

地下街における避難者個人の避難先選択が群衆避難に与える影響に関する分析 — マルチエージェントシミュレーションを用いて —

M18-104 久保山 凌

1. はじめに

近年の地下街は、ますます大規模化・複合化が進み、買い物や乗り換えなど不特定多数の利用者にとって重要な歩行空間としての役割を有しており、引き続きその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¹⁾。そのためには、事前に災害発生時の避難行動を予測して、避難上の問題点を改善する必要がある、避難行動シミュレーションは有効な手段として注目されている。

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、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では、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を用いた研究では、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するなど合理的な行動を前提にしている研究が多い。しかし、地下街などの屋外空間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、避難者の選択意識が群衆避難に与える影響を避難完了時間や混雑する出口などを分析し、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、現実に近い避難完了時間を明らかにする。

2. 対象地域

本研究の対象地域は、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²⁾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¹⁾（津波避難ビル²⁾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³⁾。

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

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⁴⁾。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」を作成する。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、避難先に向けて現在地のポテンシャル値より小さい値のセルを選択しながら移動する。

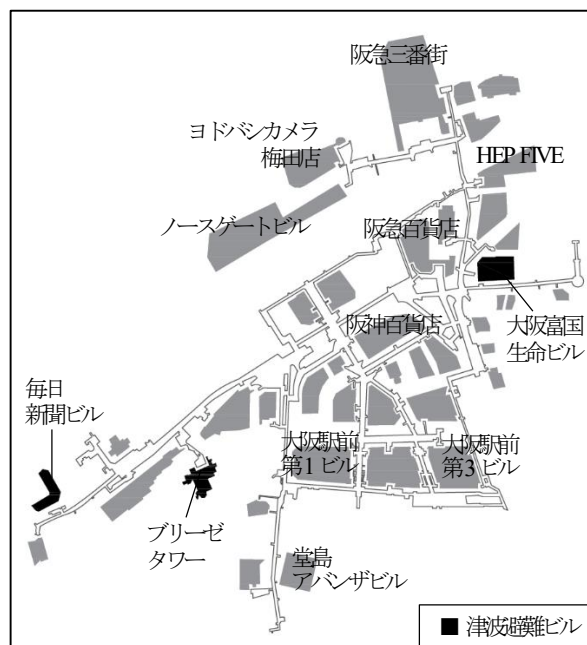


図-1 対象地域

(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避難者を受け入れないパターン2のほか、避難者が知っているビルを目指して避難を開始し、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最寄りの全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(①0.6m/s、②0.3m/s、③0.15m/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、他の低いポテンシャル値のセルに移動するか、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)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、基本的(接続ビルの収容人数が超過した場合は除く)に避難先を変更することはない。

(4) システムの設定

本研究では、避難者数を対象地下空間(店舗、駅を除く)に存在した9760人とし、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1.2m/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、避難先までの避難経路は最寄りの出口から地上に出て避難が77.6%、地下のみで避難が22.4%とした。避難先選択意識としての知っているビルについては、図-2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⁹⁾。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。全体で見ると、パターン1とパターン2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ランダムに知っているビルに避難することにより、狭い通路で交差することになり混雑が発生し、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

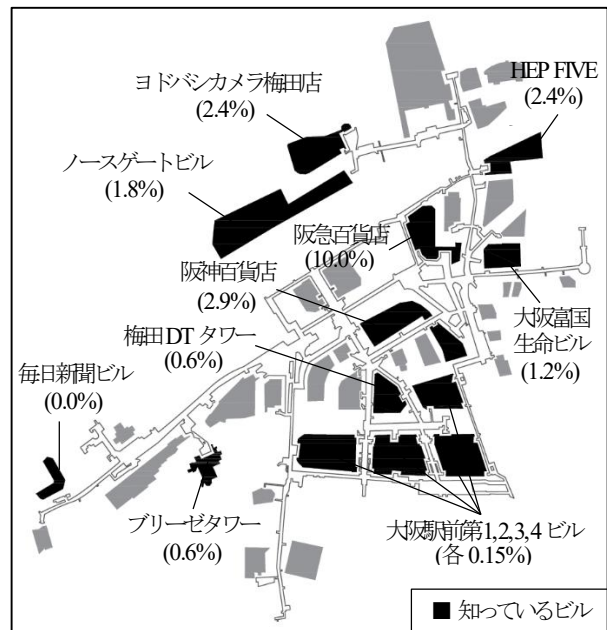


図-2 知っているビルと避難先選択割合

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	知っているビルを含む全接続ビル(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

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"
平均	14'52"	19'00"	86'49"	85'54"

に大きな影響を与えることが明らかになった。

(2) 出口の混雑状況

全体で見ると、避難先の対応が「受け入れ（パターン1、3）」から「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）」になると平均200人以上通過した地上への階段の数も増加する結果となった。接続ビルへの出口で平均200人以上通過したのは、パターン3のみであった。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。

パターン1で平均200人以上通過した出口は5ヶ所（図-3）あり、全パターンで含まれていた。周囲に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、全階段歩行速度における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おり、大阪駅前第3ビルは通路幅の広い地下街と接しているからだと考えられる。なお、阪急百貨店は5番目に多くなった。

パターン3では、全階段歩行速度における平均避難者数が最も多いのが、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棟となった。

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発生した。

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



図-3 全パターンにおいて平均200人以上通過した出口

ちらの場合でも避難者数が多くなるのは、阪急百貨店と阪神百貨店となった。それは、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、知名度も高いからである。また、この2つのビルは、鉄道駅とも隣接しており今後駅からの避難者を考慮すると更なる混雑が予想される。

全パターンにおいて、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

本研究室の調査で得られた結果から、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。その他の設定は、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の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。よって、階段での歩行速度が0.6m/sから0.3m/sになった時に22秒長くなり、0.3m/sから0.15m/sになった時に2分5秒ずつ長くなることがわかった。パターン6の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。よって、階段での歩行速度が0.6m/sから0.3m/sになった時に1分31秒長くなり、0.3m/sから0.15m/sになった時に1分4秒ずつ長くなることがわかった。ただし、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、実際の避難完了時間はより長くなると考えられる。階段歩行速度や避難先の対応

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

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"
平均	24'08"	25'43"

の違いが避難完了時間に与える影響は、今回のモデルでは、僅かな差であったが、商業施設や駅などからの避難者を考慮した場合は、出口前での避難先変更の際に衝突などが今回よりも頻繁に発生し、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-3に示す5ヶ所であった。接続ビルへの出口は、HEP FIVEへの出口であり、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。

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ヶ所となり、パターン5から追加されたのは知っているビルに設定しているビルの最寄りの階段が多いため、地下街と接続ビルの連携が不十分であった場合、仮に地下街の歩行者の密度が低かったとしても、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。

(4) 接続ビルへの避難者数

パターン5では、全階段歩行速度における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、ブリーゼタワー(50人)、毎日新聞ビル(14人)となった。

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。地下街にランダムに発生させているため、地下街の通路幅の広い場所に比較的多くのエージェントが発生しているが、実際の密度と差があるため、今後エージェントの発生方法を改善する必要がある。

全パターンにおいて、収容人数を超えた接続ビルは存在しなかった。これは、商業施設や駅などの利用者や従業員は除く地下街に存在する避難者9760人を対象としているからであり、今後それらを考慮した場合は、収容人数を超えるビルが発生する可能性がある。

6. おわりに

本研究は、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、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。

- ・「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、ばらつきがあった。

最後に、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い、現実に近い避難完了時間を明らかにした。以下にその結果を示す。

- ・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、地下街の通路幅が比較的広いにも関わらず、地上への出口が少ないため避難者が集中していることがわかった。接続ビルへの出口は、HEP FIVEへの出口であり、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、artisoc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7月27日現在)。
- (2) 津波避難ビルとは、各自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」、JP、<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)」。
- 4) 兼田敏之(2010)、「artisoc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」、p.3、株式会社構造計画研究所。