

実験計画法によるモーダルスプリットのモデルビルディングに関する研究

北海道大学 正員 〇佐藤 馨一

〃 〃 五十嵐日出夫

運輸省 〃 〃 小原 恒平

1. はじめに 交通計画におけるモデルの役割は、環境とそこにおける計画との関係の大筋を単純化し、定量的に表現することにある。それゆえ、モデルを作成するにあたっては、すでに設定された問題、目的、仮説、仮定、あるいはどのような評価基準を採用したか、という単純化が行なわれたか、問題がどのように小問題に分割されたか、集められたデータとしてどういうものがあるか、代替案はどのようなシステムになっているか等について、それまでの作業の結果が集中的に反映され、取り入れなければならぬ<sup>2)</sup>。本研究においては以上のようなモデルを作成する過程をモデルビルディング (*model building*) と称称することにした。

交通計画において用いられるモデルを、問題の持っている不確実性の程度によって分類すると次のようになる。

- i) 数学的決定モデル (*deterministic model*) : 考えられる結果がただ一つで、必ずそれが実現する場合。
- ii) 統計的決定モデル (*stochastic model*) : 幾とおりも考えられる結果について確率が分っている場合。
- iii) 政策的決定モデル (*uncertainty model*) : 幾とおりも考えられる結果について確率が分らない場合。

本研究は空港アクセスにおける交通機関別選択率を求めるため、確率モデルの一つであるモーダルスプリットモデルを実験計画法的手法を用いて作成した結果について発表するものである。

2. 空港アクセス交通におけるモーダルスプリットモデル 空港アクセス (*airport access*) を狭義に定義すると、周辺地域から空港へ向う人の移動現象となる。これに対して、空港から周辺地域へ向う場合を空港イグレス (*airport egress*) ということがある。しかしながら、空港イグレスは逆に言うと目的地である周辺地域へのアクセス交通とみなすことができる。そこで本研究においては、空港アクセスという用語を広義に解釈して、空港と周辺地域の間の交通機関を利用した人の移動現象と定義することにした。

さて、空港アクセスにおけるモーダルスプリットモデル (*modal split model*) を作成する場合、次のような問題点が生じてくる。オ1の問題点は、従来のモーダルスプリットモデル(将来における交通システムのサービス水準が、現状のサービス水準の範囲から大きく逸脱しないことを前提条件として作られていることである。このため、将来において新交通システム等の採用を検討しようとする場合には、種々の工夫が必要となる<sup>3)</sup>。

オ2の問題点は意識の数量化に関することである。モーダルスプリットモデルは、交通機関を利用しようとする人々の選択意思をモデル化しようとしたものであり、意識の数量化に伴う諸問題がそのまま、モーダルスプリットモデルのモデルビルディングに現われてくる。意識の数量化の過程は非常に複雑であり、かつ多岐にわたるものであるが、その問題点はおよそ次の3点に集約される。オ1の点は次元に関することである。モデル自体は多次元要因で構築されているにもかかわらず、分析の過程において容易に低次元化を行なってしまい、モデルの適用に際して種々の制約条件を必要とする場合が多い。空港アクセスを例に考えてみると、所要時間、待ち時間、快適性、乗換回数等の要因をすべて金額に換算しようとする試みが数多くなされているが、評価関数の設定そのものに多くの問題点が内在していることはあえて指摘するまでもない。オ2の点は要因(説明変数)の独立性に関することである。重回帰分析や数量化理論等においては、それぞれの説明変数や要因は互いに独立であるという仮定を用いているが、実際のデータにおいては変数と変数との間に強、相関性が認められたり、または組合せ効果等が存在したりする。このため、多重共線性に関する問題や、説明変数の妥当性に関する問題が発生してくる。オ3の点は誤差に関することである。モーダルスプリットモデルのみならず、モデルの作成にあたっては多くの誤差が生じるが、誤差そのものに関しての吟味は十分なされていないと言いがたい。特に、データが

実際の現象をとらだけ把握しているかについては余り言及されてははなく、モデルとデータの整合性のみを問題とする場合が多い。以上の諸問題に対処するために、本研究においては実験計画法を用いた意識調査を行ない、直交多項式によってモーダルスプリットモデルを推定することにした。

3. 実験計画法による航空旅客の意識調査 従来のモーダルスプリットモデルは、被験者が現在どのような交通機関を利用しているかを調査した上で、その選択要因が何であるか、またその説明力はどの位あるのかを多変量解析法を用いて分析してきた。このことは、被験者の意識構造を現在の選択行動を分析することによって推し量ろうとすることに外ならない。これに対して、実験計画法によるモーダルスプリットモデルの作成は、まず被験者の意識を多くの要因を組合せたアンケート票によって直接問い質し、その結果をベースにしてモデルを組み立てようとするものである。実験計画法による意識調査は、従来の意識調査法に比べて次のような利点を有している<sup>4)5)</sup>。

- 1) 調査順序をランダムにするにより、調査誤差の性を明確にすることができる。
- 2) 要因の効果を逐次的に検討することなく、他の要因の条件が変わっても目的とする要因効果を把握でき、しかも多因子の効果を同時に推定、推定することができる。このことによって、普遍性のある結論を得ることができる。
- 3) 交互作用の効果が検出できる
- 4) 同じ調査回数で、多くの要因に対する効果を精度よく検出したり、推定することができる。

さて、千代空港と札幌新港間を連絡する現在の主要なアクセス交通機関はバスであり、この外に自家用車やタクシー等も多少利用されている。本研究の目的はこのようなアクセス交通体系の中に、国鉄や新交通システム等(本研究ではこれらを新交通機関と総称する)を導入したとき、交通機関別選択率はどのようになるかを推定することにある。そこで、新交通機関の選択率構造模型を式(1)のように仮定し、表-1に示した要因と水準を用いてアンケート票を作成した。

$$X_{ijklm} = \mu + a_i + b_j + C_k + d_l + f_m + a_i b_j + b_j C_k + E_{ijklm} \quad (1)$$

$$(i=1, \dots, 4, j=1, 2, k=1, 2, l=1, 2, m=1, 2)$$

ただし、 $X_{ijklm}$  : 新交通機関の選択率

$\mu$  : 母平均,  $a_i$  : A 因子の主効果,  $b_j$  : B 因子の主効果,  $C_k$  : C 因子の主効果,  $d_l$  : D 因子の主効果,  $f_m$  : F 因子の主効果,  $a_i b_j$  : A 因子と B 因子の交互作用による効果,  $b_j C_k$  : B 因子と C 因子の交互作用による効果,  $E_{ijklm}$  : 誤差

表-1 要因と水準

表-1の要因をすべての水準について組合せると、

$$4 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 = 64 \text{ 通り}$$

となり、この組合せ全部について調査することは、非常に多くの労力と経費を必要とする。そこで直交割付け表を利用することにした。直交表は多次元空間において直交の特性を有している表であり、この表を用いると技術的に明らかに存在しないと思われる

2 因子の交互作用や、3 次や 4 次等の高次の交互作用に関する情報を犠牲にして、実験回数を減らすことができる<sup>4)5)</sup>。本研究においては、 $L_{16}$ の直交表を用い、擬水準法により表-2のような組合せを作った。表-2の組合せに従って、図-1のようなアンケート文を作成し、それぞれの航空旅客などの交通機関を選択するのを調べた。

要 因	因子	水準 1	水準 2	水準 3	水準 4
料 金	A	1 千円	2 千円	3 千円	4 千円
所要時間	B	10 分	30 分		
待ち時間	C	5 分	20 分		
調査日	D	日曜日	平日		
方 向	F	上り	下り		

航空旅客に対する意識調査は、日本航空(株)の協力をえて、昭和57年12月5日(日曜日)、12月6日(月曜日)の2日間にわたり、上、下方向それぞれ3便(計12便)を対象に実施した。調査日を12月上旬としたのは、年末年始の繁忙期を避けたためである。

調査日と方向とが一致するアンケート票は4種類ある(例えば、日曜日で上り方向のアンケート票としては、NO1, NO3, NO14, NO16 がある)。これら該当する便の乗客にランダムに配布した。なお、航空旅客に対する意識調査を行なったアンケート用紙には図-1の設問の外に、旅客の個人属性や今回どのようなアクセス交通機関を利用して空港へきたか、またそのときに運賃、所要時間、待ち時間、荷物、乗換え回数等をどの位考慮したかについても質問している。

アンケート票を総計1459票配布し、1300票回収した(回収率89.1%)、それゆえ、1種類のアンケート票に対して80人強の回答結果を得たことになる。なお、12月6日の下り方向の調査において、機内で回収したアンケート票が途中で紛失してしまうという。

アクシデントが発生したが、実験計画法に基づいた配布方式を採用していたので、調査全体が失敗するという最悪の事態を招くことができた。

それぞれのアンケート票において、航空旅客が空航アクセス交通機関として何を選んだかについては表-3にまとめてある。そこで、新交通機関を選択した要因を分析するため、表-3における新交通機関の選択率を従属変数として分散分析を行ない、表-4の分散分析表(I)を得た。この分散分析表において、D因子(調査日)、F因子(方向)、D×C(所要時間と待ち時間の交互作用)のF値は基準F値より小さくなっている。このことは、調査日や方向という要因は新交通機関の選択行動に余り影響を与えないということを意味している。そこでこれらの変動を誤差変動にプールして新たにF値を計算した。その結果、A因子(料金)、B因子(所要時間)、C因子(待ち時間)の主効果と、A×B(料金と所要時間の交互作用)が有意水準1%で有意となった。有意となった要因が総変動に対してどの位の割合を占めているかを知るために、(2)式で定義されている寄与率を計算した<sup>4)5)</sup>。

$$P_A = \frac{A \text{ 因子の総効果}}{\text{全変動}} = \frac{S_A - \cancel{A} \cdot T \cdot E}{S} \quad (2)$$

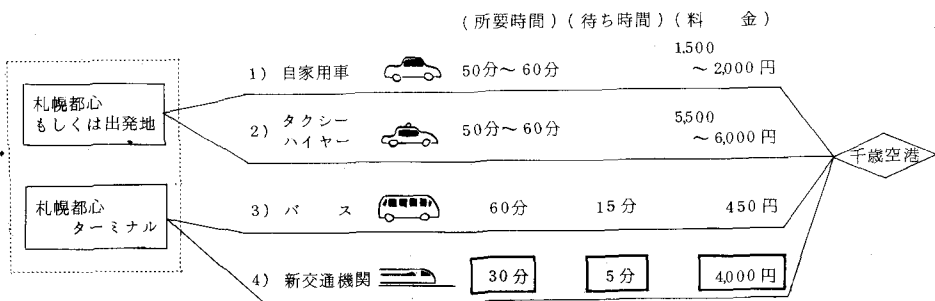


図-2 アンケート文

表-2. アンケート文の組合せ

票番号	料金	所要時間	待ち時間	調査日	方向
1	1千円	10分	5分	(日)	(上)
2	1	10	20	平	F
3	1	30	5	(日)	(上)
4	1	30	20	平	F
5	2	10	5	日	F
6	2	10	20	平	上
7	2	30	5	日	下
8	2	30	20	平	上
9	3	10	5	平	上
10	3	10	20	日	F
11	3	30	5	平	上
12	3	30	20	日	F
13	4	10	5	平	F
14	4	10	20	(日)	(上)
15	4	30	5	平	F
16	4	30	20	(日)	(上)

寄与率の計算の結果、料金の影響が最も大きく、次いで所要時間、料金と所要時間の交互作用、待ち時間の順となることが分った。また、新交通機関選択率の変動の90%以上は、料金と所要時間で説明されることも明らかになった。さらに、寄与率はいさながら、料金と所要時間の交互作用が有意となったことは注目に値する。それぞれ計算された寄与率のなかで、誤差の寄与率が非常に重要な意味をわっている。なぜならば、誤差変動の中には繰返し誤差や、錯誤、あるいは無視された要因の変動等が含まれており、その寄与率は現象からデータを得る際に生じる誤差変動の大きさを示すからである。

航空旅客に対する意識調査では、表-4の分散分析表からも明らかのように、誤差の寄与率は14%と小さく、本研究で取り上げた要因の妥当性が裏づけられた。つまり、誤差の寄与率がいさいことから、調査日や方向の要因は当然のこととして、たとえ性別、年齢、トリップ目的等を要因に採用したとしても、新交通機関の選択率にはほとんど影響を与えることはないと思定された。

表-3. 航空旅客による交通機関別選択率

票番号	自家用車	77シー	バス	新交通機関	計
1	7.6%	5.1%	7.6%	79.7%	100%
2	5.4	3.3	12.6	71.7	100
3	13.7	4.1	32.9	49.3	100
4	9.0	5.6	40.4	45.0	100
5	7.5	3.2	36.6	52.7	100
6	3.8	1.3	44.9	50.0	100
7	11.1	1.1	46.7	41.1	100
8	9.6	1.4	56.2	32.8	100
9	16.2	4.1	35.1	44.6	100
10	12.6	5.7	39.1	42.6	100
11	12.0	2.7	53.3	32.0	100
12	15.7	4.8	51.8	27.7	100
13	14.6	2.2	44.9	38.3	100
14	14.9	4.5	53.7	26.9	100
15	14.0	4.7	67.4	13.9	100
16	12.1	4.2	62.1	9.6	100

表-4 分散分析表(I)

要因記号	要因の説明	偏差平方和 S	自由度 φ	分散 V	F <sub>0</sub>	7-11-7	F <sub>0'</sub>	寄与率 ρ%	
A	料金	2179.82	3	1066.27	133.15**	$S_e = 36.55$ $\phi_e = 7$ $V_e = 5.22$	204.27**	63.5	
B	所要時間	1503.50	1	1503.50	178.89**		208.03**	29.9	
C	待ち時間	128.26	1	128.26	16.11**		24.57**	2.5	
D	調査日	0.11	1	0.11	0.01		—	—	
F	方向	4.10	1	4.10	0.52		—	—	
A×B	AとBの交互作用	142.75	3	47.58	5.98*		9.11**	2.7	
B×C	BとCの交互作用	0.52	1	0.52	0.07		—	—	
e	誤差項	31.82	4	7.96	—		—	1.4	
計		5009.88							100%

4. 直交多項式によるモーダルスプリットモデルの推定 航空旅客に対する意識調査の結果、A因子(料金)、B因子(所要時間)、C因子(待ち時間)の主効果と、A×Bの交互作用の効果が有意になることがわかった。そこで、新交通機関の選択率 $y$ を(3)式のような、多項式で表示する

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i f_i(A_i) + \alpha_2 f_2(A_i) + \alpha_3 f_3(A_i) + \beta_j g_j(B_j) + \gamma_k h_k(C_k) + \delta_{ij} f_i(A_i) g_j(B_j) + \delta_{jk} f_j(B_j) g_k(C_k) + \delta_{ik} f_i(A_i) g_k(C_k) + \epsilon_{ijk} \quad (3)$$

ただし、 $\mu, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \beta_1$  : パラメータ

$A_i, B_j, C_k$  : A因子, B因子, C因子の水準値

$f_1, f_2, f_3$  : A因子の1次, 2次, 3次の多項式

$g_i$  : B因子の1次の多項式

$h_i$  : C因子の1次の多項式

$E_{ijk}$  : 誤差

ここで、A, B, Cの水準が等間隔で、 $f_1, f_2, f_3, g_i, h_i$ を(4)式のように定めるならば、各次の多項式は互いに直交する<sup>(4)</sup>。

$$\left. \begin{aligned} f_1(A_i) &= A_i - \bar{A}, & g_1(B_j) &= B_j - \bar{B}, & h_1(C_k) &= C_k - \bar{C} \\ f_2(A_i) &= \{ (A_i - \bar{A})^2 - (\alpha^2 - 1) \cdot hA^2 / 12 \} \\ f_3(A_i) &= \{ (A_i - \bar{A})^3 - (3\alpha^2 - 7)(A_i - \bar{A}) \cdot hA^2 / 20 \} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ただし、 $\bar{A}, \bar{B}, \bar{C}$ は各因子の水準の平均値を、また $h$ は水準数を示している。(4)式における関数 $f_1, g_1, \dots, f_3$ が直交関数であるならば、各因子の変動やパラメータの推定値は直交多項式表を用いて簡単に求めることができる<sup>(4)(5)</sup>。表-5は各因子の直交分解された変動をもとに、分散分析を行なった結果を示すものである。ただし、表中において $A_L$ とはA因子の1次変動を示し、 $A_B, A_C$ はそれぞれ2次, 3次変動を示している。分散分析の結果、 $A_L, A_C, B, C, A_B \times B$ の変動が有意水準1%で有意となり、 $A_L \times B$ の変動が有意水準5%で有意となることが分かった。それゆえ、(3)式の構造式において有意とならないものを取り除くと(5)式のようになる。ただし、2次の項が有意であれば、たとえ1次の項が有意でなくとも構造式には取り上げることにした。

$$\begin{aligned} y &= 41.12 - 12.52(A_i - 2.5) + 0.6813 \{ (A_i - 2.5)^2 - 1.25 \} - 2.829 \{ (A_i - 2.5)^3 - 2.05(A_i - 2.5) \} \\ &\quad - 0.9694(B_j - 20) - 0.3775(C_k - 12.5) + 0.1188(A_i - 2.5)(B_j - 20) \\ &\quad - 0.2656 \{ (A_i - 2.5)^2 - 1.25 \} (B_j - 20) \end{aligned} \quad (5)$$

表-5の分散分析表から、式(5)は全変動の98.4%を説明していることが分る。また、A, B, Cの因子の主効果のみを取り上げて構造式を推定した場合には式(6)のようになり、その寄与率は94.8%となる。

$$\begin{aligned} y &= 41.12 - 12.52(A_i - 2.5) - 0.9694(B_j - 20) - 0.3775(C_k - 12.5) \\ &= 96.52 - 12.52 A_i - 0.9694 B_j - 0.3775 C_k \end{aligned} \quad (6)$$

直交多項式を用いてモデルビルディングを行なう最大の長所は、目的に応じて(5)式や(6)式をごく簡単に導き出すことにある。つまり、k次の多項式において、式を1次の項で打ち切ったとしても、それがそのまま最小二乗法による1次の多項式になっていることが理論的に証明されている<sup>(4)(5)</sup>。この裏付けがあってこそ、1次の

表-5 分散分析表(Ⅱ)

要因記号	要因の説明	偏差平方和 $S$	自由度 $\phi$	分散 $V$	$F_0$	7°-リング	$F_0$	寄与率 P %
A	料金	3198.82	3	-	-		-	(63.4)
A <sub>L</sub> A <sub>B</sub> A <sub>C</sub>	料金の1次効果	3133.76	1	3133.76	600.34**	S' <sub>0</sub> = 38.2 φ' <sub>0</sub> = 8	655.60**	62.4
	料金の2次効果	7.43	1	7.43	1.42		1.55	0.0
	料金の3次効果	57.63	1	57.63	11.04*		12.06**	1.0
B	所要時間	1503.50	1	1503.50	288.02**		214.54**	29.9
C	待ち時間	128.26	1	128.26	24.57**		26.83**	2.5
A×B	AとBの交互作用	142.75	3	-	-		-	(2.6)
A <sub>L</sub> ×B A <sub>B</sub> ×B A <sub>C</sub> ×B	A <sub>L</sub> とBの交互作用	28.2	1	28.2	5.40	S' <sub>0</sub> = 38.2 φ' <sub>0</sub> = 8	5.90*	0.5
	A <sub>B</sub> とBの交互作用	112.88	1	112.88	21.63**		23.62**	2.1
	A <sub>C</sub> とBの交互作用	1.65	1	1.65	0.32		-	-
e	誤差項	36.55	7	5.22	-		-	1.6
計		5007.88	15					100

項、2次の項というような分解が成立したのであり、もし普通の多項式を作ったなら1次式をあてはめるか、2次式をあてはめるかによって1次の係数が異なってくる。

5. 考察 実験計画法を用いて意識調査を行ない、直交多項式によってモーダルスプリットモデルを作成した意義と、今後の問題点を整理すると次のようになる。

- 1) 本研究において用いたデータは、誤差変動の寄与率が64%のものであり、このデータを基礎にして作成した(5)式のモーダルスプリットモデル(有意な要因をすべて取りこんでいる)の誤差の寄与率は66%となった。主効果のみで作成したモデル((6)式の場合)では、誤差の寄与率は52%となった。
- 2) 表一5の分散分析表によると、A因子の3次の項やA×Bの交互作用が2次の項まで有意になることが分かった。そのため、統計理論を厳密に準用すると、主効果のみをとり上げてそのパラメータを最小二乗法を用いて推定することはできない。
- 3) 本研究におけるモーダルスプリットモデルは、航空旅客の意識調査から作成したものであり、意識がそのまま行動につながることはないという批判は残る。しかしながら、モーダルスプリットモデルは基本的に利用者の意識を定量化しようとするものであり、しかもある特定の交通機関の選択率を問題とする場合には十分な実用性を有するであろう。
- 4) 分散分析表によつて有意となった要因をすべて用いてモデルを作ることが、モーダルスプリットモデルとして最も小さいモデルであると常に言うことはできない。つまり現象を説明するためにモデルを用いるのか予測を目的として用いるのかによってモデルの評価が異なってくる。現象の説明を目的とする場合には、(5)式のように説明変数の項数が多いほどデータとの適合度は高くなる。しかし、このモデルを用いて予測を行なおうとする場合には(特に外挿の場合)予測誤差が大きくなる。
- 5) 実験計画法でいう因子は、数量化理論においてはアイテムに相互1、水準はカテゴリーに相当する。その上新交通機関の選択率は数量で与えられているので、数量化モデル才ノ類をそのままこのデータに適用することができる。しかし数量化理論によるモデルは、現象の説明のみに有効性をもつものであり、予測の立場から用いようとしても肉挿すら不可能であることに注意しなければならぬ。
6. おわりに 本研究は従来のモーダルスプリットモデルが主として多変量解析法を用いて推定しているのに対し、実験計画法的手法を用いて意識調査を行ない、直交多項式を用いてモーダルスプリットモデルを推定してみたものである。本研究の成否は、実験計画法的手法を用いて意識調査を行なえる否かにかかっていた。その意味で航空旅客に対する意識調査の便宜を図って下さった日本航空(株)総合開発事務局および乗員各位に深く感謝する。また本研究をとりまとめるにあたり種々の御便宜を図って下さった北海道開発局開発調査課、空港課、さらに東京航空局千代田空港事務所の各位に深く感謝する。さらに、終始御指導を賜わった北海道大学土木工学科山形耕一助教授に心からのお礼を申し上げる。

## 参考文献

- 1) 宮川公男編著：PPBSの原理と分析、有斐閣、昭和44年
- 2) 長尾義三；土木計画序論—公共土木計画論、共立出版、昭和49年
- 3) 杉原頼寧；交通機関別分担モデルの簡略化、交通工学、ND3、1977年(Vol.12)
- 4) 田口玄一；才子版 実験計画法、上下、丸善、昭和52年
- 5) 石川馨、外；化学者および化学技術者のための実験計画法、上下、東京化学同人、昭和50年
- 6) 石井吾郎；実験計画法の基礎、サイエンス社、昭和50年