【土木計画学研究・論文集 No.9 1991年11月】

到着地ベース調査による観光入込客数の推計方法に関する研究*

ESTIMATING THE NUMBER OF TOURIST VISITORS WITH DESTINATION-BASED SURVEYS

小林潔司** 関原康成***
by Kiyoshi KOBAYASHI and Yasunari SEKIHARA

This paper presents an estimation method of the number of visitors based on the destination-based trip surveys. The estimation method consists of the interrelated two steps: 1) estimating the most probable states of the number of visitors by routes based on traffic count data; 2) estimating the route choice models with choice-based surveys on visitors' behavior. We propose an analytical framework which can integrate the sub-models into a Stackelberg-type of programming model. The proposed methods can be considered as a logical extension of Cosslett's method for estimating logit models with general choice-based samples. The applicability of the methodology is verified by a case study conducted for the San'in Region. Simulation experiments are made to assess the impacts of survey errors on the reproductivity of the models.

1．はじめに

本研究では，特定の調査日における観光入込客数を到着地ベースの入込客調査より推定する問題を取り上げる．すなわち，i)域内の特定地点の通過客数に関するマクロ調査，ii)アンケートによる観光行動のミクロ調査に基づいて，地域全体での入込客数を間接的に推計するための方法論を提案する．

入込客数の推定に関しては，永井等が同種の調査データを用いた推定法を提案している[1)]．その方法論は実用性に富んでいるものの，推計法の統計学的な性質は必ずしも明確ではない．この種の入込客調査では，1)対象母集団を事前に規定できない，2)アンケートの回収率が低い，3)情報精度が不均一である等の問題があり，これら問題点を明示的に考慮したような入込客数の推計方法の開発が望まれる．

* キーワード：入込客推計，mps分析，選択肢サンプリング
** 正会員 工博 鳥取大学教授 工学部社会開発システム工学科（〒680 鳥取市湖山町南4丁目101）
*** 正会員 工修 ㈱フジタ技術研究所（〒222 横浜市港北区大棚町74）

本研究では，到着地ベースの入込客調査では入込客母集団の特定化が困難であることを指摘し，ある時点で実現する入込客母集団を，その背後にある母集団の集合（母集団過程[2)]）から抽出された標本として位置づける．そして，mps(most probable state)分析により入込客数の最頻値を推定する方法論を開発する．具体的には，1)経路選択確率を求めるモデル，2)経路別の入込客数の最頻値を求めるモデルを組合せた複合的な推計方法を提案する．さらに，山陰東部地域を対象とした実証分析を実施し，提案した方法論の有効性を検討する．

2．到着地ベースの入込客調査

（1）母集団概念の問題点

発地ベースの観光行動調査は膨大な費用と労力を

必要とする.一方,着地ベースの入込客調査の利点はその簡便性にある.特に,地方生活圏では地理的境界が明確であり,限られた地点で調査を実施できるという利点がある.本研究では,1時点の着地ベースの入込客調査に基づいて,客の経路選択確率と経路別の入込客数を同時に推定する方法を提案する.

本研究では,母集団を「観光を目的として調査当日に対象地域に滞在する主体の集合」と定義する.この場合,訪問客を母集団とするため母集団自体が調査時点によって変動する.1回の調査で獲得する情報は,調査日にたまたま実現した母集団に含まれる一部の入込客の情報である.このような入込客調査の特殊性を考慮して,母集団を要素とする母集団過程が存在し,その中から調査日にある母集団が実現すると考える.到着地ベースの入込み客調査の難しさは,調査日に実現した母集団とその実現を支配している母集団過程の双方を事前に特定化できない点にある.入込客数の推計とは,ある特定の調査日に実現した未知の母集団に関する特性を限られた部分情報に基づいて推定する問題に他ならない.調査を複数時点で実施すれば,母集団過程に関する情報をある程度獲得でき,実現した母集団特性の推定に利用できる.複数時点を対象とした調査方法とその活用に関しては今後の課題とし,本研究ではとりあげない.

（2）調査方法と適用範囲

調査日におけるマイカー入込客の行動を2種類の調査により把握する.すなわち,1)当該地域の出入口,域内のスクリーンラインにおける通過客数調査,2)アンケートによる観光行動調査(調査票は断面で配布,郵便にて回収)を実施する.この種の調査の難しさとして,調査精度の不整合があげられる.通過客数はある程度正確に把握できるが,アンケート調査の回収率は低くならざるを得ない.第2に,宿泊客数に関する情報が入手しにくいという点があげられる.特に,交通手段別の宿泊客数の把握が困難である.以下では,宿泊客数に関する情報が入手できない場合を想定する.第3に,断面の通過客の中に日帰客,宿泊客が同時に含まれ,通過客数から総入込客数を求めることができない点があげられる.したがって,入込客の経路選択モデルを推計する場合,各経路(選択肢)別の入込客数が全入込客数に占めるシェアを定義できず,通常の選択肢別抽出法[3]が利用できないという問題が生じる.本研究では,このような入込客調査の特殊性を考慮して,母集団過程を明示的に考慮した経路別入込客数の推計モデルを提案する.なお,この種の調査では,大規模な交通手段の整備や観光開発が実施されれば,客の観光地選択行動が変化し母集団過程自体が変化するという問題が生じる.したがって,本研究で提案する方法論はあくまでも入込客の行動パターンに大規模な変動がない場合を対象としていることはいうまでもない.

3．入込客母集団過程の定式化

（1）本研究の基本的な考え方

本研究では,1)客の経路選択確率を推定する非集計ロジットモデル,2)1)で求めた経路選択確率と通過客数情報に基づいて経路別入込客数の最頻値を求めるmps[4)-6)]分析モデルによって構成される入込客数推計モデルを開発する.このうち,1)は断面(選択肢)別に抽出された標本に基づいて非集計ロジットモデルを推計するプロセスである.選択肢別標本抽出法(C.B.S:Choice-Based Sampling)[3)7)8)]に関しては従来よりいくつかの研究成果がある.一方,2)は経路選択確率と通過客数を与件として経路別交通量を求めるプロセスであり,従来から開発されてきた路側交通量の実測値から分布交通量を求める方法論[9)-11)]と基本的には同じ考え方に立脚している.しかし,上述のような入込客調査の特殊性のため,従来の方法を単に組合せたような推計法を開発すれば事足りるわけではない.本研究では,a)mps分析の考え方に基づいた経路別入込客数最頻値の推定方法を提案し,b)C.B.Sにおける選択肢選シェアをmps分析モデルにより推計する.そして,c)母集団過程の概念の下で2つの推計モデルを統合したような新しい推計方法を提案する.以上の改善点と既存の成果との関係は,対応する部分で個別に言及する.

（2）状態変数と母集団過程

入込客aの特性を選択経路i_aと属性ベクトルz_aを用いて状態変数ベクトル$s_a=(i_a,z_a)$として記述する.i_aは客が選択した経路の番号$i\ (i=1,\cdots,H)$を示す.客aの状態変数空間を$\Delta_a\ (s_a\in\Delta_a)$と定義する.n人の入込客の特性を示す状態空間$\Omega_n$を各個人の状態変数空間$\Delta_a$の直積空間で定義する.

$$\Omega_n = \Pi_{a=1,n}\Delta_a \qquad (1)$$

$n=0$の時，Ω_nはnull要素ϕにより構成される．入込客母集団(状態変数の集合)を以下のように定義する．

$$\omega = (s_1, \cdots, s_n) \tag{2}$$

nは確率変数であり，母集団の集合(母集団過程)を

$$\Omega = \bigcup_{n \in Z_+} \Omega_n = \bigcup_{n \in Z_+} \prod_{a=1,n} \Delta_a \tag{3}$$

と表わす．Z_+は非負整数集合である．nが既知の時Ω_nは客数nの状態空間となる．しかし，nが観測不可能であるため，ここでは潜在的に可能な母集団Ω_nの集合Ωを考え，Ω上で確率関数$\pi : \Omega \to [0,1]$を定義する．関数$\pi(\omega)$は母集団集合Ωの中からある母集団ωが実現する確率を示す．πの無名性(s_aの任意の置換に対する不変性)を仮定する．この時，(π, Ω)は母集団過程を形成する．母集団過程の中から自然によりあるωが選択され入込客母集団として実現する．

（３）母集団過程の定式化

M個の離散値をとる入込客の属性zの集合をZと定義する．ある母集団$\omega \in \Omega$に対して客の状態変数$s=(i,z)$の出現頻度$m_{iz}(\omega)$ $(i=1,\cdots,H; z=1,\cdots,M)$を

$$m_{iz}(\omega) = |\{a : i_a = \bar{i}, z_a = \bar{z}\}| \tag{4}$$

と表わす．記号$|\cdot|$は集合の要素数を表わす．$m_{iz}(\omega)$は母集団ωが実現した時，属性$z_a=\bar{z}$を有し経路$i_a=\bar{i}$を選択した入込客数を示す．頻度ベクトル$m(\omega)$を

$$m(\omega) = \{m_{11}(\omega), \cdots, m_{iz}(\omega), \cdots, m_{HM}(\omega)\} \tag{5}$$

と定義する．ここで，母集団過程(π, Ω)が条件

$$\text{(i)} \quad p(\bar{m}) = \Pi_i \Pi_z P(\bar{m}_{iz}) \tag{6}$$

$$\text{(ii)} \quad p^n(S) = \Pi_{a=1,n} P(s_a), \; n \in Z_+ \tag{7}$$

を満足すると仮定する．ただし，$p(\bar{m}) = Pr(m_{11}(\omega) = \bar{m}_{11}, \cdots, m_{iz}(\omega) = \bar{m}_{iz}, \cdots, m_{HM}(\omega) = \bar{m}_{HM})$，$p(\bar{m}_{iz}) = Pr(m_{iz}(\omega) = \bar{m}_{iz})$，$p^n(S) = Pr(s_1 \in \Delta_1, \cdots, s_n \in \Delta_n)$，$p(s_a) = Pr(s_a \in \Delta_a)$，$\bar{m}_{iz}$：特性値$i_a=\bar{i}, z_a=\bar{z}$の出現頻度の実現値である．条件(6)は各特性値の生起確率がそれぞれ独立であることを意味する．条件(7)は任意の入込客数nに対して，入込客の選択行動が互いに独立であることを意味する．この時，(π, Ω)は独立母集団過程となる．Moyalの定理[2]により，独立母集団過程はポワソン過程に従い，頻度ベクトルの実現値の同時確率密度関数を次式で表現できる．

$$p(\bar{m}) = \Pi_i \Pi_z \{\mu(m_{iz})^{\bar{m}_{iz}} \exp[-\mu(m_{iz})] / \bar{m}_{iz}!\} \tag{8}$$

$\mu(m_{iz})$はm_{iz}の期待値である．条件(7)は，従来の研究で用いられてきた仮定である．条件(6)の妥当性については議論の余地がある．しかし，1)限られた観測情報から母集団過程を支配する確率分布を推定することは不可能である，2)独立性を仮定しない場合，入込客数の推定が過度に複雑になる点を考慮すれば，独立性を仮定しない推計方法を開発したとしても，実用上の観点からあまり魅力があるとは思えない．

（４）入込客数の推定問題

母集団過程が条件(6)(7)を満足する場合，式(8)における未知母数$\mu(m_{iz})$は次式で表現できる[5]．

$$\mu(m_{iz}) = \theta p_{iz} \tag{9}$$

θ：総入込客数の期待値，p_{iz}：特性値$(i_a=\bar{i}, z_a=\bar{z})$の出現確率である．１時点の入込客調査から$p_{iz}$に関する情報はある程度収集できるが，$\theta$に関する情報は獲得できない．$\theta$に関する事前分布(主観的確率密度関数)を$F(\theta)$と表わそう．式(8)は所与の$\theta$に対する条件付き同時確率密度関数$p(\bar{m}(\omega) | \theta)$となっている．この時，未知の母集団過程を支配している確率密度関数に関する主観的分布$\pi(\bar{m}(\omega))$は

$$\pi(\bar{m}(\omega)) = p(\bar{m}(\omega) | \theta) \cdot F(\theta) \tag{10}$$

となる．$F(\theta)$に関する事前情報が存在しない場合を想定し，$F(\theta)$は一様分布$(0 \leq \theta \leq \bar{\theta})$に従うと仮定する．$\bar{\theta}$の値は十分に大きければ，以降の議論に何等影響を及ぼさない．多時点の調査結果が得られれば，$F(\theta)$をベイズ推計することも可能であるが．これに関しては今後の課題とする．推定すべき未知数は，母集団過程を支配するパラメータθ，p_{iz}，調査当日に実現した特性値の出現頻度$\bar{m}=\{\bar{m}_{iz}\}$である．一方，入手可能な情報は，通過客数X_k $(k=1,\cdots,K)$とアンケート調査により収集した入込客a $(a=1,\cdots,g)$の特性値の実現値$\bar{s}_a=(i_a=\bar{i}, z_a=\bar{z})$である．入込客数の推定問題は，以上の情報から未知パラメータθ，p_{iz}と出現頻度$\bar{m}=\{\bar{m}_{iz}\}$を推定する問題となる．未知変数を同時に求めることは困難であり推定問題を２つの部分問題，1)出現確率p_{iz}を与件とし通過客数X_k $(k=1,\cdots,K)$を用いて未知パラメータθと属性別経路別入込客数m_{iz}の最頻値を求める問題(問題1)，2)属性別経路別入込客数m_{iz}を与件とし，アンケート調査結果より出現確率p_{iz}を推計する問題(問題2)に分割する．そして，両者を統合した入込客数の推計方法を提案する．

４．入込み客最頻値の推計(問題１)

出現確率p_{iz}を与件とし通過客数X_k $(k=1,\cdots,K)$を

用いて未知パラメータθと属性別経路別入込客数の最頻値m_{iz}を求める問題を定式化する.断面の数をK(同一断面の上下方向も異なる断面とみなす)とし,経路iに対して変数$\delta_k(i)$ (k=1,…,K)を定義する.

$$\delta_k(i) = \begin{cases} 1 & :\text{断面}k\text{を通過した場合} \\ 0 & :\text{そうでない場合} \end{cases} \qquad (11)$$

母集団$\omega=(s_1,\cdots,s_n)\in\Omega$が生起した場合に観測される通過客数を関数$X:\Omega\to R$により表現する.

$$X_k(\omega)=\Sigma_i\Sigma_z\delta_k(i)m_{iz}(\omega),(k=1,\cdots,K) \qquad (12)$$

通過客数$(X_1,\cdots,X_k)$の実測値が$(\bar{X}_1,\cdots,\bar{X}_k)$となるような母集団$\omega$の集合を以下のように定義する.

$$M(\bar{X}_1,\cdots,\bar{X}_k)=\{\omega\in\Omega\,|X_1(m(\omega))=\bar{X}_1,\cdots, X_k(m(\omega))=\bar{X}_k\} \qquad (13)$$

制約(12)の下で入込客数の実現値$\bar{m}=(\bar{m}_1,\cdots,\bar{m}_K)$が生起する母集団の集合$\Phi(\bar{m})\in M(\bar{X}_1,\cdots,\bar{X}_K)$を

$$\Phi(\bar{m})=\{\omega\in\Omega\,|m(\omega)=\bar{m},\ \omega\in M(\bar{X}_1,\cdots,\bar{X}_K)\} \qquad (14)$$

と定義する.通過客数の観測値$(\bar{X}_1,\cdots,\bar{X}_k)$に対する入込客数の最頻値$\bar{m}^*(\bar{X}_1,\cdots,\bar{X}_k)$は数理計画問題

$$\rho[\Phi(\bar{m}^*(\bar{X}_1,\cdots,\bar{X}_k))]=\max_{\bar{m}}\{\rho[\Phi(\bar{m})]\}$$
$$\text{subject to}\quad \Phi(\bar{m})\in M(\bar{X}_1,\cdots,\bar{X}_k)\} \qquad (15)$$

の解として求まる.$\rho[\Phi(\bar{m})]=\int_{\Phi(\bar{m})}\pi(\omega)d\omega$である.さらに,母集団の分布が独立母集団過程に従う場合,問題(15)は同時確率密度関数(8)を用いて

$$\mathrm{Max}_{\theta,m}\{\theta^{-1}\Pi_i\Pi_z\{(\theta p_{iz})^{m_{iz}}\exp(-\theta p_{iz})/m_{iz}!\}$$
$$\text{sub to } \bar{X}_k=\Sigma_i\Sigma_z\delta_k(i)m_{iz}\quad(k=1,\cdots,K) \qquad (16)$$

と表わせる.問題(16)の目的関数を対数変換し,スターリング公式を用いて最適条件を求めれば次式を得る.

$$\ln(p_{iz}\Sigma_i\Sigma_z m_{iz})-\ln m_{iz}+\Sigma_k\lambda_k\delta_k(i)=0 \qquad (17)$$
$$(i=1,\cdots,H;z=1,\cdots,M)$$

$$\bar{X}_k = \Sigma_i\Sigma_z\delta_k(i)m_{iz}\quad(k=1,\cdots,K) \qquad (18)$$

ただし,λ_kはラグランジュ乗数である.入込客数の最頻値は非線形連立方程式(17)(18)を同時に満足するm_{iz}(i=1,…,H,z=1,…,M)として求まる.

なお,式(8)で総客数nが既知の時,頻度ベクトル$\bar{m}$が生起する条件付き確率密度関数は多項分布で表わされ,入込客数の最頻値は次の問題により求まる.

$$\mathrm{Max}_{m}\ p(\bar{m}|n)=n!\Pi_i\Pi_z[p_{iz}^{m_{iz}}/m_{iz}!]$$
$$\text{sub. to}\quad \Sigma_i\Sigma_z m_{iz}=n$$
$$\bar{X}_k = \Sigma_i\Sigma_z\delta_k(i)m_{iz}\quad(k=1,\cdots,K) \qquad (19)$$

このモデルは,高山[9],Willumsen[10],飯田等[11]による路側実測値から分布交通量を推計する方法と同じである.高山,飯田等[9) 11)]は問題(19)でnを未知数と考え,式(17)(18)と同じモデルを導出している.しかし,問題(19)はnを既知として導出しており,nを未知数として取り扱うことの理論的根拠は明らかではない.本研究で採用したmps分析の立場に立てば,式(17)(18)のモデルは母集団自体が独立母集団過程からの無作為標本であり,独立母集団過程を支配するパラメータに関するnull情報の下でミクロ状態の最頻値を求める方法であると解釈することができる.

5. 経路選択確率の推定(問題2)

(1) 推定上の問題点

通過客数の調査地点(選択肢)で実施したアンケート調査に基づいて,客の特性値の出現確率p_{iz}を非集計ロジットモデルにより推定する.選択肢標本抽出法による非集計モデルの推計法はいくつか提案[3) 7)]されている.森地等は選択肢標本抽出法の適用性に関して精緻に分析している[8)].入込客調査では,1) 1つの断面を複数の経路が通過する,2)宿泊客数に関する正確な情報が得られない,3)選択肢間の排他性が欠如するという問題が存在する.この内,1)に関しては一般化選択肢標本抽出法により対応できる.一方,2)3)の問題が存在するため,選択肢別客数の全客数に対するシェアを算定できない.シェア情報を用いないモデル推定も可能である[3)]が,通過客数情報を活用できない.本研究ではmps分析の枠組の中で非集計ロジットモデルの推定問題を位置づけ,問題1を包含したような非集計モデルの推定法を提案する.

(2) 非集計モデルの定式化

入込客の経路選択行動をMNL(Multinominal Logit)モデルにより表現する.客aの経路iに対する確率効用$U_a(i)$を次式のように表わす.

$$U_a(i)=\Sigma_j\beta_j z_{ja}(i)+\varepsilon_{ia} \qquad (20)$$

$z_{ja}(i)$:経路iの特性変数,β_{jv}:パラメータである.誤差項$\varepsilon_i{}^a$が分散$1/\lambda^2$を持つ独立なワイブル分布に従う時,選択確率$P(i_a|z_a)$は以下のようになる.

$$P(i_a|z_a) = \frac{\exp\{\lambda\Sigma_j\beta_j z_{ja}(i)\}}{\Sigma_t\exp\{\lambda\Sigma_j\beta_j z_{ja}(t)\}} \qquad (21)$$

なお,本研究で提案した推計法を若干修正すれば,選択行動の階層性を考慮したNL(Nested Logit)モデルの推計に適用可能となる.しかし,この問題は本稿の域を越えるのでここでは言及しない.

(3) 尤度関数の定式化

本アンケート調査は1つの層(交通断面)が複数の選択肢を含む一般化選択肢別標本抽出(Generalized Choice-Based Sampling:G.C.B.S.と略す)となっている.客の状態変数空間$s=(i,z)\in\Delta$をK個の層に分け,層kにおける状態変数$s=(i,z)$の集合を$\omega(k)$とする.$\omega(k)$は層kに含まれるsの集合である.入込客調査の場合,日帰客が複数断面(入口と出口)を通過するため層間の排他性が成立せず,$\omega(k)\cap\omega(j)\,(k\neq j)\neq\phi$となる.しかも,全入込客数が未知であり,母集団においてある層の客数が総客数に占めるシェアを算定できず,既存の推計方法[7]をそのままでは適用できない.本研究では母集団過程を明示的に考慮することにより,Cosslettの方法[7]を特殊ケースとして含むようなパラメータ推計方法を提案する.

いま,特性値$s=(i,z)$を有する標本の数をc_{iz}とする.母集団過程から各層ごとに$g_k(k=1,\cdots,K)$個の標本を抽出し,その結果が$c=\{c_{11},\cdots,c_{iz},\cdots,c_{HM}\}$となる同時生起確率$p(c)$は次式のようになる.

$$p(c)=\frac{\Pi_k g_k!\,\Pi_{i,z\in\omega(k)}p_{iz}{}^{c_{iz}}/c_{iz}!}{g!\,\Pi_k Q(k)^{g_k}/g_k!} \qquad (22)$$

ここで,p_{iz}を以下のように表わす.

$$p_{iz}=f(i,z)=P(i|z,\beta^*)w(z) \qquad (23)$$

ただし,$f(i,z)$:母集団過程における選択肢iと属性zの同時確率密度関数,$P(i|z,\beta^*)$:未知パラメータβ,属性zを有する個人の選択肢iの選択確率(MNLモデルで表現される),β^*:パラメータの真値,$w(z)$:母集団過程における属性zの周辺分布である.上式を対数変換し定数項を無視すれば,対数尤度は

$$L_g=\Sigma_i\Sigma_z c_{iz}\ln P(i|z,\beta)+\Sigma_i\Sigma_z c_{iz}\ln w(z)-\Sigma_k g_k\ln Q(k) \qquad (24)$$

となる.標本aの特性値を$s_a=(i_a,z_a)\,(a=1,\cdots,g)$と表わそう.対数尤度(24)をそれと等価な

$$L_g=\Sigma_a\ln P(i_a|z_a,\beta)+\Sigma_a\ln w(z_a)-\Sigma_k g_k\ln Q(k) \qquad (25)$$

に書き替えよう.属性zの周辺分布$w(z_a)$とシェア$Q(k)$が未知であり,通過客数情報を用いて$w(z_a)$,$Q(k)$を推定する必要が生じる.

(4) 推計問題の定式化

総入込客数に通過客数が占めるシェア$Q(k)\ (=\bar{X}_k/\Sigma_i\Sigma_z m_{iz})$は未知数である.シェア$Q(k)$を問題1で求めた最頻値$m_{iz}{}^*(i=1,\cdots,H;z=1,\cdots,M)$を用いて推定しよう.式(17)(18)を変形すれば

$$Q(k)=\Sigma_i\Sigma_z\delta_k(i)P(i|z,\beta)w(z)\Omega_i(\lambda)$$
$$\Sigma_i\Sigma_z P(i|z,\beta)w(z)\Omega_i(\lambda)=1 \qquad (26)$$

を得る.ただし,$\Omega_i(\lambda)=\exp(\Sigma_k\lambda_k\delta_k(i))$である.したがって,パラメータ$\beta$の最尤推定は以下のような非線形計画問題(問題2)に帰着される.

$$\mathrm{Max}_{\beta,w,Q}\ \{\Sigma_a\ln P(i_a|z_a,\beta)+\Sigma_a\ln w(z_a)-\Sigma_k g_k\ln Q(k)\}$$
$$\mathrm{s.t.}\ \ Q(k)=\Sigma_i\Sigma_z\delta_k(i)P(i|z,\beta)w(z)\Omega_i(\lambda)$$
$$\Sigma_i\Sigma_z P(i|z,\beta)w(z)\Omega_i(\lambda)=1$$
$$\Sigma_i\Sigma_z P(i|z,\beta)w(z)=1 \qquad (27)$$

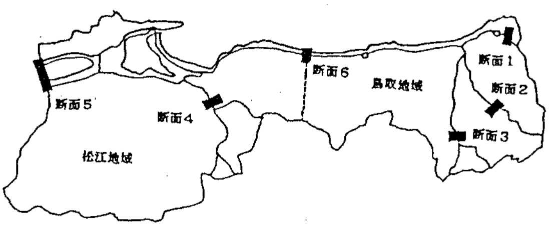
問題1の最適条件が問題2の制約条件となっていることに留意しよう.任意のβ,wに対して制約条件よりシェアの最頻値$Q(k)^*$を求めることができ,問題(27)が入込客の最頻値を求める問題1を下位問題とするStackelberg計画問題になっている.この問題の特殊例として総入込客数nが既知で層間の排他性が成立する場合を考えよう.この時,シェア$Q(k)$は既知となり目的関数の第3項は不要となる.また,排他性の条件より$\Omega_i(\lambda)=1$が成立し,最尤値βを求める問題は

$$\mathrm{Max}_{\beta,w}\{\Sigma_a\ln P(i_a|z_a,\beta)+\Sigma_a w(z_a)\}$$
$$\mathrm{s.t.}\ \ Q(k)=\Sigma_i\Sigma_z\delta_k(i)P(i|z,\beta)w(z)$$
$$\Sigma_i\Sigma_z P(i|z,\beta)w(z)=1 \qquad (28)$$

となる.この問題はCosslettが提案した推計方法と他ならず,Cosslettの方法は本研究で提案した推計法の特殊ケースに該当する.問題(27)は問題1で求まる最頻値を用いて推定した$\Omega_i(\lambda)$により層間での選択肢の重複を補正する構造になっている.なお,問題2を直接解かずにWESML(Weighted-ESML)推定量等の漸近極限値を用いた代替的推定量を開発することも可能である.代替推定量は取扱いが簡便である反面,adding-up制約(26)を満足する保証はない.この場合,adding-up制約(26)を満足するように集計化する[12]必要が生じる,一方,問題2では個々の標本に対する重み係数$w(z_a)$が最適解として求まる.集計化の便を考えれば,代替的推定量が必ずしも簡便であるとは言いきれない.本研究で述べた方法はパラメータ推計と同時に集計化も行なえるという利点がある.なお,本研究で提案した推定量は一致性,漸近正規性を有するが,その証明は紙面の都合上省略する.

6. 鳥取県東部地域を対象とした実証分析

(1) 調査データの概要



経路	周遊ﾊﾟﾀｰﾝ	経路	周遊ﾊﾟﾀｰﾝ
1	1-鳥取-1(日帰り)	9	3-鳥取泊-松江-4
2	2-鳥取-2(日帰り)	10	1-鳥取-6-松江泊-4
3	2-鳥取-3(日帰り)	11	2-鳥取-6-松江泊-6-鳥取-2
4	3-鳥取-3(日帰り)	12	2-鳥取-6-松江泊-5
5	4-鳥取-4(日帰り)	13	3-鳥取-6-松江泊-5
6	2-鳥取泊-1	14	5-松江泊-5
7	2-鳥取泊-2	15	4-松江泊-4
8	3-鳥取泊-3	16	5-松江泊-6-鳥取-1

数字は断面番号を表わす.経路6~16において鳥取(松江)泊は調査日前日の宿泊を意味する.なお,経路6~16の宿泊日を調査当日としたもの(表中省略)を実証分析では経路17~27として用いている.

図－1　対象地域と経路パターン

実証分析にあたって建設省中国地方建設局による昭和63年度春期山陰東部観光交通調査の結果[13]を用いる.同調査では地域の出入口,及び域内のスクリーンラインにおいて車籍,車種別交通量を実測している.同断面で5068台のマイカーにアンケート票を配布し回収率は14.4%である.観光客を対象とした調査のため回収率が非常に低くなっている.対象地域を図-1のようにゾーニングし,入込客の周遊経路を調査結果に基づいて同図のように特定化した.推計にあたって京阪神地域からの入込客約150サンプルを対象とした.周遊行動を1)日帰り,2)宿泊周遊に分類し,後者をi)前日宿泊し当日帰宅する,ii)当日宿泊し翌日帰宅するというパターンに分類し,周遊経路と宿泊パターンの組合せにより,図-1(脚注に説明)に示す考え方に基づいて合計27とおりの経路を設定した.なお,3日間以上連続して当地域に滞在した入込客は,推計対象から除外した.

（２）経路選択確率の推計結果

入込客の経路選択行動の説明変数として最終的に表-1に示す変数をとりあげた.この変数のうち,前日(当日)宿泊ダミーとは,当該地域に調査日前日(当日)に宿泊したか否かを示す0-1変数である.鳥取(松江)立寄ダミーとは松江(鳥取)に宿泊し,鳥取(松江)に立寄る行動パターンを表すダミー変数である.これらのダミー変数により各経路の特性を表現できる.アクセス時間,帰路時間はそれぞれ自宅から第1目的地,最終目的地から自宅までの所要時間を示す.アンケート調査結果より尤度関数に含まれる各客の状態変数i_a,z_aに関する情報を獲得できる.そこで,まずアンケート調査の結果を用いて問題(27)を解くことにより最尤値β,属性zの周辺分布w(z)を求めた.問題(27)は通常の非線形計画問題であり,種々の解法が適用可能であるが,本研究では修正ニュートン・ラフソン法を用いた.MNLモデルの推計結果を表-1に示す.各説明変数のt値はあまり高くないものの,的中率は極めて高い値を示している.選択肢の数が多くなると個々の説明変数の説明力が低下することは過去の研究事例でも指摘されている[12].今後はNLモデルの適用性を検討することが必要であろう.パラメータ推計値で特徴的なことは往路のアクセス時間のパラメータが正値をとっていることである.本研究が対象としている観光交通では交通行動自体が目的である場合も多い.また,主要目的地(宿泊地)に到達するまでに二三の観光地に立ち寄るといった周遊行動を考えれば,往路のアクセス時間のパラメータ値が正となることも納得できよう.つぎに,以上で求めた周辺分布w(z)とMNLモデル(21)を用いて属性別経路別選択確率p_{iz}を推定する.選択確率p_{iz},断面の通過客数X_kを用いれば,式(17)(18)より属性別経路別入込客数最頻値m_{iz}^*を求めることができる.問題(27)の解がadding-up制約を満足する限り,問題(27)で求まるλと式(17)(18)を満たすλの値は一致する.以上で求めた推計結果は膨大な量にのぼるので,こ

表－１　非集計行動モデルの推計結果

説明変数	ﾊﾟﾗﾒｰﾀ	t値
鳥取観光(日帰)ﾀﾞﾐｰ	-1.300	-4.331
松江観光(日帰)ﾀﾞﾐｰ	0.812	0.914
鳥取立寄ﾀﾞﾐｰ	1.178	1.125
松江立寄ﾀﾞﾐｰ	-0.712	-0.913
鳥取前日宿泊ﾀﾞﾐｰ	0.283	0.775
鳥取当日宿泊ﾀﾞﾐｰ	-0.444	-1.032
松江前日宿泊ﾀﾞﾐｰ	-0.549	-2.142
松江当日宿泊ﾀﾞﾐｰ	0.179	0.386
ｱｸｾｽ時間	0.300	3.165
帰路時間	-0.365	-0.855
尤度比	0.410	
的中率	0.825	

表－２　経路別入込客数最頻値

経路	最頻値	経路	最頻値
1	1384	9	235
2	408	10	745
3	464	11	972
4	490	12	322
5	1176	13	328
6	287	14	1131
7	301	15	925
8	351	16	558

注)単位は台/日

こでは属性別経路別に求まった入込客数を経路別入込み客数として集計した結果を表-2に示している．その結果，往路復路とも同一の断面を通過する客が多くなっている．入込客は対象地域内の道路ネットワークに対して詳細な情報を有しているとは限らず，往路復路とも同一経路を利用する客が多いことも納得がいく．以上の推計結果を見る限り，サンプル数が必ずしも十分ではないが，提案した推計法はこの種の入込客数の推計に有効であると判断できよう．

７．調査精度の影響に関する分析

（１）シミュレーション実験の方法

到着地ベースの入込客調査では利用可能な情報の精度の差異を無視できない．そこで，モンテカルロシミュレーション実験により，a)アンケート回収率，b)通過客数の調査精度が入込客数の推計精度に及ぼす影響を分析することとする．モデル推計に用いた標本の数が十分ではないため，ここでは６．で推計したMNLモデルを真のモデルと考え調査当日に実現した母集団を仮想的に作成した．その上で仮想的母集団から標本を無作為に抽出し入込客数を推計することとした．このような実験により，実証分析で推計した入込客数そのものの精度を検討することはできないことは明らかである．しかし，この種の思考実験を通じて，調査精度の精度がパラメータの推計精度に及ぼす影響を間接的に知ることはできよう．

シミュレーション実験では，上述のような試行を以下で述べる各ケースに対して100回繰返し，MNLモデルのパラメータ値，総入込客数の推計結果の変動状況について分析することとした．推計精度の評価にあたっては次式に示す相対誤差ERRを用いる．

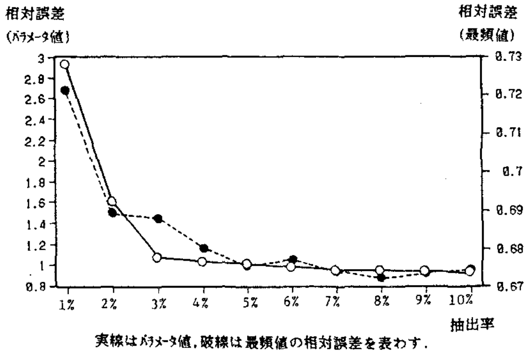


図-2　相対誤差と抽出率の関係

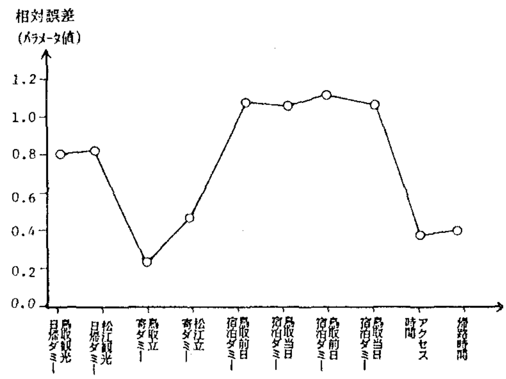


図-3　各パラメータの相対誤差

$$ERR_k = \sqrt{\frac{1}{N}\Sigma_n\left(\frac{\beta_{kn}-\beta_k^0}{\beta_k^0}\right)^2} \tag{29}$$

なお，β_{kn}:n回目の試行におけるパラメータ推計値，β_k^0:真のパラメータ値である．

（２）シミュレーション結果の考察

各断面でのサンプルの抽出率がMNLモデルのパラメータの値の相対誤差に及ぼす影響について分析した．その結果の一部を図-2~3に示している．図-2はパラメータ値の相対誤差の平均値と抽出率の関係を示す．サンプル抽出率が1%，2%の場合，相対誤差ERR_kはかなりの程度大きくなっている．抽出率が3%程度になれば相対誤差はかなりの程度小さくなる．しかも，抽出率を3%より大きくしても相対誤差はそれほど小さくならないことが判明した．図-2には経路別入込客数の相対誤差の平均値と抽出率の関係も示している．経路別入込客数もパラメータ値と同様に概ね抽出率3%程度で相対誤差が安定していることが判る．また，経路別入込客数はシミュレーション試行の度に変動しているが，総入込客数は抽出率を変化させてもそれほど変動しないことが判明した．図-3には

抽出率3%の時の各パラメータ値の相対誤差を示している.宿泊ダミー変数の相対誤差が他のパラメータ値より大きくなっている.今後は,宿泊客数に関する情報の収集と,モデル推計への活用方法に関する研究が重要な課題となろう.最後に,通過客数の実測精度が入込客数の推計精度に及ぼす影響を分析した.当然のことながら,通過客数の実測精度は総入込客数の相対誤差に大きな影響を及ぼすが,反面パラメータ値の相対誤差にそれほど大きな影響を及ぼさないことが判明した.以上の知見は本シミュレーション実験にのみ成立する事項であり,以上の結果を用いて本実証分析における入込客数の推計精度を議論することはできないが,以上の思考実験を通じて到着地ベースの入込客調査の精度を向上させるためには,アンケート調査において一定の標本抽出率を確保することが重要であることが理解できよう.

8.おわりに

本研究では,到着地ベース調査に基づいて入込客数を推計する方法を提案した.その際,入込客母集団が日々変動するため調査対象母集団をある母集団過程からの標本として位置づけた.そして,1)入込客の経路選択確率の推定,2)経路別入込客数の最頻値の推定という部分問題により構成される推定方法を提案した.さらに,山陰東部地域を対象として推計法の有効性を実証的に検討した.また,シミュレーション実験により標本抽出率や通過客数の実測精度が入込客数の推計精度に及ぼす影響を分析し,調査の実施方法に関するいくつかの有効な知見を得た.本研究で提案した推計法は実用性も高く,理論的にも優れた推計特性を有している.反面,プログラム開発等は若干複雑になる.今後の研究課題としては,1)より簡便な推計方法を開発し,その適用可能性を比較検討すること,2)NLモデルの適用性を検討すること,3)多時点の調査結果を利用して母集団過程の特性を推定する方法論の開発等があげられる.なお,本研究の遂行にあたっては岡田憲夫教授(京都大学),多々納裕一助手(鳥取大学)から貴重なご助言を賜わった.実証分析の遂行にあたって多大な協力を賜わった永田健氏,難波徹氏(当時建設省鳥取工事事務所),及び数値計算の協力を得た川端昌弘氏(JR西日本)に感謝の意を表します.

参考文献

1)永井譲,野倉淳,遠藤弘太郎:観光地における入込み者数,土木学会論文集, 第353号/IV-2, pp.93-100,1985.

2)Moyal,J.E.The general theory of stochastic population process, Acta mathematica, Vol.108,pp.1-31,1962.

3)Manski,C.F. and S.R.Lerman:The estimation of choice probabilities from choice based samples, Econometrica,Vol.45,No.8,pp.1977-1988,1977.

4)Smith,T. E.: Remarks on the most probable state approach to analyzing probabilistic theories of behavior, Env. and Plan. A,17, pp.688-695, 1985.

5)Smith,T.E.:An axiomatic foundation for poisson frequency analyses of weakly interacting populations, Regi. Sci. and Urban Economics,1988.

6)小林潔司:ｴﾝﾄﾛﾋﾟｰ理論と都市・交通ﾓﾃﾞﾘﾝｸﾞへの適用,土木計画学研究・講演集,No.10,pp.291-298,1987.

7)Cosslett,S:Efficient estimation of discrete choice models,ed.by Manski,C.F.and D.McFadden,Strctural Analysis of Discrete Data with Econometric Applications,MIT Press, 1981.

8)森地茂,屋井鉄雄:非日常的交通への非集計行動モデルと選択肢別標本抽出法の適用,土木学会論文報告集, No.343, pp.161-170, 1984.

9)高山純一:ﾘﾝｸﾌﾛｰ観測値に基づいた道路網交通需要分析ﾓﾃﾞﾙに関する方法論的研究,博士論文,1988.

10)VanZuylen H.J. and Willumsen,L.G.: The most likely trip matrix estimated from traffic counts, Trans.Res.B,Vol.14B,pp.291-293,1980.

11)飯田恭敬,高山純一,小林光二:ﾘﾝｸ交通量を用いたｴﾝﾄﾛﾋﾟｰ最大化による道路網交通需要推計法,土木計画学・講演集,No.9,pp.441-448,1986.

12)屋井鉄雄:非集計行動ﾓﾃﾞﾙによる交通需要予測手法,pp.119-143,交通と統計,No15,16,1986.

13)建設省中国建設局鳥取国道工事事務所:昭和63年度山陰東部観光交通調査報告書,1988.