

都心商業空間における商業施設への 消費者来街者数と回遊パタンの 同時推定逆問題について†

斎藤 参郎*, 梶井 昌邦**, 中嶋 貴昭**

1. 研究のねらいと目的

近年、日本では地方中核都市の中心商業地の空洞化が問題となっている。地方中核都市にとって魅力ある中心商業地が不可欠であり、これを「街づくり」のなかでどのように形成していくかが、新しい都市商業政策の重要な課題と考えられるようになったからである。実際、商業集積法、中心市街地活性化法、都市計画法の改正といった一連の動きは、ソフトの産業政策とハードの都市計画を融合し、「にぎわい」ある都心商業環境を創出し、都市魅力を高めることをねらったものである。しかし、「にぎわい」といっても、これをどのように計測するのかの枠組みがあったわけではなく、都心商業環境の整備に関する明確な評価枠組みを欠いていたといえる。

このような問題意識に立ち、斎藤らは、都心への来街者数の観点からの都心商業環境評価枠組みを構築すべく、これまで福岡市をはじめとする九州の諸都市で、消費者回遊行動調査を行うとともに、消費者回遊行動マルコフモデルの開発を行ってきた（斎藤・石橋（1992）、Saito and Ishibashi（1992）、斎藤・中嶋・梶井（1999））。

回遊行動調査とは、都心内での消費者の渡り歩き行動である回遊行動を、立ち寄り場所やそこでの目的などについて、生起順に尋ねる調査である。回遊マルコフモデルでは、消費者が都心にきて最初に立ち寄った店舗への来街頻度を入口来街頻度、これに回遊による回遊来街頻度を合わせたものを総来街頻度、店舗間での来街者の渡り歩きを回遊パターンとよび、これらを消費者の回遊行動の因果順序に従って推定していく。具体的には、入口来街頻度を他の情報を用いて別途推定し、これを所与とし、消費者の回遊選択確率をもとに、各店舗への回遊来街頻度、総来街頻度および、回遊パタンの推定を行っていく。

ところが、百貨店などの大規模店では、ほとんど自店舗への来店者数をカウントしており、来店者数データは比較的入手しやすいのに対し、入口来街者数の観測データは皆無であり、その推

† 本論文は、第36回日本地域学会年次大会（於、熊本大学）において発表したものを加筆修正したものである。討論者の労をとって頂いた中央大学の浅田統一郎先生、立命館大学の馬場美智子氏、また、豊橋技術科学大学の廣島康裕先生をはじめ、フロアーの方々からも有益なコメントを頂いた。ここに記して厚く感謝の意を表したい。

* 福岡大学経済学部

** 福岡大学大学院経済学研究科

定は非常に困難であった。利用可能な来店者数データと回遊行動調査データを活用し、入口来街頻度を逆に推定することができれば、より正確な入口来街頻度の推定が可能となるはずである。本研究の目的はこれを行うことである。

一方、交通研究の分野では、従来から、パーソントリップ調査を基本とした、OD (Origin-Destination) 交通量推定に関する多くの研究がなされている。

パーソントリップ調査は、都市圏などの広域の圏域を対象とした居住地ベースのサンプリング調査であり、回答者である圏域居住者の1日の交通行動トリップを聞く調査である。調査対象となるトリップには、通勤通学目的のトリップ、会議や集金などの業務トリップ、また買物や観光などの自由目的トリップなどが含まれている。

パーソントリップ調査は交通計画の基本となる、いわゆるOD分布交通量を推計することを目的とした調査であるが、この調査をもとにしたODの推計に関しては、いくつかの問題点が指摘されている。(1) 都市圏全体といった広域のODの推計には有効であるが、都市、さらには都心部といった狭い限定された地域でのODの推計には、その推計精度に問題があること(高山(1998))、また、(2) 買回りといった同一目的が引き続く買物目的や、レジャー目的など、自由目的のトリップについては、行先記入上の精度の問題があること、などである。

これらの問題は、パーソントリップ調査が、調査対象者に対し過去のある1日の行動を、対象者の家庭を訪問して尋ねるといった手間をかけた調査ではあるが、調査対象地域の広さから、約3%の居住地ベースサンプリング調査となっていることに起因している。これを解決するには、パーソントリップ調査の抽出率を高め、自由目的についても詳細な情報をえられる調査の実施が求められるが、大規模な居住地ベース調査であり、コストが莫大にかかることから、現実的ではない。また、大都市圏から地方都市へパーソントリップ調査を拡大する動きもあり、調査コストの観点を含め、今後のパーソントリップ調査の在り方が模索されている。

その一つ方向として考えられるのが、地域を限定し、自由目的の記述精度を高めた、来街地ベースサンプリング調査によるパーソントリップ調査であろう。都心部といった狭い範囲を対象とした来街地ベースサンプリングによるパーソントリップ調査を実施し、そのデータを既存の居住地ベース調査の補完データとして扱ったり、また、既存の居住地ベース調査の更新に活用することなどが考えられるからである。

さて、われわれが実施してきた回遊行動調査は、その目的とねらいを都心商業環境の評価に置いていたため、パーソントリップ調査との関連は、全くないものとしてきた。しかし、このように考えてみると、実は、回遊行動調査は、既存の居住地ベースパーソントリップ調査を補完する、来街地ベースパーソントリップ調査に他ならないことが分かる。それは、回遊行動調査はlinkedトリップデータを観測する調査であり、また、都心といった狭い範囲で買物レジャーといった自由目的トリップの詳細なデータを収集しようとする調査であるからである。

パーソントリップ調査と都心部での歩行者回遊行動調査を関連付けいくつかの方法の有用性を評価しようとした研究に、木下ら(1999)がある。しかし、木下ら(1999)は、回遊行動に関す

る特性を明らかにした多くの先行研究を見落とすとともに、来街地ベース調査としての都心部歩行者回遊行動調査の統計的特性を全く考慮しておらず、OD推計の精度への影響を無視したことになっている。

先にも述べたように、本研究の課題は、所与の各店舗の来街者数（結果）から、入口来街者数（原因）を消費者の回遊行動の因果順序とは逆に推定することであり、この意味で逆推定問題であった。

この課題を来街地ベースパーソントリップ調査としての課題に翻案すれば、集中交通量と来街地ベースパーソントリップ調査データをもとに、発生交通量とOD分布交通量を同時推定する問題となる。しかし、来街地ベースサンプリング調査には、必ず choice-based サンプリングバイアスの問題が生ずる。

本研究の目的は、choice-based サンプリングバイアスを除いた、これらの問題への解法を提案することである。より具体的には、回遊行動調査データから得られる観測回遊行動データと、各商業地または店舗から得られる総来街者数データを用い、I-射影モデリングによる定式化を行って、都心商業地への入口来街頻度と回遊行動のパターンを、同時推定する方法を提案することである。また、これを通して、来街地ベースサンプリングにもとづいたパーソントリップ調査データからOD分布交通量を推計するという新しい課題への理論的貢献を行おうとするものである。

2. 問題の定式化

2.1 回遊行動データの集計

本章では、上で述べた逆問題の定式化を行うが、その定式化は、linked トリップ回遊行動データの集計 (aggregation) の考え方と密接に関連する。本節では、交通研究の分野との関連に触れつつ、linked トリップ回遊行動データを unlinked トリップに分解し、ODマトリクスとして集計する方法を考察する。

回遊行動データは典型的なトリップチェインデータである。交通の分野では、トリップチェインのことを linked トリップ、パス、あるいはルートとよび、そのデータは回遊行動と同じく、消費者や移動者が立ち寄った、引き続くノードの列（あるいは集合）として表現される。このように、回遊行動データも交通のパスもデータとしては、同一の形式で表わされるが、これらのデータに関する統計的推測については、そのデータがどのように集められたかによって、大きく異なってくる。回遊行動調査は来街地ベース調査であった。これに対し、交通の分野で、パスデータを集める通常のパーソントリップ調査は居住地ベース調査である。回遊行動調査も、linked パーソントリップデータを集めるという意味でパーソントリップ調査であるが、通常のそれとの対比から、来街地ベースパーソントリップ調査として位置づけられる。来街地ベースサンプリングデータについては、常に choice-based サンプリングバイアスが伴うので、その扱いについては、十分な配慮が必要である。これについては次節で述べる。

さて、交通計画の分野ではリンクフローから、ODマトリクスを推定する方法が多数提案されて

いる。交通の分野では、伝統的に交通ネットワークはノードとリンクの集合として表現される。リンクフローとは、リンク上の断面交通量のことで、通常の通行量調査で得られる、ODに関する情報を持たないデータである。

これに対し回遊行動研究では、都心商業システムを商業地ノードの集合として定義し、リンクを明示的には導入しない。回遊行動調査は概念的には、商業地ノードでのサンプリングにもとづいて、linked パーソントリップデータを収集する。これに加え、各商業地ノードでは来店者数という交通量をカウントすることができる。この来店者数というデータは、OD の情報を含まず、交通研究でのリンクフローに相当するものである。従って、回遊行動研究での商業地ノードは、いわば、出発地、目的地ノードであると同時にリンクノードの働きをしていることが分かる。

以上のことを念頭において、linked トリップを、unlinked トリップに分解し、OD フローマトリクスに集計する方法を定式化していこう。

ある都心商業空間に、 n 個の商業地（または商業施設）が立地しているとしよう。 N を商業地ノードの集合とする。ここで、商業地ノード N には、仮想ノードである自宅ノード h が含まれているとする。ここで N の任意のノード $i \in N$ は、発地ノード (origin)、着地ノード (destination) の両方のノードになりうる。そして、全てのパスまたはルート集合を、 R としよう。 R の任意の要素 $r \in R$ は、ある消費者の、都心商業空間の商業地ノードをどのように渡り歩いたかという 1 つの回遊トリップチェーンを表わす。

R 上の確率分布 X を考えよう。 q_r を X が $r \in R$ の値を取る確率、

$$\text{Prob}(X=r) = P_X(r) = q_r \quad (1)$$

と定義する。パス r の長さ k を消費者が立ち寄った商業地ノードの数であるとし、 $R^{(k)}$ を長さ k の全パスの集合であるとする。例えば、 $h123h$ のパスの長さは 3 となる。

$$R^{(k)} = \{r \in R \mid \text{パス } r \text{ の長さ} = k\} \quad (2)$$

$R^{(k)}$ の定義より、 R は、 $R^{(k)}$ 、 $k=1, 2, \dots, n$ の直和として次のように表現できる^(註1)。

$$R = R^{(1)} \cup R^{(2)} \cup \dots \cup R^{(n)} \quad (3)$$

また、すべての OD ペアの集合を W としよう。

$$W = \{(i, j) \mid i, j \in N\} \quad (4)$$

任意の OD ペアは、トリップチェーンの間に、引き続く 2 つのノードのペアとして現れることとなる。また自宅から自宅への OD ペア (h, h) は、商業地ノードに来街頻度をもたらさないので、ここでは、このようなペアを除外することとする。

確率 $q^{(k)}$ 、 $k=1, 2, \dots, n$ を、次のように定義する。

^(註1) ここでは来街者が、1 度立ち寄った商業地ノードに再び訪れるといったサイクルがパスに含まれないものとして単純化している。

$$q^{(k)} = \sum_{r \in R^{(k)}} q_r, \quad k=1, 2, \dots, n \quad (5)$$

そして、 R_{ij} を OD ペア (i, j) を含むすべてのパスの集合とする。

$$R_{ij} = \{r \in R \mid (i, j) \in r, i, j \in N\} \quad (6)$$

R 上の確率分布 q_r と、 W 上の unlinked トリップの密度 ϕ_{ij} との間には、

$$\phi_{ij} = \frac{\sum_{r \in R_{ij}} q_r}{1 + q^{(1)} + 2q^{(2)} + \dots + nq^{(n)}} \quad (7)$$

$$= \frac{\sum_{r \in R_{ij}} q_r}{1 + m} \quad (8)$$

という関係が成立している。ただし、ここで、 $m = \sum_{k=1}^n kq^{(k)}$ として、パスの長さの全平均(ネット生成原単位)を定義した。(8)式は回遊トリップチェーンデータからの OD フローマトリクスの集計、すなわち、linked データを unlinked データへ分解し、それを OD フローマトリクスに集計する方法を表現したものに他ならない。

2.2 来街地ベースパーソントリップデータの集計問題

さて、以上のように、linked トリップを、unlinked トリップに分解し、それを OD フローとして集計する方法をみてきたが、これを実際の回遊行動データの集計に適用する際には、細心の注意が必要である。それは、回遊行動調査が、都心内の商業地に“複数”の調査地点を置き、各調査地点への来街者を対象にランダムサンプリングを行う来街地ベースパーソントリップ調査であり、これら“複数”調査地点で得られた回遊トリップチェーンデータをプールして、先の集計を行うと choice-based サンプリングの問題の引き起こすことになるからである。ここでこの点について更に詳しく説明を加えておこう。

まず、通常の外生的 (exogenous) サンプリングと choice-based サンプリングの違いを理解しておくことが必要である。自家用車対公共交通機関の交通手段選択 (モード) 選択を例にとって説明すると、choice-based サンプリングとは、調査デザインによって、自家用車を選択した人から何人、また公共交通機関を選択した人から何人と、サンプル数を決め、それぞれのモードを選択した人からサンプリング調査を行う方法のことである。これを因果の観点から述べると次のようになる。原因となる確率変数を x 、結果となる変数を y とおき、それらの同時分布を $f(x, y)$ とおこう。choice-based サンプリングは、結果変数 y を所与とした、原因変数 x の条件付き分布 $f(x | y)$ に従って、 x をランダムサンプリングすること、また通常の外生的 (exogenous) サンプリングは原因変数 x を所与とした、結果変数 y の条件付き分布 $f(y | x)$ をランダムサンプリングすることに対応する。モード選択の例でいえば、原因となる変数、年齢や性別などの属性を固定して、だれがどのモードを選択したのかを見るのが、外生的 (exogenous) サンプリングであるのに対し、choice-based サンプリングは各モードには、どのような属性の人が多いかを調べる調査といえ

る。

さて、回遊行動調査の考察に戻ろう。回遊行動調査は来街地ベースパーソントリップ調査であるので、来街地ベース調査それ自体、choice-based サンプルングになっているといえるが、都心部の OD フローである回遊パターンを推定するのがここでは課題であるので、このことは問題ではない。それは、都心部に出向したという条件のもとでの、都心部の OD フローに関心があり、都心部への出向頻度の高い人がサンプル中により多く含まれているのは当然だからである。これは旧来の居住地ベースパーソントリップ調査の OD フロー集計に、属性別のトリップ発生頻度のウェイトをかけるのと対照的である。

問題は、複数調査地点のデータをプールして、集計することにある。調査地点 a, b を考えよう。調査地点 a を固定し、そこで得られた全サンプルのうち、各サンプルがどこからきたか、またどこへいったかの比率である、 a への着地確率、 a からの発地確率は、後で述べるように、バイアスがなく不偏である。

しかし、調査地点 a, b のサンプルをプールし、プールした全サンプルのうち、 a を訪れたサンプルを対象に、上と同様に、 a への着地確率、 a からの発地確率を推計したとすれば、これは choice-based サンプルングバイアスを含むことになる。何故なら、調査地点 b で得られたサンプルの中に、 $a \rightarrow b$ の移動を行ったものがあれば、 a からの発地確率の計算に、 a からの行先の選択対象である b でサンプルングされた、choice-based サンプルを含めたことになるからである。また、同様に、調査地点 b で得られたサンプルの中に、 $b \rightarrow a$ の移動を行ったものがあれば、これは、 a への着地確率の計算に、 a への発地元の選択対象である b でサンプルングされた、choice-based サンプルを含めたことになってしまう。

以上が、複数調査地点で得られたトリップチェーンデータをプールし、OD の集計を行った結果は choice-based サンプルングバイアスを含むことになると述べた理由である。

これらのことを考慮に入れて、ここでは、調査地点 s の観測回遊トリップチェーンデータを unlinked の OD トリップ行列に集計する方法を考えていこう。

調査地点の集合を $S \subset N$ 、調査地点を $s \in S$ であらわそう。調査地点 s へ移動した全サンプルと、商業地ノード i から s へ移動した全サンプルとの比率 P_{is}^{OBS} を、調査地点 $s \in S$ での観測着地確率 (observed arrival probability) とする。このように推定された P_{is}^{OBS} 、 $i \in N$ には、調査地点のサンプルのみを用いているため、choice-based バイアスが含まれない。実際、 P_{is}^{OBS} 、 $i \in N$ は、着地確率 P_{is} 、 $i \in N$ (arrival probability) の最尤推定値となっている。このように、来街地ベースパーソントリップ調査から、choice-based バイアスを含まない着地確率の情報を得ることができる。

R 上の確率分布 q_r は未知である。分布 q_r が、来街地ベースパーソントリップ調査データから得られる情報と整合性をもつためには、観測着地確率 P_{is}^{OBS} 、 $i \in N$ との間に関係が成立しなければならない。

$$\begin{aligned}
 P_{is}^{OBS} &= \frac{\phi_{is}}{\phi_{+s}}, \quad i \in N \\
 &= \sum_{r \in R_{is}} q_r / \sum_{k \in N} \sum_{r \in R_{ks}} q_r
 \end{aligned} \tag{9}$$

これより,

$$\sum_{r \in R_{is}} q_r - P_{is}^{OBS} \sum_{k \in N} \sum_{r \in R_{ks}} q_r = 0 \tag{10}$$

同様に, R 上の確率分布 q_r は, 調査地点 s における観測発地確率 $P_{sj}^{OBS}, j \in N$ との間に次の関係が成立しなければならない。

$$\begin{aligned}
 P_{sj}^{OBS} &= \frac{\phi_{sj}}{\phi_{s+}}, \quad j \in N \\
 &= \sum_{r \in R_{sj}} q_r / \sum_{k \in N} \sum_{r \in R_{sk}} q_r
 \end{aligned} \tag{11}$$

これより,

$$\sum_{r \in R_{sj}} q_r - P_{sj}^{OBS} \sum_{k \in N} \sum_{r \in R_{sk}} q_r = 0 \tag{12}$$

2.3 入口来街頻度・回遊パタン同時推定問題のための I-射影モデリング

以上の準備をもとに, 入口来街頻度と回遊パタンの同時推定逆問題の定式化を行っていこう。このために, まず来街頻度の概念を斎藤ら (斎藤・石橋 (1992), Saito and Ishibashi (1992), 斎藤・中嶋・梶井 (1999)) に従い整理しておく。都心に訪れた消費者を考える。彼が, 回遊行動トリップチェーンの中で最初の立ち寄った商業地ノードを入口ノードという。入口来街頻度 $E_i, i \in N - \{h\}$ とは, 商業地ノード i の来街頻度のうち, 来街者に入口として選択された来街頻度をいう。また, 回遊によって選択された来街頻度を回遊来街頻度とよび, 入口来街頻度と回遊来街頻度を合わせたものを総来街頻度 $V_i, i \in N - \{h\}$ とよぶ。この総来街頻度は, 商業地 (または商業施設) からみた来店者数に対応するものである。また, 回遊パタン $F_{ij}, i, j \in N - \{h\}$ とは, 商業地ノード i から j へ渡り歩いた来街者の OD フローをいう。

入口来街頻度と, 回遊パタンの同時逆推定問題とは, 以下である。

[入口来街頻度・回遊パタン同時逆推定問題] 所与の各々の商業地ノードへ総来街頻度 $V_i, i \in N - \{h\}$ と, 来街地ベースパーソントリップデータ $D^{(s)}, s \in S$ が与えられたもとで, 未知の入口来街頻度 $E_i, i \in N - \{h\}$, 回遊パタン $F_{ij}, i, j \in N - \{h\}$ を推定せよ。

この問題に対し, 本研究では, I-射影モデリングを用いる。I-射影問題とは, ある凸制約を満たしつつ, Kullback-Leibler 情報量を最小化する分布を求める凸制約付き最小化問題であり, 具体的には, 所与の初期分布 π のもとで, 制約条件 K をみたしつつ, Kullback-Leibler 情報量 $I(q, \pi)$

を最小化する分布 q を求める方法である。I-射影モデリングは、I-射影問題によって定式化された統計的モデリングのことを指しており、対数線形モデルの最尤推定値の推定、情報量最小化原理や、エントロピー最大化原理、large deviation 理論等、様々に適用される (Saito (1998))。

以下では、まず各商業地への観測総来街頻度と、回遊行動調査データから得られる情報から、パス R 上の分布 q_r を推定し、それをもとに、未知の入口来街頻度 $E_i, i \in N - \{h\}$, 回遊パターン $F_{ij}, i, j \in N - \{h\}$ を推定する。これを I-射影モデリングにより定式化を行うが、まず、制約条件の集合 K について考えていくこととしよう。

(1) 全商業地の総来街頻度に対する各商業地の総来街頻度の割合に関する制約

全商業地の総来街頻度に対する商業地 i の総来街頻度の割合に関する観測データを $v_i^{OBS}, i \in N - \{h\}$ で表わそう。するとこれは次のようになる。

$$v_i^{OBS} = V_i^{OBS} / \sum_{j \in N - \{h\}} V_j^{OBS} \quad (13)$$

ところで全商業地の総来街頻度に対する商業地 i の総来街頻度の割合 $v_i, i \in N - \{h\}$ は、 W 上の unlinked トリップの密度と

$$v_i = \sum_{k \in N} \phi_{ki} / \sum_{k \in N} \sum_{j \in N - \{h\}} \phi_{kj}$$

という関係が成り立っている。これより、

$$\begin{aligned} v_i &= \sum_{k \in N} \phi_{ki} / \left(\sum_{k \in N} \sum_{j \in N} \phi_{kj} - \sum_{k \in N} \phi_{kh} \right) \\ &= \sum_{k \in N} \frac{\sum_{r \in R_{ki}} q_r}{1+m} / \left(\frac{1+m}{1+m} - \frac{1}{1+m} \right) \\ &= \sum_{k \in N} \sum_{r \in R_{ki}} q_r / m \\ &= \sum_{k \in N} \sum_{r \in R_{ki}} q_r / \sum_{k=1}^n k q^{(k)} \end{aligned}$$

したがって、 $v_i, i \in N - \{h\}$ の観測データ $v_i^{OBS}, i \in N - \{h\}$ と、 R 上の分布 q_r には

$$\sum_{k \in N} \sum_{r \in R_{ki}} q_r - v_i^{OBS} \sum_{k \in N} k \cdot q^{(k)} = 0 \quad (14)$$

の関係が成立せねばならない。これが、総来街頻度割合からの制約条件となる。ここで、 $v_i^{OBS}, i \in N - \{h\}$ は、各商業地（商業施設）で観測されるデータである。

(2) 着地確率の制約条件

前節の (10) 式が着地確率の制約条件となる。

$$\sum_{r \in R_{is}} q_r - P_{is}^{OBS} \sum_{k \in N} \sum_{r \in R_{ks}} q_r = 0 \quad (10)$$

(3) 発地確率の制約条件

前節の (12) 式が発地確率の制約条件となる。

$$\sum_{r \in R_{sj}} q_r - P_{sj}^{OBS} \sum_{k \in N} \sum_{r \in R_{sk}} q_r = 0 \tag{12}$$

このようにして制約集合 K は

$$K = \{(10), (12), (14) \text{ を満たす } q_r, r \in R\} \tag{15}$$

となり、パス R 上の分布 q_r を求める I-射影問題とは以下となる。

$$I(\hat{q}, \pi) = \min_{q \in K} I(q, \pi) \tag{16}$$

(16) 式の解 $\hat{q} = \{\hat{q}_r, r \in R\}$ がえられたならば、次の関係を用いて入口来街頻度を推定することが可能となる。

$$\frac{\sum_{i \in N - \{h\}} E_i}{\sum_{i \in N - \{h\}} V_i^{OBS}} = \frac{1}{\sum_{k \in N} k \hat{q}^{(k)}} \tag{17}$$

ここで $\hat{q}^{(k)} = \sum_{r \in R^{(k)}} \hat{q}_r$

総入口来街頻度の推定値 \hat{E} は次となる。

$$\hat{E} = \sum_{i \in N - \{h\}} V_i^{OBS} / \sum_{k \in N} k \hat{q}^{(k)} \tag{18}$$

そして、入口来街頻度 E_i の推定値 $\hat{E}_i, i \in N - \{h\}$ は次の式となる。

$$\hat{E}_i = \hat{E} \cdot \left(\sum_{r \in R_{hi}} \hat{q}_r \right), i \in N - \{h\} \tag{19}$$

また、度数ベースのパス r のパスフロー \hat{Q}_r は次の式により得られる。

$$\hat{Q}_r = \hat{E} \cdot \hat{q}_r, r \in R \tag{20}$$

この度数ベースのパスフローを、unlinked フローに分解しそれを集計することで、回遊パターン $F_{ij}, i, j \in N - \{h\}$ を推定することができる。

2.4 問題の解法

解法アルゴリズムとして、Saito (1998) により開発された拡張循環反復比率調整法 (Extended Cyclic Iterative Proportional Fitting Procedure) を用いる。これを、付録に記しておく。

3 シーサイドももち来街地ベースパーソントリップデータへの適用

3.1 分析対象地区とデータ

3.1.1 シーサイドももち地区：福岡市ウォーターフロント開発エリア

ここでは、適用対象地区として、福岡市のシーサイドももち地区を取り上げ、I-射影モデリング



図1 シーサイドもち地区

による入口来街頻度と回遊パタンの同時逆推定法の、実際のデータへの適用例を示す。シーサイドももちは、面積約 150 ha の 1989 年に完成したウォーターフロント開発地区である。現在では、シーサイドももちには、ホテルや、レストランをはじめ、テレビ局や、福岡市の博物館、ハイテクセンター、ドーム型の野球場等様々な施設が立地している。今回用いる来店者数データや、来街地ベースパーソントリップデータは 1996 年の時点のものである。1996 年時点のシーサイドももちには、(1) 福岡ドーム (2) シーホークホテルアンドリゾート (3) 福岡タワーそして、(4) マリゾンといった 4 つの大規模な施設が立地しているのみであった。1996 年時点でのシーサイドももちの地図を図 1 に示す。

福岡ドームは、48,000 人収容可能なプロ野球チームをもつドーム型球場、シーホークホテルアンドリゾートは、客室数 1,052、約 2,000 人宿泊可能のホテルとショッピングモールの複合施設である。福岡タワーは、展望台や、レストランを併せ持つ高さ 105 m の放送電波塔で、マリゾンは、店舗や、レストラン、広場などが集まるレクリエーション施設である。これらは福岡市の人気観光地となっている。

分析対象地区としてシーサイドももちを取り上げた理由は、福岡市観光局がシーサイドももちの各施設の来街者数のデータが毎年公表していること、1996 年、1997 年に福岡大学経済学部齋藤研究室が実施した回遊行動調査データがあり、発地確率や、着地確率の観測データが得られること、また、この時点では、地域に大規模な施設が上に示した 4 つしかなく、分析のための、調査データの扱いが容易であることである。そして、現時点でも当時でもいったいシーサイドももちへのネットの入り込み者数はどれくらいなのか分かっていないことである。それでは次の項で調査データの概要を説明していこう。

3.1.2 データ

シーサイドももち消費者回遊行動調査は、シーサイドももち地区への、来街者に対する約10分間の聞き取りアンケート調査である。そこでは、当日被験者が立ち寄った店舗、目的を生起順に尋ねる。調査日時は、1996年1月6日、7日、27日、28日の合計4日間であり、調査地点は、福岡ドーム、シーホーク、福岡タワー、マリゾンの4ヶ所を設置した。有効サンプル数は、323票である。

3.2 入口来街頻度・回遊パタンの同時逆推定問題

本節では、シーサイドももち地区における、入口来街頻度、回遊パタンの同時推定逆問題のI-射影モデリングによる定式化を行っていく。

I-射影問題は次のようになる。

$$I(\bar{q}, \pi) = \min(q, \pi) \tag{21}$$

それでは、制約条件 K についてみていくこととしよう。今回は、簡単化のため以下の2つの制約を取り上げる。

(1) 全店舗の総来街頻度に対する各店舗の総来街頻度の割合に関する制約

商業地ノードは、1. 福岡ドーム、2. シーホークホテルアンドリゾート、3. 福岡タワー、4. マリゾンの4つであり、 $N = \{1, 2, 3, 4, h\}$ となる。従って全商業地の総来街頻度に対する各商業地の総来街頻度の割合に関する制約は (22) 式となる。

$$\sum_{k \in N} \sum_{r \in R_{ki}} q_r - v_i^{OBS} \sum_{k=1}^4 k \cdot q^{(k)} = 0 \quad i=1, \dots, 4 \tag{22}$$

商業地ノードにおける総来街者数 V_i^{OBS} , $i=1, 2, 3, 4$ を表1に示す。

(2) 福岡ドームにおける着地確率

$$\sum_{r \in R_{i1}} q_r - p_{i1}^{OBS} \sum_{k \in N} \sum_{r \in R_{k1}} q_r = 0 \tag{23}$$

調査地点は4つであり、この他にも着地確率について3つの制約、また発地確率にも4つの制

表1 各商業地への総来街者数 (単位: 10,000 人/年間)
(出所: 福岡市観光統計)

| 1. 福岡ドーム | 2. シーホーク | 3. 福岡タワー | 4. マリゾン | 計 |
|----------|----------|----------|---------|-------|
| 800 | 350 | 78 | 157 | 1,385 |

表2 福岡ドームでの観測着地確率
(出所: 1996年シーサイドももち地区来街者ベースパーソントリップ調査)

| 1. 福岡ドーム | 2. シーホーク | 3. 福岡タワー | 4. マリゾン | 自宅 |
|----------|----------|----------|---------|-------|
| 0.000 | 0.125 | 0.011 | 0.074 | 0.790 |

約が考えられるが、今回は簡単化のため、福岡ドームでの観測着地確率のみを用いることとした。

表2に、福岡ドームでの観測着地確率を示す。

3.3 推定結果

推定結果を以下に示す。

表3に、I-射影問題を解として得られた、 R 上の分布 $\hat{q} = \{\hat{q}_r, r \in R\}$ を示す。商業地ノード5は自宅ノードに対応する。

表4に、入口来街頻度の推定結果を示す。

表3 バス R 上の確率分布推定結果

| | パス | 確率 | | パス | 確率 | | パス | 確率 | | パス | 確率 |
|----|---------|---------|----|-----------|---------|----|-------------|---------|----|-------------|---------|
| 1 | 5 1 5 | 0.46268 | 17 | 5 1 2 3 5 | 0.00801 | 33 | 5 3 4 1 5 | 0.00186 | 49 | 5 2 3 1 4 5 | 0.00015 |
| 2 | 5 2 5 | 0.04113 | 18 | 5 1 2 4 5 | 0.01339 | 34 | 5 3 4 2 5 | 0.00018 | 50 | 5 2 3 4 1 5 | 0.00063 |
| 3 | 5 3 5 | 0.00621 | 19 | 5 1 3 2 5 | 0.00801 | 35 | 5 4 1 2 5 | 0.01232 | 51 | 5 2 4 1 3 5 | 0.00063 |
| 4 | 5 4 5 | 0.01038 | 20 | 5 1 3 4 5 | 0.00202 | 36 | 5 4 1 3 5 | 0.00186 | 52 | 5 2 4 3 1 5 | 0.00015 |
| 5 | 5 1 2 5 | 0.15669 | 21 | 5 1 4 2 5 | 0.01339 | 37 | 5 4 2 1 5 | 0.00764 | 53 | 5 3 1 2 4 5 | 0.00015 |
| 6 | 5 1 3 5 | 0.02366 | 22 | 5 1 4 3 5 | 0.00202 | 38 | 5 4 2 3 5 | 0.00018 | 54 | 5 3 1 4 2 5 | 0.00015 |
| 7 | 5 1 4 5 | 0.03955 | 23 | 5 2 1 3 5 | 0.00457 | 39 | 5 4 3 1 5 | 0.00045 | 55 | 5 3 2 1 4 5 | 0.00039 |
| 8 | 5 2 1 5 | 0.08941 | 24 | 5 2 1 4 5 | 0.00764 | 40 | 5 4 3 2 5 | 0.00018 | 56 | 5 3 2 4 1 5 | 0.00063 |
| 9 | 5 2 3 5 | 0.00210 | 25 | 5 2 3 1 5 | 0.00178 | 41 | 5 1 2 3 4 5 | 0.00068 | 57 | 5 3 4 1 2 5 | 0.00063 |
| 10 | 5 2 4 5 | 0.00352 | 26 | 5 2 3 4 5 | 0.00018 | 42 | 5 1 2 4 3 5 | 0.00068 | 58 | 5 3 4 2 1 5 | 0.00039 |
| 11 | 5 3 1 5 | 0.00526 | 27 | 5 2 4 1 5 | 0.01232 | 43 | 5 1 3 2 4 5 | 0.00068 | 59 | 5 4 1 2 3 5 | 0.00063 |
| 12 | 5 3 2 5 | 0.00210 | 28 | 5 2 4 3 5 | 0.00018 | 44 | 5 1 3 4 2 5 | 0.00068 | 60 | 5 4 1 3 2 5 | 0.00063 |
| 13 | 5 3 4 5 | 0.00053 | 29 | 5 3 1 2 5 | 0.00178 | 45 | 5 1 4 2 3 5 | 0.00068 | 61 | 5 4 2 1 3 5 | 0.00039 |
| 14 | 5 4 1 5 | 0.03639 | 30 | 5 3 1 4 5 | 0.00045 | 46 | 5 1 4 3 2 5 | 0.00068 | 62 | 5 4 2 3 1 5 | 0.00015 |
| 15 | 5 4 2 5 | 0.00352 | 31 | 5 3 2 1 5 | 0.00457 | 47 | 5 2 1 3 4 5 | 0.00039 | 63 | 5 4 3 1 2 5 | 0.00015 |
| 16 | 5 4 3 5 | 0.00053 | 32 | 5 3 2 4 5 | 0.00018 | 48 | 5 2 1 4 3 5 | 0.00039 | 64 | 5 4 3 2 1 5 | 0.00039 |

表4 入口来街頻度推定結果 (単位: 10,000 人/年間)

| 1. 福岡ドーム | 2. シーホーク | 3. 福岡タワー | 4. マリゾン | 計 |
|----------|----------|----------|---------|-----|
| 632 | 142 | 22 | 65 | 861 |

表5 自宅を含めた回遊パターン (unlinked OD トリップマトリクス) の推定結果

(単位: 10,000 人/年間)

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 計 |
|----------|-----|-----|----|-----|-----|-------|
| 1. 福岡ドーム | 0 | 168 | 38 | 56 | 538 | 800 |
| 2. シーホーク | 100 | 0 | 13 | 28 | 209 | 350 |
| 3. 福岡タワー | 9 | 16 | 0 | 7 | 45 | 78 |
| 4. マリゾン | 59 | 24 | 5 | 0 | 69 | 157 |
| 5. 自宅 | 632 | 142 | 22 | 65 | 0 | 861 |
| 合計 | 800 | 350 | 78 | 157 | 861 | 2,246 |

表6 回遊選択確率の推定結果

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 計 |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1. 福岡ドーム | 0.000 | 0.210 | 0.047 | 0.071 | 0.673 | 1.000 |
| 2. シーホーク | 0.286 | 0.000 | 0.037 | 0.080 | 0.596 | 1.000 |
| 3. 福岡タワー | 0.118 | 0.205 | 0.000 | 0.091 | 0.586 | 1.000 |
| 4. マリゾン | 0.377 | 0.150 | 0.032 | 0.000 | 0.441 | 1.000 |
| 5. 自宅 | 0.734 | 0.165 | 0.025 | 0.076 | 0.000 | 1.000 |
| 合計 | 0.356 | 0.156 | 0.035 | 0.070 | 0.384 | 1.000 |

表7 着地確率の推定結果

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 計 |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1. 福岡ドーム | 0.000 | 0.480 | 0.484 | 0.360 | 0.625 | 0.356 |
| 2. シーホーク | 0.125 | 0.000 | 0.169 | 0.179 | 0.242 | 0.156 |
| 3. 福岡タワー | 0.011 | 0.045 | 0.000 | 0.045 | 0.053 | 0.035 |
| 4. マリゾン | 0.074 | 0.067 | 0.065 | 0.000 | 0.080 | 0.070 |
| 5. 自宅 | 0.790 | 0.407 | 0.283 | 0.416 | 0.000 | 0.384 |
| 合計 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |

(20) 式より、度数ベースのパスフローを求めることができる。これを、unlinked フローに分解して、集計することにより unlinked OD トリップマトリクスを推定することができる。これは、自宅のノードを含んだ回遊パターンである。これを表5に示す。

表6は、表5の回遊パターンより求めた、回遊選択確率である。

表7はODフローマトリクスから求められる発地確率である。第1列は、福岡ドームでの推定着地確率であるが、これは、表2に示された福岡ドームでの観測着地確率に一致している。これは、I-射影モデリングの $\hat{q} = \{\hat{q}_r, r \in R\}$ 解が、(23) 式で示された制約条件を満たさなければならないことに対応している。

4 結論と今後の課題

これまで、居住地ベースのパーソントリップデータの解析から、この程度ではないか、という数字はあったにせよ、地方中核都市の都心部へ一体何人の人が入り込んでいるのか、これを正確に推定する方法は提案されることがなかった。本研究では、シーサイドももちという福岡市のウォーターフロント開発地区を取り上げているが、ここでも都心部への入り込み者数と同様、一体何人の人が入り込んでいるのか、を確かめるすべがなかった。また更に同様の問題を付け加えれば、北部九州3県（福岡、佐賀、長崎）への観光の入り込み者数は一体どのくらいなのか、これも各県の観光客数の数字は公表されるものの、推定する方法が提案されたことはない。

本研究の意義は、来店者数、来街者数、来街観光客数といった比較的入手しやすいカウントデータに、居住地ベース調査に比べて、数段低コストな、来街地ベースサンプリング調査である回遊

行動調査データを組み合わせることによって、これまで全く提案されたことのなかった、都心部へのネットの入り込み者数の推定問題を定式化し、これを実際に解くことができることを示した点にある。

より具体的には、本研究は、来店者数データと、来街地ベース調査である回遊行動調査データから、入口来街頻度と回遊パターンを同時に推定する逆推定問題を定式化し、来街地ベース調査に特有の Choice-based サンプリングバイアスを除去する、I-射影モデリングの方法にもとづいた、入口来街頻度と回遊パターンの同時逆推定法を構築し、福岡市のウォーターフロント開発地区であるシーサイドももちに実際にこれを適用し、その有効性を示したものである。

今後の課題としては、(1) 本研究の方法を、入り込み観光客数の推定、また、より複雑な都心部商業環境への入口来街頻度の推定など種々の問題に適用すること、(2) 今回、単純化のため、1地点での着地確率の制約しか導入していないが、これを拡張した多地点の着地確率の制約の導入、また、(3) 発地確率の制約の導入、(4) 今回は、すべての地点で来街者数(来店者数)データが得られたが、これが一部しか得られない場合の推定法の構築、などが挙げられる。本研究の課題は入口来街頻度と回遊パターンの同時逆推定法という新しい推定法の提案にあり、推定値の精度検証や検定は行なわなかった。しかし、ブートストラップ等を用いた推定値の精度検証は重要な話題であり、今後の課題としたい。

参 考 文 献

- [1] Csizsár, I., "Why least square and maximum entropy? An axiomatic approach to inference for liner inverse problem," *Annals of Statistics*, Vol. 19, No. 4, 1989, pp. 2032-2066.
- [2] 木下瑞夫・田雑隆昌・牧村和彦・浅野光行 "都心地区における歩行者回遊行動調査とその有用性に関する研究," 『土木学会論文集』 No. 625, 1999, pp. 161-170.
- [3] Nguyen, S., "Estimating origin-destination matrices from observed flows," in Florian, M. (ed), *Transportation Planning Models*, Elsevier Science Publishers, 1984, pp. 363-380.
- [4] 齋藤参郎, "延岡商業地の現状と課題," 『延岡地域商業近代化計画報告書』 1983, pp. 37-94, 80-88.
- [5] 齋藤参郎, "消費者の商業地間回遊を考慮した非集計多段階選択ハフモデルの構築—佐賀市商業政策事前評価システム SCOPES の試み—," 『計画行政』 Vol. 13, 1984, pp. 73-82.
- [6] Saito, S., "Another look at the multistep iterative proportional fitting procedure: Its derivation from ML estimation under incomplete data," Paper presented at 15th PRSCO (Pacific Regional Science Conference Organization) held at Wellington in New Zealand, 1997. Also in Discussion Paper No. 46, Faculty of Economics, Fukuoka University, 1997.
- [7] Saito, S., *Extensions of Iterative Proportional Fitting Procedure and I-Projection Modeling*. Kyushu University Press, 1998.
- [8] Saito, S. and Ishibashi, K., "A Markov chain model with covariates to forecast consumer's shopping trip chains within a central commercial district.," Paper presented at The Fourth World Congress of RSAI (Regional Science Association International) held at Mallorca in Spain, 1992. Also in Discussion Paper No. 22, Faculty of Economics, Fukuoka University, 1992.
- [9] 齋藤参郎・石橋健一, "説明変数を含んだマルコフチェーンモデルによる都心再開発に伴う回遊行動の変化予測," 『都市計画論文集』 Vol. 27, 1992, pp. 439-444.
- [10] Saito, S., Kakoi, M. and Nakashima, T., "Inverse Estimation of Entry Frequency from the numbers of Visitors Observed at Shopping Sites under Consumers' Shop-around," Paper presented at 16th

- PRSCO (Pacific Regional Science Conference Organization) held at Seoul, Korea, 1999. Also in Discussion Paper No. 50, Faculty of Economics, Fukuoka University, 1999.
- [11] 斎藤参郎・梶井昌邦・中嶋貴昭, “来街地ベースサンプリングによる都心商業地への入込者数予測モデルの構築と評価,” 『地域学研究』 Vol. 29, No. 1, 1999, pp. 55-74.
- [12] Saito, S. and Kumata, Y., “The maximum likelihood estimation of gravity models under incomplete data: A unification of the IPFP and the EM algorithm,” Paper presented at The Fifth World Congress of RSAI (Regional Science Association International) held at Tokyo, 1996. Also in Discussion Paper No. 40, Faculty of Economics, Fukuoka University, 1996.
- [13] 斎藤参郎・熊田禎宣・石橋健一, “来街地調査ベースポアソン回帰集客数予測モデルの提案とその応用—小倉都心再開発に伴う入込み客数および消費者回遊パタンの変化予測と評価,” 『都市計画論文集』 Vol. 30, 1995, pp. 523-528.
- [14] Saito, S., Kumata, Y. and Ishibashi, K., “A choice-based Poisson regression model: Its integrated use with Markov shop-around model to evaluate city center retail redevelopment,” Paper presented at The Third International Conference on Retailing and Service Science held at Telfs/Buchen in Austria, 1996. Also in Discussion Paper No. 42, Faculty of Economics, Fukuoka University, 1996.
- [15] 斎藤参郎・中嶋貴昭・梶井昌邦, “消費者回遊行動からみた大規模再開発による都心部の構造変化に関する実証的研究,” 『地域学研究』 Vol. 29, 2000, pp. 107-130.
- [16] Shore, J.E., and Johnson, R.W., “Axiomatic derivation of the principle of maximum entropy and the principle of minimum cross entropy. *IEEE Transaction on information theory*,” IT-26, 1980, pp. 26-37. [Correction, IT-29, 1983, pp. 942-943]
- [17] 高山純一, “ネットワーク上の観測フローからのOD推定” 『交通ネットワークの均衡分析—最新の理論と解法』 土木学会, 1998, pp. 241-263.
- [18] Yang, H., Iida, Y., and Sasaki, T., “The equilibrium-based origin-destination matrix estimation problem,” *Transportation Research* 28B, 1994, pp. 23-33.
- [19] Yang, H., and Zhou, J., “Optimal traffic counting locations for origin-destination matrix estimation,” *Transportation Research* 32B, 1998, pp. 109-126.

付録：混合制約のもとでの循環反復比率調整法 (The Extended Cyclic Iterative Proportional Fitting Procedure for Mixed Constraints) [Saito (1998)]

$p_i^{(n)}$ を p_i の n ステップ目の推定値であるとする。

$h_{sn}^{(n)}$ と $g_{en}^{(n)}$ を次のように定義する。

$h_{sn}^{(n)}$ を

$$h_{sn}^{(n)} = \min\{h_s^{(n)}; s=1, \dots, d\}$$

と定義する。

但し,

$$k_s = \sum_{i \in I} b_{si} p_i^{(n)}, \bar{k}_s^{(n)} = \max\{k_s^{(n)}, k_s\}$$

$$h_s = k_s / \bar{k}_n$$

また, $g_{en}^{(n)}$ を,

$$|\log(g_{en}^{(n)})| = \max\{|\log(g_e^{(n)})|; e=1, \dots, t\}$$

と定義する。

但し,

$$k_e^{(n)} = \sum_{i \in I} b_{ei} p_i^{(n)}, g_e^{(n)} = k_e / k_e^{(n)}$$

ここで $|x|$ は、 x の絶対値であり、 $\rho = \text{mod}(n, 2)$ を n を 2 で割った剰余とすると、混合制約のもとでの拡張循環反復比率調整法は、(A2) と (A3) で表わされる。

$$p_i^{(0)} = \pi_i, \quad i \in I \quad (\text{A2})$$

$$p_i^{(n+1)} = \frac{p_i^{(n)} h_{s_n}^{(n)\rho b_{ei}} g_{e_n}^{(n)(1-\rho)b_{ei}}}{\sum_{j \in I} p_j^{(n)} h_{s_n}^{(n)\rho b_{ej}} g_{e_n}^{(n)(1-\rho)b_{ej}}}, \quad i \in I, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (\text{A3})$$

Joint Inverse Estimation of Consumers' Entry and Shop-Around Pattern among Shopping Sites in a City Center Retail Environment

Saburo SAITO*, Masakuni KAKOI** and Takaaki NAKASHIMA**

While researches on the choice probability that a consumer chooses shopping sites are vast, little attention has been paid on the research to forecast the frequency of visitors at shopping sites. The first author has developed elsewhere the Markov shop-around model to forecast the number of visitors at shopping sites in the city center retail environment where the multipurpose, multistop trip chaining of consumers occurs as their shop-around behavior. The model was constructed according to the natural causal chain in which the entry frequency over shopping sites determines through consumers' shop-around the total number of visitors at each shopping site, which includes both of visitors who visit first there and who visit there after visiting other sites. However, to get the estimates of the unknown entry frequency is the most difficult task while large retailer usually count the number of visitors to their own facilities. With this in mind, this paper addresses the inverse problem to estimate the entry frequency from the observed number of visitors and shows that our proposed method based on the I-projection modeling under incomplete data is effective and accurate enough to estimate the entry frequency and consumers' shop-around pattern.

* Fukuoka University

** Graduate School at Fukuoka University