

ETC ゲートが設置された料金所の容量に関する理論的解法*

A theoretical analysis for capacity of toll plaza with ETC gates

堀口良太**, 桑原雅夫***

by Ryota Horiguchi and Masao Kuwahara

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、都市間高速での通常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をとるだけでは不十分である。これは図1のような、通常ゲートからの渋滞が本線に達しており、ETC 車両も渋滞に巻き込まれているケースを考えてみても明らかである。



図1:ETC 料金所の容量が各ゲート容量の総和よりも低下しているケース

本稿では、ETC 専用/混用ゲートの数や料金所手前での渋滞の延伸を考慮した ETC 料金所の容量算定について、queueing theory を用いた理論的解法を述べている。このような解法は、ETC の普及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。

また読者の理解のため、計算例を付記する。

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、ドライバーがゲートを選択すると仮定すると、式(1)の関係が成り立つ。

$$Xh = Yh + Zh_c \quad \text{--- (1)}$$

X : 一般ゲートに並ぶ車両台数

Y : 混用ゲートに並ぶ一般車両台数

Z : 混用ゲートに並ぶ ETC 車両台数

h : 一般車両のゲートでのサービス時間

h_c : ETC 車両のゲートでのサービス時間

n : 一般ゲートの数

m : 混用ゲートの数

また、需要に対する ETC 車両の混入割合、すなわち普及率 p を式(2)で表す。

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

ETC ゲートを設置したことによる料金所容量の増加割合 γ は式(3)、すなわち

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

のように表され、式(1)と(2)より Y と Z をそれぞれ X の関数として(3)に代入すると式(4)を得る。

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

* キーワード: 交通流, 交通容量, ITS

** 正会員, 工博, (株)熊谷組エンジニアリング本部, 東京都新宿区津久戸町2-1, Tel. 03-5261-5526, e-mail rhoriguc@ku.kumagaigumi.co.jp

*** 正会員, Ph.D, 東京大学生産技術研究所, 東京都港区六本木7-22-1, Tel. 03-3402-6231, e-mail kuwahara@nishi.iis.u-tkyo.ac.jp

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、普及率 p 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。また一般に $h > h_c$ なので、 γ は 1 より大きい。

この場合の ETC 料金所の容量改善効果は、簡単な point-queue で評価できる。すなわち図 2 のように容量が増加した分だけ、料金所を流出する交通量累積曲線の傾きが大きくなり、ハッチングで示される面積の時間短縮効果が得られる。

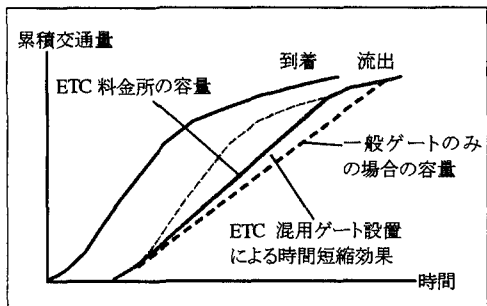


図2: Point-queue による ETC 料金所の評価

当然ながら、混用ゲートでの待ち時間が一般ゲートのそれよりも大きい場合、ETC 車両には選択の余地がないので式(1)は成立せず、従って式(4)も成立しない。このような場合は、次節に述べるように排他的な 2 つの queue として料金所の待ち行列を扱うことで解析可能である。

(2)「専用＋一般ゲート」での運用

この場合は図 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 queue に分けて扱う。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る。

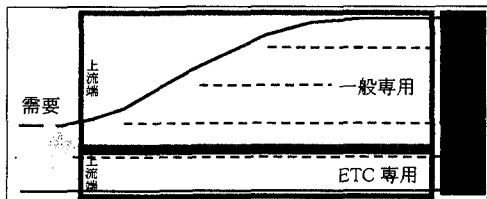


図3: 排他的な2つの queue として表現する

このとき、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と考える。

渋滞が上流に延伸する状況を扱うには physical-queue を解析する必要がある。Newell^[12]は図 4 のような三角形で近似された交通量-密度(Q-K)特性を仮定した場合に、ボトルネックを先頭とする渋滞が queue の上流端に達して流入をブロックする状況を図式的に求める手法を提案している。

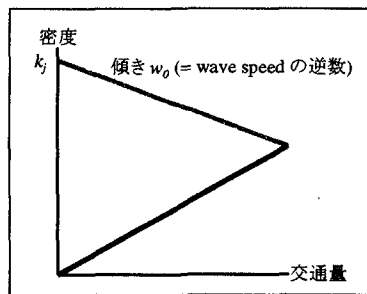


図4: 三角形で近似された交通量-密度(Q-K)特性

これはリンク長を 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るものである。

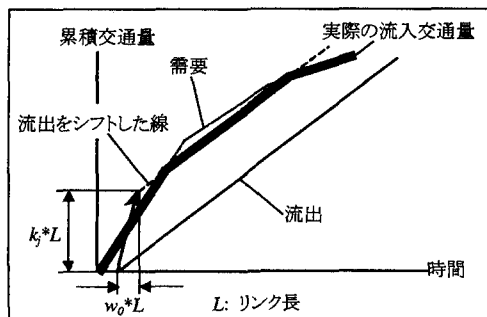


図5: Physical-queue によるボトルネックでの渋滞の解析

ここでは Newell の手法を用いて、ETC 料金所の解析を次の手順で行う。

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。また専用ゲートと一般ゲートそれぞれの容量の合計を C^E , C^N 、渋滞しないそれぞれの queue を通過する所要時間を t_0^E , t_0^N とする。図 7 に解析手順を図示する。

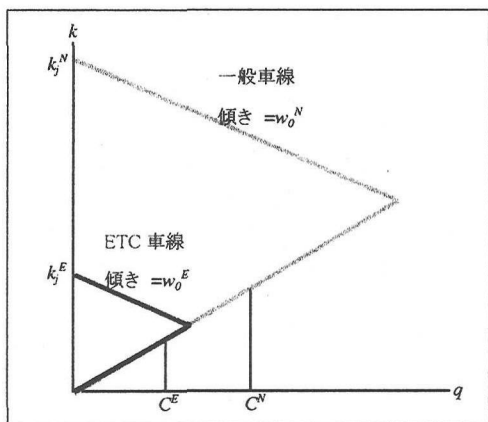


図6:ETC 専用車線と一般車線のQ-K特性

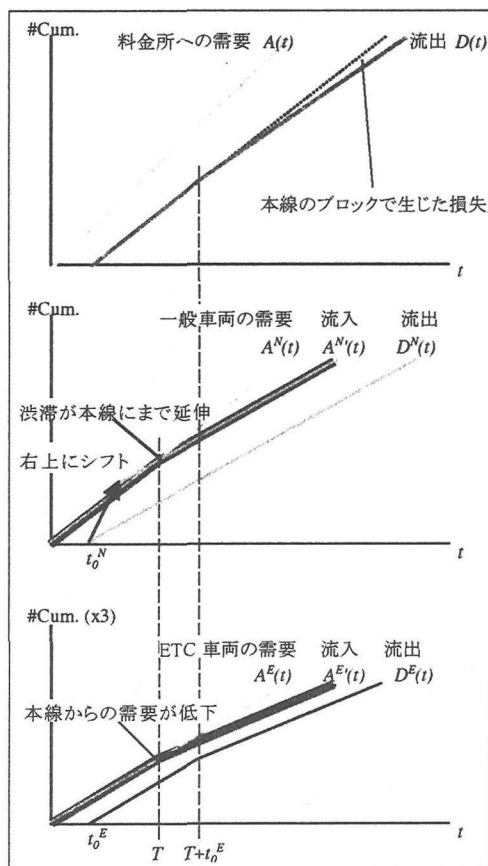


図7:排他的な2つのphysical-queueによるETC料金所の解析

- (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)に分離する。
- (b) 一般車両とETC車両のqueueをそれぞれ

physical-queueとして解析する。

- (c) 時刻 T に、一般車線での渋滞が上流端に達した時点で、混入率 p とボトルネック容量に応じて、ETC車線への需要 $A^E(T)$ を、式(5)で与えられる流入レート $A^{E'}(T)$ に置き換える。

$$A^{E'}(t) = \frac{p}{1-p} C^N \quad \text{--- (5)}$$

- (d) 需要の低下により、時刻 $T + t_0^E$ には、ETCゲートからの流出レートが低下し、同時にETC料金所の容量 C^* が低下する。すなわち、

$$C^* = \begin{cases} C^N + C^E & (t \leq T + t_0^E) \\ \frac{1}{1-p} C^N & (t > T + t_0^E) \end{cases} \quad \text{--- (6)}$$

図7上のグラフでハッチングしている部分が、本線がブロックされETC料金所の容量が低下したことによる損失時間である。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の立場が逆になる。

(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通りの状況に場合分けして解析する。

- (a) 専用ゲートの待ち時間が他よりも短い場合。
- (b) 専用ゲートの待ち時間が他と同じ場合。
- (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場合。

ドライバーはもともと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)の場合ではETC車両と一般車両が同じゲートに並ばないため、(2)での排他的な2つのqueueと同様の解法が適用できる。

(b)については、(1)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を、次のように導出できる。すなわち、

$$Xh = Yh + Zh_c = Wh_c \quad \text{--- (7)}$$

$$\frac{mZ + uZ}{nX + m(Y+Z) + uW} = p \quad \text{--- (8)}$$

W: ETC専用ゲートに並ぶ車両台数

u : ETC 専用ゲートの数

より, Y, Z, W をそれぞれ X の関数として表し, 式(9)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.

$$\gamma = \frac{nX + m(Y+Z) + uW}{(n+m+u)X} \quad (9)$$

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

すなわち, 容量の増加割合はゲートの構成によらず, 普及率の関数として表される.

3. ETC 料金所容量の計算例

次の設定で, ゲート構成が「混用 1+一般 4」の場合と「専用 1+一般 4」の場合の容量を求める.

- ・ 一般車両サービス時間…18 秒
- ・ ETC 車両 “ ” … 4 秒
- ・ ETC 普及率 …10%
- ・ 料金所への需要 …1800 台/時

一般車両と ETC 車両のサービス時間より, 一般ゲートと専用ゲートの 1 車線あたりの容量は, それぞれ 200 台/時, 600 台/時となる.

(1) 「混用 1+一般 4」の場合の容量

ETC 化したときの容量増加割合は, ETC 普及率から式(4)で求められるので, 料金所容量 C^* は一般ゲートが 5 車線の場合の容量 1000 台/時に対し, 次のように計算される.

$$C^* = 1000 * 18 / ((1 - 0.1) * 18 + 0.1 * 4)$$

$$= 1084 \quad [\text{台/時}] \quad (10)$$

(2) 「専用 1+一般 4」の場合の容量

この場合は, 料金所手前の区間における Q-K 特性を次のように仮定する.

- ・ 1 車線のジャム密度 k_j …120 台/km
- ・ 1 車線の容量 …1800 台/時
- ・ 1 車線の臨界密度 …60 台/km
- ・ 料金所手前の長さ L …100m
- ・ L を渋滞なしで通過する時間 …12 秒

このとき, Q-K 曲線の渋滞側の傾き w_0 は,

$$w_0 = (120 - 60) / 1800 = 1/30 \quad [\text{時/km}] \quad (11)$$

となるので, 一般車線での解析は図 8 のようになる.

すなわち, 到着する需要の曲線と, 流出の曲線を右と上方向にそれぞれ,

$$w_0 L = 0.1 / 30 = 0.033 \quad [\text{時間}] = 12 \quad [\text{秒}] \quad (12)$$

$$kL = 120 * 4 * 0.1 = 48 \quad [\text{台}] \quad (13)$$

だけシフトした線が交差する 240 秒の時点で, 渋滞が料金所手前区間を超えて本線に延伸する.

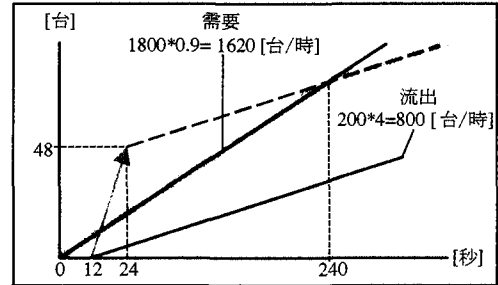


図8: 一般車線の交通量累積図

従って料金所容量 C^* は次のようになる.

$$C^* = 200 * 4 + 600 = 1400 \quad [\text{台/時}] \quad (\sim 240 \text{ 秒}) \quad (14)$$

$$C^* = (200 * 4) / 0.9 = 889 \quad [\text{台/時}] \quad (240 \text{ 秒} \sim) \quad (15)$$

4. まとめ

以上において, 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た. また, 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, ETC 普及率の関数となる.
- ・ 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するので, 料金所の容量が, 各ゲート容量の総和よりも小さくなる.
- ・ 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.

【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