

# AHS への対応行動を考慮した都市高速道路合流部の 運用評価分析システムの開発とその適用

清水 哲夫<sup>1</sup>・屋井 鉄雄<sup>2</sup>・三室 徹<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 博(工) 東京大学助教授 大学院工学系研究科社会基盤学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

<sup>2</sup>正会員 工博 東京工業大学教授 大学院総合理工学研究科人間環境システム専攻 (〒226-8503 横浜市緑区長津田町 4259)

<sup>3</sup>修(工) サン・マイクロシステムズ㈱ (〒158-8633 東京都世田谷区用賀 4-10-1SBSビル)

本研究は、都市高速道路の合流部を対象として、走行支援情報提供サービスに対するドライバーの対応行動をモデル化し、これと合流部ミクロシミュレーションと統合して、上記サービスが合流部交通流の運用の改善に与える効果を分析するための評価分析システムを構築することが目的である。本研究のドライバーの挙動モデルは、合流部手前区間の挙動と合流車・本線車の相互挙動決定行動を考慮した点に特徴がある。構築したシステムを用いて簡易な情報提供サービスの効果分析を行い、対応車両の混入率と情報への信頼度が運用改善に与える効果を試算した。

*Key Words: microscopic traffic simulation, merging section, traffic flow evaluation, AHS system*

## 1. はじめに

我が国では、交通事故減少を目的とした走行支援道路システム (Advanced cruise-assist Highway System: 以下 AHS と略記する) の研究開発が進んでいる。この AHS では、具体的な 7 つのユーザーサービスが提案され、これらサービスはすでに 2000 年末のテストコースでの実証実験を経て、実道での実証の段階へ進んでいる<sup>1)</sup>。

ところで、統計上は交通事故死者数の少ない合流部では、煩雑な運転操作が要求されるにも関わらず、その AHS サービスが 7 つのユーザーサービスに含まれていない。しかし、①合流部におけるドライバーの判断を支援することにより円滑性が向上する可能性があること、②ドライバーに緊張を強いることによる負担感という費用が生じている可能性があること<sup>2)</sup>、などから、合流部 AHS の社会的意義は大きいと筆者らは考えている。

AHS には、単なる情報提供や運転操作支援、究極的には自動運転という、いくつかの技術レベルが存在する。現在の技術的・社会的な趨勢を鑑みれば、自動運転はほぼ登場しないと考えている。そのため、比較的高度な運転操作支援までを視野に入れた AHS サービス展開を念頭に置くべきであろう。そのための要素技術の開発はほぼ実用の見通しがたつ

たものと考えて良い。ただし、実際のサービス展開の内容については未確定であり、利用者の受容性の高い AHS サービスとは何かがまさに問われようとしている。しかしながら、このような問題意識が認識されながら、サービスの評価が可能な分析手法が従来研究されてきたかは疑問を感じざるを得ない。その中で清水らは、首都高速道路の合流部を対象に、簡易な合流部 AHS サービスとして走行支援情報提供サービスの実験を実施し、サービスがドライバーの運転操作性の向上や負担感の低下に寄与する可能性があることを示した<sup>3)</sup>。しかし、このようなサービスが合流部の運用改善に与える効果については捉えられていない。

ちなみに合流部の円滑な走行をサポートする技術として、従来からランプメタリングが存在する。しかし、本研究が対象とする都市高速道路の合流部では多くの場合、①車両が停止しないこと、②加速車線が短いこと、からその適用は難しいと考える。また、本研究で想定する走行支援情報提供サービスは、車両個々に車載器を経て情報を直接提供するものであり、ランプメタリングとは本質的に異なるサービスである。

本研究は都市高速道路の合流部を対象に、清水らの実験結果<sup>3)</sup>からドライバーの AHS サービスに対する反応行動をモデル化し、これと合流部ミクロ

シミュレーションと統合した分析システムを開発し、合流部の走行支援情報提供サービスが運用改善に与える影響を把握することが目的である。

## 2. 高速道路における合流挙動分析の特徴と本研究の位置づけ

高速道路の合流時における運転挙動の研究に対する動機は、合流部の幾何構造の設計基準を決定するため、渋滞や交通事故など合流部で発生する様々な問題を解決するための管理運用方策を検討するために古くから行われてきた。その後も設計基準の再検討の必要性から、合流部の研究に対する動機は引き続き存在し、コンピュータによるシミュレーション技術の発達、データ収集技術の高度化に伴い、ミクロな運転挙動に着目した研究が行われるようになった。

合流部には、本線を走行する車両（本線車）と合流車線を走行する車両（合流車）が存在する。ほとんどの研究は、運転挙動の意志決定プロセスを複数段階に分割し、各段階でモデル化を行っており、合流車については流入ギャップ決定行動、速度調整行動が、本線車については、避走行動が主な対象となる。これらのこと自体は、AHS サービス下においても同様であろうが、情報提供を想定する場合には、従来の研究ではほとんど扱われていない合流部が見通せない直前区間における行動を新たに表現しなければならない。

以下にいくつかの既存研究の特徴を整理するが、合流部だけでなく、類似した挙動メカニズムを有する織り込みや工事区間の合流挙動も取り扱う。合流車の流入ギャップ決定行動のモデル化については、合流開始時に複数のギャップから瞬間的に最良のギャップを選択するモデル<sup>4),5),6),7)</sup>と、走行しながら条件にあったギャップを順次探索するモデル<sup>8),9),10)</sup>が提案されており、いずれもギャップ長や相対速度、必要加速度などから説明される効用により流入ギャップを評価する構造を仮定している。また、ギャップの評価基準が走行条件に応じて変化する工夫も行われている<sup>9)</sup>。筆者らは、どのような構造条件の合流部であっても、ドライバーが当面の目標となるギャップ（例えば最初に遭遇した側方ギャップ）を決定すると考えており、後者のモデルを支持している。

合流車の速度調整行動については、合流部で生じる安全性や円滑性の低下を表現するために、本線車との相互作用を考慮した速度調整プロセスを記述することが不可欠であると筆者らは考えているが、

従来のモデルではギャップ流入時や加速車線走行時は一定速度とするなど、ほとんど考慮されていない。

近年の合流部の研究では、本線車の避走行動に着目するものが多く見られる。Kita and Fukuyama<sup>11)</sup>はゲーム論のフレームで避走行動を捉えたが、現象の解析的な把握に興味があり、シミュレーション分析などへの展開は行われていない。高山ら<sup>12)</sup>は一般道路織り込み部での避走行動を統計的に分析しているが、外部観測データであるため避走を行いたくても行えなかったようなケースは考慮することができない。なお、シミュレーション時にマクロ的な避走確率分布などを与えて対応している例<sup>4),10)</sup>もあるが、プロセスをモデル化していないため、AHSが避走に与える効果の分析は当然不可能である。

なお、避走については、合流車が見えない段階で予め避走を行う「先行避走」がある。その実態については喜多ら<sup>13)</sup>による観測があるものの、メカニズムについては明らかにされていない。先行避走に関する研究は走行支援情報提供サービスの効果分析のために重要な課題であろう。

以上を踏まえ、本研究は 1)合流車と本線車の相互作用を考慮した速度調整およびギャップ選択行動のモデル化、2)合流部を見通せない区間での走行支援情報提供サービスへの対応行動のモデル化、を行うことを、評価分析システムを構築するための中心的なテーマに据える。

## 3. 合流部における走行支援情報提供サービスの評価分析システムの枠組み

### (1)合流部の運用に対する評価指標の考え方

合流部において走行支援情報提供サービスを導入する動機は、より望ましい運用状態を達成することである。各ドライバーは「何らかの満足」を達成するように合流部を走行し、それらが集合体として交通流を形成し、合流部の交通容量や平均旅行速度といった集計指標が導出される。サービス評価の対象は、個々のドライバーと合流部の両方が考えられるが、いずれにせよドライバーのミクロな挙動を表現しなければならない。本研究では、上記の「何らかの満足」を「走行効用」と表現する。この時、走行効用をどの要因で構成するか考える必要がある。

単路部の走行効用の要因については、中村・劉が実証は今後の課題としながら考え方のフレームは提案している<sup>14)</sup>。合流部の走行効用も単路部のそれと概ね同様の考え方が可能であろう。本研究では、走行効用として以下の3つの特性を考える。

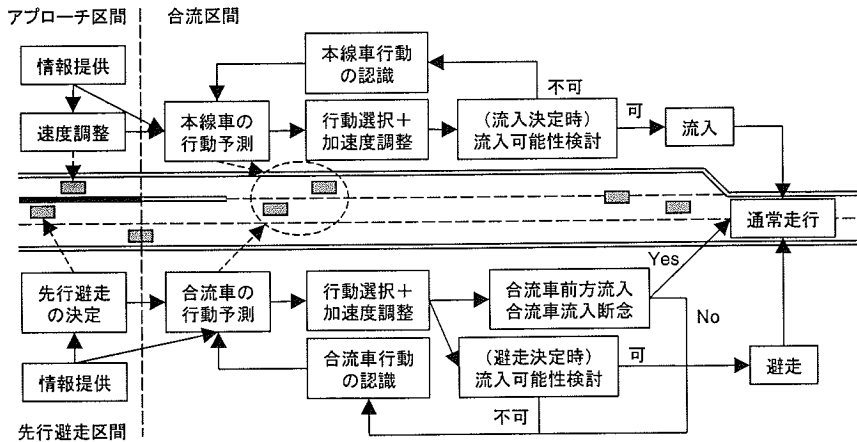


図-1 本研究で想定する合流部の運転挙動プロセス

- ①安全性：事故に遭遇しないように合流したい
- ②快適性：急な運転操作がない合流を行いたい
- ③効率性：合流時間をできるだけ短くしたい

各ドライバーは、これら3つの特性を個人の重要度に即してある種の「重み付け」を行うと考える。それぞれの効用要素は、安全性は他の車両や道路構造とのギャップ長や時間、快適性は加減速の変化速度や相手に位置を譲ることで感じる不効用、効率性は合流所要時間などが考えられる。

## (2) 本研究で想定する合流部の運転挙動プロセス

本研究では、合流部におけるドライバーの運転挙動を図-1のプロセスとして考える。ここで合流部においてアプローチ区間、先行避走区間、合流区間を定義する。アプローチ区間は合流車が合流区間に到達するまでの区間であり、側壁等で視界が遮られているために、当該区間では本線車線の状況を目視で確認できない。先行避走区間は本線車が合流区間に到達するまでの区間であり、同様に当該区間では合流車線の状況を目視で確認できない。合流区間では、合流車と本線車が互いの挙動を確認できるようになる。

合流車は始めにアプローチ区間において最適な合流を行うための合流区間への流入速度を決定する。合流区間内では後方本線車の行動を想定しながら側方ギャップに流入するか、見送るか決定し、各々の行動を実行するのに必要な加速度で進行する。流入決定時には、その後の本線車の行動を確認した上で、流入可否の判断を行い、可能と判断すれば流入を開始し、合流プロセスを完了する。走行車線（もしくは合流車線が取り付いている追越車線）を走行する本線車は、先行避走区間において合流車への遭遇状

況などを勘案して事前に車線変更を行うか判断する。もし、車線変更を希望すれば側方ギャップへの流入可能性を判断し、可能と判断すれば車線変更を開始する。そうでなければ、そのまま当該車線を走行し合流区間に流入する。その後、前方に合流車の存在を確認すれば、これを回避するために車線変更を行うか判断する。車線変更を希望すれば先行避走と同様のメカニズムで車線変更を試みる。車線変更を希望しない場合には、合流車の行動を想定しながら、合流車を前のギャップに受け入れるか、受け入れないか決定し、各々の行動を実行するのに必要な加速度で進行する。このプロセスは、合流車が前方に流入を開始するまで、もしくは逆に流入をあきらめるまで継続する。

このプロセスで走行支援情報が与える影響については次のように考える。合流車にとっては、合流する本線との速度差が小さければ合流が容易となるが、加速車線長が短いことを事前に理解していれば、流入に失敗したときに加速車線内で停止しきれないリスクを考慮してより遅い速度での流入を試みると考えられる。この場合、アプローチ区間内で事前に合流区間の交通状況を知ることができれば、可能な限り流入速度を上げておき、情報内容によりその後の行動を考えるかもしれない。また、情報が合流区間開始時の本線車の挙動予測に影響を与える可能性はある。一方、本線車は先行避走区間で予め合流車が流入してくることを認識できれば、積極的に車線変更を行うようになるかもしれない。

## (3) 評価分析システムの構成

本研究の評価分析システムは、現時点では都市高速道路のランプ合流部の中でも加速車線長が短く、

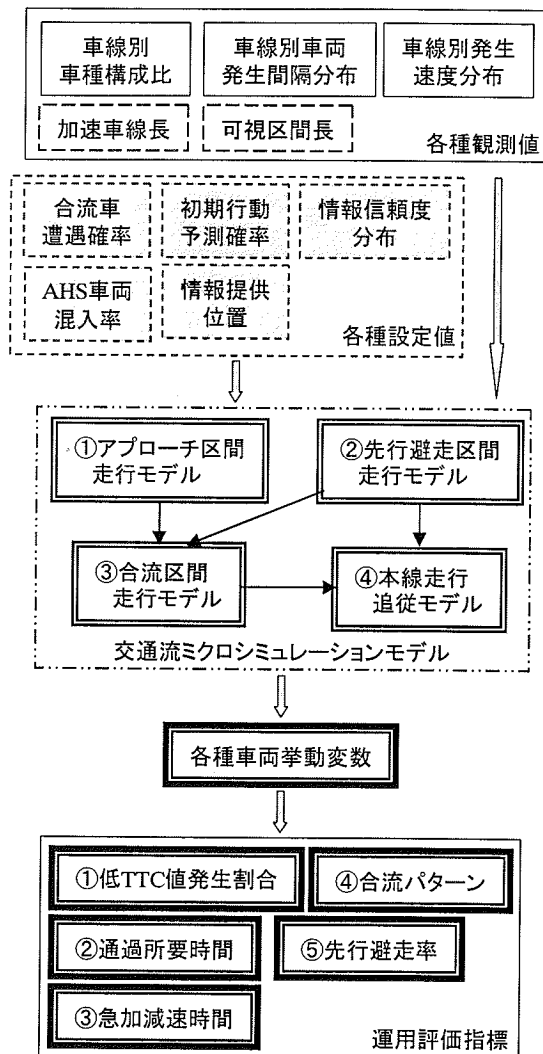


図-2 評価分析システムのサブモデルと入出力データ

本線が2車線、合流車線が1車線で左側から合流する形状の箇所が適用対象となる。車両進行方向の範囲は、先行避走区間を含み、かつ合流後に速度が安定するまでの区間を含むように設定されなければならない。前者についてはその長さを判断できるデータはないが、ドライバーが合流部手前15~20秒程度から先行避走の判断を始めると仮定し、その区間長を300mとした。後者は加速車線ノーズ端から100mとした。図-2にシステムの入出力データとサブモデルの関係を示す。各車両は確率分布に従ってランダムに発生し、ある一定の時間間隔で様々な意志決定を行いながら0.1秒間隔で移動し、様々な運用評価のためのデータを蓄積する。意志決定を表現するサブモデルとして、①アプローチ区間走行モデル

②先行避走区間走行モデル、③合流区間走行モデル、④本線走行追従モデル、が構築されている。

運用状態を表現する各指標として本研究では、①合流完了時の低Time To Collision(TTC)値(合流完了時に合流車と前後の車両の速度を一定と仮定した場合に衝突するまでに要する時間が3秒以内)発生割合、②合流区間の通過所要時間、③急加減速時間(±3m/s<sup>2</sup>以上の加速度変化の総時間)、④合流パターン、⑤先行避走率を考える。①は安全性の評価指標、②は効率性評価指標、③は快適性評価指標と考えられる。④はシステムの現況再現性を確認するために用いる。

なお、システムのプログラミングは、Microsoft Visual C++ Ver.6.0で行った。詳細なアルゴリズムについては清水<sup>15)</sup>を参照されたい。

#### 4. サブモデルの定式化および推定結果

以下に評価分析システムに含まれるいくつかのサブモデルについて定式化を行い、データが存在する場合には推定を行う。なお、例えば「情報の信頼度」といった概念的で確認が困難な変数も多いが、その実証は後の機会に譲り、本研究は不完全ながら一度モデルシステムとして構成して見ることに主眼をおくものである。

##### (1) アプローチ区間走行モデル

走行支援情報提供の評価を目的とした場合には、従来は取り組まれていないアプローチ区間の運転挙動を表現する必要が生じることは既に述べた。先の清水らの実験<sup>3)</sup>の結果から、ドライバーは運転自体や地点の経験などを通じて形成された何らかの流入速度分布を持っており、その平均値が情報提供内容と情報への信頼度に応じて変化する(標準偏差は不変)と考える。すなわち、シミュレーションでは明示的に速度を決定するモデルは利用せず、分布から流入速度を確率的に与えることになる。

この流入速度分布に正規分布を仮定し、情報サービス種別 $X$ (実験では3種類の異なる情報を提供)に対する情報信頼度が $\alpha\%$ であるドライバーの流入速度 $v_x^{\alpha}$ の平均値 $\bar{v}_x^{\alpha}$ は以下のように与える。

$$\bar{v}_x^{\alpha} = \frac{100-\alpha}{100} \bar{v}_0 + \frac{\alpha}{100} \bar{v}_x^{100} \quad (1)$$

ここで、 $\bar{v}_0$ は情報提供がない場合の流入速度 $v_0$ の平均値であり、 $\bar{v}_x^{100}$ は情報サービス種別 $X$ を100%信頼する場合の流入速度 $v_x^{100}$ の平均値であり、今回は実験後のヒアリングで情報を信頼できると答えた人

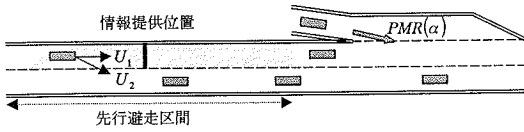


図-3 先行避走区間走行モデルの概要図

を情報信頼度 100%と見なしている。  $v_0$  および  $v_x^{100}$  の標準偏差は実験値（全パターンによる）を適用する。すなわち、  $v_x^\alpha$  の標準偏差もこれと同値となる。

## (2) 先行避走区間走行モデル

このモデルも走行支援情報を考慮する場合には重要となる。しかし、そのメカニズムが把握できる実験データが存在せず、今回は感知器の交通量データから推定することを試みる。

先行避走決定モデルの概要を図-3 に示す。先行避走区間の合流車線と接する側の車線を走行しながら合流区間に接近しているドライバー（先の先行避走区間の定義ではこの段階で合流車の接近状態を目視で確認できない）が、より早く合流部を通過できる、コンフリクトが少なくすむ、ことを希望し車線変更を行うか決定するモデルとなっている。先行避走区間の途中で情報提供が行われる地点が含まれている。車両  $i$  が先行避走を行わずに同じ車線を走行する効用を  $U_1$ 、車両  $i$  が先行避走する効用を  $U_2$  とし、それぞれ確率項と確率項からなると仮定する。この時、ドライバーが先行避走しようとする確率  $P^{sw}$  を以下のロジットモデルで表現することを考える。

$$P^{sw} = \frac{1}{1 + \exp(V_1 - V_2)} \quad (2)$$

次に、  $V_1$ 、  $V_2$  の与え方について説明する。既に述べたように、ドライバーの車線選択の要因は通過時間やコンフリクトの遭遇状況であると考えられる。合流部を通過するまでの車線別の所要時間については、現時点での前方の車線別利用状況から車線の所要時間差を認識すると仮定する。具体的には、車両  $i$  の現在位置から先行避走区間が終了するまでの区間長における車線別密度から速度を導出し、所要時間を計算する。コンフリクトの遭遇状況については、ドライバーが地点の経験に応じて「だいたい  $X\%$  くらいの確率で合流車に遭遇する」というような認識を持っていると仮定する。これらを効用差として表現すれば、以下の式で表現されよう。

$$V_1 - V_2 = \theta_1(T_1 - T_2) + \theta_2 PMR(\alpha) + C \quad (3)$$

ここで、  $T_1 - T_2$  は車線の所要時間差、  $PMR(\alpha)$  は情報信頼度  $\alpha$  の合流車遭遇確率の認識値、  $C_i$  は車線

変更の定数項である。このような判断は先行避走区間内で絶えず行われているため、ある一定時間間隔（本研究では一律に 1 秒）ごとに式(2)により先行避走確率を算出する。

ここで、  $PMR(\alpha)$  の決定方法について説明する。今、情報種別が存在確認（“遭遇します” / “遭遇しません”）<sup>3)</sup> とする。ドライバーが持っている合流地点固有の遭遇確率の認識値を  $PMR(0)$  とすると、①情報提供がない場合、②“遭遇します”との情報を受け取った場合、③“遭遇しません”との情報を受け取った場合の  $PMR(\alpha)$  を次のように与えることにする。

$$\textcircled{1} PMR(\alpha) = PMR(0) \quad (4)$$

$$\textcircled{2} PMR(\alpha) = \frac{100 - \alpha}{100} PMR(0) + \frac{\alpha}{100} \quad (5)$$

$$\textcircled{3} PMR(\alpha) = \frac{100 - \alpha}{100} PMR(0) \quad (6)$$

すなわち、情報信頼度が高ければ、“遭遇します”という情報を信じて遭遇確率の認識値が高くなり、“遭遇しません”という情報を信じて遭遇確率の認識値が小さくなる。なお、シミュレーションでは当情報提供時であっても、情報を入手するまでは式(4)にしたがって  $PMR(\alpha)$  が算出される。

ところで、式(2)は先行避走の意思表示を表すモデルである。この時、ドライバーがいくら先行避走したいと思っても側方ギャップが十分に長くなければ直ちに車線変更を行えない。そこで、先行避走を希望した車両が側方ギャップの状態により車線変更を行うか決定するモデルが別途必要となる。しかしモデル構築のためのデータ取得は難しく、後のシミュレーションでは後方ラグ長が長くなれば流入確率が大きくなる処理を行っている。ちなみに、図-1にもあるように、後述の合流区間走行モデルにおいても流入または避走を決定した後に車線変更を行うか判定することになるが、同様の処理を行っている。

さて、式(3)について、1999年10月4日～8日に首都高5号線下り東池袋合流部の直前2地点および合流車線の感知器で観測されたデータから1時間ごとの車線別時間交通量、車線別平均速度、合流台数を算出し、①車線別平均速度から走行車線と追越車線の通過所要時間差を算出、②合流車の流入時間間隔が指数分布に従うと仮定して、合流台数から合流車に遭遇する確率を算出、③2つの感知器間を先行避走区間として、これらの車線利用率から避走割合を算出（もちろん、避走ではない通常の車線変更や追越車線からの車線変更も含まれているが、これらは同程度発生し、互いに相殺されると考える）、と

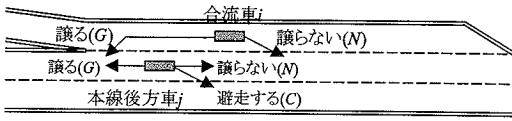


図-4 合流車と本線後方車の取りうる行動

表-1 本線車の行動を前提とした合流車の効用

本線後方車の行動	合流車の行動	$i$ の効用	$i$ の <i>j</i> に対する行動予測確率
譲らない(N)	譲らない(N)	$U_{NN}(t)$	$P_N(t)$
	譲る(G)	$U_{GN}(t)$	
譲る(G)	譲らない(N)	$U_{NG}(t)$	$P_G(t)$
	譲る(G)	$U_{GG}(t)$	
避走する(C)	譲らない(N)	$U_{NC}(t)$	$P_C(t)$
	譲る(G)	$U_{GC}(t)$	

いうデータ処理を行い、避走割合が被説明変数、通過所要時間差と合流車遭遇確率が説明変数となる集計ロジットモデルとして推定を行った。紙面の制約上式のみ示す。

$$P^{EW} = \frac{1}{1 + \exp\{-0.256(T_1 - T_2) - 1.19PMR(\alpha) - 2.13\}} \quad (3')$$

### (3) 合流車の合流区間走行モデル

本研究では、合流車と本線車がお互いを確認した段階からお互いの行動を想定しながら行動を順次決定するモデルを提案する。図-4 は合流車と本線車の取りうる行動を示すが、合流車の  $N$  と  $G$  の選択は、本線後方車の行動を想定して効用が大きい行動を逐一選択すると考える。この時、合流車と本線車の行動を与件とした時刻  $t$  の合流車の効用は表-1 のように表現できるとすると、合流車が行動  $N, G$  を選択する期待効用  $\bar{U}_N(t)$ 、 $\bar{U}_G(t)$  は次のようになる。

$$\bar{U}_N(t) = P_N(t)U_{NN}(t) + P_G(t)U_{NG}(t) + P_C(t)U_{NC}(t) \quad (7)$$

$$\bar{U}_G(t) = P_N(t)U_{GN}(t) + P_G(t)U_{GG}(t) + P_C(t)U_{GC}(t) \quad (8)$$

この時、合流車の行動  $N$  および  $G$  の確率は以下のように与える。

$$PM_N(t) = 1 / [1 + \exp\{\bar{U}_G(t) - \bar{U}_N(t)\}] \quad (9)$$

$$PM_G(t) = 1 / [1 + \exp\{\bar{U}_N(t) - \bar{U}_G(t)\}] \quad (10)$$

次に本線車行動  $B$  の予測確率  $P_B(t)$  の決定方法を説明する。図-1 のプロセスでは、 $P_B(t)$  の初期値である  $P_B(0)$  については、提供される情報内容の影響を受けることになる。そこで、“遭遇します”の情報を受けた場合の  $P_B(0)$  を、

$$P_N(0) = \bar{P}_N + \alpha(1 - \bar{P}_N) / 100 \quad (11)$$

$$P_G(0) = [\bar{P}_G \{1 - P_N(0)\}] / (\bar{P}_G + \bar{P}_C) \quad (12)$$

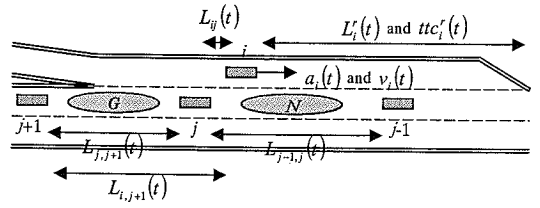


図-5 行動選択時における車両の位置関係(時刻*t*)

$$P_C(0) = [\bar{P}_C \{1 - P_N(0)\}] / (\bar{P}_G + \bar{P}_C) \quad (13)$$

“遭遇しません”の情報を受け取った場合、

$$P_B(0) = \bar{P}_B, \quad (B = N, G, C) \quad (14)$$

のように考える。ここで、 $\bar{P}_B$  は情報提供がない通常時の本線車に対する初期行動予測確率である。ここでは、合流車は基本的に本線車が譲らないと考えており、“遭遇します”の情報を受ければ、その傾向がより強くなり、一方“遭遇しません”の情報では、予測確率が変化しない。これらの設定は、“遭遇します”の方がドライバーはそれに早期に対処しよう(言い換えれば、無理をするのはやめよう)とすると仮定したためである。次に、時刻  $t$  の  $P_B(t)$  は本線車の時刻  $t-1$  での行動により影響を受ける構造とする。この時、合流車は本線車の  $t-1$  での行動が譲る/譲らないのいずれであったか判定する必要がある。そこで、合流車は本線車の加速度が増加した場合を譲らない行動であると認識し、減少した場合を譲る行動であると認識すると考える。この時、 $t-1$  で本線車が譲らなければ、

$$P_N(t) = (1 + \beta)P_N(t-1) \quad (15)$$

$$P_G(t) = P_G(t-1) \{1 - P_N(t)\} / \{P_G(t-1) + P_C(t-1)\} \quad (16)$$

$$P_C(t) = P_C(t-1) \{1 - P_N(t)\} / \{P_G(t-1) + P_C(t-1)\} \quad (17)$$

本線車が譲れば、

$$P_G(t) = (1 + \beta)P_G(t-1) \quad (18)$$

$$P_N(t) = P_N(t-1) \{1 - P_G(t)\} / \{P_N(t-1) + P_C(t-1)\} \quad (19)$$

$$P_C(t) = P_C(t-1) \{1 - P_G(t)\} / \{P_N(t-1) + P_C(t-1)\} \quad (20)$$

で与えられると考える。 $\beta$  は正のパラメータである。すなわち、もし本線車が譲ってくれなかったと認識すれば、次の時間帯はより譲ってくれないと思うことになり、逆に、本線車が譲ってくれば、次の時間帯はより譲ってくれると思うことになり、

表-2 合流車の加速度決定モデルのパラメータ推定結果

合流車 <i>i</i> の行動およびケース	$v_i(t)$	$L_{ij}(t)$	$L_{i,j+1}(t)$	$ttc_i^r(t)$	定数項	決定係数
N	$v_i(t) - v_j(t) > 0$	0.738	-0.989	---	1.17	-19.5
		7.01	-11.4	---	5.82	-11.1
G	$v_i(t) - v_j(t) < 0$	-0.299	-0.636	---	1.60	-3.25
		-4.26	-6.24	---	6.71	-2.35
G	本線後方車(j+1)あり	---	1.51	0.0102	1.68	-6.25
		---	12.5	0.282	3.50	-4.00
	なし, $v_i(t) - v_{j-1}(t) > 0$	0.0704	0.432	---	1.90	-9.77
G	なし, $v_i(t) - v_{j-1}(t) < 0$	3.34	20.3	---	15.3	-25.8
		0.304	0.116	---	1.73	-13.5
G	なし, $v_i(t) - v_{j-1}(t) < 0$	23.3	5.64	---	39.2	-36.7

次に、式(7),(8)中の合流車と本線車の行動組み合わせによる合流車の効用を表現するモデルを考える。今、車両の記号と位置関係を図-5のように与える。合流車*i*が合流区間に到達したときに、本線の走行車線を走行する1番目の後方車両を*j*とする。合流区間内を走行するうちに、もし*j*の車尾が*i*の車頭よりも完全に前に出してしまうと、*i*は行動*N*を断念し、*j+1*の本線車が*j*の役目となる。本研究では、合流車*i*が行動*B<sub>i</sub>*を、本線後方車*j*が行動*B<sub>j</sub>*を選択した場合の*i*の効用を以下のように表現する。

$$U_{B_i, B_j}(t) = \theta_{B_i, 1} |a_i(t+1, B_i) - a_i(t)| + \theta_{B_i, 2} L_{j-1, j}(t+1, N, B_j) + \theta_{B_i, 3} L_{j, j+1}(t+1, G, B_j) + \theta_{B_i, 4} L_{j-1, j+1}(t+1, B_i, C) + \theta_{B_i, 5} L_i^r(t) \quad (21)$$

ここで、 $|a_i(t+1, B_i) - a_i(t)|$ は*i*が*B<sub>i</sub>*を選択したときの加速度変化量の絶対値であり、これが大きくなれば走行の快適性が低下する。 $L_{j-1, j}(t+1, B_i, B_j)$ は*i*が*B<sub>i</sub>*、*j*が*B<sub>j</sub>*を選択した場合の*j*とその本線前方車*j-1*の次期ギャップ長、 $L_{j, j+1}(t+1, B_i, B_j)$ は*i*が*B<sub>i</sub>*、*j*が*B<sub>j</sub>*を選択した場合の*j*とその本線後方車*j+1*の次期ギャップ長、 $L_{j-1, j+1}(t+1)$ は*j-1*と*j+1*の次期ギャップ長(*j-1*と*j+1*は等速と見なし、*t*期と同一とする)であり、これらは小さくなればそのギャップを選択する効用が小さくなる。 $L_i^r(t)$ は加速車線終端までの残存距離であり、これが小さくなればギャップを見送る(*j*に譲る)傾向が強くなる。なお、 $\theta_1$ と $\theta_5$ は*B<sub>i</sub>*ごとに、 $\theta_2$ は*B<sub>i</sub>*が*N*の場合に、 $\theta_3$ は*B<sub>i</sub>*が*G*の場合に、 $\theta_4$ は*B<sub>j</sub>*が*C*の場合のみ設定される。この時、*B<sub>j</sub>*に関わるパラメータの $\theta_2 \sim \theta_4$ の推定値は、式(7),(8)で掛かる*P<sub>B</sub>*(*t*)を含んだ値となっている点に注意が必要である(分離できない)。

式(21)では自己の加速度*a<sub>i</sub>*(*t+1, B<sub>i</sub>*)を決定し、かつ $L_{j-1, j}(t+1, B_i, B_j)$ 、 $L_{j, j+1}(t+1, B_i, B_j)$ を決定するために、*j*の行動別の次期加速度*a<sub>j</sub>*(*t+1, B<sub>j</sub>*)を決定しなければならない。まず、*a<sub>i</sub>*(*t+1, B<sub>i</sub>*)については以下のように表現する。

$$a_i(t+1, B_i) = \theta_{B_i, 1} v_i(t) + \theta_{B_i, 2} L_{ij}(t) + \theta_{B_i, 3} L_{i, j+1}(t) + \theta_{B_i, 4} ttc_i^r(t) + Const. \quad (22)$$

ここで、 $v_i(t)$ は時刻*t*の*i*の速度、 $L_{mn}(t)$ は時刻*t*の車両*m, n*間のギャップ長、 $ttc_i^r(t)$ は時刻*t*の加速車線終端までの残存TTCである。各パラメータ $\theta$ は*B<sub>i</sub>*ごとに推定する。 $a_i(t+1, B_i)$ については、その予測は困難であり、後のシミュレーションでは以下の設定値を用いている。

$$a_i(t+1, N) = a_j(t+1, C) = a_i(t+1, B_i) + r \quad (23)$$

$$a_j(t+1, G) = a_i(t+1, B_i) - r \quad (24)$$

ここで、 $r(>0)$ は観測分布に基づき正規乱数を与えている。

はじめに式(22)の推定を行うが、意志決定の時間間隔は1秒として、行動別の1秒後の加速度を決定する重回帰モデルを作成することにした。なお、ドライバーが決定している真の行動については、外部観測から直接これを判断することは困難であり、何らかの仮定を行う必要がある。紙面の制約上詳細は割愛するが、本研究では、合流部におけるビデオ画像データから汎用画像処理ソフトにより位置データを抽出し、これにスムージング処理をかけて得られた時空間データを用いてその判断を行った。この時、合流車*i*について、本線車*j*よりも加速度が大きければ前方を譲らない行動*N*で、小さければ前方を譲る行動*G*であると判断した。この判断については、本研究が対象とする加速車線の短い合流部では、合流車の加速度が大きければ、後方本線車との速度差が大きいとしてみその前方に流入しようと努力していると考えることができ、概ね妥当であると考えている。

行動別の合流車速度決定モデルの推定結果を表-2に示す。なお、下段の斜字体の数字はパラメータの*t*値である。 $v_i(t)$ の単位はm/s、 $L_{ij}(t)$ は本線車*j*の位置を基準にした合流車*i*の位置(単位はm)で

表-3 合流車の期待効用モデルの推定結果

変数	パラメータ	t 値
定数項(N)	62.2	4.56
$ a_i(t+1,N)-a_i(t) $	-1.03	-4.21
$ a_i(t+1,G)-a_i(t) $	2.07	5.71
$L_{j-1,j}(t+1,N,N)P_N(t)$	0.285	5.42
$L_{j-1,j}(t+1,N,G)P_G(t)$	0.941	3.83
$L_{j-1,j+1}(t+1,N,C)P_C(t)$	-2.07	-2.09
$L_{ij+1}(t+1,G,N)P_N(t)$	0.300	5.44
$L_{ij+1}(t+1,G,G)P_G(t)$	0.603	3.44
$L_{j-1,j+1}(t+1,G,C)P_C(t)$	2.20	2.20
$L_i^r(t)$	1.91	5.84
$\beta$		0.05
サンプル数		1222
尤度比		0.911
的中率		0.976

あり、負であれば  $i$  が前方を走行している。  $L_{i,j+1}(t)$  は同様に本線車  $j+1$  の位置を基準にした合流車  $i$  の位置 (単位は m) である。  $uc_i^r(t)$  の単位は秒である。  $L_{i,j}(t)$  については、  $N$  の場合は  $i$  が  $j$  よりも前方に位置し、かつ  $ij$  間のギャップが小さければより加速度を大きくしようと、  $G$  の場合は  $ij$  間のギャップが大きければより加速度を小さくしようとする。 ちなみに、  $N$  の場合に、  $i$  の速度が  $j$  より大きい方のパラメータの絶対値が大きいが、推定に用いたデータの特性として、合流車は本線車より速度が大きいと判断すれば、より加速して素早く本線に流入していたためであると考えられる。  $uc_i^r(t)$  については、合流部終端に近づくほどより加速度を小さくし、かつ  $G$  の方がその度合いが大きいことを意味する。符号条件は整合しており、かつ、パラメータ値もほぼ有意である。

次に期待効用モデルの推定を行う。合流車の本線車に対する初期行動予測確率  $\bar{p}_b$  については、実験時<sup>3)</sup>に観測した東池袋オンランプ付近の本線車の行動シェアがドライバーの認識値と等しいと仮定して、これを用いることにする。推定されるべきパラメータは、式(21)の全パラメータと  $\beta$  であるが、 $\beta$  については同時推定が不可能であり、これを 0.01 刻みで外生的に与え、最大の尤度比を与えた時の  $\beta$  を採用している。合流車の期待効用モデルの推定結果を表-3 に示すが、全てのパラメータで有意な推定結果が得られている。

表-4 行動パターンのシェア

	行動	観測値	シミュレーション
合流車	N	0.550	0.600
	G	0.450	0.400
本線車	N	0.551	0.368
	G	0.095	0.300
	C	0.355	0.332

#### (4) 本線車の合流区間走行モデル

本線車の合流区間走行モデルは(3)と同様の考え方で、式(7),(8)に相当する期待効用モデルは選択肢が  $N,G,C$  の3つとなる。紙面の制約上、定式化や推定結果は省くが、詳細は清水<sup>15)</sup>を参照されたい。

### 5. 走行支援情報提供サービスが合流部の交通運用に与える影響

#### (1) システムの分析特性

始めにシステムの現況再現性を確認するが、その対象については、①個々の車両の走行軌跡、②走行特性を示す集計的な分布、の2つがある。本研究では、軌跡をそのもののマッチングを行うような行動モデルを使用しておらず、②による方法を試みるものとし、再現対象とする分布については、合流車および本線車の行動パターン(合流車は“譲らない”  $N$  と“譲る”  $G$ 、本線車は“譲らない”  $N$  と“譲る”  $G$  と“避走”  $C$ )の割合とした。なお、以下の分析対象合流部は、全て首都高速道路5号線下り東池袋ランプ合流部である。

東池袋ランプ合流部における4時間30分の観測から車線別平均車頭時間間隔と平均速度の入力データを作成し、5時間のシミュレーションを実行した。合流車および本線車の車両行動パターンのシェアについて、観測値とシミュレーション実行値について比較した結果が表-4であるが、本線車が合流車を前方に流入させる傾向が強くなっていることが見て取れる。その原因については、合流車の合流区間走行モデルにおいて停止後合流が十分に表現できておらず、合流部終端で合流車を強制的に流入させる処理を行っていることが考えられる。一方、本線車の避走行動については概ね再現できている。なお、詳細は紙面の制約上割愛するが、上記の傾向が走行車線の評価指標値に何らかの影響を与えているか、以下に示す感度分析の結果もプールして、3つの評価指標値と車線別の譲る割合との関係の相関性から確認したが、その影響はほぼ見られていない。



次に、加速車線長、可視区間長（合流区間開始位置から加速車線開始地点までの長さ）、車線交通量、流入速度、期待効用モデルパラメータを変化させ、評価指標値の感度を確認した。紙面の制約上図表等の提示は控えるが、①合流車線の感度は走行車線のそれよりも大きいこと、②追越車線の利用率を高めれば全車線の運用が改善されること、③合流車と本線車の走行速度差が小さいほど合流車線の運用が改善されること、④安全性を重視するドライバーが多く混入するほど安全性や快適性が低下すること、などが挙げられる。

## (2) 走行支援情報提供サービスの効果の試算

以上のシステム分析特性を踏まえ、走行支援情報提供サービス（以下 AHS-i と称す）の導入による合流部の運用改善に与える効果について、東池袋ランプ合流部を対象に試算した。ここで想定する AHS-i は既に述べたように情報提供板や信号などによらずに、車両内のモニターやスピーカーなどから情報が提供されるシステムを考え、AHS-i 対応車両の混入率を 0% から 10% ずつ増加させ 100% までの 11 種類に設定して、AHS-i の情報提供種別については存在確認のみとした。これらの情報は合流車、本線車ともに可視地点に到達するほぼ 5 秒前となる地点（合流車は 75m 手前、本線車は 100m 手前）で提供される。なお、ドライバーや車両の属性は均一と仮定しており、情報への信頼度は 50% と 90% の 2 つのケースを設定した。以上の設定をもとに 5 時間のシミュレーションを実行し、3 つの合流部の評価指標値を算出した。

本研究のサブモデルでは、定式化の特性上、合流車は“遭遇します”の情報を受け取れば本線車に譲る傾向が強くなり、本線車は逆に“遭遇します”の情報により合流車に譲らない傾向が強くなり、情報の信頼度が高ければこれらの傾向が強くなる。本線車の情報に対するこのような特性については、合流部では本質的に本線車に優先権があり、AHS-i は合流車の方がより譲るようなシステム設計にすべきとの考えに基づいている（ただし、合流車が多い本線同士の合流部では必ずしもそうではない）。以上の特性については、情報信頼度・AHS-i 混入率別の合流車線と走行車線の“譲らない”割合を確認したところ概ね表現できていた。

図-6 は情報信頼度別・AHS-i 車の混入率別の低 TTC 値発生割合を示す。情報信頼度が 50% の場合には混入率の増加に伴い発生割合が低下する傾向は見られないが、90% の場合には混入率が 80% を越えればこれが低下する傾向が見られる。これは、情報

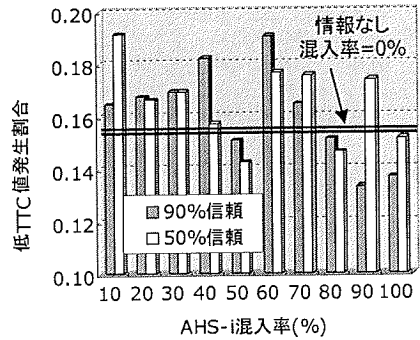


図-6 情報が低TTC値発生割合に与える影響

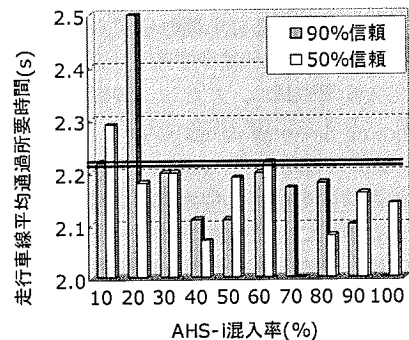
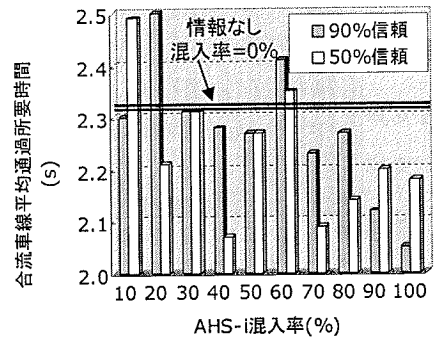


図-7 情報が通過所要時間に与える影響

提供により合流車が本線車に譲る割合が高くなり、結果として危険な合流が減っているためであると考えられる。どちらの情報信頼度についても混入率 50% で指標値が大幅に低下するが、これを説明する明快な理由は今のところない上に、情報なしのケースと比べても改善が見られず、単なる偶然の可能性も否定できない。また、安全性を表現しうる別の指標も検討する必要があるかもしれない。

図-7 は情報信頼度別・AHS-i 車の混入率別の平均通過所要時間を示す。ここでは、情報なしのケースと比べても AHS-i 混入率の増加に伴い所要時間が減少する傾向が見られている。合流車は情報によ

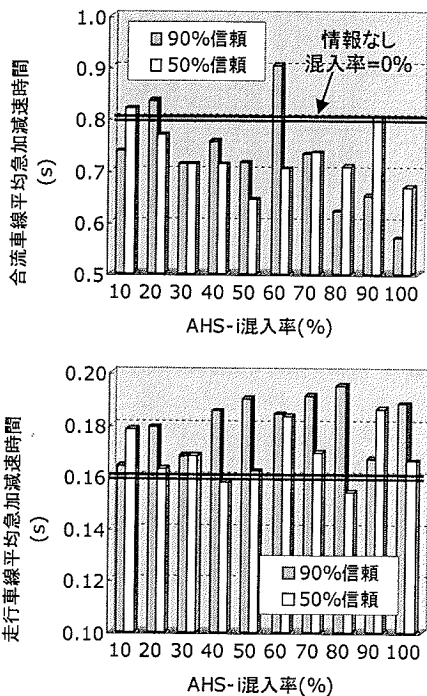


図-8 情報が急加減速時間に与える影響

り譲る傾向が強くなるにも関わらず、結果的に合流車線の通過所要時間が減少することは AHS-i の意義として大変興味深い。ただし、情報信頼度が所要時間減少に与える影響は明確でない。

図-8 は情報信頼度別・AHS-i 車の混入率別の平均急加減速時間を示す。合流車線では、低 TTC 値発生割合と同様に、信頼度が高く、かつ混入率が高い状況では、平均急加減速時間が減少する傾向にある。一方、走行車線では、情報なしのケースと比べて信頼度 90%では平均急加減速時間が増加する傾向が見られる。これは、合流車線では情報提供によって、早めに合流車が本線車に譲るようになり、急激な加減速行動が減少しているためであると考えられる一方、走行車線では情報により本線車が譲らなくなるメカニズムが加速度を増加させた悪影響が考えられる。低 TTC 発生割合の時と同様に、別の指標も検討する必要があると考える。

以上の分析と、本稿では割愛したその他の分析から、もし情報の信頼度が高く、かつ AHS-i 車両の普及が大幅に進めば合流部の安全性と快適性が改善されることになるが、普及の途上ではその効果がほとんど見られないことになる。もちろん、本研究で仮定する情報の信頼度と運転挙動の関係は実証されておらず、推定データの制約からサブモデルにお

けるドライバー属性が均一である問題も抱えている。さらに、合流部の運用評価指標についても、本研究で使用した3つの指標の妥当性は明らかにされていないこと、混入率間の各指標のばらつきが大きく、構築したシミュレーションシステム自体の安定性に依然として改善の余地が残されていることも付記しておく。

## 6. おわりに

本研究は都市高速道路合流部の走行支援情報提供サービスが運用改善に与える影響を把握することを目的として、ドライバーの AHS サービスに対する反応行動のモデル化、マイクロシミュレーションを基礎とした合流部の運用評価分析システムを開発した。主要な結論は以下の4点である。

- ①既存の合流部シミュレーションシステムが AHS サービスの評価に用いることが困難であることを問題意識として、従来は取り扱われていなかった合流部手前区間での挙動、本線車と合流車による相互の挙動決定行動の定式化を行った。
- ②一部のパラメータについては設定値であるが、いくつかの実験・調査データを用いてサブモデルのパラメータ推定を試み妥当な値を得た。
- ③ドライバーの挙動サブモデルと交通流マイクロシミュレーションを統合した合流部の運用評価分析システムを構築し、現況再現性や感度の確認を通じて、その有効性を検討した。
- ④走行支援情報提供サービスが合流部の運用状態に与える影響について試算を行い、情報信頼度の向上とデバイス普及促進が運用の改善に果たす役割を確認した。

今後の課題については、概ね以下の5点に集約されると考えている。

- ①様々な交通流環境、道路構造を持つ合流部でシステムを適用し、その有効性を高めていく必要がある。
- ②情報の信頼度については、その概念の定義や多の表現方法の検討を含め、実証的な研究を行う必要がある。
- ③ドライバーの異質性をできるだけ反映することが必要である。このことは、今後の高齢化の進展など社会情勢の趨勢を鑑みれば明らかである。
- ④より信頼性の高い評価を目指して、合流部におけるドライバーの走行効用の要素と、それを代替的に表現する交通運用変数を特定化する必要がある。

⑤より高度な AHS システム（例えば運転操作支援）の影響についても分析可能なシステムに拡張する必要がある。

**謝辞：**本研究の遂行に当たっては、土木計画学研究委員会の道路利用の情報化・効率化小委員会（平成 10 年度～12 年度，代表：内山久雄東京理科大学理工学部教授）の支援を受けた。モデル推定に使用した走行挙動データの構築には、(株)長大 ITS 事業部の方々の多大な協力を得た。5 章の分析には平岩洋三氏（国土交通省東北地方整備局）の協力を頂いた。また、査読員の方々には著者らの気づかなかった数々の問題点について、大変丁寧にご指摘いただいた。記してここに謝意を表する。

#### 参考文献

- 1) 例えば，国土交通省道路局 ITS ホームページ：  
<http://www.mlit.go.jp/road/ITS/j-html/>
- 2) 屋井鉄雄，大橋正樹，内田智也：高速道路走行における心理的負担の計測と安全性評価に関する研究，都市計画論文集，Vol.35，pp.541-546，2000。
- 3) 清水哲夫，飯島雄一，屋井鉄雄：高速道路合流部における走行支援情報提供に関する一考察，土木計画学研究・論文集，Vol. 19，No.4，pp.839-846，2002。
- 4) 森川美信，松本健二郎：合流部シミュレーションモデルの開発，交通工学，Vol.22，No.6，pp.31-44，1987。
- 5) 喜多秀行，原田裕司：流入タイミング調整行動を考慮した流入挙動モデル，土木計画学研究・論文集，No.12，pp.673-679，1995。
- 6) Ran, B., Leight, S. and Chang, B. : Microscopic simulation analysis for automated highway system merging process, Transportation Research Record, 1651, pp.98-106, 1998.
- 7) 中村英樹，桑原雅夫，越正毅：織り込み区間の交通容量算出シミュレーションモデル，土木学会論文集，No.440/IV-16，pp.51-59，1992。
- 8) Fazio, J. and Rouphail, N. M. : Conflict simulation in INTRAS: Application to weaving area capacity analysis, Transportation Research Record, 1287, pp.96-107, 1993.
- 9) Zarean, M. and Nemeth, Z. A. : WEAVSIM: A microscopic simulation model of freeway weaving sections, Transportation Research Record, 1194, pp.48-54, 1990.
- 10) 松本健二郎，高橋秀喜，井上淳一，辻光弘：織り込み区間長評価のための交通シミュレーションモデルの開発，土木学会論文集，No.440/IV-16，pp.61-69，1992。
- 11) Kita, H. and Fukuyama, K. : A merging-giveway Behavior model considering interactions at expressway onramps, Transportation and Traffic Theory, pp.173-187, 1999.
- 12) 高山純一，中山昌一郎，宇野伸宏，飯田恭敬，玉元将裕，住友拓哉：一般道路合流部の交通錯綜における避走挙動解析，土木計画学研究・論文集，Vol. 19，No.4，pp.847-852，2002。
- 13) 喜多秀行，前田信幸，塩谷直文：高速道路流入部における先行避走挙動の観測，土木計画学研究・講演集，No.23(2)，pp.791-792，2000。
- 14) 中村英樹，劉俊晟：道路の提供するサービスの質とその計量化，土木計画学研究・講演集，No.23(1)，pp.756-757，2000。
- 15) 清水哲夫：効率的な車両空間配分による都市高速道路の交通流円滑化に関する研究，平成 14 年度東京工業大学博士論文  
(2002. 12. 24 受付)

## MICROSCOPIC TRAFFIC SIMULATION SYSTEM AT MERGING SECTION OF URBAN EXPRESSWAY CONSIDERING USER'S BEHAVIOR UNDER INFORMATION SERVICES

Tetsuo SHIMIZU, Tetsuo YAI and Tohru MIMURO

The objectives of the study are to model driver's reactive behavior for the information services and mutual behavioral decision processes between vehicles at merging section of urban expressway, to construct integrated evaluation system of traffic flow at merging section by the combination of behavior model and microscopic traffic flow simulation model, and to analyze the effect of information services on the improvement of traffic flow at merging section. Through the simulation, the relation among composition of AHS vehicles, driver's degree of confidence for information contents, and improvement of traffic flow is analyzed.