

ETC 割引制度を活用した高速道路混雑緩和

鈴木崇児

概要

本研究では、通勤混雑時間帯における ETC を活用した高速道路料金の割引制度について、特に ETC の導入によって可能になった自己選択と利用履歴に基づく事後決済機能に着目し、伝統的なボトルネック混雑モデルに基づいて料金体系の分析を行った。3つの ETC 料金割引制度を分析した結果、ボトルネック混雑の状況は、割引料金制度と ETC 利用者数、時間帯別のボトルネック容量の関係に応じて変化することが示され、それらの原理を活用して料金制度を設定することで ETC 利用の促進に対するインセンティブの確保と道路混雑に関わるネットワークシステムの効率性の改善を同時に達成できる可能性が示された。

Keyword: ボトルネック混雑、高速道路料金割引制度、差別価格、ETC、自己選択型料金体系

1. はじめに

一般に混雑時間帯での高速道路料金の割引は混雑を悪化させる。事実、日本の高速道路で ETC を使って行われた混雑時間帯における割引、例えば ETC 通勤割引は通勤時間帯の混雑を助長したように見える。ほとんどの道路混雑料金政策に関する議論では、混雑時間帯における高速道路利用に追加的な料金を課すことに焦点が合わされている。しかしその一方で、公共交通サービスの料金設定では、通時的な需要の平準化を目的としたオフピーク時間帯の料金割引制度が導入されている。理論的に考えれば、ピーク時間帯での割増料金とオフピーク時間帯での割引料金の適用は、どちらも時間帯で差別化された料金体系への変更であり、交通システムの混雑緩和に対して類似した効果を及ぼすはずである。

ETC の利用率の向上は高速道路管理会社の経営上の観点だけでなく、社会的にも望ましい。例えば、ETC 利用率の増加はノンストップ収受を通じて料金徴収に関わる人件費だけでなく、燃料消費や時間費用を削減する。日本政府は ETC の早期普及を目指して ETC 利用に関連した高速道路料金割引制度を導入した。日本全国に及ぶ高速道路網が大半完成した今日では、償還原則を前提として設定されてきた高速道路料金は過剰に高い水準に維持されており、その状況が料金割引を可能にしたとも言える。この割引料金制度の導入によって急速に ETC 利用率は向上したものの、その代償として利用者の適正な選択を過度に歪め、通勤時間帯や休日における高速道路混雑を悪化させたことは否めない。

この問題について、鈴木(2008a)はピーク時間帯における ETC 利用者への高速道路料金の割引が及ぼす影響を理論的に検討している。この研究では Vickrey(1969)によって提案され、Arnott, de Palma,

and Linsey (1990a)によって時間帯別最適課金の導出に応用された伝統的なボトルネック混雑モデルが適用されている。分析の結果、ピーク時間帯での料金割引は多くのケースで明らかに高速道路混雑を悪化させるものの、ETC 利用者と非 ETC 利用者の混走によって、特定の状況下では ETC 利用者の料金を割引しても高速道路混雑の増加が抑制されることが示された。

この研究結果を踏まえ、本研究では ETC 利用率を増加させつつ、道路ネットワークシステムの効率性を改善する ETC を活用した割引料金制度の実現可能性を検討する。ETC の導入は、管理者に (1) 自己選択料金、(2) ノンストップ料金徴収、(3) 事後決済といった ETC の基本的な機能特性を利用した料金体系を設計することを許容する。利用者の出発時刻を含めた時間帯別料金の自己選択は、ETC と通常の利用者の間に効果的に差別価格を設定することで全ての利用者の旅行費用を低下させるいわゆるパレート改善をもたらす可能性がある。ノンストップ料金徴収は料金所の混雑に関連した通過時間と燃料消費を減少させる効果を持つ。事後決済は日常的に高速道路を利用する通勤者の複数回の支払や利用に対して履歴に基づいた事後的な割引を可能とし、ピーク時間帯への需要の集中を緩和するための新たな割引方法を提供するだろう。

本研究では、特に(1)と(3)の特徴に着目し、以下の手順で分析を進める。まず、第2章において、分析に用いる伝統的なボトルネック混雑モデルを説明する。次に、ETC の利用率の向上と道路ネットワークシステムの効率性を改善するオフピーク時間帯における ETC 利用者への高速道路料金の割引（以下では ETC オフピーク通勤割引）制度を検討する。その次に、オフピーク時間帯に ETC を利用して頻繁に通勤する利用者へのピーク時間帯利用に対する割引（以下では ETC オフピーク通勤割引プラス）を検討する。この割引料金制度は ETC オフピーク通勤割引制度と比較してオフピーク時間帯での走行をより強く ETC 利用者に推奨する制度であると言える。さらに、オフピーク時間帯での通常料金の割引とピーク時間帯での ETC 利用者に対する料金の割引を組み合わせた割引料金（オフピーク／ETC ピーク通勤割引）制度も検討する。

2. 自己選択型 ETC 料金割引を考慮したボトルネック混雑モデル

日本の高速道路料金体系は、割引料金の適用が ETC 利用や時間帯、距離、エリアで限定されているものの、利用者が出発時刻の変更によって通常料金と割引料金を選択できる意味で、自己選択型の性質を持ったといえる。Train(1994)が自己選択型料金体系のメリットとして言及しているように、もし、ETC による割引料金が利用者に利益をもたらさないなら、利用者は通常料金を選択できるため、この料金制度の変更は全ての利用者にとってパレート改善を達成するように思える。しかし、混雑している道路では、利用者の選択は他の利用者の選択の影響を必然的に受けるため、その前提となっている消費の独立性が満たされておらず、必ずしもパレート改善が成り立つ保証はない。

日本で導入された ETC 通勤割引制度は ETC 利用を増加させるために混雑時間帯の高速道路を利用する通勤者を対象としている。伝統的なロードプライシングの研究では、道路混雑緩和の観点からは、非論理的に思えるこの種の料金の割引が注目を集めることはほとんどなく、理論的な知見が十分に整理されていなかった。しかしながら、政策が実施されている以上は、混雑時間帯における高速道路料金の適切な割引方法を検討する必要性はあるだろう。

先述したように、鈴木(2008a)は、自己選択型料金体系の特徴をもつ ETC 通勤割引制度の導入が高速道路混雑にどのような影響を与えるのかを、ボトルネック混雑モデルに基づき検討した。その結

果、ETC 通勤割引制度が有効に機能する、換言すれば、高速道路混雑を増加させずに ETC 利用のインセンティブを確保する条件を明らかにした。さらに、当該研究ではボトルネック混雑を悪化させる要因とそれらが密接に関係する混雑悪化のメカニズムをケース間の比較によって検討している。

次に、鈴木(2008b)はノンストップ収受による料金所のパフォーマンスの向上が高速道路混雑に及ぼす影響を検討するために、高速道路上のボトルネック地点を ETC ゲート、通常ゲート、料金所外の 3 つに特定化し、それらの相互関係を検討した。分析の結果、ETC 通勤割引の導入は ETC の利用率の向上とともに料金所の混雑を減少させるケースが確認できたが、その一方で、ピーク時間における過度の割引は料金所外、例えば、本線の合流・分流地点でのボトルネック混雑を生じさせ、結果的に上述の料金所における好ましい効果が打ち消される可能性も示されている。

ETC は高速道路を利用する区間、距離、時間、車種を判別することができ、これらの要因は効率的な料金体系を設計するために利用可能である。本研究では先行研究の成果を踏まえ、区間と時間、ETC 利用についての差別化をもとに、代替経路としての一般道路を含む道路網のオフピーク容量の利用を高めることによって旅行費用を削減しつつ、ETC 利用のインセンティブを確保する割引制度の検討に焦点を絞る。そのため、高速道路上のボトルネック地点については料金所の一箇所に集約し、問題の単純化を図る。また、利用者は ETC 車載器の購入時点では、多くの利用者が ETC を使うことによって生じる旅行時間の変動までは考慮せず、車載器の設置費用と高速道路料金との関係のみで車載器の購入を判断すると仮定する。つまり、本研究では、短期的な利用者の交通選択と通勤時間におけるボトルネック混雑との関係に着目して分析し、長期的な ETC 車載器を購入する意思決定はその与件として扱うことにする。

以降では Vickrey(1969)によって提案された伝統的なボトルネック混雑モデルに基づき ETC 利用によって差別化された時間帯別割引料金制度を分析する。Arnott, de Palma, and Linsey (1990a) (1990b) は Vickrey のモデルを時間帯別最適料金の導出に応用しており、時間帯別割引料金制度を検討する上で重要な参考となる。ただし、本研究では、彼らの研究で扱われた追加課金時間帯の終了時に多くの自動車と同時に料金所に殺到する現象については問題を過度に複雑化しないために無視する。ただし、現実には日本の高速道路でも割引開始直前に料金所手前の側道に停車した自動車の列ができるといった現象が生じ、社会的時間損失や交通事故の危険性が生じている。このことが時間帯別料金設定の問題点の一つであることは事実である。

ETC 利用者と非 ETC 利用者間の料金差別化は本研究の本質的な特徴である。Daganzo (1995) 及び Daganzo and Garcia (2000)は、道路混雑に直面する利用者のグループ分割と料金設定の組み合わせにより、事後的に利益と損失の再配分をしなくてもパレート改善が達成される料金設定を提案している。これらの研究は本研究が扱う利用者差別化のパターンに類似しており、本研究の方法論を検討するうえで重要な示唆を与えている。

さらに、モデルを単純化すべく以下の仮定をおく。居住地と職場は図 1 に示すように高速道路 A と一般道路 B で結ばれており、高速道路料金は高速道路の終点にある料金所で徴収される。分析を進めやすくするため、混雑のある箇所以外の走行時間を無視し、ゼロとする。

朝の総通勤者数 N は一定で、通勤者は一人ずつ一台の自動車に乗り、高速道路 A か一般道路 B を利用する。

$$N = N_A + N_B \quad (1)$$

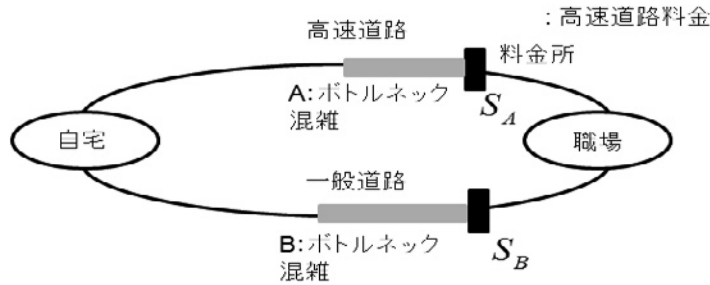


図 1 対象道路網

通勤者は出発時間と経路を以下に示す 5 つの高速道路料金制度の組み合わせの下で選択する。通勤混雑時間帯をピーク時間帯とオフピーク時間帯に分け、ピーク時間帯は最大旅行時間の通勤者の到着時間を含んでいるものと定義する。

- (i) 通常料金：1 回の高速道路利用について τ 円払う
- (ii) ETC オフピーク割引：ETC を使ったオフピーク時間帯の高速道路利用について τ 円から δ 割引く
- (iii) ETC オフピーク割引プラス：P 回のうち P-1 回の高速道路利用がオフピーク時間帯であれば、ETC を使ったピーク時間帯の高速道路利用について τ 円から δ 割引く
- (iv) ETC ピーク割引：ピーク時間帯に ETC を利用した高速道路利用について τ 円から δ 割引く
- (v) オフピーク割引：オフピーク時間帯の高速道路利用について τ 円から δ 割引く

ただし、(ii), (iii), (iv)の割引を受けるためには事前に ETC 車載器の購入が必要となる。

通勤者は ETC 利用者: N^E と非 ETC 利用者: N^N に分けられる。

$$N = N^E + N^N \quad (2)$$

なお、ETC オフピーク割引プラスが適用される利用者を N^{EE} とし、必要に応じて ETC 利用者: N^E から区別する。

ボトルネック混雑は一経路について一箇所で生じる。先述したように混雑のない区間を無視すれば、時刻 t に出発し、経路（ボトルネック） j を通過する通勤者の旅行時間は以下のように書ける。ここで、 S_j はボトルネック j の容量を、 $Q_j(t)$ は時刻 t に出発した通勤者がボトルネック j で直面する待ち行列長を表すものとする。

$$T_j(t) = \frac{Q_j(t)}{S_j} \quad (3)$$

時刻 t に出発し、経路 j を選択し、料金タイプ k ($=E$: ETC 利用者、 $=N$: 非 ETC 利用者)の通勤者の出発率を $r_j^k(t)$ とすると、待ち行列の変動は以下のように定式化できる。

$$\frac{dQ_j(t)}{dt} = \begin{cases} 0, & Q_j(t) = 0 \text{ and } \sum_{k=N,E} r_j^k(t) \leq S_j \\ \sum_{k=N,E} r_j^k(t) - S_j, & Q_j(t) > 0 \end{cases} \quad (4)$$

通勤者の旅行費用は旅行時間費用、スケジュール費用、高速道路料金からなり、以下のように表せるものとする。

$$C_j^k(t) = \alpha T_j(t) + SD_j(t) + (1 - \delta_j^k(t))\tau \quad (5)$$

ここで、 α は旅行時間の時間価値を、 $SD_j(t)$ はスケジュール費用を、 $\delta_j^k(t)$ は時間帯、経路、料金タイプによって変化する割引率を表す。

全ての通勤者が職場に始業時刻 t^* に着きたいと考えているとし、 $t_{n,j}$ を経路 j を使って、丁度 t^* に到着した通勤者の出発時刻だと仮定すると、 $t_{n,j} + T_j(t_{n,j}) = t^*$ が成り立つ。すると、 $t_{n,j}$ よりも早く出発した通勤者は始業時刻 t^* よりも $t^* - t - T_j(t)$ だけ早く職場に到着し、 $t_{n,j}$ よりも遅く出発した通勤者は始業時刻 t^* よりも $t + T_j(t) - t^*$ だけ遅く職場に到着することになる。よって、通勤者の旅行費用は以下のように表せる。

$$C_j^k(t) = \begin{cases} \alpha T_j^k(t) + \beta(t^* - t - T_j^k(t)) + (1 - \delta_j^k(t))\tau & (t \leq t_{n,j}) \\ \alpha T_j^k(t) + \gamma(t + T_j^k(t) - t^*) + (1 - \delta_j^k(t))\tau & (t \geq t_{n,j}) \end{cases}, \quad (6)$$

ここで β と γ はそれぞれ早着と遅着の時間価値を表す。それらの順序は Small (1982) を参考とし、 α に関係づけて $\beta < \alpha < \gamma$ とあらわせると仮定する。さらに $(1 - \delta_j^k(t))\tau$ は出発時刻 t 、経路 j 、料金タイプ k の利用者に対して課される道路料金を表している。通勤者は旅行費用を最小化すべく、料金タイプに応じて適切な出発時刻、経路を選択しようとする。

3. ETC 通勤割引制度の高速道路料金体系への適用

3.1. ETC オフピーク通勤割引の適用

本項では通常料金制度である(i)に(ii)の割引制度を組み合わせ Case I として分析する。通勤者は料金のタイプについて ETC 利用者 N^E と非 ETC 利用者 N^N の2つのグループに分けられる。前章で言及したように t^* に到着する通勤者が最も長い待ち行列に直面する。したがってオフピーク時間帯は到着時刻 t^* を含まないものとし、この時間帯を $[t_{0,A}, t_A^*][t_A^-, t_{e,A}]$ で表すとしよう。旅行費用は料金タイプ、経路、出発時刻に基づいて以下のように定式化できる。なお t_A^+ は、高速道路利用におけるピーク時間の開始時刻、すなわち、ここでは割引時間帯の終了時刻を、 t_A^- は、高速道路利用におけるピーク時間の終了時刻、すなわち、ここでは割引時間帯の開始時刻を表すものとする。また $t_{0,A}$ は、高

速道路のボトルネックに混雑が生じる時刻を、 $t_{e,A}$ は、高速道路でボトルネックの混雑が無くなる時刻を表すものとする。

$$C_j^k(t) = \begin{cases} \alpha T(t) + \beta(t^* - t - T_j(t)) + (1 - \delta_j^k(t))\tau & \text{for } k \in (N, E), t \in [t_{0,j}, t_{n,j}] \\ \alpha T(t) + \gamma(t + T_j(t) - t^*) + (1 - \delta_j^k(t))\tau & \text{for } k \in (N, E), t \in [t_{n,j}, t_{e,j}] \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{where} \quad \delta_j^k(t) = \begin{cases} = 0 & \text{for } j = A, k = N, t \in [t_{0,A}, t_{e,A}] \\ = 0 & \text{for } j = A, k = E, t \in [t_A^+, t_A^-] \\ = \delta & \text{for } j = A, k = E, t \in [t_{0,A}, t_A^+] \cup [t_A^-, t_{e,A}] \\ = 1 & \text{for } j = B, k = N, E, t \in [t_{0,B}, t_{e,B}] \end{cases}$$

3.1.1. Case Ia: $(t_A^+ - t_{0,A} + t_{e,A} - t_A^-)S_A > N^E$

はじめに割引時間帯の間に料金所で扱うことのできる最大の通勤者数を割引時間帯ボトルネック容量: $(t_A^+ - t_{0,A} + t_{e,A} - t_A^-)S_A$ と定義する。ETC利用者数が割引時間帯ボトルネック容量を下回るケースから検討をはじめめる。この状況 (Case Ia) は割引率が低い、ETC 車載器が高く普及していない、ボトルネック容量が大きい、割引時間帯が長いケースなどとして特徴づけられる。道路ネットワーク上での均衡状態は全ての利用者が旅行費用を減らすために出発時刻や経路を変更するインセンティブを持たない状況で生じる。均衡状態における各種の出発時刻と旅行費用、経路別の利用者数は以下のように表すことができる。

$$t_{0,j} = t^* - \frac{\gamma}{\beta + \gamma} \frac{N_j}{S_j}, \quad t_{n,j} = t^* - \frac{\beta\gamma}{\alpha(\beta + \gamma)} \frac{N_j}{S_j}, \quad t_{e,j} = t^* + \frac{\beta}{\beta + \gamma} \frac{N_j}{S_j} \quad (8)$$

$$t_{n,A}^+ = \frac{\alpha - \beta}{\alpha} t_A^+ + \frac{\beta}{\alpha} t_{0,A}, \quad t_{n,A}^- = \frac{\alpha + \gamma}{\alpha} t_A^- - \frac{\gamma}{\alpha} t_{e,A} \quad (9)$$

$$T_j(t) = \begin{cases} \frac{\beta}{\alpha - \beta} (t - t_{0,j}) & \text{for } t \in [t_{0,j}, t_{n,j}] \\ \frac{\gamma}{\alpha + \gamma} (t_{e,j} - t) & \text{for } t \in [t_{n,j}, t_{e,j}] \end{cases} \quad (10)$$

$$C_A^N = C_B^N \quad (11)$$

$$C_A^N = \frac{\beta\gamma}{\beta + \gamma} \frac{N_A}{S_A} + \tau \quad \text{for } t \in [t_{0,A}, t_{e,A}] \quad (12)$$

$$C_A^E = \frac{\beta\gamma}{\beta + \gamma} \frac{N_A}{S_A} + (1 - \delta)\tau \quad \text{for } t \in [t_{0,A}, t_{n,A}^+] \cup [t_{n,A}^-, t_{e,A}] \quad (13)$$

$$C_A^E = \frac{\beta\gamma}{\beta + \gamma} \frac{N_A}{S_A} + \tau \quad \text{for } t \in [t_{n,A}^+, t_{n,A}^-] \quad (14)$$

$$C_B^N, C_B^E = \frac{\beta\gamma}{\beta + \gamma} \frac{N_B}{S_B} \quad \text{for } t \in [t_{0,B}, t_{e,B}] \quad (15)$$

$$N_A = \frac{S_A}{S_A + S_B} \left(N - S_B \frac{\beta + \gamma}{\beta \gamma} \tau \right), N_B = N - N_A \quad (16)$$

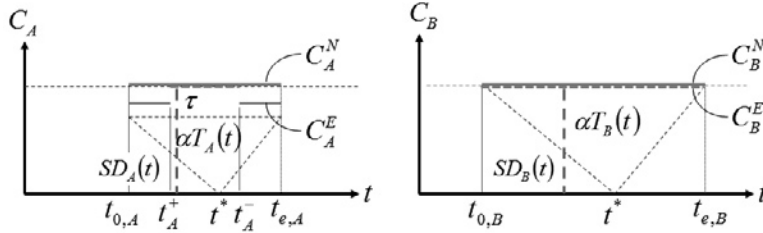


図 2. Case 1a における交通費用の遷移

上記の数式を参考に到着時刻に対応する旅行費用の内訳を図化すると均衡状態は図 2 のように描くことができる。このケースでは、明るい色で表されているオフピーク時間帯の ETC 利用者の旅行費用のみが低下している。ここで太い点線は特定の利用者にとって利用されない時間帯の旅行費用を表している。ETC 利用者と非 ETC 利用者間の旅行費用の違いは、ETC 利用者は料金所をオフピーク時間帯に通過しようとし、一方で非 ETC 利用者は ETC オフピーク通勤割引が適用されないためオフピーク時間帯に通過しなければならない理由が特にないことから生じている。 $(t_A^+ - t_{0,A} + t_{e,A} - t_A^-)S_A > N^E$ の条件から、結果的に全ての ETC 利用者といくつかの非 ETC 利用者がオフピーク時間帯に高速道路を使って通勤することになる。ETC 利用者はオフピーク時間帯で、非 ETC 利用者はオフピーク、ピーク時間帯の両方で旅行費用を低下させるために出発時刻を変更する。その結果、すべての ETC 利用者は割引時間帯内に料金所を通過する。このとき割引時間帯内であっても通勤者は他の通勤者が ETC 利用者であるか、非 ETC 利用者であるかを料金所以外で区別することはできない。また、ETC 利用者、非 ETC 利用者に関わらず、同じ時刻に出発すれば旅行時間は同一である。まったく割引を行わなかった場合の均衡状態は図 2 において暗い色の線のみがある場合に対応しており、それとの比較から、たとえ高速道路料金が割引されていても、Case 1a では、高速道路、一般道路ともに混雑自体には変化が生じておらず、(点線で囲まれた三角形の形状がボトルネック混雑を表している。) 料金制度は道路ネットワークシステムの効率性の改善に寄与していないことが分かる。その一方で、旅行費用に関しては ETC 利用者のみがオフピーク割引によって便益を得ている。よって、このケースでは ETC を利用するインセンティブが存在し、長期的に見て ETC 利用の普及は進むと考えられる。

3.1.2. Case 1b: $(t_A^+ - t_{0,A} + t_{e,A} - t_A^-)S_A < N^E$

前節とは逆に ETC 利用者数が割引時間帯ボトルネック容量を上回るケースを検討する。この状況 (Case 1b) は割引率が高い、ETC 車載器が安く普及している、ボトルネック容量が小さい、割引時間帯が短いケースなどとして特徴づけられる。道路ネットワーク上での均衡状態はどの通勤者にとっても旅行費用を減らすために変更する出発時刻や経路が見いだせない状況で生じる。均衡状態における各種の出発時刻と旅行費用、経路別の利用者数は以下のように表すことができる。

$$t_{0,j} = t^* - \frac{\gamma}{\beta + \gamma} \frac{N_j}{S_j}, \quad t_{n,j} = t^* - \frac{\beta\gamma}{\alpha(\beta + \gamma)} \frac{N_j}{S_j}, \quad t_{e,j} = t^* + \frac{\beta}{\beta + \gamma} \frac{N_j}{S_j} \quad (17)$$

$$t_{n,A}^+ = \frac{\alpha - \beta}{\alpha} t_A^+ + \frac{\beta}{\alpha} t_{0,A}, \quad t_{n,A}^- = \frac{\alpha + \gamma}{\alpha} t_A^- - \frac{\gamma}{\alpha} t_{e,A} \quad (18)$$

$$T_A(t) = \begin{cases} \frac{\beta}{\alpha - \beta}(t - t_{0,A}) + \frac{\delta\tau}{\alpha - \beta} & \text{for } t \in [t_{0,A}, t_{n,A}^+] \\ \frac{\beta}{\alpha - \beta}(t - t_{0,A}) & \text{for } t \in [t_{n,A}^+, t_{n,A}] \\ \frac{\gamma}{\alpha + \gamma}(t_{e,A} - t) & \text{for } t \in [t_{n,A}, t_{n,A}^-] \\ \frac{\gamma}{\alpha + \gamma}(t_{e,A} - t) + \frac{\delta\tau}{\alpha + \gamma} & \text{for } t \in [t_{n,A}^-, t_{e,A}] \end{cases} \quad (19)$$

$$T_B(t) = \begin{cases} \frac{\beta}{\alpha - \beta}(t - t_{0,B}) & \text{for } t \in [t_{0,B}, t_{n,B}] \\ \frac{\gamma}{\alpha + \gamma}(t_{e,B} - t) & \text{for } t \in [t_{n,B}, t_{e,B}] \end{cases} \quad (20)$$

$$C_A^N = C_B^N \quad (21)$$

$$C_A^N = \frac{\beta\gamma}{\beta + \gamma} \frac{N_A}{S_A} + (1 - \delta)\tau \quad \text{for } t \in [t_{n,A}^+, t_{n,A}^-] \quad (22)$$

$$C_A^E = \frac{\beta\gamma}{\beta + \gamma} \frac{N_A}{S_A} + (1 - \delta)\tau \quad \text{for } t \in [t_{0,A}, t_{e,A}] \quad (23)$$

$$C_B^E, C_B^N = \frac{\beta\gamma}{\beta + \gamma} \frac{N_B}{S_B} \quad \text{for } t \in [t_{0,B}, t_{e,B}] \quad (24)$$

$$N_A = \frac{S_A}{S_A + S_B} \left(N - S_B \frac{\beta + \gamma}{\beta \gamma} (1 - \delta) \tau \right), N_B = N - N_A \quad (25)$$

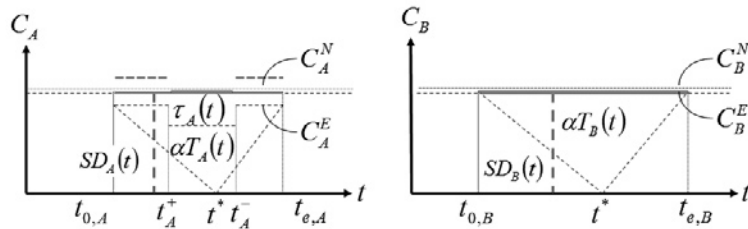


図 3. Case Ib における交通費用の遷移

図3に示す均衡状態においてはオフピーク時間帯の非 ETC 利用者を除けば旅行費用がわずかではあるが低下している。ETC 利用者と非 ETC 利用者間の旅行費用の違いは次の理由から生じる。ETC 利用者は料金所をオフピーク時間帯に通過しようとするものの、すべての ETC 利用者が割引時間帯に通過すると混雑が悪化し、ピーク時間帯の旅行費用よりもオフピーク時間帯の旅行費用の方が高くなるため、ETC 利用者の一部はピーク時間帯に料金所を通過することになる。その結果、ETC 利

用者によるオフピーク時間帯の待ち行列は、オフピーク時間帯に高速道路を使った場合の旅行費用がピーク時間帯における高速道路や一般道路における旅行費用と等しくなるまで延伸する。一方、非 ETC 利用者は必ずしもオフピーク時間帯に料金所を通過する必要がない。均衡状態では、オフピーク時間帯に料金所を通過する全ての利用者は ETC 利用者になり、ピーク時間帯に高速道路や一般道路のボトルネックを通過する利用者は ETC 利用者と非 ETC 利用者の両方になる。

図 3 において、まったく割引をしていないケースと比較してみるとオフピーク時間帯の間の混雑は増加するものの、全ての利用者の旅行費用が低下するいわゆるパレート改善が生じることになる。この旅行費用の低下は、一般道路と比べて相対的に処理能力の高い高速道路への需要転換によって生じている。また、道路混雑についても、一般道路とピーク時間帯の高速道路を中心として緩和されていることが分かる。この状況では、ETC 利用に対するインセンティブは失われており、長期的に ETC 利用者が増加することはない。

3.2. ETC オフピーク通勤割引プラスの適用

本項では ETC オフピーク通勤割引プラス、すなわち(i)と(ii)の組み合わせであった Case I の ETC オフピーク通勤割引に対し、オフピーク時間帯にさらに高速道路を利用することを推奨するインセンティブを(iii)によって加える。通勤者は料金のタイプについて ETC 利用者 N^E と非 ETC 利用者 N^{EE} の 2 つのグループに分けられ、さらにオフピーク時間帯に頻繁に利用する ETC 利用者を他の ETC 利用者から区別して N^{EE} で表す。旅行費用は以下のように定式化される。

$$C_j^k(t) = \begin{cases} \alpha T(t) + \beta(t^* - t - T_j(t)) + (1 - \delta_j^k(t))\tau & \text{for } k \in (N, E, EE), t \in [t_{0,j}, t_{n,j}] \\ \alpha T(t) + \gamma(t + T_j(t) - t^*) + (1 - \delta_j^k(t))\tau & \text{for } k \in (N, E, EE), t \in [t_{n,j}, t_{e,j}] \end{cases} \quad (26)$$

$$\text{where } \delta_j^k(t) = \begin{cases} = 0 & \text{for } j = A, k = N, t \in [t_{0,A}, t_{e,A}] \\ = 0 & \text{for } j = A, k = E, t \in [t_{A}^+, t_{A}^-] \\ = \delta & \text{for } j = A, k = EE, t \in [t_{A}^+, t_{A}^-] \\ = \delta & \text{for } j = A, k = E, EE, t \in [t_{0,A}, t_{A}^+] \cup [t_{A}^-, t_{e,A}] \\ = 1 & \text{for } j = B, k = N, E, EE, t \in [t_{0,B}, t_{e,B}] \end{cases}$$

3.2.1. Case IIa: $(t_{A}^+ - t_{0,A} + t_{e,A} - t_{A}^-)S_A > N^E - N^{EE}$

Case IIa ではオフピーク時間帯に高速道路を頻繁に利用しない ETC 利用者数 $N^E - N^{EE}$ が割引時間帯ボトルネック容量よりも少ない状況を検討する。前項と同様に均衡状態は以下のように解くことができる。

$$t_{0,j} = t^* - \frac{\gamma}{\beta + \gamma} \frac{N_j}{S_j}, \quad t_{n,j} = t^* - \frac{\beta\gamma}{\alpha(\beta + \gamma)} \frac{N_j}{S_j}, \quad t_{e,j} = t^* + \frac{\beta}{\beta + \gamma} \frac{N_j}{S_j} \quad (27)$$

$$t_{n,A}^+ = \frac{\alpha - \beta}{\alpha} t_{A}^+ + \frac{\beta}{\alpha} t_{0,A}, \quad t_{n,A}^- = \frac{\alpha + \gamma}{\alpha} t_{A}^- - \frac{\gamma}{\alpha} t_{e,A} \quad (28)$$

$$T_j(t) = \begin{cases} \frac{\beta}{\alpha - \beta}(t - t_{0,j}) & \text{for } t \in [t_{0,j}, t_{n,j}] \\ \frac{\gamma}{\alpha + \gamma}(t_{e,j} - t) & \text{for } t \in [t_{n,j}, t_{e,j}] \end{cases} \quad (29)$$

$$C_A^N = C_B^N \quad (30)$$

$$C_A^N = \frac{\beta\gamma}{\beta + \gamma} \frac{N_A}{S_A} + \tau \quad \text{for } t \in [t_{0,A}, t_{e,A}] \quad (31)$$

$$C_A^E = \frac{\beta\gamma}{\beta + \gamma} \frac{N_A}{S_A} + (1 - \delta)\tau \quad \text{for } t \in [t_{0,A}, t_{n,A}^+][t_{n,A}^-, t_{e,A}] \quad (32)$$

$$C_A^{EE} = \frac{\beta\gamma}{\beta + \gamma} \frac{N_A}{S_A} + (1 - \delta)\tau \quad \text{for } t \in [t_{0,A}, t_{e,A}] \quad (33)$$

$$C_B^E, C_B^N, C_B^{EE} = \frac{\beta\gamma}{\beta + \gamma} \frac{N_B}{S_B} \quad \text{for } t \in [t_{0,B}, t_{e,B}] \quad (34)$$

$$N_A = \frac{S_A}{S_A + S_B} \left(N - S_B \frac{\beta + \gamma}{\beta\gamma} \tau \right), N_B = N - N_A \quad (35)$$

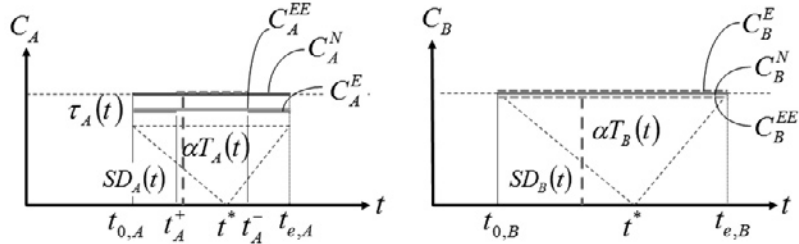


図4 Case 11aにおける交通費用の遷移

均衡状態では、図4に示すように ETC 利用者のオフピーク時間帯の旅行費用は低下する。オフピーク時間帯に頻繁に走行する ETC 利用者のピーク時間帯の旅行費用も低下していることが分かる。利用者間に生じた旅行費用の違いは以下のように説明できる。オフピーク時間帯を頻繁に利用しない ETC 利用者はピーク時間帯には割引を受けることができないのでオフピーク時間帯に料金所を通過しようとする。 $(t_A^+ - t_{0,A} + t_{e,A} - t_A^-)S_A > N^E - N^{EE}$ の条件から、すべての $N^E - N^{EE}$ と、いくつかの非 ETC 利用者やオフピーク時間帯を頻繁に利用している ETC 利用者もオフピーク時間帯に料金所を通過することができる。

オフピーク時間帯を頻繁に利用していない ETC 利用者は高速道路を使ってオフピーク時間帯で、オフピーク時間帯を頻繁に利用している ETC 利用者は高速道路を使って全通勤時間帯で、非 ETC 利用者は高速道路を使ってピーク時間帯か一般道路を使った全通勤時間帯で、より旅行費用を低下させられる出発時刻や経路の選択を繰り返す。均衡状態はどの利用者也旅行費用を低下させられる出発時刻や経路が見いだせなくなったときに生じる。その結果、図4に示すように料金制度の変更に応じて利用者の出発時刻や経路が自己選択を通じて変化しようとも、高速道路と一般道路の混雑

状況はまったく割引を行わなかったケースからなにも変化しない。

一方、旅行費用についてはオフピーク時間帯で高速道路を使う ETC 利用者だけでなく、オフピーク時間帯を頻繁に利用する ETC 利用者はピーク時間帯においても ETC オフピーク通勤割引プラスによって便益を享受している。したがって、ETC を使うインセンティブが存在し、長期的には ETC 利用者数は増加するだろう。

3.2.2. Case IIb: $(t_A^+ - t_{0,A} + t_{e,A} - t_A^-)S_A < N^E - N^{EE}$

オフピーク時間帯に高速道路を頻繁に利用しない ETC 利用者数 $N^E - N^{EE}$ が割引時間帯ボトルネック容量よりも多い状況 Case IIb を検討する。前項と同様に均衡状態は以下のように解くことができる。

$$t_{0,j} = t^* - \frac{\gamma}{\beta + \gamma} \frac{N_j}{S_j}, \quad t_{n,j} = t^* - \frac{\beta\gamma}{\alpha(\beta + \gamma)} \frac{N_j}{S_j}, \quad t_{e,j} = t^* + \frac{\beta}{\beta + \gamma} \frac{N_j}{S_j} \quad (36)$$

$$t_{n,A}^+ = \frac{\alpha - \beta}{\alpha} t_A^+ + \frac{\beta}{\alpha} t_{0,A}, \quad t_{n,A}^- = \frac{\alpha + \gamma}{\alpha} t_A^- - \frac{\gamma}{\alpha} t_{e,A} \quad (37)$$

$$T_A(t) = \begin{cases} \frac{\beta}{\alpha - \beta} (t - t_{0,A}) + \frac{(1 + 1/P)\delta\tau}{\alpha - \beta} & \text{for } t \in [t_{0,A}, t_{n,A}^+] \\ \frac{\beta}{\alpha - \beta} (t - t_{0,A}) & \text{for } t \in [t_{n,A}^+, t_{n,A}^-] \\ \frac{\gamma}{\alpha + \gamma} (t_{e,A} - t) & \text{for } t \in [t_{n,A}^-, t_{e,A}^-] \\ \frac{\gamma}{\alpha + \gamma} (t_{e,A} - t) + \frac{(1 + 1/P)\delta\tau}{\alpha + \gamma} & \text{for } t \in [t_{e,A}^-, t_{e,A}] \end{cases} \quad (38)$$

$$T_B(t) = \begin{cases} \frac{\beta}{\alpha - \beta} (t - t_{0,B}) & \text{for } t \in [t_{0,B}, t_{n,B}] \\ \frac{\gamma}{\alpha + \gamma} (t_{e,B} - t) & \text{for } t \in [t_{n,B}, t_{e,B}] \end{cases} \quad (39)$$

$$C_A^N = C_B^N \quad (40)$$

$$C_A^N, C_A^E = \frac{\beta\gamma}{\beta + \gamma} \frac{N_A}{S_A} + (1 - (1 + 1/P)\delta)\tau \quad \text{for } t \in [t_{n,A}^+, t_{n,A}^-] \quad (41)$$

$$C_A^{EE} = \frac{\beta\gamma}{\beta + \gamma} \frac{N_A}{S_A} + (1 - (2 + 1/P)\delta)\tau \quad \text{for } t \in [t_{n,A}^-, t_{n,A}^-] \quad (42)$$

$$C_A^E = \frac{\beta\gamma}{\beta + \gamma} \frac{N_A}{S_A} + (1 - \delta)\tau \quad \text{for } t \in [t_{0,A}, t_{n,A}^+], [t_{n,A}^-, t_{e,A}] \quad (43)$$

$$C_B^E, C_B^N, C_B^{EE} = \frac{\beta\gamma}{\beta + \gamma} \frac{N_B}{S_B} \quad \text{for } t \in [t_{0,B}, t_{e,B}] \quad (44)$$

$$N_A = \frac{S_A}{S_A + S_B} \left(N - S_B \frac{\beta + \gamma}{\beta\gamma} (1 - (1 + 1/P)\delta)\tau \right), \quad N_B = N - N_A \quad (45)$$

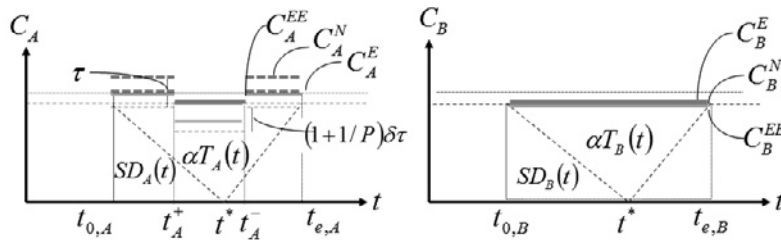


図 5 Case 11b における交通費用の遷移

この均衡状態では、図 5 に示すように ETC 利用者の旅行費用は非 ETC 利用者の旅行費用と比較してオフピーク時間帯に $\delta\tau$ だけ低下し、ETC オフピーク通勤割引プラスを選択した ETC 利用者の旅行費用はその他の利用者と比較してピーク時間帯に $\delta\tau$ だけ低下する。

ETC オフピーク通勤割引プラスを選択しない ETC 利用者のみが割引が適用されるオフピーク時間帯に料金所を通過しようとし、オフピーク時間帯での待ち行列を延伸させることになる。ただし、彼らのすべてがオフピーク時間帯で高速道路を利用した場合には道路混雑が悪化し、ピーク時間帯の旅行費用の方が相対的に安くなるため、彼らのうちいくらかはピーク時間帯に高速道路を利用することになる。その結果、ピーク時間における待ち行列の延伸による旅行費用の増加が、ETC オフピーク通勤割引と等しくなったとしても、ETC オフピーク通勤割引プラスを選んだ ETC 利用者は通勤 P 回毎に 1 回ピーク時間帯に料金所を通過することで、その他の ETC 利用者よりも旅行費用を下げるができる。最終的には、待ち行列はオフピークとピーク時間帯の間で時間差のギャップが $(1+1/P)\delta\tau$ になるまで延伸する。このとき全ての利用者の旅行費用は日々繰り返す通勤における期待値として等しくなっており、オフピーク時間帯に料金所を通過する全ての ETC 利用者は潜在的に ETC オフピーク割引プラスを選択しようとしている ETC 利用者であることになる。つまり、図 5 の均衡状態が生じているとき ETC オフピーク通勤割引プラスが適用される人数は $N^{EE} = (t_A^+ - t_{0,A} + t_{e,A} - t_A^-)S_A / (P-1)$ ということになる。また、このとき、期待値でみれば ETC 利用促進のためのインセンティブは消失していることになる。

その一方で、非 ETC 利用者はオフピーク時間帯に延伸した待ち行列に加わるインセンティブはなく、それゆえに高速道路を選択するのであればピーク時間帯に走行することになる。したがってピーク時間帯には高速道路を 3 つのグループの利用者 N^{EE} , N^E , N^N が混走することになる。短いピーク時間帯や少ない閾値 P は $(t_A^- - t_A^+)S_A < N^{EE}$ の状況を招き図 5 にみられるようなボトルネック混雑の削減を阻害する可能性がある。一方、一般道路は非 ETC 利用者と ETC 利用者の両方によって使われている。最終的には一般道路から高速道路への需要転換により、高速道路を使った通勤時間帯の拡大が生じ、オフピーク時間帯における高速道路上の混雑は増加するものの、ピーク時間の高速道路と全時間帯の一般道路を中心に混雑が緩和される。その結果、旅行費用は、一般道路、高速道路ともに低下し、道路システムの効率性は改善される。さらに、この制度には、オフピークの割引時間帯を拡大することなしに割引を享受できる ETC 利用者を割引時間帯ボトルネック容量以上に増加させられる特徴がある。

3.3. オフピーク／ETC ピーク通勤割引の適用

本項では、ETC 利用の促進とボトルネック混雑の削減を両立させる制度として、ETC ピーク通勤割引(iv)とオフピーク通勤割引(v)を通常料金(i)に組み合わせた料金体系を検討する。通勤者は2つのグループ、すなわち ETC 利用者 N^E と非 ETC 利用者 N^N に分類される。旅行費用は以下のように定式化される。

$$C_j^k(t) = \begin{cases} \alpha T(t) + \beta(t^* - t - T_j(t)) + (1 - \delta_j^k(t))\tau & \text{for } k \in (N, E), t \in [t_{0,j}, t_{n,j}] \\ \alpha T(t) + \gamma(t + T_j(t) - t^*) + (1 - \delta_j^k(t))\tau & \text{for } k \in (N, E), t \in [t_{n,j}, t_{e,j}] \end{cases} \quad (46)$$

$$\text{where } \delta_j^k(t) = \begin{cases} = 0 & \text{for } j = A, k = N, t \in [t_{0,A}, t_{e,A}] \\ = \delta & \text{for } j = A, k = E, t \in [t_A^+, t_A^-] \\ = \delta & \text{for } j = A, k = E, N, t \in [t_{0,A}, t_A^+] \cup [t_A^-, t_{e,A}] \\ = 1 & \text{for } j = B, k = N, E, t \in [t_{0,B}, t_{e,B}] \end{cases}$$

3.3.1. Case IIIa: $(t_A^- - t_A^+)S_A > N^E$

Case IIIa ではピーク時間帯ボトルネック容量よりも ETC 利用者が少ないケースから検討する。前項と同様に均衡状態を解くと以下のように表すことができる。

$$t_{0,j} = t^* - \frac{\gamma}{\beta + \gamma} \frac{N_j}{S_j}, \quad t_{n,j} = t^* - \frac{\beta\gamma}{\alpha(\beta + \gamma)} \frac{N_j}{S_j}, \quad t_{e,j} = t^* + \frac{\beta}{\beta + \gamma} \frac{N_j}{S_j} \quad (47)$$

$$t_{n,A}^+ = \frac{\alpha - \beta}{\alpha} t_A^+ + \frac{\beta}{\alpha} t_{0,A}, \quad t_{n,A}^- = \frac{\alpha + \gamma}{\alpha} t_A^- - \frac{\gamma}{\alpha} t_{e,A} \quad (48)$$

$$T_A(t) = \begin{cases} \frac{\beta}{\alpha - \beta} (t - t_{0,A}) + \frac{(1 + 1/P)\delta\tau}{\alpha - \beta} & \text{for } t \in [t_{0,A}, t_{n,A}^+] \\ \frac{\beta}{\alpha - \beta} (t - t_{0,A}) & \text{for } t \in [t_{n,A}^+, t_{n,A}] \\ \frac{\gamma}{\alpha + \gamma} (t_{e,A} - t) & \text{for } t \in [t_{n,A}, t_{n,A}^-] \\ \frac{\gamma}{\alpha + \gamma} (t_{e,A} - t) + \frac{(1 + 1/P)\delta\tau}{\alpha + \gamma} & \text{for } t \in [t_{n,A}^-, t_{e,A}] \end{cases} \quad (49)$$

$$T_B(t) = \begin{cases} \frac{\beta}{\alpha - \beta} (t - t_{0,B}) & \text{for } t \in [t_{0,B}, t_{n,B}] \\ \frac{\gamma}{\alpha + \gamma} (t_{e,B} - t) & \text{for } t \in [t_{n,B}, t_{e,B}] \end{cases} \quad (50)$$

$$C_A^N = C_B^N \quad (51)$$

$$C_A^N = \frac{\beta\gamma}{\beta + \gamma} \frac{N_A}{S_A} + (1 - \delta)\tau \quad \text{for } t \in [t_{0,A}, t_{e,A}] \quad (52)$$

$$C_A^E = \frac{\beta\gamma}{\beta+\gamma} \frac{N_A}{S_A} + (1-2\delta)\tau \quad \text{for } t \in [t_{n,A}^+, t_{n,A}^-] \quad (53)$$

$$C_B^N = \frac{\beta\gamma}{\beta+\gamma} \frac{N_B}{S_B} \quad \text{for } t \in [t_{0,B}, t_{e,B}] \quad (54)$$

$$N_A = \frac{S_A}{S_A + S_B} \left(N - S_B \frac{\beta+\gamma}{\beta\gamma} (1-\delta)\tau \right), N_B = N - N_A \quad (55)$$

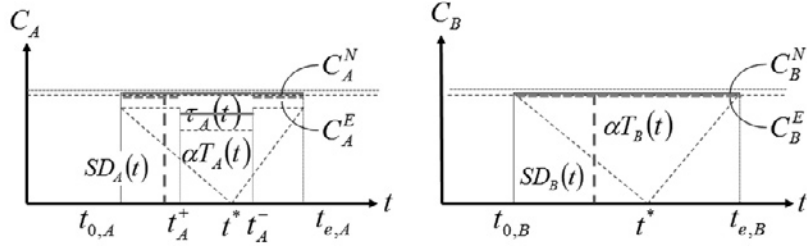


図6 Case IIIaにおける交通費用の遷移

この均衡状態では、図6に示すように非ETC利用者の旅行費用はETC利用者と比較して $\delta\tau$ だけピーク時間帯で高くなっている。

非ETC利用者は割引のためオフピーク時間帯に料金所を通過しようとするものの、全ての非ETC利用者がオフピーク時間帯に高速道路を利用すると混雑が悪化し、ピーク時間帯の旅行費用よりもオフピーク時間帯の旅行費用の方が高くなってしまふ。よって、オフピーク時間帯の待ち行列はピーク時間帯における非ETC利用者の旅行費用とオフピーク時間帯の旅行費用が等しくなるまで延伸し、非ETC利用者の一部はピーク時間帯に高速道路を利用することになる。一方、ETC利用者はオフピーク時間帯で延伸した待ち行列に加わるインセンティブを持たない。したがって、ETC利用者はピーク時間帯に料金所を通過し、割引のメリットを享受する。また、一般道路は非ETC利用者のみによって使われる。

まったく割引がなされないケースと比較してみると、一般道路から高速道路への需要が転換し、高速道路上の通勤時間帯は拡大する。その結果、オフピーク時間帯のボトルネック混雑は増加するものの、一般道路と高速道路における旅行費用はともに低下し、道路システムの効率性は改善する。このケースから当該制度はETC利用の促進とボトルネック混雑の削減を同時に達成する可能性があることが分かる。

3.3.2. Case IIIb: $(t_A^- - t_A^+)S_A < N^E$

Case IIIbではピーク時間帯ボトルネック容量よりもETC利用者が多いケースを検討する。前項と同様に均衡状態を解くと以下のように表すことができる。

$$t_{0,j} = t^* - \frac{\gamma}{\beta+\gamma} \frac{N_j}{S_j}, \quad t_{n,j} = t^* - \frac{\beta\gamma}{\alpha(\beta+\gamma)} \frac{N_j}{S_j}, \quad t_{e,j} = t^* + \frac{\beta}{\beta+\gamma} \frac{N_j}{S_j} \quad (56)$$

$$t_{n,A}^+ = \frac{\alpha - \beta}{\alpha} t_A^+ + \frac{\beta}{\alpha} t_{0,A}, \quad t_{n,A}^- = \frac{\alpha + \gamma}{\alpha} t_A^- - \frac{\gamma}{\alpha} t_{e,A} \quad (57)$$

$$T_j(t) = \begin{cases} \frac{\beta}{\alpha - \beta} (t - t_{0,j}) & \text{for } t \in [t_{0,j}, t_{n,j}] \\ \frac{\gamma}{\alpha + \gamma} (t_{e,j} - t) & \text{for } t \in [t_{n,j}, t_{e,j}] \end{cases} \quad (58)$$

$$C_A^N = C_B^N \quad (59)$$

$$C_A^N = \frac{\beta\gamma}{\beta + \gamma} \frac{N_A}{S_A} + (1 - \delta)\tau \quad \text{for } t \in [t_{0,A}, t_{n,A}^+], [t_{n,A}^-, t_{e,A}] \quad (60)$$

$$C_A^E = \frac{\beta\gamma}{\beta + \gamma} \frac{N_A}{S_A} + (1 - \delta)\tau \quad \text{for } t \in [t_{0,A}, t_{e,A}] \quad (61)$$

$$C_B^E, C_B^N = \frac{\beta\gamma}{\beta + \gamma} \frac{N_B}{S_B} \quad \text{for } t \in [t_{0,B}, t_{e,B}] \quad (62)$$

$$N_A = \frac{S_A}{S_A + S_B} \left(N - S_B \frac{\beta + \gamma}{\beta\gamma} (1 - \delta)\tau \right), \quad N_B = N - N_A \quad (63)$$

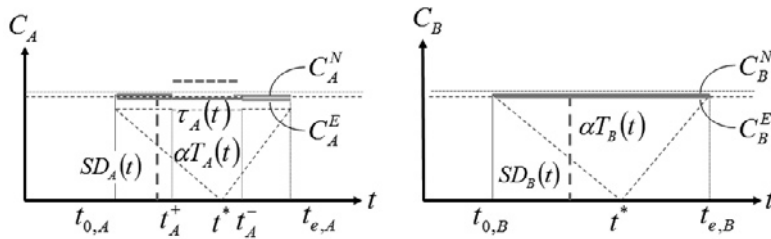


図7 Case IIIbにおける交通費用の遷移

この均衡状態では、図7に示されるようにピーク時間帯の非ETC利用者が高速道路を走行しないことを考慮すると、すべての利用者の旅行費用はわずかではあるが低下している。利用者間に生じる旅行費用の違いは以下のように説明できる。ETC利用者は割引によって彼らにとって相対的に旅行費用が低いピーク時間帯に通勤しようとする。しかし、 $(t_A^- - t_A^+)S_A < N^E$ の条件より全てのETC利用者がピーク時間帯に通勤することはできない。したがって、ETC利用者はピーク時間帯とオフピーク時間帯の旅行費用が等しくなるまで待ち行列を延伸させる。ETC利用者は全通勤時間帯に高速道路と一般道路の間で、非ETC利用者はオフピーク時間帯の高速道路と全通勤時間帯の一般道路の間で旅行費用を低下させる出発時刻と経路を選択しようとする。その結果生じる均衡状態では全ての利用者の旅行費用が一致する。さらに、前節の結果とは対照的にETC利用者数がピーク時間帯ボトルネック容量よりも多いCase IIIbでは、割引制度の目的であったETC利用を促進する効果も道路混雑を改善する効果も同時にほぼ無くなってしまうことが分かる。

4. おわりに

本研究ではETC利用者と非ETC利用者に対する通勤混雑時間帯における高速道路料金について、道路混雑に関わるシステムの効率性の改善とETC利用の促進を目的として、自己選択と利用履歴に基づく事後決済の特徴を組み合わせた3つの料金制度をボトルネック混雑モデルで分析した。

ETC オフピーク通勤割引はまったく割引がなされないケースと比較して、高速道路をオフピーク時間帯に利用するように一般道路から高速道路へ需要を転換させることで道路システムの効率性を改善することが分かった。しかしながら、割引の適用を受けるETC利用者数が割引時間帯ボトルネック容量よりも少なければ、利用者にとっては高速道路料金の節約にはなってもボトルネック混雑はETC割引の導入によって削減されないことも明らかとなった。なお、道路混雑の削減効果の大きさは一般道路から高速道路へ需要が転換することによって旅行費用がどの程度低下するかによって決まるため効果の多寡は状況に依存する。

ETC オフピーク通勤割引プラスは道路混雑の水準を抑えつつ、ETC利用に対してインセンティブを確保することが分かった。すなわち、交通政策担当者がETCを普及させるためにETCオフピーク通勤割引を導入した場合よりも多くの利用者にETC利用のインセンティブを与えようとするれば、割引時間帯を拡大する必要がある、拡大されたオフピーク時間帯における道路混雑の増加は避けられない。その一方で、ETCオフピーク通勤割引プラスは道路混雑を悪化させずにETC普及のためのインセンティブを与えることができる。ETCがかなり普及した日本の現状を考慮すれば、この割引制度は有効な方法であると考えられる。

オフピーク通勤割引とETCピーク通勤割引を組み合わせた料金制度はETC普及の初期段階ではETC利用に対するインセンティブの確保と総通勤費用の削減を同時に実現する有効な手段であることが示唆された。しかしその一方で、ETCがかなり普及した段階ではETC利用の促進と総通勤費用の削減の効果がともに失われるという欠点があることも分かった。

これらの料金体系の分析からは、高速道路を走行する全ての自動車にETC車載器が装備されていなくても道路システムの効率性が改善されるという重要な洞察も得られた。つまり、ETC利用率がある一定の値に達すれば、ETCの機能を活用した効果的な高速道路料金制度を設計することができるのである。ただし、割引制度はどんな状況にも対応できる訳ではない。現実には、ETC車載器の普及や道路混雑の削減といった複数の交通政策に対応する「最適な割引制度」を見いだすことは、道路網上に複数のボトルネック箇所が生じることを考えると難しい課題である。さらに、混雑水準が高い場合や高速道路料金収入が少ない場合にはオフピーク時間帯の割引よりもピーク時間の追加課金の検討が必要にもなるだろう。

参考文献

- Arnott, R., de Palma, A. and Lindsey, R., 1990a. Economics of a bottleneck. *Journal of Urban Economics*, 27, 111-130.
- Arnott, R., de Palma, A. and Lindsey, R., 1990b. Departure time and route choice for routes in parallel. *Transportation Research*, 24B (3), 209-228.

- Daganzo, C.F., 1995. A Pareto optimum congestion reduction scheme. *Transportation Research*, 29B (2), 139-154.
- Daganzo, C.F. and Garcia, R.C., 2000. A Pareto improving strategy for the time-dependent morning commute problem. *Transportation Science*, 34 (3), 303-311.
- Small, K.A., 1982. The scheduling of consumer activities: work trips. *American Economic Review*, 72, 467-479.
- Suzuki, T., 2008a. Application of self-selected pricing to the Japanese highway fee system based on the ETC, In: C.A.Brebbia, eds. *Urban Transport XIV*, 537-547.
- Suzuki, T., 2008b. A bottleneck model considering with performance of ETC system. paper presented to the 22th Annual Meeting of the Applied Regional Science Conference in Japanese.
- Train, K.E., 1994. *Optimal Regulation*. Cambridge, MA. MIT Press.
- Vickrey, W.E., 1969. Congestion theory and transport investment. *American Economic Review*, 59, 251-261.