

交通均衡モデルを用いた 都市バス輸送需要の影響要因に関する分析

A ANALYSIS OF THE FACTORS WHICH INFLUENCE THE CITY BUS TRANSPORT DEMAND
WITH TRAFFIC EQUILIBRIUM MODEL

河上省吾* 石 京**

S. KAWAKAMI & J. SHI

The study aims to analyse the factors influencing the city bus transport demand by using a multimodal traffic equilibrium model. Assuming that bus link flow does not have influence on car link flow, a joint modal split and distribution user equilibrium model of three modes is developed in this paper. Furthermore, some aspects of bus services are researched. Based on the study, it is found that all factors researched here affect bus users' action in some extent. In special, to ensure the bus travel speed is the most effective one for attracting the users in urban area.

1. はじめに

都市が活動し、市民が快適な日常生活を享受するためには都市内における人と物の円滑な流動が確保されていなければならない。しかしながら、既成の大都市では道路の拡幅や新設には大きい困難を伴う。したがってこの限られた道路スペースをいかに有効に利用するかが課題となる。

つまり少ない交通空間でいかに多くの人を運ぶかということであり、このためには輸送力の大きい鉄道、バス、新交通システムなどの公共交通機関が都市交通の中心でなければならない。

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、架線などの設備がいらないので、初期投資額が比較的小さく、路線の新設や変更をしやすい、即ち対象地域の実状や需要変動に応じた面的な輸送サービスを供給できる唯一の公共交通機関であると考えられる。

以上のような認識のもとに、本研究では、従来の研究を踏まえ、需要変動型交通均衡理論に基づいて、実用的な交通需要予測モデルを開発し、多手段、多経路の大規模ネットワークに適用できるバスを活用するための輸送計画策定システムを構築することを最終目的とする。

本研究の目的を達成するためには、ネットワーク利用者の経路選択行動の規範として理論的根拠の明確な利用者均衡理論を用いて交通シミュレーションを行なって交通量を把握する必要がある。

従来の研究は、仮想的なネットワーク、あるいは2手段以内の交通手段のみを扱ったものが多い。し

* 正会員 工博 名古屋大学工学部土木工学科教授

**学生員 工修 名古屋大学大学院工学研究科
博士課程後期課程

たがって、交通需要予測及びその評価システムの実際の多手段、多経路の大規模ネットワークへの適用可能性の検証を通して、実務レベルに十分適用できるものに改良しなければならない。

本研究では、名古屋市の交通ネットワークに関してバス交通のサービス水準を考慮した短期の交通需要分析を目的とし、従来の研究と本研究の関係の明確化、多手段交通均衡モデルの開発、名古屋市の幹線道路網を用いたパラメーターの推定とその現況再現性の検討などを行う。

2. 従来の研究と本研究の概要

交通主体の経路選択に際しての価値基準として最も一般的に用いられるものは、「最小一般化費用経路を選択する」というものである。

また、最小一般化費用経路をどのようにして判定するかという問題に対して、交通主体は前日の情報によって自分の行動を決定するというような行動仮説を設定して、より現実性のある交通状況を定義することも行われている。

このような行動基準をもった、交通主体の交通流が交通ネットワークシステムの各地区間に与えられた量だけ流れる場合にある均衡状態に到達すると考えられるが、これを交通均衡と呼び、このときの交通量を均衡交通量と呼ぶ。

最も一般的に用いられている交通均衡は、Wardrop均衡と呼ばれるもので、「どの利用者もより安い費用の経路を見いだせないような交通パターンである」と定義されている。

ここで、変動需要型利用者交通均衡モデルというのは、四段階推定法における前3段階の交通需要量を推定する作業と4段階目の配分過程を統合したものである。需要変動型交通均衡モデルが伝統的ネットワーク需要予測法と根本的に異なる点は、各ODペア間の需要量が一定ではなく、ネットワークの供給サービス水準に応じて変化することを前提にしている点にある。

この需要変動型利用者均衡モデルは、Beckmannらによって初めて定式化された。Beckmannモデルは、Wardrop均衡に基づいた変動需要型交通均衡モデルである。このモデルは、交通計画変更時の交通需要が、交通のサービス水準によって決まる交通パフォ

ーマンス曲線と、そのサービス水準ならばトリップを行なってもよいと考える利用者数を与える需要曲線との均衡点によって決定されることを表している。

しかしながら、交通需要は、社会経済的な現象であるために、需要関数を設定することが極めて難しいので、逆需要関数の特定化は困難であり、また、この目的関数の意味付けには問題点が存在し、このモデルの実用性については、まだ十分検討されていない。しかし、現在Beckmannモデルを基に、いろいろの分布・配分統合モデルが、その修正モデルとして、提案された。本研究は、Beckmannモデルを基に、交通手段の所要時間、所要費用と乗り換え回数を考慮した一般化費用を採用し、ロジットモデルによって、手段分担段階での手段間の均衡を考慮して、多手段機関分担、配分統合モデルを開発する。

バスの輸送計画等の交通計画の策定においては、交通需要の実態調査によって交通需要の発生機構を解明し、これをモデル化したものによって交通計画変更時の交通需要を予測すると同時に、その交通需要に対処するための各種計画の代替案を策定し、交通需要を交通網に流し、各種評価基準を用いてその交通計画を評価し、代替案の改良などを行い最良案を決定する必要がある。

3. 多手段交通均衡モデルの定式化について¹⁾²⁾

バス輸送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、バス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したロジットモデルを用い、経路選択に関しては、ピーク時即ち混雑時を考えるため、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、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従来の利用者均衡モデルを用いる。

従来の機関分担、配分同時均衡モデルについては、2手段に対する研究が多い。

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。

一般的に、マストラシステムを含む交通ネットワーク解析のためには2つのタイプの分析モデルがある。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を持つものである。第2のタイプは、通常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を持つものである。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。この場合、問題はやや複雑になり、Fisk and Nguyen³⁾が示したように、このタイプの同時モデルはヤコビ行列の対称性が成立しないので、これまで展開してきた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。

そこで、ここでは、均衡問題を数理計画問題として定式化できるようにするために、車の交通量において均衡条件式が成立すると仮定して、大都市ではバスの交通量が車の交通量よりかなり少ないという事実に着目し、車はバスの影響を直接受けないものとするが、バスの所要時間は車の交通量の影響を受けると考えるモデルを開発した。本モデルは交通手段選択、経路選択の両方に、車、バス、鉄道(地下鉄を含む)におけるそれぞれ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、バスの所要時間が道路網の影響を受ける機能を組み込んで、構成したものである。ここでいう時間価値は、パラメータに相当する一般化費用の時間価値係数である。

以下に示している式(1)の目的関数右辺の第1項は、普通車の交通均衡項であり、即ち車のネットワークの各リンクの一般化費用の総和である。第2項は、

バスOD間最短経路一般化費用の総和である。バスの一般化費用は、車のリンク所要時間が決まったあと、バス網のリンク所要時間が決まる。それによって、バスOD間の最小費用経路を求める。さらに、決めたOD最小費用を用いて、ロジットモデルによって、バスのOD交通量が求められる。第3項は鉄道OD間の一般化費用の総和である。鉄道のOD交通量が、先に決まった車、バス両手段のOD交通量と総OD交通量によって求められる。第4項は分担需要変動項である。バスと鉄道交通量が車に与える影響は、逆需要関数のパラメータの中に含まれている。ここでは、バスと鉄道の交通量は最小費用経路に配分し、車の交通量は均衡配分法によって配分されると仮定する。

$$\begin{aligned} \min Z = & \sum_a \int_{x_a^C} U_a^C(X) dX + \sum_{ij} X_{ij}^B U_{ij}^B(C^B, F^B, X) \\ & + \sum_{ij} (T_{ij} - X_{ij}^C - X_{ij}^B) U_{ij}^R(C^R, F^R) \\ & - \sum_{ij} T_{ij} \int_{t_{ij}^C}^{\theta_{ij}^C} g^{-1}(t) dt \end{aligned} \quad (1)$$

$$s.t. \quad X_a^C = \sum_k \sum_{ij} \delta_{a,ij}^k h_{k,ij}^C, \quad X_{ij}^C = \sum_k h_{k,ij}^C,$$

$$X_{ij}^C + X_{ij}^B + X_{ij}^R = T_{ij}$$

$$h_{k,ij}^C \geq 0, \quad X_{ij}^C \geq 0, \quad X_{ij}^B \geq 0, \quad X_{ij}^R \geq 0$$

ただし

$$U_a^C(X) = C_a^C + \lambda^C t_a^C(X)$$

$$U_{ij}^B(C^B, F^B, X) = C_{ij}^B + \lambda_{ij}^B t_{ij}^B(F^B, 1.5 * \sum_a \delta_{a,ij}^B t_a^C(X_a^C))$$

$$U_{ij}^R(C^R, F^R) = C_{ij}^R + \lambda_{ij}^R t_{ij}^R(F^R)$$

$$X_{ij}^C = \theta_{ij}^C T_{ij}, \quad X_{ij}^B = \theta_{ij}^B T_{ij}$$

$$g^{-1}(t) = \frac{1}{a} \ln \frac{\theta_{ij}^C}{1 - \theta_{ij}^C} + \frac{b}{a}$$

$$t_a^C(X_a^C) = t_a^C(0) [1 + 2.62 (\frac{X_a^C}{Y_a^C})^7]$$

ここに、式中の各記号の説明は以下の通りである。

t_{ij}^B 、 t_{ij}^R : バスと鉄道における乗り換え時間などを含めたODペア ij 間の総所要時間(最短経路)。

$\delta_{a,ij}^k$: リンク a がODペア ij 間の車の経路 k に含まれるとき1、その他0。

$\delta_{a,ij}^B$: リンク a がODペア ij 間のバスの経路に含まれるとき1、その他0。

$h_{k,ij}^C$: ODペア ij 間の車の経路 k の交通量

T_{ij} : ODペア ij 間の全手段交通量。

θ_{ij}^C 、 θ_{ij}^B : ODペア ij 間の車、バスの分担率。

X_{ij}^C 、 X_{ij}^B : ODペア ij 間の車、バスの分担交通量。

$g^{-1}(t)$ 、 a 、 b ：手段分担率関数逆関数、パラメータ。
 $\lambda^C, \lambda^B, \lambda^R$ ：車、バス、鉄道の時間価値。
 C_a^C, t_a^C, Y_a^C ：リンク a の車の走行費用、所要時間、交通容量。

X ：リンク a の車の交通量ベクトル

C^B, C^R ：ODペア ij 間のバス、鉄道運賃のベクトル
 $C^B = \{C_{ij}^B\}$ 、 $C^R = \{C_{ij}^R\}$

P^B, P^R ：バス、鉄道路線の運行回数のベクトル

前述のように、需要関数を設定することが極めて難しいので、逆需要関数の特定化は困難である。本モデルの手段分担率関数の逆関数は、以上の仮定の下に、車の一般化費用を定義したものである。具体的には、以下のように導いたものである。

車の分担率は次式で示されるロジットモデルによって、与えられると考えた。

$$\theta_{ij}^C = \frac{e^{\alpha U_{ij}^C}}{e^{\alpha U_{ij}^C} + e^{\alpha U_{ij}^B} + e^{\alpha U_{ij}^R}} \quad (2)$$

ここに、 $U_{ij}^C, U_{ij}^B, U_{ij}^R$ は車、バス、鉄道それぞれの一般化費用であり、 α は調整係数である。

いま、以下のような記号を導入すると

$$g^{-1}(t) = U_{ij}^C$$

$$a = \alpha$$

$$b = \ln \{ \exp(\alpha U_{ij}^B) + \exp(\alpha U_{ij}^R) \}$$

逆関数は以下の様になる。

$$g^{-1}(t) = \frac{1}{a} \ln \frac{\theta_{ij}^C}{1 - \theta_{ij}^C} + \frac{b}{a} \quad (3)$$

この逆関数の中に、バスと鉄道の影響が含まれていると考えられる。

4. 名古屋市への適用可能性の検証

本研究の理論の実証的な検討は、名古屋市の交通現況データを用いて行うことにする。名古屋市交通ネットワークは、車、バスと鉄道等交通手段によって、三部分に分け、また、公共交通機関のバスと鉄道については、それぞれの路線別の運賃、運行回数等を考慮できるように設定したものである。

表1 名古屋市の交通ネットワーク

	ノード数	リンク数			セントロイド数
		総数 両方向計	乗り換え 徒歩	アクセス	
道路	126	454	----	----	16
バス	132	355	169	----	16
鉄道	183	1353	357	186	16

車、バス、鉄道等の手段別OD交通量の実績デー

タは、昭和56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である。ただし、トリップエンドの片側のみを名古屋市内に持つトリップ及び通過交通量は対象地域内交通量に比較して小さいと見なして無視した。

また、交通渋滞等の問題の多いピーク時を扱うために、以下の推定方法を用いた。ピーク時OD交通量は、交通手段別ODペア毎に時間的にも均一と仮定して、日OD交通量に交通網全体でのピーク率（車10.9%、バス、鉄道19.4%）を乗じて求め、それを配分した結果をピーク時リンク交通量と見なした。

車ネットワークのパフォーマンス関数に関するデータは、実測値に基づいて以下のように設定した。車リンクの規格は、交通容量を750台/時・車線として、道路規格に基づいて、初期速度45、50、55km/時間等を考慮して、7種類に纏め、車の平均乗車人員は、1.3人/台とした。車の一般化費用は、車の所要時間と走行費用（31.1円/km・人）からなると考えた。

バスリンクの所要時間は、バスのゾーン間所要時間のアンケート結果によって、対応する車リンクの1.5倍になるように設定した。なお、バスの一般化費用は、バスの総所要時間（乗車時間、待ち時間、乗り換え、徒歩時間）と普通運賃からなると考えた。

鉄道の場合、徒歩等によるアクセスリンクを取り入れた他は、バスと同じように取り扱った。

また、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、分担率パラメータ a 、 b 及び時間価値 $\lambda^C, \lambda^B, \lambda^R$ の値の推定が必要である。ここでは、短期的な交通需要予測であるから、対象地域の交通網において利用者の平均所得等平均的な社会経済特性の変動は少ないと見なし、現在と予測時の時間価値は等しいと仮定する。本研究では、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。パラメーターの推定結果は表2に示す通りである。

表2 モデルの適用可能性を検証した結果

推定したパラメータ					車分相交通量		バス分相交通量	
a	b	λ^C	λ^B	λ^R	相関係数	RMS	相関係数	RMS
-0.00192	0.0743	30.1	22.6	9.35	0.914	18.9	0.880	28.9

5. バス輸送計画が利用者行動に与える影響の分析
 本節では、前節で定式化した一般化費用の概念を

用車より速度が遅いため、次々と旅客を失っていた。しかし、図2に示したように、ゾーン14-16間バスの車線が分離されるようになると、その輸送サービスは一部ではあるが自家用車を凌ぐようになり、多くの自家用車利用者をバスへとひきつけた(図3参照)。以上の結果は、基幹バスの速度上昇効果を定量的に検証したことになると言えよう。

3) 運行頻度に関する分析

バス輸送の計画主体が操作可能な重要な政策変数として、運行回数がある。本研究でバスの主要各路線の運行回数を1時間当たり5本から30本までの変化に対して、各手段ごとの分担率の現況に対する変動は、きわめて小さかった。これは、バスの運行回数が既に多い場合、路線の運行回数の増加、即ち運行間隔の減少に基づく、バス路線の利用者の待ち時間の減少による節約時間は、一般化費用に占める割合が小さいから、バス利用者への影響も小さいということが原因と考えられる。また、バス運行回数の増加は分担率に、局所的に確かに影響するが、道路混雑が大きいところでの効果は、小さいということが分かった。

4) 運賃に関する分析

バスの運賃及び料金の水準は、利用者が誰でも安心して乗れるという公共性の高さの確保、良質な輸送サービスの安定的供給等の観点から、規定されるものである。

バスの運賃制度は、バスの走っている都市や地域の実態を考慮して定められており、制定形態別には、均一制、距離制等いくつか種類がある。

本節では、バスの均一料金制と距離料金制の二つのシステムが、利用者行動に与える影響について分析した。区間料金システムは、現在日本の大都市では、余り利用されていないので、ここでは、それに対する分析を行わなかった。

均一料金システムの下で、現況の130円を10円ずつを上げることによって、車利用者が約1%ずつ増加するのに伴って、逆にバス利用者は1.7%ずつ減少しているのが分かる。距離料金制の場合、累加料金の増加に従って長距離トリップのバス利用者ほど車に転換しやすいので、車の総所要時間、車の人km数の大幅な増加が生じた。したがって、料金が上昇することによる市全体としての車の総所要時間及び人km

mの増加が、交通事故の増加、騒音の増加等につながり、社会にとって望ましくないことを考えれば、バス料金の高値安定を防ぐように、運賃認可制度を有効に活用していくべきであろう。

6. 研究の成果

本研究では、理論的根拠が明確な利用者均衡理論に基づいて、従来の変動需要型交通均衡モデルに、バスと鉄道それぞれの運賃や運行回数を考慮できるように、一般化費用の概念を採り入れ、車、バス、鉄道3手段の時間価値を区別し、かつ、バスの所要時間が道路混雑の影響を受けるようなモデルを提案し、そのモデルの名古屋市への適用可能性を検証した。そして、このモデルを用いて名古屋市のバス輸送計画、即ち、バスの運行速度、運営路線、頻度及び料金システムが利用者行動に与える影響を分析した。本研究で得られたことを纏めると以下の様である。

1) 交通需要予測モデルについては、利用者が車、バス、鉄道の3手段の時間価値を区別し、かつ、バスの所要時間が道路混雑の影響を受けて、実際に近い現象を模擬できるモデルを開発し、その適用可能性が高いことを名古屋市の交通網で検証した。

2) 本モデルを用いて、バスの輸送計画が利用者行動に与える影響を分析した結果、名古屋市のバス路線網の場合、運営路線の調整、頻度の変化および料金システムの変更の影響は余り大きくないが、バス優先措置の実施が多くのバス利用者を誘致できることが分かった。また、全市的に見ると、バス利用者はある上限値に収束する傾向があることが明らかになった。

参考文献

- 1) Yosef Sheffi: Urban Transportation Network s, Prentice-Hall, INC, 1985
- 2) 高田 篤: 都市交通体系に於ける公共輸送機関の料金システム及び輸送計画の評価に関する研究、名古屋大学修士論文、1990
- 3) Fisk, C., and Nguyen S.: Solution Algorithms for network equilibrium Models with Asymmetric User Costs. Transp. Sci. Vol.16, No. 3, pp. 361-381, 1982