コミュニティにおける津波避難初期過程の シミュレーションモデルの開発

Development of Simulation Model for the Initiation Process of Community's Tsunami Evacuation

土肥裕史¹・奥村与志弘²・小山真紀³・湯浅 亮⁴・清野純史⁵

Yuji DOHI, Yoshihiro OKUMURA, Maki KOYAMA, Ryo YUASA and Junji KIYONO

Regarding 2011 Tohoku Earthquake and Tsunami, more than 20,000 people were killed or missing. In addition, more than 90% of killed people were due to tsunami. Many people could not or did not evacuate from tsunami despite enough evacuation time and warning information. The awareness of danger in a community increases by not only information given by the governments and the mass media but also behaviors of people in a community. After their awareness reaches their upper limit, they start evacuation. In this study, authors developed the simulation model for the initiation process of community's tsunami evacuation focusing on awareness of danger in a community. Authors verified the model with simple conditions, and validated in the case study of an elderly care facility which was attacked by the 2011 Tohoku tsunami.

1. はじめに

東日本大震災（2011年）では、多くの住民が津波から逃げ切ることができなかった。犠牲者の9割以上が津波に巻き込まれたことに起因することが知られている。しかし、津波避難のために30分以上の時間があり、津波警報や避難勧告などの危機を知らせる公的機関からの情報も提供されていた。さらに、同災害の被災地は津波防災意識が我が国でトップクラスの津波常襲地域であった。

著者らは、津波避難において、避難開始に問題点があると注目した。そこで、東日本大震災等で露呈した避難開始の難しさに注目し、地震発生から避難開始までの避難初期過程を、従来とは異なる捉え方で分析を行う。従来、我が国では専門家（行政など）が非専門家（住民など）に危険を知らせ、その情報を受け取った後に、論理的な意思決定プロセスに従い、非専門家が避難行動を開始するかどうかを判断するという捉え方で、住民の避難を促す研究がなされてきた（例えば及川・片田, 2002）。しかし、東日本大震災等において、多くの住民が家族・近隣住民の呼びかけや避難行動に刺激され、避難を開始しており、上記の観点だけでは十分に説明できない（内閣府, 2012）。著者は、専門家だけではなく、住民一人ひとりがコミュニティの危機感を高める重要な情報発信源であると思われ、高められたコミュニティの危機感に

よって住民が避難行動を開始するという捉え方をする。避難初期過程を個人レベルだけではなく、コミュニティレベルで捉えている点に大きな違いがある。同様の考え方は、近年注目されつつある（例えば奥村ら, 2010; 近藤ら, 2012）。

以上を踏まえ、迅速な避難開始を促す方策を検討するためのツールの構築を目的として、コミュニティにおける避難初期過程のシミュレーションモデルの開発を行う。モデルの適用性は、東日本大震災において甚大な津波被害を受けた高齢者施設を対象に行う。さらに、対象施設における施設職員30人の避難行動を、避難開始に注目することで、避難初期過程における分析を行う。

2. 津波避難初期過程シミュレーションモデルの概要

(1) 避難初期過程のモデル化

a) 避難初期過程の全体像

本研究では、津波避難における避難初期過程に注目したシミュレーションモデルを開発する。本モデルの基本的概念は、情報の受信と発信を多くの要素との相互作用の中で表現することができるニューラルネットワークとよく類似していると考え、参考にする。

図-1は、住民が避難開始に至るまでのプロセスに沿った、開発するモデルの概念図を示す。図-1(a)は、住民 I が n 個の情報発信源($X_1 \sim X_n$; それぞれの重みは $W_1 \sim W_n$)から避難を促す情報を取得し、危機感 Y_I を高める様子を示す。このとき、避難を開始する危機感の上限は θ_I とする。図-1(b)は、住民 I の危機感が上限に達した後、避難を開始するとともに情報発信源 X_j として情報発信を

1 学生会員 修(工) 京都大学大学院 工学研究科都市社会工学専攻
2 正会員 博(情報) 京都大学助教 大学院地球環境学学
3 正会員 博(工) 京都大学特定准教授 大学院医学研究科
人間健康科学系専攻
4 正会員 国土交通省
5 正会員 工博 京都大学教授 大学院地球環境学学

行う様子を示す。以上のプロセスを、グラフおよびシミュレーションによるスナップショットを用いて、図-1(c)に示す。スナップショットは、住民Iが避難行動者の目撃により危機感を高め避難を開始する様子を表現し、グラフは、スナップショットに対応した、住民Iの危機感の時間変化を示す。スナップショットにおける左側の小円は住民I、右側の小円は避難行動中の住民、大円は避難行動者が他者の危機感に影響を与える範囲を示す。個々人を以上のようにモデル化することで、住民一人ひとりがコミュニティ全体の危機感を高め、さらに高められたコミュニティの危機感によって住民が避難行動を開始するという捉え方ができる。

こうした捉え方は、情報の入力、重み付けした各入力値の総和を計算、入力値総和の閾値超過による発火、というニューロンモデルによるネットワーク構造と類似し

ており、以下の式で表現される。

$$Y_I^t - Y_I^{t-1} = G_{(I)} * F_{conformity}(t, n) * \sum_{j=1}^N \Delta t_G M_{IJ}^t W_j X_j^t \dots\dots\dots (1)$$

$$Y_I^t - \theta_I = \begin{cases} \leq 0: \text{acquiring information} \\ \geq 0: \text{starting evacuation behavior} \end{cases} \dots\dots (2)$$

ここで、 Y_I^t は時刻 t における住民Iの危機感の蓄積、 $F_{conformity}(t, n)$ 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 は避難初期過程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（0もしくは1で表す）、 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を表す関数（0もしくは1で表す）、 θ_I は住民Iの避難開始を決定する閾値である。

b) 情報発信源 X

本研究では、情報発信源の影響範囲を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) 全解析領域型は、解析領域内すべての住民に影響を与え、例として地震による揺れ等がある。(b) 時間的に変化する面状の影響範囲型は、津波の接近・氾濫のように、新水域の拡大や接近により影響範囲が変化する。(c) 動き回る円形の影響範囲型は、情報発信源を中心とする同心円内部に存在する住民のみに影響を与える。例として、避難者の呼びかけや防災行政無線等がある。(d) 動き回る円形の影響範囲（遮蔽範囲あり）型は、視覚情報のように、情報範囲が遮蔽される場合の(c)を表す。例として、住民の避難行動等がある。なお(c)および(d)は、情報発信源が動かない場合を含む。また、コミュニティの避難開始のタイミングや対象地域に応じて、同じ情報発信源であっても属するパターンは異なる。例として、海水浴場における津波到達間際の避難開始状況を解析する場合を仮定する。津波の接近は、解析領域内すべての住民に影響を与えるため、(b) 時間的に変化する面状の影響範囲型ではなく、(a) 全解析領域型情に該当する。

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、地震による揺れ、津波の氾濫、テレビ・ラジオ、防災行政無線、避難行動、避難者の呼びかけの6点を情報発信源として

(c) 情報取得による危機感の変化および避難開始

図-1 開発するモデルの概念図

■ 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パターン

表-1 東日本大震災における「津波から避難開始のきっかけ」となった情報発信源の選択割合（「揺れによる影響」を選択した割合を1として比較する）

情報発信源	揺れの 影響	避難者の 呼びかけ	避難 行動	津波 氾濫	テレビ・ ラジオ	防災行政 無線
回答割合	1.000	0.679	0.401	1.353	0.199	0.237

解析結果のスナップショットを図-4に、避難完了者数を表-4に、エリアBの屋外にいた職員の危機感の変化を図-5に示す。解析の結果、30人中10人の職員が避難を完了した。また、エリアBの屋外にいた職員2人は、津波の目撃により危機感を高めた後、避難開始を促す呼びかけを聞き、避難を開始した。以上より、開発したシミュレーションモデルは、対象施設で得られた証言に基づく条件下において、避難初期過程を概ね再現できる。また、この検証により得られた、対象施設における情報発信源の重みを表-5に示す。これらの値は、表-1の関係をを用いて設定した。

4. 高齢者施設における避難初期過程の分析

図-6、図-7は、対象施設における津波避難初期過程の解析により明らかとなった、エリアごとの危機感の変化

図-4 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

表-4 職員の避難完了者数

初期位置	完了者数(人)
駐車場	0
エリアA	7
エリアB	2
エリアC	1
エリアD	0
エリアE	10
合計	30

表-5 対象施設における情報発信源の重み

津波の氾濫	8.4×10^{-3} (/sec)
他者の避難行動	2.5×10^{-3} (/sec)
避難者の呼びかけ	4.2×10^{-3} (/sec)

および情報発信源ごとの影響度を、避難開始率とともに示している。ここで、 Y は危機感の変化を示す。例として、 Y_{ALL} は全エリアの職員の危機感の平均、 $Y_{B,SHOUT}$ はエリアBの職員の津波氾濫による危機感の平均である。また、 N は避難開始割合を示す。例として、 N_C はエリアCの職員の避難開始者率である。なお職員の危機感の平均は、取得情報に正常性バイアスおよび集団同調性バイアスを乗じた後の値のため、取得情報の単純な総和と一致するとは限らない。これらを用いて、対象施設において推測される、避難初期過程について以下に示す。

- 1) 全体の危機感の平均は、0~20秒、20~32秒、32~50秒の3段階に分けられる。20~32秒における急激な危機感の上昇は、エリアCの職員の避難開始と避難ルートが大きな要因であると考えられる。
- 2) エリアEでは、情報が届かず職員の危機感が上昇しないため、誰も避難を開始しなかった。これは、著者らが2014年3月に行った、当時エリアEにいた職員への聞き取り調査結果と合致するものである。（この職員は、避難を開始せず津波に飲まれたが、その後幸運にも救助され、大きな怪我もなかった。）
- 3) エリアBでは、呼びかけによる危機感の上昇が最も大きい。また、情報発信源ごとの影響度の総和が、 Y_B に

図-5 エリアBの屋外にいた職員の危機感の変化
図-6 エリアごとの危機感の変化および避難開始率

図-7 各エリアにおける情報発信源別の危機感の変化および避難開始率

設定する。また、東日本大震災に関する一連の調査結果（内閣府，2011；内閣府，2012；（株）サーベイリサーチセンター，2011；（株）ウェザーニューズ，2011）における「津波から避難したきっかけ」の回答結果を用いて、情報発信源ごとの重みを設定する。上記の調査結果から、本研究で設定する情報発信源6点のうち、いずれかを選択した回答数を情報発信源別に抽出する。表-1は、「揺れによる影響」の回答割合を1としたときの情報発信源ごとの回答割合を示す。以降、この比に従い、本モデルを適用するケースごとに情報発信源別の重みを設定する。

c) 避難開始の閾値

同一の情報発信源から同じ量の情報を取得しても、個々人によって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。例として、防災教育や過去の災害の経験により、住民ごとに閾値のばらつきが生じる。なお次章以降の解析では、閾値のばらつきを考慮せず、1で統一している。今後、閾値のばらつきを考慮した避難開始過程の解析を行っていく。

d) 計算時間間隔

本研究において、著者らは避難初期過程をモデル化した。避難開始後の避難行動は既存の避難行動数値計算モデルを使用し、避難初期過程モデルと結合することで、津波避難シミュレーションモデルとして表現する。そのため、避難初期過程のモデル化において、結合する避難行動数値計算モデルの計算時間間隔によらず、一定時間ごとに情報伝達を表現する必要がある。そこで、避難初期過程モデルにおける計算時間間隔を0.1secとし、避難開始前後の両モデルの計算時間間隔が、互いのモデルに影響を与えないように設定した。

(2) 避難行動数値計算モデル

本研究では、清野ら（1994）が開発した個別要素法（DEM）に基づく避難行動数値計算モデルを使用した。モデルの詳細および計算に用いる諸元は、奥村ら（2013）の研究を参照されたい。

(3) シミュレーションモデルの妥当性の検証

本研究では、開発したシミュレーションモデルにおいて期待される機能が、設計どおりの挙動をするかの検証を、簡易な条件設定下で行った。表-2に、本シミュレーションモデルが有する基本機能を示す。表-2の1から6の項目について、300m×400m、あるいは300m×300mの矩形

表-2 本シミュレーションの基本機能

	基本機能
1	集団における相互作用
2	避難開始の閾値 θ の個人差
3	情報発信源の種類ごとの重み W の差
4	壁による視覚情報の影響遮断
5	情報発信源の影響範囲のパターンによる違い（表-1）
6	集団同調性バイアス（同時に複数の情報を受け取るほど、危機感の高まりが早まる）

領域内に2～33人の住民を配置して、それぞれ検証を行った。この結果、期待される基本機能の全てが正しく表現できることを確認した。

3. 高齢者施設における適用性の検証

(1) 施設概要

本研究では、東日本大震災にて甚大な津波被害を受けた、宮城県南三陸町志津川地区にある高齢者施設を対象に検証を行う。対象施設は、標高12～13m程度の比較的高所にあり、海岸線から約1km離れている。また、70段の階段によって高台にある高校とつながっている。屋外からは市街地を一望でき、建物南側から隣接する公園に出ることが可能である。

(2) 初期条件の設定

解析の初期条件として、奥村ら（2013）が対象施設にて行った面接調査・研究結果のうち、避難開始に関する内容を抽出し用いる。図-3に解析対象施設の間取りおよび職員の配置を、表-3に適用性の検証における設定条件を示す。その他の設定条件の詳細は、奥村ら（2013）の研究と同じ諸元を用いたため、参照されたい。

(3) 適用性の検証

適用性の検証における評価指標として、以下に示す、奥村ら（2013）が得た証言を用いる。

- 1) 津波の第一波に飲まれず避難した職員は10名弱であった。
- 2) エリアBの屋外にいた職員は、津波の氾濫を目撃し危機感を高めた後、他の職員による呼びかけを聞き、避難を開始した。

図-3 対象施設の施設の間取り、職員の配置。奥村ら（2013）に加筆した。

表-3 適用性の検証における設定条件

(a) 職員・利用者の配置と人数			(b) 職員・解析における諸元	
場所	職員(人)	利用者(人)	対象人数	30(人)
駐車場	4	0	視野の範囲	110(m)
エリアA	0	0	呼びかけが届く範囲	30(m)
エリアB	7	15	解析時間	160(sec)
エリアC	6	15		
エリアD	7	17		
エリアE	6	22		
合計	30	69		

比べてかなり小さいため、集団同調性バイアスの影響が大きいことが考えられる。これは、エリアCの職員の避難開始により、多くの情報（呼びかけ、避難行動）を取得したことによると推察される。

- 4) エリアCでは、呼びかけによる避難開始への影響が最も大きい。これは、駐車場にいた職員からエリアCの職員へ呼びかけが届いたが、施設内の壁により、避難行動を目撃できなかったと考えられる。
- 5) エリアDでは、エリアBと同様に、呼びかけによる危機感の上昇が大きく、エリアCの職員の避難開始による集団同調性バイアスの影響が大きいことが分かる。しかし、避難行動の目撃による危機感の上昇が非常に小さい。これは、エリアC・エリアD間の壁により、視野が遮られるためである。
- 6) 全体の危機感に注目すると、呼びかけによる影響が最も大きい。続いて、津波氾濫による影響が大きい。これは、施設屋外にいた職員の避難開始が、津波の目撃に大きく起因すると考えられるためである。一方で、避難行動による影響は小さい。これは、施設内は壁が多いため視野が遮断され、他者の避難行動を目撃しづらいためだと考えられる。加えて、情報発信源ごとの重みの差も重要である。また、集団同調性バイアスの影響が大きいことも確認できる。

以上より、対象施設での避難開始を大きく促す情報発信源は、呼びかけおよび津波氾濫であることがわかった。また、対象施設（および同様のコミュニティ）の避難開始を考えるうえで、壁の影響、情報発信源ごとの重みの差、呼びかけが届く範囲、避難経路、集団同調性バイアスの影響が重要であると考えられる。

5. 結論

本研究では、コミュニティの危機感の高まりに注目した避難初期過程のシミュレーションモデルの開発を行った。その後、東日本大震災で甚大な津波被害を受けた高齢者施設に適用し、開発したモデルの適用性の検証とともに、当該施設での避難初期過程の分析を行った。得られた主要な結論を以下に示す。

- 1) 住民等の非専門家が、コミュニティ全体の避難開始に重要な役割を担うことを考慮した、コミュニティにおける避難初期過程のシミュレーションを開発した。情報蓄積量が等しい場合における、避難開始のタイミングの個人差は、危機感の上限値をパラメータとすることで表現した。また、情報発信源ごとの影響度の差は、情報発信源ごとに重みを与えることで設定した。本モデルの主要な機能はいずれも簡易な条件設定下で実施した避難シミュレーションによって設計通りに挙

動することを確かめた。

- 2) 開発したモデルを適用した対象施設での避難の初期過程は、情報発信源に付与する重みを表-5の通り設定することで概ね再現可能である。
- 3) 対象施設における危機感の平均は、0~20秒、20~32秒、32~50秒の3段階に分けられる。20~32秒における急激な危機感の上昇は、エリアCの職員の避難開始と避難経路が大きな要因であると考えられる。
- 4) 対象施設における全体の危機感、呼びかけによる影響が最も大きい。一方で、避難行動による影響は小さい。これは、施設内は壁が多いため、他者の避難行動による視覚情報が遮断されると考えられる。また、集団同調性バイアスの影響も大きい。
- 5) 今後、対象施設と同様のコミュニティにおける避難初期過程の検討にあたり、壁の影響、情報発信源ごとの重み、呼びかけが届く範囲、避難経路、集団同調性バイアスの影響が重要であると考えられる。

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

- 及川 康・片田敏孝（2002）：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－都市と危機管理，pp.40-41。
- 奥村与志弘・原田賢治・河田恵昭（2010）：2009年サモア諸島沖地震津波における住民の避難行動特性とその変化－米領サモア現地調査を踏まえて－，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol.66，No.1，pp.1371-1375。
- 奥村与志弘・中道尚宏・清野純史（2013）：想定を超える津波からの避難の特徴と対策－宮城県志津川地区の事例分析－，土木学会論文報告集B2（海岸工学），Vol.69，No.2，pp.1366-1370。
- （株）ウェザーニューズ（2011）：東日本大震災 津波調査（調査結果），http://weathernews.com/ja/nc/press/2011/pdf/20110920_1.pdf，参照2013-12-08。
- （株）サーベイリサーチセンター（2011）：宮城県沿岸部における被災地アンケート，http://www.surece.co.jp/src/research/area/pdf/20110311_miyagi.pdf，参照2013-12-08。
- 清野純史・三浦房紀・瀧本浩一・中島庸一（1994）：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。
- 近藤誠司・矢守克也・奥村与志弘・李 勇（2012）：東日本大震災の津波来襲時における社会的なリアリティの構築過程に関する考察～NHKの緊急報道を題材としたメディア・イベント分析～，災害情報，Vol.10，pp.77-90。
- 内閣府（2011）：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（オンライン），<http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chousakai/tohokukyokun/7/pdf/1.pdf>，参照2013-12-01。
- 内閣府（2012）：東日本大震災時の地震・津波避難に関する住民アンケート調査〔主な調査結果〕（オンライン），http://www.bousai.go.jp/jishin/tsunami/hinan/pdf/20121221_chochol_1.pdf，参照2013-12-01。