プロセスシミュレーションモデルによる ETC 料金所広場の
レイアウト設計と評価*伊藤 照 明^{*1}, 平 本 知 之^{*2}Layout Design and Its Evaluation on ETC Toll Plaza
Based on Process SimulationTeruaki ITO^{*3} and Tomoyuki HIRAMOTO^{*3} Department of Mechanical Engineering, The University of Tokushima,
2-1 Minami-Josanjima, Tokushima-shi, Tokushima, 770-8506 Japan

This paper describes the overview of ETC system in Japan, and focuses on the issue of traffic jams, which occurs around toll plaza of expressway even after the introduction of ETC system. For a solution to this issue, this study proposes a process simulation-based approach to study and evaluate the layout design of toll plaza. The paper presents process simulation model which has been implemented in this study, and evaluates the quality of the model. Then, several layout design examples were proposed and studied based on the model, and the validity of our approach will be discussed.

Key Words: Process Simulation, ETC, Toll Plaza, Layout Design, Traffic Jams

1. はじめに

1997 年の試験運用に始まったわが国における ETC (Electronic Toll Collection) システムの歴史は本年で 8 年目を迎える。この間、ETC 対応ゲートの拡充計画が進められ、2003 年度末には全国 1300 箇所各料金所で ETC 対応可能となる。その一方で、ETC 普及率は 10%程度に留まっており、販促キャンペーン等の普及活動が進められている。導入による波及効果の期待される ETC システムであるが、特に渋滞解消に対する期待は非常に大きい。しかし、普及率の低い現状ではその利点を享受するには至っておらず、普及拡大への取り組みに関して、長期的な視野に立った有効策が求められている。本論文では ETC システムの現状を分析し、その直面している問題点である ETC 車両に対する渋滞弊害について述べる。次に、その対応策として本研究で提案する料金所広場¹⁾のレイアウト再設計について述べ、その有効性評価を行うためのプロセスシミュレーションアプローチを提案する。さらに、代表的なレイアウト再設計例を用いて、このシミュレーションによる評価例を紹介し、本手法の有効性について議論する。

2. ETC 車両に対する渋滞弊害

ETC システムが全ての料金所で利用可能となることにより、利用者の利便性が向上することは言うまでもなく、料金所付近における渋滞緩和効果、その相乗効果としての大気汚染解消や騒音の削減効果、さらには統合的な利用料金課金システムへの基礎技術の確立、交通の円滑促進による地域活性化など今後の展開が期待されている²⁾。特に渋滞緩和効果に対する期待は大きい。つまり、料金所での支払いの際に発生する車両の一時停止と再発進に起因する渋滞に対し、ETC システムの導入により一時停止が不要となることで、渋滞緩和に対する大きな効果が期待されている。しかしながら、ETC 対応ゲートが拡大してはいるものの、ETC 利用率の低い現状では思ったほどの渋滞緩和効果は得られていない³⁾。

例えば、運行車両台数が少ない場合、非 ETC 車両には ETC の効果は特にないが、ETC 車両は一時停止なしでゲート通過が可能となり、そのメリットを享受することができる。しかし、通行車両台数が増えると事情は異なってくる。ETC ゲートを設置したために相対的に一般ゲート数が減少し、非 ETC 車両の通過時間は増加している。その一方で、渋滞に巻き込まれた ETC 車両は ETC ゲートに到達することが容易ではなく、ETC システムの利点を十分に享受することができなくなる。対応策として、ETC 車両専用ゲートに加えて、

* 原稿受付 2004 年 5 月 11 日。

^{*1} 正員、徳島大学工学部機械工学科 (〒770-8506 徳島市南常三島町 2-1)。^{*2} 徳島大学大学院機械工学専攻。

E-mail: ito@me.tokushima-u.ac.jp

ETC と非 ETC ゲートを状況に応じて使い分ける、あるいは混在運用方式をとることで柔軟な対応が行われている。しかし、こうした対応だけでは渋滞の状況によっては十分な対応をとることは困難であり、抜本的な解決策が求められている。

3. 料金所広場の再設計による対応策

ETC 対応ゲートの拡充計画が展開する一方で、ETC 利用率が 10%程度という低い現状を踏まえ、ITS システムの基幹となる ETC システムのもつ利点を十分に享受するためには、料金所で発生する渋滞に対する緩和策を検討し、効果的な対応策を講じることが課題である。

基本的に料金所は ETC システム導入以前に設計され、敷設されている。ETC 対応ゲートの拡充計画を短期間で推進するためには、既存のゲートを ETC 対応へ切り替えることを基本に、部分的なゲートの増設を行うことで対応している。こうした現状を踏まえ、著者らは現状の普及率で ETC のメリットを最大限に生かすにはこの料金所付近のレイアウトの見直しのひとつの鍵を握ると考えている。ETC のメリットが享受できれば普及率増加に反映されるからである。そのためには、見直しのレイアウト設計案を様々な観点から提案することが基本となるが、そうした設計案の一つ一つの評価を実際の料金所で実験により行うことは現実には困難である。

本研究では、料金所付近の車両の流れに対するプロセスシミュレーションモデルを構築し、そのモデルによる分析を通じてそうしたレイアウト設計案の有効性を評価する手法を提案する。

4. シミュレーションモデルの作成

4. 1 料金所のモデル化

シミュレーションモデルを作成するにあたり、料金所のモデル化を行い、必要となるパラメータについて述べる。まず、料金の支払いを以下の 6 つのプロセスに分けて考える。

- (1) 料金所へ向かう車両の発生
- (2) 経路（車線）が複数考えられる場合には、走行経路の選択
- (3) 選択した経路を走行
- (4) 料金所ゲートの選択
- (5) 料金の支払い
- (6) ゲートから出る

これらの各プロセスについて、その詳細を以下のように定義する。

- (1) 2 つの車両タイプ（一般車両、ETC 車両）を発生させる。
- (2) 任意の確率、車両タイプ、あるいは道路の混雑状況などの条件に応じて各車両が走行車線の選択を行う。
- (3) 渋滞状況に応じた車両の移動およびその走行距離に対して適切な移動時間を与える。
- (4) 任意の確率、あるいは各料金所ゲートの混雑状況などの条件に応じてそれぞれの車両タイプに対応する料金所ゲートの選択を行う。
- (5) 各車両タイプに応じて任意の時間、車両をリソース（料金所ブース）に拘束し、その後解放する。また、車両の滞留による待ち行列の発生を表現する。
- (6) 料金支払いを終えた車両の破棄を行う。また、必要に応じて所要時間などの統計を取る。

4. 2 シミュレーションモデルの変数定義

図 1 に料金所モデルの例を示す。同図に示すように料金所を車両発生点（A 点）、車線幅拡大点（B 点）およびゲート設置点（C 点）に分割し、A-B 間の待ち行列を Queue.i、B-C 間の待ち行列を Queue.j とする。

Fig.1 Example of a toll plaza model

4. 2. 1 車両の発生

車両の発生は、単位時間あたりの車両到着台数を一般車両、ETC 車両についてそれぞれ仮定し、到着間隔時間を設定する。

$$t_g = \frac{3600}{x_g} \quad (1)$$

$$t_e = \frac{3600}{x_e} \quad (2)$$

$$p = \frac{x_e}{x_g + x_e} \quad (3)$$

t_g : 一般車両の到着間隔時間 [sec]

x_g : 一般車両の 1 時間あたりの車両到着台数 [台/時]

t_e : ETC 車両の到着間隔時間 [sec]

x_e : ETC 車両の 1 時間あたりの車両到着台数 [台/時]

p : 全車両数に対する ETC 車両混入率 (ETC 普及率)

4. 2. 2 車両の移動時間

車両は A 点から C 点までの渋滞状況に応じて待ち行列の最後尾まで移動する。この移動距離に応じて与えられる移動時間は次式により定義される。

$$T_d = [L - (q_i + q_j)l - L_s]S_c + L_s S_r \quad (4)$$

T_d : 移動距離に応じた時間 [sec]

L : 車両発生点からゲートまでの距離

(A-C 間距離) [m]

q_i : 任意の待ち行列 Queue.i の台数

q_j : 任意の待ち行列 Queue.j の台数

l : 渋滞領域の平均車両間隔長さ [m]

L_s : 減速開始から停止 (渋滞末端到達) までの距離 [m]

S_c : 巡航時の単位距離あたりの平均所要時間 [sec/m]

S_r : 減速時の単位距離あたりの平均所要時間 [sec/m]

待ち行列の最後尾に達した車両は、支払い完了による待ち行列の解消に従い時間を浪費し、任意の支払い時間リソース (料金所ブース) を占有した後、破棄される。

4. 3 シミュレーションの実行および評価

4.1 および 4.2 で述べたパラメータを設けたモデルの実行環境として、本研究では、Rockwell Software 社のプロセスシミュレーションソフトウェア、Arena 6.0 を用いている。Arena はフローチャート型のモジュール⁴⁾を組み合わせ各モジュールにパラメータを入力することでモデルの構築が可能であり、本ソフトウェアを用いることで期待される機能拡張⁵⁾についても柔軟に対応できると考えている。また、一般的判断基準のレポートの自動作成やアニメーションを表示することが可能で、シミュレーション結果を数値だけでなく視覚的にも捉えることができる。

Arena により表 1 に示すゲート設置条件でモデルを構築し、シミュレーションを行う。Case-1 は 4 つのゲートすべてを一般ゲート、Case-2 は 4 つのゲートのうち 1 つを ETC 車両専用ゲート、Case-3 は同様に 1 つを混在運用方式のゲートとしている。例として図 2 に Case-2 のシミュレーションモデルを示す。シミュレーション条件として車両発生点はゲートの 500m 手前、Queue.j (j=1,2,3,4) をそれぞれ 8 台 (図 1 参照)、一般車両および ETC 車両の料金所で要する料金支払い時間[sec]をそれぞれ trand(14,16,18), trand(3,4,5) の三角分布とし、シミュレーション実行時間は 1 時間とする。また、A-B 間の車線数を 2 車線 (Queue.i (i=1,2)), ETC 車両混入率を 10% とする。車線およびゲートの選択は、一般車両について待ち行列が発生していない場合は 2 つある車線を A 点において 50%、3 つあるゲートを

Table 1 Simulation conditions

Case	Use gate type
Case-1	General gate*4
Case-2	General gate*3, ETC gate*1
Case-3	General gate*3, Combined use gate*1

Fig.2 Simulation model (Case-2)

Fig.3 Comparison of handling rate for the number of entities

B点において 33.3%の確率、待ち行列が発生している場合は待ち行列の短い方を選択することとする。ETC 車両については ETC 車両を ETC 対応ゲートの設置された側の車線へ誘導する看板が設置されていることから、A 点において誘導される車線を選択し (ここでは右車線)、ゲートへ進入することとする。ここで、一般車両のゲートの選択確率を走行車線が異なる場合に対して変化がないものとしている点は 5.のレイアウト評価で考察する。以上の条件のもと、車両台数または ETC 車両混入率の変化に対してシミュレーションを

行い、その結果についていくつかの観点から述べる。

図3に料金所へ向かう車両台数に対する支払いを終えた車両台数の比、さばき率 P_h ($P_h = X_o / X_i$, X_o : 単位時間あたりの車両流出量, X_i : 単位時間当たりの車両流入量) を ETC 車両混入率が 10% 時について示す。同図から、通行車両台数の少ない (600 台) 場合には各ケースに差異はなく、800 台以降、車両台数の増加にともない ETC 車両専用ゲートを設置した Case-2 でさばき率が大きく減少していることがわかる。これは、2.で述べたように、ETC 車両専用ゲートを設置することで相対的に一般ゲートの数が減少したために、一般車両の増加に対応できなくなり渋滞が発生したことを示している。また、図4に示すゲートを通過するまでに要した時間の比較から、Case-2 の ETC 車両は車両台数の増加にともない Case-1 に対して大きく増加していることから、渋滞による弊害を受けていることが確認できる。一方で、さばき率の高かった混在運用方式のゲートを設置した Case-3 では、ETC 車両の受ける渋滞による弊害の影響はもっとも少なくなっている。これらのことが ETC 車載器の普及が進まない現状において混在運用方式を採用する理由と考えられる。

次に、車両台数 1000 台時における ETC 車両混入率

Fig.4 Comparison of average total time for the number of entities

Fig.5 Comparison of handling rate for ETC vehicle mixing rate

の増加に対するさばき率の変化を図5に示す (Case-1については一般ゲートのみのため、一般車両のみの通行とする)。同図から、さばき率の低かった Case-2 のさばき率は ETC 車両混入率の増加にともない改善され、およそ 40% に達すると Case-3 よりさばき率は高くなることがわかる。

以上のように本手法により、ETC 車両専用ゲート設置により一般ゲートが減少することによる渋滞の発生、それにともなう ETC 車両が受ける渋滞弊害、ETC 車両の少ない状況での混在運用方式ゲートの有効性を再現することができ、また車両台数の増加および ETC の普及にともなう予測を示した。料金所広場のレイアウトを変更した場合についても、これらの結果を比較することで有効なレイアウト案を提案することが可能と考えられる。

5. 料金所広場のレイアウト評価

料金所広場のレイアウトの異なるモデルを構築し、渋滞弊害改善に対するレイアウト変更の有効性について評価を行う。レイアウト変更による渋滞弊害の改善案として図6に示す4つのレイアウトについてシミュレーションを行う。各モデルともにゲート条件は 4.3 で用いた Case-1 と同様に 4 つのゲート、うち 1 つを ETC 専用ゲートとする。Layout-1 と Layout-2 は図中の一点鎖線が示すように、一般車両用に存在する 3 つの一般ゲートに対する選択確率を変えるために走行車線

Fig.6 Layout of toll plaza

から料金所ゲートへのアプローチ方向の角度に変化を与えている。Layout-1 では料金所ゲートへ向かう走行車線から3つの一般ゲートへのアプローチが幅方向に対しては非対称であり（4つのゲートに対して対称）、Layout-2 では対称としている。これにより ETC 車両が対応ゲート進入に向けて走行する右車線における一般車両の流れに変化を与え、その影響について検証する。また、Layout-3 は料金所へ向かう走行車線を1車線とし、 L_b [m]手前に ETC 専用ゲートへの進入路を設け、Layout-4 は Layout-3 の走行車線を2車線としたものである。両モデルともに走行車線から3つの一般ゲートへのアプローチは幅方向に対して対称とし、 L_b は B-C 間（図1参照）と同じ長さとし待ち行列8台分と仮定する。

以上の4つのレイアウトについて、1時間あたりの車両発生台数を1000台、ETC 車両混入率を10%としてシミュレーションを行った。各レイアウトにおける料金所全体のさばき率の比較を図7に、一般車両、ETC 車両それぞれのさばき率を図8に示す。図7から、さばき率は Layout-1、Layout-2、Layout-3、Layout-4 の順に高くなっていることがわかる。また図8からさばき率の増加は ETC 車両のさばき率の増加に依っていることがわかり、一般車両については各レイアウトに大きな差異がないことも確認された。

Fig.7 Comparison of handling rate of the total

Fig.8 Comparison of handling rate of each types

ここで車両台数の増加に対する各レイアウトのさばき率の変化をレイアウトによって差異の見られる ETC 車両について図9に示す。車両台数の少ない場合には各レイアウトともほぼ等しくそのさばき率も高く、車両台数の増加とともにさばき率は低下し1200台時には最大およそ9%の差が生じている。また同条件における所要時間の比較を図10に示す。同図から図9で大きな差異の見られなかった車両台数600台および800台時にはETC 車両の所要時間もほぼ等しく、車両台数の増加にともない所要時間も増加している。一般車両の所要時間は800台以降増加することから渋滞が発生していることがわかり、ETC 車両における800台以降の所要時間の増加は渋滞弊害によるものと考えられる。しかし、その所要時間はさばき率の高いレイアウトほど短く、レイアウトの変更により渋滞弊害の影響を軽減させたことがわかる。

次に ETC 車両混入率の増加にともなう各レイアウトの比較について述べる。車両台数1000台におけるさばき率の変化を図11に、同条件における所要時間の比較を図12に示す。図11より ETC 車両のさばき率は

Fig.9 Comparison of handling rate of ETC gate for the number of entities

Fig.10 Comparison of average total time for the number of entities

Fig.11 Comparison of handling rate of ETC gate for ETC vehicle mixing rate

Fig.12 Comparison of average total time for ETC vehicle mixing rate

ETC 車両混入率 10%時にはおよそ 74%から 81%, 同 20%時にはおよそ 86%から 92%で、ともに最大およそ 6%の差があるが、30%に達するとさばき率はおよそ 98%となりレイアウトによる差はほとんど見られなくなり、ETC 車両の渋滞も確認されなかった。これは、ETC 車両混入率の増加にともない ETC 車両の所要時間が減少し、30%に達した時点でほぼ下限に収束していることから (図 12 参照)、ETC 車両の通行に影響を及ぼす程の渋滞は解消し、レイアウトによるさばき率の差もなくなったと考えられる。また ETC 車両混入率が 10%時および 20%時においては、さばき率の良いレイアウト順に ETC 車両の所要時間は短くなっている。

以上のことから、レイアウトの変更によって ETC 車両が受ける一般車両の渋滞による弊害の改善が確認され、Layout-1 および Layout-2 の結果から ETC 車両の通行する車線の一般車両の流れを重視し一般ゲートを配置すること、Layout-3 および Layout-4 の結果から ETC 車両を料金所広場の手前で分岐させることの有効性が確認された。また、1200 台までの車両台数の増加に対して、および ETC 車両混入率が渋滞解消に至るまで増

加する過程に対しても、ETC 車両が受ける渋滞弊害の改善が確認された。

6. まとめ

本稿では、ITS システムの一部として期待が大きい ETC システムの現状と ETC 車両に対する渋滞弊害について述べた。その対応策として考えられる料金所広場のレイアウト再設計に関して、その有効性評価を行うためのプロセスシミュレーションアプローチについて述べ、レイアウト設計例を用いて本手法の有効性について議論した。

シミュレーションの結果から、ETC 車両に対する渋滞弊害対策として、料金所広場のレイアウトが大きく関与することが認められた。様々な観点からレイアウト設計を検討し、実際に実験による評価を行う前に、有効性を検証する手段として本研究の手法は有用であると考えられる。有効なレイアウト変更により、ETC 車両に対する渋滞弊害を削減し、ETC の利点を享受できるようになることは ETC 普及率向上に大きく寄与することが期待される。さらには、ETC 普及率による料金所のさばき率の予測を行うことも本稿で述べたように可能となっている。現在料金所付近の車両データを用いたシミュレーションモデルの構築を行っており、その結果については別報にて報告を予定している。

謝辞 本研究を進めるにあたり、日本道路公団四国支社の関係各位から有益な助言を頂いたことをここに記し、謝意を表す。

参考文献

- 1) 武部健一, 土屋雷蔵, 七宮大: 道路建設講座(2) 高速道路の計画と設計, 山海堂, 1971.
- 2) 吉川元淳: ETC から広がる ITS の世界 -DSRC で展開される各種アプリケーション-, 沖テクニカルレビュー・第 187 号 Vol.68 No.3, pp.14-17, 2001.
- 3) 堀口良太, 桑原雅夫: ETC 導入による料金容量への影響に関する理論的解法と考察, 土木学会論文集 No.653/IV-48, pp.29-38, 2000.
- 4) 高桑宗右エ門 (監訳), W.D.Kelton, R.P.Sadowski, D.A.Sadowski (原著): シミュレーション -ARENA を活用した総合的アプローチ- 分冊教科書用 第 2 版, コロナ社, 2002.
- 5) 堀口良太, 小根山裕之: 適用事例を通じた交通シミュレーション利用実態と利用促進への課題, 土木学会論文集 IV, Vol.709, No.IV-56, pp.61-69, 2002.