

# リグレット理論を用いた回遊行動のモデリング と実験的アプローチによる検証

小松 剛士<sup>1</sup>・井料 隆雅<sup>2</sup>・森 光<sup>3</sup>・杉森 千恵<sup>4</sup>

<sup>1</sup>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: 141t123t@stu.kobe-u.ac.jp

<sup>2</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: iryo@kobe-u.ac.jp

<sup>3</sup>非会員 南海電気鉄道株式会社（〒542-0076 大阪市中央区難波五丁目1番60号）

<sup>4</sup>正会員 西日本旅客鉄道株式会社（〒530-8341 大阪市北区芝田二丁目4番24号）

歩行者の回遊行動を不確実な状況での目的地探索問題と捉えたとき、それを記述する数理モデルの構築の際にはまずは期待効用理論が利用できよう。しかし、過去の研究では、期待効用理論で導出される理論値に比べて、人はより冗長に回遊行動を行う傾向があることを示唆する結果が出ている。これにはさまざまな理由が考えられるが、ひとつの可能性としては、このような問題に対して期待効用理論を適用することが必ずしも適切ではない、ということが考えられよう。本研究では、期待効用理論に代えてリグレット理論を用いて回遊行動を記述する理論を構築した。その理論が実際の人間の回遊行動をどれだけ記述できるかを、実空間および仮想空間において実施した交通行動実験のデータを用いて検証した結果、提案理論は結果を一定の程度説明するものの、まだ説明できないバイアスがあることもわかった。

**Key Words :** *pedestrian tour, virtual reality, regret theory.*

## 1. はじめに

### (1) 本研究の背景と目的

観光地や商業施設を訪れる歩行者が「どのように行動するか」を知ることが出来れば、観光地や商業施設にとって大きなメリットとなる。このメリットは、あくまで正しい歩行者の行動特性を把握できていることが前提になる。

回遊行動に関する研究の中には、回遊行動の観測に重点を置いた研究と、回遊行動をなんらかの行動原理に基づきモデル化することをねらった研究がある。前者の例は比較的多く見ることができる。たとえば Asakura and Iryo<sup>1)</sup>は PHS を用いて神戸北野地区の回遊行動の観測をしている。Leung et al.<sup>2)</sup>は 2008 年の北京オリンピック期間中における 500 人分の日記（ブログ）を調査・分析し観光客の行動ネットワークの変化を明らかにしている。Zheng et al.<sup>3)</sup>は Flickr や Panoramio といった写真共有サービスを用いて、地理的位置情報が付帯された写真から旅行

者の行動パターンを調査分析している。Moiseeva and Timmermans<sup>4)</sup>は個人の旅行行動のデータを GPS により収集し、そのデータにベイジアンネットワーク理論を適用させることで、行動やトリップの種類を判別させることを試みている。Edwards and Griffin<sup>5)</sup>は 3 つの GPS 装置から得られた GPS データを用いて Google Earth 上に旅行者の行動の空間的パターンを描写した。さらに旅行者にインタビューを行うことでそのデータを補完した。このような回遊行動を観測した結果から分析を行う研究は近年調査方法が多様化し発展を見せている。

一方、回遊行動をモデル化することを目的とした研究は数少ない。回遊行動は通常の目的地選択や経路選択と異なり、情報や意思決定が不確実であることを前提に、现阶段でどのような判断をすることがもっとも最終的な効用を高められるか、という行動を行うという側面がある。このような着眼点からモデルを提案した研究もいくつかある。Iryo et al.<sup>6)</sup>は、歩行者が歩行ネットワーク上における不完全情報下での回遊行動を、未知のネットワー

クにおいて目的地を探索する行動（これを「回遊探索行動」と呼ぶことにする）をとらえて、目的地の探索を打ち切りモデルを期待効用理論によって記述しその答えを数学的に導出した。この探索行動の実験的検証をした、Iryo et al. による実空間での実験<sup>7)</sup>や、中村・井料<sup>8)</sup>による、バーチャルリアリティを用いた実験がある。これらの研究では、いずれも、実際の歩行者が探索を打ち切るタイミングは効用理論よりも遅く、冗長に探索を継続する傾向があることが確認されている。また、福山・羽藤<sup>9)</sup>は時間制約下での複数目的地選択について、全体行程の効用を考慮しながら逐次的に目的地選択を行う動的な意思決定過程のモデルを構築している。

回遊行動を不確実な情報の下での意思決定ととらえてモデル化するのであれば、そのような状況において人間がどのように意思決定を行うかについて知らなくてはならない。不確実な情報の下での意思決定を記述するものも簡単なものは期待効用理論であるが、これは必ずしも人間の行動を完全には説明しない。Loomes and Sugden<sup>10)</sup>は期待効用理論で説明できない事象に対してリグレット理論を提案した。また、ランダム効用理論にリグレット理論をあてはめたRandom Regretと呼ばれる理論も研究されている<sup>11) 12) 13)</sup>。これは行動者の選択肢において後悔の値（リグレット）が決まっておきその値を最も小さくするように行動するというものである。

本研究では、回遊探索行動をリグレット理論により記述するモデルを提案し、それが実際の人間の回遊探索行動の特徴をどこまで記述できているかを検証することを行う。実際の人間の回遊探索行動の観測のためには実験的アプローチを用いる。回遊する人（回遊者）として実験協力者を雇用し、制御された一定のルールの下で回遊探索を行ってもらう。その結果を提案モデルにあてはめてモデルの適合性を検証する。本研究では実験の手法として、実空間（実際の街）における実験と、仮想空間（バーチャルリアリティ：VR）における実験の2つの手法をとった。これら2つの手法による結果の差異から、特に、（おそらくは、理論では説明できない）実空間特有の人間行動の特性が発見できる可能性も期待している。

## 2. 交通行動実験データの実験の詳細

本研究では実空間および仮想空間において実施した実験の交通行動実験のデータを用いる。実験は2013年11月25日(月)から11月29日(金)と12月2日(月)から12月6日(金)の10日間において、50名(内男性44名、女性6名)の神戸大学工学部市民工学科および工学研究科の学生を対象として行われた。本研究のすべての実験は、神戸大学大学院工学研究科人を直接の対象とする研究倫

理委員審査委員会の審査を受け承認されている。

### (1) 実空間実験

#### a) 実験の概要

本実験は神戸市中央区旧居留地周辺の市街地の一角を徒歩で回遊してもらい、回遊探索行動を観測した。回遊者の位置座標データはGPSによって観測した。

#### b) 実験条件

回遊者に回遊探索行動を行ってもらうための条件設定を行う。本実験では探索する対象を店舗にする。以下の状況を想定して実験を行った。

- ・ 回遊者が市街地になんらかの商品を購入しに来たという状況を仮定する。この回遊者は市街地を探索し商品を購入する店舗を探す。
- ・ 本実験における「購入」とは店舗の目の前まで行き実験管理者に電話で購入を宣言することによって行われる。実際に商品を購入するわけでない。
- ・ 店舗は実店舗ではなく、地図上に番号を振った場所に仮想的に存在するとした架空の店舗とする。
- ・ 店舗は市街地に2店舗存在するとし、店舗A、店舗Bと名づける。店舗Bは必ず店舗Aより近くに存在する。
- ・ 店舗は商品に対して値引きを行っている。値引き額は店舗によってそれぞれ異なるが、事前にそれを正確に知ることはできない。ただし、値引き額の幅（最大値と最小値）は事前に知らせている。
- ・ 正確な値引き額は、その店舗そのものまで行き、実験者に電話をすることにより知ることができる。
- ・ 回遊探索中は、店舗の位置と値引き幅を記した地図を持って探索する。
- ・ 回遊者が商品を購入すると決めた店舗の実際の値引き額がそのまま回遊者の謝金に加算される。
- ・ 一度購入を決定したら、その意思決定をあとから変更することはできない。
- ・ 商品を購入したら、必ずスタート地点へ戻る。

実空間、仮想空間それぞれについて、1人の回遊者に対して2つの異なる設定で実験を2回行う。どの実験参加者も、実空間実験と仮想空間実験の双方に参加するため、1人の参加者に対して合計4回の実験が実施されることになる。これにより、実空間実験、仮想空間実験とも、100個ずつのサンプルを得ることになる。

#### c) 回遊空間の構造

回遊空間の概要図を図-1に示す。神戸市三宮の南側に位置する旧居留地の一角で南北方向がおよそ450m、東西方向がおよそ300mの空間である。スタート地点がSである。1から4のいずれか特定の場所に店舗AまたはBがあることが回遊者には事前に知らされる。1から4の場所は図で示された例以外にもさまざまである。

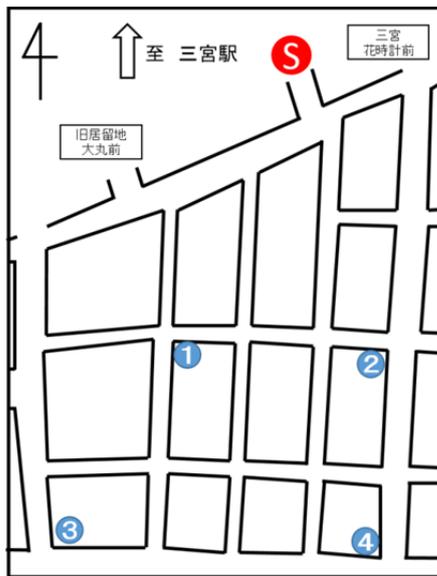


図-1 本実験の回遊空間の地図の例

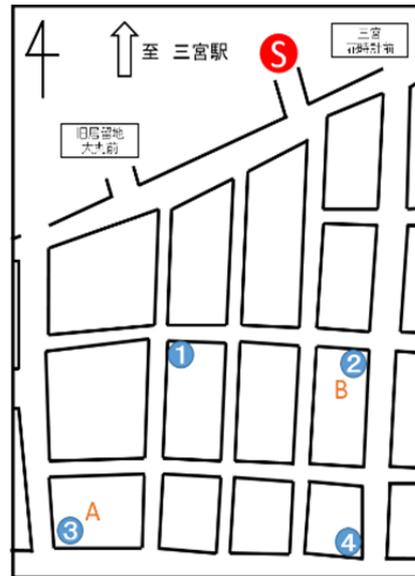


図-3 実験2回目の地図の例

d) 回遊者に与えられる情報

回遊者は回遊探索行動中いつでも地図を見ることができる。地図には店舗の位置とその店舗がとりうる値引き額の最小値と最大値が記されている。実験1回目の地図と2回目の地図の例をそれぞれ図-2、図-3に示す。店舗は必ず2か所のみ存在している。値引き最大値は200円から650円の幅で50円刻みに設定される。値引き最小値はすべてのパターンで一律150円となっている。

(2) 仮想空間実験

a) 実験の概要

実空間実験で用いた条件とできるだけ同一となる条件の下でVRを用いた実験を扱う。VR空間内を実空間の実験と同条件にするために、本実験の移動速度は歩行と同等の移動速度である1.3m/sに固定されている。



図-2 実験1回目の地図の例

b) 実験機器

実験に使用した没入型バーチャルリアリティ装置（以下、VR装置と呼ぶ）の概要を述べる。図-4のように3面スクリーンに、可動式の1面スクリーンで閉じるようにした4面スクリーン、プロジェクターが3枚、空間を作成するための空間を作成するためのコンピュータ1台で構成されている。実験中は右の図のようにスクリーンを閉じることで、回遊者の前後左右をスクリーンで囲むことができる。VRスクリーンの大きさは、縦1800mm×横1000mmである。図-5に実験に用いた映像の例を示す。回遊者はこの没入型スクリーンに入り実験を行う。歩行動作を検知するために回遊者には iPod touch と発光ダイオードをつけたリュックサックを装着してもらう（図-6）。リュックサックセンサーは青と赤のLEDライトが取り付けられている。これを天井に取り付けたカメラで撮影し、コンピュータ上で画像処理を行うことにより、回遊者の向きを取得する。センサーで感知される回遊者の方向は、矢印でスクリーンに示される。また、装置内で足踏みをすることを検知するために iPod touch を回遊者の腕に装着する。iPod touch の加速度センサーによって回遊者が VR 内で足踏みした際の腕の振りを感知する。腕振りをしているあいだ、回遊者は VR 内を等速で前進する。腕振りを速く行うことで早く移動できるようにはなっていない。iPod touch で取得したデータは Wi-Fi を通してコンピュータに送信される。

c) 実験条件

店舗を訪問したときの値引き額の確認と購入の宣言を実験者と直接の会話で出来ることと、実空間を歩行する代わりに VR 内を歩行することを除き、実空間での実験と条件は同様である。



図4 3+1面の没入型スクリーン  
(左：開いた状態 右：閉じた状態)

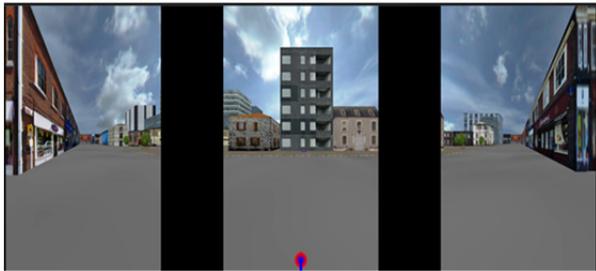


図5 VRに映し出される映像



図6 センサーリュックサックの装着図

#### d) 習熟

VR空間内での移動操作についてある程度の慣れが必要であると考えられるので、本実験開始前に習熟実験を行う。操作方法を回遊者に説明してから、VR空間内を自由に1分程度移動してもらう。

#### e) VR空間の構造

VR空間に構築した仮想的な街の地図を図-7に示す。南北方向がおおよそ450m、東西方向がおおよそ300mの空間である。この空間は実空間実験を行った神戸市三宮の地形を再現したものとなっている。左図の赤い丸で囲った地点は店舗の設置候補地点であり、15か所ある候補地点にはそれぞれ番号が振られている。この店舗の設置候補場所も、実空間実験で用いた場所とほぼ同じ場所にしており、番号の振り方も全く同じにしている。

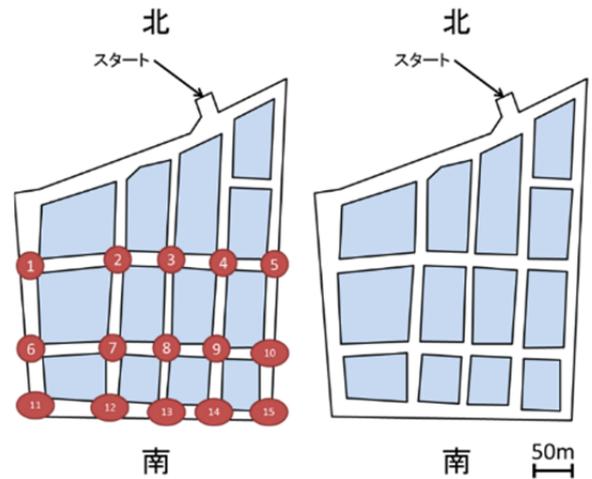


図7 VR空間に構築した街の地図

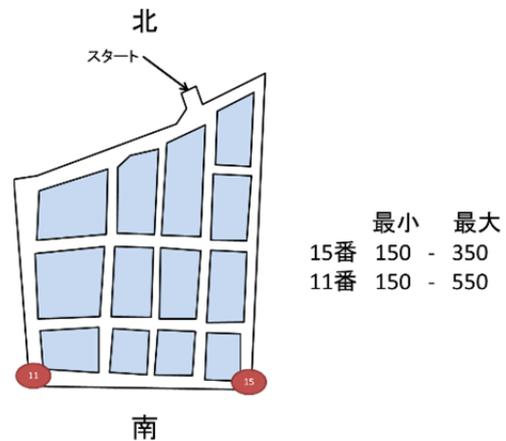


図8 回遊者に提示する地図の一例

#### f) 回遊者に与えられる情報

回遊者は回遊探索行動中、いつでも地図を見ることができる。地図には店舗の位置とその店舗がとりうる値引き額の最小値と最大値が記されている。例を図-8示す。店舗は必ず2か所のみ存在し、スタート地点から遠い方が値引き最大値は高いように設定されている。値引き最大値は200円から650円の幅で50円刻みに設定される。値引き最小値はすべてのパターンで一律150円となっている。値引き額の設定は実空間実験と全く同じである。

#### (3) 店舗の配置と値引き額最大値の決定

実空間実験でも仮想空間実験でも店舗は図-7で示した15点のうち2か所に配置する。店舗の配置の組み合わせは、 ${}_{15}C_2=105$ より、105通り存在する(店舗Bは必ず店舗Aより近く配置されることに注意)。また、値引き額最大値は200円から650円まで50円刻みで10通り存在し、かつ2つある店舗に同額の最大値引き額が設定される場合を除外すると、 ${}_{10}C_2=45$ より、45通り存在する。よって店舗配置と値引き額の組み合わせは4725

通り存在する。しかし、本実験では回遊者が 50 人であり、各 2 回の実験を行うとしても 100 通りの組み合わせしか実験を行えない。

場合の数を減らすために、まず、店舗 A と B が一直線上にある設定を除外する。これは、このような設定では、どの回遊者も必ず店舗 B に先に訪問することが当然となってしまう、行動の多様性が生まれ得ないからである。具体的には、市街地西側 (図-7 中の番号 1, 2, 3, 6, 7, 8, 11, 12, 13) と東側 (4, 5, 9, 10, 14, 15) から 1 つずつ A と B を設定することとした。これで店舗配置は 54 通りとなる。

さらに組み合わせを減らすために、第 3 章で説明する理論に基づき計算される期待効用値の差が明らかに大きい場合を除外することにした。具体的には、最大値引き額が大きい方 (以下、A と呼ぶ) へ向かう理論期待効用から、最大値引き額が小さい方 (以下、B と呼ぶ) へ向かう理論期待効用を引いた値が 200 円から-200 円の間となる組み合わせからランダムに 100 パターンを選んだ。

実験の際には、値引き額の上限額のほか、実際の値引き額を設定する必要もある。これは、

$$I_{real} = (I_{max} - 150) \times R + 150 \quad (1)$$

により決定している。ここで

$I_{real}$  : 実際の値引き額 (円)  
 $I_{max}$  : 最大値引き額 (円)  
 $R$  : 0 から 1 までの範囲の乱数  
 である。

実空間実験と仮想空間実験は基本的には全く同じ条件で実験を行うようにしている。よって、いずれの実験でも、店舗の配置パターンと上限値引き額および実際の値引き額の設定は全く同じにしている。これらのパターンの組み合わせには番号を 1 番から 100 番まで振っている。ある特定の实验参加者が実空間実験と仮想空間実験でそれぞれ参加する実験の組み合わせ番号はそれぞれ異なるようにしている。よって、先に実施した実験で得た情報を告げに実施する実験で活用することはできない。

### 3. リグレット理論を用いた回遊行動のモデル化

#### (1) 問題設定

スタート地点 S から回遊を開始する人 (回遊者) が店舗 A あるいは B のいずれかを訪問しようとしている。いずれの店舗でも同じ商品を値引きして売っているが、その値引き額は店舗によって異なる。いま、店舗 A の値引き額は 150 円から  $2a+150$  円のあいだのいずれかであり、店舗 B の値引き額は 0 円から  $2b+150$  円のいずれかで一様

分布することは実験参加者には知らされている。なお、理論モデルを考えるときは、値引き額を単に 0 円から  $2a$  ないし  $2b$  円と考えても差し支えない。

店舗 A, B とスタート地点 S のあいだの位置関係は図-9 のように模式的に示される。それぞれのあいだの移動効用は負の値を持ち、

- ・ S から A の移動効用:  $-\alpha$
- ・ S から B の移動効用:  $-\beta$
- ・ A から B の移動効用:  $\gamma$

と定義される。いずれも距離単位 (m) で示される。店舗 A と B の位置関係より、必ず  $a > \beta$  が成立する。

回遊者は、店舗まで行くことにより値引き額が実際にいくらであるかを確認することが可能である。確認した際にそこで購買を実行してもよいし、そうしなくてもよい。買う店舗は当然ながら 1 箇所である。購買を行ったらスタート地点に戻る。

#### (2) 期待リグレットを用いた回遊行動決定の理論

回遊者が実験中に意思決定すべき時点において、可能な意思決定の各選択肢に対する効用と、その期待リグレットの計算を行い、それにより、与えられた情報により回遊者がどのように意思決定を行うかを導出する。意思決定すべき時点は 3 つある。すなわち、「起点 S から出発するとき」「起点から A ないし B に行ったとき」「A ないし B から別の店舗に行ったとき」である。ただし、動的計画法と同様に、効用とリグレットの計算は時間軸方向には後ろ向きに行わなくてはならないことに注意したい。

起点から A に行った回遊者が回遊によって最終的に得る効用を計算する。起点から A に行った回遊者は、その後、「A を選んで S に戻る」「B についてそこで購買をして選んで S に戻る」「B について A に戻ってそこで購買をして S に戻る」の 3 種類の行動のいずれかをとる。それぞれの行動により得る効用は、順に、

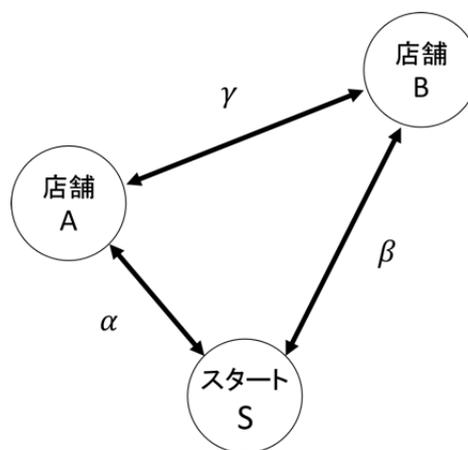


図-9 回遊空間の位置関係

$$\begin{aligned}
u_A &= x_A - 2p\alpha \\
u_{AB} &= x_B - p(\alpha + \beta + \gamma) \\
u_{ABA} &= x_A - 2p(\alpha + \gamma)
\end{aligned} \tag{2}$$

と計算できる。ただし、 $x_A, x_B$ は店舗 A, B における実際の値引き額、 $p$  は回遊者が単位距離あたり歩くことの効用に相当する金銭的損失(円/m) である。この回遊者が A から B に行ったあとに得る効用は、その時点では  $x_A, x_B$  のいずれも既知であることから、単に  $u_{AB}$  と  $u_{ABA}$  のうち大きいほうの値となる。これを用いれば、S から A に行った回遊者が、それから B に向かって得られる効用と、S に戻って得られる効用の差は

$$\Delta u_{BS}^A(x_A, x_B) = \max\{u_{AB}(x_B), u_{ABA}(x_A)\} - u_A(x_A) \tag{3}$$

と計算できる。ただし、この時点では、 $x_B$  は未知であり、その確率分布しか回遊者には知られていないことに注意したい。店舗 A にいる回遊者の意思決定を式(3)から知するためには、 $x_B$  の不確実性を考慮しなくてはならない。

$x_B$  の不確実性を考慮して店舗 A にいる回遊者の意思決定を決めるために、ここでは Loomes and Sugden によるリグレット理論<sup>10)</sup>を参考にモデルを構築する。この理論では、リグレットを、2つの選択肢の効用の差と、その差を指数とする非線形の式の和で定義している。本稿では、リグレット (の符号を反転したもの) として、

$$q(\Delta u_{BS}^A) = c_1 \Delta u_{BS}^A + c_2 ([\Delta u_{BS}^A]_+^r - [-\Delta u_{BS}^A]_+^r) \tag{4}$$

という式を用いる。ただし、 $c_1, c_2, r$  は非負のパラメータである。 $q(\Delta u_{BS}^A)$  は未知の値である  $x_B$  に依存する。リグレット理論では、 $q(\Delta u_{BS}^A)$  に対し  $x_B$  についての期待値をとることにより、回遊者がいずれの選択肢 (B に行くか S に戻るか) をとるかを記述する。いま、この期待値は

$$\Delta q_{BS}^A(x_A, b) = \frac{1}{2b} \int_0^{2b} q(\Delta u_{BS}^A(x_A, x_B)) dx_B \tag{5}$$

と表せる。この時、

$$\Delta q_{BS}^A(x_A, b) > 0 \tag{6}$$

であれば、A にいる回遊者は B に行き回遊を続ける選択をする。逆に、

$$\Delta q_{BS}^A(x_A, b) < 0 \tag{7}$$

であれば、A にいる回遊者は B に行くことなく S に戻る選択をする。

次に、起点から B に行った回遊者が回遊によって最終的に得る効用を計算する。A のときと同様に、これは、

$$\begin{aligned}
u_B &= x_B - 2p\beta \\
u_{BA} &= x_A - p(\alpha + \beta + \gamma) \\
u_{BAB} &= x_B - 2p(\beta + \gamma)
\end{aligned} \tag{8}$$

となる。S から B に行った回遊者が、それから A に向かって得られる効用と、S に戻って得られる効用の差は、式(3)と同様に

$$\Delta u_{AS}^B(x_A, x_B) = \max\{u_{BA}(x_A), u_{BAB}(x_B)\} - u_B(x_B) \tag{9}$$

と計算できる。式(4)の  $q(\Delta u_{BS}^A)$  に相当するものとして、

$$q(\Delta u_{AS}^B) = c_1 \Delta u_{AS}^B + c_2 ([\Delta u_{AS}^B]_+^r - [-\Delta u_{AS}^B]_+^r) \tag{10}$$

が計算できる。これの  $x_A$  に対する期待値は

$$\Delta q_{AS}^B(x_B, a) = \frac{1}{2a} \int_0^{2a} q(\Delta u_{AS}^B(x_A, x_B)) dx_A \tag{11}$$

である。この時、

$$\Delta q_{AS}^B(x_B, a) > 0 \tag{12}$$

であれば、B にいる回遊者は A に行き回遊を続ける選択をする。逆に、

$$\Delta q_{AS}^B(x_B, a) < 0 \tag{13}$$

であれば、B にいる回遊者は A に行くことなく S に戻る選択をする。

以上の計算を用いれば、最初に A にいったか B にいったかを所与とすれば、 $x_A, x_B$  の真の値を与えたときに (これは回遊者に与えるという意味ではないことに注意)、回遊者が理論的にはどのような行動を取るかを決定することが可能である。これを図示したのが図-10 と図-11 である。これを用いれば、 $x_A, x_B$  の真の値に対し、最初に A にいったか B にいったかを所与として、回遊者が得ることができる効用を知ることが可能である。この効用を、それぞれ、 $w_A(x_A, x_B)$ 、 $w_B(x_A, x_B)$  で示す。

図-10 と図-11 の結果を用いることによって、最終的に、起点 S にいる回遊者が、既知の情報として与えられた  $a$  および  $b$  の値に応じて、A に行くかあるいは B に行くかいずれに行くかを決定するための式を導出することができる。仮に  $x_A, x_B$  が既知であれば、それは、単に  $w_A(x_A, x_B)$  と  $w_B(x_A, x_B)$  のいずれが大きいかを評価すればよい。ただし、実際には  $x_A, x_B$  のいずれも未知であるので、この差のリグレットに相当するものを計算し、その期待値をとらなくてはならない。式(4)と同様に、リグレット (の符号を反転したもの) として、

$$q(\Delta w_{AB}) = c_1 \Delta w_{AB} + c_2 ([\Delta w_{AB}]_+^r - [-\Delta w_{AB}]_+^r) \tag{14}$$

という式を用いる。ただし

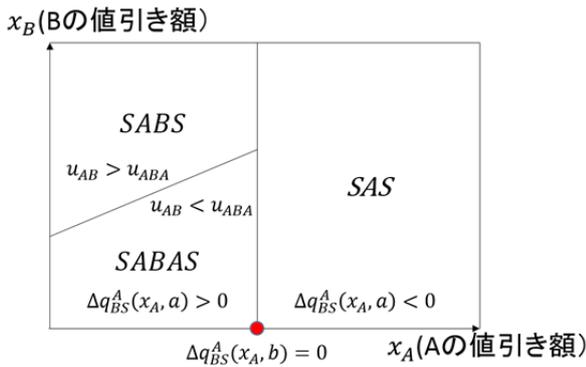


図-10 最初にAにいった回遊者の行動パターンを  $x_A, x_B$  の実際の値により分類した図

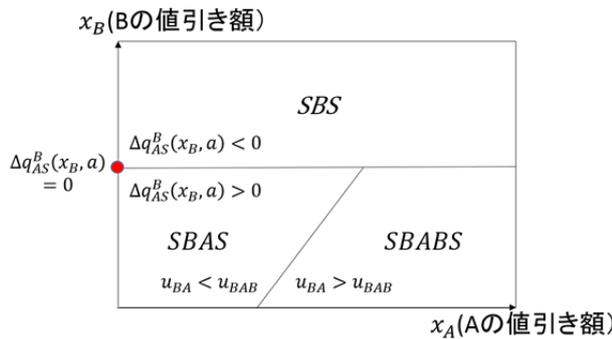


図-11 最初にBにいった回遊者の行動パターンを  $x_A, x_B$  の実際の値により分類した図

$$\Delta w_{AB}(x_A, x_B) = w_A(x_A, x_B) - w_B(x_A, x_B) \quad (15)$$

である。  $q(\Delta w_{AB})$  の  $x_A, x_B$  に対する期待値は

$$\Delta q_{AB}(a, b) = \frac{1}{4ab} \int_0^{2b} \int_0^{2a} q(\Delta w_{AB}(x_A, x_B)) dx_A dx_B \quad (16)$$

である。これが正であれば回遊者は先に A を訪問し、負であれば先に B を訪問する。

#### 4. 実験データによるモデルの検証

##### (1) 概要および共通の設定

第2章で示した実空間実験および仮想空間実験で観測された回遊者の店舗選択行動を、第3章のモデルにあてはめ、提案したモデルがどれだけ実際の回遊者の行動を説明するかを検証する。各実験では各種の行動データを取得しているが、本章の分析において、モデルでの説明を試みる行動データは、「起点Sを出発して、最初にAとBどちらの店舗に向かったか」のみである。この行動は、モデル上では、第3章の式(16)で定義した  $\Delta q_{AB}(a, b)$  の符号で判定される。モデルを介して回遊者の行動に影響を与える要因には

響を与える要因には

- ・ 店舗AおよびBの値引きの最高額、あるいは、それと関連付けられている変数  $a$  および  $b$ 。
- ・ 店舗と起点の相互の距離  $\alpha, \beta, \gamma$
- ・ 単位歩行距離の負効用を金銭単位で示すパラメータ  $p$
- ・ リグレット理論のパラメータ  $c_1, c_2, r$

がある。このうち、前者2個は実験の条件から直ちに決定するが、後者2個のパラメータは未知のパラメータである。  $p$  については、仮に、実験参加者の時間価値を1,000円/時間程度とすれば、1時間で4 km歩くと仮定して、  $p$  の値は250円/km 程度となる。時間価値の個人差や歩行の疲労の効果などを考えれば、この値はあくまでも参考程度のものでしかないが、この見積もりは、  $p$  の値は、おおむね数百円/km程度のオーダーであることを示唆する。一方、  $c_1, c_2, r$  については全く推計のしようがない。今回は、簡単のために  $c_1 = 0, c_2 = 1$  と固定し、  $r$  には0.5 (平方根に相当)、1.0, 2.0の3種類を用いた。

##### (2) ナイーブモデル

提案モデルとの適合性の検証に先立ち、店舗AおよびBの値引きの最高額と  $\alpha, \beta, \gamma$  の5個の変数の線形結合を確定効用とするロジットモデルにより回遊者の行動（最初に店舗Aを訪問するか否か）を説明するモデルを構築し、そのパラメータを、実空間実験および仮想空間実験それぞれについて推定する。このモデルは、第3章で提案したモデルとはまったく関係がない。このモデルを以降では「ナイーブモデル」と名づける。表-1、2にナイーブモデルの推定結果を示す。推定結果に加えて、各実験において、店舗A、Bを最初に訪問した人の人数も集計的な実験結果として記した。実空間、仮想空間とも、実験回数は100回（50人×2回）なので、パラメータ推定のサンプル数も100個である。いずれの実験でも有意な変数は少ない（1個ないし2個）ことがわかる。

表-1 ナイーブモデルの推定結果（実空間実験）

|                           | 推定値      | p-値     |
|---------------------------|----------|---------|
| 定数項c                      | -0.108   | 0.966   |
| A最大値引                     | 0.0019   | 0.454   |
| B最大値引                     | -0.0119  | 0.00506 |
| $\alpha$                  | -0.00278 | 0.76    |
| $\beta$                   | 0.00917  | 0.233   |
| $\gamma$                  | -0.00146 | 0.771   |
| AIC                       |          | 97.3    |
| 尤度比検定p値                   |          | 0.03577 |
| McFadden's R <sup>2</sup> |          | 0.188   |
| Aが選ばれた回数                  |          | 19回     |
| Bが選ばれた回数                  |          | 81回     |

表-2 ナイーブモデルの推定結果 (仮想空間実験)

|                           | 推定値      | p-値       |
|---------------------------|----------|-----------|
| 定数項c                      | 3.492    | 0.217     |
| A最大値引                     | 0.0052   | 0.0543    |
| B最大値引                     | -0.0097  | 0.00718   |
| $\alpha$                  | -0.015   | 0.0867    |
| $\beta$                   | -0.00371 | 0.642     |
| $\gamma$                  | 0.0124   | 0.0154    |
| AIC                       |          | 101.5     |
| 尤度比検定p値                   |          | 0.0009154 |
| McFadden's R <sup>2</sup> |          | 0.123     |
| Aが選ばれた回数                  |          | 24回       |
| Bが選ばれた回数                  |          | 76回       |

(3) 提案モデルの検証

提案モデルと実験データを照合するためには説明変数として  $\Delta q_{AB}(a,b)$  を含むロジットモデルを用いる。このロジットモデルの確定効用は、

$$V(a,b,\alpha,\beta,\gamma,p,r) = C\Delta q_{AB}(a,b) + D \quad (17)$$

と定義される。Vが大きいほど、Aを選ぶ確率が大きくなる。ここでCとDは推定されるパラメータである。なお、明示されていないが、 $\Delta q_{AB}(a,b)$  は  $\alpha, \beta, \gamma$  と  $p, r$  にも依存することに注意したい。提案モデルが回遊者の行動を的確に説明できていれば、Cは有意に正の値を持ち、Dは0になるはずである。一方で、提案モデルは回遊者の行動を説明するものの、そこに一定のバイアスがあれば、Dが一定の大きさを持つ。すなわちDはモデルが実際の回遊者の行動に対して持つバイアスの大きさを示す。もし、モデルが回遊者の行動を説明できなければ、Cの値は有意に正の値にならないだろう。

式(17)で示したロジットモデルを推定するにはpを外生的に与えなくてはならない。この正確な値はわからないが、数百円/km程度のオーダーでありうることを考慮し、pの値として10円/kmから10,000円/kmまでの値を複数設定し、それらの値での推定結果を検証することとする。

複数設定したpの値に対してロジットモデルの推定を行い、その結果得られた各種の統計量の推定結果とpの値の関係を図-12から図-17にグラフで示す。ここで示した統計量は、AIC (赤池情報規準)、Cの推定値のt値、それとDの推定値である。AICは、どのpの値においてモデルの説明力が最良になるかを知るのに用いる。t値は、モデルが回遊者の行動をどの程度説明できているかを知るのに用いる。95%の有意水準であれば、t値は1.96以上であることが求められる。Dは、モデルのバイアスがどの程度あるかを知るのに用いる。Dが正であれば回遊者は提案モデルで推定される結果に比べてより店舗Aに先に行く傾向があり、負であれば店舗Bに先に行く傾向が

あることになる。

AIC (図-12, 13) とCのt値 (図-14, 15) の計算結果を見ると以下のことがわかる：

1. AIC, t値のいずれとも、pの値が10~100円/km程度では安定して定まらない (2.以降で示す命題では、この範囲のpの値における結果は考慮していない)。
2. もっともAICが小さくなるpの値と、もっともt値が大きくなるpの値はおおむね同じである。
3. 実空間実験においては、リグレット理論のパラメータrが異なると、もっともAICが小さい (あるいは、t値が大きい) 値をとるpの値が異なる傾向がある。仮想空間実験ではこの傾向は見られない。
4. rの値を変えても、AICの最小値やt値の最大値はそれほど変わらない。

2.の結果に「モデルの説明力を最も高くするpの値が真の値である」という考え方を適用することにより、pの推定値として、374円/km (実空間実験)、159円/km (仮想空間実験) を採用することができる。これらの値におけるC, Dの値の推定結果の詳細を表-3, 4に示した。このときのrには2を用いている。

Dの値の計算結果 (図-16, 17) からは、Dは常に負の値をとっていることがわかる。ただし、pの値が比較的大きいところでは、Dの値は0に近づき、一部では有意に負の値をとらない区間もある。ただし、そのような区間は、上記で推定したpの値よりは相当高い区間であるため、これらの値を推定値として採用するのであれば、Dの値は有意に負であると考えべきである。

表-3 p = 374円/km のときの実空間実験のパラメータ推定結果

|                           | 推定値                   | p-値                   |
|---------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 定数項c                      | -1.11                 | $1.85 \times 10^{-4}$ |
| 係数 $\beta$                | $7.28 \times 10^{-5}$ | 0.0545                |
| AIC                       |                       | 97.3                  |
| 尤度比検定p値                   |                       | 0.0479                |
| McFadden's R <sup>2</sup> |                       | 0.0402                |

表-4 p = 159円/km のときの仮想空間実験のパラメータ推定結果

|                           | 推定値                   | p-値                   |
|---------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 定数項c                      | -1.19                 | $2.21 \times 10^{-6}$ |
| 係数 $\beta$                | $8.18 \times 10^{-4}$ | 0.00799               |
| AIC                       |                       | 105.7                 |
| 尤度比検定p値                   |                       | 0.00351               |
| McFadden's R <sup>2</sup> |                       | 0.0773                |

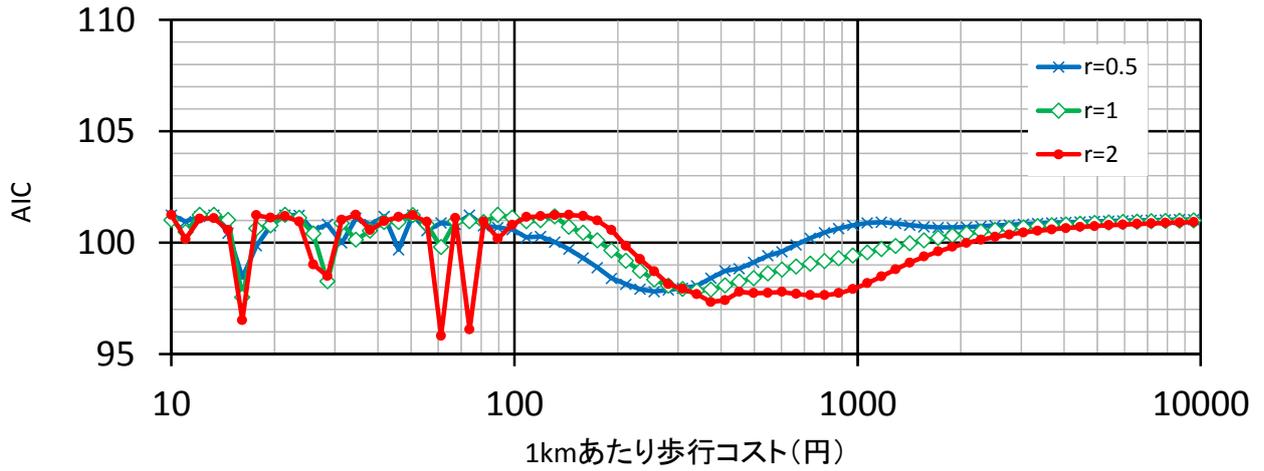


図-12 AIC (実空間実験)

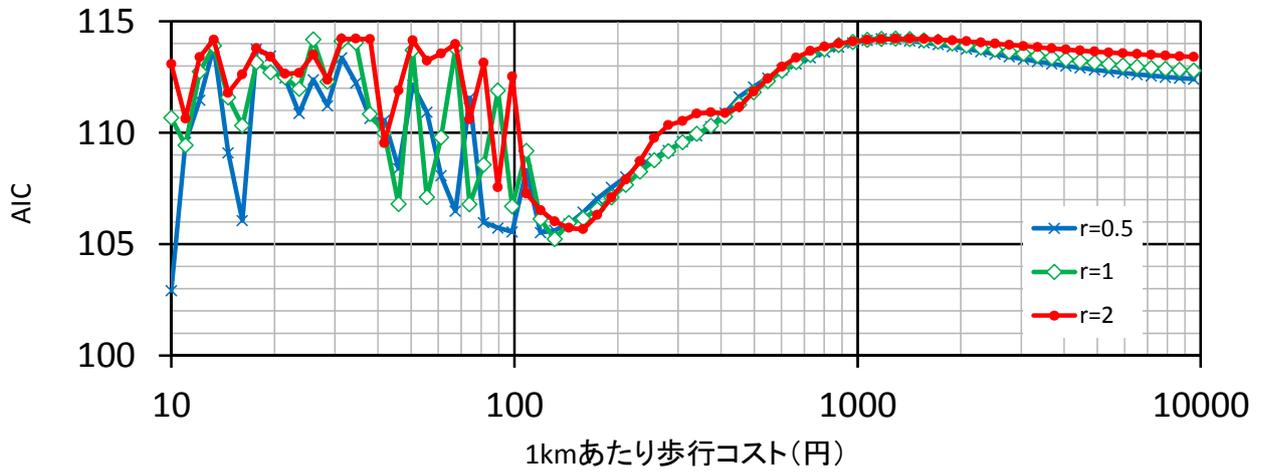


図-13 AIC (仮想空間実験)

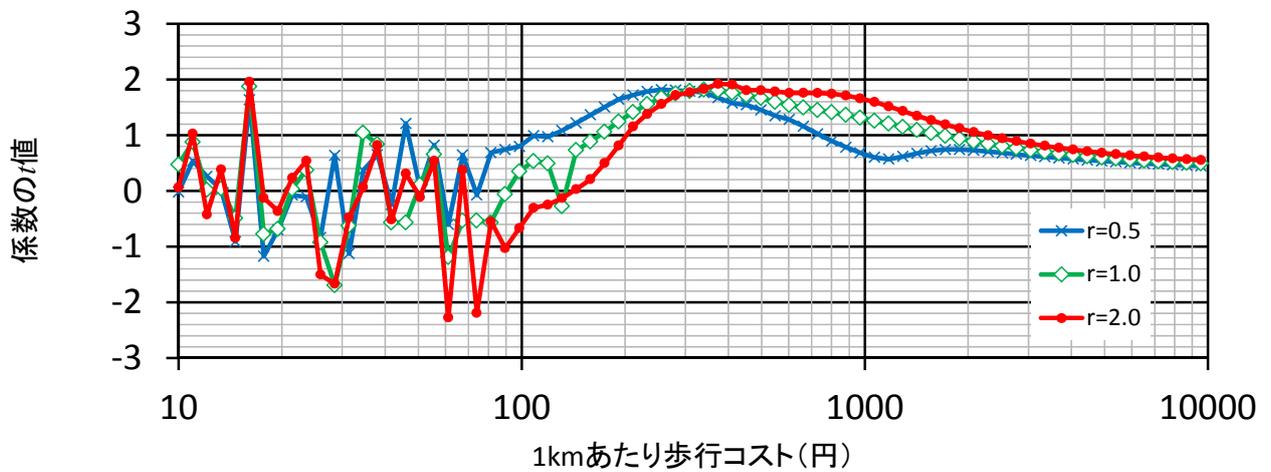


図-14 Cの値 (実空間実験)

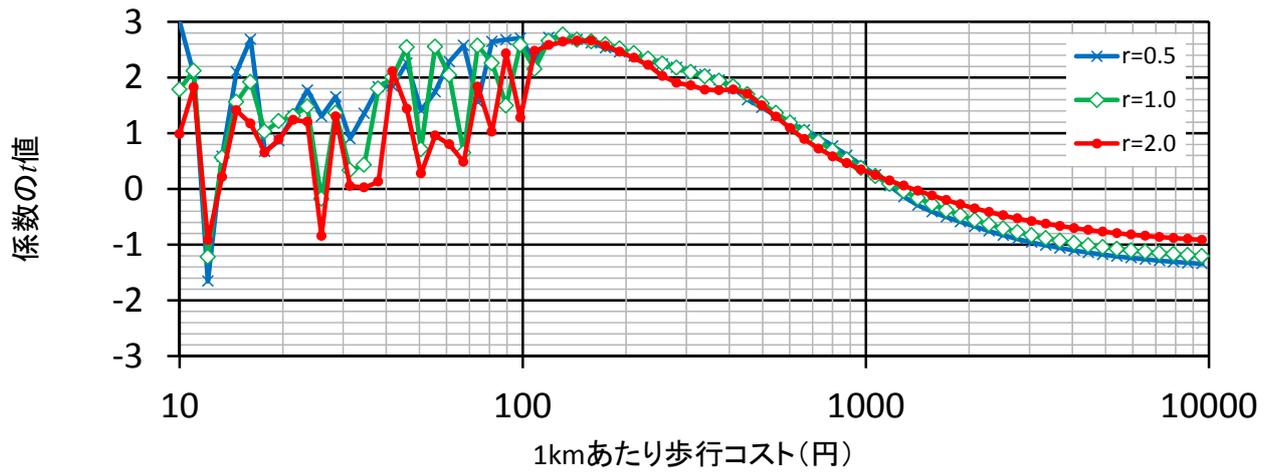


図-15 Cの値 (仮想空間実験)

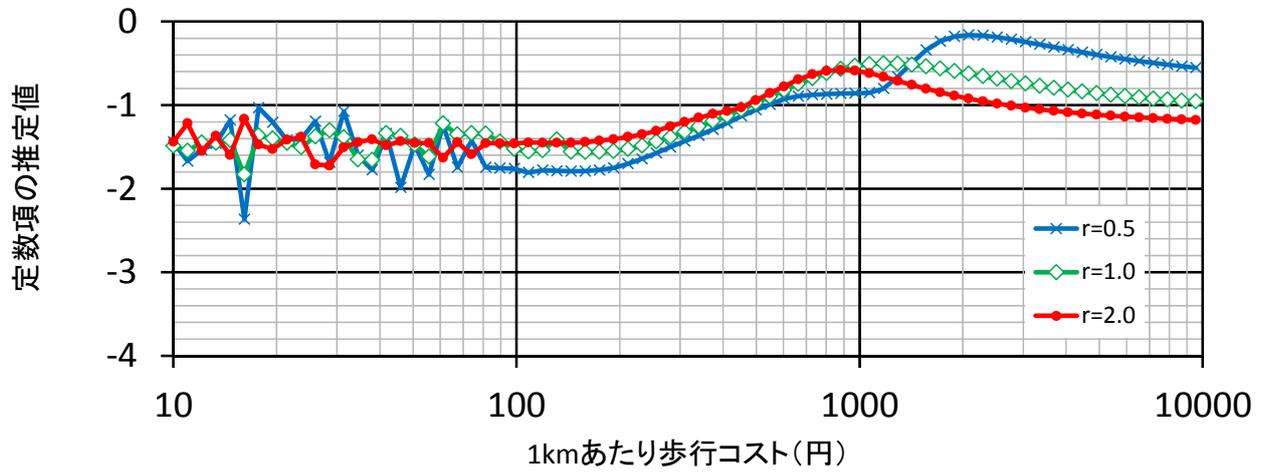


図-16 Dの値 (実空間実験)

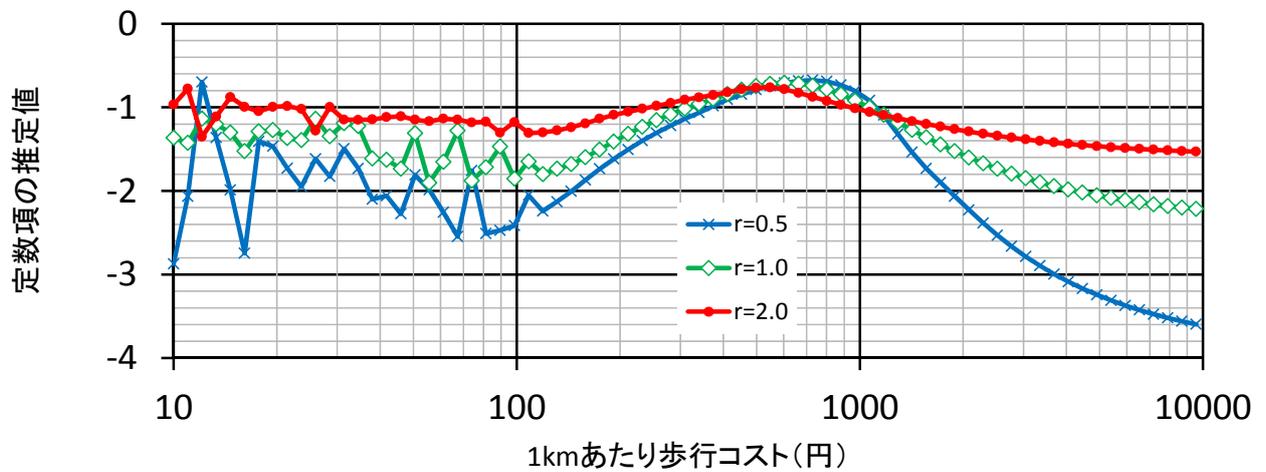


図-17 Dの値 (仮想空間実験)

#### (4) 実験結果の考察

(3)節で示された結果は、「提案モデルは、ある程度は回遊者が最初に行く店舗を選択する行動を説明するものの、その説明力には限界もある」ことを示唆している。 $r$ 値を見ると、とりあえずは、提案モデルの結果と回遊者の行動の間には一定の相関があることは確かなようである。しかし、 $D$ の値が有意に負であることは、実際の回遊者は、提案モデルが予測する結果に比べて、最初に行く店舗として店舗Bを選択しがちであるというバイアスが存在することを示唆する。店舗Bは店舗Aに比べて必ずより近くに位置することを考慮すれば、この結果は、回遊者には「とりあえず近いほうから回ろうか」という意識が働いている可能性があることを示唆しているといえよう。

提案モデルは、実空間実験の結果にくらべて仮想空間実験の結果を（上述のバイアスを除いて）よりよく説明する。 $r$ 値もより大きく、McFadden's  $R^2$ もより大きい値をとっている。理由としては「仮想空間にくらべて実空間では制御できない条件が多く結果が安定しない」「実空間では個人特性（街歩きが好きか、そうでないかなど）が影響しやすい」などが考えられる。このことは、実際の回遊行動も観測が困難なさまざまな要因による影響を受け、結果として、モデルによる厳密な説明が難しいことを示唆するともいえよう。

リグレット理論のパラメータ $r$ の影響はそれほど大きいとはいえない。少なくとも今回の分析の範囲においては、期待効用理論（ $r=1$ ）とリグレット理論のあいだでモデルに明確に優劣がある結果にはならなかった。特に仮想空間実験については結果にほとんど差がない。実空間実験では、 $r=2$ においてAICや $r$ 値が良い値をとる区間が少し広がっている。これは、実際の $p$ の値が推定された値よりいくらかずれていれもモデルの説明力が保たれることを示唆する。ただし、元々のモデルの説明力が高いとはいえないので、このことが、 $r=2$ とおくことの有力なメリットになるとはいいがたいだろう。

提案モデルの統計学的な説明力はあまりよいとはいえない。表-3, 4に示したMcFadden's  $R^2$ はいずれも0.1未満であり、説明力が十分なモデルとはいいがたい。(2)節で示したナイーブモデルのほうがMcFadden's  $R^2$ および尤度比検定の $p$ 値いずれもよい値であることも、このことを示唆する結果となっている。ただし、表-3, 4に示した（定数項のみを含むモデルに対する）尤度比検定の $p$ 値はいずれも0.05未満であり、提案モデルの導入により実験結果の説明力が有意によくなっている。

#### 5. 結論

提案モデルは、実験における回遊者の行動をある程度は説明できるものの、その説明力に限界がある。特に、近い店舗Bに行くバイアスを提案モデルだけでは説明できていない。期待効用理論に比べてリグレット理論が回遊者の行動をよく説明したわけでもない。より発展的な理論を用いて説明力を改善できる可能性はあるかもしれない。

本研究では実空間と仮想空間の2つの実験のデータを用いたが、今回の実験においては仮想空間のほうがよりモデルで説明しやすい結果が出た。仮想空間は実空間に比べて観測や制御が不可能な要因が少ない。今回の結果は、人間行動の特性を、不確定な要因の影響を取り除いて観測するには仮想空間が有効であることを示唆する。仮想空間の実験により、交通行動に影響を与える要因を細かく切り出し検証することが可能であろう。ただし、実際の行動は当然ながら実空間で行われるものである。実空間に存在する不確定な要因をどのようにあつかうかは今後の課題となりうる。

#### 参考文献

- 1) Asakura, Y. and Iryo, T.: Analysis of tourist behaviour based on the tracking data collected using a mobile communication instrument. *Transportation Research Part A*, Vol. 41, No. 7, pp. 684-690, 2007.
- 2) Leung, X., Wang, F. and Wu, B.: A Social Network Analysis of Overseas Tourist Movement Patterns in Beijing: the Impact of the Olympic Games. *International Journal of Tourism Research*, Vol. 14, pp. 469-484, 2012.
- 3) Zheng, Y., Zha, Z. and Chua, T.: Mining Travel Patterns from Geotagged Photos. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*, Vol. 3, No. 3, pp. 1-18, 2012.
- 4) Moiseeva, A. and Timmermans, H.: Imputing relevant information from multi-day GPS tracers for retail planning and management using data fusion and context-sensitive learning. *Journal of Retailing and Consumer Services*, Vol. 17, No. 1, pp. 189-199, 2010.
- 5) Edwards, D. and Griffin, T.: Tourist Pathways in Cities : Providing insights into tourists spatial behaviour The Spatial Behaviour of Tourists in Cities. <http://ssrn.com/abstract=2042291> [Accessed 20 April 2015], pp. 2-14, 2011.
- 6) Iryo, T., Asakura, Y., Onishi, R., and Samma, C.: Modeling Dynamic Generation of a Choice Set in Pedestrian Networks. In : Lam, W. H. K., Wong, S. C., and Lo, H. K. (Eds) *Transportation and Traffic Theory: Golden Jubilee*. Springer: New York: pp. 517-539, 2009.
- 7) Iryo, T., Shintaku, H., and Senoo, S., Experimental study of spatial searching behaviour of travellers in pedestrian networks, in: *LATSIS 2012: 1st European Symposium on Quantitative Methods in Transportation Systems*, Lausanne, Switzerland, 2012.
- 8) 中村優介, 井料隆雅: バーチャルリアリティによる回遊行動観測システムの開発と評価, 平成 25 年度土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集, 2013: CD-ROM (2 pages).

- 9) 福山祥代, 羽藤英二, 時間制約下の遷移確率に着目した複数目的地選択枝集合の生成手法, 土木計画学研究・講演集, Vol.49, No. 228, pp1-6, 2014.
- 10) Loomes, G. and Sugden, R. : Regret theory: An alternative theory of rational choice under uncertainty, *The Economic Journal*, Vol.92, No.368, pp805-824, 1982.
- 11) Chorus, C. G., Arentze, T. A. , and Timmermans, H. J. P. : A Random Regret-Minimization model of travel choice, *Transportation Research Part B*, Vol.42, No1, pp1-18, 2008.
- 12) Chorus, C. G.: A new model of random regret minimization, *EJTIR*, Vol.10, No.10, pp181-196, 2010.
- 13) Chorus, C. G.: Random Regret Minimization: An Overview of Model Properties and Empirical Evidence, *Transport Reviews*, Vol.32, No.1, pp75-92, 2012.