

最適ETC料金割引制度に関する一考察*

A consideration of the optimal ETC discount fee system*

鈴木崇児**

By Takaji SUZUKI**

1. はじめに

ETCの導入は多様な高速道路料金システムによる課金を技術的に可能した。ETC利用の普及は料金体系改定の影響力を高めるという意味で政策的な重要性をもち、政府と高速道路会社は、ETCの利用率を高めるべく、ETC利用者を優遇する各種の割引制度を導入してきた。その結果、高速道路を利用する自動車のおよそ7割がETC車載器を搭載するまでになった。経済情勢の急激な悪化を考慮し、政府は景気対策の意味合いも含め、さらに大胆な高速道路料金の割引や車載器のセットアップコストを無料化を実施した。しかしながら、既に高くなったETC利用率をさらに高める場面では、こうした割引や補助政策は効率的であるとは言い難く、著しく歪んだ料金体系は高速道路のパフォーマンスを阻害し、利用者の利便性を低下させる要因にすらなる。

先行研究¹⁾では、ETC処理能力を考慮したボトルネック混雑へのETC通勤割引制度の影響を検討するため、料金所付近のボトルネック混雑を3つのボトルネック箇所として具体化し、それらの組み合わせとしての料金所の処理能力を定義し、ETC通勤割引制度の影響を分析した。その結果、当該料金割引制度はETC利用に対するインセンティブを高めることで、相対的に処理能力の高いETCゲートを有効利用することで、料金所全体のパフォーマンスを向上させ得ることを明らかにした。また一方では、過度な交通集中を招く割引率の設定は料金所外にボトルネック混雑を生じさせ、料金所のパフォーマンスの向上が高速道路のサービス水準の改善に結び付かない状況を招く可能性も示した。

本研究では、先行研究を拡張し、ETC割引料金制度のあるべき姿について、基本的な枠組みを整理することを目的とし、最適ETC割引料金体系の定式化を試みる。本研究においては、ETC通勤割引料金制度について、より一般的な議論を可能にするために、高速道路だけでな

く一般道路を含めて定式化する。また、社会的目的関数を定義し、最適ETC料金割引率を検討する。

2. 割引料金制度とボトルネック混雑モデル

既存研究²⁾では、ETC通勤割引制度を利用する前提となる車載器購入時には、利用者は混雑による旅行時間の变化については考慮せず、セットアップ費用と高速道路料金の違いで、ETCを搭載するかどうかを選択すると仮定し、混雑の影響を考慮する短期的な出発時刻選択行動と分けて考えていた。本研究もこの考え方を踏襲する。

モデルを単純化するため以下の仮定をおく。図1のような道路ネットワークとボトルネック混雑箇所を想定する。ドライバーは通勤目的で朝のピーク時間に高速道路か一般道路を利用する。ドライバーは1人で乗車する。全ての高速道路利用者は、自宅から職場までの間の同一区間を走行すると仮定し、車載器の有無に応じて、オフランプのETCゲートか非ETCゲートで料金を支払って職場に向かう。

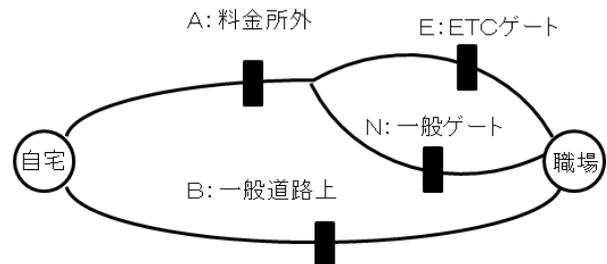


図1 道路ネットワークとボトルネック箇所

ドライバーには、次の3つの料金体系が示される。車載器の有無、料金所通過時刻によって、選択可能な料金体系は異なる。

- ①通常料金体系: 1回の利用について τ 円を払う。
- ②ETC 通勤割引料金体系: 1回の利用について割引時間内なら $(1-\delta)\tau$ 円、割引時間外なら τ 円を払う。ただし、その前提としてETC車載器の購入が別途必要となる。
- ③一般道路: 無料とする($\tau=0$ 円)。

*キーワード: ETC割引料金、ボトルネック混雑、自己選択型料金、混雑課金

**正員、工博、中京大学経済学部

(名古屋市昭和区八事本町101-2, T&F 052-835-7519)

既存研究では、ETC車載器を搭載した自動車の走行台数の算出は、車載器のセットアップ費用と高速道路料金を説明変数とする犠牲量モデル³⁾に基づいていたが、本研究では、ボトルネック処理能力とETC通勤割引制度の有効性との関係に焦点を絞るため、料金の差額のみで車載器の搭載を決定するとして簡略化する。

$$N = \bar{N}^E + \bar{N}^N, \quad \bar{N}^E = Nv(p^E, p^N) \quad (1)$$

ここで、 N ：朝のピーク時の総走行台数、 \bar{N}^E ：ETC搭載車走行台数、 \bar{N}^N ：非ETC搭載走行台数、 $v(\bullet)$ ：ETC搭載率関数、 p^E ：ETC割引料金、 p^N ：通常料金

なお、 $v(\bullet)$ をロジットモデルで特定化すると、たとえば以下のように表せる。

$$\bar{N}^E = \frac{N}{1 + \exp(p^N - p^E + \varphi)/\theta}$$

ここで、 φ, θ ：未知のパラメータ

朝のピーク時の全利用台数 N は、高速道路総利用台数を N^A と一般道路総利用台数を N^B に分けられる。また、高速道路総利用台数 N^A はETC利用台数 N^E と非ETC利用台数 N^N に分けられる。

$$N = N^A + N^B, \quad N^A = N^E + N^N \quad (2)$$

なお、 $\bar{N}^E = N^E$ であるかどうかは走行状態によって異なる。ただし、ETC搭載車を運転するドライバーが、一般道路を利用するケースもあり得る。したがって、 $\bar{N}^E = N^E$ が成り立てば、 $\bar{N}^N = N^N + N^B$ も同時に成り立つことになる。

図1のように自宅から職場への通勤経路を想定し、自宅から職場への移動時間の中で混雑に関係しない時間を無視すると、出発時刻 t のドライバーの移動時間は下記のように定義できる。

$$T^E(t) = T_A(t) + T_E(t) \quad (3-a)$$

$$T^N(t) = T_A(t) + T_N(t) \quad (3-b)$$

$$T^B(t) = T_B(t) \quad (3-c)$$

ここで、上付きの添え字はドライバー属性を下付きの添え字はボトルネック箇所をそれぞれ示している。 $Q_s(t)$ を出発時刻 t の通勤者が直面する待ち行列長とすると各通勤者の行列での待ち時間は、待ち行列長をボトルネック容量で割ったものと等しくなる。

$$T_s(t) = \frac{Q_s(t)}{S_s} \quad s \in A, E, N, B \quad (4)$$

次に $r^k(t)$ をETC, 非ETC利用者の出発時刻 t における出発率とすると、料金所外の待ち行列長の変化は以下のように定義できる。

$$\frac{dQ_A(t)}{dt} = \begin{cases} 0, & Q_A(t) = 0 \text{ and } r^E(t) + r^N(t) \leq S_A \\ r^E(t) + r^N(t) - S_A, & r^E(t) + r^N(t) \geq S_A \end{cases} \quad (5)$$

(5)式は、待ち行列が発生しておらず、出発率の和がボトルネック容量以下ならば、待ち行列長の変化はゼロであり、ボトルネック容量を出発率の和が上回るならば、その差だけ待ち行列長が延伸することを示している。ETC, 非ETCゲート、一般道路上のボトルネック箇所の待ち行列は(6)式のように表される。

$$\frac{dQ_s(t)}{dt} = \begin{cases} 0 & Q_s(t) = 0 \text{ and } r^k(t) \leq S_s \\ r^k(t) - S_s & r^k(t) \geq S_s \end{cases} \\ , (s, k) = (E, E), (N, N), (B, B) \quad (6)$$

ドライバーの通勤費用については、移動時間に相当する費用以外に、スケジュール費用と高速道路料金がかかると仮定する。

$$C^k(t) = \alpha T^k(t) + SD^k(t) + (1 - \delta^k(t))\tau \quad (7)$$

全ての通勤者が共通の就業開始時刻 t^* を持つとすると、就業開始時刻よりも早く到着した通勤者のスケジュール調整時間は $t^* - t - T^k(t)$ となり、始業開始時刻よりも遅く到着した通勤者のスケジュール調整時間は $t + T^k(t) - t^*$ となる。 t_n^k をある個人が就業開始時刻ちょうどに到着する出発時刻とすれば、 $t_n^k + T^k(t_n^k) = t^*$ となる。これらをもとに通勤費用をまとめると(8)式のように表すことができる。

$$C^k(t) = \begin{cases} \alpha T^k(t) + \beta(t^* - t - T^k(t)) \\ \quad + (1 - \delta^k(t))\tau & (t \leq t_n^k) \\ \alpha T^k(t) + \gamma(t + T^k(t) - t^*) \\ \quad + (1 - \delta^k(t))\tau & (t \geq t_n^k) \end{cases} \quad (8)$$

スケジュール調整費用のパラメータについては、就業時刻までの待ち時間の評価値 β の方が就業時刻に遅れた時間の評価値 γ よりも低いとし、通勤時間に対する時間評価値 α をはさみ、 $\beta < \alpha < \gamma$ の関係にあると仮定⁴⁾する。ここで、 $(1 - \delta^k(t))\tau$ は出発時刻 t の通勤者が課される料金を表す。

各ボトルネックにおける混雑の始まりを $t_{0,s}$ 、終わりを $t_{e,s}$ とする。ボトルネック混雑が生じる時間帯の長さはボトルネック毎の累積流入台数を容量で割ったものに等しい。

$$t_{e,s} - t_{0,s} = \frac{N_s}{S_s} \quad s \in A, E, N, B \quad (9)$$

3. ETC通勤割引制度実施時のネットワーク均衡

(1) 料金所付近のボトルネック混雑状況の分類

一般道路上のボトルネック混雑は必ず存在するものと仮定する。また、高速道路についても、少なくとも一箇所以上のボトルネックで待ち行列が発生すると仮定する。高速道路で言えば、非ETCゲートは、ETC導入以前からピーク時にはボトルネック混雑が生じる可能性が高い箇所である。ETC利用があまり普及していない段階ではその状況に大きな変化はないと考えられる。一方、ETCゲートは、その処理能力の高さからボトルネック混雑が生じる可能性は低いが、ETC利用が急速に普及し、なんらかの理由によりETC利用者が過度に集中した場合にはボトルネック混雑を生じ得る。また、料金所外にもICの分流、合流部のようなETCに関連しない区間でもボトルネック混雑は生じ得る。現実にも過度の交通集中によって渋滞が発生する箇所は料金所だけに限られない。高速道路上の3か所のボトルネック容量の関係として $2S_E > S_A > S_E > S_N$ を仮定する。この関係は、料金所外、ETCゲート、非ETCゲートの順に処理能力が高く、かつ、ETC、非ETCどちらの料金収受も可能な兼用ゲートをETC利用にして処理能力が2倍に高めた場合、ETCゲートの処理能力は料金所外のボトルネックを上回ることを示している。

上記の条件の中で3か所のうちどこにボトルネック混雑が生じるのであろうか。我々のイメージに最も近いのは、料金所のゲートに待ち行列が生じる場合であり、対応するボトルネック容量と出発率（流入率）の条件で表せば $S_A > r^E + r^N, r^E > S_E, r^N > S_N$ となる。この状況はETC利用者と非ETC利用者の流入率の合計が料金所外のボトルネック容量より小さく、ETCゲートか非ETCゲートのボトルネック容量がそれぞれの出発率（流入率）を下回っている場合である。この場合を**case-1**とする。

次に、料金所外に待ち行列が生じる場合を検討する。対応するボトルネック容量と流入率の条件で表せば $r^E + r^N > S_A$ となる。この条件はETC利用者と非ETC利用者の流入率の合計が料金所外のボトルネック容量よりも大きいことを示す。この場合を**case-2**とする。

なお、厳密に言えば、**case-2**では料金所外のボトルネックを通過した利用者が、さらに料金所のゲートにボトルネック混雑を生じさせる、いわゆるタンデムボトルネック混雑⁹⁾が生じる可能性もある。この問題は重要ではあるものの、兼用ゲートの有効利用により、料金所外のボトルネックを通過した流入量についてはボトルネック

混雑を回避させられると仮定して問題を単純化する。

(2) 料金所ゲートにおけるボトルネック混雑へのETC通勤割引制度の影響(case-1)

a) ETC通勤割引導入前のボトルネック混雑状況

case-1では、ETCゲート、非ETCゲートを先頭に待ち行列が生じる。2種類のゲートにできるボトルネック混雑を比較すると、ゲートの処理能力と利用者に違いはあるものの、料金割引がなければ均衡状態における概略的なボトルネック混雑の状況は同じである。ここでは、**case-1**において料金を割引しない状況をETC通勤割引制度導入前のケースと仮定して検討する。

均衡状態では、すべての利用者が自身の出発時刻選択を変えることによって通勤費用を改善することができないと仮定すれば、均衡状態における最初に料金所を通る利用者の出発時間、始業時間ちょうどに到着する利用者の出発時間、最後に料金所を通る利用者の出発時間 $t_{0,s}$ は、(8)、(9)式より(10)式のように解ける。

$$t_{0,s} = t^* - \frac{\gamma}{\beta + \gamma} \frac{N_s}{S_s}, \quad t_n^k = t^* - \frac{\beta\gamma}{\alpha(\beta + \gamma)} \frac{N_s}{S_s},$$

$$t_{e,s} = t^* + \frac{\beta}{\beta + \gamma} \frac{N_s}{S_s} \quad (10)$$

そのときの通勤費用は(11)式で表わされる。

$$C^k = \frac{\beta\gamma}{\beta + \gamma} \frac{N_s}{S_s} + \tau \quad (11)$$

均衡状態での通勤時間は早着と遅着の場合に分けて(12)式のように計算できる。

$$T^k(t) = \begin{cases} \frac{\beta}{\alpha - \beta} (t - t_{0,s}) & \text{for } t \in [t_{0,s}, t_n^k] \\ \frac{\gamma}{\alpha + \gamma} (t_{e,s} - t) & \text{for } t \in [t_n^k, t_{e,s}] \end{cases} \quad (12)$$

同様に出発率も(13)式のように計算できる。

$$r^k(t) = \begin{cases} \frac{\alpha}{\alpha - \beta} S_s & \text{for } t \in [t_{0,s}, t_n^k] \\ \frac{\alpha}{\alpha + \gamma} S_s & \text{for } t \in [t_n^k, t_{e,s}] \end{cases} \quad (13)$$

ETC通勤割引制度導入前の均衡状態におけるボトルネック混雑の状況は例えば図-2のように書ける。この状態では、ETC利用者と非ETC利用者の出発率の和は朝のピーク時間帯を通じて料金所外のボトルネック容量以下になっている。ETC利用は十分に普及しておらず、ETC利用者の総需要（累積台数）は非ETC利用者の総需要（累積台

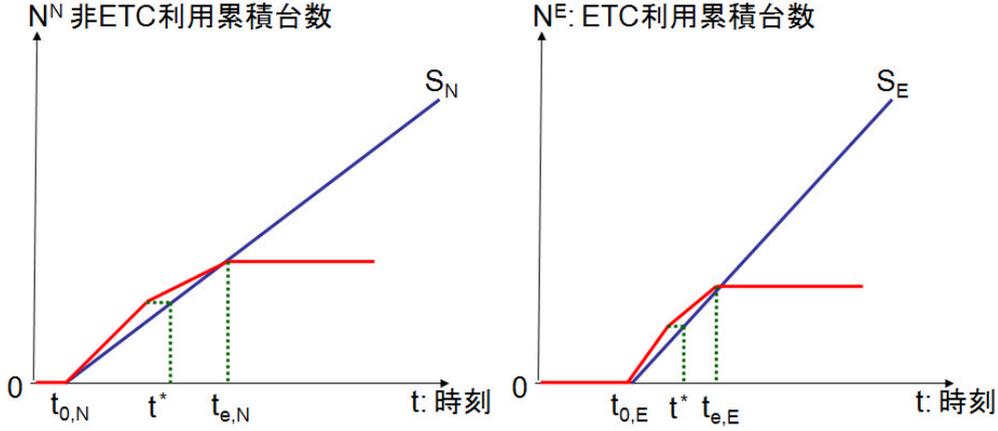


図-2 case-1 での ETC 通勤割引制度導入前の料金所ゲートのボトルネック混雑状況

数) に比べて少ない。ピーク時間、すなわちボトルネック混雑の継続時間は処理能力と総需要の違いから非ETCゲートの方が長く、個々の利用者の待ち時間も相対的に長い。したがって、通勤費用も待ち時間が短い分だけETC利用者の方が低くなっている。

b) ETC通勤割引導入後のボトルネック混雑状況

次にcase-1においてETC通勤割引が導入された場合を検討する。(3)式の需要関数の特徴に従えばETC通勤割引の効果によってETC利用台数は増加する。また、その増加は純増と非ETC利用からの転換によって生じる。非ETCゲートに関しては、ETC利用への転換によって、非ETC利用台数 N^N が減少するため、ボトルネック混雑の規模が縮小する。ただし、図-2で示したボトルネック混雑の概略的な特徴は変化しない。一方、ETCゲートについては割引時間が限られているため、ボトルネック混雑の状況は変化する。

今、割引時間帯を $[t^-, t^+]$ 、 t_n^-, t_n^+ はそれぞれ t^-, t^+ にちょうど料金所に到達する出発時刻を表すものとし、 $t_{0,E} < t_n^- < t_n^E < t_n^+ < t_{e,E}$ の関係が成り立ち、割引時間帯にボトルネックを通行する全てのETC利用者の料金が δ^E 割引されると仮定すると、通勤費用は時間帯に応じて4つに分けて定式化される。

$$C^E(t) = \begin{cases} \alpha T^E(t) + \beta(t^* - t - T^E(t)) \\ \quad + (1 - \delta^E(t))\tau \quad (t \leq t_n^E) \\ \alpha T^E(t) + \gamma(t + T^E(t) - t^*) \\ \quad + (1 - \delta^E(t))\tau \quad (t \geq t_n^E) \end{cases} \quad (14)$$

$$\text{ただし、} \delta^E(t) \begin{cases} = 0 & \text{for } t \in [t_{0,E}, t_n^-] \cup [t_n^+, t_{e,E}] \\ = \delta^E & \text{for } t \in [t_n^-, t_n^+] \end{cases}$$

前節同様に、均衡状態ではすべての通勤者の通勤費用が等しくなることから、各出発時刻と通勤費用、通勤時間が決定できる。

$$t_{0,E} = t^* - \frac{\gamma}{\beta + \gamma} \frac{N_E}{S_E},$$

$$t_n^E = t^* - \frac{\beta\gamma}{\alpha(\beta + \gamma)} \frac{N_E}{S_E} - \frac{\delta^E \tau}{\alpha},$$

$$t_{e,E} = t^* + \frac{\beta}{\beta + \gamma} \frac{N_E}{S_E} \quad (15)$$

$$t_n^- = \frac{\alpha - \beta}{\alpha} t^- + \frac{\beta}{\alpha} t_{0,E} - \frac{\delta^E \tau}{\alpha},$$

$$t_n^+ = \frac{\alpha + \gamma}{\alpha} t^+ - \frac{\gamma}{\alpha} t_{e,E} - \frac{\delta^E \tau}{\alpha} \quad (16)$$

なお、 t_n^-, t_n^+ では、割引率の値は割引 $\delta^E(t) = \delta^E$ 、非割引 $\delta^E(t) = 0$ の2つの値をとり得る。

$$T^E(t) = \begin{cases} \frac{\beta}{\alpha - \beta} (t - t_{0,E}) & \text{for } t \in [t_{0,E}, t_n^-] \\ \frac{\beta}{\alpha - \beta} (t - t_{0,E}) + \frac{\delta^E \tau}{\alpha} & \text{for } t \in [t_n^-, t_n^E] \\ \frac{\gamma}{\alpha + \gamma} (t_{e,E} - t) + \frac{\delta^E \tau}{\alpha} & \text{for } t \in [t_n^E, t_n^+] \\ \frac{\gamma}{\alpha + \gamma} (t_{e,E} - t) & \text{for } t \in [t_n^+, t_{e,E}] \end{cases} \quad (17)$$

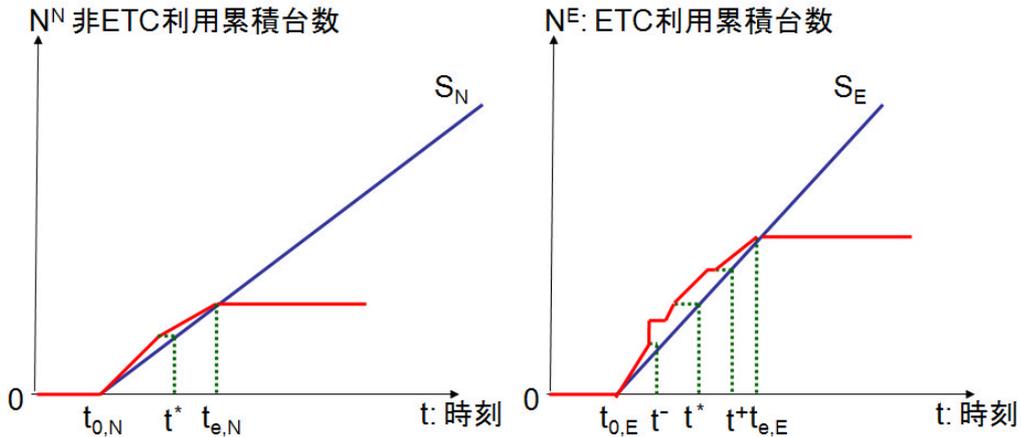


図-3 Case-1 での ETC 通勤割引制度導入後の料金所ゲートのボトルネック混雑状況

$$C = \frac{\beta\gamma}{\beta + \gamma} \frac{N_E}{S_E} + \tau \quad (18)$$

均衡状態を示した図-3からは、一定の料金 τ を課していた場合の図-2の均衡状態と比較して、ETC利用者の通勤時間が長くなっていることが分かる。この要因は2つあり、1つは通勤割引によりETC利用者の総需要が増加し、ボトルネック混雑の規模が拡大したことである。もう1つは、ETC利用者が割引時間に通行しようとするために生じる待ち行列の延伸である。この待ち時間の増加はおおよそ割引金額に相当する。なお、割引開始時刻には、Arnott et al.⁵⁾による時間帯別追加課金の分析にも見られたような一群の利用者 $2\delta^E \tau S_E / (\alpha - \beta)$ が料金所に殺到することで混雑を悪化させているのが分かる。混雑状態における特定時間帯に限った料金割引は、利用者の出発選択行動を通じて割引による料金収入の減少にほぼ等しいだけの混雑をさらに生じさせることになる。

ただし、料金所全体でみればETC通勤割引制度の導入が必ずしも混雑状況を悪化させているとは言えない。料金制度の導入によって、ETC利用者の総需要は非ETC利用者の総需要に比べて多くなっている。図-2のETC通勤割引制度導入前のボトルネック混雑の状況と比較するとピーク時間、すなわちボトルネック混雑の継続時間は非ETCゲートで短くなっており、ETCゲートで長くなっている。ETC利用台数の増加が非ETC利用からの転換と既存ETC利用者の利用頻度の増加等から生じていることを考慮すれば、その変化はETCゲートの方が相対的に少なく、割引料金によるインセンティブが、より処理能力の高いETCゲートに需要を誘導し、料金所全体として効率性を高めていることが分かる。このケースでは一般道路の総需要が高速道路利用への転換により減少しているため、

一般道路を走行した場合の通勤費用も低下する。

(3) 料金所外におけるボトルネック混雑へのETC通勤割引制度の影響(case-2)

ETC利用者と非ETC利用者の違いは2章で述べたように高速道路を利用する通勤回数のみから生じており、時間評価値などは全て同質であるとする。前節同様に割引時間帯を $[t^-, t^+]$ とし、割引時間帯にボトルネックを通行するETC利用者の料金のみが δ^E 割引されるとする。このとき、通勤費用は利用者属性と時間帯属性に応じて定式化できる。

$$C^k(t) = \begin{cases} \alpha T^k(t) + \beta(t^* - t - T^k(t)) + (1 - \delta^k(t))\tau & \text{for } k \in (E, N), t \in [t_{0,s}, t_n^k] \\ \alpha T^k(t) + \gamma(t + T^k(t) - t^*) + (1 - \delta^k(t))\tau & \text{for } k \in (E, N), t \in [t_n^k, t_{e,s}] \end{cases} \quad (19)$$

ただし、

$$\delta_i^k(t) \begin{cases} = 0 & \text{for } k = E, t \in [t_{0,s}, t_n^-] \cup [t_n^+, t_{e,s}] \\ \neq 0 & \text{for } k = E, t \in [t_n^-, t_n^+] \\ = 0 & \text{for } k = N, t \in [t_{0,s}, t_{e,s}] \end{cases}$$

a) $(t^+ - t^-)S_A \geq N^E$ のケース

割引時間にボトルネックを通過可能な利用台数 $(t^+ - t^-)S_A$ を割引時間ボトルネック総容量と定義する。まず、ETC利用台数が割引時間ボトルネック総容量を下回るケース： $(t^+ - t^-)S_A \geq N^E$ のから検討を始める。このケースは、相対的に割引率が低い、ETC車載器の購入費用が高い、ボトルネック容量が大きい、割引時間が

長い、制度導入後の初期段階でETCの普及が進んでいない等の要因によって生じる。

ETC利用者間、非ETC利用者間で通勤費用が等しく、それぞれの利用者が出発時刻を変更する誘因を持たない条件から、出発時間と通勤時間が決定できる。

$$\begin{aligned} t_{0,A} &= t^* - \frac{\gamma}{\beta + \gamma} \frac{N^A}{S_A}, \\ t_n^k &= t^* - \frac{\beta\gamma}{\alpha(\beta + \gamma)} \frac{N^A}{S_A}, \\ t_{e,A} &= t^* + \frac{\beta}{\beta + \gamma} \frac{N^A}{S_A} \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} t_n^- &= \frac{\alpha - \beta}{\alpha} t^- + \frac{\beta}{\alpha} t_{0,A}, \\ t_n^+ &= \frac{\alpha + \gamma}{\alpha} t^+ - \frac{\gamma}{\alpha} t_{e,A} \end{aligned} \quad (21)$$

$$T^k(t) = \begin{cases} \frac{\beta}{\alpha - \beta} (t - t_{0,A}) & \text{for } t \in [t_{0,A}, t_n^k] \\ \frac{\gamma}{\alpha + \gamma} (t_{e,A} - t) & \text{for } t \in [t_n^k, t_{e,A}] \end{cases} \quad (22)$$

均衡状態においては、割引時間内のETC利用者の通勤費用のみが割引分だけ安くなる。

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

$$C^N = \frac{\beta\gamma}{\beta + \gamma} \frac{N^A}{S_A} + \tau \quad \text{for } t \in [t_{0,A}, t_{e,A}] \quad (24)$$

ETCの利用者は割引時間外には料金が割り引かれないため、なるべく割引時間内に料金所を通過しようとする。一方、非ETC利用者にとっては、割引時間内外は無差別であり、どちらの時間帯で料金所を通過しても料金は変わらない。 $(t^+ - t^-)S_A \geq N^E$ より、割引時間ボトルネック総容量がETC利用台数を上回っているので、ETC利用者に加え、いくらかの非ETC利用者を割引時間内に通行させられる余剰能力が存在する。このため、非ETC利用者は出発時刻を割引時間内外に関わらず選択を変更し、通勤費用をより低下させようとする。やがて、すべての利用者が自らの出発時刻選択を変更することのみで通勤費用を低下させることができなくなる。この均衡状態では、ETC利用者はすべて割引時間内に通行し、非ETC利用者は割引時間内外を通じて通行する図-4左の状況が生じる。ETC利用者とは非ETC利用者の通勤時間は共通であるが、通勤費用に関しては料金割引の分だけETC利用者の方が安くなる。

この均衡状態を、実際的高速道路の走行状態として観察すれば、割引をしたにも関わらず、見かけ上は料金制度を導入していない場合と同じで、混雑は変化していない。その違いはETC利用者が割引時間に集中して通行しており、割引時間外に通行しないという自己選択を通じた差別化が生じていることである。

このケースでは、割引率を微小に変化させても一般道路の混雑状況は変化しない。

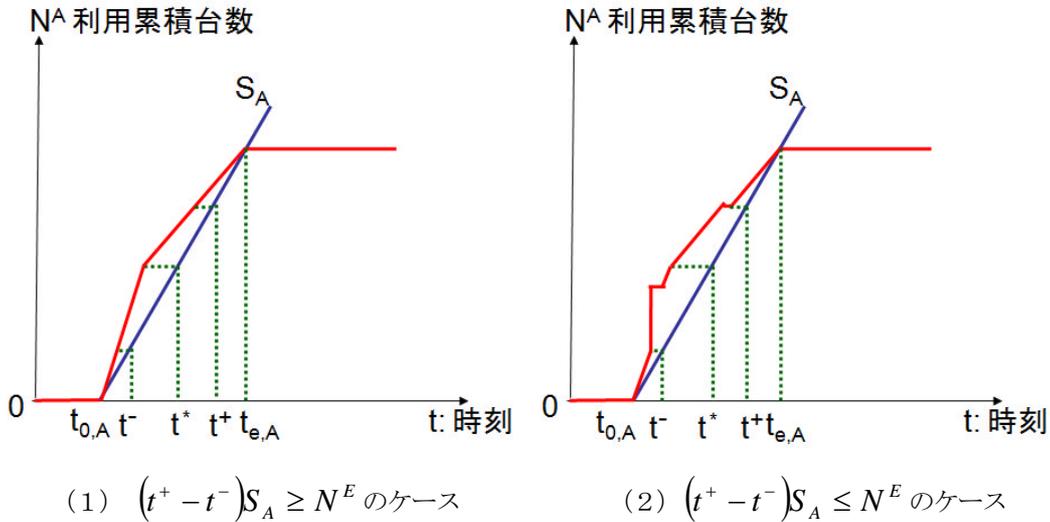


図-4 Case-2 での ETC 通勤割引制度導入後の料金所外のボトルネック混雑状況

b) $(t^+ - t^-)S_A \leq N^E$ のケース

次に、ETC利用者数が割引時間ボトルネック総容量を上回るケース： $(t^+ - t^-)S_A \leq N^E$ を検討する。先程のケースとは逆に、このケースは相対的に割引率が高い、ETC車載器の購入費用が低い、ボトルネック容量が小さい、割引時間が短い、制度導入後にETCの普及が進んだ等の要因によって生じる。

ETC利用者間、非ETC利用者間で通勤費用が等しく、それぞれの利用者が出発時刻を変更する誘因を持たない条件から、出発時間と通勤時間が決定できる。

$$\begin{aligned} t_{0,A} &= t^* - \frac{\gamma}{\beta + \gamma} \frac{N^A}{S_A}, \\ t_n^k &= t^* - \frac{\beta\gamma}{\alpha(\beta + \gamma)} \frac{N^A}{S_A} - \frac{\delta^E \tau}{\alpha}, \\ t_{e,A} &= t^* + \frac{\beta}{\beta + \gamma} \frac{N^A}{S_A} \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} t_n^- &= \frac{\alpha - \beta}{\alpha} t^- + \frac{\beta}{\alpha} t_{0,A} - \frac{\delta^E \tau}{\alpha}, \\ t_n^+ &= \frac{\alpha + \gamma}{\alpha} t^+ - \frac{\gamma}{\alpha} t_{e,A} - \frac{\delta^E \tau}{\alpha} \end{aligned} \quad (26)$$

なお、 t_n^-, t_n^+ は割引 $\delta^E \neq 0$, 非割引 $\delta^E = 0$, 状態に応じて2つの値をとり得る。

$$T^k(t) = \begin{cases} \frac{\beta}{\alpha - \beta} (t - t_{0,A}) & \text{for } t \in [t_{0,A}, t_n^-] \\ \frac{\beta}{\alpha - \beta} (t - t_{0,A}) + \frac{\delta^E \tau}{\alpha} & \text{for } t \in [t_n^-, t_n^k] \\ \frac{\gamma}{\alpha + \gamma} (t_{e,A} - t) + \frac{\delta^E \tau}{\alpha} & \text{for } t \in [t_n^k, t_n^+] \\ \frac{\gamma}{\alpha + \gamma} (t_{e,A} - t) & \text{for } t \in [t_n^+, t_{e,A}] \end{cases} \quad (27)$$

均衡状態では割引時間における非ETC利用者の通勤費用のみが割引分だけ高くなる。

$$C^E = \frac{\beta\gamma}{\beta + \gamma} \frac{N^A}{S_A} + \tau \quad \text{for } t \in [t_{0,A}, t_{e,A}] \quad (28)$$

$$C^N = \frac{\beta\gamma}{\beta + \gamma} \frac{N^A}{S_A} + (1 + \delta^E) \tau \quad \text{for } t \in [t_{0,A}, t_{e,A}] \quad (29)$$

$(t^+ - t^-)S_A \leq N^E$ より、割引時間ボトルネック総容量がETC利用台数を下回っているため、全てのETC利用者が割引時間内に通行することは不可能である。しかし、ETCの利用者は割引時間内においては割引時間外よりも料金が割り引かれるため、できる限り割引時間内に料金所を通過しようと努力する。その結果、待ち行列長は割引時間外に走行するETC利用者と通勤費用が等しくなるまで延伸する。一方、非ETC利用者にとっては、料金割引が適用されないため割引時間内で延伸した待ち行列に加わる誘因はない。したがって、非ETC利用者は割引時間外に通行する。この均衡状態では、非ETC利用者はすべて割引時間外に通行し、ETC利用者は割引時間内外を通じて通行する図-4右の状況が生じる。非ETC利用者は通勤時間が長くなる割引時間内で通行しないことから、料金割引をしているにも関わらず、実際に負担している通勤費用に関してはETC利用者、非ETC利用者の差がなくなる。

この均衡状態を実際の高速道路の走行状態として観察すれば見かけ上は、case-1のETC通勤割引制度を導入した場合のETCゲートのボトルネック混雑に似た特徴を有しており、割引時間の混雑が激しくなっていることが観察される。図-3のケースとの違いは非ETC利用者が割引時間外に集中して通行しており、割引時間内に通行しないという自己選択を通じた差別化が生じていることである。このケースでは、割引率を変化させても一般道路の混雑水準は変化しない。

4. 最適ETC料金割引問題

最適ETC料金割引問題は、先述のETC割引制度実施時のネットワーク上のボトルネック混雑を考慮した出発時刻/経路選択均衡を制約条件とし、例えば、料金割引率を意思決定変数するMPEC：均衡制約付き数理最適化問題として定式化できる。

ETC割引料金を巡る政策論の観点から、典型的な2種類の定式化を示す。

$$\begin{aligned} (A) \quad & \underset{\delta}{\text{Min.}} \sum_{k \in E, N, B} C^k(t)^* \\ & \text{s.t. } N^E \delta \leq \text{Budget} \end{aligned}$$

ただし、*は出発時刻/経路選択均衡解を表す。

$$(B) \quad \underset{\delta}{\text{Max}}. N^{E^*} (1 - \delta) \tau + N^{N^*} \tau - \sum_{k \in E, N, B} C^k(t)^*$$

ただし、*は出発時刻／経路選択均衡解を表す。

問題 (A) は、割引のための財源制約の範囲でドライバーの総走行費用を最小化することを目指す政策を定式化したものであり、現在実施されている景気対策としての側面が強い ETC 割引制度に近い。

一方、問題 (B) は、社会的厚生を最大化を目的とする政策であり、混雑課金の理論研究でも用いられている、伝統的な評価関数である。社会的厚生関数は高速道路サービス供給側の料金収入と需要側の利用者の総走行費用を合計したものであり、料金については利用者から供給者への所得移転であり、キャンセルアウトされる。その結果、道路混雑による時間損失とスケジュール費用が評価される。なお、料金収受に関する費用や道路維持管理費なども本来は同時に考慮することが望ましいが、今回は議論を単純化するために省略した。

この2つの目的関数の違いが政策評価に及ぼす影響については発表時に示すことにする。

5. まとめ

本研究では、先行研究を拡張し、ETC 割引料金制度のあるべき姿について、基本的な枠組みを整理することを目的とし、より一般的な議論を可能にするために、高速道路だけでなく一般道路を含め、既存モデルを出発時刻／経路選択均衡問題として拡張した。また、ETC 割引料金を巡る政策論の観点から、最適 ETC 割引料金率を導出する問題が MPEC として定式化できることを示した。

参考文献

- 1) 鈴木崇児：「ETC処理能力を考慮したボトルネック混雑モデルによるETC通勤割引制度の分析」講演概要，応用地域学会，2008.
- 2) 鈴木崇児：「ETC通勤割引制度が及ぼす高速道路混雑への影響」，交通学研究，pp.181-190，2008.
- 3) 渡雅信・大西隆太・藤原友・日下部貴彦：「都市高速道路の選択制料金設定に関する調査」，土木計画学研究・講演集，2007.
- 4) Small, K. A., "The scheduling of consumer activities: work trips", *American Economic Review*, 72, pp.467-479, 1982. .
- 5) 吉年 正伸・赤松 隆：タンデムボトルネックにおける通行権取引制度の効率性，土木計画学研究・講演集 36, 333 (CD-ROM), 2007.
- 6) Arnott, R., A. de Palma, and R. Lindsey, "Departure time and route choice for routes in parallel", *Transportation Research*, 24B(3), pp.209-228., 1990.