

# VR 技術の火災時の避難行動分析への応用

田中 俊成\*<sup>1</sup>・水野 雅之\*<sup>2</sup>

Keywords :VR, evacuation behavior, evacuation guidance, digital signage

VR, 避難行動, 避難誘導, デジタルサイネージ

## 1. はじめに

火災時に建築物内の在館者が速やかに避難するためには、避難出口の容量およびその配置が重要であり、避難行動特性を考慮した避難計画が望まれる。また、群集避難時にはわかりやすい避難方向などの情報を与えるデジタルサイネージの誘導設備を配置することが望ましいが、設置位置や誘導効果に関する知見は殆どない。さらに、出火位置や在館者数は多岐に渡るため、様々な条件で避難誘導方法を検討する必要がある。

火災時の被害をできる限り小さく抑えるためには、火災や在館者の条件に応じて、速やかに的確な避難指示を行うことが重要であり、建物管理者などが様々な火災シナリオで訓練することは有効である。これまでに実際の空間を利用した避難行動を分析した実験も行われてきたが<sup>1)3)</sup>、避難者が 1000 人を超えるような大規模な避難を想定した実験は、大勢の避難者とともに実際の施設を使用した実験を行うことは容易ではないため、行われてこなかった。

そこで、著者らは、BIM (Building Information Modeling) データとマルチエージェントシミュレーション (以降、MAS モデル) による避難流動の計算結果を VR 空間で統合し、大規模避難時の避難行動を分析できる VR 避難シミュレーターの開発を行ってきた<sup>4)5)</sup>。本報では VR 避難シミュレーターの紹介と VR 実験結果を報告する。VR 実験では、地下街火災時における大規模避難を想定した被験者実験を行い、避難開始時の被験者の位置や向き、他の避難者の避難行動が VR 空間での出口選択や移動にどのように影響するのか、またデジタルサイネージによる誘導効果を検討した。

## 2. 研究方法

### 2.1 VR 実験の使用機材および VR 空間内の移動

VR 避難シミュレーターの構成図を図-1 に示す。ゲームエンジン Unity を用いて、火災時避難の状況を VR として表現した。他の避難者の避難状況は、MAS モデルの計算結果を VR 空間内に配置された NPC (Non Player Character) の動きに同期することで表現した。実験に使用した機材を表-1 に示す。VR システムは、HTC 社製の VIVE PRO である。VR 空間で被験者は、ヘッドマウントディスプレイ (HMD) を装着し、HMD の正面方向にのみ移動できることとした。歩行速度の調整は、コントローラーの円形タッチパッドを用いて行い、中心から時計の 12 時方向の範囲のみを有効とし、タッチパッドの中心が 0.0 m/s、外周部が最速で早歩き程度の 2.0 m/s とし、その範囲内で触れる位置によってリニアに変化する設定とした (図-2 (a))。

実験は、図-2 (b)に示した 2 m×2 m の実空間の対角に HMD の向きや高さを検出するセンサーを設置し、その範囲の中央に被験者を配置して行なわれた。なお、VR 空間に入室する被験者は 1 名であり、VR 実験は 1 名毎に行われた。

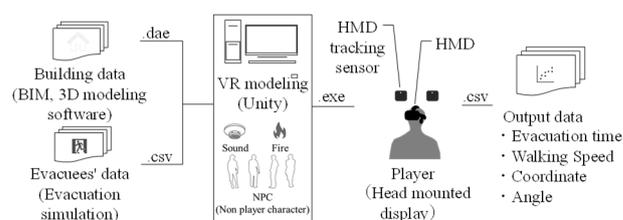


図-1 VR 避難シミュレーターの構成図  
Fig.1 VR evacuation simulator configuration

\* 1 技術センター 都市基盤技術研究部 防災研究室

\* 2 東京理科大学

2.2 空間概要

不特定多数の在館者が滞在している地下街では、シャッターなどの防火区画を超えて非火災区画へ避難する水平避難が有効な避難手段となる。本研究では、図-3に示す通路両側に店舗が配置された地下街を対象に、空間をモデル化した。避難出口は、通路の片側に3か所配置し、出口前には天井から吊り下げた避難誘導灯を設置した。被験者がPlayerとしてVR空間に入る初期位置は図-3に示した地下街通路の右端であり、そこから避難開始位置に移動する。避難開始時の向きを火源方向と非火源方向とし、図-4に示すように、Playerを避難開始位置に移動させた。避難開始位置は、VR空間内で直径1.5mの水色の透過した円柱で表示され、Exit AとExit Bとの間の距離55mを均等に4分割する3つの位置で、通路の両側の壁面近傍に計6カ所を設定した。

表-1 実験に使用した機材の仕様  
Table 1 Apparatus specifications

PC		HMD : HTC VIVE PRO	
Items	Specs	Items	Specs
OS	Windows 10 home 64bit	Weight	765 g
CPU	Intel i7-7700K	Viewing angle	110 °
RAM	16 GB	Refresh rate	90 Hz
Graphics Cards	Geforce GTX 1660 Ti 6 GB	Resolution	2880 × 1600 dpi

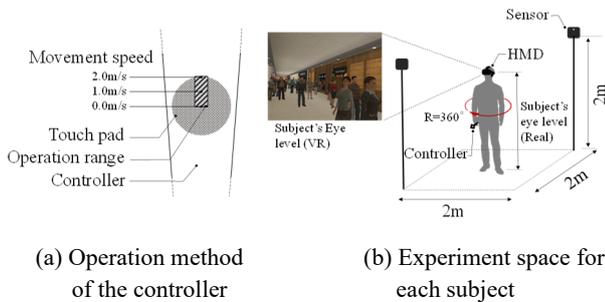


図-2 コントローラーによる操作方法と実験環境  
Fig.2 Operation method and experiment space

2.3 VR空間内に配置した他の避難者の表現

VR空間において他の避難者が避難する状況を表示するため、予めMASモデル<sup>6)</sup>を使用して対象空間の避難流動を解析した。その実行結果をVR空間内にNPC (Non Player Character)として配置することで、被験者が他の避難者(以降、NPC)と共に避難する状況を表示した。

被験者が避難開始位置に移動を完了してから、日本語と英語で感知器発報放送(15秒間)が1回流れ、その後、火災確定放送が1回(25秒間)流れてからNPCは一斉に移動を開始する。なお、NPCの避難方向は、初期位置から火源から遠ざかるように非火源方向にある最寄りの出口に避難する。また、NPCの行動は被験者のPlayerに影響されず、PlayerがNPCと接触する場合にはNPCを非表示にして通り抜ける仕様とした。

3. VR実験概要

本研究ではVRシステムを用いて、避難開始位置、初期配置時の火災に対する向き、施設内の在館者密度、NPCの移動速度、デジタルサイネージの誘導効果、防火シャッター(以降、SS)の降下が避難行動に与える影響について分析する。なお、出火位置は図-3に示した通路の右端である。図-5に示すように通路奥が火災によって明るくなっていることがわかる。

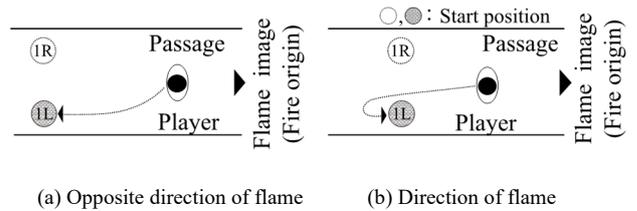


図-4 避難開始位置への入り方  
Fig.4 How to approach the start position 1L

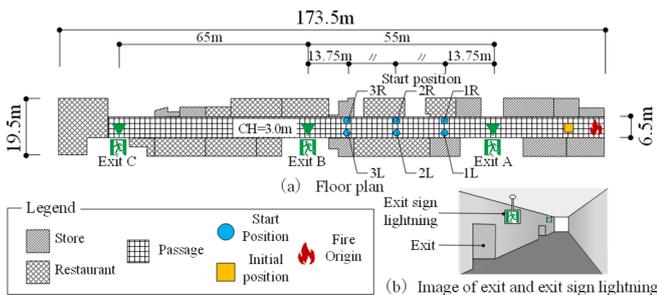


図-3 実験対象空間の平面図  
Fig.3 Floor plan(layout of three exits in the mall)



図-5 避難開始位置 2R から火災発生地点を見たイメージ  
Fig.5 VR Image of view in direction of fire origin and Exit A from start position 2R after fire

### 3.1 被験者に対する教示

被験者によってコントローラーの操作能力に差が出ないように文書で操作方法の説明を行った後、HMDを装着させVR空間上の10m四方のチュートリアルルームで自由に動き回って操作方法を理解させた。操作練習後、被験者は予め実験対象空間の俯瞰図を確認した上でVR空間に入室し、店舗構成および避難出口の配置や避難開始位置を認識した状態で実験を行った。

被験者にはNPCが避難し始めた後に任意のタイミングで避難行動に移ってもらい、地下街で火災が発生した状況で避難するように予め指示した。また、VR空間でNPCとの接触をできる限り避けて移動することを指示した。

### 3.2 実験条件

#### 3.2.1 VR 実験 1：避難開始位置と通路の滞留密度が出口選択に及ぼす影響

被験者の避難開始位置と避難開始時の向いている方向、施設内の在館者密度を実験変数とした。合計30名の被験者に参加してもらい、表-2に示す10ケースを左から順に実施させた。設定した在館者の高密度は、避難安全検証法<sup>7)</sup>に基づき、通路部を0.25人/m<sup>2</sup>、物販店舗を0.5人/m<sup>2</sup>、飲食店舗を0.7人/m<sup>2</sup>とした。中および低密度は、それぞれ高密度の1/2と1/4とした。NPCの移動速度は1.0m/sとした。

#### 3.2.2 VR 実験 2：移動速度が異なるNPCの混在比率が被験者の避難行動に及ぼす影響

移動速度の異なる3種類の避難者(NPC)属性が混在した影響を検討した。NPCの移動速度は、健常者1.3m/s、子供1.0m/s、高齢者0.5m/sとした。これらの構成比率を変えることで、「速い」、「中程度」、「遅い」の3水準の群集を設定した。「速い」は、健常者：子供：高齢者の構成比率が3:1:1で、「中程度」は構成比率2:2:1、「遅い」は構成比率1:1:3とした。在館者密度は

表-2 実験1の実験条件

Table 2 Condition of the experiment 1

Case No.	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	1-7	1-8	1-9	1-10
Density	M	M	M	M	L	L	M	M	H	H
Start position	3L	3R	1L	1R	3L	3R	3L	3R	3L	3R
Eye direction	→	→	→	→	←	←	←	←	←	←

Note：“←”：Opposite direction of fire origin，“→”：Direction of fire origin.

“L”：Low density，“M”：Medium density，“H”：High density.

実験1の高密度条件と同様である。実験2の被験者数は15名で、表-3に示した14ケースを実施した。実験の実施ケースの順番はランダムに選定した。

#### 3.2.3 VR 実験 3：デジタルサイネージを用いた避難誘導効果およびSS降下時の避難行動の分析

通路の天井、壁面に設置されたデジタルサイネージによる誘導指示の有無および二段降下式防火シャッター降下時の避難行動を分析対象とした。

実験条件を表-4に示す。実験条件は、NPCの移動パターンを4条件、被験者の避難開始位置を2箇所、避難開始時の向きを2方向とし、誘導方法の条件は、サイネージ設置なし、天井吊り下げ型サイネージ、天井吊り下げ型サイネージ+壁付き型サイネージの3条件とした。SSは、作動しない条件、1段目まで降下する条件、そして1段目の降下後に2段目の降下が始まり完全閉鎖する3条件とした。

サイネージおよびSSの設置位置を図-6に示す。サイネージの表示内容は、感知器発報放送が流れると「火災感知器作動」と表示され、火災感知器作動15秒後に火災断定放送が流れると、「火災発生」およびExit C方向に水平避難を促す内容に切り替わる(図-7)。サイネージとSSが設置されたケースでは、SSの一段目降下中のサイネージの表示は、SSが2mまで降下することとSSの下を通過して水平避難する指示を示した。その後、SSの2段目の降下が始まると、サイネージには、SSの下を通過しないように警告文を表示させた。

NPCの初期位置に対する出口の割り当てを図-8に示す。NPCが通路幅全体を通行できる状態をW、通路幅を狭めた3W/4、W/2、W/4を通行する場合を設定した。

15名の被験者に14ケースをランダムに実施させた。

表-3 実験2の実験条件

Table 3 Condition of the experiment 2

Case No.	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5	2-6	2-7
Evacuees' speed	Fast	Slow	Fast	Slow	Fast	Medium	Slow
Start position	2L	2L	2R	2R	2R	2R	2R
Eye direction	←	←	←	←	→	→	→
Case No.	2-8	2-9	2-10	2-11	2-12	2-13	2-14
Evacuees' speed	Fast	Medium	Slow	Medium	Medium	Medium	Medium
Start position	3L	3L	3L	3R	3R	1R	1R
Eye direction	→	→	→	→	←	→	←

Note：“←”：Opposite direction of fire origin，“→”：Direction of fire origin.

表-4 実験3の実験条件

Table 4 Condition of the experiment 3

Case No.	3-1	3-2	3-3	3-4	3-5	3-6	3-7
Signage	-	-	-	Ceiling	Ceiling	Ceiling	Ceiling
Fire shutter	-	-	-	-	-	-	-
Start position	2R	2R	2R	2R	2R	2R	2L
Eye Direction	←	←	←	←	←	←	←
NPC movement area	W	3W/4	W/2	W	3W/4	W/2	W/2
Case No.	3-8	3-9	3-10	3-11	3-12	3-13	3-14
Signage	Ceiling	Both	Both	-	Ceiling	Ceiling	Ceiling
Fire shutter	-	-	-	1 <sup>st</sup> stage	1 <sup>st</sup> stage	1 <sup>st</sup> stage	1 <sup>st</sup> & 2 <sup>nd</sup> stage
Start position	2R	2R	2R	2R	2R	2L	2R
Eye direction	→	←	←	←	←	←	←
NPC movement area	3W/4	W/2	W/4	W	W/2	W/2	W/2

Note: “←”: Opposite direction of fire origin, “→”: Direction of fire origin.

“Both”: Ceiling mounted signages + Signage in a wall

“Ceiling”: Ceiling mounted signages

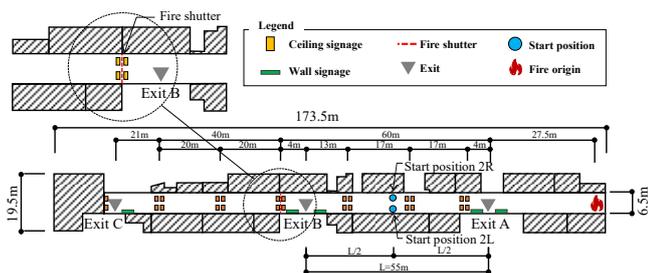


図-6 サイネージおよびSSの設置位置

Fig.6 Installation positions of signage and fire shutter

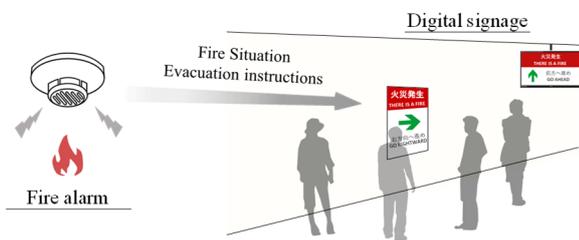


図-7 サイネージの設置と表示内容の例

Fig.7 Image of signage display

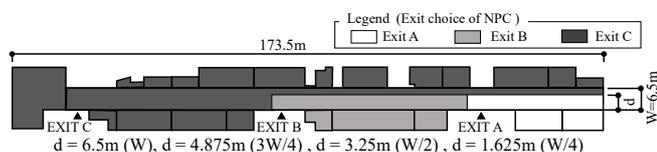


図-8 NPCの避難するエリア

Fig.8 Exit choice of NPC (NPC movement area)

## 4. 実験結果

### 4.1.1 VR 実験 1: 避難開始位置と通路の滞留密度が出口選択に及ぼす影響

実験1の各出口の選択者数およびその割合を表-5に示す。Case 1-1~4の避難開始位置が3Lと3Rでは、約8割の被験者が出口までの距離が最も短いExit Bを選択した。避難開始位置が1Lと1Rでは最も近い出口のExit Aを選択した人は1/3程度で、Exit Bを選択した割合の方がやや高かった。出口がある壁面側の3Lと出口がない壁面側の3Rを比較すると、3Lの方がExit AやExit Cを選択した割合が若干高かった。

火源方向とは逆を向いた状態で避難を開始したCase 1-5~10の開始位置は3Lと3Rであり、いずれのケースでも直近の出口であるExit Bの選択割合が非常に高かった。そして、在館者密度が高の場合では、在館者密度が低や中の場合と比較して、Exit Cを選択した割合が15%と比較的高くなった。Case 1-1~2の3Lと3Rと比較すると出口の選択傾向は同様の傾向を示しており、避難開始時の向きの影響は殆どなかった。また、避難開始位置3Lと3Rの違いによる結果の差はほぼなかった。

以上の通り、Case 1-1~4より、避難開始位置から最も近い出口が非火源方向にある場合には火源と反対方向の出口を選択し、最も近い出口が火源方向にある場合はNPCと対向しても1/3程度は火源方向に避難することがわかった。また、Case 1-5~10より、在館者密度の高い場合には出口が混雑するため、最寄りの出口ではなく火源から離れた出口の選択率の上昇がわかった。従って、避難開始時の位置や向いている方向が同じであっても、出口前の混雑状況によって出口選択が異なる結果となった。

表-5 実験1の出口選択者数  
Table 5 Exit choice tendency

Case No.	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5
Density	Medium	Medium	Medium	Medium	Low
Start position	3L	3R	1L	1R	3L
Eye Direction	→	→	→	→	←
Exit A	P: 2 Percent: 7%	P: 0 Percent: 0%	P: 13 Percent: 43%	P: 13 Percent: 43%	P: 0 Percent: 0%
Exit B	P: 23 Percent: 76%	P: 27 Percent: 90%	P: 16 Percent: 53%	P: 16 Percent: 53%	P: 28 Percent: 93%
Exit C	P: 5 Percent: 17%	P: 3 Percent: 10%	P: 1 Percent: 4%	P: 1 Percent: 4%	P: 2 Percent: 7%
Case No.	1-6	1-7	1-8	1-9	1-10
Density	Low	Medium	Medium	High	High
Start position	3R	3L	3R	3R	3R
Eye Direction	←	←	←	←	←
Exit A	P: 0 Percent: 0%	P: 0 Percent: 0%	P: 0 Percent: 0%	P: 0 Percent: 0%	P: 0 Percent: 0%
Exit B	P: 28 Percent: 93%	P: 30 Percent: 100%	P: 28 Percent: 93%	P: 26 Percent: 87%	P: 25 Percent: 85%
Exit C	P: 2 Percent: 7%	P: 0 Percent: 0%	P: 2 Percent: 7%	P: 4 Percent: 13%	P: 5 Percent: 15%

Note: “←”: Opposite direction of fire origin, “→”: Direction of fire origin.  
“P”: Number of persons.

### 4.1.2 VR 実験 2：移動速度が異なる NPC の混在比率が被験者の避難行動に及ぼす影響

実験 2 での各出口の選択者数およびその割合を表-6 に示す。被験者の避難開始位置が Exit A と Exit B の中央にある 2L, 2R で火源と逆向きで避難を開始した Case 2-1~4 では、殆どの被験者が避難開始時に向いていた方向にある最寄りの Exit B を選択し、NPC の移動速度の違いによる被験者の出口選択への影響は見られなかった。一方、避難開始位置が 2R で火源方向を向いて避難を開始した Case 2-5~7 では、NPC の移動速度が速い条件では、避難開始時の向きと異なる Exit B を選択した割合が 87% と高く、NPC の移動速度が遅いほど、火源方向にある Exit A の選択率が上がった (Case 2-5~7 の順に 13%, 33%, 47%)。これに対して被験者の避難開始位置が 3L で火源方向を向いて避難を開始した Case 2-

8~10 では、同様に Exit A と Exit B が選択され、Exit A の選択率は NPC の移動速度が速い順に 20%, 53%, 53% となり、Exit B の選択割合は NPC の移動速度が遅い条件では 80% と高く、中程度と遅い条件では Exit A と Exit B の選択率が概ね等しくなった。Case 2-11~14 では、移動速度を中程度とし、避難開始位置 3R, 1R での避難開始時の方向による出口選択の影響を比較した。いずれの避難開始位置も非火源側を向いて避難した場合には、非火源側の Exit B を選択した被験者の割合が 80~87% と高かったが、火源方向を向いた場合には、火源側にある Exit A の選択率が非火源方向を向いた場合に比べて 27~53% 上がった。まとめると、被験者が避難開始時に非火源方向を向いた場合には NPC の移動速度の影響は見られずその方向の出口に避難し、火源方向を向いた場合には、NPC の移動速度が速い場合に、NPC の避難方向 (非火源方向) に同調する影響が見られた。

表-6 実験 2 の出口選択者数とその割合  
Table 6 Results of exit choice in each case (n=15)

Case No.	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5	2-6	2-7
NPC speed	Fast	Slow	Fast	Slow	Fast	Medium	Slow
Start position	2L	2L	2R	2R	2R	2R	2R
Eye Direction	←	←	←	←	→	→	→
Exit A	P	0	0	1	0	2	5
	Percent	0%	0%	7%	0%	13%	33%
Exit B	P	15	15	14	15	13	10
	Percent	100%	100%	93%	100%	87%	67%
Exit C	P	0	0	0	0	0	0
	Percent	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Case No.	2-8	2-9	2-10	2-11	2-12	2-13	2-14
NPC speed	Fast	Medium	Slow	Medium	Medium	Medium	Medium
Start position	3L	3L	3L	3R	3R	1R	1R
Eye Direction	→	→	→	→	←	→	←
Exit A	P	3	8	8	9	1	6
	Percent	20%	53%	53%	60%	7%	40%
Exit B	P	12	7	7	6	12	9
	Percent	80%	47%	47%	40%	80%	60%
Exit C	P	0	0	0	0	2	0
	Percent	0%	0%	0%	0%	13%	0%

Note: “←”: Opposite direction of fire origin, “→”: Direction of fire origin.  
“P”: Number of persons.

Case 2-1 と Case 2-2 の全被験者の避難開始位置 2L から Exit B までの移動軌跡を図-9 に示す。図中の各プロットは、0.5 秒毎の被験者の位置を示し、その時点での移動速度をカラーマップで表した。NPC の移動速度が速い Case 2-1 での被験者の移動速度の平均値は 0.84 m/s で、NPC の移動速度が遅い Case 2-2 では移動速度平均値は 0.61 m/s であり、平均値で比較すると Case 2-1 は Case 2-2 より 1.38 倍速かった。こうした傾向は、図-9 に示したプロット表示から、Case 2-2 よりも Case 2-1 のプロットの色が全体的に濃いことから分かる。そして、Case 2-1 の移動軌跡は、Case 2-2 と比較して、通路の幅方向に広がる傾向が見られた。NPC の移動速度が速い場合は、遅い場合に比べ通路上の NPC の密度が低いいため、すり抜けて追い越す行動が起きたと考えられる。一方、Case 2-2 では、移動速度が遅い NPC の割合が高いため、通路が高密度状態となった。それにより被験者は NPC を追い越すことができず後に続くように避難したため、殆どの被験者が同じ経路を辿り移動した。

### 4.1.3 VR 実験 3：デジタルサイネージを用いた避難誘導効果および SS 降下時の避難行動の分析

実験 3 での各出口の選択割合を表-7 に示す。

サイネージのない Case 3-1~3 では、90%以上の被験者が最寄りの Exit B を選択し、Exit C を選択した被験者は 0~13%であったのに対して、天井吊り下げ型サイネージを設置した Case 3-4~8 では、Exit C の選択者は 13~53%となり、増加した。サイネージがない場合には最も近い出口を選択する傾向があったが、サイネージが

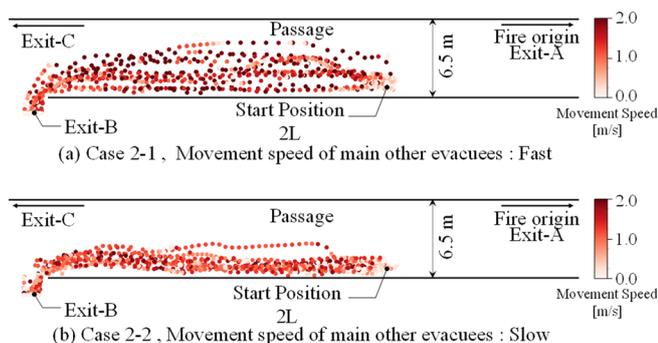


図-9 Case 2-1 および Case 2-2 の全被験者の歩行軌跡  
Fig.9 Player's movement trajectories in cases 2-1 and 2-2

ある場合には水平避難への誘導に効果があることがわかった。また、天井吊り下げ型サイネージに加えて出口付近に壁面サイネージを設置することで、被験者の40~67%が指示に従い Exit C を選択し、誘導効果がさらに高くなることがわかった (Case 3-9~10)。

サイネージがなく SS が降下する場合 (Case 3-11) では、Exit C へ避難した被験者が全体の13%であったが、天井吊り下げ型サイネージを設置した条件 (Case 3-12~13) では、47%から 60%が SS 下を通過し Exit C へ避難した。また、SS が 2 段目の降下中の場合 (Case 3-14) には、87%の被験者が指示に従い SS の下を通過せずに手前の Exit B へ避難した。以上の通り、サイネージによる指示がない場合は、1 段目の SS の降下でその下を通過して良いのかわからず SS 手前の出口へ避難した傾向があったが、サイネージの指示により SS の下を通過して水平避難へ誘導できることを確認した。

表-7 実験3の出口選択者数とその割合  
Table 7 Results of exit choice in each case (n=15)

Case No.	3-1	3-2	3-3	3-4	3-5	3-6	3-7
Signage	-	-	-	Ceiling	Ceiling	Ceiling	Ceiling
Fire shutter	-	-	-	-	-	-	-
Start position	2R	2R	2R	2R	2R	2R	2L
Eye Direction	←	←	←	←	←	←	←
NPC movement area	W	3W/4	W/2	W	3W/4	W/2	W/2
Exit A	P	0	0	0	0	0	0
	Percent	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Exit B	P	14	15	13	12	11	7
	Percent	93%	100%	87%	80%	73%	47%
Exit C	P	1	0	2	3	4	8
	Percent	7%	0%	13%	20%	27%	53%
Case No.	3-8	3-9	3-10	3-11	3-12	3-13	3-14
Signage	Ceiling	Both	Both	-	Ceiling	Ceiling	Ceiling
Fire shutter	-	-	-	○ 1 <sup>st</sup> stage	○ 1 <sup>st</sup> stage	○ 1 <sup>st</sup> stage	○ 1 <sup>st</sup> & 2 <sup>nd</sup> stage
Start position	2R	2R	2R	2R	2R	2L	2R
Eye direction	→	←	←	←	←	←	←
NPC movement area	3W/4	W/2	W/4	W	W/2	W/2	W/2
Exit A	P	1	0	0	0	0	0
	Percent	7%	0%	0%	0%	0%	0%
Exit B	P	10	9	5	13	8	6
	Percent	80%	60%	33%	87%	53%	40%
Exit C	P	2	6	10	2	7	9
	Percent	13%	40%	67%	13%	47%	60%

Note: “←”: Opposite direction of fire origin, “→”: Direction of fire origin.  
“Both”: Ceiling mounted signages + Signage in a wall  
“Ceiling”: Ceiling mounted signages

## 5. おわりに

本研究では、地下街火災時の避難状況を体験できる VR 避難シミュレーターを用いて避難実験を行い、他者の避難行動が被験者の避難行動にどのような影響を及ぼすかを分析した。一連の実験結果より、避難開始位置や向いている方向が同じ条件であっても、NPC の在館者密度や移動速度、移動経路が異なると被験者の避難行動に影響を及ぼすことが明らかになった。

大勢の他の避難者の行動を考慮した実験は現実空間において再現することは困難であり、こうした VR 技術を用いた実験を行えることは避難行動分析評価にとって大きな利点である。一方で、VR 空間での実験は、空間の照度、煙の匂いや温度や熱の変化など、現実の空間との相違点がある。従って、実空間と VR 空間での実験を比較するなど、実際の状況との関係を十分に検討することが必要である。VR 技術を活用した避難行動分析の知見を蓄積し、火災時の避難行動の解明やそれに伴う効果的な安全対策の提案や評価を併せて実施していきたい。

## 謝辞

本研究は、被験者や実験補助者として東京理科大学水野研究室をはじめ多くの方々の協力を得て実施された。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 森山修治, 長谷見雄二他: 大規模地下街における避難行動特性に関する実験研究, 日本建築学会環境系論文集, Vol. 74, No.637, pp.233-240, 2009.
- 2) 藤井皓介, 佐野友紀: 避難経路選択に関する実験的研究: スライド提示による一対比較データの分析を通じて, 日本建築学会環境系論文集, Vol.79, No.704, pp.829-839, 2014.
- 3) 北後明彦: 経路選択時の要因及び行動に基づく大規模鉄道駅の避難経路探索行動, 日本建築学会環境系論文集, Vol. 339, pp.84-89, 1984.
- 4) 田中俊成, 朴聖経, 水野雅之: VR 避難シミュレーターの開発と被験者実験への適用に基づく改善策の検討 ~仮想地下街での火災非難における出口選択傾向の分析~, ライフサポート, Vol.32, No.3, pp.90-96, 2020.
- 5) 田中俊成, 水野雅之: VR 技術を用いた地下街火災時における避難行動の分析 - Player の避難開始時の位置や向きとほかの避難者の移動速度の影響 -, 日本火災学会論文集, Vol.72, No.1, pp.9-24, 2022.
- 6) 円谷信一, 水野雅之他: ポテンシャル法に基づいた避難シミュレーションの開発 その1 被験者実験による避難者モデルの定式化, 日本火災学会研究発表会概要集, pp. 516-519, 2006.
- 7) 平成 12 年建設省告示第 1441 号 2001 年版 避難安全検証法の解説及び計算例とその解説, 井上書院, p.43, 2001.