

高速道路合流部におけるミクロ交通流シミュレーションモデルの開発* ～ 走行支援システムの評価に向けて～ Microscopic Traffic Flow Simulation Model at Merging Section of Expressway*

清水哲夫**・平岩洋三***

By Tetsuo SHIMIZU**・Yozo HIRAIWA***

1. はじめに

我が国のAHS研究開発は、平成12年12月に事故死者数の削減を目指した7つのAHSユーザーサービスに関する実証実験¹⁾が行われ、分合流支援サービスの検討など新たな取り組みが始まっている段階にある。そのコンテンツを検討するために、何らかの効果分析ツールが必要となるが、簡易な走行支援情報提供の実験²⁾は行われているものの、筆者の知る限りAHS下での合流部の運転挙動を表現したモデルは現時点ではほぼ存在しないものと考えられる。また、従来の研究^{3),4)}では、合流部を走行する車両相互の意志決定プロセスがほぼ反映されていない、合流部運用の評価指標が十分に整備されていない、などの問題を抱えており、その改良も急務であろう。

本稿では、合流部の走行支援システムが評価可能な分析モデルを開発する初期段階として、走行支援情報提供に特化した、都市高速道路合流部の運転挙動を表現するシミュレーションモデルを提案する。なお、本稿は先行論文⁵⁾の考え方をベースに内容を再検討・詳細化したものである。

2. シミュレーションモデルの枠組み

(1) 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のように考える。合流車は、アプローチ区間において最適な合流が行えるように速度調整を行いながら合流区間への流入速度を決定し、本線

車の行動を認識しながら速度調整を行いつつ、流入を希望するギャップを決定し、流入可能と判断すれば車線変更を行う。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、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し、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プロセスで車線変更を試みる。車線変更を希望しない場合には、合流車の行動を認識しながら速度調整を行いつつ、合流車を前のギャップに受け入れるか、受け入れないかを決定する。

このプロセスの中で走行支援情報提供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、流入を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。

(2) ドライバーの合流部運用評価指標

本稿では、合流部におけるドライバーの走行効用は以下の3つの要素からなると考える。

安全性：事故に遭遇しないように合流したい
快適性：急な運転操作がない合流を行いたい

*キーワード：交通流，ITS，交通制御

**正員，工修，東京大学大学院工学系研究科社会基盤工学専攻（〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1，TEL:03-5841-6129，E-mail:sim@planner.t.u-tokyo.ac.jp）

***学生員，東京大学大学院工学系研究科社会基盤工学専攻

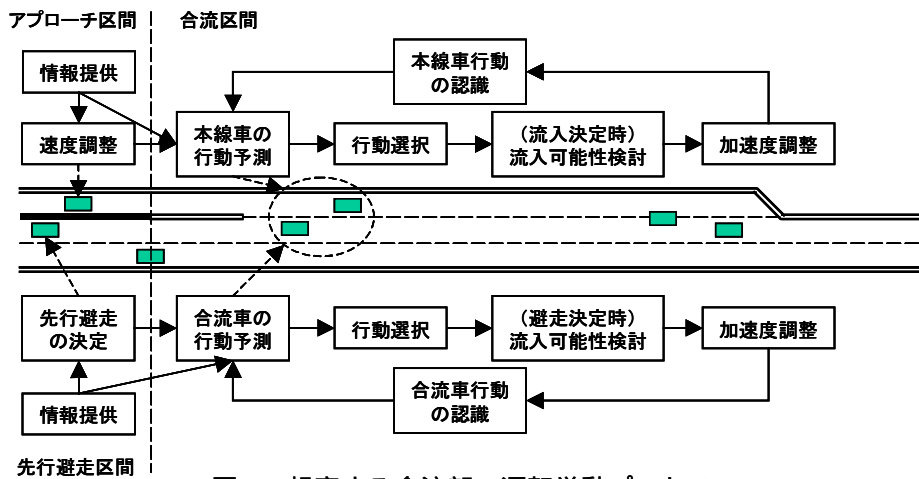


図-1 想定する合流部の運転挙動プロセス

効率性：合流時間をできるだけ短くしたい

ドライバーは、これらに重みをつけて意志決定を行うが、本稿では個人差は考慮しない。それぞれの効用要素をどの走行変数で表現するかは十分な研究蓄積がなく今後の課題であるが、本稿では安全性は他の車両や道路構造とのギャップ、快適性は加減速の変化速度や相手に前方を譲ることの不快感、効率性は合流所要時間などで与えることにする。

(3) シミュレーションモデルの概要

本稿のシミュレーションモデルは、都市高速道路のランプ合流部で、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みを対象とし、分析範囲は合流部手前300mの地点から合流部加速車線ノーズ端から100m先の地点までである。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秒間隔で移動する。意志決定を表現するサブモデルとして、アプローチ区間走行モデル、先行避走区間走行モデル、合流区間走行モデル、本線走行追従モデル、が構築されている。プログラミングは、Microsoft Visual C++ Ver.6.0で行った。詳細なフローについては清水⁶⁾を参照されたい。

3. サブモデルの概要

(1) アプローチ区間走行モデル

従来の合流部ミクロシミュレーションモデルでは、アプローチ区間のモデルは検討されていないが、

走行支援情報提供の評価を目的とした場合には、当該区間の運転挙動を表現する必要が生じる。紙面の制約上詳細は省くが、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（本稿では正規分布を仮定、平均値と標準偏差は実験²⁾による観測結果）を持っており、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。

(2) 先行避走区間走行モデル

これも従来のモデルでは直接的に検討されていないが、走行支援情報を考慮する場合には、やはり重要である。本稿ではドライバーが先行避走しようとする確率 P^{gw} を以下の式で表現する⁵⁾。

$$P^{gw} = 1/[1 + \exp\{-0.256(T_1 - T_2) - 1.19PMR(\alpha) - 2.13\}] \quad (1)$$

ここで、 $T_1 - T_2$ は車線の所要時間差、 $PMR(\alpha)$ は情報信頼度 α の合流車遭遇確率の認識値である。この判断は先行避走区間内で絶えず行われているが、ここでは1秒ごとに式(1)により確率を算出する。

ここで、 $PMR(\alpha)$ の決定方法について説明する。今、存在確認（“遭遇します” / “遭遇しません”）情報が提供されたとする。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、情報提供がない場合、“遭遇します”との情報を受け取った場合、“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。

$$\text{情報なし } PMR(\alpha) = PMR(0) \quad (2)$$

$$\text{遭遇します } PMR(\alpha) = PMR(0) + \alpha[1 - PMR(0)]/100 \quad (3)$$

$$\text{遭遇しません } PMR(\alpha) = (100 - \alpha)PMR(0)/100 \quad (4)$$

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。

(3) 合流車の合流区間走行モデル

本稿では、合流車と本線車がお互いを確認した

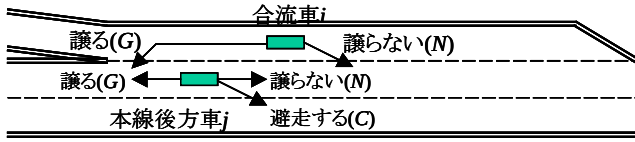


図-2 合流車と本線後方車の取りうる行動

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jの行動	合流車iの行動	iの効用	iのj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)	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)	$U_{GC}(t)$	

段階からお互いの行動を想定しながら挙動を順次決定するモデルを提案する．図-2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．

$$\bar{U}_N(t) = P_N(t)U_{NN}(t) + P_G(t)U_{NG}(t) + P_C(t)U_{NC}(t) \quad (5)$$

$$\bar{U}_G(t) = P_N(t)U_{GN}(t) + P_G(t)U_{GG}(t) + P_C(t)U_{GC}(t) \quad (6)$$

合流車は，この2つの期待効用を比較して確率的に行動を選択する．

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，

$$P_N(0) = \bar{P}_N + \alpha(1 - \bar{P}_N)/100 \quad (7)$$

$$P_G(0) = [\bar{P}_G \{1 - P_N(0)\}] / (\bar{P}_G + \bar{P}_C) \quad (8)$$

$$P_C(0) = [\bar{P}_C \{1 - P_N(0)\}] / (\bar{P}_G + \bar{P}_C) \quad (9)$$

“遭遇しません”の情報を受け取った場合を，

$$P_B(0) = \bar{P}_B, \quad (B = N, G, C) \quad (10)$$

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とを意味している．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．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，

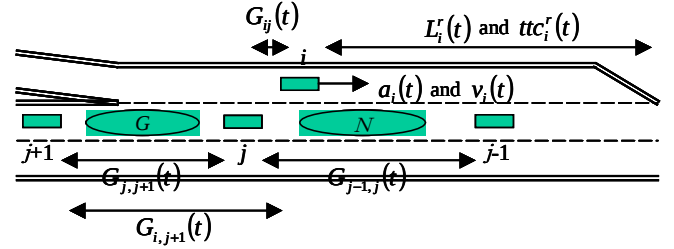


図-3 行動選択時における車両の位置関係(時刻 t)

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，

$$P_N(t) = (1 + \beta)P_N(t-1) \quad (11)$$

$$P_G(t) = P_G(t-1)\{1 - P_N(t-1)\} / \{P_G(t-1) + P_C(t-1)\} \quad (12)$$

$$P_C(t) = P_C(t-1)\{1 - P_N(t-1)\} / \{P_G(t-1) + P_C(t-1)\} \quad (13)$$

本線車が譲れば，

$$P_G(t) = (1 + \beta)P_G(t-1) \quad (14)$$

$$P_N(t) = P_N(t-1)\{1 - P_G(t-1)\} / \{P_N(t-1) + P_C(t-1)\} \quad (15)$$

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

で与えられると考える． β は正のパラメータである．すなわち，もし本線車が譲らなければ，次の時間帯もその状態が継続することを意味している．

次に，合流車 i が行動 B_i を，本線後方車 j が行動 B_j を選択した場合の i の効用を以下のように表現する（車両の記号と位置関係は図-3）．

$$U_{B_i, B_j}(t) = \theta_{B_i 1} |a_i(t+1, B_i) - a_i(t)| + \theta_{B_i 2} G_{j-1, j}(t+1, B_i, B_j) + \theta_{B_i 3} G_{j, j+1}(t+1, B_i, B_j) + \theta_{B_i 4} G_{j-1, j+1}(t+1) + \theta_{B_i 5} L'_i(t) \quad (17)$$

ここで， $|a_i(t+1, B_i) - a_i(t)|$ は i が B_i 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． $G_{j-1, j}(t+1, B_i, B_j)$ は i が B_i ， j が B_j 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， $G_{j, j+1}(t+1, B_i, B_j)$ は i が B_i ， j が B_j 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， $G_{j-1, j+1}(t+1)$ 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． $L'_i(t)$ 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，各パラメータ θ は B_j ごとに決定される．

式(17)では自己の加速度 $a_i(t+1, B_i)$ を決定し，かつ $G_{j-1, j}(t+1, B_i, B_j)$ ， $G_{j, j+1}(t+1, B_i, B_j)$ を決定するために， j の行動別の次期加速度 $a_j(t+1, B_j)$ を予測しなければならないが，以下のように与える．

$$a_i(t+1, B_i) = \theta_{B_i,1} v_i(t) + \theta_{B_i,2} G_{ij}(t) + \theta_{B_i,3} G_{i,j+1}(t) + \theta_{B_i,4} ttc_i^r(t) + Const. \quad (18)$$

ここで、 $v_i(t)$ は時刻 t の i の速度、 $G_{mn}(t)$ 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 θ は B_i ごとに決定される。式(17),(18)のパラメータ推定結果は清水⁶⁾を参照されたい。

(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)と同様の考え方である。詳細は清水⁶⁾を参照されたい。

4. 走行支援情報提供の効果の試算

構築したシミュレーションモデルについて、現実再現性や道路構造、流入需要などの感度分析を通じてその分析特性を把握し⁶⁾、首都高5号線下り東池袋ランプ合流部を対象に、存在確認情報が合流部の安全性（合流完了時TTCが3秒以内の発生割合）、効率性（平均通過所要時間）、快適性（ $\pm 3\text{m/s}^2$ より大きい加速度の継続時間）に及ぼす影響に関する若干の試算を行った。その方法は、情報の信頼度が一律50%、90%の2つのケースについて、情報提供を受ける車両（AHS-i車と称す）の混入率を0%～100%まで変化させた場合の上記3つの指標値を、5時間分のシミュレーションを実行している。なお、情報提供は合流車、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。

図-4は情報信頼度別・AHS-i車混入率別の平均急加減速時間を示す。合流車線では、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、情報提供による平均急加減速時間の変化はほぼ生じていないことが伺える。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。

その他、情報提供による効率性の向上は認められず、安全性は大きなAHS-i混入率かつ高い信頼度の下で向上する。信頼度が高ければ、AHS-i車

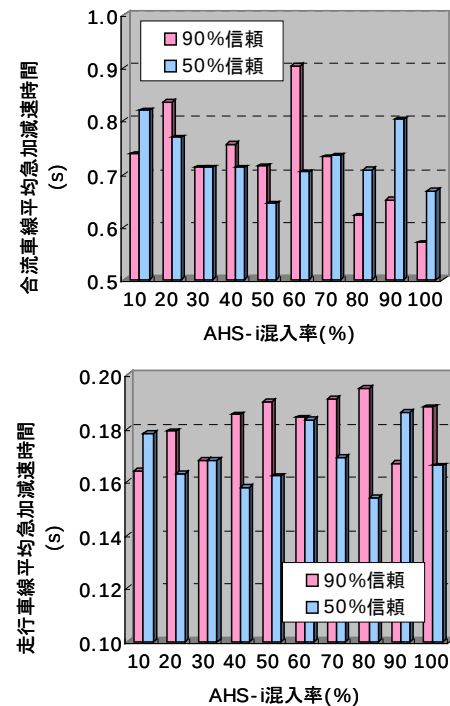


図-4 情報信頼度・混入率別の平均急加減速時間

混入率の増加に伴って先行避走率が増加する傾向が見られる、などの結果が得られている。

5. おわりに

本稿は、合流部の走行支援情報提供の評価が可能な都市高速道路合流部の運転挙動を表現するシミュレーションモデルを基礎的に開発した。今後は、情報への反応の個人差の考慮、他の地点へのモデル展開などが課題である。

参考文献

- 1) 例えば、<http://www.mlit.go.jp/road/ITS/j-html/>
- 2) 飯島雄一、清水哲夫、屋井鉄雄：高速道路合流部における走行支援情報提供方法に関する考察、土木計画学研究・講演集、No. 24 (CD-ROM), 2001.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 清水哲夫、三室徹、飯島雄一：走行支援システムの評価のための高速道路流入部におけるミクロ交通解析、第37回土木計画学シンポジウム論文集、pp. 33-40, 2001.
- 6) 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請求論文