【土木計画学研究・講演集 No.8 1986年1月】

分担需要変動型交通均衡モデルの実用可能性に関する研究

Applicability of the Network Equilibrium Model with Elastic Modal Split Demand

河上省吾* 溝上章志**

By Shogo KAWAKAMI and Shoshi MIZOKAMI

This study considers the applicability of the practical network equilibrium model with elastic modal split demand. The model is formulated so as to be appliciable to cases where the factors contributing to both mode and route choice prosesses differ in combination, and their weights are not given in advance. The model can simultaniously determine weights of factors composing link cost function and mode choice function as well as equilibrium flows by mode using practical mode choice demands data.

1．はじめに

本研究の目的は、同一リンク上を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交通均衡状態を予測する実用的な手法を開発することにある。

需要変動型均衡交通モデルは Beckmann[1),2)] のモデルに代表される。しかし、Beckmannモデルの最適性の条件である Kuhn-Tucker条件は、交通需要者による等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すぎず十分条件とはなり得ないために、均衡の定義を変え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。それに対して、近年、均衡の定義から出発して、その定義と同値となる Variational Inequality（以下では V.I. と記す）を見い出し、Projection法等の解法を用いて解く方法が開発されている(Smith[3)]; Fisk & Nguyen[4)], Dafermos[5)])。需要変動型均衡問題に対する V.I. を用いた定式化は Dafermos[6)] らにより研究が進められており、特に2手段分担／配分均衡問題は、Florian & Spiess[7)] が理論的なモデルの定式化、解の存在定理と一意性の検討を行っている。

これらの研究は数学的に極めて明解である。しかし、均衡コスト以外のコスト（例えば、交通目的やトリップエンド条件など）が手段選択関数に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、実際の交通需要分析に適用する上で残された問題が幾つかある。本研究の第1の目的は、均衡コストだけでなく、手段選択だけに影響を及ぼすと考えられるトリップ目的などの要因をも導入できる、よ

＊正会員　工博　名古屋大学教授　工学部土木工学科
（〒464 名古屋市千種区不老町）
＊＊正会員　工修　名古屋工業大学助手　工学部社会開発工学科　（〒466 名古屋市昭和区御器所町）

り一般的な２手段分担需要変動型交通均衡モデルをV.I.により定式化することにある。さらに、計算や操作性の面ですぐれるBeckmann型最適化問題に変換した後に、我々が実用上直面する問題に対して許容できる仮定を導入することにより、Ｆ－Ｗ法を適用した非線形最適化計算法を開発することにある。

従来の需要変動型交通均衡モデルでは、手段選択関数を特定化するパラメータを分析対象地域で実施したアンケート調査の回答値から予め推定しておくのが一般的であった。しかし、この均衡要因サービス水準の回答値は誤差を含むために、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値と必ずしも一致しない。本来、手段選択関数パラメータはサービス水準の均衡値を用いて推定されるべきである。本研究の２番目の目的は、観測可能な手段選択行動結果を利用して、均衡サービス水準と整合性のある手段選択関数パラメータと均衡交通量とを同時推定するモデルを開発することにある。

２．分担需要変動型交通均衡モデル

本章では、自動車とバスの２手段が同一リンクを共用し、各モードの交通量が互いのリンク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、交通量の関数であるリンクコストを通してＯＤ間の手段選択と経路選択とに影響を及ぼす所要時間、混雑度等の要因（これらの要因を以後均衡要因と呼ぶ）と、交通目的やトリップエンド条件等のように手段選択だけに影響する要因（手段選択特定要因）とを共に手段選択関数の説明要因に含む、より一般的な２手段分担需要変動型交通需要予測モデルを V.I. 理論により定式化する。次に、V.I.から Beckmann 型最適化モデルへの変換について述べる。

（１）変数の定義

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 $i \in I$、ｉＯＤ間利用可能モードを $m \in M_i$ $(m=1,2)$、ｉＯＤ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 ： ｉＯＤ間パーソントリップ数
g_i^m ： ｉＯＤ間ｍモード利用パーソントリップ数
v_a^m ： リンクａ上ｍモードの交通量
C_i^m ： ｉＯＤ間ｍモードの経路選択に影響するコスト
C_{ik}^m： ｉＯＤ間ｍモード第ｋ経路のコスト
$C_a^m(\nu_a)$： 交通量ベクトル $\nu_a=(v_a^1, v_a^2)$ の場合のリンクａ上ｍモードによるコスト
$C_{ar}^m(\nu_a)$ ： ν_a によるリンクａ上ｍモードのｒ番目均衡要因のコスト　$(r \in R_1)$
S_i^m ： ｉＯＤ間ｍモードの手段選択特定要因のコスト
S_{ir}^m： ｉＯＤ間ｍモードのｒ番目手段選択特定要因のコスト　$(r \in R_2)$
h_{ik}^m： ｉＯＤ間ｍモード第ｋ経路利用交通量

とおく。

今、g_i を与件とした場合、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なる。

$$\sum_m g_i^m = g_i \qquad i \in I \tag{1}$$

$$\sum_k h_{ik}^m = g_i^m, \quad h_{ik}^m \geqq 0 \qquad m \in M_i,\ i \in I \tag{2}$$

$$v_a^m = \sum_i \sum_k \delta_{ika}^m h_{ik}^m \qquad m \in M_i,\ a \in A \tag{3}$$

ここで、δ_{ika}^m はリンクａがｉＯＤ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。ｉＯＤペア間ｍモードｋ番目経路コスト C_{ik}^m と、ｉＯＤペア間ｍモードの経路選択に影響する均衡要因のコスト C_i^m との関係は次式で示される。

$$C_{ik}^m = \sum_a \delta_{ika}^m C_a^m(\nu_a) \tag{4}$$

$$C_i^m = \min_k C_{ik}^m = \min_k \sum \delta_{ika}^m C_a^m(\nu_a) \tag{5}$$
$$k \in K_i^m,\ m \in M_i,\ i \in I$$

リンクａ上のｍモードによるコスト $C_a^m(\nu_a)$ と、ｉＯＤペア間手段選択特定要因によるコスト S_i^m を、

$$C_a^m(\nu_a) = \sum_r \alpha_r \cdot C_{ar}^m(\nu_a) \tag{6}$$

$$S_i^m = \sum_r \beta_r \cdot S_{ir}^m \tag{7}$$
$$a \in A,\ m \in M_i,\ i \in I$$

で定義する。つまり、$C_a^m(\nu_a)$ は各種均衡要因の重み付き線形和で表されるとする。$\alpha = \{\alpha_r | r \in R_1\}$ は手段選択と経路選択両過程に共通な均衡要

因であり、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もある。$\beta=\{\beta_r | r\in R_2\}$ は手段選択特定要因にかかるパラメータである。

（２）分担需要変動型交通均衡の定義

分担需要変動型交通均衡の基礎概念は、Florian[7]の定義に基づく。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。いま、ｉODペアにおけるモード間コスト差 w_iによって、手段選択関数 $G_i(w_i)$ が定義できると仮定する。このとき、手段選択に関する均衡状態では手段間で利用者の移動が生じない。このことは、$i\in I$について以下の式で表現できる。

$$
\begin{aligned}
w_i^* &= (C_i^{1*}-C_i^{2*})+(S_i^1-S_i^2)\\
&= G_i^{-1}(w_i^*) = W_i(g_i^{1*}, g_i^{2*}) \qquad (8)
\end{aligned}
$$

次に経路選択に関する均衡状態を定義する。経路選択に関する均衡状態とは、ｉOD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である。これはまさに Wardrop均衡状態であり、次式で表わすことができる。

$$
C_{ik}^{m*}-C_i^{m*} \begin{cases} =0, & \text{if } h_{ik}^{m*}>0 \\ \geq 0, & \text{if } h_{ik}^{m*}=0 \end{cases} \qquad (10)
$$
$$
k\in K_i^m,\ m\in M_i,\ i\in I
$$

（３） V.I.による交通均衡モデル

式(9),(10)で示されるような均衡条件の数学的な表現は、Dafermos[6]、Florian[7] らの研究に基づいて、実行可能集合(1)～(3)のもとで、

$$
\begin{aligned}
&c(\upsilon^*)^t(\upsilon-\upsilon^*)\\
&-\{W(g^{1*})-s^*\}^t(g^1-g^{1*})\geq 0 \qquad (11)
\end{aligned}
$$

で示されるV.I.と同値となる。$c(\upsilon), W(g^1), s$ は次式で与えられるベクトルである。

$$
\begin{aligned}
c(\upsilon)^t &= \{C_a^1(v_a^1,v_a^2), C_a^2(v_a^1,v_a^2)\}\\
W(g^1)^t &= \{W_i(g_i^1)\} \qquad (12)\\
s^t &= \{S_i\} \qquad a\in A,\ i\in I
\end{aligned}
$$

式(11)が式(9),(10)と同値であることの必要十分条件は Florian[7]と同様の方法で証明できることからここでは省略するが、２手段分担需要変動型交通均衡解を得るためには、式(1)～(3)で表される実行可能集合のもとで、V.I.(11)を満足する (υ^*, g^{1*}) を求めればよいことになる。

（４）Beckmann型最適化問題への変換

実行可能集合(1)～(3)のもとで式(11)を直接解くことは極めて困難である。しかし、$c(\upsilon)$のヤコビ行列の正定値と対称性が仮定できれば、V.I.(11)は計算や操作性の面で優れた性質を持つ Beckmann 型最適化問題に変換できる[8]。式(11)で表されるV.I.は、以下の Beckmann 型最適化問題となる。

［P1］

$$
\begin{aligned}
\text{Min}:\ F_1 &= \oint_0^{\upsilon} c(x)\,dx\\
&-\sum_i\int_0^{g_i^1}\{W_i(y)-S_i^*\}\,dy\\
&\text{s.t.}\ \text{式 (1)～(3)}
\end{aligned}
$$

何故なら、$c(\upsilon)$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(11)が、非負条件 $h_{ik}^m\geq 0$ を持つ問題［P1］の必要十分条件に一致することは、式(13)の偏微分が０に等しいか０より大きいという問題［P1］の最適性の条件と式(11)とが等しいことから明らかである。

３．手段選択関数と均衡交通量の同時推定法

分担需要変動型交通均衡モデルを用いて交通需要分析を行う場合には、パーソントリップ調査などから得られる分担需要と手段選択要因サービス水準の実績値から予め $G_i(w_i)$ 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交通均衡モデルを適用するという手順を取る（図－1(a) 参照）。この手順から得られる均衡要因のサービス水準実績値は、設定されたネットワーク上で均衡モデルを用いて得られる推定均衡サービス水準と整合性のあるものではない。そのため $\{\alpha, \beta\}$ 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、分担需要変動を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、実績分担交通量データを用いた $\{\alpha, \beta\}$ の推定過程を均衡交通量推定過程と同様に、そのモデルの内部に持つことが望ましいと考えられる[9]。そこで、設

定されたネットワーク上の観測可能な実績分担交通量に均衡モデルから得られる推定均衡交通量が回帰するように、パラメータ $\{\alpha, \beta\}$ と均衡交通量とを同時推定する方法を提案する(図－1(b)参照)。

観測可能な i ODペア間の m モード交通量を $\bar{g}_i^m$ ($m \in M'_i, i \in I'$; 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 $h^* = \{h_{ik}^{m*} \mid k \in K_i^m, m \in M_i, i \in I\}$ の同時推定モデルは以下のように定式化できる。

［P2］

$$F_1(h^*, \alpha^*, \beta^*) = \min_h F_1(h, \tilde{\alpha}, \tilde{\beta})$$

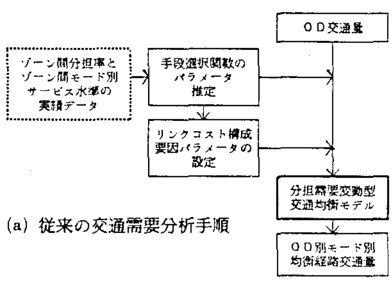
s.t. 式(1)～(3)

$$F_2(h, \tilde{\alpha}, \tilde{\beta}) = \min_{\alpha, \beta} \sum_i \sum_m \| g_i^m - \bar{g}_i^m \|^2$$

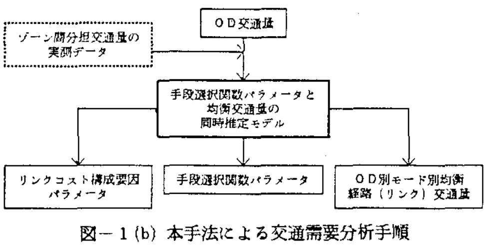
$$C_i^m = \min_k \sum_a \delta_{ika}^m \sum_\gamma \alpha_\gamma C_{a\gamma}^m(v_a)$$

$$S_i^m = \sum_\gamma \beta_\gamma S_{i\gamma}^m$$

本モデルは、観測可能な手段別交通量 $\bar{g}_i^m$ に推定均衡手段別交通量 g_i^m を最小自乗回帰させるように手段選択要因パラメータ $\{\alpha, \beta\}$ 、リンクコスト関数を定義する均衡要因パラメータ $\{\alpha\}$ 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。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、下位問題は実際の手段選択行動結果の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の未知パラメータを決定する役割を果していると言える。



図－1(a) 従来の交通需要分析手順



図－1(b) 本手法による交通需要分析手順

4．解法とモデルの感度分析

(1) 実用的な解法

分担需要変動型交通均衡問題の解法には不動点アルゴリズムなどが用いられるが、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。$C(v)$の対称性を仮定した場合には［P1］の Beckmann 型最適化問題に変換できるが、式(13)は線積分を含むため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需要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 はバスを選択した人数ではなく、定数である単位時間当たりの運行頻度 $\sum_s \Delta_{as} f_s$ に対応する。ここで、Δ_{as}は系統 s がリンク a を通過するときにのみ1の値をとる変数である。またリンクコスト関数を、

$$C_a^1 = C_a^1 \left(v_a^1, \sum_s \Delta_{as} f_s\right)$$
$$C_a^2 = C_a^2 \left(C_a^1 \left[v_a^1, \sum_s \Delta_{as} f_s\right]\right) \tag{14}$$

とすることにより、両手段のリンクコストを自動車（m＝1）交通量だけの関数とすることができる[10]。

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

$$v_a = \sum_i \sum_k \delta_{ika}^1 h_{ik}^1 + \gamma \sum_s \Delta_{as} f_s \tag{15}$$

のように自動車単一手段のフローとして表わす[7]。いま、$\tilde{C}_i^2$ を式(13)を目的関数とする最適化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、その段階のBeckmann型最適化問題の目的関数は、

$$F_1 = \sum_a \int_0^{v_a} C_a^1(x)\,dx - \sum_i \int_0^{g_i^1} \{W_i(y) + \tilde{C}_i^2 - S_i^*\}\,dy \tag{16}$$

と変形される。何故なら、$C_i^2 = \tilde{C}_i^2$ のとき、m＝1のOD間コストは $w_i(g_i^1) + \tilde{C}_i^2 - S_i^*$ となり、

m＝１の逆需要関数が $W_i(g^1_i)+\tilde{C}^2_i-S^*_i$ で表されるからである。

上位問題は、式(1)～(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多くの有効な方法が開発されている[11),12)]が、その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、宮城[13)] が分布・配分統合モデルで適用しているのと同様に、本問題でも最適解への探索方向ベクトルを求める方法として、Ｆ－Ｗ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 $(h^{1(n)}_{ik}, g^{1(n)}_i)$ が得られているとき、目的関数式(16)をその点でTaylor展開し、１次の項までとると以下のようになる。

$$
\begin{aligned}
F_1(\bar{h}^1_{ik},\bar{g}^1_i)&=F_1(h^{1(n)}_{ik},g^{1(n)}_i)\\
&+\sum_i\sum_k(\bar{h}^1_{ik}-h^{1(n)}_{ik})\cdot C^{1(n)}_{ik}\\
&-\sum_i(\bar{g}^1_i-g^{1(n)}_i)\cdot[W_i(g^{1(n)}_i)+\tilde{C}^{2(n)}_i-S^*_i] \qquad (17)
\end{aligned}
$$

$F_1(h^{1(n)}_{ik},g^{1(n)}_i), C^{1(n)}_{ik}, W_i(g^{1(n)}_i), h^{1(n)}_{ik}, g^{1(n)}_i$ は定数であるから、問題［Ｐ１］は、

［Ｐ３］

$$
\begin{aligned}
\text{Min:}\quad & F_3=\sum_i\Big[\sum_k(C^{1(n)}_{ik}-C^{1(n)}_i+S^*_i)\,\bar{h}^1_{ik}\Big]\\
\text{s.t.}\quad & \sum_k\bar{h}^1_{ik}=\bar{g}^1_i,\quad \bar{h}^1_{ik}\geq 0\\
& k\in K^1_i,\quad i\in I
\end{aligned}
$$

のように、個々のＯＤペアごとに独立な線形子問題に分解できる。ここで、$\bar{g}^1_i$ はｎ回目の反復時の手段選択要因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。したがって、問題［Ｐ３］の解は、個々のＯＤペアごとに、手段選択特定要因コストには無関係に自動車による均衡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 $\bar{g}^1_i$ 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［Ｐ１］は、宮城の導入したＦ－Ｗ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、比較的容易に解を求めることができる。さらに、１次元探索法としてＤＦＰ法を採用すれば、収束は極めて高速になる。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。従って、ここでは２レベル問題である［Ｐ２］を解く際には各レベルを交互に解く方法を用いている。

（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、パラメータや推定均衡交通量の推定精度に与える影響、

(b) 観測サンプル数が、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ろう。

本節では、図－２に示すようなモデルネットワークを対象として、

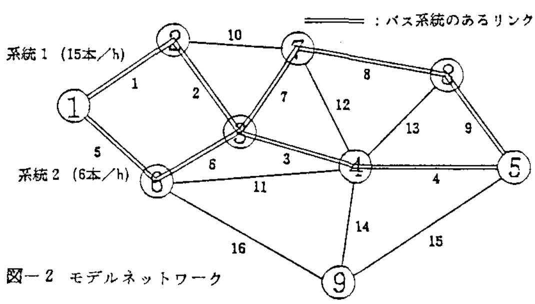
① 固定された $\{\tilde{\alpha},\tilde{\beta}\}$ に対するＯＤ別手段別交通量 $\tilde{g}=\{\tilde{g}^m_i\}$ を問題［Ｐ１］から求める。

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えたものを観測値 $\bar{g}=\{\bar{g}^m_i\}$ として仮定する。

③ 観測値 $\bar{g}$ の一部ををデータとして本モデルを適用し、真のパラメータ $\{\tilde{\alpha},\tilde{\beta}\}$ と推定パラメータ $\{\alpha^*,\beta^*\}$ との差の検定、均衡自動車分担交通量の絶対平均誤差と最大誤差、リンク交通量の推定精度等の検討などを行うことによって、(a),(b) に関するモデルの感度分析を行った。

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。このとき、均衡要因として所要時間を、手段選択特定要因として定数項、料金、都心ダミー（発、または着地がノード３の時のみ１）を取上げている。リンク走行時間関数には、次式で示される修正ＢＰＲ関数

$$C^1_a(v_a)=B_a(0)\cdot[1+2.62(v_a/Q_a)^5] \qquad (18)$$



図－２ モデルネットワーク

表－1　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　パーソントリップＯＤ表とＯＤ間費用

O＼D	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

を用いている。$B_a(0)$は $v_a=0$時のリンク走行時間、Q_a は可能交通容量であり、これらの値を表－1に示す。パーソントリップＯＤ表と自動車によるＯＤ間費用を合わせて表－2に示す。総トリップ数は 100,000トリップである。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、バスの自動車換算係数は 2.0、バスの走行時間は自動車の 1.5倍とし、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。徒歩速度は 3Km/hとした。

(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、$\{\tilde{\alpha}, \tilde{\beta}\}=\{\overset{*}{\alpha}, \overset{*}{\beta}\}$ に対する t 値などを、変動係数 u ＝15.0, 10.0, 5.0, 3.0% について計算した結果を表－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、$\{\tilde{\alpha}, \tilde{\beta}\}=\{\overset{*}{\alpha}, \overset{*}{\beta}\}$ の帰無仮説を棄却できず、推定パラメータは統計的に真値と等しく推定される。費用と定数項のパラメータが幾分不安定になるものの、均衡要因である所要時間のパラメータは０でなく、かつ有意に真値と等しく推定される。u ＝15.0の場合でも、均衡分担交通量の絶対平均誤差は6.11%、最大誤差が 13.99%程度であることから、均衡分担交通量の推定精度は高いことが分かる。リンク交通量の推定精度も高い。

(b)について：u ＝3.0 とし、実測できるサンプル数を順次、増加させた場合の結果を表－4に示す。サンプル数が少ない場合は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すべて真値と統計的に等しく推定される。サンプル数が16個でも均衡分担交通量の絶対平均誤差は1.68%、最大誤差でさえも5.21%程度である。本モデルは、自由度がかなり少なくても均衡分担交通量に関してはかなり高い精度で推定できる。また、リンク交通量の推定精度も高いことが分かる。

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、均衡リンク交通量、および手段選択関数パラメータを精度良く推定できる。

表－３　観測誤差変動によるモデルの感度分析結果

		真　値	推定値 u ＝3.00%	推定値 u ＝5.00%	推定値 u ＝10.0%	推定値 u ＝15.0%
定　数		-0.433×10^{-1}	-0.819×10^{-1} 3.59 0.54	-0.111×10^{-0} 2.80 1.70	-0.184×10^{-0} 2.32 1.77	-0.257×10^{-0} 2.04 1.69
総所要時間		-0.100×10^{-1}	-0.946×10^{-2} 17.50 1.00	-0.909×10^{-2} 8.67 0.87	-0.817×10^{-2} 3.86 0.87	-0.724×10^{-2} 2.31 0.88
費　用		-0.100×10^{-3}	-0.204×10^{-3} 1.98 1.01	-0.279×10^{-3} 1.52 0.98	-0.468×10^{-3} 1.32 1.03	-0.657×10^{-3} 1.22 1.04
都心ダミー		0.100×10^{-1}	0.671×10^{-1} 2.09 1.78	0.115×10^{-0} 2.03 1.86	0.233×10^{-0} 2.00 1.91	0.352×10^{-0} 1.98 1.93
バス分担率		44.96	44.96	44.95	44.96	44.90
分担交通量の絶対平均誤差			1.05	1.90	4.00	6.11
分担交通量の最大誤差			1.05	4.29	9.12	13.99
リンク交通量の実績再現性	a_0 a_1 $a_1=1.0$のt値		17.0(2.3) 0.99(392.9) 3.57	45.5(2.1) 0.98(131.5) 2.68	87.6(2.0) 0.96(62.3) 2.59	156.(2.0) 0.93(34.4) 2.59

注）推定パラメータの下の数字はそれぞれ 0.0、真値に対する t 値である。
　（　）内は 0.0 に対する t 値である。

表－４　観測サンプル数の差異によるモデルの感度分析結果

推定値 n ＝16	推定値 n ＝20	推定値 n ＝24	推定値 n ＝28	推定値 n ＝32	推定値 n ＝36
-0.966×10^{-1} 7.32 3.92	-0.859×10^{-1} 4.90 2.43	-0.840×10^{-1} 3.82 1.85	-0.753×10^{-1} 3.00 1.28	-0.832×10^{-1} 3.49 1.68	-0.819×10^{-1} 3.59 1.69
-0.877×10^{-2} 15.00 2.10	-0.903×10^{-2} 24.96 2.69	-0.912×10^{-2} 19.85 1.93	-0.970×10^{-2} 8.20 0.25	-0.949×10^{-2} 9.15 0.49	-0.946×10^{-2} 17.50 1.00
-0.219×10^{-3} 2.82 1.53	-0.206×10^{-3} 2.25 1.15	-0.208×10^{-3} 2.28 1.18	-0.196×10^{-3} 2.31 1.13	-0.209×10^{-3} 1.27 0.66	-0.204×10^{-3} 1.98 1.01
0.967×10^{-1} 1.07 0.96	0.866×10^{-1} 1.18 1.04	0.799×10^{-1} 1.19 1.04	0.652×10^{-1} 1.56 1.32	0.684×10^{-1} 2.04 1.74	0.671×10^{-1} 2.09 1.78
45.12	45.12	45.14	44.98	44.93	44.96
1.68	1.39	1.30	1.02	1.08	1.05
5.21	3.79	3.46	2.33	2.37	1.05
18.9(1.6) 0.99(242.4) 2.45	15.7(1.5) 0.99(213.9) 2.67	35.4(1.6) 0.98(128.2) 2.62	31.4(2.1) 0.99(194.1) 1.96	15.3(1.6) 0.99(306.4) 3.06	17.0(2.3) 0.99(392.9) 3.57

図－2のネットワークにおける計算時間も FACOM－382 によるＣＰＵが18秒程度であることから、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。

5．都市圏への適用性

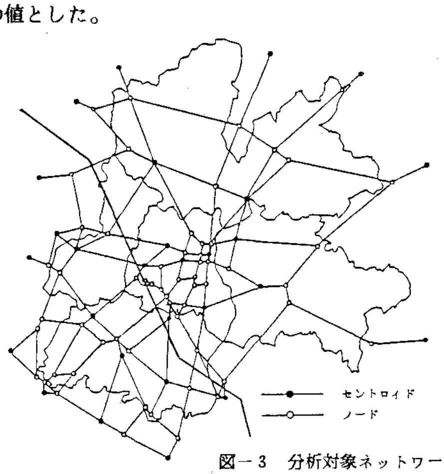
（1）ゾーニングとネットワーク

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域内Ｔ市、および隣接するＭ町である。ゾーニングは、域内14ゾーン、域外14ゾーン、計28ゾーンに分割したものを用いている。自動車とバス利用者と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、流入、流出、通過トリップについては中京都市群全体の推計値を用いて作成している。対象とするネットワークは図－3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、リンク数 278である。そのうちバス系統が存在するリンクは 174リンクである。対象地域内には24のバス系統が設定されている。

手段選択関数はロジット型とし、手段選択要因は均衡要因である所要時間、手段選択特定要因である定数項、料金、都心ダミーから構成されている。リンク走行時間関数は、各道路規格に対応した修正ＢＰＲ関数式(18)を用いている。自動車の平均乗車人員は実績値から1.22とし、バス料金Ｙは運賃表と乗車距離Ｌによる線形回帰モデル

$$Y = 82.28 + 19.72L \quad (R = 0.769) \qquad (19)$$

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－3　分析対象ネットワーク

（2）実用性の検討

本モデル（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、1次回帰分析により検討した。さらに、手段選択関数のパラメータを外生的に与え、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は、均衡要因である所要時間データとしてＰＴ調査回答値の平均値を用いて分担率モデルを推定た後に［Ｐ1］により均衡交通量を推定したモデルである。MODEL-Ｂは、ＰＴ調査全域の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にして分担率モデルを推定し、その後で［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－5に示す。MODEL-Ａ、MODEL-Ｂの分担率モデル推定時の重相関係数は 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］から得られる均衡分担率は共に 0.9程度の相関係数となる。このことから、分担需要変動型均衡交通モデルは独自で適用しても現実の都市交通需要分析に対する適用性がかなり高いことが分かる。

次に、自動車分担交通量と自動車分担率均衡値の実績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える。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から検討すると、すべてのモデルで0.66以上であり、リンク交通量の実績再現性もかなり高いと判断できる。

次に推定された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

表－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	都心ダミー			相関係数	1次回帰係数	$a_1=1.$のt値		
A	$-0.355\times10^{+1}$	-0.174×10^{-2} (0.01)	-0.111×10^{-2} (1.62)	$0.105\times10^{+1}$ (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	$-0.340\times10^{+1}$	-0.163×10^{-1} (3.24)	-0.151×10^{-2} (1.96)	$0.849\times10^{+0}$ (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	$-0.249\times10^{+1}$ (0.86)	-0.267×10^{-1} (2.97)	-0.159×10^{-2} (4.62)	$0.141\times10^{+1}$ (5.55)	91		0.995	$a_0=-0.363$ (0.05) $a_1=0.997$ (97.97)	0.28	0.920	0.663

に有意な変数とならない。一方、MODEL-BとMODEL-Cでは所要時間、費用、都心ダミー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、推定パラメータの信頼性は高い。MODEL-CのパラメータはMODEL-Bと類似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、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る。MODEL-Bも適合度が高いといえるが、分担率モデル推定時の所要時間データを作成するのに、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ため、その操作性は低い。

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個で最も少ない。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、手段の組み合せに対する均衡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手段選択特定要因の値以外は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。

6．結論

実際の都市圏交通需要分析への適用の結果、

① あらかじめ別途、手段選択関数パラメータを推定した後、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。

② 本研究で開発した手段選択関数パラメータ、均衡交通量同時推定モデルから得られた手段別交通量、分担率の精度はそれ以上に高い。

③ アンケート調査集計データによる手段選択関数のパラメータは、データの持つ相関性などの理由から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 本モデルは、従来の交通需要予測手法と比較して収集すべきデータの種類とサンプル数が少なくても高い推定精度を得ることができるという操作上の利点もある。

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る。

1) Beckmann,M.J., McGuire,C.B. and C.B.Winsten : Studies in the Economics of Transportation, Yale University Press, New Heaven, 1956.
2) 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.
3) M. J. Smith : The Existance , Uniqueness and Stability of Traffic Equiliblia , Trans. Res., Vol.13B, pp.295~304, 1979.
4) Fisk,C. and S.Nguyen: Solution Algorithms for Network Equilibrium Models with Asymmetic User Costs,Trans.Sci.,Vol.16,No.3,pp.361~381,1982.
5) S.C. Dafermos : Traffic Equilibrium and Variational Inequalities,Trans.Sci.,Vol.14, pp.42~54, 1980.
6) S.C. Dafermos : The General Multimodal Network Equilibrium Problem with Elastic Demand, Networks, Vol.12, pp.57~72, 1982.
7) Florian,M. and H.Spiess: On Binary Mode Choice / Assignment Models, Trans.Sci.,Vol.17,pp.32~47, 1983.
8) 宮城俊彦: 交通均衡モデル: 理論と計算法, 土木計画学研究・論文集, No.2, pp.13~28, 1985.
9) Boyce,D.E., LeBlanc,L.J., Chon,K.S., Lee,Y.T., 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 Stractual Economic Analysis and Planning in Time and Space, 1981.
10) M. Florian : A Traffic Equilibrium Model of Travel by Car and Public Transit Modes, Trans. Sci., Vol.11, No.2, pp.166~179, 1977.
11) 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, 第313号, pp.125~133, 1981.
12) 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, 第289号, pp.121~130, 1979.
13) 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.