

# 都市鉄道を対象とした経路配分手法の時間移転性に関する検討\*

## Temporal Transferability of Route Assignment Methods in Urban Railway Network\*

井上真志\*\*・金子雄一郎\*\*\*・加藤浩徳\*\*\*\*

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

### 1. はじめに

都市鉄道を対象とした経路配分手法については、これまで多数のモデルが開発されてきた<sup>1)</sup>。しかし、それらのモデルの時間移転性については、これまで必ずしも十分議論されてこなかった。そこで、本研究は、東京圏の鉄道ネットワークを対象に、鉄道経路配分モデルの時間移転性を検討することを目的とする。分析に当たっては、平成12年の大都市交通センサスのトリップデータを用いて、複数の経路選択モデルを構築し、これらをもとに、平成17年の鉄道OD表を用いて配分計算を行い、推定値と実績値とを比較することにより、モデルの時間移転性の検討を行う。なお、経路配分手法については、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)モデルの5つを取り上げることとする。

### 2. 事例分析

#### (1)分析に使用するパラメータの推定

本研究では、東京圏の鉄道ネットワークを対象に検討を行う。使用するパラメータの推定方法は以下のとおりである。

##### a)MNL モデル

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。

$$U_{ij,r}^a = \theta_C^a C_{ij,r} + \sum_{k \neq C} \theta_k^a X_{k,ij,r} + \varepsilon_{ij,r}^a \\ = \theta_C^a C_{ij,r} + \theta_1^a T_{1,ij,r} + \theta_2^a T_{2,ij,r} + \theta_3^a T_{3,ij,r} + \theta_4^a Cong_{ij,r} + \varepsilon_{ij,r}^a \quad (1)$$

ここで、 $U_{ij,r}^a$ : トリップ目的  $a$  の  $i$  -  $j$  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  $l$  のピーク1時間の混雑率、 $T_{2,ij,r,l}$ : 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。

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

ただし、 $x_{ij,r,l}^a$  は、トリップ目的  $a$  の  $i$  -  $j$  の  $r$  番目の経路の駅間リンク  $l$  のピーク1時間交通量、 $cap_l$  は駅間リンク  $l$  のピーク1時間交通容量(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>2)</sup>が示した方法に準拠する。GHK 法においてパラメータを抽出した回数は10回とした。パラメータの推定結果は表-1に示されるとおりである。

#### (2)配分時のパラメータの設定

##### a) MNL, SMNP モデル法

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。

\*キーワード: 経路配分, 時間移転性, 鉄道計画

\*\*正員 学(工) 社会システム(株)社会経済部

(東京都目黒区東山1-5-4 TEL:03-5773-0001 FAX:03-5773-0012)

\*\*\*正員 博(工) 日本大学理工学部土木工学科

\*\*\*\*正員 博(工) 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻

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

b) UE 法, SUE 法

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.

(i) アクセス・イグレスリンク

$$GC_l^a = C_l + \theta_1^a / \theta_c^a T_{1,l} \quad (4)$$

(ii) 乗車リンク

$$GC_l^a = C_l + \theta_2^a / \theta_c^a T_{2,l} + \theta_4^a / \theta_c^a Cong_{ij,r} \quad (5)$$

(iii) 乗換えリンク

$$GC_l^a = C_l + \theta_3^a / \theta_c^a T_{3,l} \quad (6)$$

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.

c) AON 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する.

(3) 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様な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] 一般化費用(第1経路)の探索

発ゾーンから着ゾーンまでの一般化費用(経路効用の確定項)が最短となる経路をDijkstra法により探索する. 一般化費用を用いることにより, 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.

[Step 2] アクセス駅, イグレス駅を特定した場合の最小経路

(第2経路目 ~ 最大第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)の一般化費用の小さい方から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(第11経路目 ~ 最大第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一般化費用を極端に小さくし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, 一般化費用を基準として用いていたのに対して, 方法2では経路所要時間を基準として用いる.

c) 方法3

方法1と同様に, 経路効用の確定項を基準としてもちいるが, 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.

d) 方法4

方法3と同じく, 分析者の経験による経路設定を行わない(つまり, [Step 3]を含まない)が, 方法3では, 一般化費用を基準として用いていたのに対して, 方法4では, 経路所要時間を基準として用いる.

(4) 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

表-2 事例分析において設定した分析ケース

	方法1	方法2	方法3	方法4
経路探索の基準	一般化費用	所要時間	一般化費用	所要時間
経験的な選択肢設定	あり	あり	なし	なし
AON			AON	
UE			UE	
MNL	MNL-1	MNL-2	MNL-3	MNL-4
SMNP	SMNP-1	SMNP-2	SMNP-3	SMNP-4
SUE-L	SUE-L1	SUE-L2	SUE-L3	SUE-L4
SUE-P	SUE-P1	SUE-P2	SUE-P3	SUE-P4

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。

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項を用いている。UE については、マルチクラス均衡配分を行っている。MUE モデルの解法アルゴリズムについて、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<sup>3)</sup>。

なお、UE では、 $G_C$ 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、他のトリップ目的の配分結果は混雑率によらず毎回同じとなる。

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たっては、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。

#### (5)計算状況

##### a)鉄道利用OD表の作成

配分計算にあたり、鉄道利用OD表を、以下の手順で作成した。まず、通勤・通学目的については、平成12年国勢調査による市区町村間OD表を基本に、平成10年東京都圏パーソントリップ調査(以下、PT調査)における計画基本ゾーン間OD交通量の比率を用いて、ゾーン間交通量を作成した。なお、さらに細かいゾーンに分解する段階では、単純な夜間人口比を用いた。次に、この全交通手段を含む

ゾーン間OD表をベースに、平成10年PT調査データによって推定された交通機関分担モデルを用いて、鉄道利用OD表を作成した。

一方で、私事・業務目的については、まず、平成10年PT調査による計画基本ゾーン間OD交通量を現況OD表とした上で、平成10年から平成12年の人口成長を現在パターン法(フレーター法)で反映させることによって、現況OD交通量を推計した。次に、この全交通手段を含むゾーン間OD表ベースに、平成10年PT調査データによって推定された交通機関分担モデルを用いて鉄道利用OD表を作成した。

なお、鉄道経路配分にあたっては、当然ながら、東京圏全域の鉄道ネットワークを使用している。

##### b)計算状況

以上で、作成されたゾーン間OD表を入力して、経路配分を行った。各モデルのアルゴリズムの収束までの繰り返し計算回数、計算時間は表-3のとおりである。

まず、繰り返し計算回数について、AON、MNL、SMNPは経路配分を1回のみ行う方法であることから、当然ながら計算回数は1回である。次に、繰り返し計算を行う均衡配分について、UEは17回、SUE-Lは7回~21回、SUE-Pは8~21回で収束に達している。ここで、SUE-L1、SUE-L2、SUE-L3の間、あるいはSUE-P間でそれぞれ回数が異なるのは、先に述べたように選択肢集合の設定方法が異なるためである。次に、計算時間について見ると、UEやSUE-LよりもSUE-Pの計算時間の方が長い。これは、選択肢間の確率をシミュレーションによって求める部分に時間を要しているためである。

#### (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。実績値としては、「平成14年版都市交通年報」による平成12年度断面輸送量を用い、区間数は1439である。また、再現性の指標としては、相関係数、RMS誤差の値を用いる。各モデルによる現況再現性の結果を示したものが表-4である。

表-3 配分方法間の計算状況の比較

配分方法	繰り返し回数	計算時間(分)
AON	1	3
UE	17	31
MNL-1	1	10
MNL-2	1	10
MNL-3	1	7
MNL-4	1	7
SMNP-1	1	32
SMNP-2	1	32
SMNP-3	1	20
SMNP-4	1	20
SUE-L1	10	102
SUE-L2	7	67
SUE-L3	21	151
SUE-L4	2	14
SUE-P1	11	351
SUE-P2	8	258
SUE-P3	21	431
SUE-P4	2	40

まず、一般的に相関係数は0.980～0.993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。一方、パラツキ具合を示すRMS誤差は、MNL-2、SMNP-2、SUE-L1、SUE-L2、SUE-P1、SUE-P2の値が小さく(パラツキが小さく)、AON、UE、MNL-3、MNL-4、SMNP-3、SMNP-4、SUE-L4、SUE-P4の値が大きく(パラツキが大き)くなっている。すなわち、MNL、SMNP、SUEの各モデルについて、経験的な選択肢集合の設定を行っている方法1、2の方が、機械的に選択肢集合を設定している方法3、4よりも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SPNP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および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。

### 3. モデルの時間移転性に関する検討

#### (1)平成17年データを用いた分析方法

ここからは先に構築した各種経路配分モデルの時間移転性について検討を行う。具体的には、平成17年の鉄道OD表を基に、先の需要予測モデルを用いて配分計算を行い、推計値と実績値の比較を行う。

ここで配分計算にあたっての鉄道利用OD表は、以下の手順で作成した。まず、通勤・通学目的については、平成17年国勢調査による市区町村間OD表を基本に、平成10年東京都市圏パーソントリップ調査(以下、PT調査)による計画基本ゾーン間OD交通量の比率を用いてゾーン間交通量を作成する。さらに細かいゾーンに分解する段階では人口比を用いている。次に、この全手段OD表を平成10年PT調査データによって推定された交通機関分担モデルを用いて鉄道利用OD表を作成した。現況再現時と同一のモデル

表-4 配分方法間の現状再現性の比較

配分方法	相関係数	RMS誤差
AON	0.986	45238
UE	0.989	42140
MNL-1	0.990	38916
MNL-2	0.992	34721
MNL-3	0.982	51853
MNL-4	0.981	54316
SMNP-1	0.991	37273
SMNP-2	0.992	33512
SMNP-3	0.981	54567
SMNP-4	0.980	55738
SUE-L1	0.992	35330
SUE-L2	0.992	34032
SUE-L3	0.990	40057
SUE-L4	0.982	52922
SUE-P1	0.993	32855
SUE-P2	0.993	33125
SUE-P3	0.990	39946
SUE-P4	0.981	54323

注:相関係数,RMS誤差ともに、対象ネットワーク内のすべての駅間断面交通量実績値と推計値との比較をもとに算定している。

を用いたのは、東京都市圏において平成10年以降に実施された利用可能なPT調査データが存在しなかったためである。

同様に、私事・業務目的については、平成10年PT調査による計画基本ゾーン間OD交通量を現況OD表とし、平成10年から平成17年の人口伸びを現在パターン法(フレータ法)で反映させて現況OD交通量を推計した。次に、この全手段OD表を平成10年PT調査データによって推定された交通機関分担モデルを用いて鉄道利用OD表を作成した。

なお、鉄道経路配分にあたっては、平成17年時点の東京圏全域の鉄道ネットワークを使用している。

#### (2)モデルの全体的な時間移転性の検証

まず、2.(6)と同様に、各モデルによる推計値を実績値と比較することにより、平成17年時点での、モデルの再現性を確認する。ここで実績値には、「都市交通年報」(平成17年度)による断面輸送量(計1471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-5に示す。

まず、一般的に相関係数は0.967～0.989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。すなわちモデルの時間移転性は十分担保されていることが確認された。

一方、パラツキ具合を示すRMS誤差は、MNL-1、MNL-2、SMNP-1、SMNP-2、SUE-L1、SUE-L2、SUE-P1、SUE-P2の値が小さく(パラツキが小さく)、MNL-3、MNL-4、SMNP-3、SMNP-4、SUE-L4、SUE-P4の値が大きく(パラツキが大き)くなっていることが分かる。これは2.(6)の結果とほぼ同様の傾向を示しており、MNL、SMNP、SUEの各モデルの

表-5 配分方法間の時間移転性の比較

配分方法	相関係数	RMS誤差
AON	0.981	54027
UE	0.984	50636
MNL-1	0.984	48378
MNL-2	0.985	48118
MNL-3	0.971	65854
MNL-4	0.967	70726
SMNP-1	0.985	47322
SMNP-2	0.986	46225
SMNP-3	0.967	70390
SMNP-4	0.967	71524
SUE-L1	0.987	43764
SUE-L2	0.986	45888
SUE-L3	0.985	48603
SUE-L4	0.969	69421
SUE-P1	0.989	41587
SUE-P2	0.987	44350
SUE-P3	0.986	48732
SUE-P4	0.968	70094

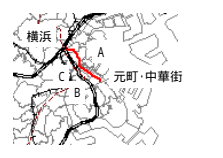

注:相関係数,RMS誤差ともに,対象ネットワーク内のすべての駅間断面交通量実績値と推計値との比較をもとに算定している。

選択肢集合について,経験的に選択肢集合を設定する方法1,2の方が,機械的に選択肢集合を設定する方法3,4よりも高い再現性を得られている。

(3)特定路線を対象としたモデルの時間移転性の検証

次に,特定の路線を対象とした,モデルの時間移転性の検証を行う。ここでは,近年開業したみなとみらい線(横浜～元町・中華街,平成15年2月開業)および地下鉄半蔵門線(水天宮～押上,平成15年3月延伸開業)の2つの路線を対象に,先に作成したH17鉄道OD表を用いて予測を行い,実績値との比較を行った。2つの路線の特性は,表-6のよう

表-6 時間移転性検討の対象路線の特性

	みなとみらい線 (横浜～元町・中華街)	半蔵門線 (水天宮前～押上)
対象路線		
	A:みなとみらい線 B:根岸線 C:市営地下鉄線	A:半蔵門線・東武伊勢崎線 B:千代田線・東武伊勢崎線 C:東西線・日比谷線,東武伊勢崎線
路線特性	<ul style="list-style-type: none"> <li>所要時間 A:7分(横浜～日本大通り) B:5分(横浜～関内) C:5分(横浜～関内)</li> <li>混雑率 A:93%(横浜 新高島) B:129%(横浜 桜木町) C:77%(横浜 高島町)</li> <li>駅乗降人員/断面輸送人員 (千人/日) A:みなとみらい:52/136(=38%) B:桜木町:108/422(=26%) C:桜木町:15/83(=19%)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>所要時間 A:60分, B:59分, C:58分 (春日部～大手町間,乗換時間含む)</li> <li>混雑率 A:81%(清澄白河 水天宮前) B:179%(町屋 西日暮里) C:163%(三ノ輪 入谷)</li> <li>駅乗降人員/断面輸送人員 (千人/日) 住吉:19/112(=22%) 清澄白河:25/120(=20%)</li> </ul>

駅乗降人員はSUE-P1による結果

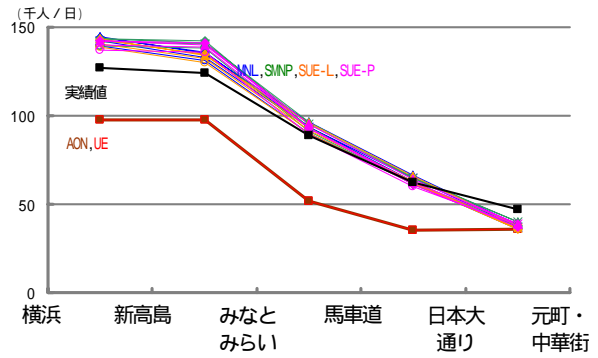


図-1 みなとみらい線の駅間断面交通量予測結果

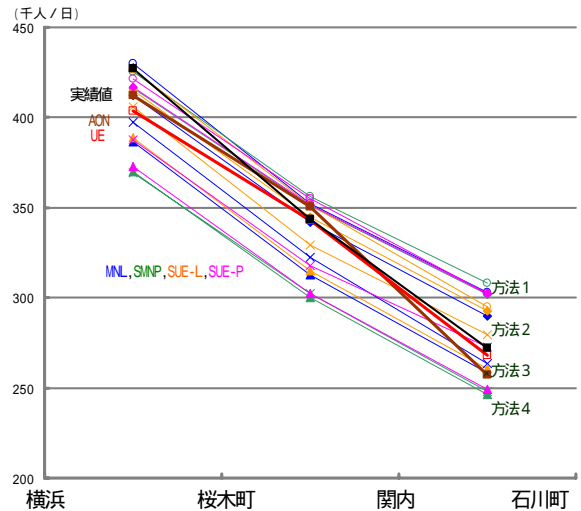


図-2 JR 根岸線の駅間断面交通量予測結果

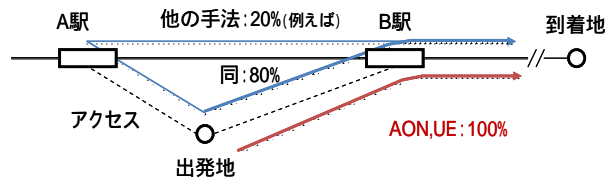


図-3 AONとUEの特性を示すネットワーク構造の例

にまとめられる。

まず,みなとみらい線の駅間断面交通量の予測結果を示したものが図-1である。これより,MNL,SMNP,SUE-L,SUE-Pの各手法の推計値は概ね実績値に近い水準となっているのに対して,AONとUEは,横浜～日本大通り間で過小推計となっていることが読み取れる。この原因をさらに考察するために,みなとみらい線と一部区間が競合しているJR根岸線の駅間断面交通量の予測結果を示したものが図-2である。これより,横浜～関内間において,AONとUEは,他の手法の推計値より高くなっていることが読み取れる。ただし,実績値と比較した場合,AONとUEの推計値は,みなとみらい線,JR根岸線のいずれもが低い結果となっている。これは,図-3のネットワーク事例で示されるように,AONの場合,一般化費用が最小の経路(図中の場合B駅にアクセスする経路)に全て配分されるが,確率的な配分手法で

