

# 都市鉄道を対象とした経路配分手法の推計特性に関する比較分析\*

## Comparative Analysis of Route Assignment Methods in Urban Railway Network\*

金子 雄一郎\*\*・加藤浩徳\*\*\*・井上真志\*\*\*\*

By Yuichiro KANEKO\*\*・Hironori KATO\*\*\*・Masashi INOUE\*\*\*\*

### 1. はじめに

昨今、交通プロジェクトに関して分析手法の不透明性への批判がしばしばなされる。これに対して例えば、道路、鉄道、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<sup>1)</sup>が最近策定されるなどの対応がなされてきた。また、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も、利用者均衡分析を用いた道路交通ネットワーク分析のマニュアルが発表されるなど、分析手法の透明性確保が進められつつある。しかし、少なくとも我が国では今日まで、都市鉄道の経路需要分析に関するマニュアルは整備されていない。そのため我が国においては、都市鉄道の交通需要分析手法の選択が単純に過去の経験にかなり依存しているのが実情である。具体的には、ロジットモデルやプロビットモデルが、これまで三大都市圏の鉄道経路需要分析の実務で適用されてきた。しかし、これらの手法が最も適している保証はどこにもない。また、マニュアルが存在しないために、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。さらに、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需要や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。

これまで需要分析手法を比較した研究は、主に道路ネットワークの交通配分を対象に行われてきており、一定の知見が得られている<sup>2)</sup>。一方、鉄道ネットワークは道路ネットワークと異なり、混雑の影響が(所要時間ではなく)乗客の不快感という形で反映される、同一リンク上を複数の種別(急行、各停等)の列車が走行している、アクセス・イグレス時間や待ち時間、乗り換え時間など乗車時間以外にも考慮するLOSが存在する、などの特徴を有している。したがって、これらの点を考慮した詳細なネットワークやLOSを設定したうえで、各交通需要分析手法間の現況再現性の違いや計算の収束状況などの特性を詳細に比較分析することは、実務

的にもきわめて重要であると考えられる。

以上のような問題意識の下、本論文は、都市鉄道交通の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、現実の鉄道ネットワークを対象とし、同一条件下における異なる交通需要分析手法が、推計結果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。

### 2. 対象とする需要分析手法

本論文では、以下の5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(Multinomial Logit: MNL)モデル
- ・構造化プロビット(Structured Multinomial Probit: SMNP)モデル
- ・All-or-Nothing(AON)法
- ・利用者均衡(User Equilibrium:UE)モデル
- ・確率的利用者均衡(Stochastic User Equilibrium:SUE)モデル

これらの5手法を対象とした理由は以下の通りである。まず、第一に、MNLモデルを対象とするのは、世界的に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と考えられるためである。

第二に、SMNPモデルを対象とするのは、最新の東京圏の都市鉄道需要予測において、この手法が活用されているためである。特に、東京圏の鉄道ネットワークのように経路の重複が多数みられるケースでは、経路重複による間接効用関数中の誤差項の相関を明示的に考慮することが有効な場合があると考えられる。

第三に、AON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ているのかについて検討することができるものと思われる。

第四に、UE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<sup>3)</sup>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<sup>4)</sup>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。

第五に、SUEモデルを対象とするのは、確率的な経路選択行動を考慮しつつ、混雑による均衡状態を明示的に考慮できるので、より現状再現性の高い結果を出力することが期

\*キーワード:経路選択, 公共交通需要, 鉄道計画

\*\*正員 博(工) 日本大学理工学部土木工学科

(千代田区神田駿河台1-8-14, TEL&FAX:03-3259-0664)

\*\*\*正員 博(工) 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻

\*\*\*\*正員 修(工) (株)企画開発社会経済部

待されるからである。ただし、その計算に要する時間が多大であること等により、実用性には劣る側面が予想される。

以上の5つの手法を、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。

### 3. 事例分析

#### (1)事例の概略

本研究では、東京圏の鉄道ネットワークを対象に、需要分析手法間相互の違いを分析する。

#### (2)分析に使用するパラメータの推定

##### a) MNL モデル

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。

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

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

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

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

ここで、 $z_l$ : 駅間リンク  $l$  の混雑率、 $T_{2,ij,r,l}$ : 駅間リンク  $l$  の所要時間[分]である。また、混雑率  $z_l$  は、式(3)のように求

められる。

$$z_l = \frac{\sum_{ij} \sum_r \sum_a q_{ij,r,l}^a}{cap_l} \quad (3)$$

ただし、 $q_{ij,r,l}^a$  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は、平成 12 年大都市交通センサスのデータを用いて推定することとする。データの抽出にあたっては、マスターデータにおける個人の発地の地理的分布を考慮した重み付けサンプリングを行った。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。推定時には、各サンプルデータに対して、実際に選択された経路に加えて、2 つの経路を設定している。パラメータの推定結果は表-1に示されるとおりである。

##### b) SMNP モデル

まず、具体的な経路別の効用関数は、MNL モデルと同一とする。各変数のパラメータは、MNL モデルと全く同一のデータセットを用いて推定する。推定は、Yai *et al.*<sup>9)</sup>が示した方法に準拠する。パラメータの推定結果は表-1に示されるとおりである。

#### (3)予測時のパラメータの設定

##### a) MNL, SMNP モデル

OD ゾーンペアごとに、経路の選択肢集合を設定する。ここで経路には、アクセス、ラインホール、イグレスの全てが含まれている。各 OD ペアについて最大で 16 経路を設定する。また予測時には、混雑率として、現況の混雑率をそのままデータとして入力することもとする。

##### b) UE, SUE モデル

UE, SUE 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。

表-1 MNL モデルと SMNP モデルの推定結果

変数名	単位	MNLモデル				SMNPモデル			
		通勤	通学	私事	業務	通勤	通学	私事	業務
乗車時間	(分)	-0.0797 (-8.8)	-0.0902 (-9.9)	-0.057 (-5.0)	-0.0337 (-3.4)	-0.1145 (-4.7)	-0.1637 (-5.9)	-0.135 (-2.9)	-0.1148 (-1.9)
乗換え時間 (待ち時間含)	(分)	-0.1153 (-13.6)	-0.1335 (-13.6)	-0.1019 (-8.9)	-0.0854 (-6.6)	-0.1422 (-6.4)	-0.201 (-7.9)	-0.1746 (-4.0)	-0.1549 (-2.6)
駅端末時間	(分)	-0.1648 (-15.8)	-0.225 (-13.9)	-0.1481 (-8.0)	-0.1818 (-9.2)	-0.1899 (-7.7)	-0.286 (-8.6)	-0.218 (-4.4)	-0.301 (-2.8)
費用	(円)	-0.00347 (-5.2)	-0.0127 (-11.8)	-0.00671 (-9.5)	-0.00288 (-3.4)	-0.00319 (-3.8)	-0.0142 (-8.6)	-0.00836 (-4.3)	-0.00315 (-1.7)
混雑指標		-0.00582 (-2.2)	-0.00709 (-1.9)	-	-	-0.00908 (-2.0)	-0.0097 (-1.7)	-	-
分散パラメータ		-	-	-	-	0.189 1.9	0.211 2.7	0.41 1.5	0.513 1.0
サンプル数		1,390	1,191	644	462	1,390	1,191	644	462
尤度比		0.228	0.402	0.292	0.194	0.232	0.418	0.305	0.222

表-2 事例分析において設定した分析ケース

選択肢集合設定	MNL	SMNP	SUE-L	SUE-P	AON	UE
方法1	MNL-1	SMNP-1	SUE-L1	SUE-P1	AON	UE
方法2	MNL-2	SMNP-2	SUE-L2	SUE-P2		
方法3	MNL-3	SMNP-3	SUE-L3	SUE-P3		

注: SUE-Lは確率配分モデルにMNLを用いたもの、SUE-PはSMNPを用いたものをそれぞれ意味する。

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

$$GC_i^a = C_i + \theta_1^a / \theta_c^a T_{1,i} \quad (4)$$

②乗車リンク

$$GC_i^a = C_i + \theta_2^a / \theta_c^a T_{2,i} + \theta_4^a / \theta_c^a Cong_{ij,r} \quad (5)$$

③乗換えリンク

$$GC_i^a = C_i + \theta_3^a / \theta_c^a T_{3,i} \quad (6)$$

ここで、 $T_{n,i}$ :リンク*l*の所要時間[分] ( $n=1\sim3$ )、 $C_i$ :リンク*l*の運賃[円]である。なお、リンク別の運賃は、本来ならば初乗料金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運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、初乗運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運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。

c) AON 配分モデル

UEと同一の方法によってリンクコスト関数を設定する。

(4) 予測時の選択肢集合の設定方法

予測時には、MNL, SMNP, SUEモデルに対して以下のような3種類の方法で経路選択肢集合を設定した。

a) 方法1

[Step 1] 時間最短経路(第1経路)の探索

発ゾーンから着ゾーンまでの所要時間が最短となる経路をDijkstra法により探索する。

[Step 2] アクセス駅、イグレス駅を特定した場合の最短経路(2経路目～最大10経路目)

3本前後設定してあるゾーンから駅へのアクセスリンク(駅からのイグレスリンク)の所要時間の短い方から3駅を選択し、駅から駅への最短経路で探索する。

[Step 3] 発ゾーンごとに設定した選択路線群を利用する経路の探索(11～最大16経路目)

現況再現性を勘案しつつ、選択肢集合に組み込まれることが適当と考えられる路線(群)を発ゾーンごとに設定する。探索においては設定された路線の所要時間を極端に短くし強制的に選択肢集合に組み込む。

[Step 4] 重複した経路の削除

[Step 1]～[Step 3]の方法で探索すると、完全に重複した経路も探索されるので、重複経路は削除する。

b) 方法2

方法1と同一方法を用いるが、方法1では、経路所要時間を基準として用いていたのに対して、方法2では経路効用の確定項を基準として用いる。これにより、収斂計算の途上において、毎回混雑による不効用の違いが選択肢集合の設定に反映されることになる。

c) 方法3

方法2と同様に、経路効用の確定項を基準として用いるが、設定プロセスのうち[Step 3]のプロセスを行わない。これにより、分析者の経験により強制的に設定されていた経路が排除される。

(5) 分析ケースと各ケースの計算方法

a) 分析ケース

事例分析において、比較する分析ケースを整理したものが表-2である。本研究では、適用するモデルの違いに加えて、選択肢集合の設定方法の違いについても考慮することとしている。

b) 各ケースの計算方法

まず、AON については、各トリップ目的を独立に配分している。最適経路を探索する際に、MNL モデルで推定されたパラメータ値による経路効用の確定値を用いている。

UE, SUE については、いわゆるマルチクラス均衡配分を行っている。その解法アルゴリズムについては、リンク間に相互干渉のある利用者均衡問題の解法の一つである緩和法を用いる。なお、UE では、 $GC_i$ として、MNL モデルで推定されたパラメータ値による経路効用の確定値を用いている。また、通勤・通学目的交通のみで、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同一となる。

次に、MNL, SMNP モデルについては、配分計算は1回のみで繰り返し計算を行わない。経路選択肢集合の方法として上述の3種類を設定している。

最後に、SUE-L では、確率配分モデルにMNL モデルを用い、SUE-P ケースでは、SMNP モデルを用いる。UEの場合と同様に、通勤目的と通学目的の交通については、相互干渉を考慮している。また、均衡解を求めるにあつ

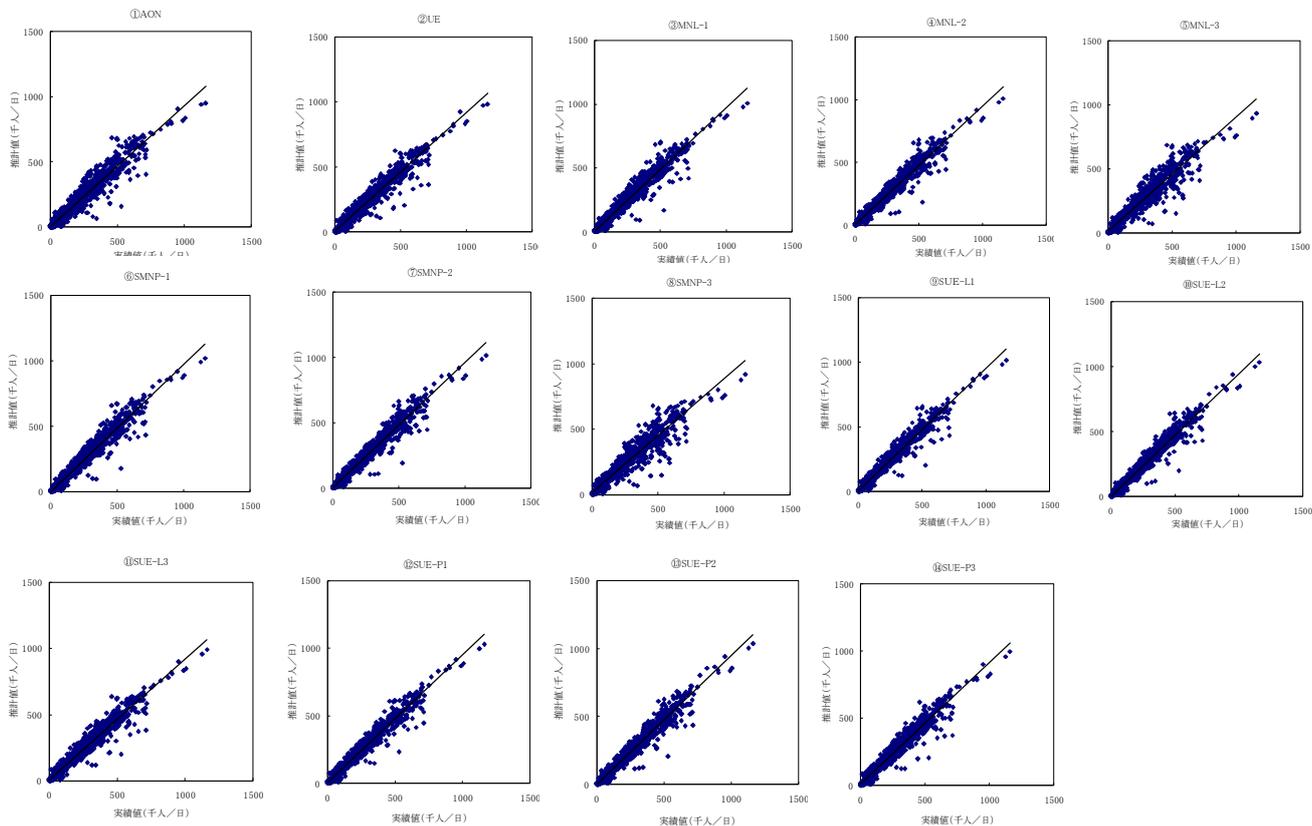


図-1 各モデルによる推計値と実績値

表-3 相関係数およびRMS誤差

	①AON	②UE	③MNL-1	④MNL-2	⑤MNL-3
相関係数	0.968	0.974	0.975	0.978	0.955
RMS誤差	46852	42910	40450	38497	53483
	⑥SMNP-1	⑦SMNP-2	⑧SMNP-3	⑨SUE-L1	⑩SUE-L2
相関係数	0.976	0.978	0.949	0.979	0.980
RMS誤差	39726	38330	57386	36548	36762
	⑪SUE-L3	⑫SUE-P1	⑬SUE-P2	⑭SUE-P3	
相関係数	0.974	0.982	0.980	0.975	
RMS誤差	41325	34760	36735	41544	

ては、逐次平均法を用いている。なお、SUE モデルでは経路の一般化費用に対応して経路選択確率が一意に決まることから、経路別の交通量についても一意に求められる。

#### (6) 現況再現性に関する考察

各モデルによる推計値を実績値と比較することで、現況再現性を確認する。ここで実績値には、「都市交通年報」による断面輸送量(計1,439 区間)を、再現性の指標として、相関係数、RMS誤差の値を用いている。以上の結果について、表-3と図-1に示す。

まず全般的に相関係数は0.949~0.982と高い値となっており、各手法とも一定の再現性が得られていることが分かる。

一方、バラツキ具合を示すRMS誤差は、④MNL-2、⑦SMNP-2、⑨SUE-L1、⑩SUE-L2、⑫SUE-P1、⑬SUE-P2の値が小さく(バラツキが小さく)、①AON、②UE、⑤MNL-3、⑧SMNP-3の値が大きく(バラツキが大きくなる)ことが分かる。すなわち、MNL、SMNP、SUEの各モデルにお

ける経路選択枝集合について、現況再現性を勘案して設定している方法1と方法2が、当然のことながら高い再現性を得られていることが確認された。

またモデル間では、MNLモデルとSMNPモデルでは若干であるがSMNPモデルの再現性が高く、全体的にはSUEモデル(SUE-L及びSUE-P)が高く、AONモデルおよびUEモデルが低い傾向にあることが示された。

#### 4. おわりに

今後の課題として、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、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について実証分析することが挙げられる。

#### 参考文献

- 1) 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。
- 2) 例えば、桑原雅夫:交通量配分手法の実証的検討、交通工学、Vol.23, No.2, pp.17-25, 1988。
- 3) 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。
- 4) 土木計画学研究委員会編:交通ネットワークの均衡分析-最新の理論と解法-, 土木学会, 1998。
- 5) Yai, T., Iwakura, S. and Morichi, S.: Multinomial probit with structured covariance for route choice behavior, *Transportation Research Part B*, Vol. 31, pp.195-207, 1997。

