

避難対象者間の関係性に基づく高速な率先避難誘発システム

福井大学 学術研究院工学系部門
准教授 川上 朋也

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が行われている[1, 2]。緊急事態においては自治体から早期かつ頻繁に避難指示が発令されている。また、被害を軽減するために早期に避難することが重要な課題となっている。しかし、自治体から早期かつ頻繁に避難指示を受けたとしても、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[3, 4]。「正常化の偏見」は正常性バイアスとも呼ばれており、異常な事態に直面していながらも自分は大丈夫だと思いつき、適切な対処を取ることができないというものである。「経験の逆機能」は、過去の災害の経験から今回も大丈夫だと思ってしまう心理のことである。また、「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というものである。これらの概念によって、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することができる。

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[5, 6]。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。先行研究として、この率先避難者を用いるとともに、社会的な関係をグラフにしたものであるソーシャルグラフ[7]に基づいて避難完了時間を削減する手法がある[8]。

そこで本研究では、先行研究[8]を拡張し、避難した際に周囲の対象者（つながっているノード）に送られるメッセージ数を地理的情報に基づいて削減する手法を提案する。ここでは、避難対象地域を設定してその地域内の対象者（ノード）のみを避難させる。 n ノード先に避難対象地域内のノードがある場合にも、避難対象地域外のノードが避難命令を中継することにより、避難完了時間の高速化やメッセージ数の削減を目指す。

2. 提案手法

既存手法の問題点として、避難対象地域や避難対象者の現在地を考慮していないという問題点があった。また、避難対象地域を設定したとすると避難対象地域内のノードが避難した際に（避難状態になったとき）周囲のつながっている未避難状態の全てのノードへ自身が避難したことを知らせるメッセージが送信されていた。しかし周囲のつながっている未避難状態の全てのノードへメッセージが送信されるため避難対象地域外のノードのような避難の必要のない対象者へメッセージが送られていた。そのため、冗長なメッセージが増えてしまうという問題点があった。

そこで本研究では、避難対象地域を設定した際に避難対象地域内のノードをより早く避難させることと、避難状態になったときに送られるメッセージ数を削減することを目的として、ソーシャルグラフを用いて避難完了時間を短縮する先行研究[8]を拡張し、避難した際に周囲の対象者（つながっているノード）に送られるメッセージ数を地理的情報に基づいて削減する手法を提案する。

2.1. 概要

率先避難者に対しての率先避難への報酬として、クーポンを一律に支払うことを考える。また率先避難者の選択方法は先行研究の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とする。

システム構成と流れを図1に示す。先行研究のシステム構成に避難対象地域を設定したものである。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率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。今回は率先避難者を、最も効果的であるリンク数の多いノードから降順に選択することとする。候補が決定した後、自治体は対象者である率先避難者へ率先避難を依頼する。自治体から依頼のあった率先避難者は率先避難を行い、避難対象地域内にいる未避難の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。情報の収集についてはプライバシーの問題などから詳細な情報を取得することは困難でありノードの接続状態や隣接しているノードの位置情報、リンクが単方向か双方向かなどの情報に限られることが考えられる。

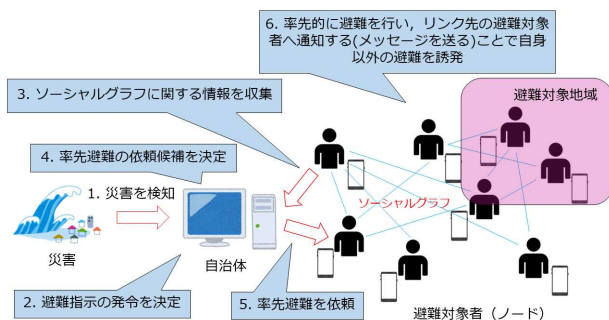


図 1：システム構成

2.2. 避難対象地域の設定

避難対象地域を設定した際のソーシャルグラフの例を図 2 に示す。もともとの避難の判断基準として各避難対象者（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。また、図 2 において赤色のノードが未避難状態のノードを、緑色が優先避難者のノードであることを表している。灰色の背景になっている範囲が避難対象地域内であることを表しており、避難対象となるノードは未避難状態である 5, 7, 8, 10 のノードである。ここで、優先避難者は避難対象地域に関係なく選択している。これは、優先避難者はリンク数の多いノードから選択しており、避難対象地域内外に関わらずリンク数の多いノードの方がより多くの対象者に避難命令を送ることができるためである。例えば、図 2 のようなソーシャルグラフにおいて $x = 30\%$ とし、ノード 10 を避難させるかどうかの場合、隣接しているノードの数は 3 つであり $3 \times 0.3 = 0.9$ であることから 1 つ以上のノードが避難状態である必要である。ここで、2 つのノードが避難状態であるため 10 のノードは避難することができる。

このように、もともとの避難手法のみで避難を進めることができればよいが、避難地域を設定した場合、避難地域内のノードしか避難しないため、避難対象地域外のノードが避難命令の中継を行わないとある一定の状態から避難率が上がらないような均衡状態になってしまう。ここで避難命令の中継するとはもともとの手法である周囲のノードの $x\%$ が避難を完了している場合に自ノードも避難するという条件を満たさない避難対象地域内のノードがあった場合、避難状態のノードと隣接している避難対象地域外のノードが避難命令を地域内のノードへ中継することにより対象

となるノードを避難させることを指す。例えば、図 2 において 5 のノードは隣接している避難状態のノードがないため 10 のノードが避難しない限り避難することができない。そこで地域外の 4 のノードが隣接している避難状態の 6 のノードから $6 \rightarrow 4 \rightarrow 5$ のように避難命令を中継することによって 5 のノードを避難させることができる。

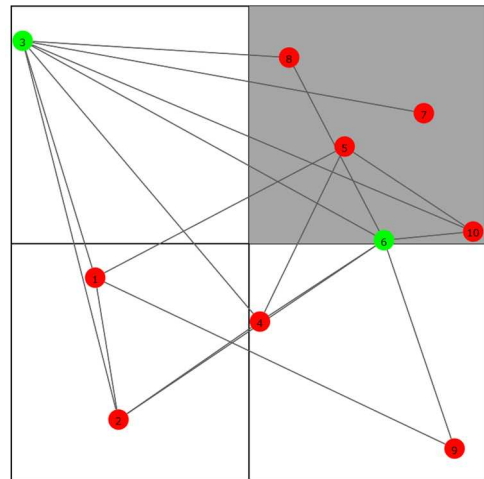


図 2：避難対象地域を設定したソーシャルグラフの例

2.3. メッセージ送信の削減

すべての避難対象地域外のノードが中継を行えば避難を完了するまでの時間は早くなるが、先でも述べた通り避難の必要のないノードにも自身が避難したことを知らせることによって冗長なメッセージ数が増えてしまう。

そこで、避難対象地域外のノードには基本的に避難命令を送らず、 n ノード先までに地域内のノードがある場合にのみ避難命令を中継する手法を提案する。図 2 を用いて説明する。メッセージはノードが避難済み状態に変わった際に隣接しているまだ避難していない状態のノードへ送信されるようになっている。そのため、優先避難者である 6 のノードが避難済み状態に切り替わった際、隣接している避難していないノードの 2, 4, 8, 9, 10 のノードへメッセージが送信されるので全部で送られるメッセージ数は 5 となる。しかし、2, 4, 9 のノードは避難対象地域外にあるため避難の必要のないノードであり、このままだと冗長なメッセージが増えてしまう。そこで提案手法である n ノード先までに地域内のノードがある場合にのみ避難命令を中継する手法を用いる。 $n=2$ と優先避難者である 6 のノードが避難済み状態に切り替わった場合で考える。まず、避難対象地域内にある 8, 10 のノードにはメッセージを送る。次に 2, 9 のノードを見てみると避難の必要なノードである避難対象地域内のノードとはつながっていないため、2, 9 のノードへはメッセージは送らな

い。最後に4のノードを見ると、避難対象地域内のノードである5のノードとつながっているため4のノードへはメッセージを送る。このようにすることによって送られるメッセージ数が5から3に削減できる。

3. 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。

3.1. 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` [9] を用いた。 `artisoc Cloud` はマルチエージェントシミュレーションのプラットフォームであり、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。図3は `artisoc Cloud` の実行画面である。環境構築などが必要なく `Web` ブラウザ上で編集、コンパイル、実行することができる。また、プログラムの継承が容易にできるためモデルの変更が比較的行きやすい。プログラミング言語としては `Python` が採用されている。あらかじめシミュレーション上のエージェントを操作するための関数も複数用意されている。

`artisoc Cloud` では最初にエージェントを動かすための空間を設定する。空間には連続空間と四角格子空間の2種類がある。連続空間ではエージェントの座標は実数をとるが四角格子空間では整数のみしかとらない。チェスやオセロなどのフィールドに罫線を引かれているものをシミュレーションする場合、エージェントは罫線の中に正しく配置されなければならない。このようなときは整数しかとらない四角格子空間を設定するべきである。本研究は避難に関するシミュレーションであり、細かな座標設定が必要である。また、エージェントは動くことを想定していないため今回は連続空間を用いることとする。次に、空間上で動作するエージェントを設定する。エージェントはその動作ごとに複数設定することができるが本研究においては避難対象者にあたる `point` のみである。

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グラフであるバラバシ・アルバート (`Barabasi-Albert`) モデル[10]を用いて生成した。

本シミュレーションでは評価指標として、避難対象地域内の全ノードが避難を完了するまでのステップ数を避難完了時間として評価を行った。また、率先避難者や避難対象地域内のノードが避難した際に自身が避難したことを知らせるために各ステップで送信されるメッセージ数の累積

で評価を行った。これら2つの評価は、次の4通りの手法を比較することにより、評価を行うこととした。

シミュレーションの条件設定は表1とした。全体のノード数を100個、率先避難者の割合を10, 20%とした。20%の場合、ノード20個が率先避難者となる。またその率先避難者の選択方法はつながっているノードの数であるリンク数が多いノードから降順に選択する。つながっている周囲のノードが何%避難していたら避難するかは15, 30%とした。これは、つながっているノードが3つあったときその内の1つのノードが避難していた場合、 $1/3 = 0.333... = 33\%$ となり30%の場合は避難することができる。また、シミュレーションを終了するときの避難完了割合を100%、つまり避難対象地域内のすべてのノードが避難を完了したときにシミュレーションを終了する。ソーシャルグラフ作成から避難するまでのシミュレーションの回数を100回繰り返した。また、シミュレーション領域を x, y 座標で $0 \sim 50$ とし、避難対象地域をその4分の1の範囲である x, y 座標で $25 \sim 50$ とした。

こ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。また初期に生成されたノードのリンク数が多くなる傾向にある。ノード数を100としてアルゴリズムを用いて作成したソーシャルグラフの例を図4に示す。

表1：シミュレーション環境

項目	値
ノード数	100
率先避難者の割合 l	10, 20%
率先避難者の選択方法	リンク数の降順
避難決定時の周囲の	15, 30%
避難完了率 x	
シミュレーション終了時の	100%
避難完了割合	
シミュレーション回数	100
シミュレーション領域	$0 \leq x, y \leq 50$
避難対象地域	$25 \leq x, y \leq 50$

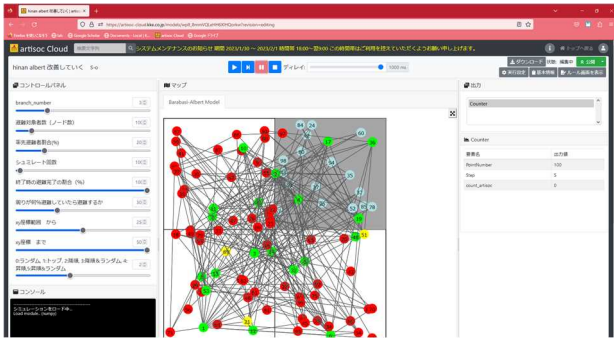


図 3 : artisoc Cloud の実行画面

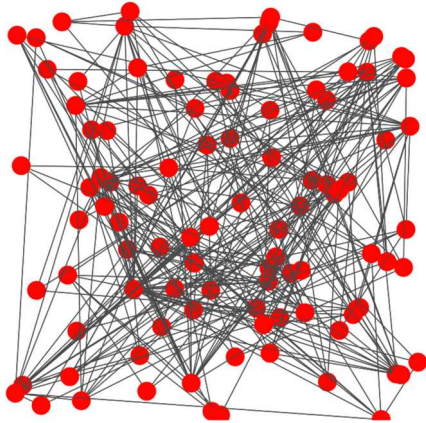


図 4 : 作成したソーシャルグラフの例

3.2. 避難完了時間

避難対象地域内の全ノードが避難を完了するまでのステップ数である避難完了時間（経過時間による避難完了率）の結果を図 5～8 に示す．横軸はステップ数（シミュレーション内の時間），縦軸は避難が完了した対象者の累積値の割合を表している．また，いずれのグラフにおいても， $n=2$ の場合の提案手法(1)を青色， $n=3$ の場合の提案手法(2)をオレンジ色，避難対象地域外のノードがすべて中継する手法(3)を緑色，避難対象地域外のノードが全く中継を行わない手法(4)を赤色で示している．

パラメータ x を変化させた場合， x の割合を増やせば増やすほど中継しない場合において避難完了率が減少していることがわかる．これは周りのノードの避難率が増えずに自身も避難できないような均衡状態により早い段階で陥っている．すべて中継する場合は避難完了数までのステップ数についてはほぼ変化がないが，避難を開始してから避難率の増え方が x の割合を増やせば増やすほどあるステップが経過するまでなだらかになっている．

率先避難者の割合を低くすると全体的に避難を完了するまでのステップ数が多くなることがわかる．また，中継しない場合においては $x=15, 30\%$ のどちらの場合も大幅に避難完了率が減少している．しかし，提案手法においては避難完了するまでのステップ数はほぼ変化していない．また

どのグラフにおいても提案手法は他の手法と比べて避難完了時間が早い．

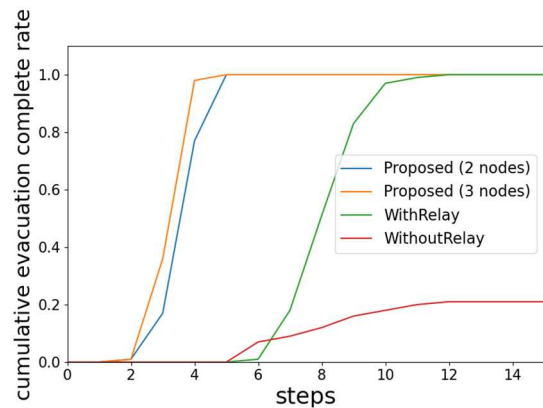


図 5 : $x = 15\%$, $l = 10\%$ での避難完了率

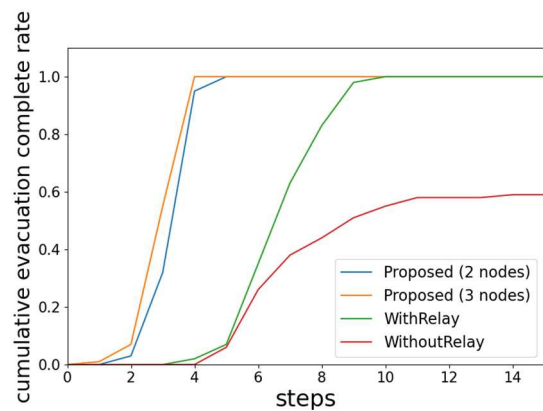


図 6 : $x = 15\%$, $l = 20\%$ での避難完了率

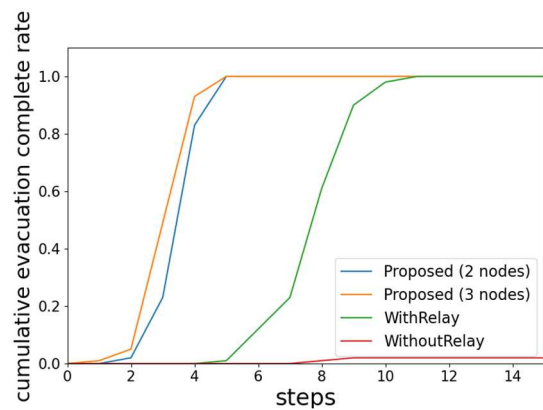


図 7 : $x = 30\%$, $l = 10\%$ での避難完了率

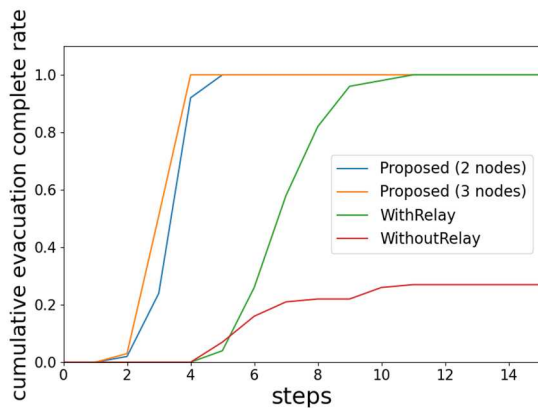


図 8 : $x = 30\%$, $l = 20\%$ での避難完了率

3.3. メッセージ数

率先避難者や避難対象地域内のノードが避難した際に自身が避難したことを知らせるために各ステップで送信されるメッセージ数の累積の結果を図 9~12 に示す。横軸はステップ数（シミュレーション内の時間）、縦軸は各ステップで送信された避難メッセージ数の累積を表している。今回、(3)(4)の手法は隣接しているノードのみの情報しか持たないことを想定している。この情報というのはプライバシーの問題があるため、避難しているかどうかと位置情報のみを知っていることとしている。そのため、避難状態に変わった際に隣接している未避難状態のノードへ送られるメッセージはつながっているノードに避難対象のノードがあるかどうかに関わらず送信することとする。また、(1)(2)の場合は n ノード先までの情報を持つことを想定している。そのため、送られるメッセージは提案し手法の通り、 n ノード先までに避難の対象となるノードがある場合のみメッセージが送られることとする。

パラメータ x を変化させた場合においては、どのグラフにおいてもあまり変化がないといえる。これはこのパラメータがメッセージ数にあまり関係していないことを指す。

率先避難者の割合 l を低くすると全体的にステップ 0 でのメッセージ数が少なくなっていると言える。図 9, 10 を見ると、特に中継を行わない手法(4)と $n=3$ の場合の提案手法(2)では他の手法に比べてステップ 0 でのメッセージ数が少なくなっていることがわかる。しかし、 x の値を変えずに l の値のみ変えた場合、 $l=20\%$ のときに比べて $l=10\%$ のほうが中継を行わない手法(4)において最終的なメッセージ数が多くなっている。これは、率先避難者を避難状態に切り替えた際に送られるメッセージはステップ 0 で送られるため、率先避難者の人数を減らした場合、相対的にメッセージ数は減少する。また、率先避難者の人数を減らすと、避難対象地域外の未避難状態のノードや避難対象地域内の未避難状態のノードが相対的に

増えるため、その影響で最終的なメッセージ数が増えていると考えられる。

また、提案手法(1)(2)を比較すると、経過時間による避難完了率においては $n=3$ の場合の提案手法(2)のほうが $n=2$ の場合の提案手法(1)よりも早く避難完了している。一方、メッセージ数においては $n=2$ の場合の提案手法(1)のほうが $n=3$ の場合の提案手法(2)よりも削減できている。このように、(1)(2)の手法はトレード・オフの関係にあるが、本研究はメッセージ数の削減を目的としていることや、避難完了までの時間にほぼ大差がないことから、 $n=2$ の場合の提案手法(1)のほうが良い結果といえる。

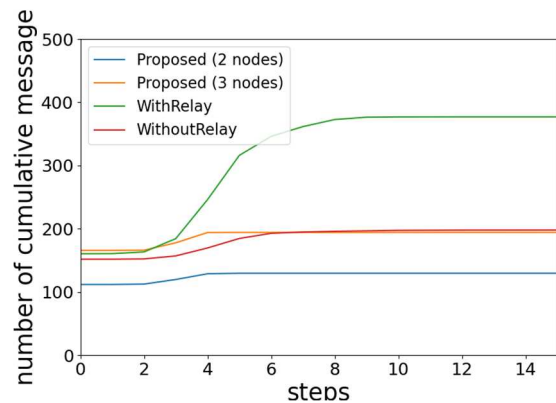


図 9 : $x = 15\%$, $l = 10\%$ での累積メッセージ数

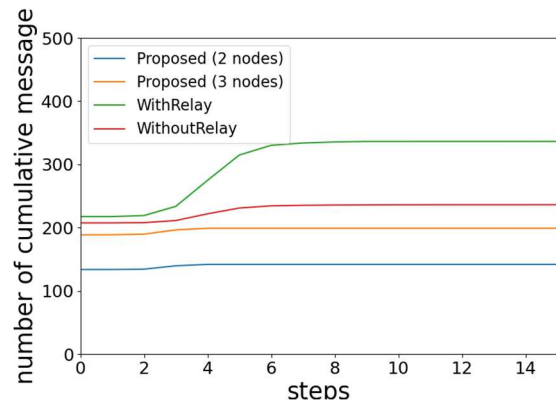


図 10 : $x = 15\%$, $l = 20\%$ での累積メッセージ数

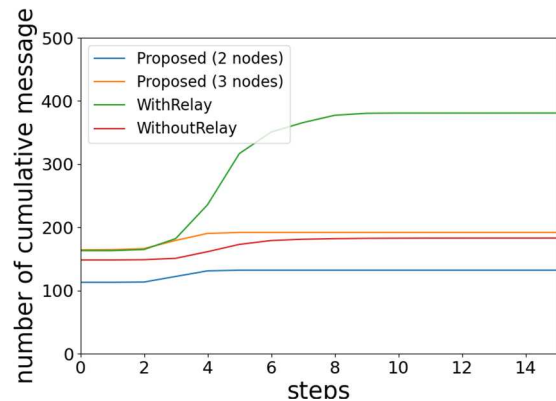


図 11 : $x = 30\%$, $l = 10\%$ での累積メッセージ数

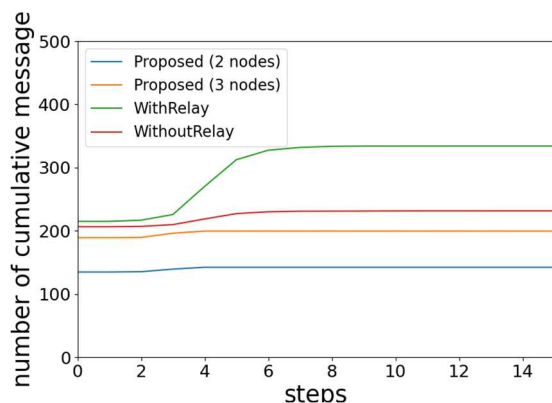


図 12 : $x = 30\%$, $l = 20\%$ での累積メッセージ数

4. 成果

本事業に関係する主な成果として、オープンアクセスの英文論文誌で1件、国内研究会で1件の論文を発表した。IEEEが主催する国際会議への論文投稿も現在準備中である。

- (1) Taiyo Ichinose and Tomoya Kawakami: An Induction Scheme of Fast Initiative-Evacuation Based on Social Graphs, *Journal of Information Processing Systems*, Vol. 18, No. 6, KIPS, pp. 770-783 (Dec. 2022).
- (2) 岡本 宙, 川上朋也: ソーシャルグラフを用いた率先避難誘発における地理的情報に基づくメッセージ削減手法の検討, 情報処理学会研究報告, Vol. 2023-DPS-194, No. 53, pp. 1-8 (Mar. 2023).

5. 今後の展望

今後の展望として、避難対象者の実際の地域や現在地を考慮することや、ソーシャルグラフ間における関係性を表すリンクの重みを考慮することが挙げられる。ここでの関係性とは関係値の深さによってリンクに個別に重みを加える事が考えられる。

謝辞

本研究は一般社団法人北陸地域づくり協会の助成を受けて実施した。ここに謝意を表す。

参考文献

- [1] 大石裕介ほか: 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] 和田友孝ほか: 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).
- [3] A. Rigos *et al.*: The Cry Wolf Effect in Evacuation: A Game-Theoretic Approach, *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, Vol. 526, No. 120890 (2019).

- [4] 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).
- [5] 藤村幸大ほか: 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).
- [6] 熊谷兼太郎ほか: 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).
- [7] 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).
- [8] 一瀬太陽, 川上朋也: 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, 情報処理学会研究報告, Vol. 2021-DPS-189, No. 3, pp. 1-8 (2021).
- [9] 小川 倫ほか: 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).
- [10] 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).