

マルチエージェントシステムを用いた 浸水地下街における 津波からの避難シミュレーション

小滝 健一¹・三上 貴仁²・柴山 知也³・森本 章倫⁴

¹学生会員 早稲田大学大学院 創造理工学研究科建設工学専攻 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)
E-mail: k.kenichi.1993@gmail.com

²正会員 早稲田大学講師 理工学術院 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)
E-mail: t.mikami@aoni.waseda.jp

³フェロー会員 早稲田大学教授 理工学術院 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)
E-mail: shibayama@waseda.jp

⁴正会員 早稲田大学教授 理工学術院 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)
E-mail: akinori@waseda.jp

我が国は地震大国であり、地震はもとよりそれに伴う津波についても早急に対策を講じていく必要がある。本研究では、津波が発生した際に浸水が予想される横浜駅東口地下街を対象に、避難における行動選択など、社会現象を人工的に再現することが可能なマルチエージェントシステムを用いて津波浸水からの避難シミュレーションを行い、地下街周辺の津波避難施設の適正立地を探った。結果として、地下街と隣接した商業施設に避難者を避難させることで、避難時間が大幅に短縮することがわかった。また、地下街内に現状の津波避難施設への案内サインを増やすことも避難時間の短縮に繋がること、そして、地下街内の店員が避難者を現状の津波避難施設に誘導する際は、施設内が混雑する可能性があることがわかった。

Key Words : tsunami, evacuation, multi-agent simulation, inundation, underground

1. 研究の背景と目的

(1) 背景・目的

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震は、想定を超える大きな津波を伴い、東日本の太平洋沿岸に未曾有の大被害をもたらした。首都圏でも過去にM7、M8クラスの大きな地震が発生しており、今後首都圏に襲来することが予想される地震およびそれに伴う津波に対して早急に対策を行わなければならない。特に大都市では、地下空間を有効活用するために地下街が発達している。このような現状でひとたび高潮や地震による津波が発生し、地下街に氾濫すれば、人的、物的に被害が出ることは避けられず、この被害を如何にして減少させるかが喫緊の課題となっている。そこで本研究では、首都圏の地下街の中でも規模が大きい横浜市の地下街を対象に、社会現象を人工的に再現できるマルチエージェントシステムを用いて避難シミュレーションを行い、より効率的な避難計画を提案する。

(2) 研究の位置づけ

避難計画に関する既存研究は数多くあり、片田ら¹⁾は洪水時の避難計画に関し、住民がその計画の意図を受け入れるとは必ずしも限らないことを示した。また澤田ら²⁾は住民の意思に基づいた避難行動を基に、避難計画を提案した。

水害や津波が沿岸地域を襲った際の人々の避難行動を再現し、その結果から新しい避難計画や避難施設の適正配置を探るにはマルチエージェントシステムが有効である。柿本ら³⁾は水害に関する避難訓練の結果を基にシミュレータを作成し実行した。また青山ら⁴⁾は名古屋駅地下街を対象に、来街者、人口密集度、要援護者やサイン表示の割合を変化させて避難シミュレーションを行った。しかし、具体的に津波避難施設の適正立地をマルチエージェントシステムを用いて探った研究は数少ない。

本研究では、津波が来襲した際に危険な状態に陥る可能性がある横浜駅東口地下街に対して避難シミュレーションを行い、避難施設配置の改善案を探る。

2. 対象地の危険性と津波避難施設候補地の選定

(1) 横浜駅東口地下街の危険性

横浜駅東口地下街（以下地下街）は横浜駅東口の地下2階に位置する。場所を図-1に示す。地下街は平日の昼間から多くの人で賑わっており、平日は約13万人、休日は約18万人もの人が訪れる⁵⁾。しかし、横浜市を襲う津波において、浸水面積、浸水深が最大となる津波をモデルとした津波ハザードマップ⁶⁾（図-1）によると、横浜駅東口周辺では予測される浸水深が0.8mを超える区域が広がり、滞留人口の多さと合わせ、津波が来襲した場合の危険性があることがわかる。

(2) 津波避難施設の現状

横浜市は東日本大震災以降、「避難者の受け入れについて御協力いただける民間施設や市立学校、市営住宅等の公共施設」⁷⁾として津波避難施設の指定を進めている。

しかし、現在横浜市によって横浜駅東口周辺で指定されている津波避難施設はA社のみである。その位置を図-1に示す。地下街からA社へ避難する場合は階段や屈曲部が多く複雑で距離もある。また地下街内に、A社への方向を示す案内サインは2つしか確認できなかった。現状では、地下街近辺に不案内な来街者が地下街からA社までスムーズに避難するのは難しいと考えられる。

(3) 津波避難施設候補地の設定

本研究では、先述した津波避難施設に指定されているA社の現状を踏まえ、A社以外にも津波避難施設を増やしたと仮定し、シミュレーション上で避難完了時間の計測を行う。本研究では、横浜駅東口にあるB店と横浜駅西口にあるC店を、A社の他に新たな津波避難施設の候補として選定した。（図-2参照）

B店とC店はそれぞれ、横浜市民に「横浜駅東口、西口の施設の中で移動の手がかりとなる役に立つと思う施設」について尋ねたアンケート調査において、8割の人が東口ではB店、西口ではC店を挙げるなど、現地民にとっては知名度が高い商業施設である⁸⁾。

またB店は、地下街と直結している商業施設であり地下街からの視認性も高い。C店は横浜駅西口に位置する商業施設であるが、地下街の中央通路から1度左折するだけで到達できることから、本研究では津波避難施設の候補として選定した。

3. 避難シミュレーション

(1) マルチエージェントシミュレーションについて

マルチエージェントシステムとは、複数のエージェン

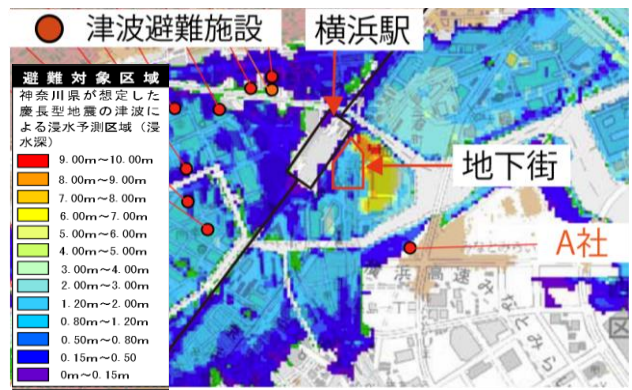


図-1 横浜市の津波ハザードマップ⁶⁾と津波避難施設の位置



図-2 対象地域（横浜駅周辺、マピオン⁹⁾に加筆）

トの振る舞いにより、全体の振る舞いの系が決まってくるシステムであり、主に社会現象を人工的に再現する際に近年用いられている手法のことである。本研究では、マルチエージェントシステムのプラットフォームであるartiscio¹⁰⁾を用いて避難シミュレーションを作成した。なおこのシミュレーションは青山ら⁴⁾のモデルを参考に作成した。

(2) シミュレーションの流れ

表-1に各シナリオの条件を整理した。本研究ではまず、現状を把握するため、地下街からA社までの避難シミュレーションを行い、最終的な避難完了時間を計測した（シナリオ1）。

その後大きく分けて3種類の条件でシミュレーションを行った。1つ目は、津波避難施設をB店、C店に増やしたシナリオ2, 3, 4である。2つ目は、地下街内のA社への案内サインを現状の2個から7個へ増やしたシナリオ5である。3つ目は、地下街内の店員がB店2階にあるD広場を経由しA社まで誘導するシナリオ6である。以上の合計6シナリオについてシミュレーションを行い、最終的な避難時間を比較した。

(3) 避難者の設定

a) 人数

本研究では、避難者の人数は地下街の休日午後 4 時台の様子を撮影した写真から概括的に 1200 人と見積もった。避難者は、地下街内にある 30 個のノードからそれぞれ 40 人ずつ生成される。

b) 歩行速度

歩行速度は、兼田¹¹⁾に記載されている値を参考に設定した。平日日中に英国の都会の舗道において実測された女性の平均歩行速度 1.42 m/s と、男性の平均歩行速度 1.52 m/s の平均をとり、基本的に 1.47 m/s とした。ただし、B 店の B2 階のフロア部分では、通路の狭さによる速度低下を考慮し、1 m/s とした。

c) 来街者の割合

実空間では現地民と来街者が混在しているが、本研究ではすでに避難場所までの道筋を知っている現地民は最終的な避難時間には影響を与えないと考え、すべての避難者を、避難場所までの道筋を全く知らない来街者と仮定してシミュレーションを行った。つまり避難者は、基本的にシミュレーション上でランダムにリンク上を動き回る。

(4) 空間のモデル化

本研究では、兼田¹¹⁾と同様に、対象の空間を交差点等のノードならびに、2 つのノードを繋ぐ通路としてのリンクの集合として捉え、ネットワークとしてモデル化した。避難者はこのネットワーク上を動き回ることになる。

以下に、図-3 に示した各施設の空間の特徴について述べる。

a) 地下街

今回のシミュレーションでは、地下街内の各ノードからそれぞれ避難者が 40 人ずつ生成されるように設定したため、できる限り、現地調査の時の人の密度と、ノードの密度を近づけるようにノードを設定した。

b) A社・B店

地下街と接続しているB店のフロアは地下2階である。現地調査の結果B店の正面玄関から正面エスカレーターまでは見通すことができないことがわかった。そこで、避難者が曲がりながらエスカレーターに向かうと考え、B店内は階段状の空間に設定した。A社へ向かう通路の特徴としては、地下街からA社へ向かう際に迷いやすい場所に、シミュレーション上でも分岐点を2個設置した。

(5) 各設備について

a) 階段

図-3 で黄色に示されたリンクが階段を示す。避難者がこれらのリンクを通過する際、実空間の 1 階ごとに 3

表-1 各シナリオの条件比較

シナリオ	津波避難施設	案内サイン数	店員の誘導	誘導人数 (人)	歩行速度 (m/s)
1	A社	通常	なし	1200	1.47
2	A社、C店	通常	なし	1200	1.47
3	A社、B店	通常	なし	1200	1.47, B店内 1
4	A社、B店、C店	通常	なし	1200	1.47, B店内 1
5	A社	増やす	なし	1200	1.47
6	A社	通常	あり	1200	1.47

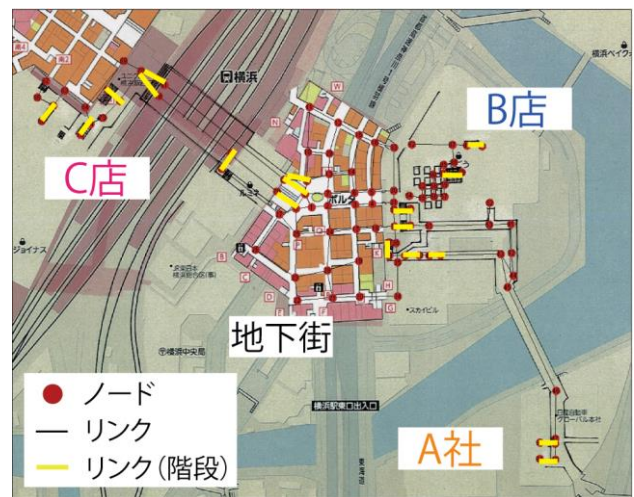


図-3 本シミュレーションで使用した空間と階段のリンクの位置 (Yahoo Japan! 地図¹²⁾ に加筆。図-6, 7 も同様)

0秒かかるように設定した。

b) 案内サイン

目的地までの方向を示す案内サイン (図-4参照) も実空間と同じ位置にシミュレーションモデル上に設置した。

図-5に、シミュレーション上での案内サインのイメージ図を示した。避難者 (青丸) は最初ノードとリンクで表現された空間内をランダムに動くが、案内サインのあるノード (赤星) がある場所に偶然辿りつくと、避難者は津波避難施設 (赤四角) の方向へ進む。

図-6に各津波避難施設への案内サインのノードを示した。例えば、今までランダムに歩いていた避難者がピンクの星印で示されたノードに到達すると、避難者はC店の方向へ進み始める。

c) 避難完了地点

このシミュレーションでは、津波が来襲した場合に横浜市が推奨している「海拔 5m 以上の高台又は、鉄筋コンクリートもしくは鉄骨鉄筋コンクリート造の頑丈な建物の 3 階以上を目安に避難」⁷⁾を踏まえ、各津波避難施設の 3 階部分に避難完了地点を設置した。各避難者はこの地点に到達すると避難が完了したとみなされる。

また、本シミュレーションでは、最終的な避難完了時間を計測するが、大多数の避難者が避難している状況下で、



図-4 写真 (地下街内の案内サイン)

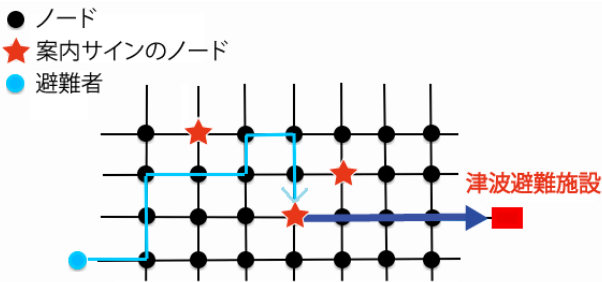


図-5 案内サインのノードのイメージ図

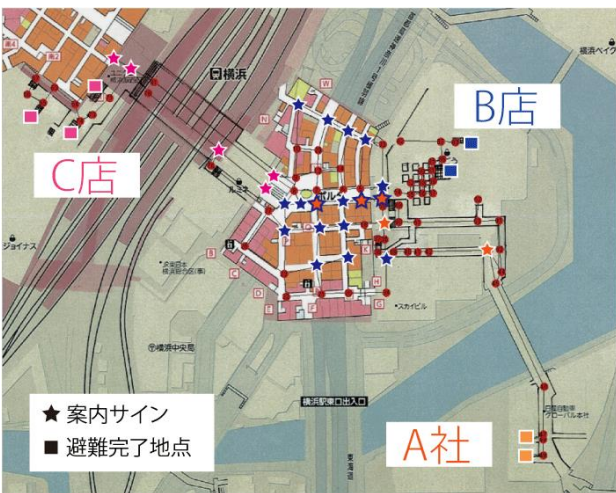


図-6 各津波避難施設への案内サイン、避難完了地点の位置

未だ避難完了地点に到達しない避難者による避難完了時間の無為な増加を防ぐため、1190人が避難完了地点に到着した時点でシミュレーションを終了し、その時間を最終的な避難完了時間とした。図-6に各津波避難施設の避難完了地点のノードを示す。

(6) 店員の誘導について

店員の誘導があるシナリオ6は、地下街内の店員が避難者を先導し、地下街の直上にある地上の歩道橋を通り、B店2階にあるD広場を経由した後、A社に避難すると仮定する。つまり、地下街内の各ノードから生成された避難者は、ランダムに動くのではなく、毎回各ノードからD広場を経由する決められたルートを通り避難することになる。

なお、A社までの道順は、地下街内の各ノードからノード77までの最短経路を通った後、図-7の矢印に従って進むように設定した。

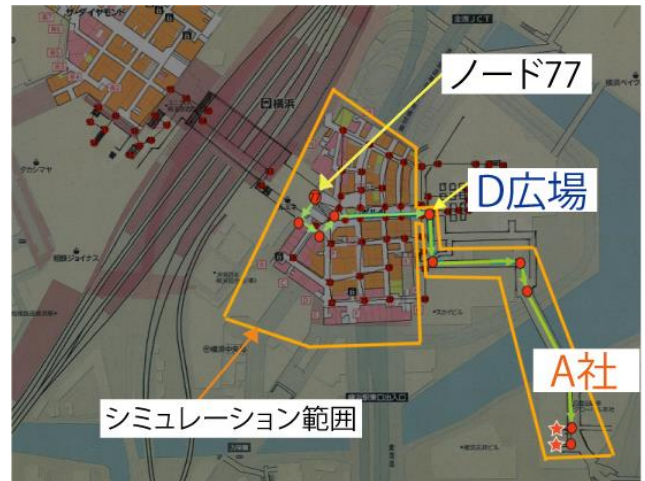


図-7 シナリオ6 (店員誘導あり) のルート

4. シミュレーション結果

図-8に各シナリオの最終避難時間を比較したグラフを示す。いずれも、現状と比べて避難時間が短縮していることがわかる。これより具体的に結果を分析する。

(1) 津波避難施設を増やした場合

まず津波避難施設を増やしたシナリオ2, 3, 4と現状のシナリオ1と比較する。結果を図-9に示す。シナリオ2は最終避難時間はシナリオ1と比べ約4分減少した。これは津波避難施設が増えたことにより、単純に単位時間あたりの避難者の受け入れ人数が増加したことが1つの理由としてあげられる。また、避難者がA社だけでなくC店のサインに辿り着くことでも津波避難施設の方向へ逃げられること、つまり、サインのあるノードにたどり着くまでランダムに歩き回る時間が減少したことも避難時間短縮の要因であろう。しかし、地下街からC店への距離が長いこともあり、劇的な避難時間の短縮には繋がらなかった。

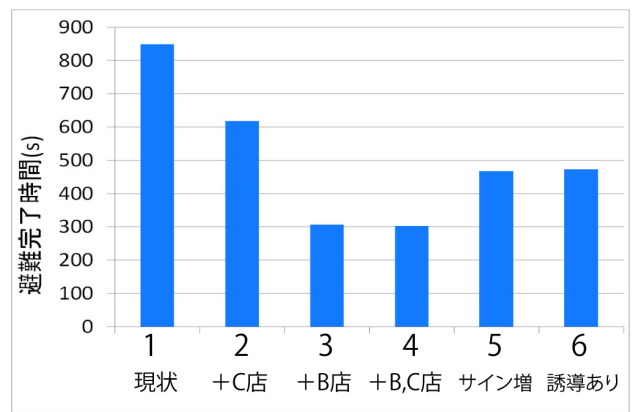


図-8 各シナリオの最終避難時間の比較

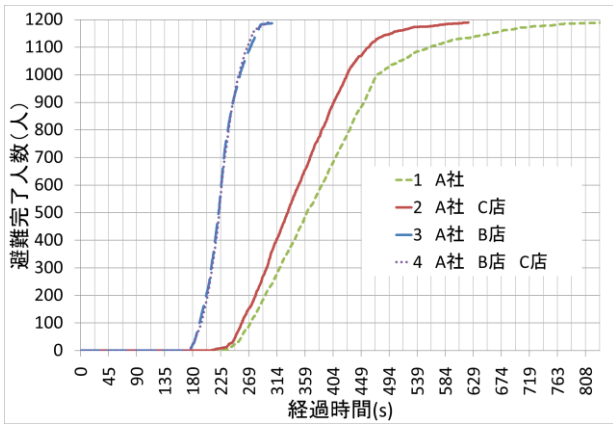


図-9 津波避難施設を増やした際の結果

シナリオ3ではシナリオ1と比べ、最終避難時間が約9分短縮した。図-9を見てもその差は明白である。今回のシミュレーションでB店はA社へ向かう道程に確認でき、避難者がA社ではなく地下街から近いB店に避難したため、避難時間が短縮したことが考えられる。また、地下街とB店は管理運営会社が同じで、地下街内にはB店への方向を示す案内サインが豊富にあるため避難者がスムーズにB店へ向かうことができたことも理由として挙げられる。

シナリオ4では、避難施設をシナリオ3よりも1施設増やしたにも関わらず、シナリオ3と比較すると、避難完了時間、グラフの変化具合ともに、大きな違いは見られなかった。これは、地下街内にB店への案内サインが豊富にあるため、地下街から生成された避難者の大多数がC店へ向かわずにB店へ向かったためシナリオ3と避難者の動きにほぼ差が無かったことによるものと考えられる。またこの結果は、C店に津波避難施設を増やす効果より、B店に津波避難施設を増やす効果はるかに大きいことも示している。

以上の結果より、地下街からC店へ避難者を避難させた場合は避難時間の大幅な減少には繋がらないが、地下街からB店へ避難者を避難させると、避難時間が劇的に短縮することがわかった。

(2) 案内サインを増やした場合

シナリオ5はシナリオ1と比べ、最終避難時間が約6分減少した。この理由は図-10によって説明できる。シナリオ1では避難完了人数が1000人を超えたあたりからの避難時間の伸びがみられ、シナリオ5では1000人を超えても避難時間が延びることなく、1000人未満と同じペースで避難者が避難し続けている。これは地下街内にA社への案内サインを増やしたため、避難者が案内サインがあるノードまでランダムに歩く時間が劇的に減りスムーズにA社へ避難できたことによる。以上に

より、地下街内にA社への案内サインを増やすことは避難時間の短縮に効果的であることがわかった。

(3) 店員による誘導があった場合

シナリオ6ではシナリオ5と同じく、1と比べ最終避難時間が約6分減少した。しかし図-10と図-11を見比べると避難時間と避難完了人数の関係に違いがあることが分かる。シナリオ6では経過時間が約7分を超えたあたりから急激に避難完了人数が伸びていることがわかる。これは、シナリオ6では地下街内の店員が避難者をA社まで誘導しているため、避難者が一斉にA社に到着することによる。

このシナリオで問題となるのは、A社での混雑である。避難完了人数が250人から1000人になるまでわずか約50秒しかない。B店に比べて、2階から3階へ上がる際の通路幅が狭いA社のビル内で、50秒で750人を捌ききることは現実では不可能であろう。また実際には、地下街内の店員が避難者を誘導し始めるまでに時間がかかるため、このシミュレーションよりも避難完了時間が遅れることが予想される。

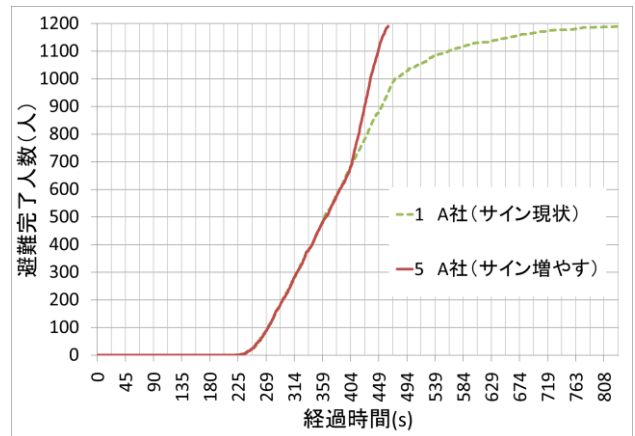


図-10 案内サインを増やした際の結果

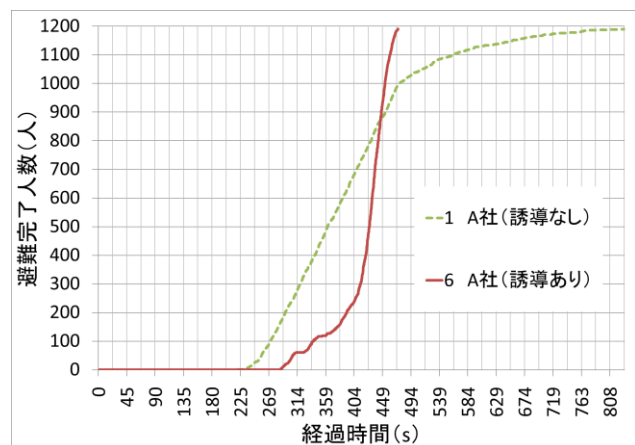


図-11 誘導ありの際の結果

5. 総括と今後の課題

(1) 本研究で得られた知見

本研究では、横浜駅東口地下街に津波が来襲した際に、最終的な避難時間が短縮できるような避難施設のあり方がシミュレーションにより明らかになった。

具体的には、B 店は津波避難施設に現在指定されていないが、津波来襲時には地下街からの避難客を受け入れること、また現在の津波避難施設である A 社への案内サインを地下街内に増やすことが避難時間の短縮に大きく繋がること示された。

(2) 今後の課題

本研究で用いたシミュレーションモデルに、避難場所までの道筋を知っている現地民を組みこむことで精度の高い結果を得ることができる。また避難者どうしの渋滞や、多くの避難者が逃げる方向に他の避難者が追従するなど避難者どうしの相互作用を組み込み、信憑性のさらに高い結果を得ることが今後の課題である。

謝辞：本研究は私立大学戦略的研究基盤形成支援事業「減災研究の国際展開のための災害研究基盤の形成」（代表者・柴山知也）による研究であることを付記する。

参考文献

- 1) 片田敏孝, 及川康: 実効性をもった洪水時の住民避難計画のあり方に関する検討, 土木計画学研究・講演集, No.24(2), pp.925-928, 2001.
- 2) 澤田基弘, 高木朗義, 廣住菜摘: 自助・共助・公助を踏まえた避難計画策定のための避難情報システムの構築, 土木計画学研究・講演集 (CD-ROM), 巻 37,

- ROMBUNNO.259, 2008. (平成 28 年 7 月 18 日閲覧)
- 3) 柿本竜治, 山田文彦, 田尻亮司, 原田翔太: リスクコミュニケーションを通じた実践的水害避難訓練に基づく避難行動シミュレータの構築, 土木計画学研究・論文集, Vol.26, No.1, pp.113-122, 2009.
- 4) 青山純也, 廣井悠: 実証実験に基づく名古屋駅周辺の地下街避難行動シミュレーション, 日本建築学会大会学術講演梗概集・建築デザイン発表梗概集(CD-ROM) NO.715, 2015. (平成 28 年 6 月 20 日閲覧)
- 5) 日本経済新聞電子版: 横浜駅地下街「地下街」35 億円投じ改装 1 年かけ店舗刷新, <http://sumai.nikkei.co.jp/news/gyoukai/detail/MMSUn5000016122011/>, 2011. (平成 28 年 3 月 29 日閲覧)
- 6) 横浜市総務局: 津波避難対策について, <http://www.city.yokohama.lg.jp/somu/org/kikikanri/keikaku/tsunami/>, 2013. (平成 28 年 3 月 29 日閲覧)
- 7) 横浜市総務局危機管理室: 津波からの避難に関するガイドライン第 3 版 <http://www.city.yokohama.lg.jp/somu/org/kikikanri/keikaku/tsunami/tsunami.pdf>, 2013. (平成 28 年 7 月 13 日閲覧)
- 8) 横浜市都市整備局: 横浜駅案内サイン調査結果, <http://www.city.yokohama.lg.jp/toshi/toshiko/yokohamasta/signkekka>, 2010. (平成 28 年 3 月 29 日閲覧)
- 9) マピオン: 横浜駅の地図, <http://www.mapion.co.jp/m2/35.46615001,139.62257282,19?poi=ST23368> (平成 28 年 7 月 12 日閲覧)
- 10) 構造計画研究所: 複雑系「マルチエージェント・シミュレーション」 http://mas.kke.co.jp/cabinet/mas_case_japanese.pdf (平成 28 年 3 月 29 日閲覧)
- 11) 兼田敏行: *artisc* 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, pp.32-33,45-60,69-71, 2010.
- 12) Yahoo! JAPAN 地図: 神奈川県横浜市西区高島 2 丁目 16-1 周辺の地図, <http://map.yahoo.co.jp/maps?> (平成 28 年 7 月 13 日閲覧)

(2016.?.?受付)

SIMULATION OF TSUNAMI EVACUATION USING MULTI-AGENT MODEL IN INUNDATED UNDERGROUND AREA

Kenichi KOTAKI, Takahito MIKAMI, Tomoya SHIBAYAMA and
Akinori MORIMOTO

Japan is one of the most earthquake-prone countries in the world, and thus it is necessary to implement effective actions against tsunamis as well as earthquakes. In this study, a simulation of tsunami evacuation in the underground area of Yokohama Station East Exit, which is likely to be inundated during a tsunami event, was carried out. A multi-agent simulation platform was used to analyze evacuation behavior and to find appropriate evacuation sites for people in the underground area. The results of the simulation showed that making people evacuate to commercial facilities next to the underground area significantly reduce the time required for the evacuation. Increasing the number of information signs about current evacuation sites was also found to reduce the evacuation time. In addition, it was found that evacuation guidance provided by clerks in the underground area may cause congestion problems in evacuation sites.