

避難者の情報取得を考慮した地震火災時の避難行動モデル

久寿米木 瞳子・大佛 俊泰

Evacuation Model from Earthquake Fire

Considering Acquiring Information

Toko KUSUMEGI and Toshihiro OSARAGI

Abstract: Many simulation models of wide-area evacuation from earthquake fires have been proposed. However, there are few models of evacuation behavior considering the information that evacuees obtain. In this paper, we propose some models that describe when and where to evacuate by acquiring the various visual information and evacuation recommendation. We estimate the parameters of these models based on the data obtained from the questionnaire survey, and analyze the characteristics of evacuation behavior.

Keywords: 地震火災 (earthquake fire), アンケート調査 (questionnaire survey), 広域避難 (wide-area evacuation), ロジットモデル (logit model), 避難行動 (evacuation behavior)

1. はじめに

世界でも有数の地震大国である我が国は、常に大規模地震のリスクにさらされている。特に、木造密集地域と呼ばれる高密度に老朽化した住宅が建ち並ぶ地域においては、延焼危険性や避難困難性から、火災による甚大な被害が発生する可能性がある。このような背景から、地震火災時を想定した避難シミュレーションを用いて物的・人的被害や避難性状を把握する研究は数多く行われ、市街地整備や避難方法等についての議論に供してきた。しかし、避難行動モデルの多くは極端な理想化や単純化がなされており、避難者が周囲の状況や避難関連情報をもとに避難行動を決定するモデルとはなっていない。

本研究では、地震火災時の避難開始のタイミングと避難場所選択行動に着目し (図-1), 避

久寿米木瞳子 〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1

東京工業大学 環境・社会理工学院

建築学系 大佛研究室

Email:kusumegi.t.aa@m.titech.ac.jp

難者が取得する視認情報や避難関連情報を考慮したモデルを構築する。また、独自に行ったアンケート調査をもとにこれらモデルのパラメータを推定し、推定モデルを用いて避難行動の特徴について考察する。

2. 避難行動モデルの概要

2.1 避難確率のモデル化

避難者の避難開始のタイミングをモデル化するにあたり、避難者がどの程度避難の必要性を感じているかを表す変数として避難者 i の避難切迫度 Φ_i を定義する。避難者が避難するか否かには、火災までの距離、近隣住民の避難割合、および、様々な媒体からの避難関連情報の有無

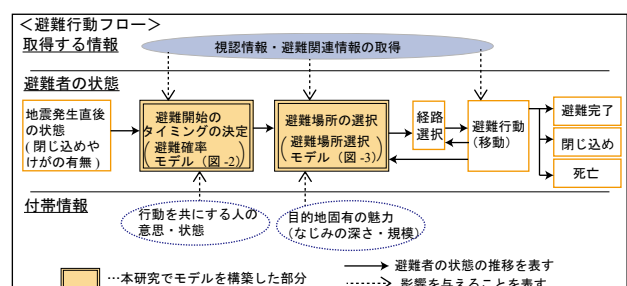


図-1 避難行動モデルの枠組みと位置づけ

が関わると考え (図-2(a)), これらを用いて, Φ_i を図-2式(2)のように定式化した. このとき, 火災接近を表す変数 Θ_i は距離減衰を表すパラメータ α を用いて式(1)のように定式化し, Θ_i とその他の変数を用いて, 交互作用の項を含めた多項式で Φ_i を定式化した. また, 避難確率 P_i は避難切迫度 Φ_i の関数であると考え, Φ_i の値の増減に応じて P_i が 0 から 1 の間を推移するよう, 図-2式(3)のように記述した.

2.2 避難場所選択行動のモデル化

避難者は, 避難する際に享受する効用 (安全性, 避難距離などから決まる総合的価値) を最大化するように行動すると仮定し, 避難者の避難場所選択行動を多項ロジットモデルで記述する. 避難者 i が避難場所 j を選択することで享受する効用の確定項を V_{ij} と表すと, 避難場所 j を選択する確率 Q_{ij} は, 確率効用理論に基づき図-3(a)のように表される. V_{ij} は, 避難場所と火災の位置関係, および, 周囲の避難者の移動方向 (図-3(b)) に関する変数の線形和で記述する.

3. 避難行動モデルのパラメータ推定

3.1 アンケート調査の概要

各モデルのパラメータを推定するため, 地震火災時を想定して, 避難開始のタイミングと避難場所選択に関して, Web アンケートを実施し

視認情報	D_i : 滞留者 i と最も近い火災建物の中心点までの距離 [m]
避難関連情報	r_i : 滞留者 i の近隣住民のうち避難行動を開始している住民の割合
避難関連情報	$\delta_1 \sim \delta_4$: 滞留者 i が以下の媒体からの避難関連情報を取得したか否かを表すダミー変数 δ_2 : 防災行政無線の避難勧告情報 δ_3 : テレビやラジオによる情報 δ_4 : Web サイトや SNS による情報

(a) 滞留者 i が避難するか否かに関する説明変数

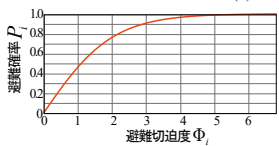
火災接近による避難切迫度 Θ_i の定式化

$$\Theta_i = \exp[-\alpha D_i] \times \dots (1) \quad (\alpha \text{ は距離減衰を表す未知パラメータ})$$

滞留者 i が避難する意思の強さを表す概念として避難切迫度 Φ_i を定義し, 火災接近の影響を表す Θ_i と, その他の変数 $r_i, \delta_2 \sim \delta_4$ を用い, 火災接近とその他の情報の交互作用の項を含めた多項式で表す.

$$\Phi_i = \lambda \Theta_i + \beta_1 r_i + \beta_2 \delta_2 + \beta_3 \delta_3 + \beta_4 \delta_4 + \gamma_1 \Theta_i r_i + \gamma_2 \Theta_i \delta_2 + \gamma_3 \Theta_i \delta_3 + \gamma_4 \Theta_i \delta_4 \dots (2)$$

Φ_i は 0 以上の値をとる変数であり, $P_i |_{\Phi_i \rightarrow \infty} = 1, P_i |_{\Phi_i = 0} = 0$ となる関数として避難確率 P_i を式(3)のように記述する.

$$P_i = \frac{1 - \exp[-\Phi_i]}{1 + \exp[-\Phi_i]} \dots (3)$$


※ 火災接近による避難切迫度 Θ_i と火災までの距離 D_i には以下の①~④の性質があると考えられる(大佛・沖, 2012).

- ① $\Delta \Theta_i / \Delta D_i < 0$ (火災建物から遠ざかるほど抵抗は減少する)
- ② $|\Delta \Theta_i| \propto \alpha_i |\Delta D_i|$ (抵抗の変化量は火災建物からの距離の変化量に比例する)
- ③ $|\Delta \Theta_i| \propto \alpha_i \Theta_i$ (抵抗が大きくなるほど抵抗はより大きく変化する)
- ④ $\Theta_i |_{D_i \rightarrow \infty} = 0$ (火災の影響は距離が大きくなるにつれ 0 に漸近する)

①~③より得る微分方程式 $\Delta \Theta = \alpha \cdot \Delta D_i \cdot \Theta_i$ を解き④を代入することで式(1)を得る. ($\alpha, \alpha_1, \alpha_2$ は定数)

(b) 避難確率モデルの定式化

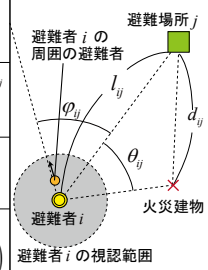
図-2 避難確率モデル

避難者 i が避難場所 j を選択する確率 Q_{ij} は, 避難者 i が避難場所 j を選択することで享受する効用 V_{ij} を用いて

$$Q_{ij} = \frac{\exp[V_{ij}]}{\sum_j \exp[V_{ij}]} \quad V_{ij} = \sum_k \eta_k x_{ijk} \quad \left(\begin{array}{l} \eta_k: \text{未知パラメータ} \\ x_{ijk}: \text{避難者 } i \text{ の避難場所 } j \text{ に関する } k \text{ 番目の特性変数 (図-3(b))} \end{array} \right)$$


避難場所の選択には避難場所までの距離, 周囲の避難者の移動, 火災建物との位置関係が影響すると考え, V_{ij} を図-3(b)に示す特性変数の線形和で表す.

(a) 避難場所選択モデルの定式化

x_{ij1} : 避難者 i から避難場所 j までの経路長に関する変数 $x_{ij1} = -l_{ij}$ l_{ij} : 避難者 i から避難場所 j までの経路長 [m]	
x_{ij2} : 周囲の避難者の移動方向に関する変数 $x_{ij2} = \cos \phi_{ij}$ ϕ_{ij} : 避難者 i の視認範囲に在る他の避難者の移動方向と避難者 i からみた避難場所の方向とのなす角度 [rad]	
x_{ij3} : 火災の方向に関する変数 $x_{ij3} = -\cos \theta_{ij}$ θ_{ij} : 避難者 i から最も近い火災建物の方向と避難場所 j の方向とのなす角度 [rad]	
x_{ij4} : 火災との距離に関する変数 $x_{ij4} = -\exp[-\alpha d_{ij}]$ d_{ij} : 避難者 i から最も近い火災建物と避難場所 j の間の直線距離 [m] (α は図-2式(1)の α と同一)	

(b) 効用 V_{ij} を記述する特性変数

図-3 避難場所選択モデル

[実施日] 調査①: 2019年1月 調査②: 2019年7月		[回答方法]		[質問の選択肢の条件の例]																																														
[サンプル数]		<input type="checkbox"/> 状況① O位 <input type="checkbox"/> 状況① Om <input type="checkbox"/> 状況② O位 <input type="checkbox"/> 状況② Om <input type="checkbox"/> 状況⑧ O位 <input type="checkbox"/> 状況⑧ Om		<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>A</th> <th>B</th> <th>C</th> <th>D</th> <th>E</th> <th>F</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>現在地からの所要時間</td> <td>20分</td> <td>20分</td> <td>10分</td> <td>15分</td> <td>15分</td> <td>20分</td> </tr> <tr> <td>周囲の人の移動方向</td> <td>45°</td> <td>135°</td> <td>45°</td> <td>159°</td> <td>32.5°</td> <td>124.5°</td> </tr> <tr> <td>火災の方角</td> <td>45°</td> <td>45°</td> <td>45°</td> <td>111°</td> <td>122.5°</td> <td>145.5°</td> </tr> <tr> <td>火災発生場所までの距離</td> <td>930m</td> <td>930m</td> <td>380m</td> <td>1245m</td> <td>1330m</td> <td>1530m</td> </tr> </tbody> </table>			A	B	C	D	E	F	現在地からの所要時間	20分	20分	10分	15分	15分	20分	周囲の人の移動方向	45°	135°	45°	159°	32.5°	124.5°	火災の方角	45°	45°	45°	111°	122.5°	145.5°	火災発生場所までの距離	930m	930m	380m	1245m	1330m	1530m										
	A	B	C	D	E	F																																												
現在地からの所要時間	20分	20分	10分	15分	15分	20分																																												
周囲の人の移動方向	45°	135°	45°	159°	32.5°	124.5°																																												
火災の方角	45°	45°	45°	111°	122.5°	145.5°																																												
火災発生場所までの距離	930m	930m	380m	1245m	1330m	1530m																																												
[アンケートにおける想定]		[8つの状況]		[仮想市街地の例]																																														
<ul style="list-style-type: none"> 阪神淡路大震災のような大規模地震がおきたとする 発災時, 木造密集地域内の自宅にいるものとする 自宅の損壊は無く, 自分自身の怪我は無いものとする 		<p>A 近隣住民の避難</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>A</th> <th>B</th> <th>C</th> <th>D</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>① いない</td> <td>x</td> <td>x</td> <td>x</td> <td>x</td> </tr> <tr> <td>② 1割程度</td> <td>o</td> <td>x</td> <td>x</td> <td>x</td> </tr> <tr> <td>③ 1割程度</td> <td>x</td> <td>o</td> <td>x</td> <td>x</td> </tr> <tr> <td>④ 1割程度</td> <td>x</td> <td>x</td> <td>o</td> <td>o</td> </tr> <tr> <td>⑤ いない</td> <td>o</td> <td>o</td> <td>x</td> <td>x</td> </tr> <tr> <td>⑥ いない</td> <td>o</td> <td>x</td> <td>o</td> <td>o</td> </tr> <tr> <td>⑦ いない</td> <td>x</td> <td>o</td> <td>o</td> <td>o</td> </tr> <tr> <td>⑧ 8割程度</td> <td>o</td> <td>o</td> <td>o</td> <td>o</td> </tr> </tbody> </table> <p>B 防災行政無線の情報</p> <p>C テレビやラジオの情報</p> <p>D 自治体のWebサイトやSNSの情報</p>			A	B	C	D	① いない	x	x	x	x	② 1割程度	o	x	x	x	③ 1割程度	x	o	x	x	④ 1割程度	x	x	o	o	⑤ いない	o	o	x	x	⑥ いない	o	x	o	o	⑦ いない	x	o	o	o	⑧ 8割程度	o	o	o	o		
	A	B	C	D																																														
① いない	x	x	x	x																																														
② 1割程度	o	x	x	x																																														
③ 1割程度	x	o	x	x																																														
④ 1割程度	x	x	o	o																																														
⑤ いない	o	o	x	x																																														
⑥ いない	o	x	o	o																																														
⑦ いない	x	o	o	o																																														
⑧ 8割程度	o	o	o	o																																														
[質問内容]																																																		
I 避難開始のタイミングに関する質問 (調査②)	近隣住民の避難割合 r_i と情報の有無 $\delta_2 \sim \delta_4$ を変化した状況①~⑧のそれぞれにおける避難開始時の火災接近距離 D_i を回答する																																																	
II 避難場所選択に関する質問 (調査①・②)	周囲の避難者の移動方向と火災の場所を図-4(c)のように想定した時の, 6箇所の避難場所 A~F の選択順序を回答する (調査①・②それぞれにおいて 2パターン, 計 4パターンで実施)																																																	
III 属性情報等 (調査①・②)	年齢・性別・居住地 (市区町村)																																																	

(a) 調査概要 (b) 避難開始に関する質問 (c) 避難場所の選択に関する質問

図-4 アンケート調査の概要

た(図-4). 問Iでは, 近隣住民の避難の有無と避難関連情報の有無の組み合わせ(8種類)を直交表を用いて作成しておき, 各状況下における避難開始時の火災までの距離について回答を求めた. 問IIでは, 仮想市街地上に火災の位置や近隣住民の避難方向を示し(図-4(c)), 6箇所の避難場所の選好順序について回答を求めた. 調査において, 想定した状況を写真や文章を用いて説明することで, 被験者間でイメージが乖離することなく, できるだけ直感的に回答できるよう配慮した.

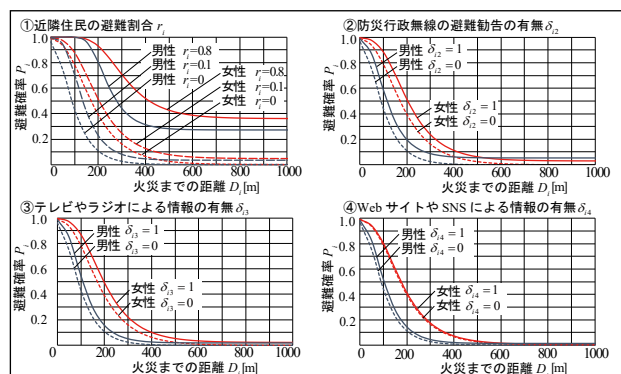
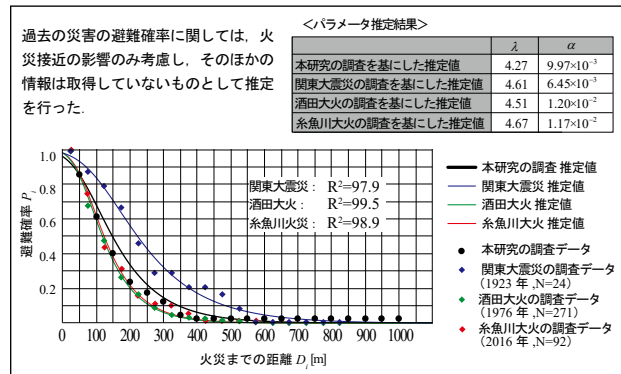
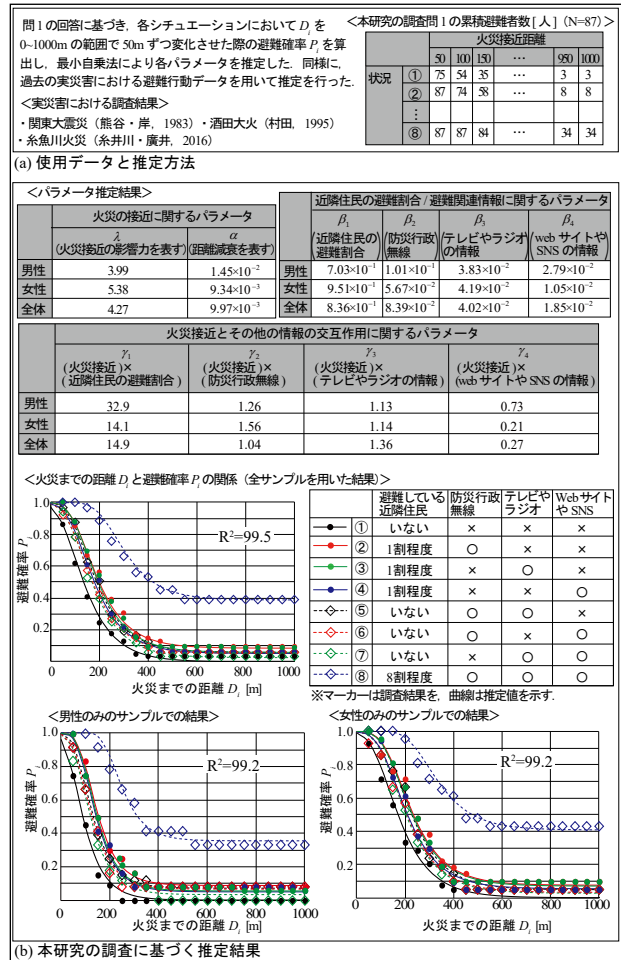
3.2 避難確率モデルのパラメータ推定

図-4(a)問Iの回答結果をもとに避難確率 P_i を算出し, 最小自乗法を用いてモデルのパラメータを推定した. アンケートで想定した8つの状況下における, 火災接近距離 D_i と避難確率 P_i , および, モデルによる推定結果を図-5(b)に示してある. モデルの記述精度は良好であることが分かる.

関東大震災(1923), 酒田大火(1976), 糸魚川火災(2016)の3つの実災害における避難行動の調査結果から同様に避難確率 P_i を算出し, これらを用いて同様の推定を行った. 本研究の調査をもとに推定した結果とこれらの結果を比較すると(図-6), 概ね整合していることが分かる.

また, 男女別に推定した結果を見ると, 男性の方が火災接近に対して避難が遅い傾向のあることが分かる. また, 避難関連情報に関しても, 女性の方が男性よりも影響を受けやすいことが分かる. しかし, 近隣住民の避難割合に関するパラメータ β_1 は男性の方が小さく, 火災との相互作用のパラメータ γ_1 は男性の方が大きい. すなわち, 男性は火災が接近した状況下で初めて他人に追従しようとする傾向のあることを示唆している.

さらに, 推定モデルを用いて, 近隣住民の避難割合, 避難関連情報の有無を変化させた場合



の男女別の避難確率を算出した結果を図-7に示してある。近隣住民の避難割合が8割程度の場合、火災が遠い場合であっても男性は3割弱、女性は4割弱の人が避難開始することが分かる。すなわち、他の避難者の避難有無が避難意思決定に大きな影響を与え得ると言える。また、避難関連情報に関しては、火災が近い状況下において避難確率を上昇させる要因になることが分かる。

3.3 避難場所選択モデルのパラメータ推定

図-4(a)問IIの回答をもとに避難場所選択モデルのパラメータ $\eta_1 \sim \eta_4$ を推定した。その結果を図-8(a)に示してある。尤度比や的中率は高く、モデルの記述精度は良好である。また、4つの推定パラメータはいずれも統計的に有意である。

推定パラメータ（標準化）の値を見ると、火災の方向に関するパラメータ η_3 の値が大きいことから、避難者は自身からみて火災に近い方向の避難場所を選択することに強い抵抗感を持っていることが分かる。

推定パラメータを用いて算出した、各地点に避難場所が存在した場合の効用値（図-4(c)で想定した状況下）の空間分布を図-8(b)に示してある。火災建物から約400mを境に、効用値が急激に減少することが分かる。また、近隣住民の避難方向の影響により、効用値の高い地点が、南西方向に偏っている様子が見て取れる。

さらに、避難場所A～Fの選択確率を男女別に算出した結果を図-8(b)下に示してある。避難場所Cは避難者にとって最も近い避難場所であるにも関わらず、選択確率は男性0.15%、女性0.22%と非常に低い。すなわち、避難者は火災発生場所との位置関係に大きく影響を受けて避難場所を選択することが分かる。ただし、男女間の避難場所の選択傾向には大きな差はみられない。

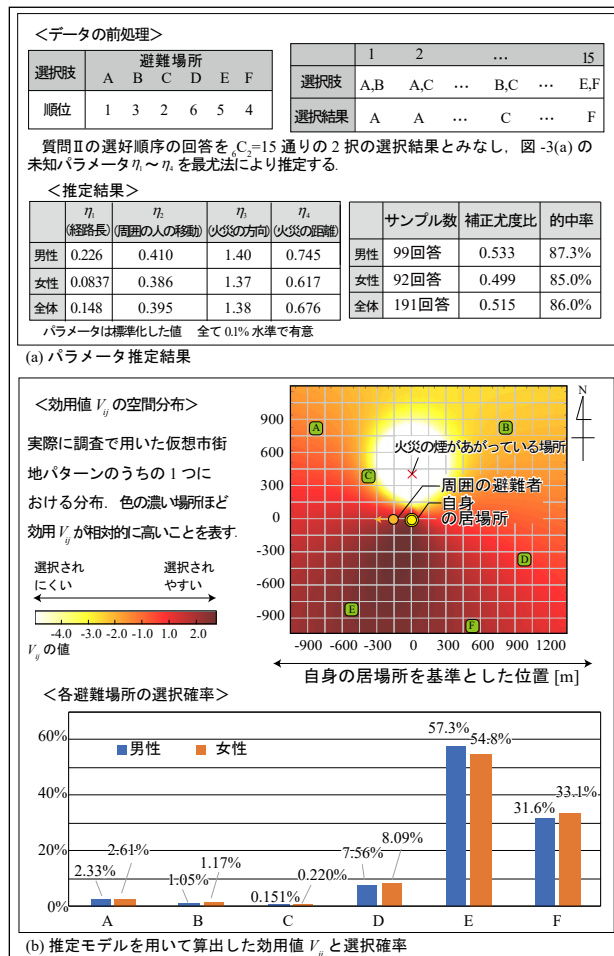


図-8 避難場所選択モデルの推定結果

4. まとめ

地震火災時の避難開始のタイミングと避難場所選択について、視認情報と避難関連情報を考慮した避難行動モデルを構築した。また、推定モデルを用いて、避難開始行動や避難場所選択行動の特徴について考察した。本研究のモデルは、時々刻々と変化する状況の中で避難者が取得する情報を考慮したシミュレーション分析等に適用できる可能性がある。

謝辞

本研究のアンケート調査に協力頂いた回答者の皆様に深く謝意を表します。本研究は、CREST、JSTの助成に基づく研究成果(JPMJCR1411)の一部です。

注

- 1) 本研究において、避難者 i から避難場所 j までの経路長 l_{ij} には、ネットワーク距離に基づく最短経路を用いるものとする。
- 2) 避難者 i の視認範囲に他の避難者がある場合、周囲の避難者の移動方向は進む人数が最も多い方向に代表させるものとする。また、群集の大きさによる影響度の違いの考慮は今後の課題である。

参考文献

- 大佛俊泰・沖拓弥 (2011)：密集市街地における大地震時の避難困難率について、日本建築学会計画系論文集, 77, 681, 2561-2567.
- 熊谷良雄・岸栄吉 (1983)：火災時における避難行動の分析-酒田大火と関東大震災・東京を例にして-, 日本都市計画学会学術研究発表会論文集, 18, 169-174.
- 村田朋子 (1996)：広域避難, 1995年兵庫県南部地震における火災に関する調査報告書, 231-237.
- 糸井川栄一・廣井悠 (2018)：地震火災時広域避難におけるリスク情報の伝達過程に関する論点と課題, 日本建築学会大会防災部門パネルディスカッション資料, 11-18.