

高速道路流入部における流入・避走行動のゲーム論的分析*

A Game Theoretic Analysis of Merging-Giveway Interactions at Expressway On-Ramps*

福山 敬**・喜多秀行***

By Kei FUKUYAMA** and Hideyuki KITA***

1. はじめに

高速道路では、一般道路に比べて高速走行となるため、わずかな運転ミスが事故に結びつきやすく、しかも一度事故が発生すると被害が大きく関連車両や死傷者も多数に及ぶ重大事故に発展することが多い。中でも、高速道路流入部は、単路部に比べて事故の危険性が高い。それは、流入車と本線走行車の錯綜が避けられないため、車両同士の追突・接触事故の割合が高いからである。したがって、流入部で生起する交通現象や交通挙動を理解することは、高速道路全体の安全性や快適性を向上させるための効果的方策を考える上で重要であると考えられる。

交通工学における今までの流入部交通行動に関する研究では、流入車の流入位置ごとの流入確率や、流入時の車頭間隔分布といった挙動解析や、流入車の速度調整行動を考慮した合流挙動解析などが行われてきた。これらの研究では、本線走行車が流入車の流入挙動に及ぼす影響のみを考えている。しかし、実際には流入部では、流入車の挙動も本線車の挙動に影響しており、さらにそれがまた流入車の挙動に影響しているといったように、両者の意思決定は相互に影響を及ぼし合っており、それを的確に把握、分析するためにはこれらの相互作用を一体として考慮する必要がある。最近になってようやく一部の研究者が本線車と流入車の相互作用を把握することの重要性に注目しはじめているが²⁾³⁾、現段階では観測した交通流挙動の整理にとどまっており、そのメカニズムについてはほとんど何もわかっていない。

このような観点から著者らは、交通現象の生成主

体である流入車と本線走行車のドライバーの意思決定に着目し、ドライバー間の互いに影響し合う意思決定を明示的に考慮できるゲーム理論を用いて高速道路流入部でのドライバーの挙動モデルを構築した¹⁾。しかしながら、複数均衡解に対する実現解の判定など、均衡解の解釈やそのモデル分析に関する考察が必ずしも十分ではないと考える。本研究では、喜多ら¹⁾のアプローチを踏襲し、高速道路流入部を走行する車両のドライバーの意思決定を合理的主体による完全情報下の意思決定問題としてとらえ、非協力ゲーム理論を用いてモデル化する。そのとき求められる均衡解を分析することにより、ドライビング環境が各ドライバーの意思決定や流入部に発生する現象にもたらす影響を分析する。これにより流入部の設計法を開発する上で有用な知見を与えるものと考ええる。

2. モデル

(1) モデル構築の基本的な考え方

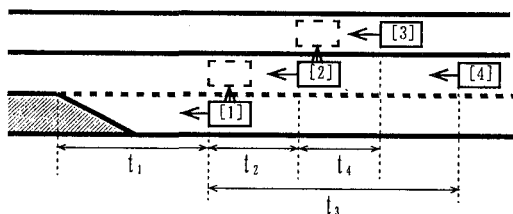
流入や車線変更といった高速道路を走行する各ドライバーの意思決定には様々な環境要因が影響していると考えられる。ドライバーは各時点において周辺の車両及び環境からもたらされる危険を考慮し、走行に関する意思決定を行うと考えられる。このとき、各車両のドライバーは互いに事前に打ち合わせをしたり取り決めを行うことはできない。ある車両の存在は周辺の車両の走行に関する意思決定に影響を及ぼし、その影響もまた最初の車両のドライバーの意思決定に影響する。このように考えると、高速道路上のある範囲に存在する複数の車両がひとつの非協力ゲームを行っていると考えられる。

図-1のような高速道路流入部を想定する。図-1の各車線は、下方から上方に、加速車線、走行車

*キーワード：交通流，交通安全，運転行動分析

**正員，Ph.D.，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，TEL 0857-31-5311，
FAX 0857-31-0882)

***正員，工博，鳥取大学工学部社会開発システム工学科
(同上，TEL 0857-31-5309，FAX 0857-31-0882)



図－1：流入部における走行車の位置関係

線、追い越し車線である。このとき、流入車（図中〔1〕）より本線車（図中〔2〕、〔4〕）、本線車より追い越し車線車（図中〔3〕）の方が高速であるとする。加速車線に1台のみ存在する流入車が本線に流入する場合について考える。本研究では、流入による錯綜の当事者である流入車〔1〕とその直近後方の本線車〔2〕との関係が対象としている流入部の交通現象を規定する支配的要因であるとみなし、この2台の車両のドライバーをプレイヤーと考える。その他の車両（〔3〕、〔4〕他）はこれらのドライバーが行うゲームを特定化する環境の一部をなすと考え。車両〔1〕～〔4〕及び加速車線終端が、各プレイヤーの意思決定に影響を与えるが、その影響（危険の大きさ）はTime to Collision (TTC) [= (対象車両（環境）との距離)/(相対速度)] で表されるとする。

流入車ドライバーと本線車ドライバーは、刻々と変化する各車の位置関係をそのときどきに応じて考慮し、流入、加減速、隣接車線への車線変更（避走）等の意思決定を行っていると考えられる。また、流入車ドライバーの流入の意思決定は、それぞれの本線車に対して複数回行われることが多々あり、また本線車の意思決定も、異なる流入車に対して複数回行われる。本研究では、このような一連の複数プレイヤーの複数回行われる意思決定のうち、ある時点における流入車線にいる1台の流入車とそのとき直近後方の本線にいる本線車に注目してゲームモデルを構築する。このゲームは流入部のある時点の流入者ドライバー及び本線車ドライバーに対して定義されるので、プレイヤーにとって本ゲームは、流入車が本線車の前方に流入するか、本線車が流入しない流入車を追い越すまでの各時点に対して定義が可能である。各ゲームにおける各プレイヤーの意思決定回数は1回である。

モデルの複雑化を避けるため、流入車の行動選択

本線車ドライバーの行動選択		
流入車ドライバーの行動選択	避走する	避走しない
	流入する F_{11}, G_{11}	流入する F_{10}, G_{10}
	流入しない F_{01}, G_{01}	流入しない F_{00}, G_{00}

図－2：流入・避走ゲームモデル（標準型）

肢として、流入車線から本線車前方に流入する（「流入する」）か否かのみを考える。また、本線車の行動選択肢として、追い越し車線に車線変更する（「避走する」）か否かのみを考え、加減速その他の流入避走行動は考えない。ただし、加減速等を考慮してもモデルの基本構造は変化しない。

以上より、本線ドライバーおよび流入ドライバーのある時点での意思決定は、環境がもたらす危険の大きさで決まる利得を持つ2人非協力ゲームとしてモデル化できる。

3. 流入避走ゲーム

流入車の意思決定を加速車線から本線へ「流入する」あるいは「流入しない」とし、流入確率を x で表す。また本線車の意思決定を追い越し車線へ「避走する」あるいは「避走しない」とし、避走確率を y で表す。このとき本ゲームモデルは標準型ゲームとして図－2のように与えられる。ここで F_{ij} は流入車の利得、 G_{ij} は本線車の利得である。添字 i は、流入車が流入するとき1、流入しないとき0であり、 j は、本線車が避走するとき1、避走しないとき0である。

図－2より流入車の期待利得 U_m 及び本線車の期待利得 U_g は以下で与えられる。

$$U_m(x, y) = x\{yF_{11} + (1-y)F_{10}\} + (1-x)\{yF_{01} + (1-y)F_{00}\} \quad (1)$$

$$U_g(y, x) = y\{xG_{11} + (1-x)G_{01}\} + (1-y)\{xG_{10} + (1-x)G_{00}\} \quad (2)$$

ここで、各利得は図－1中で与えられるそれぞれのTTC ($t_1 \sim t_4$) を説明変数とする増加関数となると考える。これを以下のように表すことにする。

$$\begin{aligned} F_{11} &= f_{11}(t_3), F_{01} = f_{01}(t_1, t_3), \\ F_{10} &= f_{10}(t_2), F_{00} = f_{00}(t_1, t_3), \\ G_{11} &= g_{11}(t_4), G_{01} = g_{01}(t_4), \\ G_{10} &= g_{10}(t_2), G_{00} = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、関数 $f_{ij}(\cdot)$ および $g_{ij}(\cdot)$ はそれぞれ流入車および本線車の利得を説明する関数であり、添字は F_{ij}

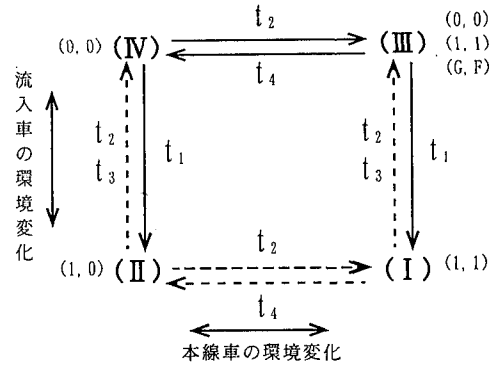
および G_{ij} と同様に、プレイヤーの選択肢を示し、 i は、流入車が流入するとき 1、流入しないとき 0 であり、 j は、本線車が避走するとき 1、避走しないとき 0 である。これらの関数 f_{ij} および g_{ij} が、各ドライバーの行動を規定することとなる。ゲームの均衡解を求めるにあたっては、各利得の説明変数 (TTC) を特定化するのみで十分であり、以下、関数を特定化せずに議論を進める。各プレイヤーは上記の式 (1) および (2) で与えられる期待利得を最大化する行動を選ぶことになる。

4. ゲームの均衡解

各プレイヤーが期待利得の最大化を行うとすると、8 ケースの可能なナッシュ均衡解 (x^*, y^*) が得られる。本線車が避走する時でも流入車は常に流入しない方がよいという特殊ケース ($F_{11} - F_{01} < 0$) を除いた 4 ケースを以下に示す。

- I. $F_{11} - F_{01} > 0, F_{10} - F_{00} > 0, G_{11} - G_{10} > 0$ のとき、 $(x^*, y^*) = (1, 1)$
- II. $F_{11} - F_{01} > 0, F_{10} - F_{00} > 0, G_{11} - G_{10} < 0$ のとき、 $(x^*, y^*) = (1, 0)$
- III. $F_{11} - F_{01} > 0, F_{10} - F_{00} < 0, G_{11} - G_{10} > 0$ のとき、 $(x^*, y^*) = (1, 1), (0, 0), (G, F)$
ただし、 $G = -G_{01} / (G_{11} - G_{10} - G_{01})$, $F = (F_{00} - F_{10}) / \{(F_{00} - F_{10}) + (F_{11} - F_{01})\}$
- IV. $F_{11} - F_{01} > 0, F_{10} - F_{00} < 0, G_{11} - G_{10} < 0$ のとき、 $(x^*, y^*) = (0, 0)$

均衡解 I は流入車にとって加速車線終端まで余裕が無く、本線車にとって追い越し車線の危険が小さいとき (流入する, 避走する) が起こることを表している。ここで $(\cdot, \cdot)$ は「流入車の行動」, 「本線車の行動」を表している。均衡解 II は、流入車の状況は均衡解 I のときと同じであり、本線車にとっては追い越し車線の危険が大きいとき (流入する, 避走しない) が起こることを表している。均衡解 III は両車が非常に接近しているとき (流入する, 避走する) (流入しない, 避走しない)、および混合戦略均衡が起こることを表している。均衡解 IV は、本線車の状況が均



注) 図中の矢印はTTCの減少による均衡解の移動方向を示している。破線方向の移動は仮定より起こらない。

図- 3: TTC の変化による均衡解の変化

均衡解 II のときと同じで、流入車は流入による本線車との錯綜の危険が大きいとき (流入しない, 避走しない) が起こることを表している。

5. 均衡解の検討

環境パラメータである TTC の変化による均衡解の変化を図- 3 に示す。均衡解が I 及び II の場合は流入車が流入するのでゲームは終了する。IV の場合、流入車は流入を完了していないので次の時点で新たなゲームを行うと考えられる。ゲームが IV から始まった場合に当該流入車が「流入する」のは、II の均衡に移動するか、III を経由して I の均衡に移動するかのどちらかであると考えられる。IV から II へ移動するのは、条件 $F_{10} - F_{00} < 0$ の不符号が逆転するときであり、流入車が加速車線終端までの距離が少なくなってくる (t_1 が小さくなる)、あるいは本線車の後続車との TTC (t_3) が小さくなっていることであり、この均衡解の変化は流入車が残存する加速車線長の減少と次の流入ギャップに対する危険が増加するため「流入する」ことを表している。

次にゲームが IV から III を経由して I へ移動する場合について考える。IV から III へ移動するときは、条件 $G_{11} - G_{10} < 0$ の不符号が逆転するときである。流入車と本線車とがさらに接近し (t_2 が小さくなり)、このとき本線車がより流入車に対して危険を感じる III の均衡解が達成されることになる。ここで、

IIIには(流入する, 避走する)を含む3つの均衡解が存在する(複数均衡)ことになるが、実際にどれが発生するかは均衡解の経路依存性を考慮に入れることにより考察できる。(0,0)の均衡解を持つIVからパラメータ t_2 が減少し(0,0)、(1,1)、(G,F)の均衡解を持つIIIに移動したとする。このときIIIでは3つの均衡解が存在するが、実際には均衡解は(0,0)をとると考える。これは初期条件であるケースIVで流入車ドライバーが「流入しない」、本線車ドライバーが「避走しない」を選択しており、この状況の下ではパラメータが変化していても、他のすべてのドライバーがIVの時の意思決定にしたがって行動していることを所与にすれば、最適反応は流入車ドライバーが「流入しない」、本線車ドライバーが「避走しない」ということになり、環境変化に関わらず均衡解は(0,0)という結果に落ちつく。

IIIからIへの均衡解の移動は、IVからIIへの移動と同様に、条件 $F_{10} - F_{00} < 0$ の不等号が逆転することにより起こる。これは、流入車が加速車線終端までの距離が短くなってくる(t_1 が小さくなる)、あるいは本車線の後続車とのTTC(t_3)が小さくなってくることを示しており、この均衡解の変化は流入車が加速車線の減少と次の流入ギャップに対する危険の増加のため「流入する」ことを表している。

最後に、ゲームが3つの均衡解を持つIIIから始まった場合は、実現する均衡解を説明できない。しかしながら、例えば流入車が加速車線に入ってきた瞬間からゲームが始まると考えれば、この初期時点でのゲームの均衡解は流入車は「流入しない」、本線車は「避走しない」と考えられ、したがってこのときの状態は(0,0)であることになる。これを初期条件とすると、環境が変化しても各ドライバーが初期条件の意思決定に経路依存的であると考え、結局IIIにおいては、流入車ドライバーが「流入しない」、本線車ドライバーが「避走しない」となる均衡解(0,0)が選択されることになると考えられる。

6. おわりに

本研究では、高速道路流入部における走行車の挙動をゲームモデルを用いて表現し、環境の状況と流入部で発生する状態の関係を明らかにした。状態の

移行を各意思決定主体を取り巻く環境(危険)の変化による均衡解の変化として説明することにより、各ドライバーの行動の変化及び結果として生起する流入現象の差異を明らかにした。これにより、それぞれの車両のドライビング環境によって、高速道路流入部に発生する流入行動や避走行動の変化、さらにはこれらの行動の組み合わせである交通現象の発生と、それらが生起するタイミングが説明できることになる。このようなモデルにより、避走行動を考慮した車線別利用率や追越し車線交通量が及ぼす影響等が明示的に考察できるようになり、より安全で快適な高速道路流入部の設計や交通制御・ITSのデザイン等に寄与するところが大きいと考える。

本研究により、以上の知見を得ることができたが、高速道路を走行する車両の挙動に関する研究の中で、本研究のようなドライバーの意思決定を明示的に考慮したアプローチにより走行挙動を明らかにした研究はまだ緒についたばかりであり、今後に残された課題も多い。まず、本モデルでは完備情報を仮定し、他のドライバーの利得が既知であると考えている。しかし、このように道路上を走行する車両のドライバーが周辺にいる他のドライバーの利得を確定的に決定できると考えるのは現実的でない。たとえば、本線車は流入部でたまたまであった流入車の危険に対する態度を完全に把握しているとは考えにくい。この場合、不完備情報下でのゲームモデルへの拡張が有用であろう。また、本研究では、ある流入車と本線車との1回のゲームを対象としている。しかしながら、流入車は、本線の他の流入ギャップも考慮し、流入すべきギャップを(言いかえればゲームの相手を)選んでいると考えられよう。流入ギャップ選択を考慮したモデルへの拡張が必要である。

参考文献

- 1) 喜多・久保園, 高速道路流入部における流入・避走挙動のモデル化, 第14回交通工学研究発表会論文集, pp. 45-48, 1994.
- 2) Troutbeck, R. J., The capacity of a limited priority merge, Physical Infrastructure Centre Research Report, No. 95-8, Queensland University of Technology, Australia, 1995.
- 3) 加古・トラウトベック, 主交通流の限定的優先権を考慮した無信号交差点のギャップアクセプタンスモデル, 交通工学, Vol. 32, No. 3, pp. 23-35, 1997.