



豪雨災害時の避難開始選択における他者避難と人的ネットワークの影響評価

浦田, 淳司

羽藤, 英二

(Citation)

土木学会論文集D3 (土木計画学) , 73(1):24-39

(Issue Date)

2017

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(Rights)

© 2017 公益社団法人 土木学会

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90004916>



豪雨災害時の避難開始選択における他者避難と 人的ネットワークの影響評価

浦田 淳司¹・羽藤 英二²

¹正会員 神戸大学大学院特命助教 工学研究科市民工学専攻 (〒 657-8501 兵庫県灘区六甲台町 1-1)

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

²正会員 東京大学大学院教授 工学系研究科社会基盤学専攻 (〒 113-8656 東京都文京区本郷七丁目 3-1)

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

稀少である災害下においてはリスクを共有する周辺他者の行動に同調した行動がとられやすく、また地区内の他者との関わりを想定した減災施策も近年注目されている。そこで、本研究では、避難開始選択における他者の行動選択の影響を評価することを目的として、個人の意思決定モデルを構築した。提案モデルは災害時に現れる不平等回避選好や時空間上の制約を反映することで、二者の関係性と地区内的人的ネットワークの影響を同時に評価することが可能である。行動仮説の実証のため、提案モデルに適用可能な疑似最尤法を導入した上で、実際の豪雨災害時の避難行動データを用いたモデル分析を行った。実証分析により、避難開始選択における他者の影響考慮の妥当性を示し、また、その空間的な偏在が生じていることを明らかにした。

Key Words: local interaction, pseudo maximum likelihood estimation, social network, evacuation demand model, heavy rain disaster

1. はじめに

(1) 研究の背景

2011 年の東日本大震災において、その犠牲者の数は 2 万人近くに及び、自然災害の脅威とその備えの必要性を改めて強く認識させられた。それ以降も、2013 年の伊豆大島豪雨災害や 2014 年の豪雨による広島市の土砂災害、平成 27 年 9 月関東・東北豪雨といった多数の犠牲者や被害を伴う災害が発生しており、有効な減災対策が各地で必要とされている。

本研究は、減災対策の一つである避難早期化(避難完了の早期化)に関するものである。まず、避難早期化にあたっては、避難開始までの時間短縮と避難移動時間の短縮の二つの対策がある。豪雨災害等の初着情報から実際の災害発生までの避難猶予時間が比較的長く、被災を免れるための避難移動距離が短い災害においては、いかに早く避難を開始するかが重要となる。こうした中、避難開始の早期化にあたって注目されている率先避難¹⁾ や災害時要支援者への対策²⁾、地区防災計画³⁾は、他者行動の避難開始への影響を念頭においた対策といえる。実際に、避難開始の意思決定にあたっては、多数派同調性や他者からの情報獲得といった他者が及ぼす影響は大きい^{4),5),6)}。一方で、東日本大震災でも見られたように、多数派同調バイアスや他者支援・送迎による避難開始の遅れといった問題もあり⁷⁾、他者行動の影響は正負両方が存在する。

そこで、本研究では、避難開始選択における他者の影響に着目する。車による避難では、避難開始タイミングの集中分散により渋滞の生起が異なり、避難完了时刻の遅れが生じやすい^{8),9)}。歩行による避難では、当然、避難開始時刻により避難可能となる距離は大きく異なる。そのため、避難開始の意思決定のメカニズム解明の意義は大きく、避難の意思決定は避難者全員に関わる重要な問題である。こうした避難開始選択には災害に関する情報や認知が影響しており、それらに対する情報伝搬やリスク教育といった施策を評価する上でも、避難開始の意思決定構造の理解の必要性は高い。

さらに、個々の避難開始の意思決定は周辺他者の意思決定に伝播し、地区全体の避難開始時刻の分布に影響を与える。つまり、地区防災計画や率先避難といった空間的な施策を計画・評価する上で、他者の影響は欠かせない要素であるといえる。他者影響のメカニズムを明らかにし、ミクロ(個人)とメゾ(集団・地区)との関係性を解明することができれば、単に個人に対する施策の評価にとどまらず、集団に対する施策の評価を行うことが可能となる。加えて、他者行動の影響には正負両面の影響があり、その評価の重要性は高い。

(2) 災害時における他者行動の影響

災害時における他者行動の影響として、他者と接触する行動による直接的な影響と他者から間接的に受けける影響の二つに分けることができる。

まず、直接的な影響としては、他者への情報伝搬行動と、情報伝搬以外の他者支援や救助等の行動がある。近隣住民等の公的機関以外の他者からの情報伝達によって、避難勧告などの災害リスクに関する情報を受け取り、避難を開始するといった行動^{4),10)}は当然生じる。また、住民間の情報伝達は物理的な施設を必要としない点で災害に対して頑健であり、地区特有の情報を内部で完結的に伝達できる点に長所があり⁵⁾、住民間の情報伝達を考慮した避難シミュレーションモデルも開発されている^{11),12)}。情報伝搬以外の他者支援等の行動については、こうした行動によって要支援者などの避難が進み、被害軽減につながる^{13),14)}。また、こうした直接的な行動の相手は、行動制約が大きい災害時では近隣住民の一部に限定される。そのため、住民間で生じるネットワーク構造や認知の関係を踏まえて評価する必要がある^{5),15),16),17)}。

次に、間接的に受ける影響とは、他者の意思決定を参考に自分の意思決定を行う場合に生じる影響を指す。これは率先避難や多数派同調といった行動メカニズムの中で現れ、他者行動の観察の上で、行動選択を行う。周辺にいる他者の避難開始有無によって自身の避難開始の意思決定が影響を受けることを、Baker¹⁸⁾ や Aguirre et al.¹⁹⁾、森・松浦⁶⁾ では実証的に明らかにしている。また、山田・織田澤²⁰⁾では、不完備情報の動学ゲームを用いて、避難の意思決定にあたり、他者行動の情報獲得のための観察行動により避難遅れが生じることを理論的に明らかにしている。

災害時はリスクの程度を正確に把握することが困難なため、他者依存的あるいは同調的な意思決定が生じやすく、他者行動の間接的な影響が生じる。しかし、こうした他者の避難開始が意思決定に与える影響についての定量的な評価は既存研究では行われていない。こうした評価を通じて率先避難や多数派同調による正負の影響を把握することで、地区での避難計画への反映が可能となる。そこで、本研究では、他者の行動選択によって受ける避難開始選択への影響の評価を行う。

(3) 研究目的

ここでは、避難開始の意思決定における他者の影響に関する基本的な考え方と本研究の目的を示す。

災害発生は稀少事象であり、経験が少なく、情報も十分にはない。そのため、独力での意思決定には不安が生じ、周辺他者の行動に影響を受けた行動選択が生じやすくなる。それは、率先避難の影響波及のように、先に避難開始した人への追従により避難確率が上昇するといった形(図-1a)) や、(避難が必要な状況にも関わらず)周辺他者が避難しないために自分も避難しないという多数派同調バイアスといった形(図-1b)) で現れ

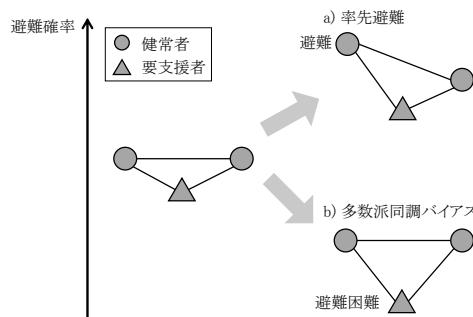


図-1 周辺他者の行動の影響のイメージ

る。また、同時に、1対1の関係性によって、こうした他者の影響の程度は異なる。自力での避難が難しい要支援者が避難していないければ健常者は避難しづらくなり(図-1b)), 自分とは関係の薄い遠方にいる他者の影響はほとんどない。前者は意思決定における利他的な選好、後者は影響する周辺他者の限定が必要であることを意味する。避難の意思決定において利他的な選好が働きうることは、早期避難には津波でんでんこの考え方が必要とされている状況からも妥当だろう。ただし、遠い相手であっても、人的ネットワークにより接続していれば、波及的に影響が及びうるだろう。

これらの点に着目して、本研究では、他者の影響を考慮した避難開始の意思決定モデルを構築する。具体には、周辺他者の限定とその相手との関係性を再現するために Local Interaction Model²¹⁾を導入し、他者の影響を評価した避難開始選択モデルを構築する。また、モデルのパラメータ推定にあたっては、疑似最尤法を用いた構造推定²²⁾を導入する。これにより、人的ネットワーク全体からの個人への影響を含めた評価を可能とする。また、構築したモデルを用い、2004年の新居浜市における豪雨災害時の避難行動データによる実証分析を行う。これにより、他者影響を評価することの妥当性を確認するとともに、他者避難の影響が生じやすい状況を明らかにする。

(4) 研究アプローチの特色

まず、他者行動の影響を導入した意思決定モデルの特色として、従前の選択モデルに対して、他者の行動開始の早期化や避難情報伝搬が及ぼす効果が正確に評価可能となる点があげられる。特に、稀少事象である災害時において、正確にリスクを認知することは難しく、リスクを共有する周辺他者の意思決定に同調した行動選択が行われやすい。こうした中で、地区内における他者との関係・影響を考慮した避難計画が、全員の避難実施を達成する上では必要とされており、他者の影響評価の重要性は大きいと考える。

さらに、相手による影響の違いを記述し、かつ影響を受ける他者を人的ネットワークにより限定する。行動・時間に制限のある災害下において、地区内全員から等しく影響を受けるとは考え難く、また、相手の状態によっても影響の程度は大きく異なるだろう。こうした他者の性質とネットワークの導入は、他者影響の評価の精度を向上させるうえで重要である。また、多様な住民のための地区避難計画をより有効なものにする上でも、個人の性質に応じた影響を考慮することは極めて重要である。

(5) 研究の構成

本研究では、個人の避難開始選択における他者行動の影響を考慮したモデルを構築し、その実証分析を行う。

本研究の構成を次に示す。**2.**では、従前の他者影響を行動選択の影響を考慮したモデルについてのレビューを行い、本研究の理論的位置づけを示す。**3.**では、他者の影響と利他的な選好を考慮した避難開始選択モデルを構築する。特に、二者間の関係性や人的ネットワークによって生じる避難開始選択確率への影響について説明する。また、提案モデルのパラメータ推定において用いる構造推定について説明する。**4.**では、構築したモデルを用い、2004年の新居浜市豪雨災害における避難行動データを用いた実証分析を行う。これにより、提案モデルの妥当性を確認するとともに、他者の影響が現れやすい状況についての考察を行う。**5.**では、本研究のまとめと今後の課題を示す。

2. 他者影響のモデリングに関する既存研究の整理

本章では、意思決定への他者の影響を考慮したモデルについて整理し、本研究で導入するモデルの特徴を明らかにする。

(1) 既存モデルの整理

ここでは、大きく四つのモデルについて説明する。一つ目は、集団内の相互作用と集団による意思決定を扱ったCollective model^{23),24)}である。二つ目は、個人間の利他的選好(不平等回避選好)として他者からの影響を考慮した利他モデル²⁵⁾である。三つ目は、個人間の相互作用と意思決定を扱ったInteraction model^{21),26),27),28)}である。このInteraction modelには、集団からの影響を考慮したGlobal型、個々人からの影響を考慮したLocal型の二つに分かれれる。

本節ではこれらのモデルの定式化と特徴について、意思決定主体や影響の記述方法等に着目して、説明する。なお、行動選択と他者からの影響については、レビュー

論文としてBen-Akiva et al.²⁹⁾やDraganska et al.³⁰⁾があり、他者の影響が生じる心理的要因や状況、概念等に詳しい。また、社会的相互作用に関する日本語のレビューとしては、力石ら³¹⁾がある。

a) Collective model

まず、Collective modelは複数人で構成された集団で一つの意思決定を行う場合を対象としている。特に、世帯内の意思決定を扱う場合が多い。このモデルでは、集団内の各個人は個別効用をもち、その上で個別効用の重みづけにより集団効用を決定し、集団で一つの意思決定を行う場合を表現する。この集団Nの効用は基本的に次の式で定式化される。

$$V_N(a_N) = W_N(\dots, u_n(a_N), \dots) + \epsilon_{a_N} \quad (1)$$

集団N全体で選択肢 a_N について、一つの効用 V_N を持つ。また、効用は集団Nの効用 W_N は構成員nの効用 u_n によって構成される。 ϵ_{a_N} は誤差項である。この効用により集団は意思決定を行う。これは、各個人で異なる選択を行った場合に大きな不効用が生じる集団(もしくは異なる選択を行うことが不可能である集団)を想定し、集団内全員の効用を考慮した上で一つの意思決定を行うモデルである。また、他者の記述にあたっては、特に1対1の関係を捉えておらず、集団を一つのまとまりとして捉えている。

b) 利他モデル

次に、利他モデルについて説明する。このモデルは個人の意思決定を対象とする。自分と相手の効用の差分が大きいほど不効用が生じるという利他的選好(不平等回避選好)の枠組みを反映したモデルである。このモデルにおいて、意思決定者nの選択肢 a_n の効用は基本的に次の式で定式化される。

$$V_n(a_n) = u_n(a_n) - \sum_{m \in N_n} J_{n,m} |u_n(a_n) - u_m(a_n)| + \epsilon_{a_n} \quad (2)$$

$J_{n,m}$ は意思決定者nにとっての他者mの重み、 N_n は不効用が生じる他者の集合、 ϵ_{a_n} は誤差項を示す。個人nとmの効用の差を不効用と捉え、効用 $V_n(a_n)$ に加えている。つまり、不平等回避の選好により、二者間の効用の差が不効用となり、意思決定に影響を与える。そのため、この効用の差を減らす行動が選択されやすくなる。また、他者の記述にあたっては、1対1の関係性を重み $J_{n,m}$ により捉え、効用に反映している。

c) Interaction model

次に、Interaction modelについて説明する。このモデルは個人の意思決定を対象とし、他者の選択行動が個人の意思決定に影響を及ぼす状況を表現する。他者と自分の行動選択に差異がある場合に、個人が負の効用(社会的効用)を受けるとして、他者の影響をモデル

表-1 モデルの特徴の比較

モデル	意思決定主体	1対1の関係性の記述	他者影響の効用の記述
Collective model	集団	なし	集団全員の和
利他モデル	個人	あり	他者との効用の差
Global Interaction model	個人	なし	他者群全体の選択確率との差
Local Interaction model	個人	あり	他者の選択との差

化している。ここでは、他者の行動選択との差異をなくす方向に他者の影響が働くことを仮定し、個人の行動選択が他者の行動選択に同調する現象を表現している。意思決定者 n の二肢選択における効用は基本的に次で定式化される。

$$\begin{aligned} V_n(a_n, \mu_n(a_{-n}), \epsilon_n) \\ = u_n(a_n) + S_n(a_n, \mu_n(a_{-n})) + \epsilon_{a_n} \end{aligned} \quad (3)$$

$$S_n(a_n, \mu_n(a_{-n})) = -E_n \sum_{m \in N_n} J_{n,m} g(a_n, a_m) \quad (4)$$

$\mu_n(a_{-n})$ は n 以外の集団内他者の選択を示し、 S_n は社会的効用である。式(4)が選択結果が違う場合 ($a_n = a_m$ のときのみ $g(a_n, a_m) = 1$, それ以外は $g = 0$) に生じる不効用 $J_{n,m}$ を示し、不効用の和の期待値を社会的効用 S_n としている。これにより、他者と異なる選択の効用は低下し、他者と同じ行動が選択されやすくなる。なお、 E_n は期待値演算子を示し、ここでは、個人が主観的な期待値を形成すると考える。

また、他者の影響の記述方法によって、Global Interaction model と Local Interaction model の二つのモデルに分けることができる。Global Interaction model では、(結果的に) 他者集合全体の行動選択割合が他者からの影響となる。影響を及ぼす他者集合は、地区や社会階層 (Walker et al.²⁸⁾) や同じ施設の利用者全体 (Fukuda and Morichi²⁶⁾) といった形で集計的に与えることができる。他者の記述にあたっては、1対1の関係性は捉えておらず、他者集団を一つのまとまりとして捉えている。Local Interaction model では、他者集合内の個々人の行動選択が意思決定者の行動選択に影響すると捉え、他者と自分の行動選択結果の差異の影響を個別に評価する。この際、影響を受ける他者の範囲を N_n により限定することが必要である。他者の記述にあたっては、1対1の関係性を捉え、効用に反映している。

(2) 本研究の位置づけ

まず、前述した他者の影響を考慮する四つの既存モデルの特徴を整理する(表-1)。Collective model は集団における統合的な意思決定を扱っている点が特徴的である。また、Local Interaction model と利他モデルは1対1の関係性を記述できる点で特徴がある。こう

した意思決定主体や記述する関係性により、他者の影響を効用に反映する際の定式化は異なる。

本研究では、集団内で統合された意思決定ではなく、個人の意思決定を対象とし、他者選択による間接的な影響を評価するモデルを構築する。その際、災害下で影響が及ぶ他者の限定性や影響する他者の性質の違いを記述し、個人間の関係性を含めた評価を行う。そこで、ベースとして Local Interaction model を導入し、こうした他者の影響を評価する。同時に、災害時は不平等回避の選好が生じやすいと考えられ、これを記述するために、効用の定式化にあたって、利他モデルの表現を援用する。

3. モデルのフレームワーク

本章では、周辺他者による影響を考慮した避難開始選択モデルの枠組みと定式化を具体に説明する。まず、周辺他者の避難／未避難による個人の避難開始選択への影響を Local Interaction model を援用し、記述する。次に、モデルによって表現する他者との性質の差による影響と周辺他者のネットワーク構造による影響について説明する。また、提案モデルによる実証分析の際に用いるパラメータ推定手法を説明する。

なお、本研究では、避難開始選択にあたって、避難／未避難の二項選択の意思決定をモデル化する。その際、時間軸上の逐次的な意思決定構造を導入したモデル³²⁾を基とする。これは、今期に未避難を選択した意思決定者のみが、次期で再度、避難／未避難の選択を行うという枠組みである。 t 期での避難は、それ以前で非避難を選択した場合のみに生じるため、その選択確率は次式となる。

$$P_{ev}(t) = p_{ev}(t) \prod_{t'=1}^{t-1} (1 - p_{ev}(t')) \quad (5)$$

ここで、 t 期の避難選択確率 $p_{ev}(t)$ は二項ロジットモデルを用いており、避難開始選択の説明変数には被災リスクや個人属性、地域特性等を反映できる。次節以降では、この $p_{ev}(t)$ の具体的な定式化について、説明する。

(1) 他者による影響のモデリング

a) 基本的な定式化

まず, Interaction Model では個人 i の選択効用 V を次で定義する.

$$\begin{aligned} V(\omega_{it}, \mu_{it}(\omega_{-it}), \epsilon_{it}(\omega_{it})) \\ = u(\omega_{it}) + S(\omega_{it}, \mu_{it}(\omega_{-it})) + \epsilon_{it}(\omega_{it}) \quad (6) \end{aligned}$$

選択効用は, 社会的効用 S が通常の個人効用 u と誤差項 ϵ に加わっている. なお, 時刻 t での選択肢 ω_{it} は避難 ($\omega_{it}^{ev} = 1$) または未避難 ($\omega_{it}^{no} = 0$) であり, $\mu_{it}(\omega_{-it})$ は i 以外の他者の選択を表す.

次に, 社会的効用 S は次で定義する.

$$S(\omega_{it}, \mu_{it}(\omega_{-it})) = -E_n \sum_{j \in N_{it}} J_{ijt} (\omega_{it} - \omega_{jt})^2 \quad (7)$$

それぞれ時刻 t における J_{ijt} は ij 間の影響の重み, N_{it} は個人 i が影響を受ける周辺他者の集合である. 社会的効用 S は, 意思決定者 i の選択 ω_{it} と周辺他者 j の選択 ω_{jt} が異なる場合, 重みづけ J_{ijt} に応じて生じる不効用の和の期待値である. つまり, 社会的効用は, 影響が及ぶ周辺他者の範囲を限定した上で, 自分と他者の行動選択に違いがある場合に生じる不効用といえる.

個人 i が避難を選択する確率 P_{it}^{ev} は, 誤差項に i.i.d ガンベル分布を仮定すれば, 次となる.

$$P_{it}^{ev} = \frac{\exp(u_{it}^{ev} - \sum_j J_{ijt} P_{jt}^{no})}{\exp(u_{it}^{ev} - \sum_j J_{ijt} P_{jt}^{no}) + \exp(u_{it}^{no} - \sum_j J_{ijt} P_{jt}^{ev})} \quad (8)$$

ここで, 周辺他者 j ($\in N_{it}$) と選択結果が異なることの期待値は他者 j が異なる選択を行う確率 P_{jt} と等しいとしている²¹⁾. 式(8)の分子第二項にあるように, P_{jt} と重み J_{ijt} の積が選択確率に影響する.

b) 二者間の非対称な影響

災害時において, 二者間の関係性により, 互いの避難確率への影響が非対称性を持つ状況が生じる. ここでは, これを説明するため, 健常者 r と要支援者 w の二者間の影響に着目する. 例えば, 要支援者が避難していない状況であれば健常者は避難の意思決定をしらくる. 一方で, 逆に, 健常者が避難していない状況は, 要支援者の意思決定には影響を与えないことも考えられる. こうした意思決定における影響の非対称性は, 不平等回避選好による行動選択の現れともいえる. 健常者側は, 要支援者が自力避難できないことで生じる不平等を危惧し, 先んじた避難を行えない. また, 被災しないという効用水準(行動目的)を住民が共有する災害時は, このような不平等回避選好は特に働きやすいと考える. 一方で, 要支援者が先に避難していたとしても, 健常者は, 運動能力に差があるために, 自分も急いで避難する必要があるとは考えない可能性もある. このように, 他者の影響を評価する際には, こ

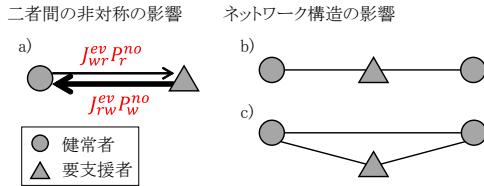


図-2 非対称の重み／ネットワーク構造の影響のイメージ

うした属性と行動に応じた非対称の影響の評価が必要である.

そこで, 本研究では, 二者の関係に応じた影響をより正確に評価するため, 社会的効用 S を構成する重み J_{ijt} を次とする.

$$J_{ijt}(\omega_{it}, \omega_{jt}) = \sum_l f_l(x_{lit}, x_{ljt}, \omega_{it}, \omega_{jt}) \quad (9)$$

x_{lit} は個人 i の時刻 t における個人属性 l を示す. ここで, J_{ijt} を二者間の属性差と二者の行動選択の組合せにより構成する. これは, 特定の属性・行動選択の組合せが生じた時に影響する非対称な影響を評価可能とする. これにより, 例えれば, i が要支援者で非避難を選択し, j が健常者が避難を選択する場合に, $f_l > 0$ となる重みづけが可能となる. この重み J_{ijt} における二者間の差の評価は, 利他モデルにおける効用の表現と同様の考え方に基づいており, 不平等回避の選好を援用した考え方である.

具体に, 避難確率の定式化を用いて, 非対称の重みによって, 表現可能となる負の影響を説明する. まず, 要支援者 w からの影響を考慮した健常者 r の避難確率は次式となる(なお, ここでは時刻 t は省略する).

$$P_r^{ev} = \frac{\exp(u_r^{ev} - J_{rw}^{ev} P_w^{no})}{\exp(u_r^{ev} - J_{rw}^{ev} P_w^{no}) + \exp(u_r^{no} - J_{rw}^{no} P_w^{ev})} \quad (10)$$

ここで, 健常者 r の避難確率 P_r^{ev} は要支援者 w からの影響である $J_{rw}^{ev} P_w^{no}$ が大きいほど低下する. この時, 健常者 r が要支援者 w から受ける影響の重み J_{rw}^{ev} が大きいほど, 避難確率が低下することとなる. さらに, 相手の影響を健常者 r のほうが強く受けやすいという非対称な関係性がある場合を考える. つまり, $J_{rw}^{ev} > J_{wr}^{ev}$ という非対称の重みが生じる場合である. この時, (相手の未避難確率によるが) 非対称の重みの影響により, 他者の影響による健常者 r の避難確率 P_r^{ev} の低下の方が要支援者 w の避難確率の低下よりも大きくなる. このイメージを図-2a) に示している. なお, 図の矢印の線の太さは影響の大きさを示している. こうした非対称の重みを導入することで, 要支援者が避難しないことで周辺の健常者も避難しづらくなるという状況を表現することができる.

c) 周辺他者ネットワークによる影響

行動選択への影響は二者の関係に加えて、周辺他者のネットワークによる影響も大きいことを説明する。

まず、前項で述べた二者の関係の積み重ねが最終的な行動選択に影響することを考えれば、影響する周辺他者の人数も重要な因子となる。本研究では、式(8)において周辺他者集合 N_{it} を導入することで影響を受ける他者の範囲を記述する。特に災害時下的限られた時間の中では、(他者に関する情報が必ずしも行き渡らない状況であり)集落内全員の行動把握が困難である。そのため、この他者集合の限定が不可欠である。また、直接的に影響を受けない他者であっても、人的ネットワークにより間接的に接続しており、媒介となる他者を通じて、影響を受ける。このように、周辺他者のネットワーク構造自体が選択確率に大きく影響する。

これらの周辺他者ネットワークによる影響を具体に説明する。まず、式(8)から、個人 i が接続する他者集合 N_{it} が大きいほど、他者から受ける負の影響は大きくなり、避難選択確率が低下することがわかる。例えば、図-2 b) の中央の要支援者が該当する。他者との接続が多く、周辺他者の未避難確率が大きければ、意思決定者の避難確率自体も低下する。これは多数派同調バイアスのメカニズムである。逆に、中央の要支援者の避難確率が高い状況では、その影響が周辺他者に及び、周辺他者の避難確率が高まる。これは率先避難による避難波及のメカニズムである。

次に、全体のネットワーク構造による影響の違いを考える。例えば、図-2 b)c) の要支援者のように、同じ次数をもつノードであっても、全体のネットワークが線形かクリークかにより、避難確率は変わる。内生効果を考慮した数値計算結果(図-3)を用いて、ネットワーク構造による影響を説明する。図-3は縦軸が避難確率を示す。横軸はネットワーク構造別に、孤立点・二者リンク・線形ネットワーク 1(端:要支援者)・線形ネットワーク 2(中央:要支援者)・クリークを並べている。

まず、個人効用のみにより選択確率が定まる孤立点をベースとして比較すると、他の四つのネットワークは他者の影響により避難確率が正負両方向に広がっている。次に、要支援者の次数が 1 である二者リンクと線形ネットワーク 1(端:要支援者)を比較すると、 $u_{no} \leq 1.3$ では、線形ネットワーク 1(端:要支援者)のほうが避難確率が大きくなっている。これは、線形ネットワークの逆側のノードの影響を間接的に受けるためである。また、要支援者の次数が 2 である線形ネットワーク 2(中央:要支援者)とクリークを比較すると、 $u_{no} \leq 1.5$ では、クリークのほうが三者ともに避難確率が大きい。これはネットワーク構造の違いにより生じる差である。クリークネットワークは、効用による避難確率の差が大

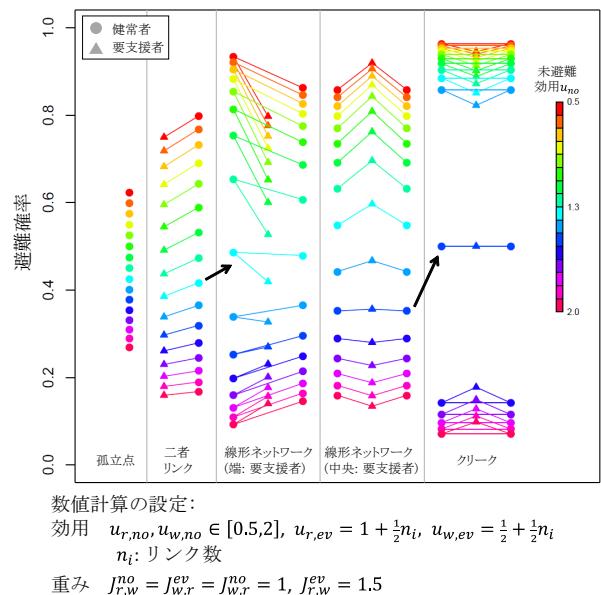


図-3 ネットワーク構造別の比較(数値計算による例示)

きく、多数派同調性が強く影響するネットワークであるといえる。

以上から、ネットワーク構造により、避難の促進・停滞の正負両面の影響が生じることがわかる。未避難効用が大きい状態でネットワークが形成されると避難が選択されづらい状況が生まれ、一方で、未避難効用が小さければ、ネットワークの形成により避難がさらに促進される。このように避難意思決定におけるネットワーク構造による影響は大きく、行動分析において考慮する必要がある。

d) 周辺他者ネットワークの外生的付与

本モデルでは、周辺他者ネットワークを外生的に付与した上で、ネットワークを通じた他者避難の影響を評価する。次章で示す実証分析において、周辺他者のネットワークについては、情報交換や他者支援行動を行った世帯間にリンクがあると仮定している。こうした情報交換等の行動の選択は、避難開始選択と相關していると想定される。例えば、将来の避難を見据えた上で、意思決定者はリスク情報がまだ不足していると考えれば、他者からの情報取得を行う場合がある。こうした場合は、避難開始選択にあたり、ネットワーク形成過程を内生的に評価することで、より正確なモデル構造とできるだろう。つまり、ネットワーク形成行動も含めた行動選択を合わせて評価するためには、災害時のアクティビティモデル構築が必要となると言える。

一方で、アクティビティモデル構築は平時行動に対しても容易ではなく、また、災害時行動において、将来想定を取り入れる場合には、その時間軸や情報の完備性についての設定が難しいという問題³³⁾がある。ま

た、形成相手に関する選択肢集合の現実的な設定等も必要となり、複雑なモデル構造が必要となる。そこで、本研究では、研究目的である他者避難の影響評価を行うために、こうした複雑さを避け、周辺他者ネットワークを外生的に与えることとする。避難開始選択以外の行動についてのモデル化は特に行わず、形成されたネットワーク構造を外生的に与え、意思決定者の避難開始選択への影響を評価する。ただし、本項で述べたように、ネットワーク形成は意思決定者の行動選択の対象となりえるため、内生的な評価が必要となる可能性があるという点については、留意されたい。

(2) 推定方法

ここでは、提案モデルの効用・重みのパラメータ推定方法について説明する。

まず、モデル尤度 L は次式とする。

$$L(\beta, \gamma) = \prod_{i=1}^N \prod_{t=1}^T (\delta_{i,t}^{ev} P_{i,t}^{ev} + \delta_{i,t}^{no} P_{i,t}^{no}) \quad (11)$$

ここで、 β は効用 u のパラメータ、 γ は重み J のパラメータ、 δ は選択結果、 N は選択者数、 T は最終時刻を示す。この尤度の最大化において、式(8)の選択確率の右辺に P が入った再帰的構造を有している。そのため、内生性を考慮した尤度関数を直接定義できないため、通常の最尤法によりパラメータを求めることができない。そこで、効用関数の選択確率に適切な推定量を代入することで疑似最尤度を定義し、パラメータを算出する疑似最尤法(NPL)²²⁾を、ここでは用いる。

疑似最尤法のアルゴリズムについて説明する。まず、Step1として全選択者 N に対して、適切な初期(0回目)の選択確率 P^0 を与える。なお、収束解を得るために、初期値として収束解に十分近い値を与える必要があり、観測値を参照して与える等の工夫が必要である。次に、Step2として、 K 回目の計算にあたり、 $K-1$ 回目に求めた選択確率 P^{K-1} を効用関数に代入し、尤度最大化によりパラメータ $(\hat{\beta}^K, \hat{\gamma}^K)$ を推定する。Step3として、この推定パラメータ $(\hat{\beta}^K, \hat{\gamma}^K)$ と P^{K-1} を用いて、選択確率 \hat{P}^K を算出する。Step4として、 \hat{P}^K と P^{K-1} の差が十分小さければ、収束と判定し、 $(\hat{\beta}^K, \hat{\gamma}^K)$ を最終的な推定結果とする。収束していない場合は、 $P^K = \hat{P}^K$ と選択確率を更新し、Step2に戻る。これを収束するまで繰り返すことで、パラメータを推定する方法が疑似最尤法である。なお、NPLは、無限回の繰り返し計算によって不動点を得ることができ、不動点を厳密に求めることができる Nested Fixed Point algorithm³⁴⁾ の解とは漸近等価となる。

周辺他者による人的ネットワークにおける疑似最尤法の適用イメージを図-4に示す。図では、 $K-1$ 回目の結果を用いて、Step2,3を経て、 K 回目の選択確率を

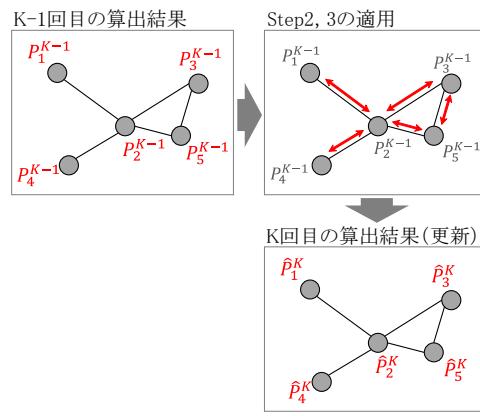


図-4 人的ネットワーク上の疑似最尤法の適用イメージ

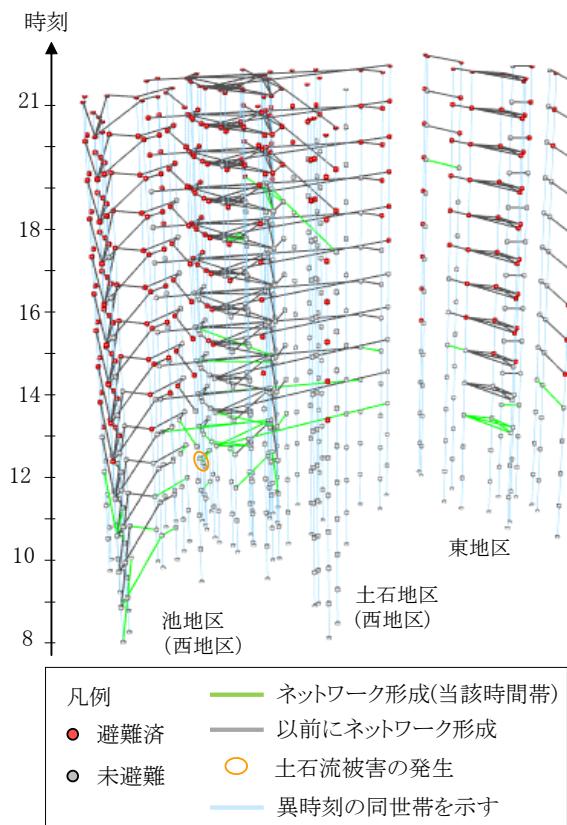
算出する過程を示している。Step2,3 により、人的ネットワーク上での他の選択確率・行動を評価した上で、 K 回目の選択確率の算出を行うことができる。これによって、ネットワーク構造上の 1 対 1 の関係に応じた他の影響を考慮した行動選択を評価できる。

4. 実証分析

(1) データ概要

本研究では、2004年8月18日の台風15号による豪雨災害における愛媛県新居浜市内のある地区における住民行動を用いて実証分析を行う。避難行動データは、2004年8月から9月にかけ、愛媛大学工学部環境建設工学科都市環境計画研究室防災グループによって、インタビューにより取得・作成されたものである¹⁵⁾。この台風による豪雨は、最大時間雨量が 55mm/hr(11 時～12 時)に達し、新居浜市内の被害は、全壊が 13 戸、半壊が 80 戸、人的被害は死者 3 人、重傷 1 人であった。分析対象とする地区は西地区と東地区の大きく二つに分かれ、西地区内で調査を実施できたのは 49 戸(総住戸数 90 戸)、東地区内で調査を実施出来たのは 9 戸(総住戸数 43 戸)である。

避難行動データは、短時間に変化する災害状況と詳細な避難行動を把握するため、住民へのインタビュー調査により収集されている。インタビュー調査では時系列に沿った当日の一連の行動を収集し、その中で他世帯の住民との当日のコミュニケーションについても調査している。なお、同世帯内でのコミュニケーションは意識せずに行われているために把握は難しく、また、全ての世帯で当日地区内にいる世帯構成員は同時に避難を開始している。そのため、ここでは世帯を 1 単位とし、他世帯からの影響を分析対象とする。

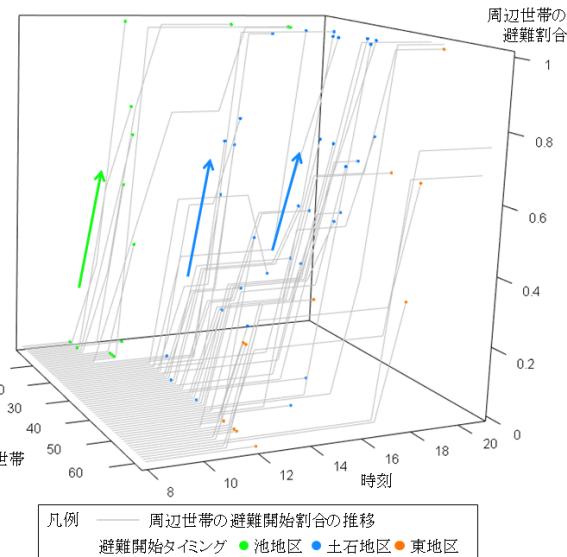


(2) 基礎的分析

本項では、避難開始行動と周辺他者の関係についての基礎的分析を行う。

まず、図-5は、各世帯の避難開始タイミングと世帯間ネットワーク形成を示している。縦軸が時刻であり、世帯位置は各住戸の位置を考慮し、配置している。なお、調査を行った世帯に加えて、調査世帯がネットワーク形成を行った世帯を表示している。縦軸方向の水色の線は、異なる時刻の同じ世帯を結んでいる。赤丸はその時刻では避難済であること、灰色は未避難であることを示す。緑色の線がネットワークを形成した時刻を示し、その時刻以降は灰色の線がネットワーク形成されたことを表す。世帯数は全部で62世帯であり、ネットワーク形成数は51である。ここでネットワーク形成とは、世帯間で情報交換や避難支援、救助といった行動が生じたことを意味する。

各地区で当日に起こった状況について説明する。まず、西地区内には川が流れおり、池地区と土石地区の二つに世帯間ネットワークは分断されている。池地区は午前中のうちに溜池決壊に関する情報伝搬と避難が生じている。そのため、午前のうちのネットワーク形成と避難が多く観測されている。土石地区は10時半前に図の橙色で示した世帯周辺に土石流被害が発生し、



その後から救助のためのネットワーク形成が多く生じている。また、避難開始は夕方から夜にかけて多くなっている。東地区は他2地区と比べると、ネットワーク形成数は少なく、避難を行わなかった世帯もある。

次に、避難開始タイミングと周辺他者の避難割合について分析する。ここで、周辺他者として、“各時刻までにネットワーク形成を行った世帯”と“3番目までに近い世帯”的集合を設定する。図-6は、x軸は時刻を表し、y軸は個別世帯、z軸は周辺他者の避難割合を示している。1時間ごとの結果を図示する。灰色線は、時系列上の周辺他者の避難割合の変化を示しており、緑点・青点・橙色点は避難開始タイミングを示す。一番右側の側面まで灰色線が到達している場合は、避難を行わなかったことを示す。池地区は全員避難しているが、残り二つの地区は避難しなかった世帯がある。図-6の上方に点があれば、周辺他者の避難割合が高まってから避難したことを意味している。

図の奥の池地区(黄緑点)は、11時頃の周辺他者の避難割合が急上昇したタイミングで避難開始している傾向がある。図の中央の土石地区(水色点)は、14時頃または17時頃の周辺他者の避難割合が急上昇したタイミングで避難開始している傾向がある。図の手前の東地区(赤点)は、避難していない割合も高く、特徴的な傾向はみられない。集計値としては、周辺世帯の避難割合が0.6以上で避難している割合が約63%である。周辺世帯の避難割合が高まった段階で避難を行っている傾向がみられるが、周辺世帯の避難以外の要因(避難勧告認知のタイミング等)が影響している可能性も考えられる。そこで、次節では提案モデルを用いた分析により、他世帯の影響の定量評価を行う。

(3) モデルを用いた分析

本節では避難開始選択モデルのパラメータ推定を行い、避難開始選択行動の特徴や他者行動の影響について考察する。

a) 効用関数・重み・周辺他者の設定

まず、効用関数の定式化を行う。なお、個人 i 、時刻 t の表記は省略する。

$$u_{ev} = \beta_{c1}x_{c,w} + \beta_{c2}x_{c,oth} + \beta_a x_a + \beta_r x_r + \beta_h x_h \\ + \beta_m x_m + \beta_w x_w + \beta_I \log(x_I + 1) \quad (12)$$

$$u_{no} = \beta_{rain}x_{rain} + \beta_p x_p + \beta_{res}x_{res} \quad (13)$$

具体に説明変数の内容を説明する。 $x_{c,w}$ は要支援者世帯(世帯構成員に高齢者又は子供を含む世帯)が消防隊からの避難勧告を聞いた場合を 1 とするダミー、 $x_{c,oth}$ は上記以外で避難勧告を聞いた場合を 1 とするダミー、 x_a は被災リスク(付録 I)、 x_h は世帯人数、 x_m は世帯の男性人数、 x_w は世帯の要支援者の人数、 x_I はネットワーク形成数、 x_{rain} は降水量(10^{-1}mm/h)、 x_p は池地区ダミー、 x_{res} は土石地区の救助活動時間帯(10 時～14 時 30 分)のダミーである。避難しない場合は、他者支援などの利他的行動の実施が可能だが、避難した後に地区内で利他行動を行うことは不可能である。こうした利他行動の不可能性も避難実施の心理的コストと考え、これを表すために x_I や x_{res} の説明変数を設定している。

次に、他者からの影響の重み J_{ij} の定式化を行う。なお、時刻 t の表記は省略する。

$$J_{ij}^{no} = \gamma_w^{10} y_{wr}^{ij} + \gamma_m y_m^{ij} + \gamma_{dis}/y_{dis}^{ij} + \gamma_I \log(y_I^{ij} + 1) \quad (14)$$

$$J_{ij}^{ev} = J_{ij}^{no} + \gamma_w^{01} y_{rw}^{ij} + \gamma_r y_r^{ij} \quad (15)$$

具体に説明変数の設定と重み設定にあたっての想定を説明する。まずは、式(14)の避難選択・未避難選択の両方に共通する変数について説明する。 y_{wr}^{ij} は $x_w^i > 0$ かつ $x_w^j = 0$ の場合に 1 となるダミー変数を示す。つまり、世帯 i に要支援者がいて、世帯 j に要支援者がいない場合である。自世帯に要支援者がいる場合には、要支援者のいない他世帯に合わせた行動をとりやすいと想定する。 y_m^{ij} は $x_m^i = x_m^j = 0$ の場合に 1 となるダミー変数を示す。つまり、世帯 $i \cdot j$ ともに女性のみ世帯の場合である。比較的災害に弱い女性のみの世帯同士で、同調した意思決定がなされやすいと想定する。 y_{dis}^{ij} は世帯 ij 間の距離(m)を示す。距離が短いほうが影響が大きいと想定する。 y_I^{ij} は世帯 ij 間のネットワーク形成後の経過時間(h)を示す。ネットワーク形成(情報交換や他者支援行動)から時間が経過するほど影響は薄れると想定する。なお、上記のうち、池地区ダミーと世帯間距離以外は全て時間変化する説明変数である(世帯人

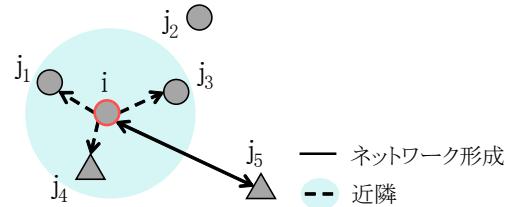


図-7 周辺他者の設定の例

数は構成員の外出先からの帰宅により変化する)。

次に、不平等回避選好を考慮した避難選択時のみに影響する変数(非対称の重み)について説明する(式(15)の右の二項)。 y_{rw}^{ij} は $x_w^i = 0$ かつ $x_w^j > 0$ の場合に 1 となるダミー変数を示す。自世帯 i に要支援者がおらず、相手世帯 j にいる場合には、避難選択を行いつらいと想定する。 y_r^{ij} は $x_a^j - x_a^i \geq 1$ であれば 1 となるダミー変数を示す。相手世帯 j のもつリスクが自世帯 i のもつリスクより大きい場合には、避難選択を行いつらいと想定する。

最後に、影響を受ける周辺他者の集合を設定する。次の二つの集合を合わせた集合を導入する。一つ目は、ネットワーク形成を行った世帯の集合である。一日の行動の中で直接的に情報交換や他者支援等の行動を行った世帯とは、それらの行動を通じ、相手のリスクやその認識を共有しており、意思決定にあたって、その影響を受けやすいと考える。二つ目は、空間的に近くに住む世帯の集合である。近隣世帯の行動は観察しやすく、またその空間リスクを共有している。そのため、意思決定にあたって、相手の影響を受けやすいと考える。この二つの集合を合わせた集合を影響を受ける周辺他者の集合として設定する。なお、パラメータ推定にあたっては、近くに住む周辺他者世帯として、近い順に上位三世帯を設定する(付録 II)。

図-7 は、世帯 i の他者集合の設定例である。 j_5 とはネットワーク形成により周辺他者に含め、 j_1, j_3, j_4 は近隣世帯であるため周辺他者に含める。この二種類の周辺他者の集合により形成される全体のネットワークを周辺他者ネットワークとする。なお、近隣世帯は各世帯から近い順に上位 3 世帯をとり、設定するため、双方向リンクになるとは限らない。

b) パラメータ推定

ここでは、パラメータ推定の結果を示し、考察する。世帯を意思決定主体とし、避難するまで 30 分ごとに避難/未避難の選択を繰り返すと仮定する。なお、意思決定を行ったタイミングについては明らかではなく、この仮定には留意が必要である。また、未避難の他世帯の避難確率は同時刻の確率を用い、既に避難した世帯の

避難確率は1とする。また、疑似最尤推定にあたり、初期避難確率としては、他者影響を考慮しないモデルの推定結果(表-2の左)から算出した避難確率を用いる。

パラメータ推定結果を表-2に示す。表-2の左側が他世帯の影響を考慮しなかった場合、右側が他世帯の影響を考慮した場合である。まず、他世帯の影響を考慮したモデルのほうが最終尤度・修正済 ρ^2 値はともに大きくなっている。また、尤度比検定の結果、 $-2(LL_{\text{他者あり}} - LL_{\text{他者なし}}) = 56.46 > 16.81 = \chi^2_{0.01}(6)$ より、他者の影響を考慮したモデルと他者の影響を考慮しないモデルのパラメータは等しいという帰無仮説は1%有意で棄却された。これらから、提案モデルの妥当性が高いことが確認できる。なお、ここでは、疑似最尤法の収束条件は、 K 回目と $K-1$ 回目に計算した避難確率の差分の絶対値($|\hat{P}^K - P^{K-1}|$)の平均が0.004以下としている。効用関数・重みのパラメータを正負を考慮した上で、絶対値0.2の間でランダムに付与した場合においても、上記と同様の安定した結果が得ている。また、内生効果の識別可能性については、力石ら³¹⁾でも言及されている通り、ローカルインタラクションを考慮した本モデルでは、内生効果のバラつきは大きく、識別可能性は高いと考えられ、特に議論の対象としない。

次に、有意となったパラメータについて考察する。まずは、避難効用のパラメータ推定結果について説明する。消防隊から要支援者世帯への避難勧告のパラメータは正で有意となっており、要支援者世帯の避難促進に消防隊からの避難勧告が有効であったといえる。世帯内男性人数・弱者人数のパラメータは負で有意となっている。世帯内の要支援者の人数が多いほど避難開始が遅れる傾向、また男性人数が多いほど避難開始が遅れる傾向があったことが確認された。要支援者人数のパラメータが負であることは、危機意識の低さや避難を行いくいことが影響していると考えられる。男性人数のパラメータが負であることは、男性が地区内の他世帯の支援に回るために避難が遅れることや男性人数が多いために避難コストを低く評価していることが理由として考えられる。ネットワーク形成数のパラメータは正で有意となっている。これは他者支援等の行動を既に形成を多く行っている世帯のほうが避難効用が高まっていることを意味する。こうした行動を実施する世帯ほど避難の必要性を高く認識していることや利他選好を満たしたために避難を選択しやすい心理状態となっていることが理由と考えられる。

次に、未避難効用のパラメータ推定結果について考察する。救助時間帯と降水量のパラメータが正で有意となっている。前者は、他の人が救助している時間帯には、避難が生じる可能性が低くなっていることを示す。後者は、雨が降っているほど避難を始めづらくなつ

ていることを示す。ただし、降雨量は全地区に共通しており、そのまま雨が降り続いた場合でも避難が始まつた可能性も否定できない。

最後に、他者影響の重みのパラメータ推定結果について考察する。世帯 i に要支援者がいて世帯 j に要支援者がいない場合のパラメータは正で有意となっている。これは、自世帯に要支援者がいる場合は、要支援者のいない世帯の意思決定に同調した行動が生じやすいことを示す。また、避難選択確率にかかる非対称の重みとして設定した世帯 i に要支援者がおらず世帯 j に要支援者がいる場合のパラメータは正で有意である。要支援者のいない世帯は要支援者世帯が避難していない状況では避難しづらくなっていることがわかる。3.(1)b)で示したように、この非対称の重みによって、要支援者がいない世帯がいる世帯の未避難から受ける影響が強くなる。つまり、この結果は要支援者のいない世帯の避難遅れが生じやすい状況になっていたことを示している。ネットワーク形成後経過時間のパラメータは負で有意となっている。これは、行動形成を通じた他者からの影響は、形成からの時間経過とともに小さくなっていることを示す。

以上の結果を整理する。まず、利他的な不平等回避選好と要支援者あり世帯の未避難により、要支援者なし世帯の避難開始が躊躇されるという負の影響が生じていることが確認できた。救助中といった地区全体の状態からも、同様に負の影響が生じていることがわかった。また、要支援者あり世帯も他世帯の避難に同調する選好をもつこと、消防からの要支援者世帯への避難勧告やネットワーク形成により避難効用が高まることが明らかになった。つまり、こうした傾向を利用し、要支援者の避難を促進することができれば、多くの人の避難が早期化する可能性があるといえる。

パラメータ推定に関する課題・留意点について示す。まず、本モデルでは、逐次的な選択を仮定し、パネル型の分析をしているものの、誤差項の時系列の相関を考慮できていない点に課題がある。特に、各世帯のリスク認知や選好は、時系列上の相関が生じている可能性も十分に考えられる。ただし、浦田・Pel³⁶⁾では、東日本大震災の避難行動データを用いて行ったリスク認知と誤差項の時系列相関を考慮した避難開始時刻モデルによる分析を行っており、その結果では誤差項の時系列相関の弾力性は0.01と小さい。このため、選択確率に対する誤差項の時系列相関の影響はあまり大きくなれない可能性も考えられる。また、被災リスクとして、付録Iに示すように時空間上のリスクを定義しているが、この変数は有意となっていない。実際には、世帯のリスク認知を考慮すべきと言え、そのためには、事前知識や情報入手と時空間リスクを組み合わせた精緻な定

表-2 パラメータ推定結果(避難開始選択)

説明変数		他者影響なし		他者影響あり	
		パラメータ	t 値	パラメータ	t 値
避難効用	避難勧告(消防→要支援者)	1.961	3.848*	1.351	2.366*
	避難勧告(上記以外)	0.519	1.441	0.576	1.570
	見回り	-0.223	-0.779	-0.138	-0.398
	被災リスク	0.108	0.639	0.00664	0.036
	世帯人数	-0.235	-1.439	-0.0903	-0.555
	世帯内男性人数	-1.344	-4.462*	-0.843	-2.633*
	世帯内弱者人数	-1.430	-4.100*	-2.101	-4.614*
	ネットワーク形成数	0.989	3.168*	1.361	4.130*
未避難効用	降水量	0.608	5.041*	0.232	1.959†
	池地区	0.226	0.615	0.504	1.248
	土石地区救助中	2.268	4.815*	1.382	2.309*
重み	弱者人数差あり(1人以上→0人)	-	-	0.442	1.871†
	女性のみ世帯	-	-	0.255	0.819
	世帯間距離	-	-	2.200	1.299
	ネットワーク形成後経過時間	-	-	-0.277	-2.098*
非対称	弱者人数差あり(0人→1人)	-	-	1.312	4.949*
の重み	被災リスク差1以上	-	-	0.0351	0.076
		サンプル数	950	950	
		初期対数尤度(L0)	-658.49	-658.49	
		最終対数尤度(LL)	-202.08	-173.85	
		ρ^2 値	0.693	0.736	
		修正済 ρ^2 値	0.676	0.710	

*: 5%有意, †:10%有意

式化³⁶⁾が必要であるだろう。また、リスク回避性向の強い(弱い)世帯ほど、元から被災リスクの低い(高い)場所に立地している可能性も考えられる。実際に、こうした傾向がある場合は、本モデルで用いたように被災リスクを用いた定式化は不十分であるだろう。特に、土砂・豪雨災害の場合には被災リスクが狭い範囲内で大きく異なるため、こうした住宅立地と災害前のリスク回避性向、また災害時の認知リスクには相互に影響が生じやすく、より詳細な分析が必要である。

c) 率先避難の影響シミュレーション

本項では、推定したパラメータを用いて、他者の避難開始の影響を定量的に示し、二者の関係性や周辺他者ネットワークの影響を明らかにする。つまり、ある世帯の率先避難によって生じる他世帯の避難確率への影響をシミュレーション評価する。これにより、率先避難の影響が生じやすい状況や世帯の特徴を明らかにする。具体的には、各時刻におけるネットワーク内のある一世帯が避難することを仮定し、その一世帯の避難によって生じる他世帯の避難確率の変化をシミュレー-

ション計算し、その結果を分析・考察する。また、避難を仮定する世帯以外については、避難有無・属性・ネットワーク等は、実データと共にとする。また、影響を評価するために各時刻において避難を仮定する世帯は、実データにおいて該当時刻以降に避難する世帯のみであり、それ以前あるいは同時刻に避難する世帯については、評価しない。

本項では、最も世帯数が多い土石地区を対象に分析を行う。図-8は、各世帯が避難した場合に生じる他世帯の避難確率の変化を示している。x軸は各世帯の周辺他者ネットワークにおける次数を表す。ただし、各時刻で既に避難している世帯との接続についてはカウントせず、避難済世帯との形成数は各ノードの塗りつぶし色で示す。y軸は自世帯が避難した場合の他世帯全ての避難確率の変化の合計を示し、z軸は時刻(10時、12時、14時、16時を対象に計算)を示す。また、同世帯の異時間帯の結果を線で結んでおり、線の色は時間帯が進むごとに、濃い色としている。12時までは避難済の世帯はなく、薄赤色の矢印で示したように、次数が

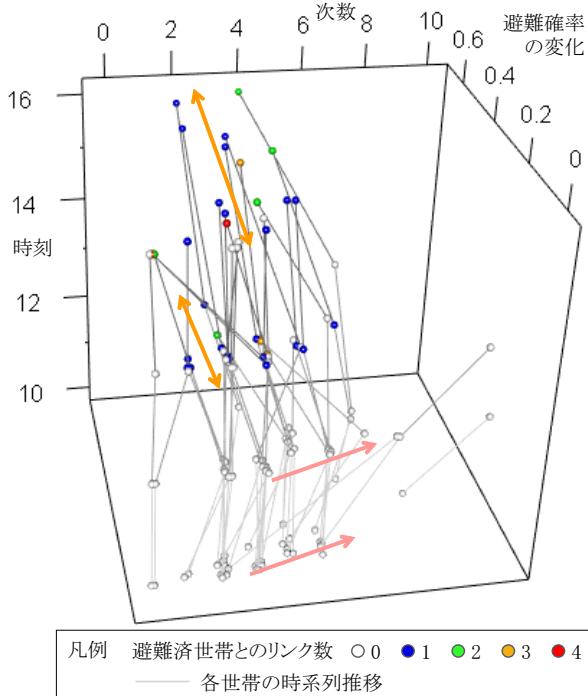


図-8 他世帯の避難確率への影響と次数の関係性の推移

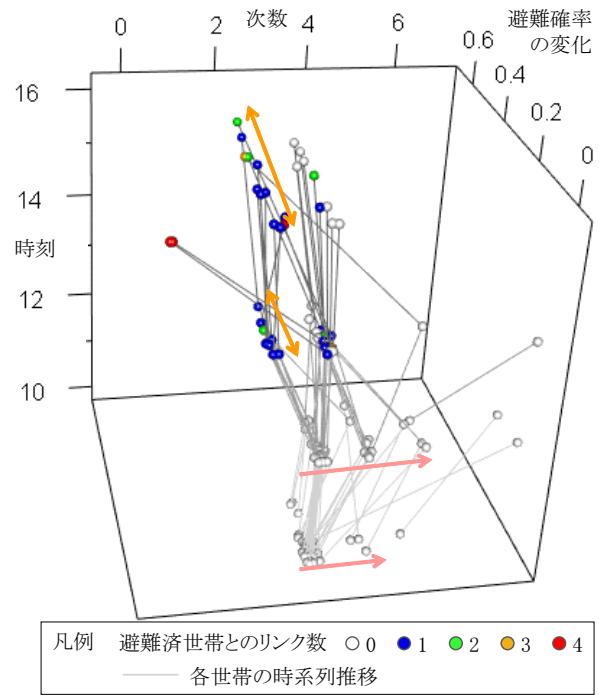


図-9 他世帯からの避難確率への影響と次数の関係性の推移

増加するほど、他世帯の避難確率の変化の影響は大きくなっている。これは、つまり、次数が大きい世帯ほど、その避難によってネットワーク上の他世帯の避難を促進する効果が高いことを示す。14時以降はいくつかの世帯が避難するために次数は小さくなるが、一部の世帯の避難確率の変化の値は大きくなる。また、橙色の矢印で示すように避難確率の変化の分散は大きくなり、かつ同じ次数でも他世帯への影響はまちまちである。ただし、避難済世帯とリンクしていない世帯については、避難確率の変化は小さい傾向がある。

次に、図-9は、他世帯の避難によって生じる自世帯の避難確率の変化を示している。y軸は、他世帯が避難した場合の自世帯の避難確率の変化(他世帯が避難した場合に生じる自世帯の避難確率変化の全世帯の合計値)を示す。それ以外は、図-8と同じである。避難が生じていない10時・12時においては、薄赤色の矢印で示したように、避難確率の変化は次数による傾向も見られず、その変化は小さい。避難済世帯が生じている14時・16時については、橙色の矢印で示したように、避難確率の変化の分散は大きくなっている。ただし、さきほどと違い、避難済世帯とのリンク有無による大きな違いがみられない。

図-8, 9から地区内に既に避難した世帯がいる状況のほうが、他者避難の影響が大きくなりやすいことが明らかになった。ただし、この場合でも他者避難の影響の程度は世帯ごとに異なる。また、他者からの影響を受

けやすい世帯の特徴は明らかではない。そこで、他者避難の影響に関する特徴を考察するため、ネットワーク構造に着目した分析を行う。

図-10は、土石地区の16時において、他者が避難を実施した場合の影響に関するシミュレーション結果を示す。図-10の左図は、図-8に対応し、自世帯の避難による他世帯の避難確率の変化を示す。図-10の右図は、図-9に対応し、他世帯の避難による自世帯の避難確率の変化を示す。それぞれ変化量をノードの塗りつぶし色で示し、黒色ノードは避難済世帯を示す。リンクは16時時点での周辺他者ネットワークを示し、近隣世帯とのネットワークは灰色矢印を用いている。なお、ノードの位置は世帯住居の位置を参考に配置し、土石流発生地点は各図の左側である。

まず、左図の他世帯への影響について考察する。赤色又は橙色で塗りつぶした他世帯への影響が大きい世帯は、要支援者あり世帯のほうが多くなっている。これは、要支援者あり世帯の避難が周辺他者に影響を及ぼしやすい傾向があるといえる。また、こうした他世帯への影響が高いノードは、左図の薄赤線で囲ったように空間的にばらついていることがわかる。

次に、右図の他世帯からの影響について考察する。影響が大きい世带は薄赤色で囲った中にあり、左図と同様に空間的に分布している。特に、他世帯への影響が大きい世帯と接続する要支援者なし世帯が、他者からの影響を受けやすい傾向がある。また、青色線で囲っ

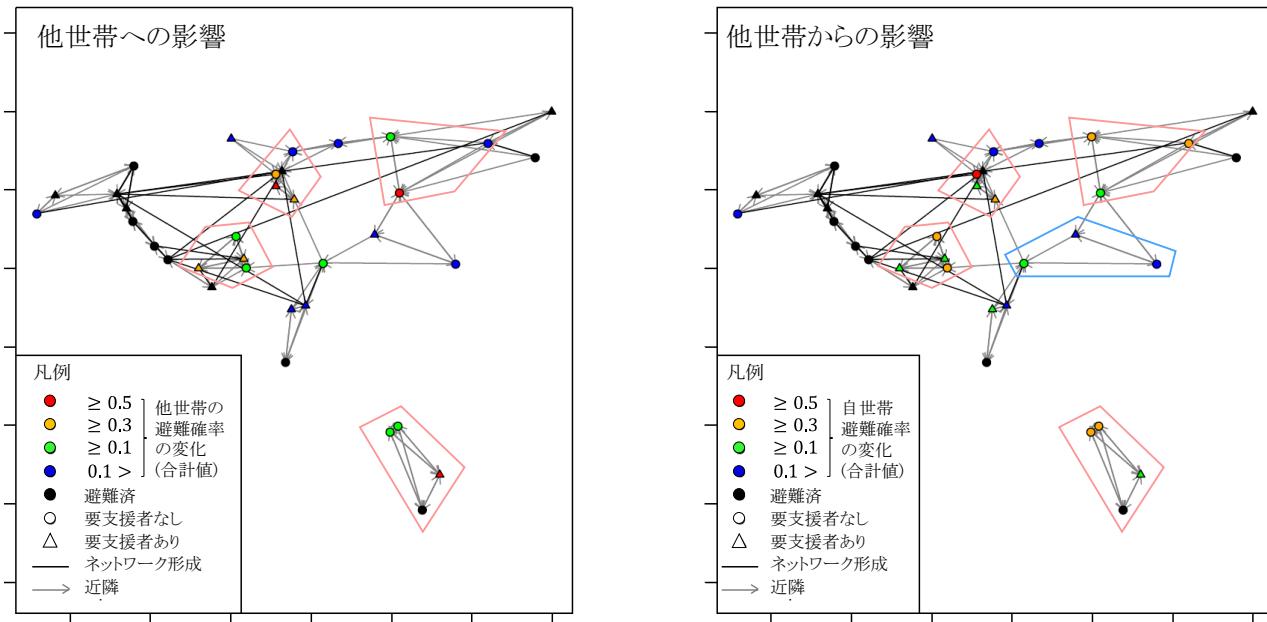


図-10 他世帯の避難実施によるネットワーク上の影響 ((左) 他世帯の避難確率の変化／(右) 自世帯の避難確率の変化)

た世帯の他者からの影響は三者ともに小さく、避難促進がなされていない。3.(1)c)で説明したように、周辺他者とのネットワークの中における負の影響が生じているといえる。この三者のネットワークは、避難済世帯と接続していない点で他の部分ネットワークと異なる。逆に言えば、接続する複数人の避難開始によって、はじめて他者避難の影響が伝搬しやすくなると考えられる。また、空間的にもリスク源である土石流発生地点から遠いために、避難選択がされづらくなっている。

最後に、土石地区の16時の時間帯における他者避難の影響の程度を考察する。まず、参考として、避難勧告なしの場合とありの場合の避難確率の変化幅は世帯平均で0.088(標準偏差0.071)である。対して、一世帯の避難による他世帯への影響の平均は0.201(標準偏差0.219)である。この値は他世帯の避難確率の変化の全世帯合計値の平均であり、一概には比べられないが、情報による影響と比べても、他者避難による避難確率への影響の程度は決して小さくはないと言える。また、(ネットワーク構造に応じて現れる)他世帯への影響の幅の大きさも特徴的であるといえる。

本項の分析により、率先的な避難によって他世帯に大きく影響する世帯は空間的に分布しており、また、近くの要支援者あり世帯の避難によって要支援者なし世帯の避難確率が上昇するという避難伝播の構造があることが明らかになった。また、こうした他者避難の影響は避難実施が既に始まっている状況下において加速的に大きくなる。

地区内全員の避難が必要な場合を想定すると、地区

内のさらに細分化された空間ごとに率先的に避難する人が生まれれば、その正の影響が伝搬し、地区全体の避難確率が上昇しうる。一方で、図-10右図の青線で示したように、率先して避難する人が近くにいない場合は、避難が進みづらくなる負の同調が生じうる。具体的に考えれば、リスク源から離れかつ避難が行われていない場所では、負の同調が生まれやすいと想定できる。全員避難の達成にむけては明確にリスクが高くない場所における避難の促進も重要なといえよう。

5. おわりに

(1) 研究の成果

本研究では、他者の行動選択の影響を評価できる避難開始選択モデルを構築した。提案モデルは、災害時に現れる不平等回避選好や時空間上の行動制約を反映しており、ミクロ的な二者の関係性とメゾン的なネットワーク構造を評価することができる。また、実際の避難行動データを用い、他者行動の避難開始選択への影響に関する実証分析を行った。

本研究の具体的な成果を以下に示す。

- これまで観測の難しさから取り扱いが困難であった稀少事象時の避難行動において、他者の影響を考慮した意思決定の枠組みを示し、他者との関係性を評価した避難開始選択モデルを提案した。
- 二者間のミクロな関係性を考慮するため、他者影響の重みを二者間の性質の差異を用いて表現した。これにより、率先的な避難により影響が及びやす

- い関係を記述することができ、地区内の要支援者への対策による効果が評価可能となる。
3. 周辺他者ネットワークを考慮した評価を行うことで、メゾ的な地区スケールからの影響の伝播を捉えるモデルを構築した。提案モデルのパラメータ推定には、ネットワーク上の影響の伝播を表現できる構造推定を導入した。これにより、二者関係に加えて地区ネットワーク全体からの避難確率への影響を記述することができ、地区内の住民避難確率のネットワーク上の偏在が評価可能となる。
 4. 2004年の新居浜市における豪雨災害での住民避難行動データを用いた実証分析を行った。他者の影響を評価したモデルの最終尤度が大きく向上することから、提案モデルの妥当性を確認した。また、他者影響が生じやすい世帯は空間的に分布していること、避難開始者がいない空間では他者避難の影響が小さいことを明らかにした。

他者避難の影響を評価することで、地区避難計画における災害時要支援者対策や率先避難の実施といった施策の効果を正しく評価することに繋がり、効果的な計画立案を行うことが可能となる。特に、計画者・行政には住民全員の避難(被災回避)の遂行が求められる一方で、時中に展開できるリソース(消防隊や防災無線等)は限られており、こうした末端部での自律的な避難促進を加味した効果的や施策展開が必要といえよう。

また、本研究で提案したモデルの枠組みは、既存の離散選択モデルを基としており、今後の発展可能性は大きい。他者の影響を考慮した意思決定は、当然平常時でも数多く生じており、活用の幅は広い。

(2) 今後の課題

最後に今後の課題について述べる。

まず、理論モデルに関する課題を示す。本研究で採用したInteraction modelは複数均衡解を持つ可能性があるモデルであり、均衡解の個数に応じた条件整理が必要となる。場合によっては、均衡状態の変化によって格段に避難確率が高まる状況が生じる可能性も考えられる。ただし、本研究では周辺他者ネットワークの時間軸上での推移を前提としているため、各時間帯における静的な均衡解の持つ意味は比較的小さいと考える。また、避難確率の分岐や収束を予測するためには、動的な状況下における均衡解の移り変わりを理論的に検討することも必要だろう。また、ネットワーク構造を与件とした計算を行っているが、ネットワーク形成自体が行動選択の一部となりえるため、ネットワーク形成過程を内生化したモデル構築も必要であろう。他には、周辺他者の避難確率の平均を効用として評価するモデル構造もあり、こうした他の相互作用の表現方法との

比較も必要である。

次に、実証分析に関する課題を示す。まず、本研究では周辺他者のネットワークの推移を所与としているが、実際には二者間の協調行動によるネットワーク形成も確率的事象であり¹⁶⁾、それを踏まえた評価やシミュレーションが必要となる。また、普段のリスク教育等を考慮したリスク認知の違い、また日常の地区内のコミュニティの性質やコミュニティ内の個性を、今回の実証分析では、調査上の難しさもあり、考慮できていない。こうした日常の積み重ねの中で、災害時行動や他者影響が顕在化していることが考えられ、その評価が必要であろう。また、分析を行った地区内全ての住民を対象とした分析となつておらず、世帯内個人の行動が分析できていない点も課題である。同時に、本研究でのモデル分析やシミュレーション結果は一つの災害におけるケーススタディに留まっており、異なる災害や住環境における検証も必要となる。

謝辞: 本研究の避難行動データは、2004年当時の愛媛大学の中川周郎氏、南信治郎、升田智美氏をはじめとした都市環境計画研究室防災グループにより収集された。その際は、新居浜市の多数の方々に協力いただいた。また、本研究の一部はJSPS特別研究員奨励費(課題番号: 26・10821)及びJSPS科研費(課題番号: 26220906)の助成を受けた。ここに謝意を示す。

付録 I 被災リスクの定量化

本研究では、他者からの影響を考慮するにあたって、利他的な不平等回避選好の考え方に入れており、不平等回避選好が生じる要因の一つとして、被災リスクの差がある。リスクの高い場所にいる人に対する安全な場所にいる人からの支援行動は不平等回避の選好が働くために生じる行動といえる。本研究で対象とする豪雨・土石流による災害では、同一の地区内でも川からの距離や標高により被災リスクは異なる。ただし、詳細に個々の世帯が持つ被災リスクの程度を観測することはできない。

そこで、最終的な被害状況と雨量を用いて、被災リスクを回帰的に定量化する。また、生じた被害は最終的な結果であり、時系列上の被災リスクとは異なる。つまり、最終的に被害を受けなかった場所も、時系列上では被災リスクがあったと考える。そこで、最終被害、空間要素と降雨量を用いて、被災リスクを算出し、時空間上の被災リスクを簡易に設定する。算出にあたっては、具体的に全壊や浸水などの被害が生じた西地区的データを用いる。

まず、空間上の被災リスクを算出する。標高の低い下流側の線路からの距離 dis_w と南北方向の川からの距

表-3 被災リスクの回帰分析

説明変数	推定値	t 値
C_0	6.916	9.17*
β_w	-0.597	-4.37*
β_r	-0.962	-8.66*
サンプル数	65	
修正済 ρ^2 値	0.565	

*は1%有意

表-4 近隣世帯の設定による最終尤度

パターン	上位 X 世帯	Xm 以内	最終尤度
I	-	-	-188.70
II	1	-	-188.35
III	3	-	-173.85
IV	5	-	-175.71
V	-	25	-189.18
VI	-	50	-189.10
VII	-	100	-178.09

離 dis_r に応じて、最終被災リスク $D(s, T)$ が地区内の各住宅 s に分布していると仮定する。ここで、 T は雨が降りやんだ時刻とする。実際の災害被害の結果を被説明変数とし、二つの距離を説明変数として重回帰モデルを構築する。最終の被害リスクの値は、全壊・半壊・床上浸水・床下浸水・被害なしの5段階(0-4)とする。重回帰モデル式は次である。

$$D(s, T) = C_0 + \beta_w \log dis_w(s) + \beta_r \log dis_r(s) \quad (I.1)$$

重回帰モデルの結果は表-3 である。修正済み決定係数は 0.565 であり、説明変数の t 値は全て 1% 有意である。説明力が十分高いと言えないが、被災リスクが川からの距離に影響を受けており、直感と一致する。

次に、時空間上の被災リスクの算出式を与える。被災リスクの時間変化には累積降雨量 $R_c(t)$ を用いる。被災確率は、当日の累積降雨量に比例して、発生確率が高まると仮定する。また、対象とする被害集落の降雨量と地形(2次谷)や地質から、この地域の土石流による被災確率は 40% と篠崎ら³⁵⁾において報告されており、これを被災確率の上限値 P_d とする。被災確率 $P(t)$ は、上限に各時刻までの累積降雨量を最終累積降雨量で割った値を掛けることで与える。最終的に、次の通り、被災リスク $D(s, t)$ は場所ごとの最終被災リスク $D(s, T)$ と累積降雨量 $R_c(t)$ に応じた被災確率を掛けた値により与える。

$$P(t) = P_d * R_c(t) / R_c(T) \quad (I.2)$$

$$D(s, t) = D(s, T) * P(t) \quad (I.3)$$

以上のように定量化した被災リスクを 4. の分析では用いる。なお、被害を受けた世帯は、被害発生以降は被災確率 $P(t)$ は降雨量に関係なく 1 とする。ただし、ここで算出した被災リスクと個人が持っていた認知リスクは必ずしも一致しない点に留意が必要である。

ただし、表-2 で示した通り、被災リスクに関するパラメータは有意となっておらず、こうしたリスクの設定方法の妥当性や各世帯の認知リスクと空間的なリスクの相違等に関しては、今後の課題である。

付録 II 周辺他者の設定による尤度比較

周辺他者ネットワークにおける具体的な近隣世帯を知ることは難しく、各世帯に対して正確に設定することはできない。本文では、複数パターンの近隣世帯の設定を用いて 4.(3) のパラメータ推定を行い、最終尤度が最も良い「近い順に上位三世帯」を採用した。表-4 に計算を行った他の設定パターンの具体的な最終尤度を示す。パターン I はネットワーク形成世帯のみ、パターン II~IV は近い順に上位 X 世帯、パターン V~VII は Xm 以内の世帯を含める設定である。なお、ネットワーク形成を行った世帯は全てのパターンにおいて含めている。

参考文献

- 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.
- 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.
- 内閣府(防災担当): 地区防災計画ガイドライン, 2014 年 3 月.
- 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.
- 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.
- 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.
- 岩手日報社: 「避難せず、犠牲者の 4 割 本紙遺族取材から推計」、岩手日報 WebNews, <http://www.iwate-np.co.jp/311shinsai/y2012/m03/sh1203131.html>, 2012 年 3 月 13 日。(閲覧日 2016 年 1 月 31 日)
- Ozbay, K. and Yazici, A. M.: Analysis of network-wide impacts of behavioral response curves for evacuation conditions, Proceedings of the IEEE Intelligence Transportation Systems Conference, Toronto, Canada, 2006.
- Pel, A. J., Hoogendoorn, S. P. and Bliemer, M. C. J.: Impact of variations in travel demand and network supply factors for evacuation studies, Transportation Research Record, Vol. 2196, pp. 45-55, 2010.
- 竹内裕希子: 水害時の住民の降雨認識と避難行動、防災科学技術研究所主要災害調査, No. 40, pp. 103-110, 2006.
- 高棹琢馬、椎葉充晴、堀智晴: 水害避難行動のミクロモデ

- ルシミュレーションと制御に関する研究, 土木学会論文集, No. 509/II-30, pp. 15-25, 1995.
- 12) 桑沢敬行, 片田敏孝, 及川康, 児玉真: 洪水を対象とした災害総合シナリオ・シミュレータの開発とその防災教育への適用, 土木学会論文集 D, Vol. 64, No. 3, pp.354-366, 2008.
 - 13) 神谷大介, 赤松良久, 板持直希, 竹林洋史, 二瓶泰雄: 小規模集落における豪雨災害に対する課題と支援方策－奄美大島豪雨災害を事例として－, 土木学会論文集 G, Vol. 68, No. 5, pp. 305-312, 2012.
 - 14) Urata, J. and 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.
 - 15) 羽藤英二, 中川周郎: 被災時の避難行動のグループダイナミクス, 土木計画学研究・講演集, Vol. 31, CD-ROM, 2005.
 - 16) 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, No. 1, pp. 29-40, 2013.
 - 17) 中山貴喜, 神谷大介: 過疎地域における近所間の認知関係を考慮した要援護者の避難支援方策の検討－沖縄県渡名喜村を対象として－, 土木学会論文集 F6, Vol. 71, No. 1, pp.1-12, 2015.
 - 18) Baker, E. J.: Predicting response to hurricane warnings: a reanalysis of data from four studies, *Mass Emergencies*, Vol. 4, No. 1, pp. 9-24, 1979.
 - 19) Aguirre, B. E., Wenger, D. and Vigo, G.: A test of the emergent norm theory of collective behavior, *Sociological Forum*, Vol. 13, No. 2, pp. 301-320, 1998.
 - 20) 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, CD-ROM, 2006.
 - 21) Brock, W. A. and Durlauf, S. N.: Interactions-based models, *Handbook of Econometrics*, Vol. 5, pp. 3297-3380, 2001.
 - 22) Aguirregabiria, V. and Mira, P.: Swapping the nested fixed point algorithm: A class of estimators for discrete Markov decision models, *Econometrica*, Vol. 70(4), pp. 1519-1543, 2002.
 - 23) Chiappori, P. A.: Rational household labor supply, *Econometrica*, Vol. 56, No. 1, pp. 63-90, 1988.
 - 24) Chiappori, P. A. and Ekeland, I.: The micro economics of efficient group behavior: identification, *Econometrica*, Vol. 77, No. 3, pp. 763-799, 2009.
 - 25) Fehr, E. and Schmidt, K. M.: A theory of fairness, competition and cooperation, *Quarterly Journal of Economics*, Vol. 114, 817-868, 1999.
 - 26) Fukuda, D. and Morichi, S.: Incorporating aggregate behavior in an individual's discrete choice: An application to analyzing illegal bicycle parking behavior, *Transportation Research Part A*, Vol. 41, No. 4, pp. 313-325, 2007.
 - 27) Dugundji, E. R. and Gulyas, L.: Sociodynamic discrete choice on networks in space: impacts of agent heterogeneity on emergent outcomes, *Environment and Planning B*, Vol. 35, pp. 1028-1054, 2008.
 - 28) Walker, J., Ehlers, E., Banerjee, I. and Dugundji, E. R.: Correcting for endogeneity in behavioral choice models with social influence variables, *Transportation Research Part A*, Vol. 45, pp. 362-374, 2011.
 - 29) Ben-Akiva, M., Palma, A., McFadden, D., Abou-Zeid, M., Chiappori, P. A., Lapparent, M., Durlauf, S., Fosgerau, M., Fukuda, D., Hess, S., Manski, C., Pakes, A., Picard, N. and Walker, J.: Process and context in choice models, *Marketing Letters*, Vol. 23, pp. 439-456, 2012.
 - 30) Draganska, M., Misra, S., Aguirregabiria, V., Bajari, P., Einav, L., Ellickson, P., Horsky, D., Narayanan, S., Orhun, Y., Reiss, P., Seim, K., Singh, V., Thomadsen, R. and Zhu, T.: Discrete choice models of firms, strategic decisions, *Marketing Letters*, Vol. 19, pp. 399-416, 2008.
 - 31) 力石真, 瀬谷創, 福田大輔: 社会的相互作用に着目したマイクロ計量経済分析の展開と土木計画への応用可能性, 第53回土木計画学研究発表会, No. 41-01, 2016.
 - 32) 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.
 - 33) 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選択モデルの構築, 土木学会論文集 D3, Vol. 72, No. 4, pp. 261-277, 2016.
 - 34) Rust, J.: Optimal replacement of GMC bus engines: An empirical model of Harold Zurcher, *Econometrica*, Vol.55, pp.999-1033, 1987.
 - 35) 篠崎嗣浩, 内田太郎, 林真一郎, 岡本敦, 清野耕史, 高濱洋介, 小野寺智久: 降雨規模と斜面崩壊・土石流の発生確率の関係分析について, 平成24年度砂防学会研究発表会概要集, No. 66, pp. 458-459, 2012.
 - 36) 浦田淳司, Adam Pel: 災害避難時の動的リスク認知とその異質性の影響評価, 第53回土木計画学研究発表会, CD-ROM, 2016.

(2016. 3. 18 受付)

LOCAL INTERACTION BASED MODEL TO UNDERSTAND HOUSEHOLD EVACUATION BEHAVIOR IN A HEAVY RAIN SITUATION

Junji URATA and Eiji HATO

In a disaster situation, people are easy to do similar behaviors of others because they don't have enough disaster-experiences to decide by just themselves. Our local interaction based model evaluate influences of others' behaviors to understand evacuation timing. The proposed model introduces a preference of inequality aversion on spatial and social network. Our model performance is demonstrated using evacuation behavior data in 2004 heavy rain disaster of Niihama city. The parameters are estimated by a pseudo maximum likelihood estimation method. Our results show that influences of others are difference depending on their relationships and social networks.