

観測リンク交通量に基づくモード別分布交通需要推定モデルとその適用性の検討

河上省吾*・陸 化普**・広畠康裕***

本論文では、交通実態をより正確に表現できると考えられる新しい分布交通需要予測モデルを提案した。そして、最適化モデルからモード別（手段または車種）の分布交通量の比率を与える交通分布モデルを導いた。さらに、名古屋市道路ネットワークに提案したモデルを適用し、観測リンク交通量から車種別OD交通量を求めた。この結果、提案したモデルに基づいて観測リンク交通量から車種別OD交通量をより高い精度で得ることができた。

Keywords : O-D matrix, link traffic counts, entropy, combined model

1. はじめに

観測リンク交通量に基づき分布交通需要を推計する手法は今まで数多く提案されてきた。このような手法のメリットを要約すると次の通りである。

①データの収集の面ではパーソントリップ調査のような大規模な交通調査に比べて、観測リンク交通量は膨大な資金・時間・労力を要せずに入手できる。また、交通制御などの他の目的のために調査された場合も多く、データは豊富に得られる。

②データの処理及び分析作業の面ではモデルの簡略化や推定計算の時間と費用の節約を実現することができる。

③需要に合うように迅速にかつ確実な情報が得られる。例えば、発展途上国においては人口の増加が著しく、経済の成長率が高いので、土地利用パターンも急速に変わり、それに伴い交通需要パターンも急激に変わる。このような場合には、たびたび交通量調査を行う必要があるが、大規模な調査を何度も実施することは資金・時間・労力がかかるので、このような発展途上国にとっては観測リンク交通量からOD分布交通量を求めることが極めて重要な意味があると思われる。

④観測リンク交通量は実際の交通現象を直接観測した結果であるので、きめ細かな交通対策の実施や局所的なネットワーク改良により引起される交通需要の変化を的確に反映する。したがって、観測リンク交通量に基づいてOD交通需要パターンを求めることができれば、交通対策の実施や局所的なネットワーク改良などの効果の予測や評価に必要な情報を提供することも可能となる。

このような理由により、観測リンク交通量に基づくOD分布交通量の推定方法に関して、これまでに数多くの研究がなされ、様々な手法やモデルが提案されてきている。それらはいろいろな観点から分類することができる。

まず、モデルの開発目的によって、2種類に大きく分けられる。第1は現況分析が主な目的で、短期計画用データを得るために開発されたものである。この種類のモデルは交通分布法則を問わず、モデルの出力は対象地域の現況OD交通量のみである。第2は、長期計画を策定するために開発されたモデルで、将来の交通需要予測を主な目的とするモデルである。この種類のモデルは交通分布法則を求めるに重点をおき、得られるのは交通分布法則を表す交通分布モデルとそれを用いて推定される現況OD交通量である。

次に、モデルの適用範囲から分類すると局所的なネットワークを対象とするモデルと広域的なネットワークを対象とするモデルに分けられる。

さらに、後述するように、使用するデータや情報の種類、交通現象の定式化の考え方、推定方法や解法などによる様々な分類も考えられる。

このように、観測リンク交通量に基づくOD交通量の推定方法には様々な手法が存在するわけであるが、本研究では広域の総合交通計画のための手法に着目し、従来の研究成果を踏まえつつ、交通モード別（手段または車種）の観測リンク交通量からモード間の相互影響を考慮しながら、モード別のOD分布交通量を推定できる手法を開発し、実際の交通網への適用を通じて、モデルの適用性を検討することを目的としている。ここで、モデルを構築する際に、複数モード（手段または車種）を同時に考慮することの意義・必要性は以下の2点にある。

① 計画の策定・評価のためのより詳細な情報の提供

近年、生活レベルの向上に伴い、より質の高い、多様なニーズに対応できるような交通網の整備が要請される

* 正会員 工博 名古屋大学教授 工学部土木工学科
(〒464-01 名古屋市千種区不老町)

** 学生会員 工修 名古屋大学大学院博士課程

*** 正会員 工博 豊橋技術科学大学助教授 建設工学系

ようになり、もはや道路網の整備だけでは交通問題を解決することができず、広域の複数交通手段からなる総合交通計画を策定しなければならなくなってきた。また、道路整備それ自体においても、単なる需要を満足させる量的供給という需要追随型から環境影響評価など質的側面の検討もしなければならない局面を迎えた。こうして、交通需要分析においても、そのような質的評価を行うためのきめ細かい情報を与えなければならない。そのためには、環境影響特性や走行特性が異なる車種ごとに交通量を予測できるモデルを開発しなければならない。例えば、大型車と普通車といった車種によって環境に与える影響は大きく異なるので、環境影響評価あるいは大型車対策のための情報とするには、車種を考慮したOD交通量の推定が重要となってきた。これらのことから、観測リンク交通量に基づくOD交通量の推定においても、複数モード（手段または車種）を同時に考慮する必要がある。

② モデルの交通分布法則の表現力と推定精度の向上
複数モード（手段または車種）を同時に考慮してOD交通量を求めるモデルを構築することの第2の意義・必要性は推定精度の向上の可能性にある。これには以下の3つの侧面がある。その第1は、OD交通量の推定において与件とされるゾーン別発生交通量の推定精度の向上に関する。通常、原単位法や閾値法などを用いることにより対象地域の総交通量や各ゾーンの発生交通量は比較的容易に求められる。このとき、発生交通量の推定精度は一般に全手段の場合の方が高くなるといえる。

第2の側面はOD分布法則の表現能力に関する。いま任意のODを考えると、その交通手段別OD交通量は交通手段間の競合関係を反映したものとなっているものと考えられる。したがって、このような交通手段間の競合関係を考慮できるよう、モデル推定時に複数交通手段を同時に考慮すれば、理論的には、各交通手段ごとに独立にOD交通量を求める手法よりも、推定精度の向上を図ることが期待できる。すなわち、分布法則はゾーン間相互作用を反映するものであるから、交通手段を超えた共通の法則が存在するはずであるので、複数交通手段を考慮することで予測精度の向上が期待できる。逆に、交通手段間に競合があるにもかかわらず、单一手段（たとえば車）のみを対象とすると、その分布法則は、モデル推定時における交通手段間の競合関係を暗黙裡に反映したものとなってしまうので、競合関係が変化する時点での推計精度は落ちると考えられる。したがって、広域の総合交通計画のためのモデルを構築する際には、交通手段間の競合関係を考慮しなければならないと言える。

第3の側面は、観測リンク交通量に基づくOD交通量推定において必要とされる経路選択率の推定の信頼性に関する。後述するように、本研究では交通均衡統合

モデルの定式化を採用することにより、経路選択率の推定を内生化しているが、車種によって走行特性が異なれば当然ながら経路選択率も異なると考えられるので、より精度のよい経路選択率の推定を行うためには、車種を考慮することが重要となると考えられる。

以上述べたように、もし、複数モード（手段または車種）を同時に考慮したOD交通量推定モデルの開発ができるれば、多様なニーズに対応でき、なおかつ、推定精度の向上を図ることができると考えられるのである。

以下、本論文では、まず、分布、分担、配分統合モデルという形で目的地選択、モード選択、経路選択を齊合的に取り扱う最適化問題を定式化する。次いで、モード別（手段または車種）の観測リンク交通量データと各ゾーンの発生交通量データとを用いてそれを解くことによってモード別（手段または車種）OD分布交通量予測モデルのパラメータを求めると同時に現況のモード別（手段または車種）OD分布交通量を推定するという手段を提案する。さらに、本モデルを簡略化した名古屋市の道路ネットワークに適用し、推定計算を通じてこの手法の有効性と実用性を検討する。

2. 問題の定義及び既存モデルの問題点

観測リンク交通量からOD交通量を求めるいわゆる逆解析問題には次の特徴がある。

リンク交通量とOD交通量との関係を表す基本的な式は式(2.1)である。

$$V_a = \sum_i \sum_j P_{ij}^a T_{ij} \quad (2.1)$$

ここに、 V_a はリンク a の交通量、 T_{ij} は OD ペア ij 間の交通量である。 P_{ij}^a は OD 交通量がリンク a を利用する比率である。

式(2.1)は各リンクに対して成立しなければならない。それゆえに、式の総数はリンク数に等しい。ここで、観測リンク交通量からOD交通量を求める問題は式(2.1)から $n \times n$ 個（ただし、 n はゾーンの総数）の未知量 T_{ij} を求める問題である。もし、各ゾーンの内々交通量を考慮しなくとも $n \times (n-1)$ 個の未知量 T_{ij} を求める必要がある。しかしながら、一般的の研究対象地域においては、 $n \times (n-1)$ の数は総リンク数よりも大きいので、観測リンク交通量のみを用いて、式(2.1)から唯一の OD 交通量分布パターン $|T_{ij}|$ を求めることは不可能である。これは観測リンク交通量からOD交通量を求める問題（逆問題）に関する最も困難なところで、特徴であるともいえる。

この問題を解決するために、一般には次のように考える。すなわち、観測リンク交通量に含まれている情報量のみを用いれば、その情報量は十分ではないので、他の情報や制約条件などを追加すべきである。ゆえに、観測リンク交通量と与えた制約条件のもとで、唯一の解が求

表1 従来の観測リンク交通量による交通需要推計モデルとそれらの特徴

著者	OD事前情報	入力データ	出力結果	備考
現況OD分布の再現を目指すモデル	H. J. V Zuylen & L.G. Willumsen(80)	過去のODマトリックス	観測リンク交通量 道路区間利用率	現状OD交通量 エントロピー最大化など
	L. J. LeBlanc (1982)	過去のODマトリックス	観測リンク交通量 道路区間利用率	現状OD交通量 交通均衡
	高山・飯田 (1986)	過去のODマトリックス	観測リンク交通量 道路区間利用率	現状OD交通量 エントロピー最大化
	飯田・高山 (1986)	過去のODマトリックス	観測リンク交通量 道路区間利用率	現状OD交通量 残差平方和最小化
	井上 (1989)	需要関数	観測リンク交通量 道路区間利用率 発生集中交通量	現状OD交通量 観測量と推定量の一致条件
	Maud Brennin Gthe(1989)	ターゲットOD	観測リンク交通 道路区間利用率	現状OD交通量 多目的計画
	M. G. H. Bell (1991)	過去のODマトリックス	観測リンク交通 道路区間利用率	現状OD交通量 一般化残差平方和最小化
	Hogberg (1976)	重力モデル	観測リンク交通量 発生集中交通量	モデルのパラメーターと現状OD 非線形回帰
	J. Holm (1976)	重力モデル	観測リンク交通量 発生集中交通量	モデルのパラメーターと現状OD 最尤法・交通配分統合モデル
	M. Carey (1981)	需要関数	観測リンク交通量 任意ODの組合せ	モデルのパラメーター 2次計画
OD分布法則を組み込んだモデル	C. S. Fisk & D. E. Boyce(1983)	不要	観測リンク交通量 発生交通量	モデルのパラメーター エントロピー最大分布配分交通均衡
	河上・広畠・陸 (1990)	不要	観測リンク交通量 発生交通量	モデルのパラメーター エントロピー最大分布分担配分均衡

められるようにすべきである。この追加情報の与え方により、これまで提案してきたモデルは二つに大別できる¹⁾。一つはOD交通量の分布パターンについての情報があらかじめ与えられると仮定する方法である。これに属するモデルとしては、前もって交通需要パターンを重力モデルなどで表わす手法などが挙げられる。

もう一つはOD分布パターンを仮定せずに、エントロピー最大化とか情報量最小化などの原理により、直接に観測リンク交通量からOD交通量を求めることがある。なお、重力モデルとエントロピー最大化原理は全く同じOD分布パターンを与えるので、本質的な差はないと考えられる。いずれの場合でも逆問題については次のように考えている。

(1) 唯一の解が得られないことに対して、いくつかの可能な解の中から最もよい解を探そうとする。つまり、最も起こり易い分布パターンを求める。

(2) 求められたOD交通量を再び各リンクに配分すると観測リンク交通量を再現できるという条件を満足させる。あるいは計算リンク交通量が観測リンク交通量に一致するOD交通量を求める。

さて、従来より、この問題に関しては様々な研究がなされており、それらの研究成果については飯田・高山²⁾、河上・広畠・陸³⁾によってすでにレビューされている。

ここに、代表的なモデル^{4)~14)}を簡単にまとめると表1のようになる。

以上のように、従来から数多くの研究がなされているわけであるが、モデルのほとんどは経路選択率を与件として与えなければならない。さらに、広域の複数モードからなる総合交通計画に対応できるようなモデルはまだ確立されていない。これらに対して、本研究の特徴は事前情報としての経路選択率を先決するという前提条件を置くことなく、かつ複数交通モード（手段または車種）からなる交通網に対応できるような実用性の高い手法の開発を目指すところにある。

3. 最適化問題による分布、分担、配分統合モデルの定式化

本研究では以下のような考え方に基づいてモデル構築を行う。人の交通行動を表現するために、経路選択については、Wardrop原則すなわち私的交通費用の最小化原則を用いる。しかしながら、モード選択については、人の交通費用の認識に個人差が存在するため、こうした原則は必ずしも説得力を有するものではない。さらに、目的地選択に関しては、こうした原則によっては説明できない部分が大きい。これは、人の交通費用の認識においては、モード選択、目的地選択に関して、ばらつき

(dispersion) が大きいことにも起因している。これらにおける私的交通費用の最小化原則からの交通行動の偏差についてはエントロピー関数で測ることが可能である¹⁵⁾。そこで、本研究では、基本的には私的交通費用最小化原則に基づきつつ、モード選択、目的地選択については、そのばらつきを考慮する必要があるので、エントロピー最大化原理をも適用することにより、分布、分担、配分を統合した形で交通量を求めるモデルの定式化を行うものである。

著者らは上述の考え方に基づき、従来の研究成果を踏まえて、観測リンク交通量から交通モード（手段または車種）間の相互影響を考慮した上で、モード別のOD分布交通量を予測できるように次の分布、分担、配分統合モデルを提案する。

$$\text{Max} - \sum_i \sum_j \left(\sum_m \sum_r P_{ijmr} \right) \ln \left(\sum_m \sum_r P_{ijmr} \right) \dots \dots \dots \quad (3.1)$$

$$\text{s. t. } \frac{1}{T} \sum_m \sum_a \int_0^{V_a^m} S_a^m(x) dx = \bar{C} \dots \dots \dots \quad (3.2)$$

$$V_a^m = \sum_i \sum_j \sum_r P_{ijmr} \delta_{ijmr}^a T \quad \forall a, m \dots \dots \dots \quad (3.3)$$

$$\sum_i \sum_m \sum_r P_{ijmr} = \bar{P}_i \quad \forall i \dots \dots \dots \quad (3.4)$$

$$- \sum_i \sum_j \sum_m \left(\sum_r P_{ijmr} \right) \ln \left(\sum_r P_{ijmr} \right) \leq E_M \dots \dots \dots \quad (3.5)$$

$$P_{ijmr} \geq 0 \quad \forall i, j, m, r \dots \dots \dots \quad (3.6)$$

ここに、 i, j, m, r はそれぞれトリップの発生地、目的地、交通モード及び経路を表す。 P_{ijmr} は ij 間のモード m の経路 r の交通量の総トリップに対する比率、 V_a^m はモード m のリンク a の交通量である。 $S_a^m(x)$ はモード m のリンク a の一般化費用関数である。 \bar{P}_i はゾーン i の発生交通量の総発生量に対する比率、 T はトータル交通量、 E_M は交通モードに対して与えられたエントロピーの限界値である。 \bar{C} は観測リンク交通量から求められる値である。 δ_{ijmr}^a は Incidence Matrix の要素で、もし、 i から j までの交通モード m の経路 r がリンク a を含めば 1 になり、その他の場合は 0 になる。

目的関数式 (3.1) は交通分布に関するエントロピーを表現するもので、式 (3.2) はネットワーク均衡に関する式である。式 (3.5) は交通モードに対するエントロピーの制約条件である。

式 (3.2) は S_a が単種流の場合の表現であるが、ここでは交通網として車種別の仮想交通網を考え、各車種の交通流がそれぞれ均衡しており、同時に同一リンク上の交通量は車種間で相互影響を及ぼし合うと考えている。そして、本モデルを車種別交通需要推定に適用するためには、車種間の相互影響を考慮する必要があり、5章の式 (5.1), (5.2) を採用することによって多種流問題を取り扱えるように工夫している。

式 (3.2) から分かるように、このモデルは観測リンク

交通量から得られる情報を集計の形で利用する。つまり、観測リンク交通量からネットワーク総費用に相当する常数 \bar{C} を求め、それを制約条件として用いる。観測リンク交通量の情報を集計の形で利用するので、推定計算をしやすく、観測誤差の影響も受けにくいが、推定リンク交通量はかならずしも観測リンク交通量に一致しない。

一方、もし、旅行者の交通行動のユーザー均衡からのずれを重視し、上のモデルの制約条件式 (3.2) の代わりに、式 (3.7) すなわち観測リンク交通量そのものを制約条件としてモデルに取り込んで最適化問題を構築することも考えられる。この場合、個々の観測リンク交通量情報をそのまま利用するので、推定計算をしにくく、観測誤差の影響も受けやすいが、推定リンク交通量が観測リンク交通量に一致する解が得られるという利点がある。

$$\bar{V}_a^m = \sum_i \sum_j \sum_r P_{ijmr} \delta_{ijmr}^a T \quad \forall a, m \dots \dots \dots \quad (3.7)$$

ここに、 \bar{V}_a^m はモード別の観測リンク交通量である。

いま、式 (3.1) から (3.6) までの最大化問題を等価な最小化問題に書き直し、さらに、それらのラグランジュ (Lagrange) 関数を考え、適當なリンクの一般化費用関数を設定すれば、唯一の解が存在し、その解から求めるモード別（手段または車種）OD 交通量の比率は式 (3.8) で与えられる¹⁶⁾。

$$\sum_r P_{ijmr} = \bar{P}_i \frac{\exp\{-\beta(\eta, \mu) \bar{C}_{ij}\} \exp\{-\mu C_{ijm}\}}{\sum_j \exp\{-\beta(\eta, \mu) \bar{C}_{ij}\} \sum_m \exp\{-\mu C_{ijm}\}} \dots \dots \dots \quad (3.8)$$

$$\text{ここで, } \mu = \eta / \gamma, \beta(\eta, \mu) = \frac{\mu^2}{\eta + \mu}$$

$$\bar{C}_{ij} = \frac{1}{\mu} \ln \sum_m \exp\{-\mu C_{ijm}\}$$

ただし、 η と γ はそれぞれ制約条件式 (3.2) と (3.5) に対応するラグランジュ未定乗数である。

これらはモデルを最適化するために、モード別（手段または車種）OD 交通量比率が満足すべき条件である。

4. 観測リンク交通量に基づくモデルの解法

(1) 解法の基本的考え方

まず、観測リンク交通量に用いて、制約条件式 (3.2) の右辺の値 \bar{C} を求める。 \bar{C} が求められたなら、交通分布モデル式 (3.8) と残された他の最適化条件式とを同時に解くことによって、現状のモード別（手段または車種）OD 交通量比率 $\sum_r P_{ijmr}$ と交通分布モデルのパラメータ γ, η とを齊合的に求める。

しかしながら、モード別（手段または車種）OD 交通量比率 $\sum_r P_{ijmr}$ は γ と η の関数であるので、この問題は解析的には解けない。そこで、繰り返し計算法に基づいて観測リンク交通量からモード別（手段または車種）

OD交通量を求ることにする。

(2) 常数 \hat{C} の求め方

与えられたデータの種類によって、 \hat{C} の求め方は2つに分けられる。

まず、全リンクについての観測交通量が与えられる場合には次式より観測リンク交通量から \hat{C} が求められる。

$$\hat{C} = \frac{1}{T} \sum_m \sum_a \int_0^{\bar{V}_a^m} S_a^m(x) dx \quad (4.1)$$

ここに、 \bar{V}_a^m はモード別のリンク a の交通量観測値である。

一方、部分的な観測リンク交通量しか与えられない場合にはリンク特性が似ているものが同じグループになるようモード別の観測されたリンクを K 個のグループに分ける。そして、各グループについて式 (4.2) を用いて計算する。

$$\bar{C}_k^m = \frac{1}{n_k^m} \sum_{a \in L_k^m} \int_0^{\bar{V}_a^m} S_a^m(x) dx \quad (4.2)$$

ここに、 \bar{C}_k^m はモード m のグループ K におけるリンク一般化費用関数の積分の平均値である。ただし、 L_k^m はモード m のグループ K におけるリンクの集合であり、 n_k^m は L_k^m におけるリンク数である。

次に、 \hat{C} を次の式で求める。

$$\hat{C} = \frac{1}{T} \sum_m \sum_{k=1}^K P_k^m \bar{C}_k^m \quad (4.3)$$

ここに、 P_k^m はモード m のグループ K におけるリンク数の全ネットワークリンク数に対する比率である。

なお、後述の名古屋市への適用ではすべてのリンク交通量が観測されたケースについて計算を行っている。

(3) 繰り返し計算法のアルゴリズム

構築された最適化問題は次のような繰り返し計算法のアルゴリズムを用いて解くものとする。

Step 1：交通モードに関するエントロピーの限界値 E_M を与える。

Step 2： $k = 1$ (ただし、 k はパラメータを求めるための繰り返し回数) とおき、パラメータ γ と η の初期値を与える。

Step 3： $n = 1$ とおき、リンク交通量 $V_a^{m(1)}$ と OD 交通量の比率の初期値 $\sum_r P_{ijmr}^{(1)}$ を与える。

Step 4：モード別（手段または車種）の最短経路を探すことにより最短経路の費用 $|C_{ijm}^n|$ を求める。ここで、車種別リンク所要費用の計算にあたっては車種間の相互作用を考慮する。

Step 5： ij 間のモード別（手段または車種）OD 交通量の比率を求める。すなわち、Step 4 で求められた最短経路の費用 $|C_{ijm}^n|$ と交通分布モデル (3.8) とを用いて、繰り返し計算 Step n における仮の OD 交通量の比率 $\sum_r P_{ijmr}^{(n)}$ を

求める。

Step 6：交通量を配分する。すなわち、 $T \sum_r Q_{ijmr}^{(n)}$ を最短経路に配分した上で、繰り返し計算 Step n における仮リンク交通量 $W_a^{m(n)}$ を求める。

Step 7：次の一次元の最適化問題を解き、最適 Step 長 $\alpha^{(n)}$ を決定する。

$$\min_{0 \leq \alpha \leq 1} [(1-\alpha)V^{(n)} + \alpha W^{(n)}]$$

$$+ g[(1-\alpha)P^{(n)} + \alpha Q^{(n)}]$$

ここに、 $f(\cdot)$ と $g(\cdot)$ はそれぞれラグランジエ関数のリンク交通量に関する関数部分と OD 交通量に関する関数部分を表す。

Step 8：Step 7 で与えられた最適 Step 長 $\alpha^{(n)}$ を用いて次式でリンク交通量 $V_a^{m(n)}$ とモード別 OD 交通量の比率 $\sum_r P_{ijmr}^{(n)}$ を更新する。

$$V_a^{(n+1)} = V_a^{(n)} + \alpha^{(n)}(W_a^{(n)} - V_a^{(n)})$$

$$P_{ijm}^{(n+1)} = P_{ijm}^{(n)} + \alpha^{(n)}(Q_{ijm}^{(n)} - P_{ijm}^{(n)})$$

Step 9：収束判断：次の収束規準を満足すれば、Step 10 にいく。さもなくば、 $n = n + 1$ とおいて Step 4 に戻る。

$$S = \frac{\sqrt{\sum_i \sum_j (P_{ijm}^{(n+1)} - P_{ijm}^{(n)})^2}}{\sum_i \sum_j P_{ijm}^{(n)}} \leq \epsilon \quad (4.4)$$

ここに、 ϵ はあらかじめ与えられた許容誤差である。

Step 10： γ と η に関する連立方程式を解くことによって、パラメータ γ と η を更新する。誤差規準を満足しなければ、Step 4 に戻る。満足すれば、Step 11 にいく。

Step 11：求められた OD 交通量が式 (4.4) の収束条件を満足すれば、計算終了。そうでなければ、新たに $E_M = E'_M$ として Step 2 に戻る。

5. 名古屋市道路交通推計への適用

(1) 入力データ及びネットワークの概要

著者らが提案したモデルの有効性と実用性を確かめるために、それを名古屋市の簡略化した道路ネットワークに適用し、車種別の現況 OD 交通量と交通分布モデルのパラメータを同時に推定することにした。なお、本モデルの特徴の一つは交通モード間の競合関係を反映できるというところにあるので、モデルの有効性と実用性を検討するために、一般性を失うことなく、車種 m を 2 にし、道路上に混在している大型車と普通車との 2 車種を推定対象にした。

推定計算に際しては昭和 60 年に実施された道路交通センサス自動車起終点調査車種別 OD 交通量と車種別リンク交通量データを利用している。車種ごとの OD 交通量とリンク交通量は次のように集計した。つまり、

乗用車＋小形貨物車＝普通車、普通貨物車＝大型車としている。さらに、調査におけるリンク交通量のほとんどは12時間交通量であるので、平均昼夜率を用いて24時間交通量を求めた。各リンクの車種ごとの初期所要時間は区間延長を仮定した普通車の自由走行における速度60km/hと大型車の自由走行における速度50km/hで割ったものにした。各リンクの普通車に関する容量は道路構造令に従って、車線数より計算した。大型車の容量については普通車交通容量の半分と仮定した。なお、大型車の平均混入率は一般国道16.3%，主要地方道(県道)16.3%，主要地方道(市道)18.3%，一般県道13.8%，一般市道8.6%となっている。調査時点では名古屋市の発生交通量の状況は次の通りである。乗用車は67.4%，バスは1.4%，小型貨物車は26.0%，普通貨物車は5.2%となっている。

ネットワーク作成にあたっては既存データを利用するため昭和60年の調査時点に分けられた中ゾーンを用いた。名古屋市は16ゾーンに分け、各ゾーンにセントロイドを設けた。また、推定計算に用いる簡略化された対象道路ネットワークはリンク交通量の観測されている主要幹線道路と一部の幹線道路から構成されている。ここでは、主要幹線道路以下の道路は配分対象道路ネットワークに含まれていないため、ゾーン内々交通量は主要幹線道路以外の道路を利用していると考え、配分対象から外している。つまり、推定対象とする未知OD交通量の総数は $2 \times n \times (n-1) = 480$ となっている。そのネットワークの概略図は図-1に示す通りである。

また、モデル化した対象ネットワークの基本的な指標は表-2に示す通りである。

本研究のモデルを用いて計算する場合の入力データは次の2種類である。

- ① 車種別の観測リンク交通量
- ② 各ゾーンの発生交通量

そして、求める結果は次の2種類である。

- ① 現状の車種別OD交通量
- ② 交通分布モデルのパラメータ γ と η

(2) リンク一般化費用関数の設定

今回の計算では普通車と大型車の相互影響を考慮できるようにするためにリンク一般化費用関数を次のように設定した¹⁷⁾。

$$t_{ar} = t_{ar}^0 \left[1.0 + \alpha_r \left(\frac{x_{ar} + \zeta x_{ac}}{C_{ar}} \right)^{\beta_r} \right] \forall a \quad \dots \dots \dots \quad (5.1)$$

$$t_{ac} = t_{ac}^0 \left[1.0 + \alpha_c \left(\frac{x_{ac} + \xi x_{ar}}{C_{ac}} \right)^{\beta_c} \right] \forall a \quad \dots \dots \dots \quad (5.2)$$

ここに、式(5.1)は大型車の一般化費用関数で、式(5.2)は普通車の一般化費用関数である。 ζ と ξ はそれぞれ大型車に対する普通車の影響度合と普通車に対する大型車の影響度合を示すパラメータである。 t_{ar} と t_{ac} はそれ

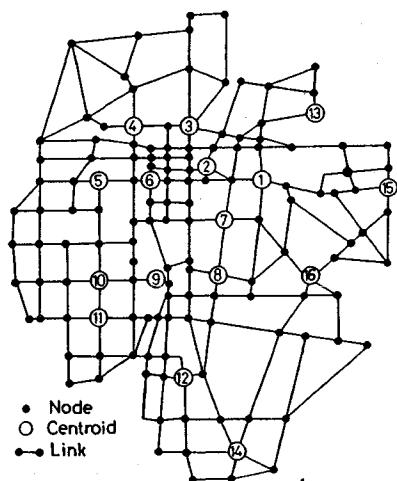


図-1 簡略化した名古屋市道路ネットワーク

表-2 名古屋市の道路ネットワーク

指標 車種	ノード 数	リンク 数	セント ロイド	未知OD ペア数
普通車	154	252	16	240
大型車	154	252	16	240

ぞれ大型車と普通車のリンク所要時間で、 t_{ar}^0 と t_{ac}^0 はそれぞれ大型車と普通車のリンクの自由走行時の所要時間である。 x_{ar} と x_{ac} はそれぞれ大型車と普通車のリンク交通量で、 C_{ar} と C_{ac} はそれぞれ大型車と普通車のリンク容量である。また、パラメータは河上ら¹⁸⁾の分析結果を参考にして、乗用車については $\alpha_c=0.15$ 、 $\beta_c=4.0$ 、大型車については $\alpha_r=0.06$ 、 $\beta_r=4.0$ とした。

このようにして、普通車と大型車との相互影響を反映することができ、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。

(3) E_M および γ , η の設定の仕方

前述の繰り返し計算法のアルゴリズムを適用するには、交通モードに関するエントロピーの限界値 E_M およびパラメータ γ , η (ラグランジェの未定乗数)の初期値を与える必要がある。 E_M の適切な初期値の範囲は道路ネットワークの規模つまり未知OD交通量の個数によって決められるものである。 E_M が大きくなればなるほど、OD交通量の分布は不均等分布から均等分布に近付く。その下限は零であり、上限は $\ln n \times (n-1) = \ln 480 = 6.174$ である。このように E_M の値の上限、下限値を決めることができる。そこで、繰り返し計算においては、 E_M の値をその上、下限の間で逐次変えながら、最も起こり易いOD交通量の分布パターンを求めるこにした。

また、推定計算にあたって、交通分布モデルのパラメー

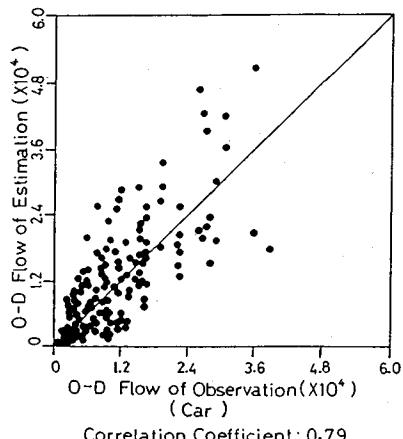


図-2 普通車推定 OD 交通量の実測値との適合度

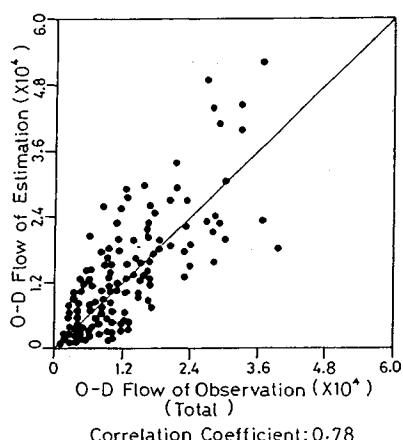


図-3 全車種推定 OD 交通量の実測値との適合度

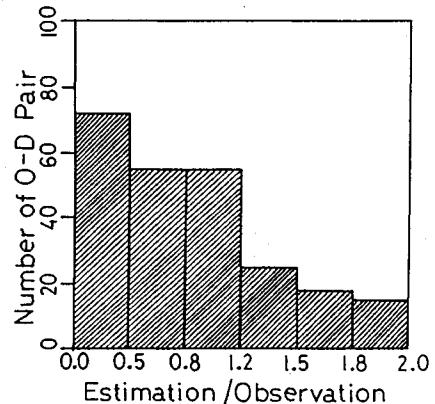


図-4 普通車の OD 交通量の推定値と実測値の比とそれらの度数(全 OD ペアについて)

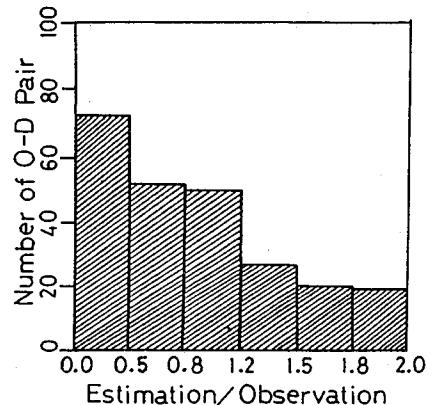


図-5 全車種の OD 交通量の推定値と実測値の比とそれらの度数(全 OD ペアについて)

タの初期値をも与えなければならない。その与え方については次のように考える。すなわち、それらのパラメータはラグランジエ関数の未定乗数であるので、物理的な意義は分布、分担段階における UE 均衡とエントロピー最大化とのバランスを意味するものである。もし、 γ の値が 0 であれば、得られた解は UE 均衡の解になる。逆に、もし、 η の値が 0 であれば、得られた解は分布のエントロピーを最大化する状態に対応する解である。今回の計算ではその値を経験的に与えることにした。つまり、その値を調整しながら、安定解に近付くようにした。

(4) 計算結果とその検討

本モデルを用いて車種別の観測リンク交通量から車種別の OD 交通量と交通分布モデルのパラメータとを同時推定計算によって求めた。求められた車種別 OD 交通量と車種別 OD 交通量の観測値との適合度は図-2、図-3 に示す通りである。図-2 は普通車の結果であり、図-3 は全車種の結果である。

全体的に見れば、普通車と全車種の推定値はいずれも

よい適合度で推計されている。計算の結果は、与えられた発生交通量の保存条件を満足している。また、OD 交通量の実測値と推定値との相関係数は普通車、大型車、全車種の順で、それぞれ $r=0.79, 0.58, 0.78$ であり、普通車については良好な推定値が得られていると言える。大型車 OD 交通量の推定値と実測値との誤差は普通車のそれに比べると大きいが、それは一般化費用関数の定式化において種々考えられる影響要因が十分に考慮されていないことと、大型車の OD 交通量がより小さいこと（これについて後で分析する）によると考えられる。

次に、OD 交通量の推定精度と推定結果の特徴を分析するために、普通車と全車種 OD 交通量の推定値とそれらの実測値の比を求め、さらに、その比を 6 ランクに分け、次の図-4、図-5、図-6 と図-7 を作成した。

これらの図の横軸は OD 交通量の推定値とその実測値の比で、0.5 以下、0.5-0.8、0.8-1.2、1.2-1.5、1.5-1.8、1.8 以上の 6 ランクに分けてある。縦軸は OD ペアの数である。これらの図で以下の 2 点について分析すること

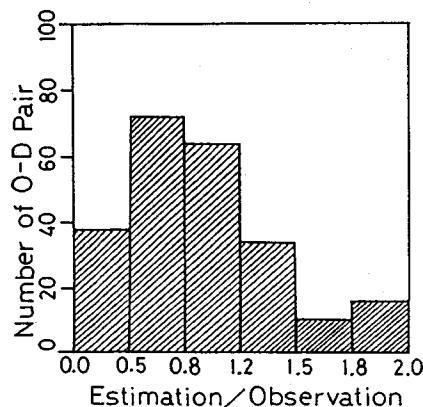


図-6 普通車のOD交通量の推定値と実測値の比とそれらの度数(部分ODペアについて)

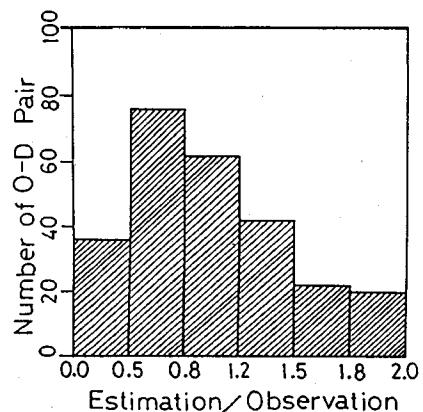


図-7 全車種のOD交通量の推定値と実測値の比とそれらの度数(部分ODペアについて)

ができる。

一つは推定精度の異なるODペアの分布であり、もう一つは図-4、図-5と図-6、図-7を比較分析することを通じて、OD交通量の大きさと推定精度の関係を明らかにすることができます。

まず、図-4を見ると、OD交通量の推定値とその実測値との比は0.5以上1.5以下のODペアが70%ぐらいを占めていることが分かる。つまり、このような大規模な都市道路ネットワークにおいても一定の信頼度でODマトリックスを求めることができると考えられる。

さらに、OD交通量の大きさと推定精度との関係を調べるために、OD交通量の大きいODペアだけについて同じようにその比を求め、図-6、図-7を作成した。

図-6、図-7に示すのは交通量が6000台を超えるODペアの推定OD交通量とOD交通量の実測値との比の図である。これを見れば分かるように図-4、図-5と違って比が1.0の周辺に集中しており推定精度の高いODペアが多くなっている。すなわち交通量の多いODペアの適合度は交通量の小さいODペアのそれよりも

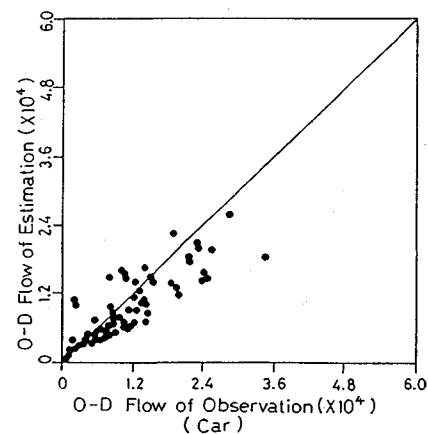


図-8 最尤法モデルによる推定OD交通量の実測値との適合度

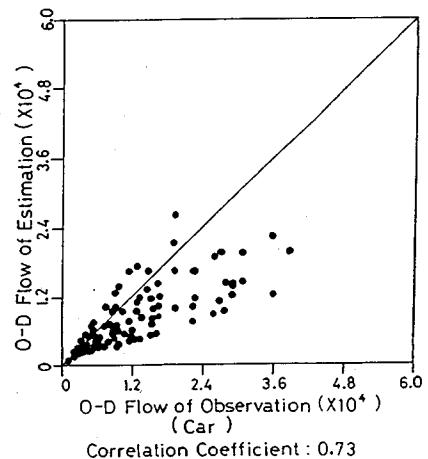


図-9 残差平方和最小化モデルによる推定OD交通量の実測値との適合度

高い。一般的にいえば、OD交通量が小さいほど、目的関数に対する影響が次第に弱くなることによると考えられる。このように、総交通量に対する比率の大きいOD交通量はより精度の高い推定値が得られたことになる。これらの推定結果より、モデルの有効性と実用性は十分あると考えられる。

なお、同時に求められたモデルのパラメータはそれぞれ $\gamma = 0.091$, $\eta = 0.134$ であった。また、 E_M の値は4.64であった。

(5) 既存モデルとの比較検討

提案したモデルと既存モデルの推定精度とを比較するために、既存の最尤法モデル¹⁹⁾と残差平方和最小化モデル²⁰⁾をも名古屋市へ適用し、推定計算を行った。最尤法モデルと残差平方和最小化モデルを用いて求められた車種別OD交通量と車種別OD交通量の観測値との適合度は図-8、図-9に示す通りである。図-8は最尤法の普通車の結果であり、図-9は残差平方和最小化モ

表-3 推計 OD 交通量と実測値との相関係数

統計指標 モデル	相関係数	%RMSE
最尤法モデル	0.73 0.47 0.75	108 306 99
残差平方和最小化 モデル（ケースA）	0.82 0.79 0.83	70 122 66
残差平方和最小化 モデル（ケースB）	0.66 0.56 0.68	80 180 76
提案モデル	0.79 0.58 0.78	57 205 58

デルの普通車の結果である。また、各モデルを用いて求められた普通車、大型車と全車種のOD交通量とのその観測値との適合度を相関係数と%RMSEで示すと表-3のようになっている。

なお、残差平方和最小化モデルの結果で、ケースAはOD交通量に関する完全な事前情報があると仮定した場合で、ケースBはOD交通量に関する事前情報が十分でないと仮定した場合である。

これらの表の値は3行ならんでいるが、上段の値は普通車で、中央の値は大型車で、下段の値は全車種である。

表-3に示す推定OD交通量と観測値との相関係数を見ると、モデルの推定精度は残差平方和最小化モデル（ケースA）、提案モデル、最尤法モデルと残差平方和最小化モデル（ケースB）の順である。表-3からも分かるように、同じ残差平方和最小化モデルであってもケースAとケースBの推定精度は大きく異なっている。すなわち、残差平方和最小化モデルの推定精度はOD交通量の事前情報に大きく左右される。今回の計算ではケースAが推定時点のOD分布交通量に関する情報を完全に知っているとして、目的地選択率を観測OD交通量を用いて計算した。OD交通量の事前情報が完全であるので、推定精度がもっとも高い。逆に、ケースBはOD交通量の事前情報があまりないケースとして、目的地選択確率を観測OD交通量に(0~1.0)の間のランダム係数を乗じたものをOD交通量の事前情報と考えた。このようにして求められたOD交通量は事前情報が推定時点のOD交通量の分布パターンと異なるので、目的地選択確率が異なる。このような条件下で、残差平方和最小化モデルの推定精度はかなり悪くなっている。

提案モデルは車種間の相互影響を反映することができるので、よりよい推定値が得られた。同じ道路上に混在している車が互いに影響するので、その影響をモデルを取り込んでおけば、交通実態をより忠実に表現すること

が期待できる。

6. 複数交通手段を含む交通体系のOD交通量予測に関する考察

本研究では、複数モード（手段または車種）を考慮できるようなモデルを構築し、さらに、名古屋市道路ネットワークに提案したモデルを適用し、車種別OD交通量を推定した。ところで、ここでは鉄道や専用軌道をもつ路面電車や専用バスレーンを走っているバスなどについて推定計算を行っていない。しかし、都市全体の交通需要を解析するために、あらゆる交通モードを統合的に分析し、交通現況を解析し、将来の需要を予測することが社会的な要請である。そこで、次にこのような場合を想定して、本モデルの適用性について検討する。

鉄道やバスなどのマストラに提案したモデルを適用する際には、次の2ケースが考えられる。

一つは鉄道のようなマストラシステムである。このようなシステムの特徴は自動車ネットワークとまったく分離、独立したものとなっているところにある。この場合、鉄道のODペア間所要時間は他の交通手段と独立で一定値 C_{ijm} ($m = \text{rail}$) であるように設定するだけで、前の推定計算と全く同じようにすればよい。

もう一つの場合は専用軌道をもつ路面電車や専用バスレーンを走っているバスを含むバスシステムである。この際には、バスのリンク走行費用関数として式(5.1)の大型車のリンク走行費用関数の中で、待ち時間、乗り換え時間などの要因を考慮できるように設定したものを使いいればよい。リンク走行費用関数さえ求められれば、このような場合にも交通モードの総数 m を増やすだけで、本モデルを直接応用することができると考えられる。

なお、観測可能交通量は自動車台数と鉄道乗車人員とすれば、自動車台数の予測は観測値をそのまま用いればよいが、パーソントリップを予測する場合、乗用車、バスなどの平均乗車人員を別途調査により求めておき、これらの値を用いて、自動車交通量からパーソントリップを推定する必要がある。物流の予測についてはさらに検討する必要がある。

7. おわりに

本論文では、まず、これまでに開発してきた観測リンク交通量に基づくOD分布交通量の推計手法を分類整理した。次に、従来の研究成果を踏まえ、交通実態をより正確に表現できると考えられる新しい交通需要予測モデルを提案した。すなわち、本研究では分布、分担、配分統合モデルという形で目的地選択、モード選択、経路選択を齊合的に扱える最適化問題を定式化した。そして、最適化モデルからモード別（手段または車種）の分布交通量の比率を与える交通分布モデルを導いた。さら

に、観測リンク交通量データを用いて、提案したモデルのパラメータとモード別（手段または車種）OD交通量比率を同時に推定する手法を提案した。従来のモデルと異なった本手法の特徴としては、逆問題に関して、複数交通モード（手段または車種）を考慮している点および経路選択率が内生化された点があげられる。最後に、名古屋市道路ネットワークに提案したモデルを適用し、観測リンク交通量から車種別のOD交通量を求めた。この結果、提案したモデルに基づいて観測リンク交通量から車種別OD交通量をより高い精度で得ることができた。計算結果からも分かるように、提案したモデルは有効性と実用性が十分あると考えられる。さらに、推定結果により、OD交通量の大きさと推定精度との関係も検討した。交通量の大きいODペアがより高い精度で推定されるという特徴があることがわかった。さらに、既存モデルの推定精度と比較し、提案したモデルがより優れていることがわかった。

なお、今後の課題としては、さらに、鉄道も含めた複数交通手段を同時に扱って大都市圏の交通現況を解析することに適用し、モデルの汎用性と推定精度をさらに向上するように研究する必要がある。

参考文献

- 1) Tamin, O.Z. & Willumsen, L.G. : Transport Demand Model Estimation from Traffic Counts, Transportation 16, pp.3~26, 1989.
- 2) 飯田恭敬・高山純一：リンクフローによるOD交通量推計モデル、第18回土木計画学講習会テキスト、1987.
- 3) 河上省吾・広畠康裕・陸化普：複数交通手段を考慮した観測リンク交通量に基づくOD交通量推定法、土木計画学研究・論文集、No.8, pp.57~64, 1990年.
- 4) Van Zuylen, Henk, J., Willumsen Luis G. : The Most Likely Trip Matrix Estimated from Traffic Counts, Trans. Res-B, Vol.14 B, pp.281~293, 1980.
- 5) Leblanc, L.J., Farhangian, K. : Selection of a Trip Table Which Reproduces Observed Link Flows, Trans. Res.-B, Vol.16B, No.2, pp.83~89, 1982.
- 6) 同前掲2)
- 7) 井上博司：シャドウ・コスト概念による観測交通量からのOD交通量推計、土木学会論文集、第401号／IV-10, pp.41~50, 1989.
- 8) Maud Brenninger-Gothe etc : Estimating Origin-Destination Matrices from Traffic Counts Using Multiobjective Programming Formulations, Trans. Res.-B, Vol.23B, No.4, pp.257~269, 1989.
- 9) Michael G.H. Bell : The Estimation of Origion-Destination Matrices by Constrained Generalised Least Squares, Trans. Res.-B, Vol.25B, No.1, pp.13~22 1991.
- 10) Willumsen Luis G. : Simplified Transport Models Based on Traffic Counts, Transportation 10, pp.257~278, 1981.
- 11) Holm, J., Jensen, T. & Nielson, S.K. et al : Calibrating Traffic Models on Traffic Census Results only, Traffic Engineering and Control, Vol.17, No.4, pp.137~140, 1976.
- 12) Carey, Malachy, Hendrickson, Chris & Siddharthan, Krishnaswami : A method for Direct Estimation of Origin/Destination Trip Matrices, Transportation Science, Vol.15, No.1, pp.32~49, 1981.
- 13) Fisk, C.S. & Boyce, D.E. : A Note on Trip Matrix Estimation from Link Traffic Count Data, Trans. Res 17B, pp.245~250, 1983.
- 14) 同前掲3)
- 15) Boyce, D.E. et al : Implementation and Computational Issues for Combined Models of Location, Destination, Mode, and Route choice, Environmentand Planning A, Volume 15, pp.1219~1230, 1983.
- 16) 同前掲3)
- 17) 陸化普・徐志敏・河上省吾：車種間の相互作用を考慮した車種別リンクコスト関数パラメータの同定に関する実証的な研究、第45回土木学会年次大会講演概要集、pp.472~473, 1990.
- 18) 河上省吾・広畠康裕・徐志敏：大型車と普通車を分離した車種別均衡交通量配分法に関する検討、土木計画学研究・論文集、No.7, pp.243~250, 1989年.
- 19) Holm, J., Jensen, T. & Nielson, S.K. et al : Calibrating Traffic Models on Traffic Census Results only, Traffic Engineering and Control, Vol.17, No.4, pp.137~140, 1976.
- 20) 同前掲2)

(1991.10.3受付)

THE DISTRIBUTION DEMAND MODEL AND ITS APPLICATION BASED ON TRAFFIC COUNTS CONSIDERING MULTI-MODES AND MULTI-VEHICLE-TYPES

Shogo KAWAKAMI, Huapu LU and Yasuhiro HIROBATA

In this study, a new distribution demand estimation model in the form of combined distribution, modal split and traffic assignment are proposed. The models take into account the traffic modes and types and, the choice rates on each link by all OD traffic volumes are internalized. The O-D trip matrix by different traffic modes can be estimated by solving the proposed model for given traffic link counts and traffic volumes generated from each zone. From the optimal conditions of the proposed model, a distribution demand model is derived. Finally the proposed model is applied to Nagoya metropolitan road traffic network to research the feasibility and efficiency. The comparison of the proposed model with the existing model is also carried. The estimated results show that the proposed model is feasible and the accurate results can be obtained by using this model.