

多種流確率的均衡モデルによる準動的配分*

Semi-dynamic Multi Classes Stochastic User Equilibrium Assignment Model*

吉田禎雄**, 原田昇***

By Yoshio YOSHIDA**・Noboru HARATA***

1. はじめに

高齢化、少子化が進む我が国では、新規投資を縮小し、既存社会資本の有効活用が求められつつあるなど、道路の整備環境が次第に厳しくなっている。このような背景の中で、TDMは既存の社会資本の有効活用という点で今後ますます必要性が高まるものと考えられる。TDM施策は、P&R、C&Rなど公共交通への転換を促す1日を単位とした施策のほか、HOVレーンやリバーシブルレーン、バス専用レーンなど時間帯によって実施する施策や、大型車の流入規制やロードプライシングといった車種別に施策を実施するものも多い。しかし、このような時間帯別や車種別に実施する施策を評価するために必要な需要予測手法として適したものがないのが現状である。本研究では、多種流確率均衡モデルとOD修正法を結合した時間帯別車種別の準動的配分モデルについて検討を加えた。

本稿では、提案する多種流確率的時間均衡モデルの基礎となる多種流確率的均衡配分モデルと時間帯均衡配分モデルに関する既存研究のレビューを行った後、提案モデルの定式化を行った。続いて、その解法アルゴリズムを示した後、数値計算により提案モデルの挙動と適用可能性について検討を加えた。

2. 既存モデルのレビュー

(1) 多種流確率的均衡配分モデル

確率的利用者均衡モデルによる車種別配分について直接扱った具体的事例は少ないが、分担・配分統合モデルのような形で示されているものが多い。その例として、Yang¹⁾、本田・溝上²⁾は多種流の確率的均衡配分モデルを基にしてITSの導入効果分析を行っている。ここで使用されている多種流確率的均衡配分モデル (MSUE)

*キーワード: 配分交通, 均衡配分, ネットワーク交通流

**正員, 株式会社インテルテック研究所

(〒169-0075 東京都新宿区高田馬場 2-14-6

TEL: 03-3203-9241, FAX: 03-3203-9246

E-mail: yoshida@intel-tech.co.jp)

***正員, 工博 東京大学大学院新領域創成科学研究科

環境学専攻

は、車種別に異なる分散パラメータを持った主体が同一リンクを共有しているとして定式化されたものであり、多種流が m 種あるとした場合、以下に示す数理最適化問題となっている。

$$\min Z(\mathbf{x}, \mathbf{f}_1, \dots, \mathbf{f}_m)$$

$$= \sum_{a \in A} \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega + \sum_{g=1}^m \frac{1}{\theta_g} \sum_{rs} f_{g,rs}^{rs} \ln \left(\frac{f_{g,rs}^{rs}}{q_{rs}^g} \right) \quad (1)$$

制約条件:

$$\sum_{k \in K} f_{g,k}^{rs} = q_{rs}^g, \quad \forall r \in R, \forall s \in S, g=1, \dots, m \quad (2)$$

$$x_a = \sum_{rs} \sum_{k \in K_{rs}} f_{g,k}^{rs} \delta_{a,k}^{rs}, \quad a \in A \quad (3)$$

$$f_{g,k}^{rs} \geq 0, \quad \forall k \in K_{rs}, r \in R, s \in S, g=1, \dots, m \quad (4)$$

ここで、 x_a はリンク交通量、 $f_{g,k}^{rs}$ は rs 間の g 別の第 k 経路の経路交通量、 q_{rs}^g は rs 間 g 別の OD 交通量、 $t_a(x_a)$ はリンクコスト関数であり、逐次平均法あるいは部分線形化法などによって解くことができる¹⁾。しかし、このモデルは単一時間帯に対する配分モデルであり、時間帯間での相互作用は考慮されていない。

(2) 時間帯配分モデル

時間帯配分という準動的交通配分は、河上・溝上・鈴木³⁾によって始められ、隣合う時間帯で交通流の保存条件をリンク交通量レベルで修正する方法が示された。続いて、藤田・松井・溝上⁴⁾は、河上らのモデルを改良したリンク修正法と交通量の修正を OD 交通量で実施する OD 修正法を提案し、OD 修正法による時間均衡配分が数理最適化問題となることを始めて定式化した。また、宮城・牧村⁵⁾は、到着交通とネットワークパフォーマンスとで均衡させる半動的交通配分モデルとして OD 修正法と同様の定式化を行い、その適用事例を示した。その後、松井・藤田⁶⁾は有料道路を考慮した OD 修正法に発展させている。OD 修正法は、次の目的関数を最小化するという数理最適化問題となっている。

$$\min Z = \sum_{a \in A} \int_0^{x_a^{(n)}} t_a(w) dw - \sum_{rs \in \Omega} \int_0^{q_{rs}^{(n)}} \frac{2T_w}{Q_{rs}^{(n)}} (q_{rs}^{(n-1)} + Q_{rs}^{(n)} - z) dz \quad (5)$$

ここで、 $x_a^{(n)}$ は n 時間帯におけるリンク a の交通量、 T_w は演算の時間帯の幅、 $Q_{rs}^{(n)}$ は OD 交通量、 $q_{rs}^{(n)}$ は経

路間の残留交通量の総和である。また、 n 時間帯の OD ペアー rs 間の最短所要時間を $c_{rs}^{(n)}$ とすれば残留交通量修正後の配分交通量 $g_{rs}^{(n)}$ は式(6)で示される。

$$g_{rs}^{(n)} = q_{rs}^{(n-1)} + Q_{rs}^{(n)} - \frac{c_{rs}^{(n)}}{2T_w} Q_{rs}^{(n)} \quad (6)$$

また、確率的モデルでは、赤松・牧野・高橋⁷⁾ が利用者の時間帯選択行動と渋滞を内生化した確率的利用者均衡配分を等価な変分不等式問題として定式化した準動的な交通量配分 (UEQ/ED) を提案している。このモデルでは定式化において待ち行列に関する状態方程式、フロー保存条件、及び経路交通量の状態などと共に、次式によって時間帯 n の OD 交通量が与えられると仮定している。

$$q_{od}^{(n)} = Q_{od} \frac{\exp[-\eta(S_{od}^{(n)} - V_{od}^{(n)})]}{\sum_n \exp[-\eta(S_{od}^{(n)} - V_{od}^{(n)})]} \quad (7)$$

ここで、 Q_{od} は OD ペアー od 間の全時間帯の総交通量 (与件)、 η は時間帯選択の分散パラメータ、 $V_{od}^{(n)}$ は時間帯 n と OD ペアー od に固有の効用 (所与の定数)、 $S_{od}^{(n)}$ は OD ペアー od の時間帯 n の期待最小費用で、次式で得られる。

$$S_{od}^{(n)} = -\frac{1}{\theta} \ln \sum_r \exp[-\theta C_r^{od(n)}(\mathbf{x}^{(n)}, \mathbf{X}^{(n)})] \quad (8)$$

ここで、 θ は経路選択の分散パラメータ、 $C_r^{od(n)}$ は OD ペアー od の r 番目経路を時間帯 n に通過するのに要する経路所要時間、 $\mathbf{x}$ はリンクへの流入交通量ベクトル、 $\mathbf{X}$ はリンクの待ち行列台数ベクトルである。

これらの2つの代表的な時間帯均衡配分モデルは全て単一車種を対象とした定式化となっており、実務で要求される車種別の評価に適用することが困難である。

3. 多種流確率的時間帯別均衡配分モデル

これまでの多種流確率的均衡配分モデルと時間帯配分モデルを結合することで多種流確率的時間帯均衡配分モデル (MTSUE) を構築する。なお、時間帯間の準動的な相互作用を考慮した時間帯配分モデルとしては、リバーシブルレーンのように時間帯によってネットワーク条件が変化する場合にも適用できるモデルで、かつ実務的に扱い易い OD 修正法を応用した。

(1) 仮定

まず、OD 修正法と同様に① 配分時間帯の幅 T_w は OD ペアー間の最大旅行時間以上である、② 発生交通は時間帯内で一様に発生しリンク上に一様に分布する、という2つの仮定を置く。ここで、現在の配分時間帯を n とし、1本のリンク a を相互干渉なしに m 種の交通が利

用するとき、車種 j のリンクコスト関数が式(9)で与えられるものとする。また、リンクの所要時間は、このリンクコスト関数にリンク交通量 $x_{j,a}^{(n)}$ に関係しない料金を時間評価値で換算した料金抵抗 $R_{j,a}$ を含めた式(10)で示されるとする。

$$t_a^j(x_a^{(n)}) = t_0 \left(1 + \alpha \left(\frac{x_a^{(n)}}{C_a} \right)^\beta \right) \quad (9)$$

$$t_a^{(n)} = t_a^j(x_a^{(n)}) + R_{j,a} \quad (10)$$

ここで、 $x_a^{(n)} = \sum_{j=1}^m x_{j,a}^{(n)}$ であり、リンク a を利用する

総交通量である。

また、 n 時間帯における車種 j の OD ペアー rs 間の経路 k の料金抵抗を除いた実所要時間を $c_{j,k}^{rs(n)}$ 、料金抵抗を含めた一般化費用を $C_{j,k}^{rs(n)}$ とし、当該時間帯の OD 交通量 (与条件) を $Q_j^{rs(n)}$ 、OD 修正法と同様の方法で $n-1$ 時間帯の残留交通量 $q_j^{rs(n-1)}$ 及び n 時間帯の OD 間所要時間より得られる残留交通量による修正後の配分交通量を $g_j^{rs(n)}$ とする。OD 修正法による残留交通量は、起終点間の経路上のリンクを時間帯 T_w の間に通過できない交通量を経路上で平均化して求めるものであり、利用する経路上でのリンクの順位に関係なく求められる。ここで、経路 k を利用する OD 交通量 $Q_{j,k}^{rs(n)}$ は、経路交通量 $f_{j,k}^{rs(n)}$ と同様に式(11)のロジット型で得られると考えられるとともに、経路 k を利用した場合の残留交通量 $q_{j,k}^{rs(n)}$ は図-1 に示すとおりであり、式(12)として求められる。

$$Q_{j,k}^{rs(n)} = Q_j^{rs(n)} \frac{\exp[-\theta_j C_{j,k}^{rs(n)}]}{\sum_k \exp[-\theta_j C_{j,k}^{rs(n)}]} \quad (11)$$

$$q_{j,k}^{rs(n)} = \frac{c_{j,k}^{rs(n)} Q_{j,k}^{rs(n)}}{2T_w} \quad (12)$$

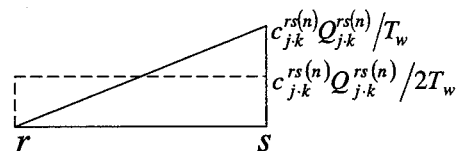


図-1 残留交通量

なお、OD ペアー rs 間で利用される複数経路の実所要時間は、確率的配分では全て異なることに注意が必要である。また、式(11)、(12)の $Q_{j,k}^{rs(n)}$ 、 $q_{j,k}^{rs(n)}$ を全経路について加算すると式(13a)、(13b)となる。

$$Q_j^{rs(n)} = \sum_k Q_{j,k}^{rs(n)} \quad (13a)$$

$$q_j^{rs(n)} = \sum_k q_{j,k}^{rs(n)} \quad (13b)$$

さらに、全ての経路別所要時間 $c_{j,k}^{rs(n)}$ を交通量で加重平均した平均所要時間 $\overline{c_j^{rs(n)}}$ 及び経路別料金抵抗を交通量で加重平均した平均料金抵抗 $\overline{R_j^{rs(n)}}$ は、次式で求められる。

$$\begin{aligned} \overline{c_j^{rs(n)}} &= \frac{\sum_k f_{j,k}^{rs(n)} \cdot c_{j,k}^{rs(n)}}{g_j^{rs(n)}} \\ &= \frac{\sum_a x_{j,a}^{rs(n)} \cdot (t_a(x_a^{(n)}) - R_{j,a})}{g_j^{rs(n)}} \end{aligned} \quad (14a)$$

$$\overline{R_j^{rs(n)}} = \frac{\sum_k f_{j,k}^{rs(n)} \cdot R_{j,k}^{rs(n)}}{g_j^{rs(n)}} = \frac{\sum_a x_{j,a}^{rs(n)} \cdot R_{j,a}}{g_j^{rs(n)}} \quad (14b)$$

さらに、OD 交通量は式(11)で示すように経路交通量と同様に算定できるため、配分交通量と経路交通量で表現された平均所要時間の式(14a)は、OD 交通量を用いた加重平均の式(15)と等価といえる。

$$\overline{c_j^{rs(n)}} = \frac{\sum_k Q_{j,k}^{rs(n)} \cdot c_{j,k}^{rs(n)}}{Q_j^{rs(n)}} \quad (15)$$

以上のことから、車種 j の rs 間の配分交通量 $g_j^{rs(n)}$ は rs 間の平均所要時間 $\overline{c_j^{rs(n)}}$ を用いて式(16)に示すようになり、経路交通量が決まることで確定的に決定される。

$$\begin{aligned} g_j^{rs(n)} &= q_j^{rs(n-1)} + \sum_k Q_{j,k}^{rs(n)} - \sum_k q_{j,k}^{rs(n)} \\ &= q_j^{rs(n-1)} + \sum_k Q_{j,k}^{rs(n)} - \sum_k \frac{c_{j,k}^{rs(n)} \cdot Q_{j,k}^{rs(n)}}{2T_w} \quad (16) \\ &= q_j^{rs(n-1)} + Q_j^{rs(n)} - \frac{Q_j^{rs(n)} \cdot \overline{c_j^{rs(n)}}}{2T_w} \end{aligned}$$

(2) 定式化

式(16)の残留交通量を考慮した需要変動型の確率的利用者均衡条件が車種毎に成立しているとし、車種別に分散係数 θ_j を与えると、多種流確率的時間帯別均衡配分モデルは以下のとおりとなる。なお、 $\delta_{j,a,k}^{rs(n)}$ は車種 j の OD ペア rs 間の経路 k でリンク a を利用するとき 1、そうでないとき 0 となるダミー変数であり、 $\overline{R_j^{rs(n)}}$ は OD ペア rs 間の平均料金抵抗である。(以下、変数集合の範囲表示は省略する)

(経路選択)

$$f_{j,k}^{rs(n)} = g_j^{rs(n)} \frac{\exp[-\theta_j C_{j,k}^{rs(n)}]}{\sum_k \exp[-\theta_j C_{j,k}^{rs(n)}]} \quad (17)$$

(リンク変数と経路変数の関係)

$$x_a^{(n)} = \sum_{j=1}^m \sum_k \sum_{rs} \delta_{j,a,k}^{rs(n)} f_{j,k}^{rs(n)} \quad (18)$$

$$C_{j,k}^{rs(n)} = \sum_a (t_a^j(x_a^{(n)}) + R_{j,a}) \delta_{j,a,k}^{rs(n)} \quad (19)$$

(フロー保存条件)

$$\sum_k f_{j,k}^{rs(n)} - g_j^{rs(n)} = 0 \quad (20)$$

(OD 需要条件)

$$\overline{C_j^{rs(n)}} = \frac{2T_w}{Q_j^{rs(n)}} \left(q_j^{rs(n-1)} + Q_j^{rs(n)} + \frac{Q_j^{rs(n)} \cdot \overline{R_j^{rs(n)}}}{2T_w} - g_j^{rs(n)} \right) \quad (21)$$

(非負条件)

$$f_{j,k}^{rs(n)} \geq 0, \quad g_j^{rs(n)} \geq 0, \quad x_a^{(n)} \geq 0 \quad (22)$$

なお、式(20)は OD 需要の逆需要関数であり、

$$\overline{C_j^{rs(n)}} = \overline{c_j^{rs(n)}} + \overline{R_j^{rs(n)}} \quad (23)$$

の関係があるため、式(16)から以下のとおり求められる。

$$\begin{aligned} q_j^{rs(n-1)} + Q_j^{rs(n)} - \frac{\overline{C_j^{rs(n)}}}{2T_w} Q_j^{rs(n)} - g_j^{rs(n)} \\ = q_j^{rs(n-1)} + Q_j^{rs(n)} - \frac{\overline{C_j^{rs(n)}} - \overline{R_j^{rs(n)}}}{2T_w} Q_j^{rs(n)} - g_j^{rs(n)} \quad (24) \\ = 0 \end{aligned}$$

(3) 等価な最適化問題

式(9)の車種別のリンクコスト関数のパラメータ α, β が車種別に異なる場合には等価な最適化問題を構成できないが、全車種共に等しい場合には、リンクコスト関数と車種 i, j のリンク交通量に関し次式が成り立つため対称であり、時間帯 $n-1$ の残留交通量を与件とした場合、MSUE と同様に時間帯 n における均衡条件をと等価な最適化問題が構成できる。

$$\frac{\partial t_a^i(x_a^{(n)})}{\partial x_{j,a}^{(n)}} = \frac{\partial t_a^j(x_a^{(n)})}{\partial x_{i,a}^{(n)}} \quad (25)$$

$$\min Z(x, f_1, \dots, f_m, g_1, \dots, g_m)$$

$$\begin{aligned} &= \sum_a \int_{x_a \rightarrow x_a} t_a(\omega) d\omega + \sum_{a,j=1}^m x_{j,a} R_{j,a} \\ &+ \sum_{j=1}^m \frac{1}{\theta_j} \sum_{rs} \sum_k f_{j,k}^{rs(n)} \ln \left(\frac{f_{j,k}^{rs(n)}}{g_j^{rs(n)}} \right) \\ &- \sum_{rs} \sum_{j=1}^m \int_0^{q_j^{rs(n)}} \frac{2T_w}{Q_j^{rs(n)}} \left(q_j^{rs(n-1)} + Q_j^{rs(n)} + \frac{Q_j^{rs(n)} \cdot \overline{R_j^{rs(n)}}}{2T_w} - z \right) dz \end{aligned} \quad (26)$$

ここで、右辺第 1 項の線積分において、状態 x_a^0 は任意であり、積分経路によらず積分可能であるため、ゼロから x_a までの直線を経路に選び積分することで次のように求められる。

$$\begin{aligned} \sum_a \int_{x_a^0 \rightarrow x_a} t_a(\omega) d\omega &= \sum_a \int_{j=1}^m \int_a (\alpha x_a) x_{j,a} d\sigma \\ &= \sum_a \sum_{j=1}^m \left[t_{a0} x_{j,a} + \alpha \frac{t_{a0} x_{j,a}}{\beta+1} \left(\frac{x_a}{C_a} \right)^\beta \right] \\ &= \sum_a \int_a t_a(\omega) d\omega \end{aligned} \quad (27)$$

そのため、式(26)は、次のとおりとなる。

$$\begin{aligned} \min Z(x, f_1, \dots, f_m, g_1, \dots, g_m) \\ &= \sum_a \int_a t_a(\omega) d\omega + \sum_{j=1}^m \sum_a x_{j,a} R_{j,a} \\ &+ \sum_{j=1}^m \frac{1}{\theta_j} \sum_{rs} f_{j,k}^{rs(n)} \ln \left(\frac{f_{j,k}^{rs(n)}}{g_j^{rs(n)}} \right) \\ &- \sum_{rs} \sum_{j=1}^m \int_0^{q_j^{rs(n)}} \frac{2T_w}{Q_j^{rs(n)}} \left(q_j^{rs(n-1)} + Q_j^{rs(n)} + \frac{Q_j^{rs(n)} \cdot R_{j,a}^{rs(n)}}{2T_w} - z \right) dz \end{aligned} \quad (28)$$

なお、OD ペア rs 間の車種 j 毎の Lagrangian 乗数として、経路交通に対し $\lambda_j^{rs(n)}$ 、OD 交通量に対し $\mu_j^{rs(n)}$ を導入して Lagrangian 関数に書き換えた後、 f_j と g_j を独立変数と考えた場合について Kuhn-Tucker 条件を調べることで、各車種別に式(17)の経路交通量及び式(16)の残留交通量修正後の配分交通量を得ることができる。また、線形結合された車種別交通量等は第 1 項から第 3 項はリンク交通量に関し単調増加関数で狭義凸関数、第 4 項の需要関数は配分交通量に関し単調減少関数で狭義凹関数であることから目的関数は狭義凸関数となり解は一意に定まる。

4. 最適化問題の解法

(1) 補助問題

式(28)のモデルは需要変動型の確率的利用者均衡モデルと同様であるが、一般的なネットワークでは経路交通変数は膨大な個数となるため最適化問題を直接解くことは困難である。そのため、経路交通量を明示的に扱わずに解く逐次平均法⁹⁾や部分線形化法¹⁰⁾が考案されている。ここでは、収束の早い部分線形化法を適用した解法を示す。

部分線形化法では、多くの経路を列挙しなければならない経路交通量について、経路選択がロジットモデルである場合には起点別リンク交通量を用いて式(29)のとお

り表すことができることを利用する¹¹⁾。

$$\begin{aligned} \sum_{rs} \sum_k f_k^{rs(n)} \ln \left(\frac{f_k^{rs(n)}}{g^{rs(n)}} \right) \\ &= \sum_r \sum_{(I,J) \in L} x_{IJ}^{r(n)} \ln x_{IJ}^{r(n)} - \sum_r \sum_{J \in N} \left(\sum_{I \in I_J} x_{IJ}^{r(n)} \right) \ln \left(\sum_{I \in I_J} x_{IJ}^{r(n)} \right) \end{aligned} \quad (29)$$

ここで、 $x_{IJ}^{r(n)}$ はリンク $(I \rightarrow J)$ における発ノード r 別のリンク交通量、 L はノードペア (I, J) で表されたリンク集合、 N はノード集合、 I_J はノード J に流入するリンクの始点ノード I の集合である。

続いて、一次元探索を実施するために、式(28)の第 1 項の積分項は取り扱いにくいので、これを線形近似する。なお、第 4 項の積分はそのまま積分したものを用いる。これにより式(28)は式(30)に示す補助問題に変換できる。そのため一次元探索は、現在の試行点におけるリンク交通量を固定した場合の残留交通量を考慮した需要変動型確率的利用者均衡問題と考えて実施すればよい。

$$\begin{aligned} \min \hat{Z}(y_1, \dots, y_m, h_1, \dots, h_m) \\ &= \sum_a t_a(x_a) \left(\sum_{j=1}^m y_{j,a} \right) + \sum_{j=1}^m y_{j,a} R_{j,a} \\ &+ \sum_{j=1}^m \frac{1}{\theta_j} \left(\sum_r \sum_{(I,J) \in L} y_{IJ}^{r(n)} \ln y_{IJ}^{r(n)} - \sum_r \sum_{J \in N} \left(\sum_{I \in I_J} y_{IJ}^{r(n)} \right) \ln \left(\sum_{I \in I_J} y_{IJ}^{r(n)} \right) \right) \\ &- \sum_{rs} \sum_{j=1}^m \frac{2T_w h_j^{rs(n)}}{Q_j^{rs(n)}} \left(q_j^{rs(n-1)} + Q_j^{rs(n)} + \frac{Q_j^{rs(n)} \cdot R_{j,a}^{rs(n)}}{2T_w} - \frac{h_j^{rs(n)}}{2} \right) \\ \text{s.t.} \\ &\sum_I y_{IK}^r - \sum_J y_{KJ}^r + \sum_s h^{rs} \delta_{rk} - h^{rs} \delta_{sk} = 0 \\ &y_{IJ} = \sum_r y_{IJ}^r, \quad h^{rs} \geq 0, \quad y_{IJ}^r \geq 0 \end{aligned} \quad (30)$$

また、残留交通量の処理で用いる平均所要時間 $\overline{c_j^{rs(n)}}$ や平均料金抵抗 $\overline{R_j^{rs(n)}}$ は、式(14)で求められるが、式(14)の車種別リンク交通量 $x_{j,a}^{rs(n)}$ は式(29)に示す発ノード別リンク交通量 $x_{IJ}^{r(n)}$ を算定する際に、OD ペア一別・車種別のリンク交通量を同時に算定しておくことで容易に求められる。

(2) 解法アルゴリズム

部分線形化法による解法アルゴリズムを簡単に示すと以下のとおりである。

Step1

交通量の最も少ない時間帯を時刻の原点とし、 $n=1$ 、 $q_j^{rs(n-1)}=0$ とする。リンク交通量がゼロの場合の最短経路を車種別に探索し、仮の OD 間所要時間及び料金

$\overline{c_j^{rs(n)(0)}}$, $\overline{R_j^{rs(n)(0)}}$ を求め式(16)に代入して残留交通流量修正後の OD 交通流量 $g^{rs(n)(0)}$ を求める。

Step2 初期実行可能解

$m=0$ として初期の実行可能解 $g^{rs(n)(0)}$, $x_a^{(n)(0)}$ を Dial のアルゴリズムによる確率配分で求める。なお、実行解を求める場合には、車種別に最短経路の探索と確率配分を実施する。 $M=1$ とする。

Step3 リンクコストの更新

リンク a の全車種交通流量 $x_a^{n(M-1)}$ に対する所要時間 $t_a(x_a^{n(M-1)})$ を求める。

Step4 補助問題：残留交通流量修正後の OD 交通流量式(14)によって車種別の OD 間平均所要時間及び料金 $\overline{c_j^{rs(n)(M-1)}}$, $\overline{R_j^{rs(n)(M-1)}}$ を求め、残留交通流量修正後の配分交通流量 $h^{rs(n)(M)}$ を次式で求める。

$$h_j^{rs(n)(M)} = q_j^{rs(n-1)} + Q_j^{rs(n)} - \frac{\overline{c_j^{rs(n)(M-1)}}}{2T_w} Q_j^{rs(n)}$$

Step5 補助問題：実行可能解

配分交通流量 $h^{rs(n)(M)}$ を車種別に Dial のアルゴリズムにより確率配分し、リンク交通流量 $y_a^{(n)(M)}$ を求める。

Step6 ステップサイズの算定

次の一次元探索問題を解きステップサイズ α ($0 \leq \alpha \leq 1$) を求める。

$$\min Z(x + \alpha(y - x), g + \alpha(h - g))$$

ここで、 Z は式(28)の目的関数であり、求めた α を用いて全ての車種 j の交通流量、OD 交通流量を更新する。また、式(14)の所要時間、料金抵抗及び式(29)の発ノード別の交通流量についても更新する。

$$x_{j,a}^{rs(n)(M)} = x_{j,a}^{rs(n)(M-1)} + \alpha(y_{j,a}^{rs(n)(M)} - x_{j,a}^{rs(n)(M-1)})$$

$$g_j^{rs(n)(M)} = g_j^{rs(n)(M-1)} + \alpha(h_j^{rs(n)(M)} - g_j^{rs(n)(M-1)})$$

Step8 収束判定

あらかじめ、設定した収束判定条件を満足すれば、計算を終了する。そうでなければ、 $M=M+1$ として Step3 に戻り、繰り返し計算を実行する。

Step9 配分時間帯終了判定

対象とする全ての時間帯でリンク交通流量を計算できたら終了する。そうでなければ残留交通流量 $q_j^{rs(n)}$ を求め、 $n=n+1$ として Step 2 に戻る。

5. 数値計算によるモデルの挙動の検討

確率配分の解を得る方法として Dial 法、Markov 連鎖による方法などがある⁸⁾ が、大規模ネットワークに容易に適用可能な Dial 法が実用的と思われる。しかし、Dial

法には明らかに経路となり得るものが欠落するという欠点がある。この欠落する経路は、繰り返し計算毎に異なるため残留交通流量や目的関数の評価に影響を及ぼすことが予想できる。そのため、Dial 法を用いた場合における提案する MTSUE モデルの収束挙動を数値計算で確認しておくことは、実務に適用する上で有意である。ここでは、簡単なネットワークを用いて収束状況を検討した後、現実のネットワークに対して数値計算を行い、その収束状況を確認する。さらに大規模ネットワークへ適用し、再現精度について検討する。

(1) 収束状態の検討

収束状態を検討するために図-2 に示す一部に有料道路を含む簡単なネットワークに表-1 に示す 2 車種の OD 交通流量を配分する計算を実施した。リンクコスト関数のパラメータは、2 車種とも等しく、 $\alpha=0.48$, $\beta=2.82$ とし、料金抵抗は車種別相違が大きく現れるように第 2 車種の料金抵抗を第 1 車種の 5 倍となるように設定した。

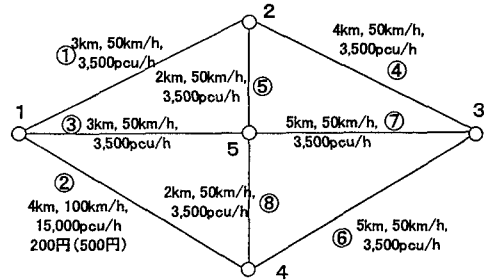


図-2 検討対象ネットワーク

表-1 検討用 OD 交通流量(単位: 台)

	Node	1	2	3	4
第1車種	1	0	2,000	2,000	5,000
	2	2,000	0	3,000	2,000
	3	2,000	3,000	0	2,000
	4	5,000	2,000	2,000	0
第2車種	1	0	1,000	400	1,500
	2	1,000	0	1,000	600
	3	400	1,000	0	1,000
	4	1,500	600	1,000	0

(a) 分散係数の影響

車種別の分散係数を等しく変化させた場合のリンク別交通流量の変化を示したものが図-3 である。分散係数が大きくなるのに従いリンク交通流量が減少している。これは、分散係数の増加に伴って選択される経路集合が一般化費用最小の経路のみの集合となり、総走行台キロが減少して確定的均衡配分に近づいているためである。また、分散係数が一般的な設定値の範囲である 1~100 の間で交通流量の変化が大きく、予測精度を高めるためには分散係数の検討が重要であると言える。

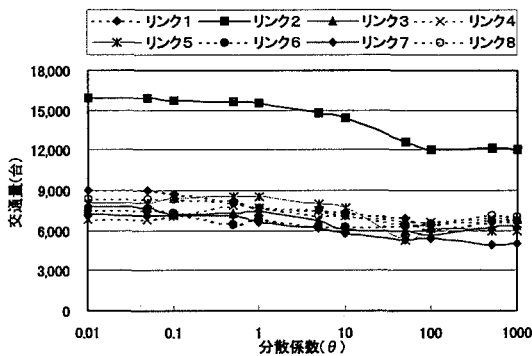
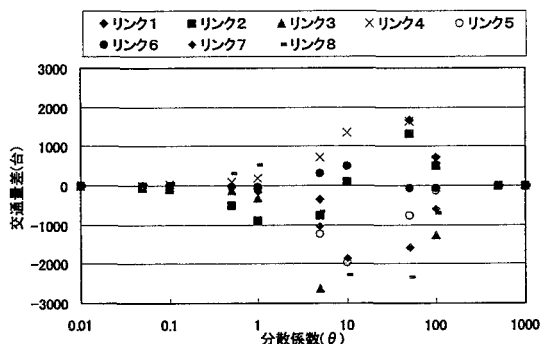


図-3 分散係数の影響

(b) 初期値と収束状態

提案する MTSUE モデルの解は一意に決まるものであるが、Dial 法を適用した場合には明らかに利用されると思われる経路が欠落するといった問題があり、その影響について初期値を変えて得られる収束誤差によって検討した。与える初期値は、実行可能解でなければならないが、一次元探索による線形結合を実施するためには多くの変数の値を保持する必要がある、その設定を人為的に行うことは困難である。そこで、初期実行可能解の計算に用いる分散係数を、本来の計算用分散係数の 5 倍に変更する場合と変更しない場合とを比較した。

リンクの総交通量について、分散係数を 5 倍にする場合としない場合との差を初期実行可能解について示したものが図-4 であり、配分結果について示したものが図-5 である。これによると、初期値の段階では大きな差があるものの、配分結果ではその差は小さくなっており、大局的には同一解に収束しているものと考えられる。車種別の混入率についても同様の傾向を示している。ただし、リンク交通量も車種比率も概ね収束しているものの全く同一の解に収束しているわけではない。



注) リンク 3 の交通量の差は、分散係数 10 の場合 4,418、50 の場合 3,623 であり、欄外のため表示されていない。

図-4 リンク交通量(初期実行可能解)の差

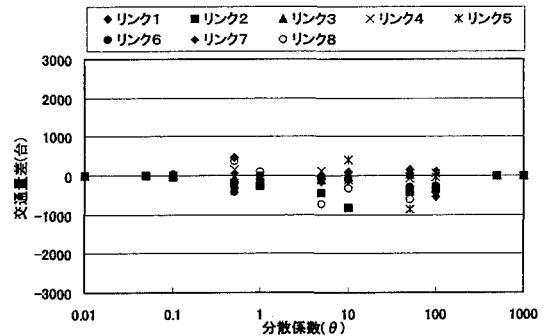


図-5 リンク交通量(収束解)の差

(c) 実ネットによる収束状態

簡単なネットワークでは、Dial 法による確率配分の経路の欠落の影響が大きく現われたのではないかと考えられる。そこで、複雑な実際のネットワークを用いた配分計算によって、さらに収束状況を検討した。用いたネットワークは沖縄本島の約 1500 リンクの幹線道路ネットワークであり、ゾーン数は 280 ゾーン、配分時間帯は 2 時間毎とし、3 車種の OD 交通量を配分した。分散係数は、 $\theta=1.0$ とし、初期値を与えるために使用した分散係数は 10 倍の $\theta=10.0$ とした。

全リンクについて初期値を変えない場合の解に対する変えた場合の解の誤差を RMSE で示したものが表-2 である。RMSE 誤差は 2~3% 程度であり、初期値が実行可能解であれば車種別比率についても解が一意に収束していると判断できる。

表-2 車種別交通量の誤差

	合計	乗用車	小型貨物	普通貨物
平均交通量(台/2 h)	1,444	1,149	245	50
RMSE(台/2 h)	31	24	7	2
RMSE (%)	2.1	2.1	2.9	3.6

(2) 大規模ネットワークへの適用例

(a) 大規模ネットワークにおける再現精度

提案する MTSUE を首都圏ネットワークに適用、道路交通センサ結果の実測値と比較することで適用精度に検討を加えた。なお、比較対象の配分モデルとして単一車種を対象とした OD 修正法 (TUE) 及び提案モデルを単一車種で定式化したモデル (TSUE) を用いた。

検証対象のネットワークは、首都圏の約 13,000 リンクで構成され、ゾーン数は約 360 ゾーンである。また、利用した OD 表は、平成 6 年度道路交通センサの現況 B ゾーン OD 表であり、首都圏周辺についてはゾーンの統合を行った。検証地点は対象地域にある全ての 24 時間観測地点の 264 箇所とした。配分時間帯は 2 時間単位とし、発時刻ベースで 2 時間 OD 表を作成した。また、各

リンクに設定するリンクコスト関数は式(31)の形をしたものであり、そのパラメータは道路区分別・規制速度別に別途道路交通センサスデータより推計し、表-3に示すとおりである¹²⁾。なお、このリンクコスト関数は信号交差点での平均的遅れ時間を別途与えるものであり、信号交差点密度の高い多車線道路及び市街地2車線道路に対して、0.01時間/km(=36秒/km)の平均的遅れ時間を加算した。このリンクコスト関数は、規制速度や平均的遅れ時間を用いているが、これらはリンク交通量とは独立しているため、MSTUEの仮定である式(25)を満足したものである。

$$\frac{t}{t_0} = k_0 + k_1 V_r + k_3 \left(\frac{x}{C} \right)^\beta \quad (31)$$

ここで、 k_0 、 k_1 、 k_2 、 k_3 、 β はパラメータ、 x は交通量、 C は可能交通容量、 V_r は規制速度(km/h)、 t_0 は規制速度で走行した場合の旅行時間である。

表-3 道路種類別 BPR 関数

道路種別	k_0	k_1	k_3	β
高速道路	0.3698	0.0072	0.8053	2.5
多車線道路	0.2843	0.0188	0.4329	1.1
2車線都市部	0.6420	0.0124	0.2298	1.2
2車線平地部	0.3310	0.0163	0.1175	2.3
2車線山地部	0.3389	0.0160	0.1013	3.7

表-4 時間評価値(円/分)

乗用車	小型貨物車	普通貨物車	平均値
54.3	85.68	97.29	76.2

有料道路の料金抵抗は、表-4に示す車種別の時間評価値によって算定した。なお、平均値は首都圏の車種別総走行台キロで加重平均したもので、比較のために単一車種で配分する場合に適用した。なお、単一車種のTSUE及びTUEでは、全車種を同一経路に同時に配分し、これをリンク別に集計することにより、大型車混入率等の車種別構成比率を算出した。ただし、TUEについては経路交通量は一意に定まらないため、大型車混入率も特定できないが、実務で多く使われている方法であり、比較のために算出した。

配分計算より得られた時間帯別交通量を24時間分加算して日交通量としたものとセンサス交通量とでRMSEを求めると、図-6に示すとおりである。全体の相関係数はいずれのモデルも0.75前後であるが、推計誤差を見ると全ての道路区分において確率的均衡配分をベースにしたTSUE及びMTSUEの精度が高くなっている。また、時間帯別交通量をセンサス交通量と比較したものが図-7であるが、時間帯別に見てもTSUE及びMTSUEの精度が高くなっている。

提案するTMSUEが単一車種のTSUE及びTUEと異なる点は、車種別に配分するか否かであるため、車種別交通量の精度について大型車混入率で見ることとする。

時間帯別の大型車混入率について、実測値と計算値を比較すると、図-8に示すとおりであり、リンク交通量と同様に確率的均衡配分をベースにしたTSUE及びMTSUEの精度が確定的均衡配分のTUEに比べ数%程度高くなっている。

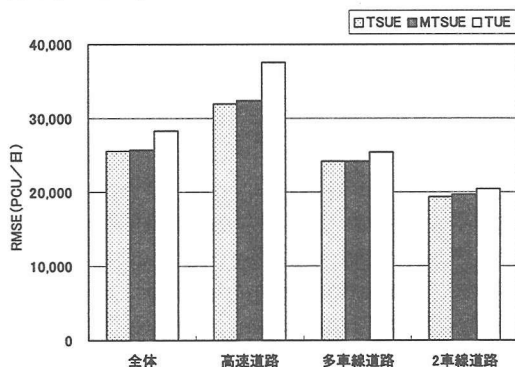


図-6 日交通量のRMSE

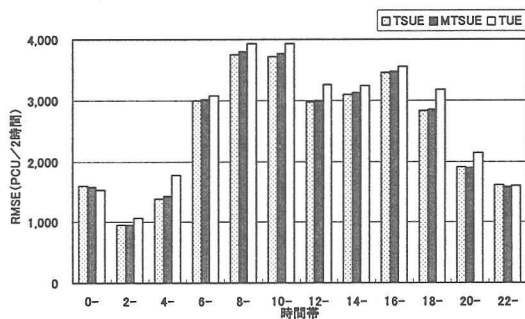


図-7 時間帯別交通量のRMSE

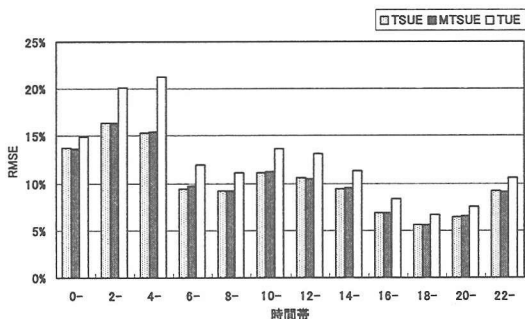


図-8 時間帯別大型混入率のRMSE

これらのことから、確率的利用者均衡であるMTSUEやTSUEは、確定的利用者均衡よりも推計精度が向上していると言える。しかし、MSTUEが、単一車種で配分したTSUEに比べて必ずしも精度が高くなっているとは言い切れない。

(b) 大型車進入規制施策の評価試算

提案する TMSUE は、車種別の時間帯配分であることに特徴があり、TDM などのうち車種別・時間帯別に実施する施策を評価するのに適している。ここでは、昼間の時間帯に環状七号線より都心側の 2 車線道路に対して大型車の進入規制を実施する施策を例にして TMSUE モデルの適用性について検討する。

配分の基本的条件は、前述のとおりであるが、ここでは、朝 8 時より夕方 20 時までの昼間 12 時間に大型車の進入規制を実施することとし、昼間と夜間の 2 種類のネットワークを作成している。配分ネットワークと規制対象道路などの概要は、表-5 に示すとおりである。都心の幹線道路は大部分が多車線道路であり、対象となる環状七号線の内側にある 2 車線道路は、延長約 120km であり、全体の 0.8% を占めているが、道路の容量から算定した容量台キロでは 0.3% を占めるのみである。

規制の有無別に推計された交通状況についてその変化をまとめると、表-6 に示すとおりとなる。なお、表-6 は、時間帯毎の結果を 24 時間分加算したものである。また、ネットワーク全体での 1 日の交通指標は、約 34 億台 km、約 1200 万台時である。

表-5 配分対象道路の概要

		延長(km)		容量台キロ	
		Km	%	百万台 km/2 時間	%
環七内側	2 車線	119.9	0.8	0.2	0.3
	多車一般	765.8	5.1	5.2	7.3
	高速	286.6	1.9	2.5	3.4
環七外側	一般道	12060.3	80.7	47.3	66.3
	高速	1706.0	11.4	16.1	22.6
合計		14938.6	100.0	71.2	100.0

表-6 大型車規制による交通変化

		小型車	大型車	合計
走行台キロ (千台 km)	環七内側 2 車線	65	-243	-179
	環七内側 多車一般	46	169	215
	環七内側 高速	-60	90	30
	環七外側 一般道	303	144	447
	環七外側 高速	-151	-44	-196
	合計	203	114	317
走行台時 (万台時)	環七内側 2 車線	1,232	-13,360	-12,128
	環七内側 多車一般	9,933	10,190	20,123
	環七内側 高速	-222	2,260	2,038
	環七外側 一般道	41,997	13,309	55,305
	環七外側 高速	-2,945	-908	-3,853
	合計	49,994	11,491	61,486

注) マイナス値は規制による減少を示す

走行台キロで見ると、対象となる環状七号線の内側にある 2 車線道路では大型車が減少し、小型車は増加している。減少した大型車は、多車線道路や高速道路へと迂

回しており、逆に小型車は高速道路などから 2 車線道路へと経路を変更していることが分かる。また、環状七号線の内部での規制に関わらず、外側の地域においても同様の変化が発生しており、特に小型車が、高速道路から一般道へと移行していることが分かる。これらは、大型車が 2 車線道路の利用ができないため、多車線道路や高速道路を利用し、小型車は混雑する多車線道路や高速道路から交通量が減少した 2 車線道路に進入してくるためである。また、経路の変更は、対象地域のみ小さく迂回するのではなく、広域的に経路の変更が発生しているためと考えられる。

走行台時でも走行台キロとほぼ同様の傾向が見られる。しかし、全域で見た走行台キロの変化は 0.1% の増加であるのに比べ、走行台時の変化は 0.5% と大きく増加しており、全体的に旅行速度が低下する可能性が高いことを示している。なお、提案するモデルは、発時刻の変更を内生化したものでないため、このような結果となっているが、現実には規制が実施されている場合には発時刻が変更され、施策の有無によって時間帯別 OD 交通量が変化すると考えられるため、これほどの影響は発生しないと思われる。

このように、提案する TMSUE は、これまでの配分モデルでは評価が困難であった時間帯別車種別に実施される施策の評価への適用可能性が高いものとなっていることが確認できる。

6. まとめ

提案する車種別時間帯別確率的利用者均衡配分モデル (MTSUE) を大規模ネットワークに適用し、その推計精度と車種別時間帯別施策の評価の適用事例を示した。この MTSUE は、車種別の料金抵抗や分散係数を与えることができるため、車種別に異なる経路選択特性を設定することが可能である。そのため、TDM など車種別時間帯別施策の評価を行う実務での適用可能性が高いモデルと言える。ただし、発ノード別リンク交通量を用いた部分線形化法による計算は、多くの記憶領域が必要になるため、計算例で示したような大規模ネットワークを対象とする場合に多大な演算時間が必要となる欠点もあり、演算時間の短縮化を図ることが今後の課題である。

また、さらに幅広い施策への適用性を高かめるためには、機関分担や出発時間帯の選択構造を内生化したモデルへの拡張が今後の課題として残されている。

参考文献

- 1) Yang, H: Multiple Equilibrium Behaviors and Advanced Traveler Information Systems with Endogenous Market Penetration, Transportation Research, 32B(3), pp.205-218, 1998.

- 2) 本田秀太, 溝上章志: 多種流確率均衡モデルに基づいた VICS 情報の利用率予測と便益評価, 土木計画学研究・講演集 No.23(2), pp.759-762, 2000.
- 3) 河上省吾, 溝上章志, 鈴木稔幸: 交通量の時間変動を考慮した道路交通配分手法に関する研究, 交通工学, Vol.20, No.6, pp.17-25, 1985.
- 4) 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, No.389, pp.111-119, 1988.
- 5) 宮城俊彦, 牧村和彦: 時間帯別交通配分手法に関する研究, 交通工学, Vol.26, No.2, pp.17-28, 1991.
- 6) 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・講演集 No.22(2), pp.1-14, 1999.
- 7) 赤松隆, 牧野幸雄, 高橋栄行: 時間帯別 OD 需要とリンクでの渋滞を内生化した準動的交通配分, 土木計画学研究・論文集, No.15, pp.535-545, 1998.
- 8) 土木学会: 交通ネットワークの均衡分析, 1998.
- 9) Fisk, C.S.: Some Developments in Equilibrium Traffic Assignment, Transportation Research, 14B, pp.243-255, 1980.
- 10) 赤松隆: 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の解法, 土木学会論文集 No.401 pp.109-118, 1989.
- 11) 赤松隆, 土屋裕二, 川上喜博: 確率的均衡配分のいくつかの計算アルゴリズムとその比較, 土木計画学論文集, No.7, pp.89-96, 1990.
- 12) 吉田禎雄, 原田昇: 均衡配分用 BPR 式パラメータの推計, 土木学会論文集 No.695/IV-54, pp.91-102, 2002.

多種流確率的均衡モデルによる準動的配分*

吉田禎雄**・原田昇****

TDMなど交通政策の評価において, 時間帯別・車種別の施策に対応した交通状況を推計する必要があるが, 現状では実用的な均衡配分手法がない。本研究では, 多種流の確率的均衡配分とOD修正法による時間帯均衡配分を結合した多種流時間帯確率的均衡配分モデルを示した。また, 実際の道路網におけるモデルの再現精度の検討及び大型車のエリア規制の評価例を示した。

Semi-dynamic Multi Classes Stochastic User Equilibrium Assignment Model*

By Yoshio YOSHIDA**・Noboru HARATA***

There is no reliable assignment method to analyze the hourly impact of TDM policy differentiated by the type of vehicle. This paper proposes the semi-dynamic multi-class stochastic user equilibrium assignment model (MTSUE) for the problem and makes an application of the model to evaluate the impact of area-wide traffic van to a specific type of vehicle.
