

# 仮想環境下での交通実験における 複数のリスク再現手法の比較検討

井料 隆雅<sup>1</sup>・樽本 佳奈<sup>2\*</sup>・藤原 龍<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>正会員 神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

E-mail:iryoy@kobe-u.ac.jp

<sup>2</sup>非会員 神戸市 (〒650-0001 神戸市中央区加納町6-5-1)

<sup>3</sup>非会員 西日本高速道路株式会社 (〒530-0003 大阪市北区堂島1-6-20)

仮想環境下の交通実験では、交通事故のような、現実の環境下での再現が事実上不可能なリスクを持つ状況を安全に再現することができる。しかし現実の環境と完全に一致した仮想環境を構築することは、技術的制約に限らず、費用制約、安全性の確保、各種規制などによる制約により一般に困難である。この問題を緩和するには、仮想環境実験の手法や設定の差異が実験参加者の挙動や意思決定にどう影響するかを知っておくことが欠かせない。本研究では、歩行者に関する特定の実験シナリオ下で、視覚環境の再現性やインセンティブ付与手法に差がある複数種類の実験を同一実験参加者で実施した。その結果、没入感の差異よりもインセンティブ付与手法の差異が今回の実験結果に対してはより大きい影響があったことを示した。

**Key Words :** *virtual reality, experimental study*

## 1. はじめに

バーチャルリアリティ (VR) 技術などを活用して仮想環境を構築し、交通事故のような、現実の環境下での再現が事実上不可能なリスクを持つ状況を安全に再現した上で実施する実験は多く実施されている。典型的なものとしてドライビングシミュレータによる実験がよく知られている。歩行者に関する実験についても、例えば本間ら<sup>1)</sup>、目黒ら<sup>2)</sup>、安福<sup>3)</sup>、掛井ら<sup>4)</sup>のような火災等の災害時における避難行動の再現を目指した事例がある。

仮想環境実験で問題となるのは、現実の環境と完全に一致した仮想環境を構築することは一般にきわめて困難であり、特にリスクを同一のものとして再現することは本質的に不可能である、ということである。VR技術の進展は近年特に著しく、視覚的側面での環境の再現に限ればかなりのレベルに達しているといえる。最近ではヘッドマウントディスプレイ (HMD) のようなデバイスが一般消費者向けに販売されるに至っており、費用面での制約も解消されつつあるといえよう。しかし、例えば、「車に当たったら負傷ないし死亡してしまう」という現

実世界に存在するリスクを仮想環境で表現することは非常に難しい。実際に負傷したり死亡したりするリスクをそのまま実験参加者に負わせることはもちろん、それを低減して (たとえば、痛みを与えるデバイスを用いるなど) 実験参加者に与えることも、研究倫理の面から見て当然のことながら忌避されるべきものである。

リスクを再現するための次善の策として、金銭などの代替手段により、リスクのある状況を避けるインセンティブを実験参加者に付与する手法を用いることもある。例えば、仮想空間内で事故に遭った場合には実験参加の謝金から一定金額を引く、という手段である。この方法は、実験参加者にリスクを認識させ、それを避けるよう行動させるのに有用である<sup>5)</sup>。しかし差し引く金額の幅には社会常識 (会計ルールなど明文化されるものも含む) の制約を受ける。たとえば、実験中に仮想的な事故に遭った実験参加者について、謝金を払う代わりに罰金を徴収することが許容される状況はそう多くはないだろう。どのような手段を取るにしても、事故に遭ったときの不効用と同じ大きさの不効用を直接実験参加者に与えることは、現実的には不可能と言わざるを得ない。

仮想環境の再現性の限界による問題を緩和するには、仮想環境実験において用いる手法や設定の差異が実験参

(註) \*の著者は神戸大学に学生として在籍時に本研究に関与しており、現在の所属と本研究はなんら関係はない。

加者の挙動や意思決定にどう影響するかをあらかじめ知った上で実験を設計することが欠かせない。このことを知ることは、どのような点に重点を置いて仮想環境の構築を行うべきか（逆に言えば、どのような点は省略してもよいか）を考える際の重要な指針となる。また、得られた結果がどのようなバイアスをもちうるか、どのように解釈すべきかを知るためにも重要である。当然ではあるが、この差異については、仮想環境と実環境との間で比較されることが本来は望ましい。ドライビングシミュレータにおいてはRisto and Martens<sup>6)</sup>とSantos et. al<sup>7)</sup>がシミュレータと実車の双方を用いた比較実験を行った例がある。前者は車頭間時間で、後者は平均速度で運転挙動を比較している。当然ながら、実車では事故を起こすリスクが皆無ではない。前者ではシミュレータと実車のあいだで差異は認められず、後者では差異が認められる（実車のほうが速度が下がる）結果が得られている。これらの結果は相反しており、仮想環境と実環境における挙動の相違という点では、現状では必ずしも確定的な知見が得られているとはいえない。

本研究では、歩行者に関する特定の実験シナリオ下で実験システムやインセンティブ付与手法に差がある複数種類の仮想空間実験を同一実験参加者で実施し、その差を比較した。実験シナリオとしては、自動運転車が車群をなして走行する一方通行の道路を実験参加者が歩行者として横断する状況を用いる。実験システムとしては没入感が大きく異なる2種類のもの（静止画によるものと、HMDを用いたVRシステムによるもの）を用いた。インセンティブ付与は金銭によるものとし、その与え方について複数のバリエーションを用意した。そのほか、静止画によるものにおいては、事故時に、コンピュータグラフィックス(CG)で書かれた人が車にはねられる映像を事前に実験参加者に見せることの効果もあわせて検証している。本研究における比較はあくまでも仮想環境間の比較であり、それにより得られる知見は、実環境との比べればどうしても限られたものになる。それでもなお、仮想環境構築で注意すべき点や得られた結果の解釈に関する一定の知見を知ることが可能であろう。また、歩行者と自動車が交錯する可能性が高い状況は、上述の既存研究にある自動車単独の実験に比べて危険性がかなり大きく、実環境で実施することは困難でもある。

本稿の構成を以下に示す。第1章で研究の背景と目的を述べた。第2章では実験シナリオを説明する。第3章では静止画による実験システムとVRによる実験システムの詳細を、与えるインセンティブ付与手法とあわせて説明する。第4章では実験結果の分析手法を説明する。第5章では実験結果を示す。第6章ではまとめと今後の課題を述べる。

## 2. 実験シナリオ

自動運転車が車群をなして走行する一方通行の道路を実験参加者が歩行者として横断する状況を考える。その状況は以下のように実験参加者に説明されている：

- あなたは帰宅途中、横断歩道のない道にさしかかりました。あなたから見て右側から車どうしの間を渡れないほど密集した車の列が近づいてきています。
- 車の列の先頭車がやってくる前に渡りはじめ渡れば早く家に着きますが、もしも車に轢かれれば大きなダメージを負います。
- 車は全て自動運転車です。自動運転車ではありますが、歩行者を感知しても停止するとは限りません。また、自動運転車なので運転者の顔を見て渡るか判断できません。もし今渡らなければ、車がやってこなくなるまで2分間待たなければなりません。
- 車の列の先頭車には以下の3種類あります：
  - A) 減速ランプを搭載した車が減速ランプを点灯し、実際に減速する。
  - B) 減速ランプを搭載しておらず、減速するかどうかはわからない。
  - C) 減速ランプを搭載した車が減速ランプを点灯せず、実際に減速せず通過する。
- 最初の車群が抜けてから次の車群が来るまでの間に横断するか判断してください。

最後の項にあるように、実験参加者は道路を横断するか否かを判断して、それに沿った行動することが求められている。図-1にCGで構築した仮想空間の様子を示す。構築の際には3次元都市モデルJapanese Otaku City<sup>8)</sup>の一部を用いた。「減速ランプ」は車両前方に設置され歩行者からの視認性が十分にあるランプである。図-2に先頭車と減速ランプの仮想環境内の画像を示す。HMDによる仮想環境では、直接光と反射光との区別がつかない（本来反射光であるものも直接光で表現される）ので、ランプの視認性は実環境にくらべて大幅に落ちる。この問題を回避するために、減速ランプの大きさは車両の大きさに比してかなり大きめに誇張して描画している。



図-1 構築した仮想空間。この道路を右から左に横断する。



図-2a 先頭車（減速ランプ点灯）



図-2b 先頭車（減速ランプ非搭載）



図-2c 先頭車（減速ランプ消灯）

### 3. 実験システムと実験手法

実験システムは「静止画実験」「VR実験」の2種類を構築した。それぞれの実験の中では、複数のインセンティブ付与手法が用いられている。これを含めて各実験の詳細を示す。

#### (1) 静止画実験

静止画実験では、最大5名の実験参加者を同時に1つの部屋に集め、液晶プロジェクターでスクリーンにCG画像を静止画として全参加者に同時に見せる。CG画像は、図-1で示される映像に図-2の車両のうちいずれか1種類の先頭車を持つ車群が重ね合わされたものである。この映像を見て、実験参加者は先頭車が通過する前に渡るか（「横断」と呼ぶ）、2分間待つか（「待機」と呼ぶ）を判断する。判断結果は配布された回答用紙に記入し、これをもって行動がなされたとする。渡る判断をした場合は、以下の確率で先頭車にはねられると設定する：

- A) 減速ランプ点灯時：3%
- B) 減速ランプ非搭載時：8%
- C) 減速ランプ消灯時：20%

この確率は事前に実験参加者に伝えられている。実際にはねられたか否かの判断はその場で乱数をコンピュータで生成し、指定された確率を基に決定する。その結果は即座に実験参加者に伝えられる。回答の修正を防ぐために、記入にはボールペンを用いるようにし、結果が伝えられる前に回答が記載されることを確認している。また、他の実験参加者の回答が見えないように、参加者間に間隔をおき、さらに小型の衝立を配置している。

はねられた際の不効用を再現するためのインセンティブの付与方法としては以下のものを用いている：

- 【なし】何も与えない
- 【増額定額】はねられなかったときに200円増額する
- 【増額ランダム】はねられなかったときに、50%の確率で400円増額し、50%の確率で何もしない。
- 【減額定額】はねられたときに200円減額する
- 【減額ランダム】はねられたときに、50%の確率で400円減額し、50%の確率で何もしない。
- 【他者定額】はねられなかったときに200円増額する。ただし、同時に参加する実験参加者の2人以上が衝突すると、この増額はキャンセルされる。
- 【他者ランダム】はねられなかったときに50%の確率で400円増額し、50%の確率で何もしない。ただし、同時に参加する実験参加者の2人以上が衝突すると、この増額はキャンセルされる。

上記で「はねられなかった」場合には、横断の選択をして、結果としてはねられなかった場合と、待機の選択をした場合の双方が含まれる。増額および減額は実験参加者にあとで支払われる謝金の金額を調整することにより反映させる。謝金のベース額は、各参加者の謝金総額の期待値が同じになるように調整してある。

待機の選択をした場合は、2分間の待ち時間が1回ごとに累積される。実験終了後、累積された待機時間の合計分だけ実験を実施した部屋で実際に待機することが要求される。待機時には、路側で待機している映像を見せながら簡単な書き取り作業をさせている。

車にはねられてしまった場合の状況にリアリティを持ってもらい、その結果、はねられることに対するリスクを感じてもらうことを期待して、実験開始前に、CGで描画された人がはねられる動画（衝突動画）を見せることを行っている。ただし、この動画には血や肉体が四散するような刺激の強い表現を含めていない（図-3）。比較のため、一部のグループには動画を見せていない。

実験は最初に実験参加者に実験の段取りとシナリオの説明とを行い、習熟を目的とした回答の機会を設定し（この回答結果はその後のインセンティブ付与の際に考慮されない）、その後本実験を行う。実験は3回の回答を

<sup>1</sup> 会計規則等に従った適正な事務手続きを経て実施している。

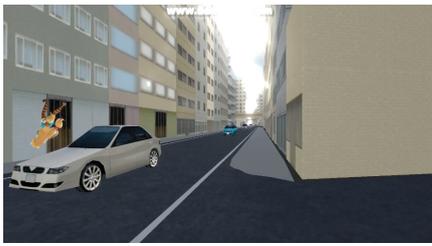


図-3 衝突動画のキャプチャ (はねられる瞬間)

1セットとし、合計3セット (9回) 実施している。セット間では休憩を設定している。同一セットでは後述するインセンティブ付与手法に同一のものを用いる。また、各セット開始前に、どのようなインセンティブ付与がそのセットで行われるかが実験参加者に説明される。セット内では先頭車の減速ランプの有無と点消灯の設定のみが変化する。すべての実験が終了後、待機時間の合計だけ実験参加者を部屋に待機させる。

実験参加者は合計で52名 (男性30名, 女性22名, すべて神戸大学の学生), 実験は2016年11月7日から9日の3日間で行った。グループ数は12グループであった。各グループにおけるインセンティブ付与手法と衝突動画を見せるか否かの設定を表-1にまとめる。グループ1から3と10から12は減額定額・ランダムを, グループ4から6は増額定額・ランダムを, グループ7から9は他者定額・ランダムを割り当てている。衝突動画は原則見せるが, グループ10から12については見せていない。よって, グループ1から3と10から12の差異は, 衝突動画を見せるか否かのみになる。

(2) VR実験

VR実験では、実験参加者を1名ずつ他の部屋から独立した実験室に来訪させ、そこでVR装置を用いた実験を行う。実験装置は、HMD (HTC Vive<sup>®</sup>)、参加者の位置を測定する赤外線センサー (HTC Viveの周辺機器として

表-1 各グループの実験設定 (静止画実験)

グループ	衝突動画	セット1	セット2	セット3
1 (3)	見せる	なし	減額定額	減額RD
2 (5)	見せる	減額RD	なし	減額定額
3 (4)	見せる	減額定額	減額RD	なし
4 (5)	見せる	なし	増額定額	増額RD
5 (4)	見せる	増額RD	なし	増額定額
6 (5)	見せる	増額定額	増額RD	なし
7 (4)	見せる	なし	他者定額	他者RD
8 (5)	見せる	他者RD	なし	他者定額
9 (4)	見せる	他者定額	他者RD	なし
10 (4)	見せない	なし	減額定額	減額RD
11 (5)	見せない	減額RD	なし	減額定額
12 (4)	見せない	減額定額	減額RD	なし

RDはランダムの略。グループのカッコ内は人数を示す。

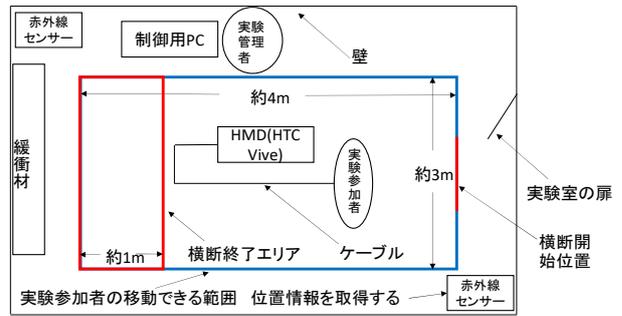


図-4 VR実験室の機器配置図

販売されている), 仮想環境の3Dモデルから画像を生成しHMDを制御するコンピュータ (ソフトウェアはUnity<sup>10)</sup>により実装している) からなる。実験室内のこれらの機器と実験参加者の配置を図-4に示す。HMDのケーブルは、実験中に絡まないように天井からつりさげている。さらに臨場感を増すために環境音も付加している。実験参加者は図-4の右側から左側に部屋の中を歩くことによって仮想環境内の道路を横断する。HMDを装着すると実際の部屋の風景は見えないため、仮想環境内にシャペロン境界 (実環境で壁などの障害物にあらずに安全に移動できるエリアを示す境界) を明示し、さらに、緊急時にはカメラで撮られた実環境の風景を仮想環境の映像にオーバーレイする機能も実装している。さらに安全を期すために、進行方向側の壁には緩衝材を設置している。HMDで見える映像の例を図-5に、実験参加者が実験室内でHMDを装着した写真を図-6に示す。

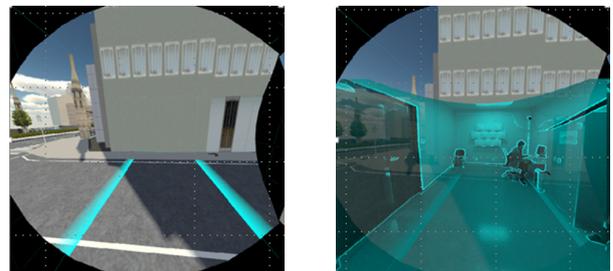


図-5 HMDで見える映像 左: 通常時, 右: 緊急時



図-6 実験室内でHMDを装着した写真

実験で想定する状況は静止画実験と全く同様である。ただし、静止画実験と異なり、VR実験では実験参加者に仮想環境内の道路を自分の足で渡ることが求められている。横断開始のタイミングと歩行速度の選択も実験参加者が自身で行う（走ることは禁止している）。実験参加者の位置は赤外線センサーで常時観測されており、仮想環境内で車に衝突した際には自動的に衝突判定がなされる。衝突した場合は、HMDの映像を暗画面にさせて、実験参加者に車にはねられてしまったことを伝える（この暗画面はあくまでも単に暗い画面であり、刺激的な映像は一切含まない）。先頭車の減速ランプの意味は第2章でしめしたシナリオで与えた通りであり、仮想環境内での先頭車の挙動はこのランプとおりになるようにしている。静止画実験と異なり、VR実験では、「実際に衝突したかどうか」を、仮想環境内の実験参加者の行動に依存した衝突判定により決定するため、減速ランプの状況と衝突確率は1対1には対応しないことに注意したい。

はねられた際の不効用を再現するためのインセンティブの付与には以下のものを用いている：

- 【なし】何も与えない
- 【増額定額】はねられなかったときに200円増額する
- 【減額定額】はねられたときに200円減額する
- 【減額1ショット】はねられたときに1000円減額する。

また、この時点で当該セットの実験を終了する。減額インセンティブが付与されているときの謝金の基準額は1800円であり、ここから減額分が引かれる。ただし負の値にはならないようにしている。

先頭車の前で横断しなかった場合、それ以降に車群が2分間連続して走行するために、実験参加者はその2分間横断することができない。このときは、実験参加者は実際に2分間だけ仮想環境内で待つ（立ったままそこで過ごす）こととなる。車群内の車間距離は非常に狭くなっており、無理に横断すると必ず衝突する。

実験は最初に実験参加者に実験の段取りとシナリオの説明と行い、最初に習熟を目的とした横断を実施し（この際の結果はその後のインセンティブ付与の際に考慮されない）、その後本実験を行う。実験は3回の横断を1セットとし、合計3セット（9回）実施している。セット間では休憩を設定している。同一セットで与えるインセンティブには同種のものを用いる。また、各セット開始前に、どのようなインセンティブ付与がそのセットで行われるかが実験参加者に説明される。セット内では先頭車の減速ランプの有無と点消灯の設定のみが変化する。

実験参加者は合計で51名（男性28名、女性23名、すべて神戸大学の学生）、実験は2016年12月5日から22日のあいだの11日間で行った。実験参加者のうち、50名は静止画実験にも参加している。実験参加者は12のグループに割り当てられ、各グループでは同一のインセンティブ

表-2 各グループの実験設定（VR実験）

グループ	セット1	セット2	セット3
1 (5)	なし	減額定額	減額1S
2 (4)	なし	減額1S	減額定額
3 (5)	減額定額	なし	減額1S
4 (4)	減額定額	減額1S	なし
5 (5)	減額1S	なし	減額定額
6 (4)	減額1S	減額定額	なし
7 (5)	なし	増額定額	減額1S
8 (4)	なし	減額1S	増額定額
9 (5)	増額定額	なし	減額1S
10 (4)	増額定額	減額1S	なし
11 (4)	減額1S	なし	増額定額
12 (4)	減額1S	増額定額	なし

1Sは1ショット略。グループのカッコ内は人数を示す。

付与手法が同一の順番で適用されるようにしている。グループごとのインセンティブ付与手法を表-2にまとめる。グループ1から6は減額定額を、グループ7から12は増額定額をふくむ。いずれのグループも「なし」と減額1ショットを必ず含む。

#### 4. 分析手法

静止画実験、VR実験いずれとも、

- インセンティブの種類
- 静止画実験については衝突動画を見せたか否かを説明変数とし、被説明変数を横断したか待機したかとするロジットモデルによって、これらの説明変数が実験参加者の判断に与える影響を分析する。なお、先頭車の減速ランプの状況（点灯、非搭載、消灯）については、説明変数には含めず、状況ごとにモデルパラメータを独立に推定する。このロジットモデルによる分析に加えて、静止画実験とVR実験を比較するために、インセンティブが「なし」のときについて、減速ランプの状況ごとに横断と待機をそれぞれ選択する回数を集計的に比較する。

##### (1) 静止画実験に適用するモデル

静止画実験においては、

- 衝突動画を見ることの効果を評価するモデル
- 衝突動画を見ている場合に、各インセンティブ付与手法を比較評価するモデル

の2種のモデルを用いる。以下でそれぞれの詳細を説明する。以降では、待機する場合の確定効用は常に0とする。また、添字*i*は個々の回答ないし横断を、*s*は減速ランプの状況（点灯、非搭載、消灯の3種類）を示す。 $V_i^s$ 、 $\beta^s$ はどのモデルでも横断の確定効用と定数項を示す。

「衝突動画を見ることの効果を評価するモデル」は、

$$V_i^s = \sum_{k \in \{MS, MR, VD\}} \alpha^{k,s} \delta_i^k + \beta^s \quad (1)$$

と定式化される。ここで、 $\alpha^{k,s}$  は係数、 $\delta_i^k$  はダミー変数である。 $k$ はMS（減額定額）、MR（減額ランダム）、VD（衝突動画を見せる）のいずれかであり、それぞれの条件が適用される場合に1を、それ以外で0をとる。このモデルにおいては、衝突動画を見たか否か以外の条件が一致するグループ1から3と10から12の結果のみを用いる。これらのグループでは、増額や他者に関するインセンティブ付与手法は適用されていない。

「衝突動画を見ている場合に、各インセンティブ付与手法を比較評価するモデル」は、

$$V_i^s = \sum_{k \in \{MS, MR, PS, PR, OS, OR\}} \alpha^{k,s} \delta_i^k + \beta^s \quad (2)$$

と定式化される。 $k$ はMS（減額定額）、MR（減額ランダム）、PS（増額定額）、PR（増額ランダム）、OS（他者定額）、OR（他者ランダム）のいずれかであり、それぞれの条件が適用される場合に1を、それ以外で0をとる。このモデルにおいては、衝突動画を見たグループであるグループ1から9の結果のみを用いる。

(2) VR実験に適用するモデル

VR実験においては、

$$V_i^s = \sum_{k \in \{MS, PS, SS\}} \alpha^{k,s} \delta_i^k + \beta^s \quad (3)$$

と定式化されるモデルのみを用いる。 $k$ はMS（減額定額）、PS（増額定額）、SS（減額1ショット）のいずれかであり、それぞれの条件が適用される場合に1を、それ以外で0をとる。

5. 実験結果

(1) 静止画実験の結果

静止画実験での回答総数は468個であり、そのうち293個が「横断」を回答したものであった。減速ランプの状況別に集計すると、「点灯」で156個中50個、「非搭載」で156個中100個、「消灯」で156個中143個であった。全体として、シナリオで想定されている横断行動と回答のあいだには整合性があることがわかる。

衝突動画の効果を見るモデルの結果を表-3にまとめる。結果は減速ランプの状況ごとにまとめている。消灯時には定数項以外のどのパラメータも5%有意にならなかったため、結果を省略している。

表-3a 衝突動画効果モデルの推定値（点灯,N=75）

係数	推定値	標準誤差	p値
定数項	-0.163	0.497	0.7437
減額定額	-1.975	0.697	0.0046
減額ランダム	-2.773	0.858	0.0012
動画を見せる	0.866	0.616	0.1599

表-3b 衝突動画効果モデルの推定値（非搭載,N=75）

係数	推定値	標準誤差	p値
定数項	1.131	0.578	0.0503
減額定額	-1.560	0.715	0.0290
減額ランダム	-1.926	0.719	0.0074
動画を見せる	1.471	0.553	0.0078

いずれにおいても、動画を見せる以外の推定値は1%ないし5%有意で負であり、減額のインセンティブを付与することが横断の選択を抑制することがわかる。一方、「動画を見せる」の推定値はいずれも正であり、なおかつ減速ランプ非搭載時には1%有意で正となっている。このことは、動画を見せて横断の危険性を想起させようとしたことが、実験結果としては逆方向に（横断を促進するように）働いてしまっていることを意味する。

各インセンティブ付与手法を比較評価するモデルの結果を表-4にまとめる。結果は減速ランプの状況ごとにまとめている。消灯時には定数項以外のどのパラメータも5%有意にならなかったため、結果を省略している。いずれの結果においても、定数項以外の係数はすべて負であり、点灯時については1個（他者ランダム）を除き5%有意で、非搭載時については2個（増額定額、増額ランダム）が5%有意であった。標準誤差を考慮すれば、各係数のあいだには有意な差があるとはいえないが、全体的には定額のほうがランダムよりも大きめの値となる傾向がある。増額、減額、他者のあいだには整合性のある大小関係は特に認められない。

いずれのモデルであっても、インセンティブを付与した場合には、ない場合に比べて確定効用が1~2程度減少する。このことは、インセンティブ付与は概して横断の回答を抑制するのに相当の効果があることを示している。

表-4a 付与手法比較評価モデルの推定値（点灯,N=117）

係数	推定値	標準誤差	p値
定数項	0.470	0.329	0.1533
減額定額	-2.079	0.842	0.0135
減額ランダム	-2.079	0.842	0.0135
増額定額	-1.769	0.730	0.0153
増額ランダム	-1.386	0.677	0.0406
他者定額	-1.674	0.736	0.0229
他者ランダム	-1.281	0.685	0.0615

表-4b 付与手法比較評価モデルの推定値（非搭載,N=117）

係数	推定値	標準誤差	p値
定数項	1.705	0.444	0.0001
減額定額	-1.368	0.735	0.0626
減額ランダム	-0.606	0.801	0.4491
増額定額	-1.705	0.695	0.0141
増額ランダム	-1.417	0.699	0.0426
他者定額	-0.894	0.747	0.2315
他者ランダム	-1.235	0.723	0.0874

(2) VR実験の結果

VR実験での横断回数は458回であり、そのうち248個が「横断」を回答したものであった。実験計画で用意していた横断回数は459回であったが、減額1ショットが適用されるセットの2回目で衝突することが1回だけ発生し、そのセットの3回目の横断はキャンセルされたため、1回だけ欠測となっている。減速ランプの状況別に集計すると「点灯」で152回中54回、「非搭載」で153回中71回、「消灯」で153回中123回であった。インセンティブ付与手法別で集計すると、「なし」が153回中114回、「減額定額」が81回中42回、「減額定額」が72回中39回、「減額1ショット」が152回中53回であった。全体として、シナリオで想定されている横断行動と回答のあいだには整合性があることがわかる。また、静止画実験での横断回数を減速ランプの状況別の集計と比較すれば、若干であるが横断した回数が少なくなっている。モデルの結果を表-5にまとめる。結果は減速ランプの状況ごとにまとめている。

いずれのケースを見ても、定数項以外の係数は負であり、一部を除いて5%有意で負となっている。また、減額1ショット時におけるインセンティブの効果が他の種類のインセンティブに比べて大きく出ている。増額と減額の差異はそれに比すれば多きくないものの、全体的には減額のほうがやや効果が大きい結果となっている。

(3) 静止画実験とVR実験の結果の比較

インセンティブが「なし」の場合の静止画実験とVR実験の横断を選んだ回数を比較したグラフを図-7に示す。両者のあいだにはほとんど差がみられないことがわかる。

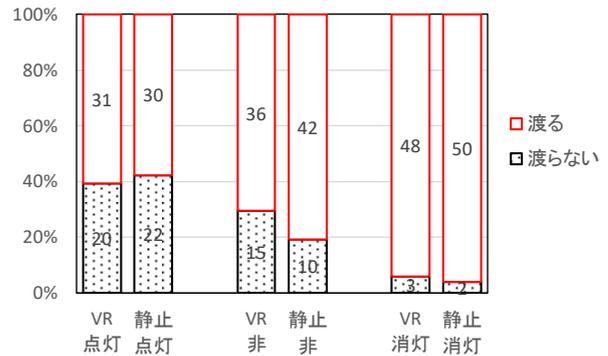


図-7 インセンティブ「なし」のときの横断回数。グラフ内数字は観測回数。非は非搭載の略。

6. まとめと今後の課題

本研究では、仮想環境下で実施する交通実験において、視覚環境の再現性やインセンティブ付与手法の差が実験結果にどう影響するかを知ることを目的とし、特定の実験シナリオにおいて複数種類の実験を実施し、その結果を比較した。実験シナリオとしては歩行者が道路を横断する状況を想定した。静止画による実験とVRによる実験の2種類の実験システムを構築し、それぞれにおいてほぼ同一の実験参加者の集団を集め、実験に参加してもらった。各実験システムでの実験に際しては、金銭を用いる複数のインセンティブ付与手法を用いた。

静止画実験の結果からわかることは、金銭を用いるインセンティブを付与する際に、その付与の方法がどうであっても（謝金を増額しようと、減額しようと、そのほかの細工をしようと）結果は大きくは変わらない、ということである。このことは、金銭を用いるインセンティブで事故等のリスクを再現する際には、あまり凝った設定を導入するメリットがないことを示唆する。実験参加者への説明を単純にするためにも、単に「リスクが現実化したときに、一定額を減額する」インセンティブ付与手法が推奨される結果になったといえよう。

VR実験では、金銭によるインセンティブの金額を大きくするために、減額1ショットと名付けた手法を導入した。減額される金額が5倍であるこの手法の効果は大きいことが結果より示された。このことは、金銭によるインセンティブ付与においては、その額の大小が重要であることを示すものといえる。これは、事故のような環境でのダメージが大きいリスクを対象とするのであれば、減額1ショットのように、リスクが1回でも現実化したときに大きい額の減額を適用する一方で、謝金が許容される最低金額を下回らないように減額の上限を定めるインセンティブ付与手法を推奨する結果といえよう。

インセンティブ付与がないときに、同一シナリオでの静止画実験とVR実験の結果を比較すると、ほぼ差がな

表-5a 衝突動画効果モデルの推定値 (点灯, N=152)

係数	推定値	標準誤差	p値
定数項	0.357	0.285	0.2100
減額定額	-1.222	0.509	0.0163
増額定額	-0.868	0.509	0.0881
減額1ショット	-2.172	0.497	0.0000

表-5b 衝突動画効果モデルの推定値 (非搭載, N=153)

係数	推定値	標準誤差	p値
定数項	0.876	0.307	0.0044
減額定額	-1.250	0.498	0.0120
増額定額	-1.043	0.512	0.0418
減額1ショット	-1.948	0.445	0.0000

表-5c 衝突動画効果モデルの推定値 (消灯, N=153)

係数	推定値	標準誤差	p値
定数項	2.773	0.595	0.0000
減額定額	-1.023	0.805	0.2035
増額定額	-1.438	0.779	0.0650
減額1ショット	-2.167	0.663	0.0011

い結果が得られた。このことは、VRにより臨場感や没入感を高めることが、実験結果に常に大きく影響するとは限らないことを示している。もちろん、今回構築したVRシステムの臨場感や没入感が不十分であった可能性はある。しかし、実験終了後に参加者に対して実施したアンケートでは、臨場感や没入感に対して肯定的な意見も多く、少なくとも静止画実験に比べればVR実験のほうがこれらの点で優位であることは疑いづらい。HMDの普及などによりVRを使用することに対する障壁は下がっているものの、そのために必要な費用や手間は無視できるものでない。また、Web上で実施可能な簡易な実験システムを用いて大量の実験参加者を確保するなど、VRを採用しないことによるメリットも存在する。VRによる交通実験は常に推奨されるわけではなく、そのメリットとデメリットの双方を勘案して導入するか否かを定めるべきであろう。

今後の課題を述べる。本研究で得られた知見は特定の実験シナリオに依存するものである。異なるシナリオを用いた実験により、これらの知見について検証を繰り返すことが求められる。実環境下と仮想環境下の結果を比較することも重要である。ただし、実環境下のリスクがあるままで実験を行うことは難しいことも多い。視覚環境のみ実環境と仮想環境の2種類を用意し、実環境は安全を確保する対策を十分実施し、リスクを再現するためのインセンティブ付与手法は同一とした上での比較も検討するべきであろう。本研究では静止画実験とVRの差異がほとんどなかったが、異なる実験シナリオにおいては大きい差がでることもあるだろう。そのようなシナリオがどのようなものであるかを知ること重要であるといえよう。

**謝辞**：本研究の実施にあたっては、神戸大学大学院人文科学研究科喜多伸一教授と、同経済経営研究所下村研一教授から助言を受けた。本研究は科学研究費補助金「リスク存在下での交通行動を観測するための仮想環境実験手法の構築と評価」（挑戦的萌芽：16K14319）の援助により実施された。この場を借りて謝意を表す。また、

本研究で実施された実験は、すべて、神戸大学大学院工学研究科の「人を直接の対象とする研究倫理委員会」における審査を受け、承認の判定を受けて実施されている。

#### 参考文献

- 1) 本間正彦, 渡辺真知子, 土井暁, 吉野攝津子, 大木淳: 地下街火災 VR シミュレータの開発: その 2 避難シミュレーションと VR シミュレータシステム, 学術講演梗概集. F-1, 都市計画, 建築経済・住宅問題, Vol. 2000, pp. 397-398, 2000.
- 2) 目黒公郎, 芳賀保則, 山崎文雄, 片山恒雄: バーチャルリアリティの避難行動シミュレータへの応用, 土木学会論文集, Vol. 1997, No. 556, pp. 197-207, 1997.
- 3) 安福健佑: 高精細没入型避難シミュレータの開発と避難経路選択に関する分析, 日本建築学会計画系論文集, Vol. 74, No. 640, pp. 1265-1270, 2009.
- 4) 掛井秀一, 佐藤博臣, 佐古順彦: VR 避難シミュレータを用いた避難実験: 避難経路図・他の避難者の影響(防火, 構造系), 日本建築学会関東支部研究報告集, Vol. 68, pp. 185-188, 1998.
- 5) 藤原龍, 三角耕太, 井料隆雅: 仮想環境下の実験におけるリスク回避行動の観測のための手法の検討, 土木計画学研究発表会・講演集, Vol. 53, 2016.
- 6) Risto, M. and Martens M. H.: Driver headway choice: a comparison between driving simulator and real-road driving, *Transportation Reserch Part F*, Vol. 25A, pp. 1-9, 2014.
- 7) Santos, J., Merat, N., Mouta, S., Brookhuis, K., and de Waard, D.: The interaction between driving and in-vehicle information systems: Comparison of results from laboratory, simulator and real-world studies, *Transportation Reserch Part F*, Vol. 8, No. 2, pp. 135-146, 2005
- 8) 株式会社ゼンリン: ZENRIN City Asset Series, Japanese Otaku City, <http://www.zenrin.co.jp/product/service/3d/asset/>, 2017/7/31 アクセス.
- 9) HTC Corporation : <https://www.vive.com/jp/>, 2017/7/31 アクセス.
- 10) 株式会社ユニティ・テクノロジーズ: <http://japan.unity3d.com/>, 2017/7/31 アクセス.

(2017.7.31 受付)

## COMPARATIVE STUDY OF RISK REPRODUCTION METHODS IN TRAFFIC EXPERIMENT UNDER VIRUAL ENVIRONMENT

Takamasa IRYO, Kana TARUMOTO, and Ryu FUJIWARA