

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

藤原 龍¹・三角 耕太²・井料 隆雅³

¹学生会員 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: 156t137t@stu.kobe-u.ac.jp

²学生会員 京都大学 大学院工学研究科都市社会学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: misumi.kota.67m@st.kyoto-u.ac.jp

³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: iryo@kobe-u.ac.jp

仮想環境下の実験では多様な状況の実空間を視覚的に再現することができる。しかし実空間には存在する身体的な危険まで再現することは困難であり、そのような状況を想定した観測ができない。この問題を解決するため、本研究では危険に起因するリスクを回避する行動を再現し観測するための実験手法を提案する。方法としては金銭的な動機付け（実験参加者の謝金を調整する）と時間的な動機付け（実験時間中に無駄な時間を費やさせる）の2つを検討した。これらの方法を実際に仮想環境下での交通行動実験に適用した結果、実験時間による手法では有意な効果が認められなかった一方で、金銭による方法では、危険を回避する選択肢を取る傾向が見られ、これが仮想環境下で危険を回避する行動を観測するための有効な手段であることが確認できた。

Key Words : *virtual reality, risk-averse behaviour, experimental study of transport behaviour*

1. はじめに

交通行動を観測する方法としては、実社会に現存する環境における人々の行動を観測するほかに、何らかの手段により人工的に構築した環境の中での人の行動を観測する方法がある。後者の方法は、人工的に環境の条件を制御して、それに対して人の行動がどう変化するかを観測することが可能であり、条件の制御が難しい実社会での観測にくらべてより科学的に信頼性の高い結果を得ることが可能になることが期待できる。本稿では、特に後者のような観測を、その条件の制御可能性に着目し「実験」と呼ぶこととする。

実験のために人工的環境を構築する方法には大きく分けて2つのものが考えられる。ひとつは、実際の移動空間（道路など）や移動体（車両など）を模した構造物を実空間に構築する方法である。もうひとつは、コンピュータ内に実空間を模した構造物のモデルを電子的に構築し、それが実験参加者に与える刺激を何らかの電子デバイスで再現する方法である。前者の代表的な例として、数十名以上の実験参加者を一度に集め、各種の指示を与えて実際に歩いてもらうことにより実施する歩行者交通

流実験^{1,2}がある。後者の代表的な例は、運転席を模した装置に車外の風景をディスプレイやプロジェクター等で投影するドライビングシミュレータである。後者の方法により実施される実験を、以下では特に「仮想環境下の実験」と呼ぶ。また、後者において電子的に構築される移動空間を「仮想環境」と名付ける。

仮想環境下での実験には、実空間での実験に比べて以下のメリットがある。まず、移動空間を仮想空間に実空間に構築するコストは、実空間下でのコストに比べて圧倒的に小さい。特に一定の広さを持った街区や道路網をもつばら実験のために実空間内に構築することは費用の面から一般にはほぼ不可能であるが、仮想環境であれば現実的な費用でこれが可能となる。次に、仮想環境では、実空間においては危険が伴うような環境下での実験を、危険を伴うことなく実施することが可能である。例えばドライビングシミュレータで交通事故を再現するような状況である。また、災害時における避難行動を仮想環境下で観測した事例も多く存在する。例えば本間ら³、目黒ら⁴、安福⁵、掛井⁶などである。

一方で仮想環境下での実験にはデメリットもある。まず指摘すべき点は、仮想環境において人間が受ける感覚

刺激は実空間におけるそれと完全に一致させることは困難であり、その差により実験結果にバイアスが発生する可能性がある、ということである。ただしこの問題については仮想環境構築に用いる視覚機器に関する各種の技術革新により一定程度緩和することは可能であり、将来的にはあまり問題とならなくなる可能性もあろう。

仮想環境下での実験がもつより大きい問題は、「仮想環境下での実験に参加する人は、実空間ではその人自身（あるいは他者）に危険が及びかねないような行動をとることを避ける動機づけを持たない」というものである。メリットのところでも挙げたように、仮想環境下での実験では、実空間においては危険が伴うような環境下での実験を、危険を伴うことなく実施できる。しかしこのことは、実験参加者は、仮想環境下でそのような危険を避けるよう行動する必要がないことも意味する。このことは、特に交通事故に関連する実験や、災害時の交通行動に関連する実験を行った際に、実験参加者が「仮想環境だから回避しなくても構わない」と考えて、過剰にリスクをとる行動をする可能性があることを意味する。

仮想環境下での行動を、完全に実空間におけるものに一致させるのは不可能としても、それをできるだけそれに近づけるためには、実際に存在する物理的な危険に代えて、何らかの負の動機づけを実験参加者に与える必要があろう。まず考えられるのは、仮想環境内で事故などの実際のダメージが発生した際に、実験参加者に支払う謝金の金額を減額するという方法である。あるいは、実験時に一定時間だけ無駄に時間を費やさせるなどの方法も考えられよう。いずれの方法にしても、実際に存在する物理的な危険の不効用と同等程度の負の動機づけを定量的に与えることは実務的に難しい。どのような工夫をすれば、実験参加者がよりリスクを回避するようになるかを検討することは、仮想環境下での実験の結果の信頼性を向上させるためには必要であろう。

本稿では、負の動機づけの手法として、特に金銭による手法と時間による手法のいずれかを用了際に、実験参加者が、どの程度実験条件として設定されたリスクを回避するかを検討する。加えて、負の動機づけに不確実性を持たせる（例えば、実際に危険に遭遇したときに、謝金がいくら減るかをあらかじめ伝えずに、確率的に変化させる）ことにより、どれだけ実験参加者が仮想環境下のリスクを回避するかを検討する。

2. 実験のための仮想環境の構築

(1) シナリオ設定

本研究では、移動時の経路選択において「より短い危険な経路」と「より長い安全な経路」2つうちいずれを実験参加者が選択するかを観測することを意図し、ある

仮想的な状況を設定した。この仮想的な状況は、実験参加者には以下の文言により説明されている（内容は一部省略されている）。

- ある市街地の付近には活火山が存在しており、現在その火山が噴火して有毒なガスが市街地内に蔓延し、市街地に住むことはとても危険であり、人の少ないゴーストタウンと化しています。インフラの整備がおろそかになり、橋や道路が陥落する恐れのある状況です。
- あなたはその市街地の状況を調査することになりました。あなたは近未来の乗り物であるニュービークルによって市街地を調査しますが、ニュービークルの重量が大きく、移動中に道路が陥落する危険があります。陥落すると、体にダメージを負うばかりではなくこの市街地はゴーストタウンで助けを求めることもできません。
- 道路には対象物の危険度を光ることによって知らせるセンサーが設置されています。センサーには4種類あります。危険率0%を意味する白色のセンサー、危険率50%を意味する赤色のセンサー、危険率10%を意味する黄色のセンサー、危険率1%を意味する青色のセンサーの4種類です。
- 市街地には2経路あり、1つ目の経路は白いセンサーが置かれていて、必ず安全ではあるが遠回りである経路、2つ目の経路は赤、黄、青のどれかのセンサーが置かれ、それぞれの色が意味する確率で大きな被害を受けることはあるが、近道である経路といった2経路のどちらかを選択し歩行してもらいます。それぞれの経路の所要時間は安全な経路が4分程度、危険な経路が無事に歩行することができれば2分程度となっています。

実験参加者は、上記で示したシナリオを再現した仮想環境下で、指定された回数だけ歩行を行う。

(2) ヘッドマウントディスプレイによるVR装置の構築

(1)のシナリオで示した市街地を模した仮想環境を構築するために、ヘッドマウントディスプレイ (HMD) を用いたVR(Virtual Reality: 仮想現実)装置を構築した。この装置は、

- HMD : Oculus Rift⁷⁾ (Oculus社)
- 3次元都市モデル : Japanese Otaku City⁸⁾ (ゼンリン)
- 都市モデルを格納した画像生成用コンピュータ
- 椅子 (通常のオフィス用の回転する椅子)
- 椅子の方向を観測する光学センサー
- ゲームコントローラー

から構成される。光学センサーは、椅子に装着されたディバックに設置された発光ダイオードと、その光を天井から観測するカメラと、その映像を解析して椅子が向い

ている方向を算出し、それを画像生成用コンピュータに送信するコンピュータの3つから構成される。図-1に全体の構成図、図-2に実際の装置の写真を示す。

HMDは実験参加者の頭部に装着され、実験参加者の両眼に別々に映像を投影し、それにより立体視を実現している。HMDには方向センサーが搭載されており、頭の向いている方向を検知する。これにより、実験参加者が向いた方向の景色を正しく投影することができるようになっている。図-3に投影される景色の例を示す。以上のHMDの機能はOculus Riftがあらかじめ有しているものであり、本研究ではその機能をそのまま用いている。

椅子は、着席型の「ニューモビリティビークル」を模している。実験参加者は、椅子に座り、コントローラーで移動速度を決定して3次元都市モデル内の道路上を移動する。移動方向は椅子の方向で決定する（座ったまま、足で床をけて回転させる）。

図-4に、(1)で設定したシナリオ内で指示される2経路を都市モデル上で図示した。いずれの経路上にも、危険度を示すセンサーを模した直方体（図-3の景色にも含まれている）が一定間隔で設置されている。ただし、安全とされるほうの経路（大回りの迂回路）については、このセンサーは常に白色を示している。



図-3 HMDを通じて投影される景色の例



図-4 シナリオ内で選択される2つの経路

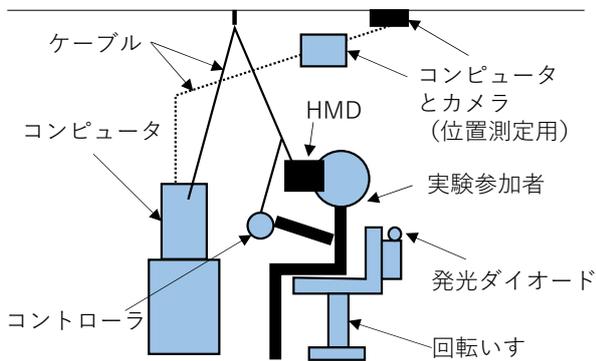


図-1 VR装置の構成図



図-2 VR装置の写真

(3) 負のインセンティブの付与方法

実験参加者が近道を選択した場合には、センサーの色が示す確率（赤：50%、黄：10%、青：1%）で、歩行中に道路が陥没し、実験参加者はそれ以上歩行を続けることができなくなる。ただしこれはあくまでも仮想的に発生するものであり、実際に実験参加者がけがをしたり、助けを得られず孤立したりするわけではない。本実験では、上記の仮想的な道路陥没に実験参加者が遭遇したときには、実験管理者が口頭でその事実を伝え、そこでその回の実験を中止させる。

仮想的な道路陥没に1回遭遇したときにこうむる負のインセンティブとしては、以下の5種類を設定した。

- 【金銭確定値】250円を謝金から減額する。
- 【金銭ランダム】0円から500円の間ランダムな値の金額を謝金から減額する。
- 【時間確定値】実験時間を10分追加する。
- 【時間ランダム】実験時間を0分から20分の間ランダムな値だけ追加する。
- 【なし】負のインセンティブを加えない。

ランダムな値については、実際に遭遇した際に、コンピュータで乱数を発生させ、その値を参加者にその場で知らせている。

(4) 実験計画

実験は35名（うち男性29名，女性6名）の実験参加者に謝金の支払いを前提として参加を依頼し，2015年12月7日より18日のあいだの10日間のあいだに実施した。本実験は，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（受付番号27-07）実施されている。

各参加者は装置への習熟のほか，合計3セットの実験に参加した。1セットの実験は3回の実験により構成される。また，1回の実験は，シナリオに定められた歩行を1回行うことに相当する。セット間には休憩時間を設定している。

実験参加者には1番から35番の通し番号をつけ，その番号に従って，各セットの各回の実験においてどのような条件で実験を行うかを決定した。決めるべき条件は「近道沿いに設置したセンサーの色」「負のインセンティブの付与方法」の2種である。前者は3種類，後者は5種類あるので，全体では15種類のパターンがある。3セットの実験ではすべてのパターンは実施できないので，センサーの色については表-1に示す要領で，負のインセンティブの付与方法については表-2に示す要領で，それぞれ各実験参加者に割り付けた。

3セット9回の実験すべてで道路が陥没した場合には，金銭ないし時間で与える負のインセンティブが実務的に許容できない程度まで大きくなる。これを防ぐために，同一セット内で一度陥没した場合には，そのセット内の残りでは近道を選択できなくなるようにしている。

3. 実験結果とその解析

実験結果およびその解析結果を示す。実験結果を集計的に示したのちに，分散分析により結果により影響を与える要因を抽出する。その要因を変数として二項ロジッ

表-1 センサーの色の出現順番

参加者No.	第1セット	第2セット	第3セット
1~12	赤→黄→青	黄→青→赤	黄→赤→青
13~24	黄→赤→青	赤→黄→青	黄→青→赤
25~35	黄→青→赤	黄→赤→青	赤→黄→青

表-2 負のインセンティブの付与方法の出現順番

参加者No.	第1セット	第2セット	第3セット
1, 13, 25	なし	時間確定値	金銭ランダム
2, 14, 26	なし	金銭ランダム	時間確定値
3, 15, 27	なし	時間ランダム	金銭確定値
4, 16, 28	なし	金銭確定値	時間ランダム
5, 17, 29	金銭ランダム	なし	時間確定値
6, 18, 30	時間確定値	なし	金銭ランダム
7, 19, 31	金銭確定値	なし	時間ランダム
8, 20, 32	時間ランダム	なし	金銭確定値
9, 21, 33	時間確定値	金銭ランダム	なし
10, 22, 34	金銭ランダム	時間確定値	なし
11, 23, 35	時間ランダム	金銭確定値	なし
12, 24	金銭確定値	時間ランダム	なし

トモデルでより詳細な分析を行う。なお，35名の実験参加者のうち，2名（18番と34番）についてはHMDによる酔いを訴えたために実験を途中（2セット目以降）で中止した。実施した実験回数は3回×3セット×33名+3回×1セット×2名=303回であった。このうち12回は，「同一セット内で一度陥没した場合には，そのセット内の残りでは近道を選択できない」のルールにより，選択肢が1個しか与えられていなかったため，最終的な観測数は303回-12回=291回である。

(1) 集計分析

「近道沿いに設置したセンサーの色」「負のインセンティブの付与方法」の合計15通りのそれぞれの組み合わせにおいて，何人が近道の経路を選択したかを集計シグラフで図示する。

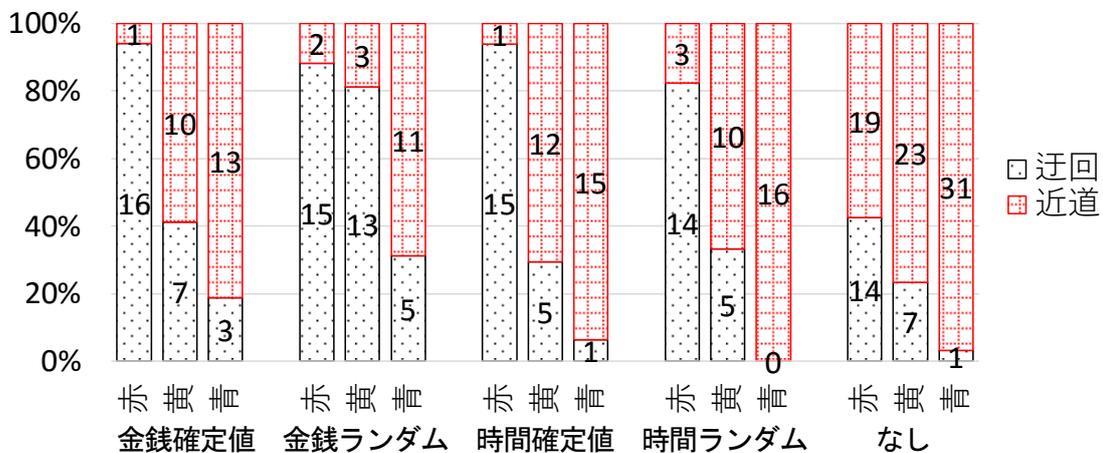


図-5 各実験条件における各経路の選択数

図-5に結果を示す。グラフから視覚的に容易に確認できる傾向は以下の2点である：

1. インセンティブの付与方法がどの場合でも、センサーの色が青，黄，赤になる順で，近道をとる実験参加者の数が減る。
2. インセンティブの付与方法が【なし】の場合は，他のどの方法に比べても近道が多く選ばれている。このうち1.については一見すれば当然のようにも見えるが，この傾向が【なし】の場合でも一応は見られることには注意したい。すなわち，実験参加者は，特段にインセンティブがなくても，仮想的なリスクを自身の選択行動にある程度は反映させている。一方，2.は，何らかの負のインセンティブを与えれば，よりリスクの少ない経路を選ぶようになるという，当然予想される結果を示しているといえる。ただし，この集計分析だけでは，どのような種類の負のインセンティブがどの程度の効果を持っているかという点についての知見については明確にはならない。

(2) 分散分析による要因抽出

「センサーの色」「負のインセンティブの付与方法」と，それに加えて，「各セット内で何回目の実験であるか」の3つの要因によって選択結果に有意な差が存在するかどうかを，3元配置分散分析により分析した。これらの要因のうち「各セット内で何回目の実験であるか」は，「同一セット内で一度陥没した場合には，そのセット内の残りでは近道を選択できなくなるようにしている」という実験のルールが選択結果に影響を与える可能性を考慮して設定した。

分散分析の結果を表-3に示す。特に有意であったものは「センサーの色」と「負のインセンティブの付与方法」であった。そのほか，これらの交互作用と「何回目か」の2つも5%有意ではあったが，前者2個ほどではなく，その効果は相対的には小さいと考えられる。このため，(3)節では，「センサーの色」と「負のインセンティブの付与方法」の2種のみを考慮することとする。

(3) 二項ロジットモデルによる分析

負のインセンティブの付与方法のみを確定効用の変数としたモデルを，センサーの色ごとに独立に作成し，そのパラメータを推定した。迂回路を選択する効用を0としたときの，近道を選択する効用確定効用の式を

$$V^c = \alpha_1^c \delta_1 + \alpha_2^c \delta_2 + \beta^c \tag{1.1}$$

とした。ここで， c はセンサーの色（青，黄，赤のいずれか）を示す。また， δ_1, δ_2 は負のインセンティブの付与方法を示すダミー変数であり，それぞれ，

表-3 分散分析の結果

要因	偏差平方和	自由度	平均平方	p値
A. センサー色	20.2	2	10.1	<10 ⁻²⁰
B. 何回目か	1.19	2	0.597	0.014
C. インセンティブ付与方法	6.68	4	1.67	5×10 ⁻⁹
A×B	0.205	4	0.0512	0.828
A×C	2.66	8	0.333	0.016
B×C	1.73	8	0.216	0.133
A×B×C	3.69	16	0.231	0.051
誤差	33.8	246	0.137	

表-4 ロジットモデルの推定結果

	c=青		c=黄		c=赤	
	推定値	p値	推定値	p値	推定値	p値
α_1^c	-2.34	0.033	-1.28	0.018	-0.35	0.670
α_2^c	-0.29	0.705	-1.01	0.063	0.98	0.263
β^c	3.59	0.001	1.31	0.008	-2.58	0.002

$$\delta_1 = \begin{cases} 0 & \text{時間で付与} \\ 1 & \text{金銭で付与} \end{cases} \tag{1.2}$$

$$\delta_2 = \begin{cases} 0 & \text{固定で付与} \\ 1 & \text{ランダムに付与} \end{cases} \tag{1.3}$$

としている。【なし】の結果はこの分析には含まれない。

パラメータ $\alpha_1^c, \alpha_2^c, \beta^c$ の推定結果を表-4に示す。定数項以外で有意水準を5%にしたときに有意であったものは，青と黄のときの α_1^c であった。いずれも符号は負である。これは，青と黄のときは「金銭」が近道の選択を避けさせる要因となっていることを示す。黄色の「ランダム」 (α_2^c) についても，p値は5%よりも若干大きいものの，符号は負であり，同じ傾向を示している。赤についてはいずれも有意ではないが，これは，図-5の結果が示すように，そもそも赤ではほとんどの実験参加者が迂回路を選択しており，これらの要因により結果が左右される余地がなかったことが理由と考えられる。以上で示した推定結果は，「時間よりも金銭」のほうがより効果の高い負のインセンティブの付与方法であることを示している。

4. まとめと今後の課題

何らかのリスクがあるシナリオを想定した仮想環境下での実験において，どのような方法でそのリスクに対応する負のインセンティブを付与すれば，実験参加者が仮想環境下のリスクを回避するかを，実際に特定のシナリオにおいて仮想環境下での実験を行い検討した。結果と

して、今回の設定の下では、負のインセンティブを時間よりも金銭で与える方が効果が大きいことがわかった。この知見は、今後、リスクのあるシナリオを想定した仮想環境下での実験において、実験参加者にそのリスクをより確実に感じてもらうために有用となるであろう。実験結果は負のインセンティブを固定値よりもランダムで与えるほうがより効果がありうることを示唆している。ただしこれは統計学的に有意な結果としては得られておらず、信頼できる結果を得るにはさらに調査を要する。

「時間より金銭が効く」という結果は、今回の実験の参加者がすべて学生であることを原因としているかもしれない。一般に学生は時間価値が比較的低いと考えるべきである（今回の設定では、10分と250円を比較しているが、これは1500円/時間に相当する）。学生を実験参加者とするのであればこの知見は有用であるが、より多様な属性の参加者を集める場合には注意が必要である。

負のインセンティブを全く付与しなくても（すなわち、近道を選択したほうが得と思われる状況でも）、一定程度で迂回路が選択され、なおかつ、それがセンサーの色が示す危険率に整合した結果になっていることは注目値する。この結果は、実験参加者は、特にインセンティブを与えられなくても、仮想環境下におけるシナリオの設定に一定程度影響を受けていることを示唆する。より現実感のある仮想環境を構築することにより、この傾向をより強めることができるかもしれない。ただし、本研究ではこれに関する参照実験を実施していないので、この点についてはあくまでも推測に過ぎず、今後の研究を要する。

参考文献

- 1) Asano, M., Iryo, T., and Kuwahara, M.: Microscopic pedestrian simulation model combined with a tactical model for route choice behaviour, *Transportation Research Part C*, Vol. 18, No. 6, pp. 842–855.
- 2) Asano, M., Kuwahara, M., Tanaka, S., 2007. Multi-directional pedestrian flow model based on empirical data. In: *Proceedings of 11th World Conference on Transport and Safety Research*, CD-ROM.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) <https://www.oculus.com/en-us/> (2016-4-20 アクセス)
- 8) <http://www.zenrin.co.jp/product/service/3d/asset/> (2016-4-20 アクセス)