

## 大地震発生後の道路閉塞状況下における

### 瓦礫間距離・瓦礫高さとは歩行者の通行可否判断との関係

○榎 愛\*1 渡邊 里奈\*2

キーワード：道路閉塞 避難シミュレーション ヘッドマウントディスプレイ VR 地震 瓦礫

#### 1. 背景・目的

大地震発生時に起こる道路閉塞は、住民避難や支援者の移動、救援物資の輸送や緊急車両の通行などに悪影響を与えるため、閉塞する可能性が高い道路を事前に把握し、備えておくことが重要である。大地震発生後の道路閉塞を予測するために様々な研究が行われているが、その多くは救助活動や物資輸送などの観点から車の通行を想定した手法が用いられている。石橋ら<sup>1)</sup>は、道路リンクを基準として閉塞判定する手法で、車による救援物資配達の経路を示そうとしたが、地域内の避難所までの経路を示せなかったことを述べている。しかし幅員の狭い道路が大半を占める密集市街地においては、平時から車よりも自転車や徒歩による移動が多く、発災後の主な移動手段はバイクや自転車、徒歩になると予想される。これまで筆者<sup>2)</sup>は、大阪府にある密集住宅地を対象として、発災後に人が通行できる道路を示すために、新たな道路閉塞シミュレーション手法の開発に取り組んでいる。そのシミュレーション結果を住民ワークショップにて提示したところ、「避難所までの道の大半が閉塞しそう。多少の瓦礫であれば、乗り越えて避難するだろう。」という意見があり、瓦礫乗り越えを考慮したシミュレーションの必要性が明らかになった。

人の瓦礫乗り越え行動を考慮した避難シミュレーションは、沖ら<sup>3)</sup>によって実施されている。しかしこの研究では、道路上の瓦礫高さの推定、瓦礫乗り越えの可否については調査事例や実験事例が少ないことから、試行的に「瓦礫高さが2m未満の場合は、その瓦礫を乗り越え可能である」と仮定し、一部の高齢者については体力・運動能力調査の結果を参考に乗り越え可能な瓦礫高さを2mよりも低く設定してシミュレーションされている。このことから、発災後の徒歩避難において瓦礫乗り越えの判断基準に関する実験結果があれば、さらに現実に即した避難シミュレーションが可能になると考えられる。

そこで本研究では、大地震発生後の道路閉塞状況下で歩行者が「通行できる」と判断する「瓦礫間の距離」「瓦礫の高さ」を被験者実験によって明らかにすることを目的とする。現実空間に複数の瓦礫を用意することは危険を伴うため、VR空間にて実験を行う。VR空間の作成には



図1 被験者実験風景

空間作成：
3dsMax・Unreal Engine4
提示機器：
Oculus Rift DK2 (没入型HMD)
提示条件：
視点位置固定 移動不可 転回可能

図2 使用機器

3dsMax と Unreal Engine 4 を、VR空間の提示には没入型ヘッドマウントディスプレイ（以下、HMDとする）Oculus Rift DK2を使用する。図1に被験者実験風景、図2に使用機器を示す。

本実験では瓦礫間の距離と瓦礫の高さが異なる複数のVR空間を作成して提示し、被験者に通行可否を判断してもらう。しかしVR空間において物体間の距離の差や高さの差をどの程度正確に被験者が認識できるのかは、明らかになっていなかった。そこで本実験に先立ち、VR空間において人が認識できる物体間の距離の差と高さの差を明らかにすることを目的として、塀を模したモデルを用いて物体間の距離もしくは物体の高さを徐々に変えて提示し、被験者が認識できる差を調べる予備実験を行う。そしてその結果を用いて、本実験の提示空間を作成して実験する。

#### 2. 予備実験 方法

本実験で使用する提示空間において、瓦礫間の距離と高さを徐々に変える寸法を明らかにするために、VR空間にて人が認識できる物体間の距離の差と高さの差を調査する。表1に予備実験の概要、表2に提示空間の詳細、図3に提示空間の例を示す。

物体間の距離に関する実験では、物体間の距離750mm基準空間とし、物体間の距離が異なる5種類の比較空間を提示する。物体の高さに関する実験では、物体の高さ700mmを基準空間とし、物体の高さが異なる比較空間を5種類提示する。なお、被験者には寸法は公開しない。

図4に予備実験の流れを示す。まず予備実験全体の説明をした後、身長やVR使用経験の有無などをアンケートにて調査し、HMDの装着方法を説明する。①基準空間を提示した後、②画面を暗転し、③比較空間を提示して基準空間と比較して評価してもらう。④再度暗転して、体調に変化がないか確認する。比較空間を変えて①から④を繰り返す、順に提示する。

図5に予備実験における評価を示す。基準空間と比べて比較空間に「1: 差がない」～「5: 極端に差がある」の5段階で評価する。さらに「物体間を通れるか」「物体を乗り越えられるか」を質問する。

### 3. 予備実験 結果

図6, 7に予備実験の結果を示す。円の大きさと数字は回答した被験者人数を示し、折れ線は全被験者の回答の平均値を示す。

物体間の距離、物体の高さともに、基準空間との差が100mm以上になったとき、約8割(12人)以上の被験者が「2 やや差がある」～「5 極端に差がある」と評価した。この結果から、VR空間において水平方向、垂直方向ともに100mm以上の差があれば、被験者はその差を認識できると言える。そこで本実験では、瓦礫間の距離、瓦礫の高さを100mmずつ変えた提示空間を用いることにした。

### 4. 本実験 方法

本実験では、大地震発生後の道路閉塞状況下で歩行者が「通行できる」と判断する「瓦礫間の距離」「瓦礫の高さ」を調査する。表3に本実験の概要、表4に提示空間の詳細、図8に本実験の提示空間の例を示す。木造住宅の倒壊を想定し、瓦礫のモデルには木材のテクスチャを設定した。

瓦礫間の距離に関する実験では、瓦礫間の距離600mmを最長とし、100mmずつ狭くして合計7種類のVR空間を提示する。瓦礫の高さに関する実験では、沖ら<sup>3)</sup>の研究で採用されていた値、瓦礫の高さ2000mmを最高とし、100mmずつ低くして合計20種類のVR空間を提示し、通行可否の判断を調査する。周囲の状況により評価が変わる可能性があるため、実験の前に図9の状況を想定するように被験者に教示する。

図10に本実験の流れを示す。まず本実験全体の説明をした後、予備実験と同様に身長やVR経験の有無などをアンケートにて調査し、HMDの装着方法を説明する。①VR空間を提示し、②評価した後、③画面を暗転して体調に変化がないかを確認する。提示空間を順に変えて①～③を繰り返し、順に提示する。なお、被験者には寸法を公開しない。

図11に本実験における評価を示す。提示されたVR空間に対して、「1: 通れない」～「5: 余裕をもって通れる」の5段階で評価する。さらに「通れない」と評価した場合は、その判断理由を尋ねる。

表1 予備実験 概要

実験室	摂南大学 12号館 ゼミ室A
被験者	20代学生15名 男性7名(平均身長171cm)・女性8名(平均身長156cm)
視点位置	物体から3000mm離れた位置に設定
視点高さ	被験者の視点高さと同じ高さに設定

表2 予備実験 提示空間 詳細

	物体間の距離		物体の高さ	
	提示空間名	距離	提示空間名	高さ
基準空間	物体間基準	750mm	物体高基準	700mm
比較空間	物体間-50	700mm	物体高+50	750mm
	物体間-100	650mm	物体高+100	800mm
	物体間-150	600mm	物体高+200	900mm
	物体間-300	450mm	物体高+500	1200mm
	物体間-500	250mm	物体高+1000	1700mm



図3 予備実験 提示空間 例  
左: 物体間-300 右: 物体高+1000

実験説明	15分
実験	15分
① 基準空間提示	10秒
② 画面暗転	10秒
③ 比較空間提示・評価	30秒
④ 画面暗転	10秒
提示空間を変えて①～④を繰り返す	

5: 極端に差がある
4: かなり差がある
3: 差がある
2: やや差がある
1: 差がない
「物体間を通れるか」
「物体を乗り越えられるか」

図4 予備実験の流れ 図5 予備実験 評価

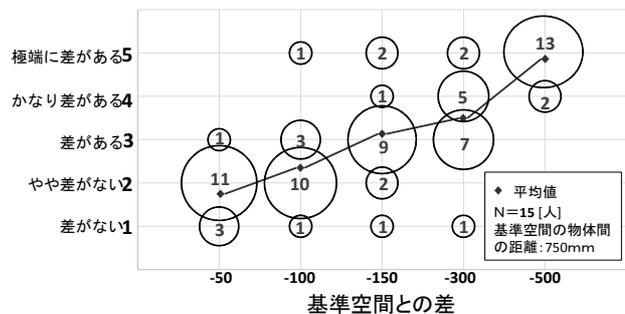


図6 予備実験結果 物体間の距離の差に関する評価

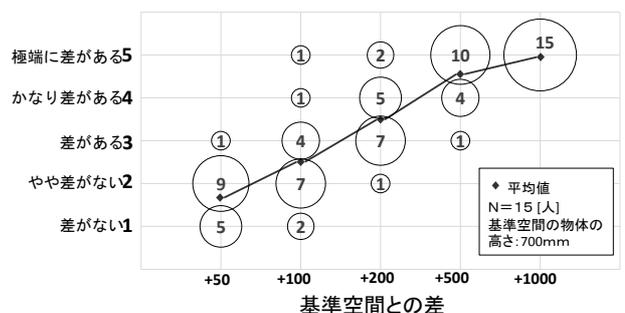


図7 予備実験結果 物体高さの差に関する評価

## 5. 本実験 結果

### 5.1 瓦礫間の距離

図 12 に瓦礫間の距離に関する結果を示す。

瓦礫間の距離 500mm 以上の空間が残っていると、全員が「なんとか通れる」以上の評価となり、男女別に見ると男性が 500mm 以上、女性が 400mm 以上の空間が残っていると「なんとか通れる」以上の評価をしていた。

塀を模したモデルを用いた予備実験の結果と比較すると、予備実験では物体間距離 250mm 以下で約 8 割の被験者が「通れない」と判断したため、本実験でも瓦礫間距離 200mm 以下で「通れない」と判断する被験者が多くなると予想していた。しかし、約 8 割の被験者が「通れない」と判断したのは、瓦礫間距離 100mm になったときであった。この結果から塀を模したモデルを用いた「物体間の距離」と「瓦礫間の距離」では、通行可否の判断基準が異なると考えられる。図 14 に予備実験「物体間の距離」と本実験「瓦礫間の距離」で「通れない」と評価した被験者の割合を示す。予備実験に比べて、本実験では被験者が「通れない」と判断する距離が狭いことがわかる。

図 15 に予備実験で用いた「物体間-150」を、図 16 に本実験で用いた「瓦礫間 600」を示す。物体間、瓦礫間ともに 600mm の隙間があるが「物体間-150」（つまり物体間距離が 600mm）に比べて「瓦礫間 600」は隙間が広く見える。瓦礫間には細かな空間が存在して最小寸法よりも広く見えること、また凹凸があるため体勢を変えながら移動すれば通行可能と判断していることが予想される。

### 5.2 瓦礫の高さ

図 13 に瓦礫の高さに関する結果を示す。

瓦礫高さが 400mm 以下であれば全員が「なんとか通れる」以上の評価となり、男女ともに同じ結果となった。一方、1600mm 以上の高さになると全員が「通れない」と判断しており、男女別に結果を見ると、男性は 1600mm 以上、女性は 1400mm 以上で全員が「通れない」と判断しており、男女で評価に差が見られた。

塀を模した予備実験の結果と比較すると、塀の場合は最も高い 1700mm の塀でも 27%の被験者が「乗り越える」と評価したが、瓦礫の場合は 1600mm の瓦礫を全員「通れない」と判断しており、塀に比べて瓦礫は不安定に見えることが通行可否判断に影響を与えていると考えられる。

図 17 に瓦礫高さ実験にて「通れない」と判断した理由の傾向を示す。被験者は瓦礫が高くなるにつれて、瓦礫に近づくことさえためらう傾向があることがわかった。この結果より、ある程度の瓦礫の高さがある場合、周辺に瓦礫のない空間が残っていたとしても通行可能な空間としては機能しないと考えられる。

表 3 本実験 概要

実験室	摂南大学 12号館 ゼミ室A
被験者	20代学生 30名 男性 15名(平均身長 173cm)・女性 15名(平均身長 158cm)
視点位置	瓦礫から 3000mm 離れた位置に設定
視点高さ	被験者の視点高さと同じ高さに設定

表 4 本実験 提示空間 詳細

瓦礫間の距離 [瓦礫高さ 2000mm]		瓦礫の高さ [瓦礫間距離 0mm]			
提示空間名	距離	提示空間名	高さ	提示空間名	高さ
瓦礫間 600	600mm	瓦礫高 100	100mm	瓦礫高 1100	1100mm
瓦礫間 500	500mm	瓦礫高 200	200mm	瓦礫高 1200	1200mm
瓦礫間 400	400mm	瓦礫高 300	300mm	瓦礫高 1300	1300mm
瓦礫間 300	300mm	瓦礫高 400	400mm	瓦礫高 1400	1400mm
瓦礫間 200	200mm	瓦礫高 500	500mm	瓦礫高 1500	1500mm
瓦礫間 100	100mm	瓦礫高 600	600mm	瓦礫高 1600	1600mm
瓦礫間 0	0mm	瓦礫高 700	700mm	瓦礫高 1700	1700mm
		瓦礫高 800	800mm	瓦礫高 1800	1800mm
		瓦礫高 900	900mm	瓦礫高 1900	1900mm
		瓦礫高 1000	1000mm	瓦礫高 2000	2000mm



図 8 本実験 提示空間 例  
左：瓦礫間 300 右：瓦礫高 1200

近所へ外出中地震が発生。避難所へ向かう。途中、瓦礫が道路へ流れ出ている道に出た。ここを通れば避難所まですぐに辿り着くが、迂回すると 30 分以上かかってしまう。あなたの服装は、Tシャツ・Gパン、スニーカー。持ち物は、リュック 1つ。

図 9 本実験 想定状況

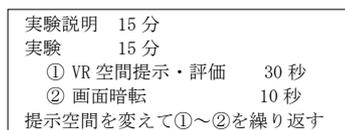


図 10 本実験の流れ

5: 余裕をもって通れる  
4: 通れる  
3: 少し通りづらいが通れる  
2: なんとか通れる  
1: 通れない  
※「通れない」と評価した場合は、判断理由を尋ねる

図 11 本実験評価

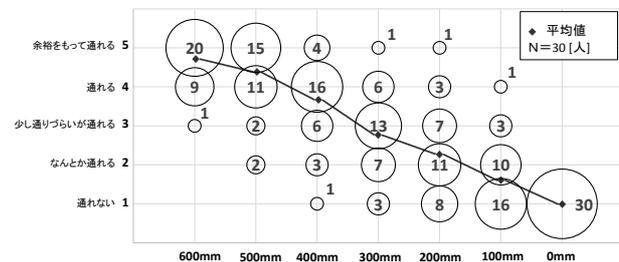


図 12 瓦礫間の距離による通行可否の評価

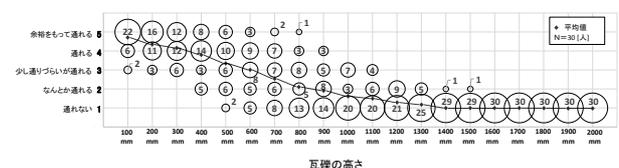


図 13 瓦礫間の距離による通行可否の評価

## 6. 総括

本研究では、道路閉塞状況下で歩行者が通行できると判断する「瓦礫間の距離」「瓦礫の高さ」を調査した。明らかになった主な結果を次に示す。

①瓦礫高さが 2000mm の場合、瓦礫と瓦礫の間に 500mm 以上の空間が残っていると被験者全員が瓦礫の間を通行できると判断した。

②道路の全面が瓦礫で閉塞している場合、高さ 400mm 以下の瓦礫は、被験者全員が乗り越えて通行できると判断した。一方、高さ 1600mm 以上の瓦礫は、被験者全員が通行できないと判断し、特に女性は 1400mm 以上の高さになると全員が通行できないと判断した。

③瓦礫が高くなるにつれ、被験者は瓦礫に近づくことさえもためらう傾向にあった。つまり、高い瓦礫の周辺に瓦礫のない空間が残っていたとしても、歩行者が通行できる空間としては機能しないことが予想される。

④瓦礫は複数の部材が重なり合って構成されているため、部材間に細かな空間が存在して広く、不安定に見えることにより、塀などの物体とは通行可否判断の基準が異なっていた。

本実験で使用した瓦礫には、住宅瓦礫を想定して木材のテクスチャを設定したが、瓦礫の材質や積み上げ方法を変えると異なる結果が出る可能性がある。また、今回は被災経験のない大学生を被験者としたため、歩行者の年齢や運動能力、被災経験によって結果が異なることが予想される。今後は様々な瓦礫パターン、幅広い年齢を対象として実験を行うことで、より現実に即した歩行者の通行可否判断基準が明確になり、徒歩による避難シミュレーションの精度向上に貢献できると考えている。

### 【参考文献】

- 1) 石橋直也, 渡辺 浩文:「大規模震災時における指定避難所への緊急輸送に関する研究」, 日本建築学会学術講演梗概集, pp. 787-788, 2010
- 2) 嶋岡亮成, 榊愛:「住宅密集地における地震発災時の人の通行可能領域の可視化に関する基礎的研究 —その 2 1m メッシュを用いた道路閉塞シミュレーション手法の検証—」, 日本建築学会学術講演梗概集, pp. 945-946, 2016
- 3) 沖拓弥, 大佛俊泰:「住民による救助活動を組み込んだ大震災時における木密地域の広域避難シミュレーション分析」, 日本建築学会計画系論文集, 第81巻, 第724号, pp. 1345-1353, 2016. 6

\*1 摂南大学 准教授 博士 (工学)

\*2 株式会社 日積サーベイ

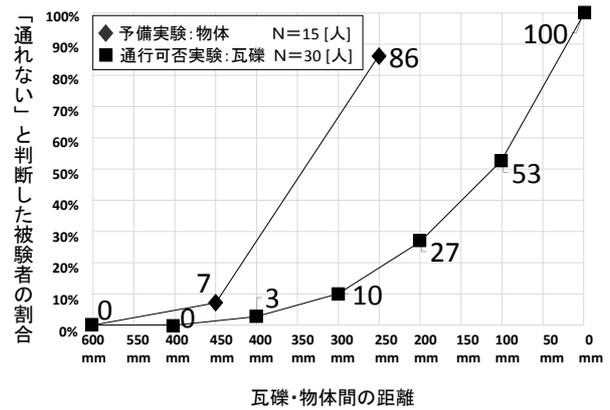


図 14 予備/本実験 「通れない」と判断した人数の割合



図 15 予備実験 提示空間  
「物体間-150」  
物体間の距離 600 mm

図 16 本実験 提示空間  
「瓦礫間 600」  
瓦礫間の距離 600mm

瓦礫高さ	「1 通れない」の判断理由
↑ 高	その場からすぐに離れる
	近寄らない
	近づきたくない
	壁・行き止まりに見える
	登ろうとは思えない
	(登ろうと考えるが) 登れない
	(登れるが) 危なそう・崩れそう
低	足場が悪い

図 17 瓦礫の高さ実験「通れない」判断理由の傾向