

高速道路サグ部における AHS 円滑化サービス 評価用交通シミュレータの開発

花房比佐友*¹ 堀口良太*¹ 桑原雅夫*² 田中伸治*¹ 牧野浩志*³ 大内浩之*³

東京大学 生産技術研究所*¹

東京大学 国際・産学共同研究センター*²

国土交通省 国土技術政策総合研究所*³

論文概要

本稿では、高速道路サグ部における AHS 円滑化サービスの評価を目的とした交通シミュレータの開発について報告する。AHS 円滑化サービスはドライバーへの走行支援により交通流を適正化し、円滑化および交通事故防止を実現するものである。導入のターゲットとしてあげられている高速道路サグ部においては、渋滞直前での追越車線への交通量の極度な偏りを是正し、断面容量の効率的な利用を可能にするシステムが考えられており、今後の渋滞緩和対策として期待されている。このような背景から、本シミュレータには、AHS 円滑化サービスの評価を可能にすることを念頭に、追従挙動モデルのほか、車両属性分布モデル、車線変更モデルなどを実装した。あわせて、実際の高速道路サグ部の渋滞の再現性、および AHS 円滑化サービスの効果を評価できるかどうかについて、検証を行った。

Development of Micro Traffic Simulator for AHS to Solve the Congestions at Highway Bottlenecks

Hisatomo HANABUSA*¹ Ryota HORIGUCHI*¹ Masao KUWAHARA*² Shinji TANAKA*¹

Hiroshi MAKINO*³ Hiroyuki OUCHI*³

Institute of Industrial Science, University of Tokyo*¹

Center for Collaborative Research, The University of Tokyo*²

The National Institute for Land and Infrastructure Management*³

Abstract

This paper describes the latest developments of a new traffic simulator which evaluates Advanced Cruise-Assist Highway Systems (AHS) built to solve congestion problems at highway bottlenecks. A case study for the validation of the simulator was carried out and the results are presented in some detail. In highway sags, it is of critical importance to keep the traffic flow in each lane even and safe, and to prevent the saturation of the passing lane that makes congestion worse in highway sags. For this purpose, AHS services for highway sags promote drivers the proper lane usage to achieve to the drivers to achieve a smooth and safe traffic flow by fully utilizing each lane capacity. These systems need a careful evaluation through the new traffic simulator described in this paper.

Keyword: traffic simulator, sag, highway, bottleneck, AHS

1 はじめに

1-1 サグ部における渋滞現象への取り組み

高速道路の渋滞は、料金所部、サグ・トンネル部、合流部、その他の順で多く、ETCの普及で料金所対策が進んでいる今、サグ・トンネル対策が次の課題となっている。

高速道路のサグ部では、勾配が下りから上りへ変化したことに気づかないドライバーが多いため、速度が低下し易く、車群が形成されていると先行車のわずかな速度低下の影響が後続車に次々と伝播し、最終的には、停止に至るような渋滞に発展する場合がある。このとき、良く知られている事実として、渋滞直前には追越車線に交通量が集中し、追越車線から先に渋滞が発生する。同時に、走行車線に着目すれば、まだ容量に対して余裕があるにもかかわらず、追越車線で発生した渋滞を避ける車両が一举に押し寄せるために、あっという間に渋滞になってしまうので、断面の容量が効率的に利用されていない状況が問題視されている。

大口らは、このような実態を示しながらも、走行速度が速い追越車線を選択するのは、人間心理上自然な動作であり、かつ道路区間を早く通過したいという正当な権利を行使している結果ととらえた上で、規制や取り締まり等による強制力ではなく、道路構造を工夫して、追越車線への交通集中を自然に分散させる方式^[1]を提案している。

また、近年になり、サグ部での渋滞現象に関する知見が蓄積された結果、従来の、上り坂での自然な速度低下による減速ショックウェーブ伝播に原因を求め、運転者特性をやや画一的にとらえた因果関係の説明に対して、「実際には、一部の動作が緩慢な車両が大きな車群を形成し、渋滞発生の直接の要因となっている」という、車群形成状況に原因を求めた仮説に基づいた研究報告^{[2][3]}がなされてきた。大口ら^[4]は、渋滞発生時の流率が、必ずしもその区間での最大流率であるわけではなく、最大流率よりも低い値であっても、渋滞が発生するという事実を示し、もっと個別車両の走行状態を示す指標で渋滞発生が判断できる可能性を示している。これによれば、車群の形成状況と渋滞発生への関連を認め、渋滞発生前に、上流にどのような車群が到着しているかを定量化して把握することで、下流サグ部での渋滞発生を予見できることになる。

1-2 サグ部 AHS 円滑化サービスのコンセプト

このような背景から、ドライバーに対する情報提

供等で、キープレフト遵守を促し、渋滞直前の車線利用を適正化することで、断面容量を効率的に利用し、渋滞損失を軽減することをねらった「AHS 円滑化サービス」の適用が検討されている。AHS 円滑化サービスでは、実施するための技術水準の違いから、次の2段階のサービスが検討されている。

- 1) 車線利用率適正化 … 渋滞直前の車線利用率が、容量を効率的に利用するという観点から適正な比率になるよう、一定量の交通に追越車線から走行車線に復帰してもらうことを目標としたサービス。
- 2) 車群先頭車対策 … 追越車線において渋滞を引き起こすおそれの大きい車群を検出し、その車群形成の原因になっている先頭車両に走行車線への復帰を促すサービス。

2 AHS 円滑化サービス評価用交通シミュレータ

ここで、開発した交通シミュレータの構成、実装されているモデルについて説明する。本シミュレータは、東京大学国際・産学共同研究センターのサステイナブル ITS 研究室で開発された実験環境に組み込んで仮想実験ができるように設計されている。そのため、シミュレーションの中で再現される道路線形は、ドライビングシミュレータに対応できる高精度な幾何情報を定義できる。また、車両挙動についても詳細な動きを表現できるよう、車両位置は mm 単位の分解能で計算される。本シミュレータのモデルは、主に①車両到着モデル、②追従走行モデル、③車線変更挙動モデルから構成され、0.05 秒毎にシミュレータの状態を更新する時間スキヤニング方式を採用している。以下、3つのモデルを説明する。

2-1 車両到着モデル

車両到着モデルでは、各車両の到着タイミングと走行特性パラメータを決定する。本シミュレータでは、ランダム到着を仮定しており、平均到着流率 λ を与えたとき、次式の指数分布に従ったヘッドウェイ間隔で車両を生成している。

$$f(x|\lambda) = \lambda \exp(-\lambda x) \quad (x > 0, \lambda > 0)$$

ただし、これはあくまでもメモリ上に車両オブジェクトが生成される間隔の分布を意味している。実際には、後述する車両の追従走行挙動による制約を受けるため、すべての車両が必ずしも生成と同時に上流端に到着するわけではなく、交通量が多い場合は、車線上流端での到着ヘッドウェイは結果的にア

ーラン分布に従う。また、車両生成と同時に、後述の追従走行モデルで、ドライバーの運転特性を特徴づけるパラメータとして用いられる乗用車換算係数 (PCU) と希望速度を決定する。ここでは、図 1 に示すように、PCU は正規分布にしたがって確率的に与え、希望速度は PCU が大きいほど低くなるよう、線形の関係性を仮定している。なお、本シミュレーションモデルでは、車線ごとに、PCU 分布、PCU と希望速度の関係、および任意の時間間隔での平均到着流率変動を設定できる仕様となっている。

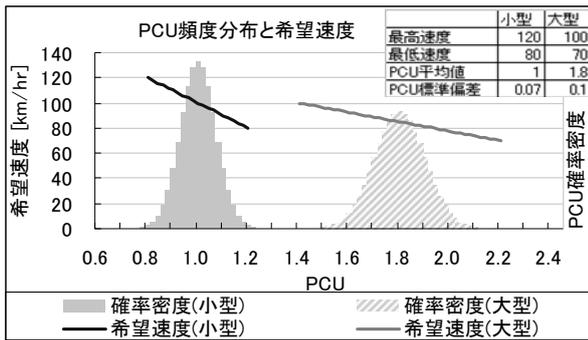


図 1 PCU 分布と希望速度の設定例

2-2 追従走行モデル

本シミュレーションでは、車線上を走行する車両に「車頭間隔-速度(S-V)関係」を与え、これに従って移動させる追従モデルを採用している。ここでの S-V 関係は各車両に個別に与えられ、最小車頭間隔 S_{min} 、臨界車頭間隔 Sc 、および希望速度 V_f で規定され、臨界車頭間隔以上であれば希望速度で走行する折れ線状の関数となっている。これとは別に、各道路区間に基本容量 Qc [pcu/h/車線] と基本ジャム密度 Kj [pcu/km/車線] が与えられており、実際に追従走行の計算をする際は、これらを個別車両の PCU と希望速度で補正する。まず、車両 i の乗用車換算係数を p_i としたとき、道路の基本容量 Qc [pcu/時] から車両ごとの換算容量 Qc_i [台/時] が求められる。

$$Qc_i = Qc / p_i \quad \text{[台/時]}$$

次に、車両ごとの換算容量を与える臨界密度 Kc_i は、一般的な交通量 q と密度 k 、速度 v の関係 ($q = kv$) から、車両ごとの希望速度 V_f を用いて

$$Kc_i = Qc_i / V_f = Qc / p_i V_f$$

となる。いま、交通密度 k は車頭間隔 s の逆数であることから、車両ごとの臨界車頭間隔は、

$$Sc_i = 1 / Kc_i = p_i V_f / Qc$$

と補正される。最小車頭間隔も、臨界密度の代わりに基本ジャム密度を用いて、同様の考え方で補正される。図 2 に S-V 関係を用いた追従走行モデルの概念図を示す。また、表 1 にモデルパラメータを、図 3 に希望速度の違いによる個別車両の追従 S-V 式を示す。

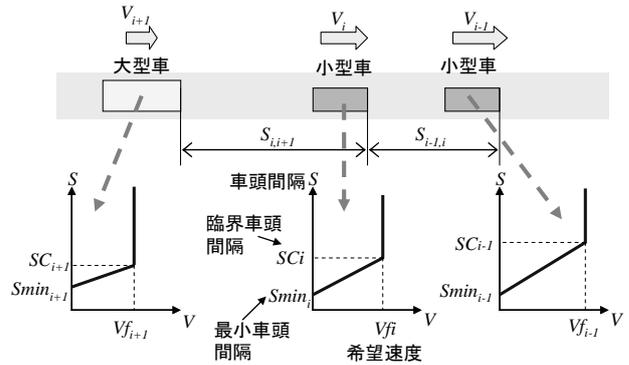


図 2 S-V 関係に従った追従走行モデル概念

表 1 追従走行モデルパラメータ

対象	パラメータ
道路区間	・道路区間の基本容量 Qc [pcu/h/車線] ・ジャム密度 Kj [pcu/km/車線]
個別車両	・各車線の平均速度 [km/h] と分散値 ・PCU 分布 (車種別) PCU 平均値, PCU 標準偏差値 PCU 最大値, PCU 最小値 最大速度, 最小速度 [km/h]

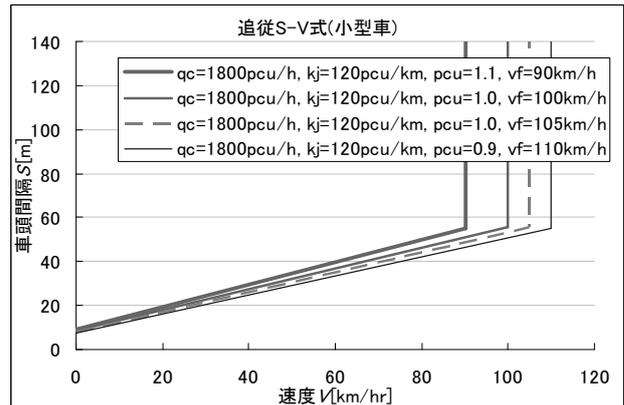


図 3 希望速度の違いによる個別車両の追従 S-V 式

2-3 車線変更モデル

車線変更モデルは、自車の周りの状況 (前後方車間、隣接車線の車両位置など) を把握しながら車線変更を決定していく。車線変更を決定する判断基準やタイミングは車両ごとに設定が可能であり、各車

が独自に車線変更の意思決定を行う。

隣接車両のギャップ、速度については、図4に示すような形で把握する。ここで、自車の速度を V 、周辺車両の速度を $V1 \sim V5$ 、周辺車両と自車との距離を $S1 \sim S5$ とする。最初の判断として、自車の速度 V と前方車の速度 $V1$ を比較し、自車の速度がある一定の速度を下回ったときに車線変更要求を行う。

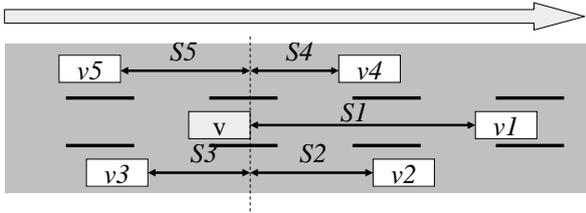


図4 周辺車両との位置関係を示す状態量

車線変更の要求があったとき、車線変更が可能かどうか、周辺車両のギャップを確認する。車線変更の可否は、車線変更を開始する時刻から、隣車線へ移動していくまでの3秒後^{[5][6]}の位置関係を予測し、そのときのギャップで判断する（予見による意思決定）。周辺車両間のギャップから車線変更可能であると判断されたときは、車線変更を実行するかどうかの判断をおこなう。実装している車線変更モデルの意思決定プロセスを図5に示す。

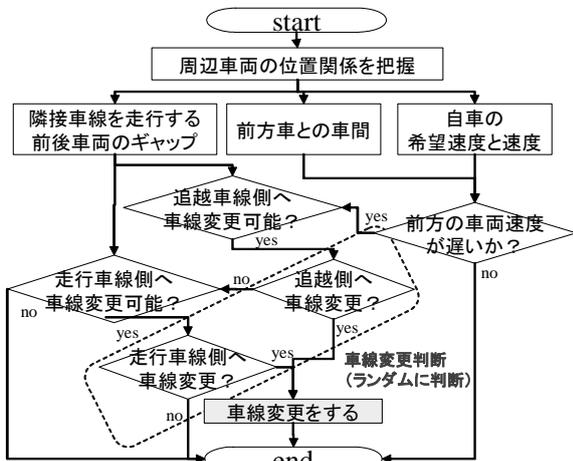


図5 車線変更の意思決定プロセス

実行判断は、乱数をもちいてランダムに行っており、車線変更ができる状態でも、車線変更する車両としない車両が混在することになる。よって、自車の希望速度よりも遅い車に追従する挙動も表現でき、高速道路における車群形成が再現される。一方、優先的に車線変更判断を行うのは追越車線側としている。

もし、追越車線側への車線変更はしないと判断した場合は、走行車線側へ車線変更するか判断を行う。

本シミュレータでは、追従状態にない自由走行車両が、希望速度を満たしているために、走行車線へ復帰する挙動は考慮していない。これは、本シミュレータが、比較的短い高速道路単路区間を対象としており、とくにサグ部での渋滞発生時前後の、比較的車両密度の高い状態で、ほぼ全車両が追従走行している状況での適用を前提としているため、必要性が低いと判断したためであるが、今後、評価に関する要求、車両挙動精度の向上に応じて機能追加を行う予定である。表2にパラメータの一覧を示す。

表2 車線変更パラメータ

パラメータ	説明
右前方車線変更可能ギャップ	右前方車との車線変更可能なギャップの閾値(秒)
右後方車線変更可能ギャップ	右後方車との車線変更可能なギャップの閾値(秒)
左前方車線変更可能ギャップ	左前方車との車線変更可能なギャップの閾値(秒)
左後方車線変更可能ギャップ	左後方車との車線変更可能なギャップの閾値(秒)
車線変更実行確率(右側)	右側車線へ車線変更が可能と判断されたときに車線変更する確率
車線変更実行確率(左側)	左側車線へ車線変更が可能と判断されたときに車線変更する確率
車線変更要求するときの自車速度閾値(希望速度に対する割合)	前方の車両が遅くなったときに、どのくらい(何割)自車の速度が低下したら車線変更の要求が発生するか

3 サグ部における渋滞再現

図6にサグ部再現の概念図を示す。サグ部の再現は、追従走行モデル(S-V関係)のパラメータ変更で実現する。サグ部で渋滞が起きると、一般的には通常の基本容量を下回る。そこで、まずサグ部の基本容量 Qc_sug はセンサーデータの最大流率を基に設定する。

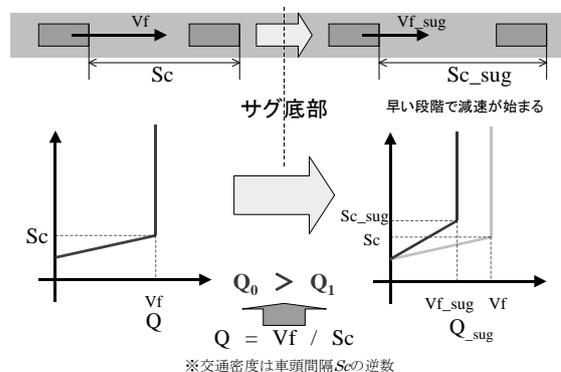


図6 サグ部の再現 概念図

一方、サグ部の希望速度 Vf_sug は、その区間だけ一時的に低くなるものと仮定し、各車両の PCU をサグ部の区間だけ一時的に増加させた後、追従走行モデルの式に従って算出する。このとき、臨界車頭間隔 Sc_sug は先の交通量 q 、密度 k 、速度 v の関係式から展開して求める。このように、パラメータを変更することによって、サグ部通過後は、サグ部通過前に比べより早い段階で減速が生じる追従挙動となる。従って、サグ部上流側から流入する車群がサグ部に到着すると、サグ区間の交通流に状態遷移し、ショックウェーブが上流へ伝播する。一方、車両ごとに与えられた乗用車換算係数と希望速度によって、道路構造の変化（ここではサグ部）による流率低下に加え、車両個別の性能差による流率低下が表現できる。つまり、車両発生モデルで生成された遅い車両によって車群が形成され、結果ある断面における流率が低下し、サグ部以外の道路区間においても、本来道路が持つ基本容量に達しない状況がシミュレーション上で表現される。表 3 に調整パラメータの一覧を示す。

表 3 サグ部の調整パラメータ

パラメータ	説明
サグ部交通容量 Qc_sug	サグ部交通容量[pcu/h/車線]
サグ部開始位置	リンク端点からの距離[m]
サグ部区間距離	サグ部の区間長[m]
サグ部 PCU 調整量	サグ部で変化する PCU の量。同時に速度 Vf_sug が算出される。
サグ部車頭間隔 Sc_sug	上記のパラメータを基に、 $q=kv$ の関係式 (2-2 の式) で求められる。

ここで、1 車線のサグ部（基本容量：1800[pcu/h/車線]、交通需要：1800 台/h）を想定し、サグ部に設置した感知器モデルから得られる交通量を利用して再現される流率を検証した。図 7 の結果から、PCU 分布によって表現された車両個別の性能差によって

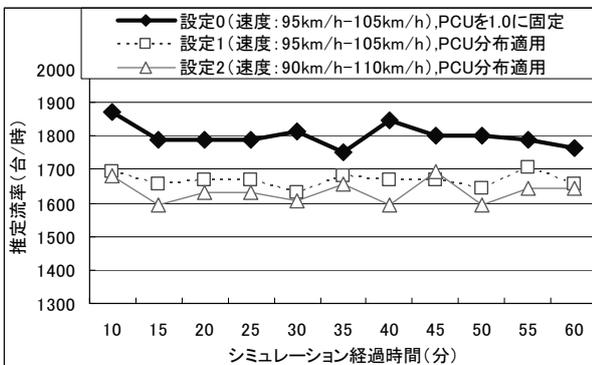


図 7 速度分布の違いによる流率の変化

流率がサグ部の基本容量を下回ることが確認できた。

また、設定 1 と設定 2 で、同じ平均値を持つが、分散が異なる希望速度分布を与えた場合、分散が大きいケース、すなわち低速車両がより多く含まれる設定のほうが、達成される基本容量が低くなる傾向にある。このことから、PCU 分布によって車両属性にばらつきがあるゆえに、発生スケジュールによって車群の形成状況や渋滞状況が大きく左右される可能性があることに留意しなければならない。

次に、AHS 円滑化サービスの車群先頭車対策に関連する現象確認として、追越車線を走行する低速車両を走行車線へ復帰させるシナリオを試みたところ、追越車線の平均速度と流率が向上することが確認された。これは、追越車線の希望速度分布を相対的に高くすることで基本容量が改善されるという、意図していた現象が記述できていることを示している。

4 サグ渋滞の再現性の検証

シミュレータを構築した後、現況再現性についてのケーススタディを実施した。今回は、東名高速道路下り・大和サグ部での 2003 年 10 月 18 日におけるサグ渋滞を再現するため、図 8 に示す道路区間をモデル化した。

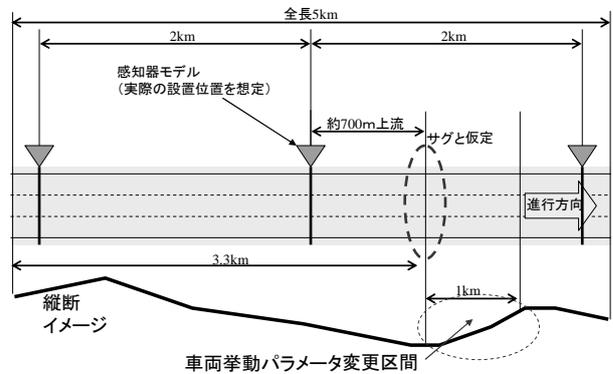


図 8 シミュレーション区間概要

現況再現 (Case1) のキャリブレーションでは、サグ底部から 700m 上流に設置された実際の感知器データと、シミュレーション上での同位置の感知器モデルで得られる車線毎の通過交通量、平均地点速度を比較した。図 9 に通過交通量の検証結果、図 10 に平均地点速度の検証結果を示す。検証の結果、臨界状態での車線ごとの速度低下の傾向や渋滞解消時の回復時刻は比較的良く再現できていることを確認した。渋滞時前半の再現速度が多少低い傾向にあるが、これは、渋滞発生直後は比較的高い流率で推移

するが、渋滞時間がある程度長くなると、渋滞中のドライバーの緩慢運転が増長し、さらに流率が低下するという現象を考慮していないからである。ただし、本モデルで評価する AHS 円滑化サービスでは、渋滞直前の現象をターゲットにしたサービスを実施するため、渋滞が発生してから容量の再現性については、特に重視する必要はないと考えている。

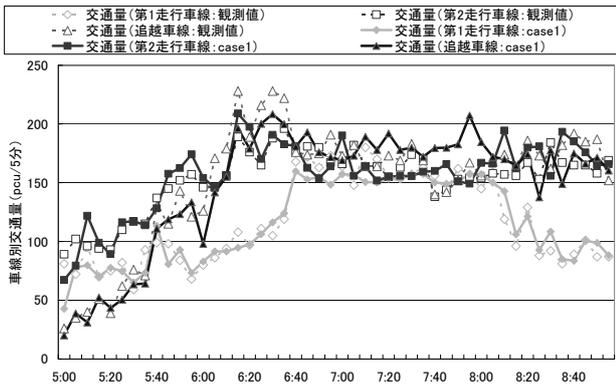


図 9 現況再現性検証結果 (車線別交通量)

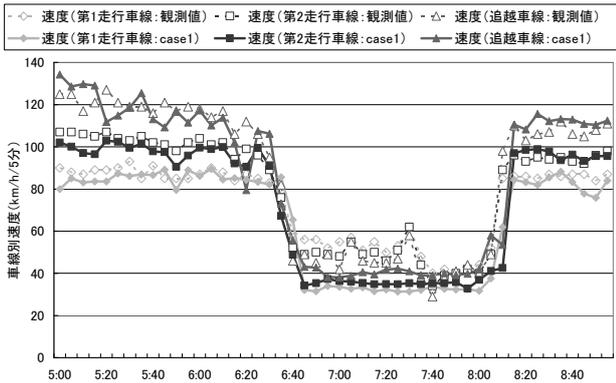


図 10 現況再現性検証結果 (車線別平均速度)

また、本モデルを用いたケーススタディでの比較実験のためには、乱数系列の影響を把握しておく必要がある。前述のとおり、このモデルでは発生スケジュールの違いが、交通容量に大きく影響するため、車両到着パターン（到着時刻と順番）を境界条件として固定するための独立した乱数系列を、車両到着モデルで利用し、車線変更モデルで用いる乱数系列の違いに影響されないようにしている。

図 11 は、3つの到着パターンを用意してシミュレーションを試みた結果である。いずれも 5 分間の交通量と平均速度を見る限りは、ほぼ同程度に現況再現できている。各到着パターンについて、車線変更モデルに使う乱数系列を 10 通り変えて、それぞれ

の渋滞損失時間を評価し、グラフに中央値と最大・最小値を示した。その結果、車線変更モデルでの乱数系列の違いによるばらつきよりも、到着パターンの違いによるばらつきのほうが大きいことが示されており、上述の通り、比較実験においては、到着パターンを境界条件として固定して評価すべきことが示されている。

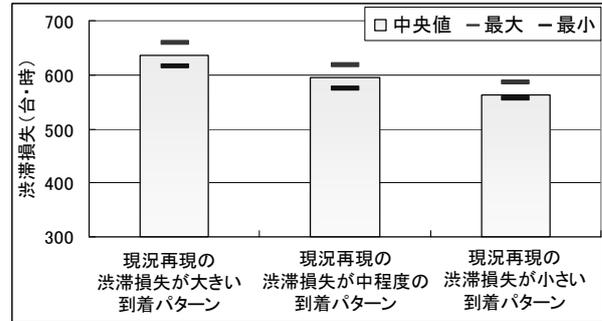


図 11 到着パターンの違いによる渋滞損失の変化

5 おわりに

本稿では、高速道路サグ部における AHS 円滑化サービスを評価する交通シミュレータを開発した経緯から、現況再現性の検証までを報告した。今後は、さらなる理論的な検証も含め、AHS 円滑化サービスの効果を具体的に評価していく予定である。

謝辞：本研究の遂行に当たり、データ提供とご意見をいただいた日本道路公団様と技術研究組合走行支援道路システム開発機構の関係各位に、深甚なる謝意を表します。

参考文献：

[1] 大口 敬, 桑原 雅夫, 赤羽 弘和, 渡邊 亨: ボトルネック上流における車線利用率の矯正効果と付加車線設置形態, 交通工学, Vol. 36, No. 1, pp. 59-69, 2001.

[2] 邢 健, 大口 敬, 越 正毅: 高速道路単路部の交通流の動的的特性, 土木計画学研究・講演集, Vol. 14(1), 1991.

[3] 岡村 寛明, ほか: 首都高速道路箱崎ロータリー合流部における渋滞メカニズムの分析, 第 29 回土木計画学研究発表会講演論文集, 2004.

[4] 大口 敬, 片倉 正彦, 鹿田 成則: 高速道路単路部をボトルネックとする渋滞発生特性に関する実証的研究, 高速道路と自動車, Vol. 44, No. 12, 2001.

[5] 大口敬 (2000.10): 高速道路単路部渋滞発生解析—追従挙動モデルの整理と今後の展望—, 土木学会論文集, 2000.10

[6] 渡辺昇治, 吉本堅一: 運転動作モデルの改良, 自動車技術会秋季学術講演会前刷集, No. 892, pp. 217-220, 1989.