

3311 鉄道プロジェクト評価において交通需要分析手法の違いが 利用者便益に与える影響

How much different the estimated user's benefit stemming from transportation investment among various methods of travel demand analysis?: empirical example of urban railway project

正 [土] ○加藤浩徳 (東京大) 正 [土] 金子雄一郎 ((財) 運輸政策研究機構)
井上真志 ((株) 企画開発)

Hironori KATO, Univ. of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo

Yuichiro KANEKO, Institution for Transport Policy Studies

Masashi INOUE, Creative Research And Planning Co., Ltd

This paper aims to analyze the relationship between methods of travel demand analysis and user's benefit stemming from transportation investment. When the different travel demand models are applied to the travel demand analysis of a project evaluation, how much the estimated user's benefit varies among the methods is analyzed. The three methods: the multinomial logit (MNL) model, user equilibrium (UE) model and all-or-nothing (AON) method, are discussed in the paper.

These three methods are compared in the empirical analysis of the urban railway project in Tokyo, based on the same data set of generalized cost, travel demand and level of service. Consequently, it is found that the user benefit estimated by the MNL is largest, whereas the benefit by the UE is smaller than the benefit estimated by the MNL by about 10 % and the benefit estimated by the AON is smaller than the MNL by about 20 %.

Keyword: travel demand analysis, project evaluation, multinomial logit, user equilibrium, all-or-nothing methods

1. はじめに

昨今、鉄道をはじめとする交通プロジェクトに関して、非効率な投資や計画の不透明性への社会的な批判がしばしばなされる。これに対して、我が国でも鉄道、道路、空港等の交通インフラの投資に関する費用対効果分析のマニュアル¹⁾が最近策定される等、客観的かつ透明な意思決定手法の導入が進められつつある。一方で、費用対効果分析の前提となる交通需要分析について見てみると、開業後の需要の実績値が事前の予測値を大幅に下回り、その結果、交通事業者の経営状況を悪化させている事例が報告されるなど、社会的にその信頼性が問題視されている²⁾。だが、少なくとも現時点では、交通プロジェクトの交通需要分析に関する公式なマニュアルは発行されていない。

土木計画分野では、これまで長い期間にわたり交通需要分析手法の研究・開発が行われ、様々な需要予測手法が実際のプロジェクト評価に用いられてきた。ところが、先述のように我が国には需要分析のマニュアルが存在しないことから、必ずしも各事例の特性に応じた最も適切な需要分析手法が用いられているとは言えない。また、異なる需要分析手法の間で、推定される需要やそれに基づいて算出される便益にどのような違いが出るのか、という問題に関して、特定の実務者には経験知として蓄積される一方で、それらが関係者間で共有されておらず、また実務的な観点からの実証的な比較分析もあまり行われていないのが実情である。

以上のような問題意識の下、本論文は、交通需要分析に関する大局的な方向性の議論に向けた第一歩として、現実の都市鉄道プロジェクトを対象とし、同一条件下における異なる需要分析手法が、同一プロジェクトによって発生する利用者便益の推計値に、どの程度の影響を及ぼすのかを

実証分析することを目的とするものである。

2. 検討する需要分析手法の概要

2.1 対象とする需要分析手法

本論文では、以下の3種類の需要分析手法について検討することとする。

- ・非集計ロジットモデル
- ・利用者均衡モデル
- ・All-or-nothing法

これらの3手法を対象とした理由は以下の通りである。

まず、第一に、非集計ロジットモデルを対象とするのは、現在我が国の鉄道プロジェクトの需要分析において、最も広く用いられている手法であるためである。したがって、本論文の分析、考察は、この非集計ロジットモデルによる評価結果をベンチマークとしてそれ以外の分析手法との比較を行うことを意図するものである。

次に、利用者均衡モデルを対象とするのは、この手法は主に道路ネットワークを対象として研究開発されてきた手法であり、鉄道への適用例³⁾が限られているためである。また、近年、道路プロジェクトの実務において利用者均衡モデルの利用が推奨される⁴⁾等、手法として注目を浴びつつあるのも採用する理由の1つである。

最後に、All-or-nothing法を採用する理由は、この手法が混雑を考慮しない(フローインディペンデントの)モデルであるためである。この手法を他の手法と比較することによって、混雑がどの程度需要推計結果や便益計測結果に影響を及ぼしうるのかについて検討することができる。

以上の3つのモデルを、できる限り同一のデータセット、すなわち、交通需要データ、交通サービスデータ、効用関数あるいは一般化費用関数をモデル間で統一した条件の下

において構築し、次にそれらを用いて需要推計、便益計測を行うことによって、相互の違いを分析することとする。以下では、鉄道利用 OD 表が所与の条件の下における、利用者の発地から着地までの経路選択行動を分析の対象とする。

2.2 非集計ロジットモデルの概略

非集計ロジットモデル (Multinomial logit model: MNL) は、ランダム効用と効用最大化を仮定する離散選択モデルの一種である⁵⁾。ここでは、消費者の特定経路の (条件付間接) 効用関数は、確定項 $V_{ij,r}$ と、独立かつ均一のガンベル分布 (i. i. d. ガンベル) に従う確率項 $\varepsilon_{ij,r}$ とに分離可能であると仮定され、以下のように表される。

$$U_{ij,r} = V_{ij,r} + \varepsilon_{ij,r} \quad (1)$$

$$= \theta_c \cdot GC_{ij,r} + \varepsilon_{ij,r}$$

ここで、 $GC_{ij,r}$: $i \rightarrow j$ の r 番目の経路 ($r \in R_{ij}$) の一般化費用、 θ_c : 費用に係るパラメータである。また、一般化費用は、観測可能な経路の属性 (運賃や所要時間等) の関数として表される。このとき、発ノード i から着ノード j への総交通需要 (分布交通量) が Q_{ij} として与えられるならば、 $i \rightarrow j$ の r 番目の経路の交通需要 $q_{ij,r}$ の期待値は、以下のように表される。

$$E[q_{ij,r}] = Q_{ij} \cdot p_{ij,r}$$

$$= Q_{ij} \cdot \frac{\exp(\lambda V_{ij,r})}{\sum_{r \in R_{ij}} \exp(\lambda V_{ij,r})} \quad (2)$$

ここで、 $p_{ij,r}$: $i \rightarrow j$ の r 番目の経路が選択される確率、 $V_{ij,r}$: $i \rightarrow j$ の r 番目の経路の効用関数の確定項、 λ : ガンベル分布の分散に関わるスケールパラメータ ($\lambda^2 = \pi^2 / 6\sigma^2$, σ^2 はガンベル分布の分散) である。また、効用関数中のパラメータは、アンケート調査等によって得られた個人の経路選択行動データならびに分析者が設定する経路属性データから、多くの場合、最尤推定法によって統計的に推定される。

2.3 利用者均衡モデルの概略

利用者均衡モデルは、全ての利用者が、完全情報の下で、混雑も含めた効用が最大となる行動を選択している状態 (利用者均衡状態) を表現するモデルである^{6), 7)}。鉄道利用者が、日々の行動を繰り返す過程において、各列車の混雑度や所要時間等について経験しており、安定した選択行動を行っていることを考慮すれば、モデルの仮定は妥当と言える。ここで、利用者均衡状態は次式で表される。

$$q_{ij,r}^* \cdot (GC_{ij,r}^* - GC_{ij}^*) = 0 \quad (3)$$

$$GC_{ij,r}^* - GC_{ij}^* \geq 0 \quad (4)$$

$$q_{ij,r}^* \geq 0 \quad (5)$$

また、経路交通量と OD 間交通量との関係、交通量および一般化費用に関するリンク変数と経路変数との関係は、以下の通りである。

$$\sum_{r \in R_{ij}} q_{ij,r} = Q_{ij} \quad (6)$$

$$X_l = \sum_{ij} \sum_{r \in R_{ij}} q_{ij,r} \delta_{ij,r,l} \quad (7)$$

$$GC_l = \sum_{ij} \sum_{r \in R_{ij}} GC_{ij,r} \delta_{ij,r,l} \quad (8)$$

ここで、 X_l : リンク l の交通量、 $\delta_{ij,r,l}$: リンク l が経路 r 上にあるとき 1、ないとき 0、となる変数、 GC_l : リンク l の一般化費用である。なお、リンクの一般化費用は、後述するように混雑を考慮したものであり、当該リンクの交通量 X_l の関数となっている。また、右肩の*は均衡状態を表す。

以上の式 (3) ~ (8) は、次のような等価な最適化問題に置き換えることができる。

$$\min_{X_l} Z = \sum_l \int_0^{X_l} GC_l(\omega) d\omega \quad (9)$$

s.t. 式 (6) ~ (8) .

この最適化問題の近似解については、Frank-Wolfe 法などのアルゴリズムを用いることで数値計算的に求めることができる。なお、均衡状態では、特定 OD 間の利用されている全ての経路について一般化費用は同一の GC_{ij}^* となるが、経路別の交通量は一意に求められない。

2.4 All-or-nothing 法の概略

All-or-nothing 法は、OD ペアごとに一般化費用が最小となる経路へ当該 OD 間の全需要を配分し、それを全ての OD ペアについて実行して合算する方法である。ここでは、混雑現象による均衡は考慮されない。したがって、この方法によって求められる $i \rightarrow j$ の r 番目の経路の交通量は、

$$q_{ij,r} = Q_{ij} \quad \text{if } GC_{ij,r} = \min\{GC_{ij,1}, GC_{ij,2}, \dots\}$$

$$= 0 \quad \text{else} \quad (10)$$

となる。

2.5 利用者便益計測手法の概略

交通プロジェクトにより発生する利用者便益は、消費者余剰の考え方をを用いて計測することとする⁸⁾。具体的には、式(11)のいわゆる台形公式を各 OD の各経路に適用した上で、全ての経路および OD ペアの利用者便益を合算する。以下、本論文では、事業が実施されるとき「w」、事業が実施されないとき「o」という右肩添字を用いるものとする。

$$UB = \frac{1}{2} \sum_{ij} \sum_r (q_{ij,r}^o + q_{ij,r}^w) (GC_{ij,r}^o - GC_{ij,r}^w) \quad (11)$$

なお、利用者均衡モデルを用いる場合には、前述のように経路別の交通量が一意には求められないが、OD 間の全ての経路の一般化費用が一致するので、式(11)より

$$UB = \frac{1}{2} \sum_{ij} \sum_r (q_{ij,r}^o + q_{ij,r}^w) (GC_{ij}^o - GC_{ij}^w)$$

$$= \frac{1}{2} \sum_{ij} (GC_{ij}^o - GC_{ij}^w) \sum_r (q_{ij,r}^o + q_{ij,r}^w)$$

$$= \frac{1}{2} \sum_{ij} (GC_{ij}^o - GC_{ij}^w) (Q_{ij}^o + Q_{ij}^w) \quad (12)$$

となり、OD をベースとした便益計測手法により総便益を求めることができる。

3. 東京圏の都市鉄道プロジェクトを対象とした比較分析

3.1 分析の対象と前提

本研究では、東京圏の都市鉄道プロジェクトのうち、既存路線の改良事業を対象に、異なる需要分析手法が利用者便益に与える影響について分析する。

既存施設改良プロジェクトの事例として、現在事業中の小田急小田原線の複々線化を取り上げる (Fig. 1)。このプロジェクトは、東北沢~和泉多摩川間の約 12km を複々線化する事業であり、小田急線の混雑緩和と所要時間の短縮効果、および代替路線の混雑緩和効果が期待されている。

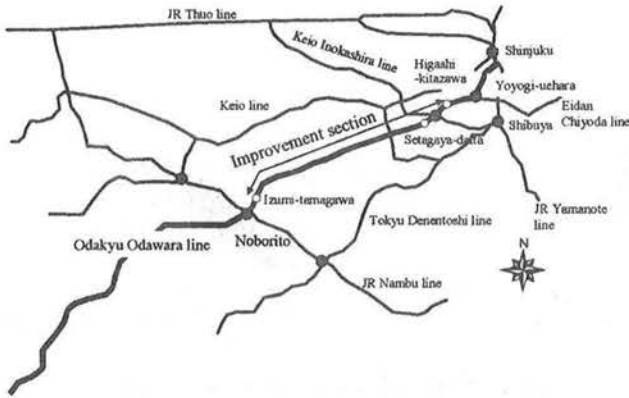


Fig.1 Map of analyzed project: Odakyu-Odawara line

3.2 需要分析の結果

(1) パラメータの設定

1) MNL モデル

式(2)で示した MNL モデルを鉄道経路選択行動に適用して、交通需要分析を行う。使用する MNL モデルの具体的な経路別の(条件付間接)効用関数を以下のように設定する。

$$U_{y,r}^a = \theta_C^a C_{y,r} + \sum_{k \in C} \theta_k^a X_{k,y,r} + \varepsilon_{y,r}^a$$

$$= \theta_C^a C_{y,r} + \theta_1^a T_{1,y,r} + \theta_2^a T_{2,y,r} + \theta_3^a T_{3,y,r} + \theta_4^a Cong_{y,r} + \varepsilon_{y,r}^a \quad (13)$$

ここで、 $U_{y,r}^a$: トリップ目的 a の $i \rightarrow j$ の r 番目の経路の効用関数、 $C_{y,r}$: 経路の総費用 [円]、 $T_{1,y,r}$: アクセス・イグレス時間 [分]、 $T_{2,y,r}$: 乗車時間 [分]、 $T_{3,y,r}$: 乗換え時間(待ち時間を含む) [分]、 $Cong_{y,r}$: 経路の混雑指標である。

なお、経路の混雑指標は、次式のようにリンク別の混雑率をベースに定義される:

$$Cong_{y,r} = \sum_{l \in L_{y,r}} z_l^2 \cdot T_{2,y,r,l} \quad (14)$$

ここで、 z_l : 駅間リンク l の混雑率、 $T_{2,y,r,l}$: 駅間リンク l の所要時間 [分] である。また、混雑率 z_l は、式(15)のように求められる。

$$z_l = \frac{\sum_a \sum_r \sum_i q_{y,r,l}^a}{cap_l} \quad (15)$$

ただし、 $q_{y,r,l}^a$ は、トリップ目的 a の $i \rightarrow j$ の r 番目の経路の駅間リンク l の交通量、 cap_l は駅間リンク l の交通容量(輸送力)である。

各変数のパラメータについては、Table 1 に示されるような運輸政策審議会答申第 18 号策定の際に用いられた値を使

Table 1. Sets of parameters used in the simulation

	Home-to-work	Home-to-school	Private	Business
In vehicle time (min)	-0.094 (-8.09)	-0.060 (-5.77)	-0.049 (-2.86)	-0.050 (-3.29)
Access and egress time (min)	-0.127 (-11.7)	—	-0.058 (-4.30)	-0.060 (-5.82)
Access time (min)	—	-0.069 (-6.20)	—	—
Egress time (min)	—	-0.0603 (-5.69)	—	—
Transfer time includes waiting time (min)	-0.112 (-10.7)	-0.079 (-8.71)	-0.072 (-4.15)	-0.069 (-4.52)
Total cost (yen)	-0.002 (-3.98)	-0.004 (-7.14)	-0.002 (-3.00)	-0.001 (-1.57)
Congestion index	-0.009 (-3.34)	-0.002 (-0.80)	—	—
Likelihood ratio	0.39	0.331	0.172	0.156
Number of sample	1,218	811	436	357
Value of time (yen/min)	47	15	21	48

(t-statistic)

用する⁹⁾。ここで、トリップ目的としては通勤、通学、私事、業務の4つを考える。このモデルでは、混雑による影響は、モデルによる配分を複数回繰り返す(まず混雑率の初期値を与えて配分を行い、その結果から混雑率を計算して、次にそれを所与として再度配分を行うことを繰り返す)ことによって考慮することとしている。なお、通勤と通学では混雑指標が考慮されるが、私事と業務では混雑指標が考慮されないことから、混雑による影響は、実質的には通勤と通学のみで取り扱われる。また、通勤と通学との間の相互関係は、一方を所与として他方の配分を行うことを繰り返すことによって、混雑率を介して近似的に考慮している。

2) 利用者均衡モデル

利用者均衡モデルにおけるリンクの一般化費用は、MNL モデルで設定された効用関数と一致するように、乗車リンク、アクセス・イグレスリンク、乗換えリンクに区分して設定した。その際、各リンクの一般化費用は次のように示されるものとした。

① アクセス・イグレスリンク

$$GC_l = \theta_1 / \theta_C T_{1,l} \quad (16)$$

② 乗車リンク

$$GC_l = C_l + \theta_2 / \theta_C T_{2,l} + \theta_4 / \theta_C Cong_{y,r} \quad (17)$$

③ 乗換えリンク (初乗賃賃がかからないケース)

$$GC_l = \theta_3 / \theta_C T_{3,l} \quad (18)$$

ここで、 $T_{n,l}$: リンク l の所要時間 [分] ($n=1 \sim 3$)、 C_l : リンク l の運賃 [円] である。なお、リンク別の運賃は、本来ならば、初乗賃が存在することから設定不可能なものである。だが、本研究では便宜的に、各鉄道事業者の運賃を、初乗賃と距離に比例する部分の運賃とに分解し、実データをもとに直線回帰式によって推定した上で、距離に比例する部分については、単位距離当たり運賃にリンク長を乗じて算出し、初乗賃については、乗車駅の乗車リンクあるいは異事業者間の乗換における乗換リンクに初乗賃のデータを付与することにより、それぞれ対応することとした。

なお、MNL モデルのケースと同様に、通勤と通学のみで混雑指標が考慮されていることから、実質的に利用者均衡配分を行っているのは通勤と通学のみであり、他の2つのトリップ目的については最小コスト経路配分(All-or-nothing 法)を行っていることとなる。この際、均衡計算においては、Multi-class 利用者均衡モデルの概念を用いることによって、トリップ目的間の相互作用を近似的に考慮している。

3) All-or-nothing 法

利用者均衡モデルと同一の方法によって、リンクコスト関数を設定し、トリップ目的ごとに独立に交通配分を行った。ただし、乗車リンクのリンクコスト関数については、式(17)の混雑指標に係わる項を削除して用いている。ここでは、4つのトリップ目的すべてについて、同様に配分を行った。

(2) 需要動向の分析結果

需要動向の分析にあたり、評価対象年次を平成 12 年と設定し、この年次の OD 表およびネットワークを作成した。これに基づき、まず、現況(プロジェクト実施なし)を対象に需要分析を行い、各分析手法による現況再現性を比較し

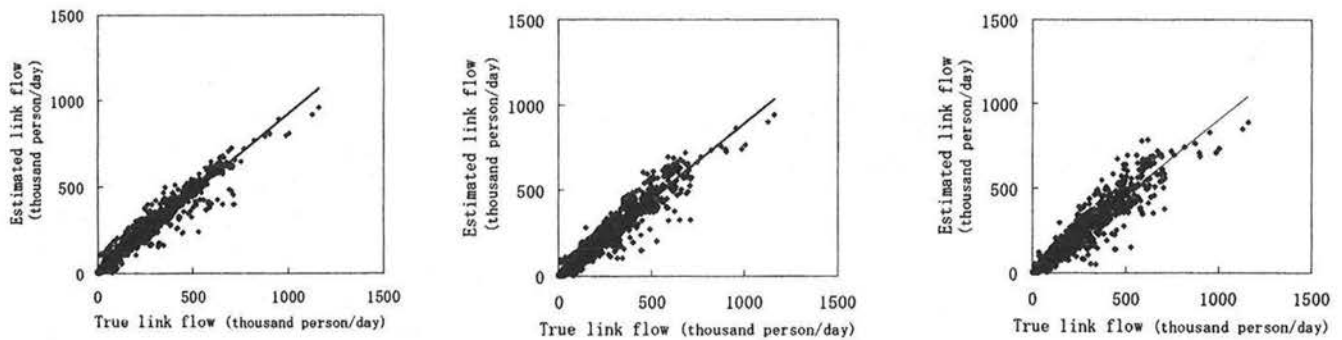


Fig. 2 Correlativity between observed link flow and estimated link flow for the three methods
(left: MNL model, center: user equilibrium model, right: all-or-nothing method)

た。Fig. 2, Table 2 は、その結果を示したものである。ここで実績値には、都市交通年報による断面輸送量(計 1439 区間)を用い、また再現性の指標として、推計値と実績値の重相関係数および RMS 誤差を採用した。

なお、利用者均衡モデルについて、近似解を求めるアルゴリズムとして Frank-Wolfe 法を用いたところ、100 回の繰り返し計算を行ったものの、一部の緩行・急行線が並行しているリンクについては、当初設定した収束基準(前回の繰り返し計算時の交通量との変化率が 5%以下)が満たされなかった。そのため今回は、収束を早めるためのアルゴリズムの改良を一部行っている。この点は、我が国の大都市圏のような複雑なネットワークを対象に Frank-Wolfe 法を適用する際の課題と指摘できるであろう。

これらの結果より、MNL モデルによる推計結果が、3 つの手法の中では最も現況再現性が高いことが示された。All-or-nothing 法については、Fig. 2 に示されるように、他の手法に比べてバラツキが大きくなっており、このことは、東京圏のように混雑が日常的に発生しているネットワークを対象とした需要分析において、混雑による負効用を考慮することの重要性を示したものと考えられる。

Table 2. Results of demand analysis by three methods

	Multiple correlation coefficient	RMS Error
MNL model	0.970	4.4×10^3
User equilibrium model	0.963	5.3×10^3
All-or-nothing method	0.952	5.9×10^3

3.3 利用者便益の比較分析

プロジェクト実施無しケースと有りケースの推計需要を用いて利用者便益を計測した結果を、MNL モデルで求められた総利用者便益を 1 に基準化してトリップ目的別に示したものが、Table 3 である。なお、All-or-nothing 法については、配分時点では混雑を考慮しなかったが、便益計測の際には、配分された需要をもとに他の 2 モデルと同一の方法により混雑不効用を計算し、これを混雑緩和便益として合算した。

この結果より、利用者便益の値は、MNL モデル>利用者均衡モデル>All-or-nothing 法となり、その差は、10~20% 程度であることがわかった。これをトリップ目的別にみると、特に通勤および帰宅目的で便益値に差が見られることがわかる。そこで特に、All-or-nothing 法による便益が小さく見積もられている原因を詳細に分析してみると、All-or-nothing 法では、MNL モデルや利用者均衡モデルと

Table 3. Results of user benefit by three methods

Trip purpose	MNL model	User equilibrium model	All-or-nothing method
Home to work	0.40	0.37	0.32
Home to school	0.02	0.02	0.02
Private	0.06	0.05	0.05
Business	0.05	0.04	0.04
Return to home	0.48	0.44	0.39
All	1	0.92	0.83

比較して、混雑緩和による便益が約 40~50% 程度となっていることがわかった。これは、All-or-nothing 法では、配分時に混雑による不効用が考慮されないため、一部のリンクで極めて高い混雑率が生じるなど、非常識的な結果が得られてことが一つの原因であると思われる。

4. おわりに

本研究は、同一の条件の下で、3 つの異なる需要分析モデル(MNL モデル、利用者均衡モデル、All-or-nothing 法)を用いて、東京圏の同一の都市鉄道プロジェクトの便益評価を行い、その結果を比較した。実証的な分析の結果、モデル間で総利用者便益には 10~20% 程度の違いが見られる可能性が判明した。

今後は、さらに他のプロジェクトや他のモデルとの比較を行い、需要分析モデルの特性に関する検討を深めていく必要があると考えられる。

参考文献

- 例えば、道路投資の評価に関する指針検討委員会：道路投資の評価に関する指針(案)、1998。
- 例えば、土木学会誌 2003 年 7 月号の交通需要予測の特集号。
- 例えば、家田 仁、加藤浩徳、城石典明、梅崎昌彦、石丸浩司：東京圏鉄道旅客流動予測システムの開発とその適用—乗降駅選択及び経路、列車種別選択モデル—、土木計画学研究・論文集、Vol. 13, pp. 721-732, 1996。
- 土木学会：道路交通需要予測の理論と適用—第 I 編利用者均衡配分の適用に向けて、2003。
- Ben-Akiva, M. and Lerman, S. R.: *Discrete Choice Analysis: Theory and Application to Travel Demand*, The MIT Press, 1985。
- Sheffi, Y., *Urban Transportation Networks*, Prentice-Hall, INC., Englewood Cliffe, New Jersey, 1985。
- 土木学会：交通ネットワークの均衡分析—最新の理論と解法—、1998。
- 運輸省鉄道局：鉄道プロジェクトの費用対効果分析マニュアル' 99, 1999。
- Morichi, S., Iwakura, S., Morishige, T., Itoh, M. and Hayasaka, S.: Tokyo Metropolitan Rail Network Long-Range Plan for the 21st Century, *Transportation Research Board*, No. 01-0475, 2001。