

# 地域条件を考慮した津波避難ルールの規範的分析

大西 正光<sup>1</sup>・柳澤 航平<sup>2</sup>・矢守 克也<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 京都大学准教授 防災研究所 巨大災害研究センター (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)  
E-mail: onishi.masamitsu.7e@kyoto-u.ac.jp

<sup>2</sup>学生会員 京都大学修士課程 情報学研究科 社会情報学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)  
E-mail: yngsw32@drs.dpri.kyoto-u.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 京都大学教授 防災研究所 巨大災害研究センター (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)  
E-mail: yamori@drs.dpri.kyoto-u.ac.jp

「津波てんでんこ」は、ある地域コミュニティにおける避難方法に関する 1 つの共有化されたルールである。しかし、津波てんでんこがあらゆる地域コミュニティの条件や想定シナリオの下で、最も望ましい避難ルールであるという理論的・実証的証拠が存在するわけではない。要するに、望ましい避難ルールは、対象とする地域コミュニティの属性に依存し、避難ルールは地域コミュニティの属性に応じたものを選択する必要がある可能性がある。本研究では、てんでんこ避難、救援避難とそれらを併用したハイブリッド避難の 3 つの避難ルールを対象として、それらの避難ルールのパフォーマンス評価を行う。その上で、地域コミュニティの属性や想定される津波の規模に応じた望ましい避難ルール選択を提案する。

**Key Words:** tsunami tendenko, evacuation, performance measurement

## 1. はじめに

2011年の東日本大震災の際、釜石で普及していた「津波てんでんこ」により多くの生命が救われた事実は、津波避難の成功例として社会的にも注目を浴びた。「津波てんでんこ」の成功を契機として、今日では防災教育や防災訓練を通じて知識として全国的に普及しつつある。

「津波てんでんこ」は、ある地域コミュニティにおける避難方法に関する 1 つの共有化されたルールである<sup>1)</sup>。「自らの生命は自ら守る」という自己避難原則を徹底することにより、身内や知り合いに対する救援行動の可能性を抑制することにより、すみやかな避難行動を実現することができる。「津波てんでんこ」の基本的原理は、自己避難原則の徹底であり、居住者全体の避難モビリティを確保することが求められる。

しかし、急速な少子高齢化が進むわが国において、特に地方部では、高齢化率が 50%を超えており、半数以上の住民が高齢者であるような地域も少なくない。また、想定される津波の規模は地域によっても異なる。津波の影響を受ける地域属性には多様性がある一方で、いかなる条件の下でも自己避難原則を基本原理とする津波てんでんこが最善の方略であるという保証はない。

以上の問題意識に基づき、本研究では、地域条件を考慮した「津波てんでんこ」のパフォーマンスを評価するための方法論を提案する。評価方法の構築により、「津波てんでんこ」が望ましい避難ルールとなるような地域コミュニティの条件の同定が可能になり、どのような地域において「津波てんでんこ」を採用すべきかという指針を導き出すことができる。

以下、2. では、津波からの避難ルールのパフォーマンス評価を行うために、沿岸都市モデルを定式化する。津波避難モデル範疇的条件について考察する。4. では、津波避難の評価モデルを定式化する。5. では、4. で定式化した評価モデルに基づいて、「津波てんでんこ」の適用条件を明らかにする。6. では、本研究の成果を取りまとめるとともに、今後の課題について言及する。

## 2. 一様避難ルールモデル

### (1) モデル化の前提条件

今、図-1に示すように、直線的な海岸線に沿って立地する都市空間を考える。都市空間の幅を 1 と基準化する。都市空間の海岸線からの奥行きを  $L$  と表そう。海岸線方向については、都市空間内で一様に人口が分布する一方、

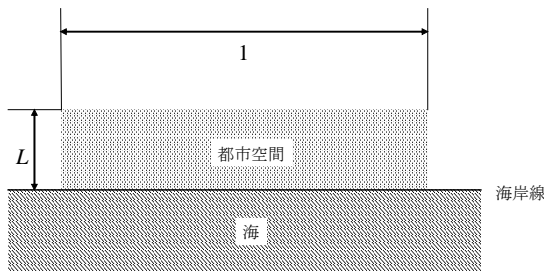


図-1 沿岸都市モデル

奥行き方向には、海岸線からの距離を  $x$  と表すと、 $f(x), x \in [0, L]$  にしたがって分布している。都市内人口を 1 に基準化すれば、

$$\int_0^L f(x) dx = 1$$

が成立する。

避難者は大地震が発生したら、津波が来ることを前提に、即座に避難行動に移る。都市空間の地形は均質であり、避難者は任意の場所を通過することができる。したがって、すべての避難者は大地震が発生すれば、海岸線と垂直方向に海岸線とは反対側に避難する。避難者は一斉に避難するが、簡単化のため、交通混雑は発生しないとする。

また、避難者には、健全な脚力を有する通常の避難モビリティを有するタイプ  $\alpha$  と、足が不自由であり相対的に避難モビリティが低いタイプ  $\beta$  が存在する。タイプ  $\beta$  の避難者全体に占める割合を  $p$  と表す。タイプ  $i$  の移動速度を  $v_i$  と表す。ただし、 $v_\alpha > v_\beta$  である。

津波の波高を  $h$  と表す。また、津波が到達する海岸線からの距離を  $y$  とする。津波の波高が高いほど、津波の影響範囲は大きい。したがって、 $y$  は波高  $h$  の関数として表され  $y = g(h)$  と書ける。ただし、関数  $g(h)$  は  $h$  に関する単調増加関数である。

地震発生から津波が海岸線に到達するまでの時間を  $t$  と表す。津波が海岸線に到達してから、都市空間に津波が広がるまでには、実際には相当の時間が存在する。しかし、本研究では、正確な定量化に目的があるわけではなく、避難ルールの定性的性質に関心がある。そのため、波高  $h$  が津波が海岸線に到達した時点で、都市空間のうち、海岸線から  $l = g(h)$  の空間的範囲が浸水すると考える。なお、津波の波高  $h$  は、 $0 \leq h < \bar{h} = g^{-1}(L)$  であり、最大波高の津波であったも、都市空間全体が浸水するケースは排除する。

まず、津波避難パターンとして、1) 都市内すべての住民が各自の足で逃げる「一様でんでんこ」、2) タイプ  $\alpha$  の住民がタイプ  $\beta$  の住民を救援する「一様救援避難モデル」を考える。

表-1 各タイプの避難者の割合

	$p \leq 0.5$ のとき	$p > 0.5$ のとき
タイプ $\alpha$	$1 - 2p$	0
タイプ $\beta$	0	$2p - 1$
タイプ $\gamma$	$2p$	$2(1 - p)$

### (2) 一様でんでんこモデル

まず、都市内すべての住民が自らの足で逃げる一様でんでんこモデルを考える。海岸線から  $x$  の距離に居住するタイプ  $i$  の避難者を避難者  $(x, i)$  と呼ぶ。避難者  $(x, i)$  は、津波が到達するまでに、海岸線から  $x + v_i t$  の地点まで逃げるができる。したがって、避難者  $(x, i)$  による避難行動の帰結は、

$$\begin{cases} \text{生存} & \text{if } x + v_i t > g(h) \\ \text{死亡} & \text{if } x + v_i t \leq g(h) \end{cases}$$

と表される。すなわち、波の波高  $h$ 、地震発生からの到達時間  $t$  のとき、海岸線から距離が  $x \in (g(h) - v_i t, L]$  の場所に居住する避難者が生存し、 $x \in [0, g(h) - v_i t]$  の場所に居住する避難者が死亡する。したがって、波の波高  $h$ 、地震発生からの到達時間  $t$  のとき、津波ででんこが適用された場合の都市空間全体の死亡者数  $D_1(h, t)$  は、

$$D_1(h, t) = (1 - p) \int_0^{g(h) - v_\alpha t} f(x) dx + p \int_0^{g(h) - v_\beta t} f(x) dx$$

と書ける。

簡単化のため、 $f(x)$  の分布形として一様分布を仮定すれば、

$$\begin{aligned} D_1(h, t) &= (1 - p)\{g(h) - v_\alpha t\} + p\{g(h) - v_\beta t\} \\ &= g(h) - v_\alpha t + pt(v_\alpha - v_\beta) \end{aligned}$$

となる。

### (3) 救援避難モデル

救援避難モデルでは、タイプ  $\alpha$  の住民 1 名がタイプ  $\beta$  の住民 1 名を救援する。タイプ  $\alpha$  の住民がタイプ  $\beta$  の住民を救援する場合、両住民の避難の際の移動速度は、 $v_\gamma$  となると仮定しよう。ただし、 $v_\alpha < v_\gamma < v_\beta$  である。このとき、 $p > 0.5$  であれば、すべてのタイプ  $\alpha$  の避難者は、タイプ  $\beta$  の避難者を救援する。また、 $1 - p$  の割合のタイプ  $\beta$  は救援を受ける一方、 $p - (1 - p) = 2p - 1$  の割合のタイプ  $\beta$  は自力で避難する必要がある。また、 $p \leq 0.5$  であれば、すべてのタイプ  $\beta$  の避難者が救援を受ける。一方、 $p$  の割合のタイプ  $\alpha$  の避難者が救援し、 $1 - p - p = 1 - 2p$  の割合のタイプ  $\alpha$  は救援せず自力で

表-2 一様てんでんこ避難の下での死亡者数

	$p \leq 0.5$ のとき	$p > 0.5$ のとき
タイプ $\alpha$	$(1-p)\{g(h) - v_\alpha t\}$	$(1-p)\{g(h) - v_\alpha t\}$
タイプ $\beta$	$p\{g(h) - v_\beta t\}$	$p\{g(h) - v_\beta t\}$
合計	$(1-p)\{g(h) - v_\alpha t\} + p\{g(h) - v_\beta t\}$	$(1-p)\{g(h) - v_\alpha t\} + p\{g(h) - v_\beta t\}$

表-3 一様救援避難の下での死亡者数

	$p \leq 0.5$ のとき	$p > 0.5$ のとき
タイプ $\alpha$	$(1-2p)\{g(h) - v_\alpha t\} + p\{g(h) - v_\gamma t\}$	$(1-p)\{g(h) - v_\gamma t\}$
タイプ $\beta$	$p\{g(h) - v_\gamma t\}$	$(1-p)\{g(h) - v_\gamma t\} + (2p-1)\{g(h) - v_\beta t\}$
合計	$(1-2p)\{g(h) - v_\alpha t\} + 2p\{g(h) - v_\gamma t\}$	$2(1-p)\{g(h) - v_\gamma t\} + (2p-1)\{g(h) - v_\beta t\}$

避難する。今、救援者及び非救援者となる住民をタイプ $\gamma$ と呼ぼう。このとき、各タイプの避難者の割合は、表-1のように整理できる。

したがって、一様てんでんこのケースと同様に、 $f(x)$ を一様分布と仮定すれば、波の波高 $h$ 、地震発生からの到達時間 $t$ のとき、一様救援避難が実施された場合の都市空間全体の死亡者数 $D_2(h, t)$ は、 $p \leq 0.5$ のとき、

$$D_2(h, t) = (1-2p)\{g(h) - v_\alpha t\} + 2p\{g(h) - v_\gamma t\} \\ = g(h) - v_\alpha t + 2pt(v_\alpha - v_\gamma)$$

となり、 $p > 0.5$ のとき、

$$D_2(h, t) = (2p-1)\{g(h) - v_\beta t\} \\ + 2(1-p)\{g(h) - v_\gamma t\} \\ = g(h) + v_\beta t - 2v_\gamma t + 2pt(v_\gamma - v_\beta)$$

と表される。

#### (4) てんでんこ避難と救援避難の比較

一様てんでんこ避難と救援避難のパフォーマンスを比較するために、両避難ルールの下での死亡者数の差 $D_2(h, t) - D_1(h, t)$ に着目する。

$$D_2(h, t) - D_1(h, t) =$$

$$\begin{cases} 2pt\left(\frac{v_\alpha + v_\beta}{2} - v_\gamma\right) & p \leq 0.5 \text{ のとき} \\ t(1-p)\left(\frac{v_\alpha + v_\beta}{2} - v_\gamma\right) & p > 0.5 \text{ のとき} \end{cases}$$

となる。したがって、一様てんでんこ避難と一様救援避難の場合の死亡者数は、津波の規模及び津波のとうたつ時間に関わらず、避難者の移動速度の差異の程度によってのみ優劣が決まる。タイプ $\alpha$ とタイプ $\beta$ の平均移動速度がタイプ $\gamma$ の移動速度よりも高ければ、一様てんでんこ避難の方が一様救援避難よりも死亡者数が少ないという意味で望ましい。言い換えれば、タイプ $\alpha$ にとって救援避難を行うことによる移動速度の損失が大きければ、

一様てんでんこ避難の方が有利となると解釈できる。

次に、避難ルールの選択がタイプごとの死亡者数に与える影響を見ておこう。一様てんでんこ避難を行ったときのタイプ別死者数を表-2に、一様救援避難を行ったときのタイプ別死者数を表-3に示している。一様救援避難の場合のタイプ $\alpha$ の死亡者数 $D_2^\alpha(h, t)$ と、一様てんでんこ避難の場合のタイプ $\alpha$ の死亡者数 $D_1^\alpha(h, t)$ の差は、

$$D_2^\alpha(h, t) - D_1^\alpha(h, t) =$$

$$\begin{cases} pt(v_\alpha - v_\gamma) & p \leq 0.5 \text{ のとき} \\ (1-p)t(v_\alpha - v_\gamma) & p > 0.5 \text{ のとき} \end{cases}$$

となる。 $v_\alpha - v_\gamma > 0$ から、一様救援避難任意のケースでタイプ $\alpha$ の死者数が増加する。

一方、一様救援避難の場合のタイプ $\beta$ の死亡者数 $D_2^\beta(h, t)$ と、一様てんでんこ避難の場合のタイプ $\beta$ の死亡者数 $D_1^\beta(h, t)$ の差は、

$$D_2^\beta(h, t) - D_1^\beta(h, t) =$$

$$\begin{cases} pt(v_\beta - v_\gamma) & p \leq 0.5 \text{ のとき} \\ (1-p)t(v_\beta - v_\gamma) & p > 0.5 \text{ のとき} \end{cases}$$

となる。 $v_\beta - v_\gamma < 0$ から、一様救援避難任意のケースでタイプ $\beta$ の死者数が減少する。

以上の分析結果は、タイプ $\alpha$ とタイプ $\beta$ の間での利益相反が常に存在することを示している。一様てんでんこ避難が、一様救援避難よりも全体の死者数の点からみれば望ましい場合でも、それは避難モビリティの高い人々の追加的犠牲によって達成されるという点は一考に値するであろう。

一方で、都市全体で一様に同じ避難ルールに従うことが必ずしも最適であるという保証はない。海岸線より離れている地域であれば、少々移動速度が遅くても、逃げ切れる可能性がある。したがって、次章では、海岸線に近いエリアはてんでんこ避難を行い、離れたエリアでは救援避難を行う、ハイブリッド避難モデルを考える。

表-4 ハイブリッド避難の下での死亡者数

	$p \leq 0.5$ のとき	$p > 0.5$ のとき
$k \geq g(h) - v_\gamma t$	$(1 - p)\{g(h) - v_\alpha t\} + pk$	$(1 - p)\{g(h) - v_\alpha t\} + pk$ $+ (2p - 1)\{g(h) - v_\beta t - k\}$
$k < g(h) - v_\gamma t$	$(1 - p)\{g(h) - v_\alpha t\} + pk$ $+ 2p\{g(h) - v_\gamma t - k\}$	$(1 - p)\{g(h) - v_\alpha t\} + pk$ $+ 2p\{g(h) - v_\gamma t - k\}$ $+ (2p - 1)\{g(h) - v_\beta t - k\}$

表-5 ハイブリッド避難による死亡者の減少数 (一様てんでんこ避難との比較)

	$p \leq 0.5$ のとき	$p > 0.5$ のとき
$k \geq g(h) - v_\gamma t$	$p\{g(h) - v_\beta t - k\}$	$(1 - p)\{g(h) - v_\beta t - k\}$
$k < g(h) - v_\gamma t$	$p(v_\gamma - v_\beta)t - 2p\{g(h) - v_\gamma t - k\}$	$(1 - p)(v_\gamma - v_\beta)t$

### 3. ハイブリッド避難モデル

#### (1) ハイブリッド避難

ハイブリッド避難では、海岸線に近いエリアにおいててんでんこ避難を実施し、離れたエリアにおいては、救援避難を実施する。具体的には、海岸線から距離  $k$  以内の住民に対しては、てんでんこ避難を行い、それ以外の住民に対して救援避難を行う。以下では、てんでんこ避難と救援避難の境界  $k$  の設定が全体の死亡者数に与える影響を見るため、

$$g(h) - v_\alpha t \leq k \leq g(h) - v_\beta t$$

となる場合に限定して分析を進める。

#### (2) 死亡者数

上記分析と同様に、 $f(x)$  は一様分布に従うと仮定する。ハイブリッド避難の下では、波の波高  $h$ 、地震発生からの到達時間  $t$  のときの死者数  $D_3(h, t)$  は、 $k$  と  $p$  の大きさに応じて、表-4 のように整理できる。さらに、一様てんでんこ避難と比較した場合の死亡者数の減少は、表-5 のように整理できる。 $g(h) - v_\alpha t \leq k \leq g(h) - v_\beta t$  が成立するとき、任意のケースで、一様てんでんこ避難よりも死亡者数を減少させることができる。

ここで、死者数を最小化するような  $k$  は、

$$k = g(h) - v_\gamma t$$

である。無論、津波の規模が判明した後に、 $k$  を決めることは現実的に容易ではない。しかし、津波の規模が大きい地域、あるいは津波の到達時間が短いと予想される場合は、 $k$  の値を大きくし、てんでんこ避難の範囲を広く設定することが望ましくなる。

### 6. おわりに

本研究では、津波からの避難ルールとして、一様てんでんこ避難、一様救援避難、ハイブリッド避難に着目し、それぞれの避難ルールの優劣を比較した。その結果、てんでんこによる移動速度の低下の程度が大きい場合は、一様てんでんこ避難より一様救援避難が望ましいことがわかった。さらに、てんでんこ避難と救援避難を組み合わせたハイブリッド避難により、一様に同じルールを用いる場合と比較して、死亡者数を減少できることが分かった。さらに、津波の規模が大きい、あるいは到達までの時間が短い地域では、てんでんこ避難の範囲を広く確保する方が望ましいことが分かった。

#### 参考文献

- 1) 矢守克也：「津波てんでんこ」の4つの意味，自然災害科学，Vol. 31, No. 1, pp. 35-46, 2012.

(2016. 7. 31 受付)

## PERFORMANCE EVALUATION OF TSUNAMI TENDENKO WITH CONSIDERATION OF REGIONAL CONDITIONS

Masamitsu ONISHI, Kouhei YANAGISAWA, and Katsuya YAMORI

‘Tsunami-Tendenko’ is a shared rule in a community concerning the method of evacuation from tsunami. Although it has been getting pervasive in Japan, there is no theoretical nor empirical guarantee that it is optimal universally for any type of communities. In short, the optimal choice of rule for tsunami evacuation might depend on the attribute of community. This paper aims at evaluating the performance of three types of evaluation rules: 1) tsunami-tendenko, 2) mutual assistance and 3) hybrid where both tsunami-tendenko and mutual assistance are employed. The analytical result implies the appropriate choice of tsunami evaluation rule depending on the attribute of community.