

2011年東北地方太平洋沖地震津波における 避難者発生シミュレーション ～石巻市門脇地区を対象として～

土肥 裕史¹・奥村 与志弘²・小山 真紀³・清野 純史⁴

¹学生会員 京都大学大学院学生 工学研究科 (〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂)

E-mail: dohi.yuji.25x@st.kyoto-u.ac.jp

²正会員 京都大学大学院助教 地球環境学堂 (〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂)

E-mail: okumura.yoshihiro.8x@kyoto-u.ac.jp

³正会員 京都大学大学院特定准教授 医学研究科 (〒615-8540 京都府京都市左京区聖護院川原町53)

E-mail: koyama.maki.3e@kyoto-u.ac.jp

⁴正会員 京都大学大学院教授 地球環境学堂 (〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂)

E-mail: kiyono.junji.5x@kyoto-u.ac.jp

東日本大震災では津波避難の難しさが改めて認識された。発震から津波来襲までの30分以上の時間、公的機関からの情報提供にも関わらず、多くの住民が津波にのまれた。本研究では、発震から避難開始までのフェーズを対象とした避難者発生に着目する。避難者発生については、近年、住民・自治体・研究者などさまざまな人々が住民の早期避難に繋がる重要な役割を担っているとの認識が注目されつつある。同様な考え方にに基づき、本研究では開発中の避難開始モデルを用いた避難シミュレーションを石巻市門脇地区を対象に実施し、同地区における避難開始の特徴を考察を行った。その結果、地震による揺れが避難開始に及ぼす影響が最も大きく、人口密度の高い地区は他の地区と比べて避難開始率が高い結果が得られた。

Key Words : *Evacuee generation, The 2011 Tohoku tsunami, Evacuation simulation, Kadonowaki, Ishinomaki*

1. はじめに

わが国では、津波予警報システムにより津波からの早期避難を促す体制が構築されている。自治体職員や防災研究者が地域住民などに危険を知らせ、避難を促す観点で早期避難が注目されてきた^{例えば1)}。東日本大震災(2011年)では、津波避難のために30分以上の時間があり、津波警報、避難勧告など公的機関からの情報も提供されていた。しかしながら、多くの住民が津波から逃げ切ることができなかった。加えて、犠牲者の9割以上は津波に巻き込まれたことに起因する。

一方で、同災害では、茨城県大洗町で冲出しする船舶の汽笛が住民の早期避難を促したという事例が報告されている²⁾。また、兵庫県南あわじ市では、早く高台に避難した住民が鐘を鳴らし、住民の早期避難を促す取り組みが始まっている。これらの事例は、「リアリティの共同構築³⁾」と呼ばれる考え方をを用いて活動の骨格をなす概念を説明できる。これは、「避難を要する災害が迫って

いる」というリアリティ(多くの人が抱いている現実味)を、社会を構成するさまざまな人々が早期に構築し、それが住民の早期避難に繋がるという考え方である。

著者らは、住民の早期避難に向けた具体的な方策の提案を行うため、数理モデルを用いてこれらの考え方をより具体的に表現していく必要があると考える。そのため、さまざまな人々が住民の避難開始に重要な役割を担っているという考え方に基づいた避難開始モデルの開発を進めている。本研究では、同モデルを用いて、東日本大震災における石巻市門脇地区を対象に避難シミュレーションを実施し、同地区の住民の避難開始の特徴について考察を行う。入力条件としては、多くの研究者らによって実施された社会調査の結果を用いる。

2. 避難シミュレーションの概要

本研究における避難シミュレーションは、避難者発生

モデルと避難行動モデルから構成される。著者らは、避難者発生のプロセスをモデル化し、清野ら⁴⁾が開発した個別要素法 (DEM) に基づく避難行動モデルに組み込んだ。

(1) 避難者発生モデル

a) 避難者発生モデルの基本的概念

著者らは、「リアリティの共同構築³⁾」の概念を用いて、津波避難における地域コミュニティの危機感の高まりが住民の避難開始につながると仮定する。モデル化において、津波避難に関する情報取得によって住民は危機感を高める。その後、危機感が上限 (閾値) に達すると住民は避難を開始するとともに、情報発信源としてふるまうものとする。危機感の変化は次式で表される。

$$y_i^t - y_i^{t-1} = G(i) \cdot F_{conformity}(t, n) * \sum_{j=1}^N \Delta t_G M_{ij}^t W_j x_j^t \quad (1)$$

ここで、 y_i^t は時刻 t における住民 i の危機感の蓄積、 $G(i)$ は住民 i の情報発信源に対する影響の受けやすさを表す関数、 $F_{conformity}$ は時刻 t における住民 i の情報取得数 n に依存する集団同調性バイアス、 N は情報発信源の種別数、 Δt_G は避難者発生モデルの計算時間間隔、 M_{ij}^t は時刻 t における住民 i と情報発信源 j の位置関係を表す関数、 W_j は情報発信源 j に対する重み、 x_j^t は時刻 t における情報発信源 j からの情報発信の有無であり、1もしくは0で表す。 $G(i)$ は0から1の乱数で表し、 M_{ij}^t は(2)式で、 $F_{conformity}$ はMilgram et al.⁵⁾の研究に基づき(3)式で定義する。

$$M_{ij}^t = \begin{cases} 1: & \text{時刻 } t \text{ において住民 } i \text{ が情報発信源 } j \text{ の影響範囲内に存在するとき} \\ 0: & \text{時刻 } t \text{ において住民 } i \text{ が情報発信源 } j \text{ の影響範囲内に存在しないとき} \end{cases} \quad (2)$$

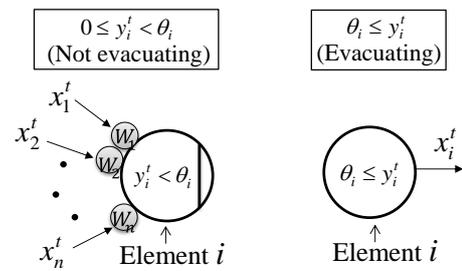
$$F_{conformity}(t, n) = (45.68 + 45.09 * \ln(n)) / 45.68 \quad (3)$$

本モデルでは、住民 i の危機感が上限 (閾値) θ_i に達した後、避難を開始するとともに情報発信源 ($x_i^t = 1$) として情報発信を行う。これらの一連の行動は、(4)式および(5)式で表現される。

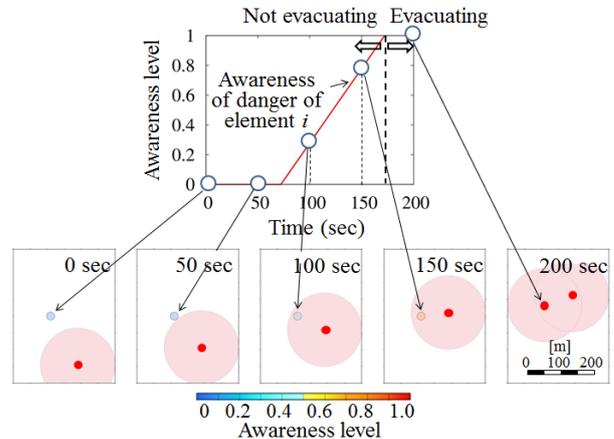
$$x_i^t = f(y_i^t, \theta_i) \quad (4)$$

$$f(y_i^t, \theta_i) = \begin{cases} 1 & \text{if } y_i^t - \theta_i \geq 0 \\ 0 & \text{if } y_i^t - \theta_i < 0 \end{cases} \quad (5)$$

図-1は、避難者発生のプロセスに沿ったモデルの概念図である。図-1(a)は、時刻 t における住民 i が避難を促す情報を入力し危機感を高める様子を、図-1(b)は、危機感が上限 (閾値) に達した後、避難を開始するとともに情報発信源としてふるまう様子を示す。図-1(c)は、住民が避難行動者の目撃により危機感を高め避難を開

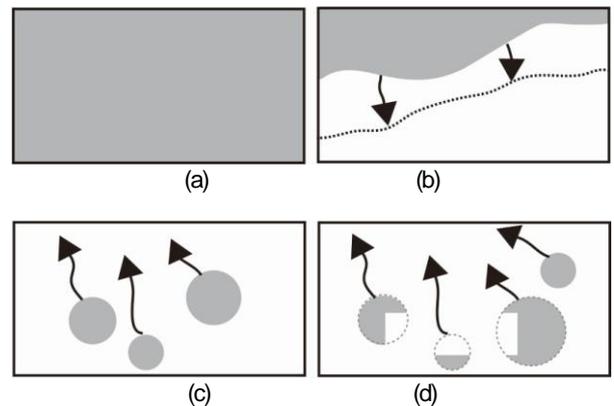


(a) 情報取得の模式図 (b) 情報発信の模式図



(c) 情報取得による危機感の変化および避難開始

図-1 避難者発生モデルの概念図



■ 影響範囲 □ 解析領域 ※解析時間内で時間変化させなければ静的に取り扱える

図-2 情報発信源の影響範囲のモデル化における分類。(a)は全領域型、(b)は非影響範囲を含む全領域型、(c)は円形型、(d)は非影響範囲を含む円形型を示す。影響範囲は矢印が示す方向へ時間変化する。

始する様子および危機感の時間変化を示す。

b) 情報発信源

情報発信源に対する重みは、それぞれの影響の大きさを表し、社会全般や各地域においてどの情報源を重視するかを相対的に表現している。本研究では、情報発信源の影響範囲のモデル化するにあたり、影響パターンを図-2のように4つに分類した。(a)は全領域型、(b)は非影響範囲を含む全領域型、(c)は円形型、(d)は非影響範囲を含む円形型を示す。影響範囲は矢印が示す方向へ時間変

表-1 東日本大震災における「避難開始のきっかけ」となった情報発信源（「揺れの影響」を選択した割合を1とする）および本計算で用いた重み（内閣府調査⁶を使用）

	情報発信源				
	揺れの影響	他者の呼びかけ	他者の避難行動	TV・ラジオ	防災行政無線
回答割合	1.00	0.42	0.31	0.15	0.04
重み	7.84×10^{-3}	3.27×10^{-3}	2.45×10^{-3}	1.14×10^{-3}	0.33×10^{-3}

化する。

本研究では、地震による揺れ、TV・ラジオ、防災行政無線、他者の避難行動、他者の呼びかけの5種類を情報発信源として設定する。情報発信源ごとの重みは、内閣府⁶が実施した東日本大震災における「避難開始のきっかけ」の調査結果を用いて設定する。表-1の上段に、「揺れの影響」で避難したと回答した人の割合を1.0として、その他の情報発信源で避難した人の割合を整理した。本研究では、この比に従い、情報発信源別の重みを設定する。

c) 避難開始の閾値

解析対象地域や住民の初期配置によって、同一の情報発信源から同じ量の情報を取得しても、住民それぞれの避難開始のタイミングは異なる。これを、危機感の上限（閾値）として表現する。本研究では、閾値のばらつきを考慮せず1.0で統一しているが、閾値のばらつきの表現法については、今後の課題である。

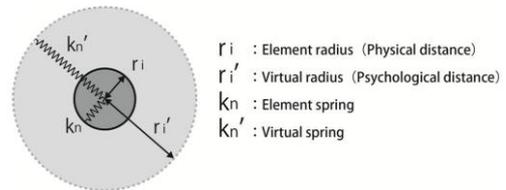
(2) 避難行動モデル

本研究では、清野ら⁴が開発した個別要素法（DEM）に基づく避難行動モデルを用いる。図-3のように、住民を円柱要素としてモデル化し、住民間の物理的距離および心理的距離をバネとダッシュポットを用いることで表現する。各要素に働く外力に対して運動方程式を解くことで、各要素の挙動を表現する。

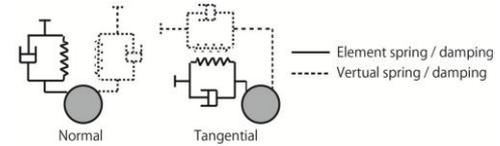
3. 石巻市門脇地区での避難シミュレーション

(1) 概要

本研究では、宮城県石巻市門脇地区（1272*1257m²）を対象に、東日本大震災における発震直後から同地区への津波到達までの避難シミュレーションを行う。別途実施した津波伝播・氾濫シミュレーションの結果より、同地区での津波の第一波来襲は地震発生から51分30秒後であることがわかった。住民は同地区内で比較的標高が高い、図-4の緑色で示す地点を目指すとして仮定する。また、表-1の下段のように重みを決定する。その他、本解析で用いる諸元はDohi et al.⁷の研究を参照されたい。



(a) 物理的半径および心理的半径



(b) バネおよびダッシュポット

図-3 個別要素法（DEM）に基づく避難行動モデル

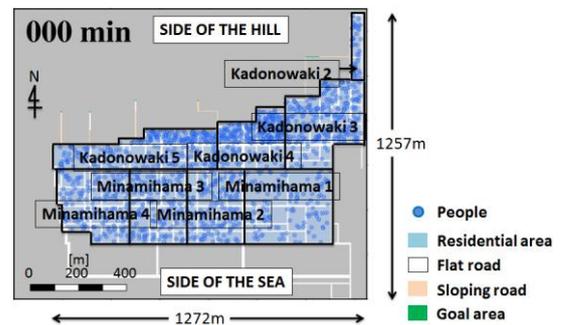


図-4 対象地域の空間条件および住所区分

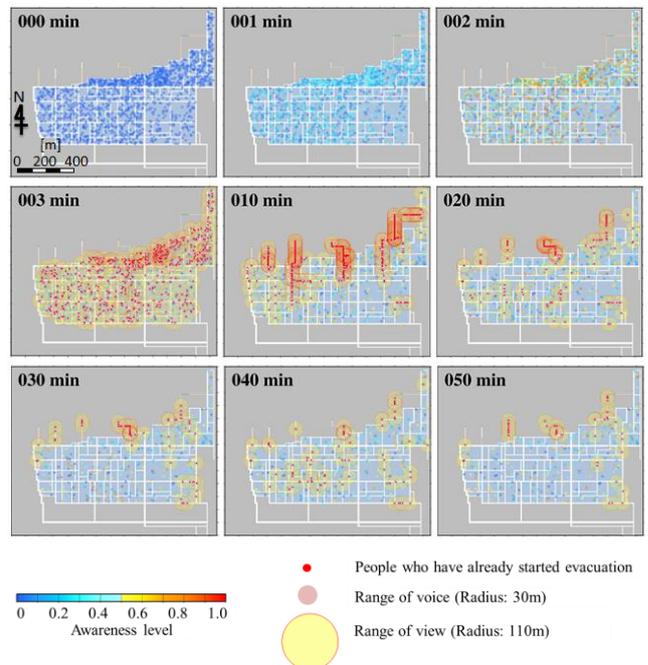


図-5 対象施設におけるシミュレーションのスナップショット。（揺れの開始(=0min)から揺れが小さくなるまでの160秒間は避難開始できないものとする）

(2) 結果

図-5は、対象地域におけるシミュレーション結果のス

ナップショットを表す。上段は揺れの開始から揺れが小さくなるまでの様子、中・下段は揺れが小さくなった後の様子を表す。強い揺れが続く160秒間は、避難を開始できないと仮定する。また、赤い円は避難を開始した住民を、桃色の円は呼びかけが届く範囲（30m）を、黄色の円は避難行動者を目撃できる範囲（110m）を表す。

(3) 考察

図-6(a)は地区ごとの住民の危機感の変化を、図-6(b)は各情報発信源が住民の危機感に与える影響を示している。

シミュレーション結果より、対象地域における津波来襲までの避難開始率は80.4%であった。後藤の調査⁸⁾によると、同災害における同地区での避難開始率は約80%であると推定されている。避難開始率に注目すると、本モデルが同地区の避難開始の様子を比較的良好に再現できているといえる。本モデルでは、住民は危機感が閾値に達することで避難を開始すると仮定している。しかしながら、実際の津波避難においては、危機感が高くても自ら避難行動を行うことができない要援護者や、危機感の高まりから他者の避難行動援助を優先して行う愛他行動が報告されている。これらの行動が避難開始に与える影響を考え、今後本モデルへの実装を検討する必要がある。

図-6(a)では、門脇4丁目、5丁目の住民の避難者発生率は他の地区より高く、一方で南浜1丁目では低い値となっている。要因の一つとして、人口密度の高い地区ではより多くの避難行動者から情報を取得できるが、人口密度の低い地区では取得できる情報が少ないことが考えられる。

また、図-6(b)より、避難者の声や避難行動が住民の危機感に与える影響は、強い揺れが与える影響に比べて小さいことがわかる。本研究では、避難行動者のうち20%が他の住民へ呼びかけを行い、危機感が80%を超えた住民は他者の避難行動を目撃し影響を受けると仮定している。今後、これらのパラメータに関する調査、研究を行う必要がある。

4. 結論

本研究では、津波からの早期避難の検討を行うためのツールとして開発している避難者発生モデルを用いて、石巻市門脇地区における避難シミュレーションを実施した。得られた主要な結論を以下に示す。

- 1) 「リアリティの共同構築³⁾」の考え方をを用いて避難者発生プロセスをモデル化し、東日本大震災における宮城県石巻市門脇地区の津波避難事例に適用した。
- 2) 避難者発生モデルにおける情報発信源を、影響範囲

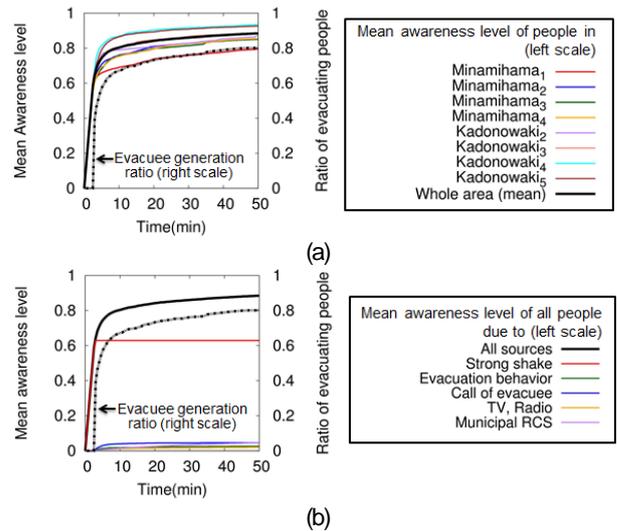


図-6 住民の危機感の平均。(a)は地区ごとの住民の危機感の変化、(b)は各情報発信源が住民の危機感に与える影響の大きさを示す。

の違いから図-2のように4種類に分類した。情報発信源ごとの影響度の差は、それぞれに重みを与えることで設定した。また、同一の情報発信源から同じ量の情報を取得した場合の避難開始のタイミングの個人差は、危機感の閾値で表現した。

- 3) シミュレーションの結果、対象地域における津波来襲までの避難開始率は80.4%であった。実際の津波避難においては、危機感が高くても自ら避難行動を行うことができない要援護者や、危機感の高まりから他者の避難行動援助を優先して行う愛他行動が報告されている。今後、本モデルへの実装を検討する必要がある。
- 4) シミュレーションの結果、門脇4丁目、5丁目の住民の避難者発生率は他の地区より高く、一方で南浜1丁目では低い値となった。要因の一つとして、人口密度の高い地区ではより多くの避難行動者から情報を取得できるが、人口密度の低い地区では取得できる情報が少ないことが考えられる。
- 5) シミュレーションの結果、避難者の声や避難行動が住民の危機感に与える影響は、強い揺れが与える影響に比べて小さいことがわかった。より現実に即した状況でのシミュレーションを行うため、呼びかけを行う住民の割合や他者の避難行動の目撃により影響を受ける際の危機感について、今後、パラメータに関する調査、研究を行う必要がある。

謝辞：本研究の一部は、JSPS科研費（基盤(C) 25350475）による支援を受けて行った。

参考文献

- 1) 及川康, 片田敏孝: 水害に対する住民の対応行動と災害意識に関する要因分析, 日本都市学会第 49 回大会報告要旨 一都市と危機管理, pp.40-41, 2002.
- 2) 矢守克也: 防災人間科学, pp.284, 東京大学出版会, 2009.
- 3) JAF: JAF Mate, 2014 年 3 月号, pp.29.
- 4) 清野純史, 三浦房紀, 瀧本浩一, 中島庸一: 個別要素法を用いた群衆行動シミュレーション, 地域安全学会論文報告集, Vol.4, pp.322-327, 1994.
- 5) Milgram, S., Bickman, L. and Berkowitz, L.: Note on the Drawing Power of Crowds of Different Size, Journal of Personality and Social Psychology, vol.13, pp.79-82, 1969.
- 6) 内閣府ホームページ: 平成 23 年東日本大震災における避難行動等に関する面接調査 (住民) 分析結果, <http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chousakai/tohokukyokun/7/pdf/1.pdf>. (参照年月日: 2014.07.01)
- 7) Dohi, Y., Okumura, Y., Koyama, M., Yuasa, R. and Kiyono, J.: Evacuee Generation Model of the 2011 Tohoku Tsunami in Kadonowaki: Proceedings of the JSCE Earthquake Engineering Symposium, 2014. (in press)
- 8) 後藤洋三: 石巻市門脇町, 南浜町の避難行動の聞き取り調査結果 (その 1) -住民の避難行動-, 日本地震工学会年次大会梗概集, Vol.10, pp.7-8, 2013.

EVACUEE GENERATION SIMULATION OF THE 2011 TOHOKU TSUNAMI IN KADONOWAKI, ISHINOMAKI

Yuji DOHI, Yoshihiro OKUMURA, Maki KOYAMA and Junji KIYONO

Many people could not evacuate from tsunami in spite of enough time for evacuation (more than half an hour) and warning information from public agency in the 2011 Tohoku Earthquake and Tsunami. The authors are focusing on evacuee generation during the period between the strong shaking and starting evacuation. Regarding evacuee generation, the concept that all the stakeholders including inhabitants have an important role in the influence that people can start evacuation early has been attracting attention. Based on this concept, the authors are developing the simulation model for evacuee generation. In this study, we apply it to Kadonowaki district where the huge tsunami hit and caused a lot of damages in the 2011 Tohoku tsunami and make discussions on evacuee generation on this area. The result of this simulation reveals that the strong shaking has the most significant influence on evacuee generation and people in highly populated areas can start evacuation easily than in other areas.