

2009 年度
芝浦工業大学 システム工学部
電子情報システム学科

総合研究論文

避難者による避難補助について **Shelter Assistance by Evacuee in Disasters**

P06065

たかはし ひでと
高橋 秀斗

指導教員：相場亮教授

概要

日本は地震や火山活動がといった自然災害が非常に多い国であり、その被害者もまた多い。しかし、自然災害には事前の予測や対策が難しく、平常時に実験を行うことができない。そのため、現在シミュレーションによる被害規模や危険区域の予測、や効率的な避難方法の模索等が行われている。

そのシミュレーションに有効な手法として現在マルチエージェントシステムが注目されており、マルチエージェントシステムを用いた数多くの避難シミュレーションが行われている。

しかし、シミュレーションを用いて予測や評価などを行う場合、そのシミュレーションがどの程度現実にもっているかによって得られた結果の信頼性が大きく異なってしまう。

そこで本研究では呼び掛けによる追従要請といった単純な誘導を用いた避難シミュレーションのモデルを構築し、避難者や誘導者の人数、誘導者の誘導範囲といったパラメータを変化させつつ実験を行った。

実験を行った結果、避難者の人数や誘導範囲が特に影響を与えており、その中でも誘導範囲を 1 マスに設定した際は誘導者数を 2 倍にするよりも、誘導範囲を 2 マスにした方が避難効率が上昇したことや、誘導者が存在しない状況では視野範囲が広くなると避難成功者の割合が低下することなど、設定するパラメータがどの程度シミュレーションに影響を与えるのかをいくつか確認し、今後の避難シミュレーションを行う際の基礎となるデータを取ることができた。

目次

1 はじめに	1
2 代表的な災害対策研究	3
3 マルチエージェントシステム	5
3.1 エージェント	5
3.2 マルチエージェントシステム	6
3.2.1 マルチエージェントシステムの利点	8
3.2.2 マルチエージェントシステムの適用分野	8
4. 既存のマルチエージェントを用いた避難シミュレーション	12
4.2 京都大学, 中西らによる市民参加による避難シミュレーションに向けて	12
4.2.1 概要・目的	12
4.2.2 避難シミュレータ FreeWalk/Q	12
4.2.3 群集歩行の記録と分析	13
4.2.4 避難誘導システム	13
4.3 石橋らによるエージェントモデルによる災害時避難行動シミュレーションの試み	14
4.3.1 概要・目的	14
4.3.2 行動モデル	14
4.3.3 モデルの適用地域	14
4.3.4 実験内容	15
5. 提案手法	16
5.1 従来研究の問題点と解決法	16
5.2 マルチエージェント・シミュレータ artisoc について	16
5.3 実験環境	17
5.3.1 対象空間の設定	17
5.3.2 エージェントの避難行動について	17
5.3.3 各エージェントの設定	19
5.4 実験内容	21
5.4.1 シミュレーションの終了条件	22
5.4.2 評価方法	22
6 実験の結果と分析	24
7 結論	29
謝辞	31
文献目録	32

1 はじめに

我が国は4つの大陸プレートの関係する位置にあり，地震，津波，火山活動といった自然災害が非常に多い．気象庁の統計によると，2007 度の 1 年間で日本国内では震度 3 以上の地震が表 1.1 に示すように年間 124 回起こっており，約 3 日に一度の割合で地震が起きている [1]．その中には表 1.2 に示すように大きな被害を出したものもある．

表 1.1：2007 年度に日本国内で発生した震度 3 以上の地震

震度	3	4	5 弱	5 強	6 弱	6 強	7
発生回数	92	28	1	1	1	1	0

このように地震は非常に多く起こっており，地震や火山活動は地球の仕組みに関連する自然災害であることから，昔から多くの被害を与えてきた．気象庁により集計された明治以降の 100 名以上の死者・行方不明者を出した地震・津波の中でも特に大きな被害を出したものを表 2 に示す．

表 1.2：日本国内で過去に起こった大地震

発生年	地震名	死者・行方不明者
明治 24(1891)年	濃尾	死者 7,273
明治 29 (1896) 年	明治三陸地震	死者 21,959
大正 12(1923)年	関東大震災	死・不明 10 万 5 千余
昭和 2(1927)年	北丹後地震	死者 2,925
昭和 8(1933)年	昭和三陸地震	死・不明 3,064
昭和 18(1943)年	鳥取地震	死者 1,083
昭和 19(1944)年	東南海地震	死・不明 1,223
昭和 20(1945)年	三河地震	死者 2,306
昭和 21(1946)年	南海地震	死者 1,330
昭和 23(1948)年	福井地震	死者 3,769
平成 7(1995)年	阪神・淡路大震災	死者 6434 不明 3

また表 1.2 には記載されていないものの、平成 16(2004)年には死者 68 名、負傷者 4805 名の被害を出した新潟県中越地震も起こっており、現在も地震による被害者は非常に多いと言える。

ただ頻度が高いだけでなく、大きな被害を出している地震に対して有効な対策を立てることは急務であり、日本では地震に対する研究を 1875 年(明治 8 年)に内務省地理局によって正式に地震の観測が開始され始め、1882 年(明治 25 年)の濃尾地震や、1923 年(大正 12 年)の関東大震災の被害を受けて住宅の耐震計算の義務化など、地震対策が行われてきている。他にも災害に対して事後対策だけでなく、事前に正しい知識を与えておくことや、避難訓練を行うなど、災害が起こった際の事を想定して事前に備えるなどの対策も行われている。しかし自然災害には発生タイミングや規模、それによって生じる二次災害など予想が難しいなどの問題点があり、実際に起こってみなければわからない部分が多いというのが現状である。

そのため、コンピュータ上で仮想的に災害時の状況を作り出し、その被害を予測することで、災害が起こった際の危険区域の割り出しや、効率的な避難方法の提示等が行われている。そのための有効な手法としてマルチエージェントを用いたシミュレーションが注目されている。具体的な例としては、地震発生後に襲来する津波の襲来予想地域をシミュレーションによって推定するものや、介護施設における火災を想定し、昼夜の

しかし、コンピュータ上で現実の状況を再現する場合、状況設定や、モデル構築が現実と異なっているかどうかで、シミュレーションから得られた予測結果の信頼性が大きく変化してしまう。そのため、構築するモデルをどれだけ現実のものへと近づけることができるかがシミュレーションにとって重要であると言える。

本研究ではマルチエージェントを利用した、屋外における地震発生からの津波避難を再現したシミュレーションモデルを構築する。過度な情報伝達を排除した上で避難シミュレーションを行い、現実的な状況設定について検討していくことでシミュレーションの精度を向上させ、新たな避難方法が考案された際にその有効性を検証するための十分な信頼性を持たせることを目的とする。

本論文では第 2 章で代表的な災害対策を紹介し、現在の災害対策の中でのシミュレーションの位置付を明確にし、第 3 章でマルチエージェントについて説明する。第 4 章ではマルチエージェントを用いた避難シミュレーションを紹介し、その上で第 5 章では本研究で提案する手法を述べ、実験方法と評価方法を述べる。以降の章では実験から得られた結果を基に第 6 章で考察を行い、第 7 章で最終的な結論を述べる。

2 代表的な災害対策研究

本章では日本の代表的な災害対策として文部科学省によって行われた国家プロジェクト「大都市大震災軽減化特別プロジェクト」 [2]について紹介する。

大都市大震災軽減化特別プロジェクトは、首都圏（南関東）や京阪神などの大都市圏において阪神・淡路大震災級の被害をもたらす大地震が発生した際の人的・物的被害を大幅に軽減することを目指した研究開発である。地震防災対策に関する科学的・技術的基盤を確立することを目的とし、2002年から2006年までの5年間行われた。

予算としては毎年約30億円が投入され、投資総額は143億円となっている。

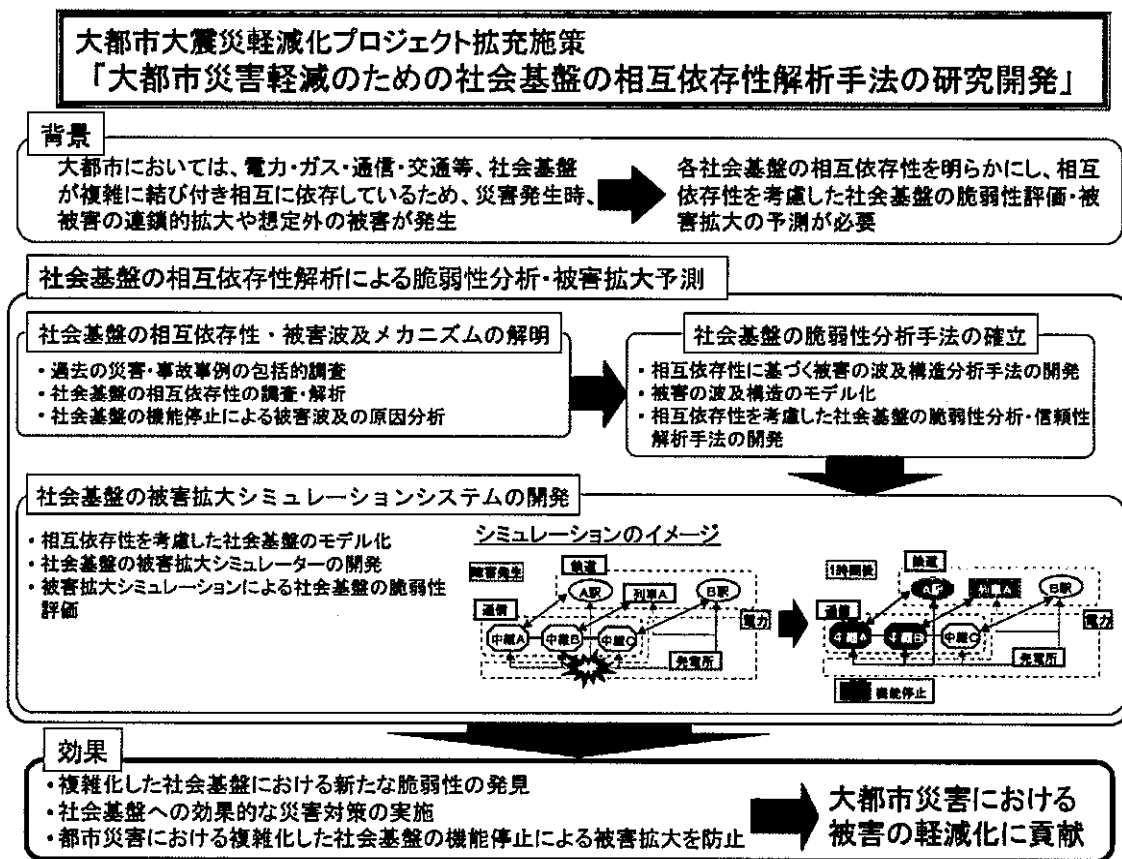


図 2.1：大都市大地震災軽減化プロジェクト概要

このプロジェクトにおいて検討されたものは大きく区分して以下の4つに分類される。

- ・地震動(強い揺れ)の予測「大都市圏地殻構造調査研究」

中核機関:東京大学地震研究所 [3]・京都大学防災研究所 [4]

独立行政法人防災科学技術研究所 [5]

地震の予測を行うことを目的とし、発生する強震動を予測するために、地表近傍の地盤の振動特性や強震動がどのように生成され、地殻上部をどのように伝搬するのかに対して研究・調査を行った。

- ・耐震性の飛躍的向上「震動台活用による耐震性向上研究」

中核機関:独立行政法人防災科学技術研究所 [5]

地震に対して倒壊しない建築物の建築のために、震動台や震動実験専用シミュレータを活用(既存データの活用を含む)して耐震に関する実験・研究を行い、構造物の耐震性の飛躍的向上を図った。またこのプロジェクトでは鉄筋コンクリート建物、地盤・基礎および木造建物を重要課題として取り上げている。

- ・被災者救助等の災害対応戦略の最適化「災害対応戦略研究」

中核機関:独立行政法人防災科学技術研究所 [5]・京都大学防災研究所 [4]

非営利活動法人国際レスキューシステム研究機構

災害が実際に発生した場合を想定し、災害時の被害を軽減するための総合的な防災情報システムや、大都市の特性を反映した災害シミュレーション、レスキューロボットの基礎技術の研究等を行った。

- ・地震防災対策への反映

中核機関:独立行政法人防災科学技術研究所 [5]

上記の研究成果を災害対策へ反映することを目的とし、単純に法律に組み込むだけでなく、シンポジウムなどを通して広く理解してもらうために活動した。

このように国家規模のプロジェクトにおいても、現在の災害対策では避難訓練や、耐震性の向上だけでなく、シミュレーションによる災害時の被害予測、被害拡大の原因究明が行われている。そのシミュレーションにはマルチエージェントシステムも利用されており、現在の災害対策の一つとして大変重要な分野であると言える。

3 マルチエージェントシステム

本章ではマルチエージェントシステムを構成するエージェントと、その集合体であるマルチエージェントシステムについて説明する。

3.1 エージェント

エージェント(agent)とは代理人などと訳されるように、一般的な意味では自分の代わりに何かを行ってくれるもののことをいう。人工知能においてはセンサを用いて環境を知覚し、その情報に基づいて意思決定を行い、行動するものとされる [6]。シミュレーションを行う際にはそこで行動する人間の役割を担うものであり、以下の4つの概念を持つとされる。

永続性	永続的に起動される
自律性	意思決定を自分の意思で行う（自律行動）
社会性	他のエージェントと相互作用する（協調行動）
反応性	周囲の環境に適切に反応する（学習行動）

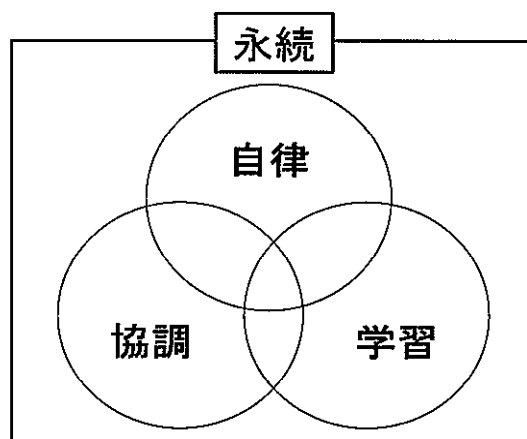


図 3.1 : エージェントの概念

- ・永続性

そのエージェントが常時起動された状態であり、外部からの要求によって行動するのではなく何らかの行動を起こす時期を自身で判断できること。例えるならば脳が覚醒状態にあること、起きていることに相当する。

- ・自律性

そのエージェントが自律的に思考し、行動することの事で実行すべき行動の選択、

優先順位付け、意思決定を人間の命令無しで行うこと。

- ・社会性

そのエージェントが周囲の別のエージェントと通信を行うことができる事で、状況によって周囲のエージェントと協調し、一つの作業を共同で行うことや、他のエージェントの行っている作業を妨害すること。例えるなら出された課題を友人と一緒にやることで効率よく終わらせたり、友人が課題に取り組んでいるそばで遊んで妨害したりするといったことに相当する。

- ・反応性

そのエージェントが周囲の環境を知覚し、それに基づいて行動を起こすことができる事で、環境が変化した場合にはさらにその変化に適切に反応し、行動できること。例えるなら気温が低くなったら厚着になり、気温が高くなれば薄着になるといったことに相当する。

これらの概念を組み合わせることでエージェントに与えることによって人間が思考に基づいて行動しているかのように振る舞わせることができる。

3.2 マルチエージェントシステム

エージェントが複数集まって構成するシステムをマルチエージェントシステムという。マルチエージェントシステムでは個々のエージェントは周囲のエージェントと協調するなど、周囲の環境に合わせて自分の目標達成のために自律的に行動し、問題解決を行う。

マルチエージェントシステムとは与えられた問題を解決するために、複数のエージェントに異なった目標や思考を与えた上で、知的な集団行動を生み出すシステムである。個々のエージェントの能力、性質、機能が重視され、自律的なエージェント間の相互作用に着眼している。

それを用いたマルチエージェントシミュレーションは、コンピュータならびにネットワーク技術の急速な発展を背景に、従来人工知能分野で研究が行われてきた人間の知能モデルをシミュレーションに持ち込むことにより、特に 90 年代以降急速に発展してきた。

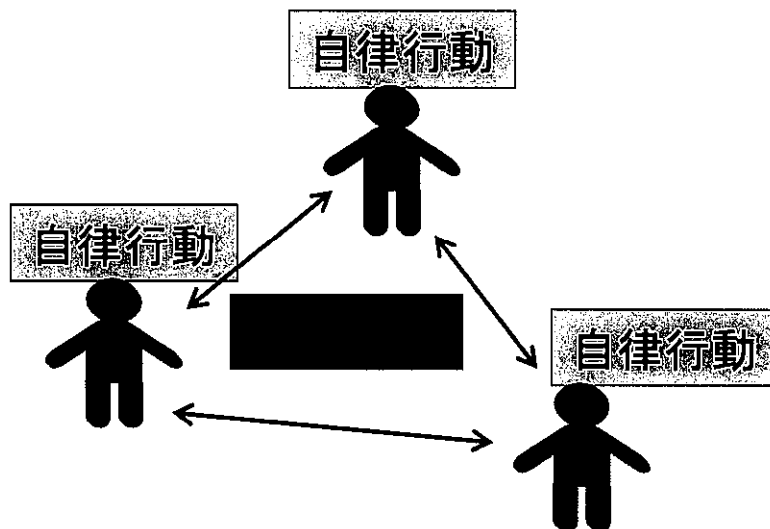


図 2.2 : マルチエージェントシステム

以下においてマルチエージェントシステムの代表的な問題である追跡問題を例としてその特徴を説明する。追跡問題とはハンターが獲物を追跡・捕獲する問題でハンター・獲物の両方ともそれぞれの状態を知覚し、ハンターならば獲物を捕獲するために、獲物ならばハンターから逃げるための行動を取る。鬼ごっこと同じ原理の行動である。

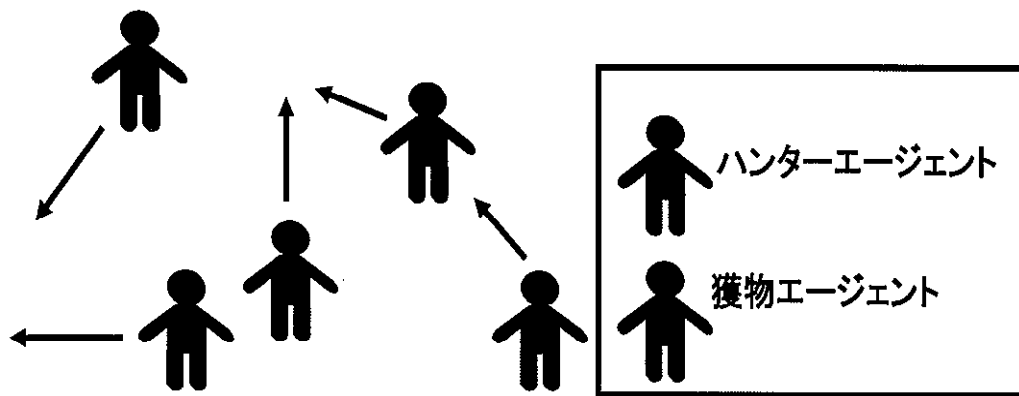


図 3.3 : 追従問題

上記の図のようにハンターは単純に近くの獲物を追うだけでなく周囲のハンターの状態によっては、協力して一体の獲物を追い詰めて捕まえるという行動を取り、また獲物もハンターの移動方向を知覚することによって進行方向を変更し、なるべくハンターから距離を取るよう行動するといったことが再現できる。各エージェントは前述のエージェントの特徴を持ち、その上で獲物を追う、ハンターから逃げる、他のハンターから逃げる獲物に先回りするといった相互作用によって全体の状態が決定されていく。

このように、マルチエージェントシステムは各エージェントが自己の目的実現のため

に行動しながらも、状況に応じて周囲のエージェントと協調し、その相互作用によってシミュレーション全体の状態が変化していくという特徴を持っている。

3.2.1 マルチエージェントシステムの利点

マルチエージェントシステムの利点としては以下のものが挙げられる [6]。

- ・問題解決能力の向上

1 体のエージェントでは解決が困難な問題でも複数のエージェントが集まり、協調を行うことによって、解決が可能になる場合がある。また多数のエージェントが協調することで効率的に作業を行うことが可能である。

- ・柔軟性

個々のエージェントが自律行動を行い独立しているため、エージェントの削除や、追加といった機能の拡張と削除が容易であり、問題の変更に対しても柔軟に対応することが可能である。

- ・頑強性

一部のエージェントのプログラムがバグ等によって機能を停止してしまっても他のエージェントがその代わりを果たすことで、シミュレーションの中断という最悪の状況を防ぐことが可能である。他に信頼性、安定性、対故障性、ロバスト性、等の言葉で表わされる。

3.2.2 マルチエージェントシステムの適用分野

マルチエージェントシステムの応用領域は多岐にわたり、以下にその代表的な分野として、交通流・人流、金融市場、災害・防災、デジタルシティを挙げる [7]。

- ・交通流・人流

車や人などの流れをシミュレーションは、従来連続な流体モデルを用いて物理場として解析されてきたが、近年では人や車両の状況認識・判断能力をモデルに取り入れた交通流・人流のシミュレーションが実用化されている。これらはセルオートマトンの分野で研究されているものの、エージェントの認識、判断能力をモデル化し、エージェントの集団を扱う点においては一種のマルチエージェントとみなすことができる。

具体的な例としては車両の流れのシミュレーションを渋滞の原因調査 [8]、駐車場設計、

バスレーンの設計に利用した研究，歩行者のパニックや避難に関する研究が行われており，従来のモデルでは解析できなかった様々な現象に対する理論的な解析が行われている。

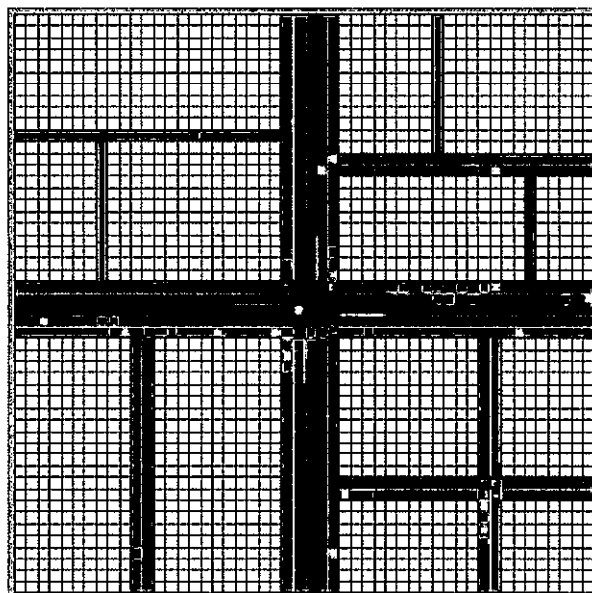


図 3.3：渋滞シミュレーション

・金融市場 [7]

金融商品の価格は時々刻々と変化するもので，市場参加者の取引の結果として形成されるものであり，参加者の取る戦略によっても市場に影響が出るものである。

このような市場はマルチエージェントとしての性質を備えており，マルチエージェントを用いて市場の性質を分析する人工市場とよばれる研究分野が存在する。

具体例としては地球温暖化ガス排出抑制のため，現在各国で導入が検討・実装されている，「地球温暖化ガス排出権取引市場」に関して，その有効性の検証や市場制度の設計をマルチエージェントシミュレーションで行う研究などがある。

また金融市場では空間的な要素を扱う必要がなく，比較的容易に実装が可能であるため，現在多くのシミュレーションが行われている。

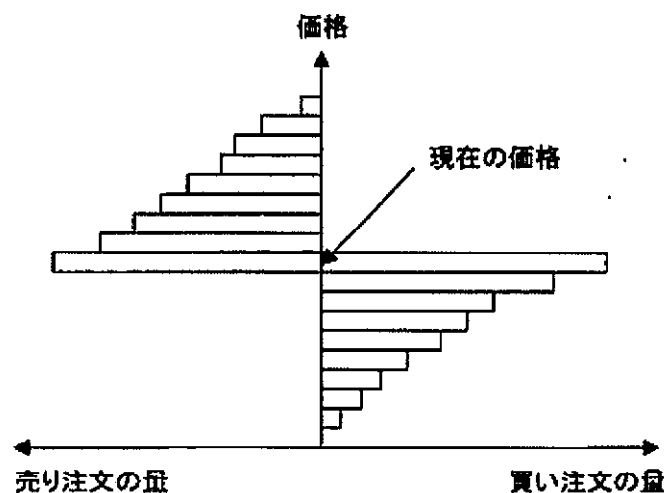


図 3.4：金融市場の状態の表現

・災害、防災 [9]

火事・地震・水害などの災害・防災の分野は、通常時において実験が不可能な領域であり、シミュレーションによる事前の評価・解析の重要性が高い分野である。自然災害・人的災害のシミュレーションはそれぞれの専門分野で長年の蓄積があり、主に物理的な側面のアプローチが中心である。

一方、災害後の救助活動などは、その状況内に存在する人間の行動モデルをモデル化する必要がある、本質的にマルチエージェントシミュレーションが必要とされる研究領域である。今回私が行う実験もこの分野のものであり、数多くのシミュレーションが行われている。

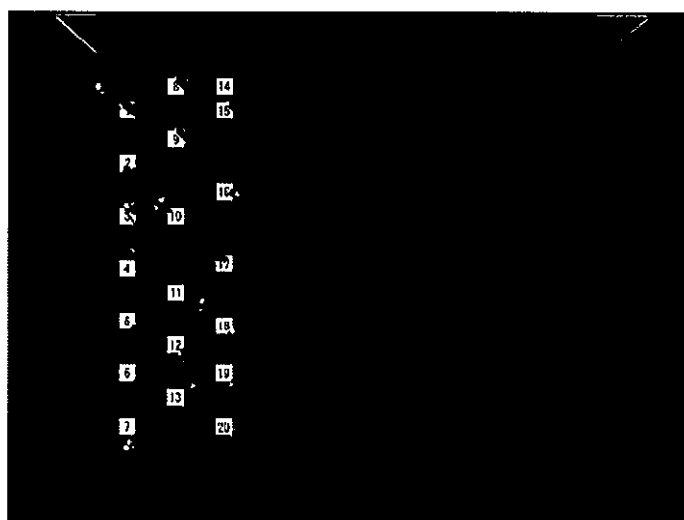


図 3.5：避難シミュレーション

・デジタルシティ [10]

デジタルシティとは、仮想的な都市をネットワーク上で構築し、新たなコミュニティ形成のプラットフォームとするようなプロジェクトである。現在京都・アステルダム・ヘルキシンなど既存の大都市上で、現実の都市と機能を融合し、その機能をさらに拡張するようなデジタルシティの開発が行なわれている。

デジタルシティのそのものはマルチエージェントシミュレーションの直接の応用ではないものの、マルチエージェント技術の一つの目標である、エージェントと人間が物理場も含む環境において高度に統合された一つのシステムとなっている。

デジタルシティの実現により、コンピュータ上での仮想的な空間において避難訓練を実施し、インターネットを経由して市民がそれに参加するといった従来では現実不可能だった社会システムへの応用が行われている。

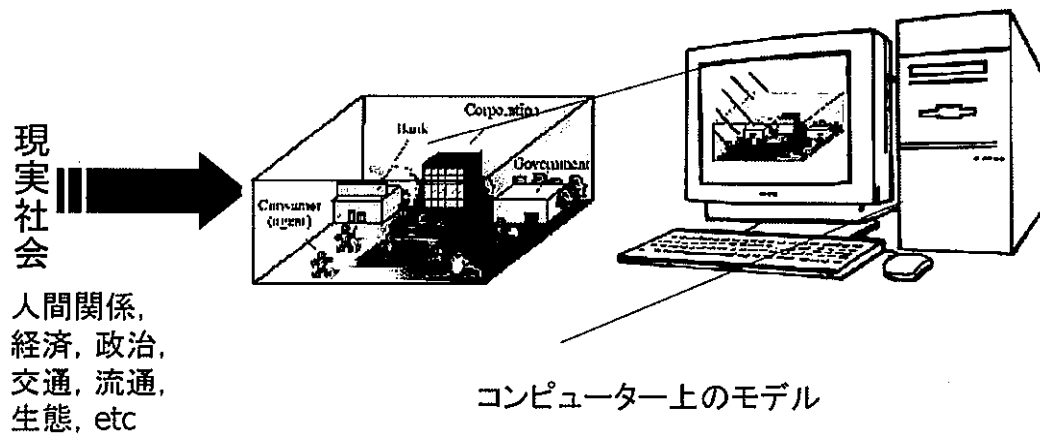


図 3.6 : デジタルシティの概要

4. 既存のマルチエージェントを用いた避難シミュレーション

本章では今までに行われたマルチエージェントを用いた避難シミュレーションの研究事例を紹介する。

4.2 京都大学，中西らによる市民参加による避難シミュレーション

4.2.1 概要・目的

京都大学ではJR 京都駅を舞台とした避難シミュレーションが行われている [9]。この研究では以前から群集行動の研究のために京都駅構内に視覚センサをいくつか設置し、群集の歩行軌跡の記録と天井からの映像の録画を行っている。

この研究は先のシステムを分析用のデータ収集だけでなく、災害発生時に避難誘導に利用するために利用するというものである。

4.2.2 避難シミュレータ FreeWalk/Q

避難シミュレータ FreeWalk/Q は京都大学がこの研究のために開発したオリジナルの避難シミュレータで、単純にシミュレーションによって災害時の状況を予測するだけでなく、マルチエージェントシミュレーションの中の一部のエージェントを人間が操作するアバターに置き換えることによって、実際に人間の行動をシミュレーションに取り込むことを可能にしている。エージェントは音声認識、ジェスチャー機能等を持っており、実際の人間のような動作が可能であり、またアバター参加者も実際の反応としての動作を仮想上で再現することができる。

また京都駅のモデルが完成しており、アバター参加者とエージェントによる仮想京都駅における避難訓練も可能といった防災教育のツールとしても利用可能である

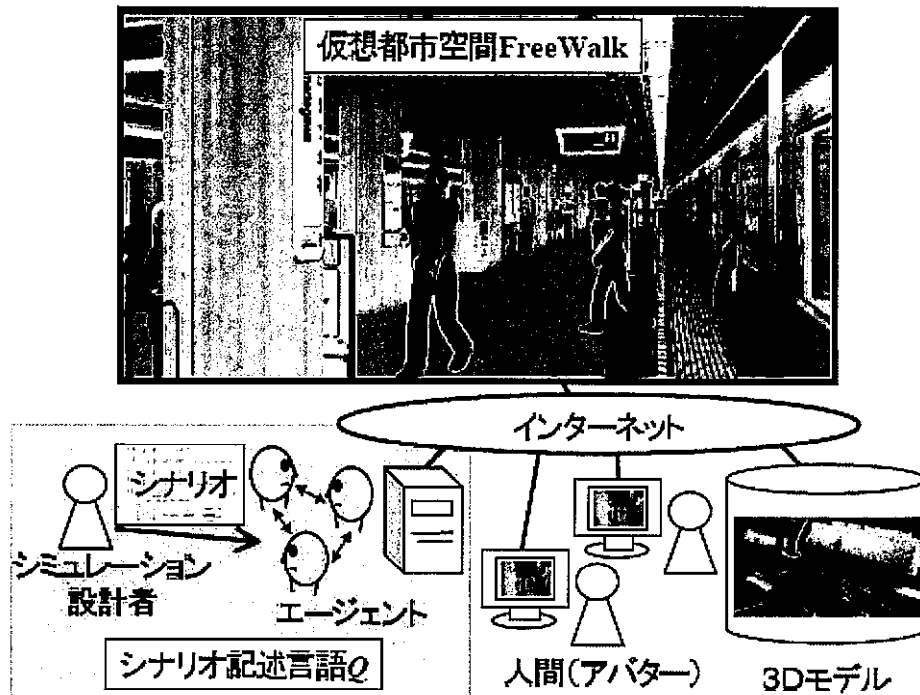


図 4.1：避難シミュレータ FreeWalk/Q

4.2.3 群集歩行の記録と分析

この研究では京都駅に視覚センサ 28 台からなるセンサネットワークを構築し、現実空間の地下鉄の昇降口から改札までの人の流れを観測している。

このセンサネットワークシステムが獲得する追跡結果を基に人間の歩行軌跡を地図と重ね合わせることで人の流れ、すなわち動線を把握することを可能にしている。

動線を解析することによってより現実に近いシミュレーションを仮想空間上で行うことが可能になると考えている。

4.2.4 避難誘導システム

避難シミュレータを事前の防災教育だけでなく、災害発生時の救援システムとしても利用するためのシステムで、以下に記述する超越型コミュニケーションを支援する。

超越型コミュニケーションとは避難状況を超越的に見下ろすことのできるユーザを含むコミュニケーションである。超越的な立場にいるユーザは全体の避難状況を見ながら東低の位置にいる集団のみに避難誘導をアナウンスすることが可能になる。この誘導を受けることで、誘導者は現場に居る場合よりも群集の動きを正確に把握し、集団毎により効率的に避難するための指示を出すことが可能になる。既に京都駅内に設置された視覚センサを用いれば避難状況を把握することは可能であり、今後のデバイスの発達とユビキタス環境の普及によって超越型コミュニケーションは容易になると予想している。

4.3 石橋らによるエージェントモデルによる災害時避難行動シミュレーション

4.3.1 概要・目的

この研究では屋外での津波避難を想定し、それまで考慮されていなかった避難者同士の情報伝達をモデルに組み込むことで、効率的な避難方法を模索し、今後の津波対策に一つの指針を与えることを目的としている [11].

4.3.2 行動モデル

この研究ではエージェントは歩行速度、情報受信能力、情報発信能力、行動決定能力、自律性、依存性、を持つものとし、その構造を以下の図 3 に示す。

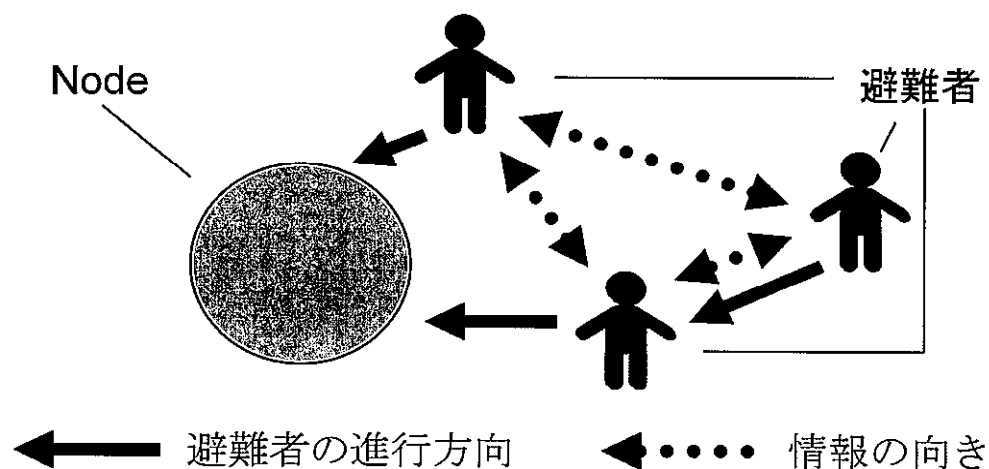


図 4.2：避難者同士の情報通信

単純なモデルとしては、とあるノードが安全であったとして、ノードから直接情報を受け取れないエージェント（避難者でも）周囲のエージェントがそのノードの情報を持っている場合、通信によってそのノードの情報を受け取り、自律的にそのノードへの移動を行う。

4.3.3 モデルの適用地域

この研究のシミュレーションでは神奈川県藤沢市鷺沼海岸 1~2 丁目、片瀬海岸 3 丁目にいたる地域を対象にして、避難モデルの構築を行った。この地域は細い道路が迷路のように走っている部分もあり、避難経路を見失う可能性も多いと考えられるため、適切な誘導が必要な地域である。

4.3.4 実験内容

実験の内容は津波の発生が予想され、避難勧告が発令された直後を想定し、そこからシミュレーションを開始し、避難所をシミュレーション開始時から入場可能にした場合と開始から300秒間は入場不可にした場合の時間経過における避難効率の変化を観測している。

実験の趣旨としては入場不可時間を設けることで移動能力の高いエージェントを津波の到達しない範囲へと避難させ、移動能力の低いエージェントを避難所に収容することで避難効率を上昇させようとしている。

5 提案手法

本章では、現実的な避難シミュレーションを実現するための避難シミュレーションモデルについて説明する。シミュレーションの基本的なモデルとしてマルチエージェントモデルを用いる。

5.1 従来研究の問題点と解決法

4.2 で述べた中西らの研究における問題点として災害時に視覚センサが使えなくなる状況が起こりえることが考えられる。また今回私が想定している屋外での避難では視覚センサが配置されていない場所も多い。

4.3 で述べた石橋らの研究における問題点としては避難者同士の通信方法が全ての情報を一瞬で共有してしまうことや、流通する情報が全て正しいものである事が挙げられる。1 人でも正確な避難場所と避難経路を把握している人間がいれば、その人を中心にその情報が連鎖的に周囲の人間に伝わり、周囲の人間が一瞬で避難所と避難場所を把握する事態が発生してしまう。

本研究ではこの複雑な情報伝達を追従の要請のみとし、単純化することで、実現可能な状態を構築することでこの問題を解決し、シミュレーションの精度を向上させることを狙う。

5.2 マルチエージェント・シミュレータ **artisoc** について

本研究ではマルチエージェントシミュレーションのモデルを構築するためのツールとして、「**artisoc**」を用いる。「**artisoc**」は株式会社日本構造計画研究所の開発した JAVA 環境のソフトである [12]。前身である「KK-MAS」というソフトの「人間同士の相互作用をコンピュータ上で誰もが簡単に再現することができ、ダイナミックに変化する社会現象を生きたまま分析できるマルチエージェント・シミュレータ」というコンセプトを受け継ぎ、デバッグ機能の追加やエージェント関数の拡張が施され開発された。エージェントの座標も格子に囚われず 4 方向だけでなく 360° 進行方向を取ることができる。また日本語に対応したマルチエージェント・シミュレータであり日本では多く利用されている。

「**artisoc**」を利用することでプログラムの核心的な部分を記述するだけでマルチエージェントシミュレーションを実行することができ、グラフや 2 次元マップ上での結果表示が可能など比較的分かりやすいツールとなっており、いくつかの避難シミュレーションにも利用されている。

5.3 実験環境

5.3.1 対象空間の設定

本研究で利用する空間は 100×100 マスの屋外を想定した仮想空間で、通路（白色・通行可能）、建築物（灰色・通行不可能）、避難所（黄色・目的地）誤った避難所（紫色・誤った目的地）で構成されており、避難者は通行可能部分を移動しつつ避難所を目指すものとする。

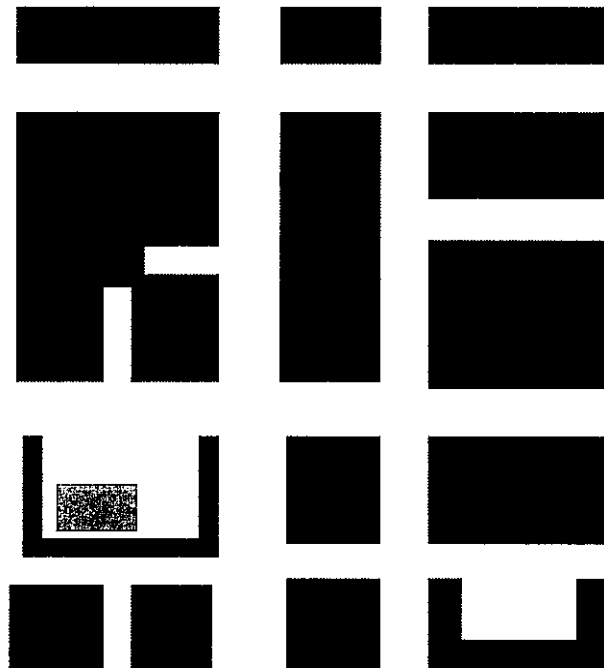


図 5.1：仮想空間

5.3.2 エージェントの避難行動について

本実験では前述の研究の問題であった過剰な情報伝達の部分を単純なやりとりで実現可能な避難行動を行わせ避難シミュレーションを行う。そのための手段として、本研究では避難者間のやりとりは、避難所や避難経路を把握している避難者が他の避難者を誘導によって追従させるというものとする。誘導を認知した避難者は手持ちの情報から避難所に到達可能かどうかを判断し、可能ならば自発的に避難し不可能ならば情報を発信していた避難者に追従し避難所を目指す。

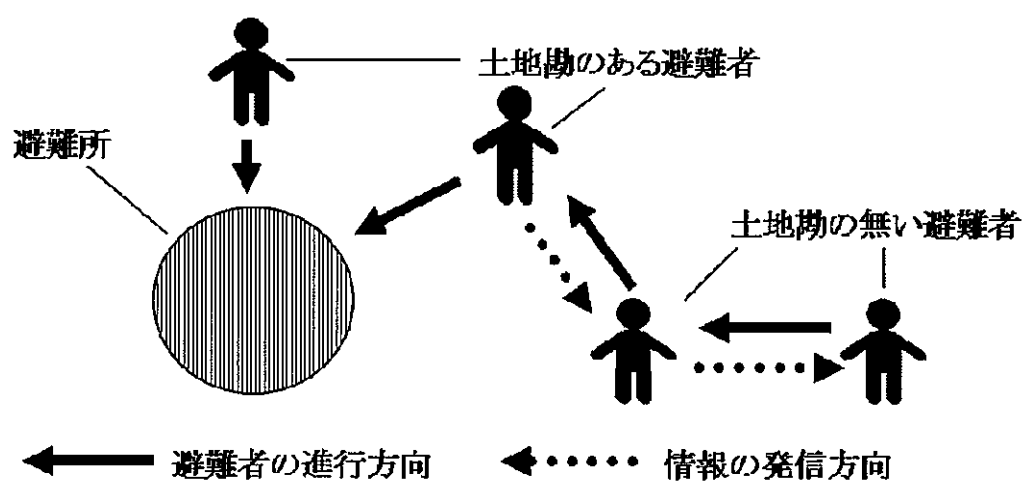


図 5.2：土地勘のある者による避難誘導

5.3.3 各エージェントの設定

本研究では以下のエージェントが存在し、実際に行動する

・避難者エージェント

避難所の位置や経路を把握していない避難者。step 開始時に自分の視野範囲内に他のエージェントが存在するかどうかを確認し、他のエージェントが存在した場合はそのエージェントに向かって移動し、存在しなかった場合は進行方向を左右 30°の範囲からランダムに変更して移動する。また、移動開始前に誘導者や誤誘導者（後述）の誘導範囲に入っていた場合はその誘導に従い進行方向を決定し、歩行速度の分だけ移動する。

また誘導を受けてそれに追従する場合には、周囲に誘導者の存在を知らせ、追従するように呼び掛ける。誘導者と誤誘導者の両方から誘導された場合は誘導者の誘導に従い、誤誘導者に追従を呼び掛ける。

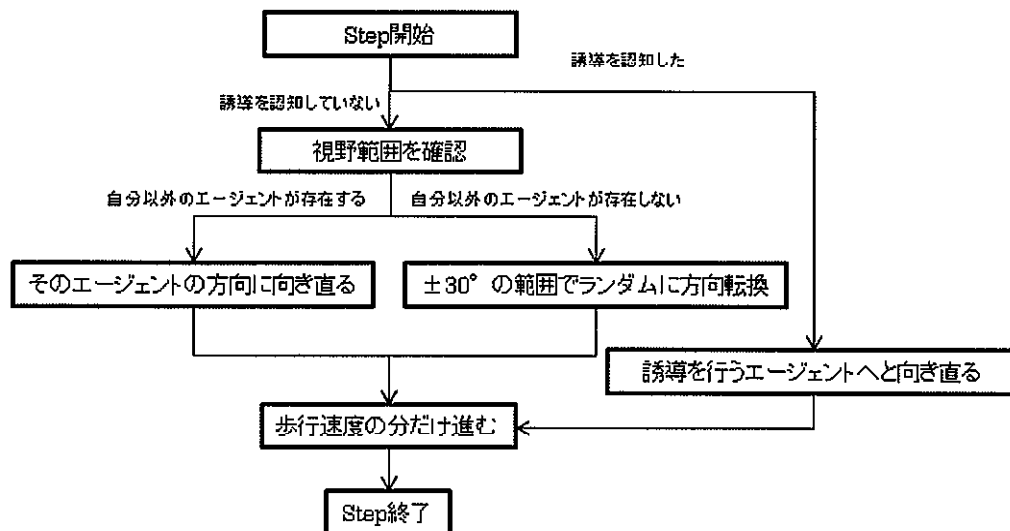


図 5.3：避難者エージェントの行動

・誘導者エージェント

避難所や避難経路を正しく把握している避難者。step 開始時に自分の現在位置と避難所の位置から進行方向を設定する。同時に誘導範囲内に他のエージェントが存在した場合はそのエージェントに自分に追従するように誘導し、歩行速度の分だけ移動する。誤誘導者に誘導された場合は、誤誘導者を自分に追従させ、誘導者同士で誘導し合った場合はお互いに不干渉とし、目的地を目指す。

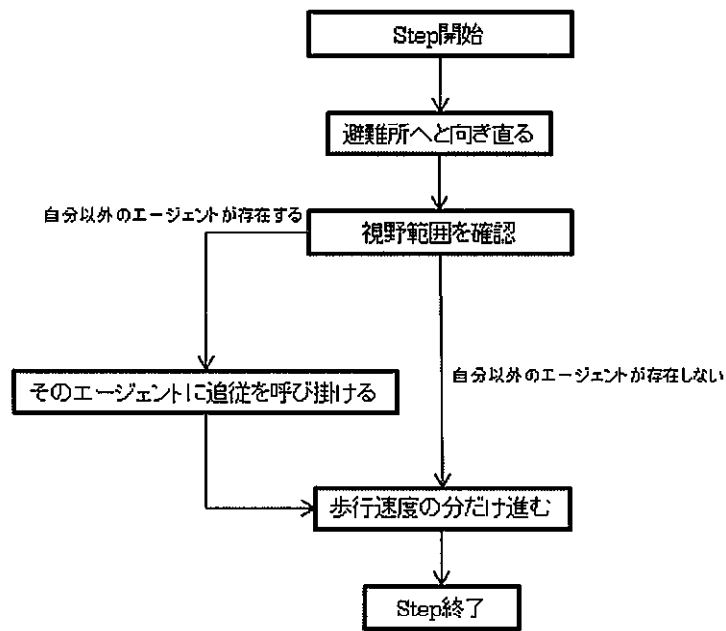


図 5.4：誘導者エージェントの行動

・誤誘導者エージェント

避難所や避難経路を誤って把握している避難者。step 開始時に自分の現在位置と誤った避難所の位置から進行方向を決定する。同時に誘導範囲内に避難者エージェントが存在している場合はそのエージェントを自分に追従するように誘導し、誘導者の誘導範囲に入っていた場合にはその誘導に従い、進行方向を決定し、歩行速度の分だけ移動する。

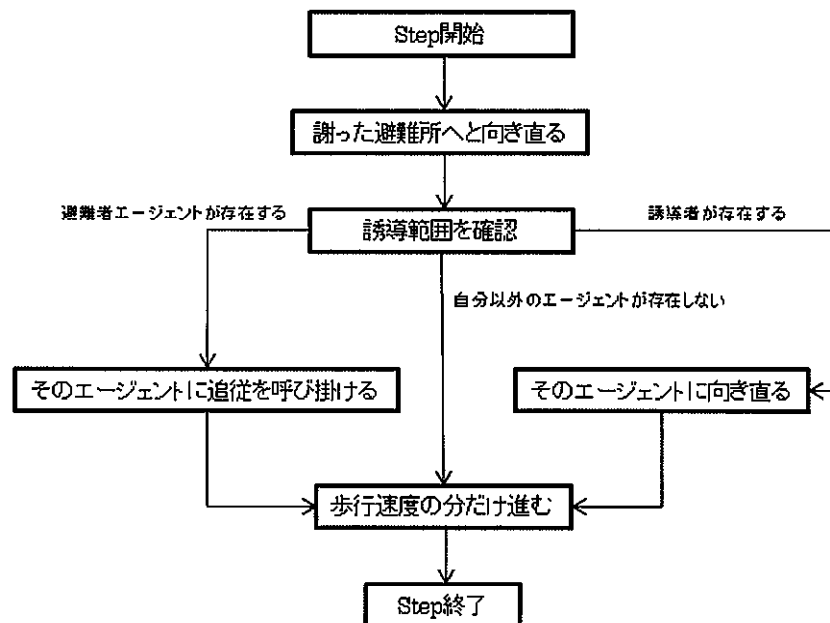


図 5.5：誤誘導者エージェントの行動

各エージェントは毎 step これを繰り返すものとし、空間上の通行可能部分を移動し、目

的地（※）に到達した時点で行動を終了する。

（※）目的地は避難所だけでなく，誤った避難所も含む，誤誘導者と誤誘導者に誘導された避難者が誘導者の誘導を受けずに誤った避難所に到達した場合は，誘導者に誘導されるまで行動を終了したものとみなす。

5.4 実験内容

エージェントの初期配置は構築した仮想空間内の通行可能部分のうち，避難所と誤った避難所を除いた部分にランダムに配置するもとし，各パラメータの値を以下のように変動させながら全 54 通りについてシミュレーションを各 100 回行う。

変動させるパラメータ

全体の人数

case1: 30 人

case2: 40 人

case3: 50 人

視野及び誘導範囲

case1: 可視範囲 2 , 誘導範囲 1

case2: 可視範囲 3 , 誘導範囲 2

case3: 可視範囲 5 , 誘導範囲 3

各エージェントの割合

case1: 全て避難者

case2: 誘導者 5 人 , 他は避難者

case3: 誤誘導者 5 人 , 他は避難者

case4: 誘導者 5 人 , 誤誘導者 5 人 , 他は避難者

case5: 誘導者 10 人 , 誤誘導者 5 人 , 他は避難者

case6: 誘導者 5 人 , 誤誘導者 10 人 , 他は避難者

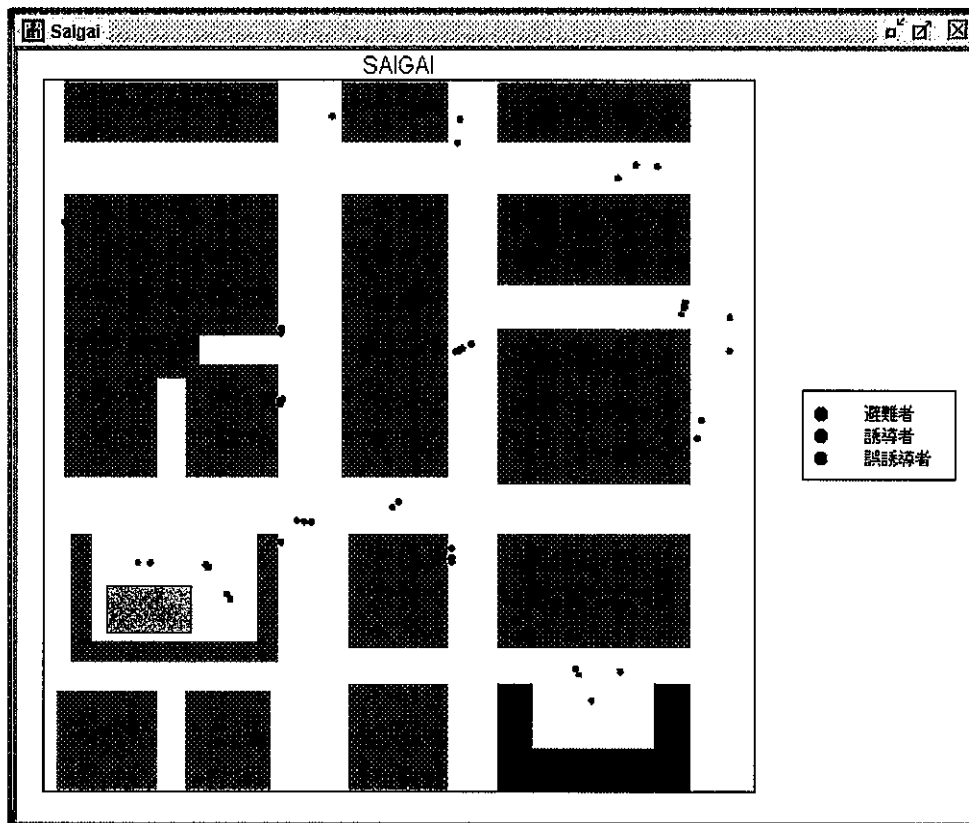


図 5.6 : シミュレーションの実行画面

5.4.1 シミュレーションの終了条件

本実験では全てのエージェントが誤った避難所を含んだ目的地に到達し、行動を終了するか、シミュレーションの開始から 200step が経過した時点でシミュレーションを終了するものとする。

5.4.2 評価方法

評価の対象となる避難成功者の割合は以下の式で表される

$$\frac{\text{Safety}}{(n1 + n2 + n3)}$$

Safety : 避難所に到達したエージェント数

n1 : 避難者エージェント数の総数

n2 : 誘導者エージェント数の総数

n3 : 誤誘導エージェント数の総数

各パラメータを一つずつ 54 通りに変化させ, 得られた 100 回の平均避難成功者の割合から避難成功者の割合の変化を観測し, どのパラメータが避難シミュレーションとどのように結びついているのかを分析する.

6 実験の結果と分析

本章では実験を行った結果のうち代表的なものを考察する。また全結果については付録に掲載する。

6.1 認識範囲による変化

このケースでは全体の人数を 30 人、エージェントの割合を避難者のみに固定し、エージェントの認識範囲を変化させた。

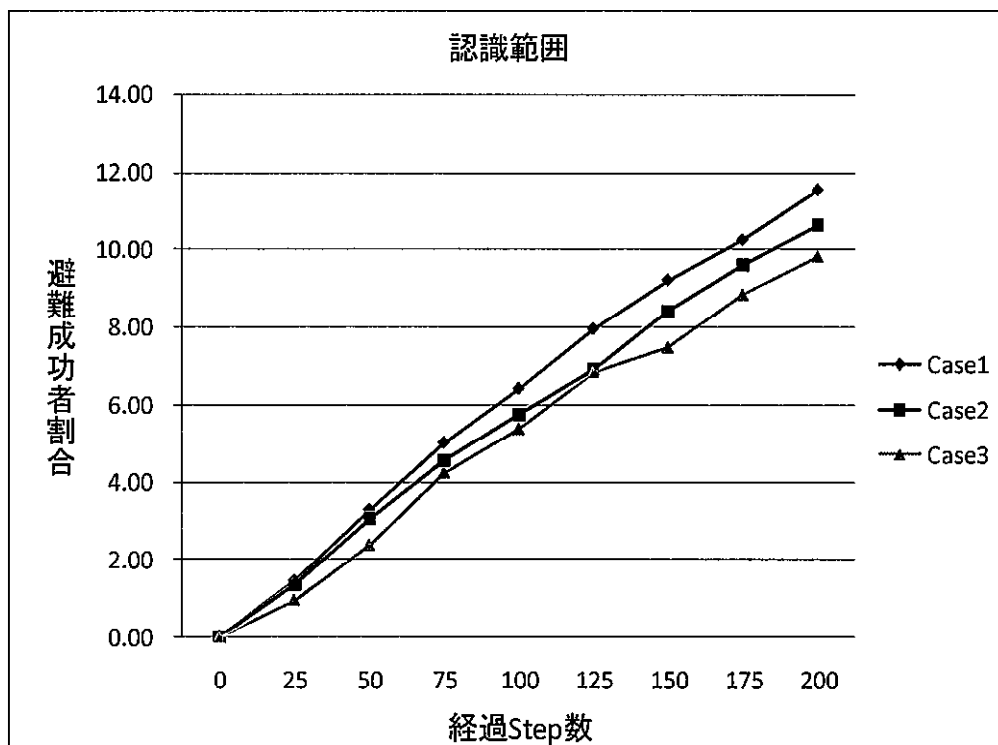


図 6.1：認識範囲による変化

Case1 から順に広い範囲を認識できるようになるが、認識範囲が広がるほど避難成功者が少なくなった。これは避難者エージェントに周囲のエージェントと合流するアルゴリズムが組まれているため、あまり広い範囲を認識しすぎると、大勢のエージェントが合流しようとして一点に集合し、そのまま集団が固まってしまい、動かなくなってしまったことが原因と考えられる。しかし、その差は僅かなものであるため、極端に大きな値を設定しなければそれほど慎重に設定する必要はないと考えられる。

6.2 全体人数による変化

このケースでは誘導者 10 人, 誤誘導者 5 人, 認識範囲 5 マス, 誘導範囲 3 マスで固定し, 全体の人数 (避難者の人数) を変化させた. シミュレーションの結果, 全体人数が 30 人の場合(case1)の避難成功者率と比較して, 全体の人数が 40 人の場合(case2)では避難成功率が向上したのに対して, 全体の人数が 50 人の場合(case3)では避難成功率が低下した.

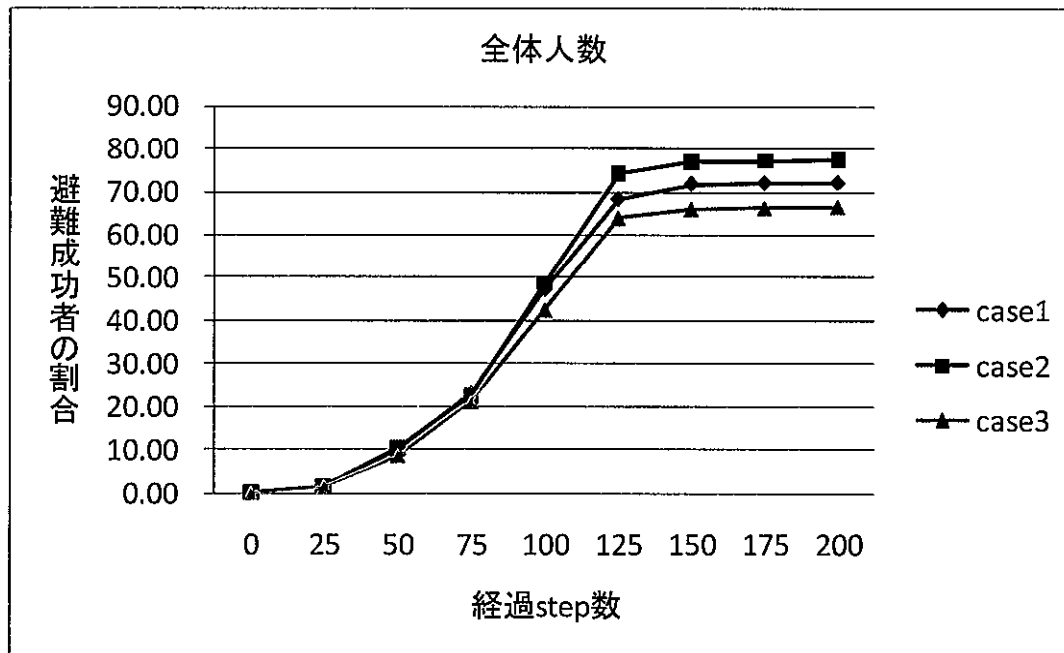


図 6.2 : 全体人数による変化

避難所に到達した人数自体は case3 が最も多く, case1 が最も少なかったが, case1 と case2 を比較した際の増加と比べると case2 と Case3 を比較した際の増加は微々たるものだったため, 図 6.2 のような結果となった.

全体の人数が 10 人増えた場合に避難成功者の割合が増加したことについては, 全体の避難者の数が増えたことで誘導者に誘導される避難者が増え, 避難所に到達した人数が増加したこと, 全体の人数が増加したことで 1 人が避難に失敗してしまった時に避難成功者の割合の減少する値が減ったことが原因と考えられる. 逆に全体の人数が 20 人増えた場合に避難成功者の割合が減少したことについては, case2 の時点で誘導者すべて有効に機能していたため, 新しく追加された分の避難者がほぼ避難失敗になってしまい, 結果として避難成功者の割合が低下したのだと考えられる.

6.3 各エージェントの割合による変化

このケースでは全体の人数を 50 人，視野範囲を 5，誘導範囲を 3 で固定し，エージェントの割合を変化させた．結果としては誘導者の数が最も多い Case5(誘導者 10 人・誤誘導者 5 人)の避難成功者の割合が最も高く，次に誘導者が 5 人の Case2(誘導者 5 人・誤誘導者 0 人)，Case4(誘導者 5 人・誤誘導者 5 人)，Case6(誘導者 5 人・誤誘導者 10 人)の順に 5 割付近に固まり，誘導者の居ない Case1 は 1 割程で，誤誘導者のみの Case3(誘導者 0 人・誤誘導者 5 人)が最低値となった．

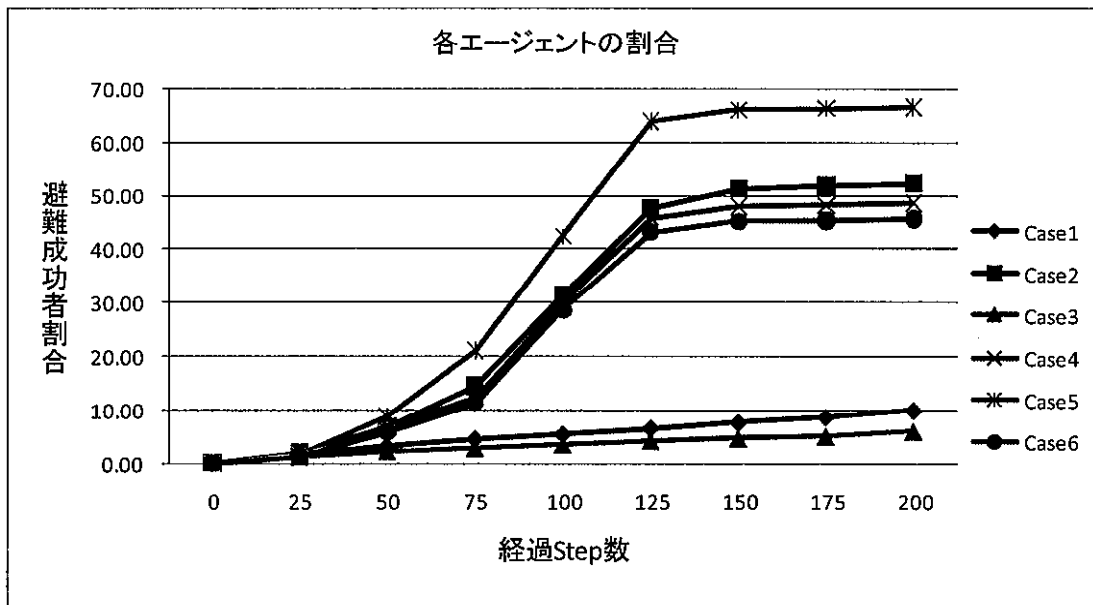


図 6.3 : 各エージェントの人数比率による変化

この図から避難成功者の割合に最も大きく影響を与えているものは誘導者の人数だということが分る．誤誘導者の人数が増加することで，避難成功者の割合は若干減少したものの，誘導者の人数を変化させたときに見られた変化と比べると変化はかなり小さいものとなった．しかし，その原因の一つとしては，今回誘導者が絶対であり，全ての避難者と誤誘導者を誘導しているように思われる．これによって誘導者が存在した場合は誤誘導者が避難者とほぼ同じ扱いになってしまい，このような結果になった可能性が考えられる．

誘導者の人数が避難効率に大きな影響を与えることは概ね正しいと考えられるが，誤誘導者の存在による避難効率の低下については今後誘導者と誤誘導者の誘導モデルを改良した上で，もう一度検証する必要がある．

6.4 誘導者数と誘導範囲による変化

このケースでは全体人数を 50 人で固定し、誘導者の人数を 5 人(エージェントの割合の Case4: 誘導者 5 人・誤誘導者 5 人)から 10 人(エージェントの割合の Case5: 誘導者 10 人・誤誘導者 5 人)に変化させた場合と誘導範囲を 1(可視及び誘導範囲の Case1)から 2, 3(それぞれ可視及び誘導範囲の Case2, 3)に変化させた場合の変化を比較した。

図 6.4 に記載された CaseA~F はそれぞれ以下の表の Case の組み合わせである。

表 3: CaseA~F の組み合わせ

Case	割合	範囲	Case	割合	範囲
A	Case4	Case1	D	Case5	Case2
B	Case5	Case1	E	Case4	Case3
C	Case4	Case2	F	Case5	Case3

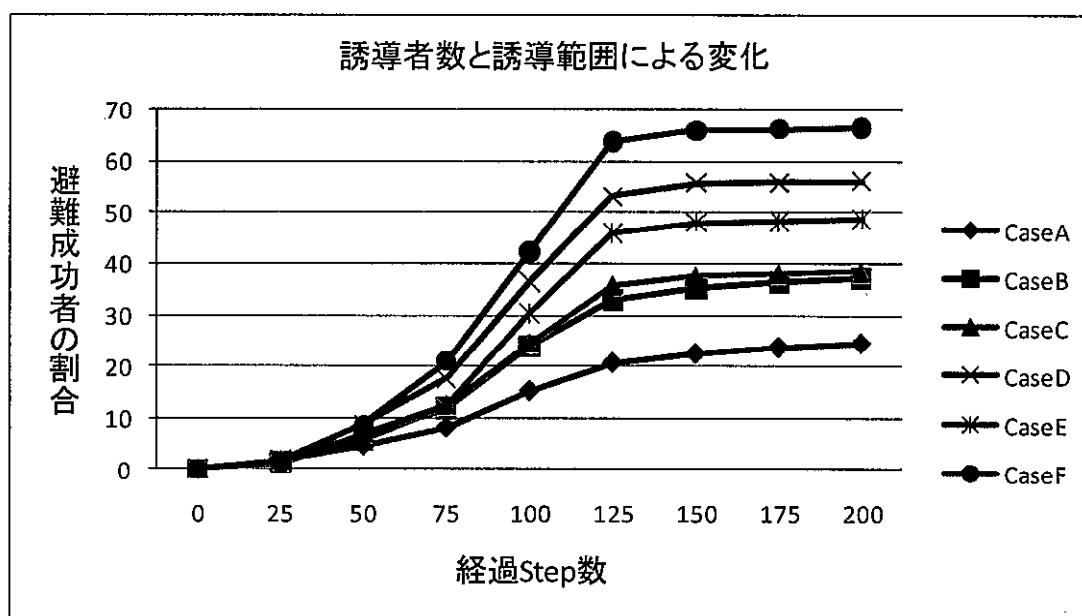


図 6.4: 誘導者数と誘導範囲による変化

誘導者の人数、誘導範囲が最も小さい CaseA と比較し、誘導者数を 2 倍にした CaseB よりも誘導範囲を 2 にした CaseC の方が避難成功者の割合が増加した。しかし、CaseC を基準とし CaseD と CaseE を比較すると CaseD の方が避難成功者の割合が増加した。このことから誘導者がある程度の誘導範囲をもつまでは誘導範囲を増やした方が効率的に避難させることができ、それ以降は人数を増やした方が、効果があると考えられる。しかし、

誘導範囲の変化による避難成功者の割合の変化も十分に大きく、この部分の値設定も非常に重要であると言える。

7 結論

本研究では実現可能な手法を用いて避難シミュレーションのモデルを構築し実験を行い、その結果からシミュレーションを実行する際に与える変数やパラメータがどの程度シミュレーションに影響を与えるのかを確認した。

最も大きな影響を与えたものは誘導者に関連するパラメータであった。誘導者の人数も大きな影響を与えていたが、その誘導範囲もまた大きな影響を与えていることが確認できた。また以下の表 7.1, 表 7.2, 表 7.3 は前章で示した結果のグラフの一部を表にしたものだが、表 7.1 に示す通り、誘導者の誘導範囲を 1 マスのまま誘導者の人数を 2 倍にしたときよりも、誘導者を増やさず、誘導範囲を 2 にした場合の方が避難成功者の割合が向上し、また誘導範囲を 2 に設定した際は誘導者の人数を 2 倍にした場合よりは誘導範囲を 3 に設定した場合の方が避難成功者の割合が低下したものの、それでも避難成功者の割合は 10% 以上増加していた(誘導者を 2 倍にした時の効果は 18% 程度の増加)。このことから誘導者に関するパラメータの設定は特に慎重に行わなければならないと考える。

表 7.1 : 誘導者の人数と誘導範囲

全体人数	視野/誘導範囲	誘導者/誤誘導者数	避難成功者の割合の最終値(%)
50	2/1	5/5	24.38
50	2/1	10/5	37.18
50	3/2	5/5	38.34
50	3/2	10/5	56.18
50	5/3	5/5	48.56
50	5/3	10/5	66.50

また、誘導者に関するパラメータ程避難成功者の割合に影響を与えたわけではなかったが、全体人数や、避難者のみの場合の認識範囲も影響を与えることが確認できた。表 7.2 で示すように、全体の人数はすなわち避難者の人数となり、誘導対象の人数となるため、少なすぎた場合は誘導者が避難者を発見できず避難成功者の割合は低くなり、また多くなった場合でも誘導者が足りず、誘導しきれなくなり、避難成功者の割合の低下が確認された。

表 7.2 : 全体の人数

全体人数	視野, 誘導範囲	誘導者, 誤誘導者数	避難成功者の割合の最終値(%)
30	5, 3	10, 5	71.77
40	5, 3	10, 5	77.40
50	5, 3	10, 5	66.50

このことから今後シミュレーションによって災害時に救助活動を行う際に、どの区域にどの程度の人数を割り振ることが適切なのかをある程度は推定可能になってくるだろうと考えられる。

表 7.3 に示すように、避難者のみの場合の認識範囲による避難成功者の割合の変化は認識範囲が広くなる程、避難成功者の割合は低下するという、こちらが予想していたものとは異なる結果となった。

表 7.3：視野範囲

全体人数	視野, 誘導範囲	誘導者, 誤誘導者数	避難成功者の割合の最終値(%)
30	1, 2	0, 0	11.53
30	2, 3	0, 0	10.63
30	3, 5	0, 0	9.83

これは、集団で行動しようという避難者の心理が働き、周囲の避難者と合流するもののその集団が大きくなりすぎると、集団全体の進行方向を決定するものが居ないため、その場に留まって動けなくなってしまうという現象が発生したためであり、避難者のみの場合でもある程度進行方向を決定できるような、案内板のようなものの必要性が考えられる。

以上のように今回想定した要素の中では誘導者の関連が最も大きな影響を与えており、今後この部分に関する値設定を特に慎重に設定していくと共に、現実の方でもこの部分をどのように改善していくかが重要になってくることがわかった。

しかし、今回のモデルにおける現実性の考慮という点では、誘導者が誤誘導者に引っ張られてしまうことや、避難者が誘導を無視するなどの事象が考えられ、それがどのような条件で起こりうるのかを考察する必要や、エージェント毎に歩行速度が異なるように設定することなど、まだまだ改善の余地が存在する。

今後は上で述べたような今回のモデルで再現できなかった現実性をさらに追求していき、新たな避難法が提案された際にその有効性を検証できるようモデルを改良していく必要がある。

謝辞

指導教員である相場亮教授には大学1年間研究に関する手厚いご指導をいただき、大変お世話になりました。ここに深く感謝の意を表します。

同研究室の院生である伊藤さん、和田さん、宇佐美さん、鈴木さん、砂田さん、には1年間研究の関する手厚いご指導をいただき、気の緩んだときに叱咤激励して頂いたことなど大変お世話になりました。本当にありがとうございました。

同研究室で1年間共に過ごした浅野さん、石黒さん、小野口さん、関島さん、遠山さん、この1年間色々なことがありながらも、振り返れば良い思い出だったと感ずることが出来るのは皆様のおかげです。特に石黒さんには1年次のころから友人として良い付き合いをさせていただきました。ありがとうございました。

最後に学費の高い私立大学に入学させてくれた両親をはじめとする家族の支えや、多くの方々の協力があつて本研究を完成させることができました。本当にありがとうございました。

文献目録

1. 気象庁. 気象庁. (オンライン) (引用日: 2010 年 2 月 6 日.)
<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>.
2. 文部科学省. 大都市大震災軽減化特別プロジェクト. (オンライン) (引用日: 2010 年 2 月 6 日.) <http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/daidai/DDT2003.html>.
3. 東京大学地震研究所. 東京大学地震研究所. (オンライン) (引用日: 2010 年 2 月 6 日.)
<http://www.eic.eri.u-tokyo.ac.jp/>.
4. 京都大学防災研究所. 京都大学防災研究所. (オンライン) (引用日: 2010 年 2 月 6 日.)
http://www.dpri.kyoto-u.ac.jp/web_j/index_topics.html.
5. 独立行政法人防災科学技術研究所. 独立行政法人防災科学技術研究所. (オンライン) (引用日: 2010 年 2 月 6 日.) <http://www.bosai.go.jp/>.
6. 大内 東雅人, 川村 秀憲, 山本. マルチエージェントシステムの基礎と応用. コロナ社, 2002. ISBN4-339-02388-4.
7. 車谷 浩一. マルチエージェント社会シミュレーション展望. システム/制御/情報, Vol.46, No9, pp518-523, 2002.
8. 畑 貴司政輝, 平田 耕一原尾. マルチエージェントモデルを用いた交通流シミュレーション. 九州工業大学大学院情報工学研究科.
9. 中西 英之智史, 石黒 浩, 石田 亨小泉. 市民参加による避難シミュレーションに向けて. 人工知能学会論文誌 18 巻 6 号 a pp643-648, 2003.
10. 生天目 章. マルチエージェントシステム. 最適設計研究会
http://www.nda.ac.jp/~nama/Top/InvitedTalk/08-01_it.pdf, 2008.
11. 石橋 健一正樹藤岡. エージェントモデルによる災害時避難行動シミュレーションの試みー湘南海岸における事例ー. オペレーションズ・リサーチ: 経営の科学 pp.447-452, 2002.
12. 日本構造計画研究所. MAS コミュニティ. (オンライン) (引用日: 2010 年 2 月 6 日.)
<http://mas.kke.co.jp/>.

付録

以下に実験で行ったシミュレーションの全結果を示す。また表中の数値は避難成功者の割合(%)である。

全体人数	誘導範囲	人数比	経過step数								
			0	25	50	75	100	125	150	175	200
Case1	Case1	Case1	0.00	1.43	3.27	5.00	6.40	7.93	9.20	10.23	11.53
Case1	Case1	Case2	0.00	1.50	5.53	10.60	19.87	27.57	29.60	30.60	31.93
Case1	Case1	Case3	0.00	1.17	2.47	4.13	4.93	5.60	6.40	7.63	8.67
Case1	Case1	Case4	0.00	1.63	5.77	10.33	19.57	25.90	27.87	28.43	29.17
Case1	Case1	Case5	0.00	1.80	8.67	16.87	32.93	44.27	47.23	47.87	48.60
Case1	Case1	Case6	0.00	1.60	6.07	10.90	20.03	25.97	27.17	27.70	28.30
Case1	Case2	Case1	0.00	1.33	3.07	4.57	5.77	6.90	8.40	9.60	10.63
Case1	Case2	Case2	0.00	1.73	7.23	14.67	29.83	44.97	47.90	48.60	49.13
Case1	Case2	Case3	0.00	1.13	2.50	3.43	3.97	5.07	5.77	6.60	7.10
Case1	Case2	Case4	0.00	1.27	6.20	13.83	26.87	38.47	40.53	40.97	41.10
Case1	Case2	Case5	0.00	1.53	10.47	21.40	41.70	58.73	61.60	61.87	62.03
Case1	Case2	Case6	0.00	1.57	6.83	11.73	25.50	37.27	38.87	39.10	39.33
Case1	Case3	Case1	0.00	0.93	2.37	4.23	5.37	6.83	7.47	8.83	9.83
Case1	Case3	Case2	0.00	1.40	7.33	15.20	34.73	49.20	52.33	52.70	53.47
Case1	Case3	Case3	0.00	1.57	2.43	3.27	3.97	4.50	5.27	5.63	6.20
Case1	Case3	Case4	0.00	1.43	7.53	16.43	34.13	48.50	50.57	51.00	51.20
Case1	Case3	Case5	0.00	1.40	9.97	23.03	47.00	68.03	71.57	71.73	71.77
Case1	Case3	Case6	0.00	1.23	6.80	14.27	30.67	44.60	47.43	47.63	47.73
Case2	Case1	Case1	0.00	1.25	3.53	4.63	6.45	7.95	9.25	10.45	11.70
Case2	Case1	Case2	0.00	1.40	5.23	9.53	17.90	24.65	26.63	28.00	28.98
Case2	Case1	Case3	0.00	1.40	2.83	4.63	5.70	6.85	8.23	9.25	10.08
Case2	Case1	Case4	0.00	1.65	5.75	10.78	18.65	24.70	26.20	27.20	28.15
Case2	Case1	Case5	0.00	1.73	7.43	14.40	28.53	39.38	42.15	43.03	43.63
Case2	Case1	Case6	0.00	1.35	4.80	9.00	17.43	22.68	24.08	25.23	25.75
Case2	Case2	Case1	0.00	1.48	3.23	5.08	6.53	7.90	9.13	10.78	11.78
Case2	Case2	Case2	0.00	1.45	5.65	12.23	28.73	39.38	42.25	42.83	43.88
Case2	Case2	Case3	0.00	1.18	2.45	3.55	4.48	5.18	5.83	6.78	7.40
Case2	Case2	Case4	0.00	1.45	6.05	12.53	26.08	37.28	38.75	39.38	39.75
Case2	Case2	Case5	0.00	1.38	7.93	17.33	37.98	56.98	59.10	59.33	59.58
Case2	Case2	Case6	0.00	1.43	5.63	11.65	24.65	34.50	35.98	36.48	36.78
Case2	Case3	Case1	0.00	1.53	3.03	4.05	5.38	6.70	8.05	9.13	10.33
Case2	Case3	Case2	0.00	1.40	7.03	14.68	31.28	47.80	50.60	51.10	51.55
Case2	Case3	Case3	0.00	1.15	2.15	3.20	3.85	4.55	5.00	5.48	6.03
Case2	Case3	Case4	0.00	1.68	6.88	15.43	34.23	52.55	54.28	54.75	54.95
Case2	Case3	Case5	0.00	1.65	10.30	22.38	48.80	74.23	77.03	77.23	77.40
Case2	Case3	Case6	0.00	1.60	6.68	15.28	34.50	49.40	51.00	51.30	51.50
Case3	Case1	Case1	0.00	1.50	3.04	4.08	5.54	6.76	7.92	9.16	10.90
Case3	Case1	Case2	0.00	1.54	4.68	8.26	15.60	21.66	23.46	24.54	26.08
Case3	Case1	Case3	0.00	1.76	3.28	4.52	5.50	6.22	7.68	8.64	9.52
Case3	Case1	Case4	0.00	1.58	4.56	8.06	15.12	20.56	22.34	23.58	24.38
Case3	Case1	Case5	0.00	1.62	6.36	11.90	23.96	33.00	35.18	36.36	37.18
Case3	Case1	Case6	0.00	1.46	4.78	8.24	15.08	19.60	21.06	22.10	22.76
Case3	Case2	Case1	0.00	1.66	3.18	5.18	6.54	7.86	9.26	10.38	11.68
Case3	Case2	Case2	0.00	1.12	5.42	11.68	24.76	38.76	40.60	41.10	41.64
Case3	Case2	Case3	0.00	1.26	2.46	3.50	4.36	5.04	5.58	6.26	6.94
Case3	Case2	Case4	0.00	1.14	5.54	12.38	24.48	35.76	37.56	38.02	38.34
Case3	Case2	Case5	0.00	1.72	8.58	17.54	36.52	53.14	55.70	55.86	56.18
Case3	Case2	Case6	0.00	1.36	5.40	10.78	23.62	35.08	37.04	37.22	37.50
Case3	Case3	Case1	0.00	1.34	2.94	4.36	5.28	6.46	7.54	8.56	9.86
Case3	Case3	Case2	0.00	1.84	6.78	14.46	31.44	47.66	51.26	51.80	52.32
Case3	Case3	Case3	0.00	1.08	2.12	2.66	3.38	4.08	4.56	4.96	5.94
Case3	Case3	Case4	0.00	1.06	6.64	12.10	30.16	45.78	47.92	48.14	48.56
Case3	Case3	Case5	0.00	1.62	8.58	20.92	42.34	63.86	66.02	66.22	66.50
Case3	Case3	Case6	0.00	1.22	5.80	11.34	28.62	43.22	45.22	45.38	45.66