

# 構造推定を適用した 紐帯の中の避難とその非対称性

羽藤英二<sup>1</sup>, 植村恵里<sup>2</sup>, 若林由弥<sup>1</sup>

<sup>1</sup>正会員 東京大学 工学系研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

E-mail:hato@bin.t.u-tokyo.ac.jp

<sup>2</sup>学生員 JR東日本株式会社 (〒160-0004 東京都渋谷区代々木二丁目2番2号)

E-mail: uemura@bin.t.u-tokyo.ac.jp

本研究は、東日本大震災における津波襲来時における避難行動に着目して、その行動の特性を明らかにした上で、津波襲来地域における復興/事前復興都市計画における市街地ネットワーク計画の一助とすることを目的としている。避難のメカニズムにおいて、1) 気づき、2) 役割、3) 避難という三段階の構造を想定することで、避難の非対称性のメカニズムを記述し、避難の遅れがどのようなメカニズムで生じているのかを明らかにすることを試みる。

**Key Words :** *evacuation behavior, structural estimation methods*

## 1. はじめに

災害というマクロハザード(大域的危機)は外部要因として地域や集落を構成する世帯や個人、企業といった様々な主体を突如襲い、多大なるロス(損失)をもたらす。取り返しのつかない最大のロスは人の生命の喪失であり、ロスを生じさせる確率はリスクと定義できよう。リスクマネジメントとは、こうしたロスを最小限に食い止めるために何らかの対策を事前に講じるマネジメント手法と言える。リスクマネジメントにはコントロール(制御)とファイナンス(財務)という2つの働きかけの方法があり、本研究の目的はこのうち前者に着目した上でハザードからもたらされる最大のロス(=人の生命が喪われること)が生じるその因果構造を明らかにすることによってリスクコントロール手法の考察を試みることにある。マクロハザードを津波災害と想定した場合、リスクコントロールの方法は、防潮堤の整備、市街地の高台移転、防災教育や情報提供、津波でんでんこのような防災文化の継承のように様々な方法が考えられる。自然条件によって与えられているマクロハザードがロスを生み出す構造のうち、本研究では避難問題を考える。従前の研究において、避難の意思決定はその場に残るか避難するかといった2択の行動として記述されることが多い。本研究ではこうした避難問題に対して、1) 気づき、2) 役割、3) 避難という3段階を意思決定過程を想定し、その非対称性に着目することで、避難の遅れによる損失のリスクがどのようなメカニズムで生じているのかを明らかにすることを試みる。

## 2. 既往の研究

### (1) 避難研究

越村ら(2003)は、津波災害時の住民間情報伝達と避難行動に着目したシミュレーションを用いることで津波被災想定地域における避難計画の評価手法を開発し、実際にワシントン州ブレマートン市に適用することで、想定すべき外力の規模と避難難航地域を明らかにしている。田ら(2005)は津波常襲地域における住民の避難意識や避難行動を反映したシミュレーションを実装し、複数のシナリオを用いて適切な避難場所の配置計画を検討している。畑山(2009)も同様に水害時における住民の避難特性をアンケート調査から分析しマルチエージェントシミュレーションを実装し、避難目的地の異なる3つのシナリオを用いて避難完了率の違いを示している。片田ら(2005)は、地震の揺れや大きさ・周辺状況・災害情報の有無といった外的要因に加え、危機意識といった住民の内面的な要因を考慮した津波避難の意思決定構造に着目した分析を行い、内面的意識が迅速な避難行動に重要な影響を与えることを明らかにした。一方、早川・今村(2002)は、災害情報と避難行動開始の関係性に着目して、過去の災害調査から得られたデータに基づいて津波避難に関連する外力及び各種情報提供とそれらに対する住民の反応について分析し、避難行動開始率を推定するモデルを構築している。及川ら(2005)も、水害の進展過程に応じて住民が周辺状況の変化を察知し災害情報を入手する過程で、どのような危機意識と対応行動に繋がるのかに着目した分析を行っている。避難勧告や避難指示の入手は避難行動実施を促進する一方で避難準備情

報の入手は家財保全行動の実施を促す作用があること、ハザードマップ公表といった施策は、地域住民への貴重な災害教育の機会として重要な意味を持つこと等も指摘された。危険状況下での他者との関係について対象としたものとして、及川ら(2000)は、住民の河川洪水時における対応行動の特性を、世帯内の役割分担の観点から分析しており、ここから世帯の避難行動には明確な性別・年齢別役割が存在し、各世帯員はその役割に応じて、優先避難・非優先避難といった形で規定された避難行動を行っていることを確認している。山田・織田澤(2006)では、災害避難時に群集行動が形成される点に着目し、そのメカニズムを表現する理論モデルをゲーム理論を用いて構築することで、群衆行動の形成が「囚人のジレンマ」と同様に、パレート劣位な均衡解として実現することを指摘している。浦田・羽藤(2012)は被災地における住民間の協調行動に関する膨大なヒアリングデータを基に、災害時の利他的協調行動に関する微視的なネットワーク行動がボーズアインシュタイン凝縮と同様のマクロ則に帰着することを示したうえで、協調行動相手の選択において道路ネットワークのリンク構成に影響を受けること、近隣の世帯間であっても世帯状況に応じた協調行動が生起していること等を明らかにしている。

浦田、羽藤(2012)のBECモデルを除けば、避難開始モデルの基本構造は、Sequential travel demand model と Simultaneous travel demand model に大別される。前者はある地域・災害において住民の避難反応曲線を集計的に求めるモデルであり、実際の避難行動データを回帰することでパラメータを推定する。Tweedie et al(1986)やOzbey and Yazici(2006)等で推定が行われており、災害規模や地域性によりパラメータ値が変化するものの、避難のメカニズムに基づいたモデルとはなっていない。後者に関しては各期に避難するか留まるか意思決定する連続型二項ロジットモデルがこれにあたる。実際の個人の意思決定を組み込んでいるという点から連続型二項ロジットモデルが動的な移動需要を予測する避難研究において用いられている。ただしPel et al(2012)は、連続型二項ロジットモデルでは逐次的な意思決定の繰り返しであり、動的に変化する現在の状況に関する効用を含むものの、将来予測される状況に基づいた意思決定は反映されていないことに言及し改善の必要性を指摘している。本研究ではこの点に着目して、ハザードが生み出す将来リスクに対する時間的な推論を記述できるモデルを提案すると共に、その原因となる気づきと役割のメカニズムについて実データを用いた考察を試みる。

## 4. 動学的モデルへの展開

### 4.1 モデルフレームワーク

地震発生直後から津波到達までの間において、各個人*i*は $J = \{1 : \text{避難} \cdot 2 : \text{避難以外}\}$ のどちらかをトリップ開始ごとに選択することを考える。各個人の意思決定ルールとして、*t*期において個人*i*は状

態変数 $s_{it}$ を観測し、次式で表される現在割引将来期待効用を最大化するような行動選択肢 $a_{it} \in A$ を選択する。

$$E\left(\sum_{j=0}^{T-t} \beta^j U(a_{i,t+j}, s_{i,t+j} | a_{it}, s_{it})\right) \quad (1)$$

ここで $\beta$ は時間割引因子、 $U(a_{i,t+j}, s_{i,t+j})$ を*t*期の効用とする。式(1)は、個人ごとに動的計画法(DP)に基づいて、 $V(s_{it})$ を価値関数とするBellman最適性原理により、再帰的な表現で書き下すことができる。

$$V(s_{it}) = \max_{a \in A} \left\{ U(a, s_{it}) + \beta \int V(s_{i,t+1}) dF(s_{i,t+1} | a, s_{it}) \right\} \quad (2)$$

各期の効用関数を $u(a, x_{it})$ として、状態変数 $s_{it}$ のうち観測可能なものを $x_{it}$ 、確率項を $\varepsilon_{it}$ とすると以下の式が再帰的に導ける。

$$v(a, x_{it}) = u(a, x_{it}) + \varepsilon_{it}(a) + \beta \sum_{x_{i,t+1}} \bar{V}(x_{i,t+1}) f_x(x_{i,t+1} | a, x_{it}) \quad (3)$$

ここで各期の選択肢について、避難( $j=1$ )と避難以外の行動選択肢( $j=2$ )にそれぞれ効用関数を設定すると、避難確率を式(4)で表わすことができる。

$$P(a | x_{it}, \theta) = \frac{\exp(v(a, x_{it}))}{\sum_{j=1}^J \exp(v(j, x_{it}))} \quad (4)$$

推定に際しては、構造推定を用いて、

$$LL(\theta) = \sum_i \sum_{t=1} \log P(a_{it} | x_{it}, \theta) \quad (5)$$

を最大化する $\theta$ を状態変数の推移確率についてパラメータ推定を行った上で、選択確率のパラメータ推定を行うことで $\theta$ を推定した。

## 4.2 推定結果

表-1に推定結果を図-1に動的モデルと静的モデルを用いて計算した避難確率の計算結果を示す。動学モデルでは、経過時間と車の保有の有無が有意なパラメータ値を示しており、時間の経過と共に避難確率が高くなること、車を持っている人ほど避難が遅くなることが明らかとなった。

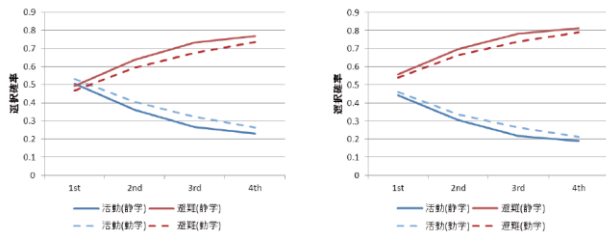
動的モデルの割引因子が負の値を取っている。避難以外の行動を行う時に、その次の行動機会において、*t*期と*t+1*期におけるリスク増加分の影響を考慮し、他の活動を行うことによるリスク上昇分が大きければ大きいほど、その活動を行うことの効用は減少することを意味する。時間割引率のパラメータ値は、実際のリスク関数上昇分に対して、意思決定時にどのように判断するのかを表している。値が大

表-1 モデル推定結果(動学/静学)

説明変数	動的モデル		静的モデル	
	パラメータ	t 値	パラメータ	t 値
男性ダミー	-0.304	-1.48	-0.264	-1.29
高齢者ダミー	0.372	1.80	0.455	2.35
車保有ダミー	-1.258	-5.32	-1.084	-5.40
経過時間 [100 分]	6.476	8.21	6.831	8.64
利他目的ダミー	0.330	1.20	0.128	0.51
割引因子	-0.769	-1.62	-	-
サンプル数		525		525
初期尤度		-363.9		-363.9
最終尤度		-306.0		-307.4
修正済み尤度比		0.14		0.14

表-2 モデル推定結果(男性/女性)

説明変数	男性		女性	
	パラメータ	t 値	パラメータ	t 値
高齢者ダミー	0.375	1.18	0.333	1.20
車保有ダミー	-1.449	-3.40	-1.209	-4.20
経過時間 [100 分]	5.894	4.74	6.604	6.47
利他目的ダミー	-0.537	-1.20	0.884	2.47
割引因子	-0.011	-0.01	-1.163	-1.83
サンプル数		194		331
初期尤度		-134.5		-229.4
最終尤度		-115.4		-187.9
修正済み尤度比		0.10		0.18



※左 (男性, 車在り, 高齢者), 右 (女性, 車在り, 高齢者)  
 図-1 静的/動的モデルを用いた避難確率の計算結果

きければ将来リスク回避型, 小さければ逐次的な状況に応じて行動選択を行っている判断できる. 時間割引因子が5%有意とはいえないものの,  $-0.769$ と相対的に大きな値を示していることから, 将来リスクを考慮しながら現時点での避難を判断しているといえよう.

次に動的モデルと静的モデルの比較を行うため, 選択確率の推移を図-1に示す. 動的モデルと静的モデルの結果を比べると, 動的モデルのほうが避難確率が全体的に低く算出されている. 動的モデルと静的モデルの違いは「将来のリスク増加分」を考慮するかどうかの違いである. 静的モデルではこの影響を考慮せず, 動的モデルでは将来リスク増加分による不効用を「避難以外の活動を行う」選択肢に導入することで定式化している(負のパラメータ値であれば, 利他的な援助活動といった避難以外の行動選択肢の効用が下がることを意味する). 今回の数値計算シナリオでは, 動的モデルのほうが避難確率は低く算出されていることがわかる. 静的な推定結果のバイアスが除去された結果であるといえよう. 構造推定を用いることで, 将来のリスク増加分の影響を考慮できたのみならず, 人の判断に対する考察を広げることができた. 本研究の動的離散選択モデル推定は, 新たな説明変数導入に加え, 人の意思決定における津波発生時の時間推論について根本的な構造部分にアプローチすることができるといえる.

さらに男性と女性で動的モデルの推定を行った. 修正済み尤度比は男性が0.10, 女性が0.18となっており, 男性の方が確率的な意思決定を行っているといえよう. 両者共に, 車保有ダミーと経過時間が有意となっており, 女性は利他目的ダミーも有意となった. 割引因子と利他目的ダミーに関しては両者

で大きく異なっている. 割引因子に関しては男性が $-0.011$ , 女性が $-1.163$ である.  $t$ 値についても男性は $-0.01$ と有意な値を示していない. 男性のほうが, 将来のリスク増加分に対し感受性が低く, 現時点での効用のみで判断する逐次的な意思決定を行いやすいといえよう. 女性は逆に将来のリスク増加分に対し懸念を示し, 実際に自身が持つリスク関数増加分より過大に評価している. 不確実性下の意思決定で定義されるリスク回避型行動をとる傾向があるといえよう. 利他目的ダミーに関して, 男女で符号が異なっている. 男性に関しては利他目的ダミーが負の効用となる. これは, 男性は家族や知人を助けるといふ行動のみならず, 自宅の確認, 社会的な役割に基づく活動や情報収集など, 利他目的に限らない避難以外の行動を多くとっていたことが影響している. 避難前行動のトリップ目的についても, 女性では避難前行動において利他目的の行動が中心となるが, 男性はそれ以外の行動が多く占めることが確認されている.

### 3. 紐帯の中の情報伝達非対称性

では, こうした将来リスクに対する反応の違いは何によって起こっているのだろうか. ハザードに接した際にロスの回避を実現する避難に向けた気づきは, 見る, 聴く, 話す/伝えるといった情報伝達行為を経て, 地域のネットワークに伝播することが考えられよう. こうした行為は図-2に示すように, 情報の受信/送信機能の担い方から, 1)オーディナリーポイント, 2)トランスミッター, 3)レシーバー, 4)孤立点のように類型化できよう. こうしたネットワーク上のロール(役割)の確率分布が変化することで, 避難に向けた地域全体のリスク認知が大きな影響を受けていることを想定する.

発災時の時間経過に伴う地域における役割変化の様子を図-3に示す. 地震発生直後15分以内に一名は咄嗟に危険を察知し危険について「妻」に連絡している. またその他4名は「防災無線」や「市役所の呼びかけ」, 「夫」による発信を受け, 情報を受信しているものの, 8割の人がなんら情報伝達に関与していない様子が伺える. このうち数名は周囲に連絡することなく一人で避難を行った者も含まれている. 次に地震発生15分~30分以内において, 警報

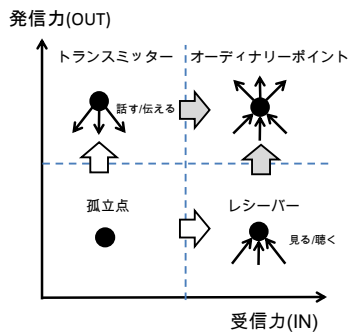


図-2 紐帯の中の役割の推移

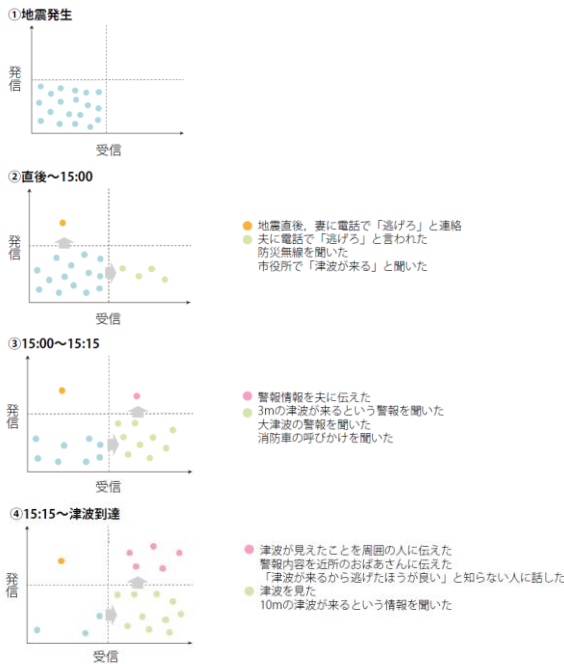


図-3 受信/発信にみる紐帯の中の役割の変遷

が発令され5割程度の人がそれらを受信し、またそのうち1名がその内容を「夫」に伝えている。更に津波到達直前において津波を「見る」ことで情報を受信し、また「見た」ことを周囲に伝えながら避難するといったオーディナリーポイントが最も多く見られた。「警報」の受信から「近所の高齢者」に避難を呼びかけ、「一緒に」避難をしたという事例も見られる。次に表-3にトランスミッターが具体的にどのような情報を相手に伝え、レシーバーがどのような行動をとったのかを示す。家族・知人など紐帯を持ったトランスミッターの情報に対してレシーバーは従順な態度を示す一方で、例えば市役所職員や知らない人等、普段関わりのない、あるいは薄い相手との対話においては、受信に際して「無視」されたと回答しているケースも散見される。

内容よりも内容を伝える相手との関係性に依存してその後の行動が大きく変化しているといえよう。防災計画において行政・消防隊員の呼びかけももちろん大事である一方で、日常での繋がりを持つ近隣住民同士が声をかけあうことが寧ろ同調性バイアスをうみ出す可能性を示唆している。特に「相談」行為に関しては必ずしも危険を察知するものではなく、

表-3 トランスミッターの情報伝達行為とその影響

id	場所	相手	内容	種類	影響
4	海側へ	消防団員	(津波が来るから海側へ進むのは危険、という内容)	受信	無視
4	自宅	妻	「ここまでは津波が絶対来ないから、俺が勤めに 行くから、お前はうちの中にといて危ないから外にいなさい」	発信	(妻:強化)
5	自宅	妻	「父ちゃん大津波だってよ!早く行くべし」	受信	変更
6	市役所	市役所職員	「津波が来るから帰ってください」	受信	無視
6	帰宅中	知らない人	「あっちが崩れた」「あーあそこはどうだー」	相談	-
6	自宅	夫	「父ちゃん大津波だってよ!早く行くべし」	発信	(夫:変更)
9	自宅	息子	「10mの津波が来るらしい」	受信	変更
10	海側へ	知らない人	「松原の方は海だから、そっちのほうに向かったらダメですよ」	発信	無視
12	沖	妻	(電話で)「逃げろ」	発信	(妻:強化)
17	職場	父	「ここにいるように」	発信	(父:強化)
17	屋外	知らない人	「津波が来るから逃げたほうがいいですよ」	発信	(相手:無視)
17	職場へ	友人	「もう津波が来るぞ」	発信	変更
19	自宅外	近所の人	「中学校に行くか」	相談	-
20	自宅外	近所の人	「津波来るのかな、どうだろうな」	相談	-
23	職場	同僚	「避難所に行こう」	発信	変更

※発災時、浸水深内に居た12人の情報伝達内容

対話の相手によっては、「津波の危険はない」とリスク認知を下げてしまう可能性も孕んでいる。「話す」という行為は、発信と受信によるリスク認知を引き上げる可能性を持つと同時に、聞き間違い・思い込みによる間違った発信や相談行為により、リスク認知を下げ、避難そのものの判断を遅らせる可能性も持ち合わせているといえよう。今後は、こうした準拠集団特性と情報伝達の仕組みそのものを組み込んだ行動モデルの構築が必要と考える。

#### 参考文献

- 1) Tweedie, S., Rowland, J., Walsh, S., Rhoten, R., A methodology for estimating emergency evacuation times, Soc.Sci.J., Vol.23, No.2, pp.189-204, 1986.
- 2) Ozbey, K., Yazici, A.M., Analysis of network-wide impacts of behavioral response curves for evacuation conditions, Proceedings of the IEEE Intelligence Transportation Systems Conference, Tronto, Canada, 2006.
- 3) Pel, A.J., Bliemer, M.C.J., Hoogendoorn, S.P., A review on travel behaviour modelling in dynamic traffic simulation models for evacuations, Transportation, Vol.39, pp.97-123, 2012.
- 4) 越村俊一, 片田敏孝, 桑沢敬行, 石橋晃睦, 津波による人的被害軽減のための避難戦略の評価手法に関する研究, 海岸工学論文集, Vol.50, pp.1336-1340, 2003.
- 5) 田洋平, 近藤光男, 渡辺公次郎, 竹内光生, 山口満, 津波常襲地域住民の防災意識に基づく避難場所の配置計画-須崎市を対象として-, 土木計画学研究・論文集, Vol.22, No.2, pp.315-323, 2005.
- 6) 片田敏孝, 桑沢敬行, 金井昌信, 細井教平, 津波避難の意思決定構造に関する研究, 土木計画学研究・講演集, Vol.31, No.180, 2005.
- 7) 早川哲史, 今村文彦, 津波発生時における避難行動開始モデルの提案とその適用, 自然災害科学, Vol.21, No.1, pp.51-66, 2002.
- 8) 及川康, 片田敏孝, 浅田純作, 岡島大介, 洪水避難時における世帯行動特性と世帯員の役割分担に関する研究, 水工学論文集, Vol.44, pp.319-324, 2000.
- 9) 及川康, 児玉真, 片田敏孝, 水害進展過程における住民対応行動の形成に関する研究, 土木学会論文集No.786, pp.89-102, 2005.
- 10) 山田昌和, 織田澤利守, 災害避難時における群集行動形成メカニズムのモデル化とその厚生分析, 土木計画学研究・講演集, Vol.34, No.77, CD-ROM, 2006.
- 11) 浦田淳司, 羽藤英二, 複雑ネットワークモデルを用いた豪雨災害時の協調行動形成に関する研究, 土木学会論文集D3, Vol. 69, pp. 29-40, 2013.