

# ETC 及び一般ゲートを有する高速道路料金所で発生する交通渋滞と特性

駒田 和史, 増倉 秀一, 長谷 隆

静岡大学大学院工学研究科機械工学専攻

## 概要

ETC 及び一般ゲートを有する高速道路料金所付近で発生する交通渋滞及びその特性について研究する. ETC 搭載車が ETC ゲートを通過できなくなる限界密度が存在する. 低密度領域では ETC 搭載車と非 ETC 搭載車はそれぞれの目標ゲートを通過することができ, 高密度領域では各ゲートで ETC 搭載車と非 ETC 搭載車が混在する交通となる. 交通状態はゲート数及び密度増加によって大きく変化する.

## Traffic States and Jams on a Toll Road with Electronic and Traditional Tollgates

Kazuhito Komada, Shuichi Masukura, Takashi Nagatani

Department of Mechanical Engineering, Shizuoka University

## Abstract

We investigate the traffic behavior and jams on two- and three- lanes toll highway with electronic and traditional tollgates. The electronic- and manual- collection vehicles sort themselves out into their respective lanes at low density, while they mix at each tollgate at high density. The traffic states change with the number of gates and the density. We clarify the characteristics of the traffic behavior and jams. We derive the fundamental diagrams and traffic patterns.

## 1 緒言

料金所を含む高速道路には ETC 搭載車と非 ETC 搭載車が混在している. ETC 搭載車は ETC ゲートに, 非 ETC 搭載車は一般ゲートを通過しなければならない. しかし混雑時には目標ゲートに行けずにゲート本来の機能が失われてしまう可能性がある [1]. そこで本論文では二車線及び三車線の高速道路料金所で発生する交通渋滞を研究する.

## 2 高速道路料金所モデル

一般的に車は料金所手前で減速しながら ETC 搭載車は ETC ゲートへ, 非 ETC 搭載車は現金ゲートへ向かって車線変更を試みる. ETC 搭載車は ETC ゲートを通過するためにさらに減速する. 非 ETC 搭載車は一般ゲートで人手による料金收受を行うため, 一旦停止して料金所を通過する. ここでは一旦停止を伴う非 ETC 搭載車の一般ゲート通過を ETC ゲートより

も強い減速度で通過するものと近似する. 料金所通過後の車は速度回復のため加速する. まずゲートを二台及び三台設置した料金所を考える. この高速道路料金所の交通モデルを以下に述べる.

### 2.1 二車線料金所モデル

まず ETC ゲートと一般ゲートが一台ずつ設置されている二車線高速道路を考える. モデル化した二車線料金所モデルを図 1 に示す.

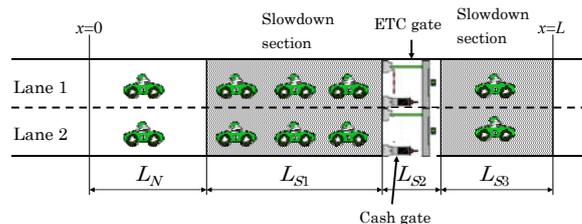


図 1 二車線料金所モデル

第一レーンに自動料金收受システム設置ゲート(ETCゲート), 第二レーンに従来の人手による料金收受ゲート(一般ゲート)を設置する. 自動料金收受システム搭載車(ETC搭載車)はETCゲートを, 従来の人手による料金收受車(非ETC搭載車)は一般ゲートを目指レーンとする. 実際の交通では車は料金所手前で減速し, 目標のゲートに向けて必要ならば車線変更を試みる. 低速で料金所を通過しその後加速していく. 減速して車線変更する区間を $L_{s1}$ とする. ETCゲートと一般ゲートを通過する区間を $L_{s2}$ とする. ただし, 一般ゲートの通過速度はETCゲートより低速とする. 料金所通過後の加速区間を $L_{s3}$ の徐行区間とする. 通常速度で走行する区間を $L_N$ とする.

次に本研究で用いる前進運動と車線変更運動について説明する. 前進運動には最適速度モデル[2-5]を用いる. このモデルは道路上を走行する車とその前方の車間距離によってその最適速度を求め現在の速度と比較し車の加速度を決める. 最適速度モデルは車 $i$ について次式で表される.

$$\frac{d^2 x_i(t)}{dt^2} = a \left\{ V(\Delta x_i(t)) - \frac{dx_i(t)}{dt} \right\} \quad (1)$$

ここで $x_i(t)$ は時間 $t$ における車 $i$ の位置,  $\Delta x_i(t)$ は時間 $t$ における車 $i$ の車間距離,  $V(\Delta x_i)$ は最適速度関数,  $a$ は感応度である. 一般に最適速度関数は, 車間距離に対して単調増加で, 車間距離が十分大きい時最大速度に達し, 安全距離 $x_c$ 付近で急激に変化するような関数である. 以上を満たす関数として本研究では以下のような最適速度関数を用いる.

$$V(\Delta x_i) = \frac{V_{max}}{2} \{ \tanh(\Delta x_i - x_c) + \tanh x_c \} \quad (2)$$

ここで $V_{max}$ は各区間の最大速度あるいは最大制限速度,  $x_c$ は安全距離である. 通常速度区間内 $L_N$ では最大速度 $V_{max} = v_{f,max}$ , 車線変更を試みる減速区間 $L_{s1}$ 内では最大制限速度 $V_{max} = v_{s1,max}$ , 料金所区間 $L_{s2}$ 内でのETCゲートでは最大制限速度 $V_{max} = v_{s2,ETC,max}$ , 一般ゲートでは最大制限速度 $V_{max} = v_{s2,Cash,max}$ , 加速区間 $L_{s3}$ 内では最大制限速度 $V_{max} = v_{s3,max}$ とする.

次に車線変更運動について説明する. 車線変更のための概略図を図2示す.

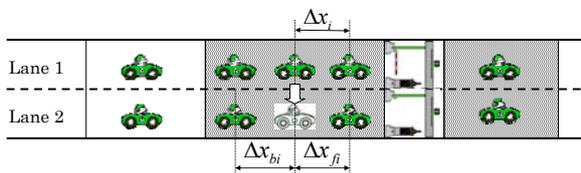


図2 車線変更の概略図

車線変更可能な区間は $L_{s1}$ 区間のみとし, ETC搭載車はETCゲートに, 非ETC搭載車は一般ゲートへ車線変更を試みる. 安全基準とはドライバーが車線変更をするのに十分な車間距離があると認識する基準である. 車は安全基準1を満たした時図2のように真横に移動する.

$$\text{安全基準 1: } \Delta x_{f_i} > x_c v_{s1,max} / 2 \text{ and } \Delta x_{b_i} > x_c v_{s1,max} / 2 \quad (3)$$

ここで $\Delta x_{f_i}$ は車線変更後の前方車間距離,  $\Delta x_{b_i}$ は車線変更後の後方車間距離である.

式(3)を満たさない場合でも実際の交通では車線変更しようと加速や減速を行うため式(3)を拡張する. 拡張した車線変更の概略図を図3に示す.

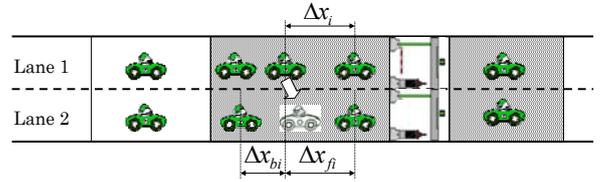


図3 加速減速時の車線変更概略図

加速減速を考慮に入れた安全基準2を満たす場合も車線変更できるものとする.

$$\text{安全基準 2: } \Delta x_{f_i} + \Delta x_{b_i} > x_c v_{s1,max} / 2 \quad (4)$$

$$\text{ただし, } x_i = x_{i-1} + x_c v_{s1,max} / 2 \text{ if } \Delta x_{f_i} \geq \Delta x_{b_i}$$

$$x_i = x_{i-1} - x_c v_{s1,max} / 2 \text{ if } \Delta x_{f_i} < \Delta x_{b_i}$$

車線変更後の前方車間距離が後方車間距離よりも大きい場合は加速し, 一方小さい場合は減速する.

## 2.2 三車線料金所モデル

ETCゲート一台と一般ゲート二台が設置されている三車線高速道路を考える. 三車線料金所モデルを図4に示す.

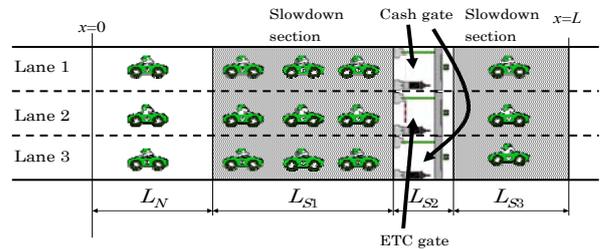


図4 三車線料金所モデル

図4では第二レーンにETCゲート, 第一及び第三レーンに一般ゲートを設置する. ETCゲート設置場所により交通状態とその特性が変化する.

各車はそれぞれの目標ゲートに向かって車線変更を試みる. しかし三車線料金所モデルでは一般ゲートを二台設置しているため, 非ETC搭載車はより空いている方のゲートに向かうものとする. そこで以下の車線変更ルールを追加する. ETCゲートがある第二レーンを非ETC搭載車が走行している場合一般ゲートがある第一もしくは第三レーンへ車線変更を試みる. ドライバーはより前方車間距離が大きいゲートへ車線変更をするものとする. 車が安全基準3を満たしたとき車は真横に車線変更するものとする.

安全基準 3:

$$\Delta x_{f_{r1}} > x_c v_{s1,max} / 2 \text{ and } \Delta x_{b_{r1}} > x_c v_{s1,max} / 2 \text{ if } \Delta x_{f_{r1}} \geq \Delta x_{f_{l1}} \quad (5)$$

$$\Delta x_{f_{l1}} > x_c v_{s1,max} / 2 \text{ and } \Delta x_{b_{l1}} > x_c v_{s1,max} / 2 \text{ if } \Delta x_{f_{r1}} < \Delta x_{f_{l1}}$$

ここで $\Delta x_{f_{r1}}$ 及び $\Delta x_{b_{r1}}$ は右車線変更後の前方及び後方

車間距離,  $\Delta x_{f_i}$ 及び $\Delta x_{b_i}$ は左車線変更後の前方及び後方車間距離である. また真横に車線変更できない場合でも目標ゲートに向かうために二車線料金所モデルと同様に加速減速を行うものとする.

### 3 シミュレーション結果

シミュレーション手法を説明する. 前進運動に式(1), (2)を, 車線変更運動に式(3)-(5)を用いて4次のRunge-Kutta法により,  $\Delta t=1/128$ 刻みで計算時間を $t=50000$ として数値シミュレーションを行う. 道路長 $L$ を $L=1600(LN=400, Ls1=600, Ls2=200, Ls3=400)$ とし, その道路上に初期車間距離 $\Delta x_0$ で車を配置する. 車の台数は $N=L/\Delta x$ である. ETC搭載車と非ETC搭載車の2種類の車を配置する. 境界条件は道路の両端を周期境界とする. ただし $X=0$ のときに確率 $c_{ETC}$ でETC搭載車となり確率 $1-c_{ETC}$ で非ETC搭載車になる. ここで $c_{ETC}$ はETC搭載車の比率である. 通常速度区間M1での最大速度は $v_{f,max}=2.0$ , 減速区間S1内では最大制限速度 $v_{s1,max}=1.0$ , 料金所区間S2内でのETCゲートでは最大制限速度 $v_{s2,ETC,max}=0.3$ , 一般ゲートでは最大制限速度 $v_{s2,Cash,max}=0.1$ , 加速区間S3内では最大制限速度 $v_{s3,max}=1.0$ , 安全距離は $x_c=4.0$ とする. 初期車間距離 $\Delta x_0$ の逆数を初期密度 $\rho_0$ と定義し, 初期密度 $\rho=0.01\sim 0.50$ まで0.01刻みでシミュレーションを行う.

#### 3.1 二車線料金所モデル

ETC搭載車比率 $c_{ETC}=0.5$ の二車線料金所モデルを調べる(図1). 二車線料金所についての基本図を図5に示す. 横軸に平均密度, 縦軸に平均流量をとる.

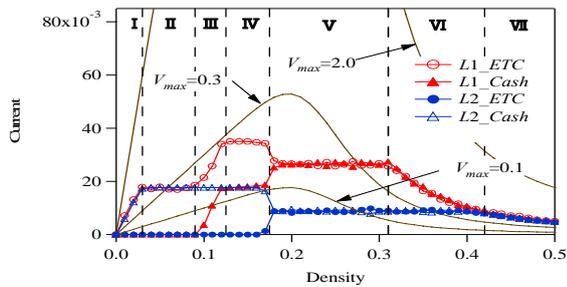


図5 二車線料金所での平均流量図( $c_{ETC}=0.5$ )

ここで○と●は第一及び第二レーン上のETC搭載車の流量を, △と▲は第二及び第一レーン上の非ETC搭載車の流量をそれぞれ表す. 2つの実線は全区間が最大速度 $V_{max}=2.0, 0.3, 0.1$ とした時の理論流量曲線を示す. 交通状態は7つ(I-VII)に分かれる. 低密度領域Iでは密度増加とともに交通流量は線形的に増加する. 中密度領域II-Vでは交通流量は飽和する. さらに高密度領域VI, VIIでは交通流量は密度増加とともに線形的に減少する. 料金所で渋滞が発生する中密度領域について詳しくパターン図と速度分布図を用いて調べる. 図6(a)-(c)はそれぞれの密度 $\rho=0.07, 0.11, 0.14$ のパターン図である. 横軸に車の位

置, 縦軸に車線番号, 点がETC搭載車, 縦棒が非ETC搭載車を示す.

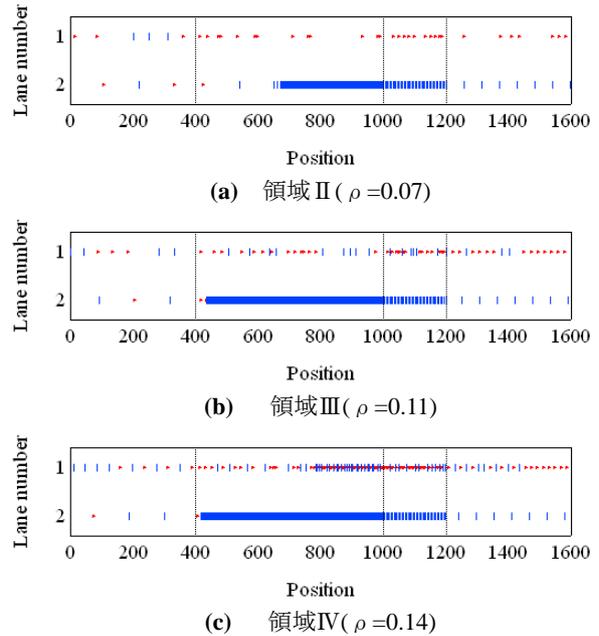
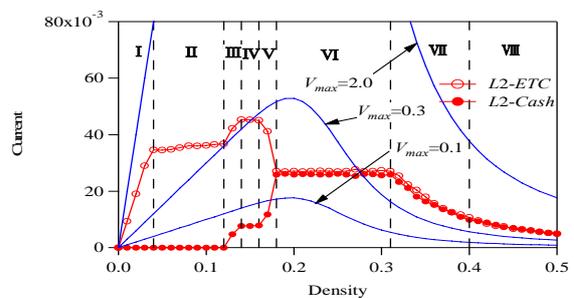


図6 二車線料金所でのパターン図( $c_{ETC}=0.5$ )

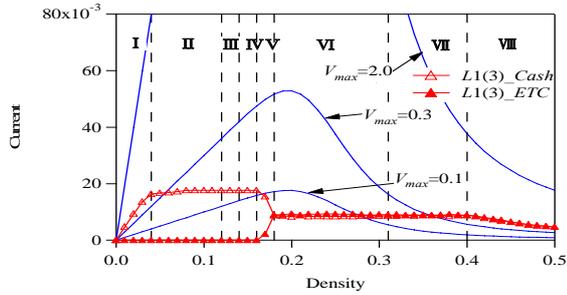
領域IIでは第二レーンでのみ渋滞が発生している. 第一及び第二レーンともに全車が目標ゲートを通過することができる. 領域IIIでは第二レーンでのみ渋滞が発生している. 一般ゲートでは非ETC搭載車のみが通過しているが, ETCゲートではETC搭載車と非ETC搭載車が混在している. 領域IVでは両レーンともに渋滞が発生している. 第一レーンは混在しているが, 第二レーンでは混在していない. 領域Vでは両レーンともに渋滞が発生し, 渋滞長さが通常速度区間まで伸びている. 両レーンともに混在する.

#### 3.2 三車線料金所モデル

ETC搭載車比率 $c_{ETC}=0.5$ について第二レーンにETCゲートが設置されている三車線料金所について研究する(図4). この場合の基本図を図7(a)-(b)に示す. 横軸に平均密度, 縦軸に平均流量をとる. ここで図7(a)はETCゲートが設置されている第二レーン, 図7(b)は一般ゲートが設置されている第一及び第三レーンの平均流量を表す.



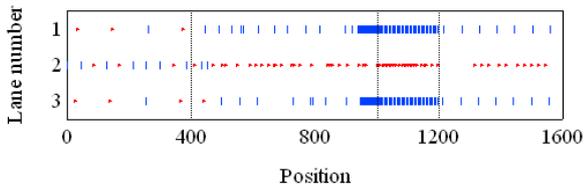
(a) 第二レーン



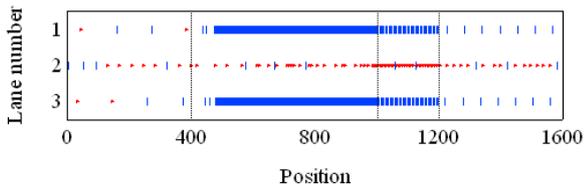
(b) 第一及び第三レーン

図7 三車線料金所での各平均流量図( $c_{ETC}=0.5$ )

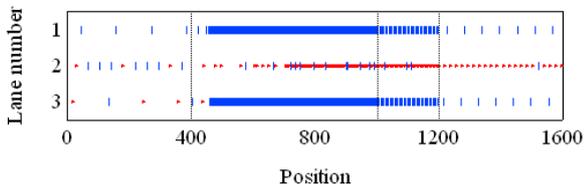
ここで○と●は第一及び第三レーン上の非ETC搭載車とETC搭載車の流量を、△と▲は第二レーン上のETC搭載車と非ETC搭載車の流量を表す。3つの実線は上から全区間が最大速度 $V_{max}=2.0, 0.3, 0.1$ のときの理論流量曲線を示す。交通状態は8つ(I-VIII)に分かれる。低密度領域Iでは密度増加につれ交通流量は線形的に増加する。中密度領域II-VIでは交通流量は飽和する。高密度領域VII, VIIIでは交通流量は密度増加につれ線形的に減少する。中密度領域についてパターン図により調べる。図8(a)-(d)はそれぞれの領域密度 $\rho=0.06, 0.13, 0.15, 0.17$ のパターン図である。横軸に車の位置、縦軸に車線番号、点がETC搭載車、縦棒が非ETC搭載車を示す。



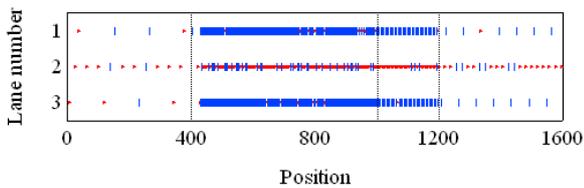
(a) 領域II ( $\rho=0.05$ )



(b) 領域III ( $\rho=0.13$ )



(c) 領域IV ( $\rho=0.15$ )



(d) 領域V ( $\rho=0.17$ )

図8 三車線料金所でのパターン図( $c_{ETC}=0.5$ )

領域IIでは一般ゲートがある第一及び第三レーンで渋滞が発生するがETCゲートがある第二レーンでは渋滞は発生しない。全レーンともETC搭載車と非ETC搭載車は各目標ゲートを通過することができる。領域IIIでは第一及び第三レーンで渋滞が伸びている一方、第二レーンでは渋滞は発生しない。第一及び第三レーンでは非ETC搭載車が目標ゲートを通過することができるが、第二レーンでは非ETC搭載車が混在し始める。領域IVでは全レーンで渋滞が発生しているが第二レーンのみでETC搭載車と非ETC搭載車が混在している。領域Vでは全レーンで渋滞し、ETC搭載車と非ETC搭載車が混在している。領域VIでは全てのレーンでETC搭載車と非ETC搭載車が完全に混在し、渋滞は通常速度区間まで達している。

## 4 結言

二車線及び三車線料金所の交通モデルを提案し、このモデルを用いて交通渋滞に関するシミュレーションを行い以下の結果を得た。

- 1) ETC搭載車と非ETC搭載車が混在する二車線及び三車線高速道路料金所を最適速度モデルとレーンチェンジ規則を用いてモデル化した。
- 2) 二車線及び三車線高速道路料金所付近の交通状態を明らかにし、交通流量曲線(基本図)を導出した。
- 3) ゲート数及び密度増加に大きく交通状態が依存していることを明らかにした。

本研究といくらか類似した研究としては、セルオートマトンモデルを使った織り込み交通の研究があるが、最適速度モデルやセルオートマトンモデルを使った高速道路料金所のシミュレーションに関する研究はほとんどなく、また実際に比較できるデータも見つからない。今後実際のデータと比較することが必要である。

## 参考文献

- 1) 西成活裕：渋滞学，新潮選書（2006）13-82.
- 2) M.Bando, K.Hasebe, A.Nakayama, A.Shibata, and Y.Sugiyama, Phys.Rev.E51(1995) 1035-1042
- 3) 杉山雄規：交通流の物理，ながれ，第22巻（2003）95-108.
- 4) 佐宗章弘：交通流における圧縮性流体力学，ながれ，第22巻（2003）117-122.
- 5) Nagatani, T.: The physics of traffic jam, Rep. Prog. Phys. 65 (2002) 1331-1386.