

避難者属性構成がDTNを用いた災害時避難経路推薦による 避難品質へ与える影響の評価

三角 真[†] 上山 憲昭[†]

[†] 福岡大学工学部 〒814-0180 福岡県福岡市城南区七隈 8-19-1

E-mail: †{mmisumi,kamiyama}@fukuoka-u.ac.jp

あらまし 災害発生時に避難者が安全かつ迅速に避難するためには、避難所や避難経路の情報が重要である。避難者が適切な避難経路を得るためには、被害を受けた道路の情報収集が必要であるが、大規模災害時には、通信インフラが破損して使用不能になる可能性がある。この問題を解決するために既存の研究では、通信インフラを利用せずに、delay tolerant network (DTN) を利用して、避難者の携帯端末を用いて収集した道路の情報を共有し、避難経路を提供することが提案されている。しかし、既存の研究では、避難者の特定経路への集中による渋滞が問題となっている。この混雑は、全ての避難者への同一の避難経路が提示が原因である。そこで、我々は、道路の混雑を緩和を目的として、避難者の属性に応じた異なる経路の提示を提案した。本稿では、著者らの手法について、避難者の属性構成が避難時間や避難距離などの避難品質に与える影響について、multi-agent simulation(MAS)により数値評価する。

キーワード Delay Tolerant Network (DTN), 災害時避難経路提案

Evaluating the Effect of Evacuee Attribute Composition on Evacuation Quality by Recommending Evacuation-Routes Using DTN in Disasters

Makoto MISUMI[†] and Noriaki KAMIYAMA[†]

[†] Faculty of Engineering, Fukuoka University

8-19-1 Nanakuma, Jonan-ku, Fukuoka-city, Fukuoka, 814-0180 Japan

E-mail: †{mmisumi,kamiyama}@fukuoka-u.ac.jp

Abstract In order for evacuees to evacuate safely and quickly in the disaster, information on evacuation centers and evacuation routes is important. In order for evacuees to obtain appropriate evacuation routes, it is necessary to collect information on damaged roads. However, in the large-scale disaster, the network infrastructure may be damaged and unusable. To solve this problem, some existing works have proposed to use delay tolerant network (DTN) to share the collected road information and provide evacuation routes using mobile terminals of evacuee, without using network infrastructure. However, in existing works, congestion caused by the concentration of evacuees on a particular route has become a problem. This congestion occurs when the same evacuation route is presented to all evacuees. Therefore, we proposed to alleviate road congestion by suggesting different routes to evacuees according to their attributes. In this paper, we use multi-agent simulation (MAS) to numerically evaluate the impact of evacuee attributes on evacuation quality, such as evacuation time and distance.

Key words Delay Tolerant Network (DTN), Evacuation Route Recommendation

1. はじめに

災害が発生したとき、被害者が安全かつ迅速に避難するためには、避難場所だけでなく、被災地の道路の被害に関する情報も必要である。道路の被害情報が得られるのは災害発生後であるため、それらの情報は被災地で収集し、被災者に配信する必要がある。しかし、大規模災害が発生時には、携帯電話網の基地局や交換局などの通信設備が損傷し、通信インフラが利用できない状況が発生する。2011年3月の東日本大震災発生時には、電話と携帯電話網は広範囲にわたって長期間使用不可能であったことが[1]で報告されている。

災害時に通信インフラが利用不能な状況において、Ad-Hoc Network [2] やマルチホップ device to device (D2D) 通信 [3]~[6] を使用した被災者間の情報共有が提案されている。Ad-Hoc Network は、被災地の端末間に end-to-end の通信パスを作成し、マルチホップ D2D 通信は基地局を経由せずに携帯電話網の複数の携帯端末を介してデータを送信する。さらに、delay tolerant network (DTN) を使用して被災地の避難者間で道路の障害情報の共有と、避難者への適切な避難経路の推奨が提案されている [7]~[10]。しかし、[7] では、特定の経路に避難者が集中することによる混雑が問題となる。これは、コストが最も低い同一の経路がすべての避難者に推奨されるためであり、避難中に渋滞が発生した場合、避難者の速やかな避難行動が阻害される。この問題を解決するために、[7] では、避難者の正確な位置情報から推測される交通渋滞状況を使用することを提案し

ているが、正確な位置情報の収集コストが問題となる。

そのため、我々は携帯電話網が利用できない状況下において、避難時の渋滞の軽減に考慮した避難経路の推薦方法を提案した [11]。具体的には、被災者が災害時に避難する際に発生する交通渋滞を緩和するために、障害が発生した道路について全ての避難者について通行を制限するのではなく、年齢や性別などの特定の属性を考慮して障害の発生した道路を含む避難経路を避難者に提案するシステムを提案した。本稿では、multi-agent simulation (MAS) により、[11] で著者らが提案した手法について、避難者属性の人口の構成が避難品質に与える影響を明らかにする。2節で関連研究を、3節では [11] で提案した方式について述べ、4節で MAS を使用した数値評価の結果を示した後5節でまとめる。

2. 関連研究

災害時の避難経路を探索の手法が [12], [13] で提案されている。[12] では、ネットワークフローの最適化問題に基づいて、ハリケーンが発生した場合の最適な避難経路計画を策定し、最適解を得るためのアルゴリズムを提案している。また、[13] は、対象地域内の複数の避難所の避難場所の分割と割り当て方法を提案しており、火災や地震による建物の倒壊などの災害パターンを事前に予測することが難しいため、考えられるすべての地域分割パターンを列挙する方法を提案している。

さらに、[2], [9], [10], [14] では、被災地で通信インフラが利用不可能なとき、安全かつ迅速な避難を目的として被災地で情報

の収集・活用が提案されている。[2]では、送信端末と受信端末の間に Ad-Hoc ネットワークを構築し、避難者による混雑を考慮して避難経路と避難のタイミングを提示するシステムが提案された。[10]では、DTN を使用して被災地情報を交換し、避難者に避難経路を提示することを提案しており、[8]では、避難者が通行不能エリアに遭遇した場合に、モバイル端末の GPS 機能を使用して通行不能エリアの自動的な推定を提案している。[7]では、渋滞を回避するためのルート推奨方法が提案されており、GPS を用いて得られた詳細な位置情報を用い、避難経路の特定の区間内の避難者の数と、区間内の避難者の順序に関する情報を使用して、避難経路の混雑状況を推定している。

加えて、通信インフラを利用せずに行われた移動端末間の直接通信が、被災地での救助活動に関する情報伝播に及ぼす影響を示した研究が行われており、[15]では、災害時の救助者の救助活動を移動モデル化し、端末間の遅延特性とパケット損失率が従来のランダムウェイポイントモデルと異なることを示しており、[16]では[15]で提案されている移動モデルを使用して、複数の DTN の経路制御手法の性能を比較している。

しかし、災害時の避難経路推奨に関するこれまでの研究では、避難者端末が収集・交換した情報を用いて障害点の故障度を推定した結果を用いた、避難者の属性を考慮した故障箇所を含む避難経路の推奨は検討されていない。

3. 提案手法

本節では、[11]で著者らが提案した、避難時の交通渋滞を緩和するために、性別や年齢などの避難者属性によって通過可能な故障箇所の故障度合いが異なることを前提とした、避難者の属性に基づいた異なるルートを提示の詳細を示す。

3.1 避難経路の提示と避難者の行動

本研究では、エッジ e のコスト c_e を式 (1) と定義し、ダイクストラ法により最小コストの経路を求める。ここで、 l_e はエッジ e の長さ、 w_e はエッジ e の幅であり、各避難者端末は、これらの道路情報を事前に取得していると仮定する。

$$c_e = \frac{l_e}{w_e} \quad (1)$$

災害発生後は、避難者端末は通行不能箇所を含まない、最短の経路をダイクストラ法を用いて求める。

以下では、災害発生後に避難者の行動に基づいて通行不能箇所を検出する方法について述べる。図 1a は、避難者端末は障害箇所に関する情報を有しておらず提示経路に含まれる故障箇所が避難者にとって通行不可の状況を示す。避難者は、①で避難者端末の提示経路 1 に従って避難を開始する。避難者は②で故障箇所に到達し、故障箇所が通過できないほど損傷していると判断すると、③に示すように、迂回して提示経路 1 とは異なる経路に迂回する。避難者の端末は、GPS を使用して避難者の位置情報を監視しているため、④で提示経路 1 とは異なる経路を避難者が選択したことを検出する。次に、避難者の端末は、故障箇所を含まない新しい提示経路 2 を提案する。さらに、避難者の端末は、提示経路 1 と実際に移動した経路の差から故障箇所を推定し、避難者が端末を操作することなく、故障箇所を登録する。避難者は、提示経路 2 に従って⑤の経路で避難し、故障箇所を回避して目的地に到着する。

避難者端末が故障箇所情報を有しており故障箇所が避難者にとって通行不可能なとき、図 1c に示すとおり、障害箇所を回避する経路が避難者に提示される。

(1) 避難者端末に故障箇所の情報がなく、提示された経路に含まれる障害点が避難者にとって通過可能である場合、または (2) 避難者端末が故障箇所情報を有しており提示されたルートに含まれる故障箇所が避難者にとって通行可能であるとき、図 1b の状況が発生する。避難者は、避難者端末による提示経路 1 で避難を開始する (①)。避難者は②で障害点に到達するが、提示経路 1 を通過できると判断する (③)。図 1b に示す状況では、避難者端末が障害箇所の情報を有しており、かつ、故障箇所を通過した場合は、故障箇所の通過済み避難者の数をインクリメントする。

3.2 故障箇所情報の交換と更新

P_{xn} が、避難者端末 n によって推定された故障箇所 x の通行可能確率を示し、 $P_{xn} = C_{xn}/S_{xn}$ として表されるとする。ここ

Algorithm 1 避難者端末 n における P_{xn} と S_{xn} の更新

```

Receive  $P_{xn_{pr}}$  and  $S_{xn_{pr}}$  from terminal  $n_{pr}$ 
if Point  $x$  is not defined as a failure point then
  if Has a record of passing through point  $x$  then
     $P_{xn} \leftarrow 1.0$ ;
     $S_{xn} \leftarrow 1$ ;
  else
     $P_{xn} \leftarrow 0.0$ ;
     $S_{xn} \leftarrow 0$ ;
  end if
end if
 $P_{xn} \leftarrow \frac{P_{xn}S_{xn} + P_{xn_{pr}}S_{xn_{pr}}}{S_{xn} + S_{xn_{pr}}}$ ;
 $S_{xn} \leftarrow S_{xn} + S_{xn_{pr}}$ ;
Add  $n_{pr}$  to  $N_{ex}$ ;

```

表 1: 通過可能な故障度合いの上限値でソートされた避難者属性 (例)

避難者属性 (T)	人口割合 (R_t) (0 to 1.0)	通過可能な 故障度合いの上限 (D_t) (0 to 1.0)
A	0.4	0.8
B	0.3	0.5
C	0.2	0.4
D	0.1	0.2

で、 C_{xn} は、故障箇所 x の通過に成功した避難者の数であり、 S_{xn} は、 x の通過を試みた避難者の数である。避難者が我々のシステムから提示された経路とは異なる経路を選択した場合、避難者端末は、避難者にとって通行不可能な故障箇所が存在したと判断する。ここで、避難者端末は、避難者が経路を変更した地点の次ホップのエッジを、故障箇所であると推測する。避難者端末 n は、このエッジを故障箇所 x として登録する。次に、初期値として $P_{xn} \leftarrow 0.0$ 、 $S_{xn} \leftarrow 1$ と設定し、 P_{xn} と S_{xn} を保持、これらの値を他の隣接端末と交換する。避難者端末は、故障箇所情報がすでに交換されている避難者端末の集合である N_{ex} も保持する。避難者端末 n は、 C_{xn} と S_{xn} の情報を近隣端末 n_{pr} と交換する。近隣端末は、($N_{in-range} \cap N_{ex}$) から選択する。ここで、 $N_{in-range}$ は通信範囲内に存在する端末群である。各避難者端末 n において、情報を送信した避難者端末が N_{ex} に登録されているノードは n_{pr} として選択されることはないため、同じ端末と複数回情報の交換は行われない。避難者端末 n が避難者端末 n_{pr} から受信する通行可能確率が $P_{xn_{pr}}$ であり、サンプル数が $S_{xn_{pr}}$ のとき、避難者ターミナル n の P_{xn} と S_{xn} は、Algorithm 1 で更新される。避難者端末 n は、情報交換が完了した後、すでに情報を交換した端末として n_{pr} を N_{ex} に追加し $m \in N_{ex}$ に登録されていない避難者端末から故障箇所を受信する度に繰り返される。

3.3 故障箇所の故障度合いと通行可能確率

提案手法は、故障箇所の故障度合いを利用しており、災害発生後にこの情報を収集する必要がある。この情報を収集する方法として、避難者が避難中に故障箇所の故障度合いを判断し、避難者端末を用いた故障度合いの入力が考えられるが、携帯端末の直接の操作は煩雑であり、避難者の妨げになる可能性がある。そこで、提案手法では、避難者の操作を必要としない以下の手順で故障箇所の故障度合いを推定する。提案手法では、表 1 に示すような、対象地域の避難者属性毎の人口比率と各属性の避難者が通過可能な故障度合いの上限を、避難者端末が事前に取得していることを前提とし、また、事前に避難者自身が避難者端末に、避難者の属性を登録しておくことを前提としている。避難者を複数の属性に分類には、避難者の通行可能確率に影響を与えるさまざまな条件、例えば年齢や性別など、を想定している。

避難者端末 n は、Algorithm 2 を使用して、 P_{xn} から故障箇所 x の故障度合いを推定する。なお、避難者端末 n は、各故障箇所に関する情報を記録し、これらの情報を他の避難者端末と交換、交換した情報を使用して各故障箇所 x の通行可能確率 P_{xn} を推定する。通行可能確率の推定については、3.2 章で説明している。ここで、 R_t を避難者属性 t の人口の比率、 D_t を避難者属性 t の通過可能な故障度合いの上限とする。また、 T は避難者タイプ t の集合とする。

3.4 近隣端末の探索

避難者端末は、次の手順で近隣端末を検索する。避難者端末 n は、時間間隔 t_B で定期的にビーコン信号を送信し、近隣の避難者端末を検索する。信号を受信した近隣の避難者端末は、

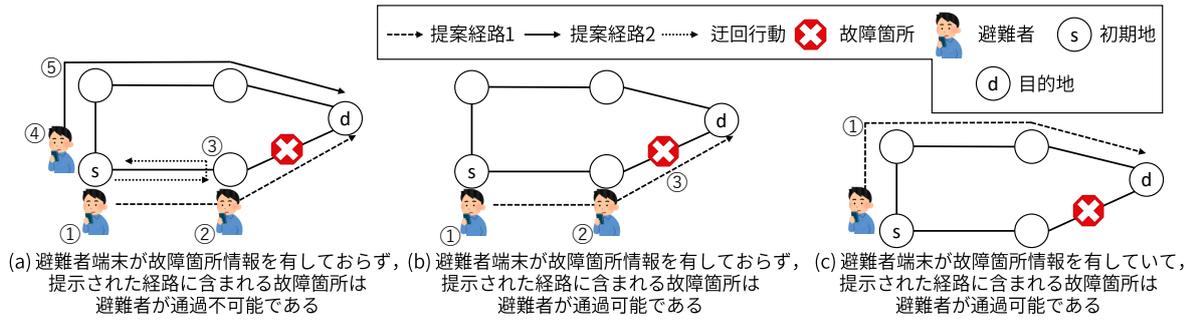


図 1: 提案システムによる避難者への避難経路提示

Algorithm 2 避難者端末 x での P_{xn} からの故障箇所 x の故障度合いの推定

```

 $r \leftarrow 0.0;$ 
 $d \leftarrow 1.0;$ 
 $T_{sorted} \leftarrow \text{Sort } T \text{ in descending order by } D_t;$ 
for each  $t$  in  $T_{sorted}$  do
  if  $P_{xn} > r$  then
     $r \leftarrow r + R_t;$ 
     $d \leftarrow D_t;$ 
  else
    Break;
  end if
end for
Return  $d$  as failure degree of point  $x$ 

```

応答信号を送信端末に返す。応答信号を受信した避難者端末 n は、一定時間内に応答を受信した近隣端末を $N_{in-range}$ に追加する。

3.5 情報交換済み端末リストの更新

N_{ex} は、各避難者端末で P_{xn} と S_{xn} の情報を交換した避難者端末の集合である。 N_{ex} に登録されている避難者端末は、情報交換の対象ノードである n_{pr} として選択しないため、同じ避難者端末と複数回情報交換することを回避可能である。一方、一度情報交換を行ったとしても、その避難者端末が通信範囲外に出て一定時間後に再び通信範囲に入ると、以前と異なる故障箇所情報を有している可能性がある。そのようなとき、これらの避難者端末を再び情報交換の対象としたいため、次の手順に従って N_{ex} を更新する。

- N_{ex} 内の各避難者端末について、近隣端末検索ビーコン応答が最後に受信された時刻を記録する。
- 近隣端末検索ビーコン応答の最終時刻が生存時間を超えた端末を、定期的に N_{ex} から削除する。

4. MAS を用いた評価実験

MAS にて、地震発生後に自宅や避難所に歩いて避難する携帯端末を所有する避難者をシミュレートした。MAS では、大阪市北区を対象とし、提案手法と避難者属性を考慮しない従来手法 [9] について得られたシミュレーション結果を示す。提案方法は、特定の故障箇所については故障箇所通過可能な避難者が存在するが、従来手法は [9] は、全ての避難者が全ての故障箇所を通過できないことを前提に避難経路を決定する。

4.1 MAS のモデル

4.1.1 道路と故障箇所設定

道路の地図情報として、OpenStreetMap [17] を使用した。大阪市北区エリアの OpenStreetMap には、高速道路 (motorways) などの自動車専用道路、生活道路、歩道、未分類などの 23 種類の道路が存在する。本稿の評価では、motorways を除くすべての種類の道路を使用した。各道路には交差点とカーブの点が存在し、これらの点はノードとして定義されている。各道路のノードで分割された各部分は、エッジとして定義されている。本稿の MAS に置いては、長さが 10 メートル以下のエッジについては、他のエッジと統合しており、10 メートル未満のエッジは本 MAS には存在しない。

図 2 は、シミュレーションの対象領域、故障領域、および避難者の目的地、つまり避難所と地域境界ノードを示している。赤い丸は故障領域の代表エッジであり、青い円は故障領域に含

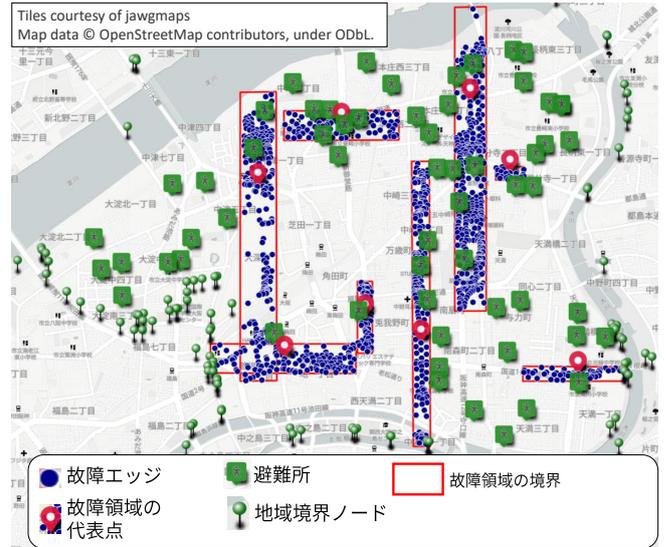


図 2: 故障箇所・地域内避難所・地域境界ノードの位置

まれる故障エッジである。赤い長方形は故障領域の境界であり、障害が発生した各エッジは、同じ赤い長方形内の代表エッジに属する。障害発生場所として、8つの代表エッジを設定し、各代表エッジを囲む長方形の領域を故障領域として、故障領域内の全てのエッジを故障エッジと見なした。なお、各故障領域における故障度合いは、0.0 から 1.0 の間でランダムに設定した。エッジのすべての故障は MAS の開始時に発生し、故障の場所と程度は MAS 実行中に変更されないものとする。

4.1.2 避難所と避難者初期配置

MAS では、避難者はエッジに存在し、各エッジの避難者の移動速度は、各エッジの避難者密度によって決定する。各ノードは、国土地理院が発行する各町の代表点座標 [18] に基づいて、最も近い町丁に属する。避難所は、大阪市の Web サイト [19]~[21] に掲載されている 60 の避難所の情報を使用した。避難所の位置座標は、避難所の位置座標に最も近い OpenStreetMap のノードの座標を用いる。図 2 の緑色の四角い吹き出しが避難所の位置を表す。また、大阪市北区と他の地域との境界を表す 122 のノードを地域境界ノードとして抽出し、被災地外への避難先として使用した。図 2 の緑色のピンは、これらの地域境界ノードを表す。大阪市の各町丁の昼間と夜間の人口情報 [22] から被災者数を求めた。大阪市北区にはマンションや事務所など耐震安全性の高い建物が多くあることから、昼間人口の 90%、70%、50% が避難せず初期配置された場所にとどまり、被災者の 10%、30%、50% が避難行動を採ることとする。また、各町丁の昼間人口から夜間人口を引いた人口を、大阪市への通勤者数とした。

4.1.3 避難行動

各避難者の目的地は、MAS の開始時に設定される。地域内に避難する避難者として、各町丁の夜間人口の 10%、30%、50% を初期配置し、避難者は、初期配置された地点から到達可能で、かつ、直線距離で最も近い避難所を目的地として避難を開始する。なお、避難所の収容人数は考慮しておらず、選択された避難所に到着した避難者は MAS から削除されるものとする。各

表 2: 道路の種類とエッジ幅の関係

OpenStreetMap の道路の種類 [24]	エッジ幅 (m)
steps	1.0
path	1.8
footway	2.0
service	2.3
track	3.0
living_street, pedestrian	4.0
construction, corridor, cycleway, residential, unclassified	5.0
road	7.0
secondary, secondary_link, tertiary, tertiary_link	8.0
motorway, motorway_link, primary, primary_link, rest_area, trunk, trunk_link	10.0

町丁の昼間の人口から夜間の人口を引いた人口を大阪市北区外から出勤・通学している通勤者人口として、通勤者人口の 10%, 30%, 50% が大阪市北区外に帰宅する想定した。これらの通勤者の目的地は [23] の表 1-2 および表 1-3 に示されている大阪市周辺地域からの通勤者数の統計情報に基づいて、通勤者の自宅が存在する地域に割り当てた。避難者は、目的地に向かって移動し、地域境界ノードに到達した避難者は MAS から削除される。

各エッジのコストは、式 (1) によって求められる。本シミュレーションにおいては、表 2 に示すとおり、OpenStreetMap の道路種類 [24] に対してエッジ幅を割り当てた。提案手法は、各避難者端末が知っている通過不可能な故障箇所を含まず、エッジコストの合計が最小の経路を避難者に提案する。シミュレーションの開始時には、故障箇所の情報が無い状態における最小コストの経路が提案され、避難者端末の故障箇所情報が更新されると、更新された故障箇所に基づいて提案経路も更新される。

一般に、道路上の避難者の数が増えると、避難者の移動速度は低下すると予想される。よって、表 2 に示す道路の種類ごとのエッジの幅と、エッジ e の長さ、避難者数から求められるエッジ e の避難者密度を d_e としたとき、エッジ e の避難速度 v_e は、[25] に示されたモデルに従って式 (2) で求める。ここで、 v_{min} は歩行者の速度の下限であり、[25] のモデルより $v_{min} = 0.1$ に設定する。

$$v_e = \begin{cases} -0.204d_e + 1.48, & d_e < 1.5 \\ \max\left\{1.32 \log \frac{9.16}{d_e}, v_{min}\right\}, & d_e \geq 1.5, \end{cases} \quad (2)$$

4.1.4 通信行動

本稿では、通信チャネルの数は無制限であると想定し、各避難者端末は各タイムスロット内に、通信範囲内の他のすべての避難者端末との故障箇所の情報交換を完了するものとする。提案手法では、各避難者端末は、他の避難者端末が収集した、故障箇所を通過した避難者数から、各故障箇所での通行可能確率を推定する。ただし、本稿の評価では、各避難者端末は、事前に与えられた各避難者タイプの人口比率から得られた真の通行可能確率を有していると仮定し、通行可能確率の推定についての評価は行っていない。

4.1.5 タイムスロット

MAS において時間は一定の長さ T_{ts} のタイムスロットに分割されており、各タイムスロットで、避難者は隣接するエッジへの移動と、故障箇所情報の交換を行う。

隣接するエッジ間の避難者の移動は、各タイムスロット毎であるため、各エッジを通過するのに少なくとも 1 タイムスロットが必要である。つまり、避難者の移動速度を考慮したとき、一つのエッジを通過するのに必要な時間よりも T_{ts} が長い場合、避難者はエッジで不必要な時間を費やすこととなり、移動時間の正確なシミュレートが不可能となる。したがって、タイムスロットの長さ T_{ts} は、避難者が最大速度 v_{max} で移動するとき、最短のエッジ長 l_{min} を通過できないよう設定する必要がある。よってタイムスロットの長さは、 $T_{ts} = \lceil l_{min}/v_{max} \rceil$ で求められる。ここで、 v_{max} は式 (2) の 1.48 m/s であり、 l_{min} は 4.1.1 から 10 m であることから、本評価での T_{ts} は 6 秒に設定した。

4.1.6 人口比率と避難者属性

本シミュレーションは、複数の異なる避難者属性の人口比率に対して実行した。具体的には、避難者の属性を考慮した提案手法のシミュレーションにおいて、表 3 に示すとおり、すべての避難者属性比率が等しい balanet と、任意の属性の避難者の割合が 70% および他の 3 つのタイプ属性の避難者割合がそれぞれ 10% について実行した。

4.2 結果

表 4 と表 5 は、避難者の属性を考慮した提案方法と、避難者を考慮していない従来方法において、MAS を 20 回試行したときの平均避難時間と平均移動距離を示している。それぞれの表において、被災地内の避難所を目的地とした避難者の結果と、被災地外を目的地とした避難者の結果を示す。提案手法のいずれの避難者属性の人口比率においても、避難者属性を考慮しない手法と比較すると、短い平均移動距離を達成している。故障箇所の故障度合いが、避難者の通過可能な故障度合いよりも低いとき、避難者は故障箇所を通過する経路を避難経路として利用可能なため、提案手法により移動距離を短縮することが達成可能となる。避難者の属性を考慮しない手法の平均避難時間は、提案された手法の約 2 倍であり、提案手法の避難時間の削減度合いは、避難距離の削減度合いを上回っている。提案手法では、踏破能力の高い避難者の比率が高いほど、平均避難時間と平均移動距離が短縮されている。一方、避難者の総数が増加すると、平均避難時間は長くなるが、平均移動距離はあまり変化しない。これは、同じ経路を選択した場合でも、混雑度が避難者の移動速度に影響を及ぼし、混雑度合いが高いと避難時間が長くなることを示している。

図 3 は、避難者の数が昼間人口の 10%, 30%, 50% であったときの、エッジでの避難者の平均密度の時間変化を示している。図 3b は昼間人口の 30% が避難するときの結果を示しているが、避難の開始直後から約 300 のタイムスロットまでの期間は、いずれの条件においても、平均避難者密度は m^2 当たり 7 人程度まで上昇し続けている。その後、約 300 タイムスロット後においては、避難者の属性を考慮しない場合の平均避難者密度は m^2 当たり 14 人まで増加し続けている。一方、提案手法の結果は、いずれの避難者タイプの人口比率においても、約 300~500 タイムスロット後に平均避難者密度が減少したため、最大避難者密度も低く保たれており、混雑が短時間で解消されたことが確認できる。さらに、避難者密度の最大からの避難者密度の低下は、避難者タイプの人口の比率に関係しており、踏破能力が高い避難者の比率が高いほど、避難者密度の最大からの速やかな低下を示した。踏破能力の低い避難者の比率が高い場合、避難者密度の低下は遅いものの、最大避難者密度は踏破能力の低い避難者の割合が最も多い type D 70% の場合であっても、避難者の属性を考慮しない場合と比べると、よりも低い密度を達成している。図 3b と比較すると、図 3a は避難者の数が少ない条件であるため、最大の平均避難者密度が低く、全員の避難がより早く完了している。対照的に、避難者の数が図 3b よりも多い図 3c では、平均最大避難者密度が高く、避難を完了するのにより多くの時間を要している。図 3a と図 3c のいずれの条件においても、図 3b と同様に、提案手法は、避難者属性を考慮しない手法と比較すると、低い平均避難者密度となっている。

図 4 は避難者の数が昼間人口の 10%, 30%, 50% であるときの、避難者の平均移動速度を示している。図 4a, 図 4b, 図 4c に示すとおり、MAS の開始直後は、いずれの手法も徐々に避難者の移動速度が低下していくが、提案手法においては従来手法と比較して移動速度が急激に回復している。踏破能力の高い避難者の割合が多く、避難者の総数が少ないほど、避難者の平均移動速度の低下が小さいことが確認できる。

図 5 および図 6 は、目的地、つまり避難所または地域の境界ノードに到達した避難者比率の時間変化を示している。提案手法では、避難者の属性を考慮しない場合と比較すると、避難完了者の比率がより早く増加することが確認された。踏破能力の高い避難者の割合が多く、避難者の総数が少ないほど、目的地に早い段階で多くの避難者が目的地に到達していることが確認された。

これらの結果から、避難者属性の人口の割合に偏りがあっても、故障箇所の故障度合いを推測し、それらの故障箇所を通行可能な避難者属性の避難者の避難に用いることで、避難経路が分散され、避難時の混雑が抑制されていることが確認できた。

5. まとめ

本稿では、著者らが提案した、避難時に発生する混雑緩和を目的とした避難者属性を考慮した避難経路の提案手法について、避難者属性の人口の構成が避難品質に与える影響を明らか

表 3: 避難者属性の人口比率別のシミュレーション条件

避難者属性	通過可能な故障度合いの上限 (D_T) (0 to 1.0)	避難者の割合 (R_i) (0 to 1.0)				
		シミュレーション条件				
		balance	type A 70%	type B 70%	type C 70%	type D 70%
A	0.8	0.25	0.7	0.1	0.1	0.1
B	0.5	0.25	0.1	0.7	0.1	0.1
C	0.4	0.25	0.1	0.1	0.7	0.1
D	0.2	0.25	0.1	0.1	0.1	0.7

表 4: 目的地への平均避難時間

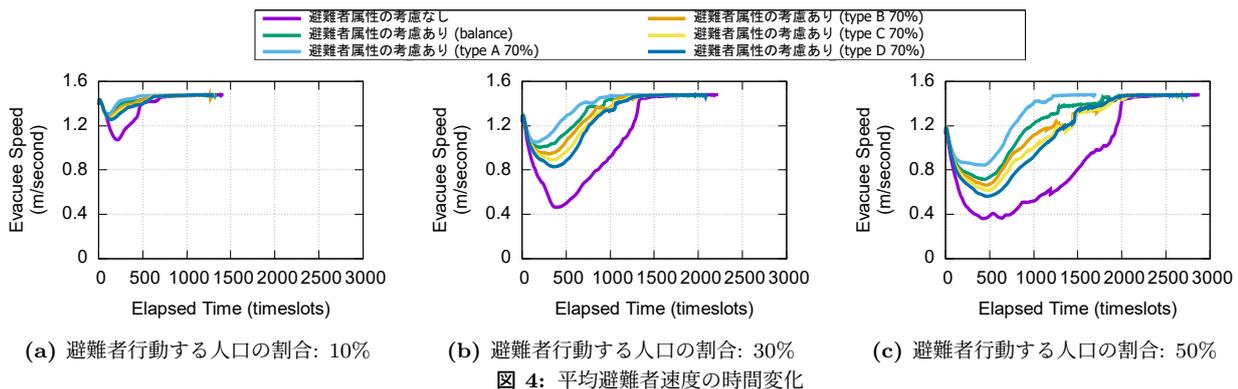
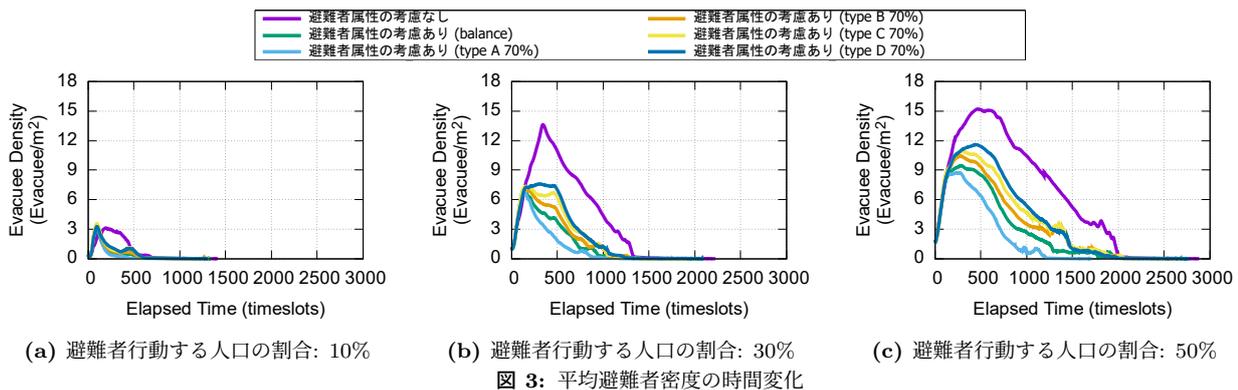
(timeslots)

		地域内の避難所への避難			被災地外への避難		
		避難行動する人口の割合					
		10%	30%	50%	10%	30%	50%
避難者属性の考慮あり (提案手法)	balance	99.513	149.826	201.766	309.447	371.886	455.806
	type A 70%	91.583	132.893	170.633	288.995	325.743	382.429
	type B 70%	103.155	156.569	211.244	316.379	385.409	482.536
	type C 70%	105.665	162.539	219.982	327.992	409.404	512.101
	type D 70%	115.422	180.452	248.052	339.056	432.222	547.015
避難者属性の考慮無し [9]		161.639	307.569	413.754	416.891	630.352	814.012

表 5: 目的地への平均避難距離

(meters)

		地域内の避難所への避難			被災地外への避難		
		避難行動する人口の割合 d					
		10%	30%	50%	10%	30%	50%
避難者属性の考慮あり (提案手法)	balance	732.958	732.784	733.037	2695.09	2699.89	2697.05
	type A 70%	658.643	659.344	659.199	2495.32	2498.71	2498.41
	type B 70%	724.473	724.920	724.594	2682.86	2685.64	2684.33
	type C 70%	734.294	734.963	734.721	2761.06	2765.67	2763.83
	type D 70%	812.170	811.521	811.838	2841.11	2844.79	2843.21
避難者属性の考慮無し [9]		1090.62	1090.76	1090.66	3363.51	3362.72	3363.37

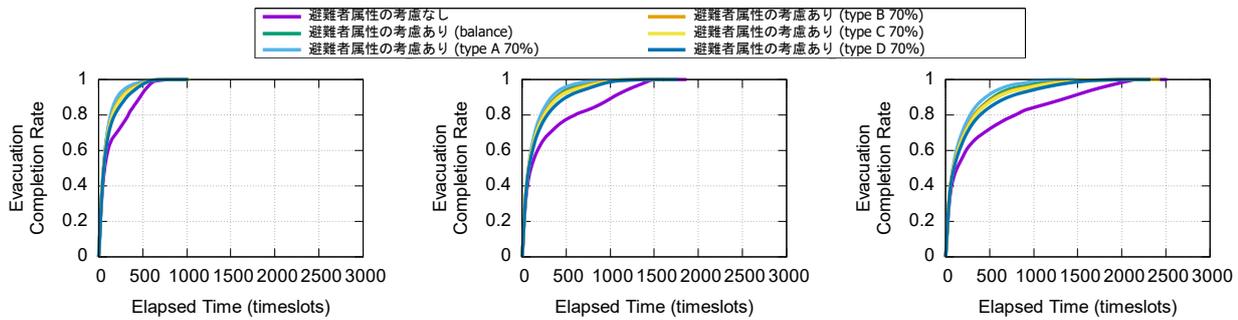


にした。なお、本稿では、携帯電話網が使用できない条件下で DTN にて故障箇所の情報を交換しているが、避難者属性毎に異なる経路の提案は、携帯電話網が使用可能な状態であっても適用可能である。MAS を用いた数値評価では、避難者属性の人口の構成が避難品質に影響を与えることを示した。また、評価を行った全ての避難者属性の人口の構成において、避難者の属性を考慮しない手法と比較し、提案手法により避難時の混雑が緩和され、避難時間も避難距離も大幅に短縮されていることを確認した。一方、本論文では、通信チャンネル数を考慮せず、故障箇所の故障度合いの推定精度の評価は行っておらず、今後、

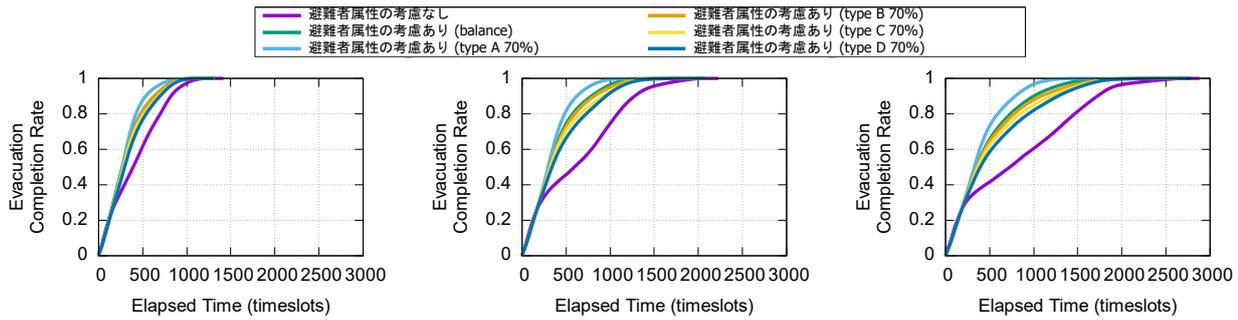
提案手法を検討する際に評価する。さらに、避難者属性の正確な分類は、我々の提案手法の実現にとって重要であるため、携帯端末の所有者の日常の活動から、避難者の属性を推定手法についても検討する必要がある。

謝 辞

本研究は福岡大学研究推進部の研究経費によるものである。
(課題番号: 185005)



(a) 避難者行動する人口の割合: 10% (b) 避難者行動する人口の割合: 30% (c) 避難者行動する人口の割合: 50%
 図 5: 地域内の避難所を目的地とした避難者の避難完了度合いの時間変化



(a) 避難者行動する人口の割合: 10% (b) 避難者行動する人口の割合: 30% (c) 避難者行動する人口の割合: 50%
 図 6: 地域外を目的地とした避難者の避難完了度合いの時間変化

文 献

- [1] Ministry of Internal Affairs and Communications, Japan: “2011 WHITE PAPER Information and Communications in Japan”, Japanese Government (2011).
- [2] Y. Iizuka, K. Yoshida and K. Iizuka: “An Effective Disaster Evacuation Assist System Utilized by an Ad-Hoc Network”, in *HCI International*, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 31–35 (2011).
- [3] A. AlHourani, S. Kandeepan and A. Jamalipour: “Stochastic Geometry Study on Device-to-Device Communication as a Disaster Relief Solution”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, **65**, 5, pp. 3005–3017 (2016).
- [4] H. Nishiyama, M. Ito and N. Kato: “Relay-by-smartphone: realizing multihop device-to-device communications”, *IEEE Communications Magazine*, **52**, 4, pp. 56–65 (2014).
- [5] M. Tanha, D. Sajjadi, F. Tong and J. Pan: “Disaster Management and Response for Modern Cellular Networks Using Flow-Based Multi-Hop Device-to-Device Communications”, in *Proc. IEEE VTC-2016-Fall*, IEEE, pp. 1–7 (2016).
- [6] H. Yuan, W. Guo and S. Wang: “Emergency route selection for D2D cellular communications during an urban terrorist attack”, in *Proc. IEEE ICC*, IEEE, pp. 237–242 (2014).
- [7] Y. Kasai, M. Sasabe and S. Kasahara: “Congestion-aware route selection in automatic evacuation guiding based on cooperation between evacuees and their mobile nodes”, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, **2017**, 1, p. 164 (2017).
- [8] N. Komatsu, M. Sasabe, J. Kawahara and S. Kasahara: “Automatic Evacuation Guiding Scheme Using Trajectories of Mobile Nodes”, in *Proc. MobiWIS*, Springer, Cham, pp. 3–14 (2015).
- [9] N. Komatsu, M. Sasabe, J. Kawahara and S. Kasahara: “Automatic evacuation guiding scheme based on implicit interactions between evacuees and their mobile nodes”, *GeoInformatica*, **22**, 1, pp. 127–141 (2018).
- [10] A. Fujihara and H. Miwa: “Disaster Evacuation Guidance Using Opportunistic Communication: The Potential for Opportunity-Based Service”, in *Eur. J. Oper. Res.*, Springer, Cham, pp. 425–446 (2014).
- [11] 三角真, 上山憲昭: “避難者属性を考慮した被災地における DTN を用いた避難経路推薦方式の提案”, 電子情報通信学会技術研究報告 (NS2018-286), pp. 533–538 (2019).
- [12] G. J. Lim, S. Zangeneh, M. Reza Baharnemati and T. Asavapokee: “A capacitated network flow optimization approach for short notice evacuation planning”, *European Journal of Operational Research*, **223**, 1, pp. 234–245 (2012).
- [13] T. Horiyama, A. Ohta, N. Katoh, A. Takizawa, J. Kawahara, T. Inoue, Y. Takechi and S.-I. Minato: “Enumeration of region partitioning for evacuation planning based on ZDD”, in *Proc. IET ISORA2013*, Institution of Engineering and Technology, pp. 65–72 (2013).
- [14] C. Lin, P. Chen and W. Chen: “An Adaptive Guiding Protocol for Crowd Evacuation Based on Wireless Sensor Networks”, in *Proc. IEEE VTC-2013-Spring*, IEEE, pp. 1–5 (2013).
- [15] N. Aschenbruck, E. Gerhards-Padilla and P. Martini: “Modeling mobility in disaster area scenarios”, *Performance Evaluation*, **66**, 12, pp. 773–790 (2009).
- [16] A. Martín-Campillo, J. Crowcroft, E. Yoneki and R. Martí: “Evaluating opportunistic networks in disaster scenarios”, *Journal of Network and Computer Applications*, **36**, 2, pp. 870–880 (2013).
- [17] OpenStreetMap contributors: “Planet dump retrieved from <https://planet.osm.org>”, <https://www.openstreetmap.org> (2019).
- [18] Geospatial Information Authority of Japan: “Basic Geographical Information Download Service”, <https://fgd.gsi.go.jp/download/mapGis.php>.
- [19] City of Osaka: “Kita-ku, Osaka City: Designated disaster evacuation site”, <https://www.city.osaka.lg.jp/kita/page/0000299024.html>.
- [20] City of Osaka: “Kita-ku, Osaka City: Temporary evacuation site”, <https://www.city.osaka.lg.jp/kita/page/0000298932.html>.
- [21] City of Osaka: “Kita-ku, Osaka City: Designated safety area”, <https://www.city.osaka.lg.jp/kita/page/0000298928.html>.
- [22] City of Osaka: “2010 Census Daytime population (estimate) by section in Osaka City”, <https://www.city.osaka.lg.jp/toshikeikaku/page/0000248962.html>.
- [23] Planning and Coordination Bureau, City of Osaka: “Outline of the 2010 National Census (Daytime population of Osaka City)”, <https://www.city.osaka.lg.jp/toshikeikaku/cmsfiles/contents/0000176/176459/gaiyou.pdf>.
- [24] OpenStreetMap Wiki: “Key:highway”, <https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Key:highway>.
- [25] N. Kamiyama, K. Ishibashi and Y. Hoshiai: “Reachability analysis of multi-hop d2d communications at disaster”, *IEICE Transactions on Communications*, **E101-B**, 8, pp. 1833–1844 (2018).