

災害避難時の動的リスク認知と その異質性の影響評価

浦田 淳司¹・Adam Pel²

¹正会員 工博 神戸大学大学院 市民工学専攻 (〒 657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1)

E-mail: urata@person.kobe-u.ac.jp

²非会員 工博 Delft University of Technology Civil Engineering and Geosciences (2628CN the Netherlands Delft Stevinweg 1)

E-mail: a.j.pel@tudelft.nl

避難は減災のための最終的な対策であり、多くの人の命を守ることができる避難計画が求められる。避難早期化の対策の一つに、避難開始の促進がある。しかし、避難開始の意思決定は個人に委ねられる部分が大きく、対策としては事前のリスク教育や時中のリスク情報伝搬といった個人のリスク認知に働きかける対策が主となる。こうした背景の下、本研究では、時空間リスクと個人特性に着目し、リスク認知とその避難開始への影響を定量評価する。また、逐次的意思決定過程におけるリスク認知の蓄積型の異質性を表現し、個人間時間異質性を考慮したモデル構築を試みる。また、被害し日本大震災における陸前高田市の避難行動データを用いた実証分析を行い、減災対策の影響評価を行う。

1. はじめに

2011年の東北地方太平洋沖地震により発生した大津波によって、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は壊滅的な被害を受けた。その犠牲者数は2万人近くに及び、そのほとんどが津波による被災である。一方で、津波到達までに少なくとも30分以上の時間があつた中でなぜ避難できなかったのかという問題は残っており、その理解はなお進展の余地が大きい。当然、今後への備えとして、各地で避難計画立案や避難のためのインフラ整備が必要とされており、その際には避難行動に関する知見を活用した適切な立案や整備の実施が求められている。

津波被災は避難完了の遅れによって生じ、その原因として、避難開始の遅れと避難移動中の遅れの二つが挙げられる。避難移動中の遅れは、混雑に起因する現象であり、避難経路や避難目的地、避難出発時刻の過集中が問題となる。対して、避難開始の遅れは、同地域内の住民の避難開始時刻が分布する中で、その最後に避難を開始するごく一部の住民に生じる現象である。こうした一部の人の行動を捉えるための分析は、従来の平常時の交通研究ではほとんど行われていない。しかし、災害避難にあたっては、こうした行動を捕捉する意義は大きい。

そこで、本研究では、避難開始の意思決定に着目し、分析を行う。避難開始の意思決定に影響する要因は、自らのリスクに依存するものと他者に依存するものの大

きく二つに分かれる。自らのリスクは、将来受ける被災までを含めたリスクであり¹⁾、また、リスク自体をいかに認知しているのかも重要である。事前のリスク教育や過去の被災経験、また災害関連の情報取得による影響が大きい。他者の影響としては、周辺他者の行動によって自分の意思決定が影響を受ける率先避難²⁾や多数派同調バイアス³⁾⁴⁾⁵⁾といった現象がある。また、災害時要援護者への支援行動⁶⁾や世帯内他者のピックアップ行動等の行動を行うことで、避難開始が遅れてしまうこともある。

本研究では、特に、避難開始の意思決定における個人のリスク認知の影響に着目する。リスク認知には、空間的に分布するリスク自体と、事前教育経験やリスク情報等の個人要因が影響を与えられ考えられる。主たる避難開始の早期化対策である情報伝搬や事前リスク教育といったものとリスク認知は直接的に関わっており、その評価の意義は大きい。これらの避難開始時刻への影響を評価することができれば、減災対策の効果を把握することに繋がる。さらに、少数派である避難開始遅れの人を捉えて評価するにあたっては、個人間の異質性や認知の時間軸上での変化といった緻密な分析が求められる。

既存研究においては、災害時避難行動のモデリングの研究は、大きく最適化ベースのアプローチとシミュレーションベースのアプローチに分けられる⁷⁾⁸⁾。本研究では、避難行動の詳細な再現を目指しており、シミュ

レーションベースのアプローチに属する。シミュレーションベースのアプローチは、最適ではない災害時行動を再現する上で有用であり、これまでも様々な研究がある⁹⁾¹⁰⁾。ただし、家族内のピックアップ行動¹¹⁾や再避難行動¹²⁾¹³⁾など、十分に理解が進んでいない行動も多い。また、このアプローチは減災対策による避難行動への影響を評価できる点でも有用である¹⁴⁾¹⁵⁾¹⁶⁾。

リスク認知に着目した既存研究については、大きくはリスク認知に影響を与える要因に関する研究とリスク認知が避難開始選択に与える影響に関する研究の二つがある。前者については、避難者の主観的なリスクと空間の持つ客観的なリスクの関連に関する研究があり、個人の社会属性やリスク教育、過去の災害経験による影響を分析している¹⁷⁾¹⁸⁾¹⁹⁾²⁰⁾²¹⁾。また、Perry&Green(1982)²²⁾やDash&Gradwin(2007)²³⁾、Lindell&Hwang(2008)²⁴⁾などではリスク情報の認知に与える影響について論じているが、この影響の実証的な分析は、動学的な状況の変化の把握の困難さのため、難しい。ただし、Kang et al.(2007)²⁵⁾やBaker(1991)²⁶⁾等でも非常時の意思決定におけるリスク教育とリスク情報の影響について指摘されており、こうした要因の導入は重要であろう。離散的なリスク認知を捉えるための実証的な研究²⁷⁾¹⁶⁾²⁰⁾²⁸⁾²⁹⁾において、個人の社会属性の影響は分析されている。一方で、空間的な要素や動的な状況までを捉えた分析は少なく、またシミュレーションベースの避難交通評価において必要となる避難開始時刻までを一気通貫に評価したモデルはない。また、個人や世帯の異質性については、Hasan et al.(2010)³⁰⁾やHasan et al.(2013)³¹⁾において避難開始時刻選択モデルの中で評価されている。こうした個人間の異質性が状況理解の難しい災害時において生じることは明らかにであり、その評価の必要性は大きい。また、時間の短い中で意思決定をする上では、異質性の動学的な側面にも留意する必要がある。

本研究では、津波災害における避難開始の意思決定過程を、リスク認知を通じて、明らかにすることを目的とする。特に、リスク認知の影響を明らかにすることで、避難対策(情報伝搬やリスク教育)の効果を把握することを目指す。同時に、少数の避難遅れの人の意思決定の分析には、意思決定における個人間の動学的異質性を導入する。

2. 提案モデル

(1) モデルのフレームワーク

まず、本研究における避難意思決定のフレームワークについて説明する。図-1に示すように、はじめにリ

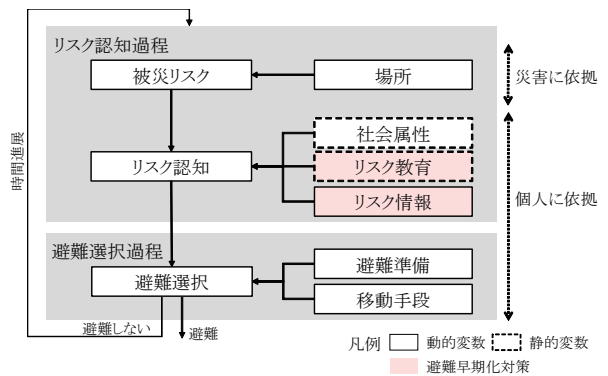


図-1 避難意思決定のフレームワーク

スク認知過程があり、そのリスク認知を受けて避難選択過程がある。リスク認知は、その災害の個人の滞在場所によって定まる被災リスクをベースとして、それに対する認知である。リスク認知には、個人の社会属性、特に事前のリスク教育や経験有無、リスクに関する情報入手の状況によって影響を受ける。こうしたリスク認知を元に、個々人は避難の有無を決定する。もちろん、避難選択にあたっては、その時の避難の準備の状況や、移動手段や避難必要距離に応じた移動手段の違いも影響を与える。図-1の実線で囲った要素は動的に変化する変数であり、こうしたリスク認知の更新と逐次的な意思決定が時間軸上で行われている。実際の意思決定過程に近いモデルのフレームワークを取り入れることで、モデルの頑健性を高めることができる。また、主要な避難早期化対策である事前のリスク教育や時中の情報伝搬といった対策は、(避難選択に直接的に働きかける対策ではなく)厳密には個々人のリスク認知に働きかける対策である。そのため、このリスク認知過程をモデルに明示的に取り入れることで、対策を評価しやすくなると考える。

次に、本研究における個人のリスク認知の捉え方について説明する(図-2)。津波災害において、実際の被害発生前の被災リスク(被災可能性)は連続的に推移する変数であると考えられる。実際の到達津波の完璧な予測は不可能であることを念頭におけば、標高が高くなるほど又海からの距離が遠くなるほど、被災リスクは連続的に低下する変数であると考えるのが自然である。ただし、最終的な津波到達後は、被災又は被災なしの二つに分かれる。その上で、個人の津波リスクの認知について考える。まず、個人が津波リスクを空間上の連続量として認知することは困難である。次に、最終的な結果は離散的な結果であることと認知のしやすさを考えれば、個人がリスクを認知する際にも離散的な形で捉えていると考えるのが自然であるといえる。本

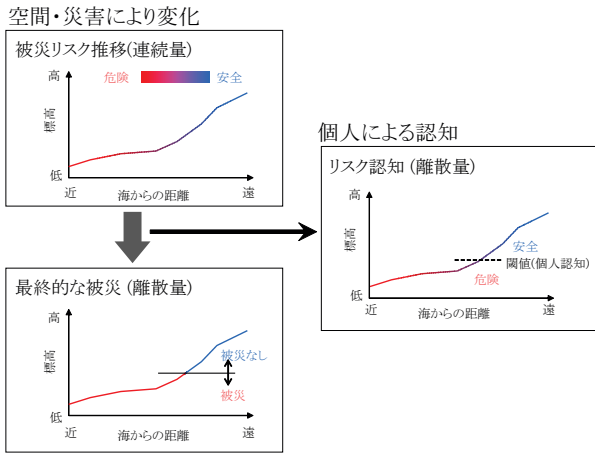


図-2 個人の離散的なリスク認知

研究では、この考え方の下、リスク認知を離散的に行っているとし、リスク認知過程のモデル化を行う。

(2) モデルの定式化

本研究では、リスク認知モデルを内包した避難開始選択モデルを構築する。本節では、モデルの定式化について説明する。

a) リスク認知モデル

本項では、リスク認知モデルの定式化を示す。図-2を用いて示した離散的なリスク認知の構造を ordered logit model により表す。基本的な定式化は次となる。

$$P_i^{l,t}(R(s_{i,t}) > H_i^l(t)) = \frac{\exp(\sum_j \beta_j s_{i,t}^j)}{\exp(\sum_j \beta_j s_{i,t}^j) + \exp(H_i^l(t))} \quad (1)$$

$$R(s_{i,t}) = \sum_j \beta_j s_{i,t}^j + \epsilon_{i,t} \quad (2)$$

$$H_i^l(t) = \sum_k \gamma_k h_{i,t}^k + \sigma_{i,t} \quad (3)$$

ここで、時刻 t における個人 i について、 $R(s_{i,t})$ は滞在場所 $s_{i,t}$ における被災リスク、 $H_i^l(t)$ はリスク認知がクラス l 以上となる閾値を示し、 $P_i^{l,t}$ はリスク認知がクラス l 以上となる確率を示す。 β_j, γ_k はパラメータを示し、被災リスク $R(s_{i,t})$ 場所 s に関わる変数のみで構成し、リスク認知の閾値 $H_i^l(t)$ は場所以外の個人 i に関わる変数で構成する。 $\epsilon_{i,t}$ と $\sigma_{i,t}$ は非観測項であり、 $\epsilon_{i,t}$ に i.i.d ガンベル分布を仮定すれば、式 (1) を得る。ここで、実証分析におけるパラメータ推定においては、空間の被災リスク R と個人の閾値 H の別々の項とする必要は特にない。しかしながら、空間の被災リスク R は津波シミュレータ等により推測値を空間別に与えることが可能であり、別々に設定することによって個人のリスク認知確率に関する計算が行いやすいという利

点があるため、この定式化とする。

また、 $\sigma_{i,t}$ は確率密度関数 $f(\sigma|\phi)$ に従うとし、mixed logit model の枠組みを用い、リスク認知がクラス l 以上となる確率 $P_{m,i}^{l,t}$ は次となる。

$$P_{m,i}^{l,t} = \int P_i^{l,t} f(\sigma|\phi) d\sigma \quad (4)$$

なお、 ϕ は確率密度関数のパラメータである。このリスク認知に関する非観測項 $\sigma_{i,t}$ の導入により、リスク認知における個人間異質性を表現できる。リスク認知は観測不可能な個人の様々な状況(周囲の様子や事前知識量など)に影響を受けていると考えられ、個人間異質性を導入することでモデルの蓋然性を高めることができると考える。また、短い時間における逐次的なリスク認知の意思決定において、この非観測項 $\sigma_{i,t}$ は個人内で連続的に変化すると考える。この個人内の連続時刻における非観測項の変化を表すため、 $\sigma_{i,t}$ をブラウン運動のメカニズム³²⁾³³⁾を用いて、次式で表現する。

$$\sigma_{i,t} - \sigma_{i,t'} \sim \mathcal{N}(0, t - t') \quad (t > t') \quad (5)$$

ここでは、二時間帯の非観測項の差は、その時刻差に応じた分散をもった正規分布 \mathcal{N} によって与える。

b) 避難開始選択モデル

前項で示した離散型のリスク認知確率を用い、潜在クラスモデルの枠組みを用いて、次式で時刻 t における個人 i の避難開始の選択モデルを構築する。

$$P_i^{ev}(t) = \sum_l P_i(ev|l, t) p_{m,i}^{l,t} \quad (6)$$

ここでは、リスク認知クラス l となる確率 p とその場合の避難開始の選択確率 $P_i(ev|l, t)$ を掛け合わせており、後者を次式で表す。

$$P_i(ev|l, t) = \frac{\exp(V_{i,l}^{ev}(t))}{1 + \exp(V_{i,l}^{ev}(t))} \quad (7)$$

$$V_{i,l}^{ev}(t) = \sum_j \alpha_l^j x_{i,t}^j + \nu_{i,l,t} \quad (8)$$

時刻 t におけるリスク認知クラス l の個人 i の避難開始効用 $V_{i,l}^{ev}(t)$ はパラメータ α と個人に関する観測変数 x と非観測項 ν で表す。 ν に i.i.d ガンベル分布を仮定し、避難開始の選択確率 $P_i(ev|l, t)$ を求める。

3. 実証分析

(1) 避難行動データ

東日本大震災における陸前高田市内の避難行動データを用い、前述したモデルによる実証分析を行う。陸前高田市は東日本大震災において、市の中心部の高田町や気仙川付近のエリアを中心に浸水や被災が生じている。表-1 は陸前高田市の被災状況を示す。震災により、当時の総人口のうち約 7.2% が死亡または行方不明となっている。中心部のほぼ全域や沿岸の集落地の大

表-1 陸前高田市の東日本大震災における被災状況

総人口 (当時)	24,246 名
死亡者・行方不明者	1,757 名
浸水面積	13 km ²
被災戸数	3,368 戸

半において津波浸水し、また平野部の建物の多くで最上階まで浸水した。また、用途地域の浸水面積率は東日本大震災の被災自治体の中で最大規模である。津波到達時刻は、牛山ら (2011)³⁴⁾ では、最も到達が早かった地点では地震発生から 37 分後、最も遅かった地点では 45 分後に到達したと報告されている。

用いる避難行動データは、2011 年に国土交通省都市局が行った津波被災現況調査で取得されたデータである。調査は、2011 年 9 月下旬から 12 月にかけて、津波浸水被害を受けた 62 市町村の聖人を対象に行われた。避難所や仮設住宅などで、訪問聞き取り調査の形で行われ、全体での調査者数は 10,603 名、うち陸前高田市は 510 名となっている。地震発生から当日の日没までの行動に加えて、当日の津波認識や警報等の情報入手状況や事前のリスク教育等についても調査している。本研究で分析対象とするのは、最も内陸側への津波到着までの地震発生から 45 分以内に避難目的の移動を行った回答者 422 名の行動データとその個人特性についてである。

(2) リスク認知に関する基礎分析

本節では、リスク認知に関する基礎分析を行う。避難開始時刻、リスク認知の推移、空間的な分布に関する分析を行う。

a) リスク認知と避難開始時刻

まず、地震発生時のリスク認知の状況と累積避難開始割合の時間推移について、図-3 に示す。リスク認知に関する設問として、”(問 3) 地震の揺れの直後、大津波警報を聞く前にあなたのいた場所に津波が来ると思いましたか。” というものがあり、この回答として、”1. 必ず来る、2. 来るかもしれない、3. 来ないだろう、4. 考えなかった”の 4 つの選択肢が提示されている。図-3 の 4 本の線はリスク認知レベルを示しており、リスク認知レベル 3~0 が、上記の選択肢 1~4 に対応している。図の縦軸は各レベルの人の時間軸上の累積避難開始割合、横軸は地震発生からの経過時間を示す。リスク認知レベルが高いほど早めに避難開始する傾向がある。半数の人が避難開始するまでに、リスク認知レベル 3 では 5 分程度、レベル 2 では 20 分程度、レベル 1・0 では 30 分程度を要している。レベル 1 と 0 はほぼ変

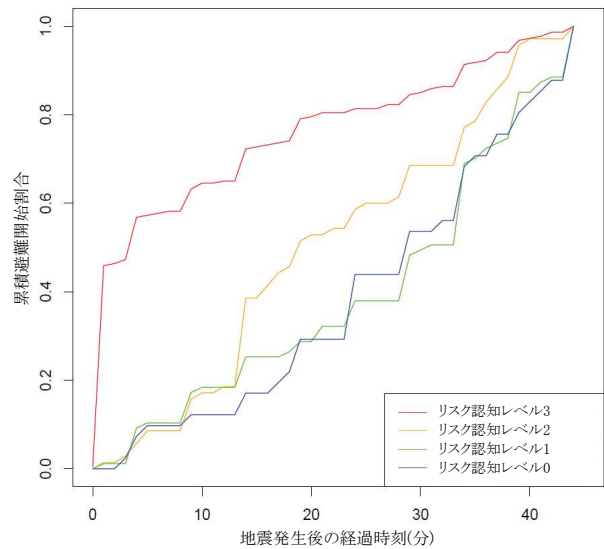


図-3 地震発生時のリスク認知と累積避難開始割合の推移

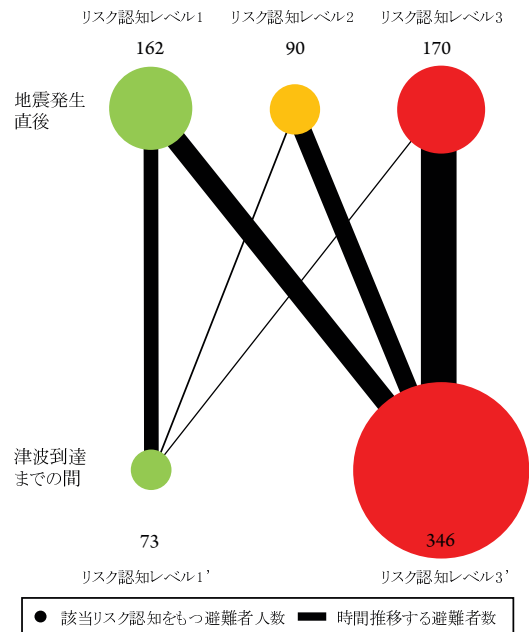


図-4 地震発生時/津波到達前のリスク認知とその推移

わらないため、今後の分析では、この二つをまとめてレベル 1 として分析する。避難開始時刻の平均値はリスク認知レベルが高い順に 19.8 分、22.6 分、28.6 分となっている。なお、この三群の平均値の差は統計的に有意である (p 値=0.00)。

b) リスク認知の時間変化

次に、リスク認知の時間変化について、図-4 に示す。図の上段の円の大きさは、前項で示した (問 3) の回答結果の各人数を示し、図の下段の円の大きさは”(問 9) 地震の後、津波が実際に押し寄せてくるまでの間、津

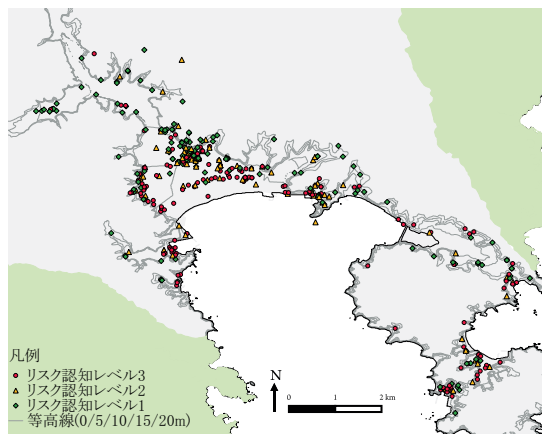


図-5 地震発生時の滞在場所分布とリスク認知レベル

波を警戒し避難しようと思いましたが。”に対する回答を示す。この回答選択肢には”1. 思った, 2. 思ったができなかった, 3. 思わなかった”の3つがあり, このうち選択肢1と2をリスク認知レベル3’, 選択肢3をリスク認知レベル1’としている。円をつなぐ線の太さは, 同じ回答者の(問3)と(問9)での回答の推移を示している。地震発生直後に比べて, 津波到達前にはリスク認知レベルが上昇していることは明らかである。

各個人のリスク認知は, 津波到達までの数十分の中で変化していることは明らかにであり, こうした時間変化を捉えることが必要である。一方で, 避難行動調査は事後的な聞き取り型の調査とならざるおえないため, 各時刻でのリスク認知について把握することは難しい。今回用いた調査でも, 地震発生直後(問3)と津波到達までの間(問9)に加えて, 大津波警報などの情報を入手した際のリスク認知を聞いているが, 地震発生直後以外はそのリスク認知を持った時刻は明らかではない。この点で, リスク認知の動的な傾向を明らかにすることに難しさがある。

c) リスク認知の空間分布

次に, リスク認知の空間分布について分析する。なお, 本項以降ではリスク認知については(問3)の回答を用いて分析する。

まず, 図-5は地震発生時の滞在場所の空間分布とリスク認知レベルを示している。海から近い場所にいる人のリスク認知レベルは比較的高い傾向にある。一方で, 図中央の平野部のうち, 海から離れた場所にいる人のリスク認知にはバラつきがあることがわかる。このバラつきの存在は, 前述したように, 個人のリスク認知は, 空間に起因する被災リスクに加えて, 個人特性による影響が生じていることを示す。

次に, 避難トリップのODの時間推移に着目した分析を行う。前項で示したように, リスク認知の時刻は

明らかではない。しかし, 調査では各トリップの生起時刻は把握しており, ここでは避難トリップの出発場所と到着場所とそれぞれの時刻を用いて, リスク認知の推移の把握を試みる。本研究で導入する仮定として, 避難トリップの出発場所では避難者の認知リスクは高く, 避難トリップの到着場所では避難者の認知リスクは小さいというものである。この仮定を導入することで, 各場所・各時刻でのリスク認知について, 分析することが可能となる。もちろん, ここでの時刻についても事後的な聞き取り調査によるものである点には留意が必要である。

図-6は避難トリップの出発場所の時間推移を示し, 図-7は避難トリップの到着場所の時間推移を示す。各小図の右上に地震発生からの経過時刻を示しており, 各点の色・形は地震発生時のリスク認知を示す。時間推移にあわせて, 出発地・到着地共に海から離れた場所かつ標高の高い場所に移っている。また, 早期に避難を開始する人は, 地震発生時のリスク認知レベルが高い人であることも確認できる。

想定通りの傾向を示しており, 避難トリップの出発場所・到着場所を各時刻のリスク認知として用いることが妥当であると考えられる。次節では, 地震発生時のリスク認知(問3の回答結果)とこの避難トリップに拠るリスク認知を用いて, モデルを用いた分析を行う。この時, 出発場所はリスク認知レベル3, 到着場所はリスク認知レベル1と設定する。

(3) モデルを用いた分析

a) リスク認知モデル

前章で示した式(1)~式(5)を用い, リスク認知のordered logit modelのパラメータ推定を行う。式(1)のリスク認知レベルに関する確率を用い, 対数尤度の最大化によりパラメータを求める。ここでは, リスク認知レベルは3段階とする。

表-2はパラメータ推定結果である。ここでは, 1. 静的モデル, 2. 静的かつ個人間異質性の考慮モデル, 3. 動的モデル, 4. 動的かつ個人間異質性の考慮モデル, 5. 動的かつ個人間時間異質性の考慮モデル(式(5)の導入)の5つについてのモデルの結果を示している。また, 異質性の表現には切断正規分布を用い, 陸前高田市の人口のうちの死亡者・行方不明者数の割合を考慮し, リスク認知を低く見積もる方向の端部10%をカットする。これは表中のCV対数尤度は, leave-one-out型のcross validationにより算出した対数尤度³⁵⁾³⁶⁾³⁷⁾である。ランダムにデータを10分割し, 9割のデータを用いて推定したパラメータを用いて, 残り1割のデータの対数尤度を算出する。これを全ての組合せ(全10パターン)について計算し, その対数尤度の合計値を示している。

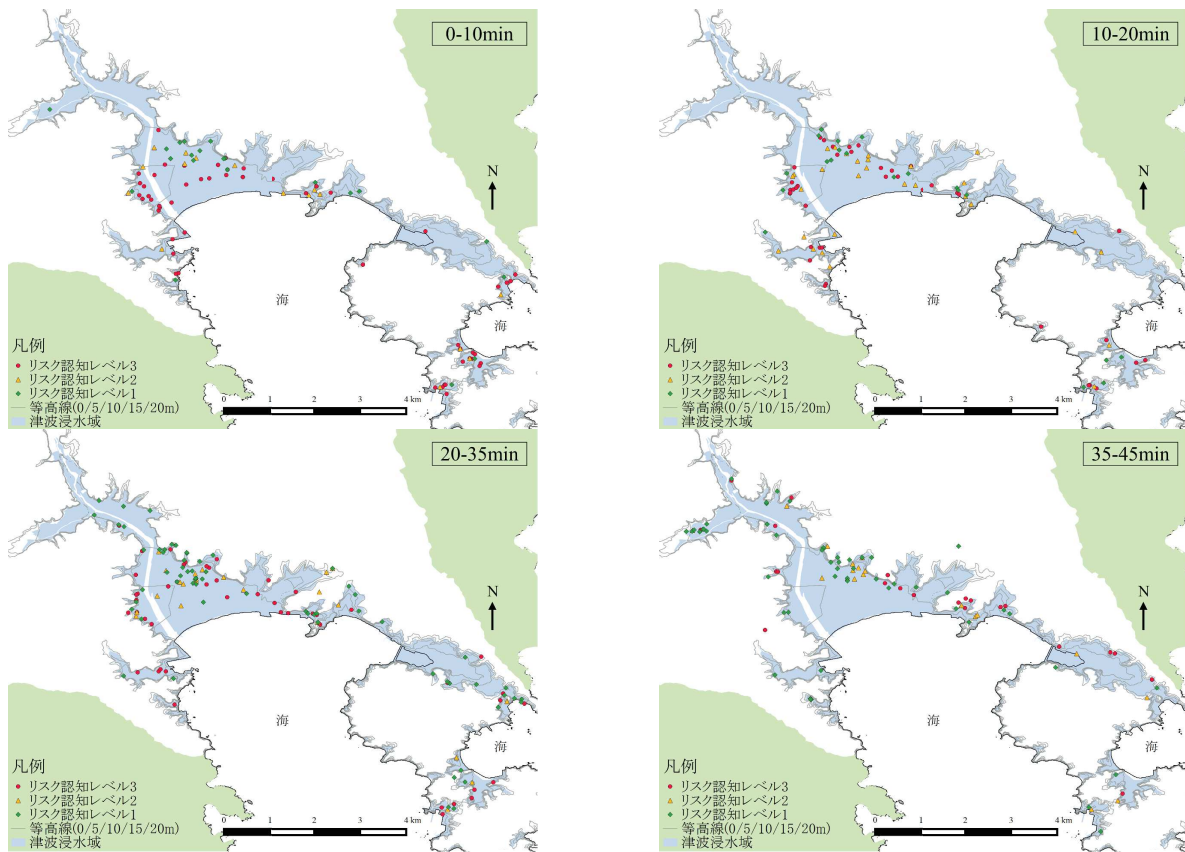


図-6 避難トリップの出発場所の時間推移

オーバーフィッティングの確認の目的に用いられることが多い。

まず、五つのモデルの尤度を比較すると、動的かつ個人間時間異質性を導入したモデル (モデル 5) が最も良い尤度を持っている。CV 対数尤度を用いて、尤度比検定を行うと、通常の静的なモデル 1 に比べて、他の 4 つのモデルは全て 1% 有意で尤度が向上している。また、異質性のみを仮定したモデル 2 に比べて、モデル 4・モデル 5 は 1% 有意で尤度が向上している。動的のみを仮定したモデル 3 に比べて、モデル 5 は 10% 有意で尤度が向上しており、モデル 4 はその差は有意ではない。この結果より、リスク認知に関して、動的で個人間時間異質性を導入することで、モデルの説明力を向上できたと言える。

モデル 5 のパラメータの推定値について確認する。まず、個人に関する閾値のパラメータについては、避難所・ハザードマップの事前知識の有無とリスク情報の入手有無が負で有意となっており、知識や情報があつた方がリスク認知が高くなりやすいということを示す。経過時刻も負で有意であり、時間が進むほどリスク認知が高くなりやすいことを示す。ここでは、3 段階のリスク認知を仮定しているため、二つの閾値が必要であり、その差を推定している。個人間時間異質性を示す σ の

標準偏差は 10% 有意となっている。なお、 σ の平均値は、異質性なしのモデルでは定数項となる。次に、被災リスクに関する指標については、標高・海からの距離ともに負で 5% 有意となっている。それぞれ大きな値をもつほど、リスクが下がり、リスク認知は低下する傾向を持つことを示す。

b) 避難開始選択モデル

次に、式 (6)~式 (8) を用い、避難開始選択モデルのパラメータ推定を最尤法により行う。リスク認知確率 $p_{m,i}^{l,t}$ については前項で推定した結果を用い、また、リスク認知レベル 3・2 を認知ありクラス、リスク認知レベル 1 を認知なしクラスとする。また、パラメータ推定にあたって用いるデータは、地震発生後 40 分までの避難開始選択行動とする。

3 つのモデルについてのパラメータの推定結果を表-3 に示す。左列がリスク認知を考慮しないモデル、中央列がリスク認知を考慮せず、リスク教育や情報に関する説明変数や空間リスクに関する説明変数を用いたモデル、右列がリスク認知を考慮した提案モデルである。

まず、3 つのモデルについて比較する。CV 対数尤度を用いた尤度比検定により、リスク認知を考慮したモデルが他のモデルより 1% 有意で尤度が向上しており、リスク認知を導入することで避難開始選択モデルの説

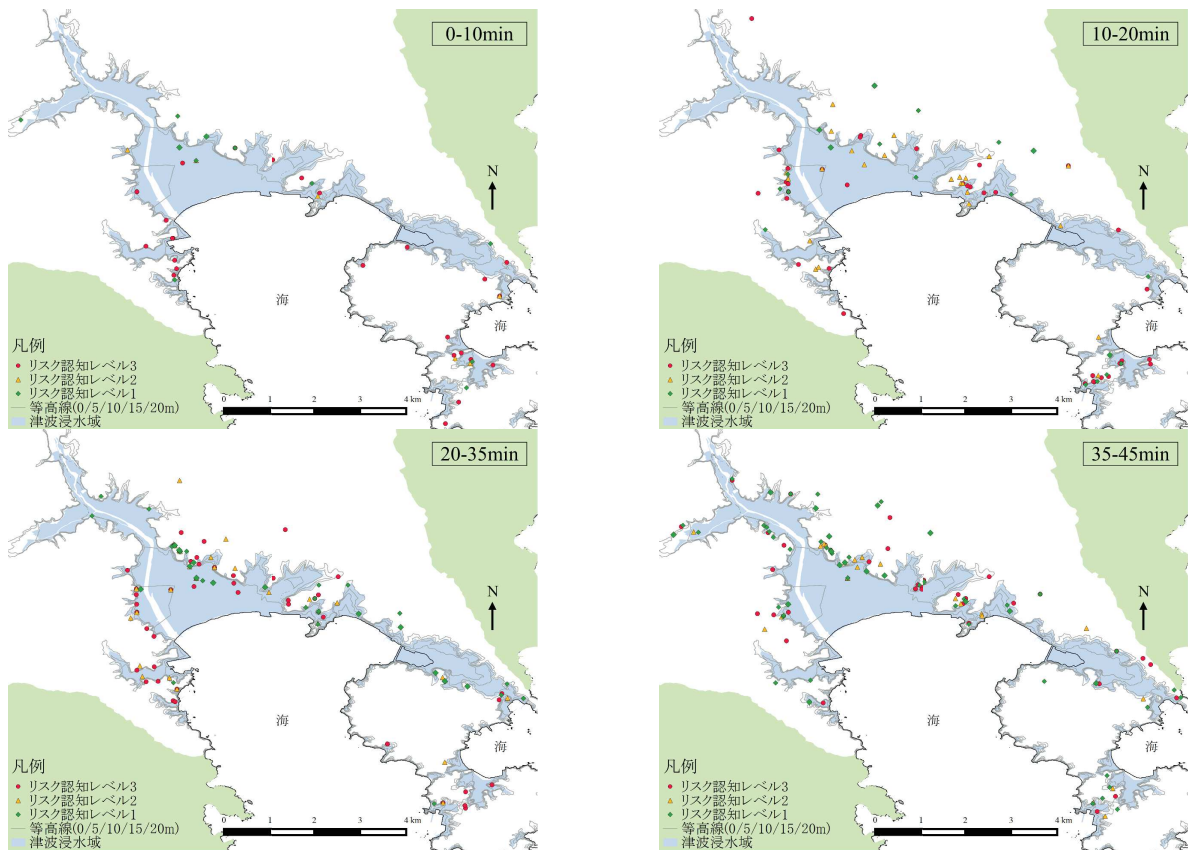


図-7 避難トリップの到着場所の時間推移

明力を向上できたといえる。また、リスク認知なしのモデルの場合は、避難所・ハザードマップの事前知識とリスク情報入手に関する説明変数は有意とならなかった。これらは、減災施策に関連する説明変数であり、評価の必要性は大きいため、できる限り説明変数として盛り込むことが望ましい。リスク認知を考慮したモデルでは、これらの説明変数は考慮できており、この点でも利点がある。

次に、リスク認知を考慮したモデルの個々の説明変数のパラメータ推定結果について考察する。認知ありクラスについては、トリップ数と同行人数・自宅経験・高齢女性・35分以降のダミー変数については、全て正で5%有意となっている。トリップ数は増えるほど、その他の変数は該当する場合に、避難開始を選択しやすくなることを示している。認知なしクラスについては、トリップ数と高齢女性のパラメータのみが正で5%有意となっている。定数項については、認知なしクラスの方が認知ありクラスよりも負でその絶対値が大きくなっており、これは認知なしクラスの方が避難開始が選択されづらいことを示す。また、最右列は説明変数ごとの弾力性(ダミー変数については擬似弾力性³⁸⁾³⁹⁾を示している。弾力性を比べると、避難開始選択に対する説明変数の影響は、35分以降の影響が最も大きく、次

にトリップ数、同行人数となっている。減災対策に関わるリスク情報入手と事前知識はこれらよりも小さくなっており、またリスク情報入手の方が事前知識よりも大きい。

上述したリスク認知モデルを内包した避難開始選択モデルにより算出した避難確率の時間推移を図-8に示す。黒線は実際の調査データによる累積避難割合の推移、赤線はリスク認知高の場合の避難開始選択確率、緑線はリスク認知低の場合の避難開始選択確率である。青線は、各個人のリスク認知確率を考慮した上で合計し、避難開始選択確率を算出した値である。図から明らかであるように、リスク認知低クラスの避難確率はきわめて小さくなっている。リスク認知を考慮したモデルとすることで、リスク認知が低い場合は避難開始が行われないという状況を表現することができ、利点大きい。

最後に、リスク情報入手による影響を把握するため、リスクエリア別の避難確率の推移を図-9に示す。リスクエリアは、本項のパラメータ推定の際に用いたサンプル数がほぼ等しく分割されるように外生的にリスクに応じて3つのエリアに分割したものである。図の実線・三角で示した線がリスク情報を入手した場合、破線・丸で示した線がリスク情報を入手していない場合

表-2 リスク認知モデルのパラメータ推定結果

説明変数	1. 静的 異質性なし		2. 静的 個人間異質性		3. 動的 異質性なし		4. 動的 個人間異質性		5. 動的 個人間時間異質性 ⁵		
	推定値	t 値	推定値	t 値	推定値	t 値	推定値	t 値	推定値	t 値	
閾値 H (個人指標)											
避難所等の知識 ¹	0.05	0.39	0.05	0.37	-0.35	-1.96*	-0.36	-1.97*	-0.36	-2.01*	
リスク情報入手 ¹	-0.42	-3.32*	-0.43	-3.35*	-0.83	-4.77*	-0.84	-4.79*	-0.83	-4.75*	
経過時刻 [h] ²	-	-	-	-	-1.57	-4.10*	-1.58	-4.12*	-1.57	-4.07*	
閾値の差	0.36	9.82*	0.36	9.82*	0.36	9.82*	0.36	9.82*	0.36	9.82*	
σ (平均値)	-2.65	-10.70*	-2.62	-10.55*	-2.42	-9.26*	-2.41	-9.22*	-2.39	-9.14*	
σ (標準偏差) ³	-	-	0.08	2.33*	-	-	0.07	0.65	0.14	1.85 [†]	
被災リスク R (空間指標)											
標高 [m] ⁴	-1.40	-13.67*	-1.40	-13.68*	-1.50	-13.66*	-1.50	-13.66*	-1.50	-13.67*	
海からの距離 [km] ⁴	-0.25	-4.66*	-0.25	-4.67*	-0.26	-4.79*	-0.26	-4.79*	-0.26	-4.79*	
サンプル数	1246		1246		1246		1246		1246		
初期対数尤度	-1368.9		-1368.9		-1368.9		-1368.9		-1368.9		
最終対数尤度	-984.0		-981.2		-975.7		-975.5		-974.0		
CV 対数尤度	-990.0		-987.0		-982.8		-983.3		-981.0		
決定係数 R^2	0.281		0.283		0.287		0.287		0.289		
修正済決定係数 R^2	0.277		0.278		0.282		0.282		0.283		

Notes: * = 5% 有意, [†] = 10% 有意

¹ ダミー係数 ² リスク情報未入手者のみ ³ 標高 4m~20m の滞在者のみを対象

⁴ 対数値 ⁵ ブラウン運動のメカニズムにより表現

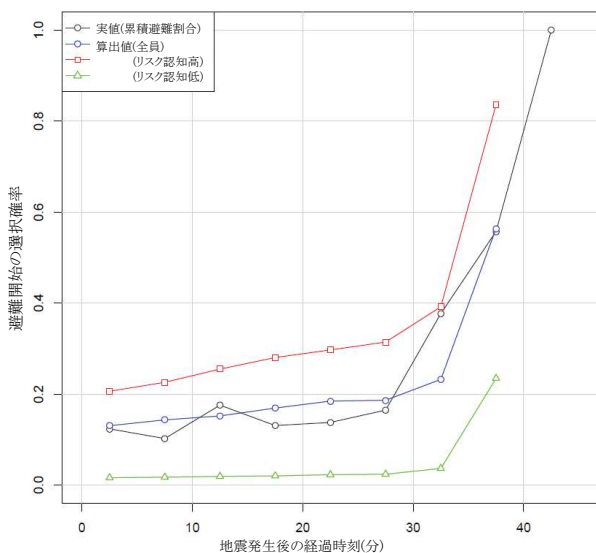


図-8 リスク認知クラス別の避難確率の推移

である。どのエリアの避難者でも、早い時間帯のリスク情報入手の方が、避難確率の増加幅が大きいことがわかる。また、避難確率の増加幅は赤線で示したリス

ク小エリアのほうが大きくなっている。これは、つまり、空間リスクの小さいエリア(最終的に避難は必要となる)では他のエリアと比べて、避難開始選択があまり進まない。そのため、リスク情報を早めに伝播することで得られる避難促進の効果がより大きくなっているといえる。

4. おわりに

人は自らの被災リスクを認知した上で避難の意思決定を行う。被災リスク自体は場所により変化し、事前知識等やリスク情報に起因する個人特性によってリスク認知は異なる。また、避難開始選択は避難時の交通需要モデルであり、最終的には、避難が遅れ、被災する可能性の高いごく一部の人を捕捉することが求められる。これは、リスク教育や情報伝搬といった減災対策の目的は最終的な避難開始の遅れによる被災を防ぐことであるからである。災害時であっても目的地選択や経路配分におけるモデリングでは、道路上での対策は混雑緩和が目的であり、混雑への影響が大きい主要な選択層を把握することが求められる。この違いは、本

表-3 避難開始選択モデルのパラメータ推定結果

説明変数	リスク認知なし		リスク認知なし (リスク・空間指標)		リスク認知あり 認知ありクラス		認知なしクラス		弾力性
	推定値	t 値	推定値	t 値	推定値	t 値	推定値	t 値	
トリップ数	0.77	9.79*	0.80	9.71*	1.17	6.90*	0.91	3.17*	1.09
同行人数 ¹	0.60	4.70*	0.76	5.65*	0.96	5.86*			0.93
自宅経験 ¹	0.25	1.76†	0.35	2.32*	0.48	2.72*			0.39
高齢女性 ¹	0.35	2.31*	0.44	2.79*	0.48	2.03*	1.95	2.06*	0.61
35分以降 ¹	1.44	6.48*	1.62	7.05*	2.29	5.14*	(2.29) ³	(5.14) ³	2.68
定数項	-2.48	-17.55*	-2.24	-10.47*	-2.32	-13.47*	-4.93	-4.92*	-
避難所等の知識 ¹	-	-	-	-	-	-	-	-	0.05
リスク情報入手 ¹	-	-	-	-	-	-	-	-	0.18
標高 [m] ²	-	-	-0.28	-2.82*	-	-	-	-	0.08
海からの距離 [km] ²	-	-	-0.24	-4.71*	-	-	-	-	0.07
サンプル数	2067		2067				2067		
初期対数尤度	-1432.74		-1432.74				-1432.74		
最終対数尤度	-876.51		-855.26				-847.34		
CV 対数尤度	-882.43		-865.06				-857.29		
決定係数 R ²	0.388		0.403				0.409		
修正済決定係数 R ²	0.384		0.397				0.402		

Notes: * = 5% 有意, † = 10% 有意, - : 推定なし, 空欄は有意ではないため除外

¹ ダミー変数, ² 対数値, ³ 2つのクラスで一つの推定値を算出

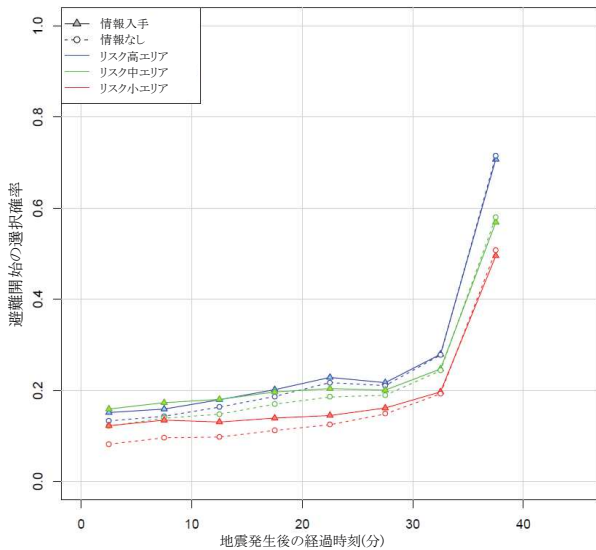


図-9 リスクエリア別の情報入手の効果

研究で対象とした避難開始選択モデルにおける大きな特徴である。

津波被災の可能性は、空間上で連続的に変化すると想定できるが、実際のダメージは離散的である。人々は、それぞれの避難開始タイミングと避難目的地を、それ

ぞれの居場所のリスクレベルによって決める。これは、連続量である被災可能性を、人が閾値をもって判断し、タイミングや目的地を決定していると言い換えることができる。

本研究では、個人特性と被災リスク認知・避難開始タイミングの関係性を、実証的なモデルを用いて明らかにしている。また、個人の異質性の動的な推移はブラウン運動のメカニズムを導入することで表現している。実証分析にあたっては東日本大震災における陸前高田市民の調査データを用いた。この調査データからは個人のリスク認知については明らかになっているが、その認知のタイミングは明らかではない。そこで、避難目的のトリップの出発地・目的地とそれぞれの時刻をリスク認知と結びつけることで、動的なリスク認知の変化を分析した。この方法は、他の避難行動トリップのみしか把握していない調査データにも適用可能である点が大きな強みである。当然、地震直後から津波に対するリスク認知は動的に移り変わっており、時間軸を考慮した分析は不可欠である。

本モデルは、個人のリスク教育や情報取得と結びつけた分析を行うことで、減災対策と直結したモデルとなっている。また、そうした個人属性、空間リスク、リスク認知という実際の意思決定過程のプロセスに沿っ

たモデルを構築した。本研究の特色は、このように、対策から避難意思決定までの一貫した需要モデルを構築したことにある。リスク認知が遅くなるほど、避難開始が遅れ、避難完了が遅くなるということを考えれば、こうした一貫したモデルは重要である。また、リスク教育やリスク情報伝搬といった対策の直接的な寄与は個人のリスク認知の向上であり、モデル構造の蓋然性は高い。

また、オーダードロッジットモデルを導入することで、空間に起因するリスクと個人に起因する認知関数を別々に評価した。空間に起因するリスクは、災害シミュレータ等により外生的に与えることも多く、本研究で提案した別々に評価することで適用しやすさは向上し、利点が多い。モデルを用いた分析結果では、リスク認知を考慮したモデルの方がリスク認知を考慮しないモデルより尤度が向上している。また、リスク認知を導入することで、リスク情報やリスク教育に関する変数を有意に評価することができる点でも強みである。また、リスク認知の高低によって避難確率は大きく異なっており、リスク認知モデルの導入により精度を高めることができるという。特に、海から離れた場所や標高の高い場所にいる人の方がリスク認知は低くなりやすく、(結果からの分析ではあるが)こうした場所にいる人に対して情報を発信することによって全体の避難確率を高めうると考える。

本研究の課題は次となる。本研究で行った実証分析は東日本大震災における一都市の避難行動データを対象としており、他の都市や他の災害においても同様のモデル構築が有効であるかを検討する必要がある。また、津波被災による死者・行方不明者の行動データはなく、この分析結果については、その点に留意する必要がある。ただし、本研究では、異質性の推定にあたって切斷正規分布を用いており、こうした分布の考慮により、ある程度この問題を考慮できるのではないかと考える。リスク認知モデルと避難開始選択モデルのパラメータ推定は別々に行っており、この点も改善の余地がある。また、動学的異質性の捕捉による避難遅れ者の特性の分析については、まだ十分とは言えない。

謝辞：本研究を行うにあたり、国土交通省都市局「復興支援調査アーカイブ」からデータ提供をいただいた。ここに感謝の意を記します。

参考文献

- 1) 浦田淳司, 羽藤英二, 植村恵里: 将来リスクの動的変化を考慮した逐次型避難開始時刻選択モデル, 第 33 回交通工学研究会論文報告集, pp. 255-260, 2013.
- 2) 片田敏孝, 金井昌信, 細井教平, 桑沢敬行: 希望者参加型の防災実践の限界—津波避難個別相談会の実施を通じて—, 土木学会論文集 F5, Vol. 67(1), pp. 1-13, 2011.

- 3) 岡部慶三, 廣井脩, 三上俊治, 山本康生, 池田謙一, 宮田加久子: 1982 年 7 月長崎水害における住民の対応, 東京大学新聞研究所「災害と情報」研究班, 1984.
- 4) 片田敏孝, 及川康, 田中隆司: 災害時における住民への情報伝達シミュレーションモデルの開発, 土木学会論文集, No. 625/IV-44, pp. 1-13, 1999.
- 5) 森伸一郎, 松浦尚輝: 2010 年チリ地震津波に対する住民の避難行動トリガー, 地域安全学会梗概集, No. 28, 2011.
- 6) 内閣府(防災担当): 避難行動要支援者の避難行動支援に関する取組指針, 2013 年 8 月.
- 7) Lim, M. B. B., Lim, H. R. J., Piantanakulchai, M., Uy, F. A.: A household-level flood evacuation decision model in Quezon City, Philippines, *Natural Hazards*, Vol. 80(3), pp. 1539-1561, 2016.
- 8) Hamacher, H. W., Tjandra, S. A.: Mathematical modelling of evacuation problems: a state of the art, *Fraunhofer-Institut für Techno-und Wirtschaftsmathematik, Fraunhofer (ITWM)*, No. 24, 2001.
- 9) Pel, A. J., Bliemer, M. C. J., Hoogendoorn, S. P.: A review on travel behavior modelling in dynamic traffic simulation models for evacuations, *Transportation*, Vol. 39, pp. 97-123, 2012.
- 10) Murray-Tuite, P., Wolshon, B.: Evacuation transportation modeling: An overview of research, development, and practice, *Transportation Research Part C*, Vol. 27, pp. 25-45, 2013.
- 11) Murray-Tuite, P. M., Mahmassani, H. S.: Model of household trip-chain sequencing in emergency evacuation, *Transportation Research Record*, No. 1831, pp. 21-29, 2003.
- 12) Liu, S., Murray-Tuite, P., Schweitzer, L.: Analysis of child pick-up during daily routines and for daytime no-notice evacuations, *Transportation research part A*, Vol. 46(1), pp. 48-67, 2012.
- 13) Urata, J., Hato, E.: Modeling the Cooperation Network Formation Process for Evacuation Systems Design in Disaster Areas with a Focus on Japanese Megadisasters, *Leadership and Management in Engineering*, Vol. 12, pp.231-246, 2012.
- 14) Ozbay, K., Yazici, A.M.: Analysis of network-wide impacts of behavioral response curves for evacuation conditions. In: *Proceedings of the IEEE Intelligence Transportation Systems Conference*, Toronto, Canada, 2006.
- 15) Pel, A. J., Bliemer, M. C. J., Hoogendoorn, S. P.: Modelling traveller behaviour under emergency evacuation conditions, *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, Vol. 11(2), pp. 122-193, 2011.
- 16) Hsu, Y. T., Peeta, S.: An aggregate approach to model evacuee behavior for no-notice evacuation operations, *Transportation*, Vol. 40, pp. 671-677, 2013.
- 17) Peacock, W. G., Brody, S. D., Highfield, W.: Hurricane risk perceptions among Florida's single family homeowners, *Landscape and Urban Planning*, Vol. 73, pp. 120-135, 2005.
- 18) Brommer, D. M., Senkbeil, J. C.: Pre-landfall evacuee perception of the meteorological hazards associated with Hurricane Gustav, *Natural Hazards*, Vol. 55(2), pp. 353-369, 2010.
- 19) Siebeneck, L. K., Cova, T. J.: Spatial and temporal variation in evacuee risk perception throughout the evacuation and return - entry process, *Risk analysis*, Vol. 32(9), pp. 1468-1480, 2012.
- 20) Villegas, J., Matyas, C., Srinivasan, S., Cahyanto, I.,

- Thapa, B., Pennington-Gray, L.: Cognitive and affective responses of florida tourists after exposure to hurricane warning messages, *Natural Hazards*, Vol. 66(1), pp. 97-116, 2013.
- 21) Wallace, J. W., Poole, C., Horney, J. A.: The association between actual and perceived flood risk and evacuation from Hurricane Irene, Beaufort County, North Carolina, *Journal of Flood Risk Management*, Vol. 38(3), pp. 610-635, 2014.
- 22) Perry, R. W., Green, M. R.: The Role of Ethnicity in the Emergency Decision-Making Process, *Sociological inquiry*, Vol. 52(4), pp. 306-334, 1982.
- 23) Dash, N., Gladwin, H.: Evacuation Decision Making and Behavioral Responses: Individual and Household, *Natural Hazards Review*, 8(3), pp. 69-77, 2007.
- 24) Lindell, M. K., Hwang, S. N.: Households' Perceived Personal Risk and Responses in a Multihazard Environment, *Risk Analysis*, Vol. 28(2), pp. 539-556, 2008.
- 25) Kang, J. E., Lindell, M. K., Prater, C. S.: Hurricane Evacuation Expectations and Actual Behavior in Hurricane Lili, *Journal of Applied Social Psychology*, Vol. 37(4), pp. 887-903, 2007.
- 26) Baker, E. J.: Hurricane evacuation behavior, *International Journal of Mass Emergencies and Disasters*, Vol. 9, pp. 287-310, 1991.
- 27) Kates, R.W.: Naturak Hazard Ecological Perspective: Hypotheses and Models, *Economic Geography*, Vol. 47(3), pp. 438-451, 1971.
- 28) Lindell, M. K., Lu, J. C., Prater, C.S.: Household Decision Making and Evacuation in Response to Hurricane Lili, *Natural Hazards Review*, Vol. 6(4), pp. 171-179, 2005.
- 29) Matyas, C., Srinivasan, S., Cahyanto, I., Thapa, B., Pennington-Gray, L., Villegas, J.: Risk perception and evacuation decisions of Florida tourists under hurricane threats: a stated preference analysis, *Natural Hazards*, Vol. 59(2), pp. 871-890, 2011.
- 30) Hasan, S., Ukkusuri, S., Gladwin, H., Murray-Tuite, P.: Behavioral model to understand household-level hurricane evacuation decision making, *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 137(5), pp. 341-348, 2010.
- 31) Hasan, S., Mesa-Arango, R., Ukkusuri, S.: A random-parameter hazard-based model to understand household evacuation timing behavior, *Transportation Research Part C*, Vol. 27, pp. 108-116, 2013.
- 32) Williams, J. T.: Capital asset prices with heterogeneous beliefs, *Journal of Financial Economics*, Vol. 5(2), pp. 219-239, 1977.
- 33) Dagsvik, J. K., Wennemo, T., Wetterwald, D. G., Aaberge, R.: Potential demand for alternative fuel vehicles, *Transportation Research Part B*, Vol. 36, pp. 361-384, 2002.
- 34) 牛山素行, 横幕早季: タイムスタンプデータによる津波到達直前の陸前高田市市内の状況推定, *日本災害情報学会第 13 回研究発表大会予稿集*, pp. 297-300, 2011.
- 35) Bolt, D. M., Lall, V. F.: Noncompensatory multidimensional item response models using morkov chain monte carlo, *Applied Psychological Measurement*, Vol. 27(6), pp. 395-414, 2003.
- 36) Ibeas, A., Conrdera, R., dell'Olio, L., Moura, J. L.: Modelling demand in restricted parking zones, *Transportation Research Part A*, Vol. 45, pp. 485-498, 2011.
- 37) Lartillot, N., Brinkmann, H., Philippe, H.: Suppression of long-branch attraction artefacts in the animal phylogeny using a site-heterogeneous model, *BMC evolutionary biology*, Vol. 7(1), S4, 2007.
- 38) Ulfarsson, G. F., Mannering, F. L.: Differences in male and female injury severities in sport-utility vehicle, minivan, pickup and passenger car accidents, *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 36(2), pp. 135-147, 2004.
- 39) Pei, Y., Fu, C.: Investigating crash injury severity at unsignalized intersections in Heilongjiang Province, China, *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, Vol. 1(4), pp. 272-279, 2014.

People's risk recognition in demand modeling with time-heterogeneity under tsunami evacuation circumstances

Junji Urata, Adam Pel

Upon planning and managing the transportation flows during an evacuation, one of the essential steps is to know the evacuation travel demand. The evacuation demand is the result of people's individual decisions whether and when to evacuate in case of danger. Many studies have shown that, apart from factors pertaining to the level of danger, the emergency warning and the evacuation order, a dominant driver in people's evacuation decision is their recognition of being at risk. In this study we formulate an ordered logit model to describe risk recognition combined with a latent class model to describe evacuation choices. Both models are estimated and evaluated according to their goodness of fit and predictive power. The study shows that (1) people's evacuation decision is associated with risk recognition, (2) levels of risk recognition can be modeled as an objective risk exceeding a subjective threshold, (3) where risk is associated with exposure and recognition thresholds are associated with people's emergency preparation and information.