

手段分担・配分結合モデルを用いた手段選択関数と 均衡交通量の同時推定法

A SIMULTANEOUS ESTIMATION FOR MODE CHOICE FUNCTION AND EQUILIBRIUM
FLOWS USING A BINARY MODE CHOICE/ASSIGNMENT COMBINED MODEL

河上省吾*・溝上章志**

By Shogo KAWAKAMI and Shoshi MIZOKAMI

This study considers the equilibrium demands forecasting model of car and transit and its practical application method.

A binary mode choice/assignment combined model was formulated using a variational inequality by Florian. His model assumes that factors contributing to mode and route choice are same and their weights are given in advance.

From these findings, Florian's model is reformed so as to be applicable to the cases where the factors contributing to both choice processes partially differ in combination. A method is also developed, which simultaneously determines the weights of mode choice factors and equilibrium traffic flows by mode using practically observable demand data.

1. はじめに

本研究の目的は、同一リンク上に自動車とバスが混在し、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。

交通均衡とは、交通需要者がとるであろう最適な交通行動の結果、必然的に生じるとされる停留的な交通状態をいう。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。そのため、交通均衡状態を記述するモデルは、交通需要者の交通行動規範をよりよく反映するものでなければならない。さらに、交通需要はサービス水準の均衡状態に応じて変動するから、交通施設整備後の交通現象を正確に予測するためには需要変動型交通均衡問題として交通均衡を取り扱う必要がある。特に、公共交通機関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ような場合の交通需要予測問題や効果測定問題には、分担需要変動型交通均衡モデルを適用する有用性はきわめて高いと

考えられる。

需要変動型均衡交通モデルは、Beckmann¹⁾のモデルに代表される。Beckmann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た²⁾。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なるだけであり、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という欠点を含んでいる。

それに対して、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で解く方法が開発されている。Smith³⁾は利用者の最適行動規範を再定義することにより、Wardrop交通均衡状態をV.I.で定式化し、解の存在条件の検討を行っている。Fisk & Nguyen⁴⁾は、多種階層が混合するネットワーク均衡問題を、Dafermos⁵⁾は、あるリンクの交通量が他のリンクのコストに非対称に影響を及ぼすネットワークにおける経路選択問題を定式化し、その解法を提案している。

* 正会員 工博 名古屋大学教授 工学部土木工学科
(〒464 名古屋市中種区不老町)

** 正会員 工博 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)

需要変動型均衡問題に対する V.I. を用いた定式化は Dafermos⁶⁾等により研究が進められており、特に 2 手段分担/配分均衡問題に対しては、Florian & Spiess⁷⁾が、理論的な定式化と解の存在定理、一意性の検討を行っている。また、彼らは V.I. と Beckmann 型最適化モデルとの関係を明らかにしている。

これらの研究は数学的にきわめて明解であるが、分担需要は均衡コスト以外のコスト（たとえば、交通目的やトリップエンド条件等）に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コストが導入されていないなかったり、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うえで残された問題がいくつかある。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した、より一般的な 2 手段分担・配分結合交通均衡モデルを 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優れる Beckmann 型最適化問題に変換した後に、われわれ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 *F-W* 法を適用した実用的な非線形最適化計算法を開発することにある。

従来の需要変動型均衡モデルでは、需要関数を特定化するパラメーターを、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から推定する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、需要関数のパラメーター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。本研究の第 2 番目の目的は、均衡サービス水準に対応したパラメーターを得るために、観測可能な行動結果データを利用して需要関数のパラメーター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。

最後に、モデルネットワークを対象にして、観測値のばらつきやサンプル数がパラメーターや均衡交通量推定値の精度に及ぼす感度分析を行い、本モデルを都市圏交通需要分析に適用するにあたって問題となる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、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効性の検証を行っている。

2. 分担・配分結合交通均衡モデル

本章では、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・配分結合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 間的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（この要因を以後均衡要因とよぶ）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、ともに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・配分結合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. の解のうち、ある制約条件のもとでの解を与える Beckmann 型最適化モデルへの変換法について述べる。

(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 $i \in I$ 、 i OD 間利用可能モードを $m \in M_i$ ($m=1, 2$)、 i OD 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 間パーソントリップ数

g_i^m : i OD 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 : i OD 間 m モードの経路選択に影響するコスト

C_{ik}^m : i OD 間 m モード第 k 経路のコスト

$C_a^m(u_a)$: 両モード交通量ベクトル $u_a = (v_a^1, v_a^2)$ の場合のリンク a 上 m モードによるコスト

$C_{ar}^m(u_a)$: u_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 : i OD 間 m モードの手段選択特定要因のコスト

S_{ir}^m : i OD 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 : i OD 間 m モード第 k 経路利用交通量

とおく。

いま、 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ようになる。

$$\sum_m g_i^m = g_i, \quad i \in I \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\sum_k h_{ik}^m = g_i^m, \quad h_{ik}^m \geq 0, \quad m \in M_i, \quad i \in I \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$v_a^m = \sum_i \sum_k \delta_{ika}^m h_{ik}^m, \quad m \in M_i, \quad a \in A \quad \dots\dots\dots (3)$$

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。

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

$$C_i^m = \min_k C_k^m = \min_k \sum_a \delta_{ika}^m C_a^m(u_a) \dots\dots\dots (5)$$

$$(k \in K_i^m, m \in M_i, i \in I)$$

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

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

$$S_i^m = \sum_r \beta_r \cdot S_{ir}^m \dots\dots\dots (7)$$

$$(a \in A, m \in M_i, i \in I)$$

で定義する。つまり、 $C_a^m(u_a)$ は、各種均衡要因の重み付き線形和で表わされるとし、 $\alpha = |\alpha_r| r \in R_1$ は手段選択・経路選択両過程に共通な均衡要因、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ーである。 $\beta = |\beta_r| r \in R_2$ は手段選択特定要因にかかるパラメーターである。

(2) 分担・配分交通均衡の定義

分担・配分交通均衡の基礎概念は、Florian⁷⁾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、 i OD 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。

$$w_i^* = (C_i^{*} - C_i^{**}) + (S_i^* - S_i^{**}) \\ = G_i^{-1}(w_i^*) = W_i(g_i^*, g_i^{**}) \dots\dots\dots (8)$$

$S_i^* - S_i^{**} = S_i^*$ は OD ペア間で与件である。 g_i^{**} が決まれば、 g_i^* は一意に $g_i - g_i^{**}$ から得られるから、式(8)は次式のように g_i^{**} だけの関数として書きかえることができる。

$$w_i^* = (C_i^{*} - C_i^{**}) + S_i^* = G_i^{-1}(w_i^*) = W_i(g_i^{**}) \dots\dots\dots (9)$$

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は、 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であり、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。

$$C_{ik}^{**} - C_i^{**} \begin{cases} = 0, & \text{if } h_{ik}^{**} > 0 \\ \geq 0, & \text{if } h_{ik}^{**} = 0 \end{cases} \dots\dots\dots (10)$$

$$(k \in K_i^m, m \in M_i, i \in I)$$

(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、Dafermos⁶⁾、Florian⁷⁾らの研究に基づいて、実行可能集合(1)~(3)のもとで、

$$c(u^*)(v - v^*) - \{W(g^*) - s^*\}(g^1 - g^1) \geq 0 \dots\dots\dots (11)$$

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

$$c(u)^t = \{C_a^1(v_a^1, v_a^2), C_a^2(v_a^1, v_a^2)\} \\ W(g^1)^t = \{W_i(g^1)\} \dots\dots\dots (12)$$

$$s^t = \{S_i^t \quad (a \in A, i \in I)$$

式(11)が式(9)、(10)と同値であることの十分条件は、Florian⁷⁾と同様の方法で証明できるため、ここでは必要条件だけについて簡単に証明する。

$$i \text{OD ペア間 } m \text{ モード } k \text{ 経路に対して、式(10)は、} \\ (C_{ik}^{**} - C_i^{**})(h_{ik}^{**} - h_{ik}^{**}) \geq 0 \dots\dots\dots (13)$$

と同値である。式(13)を $k \in K_i^m, m \in M_i, i \in I$ について加え、式(3)、(8)を代入することにより、

$$\sum_a C_a^1(u_a^*)(v_a^1 - v_a^{1*}) + \sum_a C_a^2(u_a^*)(v_a^2 - v_a^{2*}) \\ - \sum_i \{W_i(g_i^{**}) - S_i^*(g_i^1 - g_i^{**})\} \geq 0 \dots\dots\dots (14)$$

を得る¹⁴⁾。これをベクトル表示したものが式(11)である。以上のことから、式(9)、(10)が式(11)と同値であることが証明できる。以上のことから、Binary 型分担・配分交通均衡解を得るためには、式(1)~(3)で表わされる実行可能集合のもとで、V.I.(11)を満足する (u^*, g^1) を求めればよいことになる。

式(11)の解 w_i^* 、 g_i^{**} および u^* 、 C_i^{**} の一意性は、手段選択関数 $G_i(w_i)$ の狭義単調減少性、リンクコスト関数 $c(u)$ 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⁶⁾。これらの条件は、 $-W(g)$ と $c(u)$ のヤコビ行列である $[-\partial W(g)/\partial g]$ 、 $[\partial c(u)/\partial u]$ が正定値行列であることと一致する。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、 $c(u)$ に関しても、その狭義単調増加性を仮定してもよいと考えられることから、式(1)~(3)の実行可能集合の中で、式(9)、(10)を満足する均衡解は一意に求めることが可能である。

(4) 最適化問題への変換

分担・配分交通均衡の定義から出発した V.I. による交通均衡モデルは、均衡状態(9)、(10)を得るための必要十分条件となることを述べたが、実行可能集合(1)~(3)のもとで式(11)を直接解くことはきわめて困難である。しかし、 $c(u)$ のヤコビ行列が正定値、かつ対称行列であれば、V.I.(11)は計算や操作性の面で優れた性質をもつ Beckmann 型最適化問題に変換できる⁸⁾。式(11)で表わされる V.I. は、以下の Beckmann 型最適化問題となる。

$$[P 1] \\ \text{Min } F_1 = \int_0^v c(x) dx - \sum_i \int_0^{g_i^1} \{W_i(y) - S_i^*\} dy \\ \dots\dots\dots (15) \\ \text{s. t. 式(1)~(3)}$$

なぜなら、 $c(v)$ 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 $h_{ik} \geq 0$ をもつ問題 [P1] の必要十分条件に一致することは、式(15)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. 手段選択関数のパラメーターと均衡交通量の同時推定法

前章で述べた分担・配分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等から得られた分担需要と両手段選択要因サービスレベルの実績値から、あらかじめ $G_i(w_i)$ のパラメーター $\{\alpha, \beta\}$ を推定し、推定された α をリンクコスト関数に代入した後、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。この手順から得られる手段選択に影響する要因のサービス水準の実績値は、推定段階で設定される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とれたものではない。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は、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も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、パラメーター $\{\alpha, \beta\}$ と均衡交通量とを同時推定する方法を提案する。

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

[P2]

$$F_1(h^*, \alpha^*, \beta^*) = \min_h F_1(h, \tilde{\alpha}, \tilde{\beta}) \dots\dots\dots (16)$$

s.t. 式(1)~(3),

$$\left. \begin{aligned} F_2(h, \tilde{\alpha}, \tilde{\beta}) &= \min_{\alpha, \beta} \sum_i \sum_m \|g_i^m - \hat{g}_i^m\|^2 \\ C_i^m &= \min_k \sum_a \delta_{ika}^m \sum_\gamma \alpha_\gamma C_{a\gamma}^m(v_a) \\ S_i^m &= \sum_\gamma \beta_\gamma S_{i\gamma}^m \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (17)$$

本モデルは、観測可能な手段別交通量 \hat{g}_i^m に推定均衡手段別交通量 g_i^m を最小二乗回帰させるように、手段選択要因パラメーター $\{\alpha, \beta\}$ 、リンクコスト関数を定義する均衡要因パラメーター $\{\alpha\}$ を決めながら、分担・配分

結合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ー、およびリンクコスト関数のパラメーターをあらかじめ求めておく必要はなく、均衡コストと整合性のある値としてモデルの中で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、下位問題は実際の行動結果と規範的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ーを決定する役割を果たしているといえる。

下位問題は通常非線形最小二乗法であるから一意の解 $\{\alpha^*, \beta^*\}$ を得ることができる。上位問題は所与の $\{\alpha^*, \beta^*\}$ のもとで解の一意性が証明されていることから、問題 [P2] は一意の解 (h^*, α^*, β^*) を得ることができる。

4. 解法とモデルの感度分析

(1) 実用的な解法

2手段分担・配分結合均衡交通量は、 $-G_i(w_i)$ 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(1)~(3)に対して、式(11)を解くことによって一意に求められることを示した。解法には不動点アルゴリズムなどが用いられるが、選択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。もし $c(v)$ の対称性を仮定した場合には、[P1] で表わされる Beckmann 型最適化問題に変換できるが、式(15)は線積分を要する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・配分交通量予測問題として実用上われわれが直面する問題は、固定された運行スケジュールをも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 はバスを選択した人数ではなく、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 を通過するときのみ1の値をとるダミー変数である。したがって、 v_a^2 に相当する部分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、

$$\left\{ \begin{aligned} C_a^1 &= C_a^1(v_a^1, \sum_s \Delta_{as} f_s) \\ C_a^2 &= C_a^2(C_a^1[v_a^1, \sum_s \Delta_{as} f_s]) \end{aligned} \right. \dots\dots\dots (18)$$

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、ここではリンク上のバスの単位時間当たり通過台数 $\sum_s \Delta_{as} f_s$ 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

$$v_a = \sum_i \sum_k \delta_{ika} h_{ik} + \gamma \sum_s \Delta_{as} f_s \dots \dots \dots (19)$$

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 (15) 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 $\min_a \sum_k \delta_{ika} C_a^2(\bar{v}_a)$ とすると、その段階の Beckmann 型最適化問題の目的関数は、

$$F_1 = \sum_a \int_0^{v_a} C_a^1(x) dx - \sum_i \int_0^{g_i^1} [W_i(y) + \tilde{C}_i^2 - S_i^*] dy \dots \dots \dots (20)$$

と変形される。なぜなら、 $C_i^2 = \tilde{C}_i^2$ のとき、モード 1 の OD 間コストは、式 (18) 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 $W_i(g_i^1) + \tilde{C}_i^2 - S_i^*$ で表わされるからである。

上位問題は、式 (1)~(3) の非負条件、および等式条件をも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、基本的に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、最適解への探索方向ベクトルを求めるために、 $F-W$ 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 $(h_{ik}^{1(n)}, g_i^{1(n)})$ が得られているとき、目的関数式 (20) をその点で Taylor 展開し、一次の項までとると、以下のようになる。

$$F_1(\bar{h}_{ik}, \bar{g}_i) = F_1(h_{ik}^{1(n)}, g_i^{1(n)}) + \sum_k (\bar{h}_{ik} - h_{ik}^{1(n)}) \cdot C_{ik}^{1(n)} - \sum_i (\bar{g}_i - g_i^{1(n)}) \cdot [W_i(g_i^{1(n)}) + \tilde{C}_i^{2(n)} - S_i^*] \dots \dots \dots (21)$$

$F_1(h_{ik}^{1(n)}, g_i^{1(n)})$, $C_{ik}^{1(n)}$, $W_i(g_i^{1(n)})$, $h_{ik}^{1(n)}$, $g_i^{1(n)}$ は定数であるから、問題 [P 1] は、

[P 3]

$$\text{Min} : F_3 = \sum_i \left[\sum_k (C_{ik}^{1(n)} - C_{ik}^{1(n)} + S_i^*) \bar{h}_{ik} \right] \dots \dots \dots (22)$$

s. t. $\sum_k \bar{h}_{ik} = \bar{g}_i$, $\bar{h}_{ik} \geq 0 (k \in K_i, i \in I)$

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}_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 [P 3] の解は、個々の OD ペアごとに、手段選択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}_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 [P 1] は、宮城の開発した $F-W$ 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ーを求める一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、一次元探索法として DFP 法を採用したため、収束

がきわめて高速になる。

下位問題は、非線形最小二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 [P2] を解く際には、各レベルを交互に繰り返し解く収束計算方法を用いている。

(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) 観測可能な実績交通量と、その OD、手段に対応する均衡交通量との誤差の大きさが、パラメーターや観測不可能な OD ペア間手段別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、パラメーター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-1 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 $\bar{\alpha}$, $\bar{\beta}$ に対する OD 別手段別交通量 $\hat{g} = \{\hat{g}_i^m\}$ を問題 [P 1] から求める。
- ② \hat{g} に、変動係数 u に対応した共分散をもつ正規分布に従う誤差項を加えたものを、観測値 $\hat{g} = \{\hat{g}_i^m\}$ として仮定する。
- ③ 仮定された観測値 \hat{g} をデータとして、本モデルを適用し、(a), (b) に対して、真のパラメーター $\bar{\alpha}$, $\bar{\beta}$ 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などを行うことによって、モデルの感度分析を行った。

ここでは、手段選択関数 $G_a(w_a)$ としてロジット型の関数を用いたため、式 (20) に相当する目的関数の最終的な形は、

$$F_1 = \sum_a \int_0^{v_a} C_a(x) dx - \sum_i \left[\sum_m g_i^m \cdot \ln g_i^m + (\tilde{C}_i^2 - S_i^*) g_i^1 \right] \dots \dots \dots (23)$$

となる。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 のときのみ 1）を取り上げている。リンク所要時間関数には、次式で示される修正 BPR 関数

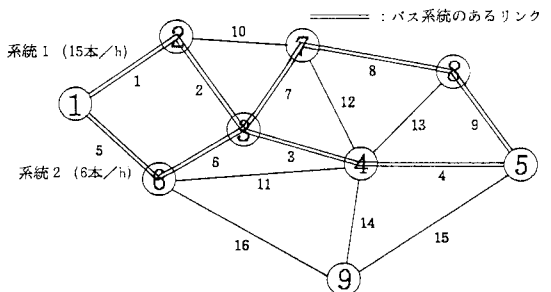


図-1 モデルネットワーク

表一 モデルネットワーク情報

No.	距離	$B_a(0)$	Q_a	No.	距離	$B_a(0)$	Q_a
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

表二 パーソントリップ OD 表および自動車による OD 間費用

D \ O	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	1626	3252
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 OD 表
下三角行列: 自動車による OD 間費用

表三 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}	-0.184×10^{-0} (2.32)	-0.111×10^{-0} (2.80)	-0.819×10^{-1} (3.59)
所要時間	-0.100×10^{-1}	-0.817×10^{-2} (3.86)	-0.909×10^{-2} (8.67)	-0.946×10^{-2} (17.5)
費用	-0.100×10^{-2}	-0.468×10^{-3} (1.32)	-0.279×10^{-3} (1.52)	-0.204×10^{-3} (1.98)
都心ダミー	0.100×10^{-1}	0.233×10^{-0} (2.00)	0.115×10^{-0} (2.03)	0.671×10^{-1} (2.09)
分担交通量の相対誤差の平均		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: 推定パラメーター 中段: 0.01 に対する t 値 下段: 真値に対する t 値

表四 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}	-0.235×10^{-0} (6.76)	-0.136×10^{-0} (6.89)	-0.966×10^{-1} (7.32)
所要時間	-0.100×10^{-1}	-0.577×10^{-2} (3.15)	-0.786×10^{-2} (8.45)	-0.877×10^{-2} (15.0)
費用	-0.100×10^{-2}	-0.525×10^{-3} (1.66)	-0.303×10^{-3} (2.31)	-0.219×10^{-3} (2.82)
都心ダミー	0.100×10^{-1}	0.335×10^{-0} (1.12)	0.164×10^{-0} (1.09)	0.967×10^{-1} (1.07)
分担交通量の相対誤差の平均		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: 推定パラメーター 中段: 0.01 に対する t 値 下段: 真値に対する t 値

$$C_a^i(v_a) = B_a(0) \cdot [1 + 2.62(v_a/Q_a)^2] \dots (24)$$

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、これらの値を表一に示す。パーソントリップ OD 構成表、自動車による OD 間費用を表二に示す。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ている。

(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ーの値とその t 値、 $|\hat{\alpha}| = |\alpha^*|$ 、 $|\hat{\beta}| = |\beta^*|$ に対する t 値等を、変動係数 $u=10.0, 5.0, 3.0\%$ について計算した結果を表三に示す。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、全パラメーターについて $|\hat{\alpha}| = |\alpha^*|$ 、 $|\hat{\beta}| = |\beta^*|$ の帰無仮説を棄却できず、推定パラメーターは統計的に真値と等しく推定されている。ダミー変数と定数項のパラメーター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ーは 0 でなく、かつ有意に真値と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は 4.00%、最大誤差が 9.12% 程度であることから、均衡交通量の推定精度は高いことがわかる。

(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四に示す。定数項の推定パラメーター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ーは 1% の有意水準のもとでは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ーの値そのもの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は 5.18%、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 程度と少なくと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わかる。

以上のことから、回帰と残差がすべて正規分布に従うようなデータが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を精度よく推定できる。図一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. 都市圏への適用事例

本研究で提案した手段選択関数パラメーターと均衡交通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、操作性の比較によって実用性の検証を行う。

(1) ゴーニングとネットワーク

分析対象地域は、昭和 56 年中京都市圏パーソントリップ調査域内の T 市、および隣接する M 町である。ゾー

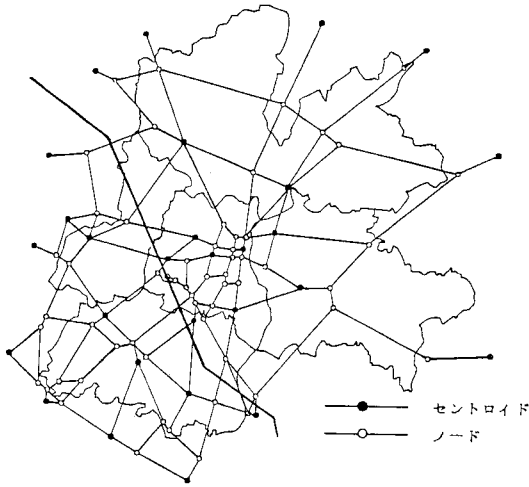


図-2 ネットワーク

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圏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-2 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とし、手段選択要因は、均衡要因としての所要時間、手段選択特定要因としての定数項、料金、都心ダミーから構成されている。リンク所要時間関数は、各道路規格に対応した修正 BPR 関数式 (24) をを用いている。自動車の平均乗車人員は実績値から 1.22 とし、バス料金は運賃表と乗車距離による推定モデルから求めている。その他のパラメーターは前章と同一の値とした。

(2) モデルの実用性の検討

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、一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ーが既知で、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、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しており、その後 [P1] により均衡交通量を推定している。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 [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 OD 調査を実施したことに対応する) の、手段選択関数パラメーター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、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いえないが、これらのパラメーターを用いて問題 [P1] から得られる均衡分担率は、ともに 0.9 程度の相関係数となる。また、自動車分担交通量、バス分担交通量の推定値と実績値との相関も 0.9 程度になることから、分担・配分結合均衡交通モデルは、従来のようにそれぞれ独自で適用しても、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わかる。

次に、自動車分担交通量、自動車分担率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、一次回帰分析におけるパラメーター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ーは 1.0 に等しいという帰無仮説をととも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きわめてよ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績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、

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	$a_1 = 1.0$ 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	$a_0 = -0.353$ (0.65) $a_1 = 0.997$ (97.57)	0.28	0.920	0.663

注) () 内は t 値を示す。ただし、MODEL-A、B は SPSS により推定したため、定数項の t 値は不明である。

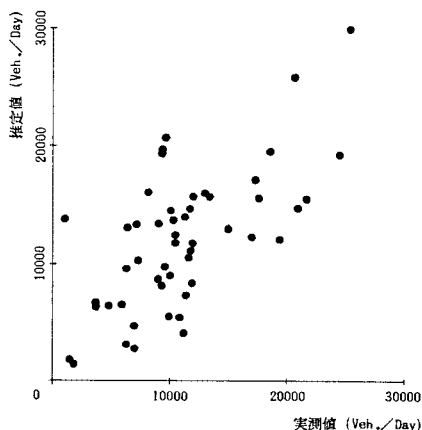


図-3 リンク交通量の推定値と実測値の相関図

リンク交通量の実績再現性も比較的高いと判断できる。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-3に示す。

次に、推定されたパラメーター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、モデルの信頼性が高い。MODEL-Cのパラメーターは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り、この結果からもMODEL-Cのパラメーター推定値の妥当性が判断できると考えられる。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、操作性が低い。

分担率モデルのパラメーター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モデル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ー推定値の有意性、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。

6. おわりに

本研究は、自動車とバスとが同一道路区間を共用し、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、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ものである。

従来、分担需要変動型交通均衡問題は、モデルの定式化、解の存在定理、解の一意性の検討等の理論面に重点がおかれていたが、本研究では、現実の都市における交通需要分析への適用性を重視し、

① 交通量によって均衡する要因だけでなく、トリップ目的やトリップエンド条件などの手段選択特定要因を手段選択関数の説明変数に含めることができるように、従来のモデルを改良した。

② 大規模ネットワークへの適用を可能にするために、許容できる現実的仮定を導入することによりモデルを簡易化し、その解法として $F-W$ の分解原理による解法が適用可能であることを明らかにした。

③ 従来、アンケート調査の集計データから推定されていた手段選択関数のパラメーターを、一部の観測可能な手段別交通量を利用して均衡交通量と同時に推定することができるモデルを開発した。

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ーを推定した後、分担・配分結合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ー、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ーは、データのも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ーの統計的信頼性はきわめて高い。

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すむ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る。
なお、本研究を進めるにあたり、名古屋工業大学教授
松井 寛氏には有益なご助言を頂いた。また、前名古屋
大学大学院生の伊藤節男君（前田建設）には計算などの
協力を頂いた。あわせて、ここに感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) Beckmann, M. J., McGuire, C. B. and Winsten, C. B. : 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) Smith, M. J. : The Existence, Uniqueness and Stability of Traffic Equilibria, Trans. Res., Vol. 13 B, pp. 295~304, 1979.
- 4) Fisk, C. and Nguyen, S. : Solution Algorithms for Network Equilibrium Models with Asymmetric User Costs, Trans. Sci., Vol. 16, No. 3, pp. 361 ~ 381, 1982.
- 5) Dafermos, S. C. : Traffic Equilibrium and Variational Inequalities, Trans. Sci., Vol. 14, pp. 42~54, 1980.
- 6) Dafermos, S. C. : The General Multimodal Network Equilibrium Problem with Elastic Demand, Networks, Vol. 12, pp. 57~72, 1982.
- 7) Florian, M. and Spiess, H. : 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 Lin, K. T. : 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.
- 10) Florian, M. : 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.
- 14) 宮城俊彦・加藤 晃：需要・パフォーマンス均衡モデルの実用化に関する一手法の提案；理論，交通工学，Vol. 20, No. 1, pp. 21~29, 1985.

(1985. 7. 23・受付)