

公共交通システム解析のための分担・配分統合モデルの定式化とその実用性に関する研究

河上省吾¹・石 京²

¹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)

²正会員 工博 中部復建株式会社技術管理部 (〒466 名古屋市昭和区福江一丁目1805番地)

本研究では、車とバス、鉄道（地下鉄を含む）などそれぞれの利用者の乗車とマストラ利用者の徒歩及び待ち時間の時間価値を区別した一般化費用の概念を採りいれて、車とバスの相互影響をある程度考慮できるような実用的な変動需要型利用者均衡統合モデルの定式化を提案し、更に、名古屋市の交通状況に基づいて、2時点の交通データを用いて、モデルのパラメータと時間価値を推定し、モデルの時間移転性を中心とした適用可能性を検討した。

Key Words: combined model, generalized cost, time value, mass transit planning

1. 本研究の概要と従来の研究

従来都市交通計画を策定する際の交通需要予測は、四段階推定法を用いて行なうのが一般的である。手段分担段階では、OD間交通量を交通機関に配分し、配分の段階では、各手段のネットワークごとに、それに対する交通量をそれぞれ独立に処理する。しかしながら、このようなモデルは基本的に、実際の状況を正確に表現できないことがある。例えば、配分モデルには通常各手段間の交通抵抗は相互に影響しないという厳しい仮定が必要である。一方、交通手段分担モデルで、分担交通量を計算するには、各手段の交通抵抗は定数であると仮定する必要がある。

実際には、交通手段毎の抵抗は、交通混雑状態の関数であり、配分計算をした後に決まるものである。しかし、現在の計算の手順は逆である。理論的には、手段分担と配分モデルの間のフィードバックを考慮する必要がある。従って、利用者が手段と経路を同時に選択できるような手段分担、配分統合モデルを開発すべきである。

公共交通機関を含む交通ネットワーク解析のための分析モデルは2つのタイプに分けられる。第1のタイプは、鉄道のように自動車ネットワークとは全く分離したネットワークをもち、走行時間が他のモードとは独立で、かつ一定と仮定できるマストラシステムである。第2のタイプは、通常のバス路線に典型的に見られるように、道路ネットワークを自動

車と共有するマストラシステムである。このタイプのマストラシステムが第1のタイプと大きく異なる点は、同一リンクの共有に伴う混雑の相互干渉効果であり、一方のモードの走行時間が他方のモードの交通量の影響を受けるという点である。このタイプの均衡モデルはFisk and Nguyen¹⁾が示したように、一般化費用のヤコビ行列の対称性が成立しないので、Beckmann型の最適化問題への変換ができない。この問題を数理計画問題として定式化することはできず、均衡条件式（非線形連立方程式）を直接解くことになる。しかしながら、実際の大規模ネットワークに対して、均衡条件式を直接解くことは現実的ではない。実際の交通問題を解決するには、実用的な予測方法を利用する必要がある。

従来統合均衡モデルについては、様々な研究がなされ多くの成果が蓄積されてきた。根本的に従来の統合モデルに対する研究は、集計型と非集計型に分けられる。非集計モデルにおいては、Sheffi & Daganzo²⁾は、分布、分担、配分の3プロセスをハイパーネットワークという仮想的ネットワークで記述し、各リンクに相当する選択肢に対する選択確率を求める。この時の需要、供給均衡のためのサービス、需要の収束条件を示している。赤松、松本³⁾は、需要変動型SUEモデルの等価最適問題を定式化し、その解法を提案している。しかしながら、非集計法は、経路選択においては適用が検討されている段階であること、推計された個人の行動をゾーン単

位で集計するのに決定的な方法が明らかでないことなどいくつかの問題が残されており、交通需要予測のトータルシステムとして実用レベルに十分達していない。

集計型モデルにおいては、Beckmannタイプのモデルが主流である。Florian⁸⁾は集計型ロジットタイプの分担率とBeckmannタイプの結合モデルを用いた均衡需要予測モデルとそれに対する解法を提案している。このモデルの特徴は自動車交通と公共交通機関利用者数を明確に区別することと、乗用車と同じ道路を利用する公共交通機関の相互影響を考慮に入れることである。本研究はこの点でFlorianのモデルに似ている。また、Boyce, LeBlanc, Chon, Lee & Lin⁹⁾、宮城⁷⁾などの研究者は、各段階に選択のばらつきを表わすエントロピー条件を追加したり、双対問題に変換したりすることによりモデルの拡張を図っている。また、均衡という定義から出発して、見出したvariational inequality理論による統合モデルの定式化⁷⁾や不動点原理による解法の開発もなされている。河上、溝上^{8), 9)}は分担需要-交通パフォーマンス均衡を考慮した交通需要予測問題、及び最適バス輸送計画問題を、2レベルStackelberg計画として定式化している。さらに、その手法を用いた最適バスサービスレベルの設計手法を開発している。

しかし、公共交通機関の計画を立案したり、その効果を計測する際には、多くの影響要因を考えなくてはならないので、これまでの研究は、各種の仮定、制限条件があったり、式が複雑であったり、計算上の不便さがあるので、公共交通システムの解析において、これらの研究結果の一般化と実用化は必ずしも十分ではなかったように思われ、実用の段階に達していないと言えよう。河上、高田¹⁰⁾は実際に応用できるようなモデルを提案したが、自動車とバスの相互干渉効果、利用者時間価値の分類及びマストラの配分段階におけるより詳細な検討が必要である。

実際の大都市での公共交通計画では、一般的に地下鉄を含む鉄道網を中心とし、バスは鉄道を補完するように整備する。また一般の都市では、鉄道だけでネットワークを構成できないこともあるので、バスと鉄道を同じ公共交通ネットワークに組み込んで考えるのが実際の状況に最も近いと思われる。本研究では、二つのタイプの公共交通機関、即ちバスと鉄道を同じネットワークに組み込んだマストラネットワークに応用できるような手段分担配分統合モデルを提案し、さらに多種の影響要因を含む大規模ネットワーク設定の仕方を検討し、それを用いて都市内鉄道とバスの役割や都市内公共輸送網のあり方を

検討し、実用的な公共交通計画策定法を開発することを目指す。

公共交通機関の交通網は、乗用車が利用する道路網と比較して、異なる特徴を持っている。まず、一般性を失わないように、バスについて考える。バスは一定の運行路線があり、運転手が勝手に経路を選択できない。利用者は、その固定されたバス路線を利用しなければならない。また、家からバス停までの徒歩時間及びバス停でバスの到着を待つ時間が必要である。さらに、目的地までに、乗換えがあれば、乗換え時間も必要である。なお、大切な影響要因として、運賃及び運賃システムを考えなくてはならない。鉄道においても同じような問題が存在する。モデルを構築する際には、少なくとも以上の点を考えなくてはならないであろう。

本文では交通手段選択、経路選択の両方に、車とバス、鉄道（地下鉄を含む）などの公共交通機関におけるそれぞれの利用者の乗車時間価値とマストラを利用する際の利用者の徒歩及び待ち時間の時間価値を区別した一般化費用の概念を採り入れて、かつ、車と同じ道路を利用するバスの相互影響をある程度考慮できるような実用的な変動需要型利用者均衡統合モデルを構築することを目的とする。

このモデルは河上、高田のモデル¹⁰⁾と類似しているが、自動車と同じ道路を利用するバスの相互影響を導入することとマストラ利用者時間価値を細分することによって、より実際に近い交通現象を再現することができるうえ、マストラの各種料金を考慮できる最短経路探索方法の開発により最適マストラ輸送計画問題にまでモデルを応用できる点が異なっている。

本文で提案したモデルを用いて、名古屋市の交通状況に基づいて、昭和56年と平成3年の2時点のPT調査で得られたOD交通量と道路の容量、制限速度、マストラの運行速度、運賃、頻度等の交通データを用いて、モデルのパラメータと時間価値を推定し、比較した。それらによって、モデルの時間移転性を中心とした適用可能性を検討した。

2. モデルの構築に関する基本的な考え方

公共交通計画に於ける短期の交通需要予測やその効果の計測を扱う場合、公共交通サービス水準の向上が、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小さいと考えられる。なお、交通機関選択に関しては費用だけで表現できない要因が多いので個人の行動のばらつきを確率的に表現できるロ

ジットモデルを用い、また、本研究で渋滞や混雑が頻繁に発生するピーク時の交通状況を検討するので、経路選択に関しては、ピーク時即ち混雑時においては、個人の知覚費用のばらつきを考慮する場合と考慮しない場合での配分結果の差が小さいと考えられるから^{10, 13}、ここではODペア別、交通手段別の利用者の知覚費用のランダム性を考慮しないWardropの第一原則に基づく利用者均衡モデルを用いる。公共交通機関利用者の経路選択に関しても、ピーク時には車内混雑の利用者心理に対する影響は小さく、利用者はすべて最短経路を利用すると仮定する。

いま、自動車とマストラの2つのモードのネットワークで構成される交通ネットワークを対象に、ロジットモデルにより機関分担量を求め、同時に均衡配分法によって各リンク交通量を求める問題を考える。この場合、地域間分布交通量 T_{ij} は固定されるが、モード別の分布交通量は各モードの相対的な交通サービス水準に応じて変化すると仮定する。したがって、この問題は一種の需要変動型均衡問題である。

統合モデルを用い、マストラの輸送計画を研究するに際して、マストラ独自の特徴を明確にしなくてはならない。まず、交通量(車両数)と利用者数(パーソントリップ数)を区別する必要がある。

鉄道の走行時間は車の走行時間関数と独立であるので、ここでバスの走行時間に関する検討を行う。

車の交通量を配分する時に、交通量と利用者数は平均的な倍数関係があるが、バスは運行路線があり、運転手が自由に通路を選択できず、バス利用者はその路線に沿わなければならないので、バス輸送の上限値に達しなければ、利用者の路線の選択即ちバス利用者数が車に与える影響は定数であると考えられる。つまり、バス輸送の上限値がないと仮定すると、車の走行時間に影響を与えるのは、バス車両数だけである。

バス交通量(車両数)と車交通量の相互干渉の影響は河上、徐、陸ら^{13, 14}により提案された車とトラックなど大型車の相互干渉効果を分析するための走行時間関数を参照し以下のような手段別のBPR型リンク走行時間関数で表すことができると考えられる。

$$t_a^c = t_a^c(0) \left[1 + \alpha^c \left(\frac{X_a^c + \xi X_a^b}{C_a^c} \right)^{\beta^c} \right] \quad (1)$$

$$t_a^b = t_a^b(0) \left[1 + \alpha^b \left(\frac{X_a^b + \eta X_a^c}{C_a^b} \right)^{\beta^b} \right] \quad (2)$$

ここに、 t はリンク a の走行時間、 X はリンクの車両台数、 C はリンク毎の容量であり、添字 C, B は交通手段である車とバスを表す。 $\alpha^c, \alpha^b, \xi, \eta, \beta^c, \beta^b$

は、走行時間関数のパラメータである。このようにして、バスとの相互影響を反映することができる交通量と走行時間との関係は曲線ではなく、曲面になっている⁹。実際に、バス運営においてその路線と運行頻度は固定されており、バスの運転手は勝手に経路を選択できないので、バスの車交通量に与える影響は定数であると考えられる。バスの運行計画が確定している場合に、リンク a のバス交通量 X_a^b は定数であり、車とバスの相互影響は非対称であり、両者の走行時間は共に車交通量の関数になり、つまり t_a^c と t_a^b の間には一定の関係があると考えられる。本研究では、バスに対するBPR型走行時間関数を省略し、従来の自動車走行時間関数を基にリンク上の全車両に関するBPR型走行時間関数を採用する。すなわち、車交通量の中にバス交通量を含めて考える⁹。

$$t_a^c = t_a^c(0) \left[1 + 2.62 \left(\frac{v_a}{C_a^c} \right)^5 \right] \quad (3)$$

式中のリンク a の交通量 v_a に車とバスの交通量が含まれている。具体的に書くと、 v_a は次の式(4)ようである。本研究で道路網リンクとマストラ網のバスリンクの数と大きさは一致しないので、一般的に、バスのリンク s の中に、何本かの道路リンクを含めている。

$$v_a = \sum_s \Delta_{a,s} f_{l(s)} \gamma + \sum_y \delta_{a,y} h_{k,y}^c \quad (4)$$

γ はバスと車の換算係数であり、都市内での値は2から4である¹⁵。 f_l はバス系統 l の頻度、バス路線 $l(s)$ のリンク s が道路リンク a を含む時 $\Delta_{a,s} = 1$ 、含まない場合は0。 $h_{k,y}^c$ は車の経路交通量である。リンク a がODペア (i, j) 間の車の経路 k に含まれる時 $\delta_{a,y} = 1$ 、その他0。

一方、道路リンクごとの車交通量がバス走行時間に与える影響は次式で表されると仮定する。ここに、 φ は定数であり、バス停での停車の影響などを含めている。

$$t_a^b(v_a) = \varphi \sum_s \Delta_{a,s} t_a^c(v_a) \quad (5)$$

$t_a^b(\cdot)$ はバスの道路リンク a に対応する所要時間。

本研究では、できるだけ多くの影響要因を考慮するために、費用、時間を含む一般化費用の概念を導入する。ここで、道路ネットワークにおいては、利用者最適な均衡状態になっていると仮定すると、以下の条件式が満足されなければならない。

$$\begin{cases} \sum_a \delta_{a,y} U_a(v_a) = U_y^c & \text{if } h_{k,y}^c \geq 0 \\ \sum_a \delta_{a,y} U_a(v_a) \geq U_y^c & \text{if } h_{k,y}^c = 0 \end{cases} \quad (6)$$

$U_a^c(\cdot)$ はリンク a の一般化費用であり、 U_y^c はODペア (i,j) 間の最小一般化費用である。 $h_{k,y}^c$ はODペア (i,j) 間の経路 k の交通量。

マストラネットワークは、利用者の乗車、乗換え、待ち、徒歩及び仮想的な運賃のリンクによって構成される。マストラ利用者層において経路を選択する際にも、Wardropの第一原則に従う利用者均衡が存在すると考えられる。従って、マストラ利用者層において利用者をOD間最小費用経路に、all or nothing法によって配分すると、以下のような関係がある。

$$\begin{cases} \sum_s \delta_{a,y} U_s(v_a^M, y_s^M, C, F) = U_y^M & \text{if } h_{k,y}^M \geq 0 \\ \sum_s \delta_{a,y} U_s(v_a^M, y_s^M, C, F) \geq U_y^M & \text{if } h_{k,y}^M = 0 \end{cases} \quad (7)$$

ここに、 $U_s(v_a^M, y_s^M, C, F)$ はマストラリンク s ごとの一般化費用関数であり、道路リンク交通量 v_a^M とマストラリンク s の利用者数 y_s^M の関数であると考えられる。また、一般化費用はマストラサービスの運賃 C と頻度 F の関数でもあると考えられる。 v_a^M はマストラ利用者の配分段階においては定数である。本研究ではマストラ利用者のマストラ路線選択の影響要因として運賃と時間しか考慮せず、車内混雑が利用者の路線選択に影響しないと仮定している。マストラリンク毎の一般化費用はマストラ利用者数の関数ではないと仮定でき、道路リンク交通量 v_a^M のみの関数になり、マストラネットワークにおける利用者最適の状態は、システム最適(SO)状態と一致する。しかしながら、マストラの運営計画を研究する際にマストラサービスの運賃 C と頻度 F は主な政策変数であり、パラメータを推定する段階においては定数であるが、本モデルでは計画の段階においてそれらを変数として検討できる。

ちなみに乗降所要時間 t_a^M は利用者数の線形関数と仮定できるが、名古屋市のような大都市では、1停留所での1台のバスの乗降者数はあまり多くないので、その影響は小さいと考えられ、マストラネットワークのリンクとノード数を減少し、計算の利便性を図るため、乗換えリンク時間は定数としてもよいと考えられる。もし必要があれば、乗降所要時間 t_a^M と利用者数を線形関係と仮定すると、それを用いて公共交通機関の容量を導入することも可能である。

3. 手段分担、配分統合モデルの定式化

前節の分析に基づいて本研究の手段分担、配分統

合モデルは、道路の車両交通量均衡モデル、マストラ利用者層における利用者均衡モデル、及び交通手段の分担関係を表すロジットモデルの三つのサブモデルによって構成されると考えている。

(1)サブモデル1：道路上交通量均衡モデル

道路上の交通量均衡の主な要因は車輛台数であるので、ここでも、従来の変動需要型利用者均衡モデルの代表として下記のBeckmannモデルを採用する。しかし、リンク a 上の交通量 v_a は、一般車両交通量だけでなく、バス車両数も含まれている。また、逆需要関数はロジットモデルによって決まるものである。

$$\min Z1 = \sum_a \int_0^{x_a^c} U_a^c(v) dv - \sum_y \int_0^{X_y^c} g^{-1}(t) dt \quad (8a)$$

s.t.

$$\sum_k h_{k,y}^c = X_y^c \quad (8b)$$

$$x_a = \sum_y \sum_k \delta_{a,y} h_{k,y}^c \quad (8c)$$

$$v_a = \sum_s \Delta_{a,s} f_{(a)} \alpha + x_a \quad (8d)$$

$$h_{k,y}^c \geq 0 \quad (8e)$$

ここに、 $U_a^c(\cdot)$ は車リンク a ごとの一般化費用、 X_y^c はODペア (i,j) 間の車交通量、 $g^{-1}(\cdot)$ は分担交通需要の逆需要関数、 $h_{k,y}^c$ は車の利用する経路 k の交通量、 X_y^c はODペア (i,j) 間の車の分担交通量を表す。

(2)サブモデル2：マストラ利用者均衡モデル

マストラ利用者層においても、利用者均衡状態が存在すると考えられるので、以下の式で表すことができる。

$$\min Z2 = \sum_y \int_0^{Y_y^M} U_y^M(v_a^M, y_s^M, C, F) dy \quad (9a)$$

s.t.

$$\sum_p h_{p,y}^M = Y_y^M \quad (9b)$$

$$Y_s^M = \sum_p \sum_y \delta_{s,p}^M h_{p,y}^M \quad (9c)$$

$$h_{p,y}^M \geq 0 \quad (9d)$$

ここで、 $U_s^M(\cdot)$ はマストラリンク s の一般化費用で、利用者数の関数である。 $h_{p,y}^M$ は経路 p のマストラ利用者数を表す。 v_a^M は車のリンク a の計算段階 I の交通量である。

本研究では、バスの輸送容量に上限がなくピーク時で車内混雑の影響を考慮しないと仮定するので、利用者はすべて最小一般化費用経路を選択すると仮定する。この段階で、車交通量の配分計算によってバスリンク s の走行時間は決まるので、定数と考えられ、全てのリンクにおいて一般化費用は利用者数と関係ないと仮定すると、マストラ利用者の一般化

費用を最小にする式は以下ようになる。

$$\min Z2 = \sum Y_i^M U_i^M (v_i^c, C, F) \quad (10)$$

本研究では、よく利用されているマストラの均一、距離、区間三種類の運賃システムを考えに入れるためには、マストラ最短経路選択において、従来の方法を改良し、最短一般化費用経路を選択する方法を提案している。この方法で、公共交通機関の路線と種類を区別し、ノードに記録する。経路ごとの距離を計測することによって、料金を算出する。この料金を下車するときリンクの一般化費用に加える。

(3)サブモデル3：手段分担率モデル

交通主体は、所要時間、費用などからなる一般化費用を考慮して手段選択を行うが、一般化費用の評価に個人差があり、確率分布すると考える。いま、交通主体は一般化費用の小さい手段を選択すると仮定し、選択確率の均衡状態を求めるとロジットモデルになる。したがって、車利用者とバス利用者間の均衡（分担関係）はロジットモデルによって求められる。すなわち、手段分担率は各手段のOD間最小一般化費用によって以下の式で計算する。

$$\theta_y^c = \frac{1}{1 + e^{\alpha(u_y^c - u_y^m) + \beta}} \quad (11)$$

ここに、 U_y^M, U_y^C はODペア(i,j)間の手段別の最小一般化費用、 α, β はパラメータ、 θ_y^c は車の分担率である。利用者が手段を選択する際における一般化費用以外の影響は、パラメータ β の中に含まれている。

本研究で一般化費用の中における時間と費用のトレードオフ関係を考慮するには、時間価値を導入する必要がある。交通における時間価値は、交通目的、利用手段などに関連する諸条件に依存する。交通に要する時間が交通活動の中のどのような活動状況かによってその時間価値は異なると考えられる。例えば、目的地までの公共交通機関利用のための時間は、待ち時間、乗車時間、乗り換え時間、徒歩時間で構成され、これらの各時間の価値は異なる¹⁰⁾。本研究では、公共交通機関利用者の各影響要因を明確にするために、利用者の徒歩（及び待ち）時間、バス、鉄道と車の乗車時間の時間価値を分けて導入する。

以上のサブモデルに基づいて、利用者の一般化費用を最小化するモデルの構築を目指して、モデルの定式化を行うと式(12)に示すようになる。

$$\min Z = \sum \int v \cdot U_a^c(v) dv + \sum Y_i^M U_i^M - \sum T_{ij} \int g^{-1}(t) dt \quad (12a)$$

subject to

$$v_a = \sum \Delta_{a,r} f_{(a)} \gamma + \sum \delta_{a,y} h_{k,y}^c \quad (12b)$$

$$X_y^c = \sum_k h_{k,y}^c \quad (12c)$$

$$X_y^c + X_y^m = T_y \quad (12d)$$

$$h_{k,y}^c \geq 0, \quad X_y^c \geq 0, \quad X_y^m \geq 0 \quad (12e)$$

ただし、 T_{ij} はODペア(i,j)間の交通量であり、また、車とバスの走行時間の計算式(3)、(5)以外に、下の式を用いる。

車リンク一般化費用：

$$U_a^c(v_a) = C_a^c + \lambda^c t_a^c(v_a) \quad (13)$$

車のODペア(i,j)間の一般化費用：

$$U_y^c(V) = \sum_a \delta_{aj}^c U_a^c(V) \quad (14)$$

マストラのODペア(i,j)間の一般化費用：

$$U_y^M(V, C) = \sum_a \delta_{aj}^M U_a^M \quad (15)$$

車のODペア(i,j)間の分担交通量：

$$X_y^c = \theta_y^c T_y \quad (16)$$

マストラネットワークは、多種のリンクによって構成されるため、リンクの一般化費用 $U_a^M(\cdot)$ の計算式も異なる。これについては次節で詳細に紹介する。

車の交通需要の逆需要関数は車とマストラとの手段間一般化費用差と定義し、ロジットモデルにより導いたものである。

$$g^{-1}(\theta_y^c) = \frac{1}{\alpha} \ln \frac{1 - \theta_y^c}{\theta_y^c} - \frac{\beta}{\alpha} \quad (17)$$

それは車のOD間分担率 θ_y^c の単調減少関数であり、 α, β はパラメータである。

4. マストラネットワークの設定について

公共交通計画に関する研究をするためには、マストラ輸送に影響するすべての要因を考える必要がある。そこで、できるだけ多くの要因を考えに入れるために、ここでは、以下のようなネットワークの設定方法を用いた。基本的に、マストラネットワークは、車ネットワークと同じように、セントロイド、ノード及びリンクによって構成される。しかし、リンクの中には4種類を設ける。つまり、バス乗車リンク、鉄道乗車リンク、交通具に乗る時のアクセスリンクと降りて目的地までの徒歩からなるイグレスリンクである。各種リンクの一般化費用は具体的に書くと式(18)のようである。

鉄道リンク：

$$U_i^M = \lambda^R t_i^R \quad (18a)$$

バスリンク：

$$U_i^M = \lambda^B t_i^B(v) \quad (18b)$$

アクセスリンク：

$$U_i^M = \lambda^F (t_i^F + t_i^W(f_{i(w)})) \quad (18c)$$

イグレスリンク：

$$U_i^M = \lambda^F (t_i^F + t_i^W(f_{i(w)})) + CF \quad (18d)$$

ここに、 λ^F 、 λ^B 、 λ^R 、 λ^C はそれぞれ徒歩（及び待ち）時間、バス、鉄道と車の乗車時間の時間価値であり、 $t_i^W()$ は待ち時間で、 CF は運賃である。

マストラ利用者層において、利用者の路線選択に影響する要因は、運賃の他に、乗車時間、待ち時間、バス停（駅）までの徒歩時間、乗換え時間及びバス停（駅）での乗降時間である。本研究のマストラネットワークにおける時間は、以下の方法によって求める。

(1) 鉄道の乗車時間 t_i^R : $t_i^R = const.$ (19)

鉄道は道路交通量の影響を受けないので、鉄道の走行時間は時刻表のとうりであり、鉄道利用者のリンクごとの乗車時間は、定数である。

(2) バスの乗車時間 t_i^B :

2節で仮定した式(5)のようである。バスが車と同じ道路を利用するために、車の走行時間の影響を受けつつ走行するので、表定速度などの調査結果によると、名古屋市の場合は、 φ の値は1.5ぐらいである^{9)・10)}。

(3) 待ち時間 t_i^W : $t_i^W(f_{i(w)}) = \frac{1}{2f_{i(w)}} \quad (20)$

集計データを用いるので、ここでは、マストラの路線ごとの運行間隔の半分を利用者の待ち時間とする。 $f_{i(w)}$ はマストラリンクsを使う路線 $f_{i(w)}$ の運行頻度である。

(4) 乗車下車および乗り換えによる徒歩時間 t_i^F :

$$t_i^F = const. \quad (21)$$

実際の状況に基づき、場所により一定の定数として与える。

本モデルの実際への適用可能性の検証は、名古屋都市圏の主要部分を占める名古屋市に適用することにより行う。名古屋市域を対象地域に選ぶ理由は名古屋市域と周辺部では交通手段分担特性に差があること¹⁹⁾と都市圏全体を対象とするとデータが膨大となり扱いにくいためである。名古屋市の実際の昭和56年当時の交通状況を基に、道路とマストラネットワークを設定した。そのノード、リンク及びセントロイド数は表-1の中に示している。

マストラ網は、JR東海道線、中央線、名鉄名古屋

表-1 設定した名古屋市交通網のデータ

	ノード	リンク (両方向)	セントロイド
道路網	132	462	16
マストラ網	252	680	16

屋本線、瀬戸線、近鉄名古屋線など5路線、名古屋市地下鉄鶴舞線、東山線、名城線3路線、及び名古屋市市バスの26路線によって構成されている。

5. モデルの解法とパラメータの推定

(1) モデルに対する解法

本研究では、実測値に基づいて、時間価値を推定し、それを用いて、リンクごとの一般化費用を算出することによって、分担、配分計算を行う。

本研究では、以下で簡単に説明する従来よく使われている"diagonalized method"法^{4)・7)・17)}を基に改良した解法を用いる。この方法は、FW法に基づいて、道路上へ全車両交通量を配分し、均衡状態を求め、OD間の最小一般化費用経路を探し出す。そして道路所用時間によって、バスのリンク所要時間を算定し、all or nothing法を用いて、マストラの最短経路を探索し、OD間の最小一般化費用を求める。さらに、両手段一般化費用差によって、ロジットモデルで車の分担率を計算し、もう一度この交通量を配分する。求めたリンク交通量とOD間交通量は前回の結果と一致しなければ繰り返して計算し、一致すれば終了する。

以上のように定式化したモデルに対する解法を提案し、その解法により得られる解の収束性と唯一性などは、式(6)、式(7)のKuhn-Tucker条件を目的関数に適用して証明できる。ここでは、具体的な証明は行わないが、それについて簡単に説明する。

U_i^C, U_i^M は X_i^C と X_i^M の連続増加関数であり、 $g_{ij}^{-1}()$ は分担率の連続減少関数であるので、目的関数を満足する唯一の (X, Y, θ) が存在することが分かる。

(X^*, Y^*, θ^*) が式(6)と式(7)のようなKuhn-Tucker条件を満足する解であるとしたら、 $(X^{**}, Y^{**}, \theta^{**}) = (X^*, Y^*, \theta^*)$ を満足すれば、それは目的関数の唯一解であることが証明できる¹⁷⁾。

(2) 時間価値とパラメータの推定及び適用可能性の検討

一般化費用を用いた本モデルを実際の都市交通ネットワークに適用し将来予測をするためには、時間

価値 λ^F , λ^B , λ^R , λ^C 及び分担率パラメータ α , β の値を推定する必要がある。ここでは、短期の交通需要予測を行うので、対象地域の交通網において利用者の平均所得など平均的な社会経済特性の変動は小さいと見なし、現在と予測時の時間価値は等しいと仮定する。現況が利用者均衡状態にあると仮定して、交通需要予測モデルから得られた手段別各OD交通量が実測値に最も近づくように、パラメータを推定する。即ち、本モデルで得られた手段別各OD交通量の推定値 X_y^c とパーソントリップ調査に基づく実績値 X_y^c （昭和56年現況値）の差の二乗和が最小になるように、パラメータを推定する。OD交通量の実績データは、昭和56年中京都市圏パーソントリップ調査を基に名古屋市16区について集計したものである。また、交通渋滞等の問題の多いピーク時を扱うために、OD交通量は、交通手段別ODペアごとにピーク時において時間的に均等に分布していると仮定して、日OD交通量に交通網全体でのピーク率を乗じてピーク時OD交通量を求め、それを配分した結果をピーク時リンク交通量とみなす。具体的に書くと、用いる推定式は以下のようである。

$$\min \sum_y (X_y^c - \bar{X}_y^c)^2 \quad (22a)$$

s.t.

$$X_y^c = X_y^c(\alpha, \beta, \lambda^F, \lambda^C, \lambda^B, \lambda^R) \quad (22b)$$

本研究では、非線形性の強い問題に特に有効な準ニュートン法による非線形最小二乗法を用いる。この方法は、Biggsによる準ニュートン反復法に基づいて局所的な最小値を求めるものである¹⁹。

この方法によって、設定した昭和56年の名古屋市ネットワークに対してパラメータを推定し、モデルの適用可能性を検証した結果を表-2と表-3に示している。

本研究においては、車とバスの相互に影響する程度によって、下に示しているような三つのモデルで計算を試みた。

モデルA：バスの時速は13kmで一定とし、バスの所要時間が道路混雑の影響を受けなく、かつバスの車に与える影響を考えない。つまり式(4)(5)が利用されていない。

モデルB：バスの所要時間をバスが利用する道路リンクの車の所要時間の1.5倍とし、つまり、式(4)を利用せず、バス所要時間が道路混雑の影響だけを受ける場合である。

モデルC：本研究で提案したモデル。つまり式(3)(4)(5)が使われている。

表-3から、本モデルが、予測過程において適合度が高く最も実用に耐えると言える。本モデルCの推

表-2 推定したパラメータ、時間価値

モデル	パラメータ		時間価値 (円/分)			
	α	β	λ^C	λ^R	λ^B	λ^F
A	1.458E-03	0.660 5	26.41	9.775	11.88	14.80
B	1.840E-03	0.856 5	20.97	7.862	13.16	13.94
C	1.858E-03	0.838 2	20.52	7.881	12.92	14.25

表-3 モデルの適用可能性の検討成果

モデル	相関係数			RMS		
	車OD	バスOD	車リク	車OD	バスOD	車リク
A	0.942	0.980	0.586	32.75	23.49	32.06
B	0.943	0.981	0.617	32.55	23.35	30.70
C	0.943	0.981	0.620	32.47	23.30	30.32

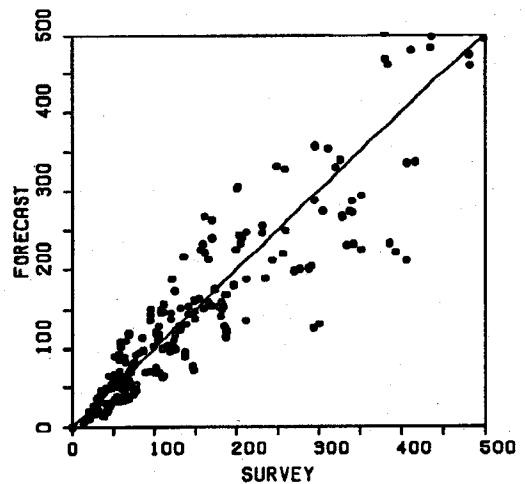


図-1 車OD交通量の実績値と予測値の相関関係 (モデルC)

定値と実績値の相関関係をグラフ化した結果を図-1に示した。

車リンクの相関係数が相対的に低い原因は、ネットワークの設定、走行時間関数の設定などに関わり、これらをよりきめ細かくモデル化すれば、相関係数等が高くなるはずである。また、統合モデルの場合には、手段別OD交通量は変動し、推定した手段別OD交通量が実績値とかけ離れ、配分結果の精度が配分単独モデルより低くなる可能性はある。

しかしながら、手段別OD交通量の相関係数が高くなればなるほど、その差が小さくなると思われる。なお、ピーク時のOD交通量の計算に使うピーク率は、全体の平均値であり、リンクごとの実績値のピーク率は各リンクごとのものであるため、それもリンク交通量の相関係数が低くなる原因の一つであると考えられる。

車とバスの所用時間が相互に影響するのが現実的であり、三つのモデルの計算結果の差はそれほど大きくないが、車とバスの走行時間の相互影響を考慮に入れる程度によって、順序に差があり、提案しているモデル(C)の結果が最もよいのが分かった。名古屋市のような大都市では、乗用車が多く、バスの路線数は相対的に少ないことが、車とバス走行時間の相互影響を考慮するのと考慮しない場合の差が大きくない原因であると考えられる。

交通手段の利用者の立場からみた時間価値は、交通手段の利用者が、時間節約によって得る効用を貨幣で評価したものであると考えられる。利用者にとって車とマストラの時間に対する感じ方に差異があると言う現象が、実際の利用者行動を表現しているといえる。

マストラネットワークにおいては時間価値を三つに分けて推定した。徒歩及び待ち時間の時間価値が最も大きく、鉄道乗車時間のそれが最も小さいという結果は、マストラ網の中の徒歩時間の節約により得られる効用が最も大きいということを表している。

本研究での時間価値は、時間を金額に換算する指標でもある。車利用者については、家から乗用車まで、或いは駐車場の所用時間を考えておらず、OD間所用時間は実際より短くなっている。これが、得られた車の乗車時間の時間価値が公共交通機関の乗車時間のそれよりかなり大きくなった原因の1つであると考えられる。

6. 時間移転性の分析と応用例

(1) 時間移転性の分析

このモデルを実際に応用し、将来交通需要を予測するために、代表交通手段別OD交通量の実績データの最も新しいデータ、平成3年の中京都市圏パーソントリップ調査を基に名古屋市16区について集計したものと平成3年の名古屋市の交通状況に基づいて設定した道路とマストラネットワークを用いて平成3年当時の時間価値とモデルのパラメータを推定した。表-4に昭和56年と平成3年の時間価値とパラメータを示している。

表-4 昭和56年と平成3年の推定結果

年代	パラメータ		時間価値 (円/分)			
	α	β	λ^c	λ^s	λ^b	λ^f
昭和56年	0.00185	0.838	20.52	7.88	12.92	14.25
平成3年	0.00219	0.948	22.30	8.54	10.56	15.26

表-5 平成3年データを用いたモデルの適用性の検討結果

利用パラメータと時間価値の年代	相関係数		RMS	
	車OD	マストラOD	車OD	マストラOD
H3	0.905	0.967	41.45	31.73
S56	0.901	0.965	41.64	31.87

	相関係数		RMS	
	車リソク	地下鉄リソク	車リソク	地下鉄リソク
H3	0.632	0.607	42.43	66.48
S56	0.614	0.568	42.88	69.84

平成3年の結果と昭和56年のそれを比べると、時間価値の変化は大きくないが、住民の生活水準の向上に伴う平均所得の増加等によって平均的に利用者の時間価値が上昇したのが分かった。その中で、自動車利用の増加と、都市内高速鉄道特に地下鉄の整備に伴って、利用者の車と鉄道の乗車中の時間価値が増加した。一方、利用者のバス乗車中の時間価値は小さくなり、鉄道の乗車中の時間価値に近づいた。これは人々が鉄道とバスを同じ公共交通機関と考えるようになったとも考えられる。徒歩及び待ち時間の時間価値の増加は、利用者がマストラを利用する時にアクセス及びイグレスの所要時間をより重視するようになったことの反映であろう。また、パラメータ α 、 β の変化より、現在の交通機関利用者は、道路混雑の悪化や高速鉄道の整備により、車とマストラの一般化費用を同じだと感じる時に、車を選択する確率が昭和56年より小さくなる傾向がある。これは、公共交通機関を整備する必要性を表していると考えられる。

平成3年のデータへの本モデルの適合性の検討結果は表-5に示している数値のとおりで、本モデルの適合度は高く、実用に耐えることを示している。表-5の中の年代はS56のところの数値は推定した昭和56年のパラメータと時間価値を用いて、平成3年のネットワークに応用する場合の検討結果である。こ

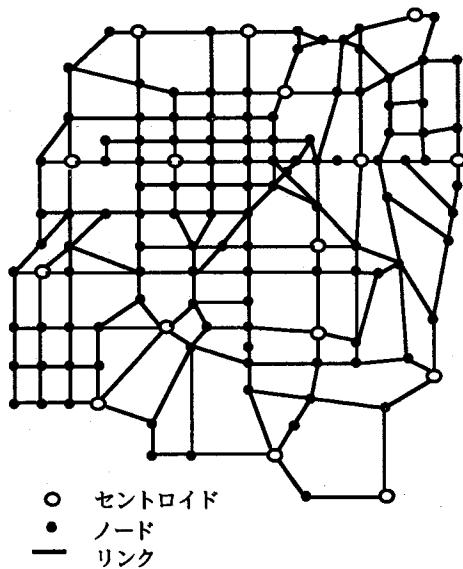


図-2 簡略化した名古屋市の道路ネットワーク

の場合は、手段ごとOD交通量の相関係数は少し小さくなって、RMSも少し大きくなったが、変化はそれほど大きくないので、10年間程度の予測には、使ってもよいと言えよう。時間価値の差異があるため、計算で得られたリンク交通量の変化があり、経路交通量特にマストラの経路交通量は実際との差がやや大きくなった。平成3年の車リンク交通量と地下鉄リンク交通量に対する検討は表-5の下の部分に示している。

バス、JRなど鉄道の実績値リンク交通量、及び昭和56年の地下鉄リンク交通量の実績値がないため、マストラ網においては、平成3年の地下鉄リンク交通量だけに対して検討を行った。車交通量並みの相関関係が得られた。この値はそれほど大きくないが、セントロイドの数を増やすことにより、高くすることは可能と考えられる。

以上の分析から見ると、10年間のパラメータと時間価値の変化が小さく、手段ごとOD交通量実測値と推定値の相関関係も良いので、新しいPTデータのない場合には、従来のパラメータと時間価値を用いて、予測してもよいと思われる。

(2) 応用例

このモデルを用いて平成4年1月に答申された名古屋都市圏に対する運輸政策審議会の交通網計画のうち答申路線Aの路線を対象として、平成3年の輸送需要を用いて、検討する。検討される計画答申路線は、地下鉄6号線の一部（今池一新瑞橋）、地下

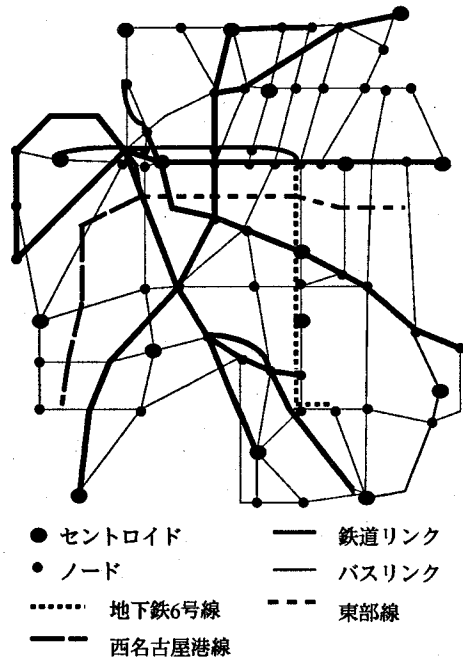


図-3 名古屋市のマストラネットワーク（計画路線含む）

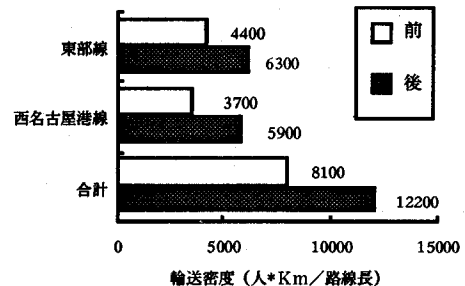


図-4 相互乗り入れ前後の輸送密度比較

鉄東部線と西名古屋港線である。

ここで、手段ごとの利用者数と一般化費用の両時点の変化により利用者便益を定義し、運営者の収入、運営費用、建設費用を含めて、運営者の利潤の差を運営者便益と定義した。それに、交通手段の分担率や車の走行キロ数や公共交通機関の輸送密度などを評価指標として、分析を行った。

平成3年の交通現況に基づいて設定した道路とマストラネットワークは、図-2と図-3に示しているものである。しかし、マストラ網の中には、計画答申路線の地下鉄6号線（今池一新瑞橋）、地下鉄東部線と西名古屋港線が含まれている。

東部線と西名古屋港線の両路線が相互直通運転をする場合としない場合との比較をした結果を例として示す。図-4のように、輸送密度の変化からみて2路線とも相互乗り入れをした方が利用者数は増え、相互乗り入れはあまり費用がかからない有効な改善策であると言える。

7. 終わりに

本研究では利用者は一般化費用最小の手段、経路を利用することを基本とする利用者均衡理論に基づいて車とマストラの中のバス、鉄道及び徒歩利用時の時間価値を分けた一般化費用を取り入れて、同じ道路を使う車とバスの所要時間における相互影響をある程度考慮にいれて短期予測するための実用的な交通量分担、配分統合モデル及びそれに対する解法を提案した。

公共交通ネットワークにおける料金などを含めて一般化費用最短経路を探索する方法を開発し、多種の影響要因を含む大規模ネットワークの設定により、本モデルを名古屋市に適用し、その適用性を検討し、モデルの実用性が高いことを証明した。

昭和56年と平成3年の交通データを用いて、パラメータと時間価値を推定し、二時点の結果を比較、分析した。この結果から、現在の交通利用者がマストラを利用する時にアクセス及びイグレスの所要時間を重視することと、交通機関利用者は、道路混雑の悪化や高速鉄道の整備により、車とマストラの一般化費用を同じだと感じる時に、車を選択する確率が小さくなる傾向があることが分かり、大都市においてより便利な公共交通機関を整備することの重要性を示した。

本研究では、モデルの適用性に対する検討は名古屋市域において行っているが、検討結果により、その適用性と実用性は検証できたと言える。将来都市圏へ応用するためには、ネットワークを拡張し、都市への流入、通過交通量を考慮にいれれば、配分の段階はよりよい結果が得られると考えられるが、分担段階の精度が上がるかどうかは不明である。

本研究の最終目的を達成するためには、今後、実証的な評価基準を設定し、名古屋市の交通計画を策定することを通じて、実用的な公共交通計画策定法を開発する必要がある。

参考文献

1) Fisk, C. and Nguyen S: Solution Algorithms for

- Network Equilibrium Models with Asymmetric User Costs, *Transpn. Sci.*, Vol. 16, No.3, pp.361-381, 1982.
- 2) Sheffi, Y. and Daganzo: Hypernetworks and Supply Demand Equilibrium Obtained with Disaggregate Demand Models, *TRR* 673, pp.113-121, 1978.
- 3) 赤松 隆, 松本嘉司: 需要変動を考慮した交通ネットワーク確率的利用者均衡モデルとその解法, 土木学会論文集, 第401号, 4-10, pp.109-118, 1989.
- 4) Michael Florian: A Traffic Equilibrium Model of Travel by Car and Public Transit Modes, *Trans. Sci.* Vol.11, No.2, pp.166-179, 1977.
- 5) 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.
- 6) 宮城俊彦: 双対交通均衡モデル—交通モード均衡を例に—, 第4回土木計画学研究発表会講演集, pp.403-412, 1982.
- 7) Florian, M. and Spiess, H.: On Binary Mode Choice/Assignment Models, *Transportation Science*, No. 17, pp. 32-47, 1983.
- 8) 河上省吾, 溝上章志: 分担, 配分過程結合交通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, pp.101-109, 1985.
- 9) 河上省吾, 溝上章志: 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, 土木学会論文集, 第371号, pp.79-87, 1986.
- 10) 河上省吾, 高田篤: 都市圏における公共輸送機関の料金システムおよび輸送計画の評価に関する研究, 土木学会論文集, No. 431, pp.77-86, 1991.
- 11) 桑原雅夫: 交通量配分手法の実証的検討, *交通工学*, Vol.23, No.2, pp.17-25, 1988.
- 12) 河上省吾, 徐志敏, 志賀雅樹: 確率均衡配分モデルの計算法に関する研究, 土木学会第44回年次学術講演会講演集4, pp.108-109, 1989.
- 13) 河上省吾, 徐志敏, 広島康裕: 車種別均衡配分モデルに関する実証的な研究, 土木学会論文集, No.431/4-15, pp.57-66, 1991.
- 14) 河上省吾, 陸化普: 観測リンク交通量からOD交通量を予測するための残差平方和最小化モデルの改良と多車種への拡張, *交通工学*, Vol.27, No.5, pp.11-19, 1992.
- 15) 河上省吾, 松井寛: *交通工学*, pp.131, 森北出版株式会社, 1987.
- 16) 徐廣綱: 価値意識法を応用した都市交通網の実用的評価方法に関する研究, 名古屋大学学位論文, 1990.
- 17) Mustafa Abdulaal & Larry J.LeBlanc: Methods for Combining Modal Split and Equilibrium Assignment Models, *Trans. Sci.* Vol.13, No.3, pp.293-314, 1979.
- 18) 名古屋大学大型計算機センター: ライブラリー・プログラム利用の手引, pp.98-101, 1982.
- 19) 中京都市圏総合都市交通計画協議会: 中京都市圏交通実態分析, 1982.

(1994. 4. 6 受付)

A STUDY ON FORMULATION AND PRACTICAL ANALYSIS OF A COMBINED MODEL FOR URBAN MASS TRANSIT PLANNING

Shogo KAWAKAMI and Jing SHI

This study aims to develop a combined modal split and assignment model in which users can choose modes and routes simultaneously. The concept of generalized cost is introduced into the model and various time values of, such as, users of car, bus, railway and also walking or waiting time value are used as well in order to get the tradeoff between cost and time exactly. The interaction of private cars and transit vehicles on the road network are considered in some extent.

Most of the effect factors, such as transfer time, waiting time, fare system, feeder function of bus, etc. can be considered in it. The model is verified by applying to Nagoya City. Large networks are set up based on the practical traffic conditions of 1981 and 1991 separately. Parameters and time values are calibrated from survey data. The OD and link traffic correlated coefficients and RMS between survey data and forecasting data are calculated and analyzed. The results show the model possesses high applicability.