

大都市圏道路網を対象とした拡張型利用者均衡配分モデルの開発とその実用化*

Development of User Equilibrium Assignment Models for An Urban Road Network Including Expressways

松井 寛**・藤田素弘***

By Hiroshi Matsui** and Motohiro Fujita***

1. はじめに

道路網上の交通ネットワークフロー分析は一般に交通量配分問題として知られ、過去多くの研究者の興味を引き付け、古くから研究されてきた分野である。いわゆる交通量配分問題は、現在広く用いられている標準的な交通需要予測手法である四段階推定法の第4段階に位置付けられるもので、とくに道路網の整備計画立案のためには不可欠な分析過程であり、今日までに多くの実用的な配分モデルが提案されてきた。なかでも分割配分法(Incremental assignment method)は、わが国においては最も実用的な配分モデルとして実務分野で広く利用されている。

分割配分法の利点は、その分かり易さと融通性にあり、長年にわたる経験の積み重ねによって改良が加えられ、実務上期待される精度(ただしリンク交通量の再現性に限った話であるが)に応えられる代表的モデルと評価されている。しかしながら、分割配分法に限らず今日までの伝統的な配分手法の多くが元来ヒューリスティックな方法であって、計算実行者の自由裁量(職人芸)に任されるところが多いから、仮に100人の人がいれば100通りの配分結果が得られるといった具合に、必ずしも客観性や信頼性をもつものではない。M.E. Campbell¹⁾はいみじくも、"traffic assignment is considered to be more of an art than a science"と表現したように

(だからこそ魅力的なのかもしれないが)、論理性、合理性と言う観点からみれば従来の配分モデルには依然として問題点が多い。

交通量配分の主たる目的は、交通網計画作成のための基礎情報を提供することであり、交通網のサービス水準を知ることによって、交通網の計画や評価を行うことである。しかしながら、時とともに交通量配分の目的が単なる交通網計画にとどまらず、TDMやITSなどの各種ソフト的な交通政策や交通情報提供に伴う影響予測の評価分析にまで広がってくると、人間の交通行動原理に基づく、より論理的で精緻な配分理論の構築が要求されてくる。また、最近では公共事業の効率性と透明性を確保する意味から、費用対効果分析に基づく客観的な事業評価が実施されるようになり、道路整備事業に伴う時間短縮効果の計測や、環境影響の事前評価として、道路交通流に起因する環境負荷量(騒音や排出ガス量等)の計測が求められるようになったことから、配分計算のアウトプットとして、リンク交通量に加えて旅行時間や旅行速度をも正確に予測できるような配分モデルが要請されるようになった。このような社会的要請に対応できる配分モデルとして、近年利用者均衡配分モデルが注目されている。

いわゆる交通均衡問題の研究は1952年に発表されたWardrop均衡²⁾に始まるが、その後M.Beckmannら³⁾やN.O.Jorgensen⁴⁾によって数理最適化問題として定式化されて以降、順次理論の拡大と精緻化が図られ、またFrank-Wolfeの分解定理の適用によって、大規模ネットワークにも適用できるようになり、近年実用的な配分手法として大きく進展した。これら最近の交通均衡理論全般については文献(5)を参照されたい。

ところで大都市圏内の広域道路網を対象とする交通量配分問題を考えたとき、対象道路網の中に有料

*キーワード：配分交通

**フェロー、工博、名古屋工業大学工学部社会開発工学科

・名古屋市中区御器所町、TEL 052-735-5481

E-mail : matsui@doboku2.ace.nitech.ac.jp

***正会員、工博、名古屋工業大学都市循環システム工学専攻

E-mail : fujita@doboku2.ace.nitech.ac.jp

制をとる高速道路が含まれることが通例である。たとえば首都高速道路はすでに首都圏全体の約 2 割の道路交通を担っており、都市高速道路の果たす役割が大きくなっている。ところが、利用者均衡配分では通常旅行時間という単一尺度を通して均衡状態が表現されているから、たとえば高速道路のように有料制をとる道路が配分対象道路網に含まれていると、時間のほかに通行料金というコスト要因が加わるため、このままの形で利用者均衡モデルを適用することはできない。一般化交通費用を用いて均衡配分する方法も考えられるが、このときに用いられる時間価値には明らかに個人差が存在し、仮にこの影響を無視すれば、非現実的な配分結果をもたらす可能性が大きい。一方、経路評価値を確率的にとらえた確率的利用者均衡配分モデルの適用も考えられるが、しかしこの方法も高速道路と一般道路の利用経路選択をランダム性のみで表現するには無理がある。そこで本論文では、このような高速道路を含むより一般的な道路網にも適用可能なモデルとして、高速道路転換率を内生化した拡張型利用者均衡配分モデルを開発し、適用計算例を通してモデルの精度検証を行うことが第一の目的である。

交通量配分はいわば総合技術であり、利用者均衡原理を導入しただけで配分精度が即向上するというものでもない。同時に、配分理論に付随して必要となる転換率やリンクコスト関数、実態に即して合理的に設定することもきわめて重要である。これらはいずれも配分精度に大きな影響をもたらすにもかかわらず、従来実証面から必ずしも十分に検討されてこなかった。本論文ではこれら配分精度に関わる一連の課題についても改めて考察することが第二の目的である。

本文の構成はつぎのとおりである。まず 2 章では交通量配分の最近の適用事例についてレビューする。3 章では高速道路転換率を内生化した利用者均衡モデルの定式化と解法について説明する。さらに、この高速道路転換率を内生化したモデルの展開として、4 章では高速道路転換率を内生化した確率的利用者均衡配分モデル、5 章では高速道路転換率を内生化した時間帯別利用者均衡配分モデルを開発しその解法を示す。6 章ではリンクコスト関数の設定方法を示し、パラメーターの全国の地域比較から本関

数の妥当性を検討する。7 章では高速道路転換率モデルの設定方法について述べる。8 章では、3 章で開発した利用者均衡モデルを名古屋都市圏ネットワークへ適用し、従来の分割配分モデルとも比較しながら、利用者均衡モデルの実用可能性を検証する。最後に 9 章では残された課題について整理する。

2. 最近の交通量配分の適用事例

Wardrop 均衡に始まる交通均衡問題は、理論の拡張が進められる一方、実務分野への実用化を目的とした適用事例の研究も行われるようになった。表-1 と表-2 は、国内の最近の研究論文から実際道路網に適用した配分計算事例(一部分割配分を含む)を抜粋したものである。

表-1 は日単位の配分事例であるが、1995 年以降高速道路を含む道路網への適用が増加している。ネットワーク規模では近年リンク数、ノード数とも増加傾向にあり、配分ネットワークを都市圏レベルで構築する方向にあるといえよう。用いられるリンクコスト関数は BPR 型関数である。なかでもオランダの道路交通データに基づいてパラメータを設定した修正 BPR 関数を用いる事例が多い。ただし文献(11),(14),(15)は国内のデータを使って設定された関数を使用している。

配分精度を実績値との相関係数でみると、0.5-0.9 と幅がある。ネットワークやセントロイドの設定条件、使用する OD データ、適用年次、需要変動型か固定型かのモデルの相違などの違いがあり、一概にモデルの比較はできない。

表-2 は時間帯別の配分事例である。時間帯別配分は前後の時間帯の残留交通量を修正することに特色があるが、修正なしと修正ありで比較した適用事例のうち、文献(18),(20),(25)では、修正なしのモデルではピーク時に過大推計の傾向があるとしており、残留交通量を考慮する必要性を実証している。

利用者均衡配分モデルの精度を検証するためには、リンクコスト関数、転換率モデル等を実データに基づいて設定するとともに、同一条件下で配分比較を行うことが必要であり、また幾つかの実際道路網を通して検証することが重要であろう。本論文では、その手始めとして、名古屋都市圏ネットワークへの

表-1 日単位の交通量配分モデルの適用事例

文献 番号・ 年度	著者	相関係数 (リンク交通 量)	推定値 (微分回 帰式の 係数)	サン プル 数	適 用 年 度	対 象 地 域	リ ン ク 数	ノ ード 数	リンクバ ランス 関数	高 速 の 有 無	転 換 率	時 間 価 値 (円/分)	配分種類	備考
6) 1981	河上・ 住田	-	-	-	s46	名古屋 圏	-	-	q-v式	無	-	-	分布・分担 配分結合の 分割配分	OD交通量の予測精度0.92
7) 1982	加藤・ 宮城他	-	-	-	s46	岐阜 圏	550	172	修正BPR	-	-	-	分布 配分 同時均衡	OD交通量の検証結果は0.90
8) 1986	河上・ 溝上	0.66-0.69	-	-	s56	T市	278	88	修正BPR	無	-	-	分担配分 同時均衡	自動車とバスの相互干渉考慮
9) 1987	佐々木 朝倉	0.94-0.95	ほぼ 45°	120	s55	京阪 奈園	153	92	修正BPR: t_0 はセンサス	無	-	-	分布 配分 同時均衡	最適道路網計画が上位,同時配 分が下位問題とする2level計画
10) 1988	松井・ 藤田	従来q-v 0.64 提案q-v 0.76	従来は 45°未 満	50	s56	豊田 圏	278	88	設定した q-v式	無	-	-	分割配分	日交通容量の合理的設定と 実配分での検証
11) 1989	溝上・ 松井他	リンク交通量 0.64, OD間所 要時間0.83	ほぼ 45°	50	s56	豊田 圏	278	88	BPR関数 ($\alpha=0.96$, $\beta=1.2$)	無	-	-	需要固定 均衡	日交通量配分のための リンクコストの設定
12) 1993	溝上・ 松井	利用者均衡 0.50 確率均衡0.59	45° 未 満	50	s56	豊田 圏	278	88	-	無	-	-	確率均衡	観測リンクからの確率均衡ハ ムータの逆推定,最適値 $\theta=$ 0.0124 ネットの集約化が問題
13) 1995	河上・ 石他	0.62	-	-	s56	名古屋 圏	-	-	BPR関数	有	無	139.97円	分担 配分 同時均衡	名古屋市鉄道計画の評価, 車 バス 鉄道で分担, 手段選択のみ需要変動.
14) 1996	柿本・ 溝上他	容量同時推定 0.82 容量設定0.72	ほぼ 45°	-	s60	熊本 圏	2446	999	BPR関数	-	-	-	日容量 配 分同時均 衡	土地利用-交通モデルの結 合手法の提案
15) 1998	宮下・ 朝倉他	高速0.89-0.90 一般0.79-0.80	ほぼ 45°	121	h3	四国 全域	1055	697	BPR関数 ($\alpha=1, \beta=3$)	有	無	全体30.01 円:業務系 29.45円, それ以外 39.85円	分布・配分 同時, 需要 固定均衡	観測値から時間価値の逆推 定, 高速道が一般道よりも精 度高い
16) 1998	尾関・ 河上	高速利用トリップ 0.51 車利用トリップ 0.90	ほぼ 45°	-	h3	名古屋 圏	-	-	-	有	有	139.97 円 名古屋 市内内の みのため	分担 配分 同時均衡	平面-高速と自動車-マスト アのネステッド構造
17) 1998	三輪・ 森川	高速0.52 一般0.55	-	-	h3	名古屋 圏	549	289	修正BPR	有	有	43.70円	オンランプ 高 速 一般道 で需要変動	ロジック型高速オンランプ選 択 高速転換率の併用

表-2 時間帯別交通量配分モデルの適用事例

論文 年度	著者	修正前 リンク交 通量の相 関係数	修正後 リンク交 通量の相 関係数	推定値の ひずみ	サン プル 数	適 用 年 度	対 象 地 域	リ ン ク 数	ノ ード 数	リンクコ スト関数	高 速 の 有 無	転 換 率	時 間 価 値	均衡配分 種類	備考
18) 1988	松井・ 藤田他	7時 0.68 日 0.77	7時 0.72 日 0.77	修正なし 7時は過 大	7時: 42 日: 50	s56	豊田 圏	278	88	修正 BPR: t_0 はセンサス	無	-	-	OD修正 法	時間帯別均衡配分の定式 化, オフピーク時はRMS誤差 のみ検証, 修正ありなしで 大きく変化なし
19) 1989	藤田・ 松井他	-	7時 0.78 8時 0.72 9時 0.67	-	56	s56	豊田 圏	528	171	修正 BPR: t_0 はセンサス	無	-	-	均衡リン ク修正法	リンク単位で修正する均 衡リンク修正法の定式化
20) 1990	藤田・ 松井他	7時 0.68 日 0.77	7時 0.70 日 0.72	修正なし 7時は過 大	7時: 42 日: 50	s56	豊田 圏	278	88	推計した q-v式	無	-	-	簡易OD 修正法: 分割配分	時間帯別分割配分法, 簡 易OD修正法の提案
21) 1992	松井・ 藤田	OD修正: RMS誤差 7時 367 8時 396 9時 278	配分同時 RMS誤差 7時 393 8時 371 9時 248	-	42	s56	豊田 圏	278	88	修正BP R: t_0 はセ ンサスより 推定	無	-	-	通勤時刻 分布 配 分同時モ デル	通勤時刻分布 配分同時 モデルの定式化, 検証は OD修正法との比較
22) 1993	高山・ 亀谷他	7時 0.81 8時 0.73 9時 0.80	7時 0.80 8時 0.74 9時 0.80	なし	61	s59	金沢 圏	542	図あり	-	無	-	-	簡易OD 修正法	信号交差点の考慮, 対象 ネットワークが中心部のた め修正の影響小
23) 1996	宮城・ 浅井他	-	7時 0.88	なし	34	h3	岐阜 市	-	図あり	-	無	-	-	半動的	フレックスタイム制導入に よる混雑緩和効果あり
24) 1996	佐藤・ 松本他	-	均衡法 8時 0.96	-	124	s63	新潟 圏	2430	819	q-v式を 基本	-	-	-	簡易OD修 正 均衡	TRIPSを使用, 通勤時刻 選択モデルで通勤目的OD
25) 1998	斎藤・ 田原他	7時 0.70	7時 0.74	修正なし は過大	-	h7	西濃 圏	-	-	-	-	-	-	簡易OD 修正法	時差出勤などピーク交通 量の標準化の検討

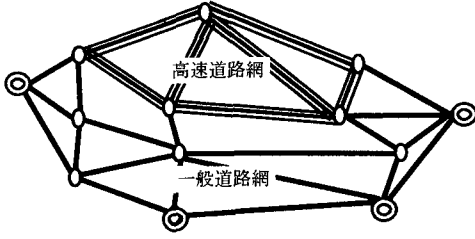


図-1 高速道路を含むネットワーク

適用計算を通して検証することとする。

3. 高速道路転換率を内生化した利用者均衡配分モデル

(1) 基本的考え方

高速道路転換率を内生化した利用者均衡配分モデルの基本的構造は以下の通りである。ここでは図-1に示すような高速道路を含む道路網を考える。一般道路のみの道路網による最短経路と、高速道路を含めた道路網による最短経路を、それぞれ一般道利用経路と高速道利用経路と定義する。これらの経路の所要時間と高速料金の時間換算値を後述の転換率モデルに代入して高速道路への転換量を計算し、それぞれの利用経路に一般道利用と高速道利用のOD交通量を配分するものである。本モデルにおいては、高速道路転換率および高速道利用OD交通量と一般道利用OD交通量、および全リンク交通量が同時に求められる。このとき一般道利用ODでは、料金を含まない経路所要時間に基づいて利用者均衡（等時間原則）が成立し、高速道利用ODでは、料金を含む一般化所要時間について利用者均衡が成立する。同時に高速道利用と一般道利用のOD割合は、経路所要時間および料金の関係から求められる高速道路転換率モデルの割合と一致する。

また本研究では、一般道利用の固定客を考慮したより一般的なモデル化をめざす。

(2) 定式化

高速道路転換率を内生化した利用者均衡配分モデルを数理最適化問題として定式化し、解の唯一性、解法等について考察する。

a) モデルの定式化²⁶⁾

高速道路転換率を内生化した利用者均衡配分モデル

は次のような数理最適化問題として定義できる。

$$\begin{aligned} \min F = & \sum \int_0^{x_a} t_a(y) dy + \frac{1}{\theta_{rs}} \sum_r \sum_s Q_{rs}^e (\ln Q_{rs}^e + \psi_{rs}) \\ & + \frac{1}{\theta_{rs}} \sum_r \sum_s Q_{rs}^a \ln Q_{rs}^a \end{aligned} \quad (1a)$$

subject to

$$\sum_k f_{rsk} - (Q_{rs}^a + G_{rs}^f) = 0 \quad \forall_{r,s} \quad (1b)$$

$$\sum_k f_{rsk}^e - Q_{rs}^e = 0 \quad \forall_{r,s} \quad (1c)$$

$$x_a = \sum_r \sum_s \sum_k \delta_{rsk} f_{rsk} + \sum_r \sum_s \sum_l \delta_{rsl} f_{rsl}^e \quad \forall_a \quad (1d)$$

$$G_{rs} - G_{rs}^f - Q_{rs}^a - Q_{rs}^e = 0 \quad \forall_{r,s} \quad (1e)$$

$$f_{rsk} \geq 0, f_{rsl}^e \geq 0, Q_{rs}^e \geq 0, Q_{rs}^a \geq 0, x_a \geq 0 \quad (1f)$$

ここに、

x_a : リンク a のリンク交通量

$t_a(y)$: リンク a のリンクコスト関数

f_{rsk} : OD ペア rs の一般道利用経路 k の経路交通量

f_{rsl}^e : OD ペア rs の高速道利用経路 l の経路交通量

θ_{rs}, ψ_{rs} : パラメータ

Q_{rs}^e : OD ペア rs の高速道利用の OD 交通量

Q_{rs}^a : OD ペア rs の一般道利用の OD 交通量

G_{rs}^f : OD ペア rs の一般道利用の固定客 OD 交通量

G_{rs} : OD ペア rs の全交通量

$\delta_{ika}(\delta_{ila}^e)$: リンク a が OD ペア rs の一般道利用経路 k (または高速道利用経路 l) に含まれるとき 1, そうでないとき 0

目的関数 (1a) は需要変動型の利用者均衡配分モデルと同形式となっており、第 1 項はリンクコスト関数、第 2, 3 項は高速道路への転換率に関する項である。

さて、本モデルが対象とするネットワークは、一般道利用経路と高速道利用経路が完全に分離されているわけではなく、一部リンクを共有している。このとき一般道利用の交通量と高速道利用の交通量は、リンクコスト関数を介して相互に干渉することになる。このような非分離型のリンクコスト関数を用いるとき、その関数のヤコビ行列が対称な場合を除き数理最適化問題として定式化できない。しかし本モ

デルでは、リンクコスト関数が一般道利用交通量と高速道利用交通量で共通であることから、ヤコビ行列の対称性は保証され定式化が可能である²⁷⁾。

ここで、式(1)の目的関数と制約条件とからラグランジュ関数を以下のように設定する。

$$L(\mathbf{x}, \mathbf{g}, \boldsymbol{\lambda}) = F(\mathbf{x}, \mathbf{g}) +$$

$$\sum_{rs} \lambda_{rs} \left((G_{rs}^f + Q_{rs}^a) - \sum_k f_{rsk} \right) + \sum_{rs} \lambda_{rs}^e \left(Q_{rs}^e - \sum_l f_{rsl} \right) + \sum_{rs} \phi_{rs} (G_{rs} - G_{rs}^f - Q_{rs}^a - Q_{rs}^e) \quad (2)$$

経路交通量 f_{rsk} 、 f_{rsl} で微分すると、利用者均衡を表現する最適性条件

$$f_{rsk} (c_{rsk} - \lambda_{rs}) = 0$$

$$c_{rsk} - \lambda_{rs} \geq 0 \quad (3a)$$

$$f_{rsl} (c_{rsl}^e - \lambda_{rs}^e) = 0$$

$$c_{rsl}^e - \lambda_{rs}^e \geq 0 \quad (3b)$$

が得られる。ここに、

λ_{rs} : 一般道利用最短経路の所要時間

λ_{rs}^e : 高速道利用最短経路の一般化所要時間

$$c_{rsk} = \sum_k t_a \delta_{rsku}, \quad c_{rsl}^e = \sum_l t_a \delta_{rsla} \quad (4)$$

である。このとき、一般道利用経路は所要時間、高速道利用経路は料金を含む一般化所要時間に基づいてそれぞれに利用者均衡が成立している。

また、高速道利用の交通量 Q_{rs}^e で微分すると、高速道路への転換率を表すロジットモデル式 (5) を得ることができる。

$$Q_{rs}^e = \frac{1}{e^{-\theta_{rs}(\lambda_{rs}^e - \lambda_{rs}^e)} + \psi_{rs} + 1} (G_{rs} - G_{rs}^f) \quad (5)$$

転換率式中の λ_{rs}^e は料金を含む一般化所要時間であり、以下のように定義される。

$$\lambda_{rs}^e = \lambda_{rs}^e + C_{rs}^d / \gamma \quad (6)$$

ここに、

λ_{rs}^e : 高速道利用経路の最短経路所要時間(料金を含まない)

C_{rs}^d : OD ペア rs の高速道路通行料金

γ : 時間価値

である。

リンクコスト関数を単調増加関数と仮定すると、目的関数の第1項は、リンク交通量に関して狭義凸関数であることが証明される。また目的関数の第2項は $\theta > 0$ において OD 交通量に関して狭義凸関数である。一方、制約条件式がすべて線形であることから変数の実行可能領域の凸性が保証されるので、OD 交通量およびリンク交通量に関して均衡解の存在と一意性が保証される。

b) 一般道利用固定客モデル

現実の経路選択行動をみると、特に都市部の OD 間距離の短いトリップにおいて高速道路を利用しないトリップが少なからず存在する。このような一般道路利用固定客をあらかじめ除いた後に、転換可能なトリップのみで転換率モデルを作成した方が精度向上には望ましいであろう。実務分野で従来使用されてきた転換率を併用した分割配分モデルにおいても、転換率式の中に OD 間距離との関係から設定された短トリップ低減係数を挿入しているのが一般的である²⁸⁾。

本研究でも OD 間距離との関係から、一般道利用固定客モデルを以下のように設定する。

$$G_{rs}^f = P^f(L_{rs}) G_{rs} \quad (7)$$

ここに、

L_{rs} : OD ペア rs の OD 間距離

$P^f(L_{rs})$: 固定客の割合, $(0 \leq P^f \leq 1)$

で、 $P^f(L_{rs})$ は OD 間距離 L_{rs} に対する単調減少関数として与えられる。

(3) 解法

本問題は利用者均衡配分の一般的な解法である部分線形化法⁵⁾によって最適解を得ることができる。

この方法の概略は次のようになる。前回の解から得られる高速道と一般道の各最短経路の所要時間を転換率モデルに代入して各利用 OD を求め、これを各最短経路へ配分する。この配分交通量を降下方向とし、前回の解と降下方向を線形結合して、目的関数の一次元最適化を行い、現段階の解を得る。上記の計算を繰り返して最適解を得るものである。

さて、この方法では各 OD 間で一般道利用の最短経路と、高速道利用の最短経路の 2 本の経路が必要となる。前者は高速オンランプにリンクコスト ∞ を入力することで経路探索できる。一方後者の高速道路を含む最短経路の探索方法にはいくつか考えられる。ここでは必ず高速道利用最短経路を列挙できることと、計算効率が良いこと等の特徴を持っていることが重要である。文献 (26) では、セントロイドからオンランプまでと、オンランプから着セントロイドまでの最短経路探索を別々に行い、かつ、一般道利用の最短経路情報を活用することによって、上述した特徴を持つ高速道利用経路探索法を提案している。

4. 高速道路転換率を生内化した確率的利用者均衡配分モデル

前述のモデルにおいては、所要時間と通行料金という 2 つ要因を用いて経路選択行動を説明しているが、それでも現実に見られる複雑な経路選択行動をあまりに単純化している嫌いがある。確かに経路選択行動において所要時間と料金は第一義的に重要な影響要因ではあるが、現実にはさらに多くの要因が複雑に加わっていると考えられる。加えて経路選択行動において利用者均衡が成立するための条件として、利用者が経路に関する完全な情報を持っていることが前提であるが、現実には不完全な情報化での選択行動である。このような観点に立てば、経路選択の多様性と経路情報の不確実性を前提とした確率的利用者均衡に基づく定式化がより現実的である。

(1) 定式化

ここで扱うモデルは経路選択行動原理が確率的利用者均衡に基づくことを除いて、前章のものとモデルの構造は同じである。問題は次のように定式化できる。

$$\begin{aligned} \min F = & \sum_{r,s} \int_0^{x_a} t_a(y) dy + \frac{1}{\theta_{rs}} \sum_r \sum_s Q_{rs}^e (\ln Q_{rs}^e + \psi_{rs}) \\ & + \frac{1}{\theta_{rs}} \sum_r \sum_s Q_{rs}^a \ln Q_{rs}^a \\ & + \frac{1}{\mu} \sum_{rs} (Q_{rs}^a + G_{rs}^f) H_{rs} + \frac{1}{\mu_e} \sum_{rs} Q_{rs}^e H_{rs} \quad (8a) \end{aligned}$$

subject to

$$\sum_k f_{rsk} - (Q_{rs}^a + G_{rs}^f) = 0 \quad \forall_{r,s} \quad (8b)$$

$$\sum_l f_{rsl}^e - Q_{rs}^e = 0 \quad \forall_{r,s} \quad (8c)$$

$$x_a = \sum_r \sum_s \sum_k \delta_{rsk} f_{rsk} + \sum_r \sum_s \sum_l \delta_{rsl}^e f_{rsl}^e \quad \forall_a \quad (8d)$$

$$G_{rs} - G_{rs}^f - Q_{rs}^a - Q_{rs}^e = 0 \quad \forall_{r,s} \quad (8e)$$

$$f_{rsk} \geq 0, f_{rsl}^e \geq 0, Q_{rs}^e \geq 0, Q_{rs}^a \geq 0, x_a \geq 0 \quad (8f)$$

ここに、

$$H_{rs} = \sum_k \frac{f_{rsk}}{Q_{rs}^a + G_{rs}^f} \ln \frac{f_{rsk}}{Q_{rs}^a + G_{rs}^f} \quad \forall_{r,s} \quad (9a)$$

$$H_{rs}^e = \sum_l \frac{f_{rsl}^e}{Q_{rs}^e} \ln \frac{f_{rsl}^e}{Q_{rs}^e} \quad \forall_{r,s} \quad (9b)$$

であり、一般にエントロピー関数と呼ばれている。

先と同様に、目的関数と制約条件から作成したラグランジュ関数を経路交通量 f_{ik}, f_{il}^e で微分すると、次式が得られる

$$f_{rsk} = \frac{\exp(-\mu C_{rsk})}{\sum_k \exp(-\mu C_{rsk})} (Q_{rs}^a + G_{rs}^f) \quad (10a)$$

$$f_{rsl}^e = \frac{\exp(-\mu^e C_{rsl}^e)}{\sum_l \exp(-\mu^e C_{rsl}^e)} Q_{rs}^e \quad (10b)$$

ここに、

C_{rsk} : OD ペア rs の一般道利用経路 k の経路所要時間

C_{rsl}^e : OD ペア rs の高速道利用経路 l の経路所要時間

すなわち、経路交通量はロジットタイプの配分式で与えられる。

次にラグランジュ関数を高速道路利用の OD 交通量で微分すると、

$$Q_{rs}^e = \frac{1}{e^{-\theta_{rs}(S_{rs} - S_{rs}^e) + \psi_{rs}} + 1} (G_{rs} - G_{rs}^f) \quad (11)$$

ここに,

$$S_{rs} = -\frac{1}{\mu} \ln \left(\sum_k \exp(-\mu C_{rsk}) \right) \quad (12a)$$

$$S_{rs}^e = -\frac{1}{\mu^e} \ln \left(\sum_l \exp(-\mu^e C_{rsl}^e) \right) \quad (12b)$$

なる高速転換率モデルが得られる。上式において新たに加わるパラメーター μ と μ^e は、一般道利用及び高速道利用それぞれの、複数経路への選択確率の分散の程度を表わすパラメータで、 $\mu, \mu^e \rightarrow \infty$ のときは、目的関数(8a)から問題は確定的利用者均衡配分問題と一致する。なお本モデルは path 形式で定式化した⁶、解法に Dial 法を利用する場合は arc-node 形式での定式化が必要である。arc-node 形式に基づく定式化については文献(29)を参照されたい。

(2) 解法

本モデルは path 形式で定式化した⁶が、このような問題を経路交通量を変数として解く方法には Simplicial Decomposition 法^{30),5)}がある。これは経路集合を限定して3.(3)と同様に部分線形化法によって目的関数の最適化を行う段階と各回の最適状態で次の新たな経路(最短経路)を取り入れる段階の計算を繰り返して、新たに経路が列挙されなくなると終了する方法である。

5. 高速道路転換率を内生化した時間帯別利用者均衡配分モデル

近年、TDM 施策や混雑料金制等、特定時間帯(例えばピーク時間帯)を対象とした交通管理計画を行う必要性の高まりから、時間帯別交通量配分がますます注目されている。既に筆者等によって開発され実用化されている時間帯別利用者均衡配分モデル¹⁸⁾は、前後の時間帯の残留交通量の影響を料金コストを含まない実所要時間で処理することから、高速道路を含む道路網で定義される一般化所要時間には適用できない。よってここでは高速道路を含む道路網に対応できる、高速道路転換率を内生化した時間帯別利用者均衡配分モデルの拡張を行う。

(1) 残留交通量の修正方法

時間帯別配分では、各時間帯の終端時刻において残留交通量が必ず発生する。残留交通量の分布は、OD 間の経路上において図-2 のような三角分布になる。本研究で開発するモデルは、既に開発されている一般道路のみを対象としたモデル(OD 修正法)と同様の残留交通量の修正方法を用いる。OD 修正法は図-2 のように残留交通量を経路上で平均化するが、これは次式によって OD 交通量が修正される。

$$g_{rs}^n = q_{rs}^{n-1} + G_{rs}^n - \frac{C_{rs}^n}{2T} G_{rs}^n \quad (13)$$

ここに,

C_{rs}^n : n 時間帯 OD ペア rs 間での最短経路所要時間

G_{rs}^n : n 時間帯 OD ペア rs 間での OD 交通量

T: 時間帯の幅

q_{rs}^{n-1} : n-1 時間帯で修正された残留交通量
(n 時間帯においては定数)

g_{rs}^n : n 時間帯 OD ペア rs 間での残留交通量修正後の OD 交通量

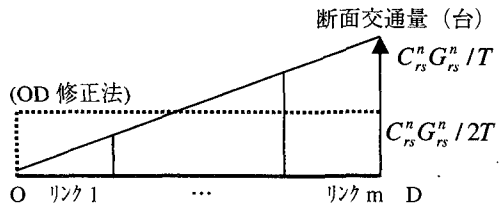


図-2 各リンクを通過していない交通量

(2) モデルの構造

本モデルは次のような2段階で表現される。第1段階は、OD修正法に基づいて、n時間帯の全OD交通量をn時間帯に流れるOD交通量と、n時間帯の残留交通量(次の時間帯の持ち越されるOD交通量)とに分割する。第2段階では、n時間帯に流れるOD交通量を転換率モデルを用いて、高速道利用OD交通量と一般道利用OD交通量に分割する。

(3) モデルの定式化

問題は次のような数理最適化問題として定式化される。ただしここでは一般道路利用の固定客は考慮していない。

$$\begin{aligned} \min. Z = & \sum_a \int_0^{x_a^n} t_a(\omega) d\omega + \frac{1}{\theta} \sum_r \sum_s \{ Q_{rs}^{en} (\ln(Q_{rs}^{en} / g_{rs}^n) \\ & + \psi_{rs}) \} + \frac{1}{\theta} \sum_r \sum_s Q_{rs}^{an} \ln(Q_{rs}^{an} / g_{rs}^n) \\ & - \frac{1}{b} \sum_r \sum_s \int_0^{g_{rs}^n} \frac{2T}{G_{rs}^n} (q_{rs}^{n-1} + G_{rs}^n - z - \frac{G_{rs}^n}{2T} a) dZ \end{aligned} \quad (14a)$$

subject to

$$\sum_k f_{rsk}^{en} - Q_{rs}^{en} = 0 \quad \forall_{r,s} \quad (14b)$$

$$\sum_k f_{rsk}^{an} - Q_{rs}^{an} = 0 \quad \forall_{r,s} \quad (14c)$$

$$x_a^n = \sum_{k \in K} \sum_{rs \in \Omega} (\delta_{ak}^{enrs} f_{rsk}^{en} + \delta_{ak}^{anrs} f_{rsk}^{an}) \quad \forall_a \quad (14d)$$

$$g_{rs}^n - Q_{rs}^{en} - Q_{rs}^{an} = 0 \quad \forall_{r,s} \quad (14e)$$

ここに、

x_a^n : リンク a のリンク交通量

$t_a(\cdot)$: リンク a の一般化所要時間関数

(一般道路では所要時間関数)

Q_{rs}^{en} : n 時間帯 OD ペア rs 間での高速道利用の OD 交通量

Q_{rs}^{an} : n 時間帯 OD ペア rs 間での一般道利用の OD 交通量

f_{rsk}^{en} : Q_{rs}^{en} に対する経路 k の経路交通量

f_{rsk}^{an} : Q_{rs}^{an} に対する経路 k の経路交通量

δ_{ak}^{enrs} : (1: リンク a が高速道路を含む経路 k に含まれるとき, 0: そうでないとき)

δ_{ak}^{anrs} : (1: リンク a が一般道路のみの経路 k に含まれるとき, 0: そうでないとき)

G_{rs}^n : n 時間帯 OD ペア rs 間の OD 交通量

上記の問題の最適化条件は、ラグランジュ関数を定義することにより以下のように導き出せる。ラグランジュ関数を一般道利用および高速道利用の経路交通量 f_{rsk} , f_{rsl}^e で微分すると、利用者均衡の解を表現する最適性条件が得られる。

$$f_{rsk}(c_{rsk} - \lambda_{rs}) = 0$$

$$c_{rsk} - \lambda_{rs} \geq 0 \quad (15a)$$

$$f_{rsl}^e (c_{rsl}^e - \lambda_{rs}^e) = 0$$

$$c_{rsl}^e - \lambda_{rs}^e \geq 0 \quad (15b)$$

ここに、

$$c_{rsk} = \sum_k t_a \delta_{rsk a}, \quad c_{rsl}^e = \sum_l t_a \delta_{rsl a} \quad (16)$$

とおり、一般道利用経路は所要時間で、高速道利用経路は料金を含む一般化所要時間に基づいて、それぞれに利用者均衡が成立している。次にラグランジュ関数を Q_{rs}^{an} , Q_{rs}^{en} で微分することにより、次式で与えられる転換率モデルが導き出せる。

$$Q_{rs}^{en} = \frac{1}{\exp(-\theta_{rs}(\lambda_{rs} - \lambda_{rs}^e) + \psi_{rs}) + 1} g_{rs}^n \quad (17a)$$

$$Q_{rs}^{an} = g_{rs}^n - Q_{rs}^{en} \quad (17b)$$

次にラグランジュ関数を g_{rs}^n で微分することにより、 n 時間帯の残留交通量処理後の OD 交通量を与える関係式が次のように得られる。

$$g_{rs}^n = q_{rs}^{n-1} + G_{rs}^n - \frac{C_{rs}^n}{2T} G_{rs}^n \quad (18)$$

ここに、

C_{rs}^n : 高速道路を含む道路網における n 時間帯 OD ペア rs 間の平均化所要時間 (= $a+b S_{rs}^n$) で、

$$S_{rs}^n = -\frac{1}{\theta} \ln(\exp(-\theta \lambda_{rs}^e + \psi_{rs}) + \exp(-\theta \lambda_{rs})) \quad (19)$$

である。 S_{rs}^n は転換率モデル式(17a)から得られる一般化所要時間の期待最小値である。さて、式(18)の第3項は n 時間帯の残留交通量を n 時間帯 OD 交通量から差し引く処理をしている。残留交通量は時間のみに依存する量であるので、式(18)の第3項の C_{rs}^n は、料金抵抗を含まない所要時間で規定する必要がある。 C_{rs}^n は厳密には高速道利用経路と一般道利用経路の所要時間(料金抵抗を含まない)を各利用 OD 交通量で加重平均した平均所要時間として求められる必要がある。

る。よってパラメータ a, b は料金抵抗を含む s_{rs}^n から料金抵抗の影響を除いた平均所要時間を近似するためのものである。仮に一般道利用 OD と高速道利用 OD が 1 対 1 の場合を考えると、パラメータは

$$a = -Cd_{rs}^n/2 + (\ln 2 + \psi_{rs}/2)/\theta_{rs} \quad (20a)$$

$$b = 1 \quad (20b)$$

のように与えることができる。ここで、 Cd_{rs}^n は OD ペア rs 間の高速料金の時間換算値 (分) である。いずれにせよ構築された高速道路を含む道路網における時間帯別利用者均衡配分モデルは、従来の一般道路網における時間帯別利用者均衡配分問題を含む一般形として定式化される。

(4) 解法

本問題も 3 章 (3) と同様に部分線形化法によって解くことができる。3 章 (3) と異なる点は、前回の解の各最短経路所要時間から時間帯別 OD 交通量 g_{rs}^n を高速道利用 OD 交通量 Q_{rs}^m 、一般道利用 OD 交通量 Q_{rs}^m とともに計算して降下方向とすることである。最短経路探索法については 3 章 (3) と同様である。

6. リンクコスト関数

交通量配分において、各リンク上の交通量と旅行速度 (あるいは旅行時間) の関係を与えるのがリンクパフォーマンス関数である。従来の分割配分法で用いられてきた関数は、リンク交通量と旅行速度の関係を与える Q-V 式であり、これを交通容量、設計速度、規制速度等を勘案して経験的、観念的に定めてきた。この Q-V 式は必ずしも現実の交通現象に則したものとはいえず、リンク交通量はともかく、この式から計算される旅行速度はかなり実際のものとは遊離しているとの指摘がある。

利用者均衡配分においては、均衡解の存在と一意性の保証から、用いるリンクパフォーマンス関数は単調増加関数である必要があり、これまでの Q-V 式は利用できない。そこでリンク交通量と旅行時間を

単調増加関数として仮定したリンクコスト関数が用いられる。その代表例としてわが国では BPR 関数が知られている。リンクコスト関数は配分精度の大きな影響をもたらすにもかかわらず、従来実証面から必ずしも十分検討されておらず、外国のパラメータ値がそのまま用いられてきた。筆者等はこれに対して道路交通センサスデータを用いて BPR 関数のパラメータ値を設定する方法を提案してきた³¹⁾。これは表-3 に示す道路タイプ別に、全国ベースの道路センサスデータ (平成 6 年度³²⁾) 値を用いて BPR 関数を設定したものである。すなわち、時間 BPR 関数として

$$t_a = t_{a0} \left\{ 1 + \alpha \left(\frac{q_a}{c_a} \right)^\beta \right\} \quad (21)$$

ここに、

t_a : リンク a の単位旅行時間 (分/km)

t_{a0} : リンク a の単位距離当たりの自由走行時間で、

$$t_{a0} = \alpha_0 + \alpha_1 \bar{z}_1 + \alpha_2 \bar{z}_2 + \alpha_3 \bar{z}_3 \quad (\bar{z}_1, \bar{z}_2, \bar{z}_3 \text{ は対象地}$$

域内の信号交差点密度, DID 率, 指定最高速度の平均値, $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ は t_{a0} の回帰パラメータ³¹⁾)

α, β : パラメータ

q_a : リンク a の時間交通量 (pcu/時)

c_a : リンク a の時間交通容量 (pcu/時)

である。

ところでわが国では日単位の交通量配分が一般的であるから、この時間 BPR 関数を日 BPR 関数に変換する必要がある。この変換方法についてもすでに筆者等によって提案されており³³⁾、これによれば、先の時間 BPR 関数式 (21) の q_a/c_a の代わりに Q_a/C_a に置き換えるだけで日 BPR 関数に変換できる。ただし Q_a はリンク a の日交通量 (pcu/日)、 C_a はリンク a の日交通容量 (pcu/日) で、時間交通容量は次式によって日交通容量に換算される。

$$C_a = c_a \left(\sum_{i=1}^{24} \eta_{ai}^{\beta+1} \right)^{-1/\beta}, \quad \eta_{ai} = q_{ai}/Q_a \quad (22)$$

表-3 リンクコスト関数のパラメータ値(愛知県分)

道路タイプ	愛知県			全国平均	
	t_{a0}	α	β	t_{a0}	α
都市間高速道路	0.76	0.51	3.3	0.72	0.54
都市内高速道路	0.87	0.40	2.8	0.86	0.42
幹線道路 (多車線)	1.86	0.54	2.4	1.84	0.54
幹線道路 (2車線)	1.74	0.40	3.1	1.58	0.44
準幹線道路 (多車線)	2.20	0.40	2.2	2.15	0.41
準幹線道路 (2車線)	1.87	0.45	2.4	1.72	0.49

ここに, q_{ai} はリンク a の時間帯 i の時間交通量である。

ところで, β は混雑度といういわば物理量に係るパラメータであるから, 全国共通の値を用いるとしても, t_{a0} や α には地域特性が反映されと考えられる。たとえば愛知県内のデータの平均値を使用して回帰分析した t_{a0} と α の値を全国値と比較すると(表-3), t_{a0} の値がすべての道路種別に対して全国平均値を上回っており, また α の値は同じかやや小さくなっていることがわかった。全国の道路交通センサスデータを, 東京(特別区と都下の市), 大阪(大阪府と府下の市), 名古屋(名古屋府), 首都圏(東京都, 千葉, 神奈川, 埼玉の各県), 近畿圏(大阪府, 京都府, 奈良, 和歌山, 兵庫の各県), 中京圏(愛知, 岐阜, 三重の各県), および北海道, 東北, 山陽, 四国, 九州の各地方ブロックに区分して, さらに東京, 大阪, 名古屋以外は市街化地域(市街化区域内延長が全区間の 50% を超える区域)とそれ以外に区分して求めた t_{a0} (棒グラフ) と α (折れ線グラフ) を比較した例を図-3 および図-4 に示す。ただし β の値は全国共通値としている。この結果によれば地域間の差はそれほど大きいものではなく, むしろ市街化地域とそれ以外との差が大きいことが明らかとなった。

7. 高速道路転換率と一般道路利用固定客モデル

(1) 高速道路転換率モデル

転換率のモデル化にあたっては, 与えられた OD 交通量データをいかに効率良く利用して信頼性のあるモデルを構築するかにかかっている。筆者等はすでに OD 間距離によるカテゴリーランク分けによるモデル化の方法を提案しているが³⁴⁾, たとえば名古屋都市圏のデータを用いて行った方法は次のよう

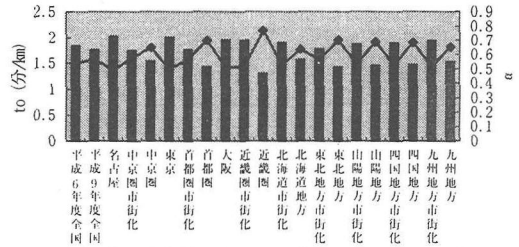


図-3 BPR関数のハムメータ比較 (幹線多車線道路)

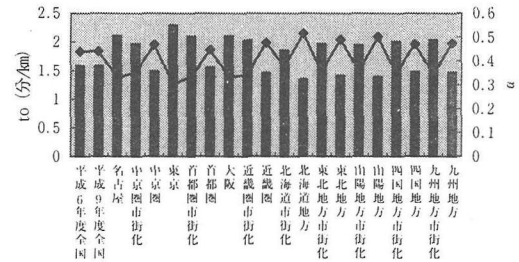


図-4 BPR関数のハムメータ比較 (幹線2車線道路)

なものである。

高速利用 OD 交通量データ³⁵⁾と, 全需要交通量³⁶⁾の実績 OD データを, OD 間距離でカテゴリーランク分けして OD ペアを集計し, 各カテゴリーランクの高速利用台数と需要台数および高速利用料金をもちいて回帰分析した結果, 転換率モデルのパラメータ θ, ψ は OD 間距離 L の関数として次式のように与えられた。

$$\theta(L) = 2.20L^{-0.964} \quad (23)$$

$$\psi(L) = 0.442 \ln(L) + 0.552 \quad (24)$$

ただし時間価値は文献(37)の調査結果に基づき平均 6.5 円/分とした。 $\theta(L)$, $\psi(L)$ を代入した転換率モデルの適合度は相関係数 0.895 と比較的精度の高い結果が得られた。

(2) 一般道路利用固定客モデル

上に得られた転換率モデルは一般道路利用固定客を考慮していないため, OD 間距離の短い距離帯において高速道路利用者を過大推計している恐れがある。次に一般道路利用固定客モデル, およびこれを考慮した高速道路転換率モデルを考える。

一般道路利用固定客数は OD 間距離にのみ依存するとして先の式(7)のように表す。さて固定客を考慮する場合の高速道路転換率は, 全 OD 交通量からあらかじめ固定客を除いた上で構築する必要があるが, 固定客 OD の実績データがないため, これ

をあらかじめ分離しておくことはできない。よって、本研究では以下の方法で固定客の割合 $P^f(L_i)$ を求めることにした。

① 前節(1)と同様に転換率モデルを作成する。
② 全 OD ペアを 1 km ごとの距離帯で集計し直し、距離帯別の一般道路と高速道路の OD 交通量、平均所要時間、平均距離、平均通行料金を算出する。それを①で求めた転換率モデルに代入して、距離帯ごとの転換率 $P(L)$ を求める。③ 一方、実績高速利用台数 $Rg^e(L)$ と上に求めた $P(L)$ を用いて、固定客を考慮しないときの全需要台数を逆算で推計すると $Rg^e(L)/P(L)$ となる。この値は固定客を考慮せずに求めた転換率から推計されているから、一般には過少推計されている。そこで距離帯別に集計された実績の全需要台数 $G(L)$ とし、これから差し引いた交通量が固定客であると考え、一般道路利用固定客の割合 $P^f(L)$ は次式から求めることができる。

$$P^f(L) = \{G(L) - Rg^e(L)/P(L)\} / G(L) \quad (25)$$

名古屋都市圏の全データを使って、上式から計算される P^f と距離 L の関係を調べ、 P^f が正の値を取った距離帯 0~15km についての散布図が図-5 である。 P^f は距離が 0km から 12km にかけて単調減少している。この関係を直線回帰すると次式が得られた(データ数 14)。

$$P^f = 0.814 - 0.068L \quad (P^f \geq 0) \quad (r=0.88) \quad (26)$$

さて、上式の固定客 OD モデルを用いて需要 OD から一般道路固定客 OD を除いて新たに高速道路転換率モデルを設定した。式(23)(24)と同様にして求めるとパラメータ θ, ψ は次式のように与えられた。

$$\theta(L) = 2.25L^{-0.970} \quad (27)$$

$$\psi(L) = 0.568 \ln(L) + 0.081 \quad (28)$$

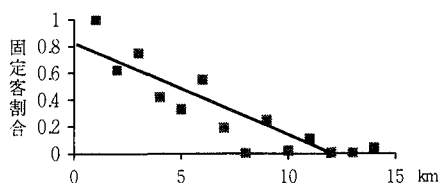


図-5 一般道路利用固定客モデル

$\theta(L), \psi(L)$ を代入した転換率モデルの適合度は相関係数 0.897 となった。以下の分析ではこのパラメータを利用して高速道路転換率を求めるものとする。

8. 名古屋都市圏道路網への適用と検証

ここでは名古屋圏内道路網への適用を通して、高速道路転換率を内生化した利用者均衡配分モデル(固定客考慮)を実証面から検討する。配分対象ネットワークはノード数 1241、セントロイド数 279、往復別リンク数 4209 である。対象道路網には東名、名神、東名阪、名古屋高速等の高速道路が含まれている。そのネットワーク図を図-6 に示す。配分に用いる OD 交通量は「平成 3 年度中京都市圏パーソントリップ調査」³⁶⁾を一部補正して各種実測データ(高速利用台数や転換率用データ)の平成 8 年用に推計したもの³⁷⁾を用いる。本論文で提案した利用者均衡配分モデルを従来の配分モデルと比較検討するため、高速道路転換率を併用した分割配分モデルについても配分計算を行う。分割配分モデルは分割回数とリンクコスト関数の種類によって 8 タイプ(QV10a, QV10d, QV20a, QV20d, BPR10a, BPR10d, BPR20a, BPR20d)採用する。ここに QV とあるのは、Q-V 式を採用したモデル、また BPR とあるのは、BPR 関数を採用したモデルを示す。10 または 20 は分割回数を表し、最後の a は均等分割、d は傾斜配分を表している。推定リンク交通量の適合度分析は実績交通量が存在するリンクについて行う。一般道路の実績交通量は平成 6 年度道路交通センサス³²⁾からリンク交通量の 24 時間観測地点(29 箇所)を抽出



図-6 名古屋圏ネットワーク

目的関数値

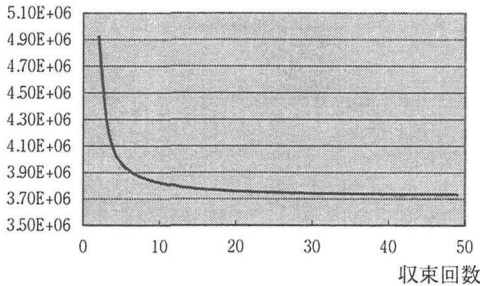


図-7 高速転換率を内生化した利用者均衡モデルの収束状況

した。また高速道路の実績交通量は、文献(35)より88個の日リンク交通量データを得た。

(1) 目的関数の収束状況

高速道路転換率を内生化した利用者均衡配分モデルについて、目的関数の収束状況(図-7)をみることにする。目的関数は順調に収束に向かってはいるが Frank - Wolf 法の特徴として知られているように、30回以上の収束では緩慢である。ただし、精度上や実用性から見れば20回程程度でかなり収束したものと考えて良いであろう。

(2) 利用者均衡配分モデルの実用性の検討

図-8, 9では各配分モデルにおいて、一般道路と高速道路の合計、高速道路のみ、一般道路のみの各場合において、リンク交通量の実績値と推定値の相関係数とRMS誤差による適合度比較を示している。全体を通して比較すると、相関係数、RMS誤差とも、Q-V式併用型分割配分、BPR関数併用型分割配分、利用者均衡配分の順に精度が高くなっていることが

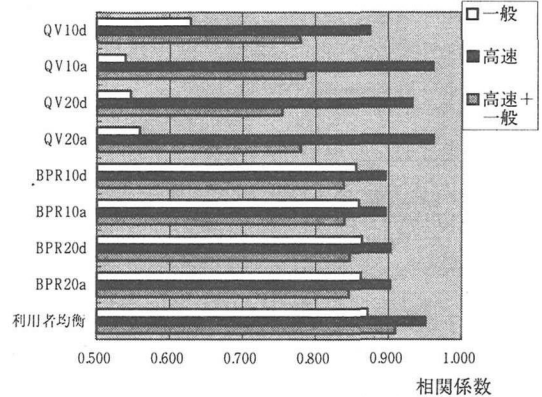


図-8 各配分モデルの精度比較 (相関係数)

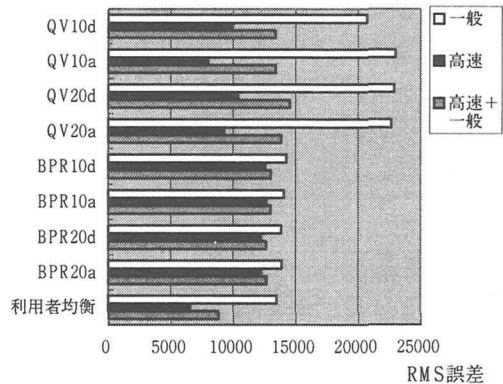


図-11 各配分モデルの精度比較 (RMS誤差)

わかる。分割配分の場合、分割回数や分割比率によっても精度が影響を受けることがわかる。とくに分割回数を増やせば精度が上がるといえるものでもない。高速道路のみの比較においては、一部Q-V式併用型分割各配分の相関係数が高くなっているが、RMS誤差をみると精度はそれほど高いとはいえない。高速道路と一般道路の全体でみた実績値と推定値の散布図から、Q-V式併用型分割配分は過少推計の傾向が

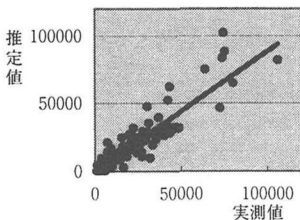


図-10 高速転換率利用者均衡モデル (高速+一般)

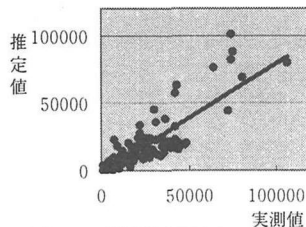


図-11 分割配分BPR20a (高速+一般)

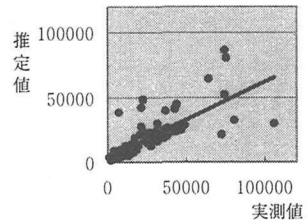


図-12 分割配分QV20a (高速+一般)

あるが、BPR 関数併用型分割配分と利用者均衡配分はほぼ 45 度の直線に分布を示しており、偏りのないことがわかる(図—10, 11, 12)。

RMS 誤差で比較すると、BPR 関数併用型分割配分と利用者均衡配分との差異が顕著となる。利用者均衡配分の相関係数は一般道路で 0.87、高速道路で 0.95、全体で 0.91 と従来の適用計算例に比べてもかなり高い値を示しており、本論文で提案したモデルが十分実用性を有しているものと判断できるであろう。

(3) 提案 BPR 関数の妥当性

Q-V 式併用型と BPR 関数併用型の分割配分結果を比較すると、従来型の分割配分であっても、本論文で提案した BPR 関数を用いることで、かなり精度が向上していることがわかる。よって本論文で提案した BPR 関数の妥当性が確かめられた。なお旅行時間の推定精度についても本来検証すべきであるが、残念ながら検証用の旅行時間実績データがなかったため今回は行っていない。BPR 関数型でみると、分割数が高い方がわずかながら精度の向上がみられる。

9. 実用化に向けての残された課題

本論文では実用性を重視したより一般性のある利用者均衡配分モデルとして、高速道路転換率を内生化した利用者均衡配分モデルを開発し、さらにその拡張型として、同じく高速道路転換率を内生化した確率的利用者均衡配分と時間帯別利用者均衡配分を定式化した。同時に交通量配分の精度に大きな影響をもつ転換率とリンクコスト関数についても、実測データに基づいて合理的に設定する方法について提案を行った。基本モデルを名古屋都市圏道路網に適用し、従来の代表的手法である分割配分法と比較したところ、本論文で提案したモデルはきわめて良好な配分精度を有することを明らかにできた。

利用者均衡理論に基づく配分手法は、従来法に比べて単に配分精度を向上させるばかりでなく、人間の交通行動原理に基づく理論モデルであるから、信頼性や説得力を持ち、今後ネットワーク流を対象とした各種交通政策を評価する際の有力なツールとして活用されることが期待される。

このように本論文で扱った利用者均衡理論の基づく各種配分モデルは、今後従来の分割配分法に代わる代表的な配分手法として実務分野で利用されていくものと思われるが、最後に、実用化に当って残された課題について整理すると次の通りである。

1) 高速道路の料金制度の検討や環境問題への対応のため、配分交通量を車種別に求めることが社会的に要請されている。車種別に経路選択原理やリンクコスト関数を考えると問題が複雑となり、いまのところ実用的な方法論が確立していない。

2) 利用者均衡配分では、リンク交通量については解の一意性が証明されるが、経路交通量については証明できない。一方確率的利用者均衡配分の場合は、リンク交通量のみならず、経路交通量についても解の一意性が言えるが、ロジット型確率均衡の場合は IIA 特性のの問題が残る。

3) 時間帯別利用者均衡配分の場合、時間帯幅は最長トリップ長より大きいという前提がある。たとえば時間帯幅を 1 時間としたとき、大都市圏内道路網ではトリップ長が 1 時間を越えるものが相当量存在することになる。大都市圏では時間帯幅を 2 時間にとれば問題を生じないが、そうでなければ、この前提が崩れ、これが配分精度を低下させる可能性がある。

4) 本論文では触れなかったが、ネットワークの表現方法やセントロイドの取り方も配分精度に大きく影響する。またネットワーク情報のコード化作業は依然として人手に頼ることが多く、間違いを起しやすいため、GIS 技術等の活用による作業の合理化が望まれる。

10. おわりに

本論文は、今回筆者らが幸運にも土木学会論文賞受賞の栄に浴することができたことにより、土木計画学研究委員会より発表の機会を与えて頂いたものであり、ここに心より感謝申し上げます。本論文の内容は筆者らが長年にわたって取り組んできた問題ではあるが、とくに名古屋高速道路高速道路公社内に設けられた「交通量配分手法に関する実証的調査研究委員会」(委員長名大河上省吾教授)での議論が参考になった。委員各位に心よりお礼申し上げます。

す。またデータ等の入手にあたっては、名古屋高速道路公社、同協会、および(株)日建設計に多大の協力を得た。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Campbel M.E.:Foreword,Highway Research Board Bulletin,61,pp.iii-iv,1952
- 2) Wardrop,J.G.:Some theoretical aspects of road traffic reseach,Proceedings of the Institute of Civil Engineers Part II,pp.325-378,1952.
- 3) Beckmann, M.J., C.B. Mc Guire, and C.B.Winsten.:Studies in the Economics of Transportation, Yale University Press, New Haven,1956.
- 4) Jorgensen,N.O.:Some aspects of the urban traffic assignment problem,master's thesis Institute of Transp. and Traffic Engin.,University of California, Berkelay, CA. 1963.
- 5) 土木計画学研究「交通ネットワーク」出版小委員会：交通ネットワークの均衡分析ー最新の理論と解法 一，土木学会，1998.
- 6) 河上省吾・住田公資：分布・分担・配分過程を結合した交通量予測モデル，土木学会論文報告集 No.306, pp. 45-58, 1981
- 7) 加藤晃・宮城俊彦・吉田俊和：交通分布・配分結合モデルとその実用性に関する研究，交通工学，pp.3-11,1982.
- 8) 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，No.371/IV-5, pp. 79-87, 1986.
- 9) 佐佐木綱・朝倉康夫：OD 需要の変動を内生化した最適道路網計画モデル，土木学会論文集，No.383/IV-7, pp. 93-102, 1987.
- 10) 松井 寛・藤田素弘：交通量配分における日交通容量とQ-V式の合理的設定方法に関する研究，土木計画学研究・論文集，No.6, pp.153~160, 1988
- 11) 溝上章志・松井寛・可知隆：日交通量配分に用いるリンクコスト関数の開発，土木学会論文集 No.401 IV-10, pp. 99-107, 1989.
- 12) 溝上章志・松井寛：Fisk 型確率均衡配分モデルの未知パラメータ θ の推定に関する一手法，交通工学 No.2Vol.28, pp. 21-29, 1993.
- 13) 河上省吾・石京・藤田仁：分担・配分結合モデルの改良と名古屋市鉄道計画の評価に関する研究，土木計画学研究・講演集 No.17, pp.1007-1014, 1995.
- 14) 柿本竜治・溝上章志・朝倉史明：土地利用ー交通モデルの結合手法に関する一提案とその適用分析，交通工学 No.3Vol.31, pp. 13-23, 1996.
- 15) 宮下等・朝倉康夫・柏谷増男：利用者均衡モデルのパラメータ推定法とその検証，土木計画学研究・講演集 No.2 1(2), pp. 753-756, 1998.
- 16) 尾関洋一・河上省吾：都市高速道路を含む多手段交通網における均衡交通量予測法に関する研究，土木計画学研究・講演集 No.21(2),pp. 757-760, 1998.
- 17) 三輪富生・森川高行：複数の高速道路選択を考慮した均衡配分モデルに関する研究，土木計画学研究・講演集 No.2 1(2), pp. 761-764, 1998.
- 18) 藤田素弘・松井寛・溝上章志：時間帯別交通量配分モデルの開発と実用化に関する研究，土木学会論文集・4, No.389, pp.111~119, 1988
- 19) 藤田素弘・山本幸司・松井寛：渋滞を考慮した時間帯別交通量配分モデルの開発，土木学会論文集・4, No.407, pp.91~100, 1989
- 20) 藤田素弘・山本幸司・松井寛：時間帯別分割配分法の開発と実用化，交通工学，Vol.25,No.5,pp.25-33,1990
- 21) 松井 寛・藤田素弘：時間帯別通勤時刻分布・配分同時モデルの開発，土木学会論文集・4, No.449,pp.63-72 1992
- 22) 高山純一・亀谷靖文・中村光生：信号交差点を組み込んだ時間交通量配分法の改良について，土木計画学研究・講演集 No.16(1)-2, pp. 981-986, 1993.
- 23) 宮城俊彦・浅井敦司・岡昭二：フレックスタイム制導入に伴う道路交通環境変化のネットワークシミュレーション分析，交通工学 No.1 Vol.31,pp.35-43, 1996.
- 24) 佐藤輝明・松本昌二・佐野可志：フレックスタイム制導入による時間帯別通勤交通の変化とその効果，土木計画学研究・講演集 No.19 (2), pp. 833-836, 1996.
- 25) 斉藤次義・田原由久・中島康博・馬場剛・高橋勝美：西遠都市圏における通勤時ピーク交通量の平準化方策に関する検討，土木計画学研究・講演集 No.2 1(2), pp. 877-880, 1998.
- 26) 松井寛・藤田素弘：高速道路を含む都市圏道路網における利用者均衡配分モデルの実用化に関する研究，土木学会論文集（投稿中）
- 27) 松井寛・上田聡：有料道路を含む道路ネットワークにおける利用者均衡配分問題，京大土木 100 周年記念ワークショップ・論文集，pp.17-22,1997.
- 28) 名古屋高速道路公社・名古屋高速道路協会：名古屋高速道路の交通量配分手法に関する実証的調査研究委員会報告書，1996.
- 29) 長澤英春・松井寛・藤田素弘：大都市圏道路ネットワークにおける確率の利用者均衡配分の適用研究，土木計画学研究・講演集 No.22,1999
- 30) Damberg O,Lundgren J T,and Patriksson M:An Algorithm For The Stochastic User Equilibrium Problem,Transp. Res.B 30(2),pp.115-131,1996.
- 31) 松井寛・山田周治：道路交通センサネットワークに基づく B P R 関数の設定，交通工学，Vol.33,No.6, pp9-16,1998.
- 32) 建設省道路局編・(社)交通工学研究会：平成 6 年度道路交通センサス，1995.
- 33) 松井 寛・藤田素弘：交通量配分における Q-V 式の設定方法に関する研究，土木計画学研究・論文集，No.3, pp.153-160, 1986
- 34) 松井寛・片桐充理：都市高速道路を対象とする転換率モデルの構築，第 18 回交通工学研究発表会論文報告集，pp.149-152,1998.
- 35) 名古屋高速道路公社：第 7 回名古屋高速道路自動車起終点調査，1996.
- 36) 中京都市圏総合都市交通計画協議会：「第 3 回中京都市圏パーソントリップ調査報告書」，1993.
- 37) 名古屋高速道路公社・名古屋高速道路協会：名古屋高速道路の交通量配分手法に関する実証的調査研究委員会報告書，1997