率先避難による避難誘発システムの広域大規模環境での評価

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．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．被害を軽減するため，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[1-3].

現在，行政のウェブサイトやSNSなど，多くのオンラインサービスが防災に活用されている．また，災害時には，多くの人がこれらのサービスを通じて情報を入手し，提供することが予想される．筆者らが想定するシナリオでは，避難を決断する際に，他人の避難は重要な要因の一つである．例えば，ある家族は，親しい友人の家族が避難している様子をSNSに投稿することで，避難を決意する．オオカミ少年効果を防ぎ，全体の避難時間を早めるため，周囲に声をかけながら率先して避難を行う「率先避難」が有効である[4-6] ．率先避難を行う人は「率先避難者」と呼ばれる．

筆者らの先行研究[7]では，率先避難を活用した関連研究[8]を拡張し，地理的情報に基づいて避難時に周囲の対象（接続しているノード）に送信するメッセージ数を削減する手法を提案していた．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のみ，避難対象地域外のノードが避難状況を中継することにより，避難完了時間を維持しつつ，メッセージ数の削減を目指していた．しかし，現実の広域大規模な環境では避難対象者間に個別の関係性がある一方，先行研究[7]では避難対象者間の関係性がすべて同じ環境で提案手法を評価していた．

そこで本研究では，現実的な避難対象者間の関係性を考慮した場合に，先行研究で実現できていた避難完了時間を維持しつつ，メッセージ数を削減できるかを検証する．また，先行研究[7]の課題として，避難対象者の実際の地域や現在地を考慮していない点もあった．先行研究では，シミュレーションのフィールド上に，人々が均等に広がるようにランダムにノードを配置していた．実際の広域大規模な環境では，人々が均等に広がっていることは考えられず，都市部に人々が集中し，山間部にまばらに人が存在しているということが考えられる．そこで本研究では，ノードの配置の偏りの有無によって，避難完了率が変化するかどうかや，複数の避難対象地域を設定した際に，地域間で避難完了率や避難完了時間に差が生じるかどうかも評価する．

2. 提案手法

先行研究[7]では，社会的な関係性を表すソーシャルグラフ[9]を用いて避難完了時間を維持しつつ，避難におけ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していた．しかし，ソーシャルグラフ間のリンクの重みを考慮しておらず，現実の広域大規模な環境で存在する避難対象者間の関係性を無視していた．そこで，本研究では避難対象地域間の関係性を考慮するためにソーシャルグラフ間に個別の重みを追加することで従来手法を改善する．

2.1. 概要

今回想定する避難システムは先行研究で用いたシステム構成と同様のものである．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，察知された情報を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，自治体は何らかの報酬（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．本研究では，避難者の端末にリアルタイムの災害情報を受け取れる SNS アプリケーションがインストールされていることを前提とする．災害発生直後，自治体が避難者間のソーシャルグラフ情報を収集できる環境が整備されていると仮定している．さらに，SNS アプリケーションの分析ツールを利用して，リンク数（例として SNS のフォロワー数）を取得することで，率先避難者を選択する方法を採用する．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．全員の位置情報を共有する必要はなく，隣接ノード間のみで位置情報を把握する仕組みがあれば十分である．自治体は避難警告を発する際に全住民の位置情報を知る必要はない．また，避難状況を中継するか否かの判断は自治体が行う．この避難状況の共有により，心理的な要因で避難が妨げられる事態を防ぐことができるため，個別の位置情報の把握は不要である．

率先避難者や避難者は避難を開始すると，まだ避難していない避難対象地域内の隣接ノードに避難状況を知らせるメッセージを送信する．本研究では，率先避難者を含む避難者がメッセージを送信する際に，つながっている避難者ごとに各メッセージの送信を確認するような能動的な方法を想定せず，避難者が避難を決定する際にボタンを押すなどの操作を行うことで，全対象に一斉にメッセージが送信されることを想定する．

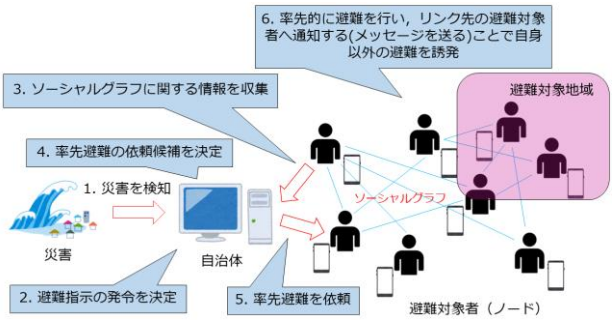

図 1：システム構成

2.2. リンクの重みの設定

先行研究[7]では，ソーシャルグラフ間のリンクの重みを考慮しておらず，知り合いと比べて家族からのメッセージの方が避難に前向きになるなどの避難者間の関係性を考えていなかった．このように，リンクの重みを実装することで，より現実的なシナリオを再現可能になる．

本研究では，Zipf 分布を用いて，リンクの重みを追加することとする．一部のリンクのみが高い信頼度が割り当てられ，大多数のリンクについては低い信頼度を割り当てられる分布である．この性質を持つ Zipf の法則は SNS での人々の関係性を表すのに適している．これは，SNS において，一部のユーザーは非常に多くのフォロワーや友人を持つが，大多数のユーザーは比較的少ないフォロワーや友人しか持たないという特徴に類似しているためである．例えば，X（旧 Twitter）のような SNS では，一部の有名人（芸能人や企業アカウントなど）は何百万ものフォロワーを持つが，大多数の一般ユーザーは数十～数百のフォロワーしか持たない．このように，SNS のような大規模なネットワークデータの特徴を表現するのに，Zipf の法則は直感的かつ統計的に有用であることが知られている．リンクの重みは非対称に設定しており，避難対象者 A から避難対象者 B への信頼度と，避難対象者 B から避難対象者 A への信頼度は異なる値を持つようにした．

また，避難者間の関係性をより現実的に表すため，負の二項分布を用いてメッセージを送受信する避難者間の距離によって信頼度を変化させた．この設定の背景には，職場や学校，家族，近隣住民といった物理的に近い人々同士が日常的に関わることが多いという社会的な特性がある．また，負の二項分布を用いた理由として，距離による避難者間の関係性の変化が単純な線形ではなく，一定の距離を超えると急激に変化する特徴を考慮した点が挙げられる．

2.3. メッセージ送信の削減

先行研究では既存手法の避難対象ノードと隣接しているノードのうち x%が避難していたら避難することができるようにしていた．また，n ノード先までの避難地域内に避難対象ノードが存在する場合に限り，地域外のノードにメッセージを送信し，対象エリア内のノードにメッセージを中継する手法を提案した．そして，本研究では，避難者間の関係性を考慮するためにリンクの重みを追加する．次に示す信頼度の計算方法で計算した信頼度が重みのしきい値 *ratio_others* を超えた場合に避難を行う．

重みの計算方法は，避難対象のノードを i とすると，

(1) 隣接しているノード p が避難している場合ノード p からノード i への重みを加算

(2) n ノード先のノード q が避難している場合ノード q からノード i までに経由したノードまでの重みの平均を求め，その値を 2 で割った値の重みを加算
例：$n = 2$ の場合 $(i \leftarrow p \leftarrow q)$
$((q \rightarrow p$ の重み $+ p \rightarrow i$ の重み $/ 2) / 2$

3. 評価

本研究では，重みを考慮した提案手法をシミュレーションにより評価する．

3.1. 評価指標

本研究のシミュレーションには artisoc Cloud[10]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．

本シミュレーションでは評価指標として，先行研究[7]と同様の指標を用いる．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，評価を行った．

(1) $n = 2$ ノード先までに避難地域内のノードがある場合にのみメッセージを中継する手法（提案手法）
(2) $n = 3$ ノード先までに避難地域内のノードがある場合にのみメッセージを中継する手法（提案手法）
(3) 避難地域外のノードが地域内のノードに避難命令をすべて中継する手法（WithRelay）
(4) 避難地域外のノードが地域内のノードに避難命令を中継しない手法（WithoutRelay)

これらの指標を用いて，本研究ではソーシャルグラフ間の重みを追加した場合に，先行研究で実現できていた避難完了時間を維持しつつ，メッセージ数を削減できるかどうかを検証する．

3.2. シミュレーション環境

シミュレーションの環境を表 1 に示す．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どの程度避難すればそのノードも避難するかは 15, 30, 50%とした．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 回繰り返すこととする．また，シミュレーション領域を x, y 座標で 0～50 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 25～50 とした．

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	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避難完了率 x	30%
シミュレーション終了時の避難完了割合	100%
シミュレーション回数	100
シミュレーション領域	$0 \leqq x, y \leqq 50$
避難対象地域	$25 \leqq x, y \leqq 50$
重みのしきい値 *ratio_others*	0.0001
ガウス分布の x 座標の平均	35
ガウス分布の y 座標の平均	15
ガウス分布の標準偏差 σ	10, 15, 20

3.2. 避難完了率と避難完了時間

本研究における避難完了の定義は，以下のいずれかの基準を満たした時点で避難が完了したとみなすものである．一つは，従来の方法に基づき，周囲のノードの x%が避難した時点で避難が完了するという基準であり，もう一つは，先行研究で提案した方法に基づき，既に避難した人物（ノード）から n ノード先に避難対象が存在し，つながっているリンクのすべての重みの合計が重みのしきい値 *ratio_others* を超えた場合のみ避難状況を知らせるメッセージが送信され，そのメッセージを受け取った時点で避難が完了するという基準である．避難は，いずれかの基準を満たした時点で完了したと判断される．本研究では移動を前提としていないが，避難にかかる時間はメッセージ送信の遅延として含まれている．そのため，シミュレーション内では移動が発生しなくても，避難が開始されてから数ステップ（シミュレーション内の時間）が経過した時点で避難が完了すると仮定する．

ソーシャルグラフ間の重みを追加した場合に，先行研究で実現できていた避難完了時間を維持しつつ，メッセージ数を削減できるかどうかを検証するために，リンクの重み無しの場合と，重みありの場合を比較する．また，重みありの場合の避難を判断する重みのしきい値 *ratio_others* を 0.0001 として比較した．

経過時間による避難完了率の結果を図 2, 3 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．つまり，縦軸の値が 1.0 になったら，避難対象地域内のノードがすべて避難したといえる．また，いずれのグラフにおいても，$n = 3$ の場合の提案手法(1)を青色，$n = 2$ 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．

提案手法においてどちらの場合も，同様に素早く累積の避難完了率が上昇し避難完了ができている．また，10 ステップ以内には避難対象地域のすべてのノードが避難できていることがわかる．このことから，先行研究で実現できていた避難完了率がリンクの重み（避難対象者感の関係性）を考慮した場合においても維持できている．

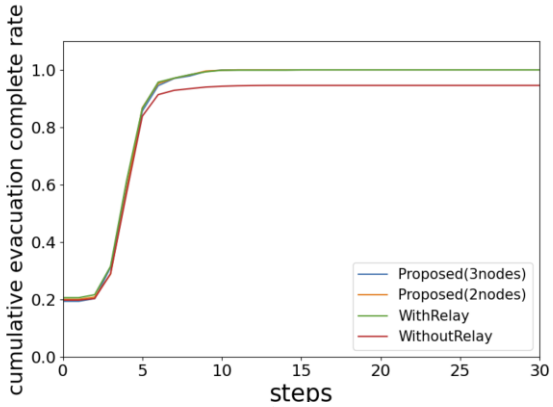

図 2：リンクの重みを考慮しない場合の経過時間（ステップ）による避難完了率

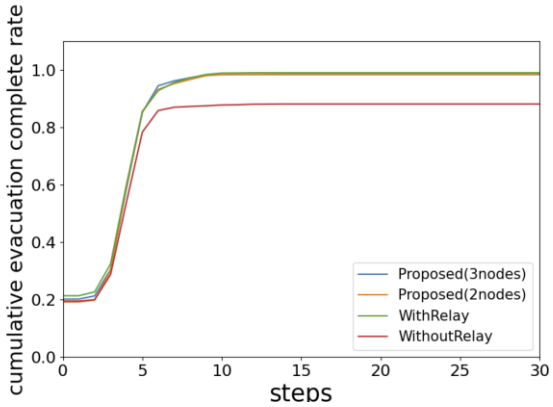

図 3：重みのしきい値 *ratio_others* = 0.0001 の場合の経過時間（ステップ）による避難完了率

3.3. メッセージ数

メッセージは，率先避難者も含め，避難を完了した避難者から，自身の避難状況を周りに知らせるために送信される．このメッセージを送信することにより，避難を促し，避難を始めるきっかけとなる．

今回の比較する手法の 4 通りすべてで，隣接するノードに関する情報のみが利用可能であることを想定する．これは，プライバシー保護の観点から，ノードが避難中であるか否かという状態とその位置情報に限定されるためである．そのため，接続先のノードに避難対象が存在するかどうかに関わらず，避難状態に変化した際には隣接する未避難ノードにメッセージが送信される．また，一度 A から B のノードへ送られたメッセージは重複してメッセージを送らないこととする．

提案する手法(1)および(2)では，避難対象地域において，避難者が避難を開始すると，その避難状況を知らせるメッセージが提案手法と同様に，*n* ノード先までに避難対象ノードが存在する場合にのみメッセージが送信される．この際，避難を開始したノードから未避難状態のノードへの複数の経路が存在する場合，すべての経路を通じてメッセージが送信される仕組みとなっている．これは，各ノードが自身の隣接ノード以外のノードとの接続状況を把握できないためである．また，メッセージの信頼度を考慮しているためでもある．本研究では，このメッセージに遅延が生じることを考慮し，複数の経路の中で最小の遅延時間（ステップ数）が経過した後に，避難を完了したノードから避難対象地域内の未避難のノードに同時にメッセージが送信されることを想定している．

メッセージ数の累積の結果を図 4, 5 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．

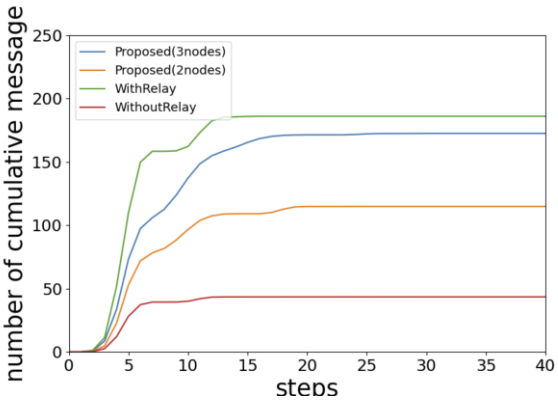

図 4：リンクの重みを考慮しない場合の各ステップで送られたメッセージ数の累積

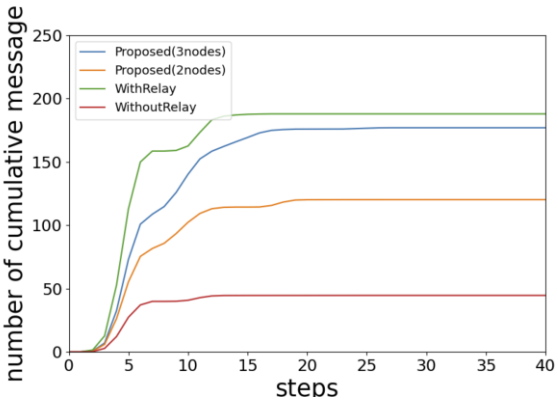

図 5：重みのしきい値 *ratio_others* = 0.0001 の場合の各ステップで送られたメッセージ数の累積

3.4. ノードの配置の偏りによる避難への影響

先行研究[7]の課題として，避難対象者の実際の地域や現在地を考慮していない点があった．先行研究では，シミュレーションのフィールド上に，ノードが均等に広がるようにランダムにノードを配置していた．実際の広域大規模な環境では，人々が均等に広がっていることは考えられず，日常生活では都市部に人々が集中し，山間部にまばらに人が存在することが考えられる．そこで，ノードの配置に偏りのあるソーシャルグラフを作成し，偏りの有無によって，避難完了率が変化するかどうかや，複数の避難対象地域を設定した際に，地域間で避難率や避難完了時間に差が生じるかどうかを評価する．また，左上に山間部があり，人々がまばらに存在することを本研究では想定する．今回は，ソーシャルグラフの偏りがあった場合に避難完了率が影響するかどうかを簡単に調査するため，ソーシャルグラフ作成時に左上から右下へ徐々に人の数が多くなるように配置した．ノードの配置は，正規分布（ガウス分布）を用いて配置を行った．

まず，$n = 2$ の場合の提案手法(1)と比較手法(3)において，標準偏差 $\sigma = 15$ とした場合の領域ごとの避難完了率の結果を図 6, 7 に示す．図 6, 7 は 50×50 のフィールドでの避難対象地域ごとの対象ノードの避難完了率の平均をヒートマップで表している．図の右側で各領域の避難完了率の値を表示している．また，データの中心となる x 座標の平均 $\mu = 35$，y 座標の平均 $\mu = 15$ の点を各図に黒点でプロットした．

提案手法(1)と，比較手法(3)を比較すると，提案手法は全体的に避難完了率が高くなっている．すべてのグラフにおいて左側から右側の領域にいくにつれて避難完了率が高くなっている．これは，距離によって信頼度を変化させているため，ノードの密度が高くなる右側のほうが避難しやすくなっていると考えられる．また，特に左側の領域 0, 1 の避難完了率が改善できている．よって，提案手法は孤立した避難者がいた場合の避難の改善が期待できる．

次に，$n = 2$ の場合の提案手法(1)と比較手法(3)において，標準偏差 $\sigma = 15$ とした場合の避難ステップ数の結果を図 8, 9 に示す．図 8, 9 は 50×50 のフィールドでの避難対象地域ごとの避難にかかるステップ数の平均をヒートマップで表している．図の右側で各領域の避難ステップ数の値を表示している．また，避難対象地域の中で，信頼度が重みのしきい値を超えず避難を行わないノードがあった場合，避難ステップ数を 20 とするようにした．

提案手法(1)と比較手法(3)を比較すると，提案手法は全体的に避難ステップ数が減少している．これは，提案手法の避難完了率が高くなっており，避難を行わないノードのペナルティが少なくなっているためであると考えられる．

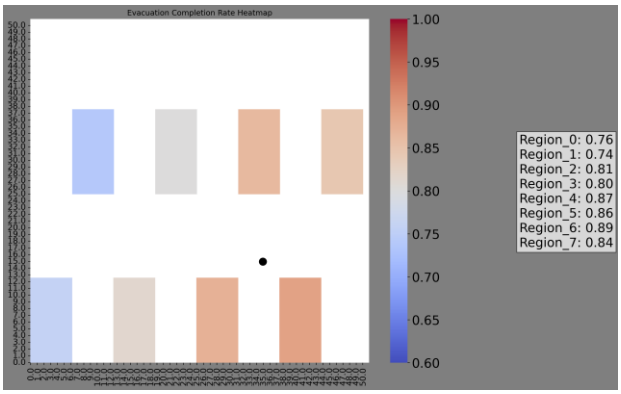

図 6：提案手法(1)，標準偏差 $\sigma = 15$ の場合の避難完了率

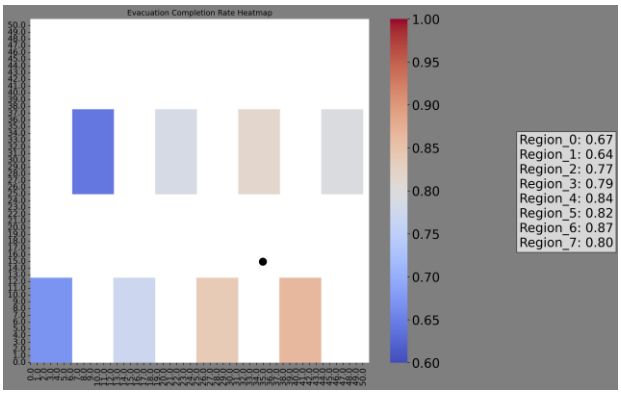

図 7：比較手法(3)，標準偏差 $\sigma = 15$ の場合の避難完了率

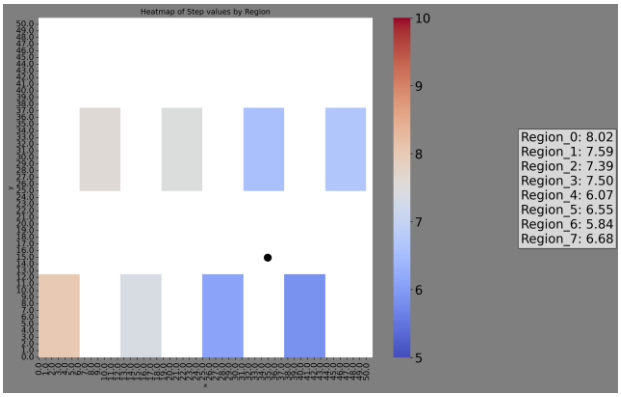

図 8：提案手法(1)，標準偏差 $\sigma = 15$ の場合の避難ステップ数

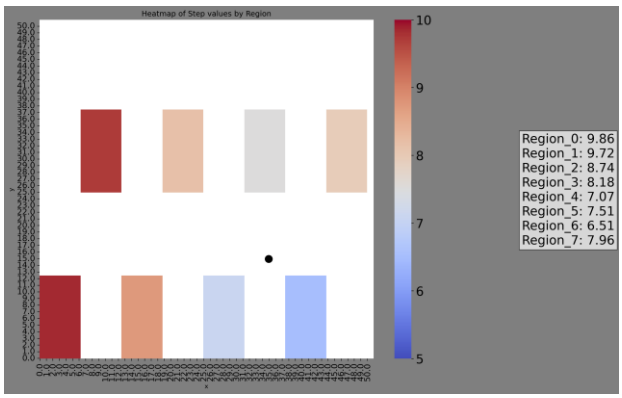

図 9：比較手法(3)，標準偏差 $\sigma = 15$ の場合の避難ステップ数

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，IEEE が主催する国際会議，国内学会の全国大会でそれぞれ 1 件の論文を発表した．

(1) S. Okamoto and T. Kawakami: A Message Reduction Scheme Based on Geographical Information in Initiative-Evacuation Induction Using Social Graphs, *Journal of Information Processing*, Vol. 32, IPSJ, pp. 1023-1032 (Nov. 2024).

(2) Y. Maeda, T. Kawakami, and Y. Watashiba: A High-Reliability and Low-Load Data Delivery Method in Distributed MQTT Broker Infrastructures, *Proc. IEEE ICCT-Pacific 2025*, Poster, 4 pages (Mar. 2025).

(3) 前田賢克，川上朋也，渡場康弘：分散 MQTT ブローカー基盤におけるデータ配信手法のテストベッドでの評価，情報処理学会第 87 回全国大会論文集，2ZB-05，2 pages (Mar. 2025).

5. 今後の展望

今後の展望として，実際の地域の人々の密度など，具体的な値を反映することが挙げられる．また，避難が進まない地域に率先避難者を優先的に配置することで，速やかな避難を促すことなども考えられる．

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] 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).

[2] 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).

[3] C. D. Wickens *et al.*: 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).

[4] 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).

[5] 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).

[6] J. Urata *et al.*: 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).

[7] S. Okamoto and T. Kawakami: A Message Reduction Method Based on Geographical Information in Initiative-Evacuation Induction Using Social Graphs, *Proc. IEEE COMPSAC 2023 Workshops*, pp. 1266-1271 (2023).

[8] T. Ichinose and T. Kawakami: An Induction Scheme of Fast Initiative-Evacuation Based on Social Graphs, *Journal of Information Processing Systems*, Vol. 18, No. 6, pp. 770-783 (2022).

[9] 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).

[10] 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).