

[特集論文]

ETC 導入による料金所容量への影響に関する 理論的解法と考察

堀口良太¹・桑原雅夫²

1 正会員 工博 東京大学生産技術研究所博士研究員 (〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)

2 正会員 Ph.D. 東京大学生産技術研究所教授 (〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)

本研究では、ノンストップ自動料金収受(ETC)料金ゲートが従来の一般ゲートとともに設置された際の、料金所全体での容量に関する理論的解法を提案する。すなわち料金ゲートの構成、運用形態とともに、料金所手前の道路形状および渋滞の延伸状況を考慮して、ETC の混入率に応じた料金所の容量を求めるものである。この理論的解法より、一般ゲートと ETC 混用ゲートでの運用の場合、料金所全体の容量改善割合は混用ゲートの数によらず ETC 混入率にのみ依存すること、また一般ゲートと ETC 専用ゲートでの運用の場合、一般ゲートからの渋滞が本線にまで延伸すると、本線がブロックされることによる見かけの容量低下を評価することができる。本稿ではさらに、いくつかのケーススタディを通して、ETC 整備のあり方について考察を加える。

Key Words : ITS, ETC, capacity analysis, physical queue, impact study

1. はじめに

ITS 施策の一環として、料金所での渋滞緩和を目的としたノンストップ自動料金収受(ETC)システムが実用化されつつある。ETC ゲートは誤進入がなければ、1 車線あたり 600~800 台/時の容量になるといわれており、都市間高速における一般ゲートの数倍の容量を持つ。

しかしながら、ETC ゲートが設置された料金所(以下 ETC 料金所)全体の容量を評価するには、単純に各ゲートの容量の総和として考えるだけでは不十分である。これはたとえば、図-1 のシミュレーション画面のように一般ゲートでの渋滞が本線に達してしまっている状態を考えてみても明らかである。すなわち、ETC 端末搭載車両(以下 ETC 車両)の十分な需要があっても、本線の渋滞に巻き込まれているために料金所への到着レートが制限されてしまい、ETC 専用ゲートが効率的に利用されていないため、料金所全体での見かけの容量が低下している場合である。この状況では、ETC 車両も大きな遅れを被っており、時間短縮の面でのメリットは小さい。

ETC ゲートの運用形態を混用とすれば、上述のような状況はなくなり、料金所全体の容量は改善されると考えられるが、この場合は混用ゲートをいくつ整備すればどれくらい容量が改善されるかの関係が明らかではない。また ETC ゲートに一般車両も並ぶため、ノンストップで

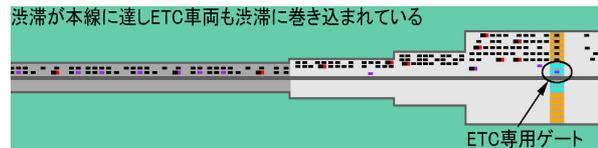


図-1 ETC 料金所全体での容量が各ゲート容量の総和よりも低下している状況のシミュレーション

の運用が不可能となり、ETC 車両にとっての時間短縮のメリットは少ない。

このように ETC の整備に際してはさまざまな視点からの議論が必要であり、なかでも道路管理者にとってのメリット、すなわち容量改善による渋滞緩和効果や人件費の削減、および利用者にとってのメリット、すなわち ETC 車両の時間短縮効果を定量的に評価することは重要である。

本稿では、料金ゲートの数や構成、運用形態、さらには料金所手前の道路形状と渋滞の延伸状況を考慮し、ETC の混入率に応じた料金所全体の容量を算定するとともに、ETC 車両と一般車両それぞれの旅行時間を評価する理論的解法について述べている。このような解法は、ETC の混入率にあわせた最適なゲート構成や、料金所の幾何形状を決めるのに有用であるのみならず、同様の目的でシミュレーションを用いた手法にとっても、その根拠を示すものとなりうる。以下では ETC 料金所のゲート構成を

(1) 「混用 + 一般ゲート」での運用

- (2) 「専用+一般ゲート」での運用
- (3) 「専用+混用+一般ゲート」での運用

の3通りに分け、それぞれについての解法を示すとともに、この理論的解法をもちいて、より効率的な ETC 整備のあり方を、いくつかのケーススタディを通して具体的に考察する。

2. ETC 料金所の容量算定

- (1) 「混用+一般ゲート」での運用

この場合はサービス時間が長い一般車両に選択の余地がある。利用者均衡の概念に従い、各ゲートでの待ち時間が等しくなるように、ドライバーが合理的にゲートを選択すると仮定すると、次の式(1)の関係が成り立つ。

$$Xh = Yh + Zh_c \quad (1)$$

ここで、

- X: 一般ゲートに並ぶ車両台数/ゲート,
- Y: 混用ゲートに並ぶ一般車両台数/ゲート,
- Z: 混用ゲートに並ぶETC 車両台数/ゲート,
- h: 一般車両のゲートでのサービス時間/台,
- h_c : ETC 車両のゲートでのサービス時間/台.

すなわち、式(1)の左辺はある時点での一般ゲートの待ち時間を、右辺は混用ゲートの待ち時間を表している。

また需要に対する ETC 車両の混入割合、すなわち ETC 混入率 p は次式(2)で表される。

$$\frac{mZ}{nX + m(Y+Z)} = p \quad (2)$$

ここで、

- n : 一般ゲートの数,
- m : 混用ゲートの数.

したがって $(n+m)$ 個のゲートがある料金所で m 個を ETC 混用ゲートに置き換えたことによる料金所全体での容量の増加割合 r は次式(3)のようになる。

$$r = \frac{nX + m(Y+Z)}{(n+m)X} \quad (3)$$

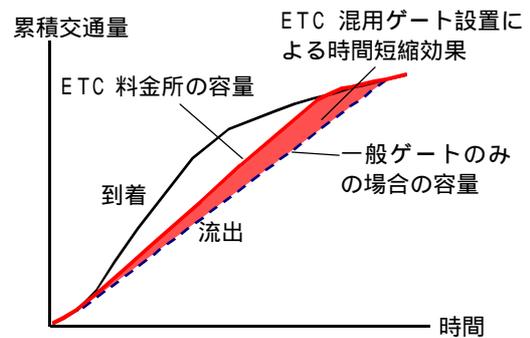


図-2 Point queue による料金所容量改善効果の評価

これは、どのゲートの待ち時間も等しいという仮定の下では ETC 混用ゲートを設置すると、式(3)の分母で示される台数の車両が ETC 導入前の料金所を通過するのと同じ時間内で、分子で示されるだけの台数を通過させることができるという意味である。なお、この仮定が成立していなくても、すべてのゲートの手前に待ち行列が発生している状態では、料金所容量の改善割合については式(3)と同じ形になることは自明である。しかしながら、各ゲートでの待ち時間が等しくなければ、渋滞が終わる時刻がゲートごとによって変わってくるため、厳密に言えば後に述べるような料金所全体を一つの point-queue として評価することが妥当ではなくなる。

式(1)と式(2)より Y と Z をそれぞれ X の関数として表し、式(3)に代入すると、 n と m がキャンセルされた形の式(4)を得る。

$$r = \frac{h}{(1-p)h + ph_c} \quad (4)$$

なお、一般に $h > h_c$ なので r は 1 より大きくなる。

式(4)より、一般車両と ETC 車両それぞれのサービス時間 h, h_c は定数と考えると、通常の料金所に対する ETC 料金所の容量増加割合は、混入率 p のみの関数として表され、ゲートの構成に依存しないことがわかる。換言すれば、各ゲートでの待ち時間が等しいという仮定が当てはまるうちは、既設の一般ゲートをいくら ETC 混用ゲートに置き換えても、料金所全体での容量は変わらない。これは混用ゲートの数が増えると、各ゲートに並んでいる車両のうちの ETC 車両の割合が減少し、各混用ゲートの容量が低下してしまうことで、料金所全体で相殺されてしまうためと説明できる。

各利用者の待ち時間が等しい場合は first-in-first-out の条件が成立しているため、料金所上流の交通状況を考慮する必要がなく、一つの point-queue とみなして到着順に車

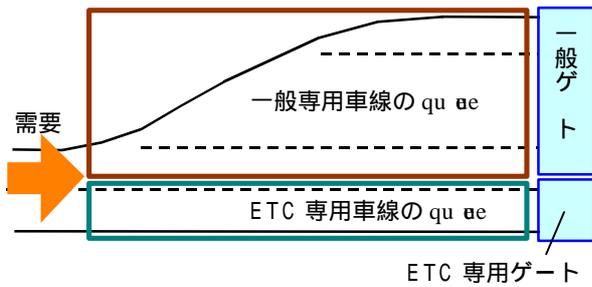


図-3 上流で需要を共有する排他的な physical queue

両の待ち時間を評価できる。すなわち図-2 のような需要と流出の交通量累積曲線を用いて総遅れ時間を求めることができる。このとき、ETC 導入により容量が増加した分だけ料金所の流出曲線の傾きが大きくなり、塗りつぶされたエリアの面積に相当する時間短縮効果が得られる。

しかしながら混入率 p が大きくなり、ETC 車両の需要が増大すると、混用ゲートでの待ち時間が一般ゲートのそれよりも長くなる、すなわち式(1)が成立しない場合も考えられる。このとき一般車両はより待ち時間が少ないゲートを選択すると考えると、混用ゲートには ETC 車両だけが並んでいることになるが、その渋滞が本線に達すると、前章の図-1 のように一般ゲートへの需要をブロックする状況となる。したがって各ゲートでの待ち時間が等しい仮定が当てはまらない範囲では、料金所上流での渋滞の延伸状況を考慮した physical queue による分析が必要となる。

実際の手順については、次節で示される「専用+一般ゲート」での運用の場合と同等なので、ここではさておき、待ち時間が等しい仮定が成立するための境界条件のみを示しておく。すなわち境界条件を与える混入率の上限 p^+ のときには、各ゲートでの待ち時間が等しく、かつ混用ゲートには ETC 車両しか、一般ゲートには一般車両しか並んでいない状況なので、あるピーク時の需要レベル Q^* [台/単位時間] に対して次式(5)が成り立つ。

$$\frac{h}{n}(1-p^+)Q^* = \frac{h_c}{m} p^+ Q^* \quad (5)$$

ここで、式(5)の左辺は一般ゲートでの単位時間あたりの待ち時間増加量を、右辺は同様に混用ゲートでの待ち時間増加量を表している。これより p^+ は式(6)のように求められる。

$$p \leq p^+ = \frac{1}{1 + \frac{n}{m} \frac{h_c}{h}} \quad (6)$$

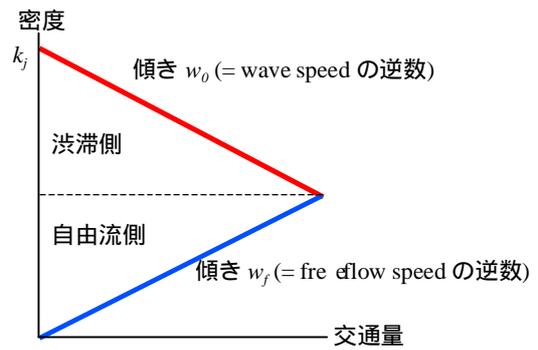


図-4 三角形で近似された Q-K 曲線

(2) 「専用+一般ゲート」での運用

この場合は一般車両と ETC 車両は料金所手前区間で分離されるため、いったんどちらかのゲートで渋滞が発生すると、本線に延伸してもう一方のゲートへの到着を阻害することが考えられる。したがって図-3 に示すように、料金所手前の区間をそれぞれ ETC 車両専用、一般車両専用の2つの排他的な physical-queue に分けて、料金所上流区間での渋滞の延伸を考慮しながら解析する必要がある。このとき、それぞれの queue の下流端は対応するゲート容量の和に制約されている。また、2つの queue は上流からの需要を共有しており、どちらか一方の queue での渋滞が上流端にまで延伸すると、本線が先詰まりとなり、もう一方の queue への需要を低下させる。

手順を解説する前に、「専用+一般ゲート」の運用で渋滞が発生しない条件について考える。すなわち、あるピーク時の需要レベル Q^* [台/単位時間] に対して、渋滞が発生しない条件は次式(7) (9)で表される。

$$pQ^* \leq \frac{u}{h_c} \quad (7)$$

$$(1-p)Q^* \leq \frac{n}{h} \quad (8)$$

$$N = n + u \quad (9)$$

ここで、

u : ETC 専用ゲートの数

N : ゲートの総数

すなわち、式(7)(8)の左辺で示される ETC 車両と一般車両それぞれの需要が、右辺で示される ETC 専用ゲートおよび一般ゲートそれぞれの合計容量よりも小さいことが必要である。

したがって ETC 料金所の最適な構成を求めることは、

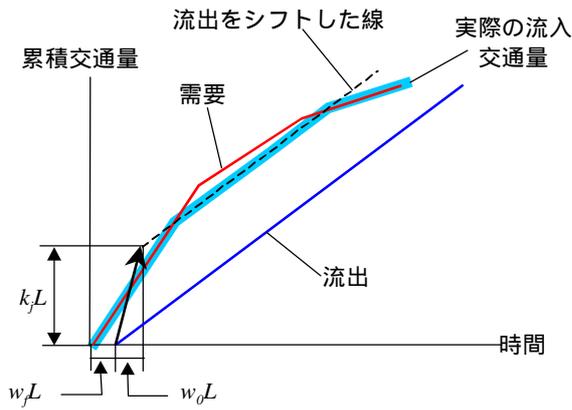


図-5 Phys da queue によるボトルネックの解析

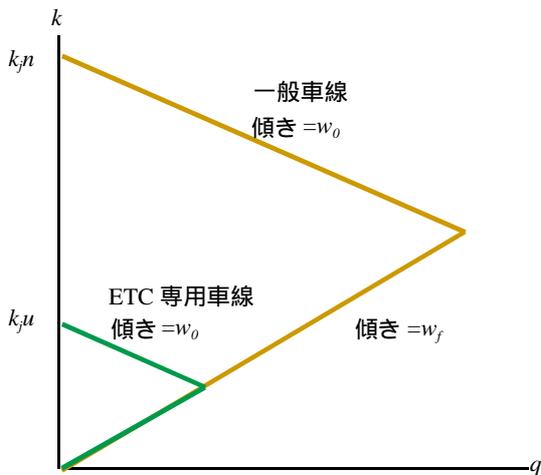


図-6 ETC 専用車線と一般車線の Q-K 特性

Q^* , p , N が与えられたときに式(7)(8)を満たす整数 n と u を見つける組み合わせ問題となるが、常に解が存在するとは限らない。解が存在しない場合は、一般ゲートか ETC 専用ゲートいずれかへの需要がゲート容量を上回り、渋滞が発生する。この渋滞が本線に延伸し、本線をブロックする可能性があるため、以下に示す手順で physical queue として解析することが必要になる。

渋滞の延伸状況を考慮した physical-queue を動的に解析するには、各種の逐次的な交通流シミュレーションがしばしば用いられるが、本研究では Newell¹²⁾による simplified kinematic wave theory を適用する。これは、リンク上の交通密度を、queue に対する上流端への需要と下流端からの流出の累積曲線を用いて図式的に解析する手法で、多くのモデルパラメータを設定しなければならないシミュレーションと比べて非常に簡潔であることが特徴である。

Simplified kinematic wave theory では、図-4 のようなジャム密度 k_j 、自由流側の傾き w_f (=free flow speed の逆数)、渋滞流側の傾き w_0 (=wave speed の逆数)で表される三角形で近似された交通量-密度(Q-K)特性を仮定したとき、wave

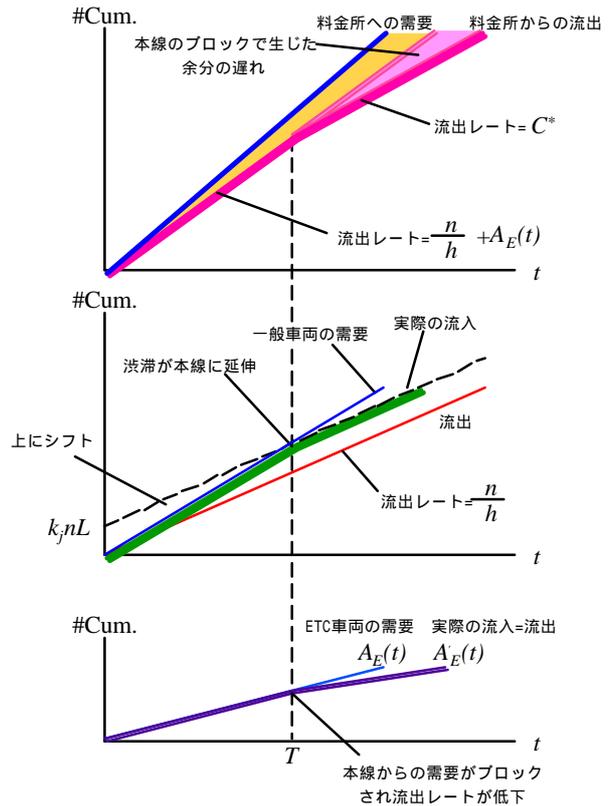


図-7 「専用+一般ゲート」の physical-queue での解析

speed が一定となる性質を利用する。すなわちリンク長を L とすると、図-5 に示すように、ボトルネック流出交通量の累積曲線を右に $w_0 L$ 、上に $k_j L$ だけ平行移動した曲線と、需要累積曲線のいずれか交通量が小さい方をつないだ曲線が、実際にその queue に流入する交通量となり、渋滞が queue の上流端に達して流入をブロックする状況を再現できるというものである。

ここでは Newell の手法を簡略化して、ETC 料金所の解析を以下に示す(a) (c)の手順で行う。まず ETC 専用車線と一般車線の Q-K 特性を、図-6 のように仮定する。すなわち ETC 専用車線の数 u としたとき、一般車線はジャム密度が $k_j n$ 、ETC 専用車線は $k_j u$ で表される。このとき専用ゲートと一般ゲートの容量はそれぞれ n/h , u/h_c で表される。通常は L に相当するゲート手前の料金所部分の区間長が比較的短いいため、free flow speed で L を通過する時間 $w_f L$ と wave speed で L を通過する時間 $w_0 L$ は数秒十数秒程度となり、これらは無視できる。図-7 に解析手順を図示する。なお説明では便宜的に、ETC 専用車線では渋滞せず、一般車線の渋滞が本線に延伸するものとしている。

- (a) 全体の需要を ETC 車両の混入率 p を用いて、一般車両(図-7 中)と ETC 車両(図-7 下)に分離し、一般車線

を physical-queue として解析する．すなわち流出の累積曲線を上に kpL だけシフトした線と一般車両の需要累積曲線がはじめに交差する時刻 T が、渋滞が本線に達した時点となる．

- (b) このとき本線から一般車線への需要は n/h で示される一般ゲートの合計容量となっているので、本線から ETC 専用車線への需要は一般車両と ETC 車両の構成割合 $p/(1-p)$ をかけたものとなる．したがって、時刻 T より ETC 車線への需要 $A_E(T)$ を、次式(10)で与えられる流入レート $A_E(T)$ に置き換える．

$$A_E'(t) = \frac{p}{1-p} \frac{n}{h} \quad (10)$$

- (c) 需要の低下により、時刻 T には、ETC ゲートからの流出レートが低下し、料金所全体の見かけの容量が低下する．見かけの容量 C^* は次式(11)で表される．

$$C^* = \frac{1}{1-p} \frac{n}{h} \quad (11)$$

なお一般車線より先に ETC 車線での渋滞が上流に延伸する場合は、それぞれの queue の立場が逆になり、料金所全体の見かけの容量 C^* は次式(12)となる．

$$C^* = \frac{1}{p} \frac{u}{h_c} \quad (12)$$

(3) 「専用+混用+一般ゲート」での運用

この場合は、さらに次の 3 通りの状態に区別して解析する．

- (a) 専用ゲートの待ち時間が他よりも短い状態．
 (b) 専用ゲートの待ち時間が他と同じ状態．
 (c) 専用ゲートと混用ゲートでの待ち時間が一般ゲートよりも長い状態．

ドライバーはもっとも待ち時間が短いゲートを選択すると仮定すれば、(a)および(c)の場合は ETC 車両と一般車両が同じゲートに並ばないため、前節で述べた排他的な 2 つの physical-queue による解法が適用できる．

(b)については「混用+一般ゲート」での運用の場合と同様に利用者均衡状態を仮定して、ETC ゲート設置によ

る容量の増加割合 r を、次のように導出できる．

$$Xh = Yh + Zh_c = Wh_c \quad (13)$$

$$\frac{mZ + uZ}{nX + m(Y+Z) + uW} = p \quad (14)$$

ただし、

W : ETC 専用ゲートに並ぶ車両台数/ゲート、
 u : ETC 専用ゲートの数．

これより、 Y, Z, W をそれぞれ X の関数として表し、次式(15)の ETC 料金所の容量増加割合に代入すると、ここでも式(4)と同じ結果を得る．

$$r = \frac{nX + m(Y+Z) + uW}{(n+m+u)X} \quad (15)$$

$$= \frac{h}{(1-p)h + ph_c} \quad \text{式(4)と同型}$$

すなわち、容量の増加割合はゲートの構成によらず、混入率 p の関数として表される．

利用者均衡状態、すなわち(b)の境界条件を考える．(a)は専用ゲート数が u 、一般ゲート数が $n+m$ の場合と等価であり、また(c)は専用ゲート数が $u+m$ 、一般ゲート数が n の場合と等価であることから、式(6)と同様の手順で混入率 p の下限値 p^- と上限値 p^+ はそれぞれ次式(16)(17)として求められる．

$$p \geq p^- = \frac{1}{1 + \frac{n+m}{u} \frac{h_c}{h}} \quad (16)$$

$$p \leq p^+ = \frac{1}{1 + \frac{n}{m+u} \frac{h_c}{h}} \quad (17)$$

3. ケーススタディによる ETC 整備効果の評価

ここでは前章で述べた解析手法を用い、

- ・ケース 1：都市間高速道路での料金バリアにみられるような、ゲート数が多い料金所の評価．
- ・ケース 2：都市内高速道路の端末料金所にみられ

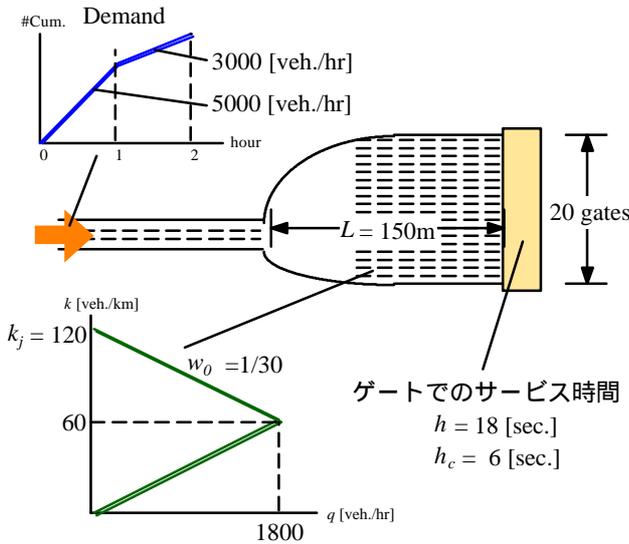


図-8 ケース1の基本設定

ような、ゲート数が少ない料金所の評価。

の2つのケーススタディを通して、ETC導入のあり方について考察する。

(1) ケース1：ゲート数が多い料金所の評価

図-8はケース1の基本設定である。すなわち、

- ・ゲート総数 20
- ・本線車線数 3
- ・料金所手前区間長 $L = 150 \text{ m} = 0.15 \text{ km}$
- ・1車線のジャム密度 $k_j = 120 \text{ [台/km]}$
- ・1車線の臨界密度 $k_c = 60 \text{ [台/km]}$
- ・1車線の容量 $Q_c = 1800 \text{ [台/時]}$
- ・一般車両のゲートでのサービス時間 $h = 18 \text{ 秒}$
- ・ETC車両のゲートでのサービス時間 $h_c = 6 \text{ 秒}$

が与えられており、このQ-K特性より $w_0 = 1/30$ と求められる。また一般車両とETC車両のそれぞれのサービス時間より、一般ゲートの容量は200[台/時]、ETC専用ゲートの容量は600[台/時]と計算される。

ETC導入以前の状態は、すべて一般ゲートでの運用なので、料金所容量 C は

$$C = 20/h = 20 \times 3600/18 = 4000 \text{ [台/時]} \quad (18)$$

となり、ピーク需要を下回るため渋滞が発生している。この渋滞による総遅れ時間 D は図-9に示すように1000[台*時]、一台あたりの平均遅れ時間は7.5[分]である。

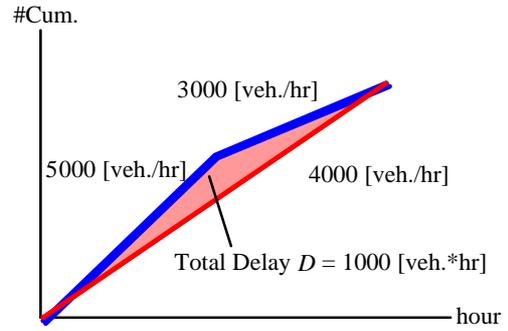


図-9 ETC導入前の渋滞状況

(i) 「混用+一般ゲート」でのETC導入効果

前章での議論より、ETCを混用ゲートで運用する場合は、容量の改善割合 r は式(4)で示されるとおり、ゲートの構成によらず混入率 p の関数となる。したがって、混入率が5%、10%、30%の場合のそれぞれの料金所容量 C^5 、 C^{10} 、 C^{30} を求めると、

$$C^5 = 4000 \times 18 / ((1-0.05) \times 18 + 0.05 \times 6) = 4138 \text{ [台/時]} \quad (19)$$

$$C^{10} = 4000 \times 18 / ((1-0.1) \times 18 + 0.1 \times 6) = 4286 \text{ [台/時]} \quad (20)$$

$$C^{30} = 4000 \times 18 / ((1-0.3) \times 18 + 0.3 \times 6) = 5143 \text{ [台/時]} \quad (21)$$

となる。このときの渋滞によるそれぞれの総遅れ時間は、簡単なpoint-queueによる解析から、

$$D^5 = 757 \text{ [台*時]} \quad (22)$$

$$D^{10} = 555 \text{ [台*時]} \quad (23)$$

$$D^{30} = 0 \text{ [台*時]} \quad (\text{渋滞なし}) \quad (24)$$

と求められ、渋滞削減の効果が評価できる。また1台あたりの平均遅れ時間 d については、一般車両もETC車両も等しいので、次式の通りとなる。

$$d^5 = 757/8000 = 0.947 \text{ [時間]} = 5.68 \text{ [分]} \quad (25)$$

$$d^{10} = 555/8000 = 0.694 \text{ [時間]} = 4.16 \text{ [分]} \quad (26)$$

$$d^{30} = 0 \text{ [分]} \quad (27)$$

注目すべきは、混入率が向上するにつれ、車載機の費用を負担しているETC車両だけでなく、負担していない一般車両も同様に待ち時間が減少することであり、両者の公平性を保証するために、料金の差別化などの議論が必要なことを示唆している。

また、ここでのピーク需要に対して十分な料金所容量 C^* を与える p^* を求めると、式(4)から次の結果を得る。

表-1 ピーク需要に対し十分な容量を持つゲート構成

混入率 p	ETC 専用ゲート数 u	一般ゲート数 n
0.00-0.32	-	-
0.32-0.36	3	17
0.36-0.48	4	16
0.48-0.60	5	15

$$C^* = 5000 = 4000 * \frac{h}{(1-p^*)h + h_c} \quad (28)$$

$$\therefore p^* = 0.277 \quad (29)$$

さらに利用者均衡の仮定が成り立つための、混入率の上限 p^+ を求めると、式(6)より、

$$p^+ = \frac{1}{1 + \frac{20-m}{m} * \frac{6}{18}} \quad (30)$$

となる。仮に ETC 混用ゲートを 1 カ所または 2 カ所設置する場合、式(30)は、

$$p^+ = 0.159 < p^* \quad (31)$$

$$p^+ = 0.286 > p^* \quad (32)$$

となる。

混用ゲートが 1 カ所の場合、混入率が 15.9%以上になると混用ゲートの待ち時間が一般ゲートのそれよりも長くなり、結果的に混用ゲートからの渋滞が本線交通をブロックすることになる。混入率が p^* 以上であれば、ここでのピーク需要に対し渋滞は発生しないので、この場合は 2 カ所で十分な効果を得ることができ、3 カ所以上は不要といえる。

(ii) 「専用+一般ゲート」での ETC 導入効果

このケーススタディにおいて式(7) (9)を満たす ETC 専用ゲート数 u と一般ゲート数 n の組み合わせの一部を表-1 に示す。これからもわかるとおり、混入率が 32%よりも小さい範囲では、ここでのピーク需要に対して渋滞が発生しないゲートの構成は存在しないため、渋滞が発生することになる。

混入率が比較的小さいときの ETC 導入効果については、 $p=10\%$ の場合を例にとって考える。このときピーク時の需要 5000[台/時]のうち ETC 車両の分は 500[台/時]となるので、これを捌くためには 1 カ所の ETC 専用ゲートを設ければよいことになる。このとき一般車両のピーク需要

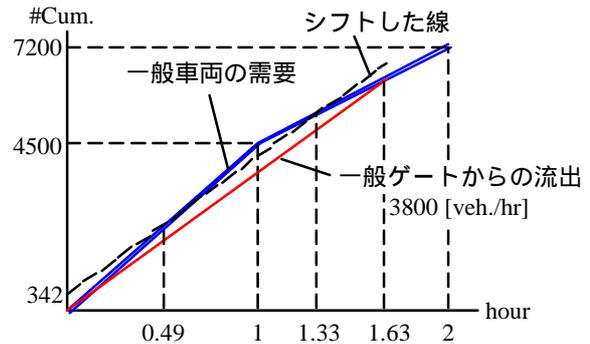


図-10 一般車線のphysical-queueとしての解析

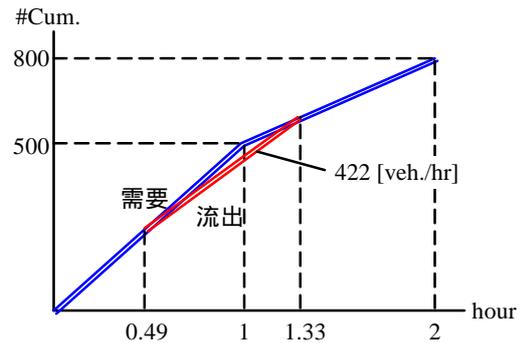


図-11 ETC車両の需要と流出

4500[台/時]に対し、一般ゲートの合計容量は 3800[台/時]であるため、渋滞が発生する。

図-10 は一般車線を physical-queue として解析した結果である。すなわち一般車両の需要累積曲線と一般ゲートからの流出累積曲線を上方に

$$k_p n L = 120 * 19 * 0.15 = 342 \text{ [veh.]} \quad (33)$$

だけシフトした線が交差する 0.49 時間の時点から 1.33 時間の時点まで、渋滞が本線に延伸している。

この間の ETC ゲートの流出レートは、式(10)より

$$\frac{0.1}{1-0.1} * \frac{19}{18} * 3600 = 422$$

と求められる。このときの ETC 車線の需要と流出の累積交通量を図-11 に示す。

このケースでは、料金所全体での総遅れ時間 D^{10} は図-10 と図-11 での需要と流出交通量の累積曲線で囲まれた部分の面積、すなわち一般車両の総遅れ時間 D_N^{10} と ETC 車両の総遅れ時間 D_E^{10} の和として次のように求められる。

$$D_N^{10} = 573 \text{ [台*時]} \quad (35)$$

$$D_E^{10} = 16 \text{ [台*時]} \quad (36)$$

$$D^{10} = D_N^{10} + D_E^{10} = 589 \text{ [台*時]} \quad (37)$$

さらに一般車両と ETC 車両それぞれの一台あたりの平均遅れ時間 d_N^{10} と d_E^{10} を求めると、次のようになる。

$$d_N^{10} = D_N^{10}/7200 = 0.796 \text{ [時間]} = 4.78 \text{ [分]} \quad (38)$$

$$d_E^{10} = D_E^{10}/800 = 0.208 \text{ [時間]} = 1.25 \text{ [分]} \quad (39)$$

混用ゲートと比較するために、混入率が 5%、30% の場合についても総遅れ時間 D 、一般車両の平均遅れ時間 d_N 、および ETC 車両の平均遅れ時間 d_E を同様に求めた結果をそれぞれ式(40) (42)、式(43) (45)に示す。なお専用ゲートの数は ETC 車両の需要に応じて、それぞれ 1 カ所と 3 カ所にしている。

$$D^5 = 970 \text{ [台*時]} \quad (40)$$

$$d_N^5 = 7.5 \text{ [分]} \quad (41)$$

$$d_E^5 = 4 \text{ [分]} \quad (42)$$

$$D^{30} = 54 \text{ [台*時]} \quad (43)$$

$$d_N^{30} = 0.6 \text{ [分]} \quad (44)$$

$$d_E^{30} = 0 \text{ [分]} \quad (45)$$

いずれの場合も ETC 導入による渋滞緩和効果が認められるが、総遅れ時間については ETC 混用ゲートの場合と比べて大きい値になってしまう。この場合も依然として、ETC 車両の車載機に対する費用負担が、一般車両の利益につながっているが、ETC 車両の平均遅れ時間を比べると、いずれも混用ゲートの場合より小さく、また一般車両についてはいずれも大きくなっており、時間短縮の面では差別化されていることがわかる。

さらに混入率が 1% と非常に低い場合を解析すると、総遅れ時間 D^1 、一般車両の平均遅れ時間 d_N^1 、および ETC 車両の平均遅れ時間 d_E^1 はそれぞれ式(46) (48)で示される値となり、ETC 導入前の状況よりも渋滞が悪化していることがわかる。

$$D^1 = 1186 \text{ [台*時]} \quad (46)$$

$$d_N^1 = 8.94 \text{ [分]} \quad (47)$$

$$d_E^1 = 5.13 \text{ [分]} \quad (48)$$

(2) ケース 2：ゲート数の少ない料金の評価

図-12 に基本設定を示す。すなわち

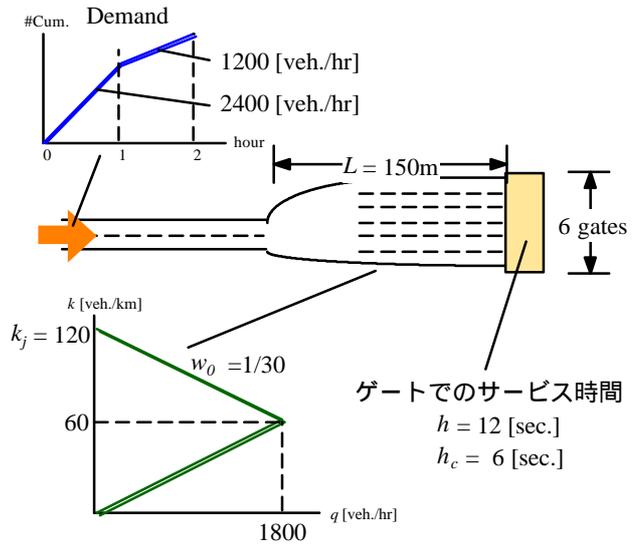


図-12 ケース2の基本設定

- ・ゲート総数 6
- ・本線車線数 2
- ・料金所手前区間長 $L = 150 \text{ m} = 0.15 \text{ km}$
- ・一般車両のゲートでのサービス時間 $h = 12 \text{ 秒}$
- ・ETC 車両のゲートでのサービス時間 $h_c = 6 \text{ 秒}$

となっている。本線の Q-K 特性はケース 1 と同じで、 $w_0 = 1/30$ である。また一般車両のゲートでのサービス時間は都市内高速道路は定額料金であることが多いのを考慮して、ケース 1 より小さく設定した。よって、一般ゲートの容量は 300[台/時]となる。

ETC 導入以前の料金所容量 C は

$$C = 6/h = 6 \cdot 3600/12 = 1800 \text{ [台/時]} \quad (49)$$

となり、ピーク需要を下回るため 総遅れ時間 D が 600 [台*時]、一台あたりの平均遅れ時間 d が 10 [分] という規模の渋滞が発生している。

(i) 「混用 + 一般ゲート」での ETC 導入効果

ケース 1 にならい、混入率が 10%、30%、50% の場合のそれぞれの料金所容量 C^{10} 、 C^{30} 、 C^{50} を求めると、

$$C^{10} = 1800 \cdot 12 / ((1-0.1) \cdot 12 + 0.1 \cdot 6) = 1894 \text{ [台/時]} \quad (50)$$

$$C^{30} = 1800 \cdot 12 / ((1-0.3) \cdot 12 + 0.3 \cdot 6) = 2118 \text{ [台/時]} \quad (51)$$

$$C^{50} = 1800 \cdot 12 / ((1-0.5) \cdot 12 + 0.5 \cdot 6) = 2400 \text{ [台/時]} \quad (52)$$

となり、それぞれの総遅れ時間と 1 台あたりの平均遅れ時間は、

表-2 ピーク需要に対し十分な容量を持つゲート構成

混入率 p	ETC 専用ゲート数 u	一般ゲート数 n
<0.5	-	-
$=0.5$	2	4
$0.5-0.67$	3	3
$0.67-1.00$	4	2

$$D^{10} = 437 \text{ [台*時]} \quad (53)$$

$$D^{30} = 184 \text{ [台*時]} \quad (54)$$

$$D^{50} = 0 \text{ [台*時]} \quad (\text{渋滞なし}) \quad (55)$$

$$d^{10} = 7.29 \text{ [分]} \quad (56)$$

$$d^{30} = 3.07 \text{ [分]} \quad (57)$$

$$d^{50} = 0 \text{ [分]} \quad (58)$$

と求められる。ケース 1 と同様に、混入率が大きくなるほど渋滞の緩和効果も高くなるが、ケース 1 が 27.7%の混入率で渋滞がなくなったのに対し、ケース 2 では 50%まで大きくなると渋滞が解消しない結果となった。また混入率が 50%の場合、式(6)で求められる、利用者均衡が成り立つための普及率の上限が 50%を越えるためには、次式より混用ゲートが2カ所必要となる。

$$p^+ = \frac{1}{1 + \frac{6-2}{2} * \frac{6}{12}} = 0.5 \geq p^* \quad (59)$$

(ii) 「専用+一般ゲート」での ETC 導入効果

ケース 2 において式(7) (9)を満たす ETC 専用ゲート数 u と一般ゲート数 n の組み合わせの一部を表-2 に示す。混入率が 50%よりも小さい範囲では、ここでのピーク需要に対して渋滞が発生しないゲートの構成は存在しないため、渋滞が発生することになる。

混用ゲートと比較するため、混入率が 10%、30%、50%のそれぞれの場合について、総遅れ時間 D と一般車両の平均遅れ時間 d_N 、および ETC 車両の平均遅れ時間 d_E を求めた結果を以下に示す。なお、専用ゲートの数は 10%の場合が 1カ所で、その他は 2カ所としている。

$$D^{10} = 867 \text{ [台*時]} \quad (60)$$

$$d_N^{10} = 14.8 \text{ [分]} \quad (61)$$

$$d_E^{10} = 11.4 \text{ [分]} \quad (62)$$

$$D^{30} = 718 \text{ [台*時]} \quad (63)$$

$$d_N^{30} = 13.0 \text{ [分]} \quad (64)$$

$$d_E^{30} = 9.58 \text{ [分]} \quad (65)$$

$$D^{50} = 0 \text{ [台*時]} \quad (66)$$

$$d_N^{50} = 0 \text{ [分]} \quad (67)$$

$$d_E^{50} = 0 \text{ [分]} \quad (68)$$

いずれの場合も、混入率が大きくなると遅れ時間が少なくなってくること、また一般車両よりも ETC 車両の遅れの方が小さくなっていることでは、ケース 1 と同様の結果となっている。しかしながら、このケースでは混入率が 10%でも、総遅れだけでなく、一般車両と ETC 車両のいずれの平均遅れ時間も ETC 導入前より増加しており、渋滞が悪化していることがわかる。

4. まとめ

本研究では、ゲートの一部が ETC 化された料金所の容量を解析的に求める手法について述べ、次のような知見を得た。

- ・混用+一般、あるいは専用+混用+一般ゲートでの運用では、利用者均衡状態を仮定すると、ETC 化による容量の増加割合はゲート構成に関係なく、混入率の関数となる。
- ・専用+一般ゲートの運用では、どちらかのゲートでの渋滞が本線に達した時点で、もう一方のゲートへの需要が低下し、料金所全体の見かけの容量は各ゲート容量の合計よりも小さくなる。
- ・専用+混用+一般ゲートでの運用でも、専用ゲートの待ち時間が他のゲートよりも小さい場合、あるいは一般ゲートの待ち時間が他のゲートよりも小さい場合に、渋滞が本線に達すると上と同じ状況となる。それ以外の状況では利用者均衡状態が仮定でき、ETC 化による容量の増加割合はゲート構成に関係なく、混入率の関数となる。

さらに本研究の手法をケーススタディに適用し、次のような結果を得た。

- ・ETC の混入率が向上するにつれ、混用+一般ゲートおよび専用+一般ゲートいずれの運用方式でも、総遅れ時間が減少する。
- ・一般車両と ETC 車両それぞれの平均遅れ時間も同様に

減少するので、ETC の普及は一般車両にとっても利益をもたらす。

- ・混入率が比較的低い状況では、総遅れ時間でみると混用+一般ゲートでの運用の方が渋滞緩和の効果が大きい。しかしながら、一般車両と ETC 車両の遅れ時間が等しいため、ETC 車両にとっては時間短縮のメリットが感じられない。
- ・混入率が低い状況では、専用+一般ゲートでの運用は総遅れ時間の面では不利であるが、ETC 車両の平均遅れ時間は混用ゲートの場合よりも小さくなり、ETC 車両にとっての時間短縮のメリットがある。
- ・混入率が非常に低い状況で一般ゲートの代わりに専用ゲートを設置すると、ETC 導入前よりも渋滞を悪化させる結果となる。とくに都市内高速の料金所のような比較的ゲート数が少ない場所では、一般ゲート数が減る割合が大きいため、都市間高速の料金バリアのような大規模な料金所と比べて、より大きな混入率が達成されなければ、ETC の導入効果が期待できない。
- ・混用ゲートの数については必要十分な値があり、これより多く混用ゲートを設置することは無駄である。
- ・専用+一般ゲートによる運用は混入率が一定以上にならないと、渋滞を解消できるゲート構成は存在しない。

これより、ETC の導入が大きな成果をもたらすには、なにより混入率の向上を図ることが重要であることがわ

かる。また一部の ETC 車両が車載機の費用を負担していることにより、一般車両も時間短縮の恩恵を受けることも示されており、これはすなわち ETC 車両と一般車両の料金を差別化する論拠となりうるものである。

利用者、道路管理者が ETC 導入のインセンティブを持つためには、渋滞削減効果だけではなく、通行料金のディスカウントや柔軟な料金体系の導入、あるいは ETC 化による人件費の削減効果など、多くの視点を取り込んだ戦略が必要である。今後の議論が待たれる。

参考文献

- 1) G. F. Newell : A simplified theory of kinematic waves in highway traffic, Part I: General theory, *Transpn. Res.-B*, Vol. 278, No. 4, pp. 281-287, 1993
- 2) G. F. Newell : A simplified theory of kinematic waves in highway traffic, Part II: Queuing at freeway bottlenecks, *Transpn. Res.-B*, Vol. 278, No. 4, pp. 289-303, 1993

(1999. 11. 8 受付)

A THEORETICAL ANALYSIS FOR THE CAPACITY OF TOLL PLAZA PARTIALLY WITH ETC TOLLGATES

Ryota Horiguchi and Masao Kuwahara

This paper, at first, describes about a theoretical analysis for the capacity of toll plaza with both ETC and non-ETC tollgates. The analysis described here considers not only the number and the type (“ETC only”, “non-ETC only” or “both together”) of tollgates but also the stock space before tollgates and the penetration of ETC equipment on vehicles. In case of the toll plaza with “non-ETC only” and “both together” tollgates, this analysis concludes that the improvement of capacity does not depend on any combination of tollgates but on the penetration rate of ETC equipment. This analysis also tells that the capacity of the toll plaza with “ETC only” and “non-ETC only” tollgates will be worse than the one of all “non-ETC only” tollgates in case of heavy traffic but low ETC penetration rate. In the last part, a simulation model to evaluate ETC toll plaza is developed and verified by comparing with the theoretical analysis.