

都市内公共輸送網の計画システムに関する研究

AN URBAN PUBLIC TRANSPORTATION NETWORKS PLANNING SYSTEM

天野光三*・小谷通泰**・山中英生***

By Kozo AMANO, Michiyasu ODANI and Hideo YAMANAKA

This study aims to propose a planning system for urban public transportation networks, such as bus and subway networks. This system is first characterised by a route choice model based on the theory of disaggregate demand forecasting and a method for evaluating alternative plans from view points of users and operator. And a computer-aided system is also developed in order to save many man-hours in the planning process and improve the reliability of planning through repeated trials. The planning system is applied to a real urban area and its effectiveness is examined.

Keywords : public transportation networks, disaggregate route choice model, computer aided planning system

1. はじめに

都市域では、交通需要の増加と都市構造の変化に対処するために、地下鉄路線の新設や延伸、新交通システムの導入、またこれらに伴うバス路線の再編など、輸送網の整備、改良が近年盛んに進められており、その合理的で効率的な計画手法が求められている。本研究はこのような公共輸送網を計画するために1つのシステムを提案するとともに、実際の都市域への適用を通じてその有効性を検討したものである。

公共輸送網の計画方法としては、従来より最適化手法¹⁾や一定の選択基準²⁾等の適用によって効率的にネットワーク案を見つけ出す手法が提案されている。しかしこうした方法は、計算に要する時間を実用的な範囲にとどめるためにネットワークの簡略化が必要なこと、また最適化のために設定する目的関数や制約条件として定式化できる要素を限定せざるを得ないこと等が問題とされている。したがってこのような方法では、直接現実に適

用可能な計画案を作成することを目的とするよりは、むしろ目的関数や制約条件を変更しながら複数の代替案を作成し、それらをより詳しく比較検討する³⁾という計画手順をとることが実際的であると考えられる。

現実に近い輸送網を対象とした詳細な計画を必要とする場合には、あらかじめ設定したいいくつかのネットワーク案の効果を予測し、その結果を評価して必要に応じて変更を加えながら望ましい計画案を見つけ出すという方法が一般的な手法となろう。しかしながらこのような方法にも、予測・評価のためのモデル計算、計画案のモデルへの入力やその変更、さらに分析結果の視覚化などに多大の労力を要すること、またこの結果実際に検討対象とする計画案の数が限られてしまうことなどの問題がある。これには、計画作業における電算機利用の非効率さがその一因となっていることも多い。

一方、輸送網計画案の効果を予測し評価する際の課題として、乗換え施設の整備やバス系統網の再編、運賃制度の改変等、多種多様で比較的短期間に実施可能な改善策の効果を予測、評価することが、近年特に必要となっている。このためには従来の所要時間や運賃といったサービス指標のみを説明変数としたモデルでは、対処することが困難な場合も多い。

さらに都市内の輸送網は、利用者にとって便利で快適

* 正会員 工博 京都大学教授 工学部交通土木工学科
(〒603 京都市左京区吉田本町)

** 正会員 工博 神戸商船大学助教授 輸送科学科
(〒658 神戸市東灘区深江南町 5-1-1)

*** 正会員 工修 京都大学助手 工学部交通土木工学科
(同上)

なものであると同時に、運営者にとっても交通需要に適合した効率的なものでなければならず、それら両者の観点からみた評価方法が必要とされる。また公共輸送網の計画は市民生活と密接にかかわりあっており、このことを考えれば、これらの予測、評価結果は分析者のみならず、一般市民にとっても理解しやすいものであることが望まれる。

そこで本研究は、現実に近い輸送網を詳細に計画する場合を考え、上述の問題点をふまえて次の内容を具体的な検討課題とする。

(1) 計画作業の効率化、合理化を図るために、近年、対話型の電算機システムや図形入出力装置、およびデータベースシステム等の利用技術を駆使した支援システムが開発されるようになった⁴⁾。ここでは、輸送網計画を対象としてその計画作業を支援する電算機システムを構築する。そのために計画プロセスの中で電算機により支援可能な作業内容を明らかにし、支援システムの具備すべき基本的機能やハードウェアの構成を検討する。特に、計画システムを操作性の高いものとすると同時に、各種予測、評価結果を分析者やそれ以外の者にとってもわかりやすく示せるような視覚化の方法を考察する。

(2) 短期的な政策効果を予測するための1つの有用な方法論として、非集計行動モデルの適用が最近盛んに行われている⁵⁾。本研究では、輸送網計画代替案の効果を予測するうえで主眼となる、公共輸送機関利用者の経路選択モデルへ非集計行動モデルの導入を試みる。またこの際、モデルの構築を容易にし、かつ適用時の操作性を向上させるために、電算機により一定の基準で列举した経路群から、判別関数を用いて自動的に各利用者の選択可能な代替経路を設定する方法を提案する。そして、利用者行動の予測結果に基づいて、利用者、運営者の各立場より、輸送網計画の代替案を評価する方法を示す。

本論文の構成は以下に示すとおりである。まず2.では、本研究で提案する公共輸送網の計画システムについて、その基本的な考え方を明らかにし、さらに計画作業を支援する電算機システムを開発する。そして3.では、後に計画システムの適用対象地域とする都市域で各種調査を実施して、公共輸送機関利用者の非集計経路選択モデルを構築する。次に4.では、開発した計画システムを現実の都市域に適用する。最後に、5.では、本研究で得られた成果や、今後に残された課題を述べる。

2. 公共輸送網の計画システムの概要と電算機支援システムの開発

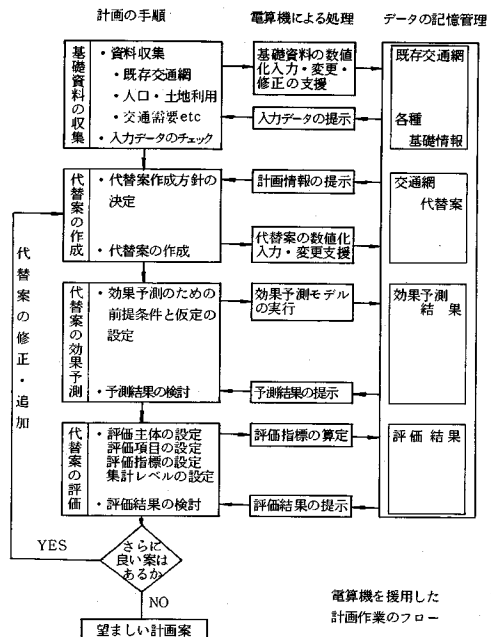
ここでは本研究で提案する公共輸送網の計画システムの基本的考え方を述べ、計画作業を支援する電算機システムを開発する。

(1) 計画システムの基本的考え方

本研究で提案するシステムは、公共輸送網の計画を4つのプロセスより構成するとともに、各プロセスごとの計画作業を電算機により支援できるようにしている。図一1は、電算機を援用した場合の輸送網計画の作業フローを示している。

図一1の左側の部分は計画の4つのプロセスを示しており、その概要は以下に述べるとおりである。まず基礎資料の収集プロセスでは、既存の公共輸送網やOD需要等の計画に必要な資料を収集し、次の計画代替案の作成プロセスで各種整備、改善計画を立案する。そして、計画代替案の効果予測プロセスでは、代替案の実施による交通サービス水準の変化を推定し、その結果生ずる利用者の行動を個人レベルで予測する。このためには、3.で開発する非集計経路選択モデルを用いる。その後、これらの各個人の行動を集計して対象地域全体としての交通量を推定する。最後に計画代替案の評価プロセスでは、利用者、運営者の各評価主体について評価項目別に評価指標を定め、交通量の推定結果に基づき評価指標の値を算定する。得られた評価情報は、さまざまな単位で集計し分析する。具体的な主体別の評価指標、集計単位については、後に4.の適用例で述べることにする。この結果必要に応じて、代替案の修正、追加のためにフィードバックを行う。

一方、図一1の右側の部分は、これらの4つのプロセスごとに電算機による計画作業の支援内容を示してい



図一1 電算機を援用した計画作業のフロー

る。これらの内容は概略次のように要約できる。

① 計画に必要な各種データを統一的に運用管理し、また収集整理した既存の、もしくは新たに開発した分析用プログラムを利用に備え管理すること。

② 計画に必要な基礎資料や計画代替案が輸送網のように地図形式で与えられる場合に、それらの電算機への入力や修正変更などの作業が容易に行え、また予測結果や評価結果などの各種計画情報を理解しやすい形で、容易に視覚化できること。

③ 対話型のシステムを構成することによって電算機と人間の間で情報交換が容易に行え、また情報のフィードバックに対して柔軟に対応できること。

(2) 電算機支援システムの開発⁵⁾

電算機支援システムが具備すべき基本的機能およびそのハードウェア構成について述べるとともに、本研究で開発したシステムのもつ具体的な機能やシステムへの入力情報を示す。

1) 支援システムの基本的機能

支援システムは次の4つの基本的機能を備えている。つまり、①データベース機能、②グラフィック機能、③基本処理機能、④対話管理機能、であり、各機能の概要は表一に示すとおりである。これらの機能は、互いに関連して1つのシステムを構成しており、この構成の概念図を示したのが図-2である。図に示すように、データベースを中心として、データベースへのデータの入力やそれに格納されたデータの出力、データの処理を対話的に管理するという構成をとっている。

2) 支援システムのハードウェア構成

図-3に、ホスト側とサテライト側の両システムよりなるハードウェア構成を示す。ホスト側は、京都大学大型計算機センター内の大型計算機とこれに配備されている各種図形出力装置等を用いる。一方、サテライト側には、大型計算機と通信回線で結んだ端末機（ディスプレイ画面をもったマイクロコンピュータ）を配し、これを

中心に種々の図形入力装置および出力装置、その他ラインプリンター等の周辺機器を備える。このような構成をとることによって、両者のシステムで次のような機能分担を図る。すなわち、ホスト側では、データベースの構築や、各種処理プログラム群の保存、および大規模な演算処理を行う。また、大量の図表や保存記録用の詳細図を出力する。一方、サテライト側では、端末機によるデータベースの利用や図形処理を対話型で行うとともに、サテライト側単独でも地図等の図形の入力や、簡単な図表の作成を行う。

3) システムへの入力データと具体的機能

システムへ入力すべきデータとしては、道路網、公共輸送網、利用者 OD があり、その詳細は表-2 に示すと

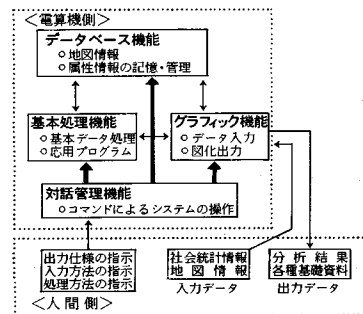


図-2 支援システムの基本的機能の構成

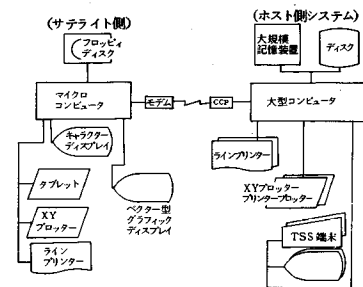


図-3 支援システムのハードウェアの構成

表一 支援システムの基本的機能

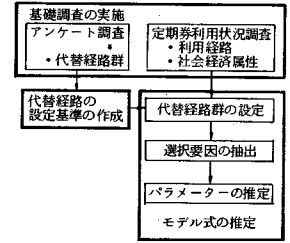
<データベース機能> 輸送網計画に関する情報の格納、抽出、修正、削除などの一連の操作が行え、データの統一的な管理や運用を可能とする機能。すべてのデータを表形式で表現し、表単位に操作を行う。
 <グラフィック機能> 地図等の図形で得られる計画に必要な情報を、入力機器を使用して数値化するとともに、データベースへの格納に備えて表形式に編集する機能、また種々の出力機器を用いて各種情報を地図上に図形出力したり、グラフに表示したりする機能。
 <基本処理機能> 電算機に格納されたデータの演算、検索、加工を行う機能。多くの分析作業に共通して必要な、データ処理を行う基本ソフトウェアを蓄積しておくことにより、種々の分析プログラムを容易に作成できるようにする。また、対象とする問題ごとに必要な各種応用プログラムを登録できる機能を備える。
 <対話管理機能> 上述の各基本機能を人間と電算機との対話により操作し、管理する機能。対話管理の方式としては、主としてコマンドやメニューを用いる。

表二 支援システムへの入力情報と入力方法

| 種別 | 入力情報 |
|----|--|
| 道 | 交差点 地図上での交差点のxy座標値、交差点番号 |
| 路 | リンク 道路区間の始点・終点の交差点番号 |
| 網 | リンク属性 道路区間別の属性情報(幅員、交通規制など) |
| 公 | 停留所 バス停留所・地下鉄駅の地図上でのxy座標値 |
| | 駅 駅・停留所番号 乗り換え時間(駅や停留所の規模により設定) |
| 系 | 系統 駅や停留所のつながり。循環・往復・変則系統を一方のループとして入力。 |
| 輸 | 送 輸送系統 (循環系統、往復系統、変則系統) |
| 運 | 行 運行頻度(時間帯毎の1時間あたりの運行本数) |
| 指 | 標 駅間や停留所間の所要時間(停留所間の所要時間はトリップレコーダによる実測データをもとにして算定) |
| 利 | 用者 OD 表 乗客調査による停留所間OD交通量 |

表—3 支援システムの具体的機能

| 計画作業 | システムの支援機能 | 具 体 的 内 容 | 使用システム | 備 考 |
|-------|------------------------------|---|--------------------|----------------------|
| データ入力 | 道路網入力支援 バス・鉄道網入力支援 | 道路リンクとその属性情報を座標入力装置を用いて対話的に入力する。 駅と停留所・鉄道とバスのルート・属性情報を座標入力装置を用いて対話的に入力する。 | サテライトのみ | サテライトのみの場合 |
| データ修正 | ネットワークデータの修正支援 属性データの修正支援 | 道路ネットワーク・鉄道とバスのルートの修正・更新をグラフィックディスプレイを用いて対話的に行う。 道路区間別や系統別の属性データの修正・更新を対話的に行う。 | サテライトとホスト | グラフィックディスプレイによるTSSS等 |
| 分析 | 最短路の探索 | 任意の停留所間(駅間)の最短路所要時間ルートとそのサービス特性を算定する。 | サテライトとホストあるいはホストのみ | 結果はデータベースに格納 |
| | 経路選択率の推定 | 任意の停留所間(駅間)の代替経路を判別回数により設定し、各経路の選択率をモデルにより推定する。 | | |
| | 利用者の配分計算 | 系統データ、OD交通量データをもとにOD別経路選択率、系統別・停留所間別(駅間別)利用者数を算定する。 | | |
| | 評価指標の計算 | 利用者側および運営者側の評価指標を算定する。 | | |
| データ表示 | 道路網の表示 | 道路網を表示し、また道路属性情報を重ねて表示する。 | サテライトとホストあるいはホストのみ | 結果はグラフィック装置に出力 |
| | 停留所別(駅別)情報の表示 | 交通網を表示し、また停留所(駅)ごとに算定された情報を重ねて表示する。 | | |
| | メッシュ別情報の表示 | 250mメッシュについて、最寄の停留所(駅)の情報をカラーや濃淡で表示する。 | | |
| | 系統別情報の表示 | 系統別に乗車密度の変化等をグラフ化して表示する。 | | |



図—4 モデル構築のための手順

おりである。また支援システムでは、先に述べた基本ソフトウェアとハードウェアをもとに、具体的には、表—3に示す、データの入力・修正、分析、およびデータの表示が可能である。これらの機能は、同表に記しているようにそれぞれホストとサテライトで機能分担される。また、これらの機能はコマンドとメニューを用いた対話方式によって容易に利用できるようになっている。

3. 非集計経路選択モデルの構築

ここでは、後に4. でシステムの適用対象地域とする都市域において各種調査を実施して、公共輸送機関利用者の経路選択モデルを構築する。

(1) モデル構築のための手順⁷⁾

公共輸送網上の任意のODペア間に複数の経路が存在する場合、本研究では、利用者が各経路を選択する確率を、次式に示すMultinomial Logit Model⁸⁾により推定することとする。

$$Pr_n(i) = \exp(V_{ni}) / \sum_{j \in C_n} \exp(V_{nj}) \dots \dots \dots (1)$$

$$V_{ni} = \sum_{k=1}^K \beta_k \cdot X_{nik} \dots \dots \dots (2)$$

- $Pr_n(i)$: 個人 n が経路 i を選択する確率
- V_{ni} : 経路 i の個人 n にとっての効用の確定項
- β_k : 第 k 番目の変数のパラメーター ($k=1 \sim K$)
- X_{nik} : 個人 n にとっての経路 i の第 k 番目の変数
- C_n : 個人 n にとって選択可能な経路の集合

図—4は、このようなモデルを構築するための手順を示しており、その概要は以下に述べるとおりである。

モデル式の推定に必要なデータは、以下の3項目、すなわち、①利用者個人の選択経路、②各個人が利用可能な代替経路とそのサービス水準、③各個人の社会経済属性、である。ここでは、これらのデータを得るために、2種の基礎調査をまず実施した。1つは、アンケート調査で、これは利用者にとって利用可能な代替経路の範囲

を知ることを目的としている。いま1つは、定期券の購入申請書を用いた調査で、定期券利用者の利用経路および個人属性のデータを入手することを目的としている。

次に、公共輸送網上で、ODペア間を連結している多数の経路の中から、アンケート調査の結果を用いて、利用者が選択する可能性のある経路を代替経路として選定する基準を作成した。

最後に、定期券利用状況調査の結果を用いて、通勤、通学トリップを対象にモデル式を推定した。なおこの際、各利用者の代替経路はアンケート調査より作成した基準を用いて設定した。

(2) 基礎調査の実施

以下では、実施した基礎調査の概要を述べる。

1) 定期券の利用状況調査

表—4に本調査の概要を示す。この調査では、定期券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。有効サンプル数は2654であり、そのうち通勤者が42%を占めている。またバスもしくは地下鉄のみを利用した者が全体の42%、バスと地下鉄を乗り継ぐ者が48%、

表—4 定期券の利用状況調査の概要

| | |
|----------|---|
| 調査対象 | 京都市の市営バス・地下鉄の定期券購入申請書 |
| サンプリング方法 | ・発行時間:昭和56年6月~7月 ・発行場所:全市11か所中 北部地域の2か所 ・利用経路:あらかじめ選定した10か所を端点に含むもの :直通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) 年令・性別・職業 |

表—5 アンケート調査の概要

| | |
|----------|---|
| 調査対象 | 京都市内14か所のバス停留周辺の住民 |
| サンプリング方法 | バス停を中心に半径200m以内に27件の住民をサンプリング、一件につき二人の被験者を指定。 |
| 調査期間 | 昭和56年12月9日~11日 |
| 調査方法 | 調査員による訪問留置法 |
| 有効データ数 | 327 (回収率88%) |
| 調査内容 | ・居住地より京都駅へ行く場合知っている経路 直通バス経路・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 ・上記各経路の想定利用頻度(10回中の何回利用するか) ・個人属性:年令・性別・年収・家族数等 |

残る 10% はバスを乗り継いでいた。

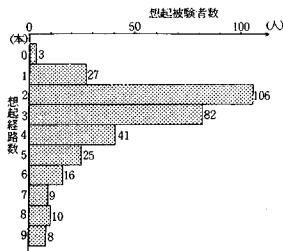
2) アンケート調査

表一5にアンケート調査の概要を示す。本調査では、利用者がどのような経路を代替経路として考えているかを調査する。このため、ここではまず、居住地から与えられた目的地まで、バスや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た。そして、それらの経路について、各経路を利用するとした場合の頻度、および被験者の個人属性についても調査した。サンプリングの方法は、表一5に示すとおりであり、有効サンプル数は327であった。アンケート調査結果より被験者が想起した経路（以後、想起経路という）の数を集計すると図一5のようになる。これによれば、約8割の者は1~4本の経路を想起しており、特に2本の経路を想起しているものが一番多いことがわかる。

(3) 代替経路の選定基準の作成

本研究で対象とする、バスや地下鉄などからなる都市内の公共輸送網では、あるODペア間を連結している経路（以後、連結経路という）は非常に多く存在する。この多数の経路のうち、利用者が代替経路と考えるのはごく一部と考えられる。ここでいう代替経路の選定基準とは、連結経路から代替経路の集合を抽出するための基準である。しかし、代替経路の範囲については、必ずしも明確な定義があるわけではない。本研究で行ったアンケート調査ではすでに述べたように、被験者に対して想起する経路を列挙させ、同時にそれらの経路について利用するとした場合の各経路の頻度（10回のうちそれぞれの経路を何回ずつ利用するか）を尋ねた。アンケート調査結果によると、すべての想起経路の集合に対して、1回以上の利用が想定された経路の集合はきわめて限定された経路のみで形成されており被験者には実際の選択経路として捉えられていた。このため潜在的な利用可能性を考えた代替経路集合の範囲を規定するものとしては想起経路集合を用いる方が妥当と考えた。

一方、多数の連結経路の中からある特定の経路が想起される要因としては大きくわけて次の3つが考えられる。



図一5 一人当たりの想起経路の分布

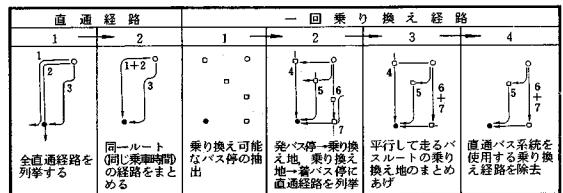
- ① 情報の有無（経路の存在を知っているか。）
- ② 物理的な制約条件（免許の有無など、特定の交通手段に対する利用の制限等。）
- ③ サービス水準の許容範囲（極端な迂回や、無意味な乗り換え等。）

ここで、アンケート調査では、通常よく利用されているODを対象としていることから①については完全情報を仮定し、また②についても公共輸送機関の利用に限定しているので個人によって利用上の物理的な制約は考えないものとする。したがって、③のどのようなサービス水準の範囲にあるかということが重要となる。

そこで、代替経路の設定基準は以下の方法で作成することとする。

<Step.1> アンケート調査で被験者が想起した経路のODペア間について、直通もしくは1回乗り換えまでの連結経路を図一6に示す方法によって電算機を用いてすべて列挙する。そして、それらの各経路のサービス特性を推定する。

<Step.2> 得られた連結経路群を被験者の想起経路の集合(C₁とする)と、それ以外の経路の集合(C₂とする)に分類し、この2つの集合を判別するための変数を抽出する。



- 注1) 2点間に直通経路がある場合は迂回経路も含めてすべてを列挙した。
- 注2) 乗り換え経路の場合は、まず乗り換え可能なバス停をすべて列挙し、乗り継ぐ2路線が並行しているときには乗り換え可能なバス本数が最も多くかつ最初のバスに一番長く乗るように乗り換え地点を設定した。

図一6 連結経路の列挙方法

表一6 判別分析の結果

| 変数 | 変数名 | 各変数のグループ別平均値 (下段: 想起されないルート) | 判別関数(注1) | | |
|---------------|---------|---------------------------------|--------------------------|------------------------|------------------------|
| | | | 関数1 | 関数2 | 関数3 |
| 乗り換え回数差 | S-TRNS | 0.9325 0.5083 | -2.972177 (-0.84454) | -1.46887 (-0.41235) | -1.37544 (-0.38620) |
| 総所要時間比 | R-TIME | 1.2667 1.5641 | -0.8660593 (-0.35081) | -0.39019 (-0.13821) | -0.29246 (-0.11688) |
| 待ち時間率の比 | R-RWAIT | 2.1086 1.5652 | -0.275075 (-0.19380) | -0.19913 (-0.14162) | -0.19896 (-0.13574) |
| 折れ曲り回数差 | S-FOLD | 2.6809 1.7819 | | | -0.13954 (-0.24136) |
| バスとバス乗り換えダミー | BBDMY | 0.8747 0.1368 | | -2.33397 (-0.77523) | -2.36480 (-0.78546) |
| 合成変数のグループ別平均値 | | 1 (想起されたルート) 2 (想起されないルート) | 1.52484 -0.14147 | 2.35142 -0.21816 | 2.42023 -0.22455 |
| ウィルスのA | 注2) | | 0.82250 | 0.66089 | 0.64785 |
| 適中率(%) | 注3) | | 71.2 | 86.3 | 87.0 |

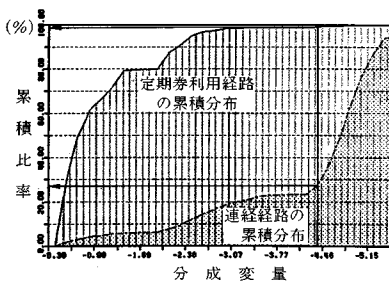
注1) 判別関数は、 $Z = \sum_{k=1}^K a_k x_k$ で表われ、この直線上に射影した両グループのデータが最も良く分離するような係数 $a_k (k=1, \dots, K)$ を定める。
 注2) ウィルスのAが低いほど判別関数の説明力が高い。
 注3) 適中率は、合成変数のグループ別平均値の中央値における判別結果にもとづき算出する。

<Step. 3> 抽出した変数を用いて、2つの集合 C_1 と C_2 を判別するための関数を推定する。そして得られた関数を用いて連結経路から想起経路を判別する基準を作成する。

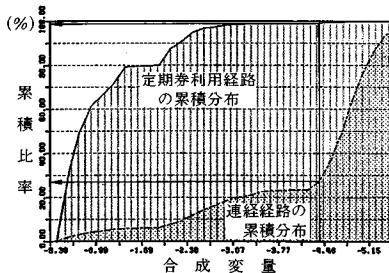
表一六は、このようにして判別分析を行った結果である。分析に用いる変数は、まず最小値との比や差をとることにより、各被験者の連結経路の中で相対的な値となるように基準化した。その後各変数間の関連を分析し、独立な変数を抽出した。また、表一六に示した判別関数の推定結果は、抽出した変数をウィルクスの λ を基準として選択投入した結果である。この中で最も判別結果が良好であるのは関数3であった。この関数3について、合成変数を横軸にとり、想起された経路群および連結経路群の累積分布を示したのが図一七である。想起された経路の90%タイル値および95%タイル値を図中に記しているが、これによるとたとえば、合成変量の値が-4.4以上の経路を抽出すると、想起経路の90%を含み連結経路の27%を占めている。そこで代替経路の設定は、このような図をもとに合成変量の値が一定値以上の経路を抽出するという方法を取ることにする。

(4) モデル式の推定

定期券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。



図一七 判別関数による想起経路の累積分布



図一八 判別関数による定期券利用経路の累積分布

1) 代替経路の設定

定期券の各サンプルについて、先に述べた方法により連結経路を列挙し、判別式3を用いて代替経路を設定する。図一八は、横軸に判別関数3の合成変量の値をとり、全利用者の連結経路の累積分布と、実際に利用された経路の累積分布を図示している。これによると、図一七の90%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、この基準は妥当と思われる。このとき、代替経路の総数は連結経路総数の27%を占め、全体の67%の利用者の代替経路は5本以下となっている。なお、この設定基準によって利用可能な代替経路が1本しか設定されなかったサンプルが455あったが、これらのサンプルは、代替経路の設定段階で選択経路が決定したと考え、後のモデル式の推定からは除くことにした。

2) 変数の選択

モデル式に導入する変数を選定する。まず、サービス変数は共通変数として、また個人属性は交通手段（ここでは地下鉄）固有変数として導入する。その他、地下鉄利用に関する固有ダミー変数を加える。このうち、サービス変数については、合計11変数を関連分析(相関分析)によりまず表一七に示すグループに分け、同一グループからは1つの変数を導入することにした。また個人属性に関する変数については、年令と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一八の脚注に示すダミー変数を作成した。

表一七 サービス特性変数の選定

- ・経路の長さに関連する変数(総所要時間, 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)
- ・折れ曲がり回数 ・表定速度 ・運賃

表一八 モデル式の推定結果

| 変数 | 種類 | パラメーター ()内はt値 | | | | | | |
|--------------|-------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--|
| | | 所要時間・非乗車時間率を用いたモデル | | | | 乗車・待ち時間を用いたモデル | | |
| | | 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 | | | | | -0.3628 (12.7) | -0.4159 (13.7) | |
| 非乗車時間率(%) | 共通 | | -0.0503 (5.2) | -0.0472 (5.8) | -0.0567 (6.3) | | | |
| 表定速度(分/分) | 共通 | 0.01795 (9.2) | 0.00598 (2.7) | 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 (4.4) | -2.9091 (20.9) | -4.0333 (14.9) | |
| 折れ曲がり回数(回) | 共通 | | | | | | -0.1417 (4.2) | |
| 地下鉄固有ダミー(注1) | 地下鉄固有 | | 2.1664 (11.7) | 2.3999 (12.3) | 2.9844 (11.4) | | 1.8307 (10.0) | |
| 年令ダミー(注2) | 地下鉄固有 | | | | | -0.8493 (1.7) | | |
| 通学目的ダミー(注3) | 地下鉄固有 | | | | | -0.8536 (4.5) | | |
| 変数 | | 3 | 5 | 6 | 7 | 4 | 4 | |
| F^2 尤度比指標 | | 0.4719 | 0.5027 | 0.5055 | 0.5062 | 0.4817 | 0.4946 | |
| 過剰率(最大確率による) | | 70.3 | 71.9 | 72.9 | 72.2 | 71.3 | 69.8 | |

注1) 地下鉄利用時に1, 利用しないとき0。
 注2) 年令60才以上または16才以下のとき1, その他のとき0。
 注3) 通学目的のとき1, その他のとき0。

3) パラメーターの推定

表—8 は、選定した変数を組み合わせ、モデル式のパラメーターを最尤法により推定⁶⁾した結果を示している。表中のモデル式は、パラメーターの符号や t 値および尤度比指標値 (ρ^2) により有意性の比較の高いもののみを列挙している。この結果、サービス変数のうち運賃は説明変数として有意ではなかった。そして、この表に示すように、モデルは変数の選び方により、所要時間をベースとしたモデルと乗車時間をベースとしたモデルに分けられるが、前者の方が全般的に ρ^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 T-4 は ρ^2 値が改善されず、個人属性導入のメリットはみられなかった。これは、通勤・通学のしかも公共輸送機関利用者に限定しているため個人属性によって交通行動に大きな差異がみられないことを示している。したがって、この中で最も有意なモデルは T-3 と考えられ、このモデルでは利用者が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。

またこのモデルでは、所要時間と乗り換え回数のウェイトが大きいことがわかる。そして乗り換え回数と時間の相対値をみると乗り換え 1 回が約 11 分に相当し比較的妥当な値を示している。しかし、本モデルでは、乗り換えによる抵抗が表現されてはいるものの、地下鉄ダミーも同時に大きなウェイトを占めている。このことは同じ乗り継ぎ経路でも、バス・バスの乗り継ぎ経路と地下鉄・バスの乗り継ぎ経路の間には、乗車時間や待ち時間といった変数以外に質的な差異があり、それを表わす変数の考慮が今後必要であることを意味している。

(5) モデルの現状再現性の検討

T-3 のモデルについて、モデル作成に用いた定期券調査の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継ぎ経路、バスとバスの乗り継ぎ経路の 3 種類の利用形態別に、実際の利用経路と、モデルにより推定した選択確率が最大となる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、バスまたバスと地下鉄の乗り継ぎ利用者では、70~80% の適中率を得ている。しかし、シェアの低いバスとバスの乗り継ぎ利用者では、50% と適中率が低くなっており、

表—9 利用形態別のモデルの適中率

| 実測 \ 推定 | 直通バス経路 | | バス・地下鉄経路 | | バス・バス経路 | | 実測の利用者数 |
|---------|---------------|---------------|---------------|--------------|--------------|----------------|---------|
| | 同じルート | 異なるルート | 同じルート | 異なるルート | 同じルート | 異なるルート | |
| 直通バス | 471 (68.9) | 107 (15.6) | 106 (15.5) | 0 (0.0) | 0 (0.0) | 684 (100) | |
| バス・地下鉄 | 146 (14.2) | 210 (78.7) | 66 (6.4) | 6 (0.6) | 6 (0.6) | 1,028 (100) | |
| バス・バス | 4 (2.6) | 49 (32.2) | 76 (50.0) | 23 (15.1) | 152 (100) | 105 (100) | |
| 推定利用者数 | 728 | | 1,031 | | 1,051 | | 1,864 |

注) □ 内は、実測のルートと推定されたルートとが一致したサンプル数。
() 内は、実測のルートがいずれのルートに推定されたかを示す比率。

その理由として、これらの利用者については、他に類似した経路が多く存在するためと考えられる。

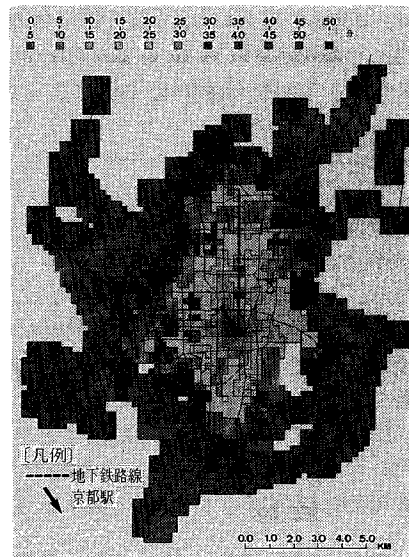
4. 都市内の公共輸送網計画への適用例

本研究では、開発したシステムを京都市内の地下鉄とバスからなる公共輸送網(市営交通機関のみ)を例に適用した。具体的には、午前中のピーク時 2 時間について、地下鉄の開通前と開通後の両者の輸送網を比較した。以下では、支援システムによって得られる出力例を用いて、これらの適用結果を説明する。

(1) 輸送網における交通量の推定

交通量の推定は以下の手順に従って行った。まず、ネットワーク上のすべての OD 間について連結経路を列挙し、それらの連結経路についてサービス特性を推定した。図—9 は、推定したサービス特性のうち所要時間を用いて、地下鉄開通後における、市内の各メッシュ(250 m メッシュ)から京都駅へ至る場合の最短所要時間を 5 分単位で色分けして図示している。これによれば、全体として、京都駅以南よりも地下鉄路線のある京都駅以北で所要時間が短くなっていることがわかる。

次に、推定したこれらのサービス水準と先に求めた判別式(図—7 脚注)を用いて、OD ペアごとに連結経路から利用者の代替経路を抽出した。さらに、この代替経



図—9 京都駅への最短所要時間(地下鉄開通後)

表—10 利用形態別のシェア

| 利用形態 | 開通前 | 開通後 | 開通前後の差 |
|----------|-------|-------|---------|
| 直通バス経路 | 64.10 | 52.03 | -12.07▼ |
| 直通地下鉄経路 | — | 3.69 | 3.69△ |
| バス・地下鉄経路 | — | 9.44 | 9.44△ |
| バス・バス経路 | 35.90 | 34.84 | -1.06▼ |

(凡例) △ 改善, ▼ 減少

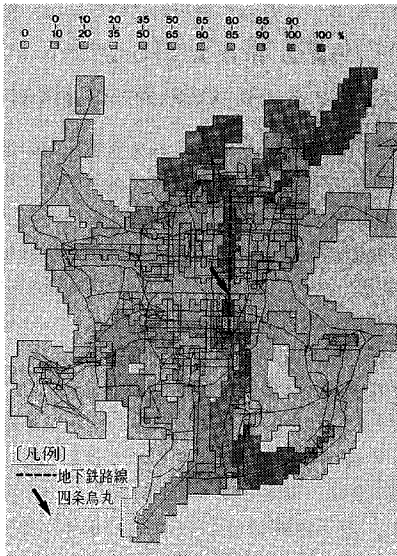


図-10 地下鉄利用経路の選択確率

路に対して、先のモデル T-3 (表-8) を適用して、各代替経路の選択確率を求めた。図-10 は、このうち特に、市内の各メッシュから都心へ行く際に、地下鉄を利用する確率 (バスと地下鉄を乗り継ぐ場合を含む) を色分けして図示したものである。

最後に、利用者行動の集計を行った。各代替経路の選択確率は、推定したモデルによれば、OD ペア間のサービス特性だけで決定されたので、ある OD ペア間 XY における経路 j の配分交通量は、次式によって得られる。

$$V_{jXY} = P_{rXY}(j) \times OD_{XY} \dots \dots \dots (3)$$

V_{jXY} : XY 間の経路 j の OD 交通量

$P_{rXY}(j)$: XY 間で経路 j を選択する確率

OD_{XY} : XY 間の OD 交通量

表-10 は、推定結果から利用形態別のシェアを示したものである。これによれば、地下鉄の利用率はバスとの乗り継ぎ利用を含めて 13.1% となり、地下鉄開通後の乗り継ぎ利用は、開通前を 8.38% 上回る 44.28% と推定された。しかし、これらの推定結果については、本研究で用いた OD 需要のデータがもつ制約のため、実態との適合度を検討することは困難であった。すなわち、

表-11 利用者からみた指標値の算定結果

| 指 標 | 開 通 前 | 開 通 後 | 開通前後の差 | |
|--------------------|----------|------------|------------|-----------|
| 所 要 時 間 (分) | 総 計 | 2,987,507 | 2,840,570 | -146,937△ |
| | 1トリップあたり | 26,753 | 25,890 | -0.863△ |
| 取 り 換 え 回 数 (回) | 総 計 | 40,092 | 48,583 | 8,491▼ |
| | 1トリップあたり | 0.359 | 0.443 | 0.084▼ |
| 運 賃 (円) | 総 計 | 19,720,768 | 19,911,866 | 191,098▼ |
| | 1トリップあたり | 176.60 | 181.48 | 4.88▼ |
| 非 乗 車 時 間 (分) | 総 計 | 519,352 | 491,095 | -28,257△ |
| | 1トリップあたり | 4.651 | 4.476 | -0.175△ |

(凡例) △改善、▼悪化

今回用いた OD 需要は市営の公共輸送機関について、地下鉄開通前に調査されたものであるが、ここでは開通前後で OD 需要は一定と仮定している。このため、地下鉄開通による市営以外の他の公共輸送機関からの転換交通量や誘発交通量を考慮できなかった。

(2) 利用者からみた比較検討結果

表-11 によれば、地下鉄の利用やバスの運行頻度の増加により所要時間は減少傾向にあるが、逆に乗り換え回数、運賃は増加している。また、運行頻度の増加に伴って非乗車時間に減少がみられる。

図-11, 12 は、利用者側の評価指標である所要時間、乗り換え回数を一例として取り上げ、地下鉄開通前後におけるそれらの比較結果を図示している。すなわち、バス停留所ごとに、そのバス停留所を起点とする利用者について、地下鉄開通前後における所要時間と乗り換え回数の平均値の差を円の大きさと表わしている。図中では、

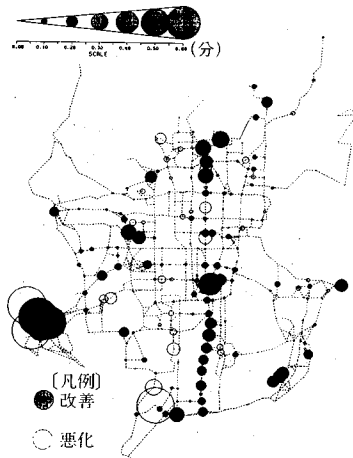


図-11 バス停別平均所要時間

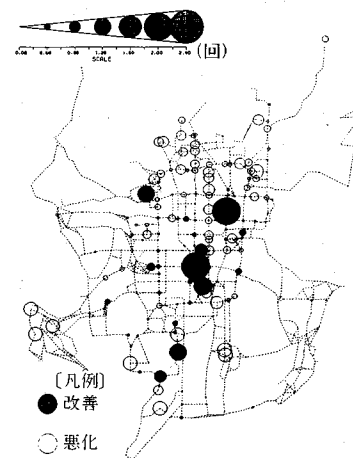
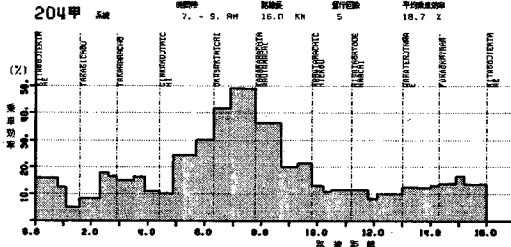


図-12 バス停別平均乗り換え回数

表一12 運営者からみた指標値の算定結果

| 指 標 | 開 通 前 | 開 通 後 | 開通前後の差 |
|------------------------|--------|--------|---------|
| 運行の平均運行所要時間 (分) | 52.247 | 50.341 | -1.906△ |
| 定時性指標 平均基準速度 (km/h) | 14.985 | 15.312 | +0.327△ |
| 平均乗客数 (人) | 139.7 | 137.6 | -2.1 ▼ |
| 運行効率 1キロあたり乗客数 (人) | 6.50 | 6.19 | -0.31 ▼ |
| 平均乗車効率 (人) | 31.85 | 29.87 | -1.99 ▼ |

【凡例】△ 改善、▼ 悪化
注) 上記指標は、平均乗車効率を除いてすべて1運行あたりの値である。



図一13 系統別の乗車効率

黒い円が開通後改善したことを、また白い円が悪化したことを示す。これらの図によれば、地下鉄の開通により、市の北部地域では所要時間は短縮しているが乗り換え回数は増加しており、また地下鉄駅間の地域ではサービス水準の低下がみられる。

(3) 運営者からみた比較検討結果

表一12に運営者の評価指標値の算定結果を示す。まず、1運行当たりの平均所要時間については、運行の定時性を確保するうえでできるだけ短いことが望ましいが、開通後の系統網では系統長の短縮や混雑区間でのバスから地下鉄への移行による効果が現われ低下していることがわかる。また、この結果バス1運行当たり平均表定速度も上昇している。

しかし、1運行当たり平均乗客数は、利用者の多い路線で乗客が地下鉄に移行し、同時にバスの運行頻度が全体的に増加したため減少している。さらに、収益性を示す指標と考えられる1運行1キロ当たりの乗客数は、開通前に比べ低下がみられる。

乗車効率は、バス1運行に平均して、乗車定員の何%の人が乗車しているかを示し、運行の効率性を示す指標となる。開通後は、運行回数の増加や、利用者の地下鉄への移行などにより、乗車効率は低下している。

また、図一13は、運営者側指標として乗車効率を取り上げ、一例としてあるバス系統についてバス停留所区間ごとの算定結果を図示したものである。このような図を用いれば、異なる系統間で乗車効率の大小を比較できるとともに、系統ごとにどのバス停留所区間で乗車効率が高いか、また低いかを知ることができる。

5. おわりに

本研究は、都市内の公共輸送網を計画するための1つのシステムを提案したものであり、このシステムでは、

ネットワーク上での利用者の経路選択行動を予測するために非集計経路選択モデルを構築し、さらに利用者行動に基づき利用者や運営者の観点から輸送網を評価する方法を示した。また同時に、モデルの構築作業や計画作業を効率的かつ合理的に行うために、輸送網計画を支援する電算機システムを開発した。そして、開発した計画システムを現実の都市域における公共輸送網に適用した。この結果、以下の成果を得ることができた。

(1) 非集計タイプの経路選択モデルを構築したり適用するうえで必要な代替経路を設定するために、以下に述べる1つの方法を提案した。すなわち、まず利用者へのアンケート調査を行い、いくつかのODについて利用者が想起する経路を調べた。次にそれらのODについて、OD間を連結している経路を電算機により一定の基準のもとで求め、これを先の想起経路とそれ以外の経路に分け、各経路のサービス水準を要因とした判別分析を行った。そして推定した判別関数を用いて連結経路から代替経路を設定するための基準を求めた。

(2) バスや地下鉄の定期券による利用状況を調査し、通勤、通学目的のトリップを対象として最尤法によりモデル式を推定した。この際、各利用者の代替経路の設定は(1)で求めた基準を用いた。最も有意なモデルは、所要時間、非乗車時間、乗り換え回数、折れ曲がり回数、高速鉄道ダミー変数を説明変数としたものであった。モデル式の中には、地下鉄やバスの乗り換え行動に関する要因が経路選択要因として組み込まれているので、多モードの輸送網計画を検討するうえで有用なモデルであった。また、作成した経路選択モデルをもとに利用者行動を推定し、この結果に基づいて輸送網を利用者、運営者からみて評価する方法を示した。つまり、それぞれの立場からみた評価指標を明らかにし、対象地域全体の評価値と同時に地域内での評価値の空間分布等を図示して分析する手法を示した。

(3) 電算機による計画作業の支援内容を明らかにし、4つの基本的機能からなる電算機支援システムを構築した。また具体的なハードウェア構成についても検討した。このような支援システムの活用により、比較的大規模なネットワーク上で任意のODペアについて、連結経路の列挙や各経路のサービス水準の推定を効率的に行えるようにした。このことが、先に作成した判別関数の利用とともに、モデルの構築を容易にし、その適用時の操作性を向上させるのに大きく役立った。またケーススタディーを通じて、各種評価結果とともに、予測過程で求めたサービス水準の推定値や代替経路の選択確率などの中間情報を、カラー表示等を用いてさまざまな集計単位で図化出力する方法を検討した。これによって、分析結果の容易な理解やその信頼性の向上にとって有効な

ことを示した。

最後に、残された問題点と今後の課題を述べる。

(1) 構築した非集計経路選択モデルに関して、以下の事項が挙げられる。

① アンケート調査による代替経路の抽出方法の妥当性や、代替経路設定時の判別基準について検討する必要がある。

② 今回は、バスや地下鉄によるすべての経路を同時選択するモデルを作成したが、類似経路の存在や利用者の意志決定構造を考慮することが必要である。

③ 直通経路、乗り継ぎ経路の各選択経路間で選択数に偏りがみられるため、たとえば選択数が等しくなるように再サンプリングしたデータを用いてモデルを推定することが考えられる。

(2) システムの適用例では、本研究で用いたOD需要のデータがもつ制約のため、利用者流動の推定結果には精度上の問題が残されている。今後は、公共輸送機関と個別輸送機関の分担関係も含めた交通需要の予測モデルをシステムに組み込むことによって、推定精度を高めていくことが必要である。

参 考 文 献

- 1) たとえば、森地・岩井：バス輸送改善のための基礎的考察，土木学会論文報告集，第238号，pp.61～68，1975.6.

- 枝村・森津：最適バス路線網構成システム，土木学会論文報告集，第300号，pp.95～107，1980.8.
- 2) 天野・銭谷・近東・都市街路網におけるバス系統の設定計画モデルに関する研究，土木学会論文報告集，第325号，pp.143～154，1982.9.
- 3) 森地 茂：通勤鉄道ネットワーク決定方法に関する研究，土木学会論文報告集，第254号，pp.73～80，1976.10.
- 4) たとえば，中村・林・宮本：広域都市圏土地利用交通分析システム，土木学会論文報告集，第335号，pp.141～154，1983.7.
- 5) たとえば，土木計画学研究委員会編：非集計行動モデルの理論と実際，計画学講習会テキスト，1984.11.
- 6) 小谷通泰：都市地域計画・交通計画の分野における電算機支援システムについて，第6回土木計画学研究・講演集，pp.27～33，1984.1.
- 7) 山中・天野・小谷：非集計経路選択モデルを導入したバス系統網計画システムに関する研究，第5回土木計画学研究発表会講演集，pp.462～467，1983.1.
- 8) たとえば，Domencich, T.A. and Mc-Fadden, D. : Urban Travel Demand—A Behavioral Analysis, Chapter 5, North Holland, 1975.
Ben-Akiva, M. and Lerman, S. : Discrete Choice Analysis, Theory and Application to Travel Demand, MIT Press, pp.59～129, 1985.
前掲5)
- 9) Amano, Odani, Yamanaka : A Computer-Aided Planning System For Public Transportation Networks, Proc. of IFAC 9th Triennial World Congress, 1984.7. (1985.8.12・受付)