

リスク認知に着目した 避難開始モデルの構築

荒木 雅弘¹・パラディ ジアンカルロス²・高見 淳史³・原田 昇⁴

¹非会員 東京大学大学院修士課程 工学系研究科都市工学専攻

(〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

E-mail:araki@ut.t.u-tokyo.ac.jp

²正会員 東京大学大学院助教 工学系研究科都市工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

E-mail:gtroncoso@ut.t.u-tokyo.ac.jp

³正会員 東京大学大学院准教授 工学系研究科都市工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

E-mail:takami@ut.t.u-tokyo.ac.jp

⁴正会員 東京大学大学院教授 工学系研究科都市工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

E-mail:nhara@ut.t.u-tokyo.ac.jp

本研究では、まず、地震動や警報等の時々刻々と蓄積される外生的な情報が津波避難行動に及ぼす影響に着目して、動的なリスク認知の概念を導入した避難開始モデルを構築する。次に、東北地方太平洋沖地震発災当日における6県47市町村での実際の津波避難行動データと状況データを用いた実証分析を通じて、外生的な情報が避難行動の選択に及ぼす影響を定量的に示す。実証分析の結果、リスク認知を導入した行動仮説の妥当性、外生的な情報が避難行動選択に有意な影響を及ぼすこと、情報内容によって影響度が異なること、避難を選択する閾値が防災情報の知識や社会経済属性等によって異なること、が確認された。

Key Words : *Evacuation Behavior, Departure Time Choice Model, Dynamic Risk Perception, the Great East Japan Earthquake*

1. はじめに

避難行動とは、複合的な情報を踏まえて、選択されるものである。独立した個人に影響を及ぼす情報としては、過去の経験、発災前の防災情報の知識、発災時刻、発災以後の現在位置の物理的環境、移動能力のほかに、発災以降に時々刻々と蓄積される外生的な情報がある。予測不可能かつ前兆が無く、比較的短時間のなかでの意思決定を余儀なくされる津波からの避難行動を考えてみると、発災以降の個人は、本震や余震の体感地震動の大きさ、大津波警報の収受の有無と内容、避難指示等の収受の有無と内容から、襲来するかもしれない津波の規模と被災リスクの空間分布を不確実ながら想像し、それを踏まえて避難するか否か、何処に避難するかを決定すると考えられる。なお、個人は完全に独立した存在ではないので、更に、社会的動物として、集団相互作用を受けたり、他者支援活動を考えたりした結果として、実際の行動選択は行われていると考えられる。

外生的な情報の観点から過去の津波災害を振り返ってみる。1896年6月15日19時32分に発生した明治三陸地震では、本震から約30分後に襲来した10m以上の津波により、約22000人の犠牲者が出た。津波地震と呼称される通り、この本震の揺れは最大震度4と小さく、それに比べて大津波が襲来したことが、避難者の少なさと犠牲者の多さの原因だと言われている¹⁾。また、1960年5月22日15時11分に発生したチリ地震では、遠地津波と呼称される通り、本震から約1日後に、揺れの無かった日本の沿岸域に津波が襲来し、約140人の犠牲者が出た。そして、2011年3月11日14時46分に発生した東北地方太平洋沖地震では、本震で最大震度7を観測し、15時15分の最大余震で震度6強を観測したほかにも、余震は相次ぎ、更には大津波警報や避難指示の発令状況が自治体によって異なるなかで、人々は発災後の行動を選択した。しかし、早いところで本震から約30分後に襲来した10m以上の津波により、岩手県・宮城県・福島県を中心とした東日本太平洋側沿岸地域において16000人以上の犠牲者が出た。

このように、ハザードは極めて個別具体的なものであるが、実際の避難・防災計画を考える為には、それらの避難行動において共通した避難意思決定メカニズムを解明していく必要がある。そこで、本研究では、様々な影響因子のなかでも、時々刻々と蓄積される外生的な情報からの動的な影響に着目して、これを評価可能な避難開始モデルを提案し、東北地方太平洋沖地震発災当日の実際の避難行動データと状況データを用いて実証することを目的とする。

2. 既往研究のレビュー

(1) 外生的な情報が避難行動選択に及ぼす影響に関する既往事例研究

金井・片田²⁾は、東北地方太平洋沖地震の事例分析により、避難指示が避難／非避難に最も強い影響を及ぼすこと、また震度4-7の体感震度と4m以上の津波予想高さが避難を促す効果があることを示している。一方、片田ら³⁾は、2003年5月26日に発生した宮城県沖地震で、最大震度6弱を観測したにも関わらず避難率が10%未満であったことを受け、津波警報が発令されなかったことが最大の原因であり、情報への過度の依存が存在することを集計分析によって明らかにしている。また、神谷ら⁴⁾は、2010年2月に沖縄本島で発令された近地および遠地の津波警報を事例に、どちらのケースでも警報の収受が避難行動を促すこととともに、友人や知人からの情報取得の方が行政からの情報取得よりも、避難行動に強い影響を及ぼすことを示している。そして、奥村ら⁵⁾は、豪雨災害を想定したSP調査分析を通じて、濁水、崖崩れ、避難勧告といった災害状況の想像が容易な情報ほど、住民の積極的な避難行動に繋がること、及び避難勧告の空振りには長期的に情報に対する信頼性を低下させることを明らかにしている。

これらの最終的な避難／非避難を扱う静的な事例分析のほかに、及川ら⁶⁾は、2002年の台風6号の豪雨災害を事例に住民の動的な行動変遷過程を危機意識形成モデルと対応行動形成モデルを用いて分析し、時間の経過と情報の入手状況の変化とともに、対応行動が動的に変化することを実証的に明らかにしている。このように外生的な情報が避難行動に及ぼす影響は統計的に示されてはいるものの、避難・防災計画の施策評価等に資する為には、個人単位の動的な避難行動選択への影響を詳細に考慮できるモデルを構築していく必要がある。

(2) 避難行動選択を記述する既往モデル研究

避難選択時の意思決定メカニズムを表現したモデルとしては、佐藤ら⁷⁾が、認知的不協和および情報待ちの態度を組み込んだ二期モデルを提案し、両者の作用を数理的に説明している。また、及川・片田⁸⁾は、被災リスクを感じつつ避難を迷う曖昧な状態の存在に着目し、情報検索行動が行われる意思決定構造を防護動機理論に基づくモデルによって数理的に説明している。ただし、これらは仮想的なパラメータを用いた分析であり、実際の避難行動データを用いてモデルを実証するには至っていない。

個人単位の避難行動データを用いて推定可能な避難開始モデルとしては、Fu and Wilmot⁹⁾が、時間を離散化し各t期で独立に避難／非避難（滞在）の二項選択が行われるとした逐次選択モデルを提案している。また、Gudishala and Wilmot¹⁰⁾は、この逐次選択構造をベースとして時刻間の相関関係を考慮することでNested Logit Modelとして表現している。そして、浦田ら¹¹⁾は、これらのモデルを更に一般化し、各t期の避難／非避難の効用を比較するのではなく、非避難時の将来効用を評価するとして、動的離散選択モデルに拡張している。このモデルでは、個人は真の将来効用とは異なる将来効用を認知し意思決定しているとして動学的異質性の概念を導入し、MPEC型アルゴリズムを提案することでパラメータ推定を実現している。しかし、このモデルでは意思決定者が真の津波襲来時刻（終端時刻）を認知するという強い仮定を置いている他に、取得時刻や内容を前以って知ることが出来ないという限界を持つ。Urata and Pel¹²⁾は、リスク認知が避難選択行動に与える影響を評価するために、静的なリスク認知レベルに関するOrdered Logit Modelを潜在クラスとして逐次的な避難開始モデルに組み込む手法を提案している。ただし、ここで評価している動的なリスク認知形成要因は、経過時間やリスク情報の入手有無だけであり、リスク認知の動的な変化とその影響因子を十分に表現したモデルとはなっていない。

3. モデルの提案

ここでは、避難開始選択の意思決定メカニズムの考え方を示し、本研究で提案するモデルの定式化を具体的に示す。最後に、提案モデルとの比較に使用した既往モデルの説明を行う。

(1) 提案する避難選択メカニズムとモデルの定式化

本研究では、避難行動の開始を、外生的な状況の変化

によるリスク認知の増大が、個々人が持つ閾値を超えたことによって発現する行動だと見做す。この意思決定メカニズムの概念を、図-1に示す。そこで、このようなリスク認知の動的な変化を仮定した避難開始モデルの定式化を行う。なお、この定式化に際しては、Arenzte et al.¹³⁾のDynamic Activity Pattern Modelを参考にした。

まず、 t 期における個人 i の認知リスク $U_{i,t}$ を式(1)で定義する。

$$U_{i,t} = R_{i,t} + \varepsilon_i \quad (1)$$

ここで、 $R_{i,t}$ は認知リスクに関する確定項であり、単調増加を仮定する。 ε_i は認知リスクに関する誤差項であり、i. i. d. Gumbel分布を仮定する。個人 i の認知リスクの閾値を R_i^* とし、個人 i が避難を開始するルールを $R_i^* \leq U_{i,t}$ だとすると、個人 i が t 期に避難を選択する確率 $P_i(t|\theta)$ は、式(2)と導出できる。以下では、表記の簡便のために、 $Z_{i,t} \equiv R_{i,t} - R_i^*$ と置いた。

$$\begin{aligned} P_i(t|\theta) &= \Pr[(R_i^* \leq U_{i,t}) \text{ and } (U_{i,t-1} < R_i^*)] \\ &= \Pr[(R_i^* \leq R_{i,t} + \varepsilon_i) \text{ and } (R_{i,t-1} + \varepsilon_i < R_i^*)] \\ &= \Pr[-Z_{i,t} \leq \varepsilon_i < -Z_{i,t-1}] \\ &= \Pr[Z_{i,t-1} < \varepsilon_i \leq Z_{i,t}] \\ &= \Pr[\varepsilon_i \leq Z_{i,t}] - \Pr[\varepsilon_i \leq Z_{i,t-1}] \\ &= \frac{\exp(Z_{i,t})}{1 + \exp(Z_{i,t})} - \frac{\exp(Z_{i,t-1})}{1 + \exp(Z_{i,t-1})} \\ &= \frac{\exp(R_{i,t})}{\exp(R_{i,t}) + \exp(R_i^*)} - \frac{\exp(R_{i,t-1})}{\exp(R_{i,t-1}) + \exp(R_i^*)} \end{aligned} \quad (2)$$

この選択確率を用いて、パラメータ θ を、式(3)と書ける対数尤度 $LL(\theta)$ の最大化により推定する。ただし δ_{it} は個人 i の選択実績が t であれば1、さもなければ0をとる。

$$LL(\theta) = \sum_{i,t} \delta_{it} \cdot P_i(t|\theta) \quad (3)$$

(3) 比較モデルの解説

本研究では、Fu and Wilmot⁹⁾が提案した逐次避難選択モデルを比較モデルとして使用する。これは、個人 i が各 t 期において逐次的に避難・非避難を選択していくと仮定したモデルであり、 t 期における個人 i の避難効用の確定項を $V_{i,t}^e$ 、 t 期における個人 i の非避難効用の確定項を $V_{i,t}^s$ と置くと、個人 i が t 期に避難を選択する確率 $P_i(t|\theta)$ は、式(4a)のように書ける。この選択確率を用いて、提案モデルと同様に対数尤度の最大化によって、パラメータ θ

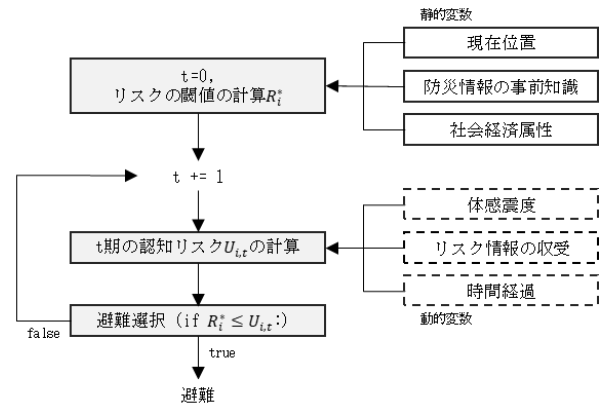


図-1 提案する避難開始選択メカニズム

の推定を行う。

$$P_i(t|\theta) = P_{i,t,eva} \prod_{j=1}^{t-1} [1 - P_{i,j,eva}] \quad (4a)$$

$$P_{i,t,eva} = \frac{\exp(V_{i,t}^e)}{\exp(V_{i,t}^e) + \exp(V_{i,t}^s)} \quad (4b)$$

4. 実証分析

本研究では、2011年3月11日に起きた東北地方太平洋沖地震の発災当日の、青森県から千葉県までの6県47沿岸市町村における避難行動データおよび発災以後の状況データを用い、前述したモデルによる実証分析を行う。

(1) データ概要

a) データ全体の概要

まず、避難行動データとしては「復興支援調査アーカイブ」¹⁴⁾が提供して下さっているデータを用いた。これは、国土交通省都市局が、2011年9月末から12月末にかけて、津波の浸水被害を受けた青森県から千葉県までの6県沿岸49市町村において、当時浸水区域内に居住していた個人に対して、調査員が避難所・仮設住宅・自宅等へ訪問し、聞き取り調査を実施して取得されたデータである。この調査では、発災から当日の深夜までの行動（避難経路、移手段、移動目的等）に加えて、地震発生時の警報等（大津波警報および避難指示）の收受状況や、災害前の防災情報（津波ハザードマップ、指定避難所等）に関する知識、社会経済属性（性別、年齢、職業等）などを訊ねている。この調査の総調査者数は、10603人であった。

次に、本震以後の状況データとしては、気象庁の「地震月報（カタログ編）」¹⁵⁾から当日の本震および余震の計測震度を、消防庁への照会によりJ-ALERT（全国瞬時警報システム）の発令状況を、「平成23年3月地震・火

山月報（防災編）」¹⁶から大津波警報の発表状況の推移を、石巻市と利府町を除く6県47市町村への照会及び復興記録誌等の参照により避難指示および避難勧告等の発令状況を、気象庁地球環境・海洋部からの回答及び復興記録誌等の参照により潮位データ及び想定津波沿岸襲来時刻を、それぞれ収集した。

当日の余震の発生状況を詳細に見ると、最大震度1以上を観測する地震は、本震が発生した14時46分から16時00分までの間に、全国で計82回、分析対象地域内において計49回発生している。なお、計測地震動を説明変数として用いる為に、発災当時、全国に4269箇所、分析対象地域内に133箇所あった震度観測点での観測値から、ArcGIS上で内挿して空間分布を算出しており、あくまでも真の地震動の近似値でしかないことをここに記す。

また、当日の警報等の発令状況を詳細に見ると、分析対象地域内においてJ-ALERTが起動したのは、三沢市、洋野町、東松島市、山元町、ひたちなか市、旭市、匝瑳市の7市町村であり、図-2に示す通り、避難指示等の発令時刻も市町村によってばらつきが生じていた。

b) 分析に使用した避難行動データ

「復興支援調査アーカイブ」の避難行動データのうち、一部の状況データが得られなかった石巻市と利府町のデータを除き、欠損データを含む個人のデータを除いたところ、サンプル数は7770人となった。ここから、移動開始時点の標高が0.1m以上300m以下、海岸からの距離が1.0m以上5000m以下となる個人を抽出したところ、サンプル数は7493人（96.4%）となり、これを分析対象者とした。

避難開始時刻は、この調査において「津波からの避難のため」または「身を寄せる避難所へ行くため」という目的で移動を開始したと回答されている時刻とした。パラメータ推定にあたり、各期の長さは5分間に設定し、分析終了時刻は発災から74分後の16時00分とした。つまり、第1期は14時46分から14時50分、第2期は14時51分から14時55分、最終の第15期は15時55分から16時00分となる。ただし、各市町村の想定津波沿岸襲来時刻の5分後迄または16時00分迄に避難を開始していない場合は、その時刻に未避難だったと見做して、未避難確率を算出した。

(2) モデルを用いた分析

次に、避難行動データと発災以後の状況データを用いたパラメータ推定を行い、その結果を考察する。

a) 効用関数の定式化

t期における個人iの認知リスクに関する確定項 $R_{i,t}$ および、個人iの認知リスクの閾値を R_i^* は、それぞれ式

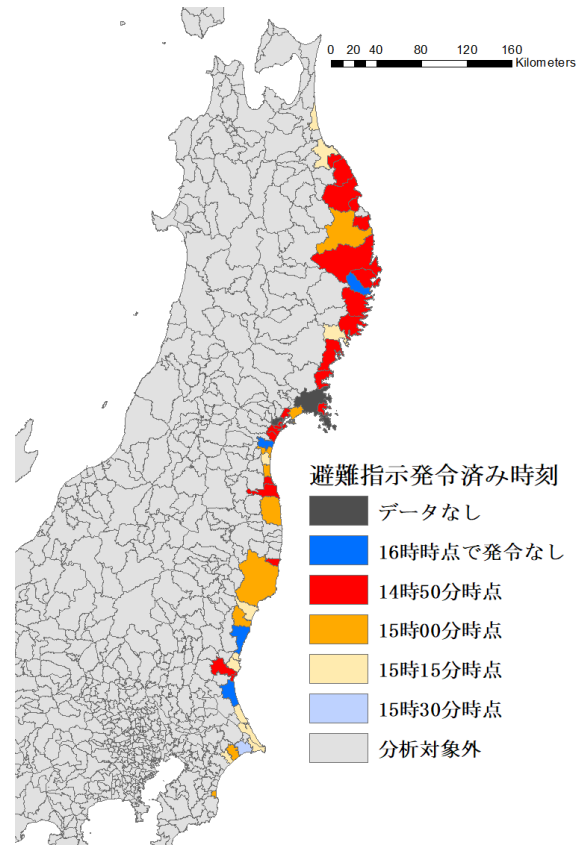


図-2 避難指示の発令時刻

(5)・式(6)のように設定した。 θ はパラメータであり、説明変数の内容は、表-1に示す。なお、 $seis_{i,k}$ が本震および余震の個々の計測震度であり、 $warn_{i,t}$ 、 $order_{i,t}$ 、 $elap_t$ が時間の経過とともに単調増加する変数であることから、 $R_{i,t}$ の単調増加の仮定が成立している。

$$R_{i,t} = \sum_{k=1}^K \theta_1 seis_{i,k} + \theta_2 warn_{i,t} + \theta_3 order_{i,t} + \theta_4 elap_t \tag{5}$$

$$R_i^* = \theta_5 \ln(dist) + \theta_6 \ln(elev) + \theta_7 dm_{wm} + \theta_8 dm_{30} + \theta_9 dm_{40} + \theta_{10} dm_{50} + \theta_{11} dm_{60} + \theta_{12} dm_{70} + \theta_{13} dm_{nm} + \theta_{14} dm_{sh} + \theta_{15} ASC_{non} \tag{6}$$

なお、個々人の警報等（大津波警報および避難指示）の取得状況を説明変数として使用するにあたっては、「復興支援調査アーカイブ」のデータでは、取得の有無を訊ねており、具体的な取得時刻は訊ねていなかったため、県または市町村単位の状況データを用いることで、代替的に設定した。例えば、L市の個人iが「避難指示を聞いた。」と回答し、L市の避難指示の発令時刻が発災後T分の場合は、個人iは発災後T分以後は避難指示を聞いている状態だと設定した。実際は、多くの市町村にお

表-1 変数の説明

変数	名称	内容
$R_{i,t}$		
$seis_{i,k}$	計測震度	時刻までに観測された本震および余震の個々の計測震度
$warn_{i,t}$	大津波警報の津波予想高さ	時刻に警報を聞いている場合、その時点の津波予想高さ (m) 警報を聞いていない場合は0.
$order_{i,t}$	避難指示ダミー	避難指示を聞いている場合のダミー変数
$elap_t$	経過時間	14時46分からの経過時間 (分)
R_i^*		
$dist$	海岸からの距離	現在位置の海岸からの距離 (m)
$elev$	標高	現在位置の標高 (m)
dm_{wm}	女性ダミー	女性を表すダミー変数
dm_x	x歳代ダミー	年齢を表すダミー変数 (20歳代を基準とした)
dm_{hm}	ハザードマップの知識ダミー	津波ハザードマップを見たことがある場合のダミー変数
dm_{sh}	避難所の知識ダミー	地震発生時にいた場所の指定避難所または避難ビルを知っている場合のダミー変数
ASC_{non}	定数項 (閾値)	

いて、防災行政無線を通じて何度も繰り返し避難の呼びかけがなされ、広報車等を通じて避難を呼びかけた市町村も多いことから、設定した説明変数は、あくまでも真の情報取得時刻の近似値でしかないことをここに記す。

b) パラメータ推定

避難開始モデルの推定結果を表-2に示す。なお、提案モデルの初期対数尤度は、無情報モデルの定義に従い、各期の選択確率が等確率 (1/16) になるとして算出した。

第一に、提案モデルの説明変数のパラメータについて考察する。認知リスクに関する確定項 $R_{i,t}$ について見ると、まず、計測震度のパラメータは正で有意となっており、本震と相次ぐ余震によって、更には地震の規模が大きいほど、認知リスクが上昇することを示している。次に、大津波警報のパラメータは正で有意となっており、大津波警報を聞いた人の認知リスクが上昇すること、その津波予報高さが高いほど上昇度が大きいことを示している。また、避難指示のパラメータは正で有意となっており、避難指示を聞いた人の認知リスクが上昇することを示している。更に、大津波警報の津波予報高さの最大値は10mであり、これを踏まえて推定値の絶対値を比較すると、大津波警報と比較して避難指示の方が、認知リスクの上昇に強く効くことが推測される。そして、経過時間のパラメータは正で有意となっており、時間が経つにつれて、認知リスクが上昇することを示している。

また、認知リスクの閾値 R_i^* について見ると、まず、海岸からの距離と標高のパラメータは正で有意となっており、海岸から離れた場所や標高が高い場所にいるほど、閾値が高くなり、避難しにくくなることを示している。次に、女性ダミーのパラメータは負で有意となっており、女性の方が閾値が低くなり、避難しやすい傾向があることを示している。また、年齢に関するダミー変数を見ると、40歳代のパラメータは正で有意となっており、70歳代のパラメータは負で有意となっていることから、働いている世代は避難しにくく、高齢者ほど避難しやすい傾向があることが示唆される。ただし、本研究の分析は避難行動の開始に焦点をあてたものであり、最終的な避難に到るまでのトリップチェーンは分析対象外としたことから、避難以前の津波襲来を想定した上での支援活動などは考慮できていないことに注意が必要である。そして、ハザードマップおよび避難所の知識ダミーは負で有意となっており、これらの災害前の防災情報を持つ人ほど、避難しやすい傾向があることを示している。更に、両者の推定値の絶対値を比較すると、避難所の知識ダミーの方が絶対値が大きいことから、「何処が危険でありそうか」という情報を知っているよりも、「何処に逃げるべきか」という避難する先を想定できる状況の方が、避難

しやすい可能性が示唆される。

第二に、提案モデルと比較モデルを比較してみる。まず、提案モデルの最終対数尤度は、比較モデルのそれよりも小さくなっている。ただし、提案モデルは比較モデルを一般化したモデルでは無いため、両者を最終対数尤度から直接的な比較することは出来ず、更なる検証が必要である。次に、両モデルで有意となったパラメータを見ると、経過時間を除く全ての説明変数の符号は同じであり、更に説明変数間の絶対値の比率も似通っていることが確認される。このことから、提案モデルの妥当性がある程度示されたと考えられる。また、計測震度のパラメータに着目すると、提案モデルで正で有意になっている一方で、比較モデルでは有意になっておらず、提案モデルの方が、計測震度の影響をより明確に表現出来ることが示される。そして、経過時間のパラメータに着目すると、提案モデルと比較モデルでは符号が真逆の結果が出ており、更なる分析の必要性が明らかになった。

5. おわりに

(1) 研究の成果

本研究では、大津波警報や避難指示、地震動が避難行動に及ぼした影響を分析するため、リスク認知の動的な変化を仮定した避難開始モデルを構築した。また、実際の避難行動データおよび状況データを用いて、実証分析を行った。本研究の具体的な成果は以下の通りである。

表-2 パラメータ推定結果

説明変数	提案モデル		比較モデル (逐次選択モデル)	
	推定値	t 値	推定値	t 値
認知リスク $R_{i,t}$・避難効用の確定項 $V_{i,t}^e$				
計測震度	0.021	11.48**	-0.427e-03	-0.77
大津波警報の津波予報高さ	0.021	5.53**	0.015	3.40**
避難指示ダミー	0.269	9.10**	0.340	10.83**
経過時間	0.029	14.10**	-0.005	-5.61**
リスクの閾値 R_i^*・非避難効用の確定項 $V_{i,t}^f$				
海岸からの距離	0.366	25.57**	0.240	21.14**
標高	0.204	9.38**	0.127	7.60**
女性ダミー	-0.334	-5.14**	-0.271	-9.01**
30歳代ダミー	0.162	1.57	0.224	3.07**
40歳代ダミー	0.280	3.31**	0.315	4.27**
50歳代ダミー	0.070	0.65	0.142	2.06*
60歳代ダミー	-0.070	-0.68	0.183e-03	0.00
70歳代ダミー	-0.347	-3.37**	-0.238	-3.70**
ハザードマップの知識ダミー	-0.237	-5.42**	-0.134	-4.26**
避難所の知識ダミー	-0.413	-9.44**	-0.106	-2.93**
定数項 (閾値)	-0.061	-0.70	0.636	6.29**
サンプル数				
初期対数尤度 (無情報モデル ※注1)	7493		7493	
最終対数尤度 (※注2)	-20775.01		-33366.72	
	-17022.46		-16445.34	
McFaddenの決定係数	0.181		0.507	
修正済み決定係数	0.180		0.507	

* : 5%有意, ** : 1%有意.

※注1 : 提案モデルの初期対数尤度は、無情報モデルの定義に従い、各期の選択確率が等確率 (1/6) になるとして算出した。

※注2 : 提案モデルは比較モデルの一般化モデルでは無い為、最終対数尤度だけによる単純な比較はできない。

まず、従来のモデルでは評価が難しかった外生的な情報からの動的な影響を考慮するために、リスク認知に基づく避難選択メカニズムを示し、この意思決定構造を反映した避難開始モデルを提案した。次に、東北地方太平洋沖地震発災当日における6県47市町村での実際の避難行動データと状況データを用いて、提案モデルの実証分析を行った結果、有意となったパラメータの符号と既存モデルとの比較により、リスク認知を導入した行動仮説の妥当性が確認された。そして、パラメータ推定の結果から、外生的な情報が避難行動選択に有意な影響を及ぼすこと、情報内容によって影響度が異なること、避難を選択する閾値が防災情報の知識や社会経済属性等によって異なること等、避難・防災計画に資する知見を得ることが出来た。

(2) 今後の課題

最後に、今後の課題について述べる。

まず、今回の提案モデルと比較モデルの結果からだけでは、提案モデルの優位性は十分に示されなかった為、検証を行ってモデルの妥当性を明らかにする必要がある。

次に、提案モデルに関して、現象を記述するモデルと

しての課題を述べる。認知リスクに関する確定項 $R_{i,t}$ の式(5)から分かる通り、本研究では、個々の計測地震動を線形加算的に扱い、また、大津波警報や避難指示、経過時間とも独立に影響を評価している。しかし、実際の認知リスクの形成過程においては、地震動の影響が非線形であるだけでなく、これらが相互作用を持っていると考えるのが妥当である。例えば、地震動が小さい場合は、避難指示への信頼性が小さくなり、結果として避難確率が小さくなるのが想像される。これらの複合的な認知リスクの形成過程を記述できる発展モデルの構築が必要となる。

また、リスク認知の閾値の形成にあたっては、環境からの影響を詳細に分析する必要がある。今回の分析では、現在位置の変数として海岸からの距離と標高のみを用い、物理的環境変数は用いなかった。しかし、既往研究¹⁷⁾でも述べられている通り、防潮堤の高さや位置、震災以前のハザードマップの範囲等は、個人のリスク認知および避難行動選択に強い影響を及ぼしていると考えられるため、今回のリスク認知に基づく避難選択メカニズムに組み込むことができるような手法の構築と分析が必要となる。

そして、発災以後の行動を分析するには、トリップチェーン選択を扱う必要がある。今回の分析対象は最終的な避難開始時刻であり、推定結果として、40歳代が避難しにくいという結果が出た。しかし、この分析では、津波襲来を想定したが故に、家族等を迎えに行ったり避難を手助けしたりして、その後に避難するという行動を表現出来ていない。子供がいたり、親が高齢者となっていたりする世代は、特にこのようなトリップチェーンを選択しやすいと考えられる為、それらを記述できるモデルへ発展させていくことが重要だと考える。

謝辞：本研究にて、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震の発災当日における避難行動を分析するにあたって、国土交通省都市局から「復興支援調査アーカイブ」のデータを、消防庁からJ-ALERTの発令状況を、分析対象の各自治体から避難指示等の発令状況を、気象庁地球環境・海洋部から潮位データを、気象庁地震火山部から地震月報（カタログ編）のデータの詳細を、ご提供またはお教えいただきました。また、各種資料の閲覧にあたっては国立国会図書館にお世話になりました。ここに改めて御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 山下文男：哀史 三陸大津波，河出書房新社，2011.
- 2) 金井昌信，片田敏孝：2011 年東北地方太平洋沖地震津波襲来時における津波避難意思決定構造の把握，災害情報，No. 10，pp. 91-102，2012.
- 3) 片田敏孝，児玉真，桑沢敬行，越村俊一：住民の避難行動にみる津波防災の現状と課題-2003 年宮城県沖の地震・気仙沼市民意識調査から-，土木学会論文集，No. 789，pp. 93-104，2005.
- 4) 神谷大介，當間優樹，赤松良久，富山潤：近地と遠地の津波警報発表時における住民の避難行動に関する分析，土木学会論文集 B3，Vol. 68，No. 2，I_138-I_143，2012.
- 5) 奥村誠，塚井誠人，下荒磯司：避難勧告の信頼度と避難行動，土木計画学研究・論文集，Vol. 18，No.2，2001.
- 6) 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. 89-101，2005.
- 7) 佐藤太一，河野達仁，越村俊一，山浦一保，今村文彦：心理的作用を考慮した津波避難開始における意思決定モデルの開発，土木学会論文集 D3，Vol. 69，No. 2，pp. 64-80，2013.
- 8) 及川康，片田敏孝：災害時における情報検索行動を考慮した住民避難行動の記述と避難誘導方策の考察，災害情報，No. 15-(1)，pp. 1-15，2017.
- 9) Fu, H. and Wilmot, C. G.: A sequential logit dynamic travel demand model for hurricane evacuation, Transportation Research Record, Vol. 1882, pp. 19-26, 2004.
- 10) Gudishala, R. and Wilmot, C. G.: Comparison of Time-Dependent Sequential Logit and Nested Logit for Modeling Hurricane Evacuation Demand, Transportation Research Record, Vol. 27, pp. 108-116, 2013.
- 11) 浦田淳司，羽藤英二，柳沼秀樹：将来効用の動学的異質性を考慮した避難開始モデルの構築，土木学会論文集 D3（土木計画学），Vol. 72，No. 4，pp. 261-277，2016.
- 12) Urata, J. and Pel, A. J.: People's risk recognition preceding evacuation and its role in demand modeling and planning, Risk Analysis, 38(5), pp. 889-905, 2018.
- 13) Arentze, T., Ettema, D., Timmermans, H.: Estimating a model of dynamic activity generation based on one-day observations: method and results, Transportation Research Part B, Vol. 45, pp.447-460, 2011.
- 14) 国土交通省都市局 復興支援調査アーカイブ
- 15) 気象庁 地震月報（カタログ編）
- 16) 気象庁 平成 23 年 3 月 地震・火山月報（防災編）
- 17) Parady, G., Tran, B., Gilmour, S.: Effect of seawalls on tsunami evacuation departure in the 2011 Great East Japan Earthquake, Injury Prevention, 2018.

(?)

MODELING TSUNAMI EVACUATION DEPARTURE TIME FOCUSING ON INDIVIDUAL'S RISK PERCEPTION

Masahiro ARAKI, Giancarlo PARADY, Kiyoshi TAKAMI
and Noboru HARATA

In this study, we first model tsunami evacuation departure time choice by introducing the concept of dynamic risk recognition, focusing on the effect of exogenous information accumulated every moment, such as earthquake motion and warning. Next, through empirical analysis using actual tsunami evacuation behavior data and situation data in 47 municipalities in six prefectures on the day of the Great East Japan Earthquake, we quantitatively evaluated the influence of exogenous information on the choice of evacuation behavior. As a result of empirical analysis, it has been confirmed that the validity of the behavioral hypothesis that introduces dynamic risk perception, the fact that exogenous information has a significant effect on evacuation behavior selection, the degree of influence varies depending on the information content,

and the threshold for selecting evacuation is disaster prevention information, and it differs depending on the knowledge and socio-economic attributes.