

# 2015年度 卒業論文

## 梅田地下街におけるシミュレーションを用いた 浸水被害予測

2011年度入学

18110055 一居 政宏

主担当教員 深川 大路 助教

副担当教員 星 英仁 准教授

2015年12月18日

同志社大学文化情報学部文化情報学科

# 2015年度 卒業論文

## 梅田地下街におけるシミュレーションを用いた 浸水被害予測

同志社大学文化情報学部文化情報学科

18110055

主担当教員 深川 大路 助教

副担当教員 星 英仁 准教授

2015年12月18日

# 要 旨

本研究では、地下街において水が侵入した際の緊急避難をシミュレーションソフトを用いて再現する。地下街などの閉鎖空間で集団が避難行動をとる際、求められることは被害者を出さず円滑に避難を完了させることである。被害者の数と避難完了までにかかる時間については様々な要因が存在する。例えば、避難可能な出口の数である。限られた数の地上へ繋がる出口が水の侵入によって塞がれた場合、残る避難可能な出口へと人は集まる。さらにそこでも出口の幅が狭いゆえに多くの人々がパニックに陥る可能性がある。このように複数ある要因を加味してシミュレーションを行うことで、より実際の災害現場に近い結果が導き出される。

本研究では、対象とする地下街で複数ある連絡口のうち、浸水する危険性のある連絡口を限定し、それらのうち人的被害の影響が大きい連絡口を選定することを目的とした。また実験の際には「artisoc」というシミュレーションソフトを用いて、人数や浸水する連絡口の種類などの条件を設けて避難行動を再現した。その結果得られた避難完了者数に関するデータを相対的に比較することで、避難完了率に影響を及ぼすであろう浸水口を選定することができた。

# 目次

第 1 章	はじめに	1
1.1	研究背景	1
1.2	研究の手順	1
1.3	研究の意義	1
第 2 章	関連研究	7
2.1	「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」	7
2.2	「マルチエージェントを用いた火災発生時の避難シミュレーション～大阪市浪速区の個室ビデオ店放火事件の実例に基づいた研究～」	8
2.3	「マルチエージェントによる避難計画を踏まえた教室配置の検証～芝浦工業大学大宮キャンパス新 2 号対象～」	8
2.4	本研究の目的	8
2.5	「プチシャンエリア」の危険性	9
2.5.1	浸水の可能性がある地上連絡口	10
第 3 章	分析手法	13
3.1	マルチエージェントシミュレータ「artisoc」	13
3.1.1	artisoc のシミュレーション設定	13
3.1.2	各エージェントのルール	14
3.1.3	避難時に必要な条件	15
第 4 章	シミュレーション実験	16
4.1	実験方法	16
4.1.1	空間の大きさ	16
4.1.2	各エージェントのルールの詳細	17
4.1.3	比較する状況	18
4.2	シミュレーション結果	18
4.2.1	避難完了者数の平均	18
4.2.2	分散分析の結果	19
4.2.3	避難完了率 (避難成功者数/避難者数)	20
4.2.4	重回帰分析の結果	22

4.3 考察・今後の課題 . . . . .	22
第 5 章 おわりに	24
謝辞	25
参考文献	26

# 第1章 はじめに

## 1.1 研究背景

地下鉄駅構内などの施設が充実する一方で、自然災害などによる浸水被害が懸念される。実際、2004 年 10 月には台風 22 号の接近により、都心部で 1 時間当たり 69 mm の激しい雨を記録した。その影響で麻布十番駅では構内地下 3 階のホームまで水が押し寄せた(国土交通省 [http://www.mlit.go.jp/river/pamphlet\\_jirei/bousai/saigai/kiroku/suigai2004/kanto.html](http://www.mlit.go.jp/river/pamphlet_jirei/bousai/saigai/kiroku/suigai2004/kanto.html))。また、2014 年 9 月には名古屋市営地下鉄の名古屋駅で冠水事故が発生している(日本経済新聞 [http://www.nikkei.com/article/DGXLASDG2501S\\_V20C14A9CC0000/](http://www.nikkei.com/article/DGXLASDG2501S_V20C14A9CC0000/))。我々はこうした自然災害を未然に防ぐことはできない。しかし事前にもどのような災害が起こるのかを把握し十分に対策を練ることで、その被害は最小限に抑えることができる。地下街において地震による津波などの被害を防ぎ、危険から身をまもるためには防水パネルなどのハードウェア対策はもちろん、避難経路掲示などのソフトウェア対策はより一層強化していかなければならない。一方で被害を予測し、密集空間に関する危険度を予測することも必要とされる。地下街という逃げ場に困る空間において、ある程度逃げ道を確保し、知っておくことは万が一の事態を想定すると非常に有益なことであるといえる。

## 1.2 研究の手順

大阪市の梅田地下街はいくつかのエリアに分かれている(図 1.1)。本研究では、プチシャノンエリアを対象にシミュレーションを行う。第 1.3 節では、この後に研究の意義を述べる。また、第 2 章では先行研究について述べた後、本研究の目的を明確にする。さらに第 3 章ではシミュレーションを行う際に必要なソフトとその設定について述べる。第 4 章ではシミュレーションをする状況を決定し、シミュレーションソフトを用いた実験を行い、その結果を用いて考察をする。

## 1.3 研究の意義

大阪梅田の地下街は延べ床面積が  $313,361M^2$  であり、一日推定来街者数が 400,000 人(Whity うめだホームページ <http://whity.osaka-chikagai.jp/facility/>)にものぼる大規模な地下街である。平日休日を問わず多くの人が訪れるこの地下街で浸水被害が起こると、利用者がパニック状態に陥ることが予想される。

また、地下街に襲い掛かる水害被害においてもその原因は様々である。図 1.2、1.3 は大阪市危機管理室が発表している様々な水害に対する予測である。1 つ目はゲリラ豪雨などの大雨 (内水氾濫) である。平成 23 年から 25 年にかけて毎年 8 月になると 1 時間あたりの雨量が 60mm 以上の激しい雨が記録されている。また、8 月 25 日には大阪市付近で起きたゲリラ豪雨によって、阪急梅田駅前の繁華街で道路が水没する事態が発生した。このような大雨の場合、梅田駅周辺の地上では最大で 50cm 程度の水位で浸水すると予測される (図 1.2)。2 つ目は南海トラフ巨大地震による津波である。内閣府の調査によると津波は梅田駅付近にまで到達し、その津波の高さは梅田駅周辺で 1~2m とされる (図 1.4)。3 つ目は淀川の氾濫である。国土交通局淀川河川事務局によると長柄橋付近で淀川の氾濫が起こった場合、梅田駅付近で 3m から最大で 4m の浸水が起こると予想されている (図 1.3)。

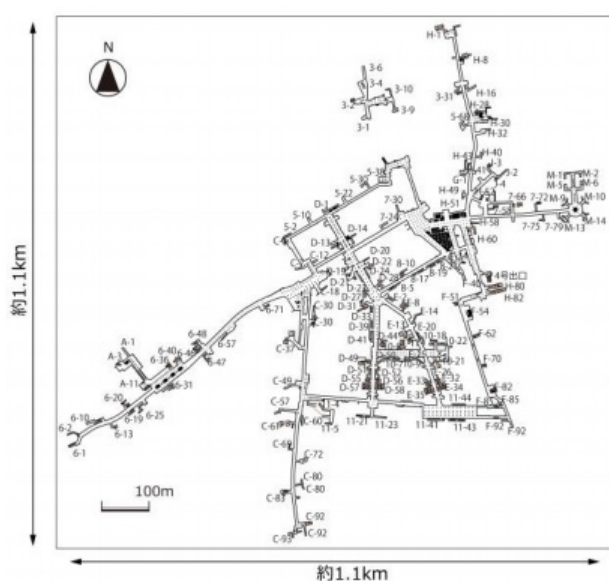


図 1.1: 「大阪駅前地下街の津波避難計画に関する研究」合田ら (2011) より

これらの浸水から被害を最小限に抑えるべく、大阪市営地下鉄では地上連絡口に止水板の設置が施されている。梅田駅も 26 の地上連絡口のうち 21 の連絡口に止水板が設置されている。また残りの 5 つの連絡口については、他の連絡口よりも標高が高い位置にあるため止水板は設置されていない。これらの止水板は高さ約 50cm である。地上連絡口のうち止水板が地上より階段を 2、3 段上がったところに設置されている箇所 (マインドアップ) があるが、その場合でもその高さは地上から 70cm となる。よって大雨による浸水は、止水板または土嚢などによる素早い対応によって防ぐことができると予想される。しかし、巨大地震による津波または淀川氾濫による浸水被害は、その水位の高さから止水板では防ぐことができない。このような要因で浸水が発生した場合、避難できる地上連絡口は限られてくる。

大阪市地下街株式会社が発表した資料「梅田地下空間避難確保・浸水防止計画」によると、浸水被害の場合は隣接する商業ビルの 3 階以上に避難への避難を求めている。このように地下街における浸水被害による避難は、避難可能な出口が限られるなどの制限が課せられる。出口の限られた空間において、避難者の行動を予め知っておくこと、そして被害の規模を予

想しておくことは、我々の防災意識を高めることができるのではないかと考える。



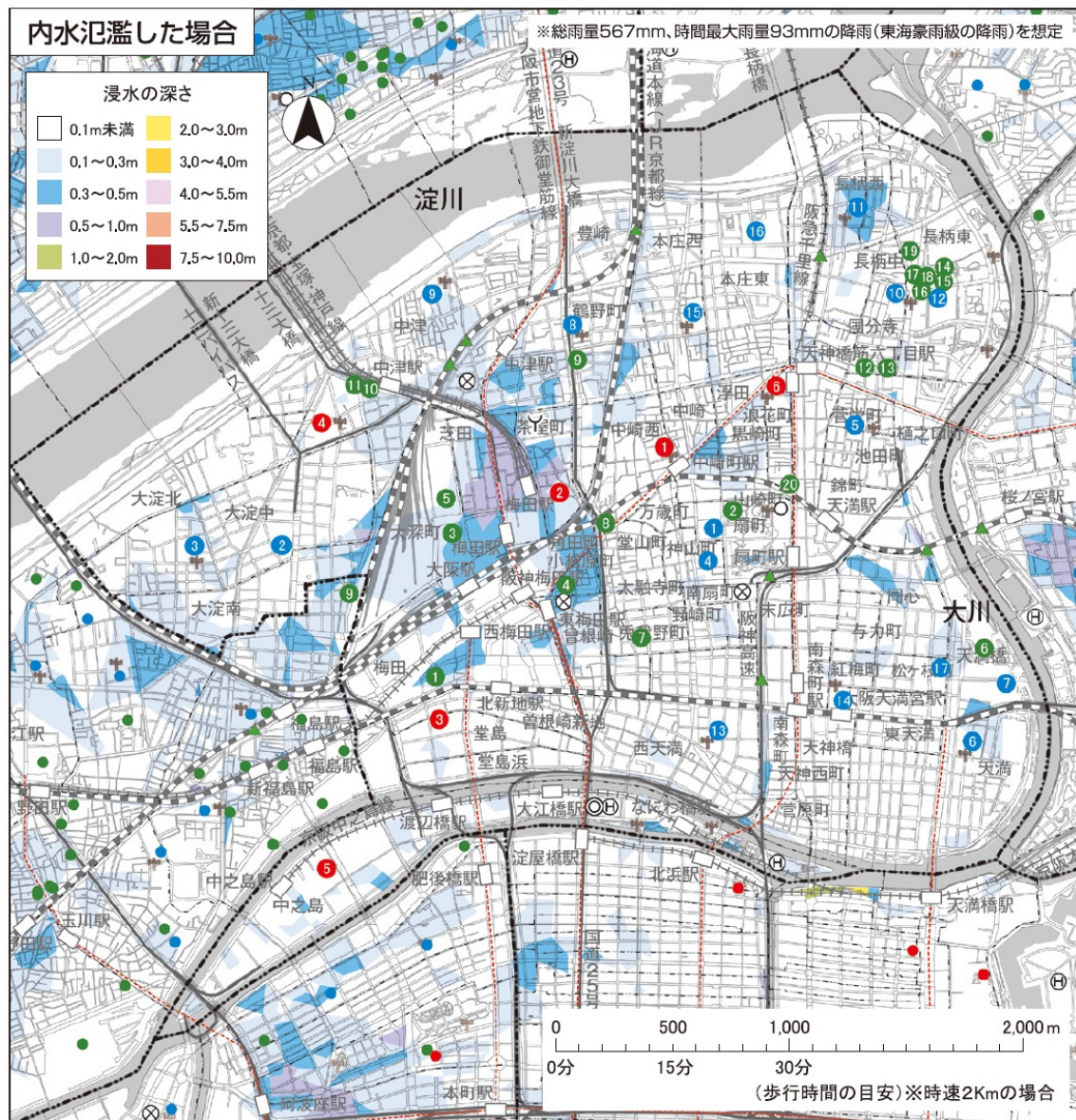


図 1.2: 梅田駅周辺における大雨による浸水被害予測 [大阪市危機管理室ホームページ <http://www.city.osaka.lg.jp/kikikanrishitsu/>]



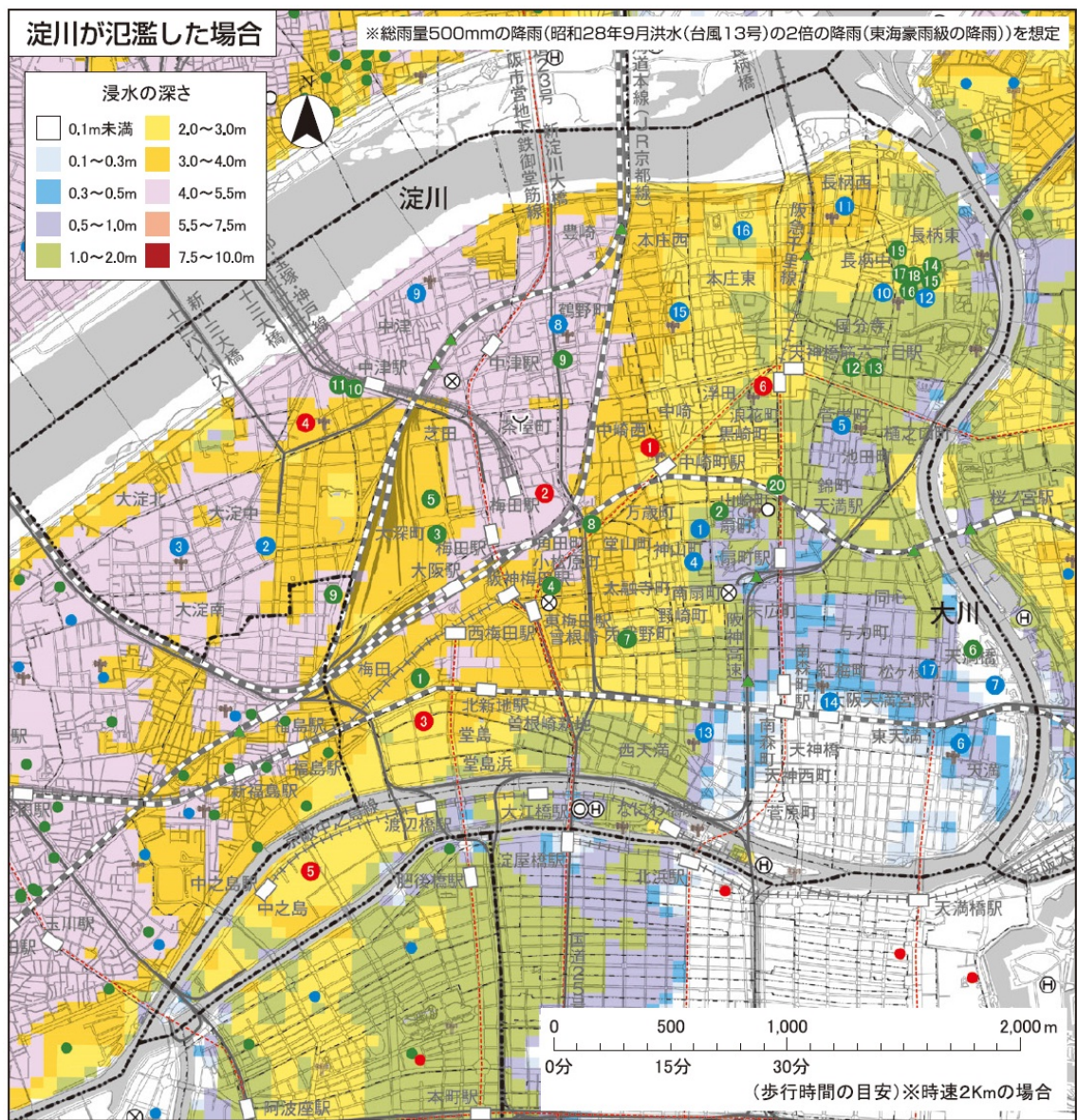


図 1.3: 梅田駅周辺における淀川の氾濫による浸水被害予測 [大阪市危機管理室ホームページ <http://www.city.osaka.lg.jp/kikikanrishitsu/>]



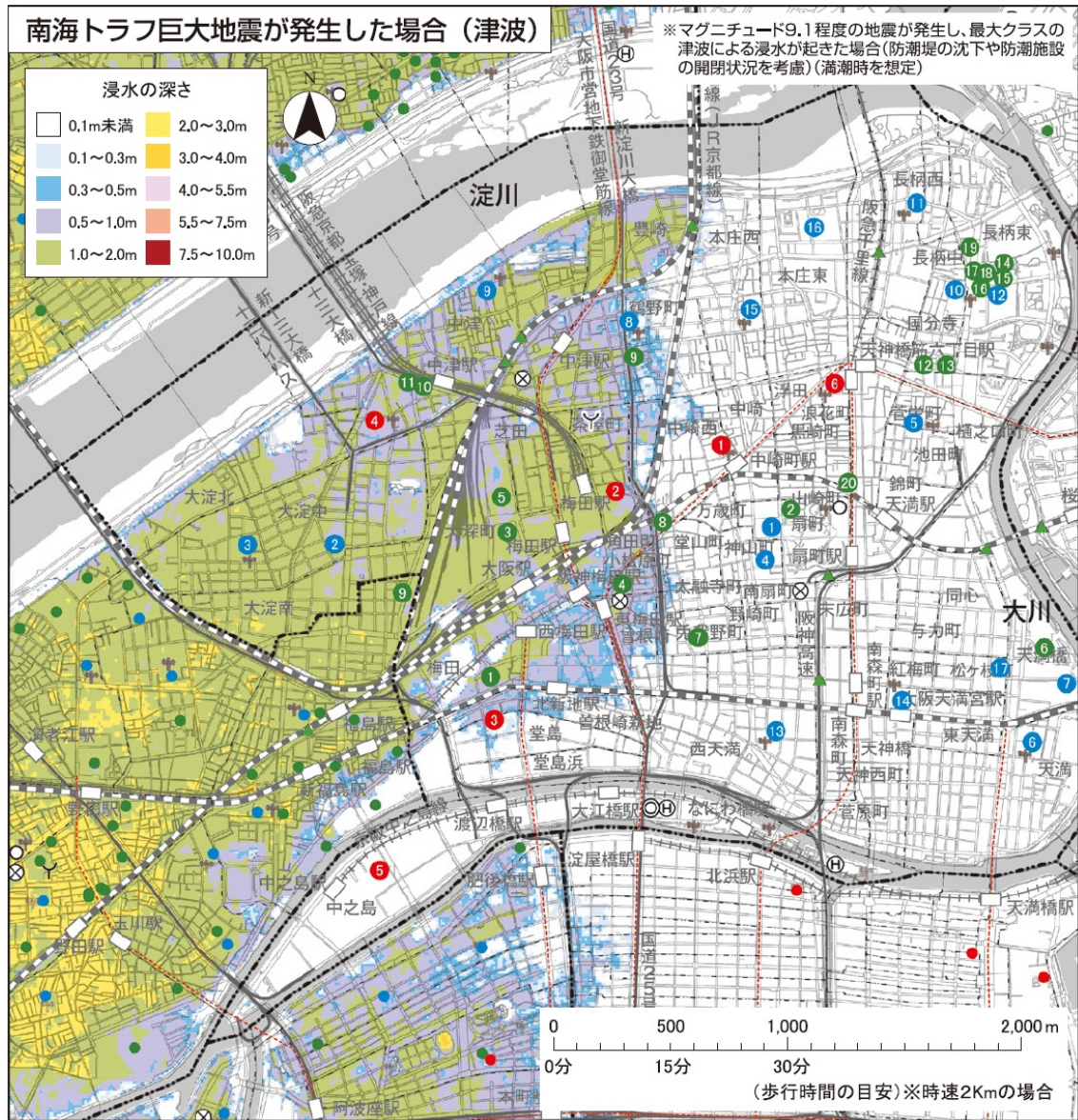


図 1.4: 梅田駅周辺における南海トラフ巨大地震の津波による浸水被害予測 [大阪市危機管理室ホームページ <http://www.city.osaka.lg.jp/kikikanrishitsu/>]

## 第2章 関連研究

本章では避難経路に関連する研究で用いられた手法と避難状況に関する調査などを紹介するとともに、本研究の目的を明確にする。

### 2.1 「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」

この研究では「避難行動シミュレーションの現状」として3つの手法の紹介をしている。1つめは群集の物理モデル手法である。この方法は群集を流体として、速度や空間あたりの人数を計算する方法である。群衆が円滑に動く場合は効果的な手法であり、地震や津波の際の避難行動シミュレーションに用いられている。しかし、群集に速度のばらつきを与える場合や複雑な空間内でシミュレーションを行う場合にはパラメータの設定が難しい。よってある空間内での避難行動の予測には適さない。2つめはセルオートマトン法である。この方法はセルの状態を変化させることにより、群集が円滑に流れる状態や閉塞状態を再現できるものである。状態量の種類を増加させることにより、人間の行動をより綿密に表現できる可能性をもつが、セルオートマトン法の強みではない。3つめはマルチエージェントシミュレーションである。この方法は、密集空間で多数のエージェントを自律行動させることにより、避難行動の再現と予測を実現させることができる。またエージェントをうまく設計することで、複雑な避難行動の予測が可能となる。

さらに著者はマルチエージェントシミュレーションを採用し、ある地下街において地震を想定した避難行動シミュレーションを行っている。また、シミュレーションの際に最も重要となる物理パラメータは「避難者の速度」とし、2004年に横浜みなとみらいで行われた花火大会の際の群集の行動を捉えたデジタルビデオカメラの記録を参考に、群集の中で混雑の影響を受けながら歩く人と影響を受けずに歩く人の平均の速度を分析し、シミュレーションの際に用いる避難者の速度の妥当性を検証している。

## 2.2 「マルチエージェントを用いた火災発生時の避難シミュレーション～大阪市浪速区の個室ビデオ店放火事件の実例に基づいた研究～」

この研究では、実際に大阪市の浪速区の個室ビデオ店で起こった放火事件を例に、シミュレーションソフト「artisoc」を用いて火災報知器の有無、避難ルートの変更・追加などを設定項目に挙げてシミュレーションを行っている。その結果、各設定ごとの避難不可能者数を比較し、被害程度に応じて火災報知器の有効性や最適な避難口の位置を示している。またシミュレーションの際、火災を模擬した火エージェントと煙エージェントの延焼確率と煙のスピードを設定項目に加えており、場合に応じて様々なシミュレーション結果が得られるようになっている。さらにシミュレーション開始時(出火時)には店内にいる客の80%は寝ており、火災報知器が作動している場合にのみ避難を開始するものと設定されている。それゆえ火災報知器の作動と避難経路の選択肢が多くあることが避難不可能者を減らす大きな要因となると結論づけている。

## 2.3 「マルチエージェントによる避難計画を踏まえた教室配置の検証～芝浦工業大学大宮キャンパス新2号対象～」

この研究では、大学の建物においてシミュレーション開始時に一斉に避難行動をとる様子を「artisoc」を使って再現している。建物の教室内に配置された多くの避難者が出口から教室を出る際には混雑が予想される。特に机や椅子などの障害物が存在する空間では、何もない空間と比較して、避難者の歩行速度に差がでると考えられる。著者は教室から1つの出口を利用して避難が完了するために要する時間を、41人の被験者とともに実験をし、シミュレーションの際に用いる避難者の歩行速度の妥当性を示している。また教室から出口を利用して避難する際に、出口の幅が限られるため、1秒間に出口を通過できる人数は限られている。そのため流動係数を用いて実際に出口で避難者の行動が制限される様子を再現している。

## 2.4 本研究の目的

本研究では大阪市営地下鉄の梅田駅構内のプチシャンエリアをモデル化し、地下街で浸水が起こる場合を想定してシミュレーションを行う。

避難行動に関するシミュレーションを行った研究はいくつも存在するが、シミュレーションの際は手法により袋小路に迷い込む避難者が出たり、同じ経路を何回も通る避難者が出たりと、不自然な人間行動が起きることがある。そのため、本研究ではマルチエージェントシミュレーションに注目した。マルチエージェントシミュレーションとは、シミュレーションの際に必要な人や物体に対して個々のルールを与えて各エージェントがそのルールに従った

行動をとることにより、より現実に近い再現ができる手法である。この手法を駆使し、実際に起こりうるであろう状況をシミュレーションする。

地下街で浸水被害が発生すると、地上へとつながる連絡口から大量の水が流れてくる危険性がある。流れてくる水の勢いが強ければ、その連絡口から地上へ脱出することが不可能となり得る状況に陥るかもしれない。よって、他の災害要因で避難行動をとる場合と比べて、浸水を想定した場合は避難者が避難できる経路または出口が限られてくる。このことが原因で地下街から避難をすることが難しい状況が生まれるかもしれない。また、地下街に侵入した水は避難者の歩行速度に大きな影響を与える。よって本研究において、シミュレーションの際に重要となる項目は、避難可能出口または水が進入する可能性がある連絡口と避難者の歩行速度とする。水が進入する連絡口の数や避難者の歩行速度などの条件を加味したシミュレーションを行うことにより、避難不可能者数に差が生じることが考えられる。それらを比較することにより、水の侵入があった場合に最も危険な地上連絡口を明らかにし、地域防災に役立てることを本研究の目的とする。

## 2.5 「プチシャンエリア」の危険性

大阪梅田の地下街は南北、東西におおよそ 1km もある大規模な地下空間である。また、梅田付近の地形には東高西低の特徴がみられる。

石垣ら (2011) はこの梅田地下街を対象に内水氾濫における地下空間の浸水に対する避難困難度について調査している。その中で対象の地下街においてフロアレベルの高低差が示されている (図 2.1)。この図の中では、基準面からの高低差が  $-2.0\text{m}$  よりも大きい区間が存在する中で、本研究で対象とするプチシャンエリアは図中の赤枠内であり、基準面との高低差は  $0\sim -1.0\text{m}$  である。一般的に水は高いところから低いところへと流れるのでプチシャンエリアに比較的浸水の危険性はないと考えられるかもしれない。しかし、石垣ら (2011) はまた別の方法で梅田地下街における地域別浸水脆弱性について 2 つのケースを想定して示している。

1 つめは、出入り口地盤高とマインドアップ高を考慮し、浸水深が内水氾濫時には毎分  $2\text{cm}$  で上昇するとして地盤高の低い出入り口から順番に流入する場合 (図 2.2)。2 つめは、プライスマンスロット (管路) モデルと InfoWorks CS (都市型下水道ネットワークの管理と計画を利用目的としたシミュレーションソフト) を用いて出入り口からの流量を算定した場合である (図 2.3)。さらに、避難困難状態を「手すりや命綱等の補助なしで避難が困難な状態」とし、その困難度指標を性別・年齢・流れによる力・水圧による力を考慮した単位幅比力により計算した結果を用いると、最も低い指標である高年齢の女性の避難困難状態は  $0.8$  とされる。この避難困難状態に達するまでにはプチシャンエリアにおいて、 $1200\sim 1800$  秒かかるかとされている。つまり流入開始から最短で  $1200$  秒後に梅田地下街のプチシャンエリアで全員が避難困難な状態になると考えられる。

以上より、梅田地下街全域のうちプチシャンエリアは特に浸水時に大変危険な地区である

といえる。よって本研究ではプチシャンエリアを対象とし、浸水を仮定したシミュレーションを行う。

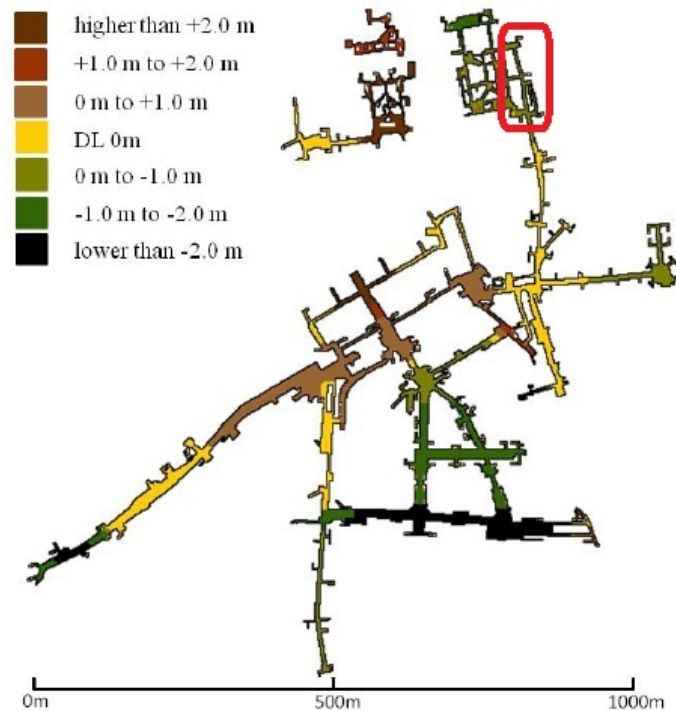


図 2.1: 梅田地下街の通路における高低差 [内水氾濫時における大規模地下空間浸水と避難 (石垣ら, 2011)]

### 2.5.1 浸水の可能性がある地上連絡口

第 1.3 節で述べた通り、浸水被害についてもその要因はいくつか存在する。特に水の都と呼ばれる大阪では琵琶湖と大阪湾を結ぶ淀川が大阪市の間を横切る。そのため淀川の氾濫も浸水被害の要因の一つとなる。さらにはゲリラ豪雨など大雨、また南海トラフ巨大地震による津波なども懸念される。以下に大阪梅田地下街で起こりうる浸水被害をまとめた。

- 淀川の氾濫  
梅田付近において地上から最大 4m の浸水。
- 南海トラフ巨大地震による津波  
梅田付近において最大 2m の津波。
- ゲリラ豪雨などの大雨  
梅田付近において最大でも 50cm の浸水。









図 2.3: 梅田地下街における浸水を想定した危険性 (ケース 2)[内水氾濫時における大規模地下空間浸水と避難 (石垣ら,2011)]

## 第3章 分析手法

本研究ではシミュレーションソフト「artisoc」を用いて、マルチエージェントシミュレーションにより分析を行う。本章では artisoc におけるエージェントの種類と、それらに与えるルールをより詳細に説明する。また、シミュレーションを行う際に必要な条件などを説明する。

### 3.1 マルチエージェントシミュレータ「artisoc」

artisoc とは、株式会社構造計画研究所が提供しているシミュレーションソフトである。言語形式は Visual Basic に近いものである。各エージェントにルールを与えることでそれらが自律行動をし、相互作用を及ぼす。

#### 3.1.1 artisoc のシミュレーション設定

- 空間  
エージェントを配置させる場所のことを指す。エージェントはこの「空間」の中で動作する。本シミュレーションでは、梅田の地下街（ブチシャンエリア）を再現したものを「空間」としている。
- エージェント  
空間の中に存在している物体のことを指す。本シミュレーションでは、「壁エージェント」「階段エージェント」「出口エージェント」「人エージェント」「水エージェント」「障害物エージェント」が存在する。
- ルール  
各エージェントはこの「ルール」にしたがって動く。さらにこの「ルール」により、エージェント同士が互いに作用しあい、動作する。
- 廊下  
階段エージェントと障害物エージェント、壁エージェントを除く、人エージェントが歩行可能である場所を指す。「空間」に「人エージェント」や「出口エージェント」などを配置して、これらのエージェントに「ルール」を与えていく。その「ルール」に従って動くエージェントによって仮想空間でのシミュレーションを行う。

### 3.1.2 各エージェントのルール

- 壁エージェント (Wall)

本シミュレーションでは、階段を除く、人エージェントが歩行不可能なすべての場所を「壁エージェント」で囲む。「壁エージェント」はルールをもっていない。

- 階段エージェント (Steps)

「階段エージェント」もまた、ただ存在するだけであり、ルールは設定していない。

- 障害物エージェント (Obstacle) 「障害物エージェント」もまた、ただ存在するだけであり、ルールは設定していない。

- 出口エージェント (Exit)

「出口エージェント」は人エージェントが脱出を完了した時点でその数をカウントする。また出口の幅により人が1秒間に通過できる数を定めている。

- 人エージェント (Person)

このシミュレーションにおいて、地下街で避難をする人を指す。「人エージェント」は自分以外の人エージェントと壁エージェントと水エージェントを避けながら出口エージェントを目指す。

- 水エージェント (Water)

本シミュレーションにおいて、地下街に侵入していく水を指す。

下に実際に artisoc において各エージェントを設定したエージェントの種類を示す。

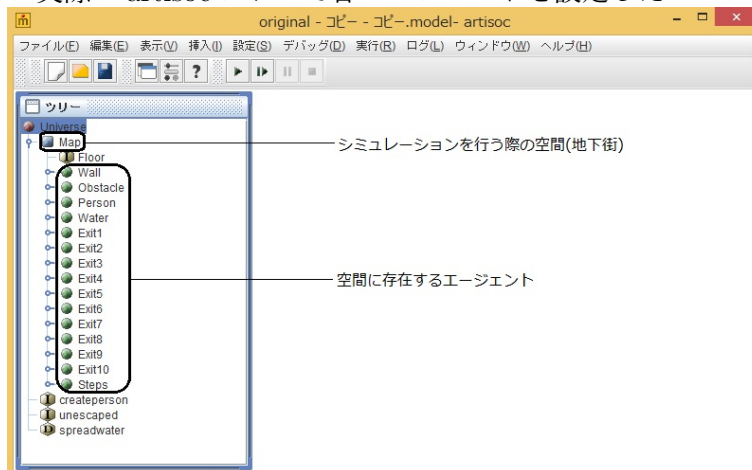


図 3.1.artisoc によるエージェント設定

### 3.1.3 避難時に必要な条件

#### 利用者の避難開始

大阪地下街株式会社では、避難時の場合に構内放送にて利用者に避難の呼びかけを行うこととしている。よって本研究ではシミュレーション開始とともに、人エージェントも避難を開始するものとする。

#### 歩行速度条件

地下街の利用者の歩行速度は兼田 (2011) より、1.2 m/s とする。しかし、本シミュレーションでは利用者における高齢者の歩行速度を考慮し、20% のエージェントの歩行速度を 0.6 m/s とする。歩行速度が成人の平均の速度に達しない幼児の歩行速度も考慮する必要もあるかもしれないが、この場合は保護者が抱きかかえて避難を開始すると仮定した。また、身体的障害を持つ人などは誘導員と共に行動し、歩行速度は変化しないと仮定した。よって、本シミュレーションでは、乳幼児や身体的特徴を持つ人などによる歩行速度の変化は考慮しない。

## 第4章 シミュレーション実験

### 4.1 実験方法

#### 4.1.1 空間の大きさ

プチシャンエリアは南北に約 140m で東西に最大で約 21m の区間となっている。artisoc の空間は罫線状になっており 1 つ 1 つの正方形をセルと呼ぶ。今回は 1 つのセルの大きさを 1m×1m と定義した。また、空間は 150 コ×50 コのセルの集合でできている。地下街空間を描画ツールを用いて図 4.1 の赤枠部分を参考に再現した (図 4.2)。図 4.1 の緑部分①～⑩がビル連絡口と地上連絡口を合わせた出口となっている。図 4.1 と第 3.1 節の図 3.5 で示した、浸水の可能性がある連絡口と照らし合わせてみると図 5 の①、②、⑧、⑨ が浸水の可能性がある連絡口となっている。これらの連絡口からの水の侵入を想定してシミュレーションを行う。また、シミュレーションソフト「artisoc」はステップ毎ごとに各エージェントが移動または状態を変化させる。よって本シミュレーションでは 1 step を 2 秒として実験を行う。さらに第 3.1 節でも述べたが、梅田地下街のプチシャンエリアにおいて、石垣ら (2011) の研究によると地下街に水が流入してから最短で 1200 秒で全員が避難困難状態になる可能性がある。本研究ではこの数字に着目して、シミュレーション開始から 1200 秒、つまり 600 step でシミュレーション終了とした。

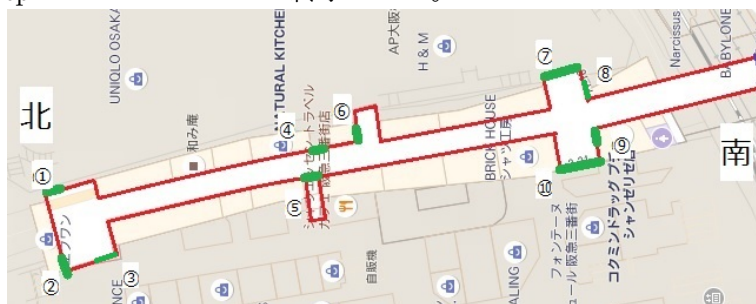


図 4.1. 梅田地下街のプチシャン地区の図 (GoogleMap より)

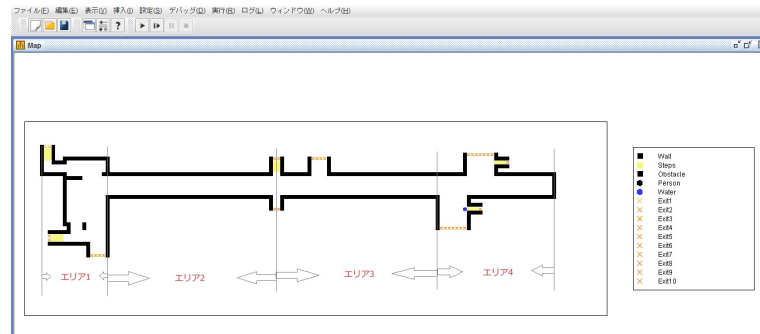


図 4.2.artisoc で描いた梅田地下街プチシャン地区の図

#### 4.1.2 各エージェントのルールの詳細

図 4.2 で示した空間の中に存在するエージェントのうち壁エージェント (Wall)、出口エージェント (Exit)、階段エージェント (Steps) は基本的にただ存在するだけである。以下に人エージェント (Person) と水エージェント (Water) のルールについて説明をする。

##### 水エージェント (Water)

水エージェントの初期値は図 4.1 の出口①、②、⑧、⑨ のいずれかに存在する。水の初期値エージェントは周囲 8 マスにおいて任意の確率で他のエージェントが存在しないマスに新しいエージェントを生成する。この確率を浸水率とする。その後、壁エージェントと出口エージェント、障害物エージェントに重ならないように移動する。また、水エージェントの浸水率はシミュレーションの際に、コントロールパネルを使って 0~1 の間で任意に決めることができる。本研究では 600 step でシミュレーション終了とすることから、600 step の時点で水エージェントが空間内に蔓延するように浸水率を設定する。

##### 人エージェント (Person)

人エージェントの初期値は空間内でランダムに決められている。また、プチシャンエリアに存在するある時間帯での利用人数は谷口ら (2014) のシミュレーション条件を参考に 1000 人に設定した。さらに人数の変化による避難完了率の変化を調べるため、1000、700、500、300 の場合を想定している。兼田 (2010) によると人の占有面積は、ショッピングバッグを持った状態で、男性で 587 mm×426 mm、女性で 484 mm×323 mm となっている。本研究では人エージェントが占有する面積を 50 cm×50 cm とした。シミュレーション開始と同時に出口エージェントを目指して 1.2 m/s (0.6 マス/step)、20%のエージェントは 0.6 m/s(0.3 マス/ステップ) の速さ移動する。また階段エージェントに存在する間は 0.6 m/s(0.3 マス/step) で移動する。人エージェントが他の人エージェントや壁、障害物と接触した際には進行方向を変えて移動する。その際の角度については宇佐美 (2009) を参考に決定した。シミュレー

ション開始後、移動方向に壁エージェントが存在する場合は左右 90 度どちらかをランダムに選択して向きを変える。他の人エージェントに直面した場合は、左右 45 度どちらかをランダムに選択して向きを変える。その後、進行方向に何もない場合はそのまま移動する。しかし、さらに他の人エージェントに直面する場合は左右 22.5 度どちらかをランダムに選択して向きを変える。また、壁エージェントに直面する場合も左右 22.5 度どちらかをランダムに選択して向きを変える。

このように人エージェントは基本的に壁エージェント、他の人エージェントを避けつつ移動しつつ最終的に出口エージェントを目指す。また、人エージェントは水エージェントの初期値が設定された出口には向かわないものとする。さらに、水エージェントと人エージェントが接触している場合には人エージェントの歩行速度を低下させる。須賀ら (1995) に行った研究によると、水中での安全避難歩行速度はおおむね  $0.4 \sim 0.7$  m/s とされていた。よって本研究では人エージェントが水エージェントと重なったときの歩行速度を  $0.4$  m/s ( $0.2$  マス/step) とした。

#### 4.1.3 比較する状況

避難行動をとる際に最も重要なことは人的被害を最小限に抑えることである。本研究では「避難成功率」(避難成功者数/避難者数)に注目し、シミュレーションを行う。人エージェントは 1000、700、500、300 人とした。さらに水エージェントが侵入する連絡口については、浸水口が 1 つのとき出口①、②、⑧、⑨、浸水口が 2 つのとき、出口①②、⑧⑨、浸水口が 4 つの場合、出口①②⑧⑨を想定する。以上の避難者数、浸水口についてそれぞれの計 60 パターンで各 10 回ずつ試行を繰り返す。そして避難完了者数や、避難成功率から人的被害が最も大きい場合、つまり避難完了率が低い場合を浸水口による違いで比較し、危険度の高い浸水口を明確にする。

## 4.2 シミュレーション結果

### 4.2.1 避難完了者数の平均

以下にシミュレーションの結果得られた避難完了者数の平均を浸水口の数ごとにわけて示す。

表 4.1 をみると、避難者の数に関わらず浸水口によってかなりの差があることがわかる。表 4.2 において避難者が 1000 人の場合を見てみると、浸水口が①②の場合に最も避難完了者数の平均が大きく、⑧⑨の場合に最も避難完了者数の平均が少ない。またその差は大きい。しかし避難者が 300 人の場合をみてみると、避難完了者数の平均にそれほど差があるとは言えない。続いて浸水口が①⑧と①⑨の場合をみてみると、人数別での避難完了者数の平均にそれほど差があるとは言えない。これは浸水口が②⑧と②⑨の場合を比較しても同様のことがいえる。

浸水口の数が3つの場合については、人数別にみて避難完了者数の平均にそれほど差はないと思われる。これら避難完了者数の平均に差があるのかを確かめるために、分散分析を行った。

	①	②	⑧	⑨
1000(人)	540.9	471.6	419.0	490.9
700(人)	456.6	396.6	339.7	406.0
500(人)	377.4	341.9	296.6	341.6
300(人)	261.9	245.8	224.2	269.9

表 4.1. 浸水口が1つの場合

	①②	①⑧	①⑨	②⑧	②⑨	⑧⑨
1000(人)	592.3	565.4	565.6	537.3	541.9	509.5
700(人)	473.9	476.4	467.3	443.4	449.4	426.7
500(人)	396.5	392.4	395.2	376.8	383.9	357.6
300(人)	273.5	280.0	282.1	270.4	272.8	275.0

表 4.2. 浸水口が2つの場合

	①②⑧	①②⑨	①⑧⑨	②⑧⑨
1000(人)	564.8	567.0	568.6	564.9
700(人)	463.8	473.7	465.2	470.6
500(人)	390.9	405.5	392.4	391.1
300(人)	276.6	277.5	282.3	277.3

表 4.3. 浸水口が3つの場合

	①②⑧⑨
1000(人)	566.3
700(人)	461.6
500(人)	390.6
300(人)	279.5

表 4.4. 浸水口が4つの場合

#### 4.2.2 分散分析の結果

シミュレーションの結果得られたデータをもとに、浸水口の数ごとに避難者数が1000人と300人の場合のみ分散分析を行った。浸水口が1つの場合、避難者の数が1000人、300人の場合ともに避難成功者数の平均に有意な差が見いだされた(それぞれ  $F(3,32)=103.2$  ,  $p<0.05$ 、 $F(3,32)=184.8$  ,  $p<0.05$ )。浸水口が2つの場合についても、避難者の数が1000人、300人の場合ともに避難成功者数の平均に有意な差があるとされた(それぞれ  $F(5,54)=21.8$  ,  $p<0.05$ 、 $F(5,54)=7.5$  ,  $p<0.05$ )。しかし浸水口が3つの場合については、避難者の数が1000人、300人の場合ともに避難成功者数の平均に有意な差があるとは言えなかった(それぞれ  $F(3,36)=0.2$  ,  $p>0.05$ 、 $F(3,36)=2.6$  ,  $p>0.05$ )。



#### 4.2.3 避難完了率 (避難成功者数/避難者数)

以下にシミュレーションの結果得られた避難成功率についての表を避難者数別に示す。また①～⑩の各連絡口について、水の進入がある場合を1、ない(脱出可能な)場合を0として表現する。

1000 人	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	避難完了率
①	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.541
②	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0.472
⑧	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0.419
⑨	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0.491
①②	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0.592
①⑧	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0.565
①⑨	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0.566
②⑧	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0.537
②⑨	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0.542
⑧⑨	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0.51
①②⑧	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0.565
①②⑨	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0.567
①⑧⑨	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0.569
②⑧⑨	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0.565
①②⑧⑨	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0.566

表 4.5. 避難者

数 1000 人の場合

700 人	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	避難完了率
①	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.652
②	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0.567
⑧	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0.485
⑨	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0.58
①②	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0.677
①⑧	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0.681
①⑨	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0.668
②⑧	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0.633
②⑨	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0.642
⑧⑨	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0.610
①②⑧	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0.663
①②⑨	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0.677
①⑧⑨	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0.665
②⑧⑨	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0.672
①②⑧⑨	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0.659

表 4.6. 避難者

数 700 人の場合

500 人	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	避難完了率
①	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.755
②	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0.684
⑧	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0.593
⑨	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0.683
①②	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0.793
①⑧	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0.785
①⑨	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0.79
②⑧	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0.754
②⑨	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0.768
⑧⑨	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0.715
①②⑧	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0.782
①②⑨	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0.811
①⑧⑨	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0.785
②⑧⑨	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0.782
①②⑧⑨	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0.781

表 4.7. 避難者

数 500 人の場合

300 人	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	避難完了率
①	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.873
②	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0.819
⑧	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0.747
⑨	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0.9
①②	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0.912
①⑧	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0.933
①⑨	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0.94
②⑧	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0.901
②⑨	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0.909
⑧⑨	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0.917
①②⑧	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0.922
①②⑨	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0.925
①⑧⑨	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0.941
②⑧⑨	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0.924
①②⑧⑨	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0.932

表 4.8. 避難者

数 300 人の場合

表 4.5 から 4.8 より、1000 人の場合①②から流水する場合が最も避難完了率が高く、⑧から流水する場合が最も避難完了率が低いことが分かった。700 人、500 人、300 人、の場合についても⑧から流水する場合が最も避難完了率が低いことがわかった。さらに、浸水口の数 4 つの場合みると 1000 人、700 人、500 人、300 人のとき、全 15 パターンある中で避難完了率がそれぞれ上位第 4 位、8 位、8 位、4 位であった。よって、流水する連絡口の数 4 が避難完了率に作用するとは判断できない結果となった。続いて、どの出口が避難完了率に影響を与えているのかを確かめるために、目的変数を避難完了率として重回帰分析を行った。

#### 4.2.4 重回帰分析の結果

1000 人、700 人、500 人、300 人の場合に分けて重回帰分析を行った。その結果 500 人の場合、入水口①の偏回帰係数が最も高く、避難完了率に正の影響が大きいという結果になった。これは 700 人と 1000 人の場合についても同様のことがいえる。また入水口⑧の偏回帰係数が最も小さいことから、⑧から流入があった場合は避難完了率に正の影響が少ないという結果になった。

### 4.3 考察・今後の課題

水の侵入口が①②の場合に最も避難完了者数の平均が大きく、⑧⑨の場合に最も避難完了者数の平均が少ないという結果について、①②から入水した場合、図 4.2 においてエリア

4に存在する人は水と接触する前に出口⑦、⑧、⑨、⑩から避難でき、この4つの出口のうち出口⑦、⑩の幅は比較的広いためたくさんの人が避難できた結果、避難完了率が高くなったと考えられる。また、出口⑧⑨から入水した場合、エリア1に存在するひとは出口①②などの比較的狭い幅の出口から脱出しなければならない。その結果逃げ遅れるひとは発生し、避難完了率に負の影響が出たと考えられる。また避難者の数に関わらず、浸水口が複数ある場合に対して、浸水口が1つの場合の避難成功者数の平均が小さいという結果について、本研究では実験の際に人エージェントが水エージェントの初期値が存在する連絡口には向かわないように設定してある。ゆえに人エージェントは迷うことなく限られた連絡口へ向かう。ゆえに、浸水口が多い、つまり避難可能な連絡口が限られた場合のほうが避難完了者の平均が高くなるという結果が得られたと考えられる。本研究で行った実験によって、プチシャンエリアにおいて水の侵入の危険性がある4つの連絡口のうち連絡口⑧が最も人的被害の影響が大きいと結論づけることができる。

実際の避難状況には地下街に侵入する水の数や量、避難者の心理状態までもが人的被害結果に左右される。これらを考えた場合、シミュレーションの際に加味しなければならない条件は無数に存在する。しかし、本研究ではマルチエージェントシミュレーションという手法を採用し、避難者の歩行速度や、歩行者が移動中に他のエージェントを回避しようとする角度などを詳細に決定することができた。その結果より現実に近いシミュレーションを行い、いくつかのパターンを相対的に比較することができた。また、本研究では梅田地下街のプチシャンエリアに限定してシミュレーションを行ったものであり、図2.1や2.2に示されるように他のエリアにおいても浸水時に危険性のあるエリアが存在する。よって今後はそのエリアに関しても同様のシミュレーションを行い、浸水時に人的被害の影響が大きい連絡口を選定しなければならない。またその後の対策として、選定された連絡口の近くに新たな連絡口を設けるなどの対策を取らなければならない。

## 第5章 おわりに

本研究では、マルチエージェントシミュレーションを採用し、地下街において浸水被害が起こることを想定した上で、水の侵入が避難完了率に及ぼす影響を明らかにすることを目的として避難行動に関するシミュレーションを行った。シミュレーションソフト「artisoc」を用いることで、避難現場に存在する人・物体・特に本研究に関しては浸水する水の動きを再現することができた。さらにその結果、人数別や浸水口別の避難完了率に関してのデータを取得することができ、それらを統計的手法を用いて分析を行うことで浸水時に人的被害が大きく危険度の高い浸水口を明らかにした。いつ起こるかわからない災害を想定し、予め被害の予測をしておくことで防災意識を高めるとともに、実際に災害が起こったときに迅速な避難行動をとることができるかもしれない。これから起こりうるであろう災害に対して人的被害を最小限にとどめることを願ってやまない。

## 謝 辞

本論文を執筆するにあたり、多大なるご指導を賜りました深川大路助教、星英仁准教授、シミュレーションソフト「artisoc」を無償で貸与して下さった構造計画研究所様に厚く御礼を申し上げます。最後に、卒業に至るまでの間ご指導いただいた諸先生方に心からの感謝の意を表します。

## 参考文献

- [1] 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, pp. 1017-1036, 2008.
- [2] 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. 社会技術研究論文集, Vol.3, 138-145, Nov.2005.
- [3] 関根正人, 大野龍馬. 集中豪雨により発生する地下空間の浸水と利用者の避難誘導に関する数値解. 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.69, No.1, 30-34, 2013.
- [4] 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. 実土木情報利用技術論文集, Vol.17, 2008.
- [5] 清野純史, 土岐憲三, 犬飼信広, 竹内徹. 避難行動シミュレーションに基づく地下街の安全性評価. 土木学会論文集 No.689/I-57, 31-43, 2001.
- [6] 犬飼洋平, 小国健二, 堀宗朗. 情計測に基づく避難行動マルチエージェントシミュレータの開発. 人応用力学論集, Vol.8, pp.629-636, 2005.
- [7] 松田泰治, 大塚久哲, 樗木武, 内田広. セルオートマトン法を用いた地下街の避難行動シミュレーションに関する一考察. 地域安全学会論文集, No.2, 2000.
- [8] 宇佐美一郎. マルチエージェントを用いた火災発生時の避難シミュレーション～大阪市浪速区の個室ビデオ店放火事件の実例に基づいた研究～. 2009.
- [9] 城田拓耶. マルチエージェントによる避難計画を踏まえた教室配置の検証～芝浦工業大学大宮キャンパス新2号対象～. 2011.
- [10] 須賀堯三, 上坂恒雄, 吉田高樹, 浜口憲一郎, 陳志軒. 水害時の安全避難行動 (水中歩行) に関する検討. 地域安全学会論文会, 第 39 巻, 1995.
- [11] 石垣泰輔, 戸田圭一, 尾崎平, 馬場康之, 井上和美. 内水氾濫時における大規模地下空間浸水と避難. 京都大学防災研究所年報, 第 54 号 B, 2011.
- [12] 合田祥子, 谷口与史也, 吉中進, 瀧澤重志. 大阪駅前地下街の津波避難計画に関する研究. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2014.
- [13] 兼田敏行. artisoc で始める歩行者エージェントシミュレーション. 構造計画研究所, 2010.