

通勤交通における経路別利用者数の予測

——宇野モデルの検討——

MODAL SPLIT FOR WORK TRIPS BY A GENERALIZED FUNCTIONAL MODEL

——A Theoretical and Empirical Study on The Uno Model——

佐佐木 綱* 西井和夫**

1. はじめに

交通需要予測モデルは、これまでの個別輸送機関ごとの需要予測手法に代りパーソントリップ法としての体系化が漸次進められ、ほぼ完成の域に達しているものと考えられる。しかしながら、この方法が段階的推定法であるため各ステップ間の整合性に関する問題点が指摘されており、とくに交通機関分担において、本来人の動きの中での交通機関の選択がその経路をどのように選ぶかという経路選択と密接な関係があることから、経路選択のステップとの連繋が必要といわれている。またこうした交通手段や経路選択に関しては従来より数多くのモデル開発がなされているが、それらのモデルの関数形について十分な議論がなされているわけではない。ところが、宇野(1983)により提案された経路選択モデル(以下、宇野モデルと呼ぶ)では、モデルの本来具備すべき条件に着目し、これを満足する関数形の一般式を数学的に導出している。そこで本研究では、この宇野モデルを通勤交通の経路選択に適用することにより、モデルの実際への適用性に関する諸検討を行うことにする。そのために次章ではまず、宇野モデルの概要を紹介するとともに、従来の諸モデルとの比較を通じてモデルの基本的な性質の理解を深めることにする。次いで通勤交通の経路選択への具体的な適用のために、対象圏域の通勤経路選択の実態を明らかにする。そしていくつかの検討ケースに対してパラメータの推定結果および適合性を議論する。

2. 宇野モデルの概要とその性質

(1) モデルの概要

ある2地点間において競合するルートを $1, 2, 3, \dots$ 、その乗客数(分担率)を $p_1, p_2, p_3, \dots$ 、各ルートの所要時間、乗り換え回数、コストなどのルート特性値ベクトルを $x, y, z, \dots$ 、とする。そして、このモデルは、「競合するルートの乗客数比が当該ルートのルート特性値の関数である」とし、次式を仮定している。

$$p_1/p_2 = f(x, y) \quad (1)$$

このとき、関数 f は、本来経路選択モデルとして具備すべき次の3つの条件を満足するものでなければならぬと仮定し、宇野はこれらを満たす f の一般式((5)式)を関数方程式論を用いて導出している。

$$\text{(条件Ⅰ)} \quad \text{定義より } p_1, p_2 > 0 \text{ であるから, } f(x, y) > 0 \quad (2)$$

$$\text{(条件Ⅱ)} \quad p_1/p_2 \cdot p_2/p_1 = 1 \text{ より, } f(x, y) \cdot f(y, x) = 1 \quad (3)$$

$$\text{(条件Ⅲ)} \quad p_1/p_2 \cdot p_2/p_3 = p_1/p_3 \text{ (推移律) より, } f(x, y) \cdot f(y, z) = f(x, z) \quad (4)$$

$$f(x, y) = \exp\{-G(x) + G(y)\} \quad (5)$$

そして、式(5)中の $G(x)$ は、ルート特性値 $x, y, z, \dots$ 間の関係についての付加的な仮定を設けることによって、その仮定のもとでの関数 G の特定化が可能となる。例えば、式(1)の関数 f が当該ルート特性値間の比の関数と同じくべき乗の差の関数との積になっていると仮定する。すなわち、関数 f の形を、

* Tsuna SASAKI 正会員 工博 京都大学教授 工学部交通土木工学教室

** Kazuo NISHII 正会員 工修 京都大学助手 工学部交通土木工学教室

$$f(x, y) = \phi(x/y) \cdot \varphi(x^P - y^P) \quad (6)$$

と限定するとき、関数 G は式 (7) のように特定化することができ、その関数 f は式 (8) で示される。

$$G(x) = \sum_{i=1}^m a_i \ln x_i + \sum_{j=m+1}^n b_j x_j^P \quad (7)$$

$$P_1/P_2 = f(x, y) = \prod_{i=1}^m (x_i/y_i)^{a_i} \exp \left\{ \sum_{j=m+1}^n b_j (x_j^P - y_j^P) \right\} \quad (8)$$

ここで、 $a_i = 0$ (for all i) および $P = 1.0$ とおけば、

$$P_1/P_2 = \exp \left\{ \sum_{j=1}^n b_j (x_j - y_j) \right\} \quad (9)$$

となり、これは、関数 f がルート特性間の差のみの形となり、通常の logit 型に一致することがわかる。また、 $b_j = 0$ (for all j) とおけば、比のみ関数となり、Baumol-Quandt 型になる。(式 (10) 参照)

$$P_1/P_2 = \prod_{i=1}^n (x_i/y_i)^{a_i} \quad (10)$$

さらに、ルート特性値の合成を行うことにより、次式で示される比と差の合成型の関数形も可能である。

$$P_1/P_2 = \left(\frac{x_1 + w x_2}{y_1 + w y_2} \right)^a \exp \left\{ \sum_{j=3}^n b_j (x_j^P - y_j^P) \right\} \quad (11)$$

式 (11) 中の合成では、例えば所要時間 x_2, y_2 を時間評価値 w によって費用換算し、それとコスト x_1, y_1 と加算することによって、一般化費用の形での新たなルート特性値を想定した場合などがあてはまる。なお、式 (8)～式 (11) で示される 4 つのタイプは、後述の適用時に具体的に検討されることになる。

(2) 従来の経路選択モデルとの比較

宇野モデルの大きな特徴点の一つは、経路モデルが本来具備すべき条件のもとでの一般的な関数形の導出にあるが、ここでは従来の経路モデルのいくつかについて、主にモデル構造上の性質に関する比較を行う。

まず Theil (1969) は、Warner のロジットモデルが 2 項選択であったことに対しそれを多項選択に拡張すべくモデル式が満足しなければならない条件に着目した。すなわち、Warner のロジットモデルは、式 (12) で示されるようにある事象の生起確率とその余事象の生起確率との確率比の対数がいくつかの規定要因の線形結合で説明されるものである。

$$\log \frac{P}{1-P} = \alpha + \beta \log \frac{T_1}{T_2} + r \log \frac{C_1}{C_2} + \sum_{i=1}^3 \delta_i \log Q_i \quad (12)$$

ここで、 T_1, T_2 ; 競合する 2 つのモードのそれぞれの所要時間

C_1, C_2 ; " 所要費用

Q_1, Q_2, Q_3 ; 2 モード間の選択に関連する個人属性 (所得, 世帯構成)

P ; 例えば、車が使われる確率

$1-P$; 車が使われない (マストラが使われる) 確率

また式 (12) を変形すれば、

$$\frac{P}{1-P} = e^{\alpha} \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{\beta} \cdot \left(\frac{C_1}{C_2} \right)^r \prod_{i=1}^3 Q_i^{\delta_i} \quad (12)$$

と書き表わすことができる。ここでモデル式の構造を見ると、 $\log(P/(1-P))$ は P について単調増加関数でありまたその補完的事象 P に対する $\log(P/(1-P))$ とは絶対値が等しく符号が異なることより、当該 2 モード間で完全に対称性を有することがわかる。そこで、Theil は、これらの性質を踏まえ N 個の代替案の場合に拡張しようとするときには、次式で示される一般式が考えられるとした。

$$P_i/P_j = e^{\alpha_{ij}} \prod_{h=1}^m x^{\beta_{hij}} \prod_{k=1}^n \left(\frac{y_{ki}}{y_{kj}} \right)^{\gamma_{kij}} \quad (i, j=1, 2, \dots, N) \quad (13)$$

式 (13) におけるパラメータ $\alpha_{ij}, \beta_{hij}, \gamma_{kij}$ は、 m, n, N が余程小さくない限り膨大な数になるが、それらが恒等的に満足しなければならない条件として、当該 2 モード間の対称性 (条件①) と 2 モード間の確率比における循環性 (条件②) を考えることにより、式 (13) が次式のように変形されるものと結論づけた。

$$P_i/P_j = e^{\alpha_i - \alpha_j} \prod_{h=1}^m x_i^{\beta_{hi} - \beta_{hj}} \prod_{k=1}^n \left(\frac{y_{ki}}{y_{kj}} \right)^{\gamma_k} \quad (i, j = 1, 2, \dots, N) \quad (14)$$

このような Theil の諸検討と宇野モデルとを比較してみると、(イ)多項選択を想定しモデルが本来満足すべき条件に着目している点は共通する。すなわち、前述の条件①は宇野モデルの条件Ⅱ（式(3)）に、また条件②は明らかに条件Ⅲの推移律と一致する。(ロ)しかし、モデル式の基本構造に関しては Theil の方は、Warner の 2 項選択におけるロジットモデルにもとづいているため、式(13)の形に書き表わすこと自体が大きな前提条件となっていることになり、この点は宇野モデルと異なる。

次に、同様に競合する 2 経路の分担率比に対し、モデルの本来具備すべき条件に着目した河上(1970)による方法を検討してみよう。河上は、従来の経路モデルのもつ問題点を踏まえ、次式で示される 2 地点間 3 ルートの分担率比をいくつかの規定要因の関数形として表わそうとした。

$$P_j/P_i \equiv e^{f(x_{ij}, y_{ij}, z_{ij})} \equiv e^F \quad (15)$$

ここで、 $x_{ij} = x_i - x_j$ 、 $y_{ij} = y_i - y_j$ 、 $z_{ij} = z_i - z_j$ であり、2 ルート間の所要時間、コスト、乗り換え回数のそれぞれの差として定義されている。関数 f の特定化のために、(1) $P_i/P_j = 1/(P_j/P_i)$ の条件と(2)モデル式における基準ルートが変化しても同一のモデル式が誘導されるという条件を考慮することにより、結局次式で表わされる線形結合の形を提案している。

$$f(x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}) = a x_{ij} + b y_{ij} + c z_{ij} = a(x_i - x_j) + b(y_i - y_j) + c(z_i - z_j) \quad (16)$$

より一般的な K 個の規定要因のときには、

$$P_j/P_i = \exp \left\{ \sum_{k=1}^K \alpha_k (q_{ik} - q_{jk}) \right\}, \quad q_{ik}(q_{jk}); \quad i(j) \text{ ルート } k \text{ 番目の規定要因の値} \quad (17)$$

となる。宇野モデルとの関係について言えば、(イ)式(15)で示される指数形をあらかじめ先決している点が大きく異なる。これは、規定要因の x, y, z の値にかかわらず分担率比が単調関数でしかも正值であるなどの利点を有するが、関数形の一般性の観点からは議論の余地が残るところである。(ロ)また、このモデルでは規定要因を比の形で取り込むことは、条件を満足しないので望ましくないと考えられていた。しかしながら、それぞれのルートの説明変数値 ($x_i, x_j, y_i, y_j, z_i, z_j$) を対数変換することにより、

$$x'_{ij} = \ln(x_i/x_j), \quad y'_{ij} = \ln(y_i/y_j), \quad z'_{ij} = \ln(z_i/z_j) \quad (18)$$

の形を仮定すれば、

$$P_j/P_i = e^{ax'_{ij} + by'_{ij} + cz'_{ij}} = \left(\frac{x_i}{x_j} \right)^a \left(\frac{y_i}{y_j} \right)^b \left(\frac{z_i}{z_j} \right)^c \quad (19)$$

となり、比の形でのモデル式の表現は可能であり、かつその場合も宇野モデルの中の 1 つのタイプと一致する。(イ)また、条件(2)での恒等式が示す関係は、3 ルートの場合には、

$$f(x_{23}, y_{23}, z_{23}) - f(x_{21}, y_{21}, z_{21}) = f(x_{13}, y_{13}, z_{13}) \quad (20)$$

となるが、これは、結局のところ $(P_3/P_2) \cdot (1/(P_1/P_2)) = P_3/P_1$ が成立するための条件であり、宇野モデルの条件Ⅲの推移律と等しい。

この他に、経路モデル式の構造的特徴を有するものとして、天野(1967)による経路別分担率を重回帰式によって推定する交通シエモデルがある。具体的には、競合する経路の本数別に次式で示される重回帰式を提案している。

$${}^r Q_i^s / {}^r Q^s - 1/N = a_0 + \sum_{j=1}^m a_j \left(\sum_{k=1}^N {}^r x_{kj}^s / N - {}^r x_{ij}^s \right) \quad (21)$$

ここで、 ${}^r Q^s$ は、 r s 地域間 i ルート交通量 ($\sum_{i=1}^N {}^r Q_i^s = {}^r Q^s$)、 ${}^r x_{ij}^s$; r s 地域間 i ルート j 番目説明要因値
このモデルでは、経路別分担率推定を重回帰式で直接的に行うため、モデル式の構造それ自体に理論的根拠があるわけではないが、すべての説明変数の値が等しいときに、経路分担率が $1/N$ に等しくなるように巧みに取入れられている特徴をもつ。しかし、将来予測において、経路数別の推定式であることの問題ならびに $a_0 \neq 0$ のときに推定分担率のすべての経路についての総和が 1 とならないなどの問題点がある。一方、宇野

モデルとの比較から言えば、前述の特徴点である分担率が $1/N$ となる場合に関して、宇野モデルの定義式より、当該2ルート間のルート特性値が等しければ分担率比（乗客数比）が1になることから成立することがわかる。

以上のように、宇野モデルは、従来の諸モデルにおいて議論された諸条件と同一の前提条件のもとで、より一般的な形で経路モデルの関数形を導出していると言える。また、ルート特性値間の関係についての付加的な条件式を仮定することにより、既存モデルの形式のいくつかと一致する性質を有することもわかる。

3. 通勤交通の経路選択への適用

(1) 対象区域の実態分析

宇野モデルの適用に際して、まず昭和55年度京阪神都市圏業務パーソントリップ調査データより通勤トリップ（自宅を出発地として大阪市内に立地する事業所を目的とする）を抽出し、次いで比較的路線間の競合関係が明確な神戸方面（尼崎市、西宮市、芦屋市そして神戸市の東灘区、灘区）からの通勤流動にサンプルを限定することによって、その実態分析から対象経路の選定を行った。

その結果、通勤トリップを構成する個々の交通手段の組合せは、134種類と多岐にわたっていた。そこで、代表交通手段（ただし、私鉄は当該地域にある阪急・阪神を区別して取扱うことにする）とそのアクセス側、

表-1 ルートパターンの分類

全域のルートパターン 乗客総数 131,608
ルートパターン総数 114

ルートターン (順位)	アクセス側 の主な手段	代表交通 手段	イグレス側 の主な手段	乗客数 (人)	シェア (%)	累積 シェア(%)
1	(徒歩)	(阪急)	(地下鉄)	17023	12.9	12.9
2	(徒歩)	(阪神)	(地下鉄)	13037	9.9	22.8
3	(徒歩)	(阪神)	(徒歩)	12153	9.2	32.1
4		(車)		10878	8.3	40.3
5	(徒歩)	(阪急)	(徒歩)	9514	7.2	47.6
6	(徒歩)	(国鉄)	(徒歩)	8364	6.4	53.9
7	(徒歩)	(国鉄)	(地下鉄)	7040	5.3	59.3
8	(バス)	(阪急)	(地下鉄)	4018	3.1	62.3
9	(バス)	(阪神)	(地下鉄)	3648	2.8	65.1
10	(バス)	(国鉄)	(徒歩)	3551	2.7	67.8
11	(バス)	(阪神)	(徒歩)	3306	2.5	70.3
12	(バス)	(阪急)	(徒歩)	3172	2.4	72.7
13	(阪急)	(国鉄)	(徒歩)	3063	2.3	75.0
14	(バス)	(国鉄)	(地下鉄)	2575	2.0	77.0
15	(自転車)	(阪急)	(徒歩)	1718	1.3	78.3
16	(徒歩)	(阪神)	(バス)	1699	1.3	79.6
17	(阪神)	(国鉄)	(徒歩)	1666	1.3	80.9
18	(自転車)	(阪神)	(徒歩)	1521	1.2	82.0
19	(自転車)	(国鉄)	(徒歩)	1516	1.2	83.2
20	(自転車)	(阪急)	(地下鉄)	1473	1.1	84.3
21	(徒歩)	(阪急)	(バス)	1236	0.9	85.2
22		(ライトン)		1106	0.8	86.1
23		(自転車)		1047	0.8	86.9
24	(自転車)	(阪神)	(地下鉄)	1008	0.8	87.6
25	(自転車)	(国鉄)	(地下鉄)	939	0.7	88.3
26	(徒歩)	(国鉄)	(バス)	899	0.7	89.0
27		(貨物車)		749	0.6	89.6
28	(徒歩)	(阪急)	(阪神)	702	0.5	90.1

イグレス側のおおのの主な交通手段との組合せによって分類してみると、表-1に示すように、上位28種類で累積シェアが90%を上回るほどのやはり多様なルートパターンが見られる。また、その内訳を眺めれば国鉄・阪急・阪神の3つのマストラを代表交通手段とするパターンについては、アクセス側で徒歩・自転車・バスが主であり、一方イグレス側では徒歩・地下鉄が主となっている。そこで、①着側の大阪市内での地下鉄網が密に整備されており、また国鉄・阪急・阪神から地下鉄への乗り継ぎに関する差異も少ないと考えられること、②アクセス側にしても、代表交通手段の最寄駅への手段選択が実際には代表交通手段が何かに大きく依存すること、③さらにモデルの複雑さを避けるとともに、データ数の確保のため、などを考慮し、結局、路線の選択を重視する観点から、国鉄・阪急・阪神をそれぞれ利用する場合と車を利用する場合の計4ルートを対象経路とした。

ルート特性値に関しては、従来の経路モデルにおいてよく用いられるものから、表-2に示す8種類を取上げることにし、パラメータ推定における符号条件などの現実的な意味合

表-2 宇野モデルで取上げたルート特性値の種類

X_1 ; アクセス時間(分)、 X_2 ; イグレス時間(分)
 X_3 ; 代表交通手段乗車時間(分)
 X_4 ; 全乗車時間(分) ($X_4 = X_1 + X_2 + X_3$)
 X_5 ; 総所要時間(分) ($X_5 = X_4 + X_6$)
 X_6 ; 乗り換え時間(分)、 X_7 ; 乗り換え回数(回)
 X_8 ; 所要費用(円)

いを考慮した変数の取捨選択を行うものとする。

これらの説明変数値の算定方法であるが、所要費用を除く7つの変数に関しては、パーソントリップ調査データの集計項目にそのおのおのが記されているので、圏域内でのOD別ルート別の平均値として求めた。また所要費用については、集計項目にないため次の方法により別途算定した。すなわち、鉄道利用の場合には発着ゾーンそれぞれに各ルートの乗降駅があるので、各ゾーンでの乗客が最寄駅として最も多く利用している駅を代表駅として定め、各ルートの代表駅間の所要費用（昭和55年での1カ月通勤定期代）を求めた。なお、アクセス・イグレス側でのバス・地下鉄利用が考えられるときには、定期割引率を考慮した運賃を加算している。また車利用の場合には、発着ゾーン間の道路ネットワークに関する最短経路探索を行い、その最短経路上の距離に車の燃費とガソリンの小売価格から換算した16.5円/Kmを乗じることにより所要費用とした。

(2) 検討ケースの設定

ここでは、今回の適用において検討の対象とした各ケースの設定に関する基本的な考え方を明らかにする。まず、宇野モデルの構造的特徴よりいくつかの既存の経路モデルのタイプに等しいモデル式の設定が可能であることは、すでに述べたとおりであり、モデル式のタイプに関して次の4つのケースを取上げることにした。

ケース名称	変数の取込み方	パラメータの対応	モデル式
ケースⅠ	差のみの型	$a_i = 0$ for all i , $P=1.0$	$P_1/P_2 = \exp\left\{\sum_{j=1}^n b_j(x_j - y_j)\right\}$ <式(9)参照>
ケースⅡ	比のみの型	$b_j = 0$ for all j	$P_1/P_2 = \prod_{i=1}^n (x_i/y_i)^{a_i}$ <式(10)と同じ>
ケースⅢ	差と比の混合型	$a_i \neq 0, b_j \neq 0, P=1.0$	$P_1/P_2 = \prod_{i=1}^n (x_i/y_i)^{a_i} \exp\left\{\sum_{j=m+1}^n b_j(x_j - y_j)\right\}$ <式(8)参照>
ケースⅣ	合成変数を含む場合	$a_i \neq 0, b_j \neq 0, P=1.0$	$P_1/P_2 = \left(\frac{x_1 + w_1 y_1}{y_1 + w_1 y_1}\right)^{a_1} \exp\left\{\sum_{j=3}^n b_j(x_j - y_j)\right\}$ <式(11)参照>

なお各ケースでの説明変数となるルート特性値の組合せは、車利用を含めた経路選択であるためにアクセス時間、イグレス時間、乗り換え時間、乗り換え回数の4つについて車利用の場合で0となるので、これらは比の要因として取込んでいない。また合成変数としては、前述のように時間評価値（35円/分を仮定）を先決的に与えることで、費用換算して得られるものを取上げることにした。

次に、説明変数がルート特性値の差の形で取込まれるときのパラメータ P の値に関し、差のみ（ケースⅠ）、混合型（ケースⅢ）、合成型（ケースⅣ）の3つの場合を取上げることにより、 $P=1.0$ 、 $P=0.5$ 、 $P=2.0$ の3通りの比較検討を試みることにする。この P 値は、各ルート特性値ごとに異なっているようにもよいわけであるが、本適用では全体的に見た場合の適合性にどの程度関与するものかをまず把握するために、一律に変化させてみた。

そして、宇野モデルの実際への適用におけるルート別定数項の導入を検討してみることにする。宇野モデルの基本的な考え方では、2ルート間の乗客数比が当該2ルートのルート特性値の差や比の関数として説明されるものとなっている。したがってすべてのルート特性値に差異がなければ、その乗客数比は当然のことながら1となる。しかるに、現実の経路選択では、取上げたルート特性値に差異がない場合でも乗客数比は1とは限らないことが生じる。これは、モデル式に組込んだ説明変数だけで説明しきれない要因の影響に依るものと考えられ、またその中には、あるルートに固定的な選択をしているキャプティブな層の存在なども含まれよう。

そこで本研究では、このようなルートに固有な要因の影響をモデルに反映させる1つの方法であるとともに、適用面の実用性を高める意味からも、ルート別定数項の導入を次のような形で考えることにした。すなわち、宇野モデルの一般式（式(5)）において、例えば、ルート特性間の関係が差のみの関数であるという条件を付加すれば、関数 $G(x)$ は $G(x) = \sum_{j=1}^n b_j x_j^P$ として特定化されるが、このとき、モデルの諸仮定に矛盾することなくルート別定数項を導入することを念頭に置き、次式に変形する。

$$G(x) = \sum_{j=1}^n b_j x_j^P + \theta_1, \quad G(y) = \sum_{j=1}^n b_j y_j^P + \theta_2 \quad (23)$$

ここに、 θ_1, θ_2 はルート 1, ルート 2 のそれぞれのルート別定数項である。

結局、このときのモデル式は、

$$P_1/P_2 = \exp \left\{ \sum_{j=1}^5 b_j (x_j^P - y_j^P) + (\theta_1 - \theta_2) \right\} \quad (24)$$

となる。なお、今回の適用では 4 種類の経路にそれぞれのルート別定数項が考えられるわけであるが、モデル式のパラメータ推定が式 (24) にもとづいて行うため、独立なルート別定数項は 3 種類しか設定することができないことに注意する必要がある。

(3) 適用結果の検討

a) モデル式のタイプ間比較

前項で示された検討ケースのうち、まず第一にモデル式の各タイプごとにパラメータ推定した結果を表 3 に示す。なお、パラメータの推定にあたっては、説明変数となる各ルート特性値の組合せを試行錯誤的に行い、符号条件および偏回帰係数の t 値などを考慮して求めており、これらを各ケースの基本式と呼ぶことにする。これは、後述の P の値による比較、ルート別定数項の導入による検討との関連から、タイプ間比較では、どのケースも $P = 1.0$ 、ルート別定数項なしとしているためである。これより、

- ① 全体的に見て、4 ケースともその適合度はあまり差異がなく、また得られた各パラメータに関してもその符号が負値を示している。これは、ルート特性値が本適用では各ルートの選択におけるマイナスの要因を表わしていることと一致する。
- ② 各ケースでの採用されたルート特性値のうち、ケースⅠ,Ⅲ,Ⅳのイグレス時間、およびケースⅣのアクセス時間が、その t 値から判断して 5 % 有意水準で棄却できない結果となった。これは、今回の適用地域において鉄道利用 3 ルートが大阪市への流入口で 1 つのターミナルを形成しているため、鉄道間のイグレス時間の差異があまり大きくないことに依ると考えられる。そして、所要費用に関しては、ケースⅠの差のみのルート特性値に乗り換え回数を付加するとその符号が負値となくなったり、またケースⅢでも同様な傾向を示し、他の変数と比較して要因としての規定力がやや低いものと解釈できる。

表 3 モデル式のタイプに関する比較

ケース	モデル式のタイプ	比の要因			差の要因					相関係数
		全乗車時間	所要費用	合成変数	アクセス時間	イグレス時間	代表交通手段乗車時間	乗り換え時間	所要費用	
Ⅰ	差のみの要因				-0.016 (1.95)	-0.013 (1.25)	-0.032 (4.67)	-0.053 (4.15)	-0.001 (1.95)	0.634
Ⅱ	比のみ※の要因	-0.965 (3.00)	-0.643 (2.77)							0.645
Ⅲ	差と比の混合型		-0.626 (2.21)		-0.016 (2.02)	-0.013 (1.30)	-0.031 (4.62)	-0.053 (4.22)		0.637
Ⅳ	合成変数を含む			-1.222 (4.24)	-0.014 (1.58)	-0.003 (0.35)		-0.047 (3.58)		0.607

表中 () 内の数字はパラメータの t 値を示す。

合成変数；所要費用＋時間評価値 (35円/分)×代表交通手段乗車時間

b) P の値による比較

ここでは、各ケース (ケースⅡを除く) の基本式における P の値を、0.5、2.0 と変化させたときの推定結果を比較検討する。(表 4 参照)

まずケースⅠについて $P = 0.5$ の場合には、相関係数の値は 0.633 と基本式との差異がないものの、アクセス時間とイグレス時間の符号が正となり、また他の変数の t 値も小さく有意でない場合が多い結果となった。そこで、その他のケースでは、 P の値を 2.0 と大きくする場合のみを示すにとどめる。この結果、

- ① $P = 2.0$ のとき、3 つのケースともそれぞれの基本式の適合度が改善され、また各パラメータについても有意な結果を得ていることがわかる。これは、各ルート特性値のベキ乗を大きくすることによって

表-4 Pの値に関する比較

ケース	モデル式のタイプ	比の要因		差の要因					相関係数
		所要費用	合成変数	アクセス時間	イグレス時間	代表交通手段乗車時間	乗り換え時間	所要費用	
I	差のみ ($P=0.5$)			0.053 (0.74)	0.055 (0.88)	-0.122 (1.29)	-0.107 (1.59)	-0.024 (0.74)	0.633
I	差のみ※ ($P=2.0$)			-0.253×10^{-3} (2.66)	-0.698×10^{-3} (2.60)	-0.298×10^{-3} (5.10)	-0.305×10^{-2} (5.77)	-0.977×10^{-6} (1.65)	0.660
III	混合型※ ($P=2.0$)	-0.528 (2.08)		-0.247×10^{-3} (2.60)	-0.694×10^{-3} (2.61)	-0.280×10^{-3} (4.76)	-0.310×10^{-2} (5.88)		0.663
IV	合成型※ ($P=2.0$)		-1.115 (5.77)	-0.322×10^{-3} (3.21)	-0.648×10^{-3} (2.40)		-0.313×10^{-3} (5.80)		0.611

表中()内数字は t 値を示す。また合成変数は表-3の定義と同じ。

説明変数の値のばらつきを大きくすることが結果的に適合度の改善に結びついたものと考えられる。

- ② しかし今回の適用では、すべてのルート特性値の P 値を一律に変化させるため、その妥当な値の決定に関しては議論の余地を残す。(例えば、ケースⅠの所要費用は、その t 値が若干小さくなり結果的に5%有意水準で棄却できなくなっている。)

c) ルート別定数項の導入の検討

ルート別定数項は、車を除く3つの鉄道利用のルート(国鉄 θ_1 、阪急 θ_2 、阪神 θ_3)に設定し、各ケースの基本式および $P=2.0$ の場合についてそれぞれパラメータ推定を行った。その結果の一部を表-5に示す。これより、

- ① ケースⅠの差のみのタイプでは、表-5に示すように、 $P=2.0$ で所要費用の符号が正值となり現実的でない推定値となった。この傾向は、ケースⅢの混合型においても同様であり、ルート別定数項の導入によって重回帰式の説明変数が増加し、結果的に規定力の比較的小さい要因にこのような結果を生じたと考えられる。なお、表-5には示していないが、ケースⅡにおいても同じであった。
- ② ケースⅣの合成型については、パラメータ値の符号条件は満足されているものの、合成変数の t 値が小さいので、合成変数自体の設定に関して改良の必要があろう。
- ③ なお、得られたルート別定数項の値そのものは、ケース間での差異はなく、国鉄・阪急・阪神の順になっており、またそれぞれの t 値から有意であることがわかる。

表-5 ルート別定数項の導入に関する検討

ケース	モデル式のタイプ	比の要因		差の要因					ルート別定数項 θ_1 :国鉄 θ_2 :阪急 θ_3 :阪神	相関係数
		所要費用	合成変数	アクセス時間	イグレス時間	代表交通手段乗車時間	乗り換え時間	所要費用		
I	差のみ ($P=2.0$)			-0.288×10^{-3} (3.08)	-0.958×10^{-3} (3.31)	-0.162×10^{-3} (2.46)	-0.361×10^{-2} (6.68)	0.327×10^{-6} (0.49)	$\theta_1:1.048(2.54)$ $\theta_2:1.006(2.90)$ $\theta_3:0.760(2.60)$	0.657
III	混合型 ($P=2.0$)	0.211 (0.63)		-0.291×10^{-3} (3.12)	-0.986×10^{-3} (3.36)	-0.152×10^{-3} (2.41)	-0.363×10^{-2} (6.71)		$\theta_1:1.111(2.52)$ $\theta_2:1.073(2.80)$ $\theta_3:0.830(2.44)$	0.658
IV	合成型 ($P=2.0$)		-0.230 (0.74)	-0.281×10^{-3} (2.82)	-0.924×10^{-4} (3.16)		-0.360×10^{-2} (6.57)		$\theta_1:1.117(2.65)$ $\theta_2:1.111(3.09)$ $\theta_3:0.866(2.67)$	0.646

表中()内数字はパラメータの t 値を示す。また合成変数の定義は表-3に同じである。

最後に、今回の適用結果の中で各ケースごとにモデル式の適合性、パラメータ値の意味づけなどを考慮して選んだ主なモデル式(表-3、表-4中の※印の式)について、ルート別乗客数の相関係数の値を表-6に示す。これより、どのケースにおいても、鉄道利用の3ルートに比較して車利用における適合度が低いことがわかる。これは、本適用で取上げた説明変数が鉄道利用における選択要因をある程度反映したものにな

っているものの、車利用に対しては、乗車時間と所要費用のみが対鉄道利用と比較可能なだけであり、また大阪市内へ流入する車利用の通勤者には、こうした説明要因だけでなく業務上の車の必要性からキャプティブな選択を強いられている場合もあると考えられ、今後の課題となろう。

表-6 各ケースにおけるルート別乗客数での相関係数一覧

ケース \ ルート	1.国鉄	2.阪急	3.阪神	4. 車	合 計
ケースⅠ (差のみ) ルート別定数項なし $P=2.0$	0.775	0.730	0.689	0.532	0.660
ケースⅡ (比のみ) ルート別定数項なし	0.766	0.741	0.676	0.460	0.645
ケースⅢ (混合型) ルート別定数項なし $P=2.0$	0.773	0.727	0.695	0.510	0.663
ケースⅣ ルート別定数項なし $P=2.0$	0.760	0.719	0.667	0.448	0.611

4. おわりに

本研究は、交通手段選択あるいは経路選択モデルの一つとして最近注目されつつある宇野モデルに対してその基本的な性質の理解を深めるとともに、通勤交通の経路選択への具体的な適用を通じてモデルの適用性に関する諸検討を行ってきた。

その結果、まず従来の経路モデルとの比較検討を行ってみたところ、宇野モデルは、モデルが本来具備すべき諸条件にもとづいてそれを満足する関数形の一般式を数学的に導出し、それが従来の経路モデルのいくつかを包括することができることがわかった。またモデルの実際への適用性に関しては、モデル式のタイプ間の比較、 P 値による比較、ルート別定数項の導入について検討がなされた。宇野モデルが種々のタイプのモデル式を設定できるという大きな利点を有するため、現実の適用面での有効性はかなり高いと考えられる。今回の適用で取上げた4ケースについても、結果的にタイプ間の適合性の差異はみられなかったものの、混合型や合成型のように説明要因の組合せ方を工夫することでより洗練化されたモデル式を構成していくことができるわけで、実証的なモデル開発が可能であるといえる。したがって、その意味からも、今後は将来予測プロセスに関連した議論が重要な検討課題となろう。

最後に、本研究を遂行するにあたり貴重な御助言を賜った宇野敏一氏ならびに、大阪市立大学名誉教授・富永祐治先生をはじめ需要予測研究会(都市交通研究所)委員の各位に対し感謝するとともに、研究討議および計算等に協力して頂いた京都大学大学院生、樋口吉隆君(現在(株)セントラルコンサルタント勤務)、池田薫君同大学生、黒田えり子嬢(現在、横浜市役所勤務)に対しても深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 宇野敏一(1983)；“交通手段選択モデルのある一般形の導出”，交通工学，Vol. 18, No. 4, pp3～8.
- 2) S.L.Warner(1962)；“Stochastic Choice of Mode in Urban Travel, A Study in Binary Choice”，Northwestern Univ. Press.
- 3) Henri Theil(1969)；“A Multinomial Extension of the Linear Logit Model”，International Economics Review.
- 4) 河上省吾(1970)；“通勤・通学者の輸送機関および経路の選定率に関する研究”，JSCE 論文集，No. 179, pp61～68.
- 5) 天野光三(1967)；“交通シェアの形成機構に関する考察—交通機関選択条件の計量分析—”運輸と経済，Vol. 27, No. 4, pp10～19.
- 6) 佐佐木綱・西井和夫・樋口吉隆(1983)；“通勤交通における経路別利用者数の予測に関する研究—宇野モデルの適用—”，第38回 JSCE 年次学術講演会概要集，pp21～22.