

# 移動制約者を含む群集の広域避難シミュレーション

## Evacuation simulation of crowd including people with walking difficulties

吉田孝志<sup>1\*</sup> 前野義晴<sup>1</sup> 但野紅美子<sup>1</sup>  
Takashi YOSHIDA<sup>1</sup> Yoshiharu MAENO<sup>1</sup> Kumiko TADANO<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 日本電気株式会社

<sup>1</sup> NEC Corporation

**Abstract:** バリアフリー化や国際化の進展により、高齢者、車いす利用者、外国人観光客などの移動制約者がより自由に外出できるようになっているが、一方で災害発生時に路上や観光地にいる移動制約者を円滑に一時滞在施設へ誘導する必要性も増している。移動制約者は、移動速度の個人差が大きいこと、段差等が障害になること、土地に不慣れなこと等の行動特性を有しているため、群集に移動制約者が高い比率で含まれる場合は避難に要する時間が長くなる。そこで、これらの行動特性を持たせたエージェントを含むエージェントベースモデルを作成し、シミュレーションを行って、避難を円滑にする誘導方法や街づくりのあり方を検討する。

## 1 はじめに

地震などの災害時には、交通機関が利用できなくなり、外出先に居合わせた人が徒歩による移動を強いられる場合がある。首都直下地震のような大きな災害が発生した場合には、徒歩で帰宅しようとする人たちが特定の場所に集中して大混雑になったり、落下物や火災により死傷者が発生する可能性が指摘されている。

一方で近年では、バリアフリー化の進展により、高齢者や車いす利用者が外出時に受ける制約が着実に減少しており、以前よりも自由に外出できるようになっている。また、外国人観光客の増加により、観光地では外国人の姿も目立つようになっている。災害時には、こうした人たちが路上や観光地から一時滞在施設へ円滑に誘導する必要性が増している。

高齢者、車いす利用者、外国人観光客といった人たちは、移動速度の個人差が大きいこと、段差等が移動の妨げになること、土地や言語に不慣れなこと等の行動特性を有している。こうした人たちが高い比率で含む群衆では、全体の移動速度が遅くなり、避難に要する時間が長くなるおそれがある。

そこで本研究では、こうした人たちの「移動制約者」と定義し、群集に含まれる移動制約者を災害時用の一時滞在施設へ誘導する過程についてシミュレーションを行って、移動制約者の行動が群衆全体の行動に及ぼす影響を検証する。さらに、その成果に基づいて避難

を円滑にする誘導方法や街づくりのあり方を検討する。

## 2 背景

2011年3月11日の東日本大震災当日は首都圏の主要な交通機関が利用できなくなり、多くの人々が外出先から長距離を徒歩で帰宅した。内閣府では帰宅困難者を「3月11日のうちに帰宅できなかった人」と定義し、当日の首都圏1都4県での帰宅困難者は約515万人だったと推計している[1]。このときは地震による被害は都心部では少なかったため、死傷者を伴うような大きな混乱は起きなかった。徒歩帰宅者は一部の混雑区間を除けばおおむね通常の数で通行できたと推定されている[2]。

しかし将来、首都直下地震のような大きな被害をもたらす大規模災害が発生した場合には、このときとは異なる状況となる可能性が指摘されている。首都直下地震では都心部でも最大震度6強に達すると予測されており、建物倒壊による道路閉塞や、落下物、停電、沿道火災などが生じ、徒歩帰宅者の通行が阻害されて路上が大混雑となったり、混乱が拡大して死傷者が発生するおそれがある。

さらに近年では状況の変化が生じている。変化の1つは官民によるバリアフリー化の取り組みである。たとえば鉄道事業者はバリアフリー施策の一環としてホームドアの設置を進めており、全国のホームドア設置駅数は2011年3月末の484から2014年9月末には593まで増加している(国土交通省)。こうした努力により

\*連絡先： 日本電気株式会社 情報・ナレッジ研究所  
〒211-8666 川崎市中原区下沼部 1753  
E-mail: t-yoshida@ei.jp.nec.com

高齢者や車いす利用者が外出時に受ける制約は着実に減少しており、以前よりも自由に外出できるようになっている。このこと自体は好ましいことであるが、災害時の課題についても考慮する必要がある。

高齢者や車いす利用者は次のような行動特性を有している。

(a) 移動速度の個人差が大きいこと 第1の特性は、一般の成人健常者に比べて移動速度の個人差が大きいことである。年齢と歩行速度との関係は、調査結果や性別によりばらつきはあるものの、青年では1.2 m/sから1.5 m/sであるのに対して、65歳以上では1 m/sを下回り、それ以上の年齢になると急に遅くなっていく傾向がある [3]。移動速度が遅い人たちが歩道上に広がり、追い抜きができなくなると、他の人の移動も制約を受けることになる。

(b) 段差等が妨げとなること 第2の特性は、段差や放置自転車等の、一般の成人健常者にとっては大きな問題にはならない障害物が、高齢者や車いす利用者にとっては移動の妨げとなることである。特に大きな地震の際は、建物倒壊や落下物によって路上に物が散乱し、高齢者や車いす利用者にとっては通行が困難な状況になることが予想される。

近年におけるもう1つの変化として外国人観光客の増加があげられる。訪日外国人旅行者数は2010年の861万人から2014年には1,341万人にまで増加しており(国際観光振興機構)、観光地では外国人観光客の姿が目立つようになっている。さらに日本政府は2020年までにこれを2,000万人とする目標を掲げている。外国人観光客の増加もそれ自体は好ましい現象であるが、災害時の課題についても考慮する必要がある。

外国人観光客は次のような行動特性を有している。

(c) 土地や言語に不慣れなこと 第1の特性は、土地や言語に不慣れなことである。外国人観光客は一般に土地に不慣れであるため地図を用いて誘導することが難しい。さらに、日本語話者でないならば、日本語のみで書かれた災害に関する掲示物から情報を得たり、日本人に情報を問い合わせることも困難である。

(d) 移動方向が国内在住者と異なること 第2の特性は、徒歩移動の方向が国内在住者と異なることである。災害時には、国内在住者は主に都心部の勤務地や商業地から郊外の自宅へ向かって徒歩移動する。一方、外国人観光客は主に都心周辺部の観光地から都心部の宿泊地を目指すと考えられる。すなわち移動の方向が国内在住者と外国人観光客とは逆向きになるため、混

雑した道路では互いに通行の障害になり、混雑悪化の要因となる。

このように、高齢者、車いす利用者、外国人観光客といった人たちを、災害時には路上や観光地から一時滞在施設へ円滑に誘導する必要性が増している一方で、こうした人たちは災害時の移動に各種の制約を負っているため、こうした人たちを高い比率で含む群衆では全体の移動速度が遅くなり、避難に要する時間が長くなるおそれがある。

### 3 研究目的



図1: 移動制約者の行動を考察の中心とする場合に重点的な分析が必要となる地域(地図は国土地理院地図を加工して作成)

本研究では、災害時の移動に各種の制約を負っている人たちを「移動制約者」と定義し、群衆に含まれる移動制約者を災害時用の一時滞在施設へ誘導する過程についてモデル化とシミュレーションを行って、移動制約者の行動が群衆全体の行動に及ぼす影響を検証する。

移動制約者は、災害時に長距離を歩いて帰宅することはあまりないと考えられるため、移動制約者の行動を考察の中心とするならば、首都圏全体を対象として帰宅行動をシミュレーションするといった分析を行う必要性は低い。一方で、発災時に多数の移動制約者が居合わせると予想され、また移動制約者と徒歩帰宅者の移動方向の交錯が懸念される地域については重点的な分析が必要である。具体的には、図1に示す銀座、新宿、六本木などの商業地や、お台場、浅草などの観光地、さらには2020年東京オリンピック・パラリンピック会場周辺などの地域がこれに該当する。

本研究で作成するモデルは、以下のような目的に活用することが可能である。

- 移動制約者と徒歩帰宅者の人の流れを分離し、一時滞在施設への避難を円滑にする誘導ルートの検討
- 一時滞在施設の配置および収容人数の計画立案や、こういった場所で段差解消などのバリアフリー化を重点的に進めるべきかといった街づくりのあり方の検討
- IT 技術等を活用した、混雑状況の情報収集方法や歩行者への情報提供方法の検討

## 4 研究手法

中央防災会議では 2008 年に首都直下地震避難対策等専門調査会を設置し、首都圏における徒歩帰宅者の帰宅行動のシミュレーションを行っている [4]。このときは以下のモデルを作成している。

- 東京を中心とする半径 80 km の圏域を対象とし、徒歩帰宅者は一般国道、主要地方道、一般都道府県道を移動経路とする
- 徒歩帰宅者の人数は、東京都市圏交通計画協議会が 1998 年に実施したパーソントリップ調査のデータを用いて、1 km メッシュごとに帰宅行動の起点となる人数と終点となる人数とを設定する
- 個別の徒歩帰宅者の動きを計算することは現実的でないため、起点と終点とが共に同じメッシュである徒歩帰宅者を 1 グループの人数が最大で 100 人以下になるように分割し、グループ単位で同一行動を取るものとする
- 各時間ステップにおいて各径路上に位置する徒歩帰宅者の人数を求め、密度が一定以上となる場合は移動速度を遅くする

このモデルにより、たとえば丸の内から 21 km 離れた和光市へは、平常時であれば徒歩 5 時間で帰宅できるところを災害時には 15 時間を要し、そのうち 9 時間は満員電車に相当するような混雑状態の場所を通過するというシミュレーション結果を得ている。

しかし移動制約者の行動を考察の中心とするならば、上記モデルよりもより詳細に歩行者の行動を再現するモデルが必要である。理由は以下の通りである。

1. 上記モデルでは歩行者の多様性を考慮していないが、移動制約者は高齢者、車いす利用者、外国人観光客など多様な特性を有しており、個人差も大きい。こういった歩行者の多様性をモデルに取り込む必要がある

2. 上記モデルでは歩行者間の相互作用として、経路上での密度が一定値以上となる場合に移動速度が遅くなる効果のみを考慮しているが、たとえば、移動の方向が逆向きになり、互いに通行の障害になる等の相互作用についても考慮する必要がある
3. 上記モデルでは歩行者が道に迷うことは考慮していないが、土地に不慣れな歩行者が周囲につられて意図しない方向へ進んでしまったり、適切な情報提供によってこれを防止したりする効果についても考慮する必要がある

歩行者の多様性や相互作用を反映させることができるモデリング手法としてエージェントベースモデルがある。エージェントベースモデルとは、システムの中に比較的単純な行動ルールを持つ多数のエージェントを配置し、それらの相互作用の結果としてシステム全体で何らかのパターンを創発させるモデルである。本研究では以下の考え方に基づいてエージェントベースモデルを作成する。

- 個別の歩行者をエージェントとし、エージェントには一般の成人健常者、高齢者、車いす利用者、外国人観光客といった多様な性格付けをする
- 移動制約者のエージェントには第 2 節で列挙した (a) から (d) の行動特性を持たせる
- エージェント間の相互作用として、互いに通行の障害になる等の効果を考慮する
- 外部からエージェントに働きかけることができる効果として、適切な情報提供による誘導を考慮する

エージェントベースモデルを採用した先行研究として Helbing et al. (2000)[5] による Social Force モデルがある。このモデルは、歩行者どうしの間や歩行者と環境との間に仮想的な引力や斥力が働き、歩行者はこれらの力の合成によって移動すると想定することで、群集移動を再現するモデルである。また五十嵐ら (2011)[6] は、ポテンシャルモデル [7] を用いて、高齢者や車いす利用者など多種多様な避難者が混在している場合の建物内での群集移動を再現するモデルを作成している。このモデルは、出口までの距離によるポテンシャルと、他の避難者および障害物によるポテンシャルを考慮し、各避難者は移動速度で決まる移動可能領域内において、それらの合成ポテンシャルが最小となる位置に進むとするモデルである。

一方、安福 (2011)[8] は、RVO(Reciprocal Velocity Obstacles) モデルを用いて群集移動を再現している。RVO モデルとは、ロボティクスの分野で開発された移動物どうしの衝突を回避するアルゴリズムである Velocity

Obstacles という概念を、群集移動モデルへ拡張したものである。安福 (2011) は、RVO モデルをベースに、人間の肩幅と体の厚みの違いを考慮してエージェントの形状を円形から楕円形に変更することで、現実には起こりうる高密度状態の対向流を再現している。

しかし、これらの先行研究は建物程度の大きさの範囲内での避難行動を分析対象としたものである。本研究では数 km 四方程度の広域的な市街地を分析対象とし、またエージェント数も数千から数万程度となるため、これらの先行研究の手法を適用すると、モデル化に必要な要素が多くなりすぎ、また計算負荷も大きくなるため現実的ではない。したがって、構成を簡略化しつつ、研究目的を達成するうえで必要な精度を確保できるモデルを検討する必要がある。



図 2: NetLogo を用いた避難シミュレーションの一例 (地図は OpenStreetMap の地図を加工して作成)

本研究ではエージェントベースモデリング環境の 1 つである NetLogo[9] を用いてモデルを作成する。図 2 は NetLogo を用いて歩行者の避難行動を再現するモデルを試作し、シミュレーションを行った一例である。

## 5 まとめ

高齢者、車いす利用者、外国人観光客といった人たちは、移動速度の個人差が大きいこと、段差等が移動の妨げになること、土地や言語に不慣れなこと等の行動特性を有しているため、こうした人々を高比率で含む群衆では、全体の移動速度が遅くなり、災害時には避難に要する時間が長くなるおそれがある。本研究ではこうした人々を「移動制約者」と定義し、群衆に含まれる移動制約者を一時滞在施設へ誘導する過程についてシミュレーションを行って、移動制約者の行動が群衆全体の行動に及ぼす影響を検証する。

移動制約者の上記のような行動特性を考慮するため、本研究では歩行者の行動を再現する手法としてエージェントベースモデルを採用する。このモデルでは個

別の歩行者をエージェントとし、エージェントには一般の成人健常者、高齢者、車いす利用者、外国人観光客といった性格付けをする。エージェントには第 2 節で列挙した (a) から (d) の行動特性を持たせ、エージェント間の相互作用を考慮する。

本研究では、発災時に多数の移動制約者が居合わせると予想され、また移動制約者と一般の徒歩帰宅者との移動方向が交錯すると懸念される地域を重点的な分析対象とする。具体的には商業地、観光地、大規模イベント会場周辺などの地域がこれに該当する。本研究の成果は、一時滞在施設への誘導方法の検討、一時滞在施設の設置計画立案、バリアフリー化街づくりの検討などの目的に活用可能である。

## 参考文献

- [1] 首都直下地震帰宅困難者等対策協議会: 首都直下地震帰宅困難者等対策協議会最終報告参考資料 (2012)
- [2] 三菱総合研究所: 日本大震災における首都圏の帰宅困難状況を踏まえた今後の帰宅困難者対策のあり方～再現シミュレーションから見えてきた現状と課題～(2011)
- [3] 熊谷兼太郎: 2011 年東北地方太平洋沖地震津波の避難行動への津波避難シミュレーションの適用性, 国土技術政策総合研究所資料, No. 742 (2013)
- [4] 中央防災会議首都直下地震避難対策等専門調査会: 帰宅行動シミュレーション結果について (2008)
- [5] Helbing, D., Farkas, I., Vicsek, T.: Simulating dynamical features of escape panic, *Nature*, Vol. 407, No. July, pp. 487–490 (2000)
- [6] 五十嵐さやか, 中村正寿, 坂本成: マルチエージェントシミュレーションによる地震時避難に関する検討, 大成建設技術センター報, Vol. 44, p. 42 (2011)
- [7] 横山秀史, 目黒公郎, and 片山恒雄: 避難行動解析へのポテンシャルモデルの応用, 土木学会論文集, Vol. 513/I-31, pp. 225–232 (1995)
- [8] 安福健祐: 楕円型 RVO モデルを用いた高密度群衆流動の再現, 日本建築学会技術報告集, Vol. 17, No. 35, pp. 187–190 (2011)
- [9] 筑波大学大学院倉橋研究室: NetLogo User Manual 日本語版