京都大学防災研究所年報　第42号　B-2　平成11年4月
Annuals of Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., No. 42 B-2, 1999

ドライバーの危険運転行動の社会的均衡に関する研究

福山　敬*・喜多秀行*・保科博靖**

* 鳥取大学工学部社会開発システム工学科
** コベルコシステム(株)

要　旨

危険な運転行動が，結果として必ずしも交通事故を引き起こすとは限らない．あるドライバーの危険な運転行動に起因する事故も，他の（その事故の潜在的当事者となる）ドライバーによる危険回避行動や事故危険に備えた運転特性によって，避けられる可能性がある．本研究では，複数の異なった事故危険に対する態度・選好と行動戦略を備えたドライバーが存在する社会において，いかに交通事故が発生するか，あるいは，いかに潜在的事故が避けれられるかをゲームモデルを用いてモデル分析し，各タイプのドライバーがいかなる運転行動を行い，社会に事故危険に関していかなる均衡状態が生起するかを明らかにする．

キーワード：危険選好，ドライバー，運転行動，ゲーム理論，リスク

1. はじめに

正面衝突や車両同士の接触のような複数の車両が当事者となる交通事故は，多くの場合それら車両の意思決定と行動の組み合わせの結果発生するものと考えられる．個々のドライバーの行動に関する意思決定は，その個人の危険に対する認識や態度，さらには他人のそれらのあり方によって大きく異なろう．危険な車操作やルール違反を好んで行うドライバーは，危険回避的なドライバーの危険なドライバーに対する自主的な危険回避行動によってその行動の社会的コストを払うことなく（後者が危険回避的な行動をとるというコストを払うことで)その行動を行っていると考えられる．本研究は，事故危険に対する態度の違う複数ドライバーからなる社会において，危険に関する運転行動についていかなる均衡状態が成立するかをモデル分析し，無策下の均衡の非効率性を明らかにする．また，この分析をもとに，社会的により安全なドライバー行動を誘導するための費用負担・ペナルティーシステムについて考察する．

以下，第２章では，基本的な考え方について説明し，第３章では，モデルの前提条件を定義した後に，個々のドライバーが他のドライバーと遭遇することにより発生する「ドライバーの遭遇」をモデル化し，その均衡解分析を行うことによりドライバー同士の遭遇時の行動の基本的構造を明らかにする．第４章では，前章で導出した「ドライバーの遭遇」モデルを基に複数のドライバーが遭遇を繰り返す「ランダムに遭遇するドライバー社会」のモデルを定式化し，その均衡解分析を行うことにより，社会的に安定的な危険に関するドライバーの行動パターンと社会に発生する事故危険を明らかにする．最後に，第５章で本研究の分析結果と今後の課題を述べる．

2. 本研究の基本的な考え方

様々な危険意識を持ったドライバーが道路上で(運転の仕方によっては事故を引き起こす可能性がある

という意味で)「潜在的」な事故危険距離まで他のドライバーと接近したとき，その状況になる(複数)ドライバーの運転行動に関する意思決定により事故が避けられるかあるいは発生するかが決定することになる．したがって，そのような潜在的事故発生の状況におけるドライバーの意思決定と行動の組み合わせによって事故が実際に発生する危険性が異なるといえる．たとえあるドライバーが危険な運転を避け注意深く運転していたとしても，相手ドライバーが危険な運転をしていれば，事故が発生することもあり，また，逆に危険な運転をしていても相手ドライバーが注意深く運転していれば，事故が発生しないこともある．このように，いくら注意を払って運転しているドライバーがいたとしても，相手ドライバーの行動如何によっては必ずしも事故が避けられるとは限らない．

「事故が発生していない」という状況の背後を考える．安全運転を心がけかつ実際にそうしているドライバーは，常に周囲に注意を払い事故を未然に防ごうと道路上を走行している．このようなドライバーが互いに道路上で出会った結果として事故が起こらないという状況が考えられよう．一方，危険な運転を好んで行っているようなドライバーも社会には存在する場合が考えられる．このとき，先の事故を避けて安全運転をしているドライバーと，この危険な運転行動を行うドライバーが「遭遇」する場合が考えられる．このとき，後者が自ら進んで危険な運転をし，前者は事故を防ごうと不快な思いをして危険を回避することが考えられる．このとき，事故が(特に前者の努力によって)避けられ，発生しないと考えられる．このような場合，事故は発生していないが，先の安全運転同士の車両によって発生した「事故発生せず」の状況に比べれば，決して社会的に好ましい状態にあるとは言うことができない．さらに，このようなときに事故が発生した場合，危険な運転行動を行ったドライバーと危険を避けようとしたドライバーの事故費用負担額の如何によりその社会的非効率性・不平等性が増してしまう状況も考えられる．もし，事故が発生するか否かに関わらず危険な運転を行うドライバーが「得」をし，安全運転を心がけているドライバーが「損」をするという状態であれば，ドライバーは危険を避ける運転行動を積極的に行うインセンティブを失うかもしれない．社会の(ドライバー同士の)交通事故の危険性の分析とその危険度減少のための政策分析のためには，事故率・事故件数等の社会に顕在化したデータ・指標のみならず，その背後にある事故発生・非発生のメカニズムを明らかにすることが重要である．

3. ドライバーの「遭遇」のモデル化

3.1 モデル化の前提条件

本章では，事故危険に対して意識の違う複数ドライバー社会をモデル化するため，非協力ゲーム理論の概念を用いる．事故危険に関する認識や態度の異なる複数のドライバーによって形成される「社会」を想定する．当該社会には2タイプのドライバーが存在しており，一方は危険な運転操作や交通ルール違反を選好するドライバー（以後，危険愛好的ドライバーまたはタイプ1と呼ぶ）であり，不注意な運転をすることにより，注意を払うことで生じる精神的な不利益（注意コスト）を節約することができ，危険な運転に対して喜びを感じるドライバーであると仮定する．もう一方は，自ら進んで不注意な運転はせず，事故危険が迫ると交通事故を避けようと注意コストを払ってでも危険を回避することを選好するドライバー（以後，危険回避的ドライバーまたはタイプ2と呼ぶ）であると仮定する．各ドライバーは，当該社会における道路ネットワークを日々走行しており，他のドライバーと潜在的に接触事故やその他の交通事故をおこす距離に接近することになる．この接近を「遭遇」と呼ぶ．「遭遇」においては，各ドライバーの意思決定や運転行動の組み合わせ如何によって，事故が発生する可能性が変わる．ここでは，最も単純な2ドライバーの遭遇のみ発生する社会を考える．

各タイプのドライバーは保有する戦略の違いにより区別され，危険愛好的ドライバーは，危険な運転を行うか否かの戦略（危険行動戦略）をもつと考えられ，危険行動を行う確率をpで表す．また，危険な運転行動を行うことで喜びや快感等の精神的便益（B）を得ると仮定する．一方，危険回避的ドライバーは，事故危険に対して回避的であり，危険愛好的ドライバーが危険な運転行動を行うことを常に予期し，危険を回避するような運転行動を行うか否かの戦略（危険回避行動戦略）をもつと考えられ，危険回避行動を行う確率をqで表す．またその行動を行うことで不快感や怒り等の精神的不利益（C）が生じると仮定する．

個々のドライバーは，他の1人のドライバーと道路ネットワーク上でランダムに「遭遇」し，そのときの運転行動を決定する．そのときの両ドライバーのタイプと戦略の組み合わせにより決定する事故発生確率は，10ケースあり，Table 1のように与えられるとする．Table 1において，「Risky (R)」および「Not Risky ($\overline{R}$)」はそれぞれ危険愛好的ドライバーの危険行動戦略の採択および不採択を表し，「Avoid (A)」および「Not Avoid ($\overline{A}$)」はそれぞれ危険回避

Table 1 Relationship between types of drivers and probability of accident

Types	*Strategies*	*Prob.of accident*
(1,1)	(Risky, Risky)	P_{11}^{RR}
(1,1)	(Risky, Not Risky)	$P_{11}^{R\overline{R}}$
(1,1)	(Not Risky, Not Risky)	$P_{11}^{\overline{RR}}$
(1,2)	(Risky, Avoid)	P_{12}^{RA}
(1,2)	(Risky, Not Avoid)	$P_{12}^{R\overline{A}}$
(1,2)	(Not Risky, Avoid)	$P_{12}^{\overline{R}A}$
(1,2)	(Not Risky, Not Avoid)	$P_{12}^{\overline{RA}}$
(2,2)	(Avoid, Avoid)	P_{22}^{AA}
(2,2)	(Avoid, Not Avoid)	$P_{22}^{A\overline{A}}$
(2,2)	(Not Avoid, Not Avoid)	$P_{22}^{\overline{AA}}$

的ドライバーの危険回避行動戦略の採択および不採択を表す．また，「P_{ij}^{kl}」は遭遇したタイプiとjの各ドライバーが，それぞれkとlの戦略をとるときの事故確率である．例えば，「$P_{12}^{R\overline{A}}$」は，危険愛好的ドライバーと危険回避的ドライバーとの遭遇時に前者が危険行動戦略(R)をとり，後者が危険回避的行動戦略($\overline{A}$)をとらなかったときの事故発生確率を表す．他の「遭遇」における事故発生確率も同様に定義している．

「遭遇」の種類は，「タイプ１同士の遭遇」，「タイプ１とタイプ２の遭遇」，「タイプ２同士の遭遇」の３種類の（２人）遭遇の可能性があり，もし事故が発生したとすると，そのときの総事故費用（d）は全ての「遭遇」に関して等しく，同タイプのドライバー同士の「遭遇」の場合，事故費用負担($d_1^{(1,1)}, d_2^{(2,2)}$)は均等であると考える．異なるタイプのドライバー同士の「遭遇」では，タイプ１の事故費用がタイプ２のそれよりも大きい($d_1^{(1,2)} > d_2^{(1,2)}$)と仮定する．各「遭遇」において危険行動あるいは危険回避行動を行わない場合に事故が未発生であるとき，利得は発生しないものとする．また，利得を表すパラメータは全て正の値をとるものとし，それをTable 2にまとめる．ただし，本研究で用いる費用や便益を表すパラメータは，全てフォンノイマン=モルゲンシュテルンの効用水準で計られているものとする．

3.2 モデルの定式化

(1) 期待利得の導出

本節では，各タイプのドライバーが遭遇し得る全ての組み合わせについて，各タイプにおける期待利得を導出する．

Table 2 Payoff parameters of drivers

Parameters	Meanings
B	Benefit of risk-taking drivers when taking risks
C	Cost of risk-aversion drivers when avoiding risks
$d_1^{(1,1)}$	Cost of the driver when risk-takers make an accident
$d_1^{(1,2)}$	Cost of a risk-taker when the risk-taker and risk-avoider make an accident
$d_2^{(1,2)}$	Cost of a risk-avoider when the risk-avoider and a risk-avoider make an accident
$d_2^{(2,2)}$	Cost of the driver when risk-takers make an accident

危険愛好的ドライバー同士が遭遇した場合の各戦略下における期待利得はTable 3のように与えられる．同タイプのドライバー同士が遭遇した場合に，表現の混同をさけるため，以後，一方のドライバーを「ドライバー１」，相手ドライバーを「ドライバー２」と呼ぶことにする．ここで，pをドライバー１が危険行動を行う確率とし，$\hat{p}$を，記号の乱用を避けるため相手ドライバー（これも危険愛好的ドライバー）が危険行動を行う確率とする．このとき，タイプ１のドライバー１がタイプ１のドライバー２に遭遇したときのドライバー１の期待利得$U_1^{(1,1)}(p;\hat{p},q)$は，Table 3の利得表を用いて以下のように導出される．

$$
\begin{aligned}
&U_1^{(1,1)}(p;\hat{p},q) \\
&= p\left\{\hat{p}(B - P_{11}^{RR}d_1^{(1,1)}) + (1-\hat{p})(B - P_{11}^{R\overline{R}}d_1^{(1,1)})\right\} \\
&+ (1-p)\left\{\hat{p}(-P_{11}^{R\overline{R}}d_1^{(1,1)}) + (1-\hat{p})(-P_{11}^{\overline{RR}}d_1^{(1,1)})\right\}
\end{aligned} \tag{1}
$$

式(1)の第１項は，ドライバー１が危険行動を行うもとでドライバー２も危険行動を行ったときに生じる利得を表し，第２項は，ドライバー１が危険行動を行うもとでドライバー２は危険行動を行わないときの利得を表す．第３項は，ドライバー１が危険行動を行わないもとでドライバー２が危険行動を行うときの利得を表し，第４項は，ドライバー１が危険行動を行わないもとでドライバー２も危険行動を行わないときの利得を表す．なお，ドライバー２における期待利得はドライバー１と等しいため省略する．

危険愛好的ドライバー（タイプ１）と危険回避的

Table 3: Payoffs when risk-taking drivers meet

Strategy	Payoff of Driver 1	Payoff of Driver 2
(Risky,Risky)	$P_{11}^{RA}(B-d_1^{(1,1)})$ $+(1-P_{11}^{RA})B$	$P_{11}^{RA}(B-d_1^{(1,1)})$ $+(1-P_{11}^{RA})B$
(Risky,Not Risky)	$P_{11}^{R\overline{A}}(B-d_1^{(1,1)})$ $+(1-P_{11}^{R\overline{A}})B$	$-P_{11}^{R\overline{A}}d_1^{(1,1)}$
(Not Risky,Risky)	$-P_{11}^{R\overline{A}}d_1^{(1,1)}$	$P_{11}^{R\overline{A}}(B-d_1^{(1,1)})$ $+(1-P_{11}^{R\overline{A}})B$
(Not Risky,Not Risky)	$-P_{11}^{\overline{RA}}d_1^{(1,1)}$	$-P_{11}^{\overline{RA}}d_1^{(1,1)}$

Table 4: Payoffs when a risk-taker and risk-avoider meet

Strategy	Payoff of Driver 1	Payoff of Driver 2
(Risky,Avoid)	$P_{12}^{RR}(B-d_1^{(1,2)})$ $+(1-P_{12}^{RR})B$	$-P_{12}^{RR}(C+d_2^{(1,2)})$ $+(1-P_{12}^{RR})(-C)$
(Risky,Not Avoid)	$P_{12}^{R\overline{A}}(B-d_1^{(1,2)})$ $+(1-P_{12}^{R\overline{A}})B$	$-P_{12}^{R\overline{A}}d_2^{(1,2)}$
(Not Risky,Avoid)	$-P_{12}^{\overline{R}A}d_1^{(1,2)}$	$-P_{12}^{\overline{R}A}(C+d_2^{(1,2)})$ $+(1-P_{12}^{\overline{R}A})(-C)$
(Not Risky,Not Avoid)	$-P_{12}^{\overline{RA}}d_1^{(1,2)}$	$-P_{12}^{\overline{RA}}d_2^{(1,2)}$

Table 5: Payoff when risk-avoiders meet

Strategy	Payoff of Driver 1	Payoff of Driver 2
(Avoid,Avoid)	$-P_{22}^{AA}(C+d_2^{(2,2)})$ $+(1-P_{22}^{AA})(-C)$	$-P_{22}^{AA}(C+d_2^{(2,2)})$ $+(1-P_{22}^{AA})(-C)$
(Avoid,Not Avoid)	$-P_{(2,2)}^{AN}(C+d_2^{(2,2)})$ $+(1-P_{22}^{A\overline{A}})(-C)$	$-P_{22}^{\overline{A}A}d_2^{(2,2)}$
(Not Avoid,Avoid)	$-P_{22}^{A\overline{A}}d_2^{(2,2)}$	$-P_{(2,2)}^{AN}(C+d_2^{(2,2)})$ $+(1-P_{22}^{A\overline{A}})(-C)$
(Not Avoid,Not Avoid)	$-P_{22}^{\overline{AA}}d_2^{(2,2)}$	$-P_{22}^{\overline{AA}}d_2^{(2,2)}$

ドライバー（タイプ２）とが遭遇した場合の各戦略下における期待利得はTable 4のように与えられる．qをタイプ２が回避行動を行う確率とすると，タイプ１の期待利得$U_1^{(1,2)}(p;q)$は，以下のように導出される．

$$
\begin{aligned}
&U_1^{(1,2)}(p;q)\\
&=p\left\{q(B-P_{12}^{RA}d_1^{(1,2)})+(1-q)(B-P_{12}^{R\overline{A}}d_1^{(1,2)})\right\}\\
&+(1-p)\left\{q(-P_{12}^{\overline{R}A}d_1^{(1,2)})+(1-q)(-P_{12}^{\overline{RA}}d_1^{(1,2)})\right\}
\end{aligned} \tag{2}
$$

式(2)は，式 (1) と同様に考えることができ，第１項は，危険愛好的ドライバーが危険行動を行うもとで，危険回避的ドライバーが回避行動を行うときの利得を表し，第２項は，タイプ１が危険行動を行うもとでタイプ２は回避行動を行わないときの利得を表す．以下第３項，第４項とも同様に考えることができる．また，危険愛好的ドライバーと危険回避的ドライバーが遭遇した場合，タイプ２における期待利得$U_2^{(1,2)}(q;p)$はTable 4より以下のように表すことができる．

$$
\begin{aligned}
&U_2^{(1,2)}(q;p)\\
&=q\left\{p(-C-P_{12}^{RA}d_2^{(1,2)})+(1-p)(-C-P_{12}^{\overline{R}A}d_2^{(1,2)})\right\}\\
&+(1-q)\left\{p(-P_{12}^{R\overline{A}}d_2^{(1,2)})+(1-p)(-P_{12}^{\overline{RA}}d_2^{(1,2)})\right\}
\end{aligned} \tag{3}
$$

式(3)の説明は式(1)および式(2)と同様に考えられる．

最後に，危険回避的ドライバー同士が遭遇した場合，$\hat{q}$をドライバー２が回避行動を行なう確率とすると，ドライバー１の期待利得$U_2^{(2,2)}(q;\hat{q})$は，Table 5より以下のように表すことができる．

$$
\begin{aligned}
&U_2^{(2,2)}(q;\hat{q})\\
&=q\left\{\hat{q}(-C-P_{22}^{AA}d_2^{(2,2)})+(1-\hat{q})(-C-P_{22}^{A\overline{A}}d_2^{(2,2)})\right\}\\
&+(1-q)\left\{\hat{q}(-P_{22}^{\overline{A}A}d_2^{(2,2)})+(1-\hat{q})(-P_{22}^{\overline{AA}}d_2^{(2,2)})\right\}
\end{aligned} \tag{4}
$$

このとき，ドライバー２の期待利得はドライバー１と等しい．

次に，各「遭遇」と各「戦略」における事故発生確率の大小関係を以下のように規定する．

$$
\begin{aligned}
P_{22}&=P_{12}^{\overline{R}A}=P_{12}^{\overline{RA}}\\
&=P_{11}^{\overline{RR}}<P_{12}^{RA}<P_{12}^{R\overline{A}}=P_{11}^{R\overline{R}}<P_{11}^{RR}
\end{aligned} \tag{5}
$$

ここで，P_{22}は危険回避的ドライバー同士が遭遇したときのすべての事故発生確率($P_{22}^{AA},P_{22}^{A\overline{A}},P_{22}^{\overline{AA}}$)であり，それらはすべて等しいと考える．危険愛好的ドライバーが危険行動を行わないときは，相手ドライバーのタイプや戦略が何であれ事故発生確率($P_{12}^{\overline{R}A}$,$P_{12}^{\overline{RA}},P_{11}^{\overline{RR}}$)は最も低く，危険回避的ドライバー同士が遭遇したときの事故発生確率と等しい．次に，危険愛好的ドライバーが危険行動を行い，危険回避的ドライバーが回避行動を行うときの事故発生確率(P_{12}^{RA})，続いて，危険愛好的ドライバーが危険行動を行うとき，相手のタイプがどちらでも，相手がもっている戦略を行わなかったときの事故確率($P_{12}^{R\overline{A}},P_{11}^{R\overline{R}}$)，最後に，危険愛好的ドライバー同士が遭遇し，共に危険行動を行うときに最も事故確率(P_{11}^{RR})が高くなると仮定する．これらの４つの確率を表すため，新しく以下の４つの事故発生確率P_0,P_1,P_2,P_3を定義する．

$$P_0=P_{22}=P_{12}^{\overline{R}A}=P_{12}^{\overline{RA}}=P_{11}^{\overline{RR}} \tag{6}$$

$$P_1=P_{12}^{RA} \tag{7}$$

$$P_2=P_{12}^{R\overline{A}}=P_{11}^{R\overline{R}} \tag{8}$$

$$P_3=P_{11}^{RR} \tag{9}$$

この簡略化した事故発生確率を，式(1)，式(2)，式(3)，式(4)に適用すると，以下のように各「遭遇」における期待利得を表すことができる．

$$U_1^{(1,1)}(p;\hat{p})=p\left\{B-(P_3-P_0)d_1^{(1,1)}\hat{p}\right\}-P_0d_1^{(1,1)} \tag{10}$$

$$U_1^{(1,2)}(p;q) = p\{B + (P_2 - P_1)d_1^{(1,2)}q - (P_2 - P_0)d_1^{(1,2)}\} - P_0 d_1^{(1,2)} \tag{11}$$

$$U_2^{(1,2)}(q;p) = q\left\{(P_2 - P_1)d_2^{(1,2)}p - C\right\} - (P_2 - P_0)d_2^{(1,2)}p - P_0 d_2^{(1,2)} \tag{12}$$

$$U_2^{(2,2)}(q;\hat{q}) = -P_0 d_2^{(2,2)} - Cq \tag{13}$$

(2)　最適反応戦略の導出

前節では，各タイプのドライバーの各「遭遇」における期待利得を定式化した．本節では，各遭遇ゲームの均衡解を求める．各タイプのドライバーは自分の利得を最大にするような運転行動を行おうとする．しかし，相手ドライバーも同様に利得の最大化を図るため，相手ドライバーの戦略を推測した後に自分の戦略を決定する．このようなドライバーの推論の結果，起生する結果がナッシュ均衡解である．前節で導出した期待利得を自身の戦略を行う確率で偏微分して限界期待利得を求め，それを相手ドライバーの戦略について式を整理することにより，各ドライバーの最適反応を求めることができる．これらの安定的な組み合わせを考察することで，各「遭遇」におけるナッシュ均衡解が導出される．本節では，危険愛好的ドライバーと危険回避的ドライバーとの「遭遇」の場合の期待利得(式(11)，式(12))を用いて最適反応を導出する．なお，その他の危険愛好的ドライバー同士の「遭遇」，危険回避的ドライバー同士の「遭遇」に関するナッシュ均衡解の導出過程の詳細は付録に示す．

まず，危険愛好的ドライバーの最適反応を導出する．式(11)を危険愛好的ドライバーが危険行動を行う確率pで偏微分することにより限界期待利得$\partial U_1^{(1,2)}(p;q)/\partial p$を得る．

$$\frac{\partial U_1^{(1,2)}(p;q)}{\partial p} = (P_2 - P_1)d_1^{(1,2)}q + B - (P_2 - P_0)d_1^{(1,2)} \begin{bmatrix} > \\ = \\ < \end{bmatrix} 0$$

$$\Longrightarrow p^{best} = \begin{bmatrix} 1 \\ [0,1] \\ 0 \end{bmatrix} \tag{14}$$

式(14)は，限界期待利得が0よりも大きい値をとるとき危険愛好的ドライバーは危険行動を行い($p^{best} = 1$)，0よりも小さい値をとるとき危険行動は行なわず($p^{best} = 0$)，0と等しいとき任意の戦略をとる($p^{best} = [0,1]$)ことを意味する．式(14)をqについて整理すると，以下のように表すことができる．

$$q \begin{bmatrix} > \\ = \\ < \end{bmatrix} \frac{(P_2 - P_0)d_1^{(1,2)} - B}{(P_2 - P_1)d_1^{(1,2)}} \equiv I$$

$$\Longrightarrow p^{best} = \begin{bmatrix} 1 \\ [0,1] \\ 0 \end{bmatrix} \tag{15}$$

式(15)におけるqの閾値をIとおくと，Iは危険回避的ドライバーが回避行動を行うことによる便益（行わないことによるコスト）を表している．この便益の大小により危険愛好的ドライバーの戦略が変化する．一方，危険回避的ドライバーの限界期待利得$\partial U_2^{(1,2)}(p:q)/\partial q$も同様に導出することができ，それを以下に示す．

$$\frac{\partial U_2^{(1,2)}(q;p)}{\partial q} = (P_2 - P_1)d_2^{(1,2)}p - C \begin{bmatrix} > \\ = \\ < \end{bmatrix} 0$$

$$\Longrightarrow q^{best} = \begin{bmatrix} 1 \\ [0,1] \\ 0 \end{bmatrix} \tag{16}$$

式(16)は，限界期待利得が0よりも大きい値をとるとき危険回避的ドライバーは回避行動を行い($q^{best} = 1$)，0よりも小さい値をとるとき回避行動を行わず($q^{best} = 0$)，0と等しいとき$[0,1]$間の任意の戦略をとることを意味する．式(16)をpについて整理すると，以下のように表すことができる．

$$p \begin{bmatrix} > \\ = \\ < \end{bmatrix} \frac{C}{(P_2 - P_1)d_2^{(1,2)}} \equiv J$$

$$\Longrightarrow q^{best} = \begin{bmatrix} 1 \\ [0,1] \\ 0 \end{bmatrix} \tag{17}$$

式(17)におけるpの閾値をJとおくと，Jは危険愛好的ドライバーが危険行動を行うことによる便益（行わないことによるコスト）を表し，この便益の大小関係により危険回避的ドライバーの戦略が変化する．

式(15)，式(17)で求まった最適反応戦略を図示すると，Fig. 1のようになる．Fig. 1において横軸は危険愛好的ドライバーの危険行動を行う確率p，縦軸は危険回避的ドライバーの回避行動を行う確率qである．図中，太実線は危険愛好的ドライバーの最適反応戦略p^{best}を表しており，破線は危険回避的ドライバーの最適反応戦略q^{best}を表している．

危険愛好的ドライバー同士の「遭遇」，危険回避的ドライバー同士の「遭遇」の場合も同様に導出することができ，そのときの最適反応戦略を，それぞれFig. 2，Fig. 3に示す．Fig. 2においては，横軸に危険愛好的ドライバーにおけるドライバー1が危険行動を行う確率p，縦軸にドライバー2が危険行動を行う確率$\hat{p}$を表す．また，Fig. 2中のHは以下のよ

うに与えられる．

$$H = \frac{B}{(P_3 - P_0)d_1^{(1,1)}} \tag{18}$$

式(18)は，危険愛好的ドライバー（相手ドライバー）が危険行動を行うことによる便益（行わないことによるコスト）を表している．また，Fig. 3においては，横軸に危険回避的ドライバーにおけるドライバー1が危険行動を行う確率qを表し，縦軸にドライバー2が回避行動を行う確率$\hat{q}$を表している．

(3) 均衡解分析

各遭遇におけるナッシュ均衡解$(p^*,\hat{p}^*)$, (p^*,q^*)，あるいは$(q^*,\hat{q}^*)$は，前節で求めた最適反応戦略により導出することができる．Fig. 1よりこの2本の線の交点，すなわち$(p^*,\hat{p}^*) = (1,0), (H,H), (0,1)$の3つが危険愛好的ドライバー同士の「遭遇」の場合のナッシュ均衡解（複数解）となる．ただしHは式(18)で与えられる．危険愛好的ドライバーと危険回避的ドライバーの「遭遇」では$(p^*,q^*) = (1,1), (I,J), (0,0)$の複数均衡解となり，危険回避的ドライバー同士の「遭遇」では均衡解は$(q^*,\hat{q}^*) = (0,0)$となる．なお，Iは式(15)で与えられており，危険回避的ドライバーが回避行動を行うことによる便益を表し，Jは式(17)で与えられ，危険愛好的ドライバーが危険行動を行うことによる便益である．

危険回避的ドライバー同士の「遭遇」において，Fig. 1よりドライバー1が危険行動を行う$(p^* = 1)$ときドライバー2は危険行動を行わず$(\hat{p}^* = 0)$，ドライバー1が危険行動を行わない$(p = 0)$ときドライバー2は危険行動を行い$(\hat{p}^* = 1)$，どちらか一方が確率pまたは$\hat{p}$で危険行動を行うという混合戦略をとると，他方も混合戦略をとることになる．

危険愛好的ドライバーと危険回避的ドライバーとの「遭遇」の場合においては，Fig. 2より危険愛好的ドライバーが危険行動を行う$(p^* = 1)$とき危険回避的ドライバーは事故を避けようと回避行動を行う$(q^* = 1)$．危険愛好的ドライバーが危険行動を行わない$(p^* = 0)$とき危険回避的ドライバーは回避行動を行わず$(q^* = 0)$，一方が，確率pで危険行動を行うという混合戦略をとると，他方は，確率qで危険回避行動を行うという混合戦略をとることになる．

危険回避的ドライバー同士の「遭遇」において，Fig. 3より，相手ドライバーは危険行動を行わないことを両ドライバー共に知っており，あえてコストを払ってまで回避行動を行う必要がない．この場合，両ドライバー共に回避行動は行わない$(q^* = 0, \hat{q}^* = 0)$という支配戦略均衡となる．以上の各ケースの均衡解をTable 6にまとめる．

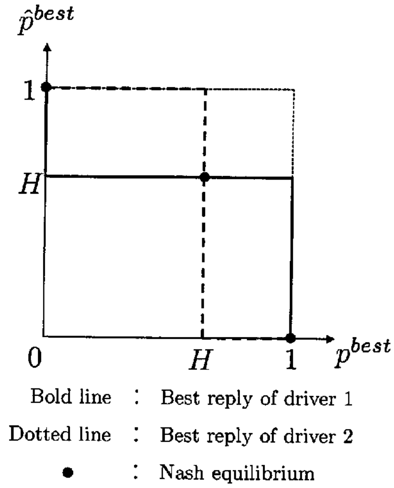

Fig. 1: Optimal strategies at a matching by a risk averse drivers and a risk taking driver.

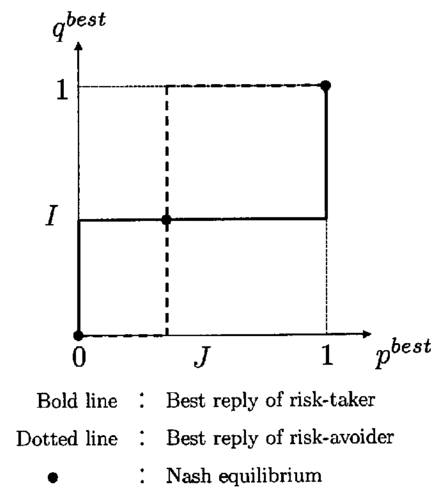

Fig. 2: Optimal strategies at a matching by two risk taking drivers.

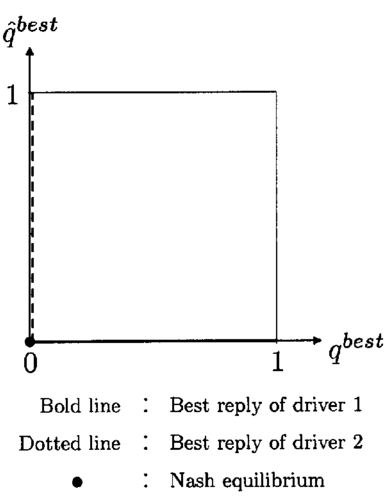

Fig. 3: Optimal strategies at a matching by two risk averse drivers.

Table 6：Nash equilibria at each ‘matching’

Driver 1	Driver 2	Equilibria
Risk-taker	Risk-taker	$(1,0)$ (H,H) $(0,1)$
Risk-taker	Risk-avoider	$(1,1)$ (I,J) $(0,0)$
Risk-avoider	Risk-avoider	$(0,0)$

4. ランダムに遭遇するドライバー社会のモデル化

4.1 ランダム遭遇社会

前章では, 異なるタイプのドライバーが遭遇したとき, 遭遇した2ドライバーのタイプの組み合わせによって, 各遭遇にどのような結果(各ドライバーの行動とその危険性)が発生するかをモデル分析した. 本章では, そのような各遭遇が, 道路ネットワーク上で複数のドライバーによりさまざまに繰り返されている社会を考える. 実際, 遭遇の場面に出会うドライバーは, その遭遇における相手ドライバーのタイプを知っているとは考えにくい. 各ドライバーは, 日々道路ネットワークを走りながら, 未知の他のドライバーと遭遇を繰り返し, 個々の遭遇に対してでなく, 社会全体に対して一貫してとるべき危険回避行動に関する意思決定を行っていると考えられる. 本章では, そのような社会のモデル化への拡張を試み, そのようなドライバー社会を道路ネットワーク上でランダムに他のドライバーと遭遇を繰り返し自らの運転危険行動に関する意思決定を行う「ランダム遭遇社会」を考える.

4.2 モデル化の前提条件

各ドライバーが誰とどのように遭遇するかという「遭遇」の仕方は完全にランダム（ランダム・マッチング）であると仮定する. 各ドライバーは単位時間当たりに1台の他のドライバーと遭遇すると考えると, 道路ネットワークは, 異なるタイプのドライバーが互いに遭遇を繰り返す（ランダム・マッチングが時間を通じて離散的に繰り返される）ランダム・マッチング・ゲームを行っていると考えることができ, 個々のゲームの結果で特定化された便益あるいは費用を得ると考えられる.

時間を通じて同じゲームが繰り返されるランダム・マッチング・ゲームと, 一般にいわれる繰り返しゲームとの混同を避けるため, その違いを説明する. 繰り返しゲームではプレイヤーは固定されており, 共に完全合理的な主体であると仮定されている. プレイヤーは過去の各時点でいかなる行動が行われたかを全て知っており, また, 未来に繰り返されるゲーム（遭遇）に関しても完全に予見し, 計算し, 最適な行動をとるといった意思決定を行う.

これに対して, 本研究で扱うランダム・マッチング・ゲームでは, 当該社会における各ドライバーがランダムに遭遇し, 特定の相手ドライバーと遭遇したときの相手の戦略は記憶されない. 各ドライバーは, 社会におけるマクロな情報, つまり, 各タイプのドライバーが当該社会に占める割合（各タイプとの遭遇確率）のみを過去のマッチング経験を通じて知っており, 次々と遭遇する個々の相手ドライバーのタイプを事前に知ることはできない. ドライバーはマクロ情報を下に当期の戦略を決定する.

4.3 モデルの定式化

(1) 期待利得の導出

期待利得を導出するにあたって, 社会にはドライバーがN人存在しており, その中で危険愛好的ドライバーがn_1人, 危険回避的ドライバーがn_2人存在すると仮定する. 前章で求めた各「遭遇」での期待利得(式(10), 式(11), 式(12), 式(13))を用いて社会における各タイプのドライバーの期待利得を導出する.

まず最初に, 社会における危険愛好的ドライバーの期待利得を導出する. 社会における同タイプのドライバーは, すべて同質であり, したがって同じ戦略をとると考える. 社会におけるタイプ1のドライバーの戦略をp, タイプ2のドライバーの戦略をqとする. 社会における危険愛好的ドライバーの期待利得$U_1(p;\hat{p},q)$は, 式(10), 式(11)を用いて次式のように表すことができる.

$$\begin{aligned} &U_1(p;\hat{p},q)\\ &=\frac{n_1}{N}\left[p\left\{B-(P_3-P_0)d_1^{(1,1)}\hat{p}\right\}-P_0d_1^{(1,1)}\right]\\ &+\frac{n_2}{N}[p\{B+q(P_2-P_1)d_1^{(1,2)}-(P_2-P_1)d_1^{(1,2)}\}\\ &-P_0d_1^{(1,2)}] \end{aligned} \tag{19}$$

ここで当該ドライバーの戦略と同タイプのドライバーの戦略を区別するために, 前者をp, 後者を$\hat{p}$と書く. 式(19)の上段は, 危険愛好的ドライバーが同タイプのドライバーと遭遇するもとでの期待利得と同タイプのドライバーとの遭遇確率の積を表し, 下段は, 危険回避的ドライバーと遭遇するもとでの期待利得と危険回避的ドライバーとの遭遇確率の積を表している. したがって, 両方の和をとることによって危険愛好的ドライバーの社会全体における期待利得となる.

一方, 社会における危険回避的ドライバーの期待

利得$U_2(q;p)$は，式(12)，式(13)を用いて次式により表すことができる．

$$\begin{aligned}&U_2(q;p)\\&=\frac{n_1}{N}[q\left\{(P_2-P_1)d_2^{(1,2)}p-C\right\}-(P_2-P_0)d_2^{(1,2)}p\\&-P_0d_2^{(1,2)}]+\frac{n_2}{N}\left[-P_0d_2^{(2,2)}-Cq\right]\end{aligned} \tag{20}$$

式(20)は，式(19)と同様に考えることができ，式(20)の上段は，危険回避的ドライバーが危険愛好的ドライバーと遭遇するもとでの期待利得と危険回避的ドライバーとの遭遇確率の積を表し，下段は，危険回避的ドライバー同士で遭遇するもとでの期待利得と同タイプのドライバーとの遭遇確率の積を表している．したがって，両方の和をとることによって危険回避的ドライバーの社会全体における期待利得となる．

(2) 最適反応戦略の導出

次に，各タイプのドライバーの最適反応を求めるため，前章と同様に各タイプの期待利得(式(19)，式(20))を自身の戦略で偏微分することにより限界期待利得を求める．

危険愛好的ドライバーの社会における限界期待利得は，社会における危険愛好的ドライバーの期待利得(式(19))を自身が危険行動をとる確率 (p) で偏微分することにより求めることができ，限界期待利得は以下のように表すことができる．

$$\begin{aligned}&\frac{\partial U_1(p;\hat{p},q)}{\partial p}=\frac{n_1}{N}\left\{B-(P_3-P_0)d_1^{(1,1)}\hat{p}\right\}\\&+\frac{n_2}{N}\left\{B+(P_2-P_1)d_1^{(1,2)}q-(P_2-P_0)d_1^{(1,2)}\right\}\\&\begin{bmatrix}>\\=\\<\end{bmatrix}0\Longrightarrow p^{best}=\begin{bmatrix}1\\ [0,1]\\0\end{bmatrix}\end{aligned} \tag{21}$$

式(21)は，限界期待利得が0以上の値をとるとき，危険愛好的ドライバーは危険行動を行う確率(p)を$[0,1]$の間で可能な限り大きくし，0以下の値をとるとき，pを$[0,1]$の間で可能な限り小さくする．0と等しいときpは$[0,1]$の値をとることが期待利得を最大にすることを意味する．次に式(21)を$\hat{p}$について整理すると最適反応は以下のようになる．

$$\begin{aligned}&\hat{p}\begin{bmatrix}<\\=\\>\end{bmatrix}\frac{B+\frac{n_2}{N}\left\{(P_2-P_1)d_1^{(1,2)}q-(P_2-P_0)d_1^{(1,2)}\right\}}{\frac{n_1}{N}(P_3-P_0)d_1^{(1,1)}}\\&=f(q)\Longrightarrow p^{best}=\begin{bmatrix}1\\ [0,1]\\0\end{bmatrix}\end{aligned} \tag{22}$$

式(22)における$\hat{p}$の閾値を$f(q)$とおくと，$f(q)$は危険愛好的ドライバーと危険回避的ドライバーとの遭遇において，危険愛好的ドライバーが危険運転行動を行なうことによる便益（行わないことによるコスト）表す．この便益はqの関数であり，危険回避的ドライバーが回避行動を行う確率(q)に依存してるため，$f(q)$の位置関係により危険愛好的ドライバーの戦略が変化する．一方，危険回避的ドライバーの期待利得(式(20))を回避行動を行う確率 (q) で偏微分することにより次式の限界期待利得を得ることができる．

$$\begin{aligned}&\frac{\partial U_2(q;p)}{\partial q}=\frac{n_1}{N}\left\{(P_2-P_1)d_2^{(1,2)}p-C\right\}-\frac{n_2}{N}C\\&\begin{bmatrix}>\\=\\<\end{bmatrix}0\Longrightarrow p^{best}=\begin{bmatrix}1\\ [0,1]\\0\end{bmatrix}\end{aligned} \tag{23}$$

式(23)は，限界期待利得が0以上の値をとるとき危険回避的ドライバーは回避行動を行い $(q=1)$，0以下の値をとるとき回避行動を行わない$(q=0)$．0と等しいときqは$[0,1]$間の任意の戦略をとることを意味する．次に，式(23)をpについて整理すると最適反応は以下のように表すことができる．

$$\begin{aligned}&p\begin{bmatrix}>\\=\\<\end{bmatrix}\frac{C}{\frac{n_1}{N}(P_2-P_1)d_2^{(1,2)}}=W\\&\Longrightarrow q^{best}=\begin{bmatrix}1\\ [0,1]\\0\end{bmatrix}\end{aligned} \tag{24}$$

式(24)におけるpの閾値をWとおくとすると，Wは危険愛好的ドライバーと危険回避的ドライバーとの遭遇において，危険回避的ドライバーが回避行動を行うことによるコストを表している．また，分子，分母が共に正の値をとるため常に$W>0$となる．

ここで，式(24)に着目すると，Wは定数とみなすことができ，危険回避的ドライバーは，危険愛好的ドライバーの戦略のみにより自分の戦略が決定することがわかる．それに対して，(23)式に着目すると，$f(q)$はqの関数であり，危険愛好的ドライバーは，同タイプのドライバーと危険回避的ドライバーの両方のドライバーの戦略により自身の戦略を決定することがわかる．また，$f(q), W$の大小関係によりナッシュ均衡解が異なるため，全部で11通りの場合分けができることになる．ナッシュ均衡解の導出過程については，本節では省略し付録に示す．求められたナッシュ均衡解をTable 7にまとめる．

Table 7において，$f(0)$は危険回避的ドライバーが回避行動を行わなかったときの，危険愛好的ドライバーが危険行動を行なうことによる便益（行わな

Table 7 : Nash equilibria of drivers' society

Conditions		Equilibria (p^*, q^*)
$W > 1$	$f_0 > 1$	$(1,0)^*$
	$0 < f_0 < 1$	$(f_0, 0)$
	$f_0 < 0$	$(0,0)^*$
$0 < W < 1$	$W < f_0 < 1 < f_1$	$(1,1)^*$
	$0 < f_0 < W < 1 < f_1$	$(1,1)^*$ $(f_0, 0)$ (W, G)
	$f_0 < 0 < W < 1 < f_1$	$(1,1)^*$ $(0,0)^*$ (W, G)
	$W < f_0 < f_1 < 1$	$(f_1, 1)$
	$0 < f_0 < W < f_1 < 1$	$(f_1, 1)$ $(f_0, 0)$ (W, G)
	$f_0 < 0 < W < f_1 < 1$	$(f_1, 1)$ $(0,0)^*$ (W, G)
	$0 < f_0 < f_1 < W$	$(f_0, 0)$
	$f_0 < 0 < f_1 < W$	$(0,0)^*$

* in the table means 'Evolutionary stable state'.

いことによるコスト）であり，これを以下に示す．

$$f(0) = \frac{B - \frac{n_2}{N}(P_2 - P_0)d_1^{(1,2)}}{\frac{n_1}{N}(P_3 - P_0)d_1^{(1,1)}} \tag{25}$$

$f(1)$についても同様に考えることができ，危険回避的ドライバーが回避行動を行ったときの，危険愛好的ドライバーが危険行動を行なうことによる便益（行わないことによるコスト）を表す．これを以下に示す．

$$f(1) = \frac{B - \frac{n_2}{N}(P_1 - P_0)d_1^{(1,2)}}{\frac{n_1}{N}(P_3 - P_0)d_1^{(1,1)}} \tag{26}$$

Table 7中のGは，危険愛好的ドライバーの限界期待利得に$p = W$を代入し，qについて整理した値であり，危険回避的ドライバーの混合戦略を表している．これを以下に示す．

$$G = \frac{\frac{n_1}{N}(P_3 - P_0)d_1^{(1,1)}W + \frac{n_2}{N}(P_2 - P_0)d_1^{(1,2)} - B}{\frac{n_2}{N}(P_2 - P_1)d_1^{(1,2)}} \tag{27}$$

(3) 均衡解分析

ナッシュ均衡解を導出するにあたって，まず，$W > 1$と$0 < W < 1$との場合に分けることができる．$W > 1$のとき，式(24)より危険回避的ドライバーは，回避行動を行わない$(q = 0)$，つまり常に回避行動を行なわないことが支配戦略となっている．一方，危険愛好的ドライバーの戦略は，$f(0)$の位置関係のみにより場合分けできる．Table 7より，$f(0)$の値が小さくなるにつれ危険愛好的ドライバーが危険運転行動を行う確率(p)が低くなっているのがわかる．

次に，$0 < W < 1$のとき，$f(1), f(0), W$の大小関係によって8通りに場合分けができる．$0 < f(0) < W < 1 < f(1), f(0) < 0 < W < 1 < f(1), 0 < f(0) < W < f(1) < 1, f(0) < 0 < W < f(1) < 1$のときナッシュ均衡解は複数均衡となり，また，$W > 1$のときと同様に$f(1), f(0)$の値が小さくなるにつれ，危険愛好的ドライバーが危険行動を行う確率(p)，危険回避的ドライバーが回避行動を行う確率(q)が低くなることがわかる．このことより，$f(1)$の値を小さくするような何らかの政策をとることによって，危険運転行動を行うドライバーが少なくなることが予想される．これに関する詳細な考察は，次節で行うことにする．

次に，求まったナッシュ均衡解に対して進化論的安定性（ESS）をチェックする．ESSとは，ある集団内の全ての個体がそのナッシュ均衡戦略を採用しているときに，「突然変異」によって生ずる他のどのような戦略も集団に侵入できない（これを自然淘汰と呼ぶ）ような戦略の安定性に関する性質である．つまり，本研究においては，危険愛好的ドライバーにおいて当該社会にごく少数のドライバーが各均衡解における戦略と異なる戦略を採用したとしても，元の戦略を採用するほうが新しい戦略を採用するよりも利得が高ければ，均衡解戦略は，ESSであることを意味する．逆に，ごく少数のドライバーの新しい戦略を採用する方が利得が高い場合は，他のドライバーもその戦略を採用し，その結果，元の戦略を採用するドライバーはいなくなり均衡解が崩れてしまうことになる．このことより，ESSを導出した結果，混合戦略は全て不安定になり，すべての場合において$(p^*, q^*) = (1,1), (0,0), (1,0)$が進化論的に安定した戦略であることが明らかになった．

(4) 政策的含意

本節では，前節で少し述べた「$f(1), f(0)$の値が小さくなると，危険運転行動を行う確率(p)，回避行動を行う確率(q)が低くなる」ことに着目して，いかなる政策をとることで危険運転行動を行うという戦略を採用するドライバーを減少させ，より安全なドライバーの運転環境を達成できるかについて考察する．

危険愛好的ドライバーの各戦略をとるインセン

ティブを表す$f(1), f(0)$の値に大きく影響を及ぼす要因の1つとして，事故が発生したときに自己が負担する事故費用があげられる．これまで，事故総費用$(d^{(1,2)})$は全ての遭遇において同額であり，同タイプ同士のドライバーの遭遇での事故では事故費用負担は均等で，異なるタイプのドライバー同士との遭遇時の事故費用負担は危険愛好的ドライバーの事故費用負担が多いこと以外何の仮定も設けていなかった．しかし，異なるタイプのドライバーとの「遭遇」において事故費用（$d_1^{(1,2)}$または$d_2^{(1,2)}$）の配分率を変化させることにより，各タイプのドライバーの戦略は変化すると予想される．この効果を確認するため，前節のTable 7で示したナッシュ均衡解を，横軸に$f(0)$，縦軸に$f(1)$をとりFig. 4に図示した．また，$f(1), f(0), W$は$d_1^{(1,2)}, d_2^{(1,2)}$の関数とみなすことができ，本節では，便宜上Wを一定値$\overline{w}$に固定した場合について均衡解のエリア分けを表した．

当然，事故が発生したときに危険愛好的ドライバーの事故費用負担$d_1^{(1,2)}$を大きくすると危険回避的ドライバーの事故費用負担$(d_2^{(1,2)} = d^{(1,2)} - d_1^{(1,2)})$が少なくなる．Fig. 4を現状と考えたとき，式(24)，式(25)，式(26)よりこの費用配分変化はWの値を大きくし，また，$f(1)$，$f(0)$の値を小さくする．この事故費用負担の変化は，Fig. 4で表される均衡解のエリアを分ける境界線を移動させ，均衡解を他に変える効果と，均衡解のエリアは不変でも，（事故費用負担額で決定している）均衡解戦略自身を変化させる効果をもつ．まず，前者の効果について考察する．

Fig. 5にこの前者の効果を表す．危険愛好的ドライバーの事故費用負担を大きくすると危険行動を行うエリアが減少し，回避行動を行うエリアも減少することがわかる．以上のことより事故が発生した時の，危険愛好的ドライバーの事故費用負担を大きくすることにより，危険愛好的ドライバーが危険行動を行う均衡解エリアが減少し，さらに，危険回避的ドライバーが危険回避行動を行わない均衡解エリアが増加するという効果があることがわかった．

次に，後者の効果（各均衡解エリア内の均衡解戦略の値が変わる）を考察する．危険愛好的ドライバーの事故費用負担の増加に伴い$W, f(0), f(1)$の値が変化することに着目すると，各均衡解エリア内で各タイプのドライバーがとる均衡解戦略が変化することがわかる．Fig. 6は，均衡解エリアを色分けし，番号付けしたものである．各エリアの均衡解にいかなる変化が生じているかをエリア別に検討する．

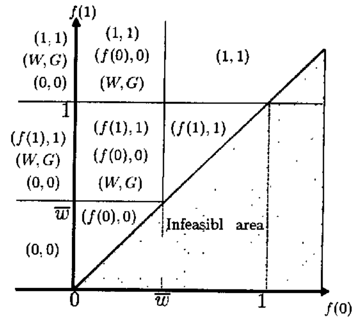

Fig. 4: Equilibria in drivers' society

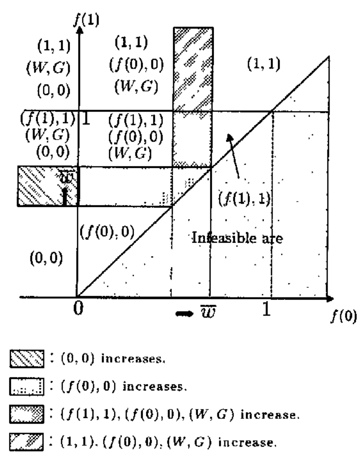

Fig. 5: Transition of equilibra according to the increase in accident cost shair for risk taking drivers.

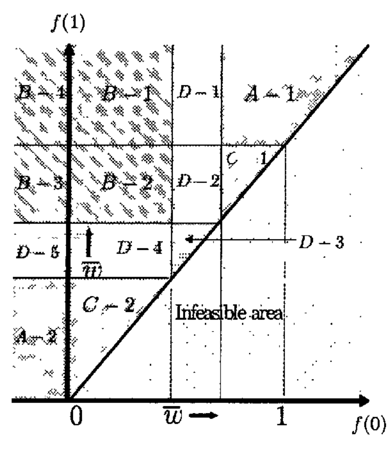

Fig. 6: Change of area sizes of equilibria according to the increase in accident cist shair for risk taking drivers.

1. Aエリア　事故負担額の変化に対して，均衡解戦略が不変であるエリアである．
   (a) $A-1$エリア [均衡解の変化 : $(1,1) \longrightarrow$ 不変] 均衡解戦略は，事故負担が不変$(1,1)$のエリアであり，常に危険愛好的ドライバー（タイプ1）は危険行動を行い，危険回避的ドライバー（タイプ2）は回避行動を

行う．

(b) $A-2$エリア [均衡解の変化：$(0,0) \longrightarrow$ 不変] 均衡解戦略が不変$(0,0)$のエリアであり，常にタイプ１は危険行動を行わず，タイプ２も回避行動を行わない．

2. Bエリア　事故負担額の変化に対して，複数均衡解すべてが不変であるが，複数均衡のうち実現している均衡解によって危険行動戦略をとる確率が増加または減少し，危険回避行動戦略をとる確率も増加または減少するエリアである．
   (a) $B-1$エリア [均衡解の変化: $(1,1)$，$(f(0),0)$，$(W,G) \longrightarrow$ 不変] 均衡解$(1,1)$，$(f(0),0)$，(W,G)は不変である.各ドライバーが$(1,1)$を選択するとき，両タイプの行動戦略をとる確率も不変である．$(f(0),0)$を選択するとき，タイプ1が危険行動戦略をとる確率$f(0)$が減少し，タイプ2が危険回避行動戦略をとる確率は不変である．また，(W,G)を選択するとき，タイプ1が危険行動戦略をとる確率は増加し，タイプ2の危険回避行動戦略をとる確率も増加する．
   (b) $B-2$エリア [均衡解の変化: $(f(1),1)$，$(f(0),0)$，$(W,G) \longrightarrow$ 不変] 均衡解$(f(1),1)$，$(f(0),0)$，(W,G)は不変である．各ドライバーが$(f(0),0)$，$(f(1),1)$を選択するとき，タイプ１は危険行動戦略をとる確率は共に減少するが，タイプ２の危険回避行動戦略をとる確率は共に不変である．(W,G)を選択するとき，タイプ１，タイプ２共に各タイプがそれぞれ危険行動，回避行動戦略をとる確率が増加する．
   (c) $B-3$エリア [均衡解の変化: $(f(1),1)$，(W,G)，$(0,0) \longrightarrow$ 不変] 均衡解$(f(1),1)$，(W,G)，$(0,0)$は不変である．各ドライバーが$(f(1),1)$を選択するとき，タイプ１が危険行動戦略をとる確率は減少するが，タイプ２の危険回避行動戦略をとる確率は不変である．$(0,0)$を選択するとき，タイプ１，タイプ２共に各タイプの行動戦略は不変である．また，(W,G)を選択するとき，タイプ1，タイプ２は共に各戦略をとる確率が増加する．
   (d) $B-4$エリア [均衡解の変化: $(1,1)$，$(0,0)$，$(W,G) \longrightarrow$ 不変] 均衡解$(1,1)$，$(0,0)$，(W,G)は不変であり，各ドライバーが$(1,1)$，$(0,0)$を選択するとき，各ドライバー行動戦略を行う確率は不変であり，(W,G)を選択するとき，タイプ１，タイプ2は共に各ドライバーの各戦略を行う確率は増加する．

3. Cエリア　事故負担額の変化に対して，均衡解は不変である．回避行動を行う確率は不変であるが，危険行動を行う確率は減少する．
   (a) $C-1$エリア [均衡解の変化: $(f(1),1) \longrightarrow$ 不変] 事故負担額が変化すると，均衡解戦略が，危険回避的ドライバーは回避行動をとり続け，危険愛好的ドライバーは危険行動戦略をとる確率が減少する．
   (b) $C-2$エリア [均衡解の変化: $(f(0),0) \longrightarrow$ 不変] 事故負担額が変化すると，均衡解戦略が，危険回避的ドライバーは回避行動を行わないままで，危険愛好的ドライバーは危険行動戦略をとる確率が減少する．

4. Dエリア　事故負担額の変化に対して，$D-1$，$D-2$エリアにおいては均衡解戦略は不変の可能性が高く，$D-3$エリアにおいては危険行動戦略をとる確率は減少し，危険回避行動戦略をとる確率も減少する．$D-4, D-5$エリアにおいては不変か，両タイプの行動戦略をとる確率は減少する．
   (a) $D-1$エリア [均衡解の変化: $(1,1) \longrightarrow (1,1)$，$(f(0),0)$，$(W,G)$] 均衡解戦略が$(1,1)$から$(1,1)$，$(f(0),0)$，$(W,G)$の複数均衡に変わるエリアであり，タイプ１，タイプ２は共に各タイプの行動戦略をとる確率は不変であるか減少するかのどちらかである．
   (b) $D-2$エリア [均衡解の変化: $(f(1),1) \longrightarrow (f(1),1)$，$(f(0),0)$，$(W,G)$] 均衡解戦略が$(f(1),1)$から$(f(1),1)$，$(f(0),0)$，$(W,G)$の複数均衡に変わるエリアであり，タイプ１，タイプ２は共に各タイプの行動戦略をとる確率は不変であるか減少するかのどちらかである．
   (c) $D-3$エリア [均衡解の変化: $(f(1),1) \longrightarrow (f(0),0)$] 均衡解が$(f(1),1)$から$(f(0),0)$に変わるエリアであり，タイプ１が危険行動行う確率は減少し，回避行動を行っていたタイプ２は回避行動を行わなくなる．
   (d) $D-4$エリア [均衡解の変化: $(f(1),1)$，$(f(0),0)$，$(W,G) \longrightarrow (f(0),0)$] $(f(1),1)$，$(f(0),0)$，(W,G)の複数均衡が$(f(0),0)$に変わるエリアであり，タイプ１，タイプ２共にそれぞれ，危険行動，回避行動を行う確率は不変であるか減少するかのどちらかである．
   (e) $D-5$エリア [均衡解の変化　$(f(1),1)$，

(W,G), $(0,0) \longrightarrow (f(0),0)]$ 均衡解が $(f(1),1)$, (W,G), $(0,0)$ の複数均衡から $(0,0)$ に変わるエリアでありタイプ１，タイプ２はそれぞれ，危険行動を行わず，回避行動も行わないようになる

以上の結果をまとめると，A, C, Dのエリアにおいては，危険愛好的ドライバーの事故費用負担を増加させることによって，タイプ１，２共にそれぞれ危険行動を行う確率，回避行動を行う確率は不変であるか，減少することがわかった．これより，危険愛好的ドライバーの事故費用負担を増加させることで，危険行動を行う確率が減少し，社会はより安全になることがわかる．しかしながら，Bのエリアにおいては，各ドライバーがとる戦略により危険行動，回避行動を行う確率が場合において増加するため，危険愛好的ドライバーの事故費用負担を多くすることが，常により安全な社会をもたらすとは限らない．事故費用負担に影響を与える政策を実現する際には，社会で実現している均衡解の「エリア」を的確に判断し，適切な事故費用負担の配分を考えることが重要であると考える．

5. おわりに

ドライバーの事故や危険に対する意識の違いは，事故の発生や各ドライバーの効用に大きな影響を与えると考えられる．危険意識の異なるドライバーからなる社会では，発生する事故率は高くなくても，危険回避的な運転をするドライバーが不効用を得ているという社会的に非効率な状況が生じている可能性がある．本研究では，事故に対して異なる危険意識をもつ複数のドライバーからなる社会において，事故危険に関するドライバーの運転行動について社会にいかなる均衡状態が成立するかをモデル分析した．さらに，社会をより安全で拘束的な状況を誘導するためのドライバー間の事故費用負担のあり方について言及した．

第２章では，本研究を進めていく上での基本的な考え方を述べた．第３章では，ドライバーの道路上での潜在的事故危険を含んだ出会いの場である「遭遇」をモデル化するため，社会に２タイプのドライバーが存在している状況を考え，各タイプのドライバーが，他のドライバーと遭遇したときに相手のとる戦略が分かっている場合において，考えられる全ての遭遇パターンにおける各タイプのドライバーの期待利得を導出した．また，最適反応戦略を導出することにより，各遭遇におけるナッシュ均衡解を求め，遭遇における各ドライバーの行動を明らかにした．また，第４章では，ランダムに遭遇する複数ドライバー社会をモデル化するため,「各タイプのドライバーが社会に存在する割合」というマクロ情報の下で戦略的行動を行うドライバー社会のナッシュ均衡解を求め，社会に成立するであろう運転行動や事故に関する均衡状態を明らかにした．さらに，求まった均衡解の感度分析を行うことにより，事故費用負担の変化が，社会的均衡に与える影響についても言及した．

本研究により，危険意識の異なる複数のドライバーにより形成される社会において，社会的均衡状態として，ドライバーが道路ネットワークを走行する際に事故危険に対してにいかなる運転行動を行っているのかを明らかにした．事故が発生したときに危険な運転を行ったドライバーの事故費用負担額が少ない場合は，危険な運転行動を行い易いという非効率な社会となる．そのため，１つの政策として危険な運転を行うドライバーに対して事故費用負担額を増加させることによって危険な運転を行う確率が減少し，全体としてより安全な社会となることが明らかとなった．しかしながら，ある条件の下では，逆に危険な運転を行う確率が増加し，危険愛好的ドライバーの事故費用負担の増加は，かえって社会の安全性を下げる可能性があることが示された．

今後の課題として，ドライバーの過去の交通事故や交通ルール違反等の経験により差別化した事故負担ルールの効果を分析する必要性がある．このような事故負担ルールは，自動車保険や交通違反に対する罰金等で用いられると考える．また，本研究では，危険な運転行動を行うドライバーが社会に占める割合を固定しており，危険な行動を行うか否かという選択のみを戦略と考えたが，長期的に安全なドライビング環境を実現するためには，危険行動を行うドライバーの社会に占める割合自体を変化させるような長期的政策を考慮に入れたモデルへ拡張し，安全な運転行動が「習慣化」するかを検討することも必要であろう．

謝　辞

本稿の作成にあたっては，京都大学防災研究所 岡田憲夫教授，同 多々納裕一助教授との議論を通じて有益なご示唆を得た．また，平成10年度京都大学防災研究所一般共同研究(研究代表者 喜多秀行鳥取大学工学部教授)の補助を受けた．ここに記して謝意を表す．

参考文献

岡田 章 (1996)：ゲーム理論，有斐閣．

青木昌彦・奥野正寛 (1996)：経済システムの比較制度分析，東京大学出版．

付録1　各遭遇ゲームにおける最適反応戦略の導出

ここでは，危険愛好的ドライバー同士の「遭遇」と危険回避的ドライバー同士の「遭遇」における最適反応戦略を導出する．式(3.1),(3.4)をそれぞれ自身の戦略$p, \hat{p}, q, \hat{q}$について偏微分すると以下のような限界期待利得を得ることができる．

危険愛好的ドライバー同士の「遭遇」の場合のドライバー1における限界期待利得$\partial U_1^{(1,1)}/\partial p$は以下のように定式化できる．

$$\frac{\partial U_1^{(1,1)}}{\partial p} = B - (P_3 - P_0)d_1^{(1,1)}\hat{p}\begin{bmatrix} > \\ = \\ < \end{bmatrix} 0$$

$\hat{p}$について整理すると最適反応戦略は以下のようになる．

$$\hat{p}\begin{bmatrix} < \\ = \\ > \end{bmatrix} \frac{B}{(P_3 - P_0)d_1^{(1,1)}} = H \Longrightarrow p^{best} = \begin{bmatrix} 1 \\ \{0,1\} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$\hat{p}^{best}$についても同様に求めることができ，そのときの最適反応戦略をFig. 1に表す．ナッシュ均衡は2本の線の交点で表されるため，このときのナッシュ均衡解は$(1,1),(H,H),(0,0)$の複数均衡となる．

危険回避的ドライバー同士の場合のドライバー1における限界期待利得$\partial U_2^{(2,2)}/\partial q$は以下のように定式化できる．

$$\frac{\partial U_2^{(2,2)}}{\partial q} = -C$$

$C > 0$より，限界期待利得は必ず負の値をとるので最適反応戦略は以下のようになる．

$$\frac{\partial U_2^{(2,2)}}{\partial q} < 0 \Longrightarrow q^{best} = 0$$

$\hat{q}^{best}$についても同様に求めることができ，このときの最適反応戦略はFig. 3のように表される．このとき，ナッシュ均衡は$(0,0)$となる．

付録2　社会におけるナッシュ均衡解の導出

ランダムに遭遇するドライバー社会のモデルにおいて均衡解の導出過程を省略していたので，ここでは場合分けをして均衡解を導出する．それを以下に示す．

本文で記したように，ナッシュ均衡解は，$W, f(1), f(0)$の位置関係により場合分けが必要となる．危険愛好的ドライバーの運転行動は危険回避的ドライバーの運転行動に影響されるので，まず，危険回避的ドライバーの運転行動を決定する必要がある．そこで，$W > 0$より大きく$W > 1$と$0 < W < 1$の2通りに場合分けし均衡解を導出する．

1. $W > 1$のとき，$0 < p < 1$より，必ず$p < W$となり(4.24)式より$q^{best} = 0$となる．このときの危険行動をやめることによる費用・便益比は，(4.22) 式に$q = 0$を代入することによって以下のように表される．

$$f(0) = \frac{B - \frac{n_2}{N}(P_2 - P_0)d_1^{(1,2)}}{\frac{n_1}{N}(P_3 - P_0)d_1^{(1,1)}}$$

この場合，pは$0 < p < 1$の値をとるので，Wより常に小さい値をとることがわかる．$p < W$のとき，(4.24)式より危険回避的ドライバーは回避行動をとらない（$q^{best} = 0$）ということを意味する．

   i. $f(0) > 1$のとき，(4.22)式より，必ず$\hat{p} < f(0)$となるのでp^{best}は，より大きい方が良い．このとき$p^{best} = 1$となり，ナッシュ均衡解は$(p^*, q^*) = (1, 0)$となる．

   ii. $0 < f(0) < 1$のとき，
      A. $p < f(0)$と仮定するとp^{best}は大きい方がよい．このとき$p^{best} = f(0) - \epsilon$　(ϵは微小な正の定数).
      B. $p = f(0)$と仮定するとp^{best}は$[0,1]$の値をとる．このとき$p^{best} = f(0)$
      C. $p > f(0)$と仮定するとp^{best}は小さい方がよい．このとき$p^{best} = f(0) + \epsilon$.

      この範囲ではpは$f(0)$に収束していることより，ナッシュ均衡解は$(p^*, q^*) = (f(0), 0)$　となる．

   iii. $f(0) < 0$のとき，$p > f(0)$となるのでp^{best}は小さい方がよい．このとき$p^{best} = 0$となり，ナッシュ均衡解は$(p^*, q^*) = (0, 0)$　となる．

2. $0 < W < 1$のとき，pとWの位置関係によって危険愛好的ドライバーが危険行動を行う確率(p)と危険回避的ドライバーが危険回避的行動を行う確率(q)が変化するので，$p > W, p < W, p = W$ときの3通りのケースを仮定して考察する．

   (a) $p > W$と仮定すると$q^{best} = 1$となり，このとき危険愛好的ドライバーが危険行動を行うことによる費用・便益比は次のように表される．

$$f(1) = \frac{B - \frac{n_2}{N}(P_1 - P_0)d_1^{(1,2)}}{\frac{n_1}{N}(P_3 - P_0)d_1^{(1,1)}}$$

      i. $f(1) > 1$と仮定すると$p < f(0)$とな

りp^{best}は大きい方がよい．このとき$p^{best}=1$.

ii. $0<f(1)<1$と仮定すると

A. $W>f(1)$のとき$p>f(1)$となりp^{best}は小さい方がよい．このとき$p^{best}=W+\epsilon$.

B. $W<f(1)$のとき

- $p<f(1)$と仮定するとp^{best}は大きい方がよい．このとき$p^{best}=f(1)-\epsilon$
- $p=f(1)$と仮定するとp^{best}は$[0,1]$の値をとる．このとき$p^{best}=f(1)$
- $p>f(1)$と仮定するとp^{best}は小さい方がよい．このとき$p^{best}=f(1)+\epsilon$. この範囲ではpは$f(1)$に収束していることより$p^{best}=f(1)$.

iii. $f(1)<0$と仮定すると$p>f(1)$となりp^{best}は小さい方がよい．このとき$p^{best}=W+\epsilon$.

(b) $p<W$と仮定すると$q^{best}=0$となり，このとき危険行動を行うことによる費用・便益比は次のように表される．

$$f(0)=\frac{B-\frac{n_2}{N}(P_2-P_0)d_1^{(1,2)}}{\frac{n_1}{N}(P_3-P_0)d_1^{(1,1)}}$$

i. $f(0)>1$と仮定すると$p<f(0)$となりp^{best}は大きい方がよい．このとき$p^{best}=W-\epsilon$.

ii. $0<f(0)<1$と仮定すると

A. $W>f(0)$のとき

- $p<f(0)$と仮定するとp^{best}は大きい方がよい．このとき$p^{best}=f(0)-\epsilon$.
- $p=f(0)$と仮定するとp^{best}は$[0,1]$の値をとる．このとき$p^{best}=f(0)$.
- $p>f(0)$と仮定するとp^{best}は小さい方がよい．このとき$p^{best}=f(0)+\epsilon$. この範囲ではpは$f(0)$に収束していることより$p^{best}=f(0)$.

B. $W<f(0)$のとき$p<f(0)$となりp^{best}は大きい方がよい．このとき$p^{best}=W-\epsilon$.

iii. $f(0)<0$と仮定すると$p>f(0)$となりp^{best}は小さい方がよい．このとき$p^{best}=0$.

(c) $p=W$と仮定すると

$$\frac{\partial u_1(W;q)}{\partial p}=\frac{n_1}{N}\left\{B-(P_3-P_0)d_1^{(1,1)}W\right\}+\frac{n_2}{N}\left\{B+(P_2-P_1)d_1^{(1,2)}q-(P_2-P_0)d_1^{(1,2)}\right\}\left\{\begin{array}{c}>\\=\\<\end{array}\right\}0$$

$$q\left\{\begin{array}{c}>\\=\\<\end{array}\right\}G\equiv\frac{\frac{n_1}{N}(P_3-P_0)d_1^{(1,1)}W+\frac{n_2}{N}(P_2-P_0)d_1^{(1,2)}-B}{\frac{n_2}{N}(P_2-P_1)d_1^{(1,2)}}$$

このとき危険愛好的ドライバーのドライバーが危険行動を行う確率(p)はWとなるので，$p=W$が成立する条件は次のようになる．

i. $g(0)>0(f(0)>W)$のときpは大きい方がよい．このとき$p^{best}=1$となり，$p=W$という仮定に矛盾する．

ii. $g(0)<0, g(1)>0(f(0)<W, f(0)>W)$のとき$p$は$[0,1]$の値をとる．このとき$p^{best}=W$となり，仮定に従う．

iii. $g(1)<0(f(0)<W)$のときpは小さい方がよい．このとき$p^{best}=0$となり，これは仮定に矛盾する．

したがって，$f(0)<W$という条件のもとでのみ$p=W$という仮定が成立し，そのときのqの値は$G(q=G)$となる．

Modelling of Social Equilibria on Drivers' Risk Behaviors

Kei FUKUYAMA*, Hideyuki KITA*, and Hiroyasu HOSHINA**

* Department of Social Systems Engineering, Tottori University
** KOBELCO SYSTEM

Synopsis

Risky driving behaviors does not always mean accidents. A potential accident to be caused by risky driving behavior of a driver can be avoided by risk-avoiding driving behaviors by other drivers: whether risky driving by some drivers cause car accidents depends on other drivers' behaviors and attitude toward risk. This study analyzes causing mechanism of car accidents among drivers with different preferences and behavioral options on accidental risk. A random matching game is used to model interactions by drivers' 'meetings' on roads, and the resulting stable equilibrium behaviors of drivers in society is clarified.

Keywords : *Risk Preference, Risk Attitude, Drivers, Game Theory*