

1. はじめに

パーソントリップ調査（以下、PT調査）をはじめとする、実際の行動に基づいた顕示選好データ（以下、RPデータ）では、年齢や性別などの個人属性が母集団からランダムに抽出されていることが望ましい。しかし近年、個人情報に対する認識の変化を背景とする調査環境の悪化により、調査回答者の母集団代表性が損なわれる危険性が懸念されている。

さらにRP調査では、交通機関選択モデルなどに用いられる各交通機関の所要時間、費用などの説明変数間に相関が生じる。松原¹⁾は、それらの相関が高いほど、交通機関選択モデルの予測精度が低下する危険性が高いことを指摘している。

本研究では、RP調査の統計的な問題のうち、1) 個人属性の母集団代表性の毀損、と2) 交通機関のサービス水準の空間相関、に着目して、これらを修正するためのデータ重み付け法を適用して交通機関選択モデルの精度向上を図る。

2. データ重み付けの方法

1) IPF法

IPF (Iterative Proportional Fitting) 法は、個人属性別のクロス集計値を母集団の周辺分布に合致させることを条件として、繰り返し演算によって、各サンプルに与える重みの値を設定する手法である²⁾。本研究では、IPF法により、母集団から標本抽出されたRPデータの性別と年齢階層の分布を、国勢調査の性別と年齢階層の分布に近似するように重み付けする（性別は2カテゴリ、年齢階層は5歳以上の5歳階級の15カテゴリ）。RPデータの性別と年齢階層のクロス集計値を c_{jk} 、RPデータの性別と年齢階層の周辺分布をそれぞれ W_j 、 W_k とした。また、国勢調査データの性別と年齢階層の周辺分布は、 C_j 、 C_k である。クロス集計表とともに、RPデータと国勢調査データの周辺分布を表1に示す。クロス集計値 c_{jk} の重み ω_{jk} は、以下のi)~iv)の手順で、Cゾーン別性年齢階層別に算出する。ただし、 $c_{jk} = 0$

表1 クロス集計表と周辺分布

	$k=1$	$k=2$	...	$k=15$	W_j	C_j
$j=1$	c_{11}	c_{12}	...	c_{115}	$W_{j=1}$	$C_{j=1}$
$j=2$	c_{21}	c_{22}	...	c_{215}	$W_{j=2}$	$C_{j=2}$
W_k	$W_{k=1}$	$W_{k=2}$	...	$W_{k=15}$		
C_k	$C_{k=1}$	$C_{k=2}$	...	$C_{k=15}$		

の場合、 $c_{jk} = 0.01$ と設定した。また、初期重み $\omega_{jk}^{(0)} = 1$ とした。（カッコ付の右上添え字⁽⁰⁾内の数字は重みの更新回数）

i) k の重み更新

$$\textcircled{1} \quad W_k^{(0)} = \sum_{j=1}^J (c_{jk} \omega_{jk}^{(0)}) \quad (1a)$$

$$\textcircled{2} \quad v_k^{(0)} = \frac{C_k}{W_k^{(0)}} \quad (1b)$$

$$\textcircled{3} \quad \omega_{jk}^{(1)} = \omega_{jk}^{(0)} v_k^{(0)} \quad (1c)$$

ii) j の重み更新

$$\textcircled{1} \quad W_j^{(1)} = \sum_{k=1}^K (c_{jk} \omega_{jk}^{(1)}) \quad (2a)$$

$$\textcircled{2} \quad v_j^{(1)} = \frac{C_j}{W_j^{(1)}} \quad (2b)$$

$$\textcircled{3} \quad \omega_{jk}^{(2)} = \omega_{jk}^{(1)} v_j^{(1)} \quad (2c)$$

iii) 相対誤差の算出

k 、 j の重みを更新し、1回目の計算が終了する。1回目の計算終了時の k の周辺分布 $W_k^{(2)}$ と C_k の相対誤差 $\delta_k^{(2)}$ と、 j の相対誤差 $\delta_j^{(2)}$ の相加平均 $\delta_m^{(2)}$ を算出する。

$$\begin{aligned} \delta_m^{(2)} &= \frac{1}{K+J} \left\{ \sum_{k=1}^K \frac{|W_k^{(2)} - C_k|}{C_k} + \sum_{j=1}^J \frac{|W_j^{(2)} - C_j|}{C_j} \right\} \\ &= \frac{1}{K+J} (\delta_k^{(2)} + \delta_j^{(2)}) \end{aligned} \quad (3)$$

iv) $\delta_m \leq 1.0 \times 10^{-10}$ となるまで i)~iii) を繰り返す

なお、以上の手順から明らかなように、本手法ではクロス集計されたカテゴリが同一の標本については、同一の重みが与えられる。

2) IPW法

IPW(Inverse Probability Weighting)法は、標本ごとに算出する傾向スコアの逆数で標本を重み付ける手法である。傾向スコアは、政策や治療などの処理（独立変数）が結果に及ぼす効果（因果効果）を定量評価する方法として用いられる。これは、独立変数を媒介として処理・結果の双方に影響を及ぼしうる要因（共変量）を一つの変数（傾向スコア）に集約し、共変量が独立変数を介して結果変数に及ぼす間接効果を調整することで、独立変数による結果変数への直接効果を明らかにする方法である。サンプル i が有する s 種類の共変量を x_{is} 、独立変数を z_i 、結果変数を y_i とすると、傾向スコア e_i はサンプル i （ $i=1,...,N$ ）の処理を受けた群（ $z_i=1$ ）への帰属確率として、式（4）で表される。

各サンプルの傾向スコアの真値は不明なため、傾向スコアはロジットモデルによって推定する。

$$e_i = P[z_i = 1 | x_{is}] \quad (0 \leq e_i \leq 1) \quad (4)$$

Rosenbaum と Rubin³⁾は、傾向スコアの値を参照して、独立変数と共変量が独立とみなせることを示した。本研究ではこの性質に着目して、交通機関サービス水準間の相関を緩和する目的で傾向スコアの逆数（IPW推定量）で標本の重み付けを行う。独立変数、結果変数、および共変量の関係を図1に示す。本研究における結果変数は交通機関選択であり、独立変数、共変量は、ともに交通機関サービス水準である。

傾向スコアの算出には、独立変数について、処理群（ $z_i=1$ ）と非処理群（ $z_i=0$ ）を設定する必要がある。そこで本研究では、独立変数のアストラムラインの所要時間データ t_i をソートし、中央地付近 M で $z_i=1$ （所要時間が長い）、 $z_i=0$ （所要時間が短い）の大小の2グループに分割した。IPW推定量 w_i は、式（6）に示すように、式（5a）、式（5b）で得られる重み $w_{z=1,i}$ の和として算出される。

$$w_{z=1,i} = \frac{\frac{z_i}{e_i}}{\sum_{i=1}^{N_{z=1}} \frac{z_i}{e_i}} N_{z=1} \quad (5a)$$

$$w_{z=0,i} = \frac{\frac{1-z_i}{1-e_i}}{\sum_{i=1}^{N_{z=0}} \frac{1-z_i}{1-e_i}} N_{z=0} \quad (5b)$$

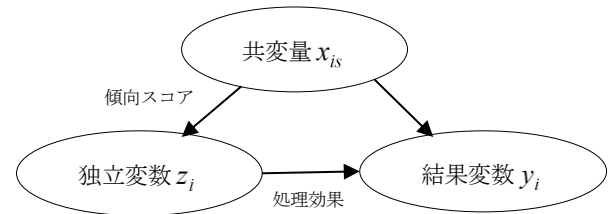


図1 共変量・独立変数・結果変数の関係図

$$w_i = w_{z=1,i} + w_{z=0,i} \quad (6)$$

ただし、 $N_{z=1}$ と $N_{z=0}$ はそれぞれ $z_i=1$ と $z_i=0$ の標本数であり、 N は $N_{z=1}$ と $N_{z=0}$ の和（総標本数）である。

3. 分析データの概要

分析に使用するデータは、H20 広島市交通実態調査データ（以下、広島PTデータ）と交通機関サービス水準データを統合したものである。広島PT調査は、H20年11月下旬～12月中旬にかけて、郵送配布、郵送回収方式で実施された。調査内容は、性別や年齢、職業などの個人・世帯属性、出発地・到着地や代表交通手段などの移動に関する項目である。本調査の有効トリップ数は92221トリップであった。

有効トリップから、出発地が郊外（アストラムラインの駅を含むBゾーン）で、目的地が都心（アストラムラインの駅である本通、県庁前、城北、および白島を含むゾーン、また、それらに近接するCゾーン）のトリップと、都心から郊外の逆方向のトリップを分析対象トリップとして抽出した。さらに自動車、バス、アストラムラインの3つの交通機関全てを選択可能なトリップを抽出したところ、2440トリップが得られた。以下、これを有効データとして、分析を行う。

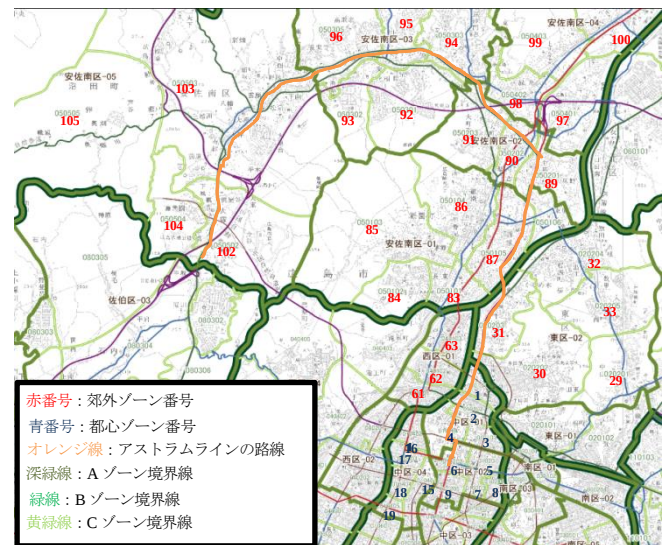


図2 抽出した分析対象ゾーン

表 2 交通機関選択モデルの推定結果

説明変数	①PTモデル			②IPFモデル			③IPF・IPW1モデル			④PT・IPW2モデル		
	推定値	t値		推定値	t値		推定値	t値		推定値	t値	
自動車所要時間	-0.14	-15.75	***	-0.22	-17.01	***	-0.17	-15.93	***	-0.14	-14.54	***
バス所要時間	-0.07	-10.85	***	-0.07	-7.12	***	-0.04	-3.91	***	-0.08	-10.46	***
アストラムライン所要時間	-9.E-03	-1.67	+	-6.E-03	-0.89		-0.01	-1.78	+	-0.02	-3.24	**
自動車費用	-1.E-03	-4.13	***	-2.E-03	-8.57	***	-2.E-03	-10.35	***	-1.E-03	-5.77	***
バス費用	-3.E-03	-4.88	***	-3.E-03	-3.44	***	-7.E-03	-7.53	***	-3.E-03	-5.05	***
アストラムライン費用	-7.E-03	-14.91	***	-8.E-03	-11.35	***	-0.01	-15.09	***	-8.E-03	-14.74	***
利用可能な自動車あり(1) ^{a)}	1.24	11.36	***	0.20	1.76	+	0.04	0.39		1.07	9.56	***
男性(2) ^{a)}	-0.38	-3.82	***	-0.34	-2.67	**	-0.99	-8.46	***	-0.73	-7.08	***
年齢(2) ^{a)}	1.E-03	0.36		-0.02	-7.31	***	-9.E-03	-2.98	**	3.E-03	1.03	
就業者(3) ^{a)}	0.72	5.24	***	0.71	4.20	***	0.54	4.14	***	0.68	5.16	***
通学者(1) ^{a)}	-0.10	-0.45		-1.69	-9.31	***	-2.34	-10.52	***	-0.55	-2.16	*
1人世帯(3) ^{a)}	-0.08	-0.74		-0.26	-1.62		-0.46	-3.85	***	-0.35	-3.47	***
定数項(1) ^{a)}	-0.62	-2.59	**	2.28	6.82	***	-0.78	-2.35	*	-1.42	-5.33	***
定数項(2) ^{a)}	1.26	4.63	***	2.01	5.54	***	0.19	0.54		0.87	2.87	**
初期対数尤度	-2680.61			-2680.61			-2680.61			-2680.61		
最終対数尤度	-2204.18			-1620.98			-1982.32			-2174.30		
サンプル数	2440			2440			2440			2440		
自由度調整済み尤度比	0.18			0.39			0.26			0.19		
再現性(%)	55.37			45.61			48.73			56.23		

a): 数字は説明変数が入力された選択肢 1: 自動車, 2: バス, 3: アストラムライン
 ***):0.1%有意 **):1%有意 *):5%有意 +):10%有意

4. 多項ロジットモデルの推定

1) データセットの設定

有効データ (2440 トリップ) を用いて, 多項ロジット (MNL) モデルを推定する. その際, 標本の重みが異なる 4 種類のデータセットを用いた.

①PT モデルは, 広島 PT データに付された拡大係数 (以下, PT 拡大係数) で重み付けしたモデルである. ②IPF モデルは, PT 拡大係数の代わりに IPF 拡大係数で重み付けしたモデルである. ③IPF・IPW1 モデル, ④PT・IPW2 モデルは, それぞれ IPF 拡大係数と IPW 推定量, PT 拡大係数と IPW 推定量, で重み付けしたモデルである. ここで, ③と④の IPW 推定量は同一ではなく, それぞれ IPF 拡大係数, PT 拡大係数で重み付けしたデータを用いて傾向スコアモデルを推定して算出した.

本研究では, IPF 法の影響を確認するために, ①PT モデルと②IPF モデルとを比較した. IPW 法の影響は, ①PT モデルと④PT・IPW2 モデルとを比較して確認した. さらに IPF 法と IPW 法を組み合わせた影響を確認するために, ③IPF・IPW1 モデルを推定した.

2) モデル推定結果

表 2 に交通機関選択モデルの推定結果を示す. ②③④全てのモデルにおいてモデルの当てはまりを表す自由度調整済み尤度比は上昇した. ①と②の比較

より, IPF 法の適用によって, 年齢, 通学者の精度が大きく向上した. しかし, 精度が低下したパラメータも存在し, また, 再現性が低下する結果となった.

①と④の比較より, IPW 法の適用によって, アストラムライン所要時間, 通学者などにおいてパラメータの精度向上が確認され, 再現性もやや上昇した.

5. クロスバリデーションによる再現性の検証

1) クロスバリデーション (CV) の概要

推定に用いたデータに良く当てはまるモデルであっても, 予測対象となるゾーンに関して精度が確保できなければ, 空間的な安定性の面では, 良いモデルとはいえない. そこで, 全データを「あるブロックのデータセット」と「そのブロックを除いたデータセット」に分割し, 前者を検証用, 後者を推定用として, 推定用データで検証用データの予測を行う CV により, 空間的な安定性を検証する. CV で除くブロックは, アストラムラインの沿線を選定した.

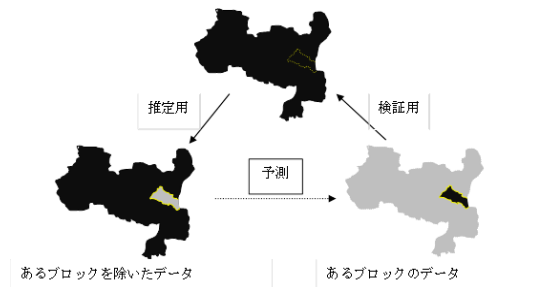


図 3 本研究の CV のイメージ

本研究では、空間的な安定性の指標としての的中率を用いる。的中率 $HitR_z$ は、個人 i が選択肢 n を選択した実際の選択結果 $y_{i,n}$ と、予測結果 $\hat{y}_{i,n}(A|-A)$ を用いて、式 (7) 式 (8) で算出される。

$$S_{i_z,n} = \begin{cases} 1 & ; y_{i_z,n} = \hat{y}_{i_z,n}(A|-A) \\ 0 & ; y_{i_z,n} \neq \hat{y}_{i_z,n}(A|-A) \end{cases} \quad (7)$$

$$HitR_z = \frac{1}{N_z} \sum_{i_z=1}^{N_z} \sum_{n=1}^3 S_{i_z,n} \quad (8)$$

ただし、 z は検証用のブロックに属するゾーンである。また、予測結果 $\hat{y}_{i_z,n}(A|-A)$ に付す括弧内において、右側は推定用のデータを表す。これらは一部のブロックを除くデータセットを表しており、 $-A$ 、 $-B$ 、 $-C$ 、および $-D$ と表記する。一方、左側は予測ブロックを表すので、 $A \sim D$ ブロックが入る。

2) クロスバリデーション (CV) 結果

MNL モデルによる CV 結果を、表 3 に示す。紙面の都合上、モデルの推定結果は掲載していないが、4 ブロック全てにおいて、全データの推定結果とほぼ同じ傾向がみられた。

CV の結果、IPF 法の適用によって、モデルの当てはまりが大きく改善した一方で、予測対象ゾーンへの精度は低く、推定用データへの過剰適合の傾向がみられた。また、IPW 法の適用によって、全ブロックでの的中率が上昇しており、空間安定性の改善が確認された。

6. おわりに

1) 研究の成果

本研究では、RP データの個人属性の母集団代表性の毀損と交通機関のサービス水準の空間相関などの RP 調査の統計的な問題に着目して、2 種類の標本重み付け手法によるモデル精度の改善を検討した。

その結果、IPF 法の適用によって、個人属性のパラメータの精度や、モデルの当てはまりが向上した。しかし一部に精度の低下したパラメータも存在した。また、モデルの予測精度の改善は見られなかった。IPW 法の適用によって、パラメータの精度、モデルの当てはまりが改善し、再現性の向上がみられた。

表 3 MNL モデルによる CV 結果

	検証用データ	トリップ数	的中率 (%)	全データとの比較 (%)	PTモデルとの比較 (%)
①PT	全データ	2440	55.37	0.0	-
	A	306	55.88	0.5	-
	B	282	47.52	-7.9	-
	C	332	55.72	0.4	-
	D	346	50.58	-4.8	-
	A～Dの加重平均		52.53	-2.84	-

	検証用データ	トリップ数	的中率 (%)	全データとの比較 (%)	PTモデルとの比較 (%)
②IPF	全データ	2440	45.61	0.0	-9.76
	A	306	37.58	-8.0	-18.30
	B	282	34.04	-11.6	-13.48
	C	332	42.77	-2.8	-12.95
	D	346	43.93	-1.7	-6.65
	A～Dの加重平均		39.89	-5.72	-12.64

	検証用データ	トリップ数	的中率 (%)	全データとの比較 (%)	PTモデルとの比較 (%)
③IPF/ IPW1	全データ	2440	48.73	0.0	-6.64
	A	306	48.37	-0.4	-7.52
	B	282	47.52	-1.2	0.00
	C	332	47.59	-1.1	-8.13
	D	346	45.95	-2.8	-4.62
	A～Dの加重平均		47.31	-1.42	-5.21

	検証用データ	トリップ数	的中率 (%)	全データとの比較 (%)	PTモデルとの比較 (%)
④PT/ IPW2	全データ	2440	56.23	0.0	0.86
	A	306	56.54	0.3	0.65
	B	282	50.35	-5.9	2.84
	C	332	56.93	0.7	1.20
	D	346	55.20	-1.0	4.62
	A～Dの加重平均		54.90	-1.33	2.37

さらに、CV の結果、空間安定性が改善することが明らかとなった。

2) 今後の課題

今後は、性別・年齢以外の個人属性についても IPF 法を適用する必要がある。また、本研究では検証用のデータの重み付けは行っていなかったが、検証用データの母集団代表性が毀損している可能性も考えられるため、予測時に、検証用データの重み付けをした結果についても検討する必要がある。

参考文献

- 1) 松原司：空間データサンプリングのための交通機関選択モデルの精度検証に関する研究,平成 24 年度修士論文,
- 2) 倉内慎也, 萩尾龍彦, 石村龍則, 吉井稔雄：世帯及び個人属性分布を考慮した PT 調査データの拡大係数算出手法の適用, 土木学会論文集 D3, Vol.67, No.5, 2011
- 3) Rosenbaum, Paul R. & Rubin, Donald B: “The Central Role of the Propensity Score in Observational Studies for Causal Effects” *Biometrika*, 70(1), 41-55, 1983