

神戸市中心部における徒歩帰宅シミュレーション

榎本大悟¹, 菊池麻衣子², 照井彩子², 安倍孝太郎²,
土居菜々子², 小林実季², 伊藤伸泰¹, 野田五十樹^{1,3}

¹ 理化学研究所 計算科学研究センター,

² 株式会社 NTT ドコモ, ³ 北海道大学

概要

2021 年度より理研・ドコモ・神戸市は共同で、神戸市中心部におけるデジタルツインを構築し、災害時の避難計画立案に役立てることを目指して、都市スケールの歩行者避難行動を予測することを試みてきた。本研究では NTT ドコモ提供の携帯電話情報によるメッシュ人口データ、デジタル地図 OpenStreetMap、オープンソースシミュレータ CrowdWalk を用いてデジタルツインを構築し、混雑箇所を予測した。その結果、合流部から混雑が広がっていく様子が観測された。これらの混雑は特に事業所が集中している旧居留地の帰宅を 6 時間遅らせることにより軽減され、混雑箇所の数が減少することが明らかとなった。

Pedestrian return home simulation in Kobe City center

Daigo Umemoto¹, Maiko Kikuchi², Ayako Terui², Koutarou Abe²,
Nanako Doi², Miki Kobayashi², Nobuyasu Ito², Itsuki Noda^{1,3}

¹ RIKEN R-CCS, ² NTT DOCOMO, INC.

³ Hokkaido University

Abstract

Since FY2021, RIKEN, Docomo, and the Kobe City Government have been attempting to construct a digital twin of the central region of Kobe City under a joint research, to estimate urban scale pedestrian evacuation behavior, with the aim of using it for evacuation planning in the event of a disaster. In this study, the construction was accomplished using population information from cell phones provided by NTT DOCOMO, INC., OpenStreetMap, and CrowdWalk, the open source pedestrian simulator, to estimate congestion locations. It was observed that congestion spread out from the merging roads, and it became clear that these congestion areas could be reduced by delaying the return home for 6 hours of the pedestrians from Old Settlement of Kobe City, where highly concentrated business district locates.

1 背景

災害時に都市に人が集中していると、避難行動に起因する混乱によって二次被害が生じることが懸念される。特に、都市そのものに災害が発生しなくても、その都市が労働の拠点となっている場合、近隣の都市や地域で災害が発生すると、多数の帰宅困難

者が発生する危険性がある。実際に東日本大震災の際には多くの勤労者が東京都内を徒歩で帰宅することを余儀なくされた。

2021 年度より神戸市、NTT ドコモ、理化学研究所の 3 者は共同で、実データに基づく神戸市のデジタルツイン [1] を構築し、避難シナリオの検討、あるいは再開発のシナリオを含めたより広範なまちづ

くりの検討を進めている。本研究では、神戸市の外部で大規模災害が発生した場合を想定し、普段から神戸市中央部へ徒歩で通勤している人に加え、普段は電車で通勤する人が駅に集まり、電車が運休していることを知って徒歩での帰宅に切り替えるケースをシミュレーションすることを目標に、帰宅困難者によって生じる混雑が著しい箇所の推定を試みた。また、特定の箇所からの徒歩帰宅者の出発を遅延させれば、これらの混雑が避けられるか、その程度はどのくらいになるか調査した。

本研究では、シミュレーションフレームワークとして、オープンソースのエージェントベース歩行者シミュレータである CrowdWalk[2] と、手作業で編集された OpenStreetMap[3]、株式会社 NTT ドコモにより提供された 1 時間分解能・500 m メッシュの人口データを用いた。シミュレーション領域を図 1 左の赤枠で示す。地図の編集、環境の構築に関する詳細は [4] に掲載されている。



図 1: シミュレーション領域 (左赤枠) と歩道実装の様子 (右青枠)

2 歩行者数推定とシナリオ

メッシュ人口データにより昼間に神戸市中心部にいる人々がどのメッシュからやってきたか (正確な座標・時刻は不明であるものの) 遡って調査できる。これにより、シミュレーション領域内から出勤してきた人、東西から出勤してきた人をメッシュごとに弁別し、全体で通常時の徒歩帰宅者は 53,310 人、うち区内・東・西からの出勤がそれぞれ 14,856 人、16,749 人、21,705 人と判明した。シミュレーション実行時にはより細かいメッシュ単位人口を設定した。

神戸市の近隣で災害が発生し、神戸市中心部に出勤・勤務している人が区内・域外へ避難する状況を想定する。ゴールは図 2 に示すように、東の域外に帰宅する人は東 1,2,3,4、西については西 1,2,3,4 に設定した。エージェントはシミュレーション開始か

ら 1 時間にわたって均等な時間分布で出発させた。この設定でシミュレーションを実行すると、一つのシナリオあたりコンベンショナルな X86CPU では約 30 分、富岳では約 2 時間を要するが、後者では並列実行により数十～千のシナリオを同等の時間で完了できる。



図 2: ゴール位置と駅の位置。東の域外に帰宅する人は東 1,2,3,4、西については西 1,2,3,4 をゴールに設定した。

神戸の北には山地が、南には海が存在し、徒歩で北に向かう場合も東西どちらかの道を利用することになるため、北への人流は想定しない。神戸の南方にはポートアイランドが存在するが、今回は災害時には島に留まってもらうことを想定し、この人流も仮定しない。図 2 には参考のため駅も示したが、本シミュレーションにおいては電車が継続して運行を停止していることにより徒歩帰宅行動が生じると仮定しているため、帰宅のために駅に向かう人流は設定しない。今回は、上記の人数が一斉 (1 時間以内) に帰宅を開始した場合と、図 3 赤枠で代表する旧居留地の人々が帰宅を遅延した場合を比較する。

赤信号によって交差点に差し掛かった人の歩行が止まると、その後ろに向かって停止列が成長する。やってくる人数が少なければ、青信号になるとともに人は歩き去って混雑が解消する。新たに交差点に到来する人数が十分に少なければ、次に赤信号になったときには誰も列に並んでいないかもしれない。このように青信号が終わる瞬間 (シミュレーション計算間隔は 1 秒で、エージェントは停止までに 1 秒以上かかるため、まだ赤信号の効果は現れない) は最も混雑が解消する瞬間である。その時点で交差点手前に停止している人が存在するようであれば、その交

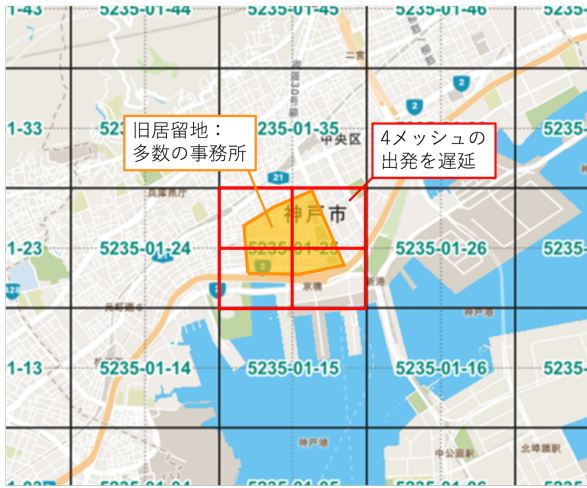


図 3: 旧居留地の場所

差点は1回の信号周期内にやってくる人を捌けない、すなわち混雑を生じていると考えられる。そこで赤信号に変化する瞬間のスナップショットを取得することにした。それらを全時間帯にわたって画像的に重ね合わせたものを図4に示す。色は速度を表し、赤であれば停止、緑であれば自由歩行(約1 m/s)を示す。画像平均であるため、色の濃さはエージェントの存在確率に対応している。市内中心部における混雑は左図で特に顕著で、駅周辺は電車を利用する交通需要がなくても混雑することが読み取れる。

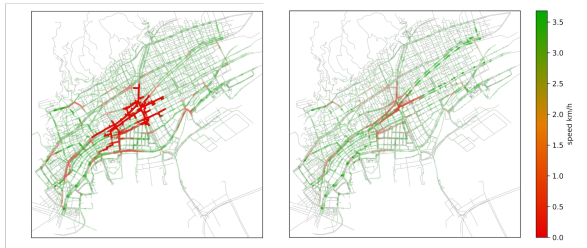


図 4: 遅延なし(左)・あり(右)による混雑状況の比較。4分ごとに赤信号へ変化する瞬間のスナップショットの、全シミュレーション時間による画像平均。

前記の分析に加え、長い時間スケール(数十分〜1時間)にわたってこの混雑の列が長くなっていくようであれば、その交差点は大域的な混雑の原因となっていると考えられる。そのダイナミクスと混雑の原因を解明するため、混雑がどこから開始するのか調べた。上記スナップショットを時系列で動画に

し、混雑の列が成長を始める位置を特定・プロットしたものを図5に示す。赤の矢印が混雑の開始点を表している。左の図に着目すると、市内全域で混雑が生じているが、図中赤丸で示した箇所はふだんあまり人流がないにも関わらず、長く続く顕著な混雑が見られた。この様子は図4でも確認することができる。これは、東西それぞれ4ヶ所しかない出口のうち、西1・東4に向かう人流が合流することが原因と考えられる。より本質的には、神戸市の道の方向は海岸線に対してやや傾いており、北西と南東は道が土地が外に向かって絞られているため、道が合流する構造になっていることに起因すると考えられる。

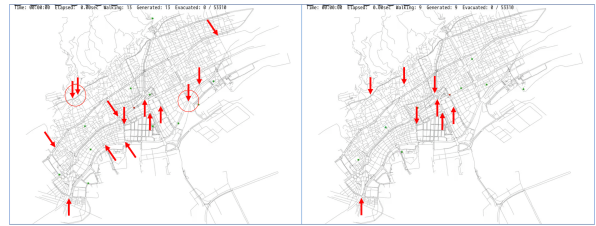


図 5: 遅延なし(左)・あり(右)による混雑箇所(赤矢印)の比較。赤丸は合流により混雑が生じたと考えられる箇所。

3 帰宅抑制の効果と考察

旧居留地からの帰宅開始を遅延させた場合の混雑状況を図4,5の右側に示した。混雑箇所が顕著に減少していることが確認できる。また、シミュレーション内に存在するエージェント数の推移を図6に示す。帰宅開始の遅延により、全体では約5時間から8時間に増大するが、これは遅延の効果がドミナントで、旧居留地以外・遅延させた旧居留地からの帰宅行動の完了時間はいずれも元の時間より短く、それぞれ要した時間は約4時間と約2時間となった。また、シミュレーション開始時から最初の避難行動が終了するまでの時間は遅延あり・なしでそれぞれ約5時間、約4時間となり、20%程度の短縮が見られる。また、遅延ありの場合においては4時間経過後に全く人がいなくなることから、6時間の遅延は十分すぎるほどであり、4時間程度の遅延で混雑が十分回避可能であることが読み取れる。

さらに効率が最大化される遅延時間を調べるため、パラメータとして変化させた。避難完了すなわちシミュレーション終了までの時間(ほぼ図6の右端の座標に対応)と、平均旅行時間を図7左に示す。2時

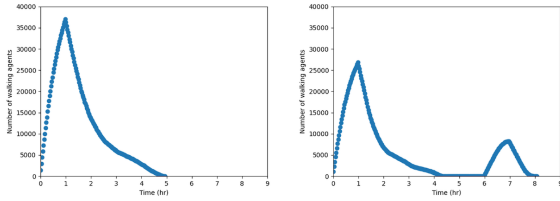


図 6: 遅延なし・ありによる歩行者人数の比較

間遅延した際に効率が最大化され、平均旅行時間は遅延 3 時間ではほぼ最小となる以降、ほぼ違いがないことが読み取れる。

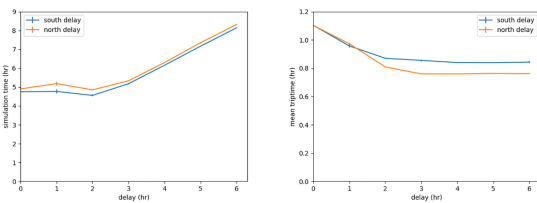


図 7: 左右はそれぞれシミュレーション完了までの時間 (片対数)、平均旅行時間。青と橙は各々、遅延区域として旧居留地周辺、1 メッシュ北に移動した際の結果。誤差は各 5 試行の標準誤差を示した。

また、遅延メッシュの南半分は人口は少ないが、現遅延領域の北側に隣接する 2 メッシュは三宮駅を含み、北半分と同等に人口が多い。そこで遅延領域を 1 メッシュ北に移動すると、避難時間が劇的に減少し、平均旅行時間は 10% ほど削減された (図 7)。人口密集地であるほど遅延は有意義と解釈される。

混雑箇所は駅の所在する中心部に集中する傾向が遅延あり・なしのいずれにおいても見られた。各交差点における最大の待機人数を分析すると、東西に列が伸びていることが確認され、東西に貫通する大通りにて東西に行き交う人流が互いに干渉していることが分かった。これは、東に出勤している人が西の出口から、西に勤務している人が東の出口から出るといった回避不能な帰宅行動によって生じていると考えられる。混雑を回避するためには、東または西に向かう人々だけが用いる専用の避難経路を個別に指定する等の方法が考えられる。これは、現時点で無向リンクとしている歩道を、有向リンクに設定しなおすことでシミュレーションにより結果を推定できる。東・西への交通量が最も多い地点はそ

れぞれ特定できているため、それらの箇所を東・西通行専用とするのが妥当と考えられるが、避難計画担当部署へヒアリングのうえ、具体的にどの箇所に有向リンク設定を実施するか検討していきたい。

今後の展望として、一次避難施設への誘導も計画されている。避難施設利用者は、市中心部南にある公園で各避難施設に振り分け誘導する方法のほか、インターネットやスマートフォンを用いて直接誘導する方法が提案されている。これらの仕様詳細を調査・ヒアリングのうえシミュレーションに実装し、さらに現実に近い状況を再現することで、より具体的に混雑を回避できる誘導方法を提案していきたい。

4 まとめ

本研究では、神戸市中心部における歩行者の避難シミュレーションを実施し、混雑箇所と、特定の箇所の避難開始遅延の効果を推定した。旧居留地の避難開始遅延時間は約 2 時間において最適化され、また一つ北側のメッシュを遅延区域として指定するとさらに効率化できることが明らかとなった。

5 謝辞

本研究は FOCUS (Foundation for Computational Science) Establishing Supercomputing Center of Excellence および JSPS 20K15004 の予算においてなされ、OpenStreetMap <https://www.openstreetmap.org> の地図を用いた。記して謝意を表する。

参考文献

- [1] Fuller, A., et al. Digital twin: Enabling technologies, challenges and open research. IEEE access, 8, 108952–108971
- [2] Yamashita, T., et al. Implementation of Simulation Environment for Exhaustive Analysis of Huge-Scale Pedestrian Flow, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 6(2), 137–146.
- [3] OpenStreetMap contributors. Retrieved from <https://planet.openstreetmap.org>. (2015)
- [4] Umamoto, D., et al. Urban scale pedestrian simulation in Kobe City center, ISAROB, AROB 28th 2023, OS18-1