

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問題^{*1}

An Optimal Toll Problem of Urban Expressway for Temporal Dispersion of Traffic Demand^{*1}

伊庭洋一^{*2}・宇野伸宏^{*3}・塩見康博^{*4}・安隆浩^{*5}

By Yoichi IBA^{*2}・Nobuhiro UNO^{*3}・Yasuhiro SHIOMI^{*4}・Yoongho AHN^{*5}

1. はじめに

都市内高速道路における通行料金は一般道との関係で、受益者負担原則、償還主義、公正妥当主義、混雑料金原則が成立するよう、決定されるのが望ましい。しかし、現状では朝・夕のピーク時間帯に交通需要の集中により慢性的な交通渋滞が発生しているなど、上述の料金体系理念が実現されているとは言い難い。この解決策として、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が挙げられる。特に近年、ETCの普及により、柔軟な料金体系の設定が実現可能となり、時間帯別の料金割引施策が実際に導入されている。しかしながら、ドライバーの高速道路利用に対する料金弾力性などは考慮されていない。また、時間帯別料金設定による需要分散効果を図った適切な通行料金のあり方に関する知見はこれまでに得られていない。

そこで、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、高速道路通行料金決定モデルを構築する。具体的には、一般道と高速道路で構成される道路ネットワークにおいて、高速道路料金体系を所与とする時間帯別需要変動型利用者均衡配分モデルを構築する。この利用者均衡問題を下位問題として持つ、総走行時間・料金収入・消費者余剰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。その上で、構築したモデルを用いて、仮想ネットワークにおける最適通行料金についての考察を行う。

2. 時間帯別需要変動型利用者均衡モデル

(1) 配分に際する仮定

時間帯別料金設定による交通量配分の変化を表現す

^{*1} キーワーズ：交通需要，時間的分散，都市高速道路，料金決定問題

^{*2}：正会員，修(工)，阪神高速道路株式会社 大阪管理部 保全工事グループ (〒552-0023 大阪市港区港晴2-11-12, TEL. 06-6576-6111, FAX.06-6576-6171)

^{*3}：正会員，博(工)，京都大学大学院経営管理研究部

^{*4}：正会員，博(工)，京都大学大学院工学研究科

^{*5}：正会員，博(工)，京都大学大学院工学研究科

るため、以下の仮定を設ける。

- 利用者は利用時間帯と経路の選択を行う。
- 全時間帯のOD需要の和は一定とする。

$$\sum_{n \in N} q_{rs}^n = \bar{q}_{rs} = \text{const.} \quad (1)$$

q_{rs}^n ：時間帯 n , OD ペア rs の交通量

- 時間帯・経路間ではコスト（一般化費用）に応じて利用者均衡が成り立つ。経路コストは(2)式で表わされる。

$$c_k^{rs,n} = t_k^{rs,n} + p_k^{rs,n} / \delta \quad (2)$$

$c_k^{rs,n}$ ：時間帯 n , OD ペア rs の経路 k のコスト

$t_k^{rs,n}$ ：時間帯 n , OD ペア rs の経路 k の所要時間

$p_k^{rs,n}$ ：時間帯 n , OD ペア rs の経路 k の料金

δ ：時間価値

- 各時間帯の残留交通量は考えない。

(2) 時間帯別需要変動型利用者均衡の定式化

上述の仮定に基づくと、時間帯、及び経路の選択は、(3),(4)式のようなNested Logitモデルで表される。

$$\Pr(k | n)_{rs} = \frac{\exp(-\theta_1 c_k^{rs,n})}{\sum_{k \in K_{rs}^n} \exp(-\theta_1 c_k^{rs,n})} \quad (3)$$

$\Pr(k|n)_{rs}$ ：OD ペア rs 間で時間帯 n を選んだ条件の下に、経路 k を選択する確率

θ_1 ：経路転換パラメータ

K_{rs}^n ：時間帯 n , OD ペア rs の経路集合

$$\Pr(n)_{rs} = \frac{\exp\{-\theta_2 (C_{rs}^n + S_{rs}^n)\}}{\sum_{n \in N} \exp\{-\theta_2 (C_{rs}^n + S_{rs}^n)\}} \quad (4)$$

$\Pr(n)_{rs}$ ：OD ペア rs 間で時間帯 n を選択する確率

θ_2 ：時間帯転換パラメータ

C_{rs}^n ：OD ペア rs における時間帯 n の固定費用

S_{rs}^n ：OD ペア rs における時間帯 n の経路選択の期待最小費用

この均衡状態と等価な最適化問題P1は(5)~(9)式で記述される。これは、目的関数が凸関数、制約条件が凸関

域であることから、最適解が満足する必要十分条件はKuhn-Tucker条件として与えられ、(3)、(4)式と一致する。

$$\begin{aligned} \min Z(\mathbf{x}(\mathbf{f}), \mathbf{q}) &= \sum_{n \in N} \sum_{a \in A} \int_0^{x_a^n} c_a^n(\omega) d\omega + \frac{1}{\theta_1} \sum_{n \in N} \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{k \in K_{rs}^n} f_k^{rs,n} \ln \frac{f_k^{rs,n}}{q_{rs}^n} \\ &\quad + \frac{1}{\theta_2} \sum_{n \in N} \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} q_{rs}^n \ln \frac{q_{rs}^n}{\bar{q}_{rs}} + \sum_{n \in N} \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} q_{rs}^n C_{rs}^n \quad (5) \\ \text{subject to} & \\ \sum_{k \in K_{rs}^n} f_k^{rs,n} &= q_{rs}^n, \quad \forall n \in N, r \in R, s \in S \quad (6) \\ \sum_{n \in N} q_{rs}^n &= \bar{q}_{rs}, \quad \forall r \in R, s \in S \quad (7) \\ f_k^{rs,n} &\geq 0, \quad \forall k \in K_{rs}^n, n \in N, r \in R, s \in S \quad (8) \\ q_{rs}^n &\geq 0, \quad \forall n \in N, r \in R, s \in S \quad (9) \end{aligned}$$

\mathbf{x} : リンク交通量ベクトル

\mathbf{f} : 経路交通量ベクトル

\mathbf{q} : OD交通量ベクトル

$c_a^n(x_a^n)$: 時間帯 n , リンク a のリンクコスト関数

$f_k^{rs,n}$: 時間帯 n , ODペア rs の経路 k の交通量

(3) 時間帯別需要変動型利用者均衡モデルの解法

本モデルは確率的均衡配分を用いるため、配分対象となる経路集合の特定が必要となるが、全経路を列挙するのは計算負荷が膨大となる。一方、経路集合を特定しない方法として Dial のアルゴリズムがある。しかし、Dial のアルゴリズムでは繰り返し計算中に経路選択枝集合が必ずしも収束しないため、厳密解を得られないことが指摘されている¹⁾。そこで、本研究では0フロー時において Dial のアルゴリズムを用いて、迂回を許さない経路選択枝集合を特定する。その上で、Simplicial Decomposition 法²⁾により配分交通量を求める。

(4) パラメータの設定

θ_1 は経路転換に関するコストの感度パラメータ、 θ_2 は時間帯転換に関するコストの感度パラメータを表す、また、 C_{rs}^n は時間帯・ODの固定費用、すなわち、所要時間・料金を除いたその時間帯・ODを利用する都合の良さで決まる費用（各時間帯・ODペアで一定値）を表す。この値により、ピーク時に需要が集中するといった現象が反映される。 S_{rs}^n は経路選択に対する期待最小費用、すなわち、経路コストで決定される費用であり、(10)式で表わされる。

$$S_{rs}^n = -\frac{1}{\theta_1} \ln \left\{ \sum_{k \in K_{rs}^n} \exp(-\theta_1 c_k^{rs,n}) \right\} \quad (10)$$

本モデルでの交通量配分はパラメータ値に依存する。そこで既往研究³⁾⁴⁾を参考に $\theta_1=0.1$, $\theta_2=0.01$ とし、観測 OD交通量を用いて現況の交通量配分状況を的確に記述

する C_{rs}^n を最尤推定法により導出する。

3. 通行料金決定モデルの構築

通行料金決定モデルを構築するにあたり、与えられた料金体系の下で時間帯・経路に関する利用者均衡状態の成立を仮定する。その上で、高速道路建設費の償還条件、及び各リンクの容量条件を満たしつつ、ある目的関数を最大化、もしくは最小化する料金体系を決定する。このとき、本モデルは(11)～(14)式のように2レベル問題として定式化され、求める変数は時間帯別料金となる。ただし、 Z は時間帯均衡配分での目的関数を表す。

Max or Min	(料金決定方針を表す目的関数)	(11)
subject to	(料金収入) \geq (償還に必要な金額)	(12)
	(配分交通量) \leq (容量条件)	(13)
	時間帯別確率利用者均衡配分問題P1	(14)

目的関数としては、成瀬⁵⁾を参照すると総走行時間最小化、料金収入最大化、及び消費者余剰⁶⁾最大化が考えられ、それぞれ式(15)～(17)で定義される。

$$\text{総旅行時間} : \min \sum_{n \in N} \sum_{a \in A_n} x_a^n t_a^n \quad (15)$$

N : 全時間帯の集合

A_n : 全リンクの集合

x_a^n : 時間帯 n , リンク a の交通量

t_a^n : 時間帯 n , リンク a の所要時間

$$\text{料金収入} : \max \sum_{n \in N} \sum_{a \in A_F} F^n x_a^n + \sum_{n \in N} \sum_{a \in A_P} P^n l_a x_a^n \quad (16)$$

A_F : 初乗り料金のかかるリンク集合

F^n : 時間帯 n の初乗り料金

A_P : 距離料金のかかるリンク集合

P^n : 時間帯 n の距離料金

l_a : リンク a の距離

$$\text{消費者余剰} : \max \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \bar{q}_{rs} (S_2^{rs,B} - S_2^{rs,A}) \quad (17)$$

R : 全起点集合

S : 全終点集合

\bar{q}_{rs} : ODペア rs の全時間帯交通量

$S_2^{rs,B}$: ODペア rs における時間帯選択の期待最小費用

A : 料金変更後を表す添え字

B : 料金変更前を表す添え字

本モデルの解法は以下の通りである：①複数の料金パターンを与える。②各料金パターンにおいて時間帯需要変動を考慮した均衡配分問題P1を解く。③配分結果に基づき、(12)式の償還条件、(13)式の高速道路の容量条件を満たす料金パターンのみを抽出する。④各料金パターンに対して目的関数値を算出し、最適な順に並べる。

4. 仮想ネットワークによる最適料金体系の分析

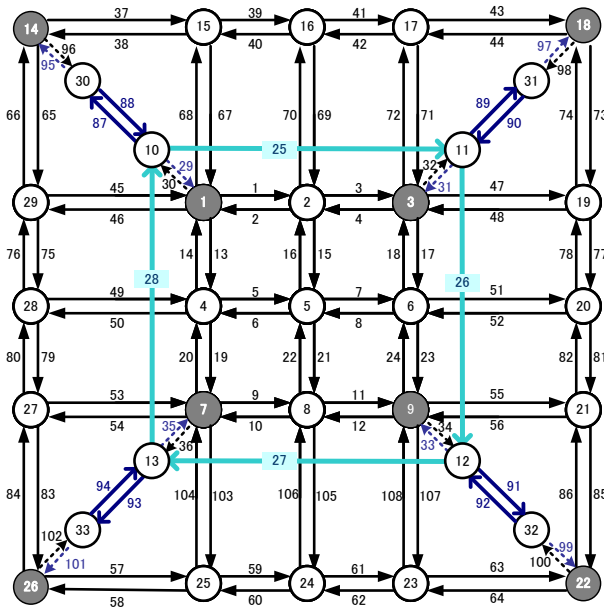
(1) 計算条件の設定

仮想ネットワークとして一般道リンクと高速道路リンク、及び高速道路料金を課すダミーリンクで構成された図1のネットワークを想定する。このとき、各リンク a の所要時間 $t_a(x_a)$ は(18)式の BPR 関数に従うとする。仮想ネットワーク上の各リンクのパラメータ値を表1に整理する。

$$t_a(x_a) = t_{a0} \left\{ 1 + \alpha (x_a / C_a)^\beta \right\} \quad (18)$$

t_{a0} : 0 フロー時におけるリンク a の所要時間

α, β : BPR 関数の係数



●: 需要発生ノード ○: 分岐ノード

図1 仮想ネットワーク

表1 リンクパラメータ値

記号	用途	t_{a0} (分)	距離 (km)	容量 (台/h)	α	β
	環状高速	8	10	8000	0.4	2.8
	放射高速	6	8	4000	0.4	2.8
	一般道	10	5	2000	0.54	2.4
	出口	0	0			
	入口	0	0			

償還条件は、建設費 180 億円/km、償還年数 45 年、社会的割引率 4%を想定し、対象時間に必要な償還額は 1 日の償還額の 17%とする。また、時間価値は 50 円/分とする。

分析対象時間帯として 3 つの時間帯 (時間帯 1, 時間帯 2, 時間帯 3) を想定し、各時間帯幅は 1 時間とする。

時間帯別料金設定導入前の基準状態として、高速道路料金を一律 700 円とし、その時の各時間帯の交通需要は時間帯 1→3→2 の順に大きくなるように設定する。

その上で、初乗り料金を 0~1000 円で 100 円刻み、距離

料金を 0, 25, 50 (円/km) として需要の高い時間帯ほど、初乗り・距離料金共に高額になるような料金パターンを設定し、総走行時間を最小化する料金パターンについて考察を行う。

OD 交通量パターンは、全 OD ペアで交通需要量を等しくなるよう設定する。また、紙幅の制約上、目的関数を総走行時間最小化としたケースについて詳述する。

(2) 分析結果

総走行時間を低減させる料金パターンを、総走行時間の低い順に 4 パターン導出し、表 2 に整理した。ただし、本研究では料金変更による交通制御の効果を純粋に評価することを目的とするため、償還条件を考慮しない場合の分析結果も合わせて導出した。また、基準状態との比較で、(16)式で定義される料金収入、及び(17)式で定義される消費者余剰の増減も整理した。

まず、償還条件を考慮しない場合は、表 2(a)より全時間帯において基準料金より安い初乗りのみの時間帯別料金となった。これは、長距離旅行者に好ましく、ピーク時の需要分散が狙われている。その一方で、値下げを行ったことにより料金収入は下がり、結果、消費者余剰は上がることとなる。次に、償還条件を考慮した場合、表 2(b)より、初乗りのみの時間帯別料金となっているが、償還条件を考慮しない場合より料金が高く決定され、総走行時間、料金収入の減少分、及び消費者余剰の増加分は小さくなっている。

さらに、最適料金時の各リンク交通量の増減を表 3 に示す。これより、最適料金時は、時間帯別料金のため、一般道リンクではオフピーク時 (時間帯 1,3) に大きく交通量が減少、高速道路ではオフピーク時に大きく増加していることが読み取れる。また、各 OD ペアの時間帯別交通量の変化量を表 4 示す。これより、時間帯別料金のため、概ね時間帯 2,3 で減少、時間帯 1 で増加する。特に、走行時間の長い外側ノードから外側ノードへ向か

表 3 最適料金時のリンク交通量増減(%)

	時間帯1	時間帯2	時間帯3
リンク1		-8.03	-71.48
リンク2	3.13	5.45	2.56
リンク3		-8.03	-71.48
リンク4	9.75	4.29	4.75
リンク56		-56.36	
リンク57	-89.81	-30.33	-74.34
リンク58		-54.78	
リンク59	-71.56	-4.87	-55.66
リンク25	33.63	2.07	21.31
リンク26	33.61	2.08	21.30
リンク27	33.55	2.08	21.32
リンク28	33.63	2.08	21.30
リンク87	40.57	15.42	35.09
リンク88	106.99	44.90	84.88
リンク89	40.60	15.41	35.11
リンク90	106.83	44.92	84.88

環状内一般道 環状外一般道 環状高速 放射高速

表2 基準需要における総走行時間の低い順4位

(a)償還条件を考慮しない場合

初乗り料金(円)			距離料金(円/km)			総走行時間			料金収入		消費者余剰
時間帯1	時間帯2	時間帯3	時間帯1	時間帯2	時間帯3	順位	値(万分)	増減(%)	値(万円)	増減(%)	値(万分)
0	400	200	0	0	0	1	227.3	-9.59	1548.5	-61.50	22.8
100	400	200	0	0	0	2	227.4	-9.54	1773.8	-55.89	18.4
200	400	200	0	0	0	3	227.4	-9.52	1976.6	-50.85	14.3
0	400	400	0	0	0	4	230.1	-8.46	1872.8	-53.43	27.6

基準料金	700	700	700	0	0	0	64	251.4	0.00	4021.6	0.00	0
------	-----	-----	-----	---	---	---	----	-------	------	--------	------	---

(b)償還条件を考慮した場合

初乗り料金(円)			距離料金(円/km)			総走行時間			料金収入		消費者余剰
時間帯1	時間帯2	時間帯3	時間帯1	時間帯2	時間帯3	順位	値(万分)	増減(%)	値(万円)	増減(%)	値(万分)
200	800	400	0	0	0	1	238.9	-4.97	2928.6	-27.18	10.5
400	600	400	0	0	0	2	240.1	-4.48	2952.4	-26.59	17.0
400	700	400	0	0	0	3	240.2	-4.45	3130.7	-22.15	12.8
300	700	400	0	0	0	4	240.4	-4.36	2994.4	-25.54	16.8

基準料金	700	700	700	0	0	0	64	251.4	0.00	4021.6	0.00	0
------	-----	-----	-----	---	---	---	----	-------	------	--------	------	---

う OD (OD 表の右下) において顕著であることが分かる。

表4 最適料金時の OD 交通量増減 (%)

時間帯 1

O\D	1	3	7	9	14	18	22	26
1		0.7	2.3	3.1	1.6	3.5	3.2	0.8
3	2.3		3.1	0.7	0.8	1.6	3.5	3.2
7	0.7	3.1		2.3	3.5	3.2	0.8	1.6
9	3.1	2.3	0.7		3.2	0.8	1.6	3.5
14	1.3	4.4	0.5	4.2		5.0	4.4	5.2
18	0.5	1.3	4.2	4.4	5.2		5.0	4.4
22	4.2	0.5	4.4	1.3	4.4	5.2		5.0
26	4.4	4.2	1.3	0.5	5.0	4.4	5.2	

時間帯 2

O\D	1	3	7	9	14	18	22	26
1		-1.2	-2.0	-0.5	1.5	-1.0	-0.4	3.4
3	-2.0		-0.5	-1.2	3.4	1.5	-1.0	-0.4
7	-1.2	-0.5		-2.0	-1.0	-0.4	3.4	1.5
9	-0.5	-2.0	-1.2		-0.4	3.4	1.5	-1.0
14	1.7	-2.5	3.3	-1.9		-2.7	-1.8	-1.0
18	3.3	1.7	-1.9	-2.5	-1.0		-2.7	-1.8
22	-1.9	3.3	-2.5	1.7	-1.8	-1.0		-2.7
26	-2.5	-1.9	1.7	3.4	-2.7	-1.8	-1.0	

時間帯 3

O\D	1	3	7	9	14	18	22	26
1		0.9	0.7	-1.7	-2.9	-1.4	-1.9	-4.5
3	0.7		-1.7	0.9	-4.5	-2.9	-1.4	-1.9
7	0.9	-1.7		0.7	-1.4	-1.9	-4.5	-2.9
9	-1.7	0.7	0.9		-1.9	-4.5	-2.9	-1.4
14	-2.9	-0.3	-4.3	-0.8		-0.6	-1.1	-2.7
18	-4.3	-2.9	-0.8	-0.3	-2.7		-0.6	-1.1
22	-0.8	-4.3	-0.3	-2.9	-1.1	-2.7		-0.6
26	-0.3	-0.8	-2.9	-4.3	-0.6	-1.1	-2.7	

(3) 考察

総走行時間の最小化には、初乗りのみの時間帯別料金が有効である。そのとき、料金収入は下がり、消費者余剰は上がる。償還条件を考慮すると、料金が上がるため各目的関数値の増減が小さくなる。また、最適料金によりリンク交通量がオフピーク時の高速道路へ転換し、OD交通需要が時間的

に分散され、その結果総走行時間についても削減される傾向にあると考えられる。

5. 結論

本研究では、時間帯の需要変動を考慮した配分を考案し、通行料金の決定モデルの構築・計算方法の開発を行った。そして、仮想ネットワークに適用計算を行い、ピーク時需要のオフピークへの分散ならびに目的関数に合致した解が得られ、モデルの妥当性を検証できた。今後、需要の設定パターンや最適化する目的関数を変えて分析を進める。また、研究課題としては次の2点が挙げられる。

- ✓ 経路・時間帯転換パラメータ θ_1, θ_2 をアンケート調査等により推定する。
- ✓ 本モデルを実ネットワークにも適用する。

参考文献

- 1) 円山琢也：ネットワーク均衡モデルを応用した都市圏レベルの交通政策分析，東京大学大学院修士論文，pp30-32，2004.8
- 2) 土木学会「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－，209-211，1998
- 3) Mitsuhsisa TANAKA, Nobuhiro UNO, Fumitaka KURAUCHI, Yoongho Ahn : An Analysis of Effects of Trend Information upon Route Choice Behavior by In-Laboratory Experiment, International Journal of ITS Research, Vol.6, No.1, pp57-65, July 2008
- 4) 中山晶一郎：交通ネットワークの連結効果と信頼性：統一的な信頼性指標としての最小旅行時間のパーセンタイル値，土木計画学・講演集 Vol.28, CD-ROM, 2008.11
- 5) 成瀬栄治：利用者均衡を考慮した都市高速道路の料金決定モデルに関する研究，京都大学大学院修士論文, 1988.2
- 6) 北村隆一・森川高行：交通行動の分析とモデリング，技報堂出版，p.144-145, 2002.5