

車種別時間帯別確率的利用者均衡配分に関する実証的研究*

Development of Time-of-Day Stochastic User Equilibrium Assignment Considering Mutual Interferences of Vehicles*

伊藤慎兵**・河上省吾***

By Shinpei ITO**・Shogo KAWAKAMI***

1. はじめに

近年、環境問題の一つである大気汚染が深刻な問題として取り上げられ、その対策が急がれている。大気汚染の主因は自動車の排出ガスであり、特に窒素酸化物や浮遊粒子状物質を多く排出するディーゼル車が問題となっている。ディーゼル車は、燃料費が安いことなどから現在の交通、特に物流において大きな地位を占めており、経済活動への影響が大きいことからガソリン車に比べ実効性の強い施策・規制が不十分といわれてきた。今後、環境対策に重点をおき、ディーゼル車の規制を主な目的とした施策や条例が広く定められることが予想される。

一方で、利用者均衡配分に目を向けると、これまでに多くのモデルが提案されてきたが、それらの多くは走行特性、経路選択基準や有料道路の料金制度などが異なる普通車と大型車を均一車種と考えているため、車種別の交通量や旅行時間を正確に予測することができない。また、交通流をできるだけ忠実に再現するためには、日交通量を対象とした静的配分ではなく、時々刻々あるいは特定の時間帯を対象とした動的・準動的な交通量配分モデルの開発が必要であろう。そこで、本研究では大型車を明示的に考慮した時間帯別確率的利用者均衡配分モデルを構築し、名古屋都市圏道路ネットワークへの適用を通じて、現況再現性や実用性などについて検証を行う。

*キーワード：配分交通，経路選択

**正会員，株式会社ニュージェック

(〒542-0082 大阪市中央区島之内1-20-19，
TEL06-6245-4901，FAX06-6245-5413)

***フェロー，工博，関西大学工学部

(〒564-8680 吹田市山手町3-3-35，
TEL06-6368-0964，FAX06-6368-0964)

2. 確率的利用者均衡配分モデルと変分不等式問題

確率的利用者均衡配分モデルは、実際の利用者の経路選択の多様性や不確実性に注目し、非集計行動モデルに用いられるランダム効用最大化理論に基づいた利用者均衡配分モデルである。経路交通量を含んだ等価な最適化問題は以下のようなになる。

$$\min Z = \sum_a \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega - \frac{1}{\theta} \sum_{rs} q_{rs} \left(- \sum_{rs} \sum_k \frac{f_k^{rs}}{q_{rs}} \ln \frac{f_k^{rs}}{q_{rs}} \right) \quad (1)$$

ここで、 x_a ：リンク a のリンク交通， $t_a()$ ：リンク a のリンクパフォーマンス関数， f_k^{rs} ：OD ペア rs 間の経路 k の経路交通量， q_{rs} ：OD ペア rs 間の交通量， $\delta_{a,k}^{rs}$ ：OD ペア rs 間の経路 k にリンク a が含まれるとき 1，そうでないとき 0， θ ：パラメータ，である。

本研究では大型車を明示的に考慮した確率的利用者均衡配分モデルを用いるが、このモデルにおけるリンクパフォーマンス関数はベクトル関数となるため、リンク間に相互干渉が生じる（リンクパフォーマンス関数のヤコビアンが非対称となる）。この場合、確率的利用者均衡配分モデルは、式(1)のような等価な最適化問題に帰着できず、以下の変分不等式問題として表現される。

$$\begin{aligned} \text{Find } \mathbf{x}^* \in W \quad \text{such that } & \sum_a t_a(\mathbf{x}^*) \cdot (x_a - x_a^*) \\ & + \frac{1}{\theta} \ln(\mathbf{f}^*) (\mathbf{f} - \mathbf{f}^*) \geq 0 \\ & \forall \mathbf{x} \in W \quad (2) \end{aligned}$$

ここで、 x_a ：リンク a のリンク交通， $t_a()$ ：リンク a のリンクパフォーマンス関数， f ：経路交通量，である。また、本研究では、変分不等式問題の解法アルゴリズムとして射影法を用いている。

3. 時間帯別交通均衡配分モデルの概要

藤田・松井・溝上¹⁾は、交通量の修正をOD交通量で行うOD修正法を提案し、OD修正法による時間帯別均衡配分が数理最適化問題となることを初めて定式化した。

OD修正法において、 n 時間帯におけるODペア 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(3)で示される。

$$g_{rs}^n = q_{rs}^{n-1} + Q_{rs}^n - \frac{c_{rs}^n}{2T_w} Q_{rs}^n \quad (3)$$

ここで、 g_{rs}^n : n 時間帯における残留交通量修正後の配分交通量、 q_{rs}^{n-1} : $n-1$ 時間帯における残留交通量、 Q_{rs}^n : n 時間帯におけるOD交通量、 T_w : 時間帯幅、 c_{rs}^n : n 時間帯におけるODペア rs 間の最短所要時間、である。

4. 車種別時間帯別確率的利用者均衡配分モデル

車種別交通量配分と時間帯別交通量配分を統合した研究として、吉田・原田²⁾はリンクパフォーマンス関数のヤコビアンが対称である場合の多種流確率的均衡モデルによる時間帯別(準動的)均衡配分をテストネットワークに適用している。ここで、ヤコビアンが対称となるためには大型車の乗用車換算係数が1である必要があるが、これは明らかに非現実的である。一方、乗用車換算係数が1でない場合、リンクパフォーマンス関数のヤコビアンは非対称となるため等価な数理最適化問題に帰着できない。そこで、本研究では、近似的解法アルゴリズムである射影法を用いることにより乗用車換算係数が任意の値をとる場合でも等価な数理最適化問題に置き換えることができる利用者均衡配分モデルを構築した。式(4)にその定式化を示す。

$$\begin{aligned} & \text{Min}_{\mathbf{x}, \mathbf{g}} Z(\mathbf{x}, \mathbf{g}_1, \dots, \mathbf{g}_m) \\ & = \sum_{j=1}^m \sum_{a \in A} \int_0^{x_{j,a}^{(n)}} \hat{t}_a(\omega) d\omega \\ & + \sum_{j=1}^m \frac{1}{\theta_j} \sum_r \left\{ \sum_u \left(\sum_t x_{j,tu}^{r(n)} \right) \ln \left(\sum_t x_{j,tu}^{r(n)} \right) - \sum_{tu} x_{j,tu}^{r(n)} \ln x_{j,tu}^{r(n)} \right\} \quad (4) \\ & - \sum_{j=1}^m \sum_{rs} \int_0^{g_j^{rs(n)}} \frac{2T_w}{Q_j^{rs(n)}} (q_j^{rs(n-1)} + Q_j^{rs(n)} - z) dz \\ & \text{subject to} \\ & \sum_{j=1}^m \sum_t x_{j,tk}^{r(n)} - \sum_{j=1}^m \sum_u x_{j,ku}^{r(n)} \\ & + \sum_{j=1}^m \left(\sum_s q_j^{rs(n)} \delta_{rk} - q_j^{rk(n)} \right) = 0 \quad \forall k \in N, \forall r \in R \\ & x_{j,tu}^{(n)} = \sum_r x_{j,tu}^{r(n)} \quad \forall (t, u) \in A \\ & x_{j,tu}^{r(n)} \geq 0 \quad \forall (t, u) \in A, \forall r \in R \end{aligned}$$

ここで、 \hat{t}_a : 線形近似されたリンクパフォーマンス関数、 $x_{j,tu}^{r(n)}$: 起点を r とする車種 j の n 時間帯におけるノード t から u へのリンク交通量、 $x_{j,tu}^{(n)}$: 車種 j の n 時間帯におけるノード t から u へのリンク交通量、 $Q_j^{rs(n)}$: 車種 j の n 時間帯におけるODペア rs 間の交通量、 T_w : 時間帯幅、 $q_j^{rs(n-1)}$: 車種 j の $n-1$ 時間帯におけるODペア rs 間の残留交通量、 $g_j^{rs(n)}$: 車種 j の n 時間帯におけるODペア rs 間の修正OD交通量、 δ_{rk} : 起点 r からノード k を通れば1, そうでなければ0, である。

5. 車種別リンクパフォーマンス関数

大型車の乗用車換算係数が任意の値である場合の車種別リンクパフォーマンス関数を式(5)のように定義した。比較検討のために乗用車換算係数が1と固定した場合の車種別リンクパフォーマンス関数も式(5)に示す。

$$\begin{aligned} t_{C\gamma}(\mathbf{x}) &= t_{C\gamma 0} \left(1.0 + \alpha_{C\gamma} \left(\frac{x_C + \gamma_C x_T}{C} \right)^{\beta_{C\gamma}} \right), \\ t_{T\gamma}(\mathbf{x}) &= t_{T\gamma 0} \left(1.0 + \alpha_{T\gamma} \left(\frac{x_C + \gamma_T x_T}{C} \right)^{\beta_{T\gamma}} \right), \\ t_{C1}(\mathbf{x}) &= t_{C1 0} \left(1.0 + \alpha_{C1} \left(\frac{x_C + x_T}{C} \right)^{\beta_{C1}} \right), \end{aligned} \quad (5)$$

$$t_{T1}(\mathbf{x}) = t_{T10} \left(1.0 + \alpha_{T1} \left(\frac{x_C + x_T}{C} \right)^{\beta_{T1}} \right)$$

ここで、 $t_j()$ ：車種 j のリンクパフォーマンス関数(分/km)、 x_j ：車種 j のリンク交通量(台)、 t_{j0} ：車種 j の自由走行時間(分/km)、 C ：時間可能交通容量(台/時間)、 α_j, β_j ：車種 j のパラメータ、 γ_j ：車種 j の乗用車換算係数、 C ：普通車、 T ：大型車、である。

大型車のリンクパフォーマンス関数の推定には、大型車の旅行速度データが必要であるが、道路交通センサデータからは得ることができない。そこで本研究では、以下の仮定のもと大型車の旅行速度データを作成した。

(仮定) 混雑時の大型車の旅行速度は、都市間・都市高速道路と沿道条件が山地部以外の2車線道路では普通車と等しく、その他は普通車の旅行速度から10%減少した旅行速度とする。

(仮定) 自由走行速度は主に規制最高速度に影響されると考えられるため、大型車の規制最高速度を都市間・都市高速道路以外の道路では普通車の規制最高速度から20%減少した速度とする。

推定方法は八木・溝上³⁾と同様に最尤推定法により推定した。また自由走行時間は式(6)のように線形

関数を仮定した。

$$t_0 = (k_0 : \text{定数項 (分/km)}) + k_1 \cdot (\text{信号交差点密度 (個所/km)}) + k_2 \cdot (60.0/\text{規制最高速度 (分/km)}) \quad (6)$$

表1, 2に、大型車の乗用車換算係数を1と固定しない場合の普通車と大型車のリンクパフォーマンス関数の推定結果をそれぞれ示す。

6. モデルの適用

配分対象地域は名古屋市を中心とした30km圏域であり、ネットワークはセントロイド数279, 上下別リンク数4303, ノード数1304である。配分対象時間帯は5時から13時で、配分の時間帯幅は2時間である。

乗用車換算係数と1のモデルによる、それぞれの時間帯(7-9時, 9-11時, 11-13時)の相関係数を表3に示す。

表3 配分結果と実績リンク交通量との相関係数

時間帯	乗用車換算係数のモデル		乗用車換算係数1のモデル	
	普通車	大型車	普通車	大型車
7-9時	0.12	0.53	0.12	0.53
9-11時	0.60	0.49	0.32	0.40
11-13時	0.54	0.40	0.32	0.38

表1 乗用車換算係数を1と固定しない場合の普通車のリンクパフォーマンス関数の推定結果(()内はt値)

道路種別	都市間高速	都市高速	2車線(平地)	2車線(山地)	4車線	6車線以上	
サンプル数	219	342	7434	1124	2728	1129	
c	0.363 (3.3)	0.464 (6.0)	0.359 (17.1)	0.306 (5.3)	0.651 (9.1)	0.955 (6.1)	
c	3.320 (5.4)	2.955 (8.1)	1.651 (16.2)	1.532 (5.6)	1.106 (5.0)	1.152 (3.3)	
c	1.137 (2.4)	1.682 (4.2)	1.149 (4.2)	3.371 (3.9)	3.489 (4.6)	2.268 (2.5)	
t_{C0}	k_0	0.518 (14.0)	0.819 (42.9)	0.108 (2.1)	0.381 (3.1)	0.542 (5.3)	0.458 (2.0)
	k_1	---	---	0.147 (25.7)	0.155 (11.2)	0.116 (15.5)	0.158 (8.9)
	k_2	0.208 (4.2)	---	1.027 (30.4)	0.792 (9.5)	0.731 (8.4)	0.741 (3.8)
分散	0.057 (20.9)	0.197 (26.2)	0.681 (121.9)	0.644 (47.4)	0.720 (73.9)	0.765 (47.5)	

表2 乗用車換算係数を1と固定しない場合の大型車のリンクパフォーマンス関数の推定結果(()内はt値)

道路種別	都市間高速	都市高速	2車線(平地)	2車線(山地)	4車線	6車線以上	
サンプル数	219	342	7442	1124	2737	1130	
T	0.363 (3.3)	0.464 (6.0)	0.361 (17.0)	0.306 (5.3)	0.650 (8.7)	0.834 (5.6)	
T	3.320 (5.4)	2.955 (8.1)	1.657 (15.7)	1.532 (5.6)	1.038 (4.7)	1.104 (3.0)	
T	1.137 (2.4)	1.682 (4.2)	1.085 (4.0)	3.372 (3.9)	3.780 (4.5)	2.724 (2.5)	
t_{T0}	k_0	0.518 (14.0)	0.819 (42.9)	0.164 (3.2)	0.424 (3.1)	0.571 (5.0)	0.758 (2.9)
	k_1	---	---	0.147 (25.5)	0.172 (11.2)	0.128 (15.0)	0.168 (8.2)
	k_2	0.208 (4.2)	---	0.793 (29.0)	0.704 (9.5)	0.654 (8.3)	0.546 (3.1)
分散	0.057 (20.9)	0.197 (26.2)	0.684 (122.0)	0.716 (47.4)	0.808 (74.0)	0.866 (47.5)	

乗用車換算係数 1 と のモデルによる各時間帯における普通車の配分結果の散布図をそれぞれ図 1,2 に示す。9 11, 11 13 時においては図 1,2 を見ても分かる通り、乗用車換算係数 のモデルの方が良い結果が得られた。このことから、大型車は、普通車と異なる走行特性、経路選択基準等を有しており、乗用車換算係数を 1 と固定しないほうが、実現象をより精緻に説明できると考えられる。

大型車の配分結果については、どちらのモデルも過小推定の傾向が見られた。この理由としては、大型車のリンクパフォーマンス関数推定における仮定の条件設定、推定に用いた大型車の OD 交通量が実際(現実)の OD 交通量よりも過小であることが考えられる。

7. おわりに

大型車の乗用車換算係数が のモデルの方が 1 と固定したモデルよりも良い結果が得られたことから、汎用性が高く、かつ実現象をより精緻に説明可能なモデルが構築できたといえる。今後は、大型車の旅

行速度の設定方法に加えて BPR 関数型以外のより分かりやすい関数型の検討、および大型車混入率のパラメータへの導入等を再考するとともに、適用事例を増やし比較検討することで、モデルの精度を向上させていく必要がある。また、本研究では時間価値を車種毎に一律に設定しているが、同車種でも、交通目的・ゾーン特性によって、時間価値は異なると考えるのが自然であり、時間帯にも左右されると考えられることから、これらの時間価値に関する検討は重要な研究課題である。

参考文献

- 1) 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/-8, pp.111 - 119, 1988.
- 2) 吉田禎雄・原田昇：多種流確率均衡モデルによる準動的配分,土木計画学研究・論文集, Vol.24/講演番号 318, 2001.
- 3) 八木勇司・溝上章志：時間帯別交通量配分に用いるリンクコスト関数の推定,土木学会第 55 回年次学術講演会, -364, 2000

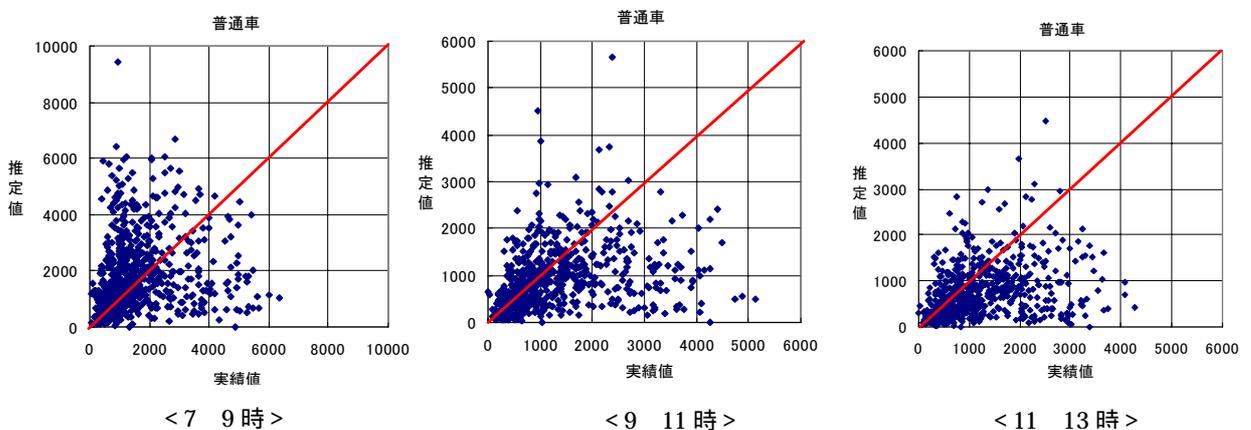


図 1 乗用車換算係数 1 の場合の普通車の配分結果の散布図

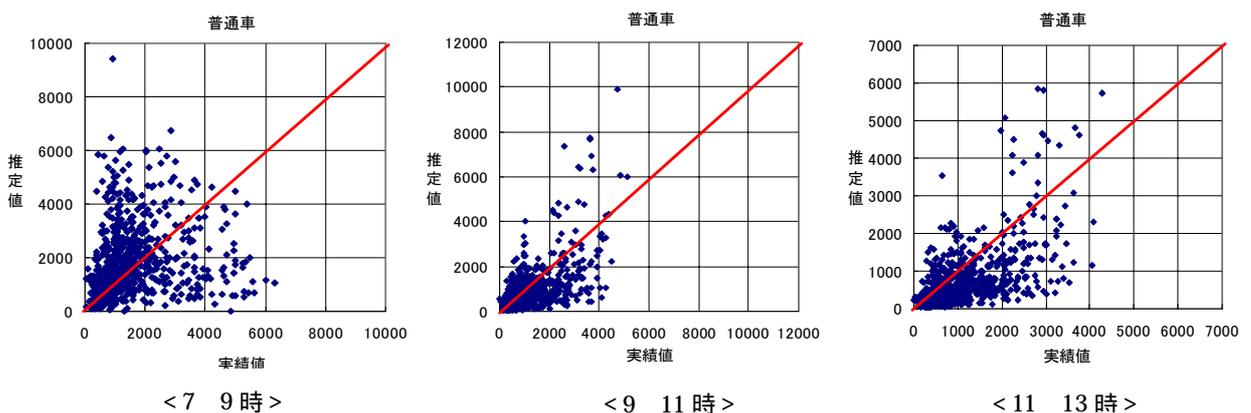


図 2 乗用車換算係数 の場合の普通車の配分結果の散布図