来街地ベースパーソントリップ調査による ODパタンの一致推定法†

斎藤　参郎*，中嶋　貴昭**，栫井　昌邦***

1. 研究のねらいと目的

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。これまで斎藤らは，魅力ある都心空間の創出に資するため，九州の諸都市において10数回の消費者回遊行動調査を実施し，回遊性に優れた街づくりを提案するとともに，相次いだ福岡都心部での大規模都心商業再開発の効果を，消費者の回遊行動の変化から捉えるべく，回遊行動調査を継続して実施し，人の流れからみた，都心の重心が105 m南下したことを検証するなどの成果を上げてきた。（斎藤編 [21] [22] [23]，斎藤・中嶋・栫井 [31]）

一方，回遊行動調査にもとづいた分析の基礎となる回遊マルコフモデルを，実用に耐えるように，精緻化すべく，様々な理論的，技術的開発も平行して行ってきた。（斎藤・石橋 [24]，Saito, Ishibashi [25]，斎藤・熊田・石橋 [29]，Saito, Kumata, Ishibashi [30]，石橋 [10]，Saito [20]，石橋・斎藤・熊田 [12]，Ishibashi, Saito, Kumata [13]，斎藤・栫井・中嶋 [26]，Saito, Kakoi, Nakashima [27]，栫井 [14]，斎藤・栫井・中嶋 [28]）（回遊行動研究の経緯については，石橋・斎藤 [11] に詳しい。）

本研究は後者の研究の流れに属すものであるが，その直接の契機は，われわれがこれまで行ってきた，都心部への来街者を対象にした都心部回遊行動調査が，実は「来街地ベース」のパーソントリップ調査に他ならない，と気づいたことにある。

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。しかし，そこで想定されるパーソントリップ調査は，「居住地ベース」のサンプリング調査であり，都市圏などの広域の圏域を対象に，圏域居住者から回答者をサンプリングし，その1日の交通行動を聞く調査である。ここで，1日の交通行動とは，複数の目的と目的地をもった，Multi-stop, Multi-purposeトリップのことであり，トリップチェインデータを採取することで，OD交通量を推定することが，パーソントリップ調査の主眼であるといえる。

しかし，従来から行われてきた「居住地ベース」のパーソントリップ調査をもとにした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) 広域の居住地ベースの調査であり，非常にコストがかかること，その結果，(2) 改訂までの期間が10数年といった，長さにわたり，変化に対応できていないこと，また，(3) 大都市圏のみで行われており，地方圏での需要が高いにも係わらず，実施されて

† 本論文は，第37回日本地域学会年次大会（於，東北学院大学）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名古屋大学の河上省吾先生，広島大学の戸田常一先生をはじめ，フロアーの方々から有益なコメントを頂いた。厚く感謝の意を表したい。また，匿名の2名のレフェリーからの貴重な指摘によって，本論文の意義を，より明確にすることができたとともに，その記述を大幅にわかりやすく改善することができた。ここに記して厚く謝意を表したい。
* 福岡大学経済学部 教授，福岡大学都市空間情報行動研究所 所長
** 福岡大学都市空間情報行動研究所 研究員
*** 福岡大学経済学部 講師，福岡大学都市空間情報行動研究所

こなかったことなどの実施上の問題点にくわえ，(4) 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の OD の推計には，その推計精度に問題があること，(高山 [33])，また，(5) 買い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，行先記入上の精度に問題があること[1]，などである。

これらの推定精度の問題は，従来のパーソントリップ調査が，調査対象者への訪問調査という，手間とコストをかけた調査ではあるものの，調査対象地域の広さから，その抽出率が大都市圏では約 3 から 5% の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考えられるが，大規模な居住地ベースのサンプリング調査であり，コストが莫大にかかることから，現実的ではない。現在，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自体が模索されているところである。(原田 [7])

その一つ有力な方向は，「来街地ベース」のパーソントリップ調査であろう。実際，都心部の消費者回遊行動調査は，都心という地域を限定し，買物，レジャー，食事といった自由目的の記述精度を高めた，来街地ベースのパーソントリップ調査とみることができる。また，既存の大都市圏のパーソントリップ調査を，より低コストな来街地ベースのパーソントリップ調査を用いて，短いタイムスパンで改訂するという方法にも適用できるはずである。

しかし，斎藤・栫井・中嶋 [28]，栫井 [14] によって，はじめて指摘されたように，来街地ベースのパーソントリップ調査では，得られたトリップチェインデータを，従来の方法に従って単純に集計し，OD パタンの推定を行えば，choice-based バイアスが生じてしまう，という理論的問題が起こる。それゆえ，来街地ベースパーソントリップ調査の導入，実施には，このような来街地ベーストリップチェインデータによる OD パタン推定における，choice-based バイアスの問題の理論的解決が必要不可欠となっていた。

本研究のねらいは，斎藤・栫井・中嶋 [28] の方法とは全く異なった視点から，その理論的解決を与えることである。その目的は，来街地ベースパーソントリップチェインデータによる OD パタン推定における，choice-based バイアスを取り除く，一致推定法を構成することであり，それによって，来街地ベースパーソントリップ調査法の基礎を確立することである。

2.　居住地ベースパーソントリップ調査による OD パタンの既存推定法

本章では，従来の居住地ベースパーソントリップ調査にもとづく OD パタンの推定法について明確な定式化を行ってレビューする。

2.1　使用する概念と記号

まず，ノードの集合を $N=\{1, 2, \cdots, n, h\}$ で表す。ここで，h は自宅である。N の要素を $i, j\in N$ で示す。これまでのパーソントリップ調査では，ノードではなく，「ゾーン」という概念を用いてきた。ここでのノードをゾーンと捉えても，以下の数学的表現は全く変らないが，誤解を避けるため，若干の説明を加えておく。「ゾーン」の概念を用いる目的は，対象地域をいくつかのゾーンに分割し，それらのゾーン間の OD を推定することにある。対象地域の分割である。

ここでは，簡単化のため，ノードをゾーンと捉えてもよいが，正確には，集合の分割でいえば，ノー

[1] 実際，北部九州圏パーソントリップ調査の記入例 [8] によれば，商店街などを複数地点回遊した場合は，最も遠い地点のみを記入する旨の指示がなされている。

ドの集合 N はゾーンの集合の細分割である。すなわち，本論文では，都心部における大規模店舗間の人の流れといった小地域の OD も捉えられるように，ノードを点的魅力施設と捉えており，点的魅力施設がいくつか集って，一つのゾーンを形成すると考えている[2,3]。

さて，本論文では，すべてのノードは，いずれも目的トリップ[4] の発地（Origin），着地（Destination）になりうると考える。これらすべての OD ペア (i, j) の集合を W で表そう。すなわち，$W=\{(i, j)|i, j\in N\}$ である。

次に，ルート（トリップチェイン，パス）の概念を導入する。通常，ルートとは，OD を結ぶリンクの連鎖とされるが，ここでは，通常の使い方とは異なって，経路をなす，複数の OD ペアの連鎖，すなわち，トリップチェインの意味で使うことに注意しよう。経路をなす，OD ペアの連鎖とは，引き続く OD ペアの着地と発地が一致するものである。

例えば，3 つの OD ペア $\{(h, 1), (1, 3), (3, h)\}$ の連鎖は，$(h, 1)$ の 1 と $(1, 3)$ の 1 が一致し，同様に，$(1, 3)$ の 3 と $(3, h)$ の 3 が一致しているので，経路をなしている。このように，経路をなす OD ペアの連鎖であるトリップチェイン $\{(h, 1), (1, 3), (3, h)\}$ を，ルートとよび，ルート $h13h$ と書く。本論文では，ルートとして，h で始まり，h で終わる，サイクルのみを考える[5]。

以上のもとで，すべてのルートの集合を R で表す。また，その要素を $r\in R$ で示す。

通常，ルート $r\in R$ は，$r=h13h$ のように，ノードの文字列として表すが，誤解のおそれがないときには，$r=\{h, 1, 3, h\}$ のように，列をなす，ノードの集合とみなすことがある。ルート $r\in R$ の長さ $l(r)$ は，ルートの集合表現を用いて，次のように定義する。

$$l(r)=|r|-2 \tag{2.1}$$

ただし，$|A|$ は集合 A の要素数，濃度を表す。例えば，ルート $r=\{h, 1, 3, h\}$ の長さは 2 である。つまり，自宅以外の立ち寄りノード数のことである。

さて，来街地ベースのサンプリング調査の場合は，自宅 h 以外にサンプリングを行うノードを考えることになる。サンプリング地点 k の集合を S とする。$S\subset N$ である。また，サンプルを t で識別し，サンプルの集合を T で示す。

$$T=\{1, 2, \ldots, t, \ldots, T\}$$

次に，いくつかの確率変数を導入する。まず第 1 は，対象地域への出向頻度の分布（確率変数）V である。これはトリップチェインの発生頻度の分布である。従来の概念と混同しやすいので，説明を加え

---

[2] 実際には，ゾーン内の，点的魅力施設以外の領域の扱いが問題となるが，これは次のように考える。あるゾーンにいくつかの点的魅力施設が含まれているとしよう。このゾーン内の，これらの点的魅力施設以外の領域を一つにまとめ，これも一つのノードと定義し，点的魅力施設のノードに加えて，ノードの集合 N を再定義する。こうすると，ノードによる対象地域の分割が，ゾーンによる分割をさらに細かく分割した，細分割となっていることが理解される。

[3] 従来のパーソントリップ調査で大きな部分を占める，ゾーン内交通は，同一のゾーンに含まれるノード間のトリップとして集計されることになる。

[4] 従来の交通需要予測研究では，目的トリップと手段トリップの概念の区別をする。目的トリップとは，一つの目的を達成するためにある地点からある地点へ移動することであり，複数の交通手段を含んでもよい。一方，手段トリップは，一つの交通手段が継続する移動であり，移動の地点には，ターミナルなどのいわば「交通」ノードをふくむ。（Cf. [17] [32]）本稿では，ノードはすべて点的魅力施設と考えているので，ノード間の移動は，すべて目的トリップと考えている。

[5] 自宅ノード h は，ルート（トリップチェイン）を，h から始まり，h で終わるサイクルにするための仮想ノードと考えている。居住地ゾーンが複数ある場合も（これが通常のケースである），これらの居住地ゾーンを，ノード h の他に，必要なだけノードに加えれば同様の扱いができる。

ておこう。従来の交通需要予測の研究では，パーソントリップ調査の当日に何回目的トリップを起こしたかに着目し，目的トリップを起こした人の中での平均を，ネットの生成原単位，また，外出しなかった人を含めたときの平均を，グロスの生成原単位と呼んでいる。グロスの目的トリップ生成原単位は，ネットのそれに外出率をかけたものに等しい。出向頻度の分布は，この外出率に相当する概念である。しかし，期間をパーソントリップ調査のように特定の 1 日とせず，1ヶ月といった期間を考え，当該期間中の外出回数として，出向頻度を定義する。

次に，Y を R 上の分布とし，ϕ を W 上の分布，i.e., OD フローの密度とする。本論文では，この ϕ を「OD パタン」と呼ぶ。また，Z でサンプリング地点への来街者数の分布を表す。$\varDelta^s$ はサンプルがサンプリング地点 s に立ち寄ったとき 1，そうでないとき 0 の値をとる確率変数とする。

さて，本研究では，居住地ベースの概念と来街地ベースの概念を明確に区別しておく必要がある。そこで，まず，確率事象としてのトリップチェインの観測についての検討から始めよう。トリップチェインの観測の基本は，被験者が，一定期間に，何回外出し，どのようなタイプのトリップチェインを何回行ったかを観測することである[6]。一般に，このような度数に関する確率過程（カウント過程）では，事象の観測は，一定期間に，「同一の」場所で，対象となる事象が何回起こったかを記録すること，と想定している。しかし，ここで観測の対象となっている，「トリップチェイン」の事象とは，場所を移動することである。したがって，この事象は，それが発生した場所でも，また，移動の途中でも，さらに，移動先でも，観測できることになる。トリップチェインの起点である自宅 h で観測することを，居住地ベース，また，移動先，訪問先で観測することを，来街地ベースと呼ぶ[7]。注意すべきは，観測は，観測者がトリップチェインの事象とともに移動して行う必要はなく[8]，来街地ベースの観測とは，訪問先となるノードを観測地点として定め，そこでどのようなトリップチェインが何回観測されたかを記録することを意味している。

上述の確率変数や分布を，居住地ベースで定義するとは，トリップチェイン事象を，居住地ベースで観測したときの真の分布や確率変数のことをいい，来街地ベースでの定義とは，来街地ベースで観測したときの真の分布や確率変数を指す。

例をあげよう。OD パタンは，実際にトリップチェインが起こっている現場で観測されて，はじめて意味を持つ。すなわち，それぞれのノードに何人訪れたか，といったことは来街地ベースの観測に係わるものであり，OD パタンとは来街地ベースで定義されるべき概念である。これに対して，出向頻度は本来，居住地ベースの概念であるが，各ノードへの来訪者に，一定期間に何回外出したかを回顧的（retrospective）に聞く，といった方法で，来街地ベースでも調査可能である。

本論文では，分布（確率変数）が，居住地，来街地のいずれで定義されているのかを明確に区別するために，その分布（密度）関数に，居住地ベースの場合には，添字 h を，また来街地ベースの場合には，

[6] これは，一定期間の交通行動を調べるダイアリー調査などの場合である。1 日の交通行動を調べる，従来のパーソントリップ調査では，外出したか否か，すなわち，どのタイプのトリップチェインを起こしたか否かの 0, 1 の観測となる。

[7] 移動途上の観測としては，交通手段別の乗客調査（on-board）や路側 OD 調査などがある。早い時期に on-board 調査において choice-based bias が生じることを論じた論文に［6］がある。田村・石田［34］では，「非日常的で低頻度の」，宿泊や周遊を伴う観光交通といった交通行動把握に，「トリップの途上で実際に交通選択を行っているサンプルを抽出する方法」，すなわち，移動途上における choice-based sampling の必要性を述べている。（交通行動調査の方法，種類については，注 12 を参照されたい。）

[8] 移動しながら記録する調査は，PHS を用いた人の動き，in-vehicle 調査など GPS をもちいた車の動きの自動記録など，始まったばかりである。通常，居住地ベースのパーソントリップ調査では，どのようなタイプのトリップチェインが起こったかを記録するのに，トリップメーカーとともに移動しながら記録するわけではなく，被験者の回顧（retrospective）による調査であることがほとんどである。

添字 c を付けて区別することにする。

2.2　居住地ベースパーソントリップ調査による OD パタンの推定法の定式化

2.2.1　確率的機構としてのトリップチェイン交通行動

OD パタンの統計的推定法を議論するためには，トリップチェイン事象を生起させる，確率的機構についてのモデル化が必要である。そのために，トリップチェインという交通行動事象の確率的機構を明確にしておかねばならない。これは，いわば交通行動事象の因果順序の仮定を明確にすることに対応する。

パーソントリップ調査が想定する交通行動事象の因果関係は，これまであまり明示的に述べられたことはないが，大まかな合意は，居住地で観測される，異なった出向頻度をもった交通行動主体が，その出向頻度にしたがって，トリップチェインを起こした結果[9]，出向先で来街者として，観測され，OD パタンとして現れる，ということであろう。

ここであまり明確でないのは，トリップチェインの選択である。本論文では，一歩踏み込んで，居住地ベースでトリップチェインと出向頻度の同時分布を想定する。これは，交通行動主体が，トリップを起こす前に，事前に，出向頻度とトリップチェインの同時選択を行うという仮定であり，統計的推定の仮定をより明確に定式化するための概念装置である。それゆえ，f_h を居住地ベースのトリップチェイン (Y) と出向頻度 (V) の同時密度，f_c を来街地ベースのそれとすると，想定する因果順序は以下となる。

$$f_h(r,v)\Rightarrow f_c(r,v)\rightarrow f_c(r)\rightarrow \phi$$

すなわち，最初の矢印 $\Rightarrow$ は，交通行動主体が，居住地 h で，$f_h(r,v)$ にしたがって，出向頻度 v とトリップチェインのタイプ r を同時に選択し，トリップチェイン r を v 回，引き起こした結果，それが，来街地で観測されて，$f_c(r,v)$ として，観測されることを表している。後の 2 つの矢印 $\rightarrow$ の意味は次である。$f_c(r,v)\rightarrow f_c(r)$ は，来街地で観測される，トリップチェインのタイプの分布 $f_c(r)$ が，$f_c(r,v)$ の周辺分布として得られることを示している。また，$f_c(r)\rightarrow\phi$ は，後述するように，来街地ベースでの R 上の分布 $f_c(r)$ が得られれば，OD ペア上の分布 ϕ が導出できることを示したものである。

さて，f_h と f_c には，上述のように矢印 $\Rightarrow$ で示した因果関係があるが，これらの間には，次の明確な関係が成立する。

$$f_c(r,v)\propto vf_h(r,v),\quad v>0 \tag{2.2}$$

この関係を理解するために，次の簡単な例を挙げておく。居住地には 4 人がいて，$f_h(r,v)$ が，表 2.1b の分布だったとする。出向頻度 $v=2$ の人たちは，それぞれ 2 回トリップチェインを起こすので，表 2.1a の $v=2$ の行を 2 倍して，来街地ベースで観測される $f_c(r,v)$ は，表 2.2b となる。従来の 1 日の交通行動を聞くパーソントリップ調査では，出向頻度は外出率に相当し[10]，また，居住地ベースの $f_h(r,v)$ は，人単位の集計に，来街地ベースの $f_c(r,v)$ は，トリップ単位の集計に対応する，と考えると理解しやすい。

[9]「出向頻度にしたがって，トリップチェインを起こす」という視点は，特定の同一の 1 日の交通行動を被験者に聞く，居住地ベースのパーソントリップ調査の枠組では，理解しにくいかもしれない。しかし，居住地ベースで被験者となった交通行動主体の，同一の 1 日（期間）の，実際の交通行動を観測するということは，「暗黙のうちに」，交通行動主体が，それぞれの外出率（出向頻度）に応じて，トリップを起こしたことを観測することに他ならない。

[10] 実際，一定期間の出向頻度＝1 日当たり平均外出率×一定期間の日数＝一定期間の外出数である。したがって，この例での，$v=1$, $v=2$ を，それぞれ外出率が，0.4, 0.8 といったように 2 倍になっている場合だと考えても，同一の結果を得る。

表 2.1a　$4\times f_h(r,\ v)$

	$h1h$	$h12h$	Σ
$v=1$	1	1	2
$v=2$	1	1	2
Σ	2	2	4

表 2.1b　$f_h(r,\ v)$

	$h1h$	$h12h$	Σ
$v=1$	0.25	0.25	0.5
$v=2$	0.25	0.25	0.5
Σ	0.5	0.5	1

表 2.2a　$6\times f_c(r,\ v)$

	$h1h$	$h12h$	Σ
$v=1$	1×1	1×1	2
$v=2$	2×1	2×1	4
Σ	3	3	6

表 2.2b　$f_c(r,\ v)$

	$h1h$	$h12h$	Σ
$v=1$	1/6	1/6	1/3
$v=2$	1/3	1/3	2/3
Σ	1/2	1/2	1

2.2.2　居住地ベース調査による $\boldsymbol{f_c(r, v)}$ の推定

先の因果順序から，居住地ベースのパーソントリップ調査による OD パタンの推定には，$f_c(r, v)$ が推定されれば，十分である。それは，次節で定式化されるように，$f_c(r, v)$ の周辺分布

$$f_c(r)=\textstyle\sum_{v>0}f_c(r,\ v)$$

で示されるトリップチェイン上の分布 q_r をもちいて OD パタン ϕ が導かれるからである。ここでは，居住地ベースのパーソントリップ調査による $f_c(r, v)$ の推定法を定式化しておこう。確率変数 $\delta_t^h(r, v)$ を

$$\delta_t^h(r,\ v)=\begin{cases}1\ \ if\ \ Y_t^h=r\ \ and\ \ V_t^h=v\\ 0\ \ otherwise\end{cases} \tag{2.3}$$

で定義しよう。すなわち，サンプル t がトリップチェイン r と出向頻度 v を選択したとき，1，そうでないとき，0 の値をとる確率変数とする。居住地ベースのランダムサンプリングによって，サンプル t をとり，

$$\tilde{f}_h^T(r,\ v)=\frac{1}{T}\sum_{t\in T}\delta_t^h(r,\ v) \tag{2.4}$$

で，$f_h(r, v)$ の推定値 $\tilde{f}_h^T(r, v)$ を推定する。明らかに，次が成り立つ。

$$\frac{1}{T}\sum_{t\in T}\delta_t^h(r,\ v)\rightarrow f_h(r,\ v),\quad (T\rightarrow\infty)$$

来街地ベースの $f_c(r, v)$ の推定値 $\tilde{f}_c^T(r, v)$ は次で得られる[11]。

$$\tilde{f}_c^T(r,\ v)=\frac{v\tilde{f}_h^T(r,\ v)}{\sum_{r\in R}\sum_{v>0}v\tilde{f}_h^T(r,\ v)} \tag{2.5}$$

2.2.3　居住地ベース交通行動調査が収集する情報と $\boldsymbol{f_c(r, v)}$ の推定との関連

来街地ベースの $f_c(r, v)$ の推定法 (2.5) 式は，あまり見かけない式であり，その意味を明確にするた

---

[11] 式 (2.5) の $v>0$ より分かるように，来街地ベースの概念である OD パタンの推定には，外出した人の情報のみを用いている。外出しなかった人の情報は，属性別の外出率（外出率×一定期間＝出向頻度）の情報を得るために用いられる。

め，ここでは，従来の居住地ベースパーソントリップ調査が収集する情報との関連について考察しておく[12]。従来から行われてきた居住地ベースパーソントリップ調査は，サンプル t の，指定した 1 日の交通行動を記録する調査であるが，サンプル t から収集する情報は，トリップチェイン r_t のデータのみであり，一般に，出向頻度 v_t については質問項目を設けていない。出向頻度に関連する情報は，1 日の交通行動記録から，外出したか否かの情報が得られるだけである[13]。

それでは，(2.5) 式の推定値 $\tilde{f}_c^T(r,v)$ は，どのようにして得るのであろうか？

実は，従来のパーソントリップ調査では，トリップチェイン単位で集計することで，$\tilde{f}_c^T(r,v)$ ではなく，トリップチェインの分布 $\tilde{f}_c^T(r)$ を，直接求めているといえるのである。その理由は，次である。居住地ベース調査では，居住者の出向頻度（外出率）の分布を正しく反映するようにランダムサンプルが得られている。それゆえ，収集されるトリップチェインデータは，サンプルがその出向頻度(外出率)のウェイトにしたがって，トリップチェインを起こした結果である。したがって，トリップチェイン単位で集計するとは，出向頻度によるウェイト付き集計のこととなるからである。ただし，サンプル別の出向頻度の情報 v_t は識別されないので，トリップチェインの集計 $\tilde{f}_c^T(r)$ を求めることになる。

このように，現在のパーソントリップ調査では，出向頻度 v に関しては，集計した情報が得られるだけであり，サンプル t の出向頻度 v_t の情報を得るには，集計して属性別の v の平均を求め，これを用いてサンプル t の属性から v_t を推測する方法になる。

さて，交通行動調査には，このパーソントリップ調査の他にも様々な調査がある。都市圏といった範囲をこえる長距離の移動を対象とした調査，1 日の行動ではなく，1 週間や 3ヶ月といった期間にわたるダイアリー調査などである[14]。しかし，期間や対象とするトリップが異なっても，一定期間に，実際にどのような交通行動を行ったかを記録する調査である限り，収集する情報は基本的にパーソントリップ調査と同じである。ただし，1 日ではなく，長期間の記録を取れば，各サンプルの出向頻度(外出回数)を，直接計測できることになる。

一方，以上の方法と対照的に，過去の一定期間の交通行動を回顧的（retrospective）に想起する調査方法がある。その一定期間の交通行動を，記憶をたどって，すべて記録するという方法であれば，上の方法と，忘却率といった要因を除いて，全く同じとなるが，回顧的交通行動調査でも，トリップを起こす頻度の高い人の負担を軽減するため，「直近」の長距離交通行動を 1 つだけ記録してもらう[15]，といった調査方法の提案がなされている。この場合には，従来のパーソントリップ調査の方法とは全く異なって，明示的に，(2.5) 式の出向頻度によるウェイト付けを行って，居住地ベースの $f_h(r,v)$ を，来街地ベースの $f_c(r,v)$ へ変換しなければならない。

また，伝統的に，消費者の居住地ベースでの購買行動調査では，主要な商業施設へ，過去の一定期間に，何回出向したか，サンプル t にその出向頻度 v_t を，直接聞いたり，「直近」に訪れた商業施設はどこ

---

[12] 交通行動調査の方法，種類についての解説が，日本の例では，[5] [18] [34] に，また，米国の例では，[1] に種々の調査の比較が述べられており，調査方法の詳細や実際の調査票については，[2] [3] に解説されている。日本におけるパーソントリップ調査で実際に使われた調査票は，[8] といった報告書に載っているが，市販書では，[32] に京阪神の例，[4] に北部九州の例が掲載されている。

[13] 実際，外出率の男女別年齢 5 歳階級別の集計結果が [8]（p. 131）にある。従来のパーソントリップ調査データを用いたトリップチェインの分析が [16] にあるが，外出率，出向頻度の分析はなく，サイクル数，ストップ数といった，トリップ生成原単位に関する分析を行っている。

[14] アメリカにおける 1 日の交通行動を調べる NPTS（National Person Travel Survey）と，州間（interstate）のトリップといった長距離の移動を長期にわたって調べる ATS（American Travel Survey）の違いなど。2001 年からは NPTS と ATS を統合した調査が企画されている。（TRB の会議録 [35] やその中の論文 [9] 参照）

[15] Most recent trip を聞く方法。論文 [19] 参照。

か，などを聞くことが多い。これらの調査方法を採用した場合にも，(2.5) 式による $f_c(r,v)$ の推定が必要になる。

2.2.4 居住地ベース調査による OD パタンの推定

記述を複雑にしないために，トリップチェインの集合 R 上の分布 $q_r, r\in R$ を導入しよう。その定義は，

$$q_r=f_c(r)=\Pr(Y^c=r)$$

である。すなわち，来街地ベースでトリップチェインの確率変数 Y^c が r をとる確率である。以下では，q_r と OD パタン ϕ の関係を導くが，この q_r をその推定値で置き換えて，ϕ の推定値を得るのが，OD パタンの推定法である。

まず，トリップチェインをその長さによって，直和分割する。

$$R=\bigcup_{l=1}^{n}R^{(l)}$$

ここで，$R^{(l)}=\{r\in R|\mathit{length\ of}\ \ r=l\}$ はその長さが l であるトリップチェインの集合である。トリップチェインの長さとは，式 (2.1) で定義したように，例えば，$h123h$ のトリップチェインの場合は 3 であり，サイクルをなすトリップチェインに含まれる，自宅以外のノードの数である。次の定義をしよう。

$$R_{ij}=\{r\in R|(i,j)\in r\}$$
$$q^{(l)}=\sum_{r\in R^{(l)}}q_r$$
$$m=\sum_{l=1}^{n}lq^{(l)}$$

ここで，m はトリップチェインの長さの全平均であり，「ネットの生成原単位」と呼ばれているものである。以上のもとで，OD パタン ϕ はつぎのように表現できる。

$$\phi_{ij}=\frac{\sum_{r\in R_{ij}}q_r}{1+\sum_{l=1}^{n}lq^{(l)}}=\frac{\sum_{r\in R_{ij}}q_r}{1+m},\quad (i,\ j)\in W \tag{2.6}$$

この式の意味は，次である。ϕ_{ij} は，全 OD トリップに占める(i,j) OD トリップの比率のことである。分子が確率で表した (i,j) OD トリップの期待頻度であることは明らかである。また，分母は確率で表現した全 OD トリップの期待頻度となっている。何故なら，長さ l のトリップチェインが落とす OD トリップ数は $1+l$ であるから，その期待頻度は $(1+l)q^{(l)}$ であり，これをすべての長さについて加えたものが全 OD トリップの期待頻度であり，$\sum_{l=1}^{n}q^{(l)}=1$ に注意すると，(2.6) 式の分母となるからである。

3. 来街地ベースパーソントリップ調査による OD パタンの一致推定法の構成

3.1 来街地ベーストリップチェインサンプルの尤度

本節では，来街地ベースパーソントリップ調査のサンプリングの機構を検討し，そこで得られるトリップチェインデータの尤度を考察する。

来街地ベースのサンプリングでは，まず，(1) サンプリングデザインによって，各サンプリング地点のサンプル数の全サンプル数に対する比率[16]，すなわち，各サンプリング地点のサンプリング比率，$H(s)$, $s\in S$，$\sum_{s\in S}H(s)=1$ を決め，これにしたがって，ランダムサンプリングを行い，次いで，(2) 来街地ベー

[16] サンプリング地点 s のサンプル数を $T^{(s)}$ とすると，$H(s)=T^{(s)}/T$ である。

スのトリップチェインと出向頻度の同時分布 (Y^c, V^c) から，ランダムサンプル (r_t, v_t) を得る，というスキームをとっていると考えることができる。後者のステップは，まず，サンプル t のサンプリング地点 s_t と出向頻度 v_t を決め，次いで，(v_t, s_t) のもとで，サンプル t のトリップチェイン r_t を決めると考えても，概念上同じである。

すなわち，$H(s)$ にしたがって，s_t をサンプリングし，次いで，$f_c(v|s)$ にしたがって，v_t をサンプリングし，最後に，$f_c(r \mid v, s)$ にしたがって，r_t をサンプリングするのである。まとめると，以下となる。

$$
\begin{gathered}
s_t \sim H(s) \\
v_t \sim f_c(v|s) \\
r_t \sim f_c(r|v, s)
\end{gathered}
$$

このような来街地ベースのサンプリングスキームで，サンプル (r_t, v_t, s_t) が得られる尤度を $f_{CB}(r_t, v_t, s_t)$ で表すと，次となる。

$$
f_{CB}(r_t, v_t, s_t) = f_c(r_t \mid v_t, s_t) f_c(v_t \mid s_t) H(s_t) \tag{3.1}
$$

従って，サンプル $\{(r_t, v_t, s_t) \mid t \in T\}$ が得られる完全尤度 L_{CB} は以下となる。

$$
\begin{aligned}
L_{CB} &= \prod_{t \in T} f_{CB}(r_t, v_t, s_t) \\
&= \prod_{t \in T} f_c(r_t|v_t, s_t) f_c(v_t \mid s_t) H(s_t) \\
&= \prod_{k \in S} \prod_{t \in T^{(k)}} f_c(r_t \mid v_t, k) f_c(v_t \mid k) H(k)
\end{aligned} \tag{3.2}
$$

第 3 式はサンプルをサンプリング地点 k ごとに，$T^{(k)}, k \in S$ と分割した表現であり，$t \in T^{(k)}$ のとき，$s_t = k$ である。

ここで，もしも $H(s)$ ではなく，各サンプリング地点への来街者数の真の比率 $f_c(s), s \in S$ にしたがってサンプリングされたならば，バイアスのない正しい尤度を与えたはずである。各サンプルに重みを与えることで，来街地ベースのサンプリングの尤度をランダムサンプリングの尤度に変換できれば，目的は達する。そこで，次節の目的は，各サンプルに与える，この重みを導出することである。

3.2　来街地ベースパーソントリップ調査による重み付き一致推定法の構成

本節の目標は式 (3.2) をランダムサンプリングの完全尤度に変形するためのウェイトを求め，その推定方法を，来街地ベースのパーソントリップ調査の設計とともに構成することである。

3.2.1　重み付き推定法の構成

そのためには，来街地ベースパーソントリップ調査における各サンプル (r_t, v_t, s_t) の尤度 $f_{CB}(r_t, v_t, s_t)$ の式において，最後の項 $H(s_t)$ を $f_c(s_t)$ で置き換える，あるいは，最後の 2 項 $f_c(v_t \mid s_t) H(s_t)$ を真の密度 $f_c(s_t|v_t) f_c(v_t)$ に置き換えればよい。本論文での重み付き推定法は，後者の方法によって，先の来街地ベースサンプリングによる尤度 L_{CB} を変換し，次の第 2 式により，ランダムサンプリングの完全尤度 L を推定する方法である。

$$
\begin{aligned}
L &= \prod_{t \in T} f_{CB}(r_t, v_t, s_t) \frac{f_c(s_t)}{H(s_t)} \\
&= \prod_{t \in T} f_{CB}(r_t, v_t, s_t) \frac{f_c(s_t \mid v_t) f_c(v_t)}{H(s_t) f_c(v_t \mid s_t)}
\end{aligned} \tag{3.3}
$$

そこで，順次，その構成要素である，$H(s)$，$f_c(v)$，$f_c(v \mid s)$，$f_c(s \mid v)$，$f_{CB}(r, v, s)$ の推定方法を構成

していくことになるが，見通しをよくするために，結論を先に述べれば，次の式 (3.4) にしたがって，$f_c(r, v)$ の推定を行うことになる。

$$\frac{1}{T}\sum_{s\in S}\sum_{t\in T^{(s)}}\delta_t^c(r, v, s)\frac{1}{l_S(r_t)}\frac{\tilde{f}_c(s_t|v_t)\tilde{\tilde{f}}_c(v_t)}{H(s_t)\tilde{\tilde{f}}_c(v_t \mid s_t)}\propto f_c(r, v) \tag{3.4}$$

式中の各項の意味は次の通りである。まず，度数カウントの確率変数 $\delta_t^c(r, v, s)$ は次で定義する。

$$\delta_t^c(r, v, s)=\begin{cases}1 \ \mathit{if} \ \ r_t=r, \ v_t=v, s_t=s \\ 0 \ \mathit{otherwise}\end{cases}$$

$l_S(r)$ はトリップチェイン r のサンプリング地点の集合 S 上での長さである。$l_S(r)$ の形式的な定義は次である。ただし，$h\notin S$としている。

$$l_S(r)=|r\cap S|$$

また，$\tilde{\tilde{f}}_c(v)$, $\tilde{\tilde{f}}_c(v|s)$, $\tilde{f}(s|v)$ は，式の中で，それぞれに対応する分布の推定値である。式 (3.4) は各サンプルに次のウェイト (3.5) を与えて，

$$\frac{1}{l_S(r_t)}\frac{\tilde{f}_c(s_t|v_t)\tilde{\tilde{f}}_c(v_t)}{H(s_t)\tilde{\tilde{f}}_c(v_t|s_t)} \tag{3.5}$$

集計することを意味する。

3.2.2　来街地ベースパーソントリップ調査の設計

来街地ベースパーソントリップ調査の設計によって，収集される情報のみで，上述のウェイトに関する推定が行えることが望ましい。この観点から，来街地ベースパーソントリップ調査の設計要件をまとめれば，次となる。

まず，各サンプリング地点でのサンプリング比率 $H(s)$ をきめる。サンプル t が得られたサンプリング地点を s_t としよう。来街地ベースパーソントリップ調査において，各サンプルから同時に聞くべき調査項目は，(1) サンプル t のトリップチェイン r_t，(2) サンプル t の対象地域全体への出向頻度 v_t，そして，(3) サンプル t のサンプリング地点 s_t への出向頻度 $v_t(s_t)$ である。

したがって，来街地ベースでトリップチェインデータを収集し，これを用いてバイアスのない OD パタンを推定するための調査の要件は，これら 3 種類の情報を同時に聞くことである。トリップチェインのデータは，従来と同様，どこからどこへどんな目的で移動したかの履歴を聞く項目となる。また，対象地域全体，サンプリング地点への出向頻度については，(a) 過去一定期間に，何回外出したか，あるいは，当該地域，地点へ何回訪れたか，を回顧的 (retrospective) に聞く方法，(b) これと同様，将来一定期間に何回外出する予定か，あるいは，当該地域，地点へ何回訪れる予定かを聞く，展望的(prospective) な方法，(c)「直近」の外出はいつだったか，あるいは，当該地域，地点への「直近」の訪問時期はいつだったか，を聞く方法など，いくつかの方法が考えられる[17]。更には，想起法と実際の出向頻度を記録する方法との組み合わせなどの方法も考えられる[18]。

[17] この出向頻度に関する質問項目は，行動データに「意識データ」を併用したともとれるが，ここでの調査法は，質問項目から見て分かるように，過去の行動を聞く方法，想起法である。忘却率や期間の違いはあるものの，基本的には，居住地ベースのパーソントリップ調査での，その日，一日の行動を思い出して記入してもらう方法，想起法と変らないと考えている。

[18] 個人の出向頻度の情報を，いかに正確に収集するかは，来街地ベースパーソントリップ調査とっての今後の課題であろう。これは，個人の出向頻度の情報を収集していない，従来の居住地ベースパーソントリップ調査でも同様であり，そのための様々な調査方法の工夫が考えられてよい。注 20 も参照。

いずれにせよ，ここでのポイントは，交通行動調査においては，出向頻度の情報，v_t と $v_t(s_t)$ を収集することが，サンプリングの効率を高めるという視点である。

従来のパーソントリップ調査では，調査対象を1日の交通行動に限定することにくわえ，出向頻度を聞いていないため，サンプル t の外出率を予測したり，属性別に，一定期間での外出回数や出向頻度を予測したりするには，属性別の外出率の集計結果を用いなければならず，かなり大規模なサンプルを得ることが必要になる。この点は，非日常的で低頻度の観光交通行動といった調査では，on-board や来街地ベースでの調査方法が効率的である，という視点にも重なるものである。しかし，本研究の目的は，来街地ベースでえられたトリップチェインデータをもとにバイアスのない，ODパタンの推定方法の理論的研究であり，このような，実際に，どの方法が優れているのか，といった実用化へむけての興味深い論点については，ここでは深入りせず，今後の研究課題としたい。

3.2.3　ウェイトの導出

(a)　$l_S(r)$

$f_{CB}(r,v,s)$ の推定を考えよう。先の $\delta_t^c(r,v,s)$ を用いて集計すると，

$$\frac{1}{T}\sum_{t\in T}\delta_t^c(r,v,s)\propto l_S(r)f_{CB}(r,v,s),\quad (T\to\infty)$$

となることがわかる。したがって，次が成り立つ。

$$\frac{1}{T}\sum_{t\in T}\delta_t^c(r,v,s)\frac{1}{l_s(r)}\propto f_{CB}(r,v,s),\quad (T\to\infty)\tag{3.6}$$

(b)　$\tilde{\tilde{f}}_c(v)$

次に，$f_c(v)$ の推定を考えよう。まず，前と同様に $\delta_t^c(v\mid s)$ を次で定義する。

$$\delta_t^c(v\mid s)=\begin{cases}1 & if\ \ v_t=v,\ s_t=s\\ 0 & otherwise\end{cases}$$

これを用いると，次が成り立つ。

$$\frac{1}{T^{(s)}}\sum_{t\in T^{(s)}}\delta_t^c(v\mid s)\to f_c(v\mid s),\quad (T^{(s)}\to\infty)\tag{3.7}$$

いま，サンプル t の $f_c(s_t\mid v_t)$ が既知であるとしよう[19]。すると，

$$\frac{1}{T^{(s)}}\sum_{t\in T^{(s)}}\frac{\delta_t^c(v\mid s)}{f_c(s_t\mid v_t)}\to\frac{f_c(v\mid s)}{f_c(s\mid v)}=\frac{f_c(v)}{f_c(s)},\quad (T^{(s)}\to\infty)$$

であるから，次が成り立つ。

$$\frac{1}{T}\sum_{k\in S}\sum_{t\in T^{(k)}}\frac{\delta_t^c(v\mid k)}{f_c(s_t\mid v_t)}\to\sum_{k\in S}\frac{T^{(k)}}{T}\frac{f_c(v)}{f_c(k)}=f_c(v)\sum_{k\in S}\frac{H(k)}{f_c(k)},\quad (T^{(k)}\to\infty,\ k\in S)$$

そこで，この左辺をもちいて，$f_c(v)$ の推定値 $\tilde{\tilde{f}}_c(v)$ を式 (3.8) で求める。

$$\tilde{\tilde{f}}_c(v)=\sum_{k\in S}\sum_{t\in T^{(k)}}\frac{\delta_t^c(v\mid k)}{f_c(s_t\mid v_t)}\Bigg/\sum_{v>0}\sum_{k\in S}\sum_{t\in T^{(k)}}\frac{\delta_t^c(v\mid k)}{f_c(s_t\mid v_t)},\quad for\ \ \forall v>0\tag{3.8}$$

サンプル t へのウェイト $\tilde{\tilde{f}}_c(v_t)$ は，式 (3.8) を v の関数とみて，これに v_t を代入すればよい。つまり，集計型の推定であり，このことを示すために，$\tilde{\tilde{f}}_c$ と推定値を2つの波線で表現している。

---

[19]　式 (3.10) で，後述するように，$f_c(s\mid v)$ は，調査データから推定する。

(c)　$\tilde{\tilde{f}}_c(v|s)$

$f_c(v|s)$ の推定については，すでに式 (3.7) で導出されている。すなわち，次で求める。

$$\tilde{\tilde{f}}(v|s)=\frac{1}{T^{(s)}}\sum_{t\in T^{(s)}}\delta_t^c(v|s),\ for\ \forall_s\in S,\ \forall_v>0 \tag{3.9}$$

これも集計型の推定値であり，サンプル t へのウェイト $\tilde{\tilde{f}}_c(v_t|s_t)$ は v_t と s_t とを代入したものである。

(d)　$\tilde{f}_c(s_t|v_t)$

さて，$f_c(s|v)$ の推定に関しては，$\tilde{\tilde{f}}_c(v)$, $\tilde{\tilde{f}}_c(v\mid s)$ が集計型の推定値であったのに対し，来街地ベースパーソントリップ調査の出向頻度の質問項目から，非集計型として，次式 (3.10) の右辺を用いる。

$$\tilde{f}_c(s_t|v_t)\propto\frac{v_t(s_t)}{v_t} \tag{3.10}$$

これは次のように導出される。確率変数 Z は，各サンプリング地点への来街頻度の分布であり，確率変数 $\varDelta^s$ は，サンプリング地点 s へ立ち寄ったとき，1，そうでないとき 0 の値をとる確率変数であった。$\varDelta^s$ の定義から，地点 s を通るルートの集合を R_s とおくと，$f_c(\varDelta^s, v)$ は次のように表わされる。

$$f_c(\varDelta^s=1,v)=\sum_{r\in R_s}f_c(r,v)=f_c(\varDelta^s=1\mid v)f_c(v)$$

一方，Z は，各地点 s への来街頻度の分布であるから，$f_c(Z=s, v)$ を，次のように表現できる。

$$f_c(Z=s,v)=\frac{\sum_{r\in R_s}f_c(r,v)}{\sum_{k\in N|h}\sum_{r\in R_k}f_c(r,v)}=\frac{f_c(\varDelta^s=1\mid v)f_c(v)}{\sum_{k\in N|h}\sum_{r\in R_k}f_c(r,v)}$$

以上の関係より，条件付き確率 $f_c(Z=s\mid v)$ が，次のように $f_c(\varDelta^s=1\mid v)$ に比例することが分かる。

$$f_c(Z=s\mid v)=\frac{f_c(Z=s,v)}{f_c(v)}=\frac{f_c(\varDelta^s=1\mid v)}{\sum_{k\in N|h}\sum_{r\in R_k}f_c(r,v)}=\frac{f_c(\varDelta^s=1\mid v)}{m_v}\propto f_c(\varDelta^s=1\mid v)$$

ここで，定数項 $m_v=\sum_{k\in N|h}\sum_{r\in R_k}f_c(r,v)$ は，出向頻度 v をもつルート r の長さの期待値である。

さて，出向頻度が v のもとで，地点 s に立ち寄る条件付き確率 $f_c(\varDelta^s=1\mid v)$ が，地点 s への出向頻度 $v(s)$ と v との比 $v(s)/v$ と表わされることに注意しよう。これをサンプル t に適用したものが式 (3.10) である。以下の式(3.11)から分かるように，$f_c(r)$ の推定では観測度数の比をとっているので，$f_c(s_t\mid v_t)$ の推定値としては，定数項 m_v を無視し，$\tilde{f}_c(s_t|v_t)=v_t(s_t)/v_t$ としてよい。

さて，先にも述べたが，v_t と $v_t(s_t)$ を聞く，より具体的な質問項目は，以下のごとくである。都心部といった小地域では，まず，v_t については，「都心部に何回訪れますか？」，また，$v_t(s_t)$ については，「都心部に訪れたとき，この商業施設（サンプリング地点）s_t には，どのくらい訪れますか？」といったものになる。また，より広域でゾーンを単位とするときには，「何回外出しますか？」「このサンプリング地点（ゾーン）へは，そのうちどのくらい訪れますか？」といった質問項目となる[20]。

以上の議論をまとめたものが式 (3.4) である。OD 交通量の一致推定に必要な $f_c(r)$ の推定値 $\hat{f}_c(r)$ は，式 (3.11) となる。

[20] さらには，これらの情報収集の精度を上げるために，ここでの想起法にくわえ，来街地ベースで抽出された被験者に，現場では，当日のトリップチェインの情報を収集し，出向頻度の情報は，その場で調査票を手渡し，それ以後の一定期間での実際の出向頻度を記録してもらい，郵送で回収するなど，様々な調査方法の工夫が考えられよう。

$$\hat{f}_c(r)=\frac{\displaystyle\sum_{v>0}\sum_{s\in S}\sum_{t\in T^{(s)}}\delta_t^c(r,\ v,\ s)\frac{1}{l_s(r_t)}\frac{\tilde{f}_c(s_t|v_t)\,\tilde{\tilde{f}}_c(v_t)}{H(s_t)\,\tilde{\tilde{f}}_c(v_t|s_t)}}{\displaystyle\sum_{r\in R}\sum_{v>0}\sum_{s\in S}\sum_{t\in T^{(s)}}\delta_t^c(r,\ v,\ s)\frac{1}{l_s(r_t)}\frac{\tilde{f}_c(s_t|v_t)\,\tilde{\tilde{f}}_c(v_t)}{H(s_t)\,\tilde{\tilde{f}}_c(v_t|s_t)}} \tag{3.11}$$

4. 数　値　例

本章では最も簡単な 2 ノードの場合の数値例を示す。説明の簡単化のために，都心への買物トリップチェインを想定する。1 居住地，都心 2 商業地を考える。ノードの集合は $N=\{1, 2, h\}$ となる。サンプリング地点は商業地 1, 2 で，サンプリング地点の集合は $S=\{1, 2\}$ である。ルートの集合は $R=\{r_1, r_2, r_3, r_4\}$ とする。ルート r_1, r_2, r_3, r_4 は，それぞれ，$h1h$, $h2h$, $h12h$, $h21h$ である。

さて，居住地に 2 人の居住者がいて，ある一定期間に出向頻度が 200 のタイプ I が 1 人，出向頻度が 100 のタイプ II が 1 人とする。タイプ I は，都心へ出向したとき，トリップチェイン $r_1=h1h$ と $r_3=h12h$ をそれぞれ 0.5 の確率で選択するとする。同様に，タイプ II については，トリップチェイン $r_2=h2h$ と $r_4=h21h$ をそれぞれ 0.5 の確率で選択するとする。以上の想定のもとでは，タイプ I は都心へ 200 回，タイプ II は 100 回出向するので，都心で，すなわち，来街地ベースで観測すると，トリップチェイン $r_1=h1h$ と $r_3=h12h$ が 100 回，$r_2=h2h$ と $r_4=h21h$ が 50 回ずつ，カウントされる。つまり，来街地ベースの R 上の分布，$f_c(r)$ は次の表 4.1 となる。

表 4.1　来街地ベースの R 上の分布 $f_c(r)$

R	タイプ I $v=200$	タイプ II $v=100$	観測頻度 計	$\Pr(Y=r)$	真の分布 $f_c(r)$
$r_1=h1h$	100		100	q_1	1/3
$r_2=h2h$		50	50	q_2	1/6
$r_3=h12h$	100		100	q_3	1/3
$r_4=h21h$		50	50	q_4	1/6
計	200	100	300		1

真の分布 $f_c(r)$ のもとでの真の OD パタンは表 4.2 となる。

表 4.2　真の分布 $f_c(r)$ のもとでの真の OD パタン

	1	2	h	Σ
1	−	q_3	q_1+q_4	$q_1+q_3+q_4$
2	q_4		q_2+q_3	$q_2+q_3+q_4$
h	q_1+q_3	q_2+q_4	−	1
Σ	$q_1+q_3+q_4$	$q_2+q_3+q_4$	1	$1+q_1+q_2+2(q_3+q_4)$

さて，来街地ベースパーソントリップ調査であるが，これはサンプリング地点 1 で 50 票，地点 2 で 100 票を抽出する，ランダムサンプリングを実施したとしよう。その結果は表 4.3 となる。

表 4.3 から，全サンプル 150 の中に含まれる，トリップチェイン r_1 をとった人の数は，a の 20 人，r_2 は d の 25 人，r_3 は b と e の 70 人，r_4 は c と f の 35 人である。これより，単純にその比率をとって，q_i,

表 4.3　来街地ベースパーソントリップ調査のサンプリング結果

タイプ	ルート	観測度数	h	1		2		h	地点 1 $v_t(1)/v_t$	地点 2 $v_t(2)/v_t$	出向頻度 v_t	パス長 $l_s(r_s)$
I	$r_1=h1h$	100	○	○[a]	20			○	1[a]	0.5	200	1
II	$r_2=h2h$	50	○			○[d]	25	○	0.5	1[d]	100	1
I	$r_3=h12h$	100	○	○[b]	20	○[e]	50	○	1[b]	0.5[e]	200	2
II	$r_4=h21h$	50	○	○[c]	10	○[f]	25	○	0.5[c]	1[f]	100	2
サンプル数					50		100					
H(s)					1/3		2/3					

$i=1, \ldots, 4$ の推定値 $\hat{q}_i$, $i=1, \ldots, 4$ を求めると，次となる。

$$\hat{q}_1=\frac{20}{150},\ \hat{q}_2=\frac{25}{150},\ \hat{q}_3=\frac{70}{150},\ \hat{q}_4=\frac{35}{150} \tag{4.1}$$

これは，真の分布 $q_1=1/3$, $q_2=1/6$, $q_3=1/3$, $q_4=1/6$ と異なるので，choice-based バイアスが生じていることがわかる。

そこで，式 (3.5) のウェイトを各サンプルについて求め，(3.11) 式のウェイト付き最尤推定を行うことで，真の分布の推定値を導くのが，本論文で構成した一致推定法である。

すでに，表 4.3 中に，サンプリング比率 $H(s)$，パス長 $l_s(r_t)$ が得られている。また，この表には，$v_t(k)/v_t$, $k=1, 2$, $t=\mathrm{I}, \mathrm{II}$ が記載されているので，これを用いて，$f_c(s_t \mid v_t)$ の推定値 $\tilde{f}_c(s_t \mid v_t)$ を求めよう。その結果は，次である。

$$f_c(s_t=1 \mid v_t=100)=0.5 \tag{4.2}$$

$$f_c(s_t=2 \mid v_t=100)=1 \tag{4.3}$$

$$f_c(s_t=1 \mid v_t=200)=1 \tag{4.4}$$

$$f_c(s_t=2 \mid v_t=200)=0.5 \tag{4.5}$$

表 4.3 の各集団 a, b, c, d, e, f では，タイプ I の a, b が式 (4.4) に，e が式 (4.5) に対応し，タイプ II の c が式 (4.2) に，また，d, f が式 (4.3) に対応している。

残りは，集計型の推定値である，$\tilde{\tilde{f}}_c(v)$，$\tilde{\tilde{f}}_c(v|s)$ を求めればよい。

まず，$\tilde{\tilde{f}}_c(v)$ の推定は，(3.8) 式の $\sum$ の各要素を求めると表 4.4 を得るので，式 (3.8) にしたがって，次式 (4.6)，(4.7) から求める。

$$\tilde{\tilde{f}}_c(v=200)=\frac{20+20+100}{20+20+20+25+100+25}=\frac{140}{210}=\frac{2}{3} \tag{4.6}$$

$$\tilde{\tilde{f}}_c(v=100)=\frac{20+25+25}{20+20+20+25+100+25}=\frac{70}{210}=\frac{1}{3} \tag{4.7}$$

表 4.4　$\tilde{\tilde{f}}_c(v)$ の推定

a	b	c	d	e	f
$\frac{20}{1}=20$	$\frac{20}{1}=20$	$\frac{10}{0.5}=20$	$\frac{25}{1}=25$	$\frac{50}{0.5}=100$	$\frac{25}{1}=25$

次に，$\tilde{\tilde{f}}_c(v \mid s)$ を式 (3.9) にしたがって求めると，以下となる。

$$\tilde{\tilde{f}}_c(v=100|s=1)=\frac{10}{50}=\frac{1}{5},\quad \tilde{\tilde{f}}_c(v=200|s=1)=\frac{40}{50}=\frac{4}{5}$$

$$\tilde{\tilde{f}}_c(v=100|s=2)=\frac{50}{100}=\frac{1}{2},\quad \tilde{\tilde{f}}_c(v=200|s=2)=\frac{50}{100}=\frac{1}{2}$$

以上をもちいて，各サンプルにウェイトを付けて，集計する。これらのウェイトは，表 4.3 の a, b, c, d, e, f ごとに，同一であるので，それぞれの集団ごとに求めると，次となる。

$$\text{a.}\quad \frac{1\cdot\frac{2}{3}}{\frac{1}{3}\cdot\frac{4}{5}}\cdot 20=\frac{15}{4}\cdot\frac{2}{3}\cdot 20=50,\qquad \text{b.}\quad \frac{1\cdot\frac{2}{3}}{\frac{1}{3}\cdot\frac{4}{5}}\cdot\frac{20}{2}=\frac{5}{2}\cdot 10=25,$$

$$\text{c.}\quad \frac{0.5\cdot\frac{1}{3}}{\frac{1}{3}\cdot\frac{1}{5}}\cdot\frac{10}{2}=\frac{15}{2\cdot 3}\cdot\frac{10}{2}=\frac{25}{2},\qquad \text{d.}\quad \frac{1\cdot\frac{1}{3}}{\frac{2}{3}\cdot\frac{1}{2}}\cdot 25=25,$$

$$\text{e.}\quad \frac{0.5\cdot\frac{2}{3}}{\frac{2}{3}\cdot\frac{1}{2}}\cdot\frac{50}{2}=\frac{3\cdot 2}{2\cdot 3}\cdot\frac{50}{2}=25,\qquad \text{f.}\quad \frac{1\cdot\frac{1}{3}}{\frac{2}{3}\cdot\frac{1}{2}}\cdot\frac{25}{2}=\frac{25}{2}$$

これらの度数をトリップチェインごとに集計すると，

$$\hat{q}_1=\frac{50}{150}=\frac{1}{3}\qquad \hat{q}_2=\frac{25}{150}=\frac{1}{6}\qquad \hat{q}_3=\frac{50}{150}=\frac{1}{3}\qquad \hat{q}_4=\frac{25}{150}=\frac{1}{6}$$

となって，真の分布を推定できたことが分かる。

5.　結論と今後の課題

以上によって，来街地ベースパーソントリップ調査でえられた，トリップチェインデータを用いて，バイアスのない，OD パタンの推定方法を理論的に構成しえたと考える。これまで，観光行動や小地域の交通行動調査に来街地ベースでの調査の可能性が指摘されてきたものの，明確な問題の定式化が与えられていなかった。このような状況において，来街地ベース調査によるトリップチェインデータを用いた OD パタンの一致推定法の構成という問題として，これを明確に定式化し，その理論的構成法を与えたという点が，本研究の最も大きな意義であると考える。

本研究は，理論的にも未だ第一歩の研究であるが，来街地ベースパーソントリップ調査法において OD パタンの一致推定法が構成できるという理論的基礎を与えたことで，来街地ベースパーソントリップ調査法を実際に適用するための，出向頻度情報の精度の問題やサンプリングの効率性の問題，調査方法の工夫など，理論的研究とともに，実用化に向けての研究が期待されるところであり，今後の課題である。

［付記］　本論文の内容は，以下に特許出願されている。
特願 2001-336604　「回遊行動調査方法及び装置並びにナビゲーションシステム」，2001 年 11 月 1 日
特願 2000-336170　「回遊行動調査方法」，2000 年 11 月 2 日

参　考　文　献

［1］ Cambridge Systematics, Inc., *Scan of Recent Travel Surveys*, The U.S. DOT, 1996.

[2] Cambridge Systematics, Inc., *Travel Survey Manual*, The U.S. DOT, 1996.
[3] Cambridge Systematics, Inc., *Travel Survey Manual Appendices*, The U.S. DOT, 1996.
[4] 樗木　武，井上信昭，『交通計画学』3 章，共立出版，1993, pp. 40-64.
[5] 土木学会編，『交通需要予測ハンドブック』第 1 章，技報堂出版，1981, pp. 15-61.
[6] Doxsey, L.B., “Respondent Trip Frequency Bias in On-Board Surveys”, *Transportation Research Record*, Vol. 944, 1983, pp. 54-56.
[7] 原田　昇，“人の動きを捉える都市交通調査のあり方”，『都市計画』，Vol. 49, No. 2, 2000, pp. 9-12.
[8] 北部九州圏都市交通計画協議会，『第 3 回北部九州圏パーソントリップ調査 実態調査計画準備編』，1994.
[9] Hu, P.S., and Young, J., “Using the NPTS and the ATS Together : A Case Study”. In [35]，pp. 221-236.
[10] 石橋健一，『回遊行動モデルによる中心商業地計画評価に関する研究』，東京工業大学博士論文，1998.
[11] 石橋健一，斎藤参郎，“回遊行動モデルからみた都心空間評価”，熊田禎宣編，『公共システムの計画学』第 11 章，技報堂出版，2000, pp. 177-193.
[12] 石橋健一，斎藤参郎，熊田禎宣，“来街頻度に基づく販売額予測非集計回遊マルコフモデルの構築―小倉都心商業地区への適用―”，『都市計画論文集』，No. 33, 1998a, pp. 349-354.
[13] Ishibashi, K., Saito, S., and Kumata, Y., “Forecasting sales of shopping sites by use of the frequency-based disaggregate Markov shop-around model of consumers : Its application to central commercial district at Kitakyushu City”, Paper presented at 5th PRSCO Summer Institute. Also in *DP* No. 98-4, UNCRD (United Nation Center for Regional Development), 1998b.
[14] 栫井昌邦，『Choice-based バイアスをともなった統計的逆問題の理論と応用―都心部への入込み者数および回遊パタンの同時逆推定法の構成と評価―』，福岡大学博士論文，2000.
[15] 米谷栄二監修，渡辺新三，毛利正光，佐佐木綱，加藤　晃，『(新訂版)交通工学』，国民科学社，1981.
[16] 近藤勝直，『交通行動分析』，晃洋書房，1987.
[17] 森杉壽芳，宮城俊彦，『都市交通プロジェクトの評価』，コロナ社，1996.
[18] 中野　敦，毛利雄一，佐藤和彦，“交通統計調査データの現状と課題”，『交通工学』，Vol. 34, 1999, pp. 36-40.
[19] Richardson, A.J., and Seethaler, R.K., “Estimating Long-Distance Travel Behavior from the Most Recent Trip”. In [35]，pp. 237-254.
[20] Saito, S., *Extensions of Iterative Proportional Fitting Procedure and I-projection Modeling*, Kyushu University Press, 1998.
[21] 斎藤参郎編，『福岡都心部回遊行動調査報告書 1996-1998』，1998.
[22] 斎藤参郎編，『福岡都心部回遊行動調査報告書 1999 : 回遊行動からみた福岡都心部再開発による都心構造の経年比較分析―特に博多リバレインの開業による効果に着目して』，1999.
[23] 斎藤参郎編，『福岡都心部回遊行動調査調査報告書 2000』，(財) 福岡都市科学研究所，2000.
[24] 斎藤参郎，石橋健一，“説明変数を含んだマルコフチェイ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』，No. 27, 1992a, pp. 439-444.
[25] 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 4th World Congress of RSAI, 1992b.
[26] 斎藤参郎，栫井昌邦，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.
[27] 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), 1999.
[28] 斎藤参郎，栫井昌邦，中嶋貴昭，“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”，『地域学研究』，Vol. 30, No. 1, 2000, pp. 213-229.
[29] 斎藤参郎，熊田禎宣，石橋健一，“来街者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”，『都市計画論文集』，No. 30, 1995, pp. 523-528.

[30] 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 3rd Recent Advances in Retailing and Services Science Conference held at Telfs-Buchen, Austria, 1996.

[31] 斎藤参郎，中嶋貴昭，栫井昌邦，"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, No. 3, 1999, pp. 107-130.

[32] 佐佐木綱，『都市交通計画』3章，国民科学社，1974, pp. 49-73.

[33] 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』第12章，土木学会，1998, pp. 241-263.

[34] 田村　亨，石田東生，"交通行動の調査技法の発展"，『行動計量学』，Vol. 20, No. 1, 1993, pp. 4-11.

[35] Transportation Research Board, *Person Travel : The Long and Short of It, Transportation Research E-Circular E-C026*, 2001.

The Consistent OD Estimation for On-Site Person Trip Survey

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

We have conducted series of surveys on consumer's shop-around behavior at city center retail environment (CCRE) of Fukuoka City for the purpose to create the more attractive CCRE from the viewpoint of consumer's behavior. The survey on consumer's shop-around behavior at CCRE is conducted as follows. At several sampling points (shops) chosen, samples are randomly selected from visitors at these sampling points to record their shop-around history, the sequence of shops visited, purposes done and expenditure spent there in the order of their occurrence. This is just to collect the shopping trip chain data by on-site sampling. In other words, it is simply the on-site person trip survey, which is a striking contrast to the traditional person trip survey by home-based sampling.

However, as Saito, Kakoi, and Nakashima (2000) first indicated, there occurs the choice-based bias if on-site trip chain data from different sampling points are pooled to be used to estimate OD pattern. The purpose of this paper is to address this problem to formulate a new theoretical method for consistent estimation of OD pattern based on on-site trip chain data and to establish a theoretical foundation for on-site person trip survey.

* Professor, Faculty of Economics, Fukuoka University; Director, Fukuoka University Institute of Quantitative Behavioral Informatics for City and Space Economy (FQBIC)

** Researcher, Fukuoka University Institute of Quantitative Behavioral Informatics for City and Space Economy (FQBIC)

*** Assistant Professor, Faculty of Economics, Fukuoka University; Fukuoka University Institute of Quantitative Behavioral Informatics for City and Space Economy (FQBIC)