

災害弱者を考慮したマルチエージェント避難シミュレーションモデル

東京理科大学 理工学部 経営工学科
新井 健、 増田 浩通、 落合 哲郎

1. 研究の背景と目的

高層ビルやデパートなどの閉鎖された空間では、毎日毎日、人々が、なにげなくそこを利用している。しかし、安全性という面から考えてみると、危険の満ちている空間といえる。確かに、技術の発達に伴い構造的にも安全な空間であるという評価が高くなってきている。しかも、地震時など、地上の建物より揺れは少なく、シェルターの役割で利用される場合も考えられるようになってきた。しかし、人間は、元来地上の生き物であり、閉鎖空間という特殊な空間での人間の行動は、単純には計り知れないものと考えられる。したがって、発生した災害自体が極めて小さな規模のものでも不安が急速にふくれあがった群集は、冷静さを失い、さも大規模な災害が発生したように混乱し、膨大な数の犠牲者を出すという可能性をも、十分に含んでいる。

以上のような背景を踏まえて、本研究では、閉鎖された空間を安全な空間にし、犠牲者を一人でも少なくするために、その一手段として避難シミュレーションモデルの構築という課題をとりあげる。その際、災害弱者である高齢者や電動車イスを使用している者の存在も考慮する。対象とする地域は仮想空間とし、避難者が地下街の出口まで向かう行動をエージェント・ベースド・モデリングの手法を用いてモデル化し、シミュレーションにより避難者がどのように動いていくかを把握するシステムを作ることとを目的とする。

2. 既存研究と本研究のモデル

本研究の先行研究として、個別要素法を用いたシミュレーション手法の提案^[1]、防災要員と避難者間の情報伝達を考慮した避難行動シミュレーション^[2]、CAを用いた歩行シミュレーション^[3]等が上げられる。しかし、これら先行研究は、いずれも避難者に差異を設けておらず、全ての避難者が同一であると表現している。

そこで、本研究で用いるシミュレーションでは、避難者の属性を、以下のように表現する。

- (1) 歩行速度
- (2) 自律型・追従型
- (3) 視野範囲

(1)として、年齢別によって“歩行速度”を変化させたエージェントを使用する。(2)は、エージェントごとに“自律型”(自分で出口を探して脱出

する)と“追従型”(他の避難者について行き出口から避難する)の型を付加した。(3)は、エージェントごとに“視野範囲”を変更させた。これら(1)、(2)、(3)の避難者の属性を付加したことにより、先行研究では、表現しにくかった避難者個人の歩行特性をモデルに組み入れることが出来るようになった。

3. 避難行動シミュレーションモデル

3.1 避難行動モデルの基本的構造

人間の行動を再現するシミュレーションにおいては、マクロレベルで扱うより、ミクロレベルで行う方がより忠実に再現できると思われる。近年、エージェント技術を用いたモデル構築が様々な分野において、多数行われている。エージェントモデルとは、エージェント自身が環境を認知し、自律的に自分自身を環境に対応させるように変化し、加えて、他のエージェントとも情報交換を行い、目標を達成するためによりよい行動を自分自身で計画し、実現することができるという特性を持っている。

このような特性を用いて、本研究では、避難者間の情報のやり取りをエージェントに与え、その影響を見ることができる避難行動シミュレーションモデルを構築する。

3.2 空間のモデル化

シミュレーションモデルを構築するにあたり対象とする空間をモデル化する必要がある。本研究では、2次元モデルを採用し、空間格子として最も代表的である図1のような空間格子をとるものとした。

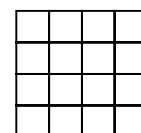


図1. 採用する空間格子

3.2.1 セル一辺の寸法

上記の図1で示したメッシュ構造の一つのセルに1人の人間が存在できるような空間モデルとするため、参考文献^[4]などをもとに、セルの一辺を50cmとした。

3.3 モデルの構成要素

本研究で扱う避難行動モデルの構成要素を以下に示す。それぞれの要素についての説明は、後述する。

- 避難者
- 障害物
- カウンター
- 標識
- 出口

3.4 避難者の属性

本研究では、避難者の属性を一定とせず、「若年者(0~65歳)」、「高齢者(65歳以上)」、「電動車イスを使用している者」の3つに分類した。

3.4.1 歩行速度

避難者は、それぞれの年齢や性別によって、歩行による速度の差異は、当然として存在している。避難者のそれぞれの“歩行速度”は、文献^[4]などを参考に、以下のように設定した。

- ・ 若年者：1.4(m/s)
- ・ 高齢者：0.8(m/s)
- ・ 電動車イスを使用している者：0.556(m/s)

3.4.3 視野範囲

一般に、高齢者は、“視野範囲”が狭く、腰も曲がっている人も多いため、あまり遠くまで見ることができないと考えられる。また、電動車イスを使用している人も同じことが言えると考えられる。

以上より、あたりを見回す“視野範囲”を「高齢者」、「電動車イスを使用している者」は、ある程度限定した値とした。一方、「若年者」の“視野範囲”は対象空間全てを見渡せる事とする。“視野範囲”は、自分自身の位置を0とし、周囲セル一回り分増えるごとに1を足した値とし、その範囲内のセルは見えるものとする。例えば、図2の避難者の位置において、“視野範囲”が1、2、3と増えるに従って回りを見渡す空間が広がることを意味する。

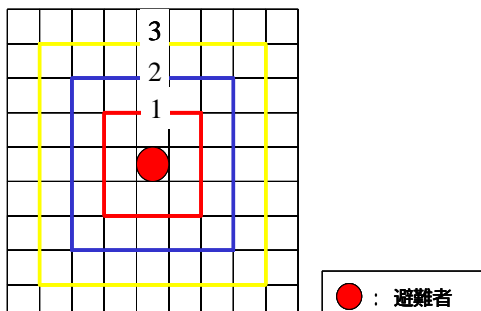


図2. 自分の位置と視野範囲の関連

3.4.4 自律・追従型

災害時において、とっさに他者の行動を判断のよりどころとする追従行動が起こることが知られている。この行動をモデル化するために、「高齢者」、「電動車イスを使用している者」は、ある一定の視野範囲に若年者が存在していた場合には、その若年者を追従して避難する“追従型”と、視野内に若年者が存在していても追従せず、自分で出口を見つけて避難する“自律型”という型のどちらかに属するようにした。一方、本研究では「若年者」は、全て“自律型”とした。図3に、具体的な追従型の追従例を示す。

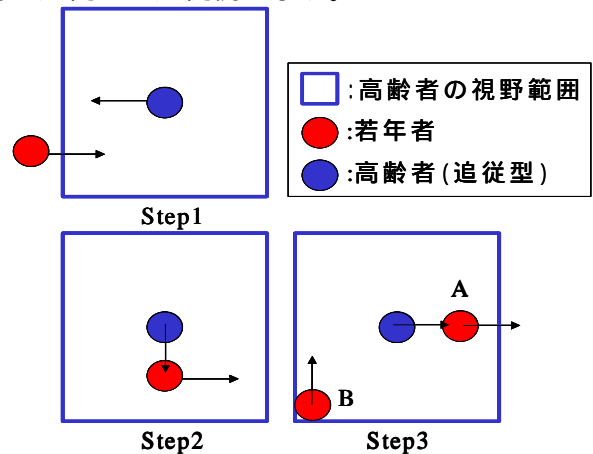


図3. 高齢者が若年者を追従する例

図3のStep1では、追従型の高齢者は左に移動し、若年者は右に移動している。この時点では、若年者は高齢者の視野範囲に入っていない。次のStep2では、高齢者の視野範囲に若年者が存在しているため、高齢者の目的地を若年者の現在位置に設定し若年者を追従し始める。そして、Step3では、高齢者の視野範囲内に追従すべき対象が2人いる場合である。追従範囲内に2人以上いる場合、自分の現在位置と、それぞれの若年者の現在位置との距離を計算し、短い方の若年者の現在位置を目的地に設定する。この具体例では、若年者Aの方が高齢者の現在位置から見て近くにいるので、若年者Aの現在位置を目的地に設定する。

以上、避難者の属性についてまとめた表1を下に示す。

表1. 避難者の属性

エージェント	速さ(m/s)	視野範囲	型
若年者	1.4	対象空間全て	自律型
高齢者	0.8	5	自律・追従型
電動車イス使用者	0.556	5	自律・追従型

3.5 避難者の行動アルゴリズム

避難者は、シミュレーションが開始されたら、以下の図4のようなアルゴリズムに従い、行動する。

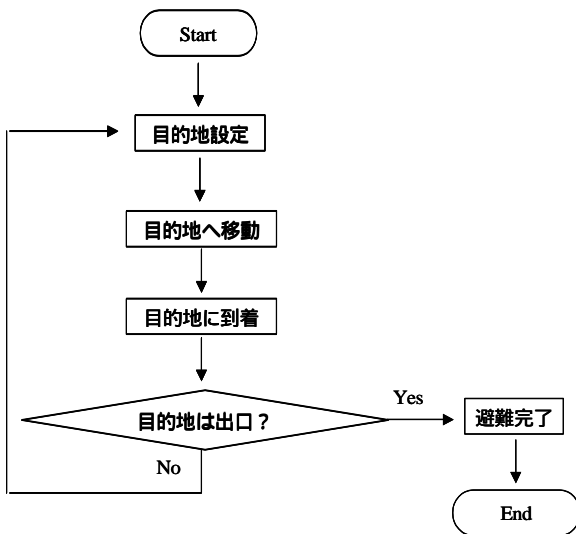


図4. 避難者の行動アルゴリズム

避難者は、まず自分の視野範囲内から目的地設定を行い、目的地まで移動する。そして、目的地に到着したら、その目的地が出口かどうか判断し、もし出口ならば、避難者はその空間から避難させ避難完了とする。もし、目的地が出口でない場合は、再度目的地設定を行う。

なお、「目的地設定」、「目的地へ移動」の方法に関しては後述する。

3.6 避難者の目的地設定方法

避難者は、「視野範囲内から自分がこれからどの地点へ移動したいのか、という目的地を決定し移動する」という歩行方法を取るものとした。その際、視野範囲が対象空間全てである若年者と視野範囲が限られる高齢者、電動車イス使用者の目的地設定方法はそれぞれ異なるので、下記にそれぞれ分けて説明する。

3.6.1 若年者の目的地設定方法

若年者の目的地設定方法は、参考文献^[3]をもとに、以下のように若年者の周りに視野番号～を作り、視野番号から外側の矢印の方向を、障害物、標識、出口が存在するまで順番に調べていくという方法を取った。詳細は、下で述べる。

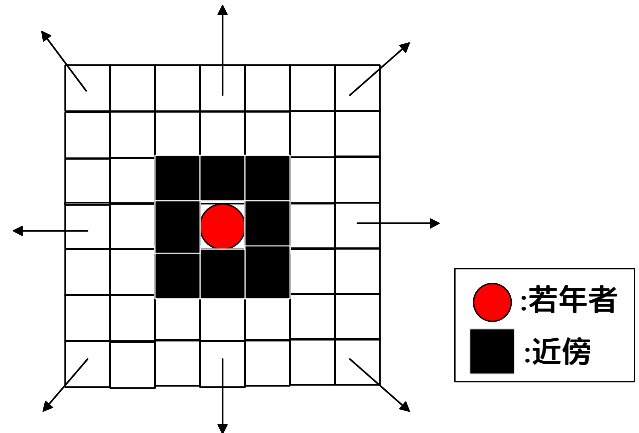


図5. 若年者の周りの視野番号

ここで、視野番号より外側を順番に調べていくため、自分の周りの近傍(図5参照)に障害物がある場合とない場合で、場合分けをした。

(1) 近傍に障害物が存在しない場合

自分のセルより2つ外側のセルから、図5のように、～までの視野番号を定め、それぞれについて避難者に近い方から障害物が存在しないかを調べていく。例えば、、、の視野の障害物を調べる時は、下の図6のA、B、C...の順番にセルを調べていき、最初に存在した障害物までの距離を取得する。同様にして、図5の、、、、の視野番号を調べていく。

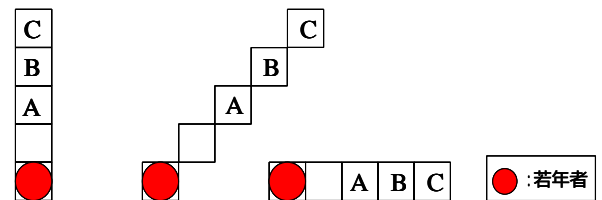


図6. の視野の視野番号を調べる順番

また、、の視野番号の調べ方は、下の図7のA、B、C、D、E、F...の順番にセルを調べていき、最初に存在した障害物までの距離を取得する。同様にして、図5の、、、、の視野番号を調べていく。

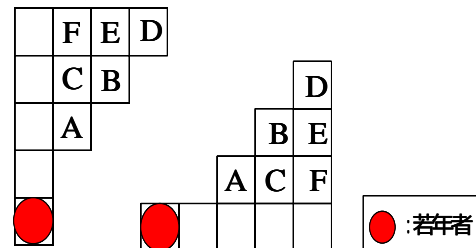


図7. の視野の視野番号を調べる順番

このようにして、～ までの視野番号のセル全てを調べ、その中で一番長い視野線の中心点を目的地に設定する。ただし、全ての視野番号を調べる時に、標識または、出口を見つけた場合は、出口を目的地に設定する。

(2) 近傍に障害物がある場合

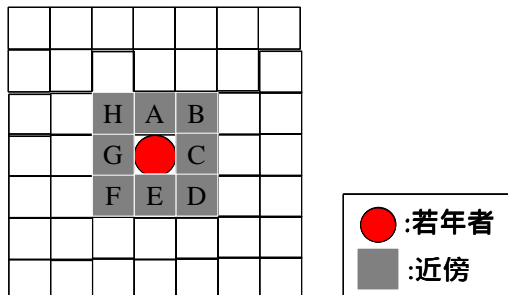


図 8. 近傍と視野番号

例えば、図 8 の A に障害物が存在した場合、若年者からの視野は見えないので、の視野番号までの距離は 0 とする。同様に、C、E、G に障害物が存在した場合、の視野番号までの距離は 0 とする。次に、B に障害物が存在した場合、の視野は若年者から見えないので、の視野番号までの距離は 0 とする。同様に D、F、H に障害物が存在した場合、の視野番号までの距離は 0 とする。

以上、まとめると目的地を設定するまでのアルゴリズムは図 9 になる。

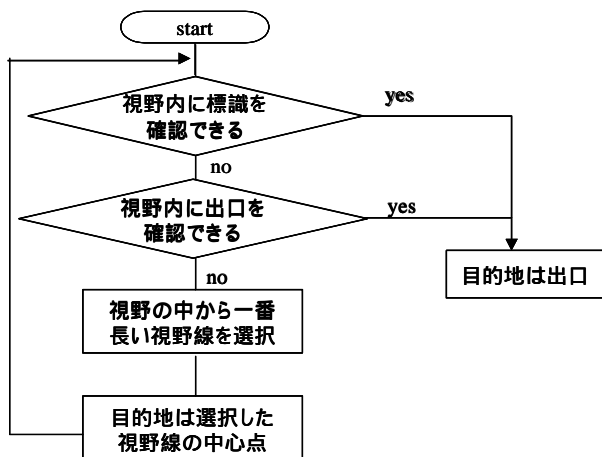


図 9. 若年者の目的地設定アルゴリズム

この視野における目的地設定方法は、参考文献^[3]をもとにした。

3.6.2 高齢者・電動車イス者の目的地設定方法

「高齢者」と「電動車イス者」は、視野範囲に制限があるため、「若年者」のような方法で目的地を設定することはできない。よって、図 10 のようなアルゴリズムで目的地を設定するものとする。

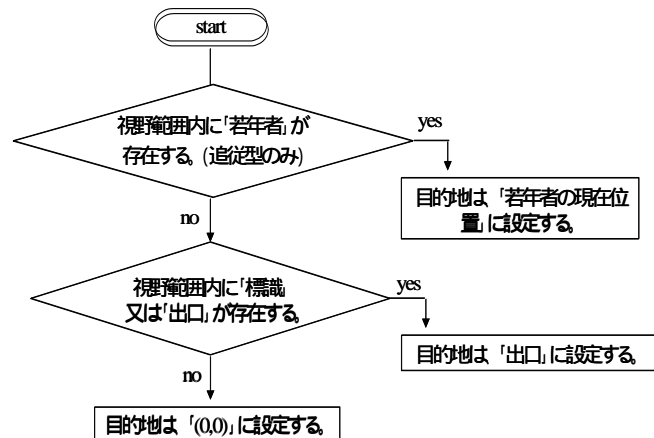


図 10. 高齢者・電動車イス者の目的地設定アルゴリズム

3.7 カウンター・障害物

本モデルでの障害物とカウンターについて、定義しておく。

- カウンター・・・商品が陳列してある棚や、腰位までの高さの机のこと等を指す。
- 障害物・・・柱や壁など、建物の一部分を指す。

すでに述べたように、本モデルの若年者は、標識・出口が存在しなかった場合、「障害物」にぶつかるまで視野番号を調べる。この際、「カウンター」の存在を見つけても視野には、影響しないものとする。上記の例を次に示す。

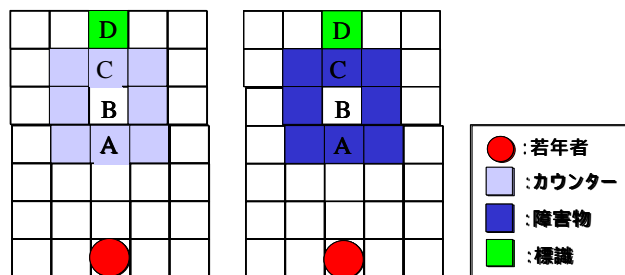


図 11. 避難者とカウンター・障害物

若年者は、目的地を設定する際に～ までの視野番号を調べることはすでに述べた。ここで、図 11 の左側の若年者は、の視野番号の領域である、A、B、C、D を順番に調べていくが、この時、A にカウンターがあるが、カウンターは視野を遮るほど高くはないと考えるため、次の B を調べ、C を調

べる時にも、Cにカウンターは存在するが、同様の理由で次のDを調べることができる。そしてDを調べた時に、標識があるので出口を認識する。

次に、右側の若年者も、の視野番号の領域である、A、B、C、Dを順番に調べていくが、Aを調べた時にこの場合は、障害物が存在する。本モデルでいう障害物は、すでに述べたように柱や壁などを想定しているため、その向こう側に何があるか若年者は見ることができない。したがって、若年者はDにある標識を認識することができない。

3.8 標識・出口

本モデルでの標識と出口について、定義しておく。

- 標識・・・非常口の表示灯であり、出口の方向がしめされている標識。(図12参照)
- 出口・・・この場所に避難者が、移動したら、避難完了とみなす場所のこと。



図12. 標識の例

本モデルでは、視野範囲内に標識または出口を認識した場合は、目的地を出口に設定する。ここで、例を図13に示す。

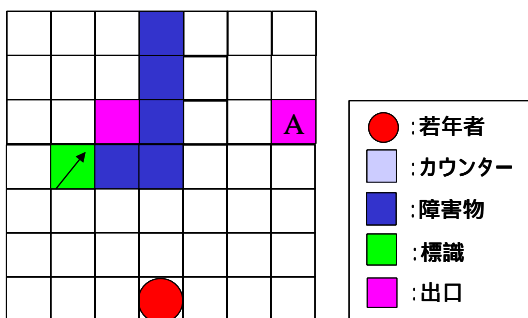


図13. 避難者と標識・出口

避難者はの視野番号の時に出口Aを発見し、の視野番号を調べる時に標識を発見し、この標識により出口Bも発見することができる。このように避難者の視野内に2つ以上出口を発見した時は、避難者の現在位置とそれぞれの出口までの距離を計算し、距離が短い方の出口を目的地に設定することとする。この例の場合、出口Aと出口Bまでの距離を

比較した時、出口Bの方が距離が短いため、避難者は出口Bを目的地に設定する。

3.9 移動可能セル

時間ステップが1進むごとに、避難者は隣接する4つの方向から1つを選択して移動する。避難者の移動可能な4つの方向を図14に示す。

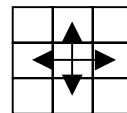


図14. 移動可能セル

3.9.1 移動アルゴリズム

避難者の目的地までの移動アルゴリズムを下に示す。

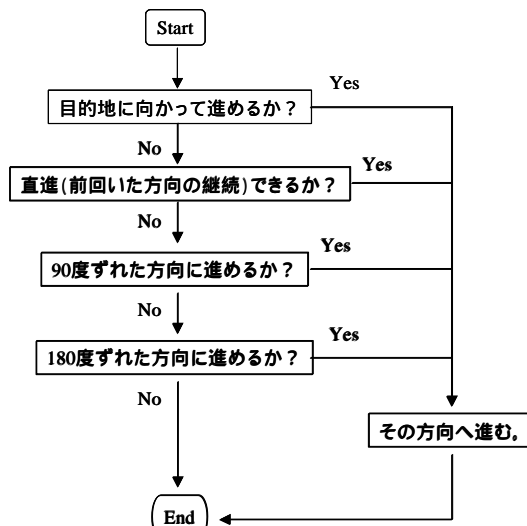


図15. 移動アルゴリズム

この移動アルゴリズムは、参考文献^[6]の歩行アルゴリズムと同じである。

4. シミュレーション分析

4.1 対象地域

コンピューター上に「食品売り場」という箱庭を設定する。理想的には、現存する「食品売り場」を完全に模した物をそのままコンピューター上に再現することが望ましいが、非常に煩雑であり、その構築は容易ではない。しかし、何も参考にしていないというわけではなく、対象として柏駅の高島屋T館の1Fを調査し、参考にした。対象地域をモデル化したものの画面を図16に示す。

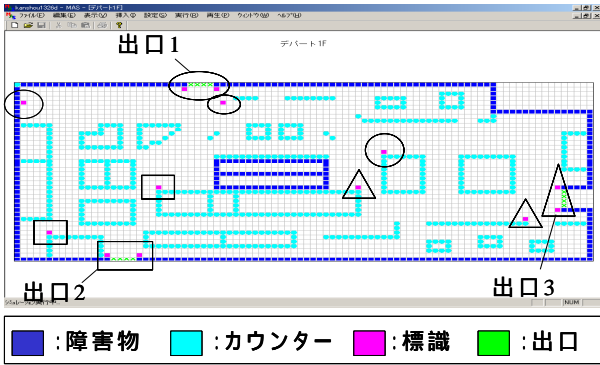


図 16. 対象地域 (標識数 13)

- ・ で囲まれた標識、出口を視野範囲に見ついたら、「出口 1」を目的地に設定する。
- ・ で囲まれた標識、出口を視野範囲に見ついたら、「出口 2」を目的地に設定する。
- ・ で囲まれた標識、出口を視野範囲に見ついたら、「出口 3」を目的地に設定する。

4.2 シミュレーションの前提条件

避難者の見える“視野範囲”と、視野内の歩行者を追従する人の割合を変化させる“追従型割合”を変化させ、その評価を行った。シミュレーションのシナリオとしては、避難者総数 100 人を片寄らないように画面全体に配置し、シミュレーション開始時から、避難者は、一斉に出口を探して避難するものとする。シミュレーションを評価する値として「残留避難者数」を選んだ。本モデルでの避難完了とは、モデル内にある出口に到達することを意味し、ゆえに「残留避難者数」は、まだ出口に到達していない避難者の人数とする。1 ステップは、0.5 秒に設定した。

4.3 シミュレーションケース

シナリオ 1、2、3 より、「避難誘導による効果」を見るために、高齢者・電動車イス使用者の追従する人の割合を変化させたシナリオを行った。シナリオ 1、4、5 より、「標識による効果」を見るために、標識の数を変化させたシナリオを行った。(図 17 参照)

シナリオ	高齢者、電動車イス者の人の構成	標識数
シナリオ1	自分で出口を探す人半分、追従する人半分	基準
シナリオ2	全員追従する人	基準
シナリオ3	全員自分で出口を探す人	基準
シナリオ4	自分で出口を探す人半分、追従する人半分	増加
シナリオ5	自分で出口を探す人半分、追従する人半分	減少

図 17. シナリオの想定している状況設定

ここで、シナリオ 4 の標識数を増加させた対象地域を図 18 に示す。(増やした標識は赤で囲んでいる。)シナリオ 5 の標識数を減少させた対象地

域は図 19 に示す。

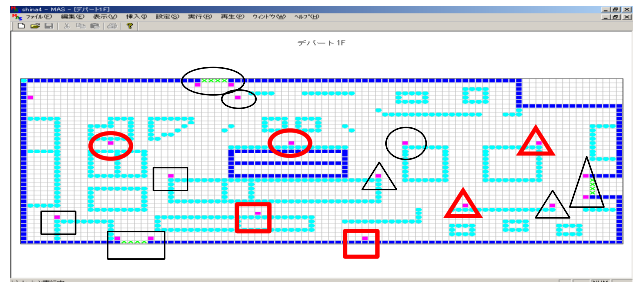


図 18. シナリオ 4 の対象地域 (標識数 19)

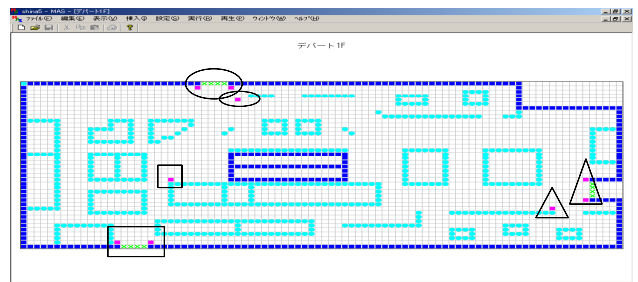


図 19. シナリオ 5 の対象地域 (標識数 9)

以下にシナリオ 1 のシミュレーション開始時から 120 ステップまでの様子を示す。

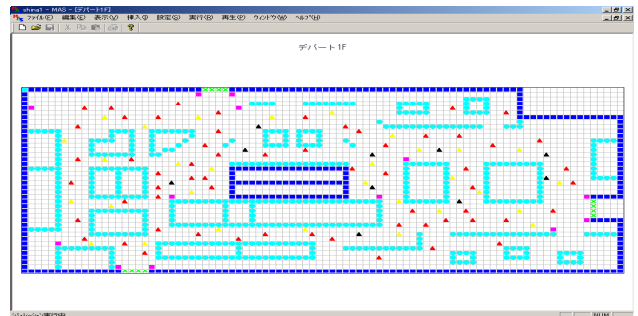


図 20. シミュレーション開始時の状態

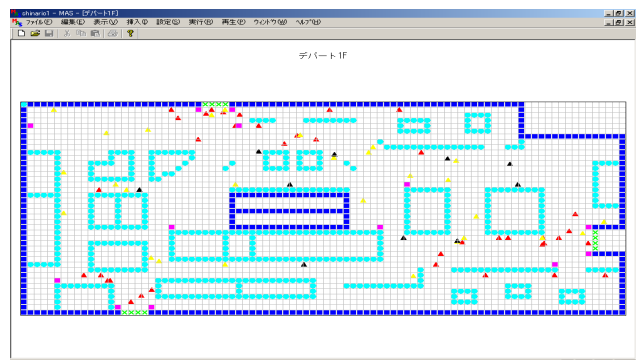


図 21. 15 ステップ後

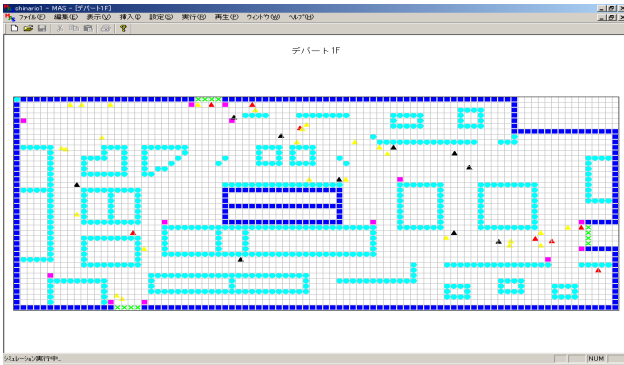


図 22. 30 ステップ後

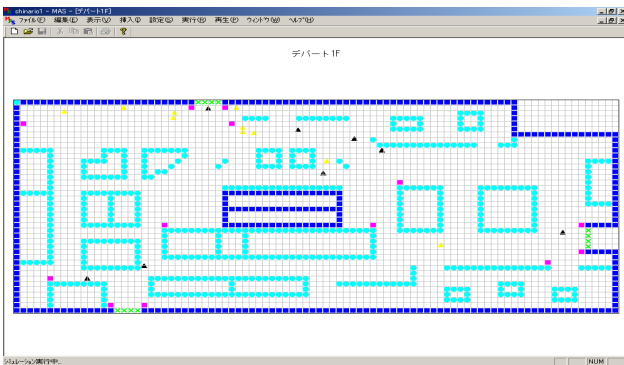


図 23. 60 ステップ後

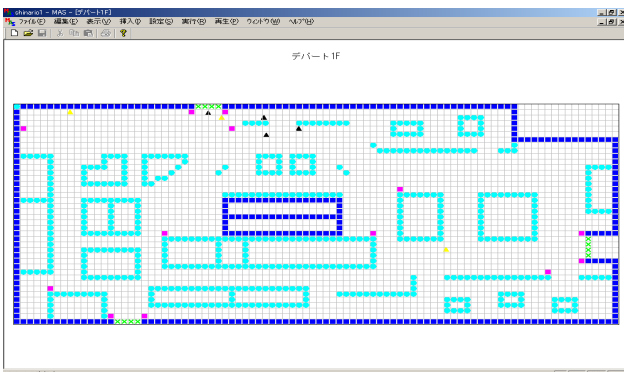


図 24. 90 ステップ後

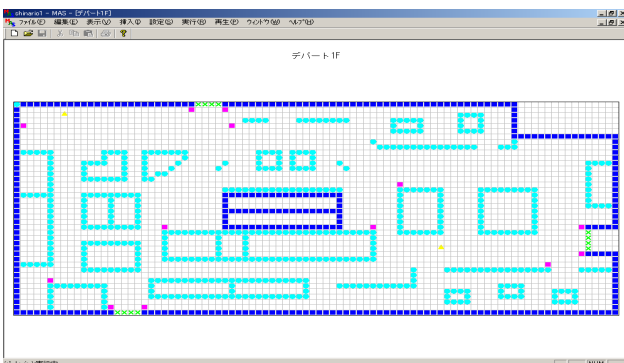


図 25. 120 ステップ後

4.4 シミュレーション結果

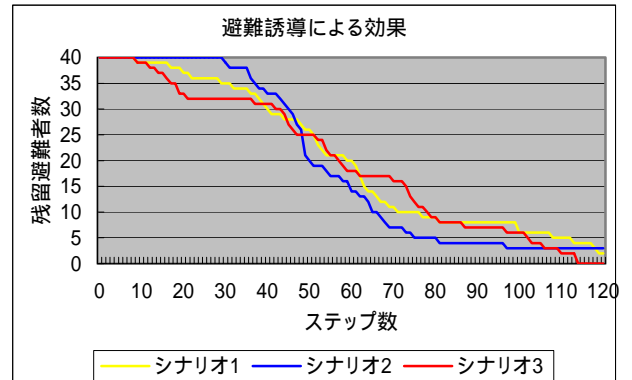


図 26. シナリオ 1、2、3 の残留避難者数の推移

シナリオ 1、2、3 の高齢者と電動車イス使用者の残留避難者数の推移を図 26 に示す。シナリオ 2(高齢者・電動車イス使用者の全員が若年者を追従する場合)を見ると、30 ステップ位から急に避難して 80 ステップ位までは他のシナリオよりも早く避難していることがこのグラフから読み取れる。これは、視野範囲内から若年者を追従した結果、出口付近まで連れて行ってもらい、回りに若年者がいなくなったら、一斉に高齢者・電動車イス使用者は、避難することが原因として考えられる。しかし、その後のステップは横ばい状態であり、120 ステップまでに全員避難完了していない。この原因を下で説明する。

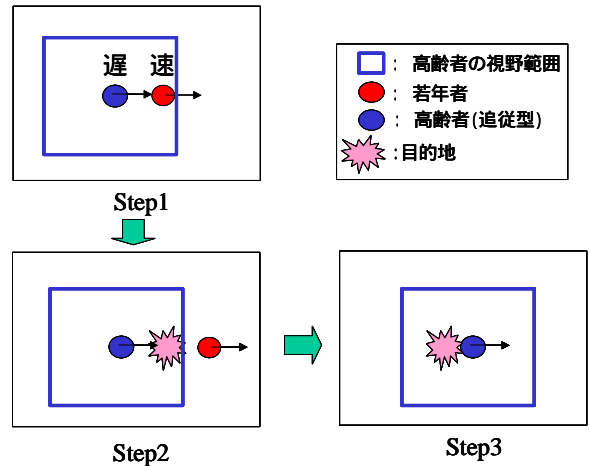


図 27. 高齢者が若年者を見失う例

上図 27 の Step1 で、高齢者は若年者を追従するが、高齢者と若年者に速度差が存在するため、Step2 で、若年者は高齢者の視野範囲外に出てしまい若年者の位置を認識できなくなってしまい、目的地を設定したままになってしまう。避難者の移動アルゴリズムにより、Step3 で、目的地を歩き過ぎてしまい、すぐに目的地には戻らないようになっているため、そのまま目的地を設定したまま移動することが避難完了できない理由と考えられる。

シナリオ3（高齢者・電動車イス使用者の全員が自分で出口を探す場合）は、全体的になだらかな曲線になっており、時間はかかるが120ステップまでに全員が避難完了しているのが分かる。

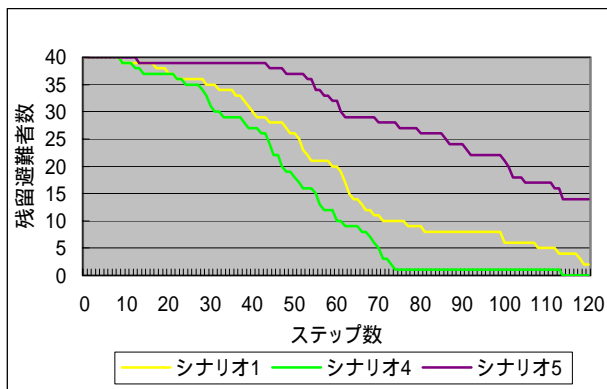


図 28. シナリオ 1、4、5 の残留避難者数の推移

シナリオ 1、4、5 の高齢者と電動車イス使用者の残留避難者数の推移を図 28 に示す。この結果を見ると標識の数が多いシナリオ 4 は 80 ステップ位で避難完了しているのに対して、標識の数が少ないシナリオ 5 では 120 ステップ経過してもまだ、避難完了していない。

5. 結論と今後の課題について

本研究では、KK-MAS を用いて、閉鎖された空間における避難行動シミュレーションモデルを構築した。作成したシミュレータにおいて、本研究の特徴である歩行速度、自律型・追従型、視野範囲の属性を付加したエージェントを作成できたと考える。この避難行動シミュレーションモデルを用いて、シミュレーションを行った結果、避難時に円滑に避難を完了するためには、以下の事柄を実行すべきである。

- (1) 避難時には、回りの状況を的確に判断し、出口を知っている人に追従した方が早く出口に到達できる。
- (2) 出口を示す標識を適切な位置に設置することで視界が悪い高齢者の避難時間を短縮させることができる。

(1)として、避難開始時に近くに若年者が存在した時は、若年者を追従することができ、早いステップで出口に到達し避難することができる。シナリオ2より分かった。また、シナリオ3より自律型の場合、必ず出口を見つけて避難することができるが、時間がかかってしまう場合がある。これは、災害時において一刻も早くその場を離れなければならない状況においては致命的な事であると考える。したがって、災害時の避難においては、安全な非常口を認知していない場合、周りの

避難者の状況を的確に認知し、出口を知っている人に追従して出口に向かうことが一番早く避難できるといえる。その際、気をつける点は、追従する人を見失わないことである。もし、自分の歩行速度より相手の歩行速度が速い場合は、相手に声をかける、出口を大声で教えてもらうなどの対策を行うべきである。

(2)として、現在の標識の設置位置が視界の悪い高齢者や電動車イス使用者の場合には、標識数を増やすことにより、避難時間を短縮させることができることがシナリオ4より分かった。また、標識数を減らしたシナリオ5により、適切な位置に標識を設置することの重要性を示すことが出来たと考える。

今後の課題として、本研究では、仮想的な空間を対象地域にしたが、これをできるだけ現実的なものへと適応できるようにすることである。具体的には、本研究では、店員を含めていないが店員をカウンター内に配置し、災害時には避難者を避難誘導させる等である。

参考文献

- [1] 清野純史他2名「個別要素法を用いた被災時の非難行動シミュレーション」、土木学会論文集、pp.365-378、1998
- [2] 瀧本 浩一他2名「防災要員と避難者の間の情報の伝達を考慮に入れた避難行動シミュレーション」、土木学会論文集、pp.257-266、1996
- [3] 近田 康夫他2名「CAを用いた歩行シミュレーションモデルの構築」、土木情報システム論文集 vol.9、pp19-30、2000
- [4] ジョン・J・フルーイン著、長島 正充訳「歩行者の空間」、鹿島出版会、1974
- [5] 建築・都市計画のためのモデル分析の手法 日本建築学会編、井上書院
- [6] 服部 正太他3名「遊園地における混雑情報と入場者の行動」、構造計画研究所ワーキングペーパーNo.12、2000
- [7] 三宅 秀幸「繁華地区における避難行動シミュレーションモデル」、東京理科大学修士論文、2001
- [8] 位寄 和久「避難行動モデルに関する研究」、日本建築学会論文報告集、pp.125-131、1983
- [9] 横山 秀志他3名「迷路実験による緊急時の人間行動特性」、土木学会論文集、pp.107-115、1992
- [10] Mordechai Haklay, David O' Sullivan, "So go down: simulating pedestrian movement in town centers" Environment and Planning B: Planning design 2001, volume 28, pages343-359