

同伴者を考慮した交通機関選択モデルの構築

A development of a joint party size and mode choice model

阿部昌幸*・藤井 聡**・北村隆***

By Masayuki ABE, Satoshi FUJII, Ryuichi KITAMURA

1. はじめに

近年、我が国の都市地域で発生している交通問題に対して、交通需要マネジメントなどの交通政策が注目を集めている。それに伴い、より高い精度の交通需要予測手法を開発することが重要な課題となっている。

交通需要予測モデルの精度向上を図る場合の重要な課題の一つに、個人が交通行動を行う際の同伴者の取り扱いの問題がある。例えば、自動車利用者数から自動車トリップ数を求める場合、一台当りの同乗者数を把握する必要がある。従来の交通需要予測手法では、平均同乗者数を外性的に与えるという手法を採ることが一般的であったが、同乗者数は交通行動を行う各グループによって異なるものと考えられる。また、同伴者が存在する場合の個人の交通行動は、同伴者が存在しない場合の交通行動と比較すると、異なるものと考えられる。この点においても、同伴者を考慮する必要性があるものと考えられる。

同伴行動に関して分析を加える場合、個人間の相互作用を、双方の属性、ならびに当日のスケジュール考慮したうえでモデル化するという方法が考えられる¹⁾²⁾。しかしこの場合、ある個人の情報の他に、その同伴者の情報も必要となり、データ整備に大きなコストが必要となる。他者を考慮した交通需要予測を目指す場合、理論的な精緻さの観点から問題が存在するとは考えられるものの、実用化を重視する場合には、他者の情報を外生変数として持たない枠組みの方がより適しているものと考えられる。

一方、自動車に複数の人間と共に乗車するといった場合には、一人当たりの負担する費用が小さくなる、あるいは、大勢の場合は乗用車一台では移動できない、等が考えられる。これに加えて、自動車トリップ数は同伴者数に依存するという点も考慮すると、交通需要予測の中でも、機関分担交通量の予測の際に、同伴者数を明示的に考慮する必要があるものと考えられる。

以上を踏まえて、本研究では、同伴者数と交通機関選択行動の両者を内生化し、かつ、両者の相関を考慮した、他者の情報を外生変数として持たない非集計モデルシステムを提案する。そして、モデル化の対象とする主体を個人とし、同伴者数によって、交通行動実行時の意思決定構造が異なるものとし、モデルの実用性の向上を目指す。

2. アンケートの概要

本研究では、一昨年に供用された阪神高速湾岸線の影響と効果の調査のため、昨年6月に実施されたアンケートで得られたダイアリー調査を用いた。被験者については、予備調査を実施することで抽出した。予備調査では、設問項目の少ない調査票を、神戸市、阪神地域を含む大阪湾岸地域の居住者を中心として抽出した7000世帯と、湾岸線競合路線利用者に手渡しで10,500人に調査票を配付した。そして、ダイアリーデータから得られた機関選択行動を分析対象とし、機関選択肢集合を電車と自動車に限定することとした。これは、都市交通に関する問題は、自転車では完結できない比較的距離のあるトリップに多く生じており、かつ、そのトリップの代表的な交通機関として考えられるのが、電車と自動車の両者だからである。そこで、各回答者が報告しているトリップの中で、電車、あるいは自動車を利用してトリップのみを抽出することとした。さらに、トリップを抽出する際には、前後の活動内容や活動場所も同時に抽出し、トリップ目的を特定するためのデータとして利用した。

3. モデルシステムの概要

(1) モデルシステムの定式化

本モデルでは、個人の機関選択行動の意思決定構造は、その個人が交通行動を行った際の同伴者の人数によって異なるものと仮定し、ある個人が、同伴者数 i 人で、交通機関 j を選択する同時確率 $P_{ij}(i,j)$ を以下のように定式化する。

$$P_{ij}(i,j) = P_A(i)P_M(j|i) \quad (1)$$

i : 同伴者数($i=1, 2, 3, \dots$)

キーワード：交通行動分析、手段選択

* 学生員 京都大学大学院工学研究科土木システム工学専攻
(〒606 京都市左京区吉田本町) Tel 075-753-5136 Fax 075-753-5916)

** 正会員 工修 京都大学大学院工学研究科土木システム工学専攻 助手

*** 正会員 Ph.D 京都大学大学院工学研究科土木システム工学専攻 教授

j : 交通機関(=1:電車, =2:自動車)

$P_j(i, j)$: 同伴者数 i 人で、交通機関 j を選択する同時確率

$P_A(i)$: 同伴者の数が i 人である確率

$P_M(j|i)$: 同伴者数が i 人である場合に、交通機関 j を選択する確率

そして、 $P_A(i)$ をオーダードプロビットモデルの枠組みに、 $P_M(j|i)$ をバイナリープロビットモデルの枠組みに基づいて、以下のように定式化する。

$$\omega_A = \beta_A X_A + \varepsilon_A \quad (2)$$

$$P_A(i) = \begin{cases} \Pr(\theta_{A1} > \omega_A) & \text{if } (i=0) \\ \Pr(\theta_{Ai} \leq \omega_A < \theta_{Ai+1}) & \text{if } (1 \leq i \leq 2) \\ \Pr(\theta_{A3} \leq \omega_A) & \text{if } (i \geq 3) \end{cases} \quad (3)$$

$$\omega_{Mj} = \beta_{Mj} X_{Mj} + \varepsilon_{Mj} \quad (4)$$

$$P_M(j|i) = \begin{cases} \Pr(\theta_{M1} > \omega_{Mj}) & \text{if } (j=1) \\ \Pr(\theta_{Mj} \leq \omega_{Mj}) & \text{if } (j=2) \end{cases} \quad (5)$$

ω_A : 同伴者数を規定する潜在変数

ω_{Mj} : 同伴者数 i の場合の機関選択行動を規定する潜在変数

B_A, B_{Mj} : 外生変数の係数ベクトル

X_A : 同伴者数を規定する外生変数ベクトル

X_{Mj} : 同伴者数 i の場合の機関選択行動を規定する外生変数ベクトル

$\varepsilon_A, \varepsilon_{Mj}$: 平均0の正規分布に従う誤差項

θ_{Ai}, θ_{Mj} : しきい値

一方、誤差項 $\varepsilon_A, \varepsilon_{Mj}$ の共分散構造に関して、以下のように仮定する。

$$\begin{matrix} & \varepsilon_A & \varepsilon_{M1} & \varepsilon_{M2} & \varepsilon_{M3} & \cdots \\ \begin{matrix} \varepsilon_A \\ \varepsilon_{M1} \\ \varepsilon_{M2} \\ \varepsilon_{M3} \\ \vdots \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & \sigma_{A0}^2 & \sigma_{A1}^2 & \sigma_{A2}^2 & \sigma_{A3}^2 & \cdots \\ \sigma_{A0}^2 & 1 & 0 & 0 & 0 & \cdots \\ \sigma_{A1}^2 & 0 & 1 & 0 & 0 & \cdots \\ \sigma_{A2}^2 & 0 & 0 & 1 & 0 & \cdots \\ \sigma_{A3}^2 & 0 & 0 & 0 & 1 & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (6)$$

なお、式(6)は同伴者数に影響を与える未観測要因が、機関選択行動に影響を与える未観測要因と相関を持つ一方で、各同伴者数における機関選択行動の未観測要因の間には相関がないという仮定に基づいている。

ここで、 $P_A(i)$ を、同伴者数が0人、1人、2人、3人以上のそれぞれについて定式化したが、同伴者数が2人以上の場合には、機関選択行動の意思決定構造は同伴者数に関わらず等しいものと仮定する。すなわち、任意の2以上の k, l に対して以下の式が成立するものと仮定する。

$$\omega_{Mk} = \omega_{Ml} \quad (7)$$

$$P_M(j|k) = P_M(j|l) \quad \forall k, l = 2, 3, \cdots \quad (8)$$

$$\sigma_{Ak}^2 = \sigma_{Al}^2 \quad (9)$$

以上の仮定に基づいて、外生変数、外生変数の係数ベクトル、しきい値、ならびに、誤差項間の共分散が与えられた場合の、同伴者数 i 人で、交通機関 j を選択する同時確率 $P_j(i, j)$ を以下のように定式化する。

$$P_j(i, j) = P_A(i) P_M(j|i) = \begin{cases} \Pr(\theta_{A0} - \beta_A X_A > \varepsilon_A) \Pr(\theta_{M1} - \beta_{M1} X_{M1} > \varepsilon_{M1}) & \text{if } (i=0, j=1) \\ \Pr(\theta_{A0} - \beta_A X_A > \varepsilon_A) \Pr(\theta_{M1} - \beta_{M1} X_{M1} \leq \varepsilon_{M1}) & \text{if } (i=0, j=2) \\ \Pr(\theta_{Ai} - \beta_A X_A \leq \varepsilon_A < \theta_{Ai+1} - \beta_A X_A) \\ \times \Pr(\theta_{Mj} - \beta_{Mj} X_{Mj} > \varepsilon_{Mj}) & \text{if } (1 \leq i \leq 2, j=1) \\ \Pr(\theta_{Ai} - \beta_A X_A \leq \varepsilon_A < \theta_{Ai+1} - \beta_A X_A) \\ \times \Pr(\theta_{Mj} - \beta_{Mj} X_{Mj} \leq \varepsilon_{Mj}) & \text{if } (1 \leq i \leq 2, j=2) \\ \Pr(\theta_{A3} - \beta_A X_A \leq \varepsilon_A) \Pr(\theta_{Mj} - \beta_{Mj} X_{Mj} > \varepsilon_{Mj}) & \text{if } (i \geq 3, j=1) \\ \Pr(\theta_{A3} - \beta_A X_A \leq \varepsilon_A) \Pr(\theta_{Mj} - \beta_{Mj} X_{Mj} \leq \varepsilon_{Mj}) & \text{if } (i \geq 3, j=2) \end{cases} \quad (10)$$

ここで、誤差項 $\varepsilon_A, \varepsilon_{Mj}$ の間には、式(6)で示したような共分散が存在するものと仮定しているため、式(10)は以下ようになる。

$$P_j(i, j) = \begin{cases} \Phi_0(\theta_{A0} - \beta_A X_A, \theta_{M1} - \beta_{M1} X_{M1}) & \text{if } (i=0, j=1) \\ \Phi_0(\theta_{A0} - \beta_A X_A, -\theta_{M1} + \beta_{M1} X_{M1}) & \text{if } (i=0, j=2) \\ \Phi_i(\theta_{Ai+1} - \beta_A X_A, \theta_{Mj} - \beta_{Mj} X_{Mj}) \\ - \Phi_i(\theta_{Ai} - \beta_A X_A, \theta_{Mj} - \beta_{Mj} X_{Mj}) & \text{if } (1 \leq i \leq 2, j=1) \\ \Phi_i(\theta_{Ai+1} - \beta_A X_A, -\theta_{Mj} + \beta_{Mj} X_{Mj}) \\ - \Phi_i(\theta_{Ai} - \beta_A X_A, -\theta_{Mj} + \beta_{Mj} X_{Mj}) & \text{if } (1 \leq i \leq 2, j=2) \\ \Phi_i(-\theta_{A3} + \beta_A X_A, \theta_{Mj} - \beta_{Mj} X_{Mj}) & \text{if } (i \geq 3, j=1) \\ \Phi_i(-\theta_{A3} + \beta_A X_A, -\theta_{Mj} + \beta_{Mj} X_{Mj}) & \text{if } (i \geq 3, j=2) \end{cases} \quad (11)$$

ここに、 $\Phi_i(\cdot, \cdot)$ は式(2)における誤差項 ε_A と、式(4)における同伴者数が i 人の場合の誤差項 ε_{Mj} が従う2変量正規分布の多変量正規分布関数であり、以下のように定義される。

$$\Phi_i(a, b) = \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\sigma_{Ai}^2}} \exp\left\{-\frac{1}{2(1-\sigma_{Ai}^2)}(a^2 + \varepsilon_{Mj}^2 - 2\varepsilon_A \varepsilon_{Mj} \sigma_{Ai})\right\} d\varepsilon_A d\varepsilon_{Mj} \quad (12)$$

以上のように定式化した同伴者・機関選択モデルのパラメータを、最尤推定法を用いて推定する。

(2) 同伴者を考慮した交通需要予測手法

本研究で提案したモデルシステムに基づく、需要予測の対象となる個人集合が特定化され、かつ、各個人の外生変数が特定化された場合、式(11)、(12)で定式化した同伴者数、機関選択同時確率 $P_j(i, j)$ に基づいて交通需要予測が可能となる。

ここでは、交通需要予測手法に関して述べる。なお、対象とする個人集合は N 人の個人で構成されるものとする。また、ある個人 n の同伴者数、機関選択同時確率を、 $P_j^n(i, j)$ と表記するものとする。

はじめに、各個人の外生変数を式(11)、(12)に代入することによって、全ての個人について $P_j^n(i, j)$ を

算出する。そして、対象とする個人集合の内、同伴者数 i 人で機関 j を選択する個人数 N_{ij} 、機関 j を選択する個人数 N_j を以下の式に基づいて算出する。

$$N_{ij} = \sum_{n=1}^N Pr^*(i, j) \quad (13)$$

$$N_j = \sum_{i=0} N_{ij} \quad (14)$$

同伴者数 i 人の自動車発生台数 NC_i 、自動車利用台数 NC は、以下の式で算出する。

$$NC_i = \frac{N_{i2}}{i+1} \quad (15)$$

$$NC = \sum_{i=1} NC_i \quad (16)$$

一方、従来では外生値として与えられていた平均自動車同乗者数 NA は、以下の式で求められる。

$$NA = \frac{N_2}{NC} \quad (17)$$

ただし、1台に同乗できる人数には限りがあるため、式(15)における NC_i において、 i が4人あるいは5人以上の場合については、2台に分乗する等の仮定を施し、補正を加える必要がある。以上のような方法に基づいて、同伴者を考慮した鉄道利用客数、自動車利用者数に加えて、自動車発生台数、平均自動車同乗者数の推定に適用することが可能である。

4. 推定結果の考察

本研究で提案するモデルシステムの推定結果を表1に示す。また比較のために、交通機関選択と同伴者数とが完全に独立に決定されていると仮定して、それぞれを単純なオーダープロビットモデルの枠

組みで、同じサンプルに対して個別に推定したモデル（比較モデル）の適合度を表2に示す。表2より、本研究で提案するモデルシステムの方が、 ρ^2 、 χ^2 ともに大きくなっていることが分かる。これは、同伴者数によって、機関選択行動の意思決定が異なるということを示していると考えられ、同伴者数と機関選択行動との間には相関が存在するということが、統計的に示されたものと考えられる。

次に表1に着目すると、誤差項間の共分散（分散を1に固定しているため相関係数に等しい）は、同伴者数モデルと同伴者0人機関選択モデルでは0.62、同伴者数モデルと同伴者1人機関選択モデルでは0.79、同伴者数モデルと同伴者2人以上機関選択モデルでは-0.79となった。この結果は、同伴者が1人以下の場合に、さらに多くの人と一緒に行動しようとする非観測要因が存在する場合には、自動車の選択確率が増加することを示している。しかし、同伴者数が2人以上になった場合は、非観測要因の効果がさらに多くの人と一緒に行動しようとした場合には、電車の選択確率が増加するものと解釈できる。

次に、説明要因のパラメータについて着目する。最初に、同伴者数モデルについて述べると、トリップ目的ダミーは全て負となったが、これは、「その他」目的の同伴確率が最も高く、かつ、その他トリッ

表2 適合度の比較

	χ^2	ρ^2
本研究で提案するモデル	763.7	0.228
比較モデル	654.4	0.195

表1 モデルシステムの推定結果

	同伴者0人機関選択モデル		同伴者1人機関選択モデル		同伴者2人以上機関選択モデル		同伴者数モデル	
	推定値	t値	推定値	t値	推定値	t値	推定値	t値
男性ダミー					1.61	7.54	-0.29	-4.22
世帯内自動車保有台数	0.33	7.70					-0.21	-2.56
運転免許保有ダミー	2.07	11.19	0.36	3.66			-0.32	-4.69
自営業ダミー	0.63	4.68					-0.15	-2.10
学生ダミー	-0.94	-3.56	-1.00	-5.90	-2.15	-5.01	-1.32	-13.73
専業主婦ダミー	0.37	2.29	-0.89	-7.52	0.26	1.59	-1.09	-9.78
個人収入300万円以上ダミー	0.26	2.80	-1.00	-7.30			-0.41	-6.32
通勤通学ダミー	-1.08	-10.22	-1.55	-8.47			-0.30	-3.72
帰宅（会社・学校より）ダミー	-0.77	-6.82	-1.39	-7.75			-0.12	-1.75
帰宅（上記以外）ダミー	-0.61	-6.57					-0.36	-3.06
食事・買い物ダミー					-0.72	-2.70	-0.42	-5.42
趣味・スポーツダミー					-1.56	-6.46	0.55	5.71
自動車費用	-1.12	-14.76	-0.52	-7.95	-0.47	-3.42	1.17	9.36
所要時間差*	0.96	5.53	1.76	8.67	4.22	10.97		
定数項	-1.22	-8.07	1.02	9.91	1.46	7.77		
	推定値	t値						
σ_{ϵ}^2	0.62	10.77	Sample Size		1209		χ^2	763.7
σ_{ϵ}^2	0.79	28.57	L(C)		-1677.2		β	0.228
σ_{ϵ}^2	-0.79	-34.16	L(B)		-1295.3			

（なお表中の各適合度指標はモデルシステム全体としてのものである）

- σ_{ϵ}^2 : 同伴者数モデルの誤差項と同伴者がいないのときの機関選択モデルの誤差項との共分散
- σ_{ϵ}^2 : 同伴者数モデルの誤差項と同伴者が1人ときの機関選択モデルの誤差項との共分散
- σ_{ϵ}^2 : 同伴者数モデルの誤差項と同伴者2人以上のときの機関選択モデルの誤差項との共分散
- 所要時間差* : 鉄道所要時間-自動車所要時間

プの目的ダミーを0に固定して推定したためである。推定結果より、食事・買い物、趣味・スポーツ等の自由活動目的の場合、あるいは業務目的の場合、同伴傾向が相対的に大きく、通勤・通学、会社学校からの帰宅の場合では、同伴傾向が小さいことが分かる。また、女性や個人収入300万円以下の個人の同伴傾向が大きいことが分かる。

さらに、機関選択効用のパラメータに着目する。なお、推定の際には、鉄道の確定効用を0に固定したため、正のパラメータが推定された変数が増加した場合、自動車選択確率が増加するものと解釈する。また、推定の際には、有意な推定値が得られなかったパラメータについては、0.0に固定した。推定結果より、学生は同伴者数が多いほど鉄道を選択する傾向が強くなる、専業主婦は同伴者が1人の場合のみ鉄道の利用確率が大きい、それ以外では自動車を選択する傾向が強い、等の傾向が読み取れる。

また、交通機関固有属性に着目すると、同伴者数の増加にしたがって、所要時間差のパラメータの絶対値は大きくなっていることが分かる。すなわち、同伴者数の増加に伴って、所要時間の価値をより高く評価する傾向にあるものと解釈できる。一方、一人当りの自動車費用の期待値を考慮すると、同伴者数が1人の場合の自動車費用のパラメータは $0.52 \times 2 = 1.04$ 、2人の場合 $0.47 \times 3 = 1.41$ というパラメータが算定できる。同伴者が存在しない場合のパラメータが1.12であることを考慮すると、所要時間についてみられたような傾向は読み取れない。なお、鉄道費用のパラメータは、いずれの場合も有意とはならなかった。

ここで、所要時間差のパラメータを自動車費用のパラメータで除して求めた時間価値結果を図1に示す。本研究で提案したモデルの推定結果より算出された時間価値は、同伴者が存在しないトリップでは、8.6 (円/分)、同伴者数が1人のトリップでは、33.6 (円/分)、同伴者数が2人以上のトリップで

は89.9 (円/分)である。また、上述の一人当りの自動車費用の期待値を考慮し、時間価値に修正を施しても、同伴者数の増加に伴って時間価値が増大する傾向があることが分かる。

5. まとめ

本研究では、電車と自動車の2機関の交通機関選択分析を行う際に、同伴者を明示的に考慮し、同伴者数を内生化した形での実用的な交通機関選択モデルを提案した。その際、同伴者数と交通機関選択行動の間の相関、ならびに、個人の機関選択行動の意思決定構造はその個人が交通行動を行った際の同伴者の人数により異なる、という仮定を設けた。

さらに、本研究の成果として、同伴者数を考慮することで、自動車利用者数の推定結果から自動車トリップ発生数がモデル上で予測可能となり、従来は外生値として与えていた平均自動車同乗者数を、モデルの推定結果から求めることが可能となった。加えて、同伴者数が増加するにしたがって、時間価値も増加することが示された。よって、同伴者数が変われば交通機関選択行動の意思決定構造も変わることが分かった。これらの分析結果から、同伴者を明示的に考慮することによって、同伴行動の詳細を記述することができ、交通需要予測における精度向上が図られたものと思われる。

今後の課題としては、他者との相互作用を考慮した上で、実用的なモデルシステムを構築すること等が挙げられる。

最後になりましたが、調査及び資料の提供にご協力いただいた阪神高速道路公団に対して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 小林潔司・喜多秀行・多々納裕一：送迎・相乗り行動のためのランダム・マッチングに関する研究，土木学会論文集，No. 536/IV-31，pp. 49-58，1996.
- 2) 吉田洋・藤井聡・山本俊行・北村隆一：世帯構成員間の関係に基づいた自家用車利用確率を考慮した交通機関選択モデルの構築，土木計画学研究・講演集，No. 18(1)，pp. 305-308，1995.

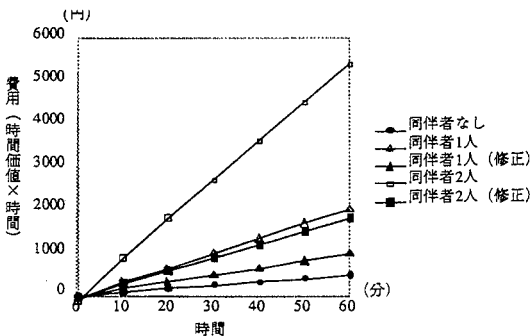


図1 時間価値結果