

要救助者に関する被災情報が災害救助活動に与える影響の検証

Verification of the effect of damage information on disaster victims in need of rescue on disaster relief activities

○浅野 航輝^{*1}, 山邊 友一郎^{*2}

Koki ASANO^{*1} and Yuichiro YAMABE^{*2}

^{*1} 神戸大学大学院工学研究科 大学院生

Graduate Student, Graduate School of Engineering, Kobe University

^{*2} 神戸大学大学院工学研究科 准教授 博士（工学）

Association Professor, Graduate School of Engineering, Kobe University, Dr. Eng.

Summary: In recent years, after such massive earthquakes as the Great Hanshin-Awaji Earthquake and the Great East Japan Earthquake, it has become clear that disaster prevention in advance is not sufficient to limit the damage caused by disasters, and the importance of rescue activities after an earthquake has occurred has increased. The acquisition of disaster information plays an important role in post-disaster rescue activities. However, after an earthquake, it is difficult to gather useful information due to the intricacy of various types of information. In addition, it is not clear what kind of information is useful for rescue activities. In this study, a multi-agent system is used to predict earthquake damage in a virtual city, and rescue operations are simulated using the information available to rescue teams as parameters. The purpose of this study is to clarify the influence of information about people in need of rescue on the rescue activities of rescue teams.

キーワード: マルチエージェントシステム; 災害救助; 救助隊; 被災情報

Keywords: Multi Agent System; simulation; disaster relief; rescue team; damage information.

1. はじめに

地震による被害拡大を防ぐ方法として、災害発生より事前に行っておく防災と地震発生後に行う活動がある。後者は実際に地震が発生した際のその対応策に着目しており、地震発生と同時に、地震動の分布を把握し被害の程度を迅速に推測して、被害を最小限に抑えるために、救助活動の初動体制の確立・緊急対応を行うものである。近年、阪神淡路大震災や東日本大震災といった巨大地震が発生し、事前の防災だけでは災害による被害を抑えるのに不十分であることが分かり、地震発生後の災害対応の重要性が高まってきている。しかし、地震被害発生後は、様々な情報が錯綜し、有用な情報を集めることが困難となる。そのため情報を適切に活用できず、効果的な救助を行うことが難しくなる。これらの課題を解決する方法として、IoT・センシング技術の活用が有効である。各種センサを住宅に導入し、地震被害を計測することで効果的に情報を取得できる可能性があるが、現状一般的な住宅にこの技術を普及し、災害時に活用できるレベルになるまでにはまだ時間がかかると予測される。

災害発生後の救助活動を行う上で、被災情報の取得が果たす役割は大きいと考えるが、どのような情報が有効であるかは明らかではない。そこで、様々な情報の有無をパラメータとしてマルチエージェントシステムを用い

た災害救助シミュレーションを実行し、有効な情報の種類や情報の活用方法について検討する必要がある。

災害救助シミュレーションの先行研究として、山村ら¹⁾は過去の研究データから地震による住居建築の倒壊被害、人的被害について予測するシステムを構築し、救助隊による救助シミュレーションに関する研究を行っている。しかしこの研究では、救助隊があらかじめ要救助者の位置や人数に関する情報を入手出来ているものと仮定してシミュレーションを行っており、要救助者や建物の被災程度に関する情報が救助隊の行動に与える影響については考慮されていない。また、情報を考慮した災害シミュレーションの先行研究として、大佛ら²⁾は作業にかかる時間を考慮して、要請者と対応者を適切に割り当てることで、地域巡回時間を最小化する研究を行っている。さらに、大佛ら³⁾によって被災情報や避難経路に関する情報を考慮した避難シミュレーションに関する研究も実施されている。しかし、これらの研究は救助隊による救助活動ではなく、住民による救助活動や避難に着目して、情報の効果を検証している。そのため、情報が救助隊の救助活動に与える影響については検証されていない。

そこで、本研究では地震被害予測システムを用いることで、地震が発生した場合の救助活動をシミュレーションし、要救助者に関する情報が救助隊の救助活動に与え

る影響を明らかにする。

2. 災害救助シミュレーションシステム

本システムでは、まず初期被害予測を行い、次に救助活動シミュレーションを実施する（図1参照）。初期被害予測では、既往の研究^{2) 3)}より住居の倒壊判定や住民の閉じ込め率に関する式を適用することで、地震による初期被害を予測し、地震発生直後の仮想都市モデルを構築する。災害救助シミュレーションでは、住民と救助隊の2種類のエージェントによる救助活動を再現し、地震による人的被害の時間的推移をシミュレートする。この時、救助隊の取得できる被災情報をパラメータとして変化させ、被災情報の救助活動への影響を検証する。

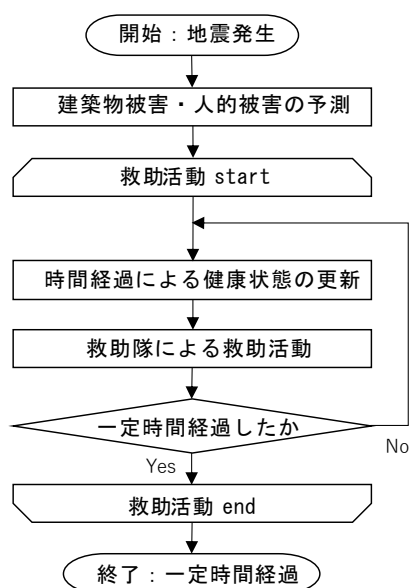


図1 システムのフローチャート

2.1. 初期被害予測

本研究では、地震による初期被害として「住居の倒壊被害」、「住居内への閉じ込め」、「住民の健康被害」の3つを想定した。これらの被害を再現するため、図2に示す手順で予測を行った。ここでは、阪神淡路大震災の際に得られた統計データ^{4) 5)}を用いて確率を設定した。式1～4に住宅の被害関数を、図3、4に住居内への閉じ込め確率と閉じ込められた住民の健康被害確率を示す。

なお、本研究では1981年以降に建てられた軽量屋根、もしくは重量屋根の住宅を想定している。そして、想定の下で、式(2)については、 $m=2800$ 、 $a=0.0082$ と設定し、式(3)については、 $m=2000$ 、 $a=0.0105$ と設定した。

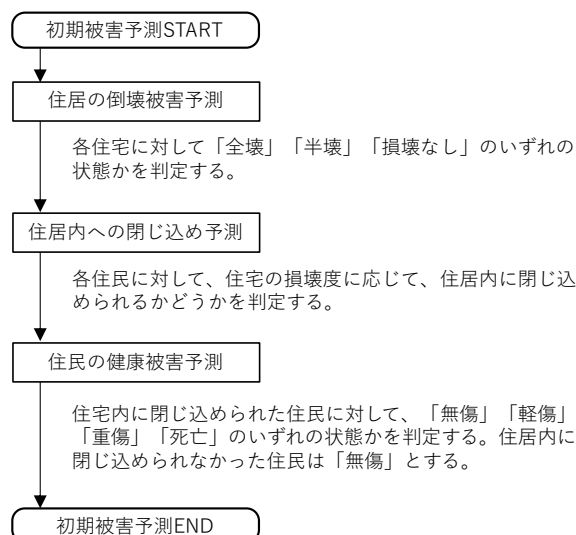


図2 初期被害予測手法

$$Y = 100 / \{1 + m \cdot \exp(ax)\} \quad (1)$$

$$Y_{ZENKAI} = 100 / \{1 + 2800 \exp(-0.0082x)\} \quad (2)$$

$$Y_{HIGAI} = 100 / \{1 + 2000 \exp(-0.0105x)\} \quad (3)$$

$$Y_{HANKAI} = 2(Y_{HIGAI} - Y_{ZENKAI}) \quad (4)$$

$$Y_{HANKAI} = 1 - Y_{ZENKAI} \quad (5)$$

Y_{ZENKAI} ：全壊率（%）， Y_{HIGAI} ：被害率（%），
 Y_{HANKAI} ：半壊率（%）， x ：地表面実効加速度（gal）

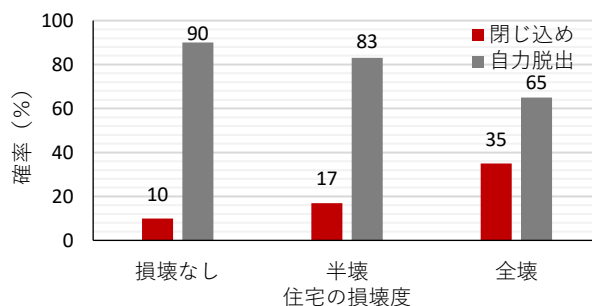


図3 住居内への閉じ込め確率⁵⁾

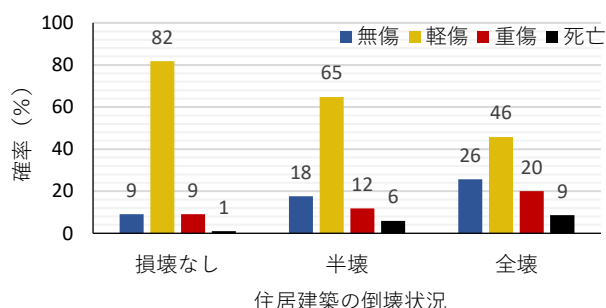


図4 閉じ込められた住民の健康被害確率⁵⁾

2.2. エージェントの設定

2.2.1 住民（要救助者）

本研究で災害救助の対象となる住民（要救助者）は、居住する住居が全壊して閉じ込められたため、自力での脱出が困難な人を指す。損壊なしや半壊の住居に居住する人や、全壊した住居で脱出した人については、災害救助の対象として考慮しないものとする。要救助者は、2.1節で示した確率をもとに健康被害を受け、「無傷」、「軽傷」、「重傷」、「死亡」の4種類の健康状態となる。

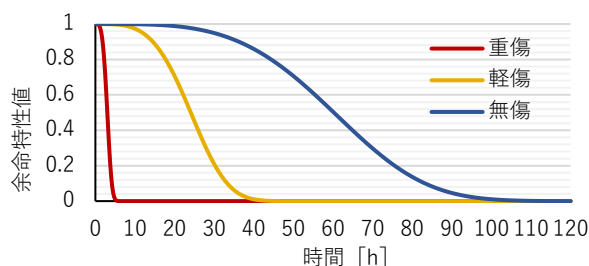


図5 余命特性値曲線

また要救助者は、住居に閉じ込められていると次第に健康状態が悪化し、やがて死亡するものとし、その確率は、太田ら⁶⁾によって提唱された余命特性値をもとに作成した余命特性値曲線（図5参照）を用いて計算した。

2.2.2 救助隊

救助隊は地震による被害を受けず、救助開始時は消防局に配置されているものとする。また救助活動では、一般住民による救助が困難であると考えられる、「全壊」の住宅のみを対象とした。救助隊の救助対象の探索方法としてポテンシャル法を採用した。救助隊はあらかじめ、「全壊」の住宅の位置を全て把握しており、複数の救助対象（全壊住宅）のうち、自身の位置から最も近い現場へと救助に向かうものとする。また救助隊は救助活動のみを行い、救助が完了した住民の搬送等は行わない設定とした。図6に救助活動のフローチャートを示す。

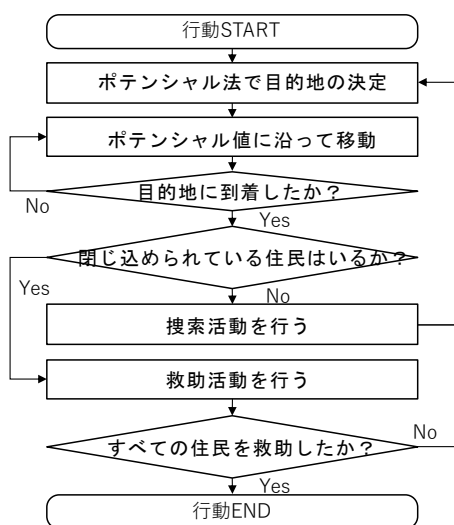


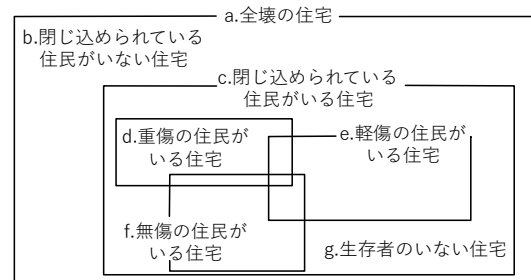
図6 救助隊の行動フローチャート

2.3 被災情報と救助活動の関係

救助隊は取得できる被災情報に応じて救助対象の「絞り込み」と「優先順位付け」を行うことができる。本研究では、救助隊は地震発生後に、被災した住宅について、以下の2つの被災情報を取得できる設定とした。

- ① 閉じ込められている住民の有無に関する情報
- ② 閉じ込められている住民の健康状態に関する情報

これらの被災情報を取得したことによる救助隊の救助活動の変化を図7に示す。



情報の種類		救助活動
①	②	
×	×	aの住宅に対し、救助を行う
○	×	cの住宅に対し、救助を行う
○	○	d→e→f→gの順番に救助を行う

図7 情報の有無に応じた救助隊の救助活動

図7に従えば、①と②の被災情報（要救助者の有無）を取得していない場合は、救助隊は「全壊」の住宅であれば、閉じ込められている住民がいない場合でも救助に向かう。その際は、住民がいないことを確認するために、救助活動の代わりに搜索活動を行う。また、①の被災情報（要救助者の有無）のみを把握している場合、「全壊」かつ「要救助者がいる」住宅の救助活動を行う。さらに、①に加え、②の被災情報（健康状態）も把握している場合、「重傷」の住民がいる住宅を、優先して救助対象とし、「重傷」の救助対象を救助し終えたのち、「軽傷」の住民がいる住宅を救助対象として設定する。これは緊急度の高い住宅を優先的に救助するシナリオを想定している。

ここで示した救助隊の取得できる情報及び救助活動の違いをもとに、4種類のシナリオを設定する。表1に各シナリオの詳細設定を示す。

表1 各シナリオの詳細設定

シナリオ	取得できる情報の種類		情報の更新
	①要救助者の有無	②健康状態	
1	×	×	—
2	○	×	—
3	○	○	×
4	○	○	○

表 1 における「情報の更新」とは、地震発生直後に得られた情報は時間経過とともに変化することが想定されるが、これを更新するかどうかの設定である。情報の更新を行う場合、時間経過とともに住民の健康状態が悪化し、死亡したかどうかをリアルタイムに情報として取得できる設定とした。

3. 災害救助シミュレーションの設定

3.1. 仮想都市モデル

シミュレーションを行う空間である仮想都市モデルは、セルを構成単位とする 2 次元平面として定義されている。1 セルの単位長さは現実世界の 10m に相当する。本システムでは兵庫県宝塚市の地図情報⁷⁾をもとに仮想都市モデルを作成した。図 8 に本システムで作成した仮想都市モデルを示す。

仮想都市内には住居を 5431 戸配置し、各住居に 0～4 人の住民を、一様乱数を用いて配置した。また本研究では、道路閉鎖の影響については考慮していない。これは、要救助者の有無に関する情報の効果の影響を検証することを目的としているためである。

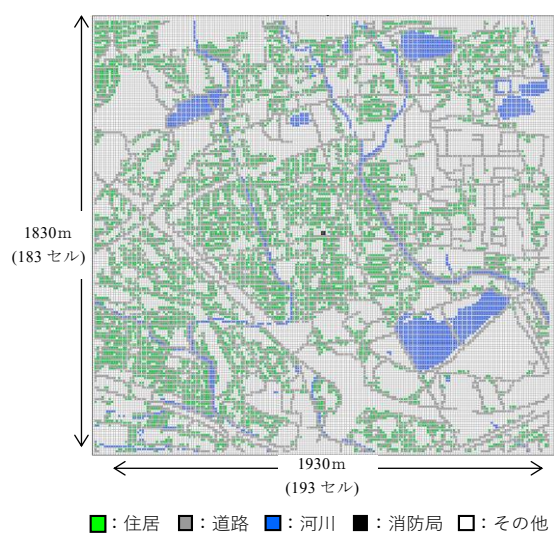


図 8 仮想都市モデル

3.2. シミュレーションの設定

救助隊が取得できる被災情報の有無をパラメータとして、2.3 節で示した 4 種類のシナリオのもとでシミュレーションを実施する。また各シナリオでは、初期被害予測を 5 種類 (乱数を変えて求める)、消防局に配置される救助隊の数を 1, 5, 10, 15, 20 の 5 種類設定し、計 100 ケースのシミュレーションを実行した。そして得られた結果を考察し、救助隊の取得できる被災情報が、地震による被害状況に及ぼす影響について検証する。表 2 に各シナリオに共通な設定を示す。

表 2 シミュレーションの共通設定

地表面加速度	700gal
救助隊の移動速度	12km/h
救助所要時間	90 分/人
搜索所要時間	5 分/戸

救助所要時間については、村上ら⁸⁾による福岡市消防局へのヒアリング結果をもとに設定しており、救助隊 1 部隊 (隊員 4～5 名により編成されている) による救助時間を想定している。

シミュレーションの終了条件は、全壊の住宅内にいるすべての住民の救助が完了した時点 (救助完了時点) とする。

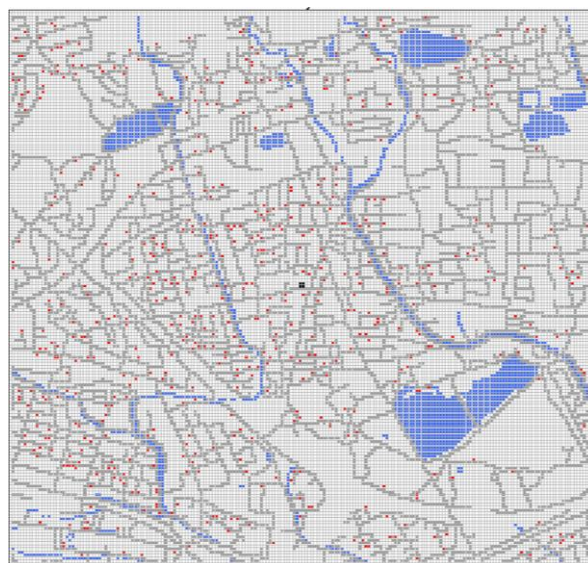
4. 災害救助シミュレーションの実行結果

4.1. 初期被害予測の状況

表 3 に初期被害予測で得られた被害状況 (全壊の住宅のみ) を示す。これら 5 パターンの状況を、災害救助シミュレーションの開始時点の被害状況として利用する。

表 3 初期被害状況

パターン	全壊棟数	閉じ込められた住民の人的被害(人)				
		死亡	重傷	軽傷	無傷	計
1	544	30	74	151	86	341
2	556	26	76	170	106	378
3	546	41	55	188	99	383
4	546	44	78	199	99	420
5	542	34	66	151	99	350



■：全壊の住居 ■：道路 ■：河川 ■：消防局 □：その他

図 9 パターン 1 の被害状況

4.2. 災害救助シミュレーション実行結果

表 4 に救助完了までにかかった時間を、図 10, 11 に、シナリオ毎の救助隊の総移動距離と救助完了時点での死亡者数を示す。なお、以下の結果は、5 種類の初期被害の下でシミュレーションを行った結果の平均値を採用した。

表 4 より、救助完了時間は、被災情報を取得できないシナリオ 1 では、他のシナリオと比べて 10%ほど長くなった。また、図 10 より移動距離は、要救助者の有無を情報として取得できるシナリオ 2 が最も短くなり、次いで情報なしのシナリオ 1 が短かった。さらに、図 11 より、救助完了時点での死亡者数は、リアルタイムに住民の健康状態に関する情報が取得できるシナリオ 4 が最も少なかった。

表 4 救助完了時間 (hour)

シナリオ	1 部隊	5 部隊	10 部隊	15 部隊	20 部隊
1	608	123	63	43	33
2	561	114	58	39	30
3	565	114	58	40	30
4	562	114	58	39	30

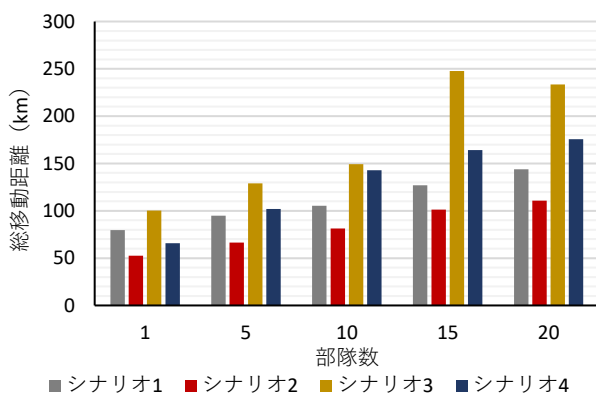


図 10 救助隊の総移動距離

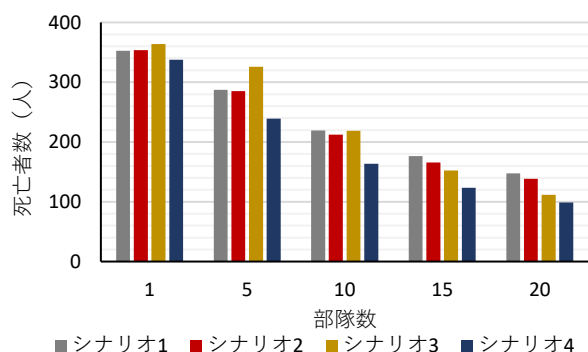


図 11 最終的な死亡者数

5. 考察

ここでは情報の効果について①取得できる情報の種類による比較・考察、及び②健康状態が取得できる場合の

情報の更新の有無による比較・考察を行う。

5.1. 取得できる情報の種類について

図 10 より、入手できる被災情報の違いが救助隊の移動距離に影響を与えることが分かる。要救助者の有無を把握できるシナリオ 2 では、全壊しているが要救助者がいないため、救助に向かう必要がない住宅へ移動することができたと考える。一方、要救助者の有無に加え、健康状態を把握できるシナリオ 3, 4 では情報が取得できないシナリオ 1 よりも移動距離が長くなっている。これは、住民の健康状態を考慮して救助対象に優先順位を付けたことにより、重傷者や軽傷者がいない住宅が分散して残ってしまったためと考えられる。つまり、同じ道路を何度も行き来することになり、移動距離が長くなった。

しかし、表 4 に示す様に救助完了時間に及ぼす影響は小さかった。これは、移動時間が救助所要時間と比較すると、かなり短いためである。本シミュレーションでの一戸当たりの救助所要時間と移動時間の平均を図 12 に示す。この図からわかるように、移動時間は救助所要時間の約 1/55 であり、移動時間がトータルとしての救助完了時間に与える影響は非常に小さいことが分かる。

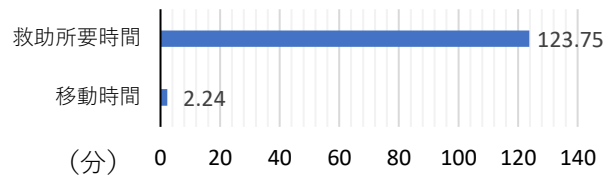


図 12 一戸当たりの平均救助所要時間と移動時間

救助完了時点での死亡者数については、被災情報を活用することで改善できる結果となった。部隊数が 1 部隊の場合、ほとんどの住民が救助される前に死亡してしまい、シナリオによってほとんど差は生じなかった。しかし部隊数が 5, 10, 15, 20 部隊の場合、要救助者の健康状態がリアルタイムで分かるシナリオ 4 ではシナリオ 1 に比べて、死亡者数が 15%以上減少している。これは優先順位をつけて救助活動を行うことで、より多くの要救助者を死亡する前に救助できたためと考えられる。図 13 に 10 部隊の場合の健康状態別の救助された住民の人数をシナリオ別に示す。この図からわかるように、シナリオ 4 では軽傷者の住民の救助数が他のシナリオよりも多くなっている。一方で、要救助者の有無に関する情報のみが取得できるシナリオ 2 では、あまり死亡者数を減らすことができなかった。これは、要救助者の有無を把握することで改善される救助隊の移動距離や捜索時間の短縮が救助所要時間に比べて少なく、救助活動全体に及ぼす影響が小さいためと考えられる。

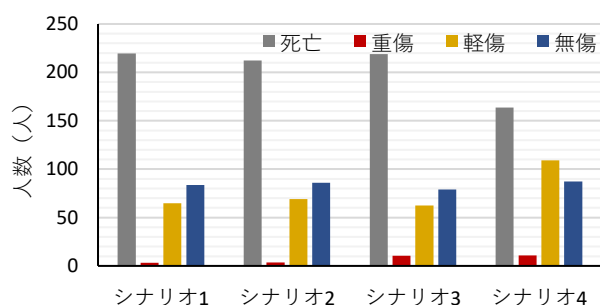


図 13. 健康状態別の救助された住民の人数 (10 部隊)

5.2. 健康状態が取得できる場合の情報の更新について

リアルタイムで要救助者の健康状態が分かるシナリオ 4 では、先に述べたように、部隊数に関係なく救助活動完了時点での死亡者数が軽減された。一方で、情報の更新を行わないシナリオ 3 では、部隊数が 1~10 部隊では死亡者数が増加していた。これは、情報が更新されないため、時間経過によって死亡してしまった住民が閉じ込められている住宅を優先的に救助していたからと考えられる。しかし、部隊数が 15 部隊以上になると、救助スピードが上がることで住民の健康状態が悪化する前に、ほとんどの救助を完了できるため、情報を効果的に活用でき、情報を取得できない場合と比べて死亡者数が改善された。図 14 にシナリオ 3 の健康状態別の救助された住民の人数を部隊別に示す。この図より、部隊数が 15 部隊以上の場合、軽傷の住民を死亡する前に救助できていることが分かる。

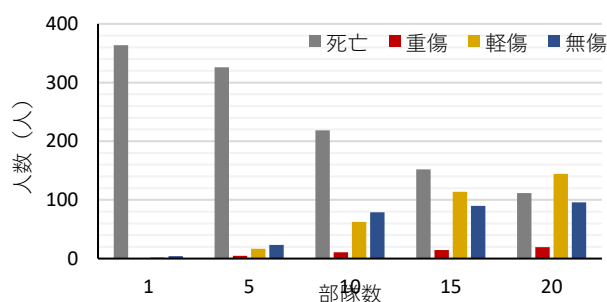


図 14 シナリオ 3 の健康状態別の救助された住民の人数

6. まとめ

本研究では、災害時の救助活動に被災情報の有無が及ぼす影響を検証するために災害救助シミュレーションを実施した結果、以下の知見が得られた。

- ①住宅内の要救助者の有無を救助隊が取得できると、効率的に救助が必要な住宅を巡回できるため、救助隊の総移動距離が 20%以上短くなった。
- ②要救助者の健康状態をリアルタイムで取得できる場合、健康状態に応じて救助に優先順位をつけることで、緊急度の高い重傷者や軽傷者をより多く救出することができ、死亡者数を最大で約 32%減少させることができ

た。

- ③要救助者の健康状態を、地震発生直後に取得して情報を更新できない場合、救助隊の部隊数が少なければ、情報が取得できない場合と比べて、死亡者数が増加する結果となった。しかし、部隊数が増加するにつれて、情報を効果的に活用できるようになり、人的被害を軽減できた。

以上より、各種被災情報の有無が、救助隊の活動に及ぼす影響を把握することができた。本研究で実施したシミュレーションの設定の範囲では、救助隊が救助活動を行う上で、災害による死亡者数を減らすためには、住民の健康状態をリアルタイムに把握することが重要であることを示した。これらを精度良く推定可能なセンシングシステムの開発・導入が望まれる。また、被災情報を災害直後に収集するだけでなく、災害発生後も逐次、収集し続けられるシステムの構築が要求されると分かった。

なお、本研究では空間構成やエージェントの行動ルールを簡略化してシミュレーションを行っているため、現実の救助活動と異なる点もある。今後は実験や調査を行うことで、より現実に則した行動ルールの下でシミュレーションを実行することが必要である。また時間経過に伴う救助隊の行動変化を考慮し、シミュレーションを行うことでさらに詳細に情報の効果を検討できると考える。

【謝辞】

本研究は JSPS 科研費 (20K04381) の助成を受けたものです。

【参考文献】

- 1) 山村貴史, 河村廣, 瀧澤重志, 谷明勲: エージェントシステムによる地震被害と救助シミュレーション, 日本建築学会近畿支部研究報告書. 計画系 43 巻, pp293-296, 2003. 05.
- 2) 大佛俊泰, 木村将, 沖拓弥: 災害時における救援救護活動のための効率的な地域内巡回について, 日本建築学会計画系論文集. 第 84 巻, 第 757 号, pp743-750, 2019. 03.
- 3) 大佛俊泰, 岸本まき: 避難者の多様な情報取得と行動特性を考慮した地震火災時避難行動シミュレーションモデルの構築と避難方策に関する考察, 日本建築学会計画系論文集. 第 88 巻, 第 806 号, pp1313-1322, 2023. 04.
- 4) 能島暢呂, 杉戸真太, 清水浩二, 金澤伸治: 実被害情報の逐次処理による地震被害のリアルタイム推定モデル, 東濃地震科学研究所報告 Seq. No. 7 地震防災分野, pp171-185, 2001.
- 5) 村上ひとみ, 竹田宏樹, 鍛田泰子, 高田至郎: 兵庫県南部地震における東灘区の住家倒壊と閉じ込めに関する実態追跡調査, 東濃地震科学研究所報告 Seq. No. 7 地震防災分野, pp101-123, 2001.
- 6) 太田裕, 小山真紀, 和藤幸弘: 震後余命特性曲線の試算—1995 年兵庫県南部地震の場合—, 東濃地震科学研究所報告 Seq. No. 7 地震防災分野, pp93-100, 2001.
- 7) 生活地図サイト MapFan, 入手先< <https://mapfan.com/>>, (参照 2022. 07. 03).
- 8) 村上ひとみ, 波多野雅之, 川瀬博: 福岡市における想定地震に対する閉じ込め予測と救助活動シミュレーション: 木造建物について (地震災害), 日本建築学会中国支部研究報告集第 31 巻, pp1401-1-1401-4, 2008. 03.