

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 3 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2013～2015

課題番号：25702018

研究課題名(和文)複合災害を考慮した大都市における広域避難時の課題抽出とその計画・支援に関する研究

研究課題名(英文)Study of evacuation plan in metropolitan area concerning complex disaster

研究代表者

廣井 悠 (HIROI, U)

名古屋大学・減災連携研究センター・准教授

研究者番号：50456141

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、複合災害を前提とした大都市避難シミュレーションを構築することで、大都市における広域避難時の課題を抽出するとともに、避難計画や帰宅困難者対策の評価手法を確立することができた。例えば帰宅困難者対策については、帰宅意思モデルを用いて対策の量的評価を行うとともに、災害時における混雑危険度指標を提案することができた。この結果、首都圏において仮に大規模災害時に帰宅困難者の一斉帰宅が行われると、6人/m<sup>2</sup>を超える密集空間の道路延長距離は東日本大震災の約137倍となることや、このような帰宅困難者の大量発生が市街地火災からの避難時間に大きな影響を与えることなどが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：we built "Evacuation Simulation in Metropolitan Area" for the Tokyo Metropolitan Area. The simulation can evaluate policies for stranded commuters and provide several risk maps of heavy traffic in catastrophic disaster, using decision making model and movement data in the Tokyo Metropolitan Area on the Great East-Japan Earthquake. As a result, if catastrophic disaster occurs and everyone goes home all together in metropolitan area, we calculated that heavy traffic will overload the trunk lines for many hours in wide area and huge people(for example, six people in a square meter) along some sidewalks.

研究分野：都市防災

キーワード：都市防災 避難シミュレーション 市街地火災 帰宅困難者 大都市

### 1. 研究開始当初の背景

2011年3月に発生した東日本大震災時、首都圏では鉄道が運休したことにより515万人ともいわれる大量の帰宅困難者が発生し、各地で車や人の大渋滞が発生した。他方で大都市は複合災害リスクが極めて高いことが知られているが、大都市における市街地火災からの避難や津波避難を考える場合は、このような数多の広域的移動による影響も考慮しなければならない。特に時間制約の強い津波避難は渋滞による避難行動の遅れがとりわけ影響が大きく、また大都市で発生する可能性の高い地震火災は帰宅困難者の発生と同時発生の蓋然性も高い。このような状況を考慮すると、局地的な範囲のみを対象とした避難安全検証はこと大都市においては不十分であり、大量の帰宅困難者の移動による避難障害もあわせて考える必要があるものと考えられる。

### 2. 研究の目的

上記の点を問題意識として、本研究では避難シミュレーション技術によって、大都市における避難行動を再現し、これをもとにした政策評価を実現する。特に、大都市災害の特徴である複合的な災害事象を取り扱う点が研究の独創的な点であり、ここでは首都圏を対象として、広域的な帰宅困難現象と市街地火災からの地区単位の避難行動を取り上げる。このため本研究では、首都圏スケールの広域シミュレーションと地域単位の狭域シミュレーションを別個に構築し、両者を入れ子構造的に関連付けることで複合災害からの避難行動の評価を可能としている。

### 3. 研究の方法

#### (1) 広域避難シミュレーション

本研究で構築するシミュレーションのひとつめは、都市圏スケールを対象とした避難シミュレーションである。これは首都圏の自動車と徒歩移動者を両方考慮したもので、おおむね1都3県かつ東京駅から40km圏内を対象範囲としている。このもとで、帰宅意思モデルに基づき帰宅困難者が自宅へ様々な交通手段で移動すると仮定して、その再現を試みた。なお、このシミュレーション単体でも歩行者空間で6人/m<sup>2</sup>を超えるような過剰な密集状態がいつどこで発生するか、また災害対応が著しく遅れる重度の交通渋滞がどのような条件で発生するかを検証することができ、帰宅困難者対策の政策評価を可能としている。用いた道路はDRMデータ(平成26年)の一般都道府県道以上及び道路交通センサス(平成22年)対象道路(ただし高速道路は除外)であり、歩道幅は道路交通センサスの歩道幅データを使用、道路交通センサス対象外の歩道幅については片側1m×両側とした。このもとで自動車と徒歩移動者がマルチエージェント型に移動する。移動速度は中央防災会議を参考に、徒歩移動の場合は混雑

度が1.5人/m<sup>2</sup>で時速4km/h、混雑度が1.5人/m<sup>2</sup>以上6人/m<sup>2</sup>未満では時速4km/hから時速0.4km/hまで直線的に低減し、混雑度6人/m<sup>2</sup>以上は0(つまりそれ以上入らない)ものとした。他方で自動車の移動速度は道路交通センサスの非混雑時旅行速度を基本としたが、帰宅車両による混雑状況に応じた速度制限を与えた。混雑状況による速度制限は道路交通からの推計値により、車両密度の最大値を150台/kmとしたうえで、100台/km以上の車両密度では、速度を1km/hに制限し、車両密度(台/km)、移動速度(km/h)において(1)式が成り立つよう設定した(ただし歩道の混雑度が0.5人/m<sup>2</sup>以上の場合には歩行者による車両交通への影響を考え、車両密度に(2)式を適用。この数値は実データと適合するよう推定した値であり、この場合のR<sup>2</sup> = 0.48であった。詳細は図1)。なお、車両密度には帰宅車両の通行台数に道路交通センサスの14時台の交通量を加えたものとした。上記のシミュレーションで用いる移動者データは研究代表者が過去に行った社会調査の結果を用いた。ここでは、帰宅意思の決定にランダム効用理論(Multinomial Logit Model)を仮定し、東日本大震災時のトリップデータをあてはめ、係数とそのHessian行列を求めることで係数の有意確率及びモデル全体の自由度調整済尤度比を求めている。なお、ここで構築したシミュレーションを東日本大震災時の帰宅データと比較すると、図1のようになる。これは東日本大震災時に帰宅した人の帰宅所要時間(横軸)と、その人のシミュレーションで計算された帰宅所要時間(縦軸)を比較したものである。アンケートデータは1時間単位かつ休憩など立ち寄り時間も含むため、回帰式の傾きは0.84、R<sup>2</sup> = 0.48となった。おおむねシミュレーション結果は東日本大震災の実態を表しているものと解釈できる。

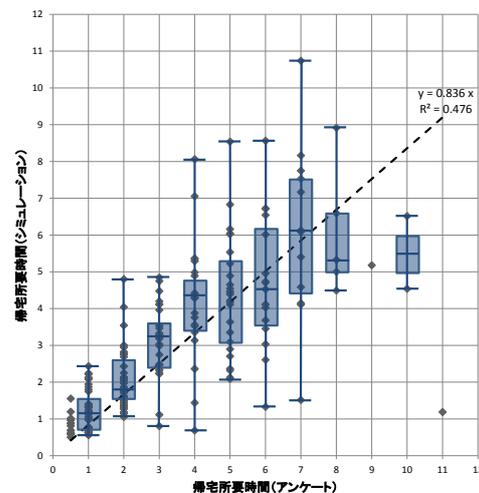


図1 実データとシミュレーション(ケース1)で計算した帰宅所要時間の比較(N=444)

$$\rho_{car} = 1000V_{car}^{-1.0} \quad (1)$$

$$\rho'_{car} = 750V_{car}^{-1.3} \quad (2)$$

また同じく車道についても、道路混雑と移動速度の関係を検証した。車道については緊急車両の走行障害を想定して移動速度での検証を行うこととし、東日本大震災発生時の携帯端末による経路探索サイト（株式会社ナビタイムジャパン）利用者のプローブデータ（東京23区内、トリップ移動距離1km以上、震災直後から6時間後までの移動で抽出：サンプル数81区間）をもとに、シミュレーションケース1の区間別移動速度の比較検証を行った。プローブデータと計算結果の区間別移動速度の関係は線形近似の傾き0.89（計算結果のほうがやや遅い）で相関係数0.52という結果となり、検証したサンプルは少ないながらもおおむねシミュレーション結果は東日本大震災の実態を表しているものと解釈できる。これにより、実データによる検証を経た大都市避難シミュレーションの構築が完成したことになる。もちろん今後は、さらに多量のプローブデータとの比較検証を行うことで、混雑と移動速度の関係の簡易モデルの改善検討を行っていく予定である。

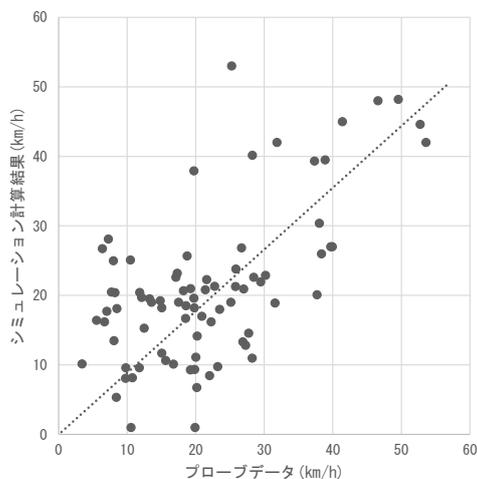


図2 プローブデータ（東京23区内、トリップ移動距離1km以上、震災直後から6時間後までの移動で抽出）とシミュレーションケース1の区間別移動速度の関係（N=81）

#### (2) 狭域避難シミュレーション

続いて、市街地火災からの避難シミュレーションを構築する。ここでは延焼危険性の高い墨田区北部を対象に、対象地域内の平日昼間での滞在者（PT調査により算出し、総計4.5万人）が各建物から指定広域避難場所へ移動するようシミュレーションを設定し、広域シミュレーションで対象とした幹線道路のみならず、細街路（歩行者通行幅は4mと

し、車は通行しないものとする）も避難行動に用いることとした（図3）。このもとで、上記ケース2に従って帰宅困難者が一斉帰宅するものとし、道路閉塞する場合は閉塞確率を細街路に限り1リンクあたり5%と設定し、様々なケースの下で避難完了時間分布を計算した。



図3 対象地域と通行不能箇所（墨田区北部）

#### 4. 研究成果

はじめに広域の避難シミュレーションからは、様々な政策評価を検証することができた（表1、平均道路延長は1～10時間後の平均を導出）。図4がケース(2)の発災1時間後における歩行者密度であり、図5がケース(2)の発災1時間後における自動車の平均移動速度である。東日本大震災と異なり、万一大規模災害直後に一斉帰宅を許してしまった場合は、首都圏では歩行者密度が6人/m<sup>2</sup>以上というきわめて高い密度が散見された。中心部では直後に、周縁部では発災後ある程度時間が経過したのちに混雑が発生しやすいことがわかる（特に周縁部の橋などでは発災1時間後より発災5時間後のほうが混雑している）。また自動車の平均移動速度も、時速3km/h未滿の箇所が多く現れることが分かった。一刻も早く現場に到着せねばならない状況下でこのような重度の交通渋滞が起きた場合、災害対応の著しい遅延を許す可能性がある。更にこの傾向は、時間経過につれて首都圏郊外部に向け拡大していくことも分かった。このように、どの道路が・どのような時刻に・どの程度混雑するかを知ることは、滞留者の誘導や一時滞在施設の施設立地問題を考える上で重要な知見である。

ケース(1)とケース(2)の比較により判明したことは、滞留場所の喪失や家族の安否が懸念されることにより一斉帰宅が行われやすい首都直下地震時などでは、首都圏の居住者が2011年3月11日に経験した徒歩帰宅者の大行列とは、比べ物にならないほど深刻な状況になるという可能性である。特に上記で述べた群衆なだれの危険性が増す6人/m<sup>2</sup>の歩行空間は発災後10時間までの計算結果を平均すると、道路延長距離でケース(1)の約

137 倍発生することがわかり、人的被害の発生リスクが深刻であることも物語っている。このことより一斉帰宅を許してしまった場合と東日本大震災では帰宅困難者を取りまく状況が全く異なることが定量的に判明したほか、首都圏で帰宅困難者対策をすすめる意義を改めて確かめることができた。ケース(2)からケース(4)を比較することで、帰宅困難者対策の具体方針を評価することが可能となる。これによると、少なくとも広域的な視点においては、災害直後の歩行者密度を減らすには就業者の一斉帰宅抑制がとりわけ効果的である(6人/m<sup>2</sup>の歩行空間がケース(3)はケース(2)の0.28倍、ケース(4)はケース(2)の0.83倍)。就業者の半分の帰宅抑制することで、東日本大震災時とまではいかないまでも、滞留者密度は大幅に減じることがわかった。反対に、私用外出者の一斉帰宅抑制は就業者の一斉帰宅抑制と比べてやや効果が薄い。上記の帰宅意思モデルによれば、私用外出者は就業者に比べてそもそも滞留しにくいことが明らかになっており、また一時滞在施設における私用外出者の滞留も、備蓄物資の費用負担や善管注意義務など法的責任の所在、セキュリティの問題など数多もの課題が存在し、一般には事業所への就業者の滞留よりも困難である。それゆえ地域や曜日によっても異なるが、帰宅困難者対策としては就業者の一斉帰宅抑制の優先順位がきわめて高いものと判断できる。

表1 シミュレーションケースの特徴と結果

	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4	ケース5
帰宅開始時間	東日本大震災時と同様	一斉	一斉	一斉	一斉
従業員の帰宅・滞留	東日本大震災時と同様	全員帰宅	半分の滞留	全員帰宅	全員帰宅
私用外出者の帰宅・滞留	東日本大震災時と同様	全員帰宅	全員帰宅	半分の滞留	全員帰宅
車両による帰宅	PT調査の主要交通手段が自動車	PT調査の主要交通手段が自動車	PT調査の主要交通手段が自動車	PT調査の主要交通手段が自動車	PT調査の主要交通手段が自動車
車両による滞留	東日本大震災時と同様	東日本大震災時と同様	東日本大震災時と同様	東日本大震災時と同様	無し
1m <sup>2</sup> 人以上の平均道路延長(歩道, km)	0.04	5.10	1.43	4.24	5.10
30m/分未満となる道路延長(車道, km)	1307	1529	1527	1537	576

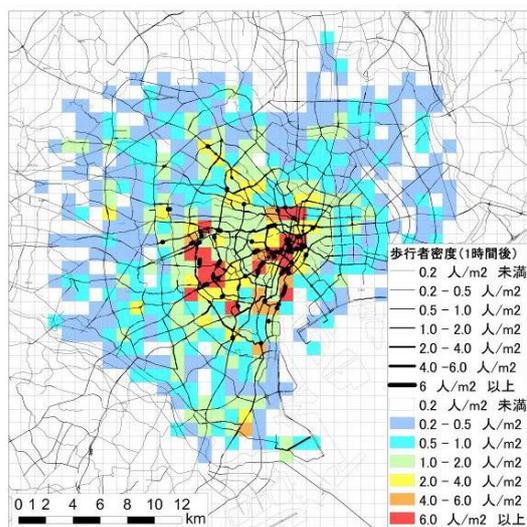


図4 ケース(2)における

徒歩帰宅者の歩行者密度(発災1時間後)

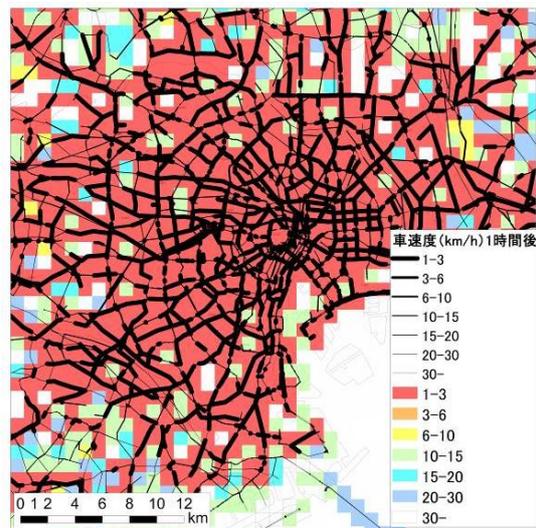


図5 ケース(2)における

車の平均移動速度(発災1時間後)

一方で、自動車の平均移動速度をケースごとに調べると(上り、下りを別個に計算して合計)、歩行者密度と同様に、大規模な災害のもとで一斉帰宅を許してしまった場合は、東日本大震災を超える車道の交通渋滞が発生する。とはいえ、その平均移動速度はおおむね3km/h未満と10km/h以上に2極化する傾向にあり、また東日本大震災時と同じく一度交通渋滞が発生するとその状況は長時間に及ぶ。例えばケース(1)に比べケース(2)では、平均移動速度が3km/h未満の大渋滞が発生する箇所が発災1時間後に道路延長距離で約2.6倍に至るが、発災10時間後までの平均を計算するとその道路延長距離は約1.2倍となる。つまり徒歩帰宅者の一斉帰宅は、時間経過後の車道の交通渋滞よりもむしろ、直後の交通渋滞に強い影響を及ぼし、特に初期段階の消火や救急の阻害要因となりうることを判明した。一方で、ケース(2)からケース(4)を見る限り、就業者の徒歩帰宅抑制や私用外出者の徒歩帰宅抑制は、それぞれ半分の滞留に成功したとしても車道の交通渋滞を減らす効果はほぼないことがわかる。帰宅困難者対策の主な目的は、1. 過密空間における歩行者・滞留者の人的被害軽減、及び2. 深刻な交通渋滞による消防・救急など様々な災害対応の遅延解消であることは先述の通りであるが、各都市で現在精力的に行われている対策は、おおむね一斉徒歩帰宅の抑制や一時滞在施設の確保に偏っており(ただし東京都の帰宅困難者対策条例では帰宅手段にかかわらず、大規模地震直後における都民の一斉帰宅を禁じている)、車道における交通渋滞の解消はその多くを警察による交通規制に頼らざるを得ず、場合によっては後者の目的を達成できないことになる。それゆえ今後は、自動車による帰宅の抑制や自動車の滞留場所などの確保についても、さらなる対策

の進捗を期待したい。ここでケース(2)とケース(5)を比較すると、全体の3.3%ともいうべき自動車による迎え交通需要のみを抑制するだけで、平均移動速度の延長距離を東日本大震災当日以下に減らせることが明らかになった(ケース(5)における平均移動速度3km/h未滿の道路延長は、発災1時間後こそケース(1)の1.4倍であるものの、発災後10時間の平均をとると0.4倍と半減する)。自動車による迎え交通需要の抑制はいつものところ、帰宅困難者対策として検討している例がほとんどないが、災害直後の活動障害を減じる意味でも、効果の高い施策であると考えられる。なお図6のように、大都市避難シミュレーションの計算結果をgoogle earth上に重ねることで、任意のスケールで災害後の滞留者密度や車両移動速度を把握することが可能となった。これによって帰宅困難者対策の啓発という社会的課題にも寄与することができるものと考えている。

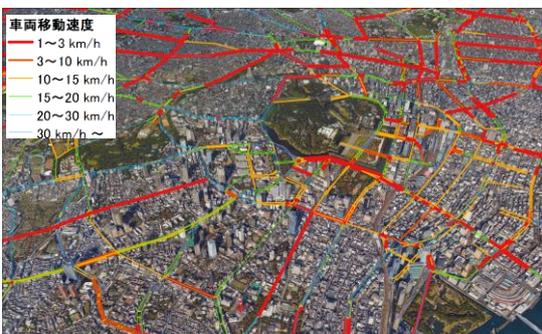


図6 シミュレーションケース(2)の東京中心部の発災5時間後の車両移動速度

つづいて、広域シミュレーションと狭域シミュレーションの結果から、広域的な帰宅困難者の移動が地区単位の市街地火災の避難行動にどのような影響を与えるかについて計算を行った。その結果が図7である。Case Aは混雑の影響がなく、かつ道路が閉塞しない場合である。このケースは平常時に避難場所へ任意の住民が建物から移動することを想定したもので、この状況下では99%以上が30分以内に避難を完了することができる。Case Bは混雑を考慮しないが道路閉塞があるパターンを示したものである。ここでは、Case Aと比べてやや避難完了時間が遅くなるが、それでも97%以上が一時間以内での避難が可能である。Case Cは、道路閉塞したうえで、震災直後に地域住民全員が避難を開始するケースである。この状況下では、30分以内に避難を完了できる人が49.5%であり、1時間以内は71.2%、2時間以内でも89.7%しか避難場所に到達できない。Case Dは、道路閉塞したうえで、震災から2時間後に地域住民全員が避難を開始するケースである。ここでは震災直後に帰宅困難者が一斉帰宅するものとしているため、帰宅困難者の移動と市街地火災からの避難者が錯綜して大混雑を起こ

すケースを検証するもので、30分以内に避難を完了できる人は46.9%、1時間以内は65.9%、2時間以内でも80.3%しか避難場所に到達できない。すなわち細街路の閉塞はもちろん、帰宅困難者の一斉帰宅が地域の避難行動を阻害することがシミュレーション上でも再現されたことになる。本研究は市街地火災からの避難を念頭に置いたが、津波避難においてもこの傾向は同様であると考えられ、大都市内で迅速な避難を実現するためには、帰宅困難者による混雑発生も踏まえた避難開始時間の設定や、避難計画からみた一斉帰宅抑制の効果検証など、大都市特有の避難計画の策定技術が必要と考えられる。

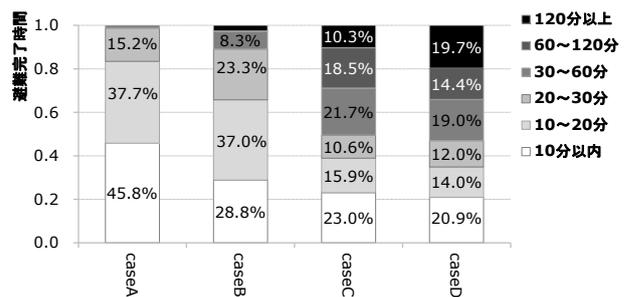


図7 各ケースにおける避難完了時間

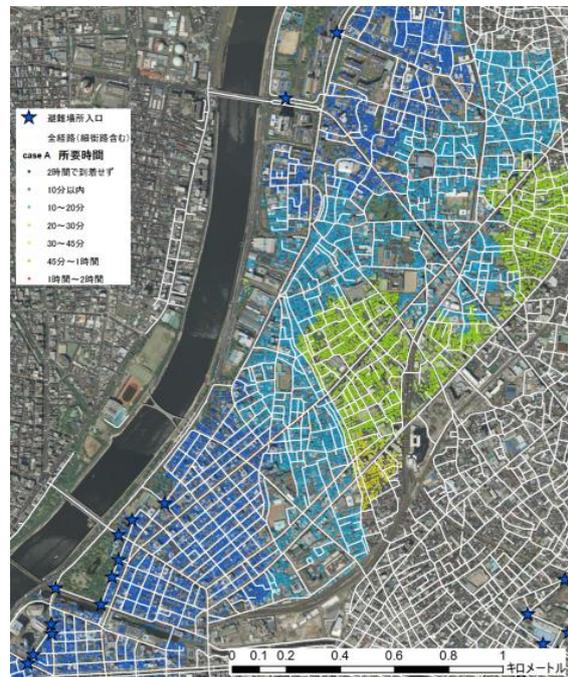


図8 caseA(混雑なし+閉塞なし+帰宅者なし)の避難時間分布

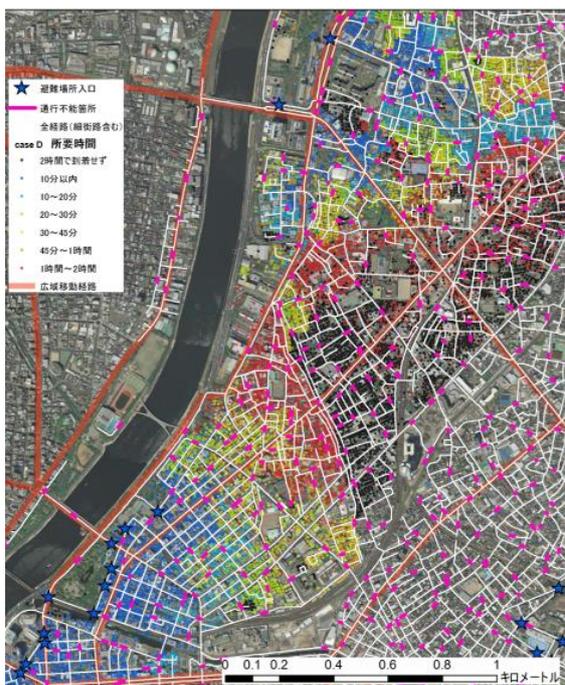


図 9 caseD (混雑あり+閉塞あり+帰宅者あり) の避難時間分布

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 3 件)

- ① 廣井悠, 大森高樹, 新海仁: 大都市避難シミュレーションの構築と混雑危険度の提案, 日本地震工学会論文集第 16 巻第 5 号, pp. 111-126, 2016. 04. (査読有)
- ② U HIROI, Jyunya AOYAMA: Study about the Effect of the Signature Indication for Evacuation in the Underground Space, Journal of Disaster Research, Vol. 11, No. 2, pp. 315-321, 2016. 03. (査読有)
- ③ 廣井悠: 帰宅困難者と災害情報, 社会情報学, 第 3 巻 3 号, pp. 39-60, 社会情報学会, 2015. (査読有)

〔学会発表〕 (計 2 件)

- ① 廣井悠, 大森高樹, 新海仁, 大都市複合災害避難シミュレーションの提案, 日本災害情報学会第 16 回研究発表大会概要集, 2015. 10, 山梨大学.
- ② 廣井悠: 大都市避難シミュレーションの構築とその応用, 日本建築学会梗概集, 2015. 05, 東海大学.

〔その他〕

ホームページ:

<http://www.u-hiroi.net/index.html>

受賞: 日本災害情報学会奨励賞「阿部賞」(2015)

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

廣井 悠 (HIROI, U)