

通勤鉄道利用者の不効用関数パラメーターの 移転性に関する研究

A Study of Transferability of Parameters of
Railway Commuter's Dis-utility Function

志田州弘^{*}・古川 敦^{*}・赤松 隆^{**}・家田 仁^{***}

By Kunihiro SHIDA, Atsushi FURUKAWA, Takashi AKAMATSU and Hitoshi IEDA

This paper examines the transferability of the dis-utility functions in time-space network equilibrium model which is implemented for the analysis of the influence of train diagram on commuter's behavior. We applied this model to several railway lines at commuter time and calibrated the parameter of the disutility function by the least square methods. As the result, we can conclude that the parameter on congestion has transferability, but the parameter on waiting time does not necessarily show the similarity between several lines. Also, the sensitivity analysis shows that the congestion parameter has great influence on user's behavior and the model without considering the effect of congestion can not produce the observed flow pattern.

Keywords: train scheduling, disutility function, transferability

1. 研究の背景

通勤鉄道混雑の激化、遠距離通勤旅客数の増加等により、大都市近郊の輸送改善の必要性は年々高まっている。これに対し筆者らは、輸送改善に対するソフト面からのアプローチ策として、列車運行計画（列車ダイヤ）の利用者便益の立場からの評価手法の提案およびそれを用いた実際の鉄道路線の評価に関する研究を行ってきた⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。列車ダイヤを定量的に評価するためには、実際のダイヤ上での利用者の行動をシミュレーションする必要があるが、筆者らは、従来主に道路ネットワーク上での交通流の解析に用いられてきた利用者均衡配分モデルを列車ダイヤに応用し、混雑回避行動を含めた利用者行

動を内生化したダイヤ評価モデルを構築した。

ところで、道路ネットワークにおいてはリンクコスト（所要時間）は当該リンク交通量の関数であり、わが国においては主にオランダで開発された修正BPR関数が用いられている⁽⁴⁾。しかし、実際に日本に適した関数形の開発や関数の時間的空間的移転性に関する研究は少なく、実際の配分作業では道路区間ごとに経験的にリンクコスト関数を与えているのが現状であり、リンクコスト関数に関する研究は発展途上であると言わざるを得ない⁽⁵⁾。

利用者均衡配分モデルを列車ダイヤに応用する際にもリンクコスト関数をどの様に設定するかは大きな問題となる。道路ネットワークにおけるリンクコストは交通量に応じたノード間移動所要時間であるが、鉄道のように定時性の高い交通機関においては所要時間をそのままリンクコストとするのは適当ではなく、むしろ列車混雑や待ち時間に対する利用者の認知所要時間をリンクコストとして用いるのが適

* 学生会員 東京大学大学院工学系研究科修士課程
(〒113 文京区本郷7-3-1)

** 学生会員 工修 東京大学大学院工学系研究科博士課程

*** 正会員 工博 東京大学工学部助教授

当であろう。筆者らは、この認知所要時間、すなわちリンクコスト関数を先験的に与えるのではなく、実際の利用者行動結果から推定し、列車混雑等に対する利用者の評価を時間に換算した不効用関数の形で捉えた⁽¹⁾。ただしこの不効用関数を推定するには、利用者の列車選択行動があらかじめデータとして与えられなければならないが、その種のデータが存在する場合は少なく、ある1つの路線で推定した関数を、他路線の評価にも用いたというのが実状であった⁽³⁾。しかし、異なる路線同士を比較評価する場合に、ある路線において推定した利用者の不効用関数を別の路線にそのまま適用して良いかどうか、即ちモデルの空間移転性の問題についての検証はなされていない。これらの背景を踏まえ、本研究ではデータを入手することのできた首都圏、関西圏の数路線について不効用関数を推定するとともに、この不効用関数の空間移転性の検証を試みる。

2. 列車ダイヤネットワークと利用者均衡モデル

(1) 列車ダイヤの時空ネットワーク化

本研究では前述の通り利用者の列車選択行動を数学的に表現するために利用者均衡モデル（以下UE）を列車ダイヤに応用する⁽¹⁾。このために、本来、縦軸方向に距離（空間）、横軸方向に時間（時刻）をとる列車ダイヤを、時間変化を考えない平面上の静的ネットワークとして表現し、利用者をそのネットワーク上のフローとして捉えることとする。ネットワークの構造はダイヤ上での利用者の列車の乗降、待ち、乗り換えといった行動を的確に表現するために図2-1に示すような形態をとる。各々のリンクには利用者が被る不効用に相当するリンクコストが付

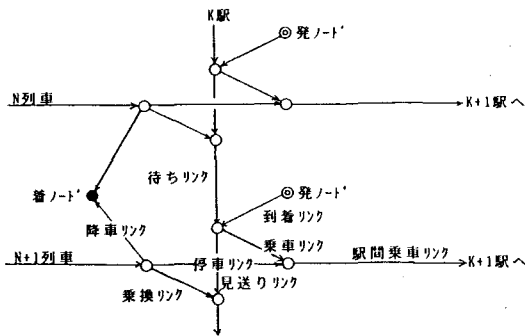


図2-1 ダイヤーネットワークの構造

加されている。特に駅間乗車リンクのリンクコストはフローディペンデントとし、ダイヤ上での利用者の混雑回避行動を内生化した形で捉えることとする。

発ノードは各駅各列車ごとと設け、各発ノードに対応したOD交通量を与えた。

(2) 利用者行動モデル

本研究では利用者行動モデルとしてUEモデルを用いた。これは、大都市近郊での通勤行動においては、列車選択行動に対する混雑の及ぼす影響が大きいため、利用者行動モデルとして混雑回避行動を明示的に取り扱えるモデルを用いるのが適切であろうと考えられること、また(1)に示したようにダイヤをネットワーク化し、そのリンクコストをフローディペンデントとした場合、このネットワーク上で利用者は日々の通勤行動を通じて各列車の混雑度、所要時間等を熟知した上で、各々の不効用が最小となるような経路、つまり列車を選択していると考えられることなどによる。

UE状態におけるリンクフローは以下の最適化問題によって定式化される⁽⁶⁾。

$$\min. Z(x) = \sum_a \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega \quad (2.1)$$

$$s.t. \quad x_a = \sum_{rs} \sum_k f_k^{rs} \delta_{ak}^{rs} \quad (2.2)$$

$$Q_{rs} = \sum_k f_k^{rs} \quad (2.3)$$

$$f_k^{rs} \geq 0 \quad (2.4)$$

ここで、 x_a, t_a : リンクaの交通量、コスト関数、

f_k^{rs} : ODペアrsのk番目経路の交通量、

Q_{rs} : ODペアrsの交通量、

δ_{ak}^{rs} : リンクaが経路k上にあれば1
ないなら0

(3) リンクコスト関数

式(2.1)に示したリンクコスト関数 t_a はリンクaの種類（駅間乗車リンク、待ちリンク、乗換リンク、etc）によってその関数形は異なる。ここでリ

リンクの種類とそれに対応したリンクコスト関数形について述べておく。

1) 駅間乗車リンク，停車リンク

これらのリンクは利用者が列車内にいることを示すものであるから，リンクコスト関数として

$$\text{所要時間} + \text{混雑不効用} \dots\dots\dots (2.5)$$

の形のものを用いる。混雑不効用は明らかに非負でかつ混雑率に対して単調増加である。そこで本研究ではこれらの条件を満たすリンクコスト関数として次の式で表わされるべき乗関数を用いた。

$$t_a(x_a) = \alpha \times T \times (x_a / C)^\beta \dots\dots\dots (2.6)$$

ここで， α ：単位所要時間を1としたときの混雑不効用の重みを表わすパラメーター
 β ：べき乗の形を決めるパラメーター
 T ：所要時間
 C ：列車定員

であり，これら2つのパラメーターによって関数形は決定される。

2) 待ちリンク，到着リンク

実際の乗車時間と駅での待ち時間では利用者の感じる不効用の差異があるものとして単位乗車時間を1としたときの待ち時間の重みをパラメーター δ とした以下の関数形をリンクコスト関数として用いる。

$$t_a = \delta \times \text{待ち時間} \dots\dots\dots (2.7)$$

また到着リンクでは，各発ノードからの発生交通量の平均待ち時間，つまり当該列車と先発列車の運行間隔の $1/2$ を待ち時間として用いる。

3) 乗り換えリンク

乗り換えリンクは乗り換え一回当りに利用者が被る不効用を時間に換算した値 γ をリンクコストとする。

以上， α ， β ， δ ， γ の4つパラメーター（以下ベクトル p で表わす。）の移転性について以下，検討を進めていく。

$$p = (\alpha, \beta, \delta, \gamma) \dots\dots\dots (2.8)$$

3. 不効用関数のパラメーター推定

前章で述べたモデルによるリンクフロー x は実際の利用者行動をなるべく忠実に再現するものであることが望まれる。そこで本研究では，実際の利用者行動結果と配分計算による推定値の誤差が最小となるようにパラメーターベクトル p を求める。ただし本研究で用いるモデルをそのまま用いたのではパラメーターベクトル p を直接測定することは不可能である。そのため，以下に示す二段階最適化問題(Bi-level Programming，以下BP)を用いて p を推定する。

$$\min. Z_m(p) = \sum_a (x_a - \tilde{x}_a)^2 / x_a \dots\dots (3.1)$$

s.t

$$\min. Z_s(x) = \sum_a \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega \dots\dots\dots (2.1)$$

s.t (2.2)～(2.4)

ここで， $\tilde{x}_a$ ：リンク a のフローの観測値

このBPのうち子問題であるUE配分はFW法等のアルゴリズムを用いて容易に解くことができる。しかし親問題である誤差最小化問題は変数 p に関し

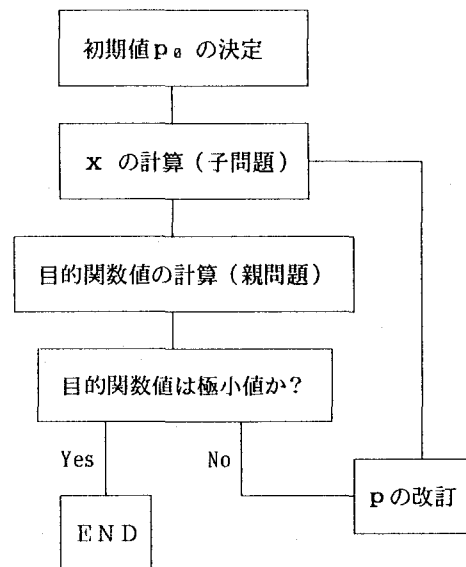


図3-1 解法のアロリズム

凸関数ではない。このため局所最適解が複数存在し大局解を求めることは容易ではないが、この様な非線形計画問題に対する有効な解法は提案されていない。しかしこの様な問題の場合においても、変数の初期値が与えられた場合にその近傍の局所解を求める方法はいくつか存在する⁽⁷⁾。そこで本研究では親問題の解法として格子点探索法と勾配法とを併用する。本研究で行なう計算の場合、局所解が無数に存在するため、ある与えられた初期値から得られた局所最適解における目的関数値にはかなりのばらつきがある。そこで、計算の手順としてまず最初は格子点探索法により、パラメーター p と目的関数値との大域的な傾向を把握し、次に最適解があると考えられる近傍数ヶ所で勾配法を用いて、解を求めることとする。図3-1に解法のアルゴリズムを示す。

4. 各路線への適用

(1) 対象線区

前章までに述べたモデルを適用する路線としては、大都市周辺の通勤鉄道路線であって、解析に必要なデータの揃っている、西武池袋線・東急東横線・東急田玉線（田園都市新玉川線）・南海本線・南海高

野線の計5線区を選定した（表4-1）。この各線区について不効用関数のパラメーターを推定し、その路線間移転性を検討する。

(2) 計算の前提とデータ

計算に用いるデータは、列車ダイヤ・OD表・駅間距離・列車別断面通過人員の4種類である。各路線ともデータの精度および計算量の制約から、最も混雑の激しい朝ラッシュ時の1時間だけを対象にしてネットワークを作り、計算を行なった。

また各発ノードから発生する交通量については分単位の詳細なデータが得られず、最も詳しいものでも1時間の幅を持っていたため、“乗客の乗車駅到着密度は時間的に均一である”⁽⁸⁾という仮定を立てて、各駅について各列車発車時分に対応した駅間OD表を作成した。

リンクフローの観測値 x についてはネットワークの全リンクについて求められていることが望ましいが、本研究で扱うネットワークはリンク数が数千に及び全リンクのフローを観測することは不可能であるので、観測値としてデータの得られた特定の駅間の列車別交通量を用いることとする。

	最混雑区間	最混雑1時間	交通量観測断面		のべ通過列車数
西武池袋線	椎名町→池袋	7:39～8:38	同左		28
東急東横線	祐天寺→中目黒	7:50～8:50	同左		26
東急田玉線	池尻大橋→渋谷	7:50～8:50	同左		18
南海本線	湊→堺	7:29～8:29	新今宮→難波 堺→七道	羽衣→浜寺公園 泉大津→松ノ浜	82
南海高野線	帝塚山→岸の里	7:31～8:32	新今宮→今宮夷 堺東→浅香山 白鷺→中百舌鳥	北野田→萩原天神 深井→中百舌鳥	82

表4-1 計算対象路線とリンクフロー観測区間

5. 計算結果および考察

各路線で行なった計算の結果は、以下のとおりである。

(1) 不効用関数

まず、混雑不効用関数のパラメーターについて得られた結果を表5.1 に示す。また、式(2.6) に表5.1 の値を代入した関数形のグラフを図5-1 に示す。これはある混雑率における混雑不効用の、単位乗車時間に対する倍率を表わすものである。

各路線を比較すると東急田玉線の混雑不効用が特に高くなっているのが目につくが、これは同線における実測リンクフローのサンプル数が少なく、パラメーター推定が正しくできなかったことによるものと思われる。

しかし、他の路線間については、パラメーター移転性が認められる。一般に、列車種別を優等列車と普通列車に分けて考えた場合、所要時間と混雑不効用とのトレードオフより、乗車人数は所要時間の短い優等列車の方が普通列車よりも多くなる傾向があり、同一の駅間で観測した交通量のデータには列車種別に応じた複数の集団が形成される。そのため列車混雑率は150～250％程度の幅を持ったものになるが、その定義域における混雑不効用はどの路線もほぼ同様の傾向を示している。

次に、乗り換え不効用のパラメーター推定の結果を表5-2 に示す。各路線においてかなりのばらつきが見られるが、これは全不効用の中に占める乗り換え不効用の割合が小さいために、乗り換えについてのパラメーター感度が鈍くなっているためである⁽¹⁾。

待ち時間不効用のパラメーターは表5-3 に示すとおりである。どの路線についても、1 よりやや大きい数値を示しており、待ち時間について感じる不効用が乗車時間よりも若干大きい、という傾向があるという点では一致しているが、これだけでは必ずしもパラメーターの移転性があるとはい言切れない。

(2) 観測値と推定値との相関

モデルの適合度を見るために、各線区におけるリンク交通量の実測値と推定値の相関を図5-2 ～ 6に示す。

東急田玉線(図5-4) において相関が極端に低くなっているが、これは前述のサンプル数の問題に加え、列車ごとに乗車人数のばらつきが小さいためパラメーターの感度が鈍くなり、最適パラメーターベクトルが求まりにくくなっているためと思われる。それ以外の路線については、いずれも強い相関が見られ、求められたパラメーターの妥当性を示している。

表5-1 各路線別混雑不効用

	α	β
西武池袋線	0.007	5.81
東急東横線	0.019	4.52
東急田玉線	0.103	3.49
南海本線	0.030	4.49
南海高野線	0.011	5.50

図5-1 各路線別混雑不効用関数

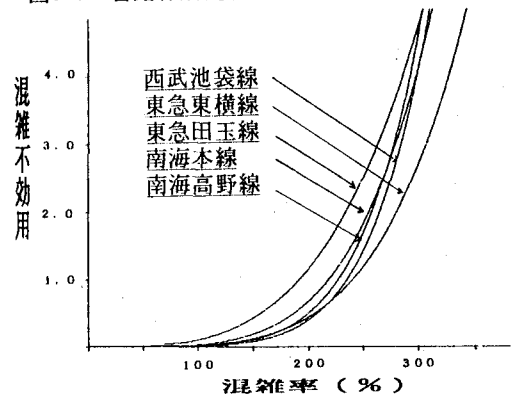


表5-2 各路線別
乗り換え不効用

	γ
西武池袋線	14.93
東急東横線	5.62
東急田玉線	18.71
南海本線	27.68
南海高野線	10.03

表5-3 各路線別
待ち時間不効用

	δ
西武池袋線	1.023
東急東横線	1.202
東急田玉線	1.097
南海本線	1.362
南海高野線	1.124

図5-2 リンクフロー相関図（西武池袋線）

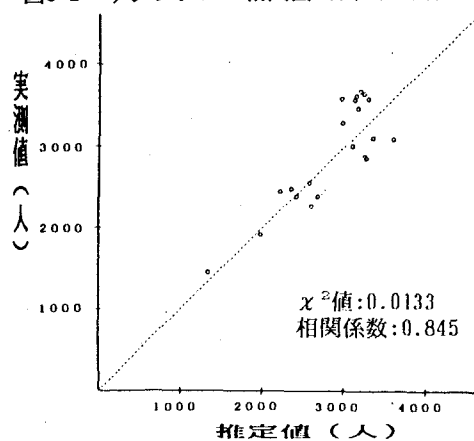


図5-5 リンクフロー相関図（南海本線）

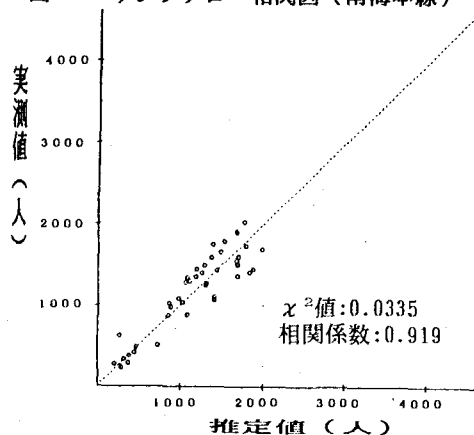


図5-3 リンクフロー相関図（東急東横線）

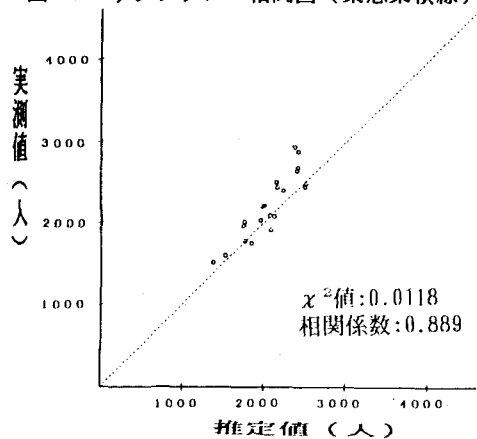


図5-6 リンクフロー相関図（南海高野線）

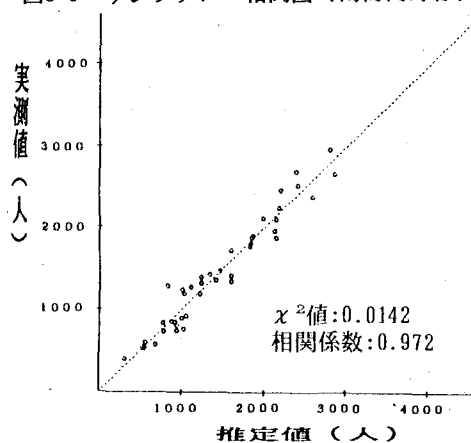


図5-4 リンクフロー相関図（東急田玉線）

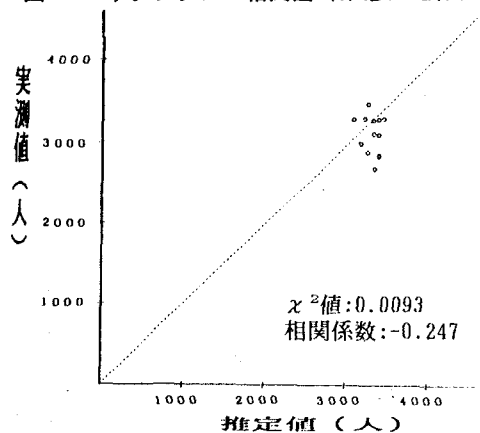
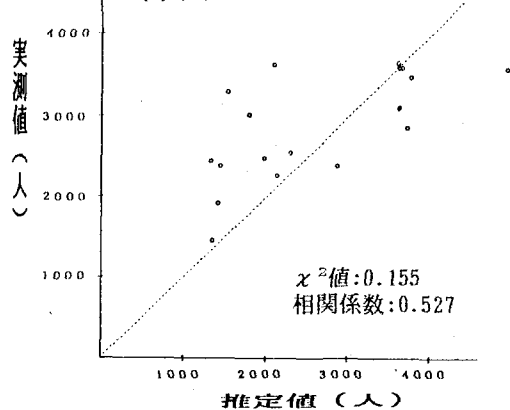


図5-7 リンクフロー相関図（西武池袋線）
（リンクコストは所要時間のみ）



(3) 最短経路配分との比較

次に、本研究で用いた利用者均衡配分法と、最短経路配分法との比較を行なう。

西武池袋線において、混雑などを考慮せずに時間的最短経路に配分した場合の実測値－推定値の相関を図5-7に示す。図5-2と比較することにより、利用者の混雑回避行動を内生化し、フローディペンデントな取扱いをしたこのモデルが、利用者の列車選択行動を表現するモデルとして妥当であることが明らかとなった。

(4) 混雑不効用の関数型

この研究では混雑不効用関数としてべき乗関数を用いたが、西武池袋線を対象に以下に示す指数関数(5.1)、分数関数(5.2)についても検定を行なった。

$$t_a(x_a) = \alpha_{frc} \times T \times \{x_a / (\beta_{frc} \cdot C - x_a)\} \cdots \cdots (5.1)$$

$$t_a(x_a) = \alpha_{exp} \times T \times \{\exp(\beta_{exp} \cdot x_a / C) - 1\} \cdots \cdots (5.2)$$

その結果、混雑不効用関数は、単調増加する凸関数という条件の下ではどのような関数型を用いてもほぼ同様の関数形が得られることがわかった(表5-3)(図5-8)。

6. 今後の課題

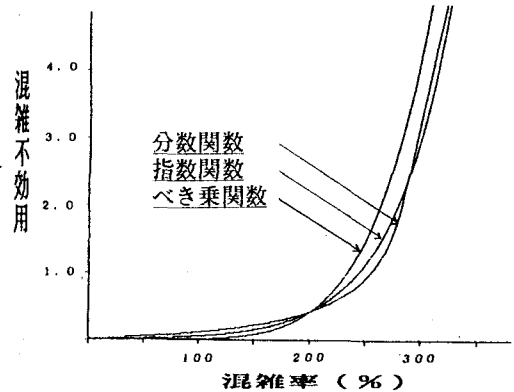
本研究により、リンクコストパラメーターの空間的移転性についておおまかな傾向を把握することができたが、モデル及び計算手法についていくつかの問題点が残されている。

まず第一にBPの効率的解法の開発である。本論文で述べた手法ではBPの親問題を1回計算するごとに子問題のUE配分を計算しなければならず、数千リンクの規模のネットワークにおいては計算量が膨大になる。また、求められた解が真の最適解であるとは言い切れないことなど、計算方法について改善すべき点が多い。さらに、これだけの計算を行なうのにデータが十分であるとは言えず、限られたデータをもとに、いかに効率的にパラメーター推定を行なうかが今後の課題となる。具体的には、リンクコストをもとにリンクフローを求める現在の方法に

表5-4 各混雑不効用関数パラメーター

分数関数	$\alpha_{frc} = 0.26$	$\beta_{frc} = 3.15$
指数関数	$\alpha_{exp} = 0.01$	$\beta_{exp} = 1.97$

図5-8 各関数型混雑不効用(西武池袋線)



代えて、与えられたリンクフローから逆にリンクコストを推定する方法を検討する予定である。

参考文献

- 1) 家田仁・赤松隆・高木淳・畠中秀人：利用者均衡配分法による通勤列車運行計画の利用者便益評価，土木計画学研究論文集No.6，pp.177～184，1988。
- 2) 赤松隆・古川敦・家田仁：利用者便益からみた列車ダイヤ最適化に関する基礎的研究，土木計画学研究講演集No.11，pp.243～250，1988。
- 3) 古川敦・高木淳・赤松隆・家田仁：列車ダイヤパターンと利用者便益との関連性に関する分析，土木計画学研究論文集No.7，1989。
- 4) 第18会土木計画学講習会テキスト・交通ネットワークの分析と計画，pp.21～23，1987
- 5) 溝上章志・松井寛・可知隆：日交通量配分に用いるリンクコスト関数の開発，土木学会論文集No.401 pp.99～107，1989。
- 6) Beckman, M.J., McGuire, and C.B. Winstein: Studies in the Economics of Transportation. Yale University Press, New Haven, Conn. 1956.
- 7) 松本嘉司：土木解析法，pp.182～189，技報堂
- 8) 家田仁・後藤貞二・松本嘉司・島崎敏一：通勤者における消費時間弁別関の確率的評価，土木学会論文集，No.383，pp.73～81，1987。