

マルチエージェントモデルを用いた 大規模地下空間における避難行動の検討

中阪 友太郎¹・石垣 泰輔²

¹ 学生会員 関西大学大学院 理工学研究科 (〒564-8680 吹田市山手町 3-3-35)

E-mail: k192114@kansai-u.ac.jp

² 正会員 関西大学教授 環境都市工学部 都市システム工学科 (〒564-8680 吹田市山手町 3-3-35)

E-mail: ishigaki@kansai-u.ac.jp

近年, 大都市において限られた土地を有効活用するために地下空間の利用が進んでいる. 特に地下鉄や地下街が連続的に接続された大規模地下空間により, 生活の利便性や快適性は向上した. 一方で, 災害発生時に地下空間内に留まることは危険であり, 安全かつ迅速な避難行動を行うことが防災上の重要な課題である. しかしながら, 大規模な閉鎖空間における群衆の避難行動については, 安全面やコストの問題から避難訓練等の実験による検討は困難である. そこで, 本研究では簡易的なマルチエージェントモデルを用いることで, 地下空間における歩行者の避難行動のシミュレーションを行い, 地下から地上への出口までの避難行動を分析した. また, 出口までの最短経路を知っているかどうかで避難が完了する時間がどれだけ変化するかを比較した.

Key Words: *underground, space user, evacuation, complex system, multi-agent model,*

1. はじめに

わが国では, 国土の10%の平野に総人口の50%, 資産の75%が集中することで密集市街地を形成してきた. 近年では, このような都市域を高度利用するという観点から地下空間の利用が拡大し, 多数の地下鉄駅, 地下街, 地下道などが建設されている. また, 多数の建築物の地階と地下道が接続することで地下空間の大規模化が進行し, 巨大な地下交通ネットワークを形成している.

大規模地下空間の形成によって, 都市活動における快適性や利便性が向上したが, 災害に対する安全性も十分に検討する必要がある. どうすれば安全かつ迅速な避難行動を行えるかが防災上の重要な課題である.

しかしながら, 大規模な閉鎖空間における群衆の避難行動については, 安全面やコストの問題から実験による検討は困難である. また, 群衆による行動は各々の自律性や相互作用などの様々な要因によって変化する複雑なものとなるため, 単純な数値解析でシミュレーションを行うことも困難である.

そこで, 本研究では, 複雑な状況変化にも対応できるシミュレーション手法であるマルチエージェントモデルを用いることで, 実在する大規模地下空間を対象として

歩行者の避難行動のシミュレーションを行い, 地上への出口までの避難行動を分析した. 具体的には, 来街者を避難行動者として, 出口の場所と出口までの最短経路を予め知っているという「土地鑑」の有無に着目して, その割合を変化させることで避難完了時間がどのように変化するのかを分析した. また, 今回は地下空間と接続しているビルや百貨店についてはほとんど考慮せず, 地上への出口を目標地点と設定して避難行動シミュレーションを行った.

2. 避難行動シミュレーションの概要

(1) 避難シミュレーションの意義

災害時における避難行動を分析するには, 災害時の状況を再現した上で実験を行う必要がある. しかし, 大都市の地下街のような場所では, 災害が発生した状態を作ることや利用者の通行を一時的に止めることは困難である. そこで, コンピュータによる避難行動シミュレーションによる分析を用いれば, 災害発生時における空間やその中にいる人間の行動特性を考慮した避難モデルを作成することができ, 時間を選ばずに実験を行えるという

利点を持っている。ただし、避難シミュレーションはルールなどの設定により結果が大きく異なるため、現実的な結果を得るには対象となる空間の情報や人間の特性について検討を行う必要がある。また、シミュレーションは多種多様な条件下で繰り返し実験を行うことができるため、比較分析が容易に行えるという利点もある。

(2) 避難行動シミュレーションの方法

避難行動シミュレーションの方法としては、群衆を流体として物理モデルを用いる方法や空間を多数のセルで表現し近隣のセルと相互作用させて状態を変化させるセルオートマトン法などがある。本研究では、大規模な空間での群衆の挙動を分析するために「マルチエージェントシステム」を用いた避難行動シミュレーションを行う。マルチエージェントシステムとは、仮想空間に人や物を配置し、各々に独自のルールを持たせて相互作用を考慮することにより、人間の自律的な意思決定をモデル化することができるシステムである。ここでは(株)構造計画研究所が開発したプラットフォーム「artisoc 4.2」を用い、避難行動シミュレーションモデルを構築する。本研究では、対象地域が広範囲のため、避難経路をノードとリンクで表現したネットワークモデルを作成し、避難者が全員出口に到達するまでの時間を計算する、

3. 避難行動シミュレーションモデルの構成

(1) 対象地域の設定

対象地域は、大阪府大阪市北区に位置している「梅田地下街」である。この大規模地下空間は約1km四方に広がる日本有数の地下街で、接続する駅が5つあり、百貨店、ビルなどが存在する。今回は地下通路のみを考慮し、隣接している建物、駅の内部、店舗の内部については対象範囲外とする。また、店舗内の避難者は地下通路に配置して分析を行うものとする。今回は目的地として、公共の地上につながる出入り口を136ヶ所（一部接続ビル内）を考慮する。

使用する地図データは、図-1に示すように当該地下街を対象とした浸水解析に関する既往の研究¹⁾で使用した構造格子モデルのメッシュデータである。この地図データは、浸水解析を行うために2m×2mの正方形セルで構成されていて、縦に1060m、横に1020mの区間がある。

本研究では、通常時（非浸水時）の事前避難としてシミュレーションを行うが、将来的には浸水時のシミュレーションも行う予定である。また、地上部の混雑については一切考慮せず、地上から地下への人の入りはないものとして、地下街内における避難行動のみを考えるものとする。



図-1 対象地下街（百貨店、ビル、駅の内部は除く）

(2) エージェントの配置

1つのセルを10m×10mとし、空間全体を102セル×106セルとする。空間には地下街全体の地図ファイルを背景として設定し、地下街内の交差点及び中継点に559個のノードを設置し、ノードとノードの間にリンクを結び、リンクに通路（歩道）と階段の属性を与えた。ここでの中継点とは、交差点と次の交差点との距離が長くなった場合にその中間点付近に配置するものや、通路が曲がっている場合にその曲がり角に配置するものである。避難目的地は地上につながる出口として設定し、来街者が出口に到達したらエージェントを消去し、避難人数に加算するように設定した。来街者は出口以外のノード（421ヶ所）から1秒毎に生成するとして、その人数は大阪駅周辺地区地下空間浸水対策計画による人口推計データ²⁾から地下鉄駅の利用客数を差し引くと約13900人となるため、33秒かけて合計13893人を配置するとした。

(3) 避難者の行動パターン（ルール）

1step（各エージェントの動作が一巡するまでの時間）を1秒として、避難行動シミュレーションを行う。空間内に来街者エージェントを生成し、各エージェントに属性や個人差を与えて移動させる。今回与える来街者エージェントの属性は、土地鑑の有無、年齢階層、性別、通常時の歩行速度、前方に人や階段があるか、近くに出口への階段があるかである。

a) 移動目標の設定

来街者エージェントは、土地鑑がある人となない人の2種類のカテゴリーに分けている。土地鑑の有無により移動目標の決定方法を変えることとする。

土地鑑のある人は、地上への出口の場所とそこまでの道順を知っている人と定義し、避難目的地までを最短経路で移動するように設定している。最短経路はダイクストラ法を用い、リンク距離をコストとして計算している。

土地鑑のない人は、出口がどこにあるのかを知らないとして定義し、ノードに到達すると次のリンクの繋がっているノードにランダムに移動し、避難目的地をランダムに探索するように設定している。土地鑑がない場合の避難者エージェントの経路選択について図-2に示す。

ただし、通常時は目の前にある出口を素通りすることは起こりえないと考えられるため、隣接したノードに出口に通じるリンク（階段）がある場合、そのノードへ移動するように設定している。出口が見えていないと仮定した場合の経路選択を図-3に示す。ちなみに、来街者の土地鑑がないことによる迷いやすさも分析する上で考えるため、エージェント間での追従行動の設定は行わず、前方にいるエージェントを移動目標とすることはないものとする。

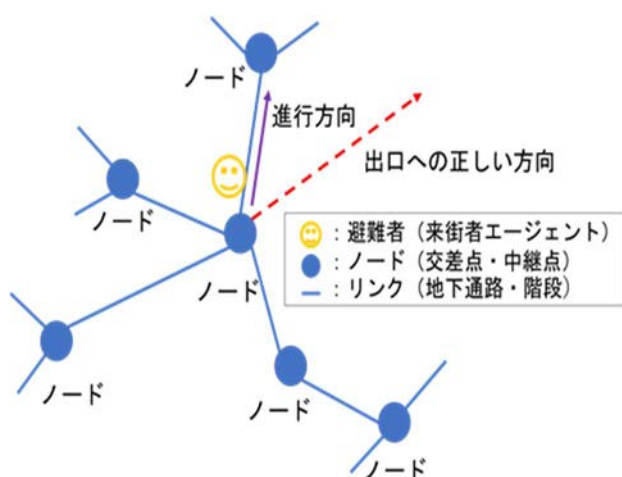


図-2 来街者エージェントの経路選択（土地鑑がない場合）

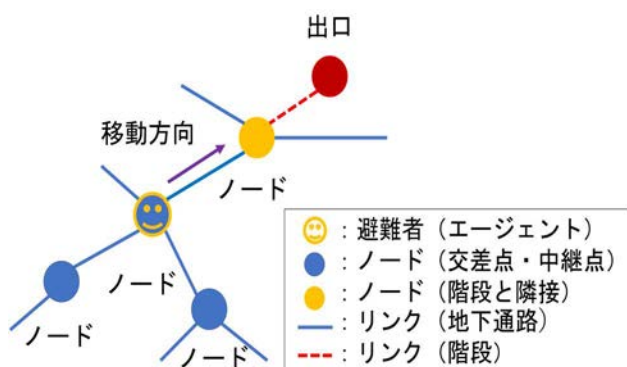


図-3 出口が近くにある（視野にある）場合の経路選択

b) 避難者の属性割合・歩行速度

避難者エージェントは、成人男性・成人女性・高齢男性・高齢女性の4つの属性に分けて割合と歩行速度を決定する。

エージェントの個人属性の割合について考える。割合は総務省統計局の人口推計データ³⁾（2018年（平成30年）10月1日現在）による年少・生産年齢・老年の人口比率を基に設定している。ただし、年少の割合は高齢女性に加算するものとする。

次に、各属性における通常時の歩行速度について考える。避難における歩行速度は浅井ら⁴⁾の研究により得られた非浸水時の歩行速度データを利用する。また、個人差を考慮するために移動速度に $\pm 0.3\text{m/s}$ が含まれるように乱数を発生させている。以上のデータをまとめたものを表-1に示す。

表-1 個人属性別の割合・歩行速度（nは個人差）

年齢・性別	人数の割合	速度（m/s）
成人男性	30%	$1.40 + n$
成人女性	29%	$1.30 + n$
高齢男性	12%	$1.10 + n$
高齢女性	28% ※年少含む	$0.80 + n$

次に、前方に階段がある又は階段を上の場合と前方に人がいる場合の歩行速度の減少について考える。今回は階段以外での高低差による速度変化は考慮しないものとする。

前方に階段があるもしくは階段を上場合は既往の研究⁵⁾や実験結果⁴⁾により、通常時（平坦な歩道を歩く場合）の1/2とする。また、前方に人がいる場合の混雑度を考慮した速度の減少は、次式⁶⁾で表される。

$$v = D_e \cdot v_{normal} \quad (1)$$

ここで、 v は歩行速度、 D_e は歩行密集度による歩行速度の減少率、 v_{normal} は通常時の歩行速度を示している。

歩行密集度の影響については、進行方向に存在する人エージェントとの距離により次式⁶⁾を用いて計算した。

$$D_e = \exp(L^{4.37}/2.55) - 0.48 \quad (2)$$

ここで、 L は進行方向に存在する最も近い人エージェントとの距離を示している。

以上の条件により、状況の変化を考慮した歩行速度が計算される。

c) 避難行動シミュレーション分析

来街者の中の土地鑑のある人の割合に着目し、土地鑑のある人の割合が 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, 100% の 11 通りのパターンに分けて避難行動シミュレーションを行った。避難開始のタイミングはアナウンスによる避難指示が発令された直後と仮定し、全員が一斉に避難するものとする。来街者エージェントが配置されてから避難完了するまでの流れをまとめたものを図-4 に示す。来街者エージェントを避難者として、全員が避難を完了するまでの時間を避難完了時間とし、その時間をシミュレーションにより計測する。

シミュレーションは、1つの場合に対して10回の試行を行う。そして、シミュレーション結果から得られた避難完了時間の平均値を求め、比較分析を行う。ただし、平均値だけでなくばらつきも分析の対象とするため、他のシミュレーション結果とは極端に異なる結果が得られたとしても除外せずにそのまま記録している。

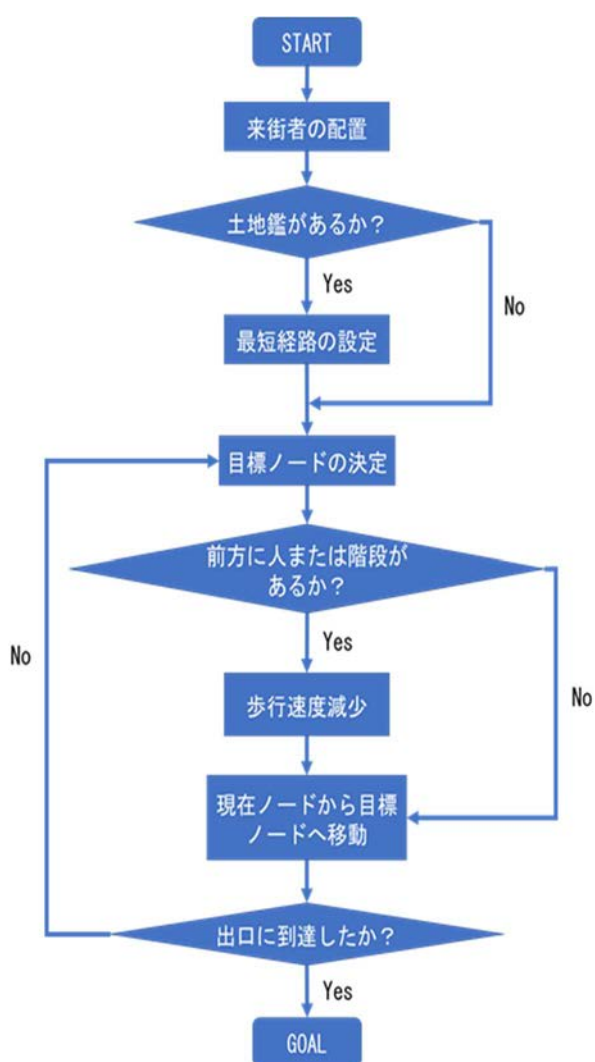


図-4 来街者エージェントの避難行動フロー

4. シミュレーションの結果及び分析

(1) 各パターンにおける避難完了時間

来街者の中で土地鑑のある人の割合を変化させると避難完了時間がどのように変化するかを分析する。シミュレーションによって計測した来街者の避難完了時間をまとめたものを表-2 に示す。表-2 より、シミュレーション結果によりばらつきが大きいことが分かる。そこで、ばらつきを考慮した避難完了時間の分布を考える必要がある。各パターンにおける避難完了時間の計測結果の分布を図-5 に示す。図-5 より、ばらつきはあるものの、概ね土地鑑のある人の割合が増加すれば、避難完了時間が短縮されることが分かる。また、土地鑑のある人が 100% の場合ではほかのパターンと比較して極端に避難完了時間が早くなることが分かる。

(2) 避難完了時間が遅くなった要因

土地鑑のない人は、出口の近くのノードに達するまでランダムに目標ノードを設定してリンク上を動くように設定した。しかし、通路が交差するポイントが多くありかつ地上への出口と出口の間が遠かったホワイトティームだや西梅田駅周辺でなかなか避難できていないエージェントが存在した。森山ら⁷⁾によると交差点での経路の選び間違いが多くなるとそれだけ避難が完了する時間が遅れてしまうことが示されている。さらに、接続ビルの出入口を考慮していなかったため、近くにある接続ビルを素通りしてしまったことも避難の遅れが生じた要因と考えられる。

また、土地鑑のある人のみで避難させた場合も全員が最短経路で出口に向かっていて、特定の出口に避難者が偏ってしまい滞留が発生した。滞留により速度減少が起こり、避難時間が若干遅くなったと考えられる。

(3) 避難完了時間を早くする方法

避難完了時間を早くするためには、土地鑑のない人を誘導できる誘導員もしくは標識の存在を考慮する必要がある。今回は考慮していなかったが、実際は避難標識や避難誘導によってより早く目的地まで到達できると考えられる。出入口付近だけでなく交差点での避難誘導や標識を考えることで避難にかかる時間を短縮させることができる。そして、最短経路での避難を行う人が増加すると集まる出口が偏り滞留が起こりやすいため、群衆を分散させて避難できるようにする必要がある。

また、先述した通り接続したビルや百貨店も考慮しなかったため、接続先の出入口を考慮することでよりスムーズに避難することができると考えられる。

表-2 避難行動シミュレーション結果（各パターン10回ずつ）

		避難完了時間（秒）										
		1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	6回目	7回目	8回目	9回目	10回目	平均
土地鑑のある人の割合	0%	1929	1586	1837	1824	1807	2134	2031	1877	1930	1774	1872.9
	10%	2010	2088	1520	2176	1768	1815	1992	2225	1856	1862	1931.2
	20%	1757	2066	1867	1631	1580	1871	1487	2022	1697	1654	1763.2
	30%	1713	1376	1855	1850	1456	2010	1643	1696	2091	1716	1740.6
	40%	1458	1477	1657	1728	1591	2069	1667	1618	1753	1535	1655.3
	50%	1662	1405	1534	1622	1713	1767	1797	1216	1519	1619	1585.4
	60%	1644	1410	1569	1681	1645	1322	1668	1588	1341	1885	1575.3
	70%	1410	1291	1731	1412	1279	1410	1747	1147	1607	1459	1449.3
	80%	1326	1395	1377	1281	1359	1457	1378	1261	1559	1532	1392.5
	90%	901	1156	1268	1222	1508	1345	1525	1194	1167	995	1228.1
	100%	486	466	466	488	515	510	531	485	516	508	497.1

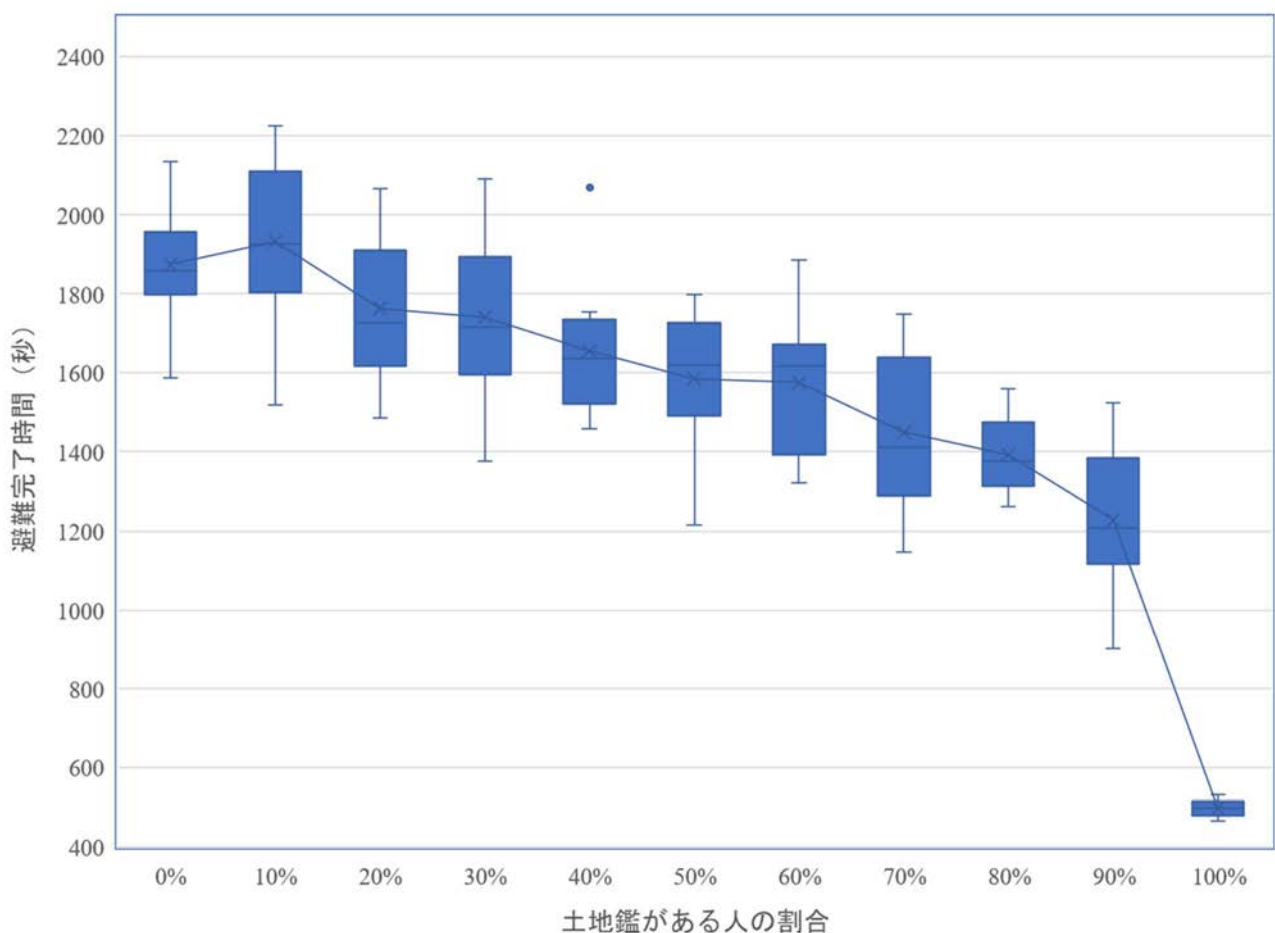


図-5 各パターンごとの避難完了時間分布（平均値を折れ線で結んでいる）

5. おわりに

本研究では、マルチエージェントモデルによる大規模地下空間を対象とした来街者の避難行動シミュレーションを行い、来街者の土地鑑の有無とその割合によって全員の避難完了にかかる時間を計測し分析した。シミュレーション結果から、土地鑑のある人が増加するにしたがって全員の避難完了時間が早くなることが分かった。また、全員が土地鑑のある場合は、避難完了時間が極端に早くなることが分かった。ただし、最適な避難経路を誘導できる標識や接続ビルの考慮など避難時間が短縮できる要因が考えられるため、構築したシミュレーションモデルは改善すべき要素が多くあると考えられる。また、災害発生時の状況変化や避難者の心理状態を考慮した避難行動シミュレーションの検討も行う必要がある。

謝辞：本研究を遂行する上で必要なデータと資料を提供していただいた関係各位に心から謝意を表します。

参考文献

- 1) 森兼政行, 井上知美, 石垣泰輔, 尾崎平, 戸田圭一: 地下駅を考慮した大規模地下空間での浸水特性と浸水対応策の効果に関する検討, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.168, No.4, I_1003- I_1008, 2012.
- 2) 大阪市 HP: 大阪市地下空間浸水対策協議会, <<https://www.city.osaka.lg.jp/kikikanrishitsu/page/0000259323.html>>, 公開日: 2016.3.31, 閲覧日: 2019.9.27.
- 3) 総務省統計局 HP: 人口推計 (2018 年 (平成 30 年) 10 月 1 日現在) <<https://www.stat.go.jp/data/jinsui/2018np/index.html>>, 公開日: 2019.4.12, 閲覧日: 2019.9.27.
- 4) 浅井良純, 石垣泰輔, 馬場康之, 戸田圭一: 高齢者を含めた地下空間浸水時における避難経路の安全性に関する検討, 水工学論文集, 第 53 巻, pp.859-864, 2009.
- 5) 枝松千尋, 宮川健, 早田剛, 山口英峰, 小野寺昇: 階段昇降における二足一段昇降と下肢への負担, 体力科学, 50(4), pp.453-465, 2001.
- 6) 川中龍児, 石垣泰輔: 地下空間浸水時のアナウンスが安全避難成功率に及ぼす影響について, 地下空間シンポジウム論文・報告集, 第 17 巻, pp.163-168, 2012.
- 7) 森山修治, 長谷見雄二, 小川純子, 佐野友紀, 神忠久, 蛇石貴宏: 大規模地下街における避難行動特性に関する実験研究—実験概要と避難経路・避難出口の選択性, 日本建築学会環境系論文集, 第 74 巻, 第 637 号, 233-240, 2009.

A STUDY ON EVACUATION FROM UNDERGROUND SPACE BY USING MULTI-AGENT MODEL

Yutaro NAKASAKA and Taisuke ISHIGAKI

In recent years, underground spaces have been used to make effective use of limited land in large cities. In particular, the convenience and comfort of living have been improved by using a large underground space where subways and underground malls are connected continuously. On the other hand, it is dangerous to stay there when a disaster occurs, so doing safe and quick evacuations is an important measure for disaster prevention. However, it is difficult to examine the evacuation behavior of the crowd in a large enclosed space by experiments such as evacuation drills because of the huge cost. In this study, a multi-agent model was used to simulate the evacuation behavior of users in the underground space, and the percentage of successful person was figure out. This study also compared how long the evacuation time changed depending on whether users knew the shortest route to the exit.