

# 需要の時間分散を目指した都市高速道路の 車種別料金決定モデル

羅 罕勳<sup>1</sup>・宇野 伸宏<sup>2</sup>・嶋本 寛<sup>3</sup>・中村 俊之<sup>4</sup>・山崎 浩気<sup>5</sup>

<sup>1</sup>学生会員 京都大学 都市社会工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)  
E-mail:luo@trans.kuciv.kyoto.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 京都大学経営管理大学院 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)  
E-mail: uno@trans.kuciv.kyoto-u.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 京都大学大学院 工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)  
E-mail:shimamoto@trans.kuciv.kyoto-u.ac.jp

<sup>4</sup>正会員 京都大学大学院 工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)  
E-mail:nakamura@trans.kuciv.kyoto-u.ac.jp

<sup>5</sup>正会員 京都大学大学院 工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)  
E-mail:yamazaki@trans.kuciv.kyoto-u.ac.jp

都市高速道路におけるピーク時間帯の交通需要の集中に伴う渋滞を緩和させる、ソフト的施策の一つとして、車種別・時間帯別に適切な通行料金を設定し、交通需要の時間的分散を図る施策の適用が考えられる。また大型車の走行に伴う交通混雑ならびに環境負荷への影響は、小型車に比較して大きく、そのインパクトを明示的に考慮した料金の設定が望まれる。そこで本研究では、利用者の出発時間帯ならびに経路の選択を表現可能な利用者均衡配分モデルを下位問題として内包した、総走行時間・料金収入に関する最適化問題として時間帯別料金決定モデルを定式化する。仮想ネットワークにおけるケーススタディでは、一般道路も含めたネットワーク混雑度と料金収入を評価し、交通効率性と料金収入の両面から、適切な料金について考察を加える。

**Key Words :** Toll determination model, Multi-class assignment, Temporal dispersion of travel demand

## 1. はじめに

近年、都市高速道路では朝・夕のピーク時間帯に交通需要の集中により慢性的な渋滞が発生している状況も散見されている。その渋滞を緩和させるためのソフト的施策の一つとして、交通需要の時間的分散を図ることを目的とした時間帯別に適切な通行料金の設定が考えられる。さらに、大型車の料金は小型車の2倍と固定されているが、車種別に料金を変更して環境負荷の低減を図るため大型車を高速道路に誘導することも考えられるであろう。以上を踏まえて、本研究では時間帯別料金設定による交通需要分散効果を考慮した都市高速道路車種別通行料金決定モデルを構築する。さらに、利用者均衡状態を仮定した上で、総走行時間・総料金収入といった二つの目的関数に関する最適化問題として時間帯別料金決定モデルを定式化する。そして、仮想ネットワークに適用計算を行い、交通効率性と料金収入の両面から、適切な料金に

ついて考察を加える。

本研究のベースとなる統合型利用者均衡モデルに関しては、機関選択と経路選択を統合したモデル（例えば Oppenheim<sup>1)</sup>、長尾ら<sup>2)</sup>、Graciaら<sup>3)</sup>、Uchidaら<sup>4)</sup>）、出発時間帯選択と経路選択を統合したモデル（例えば渡辺ら<sup>5)</sup>、伊庭ら<sup>6)</sup>）、発生、集中、分担、経路選択を統合したモデル（例えば円山ら<sup>7)</sup>）など様々なバリエーションのモデルが存在するが、本研究の特徴は伊庭ら<sup>6)</sup>が構築したモデルを車種別均衡モデルに拡張することにより車種別料金導入による影響評価を行える点にある。

## 2. モデルの定式化と解法アルゴリズム

本研究で構築するモデルは総走行時間最小化あるいは総収入最大化を実現する車種別、時間帯別の料金を決定する数理計画モデルであり、車種別、時間帯別利用者均衡問題を下位問題とする二段階最適化問題として定式

化する。

### (1) 上位問題の定式化

目的関数の1つである総走行時間  $TT$  は、道路ネットワーク上の交通効率性の向上を目指しており式(1)のように定式化する。なお  $t_a^n$  は時間帯  $n$  におけるリンク  $a$  の旅行所要時間、 $x_a^{nb}$  は時間帯  $n$  におけるリンク  $a$  の車種  $b$  のリンク交通量である。

$$TT = \sum_{n \in N} \sum_{b \in B} \sum_{a \in A} t_a^n x_a^{n,b} \quad (1)$$

もう1つの目的関数である総料金収入  $TI$  は式(2)のように定式化する。なお、 $F^{nb}$  は時間帯  $n$  における車種の初乗り料金、 $l_a$  はリンク  $a$  の距離、 $P^{nb}$  は時間帯  $n$  における車種  $b$  の単位距離当たりの料金である。

$$TI = \sum_{n \in N} \sum_{b \in B} \sum_{a \in A} (F^{n,b} x_a^{n,b} + P^{n,b} l_a x_a^{n,b}) \quad (2)$$

### (2) 下位問題の定式化

#### a) 前提条件

下位問題である車種別の時間帯・経路選択を表現するネットワーク均衡配分問題を定式化するにあたり、以下の前提条件を設定する。

- ・ 全時間帯での OD ペア単位の需要の和は一定
- ・ 各時間帯間の残留交通量を考えない
- ・ 利用者は、期待コストを最小化するように利用時間帯と経路の選択を行う
- ・ 時間帯  $n$  において、式(3)に示す経路コスト  $c_{rsk}^{nb}$  に関する確率的利用者均衡状態が成立している。

$$c_{rs,k}^{n,b} = t_{rs,k}^n(x) + P_{rs,k}^{n,b} / \xi_b, k \in K_{rs}, \forall n \in N, r \in R, s \in S \quad (3)$$

ここに、 $P_{rsk}^{nb}$  は時間帯  $n$ 、車種  $b$  における OD ペア  $rs$  の料金、 $\xi_b$  は車種  $b$  の時間価値である

#### b) 均衡状態の定式化

a) で述べた条件下では、経路及び時間帯の選択確率は、式(4)及び式(5)で表される Nested Logit Model で表される。

【経路選択確率  $K \in K_{rs}, n \in N, r \in R, s \in S$ 】

$$\Pr(k|n, rs, b) = \frac{\exp(-\theta_1 c_{rs,k}^{n,b})}{\sum_{k' \in K_{rs}} \exp(-\theta_1 c_{rs,k'}^{n,b})} \quad (4)$$

【時間帯選択確率  $K \in K_{rs}, r \in R, s \in S$ 】

$$\Pr(n|rs, b) = \frac{\exp(-\theta_2 (C_{rs,k}^{n,b} + S_{rs,k}^{n,b}))}{\sum_{n' \in N} \exp(-\theta_2 (C_{rs,k}^{n',b} + S_{rs,k}^{n',b}))} \quad (5)$$

ここに、

$$S_{rs}^{n,b} = -\frac{1}{\theta_1} \ln \left\{ \sum_{k \in K_{rs}} \exp(-\theta_1 c_{rs,k}^{n,b}) \right\} \quad (6)$$

ただし、 $\theta_1, \theta_2$  はそれぞれ経路、時間帯転換におけるコストの感度パラメータ、 $S_{rs}^{nb}$  は時間帯  $n$ 、車種  $b$  における OD ペア  $rs$  の期待最小コストである。また、 $C_{rs}^{nb}$  は時間帯  $n$ 、車種  $b$  における OD ペア  $rs$  の固有費用であり、各時間帯の潜在的な需要を表現するために導入する。

#### c) 等価な最適化問題としての定式化

詳細は省略するが、本研究の下位問題は式(7)から式(9)のような等価な最適化問題として再定式化することが可能である。

$$\begin{aligned} \min Z(x(f), q, P(V_n^b)) = & \sum_{n \in N} \sum_{b \in B} \sum_{a \in A} \int_0^{x_a^n} t_a(w) + \\ & \sum_{a \in A} \sum_{b \in B} \frac{P(V_n^b)}{\xi_b} \times x_a^b + \frac{1}{\theta_1} \sum_{n \in N} \sum_{b \in B} \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{k \in K_{rs}} f_{rs,k}^{n,b} \ln \frac{f_{rs,k}^{n,b}}{q_{rs}^{n,b}} \quad (7) \\ & + \frac{1}{\theta_2} \sum_{n \in N} \sum_{b \in B} \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} q_{rs}^{n,b} \ln \frac{q_{rs}^{n,b}}{\bar{q}_{rs}^b} + \sum_{n \in N} \sum_{b \in B} \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} q_{rs}^{n,b} C_{rs}^{n,b} \end{aligned}$$

制約条件：

$$\sum_{k \in K_{rs}} f_{rs,k}^{n,b} = q_{rs}^{n,b}, \sum_{n \in N} q_{rs}^{n,b} = \bar{q}_{rs}^b \quad (8)$$

$$x_a^{n,b} = \sum_{b \in B} \sum_{k \in K_{rs}} \sum_{rs \in \Omega} \delta_{rs,k}^{a,b} f_{rs,k}^{n,b} \quad (9)$$

なお、 $P(V_n^b)$  は時間帯  $n$  における車種  $b$  の料金パターン、 $q_{rs}^{nb}$  は時間帯  $n$ 、車種  $b$  における OD ペア  $rs$  の OD 交通量 ( $\bar{q}_{rs}^b$  はその全時間帯の合計)、 $f_{rsk}^{nb}$  は時間帯  $n$ 、車種  $b$  における OD ペア  $rs$  間の経路  $k$  のフローである。式(7)における第1項は所要時間に関する項、第2項は通行料金の時間換算分、第3項と第4項はそれぞれ経路及び車種別時間帯 OD に関するエントロピー項、第5項は車種別時間帯別の OD ペア間での固定費用に関する項である。また、式(8)はそれぞれ経路交通量、車種別時間帯別交通量における保存則を、式(9)は車種別に経路交通量とリンク交通量の計算式を表す制約条件である。

証明は省略するが、式(7)に示す目的関数と制約条件はいずれも凸関数である。下位問題における車種別・時間帯別確率的利用者均衡配分モデルの解法として Simplicial Decomposition 法を用いる。具体的な手順は以下の通りである。

**Step.1:** 車種  $b$ 、時間帯  $n$  におけるリンク交通量  $x_a^{nb}$ 、リンク交通コスト  $C_a^{nb}$ 、経路コスト  $c_{rsk}^{nb}$ 、期待最小費用  $S_{rs}^{nb}$  を以下のように更新する。

$$x_a^{n,b} = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{k \in K_{rs}} \sum_{b \in B} \delta_{rs,k}^b f_{rs,k}^{n,b} \quad \forall n \in N, a \in A$$

$$C_a^{n,b} = t_a \left( \sum_{b \in B} x_a^b \right) + \left( \frac{P(V_n^b)}{\xi_b} \right) \forall n \in N, k \in K_{rs}$$

$$S_{rs}^{n,b} = -\frac{1}{\theta_1} \ln \left\{ \sum_{k \in K_{rs}} \exp(-\theta_1 c_{rs,k}^{n,b}) \right\} \quad n \in N, r \in R, s \in S$$

**Step.2** : OD 交通量と経路交通量の補助変数  $v_{rs}^{nb}, g_{rsk}^{nb}$  を以下の式により更新する。

$$v_{rs,k}^{n,b} = \bar{q}_{rs}^b \frac{\exp\{-\theta_2(C_{rs}^{n,b} + S_{rs}^{n,b})\}}{\sum_{n \in N} \exp(-\theta_2(C_{rs}^{n,b} + S_{rs}^{n,b}))} \quad \forall r \in R, s \in S$$

$$g_{rs,k}^{n,b} = v_{rs}^{n,b} \frac{\exp(-\theta_1 c_{rs,k}^{n,b})}{\sum_{k \in K_{rs}} \exp(-\theta_1 c_{rs,k}^{n,b})} \quad \forall n \in N, r \in R, s \in S$$

**Step.3** : 次元探索法により最適ステップ幅  $\alpha$  を求める。

$$\min Z(\alpha) = \min Z(f_m^b + \alpha(g - f_m^b), q_m^b + \alpha(v - q_m^b))$$

subject to  $0 \leq \alpha \leq 1$

**Step.4** : 経路交通量, 時間帯別 OD 交通量を以下の式により更新する。

$$f_{m+1}^b = f_m^b + \alpha(g - f_m^b)$$

$$q_{m+1}^b = q_m^b + \alpha(v - q_m^b)$$

**Step.5** : 車種別経路交通量が収束していれば計算を終了し, 収束していなければ  $m=m+1$  として, Step.1 へ戻る。

$$\frac{|x_a^{(n,b)^{m+1}} - x_a^{(n,b)^m}|}{x_a^{(n,b)^m}} \leq \varepsilon$$

本研究では, 求解の容易さを考慮し, 料金パターンを外生的に与え, 下位問題を繰り返し計算することにより, 上位問題の目的関数を最小化する料金パターンを求める。

### 3. 仮想ネットワークにおける適用計算

本章では, 第2章で構築したモデルを図-1および表-1に示すような放射・環状からなる高速道路と一般道路からなる仮想ネットワークに適用して最適な時間帯別料金の算出を行い, 総走行時間の最小化とより代表される交通効率性と, 料金収入の最大化の両面から適切な料金について考察を行う。

#### (1) 前提条件

計算を行うにあたり, 以下の前提条件を設定する。

- 図-1 において色がついたノードがセントロイドであり, 各 OD ペアの全時間帯の総需要を 1600 とする。
- 大型車混入率を全 OD ペアについて 0.3 とする。
- 朝ピーク前, 朝ピーク時, 朝ピーク終了後を想定した時間帯 1, 2, 3 の 3 時間帯を想定する。
- 固定費用  $C_{rs}^{nb}$  は, 大型車混入率を 0.0 として小型車料金が全時間帯で 700 円とした状態で各時間帯の需要が時間帯 2, 3, 1 の順に大きくなるように小型車の

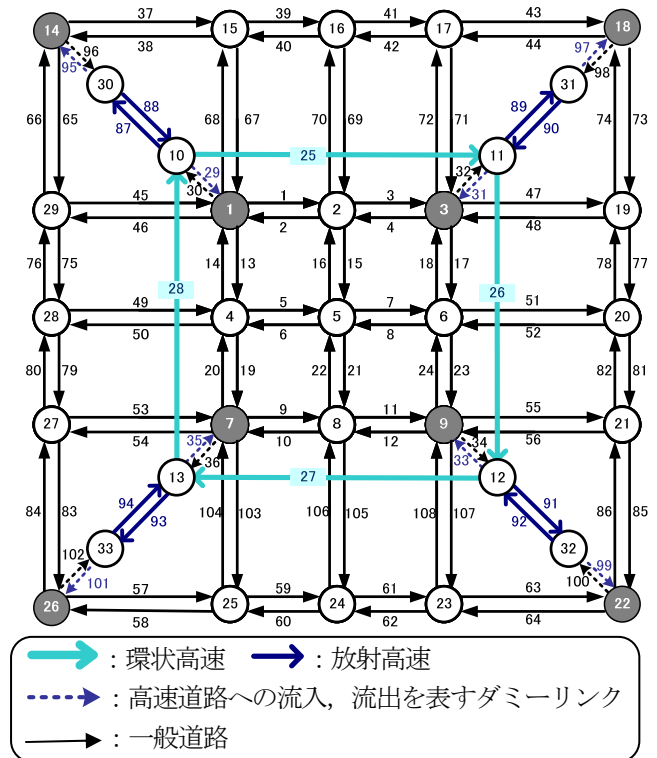


図-1 計算対象ネットワーク

表-1 リンク属性

	距離 (km)	自由流 旅行時間 (min)	容量 (veh/h)	$\alpha$	$\beta$
環状高速	10	8	8,000	0.4	2.8
放射高速	8	6	4,000	0.4	2.8
一般道路	5	10	2,000	0.54	2.4

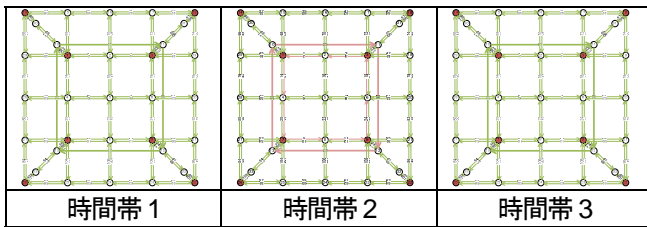
固定費用  $C_{rs}^{nb}$  を設定し<sup>9)</sup>, 大型車も同一の値とする。

- 均一料金制度における各時間帯の小型車の料金を 0 円, 300 円, 500 円, 700 円, 900 円の 5 種類とする。
- 大型車の小型車に対する料金比を 1.5, 2.0, 3.0 の 3 種類とする。

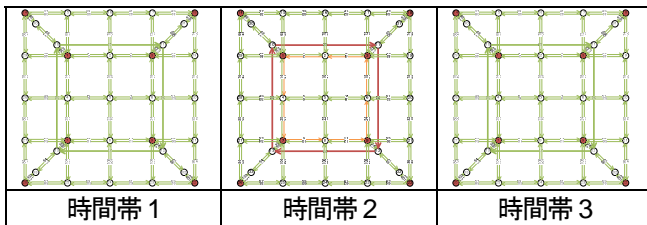
なお, 小型車の 3 つの時間帯において取りうる料金の組み合わせは  $5^3=125$  通りあるが, 計算時間を短縮するために, 以下では小型車料金に関しては需要がピークである時間帯 2 から時間帯 1, 3 への需要分散が生じる料金の組み合わせ (時間帯 2 の料金が他の時間帯よりも大きくなる料金組み合わせ) の 55 通りを抽出して, それらの目的関数値を比較する。

#### (2) 大型車料金比に対する感度分析

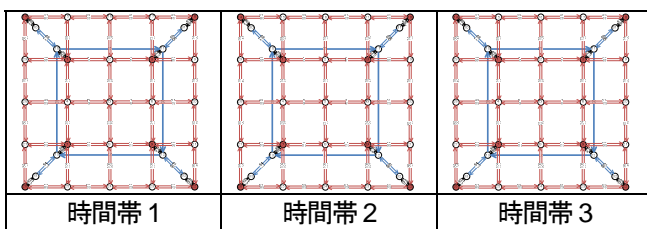
まず, 小型車料金に対する大型車料金比の感度を分析するため, 小型車の料金パターンを全時間帯で 700 円に固定した上で大型車料金比を 1.5 および 3.0 としたときの各時間帯のリンク混雑度の変化を分析する。結果は図-2の通りである。



(a) 大型車料金比 3.0 におけるリンク混雑度



(b) 大型車料金比 1.5 におけるリンク混雑度



(c) リンク混雑度の差 (料金比 3.0-料金比 1.5)

図-2 大型車料金比とリンク混雑度の関係

混雑率	黒	緑	黄色	薄赤	濃赤
		0.0	0.0~0.8	0.8~0.9	0.9~1.0

図-2(a)の大型車料金比が 3.0 のときも図-2 (b)の大型車料金比が 1.5 のときも時間帯 1, 時間帯 3 とも混雑が生じておらず, また時間帯 2 において環状高速とその内側の一般道路が混雑している. ただし, これまでの分析では大型車料金比が混雑に及ぼす影響が明確に現れなかったため, 図-2(c)に料金比が 3.0 のときの混雑率と 1.5 のときの混雑率の差を示した. 図中において, 赤色は混雑率の差が正であるリンクを表しており, 青色は混雑率の差が負のリンクを表している. 図-2(c)から, 料金比が 3.0 の場合は, 料金比が 1.5 のときと比べると高速道路のリンク混雑率が小さくなり, 一般道路のリンク混雑率が大きくなっている. これは本研究の枠組みでは大型車の料金が相対的に高くなると大型車が高速道路の利用を避けるためであると考えられ, 料金比に対するリンク混雑度の感度は高くないものの妥当な結果が得られていることが確認された. なお, 以降の分析では, 時間帯別の料金パターン設定の影響を主として分析するため, 大型車の料金比を 2.0 に固定する.

## (2) 料金パターンと料金収入・総走行時間

本節では, 55 の料金パターンにおける料金収入, 総走行時間の関係について分析する. 図-3 に料金パターンと料金収入の関係, 図-4 に料金パターンと総走行時間の関係をそれぞれ示す. 図中の「均一料金」は 3 時間帯における料金が等しい料金パターンを, 「料金時間帯差大」は小型車の最大料金と最小料金の差が 500 円以上の

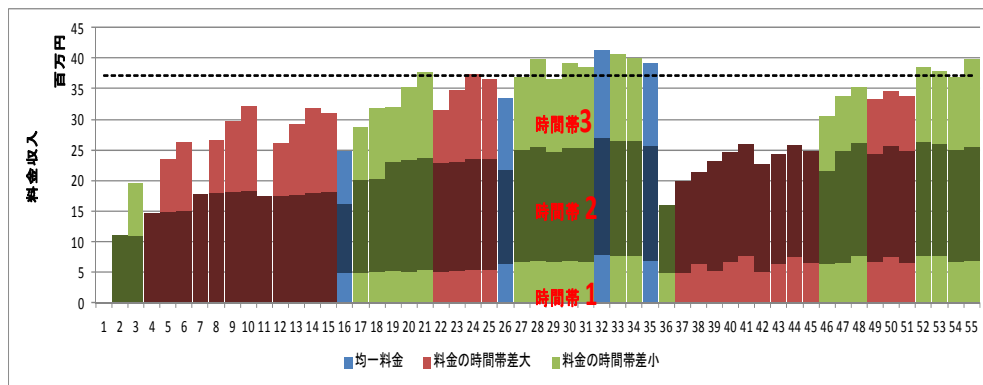


図-3 料金パターンと料金収入の関係

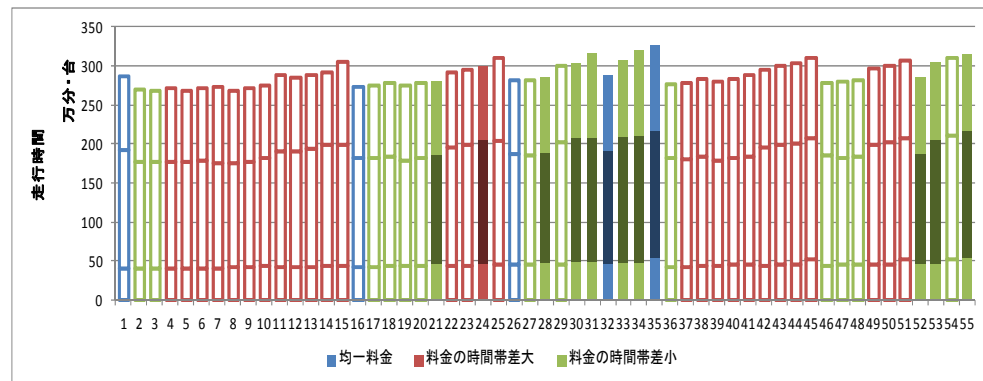


図-4 料金パターンと総走行時間の関係

料金パターンを、「料金時間帯差小」は小型車の最大料金と最小料金の差が 500 円未満の料金パターンをそれぞれ示している。まず、料金収入が最大となる料金パターンは料金パターン 32（すべての時間帯で小型車 700 円）であり、最大限徴収可能なすべての時間帯で小型車 900 円の料金パターン 35 ではこれよりも総料金収入がわずかではあるが減少していることがわかる。また、図-3 の点線は総料金収入が最大値の 90% のラインであるが、これを満たす料金パターンは多くないことがわかる。図-4 において塗りつぶされているグラフは、総料金収入が最大となるケースの収入の 90% を超える料金パターンを表している。図4 から、総料金収入が多い料金パターンが必ずしも総走行時間が大きくなるという傾向が確認できず、料金収入を担保しつつ社会的に望ましい料金パターンを設定できる可能性があることを示しているといえる。

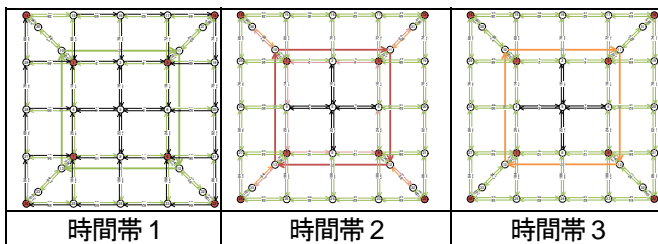
### (3) 総走行時間最小となる料金パターン

表-2 各料金パターン別の時間帯別料金の内訳

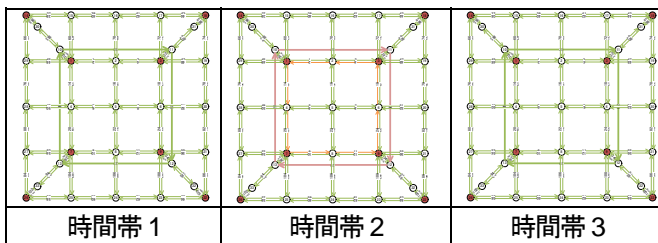
時間帯	小型車(円)			大型車(円)		
	1	2	3	1	2	3
MinTT	0	300	300	0	600	600
MaxIC	700	700	700	1,400	1,400	1,400

表-3 各料金パターンの目的関数の比較

料金パターン	総走行時間 (万分・台)	総料金収入(百万円)
MinTT	268.22	19.57
MaxIC	288.15	41.35



(a) MinTT におけるリンク混雑度



(b) MaxIC におけるリンク混雑度

図-5 料金パターンとリンク混雑度の関係

混雑率	黒	緑	黄色	薄赤	濃赤
		0.0	0.0~0.8	0.8~0.9	0.9~1.0

本節では大型車の料金比を 2.0 に固定して、総走行時間が最小となる料金パターン(MinTT)について分析する。表-2 に総走行時間が最小となる料金パターンと、参照点として料金収入が最大となる料金パターン(MaxIC)を示す。また、表-3 に各料金パターンにおける目的関数の比較を行う。

表-2 を見ると、総旅行時間が最小となる料金パターン (MinTT) においては、需要が少ない時間帯 1 の料金を 0 とすることにより需要の時間分散を図っており、さらに基準料金と比べると時間帯 2, 3 の料金も下げていることから、全体的に料金収入が最大となる料金パターン(MaxIC)と比べて高速道路の利用を促していることが読み取れる。その結果、表-3 に示すように総旅行時間が最小となる料金パターンでは総旅行時間が MaxIC のおおよそ 7% 減少となるが総料金収入は大きく減少し半分以下となっている。

次に、図-5 に各料金パターンにおける時間帯別リンク混雑度（自由流リンク旅行時間に対するリンク旅行時間の比率）を表す。MaxIC では各時間帯の料金が同じであるため、需要の多い時間帯 2 で特に環状高速道路において激しい混雑が生じているが、需要の少ない時間帯 1, 3 では高速道路、一般道路とも激しい混雑は生じていない。総走行時間を最小にする料金パターン (MinTT) においては、料金収入が最大となる料金パターン(MaxIC)と比べて料金が安いいため、需要が多い時間帯 2 において高速道路に混雑が生じているものの、一般道路の料金は緩和されている。また、料金が 0 の時間帯 1 では、一部の一般道路のリンク交通量が 0 となっている。

以上より、総走行時間最小化を目的関数とした時間帯別料金を適用すると、高速道路料金が安く設定されることにより総料金収入は減少するものの高速道路の利用が増加し、一般道路の利用が減少することが確認できた。

### (4) 料金収入制約を課した場合の計算結果

前節では、総走行時間が最小となる料金パターンにおけるリンク混雑度について分析したが、総料金収入が最大値の 47% 程度となり、建設費用の償還という観点から見て、現実的な施策であるとはいいいにくい。本節では、料金収入が最大値の 90% 以上確保するという制約条件を課した上で、総所要時間が最小となる料金パターンにおける混雑度について分析を行う。

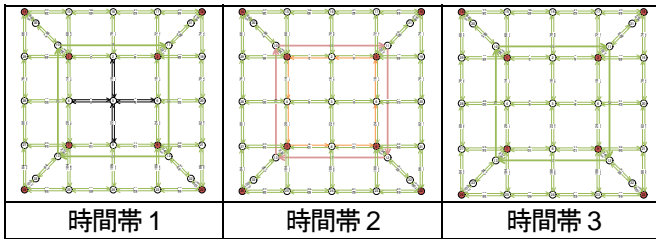
表-5 に総所要時間が最小となる料金パターン (MinTT2) と料金収入が最大となる料金パターン (MaxIC) を示す。また、表-6 に各料金パターンにおける目的関数の比較を行う。表-6 を見ると、MinTT2 では料金収入を担保す

表4 各料金パターンの時間帯別料金の内訳

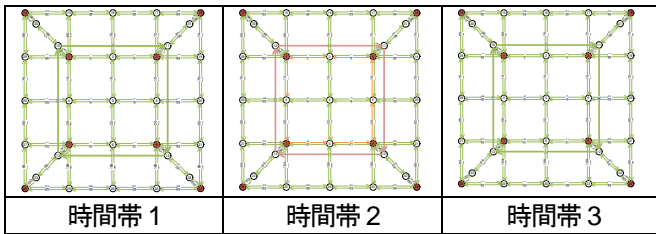
時間帯	小型車(円)			大型車(円)		
	1	2	3	1	2	3
MinTT2	300	700	700	600	1,400	1,400
MaxIC	700	700	700	1,400	1,400	1,400

表5 各料金パターンの目的関数の比較

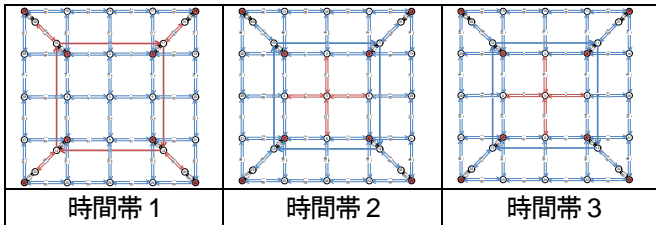
料金パターン	総走行時間(万分・台)	総料金収入(百万円)
MinTT2	278.89	37.90
MaxIC	288.15	41.35



(a) MinTT2におけるリンク混雑度



(b) MaxICにおけるリンク混雑度



(c) リンク混雑度の差 (MinTT2- MaxIC)

図-6 料金パターンとリンク混雑度の関係

混雑率	黒	緑	黄色	薄赤	濃赤
		0.0	0.0~0.8	0.8~0.9	0.9~1.0

るため時間帯2、時間帯3の料金は料金収入が最大となる料金パターン(MaxIC)と同じであるが、時間帯1の料金を安く設定することにより時間帯1への需要の分散を図っていることが読み取れる。図-6(a)、(b)にそれぞれMinTT2とMaxICのリンク混雑度を、図-6(c)にMinTT2におけるリンク混雑度とMaxICにおけるリンク混雑度の差を示す。図-6(c)において、赤色は混雑率の差が正であるリンクを表しており、青色は混雑率の差が負のリンクを表している。図6(a)と図-6(b)を比較すると、時間帯1の料金が安いMinTT2では中心部の一般道路のリンク混雑度が0となっているがその他には大きな違いは見られない。そこで、

図-6(c)を見ると、MinTT2ではMaxICと比べると混雑が激しくない時間帯1においてリンク混雑度が増加しており、混雑が生じている時間帯2において一般道路のリンク混雑度が減少していることから、MinTT2は料金収入を確保しつつも一般道路の混雑緩和に寄与する料金パターンであるといえる。

#### 4. おわりに

本研究では、道路事業者が時間帯別・車種別に適切な通行料金を設定し、交通需要の分散を図るソフト的な施策実施のための評価ツールとして、利用者の出発時間帯ならびに経路の選択を表現可能な確率的利用者均衡配分モデルを下位問題として内包した時間帯別・車種別料金決定モデルを構築した。構築したモデルを仮想ネットワークに適用して、車種別料金設定がネットワーク上の交通状態に及ぼす影響の有無について確認した。また、道路事業者の料金収入をある程度担保しつつも一般道も含めた道路混雑を緩和できる料金体系が実現できる可能性を示すことができた。

今後の課題として、まず上位モデルを総当たり法により解いているが、効率的な解法アルゴリズムの構築が求められる。その上で、各種パラメータをアンケート調査等を行うことによって推定した後に、実規模ネットワークに適用して施策評価を行うことが求められる。その際に、我が国の都市高速道路において実現されている対距離料金制についても考察を行いたい。

#### 参考文献

- 1) Oppenheim, N. *Urban Travel Demand Modeling: From Individual Choices to General Equilibrium*, John Wiley & Sons, New York, 1995.
- 2) 長尾一輝, 中山晶一朗, 高山純一, 円山琢也: 旅行時間の不確実性を考慮した分担配分統合交通ネットワーク均衡モデルに関する研究—金沢都市圏への軌道系交通機関導入時の道路交通への影響分析を例に—, 土木学会論文集 D, Vol.65 No.1, pp.12-25, 2009
- 3) Garcia, R. and Marin, A. Network equilibrium with combined modes: models and solution algorithms, *Transportation Research* 39B, 223-254, 2005.
- 4) Uchida, K., Sumalee, A., Watling, D. and Connors, R. A study on network design problems for multi-modal networks by probit-based stochastic user equilibrium., *Network Spatial Economics*, 7, 213-240, 2007.
- 5) 渡辺健司, 中村毅一郎, 千葉尚, 井上紳一: 時間帯別利用者均衡配分モデルと出発時刻選択による時間帯別料金施策評価手法の検討, 土木計画学研究・講演集, Vol.31, pp.63, 2005
- 6) 伊庭洋一, 宇野伸宏, 塩見康博, 安隆浩: 交通需要の時間的分散を目指した都市高速道路の料金決定モデルに関する研究, 土木計画学研究・講演集, Vol.40, CD-Rom, 2009
- 7) 円山琢也, 原田昇, 太田勝敏: 活動選択を内生化した時間帯別・統合均衡モデルの構築, 土木計画学研究・講演集, Vol.24, No.2, pp.581-pp.584, 2007

(2013.5.7受付)

A OPTIMAL MULTI-CLASS TOLL MODEL OF URBAN EXPRESSWAY FOR  
TEMPORAL DISPERSION OF INFLOW DEMAND

Hanxun LUO, Nobuhiro UNO, Hiroshi SHIMAMOTO,  
Toshiyuki NAKAMURA and Hiroki Yamazaki