

# 有料道路における時間帯料金割引きの有効性に関する研究

根本 敏則<sup>\*1</sup> 今西 芳一<sup>\*2</sup> 菊地 春海<sup>\*3</sup> 小林 正紀<sup>\*4</sup> 河野九三夫<sup>\*5</sup>

一橋大学大学院商学研究科 教授<sup>\*1</sup>

(株) 公共計画研究所 所長<sup>\*2</sup>

国土交通省道路局地方道環境課環境調査室長<sup>\*3</sup>

(財) 首都高速道路技術センター 企画部長<sup>\*4</sup>

(株) 公共計画研究所 主任研究員<sup>\*5</sup>

混雑する有料道路で、早朝の時間帯の料金を割引いてピーク時の交通量をピーク時前の時間帯に分散させることによる総交通費用の変化を評価する交通経済モデルを構築した。このモデルに首都高速道路3号線の交通データを適用し、早朝の時間帯割引料金の有効性を実証的に把握することを試みた。その結果、ピーク時間帯の前の時間帯の料金を割引いてピーク時交通をピーク時前の時間帯にシフトさせると、ピーク時とそれ以降の時間帯の渋滞緩和が長時間継続し、交通費用削減効果が大きいことが分かった。すなわち、早朝の時間帯割引が交通費用削減に有効であることが実証的に示された。

## Effect of Hourly Toll Reduction on Toll Roads

Toshinori NEMOTO<sup>\*1</sup>, Yoshikazu IMANISHI<sup>\*2</sup>, Harumi KIKUCHI<sup>\*3</sup>, Masaki KOBAYASHI<sup>\*4</sup>, Kumio KONO<sup>\*5</sup>

Hitotsubashi University, Graduate School of Commerce and Management<sup>\*1</sup>

Public Planning & Policy Studies, Inc.<sup>\*2</sup>

Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism<sup>\*3</sup>

Technology Center of Metropolitan Expressway<sup>\*4</sup>

Public Planning & Policy Studies, Inc.<sup>\*5</sup>

Keywords: transport-economics model, toll discounts, travel cost, congestion pricing, road pricing

### 1. はじめに

一般に道路交通は朝夕に利用交通量が多く混雑し、早朝・夜間は利用交通量が少なく空いている。道路資源の有効利用の観点からは混雑している時間帯の交通量を空いている時間帯にシフトさせて混雑を緩和することが考えられる。

有料道路の場合、空いている時間帯の料金を下げると、混雑時間帯から空いている時間帯へ交通がシフトし、混雑が緩和されることが期待される。ETCをはじめとするITSが普及しており、きめ細かな料金設定による交通需要管理が期待される。

本研究では、早朝の時間帯割引を行った場合の道路利用者の時間シフトと社会便益の発生の仕組みを交通経済学の理論に基づいてモデル化し、首都高速道路の観測データを用いて実証的な分析を試み、有料道路において望ましい時間帯別料金を設定する理論的基礎を構築した。

### 2. 既存研究の概観と本研究の位置づけ

#### (1) 主な既存研究の手法と結論の整理

ピーク時の交通行動に関していくつかの研究がある。過去の研究では、「同一の始業時刻(=到着希望時刻)を持つ労働者が、混雑(時間費用)とスケジューリング費用とのトレードオフを考慮して出発時刻を選択する」という行動選択モデルが定式化されてきた。ここで、スケジューリング費用とは、「早着による待機時間の機会費用(早着費用)」または「遅刻によるペナルティ(遅刻費用)」である。

ピーク時の交通行動モデルは混雑の表現方法によって2通りのアプローチに大別できる。Henderson(1981)等による「フロー混雑モデル(QV式を用いて交通量が増加すると所要時間が長くなるモデル)」と、Vickrey(1969), Arnott et al.(1990)に代表される「ボトルネックモデル(交通量が交差点などの隘路の交通容量を超えると、隘路を先頭として渋滞列が発生し、

所要時間が長くなるモデル)」である。

混雑の表現方法によって、混雑課金による効果の評価が異なる。フロー混雑モデルでは混雑課金により利用者の厚生が悪化（時間費用とスケジュール費用を合わせた費用負担が増加）する。一方、ボトルネックモデルでは混雑課金により利用者の厚生を悪化させずに混雑による経済損失を解消できる。

観測データを用いた交通シミュレーションも行なわれている。例えば、文(2005)は、フロー混雑モデルとボトルネックモデルを統合したモデル（ボトルネックに到達するまでの道路区間では QV 式を用いて交通量が増加すると所要時間が長くなり、ボトルネックにおいては交通量が交通容量を超えると渋滞列が発生し、所要時間が長くなる）を作成し、名神高速道路を対象としたシミュレーション分析を実施し、最適混雑課金水準を求めた。

また、越(2007)は、ボトルネックモデルを基に各利用者が前日の交通状態から当日の出発時刻を決定するという学習型シミュレーションを実施し、混雑課金により渋滞緩和効果が発現することを示した。

## (2) 既存研究における費用項目・費用単価

これまでの研究では利用者の一般化費用は、①所要時間費用、②スケジュールリング費用（早着費用または遅刻費用）と③通行料金の和としてきた。また、各出発時刻の利用者の一般化費用が同額となるように出発時刻が分布するという利用者均衡の概念が用いられている。

図表 1：既存研究における費用単価

	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
Vickrely (1969)	3.0	1.5	6.0
Henderson (1981)	-	-	-
Small, et al. (1982)	12.2	7.5	29.2
Arnott, et al. (1990)	16.0	9.8	38.0
越 (1998)	-	-	-
越 (2007)	140.0	60.0	200.0
文 (2005)	33.3	13.3	70.0

注 1)  $\alpha$ ：遅れ時間費用単価、 $\beta$ ：早着費用単価、 $\gamma$ ：遅刻費用単価（いずれも円/分）

注 2) 「-」はモデルによる定式化のみで、数値解析を実施していない。

注 3：1 ドル=115 円で換算した。

既存研究のうち、交通量等の観測データから実証的に各費用の単価を推定したものは Small (1982)のみである。その他の研究では各費用を外生値として

与えている。このとき、Small (1982)の推定結果が援用されることが多い。各研究とも、「早着費用 ( $\beta$ ) < 走行時間費用 ( $\alpha$ ) < 遅刻費用 ( $\gamma$ )」と設定している点で共通している。これまでの主な研究における費用の単価の設定状況を図表 1 に整理した。

## (3) 本研究の位置づけ

これらの既存研究においては、何れのモデルも道路利用者の目的地到着希望時刻がひとつであるという仮定をしており、また、総交通費用が最小となる課金額等の最適解を求めようとしている。一方、本研究は次の点で既存研究と異なる。

- ア. 目的地到着希望時刻はひとつではなく、分布していると仮定する。
- イ. 求める解は最適解ではなく、課金額が与えられた場合の交通行動の変化と総交通費用である。
- ウ. 早発・早着時間費用をモデルに組み込む。
- エ. 早発・早着時間単価は仮定ではなく、料金社会実験データを用いて推計する。

## 3. 利用者均衡モデルの構築

### (1) 一般化費用の設定

一般化費用は、①トリップの時間費用、②「早着費用」または「遅刻費用」、③「早発費用」または「遅発費用」、④料金で構成されるとした。既存研究では早発費用がモデルに組み込まれて来なかったが、越(1998)の提案に従って、早発費用をモデルに組み込み、また、遅発による便益についても、負の早発費用として設定する。

各費用単価は、本来、個人や社会状況によって異なるが、全利用者の費用単価が同一であると仮定してモデル化する。一般化費用は下式で表される。

$$\begin{aligned} \text{一般化費用} = & \text{① (所要時間} \times \text{時間費用単価 } \alpha) \\ & + \text{② (早着時間} \times \text{早着費用単価 } \beta, \text{ または、遅} \\ & \text{刻時間} \times \text{遅刻費用単価 } \gamma) \\ & + \text{③ (早発} \cdot \text{遅発時間} \times \text{早発} \cdot \text{遅発費用単価 } \delta) \\ & + \text{④ (有料道路料金 } \tau) \end{aligned}$$

ここで、遅発時間は負の値である。

### (2) 希望到着時刻と希望出発時刻の設定

既存研究においては道路利用者の到着希望時刻は同一（例えば、越 (1998)）、あるいは、希望時刻がない（例えば竹内 (2008)）と仮定している。しかし、実際の道路利用者はそれぞれ異なる希望到着時刻を持ち、また、検討対象としている道路区間やボトルネックから目的地までの距離や所要時間も異なる。

現実的な仮定を考え、次のような状況を想定する。

所要時間の変動がない場合、現在の道路利用者は希望到着時刻に到着するために出発時刻を定め、希望時刻に到着していると考えられる。したがって、現在の出発時刻が希望出発時刻であり、この出発時刻を基準として生活や仕事のスケジュールが成立している。このように考えると、移動経路上の全ての地点における現状の通過時刻は希望通過時刻であり、これより早く出発する場合はスケジュールに無理が生じ損失が発生する。また、遅く出発する場合はスケジュールに余裕ができて便益が発生する。

そこで、本研究では時間帯別料金の検討対象となる道路区間において、その下流側端点における現状の通過時刻が道路利用者の希望通過時刻である。

### (3) 利用者均衡条件

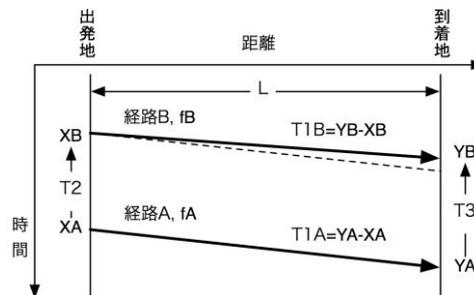
利用者均衡の考え方に基づき、同一の出発希望時刻を持つ利用者がどの時刻に出発しても一般化費用が同一となり、どの時間帯へシフトしても自らの一般化費用を減少できない状態で均衡すると仮定する（ワードロップ第1原理）。そこで、次のような状況を想定する。

- ア.  $X_A$ ,  $X_B$  という2つの出発時刻があり、 $X_A$  がピーク時間帯、 $X_B$  が早朝の時間帯である。
- イ. それぞれ所要時間が  $T_{1A}$ ,  $T_{1B}$  であり、ピーク時間帯の方が所要時間が長く、 $T_{1A} > T_{1B}$  である。
- ウ. それぞれの時間帯の交通量は  $Q_A$ ,  $Q_B$  である。

このとき出発時刻  $X_A$  を選んでいる道路利用者が  $X_B$  の出発時刻に変更すると、早発費用が発生する。このため、現状では  $X_B$  に出発した方が所要時間が短いにも関わらず、この時間帯を選ばない。この状況を図表2に図化して示す。

ここでそれぞれの記号は次の意味を表す。

- $X_A$ ,  $X_B$  : 時空間上の経路A, Bを利用した出発時刻
- $Y_A$ ,  $Y_B$  : 時空間上の経路A, Bを利用した到着時刻
- $\tau_A$ ,  $\tau_B$  : 時空間上の経路A, Bの通行料金 (円)
- $T_{1A}$ ,  $T_{1B}$  : 経路A, Bを利用したときの所要時間 (分)、  
 $T_{1A} = Y_A - X_A$ ,  $T_{1B} = Y_B - X_B$  である。いずれも交通量の関数、 $T_{1A} = T_{1A}(Q_A)$ ,  $T_{1B} = T_{1B}(Q_B)$
- $T_2$  :  $T_2 = X_A - X_B$ 、経路Aから経路Bに変更したときの早発時間 (分)、 $T_2 < 0$  のときは遅発時間
- $T_3$  :  $T_3 = Y_A - Y_B$ 、経路Aから経路Bに変更したときの早着時間 (分)、 $T_3 < 0$  のときは遅刻時間



図表2 時空間上の時間シフトの概念図

このとき、一般化費用は次のように表される。

ア. 目的地に早着する場合 ( $T_3 > 0$ )

$$P_A = \alpha T_{1A} + \tau_A$$

$$P_B = \alpha T_{1B} + \tau_B + \delta T_2 + \beta T_3$$

イ. 目的地に遅刻する場合 ( $T_3 < 0$ )

$$P_A = \alpha T_{1A} + \tau_A$$

$$P_B = \alpha T_{1B} + \tau_B + \delta T_2 - \gamma T_3$$

ここでそれぞれの記号は次の意味を表す。

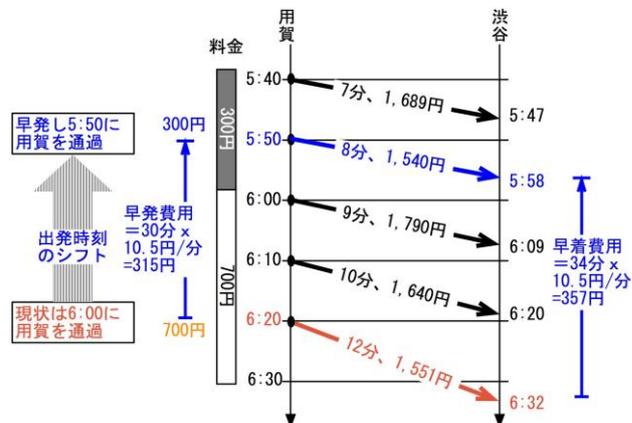
$P_A$ ,  $P_B$  : 経路A, Bを利用したときの一般化費用 (円)

$\alpha$  : 所要時間費用単価 (円/分)

$\beta$  : 早着費用単価 (円/分)

$\gamma$  : 遅刻費用単価 (円/分)

$\delta$  : 早(遅)発費用単価 (円/分)



図表3 時間シフト時の一般化費用の例示

(矢印上に示した数値はそれぞれ所要時間、一般化費用を表す。例えば5時台の通行料金が700円から300円に変化したとき、6:20出発の利用者は5:50出発に変更すると、一般化費用が最小になる。)

早朝の時間帯割引料金が適用される以前の場合、 $\tau_A = \tau_B$  であり、時刻  $X_A$  に出発する道路利用者にとっては  $P_A < P_B$  である。早朝の時間帯割引料金が適用されると  $\tau_A > \tau_B$  となり、 $P_A > P_B$  となる者は出発時刻  $X_B$  に移動 (時間シフト) する。このとき、時刻  $X_A$ ,  $X_B$  のいずれの出発時刻を選んでも、一般化費用

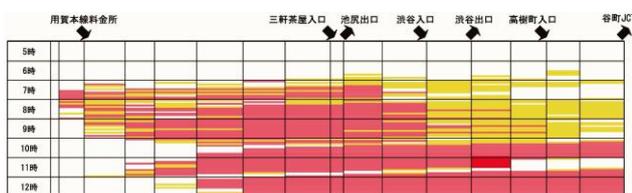
PA、PB が同じになる時間シフト量で均衡する。すなわち、 $PA^*=PB^*$ となる、 $QA^*$ 、 $QB^*$ が存在し、その時の所要時間は  $T1A^*$ 、 $T1B^*$ となる。出発時刻選択の概念を図化すると図表3のようになる。

#### 4. 分析対象道路の設定とその交通状況

##### (1) 分析対象道路の設定

本研究では、モデル化の対象路線を首都高速3号線とした。対象路線は次の特徴がある。

- ア. 途中の出入口の交通量が少ないことから、単一経路としてモデル化が可能である
- イ. 図表4に示すように、午前10までは路線上の池尻付近にボトルネックが存在する



出典：首都高速道路感知器データ(2007年2月19日)

注：■：渋滞、■：混雑

図表4：首都高速3号渋谷線(上り)の区間別・時間帯別渋滞発生状況

##### (2) 渋滞が発生する区間と時間帯

首都高速3号線では朝6時台から池尻出口～渋谷入口付近(サグによるボトルネック)を先頭に朝10頃まで渋滞する。渋滞のピークは7～8時である。

##### (3) 区間の交通量と旅行速度

首都高速3号線上りの交通量が最大となるのは、6～8時台である(最大交通量:約3,500台/時)。一方、旅行速度が最低になるのは10時頃である。両者は単純な比例関係にあるのではなく、時間交通量が最大となる時間の後に、旅行速度が最低となる時間が現れるという時間の差が生じている。

首都高速3号線に並行する国道246号上りでは、日中ほぼ一定の交通量(約2,000台/時)、旅行速度(20～30km/時)で推移している。

##### (5) 出入口交通量及び本線交通量

首都高速3号線上りの流入交通量のうち、東名からの接続と用賀入口からの流入が合わせて約80%を占める。したがって、首都高速3号線上りは途中の出入口の交通量を考慮しない単一経路モデルとする。

#### 5. 旅行時間推計モデル

上記の利用者均衡モデルを解くためには道路区間の旅行所要時間を推計する必要がある。一般に道路区間の旅行所要時間を推計する手法としてQV式が

用いられている。QV式は交通量に対して所要時間が単調増加するため、渋滞時に交通量が減少し、所要時間が増加する現象を表すことができない。このため、本研究ではブロック密度法を用いる。

##### (1) モデル対象区間

首都高速3号線上りの朝ピークの渋滞は渋谷出口付近を先頭に発生する。一方、利用者のほとんどは実際には渋谷出口を通過し、総利用距離に対して料金を支払っている。そこで、モデル対象区間延長を首都高速道路東京線の利用距離の中央値約15kmを考慮して、15kmとした。

ここで、用賀料金所～渋谷入口(8.0km)はブロック密度法のモデル対象区間とし、残りの区間(7.0km)は自由走行速度で走行できる区間と仮定した。

##### (2) 計算手順

i) ブロック長・スキャン時間・自由流速度の設定

まず、分析対象道路区間を単位距離で区切られたブロックに分割する。単位距離( $dL$ :ブロック長=133m)はスキャン時間( $dt=6sec$ )の間に自由流速度( $Vf=80km/h$ )で進む距離と設定する。すなわち、 $dL=Vf dt$ と設定する。

ii) 交通量-密度関係の設定

次に、各ブロック*i*について交通量( $Qi$ ) - 密度( $Ki$ )の関係を設定する。臨界密度( $Kci$ )、飽和(ジャム)密度( $Kji$ )をパラメータとして与える。臨界交通量( $Qci$ :ブロック*i*の交通容量)は、 $Qci=Vf*Kci$ として定まる。

iii) ブロック間の移動交通量の算出

上流ブロック*i+1*から下流ブロック*i*へ移動する交通量 $Q_{i+1,i}$ は、上流ブロック*i+1*の流出可能交通量、下流ブロック*i*の流入可能交通量、上流ブロック*i+1*と下流ブロック*i*の交通密度に応じて算出される。

##### (3) パラメータ値設定

交通容量を普通区間3600台/時、ボトルネック区間2400台/時など、観測交通に適合するように各種パラメータを設定した。

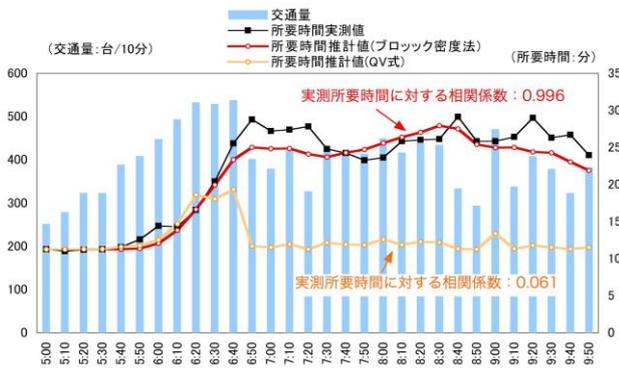
##### (4) 交通量の設定

対象区間上流端(東名からの接続と用賀入口からの合計)への10分毎の流入交通量(2007年2月19日の感知器データ)をスキャン時間 $dt$ で除して単位時間毎の流入量を設定した。

##### (5) 実測値とモデル値の整合性

設定した旅行時間推計モデルを用いて、料金割りのない現状における所要時間を推計し、実測値との比較を行った。図表5に示すように、旅行時間推計モデルによって推計された所要時間は実測値とよく

一致している。



図表5：推計値（ブロック密度法及びQV式）と実測値と比較

注1) 5:50の所要時間の変化は事故が原因である。

注2) ブロック密度法による推計値と実測値の不一致の要因としては渋谷出口下流にもボトルネックがあることが考えられる。

注3) 参考のためQV式を用いた推計値も記載した。

## 6. データを用いた早発・早着時間費用単価の推計

早発・早着時間費用単価については観測された例がない。既存研究においては数値を仮定している。ひとつの手がかりとして、料金割引社会実験において観測された時間シフト率がある。そこで、本研究では、まず、既存研究で用いられた仮定値でシミュレーションを行い、その後、料金割引社会実験の観測値に適合する早発・早着時間費用単価を探索した。

### (1) 社会実験による交通量の時間シフトの実態

首都高速道路においては、平成15年11月から料金割引社会実験が実施された。このうち、H18年度アンケートの結果によると、早朝割引（20%割引）により、6時台の交通のうち2.9%が5時台にシフトしたことなどが把握されている。

### (2) 早発・早着時間費用単価の推計

文(2005)は早発費用の単価 $\beta$ の値を13.3円/分と仮定している。そこで、この値（13.3円/分）、その1/2の値（6.65円/分）、その1/4倍（3.33円/分）の値を用いて、シミュレーションを行い、6時台から5時台への交通シフト率を求めるとそれぞれ1.2%、2.9%、9.3%となった。シミュレーション結果から、6.65円/分のケースが最も社会実験観測値に近いので、この値を用いる。

なお、ここでは簡単な仮定として、早発・早着費用は同じとした。早発の場合は出発前の活動を断念するか他の時間帯に移すことになり、早着の場合は約束時刻まで待機するか他の活動を行うことになる。

早発・早着では活動変更内容が異なり、費用も異なると考えられる、定量的な研究は今後に期待される。

## 7. 時間帯別料金設定による交通改善効果の評価

### (1) 費用項目と単価の設定

走行時間単価 $\alpha$ 、スケジュールリング費用（早着費用 $\beta$ 、早発費用 $\delta$ ）は以下の単価を設定した。

渋滞遅れ時間費用単価 <sup>1</sup>	$\alpha = 70.94$ (円/分)
早着費用単価	$\beta = 6.65$ (円/分)
早発費用単価	$\delta = 6.65$ (円/分)

ここで、スケジュール費用単価はすべて同じ値と仮定した。なお、料金割引は早い時間へのシフトを促す施策対象のみを分析対象とするため、遅着費用単価 $\gamma$ や遅発費用単価 $-\delta$ については取り扱わない。

### (2) 割引対象時間帯と割引料金額

首都高速3号線上り交通量の朝ピークは、6~8時台であるので、割引対象時間帯を5時台に設定し、5時台の料金を現行料金700円を基礎に、①600円、②500円、③400円、④300円の4ケースとした。

### (3) 評価結果

5時から10時までを対象として前述のモデルを用いて分析を行なったところ、次の結果を得た。

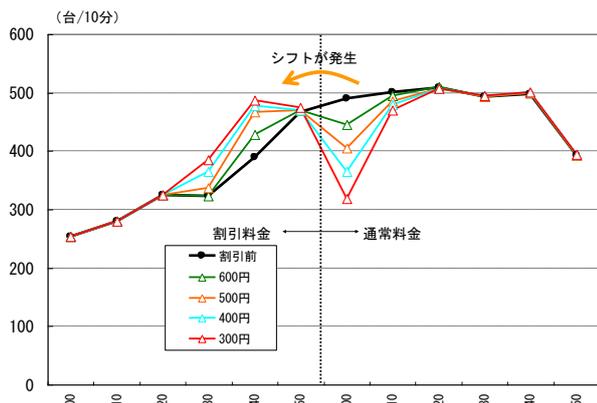
#### ア. 交通量シフトの発生状況

5時台にオフピーク割引を実施することにより、図表6に示すように、6時台から5時台へシフトした交通量の割合は、各料金割引ケースについて①1.7%、②3.5%、③5.0%、④6.9%であった。交通のシフト率をみると、平成18年度アンケートの結果である「料金が560円（2割引）のときに2.9%」とも整合している。

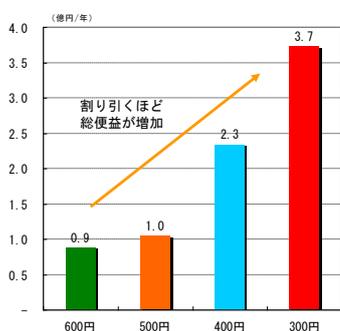
#### イ. 渋滞緩和効果の評価

早朝の時間帯に交通がシフトすることにより、6時以降のピーク時間帯、および、それ以降の時間帯に渋滞緩和効果が発生した。現行料金ケースと割引料金ケースの総時間費用の差を便益とすると、図表7に示すように、割引額が大きいほど総便益は増大し、早朝の時間帯割引料金を300円に設定した場合、総便益が3.7億円/年と推計された。

<sup>1</sup> この値は本研究が行われた時期の費用便益分析マニュアルに基づく値である。2008年に時間単価が改正され、現在はこの値よりも小さくなっている。



図表6：各料金ケースの10分間交通量の変化



図表7：総便益の変化 (億円/年)

## 8. 考察

### (1) 交通の時間シフトと渋滞緩和効果の関係

渋滞が始まる前の時間帯に渋滞が始まる時間帯の交通をシフトさせると効果が大きい。シフトした台数分だけ、後の時間の滞留台数が減少し、この効果は、渋滞解消まで継続する。したがって、朝の時間帯を大幅に割引くことが望ましい。

### (2) シミュレーション結果の評価

- ア. 利用者均衡の概念を出発時間選択に適用することにより、料金変化に対する交通量変化が内生的に求められるモデルを構築することができた。
- イ. 首都高速3号線朝時間帯の観測データを用いてシミュレーションを実施し、早朝割引によって社会的便益が発生することを実証した。

## 9. 今後の研究課題

- ア. 本研究では総需要固定、単ルートを設定した。通行料金を大きく変化させると、一般道路からの転換や総需要変化などがあると考えられる。これらの効果を定量的に検証するためには需要関数や経路選択を組み込んだモデルへ拡張する必要がある。
- イ. 本研究は早朝の時間帯割引を分析対象としたが、ピーク時の料金割増についても検討が必要である。

更には、時間帯毎に異なる料金を設定して、交通流の最適化を検討することも望まれる。

- ウ. 本研究では全ての利用者が均一の時間価値グループを持つと仮定している。モデルをより実現象に近づけるために複数の時間価値グループを想定したモデルへの拡張は意義があると考えられる。
- エ. 本研究では複数のスケジュール費用単価は同じ額と仮定した。本来は異なると考えられるので、単価の計測を行う必要がある。
- オ. 本研究が行われた時期と現在では、時間単価が異なり、また、渋滞状況も変化している。引き続き状況変化に合わせて研究を継続する必要がある。

## 10. 謝辞

この研究を行うにあたって、小根山裕之首都大学東京准教授、竹内健蔵東京女子大学教授に貴重な助言をいただきました。深く感謝いたします。

### [参考文献]

- 1) Henderson, J. V. (1981) "The Economics of Staggered Work Hours," *Journal of Urban Economics*, 9, 349-64.
- 2) Vickrey, W. S. (1969) "Congestion Theory and Transport Investment," *American Economic Review*, 53, pp.452-65
- 3) Arnott, R., de Palma, A., and Lindsey, R. (1990) "Economics of a Bottleneck," *Journal of Urban Economics*, 27, pp.111-30.
- 4) 越正毅(1998)「道路混雑対策としての時差出勤と混雑課金についての一考察」*交通工学*, Vol.33, No.3
- 5) 越正毅(2007)「動的課金による渋滞解消のシミュレーション」*高速道路と自動車*, No.50, vol.2, pp.14-22.
- 6) 文世一 (2005) 「通勤ラッシュアワーにおけるピークロード問題」, 文世一『交通混雑の理論と政策』東洋経済新報社, 第3章
- 7) 竹内健蔵(2008)「交通ネットワーク理論を応用した時間帯別道路料金：抵抗費用概念の導入」、*高速道路と自動車*, 第51巻, 第1号, pp21-27,
- 8) Small, K. A., (1982) "The Scheduling of Consumer Activities: Work Trips," *American Economic Review*, 72, pp.467-479
- 9) 国土交通省 道路局, 都市・地域整備局(2003)「費用便益分析マニュアル」