

逸脱者の存在を考慮した 津波避難ルールの脆弱性の分析

中居 楓子¹・畑山 満則²・Junko Mochizuki³・Poledna Sebastian³

¹ 正会員 京都大学防災研究所研究員 巨大災害研究センター (〒601-0011 京都府宇治市五ヶ庄)
E-mail: nakai.huko.8n@kyoto-u.ac.jp

² 正会員 京都大学防災研究所教授 巨大災害研究センター (〒601-0011 京都府宇治市五ヶ庄)
E-mail: hatayama@imdr.dpri.kyoto-u.ac.jp

³ Member of IIASA, International Institute for Applied Systems Analysis
(Schlossplatz 1 - A-2361 Laxenburg, Austria)
E-mail: mochizuk@iiasa.ac.at
E-mail: poledna@iiasa.ac.at

津波避難では、同時に多くの人と同じ方向に逃げるため、渋滞が生じやすい。そのため、地域の問題に応じた環境整備や避難ルールの検討を事前におこなっておく必要がある。しかし、過去の災害において避難時の「原則徒歩」ルールが守られていない事実からもわかるように、避難時のルールを決めても、それに沿わない行動をする住民（逸脱者）が出る可能性は十分にある。また、逸脱者の存在によって、地域の避難ルールが効果を発揮しない場合もあると考えられる。本研究では、逸脱者の存在が、他の地域住民の避難にかかる所要時間に与える影響について、「限界損失」を用いて評価する。また、その結果から、原則徒歩ルールがもたらすはずの本来の効果が低減される可能性を指摘し、「ルールがもつ脆弱性」として分析をおこなう。

Key Words: *evacuation rule, defection, fragility, tsunami, multi-agent model, simulation*

1. はじめに

津波からの避難では、同時に多くの人と同じ方向に逃げるため、渋滞などが生じやすい。したがって、事前に起こりうる交通状況を予測し、地域の問題に応じた環境整備や避難ルールの検討をおこなうことが重要である。

しかし、避難時のルールに従うかどうかを決定する主体は個人であるため、ルールが守られない可能性もあり得る。東日本大震災以前に定められていた「原則徒歩」のルールなどはその代表例である。災害時には、道路閉塞や渋滞などが懸念されるため、市町村の地域防災計画では「車は利用せず、徒歩で避難すること」が原則とされている¹⁾。しかし、過去の災害でおこなわれた避難行動調査(表 1)によると、避難者の 5~6 割程度が車を利用しており、「原則徒歩」のルールは実態として十分に機能しているとは言えない。

住民が車を利用した理由の上位には「車で避難しないと間に合わないと思った」「車が大切な財産だから」などが挙げられている。しかし、その結果、車で避難して渋滞に遭遇した人は東北地方太平洋沖地震で 34%²⁾、

福島県沖地震で 17%³⁾となっており、一部の住民にとっては避難にかかる所要時間(家を出発してから避難場所に到着するまでの時間、以下「避難所要時間」という)を長引かせる可能性があることが指摘された。これより、車避難は、個人が個人の利益を求めて行動することにより他の人が被害を受ける、という外部性の問題を含んだ課題であるといえる。

それでは、原則徒歩ルールに従わない人(以下、逸脱者という)の存在は、他の地域住民の避難にかかる所要時間にどれだけ外部性を与えるのだろうか。この外部性は、逸脱者が増えたときに他の地域住民に発生する追加的な損失である限界損失として定義できる。一般的な経

表 1 避難行動調査における車利用率

発生年月	名称	車利用率
2011. 3	東北地方太平洋沖地震 ²⁾	57%
2014. 3	福島県沖地震・津波 ³⁾	73%
2016. 11	伊予灘地震 ⁴⁾	55%

済の問題であれば、限界損失を計量化したうえで、ピグー税・補助金等を導入することによって解決が図られる。また、平常時の交通問題であれば、ロンドンの混雑税などによる対処も可能である⁵⁶⁾。しかし、津波避難の問題において金銭的な対処は現実的ではない。

藤井(2001)⁷⁾は、交通問題の解消において、人々の態度変容に働きかける心理的方略の有効性を示している。特に、道徳心、利他心、規範意識等の公共利益の増進に結びつく動機「公共心」の活性化が必須であると述べている。また、心理的方略を実現する技術として、事実情報の提供、経験誘発法、コミュニケーション法を挙げている⁸⁾。しかし、災害という稀有な事象下においては、事実や経験を得ることができないため、再検討が必要である。問題を解決するためには、住民の選択行動をよく理解したうえで、課税・補助金等に替わる動機を創出することが求められる。

2. 本研究の目的

本研究では、住民の逸脱行動モデル構築の基礎的情報となる、(1)「限界損失」を定量的に評価する。また、その結果を用いて、原則徒歩ルールがもたらすはずの本来の効果が低減される可能性を指摘し、(2)「ルールがもつ脆弱性」として分析をおこなう。なお、本稿では逸脱行動に特定のモデルを仮定していない。

また、移動手段以外に避難行動を規定するいくつかの項目（避難場所、出発地、出発時刻など）については、4(1)で示す文献⁹⁾に基づいて与えるものとする。本研究における逸脱とは車を利用すること、逸脱しないことは徒歩で行くことを指す。

(1) 車避難における限界損失の考え方

原則徒歩ルールのもとで発生する逸脱者は、ルールが本来もたらすはずの効果をどの程度低減させるのだろうか。本研究では「逸脱者が増えた場合に他人が被る所要時間の増加」、つまり限界損失： T をルール効果の低減の度合いとして用いる。本節では、車避難における社会的限界費用、私的限界費用と限界損失の考え方について、問題を簡略化したうえで整理する。

まず、住民の総数を N 、逸脱者の数を A とおく。そして、逸脱者、非逸脱者の避難所要時間をそれぞれ t 、 t' とおく。いま、逸脱者の数が ΔA だけ変化しとす。このとき、一人当たりの所要時間は、逸脱者、非逸脱者それぞれに Δt 、 $\Delta t'$ 変化するとす。すると、社会的費用 c の変化量（社会的限界費用） Δc は次の式で書ける。

$$\Delta c = (A + \Delta A)(t + \Delta t) + ((N - A) - \Delta A)(t' + \Delta t) - (At + (N - A)t')$$

$$= \Delta A(t + \Delta t) + A\Delta t - \Delta A(t' + \Delta t') + (N - A)\Delta t' \quad (1a)$$

ここで、 $\Delta A = 1$ とおくと、(1a)は以下ようになる。

$$\Delta c = \Delta t(A + 1) + \Delta t'(N - A - 1) + t' - t' \quad (1b)$$

右辺の第一項と第二項は逸脱者が一人増えたときの限界損失を表している。これは、逸脱者数の変化による避難所要時間の変化量と各々の総数をかけたもので、総走行時間の変化量を意味する。また、 t と t' の和は私的限界費用を意味し、逸脱者と非逸脱者それぞれひとりあたりが持つ避難所要時間のことである。

しかし、実際の避難の状況を考慮すると、このように解析的に得られる値では、地域における具体的な対策の立案は困難である。実際には、 Δt 、 $\Delta t'$ 、 A などの値がどのように生じるかを問い、それに応じた解決策を提案することが重要である。したがって、次の2点に考慮する必要がある。

- ① 避難所要時間 t 、 t' の値はその住民の居住地域や年齢、世帯構成、目指す避難場所などの住民属性、空間属性に大きく依存する。
- ② 各住民の避難所要時間の増分 Δt （損失）も住民属性、空間属性などによって異なる。

これらの理由から、本研究では、限界損失を、マルチエージェントモデルによる避難シミュレーションを使って数値的に明らかにする。なお今回は、住民を属性ごとにおいて分析する。属性 k をもつ住民の数を A_k で表し、 A_k が1単位増加した場合の限界損失を T_k として以下の値を得る。

$$T_k = \sum_{i=1}^{A_k} \Delta t_i + \sum_{j=1}^{N-A_k} \Delta t_j \quad (2a)$$

これは便宜上、逸脱者と非逸脱者の項を分けているが、単に全住民の所要時間の増分を足し上げたものである。

(2) 限界損失を用いたルールの脆弱性の分析

逸脱者に対する「原則徒歩」のルールの脆弱性を、(1)逸脱者が全住民からランダムに抽出される、(2)逸脱者の発生率を住民属性 k ごとに独立とし、各属性グループからランダムに抽出される、というふたつのケースについて検討する。次のページの表2に考慮する属性の分類を示した。考慮する属性 k には、世帯構成と居住地を用いる。例えば、世帯構成ごとに住民を分類した分析では、すべての住民は、a.高齢者のいる世帯、b.子供のいる世帯、c.高齢者も子供もいない世帯、d.高齢者も子供もいる世帯のいずれかに該当する。

表 2 属性の分類

属性	表記 k =	分類
世帯構成	a	高齢者(65 歳以上)のいる世帯
	b	子供(13 歳以下)のいる世帯
	c	高齢者・子供がいない世帯
	d	高齢者・子供がいる世帯
居住地	e	海側に居住している世帯
	f	山側に居住している世帯

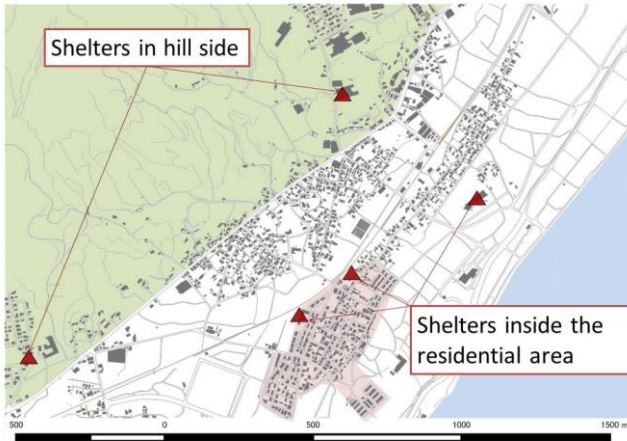


図 1 万行地区と避難場所の位置関係

逸脱は a, b, c, d それぞれに独立して発生する。脆弱性の分析にあたっては、まず、上記(2a)の式における T_k に対して、いくつかの A_k のシナリオ (逸脱者発生シナリオ, 逸脱率によって与える。4-(2)に記載) を作成し、 $T_k(A_k)$ を得た後、 $T_k(A_k)$ の形状や、着目する特定の A_k の値を分析することにより、ある属性 k をもつ住民が逸脱することによる損失の性質を明らかにする。

3. 対象地域

対象地域である万行地区(図 1)は、高知県西南部に位置する黒潮町の海沿いの地区である。人口約 600 人、約 250 世帯が暮らす地域である。「南海トラフの巨大地震モデル検討会 (第二次報告)」で示された市町村別最大震度¹⁰⁾によると、黒潮町では最大震度 7 という強い地震動に見舞われることが予測されている。さらに、それに伴い、万行地区では避難の障害となる 30cm 程度の高さの津波が、22 分程度で居住域に到達し、最大 14 メートル以上の高さになると想定されている。

4. 研究の方法

対象地域で実施した避難行動調査のデータを用いて、逸脱者発生シナリオを作成する。そして、シナリオに基づいた割合で逸脱者と非逸脱者を混在させた避難シミュレーションを実施し、各エージェントの避難所要時間か

ら T_a, T_b, T_c, T_d , および T_e, T_f を計算する。

(1) 利用するデータ

2012 年に実施した全世帯を対象とした津波避難行動に関する聞き取り調査の結果⁹⁾を用いる。全住民について、想定している避難先、経路、移動手段、年齢などの属性が把握されている。介助が必要ななどの個人の属性に関する項目(同居の家族についても同様の情報を聴取)、防災対策の状況などを聴取している。

(2) 逸脱者発生シナリオの作成

ここでは、(1)逸脱者が全住民からランダムに抽出される、(2)逸脱者の発生率を住民属性 k ごとに独立とし、各属性グループからランダムに抽出される、というふたつのケースを作成する。逸脱者として抽出された住民は車に乗って避難し、抽出されなかった住民は徒歩で避難する。

(3) 避難シミュレーション

避難シミュレーションには、畑山ら(2013)¹¹⁾によるマルチエージェントモデルに、歩行者と車の相互作用を追加したものを利用する。モデルの基本には、浅野¹²⁾による歩行者の行動モデルと、追従モデル¹³⁾を基本とした車のモデルを用いた。これに、歩車間の相互作用として、①車が歩行者を追い越す、②車がすれ違う、③車と歩行者がすれ違う、という 3 つの状況に応じた行動のモデルを追加した。

避難シミュレーション上での行動モデルは物理的なものであり、経路の意思決定などは行わない。これらは、ステップ i の時に周囲に存在する最も近い主体との距離に応じて $i+1$ 時の速度を決定するものである。この基本モデルによって渋滞の表現が可能となる。

5. 結果と考察

本稿では、現段階で得られた(1)逸脱者が全住民からランダムに抽出された場合の結果のみを示す。

(1) 逸脱者が全住民からランダムに抽出された場合

このケースでは、すべての住民を含む集合から逸脱者をランダムに選んだ。また、シナリオとしては、逸脱者数を住民総数の 10%-90% で変化させた場合の 9 シナリオを用いた。

結果として、総避難所要時間は、逸脱者の発生が 10% から 80% の間は下降する様子が見られた(図 2-左)。したがって、逸脱者が 10% ずつ増えたときの、他の地域住民に発生する追加的な損失である限界損失(図 2-右)は 80% まではマイナスの値となっている。これは、車利用

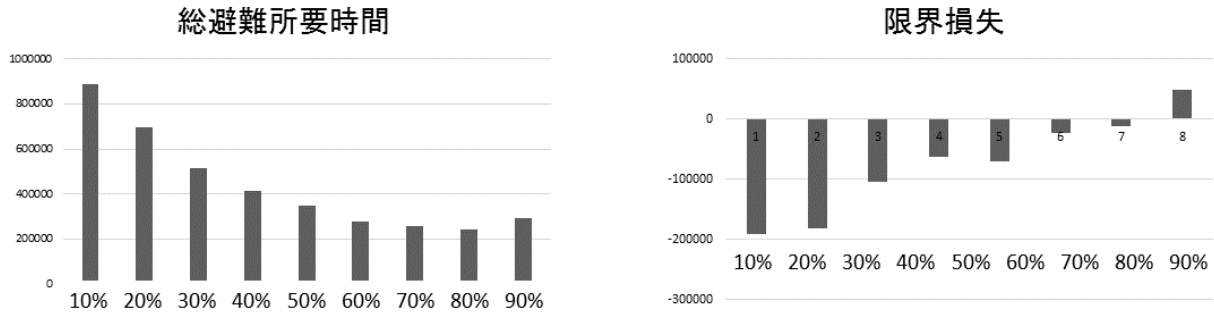


図2 逸脱者数を住民総数の10%-90%で変化させた場合の総避難所要時間と限界損失

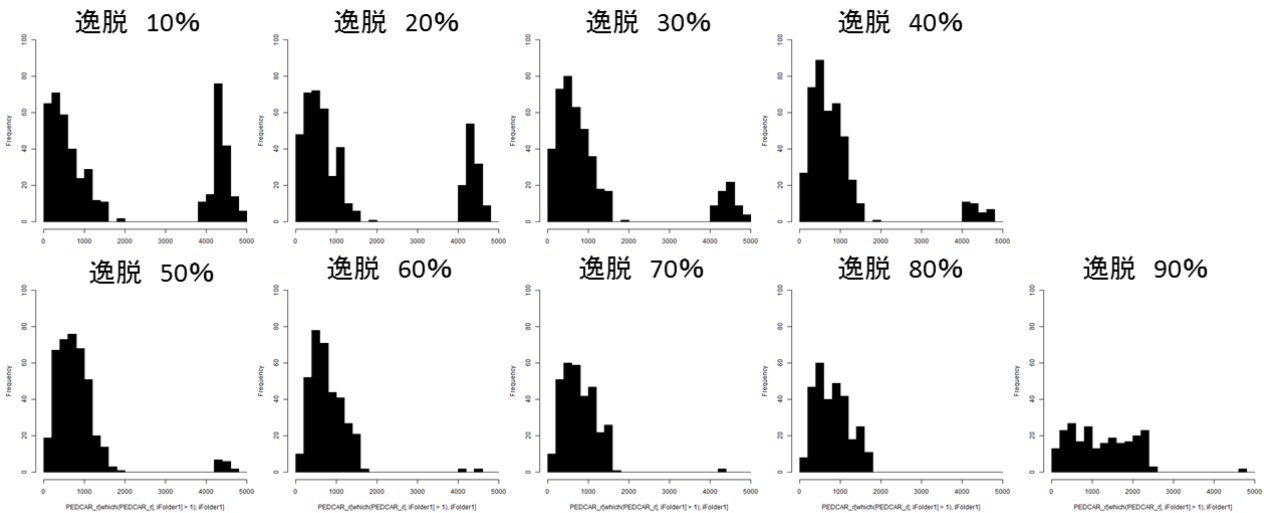


図3 逸脱者数を住民総数の10%-90%で変化させた場合の避難所要時間分布

ど者が80%程度になるまでは地域全体として使えば使うほど良いということを示していると言える。

図3は、逸脱者数を住民総数の10%-90%で変化させた場合の避難所要時間分布を示している。逸脱10%のグラフを見ると、避難所要時間が比較的早いグループと遅いグループに二分されていることが分かる。しかし、逸脱者が増えるにしたがって、後者のグループは消えていくことがわかる。計算上、80%程度の住民の逸脱は許容されることがわかったが、90%を超えると、地域の最短津波到達時刻を超えてもまだ多くの住民の避難が完了していないという状況になることが示唆される。

6. まとめ

本稿では「津波避難における原則徒歩ルールは住民による逸脱に対してどの程度脆弱なのか」ということについて、明らかにしてきた。現段階で得られている結果は、(1)逸脱者が全住民からランダムに抽出された場合のものであるが、限界損失を用いた手法によって、ルールの性質を示す情報となり得ることを示すことができた。

しかし、現段階では「どのような属性の住民の逸脱に対してルールは脆弱なのか」という問いには答えられて

いない。2-(1)で述べたように、実際の避難行動には住民の様々な属性が影響することが考えられるため、これを考慮できていない現段階の結果は不十分である。

さらに、今後対策を考えるにあたっては、住民の選択行動、すなわち逸脱するか否かに着目する必要がある。今回は、逸脱者数が外生的に与えられたが、実際に逸脱をするかどうかの意思決定は、逸脱しない場合の避難所要時間 t に大きく依存すると考えられる。また、直感的には t が大きければ大きいほど逸脱の動機は高まると考えられるが、 t だけでなく、他の様々な要素や個人の特性に応じて逸脱を選択する確率は異なると考えられる。

今後は、本研究で明らかにした限界損失を住民の選択行動に組み込んだモデルを検討する。そのうえで、逸脱による限界損失が比較的大きな住民に対しては、逸脱行動を抑制するような動機的设计を検討する予定である。

参考文献

- 1) 消防庁国民保護・防災部防災課：津波避難対策推進マニュアル検討会 報告書, p.30, 2013.
- 2) 内閣府：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, pp.13, 2011.

- 3) 石巻市総務部危機対課, 東北大学災害科学国際研究所, 株式会社サーベイリサーチセンター: 2016年11月22日福島県沖地震津波避難行動に関するアンケート http://www.tohoku.ac.jp/japanese/newimg/pressing/tohokuuniv-press20170306_01web.pdf, p.13, 2017, (2017.4.20 情報取得).
- 4) 孫英英, 中居楓子, 矢守克也, 畑山満則: 2014年伊予灘地震における高知県沿岸住民の避難行動に関する調査, 自然災害科学, vol.33, no.1, pp.53-63, 2014..
- 5) Car Clubs Strategy - Evidence Summary March 2015, <http://content.tfl.gov.uk/car-club-evidence-summary.pdf>, pp.1-13, 2015, (2017.4.27 情報取得).
- 6) A Car Club Strategy for London Growing car clubs to support London's transport future.
- 7) 藤井聡, “TDMと社会的ジレンマ 交通問題解消における公共心の役割,” 土木学会論文集, no. 667, pp. 41-58, 2001.
- 8) 藤井聡, “交通計画のための態度・行動変容研究—基礎的技術と実務的展望—,” no. 737, pp. 13-26, 2003.
- 9) 中居楓子・畑山満則: 住民の避難行動の分析および地域住民との連携による避難計画の検討と評価: 高知県黒潮町における災害リスクコミュニケーションの事例研究, 土木計画学研究・講演集, Vol.47, CD-ROM(54), 2013.
- 10) 内閣府: 南海トラフの巨大地震モデル検討会(第15回)記者発表資料一式(10)市町村別の最大となる震度, http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/15/pdf/kisya_10.pdf, pp.18, 2012, (2016.2.3 情報取得).
- 11) 畑山満則, 中居楓子, 矢守克也: 地域ごとの津波避難計画策定を支援する津波避難評価システムの開発, 情報処理学会論文誌ジャーナル, Vol.55, No.5, 2013..
- 12) 浅野美帆・桑原雅夫: 先読み行動を考慮した歩行者交通流シミュレーション, 生産研究, vol.59, no.3, pp.38-41, 2007.
- 13) Pipes, L. A.: An Operational Analysis of Traffic Dynamics, Journal of Applied Physics, Vol.24, No.3, pp.274—287, 1953..
- 14) 畑山満則, 中居楓子, 矢守克也: 地域ごとの津波避難計画策定を支援する津波避難評価システムの開発, 情報処理学会論文誌ジャーナル, Vol.55, No.5, 2013.

(2017. 4. 28 受付)

MEASURING VULNERABILITY OF TSUNAMI EVACUATION RULES TAKING ACCOUNT OF COMPLIANCE OF EVACUEES

Fuko NAKAI, Michinori HATAYAMA, Junko MOCHIZUKI and Sebastian POLEDNA

Evacuation rules in community are sometimes collapsed because of the conditions of social factors including decision making by individuals. This research tries to identify the fragility of evacuation rule that community rule has. The fragility is identified by the marginal external damage(i.e. the time required to move to the safe place) calculated by an agent-based model (ABM). We apply the methodology to a research domain, Kuroshio, Kochi prefecture in Japan.