大規模災害時における敦賀市周辺の広域避難シミュレーション†

福田 健太* 野村 泰稔** 川崎 佑磨*** 伊津野 和行***

Multi-Agent Simulation for Disaster Emergency Evacuation in Tsuruga City

by

Kenta FUKUDA*, Yasutoshi NOMURA**, Yuma KAWASAKI***, and Kazuyuki IZUNO***

Disaster emergency evacuation plan is important especially for the cities where nuclear power stations are located. Once a mega disaster occurs, smooth evacuation is necessary for the people living near the nuclear power stations. This study conducted multi-agent simulations for disaster evacuation in Tsuruga city, where several nuclear power stations are located near the city. The results showed that the evacuation using buses was effective to reduce the total evacuation time, if a sufficient number of buses are prepared in a short time. Two-step evacuation was effective to reduce the total evacuation time, however, this method was inefficient at the beginning of evacuation. The combined method using buses and two-step evacuation was the most effective to reduce the total time and could solve the both problems.

Key words:

Disaster emergency evacuation, Nuclear power station, Multi-agent simulation, Two-step evacuation

1 緒言

日本ではこれまで非常に多くの地震が発生し、多大な被害を受けてきた。そういった歴史から日本の耐震技術は大きく発展し、地震の揺れによる倒壊は比較的減少した。しかし、警察庁によると東日本大震災では死者が約1万6千人、このうち津波による水死が全体の約91%であり、地震後の避難の段階で多くの犠牲者が発生している¹⁾。また、絶対に安全と言われていた原子力発電所が炉心融解を起こして放射性物質を放出させ、周囲の人々を避難させることとなったが十分な避難計画が無かったために避難に多大な時間を要した。これらの理由から、避難に関して研究を深めることで今後起こる地震に対して被害を小さくすることができると考えられる。

東日本大震災の想定外の津波による被害から、東北地方を中心とした様々な地域を対象とした避難に関する研究が行われてきた。高田らは宮城県気仙沼市を対象として東日本大震災時の自動車による津波避難の状況再現手法に関する研究²⁾を行った。柳原らは宮城県石巻市内の住民の移動パターンと移動距離から渋滞を抑える避難行動を分析した³⁾。これらのように自動車をを用いた避難や津波に対する避難については様々な地域を対象として研究されているが、原発事故からの広域避難に関する研究は多くなかった。特に、福井県敦賀原発の半径20km圏内には11.3万人もの住民がおり、これは福島第一原発の20km圏内の住民約7.8万人よりも多く、敦賀原発での広域避難指示が出された際に福島よりも大きな渋滞が発生することが考えられる。

そこで本研究では、福井県敦賀市周辺地域を対象として、原発事故が起きた際の避難状況をエージェント型のシミュレーションにより表現し、広域避難時に発生し得る交通問題を把握するとともに、住民が速やかに避難できる方法を、自家用車やバス利用などの避難手段を考慮して検討することを目的とした。

2 対象とする地域

2.1 福井県と原子力発電所

福井県には全体で15基の原子力発電所が存在し、福井県の南西部（嶺南地方）に位置する敦賀市には日本原子力発電（株）の敦賀発電所1号機および2号機と日本原子力研究開発機構新型転換炉ふげんおよび高速増殖原型炉もんじゅの計4基が存在する。また敦賀市の西隣に位置する美浜町には関西電力美浜発電所に1号機から3号機までの3基が存在するなど、周囲に多くの原子力発電所が立地する。それに加え、Table1（全国の原子力発電所および国土数値情報 ダウンロードサービス⁴⁾より作成）に示すように多くの人々が敦賀発電所の近辺に定住している。これらの背景から、福井県の原因災害を考える中で敦賀市を中心に広域避難について研究を進めた。

Table1 Population from Tsuruga nuclear power station.

0~5km	5~10km	10~20km	20~30km	30~40km	40~50km
373	3084	108656	164483	261615	331758
0~5km	0~10km	0~20km	0~30km	0~40km	0~50km
373	3457	112113	276596	538211	869969

† 原稿受理 平成 27年 8月 10日 Received Aug. 10, 2015

* 立命館大学大学院 理工学研究科 〒525-8577 草津市野路東
Graduate School of Ritsumeikan University, Noji-Higashi, Kusatsu, 525-8577.

** 正会員 立命館大学 理工学部 〒525-8577 草津市野路東
Ritsumeikan University, Noji-Higashi, Kusatsu, 525-8577.

*** 立命館大学 理工学部 〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1
Ritsumeikan University, Noji-Higashi, Kusatsu, 525-8577.

2.2 敦賀市の道路状況

福井県敦賀市⁵⁾は面積251.20km², 人口67845人であり, 嶺南地方最大規模の市である。大阪, 名古屋方面と北陸を結ぶ北陸自動車道と国道8号線が敦賀市を通っていることから比較的交通量が多い。また2014年7月20日に舞鶴若狭自動車道の小浜敦賀間が開通し⁶⁾, 日本海側からのアクセスも向上した。しかし, 福井市などの嶺北地方へ続く道の国道305号線や, 小浜市などの西方面に続く国道27号線, 国道162号線は海沿いに続く道路であるため, 地震による大規模災害の際, 津波による被害が発生する恐れがあることから, 避難の際にこれらの道路を用いる避難経路は実用的でないと考えられる。

2.3 対象範囲

IAEA (国際原子力機関)⁷⁾は原子力発電所との距離に応じて予防的防護措置を準備する区域 (PAZ) と緊急時防護措置を準備する区域 (UPZ) を定めた。PAZ は原発事故の際, 即時避難を実施する等, 放射性物質の環境への放出前の段階から予防的に防護措置を準備する区域で原子力発電所から概ね半径5km圏内に定め, UPZ は原子力発電所より概ね半径30km圏内に定められている。

また, 東日本大震災時の福島原発からの避難の際, 福島原発から半径20km圏内の住民に避難指示が出された。これらから, 敦賀原発から半径20km圏内の住民について半径30km圏外に避難するモデルを作成し, シミュレーションを行った。

3 避難シミュレーションモデル

3.1 マルチエージェントシステムについて

マルチエージェントシステムとは, 複数の自律的に行動するエージェントから構成されるシステムである。それぞれのエージェントが様々な判定アルゴリズムを有し, それらの属性と周囲のエージェントや環境から自律的に行動し, 現実に近い環境をモデルで再現することができる。

本研究ではモデルの作成にあたり, 市販のマルチエージェント・シミュレーション・ソフトウェア *artiso*c を用いる。

3.2 モデルの基本的な動き

Fig.1 に示すように交差点を表す Point エージェントから避難者を表す Evacuee エージェントが発生する。本シミュレーションでは公表されている政府のデータ⁸⁾から各 Point エージェント周辺の人口密度を調べ, 各 Point エージェントが生成する Evacuee エージェントの数を割り当てた。したがって Point エージェントは, 各地域を代表するノードとしての意味を持っている。各 Evacuee エージェントは最短経路を選択し, Point エージェント同士を繋ぐ道となる Link をたどって目的地まで移動する。なお, 本モデルでは交差点における信号が考慮されておらず, 交差点に複数のリンクから到達した複数の Evacuee エー

ジェントは, そのまま次のリンクへと進むことになる。そのため, 現実の交差点よりスムーズに進行することができるモデルになっており, 今後の改善が必要である。目的地に到着した Evacuee エージェントはその Point エージェントに収容される。最短経路の選択には, 各 Link に定められている距離, 車線数, 法定速度の値から目的地 Point までの所要時間をコストとしてダイクストラ法によって計算し, 最短コストとなる経路を導く。Evacuee エージェントは道路の交通密度によって速度が変化する。また, 処理速度の関係から, 1つの Evacuee エージェントを車10台分としてモデルを作成する。

Fig.1 Schematic diagram of simulation model.

3.3 Evacuee エージェントの移動速度

各 Evacuee エージェントの移動速度は各 Link の交通密度と法定速度から式 (1) に示す Greensheelds の式⁹⁾より算出する。

$$v = v_f (1 - k/k_f) \quad (1)$$

v : 移動速度 (km/h)

v_f : 自由速度 (km/h) ...今回は各 Link に与えられた法定速度を用いる

k : 交通密度 (台/km) ...ある瞬間における単位区間上に存在する車の台数

k_f : 最大交通密度 (台/km)

3.4 対象地域

本研究における対象地域の地図を Fig.2 に, 各 Point の ID 地図を Fig.3 に示す。本研究で使用する道路は, 国道8号線, 国道27号線, 国道161号線, 国道305号線, 国道365号線, 国道417号線, 国道476号線, 県道33号線, 県道141号線, および北陸自動車道とする。

本研究では原子力発電所である敦賀発電所1号機および2号機において事故が発生した場合の避難シミュレーションをおこない, 20km圏内の住民を避難対象とする。UPZ 圏外となる 30km 圏外の Point を目的地とし, 主な避難方向は福井県広域避難計画要綱¹⁰⁾に示されるように敦賀市は奈良県のある南方向, 美浜町と小浜市は京

都府のある西方向、越前市と鯖江市は石川県のある北方向として避難シミュレーションを行う。ただし、海岸沿いの道路は津波の発生可能性があるため、海岸沿いのPointに関しては目的地としない。

Fig.2 Target area map(revised Google maps).

Fig.3 Point ID map.

3.5 モデルの条件

避難時間を推計するモデルを作成するに当たり、避難時間推定ガイドライン¹¹⁾および福井県広域避難計画要

綱¹²⁾に基づいて以下の条件を与える。

①住民の避難行動

一斉避難を行う場合と2段階避難を行う場合のモデルを作成する。2段階避難はPAZ 圏内 (5km 圏内) の住民が 20km 圏外へ避難した後に 20km 圏内の住民が避難を開始するものとする。

②自主避難率

2段階避難においてUPZ 圏の住民が避難指示を待たずに自主避難を開始する割合を 40%に設定する。

③自家用車避難率

避難手段として、自家用車とバスの2種類を用いる。本研究では、バスで避難する割合を基準である 5%に加え、10%、20%の場合においても検証する。福井県の1世帯当たりの人数が 2.8 人¹²⁾であることから車には 1 台に 3 人、バスには 1 台 40 人乗車すると仮定する。Table2 に自家用車避難率毎の避難車両台数を示す。また、Table2 における最大交通密度は、道路構造令において乗用車の長さ 6m、バスの長さ 12m と定められるため、自家用車避難率の割合から 1 台当たりの平均の長さを算出し、その値からそれぞれ最大交通密度を定めた。

④避難時間

避難指示が出されてから 1 時間以内に避難を開始すると仮定する。

Table2 The number of vehicles and maximum traffic density.

	Vehicles	Bus	Total	Maximum traffic density
Bus user 5%	35502	140	35642	166 unit/km
Bus user 10%	33633	280	33913	165 unit/km
Bus user 20%	29896	560	30457	164 unit/km

4 シミュレーション結果と考察

本研究では、上記の設定条件の下、一斉に避難を開始し、バス利用避難率を 5%とする方法を基本モデルとし、バス利用避難率 10%および 20%とした場合、さらに 2 段階避難を行った場合について検討した。Fig.4 および Table3 に結果を示し、以下にそれぞれの避難モデルでの結果を考察する。

Fig.4 Evacuation completion ratio.

Table3 Required evacuation time.

	Evacuation time	Average evacuation time	Evacuation time of PAZ
Basic model	7 hours 24 minutes	2 hours 56 minutes	
Bus user 10% model	6 hours 5 minutes	2 hours 18 minutes	
Bus user 20% model	5 hours 21 minutes	2 hours 6 minutes	
2 step evacuation model	5 hours 49 minutes	2 hours 53 minutes	2 hours 33 minutes
Bus user 20% +2 step evacuation model	4 hours 57 minutes	2 hours 35 minutes	2 hours 20 minutes

4.1 基本モデル

一斉避難でバス利用避難率 5%の基本モデルを用いてシミュレーションを行う。シミュレーションの結果をすべての車両が避難するのに7時間24分かかった。Fig.5に示すように15分経過した時点で敦賀インターチェンジのある PointID.1 付近の道路が最大交通容量に達し、大規模な渋滞が発生した。最終的に2時間50分を越えるあたりまで敦賀インターチェンジ付近の渋滞は続いた。敦賀インターチェンジを越えると2車線道路となり、交通容量も比較的大きくなることから、広域避難指示が発令された際に解放される別の入口を設置するなど、流入口を他にも設けることでインターチェンジ付近の渋滞は緩和することができると考えられる。

上記の他に、15分経過時に PointID.16 の国道8号線および国道161号線に渋滞が見られ、2時間を経過したところに渋滞が無くなった。また、2時間経過時に渋滞が敦賀市の市街地である PointID.0 から北陸自動車道上の PointID.48 まで続く最も長いものとなった。この渋滞は避難終了直前まで続き、避難時間に大きな影響を与えている。これらから、敦賀市の市街地の住民が1時間以内に避難を開始するため、渋滞の発生自体は避けられないが、PointID.16 付近の渋滞は2時間経過後に収束することから、北陸自動車道を利用して避難しようとしている避難者に国道8号線および国道161号線の利用を促すことで避難時間の短縮につながると考えられる。

また、本モデルでは範囲外であるために表現されなかったが、PointID.58 の約5km 北には比較的人口の多い福井市が存在し、避難指示地域外ではあるが自主避難をする住民による渋滞が考えられる。避難指示地域内の住民の避難を最優先し、避難時間短縮化を行うためにも避難指示圏外の住民に屋内退避指示を出すなど、避難自粛を呼びかけておく必要があると考えられる。

避難終了間際に避難者完了率が垂直に上がっているが、これは目的地に到着して Evacuee エージェントが収容されることで、急激に交通密度が小さくなることで最後の Evacuee エージェントの速度が急激に大きくなったためであり、実際はもう少し緩やかなグラフを描くと考えられる。

Fig.5 15 minutes passed situation of basic model.

4.2 バス利用避難率を変更させたモデル

バス利用避難率を変更させたモデルについて考える。本研究では、バスを用いて避難する割合を基本モデルである5%に加え、10%、20%に設定したモデルを作成し、それぞれ避難に要した時間を求める。基本モデルの避難に要した時間の7時間24分に比べ、バス利用避難率が10%の時に6時間5分となり、1時間19分の短縮となった。さらにバス利用避難率が20%の時、避難時間が5時間21分と基本モデルに比べ、約2時間の短縮ができた。これは、バスを用いることで避難に必要な車両台数が少なくなり、渋滞の規模が小さく抑えられたためであると考えられる。このように自家用車による避難を行う割合が少ないほど避難時間が短くなり、バスによる車両数の削減は避難時間の短縮化に非常に有効であると言える。

しかし、今回のモデルではバスを配車するまでの時間が考慮されていない。そのため、実際は今回求めた時間にバスの配車にかかる時間および配車に伴う渋滞についても考慮する必要がある。また、バス利用者が20%であるとき、560台のバスが必要であり、これだけの数のバスを確保しきれないことが考えられる。そのため、各バス会社との協議を進め、前もって配車場所やバスの確保台数などの計画を立てておくことが必要だと考えられる。

また、渋滞箇所については基本モデルと大きな違いはなく、いかに北陸自動車道へ円滑に車両を流入させるかという点が避難時間を短縮することに大きな影響を及ぼすと考えられる。

4.3 2段階避難モデル

2段階避難を行うモデルについて考える。2段階避難はPAZ 圏内(5km 圏内)の住民を先に避難させることで原子力発電所周辺の住民の安全を確保することに加え、避難における渋滞の規模を縮小させる狙いがある。2段階避難をおこなった場合の1段階目の避難であるPAZ 圏内の

避難時間は2時間33分であった。また、全体の避難時間は5時間49分となり、基本モデルに比べ1時間35分の時間短縮につながった。しかし、5km圏内の住民が避難するまで20km圏内の住民は避難ができないため、そのうちの40%は自主避難をしているにもかかわらず、Fig.4の交点である3時間40分が経過するまでは基本モデルより効率の悪い結果となる。

また、2段階避難においても15分を経過したところに基本モデルほどではないがPointID.0付近から渋滞が発生した。これは避難指示が出されていないが自主避難をおこなうUPZ圏内の住民によるものである。日本原子力産業協会¹³⁾によると、自主避難をおこなう割合が増えるほど全体の避難時間が長くなっていく傾向がある。Table3に示すように、先に避難を開始した住民は2時間33分で避難が完了する。UPZ圏の住民も原発による影響が不鮮明な中で、先に自主的に避難してしまうという心理が発生することが十分理解できる。しかし、そのために自分だけが先に避難を完了し、2段階避難を遵守した住民の避難時間が長くなっていく人々が存在してしまう。そのため、地域住民に2段階避難の有用性を十分に周知させるとともに、自主避難の抑制を図る必要がある。

4.4 バス利用避難率を20%とした2段階避難モデル

バス利用避難率を20%とした上で2段階避難をおこなうモデルについて考える。このモデルではバスを準備、配車する間の時間にPAZ圏内の住民を先に避難させることで時間を無駄なく使うことができ、最適な避難を行うことができると考えられる。本モデルでは避難時間4時間57分となり、今回比較したモデルの中で最も短い時間で避難が可能となった。

しかし、避難率が90%を超える4時間30分経過時までは、ほぼ常にバス利用避難率20%のモデルの避難率の方が高い値を示し、平均避難所要時間においてはTable3から分かるようにバス利用避難率20%モデルよりも29分遅い2時間35分となっている。これに関してはバス利用避難率20%モデルのバスの準備・配車にかかる時間が29分以上かかると考えられるため、実際にバスを用いる場合は、バスの配車にかかる時間をPAZ圏内の住民の避難時間とすることができる本モデルが最適な避難計画であると考えられる。

5 ジニ係数による評価

Fig.6, Table4にジニ係数における各避難時間の評価を示す。ジニ係数とはFig.6に示す $y=x$ の式で表せる均等分布線と累積相対度数を組み合わせる表すローレンツ曲線によって囲まれた面積を2倍した値で、主に所得分配などの不平等さについて測る指標である。ジニ係数のとる値は0から1であり、0に近いほど平等であるといえる。

Table6から分かるように2段階避難を行う2パターンがそれぞれ2.99, 2.97と2段階避難を用いない避難方法よりも平等な避難ができていると言える。

Fig.6 Lorenz curve.

Table4 Gini coefficient.

	Gini coefficient
basic model	0.444
bus user 10% model	0.42
bus user 20% model	0.387
2 step evacuation	0.299
bus user 20% + 2 step evacuation	0.297

6 結 言

本研究では、福井県敦賀市周辺地域を対象として、原発事故が起きた際の避難状況をマルチエージェントシミュレーションにより表現し、広域避難時に発生し得る交通問題を把握するとともに、住民が速やかに避難できる方法を調査した。本研究で得られた結果をもとに結論を以下にまとめる。

- ・敦賀インターチェンジ付近で大規模な渋滞が発生し、その影響によって避難に多大な時間を要する。このことから、大規模災害時の避難に備え、北陸自動車道への流入口を他にも設ける必要がある。また、随時道路情報を発信することで、北陸自動車道以外を用いた避難ルートを的確に案内することで避難時間を短縮できる。
- ・2段階避難は前半において避難効率が低くなるが、被曝という最悪の被害を避けるには有効な避難方法であり、被害者を少しでも減らすためには2段階避難を導入すべきであると考えられる。

- ・ 2 段階避難は全体の避難時間は短縮できるが, 20km 圏内の避難開始が遅れるため, 1 台当たりの平均避難時間に関して短縮はあまり望めない. その中でも迅速な避難を実現するために, 5km 圏内の住民が避難している間は, 20km 圏内の住民に自主避難しないことで避難効率が上がることを周知させ, 自主避難を行わないよう呼びかける必要がある.
 - ・ バスを用いて自家用車での避難率を下げることに加え, 2 段階避難を実施することで避難時間を最大 2 時間 27 分短縮することができる. しかし, そのためには, 各バス業者との協議し, 避難指示が出された際に速やかに配車できる環境作りが必要である.
- 12) Fukui Prefectural Government, "Estimated population of Fukui prefecture"
<http://www.pref.fukui.jp/doc/toukei-jouhou/zinnkou/jinkou.html> (Accessed 2015)
 - 13) Japan Atomic Industrial Forum Inc., "News at 4 August 2014"
<http://www.jaif.or.jp/p7382/> (Accessed 2015)

参 考 文 献

- 1) National Police Agency, "Great East Japan Earthquake"
<https://www.npa.go.jp/archive/keibi/biki/index.htm> (Accessed 2015)
- 2) H. Otsuka, T. Osajima, Y. Kajita and T. Yamasaki, "Evacuation support in the Pacific Ocean coast residence district based on location characteristic", Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A1 (Structural Engineering & Earthquake Engineering, Vol. 68, No. 4, pp. I_1081-I_1090 (2012).
- 3) S. Yanagihara and H. Murakami, "A study on travel means and distances of tsunami evacuation in ishinomaki urban area after the 2011 great east japan earthquake disaster" Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A1 (Structural Engineering & Earthquake Engineering, Vol. 69, No. 4, pp. I_1013-I_1020 (2013).
- 4) Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism,
- 5) Tsuruga city, "The official homepage"
<http://www.city.tsuruga.lg.jp/> (Accessed 2015)
- 6) Central Nippon Expressway, "News release at 16 May 2014"
http://www.cnexco.co.jp/corporate/pressroom/news_release/3485.html (Accessed 2015)
- 7) International Atomic Energy Agency, "The official homepage"
<https://www.iaea.org/> (Accessed 2015)
- 8) Incorporated Administrative Agency National Statistics Center, "Japan in figures"
<https://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/toukeiChiri.do?method=init> (Accessed 2015)
- 9) S. Kawakami and H. Matsui, "Traffic Engineering", p. 105 (2004), Morikita Publishing.
- 10) Fukui Prefectural Government, "Outline for regional evacuation in Fukui prefecture" (2014)
- 11) Japan Nuclear Energy Safety Organization, "Guideline for estimation of evacuation time", (2012).