

ITS 技術が流入部のサービス水準に及ぼす影響評価*

An Evaluation of Advanced Lane Changing Advisory at On-Ramps

喜多秀行**・原口晃***・前田信幸****

By Hideyuki KITA, Akira Haraguchi and Nobuyuki Maeda

1. はじめに

道路の流入部では、ドライバー相互間の意思疎通が十分できないことに起因する危険や不効率が少なからず生じている。ITS 技術を導入することにより、既存技術の下では困難であった危険状況の発生予測や運転意図の伝達などが容易なものとなり、“車線利用の個別誘導”や“交通錯綜の事前回避”などきめ細かな運用・管理・制御が可能となる。その際に重要なことは、交通流全体の円滑性や安全性の向上とともに、個々のドライバーが“走りやすくなった”と感ずることであるが、この点についてはあまり知見が得られていない。

本研究では、流入部区間における錯綜やそれを回避するための相互依存的な判断における情報の欠落が危険性や不効率性をもたらしていることを指摘し、ITS 技術に基づく情報提供がサービス水準の改善にもたらす影響と、その改善に効果的な運用管理方策を、ドライバーの認識という観点から検討する。

2. 流入部で生起する“囚人のジレンマ”

(1) 流入-避走行動のゲームとしてのモデル化

流入部ではしばしば流入車と本線車との交錯が生じるため、流入車は本線車の、本線車は流入車の動きにそれぞれ注意を払いつつ、互いに協調したり牽制したりしながら走行している。Kita and Fukuyama¹⁾は、流入車ドライバーと本線車ドライバーの間に存在するこのような運転行動の相互依存性に着目し、これを 2 人非協力ゲームで記述するモデ

ルを構築した。このモデルは、互いに相手の行動に即して行動するという実態を比較的うまく説明するものではあったが、そこで用いられている利得は、独立に推定された流入車ドライバーの効用関数と本線車ドライバーの効用関数を単に組み合わせたものにすぎず、必ずしも整合的なものではなかった。

この不整合を避けるため、塩谷・高橋・喜多・谷本²⁾は、両者の利得パラメータを一括して同時推定する方法を提案した。さらに、藤原・喜多・谷本³⁾は、利得の誤差項に存在する系列相関性を考慮した推定法へと拡張を行った。

(2) “囚人のジレンマ”の生起と情報提供による不効率の解消

流入・避走ゲームにおいては、図 1 に示す流入車 [1]とその直近後方の本線車[2]の2台をプレイヤーと考えている。その行動はそれぞれ「流入しない($i=1$)、する($i=2$)」、「避走しない($j=1$)、する($j=2$)」である。他の車両はゲームを特定化する環境の一部と考える。表 1 は本ゲームの利得表である。利得 U_{ij}^k は、図 1 に示す車間距離および相対速度で規定される TTC (time to collision) により特定化され、8 つの均衡解が導出される。詳しくは文献 3) を参照されたい。

東名豊田ICのオンランプ流入部におけるビデオ観測データ⁴⁾から利得関数のパラメータと均衡解選択

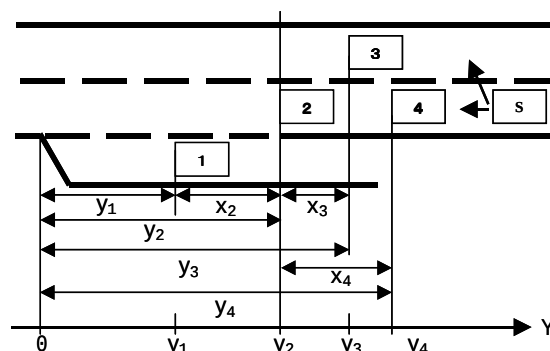


図 1 ゲームの状況と利得の説明変数

*キーワード：流入部，先行避走誘導，サービス水準

**正会員 工博 鳥取大学工学部社会開発システム工学科
(鳥取市湖山町南4丁目101番地，TEL0857-31-5309，
FAX0857-31-0882)

***学生会員，鳥取大学大学院工学研究科博士前期課程社会
開発システム工学専攻（同上）

****正会員，(株)建設技術研究所道路交通部，鳥取大学大学院
工学研究科博士後期課程社会システム工学専攻（同上）

表1 流入-避走ゲームの利得表

		Player 2	
Player1	action	A_1^2	A_2^2
	A_1^1	(U_{11}^1, U_{11}^2)	(U_{12}^1, U_{12}^2)
	A_2^1	(U_{21}^1, U_{21}^2)	(U_{22}^1, U_{22}^2)

確率を推定し、どのような均衡解が生じているのかを分析した。ここに、均衡解選択確率とは、均衡解が複数存在する場合にそれぞれの均衡解が実現する確率を表す概念である²⁾。流入-避走ゲームの8つの均衡解（純粋戦略下の均衡解4つと混合戦略下の均衡解1つからなる組み合わせ）のどれが実現するかは車両の位置関係や速度差によって規定される。

分析の結果、“流入車は本線車が避走してくれないだろうと推測して流入を見送り、本線車は流入車が流入してくるだろうと推測して避走する”という一種の「囚人のジレンマ」の生起が確認され、意図せざる不効率が発生していることが明らかとなった。

流入車または本線車のいずれかが相手に対して運転意思を適切に伝達することができれば、情報の不完備性に起因する囚人のジレンマは解消され、“流入する-避走しない”という危険な状況や“見送る-避走する”という不効率的状況の発生が防止され、より望ましい交通状態が実現される。これにより、運転環境に対するドライバーの評価も向上するものと考えられる。

しかし、流入部区間内における情報提供や誘導はその影響を受ける一連の行動を短時間のうちに完了させることを要求する。そのため、ドライバーの行動を含めた意味での信頼性が高いかなり高度なシステムが必要である。そこで次節では、少しは時間的に対処する余裕のある上流側の地点ではたらきかけを行う“先行避走誘導”について検討する。

3. 先行避走誘導情報の提供

(1) 先行避走

流入部区間で流入車との“錯綜状態”を解消するために行われる通常の避走に対し、流入部より上流側の未だ流入車の存在を確認できない地点で流入車との“錯綜可能性”を避けるために予め避走が行われることがあり、これを“先行避走”と呼んでいる。

通常の避走に比べ、ドライバーはある程度の時間的余裕をもって運転することができる。

著者らによる東名豊田ICおよび岡崎ICでの観測結果⁴⁾によると、比較的多くの車両が先行避走を行っている。それらの多くは、ノーズ端から上流方向に向かって150～200m程度の地点からノーズ端に至る区間でなされており、先行避走が始まる地点とノーズ端で車線利用率が逆転することも少なくない。

第一車線を走行しているドライバーは、このまま流入部に近づいていった場合に流入車との錯綜が生じるか否かに関する情報を持っていないため、過去の経験等により予想する“錯綜の可能性”に基づき行動を決定せざるを得ない。錯綜の可能性はあくまで“可能性”でしかないので、実際には先行避走をしなくても錯綜が生じないこともある（観測ビデオ映像等からもこのことが確認できる）。このような場合、先行避走は必ずしも必要でなく、かえって内側車線の混雑をむやみに増大させている可能性もある。

したがって、流入車の位置情報など錯綜の発生可能性に関する情報を的確に提供することにより、先行避走の有効性は大きく改善される可能性がある。

(2) 先行避走挙動のモデル化

このことを確かめるため、まず先行避走誘導がなされず、第1車線を走行する車のドライバーが自らの判断のみで避走するかしないかを定める状況をモデル化しよう。

先行避走に関する意思決定者（以下、「先行避走車」と呼ぶ）は本線走行車線を走行しているものとする。先行避走車はこの後に流入部で流入-避走ゲームに加わることの効用と、流入-避走ゲームを避けて第2車線を走行することの効用を比較・評価する。

ドライバーは均質であると仮定し、車線別効用 U_m ($m=1$:第1車線, $m=2$:第2車線) を、流入車との錯綜に関わる効用の期待値 ER_m と混雑による所要時間の増分 D_m から構成される以下の線形効用関数で定義する。

$$U_m = ER_m(q_1, q_2) + \beta D_m(q_m) \quad (1)$$

ここに、 $q_m = q_m(p)$ は車線 m の交通量、 p は後に求める先行避走確率、 β はパラメータである。

先行避走を行う場合と行わない場合の期待利得 ER_1, ER_2 はそれぞれ(2)(3)式により求められる。

$$ER_1 = g_{11}^1 + g_{12}^1 + g_{21}^1 + g_{22}^1 + h \quad (2)$$

$$ER_2 = g_{11}^2 + g_{12}^2 + g_{21}^2 + g_{22}^2 \quad (3)$$

g_{ij}^n は行動の組み合わせ (i,j) が生起する場合の車両 n の期待利得である。例えば「流入する」「避走する」という行動の組み合わせが生じた場合の車両 3 の期待利得 g_{22}^1 は次式のように計算される。

$$g_{22}^1 = \int_{\alpha_4}^{\infty} \int_{\frac{(v_2^2 - v_1)y_1}{v_1}}^{y_1} \int_0^{\frac{v_3 - v_2^2}{v_2^2 - v_1} x_2} \frac{x_3}{v_2 - v_1} \cdot f_{x_2}(x_2) f_{x_3}(x_3) f_{x_4}(x_4) dx_3 dx_2 dx_4 \quad (4)$$

ここに、 v_1, v_2 はそれぞれ流入車と本線車（第 1 車線）の走行速度、 $f_{x_2}(x_2)$ は流入車[1]からみた本線車[2]の後方ラグ分布、 $f_{x_3}(x_3)$ と $f_{x_4}(x_4)$ は第 1 車線と第 2 車線の車頭間隔分布である。

また h は先行避走のため第 2 車線へ車線変更する際の効用の期待値で、次式で与えられる。

$$h = \int_0^{\infty} \frac{y}{v_3 - v_2} q_2 \exp[-q_2(y - \alpha)] dy \quad (5)$$

ここに、 v_2, v_3 はそれぞれ第 1 車線と第 2 車線の走行速度、 α は最小車頭間隔である。

第 1 車線を走行しているドライバーは、第 1 車線を走行し続けることによる効用 $U_1(p; q_1, q_2)$ と第 2 車線へと先行避走することによる効用 $U_2(p; q_1, q_2)$ を比較し、高い方の行動を選ぶ。したがって、均衡状態下における先行避走確率 p_e は、

$$U_1(p_e; q_1, q_2) = U_2(p_e; q_1, q_2) \quad (6)$$

を満たす $p = p_e$ として求めることができる。

(3) 先行避走誘導による交通状況の改善

ITS 技術により、ドライバーの主観的判断のみで先行避走を行っている状況下で生じている“しなくてもよかった先行避走”や、“先行避走していれば避けることができた錯綜”を解消することができる。

いま、先行避走区間上流端における第 1 車線と第 2 車線の交通量が q_1^0, q_2^0 であり、先行避走を行わない場合に第 1 車線上の走行する本線車のうち流入車と錯綜する車両の比率が γ であるとする。しかるべ

き ITS 技術により錯綜が生じる本線車を特定して当該本線車には避走誘導情報を、他の車両には避走の必要がない旨の情報提供を行い、全車両がその誘導に従うとすれば、誘導後の車線別交通量 q_1^1, q_2^1 は、

$$\begin{aligned} q_1^1 &= (1-r)q_1^0 \\ q_2^1 &= q_2^0 + r q_1^0 \end{aligned} \quad (7)$$

となる。

誘導により流入部の錯綜がすべて回避されれば、車線 m ($m=1,2$) を走行するドライバーの効用 U_m^1 は、

$$U_m^1 = \beta D_m(q_m^1) \quad (8)$$

となる。このとき、先行避走の誘導情報を提供することによる当該区間の交通状況改善効果 ΔU_m は、

$$\Delta U_m = U_m^1(q_m^1) - U_m(q_1, q_2) \quad (9)$$

で評価される。

(4) 数値例

ビデオ観測を行った東名豊田 IC 上り線オンランプ流入部を念頭に置いたモデル分析を行った。25 分間の観測における各車線の交通量は、流入車線 261(台)、第 1 車線 312(台)、第 2 車線 336(台)、312 台のうち 68 台がその後先行避走を行った。流入車の平均走行速度は 82.8(km/h)であり、Underwood の式、

$$v_i = v_i^f \cdot e^{-k/k_c} \quad (10)$$

により推定した第 1 車線と第 2 車線の自由走行速度は 85.8(km/h)と 95.7(km/h)である。車頭間隔分布はシフトした指数分布を、後方ラグ分布は指数分布を仮定し、車線利用率の上昇に伴う所要時間の増分 D_m は(10)式の Underwood 式を用いて算定した。

第 1 車線交通量に占める先行避走車両台数の比率として求めた均衡先行避走確率は 0.218 であり、(1)式の効用パラメータ β は $\beta = -0.0294$ 、先行避走を行わない場合の流入車との錯綜確率は $r=0.220$ と算定された。避走誘導を行わない時の各車線の均衡期待効用は $U_1 = U_2 = 0.0014$ であった。

他方、避走誘導を行った時の各車線のサービス水準は、第 1 車線で $U_1^1 = 0.0015$ 、第 2 車線で $U_2^1 = 0.0017$ となった。避走誘導を行うことにより、いずれの車線のサービス水準も改善されたことになる。

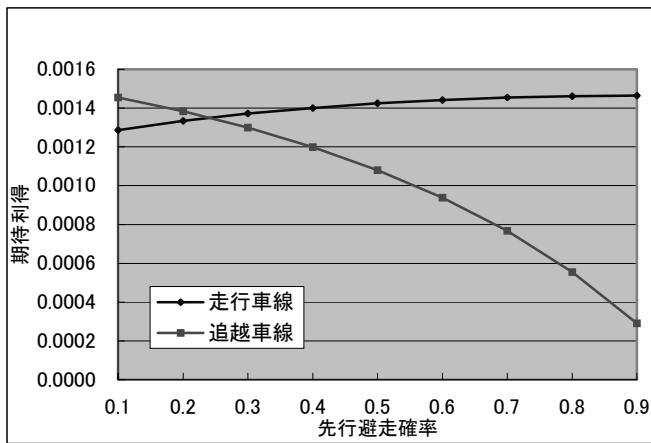


図2 均衡先行避走確率

すなわち、第1車線では錯綜の解消効果とわずかではあるが先行避走車の減少による若干の混雑の低下が生じ、第2車線では流入部区間で避走する車両との錯綜の解消がと先行避走車の若干の増加による混雑の増大を上回った結果、双方共に改善効果が現れたものと推察される。

4. 情報提供と交通制御の方法に関する若干の議論

前節の検討においては、流入車と本線車の錯綜が予測される場合に、本線車の方にその情報を提供し、第1車線から第2車線への車線変更により避走するよう誘導することとしていた。しかし、本線車のみ働きかけるこの方法が全体的にみて望ましいものであるかどうかについては議論が残るところである。

まず流入車と本線車のどちらを誘導すべきなのかという点であるが、本線車のみを誘導する上述の方法では流入車は何の誘導も受けないため、流入交通量が多い場合には主として本線側にしわ寄せがくる可能性がある。逆に、錯綜が生じる場合に流入車の流入を抑制する方法をとれば、流入交通量が増加しても本線の流れが極端に悪くなることは避けられるが、本線の非効率な車線利用が温存されるという可能性が残る。したがって、両者を適切に組み合わせた方法を探る必要がある。

また、錯綜が予測される第1車線の車両を車線変更ではなく減速して錯綜を回避する、という方法もある。この方法では車線別交通量が変化しないため、第2車線の交通量をそれ以上高めたくない場合に有利であるが、第1車線の交通量が多い場合には後続車に減速の影響が波及するため注意が必要である。

流入部の下流側の交通容量を超えない範囲の交通量であれば、下流側で最適な車線利用率が実現する誘導比率で先行避走効果の高い本線車から誘導を行い、それにより実現した第1車線の交通状況に基づいて減速避走と流入抑制を適切に組み合わせる、という方法を探ることが望ましいと考える。

5. おわりに

本研究では、流入部区間で情報の欠落に起因する不効率な事態が生じていることを指摘し、先行避走誘導の効果を検討する簡単なモデルを構築した。数値例を通じて、先行避走誘導の有用性についての示唆が得られた。

しかし、上記のモデル化では、誘導した車両が前後の車両に接近しサービス水準に影響を及ぼすことなど、考慮していない要素が少なからず残っている。実際にはこれらの要素による影響が無視できないこともあるため、シミュレーション実験を行うなど動的な影響を踏まえた検討を行う必要がある。また、ドライバーの行動特性に関する異質性についても考慮しておく必要がある。同一の誘導発出基準であってもドライバーの抱く認識は同一ではないため、その認識の差異を考慮し、適切な誘導発出基準を検討する必要がある。いずれにせよ、ITS技術の導入を検討する際には、サービス水準に対する個々のドライバーの認識を適切に評価することが重要となろう。

参考文献

- 1) Kita, H and K Fukuyama: A Merging-Giveway Behavior Model Considering Interactions at Expressway On-Ramps, in Ceder, A. (ed): *Transportation and Traffic Theory*, Pergamon, pp.173-187, Amsterdam, 1999.
- 2) 塩谷・高橋・喜多・谷本：複数均衡解を持つゲームの逆推定法 —均衡解選択確率と利得の同時推定, 土木学会第56回年次学術講演会講演概要集, IV, pp.326~327, 2001.
- 3) 藤原・喜多・谷本：非観測誤差の系列相関を考慮したゲームの利得推定法, 土木学会中国支部平成14年度研究発表会概要集, 2002. (印刷中)
- 4) 喜多・塩谷・前田：流入部における先行避走挙動の実態と交通への影響, 第21回交通工学研究発表会論文報告集, pp.333~336, 2001.