避難時の異質性を考慮した離散連続選択の逐次最適化問題への拡張

東京大学 学生会員 ○植田 瑞貴
東京大学 正会員 羽藤 英二

1. はじめに

近年，日本では全国各地で災害発生が確率的に予測されており，平時の計画に組み込む事前復興計画の評価方法の確立が急務である．本稿では，避難可能人数を最大化する空間設計など事前復興計画最適化を上位問題とし，下位問題として人間の意思決定構造に基づく避難行動スケジューリング問題を設定した，多段階最適化問題を考える．リスク認知の異質性を考慮した逐次的な行動選択モデル構築を行い，実際の避難データを用いてその有用性を確認することを試みる．

2. モデル構造

避難行動モデリングでは，各個人が避難/非避難の選択を行うとする非集計型モデル[2]が一般に用いられているが，時間制約条件の概念は組み込まれていない．実際には発災認識時刻から避難すべきと各自が考える時刻までに，避難の準備，他者の救助など，様々な活動が行われるが，この活動への時間の間違った割り付け方や，避難完了期待時刻の誤認が避難を遅らせる要因となる．浦田 (2015)[5] のように，意思決定を動的に分析しようとする試みは行われてきたが，制約時間内に行う他の行動，言い換えれば行動スケジューリングによる各段階の活動に対する影響は明らかになっていない．

本稿では，各個人が逐次的に活動種類を選択すると同時に，避難完了期待時刻という時間制約下で活動への残り時間の配分を行っているとみることで，Habib(2011)[4] の離散-連続モデルに基づいて定式化する（図 1）．

2-1. 離散選択・連続選択の効用関数

活動選択を離散選択として，個人 i が各段階で逐次的に活動選択肢 j を選択した場合の離散選択の効用関数を次のように定式化し，RUM 理論に従うとする．以下では個人を表す添字 i，段階を表す添え字 s を省略する．

$$U_j = V_j + \varepsilon_j = \gamma_j x_j + \varepsilon_j \tag{1}$$

V_j: 選択した活動 j の効用の確定項，x : 説明変数，γ: パラメータ係数，ε_j: 非観測の誤差項

キーワード：離散連続モデル 時間制約 避難ネットワーク
住所：〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 工学部 1 号館 409 号室　電話番号 03-5841-1649

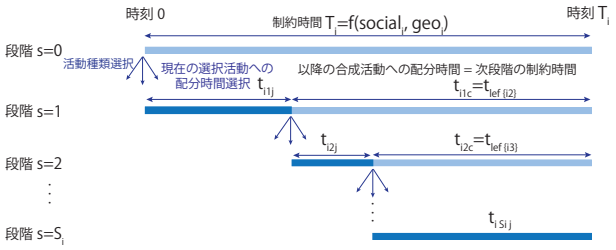

図- 1 離散-連続モデルによる避難行動表現

次に，離散選択と同時に行う時間配分を連続選択として，効用関数を次のように記述する．$k = j$ は現在の選択活動，$k = c$ は現在の活動より後に行う全ての活動（合成活動）を表す．

$$U(t_k) = \sum_{k=j,c} \frac{1}{\alpha_k} \exp(\psi_k z_k + \varepsilon'_k)(t_k^{\alpha_k} - 1) \tag{2}$$

t_j : 各段階に配分する時間，t_c : その後の合成活動に対して配分する時間，z_k : 説明変数，ψ_k : パラメータ係数，ε'_k : 非観測の誤差項，α_k : 飽和パラメータ[1]

離散と連続ともに誤差項に Gumbel 分布を仮定する．

2-2. リスク認知と時間制約の異質性

現在の活動への時間配分と，今後の合成活動への時間配分の間にトレードオフが起こっていることから，式 (2) は次の時間制約下で最適化されると仮定する[1]．

$$t_j + t_c = t_{\mathrm{lef}} \tag{3}$$

t_{lef} : 各段階での残り時間

Habib(2011)[4] はこの時間制約を外生的に与えている．しかし避難行動では，各個人のリスク認知状況により，津波到達までの見込みである制約時間に異質性が認められる．本稿では一連の行動で個人 i が想定する時間制約について次式のように定式化を試みる．

$$T_i = \sum \tau_i y_i \tag{4}$$

y_i : 説明変数，τ_i : パラメータ係数

ここで，T_i は個人 i の避難行動全体における制約時間であり，先の式 (3) の段階 $s = 0$ での t_{lef} に等しい．KKT 条件の一階の最適化条件を適用し，それぞれ ε_j と ε'_j を標準正規分布に変換した変数 $J_1(\varepsilon_j)$ と $J_2(\varepsilon'_j)$ を用いて，

同時選択確率が導かれ[3)]，尤度関数は以下のように書ける．

$$L_i = \prod_{j=1}^{n}\Big(\Big(\frac{1-\alpha_{ji}}{t_{ji}} + \frac{1-\alpha_{ci}}{t_{ci}}\Big)\frac{1}{\sigma}\exp\Big(\frac{-(V'_{ci}-V'_{ji})}{\sigma}\Big) \times\Big[1+\exp\frac{-(V'_{ci}-V'_{ji})}{\sigma}\Big]^{-2} \times\Phi\Big(\frac{J_1(\varepsilon_{ji})-\rho_{jt}J_2(\varepsilon'_{ji})}{\sqrt{1-\rho_{jt}^2}}\Big)\Big)^{D_{ji}} \quad (5)$$

D_{ji} は選択された活動種類に対しては1，選択されない活動種類に対しては0となる変数である．

3. ケーススタディ

以上のモデルについて，本研究室が陸前高田市と復建調査設計株式会社にご協力いただき2012年9月に実施した調査での，東日本大震災時の陸前高田市の災害発生時の避難行動データを用いてケーススタディを行った．

推定結果を表1に示す．ただし推定値が初期値に依存する局所解である可能性には留意が必要である．

推定結果ではパラメタの正負についておおむね感覚と合致する結果が得られている．V'_j の baseline utility の避難行動の説明変数のうち海岸距離に対するパラメタが正である．これは，海岸から遠いほど避難行動にかける時間を長くとることを示しており，ある程度海岸から離れていれば急いで避難所に移動する必要がないと考える人が多いためではないかと推測される．また制約時間の説明変数でも海岸距離に対するパラメタは正であり，海に近い地域ではすぐ行動を終え避難を完了するが，海から遠いと避難完了は遅くて良いと考えがちであるという傾向を示している．この傾向は，津波襲来時刻が近くなったころ，両エリアからの移動需要が避難所近傍で重なり，混雑を引き起こす要因となる可能性があり，特に車避難が必要とされる地域では交通容量の検討が必要となる．

表- 1 推定結果

説明変数		パラメタ	t 値
V'_j の baseline utility			
避難行動			
男性ダミー		0.747	2.837
高齢ダミー		0.274	1.029
車使用ダミー		0.362	1.893
海岸距離		1.861	2.286
非避難行動			
利他目的		0.650	4.662
情報取得目的		0.987	4.620
共通			
エリア固有ダミー	広田	-0.914	-1.149
	小友	-1.568	-2.184
	米崎	-1.146	-1.193
	高田	-1.487	-2.266
	気仙	-1.169	-1.898
	竹駒	-1.384	-1.406
	横田	-1.608	-1.109
	矢作	-1.225	-1.370
V'_c の baseline utility			
避難行動			
男性ダミー		0.253	0.963
高齢ダミー		0.726	2.729
車使用ダミー		0.638	3.335
海岸距離		-0.861	-1.057
非避難行動			
利他目的		0.350	2.507
情報取得目的		0.013	0.062
共通			
エリア固有ダミー	広田	-0.987	-1.189
	小友	-0.765	-1.133
	米崎	0.051	0.051
	高田	0.811	1.141
	気仙	0.986	1.333
	竹駒	1.838	2.007
	横田	1.223	0.607
	矢作	0.779	1.010
飽和パラメタ	α_j	-0.754	-13.485
	α_c	0.026	0.215
活動選択			
現在・将来共通			
避難行動			
男性ダミー		-3.608	-6.596
高齢ダミー		6.553	14.923
車使用ダミー		2.962	8.373
海岸距離		-5.147	-3.360
非避難行動			
利他目的		-4.741	-9.150
情報取得目的		10.319	9.054
エリア固有ダミー	広田	1.417	1.996
	小友	1.156	1.629
	米崎	1.923	2.563
	高田	2.835	5.036
	気仙	0.543	0.793
	竹駒	0.763	0.828
	横田	3.285	2.461
	矢作	1.978	2.797
相関係数 ρ		0.288	2.115
制約時間※ 2			
男性ダミー		0.005	0.003
高齢ダミー		-0.248	-0.167
海岸距離		31.459	269.024
定数項		2.563	1.328
初期尤度			-3885.467
最終尤度※ 3			-3170.162
尤度比			0.184
修正済み尤度比			0.171

※ 1：単位 分
※ 2：単位 1000 分
※ 3：BFGS 法の 100 回の繰り返しのうちに収束せず，得られたパラメタを初期値として再度推定を行った
※ 4：いずれも t 値はムーア・ペンローズ型一般化逆行列を用いた代替的なものである

4. おわりに

本稿では，リスク認知条件に応じた時間制約の異質性を取り入れた逐次選択の離散-連続モデルを提案し，東日本大震災被災地である陸前高田の避難行動データを用いたケーススタディで，モデルの再現性を確認した．また，今後津波災害が見込まれる地域における事前復興での避難ネットワーク整備に向けたアクティビティモデルに基づく計画手法として用いることができる可能性を示した．各個人がもつ潜在的な認識時間制約には大きな異質性が存在し，リスクの高いエリアと低いエリアで行動スケジューリングに大きな違いがあることから，避難ネットワーク計画においては，特に車避難が必要な地域で交通容量割り当てを戦略的に計画する必要があることを明らかにした．今後は，精度の向上と実際のネットワークでの検討を進めたい．

参考文献

1) Chandra R. Bhat. The multiple discrete-continuous extreme value (MDCEV) model: Role of utility function parameters, identification considerations, and model extensions. *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 42, No. 3, pp. 274–303, 2008.
2) Haoqiang Fu and Chester Wilmot. Sequential Logit Dynamic Travel Demand Model for Hurricane Evacuation. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1882, No. 1, pp. 19–26, 2004.
3) Khandker Habib, Juan Carrasco, and Eric Miller. Social Context of Activity Scheduling: Discrete-Continuous Model of Relationship Between "with Whom" and Episode Start Time and Duration. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2076, pp. 81–87, 2008.
4) Khandker M. Nurul Habib. A random utility maximization (RUM) based dynamic activity scheduling model: Application in weekend activity scheduling. *Transportation*, Vol. 38, No. 1, pp. 123–151, 2011.
5) 浦田淳司. 避難時の他者同調作用に着目した交通流の動的制御. PhD thesis, 東京大学大学院工学系研究科, 2015.