

拡大車線料金所で発生する交通渋滞と特性

駒田 和史, 長谷 隆

静岡大学大学院 工学研究科 機械工学専攻

概要

拡大車線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. 交通状態は流入密度及びゲート数によって変化する. 料金所手前の渋滞はレーン数と制限速度との相互作用により引き起こされる. 交通流量は低密度領域では直進ゲートから飽和し, 流量飽和は流入密度増加と共にその隣のゲートに拡大していく. 拡大車線料金所における交通流の基本図を導出する.

Traffic Flow on a Toll Highway with Expanded Tollgates

Kazuhito Komada, Takashi Nagatani

Department of Mechanical Engineering, Shizuoka University

Abstract

We investigate the traffic states and queuing occurring in traffic flow on a toll highway with expanded tollgates. The traffic states change with increasing density and varying number of tollgates. The queuing in front of tollgates is induced by the competition between the lane expansion and slowdown effects. The current saturates at the nearest tollgate at a low density and the saturation extends to the next-nearest tollgate with increasing density. We derive the fundamental diagrams(current –density diagrams) for the traffic flow on the toll highway.

1 緒言

料金所はボトルネックとして作用し、中高密度時には料金所手前での渋滞や混雑発生の原因となる。料金所での遅れや混雑を緩和させるために、より多くのゲートを設置する必要がある。料金所での遅れはゲート数を増加させることにより、緩和させることができる。

料金所のボトルネック作用を緩和するために料金所ではより多くのゲートを設置しそのゲート手前にレーンを拡大させる構造をとっている。渋滞はゲート数により変化するため、交通状態や渋滞形成を説明するのは重要なことである。しかし拡大車線料金所で発生する渋滞の研究は最近の交通モデルを用いてはあまり研究されていない[1, 2]。

本論文では一車線から五車線までの拡大車線料金所をモデル化し、車両の運動に関して最適速度モデルと車線変更ルールを適応する。この拡大車線料金所で発生する交通渋滞やその特性を明らかにし、基本図や交通流の動的状態を研究する。

2 拡大車線料金所モデル

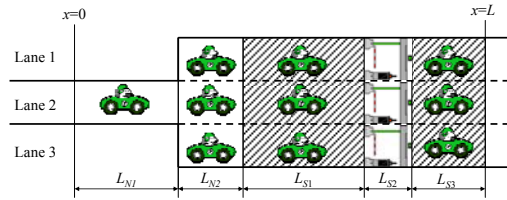
一車線から多車線に車線数を増加させた拡大車線料金所を考える。車は料金所手前で減速しながら、各ゲートに向かう。車が料金所に差し掛かってきたとき最も近いゲートが混雑していないならばドライバーはそのゲートに向かって直進する。しかしゲートが混雑している場合車は混雑していないゲートに向かって車線変更を試みる。車の挙動はゲート数に応じて変化していく。そして料金所通過後の車は速度回復のため加速する。

本研究では全ゲートを ETC ゲートとする。これは一般ゲートでは料金収受より車は一旦停止をするため車の挙動が複雑になるからである。

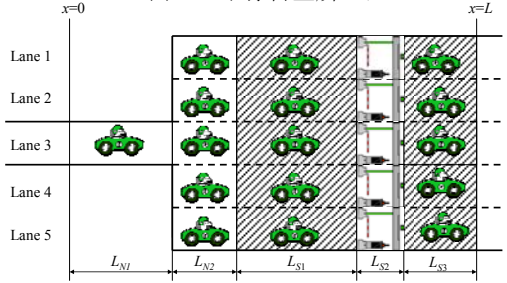
ゲートを三台設置した料金所と五台設置した料金所を考える。ここでは三車線料金所交通流モデル及び五車線料金所交通流モデルを以下に説明する。

2.1 三車線料金所及び五車線料金所モデル

まず全ゲートに ETC ゲートが設置されている一車線から三車線に拡大する三車線料金所モデル及び一車線から五車線に拡大する五車線料金所モデルを考える。図 1(a)に三車線料金所モデルを、図 1(b)に五車線料金所モデルを示す。



(a) 三車線料金所モデル



(b) 五車線料金所モデル

図1 拡大車線料金所モデル

実際の交通では車は料金所手前で減速し、出口に向けて混雑していないゲートに向かって車線変更を試みる。料金所を低速で通過しその後出口に向かって加速していく。

拡大車線料金所を五つの区間に分ける。車が第二(三)レーンのみを通常速度で走行する区間を $N1$ とする。車が全車線を通常速度で走行する区間を $N2$ とする。ゲート手前の減速する区間を $S1$ とする。ETCゲートを通過する区間を $S2$ とする。料金所通過後の加速する区間を $S3$ とする。各区間の長さを L_{N1} , L_{N2} , L_{S1} , L_{S2} , L_{S3} 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を用いる。最適速度モデルは車 i について次式で表される。

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

ここで x_i は車 i の位置、 Δx_i は車 i の前方車間距離、 $V(\Delta x_i)$ は最適速度関数、 a は感応度である。最適速度関数は次式で表す。

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

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 $N1$ と $N2$ 内では最大速度 $V_{\max} = v_{f,\max}$ 、減速区間 $S1$ 内では最大制限速度 $V_{\max} = v_{s1,\max}$ 、料金所区間 $S2$ 内では最大制限速度 $V_{\max} = v_{s2,\max}$ 、加速区間 $S3$ 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。車線変更の概略図を図2示す。車線変更可能な区間は $N2$, $S1$ 区間とする。車が以下の基準を満たしたとき、その車は車線変更をするものとする。動機基準とは前方車間が狭くなり、ドライバーが車線変更をしたいと思う基準であり、安全基準とは安全に車線変更するのに十分なスペースがあるかどうかの基準である。

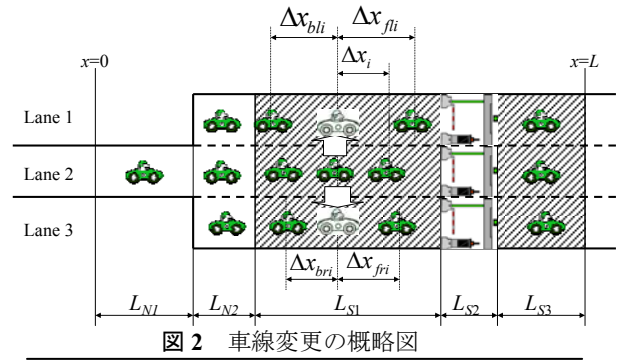


図2 車線変更の概略図

$$\text{動機基準} \quad \Delta x_i < 2.0 x_c \quad (3)$$

$$\text{左安全基準} \quad \Delta x_{fi} > \Delta x_i \text{ and } \Delta x_{bli} > x_c \quad (4)$$

$$\text{右安全基準} \quad \Delta x_{fi} > \Delta x_i \text{ and } \Delta x_{bri} > x_c \quad (5)$$

ここで、 $\Delta x_{fi}(\Delta x_{bli})$ はターゲットレーンの左前方(後方)車間距離、 $\Delta x_{ri}(\Delta x_{bri})$ はターゲットレーンの右前方(後方)車間距離。前方車間距離 Δx_i が安全距離 x_c の2倍より小さくなることで車線変更が動機付けられること、ターゲットレーンの前方車両と車線変更をしたい車の距離が前方車間距離よりも広いこと、ターゲットレーンの後方車両と車線変更をしたい車の距離が安全距離よりも広いことを安全基準とする。左右どちらの車線変更条件も満たしている場合、 $\Delta x_{fi} > \Delta x_{ri}$ ($\Delta x_{fi} > \Delta x_{li}$) ならば左(右)へ車線変更を行う。式(3)と(4)もしくは(5)の二つの条件が同時に満たされたとき車線変更を行う。

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 $L = 1600$ とする。境界条件は道路の両端を開放境界とする。まず車を $X = 0$ に一台配置し、車が初期車間距離 Δx_0 を越えた時 $X = 0$ に新たに車を配置する。また $X = 1600$ を越えた車は排除する。通常速度区間 $N1$ と $N2$ では最大速度 $v_{f,\max} = 2.0$ 、減速区間 $S1$ 内では最大制限速度 $v_{s1,\max} = 1.0$ 、料金所区間 $S2$ 内での最大制限速度 $v_{s2,\max} = 0.3$ 、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。ここで無次元長さを車幅 $L = 5[\text{m}]$ 、代表速度 $U = 45[\text{km/h}]$ とすると、無次元安全距離 $x_c = 4.0$ は実際の距離では $20[\text{m}]$ に相当する。また無次元最高速度 $v_{f,\max} = 2.0$ は $90[\text{km/h}]$ 、減速及び加速区間内最大制限速度 $v_{s1,\max} = v_{s3,\max} = 1.0$ は $45[\text{km/h}]$ 、ETCゲート内最大制限速度 $v_{s2,\max} = 0.3$ は $13.5[\text{km/h}]$ に相当する。無次元道路長 $L = 200$ とした場合の各区間の長さはETCゲート $100[\text{m}]$ 、減速及び加速区間 $200[\text{m}]$ となる。実際ETCゲートの長さは $100[\text{m}]$ よりも短い、これは本研究ではETCゲート前後もETCゲート区間としているからである。各区間比率を一

定に保ったまま無次元道路長 L を拡大しても同じ結果が得られる。本研究ではデータのばらつきを抑えるため、無次元道路長 $L=1600$ と長くとる。初期車間距離 Δx_0 の逆数を流入密度 ρ と定義し、流入密度 $\rho=0.01\sim 0.25$ まで 0.01 刻みでシミュレーションを行う。

3.1 三車線料金所モデル

三車線料金所モデルを調べる(図 1(a))。三車線料金所についての基本図を図 3 に示す。横軸に流入密度、縦軸に平均流量をとる。

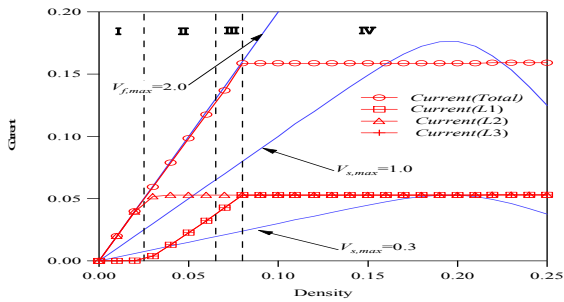
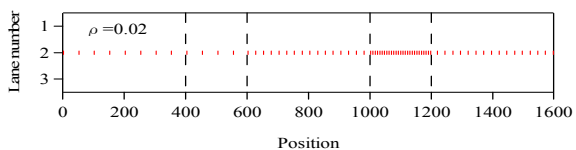
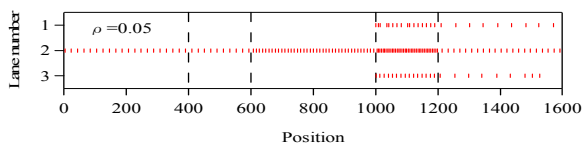


図 3 三車線料金所での平均流量図

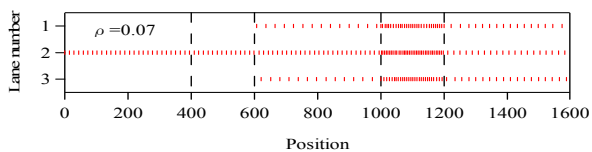
ここで○は全車線の車の合計流量を、□は第一レーン上の車の流量を、△は第二レーン上の車の流量を、+は第三レーン上の車の流量をそれぞれ表す。3つの実線は全区間が最大速度 $V_{max}=2.0, 1.0, 0.3$ とした時の理論流量曲線を示す。交通状態は 4 つ(I-IV)に分かれる。低密度領域 I-III では基本的に密度増加とともに交通流量は線形的に増加する。ただし、第二レーンでは領域 II 以降交通流量は飽和する。中密度領域 IV では全レーンの交通流量は飽和する。料金所手前で発生する渋滞を詳しく調べるためパターン図を示す。図 4(a)-(e) はそれぞれの流入密度 $\rho=0.02, 0.05, 0.07, 0.08, 0.09$ のパターン図である。横軸に車の位置、縦軸に車線番号、縦棒が車を示す。



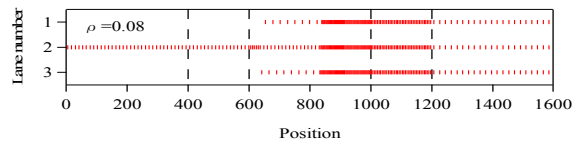
(a) 領域 I ($\rho=0.02$)



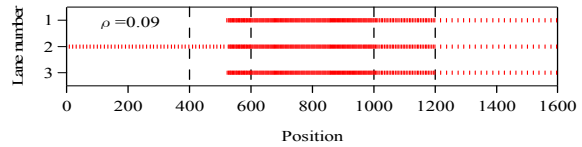
(b) 領域 II ($\rho=0.05$)



(c) 領域 III ($\rho=0.07$)



(d) 領域 IV ($\rho=0.08$)



(e) 領域 IV ($\rho=0.09$)

図 4 三車線料金所でのパターン図

領域 I では第二レーン上のみを車は走行する。第一及び第三レーンには車は存在しない。領域 II では第二レーンに設置してあるゲートの交通容量が飽和し、車はゲート手前でレーンチェンジを行い、第一及び第三レーンの料金所も通過する。領域 III では減速速度区間で車はレーンチェンジを行い、第一及び第三レーンの SI 区間から車は存在する。領域 IV では全レーンでともに渋滞が発生し、渋滞長さが減速速度区間から通常速度区間まで伸びていく。

3.2 五車線料金所モデル

一車線から五車線にレーンを増設した五車線料金所について研究する。この場合の基本図を図 5 に示す。横軸に流入密度、縦軸に平均流量をとる。

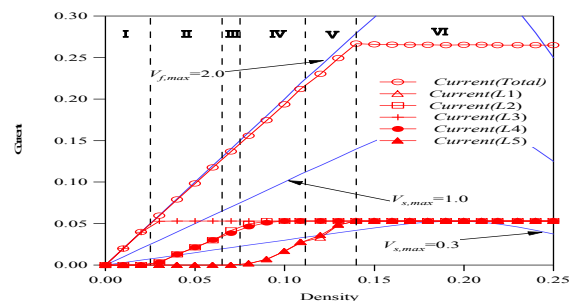


図 5 五車線料金所での平均流量図

ここで○は全車線の車の合計流量を、△は第一レーン上の車の流量を、□は第二レーン上の車の流量を、+は第三レーン上の車の流量を、●は第四レーン上の車の流量を、▲は第五レーン上の車の流量をそれぞれ表す。3つの実線は上から全区間が最大速度 $V_{max}=2.0, 1.0, 0.3$ のときの理論流量曲線を示す。交通状態は 6 つ(I-VI)に分かれる。低密度領域 I-V では基本的に密度増加につれ交通流量は線形的に増加する。ただし、第三レーンでは領域 II 以降、第二及び第四レーンでは領域 IV 以降交通流量は飽和する。中密度領域 VI では全レーンで交通流量は飽和する。料金所手前で発生する渋滞を詳しく調べるためパターン図により調べる。図 6(a)-(g) はそれぞれの流入密度 $\rho=0.02, 0.04, 0.07, 0.09, 0.12, 0.14, 0.25$ のパターン図である。横軸に車の位置、縦軸に車線番号、縦棒が車を

示す。

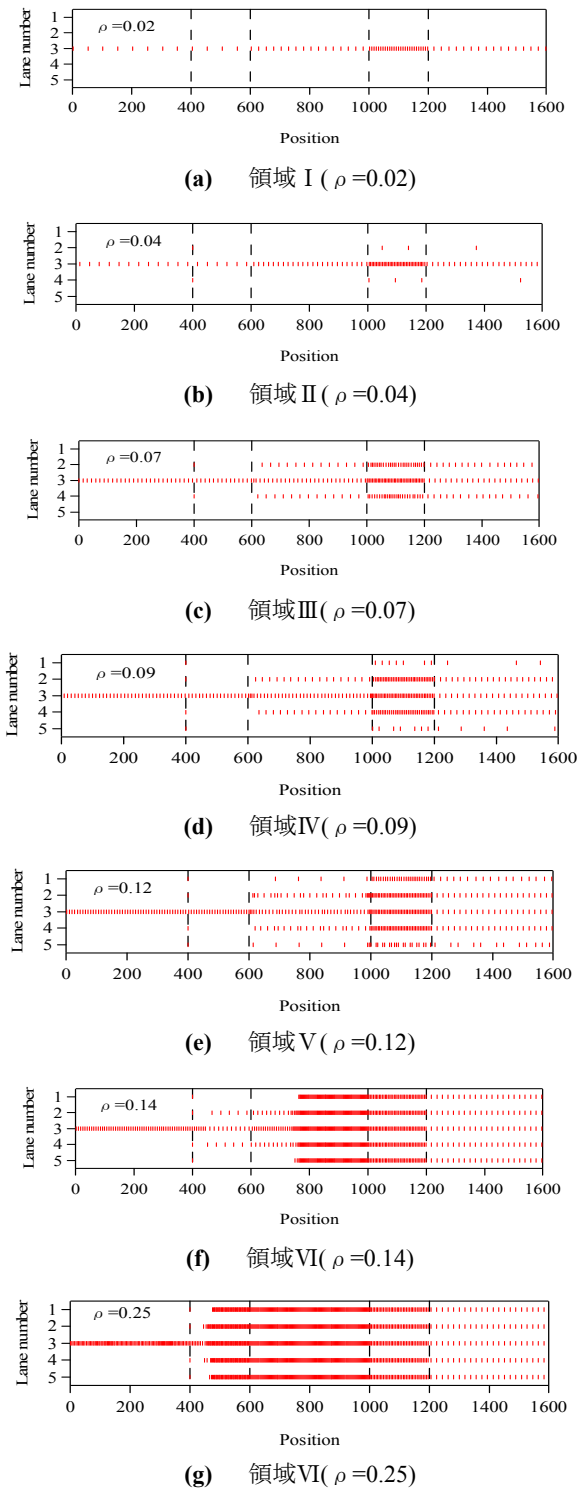


図6 五車線料金所でのパターン図

領域 I では第三レーン上のみを車は走行する。その他のレーンには車は存在しない。領域 II では第三レーンに設置してあるゲートの交通容量が飽和し、車はゲート手前でレーンチェンジを行い、第二及び第四レーンの料金所も通過する。領域 III では減速速度区間手前で車はレーンチェンジを行い、第二及び第四レーンの SI 区間から車は存在する。領域 IV では第二、第三、及び第四レーンの料金所の交通容量が飽和し、第一及び第五レーンの料金所も通過する。

領域 V では減速速度区間内で車は車線変更を行い、第一及び第五レーンの L_{SI} 区間から車は存在する。領域 VI では全レーンでともに渋滞が発生し、渋滞長さが減速速度区間から通常速度区間まで伸びていく。

3.3 一車線から五車線料金所の比較

一、二、三、四、そして五車線料金所について研究する。これらの基本図を図 6 に示す。横軸に流入密度、縦軸に平均流量をとる。

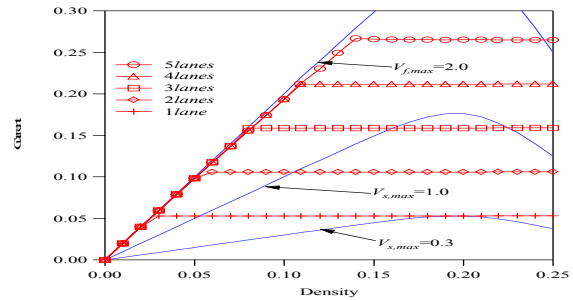


図6 一車線から五車線料金所での平均流量図

ここで○は五車線料金所での合計平均流量を、△は四車線料金所での合計平均流量を、□は三車線料金所での合計平均流量を、◇は二車線料金所での合計平均流量を、+は一車線料金所での合計平均流量を表す。3つの実線は上から全区間が最大速度 $V_{max}=2.0, 1.0, 0.3$ のときの理論流量曲線を示す。自由流領域からの転移点はゲート数に応じて変化する。飽和流量もまた変化する。拡大車線料金所の基本図はゲート数に大きく依存する。交通状態と基本図は流入密度、制限速度、そしてゲート数に応じて変化する。料金所手前での渋滞を避けるために流入密度を転移点より低く保つことが重要である。

4 結言

拡大車線料金所の交通モデルを提案し、このモデルを用いてシミュレーションを行い、以下の結果を得た。

- 1) 一車線から五車線までの拡大車線料金所を最適速度モデルと車線変更ルールを用いてモデル化した。
- 2) 三車線及び五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、流入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。

参考文献

- 1) M.Bando, K.Hasebe, A.Nakayama, A.Shibata, and Y.Sugiyama, Phys.Rev.E51(1995) 1035-1042
- 2) K.Komada, S.Masukura, T.Nagatani, Physica A 388 (2009) 4979-4990.