

ソーシャルグラフに基づく高速な率先避難誘発手法の検討

一瀬 太陽^{1,a)} 川上 朋也¹

概要: 津波や大雨による土砂災害、河川の氾濫などに関して、早期に避難を進めることでそれらの被害を軽減できる。しかし、警報や避難指示を認知していても住民がなかなか避難しない、「オオカミ少年効果」などの概念が指摘されている。対象者全体の避難を早めるためには、周囲に声をかけながら率先して避難を行う「率先避難」とその実施者（率先避難者）の存在が重要である。本研究では限られた報酬（インセンティブ）において、対象者全体の速やかな避難を誘発する手法を提案する。提案手法は人間の社会的な関係性を表すソーシャルグラフに基づき、ほかの多くの対象者の避難をより高速かつ効率的に誘発できる率先避難者を意図的に選択する。提案手法をシミュレーションにより評価し、避難完了までの時間の大幅な削減や避難誘発のための早期のメッセージ送信を確認した。

1. はじめに

日本では地震が多く発生し、海溝型地震では沿岸部において津波の被害が起こる。また、近年では異常気象の増加により土砂災害や河川の氾濫が起き、死者や行方不明者が出ている。さらに、世界的に見れば、テロによって避難が必要となることもある。津波や集中豪雨などはある程度の予測が可能になっており、防災や避難誘導に関する多くの研究も行われている [1-5]。緊急事態においては現在、自治体などによって早期かつ頻繁に避難指示が発令される。しかし、自治体から早期かつ頻繁に避難指示を受けても、住民はいくつかの心理的な要因で避難しないことが知られている。

住民が避難しない要因として、「正常化の偏見」、「経験の逆機能」、「オオカミ少年効果」の概念がある [6-9]。「正常化の偏見」は正常性バイアスとも呼ばれ、異常な状態に直面していながらも自分は大丈夫だと思い込み、適切な対処を取ることができない。「経験の逆機能」では、過去の災害の経験から今回も大丈夫と思う心理を表している。「オオカミ少年効果」は複数回にわたる誤報によって、自治体からの避難指示の信頼性低下や人々の過小評価につながる。これら概念によって、避難行動の遅れや避難行動そのものがとられない要因を説明できる。

多くの人々が早く避難するためには、避難を開始するきっかけが重要である。その一つとして、率先避難者の存

在が知られている [10-12]。率先避難者とは、周囲に声をかけながら率先して避難（率先避難）を行う人を指す。周りに避難を呼びかけることで避難の必要性を認識させ、避難の判断を導きやすくする。率先避難は対面での効果が特に高いが、近年ではソーシャル・ネットワークキング・サービス (Social Networking Service, SNS) などの発達によって、避難警報が発令されている際にオンライン上のテキストメッセージなどで近所の知人とやり取りを行うことも考えられる。オンライン上のやり取りにおいても、近所の人が避難したという情報を知れば、住民は避難行動をとりやすくなると考えられる。特にオンライン上であれば対面で避難を呼びかけるよりもコストが低く、避難のために時間が限られていても、比較的容易かつ多くの人々に避難を呼びかけられる。従来研究の多くでは、災害後の調査などによって住民が避難をしない心理を分析し、避難のきっかけなどの調査によって、率先避難者の重要性を指摘している。しかし、率先避難者の特性が避難対象者全員の避難完了時間に与える影響については言及されていない。

そこで、本研究では率先避難者の特性が避難対象者全員の避難完了時間に影響を与えると考え、対象者全体の避難完了までの時間を減少させるため、ほかの対象者の避難をより高速かつ効率的に誘発できる率先避難者を意図的に選択する手法を提案する。提案手法では人間の社会的な関係性を表すソーシャルグラフ [13,14] に基づき、限られた報酬（インセンティブ）で、リンク数の多い避難対象者（ノード）に率先避難を依頼する。

以降、関連研究について 2 章で述べる。3 章では提案する率先避難誘発手法について述べ、4 章ではシミュレ

¹ 福井大学工学部
School of Engineering, University of Fukui, Fukui 910-8507,
Japan

^{a)} hb180118@u-fukui.ac.jp

ションによる提案手法の評価について述べる。5章では提案手法とその評価について議論し、最後に6章で本論文をまとめる。

2. 関連研究

2.1 オオカミ少年効果

避難を行わない心理的なメカニズムの一つとして、「オオカミ少年効果 (Cry Wolf Effect)」がある [6-9]。オオカミ少年効果とは、災害情報の誤報が繰り返されることで、それら災害情報に対する信頼が低下していくことである。オオカミ少年効果はイソップの寓話「オオカミ少年」にちなんでそのように呼ばれている。

文献 [6] ではオオカミ少年効果の影響を調査するため、緊急時に避難情報を発令する自治体と避難情報を受け取る避難者との間の均衡解をゲーム理論を用いて求めている。避難を指示するかどうかを決定する自治体と避難行動をとるかを決定する避難者という2種類のプレイヤーを設定し、それぞれの戦略を定めている。その後、逐次均衡を用いてそれぞれの利得を最大化するような解を求めている。また、煙探知機などの警報システムから送られる信号の精度を3段階に変更して解を求め、それぞれ自治体と避難者の最適な対応は変わるとしている。さらに、予告しないで避難訓練を行う場合には、訓練によって得られるメリットとオオカミ少年効果による信頼性の低下とを照らし合わせ、注意深く評価を行う必要があるとしている。オオカミ少年効果による非効率性を防ぐには、火災報知機などの脅威を検出する機器の精度を高めることが挙げられる。しかし、技術面や費用面で制約もあるため、検出精度を十分に高めることは難しい。

文献 [7] では知覚均衡モデルを用いて、オオカミ少年効果を説明している。五感を通じて感じ取った「自己のリスク知覚」とそれ以外の情報である外部から取得した情報や本人に蓄積されている情報を合わせ、「準拠情報 (情報の解釈や確認を行うための情報) からの知覚」が定義されている。その上で、「自己のリスク知覚」と「準拠情報からの知覚」が互いに不均衡な状態に陥る際、不安の低減や解消として均衡を図ろうとすると述べている。また、オオカミ少年効果では自己のリスク知覚と準拠情報からの知覚がともに高い状態からともに低い状態へ移っていくことで、避難行動が行われなくなるタイプであると説明している。さらに、避難行動を促進するための方法として、「準拠情報からの知覚」を高めることを挙げ、その中には他の人々の観察から得られる情報が含まれる。後述する率先避難者の存在は準拠情報であり、オオカミ少年効果を防ぐ効果があると考えられる。

2.2 率先避難

周囲に声をかけながら率先して避難をすることは「率先

避難」、その率先避難を行う人は「率先避難者」と呼ばれる [10-12]。率先避難者の存在は準拠情報の一つであり、他人の避難に影響を与えることが既存研究において知られている。文献 [10] では仮想現実 (Virtual Reality, VR) を用いて率先避難者の実験を行っており、河川が氾濫するという状況で基準シナリオや増水視認シナリオ、率先視認シナリオを設け、被験者の避難開始までの時間を測定している。増水視認シナリオでは河川の増水を確認でき、率先視認シナリオでは率先避難者を確認できる。文献 [10] の実験では、増水視認シナリオと率先視認シナリオについてはいずれも、基準シナリオと比べて避難開始時刻が早いことが確認されている。また、率先視認シナリオは増水視認シナリオと同程度の避難促進効果があるとされている。テロや津波、土砂災害においては河川の増水のように増大する危険性を認識することが難しいため、特に率先避難者の存在は避難促進に大きい効果があると考えられる。

近年では Twitter, Facebook などの SNS や LINE などのコミュニケーションツールが一般に普及し、それらを用いたオンライン上のテキストメッセージなどで避難を呼びかけることも考えられる。文献 [11] では、率先避難者の影響はその率先避難者の姿が見えるか、声の届く範囲にしか及ばないことや、率先避難者のような人が旅行などで不在だった場合は対応できないと述べられている。そのため、IoT 技術を用いることで、率先避難者の行動をリアルタイムで見える化することが検討されている。このようなシステムが実装されれば、率先避難者は追従する避難者をより多く生むようになると考えられる。

文献 [12] では、避難者間のネットワーク構造が形成される確率とそのネットワーク構造における避難の確率について評価している。文献 [12] では避難者それぞれの立地や年齢、健康状態、避難者間の距離などの詳細な要素を考慮し、避難者を分析している。例えば、レスキュー隊員の警告がない場合はすべての避難者の避難率が低く、警告がある場合は中程度の避難率となっている。また、警告ありかつ率先避難者がいる場合では避難率が高くなっている。特に高齢者のいる住宅の隣人の率先避難は早期の避難を促すことにつながると述べている。さらに、避難時の率先避難者による動的な影響を評価したシミュレーションにおいては、危険性の高い場所に住んでいて危機意識の高い高齢者は率先避難者の影響が大きく、避難率が上がると述べている。一方、危機意識の弱い高齢者に対しては率先避難の影響は弱い結果になっている。危機意識などの避難者の状態によっても、避難の判断は変化する。

3. 提案手法

避難対象者を速やかに避難させるため、本研究ではソーシャルグラフに基づく高速な率先避難誘発手法を検討する。

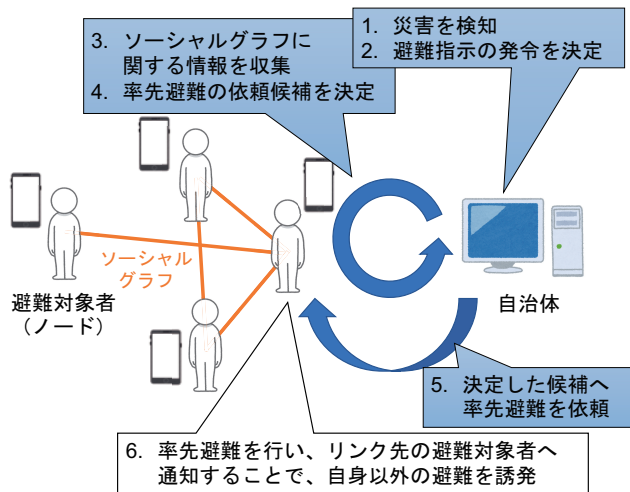


図 1 提案手法の流れ

3.1 概要

対象者を速やかに避難させる方法の一つとしては、何らかの報酬（インセンティブ）を対象者へ与えることが考えられる。しかし、金銭や物品、クーポンなどをインセンティブとしても、避難を呼びかける自治体の財源には上限がある。インセンティブを与える人数を増やすために一人あたりの量を減らすと、インセンティブを与えても避難する可能性が下がる。そのため、公平性の観点での議論がある一方、本研究では避難を十分に誘発できるインセンティブを一部の避難対象者へ与える手法を考える。また、優先避難者は自身が避難するとともに、ほかの対象者の避難を誘発する。そこで本研究では、インセンティブを与える避難対象者をランダムに決定するのではなく、優先避難者としてより効果的な対象者から選択することを考える。優先避難者としてより効果的な対象者が避難することで、ほかの対象者の避難を効率的に誘発し、対象者が避難した割合（避難完了率）や避難開始までの時間、全員の避難が完了するまでの時間を改善できる。ここでの効率的とは、限られた費用（コスト）で、より多くの対象者を早く避難させられることを指す。

提案手法のシステム構成と流れを図 1 に示す。まず、避難を呼びかける自治体が観測機器などから災害やテロなどの脅威を察知する。次に、察知された情報に基づいて自治体が検討を行い、対象者への避難指示の発令を決める。その後、自治体はインセンティブによって優先避難を依頼する対象者を決定するが、提案手法では避難対象者間に何らかのソーシャルグラフが構築されているものとし、その情報に基づいて依頼候補を決定することを考える。候補が決定した後、自治体は対象者へ優先避難を依頼する。自治体から依頼のあった対象者は優先避難を行い、ほかの避難対象者の避難を誘発する。誘発の過程においても、ソーシャルグラフに基づいて情報を伝達できるものとする。また、ソーシャルグラフに関する情報の収集やインセンティブを

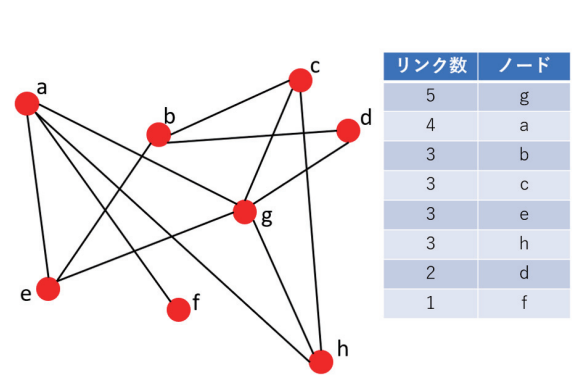


図 2 ソーシャルグラフの例

与えるタイミングは災害発生直後のほか、あらかじめ平常時に定期的に行うことも考えられる。なお、実際には避難指示の対象は地域や現在地に依存するが、本論文では考慮しないものとする。

3.2 ソーシャルグラフ

ソーシャルグラフとは、個人をグラフのノード（頂点）に、個人同士のつながりをリンク（枝，エッジ）にそれぞれ割り当てることで、社会的関係を表すものである [13, 14]。グラフは有向グラフと無向グラフに大きく分けられる。本研究では人間関係において互いに知っている状態を想定するため、双方向の関係を示す無向グラフを用いる。ノード数が 8 のソーシャルグラフの例を図 2 に示す。図 2 の右の表は各ノードのリンク数を降順に表している。図 2 の例ではノードが持つリンク数の最大値は 5 であり、最小値は 1 である。現実の人間関係を表すソーシャルグラフは各ノードの次数（リンク数）に偏りがあり、次数の分布がべき乗則に従うスケールフリーネットワークなどで表現される。ノード数が多くなるほど、ノード間のリンク数の差は大きくなる。

3.3 優先避難の誘発

ソーシャルグラフは各ノード（避難対象者）のリンク数に偏りがある。提案手法では収集したソーシャルグラフの情報に基づき、リンク数の多い避難対象者から順番に、許容されるインセンティブの総額まで優先避難の依頼候補を決定する。リンクを多く持つノードが避難したほうが優先避難者としてより多くのノードへ影響を与え、全体の避難を促進できる。インセンティブの例としては、金銭や物品、クーポンなどが考えられ、優先避難の依頼はメールや SNS、コミュニケーションツールなどの電子的な方式を想定する。また、優先避難者がほかの対象者の避難へ影響を与える過程については、同様にメールや SNS、コミュニケーションツールのほか、対面での声かけや、避難したことが第三者経由で伝わることも考えられる。

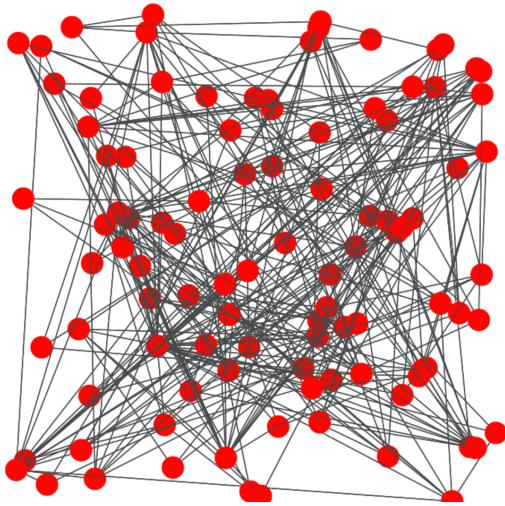


図3 作成したソーシャルグラフの例

実際には、特定の避難対象者がほかの避難者の影響で避難するかどうかはその対象者自身の性格やほかの避難者との関係や信頼性に依存すると考えられる。それらの要素を反映するためにはプライバシーにかかわる多くの情報の収集が必要な一方、各ノードのリンク数に基づいて率先避難の依頼候補を決定する本研究の提案手法では情報収集も容易で、実現可能性が高い。

4. 評価

本研究では、提案手法をシミュレーションにより評価する。

4.1 シミュレーション環境

本研究のシミュレーションには artisoc Cloud [15, 16] を用いた。artisoc Cloud はマルチエージェントシミュレーションであり、社会システムの設計などに用いられる。エージェント自身の動作とエージェント同士の相互作用を記述することで、経過時間(ステップ)ごとの状態の変化を観察できる。また、社会的関係を表すソーシャルグラフには多数の種類がある。本研究で想定するソーシャルグラフでは、一部のノードが多数のリンクを持つスケールフリー性を有する。スケールフリー性を持つグラフはバラバシ・アルバート(Barabasi-Albert)モデル [17] を用いて生成した。バラバシ・アルバートモデルのアルゴリズムでは、ノードを一つずつ追加していくことでグラフが生成される。ノードを追加する際、すでに多くのリンクを持っているノードほど新たなリンクが形成される確率を高くしているため、ノードごとのリンク数に偏りが生じる。ノード数は100とし、作成したソーシャルグラフの例を図3に示す。

本シミュレーションでは評価指標の一つとして、100ノードすべてが避難するまでのステップ数を避難完了時間として計測した。最初のステップ0では選択された率先避難者のノードが避難を始め、選択方法は以下の5種類で比較

した。

- (1) リンク数の少ないノードから昇順に $l\%$
- (2) リンク数の少ないノードから昇順に $l/2\%$ とランダムに $l/2\%$ との合計 $l\%$
- (3) 全ノードからランダムに $l\%$
- (4) リンク数の多いノードから降順に $l/2\%$ とランダムに $l/2\%$ との合計 $l\%$
- (5) リンク数の多いノードから降順に $l\%$

l は依頼する率先避難者の割合(%)で、20%と10%の場合で行った。(1)の選択方法では各ノードが持つリンクの数で並べ、リンク数の少ないノードから昇順に $l\%$ を率先避難者とする。(3)の選択方法では全ノードから $l\%$ をランダムに率先避難者とする。(2)の選択方法では(1)と(3)の選択方法を組み合わせ、それぞれ $l/2\%$ ずつを率先避難者とする。(5)の選択方法では、リンク数の多いノードから降順に $l\%$ を率先避難者とする。(4)の選択方法では(3)と(5)の選択方法を組み合わせ、 $l/2\%$ ずつを率先避難者とする。

各避難対象者(ノード)が避難するかどうかについては、自ノードが隣接するノードのうち、 $x\%$ が避難を完了している場合には自ノードも避難するとした。 x はしきい値となるパラメータであり、本シミュレーションでは30%と15%の2通りで行った。例えば $x = 30$ で図2のノード e の場合、 $3 \times 0.30 = 0.9 < 1$ となり、隣接している3つのノードのうち1つ以上が避難していれば自ノードも避難する。また、情報の伝達や意思決定の時間は人や環境によって異なるため、本シミュレーションでは各ノードが避難や情報伝達を行う際の遅延を設定した。設定した遅延は平均5ステップ、標準偏差1ステップの正規分布に従ってランダムに決定した。各ノードは隣接しているノードのうち、しきい値以上がすでに避難していれば自身も避難状態になり、設定された遅延のステップが経過した後、まだ避難していない隣接ノードへ自身の避難を通知する。シミュレーションでは手法とパラメータ l, x ごとに100回ずつ行い、すべてのノードが避難するまでのステップ数の平均を算出した。ソーシャルグラフもシミュレーションごとに新規に作成した。

実際の環境では、避難が完了するまで、知人などの間でメッセージのやり取りがあると考えられる。そこで、本シミュレーションではコミュニケーションにかかる費用の指標として、各ステップで送信されるメッセージ数も計測した。メッセージはノードが避難済みの状態に変わった際にまだ避難していない状態のノードへ送信されるとして、ステップごとに送信メッセージ数を計測した。例えば図2でノード e が避難済みかつノード b が避難状態へと遷移する場合、その時刻に隣接しているノード a, c, d へメッセージが送信されるとして、その時刻のメッセージ数に3を加算する。メッセージ数も同様に、それぞれの手法とパラメー

タ l, x で 100 回ずつの平均を算出した。

4.2 避難完了時間に関する結果

率先避難者の割合 $l = 20$ 、周囲のノードが $x = 30\%$ 避難していれば自身も避難するとした場合について、各ステップで避難した対象者の相対度数を図 4 に示す。横軸はステップ数で、縦軸は横軸のステップで避難した対象者の相対度数を表している。また、同様のデータを累積した結果を図 5 に示す。横軸は同様にステップ数で、縦軸は横軸のステップまでに避難が完了している避難対象者の割合を表している。いずれの結果においても、率先避難者の選択方法 (1) を青色、(2) をオレンジ色、(3) を緑色、(4) を赤色、(5) を紫色で示している。図 4 より、リンク数の多いノードから率先避難者とする紫色の提案手法はステップ 9 から 16 で避難を完了できている。一方、ランダムに率先避難者を選択する青色の方法ではステップ 14 から 33 までと、避難完了までの時間が広く分布している。また、最悪の場合においては、提案手法はランダムに選択した場合の $1/2$ 程度のステップ数で避難が完了できている。率先避難者をリンク数の多いノードから降順とランダムの混合で選択した赤色の方法ではステップ 10 から 15 に分布しており、ランダムに選択した場合よりも避難完了までの時間が短い。さらに、提案手法である選択方法 (5) はステップ 11 で避難が完了している場合が最も多く、選択方法 (4) ではステップ 13 で終了している場合が多い。これらは選択方法 (3) で最も早く避難したステップ 14 よりも早い。また、選択方法 (3), (4), (5) はすべてのシミュレーションで避難が完了しているが、選択方法 (1), (2) は全ノードの避難が完了しない場合もあった。避難が完了しない理由はシミュレーションの途中でいずれのノードも隣接ノードの避難率がしきい値 $x = 30\%$ に達することがなく、メッセージが伝搬されなくなる場合のためである。一度そのような膠着状態になると、多くのステップが経過しても避難を完了できない。本シミュレーションはステップ数の上限を 300 としており、その上限を超えて膠着状態になっていると考えられる。

率先避難者の割合 $l = 20$ は変更せず、周囲のノードが $x = 15\%$ 避難していれば自身も避難するとした場合について、各ステップで避難した対象者の相対度数を図 6 に、その累積を図 7 に示す。率先避難者の選択方法 (3) では、ステップ 11 から 17 で避難が完了している。また、選択方法 (5) ではステップ 7 から 12 に、選択方法 (4) ではステップ 8 から 15 に分布している。さらに、 $x = 30$ の結果と異なり、選択方法 (1), (2) の場合でも避難を完了できている。 $l = 20, x = 30$ の場合と比較すると、率先避難者の選択方法によるステップ数の差は縮まっている。また、いずれの率先避難者の選択方法を用いても、少ないステップ数で避難が完了している。

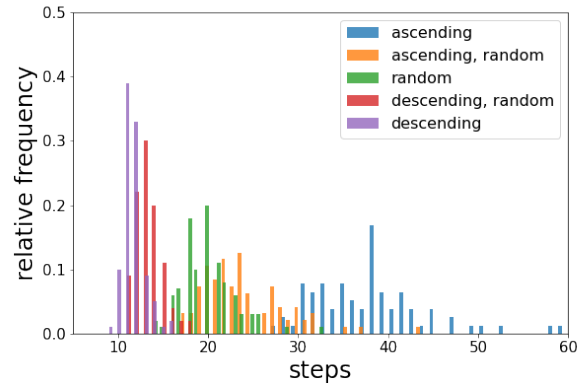


図 4 $l = 20, x = 30$ での相対度数

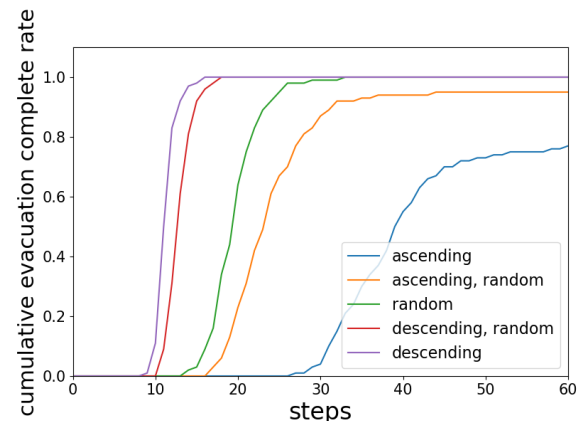


図 5 $l = 20, x = 30$ での累積相対度数

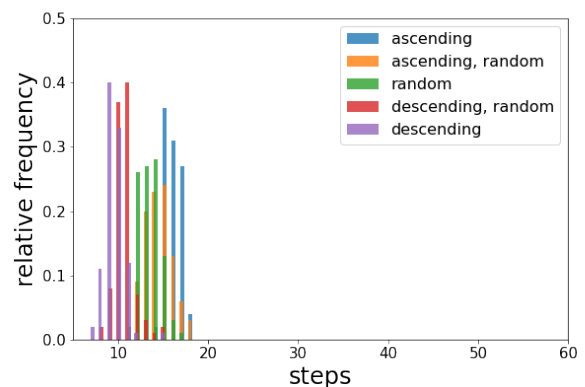


図 6 $l = 20, x = 15$ での相対度数

周囲のノードが $x = 30\%$ 避難していれば自身も避難するとし、率先避難者の割合を $l = 10$ と変更した場合について、各ステップで避難した対象者の相対度数を図 8 に示す。率先避難者の選択方法が (5) で、リンク数の多いノードから降順に 10% を選択した場合では、ステップ 15 程度で避難を完了している場合が多い。選択方法が (4) で、リンク数の多いノードから降順に 5% とランダムに 5% のノードを組み合わせた場合では、ステップ 18 程度で避難を完了している場合が多い。選択方法 (3) のランダムに 10%

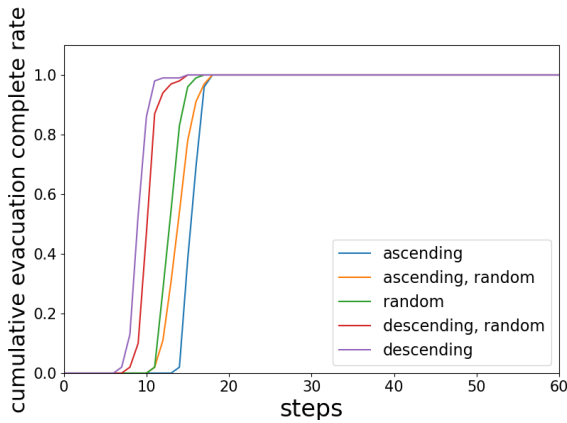


図 7 $l = 20, x = 15$ での累積相対度数

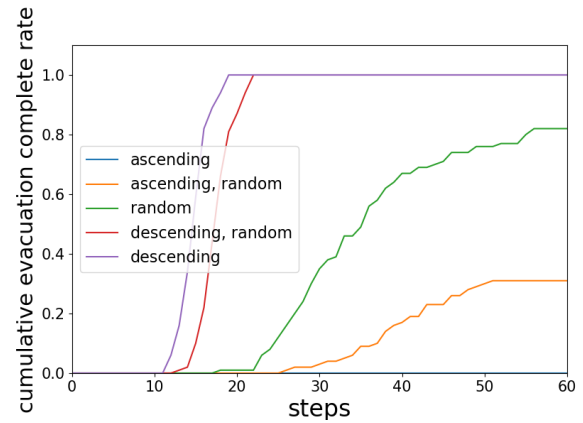


図 9 $l = 10, x = 30$ での累積相対度数

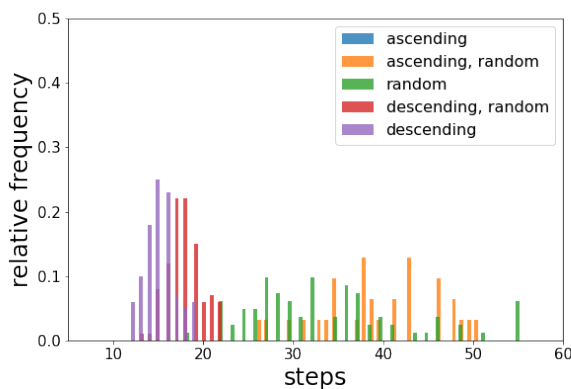


図 8 $l = 10, x = 30$ での相対度数

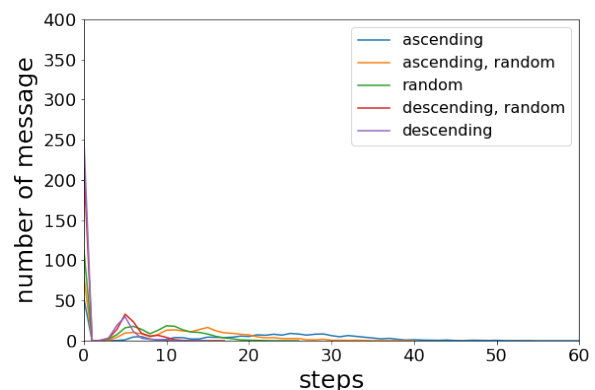


図 10 各ステップでのメッセージ数

を率先避難者として選択した場合では、ステップ 55 までに広く分布している。率先避難者の割合 l を 20% から 10% へ変更した場合でも、選択方法 (4) と (5) では $x = 30$ の場合と比較して、避難完了が全体的に 5 ステップ程度遅くなっている。選択方法 (1), (2), (3) では $l = 20, x = 30$ の場合と大きな差があり、多くのノードでステップ数が延びている。特に選択方法 (1) の場合ではすべてのシミュレーションにおいてステップ数の上限に達し、避難が完了していなかった。図 8 の結果の累積を図 9 に示す。選択方法 (4) と (5) については 100 回すべてのシミュレーションで、ステップ 22 程度で避難を完了している。一方、選択方法 (3), (4), (5) ではステップ 22 までで避難完了できている場合はほとんどない。また、選択方法 (3) の避難率の累積値は約 0.6、選択方法 (2) では約 0.3 にとどまっている。

4.3 メッセージ数に関する結果

ノードの避難時に各ステップで送信されるメッセージ数を図 10 に、累積メッセージ数を図 11 に示す。ノード数とシミュレーション回数は同様に 100 で、率先避難者割合は $l = 20$ 、ノードが避難状態に移移するための周囲の避難割合は $x = 30$ としている。図 10 ではステップごとに全

体のメッセージ数を計測し、図 11 ではその累積を示している。最初のステップの送信メッセージ数は率先避難者の選択方法によって異なっている。ステップ 0 から 5 程度まではメッセージがほとんど送信されていない。これはステップ 0 で率先避難者が同時に選択され、ほかの避難者へ情報が伝達されるまでに、平均 5 ステップの遅延を設定しているためである。ステップ 0 のメッセージ数は選択方法 (5), (4), (3), (2), (1) の順に多くなっている。縦軸の変化量についても、同様の順番になっている。また、最終的な累積メッセージ数についても、順位は途中のステップで変わらなかった。さらに、率先避難者の選択方法が (4) と (5) ではステップ 10 程度までメッセージの送信があり、累積の値は選択方法 (4) では約 100、選択方法 (5) では約 70 増加している。選択方法 (3) ではステップ 5 から 15 まで緩やかに増加し、最終的な累積メッセージ数は 250 となっている。選択方法 (2) については、最終的な累積メッセージ数は選択方法 (3) とほとんど等しいにもかかわらず、ノードの避難完了率は選択方法 (3) より低い。リンク数の少ないノードからの昇順の選択方法を率先避難者の決定に取り入れた場合、避難誘発の効率性は大きく下がる。

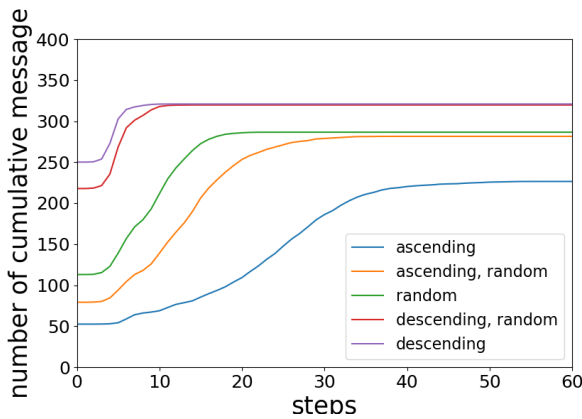


図 11 各ステップでの累積メッセージ数

5. 議論

本論文の提案手法ではソーシャルグラフに基づき、リンク数の多いノードに率先避難を依頼する。シミュレーションの結果から、率先避難者をランダムに選択した場合と比較して、提案手法では避難時間が大きく削減されている。率先避難者の割合 l やノードが避難する際のしきい値 x をそれぞれ変更した場合でもシミュレーションを行い、同様の傾向を示す結果が得られている。また、リンク数の少ないノードから降順とランダムの混合の場合、リンク数の少ないノードから降順のみを選択した場合と結果が近いことが多かった。本論文で比較した率先避難者の5つの選択手法においては避難時間の短い順から降順、降順とランダムの混合、ランダム、昇順とランダムの混合、昇順となっていた。また、率先避難者の割合が少ない場合やノードが避難する際のしきい値が高いほど、提案手法による避難時間の削減効果は大きくなっている。メッセージ数に関するシミュレーション結果では、率先避難者の選択方法によって、最初のステップ0のメッセージ数が大きく異なっている。また、その後の累積メッセージ数の変化量にも差がある。以上から、限りあるインセンティブを用いてなるべく早期に多くの対象者の避難を完了させたい場合、提案手法であるリンク数の多いノードから降順に選択することが有効である。また、リンク数の多いノードから降順とランダムの混合でも結果は大きく変わらないため、リンク数の多いノードの数が少ない場合は一部のノードをランダムに選択しても影響は小さいと考えられる。

本論文の提案手法では情報収集の容易性や実現可能性のため、各ノードのリンク数に基づいて率先避難の依頼候補を決定している。しかし、実際には人によってインセンティブが与える影響や相手との関係性が異なる。例えば、指定の避難先が遠方である場合や移動手段が限られている場合は移動の負担が大きいため、避難するための判断基準が高くなると考えられる。また、人間関係のつながりは強

さがそれぞれ異なり、避難情報の伝搬は一律ではない。実際の避難ではそれら要因も避難状況に関係するため、インセンティブが与える影響や避難開始の意思決定、リンク先との関係性などをパラメータとし、提案手法に反映することが今後考えられる。また、本論文では避難対象の地域や避難対象者の現在地を考慮していないが、声の届く範囲や視認できる範囲であれば、オンラインのコミュニケーションツール以上に率先避難者が周りの住民の避難を誘発できる。被害を受けやすい場所にいる人とそうでない場所にいる人でも、避難行動を取るかどうかの判断基準に差がある。そのため、避難対象の地域や対象者の現在地を提案手法で考慮することも今後考えられる。

6. まとめ

本研究では、ソーシャルグラフに基づく高速な率先避難誘発手法を提案した。提案手法ではソーシャルグラフに基づき、限られた報酬（インセンティブ）で、リンク数の多い避難対象者（ノード）に率先避難を依頼する。依頼された対象者は率先避難を行い、ほかの対象者の避難を誘発することで、より多くの対象者を早く避難させる。提案手法をシミュレーションにより評価し、率先避難者をランダムに選択した場合と比較して、避難時間が大きく削減されることを確認した。避難誘発のために送信されるメッセージ数も計測し、早い時間にメッセージが送信されることを確認した。

今後の課題として、実際には避難の判断基準やリンク先との関係性が個別に異なるため、それら要因の提案手法への反映が考えられる。また、本論文では避難対象の地域や避難対象者の現在地を考慮しておらず、それらの情報を提案手法で考慮することも考えられる。

謝辞 本研究の一部は G-7 奨学財団研究開発助成事業による成果である。

参考文献

- [1] 大石裕介, 古村孝志, 今村文彦, 三原宜輝, 牧野嶋文泰, 山下 啓, 東山孝生, 後藤知範, 大村 誠, 永山実幸: スマートフォンアプリによるリアルタイム災害情報を活用した津波避難の有効性と課題, 土木学会論文集 B2, Vol. 75, No. 2, pp. I.1381–I.1386 (2019).
- [2] 廣川雄一, 西川憲明, 山田武志, 印南潤二, 坂井隆志, 浅野俊幸: 土地鑑を考慮した徒歩経路探索モデルによる浸水避難シミュレーション, 情報処理学会論文誌数理モデル化と応用, Vol. 12, No. 1, pp. 11–22 (2019).
- [3] 榎本満帆, 峯岸良和, 森山修治, 長谷見雄二: 大規模地下街における空間形状と避難者の追従性を考慮した避難群集の出口到達・経路選択の要因分析とそのモデル化, 日本建築学会計画系論文集, Vol. 84, No. 756, pp. 299–309 (2019).
- [4] 和田友孝, 松本航輝, 大月一弘: 緊急救命避難支援システムにおける突発性災害時の通路混雑状況を考慮した避難誘導方式, 災害情報, Vol. 17, No. 2, pp. 179–190 (2019).
- [5] 三好哲也: 走査音を用いた積極的避難誘導システムにお

- ける走査方向定位特性, 知能と情報, Vol. 32, No. 5, pp. 891–896 (2020).
- [6] Rigos, A., Mohlin, E. and Ronchi, E.: The Cry Wolf Effect in Evacuation: A Game-Theoretic Approach, *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, Vol. 526, No. 120890 (2019).
- [7] 加藤 健: 体内警報システムの機能不全—非避難行動の心理的メカニズム, 災害情報, Vol. 8, pp. 42–54 (2010).
- [8] Wickens, C. D., Rice, S., Keller, D., Hutchins, S., Hughes, J. and Clayton, K.: False Alerts in Air Traffic Control Conflict Alerting System: Is There a “Cry Wolf” Effect?, *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, Vol. 51, No. 4, pp. 446–462 (2009).
- [9] Uchida, K.: A Model Evaluating Effect of Disaster Warning Issuance Conditions on “Cry Wolf Syndrome” in the Case of a Landslide, *European Journal of Operational Research*, Vol. 218, No. 2, pp. 530–537 (2012).
- [10] 藤村幸大, 藤見俊夫, 田中歩夢, Aulady, M. F. N.: VRを用いた率先避難者の有効性の検討, 土木学会論文集 D3, Vol. 75, No. 5, pp. I.61–I.68 (2019).
- [11] 熊谷兼太郎, 小野憲司: 率先避難者情報を津波避難トリガーとして活用する IoT 技術に関する一考察, 土木計画学研究・講演集, Vol. 55, pp. 1–6 (2017).
- [12] Urata, J. and Hato, E.: Dynamics of Local Interactions and Evacuation Behaviors in a Social Network, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 125, No. 103056, pp. 1–18 (2021).
- [13] 大向一輝: ソーシャルグラフ, 映像情報メディア学会誌, Vol. 65, No. 8, pp. 1161–1165 (2011).
- [14] Drobyshevskiy, M. and Turdakov, D.: Random Graph Modeling: A Survey of the Concepts, *ACM Computing Surveys*, Vol. 52, No. 6, pp. 1–36 (2019).
- [15] 小川 倫, 北上靖大: マルチエージェント・シミュレーション用ソフトウェア artisoc Cloud の紹介, オペレーションズ・リサーチ, Vol. 65, No. 4, pp. 206–211 (2020).
- [16] 株式会社構造計画研究所: artisoc Cloud. Available at <https://mas.kke.co.jp/artisoccloud/> (accessed Sept. 29, 2021).
- [17] 末木俊之: Artisoc による BA (Barabasi-Albert) モデルコミュニティ抽出, 駒沢女子大学研究紀要, Vol. 19, pp. 315–329 (2012).