想現実ゲームのフィールドとなるフロアを作成する。

Clear クラス

プレイヤーが出口に到達した際に処理を行うクラスである。

プレイヤーがフィールド上の出口オブジェクト(Clear クラス)に触れたことを感知して、PlayerController クラスに対して、プレイヤーの移動記録を分析用のファイルに書き出す命令を出す機能とプレイヤーが操作するエージェントをフロア上から削除する機能を持つ。

AgentFileRead クラス

避難シミュレータの結果ファイルを基に避難シミュレータとシミュレーション結果通りに移動するエージェントを作成するクラスである。

主な機能としては指定された人数のエージェントを作成する機能を持つ。作成されたエージェントは避難シミュレータの結果ファイル内の初期位置(0 秒地点)に配置され、その後は **AgentTranslate** クラスによって制御されることで避難シミュレータのシミュレーション時と同様の移動を行う。また、任意の番号を指定することができ、該当するエージェントは操作可能プレイヤーとなる。

PlayerController クラス

操作可能なプレイヤーに与えられるクラスである。

フロア上のプレイヤーの位置と視点の位置を毎秒記録して、出口オブジェクト (**Clear** クラス)に触れたときに移動記録を外部にテキストファイルとして出力することが可能である。

AgentTranslate クラス

AgentFileRead クラスから呼び出されるエージェントに与えられるクラスである。このクラスはエージェント毎に振られる番号に基づき、番号に該当する避難シミュレータのシミュレーション結果のファイルを読み込み、**Timer** の時間を取得しながら移動を行うことで避難シミュレータでのシミュレーション結果を再現する。

FinishTime クラス

プレイヤーが出口オブジェクト (**Clear** クラス)に接触した時点での経過時間を **Timer** クラスから取得して、避難にかかった時間を画面に表示するクラスである。

StartSenser クラス

GameStarter クラスと連携して、ゲーム開始時にプレイヤーをフロアの初期位置に移動させるクラスである。

Timer クラス

避難開始から終了までの時間を管理するクラスである。このクラスの記録する時間を基に `AgentTranslate` クラスがエージェントに避難シミュレータのシミュレーション結果と同等の移動を行わせる。また、`PlayerController` クラスでのプレイヤーの位置や視点を毎秒記録する際にこのクラスの時間を用いている。

