歩行者シミュレーションを用いた二段階避難による混雑軽減の分析

Analysis of Congestion Reduction by Two-Phase Evacuation with a Pedestrian Simulation

山下 倫央

Tomohisa Yamashita

国立研究開発法人 産業技術総合研究所 人工知能研究センター*1

Artificial Intelligence Research Center, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology(AIST)

tomohisa.yamashita@aist.go.jp

野田 五十樹

Itsuki Noda

国立研究開発法人 産業技術総合研究所 人工知能研究センター

Artificial Intelligence Research Center, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology(AIST)

i.noda@aist.go.jp

荻野 光司

Koji Ogino

東京工業大学大学院 環境・社会理工学院 建築学系

School of Environment and Society, Department of Architecture and Building Engineering, Tokyo Institute of Technology

12rg025@ms.dendai.ac.jp

高田 和幸

Kazuyuki Takada

東京電機大学理工学部 建築・都市環境学系

Division of Architectural, Civil and Environmental Engineering, School of Science and Engineering, Tokyo Denki University

takada67@gmail.com

大原 美保

Miho Ohara

国立研究開発法人 土木研究所 水災害・リスクマネジメント国際センター

International Centre for Water Hazard Risk Management under the auspices of UNESCO, Public Works Research Institute (PWRI)

mi-ohara@pwri.go.jp

key words: pedestrian simulation, two-phase evacuation temporary meeting place, interregional temporary refuge

Summary

In this paper, we analyze the effect of two-phase evacuation with a temporary gathering place on congestion reduction with a pedestrian simulator. At first, we construct an evacuation behavior model based on the questionnaires in Senju Area, Tokyo, and estimate the number of the evacuees under several disaster situations. We apply CrowdWalk, pedestrian simulator to measure the effect of two-phase evacuation and direct evacuation to wide-area evacuation sites with using two evaluation indexes, an average evacuation time of all evacuees and average stopping time in congestion of all evacuees. As a result of our simulation, we conform that two-phase evacuation has an effect preventing the evacuees from concentrating in an evacuation route, and the variation of evacuation behavior can be caused by two-phase evacuation. Finally, we discuss the availability of the two-phase evacuation for practical use.

1. はじめに

東日本大震災によって多くの人的被害が生じたことから、災害による被害を軽減する取り組みに対する社会的ニーズが高まっている。今後の地震・津波等によって引き起こされる甚大な被害発生を防ぐため、多くの防災・減災の施策が見直されつつある。その取り組みの一つとして複数の災害の被災リスクが同時に高まる複合災害への対応が挙げられる。複合災害は、複数の自然災害が同時または時間差をもって発生することで起こる災害である。例えば、地震による液状化によって堤防や護岸が破壊されて、水害が発生するような場合が挙げられる。本研究では、まちの総合危険度や水害の危険度が高いと判定されている[足立 12] 東京都足立区の千住地区を取り上げる。危険度の高い千住地区は東京都内および東京近郊の

木造家屋が密集している地域の代表例であるため、千住地区に対して有効な対策を考えることで、その他の多くの地域へ波及効果が見込まれる。

本論文では、このようなリスクを含む状況への対策の一つとして、一時集合場所を用いた二段階避難を取り上げる。二段階避難は、避難対象者が一時集合場所に集合して災害状況を見極めた後、広域避難場所に移動する避難方法である[東京 14]。千住地区の住民の避難に着目し、災害からの避難に関する選択行動モデルの推定を通じて、災害状況に応じた避難行動の推計を行う。この推計結果に基づいて、歩行者シミュレータを用いて千住地区における二段階避難の効果を検証する。

二段階避難もしくは広域避難場所への直接避難を行う状況として、首都直下地震等によって木造家屋が倒壊して、千住地区の各所で火災が発生している状況を想定している。このような災害状況では、現状では東京都を始

*1 2017 年 2 月より北海道大学大学院情報科学研究科

めとする自治体は一時集合場所を利用した二段階避難の実施を呼びかけており、一時集合場所の整備や情報配信を進めている。しかし、現状では二段階避難がどのような状況を引き起こすかは明らかになっておらず、どのように二段階避難を運用すれば良いかといった具体的な運用方法も明らかになっていない。また、大規模な避難行動をどのような指標で評価するのかも定まっていない。混雑はどの程度に抑えるべきである、何分以内に避難を完了すべきである、といった指針もない。そのため、二段階避難の特徴を明確にして、二段階避難にはどのような有用点があるのか、またどのような条件でその有用な点が現れるのか、といった疑問に答えることには社会からの強いニーズがある。

このような社会的ニーズに加えて、二段階避難は一時集合場所を経由するため、その際に避難者の経路分散や再移動開始時刻を調整しやすいという特徴を持っている。そのため、二段階避難を有効に機能させる条件を検証するにあたって、二段階避難において避難者を分散させるように避難者の行動を調整することに着目する。そこで本論文の目的を、

- 避難者の分散の観点から、二段階避難を有効に機能させる条件を明確にすること、
- 二段階避難と広域避難場所への直接避難と比較して差異を明確にすること、

とする。

本論文は次のように構成される。2 章では、一時集合場所を用いた二段階避難と千住地区の災害リスクの現状をまとめ、災害からの避難に関する選好意識調査の結果を示す。3 章において千住地区を対象とした避難シミュレーションを歩行者シミュレータ CrowdWalk を用いて実施する。避難者の平均避難完了時間や平均混雑内滞留時間といった評価指標で、避難者を分散させる条件が二段階避難に与える影響を検証する。4 章においてシミュレーション結果に基づいて二段階避難の現実的な有用性について考察する。最後に 5 章で本論文の結論を述べる。

2. 避難行動の推計

本章では、はじめに一時集合場所を用いた二段階避難に関してまとめる。次に対象となる千住地区の異なる災害の被災リスクの現状をまとめ、2014 年に千住地区居住者を対象として行った災害からの避難に関する選好意識調査の結果を示す。

この調査結果から居住者の二段階避難に対する選好意識を明らかにして、二段階避難の検証項目を検討する。

2.1 二段階避難の概要

二段階避難は混乱発生を防止するために、広域避難場所に移動する避難対象者が一時集合場所に集合して集団を形成し、秩序正しい避難態勢を整えることを目的とし

図1 避難行動の順序

て行われる。一時集合場所は広域避難場所に避難する前に近隣の住民が一時的に集合する場所で、集合した人々の安全が確保されるスペースを有する学校のグラウンドや神社・仏閣の境内等を自治体が指定している。一時集合場所に行った後は、近所の人たちが集まって、災害状況に応じて広域避難場所に移動する。学校は自治体によっては一時集合場所と同じ扱いになることもある一方で、避難所として指定されている場合には一時集合場所に含まれない場合もある。

現状では一時集合場所を利用した避難方法は明確に定められているわけではない。図1は、東京都が公開している避難の順序である^{*2}。この避難の順序において、一時集合場所が安全であるか、危険かといった判断や火災などの危険の有無に関する意思決定の判断基準は明確ではなく、意思決定を行うのが自治体の担当者なのか住民なのかも定められていない。

現状の避難の順序においては、地域住民が一時集合場所に集まってから広域避難場所に移動するという避難方法は具体性に欠けている。そのため実際の災害時に一時集合場所を経由する避難は実効性が上がらないことが懸念される。一方で地域住民が一時集合場所を利用せず、一斉に広域避難場所に避難した場合に、避難経路上で混雑を生じさせてしまい、混雑による二次災害を生じさせる危険も懸念される。

^{*2} この図は、東京都が下記 URL で公開している図を引用して著者が作成した図である。
<http://www.bousai.metro.tokyo.jp/bousai/1000029/1000316.html>

一時集合場所を利用した二段階避難に関する従来研究においては、一時集合場所を利用する防災訓練手法に関する研究[久田 09]、広域火災に対する一時集合場所の有効性を検証した研究[馬淵 08]、一時集合場所の安全性・利便性の静的な評価に関する研究[澤井 13]が行われてきた。また、様々な災害状況に対する広域な避難シミュレーションの構築とその利用に関する研究[児玉 14, 村木 07]も行われてきたが、本研究で扱っている数万人規模の避難における二段階避難の有効性を検証した事例はない。

2.2 千住地区の被災リスク

千住地区の住宅や建築物の特徴として、第一に建築密度が高く不燃化率が低いことが挙げられる。そのため、防災上多くの課題が残された地区であると指摘されており[足立 12]、東京都が5年ごとに実施している地域危険度測定調査[東京 13]では総合危険度の高い地区に指定されている。次に、国土交通省河川局により、千住地区では荒川が氾濫した場合には浸水深が5mになる地点があることを指摘されている[足立 07]。

複数の災害リスクのある千住地区では、地震発生後の火災からの避難場所として千住地区北部の荒川沿いの河川敷が指定されている。洪水発生の場合には、千住地区南側にある足立区外の北区・台東区・文京区の方角へ避難することが推奨されている。さらに、災害の種類によって避難する方向が異なるため、複合災害の発生の危険性が高まったり、実際に複合災害が発生した際には、避難者が混乱することが懸念されている。

首都直下地震が発生した際、災害の種類によって避難方法が異なることで、JR 北千住駅周辺は近隣地区からの避難者と千葉・埼玉方面への帰宅困難者が混在する可能性や、千住地区は荒川と隅田川に挟まれた中洲であるために落橋時に千住地区が孤立する危険性が指摘されている[久田 13]。千住地区では首都直下地震の発生時刻によっては被災者や避難者となるのが地域住民だけではなく、従業者、通学者、地域を通過中の電車利用者や自動車利用者と増加してしまい、千住エリアの滞在者数が7万人を超える可能性がある[大原 13]。

2.3 避難行動に関する選好意識調査

§ 1 調査概要

千住地区における災害からの避難行動を事前に把握するために、千住地区の居住者と従業者を対象としたアンケート調査を行い、首都直下地震時の想定されている震度や荒川洪水時の浸水深に対する認知状況等について調査を行った[高田 14b]。実施した災害避難に関する選好意識調査の概要を表1に示す。本節では、災害状況に応じた避難行動を推計するために、2014年に千住地区居住者を対象として行った災害からの避難に関する選好意識調査に基づいて、選択行動モデルの推定結果を示す。

表1 災害からの避難に関する選好意識調査の概要

調査対象者	千住地区居住者
調査日時	2014年1月28日(火) ～2月4日(火)
配布方法	ポスティング
回収方法	郵送
配布部数	2,500部
回収数(率)	335部(13.4%)
調査項目	(1) 想定被害の認識について (2) 災害に対する備えについて (3) 避難情報・予警報の知識について (4) 地震避難の知識について (5) 避難行動について(選好意識調査) (6) 住宅特性・個人属性について

ネスティッド・ロジットモデルを用いて階層構造化した選択行動を表現し、その要素となる一時集合場所、広域避難場所、学校、その他から避難施設を選択する避難施設選択行動モデル、垂直避難・水平避難のどちらかを選択する垂直避難/水平避難選択行動モデル、屋外避難の有無に関する選択行動モデルを推定する。

複合災害の発生状況については、火災の延焼の有無、洪水発生時の危険性の有無、道路混雑の有無を組み合わせ設定する。組み合わせを行う際には、実験計画法の直交配置を援用するとともに、被験者が想定し難い状況については設定しないようにした。各回答者には異なる災害状況を提示し、それぞれの状況下における避難行動について回答していただいた。調査の詳細に関しては文献[高田 14b]、モデルの推定結果の詳細に関しては、文献[高田 14a, 山下 15]を参照されたい。

§ 2 避難者数の推計結果

推定した3つのモデルを用いて、想定する6つの災害シナリオにおける避難者数の推計を行う。6つの災害シナリオは延焼、水害、道路混雑の有無の組み合わせにより表される。災害シナリオ1は延焼のみを考慮しており、災害シナリオ2は災害シナリオ1に道路混雑を加えている。災害シナリオ3では水害のみを考慮しており、災害シナリオ4では災害シナリオ3に道路混雑を加えている。災害シナリオ5では延焼と水害を考慮しており、災害シナリオ6では災害シナリオ5に道路混雑を加えたシナリオである。避難者数の推計は町丁目単位、年齢層(70歳以上/未満)別に行い、人口には平成22年度国勢調査の結果を用いる。

災害シナリオ1から6の避難者数の推計結果を表2に示す。表2中のシナリオ1と2、3と4、5と6を比較することで、延焼、水害、および双方の災害状況において道路混雑が避難行動に与える影響が分かる。道路混雑の条件が加わっているシナリオ2、4、6が1、3、5に比べて、自宅滞在者が増加している。選好意識調査の

設問中の混雑に関する条件である「荒川・隅田川に架かる 6 本の橋は車道・歩道共に混雑しており、スムーズに通行できない」が自宅滞在者を増加させることが確認された。

避難者の目的地として広域避難場所、一時集合場所、学校が挙げられている。想定される災害が延焼のみという比較的発生頻度の高いと想定される状況においては、一時集合場所と学校が避難先として選ばれる割合が高かった。表中に記載されている学校の数は一時的集合場所ではない学校であるので、最大で 61% (シナリオ 1) の地区内居住者が一時集合場所ではない学校を避難先として選択している。

シナリオ 1 と 5, 2 と 6 を比較することで、水害リスクが与える影響が分かる。水害リスクが高いと考慮した場合には、広域避難場所に直接向かう割合が高くなることが確認された。

これらの推計結果から、二段階避難に関して、i) 混雑している状況を知ることが避難開始の障壁となること、ii) 一時集合場所を利用した二段階避難の認知は不十分であること、の二点を確認された。

3. 避難シミュレーションの適用

前章で述べたように現在、自治体は一時的集合場所を経由する二段階避難を推奨している。また、避難者数の推計結果からは、混雑が発生しているという情報が自宅滞在者を増加させてしまうことが明らかになった。二段階避難により混雑を軽減することができれば、その他の避難対象者の避難開始を促進することも可能になり、混雑軽減による迅速な避難完了と避難開始の心理障壁の軽減という二つのメリットが生まれる。本章では二段階避難の安全性や効率性の定量的な評価指標の提案を行い、千住エリアを対象とした避難シミュレーションによって、二段階避難の効果を検証する。

3.1 歩行者シミュレータ CrowdWalk の適用

§ 1 CrowdWalk の概要

本研究では、一時集合場所を利用した避難方法を歩行者シミュレータ CrowdWalk [Yamashita 13] を用いて評価する。CrowdWalk では歩行可能領域をネットワークのリンクとして表現する一次元空間モデル [山下 12] を採用しており、歩行者間の相互作用を簡略化して扱っている。そのため、CrowdWalk は広範囲・大規模の群集流動の挙動を扱うことに適している。

CrowdWalk はマルチエージェントモデルを採用しており、各歩行者エージェントの歩行速度はそれぞれのエージェントの置かれた状況に応じて加減する。本論文で実施するシミュレーションでは、各避難者をエージェント一体として表現する。本論文の設定では、歩行者エージェントの歩行速度は前方の歩行者エージェントとの距離か

ら決定される。ただ、この歩行速度を決定するための歩行速度関数は全ての避難者で同一の関数を利用している。歩行速度関数の詳細に関しては、文献 [Yamashita 13] を参照のこと。

一次元空間モデルでは、歩行者は歩行可能領域をリンク、その結節点をノードとするネットワーク上を移動する。歩行者エージェントはネットワーク上を移動する場合、目的地 (または経由地点) として指定されたリンクやノードに向かって最短距離経路を移動する。

本論文では、避難者が移動する歩行可能領域として、昭文社製の歩行者ネットワークデータ^{*1} を CrowdWalk 用の地図データに変換して利用する。この歩行者ネットワークデータの特徴は、通常の道路地図に比べて、歩行者のみが移動可能な車道に沿った歩道、歩道橋、アーケード、ペDESTリアンデッキといったデータが含まれていることが挙げられる。そのため、北千住駅周辺や道路の狭い住宅街を含む千住エリア (約 2.5km 四方) を住民が徒歩で避難する状況を扱うシミュレーションに適している。

§ 2 二段階避難の機能追加

一時集合場所には通常、学校、公園、寺社仏閣が指定されている。しかし、本シミュレーションで用いる昭文社製の歩行者ネットワークデータにこれらの施設は記載されていないため、CrowdWalk 用の地図データに一時集合場所として避難者が一定期間滞在するリンクを追加する。二段階避難を実施する場合には、シミュレータ内で避難者エージェントは発生した町丁目ごとに決められた一時集合場所として指定されたリンクに移動する。避難者エージェントは、一時集合場所であるリンク上で指定時刻まで待機し、指定時刻になったら広域避難場所へ移動する。

3.2 シミュレーション設定

2 章の避難者数の推計結果を適用した避難シミュレーションを実施して、千住地区における住民の一時避難場所、広域避難場所、学校等までの二段階避難の効果を検証する。ここでの避難条件として、避難方法、移動開始期間、広域避難場所への経路分散に関する設定を取り上げる。

災害状況の避難に影響を与える要因としては多岐にわたる要因が考えられる。二段階避難の特徴を検証する第一段階としては、条件数を増やすことで二段階避難の特徴を明確にすることが困難になるため、避難者を分散させて混雑軽減に影響が強いと思われる避難方法 4 通り、避難開始期間 2 通り、経路分散 2 通りに絞って検証する。以下で避難条件の詳細を述べる。

§ 1 避難者

今回のシミュレーションでは、町丁目ごとに発生する避難者数を設定する。各町丁目の避難者数は、表 2 における

^{*1} 昭文社 歩行者ネットワークデータ

<http://www.mapple.co.jp/biz/product/digital/road/routing.html>

表2 各災害シナリオの避難者の推計

災害シナリオ		1	2	3	4	5	6
設定状況 (: 考慮した 条件)	延焼						
	水害						
	道路混雑						
水平避難先	一時集合場所	21,876	21,139	30,349	25,570	11,770	10,283
	広域避難場所	1,222	1,186	12,066	10,550	33,444	28,191
	学校	45,007	43,674	242	194	15,212	13,466
	その他	4,819	4,706	5	4	6,474	5,466
水平避難者数計		72,923	70,704	42,662	36,318	66,900	57,406
垂直避難者数計		0	0	28,425	23,333	4,308	3,687
自宅滞在者数計		320	2,539	2,156	13,592	2,035	12,150

水平避難者総数が最も多かった災害シナリオ1の72,923人を利用し、総夜間人口に対する各町丁目の夜間人口の割合を乗じて算出する。この各町丁目に対して設定された避難者数分の避難者エージェントが初期配置される位置は、その町丁目内の歩行可能領域(歩道や歩・車混合交通の道路)に対して一様分布に基づいて決定される。

千住エリアの広域避難場所は、千住東一丁目、千住閑屋町、千住仲町の3町会では千寿第八小学校一帯、残りの25町会では千住エリア南側の荒川南岸・河川敷緑地一帯(全域)となっている。

広域避難場所には千寿第八小学校一帯には3箇所、荒川南岸・河川敷緑地一帯(全域)には50箇所の入口が設定されている。避難者は入口の一つを最終的な目的地として発生地点からの最短距離経路を移動する。避難者は指定された広域避難場所の入口まで来ること、広域避難場所に到着したとみなされる。

§2 避難方法

一時集合場所を利用した二段階避難の効果を検証するために、広域避難場所に直接移動する避難と一時集合場所に集合した後に広域避難場所に移動する二段階避難を比較する。

広域避難場所に直接移動する場合には、各町丁目で発生した避難者は指定された広域避難場所(の入口)に移動する。一時集合場所を利用した二段階避難では、避難者は発生した各町丁目に定められている一時集合場所に最短距離経路で移動する。その後、一時集合場所ごとに設定されている再移動開始時刻まで一時集合場所で待機し、その後指定された広域避難場所の入口まで距離最短経路で移動する。

これらの避難行動を踏まえて、シミュレーションでは表3で示される4つの状況における避難方法を考える。

避難方法に関しては、二段階避難と広域避難場所への直接避難を比較するために避難方法1と避難方法3を設定する。次に、二段階避難を行うことを考えた場合、各町丁目に設定された一時集合場所に避難者が集まった後、どのようなタイミングで広域避難場所に移動するかといっ

表3 避難方法に関する設定

避難方法1	全員が広域避難場所に直接移動する。
避難方法2	避難方法1と避難方法3-1を取る避難者が50%ずつ混在する。
避難方法3-1	全員が一時集合場所に集合・滞在後に広域避難場所に移動する。 (一時集合場所ごとに再移動の開始時間にばらつきがある。 避難者の移動開始期間が10分間の場合、再移動の開始時間はシミュレーション開始50, 70, 90分後のいずれかに設定。 避難者の移動開始期間が30分間の場合、再移動の開始時間はシミュレーション開始70, 90, 110分後のいずれかに設定。)
避難方法3-2	全員が一時集合場所に集合・滞在後に一斉に広域避難場所に移動する。 (避難者の移動開始期間が10分間の場合、再移動の開始時間は、シミュレーション開始70分後に設定。 避難者の移動開始期間が30分間の場合、再移動の開始時間は、シミュレーション開始90分後に設定。)

た意思決定は、広域避難場所に直接避難する場合にはないため、二段階避難を運用する上で重要な点となる。避難者の安全に大きくかわるにもかかわらず、従来研究では扱われていないため、分散して再移動を開始する避難方法3-1と全体として同時に再移動を開始する避難方法3-2を設定する。また、避難者全員が同一の避難方法を取ると想定することは現実的ではないため、二段階避難と広域避難場所への直接避難が混在する状況として避難方法2を設定する。

表3における広域避難場所に近い一時集合場所の方が広域避難場所までの経路の安全性(火災や家屋倒壊の有無)を確認するための時間がかからないと想定する。50,

表 4 避難者の移動開始期間に関する設定

発生期間 1	10 分間
発生期間 2	30 分間

70, 90 分後のいずれかに設定する場合には, 広域避難場所に近い一時集合場所には, 再移動の開始時間として 50 分後を設定し, 広域避難場所への距離が離れるに応じて, 70 分後, 90 分後を設定する. 同様に, 70, 90, 110 分後のいずれかに設定する場合にも距離に応じて, 再移動の開始時間に 70, 90, 110 分後を設定する. また, 一時集合場所同士で連絡を取り合って, 広域避難場所の入口での混雑を回避できる状況を想定して, 隣り合う町丁目の一時集合場所が同じタイミングで再移動を開始しないように再移動の開始時間をずらして設定する.

§ 3 移動開始期間の分散

移動開始期間に関しては以下のような想定に基づいて設定している. 本シミュレーションでは, 首都直下地震等によって木造家屋が倒壊して, 千住地区の各所で火災が発生している状況を想定している. さらに, 地域住民に関しては, 千住地区に木造家屋が多く, 首都直下地震等では火災の危険が高いことを事前に把握しており, 比較的速やかに避難を開始する状況を想定している. このような災害状況と住民の対応を表すための「移動開始期間」として, 表 5 に示されるように 10 分と 30 分を設定する.

避難を開始する期間を 10 分間とした場合は, 避難者はシミュレーション開始からの 10 分以内にランダムに発生して移動を開始する. 同様に, 30 分間の場合は, 避難者は開始から 30 分以内にランダムに発生して移動を開始する.

移動開始期間が 10 分の方が 30 分間の場合に比べて一斉に移動を開始している度合いが強いため, 避難者の集中が生じることが想定される.

§ 4 広域避難場所への経路分散

同一町丁目で発生した避難者が移動する発生箇所から広域避難場所までの経路と一時集合場所から広域避難場所の経路の数を設定する. 混雑発生を防いで避難を行うことを考えた場合, 分散して広域避難場所へ移動することも重要である. そのため, 広域避難場所に直接移動する場合と一時集合場所での待機後に広域避難場所へ移動する場合に, 避難先となる広域避難場所と経路の分散数に関する設定を取り上げる. ただし, 災害発生後の避難誘導において, 1 つの一時集合場所から多数の広域避難場所に誘導することは, 誘導にかかる人員や手間の観点から現実的ではないため, 表 4 に示されるように誘導がない場合を経路分散数 1, 誘導がある場合を経路分散数 3 と設定とする.

広域避難場所への経路分散が 1 の場合, 避難者は自分が発生した場所から発生した町丁目に割り当てられた広域避難場所に向かって最短距離経路を移動する. 広域

表 5 広域避難場所への経路分散に関する設定

経路分散 1	1 (同一町丁目で発生した避難者全員が同一の経路で移動)
経路分散 2	3 (同一町丁目で発生した避難者が三等分して移動)

難場所への経路分散が 3 の場合, 各町丁目で発生した避難者は三つの群に等分されて, それぞれ群の避難先としては, 発生した町丁目に割り当てられた広域避難場所, そこに最も近い広域避難場所 2 つのいずれかが重複なく割り当てられる. その後は経路分散数が 1 の場合と同様に割り当てられた広域避難場所に向かって最短距離経路を移動する.

ただし, ここで異なる広域避難場所というのは, 全く別の広域避難場所へ移動するのではなく, 同一の広域避難場所の入口を目的地として移動することである. 千住エリアのシミュレーションの場合, 荒川南岸・河川敷緑地一帯(全域)を広域避難場所として移動する場合, 経路が分散しても, 別の広域避難場所(千寿第八小学校一体)に移動するのではなく, 複数ある河川敷の入口に向かう経路に分散するということになる.

分散経路数が少ない方が同一の経路に避難者数がより多く流入するため, 避難者の集中が生じることが想定される.

3.3 評価指標

評価指標として平均避難完了時間と平均混雑内滞留時間を適用する. 平均避難完了時間は全避難者が移動開始から広域避難場所に到達するまでの平均移動時間である. また, 平均避難完了時間において一時集合場所における待機時間を含む場合と含まない場合を考える.

住民の初期配置と避難場所によって避難完了時間は異なるため, 平均した場合にその偏りに関する情報は欠落する. ただし, 平均値は全ての避難者の避難時間を考慮しているため, 避難者全体としての避難状況の傾向を把握するための評価尺度としては利用可能である. 平均値は一般的に外れ値としての影響を受けやすいという特徴がある. しかし, 本シミュレーションにおける他の避難者よりも大幅に遅れた避難者が現れた場合, その遅れは移動の阻害要因により生じているため, 大幅な遅れが反映される指標が望ましい. 中央値や最頻値を用いることも考えられるが, 中央値は外れ値の影響を受けにくく, 中央値は全てのデータを考慮していないため全避難者の動向を反映しづらい. 最頻値も外れ値の影響を受けにくく, 最頻値は複数の代表値が現れてしまう可能性がある. 上記の特徴を考慮して, 本論文では平均避難完了時間を評価尺度として利用する.

混雑内滞留時間を, 避難者が避難開始してから目的地に到着するまでの移動時間の中で, 歩行速度が混雑によって設定した閾値以下になっていた時間とする. 平均混雑

図2 千住地区を対象とした避難シミュレーションのスクリーンショット

内滞留時間とは、全避難者の混雑内滞留時間の平均値である(本論では、歩行速度が0.1m/s以下の場合を滞留と定義する)。

平均混雑内滞留時間を算出することで、避難者全体が混雑に巻き込まれずに移動ができているかどうかを判定できる。移動時間が短くても混雑の中にいる時間が長ければ、混雑による危険が増してしまうため、平均混雑内滞留時間はできるだけ短くなるのが望ましい。

3.4 シミュレーション結果

図2にCrowdWalkを用いて実装した千住地区を対象とする避難シミュレーションのスクリーンショットを示す。広域避難場所である荒川南岸・河川敷緑地一体(全域)が千住エリアの北側にあり、千寿第八小学校一帯が南側にある。図中の緑の点は自由流速度で移動している避難者を表している。赤い点は、混雑による速度の低下または一時集合場所で待機している避難者を表している。

図3、図4は各ケースにおける広域避難場所への平均避難完了時間と平均混雑内滞留時間を表している。

一時集合場所を利用した場合には、平均避難完了時間としては一時集合場所における待機時間を含むものと含まないものの両方を取り上げる。

また、これらの値は乱数シードのみを変えた5試行の平均である。5試行の平均値と最大値・最小値との差が平均値の1%を超えることがなかったため、グラフには平均値のみを記載して、最大値・最小値は省略した。

図3において、避難方法に関しては、広域避難場所に直接移動する避難方法1の方が平均避難完了時間は短いことが確認できる。一方で、二段階避難が含まれている避難方法2、3-1、3-2の方が平均混雑内滞留時間は短い。避難方法2、3-1、3-2の比較では、広域避難場所に直接移動する避難と二段階避難が混ざっている避難方法2の平均避難完了時間と平均混雑内滞留時間の両方が最も短く、一斉に一時集合場所から広域避難場所

に移動する避難方法3-2が両方とも最も長い。ただし、待機時間を除く平均避難完了時間では避難方法2、3-1、3-2で大きな違いは見られない。同様の傾向が図4でも表れている。

広域避難場所への経路分散数に関しては、経路分散数が1から3に増加すると平均避難完了時間、平均混雑内滞留時間共に短くなることが確認できた。図4でも同様の傾向が表れている。

避難者の移動開始期間に関して、図3、図4を比較すると、避難開始期間が10分間から30分間に増加すると待機時間を含む平均避難完了時間は増加、待機時間を含まない平均避難完了時間は変わらず、平均混雑内滞留時間は減少している。

4. 考察

4.1 シミュレーション結果からの知見

本節では、二段階避難の現実的な有用性に関して考察する。シミュレーションの結果から、避難に関する条件である避難方法、避難者の移動開始期間、広域避難場所への経路分散のいずれに関しても避難対象者を分散させることが平均混雑内滞留時間を減少させることにつながることが分かった。

避難方法に関しては、広域避難場所に直接移動する避難と二段階避難が混在する避難方法(避難方法2)の平均混雑内滞留時間が最も短かった。また、避難方法2を除くと、一時集合場所からの再移動開始時刻にばらつきがある二段階避難の平均混雑内滞留時間が短かった。避難者の移動開始期間に関しては、移動開始期間の幅が広い方が平均混雑内滞留時間が短かった。広域避難場所への経路分散に関しても、分散している方が平均混雑内滞留時間が短かった。

このようなシミュレーション結果から以下の知見が得られる。二段階避難において避難者を分散させるように避難者の行動を調整(経路分散や再移動開始時刻を設定)すると、二段階避難は広域避難場所への直接避難と比較しても、混雑を軽減することが可能となる。また、避難開始から避難完了までの平均避難完了時間が延びる傾向があるが、一時集合場所での待機時間を除いて移動している時間のみを考えると平均避難完了時間は二段階避難と広域避難場所への直接避難のわずかな違いとなる。

4.2 二段階避難の有用性

災害に対する事前準備では、地域住民に対してある程度一律に情報を流したり、行動を規定せざるをえないため、災害状況において各人の行動を詳細に規定して、全体としてばらつきのある行動を取らせることは現実的ではない。それに対して、二段階避難では、避難対象者が一斉に一時集合場所に集まってきたとしても、一時集合場所にいる避難対象者(または意思決定者)が他の一時集合

場所の移動状況を知って、広域避難場所に移動するタイミングを変更することができれば、一時集合場所がバッファとしての役割を果たし、避難者の広域避難場所への移動のタイミングを分散させ、混雑を軽減させることができる。そのため、2.3 節 §2 において述べた千住エリアの

i) 混雑している状況を知ることが避難開始の障壁となること、

という問題に対して、混雑を軽減させる二段階避難は有効に機能する。

二段階避難のメリットとして、発生頻度の高い被災程度の小さい災害が発生した際には、移動時間のかかる広域避難場所に行かずに、各町丁目にある一時集合場所で被害がないことを確認して自宅に戻れば、移動時間と移動距離が少なくて済むということも挙げられる。避難シミュレーションにおいて、広域避難場所までの移動時間は 19 分から 25 分程度であるが (避難経路の分散数が 1, 3 の場合)、一時集合場所までの移動時間は 5 分から 10 分程度であることが確認された。一時集合場所までの移動に時間がかからず、避難者への負担の少ない二段階避難を普及させておくことで、自宅からの避難開始を早めることができると考えられる。

今回のシミュレーションによって二段階避難は、避難者行動の分散によって混雑の軽減を実現できることを確認した。しかし、そのため、2.3 節 §2 において述べた千住エリアの

ii) 一時集合場所を利用した二段階避難の認知は不十分であること、

という問題点と共に、実際に二段階避難を運用する場合には、一時集合場所に集合して再び移動するという手順は分かりづらく、広域避難場所への移動のタイミングを計るのが難しいという問題点 [関澤 14] も指摘されている。そのため、具体的な二段階避難方法を確立するためには、一時集合場所の意思決定主体の選定、再移動開始の判断基準の確立、防災組織を含んだ一時集合場所間での通信体制の確立が必要である。

4.3 今後の展開

今回のシミュレーションによって二段階避難は、避難者行動の分散によって混雑の軽減を実現できることを確認した。今後は、具体的な二段階避難方法を確立するために、通信体制や一時集合場所での意思決定の過程の明確化を図る。

災害状況の避難に影響を与える要因としては、本論文で取り上げた三つの要因の他にも、例えば、避難者の年齢や性別による歩行速度の差異、避難者の一時集合場所や広域避難場所に関する知識の有無、地震後の家屋崩壊や液状化による道路閉塞、といった避難者の内的な要因から災害による外的な要因までの多岐にわたる要因が考えられる。本論文で取り上げた三つの要因に関しても、条件数を増加させて詳細な検討が可能である。本論文で

は二段階避難の特徴を検証する第一段階として、3 条件 16 通りのシミュレーションを実施したが、さらに多様な条件下で、どのような避難方法が有効であるかを検証することには強い社会的ニーズがあるため、さらに詳細な分析を進める。また、今回の歩行者シミュレーションでは扱わなかった要因として、道路幅、周辺家屋の材質 (木造 or 非木造)、壁面崩落の可能性が挙げられる。これらの条件に関してもシミュレーションモデルの実装を行い、移動時間や混雑内滞留時間に加えて、安全な経路に関する定量化を行う。

5. おわりに

本論では、東京都足立区千住地区の住民避難を取り上げて、災害からの避難に関する選択行動モデルの推定を通じて、災害状況に応じた避難者数の推計を行った。歩行者シミュレータ CrowdWalk を導入して、避難方法、避難者の移動開始期間、広域避難場所への経路分散を避難条件として扱うシミュレーションを実施し、避難方法の評価指標として避難完了時間と混雑内滞留時間を適用した。二段階避難においては、各一時集合場所から広域避難場所へ移動するタイミングをずらすことで、避難者が特定の避難経路に集中することを防ぎ、混雑軽減に効果があることを確認した。シミュレーション結果を踏まえて、二段階避難の現実的な有用性を考察した。

謝 辞

本研究の一部は、総合科学技術・イノベーション会議の SIP (戦略的イノベーション創造プログラム)「レジリエントな防災・減災機能の強化」(管理法人:JST)によって実施されました。

◇ 参 考 文 献 ◇

- [足立 07] 足立区:足立区洪水ハザードマップ (2007)
- [足立 12] 足立区:足立区防災会議:地域計画震対策編 (H24) (2012)
- [久田 09] 久田 嘉章, 村上 正浩, 座間 信作, 遠藤 真, 柴山 明寛, 市居 嗣之, 関澤 愛, 末松 孝司, 山田 武志, 野田 五十樹, 松井 宏樹, 久保 智弘, 大貝 彰: 地域住民と自治体の協働による防災対応力の向上と効率的な被害情報収集・共有のための防災訓練, 日本地震工学会論文集, Vol. 9, No. 2, pp. 130-147 (2009)
- [久田 13] 久田 嘉章:「逃げる対策」から「逃げない対策」へ, 自主防災 2013 年 7・8 月号, Vol. 234, pp. 6-9 (2013)
- [児玉 14] 児玉 真, 桑沢 敬行, 片田 敏孝, 澁谷 慎一, 村田 智孝: 大規模水害時の広域避難誘導方策のあり方に関する研究, 日本災害情報学会 第 16 回研究発表大会予稿集, pp. 46-47 (2014)
- [馬淵 08] 馬淵 ゆみ, 瀬尾 和太, 元木 健太郎, 上田 遼: 木造密集地域における地震時の広域火災に対する避難計画に関する研究, 地域安全学会論文集, No. 10, pp. 409-415 (2008)
- [村木 07] 村木 雄二, 狩野 均: 地域性を考慮した広域災害避難シミュレーションのためのマルチエージェントモデル, 人工知能学会論文誌, Vol. 22, No. 4, pp. 416-424 (2007)
- [大原 13] 大原 美保, 藤生 慎, 山下 倫央, 高田 和幸: ターミナル駅周辺における災害時の群衆挙動シナリオに関する検討 - JR 北千住駅周辺地区でのケーススタディー -, 日本地震工学会年次大会 2013 論文梗概, pp. 15-16 (2013)

- [澤井 13] 澤井勇人：東京都区部における災害時の一時集合場所の立地特性に関する研究, 政策研究大学院大学 政策研究科 まちづくりプログラム 修士論文 (未公開) (2013)
- [関澤 14] 関澤愛：巻頭随想 震災火災時における広域避難の課題 いつどこに逃げればよいのか, 消防科学と情報, No. 113, pp. 4-5 (2014)
- [高田 14a] 高田和幸, 金野貴紘, 藤生慎：選好意識データを用いた災害時の避難行動モデルの推定～足立区千住地区を対象にして～, 第 50 回土木計画学研究発表会講演集 (2014)
- [高田 14b] 高田和幸, 大原美保, 藤生慎, 山下倫央：複合災害からの避難に関する意識分析 東京都足立区千住地区を対象として, 第 49 回土木計画学研究発表会講演集 (2014)
- [東京 13] 東京都都市整備局：地震に関する地域危険度測定調査報告書 (第 7 回) (2013)
- [東京 14] 東京都総務局総合防災部：東京都地域防災計画 (平成 24 年度修正) 素案 (2014)
- [山下 12] 山下 倫央, 副田 俊介, 大西 正輝, 依田 育士, 野田 五十樹：一次元歩行者モデルを用いた高速避難シミュレータの開発とその応用, 情報処理学会論文誌, Vol. 53, No. 7, pp. 1732-1744 (2012)
- [Yamashita 13] Yamashita, T., Soeda, S., Onishi, M., Yoda, I., and Noda, I.: Implementation of Simulation Environment for Exhaustive Analysis of Huge-scale Pedestrian Flow, *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, Vol. 6, No. 2, pp. 137-146 (2013)
- [山下 15] 山下倫央, 高田和幸, 大原美保, 金野貴紘：選好意識データを用いた災害時避難行動モデルの推定と避難シミュレーションによる避難時のリスク要因の抽出, 第 51 回土木計画学研究発表会講演集 (2015)

〔担当委員：金森 亮〕

2016 年 1 月 15 日 受理

および建設マネジメントに関する研究に従事。博士 (工学)。土木学会, 日本都市計画学会, 地域安全学会, アジア交通学会 (EASTS) 各会員。

大原 美保

2005 年 東京大学大学院工学系研究科社会基盤工学専攻博士後期課程修了。2003 年 東京大学生産技術研究所 都市基盤安全工学国際研究センター 助手。2008 年 同大学院情報学環 総合防災情報研究センター 准教授。2014 年 土木研究所 水災害・リスクマネジメント国際センター (ICHARM) 主任研究員。災害常襲地帯の現場ニーズを踏まえた被害軽減策の提案やリスクアセスメント手法の体系化に関する研究に従事。博士 (工学)。

著者紹介

山下 倫央 (正会員)

2002 年 北海道大学大学院工学研究科システム情報工学専攻博士後期課程修了。2003 年 産業技術総合研究所 サイバーアシスト研究センター特別研究員。2005 年 同所情報技術研究部門研究員。以降, サービス工学研究センター, 人間情報研究部門, 人工知能研究センター主任研究員。2017 年 北海道大学大学院 情報科学研究科 准教授。社会システムシミュレーションの開発と社会実装に関する研究に従事。博士 (工学)。情報処理学会会員。

野田 五十樹 (正会員)

1992 年 京都大学大学院工学研究科博士課程修了, 通商産業省工業技術院 電子技術総合研究所に入所後, 改組を経て, 現在, 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 人工知能研究センター総括研究主幹。博士 (工学)。RoboCup Federation President。本会副会長, ロボカップ日本委員会・防災推進機構 理事。情報処理学会, 電子情報通信学会各会員。

荻野 光司

東京工業大学大学院環境・社会理工学院建築学系修士 2 年。学士 (工学)。地理情報システム学会学生会員。

高田 和幸

2000 年 東京工業大学大学院理工学研究科博士後期課程修了。1996 年 東京工業大学理工学部 助手。2000 年 東京電機大学理工学部 助教授。2007 年 同大学 理工学部 准教授を経て, 2012 年 同学部 教授。交通計画, 都市・地域計画お

図3 各避難方法における平均避難完了時間と平均混雑内滞留時間 (避難開始期間が 10 分間の場合)

図4 各避難方法における平均避難完了時間と平均混雑内滞留時間 (避難開始期間が 30 分間の場合)