

## 地下街の避難誘導に資する避難シミュレーションモデルの開発

大阪工業大学工学部 准教授 山口行一

### 1. はじめに

地下街は、大規模化・複合化が進み、買い物や乗り換えなど不特定多数の来街者に利用されている。近年、地下街では、そうした都市機能を適切に確保していくと同時に、大規模地震などへの防災・減災対策を早期に進めることが必要となっている<sup>1)</sup>。避難上の問題点を特定あるいは改善するためには、事前に災害発生時の来街者の避難行動を予測する必要があるため、避難行動シミュレーションはその有効な予測手法となっている。

発災時の避難者はそれぞれが独立した個体であり、異なる行動特性を持っていて、複数の避難者の様々な行動特性が相互に影響を及ぼし合いながら、群衆全体の避難が構成されていると考えられる。このため、避難行動シミュレーションには、個人の行動を考慮し、避難者の相互作用から全体の避難状況を表せるモデルが必要で、数理モデルやヴァーチャルリアリティを用いた避難シミュレータでは困難と言われている。このような現象に対して、各個体をエージェントとして捉え、個々のエージェントにルールを与え、システム全体の現象を捉えようとする手法にマルチエージェントシステム（以降、MAS）がある。

MAS を用いた研究は、オフィスビルなどの建築物や市域全体を対象として、避難者が避難開始時に避難先との最短避難経路を既知として合理的な行動をとることを前提にしている研究が多い。しかし、外出先である地下街などで多くの来街者が被災した場合、最寄りの避難施設や最短避難経路を認知できないといった混乱が発生するが、この点に着目した避難シミュレーションに関する研究は蓄積が少ない。

そこで本研究では、地下街での避難者が最寄りの避難施設や最短避難経路を認知できないことを表現して、避難先選択意識の異なるモデルを比較し、群衆避難に与える影響を明らかにすることを目的とする。

本稿では、まず避難意識を考慮した避難行動シミュレーションモデルの構築を行う。次に、「避難先選択意識」と「避難先の対応」の異なる 4 つのシミュレーションパターンを設定する。そして、シミュレーションを行い、避難者の避難意識が群衆避難に与える影響を分析し、避難完了時間や混雑する出口などを明らかにする。最後に、初動時の避難先として「最寄りのビル」と「知っているビル」を目指す割合を設定してシミュレーションを行い、避難完了時間を明らかにする。

### 2. 対象地域

対象地域は、図-1 に示す大阪梅田地下街とする。対象地域には、54 棟の接続ビル<sup>2)</sup>が存在するが、避難シミュレーションには、オフィスなどを除いた商業施設 40 棟<sup>1)</sup>（津波避難ビル<sup>2)</sup> 3 棟を含む）を用いる。南海トラフ巨大地震が発生した際、発災から約 1 時間 50 分後に、大阪市沿岸部へ津波が到達し、対象地域は最大 1.9m の浸水が予想されている<sup>3)</sup>。

### 3. 避難行動シミュレーションモデルの構築

#### (1) シミュレーションモデルの構成



図-1 対象地域

本研究では、発災時に地下街にいた来街者が避難先を決め、地上や地下の経路を選択し避難するシミュレーションモデルを、(株)構造計画研究所が作成した MAS のプラットフォーム「artisoc4.2」を用いて構築する。本研究では、空間表現形式として、「セル空間表現」を用いる。セル空間表現とは、二次元空間をグリッドに分割した、ある一つのセルにエージェントが位置するとし、そのセルから別のセルに位置を移すことで行動を表現する形式である<sup>4)</sup>。このため、地下街をグリッドに分割し、すべての出口に対して、各出口からの距離（以降、ポテンシャル値）をセルに格納した「ポテンシャルマップ」を作成している。ポテンシャルマップは、出口セルを「0」としてそこから離れれば離れるほど大きな数字がセルに格納される。発生したエージェントは、全出口のポテンシャルマップを読み取り、全ポテンシャルマップの中から、エージェントが現在いる地点において最もポテンシャル値の小さいポテンシャルマップを見つけ出し、そのマップを用いて避難先に向けてポテンシャル値の小さいセルを選択しながら移動する。地下街の通路にいた全ての避難者が地下街からいなくなれば避難完了である。

(2) シミュレーションの比較パターン

避難完了時間は、避難者が選択する避難先や、避難先での受け入れ可否といった対応に影響を受けるため、表-1 に示す 4 つの異なるパターンを設定しシミュレーションを行った。避難者が最寄りのビルを目指して避難を開始し、全接続ビルが避難者を受け入れるパターン 1 と、津波避難ビル（3 棟）以外の接続ビルではビル内にいる人を外に避難させるため地下街の避難者を受け入れないパターン 2 のほか、避難者が自分が知っているビルに避難しようとして避難を開始し、その知っているビルが避難者を受け入れるパターン 3 と、津波避難ビル（3 棟）以外の知っているビルでは受け入れないパターン 4 とした。なお、出口の混雑や収容人数超過により避難先を変更する場合は、全パターンにおいて最寄りの地上への階段または接続ビルを避難先とする。すべてのパターンにおいて地上への階段では地上での混雑を考慮して、3 種類の階段歩行速度パターン（① 0.6m/s、② 0.3m/s、

表-1 比較パターンの概要

		パターン1	パターン2	パターン3	パターン4
避難先選択意識		最寄りのビル (40棟)	最寄りのビル (40棟)	知っているビル (13棟)	知っているビル (13棟)
避難先の対応		全接続ビル (40棟) 受け入れ	津波避難ビル(3棟)以 外の接続ビルでは 受け入れない	全接続ビル (40棟) 受け入れ	津波避難ビル(3棟) 以外の接続ビルでは 受け入れない
避難先への 移動経路	いち早く 地上に出て避難	77.6%			
	地下のみで避難	22.4%			
避難先変更後の避難先		地上への階段 または 最寄りのビル (40棟)			
地上への階段での歩行速度		① 0.6m/s ② 0.3m/s ③ 0.15m/s			

③ 0.15m/s) を設定して比較を行う。なお、比較は各パターン階段歩行速度別に 10 回ずつシミュレーション (図-2 参照) を実行した結果の平均値を用いて行う。

(3) ルールの設定

1セルを 1.2m×1.2m と定義して、避難者は自身を中心としたムーア近傍の 8セルの中から、ポテンシャル値の低いセルを選択し移動する。ただし、進行方向のセルに別のエージェントが存在する場合は、他のポテンシャル値の低いセルに移動するか、その場に立ち止まることになる。なお、選択したセル (エージェントの存在しないセル) が、他のエージェントが選択したセルと同じになった場合のみ、1セルに複数のエージェントが存在することとなる。

地上への階段または接続ビルの出口から半径 12m~24m 間の移動に 30 秒以上要した場合、出口が混雑していると判断して、別の地上への階段 または 最寄りの接続ビルに避難先を変更する。出口から 12m 圏内にエージェントが並んだ場合は、接続ビルの収容人数が超過しない限り、避難先を変更することはなく、待ち行列があればその場で並び続ける。

(4) システムの設定

本研究では、避難者数は対象地下空間 (店舗、駅を除く) に存在した 9,760 人 (2018 年 11 月 16 日(金)18:00 時点の当研究室で調査したデータ) とし、対象地域内にランダムに発生させる。出口数は地上への階段が 146ヶ所と接続ビルへの出口が 100ヶ所の計 246ヶ所、歩行速度は階段以外で 1.2 m/s、階段では地上での混雑を考慮して 3パターン (0.6、0.3、0.15m/s) に変化させて比較する。避難先までの避難経路は、最寄りの出口から地上に出て選択したビルに避難が 77.6%、地下のみの経路で選択したビルに避難が 22.4%とした (2017 年度に当研究室での調査データに基づいて設定)。避難先としての「知っているビル」については、図-3 に示す 13 棟を設定し、各ビルに重みづけ (以降、避難先選択割合) を行った。接続ビルの収容人数は、津波避難ビルの避難可能フロア割合から算出して設定した<sup>(3)</sup>。なお、地上からの避難者も考慮して、地下からの収容人数は半分とした。

4. 避難先選択が群衆避難に与える影響分析

(1) 避難完了時間

パターン1~4の階段歩行速度別の平均避難完了時間を、表-2に示す。パターン1とパターン2



図-2 シミュレーションの様子（避難開始直後）

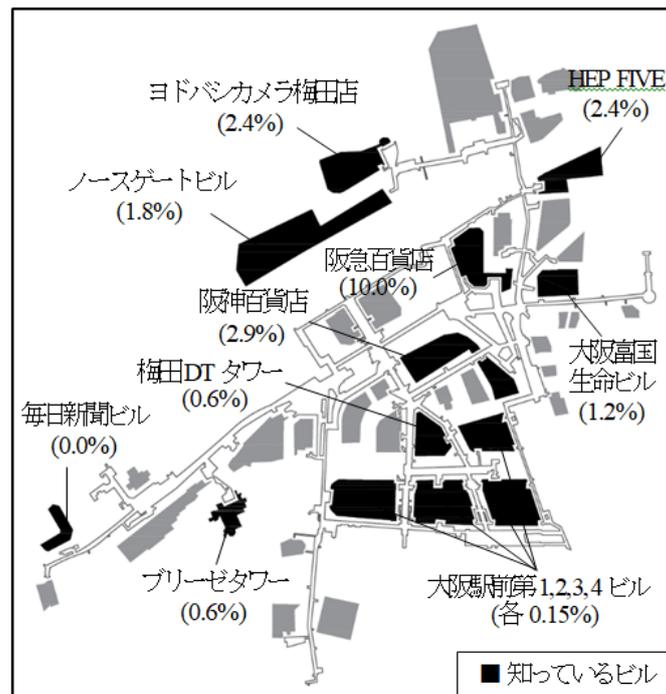


図-3 知っているビルと避難先選択割合

表-2 平均避難完了時間

	パターン1	パターン2	パターン3	パターン4
階段歩行速度 0.6m/s	10'00"	13'40"	100'38"	95'08"
階段歩行速度 0.3m/s	14'58"	18'57"	70'19"	80'10"
階段歩行速度 0.15m/s	19'37"	24'23"	89'30"	81'23"

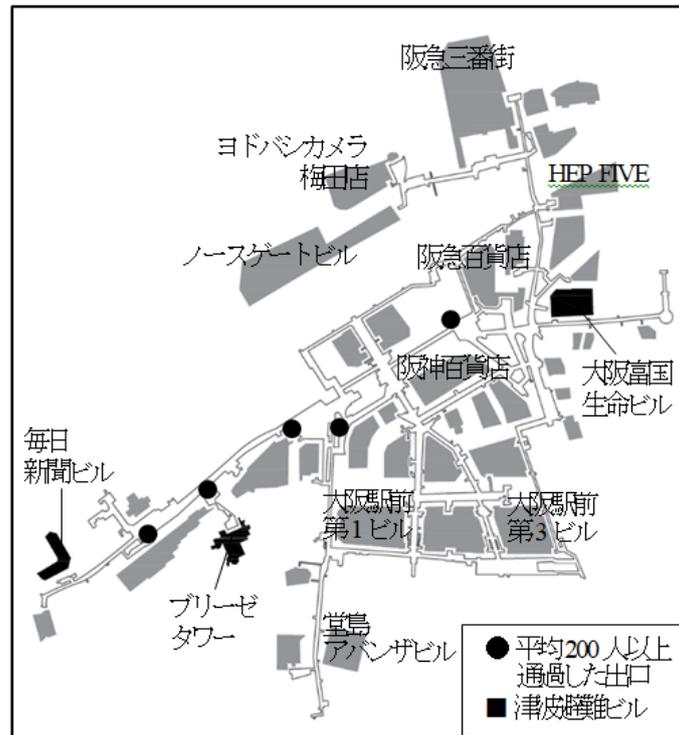


図-4 全パターンにおいて平均 200 人以上通過した出口

は、階段歩行速度が遅くなれば避難完了時間も長くなったが、パターン 3 とパターン 4 は、階段での歩行速度が最も速い 0.6m/s で避難完了時間が最も長くなった。これは、エリア内にランダムに発生させたエージェントが知っているビルに設定されているビルからランダムにビルを選んで避難するため狭い通路で交差する事案が発生し、そこで混雑が発生し解消まで時間がかかっているためである。パターン 1、2 とパターン 3、4 の避難先選択意識の違いによる比較では、平均避難完了時間に約 70 分もの差が生じた。よって、避難先選択意識の違いが避難完了時間に影響を与えるといえる。

(2) 混雑する出口

地上への階段と接続ビルが出口として選択されるが、「接続ビルで受け入れる（パターン 1、3）」と「津波避難ビル以外の接続ビルでは受け入れない（パターン 2、4）」を比べると、後者の方が平均 200 人以上通過した地上への階段の数も多くなった。また、パターン 3 のみ平均 200 人以上通過した接続ビルへの出口が 2 カ所あった。この出口は、知っているビル（13 棟）に指定した「阪急百貨店」と「HEP FIVE」への出口であり、阪急百貨店は避難先選択割合の高さ、HEP FIVE は地下街に接続する出口数の少なさが原因で発生していた。

参考として、全てのパターンで平均 200 人以上通過した出口は 5 ヶ所を図-4 に示す。特に西側は

表-3 パターンの概要

	パターン5	パターン6
避難先 選択意識	最寄りのビル (40 棟) : 53% 知っているビル (13 棟) : 47%	
避難先 の対応	全接続ビル (40 棟) 受け入れ	津波避難ビル (3 棟) 以外の 接続ビルでは受け入れない

地上への出口が比較的少ないため避難者が集中したと考えられる。

### (3) 接続ビルへの避難者数

パターン 1 では、全ての階段歩行速度において平均避難者数が最も多いのが、阪神百貨店、次いで、大阪駅前第 3 ビル、サウスゲートビルとなった。これは、阪神百貨店は 12 ヶ所、サウスゲートビルは 17 ヶ所の出口で地下街と多く接しているため、大阪駅前第 3 ビルは通路幅の広い地下街と接しているためだと考えられる。5 番目は、阪急百貨店が多くなった。

パターン 3 では、全ての階段歩行速度における平均避難者数が多い順に、阪急百貨店、次いで、阪神百貨店、ヨドバシカメラ梅田店となった。これは、避難先選択割合の上位 3 棟である。

パターン 2、4 では、津波避難ビル以外の接続ビルは受け入れないため、津波避難ビルのみ避難者が集中した。

避難者数には、各接続ビルが地下街と接している出口の数や地下街の通路幅、避難先選択割合が影響していることがわかった。避難先選択意識が「最寄り」「知っている」どちらの場合でも避難者数が増えるのは、阪急百貨店と阪神百貨店となった。これは、この 2 つのビルが地下街と接している出口の数が多く、地下街の通路幅も広く、知名度が高いことが考えられる。また、この 2 つのビルは、鉄道駅とも隣接しており鉄道駅からの避難者を考慮すると更なる混雑が予想される。

なお、全てのパターンにおいて、収容人数を超えた接続ビルは存在しなかった。

## 5. 避難先選択割合を考慮した避難行動分析

### (1) 設定条件

本研究室の過去の調査で得られた結果をもとに、初動時の避難先として「最寄りのビル」を目指す割合を 53%、「知っているビル」を目指す割合を 47%としてシミュレーションを行う。パターンの概要を、表-3 に示す。避難先の対応として「全接続ビル (40 棟) が受け入れ」であるパターン 5 と、「津波避難ビル (3 棟) 以外の接続ビルでは受け入れない」であるパターン 6 の 2 パターンとする。避難先選択割合以外の条件、例えば、同じ避難先でも、いちはやく地上に出て避難する経路を選択する割合と地下だけの経路で避難する割合などの設定は、4 章と同様とする。

### (2) 避難完了時間

パターン 5 と 6 の階段歩行速度別の平均避難完了時間を表-4 に示す。パターン 5 では、各階段歩行速度における平均避難完了時間は、0.6m/s で 23 分 12 秒、0.3m/s で 23 分 34 秒、0.15m/s で 25 分 39 秒となった。最寄りのビルに全員が避難するパターン 1 と比べて 6 分から 15 分程度長くなっている。パターン 6 では、各階段歩行速度における平均避難完了時間は、0.6m/s で 24 分 21 秒、0.3m/s で 25 分 52 秒、0.15m/s で 26 分 56 秒となった。パターン 2 と比べると、3 分から 10 分程度長くなっていることがわかった。パターン 1 やパターン 2 に比べると、階段の歩行速度の影響や避難先の対応の違いが避難完了時間に与える影響は小さくなっている。今回のモデルは地下街に存在する避難者のみを対象としているため、商業施設や駅などからの避難者を考慮した場合は、出口前での避難先

表-4 平均避難完了時間

	パターン5	パターン6
階段歩行速度 0.6 m/s	23'12"	24'21"
階段歩行速度 0.3 m/s	23'34"	25'52"
階段歩行速度 0.15 m/s	25'39"	26'56"

変更の際に衝突などが今回よりも多く発生し、避難完了時間への影響が大きくなる可能性がある。

### (3) 出口の混雑状況

パターン5で平均200人以上通過した地上への階段は、図-4に示した5ヶ所であった。平均200人以上通過した接続ビルへの出口は、HEP FIVEへの出口のみであり、出口が1ヶ所しかないので避難者が集中したと考えられる。パターン6で平均200人以上通過した地上への階段は、最大9ヶ所となった。パターン5と比べると、200人以上通過した階段は、知っているビルの最寄りの階段が多い。このため、特定の出口や知名度の高いビル周辺の出口に人が集中し混雑が発生する可能性があることから、地下街と接続ビルが連携して適切に避難誘導を行う必要があると思われる。

### (4) 接続ビルへの避難者数

パターン5では、全ての階段歩行速度において平均避難者数が最も多いのは、ヨドバシカメラ梅田店(249人)、次いで、HEP FIVE(222人)、阪神百貨店(204人)となった。パターン6では、全ての階段歩行速度における平均避難者数が最も多いのは、大阪富国生命ビル(165人)、次いで、グリーンゼタワー(50人)、毎日新聞ビル(14人)となった。また、両パターンにおいて、収容人数を超えた接続ビルは存在しなかった。

接続ビルへの避難者数は、各接続ビルが地下街と接している出口の数や地下街の通路幅、避難先選択割合が影響していることがわかった。

## 6. おわりに

本研究は、地下街にいる避難者が最寄りの避難施設や最短避難経路を認知できない影響を検討するため、まず避難先選択意識と避難先の対応の異なる4パターンを比較し、群衆避難に与える影響を明らかにした。以下にその結果を示す。

- ・最寄りのビルに避難するか、知っているビルに避難するかといった「避難先選択意識」の違いによる比較では、平均避難完了時間に約70分もの差が生じた。避難先選択意識の違いが避難完了時間に大きな影響を与えることが明らかになった。
- ・「避難先の対応」の違いによる比較では、「最寄りのビル」に避難する場合、全接続ビルが避難者を受け入れる方が津波避難ビルのみ受け入れに比べ避難完了時間が短い、「知っているビル」に避難する場合、混雑の発生状況の影響が大きく、避難完了時間が長くなった。また、ばらつきも大きく、明確な示唆は得られなかった。

既往の成果をもとに、初動時の避難先として「最寄りのビル」を目指す割合を53%、「知っているビル」を目指す割合を47%と設定してシミュレーションを行った避難完了時間について以下に結果を示す。

- ・各パターンの避難完了時間は、階段歩行速度別(0.6、0.3、0.15m/s)にそれぞれ、パターン5が23分12秒、23分34秒、25分39秒、パターン6が24分21秒、25分52秒、26分56秒となった。
- ・地上への階段で、平均200人以上通過した5ヶ所の出口周辺は、地下街の西側にあり地上への出

口が少ないため避難者が集中することがわかった。平均 200 人以上通過した接続ビルへの出口は、HEP FIVE であり、出口が 1 ヶ所しかないため避難者が集中したと考えられる。これらの出口周辺では、特に適切な避難誘導を行わなければ更なる混雑が予想される。

今後の課題として、セルを実際の人体占有面積に近い大きさに変更することや、避難者に商業施設や駅などの利用者や従業員を含めること、避難者をエリアごとの密度に合わせて発生させること、出口前の混雑による避難先変更の目安の解明、artiso の制約により発生する混雑の解消があげられる。

#### 【補注】

- (1) 対象接続ビルは、「工事中」「オフィス」「ホテル」「病院」「駐車場」を除く 40 棟とする（2018 年 10 月 27 日現在）。
- (2) 津波避難ビルとは、各自治体が定める要件を満たした建築物で、協定を締結した建物である。緊急時に一時避難する場所であり、安全が確認された後には、避難者は自宅や小学校等の収容避難所へ移動する。
- (3) 接続ビルの収容人数は、「①津波避難ビルの地上 2 階以上の階数」の内、「②受け入れに指定している階数」の割合を求め「③平均値」を算出する。次に、その値（③）を「④接続ビルの地上 2 階以上の階数」に乗じて、「⑤推定の受け入れ可能階数」を求める。その値（⑤）に、「⑥1 階あたりの面積」を乗じて受け入れ可能面積を求め、「⑦避難者 1 人あたりの占有面積」で除して「⑧推定受け入れ可能人数」を求める。最後に、地上からの避難者も考慮して、「⑧推定受け入れ可能人数」の 1/2 を「⑨地下からの避難者の推定受入可能人数」とした。ただし、「⑨地下からの避難者の推定受入可能人数」は、小数点以下切り上げとした。

#### 【参考文献】

- 1) 国土交通省「地下街の安心避難対策ガイドライン」2014 年 4 月。
- 2) 大阪市「大規模な地下空間の浸水対策の取り組み」  
<https://www.city.osaka.lg.jp/kikikanrishitsu/page/0000259323.html>, 閲覧日 2019.10.16.
- 3) 大阪市地下空間浸水対策協議会「大阪駅周辺地区地下空間浸水対策計画 Ver.1（2016.3）」  
<https://www.city.osaka.lg.jp/kikikanrishitsu/page/0000259323.html>, 閲覧日 2019.10.16 .
- 4) 兼田敏之（2010）「artiso で始める歩行者エージェントシミュレーションー原理・方法論から安全・賑わい空間のデザイン・マネジメントまでー」p.3, 株式会社構造計画研究所.