

報告番号 第 1299 号

需要変動を考慮した
バス輸送計画策定法に関する基礎的研究

昭和 60 年 12 月

溝 上 章 志

図・本館

需要変動を考慮した
バス輸送計画策定法に関する基礎的研究

昭和 60 年 12 月



溝 上 章 志

A Study on Bus Transport Planning Method
with Elastic Demand

by Syoshi MIZOKAMI

Synopsis

Bus would be the only public transport device which can provide services flexibly responding to the changes of spatial demand distribution. However, methods for forecasting bus demand, which is an inevitable information for bus service planning, has not yet been established. In the practical planning, the key factors such as routes and their frequencies have been determined depending on only the accumulated experiences of individual planners. Hence, it seems that the bus transport has not played its essential role in urban public transport systems.

From this point of view, this paper aims to develop a forecasting method of bus demand and a systematic planning method for bus services. The contents of the paper are summarized as follows:

Chapter 1 presents the aim of this study on bus transport planning with elastic demand.

Chapter 2 discusses a forecasting model for equilibrium demand in a multi-modal network of car and bus transport with elastic modal split and its practical application method. In this model, the equilibrium is formulated as a variational inequality so as to represent different norms of mode and route choices in the first step, which cannot be treated by Beckmann-type model. And then the formulation is transformed as a Beckmann-type model to be suitable for numerical calculation. The model can simultaneously determine weights of mode choice factors together with equilibrium flows by mode, using observable mode choice demand data. In order to verify this method, we apply it to a real multi-modal urban road network in city of Toyota. The goodness of fit of calculated demand to actual one, stability of parameters as well as tractability of the model for forecasting were tested with a good result.

In chapter 3, we develop a model which determines bus service levels considering users' travel behavior in multi-modal road network. This model is formulated as a 2-levels Stackelberg planning problem. The optimal solutions of the sub-optimization problems represent the network equilibrium conditions by mode (car and bus) under a given bus service level. The solutions of the main optimization problem are bus service levels so as

to maximize the users' benefit in the urban transport system under the traffic equilibrium conditions by mode. In order to solve this model, we first prove the convexity of sub-optimization problems and then replace them with their Kuhn-Tucker's conditions. We also develop an algorithm to search the optimal solutions. In a model network, the applicability of this model is verified.

Chapter 4 discusses disaggregate bus demand models for planning of rail-feeder bus services; Firstly we carry out the empirical analysis of mode-switching behavior by a disaggregate model using traveler's intention data. Parallely mode-choice behavior is analysed by another model using observed cross-section data of modal choice. Having compared, mode-switching models are proved to be more effective than mode-choice models in order to forecast rail-feeder bus demand in a short range bus service planning. Secondly, we develop a planning system of rail-feeder bus routes and their frequencies which incorporates the disaggregate bus demand models for mode-switching. By applying the model to an area where rail-feeder bus service is provided, the properties of the disaggregate models for mode-switching are examined and applicability of the rail-feeder bus transport planning system are verified.

Finally in chapter 5, the results obtained from this study and the problems remained for the future research are summarized as the conclusion.

序

都市における公共交通輸送体系の中で、バスは鉄道に比較すると容量が小さく速度も遅いが、路線網や運行速度の設定が容易であり、計画対象地域の道路や需要の実情に応じた面的なサービスを供給できる唯一の公共交通機関として重要な輸送機能を分担している。しかし、バス輸送需要を正確に予測するための有効な手法は今だ開発されていない。また、バス輸送サービス計画は従来、経験や勘にたよってその策定がなされており、路線網や運行頻度は実際の需要に対して後追的に決定されているのが実情である。現在、バス輸送はその本来的な輸送機能を十分にはたすまでには至っていないといえよう。このような状況の中で最適なバス輸送サービス設計とまではいかないまでも、より合理的なバス輸送サービス計画をシステムティックに見出す科学的な計画策定手法、およびバス需要予測手法が開発されることが強く望まれている。

本研究では以上のような問題意識から、都心への幹線輸送機能や鉄道駅までの端末輸送機能などの各バス路線網の輸送機能に応じたバス輸送サービス計画の策定方法と、バス輸送サービスの変化に伴うバス分担需要変動をバス輸送サービス計画問題で考慮する方法とに着目し、分担需要変動型交通均衡理論に基づくバス需要予測手法、均衡交通需要変動を考慮した最適バス輸送計画策定手法、非集計手段転換モデルを需要関数とした端末バス輸送計画の策定手法の開発を行ってきた。さらに、これらの手法をバス路線網を有する実際の道路網に適用した結果、比較的適用性の高いものであることが認められ、計画対象とするバス輸送ネットワークの輸送機能に応じた計画策定アプローチとバス需要予測手法の効果的な組み合わせを見出すという当初の目的をある程度達成できた。本研究の成果が交通需要分析やバス輸送計画に何等かの貢献をし、さらに今後の研究の発展方向を示唆するものになれば本望である。

本研究を遂行するに当っては、多くの方々から御指導ならびに御援助を賜った。まず、始終、御指導と御便撻をいただいた名古屋大学工学部河上省吾教授に対して深甚なる謝意を表す。本テーマをもとに研究を開始して以来今日まで、同教授の有益な御示唆を受け、その研究姿勢に接することができたことは、筆者にとって大きな幸せであった。同教授の存在なくしてはこの研究は完成しえなかったと思われる。同様に、本研究の内容について貴重なコメントをいただいた名古屋大学工学部高木不折教授、名古屋大学工学部林良嗣助教授、名古屋大学工学部広島康裕助手にも心から感謝の意を表す。また、始終暖かい御助言と御鞭撻を頂いた名古屋工業大学工学部松井寛教授に厚く御礼申しあげる次第である。以上の方々以外の多くの学兄より論文や討論を通して多くのことを学んだことが本研究の遂行に当たっての基礎と刺激になったことは言うまでもない。ここに併せて深く感謝する次第である。

昭和60年12月

溝上章志

目 次

第1章 序 論	1
1.1 本研究の目的と意義	1
1.2 本研究の内容と構成	6
1.3 交通需要分析における交通均衡理論	8
1.3.1 交通ネットワークの用語とその表記法	8
1.3.2 需要変動型交通均衡問題	12
参考文献	13
第2章 分担需要変動型交通均衡理論による均衡交通需要の予測手法	14
2.1 概説	14
2.2 分担需要変動型交通均衡モデル	17
2.2.1 変数、およびフローに関する定義	17
2.2.2 手段選択、経路選択に関する交通均衡の定義	19
2.2.3 Variational Inequality による分担需要変動型交通均衡モデルの定式化	20
(1) 均衡モデルの定式化	20
(2) 解の一意性	22
2.2.4 Beckmann 型最適化問題への変換	25
2.3 手段選択関数のパラメータと均衡交通量の同時推定法	27
2.3.1 従来の均衡交通需要予測プロセス	27
2.3.2 手段選択関数パラメータと均衡交通量の同時推定	28
2.4 解法とモデルの感度分析	30
2.4.1 Frank-Wolfe法を用いた実用的な解法	30
2.4.2 モデルの感度分析	33
2.5 都市圏への適用事例	38
2.5.1 分析対象地域とネットワーク	38
2.5.2 同時推定モデルの実用性の検討	40
2.6 まとめ	44
参考文献	46

第3章	分担需要変動型交通均衡を考慮した最適バス輸送計画策定手法	48
3.1	概説	48
3.2	多種モード混合交通均衡問題	50
3.2.1	走行コストに関する定義	50
3.2.2	各モード利用者の経路選択規範の定義	52
3.3	便益の測定方法とシステムの評価基準	54
3.3.1	Modal Demand モデル	54
3.3.2	バス輸送システムの便益測定法とシステムの評価基準	56
3.4	分担需要変動型交通均衡を考慮した最適バス輸送計画策定法	58
3.4.1	最適バス輸送計画問題の定式化	58
3.4.2	Stackelberg 計画問題	61
3.4.3	下位問題の凸性とモデルの再定式化	62
3.5	解法の開発とモデルの適用例	65
3.5.1	解法のアルゴリズム	65
3.5.2	モデルの適用例	68
3.6	まとめ	74
	参考文献	76
第4章	非集計交通行動モデルを用いた鉄道端末バス輸送計画の策定手法	78
4.1	概説	78
4.2	鉄道端末バス輸送計画のための調査とその分析	81
4.2.1	調査の概要	81
4.2.2	集計分析の結果とその考察	84
4.3	非集計交通行動モデルを用いたバス利用需要予測モデル	88
4.3.1	モデルの概要とその特徴	88
4.3.2	交通手段選択型モデル	90
	(1) データの作成と選択枝の決定	90
	(2) モデルのキャリブレーション	91
4.3.3	交通手段転換型モデル	98
	(1) 転換モデル構築のためのデータ作成法	98
	(2) 転換モデルの定式化	99

(3) モデルのキャリブレーション	99
4.3.4 モデル相互の比較、検討	102
4.4 鉄道端末バス輸送計画策定システム	104
4.4.1 計画策定システムの概要	104
4.4.2 バス系統網代替案に対するバス利用者数の予測プロセス	106
4.4.3 本バス利用需要予測手法の適合性の検討	112
4.5 鉄道端末バス輸送計画策定システムの適用例	114
4.5.1 バス系統網代替案とその比較評価	114
4.5.2 バス運行頻度の決定	119
4.6 まとめ	121
参考文献	123
第5章 結 論	125
5.1 研究成果の要約	125
5.2 今後の課題と展望	130

第1章 序論

1.1 本研究の目的と意義

公共交通機関優先の立場にたった総合交通体系確立の方針が都市交通計画策定の基本原則として打ちだされてから既に久しい。近年では、省エネルギーや環境保全などの視点からも、バスや鉄道、地下鉄、その他のマストランジットのような公共交通機関の輸送機能を見直し、その整備拡充をはかるべきであるという声が高まっている。

これらの公共交通機関は、それぞれの能力と特性を生かしつつ、相互に有機的一体的にきめ細かい役割分担を行って公共交通輸送網を形成する必要がある。そのなかでバスは鉄道や地下鉄に比較して容量が小さく速度は遅いが、路線網の設定が容易であり、対象地域の実状や需要に応じた面的なサービスを供給できる唯一の公共交通機関である。たとえば名古屋市は公共交通機関の輸送体系とバスの役割を以下のように規定している（名古屋市交通問題調査会，1981）。

- ① 鉄道、および地下鉄は、基幹的交通機関としてそれぞれ地域的な分担を行いつつ基幹路線網を形成し、線的な交通に対処する。
- ② バスは基幹路線網との競争を避け、市民の住居、あるいは都市施設と基幹路線とをきめ細かく結び、面的な交通に対処する。
- ③ バスのなかでも一部の路線は、基幹バス、幹線バスとして基幹路線網の一部を構成する機能を持たせるものとする。

このようなバス輸送に対する新たな方針に基づく整備拡充にもかかわらず、名古屋市営バスの利用需要は1964年をピークにして減少してきている（図1.1参照）。バス利用需要減少の主たる原因は、マイカーの増加に起因する道路混雑による運行効率の低下、特に走行速度の低下や定時性の確保の困難さにより、バスサービス水準が他の手段に比較して相対的に悪化したことにあると考えられる。またそれと同時に、①～③のように規定されたバスの輸送機能を効果的に達成するようなバス輸送計画の策定が実際にはなされていないことにもその原因があるといえよう。

バス輸送計画問題（ここでは、バス系統網と各系統の運行頻度の設定計画に限定して考える）は、数理的には、バス系統網については0-1整数、運行頻度については実数を解にもつ混合整数計画問題であり、これら2つの決定項目を同時に解く効率的な解法は未だに開発されていない。また、代替案の評価も多岐の項目にわたってなされるべき問題である。そのため、従来、バス輸送計画を行うのに、主として以下の5つのアプローチが採用されてきている。

- (1) Manual: バス輸送計画策定者の直観と経験に頼って、バスネットワークとその運行頻度を手作業で設定する方法。
- (2) Market Analysis Project: バス利用OD調査や家庭訪問調査による現況データと照合させなが

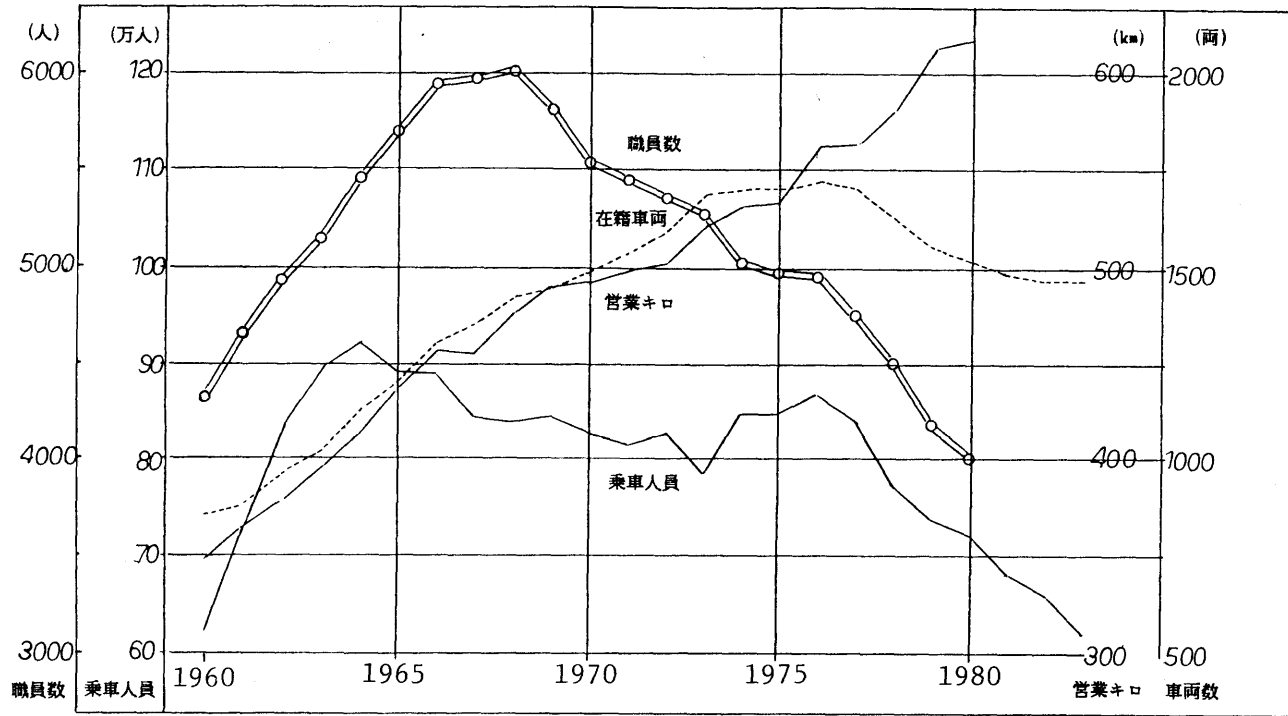


図1.1 名古屋市営バスの利用需要の推移

らバス輸送計画代替案の設定を行うものの、それらは手作業でなされる。

(3) Systems Analysis: バス系統網とその運行頻度代替案は計画策定者によって設定されるが、それらの代替案は計算機を用いた評価モデルによって分析されるような、計算機を基礎とした計画策定システム。

(4) Systems Analysis with Interactive Graphics: より多くの計画代替案を短期間のうちに効率的に比較、評価するために、Systems Analysis の結果の出力や分析に必要なデータの入力媒体として、Interactive な Graphics システムを用いる計画策定システム。

(5) Mathematical: 最適なバスネットワークを構成するために、数学的技術、特にORの技術を援用する計画策定システム。

これらのアプローチの利点、欠点などについて、Chua(1984)は表1.1に示すように要約している。これらのアプローチのなかで我々が興味を持つのは(3)~(5)のアプローチであり、特に、(5)に示したMathematicalなアプローチは、将来のいつの日か、より現実的でかつ大規模なバス輸送計画問題に対しても論理的、数学的アプローチならではの貢献をすると考えられる。

バス輸送計画策定の際に、上記のいかなるアプローチを採用したとしても重要になるのは、バス輸送サービスの変化に対応する需要変動をどのように計画策定システムのなかで取扱うかという問題である。バス輸送計画策定システムの中で需要変動を考慮する方法としては以下に示すような方法がある。

(1) 固定型需要: バス輸送サービスの変化にかかわらず、現況のバス利用OD表をそのまま使用方法(森地・岩井・鈴木,1975; 枝村・森津・松田・土井,1980; 天野・銭谷・近東,1983)。

(2) 集計確率分布型需要: バス利用需要をあらかじめ確率分布関数で与えておくか、バス利用需要を需要関数を通して確率変数で与えられる発生・集中ゾーン特性やゾーン間サービス特性の関数である確率変数と考える方法(Westin,1974; Chatterjee and Sinka,1976; 河上・溝上,1984)。

(3) 非集計型需要: 個人の交通行動に関するクロスセクション実態データ、あるいは意識調査による意識データを用いて、非集計型交通行動モデルにより個人の行動確率に基づいた需要関数を同定しておく方法。

(4) 需要変動型均衡交通需要: 運行頻度などのサービス供給水準や交通需要に依存するサービス要因の水準と独立した需要を仮定するのではなく、バス輸送サービス計画策定者のサービス供給水準や設定された道路網などによって決まる交通パフォーマンス曲線とバス利用需要曲線との交点で均衡交通需要と均衡サービス水準を決定する方法。

これらの方法のなかで、同一道路ネットワーク上を自動車と共用するようなバス輸送計画を行う場合、我々が最も興味を抱くのは、(4)の需要変動型均衡交通需要としての需要の取扱いである。その理由は、バス輸送施設投資による交通需要の予測と効果の評価に当って、(1)~(3)の方法が次のよう

表 1. 1 バス輸送計画のアプローチとその特徴

アプローチ	利点	欠点	利用対象
Manual	<ul style="list-style-type: none"> ・ 簡便 ・ 安価 ・ 専門的な技術をほとんど必要としない 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 当面の問題だけに対処 ・ 入力として多くのデータを必要とする ・ 総合的な計画を策定するのが困難 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 小都市域 ・ 小規模バス系統 ・ 簡単なバスネットワーク ・ 極めて短期の計画 ・ ネットワークの微調整計画
Market Analysis Project	<ul style="list-style-type: none"> ・ システムテック ・ 総合的 ・ 比較的安価 	<ul style="list-style-type: none"> ・ Systems Analysisに類似したアプローチに過ぎない ・ 大規模都市ネットワークには非実用的 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 小都市域 ・ バスの運用計画 ・ 郊外部、または都市間ネットワーク ・ 小規模バスネットワーク
Systems Analysis	<ul style="list-style-type: none"> ・ システムテック ・ 比較的簡便 ・ それほど高価にはならない ・ 多目的評価が可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 検討できる代替案の数は多くない ・ 計画決定のための期間が長期化する ・ 計画策定の結果の出力が膨大になる ・ 現況ネットワークに結果が依存しやすい ・ 膨大な入力データを必要とする 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 中、大都市域 ・ 中期運用計画 ・ 複雑なネットワークに対処できる ・ 多くのバス系統網 ・ 長期の概念的の基本計画 ・ それほど詳細ではない計画
Systems Analysis with Interactive Graphics	<ul style="list-style-type: none"> ・ システムテック ・ 多くの代替案の検討が可能 ・ 計画策定結果の表現に優れている ・ 計算結果の出力が少なくて済む 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 非常に高価になる ・ Systems Analysisに比べて幾分、総合的でなくなる ・ 現況ネットワークに結果が依存しやすい ・ マンマシンシステムを用いることにより、検出できない問題点が内在する恐れがある 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 使用されるモデルによって、短期から長期まで、小都市域から大都市域までの計画に適用可能 ・ 比較的複雑なバスネットワーク
Mathematical	<ul style="list-style-type: none"> ・ システムテック ・ 多くの代替案を検討できる ・ 計画決定が瞬時にできる ・ 現況のバスシステムに依存せずに ・ 計画決定ができる ・ 最適システムを作成可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 高価になる場合もある ・ Systems Analysisほどは総合的ではない ・ かなり計算が複雑で難易度が高い ・ 技法については開発の途中にある 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 短、中期の計画 ・ 小、中規模の都市域 ・ 全く新規のバスネットワークに適用可 ・ バスシステム計画

注) 出典: T.A.Chua(1981)

な問題点を持っているためである。交通サービス変化に伴う交通需要は、バス輸送サービス供給水準や道路網の容量などによって決定される交通パフォーマンス曲線と、人がそのサービス水準であれば交通を行っても良いと考える総トリップ数の軌跡である需要曲線との均衡点で決定されるはずである。この点は、人が交通を行うに当たっての支払い意志額に相当するコストを示し、また、その額までなら支払っても交通を行うという人の総和、つまり交通需要量を表すものである。それにもかかわらず、(1)～(3)の需要予測手法では、バス輸送サービス変化後のサービス水準があらかじめ判明していなければその需要量を求めることができない。したがって、(1)～(3)の需要予測手法を用いた場合には、バス輸送施設の投資効果も、交通需要と同様にサービス供給水準や道路網容量などによって決定される交通パフォーマンス特性値とは全く無関係の値として求められてしまう。そのため、正確な交通需要の予測と効果の測定ができない。以上のような理由から、需要変動型均衡交通需要を内的に考慮できるバス輸送計画策定システムは、(1)～(3)の需要予測手法を導入した計画策定システムに比べてはるかに大きな説得力を持つ計画策定システムとなりうる。

しかし、需要変動型交通均衡問題はそれ自体が極めて難度の高い研究課題であり、対象とする道路ネットワークの規模や競合する交通手段の走行特性などの要因によっては、バス輸送計画策定システムのなかで需要変動型交通均衡問題を内的に考慮する有用性が逆に失われる場合もある。また、計画対象バスネットワークが地域全体の公共交通輸送体系の中ではたす役割によっては、バス利用需要を規定する要因として、交通需要に依存する交通パフォーマンス要因以外の要因、たとえば定時性や乗り換え回数などのサービス要因や個人の社会経済的特性などの詳細で多様な要因が交通パフォーマンス要因に卓越する場合もあると考えられる。そのような場合には、需要変動型交通均衡を考慮することなく、多様なサービス要因の変化に対する感度が高いと言われている非集計型需要予測モデルを内在する計画策定システムを適用した方が有効であると考えられる。

以上のような認識の上にならば、本研究ではバス需要予測手法とバス輸送計画策定手法の開発に関して以下のような視点から理論的研究、実証的研究、実用的なモデル開発に関する研究を行っている。

- ① 需要変動型交通均衡理論に基づく交通需要予測手法の確立と、実際の都市交通需要分析への適用可能性の検証を行う。
- ② 分担需要変動型交通均衡を考慮した最適バス輸送計画策定手法の開発と、その実用可能性の検討を行う。
- ③ 意識データを用いた非集計手段転換モデルの鉄道端末バス需要関数としての適用可能性と、それを需要関数として組込んだ鉄道端末バス輸送計画の策定システムの開発を行う。

以上の検討結果から、計画の対象となるバスネットワークの輸送機能に応じた計画策定アプローチ法と計画策定時の需要の考慮の仕方の組み合わせを見出すことを最終的な目的としている。

1. 2 本研究の内容と構成

本研究は第1章序論、第2章から第4章の本論、および第5章結論の5つの章で構成されている。以下に本論部分の内容を順を追って概説する。

まず第2章においては、バスと自動車が共用する道路ネットワークにおける分担需要変動型均衡交通需要の推定手法について検討を行っている。そのなかで2手段分担需要変動型交通均衡理論を基礎として手段選択関数を特定化するパラメータと均衡交通需要とを同時に推定する新たな推定手法を開発している。需要変動型交通均衡モデルの誘導は、分担需要変動下での需要-交通パフォーマンス均衡と必要十分な関係にある Variational Inequality (変分不等式、以後V.I.と記す)を導出することによって行う。このとき、分担需要を規定する手段別コストは、交通需要に依存するリンク交通パフォーマンス要因と手段選択だけに影響を与えるトリップ特性要因との関数で表されると仮定することによって、従来のモデルより一般的な V.I. を定式化する。V.I.型モデルは不動点反復法などの計算法によって解を求めることができるが、実際の道路ネットワークを対象にした場合には計算時間や計算容量の制約のために求解は極めて困難である。そのため、リンクパフォーマンスを表現するリンクコスト関数のヤコビ行列が正定値かつ対称であると仮定することによって、目的関数の凸性と可積分条件とを満足する V.I. と同値な Beckmann 型最適化問題に変換して解を得る方法を用いる。この仮定のうちリンクコスト関数のヤコビ行列の対称性は、多種のモードが混合する交通フローの場合は一般に成立しないが、換算係数を用いてバス台数を自動車台数に換算できれば、自動車換算交通量を変数とした可積分条件を満足するより実用的な Beckmann 型最適化問題の目的関数が導出できることを明らかにしている。さらに、この最適化問題は Frank-Wolfe の分解原理を利用した非線形収束計算法によって解を得ることができることを示す。一方、手段選択関数を特定化するパラメータは、従来、アンケート調査によるOD間サービス水準、OD間分担率などの回答値集計データを用いて推定されていたため、需要変動型交通均衡モデルから得られる均衡分担交通量が実績分担交通量に回帰する保証はなかった。そこで、観測可能な手段別分担交通量に推定均衡交通量が最小自乗回帰するように、手段選択関数パラメータと均衡交通量とを同時に推定する新たなモデルを開発する。本モデルと解法の実用可能性を検証するために観測可能データの観測サンプル数や観測誤差に対する感度分析を行い、そのあとで本モデルを実際の都市道路ネットワークに適用し、実績再現性の検討、従来の需要分析手法との精度、操作性の比較を行っている。

続く3章では、需要変動型交通均衡問題を2章で構築したモデルとは異なる方法で定式化し、この需要変動型交通均衡を内的に考慮できる最適バス輸送計画の策定手法の開発に発展させている。最適バス輸送計画問題のなかでサービス水準の変化による分担需要変動を考慮する場合には、需要変動型交通均衡問題をその制約条件として最適バス輸送計画問題に組込む必要がある。本モデルでは、需要変動型交通均衡下での最適バス輸送計画問題を、交通需要者の手段選択に対する意志決定結果から得

られる総増加便益を評価関数としたシステム評価段階と、各手段利用者の利用者最適となる経路選択に対する意志決定段階との2段階の意志決定問題とみなし、これを2レベル Stackelberg計画問題として定式化している。このモデルは、バス運行頻度が固定されている場合には需要変動型均衡交通需要予測モデルとしても有用であることを明らかにする。Stackelberg 計画問題は2段階の最適化問題であるが、求解のために下位の最適化問題をその必要十分条件で置換えた形で再定式化し、通常の第Ⅱ種最適化問題に変換できることを示す。さらに、ペナルティ関数法を用いた解法の開発を行い、その中で経路逐次取込み法を用いると不等式で表される制約条件を考慮する必要がなく、等式条件と非負条件だけを考慮した非線形収束計算法を適用すれば良いことを明らかにする。最後に、本モデルとその解法をモデルネットワークに適用し、感度分析と数値実験により需要変動型均衡交通需要予測、および分担需要変動型交通均衡下での最適バス輸送計画策定の一手法として現実の問題に実用可能であることを示す。

第4章においては、意識調査データを用いて構築した非集計交通需要予測モデル、特にサービス変化に伴う手段転換というダイナミックな交通行動を表現できる交通手段転換型需要予測モデルを組込んだ鉄道端末バス輸送計画の策定システムを作成する。前章までの手法が、集計的なデータの取扱いを行い、決定論的に構築される分担需要変動型交通均衡理論に基づく均衡交通量の予測手法、および最適バス輸送計画策定手法であったのとは異なり、ここで作成するシステムは非集計型確率論にその方法論的基礎をおく。なぜなら、これまでの実証的な検討結果から非集計型需要予測モデルはサービス変化に対する感度や予測精度が高いことが判明しており、特に鉄道駅からの端末バス輸送サービスのように多様で詳細な交通サービス要因に対する需要を予測する方法論としては極めて有効であると考えられるからである。ここでは、実際の交通手段選択行動に関するクロスセクションの実態データを用いた静的な手段選択型モデルと手段転換意識データを用いた手段転換型モデルを構築し、理論的にも実証的にも手段転換型モデルの方が短期を想定した端末バス輸送需要モデルとして有用性が高いことを明らかにする。次に、実サンプルを用いた集計化手法を用いて集計需要を算出し、種々の代替案に対して計画策定者が複数の評価項目を評価しながら代替案の選択を行う systems analysis アプローチを用いて、まず最適バス系統網を決定し、次に弾力性分析によって運行頻度を修正するという段階的な端末バス輸送計画の策定システムを開発している。最後に、実際の地域を対象にして本計画システムの適用を行ない、その有効性の検討を行っている。

1. 3 交通需要分析における交通均衡理論

1. 3. 1 交通ネットワークの用語とその表記法

ネットワークは、物理的な物（たとえば、道路と交差点、パイプラインとその節結点など）を表現したり、概念的なもの（たとえば、情報の流れと人との関係、概念相互の関係など）の構造を表現するために用いられる。いずれにせよ、ネットワークは2つの要素、つまり点の集合とこれらを連結する向きを持った線の集合とから成る。これらの2つの要素は、それぞれノード集合 N 、有向リンク集合 A とよばれ、ネットワークは有向グラフ $G[N, A]$ で表現される。

道路ネットワーク（図1.2参照）では、ノード集合 N は交通の発生、集中点となるセントロイド集合 J とそれ以外の交差点などの交通分岐点を表す交差点ノード集合 \bar{J} とから構成される。各ノードには正の整数値を対応させて識別する。都市交通需要分析では、一般に対象地域をゾーンに分割して集計レベルで分析が行われるが、セントロイドはこれらのゾーン中心を表現している。これら全てのセントロイドの対に対して正の整数 i を対応させ、これらをODペア i とよぶ。このODペア i はODペア集合 I の要素である。ODペア集合 I について、行方向に発生点、列方向に集中点を取り、各ODペア対間のパーソントリップ数をマトリックス表示したものをパーソントリップOD表という。

一方、リンク集合 A は道路区間そのもの、またはいくつかの道路を集約した仮想の道路区間に対応し、 A の要素 a には1から一連の正の整数を対応させる。各リンクは、そのリンク a を流れるフロー V_a に影響を及ぼす抵抗を持つ。逆に、リンクの抵抗はフロー V_a によって変化する。この抵抗の測度は、交通現象に対応させるなら、所要時間や費用、混雑度などのサービス要因 r ($r \in R$)のサービス水準であり、このサービス水準は $C_a = C_a(C_{ar}(V_a))$ なる関数により合成コスト C_a として表現される。

都市交通需要分析では、道路ネットワーク上の自動車利用者のフローだけでなく、公共交通機関利用者のフローに関する分析も重要である。本論では、自動車やバスなどのモード集合 M が同一路面ネットワーク上を共用し、それらのモードが競合関係にある場合の均衡交通需要の分析を行っている。このとき、バスネットワークにおけるリンクとは、バス系統網上のバス停を表すノードを連結するリンクだけでなく、乗車リンク、降車リンクなどから構成される。異なるバス系統への乗り換えリンクは、乗車リンクと降車リンクとの組み合わせにより表現される（図1.3参照）。バスリンクの抵抗測度は、道路ネットワークのリンク抵抗と同様に、バス系統網リンクをフローが流れることによってこゝろむる所要時間や混雑度などがあるが、平均待ち時間や乗り換え時間、バス料金のようにバス系統網リンクをフローが流れることなしにこゝろむる抵抗がそれとは別に存在する。これらの抵抗のうち、バス停へのアクセス時間やバス待ち時間やバス料金は乗車リンクで表現でき、目的施設へのイグレス時間は降車リンクで表現することができる。

これらのリンク合成コストはモードによってその関数形が異なるのが一般的であるから、モード m

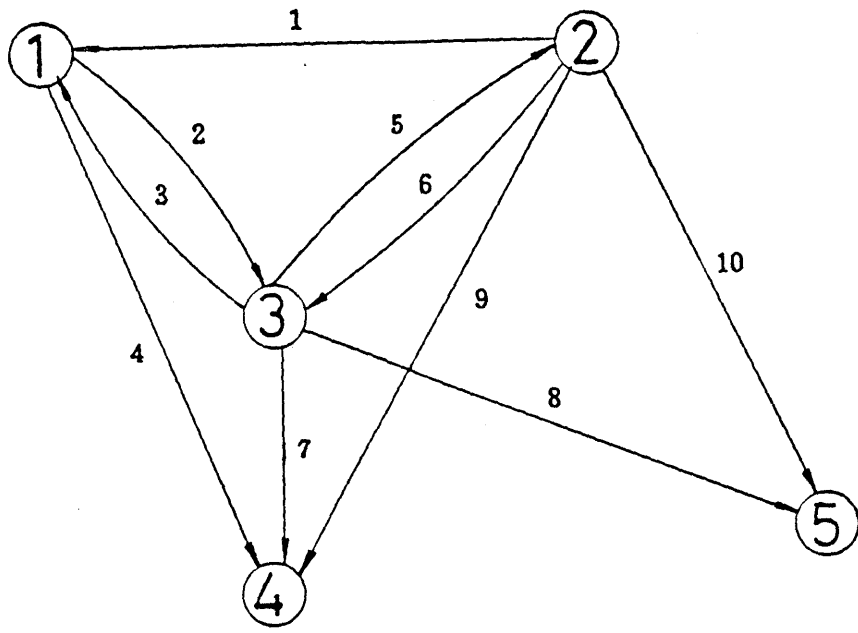


図1.2 道路ネットワーク

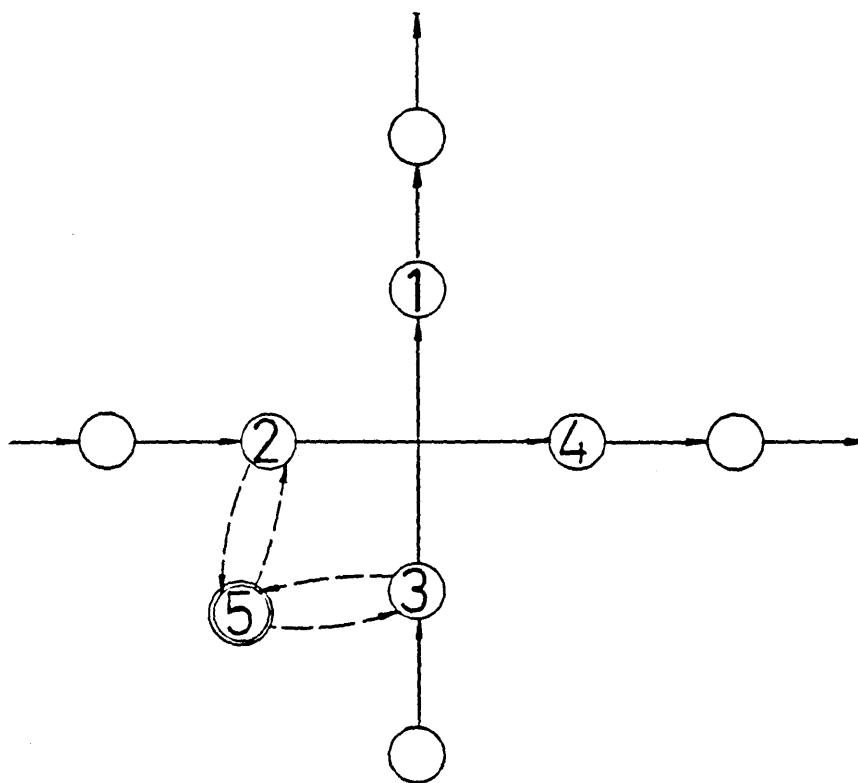


図1.3 バスネットワーク

ごとに $C_a^m (v_a)$ ($m \in M, a \in A$) により識別する。これらの合成コストは交通パフォーマンスと言われ、その形状は一般にリンクフローの増加に従って単調に増加する関数と考えられる。いま、あるリンクの交通パフォーマンス要因を所要時間だけとし、2種のモードがリンク上で混合している場合を考える。このとき、リンク上の混合フローがそのリンク特有の換算交通容量に近づくに従って、リンク所要時間曲面は交通容量曲面に漸近していき、その値は無大となる(図1.4参照)。このリンク所要時間曲面、つまりパフォーマンス関数の形状は、各リンクの物理的特性によって特定化されるものである。

任意の i ODペア間には多数の利用可能な経路が存在する。これらの経路集合を利用可能経路集合 E_i という。しかし、実際に利用される経路は限定され、それらの経路集合は有効経路集合といわれる。ODペア i 、モード m に対する有効経路集合を K_i^m で表し、その要素である有効経路は k により識別され、識別番号として正の整数が付けられる。これらの経路は連続する幾つかのリンクで構成される。このとき、 i ODペア間 m モードによる k 番目経路を構成するリンク集合のなかにリンク a が含まれる場合に1、その他の場合に0の値をとるダミー変数 δ_{ika}^m を用いてその経路の構成リンクは表現され、 i ODペア間 m モードごとに行方向にリンク番号、列方向に経路をとって δ_{ika}^m の値を代入したマトリックスを経路行列 δ とよぶ。図1.2のネットワークのノード2からノード4へのOD対に対する経路行列 δ は次のようになる。

$$\delta = \begin{matrix} & & & \text{経} & & \text{路} & & & & \\ & & & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & & \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ \text{リ}3 \\ 4 \\ \text{ン}5 \\ 6 \\ \text{ク}7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \end{matrix} & \left(\begin{array}{cccccc} 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right) \end{matrix}$$

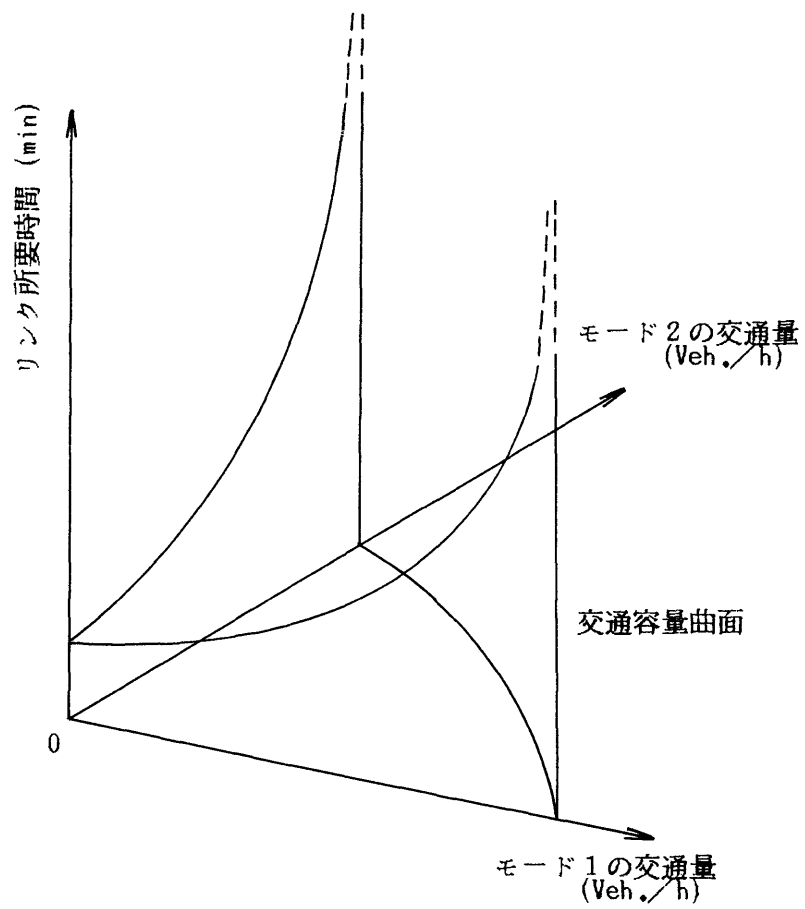


図1.4 リンクパフォーマンス関数の例

1.3.2 需要変動型交通均衡問題

需要変動型交通均衡問題を定義する前に、まず、自動車だけが利用可能な交通ネットワークにおける需要固定型交通均衡問題について説明する。需要固定型交通均衡問題とは、交通ネットワークを構成する各リンクのリンクパフォーマンス関数が特定化され、パーソントリップOD表が既知として与えられている場合に、自動車の運転者がOD間のいかなる経路を選択するかという問題であり、その結果として各リンク上の自動車のフローを求める問題である。この問題を解くためには、運転者がOD間経路を選択する際に、その規範となる経路選択規範が設定されていなければならない。この経路選択規範として最も合理的と考えられるものの1つは、自動車利用者はOD間をトリップする際には彼ら自身がこうむるコストを最小にするような経路を選択するという経路選択規範であろう。つまり、安定な交通状態では、ある運転者が経路を一方的に換えることによって彼の旅行コストをそれ以上に小さくすることができないと仮定し、この状態を交通均衡状態と定義する。交通均衡状態は、すべての交通需要者にとってコスト最小の状態であり、利用者最適な交通状態となる。ただし、この交通状態は、①利用可能経路における旅行コストに関する情報をすべての交通需要者が知っており、②その結果、全交通需要者は必ず最小コスト経路を選択するという合理的選択行動をとる、という2つの仮説のもとに成立する。この問題は、システム分析者の視点から見た場合には、OD交通量をネットワーク上にいかに配分すればよいかという交通量配分問題ともいわれる。しかし、交通均衡状態とは、交通需要者の視点から見て各交通需要者がとる利用者最適行動の結果、必然的に生じる交通状態であることから、その概念は交通量配分とは本質的に異なると考えた方がよい。

実際には、交通需要はネットワーク上の各種サービス要因のサービス水準によって変動する。たとえば、道路混雑が増大しOD間所要時間が増加すると、自動車利用者のうち、0からそのOD間パーソントリップ数までの範囲のうちの何人かが異なるモードを利用するようになると考えられる。この需要はOD間交通コストの関数として定義される需要関数上にある。このように、交通サービス水準の変動に伴って需要は変動し、同時に、需要の変動に伴って交通サービス水準も変動し、最終的にはすべてのODペア間で需要とOD間交通パフォーマンスとが均衡する。このような状態における交通需要と各リンクの交通フロー、サービス水準とを同時に決定する問題を需要変動型交通均衡問題という。需要変動型交通均衡問題には大きく分布需要変動型と分担需要変動型とがあり、本文では主として分担需要変動型交通均衡問題を取扱っている。なぜなら、新規、又は改善される交通サービス施設が本論文で対象としているようなバス輸送システムである場合には、その便益の帰属は現在も何らかの交通手段を用いてすでにトリップを行っている人であり、バス輸送システムの導入が発生・集中交通需要や分布交通需要の変化に与える影響は極めて小さいと考えられるからである。

参考文献

名古屋市交通問題調査会：市営交通事業のあり方と経営健全化方策（第1次答申）；バス事業のあり方と経営健全化方策，1981。

森地 茂・岩井壮三・鈴木純夫：バス輸送改善のための基礎的考察，土木学会論文報告集，No.238，pp.61-68，1975。

枝村俊郎・森津秀夫・松田 宏・土井元治：最適バス路線網構成システム，土木学会論文報告集，No.300，pp.95-107，1980。

天野光三・銭谷喜信・近東信明：都市街路網におけるバス系統網の設定計画モデルに関する研究，土木学会論文報告集，No.325，pp.143-154，1982。

河上省吾・溝上章志：需要変動を確率的に考慮した最適バス輸送計画に関する一考察，土木学会中部支部研究発表会講演概要集，pp.286-287，1984。

T.A.Chua : The Planning of Urban Bus Route and Frequencies ; a Survey, Transportation, 12, pp.147-172, 1984.

B.R.Westin : Predictions from Binary Choice Models, Journal of Econometrics, Vol.2, pp.1-16, 1974.

B.P.Lingaraj, A.Chatterjee and C.Sinha : An Optimization Model for Determining Headways for Transit Routes, Transportation Planning and Technology, Vol.3, pp.81-90, 1976.

第2章 分担需要変動型交通均衡理論による均衡交通需要の予測手法

2.1 概説

本章では、同一リンク上に自動車とバスが混在し、互いの交通量が各手段のサービス水準に影響しあうことによって手段分担需要が変動する場合の道路ネットワークにおける交通均衡状態を予測する実用的な手法を開発することを目的としている。

交通需要分析に際して、①需要予測モデルは人の交通行動原理に基づいて構築されるべきであり、②交通需要は交通サービスと需要予測モデルとの均衡点として求められる、という概念が近年、しだいに一般化されつつあるが、従来の4段階推定法の中の種々のモデルは、その大半がこれらの概念を考慮せずに構築されたものであった。しかし、各交通需要者が自分にとって最適な交通行動をとるといふ交通行動原理が合理的であるとすれば、交通は各交通施設の持つ交通パフォーマンス特性のもとで各交通需要者がとるであろう交通行動の結果、必然的に生じると思われる均衡状態になると考えられる。また実際の交通現象はこのような交通均衡状態にあると考えられることから、交通需要分析モデルは各交通需要者の行動規範がより良く反映され、需要と交通パフォーマンスとの均衡が考慮できるようなモデルでなければならないであろう。一方、バス輸送は鉄道のように専用軌道を持たず、自動車と同一の道路網を運行する。したがって道路区間上で各手段の交通需要が互いのサービス水準に大きく影響を及ぼし合うために、将来、道路網やバス輸送サービスの変更がなされた場合のOD間交通コストなどをあらかじめ予測しておくことは困難である。また、手段分担交通需要はサービス水準に応じて変動するから、交通施設整備後の交通状態を正確に予測するためには、分担需要の変動を考慮することが可能なモデルを構築する必要がある。本章では、以上の2つの点を伴って考慮することができる需要変動型交通均衡理論に基づく交通需要予測手法の開発を行っている。特にバス輸送のサービス向上に伴う手段分担需要の変化のように、その変動が比較的短期間に安定すると思われる交通需要予測問題や効果測定問題にこの需要変動型交通均衡モデルを適用することの有効性は極めて高いと考えられる。

需要変動型交通均衡モデルは、Beckmann (1956) のモデルに代表される。Beckmann 型モデルは、構造的に非線形最適化問題であるために、その効率的解法の開発が精力的に進められてきている。また、各個人の経路や利用手段に関するコスト最小化選択行動の平均からのばらつきを考慮するためにエントロピー制約条件を導入するなどの改良 (Boyce et al, 1983) が加えられてきている。しかし、Beckmann 型モデルの最適性の条件である Kuhn-Tucker条件は、交通需要者による最小コスト選択を彼らの交通行動規範としたときの必要条件になるだけであり、十分条件とはなり得ないため、均衡の定義、つまり、行動規範の仮定を変更した場合の目的関数の一般的な定式化が容易ではない。また、使用するコスト関数や需要関数の関数形によっては、解が一意に定まらないという欠点を含んでいる。

このような分担需要変動型均衡交通モデルとしての Beckmann 型最適化モデルは、Florian (1977)、Florian and Nguyen (1978)、Abdulaal and LeBlanc (1979)、LeBlanc and Farhangian (1981)、宮城 (1982)、Florian and Spiess (1983) 等によって提案されている。

Beckmann 型の最適化モデルに対して、近年、均衡という定義から出発して、その定義と同値となる Variational Inequality (以下では V.I. と記す) を見出し、不動点アルゴリズム等の数学的解法を用いて解く方法が開発されている。Smith (1979) は、利用者の最適行動規範を定義しなおすことにより、Wordrop 交通均衡状態を V.I. で再定式化し、解の存在条件の検討を行っている。Fisk and Nguyen (1981) は、多種階層が混合するネットワーク均衡問題に対する V.I. による定式化をおこない、Dafermos (1980) は、あるリンクの交通量が他のリンクの走行コストに非対称に影響を及ぼすようなネットワークにおける経路選択問題を V.I. により定式化し、その解法を提案している。

需要変動型均衡問題に対する V.I. を用いた定式化は、Dafermos (1982)、Fisk and Boyce (1983) らにより研究が進められており、特に、2 手段分担・配分均衡問題に関しては、Florian and Spiess (1983) が、理論的な定式化と解の存在定理、および解の一意性の検討を行っている。また、V.I. と Beckmann 型最適化モデルとの相互関係を明らかにしている。

これらの研究内容は数学的に極めて明解である。しかし、手段分担需要は交通需要に依存する要因以外の要因 (例えば、交通目的やトリップエンド条件など) に大きく規定されることが多いにもかかわらず、手段選択関数にこれらの要因が導入されていなかったり、Beckmann 型最適化モデルに変換した後の効率的な計算法の検討がなされていないなど、実際のネットワークに適用する上で残された問題がいくつか存在する。本章 2 節では、交通需要に依存する要因だけでなく、手段選択過程だけに影響を及ぼすと考えられる交通目的などの要因をも手段選択関数の説明変数に導入した、より一般的な 2 手段分担需要変動型交通均衡モデルの V.I. による定式化を行っている。さらに、V.I. モデルを計算や操作性の面ですぐれている Beckmann 型最適化問題に変換した後に、4 節では我々が直面している問題に対して許容できる現実的な仮定を導入することにより、その解法として Frank-Wolfe の分解原理が適用可能であることを明らかにし、Frank-Wolfe 法を適用した実用的な非線形最適化収束計算法を開発している。

従来の需要変動型交通均衡モデルでは、需要関数を特定化するパラメータを、均衡問題を定義しているネットワークを介さずに、分析対象地域で実施したアンケート調査の回答値データを用いて推定するのが一般的であった。しかし、アンケート調査から得られる所要時間などのサービス要因に関するサービス水準の回答値には回答誤差などが含まれるために、その値と交通均衡モデルを適用した結果得られる均衡サービス水準の値とは必ずしも一致する保証はない。本来、手段選択関数を特定化するパラメータは、交通需要によって定まるサービス水準の均衡値を用いて推定されるべきである。3 節では、均衡サービス水準をデータとした手段選択関数のパラメータを求めるために、人の手段選択

行動結果である観測可能ないくつかの分担交通量データを利用して手段選択関数のパラメータと均衡交通量とを同時に推定するモデルを提案している。

4節では、観測値のばらつきの程度や観測サンプル数がパラメータや均衡交通量の推定精度に与える影響を把握するために、モデルネットワークを対象にしたモデルの感度分析を行い、本モデルを都市圏交通需要分析に適用するに当たって問題となる観測サンプル数や観測誤差などの影響を明らかにしている。さらに5節では、本モデルを実際の都市交通需要分析に適用し、従来のモデルによる分析結果との比較検討を行うことによって本モデルの有用性の検証を行っている。

2.2 分担需要変動型交通均衡モデル

本節では、OD交通量が与件であるとき、自動車とバスのように走行時に同一リンクを共用し、各モードの交通量が互いのリンク走行コストに相互に影響を与えるような道路ネットワークにおける2手段分担需要変動型交通均衡モデルの定式化を行う。このとき、両手段の交通量の関数であるリンク走行コストを通してOD間の手段選択と経路選択とに影響を及ぼす所要時間、混雑度などの要因（これらの要因を、以後、交通パフォーマンス要因と呼ぶ）と、交通目的やトリップエンド条件等のようにOD間の手段選択だけに影響を与える要因（以後、これらの要因をトリップ特性要因と呼ぶ）とを手段選択関数の説明要因として含む、より一般的な場合を考慮した2手段分担需要変動型交通均衡需要予測モデルをV.I.理論により定式化する。次に、V.I.の解のうち、ある制約条件の下での解を与える Beckmann 型最適化モデルと V.I.との関係について述べる。

2.2.1 変数、およびフローに関する定義

ノード集合 N 、リンク集合 A ($a \in A$) で構成される道路ネットワークにおいて、ODペアを $i \in I$ 、 i ODペア間利用可能モードを $m \in M_i$ ($m=1,2$)、 i ODペア間 m モードによる経路を $k \in K_i^m$ とする。このとき、

g_i : i ODペア間パーソントリップ数

g_i^m : i ODペア間 m モード利用パーソントリップ数

v_a^m : リンク a 上の m モード利用パーソントリップ数

C_{ik}^m : i ODペア間 m モード第 k 経路の経路コスト（交通パフォーマンス要因に係るコスト）

C_i^m : i ODペア間 m モードの最小コスト

$C_a^m(v_a)$: 両モードの交通量が $v_a = (v_a^1, v_a^2)$ の場合のリンク a 上 m モードのコスト

$C_{ar}^m(v_a)$: 上記コストのうち、要因 r に係るコスト ($r \in R_1$)

S_i^m : i ODペア間 m モードの手段選択のみに影響するコスト（トリップ特性要因に係るコスト）

S_{ir}^m : 上記コストのうち、要因 r に係るコスト ($r \in R_2$)

h_{ik}^m : i ODペア間 m モードの第 k 経路利用交通量

とおく。

いま、 g_i は固定とした場合、OD交通量保存式、OD間モード別交通量保存式、リンク a 上 m モードのフロー条件式は以下のように表される。

$$\sum_m g_i^m = g_i \quad i \in I \quad (2.1)$$

$$\sum_k h_{ik}^m = g_i^m, \quad h_{ik}^m \geq 0 \quad m \in M_i, i \in I \quad (2.2)$$

$$v_a^m = \sum_i \sum_k \delta_{ika}^m h_{ik}^m \quad m \in M_i, a \in A \quad (2.3)$$

ここで、 δ_{ika}^m はリンク a が i OD ペア間 m モード k 番目経路に含まれるとき 1、その他のとき 0 の値をとる変数である。以後、自動車利用パーソントリップ数と自動車台数とは等しいものとして定式化を行う。 i OD ペア間 m モード k 番目経路コスト C_{ik}^m と、 i OD ペア間 m モードの経路選択に影響する交通パフォーマンス要因の最小コスト C_i^m との関係は次式で示される。

$$C_{ik}^m = \sum_a \delta_{ika}^m C_a^m(v_a) \quad k \in K_i^m, m \in M_i, i \in I \quad (2.4)$$

$$C_i^m = \min_k C_{ik}^m = \min_k \sum_a \delta_{ika}^m C_a^m(v_a) \quad m \in M_i, i \in I \quad (2.5)$$

また、リンク a 上の m モードによるコスト $C_a^m(v_a)$ と、 i OD ペア間トリップ特性要因に係るコスト S_i^m を次のように定義する。

$$C_a^m(v_a) = \sum_Y \alpha_Y \cdot C_{aY}^m(v_a) \quad a \in A, m \in M_i \quad (2.6)$$

$$S_i^m = \sum_Y \beta_Y \cdot S_{iY}^m \quad m \in M_i, i \in I \quad (2.7)$$

つまり、 $C_a^m(v_a)$ は、各種交通パフォーマンス要因の重み付き線形和で表されるとし、 $\alpha = \{\alpha_Y | r \in R_1\}$ は手段選択と経路選択両過程に共通な交通パフォーマンス要因、つまり、リンクコスト関数を構成する要因にかかるパラメータである。 S_i^m も各種のトリップ特性要因の重み付き線形和であり、 $\beta = \{\beta_Y | r \in R_2\}$ はこれらの要因にかかるパラメータである。

2.2.2 手段選択、経路選択に関する交通均衡の定義

ここでは、手段選択、および経路選択に関する交通均衡の定義を、Florian and Spiess (1983) の研究に基づいて設定する。以後、均衡状態にある変数には、* を付加することによって均衡値を示す。Florian and Spiess は、i ODペアにおけるモード間コスト差 w_i によって、モード1の手段選択関数 $G_i(w_i)$ が定義できると仮定し、手段間で利用者の移動が生じない状態が手段選択に関する均衡状態である。この定義を用いるならば交通手段選択に関する均衡状態は、 S_i^m を投入した場合には全てのODペア $i \in I$ について以下の式で表現できる。

$$w_i^* = (C_i^{1*} - C_i^{2*}) + (S_i^1 - S_i^2) = G_i^{-1}(w_i^*) = W_i(g_i^{1*}, g_i^{2*}) \quad (2.8)$$

$S_i^1 - S_i^2 = S_i^*$ は交通の状態には依存しないため、i ODペア間で与件である。また g_i^{2*} は、 g_i^{1*} が決まれば g_i^{1*} より一意に得られるから、式(2.8)は次式のように g_i^{1*} だけの関数として書き換えることができる。

$$w_i^* = (C_i^{1*} - C_i^{2*}) + S_i^* = G_i^{-1}(w_i^*) = W_i(g_i^{1*}) \quad i \in I \quad (2.9)$$

次に、経路選択に関する均衡状態を定義する。彼らは、経路選択に関する均衡状態を、i ODペア m モード利用者が最終的に新しい経路を選択することによって交通コストを今以上に小さくすることができない状態と仮定している。これはまさに Wardrop (1952) 均衡状態である。これを数学的に記述すると、次式のように表わすことができる。

$$C_{ik}^{m*} - C_i^{m*} \begin{cases} = 0, & \text{if } h_{ik}^{m*} > 0 \\ \geq 0, & \text{if } h_{ik}^{m*} = 0 \end{cases} \quad k \in K_i^m, m \in M_i, i \in I \quad (2.10)$$

つまり、i ODペア間 m モード利用者が k 番目経路を利用している ($h_{ik}^{m*} > 0$) ならば、その経路コスト C_{ik}^{m*} は i ODペア間 m モードの交通パフォーマンス要因による最小経路コスト C_i^{m*} に等しい。逆に、利用していない ($h_{ik}^{m*} = 0$) 経路のコストは、最小経路コストより大きいことを意味している。

2.2.3 Variational Inequality による分担需要変動型交通均衡モデルの定式化

(1) 均衡モデルの定式化

Dafermos (1982), Florian(1983)らは、通常の需要変動型交通均衡問題をそれと必要十分の関係にあるV.I.でモデル化しているが、式(2.9),(2.10)で定義したモード間のコスト差の中にトリップ特性要因 s を含む需要変動型交通均衡条件も、実行可能集合を表わす式(2.1)~(2.3)のもとで、

$$C(v)^t (v - v^*) - \{W(g^1) - s\}^t (g^1 - g^{1*}) \geq 0 \quad (2.11)$$

で示される V.I. と同値となる。ここで、 $C(v)$ 、 $W(g^1)$ 、 s はそれぞれ次式で与えられるベクトルである。なお、 t は転置ベクトルを示している。

$$\begin{cases} C(v)^t = \{C_a^1(v_a^1, v_a^2), C_a^2(v_a^1, v_a^2)\} & a \in A & (2.12.a) \\ W(g^1)^t = \{W_i(g_i^1)\} & i \in I & (2.12.b) \\ s^t = \{S_i\} & i \in I & (2.12.c) \end{cases}$$

まず、必要条件、つまり、式(2.1)~(2.3)のもとで式(2.9),(2.10)が、V.I.(2.11)を意味することを示す。 i ODペア間 m モード k 経路に対して、式(2.10)は、

$$(C_{ik}^{m*} - C_i^{m*})(h_{ik}^m - h_{ik}^{m*}) \geq 0 \quad k \in K_i^m, m \in M_i, i \in I \quad (2.13)$$

と同値である。何故なら、 $h_{ik}^m > 0$ のとき、 h_{ik}^m は、式(2.2)の非負条件より $h_{ik}^m \geq 0$ であるから、任意の h_{ik}^m に対して式(2.13)が成立するためには $C_{ik}^{m*} - C_i^{m*} = 0$ でなければならない。また、 $h_{ik}^m = 0$ のときは、 $C_{ik}^{m*} - C_i^{m*} \geq 0$ でなければならない。このことは、まさに式(2.10)を意味している。ここで、式(2.13)を $k \in K_i^m$ 、 $m \in M_i$ 、 $i \in I$ について加え、式(2.3),(2.8)を代入することにより、

$$\begin{aligned} \sum_a C_a^1(v_a^1)(v_a^1 - v_a^{1*}) + \sum_a C_a^2(v_a^2)(v_a^2 - v_a^{2*}) \\ - \sum_i \{W_i(g_i^1) - S_i\} (g_i^1 - g_i^{1*}) \geq 0 \end{aligned} \quad (2.14)$$

を得る。式(2.14)を式(2.12.a)~(2.12.c)を用いてベクトル表示したものがまさに式(2.11)である。

次に、十分条件、つまり、V.I.(2.11)が式(2.9),(2.10)を意味することを示す。まず、 (ν, g^{1*}) をV.I.(2.11)の解とする。ここで、 $k_1 \in K_i^m$ は手段mに対して用いられている経路($h_{ik_1}^m > 0$)とし、 $k_2 \in K_i^m$ を同一手段の利用可能経路とする。いま、 (ν, g^1) が均衡解 (ν, g^{1*}) と同じ2つの経路 k_1, k_2 を有すると仮定する。手段間の利用者の移動を考えない場合、これらの経路交通量には、

$$h_{ik_1}^m = h_{ik_1}^{m*} - \delta, \quad h_{ik_2}^m = h_{ik_2}^{m*} + \delta, \quad 0 < \delta \leq h_{ik_1}^{m*} \quad (2.15)$$

の関係が成立する。 k_1, k_2 は同一手段に対する経路であるから、iODペア間の1番目のモードの交通量に関して、 $g_i^1 = g_i^{1*}$ の関係も成立する。これらを式(2.11)に代入すると、

$$C_{ik_1}^{m*} \cdot (-\delta) + C_{ik_2}^{m*} \cdot (\delta) \geq 0 \quad (2.16)$$

となり、両辺を δ で割ると、

$$C_{ik_1}^{m*} \leq C_{ik_2}^{m*} \quad (2.17)$$

となる。上式は、現在利用している経路のコストは他のどの経路のコストよりも安いか等しいことを意味し、これはまさに式(2.10)を意味する。次に式(2.11),(2.10)より式(2.9)を導く。一般に手段選択関数 $G_i(w_i)$ は狭義の単調減少関数であると仮定できるから、その逆関数も狭義の単調減少関数となる。ここで、手段mのiODペア間の均衡交通量を g_i^{m*} ($> 0, m=1,2$)とし、各手段とも少なくとも1つの経路が存在すると仮定し、それらを $k_1 \in K_i^1, k_2 \in K_i^2$ とする。この場合には手段間の利用者の移動が可能であるから、経路交通量に対して以下の式が成立する。

$$h_{ik_1}^1 = h_{ik_1}^{1*} - \delta, \quad h_{ik_2}^2 = h_{ik_2}^{2*} + \delta, \quad 0 < |\delta| \leq \min(h_{ik_1}^{1*}, h_{ik_2}^{2*}) \quad (2.18)$$

また、i番目OD交通量に対して、その保存式から

$$g_i^1 = g_i^{1*} - \delta, \quad g_i^2 = g_i^{2*} + \delta \quad (2.19)$$

が成立する。これらを式(2.11)に代入すると以下の式が得られる。

$$C_{ik1}^{1*} \cdot (-\delta) + C_{ik2}^{2*} \cdot (\delta) - \{W_i(g_i^{1*}) - S_i^*\} \cdot (-\delta) \geq 0 \quad (2.20)$$

この式の両辺を δ で割ると、

$$\begin{cases} -C_i^{1*} + C_i^{2*} + \{W_i(g_i^{1*}) - S_i^*\} \geq 0, & \text{if } \delta > 0 \\ -C_i^{1*} + C_i^{2*} + \{W_i(g_i^{1*}) - S_i^*\} \leq 0, & \text{if } \delta < 0 \end{cases} \quad (2.21.a)$$

$$\quad (2.21.b)$$

となる。 δ の符号にかかわらず、式(2.21.a),(2.21.b) が成立するためには、

$$C_i^{1*} - C_i^{2*} - \{W_i(g_i^{1*}) - S_i^*\} = 0 \quad (2.22)$$

が成立しなければならない。この結果はまさに式(2.9) に一致している (図2.1 参照)。

以上のことから、式(2.9),(2.10)が式(2.11)と同値であることが証明された。したがって、 S^* を含む2手段分担需要変動型交通均衡解を得るためには、式(2.1)~(2.3)で表される実行可能集合のもとで、V.I.(2.11)を満足する (ν^*, g^{1*}) を求めればよいことになる。

(2) 解の一意性

式(2.11)の解 w_i^*, g_i^{1*} 、および ν^*, C_i^{m*} の一意性は、手段選択関数 $G_i(w_i)$ の狭義の単調減少性、リンクコスト関数 $C(\nu)$ の狭義単調増加性により保証されることが Brouwerの不動点定理から証明されている (Smith,1979; Dafermos,1982)。以下に、 $G_i(w_i)$ の狭義単調減少性、 $C(\nu)$ の狭義単増加性が仮定されたときに、V.I.(2.11)の解 g_i^{1*}, w_i^* 及び ν^*, C_i^{m*} が一意に決定されることを示す。手段選択関数 $G_i(w_i)$ は、 w_i に対して狭義の単調減少関数であるとする、

$$(G(w') - G(w''))^t (w' - w'') < 0, \quad \text{for } w' \neq w'' \quad (2.23)$$

と表される。ここで、 $w = \{w_i\}$ なるベクトルである。このとき、 $G_i(w_i)$ の逆関数 $W_i(g_i^1)$ もまた単調減少関数となり、次式のように表わすことができる。

$$(W(g^1') - W(g^1''))^t (g^1' - g^1'') < 0, \quad \text{for } g^1' \neq g^1'' \quad (2.24)$$

リンクコスト関数は、狭義の単調増加関数であると仮定すると、

$$(c(v') - c(v''))^t (v' - v'') > 0, \quad \text{for } v' \neq v'' \quad (2.25)$$

となる。今、V.I.(2.11)を満足する2つの異なる解 (v', g^1') , (v'', g^1'') が存在すると仮定する。これらを式(2.11)において $v = v'$, $g^1 = g^1'$, $v^* = v''$, $g^{1*} = g^1''$ 及び、 $v = v''$, $g^1 = g^1''$, $v^* = v'$, $g^{1*} = g^1'$ として、それぞれ V.I.(2.11) に代入し、これらの2つの式を加えると、

$$(c(v') - c(v''))^t (v' - v'') - (W(g^1') - W(g^1''))^t (g^1' - g^1'') \leq 0 \quad (2.26)$$

となる。式(2.24), (2.25) のもとで式(2.26)が常に満足されるのは、式(2.26)の各項が0になるときである。つまり、

$$(C_a(v_a') - C_a(v_a''))^t (v_a' - v_a'') = 0 \quad a \in A \quad (2.27)$$

$$(W_i(g_i^1') - W_i(g_i^1''))^t (g_i^1' - g_i^1'') = 0 \quad i \in I \quad (2.28)$$

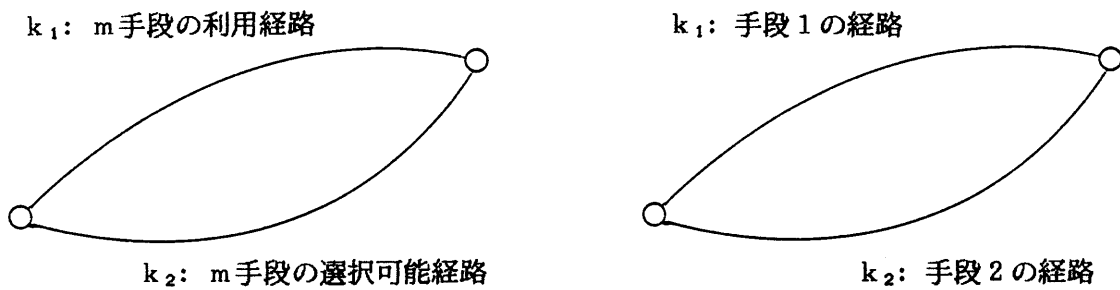
式(2.28)が満足されるのは $g_i^1' = g_i^1''$ のときだけであり、これより g_i^{1*} は一意に決まる。このことは、 w_i^* が一意に決まることを意味する。以上より、手段選択関数 $G_i(w_i)$ が狭義の単調減少関数であれば、均衡解 g^{1*} と w^* は一意に定まる。

一方、上述の式(2.27)が満足されるのは $v_a' = v_a''$ のときだけであり、このことから v_a^* の一意性が保証される。同様にリンクコスト $C_a(v_a)$ の一意性も保証される。ここで、リンクコストが一意であるから、最短経路コスト C_i^{m*} の一意性も保証される。以上のことより、リンクコスト関数 $c(v)$ が狭義の単調増加関数ならば、均衡解 v_a^* , C_i^{m*} は一意に決まる。式(2.23)と(2.25)の条件は、 $-W(g)$ と $c(v)$ のヤコビ行列である $[-\partial W(g)/\partial g]$, $[\partial c(v)/\partial v]$ が正定値行列であることと一致する。以下に $c(v)$ のヤコビ行列を示す。

$$J = \begin{pmatrix} J_1 & & & & & & 0 \\ & \ddots & & & & & \\ & & J_a & & & & \\ & & & \ddots & & & \\ & & & & \ddots & & \\ & & 0 & & & & J_A \end{pmatrix}, \quad \text{ここで } J_a = [\partial C_a(v_a)/\partial v_a] \quad (2.29)$$

ここで考えている2手段選択問題では、 $G_i(w_i)$ として一般にロジットタイプの関数が用いられる

ことから、 $G_i(w_i)$ の狭義単調減少性は保証される。また、 $C(U)$ についても一般にその狭義単調増加性を仮定しても良いと考えられることから、理論的には式(2.1)~(2.3)で表される実行可能集合の中で、式(2.9)~(2.10) を満足する均衡解を一意に求めることが可能である。



$$\begin{aligned}
 h_{k1}^m &= h_{k1}^{m*} - \delta \\
 h_{k2}^m &= h_{k2}^{m*} + \delta \\
 0 < \delta &\leq h_{k1}^{m*}
 \end{aligned}
 \tag{2.15}$$

$$\begin{aligned}
 h_{k1}^1 &= h_{k1}^{1*} - \delta \\
 h_{k2}^2 &= h_{k2}^{2*} + \delta \\
 0 < |\delta| &\leq \min(h_{k1}^{1*}, h_{k2}^{2*})
 \end{aligned}
 \tag{2.18}$$

図2.1 V.I.モデルの十分条件

2. 2. 4 Beckmann 型最適化問題への変換

手段選択と経路選択に関する交通均衡状態の定義と同値となる V.I.(2.11) による手段分担需要変動型交通均衡モデルは、需要変動型交通均衡状態式(2.9), (2.10)を得るための必要十分条件になることを前節で述べたが、実行可能集合を表す式(2.1)~(2.3)のもとで V.I.(2.11)を直接解くことは極めて困難である。しかし、 $C(U)$ のヤコビ行列が正定値、かつ対称であれば、V.I. は計算や操作性の面ですぐれている Beckmann 型最適化問題に変換することができる。式(2.11)で表される V.I. は以下に示すような Beckmann 型最適化問題となる。

[P 1]

$$\text{Min : } F_1 = \int_0^v C(x) dx - \sum_i \int_0^{g_i} \{W_i(y) - S_i^*\} dy \quad (2.30)$$

s.t. 式 (2.1)~(2.3)

何故なら、 $C(U)$ のヤコビ行列の正定値対称性により、目的関数の 1 項目の凸性と可積分条件が保証されるためである。式(2.11)が、非負条件 $h_{ik} \geq 0$ を持つ問題 [P 1] の必要十分条件に一致することは、式(2.30)の偏微分が 0 より大きい、0 に等しいという問題 [P 1] の最適性の条件と式(2.11)とが等しいことから明らかである。

ここで、 \int は線積分を表しており、問題 [P 1] が積分経路に依存せず一意の解を持つための条件は目的関数 F_1 が凸関数で、 $C(x)$ 、 $W_i(y) - S_i^*$ が可積分条件を満足しなければならない。手段選択関数 $G_i(w_i)$ にロジット関数を仮定すれば $-W_i(y)$ は単調増加関数となり、式(2.30)の第 2 項 $-\sum_i \int_0^{g_i} \{W_i(y) - S_i^*\} dy$ は凸関数の定義よりやはり凸関数となる。また第 2 項は明らかに積分可能である。したがって、第 1 項の凸性と可積分条件が満足されさえすればよい。そのための必要十分条件は、第 1 項のヘッセ行列の正定値性、かつ被積分関数 $C(U)$ のヤコビ行列の対称性である。第 1 項のヘッセ行列は以下ようになる。

$$H = \begin{pmatrix} H_1 & & & & & 0 \\ & H_a & & & & \\ & & \ddots & & & \\ & & & 0 & & \\ & & & & \ddots & \\ & & & & & H_A \end{pmatrix}, \quad H_a = \frac{\partial^2 \int_0^v C(x) dx}{\partial v_a \partial v_a} = [\partial C_a(v_a) / \partial v_a] \quad (2.31)$$

これは、 $C(U)$ のヤコビ行列である式(2.29)と同一のものである。つまり、 $C(U)$ のヤコビ行列の正定値性条件は Beckmann 型最適化モデルの目的関数式(2.30)のヘッセ行列の正定値性条件、つまり、目的関数式(2.30)の第 1 項の凸性条件に一致する。また、第 1 項が積分可能であるためには $C(U)$

のヤコビ行列が対称でなければならない。以上のことから、V.I.の解の一意性の条件は Beckmann 型最適化問題 [P 1] の目的関数の凸性の条件であり、かつ V.I.の中のリンクコスト関数 $C(U)$ のヤコビ行列の対称性が保証されて始めて目的関数の可積分条件が保証される。逆に言えば、目的関数式(2.30)の凸性と $C(U)$ の可積分条件が保証された問題 [P 1] の解は、V.I.(2.11)において解の一意性の条件に加えてリンクコスト関数のヤコビ行列の対称性を仮定したときの解を与えることになる。

2.3 手段選択関数のパラメータと均衡交通量の同時推定法

2.3.1 従来の均衡交通需要予測プロセス

前節で述べた分担需要変動型交通均衡モデルを用いて交通需要予測を行う場合には、パーソントリップ調査などから得られた分担需要と両手段の手段選択要因サービス水準の実績値データから、あらかじめ $G_i(w_i)$ のパラメータ $\{\alpha, \beta\}$ を推定し、推定された $\{\alpha\}$ をリンクコスト関数に代入した後で設定されたネットワークを対象にして分担需要変動型交通均衡モデルを適用するというプロセスを取る（図2.2(a)参照）。このプロセスにおける交通パフォーマンス要因のサービス水準の実績値は、推定段階で設定されているネットワーク上で均衡モデルを用いて得られる均衡サービス水準推定値と整合性のとれたものとはならない。そのため、パラメータ $\{\alpha, \beta\}$ を用いて推定される均衡分担交通量は実績の分担交通量に回帰するように推定される保証はない。経路選択だけでなく、分担需要変動までもネットワークを介して分析する交通需要分析モデルであれば、実績のデータを用いた手段選択関数パラメータ $\{\alpha, \beta\}$ 、およびリンクコスト構成要因のパラメータ $\{\alpha\}$ の推定過程を、均衡交通量推定過程と同様に、その交通需要分析モデルの内部に持つことが望ましいと考えられる（Boyce et al,1983）。

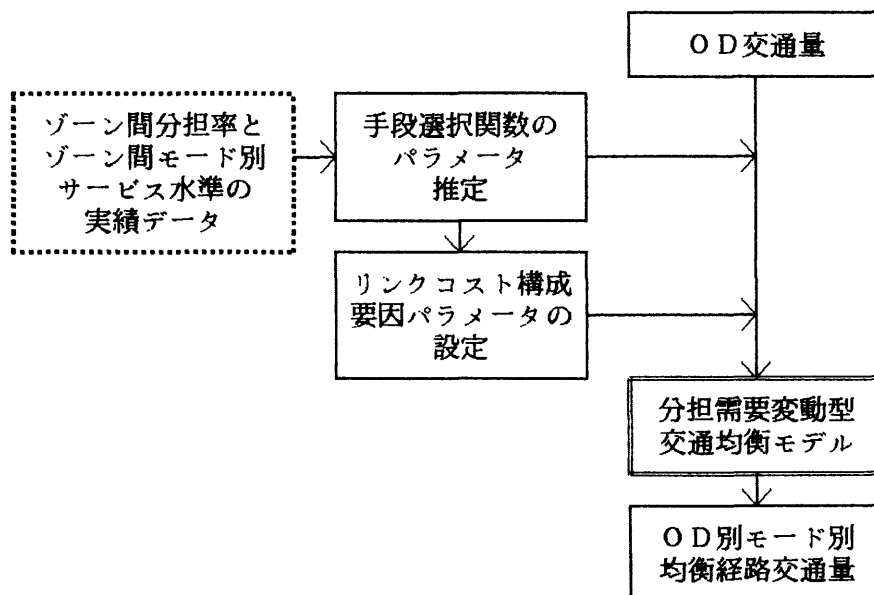


図2.2(a) 従来の均衡交通需要推定プロセス

2.3.2 手段選択関数パラメータと均衡交通量の同時推定

本節では、均衡モデルによる推定均衡交通量が道路ネットワーク上での人の手段選択行動結果である観測可能ないくつかの実績分担交通量に回帰するように、手段選択関数パラメータ $\{\alpha, \beta\}$ とリンクコスト構成要因のパラメータ $\{\alpha\}$ 、および手段別均衡交通量、均衡フローとを同時に推定する方法 (図2.2(b)参照) を提案する。

今、観測が可能な i' ODペア間の m' モード交通量を $g_{i'm'}^m$ ($m \in M_i', i' \in I'$; M_i', I' は観測値が存在するODペア、モードの集合) とすると、 $\{\alpha, \beta\}$ と手段別経路別均衡交通量 $h = \{h_{ik}^m \mid k \in K_i, m \in M_i, i \in I\}$ の同時推定モデルは以下のように定式化できる。

[P2]

$$F_1(h, \alpha, \beta) = \underset{h}{\text{Min}} : F_1(h, \alpha, \beta) \quad (2.32.a)$$

$$\text{s.t. 式(2.1)~(2.3)} \quad (2.32.b)$$

$$F_2(h, \alpha, \beta) = \underset{\alpha, \beta}{\text{Min}} : \sum_{i'} \sum_{m'} \|g_{i'm'}^m - \bar{g}_{i'm'}^m\|^2 \quad (2.32.c)$$

$$C_i^m = \min_k \sum_a \delta_{ika} \sum_Y \alpha_Y C_{aY}^m(V_a) \quad (2.32.d)$$

$$S_i^m = \sum_Y \beta_Y S_{iY}^m \quad (2.32.e)$$

本モデルは、式(2.32.c)~(2.32.e)によって、観測可能な手段別交通量 $\bar{g}_{i'm'}^m$ に推定均衡手段別交通量 $g_{i'm'}^m$ を最小自乗回帰させるように手段選択関数のパラメータ $\{\alpha, \beta\}$ 、リンクコスト関数を定義する均衡要因のパラメータ $\{\alpha\}$ を決めながら、分担需要変動型交通均衡モデルを用いてすべてのODペア間手段別経路交通量 h を求めるという2レベル計画問題である。したがって、上位問題から求まる均衡交通量と均衡コストとをデータにして下位問題から求められる $\{\alpha, \beta\}$ も均衡値となる。本モデルでは、手段選択関数のパラメータ、およびリンクコスト関数のパラメータをあらかじめ求めておく必要はなく、それらの値は問題[P1]の中で均衡コストと整合性のある値として内生的に求めることができる。本モデルの上位問題は人の交通行動を規定する基礎方程式であり、下位問題は実際の人手段選択行動結果と規範的選択行動からのずれを最小にするような基礎方程式に含まれる未知パラメータを求める役割を果しているといえる。

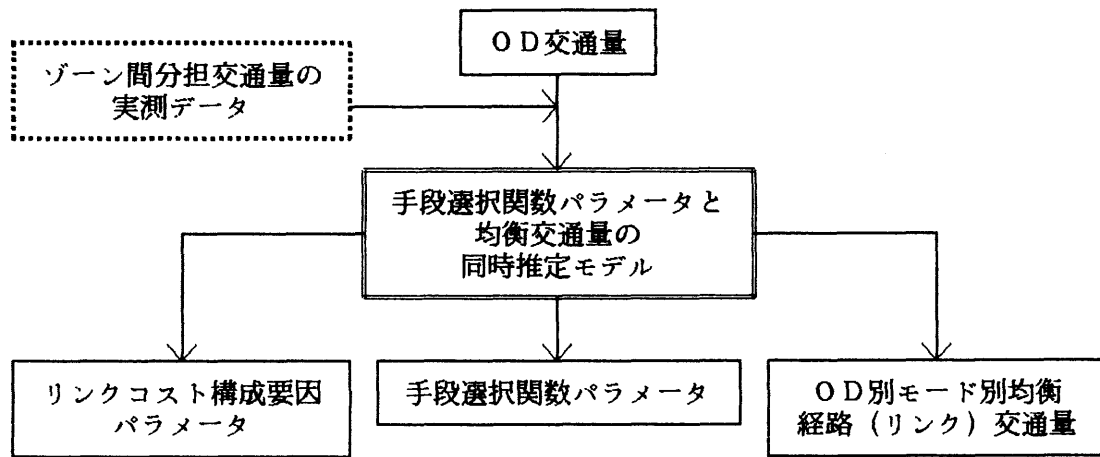


図2.2(b) 手段選択関数パラメータと均衡交通量の同時推定プロセス

2.4 解法とモデルの感度分析

2.4.1 Frank-Wolfeを用いた実用的な解法

2手段分担需要変動型均衡交通量は、 $-G_i(w_i)$ と $C(v)$ の狭義の単調増加性さえ保証されれば、実行可能集合式(2.1)~(2.3)に対して、V.I.(2.11)を解くことによって一意に求められることを示した。この解法には主として不動点アルゴリズムが用いられ、それによって一意の解を得ることが可能である。しかし、実行可能経路の取込みをいかに効率的に行うかなどの問題が未解決であるために、実際の道路ネットワークへの適用にまでは至っていないのが現状である(宮城・大野,1985)。もし、 $C(v)$ のヤコビ行列の正定値性と対称性が保証された場合には、問題[P1]のBeckmann型最適化問題に変換できるが、式(2.30)は線積分を要するためにヤコビタイプの収束計算を行う必要があるなど計算上の困難さを伴う。さらに、道路ネットワークを共用する2手段分担需要変動型交通量予測問題として実用上我々が直面する問題は、固定された運行スケジュールを持つバスなどの公共路面交通機関と自動車との競合を考慮した交通需要予測問題である。この場合、バス(以後、バスを $m=2$ とする)のリンク交通量 v_a^2 はバスを選択した利用者数ではなく、単位時間当たりリンク a を通過する全ての系統の累積運行頻度 $\sum_s \Delta_{as} f_s$ に対応する。ここで、 Δ_{as} は系統 s がリンク a を通過しているときにのみ1の値をとるダミー変数であり、 f_s は s 系統の運行頻度である。したがって、 v_a^2 に相当する変数は定数として与えることができる。また、リンクコスト関数を、

$$\begin{cases} C_a^1 = C_a^1(v_a^1, \sum_s \Delta_{as} f_s) \\ C_a^2 = C_a^2(C_a^1[v_a^1, \sum_s \Delta_{as} f_s]) \end{cases} \quad (2.33)$$

とすることにより、両手段のリンクコストを自動車($m=1$)交通量だけの関数(Florian,1977)とすることができる。以上のことから、ここではバスの単位時間当たり運行頻度 $\sum_s \Delta_{as} f_s$ を自動車換算係数 γ を用いて自動車台数に換算し、リンク a 上の交通量を、

$$v_a = \sum_{i,k} \delta_{ika}^1 h_{ik}^1 + \gamma \sum_s \Delta_{as} f_s \quad (2.34)$$

のように、自動車単一手段のフローとして表わす。いま、 \tilde{C}_i^2 を式(2.32.a)を目的関数とする最適化アルゴリズムの任意の収束段階における $\min_k \sum_a \delta_{ika}^2 C_a^2(\tilde{v}_a)$ とするとき、その段階のBeckmann型最適化問題[P1]の目的関数は、

$$F_1 = \sum_a \int_0^{v_a} C_a^1(x) dx - \sum_i \int_0^{g_i^1} \{W_i(y) + \tilde{C}_i^2 - S_i^*\} dy \quad (2.35)$$

と変形される。何故なら、 $C_i^2 = \tilde{C}_i^2$ のとき、モード1のOD間コストは、式(2.33)より $w_i(g_i^1) + \tilde{C}_i^2 - S_i^*$ となり、モード1の逆需要関数が $W_i(g_i^1) + \tilde{C}_i^2 - S_i^*$ で表されるからである。

上位問題は、式(2.1)~(2.3)の非負条件、および等式条件を持つ非線形最適化問題である。このような最適化問題を解くために種々の有効な方法が開発されている (Florian,1977; 加藤・宮城,1979; 井上,1981)が、その基本的アルゴリズムは探索方向ベクトルと最適刻み幅の決定という2段階から構成される。ここでは、加藤・宮城 (1982) が分布・配分統合モデルで適用しているのと同様に、最適解への探索方向ベクトルを求めるために、Frank-Wolfeの分解原理が適用できることを示す。

いま、 n 回目の反復時の解 $(h_{ik}^{1(n)}, g_i^{1(n)})$ が得られているとき、目的関数式(2.35)をその点でテラー展開し、第1次の項までとると、

$$F_1(h_{ik}^{-1}, g_i^{-1}) = F_1(h_{ik}^{1(n)}, g_i^{1(n)}) + \sum_{i \in I} \sum_{k \in K_i^1} (h_{ik}^{-1} - h_{ik}^{1(n)}) \cdot C_{ik}^{1(n)} - \sum_i (g_i^{-1} - g_i^{1(n)}) \cdot [W_i(g_i^{1(n)}) + \tilde{C}_i^{2(n)} - S_i^*] \quad (2.36)$$

となる。 $F_1(h_{ik}^{1(n)}, g_i^{1(n)})$ 、 $C_{ik}^{1(n)}$ 、 $W_i(g_i^{1(n)})$ 、 $h_{ik}^{1(n)}$ 、 $g_i^{1(n)}$ は n 回目の反復計算時には定数であるから、問題 [P 1] は次のような個々のODペアごとに独立な線形子問題に分解できる。

[P 3]

$$\text{Min : } F_3 = \sum_{i \in I} \sum_{k \in K_i^1} (C_{ik}^{1(n)} - C_i^{1(n)} + S_i^*) \cdot h_{ik}^{-1} \quad (2.37.a)$$

$$\text{s.t. } \sum_k h_{ik}^{-1} = g_i^{-1}, \quad h_{ik}^{-1} \geq 0 \quad k \in K_i^1, \quad i \in I \quad (2.37.b)$$

ここで、 g_i^{-1} は、 n 回目の反復時の手段選択要因のサービス水準を手段選択関数に代入することによって得られる自動車の分担需要量である。問題 [P 3] の解は、個々のODペアごとに、トリップ特性要因のサービス水準に無関係に、自動車による交通パフォーマンス要因コストが最小である経路にすべての自動車分担需要 g_i^{-1} を割り当てることによって得られる。以上のことから、問題 [P 1] は宮城の適用した Frank-Wolfe 法に基づく分布・配分統合モデルの解法アルゴリズムと同一の手順で解くことが可能となる。この方法は、All-or-nothing 配分段階と実行可能解の凸結合パラメータを求める1次元探索段階で構成されるため、解は比較的容易に求めることができる。以下に Frank-Wolfe 法に基づく上位問題の解法のアルゴリズムを示す。なお、本アルゴリズムでは、経路交通量のかわりに、式(2.34)のように経路交通量の一次結合で表され、かつ大局的最適解となる上に解の一意性が保証されたリンク交通量を決定変数としている。

Step 1. $n = 0$ として、初期実行可能解 $g_i^{(n)}$ 、 $v_a^{(n)}$ を設定する。

Step 2. $v_a^{(n)}$ に応じて決まるモード別リンク所要コスト $C_a^{(n)}$ 、 $C_a^{2(n)}$ を計算し、最小コスト経路探索により各モードのOD間最小コスト経路の所要コスト $C_i^{(n)}$ 、 $C_i^{2(n)}$ を求める。

Step 3. $C_i^{(n)}$ 、 $C_i^{2(n)}$ を用いて、手段選択関数から分担交通量 g_i^{-1} を求める。

Step 4. 最小コスト経路に、 g_i^{-1} をすべて負荷する All-or-nothing 法により、 v_a^{-1} を求める。

Step 5. あらかじめ設定された ε_1 、 ε_2 に対して、

$$\sum_a (v_a^{-1} - v_a^{(n)}) C_a(v_a^{(n)}) \leq \varepsilon_1 \quad (2.38)$$

$$\max_a | (v_a^{-1} - v_a^{(n)}) / v_a^{(n)} | \leq \varepsilon_2 \quad (2.39)$$

の両収束判定基準を満足しているどうかを確認し、満足すれば計算を終了する。そうでなければ、次の Step 6. へ進む。

Step 6. g_i^1 と v_a^1 を、

$$\begin{cases} g_i^1 = \lambda g_i^{(n-1)} + (1-\lambda) g_i^{-1} \\ v_a^1 = \lambda v_a^{(n-1)} + (1-\lambda) v_a^{-1} \end{cases} \quad (2.40)$$

とおき、1次元探索によって目的関数式(2.35)を最小にする凸結合パラメータ $\lambda^{(n)}$ ($0 \leq \lambda^{(n)} \leq 1$) を求める。

Step 7.

$$\begin{cases} g_i^{(n)} = \lambda^{(n)} g_i^{(n-1)} + (1-\lambda^{(n)}) g_i^{-1} \\ v_a^{(n)} = \lambda^{(n)} v_a^{(n-1)} + (1-\lambda^{(n)}) v_a^{-1} \end{cases} \quad (2.41)$$

により、分担交通量、リンク交通量の修正を行う。

Step 8. $n = n + 1$ において、Step 2. へもどる。

なお、本アルゴリズムにおける Step 6. では1次元探索法としてDFP法を採用したため、 $\lambda^{(n)}$ の収束は極めて高速になっている。

下位問題は、非線形最小自乗問題であるから容易に解を得ることができる。したがって、ここでは2レベル問題である問題 [P2] を解く際には、各レベルを交互に解く方法を用いた。

2.4.2 モデルの感度分析

本モデルが、現実の都市圏における交通需要推定手法として実用可能か否かを検証するためには、

(a) 観測可能な実績分担交通量とそのODと手段に対応する均衡分担交通量との誤差の程度が、パラメータや観測不可なODペア間手段別均衡交通量推定値の精度に与える影響や、

(b) 観測サンプル数が、手段選択関数のパラメータや均衡交通量推定値の精度に与える影響について検討する必要がある。

本節では、図2.3に示すようなモデルネットワークを対象として、以下の手順で上述した検討項目である(a)、(b)に対するモデルの感度分析を行った。

- ① 固定された $\{\alpha, \beta\}$ に対するOD別手段別交通量 $\tilde{g} = \{g_i^m\}$ を問題 [P1] から求める。
- ② \tilde{g} に、変動係数 u に対応した共分散を持つ正規分布に従う誤差項を加算したものを、人の手段選択行動結果の観測値 $\bar{g} = \{g_i^m\}$ として仮定する。
- ③ このように仮定された観測値 \bar{g} の幾つかを用いて同時推定モデル [P2] を適用し、検討項目(a)、(b)に対して真のパラメータ $\{\alpha, \beta\}$ と推定値 $\{\alpha^*, \beta^*\}$ の差の検定、均衡自動車分担交通量の相対誤差の平均と最大誤差等の検討を行う。

ここでは、手段選択関数 $G_i(w_i)$ としてロジット型の関数を用いたため、式(2.33)に相当する目的関数の最終的な形は、

$$F_1 = \sum_a \int_0^{v_a} C_a^1(x) dx - \sum_i \left\{ \sum_m g_i^m \cdot \ln g_i^m + (C_i^2 - S_i^*) g_i^1 \right\} \quad (2.42)$$

となる。交通パフォーマンス要因としては所要時間を、トリップ特性要因としては、料金、トリップ特性（発、または着地がノード3の時のみ1の値をとる都心ダミー）を取上げている。リンク走行時間関数は、

$$C_a^1(v_a) = B_a(0) \cdot [1 + 2.62 (v_a/Q_a)^5] \quad (2.43)$$

で示される修正BPR関数を用いている。 $B_a(0)$ は $v_a = 0$ 時のリンク a の走行時間、 Q_a は可能交通容量であり、これらの値を表2.1に示す。パーソントリップOD構成表、自動車によるOD間費用を表2.2に示す。総トリップ数は、100,000 トリップとする。バス料金は150円とし、系統を乗り継ぐ場合には改めて正規の料金を支払うこととする。自動車の平均乗車人員は1.2人、自動車換算係数は2.0、式(2.33)におけるバスのリンク走行時間は自動車のリンク走行時間の1.5倍になるような関数形としている。バスの運行頻度は系統1が15本/時、系統2が6本/時である。バスによるOD間所要時間には、走行時間以外に運行頻度に対応した平均待ち時間が加算される。

(a)について： 観測可能サンプルとして、36個（全OD対の半分のサンプル）のODペア間自動車分担交通量を用いた場合のパラメータの値とそのt値、 $\{\tilde{\alpha}, \tilde{\beta}\} = \{\alpha^*, \beta^*\}$ に対するt値を変動係数 $u = 10.0, 5.0, 3.0\%$ について計算した結果を表2.3に示す。危険率5%という比較的緩い有意水準のもとでも、すべてのケースで、全パラメータについての $\{\tilde{\alpha}, \tilde{\beta}\} = \{\alpha^*, \beta^*\}$ という帰無仮説を棄却できない。このことは、推定パラメータは真値と等しいということを統計的に意味している。ダミー変数、および定数項のパラメータが幾分不安定になるものの、交通パフォーマンス要因である所要時間のパラメータは0でなく、かつ真値に極めて有意に等しく推定される傾向にある。 $u = 10.0\%$ の場合でも、均衡分担交通量の相対誤差の平均値は4.00%、最大誤差が9.12%程度であることから、均衡交通量に関しては、その推定精度はかなり高いことが分かる。

(b)について： サンプル数を16（2つのゾーンで発生交通量だけを調査すると仮定した場合のサンプル数）とした場合の結果を表2.4に示す。定数項の推定パラメータが真値と統計的に異なる結果となっているものの、他の変数のパラメータは1%の有意水準のもとで、真値と統計的に等しく推定されている。 $u = 10.0\%$ になると、推定パラメータの値自身は真値とかなり異なってくるが、均衡分担交通量の相対誤差の平均値は5.81%、最大誤差でさえも16.25%程度であり、本モデルは、自由度が10程度であっても、均衡交通量に関してはかなり高い精度で推定できることが分かる。

以上のことから、回帰との残差がすべて正規分布に従うようなデータをある程度のサンプル数収集できれば、観測値の変動がかなり大きい場合でも、本モデルは均衡分担交通量に関しては、かなり高い精度で推定が可能である。ことがわかる。図2.3のネットワークにおける計算時間もFACOM-382によるCPUが18秒程度であり、収束は極めて高速であることが分かる。以上のことから、本モデルは、実際の都市圏交通需要分析に対しても十分、適用可能であると考えられる。

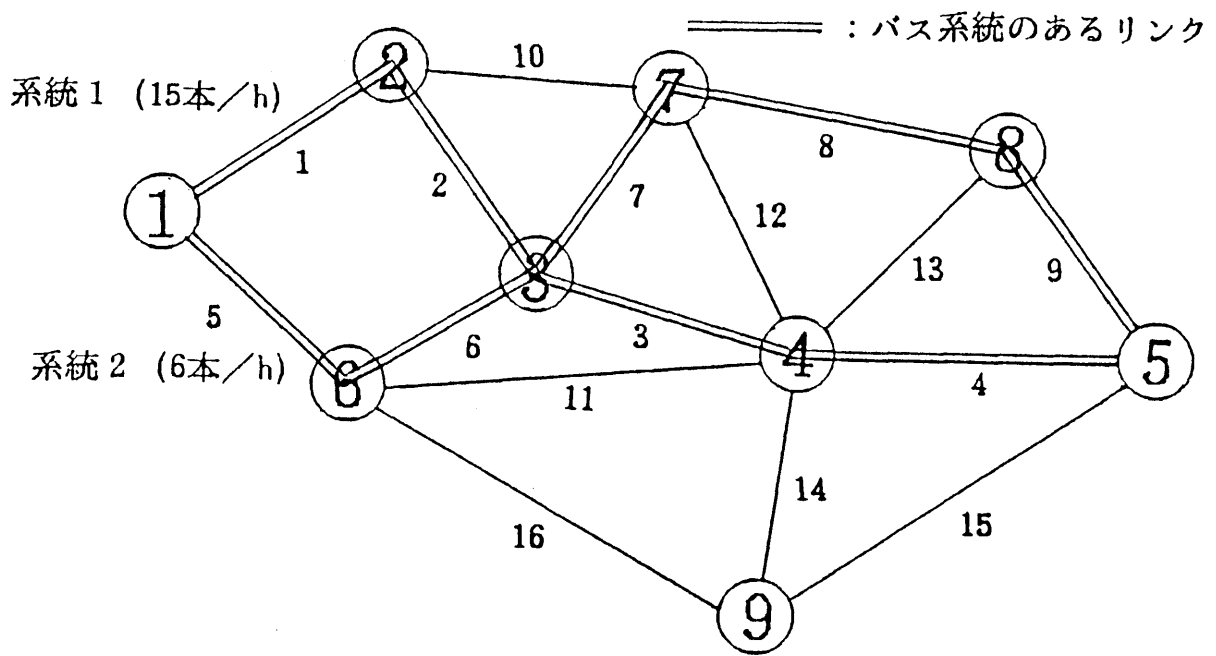


図2.3 感度分析のためのモデルネットワーク

表2.1 モデルネットワーク情報

No.	距離 (km)	$B_a(0)$ (分)	Q_a (Veh./Day)	No.	距離 (km)	$B_a(0)$ (分)	Q_a (Veh./Day)
1	2.5	3.75	4000	9	2.5	3.75	4000
2	2.5	3.75	9000	10	3.2	4.80	4000
3	3.0	3.60	9000	11	4.4	5.28	9000
4	3.5	4.20	9000	12	3.0	4.50	4000
5	3.3	6.60	6300	13	3.2	4.80	4000
6	2.0	3.00	4000	14	2.4	3.60	8000
7	2.8	4.20	4000	15	4.2	5.04	9000
8	3.4	5.10	4000	16	4.8	5.76	9000

表2.2 パーソントリップOD表
および自動車によるOD間費用

$\begin{matrix} D \\ O \end{matrix}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	*	3252	4878	4065	5691	3252	2439	2439	1626
2	150	*	4065	4065	4878	4878	1626	3252	1626
3	300	150	*	3252	1626	1626	2439	1626	4878
4	462	330	180	*	2439	1626	1626	1626	4878
5	672	540	390	210	*	3252	2439	3252	4065
6	198	270	120	264	474	*	1626	813	1626
7	342	192	168	180	354	288	*	1626	813
8	546	396	372	192	150	456	204	*	813
9	486	474	324	144	252	288	324	336	*

注) 上三角行列: パーソントリップ対称OD表
下三角行列: 自動車によるOD間費用

表 2. 3 感度分析の結果 (サンプル数36)

	真 値	推 定 値		
		u = 10%	u = 5%	u = 3%
定 数	-0.433×10^{-1}	$-0.184 \times 10^{+0}$ (2.32) 1.77	$-0.111 \times 10^{+0}$ (2.80) 1.70	-0.819×10^{-1} (3.59) 0.54
所要時間	-0.100×10^{-1}	-0.817×10^{-2} (3.86) 0.87	-0.909×10^{-2} (8.67) 0.87	-0.946×10^{-2} (17.5) 1.00
費 用	-0.100×10^{-3}	-0.468×10^{-3} (1.32) 1.03	-0.279×10^{-3} (1.52) 0.98	-0.204×10^{-3} (1.98) 1.01
都心タミ-	0.100×10^{-1}	$0.233 \times 10^{+0}$ (2.00) 1.91	$0.115 \times 10^{+0}$ (2.03) 1.86	0.671×10^{-1} (2.09) 1.78
分担交通量の相対誤差平均		4.00%	1.90%	1.05%
分担交通量の最大誤差		9.12%	4.29%	1.05%

注) 上段: 推定パラメータ、中段: 0.0に対する t 値、上段: 真値に対する t 値

表 2. 4 感度分析の結果 (サンプル数16)

	真 値	推 定 値		
		u = 10%	u = 5%	u = 3%
定 数	-0.433×10^{-1}	$-0.235 \times 10^{+0}$ (6.76) 5.51	$-0.136 \times 10^{+0}$ (6.89) 4.69	-0.966×10^{-1} (7.32) 3.92
所要時間	-0.100×10^{-1}	-0.577×10^{-2} (3.15) 2.30	-0.786×10^{-2} (8.45) 2.30	-0.877×10^{-2} (15.0) 2.10
費 用	-0.100×10^{-3}	-0.525×10^{-3} (1.66) 1.58	-0.303×10^{-3} (2.31) 1.54	-0.219×10^{-3} (2.82) 1.53
都心タミ-	0.100×10^{-1}	$0.335 \times 10^{+0}$ (1.12) 1.09	$0.164 \times 10^{+0}$ (1.09) 1.03	0.967×10^{-1} (1.07) 0.96
分担交通量の相対誤差平均		5.18%	2.90%	1.68%
分担交通量の最大誤差		16.25%	8.53%	5.21%

注) 上段: 推定パラメータ、中段: 0.0に対する t 値、上段: 真値に対する t 値

2.5 都市圏への適用事例

本節では、ここで提案した手段選択関数パラメータと需要変動型均衡交通量の同時推定法を実際の都市圏交通需要分析に適用し、実績再現性の検討、従来の分析方法との精度比較、操作性の比較をすることによって、本モデルの実用性の検証を行う。ここで定式化した需要変動型交通均衡問題を適用する場合の時間間隔には、平均トリップ時間程度をとるのが妥当であると考えられる。何故なら、経路選択に関する均衡の定義が等コスト経路選択であり、交通需要者がこの等コスト経路選択を行う際に想定する時間間隔は発地を出発して目的地に到着するまでの時間であると考えられるからである。しかし、交通量に関する実測、あるいは調査データ、特に本手法の入力データであるOD間パーソントリップ数とリンクコスト関数のパラメータ、実用性の検証を行うためのチェックデータであるOD間分担交通量や道路区間交通量については日単位のデータしか入手できないため、本節ではやむを得ず一日交通量を対象にしたモデルの適用を行っている。

2.5.1 分析対象地域とネットワーク

分析対象地域は、昭和56年中京都市群パーソントリップ調査地域内のT市、および隣接するM町である。対象地域内のゾーニングは、域内を14ゾーン、域外を14ゾーン、計28ゾーンに分割したものを採用している。自動車とバス利用者を合計したパーソントリップOD表は、域内トリップについては集計値を用い、流入、流出、通過トリップについては中京都市群全体を対象にして算出した推計値を用いて作成している。

分析の対象とするネットワークは図2.4に示す昭和56年現況道路ネットワークであり、その規模は、ノード数88（そのうちセントロイドは各ゾーン中心に1つずつ計28）、リンク数278である。その内、バスシステムが存在するリンクは174リンクである。対象地域内には24のバスシステムが設定されている。

手段選択関数はロジット型関数とし、手段選択要因は交通パフォーマンス要因としての所要時間、トリップ特性要因としての料金、トリップ特性（都心ダミー）から構成されている。リンク走行時間関数には、各道路規格に対応した修正BPR関数式(2.43)を用いている（加藤・宮城・平岡，1979）。修正BPR関数は我が国に比較的近い道路規模を持つオランダで開発されたモデルである。自動車の平均乗車人員は実績値より1.22人/台、バス料金 Y は、バス運賃表と乗車距離 L により求めた次の線形回帰モデル

$$Y = 82.28 + 19.72 L \quad (R=0.769) \quad (2.44)$$

から求めている。その他のパラメータは、前章と同一の値とした。

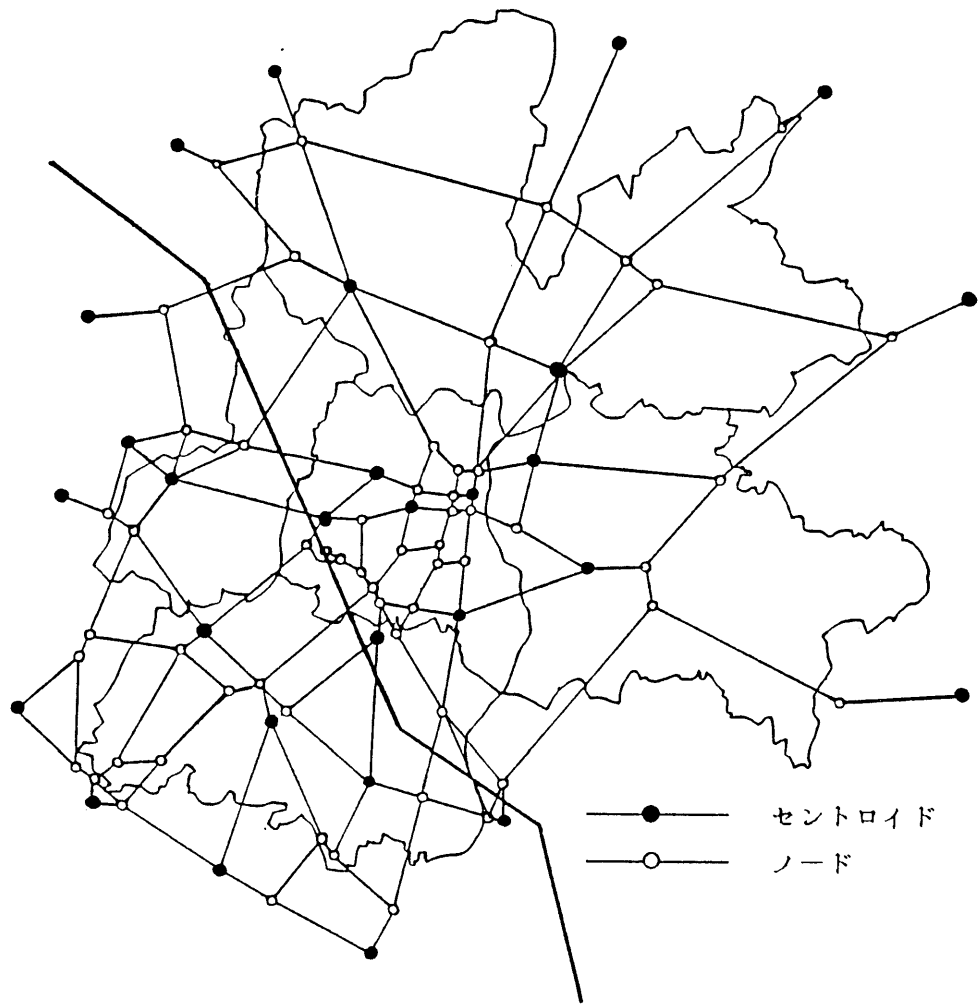


図 2. 4 分析対象ネットワーク

2.5.2 同時推定モデルの実用性の検討

本章で提案した同時推定モデル（以後、MODEL-Cと記す）の実用性の検証を行うために、自動車分担交通量と自動車分担率に関する推定均衡値と実績値との適合度を、相関分析と1次回帰分析とにより検討した。さらに、手段選択関数のパラメータが既知であり、問題[P1]を用いて均衡交通量だけを求める従来の方法 MODEL-A、MODEL-B との比較を行っている。MODEL-Aでは、交通パフォーマンス要因である所要時間のデータとしてPT調査回答値の平均値を用いて分担率モデルを推定しており、その後で問題[P1]により均衡交通量を推定している。MODEL-Bとは、PT調査全域に自動車需要量を仮配分したときの最短経路所要時間を所要時間データとして分担率モデルを推定し、その後で問題[P1]により均衡交通量を推定したモデルである。MODEL-Cは、91個のOD対に対する自動車分担交通量が観測可能とした場合（7ゾーンで自動車利用パーソントリップOD数だけを調査により把握したことに相当する）の、手段選択関数パラメータと均衡交通量同時推定モデルである。

各モデルの推定結果を表2.5に示す。MODEL-A、Bにおける分担率モデル式の重相関係数は0.5程度であり、推定精度は必ずしも良好とは言えないが、これらのパラメータを用いて問題[P1]を解いて得られる均衡分担率は、共に実績値と0.9程度の相関をもつ。このことから、分担需要変動型交通均衡モデルは、従来のようにそれ独自で対象ネットワークに適用しても現実の都市交通需要分析に対する適用性はかなり高いことが分かる。

次に、自動車分担交通量、自動車分担率に対する推定均衡値の実績値再現性を相関係数により検討すると、MODEL-Cが最も高くなっている。また、1次回帰分析におけるパラメータの有意性検定の結果、定数項は0.0に等しく、実績値にかかるパラメータは1.0に等しいという帰無仮説を共に棄却できないことから、すべてのモデルで実績値と推定値とは極めて良く適合しているといってもよい。その中でも、MODEL-Cはこれらの仮説に対するt値が他のモデルと比較して低いことから、最も適合性の高いモデルであるといえる。

リンク交通量の適合度を実測値と推定値との相関係数により検討すると、すべてのモデルで0.66以上であり、MODEL-A、B、Cはリンク交通量の実績再現性もかなり高いと判断できる。ここで用いた実測リンク交通量は、昭和56年道路交通情勢調査データから得られたものである。MODEL-Cによる推定リンク交通量と実測値との相関図を図2.5に示す。

次に、推定された手段選択関数パラメータについての検討を行う。MODEL-Aでは、所要時間と費用のt値が低く、統計的に有意な変数とならない。一方、MODEL-B、およびMODEL-Cでは、所要時間、費用、トリップ特性とも統計的に有意になっており、特にMODEL-Cではt値が高く、モデルの信頼性が極めて高くなっている。MODEL-CのパラメータはMODEL-Bのものと同類した値になっている。この理由は、MODEL-Bが分担率モデル推定時の所要時間データとして自動車交通量の仮配分後の最短経路時間という均衡値の近似値を用いているためであり、この結果からもMODEL-Cの推定パラメー

タ値の妥当性が判断できると考えられる。MODEL-Bも適合度の高いモデルといえるが、分担率モデル推定時の所要時間データを作成するために現況自動車OD交通量をあらかじめネットワークに配分するという作業を必要とすることから操作性は低い。

分担率モデルのパラメータ推定のために用いられたサンプル数は、MODEL-Cが91個と最も少ない。それにもかかわらず他のモデルより信頼性の高い分担率を得ることができるのは、交通均衡モデルによりすべてのODペアと手段の組み合わせに対する交通パフォーマンス要因サービス水準を一意に得ることができるためである。また、MODEL-Cが必要とするデータはトリップ特性要因の値以外はOD間手段別利用者数だけであり、これらのデータを収集することは従来のPT調査に比べて比較的容易である。

このように、手段別分担交通量やリンク交通量の適合度の高さ、手段選択関数パラメータ推定値の有意性、サンプル収集の容易さ、操作性の高さなど種々の理由から、本モデルは都市圏の交通需要分析に十分、貢献できると考えられる。

表 2.5 各モデルの推定結果

MODEL	推定パラメータ				サン プル 数	重 相 関 係 数	自動車分担交通量の推定値と実績値			自動車 分担率 の相 関 係 数	リンク 交通量の 相 関 係 数
	定数項	所要時間	費用	トリップ特性			相関係数	1次回帰係数	$a_1=1$ のt値		
A	$-0.355 \times 10^{+1}$	-0.174×10^{-2} (0.01)	-0.111×10^{-2} (1.62)	$0.105 \times 10^{+1}$ (5.43)	123	0.48	0.994	$a_0 = -12.369$ (1.02) $a_1 = 1.019$ (93.04)	0.96	0.906	0.665
B	$-0.340 \times 10^{+1}$	-0.163×10^{-1} (3.24)	-0.151×10^{-2} (1.96)	$0.849 \times 10^{+0}$ (4.74)	129	0.55	0.994	$a_0 = -7.572$ (0.54) $a_1 = 1.018$ (89.07)	1.59	0.906	0.689
C	$-0.249 \times 10^{+1}$ (0.86)	-0.267×10^{-1} (2.97)	-0.159×10^{-2} (4.62)	$0.141 \times 10^{+1}$ (5.55)	91	/	0.995	$a_0 = -0.363$ (0.05) $a_1 = 0.997$ (97.97)	0.28	0.920	0.663

注) () 内は t 値を示す。但し、MODEL-A, MODEL-BはSPSSにより推定したため定数項の t 値は算出していない。

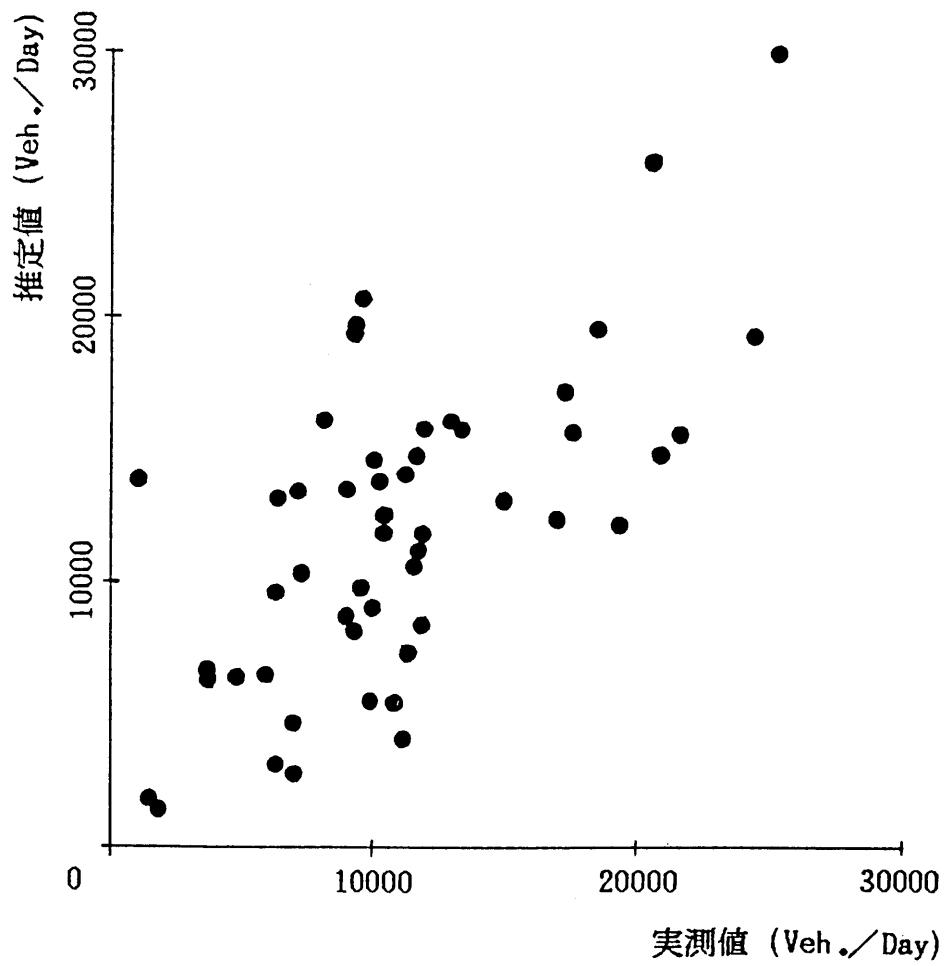


図 2. 5 リンク交通量の推定値と実測値の相関図

2.6 まとめ

本章では、自動車とバスとが同一道路区間を共用し、道路区間上で互いにそのサービス水準に影響し合うことによって手段分担需要に変動が生ずる場合の交通均衡状態を予測する実用的な手法を開発した。さらに、感度分析と実際の都市圏交通需要分析への適用結果を考察することによって、本手法の有用性を検証した。以下、本章で得られた結果をまとめてみる。

従来、分担需要変動型交通均衡問題は、主としてモデルの定式化、解の存在定理、解の一意性の検討などの理論面に重点がおかれていたが、本章では現実の都市における交通需要分析への適用性を重視している。2節では、経路選択だけに影響を与える要因だけでなく、トリップ目的やトリップエンド条件などのように手段選択だけに影響を与えられようとする要因をも手段選択関数の説明変数に含めることができるように、従来の V.I. モデルの改良を行った。V.I. モデルは不動点アルゴリズムなどの解法を用いて直接解くことができるが、選択経路の効率的な取込みを如何に行うかなどの問題点があるため、計算や操作性の面で優れた Beckmann 型最適化問題に変換して解く。この変換された Beckmann 型最適化問題の最適解は、V.I. モデルにおける解の一意性条件に加えてリンクコスト関数のヤコビ行列の対称性を仮定した場合の解になることを示した。

従来、手段選択関数のパラメータはアンケート調査による回答値の集計データを用いて推定されていた。第3節では、人の手段選択行動の結果である観測可能な実績手段別交通量を利用して、分担需要変動型交通均衡モデルから得られる推定手段別交通量と観測可能な実績手段別交通量とが回帰するように、均衡交通量と同時に手段選択関数パラメータを推定するモデルを開発した。本モデルは、手段選択関数パラメータが既知とした場合の人の規範的交通行動を求める分担需要変動型交通均衡問題である上位問題と、実際的手段選択行動結果と上位問題から得られる規範的選択行動とのずれを最小にするような手段選択関数パラメータを求める最小自乗問題である下位問題とから構成される2レベル問題となる。

本モデルの大規模ネットワークへの適用を可能にするために、4節では、バス運行頻度は固定であり、バスのリンクコストは自動車のリンクコストの関数と考えられるという現実的に許容できる仮定を導入することにより、モデルを自動車単一モードの交通均衡問題に簡略化した。さらに、本モデルを解くために Frank-Wolfe の分解原理を用いた勾配ベクトル探索法が適用可能であることを明らかにし、Frank-Wolfe 法による非線形最適化計算法のアルゴリズムを示した。均衡交通量や手段選択関数パラメータ推定値の精度に与えるサンプル数や観測値の誤差の影響を調べるために、本計算法を用いてモデルの感度分析を行った結果、回帰との残差がすべて正規分布に従うような観測データがある程度のサンプル数だけ収集することができれば、観測値の変動がかなり大きい場合でも、均衡交通量に関してはかなり高い精度で推定が可能となることが明らかになった。

5節では、本モデルを実際の都市圏交通需要分析に適用し、実績再現性の検討、従来の分析方法と

の精度比較、操作性の比較などを行った。その結果、

① アンケート調査などのデータにより、あらかじめ手段選択関数パラメータを推定した後で分担需要変動型交通均衡モデルを独自に適用した場合でも、手段別交通量、分担率、リンク交通量の推定精度はかなり高いことが分かった。このことから、人の手段選択、経路選択に関する本モデルの均衡の定義は、実際の人々の交通行動原理をうまく定義していると判断できる。

② 本章で開発した手段選択関数パラメータと均衡交通量同時推定モデルを用いて得られる手段別交通量、分担率の精度は、分担需要変動型交通均衡モデルを独自に適用した場合以上に高い。

③ アンケート調査の回答値データにより推定された手段選択関数のパラメータは、変数相互の相関性などの理由で不安定になる場合があるが、本モデルから得られる推定パラメータの統計的信頼性は極めて高い。

④ 交通需要を推定するに当たって本モデルが必要とするデータは、トリップ特性要因の値以外はOD間手段別利用者数だけであり、そのサンプル数も従来の交通需要予測手法と比較してかなり少なくてもよい。それにもかかわらず均衡交通量、手段選択関数パラメータ推定値の精度は極めて高くなるという操作上の利点がある。

などの結果が得られ、本モデルの有用性が検証できた。本モデルは、大規模な調査を必要とする大都市圏交通需要分析だけでなく、単一中小都市における簡易的な調査による交通需要分析に特に有用であると考えられる。

本研究で使用したデータは、中京都市圏総合都市交通計画協議会データ管理委員会より借用したものであり、御協力をいただいた方々に感謝の意を表す。

参考文献

宮城俊彦: 交通ネットワーク均衡の理論と計算法, 京都大学学位論文, 1982.

溝上章志・河上省吾: 分担・配分結合モデルの定式化とその実用的な適用法に関する検討, 土木計画学研究・講演集, Vol.7, pp.295-299, 1985.

加藤 晃・宮城俊彦: 交通ネットワークにおける需要均衡問題とその解法, 土木学会論文報告集, No.289, pp.121-130, 1979.

井上博司: 道路網における均衡交通量配分の勾配射影法による計算法, 土木学会論文報告集, No.313, pp.125-133, 1981.

宮城俊彦・大野栄治: 交通機関分担を考慮したネットワーク均衡問題, 土木計画学研究・講演集, Vol.7, pp.287-294, 1985.

加藤 晃・宮城俊彦・吉田俊和: 交通分布・配分統合モデルとその実用性に関する研究, 交通工学, Vol.17, No.6, pp.3-11, 1982.

加藤 晃・宮城俊彦・平岡 隆: 最短経路原則に基づく交通配分手法の比較・検討, 交通工学, Vol.14, No.7, pp.3-11, 1979.

M.Florian : A Traffic Equilibrium Model of Travel by Car and Public Transit Modes, Transpn.Sci., Vol.11, No.2, pp.166-179, 1977.

M.Florian and S.Nguyen : A Combined Trip Distribution, Modal Split and Traffic Assignment Models, Transpn.Sci., Vol.12, No.4, pp.241-346, 1978.

M.Abdulaal and L.J.LeBlanc : Methods of Combining Modal Split and Equilibrium Assignment Models, Transpn.Sci., Vol.13, No.4, pp.292-315, 1979.

L.J.LeBlanc and K.Farhangian : Efficient Algorithms for Solving Elastic Demand Traffic Assignment Problems and Mode Split-Assignment Problems, Transpn.Sci., Vol.15, No.4, pp.306-317, 1981.

M.Florian and H.Spiess : On Binary Mode Choice/Assignment Models, Transpn.Sci., Vol.17, No.1, pp.32-47, 1983.

M.J.Smith : The Existence, Uniqueness and Stability of Traffic Equilibria, Transpn.Res.-B, Vol.13B, pp.295-304, 1979.

C.Fisk and S.Nguyen : Solution Algorithms for Network Equilibrium Models with Asymmetric User Costs, Transpn.Sci., Vol.16, No.3, pp.361-381, 1982.

S.C.Dafermos : Traffic Equilibrium and Variational Inequalities, Transpn.Sci., Vol.14, No.1, pp.42-54, 1980.

S.C.Dafermos : The General Multimodal Network Equilibrium Problem with Elastic Demand, Networks, Vol.12, No.1, pp.57-72, 1982.

C.Fisk and D.Boyce : Alternative Variational Inequality Formulations of the Network Equilibrium Travel Choice Problem, Transpn.Sci., Vol.17, No.4, pp.454-463, 1983.

M.J.Beckmann, C.B.McGuire and C.B.Winsten : Studies in the Economics of Transportation, Yale University Press, New Heaven, 1956.

J.G.Wardrop : Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research, Proc.Inst. Civil Engineers, Part 2, No.1, pp.325-378, 1952.

D.E.Boyce, L.J.LeBlanc, K.S.Chon, Y.T.Lee and K.T.Lin : Combined Models of Location, Destination, Mode and Route Choice; Implementation Issues Related to a Generalized Algorithm, Proc. of the Conference on Structural Economic Analysis and Planning in Time and Space, 1981.

D.E.Boyce, L.J.LeBlanc, K.S.Chon, Y.T.Lee and K.T.Lin : Implementation and Computational Issues for Combined Models of Location, Destination, Mode and Route Choice, Environment and Planning A, Vol.15, pp.1219-1230, 1983.

M.Florian : A Traffic Equilibrium Model of Travel by Car and Public Transit Modes, Transpn.Sci., Vol.11, No.2, pp.166-179, 1977.

第3章 分担需要変動型交通均衡を考慮した最適バス輸送計画策定手法

3.1 概説

本章の目的は、リンク走行コスト関数やそれらのモードを利用した際の経路選択規範が互いに異なる多種のモードが、同一の道路ネットワークを供用する場合の交通機関分担プロセスと配分プロセスとを結合した需要変動型均衡交通需要予測手法、ならびに需要変動型交通均衡を内生的に考慮した最適バス輸送計画策定手法を開発することにある。

従来 of 四段階推定手法を用いて分布交通量や分担交通量を推定する際には、交通サービス変化後の所要時間などのサービス水準をあらかじめ与えておかなければならない。しかし、配分プロセスを経て最終的に得られるサービス水準と与件値との間に大きな差が生じる恐れがある。この点が四段階推定手法を用いて交通サービス変化後の需要を予測する場合の大きな問題点であった。本来、これらのサービス水準と需要量は交通需要と交通パフォーマンスとの均衡値として求められるべきである。同様に、新規交通サービスの効果を評価する際には、改善されたサービス水準と需要量の均衡値を用いて行わなければその正確な効果量を計測することはできない。以上のような理由から、均衡交通需要を予測するプロセスを内生化した交通サービス計画手法と効果測定手法の開発が強く望まれている。このような中で、需要変動型交通均衡理論に基づく均衡交通需要予測モデルに関しては、前章に示したように Beckmann 型最適化問題モデルや V.I. モデルなどの開発が進められてきている。しかし、最適交通サービス計画問題を定式化する際に、需要変動型交通均衡を内生的に考慮できるように拡張されたモデルはほとんど存在しないといっても過言ではないであろう。

最適交通サービス計画問題、特に、交通需要変動を考慮した交通サービス計画問題 (Poorzahedy & Turnquist, 1982 ; 朝倉, 1985) は、需要変動型交通均衡状態を定義する最適化問題の目的関数を F_2 、制約関数を $g_2 \in \mathbb{R}^{m_2}$ 、均衡交通量を $h \in \mathbb{R}^{n_2}$ とし、最適交通サービス計画問題の目的関数を F_1 、制約関数を $g_1 \in \mathbb{R}^{m_1}$ 、最適交通サービスを $s \in \mathbb{R}^{n_1}$ とすると、一般に次式のように定義される。

$$F_1(s^*, h^*) = \min_s F_1(s, h^*) \quad (3.1.a)$$

$$\text{s.t.} \quad \begin{cases} g_1(s, h^*) \leq 0 \end{cases} \quad (3.1.b)$$

$$F_2(s, h^*) = \min_h F_2(s, h) \quad (3.1.c)$$

$$\text{s.t.} \quad g_2(s, h) \leq 0 \quad (3.1.d)$$

ここで、 h^* は s が与えられたもとのパラメトリック最適解である。つまり、最適交通サービス

計画問題の中でサービス変化による需要変動を考慮する場合には、交通均衡問題をその制約条件として含み、常に2つの最適化問題を対にした定式化がなされ、最適交通サービス S は均衡交通量 h^* と同時に決定される。需要固定型の交通サービス計画問題は、式(3.1.a)~(3.1.d)において $h = h^*$ を仮定し、問題を式(3.1.a)と(3.1.b)だけで定義した、一般的な最適交通サービス計画問題の特殊問題である。

本章で対象としているように、新規の交通サービス計画案がバス輸送システムの導入である場合には、その便益の帰属主体は、現在、何らかの交通手段を利用してトリップを行っている人であり、バス輸送システム導入の効果が発生・集中交通需要や分布交通需要に大きな変化を与えることはほとんどないと考えられる。そこで、本章では、交通手段分担プロセスと配分プロセスとを結合した分担需要変動型均衡交通需要予測手法と、この分担需要変動型交通均衡をモデルの中で内生的に考慮した最適バス輸送計画策定手法を開発することを目的としている。本モデルでは、交通需要者の交通手段選択に対する意志決定結果から得られる増加便益を評価関数としたシステム評価段階と、各モード利用者の利用者最適となる経路選択に関する意志決定段階とを2段階の意志決定問題とみなし、2レベルの最適化問題で構成される Stackelberg 計画問題としてモデルの定式化を行っている。モデル構造の点で、松井・山下(1978)のモデルと類似しているが、本モデルは、需要変動型交通均衡下で個人の効用最大化原理に基づく交通手段選択結果から得られる交通需要者の総便益を最大にするようなシステムを設計することができる。そのため、より実際に近い均衡交通需要下での最適バス輸送サービス水準を決定することが可能である。

本章では、2節で多種モード混合交通均衡問題に関する定式化の一方法とその必要条件について述べる。3節では分担交通需要関数として用いた Modal Demand Model (以下ではMDモデルと記す)について解説し、MDモデルに基づく新規、既存両交通モード利用者の総便益測定法とバス輸送システム導入政策の評価基準について述べる。4節では、分担需要変動型均衡交通需要予測問題、および分担需要変動型交通均衡下での最適バス輸送計画問題を、ここでは最適運行頻度計画問題に特定化して2レベルStackelberg 計画問題として定式化する。次に、上位問題の制約条件の一つである下位問題、つまり多種モード混合交通均衡問題の凸性を証明することによって最適化問題をその必要十分条件で置換え、先に定式化した Stackelberg 計画問題を通常第Ⅱ種非線形計画問題に再定式化する。5節ではペナルティ関数法を用いた求解のためのアルゴリズムの開発と、仮想的ネットワークを対象としたモデルの適用例について考察を加え、都市域におけるバス輸送計画への本モデルの適用性の検討を行っている。

3.2 多種モード混合交通均衡問題

多種モード混合交通均衡問題とは、自動車とバスなどのように、リンク走行コストや各モード利用者の経路選択規範の異なる多種モードが同一の道路ネットワークを供用する場合の交通均衡状態を求める問題である。前章でも同じ問題を取上げているが、本章では独自の解釈を加えた新しい定式化を行っている。

3.2.1 走行コストに関する定義

いま、モデルの一般性を失わない程度に問題を簡略化するために、以下では自動車とバスという2種のモードが同一の道路ネットワークを供用している場合を考える。まず、各モードのリンク走行コストの相違点について考察する。対象とする道路ネットワークは、集合Aに含まれるリンクaと集合Nに含まれるノードnから成り、集合Iに含まれるiODペア間にトリップ分布が存在するとき、

- g_i : i番目ODペア間パーソントリップ数
- x_i : 自動車を利用するi番目ODペア間パーソントリップ数
- y_i : バスを利用するi番目ODペア間パーソントリップ数
- x_{ik} : 自動車を利用するi番目ODペア間パーソントリップのうち、k番目の経路を利用するパーソントリップ数 ($k \in K_i^x$)
- y_{ih} : バスを利用するi番目ODペア間パーソントリップのうち、h番目の経路を利用するパーソントリップ数 ($h \in K_i^y$)
- f_s : 単位時間当たりのs系統バス運行頻度 ($s \in S$)
- C_a^x : リンクaの自動車による走行コスト
- C_a^y : リンクaのバスによる走行コスト

とおく。なお、各トリップは単位時間当たりのトリップ数である。ここでは、自動車台数は平均乗車人員を介してパーソントリップ数に1対1に対応すると仮定し、自動車台数=自動車利用パーソントリップ数として以後の定式化を行う。いま、 g_i を与件とした場合には、i番目のOD間パーソントリップ数の保存式、モード別OD間パーソントリップの非負条件、およびモード別経路別OD間パーソントリップの非負条件は次式のように表される。

$$\begin{cases} g_i = x_i + y_i = \sum_k x_{ik} + \sum_h y_{ih}, \\ x_i, y_i, x_{ik}, y_{ih} \geq 0 \quad i \in I, k \in K_i^x, h \in K_i^y \end{cases} \quad (3.2)$$

x_a, y_a をリンク a 上の各モード利用者数とすると、リンク a の各モードの走行コストは、一般に両モードの利用者数の関数となり、

$$\begin{cases} C_a^x = C_a^x(x_a, y_a) \\ C_a^y = C_a^y(x_a, y_a) \end{cases} \quad a \in A \quad (3.3)$$

のように表現することができる。しかし、この関数形では可積分条件を満足するコスト関数を特定化することが困難であるため、本章でも前章と同様に自動車換算係数 γ を用いてバス台数を自動車台数に換算することにより、リンク a の交通量 v_a を自動車単一モードによる交通量

$$v_a = \sum_i \sum_k \delta_{ika} x_{ik} + \gamma \sum_s \Delta_{as} f_s \quad a \in A \quad (3.4)$$

で表す。ここに、 δ_{ika} は自動車による i 番目 OD ペア間の第 k 経路がリンク a を含むとき 1、含まないとき 0 の値をとるダミー変数であり、 Δ_{as} はバス系統 s がリンク a に設置されているとき 1 をとり、設置されていないとき 0 の値をとるダミー変数である。さらに、 C_a^y は C_a^x の関数と仮定すると、両モードのリンク走行コスト関数 C_a^x, C_a^y はそれぞれ、

$$\begin{cases} C_a^x = C_a^x(v_a, \sum_s \Delta_{as} f_s) \\ C_a^y = C_a^y(C_a^x[v_a, \sum_s \Delta_{as} f_s]) \end{cases} \quad a \in A \quad (3.5)$$

のように表すことができる。本来、 γ はバスの混入率によって変動する値である。しかし、バスの混入率の変動範囲が一定限度内では一定値と考えてもよいことがわかっているため、ここでは γ を定数と仮定している。もし γ を f_s の関数であると定義すると、コスト関数のヤコビ行列が非対称となるため、以下で述べる目的関数の解の一意性が保証されなくなる。しかし、ヤコビタイプの収束計算 (Florian and Spiess, 1983) を行えば、実用的には満足のいく解を得ることが可能であると考えられる。

3.2.2 各モード利用者の経路選択規範の定義

次に、各モード利用者の経路選択規範について考える。自動車の利用者は、Wardrop (1952) の第一原則である等コスト原則に従うものと仮定する。一方、バス利用者は容量制約なしの等コスト原則に従うものとする。この2つの経路選択規範に従って経路選択を行った時の交通状態は、交通需要者がモードを選択した後に自分にとってコストが最小である経路を選択したときの交通状態を表現することになる。これらの経路選択規範は各モード利用者にとって利用者最適な経路選択規範である。

単一モードの場合の等コスト原則による交通均衡問題は、Jørgensen(1963) によって数理最適化問題として定式化された。各モードの走行コスト関数を式(3.5) のように仮定した場合には、多種モードが混合するネットワーク上の自動車利用者の等コスト原則を満足する交通均衡問題も、換算された自動車の経路交通量を変数とした場合、次のような数理計画問題で表現することができる。

$$\text{Min : } F_x = \sum_a \int_0^{v_a} C_a^x(v) dv \quad (3.6)$$

$$\text{s.t. } \begin{cases} \sum_k x_{ik} = x_i \\ v_a = \sum_i \sum_k \delta_{ika} x_{ik} + \gamma \sum_s \Delta_{as} f_s \\ x_{ik} \geq 0, \quad k \in K_i^x, i \in I, a \in A \end{cases} \quad (3.7)$$

この最適化問題の解が、多種モード混合状態における自動車利用者の経路選択規範である等コスト原則の概念に一致することは、式(3.6), (3.7) の Kuhn-Tucker条件が、

$$\begin{cases} \sum_a \delta_{ika} C_a^x(v_a) - \lambda_i = 0, & \text{if } x_{ik} > 0 \\ \sum_a \delta_{ika} C_a^x(v_a) - \lambda_i \geq 0, & \text{if } x_{ik} = 0 \end{cases} \quad k \in K_i^x, i \in I \quad (3.8)$$

のようになり、ラグランジュ乗数 λ_i が i 番目 OD ペア間に固有のコストを示すと考えられることにより証明することができる。

一方、バス利用者の経路選択規範である容量制約なし等コスト原則は、すべてのバスリンクでバス利用者がバス輸送可能量を超過することはないという輸送可能条件、

$$Q \sum_s \Delta_{as} f_s \geq \sum_i \sum_h \delta_{iah} y_{ih} \quad a \in A \quad (3.9)$$

を満足するという条件下で、

$$\text{Min : } F_y = \sum_a \sum_i \sum_h \delta_{iha} y_{ih} C_a^y(v_a) \quad (3.10)$$

$$\text{s.t. } \begin{cases} \sum_h y_{ih} = y_i \\ v_a = \sum_i \sum_k \delta_{ika} x_{ik} + \gamma \sum_s \Delta_{as} f_s \\ y_{ih} \geq 0, \quad h \in K_i^y, i \in I, a \in A \end{cases} \quad (3.11)$$

のように定式化できる。ここで、 Q はバス定員である。この不等式制約条件付きの非線型最適化問題(3.9)～(3.11)の Kuhn-Tuckerの必要条件(今野・山下,1978)は次のようになる。

$$\sum_a \delta_{iha} \{C_a^y(v_a) + \sigma_a\} - \mu_i \geq 0 \quad (3.12.a)$$

$$y_{ih} [\sum_a \delta_{iha} \{C_a^y(v_a) + \sigma_a\} - \mu_i] = 0 \quad (3.12.b)$$

$$\sigma_a \geq 0, \quad \mu_i \geq 0 \quad (3.12.c)$$

$$\sum_i \sum_h \delta_{iha} y_{ih} - Q \sum_s \Delta_{as} f_s \leq 0 \quad (3.12.d)$$

$$\sigma_a (\sum_i \sum_h \delta_{iha} y_{ih} - Q \sum_s \Delta_{as} f_s) = 0 \quad (3.12.e)$$

$$(3.11), \quad h \in K_i^y, i \in I, a \in A \quad (3.12.f)$$

ここで、 μ_i は i 番目 OD ペアに固有のラグランジュ乗数であり、 σ_a はリンク a に固有のラグランジュ乗数である。いま、式(3.9)が有効な制約条件でなければ、つまり式(3.9)の不等号だけが成立するときには、式(3.12.e)から $\sigma_a = 0$ となる。このとき μ_i は i 番目 OD ペアのバス利用者の所要コストと考えることができ、式(3.12.a),(3.12.b)は自動車に対する Kuhn-Tucker 条件式(3.8)と同一のものとなる。したがって、常にバス利用需要が総バス定員より小さければ、最適化問題(3.9)～(3.11)の最適解は、バス利用者に対する容量制約なしの等コスト原則を表現することになる。以下の計算例では、式(3.9)が有効にならないようにバス容量 Q に大きな値を想定し、計算終了後にバス乗車人員のチェックを行うという手順をとることによって、バス利用者の経路選択規範を式(3.9)～(3.11)による定式化で満足できるようにしている。

3.3 便益の測定方法とシステムの評価基準

3.3.1 Modal Demand モデル

新規交通サービス導入による利用者便益を測定するためには、その交通サービスに対する需要関数が特定化されていなければならない。その場合、種々の需要関数のなかでも、交通サービスに対する個人の効用を明示的に表現するモデルを需要関数として用いることが望ましい。このような効用の概念を用いた交通需要モデルとしては、非集計行動モデルとMDモデルがある。非集計行動モデルが利用者の便益測定に関して多くの利点を持つことは、確率効用最大原理というモデル構築の基本的仮定から理論的にも明らかである (Williams,1977 ; Sasaki,1982)。しかし、需要関数を非集計型モデルにより定義する場合には、交通均衡状態を求めるプロセスで制約条件となる交通手段別分担交通量を得るために、何らかの方法によって集計化の作業が必要となる。何故なら、各モード利用者の交通均衡状態の定義が、3.2で示したような確定的な効用、つまり確定的な交通需要によって一意に決まる最小コストにより集計型決定論的になされているからである。非集計型需要をゾーン間集計需要に集計する作業はかなり複雑であり、また非集計型需要関数を需要変動型交通均衡問題に適応した場合に解の一意性が保証されるかどうかは不明である。以上のような理由から、本研究では需要関数として集計型であるMDモデルを採用する。

MDモデルとは、本来、以下に示すような仮説にその理論的基礎がおかれている (費用・便益研究委員会, 1980)。

- (1) 潜在需要の仮定： 各OD間には、両ゾーン間交通のために要する不効用とは無関係に潜在的な需要があるものと仮定し、その大きさは、発着両ゾーンの経済的要因、社会的要因、および両ゾーン間の結び付きの強さを表す要因によって定まる。
- (2) 交通目的の効用： 潜在需要のすべてについてみれば、各OD間の交通目的の効用はある種の確率分布をなし、その分布形は各OD対について共通である。
- (3) 交通による不効用要因の相対評価： 交通に伴う不効用要因に対して利用者は主観的な相対評価を行うが、潜在需要のすべてについて見た場合には、不効用要因相互の相対的評価基準はある種の確率分布をなし、その分布は各ODについて共通とみなし得る。
- (4) 確率分布の独立性： 交通目的の効用の分布と交通に伴う不効用要因の相対的評価値の分布は、互いに独立であると仮定する。
- (5) 交通手段選択基準と有効需要： 交通利用者は、各種交通手段のもつ不効用について各自、評価を行い、不効用の総和が最小である交通手段を確定的に選択する。また、潜在需要のうち、選択された交通手段の不効用よりも大きな効用を持つ交通のみが有効需要として顕在化する。

ここではOD間トリップ数 g_i を与件としているから、仮説(1)における潜在需要を仮定せず、交通需要者全員にとって仮説(2)のOD間交通目的の効用の方が交通による不効用よりも大きいということを仮定していることになる。さらに、仮説(3)の交通に伴う不効用要因として所要費用 p と所要時間 t だけを考え、不効用要因相互の相対的評価基準を時間評価値 w とするならば、交通に伴う不効用は、一般化費用 $C = p + w t$ で表されることになる。したがって、 i 番目ODペア間各モードの所要費用、所要時間を $p_i^x, p_i^y, t_i^x, t_i^y$ 、時間評価値 w の確率密度関数を $\phi(w)$ とすると、自動車、バスの均衡分担需要量 x_i^*, y_i^* は、それぞれ、

$$\begin{cases} x_i^* = g_i \int_{w_i^*}^{\infty} \phi(w) dw & (3.13.a) \\ y_i^* = g_i \int_0^{w_i^*} \phi(w) dw & (3.13.b) \end{cases}$$

によって表される。ここに、 w_i^* は、所要時間、費用の均衡値により定義される

$$w_i^* = (p_i^{x^*} - p_i^{y^*}) / (t_i^{y^*} - t_i^{x^*}) \quad i \in I \quad (3.14)$$

で表される均衡値である(青山・芝原,1978)。その他の変数についても均衡状態にあるものには*を付けて均衡値を示している。ただし、ここでは、

$$t_i^y \geq t_i^x, \quad \text{かつ} \quad p_i^x \leq p_i^y \quad i \in I \quad (3.15)$$

の場合だけを考えている。 t_i^y は、運行頻度に対応した平均バス待ち時間(運行間隔の1/2)を含んでおり、均衡要因であるリンク走行所要時間の関数である均衡経路所要時間だけでなく、制御可能な計画決定変数である系統別運行頻度の関数にもなっている。

3.3.2 バス輸送システムの便益測定法とシステムの評価基準

新規の交通施設投資に対する効果の測定には、従来、新規施設への転換と誘発利用者だけに対する利用者余剰の測定が用いられてきた。実際には、新規交通施設の設定により、新規交通施設へ既存交通施設からの転換需要が生じ、既存交通施設の混雑も緩和される。それによって新規交通施設設定後も既存交通施設を利用する主体に対しても走行コストの減少という純間接便益が生じる。そのため、総合的な交通計画の見地からは、新規交通施設利用者だけでなく既存交通施設利用者への効果をも測定することが必要である。本節では、MDモデルを導入した両モード利用者の便益測定法と、それを用いたバス輸送システム導入の評価基準について検討を行う。

いま、一般化費用が C_x の自動車だけが使用されている任意のODペア間に、一般化費用が C_y の新規バス輸送システムが導入されたとすると、自動車からバスへの転換が生じ、交通手段分担需要の変動に伴う交通均衡状態がシフトすることによって両モードの一般化費用はそれぞれ C_x^* 、 C_y^* に移動し、 w_i は w_i^* でその均衡値を示す(図3・1参照)。このときの両モード利用者の総便益の増加量は、

(a) 自動車からバスへの転換者にとっては費用は減少するが所要時間は増加するから、直接便益は、
(費用節約額) - (増加所要時間の貨幣価値換算額)

(b) バスシステム導入後も自動車を利用する人にとっては、混雑緩和により所要時間が減少するから、その純間接便益として、
(減少所要時間の貨幣価値換算額)

となる。従って、システム全体の利用者の総便益の増加量 B は、

$$B = \sum_i \left\{ (p_i^{x^*} - p_i^{y^*}) \int_0^{w_i^*} \phi(w) dw + (t_i^{-x} - t_i^{y^*}) \int_0^{w_i^*} w \phi(w) dw + (t_i^{-x} - t_i^{x^*}) \int_{w_i^*}^{\infty} w \phi(w) dw \right\} g_i \quad (3.16)$$

となる。ここで、 t_i^{-x} はバス輸送システム導入前の自動車による*i*番目ODペア間所要時間である。バスへの転換に伴う自動車利用率の減少による道路混雑緩和効果以上に、バスの過剰投入が道路混雑を激化させる場合には、(a)、(b)の各便益が逆符号となるだけで、総便益増加量は同様に式(3.16)で表される。式(3.16)は、交通手段分担需要の変動を考慮した交通均衡状態の下でトリップを行う全ての人に対する便益を測定していることから、新規バス輸送システム導入効果を評価するという意味で適切な評価指標と考えることができる。そこで、本章では、バス輸送システム導入の評価関数として式(3.16)を採用し、次節以下では B を最大にするような最適バス輸送システムの計画策定手法の検討を行う。

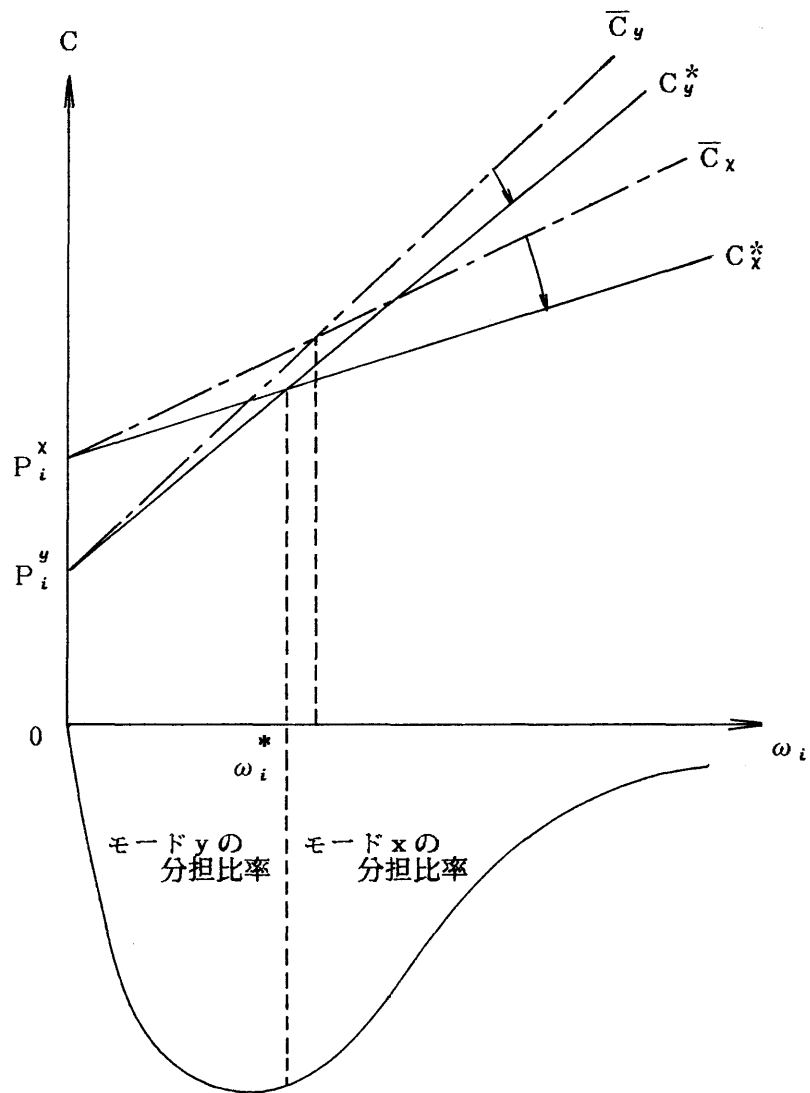


図 3. 1 手段選択需要の均衡過程

3.4 分担需要変動型交通均衡を考慮した最適バス輸送計画策定手法

3.4.1 最適バス輸送計画問題の定式化

分担需要変動型交通均衡下での均衡交通需要量は、3.3.1で述べた交通手段分担需要の発生機構と、3.2で述べた多種モード混合交通均衡条件との相互関係を満足する交通量として求められる。したがって、分担需要変動型交通均衡を考慮した最適バス輸送計画問題とは、上記の交通需要予測手法を計画評価システムの中で内生的に考慮しながらシステム評価関数を最適にするようなバスサービス水準を決定する問題である。バス系統網は既知として運行頻度だけを決定することに問題にしぼるなら、最適バス輸送計画問題は、制御可能な系統別バス運行頻度をパラメトリックに変化させたときの需要変動と各モードに対する交通均衡条件式(3.6),(3.7)と式(3.9)~(3.11)を共に満足させながら、式(3.16)で示されるシステム評価関数を最大にするような系統別バス運行頻度ベクトル f^* を決定し、それに伴う両モードの均衡経路交通量ベクトル x^*, y^* を求める問題となる。この問題は以下のように定式化することができる。

[P1]

$$\text{Max : } B(Z) = \sum_i \left\{ (p_i^x - p_i^y) \int_0^{w_i} \phi(w) dw + (t_i^x - t_i^y) \int_0^{w_i} w \phi(w) dw \right. \\ \left. + (t_i^x - t_i^x) \int_{w_i}^{\infty} w \phi(w) dw \right\} g_i$$

$$\text{s.t. } \sum_k x_{ik} + \sum_h y_{ih} - g_i = 0 \quad i \in I$$

$$w_i = (p_i^x - p_i^y) / (t_i^y - t_i^x) \quad i \in I$$

$$\text{Min : } F_x = \sum_a \int_0^{v_a} C_a^x(v) dv$$

$$\text{s.t. } \begin{cases} \sum_k x_{ik} = x_i & i \in I \\ v_a = \sum_{i,k} \delta_{ika} x_{ik} + \gamma \sum_s \Delta_{as} f_s & a \in A \\ x_{ik} \geq 0 & k \in K_i^x, i \in I \end{cases}$$

$$\text{Min : } F_y = \sum_a \sum_{i,h} \delta_{iha} y_{ih} C_a^y(v_a)$$

$$\text{s.t. } \begin{cases} \sum_h y_{ih} = y_i & i \in I \\ v_a = \sum_{i,k} \delta_{ika} x_{ik} + \gamma \sum_s \Delta_{as} f_s & a \in A \\ y_{ih} \geq 0 & h \in K_i^y, i \in I \end{cases}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Q \sum_s \Delta_{as} f_s > \sum_{i,h} \delta_{ih} y_{ih} \quad a \in A \end{array} \right.$$

この問題 [P 1] は、上位の最適化問題の制約条件として最適化問題を含む 2 レベル Stackelberg 計画問題を構成している。

まず、この 2 レベル Stackelberg 計画問題の構造について考察する。バス輸送サービス計画主体の評価関数、式 (3.16) をその目的関数として持つ上位最適化問題は、計画主体の設定する運行頻度と内生的に決定される所要コストの変化を通して、式 (3.6), (3.7) と式 (3.9)~(3.11) で示される下位最適化問題の制約条件 x_i, y_i に影響を及ぼす。一方、同一道路区間上を自動車とバスとが共用するために、両手段の換算交通量 v_a がリンク走行コストに影響を与える。この走行コストのもとで、上位問題の解として与えられる手段別の利用者 x_i, y_i は、下位最適化問題によって利用手段ごとに等コスト経路選択となるように経路配分され、その結果として利用者最適なフローパターン x_{ik}, y_{ih} を求めることができる。これらは手段別の OD 間走行コストを変化させ、上位の最適化問題の w_i の値を変化させる。上位最適化問題は、その目的関数を最適にする運行頻度 f_s を決定するというバス輸送サービス計画主体の意志決定構造を表すと同時に、交通手段選択に関するトリップ主体の意志決定構造をもモデル化している (図 3.2 参照)。

次に、このモデルが再現する現象について考察する。上位の最適化問題の中に含まれる分担率モデルでは、任意の OD 間交通需要者は、与えられたサービス水準のもとで自分にとって非効用が最小の交通手段を必ず選択するという意志決定を行い、システム最適化のために非効用が最小であるモード以外のモードを強制的に選択させられることはない。一方、下位の最適化問題では、各モードの分担需要保存条件のもとで利用者最適な経路選択に関する意志決定がなされる。このため、本モデルは、任意に固定された制御可能バス運行頻度と下位の最適化問題から得られる均衡コストのもとで、経路選択だけでなく交通手段選択についても利用者最適パターンを再現する。さらに、交通手段選択プロセスが経路選択プロセスよりも上位のレベルにあることから、手段と経路を選択する際の段階的な意志決定のモデル化を行っていることになる。したがって、本モデルは、人の段階的な利用者最適交通選択行動結果から得られる交通需要を予測しながら最適バスサービス水準の設定を行うことが可能となる。

以上のことから、問題 [P 1] を需要変動型交通均衡問題として考える場合には、外生的に設定されたバスサービス水準のもとでの交通手段選択過程と経路選択過程を結合した均衡フローパターンが再現される。一方、最適バス輸送計画問題として考える場合には、[P 1] を解くことによって分担需要変動型交通均衡下でのシステム最適なバスサービス水準を決定することができる。

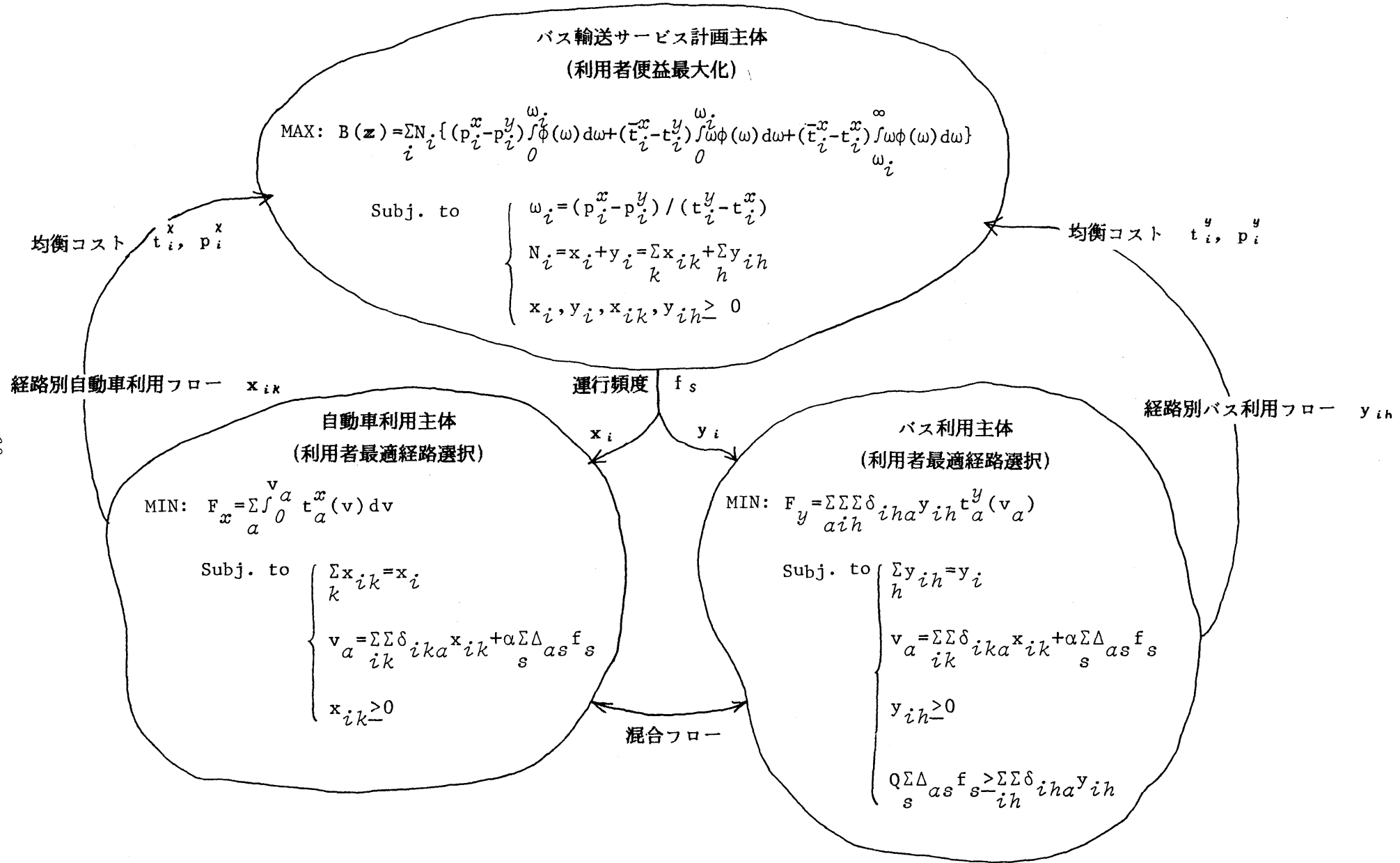


図 3. 2 最適バス輸送問題の概念図

3.4.2 Stackelberg 計画問題

Stackelberg 計画問題とは以下のような問題をいう (志水, 1982)。今、意志決定者Aは、相手の意志決定者Bの目的関数や制約条件に関するすべての情報を持っているが、意志決定者Bは意志決定者Aに関する情報としてはAがBに示す政策しか分からず、Bはその政策に対して自己の目的関数を最適にするように行動すると仮定する。このような状況下では、意志決定者Aが主導権を握っていて、Aにとっての最適政策を先に決定できる。このような状況を意志決定者A先手のStackelberg 解という。

数学的に示すならば、以下のように定義される。今、意志決定者Aの決定変数、目的関数、制約関数を $x \in R^{n_a}$, F_a , $g_a \in R^{n_a}$ とする。意志決定者Bのそれらを $y \in R^{n_b}$, F_b , $g_b \in R^{n_b}$ とすると、Stackelberg 計画問題は次のように定式化される。

$$F_a(x^*, y(x^*)) = \min_x : F_a(x, y(x)) \quad (3.17.a)$$

$$\text{s.t.} \quad \begin{cases} g_a(x, y(x)) \leq 0 \end{cases} \quad (3.17.b)$$

$$\begin{cases} F_b(x, y(x)) = \min_y : F_b(x, y) \end{cases} \quad (3.17.c)$$

$$\begin{cases} \text{s.t.} \quad g_b(x, y) \leq 0 \end{cases} \quad (3.17.d)$$

ただし、 $y(x)$ は、 x が与えられたもとでの下位問題(3.17.c), (3.17.d)のパラメトリック最小解である。

本モデルに当てはめるならば、解ベクトル x^* は、システム最適状態を達成するバス運行頻度であり、 $y(x^*)$ が利用者最適なフローパターンに対応する。また、意志決定者Aはバス輸送計画策定者であり、その目的関数は、新規、既存両交通施設利用者の増加便益に負符号を付けたものにあたり、制約関数はODトリップ数の保存式などに対応する。意志決定者Bは各モードの交通需要者であり、目的関数は、その関数を最小化することによって各モード利用者最適な経路選択を達成する必要条件を得ることができる式(3.6) および式(3.10)であり、制約関数はモード別OD保存式や非負条件に相当する。したがって、問題 [P1] は、交通需要者はバス輸送計画策定者が示す政策しか知らず、その政策のもとで各交通需要者にとって最適な交通行動を行うが、バス輸送計画策定者は交通需要者の目的関数や制約条件等のすべての情報を把握しているから、交通需要者の最適行動結果から得られる均衡交通需要を予測しながら自らの目的である社会的便益の増加量を最大にする政策を提示するという意志決定手順のモデル化となる。この問題はまさに、バス輸送計画策定者先手の Stackelberg 計画問題である。

3.4.3 下位問題の凸性とモデルの再定式化

前節で定式化された2レベル Stackelberg計画問題 [P1] を直接解くことは困難であるが、下位の最適化問題をその必要十分条件で置換えることができれば、問題 [P1] の必要条件を得ることができる。そのためには、 x, y, f を解ベクトル、 $Z = (x, y, f)$ としたとき、

- (a) 目的関数が Z に関して微分可能な凸関数である。
- (b) 任意に固定された f に対して、下位の最適化問題の有限な最適解 $x(f), y(f)$ とそれに対応するラグランジュ乗数が存在する。

という条件を満たさなければならない。条件(b)は2章より明らかであるから、条件(a)の多種モード混合交通均衡フローを決定する下位の最適化問題(3.6), (3.7)の凸性についての検討を行う。

制約条件(3.7)は、経路交通量、および運行頻度に関して線形であるから、これらを満足する変数の集合 R は凸集合である。次に、目的関数(3.6)の凸性について考察する。いま、解集合に含まれる2点 $Z^{(1)}, Z^{(2)} \in R$ に関して、式(3.6)をテーラー展開すると、

$$F_x(Z^{(2)}) = F_x(Z^{(1)}) + (Z^{(2)} - Z^{(1)})^t \nabla F_x(Z^{(1)}) + 1/2 (Z^{(2)} - Z^{(1)})^t \cdot H[\theta Z^{(2)} + (1-\theta)Z^{(1)}] \cdot (Z^{(2)} - Z^{(1)}) \quad (3.18)$$

となる。ここで、 $0 < \theta < 1$ であり、 H はヘッセ行列を示す。このとき、

$$\begin{aligned} & F_x(Z^{(2)}) - F_x(Z^{(1)}) - (Z^{(2)} - Z^{(1)})^t \nabla F_x(Z^{(1)}) \\ &= (1/2) \cdot (Z^{(2)} - Z^{(1)})^t \cdot H[\theta Z^{(2)} + (1-\theta)Z^{(1)}] \cdot (Z^{(2)} - Z^{(1)}) \\ &= (1/2) \cdot \sum_a^x \{ dC_a^x(v_a)/dv_a \} \cdot [\{ \sum_{i,k} d_{ik} (\partial v_a / \partial x_{ik}) \} \\ & \quad + \{ \sum_{i,h} e_{ih} (\partial v_a / \partial y_{ih}) \} + \{ \sum_s q_s (\partial v_a / \partial f_s) \}]^2 \\ & \quad + \sum_a^x C_a^x(v_a) \cdot \{ (\partial / \partial x_{ik}) + (\partial / \partial y_{ih}) + (\partial / \partial f_s) \}^2 v_a \quad (3.19) \end{aligned}$$

となる。ここで、 d_{ik}, e_{ih} はそれぞれ、点(1)と(2)の解集合における i ODペア間の自動車とバスによるトリップの第 k 、第 h 番目の経路交通量の差であり、 q_s は s 系統の運行頻度の差を表わす。 $C_a^x(v_a)$ は単調増加関数と仮定できるから、 $dC_a^x(v_a)/dv_a \geq 0$ となる。また、 $x_{ik} \geq 0, y_{ih} \geq 0, f_s \geq 0$ に対して $v_a \geq 0$ であり、かつ $\sum_a^x C_a^x(v_a) \geq 0$ であるから、式(3.19) ≥ 0 となり、 H は半正定値となる。以上のことから、

$$F_x(Z^{(2)}) \geq F_x(Z^{(1)}) + (Z^{(2)} - Z^{(1)})^t \nabla F_x(Z^{(1)}) \quad (3.20)$$

となるから、目的関数(3.16)は凸関数であるといえる。

凸関数であれば擬似凸関数であり、目的関数が擬似凸関数で、かつ実行可能領域が凸であれば、式(3.7),(3.8)で表される Kuhn-Tucker条件は十分条件となるから、式(3.7),(3.8)は式(3.6),(3.7)の必要十分条件となる。以上のことから、多種モード混合フローにおける等コスト原則に従う交通均衡問題も単一モードの場合(井上, 1975)と同様に $Z \in R$ で凸計画問題となり、 F_x の局所的最適解は大局的最適解に一致する。バス利用者に対する最適化問題についても全く同様のことが成立する。したがって、上位の最適化問題の制約条件を構成する2つの下位の最適化問題はその必要十分条件で置換えることができる。

以上の結果から、3.4.1で定式化された2レベル Stackelberg計画問題 [P1] は以下に記す問題 [P2] と等価になる。

[P2]

$$\text{Max : } B(Z) = \sum_i \left\{ (p_i^x - p_i^y) \int_0^{w_i} \phi(w) dw + (t_i^{-x} - t_i^y) \int_0^{w_i} w \phi(w) dw + (t_i^{-x} - t_i^x) \int_{w_i}^{\infty} w \phi(w) dw \right\} g_i$$

$$\text{s.t. } \sum_k x_{ik} + \sum_h y_{ih} - g_i = 0$$

$$w_i = (p_i^x - p_i^y) / (t_i^y - t_i^x)$$

$$\sum_k x_{ik} = x_i, \quad \sum_h y_{ih} = y_i$$

$$v_a = \sum_{i,k} \delta_{ika} x_{ik} + \gamma \sum_s \Delta_{as} f_s$$

$$\sum_a \delta_{ika} C_a^x(v_a) - \lambda_i = 0, \quad \text{if } x_{ik} > 0$$

$$\sum_a \delta_{ika} C_a^x(v_a) - \lambda_i \geq 0, \quad \text{if } x_{ik} = 0$$

$$\sum_a \delta_{iha} C_a^y(v_a) - \mu_i = 0, \quad \text{if } y_{ih} > 0$$

$$\sum_a \delta_{iha} C_a^y(v_a) - \mu_i \geq 0, \quad \text{if } y_{ih} = 0$$

$$Q \sum_s \Delta_{as} f_s \geq \sum_{i,h} \delta_{iha} y_{ih}$$

$$x_{ik} \geq 0, \quad y_{ih} \geq 0$$

$$k \in K_i^x, \quad h \in K_i^y, \quad i \in I, \quad a \in A$$

なお、 λ_i と μ_i とは、

$$\lambda_i = p_i^x + w_i t_i^x, \quad \mu_i = p_i^y + w_i t_i^y \quad (3.21)$$

の関係にある。この再定式化により、問題 [P 2] は等式、不等式条件をもつ通常の第 II 種の非線形計画問題に変換される。なお、 $B(Z)$ はその中の、

$$t_i^x \int_0^{w_i} w \phi(w) dw + t_i^y \int_{w_i}^{\infty} w \phi(w) dw = \text{constant} \quad (3.22)$$

より、以後、式(3.8)の目的関数には

$$B'(Z) = \sum_i \left\{ (p_i^x - p_i^y) \int_0^{w_i} \phi(w) dw - t_i^y \int_0^{w_i} w \phi(w) dw - t_i^x \int_{w_i}^{\infty} w \phi(w) dw \right\} g_i \quad (3.23)$$

を用いる。

3.5 解法の開発とモデルの適用例

3.5.1 解法のアルゴリズム

第Ⅱ種の非線形計画問題は種々の方法で解くことが可能であるが、ここでは、問題 [P 2] の各種制約条件をペナルティ関数法によって、

$$\text{Min} : F(u, \gamma^{(m)}) = -B(z) + \gamma^{(m)} \sum_i G_i^{-1}(z) + \gamma^{(m)^{-1/2}} \sum_j E_j^2(z) \quad (3.24)$$

なる制約条件なしの最小化問題に変換し、以下に示す問題 [P 2] のもつ特性に適したアルゴリズムを適用することによって解くことを試みる。ここで $\gamma^{(m)}$ は $\lim_{m \rightarrow \infty} \gamma^{(m)} = 0$ を満足し、単調に減少する正の実数である。関数 $G_i(z)$ 、 $E_j(z)$ はそれぞれ、不等式、および等式条件関数である。 u は $u = (z, \lambda_i, \mu_i)$ なる解ベクトルを示している。

問題 [P 2] を解く場合に考慮すべき特性としては、以下のようなものがある。

(a) 問題 [P 2] の決定変数の中で、各モードの経路別交通量を表す変数、およびその個数はあらかじめ与えられているわけではなく、最適化の過程で求まるものである。また、その総数はネットワーク規模のべき乗のオーダーで増加するため、決定変数の数が極めて多くなる。

(b) 下位の最適化問題を最適解に収束させるのと同時に、上位の最適化問題自身も最適解の方向へ修正させなければならない。

問題点 (a) を回避するためには、各モードの通過経路を各イテレーションで実際に利用可能である通過経路だけに特定化して記憶し、計算時の記憶領域をできる限り小さくすることが重要である。そこで、利用可能な最短経路を逐次取り込む方法 (Leventhal et al, 1973) を用いる。この方法を用いることによって、問題 [P 2] における $x_{ik} = 0$ 、 $y_{ih} = 0$ の場合の不等式条件、つまり利用可能な最短経路以外の経路に関する条件をペナルティ関数に含ませる必要がなくなるという利点が生じる。問題点 (b) を解決するためには、下位の最適化問題である需要固定型交通均衡問題を解くためのステップを、上位の最適化問題の解の改善がなされるような収束ループの内側に取入れたアルゴリズムとする必要がある。以下に本研究で適用したアルゴリズムを紹介する。このアルゴリズムは、宮城 (1982) によって開発されたものを問題 [P 2] を解くために拡張したものである。

Step 0. 初期実行可能解 $u^{(0)}$ を与え、

$$E_x^{(m)} = E_y^{(m)} = \phi \quad (3.25)$$

および、 $m = 0$ とおく。ここで、 $E_x^{(m)}$ 、 $E_y^{(m)}$ は、それぞれ、自動車とバス利用者の経路選択対象となる経路集合を示している。

Step 1. $u^{(m)}$ に対応したリンクのリンクフロー $u^{(m)}$ を求め、目的関数値 $F^{(m)}$ を計算する。次に、各モードのリンク走行コスト C_a^x, C_a^y を求め、各ODペア間最短経路 p_x^*, p_y^* を探索する。

Step 2. $p_x^* \in E_x^{(m)}, p_y^* \in E_y^{(m)}$ であれば、Step 3. へ。そうでなければ、

$$E_x^{(m)} = E_x^{(m)} \cup p_x^*, \quad E_y^{(m)} = E_y^{(m)} \cup p_y^* \quad (3.26)$$

とする。

Step 3. $p_x^* \in E_x^{(m)}, p_y^* \in E_y^{(m)}$ 、および各系統の運行頻度 f_s に対して、勾配 $\nabla F(u^{(m)})$ を計算する。

Step 4. $p_x^* \in E_x^{(m)}, p_y^* \in E_y^{(m)}$ 、 f_s からなる変数集合 $u^{(m)}$ に対して、

$$\|\nabla F(u^{(m)})\| < \tau \quad (3.27)$$

ならば計算を終了し、そうでなければ Step 5. へ進む。ここで、 τ はあらかじめ設定された正の値である。

Step 5. 降下方向ベクトル $d^{(m)}$ を求める。ここでは勾配法を用いたため、 $d^{(m)}$ は次のように表される。

$$d^{(m)} = -\nabla F(u^{(m)}) \quad (3.28)$$

Step 6. 最適刻み幅 $\beta^{(m)}$ を、

$$F(u^{(m)} + \beta^{(m)} d^{(m)}) = \min_{\beta} F(u^{(m)} + \beta d^{(m)}) \quad (3.29)$$

のような β に関する1次元探索法により求める。

Step 7. 新しい解を、

$$u^{(m+1)} = u^{(m)} + \beta^{(m)} d^{(m)} \quad (3.30)$$

とする。もし、 $u^{(m+1)}$ のうち負となるものがあれば0とおき、それらに対応する自動車利用経路 q_x 、バス利用経路 q_y を経路集合 $E_x^{(m)}, E_y^{(m)}$ から削除し、新しい利用可能経路集合を、

$$E_x^{(m+1)} = E_x^{(m)} - q_x, \quad E_y^{(m+1)} = E_y^{(m)} - q_y \quad (3.31)$$

とする。

Step 8. 新しい目的関数値 $F^{(m+1)}$ を求める。

Step 9. あらかじめ与えられた正値 ε_1 、 ε_2 に対して、

$$F^{(m)} - F^{(m+1)} < \varepsilon_1 \quad (3.32)$$

$$\beta^{(m)} \|d^{(m)}\| < \varepsilon_2 \quad (3.33)$$

を共に満足するならば計算を終了する。そうでなければ Step 10. へ進む。

Step 10. $m = m + 1$ として Step 1. へ戻る。

3.5.2 モデルの適用例

本章で提案したモデルとその解法の有用性を検証するため、図3.3に示す1-OD、2-経路のネットワークのうち、片方の経路にバス路線が設定されているようなモデルネットワークを対象にして、バス運行頻度を外生的に与えた場合の交通需要予測問題に対するモデルの感度分析を行った。トリップ数 900人、バス料金 140円、バスの自動車換算係数 2.0、平均乗車人数 1.2人、自動車の費用を 250円とする。ここでは簡単のために、両モードのODペア間所要費用 p_i^x 、 p_i^y を通過経路によらず一定値で与えたため、等コスト経路選択規範は等時間経路選択規範に一致する。自動車による走行コスト関数としては、

$$C_a(v_a) = A_a + B_a v_a \quad (3.34)$$

なる線形関数を用い、バスの走行コストは自動車の走行コストの 1.5倍となる関数を仮定した。バスによるOD間所要時間は、バス利用経路上のリンク走行総時間と平均待ち時間の和であり、系統別運行頻度 f_s の大きさにも依存する。各ネットワーク情報は図3.3に示すとおりであり、時間評価値 w は $N(6.67, 9.07)$ の正規分布(青山・西岡, 1980)の正の部分だけを考えた確率分布に従うものとする。表3.1にバス運行頻度に対する感度分析の結果を示す。バス運行頻度が少ない場合、つまりバス分担率が低く道路混雑が激しい場合には、経路1と経路2の間で所要時間の相対誤差が5%程度生じている。これは、第2番目通過経路を配分対象経路に取り込んだときの自動車によるODペア間所要時間を、現イテレーションでの利用経路所要時間の平均値を用いて算定していることに起因するものと考えられる。この相対誤差も、運行頻度が増加し道路混雑が緩和されるのに伴って減少する。実用的にはこの程度の相対誤差は無視できると考えられる。また、運行頻度の変化に伴う自動車、バス両モードの所要時間の変化、目的関数値の収束状況、バス分担率の増加率の定性的傾向が常識的であることからみても、本モデルとその解法のアルゴリズムの有効性が検証できたものと考えられる。図3.4、および図3.5に運行頻度が6本/時の場合の解と目的関数値の収束状況を示す。28回の繰返しにより ϵ_1 と ϵ_2 制約による収束判定条件を満足するが、16回程度で最終的な解にはほぼ到達していることがわかる。28回の繰返し計算に必要な総CPU時間はFACOM-382で2.96秒程度であり、降下方向ベクトル $d^{(n)}$ を求めるのに不効率な勾配法を用いていることを考えるならば、計算時間の上でも十分に実用性のあるアルゴリズムであると考えられる。なお、上位の最適化問題の凸性が保証されていないために収束回数やノルムにばらつきがみられるが、初期値を変化させてみても同一の解に収束することから、これらの解は大局的最適解に到達していると考えられる。

次に、図3.5に示すような、リンク1と2をバス路線と共用している道路ネットワークを対象にして、運行頻度をパラメトリック決定変数として取り込んだバス輸送計画問題を解く。徒歩速度を3 km/h、その他の定数については前例と同様とし、各リンクのリンク特性値 A_a 、 B_a の値は図3

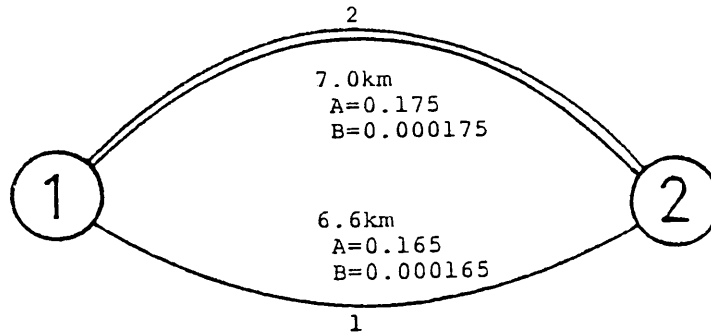


図 3. 3 感度分析のためのモデルネットワーク

表 3. 1 バス運行頻度に関する感度分析の結果

BUS FREQ. (台/h)			3	4	6	10	15	20
自動車	経路 1	利用者数	227.15	204.91	175.25	146.41	146.38	139.78
		所要時間	11.67	11.59	11.35	11.11	11.11	11.05
	経路 2	利用者数	61.70	52.59	42.12	32.53	8.76	7.47
		所要時間	11.16	11.10	11.01	11.00	10.90	10.99
バス	利用者数		161.16	192.13	232.64	271.06	284.85	302.75
	所要時間		6.65	24.07	21.49	19.49	18.34	17.80
F(u)			65819.	58912.	49766.	40852.	35615.	33328.
B'(z)			61318.	55962.	48536.	40724.	35148.	33282.
収束回数			44	33	28	50	47	17
VF			29.7	7.6	32.2	6.9	45.3	16.8
バス分担率			35.8	42.6	51.7	60.2	65.5	67.2

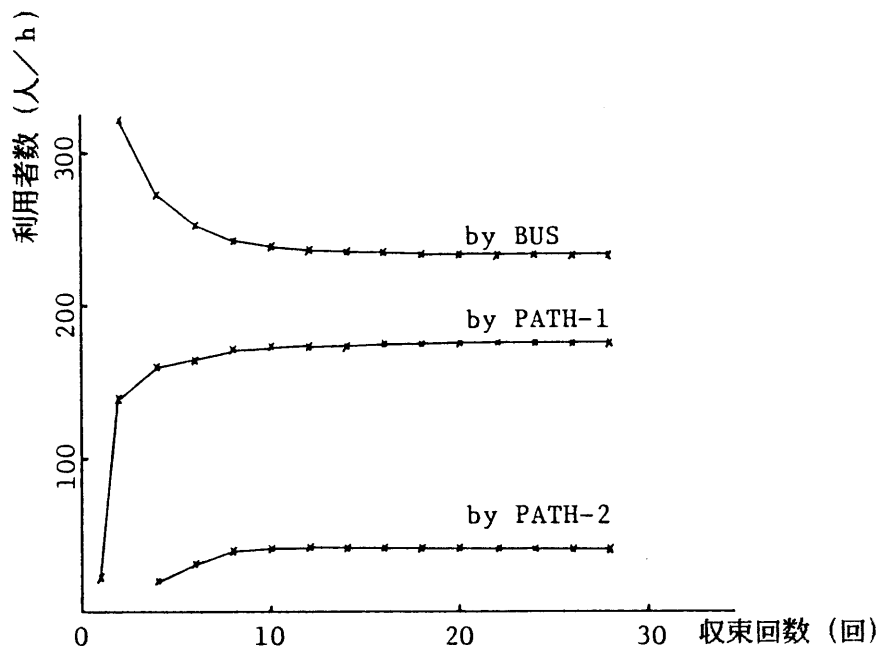


図 3.4 解の収束状況

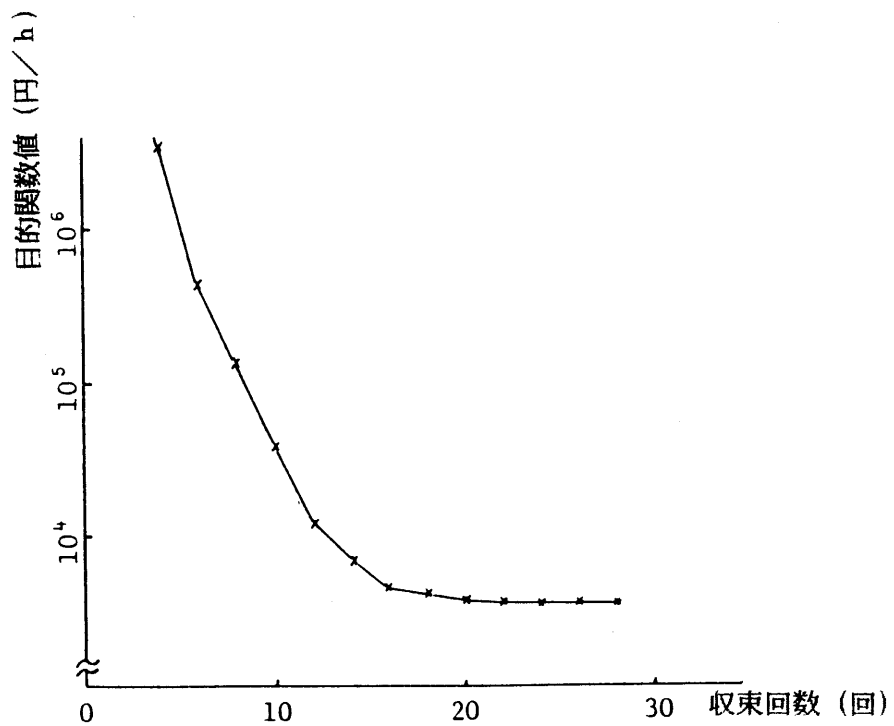


図 3.5 目的関数の収束状況

。6に示すように仮定している。総トリップ数は6,000人/hであり、そのOD構成比と自動車によるOD間費用を表3.2にあわせて示す。このときの最適なバス運行頻度は20.2本/hとなり、バスの分担率は10.96%、目的関数値は 0.60709×10^6 円/hとなる。バス利用者のフローパターンを図3.7に、自動車利用者のフローパターンを図3.8に示す。自動車を利用した場合、①-②-③と①-⑤-③、④-②-⑤と④-①-⑤の2つのOD間経路で等コストとなるフローパターンが成立していることが分かる。このときの両等時間経路の所要時間の相対誤差は、それぞれ0.39%、8.47%である。この相対誤差の値も現実的には無視できる程度のもと考えられる。図3.7における実線のフローは、バスへのアクセス、またはイグレスのための徒歩によるフローを示している。バス路線が全く存在しない場合の徒歩の分担率は5.83%であり、目的関数値は 0.62404×10^6 円/hとなる。したがって、本モデルを用いて最適バス輸送計画を策定することにより、システム全体として約16,950円/h、1人当たり平均2.83円/hの便益増加を得ることができる。

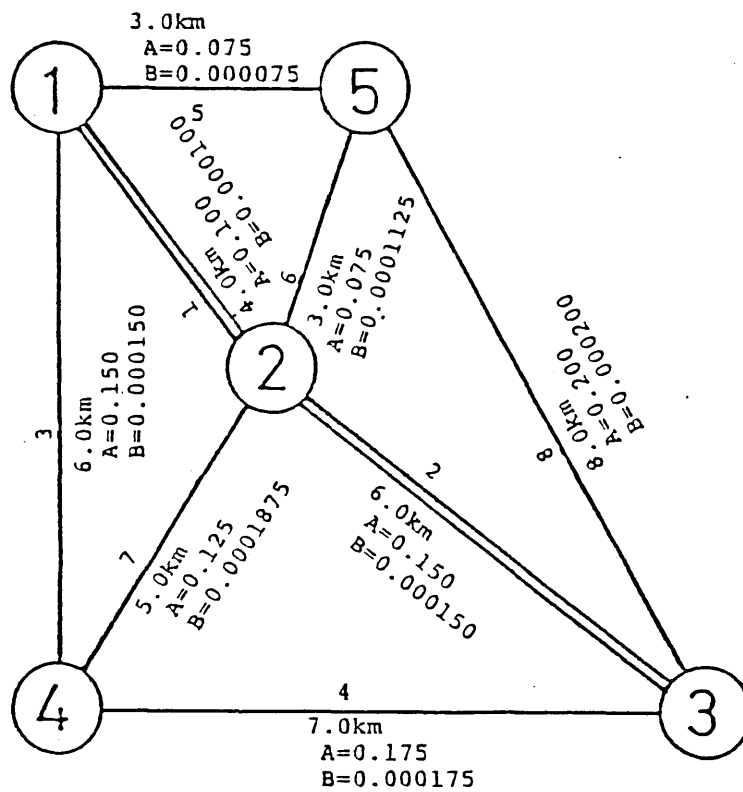


図 3. 6 モデルネットワーク

表 3. 2 OD構成比、および自動車によるOD間費用

	1	2	3	4	5
1	*	0.06(160)	0.04(250)	0.05(190)	0.04(145)
2	0.06(160)	*	0.06(190)	0.04(175)	0.04(145)
3	0.05(250)	0.06(190)	*	0.07(205)	0.04(220)
4	0.05(190)	0.04(175)	0.07(205)	*	0.06(220)
5	0.04(145)	0.04(145)	0.04(220)	0.04(220)	*

注) () 内は自動車によるOD間費用を示す。

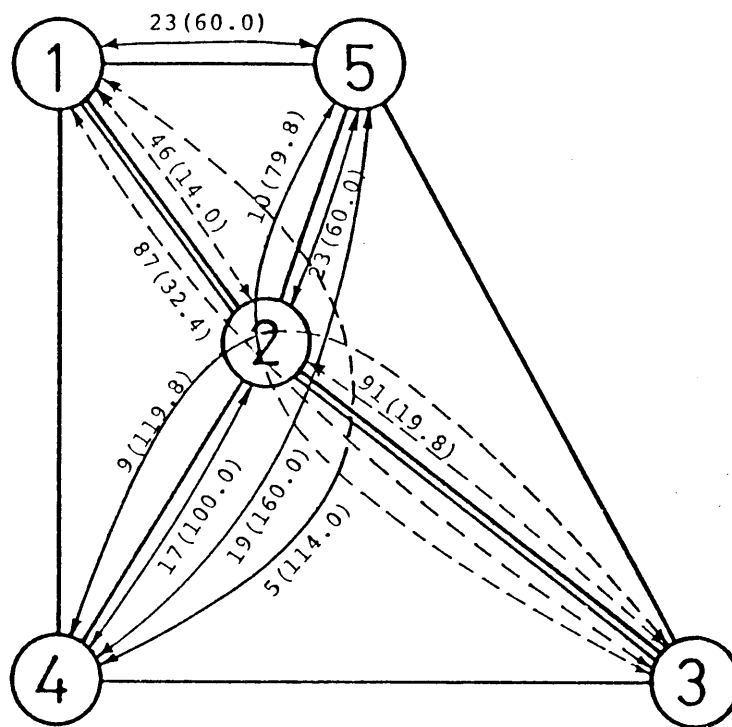


図3.7 バス利用者のフローパターン

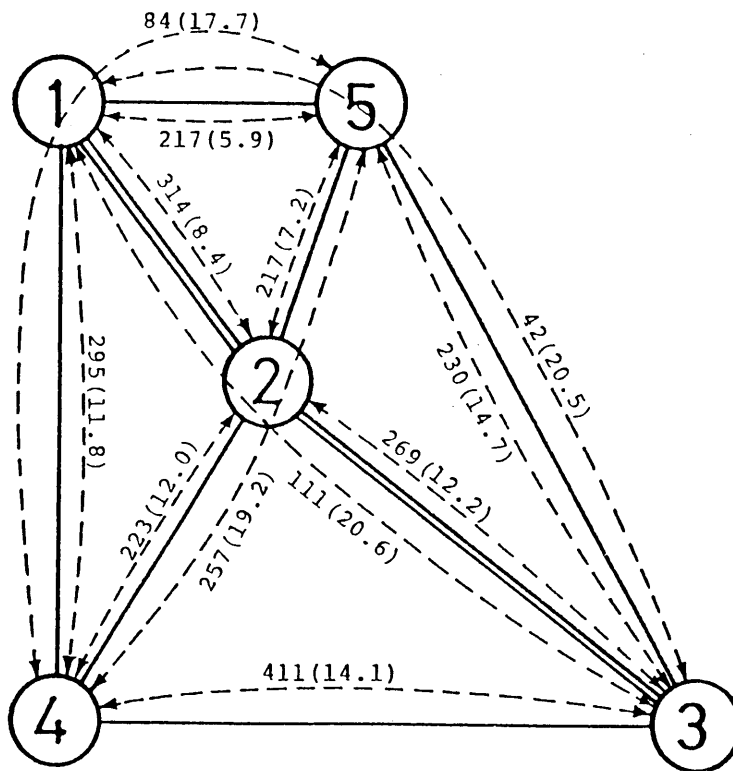


図3.8 自動車利用者のフローパターン

3.6 まとめ

本章では、バスと自動車という2種のモードが同一のリンクを共用する道路交通ネットワークを対象にして、交通手段分担過程と配分過程とを結合した需要変動型均衡交通需要予測手法を開発した。さらに、この手法を用いて、分担需要変動型交通均衡を考慮しながら両モード利用者の増加総便益を最大にするような最適バス輸送計画を策定する手法についての検討を行った。以下に、本章で得られた結果についてまとめる。

まず2節では、自動車とバスとが同一道路ネットワーク上で混合する場合の各モード利用者の交通均衡状態を求めるために、バス台数を自動車換算係数を用いて自動車台数に換算し、バスのリンクコスト関数を自動車リンクコストの関数と定義することによって、自動車利用者とバス利用者による等コスト経路選択規範を数学的に定義した。その結果、多種モードが混合する場合の自動車利用者の等コスト経路選択規範は、Jørgensenによる定式化を一部修正し、バス台数を含めた換算自動車台数を用いた非線形数理最適化問題として定式化できることを示した。

3節では、均衡リンクコストと運行頻度によって決まる均衡分担需要を求めるための需要関数として効用の概念に基づいたMDモデルを採用し、このモデルを用いてバス輸送システム導入による直接便益だけでなく既存交通施設の純間接便益をも評価する評価関数を設定した。

4節では、上記のシステム評価関数を最大にするような最適バス輸送計画の策定手法についての検討を行った。我々は、この問題を、各モードの交通均衡問題を表現する下位の最適化問題を制約条件とし、交通手段選択に関する人の意志決定結果から得られるシステム全体の増加総便益関数を上位の最適化問題の目的関数とした2レベル Stackelberg計画問題として定式化している。本モデルは、運行頻度などの制御可能な交通サービス水準が与えられると、下位の最適化問題から均衡所要コストが得られ、上位の最適化問題では、制御可能な交通サービス水準と均衡所要コストのもとで個人は自分にとって効用最大となる交通手段を選択するという意志決定構造をモデル化している。そのため、各交通需要者は利用者最適な交通手段と経路を選択することとなり、さらに、その選択順序は人の交通行動に関する段階的な意志決定順序をモデル化していることになることから、本モデルは交通需要予測モデルとしてより実際に近い人の交通行動を表現できるモデルになっていると考えることができる。本モデルを用いることによって、交通施設投資後の短期の交通手段分担・配分交通量の予測が可能となるうえ、システムにおける増加総便益を最大にするような交通サービス計画の策定を行うことも可能となる。

また4節では、2レベル Stackelberg計画問題を、下位の最適化問題の凸性を証明することによって下位最適化問題をその必要十分条件となる Kuhn-Tucker条件で置換え、それを上位最適化問題の制約条件とした通常の第Ⅱ種の非線形計画問題として再定式化した。

5節では、ペナルティ関数法を用いた制約条件付き非線形最適化計算法を示し、下位の最適化問題

の解の特性を考慮しながら最適解を探索するアルゴリズムを開発した。さらに、仮想的なネットワークに適用することによってモデルとアルゴリズムの有用性の検討を行った結果、分担需要変動型交通均衡モデルとして適用性が高いこと、最適バス輸送計画策定のための一手法として有用であることを明らかにした。

しかし、本モデルを実際のバスと自動車混合ネットワークに適用する際には、各モードのリンク走行コスト関数形や時間評価値の確率密度関数の正確な推定、および同一経路上にバス相互の競合システムが存在する場合の乗車比率の検討などを行う必要があり、これらの基礎的データを十分に把握しておくことが重要である。また、大規模ネットワークへの適用を可能にするためには、非線形収束計算手法をD.F.P.法などの数値計算上効率的な降下ベクトル決定法を組込んだアルゴリズムに改善していく必要があり、今後、これらの課題を解決していくことが望まれる。

参考文献

朝倉康夫：交通混雑を考慮した最適道路網計画モデルとその適用，土木計画学研究・論文集，No.2，pp.157-164，1985。

河上省吾・溝上章志：分担・配分過程結合需要予測モデルとそれを用いた最適バス輸送計画策定手法の開発，土木学会論文集，第353号/IV-2，pp.101-109，1985。

松井 寛・山下益宏：多種モード混合の最適ネットワークフローに関する研究，交通工学，Vol.13，No.7，pp.21-29，1978。

今野 浩・山下 浩：非線形計画法，日科技連，1978。

費用・便益研究委員会：鉄道の投資プロジェクトにおける費用・便益の計算手法の研究，1980。

青山吉隆・芝原靖典：混雑費用を考慮した一般化費用による Modal Choice モデル，土木学会論文報告集，第275号，pp.91-101，1978。

志水清孝：多目的と競争の理論，共立出版，1982。

井上博司：道路網における等時間原則による交通量配分に関する基礎的研究，京都大学博士論文，1975。

宮城俊彦：交通ネットワーク均衡の理論と計算法に関する基礎的研究，京都大学博士論文，1975。

青山吉隆・西岡敬治：交通計画における時間価値研究の系譜，第2回土木計画学研究発表会講演集，pp.61-70，1980。

H.Poorzahedy and M.A.Turnquist : Approximate Algorithms for the Discrete Network Design Problem, Transpn.Res.-B, Vol.16B, No.1, pp.45-55, 1982.

M.Florian and H.Spiess : On Binary Mode Choice/Assignment Models, Transpn. Sci., Vol.17, No.1, pp.32-47, 1983.

J.G.Wardrop : Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research, Proc.Inst. Civil Engineers, Part 2, No.1, pp.325-378, 1952.

N.O.Jørgensen : Some Aspects of the Urban Traffic Assignment Problem, I.T.T.E. Graduate Rept., University of California, Berkeley, 1963.

H.C.W.L.Williams : On the Formulation of Travel Demand Models and Economic Evaluation Measures of User Benefit, Environment and Planning A, Vol.9, pp.285-344, 1977.

K.Sasaki : Travel Demand and the Evaluation of Transportation System Change ; A Reconsideration of the Random Utility Approach, Environment and Planning A, Vol.14, pp.169-182,1982.

T.Leventhal, G.Nemhauser and L.Troffer JR. : A Column Generation Algorithm for Optimal Traffic Assignment, Transpn.Sci., Vol.7, No.2, pp.168-176,1973.

第4章 非集計交通行動モデルを用いた鉄道端末バス輸送計画の策定手法

4.1 概説

本章では、意識調査データを用いて構築される非集計型転換モデルをその需要予測プロセスの中に組み込んだ鉄道端末バス輸送計画策定手法の開発と、本手法の適用可能性についての検討を行うことを目的としている。

前章までは、分担需要の変動と交通均衡サービス水準とが互いに影響を及ぼし合うような分担需要変動型交通均衡理論に基づく交通需要予測手法、および最適バス輸送計画策定手法の開発を行ってきた。交通需要予測や最適バス輸送計画策定を行うに当たって分担需要変動型交通均衡を考慮する必要があるのは次のような場合である。

- ① 都市全域をカバーする幹線道路ネットワークを対象にするような広域的交通計画において、交通混雑が激しいために交通施設整備に伴う分担交通需要の変動が各リンクの均衡要因コストに影響を与えることによってOD間手段別均衡コストを大きく変化させると考えられるが、その将来値をあらかじめ予測できないような場合。
- ② 手段選択関数の感度が、手段選択要因のうち特に均衡要因に大きく依存し、交通手段の乗り継ぎや、自転車や徒歩などの下位の交通手段サービスの水準が与える推定値への影響を無視しても予測精度に問題が生じないような巨視的な交通計画の場合。

以上は一般的な交通施設を想定した場合の議論であるが、これを本論文で対象としているバス輸送システムに置換えて考えるならば、自動車の代替交通手段としてバスだけが利用可能であるような大・中規模の都市において、都市周辺の居住地から都心を結ぶ幹線バスシステムのサービス変化に伴う交通需要予測や最適バス輸送計画の策定を目的とする場合には、需要変動型交通均衡を考慮した交通需要予測法、バス輸送計画策定法は方法論的に極めて有効であると考えられる。

一方、前章までのモデルはすべて集計決定論型のモデルであった。すなわち、ODペアを1つのセグメントとし、同一セグメントの交通需要はすべて同じ効用関数を持ち、同一のサービス水準を享受しているという仮定のもとに構築されたモデルである。このような集計決定論型のモデルは以下に示すような問題点を含んでいる。

- ① 所得階層、職業、年齢などの個人属性や社会経済的特性の相違による個人の交通行動の相違をモデルの中で考慮することが難しい。
- ② 人口密度の疎な分析対象地域ではゾーニングを広域化せざるを得ず、そのために変数の平均化による誤差の増大やモデルの感度の低下が生じる恐れがある。
- ③ 集計型モデルを構築する際に信頼性の高いデータを得るためには、対象地域全体にわたってかなり大規模な調査や実測を必要とする。

④ 集計型のモデルは手段選択需要関数を構成する手段選択要因のうち、乗り換え時間、乗り換え回数、居住地からバス停までの距離などの多様なサービス要因に関する感度が低いため、これらの要因のサービス変化に伴う需要予測や計画評価の精度が低下する。

⑤ パークアンドライドやバスアンドライドのような乗り継ぎ交通手段需要を予測する場合、同一の手段選択要因でも乗り継ぐ交通手段の機能や形態によって効用に掛かるウェイトの値が異なる場合があると考えられるが、集計型モデルではこのような詳細な人の交通需要発生機構を明らかにするためには膨大な数のデータを必要とし、そのためには大規模な調査を実施しなければならない。

⑥ 経路や交通手段などに対する個人の選択行動は、本来、決定論的なものではなく、ばらつきを持った不確定的要素を含むものと考えられるが、このような確率的な要素をモデルの中で表現することができない。

本章では、鉄道駅の端末交通手段としてバス輸送システムが機能している地域におけるバス系統網と運行頻度の最適化を目的として、上述した集計決定論型モデルの問題点をある程度解決できるとされている非集計確率型交通需要予測モデル (Domencich & McFadden, 1975) を需要予測プロセスの中に組み込んだ鉄道端末バス輸送計画策定システムの開発を行っている。本章における非集計確率論型交通需要予測モデルとは、確率効用最大化理論から導出され、パラメータ推定のためのデータとして非集計データを用いる非集計交通行動モデルをさしている。非集計交通行動モデルを用いた鉄道端末バス輸送の需要分析に関する研究は、Liou & Talvitie (1974)、McFadden & Talvitie (1977)、原田・太田 (1983)、Ortuzar (1983) らによって行われている。これらの研究では、端末駅と端末交通手段の組み合わせを互いに独立な選択肢と考えて多項ロジットモデル (Multinomial Logit Model、以後、MNLモデルと記す) によりパラメータを推定した場合と、端末駅と端末交通手段との同時選択をネステッドロジットモデル (Nested Logit Model、以後、NLモデルと記す) による多次元選択問題として推定した場合との両モデルの適合度の高さや選択肢ツリー構成の妥当性の検証などが行われており、主として非集計交通行動モデルの理論的考察と実証的検討に重点が置かれてきた。

近年、これらの研究成果に基づいて、非集計交通行動モデルを端末バス輸送計画策定システムの一段階である交通需要予測プロセスの中の需要関数として位置付けているもの (原田・太田, 1984; 河上・広畠・溝上, 1985) があり、集計化手法 (McFadden & Reid, 1975; Koppelman, 1976; Reid, 1978; Watanatada & Ben-Akiva, 1979; Daganzo, 1982) や移転可能性の検討 (Atherton & Ben-Akiva, 1976; Train, 1978; McCarthy, 1980; 河上・広畠, 1985; 森地・屋井・田村, 1985)、個人の意志決定構造仮説のモデル化に関する研究 (河上・広畠・溝上, 1984; 河上・広畠, 1985) が進むなかで、非集計交通行動モデルも集計型四段階交通需要推定手法の代替的方法論として確立されつつあると言えよう。

本章で開発した鉄道端末バス輸送計画の策定システムは、端末駅と端末交通手段の同時選択需要を

予測するシステムが導入されており、その需要予測モデルとして、サービス変化後のバスへの転換需要を求める意識データを用いた非集計手段転換型モデルを採用していることに特色がある。また、バス系統網と運行頻度を決定するための計画策定アプローチとして、代替案の比較評価をシステムティックに行うことができる Systems Analysis 手法を用いており、その有用性を実際の地域に適用して検証しているところにその特徴があるといえよう。

本章 2 節では、鉄道端末バス輸送に対する需要発生機構の特性を分析するために実施したアンケート調査の概要を述べ、対象地域の交通サービス実態や手段別利用実態、転換意志に関する集計分析を行っている。3 節では、非集計交通行動モデルに基づくバス利用需要予測モデルを手段選択型と手段転換型の両方から構築し、各モデルの特性について検討を行っている。4 節では、非集計交通需要予測モデル、ここでは前節で構築した手段転換型モデルを交通需要予測プロセスの中に組込んだ鉄道端末バス輸送計画策定システムを開発する。5 節では、端末バス系統網とその運行頻度の適正化を目的として、実際の鉄道端末地域におけるバスネットワークを対象とした本システムの適用例を示し、その有用性の検証を行っている。

4.2 鉄道端末バス輸送計画のための調査とその分析

4.2.1 調査の概要

マイカーから公共交通機関への転換対策に関するアンケート調査は、昭和58年11月に、図4.1に示す名古屋市の東部に隣接する日進、東郷の両町域のうち、名鉄豊田新線の各鉄道駅から500m以内を除く地域を対象地域として実施された。この地域は、地下鉄1号線と名鉄豊田新線とを幹線交通機関としてともに利用可能な地域である。本調査は、対象者を対象地域内から名古屋市内への通勤・通学者に限定し、調査員による調査票の訪問配布、訪問回収という方法によって実施された。調査票配布世帯1,011世帯に対し、回収世帯数は879世帯、80.9%の回収率であった。本調査では、通勤通学者の交通実態を把握するとともに、鉄道端末バス系統網の再編や運行頻度の適正化による交通手段や経路の転換行動、および手段選択行動の変化を予測する需要予測モデルを構築する際に必要となる個人ごとの社会経済的特性、各手段・経路の各種サービス要因特性値と交通サービス変化時における交通手段選択行動結果などのデータを収集することに重点を置いている。そのため、本調査では、

- ① 各種個人属性、社会経済的特性、
- ② 現在の通勤通学手段とその経路、
- ③ 現利用手段、代替手段に関するサービスの実態とその評価、
- ④ 代替手段への転換意志の有無、
- ⑤ サービス要因ごとに、単一のサービス要因だけが変わり、それ以外の要因は現況のままとした場合の手段転換意志と手段を転換するためのサービスの最低条件（転換条件）

を質問している。なお、本調査では現利用手段別に表4.1に示すような代替手段を指定しており、質問項目⑤に関しては、現在、自動車を利用している人が鉄道端末バス輸送システムの改善によりバスアンドライドに転換する場合を例にとると、図4.2に示すような形式で質問を行っている。本章では、以後、表4.1に示すような略記号を用いて交通手段を表す場合がある。

表4.1 現利用手段別に指定した代替手段

現利用手段	代替手段	C	B以外&R	B	B&R
自動車直行	(C)		○	—	○
バス以外&ライド	(B以外&R)	○		—	○
バス直行	(B)	○	—		—
バス&ライド	(B&R)	○	○	—	

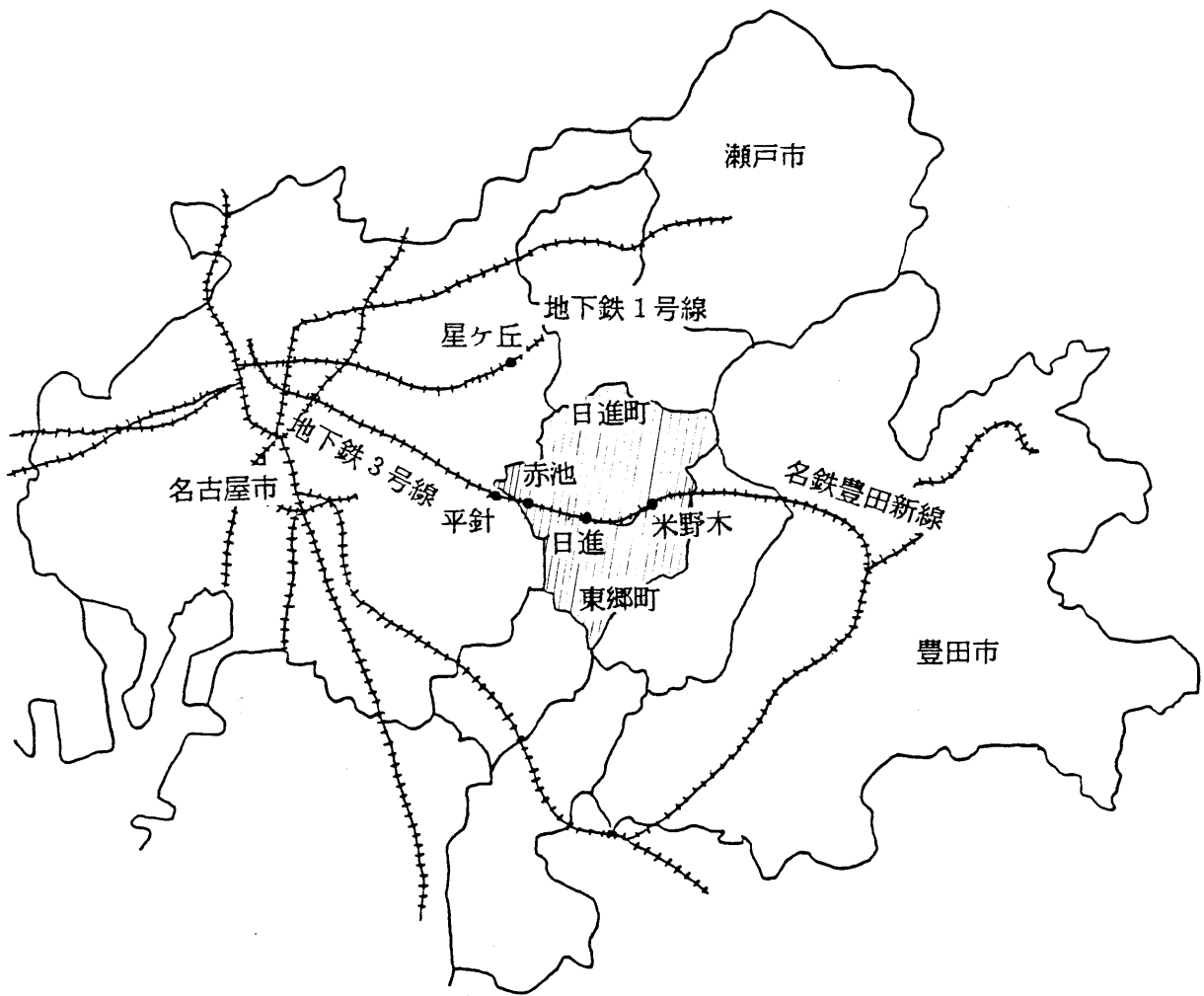


図4.1 調査対象地域

番号	良くなる項目	やはり車を利用する	車の利用をやめる	車利用をやめるとすればその最低条件は
1	電車やバス全般が整備され、目的地までの所要時間さえ短縮されたら	1	2	所要時間が片道（ ）分以下になりさえしたら
2	電車やバスの所要時間がいつも一定にさえなったら	1	2	_____
3	バスの乗車時間さえ短縮されたら	1	2	片道（ ）分以下になったら

図4.2 転換意識質問の例

4. 2. 2 集計分析の結果とその考察

まず、交通実態に関するデータの分析を行い、その結果について考察する。現況の手段別分担率は自動車直行が46.9%、バスアンドライド（以後、B&Rと記す）が26.6%、徒歩、またはサイクルアンドライド（以後、B以外&Rと記す）が22.8%である（表4.2参照）。鉄道端末駅別利用率は、星ヶ丘駅が26.6%、日進駅が23.9%、赤池駅が18.5%であり、地下鉄1号線星ヶ丘駅の利用率が最も高い。利用率を端末駅別端末手段別クロスでみると、星ヶ丘駅のB&R利用者が102人であり有効サンプルの24.9%を占めている。しかし、星ヶ丘駅のパークアンドライド（以後、P&Rと記す）利用者は5人であり、全体のわずか1.2%に過ぎない。地下鉄1号線星ヶ丘駅は、調査対象地域中心（名鉄豊田新線日進駅）付近から空間距離で約7kmの所に位置しており、対象地域から距離的に最も遠い駅である。それにもかかわらず上述したような利用実態を示すのには次のような理由が考えられる。

① 星ヶ丘駅から地下鉄1号線を利用すれば、名古屋市中区栄などの中心業務地区へ乗り換えをせずに行くことができる。また、② 星ヶ丘駅には商業が集積していることから、駅自体の魅力が高いことも星ヶ丘駅の利用率が高い理由の1つと考えられる。③ 調査対象地域から星ヶ丘駅へのバスサービス水準が他の駅へのものに比較して高いために星ヶ丘駅へのB&R利用率は高いが、駐車施設などのサービス水準が低いためにP&Rなどの利用率は極めて低い。一方、名鉄豊田新線日進駅の利用者は自転車や徒歩を端末手段として利用する割合が高く、日進駅全利用者の43.9%を占める。B&R利用者はわずか20.4%であり、その割合はすべての端末駅の中で最も低い。

発メッシュ別に利用手段別端末駅の割合を表したのが図4.3である。全体的には端末駅として居住地に近い駅を選択している傾向があるが、地下鉄1号線星ヶ丘駅だけは名鉄豊田新線各駅近隣のメッシュからの利用者も多く存在している。

以上のことから、複数の交通手段の組み合わせから成る交通経路の選択に際して、個人はアクセス交通手段の交通サービス水準、乗り継ぎ駅特性、主要幹線交通手段のサービス水準などを総合的に評価しているものと考えられる。したがって、鉄道端末バス輸送需要を予測する場合には、従来よく行われているように端末手段のサービス水準だけで鉄道駅勢圏を限定し、その圏域内での需要を予測するのではなく、幹線鉄道サービスと端末交通サービスを統合した交通サービスに対する人の評価構造を明示的に考慮できる需要予測モデルにより需要予測を行う必要がある。バス輸送計画を策定する際には、鉄道網と端末バス輸送との有機的な結合を考慮した総合的な計画代替案を提示することが重要であると考えられる。

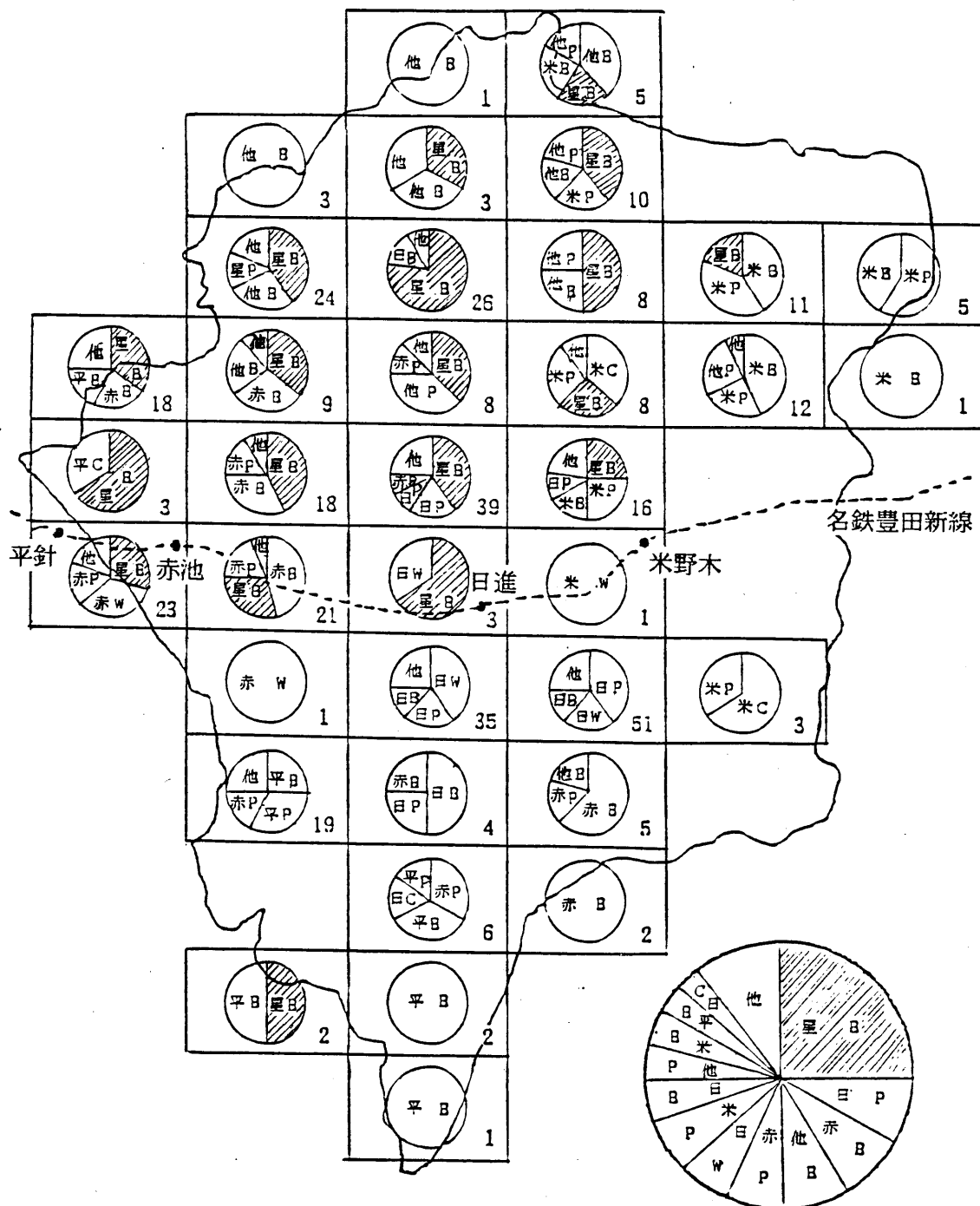
次に、交通手段転換に関する意識データの分析結果について考察する。代替手段のサービス改善、あるいは現利用手段のサービス変化による代替手段への転換意志率（この値は自動車と公共交通機関とを選択できるチョイス層の割合を示すと考えられる）を、表4.3に示す。利用手段と代替手段の組み合わせが同一である手段組の転換意志率は互いにほぼ等しいが、組み合わせが異なる手段組の間での

表4.2 端末駅別手段別利用実態

利用手段 利用駅	B & R	P & R	C & R	W & R	合計	C
日 進	20	35	15	28	98	
	20.41	35.71	15.31	28.57		
	9.05	29.17	51.72	70.00		
	4.88	8.53	3.66	6.83	23.90	
赤 池	33	30	4	9	76	
	43.42	39.47	5.26	11.84		
	14.93	25.00	13.79	22.50		
	8.04	7.32	0.98	2.20	18.54	
星ヶ丘	102	5	1	1	109	
	93.58	4.59	0.92	0.92		
	46.15	4.17	3.45	2.50		
	24.88	1.22	0.24	0.24	26.58	
平 針	16	8	3	0	27	
	59.26	29.63	11.11	0		
	7.24	6.67	10.35	0		
	3.91	1.95	0.73	0	6.59	
米野木	17	22	5	2	46	
	36.96	47.83	10.87	4.35		
	7.69	18.33	17.24	5.00		
	4.14	5.37	1.22	0.49	11.22	
そ の 他	33	20	1	0	54	
	61.11	37.04	1.85	0		
	14.93	16.67	3.45	0		
	8.05	4.88	0.24	0	13.17	
計	221	120	29	40	410	396
	26.6	14.5	3.5	4.8	52.3	47.7

注)

利用者数 (人)
鉄道駅に対する割合 (%)
利用手段に対する割合 (%)
全体に対する割合 (%)



日: 日進	B: B & R
赤: 赤池	P: P & R
平: 平針	C: C & R
米: 米野木	W: W & R
他: その他	

図4.3 メッシュ別利用端末駅、および端末交通手段

転換意志率は異なっていることがわかる。表4.4には転換意志を有するサンプルに対するサービス項目別転換意志率を示す。この結果から、① すべての手段の組み合わせにおいて、総所要時間の改善（悪化）に対する転換意志率が最も高いこと、② 同一のサービス項目であっても、改善に対する転換意志率より悪化に対する転換意志率の方が高いこと、③ 同一サービス項目について、現利用手段と代替手段との組み合わせが同一である手段組のサービス項目別転換意志率の差よりも、組み合わせの異なる手段組のサービス項目別転換意志率の差の方が大きいことが分かる。

河上・広昌・溝上（1984）は、人の手段転換行動に関する意志決定構造について、他の交通手段へ転換する際には何らかの抵抗が存在し、サービス変化後の交通サービスに対する評価は同一の個人であってもそれまでの利用手段によって異なるのではないかということを描している。各個人が享受しているサービス水準は現利用手段ごとに異なっており、注目している要因以外のサービス要因の水準も個人によって異なっているために転換意志率の値だけで厳密な考察はできないが、この分析結果からも、これらの仮説が妥当であるということが定性的ではあるが推察できる。

表4.3 サービス変化後の手段転換意志率

MT改善による CからMTへの転換	BUS改善による P&RからB&Rへの転換	BUS悪化による B&RからP&Rへの転換	MT悪化による MTからCへの転換
33.90	52.28	50.00	39.34

表4.4 サービス項目別手段転換意識

手段組 サービス項目	MT改善による CからMT への転換	BUS改善による P&RからB&R への転換	BUS悪化による B&RからP&R への転換	MT悪化による MTからC への転換
総所要時間	69.23		80.20	68.13
総所要時間変動	37.10	36.56	78.00	51.27
バス乗車時間	30.58	44.68	74.75	45.27
鉄道乗車時間	36.07			44.44
乗り換え回数	39.67			58.23
乗り換え時間	23.73	23.16	58.95	46.79
発着の正確さ	34.71	36.46	73.53	54.49
徒歩時間	35.83	38.30	57.73	47.37
冷房の整備	29.31	23.91		35.81
鉄道内混雑	39.50			41.83
バス内混雑	38.26	31.52	51.49	45.89
出発時間帯運行間隔	52.50	46.81	63.37	43.71
帰宅時間帯運行間隔	51.67	54.74	65.35	43.05
所要費用	37.82			43.42
バス料金	25.64	35.48	67.65	37.67
始発時刻	21.74	15.22	53.47	33.33
終発時刻	31.03	32.26	55.45	38.56

注) 単位は%である。空白の部分は質問項目がないサービス項目である。

4.3 非集計交通行動モデルを用いた端末バス利用需要予測モデル

本節では、集計分析から得られた手段利用実態、手段転換意識に関する特性をモデルの中で明示的に考慮することができ、端末バス需要予測モデルとしてより信頼性の高い非集計交通行動モデルを構築することを目的としている。以下で構築するモデルは、基本的にはすべて効用の確率項にワイブル分布を仮定したロジット型のモデルである。また、効用関数は線形とし、効用関数を構成する要因のパラメータは非集計データを用いた最尤法により推定している。

4.3.1 モデルの概要とその特徴

従来の端末駅と端末手段の同時選択に関する非集計交通行動モデルを用いた実証的研究結果（原田・太田，1983）や、河上・広島・溝上（1984）によって指摘されている手段転換行動に関する意志決定構造仮説、および4.2.2の集計分析結果から、非集計型交通行動理論を用いて鉄道端末バス利用需要予測モデルを構築する際には以下の点を考慮する必要があると思われる。

① 幹線交通手段、端末駅、端末手段の組み合わせから成る通勤通学経路の選択に関して、個人は幹線交通手段サービス要因、端末駅特性、端末手段サービス要因などを総合的に評価し、効用最大となる選択肢を選択する。この時、利用可能な端末駅と端末手段の組み合わせから成る選択肢は個人にとって各々独立なものではなく、一つの端末駅選択肢に対して複数の端末手段選択肢が存在するというように、選択肢の一部が重複したものになっている。このような場合には、選択肢に高い類似性が生じていると考えられる。また、一つの端末手段に対して複数の端末駅が存在し、一方で自動車直行という選択肢が存在するように、選択肢の主要な属性が類似した選択肢グループとそうでない選択肢グループとが選択肢集合に同時に存在しているような場合にも、選択肢の独立性を仮定することはできずと考えられる。

② 交通サービスに変化が生じたとき、現利用手段から他の交通手段へ転換する際には何らかの抵抗が存在する。さらに、同一の個人であっても、現在の利用手段によって交通サービスに対する評価構造は異なると考えられる。また、転換するか否かの転換意志と転換に踏み切るための限度値は仮想質問に対する意識上の回答値であることから、その値と実際の行動との間にはギャップが存在すると考えられる。

そこで、本節では以下に示す仮説をたて、これらの仮説を検証できるような構造を持つ非集計交通行動モデルの構築を試みる。

仮説(a)：手段選択に関する実態データは、個人が効用最大となる端末駅と端末交通手段の組み合わせを同時選択した結果であるが、その選択肢集合の中には類似性の程度の異なるものが含まれている。

仮説(b)：現利用手段から他の交通手段へ転換する際には転換抵抗が存在する。また、サービス変化

後の交通サービス要因に対する評価構造は、それまでの手段選択行動結果によって異なる。

本節では、上述した仮説を定量的、統計的に検証し、その結果を考慮して端末バス輸送需要予測モデルとして信頼性の高いモデルを構築することを目的としている。仮説(a)については、実際の交通手段選択行動に関するクロスセクションの実態データを用いて、手段選択肢の独立性を仮定したMNLモデルと選択肢内の類似性と選択肢構成ツリーの妥当性を評価することができるNLモデルという2つの交通手段選択モデルを構築し、各モデルの適合度やデータと推定パラメータとの関係について考察を行う。仮説(b)については、交通手段選択型モデルではなく、効用関数の中に転換抵抗項を導入した手段転換型モデルを現利用手段ごとに構築し、推定された手段転換モデル相互の統計的性質を比較検討することによって仮説の検証を行う。このときに用いるデータは、4.3.3で述べる方法により作成される手段転換に関する意識に基づくデータである。さらに、効用関数を構成する説明要因は、両モデルとも、端末駅までの端末手段サービス要因、端末駅の魅力度を表す要因、端末駅から目的地までのサービス要因を分離した形で導入することによって各要因のウェイトを求めることにする。

4.3.2 交通手段選択型モデル

(1) データの作成と選択肢の決定

手段選択型の非集計交通行動モデルを推定する際に必要となるデータは、個人属性、社会経済的特性、現利用手段と利用可能代替手段の各種交通サービス要因の特性値である。しかし、表4.1に示したように、本調査では現利用手段別に代替手段を指定しているうえに、指定された1つの端末交通手段に対して1つの端末駅を利用した場合の交通サービス特性値だけを把握しているに過ぎない。そこで、その他の利用可能選択肢とそのサービス要因のサービス特性値を以下の方法により作成する。なお、同一端末手段であっても異なる端末駅へアクセスする選択肢があるため、以下では、端末手段と端末駅との組み合わせ選択肢のことを経路選択肢と呼ぶことにする。

- ① 現利用経路と回答されている代替経路のサービス特性値は回答値をそのまま用いる。
- ② 代替経路のうち、回答されていない経路選択肢のサービス特性値については、発ゾーンを750m×500mメッシュ、着ゾーンを名古屋市内各区にゾーン分割し、同一発着ゾーンペアを持つサンプルのサービス特性値の平均値でこれを代用する。
- ③ ②で平均値を求める際には、自動車直行の人の代替経路データも利用する。

以上のような方法によって利用可能選択肢とそのサービス特性値を設定する必要性と妥当性は次のような点にある。

- ① サンプルの約半数を占める自動車直行経路利用者の利用可能選択肢数は、自動車直行を含めて2つだけである。さらに、公共交通機関利用者が回答している代替経路もその大半が端末交通手段が異なるだけで現利用端末駅を利用する経路であることから、現在の利用経路によって利用可能選択肢が限定される恐れがある。
- ② 利用可能経路選択肢が2つ以上あっても、その数が少ないと回答率の高い特定の選択肢の利用可能性が高くなる。
- ③ 発メッシュ、または現利用手段ごとに、利用距離限界などにより利用可能選択肢を特定化してそのサービス特性値を与える方法（原田、太田，1983）がある。しかし、この方法では、現利用手段と効用レベルの接近した代替選択肢が実際には存在するにもかかわらず、これらの選択肢が恣意的に除去される恐れがあるため、現利用手段の効用を高める効果を与える場合がある。
- ④ 無回答の代替手段サービス特性値として平均値を用いると、本来の意味の非集計データとは言えなくなる。しかし、平均するためのゾーン分割が発生地側で750m×500mと特に細かく、個人属性、社会経済特性は個人の回答値を用いていることから、本手法で作成したデータは端末手段の輸送需要モデル構築のための非集計データとして使用すると判断した。

このようにして作成されたデータから得られるサンプル数と選択肢、ならびに利用実績と利用可能人数、利用率を表4.5に示す。この結果、以下のようなことが分かる。① 自動車直行を現利用手

段とする割合、および自動車直行利用可能者に対するその利用率が極めて高い。② マストラ利用者では、星ヶ丘駅利用のB&Rが多い。③ 星ヶ丘駅へのP&R以外は、B&RとP&Rの利用率は各駅とも比較的高い。④ サイクルアンドライドや徒歩の利用可能者数も比較的多いにもかかわらず、その利用率は低く、利用駅は特定の端末駅（サイクルアンドライドでは米野木駅、徒歩では日進、赤池駅）に限定されている。これらのことから、以下では端末交通利用手段としてB&RとP&Rだけを、端末駅としては5駅を選択肢とし、それに自動車直行選択肢を加えた11選択肢の経路選択問題として手段選択型モデルの定式化を行う。このときの選択肢と利用実績を表4.6に示す。

(2) モデルのキャリブレーション

11経路選択問題をMNLモデルにより推定した結果を表4.7に示す。 ρ^2 値、全体の的中率ともかなり高い値を示すものの、待ち時間、駐車料金という乗り継ぎ経路選択肢だけに特有の要因の符号が非論理的になる上に、端末手段、端末駅的中率が全般的に低い。一方で、自動車直行者の的中率はほぼ100%と極めて高い値をとる。この理由は、最尤法は同時生起確率を最大にするようにパラメータを決定することから、現利用率の高い自動車直行者の自動車直行選択確率を向上させるようにパラメータが推定されたためであると考えられる。このように、自動車直行のような他の選択肢と特性の異なる選択肢が一つだけ選択肢集合に含まれ、かつその選択肢が全サンプルの中で高いシェアを占める場合には、MNLによるモデル構築は適切ではない。したがって、以下では自動車直行を選択肢からはずし、B&RかP&Rかによる5端末駅選択、つまり10選択肢選択問題としてMNLモデルとNLモデルによるパラメータの推定を行った。この場合のモデル形式は以下に示すような3種類であり、各モデルの選択肢ツリー構造は図4.4のように構成されている。ここで、sは鉄道端末駅、mは端末交通手段を示す。このときの選択肢と利用実績、利用率を表4.8に示す。

① P(m, s)型MNLモデル

$$P(m, s) = \frac{\exp[\lambda(V_s + V_m + V_{sm})]}{\sum_{s', m'} \exp[\lambda(V_{s'} + V_{m'} + V_{s'm'})]} \quad (4.1)$$

② P(s)P(m|s)型NLモデル

$$P(m, s) = \frac{\exp[\lambda_1(V_s + \Lambda_s)]}{\sum_{s'} \exp[\lambda_1(V_{s'} + \Lambda_{s'})]} \frac{\exp[\lambda_2(V_m + V_m|s)]}{\sum_{m'} \exp[\lambda_2(V_{m'} + \Lambda_{m'}|s)]} \quad (4.2.a)$$

$$\text{但し、} \Lambda_s = (1/\lambda_1) \ln \left\{ \sum_{m'} \exp[\lambda_2(V_{m'} + \Lambda_{m'}|s)] \right\} \quad (4.2.b)$$

表4.5 端末駅別端末手段別利用率

選 択 肢		利用実績	利用可能人数	利用率
B & R	日 進	20	250	8.00
	赤 池	27	202	13.87
	屋ヶ丘	100	361	27.70
	平 針	15	97	15.46
	米野木	15	128	11.72
P & R	日 進	34	202	16.83
	赤 池	29	336	8.63
	屋ヶ丘	5	127	3.94
	平 針	8	69	11.59
	米野木	21	170	12.35
C & R	日 進	14	234	5.98
	赤 池	3	165	1.82
	屋ヶ丘	1	73	1.37
	平 針	2	68	2.94
	米野木	5	38	13.16
W & R	日 進	28	198	14.14
	赤 池	9	78	11.54
	屋ヶ丘	1	50	2.00
	平 針	0	50	0.00
	米野木	2	52	3.85
自動車直行		396	552	71.74
計		735	3500	21.00

表4.6 作成データの集計分析

選 択 肢		利用実績	利用可能人数	利用率
B & R	日 進	20	214	9.35
	赤 池	27	165	16.36
	屋ヶ丘	100	320	31.25
	平 針	15	68	22.06
	米野木	15	95	15.79
P & R	日 進	34	175	19.43
	赤 池	29	310	9.35
	屋ヶ丘	5	100	5.00
	平 針	8	49	16.33
	米野木	21	146	14.38
自動車直行		396	519	76.30
計		670	2161	31.00

表4.7 MNLモデルの推定結果

変数	モデル	β	t
車の所有 (有=1)		-1.804	-4.258
駅ダミー	日進	0.791	2.153
	赤池	0.435	1.241
	星ヶ丘	0.568	1.444
	平針	0.519	1.167
P&Rダミー		-0.758	-3.003
アクセス所要時間		-0.051	-3.347
代表手段所要時間		-0.053	-5.514
バス運行間隔		0.103	2.640
駐車料金		0.002	0.342
Cダミー		0.151	0.232
自動車所要時間		-0.026	-3.219
サンプル数		486	
ρ^2 値		0.313	
駅別の中率	日進	44.90	
	赤池	13.46	
	星ヶ丘	49.41	
	平針	38.10	
	米野木	58.62	
モード別の 中率	B&R	50.98	
	P&R	18.07	
	C	99.02	
全体の的中率		67.08	

表4.8 手段選択型モデル作成のためのデータ分析結果

選 択 肢	利用実績	利用可能人数	利用率	平均アクセス時間	
B & R	日進	20	116	17.24	16.55 (6.25)
	赤池	27	88	30.68	19.40 (5.07)
	星ヶ丘	100	171	58.48	32.12 (7.19)
	平針	15	31	48.39	23.55 (5.94)
	米野木	15	43	34.88	19.04 (6.87)
小計	177	449	39.42	26.85 (10.06)	
P & R	日進	34	92	36.96	6.63 (2.89)
	赤池	29	166	17.47	9.10 (3.13)
	星ヶ丘	5	69	7.25	15.04 (3.16)
	平針	8	30	26.67	10.00 (2.67)
	米野木	21	81	25.93	12.05 (5.84)
小計	97	438	22.15	10.95 (4.94)	
計	274	887	30.89	—	

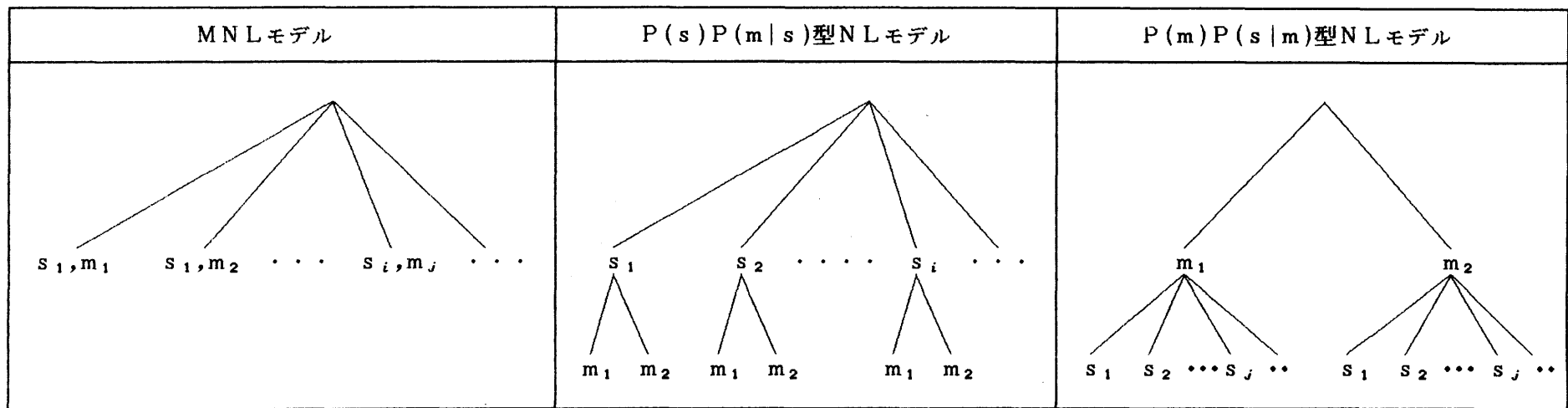


図4.4 手段選択型モデルの選択枝ツリー構造

③ $P(m)P(s|m)$ 型NLモデル

$$P(m, s) = \frac{\exp[\lambda_1(V_m + \Lambda_m)]}{\sum_m \exp[\lambda_1(V_m' + \Lambda_m')]} \frac{\exp[\lambda_2(V_s + V_s|m)]}{\sum_s \exp[\lambda_2(V_s' + \Lambda_s'|_m)]} \quad (4.3.a)$$

$$\text{但し、} \Lambda_m = (1/\lambda_1) \ln \left\{ \sum_s \exp[\lambda_2(V_s' + \Lambda_s'|_m)] \right\} \quad (4.3.b)$$

ここで、 V_i は i のみに関連した効用であり、端末駅と端末交通手段の選択から得られる効用 V は $V = V_m + V_s + V_{ms}$ (ただし $V_{ms} = V_s|m = V_m|s$) で表される。ここでは、モデル相互の比較のために説明変数は全てのモデルで同一の組み合わせとした。各モデルの推定結果を表4.9に示す。

まず、 $P(s, m)$ 型MNLモデルによる推定結果について考察する。的中率、 ρ^2 値、符号条件とも良好であり、適合度は高いと言える。推定パラメータの値から、代表手段の所要時間は端末手段によるアクセス所要時間の約3倍、効用に影響を及ぼすこと。端末駅の魅力度を表す駅特定ダミーも効用に有意に影響を及ぼすと考えられること。表4.7に示すモデルで符号に非論理性が生じた駐車料金の符号が論理的になること。端末バス運行間隔は、効用に対して代表手段である鉄道の所要時間と同程度、アクセス所要時間の3倍のウェイトを持つことなどが分かる。このように、表4.9に示す10選択肢MNLモデルは、表4.7の自動車直行を選択肢集合に含めたMNLモデルと比較して適合度やパラメータの統計的信頼性の上で大きな改善がなされている。

NLモデルは、 $P(s)P(m|s)$ 型、 $P(m)P(s|m)$ 型とも、的中率でみた精度は $P(m, s)$ 型MNLモデルと比較すると低い。特に、両モデルとも端末手段選択レベルでの ρ^2 値が低いことから、このレベルでの推定精度が低下することによってモデル全体の精度の低下が生じているものと考えられる。また、駐車料金の符号が逆転しているなどの非論理性が生じている。理論的にはMNLモデルよりも合理的であるはずのNLモデルが、適合度、パラメータの符号の論理性などの面でMNLモデルに劣っている理由として以下のようなものが考えられる。① 段階推定を行う場合、各レベルにおけるサンプル数が $P(s, m)$ 型MNLモデルと比較して減少するため。② 選択肢ツリーを2層構造にして選択肢の類似性を考慮した効果以上に、2段階推定による誤差が卓越した恐れがある。③ 各推定レベルでの説明要因数が減少するため。④ 特性変数を、下位レベルで使用するものと上位レベルで使用するものと完全に分離したため。⑤ 端末交通手段選択レベルで用いられるデータは異なる端末手段であっても同一端末駅へのものであるため、両端末手段選択肢の効用レベルが極めて類似していると考えられるため。

2つのNLモデルをキャリブレーションにおける精度の面で比較すると、 $P(m)P(s|m)$ 型の方が $P(s)P(m|s)$ 型より ρ^2 値、的中率とも高いことから、NLモデルの中では $P(m)P(s|m)$ 型の方が優れていると考えられる。

表4.9 手段選択型モデルの推定結果

変数 モデル	MNLモデル		P(s)P(m s)型NLモデル				P(m)P(s m)型NLモデル			
			P(m s)		P(s)		P(s m)		P(m)	
	β	t	β	t	$\lambda_2 \theta$	t	β	t	$\lambda_2 \theta$	t
車の所有 (有=1)	-1.212	-2.348	-1.440	-3.561					-1.680	-4.538
駅ダミー 日進	0.860	1.048			0.617	1.441	0.813	1.470		
赤池	0.972	1.165			0.512	1.245	1.019	1.846		
星ヶ丘	0.778	0.889			0.722	1.610	1.267	1.925		
平針	4.026	2.845			1.126	1.974	2.799	3.198		
P&Rダミー	-1.487	-1.175	-3.363	-4.972					-1.827	-5.408
アクセス所要時間	-0.023	-1.125	-0.023	-1.006			-0.047	-2.166		
代表手段所要時間	-0.066	-4.409			-0.050	-4.534	-0.057	-4.432		
バス運行間隔	-0.067	-2.148	-0.080	-3.187			0.016	0.549		
駐車料金	-0.013	-0.771	0.008	1.103			0.005	0.571		
λ_2					0.856				0.517	
$\lambda_2/\lambda_1=0$ のt値					4.642				2.882	
$\lambda_2/\lambda_1=1$ のt値					0.781				2.693	
サンプル数	245		176		211		169		232	
ρ^2 値	0.279		0.163		0.237		211		0.147	
駅別の中率 日進	74.29		71.43				78.72			
赤池	60.71		34.69				46.30			
星ヶ丘	90.41		88.24				87.80			
平針	100.00		78.95				100.00			
米野木	88.89		22.22				72.41			
モード別 的中率 B&R	79.64		59.12				74.83			
モード別 的中率 P&R	67.74		44.59				38.20			
全体の的中率	76.58		41.23				52.16			

次に、選択肢ツリー構成と効用最大化理論との整合性を評価する指標である λ_2/λ_1 の検討を行う。両モデルとも $0 < \lambda_2/\lambda_1 \leq 1$ の条件は満足している。しかし、 $P(s)P(m|s)$ 型モデルは $\lambda_2/\lambda_1 = 1$ の帰無仮説を統計的に有意に棄却できない。それに対し、 $P(m)P(s|m)$ 型モデルの λ_2/λ_1 は、 $\lambda_2/\lambda_1 = 0$ 、かつ $\lambda_2/\lambda_1 = 1$ の帰無仮説を5%の有意水準で有意に棄却できることから、 $P(m)P(s|m)$ 型モデルの λ_2/λ_1 は0と1の間の値であると言える。このことは、端末駅選択肢相互の類似性の方が端末交通手段選択肢相互の類似性より高いことを表しており、 $P(m)P(s|m)$ 型NLモデルの方が、効用最大化理論と整合性のある合理的な選択肢ツリー構成となっているといえる。これら2つのNLモデルを上述した適合度による検討結果と合わせて評価すれば、 $P(m)P(s|m)$ 型モデルの方が鉄道端末需要予測モデルとしてより適切なモデルであると言える。

4.3.3 交通手段転換型モデル

(1) 転換モデル構築のためのデータ作成法

非集計交通手段転換モデルを推定するためには、個人ごとに代替手段（または、現利用手段）のサービスが変化した時の利用手段とそのサービス特性値データが必要である。しかし、本調査から得られる利用手段、およびそのサービス特性値は、全ての個人について現利用手段選択肢に関するものであり、代替手段のサービス変化後のサービス特性値は未知である。本調査では、個人 n ($n=1, \dots, N$) に対して、提示されたサービス要因 k ($k=1, \dots, K$) ごとに、代替手段の現況のサービス水準 S_{nk}^b 、現利用手段のサービス水準 S_{nk}^a 、および他のサービス要因の水準は現況のままとしたときの代替手段へ転換に踏み切る場合のサービス改善の限度値 R_{nk}^b とをデータとして得ることができる。これらの情報を用いてモデル構築に必要な代替手段のサービス変化後のサービス特性値と利用手段のデータを以下のようにして作成する。ここでは、所要時間のようにその特性値が小さい方がより高い効用を示すようなサービス要因を想定して説明をする。まず、個人 n ごとに、代替手段のサービス要因 k だけが現在の水準から任意の水準 $\alpha_{nk} \cdot S_{nk}^b$ （ここで α_{nk} はサービス変化率）に改善された状態を設定する。このとき、 $\alpha_{nk} \cdot S_{nk}^b \geq R_{nk}^b$ であれば、つまり仮想的なサービス変化後のサービス水準が回答された転換限度値よりも大きければ、個人 n は代替手段への転換は行わず、現利用手段を利用し続けると判定する。逆に、 $\alpha_{nk} \cdot S_{nk}^b < R_{nk}^b$ であれば、すなわち仮想的なサービス変化後の水準が回答された転換限度値よりも小さければ、個人 n は代替手段に転換すると判定する。このようにして、個人 n ごとに任意のサービス要因 k だけが単一で変化した場合（ k 以外の要因は現況のまま）の利用手段とそのサービス特性値データを作成することができる。実態のデータでは、所要時間と所要費用などのサービス要因間に強い相関があるために、パラメータ推定時の変数間の相関関係により要因効果の分離が困難となる場合（一般に多重共線性と呼ばれる性質）がある。しかし、本データ作成法を用いれば、上述した操作をモデルに採用するすべてのサービス要因について行うことによって種々のサービス要因に対するサービス変化後の状況を設定することができる上に、これらのサービス要因のレベルが独立に変化する状況を設定することができる。本来、サービス変化率 α_{nk} はいかなる値をとっても良いわけであるが、ここでは、個々人に対するサービス改善率にばらつきを持たせるため、 $(0, 1]$ の一様乱数 α_{nk} を個人ごと、サービス要因ごとに発生させることによって代替経路のサービス変化後の水準 $\alpha_{nk} \cdot S_{nk}^b$ の設定を行っている。一方、図4.2のような形式の質問から得られる転換限度値 R_{nk} は、意識データとはいうものの、各個人の現状のサービス水準に照らし合わせて回答されたものであるから、本作成データは完全な仮想選択肢に対する選好を質問するような通常の意識調査から得られるデータと比較して、より実際の行動に近い意識データになっていると考えられる。

(2) 転換モデルの定式化

ここで開発したモデルは、通常非集計行動モデルと同様に、個人の行動規範として確率効用理論に基づく効用最大化理論を採用している。しかし、4.3.1で述べたように、個人のそれまでの手段選択行動結果による交通サービスに対する評価構造の違いを考慮するために、モデルは現利用手段別に定式化され、さらに、転換抵抗を考慮するため効用関数に転換抵抗項が導入される。以下に本手段転換モデルを示す。

$$P_{ij} = 1 / [1 + \exp \{ \beta_0 + \sum_k \beta_k (x_{ik}^b - x_{jk}^b) - \sum_k \alpha_k (x_{ik}^a - x_{jk}^a) \}] \quad (4.4)$$

ここで、 P_{ij} : 現利用手段 i から代替手段 j への手段転換確率

β_k, α_k : サービス変化後 (、前) の k 番目変数のパラメータ

x_{ik}^b, x_{ik}^a : サービス変化後 (、前) の現利用手段 i の k 番目変数のサービス特性値

x_{jk}^b, x_{jk}^a : サービス変化後 (、前) の代替手段 j の k 番目変数のサービス特性値

である。このモデルは、基本的には、サービス変化前後の効用差が転換抵抗値よりも大きくなる確率で手段転換確率が与えられるというモデルである。このとき、サービス変化後の効用の確率項はサービス変化前後のサービス水準とは全く独立でランダムに分布し、かつ、転換抵抗値はサービス変化前のサービス水準の線形関数であると仮定することによって、式(4.4)で表される手段転換型モデルが導出される。その詳細は、河上・広畠・溝上(1984)の論文に譲る。

本モデルは、形式的にはバイナリーロジット型であるが、転換確率はサービス変化後のサービス水準だけでなく、サービス変化前のサービス水準の関数となる。本モデルは、交通サービスの変化がない場合でも正の転換確率を生じるという理論上の問題点が残るものの、これまでの実証的検討の結果、適合度がかなり高いことが判明している(河上・広畠・溝上, 1984)。

(3) モデルのキャリブレーション

ここで推定する交通手段転換モデルは、後に検討する鉄道端末バスサービス改善計画へのモデルの適用ということを考慮するため、B&Rに関するモデルが中心となっている。その内容は以下の4つのモデルである。

- ① 自動車直行からB&Rへの手段転換モデル
- ② B以外&RからB&Rへの手段転換モデル
- ③ B&Rから自動車直行への手段転換モデル

④ B & RからB以外&Rへの手段転換モデル

本調査では、仮想的に交通サービス変化後の水準を設定することができるサービス要因を図4.5に示す17要因、取上げている。各モデルの説明変数の選定には、①バス利用需要の予測時に制御可能なバス運行時間間隔などの要因を必ず入れ、②パラメータの符号条件の合理性、③モデルの的中率や ρ^2 値を考慮しながら、この17要因を逐次入れかえる方法を用いている。表4.10に各転換モデルの推定結果とその適合状況を示す。パラメータの符号条件は、B & RからB以外&Rへの転換モデルにおけるサービス変化前の所要時間だけが常識とは逆の結果となっているだけで、他はすべて合理的である。すべてのモデルで統計的には有意とはいえない変数が幾つか存在するものの、的中率は80%以上であり、 ρ^2 値も0.4以上の高い値を示していることから、適合度はかなり高いモデルであるといえよう。

仮想的に変化させる要因
1. 総所要時間
2. 総所要時間変動
3. バス乗車時間
4. 鉄道乗車時間
5. 乗り換え回数
6. 乗り換え時間
7. 発着の正確さ
8. 総徒歩時間
9. 冷房の整備
10. 鉄道内混雑度
11. バス内混雑度
12. 出発時間帯運行間隔
13. 帰宅時間帯運行間隔
14. 所要費用
15. バス料金
16. 始発時刻
17. 終発時刻

図4.5 仮想的に変化させる要因

表4.10 手段転換型モデルの推定結果

変数	モデル	自動車直行とB&R の手段選択モデル	自動車直行からB&R への手段転換モデル	B以外&Rから自動車 直行への手段転換モデル	B&Rから自動車直行 への手段転換モデル	B&RからB以外&R への手段転換モデル
定数項		-0.738E+01 (-2.74)	0.335E+01 (2.60)	0.114E+01 (0.97)	0.328E+01 (3.66)	0.127E+01 (0.82)
性別 (男性=1)		0.196E+01 (1.51)				
年齢 19以下		-0.133E+01 (-0.96)				
20~29		-0.962E+00 (-0.81)				
30~39		0.601E+00 (-0.90)				
40以上		-0.310E-01 (-0.06)				
免許の有無 (有=1)		0.141E+01 (0.96)				
車の有無 (有=1)		0.273E+01 (3.30)				
年収 ~ 100万円		0.168E+01 (1.03)	0.533E+00 (0.51)		-0.513E+00 (-0.78)	
100万~ 300万円		0.124E+01 (0.78)	0.161E+01 (1.10)		-0.863E+00 (-1.17)	
300万~ 600万円		0.800E+00 (0.76)	-0.390E+00 (-0.50)		0.179E+00 (0.30)	
600万~1000万円		0.193E+01 (1.63)	-0.112E+01 (-1.53)			
現利用手段 (B&R=1)				0.556E+00 (0.92)		
所要時間差 (後)		-0.628E-04 (-4.88)	-0.689E-01 (-4.10)	-0.426E-01 (-2.13)	-0.671E-01 (-4.92)	-0.257E-01 (-1.16)
(前)			0.807E-02 (0.43)	0.149E-01 (0.67)	0.159E+00 (7.60)	-0.297E-01 (-0.66)
待ち時間 (後)		0.292E-01 (0.70)	-0.225E+00 (-3.05)			-0.634E-01 (-0.34)
(前)			0.260E+00 (3.53)			0.147E+00 (0.55)
徒歩時間 (後)		0.359E-01 (1.30)	-0.290E-01 (-0.18)	-0.150E+00 (-2.16)	-0.139E+00 (-2.74)	-0.108E+00 (-1.36)
(前)			0.104E+00 (0.65)	0.190E+00 (1.97)	0.203E-02 (0.03)	0.817E-01 (0.85)
出発時間 (後)		-0.549E-01 (-1.31)	-0.238E+00 (-4.15)	-0.121E+00 (-1.80)	-0.122E+00 (-2.54)	-0.637E-01 (-0.84)
運行間隔 (前)			0.173E+00 (3.41)	0.133E-01 (0.80)	0.912E-01 (1.50)	0.972E-01 (0.84)
サンプル数		178 (B&R:0.365)	236 (転換者:28)	99 (転換者:17)	403 (転換者:92)	82 (転換者:12)
的中率		82.0 %	89.0 %	82.2 %	88.4 %	85.4 %
ρ^2 値		0.39	0.64	0.42	0.75	0.46

注) () 内は t 値を示す。

4.3.4 モデル相互の比較、検討

前節では、端末バス輸送利用需要を予測するための需要関数を、手段選択型と手段転換型の2つの非集計交通行動モデルによって構築した。手段選択型モデルは、交通手段選択行動に関する一時点のクロスセクションデータを用いて、実際に生起している手段選択行動結果に推定結果が最も一致するような個人の各手段選択肢に対する選択確率を決定する効用関数パラメータを求めるモデルである。したがって、交通サービス変化後の選択確率の予測値は、推定されたパラメータの値が将来も変化しないと仮定した上で、効用関数を構成するサービス要因にサービス変化後の特性値を代入することによって得られる。このときの手段転換需要は、サービス変化前と変化後の選択比率の差として求められる。この形式のモデルは、本来存在するであろうサービスの変化に伴う手段選択行動の変化を考慮しない静的なモデルであるため、本章で対象としているような端末バス輸送サービス変化直後の需要予測モデルとして適用性を有するという保証はない。何故なら、前述した手段転換行動に関する意志決定構造仮説、つまり同一の個人であっても現利用手段によって交通サービス変化後の交通サービスに対する評価が異なり、手段転換に対して何らかの抵抗が存在するという仮説を通常の手段選択型モデルではモデル化できないためである。

4.3.1における仮説(b)のうち、転換抵抗が存在するか否かの結果は、定数項パラメータか各サービス要因のサービス変化前パラメータの統計的性質に現れる。つまり、パラメータ β_0 か α_k が統計的に有意であれば、転換抵抗が0でない有意な値として存在することになる。また、現利用手段によるサービス変化後の評価構造の相違は、逆向きの転換行動を表す2つの転換モデル間のパラメータの相対的ウェイトの差として現れる。現利用手段と代替手段との組み合わせが自動車直行とB&Rである両転換型モデルでは、定数項パラメータは共に同符号、かつ統計的に有意であり、サービス変化前のサービス要因パラメータが有意となる変数が幾つか存在することから、現利用手段の違いによって異なる転換抵抗が存在することが分かる。また、所要時間差のパラメータに互いに差があることから、現利用手段によりサービス変化後の評価構造に差があることも分かる。一方、B以外&RとB&Rを組み合わせとする2つの手段転換モデルには明確な転換抵抗の存在や評価構造の相違を見出すことができない。これは、B以外&RとB&Rのように幹線交通手段が同一であるような類似した手段相互の転換行動においては、現利用手段の相違による転換抵抗や評価構造の差が共に小さいためと考えられる。このように、交通サービス変化に伴う交通手段転換需要量を予測する場合には、いずれかの手段を選択しているという状態ではなくて、手段転換という状態間の変化過程を明示的に考慮できる交通手段転換型モデルにより転換量を直接予測の方が望ましいと考えられる。

次に、手段選択型、転換型両モデルの端末バス輸送需要予測モデルとしての適用可能性について考察する。自動車直行選択肢を選択肢集合から除外した手段選択型MNLモデルは、データ数などの条件が同じであれば理論的にはMNLモデルより合理的であるはずのNLモデルよりも高い適合度を得

ている。しかし、端末バス輸送サービス変化後のB & Rへの主要な潜在的転換需要者は自動車直行利用者であることから、自動車直行を選択肢集合に含まず、単一のモデルで自動車直行選択需要が予測できないようなモデルは需要関数として意味を成さない。自動車直行か公共交通機関利用かの選択肢ツリーを最上段レベルにもつNLモデルを構築する必要があるが、下位レベルのモデル推定時には前述したモデルで用いたものと同一のサンプルを用いてパラメータ推定を行うことになるため、駐車料金にかかるパラメータの符号の非論理性やモデル全体の的中率の改善の期待は薄いと考えられる。

以上の2つの理由から、以後の端末バス輸送計画策定システムにおける需要予測モデルとして手段転換型の予測モデルを採用することにする。

4.4 鉄道端末バス輸送計画策定システム

本節では、前節でその有用性が検証された非集計交通手段転換モデルを用いたバス利用需要数の予測プロセス、およびその交通需要予測プロセスをシステム本体の中に組み込んだ鉄道端末バス輸送計画策定システムの概要について述べる。

4.4.1 計画策定システムの概要

最適バス輸送計画を客観的に策定することができるアプローチとしては、主として次の2つのアプローチが考えられる。その1つは、設定された評価項目の評価関数を最適化するように数理計画手法を用いて最適代替案を決定する Mathematical なアプローチ法であり、他の1つは、幾つかの評価項目に対する計画策定者の相対評価によって、複数の代替案の中から最良の代替案を選択する Systems Analysis による方法である。このとき、バス輸送計画代替案はバス系統網とその運行頻度の組み合わせから構成されており、本来、これらを同時に決定することが望ましい。しかし、バス系統リンクが要か不要かは0-1整数であり、各系統の運行頻度は実数であることから、これらの要素の同時決定問題は混合整数計画問題となる。混合整数計画問題は解法が極めて困難であることから、主にこれらの2要素を段階的に決定する方法がとられている(枝村・森津・松田・土井,1980; 天野・銭谷・近藤,1982; 河上・溝上,1984)。これらの2要素を分離して段階的に決定するのは以下のような2つの理由からである。最適系統網代替案を選択した後で運行頻度を決定する段階的な方法を用いる場合には、系統網代替案の設定段階で各系統の運行頻度の初期値を与えておかなければならないが、その与え方によっては選択される系統網代替案が異なってくる場合がある。しかし、系統網代替案は現在の需要状況と計画の基本指針に基づいて設定されるものであるから、大局的な最適代替案が選択される保証はないものの、それから大きくかい離した系統網代替案が選択される恐れは少ないと考えられるというのが第一の理由である。他の1つは、代替案選択の指標となる評価指標を算定するために、その前段階でサービスの変化に応じたバス利用需要の予測を行う必要があるが、本章では、前節で提案した非集計手段転換モデルを需要関数として採用しているために、バス輸送サービスを最適化するための任意の段階で、毎回、需要の集計化を行う必要があり、そのプロセスには多くの計算時間を要するという点である。

以上のような理由から、ここでは、計画策定アプローチとしては複数代替案に対して計画策定者が多評価項目にわたる評価を行いながら最適代替案を選択するという Systems Analysis アプローチをとり、その際には系統網と各系統の運行頻度とを段階的に決定する方法を用いた。すなわち、図4.6に示すフローに従って、まずバス系統網と運行頻度とを固定したバス系統網代替案を複数個設定し、それぞれの代替案に対して交通需要予測と評価指標値の算出を行い、それらの相対評価に基づいて最も望ましいと考えられる系統網代替案を選択する。次に、選択された系統網代替案に対して運行頻度

による弾性値分析を行い、各系統の運行本数を修正することによって、より適切な運行頻度計画案を決定するという手順をとっている。

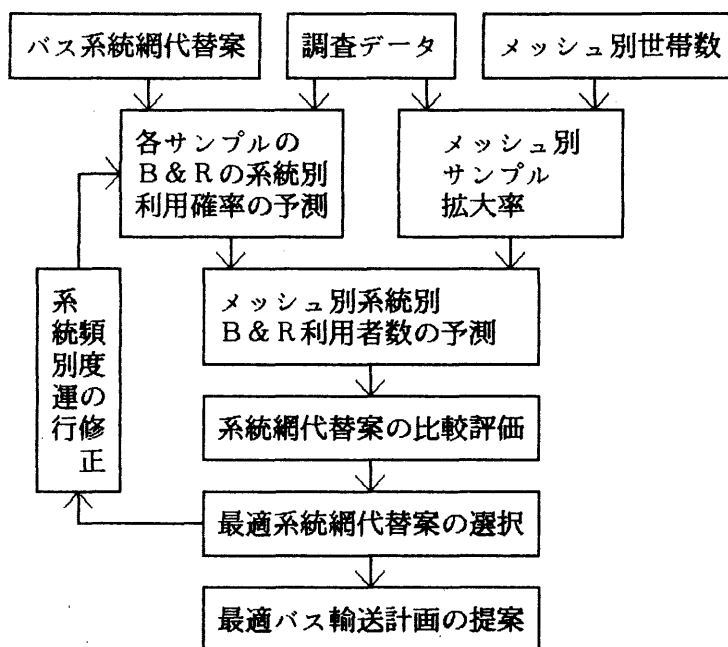


図4.6 端末バス輸送計画の策定手順

4.4.2 バス系統網代替案に対するバス利用者数の予測プロセス

バス利用者総人数などの評価指標による代替案評価には、バス利用者数の予測が不可欠である。ここでは、バス輸送サービス変化による交通行動の変化は交通手段選択とB&Rの経路選択だけに現われ、ODに関する交通行動の変化はないものと仮定してB&R利用者数を予測するものとした。本システムでは、計画代替案ごとに非集計手段転換モデルによって利用需要を予測するが、そのためには集計化の作業を必要とする。ここでは、調査から得られた実サンプルを用いたサンプリング法による集計化予測法を採用する。この方法は、対象地域をゾーンに分割し、モデルから得られる各サンプルの選択確率はそれが属するゾーンにおける母集団の選択確率（集計シェア）を与えるものとし、ゾーン内利用需要は各サンプルの選択確率にゾーン拡大率を乗じることによって算出されるというものである。実サンプルを用いた集計化手法は、サービスの変化による短期の需要変化を予測する場合や、対象地域が限定されていてサンプルが正しく母集団を代表していると考えられる場合には高い予測精度を得ることが可能であり、本章で対象としているような端末バス輸送計画には最も適した集計化手法であると考えられる。以下では、対象地域を500m×750mメッシュを1ゾーンとする94個のゾーンに分割して分析を行っている。B&R利用者数の予測プロセスを図4.7に示し、以下にその手順を述べる。

まず、以下のStep1～Step3によって各代替案に対するサービス水準を算定する。

Step 1. 端末駅－目的地間鉄道利用の各種サービス要因のサービス水準平均値をアンケート回答結果から求めておく。これは全てのバス系統網代替案に対して一定であるとする。

Step 2. バス系統網代替案ごとに、各居住地メッシュ－端末駅間のバスの各種サービス要因特性値を算定する。

Step 3. Step 1, Step 2の結果から、居住地メッシュ－目的地別にB&Rを利用するとした場合の乗り継ぎ端末駅別各経路のサービス特性値を求める。

次に、サンプルごとに、居住地メッシュ－目的地間サービス特性値データから利用可能なB&R経路のサービス特性値を求める。B&R以外の交通手段のサービス特性値は各サンプルの回答値を用いて以下のStep4～Step8の手順で各バス系統網代替案に対する利用者数を算定する。

Step 4. B&Rの経路（端末駅）選択モデルを用いて、B&Rを利用するとした場合の各経路の選択確率を求める。

Step 5. B&Rの各経路それぞれについて、B&Rがそのサンプルに利用可能な全ての交通手段の中から選択される確率を手段転換モデルを用いて求める。このとき、各サンプルの現利用交通手

段によって以下に示すような異なる転換モデルを適用する。

(a) 現利用手段がB & Rであるサンプルについて (図4・8(a) 参照)

(1) 自動車直行とB以外&Rとの手段選択モデルを用いて、各手段が各個人の代替手段となる確率を求める。この確率は、バス系統網が変化しても同じ個人については同一であると考えられる。

(2) B & RからB以外&Rへの手段転換モデル、およびB & Rから自動車直行への手段転換モデルを用いて、B & Rから転換せず、B & Rを利用し続ける確率を求める。

(3) (1) と (2) の確率を乗じることによりB & Rの選択確率を求める。

(b) 現利用手段が自動車直行であるサンプルについて (図4・8(b) 参照)

(1) 自動車直行からB & Rへの転換モデルを用いて、B & Rの各経路が自動車直行よりも優れている確率を求める。

(c) 現利用手段がB以外&Rであるサンプルについて (図4・8(c) 参照)

(1) B以外&RからB & Rへの転換モデルにより、B & Rの各経路がB以外&Rよりも優れている確率を求める。

Step 6 . サンプルごとに Step 4 と Step 5 の確率を乗じて、端末手段としてB & Rを利用する経路別利用確率を求める。

Step 7 . 同一の経路 (すなわち、同一の居住メッシュ-端末駅間) に複数の系統が運行されている場合には、利用者はバス乗車時間が最短である系統を利用するものとし、最短時間の系統が複数個存在する場合には、各系統の利用比率は運行頻度に比例するものとしてB & Rの経路別系統別の利用確率を求める。

Step 8 . B & Rの経路別系統別利用確率に拡大率を乗じ、各サンプルが代表している通勤通学者母集団のB & Rの経路別系統別利用者数を求める。拡大率は次の2段階で設定する。1つは、メッシュ i ($i \in I$) 別の抽出率、および対象者比率の違いを考慮した上で対象地域の対象者数を推定するための拡大率 $K1_i$ であり、次式によって求めることができる。

$$K1_i = T_i \times (G_i / H_i) \times (1 / S_i) \quad (4.5)$$

ここで T_i : メッシュ i の総世帯数、 G_i : メッシュ i の調査該当世帯数、 H_i : メッシュ i の調査訪問世帯数、 S_i : メッシュ i の回収世帯数である。他の1つは、メッシュ別利用手段 m ($m \in M$) 別にモデル適用における有効サンプル比率が異なることを考慮し、メッシュ別手段別の利用者数を算定するために用いる拡大率 $K2_i^m$ であり、次式によって求める。

$$K2_i^m = S_i^m / M_i^m \quad (4.6)$$

ここに S_i^m : メッシュ i の手段 m の現利用者数、 M_i^m : メッシュ i の手段 m の利用者のうち、モデル説明変数がすべて得られた有効サンプル数である。これら2つの拡大率を乗じたものが各サンプルの拡大率となる。

以上の方法でB&R利用者数を予測するためには、4.3.3の(3)で示した4つの転換モデルとB&Rと自動車直行とのバイナリー型の手段選択モデルの他に、B以外&Rと自動車直行とのバイナリー型の手段選択モデルとB&R経路選択モデルを作成する必要がある。これらのモデルの推定結果は以下に述べる通りである。

(a) 自動車直行とB以外&Rとの手段選択モデル

モデルの推定結果は表4.11のとおりである。各パラメータの符号は合理的であるが、統計的に有意なものは所要時間差だけである。しかし、的中率は全体で81.7%であることから、適合性はかなり高いモデルといえる。

(b) B&Rの経路（端末駅）選択モデル

名鉄豊田新線の米野木駅、日進駅、赤池駅、平針駅、地下鉄1号線の星ヶ丘駅、藤ヶ丘駅を經由する6経路を選択肢として取上げ、B&R経路選択モデルを作成した。

本調査では、個人に対して1つのB&R経路とそのサービス状況しか質問していないため、その個人が他の利用可能なB&R経路を利用する場合のサービス条件は不明であり、モデルを作成することができない。そこで、4.3.2で述べたデータ作成法を用いて現在利用している経路以外のB&R経路の交通サービス特性値を作成し、そのデータを用いてモデルのパラメータを推定している。説明要因としては、各経路を利用する場合の総所要時間、総乗り換え時間、端末駅までのバス運行間隔、乗り換え回数、総徒歩時間の5要因を考え、それらの組み合わせについていくつかのモデルを推定した。そのうちで比較的妥当な結果が得られた変数組モデルの推定結果を表4.12に、その適合状況を表4.13に示す。すべてのパラメータの符号は合理的であり、バス運行間隔の t 値がやや小さいものの他の要因はすべて統計的に有意となっている。的中率は61.6%であるが、選択肢が6個と多いことを考えるならばこのモデルの適合性もかなり良好であるといえる。

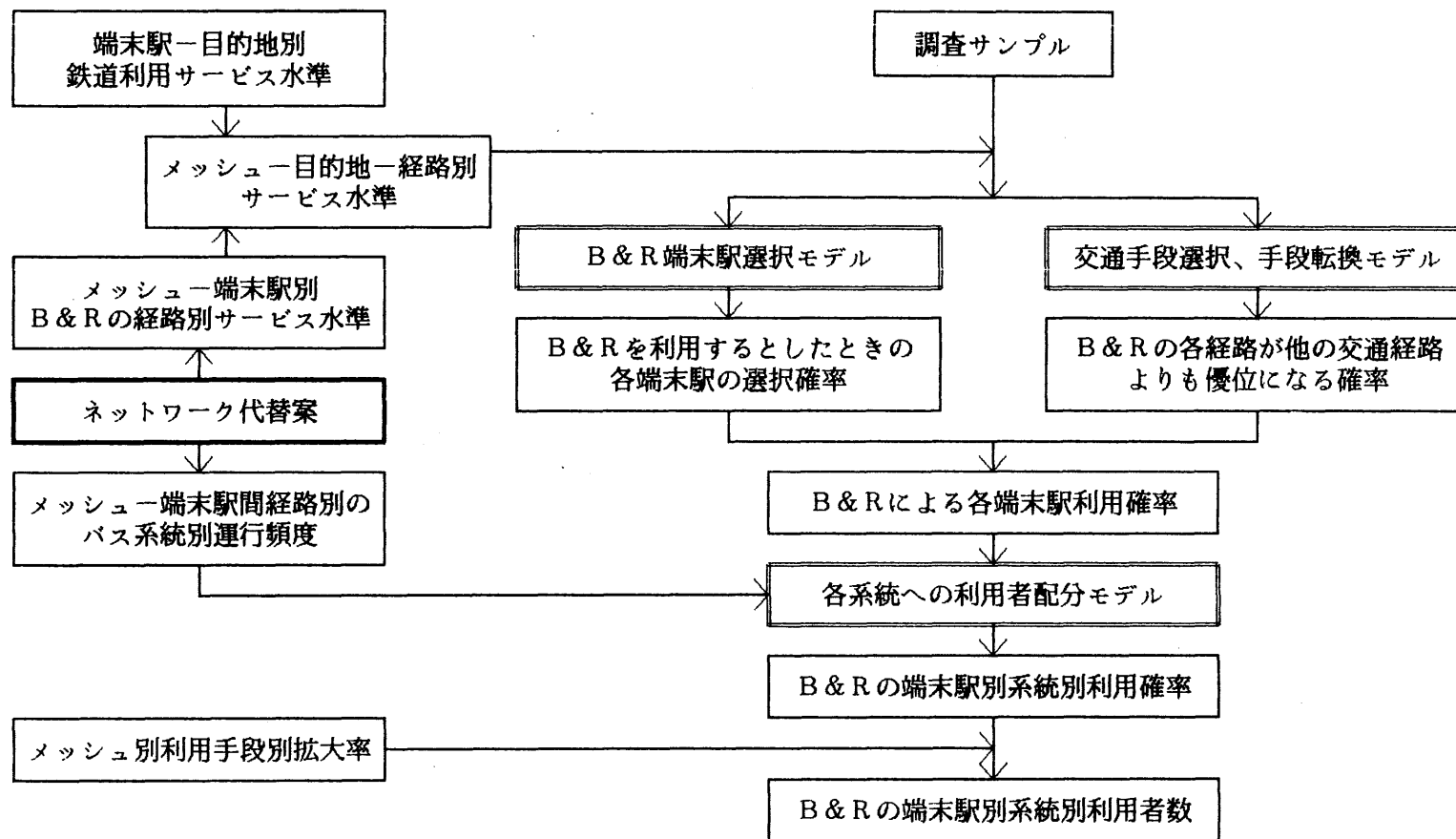
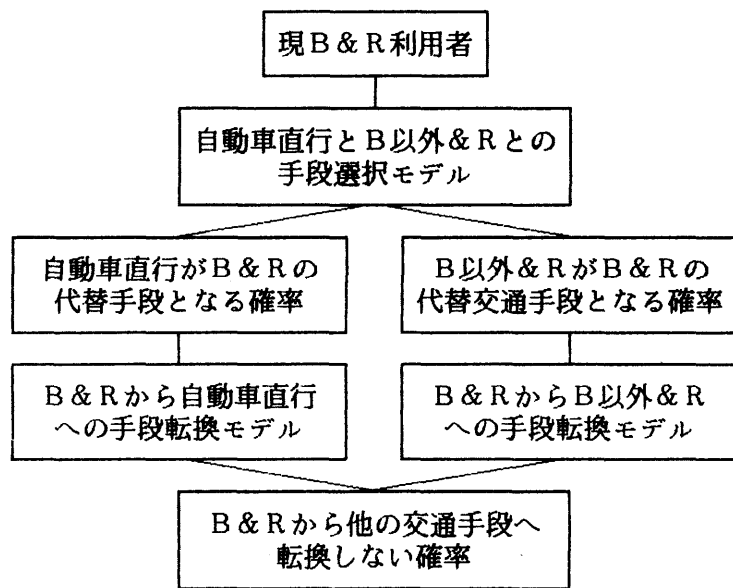
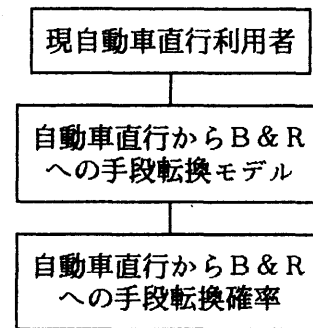


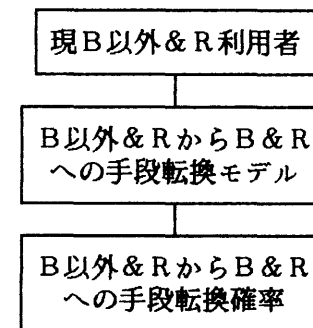
図4.7 B & R利用者の予測手順



(a) 現手段がB & Rの場合



(b) 現手段が自動車直行の場合



(c) 現手段がB以外&Rの場合

図4.8 現利用手段別のB & R利用確率の算定手法

表4.11 CとB以外&Rの手段選択モデル

変数	β	t
定数項	-1.734	-1.188
年収		
~ 100万円	-1.597	-1.239
100~ 200万円	-0.988	-0.689
200~ 600万円	0.052	0.049
600~1000万円	1.059	0.903
車の保有 (有=1)	1.453	1.685
所要時間差	-0.092	-4.179
徒歩時間	-0.012	-0.305
待ち時間	-0.055	-0.732
サンプル数	131	
ρ^2 値	0.43	
的中率 C	63.4	
B以外&R	90.0	
全体の的中率	81.7	

表4.12 B&Rの端末駅選択モデル

変数	モデル	β	t
総所要時間		-0.038	-3.624
バス運行間隔		-0.024	-1.129
待ち時間		-0.120	-2.171
サンプル数	211		
ρ^2 値	0.12		
全体の的中率	61.6		

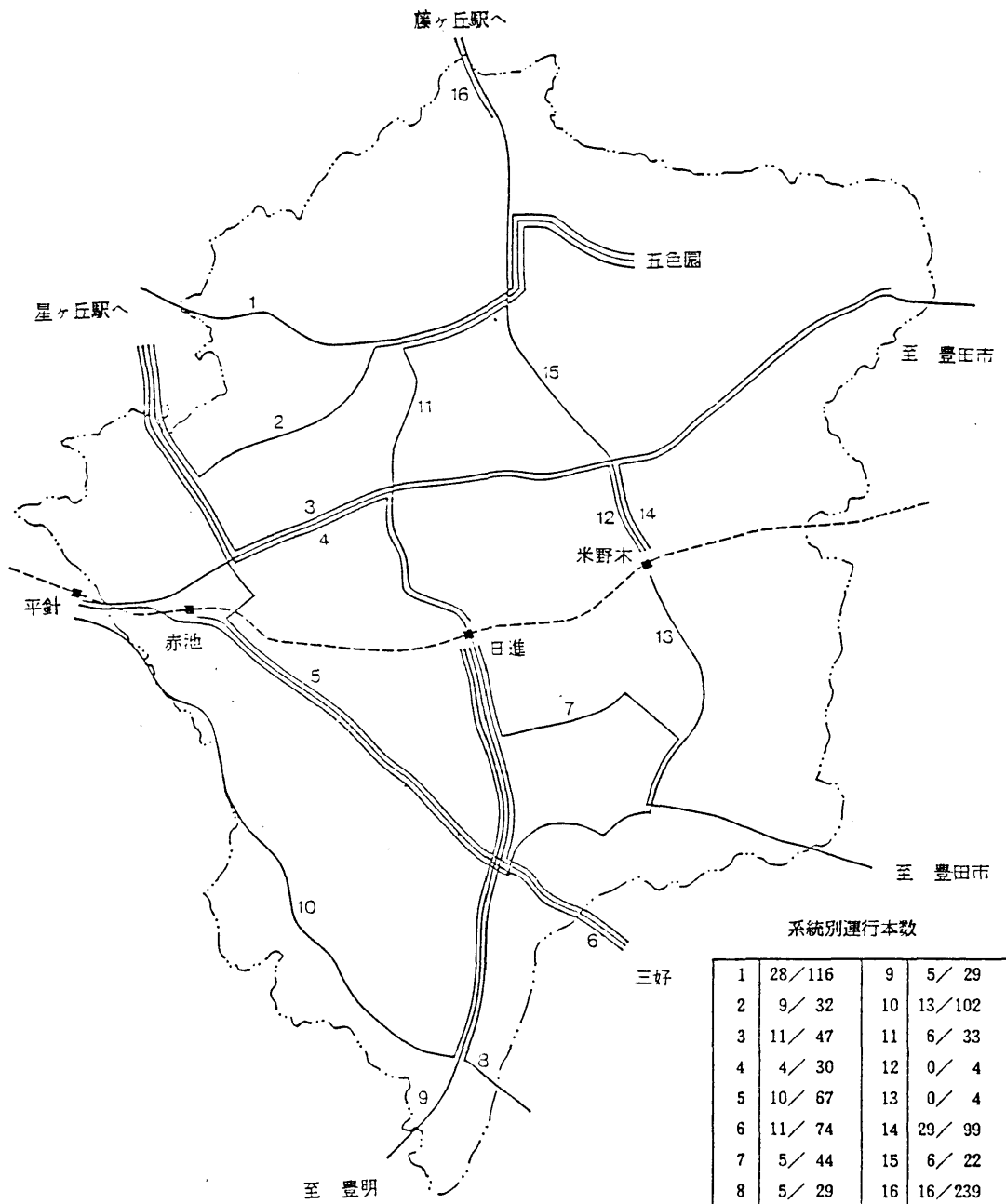
表4.13 B&Rの端末駅選択モデルの適合状況

実績	米野木	日進	赤池	平針	星ヶ丘	藤ヶ丘
米野木	3	1	0	0	1	0
日進	3	19	0	0	10	0
赤池	0	4	20	1	25	0
平針	0	2	1	1	2	0
星ヶ丘	0	5	18	1	82	3
藤ヶ丘	0	0	0	4	4	5
推定確率	0.034	0.187	0.215	0.029	0.503	0.032
実績確率	0.024	0.152	0.237	0.028	0.517	0.043

4.4.3 本バス利用需要予測手法の適合性の検討

本章で開発した交通需要予測プロセスが、実際の端末バス輸送計画策定システムにおける需要予測手法として適合性を持つためには、現況再現性のチェックを行っておく必要がある。そのために、まず現B&R利用者のみを対象として、B&Rの経路（端末駅）選択モデルと拡大率とから、図4.9に示す現況バスネットワークにおける経路別利用者数の算定を行った。これは、調査対象地域からの経路別、つまり端末駅別B&R利用者の実数がデータとして入手できないためにその数を概算しておき、実数値の代用値として用いるためである。その結果、全システムの総B&R利用者数は3,074人となった。

次に、現況バスネットワーク条件下で本交通需要予測プロセスを用いて系統別利用者数を予測し、先のB&R経路（端末駅）選択モデルから得られた経路別推定利用者数との比較を行うことによって本交通需要予測プロセスの現況再現性のチェックを行った。本来なら現況ネットワーク条件下での交通手段転換者は0のはずであるが、ここで用いた手段転換モデルを適用すると、モデルの構造上の性質やサービス水準の設定誤差などのために手段転換者が幾分生じる。しかし、現B&R利用者のうち他の手段に転換すると予測される人数と他の手段からB&Rに転換すると予測される人数とがほぼ等しく、互いに相殺されてB&R利用総人数の予測値は3,090人となった。この値は先に求めたB&R利用者数3,074人にはほぼ一致している。また、バス系統別にみても、本交通需要予測プロセスによる予測値と現B&R利用者を経路選択モデルを用いて経路別に配分した結果との間に大きな差は見られない。以上のことから、本プロセスによってバス利用需要を予測し、その結果を用いてバス輸送計画代替案の比較評価を行うことに大きな問題は生じないものと考えられる。



注) a / b
 a: 7時から9時までの本数
 b: 一日の本数

図4.9 現況バスネットワーク

4.5 鉄道端末バス輸送計画策定システムの適用例

4.5.1 バス系統代替案とその比較評価

ここでは、バス系統網代替案として表4.14に示すような特性をもつ6ケース考えている。また、本計画策定システムは、①B&R総利用者数、②乗車人キロ、③利用者数/運行本数、④利用者数/台kmという4つの指標の組み合わせに対して代替案の比較評価を行うことが可能であり、それらの総合評価によって最適代替案を選択する。

各バス系統網代替案は、①居住人口の多い地区を多くの系統が通過する、②運行間隔は20分以下とする、③名鉄豊田新線が乗り入れている地下鉄3号線への端末バスの接続は赤池駅とする、④現在のバス総走行台kmの値を大きく越えない範囲で増便を考える、などのことを考慮して表4.14の6つの代替案を設定している。本交通需要予測プロセスを用いて計算した各代替案の需要予測結果の特徴を表4.15に、また、算出された各評価指標値を表4.16に示す。バス利用者数で見ると、総系統数は最も少ないが運行台kmが2番目に大きいCASE3が最大であり、CASE6が最小である。乗車人kmはCASE1が最大で、次いでCASE3であり、CASE4が最小である。運行本数当たりの利用者数はCASE3が最大でCASE4が最小である。台km当たりの利用者数はCASE5以外のすべてのケースで現況より増加している。以上の結果より、系統数は少ないが利用者総数と運行本数当たりの利用者数が最大であり、運行台キロ当たりの利用者数も他のケースに比べて比較的多いCASE3を最も適切なバス系統網代替案(図4.10参照)として採用することにする。

表4.14 バス系統網代替案の特性

系統網代替案	主な特性
CASE1	対象地域の南部方面の系統網を強化するものである。系統1, 11を廃止し、系統7, 8, 10のルートを変更、増便する。
CASE2	現在の系統のうち、利用者の少ない系統を廃止し、要望の強い系統を新設するものである。系統2, 9, 12, 1311を廃止し、系統11を藤ヶ丘-日進駅間に変更し増便する。
CASE3	現在の系統網を大幅に変更し、南北方向の輸送を強化し、主として地下鉄1号線星ヶ丘、藤ヶ丘へ系統を集中させるもの。系統1, 2, 8, 9, 11, 12, 13, 14を廃止し、系統3, 4, 5, 7, 10, 15, 16のルートを変更、増便する。
CASE4	現在の系統網を大幅に変更し、東西方向の輸送を強化して地下鉄3号線赤池駅へ系統を集中させるもの。系統3, 4, 15を廃止し、系統2, 7, 9, 10, 12, 13, 14のルートを変更、増便し、新系統17を米野木-名商大に設定する。
CASE5	現在の系統網を一部修正して鉄道駅への集中を強化するもの。系統5, 7を廃止し、系統13, 15, 16のルートを変更し増便する。日進-米野木間の循環系統17を新設する。
CASE6	バス系統を名鉄豊田新線方面と地下鉄1号線方面とに分離し、赤池駅へ集中させるもの。系統3, 4, 10, 11, 12を廃止し、系統1, 2, 8, 13, 14, 15, 16のルートを変更し増便させる。日進-米野木間の循環系統17を新設する。

表4.15 各バス系統網代替案に対する需要予測結果

系統網代替案	需要予測結果
CASE1	系統7', 10'の利用者数は現況に比べて大幅に増加し、いずれも1,000人前後となる。駅別では、日進、赤池の利用者数が増加し、米野木、平針の利用者数が減少する。
CASE2	系統11の利用者数が現況に比べて大幅に増加し、本代替案の中で最大の利用者数を示す。駅別には星ヶ丘、米野木の利用者が減少し、藤ヶ丘が増加する。
CASE3	すべての代替案の中で最も系統数が少ないものであるが、変更、増便した系統の大部分で利用者が増加する。駅別利用者数の差がすべての代替案の中で最も小さい。
CASE4	系統5, 14'の利用者が増加する。駅別では赤池の利用者が最も多くなり、星ヶ丘は現況に比べてほぼ500人程減少している。
CASE5	新設の循環系統17の利用者数が最大の720人となる。駅別では米野木の利用者が現況に比べて増加し、星ヶ丘は減少する。
CASE6	系統14'の利用者が現況に比べて大幅に増加する。駅別では赤池駅が最大となり、星ヶ丘は大きく減少している。

表4.16 評価指標の値

評価指標 \ 代替案	現況	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4	CASE5	CASE6
総系統数 (本)	16	14	12	8	14	15	12
片道ラッシュ時 総運行本数 (本/時)	79	70.5	77	63	80	85	68.5
総延長 (km)	129	130	100	81	96	120	89
総運行台km (km)	614	656	612	666	583	672	529
B & R利用者 (人)	3074	3406	3154	3464	3037	3271	3003
乗車人km (km)	15533	17200	16016	17152	11484	15437	11777
運行本数当り利用者 (人/本)	38.9	48.3	41.0	55.0	38.0	38.5	43.2
台km当り利用者 (人/台km)	5.01	5.19	5.15	5.20	5.21	4.87	5.68

注) 現況とは現B & R利用者を配分した結果である。

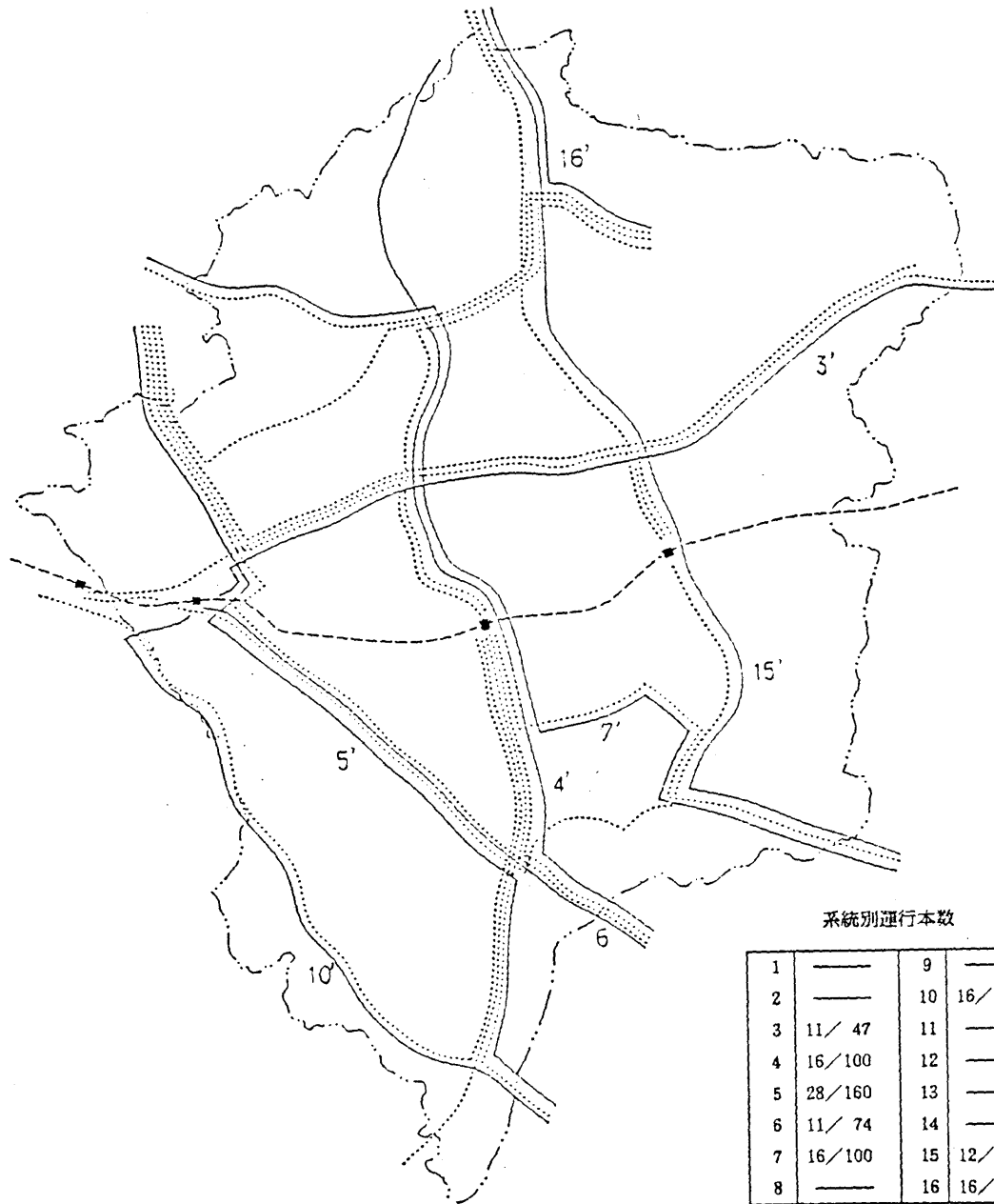


図4.10 CASE 3のバス系統網代替案

注) a/b
 a: 7時から9時までの本数
 b: 一日の本数

表4.17 弧弾性値分析による集計レベル系統別需要

変化させる系統	CASE3	3'	4'	5'	6	7'	10'	15'	16'
3'	246	270	245	244	244	243	245	246	246
4'	712	709	734	712	709	678	712	711	712
5'	793	788	792	821	789	789	790	793	793
6	113	111	113	132	149	113	112	113	113
7'	874	868	838	870	870	956	874	871	874
10'	239	237	239	237	236	239	261	239	239
15'	337	337	336	337	337	336	337	413	335
16'	152	152	152	152	152	152	152	150	169
合計増加量	3464	3474 +10	3494 +30	3484 +20	3475 +11	3505 +41	3483 +19	3536 +72	3479 +15

表4.18 弧弾性値分析による集計レベル端末駅別需要

端末駅	CASE3	変化させる系統							
		3'	4'	5'	6	7'	10'	15'	16'
米野木	65	65	64	65	64	65	64	73	65
	1.8	1.8	1.8	1.9	1.9	1.8	1.9	2.1	1.9
日進	887	883	905	887	883	913	887	886	887
	25.6	25.4	25.9	25.5	25.4	26.1	25.5	25.1	25.5
赤池	598	619	595	594	617	594	616	598	598
	17.3	17.8	17.0	17.1	17.8	17.0	17.7	16.9	17.2
平針	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
星ヶ丘	1226	1219	1219	1252	1224	1253	1225	1225	1226
	35.4	35.1	34.9	35.9	35.2	35.8	35.2	34.6	35.2
藤ヶ丘	689	688	715	689	689	682	689	754	703
	19.9	19.8	20.5	19.8	19.8	19.4	19.8	21.3	20.2

注) 下段は駅別利用率を示す。

表4.19 弧弾性値

	3'	4'	5'	6	7'	10'	15'	16'
3'	0.49	-0.02	-0.04	-0.04	-0.06	-0.02	0.00	0.00
4'	-0.02	0.15	0.00	-0.21	-0.24	0.00	-0.01	0.00
5'	-0.03	-0.01	0.18	-0.03	-0.03	-0.02	0.00	0.00
6	-0.09	0.00	0.84	1.59	0.00	-0.04	0.00	0.00
7'	-0.03	-0.21	-0.02	-0.02	0.47	0.00	-0.02	0.00
10'	-0.04	0.00	-0.04	-0.06	0.00	0.46	0.00	0.00
15'	0.00	-0.02	0.00	0.00	-0.02	0.00	1.13	-0.03
16'	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.07	0.56
総需要弾性値	0.01	0.04	0.03	0.02	0.06	0.03	0.10	0.02

4.5.2 バス運行頻度の決定

CASE 3 で設定されたバス系統網における最適バス運行頻度を決定するために、各系統の運行頻度に対する各系統の利用需要の集計レベルの弾性値分析を行い、その結果を用いて運行頻度の修正を行った。ここでは運行頻度の変化率を2割とした集計レベルの弧弾性値を用いている。この時の系統別、端末駅別利用需要を表4.17と表4.18に、自己、交差弧弾性値を表4.19に示す。自己弾性値は系統6が最も高く1.539であり、系統5'が1.128で2番目に高い。系統6の交差弾性値をみると系統5'が唯一0.841と正の値をとっている。これは、系統6と5'が同一のルートを通過して同一の赤池駅に集中しているため、これらの系統の利用者は系統6と5'とを区別せずに利用可能となり、効用が共に上昇するからである。他の交差弾性値は0か負の値を示しており、系統4'に対する系統7の交差弾性値は-0.239、逆は-0.206と他の値に比較してその絶対値が大きくなっている。この理由は両系統が一部、同一区間を通過しているものの、系統7'の端末駅は星ヶ丘駅、系統4'は藤ヶ丘駅というように、一方の端末サービス水準の向上が他方の端末サービス水準を相対的に低下させるためである。この結果は、表4.18の星ヶ丘駅と藤ヶ丘駅への集中比率の感度を見ても明らかである。ここでは、B&R総利用者数に対する自己弾性値の大きさを重視して、系統15'、7'、4'を中心に運行頻度の増加改善を行うような表4.20に示すCASE3を基調にした2つの運行頻度代替案を提案している。これらの運行頻度代替案に対して、本交通需要予測プロセスを適用し、各評価指標を算出した結果を表4.20に示す。各系統の運行頻度の変化率に対する各評価指標値の変化率が逡減していることから、代替案2は代替案1に比較して最適運行頻度解により近い実行可能解になっているものと考えられる。運行頻度代替案2は元のCASE3と比べて総運行頻度、運行台キロとも減少しているにもかかわらず4.7%のB&R利用者増を、また現在のバス利用者よりも17.3%の利用者増を得ることができる。この時の端末駅別B&R利用需要を表4.21に示す。

表4.20 運行頻度代替案とその需要予測結果

系統		CASE3				運行頻度代替案1			運行頻度代替案2		
現	新	延長	頻度	台km	需要	頻度	台km	需要	頻度	台km	需要
1											
2											
3	3'	8.7	5.5	47.8	346	4.0	34.8	203 (-41.3)	3.0	26.1	162 (-53.2)
4	4'	13.3	8.0	77.6	712	9.0	87.3	747 (+4.9)	8.0	77.6	691 (-2.7)
5	5'	13.2	14.0	184.1	793	14.0	184.1	805 (+1.5)	14.0	184.1	822 (+3.7)
6	6'	4.9	5.5	27.1	113	4.0	19.7	82 (-27.4)	3.0	14.8	59 (-47.8)
7	7'	14.7	8.0	90.9	874	9.0	102.2	923 (+5.6)	10.0	113.6	1017 (+16.3)
8											
9											
10	10'	6.3	8.0	50.5	239	8.0	50.5	243 (+1.7)	8.0	50.5	247 (+3.3)
11											
12											
13											
14											
15	15'	13.4	6.0	58.9	337	8.0	78.5	462 (+37.1)	9.0	88.2	516 (+53.1)
16	16'	6.5	8.0	52.3	152	6.0	39.2	126 (-20.6)	5.0	32.7	113 (-34.5)
17											
合計		81.0	63.0	589.2	3464	62.0	596.3	3590 (+3.6)	60.0	587.6	3626 (+4.7)

注) () 内は増加率を示す。

表4.21 最適端末バス輸送代替案に対する駅別B&R利用需要

端末駅	CASE3	運行頻度代替案1	運行頻度代替案2
米野木	65 (1.9)	78 (2.2)	84 (2.3)
日進	887 (25.6)	929 (25.9)	953 (26.3)
赤池	598 (17.3)	528 (14.7)	469 (12.9)
平針	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)
星ヶ丘	1226 (35.4)	1264 (35.2)	1313 (36.2)
藤ヶ丘	689 (19.9)	791 (22.0)	808 (22.3)
合計	3464	3590	3626

注) () 内は駅別利用率を示す。

4.6 まとめ

本章では、鉄道端末バス輸送サービスの改善を目的とした交通計画を策定するために、従来の集計決定論型需要予測モデルの問題点をある程度解決できるとされている非集計交通行動理論を基礎にした需要予測モデルを構築し、この需要予測モデルを組込んだ一連の鉄道端末バス輸送計画策定システムを開発した。さらに、鉄道端末交通手段としてバスが利用可能である地域を対象にして本システムを適用し、幾つかの評価指標に対する系統網と運行頻度の適正化を目的としたバス輸送計画案を提示することによって本システムの有用性を検証した。以下、本章の成果についてまとめてみる。

2節では、鉄道端末駅周辺の通勤通学交通実態と交通サービス変化後の代替手段への手段転換意識を把握するために実施したアンケート調査の集計分析を行った。交通実態分析の結果からは、複数の交通手段の組み合わせから成る交通経路に対して、人は端末手段、端末駅、幹線交通手段の各サービス項目を総合的に評価し、効用最大となる経路選択の結果が実態の経路選択結果として現れることが明らかになった。手段転換に関する意識データの分析結果からは、代替交通手段への転換の際には何等かの転換抵抗が存在すること。同一の個人であっても、サービス変化後の交通サービスに対する評価は現利用手段によって異なるという仮説を定性的に把握した。

3節では、鉄道端末バスの需要関数としてより信頼性の高い需要予測モデルを得るために、2節で考察した端末交通手段選択、手段転換意識に関する仮説を明示的に検証することができる非集計交通行動理論に基礎をおく2つの非集計端末バス需要予測モデルを構築した。その一つは実際の手段選択に関するクロスセクションデータを用いた手段選択型モデルであり、他の一つは転換意識データを用いた手段転換型モデルである。手段選択型モデルとしてMNLモデルとNL両モデルを構築した結果、経路選択肢間に類似性が存在し、特に端末駅選択肢の類似性が高いことが明らかになった。しかし、NLモデルは適合度が低く、符号が非論理的になるパラメータが存在するなど、MNLモデルに比べると需要モデルとしての信頼性に欠ける結果となった。MNLモデルも、他の選択肢と性質が大きく異なる上にそのシェアが極めて大きい自動車直行選択肢を選択肢集合に含む場合には、適合度が低下し、符号が非論理的になるパラメータが出現する。以上のことから、手段選択型モデルを需要関数として採用するには問題があることが明らかになった。一方、現利用手段と代替手段との組み合わせごとに作成した手段転換型モデルはすべて高い適合度を示した。また、現利用手段と代替手段の各組み合わせに特有の転換抵抗とサービス変化後のサービス要因に対する評価構造の相違が存在することが確認され、手段転換需要を予測するためには、人の手段転換という動的な意志決定行動をモデル化できる転換型モデルが有用であることを明らかにした。

4節では、非集計手段転換型モデルを交通需要予測モデルとして組込んだ鉄道端末バス輸送計画策定システムを開発した。本システムは、需要予測モデルとして非集計モデルを用いているため、計画代替案に対する需要予測、代替案評価においてより詳細で精度の高い検討が可能になることが明らか

になった。一方で、本システムにおける交通需要予測段階では、現利用手段と指定された代替手段とのペア間での転換需要しか予測できないため、すべての手段別需要を算出するためには転換モデルの数が通常の手段選択型モデルに比較して多くなり、予測プロセスが煩雑になるという欠点がある。しかし、本交通需要予測手法は、現況の端末駅別、系統別利用需要をうまく再現できることを検証し、本手法を用いてバス輸送計画代替案の比較評価を行うことに問題が生じないことを明らかにした。

5節では、実際の地域を対象に、まず6つの系統網代替案に対して4項目の評価指標の評価値を比較、検討することにより最適系統網代替案を選択し、次に集計レベルでの需要弾性値分析を行うことによって初期運行頻度を適切な運行頻度に修正するという手順で最適端末バス輸送計画案を提示する適用例を示し、本システムの適用可能性の高さを検証した。

参考文献

- 原田 昇・太田勝敏: Nested Logit モデルの多次元選択への適用; 駅・アクセス手段同時選択の場合, 交通工学, Vol.8, No.6, pp.3-11, 1983.
- 原田 昇・太田勝敏・新谷洋二: 非集計行動モデルによる新駅利用量の予測とその評価, 土木学会論文集, 第347号/IV-1, pp.49-58, 1984.
- 河上省吾・広島康裕・溝上章志: 鉄道端末バスサービスの改善計画のための交通需要予測モデルの開発と適用, 土木計画学研究・論文集, No.2, 1985.
- 河上省吾・広島康裕: 鉄道開通に伴う交通手段分担の変化に関する分析, 第3回土木計画学研究発表会講演集, pp.227-232. 1982.
- 森地 茂・屋井鉄雄・田村 亨: 非集計交通手段選択モデルの地域間移転可能性, 土木学会論文集, 第359号/IV-3, pp.107-115, 1985.
- 河上省吾・広島康裕・溝上章志: 意識データに基づく非集計交通手段転換モデルの構築の試み, 土木計画学研究・論文集, No.1, 1984.
- 河上省吾・広島康裕: 利用者の主観的評価を考慮した非集計交通手段選択モデル, 土木学会論文集, 第353号/IV-2, pp.83-92, 1985.
- 枝村俊郎・森津秀夫・松田 宏・土井元治: 最適バス路線網構成システム, 土木学会論文報告集, No.300, pp.95-107, 1980.
- 天野光三・銭谷喜信・近東信明: 都市街路網におけるバス系統網の設定計画モデルに関する研究, 土木学会論文報告集, No.325, pp.143-154, 1982.
- 河上省吾・溝上章志: バス輸送計画の策定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.226-232, 1983.
- T.A.Domencich and D.McFadden: Urban Travel Demand, North-Holland/American Elsevier, 1975.
- P.S.Liou and A.P.Talvitie: Disaggregate Access Mode and Station Choice Models for Rail Trips, Transpn.Res.Rec., Vol.526, pp.42-65, 1974.
- D.McFadden and A.P.Talvitie: Demand Model Estimation and Validation, Special Report, UCB-ITS-SR-77-9, The Institute of Transportation Studies, Univ. of California, 1977.

J.D.Ortuzar : Nested Logit Models for Mixed-Mode Travel in Urban Corridors, Transpn.Res.-A, Vol.17A, No.4, pp.283-299, 1983.

D.McFadden and F.Reid : Aggregate Travel Demand Forecasting from Disaggregated Behavioral Models, Transpn.Res.Rec., Vol.534, pp.24-37, 1975.

F.S.Koppelman : Guidelines for Aggregate Travel Prediction Using Disaggregate Choice Models, Transpn.Res.Rec., Vol.610, pp.19-24, 1976.

F.A.Reid : Minimizing Error in Aggregate Predictions from Disaggregate Models, Transpn.Res.Rec., Vol.673, pp.59-64, 1978.

T.Watanatada and M.Ben-Akiva : Forecasting Urban Travel Demand for Quick Policy Analysis with Disaggregate Choice Models ; A Monte Carlo Simulation Approach, Transpn.Res.-A, Vol.13A, pp.241-248, 1979.

C.F.Daganzo : Goodness-of-Fit and the Predictive Power of Discrete Choice Models, Transpn.Res.Rec., Vol.874, pp.13-18, 1982.

T.J.Atherton and M.Ben-Akiva : Transferability and Updating Disaggregate Travel Demand Models, Transpn.Res.Rec., Vol.610, pp.12-18, 1976.

K.Train : A Validation Test of Disaggregate Mode Choice, Transpn.Res., Vol.12, pp.167-174, 1978.

P.S.McCarthy : Further Evidence on the Temporal Stability of Disaggregate Travel Demand Models, Transpn.Res.-B, Vol.16B, pp.263-278, 1982.

第5章 結論

5.1 研究成果の要約

本研究は、道路網をネットワーク構造として明示的に表現した上でサービス変化に伴う分担需要の変化を考慮できる分担需要変動型交通均衡理論による交通需要予測法、およびバス輸送計画の策定手法について研究を行ったものである。バス輸送計画の策定に対する方法論としては、① Manual ② Market Analysis Project ③ Systems Analysis ④ Systems Analysis with Interactive Graphics ⑤ Mathematical などのアプローチ法が考えられる。本研究では③と⑤のアプローチ法に焦点をあて、特に、一意の最適解の決定可能性や数学的客観性を持つ上に数理計画手法や計算機の計算処理能力の発達に伴う計算可能性が今後多いに期待できる Mathematical アプローチ法を中心に研究を進めてきた。①～⑤のいずれのアプローチをとるにせよ、バス輸送計画策定時に問題となるのは、交通サービス変化に伴う需要変動の考慮の方法である。従来は主に、①固定型需要 ②集計確率分布型需要に対してバス輸送計画の策定が行われていたのに対して、本研究では交通サービス変化に伴う ③非集計型需要 ④需要変動型均衡交通需要をその中で考慮できるようなバス輸送計画策定手法の開発を行っている。以上のように、バス輸送計画策定手法には (a) 計画策定に対するアプローチの方法 (b) 需要変動の考慮の方法 という2つの軸が存在する。本研究の最終の目的は、計画の対象となるバス輸送ネットワークの輸送機能に応じた計画策定アプローチと需要考慮法の適切な組み合わせを見出すことであり、その理論の確立と実際の道路網へのモデルの適用可能性を明らかにすることにあつた。そのために、本研究は以下の3つの主題によって構成された。それらは、

- (1) 需要変動型交通均衡理論による交通需要予測法の確立と、実際の都市交通需要分析への適用可能性の検証
- (2) 分担需要変動型交通均衡を考慮した最適バス輸送計画策定手法の開発とその実用可能性の検討
- (3) 意識データを用いた非集計型手段転換モデルの鉄道端末バス輸送需要関数としての適用可能性の検討と、それを需要関数として組込んだ鉄道端末バス輸送計画の策定システムの開発

である。(1)については第2章で、(2)については第3章で、(3)については第4章において議論を行っている。以下に各章別に本研究の成果を要約し、全体的な視点から今後の展望を行い、本研究の結論としたい。

- (1) 需要変動型交通均衡理論による交通需要予測法の確立と、実際の都市交通需要分析への適用可能性の検証

需要固定型交通均衡問題とは、交通ネットワークを構成する各リンクのリンクパフォーマンス関数が特定化され、OD表が与えられたときに、自動車の運転者がとるであろう経路選択に関する交通行

動の下での自動車交通フローを求める問題である。このときの運転者の経路選択に関する交通行動規範として最も合理的であると考えられるのは等コスト経路選択規範であり、この経路選択規範に従った交通状態においては各交通需要者の走行コストは自分にとって最小になることから、この交通状態は利用者最適な交通状態となる。このような交通状態を交通均衡状態と定義する。交通均衡状態は需要と交通パフォーマンスの均衡点により決まることから、交通需要を予測するためにサービス変化後のサービス水準を先決しておく必要がない。また、交通サービス整備による効果は一意に決まる均衡値によって正確に求めることが可能である。この固定型交通均衡問題に対して、分布交通需要や分担交通需要の変動を認めたものを需要変動型交通均衡問題ということを1章3節で述べた。分担需要変動型交通均衡を交通需要分析の中で考慮する必要があるのは、2、3章で対象としているように、同一ネットワーク上で自動車とバスとが競合し、互いの交通量が各手段のサービス水準に影響し合うことによって手段分担需要が変動するような場合であり、これは主として、自動車の代替交通手段であるバス輸送網が主要幹線的な機能を持つ場合である。2章は、このような交通状態を予測するための理論と実測交通量を追加データとして用いて交通フローを予測する新たな方法論を確立したものである。2節では、自動車、バス両手段の交通量の関数であるリンク走行コストを介して、OD間の手段選択と経路選択とに影響を及ぼす交通パフォーマンス要因と、手段選択だけに影響を与えるトリップ特性要因とを手段選択関数の説明要因として含む2手段分担需要変動型交通均衡需要予測モデルを、Variational Inequality 理論により定式化した。さらに、リンクコスト関数のヤコビ行列の正定性と対称性を仮定した場合には、多くの有効な解法が開発されている Beckmann 型の数理最適化問題に変換可能であることを明らかにした。従来、需要変動型交通均衡需要予測法は、手段選択関数パラメータをPT調査などから得られるゾーン間分担率とサービス特性値の実態データを用いて重回帰分析などによりあらかじめ求めておき、その値を手段選択関数に代入してから均衡交通量を求めるというプロセスの中で用いられてきた。しかし、需要変動型交通均衡問題から得られるサービス特性値の均衡値は調査から得られたサービス特性値の実績値と整合性のあるものではなく、そのために推定された均衡交通量は実績交通量に回帰する保証はない。3節では、観測可能ないくつかの実績分担交通量に分担需要変動型交通均衡モデルから得られる推定均衡交通量が最小自乗回帰するように、手段選択関数パラメータとリンクコスト構成要因パラメータ、および均衡交通量とを同時推定するモデルを開発した。このモデルは2レベル問題で定式化されている。上位最適化問題は手段選択関数パラメータが既知とした場合の人の規範的交通行動を求める分担需要変動型交通均衡問題であり、下位最適化問題は人の実際的手段選択行動結果と上位問題から得られる規範的選択行動とのずれを最小にするような手段選択関数パラメータを求める最小自乗問題である。4節では、バス運行頻度は固定であり、バスのリンクコストは自動車のリンクコストの関数であるという現実的な仮定を導入することにより、線積分を目的関数の中に含む Beckmann 型最適化問題を単一モードの問題に簡略化した。さらに、非

線形収束計算アルゴリズムにおける勾配ベクトル決定法としてF-Wの分解原理が利用可能であることを明らかにした。このモデルと解法を用いて、観測サンプルと観測誤差が推定精度に与える影響を検討するための感度分析を行った結果、観測データのある程度の数収集すれば、たとえ観測誤差が大きい場合でも、均衡交通量はかなり高い精度で推定可能であることが分かった。5節においては、本モデルを実際の都市圏交通需要分析に適用した結果、分担需要変動型交通均衡需要予測モデル自身の適合度は高いこと、手段選択関数パラメータと均衡交通量の同時推定モデルの適合度はそれ以上に高いこと、推定パラメータの統計的信頼性も向上すること、収集すべきサンプル数とその種類が従来の方法より少なくとも手段選択関数パラメータと均衡交通量の推定精度は高いことが明らかとなり、本章で開発したモデルの有用性を検証することができた。

(2) 分担需要変動型交通均衡を考慮した最適バス輸送計画策定手法の開発とその実用可能性の検討

3章では、分担需要変動型交通均衡を考慮しながらバスと自動車両モード利用者の増加便益を最大にするような最適バス輸送計画を策定する手法を提案した。2節では、バス台数を自動車換算係数を用いて自動車台数に換算し、バスのリンクコストを自動車のリンクコストの関数であると定義することによって、多種モード混合ネットワークにおける自動車の交通均衡問題を自動車換算経路交通量を決定変数とする数理最適化問題により定式化できることを示した。3節では、均衡分担需要を求めるための需要関数として採用した Modal Demand モデルを紹介し、このモデルを用いてバス輸送システム導入による交通需要者の直接、間接両便益を評価できるシステム評価関数を設定した。4節では、各モードの交通均衡状態を表現する下位最適化問題を制約条件とし、人の手段選択結果から得られるシステム全体の増加便益関数を上位最適化問題の目的関数とした2レベル Stackelberg計画問題により、分担需要変動型交通均衡を考慮した最適バス輸送計画問題を定式化した。このモデルは、均衡交通需要予測モデルとして考える場合には、各交通需要者の交通手段と経路選択に関する利用者最適な選択行動と、選択に関する段階的な意志決定順序とをモデル化したものになることを示した。この2レベル Stackelberg 計画問題を解くために、下位の最適化問題の凸性を証明し、下位最適化問題をその必要十分条件となる Kuhn-Tucker条件で置換え、それを上位最適化問題の制約条件とすることによって通常の第Ⅱ種非線形計画問題に再定式化できることを示した。5節は、その解法のアルゴリズムとモデルの適用例を示したものである。本問題は、通過経路をあらかじめ指定しておくことができない上に変数の数が多いこと、パラメトリック変数であるバス運行頻度についても最適化する必要がある点に特徴がある。そこで、有効経路を逐次取込み法により限定し、均衡問題の外側にバス運行頻度の収束ループを持つアルゴリズムを開発した。仮想的なネットワークに適用した結果、計算時間、解の収束状況、解の一意性などの面で最適バス輸送計画策定のための一手法として本モデルとその解法が有用であることが明らかにされた。

(3) 意識データを用いた非集計型手段転換モデルの鉄道端末バス輸送需要関数としての適用可能性の検討と、それを需要関数として組込んだ鉄道端末バス輸送計画の策定システムの開発

4章では、鉄道端末輸送をその機能とするバス輸送計画の場合には、交通均衡理論に立脚した需要予測手法よりも、多様で詳細なサービス要因の変化に対する感度が高い非集計型交通需要予測手法、その中でも、意識データを用いて構築される手段転換型モデルが鉄道端末バス輸送需要関数として適用性が高いこと、計画策定を行うためのアプローチ法としては複数の代替案に対して多様な評価項目に関する総合評価を行いながら最適代替案を選択する Systems Analysis が有効であることを示した。まず2節では、自動車から公共交通機関への転換対策に関するアンケート調査結果の集計分析を行った。その結果、人は端末手段だけのサービス特性で端末手段を選択しているのではなく、端末駅の魅力度や駅から目的地までのサービス特性などを総合的に評価して選択を行っていること、他の交通手段へ転換する際には何らかの抵抗が存在し、サービス変化後の交通サービスに対する評価は同一個人であってもそれまで利用している交通手段によって異なるというダイナミズム性が存在することが定性的に明らかとなった。3節では、2種類の非集計型交通行動モデルの推定パラメータの検討によって、端末手段選択行動に関する上記の仮説の検証を統計的、定量的に行った。モデルの一つは実際の交通手段選択行動結果に関するクロスセクションデータを用いた手段選択型のMNLモデルとNLモデルであり、他の一つは意識データを用いて現利用手段ごとに構築される手段転換型のモデルである。第一の仮説を検証した結果、端末手段の各種サービス特性、駅独自の特性、駅から目的地までの各種サービス特性を総合的に評価して端末手段選択が行われていること、端末手段よりも端末駅相互に選択肢類似性が存在すること、自動車直行のようにその特性が他の選択肢特性と異なる上にその選択比率が極めて高いような選択肢を選択肢集合に含む手段選択型モデルは推定パラメータに片寄りが生じることなどが明らかになった。第二番目の仮説を検証した結果、他の交通手段への転換の際には転換抵抗が存在すること、サービス変化後の交通サービスに対する評価は同一個人であってもそれまでの利用交通手段によって異なること、類似した交通手段相互の転換行動には現利用手段の相違による転換抵抗や評価構造の差は小さいことなどが明らかにされた。以上の検討結果より、鉄道端末バス輸送需要予測モデルとしては、非集計交通行動理論に基づき、交通サービス変化による手段転換行動を適切に表現できる手段転換型モデルがより有効であろうという結論を得た。4節では、非集計手段転換型需要関数を組込んだ鉄道端末バス輸送計画の策定システムを提案した。非集計型需要関数を用いてゾーン内利用需要量を求めるためには集計化の手続きを必要とする。ここでは、短期の需要変化を予測する場合や対象地域が限定されている場合には高い集計予測精度を得ることができるといわれる実サンプルを用いた集計化手法を用いた。バスアンドライドの利用端末駅別需要とバス系統別需要に関する再現性をチェックした結果、本バス需要予測手法の適合性はかなり高く、本手法から得られる需要予測結果を用いてバス輸送計画代替案の比較評価を行うことに大きな問題は生じないことが明らか

になった。計画策定システムは Systems Analysis をそのアプローチ法としており、複数の系統網代替案に対して多様な評価項目に関する総合評価を行いながら最適末端バス系統網を選択し、運行頻度に関する弾性値分析を行って適切な系統別運行頻度を決定するというシステムである。5節では、アンケート調査実施地域を対象にして本末端バス輸送計画策定システムを適用した結果、その適用可能性の高さを検証することができた。

5.2 今後の課題と展望

以上、本研究で得られた成果を要約したが、残された問題点や今後解決されるべき課題も数多く存在する。以下では、前述した(1)~(3)の各々についてその問題点と課題に触れ、自らが行うべき内容も含めて今後の研究方向への提言とする。

(1)に関する第一の問題点は、均衡の定義に係わる問題である。本研究における分担需要変動型交通均衡の定義は、手段選択に関しては同一OD間パーソントリップであっても手段間コスト差の関数である手段選択関数によって異なる手段を選択するという確率論的定義となっているのに対し、経路選択に関してはOD間最小コストよりもコストが大となる経路は誰一人たりとも選択しないという決定論的定義によって構成されている。しかし、経路選択に関する実際の交通行動は決定論的ではないと考えられ、個々の利用者の時間価値や趣好の違いによって最小コスト以外の経路も選択されていると考えられる。このような考え方に立つ均衡モデルは確率均衡モデルと呼ばれており、米国や日本でもその理論的研究や適合性に関する実証的研究が進められている。第2章における手段選択関数パラメータと均衡交通量との同時推定モデルの基本的考え方は、任意に定義された均衡状態を再現する最適化問題から得られる解と実際の人の交通行動結果とのずれを最小にするようなパラメータを決定するものであるから、設定された均衡の定義が実際の人の交通行動規範から大きくかい離したものである場合には、モデルは単なる最小自乗推定問題となり、交通需要予測手法としては意味がなくなる。実際の都市圏交通分析への適用の結果、均衡交通需要モデルの推定精度は高いことから、2章で用いた分担需要変動型交通均衡の定義は人の交通行動規範として一応適切であると考えられるものの、確率均衡の定義による推定精度の方がより高いと考えられる。今後は、本モデル形式を用いて種々の均衡の定義による推定精度の比較検討を行う必要があり、またその結果として手段、および経路選択に関する人の真の交通行動規範を見出すことが可能になると考えられる。

第二の問題点は、対象とする交通需要分析に応じた定式化方法とその解法の選択の問題である。交通均衡状態を定義し、それと必要十分の関係にある Variational Inequality を誘導することによって交通均衡モデルを定式化する方法は有用である。一般の多種モード混合ネットワークフロー問題や当該リンクのリンクコストが他のリンク交通量に影響を受けるようなネットワークフロー問題の定式化にも V.I. はそのまま適用でき、コスト関数のヤコビ行列が非対称であったり、需要変動型の問題であっても一意の解を得ることができる。Relaxation 法や Projection 法など、V.I. を解くための解法が開発されてきてはいるものの、その解法は極めて複雑であり、高度の数値計算技法を必要とする。これらの問題は数理計画や数値計算技法の有効性を試みる格好の対象事例にはなっているが、実際の交通現象分析から幾分離れたところで議論がなされている感がある。モデルやその解法は簡単である方が better であり、我々は分析しようとする対象に応じて、有効な信頼区間の中で現実的な仮定や許容される変換を用いることによって、より平易なモデル (Beckmann 型の数値最適化モデルな

ど)とその解法の開発へ研究を展開する必要がある。逆に、分析対象によってはより厳密なまでの定式化とその解法が必要となる場合もあり、今後はこの両方向への研究の発展が望まれる。

(2)については、交通均衡の定義とモデルの定式化や解法に関する点で、(1)で述べた問題点と全く同様の問題点がある。また、分担需要変動型交通均衡を考慮できる最適バス輸送計画問題を2レベルStackelberg計画問題として理論に定式化できたものの、大都市道路網を対象とした実際の道路ネットワークでの計算を行っておらず、今後この実証的研究を進める必要がある。

しかし、バス輸送計画に限らず最適交通サービス計画問題において最も重要な問題は、計画の評価指標をどのように与えるかと言う問題であろう。3章では、バス輸送システム導入により自動車からの転換が生じ、交通混雑が緩和されることによって自動車利用者が得る間接便益までも評価の対象とし、交通需要者全体が受ける総便益を評価指標とした。新規施設利用者に対する直接便益だけを評価指標としていた従来の方法に比較すればより進展したのになっているが、新規バス輸送システムの与える影響は更に多くのものが存在すると考えられ、今後は便益の種類とその帰属主体を明確にした評価システムを開発することが重要である。さらに、系統別運行頻度だけではなくバス系統網も同時に決定変数とするようなモデルに拡張する必要もあろう。

(3)に関しては、鉄道端末バス輸送計画に対する有効な計画策定システムを開発できたと考えている。しかし、今だに多くの問題点が残されている。その一つは、非集計型交通需要予測モデル構築に当って手段選択や手段転換に関する人の交通行動原理の解明に力点を置きすぎたために、本システムで開発した需要予測システムは現利用手段と転換対象手段の組み合わせごとに手段転換モデルを必要とし、さらに駅選択モデルを必要とするなど、需要予測システムが極めて複雑になった点である。

第二の問題点は各種代替案の評価システムに関するものである。前述したように、システムを評価するのにいかなる評価指標を用いるかという問題に対して、4章ではバス利用需要を中心としたバス輸送運営者側の視点からだけの評価指標を設定しているにすぎず、利用者側からの定量的な評価項目が全く採用されていないため、実際のバス輸送計画策定システムとしては片手落ちである。また、計画策定者が多くの評価指標を検討しながら最適な代替案を選択する場合に必要な客観的評価手法や道具が用意されていないことにも大きな問題が残る。客観的評価手法として考えられるのは多目的計画法を導入した評価システムであり、道具となるのは入力情報に対して interactiveであり、結果の出力媒体として graphics 機能を備えた評価システムであろう。今後はこれらの機能を組込んだバス輸送計画策定システムの開発が望まれよう。

以上が、本研究で探究できなかった主要な問題点であり、今後に残された研究課題である。