

I-14 高速道路転換率モデルを組み込んだ確率的均衡配分の実用化

Stochastic User Equilibrium Assignment Adopting
Expressway Diversion Function雲林院康宏¹藤田 素弘²松井 寛³Yasuhiro Ujii¹Motohiro Fujita²Hiroshi Matsui³

【抄録】高速道路を含む大都市圏道路ネットワークを対象とする交通量配分において、本研究では、実務的によく使われている高速道路転換率モデルを、論理的に利点の多い確率的均衡配分モデルへ組み込んだ、実用的なモデルを開発した。さらに、開発したモデルを名古屋圏の実規模ネットワークへ適用し、その実績再現性を検証することによって、高速道路、一般道ともに比較的高い精度で推定できることがわかり、これらの経路選択における分散特性も明らかにすることができた。

【Abstract】 To estimate traffic assignment for urban road network including expressways, we propose a utility model which the stochastic user equilibrium assignment model adopts a diversion function that determines the ratio of traffic demand passing expressways between each OD pair(expressway diversion function). Furthermore, this model is applied to a real-scale road network in Nagoya metropolitan city, the results show good accuracy and it is clear that the diversity of path choice on highway and freeway network.

【キーワード】 交通量推計, 高速道路, 高速道路転換率, 確率的均衡配分

【Keywords】 traffic flow estimation, expressway, expressway diversion function, stochastic user equilibrium assignment

1. はじめに

交通量配分は、標準的な交通需要予測手法である4段階推定法（交通の発生・集中―分布―分担配分）の第4段階に位置づけられており、道路ネットワーク上において、それぞれ固有の出発地と目的地を持ったドライバーの経路選択を予測

し、その経路交通量及びネットワークを構成するリンクの交通量の推計を目的としている。今日までに多くの実用的な交通量配分モデルが提案されているが、その中でも近年、利用者均衡配分モデルが注目されており、その発展型モデルとして知られている確率的均衡配分モデル¹⁾は、不完全情報下における経路選択のランダム性を考慮でき

1：名古屋工業大学大学院工学研究科博士後期課程都市循環システム工学専攻

(TEL052-732-2111, E-mail: ujii@keik1.ace.nitech.ac.jp)

2：名古屋工業大学大学院ながれ領域(TEL052-732-2111, E-mail: fujita@doboku2.ace.nitech.ac.jp)

3：名城大学理工学部建設システム工学科(TEL052-832-1151, E-mail: hmatsui@ccmfs.meijo-u.ac.jp)

ること及び実務においてニーズの高い経路交通量が一意的に定まることが利点である。

表-1 各都市高速道路の転換率モデル

首都高速道路公社	名古屋高速道路公社	阪神高速道路公社	福岡北九州高速道路公社
$p = \left(\frac{1}{1+T^6} - 0.05 \right) \alpha$	$p = \frac{1}{1+T^6} - 0.05$	$p = \frac{1}{1+\alpha T^3} - 0.03$	$p = \left(\frac{1}{1+T^6} - 0.005 \right) \alpha$
T: 走行時間比	T: 競合時間比	T: 競合時間比	T: 走行時間比
α : 短トリップ低減係数 ($\alpha = 0.047D + 0.2696$)		α : パラメータ ($\alpha = 3$)	α : 短トリップ低減係数 ($\alpha = (L-1)/4$) L: 本線利用距離 ($L \leq 5\text{km}$)
D: 高速本線走行距離			

注) 走行時間比は高速利用経路走行時間に対する一般道利用経路走行時間の比
競合時間比は高速道路部走行時間に対する一般道利用経路走行時間の比

一方、大都市圏内の広域道路網の中には、通常、有料制をとる高速道路が含まれている。利用者均衡配分理論では高速道路の所要時間を、料金を含む一般化所要時間で扱うことはできるが、高速道路を利用するか、又は、一般道のみを利用するかについての転換行動では個人属性等による分散要因がより大きくなり、一般化所要時間だけでは十分に表現できないと言える。これを考慮可能な交通量配分モデルとして、高速道路転換率モデルを分割配分法（均衡配分法の近似的解法）に組み込む配分モデル（高速道路転換率併用型分割配分モデル）がこれまで実務においてよく利用されてきた。なお、表-1は各都市高速道路の高速道路転換率モデルを示している。しかし、前述の利点を有する確率的均衡配分に高速道路転換率モデルを組み込んだ配分モデルはまだ開発されていない。

以上のような背景から本研究では、高速道路転換率モデルを確率的均衡配分に組み込んだ、実用的なモデルを開発する。さらに、開発したモデルを名古屋圏の実規模ネットワークへ適用し、その実績再現性を検証する。本研究で適用するネットワークはノード数 1241（そのうち、セントロイド数 279）、往復別リンク数 4209 で構成される大規模ネットワークである。そのため、Simplicial Decomposition 法（4 章参照）を応用した確率的均衡配分の実用化は今までに研究事例がなく、その実現は、すべての OD ペアの経路交通量を記憶する膨大なメモリー、収束計算を行うための高性能な CPU 等のコンピュータの大幅な性能向上に起因するところが多い。

ところで、著者ら²⁾³⁾は、数理計画問題として取

り扱いができ、操作性が高い、期待最小コストを変数とする高速道路転換率モデル（次式）を組み込んだ確率的均衡配分モデルの構築を試みているが、その実用化には至っていない。

$$g_{rs}^e = G_{rs} \frac{1}{\exp\{-\theta_{rs}(S_{rs} - S_{rs}^e) + \psi_{rs}\} + 1} \tag{1}$$

ただし、
$$S_{rs} = -\frac{1}{\mu} \ln \sum_k \exp[-\mu C_k^{rs}] \tag{2}$$

$$S_{rs}^e = -\frac{1}{\mu^e} \ln \sum_k \exp[-\mu^e C_k^{rs,e}] \tag{3}$$

- g_{rs}^e : OD ペア rs 間の高速道路利用の OD 交通量
- G_{rs} : OD ペア rs 間の全 OD 交通量
- C_k^{rs} : rs 間経路 k の一般道利用経路コスト (分)
- $C_k^{rs,e}$: rs 間経路 k の高速道路利用経路コスト (分) (料金コストを含む)
- S_{rs} : rs 間一般道利用経路の期待最小コスト
- S_{rs}^e : rs 間高速道路利用経路の期待最小コスト
- μ : 一般道利用経路の選択のパラツキを表す分散パラメータ
- μ^e : 高速道路利用経路の選択のパラツキを表す分散パラメータ
- θ_{rs}, ψ_{rs} : 高速道路転換率パラメータ

それは、実ネットワークへの適用において、高速道路転換率モデルがアンケート結果（OD ペア間平均所要時間データ）から構築されることや、期待最小コストと平均コストの特性（3 章、5 章参照）を考えると、現実的な意味を持つ平均コストを利用することが妥当と考えられたためである。よって本研究では新たに平均コストで定義される高速道路転換率モデルを組み込んだ需要変動型確率的均衡配分モデルの開発実用化を行うことを目的とする。

現実的に見られる利用者の経路選択の多様性や情報の不完全性に注目した均衡配分手法⁴⁾⁵⁾の従来なされた研究を概観すると、需要固定型確率的均衡配分モデルは Daganzo and Sheffi¹⁾や Fisk⁶⁾によって定式化された。また、その実用化では宮城⁷⁾や溝上⁸⁾の研究がある。一方、需要変動型確率的均衡配分モデルについては赤松⁹⁾によってモデルの定式化と解法が示された。

x_a :リンク a のリンク交通量

$\delta_{rs,k,a}$: (1:リンク a が一般道利用経路 k に含まれるとき, 0:そうでないとき)

$\delta_{rs,k,a}^e$: (1:リンク a が高速道路利用経路 k に含まれるとき, 0:そうでないとき)

$g_{rs}^e, G_{rs}, C_k^{rs}, C_k^{rs,e}, \mu, \mu^e, \theta_{rs}, \psi_{rs}$ は式(1)の定義と同様

本研究の問題は,リンクコスト関数が各リンクで分離可能であり,単調増加関数である.このような条件をもつ需要変動型確率的均衡配分の場合,ロジット型需要関数が期待最小コストを変数とするものであれば,通常,数理最適化問題として再定式化できる¹⁰⁾.しかし,本研究のロジット型需要関数には平均コストを利用していることから,数理最適化問題への再定式化はできない.

このモデルは,Yang¹¹⁾が交通情報提供下のドライバーとそうでないドライバー間の需要変動を組み込んだ確率的均衡配分モデルと同様の問題となっている.Yang は平均コストを利用する需要変動型確率的均衡配分では,解は存在するものの,唯一性は保証されないことを証明するとともに,そのアルゴリズムを示した.本研究のモデルでも同等に解の一意性は証明できないが,Yang の方法とは異なるアルゴリズムを用いて,大規模ネットワークにおける収束性と配分精度を 5 章において実証的に検証するものとする.

ところで,本研究の需要関数(高速道路転換率モデル)に,期待最小コストではなく,平均コストを利用する理由は,高速道路転換率モデルが現実の OD ペア間平均所要時間データから求められているためである.期待最小コストと平均コストがほぼ同一であれば,近似的に期待最小コストを利用することも可能であるが,一般にそれは分散パラメータの値によって異なるといえる.このことに関して,次章では期待最小コストと平均コストの特性を比較し,平均コストで定式化する必要性について考察するものとする.

3. 確率的均衡配分モデルにおける分散パラメータ

3. 1 分散パラメータと経路選択確率

ここでは,表-2左端の列に示すように 10 本の経路について,経路コストが 30 分から 39 分まで既に与えられている簡単なケースを考える.経路選択確率は,式(8),式(9)のようなロジットモデルを仮定している.

表-2 は分散パラメータ [10, 30, 60, 100, 500] (1/hr) の値に対して各経路選択確率の変化を見たものである.分散パラメータが 10 のとき,経路選択確率 5%以上である経路の経路コストは最短経路コスト(30 分)から+7 分までである.しかし,分散パラメータが大きくなる(経路選択は確定的になる)と,経路選択確率 5%以上である経路は,分散 30 で最短経路コスト+4 分,分散 60 で+2 分,分散 100 以上では+1 分以内の経路に絞られて,分散が大きくなるほど確定的な配分に近づくことがわかる.表-2 の結果は,経路数と経路コストが与えられ,フローインディペンデントな条件の下での結果であり,現実の均衡配分下での状況とは幾分異なるものの,およその傾向は読み取ることができる.

表-2 分散パラメータと各経路の選択確率の関係

No	経路コスト(分)	分散パラメータ				
		10	30	60	100	500
1	30	0.1893	0.3961	0.6321	0.8111	0.9998
2	31	0.1602	0.2403	0.2326	0.1532	0.0002
3	32	0.1356	0.1457	0.0856	0.0289	0.0000
4	33	0.1148	0.0884	0.0315	0.0055	0.0000
5	34	0.0972	0.0536	0.0116	0.0010	0.0000
6	35	0.0823	0.0325	0.0043	0.0002	0.0000
7	36	0.0696	0.0197	0.0016	0.0000	0.0000
8	37	0.0589	0.0120	0.0006	0.0000	0.0000
9	38	0.0499	0.0073	0.0002	0.0000	0.0000
10	39	0.0422	0.0044	0.0001	0.0000	0.0000

3. 2 期待最小コストと平均コスト

表-3 は,表-2 と同じ経路数と経路コストを持つネットワークにおいて,分散パラメータと期待最小コスト・平均コストの関係を見たものである.期待最小コストは,式(2)によって与えられるが,表-1においては 1 OD ペアの経路 k (=1-10) で適用している.平均コストは,表-2 に示す経路選択確率と経路コストの積を合計したものである.

表-2 より,分散パラメータが 70 以上のときは,期待最小コスト,平均コストはともにほぼ最短経路コスト(30 分)で大きな違いはない.これら

しかし、これまでの研究例では、平均コストによる高速道路転換率モデルを組み込んだ確率的均衡配分モデルを構築し、実規模ネットワークへの適用計算及び高速道路と一般道の分散特性を明示的に分析した例はないといえる。

本研究の構成は以下になる。2 章では、高速道路を考慮した確率的均衡配分モデルの前提条件と定式化をおこなう。3 章では、期待最小コスト、平均コスト及び分散パラメータの関係を考察し、本研究の平均コストによる高速道路転換率モデルの妥当性を検討する。4 章では、Simplicial Decomposition 法を応用したモデルの解法を示す。5 章では、本研究で開発したモデルを実ネットワークに適用して精度検証をおこなうとともに、高速道路と一般道の経路分散特性について実証的に分析する。

2. 高速道路転換率を含む確率的均衡配分モデルの定式化

2. 1 モデルの前提条件

ここでは、一般道のみ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路利用経路と定義する。

本研究で扱う高速道路転換率を内生化した確率的均衡配分モデルは、各需要 OD 交通量を高速道路転換率を用いてあらかじめ高速道路利用と一般道利用の OD に分割する。このとき一般道利用 OD の経路選択は料金を含まない経路所要時間に関する確率的均衡に従い、高速道路利用 OD の経路選択は料金を含む一般化所要時間に関する確率的均衡に従う。すなわち、本モデルでは、高速道路への転換行動と一般道利用の経路選択および高速道路利用の経路選択がそれぞれ異なる分散を持って確率的に行われているものとしてモデルを構築する。

また、ここでの高速道路料金は車種別ではなく車種別混入率を考慮した平均的な値を使う。料金は全てリンクごとに分解して与えるものとする。また、一般道利用交通量と高速道路利用交通量のリンクコスト関数は共通であるとし、単調増加で

各リンクで分離可能な BPR 型関数を利用するものとする。

高速道路転換率モデルは、高速道路および一般道利用経路の平均コストを変数とするロジット型需要関数によるものとする。

一般道利用経路と高速道路利用経路の経路選択は、各経路で異なる分散パラメータを持つロジット型確率経路選択に従うものとする。

2. 2 モデルの定式化

前節のような前提条件をもつ高速道路転換率モデルを考慮した確率的均衡配分モデルは、以下の均衡条件をすべて満足する状態として定式化される。

a) 高速道路転換率モデル

$$g_{rs}^e = G_{rs} \frac{1}{\exp\{-\theta_{rs}(\bar{C}_{rs} - \bar{C}_{rs}^e) + \psi_{rs}\} + 1} \quad (4)$$

$$g_{rs} + g_{rs}^e = G_{rs} \quad (5)$$

$$\bar{C}_{rs} = \sum_k \frac{f_k^{rs}}{G_{rs} - g_{rs}^e} C_k^{rs} \quad (6)$$

$$\bar{C}_{rs}^e = \sum_k \frac{f_k^{rs,e}}{g_{rs}^e} C_k^{rs,e} \quad (7)$$

b) 経路選択モデル

$$f_k^{rs} = (G_{rs} - g_{rs}^e) \frac{\exp(-\mu C_k^{rs})}{\sum_k \exp(-\mu C_k^{rs})} \quad (8)$$

$$f_k^{rs,e} = g_{rs}^e \frac{\exp(-\mu^e C_k^{rs,e})}{\sum_k \exp(-\mu^e C_k^{rs,e})} \quad (9)$$

c) 交通フローの保存条件

$$\sum_k f_k^{rs} - g_{rs} = 0 \quad (10)$$

$$\sum_k f_k^{rs,e} - g_{rs}^e = 0 \quad (11)$$

$$x_a = \sum_{rs} \delta_{rs,k,a} f_k^{rs} + \sum_{rs} \delta_{rs,k,a}^e f_k^{rs,e} \quad (12)$$

$$f_k^{rs} \geq 0 \quad f_k^{rs,e} \geq 0 \quad g_{rs} \geq 0 \quad g_{rs}^e \geq 0 \quad x_{ij} \geq 0 \quad (13)$$

ここで、

$\bar{C}_{rs}$: OD ペア rs 間の一般道利用経路の平均コスト

$\bar{C}_{rs}^e$: OD ペア rs 間の高速道路利用経路の平均コスト

f_k^{rs} : OD ペア rs 間の一般道利用経路 k の交通量

$f_k^{rs,e}$: OD ペア rs 間の高速道路利用経路 k の交通量

g_{rs} : OD ペア rs 間の一般道利用の OD 交通量

の差は、分散パラメータが小さくなるにつれて大きくなる。分散パラメータが小さくなると、交通量が最短経路以外の経路に多く流れるようになるため、平均コストは最短経路コストよりも徐々に大きくなる。一方、期待最小コストは分散 20 以下から最短経路コストよりも大きく下回る値を示している。この結果から期待最小コストが選択可能な経路のどの経路よりも小さな値を示す特徴をもち、分散パラメータが小さくなるほどその傾向が強くなるという基本的特性を確認することができる。

表-3 分散パラメータと期待最小コスト・平均コスト

分散パラメータ(1/hr)	期待最小コスト(A)	平均コスト(B)	コスト差(A-B)
1	-103.72	34.36	-138.08
5	6.53	33.82	-27.29
10	20.01	33.19	-13.18
20	26.33	32.16	-5.83
30	28.15	31.47	-3.32
40	28.92	31.04	-2.12
50	29.32	30.77	-1.45
60	29.54	30.58	-1.04
70	29.68	30.45	-0.77
80	29.77	30.36	-0.59
90	29.83	30.29	-0.46
100	29.87	30.23	-0.36

4. モデルの解法

高速道路転換率を内生化した確率的均衡配分モデル {式(4)～式(13)} は、高速道路転換率モデルに平均コストを用いており、数理最適化問題としては定式化できないため、一般的な数値計算手法は利用できない。しかしながら、本研究では、需要関数に期待最小コストを用いて得られる、需要変動型確率的均衡モデルの数理最適化問題を利用する解法を考える。すなわち本研究では以下の数理最適化問題を補助問題として解法に利用する。

【補助問題】

$$\begin{aligned} \min Z = & \sum_a \int_0^{x_a} t_a(y) dy \\ & + \sum_{rs} \int_0^{g_{rs}^e} \left(\frac{1}{\theta_{rs}} \ln \frac{w}{G_{rs} - w} + \psi_{rs} + \theta_{rs} \xi_{rs} \right) dw \\ & - \frac{1}{\mu} \sum_{rs} g_{rs} H_{rs} - \frac{1}{\mu^e} \sum_{rs} g_{rs}^e H_{rs}^e \end{aligned} \quad (14)$$

$$\text{ただし, } H_{rs} = - \sum_k \frac{f_k^{rs}}{g_{rs}} \ln \frac{f_k^{rs}}{g_{rs}}$$

$$H_{rs}^e = - \sum_k \frac{f_k^{rs,e}}{g_{rs}^e} \ln \frac{f_k^{rs,e}}{g_{rs}^e}$$

制約条件：交通フローの保存条件 {式(5), (10)～(13)}

ここで,

$t_a(\bullet)$: リンク a のリンクコスト関数

ξ_{rs} : 補正パラメータ (補助問題において定数)

補助問題の解の一意性については、一般的な需要変動型確率的均衡問題と同等であることから保障される¹⁰⁾。補助問題の最適性条件は、制約条件を取り込んだ Lagrange 関数を定義することにより導出できる。まず、Lagrange 関数の f_k^{rs} , $f_k^{rs,e}$ に関する Kuhn-Tucker 条件より、経路選択に関する式(8)、式(9)のような最適性条件が得られる。次に Lagrange 関数の g_{rs} , g_{rs}^e に関する Kuhn-Tucker 条件より、次式のような最適性条件が得られる。

$$g_{rs}^e = G_{rs} \frac{1}{\exp\{\theta_{rs}(S_{rs} - S_{rs}^e - \xi_{rs}) + \psi_{rs}\} + 1} \quad (15)$$

この補助問題を解く場合において変数 ξ_{rs} は定数である。補助問題の均衡解が元問題 {式(4)～式(13)} の解であるためには、予め定数として与えられる ξ_{rs} が、均衡配分後に求められる期待最小コストと平均コストの次式の関係式を結果的に満たしていればよい。

$$\xi_{rs} = (S_{rs} - S_{rs}^e) - (\overline{C_{rs}} - \overline{C_{rs}^e}) \quad (16)$$

このとき、補助問題の最適解は平均コストをもつ高速道路転換率モデルの式(4)と同等の解をあたえることになる。上式を満たす ξ_{rs} を最初から与えるのは不可能であるので、以下の計算手順で、式(16)を満たす ξ_{rs} が最適化問題の結果として得られる解を探索する。

【元問題 {式(4)～式(13)}】の計算アルゴリズム

Step0 初期値, $\xi_{rs}^{(1)}$, $n=1$ を設定する。

Step1 数理最適化問題【補助問題】(付録参照)を解き、各コストを求める。

Step2 次式により更新する。

$$\xi_{rs}^{(n+1)} = (S_{rs}^{(n)} - S_{rs}^{e(n)}) - (\overline{C_{rs}^{(n)}} - \overline{C_{rs}^{e(n)}})$$

Step3 あらかじめ設定した ε に対して

$$\max_{rs} \left| (\xi_{rs}^{(n+1)} - \xi_{rs}^{(n)}) / \xi_{rs}^{(n)} \right| \leq \varepsilon$$

を満足するならば、計算を終了する。そうでなければ、 $n=n+1$ において Step1 へ戻る

ところで、Yang¹¹⁾は平均コストで定式化した需要変動型確率的均衡問題について、本研究とは別の補助問題である固定需要型確率的均衡問題を解く方法を提案しているが、必ずしも解が収束することは保障されないとしている。本研究では需要変動型確率的均衡で数理最適化問題として定式化される補助問題をアルゴリズムに利用したが、この解の安定性、収束性の保証はされないため、次章で実証的に検証するものとする。

5. 実ネットワークへの適用

5. 1 各パラメータの設定

リンクコスト関数は式(17)を用いる。料金を含まない一般道リンクでは式(17)右辺第2項の料金項は除かれる。

$$t_a = t_{a0} \left\{ 1 + \alpha \left(\frac{x_a}{C_a} \right)^\beta \right\} + tc_a / \gamma \quad (17)$$

ここに、

t_a : リンク a の単位距離あたり所要時間

t_{a0} : リンク a の単位距離あたりの自由走行時間

x_a : リンク a のリンク交通量

C_a : リンク a の日交通容量

γ : 時間価値

tc_a : リンク a の通行料金

α, β : パラメータ

t_{a0} と α, β のパラメータ、時間価値 (65 円/分) および、高速道路料金の各個別リンクへの推計モデルは文献¹²⁾で利用したものと同様である。高速道路転換率モデル {式(4)} のパラメータは、従来研究¹²⁾の日単位の高速度道路転換率モデルで設定された次式を用いる。

$$\theta(L_{rs}) = 2.2008 L_{rs}^{-0.9635} \quad (18)$$

$$\psi(L_{rs}) = 0.4415 \ln(L_{rs}) + 0.5524 \quad (19)$$

L_{rs} : OD ペア rs 間の距離(km)

これらは、第7回名古屋高速道路自動車起終点調査¹³⁾のデータ(高速道路利用平均所要時間と交通量)とPT調査データ¹⁴⁾(一般道利用平均所要時間と交通量)を用いて設定されたものである。配分計算に用いる 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」¹⁴⁾を一部補正して、各種実測データ(高速道路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¹⁵⁾を用いる。モデルの適合度比較にもちいる実績交通量は平成6年道路交通センサス¹⁶⁾より得た一般道交通量(128個)と車両感知器データとして入手した高速道路交通量(41個)である。

5. 2 配分結果と考察

ここでは本研究で開発した、平均コストによる高速道路転換率内生型確率的均衡モデルの精度検証をおこなう。

1) モデルの収束状況

本研究で開発した計算アルゴリズムの収束状況を検証する。まず図-1は、 ξ を固定した後の補助問題の目的関数について Simplexial Decomposition 法による収束状況例 ($\xi=6$ 分)を示しており、この目的関数は経路生成回数18回で滑らかに収束している。

図-2は、元問題の収束状況を示しており、すべての OD ペアの ξ の平均値を ξ の更新回数との関係で示している。初期値による収束状況の変化もみるために、ここでは ξ を各 OD で一律に 0, 5, 10, 20(分)の4パターンの初期値を設定した。その結果、いずれの初期値の場合も1回の ξ の更新で、6分前後の値になり、3回程度の更新でおおよそ収束しているといえる。したがって、本ネットワークに限られた結果ではあるものの、実規模ネットワークにおける実証分析において、平均コストを用いた高速道路転換率内生型確率的均衡モデルは収束することが検証できたものと考ええる。

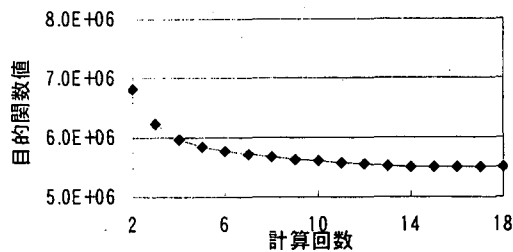
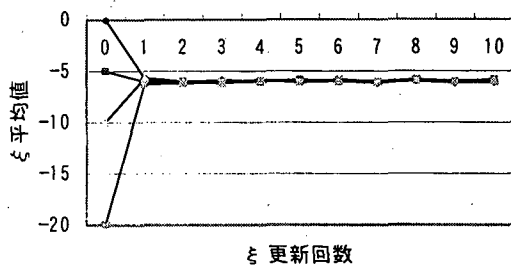


図-1 目的関数の収束状況

図-2 ξ の収束状況

2) 分散パラメータによる精度比較

高速道路経路と一般道経路の分散パラメータのペアをいくつか変えて行った配分結果を表-4に示す。高速道路と一般道のRMSEの和でみると、高速道路パラメータ90(1/hr)、一般道パラメータ10(1/hr)とする場合が最も低い値を示している。そのときの散布図は図-3のようになり、高速道路でやや過少ぎみではあるがほぼ45度の直線状に載っており、比較的良好な精度といえる。このことから、高速道路利用経路の選択は確定的に近いものであるが、一般道利用経路の選択は高速道路利用経路に比べ確率的に扱った方がよいという結果になった。高速道路が確定的になる理由は、高速道路ネットワークの方が一般道よりも経路選択の幅が少なく、渋滞の影響が少ないため経路が確定されやすいことがいえると考えられる。特に名古屋圏高速道路ネットワークは、選択すべき経路が少ないことがあるためと思われる。逆に、確定選択を行っている高速道路の分散を取って小さくすると、誤差が大きくなることもわかる。

ところで、桑原¹⁷⁾は実際ネットワークにおいて、高速道路と一般道で同じ分散パラメータを使った需要固定型確率的均衡配分により、分散パラメータと配分精度との興味深い関係を分析している。それによれば、分散パラメータは6(1/hr)か

ら60(1/hr)まで精度がよく、その間は変わらなかったとしている。本研究でもパラメータの範囲はほぼ同様となったが、高速道路と一般道を明確に分離することにより、各分散パラメータの影響がより明らかとなったものとする。

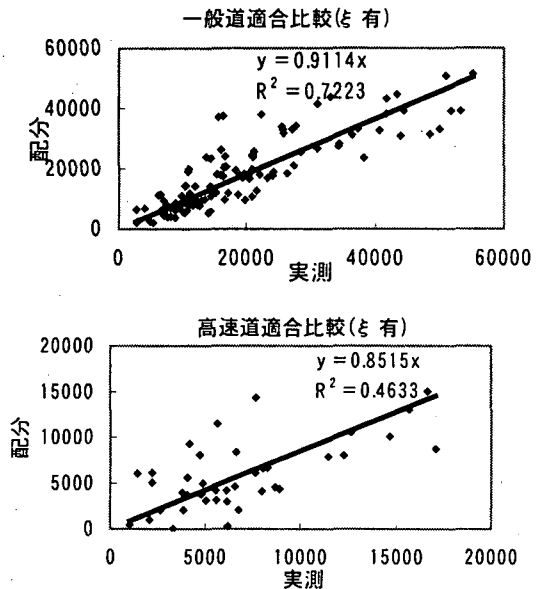


図-3 確率的均衡配分の結果
(高速道路パラメータ90,一般道パラメータ10)

表-4 RMS誤差による適合度比較

高速道 パラメータ	一般道 パラメータ	高速道 RMS誤差	一般道 RMS誤差	合計
10	10	3659.7	6754.2	10413.9
10	30	3893.8	6764.1	10657.9
10	60	3944.1	6641	10585.1
30	10	3717.8	6632.9	10350.7
30	30	3712.3	6588.4	10300.7
30	60	3786.3	6656.9	10443.2
60	10	3593	6674.1	10267.1
60	30	3678.7	6859.6	10538.3
60	60	3781.3	6657.1	10438.4
90	10	3653.3	6569.6	10222.9
90	30	3704.9	6596.6	10301.5
120	10	3699.4	6618.8	10318.2
120	30	3682.5	6740.5	10423
∞	∞	3747.6	6602.2	10349.8

3) 確定的配分との精度比較

表-4で高速道路と一般道の分散パラメータを ∞ とした配分結果は、確定的な均衡配分をした結果と同等である。このとき、最短経路コストは利用される経路の平均コスト及び期待最小コストと同一である。この確定均衡の配分結果より、確定的

に配分をおこなった場合でも十分な現況再現性を有しているとはいえ、表-4 で示すとおり、確率的に配分をおこなった方が、さらにより現況再現性を有することが示された。

5. 3 期待最小コストによるモデルの配分結果と考察

本研究で ϵ を導入して、平均コストの確率的均衡を行った妥当性を考える。そのため $\epsilon=0$ として、補助問題を最適化することを一度のみ行い、期待最小コストを用いる高速道路転換率内生型確率的均衡配分モデルの精度を考察する。表-5 は、高速道路の分散パラメータを90で固定し、一般道の分散パラメータを変化させて、高速道路利用OD交通量の配分結果と実測 OD 交通量との比を示したものであるが、一般道分散パラメータが低くなるにつれて、配分 OD 交通量は過少に推定される結果となった。

この原因は、3.2節で考察した期待最小コストと平均コストの基本的特性にあると考えられる。前節で精度が最もよかった分散パラメータ（高速道路：90、一般道：10）について、3.2 節表-2 の結果を当てはめてみる。分散パラメータが90の時の期待最小コストと平均コストのコスト差は-0.46 であるのに対して、10 の時のコスト差は-13.17 となる。これは（高速道路：90、一般道：10）のケースでは、高速道路は期待最小コストと平均コストはほぼ同値だが、一般道は期待最小コストが平均コストより大きく下回る値になることを示唆するものである。よって高速道路転換率モデルの計算に期待最小コストを用いると、特に一般道の経路コストが実際の平均コストに比べ小さい値をとることから、表-5 では高速道路利用

ODが過少に推定されてしまったものと考えられる。これらの結果から本研究で開発した平均コストを用いた高速道路転換率内生型確率的均衡配分モデルの有用性がわかったといえる。

6. おわりに

本研究で得られた結論及び今後の課題は以下のようになる。

1) 高速道路転換率を含む確率的均衡配分の定式化をおこなった。需要関数である高速道路転換率は、平均コストを変数としたロジット型関数を用いた。

2) 分散パラメータの違いによる期待最小コストと平均コストの特性を分析した結果、それらのコスト差は、分散パラメータが小さくなる(20 以下)ほど、大きくなる傾向が強い。このことから、現実のデータから得られる高速道路転換率モデルに平均コストを用いる妥当性を考察できた。

3) 平均コストによる高速道路転換率を生内化した確率的均衡モデルの解法を示した。このアルゴリズムから得られる解の収束性は証明されないが、実証分析をとおして収束することが検証できた。

4) Simplicial Decomposition 法を応用したモデルの解法を用いて、開発したモデルを名古屋圏の大規模ネットワークへ適用した。適用計算の実現は今までに研究事例がなく、近年のコンピュータの大幅な性能向上に起因するところが大きい。配分結果の適合度は、高速道路パラメータ 90(1/hr)、一般道パラメータ 10(1/hr)を用いた場合が最も高い再現性を示した。このことから、高速道路利用の経路選択は確定的に近いものであり、一般道利用の経路選択は高速道路利用経路に比べ確率的に扱ったほうがよいことが分かった。

5) 期待最小コストによる高速道路転換率の確率的均衡配分では一般道分散パラメータが低くなるにつれて、高速道路利用OD交通量は過小に推定されるようになった。よって、平均コストを用いた高速道路転換率の有用性が確認された。

さらに、信頼性を高めるためには、他の都市圏でも本モデルを適用して収束性や実績再現性の検証を行う必要がある。最後に、本研究の適用計

表-5 期待最小コストによる高速転換率内生型確率的均衡配分結果

高速道 パラメータ	一般道 パラメータ	高速道 配分/実測	高速道 RMS誤差	全体 RMS誤差
90	1	0.279	6515.8	13487.2
90	5	0.477	5347.5	12019
90	10	0.693	4282.3	10843.7
90	15	0.816	3881.8	10529.5
90	20	0.874	3736.6	10326.9
90	50	0.978	3713.8	10343.2
90	60	0.993	3737.7	10293.3

算において、名古屋高速道路公社、名古屋高速道路協会、(株)日建設計より多大な協力を得ました。ここに感謝の意を表します。

付 録

【補助問題】の計算アルゴリズム

補助問題は、期待最小コストを変数に持つ需要関数を組み込んだ需要変動型確率的均衡配分モデルであり、数理最適化問題としての解法がいくつか開発されている⁷⁾。本研究ではこの補助問題を解いた後に平均コストを求める必要があることから、経路交通量を未知変数として解くことができる Simplicial Decomposition 法を利用する。ただし、一般道利用経路及び高速道路利用経路の分散パラメータ(μ , μ_e)が異なるため、それらの経路は別々に探索する必要がある。その点を含め、計算アルゴリズムを以下に示す。

Step A. 初期設定

経路拡張回数を $m=0$ 、計算回数を $p=0$ 、初期一般道利用経路集合を K_{rs}^m 、初期高速道路利用経路集合を K_{rs}^{em} に設定し、 K_{rs}^m, K_{rs}^{em} に対して、初期実行可能解となる経路交通量 $f_k^{rs(m)}$ 、 $f_k^{rs,e(m)}$ を設定する。

Step B. 経路限定後の均衡解を求める

Step B-0. 収束回数を $n=0$ として、初期経路交通量パターンとそれに対応するリンク交通量を設定

$$f_k^{rs(n)} = f_k^{rs(m)}, f_k^{rs,e(n)} = f_k^{rs,e(m)}$$

$$x_a^{(n)} = \sum_{k \in K_{rs}^m, K_{rs}^{em}} \sum_{rs} (\delta_{rs,k,a}^{e(n)} f_k^{ers(n)} + \delta_{rs,k,a}^{rs(n)} f_k^{rs(n)})$$

Step B-1. 降下方向ベクトル

- $x_a^{(n)}$ に応じたリンクコストの更新
- 一般道利用経路と高速道路利用経路を別々に探索する最短経路探索を行い、 $C_k^{rs(n)}$ 、 $C_k^{rs,e(n)}$ を更新
- 高速道路転換率モデルを用いて、高速道路利用 OD 交通量 $g_{rs}^{e(n)}$ 及び一般道利用 OD 交通量 $g_{rs}^{rs(n)}$ を設定し、これらをすべて負荷す all-or-nothing 法により $x_a^{(n)}$ を求める。
- ロジット型経路選択モデルにより経路集合

K_{rs}^m, K_{rs}^{em} に対して補助経路交通量 $f_k^{rs(n)}$ 、 $f_k^{rs,e(n)}$ を設定

Step B-2. 一次元探索

$$f_k^{rs(n+1)} = \alpha f_k^{rs(n)} + (1-\alpha) f_k^{rs(n)}$$

$$f_k^{rs,e(n+1)} = \alpha f_k^{rs,e(n)} + (1-\alpha) f_k^{rs,e(n)}$$

$$g_{rs}^{e(n+1)} = \alpha g_{rs}^{e(n)} + (1-\alpha) g_{rs}^{e(n)}$$

$$g_{rs}^{rs(n+1)} = \alpha g_{rs}^{rs(n)} + (1-\alpha) g_{rs}^{rs(n)}$$

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

とおき、一次元探索によって目的関数式を最小とするステップサイズ α を求める

Step B-3. α に基づいて解を更新

Step B-4. 収束判定

収束していれば Step C へ、そうでなければ $n=n+1$ として Step B-1. へ

Step C. 新たな経路の生成

経路集合 K_{rs}^m, K_{rs}^{em} を拡張する。このとき、一般道利用経路、高速道路利用経路の最短経路探索は文献 9) と同様である。ここでもし、新たな経路が見つからなければ、4 章：計算手順の Step 1 へ。そうでなければ、経路集合を拡張し、 $f_k^{rs(m+1)} = f_k^{rs(n)}$ 、 $f_k^{rs,e(m+1)} = f_k^{rs,e(n)}$ 、 $m=m+1$ として Step B-0. へ

参考文献

- 1) Daganzo, C.F. and Sheffi, Y. : " On Stochastic Models of traffic Assignment , Trans. Sci. 11 (3), pp. 253-274, 1977
- 2) 長澤秀春・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的均衡配分の適用研究，土木計画学研究・講演集 No22(2)，pp195-199, 1999
- 3) 松井 寛・藤田素弘：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，土木計画学研究・論文集 No.17, pp.15-28, 2000.
- 4) 高橋勝美，毛利雄一，井上紳一：均衡配分適用における課題と対応，土木計画学研究・講演集 No25(57)，2002
- 5) 吉田禎雄：発展的均衡配分の適用と課題 車種別時間帯均衡配分，土木計画学研究・講演集

No25(58), 2002.

- 6) Fisk, C. S.: "Some Developments in Equilibrium Traffic Assignment" Trans. Res. 14B(3), pp. 243-255, 1980
- 7) 宮城俊彦, 小川俊幸: 共役性概念に基づきロジットモデルのパラメータ推定法, 土木計画学研究・論文集, No.3, pp185-192, 1986.
- 8) 溝上章志, 松井寛: Fisk 型確率的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.28, pp21-29, 1992.
- 9) 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均衡モデルとその解法, 土木学会論文集, No.401, pp109-118
- 10) 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 ―最新の理論と解法―, 土木学会, 1998.
- 11) HAI YANG: MULTIPLE EQUILIBRIUM BEHAVIORS AND ADVANCED TRAVELER INFORMATION SYSTEMS WITH ENDOGENOUS MARKET PENETRATION, Transp Res-B, Vol. 32, No. 3, pp205-218, 1998
- 12) 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 No.653/IV-48, pp.85-94, 2000.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) 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