

京都大学大学院 学生員○山中 英生
京都大学工学部 正 員 天野 光三
京都大学工学部 正 員 小谷 通泰

1 はじめに

都市交通機関としてのバスは、地下鉄・鉄道からの末端サービスを受け持つ交通手段として、あるいは主要な幹線交通手段として重要な役割を果たしているが、近年都市構造の変化に伴う需要の変化や、地下鉄等の整備に際して、系統網再編などの短期的施策によるバス運行の改善の必要性が生ずるようになった。筆者らは、従来よりこのようなバス系統網に関する改善策を分析評価するための計画システムの開発を行っており、同時に、多数の代替案の分析評価を容易にし、かつ迅速に行なえるような電算機支援システムの整備を進めてきたが、その概要については既に参考文献に述べている。

そこで本研究は、この計画システムを拡充するため、非集計タイプの経路選択モデルを導入してバス・地下鉄利用者の経路選択特性を明らかにするとともに、さらに作成したモデルを、実際のバス系統網の改善策の効果予測に適用し、その有用性について検討した。なお、モデルの作成にあたっては、既に整備した電算機支援システムを活用して作成作業の効率化をはねており、このような電算機支援システムの役割についてもあわせて述べることにする。

2 モデルの作成手順と電算機支援システムの役割

本研究で導入した経路選択モデルは、京都市を対象地域として、バスおよび地下鉄利用者、自宅最寄バス停（地下鉄駅）から、目的地バス停（地下鉄駅）まで、どのような経路をとるかを明らかにするものである。トリップの目的としては、基礎データを定期券の調査から得るため通勤・通学を扱い、経路としては、バスおよび地下鉄の直通経路に加え、これらの乗り換えを含めたものとし、ルート選択と手段選択を同時に扱うモデルとしている。採用したモデル式は表-1に示すような一般化ロジット型である。

表-1 モデル式

$$Prn(j) = \frac{\exp(Vni)}{\sum_{j \in An} \exp(Vni)} \quad (Vni = \sum_k Bk \cdot Xnik)$$

Prn(j) : 個人nが経路jを選択する確率
Vni : 個人nが経路jに対する効用の平均値
An : 個人nの代替経路集合
Bk : パラメータ
Xnik : 経路長のカテゴリ特性・個人nの属性

このような都市の大規模なバスネットワーク上での経路選択モデルを作成するにあたっては、モデル推定のための大量の基礎データを用いる必要がよく作成される問題となる。本研究では、比較的収集しやすい定期券のデータを基礎として、これを補完するアンケート調査および、系統網データを処理する電算機支援システムを活用して作成手順を構成した。

2-1 モデルの作成手順

一般に、非集計タイプの経路選択モデルを作成するには、次のような基礎データをそろえる必要がある。

- ① 利用者各個人の選択経路
- ② 利用者各個人が利用可能な代替経路群とそれらのサービス特性値
- ③ 経路選択に影響を与えるような利用者の個人属性

本研究では、①と③については、定期券購入申請書のサンプル調査より得、また②については、アンケート調査をもとに代替経路の設定基準を作成し、これを用いて電算機支援システムにより設定する方法をとっている。この実際の作業手順を示したのが図-1である。すなわち、作業は大きく

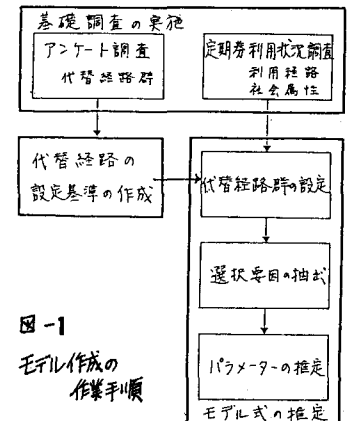


図-1

モデル作成の
作業手順

分けて ①基礎調査の実施 ②代替経路設定基準の作成 ③モデル式の推定 の三つより成っている。

基礎調査では、利用経路および個人属性のサンプルデータを得るための定期希調査と、利用者などのような代替経路を想定しているものを調査するためのアンケートを行っている。また代替経路設定基準の作成においてはアンケート調査の結果および 電算機による各乗継者の代替経路の列举結果を用いて、判別分析手法により利用者は想定している代替経路の範囲を分析し、代替経路の設定基準を作成する。次にこの設定方法を用いて、定期希調査のサンプルに対して代替経路群を設定し、選定要因となる変数を抽出して、最尤法によりパラメータを推定する。なお、これらの各作業の詳しい内容についてはより述べる。

2-2 電算機支援システムの役割

モデル作成にあたって、対象地域のバス系統網および地下鉄の運行データより、各利用者の代替経路の候補となる経路を列举したり、それらのサービス特性を推定するために、電算機支援システムは重要な役割を果たしている。

図-2 バス系統網データの構造

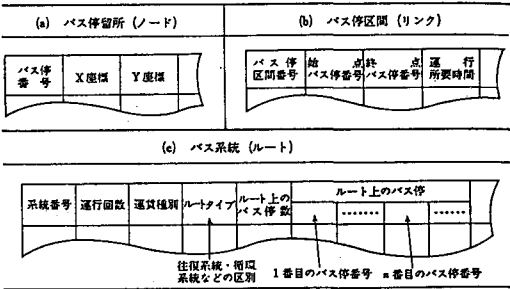


図-2は電算機に入力されたバスおよび地下鉄の系統網のデータ構造を示したものである。バスや地下鉄のルートは、バス停(駅)の連なりとして表現されており、運行頻度や運賃制度などが入力されている。またバス停区間ごとに、運行ダイヤより求めた平均運行所要時間を入力して、所要時間算定の基礎としている。

さらに図-3は、2つのバス停間を一回乗り換えまでの全経路を列举する方法を図示したもので、この方法により、任意のバス停間を連絡する経路(これを二乗は連絡経路と呼ぶ)を列举できる。また列举した各経路について、表-2に示す方法をサービス特性は算定される。算定される特性値は時間(乗車時間等)、距離、折れ曲り回数、料金などであり、またいくつかの時間帯(ピーク時、昼間時)に分けて算定が可能であるが、モデル作成にはピーク時の算定結果を用いている。

図-3 連絡経路の列举方法

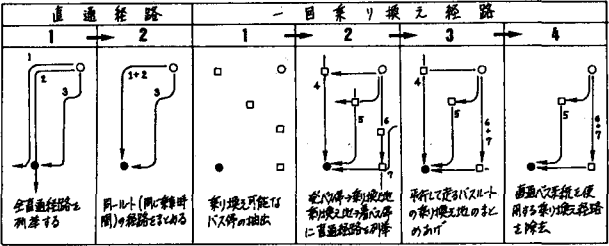


表-2 サービス特性の算定方法

サービス特性		推定・算定方法
時間	所要時間	乗車時間 + 待ち時間 + 乗り換え時間
	乗車時間	$\sum$ バス停間所要時間 (運行ダイヤより)
	待ち時間	利用交通機関の運行頻度 $\times 1/2$
	乗り換え時間	乗り換え地の形状、規模により分類 (0~2分)
	非乗車時間率	(所要時間 - 乗車時間) / 所要時間
乗	待ち時間率	待ち時間 / 所要時間
	乗り換え回数	直通 = 0 バス・バス乗り換え、バス・地下鉄乗り換え = 1
距離		$\sum$ バス停間距離
折れ曲り回数		ルートに沿って 75°以上の折れ曲りをカウント
表定速度		距離 / 所要時間
運賃		定期 1ヵ月運賃 / 25 (回) / 2 (往復) (定期調査のみ)

3 基礎調査の実施

モデル作成にあたって、まず定期希調査およびアンケート調査を実施した。以下にその概要を述べる。

3-1 定期希調査の概要

定期希を購入する際に利用者が記入する申請書をサンプリングして、利用経路および個人属性のデータを収集した。表-3にサンプリング方法を示しているが、完全なランダムサンプリング方法ではない。収集サンプル数は2654であったが、モデルに用いることの可能な完全なデータは2319であり、そのうち通勤者4割、通学者26割を占め、また直通バス利用者42%、バスと地下鉄の乗り換え者48%、他10%はバスを乗り換えていた。

表-3 定期希調査の概要

対象地域	東京都
調査対象	東京都の市営バス・地下鉄の定期希購入申請書
サンプリング方法	・発行時期: 昭和55年6月~7月
	・発着場所: 全市117箇所、北豊地域の20箇所
	・利用経路: あらかじめ選定した10ヶ所の乗継地点を含むもの、最速の地下鉄経路利用以外のもの
有効データ数	2654
収集データ	・利用経路データ: 発バス停・着バス停・乗り換え地・利用バス系統
	・個人属性: トリップ目的(通勤・通学)・年齢・性別・職業

3-2 アンケート調査の概要

アンケート調査は利用者視点の代替経路を代替経路として考えることを調査するためのものであり、主な調査内容としては、居住地域から昇えられた目的地まで、バス・地下鉄を利用して行く場合を想定させ、知っている経路を列挙させるものである。その他、各経路の利用頻度（想定値）やいくつかの個人属性もあわせて調査した。実験のサンプリング方法は表-4に示す通りで、有効サンプル数は324であった。アンケート結果より各被験者が想起した経路の致し集計すると図-4のようになった。これらを見て、約8割の人は1〜4本の代替経路を想起しており、とくに2本の経路を想起している人は一番多く、現実にはこの程度の代替経路を想定して選択しているものと考えられる。

4 代替経路設定基準の作成

本研究が求めているような、都市のバス・地下鉄交通網では、あるOD間を接続している経路は、2-2で述べたような方法で列挙しても非常に多く存在する。この多数の経路のうち、利用者視点で代替経路として想起するのは、上に述べたように一部だけであり、現実利用可能性のあるものだけを代替経路とし、その中から利用経路を選択していると考えられる。この現実の利用可能性を決定する要因としては、①情報の有無（経路の存在を知っているか）②物理的利用可能性（バイク利用等、個人により利用可能性は異なるもの）③サービスレベルの許容範囲（極端な迂回、無意味な乗り換え）などを考えられる。ここでは、公共交通機関の通勤、通学利用を対象とするため、「完全な情報」と「物理的利用可能性は個人によって変わらぬ」ということを仮定し、③のどのようなサービスの範囲の経路を代替経路とあるかを問題とする。

そこで先に述べたアンケート調査の結果より、図-5の方法で代替経路の設定基準を作成する。おおよそ、①まずアンケートの被験者が列挙した経路（想起経路）のOD間について、前述の方法で一回乗り換えまでの全経路（連絡経路）を列挙し、それらのサービス特性を算定する。②次に、得られた連絡経路群を被験者視点代替経路として考えている想起経路と、それ以外の経路に分類し、③この2つの群を判別するための変数を抽出した上で④連絡経路群から代替経路群を抽出するための判別関数を推定し⑤代替経路設定の基準を作成する。

表-5は、このようにして判別分析を行った結果である。

分析に用いた変数は、まず表に示すように最小値との比や差をとり、これにより、各被験者の連絡経路群の中で相対的な値とできるように基準化した上で、各変数間の関連を分析し、独立した変数を抽出したものである。また、表-5に示した判別関数の推定結果は、抽出した変数をフィックスの△を基準として選択投入した結果であり、この中で最も判別結果の良好なのは関数3とされている。この関数3について、合成変数を横軸にとり、想起された代替経路群および連絡経路群の累積分

表-4 アンケート調査の概要

調査地域	京都市
調査対象	京都市内14ヶ所のバス停留所の住民
サンプリング方法	バス停を中心に半径200m以内に27軒の住居をサンプリング、一軒に7人までの被験者を指定。
調査期日	昭和56年12月9日〜11日
調査方法	調査員による訪問調査法
サンプル数	327（回収率88%）
調査内容	・居住地より京都駅へ行く場合に知っている経路 ・直線バス経路、バスと地下鉄利用経路、バスとバスの乗り換え経路、その他の交通手段 ・各経路の想定利用頻度 ・個人属性：年齢、性別、年収、家族数等

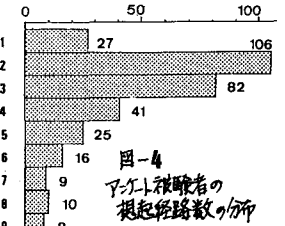


図-4 アンケート被験者の想起経路数の分布

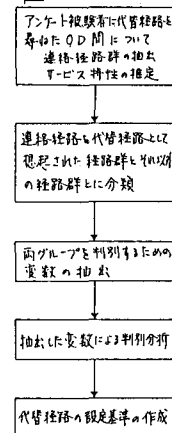
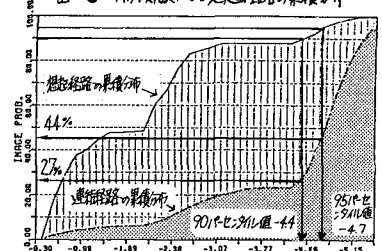


図-5 代替経路設定基準の作成手順

表-5 判別分析の結果 (1)因はサービスレベル

変数 (基準値0.5)	判別関数 $Z = \sum a_i X_i$	判別関数		
		関数1	関数2	関数3
乗り換え回数比 ($X - X_{min}$)	0.9325 0.5083	-2.97218 (-0.8445)	-1.46857 (-0.4124)	-1.37544 (-0.3862)
所要時間比 (X / X_{min})	1.2667 1.5641	-0.86506 (-0.3508)	-0.39019 (-0.1582)	-0.29246 (-0.1187)
待ち時間率の比 (X / X_{min})	2.1086 1.5641	-0.27507 (-0.1938)	-0.19913 (-0.1416)	-0.19036 (-0.1357)
折れ曲り回数比 ($X - X_{min}$)	2.6809 1.7819			-0.13954 (-0.2414)
バス(バス)乗り換え (地下鉄乗り換え)の比	0.8747 0.1368		-2.33397 (-0.7752)	-2.36480 (-0.7854)
合成変数のグループ別平均		1.52484 -0.14147	2.35142 -0.21816	2.42023 -0.22455
ワイルド中 (△)		0.82250 71.2	0.65089 86.3	0.64785 87.0

図-6 判別関数による想起経路の累積分布



布を示したの図一六である。想起された代替経路の90パーセンタイル値および各パーセンタイル値を図中に記しているが、これによると例えば、合成変数の値が-4.4以上の経路を抽出すると、想起経路の90%を含み、連絡経路の27%を占めることとなる。代替経路の設定は、このような図をもとに合成変数の値が一定以上の経路を抽出する方法をとることにある。

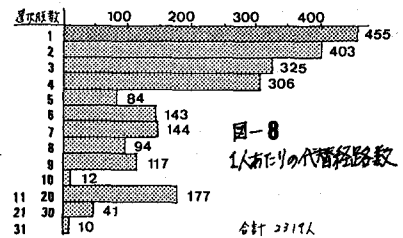
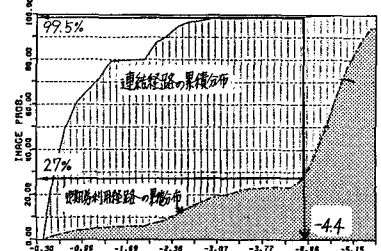
5 モデル式の推定

定期希調査の結果を用いてモデル式を推定し、現状再現性の検討を行った。以下、手順に従い説明する。

5-1 代替経路の設定

まず定期希調査の各サンプルについて、前述した方法により連絡経路を列挙し、判別式を用いて代替経路を設定する。図一七は横軸に判別関数 z の合成変数の値をとり、全利用者の連絡経路の累積分布と、実際に利用された経路の累積分布を図示したものである。これによると、図一六の90パーセンタイル値-4.4以上の経路を抽出すれば、利用経路の99.5%が含まれることになり、この基準を妥当と思われる。このとき、代替経路の総数は連絡経路総数の27%で、一人平均約6経路の割合となる。また図一八は、この基準値より代替経路を設定した後の各利用者の代替経路数の数値分布図を示しているが、これによると約7割の利用者が4本以下の代替経路となっている。なお、代替経路が一本しか設定されなかった455人については、設定段階で選択経路が決定してしまつたため、後のモデル式の推定から除くことにある。

図一七 判別関数による定期利用経路の累積分布



図一八 一人あたりの代替経路数

5-2 変数の選定

次にモデル式に導入する変数を選定する。基本的方針として、サービス変数は共通変数として、また個人属性については交通手段(地下鉄利用)固有変数として導入することにし、その他、地下鉄利用に関わる固有ダミー変数を加えることにした。このうち、サービス変数については表一に示した変数を関連分析(相関分析)により表一に示すようなグループに分類し、同一グループ内からは一つの変数を導入することにする。また個人属性の変数については、各令セトリップ目的を取り上げ、地下鉄利用とのクロス分析の結果から便宜的に表一に示すようなダミー変数を作成した。

表一 サービス特性変数の選定

経路の長さに関連する変数	施設所要時間 乗車時間 距離
待ち時間に関連する変数	待ち時間 待ち時間率 非乗車時間率
乗り換えに関連する変数	乗り換え回数 乗り換え所要時間

折れ曲り回数
表定速度
運賃

表一 個人属性変数の作成

年齢-変数: 年齢60以上・16以下で地下鉄経路=1
通勤目的-変数: 通勤目的で地下鉄経路=1

5-3 パラメーターの推定

表一は選定した変数を組み合せて、モデル式のパラメーターを最尤法により推定した結果を示している。表に示したモデル式は、パラメーターの符号や値および尤度比指標 χ^2 値により有意性の比較的高いもののみを示している。表に示すように、モデルは変数の選定方法により所要時間とベースとなるモデルと乗車時間とベースとなるモデルに分けられるが、前者の方が全般的に χ^2 値が良好である。また、個人属性の変数を導入したモデルでは χ^2 値が改善しないが、個人属性導入のメ

表一 パラメーターの推定結果

変数	単位	種類	パラメーター (β)					
			所要時間・非乗車時間率を用いたモデル				()内は t 値	
			T-1	T-2	T-3	T-4	VT-1	VT-2
所要時間	分	共通	-0.2820 (17.2)	-0.3055 (17.6)	-0.3070 (17.2)	-0.3096 (17.7)		
乗車時間	分	共通					-0.2957 (15.9)	-0.2857 (16.2)
待ち時間	分	共通					-0.3629 (12.7)	-0.4159 (13.7)
非乗車時間率	%	共通		-0.0503 (6.2)	-0.0472 (5.8)	-0.0567 (6.9)		
表定速度	km/h	共通	0.01795 (2.7)	0.00588 (2.1)	0.00468 (2.1)	0.00349 (1.5)	0.01353 (6.5)	0.00494 (2.2)
乗り換え回数	回	共通	-2.2690 (19.1)	-3.0278 (4.5)	-3.1822 (16.0)	-3.0812 (0.4)	-2.9091 (20.9)	-4.0933 (14.9)
折れ曲り回数	回	共通			-0.1348 (4.0)			-0.1417 (4.2)
地下鉄固有ダミー		地下鉄利用		2.1664 (11.7)	2.3999 (12.3)	2.9844 (11.4)		1.8307 (10.0)
通勤目的 (通勤=1)		通勤目的				-0.8493 (1.7)		
通勤目的 (通勤=1)		通勤目的				-0.8536 (4.5)		
変数数			3	5	6	7	4	6
χ^2 尤度比指標			0.4719	0.5027	0.5055	0.5062	0.4817	0.4946
過剰率 (最大尤度による)			70.3	71.9	72.9	72.2	71.3	69.8

リットは見られなかった。さらに通貨の変数については、七値や符号に問題もあり、モデルに導入できなかった。これは、定期券利用者のために通貨制度が特殊なことをとらえるものと考えられる。したがって、この中で最も有意なモデルは「一」号と考えられ、このモデルでは最大確率の経路を選択するとした場合、約73%の適中率を得ている。また「一」号のモデル式のパラメータについて、乗り換え回数と時間の相対価値をみると、乗り換え1回が約11分と乗り換えの抵抗は非常に大きいこととわかる。しかし、地下鉄利用の固有ダミー変数のパラメータをあわせて考えると、地下鉄利用の一回乗り換えと乗車利用の所要時間は約2.5分とわり、地下鉄とバスの乗り換え経路は充分直通バスと対抗できることを示している。

5-4 モデルの現状再現性の検討

次に、「一」号のモデルについて、作成に用いた定期券データに対する再現性を検討した。表-9は直通バス、バスと地下鉄の乗り換え経路、バスとバスの乗り換え経路の3種類の利用形態別に、実際の利用経路と、モデルにより最大確率の推定された経路とのクロス集計結果を示したものである。これによると直通バス利用者およびバス地下鉄経路利用者では70%～80%の適中率の適中率を得ているが、ミニアの低いバスバス経路の利用者では50%と適中率が低くなっている。これは乗り換え利用者では、他に類似した経路が多く存在するためと考えられる。

表-9 モデルによる利用形態別推計結果

推定	直通バス	バス地下鉄経路	バスバス経路	乗車
実際の	利用回数	利用回数	利用回数	利用回数
直通バス	471 (68.9)	107 (15.6)	106 (15.5)	0 (0.0)
バス地下鉄	146 (14.2)	810 (78.7)	66 (6.4)	6 (0.6)
バスバス	4 (2.6)	49 (32.2)	76 (50.0)	23 (15.1)
推定利用回数	738	1031	105	1864

□ No.7-アが経路が適中と判断されている。

6 バス系統網改善策の効果予測

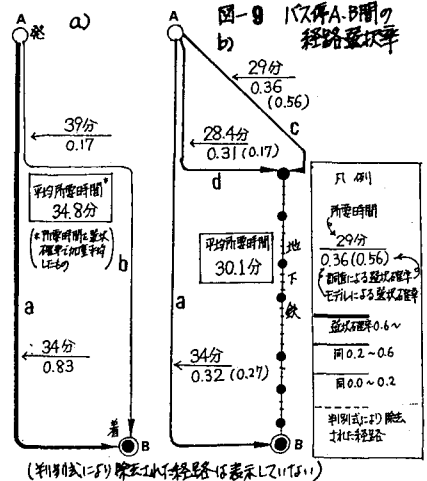
ここには作成したモデルの適用例として次の2つについて述べる。第一に、京都市における昭和47年度の地下鉄開通に伴う系統網の変化が利用者の経路選択に与える効果について推定し、考察する。次に京都市全域において、現行のバス系統網に対して系統網の改正案を作成し、その効果を予測した例について述べる。

6-1 地下鉄開通に伴うバス停間利用者の経路選択の変化

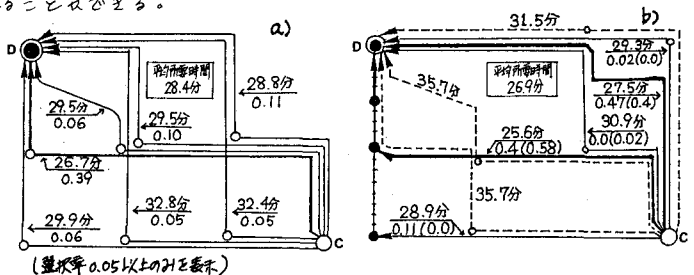
図-9のa)は、バス停A、B間について、地下鉄開通前a)と開通後b)の利用者のモデル「一」による経路選択率を図示したものである。このバス停間には、地下鉄開通前は2系統の直通バスあり、そのうちの1系統は約8割の選択確率となっている。開通後は、残された直通1系統と2本の地下鉄利用経路があり、この3経路にほぼ等しい選択確率が推定されており、この結果からこのバス停間では地下鉄の開通により約7割の乗客が地下鉄利用に移行し、全体として、平均所要時間が約4.7分の短縮が生じるという。

また図-10のa)は、バス停C、D間について同様に図示したものである。このバス停間では、開通前、直通系統はごく少く、乗り換え経路に分散していた乗客は、開通後は、直通経路と地下鉄乗り換え経路を選択するようになる。様子を見ることとなる。

ところで、図中には定期券調査データより求めた選択率を()内に記してあり、予測結果との検討ができるが、たとえば図-9のb)では、経路Cの確率がモデルでは高く、逆にb)では低くなっているものの、直通バスと乗り換え経路の分担関係はほぼ等しい結果が得られている。



(判別式に)乗客が経路は表示しない



(選択率0.05以上のものを表示)

図-10 バス停C、D間の経路選択率

6-2 バス系統網修正案の効果予測

モデルの適用例として、京都市全域のバス系統網の2つの修正案について利用者の交通流動を集計し、利用者側、運営者側評価指標値を算定した例を示す。

まず現行のバス系統網から、次の2つの方針に従って図-11のb)に示す修正案1、2を作成した。

① 郊外より市内中心部に向かう低乗車効率のバス系統網を、地下鉄や循環バス系統網へ連絡させて系統長を短縮し、乗り換え利用を促進する。

② 市内中心部、特に地下鉄駅間のバス停のライダーサービス向上のため、ゾーンバスを導入する。

次に、現行の系統網および修正案について、モデルT-3を用いて交通流動を推計する。おなわち、まず各バス停間について6-2に示したように経路を列举して選択確率を推定し、これにOD交通量を乗じて各経路の利用者数を算定し、これを全域で集計する。

こうして得られた交通流動の推計結果より、各案について利用者側、運営者側の評価指標値を算定した結果、表-10のようになった。表に示すように、修正案1では運営面の効率化と利便性の低下、修正案2では利便性の向上と運営効率低下といった相反する効果が算定されている。

7 おわりに

本研究では、バス・地下鉄利用者の非集計経路選択モデルを構築し、実際のバス系統網計画への適用を行なった。得られたいくつかの成果をまとめると次のようになる。

- ① 大規模なバスネットワーク上でモデルを作成する上で、困難であった代替経路の設定やサービス特性の推定作業に対して、判別関数を用いて電算機支援システムにより作成する方法を提案した。
- ② 定期券調査データをもとに、所要時間、非乗車時間率、乗り換え回数、折れ曲り回数のサービス特性を変数とした有意なモデルは構築でき、これらの指標に対する利用者の行動の予測が可能となった。
- ③ 構築したモデルでは、特に地下鉄やバスの乗り換えの要因に対する利用者の行動を把握できることになり、今後、地下鉄整備やゾーンバス導入計画などにおいても有用な情報となると考えられる。

また、問題点ならびに今後の課題についてまとめると次のようになる。

- ① モデルへ導入する変数の選定や作成方法の問題、とくに個人属性変数については、変数の作成方法についての検討や、モデル導入した場合の集計方法の問題が残されている。その他、運賃等、今回導入できなかったサービス変数の導入方法や、そのための調査の設計などの課題がある。
- ② モデルは京都市全域への適用を目的としているが、全域でのモデルの適用可能性の検討と、実績値との検証等の課題が残されている。
- ③ バス系統網を評価する上においても、他の交通手段(車、バイク、自転車など)の交通手段選択を明らかにする経路選択モデルの構築は今後の大きな課題といえる。

参考文献

- 1) 木野、小谷、山中「電算機支援システムによるバス系統網計画の評価に関する研究」 第4回土木学会計画学研究会発表会 昭和57年1月
- 2) 大田、原田「非集計行動モデルの現状と課題」 第4回土木学会計画学研究会発表会 昭和57年1月
- 3) H.B. Akiva, S.R. Lerman「Travel Behavior: Theories Models and Prediction Models」 1980
- 4) 木野、小谷、山中「非集計経路選択モデルによるバス系統網改善の効果予測」 第7回土木学会計画学研究会発表会 昭和57年10月

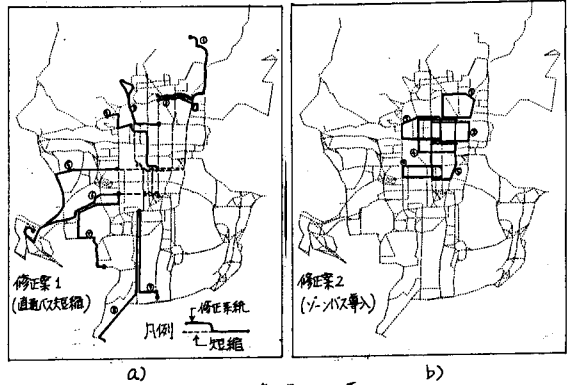


図-11 バス系統網修正案の概要

表-10 評価指標の算定結果

評価指標	現行	修正案1	修正案2
利用			
平均所要時間	25.89 分	26.42 ●	25.85 ○
平均乗り換え回数	0.443 回	0.450 ●	0.441 ○
平均運賃	181.48 円	181.75 ●	180.97 ○
平均非乗車時間	4.476 分	4.464 ●	4.442 ○
運行1台の必要台数	6,190 台	6,332 ○	6,020 ●
必要台数率	29.87 %	31.21 ○	28.72 ●
必要台数	746 台	713 ○	777 ●

(乗車時間率○-改善 ●-悪化)

運行1台の必要台数: $\sum \sum (\text{バス停留所乗車人員} \times \text{バス停留所距離}) / \text{運行距離}$

必要台数率: $\sum (\text{経路別1時間あたり運行回数} / \text{系統運行所要時間} \times 60)$