ISSN 2186-5647
－日本大学生産工学部第44回学術講演会講演概要（2011-12-3）－
7-47

ITSドライバーの利他行動に関するゲーム理論モデル

日大生産工　○篠原　正明　計量計画研究所　茂木　渉
日大生産工　丸茂　喜高

1.　はじめに

道路混雑情報などを，各種情報技術を駆使して利用することができる自動車等運転者（以下，ITSドライバー）が運転中に遭遇する競合相手ドライバーとの様々な競合状態をゲーム理論的にモデル化し，その時に注目ITSドライバーがとるべき行動（特に，相手に道をゆずる等の利他行動）をゲーム理論的に分析する．

2.　一方通行一車線道路の十文字交差点における利他行動

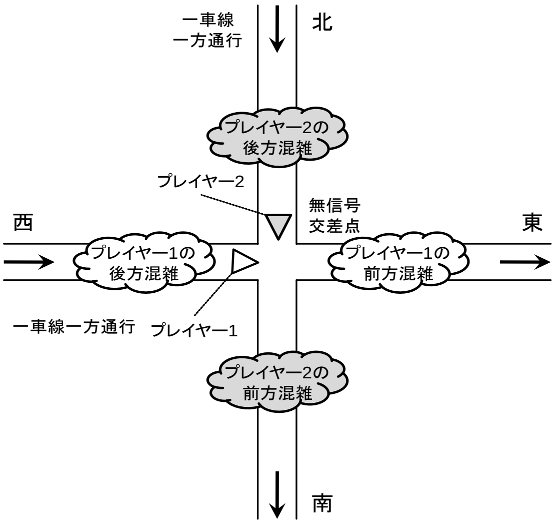

図1:　一方通行一車線の十文字交差点

自動車道路におけるドライバーの利他行動は，対歩行者，対ドライバーなど様々な道路状況における競合状態において，注目ドライバー（プレイヤー）が相手プレイヤーに対して道をゆずる等の行動をとる時に発生する．本論文では，ドライバー同士の単純な利他行動を表現できる「一方通行一車線の十文字交差点」について考察する．図1に示す「一方通行一車線の十文字交差点」を想定する．東西道路，南北道路，いずれも一車線一方通行とする．両道路の交差する箇所が交差点である．交差点には信号機等が設置されておらず無信号の交差点である．従って，交差点の直前に到達したドライバー（プレイヤー）にとっては，交差点に進行（進）と交差点直前で待機（待）の2つの行動戦略をとることができる．ここで，注目ドライバーが待機する行動戦略を採用し，相手ドライバーが進行する行動戦略を採用した時が，注目ドライバーの利他行動である．

3.　交差点における利他行動の2人非零和非協力2×2行列ゲーム

東西道路のドライバー（プレイヤー1）と南北道路のドライバー（プレイヤー2）が交差点で遭遇した時の両者の利得行列を各々 $\boldsymbol{A}, \boldsymbol{B}$ とする．$\boldsymbol{A}, \boldsymbol{B}$ 共に2×2行列である．

$$\boldsymbol{A} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{B} = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{pmatrix} \tag{2}$$

ここで，a_{ij}（b_{ij}）はプレイヤー1（2）が戦略 $i(i=1,2)$，プレイヤー2（1）が戦略 $j(j=1,2)$ を採用した時のプレイヤー1（2）の利得である．但し，両プレイヤー共に戦略1が「進」，戦略2が「待」とする．

・ a_{11} は両プレイヤー共に交差点に進入時のプレイヤー1の利得であり，交差点を通過できないのみならず，最悪時は衝突のリスクも生じる．従って，自分の後方混雑の程度に依存した損失BCL(1)等と衝突ペナルティCP(1)をとる．

$$a_{11} = \mathrm{BCL}(1) + \mathrm{CP}(1) + \mathrm{FCG}(1) \tag{3}$$

プレイヤー2についても同様に(4)となる．

Game Theory Model for ITS Driver's Altruism

Masaaki SHINOHARA, Wataru MOGI and Yoshitaka MARUMO

$$b_{11} = \mathrm{BCL}(2) + \mathrm{CP}(2) + \mathrm{FCG}(2) \qquad (4)$$

- a_{22} は両プレイヤー共に交差点で待機する「お見合い状態」でのプレイヤー1の利得である．両者とも交差点通過の機会を損失したので，自分の後方混雑の程度に依存した損失等を被る．

$$a_{22} = \mathrm{BCL}(1) + \mathrm{FCG}(1) \qquad (5)$$

プレイヤー2についても同様に(6)となる．

$$b_{22} = \mathrm{BCL}(2) + \mathrm{FCG}(2) \qquad (6)$$

- a_{21} はプレイヤー1が待ち，プレイヤー2が進入した時のプレイヤー1の利得である．すなわち，プレイヤー1が利他行動選択時のプレイヤー1の利得となる．プレイヤー1は自分の後方混雑の程度に依存した損失を被る．その時に，自分の前方が混雑していれば，無理して進む必要がないので，その程度に依存した利得FCG を得る．

$$a_{21} = \mathrm{BCL}(1) + \mathrm{FCG}(1) \qquad (7)$$

プレイヤー2については，交差点を通過できるので，通過利得PG(2) とその後の自分の前方混雑の程度に依存した損失FCL(2) を被る．

$$b_{21} = \mathrm{PG}(2) + \mathrm{FCL}(2) \qquad (8)$$

- a_{12} はプレイヤー1が進入し，プレイヤー2が待つ時のプレイヤー1の利得であり，同様に(9)，b_{12} は(10)となる．

$$a_{12} = \mathrm{PG}(1) + \mathrm{FCL}(1) \qquad (9)$$
$$b_{12} = \mathrm{BCL}(2) + \mathrm{FCG}(2) \qquad (10)$$

すなわち, 基本的には, 交差点通過時はPG, FCL，待機時にはFCG , BCL の損失と利得をとる．

PG : Passing Gain（通過利得）
BCL : Backward Congestion Loss（後方混雑損失）
FCL : Forward Congestion Loss（前方混雑損失）
FCG : Forward Congestion Gain（前方混雑利得）
CP : Collision Penalty（衝突罰金）
（なお、BCGは未考慮である）

又，各利得行列 $\boldsymbol{A} = \{a_{ij}\}, \boldsymbol{B} = \{b_{ij}\}$ の構成要素を見ると，プレイヤー1の利得行列 $\boldsymbol{A}$ は自分で走行している東西道路の混雑状況のみの関数で，プレイヤー2についても同様に，$\boldsymbol{B}$ は南北道路の混雑状況のみの関数である．

$\boldsymbol{A} + \boldsymbol{B} \neq \boldsymbol{O}$ なので非零和ゲームであり，東西道路と南北道路の混雑状況は一般に異なるので$(\boldsymbol{A} \neq \boldsymbol{B}^{\mathrm{T}})$，非対称ゲームである．もし，$\boldsymbol{A} = \boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}$ が成立すれば，対称ゲームとなり，プレイヤー1と2が同じ対称な立場にあり，本例では，$\mathrm{PG}(1) = \mathrm{PG}(2)$，$\mathrm{BCL}(1) = \mathrm{BCL}(2)$，$\mathrm{FCL}(1) = \mathrm{FCL}(2)$，$\mathrm{FCG}(1) = \mathrm{FCG}(2)$，$\mathrm{CP}(1) = \mathrm{CP}(2)$ が成立する．又，以上のゲームモデルは両ドライバーが交差点で遭遇した時の競合モデルであり，相手ドライバーが存在しない場合は，注目ドライバーが交差点を通過する．又，通過後に車両スペースが道路上に存在しない状況は考慮しない．

4. 混雑状況に応じたゲームモデル例

4.1. 無混雑時のゲームモデル

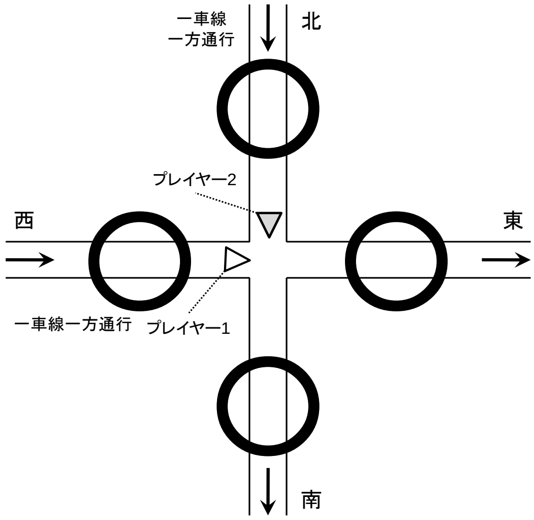

図2: 無混雑時の道路状況（○は無混雑を示す）

図2に示すように東西道路, 南北道路いずれにも混雑が無い状況を考えると，考慮すべき損益要素はCP とPG である．従って，$\boldsymbol{A},\boldsymbol{B}$ は(11),(12)となる．

$$\boldsymbol{A} = \begin{pmatrix} \mathrm{CP}(1) & \mathrm{PG}(1) \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \qquad (11)$$

$$\boldsymbol{B} = \begin{pmatrix} \mathrm{CP}(2) & 0 \\ \mathrm{PG}(2) & 0 \end{pmatrix} \qquad (12)$$

［ゲーム例1］$\mathrm{CP}(1) = \mathrm{CP}(2) = -1$，$\mathrm{PG}(1) = \mathrm{PG}(2) = 1$とすれば，以下の3つの均衡点を持つ．ただし、$x_i(y_i)$はプレイヤー1(2)の戦略iの採用確率、u(v)はプレイヤー1(2)の期待利得値である。

均衡点1 ： $(x_1 = 1, x_2 = 0), (y_1 = 0, y_2 = 1),$
$u = 1, v = 0$

均衡点2 ： $(x_1 = 0, x_2 = 1), (y_1 = 1, y_2 = 0),$
$u = 0, v = 1$

均衡点3 ： $(x_1 = 0.5, x_2 = 0.5), (y_1 = 0.5, y_2 = 0.5),$
$u = 0, v = 0$

ここで，均衡点1はプレイヤー1が「進」，プレイヤー2が「待」，均衡点2はプレイヤー1が「待」，プレイヤー2が「進」の行動戦略を採用した場合であり，純粋戦略のみによる最適反応戦略対（Nash均衡点）である．均衡点3はプレイヤー1, 2が共に半々の確率で「進」と「待」をランダム選択する混合戦略の最適反応戦略対である．

無信号交差点では，一方のドライバーが他のドライバーに道をゆずるといった状況は日常的であり，均衡点1あるいは2が生じていると考えられる．なお，均衡点3は両ドライバーがどちらの行動を選択すべきか迷っている状況であり，不安定な均衡点と類別できる．［例1終り］

さて，(11),(12)では$a_{21}=0, b_{12}=0$としたが，いずれも相手ドライバーに道をゆずった時の当該ドライバーの利得である．利他行動の選択を心理的喜びと感じるか，心理的負担と感じるかによって，$\boldsymbol{A},\boldsymbol{B}$は(13),(14)となる．

$$\boldsymbol{A}=\begin{pmatrix}\mathrm{CP}(1) & \mathrm{PG}(1)\\ \mathrm{PE}(1) & 0\end{pmatrix} \tag{13}$$

$$\boldsymbol{B}=\begin{pmatrix}\mathrm{CP}(2) & \mathrm{PE}(2)\\ \mathrm{PG}(2) & 0\end{pmatrix} \tag{14}$$

但し，PE ： Psychological Effect（心理的影響度）．

［ゲーム例2］$\mathrm{CP}(1)=\mathrm{CP}(2)=-1$，$\mathrm{PG}(1)=\mathrm{PG}(2)=1$に加えて，利他行動を心理的喜びとし，$\mathrm{PE}(1)=\mathrm{PE}(2)=1$とすれば，以下の3つの均衡点を持つ．

均衡点1 ： $(x_1=1, x_2=0), (y_1=0, y_2=1)$,
$u=1, v=1$

均衡点2 ： $(x_1=0, x_2=1), (y_1=1, y_2=0)$,
$u=1, v=1$

均衡点3 ： $(x_1=1/3, x_2=2/3), (y_1=1/3, y_2=2/3)$,
$u=1/3, v=1/3$ ［例2終り］

［ゲーム例3］$\mathrm{CP}(1)=\mathrm{CP}(2)=-2$，$\mathrm{PG}(1)=\mathrm{PG}(2)=1$，利他行動を心理的負担とし，$\mathrm{PE}(1)=\mathrm{PE}(2)=-1$とすれば，以下の3つの均衡点を持つ．

均衡点1 ： $(x_1=1, x_2=0), (y_1=0, y_2=1)$,
$u=1, v=-1$

均衡点2 ： $(x_1=0, x_2=1), (y_1=1, y_2=0)$,
$u=-1, v=1$

均衡点3 ： $(x_1=0.5, x_2=0.5), (y_1=0.5, y_2=0.5)$,
$u=-0.5, v=-0.5$ ［例3終り］

［ゲーム例4］$\mathrm{CP}(1)=\mathrm{CP}(2)=-2$，$\mathrm{PG}(1)=\mathrm{PG}(2)=1$に加えて，プレイヤー1は利他行動を心理的喜び，プレイヤー2は心理的負担とし，$\mathrm{PE}(1)=1$ $\mathrm{PE}(2)=-1$とすれば，以下の3つの均衡点を持つ．

均衡点1 ： $(x_1=1, x_2=0), (y_1=0, y_2=1)$,
$u=1, v=-1$

均衡点2 ： $(x_1=0, x_2=1), (y_1=1, y_2=0)$,
$u=1, v=1$

均衡点3 ： $(x_1=0.5, x_2=0.5)$,
$(y_1=0.25, y_2=0.75)$,
$u=0.25, v=-0.5$ ［例4終り］

ゲーム例1～4のいずれの2人ゲームモデルにおいても，2つの安定な純粋戦略によるNash均衡点と1つの不安定な混合戦略によるNash均衡点が存在している．又，ゲーム例3において、$\mathrm{CP}(1)=\mathrm{CP}(2)=0$ならば、零和ゲームとなり、唯一の均衡点を持つ．一般に無混雑時は$\mathrm{CP}(1)=\mathrm{CP}(2)=0$、$\mathrm{PG}(1)+\mathrm{PE}(2)=0$, $\mathrm{PG}(2)+\mathrm{PE}(1)=0$ならば、零和ゲームとなる。

4.2. 東西道路混雑時のゲームモデル

図3に示すように東西道路のみが混雑している状況を考えると，$\boldsymbol{A},\boldsymbol{B}$は以下のとおりである．

$$\boldsymbol{A}=\begin{pmatrix}\mathrm{BCL}(1)+\mathrm{CP}(1)+\mathrm{FCG}(1) & \mathrm{PG}(1)+\mathrm{FCL}(1)\\ \mathrm{BCL}(1)+\mathrm{FCG}(1) & \mathrm{BCL}(1)+\mathrm{FCG}(1)\end{pmatrix} \tag{15}$$

$$\boldsymbol{B}=\begin{pmatrix}\mathrm{CP}(2) & 0\\ \mathrm{PG}(2) & 0\end{pmatrix} \tag{16}$$

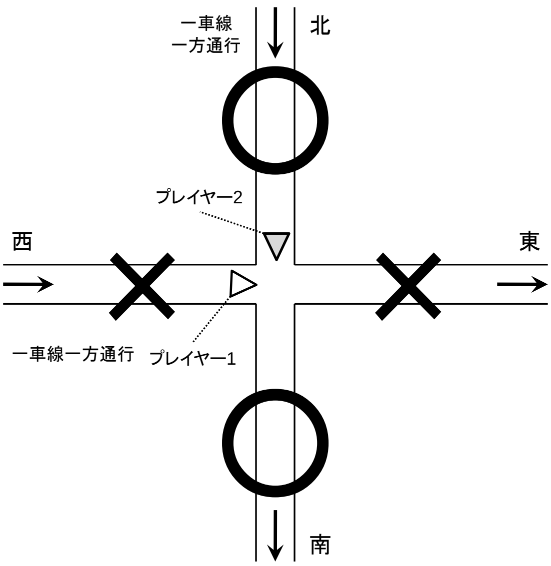

図3: 東西道路混雑時の道路状況（✕は混雑を示す）

(15)の $\boldsymbol{A}$ において，プレイヤー1（東西ドライバー）が交差点を通過する時のみ（a_{12}），前方混雑を助長するので，$\mathrm{FCL}(1)$ を付加し，それ以外（a_{11}, a_{21}, a_{22}）では，前方混雑を緩和するので，$\mathrm{FCG}(1)$ を付加した．又，FCG 項と同時に，後方混雑が強まる恐れがあるためBCL 項を付加した．(a_{11}, a_{21}, a_{22}) での $\mathrm{BCL}+\mathrm{FCG}$ の値は，前方混雑と後方混雑の程度に依存して決まる．

プレイヤー2（南北ドライバー）の利得は，東西道路の混雑状況とは無関係に南北道路のみの状況で決まるので，(16)式の $\boldsymbol{B}$ は，(12)式と同じである．

［**ゲーム例5**］東西道路で前方混雑の程度が非常に大きい場合を想定して，$\mathrm{BCL}(1)+\mathrm{FCG}(1)=1$, $\mathrm{FCL}(1)=-2$, $\mathrm{CP}(1)=\mathrm{CP}(2)=-1$, $\mathrm{PG}(1)=\mathrm{PG}(2)=1$ とすると，以下の1つの均衡点を持つ．

均衡点1 ： $(x_1=0, x_2=1), (y_1=1, y_2=0)$,
$u=1, v=1$ ［**例5終り**］

［**ゲーム例6**］東西道路で後方混雑の程度が非常に大きい場合を想定して，$\mathrm{BCL}(1)+\mathrm{FCG}(1)=-1$, $\mathrm{FCL}(1)=0$, $\mathrm{CP}(1)=\mathrm{CP}(2)=-1$, $\mathrm{PG}(1)=\mathrm{PG}(2)=1$ とすると，以下の3つの均衡点を持つ．

均衡点1 ： $(x_1=1, x_2=0), (y_1=0, y_2=1)$,
$u=1, v=0$

均衡点2 ： $(x_1=0, x_2=1), (y_1=1, y_2=0)$,
$u=-1, v=1$

均衡点3 ： $(x_1=0.5, x_2=0.5), (y_1=2/3, y_2=1/3)$,
$u=-1, v=0$ ［**例6終り**］

利他行動による心理的影響を a_{21} に $\mathrm{PE}(1)$，b_{12} に $\mathrm{PE}(2)$ として付加すると，(15),(16)は(17),(18)となる．

$$\boldsymbol{A}=\begin{pmatrix}\mathrm{BCL}(1)+\mathrm{CP}(1)+\mathrm{FCG}(1) & \mathrm{PG}(1)+\mathrm{FCL}(1)\\ \mathrm{BCL}(1)+\mathrm{FCG}(1)+\mathrm{PE}(1) & \mathrm{BCL}(1)+\mathrm{FCG}(1)\end{pmatrix} \quad (17)$$

$$\boldsymbol{B}=\begin{pmatrix}\mathrm{CP}(2) & \mathrm{PE}(2)\\ \mathrm{PG}(2) & 0\end{pmatrix} \quad (18)$$

［**ゲーム例7**］ゲーム例5において，東西ドライバー（プレイヤー1）が利他行動を非常に心理的負担と考える場合（$\mathrm{PE}(1)=-2, \mathrm{PE}(2)=0$）を想定しよう．すなわち，$\mathrm{BCL}(1)+\mathrm{FCG}(1)=1$, $\mathrm{FCL}(1)=-2$, $\mathrm{CP}(1)=\mathrm{CP}(2)=-1$, $\mathrm{PG}(1)=\mathrm{PG}(2)=1$ に加えて，$\mathrm{PE}(1)=-2, \mathrm{PE}(2)=0$ とすると，$\boldsymbol{A},\boldsymbol{B}$ は(19),(20)となり，以下の1つの均衡点1を持つ．

均衡点1 ： $(x_1=0.5, x_2=0.5), (y_1=2/3, y_2=1/3)$,
$u=2/3, v=0$

$$\boldsymbol{A}=\begin{pmatrix}0 & -1\\ -1 & 0\end{pmatrix} \quad (19)$$

$$\boldsymbol{B}=\begin{pmatrix}-1 & 0\\ 1 & 0\end{pmatrix} \quad (20)$$

ゲーム例5では純粋戦略の均衡点であったが，本例では混合戦略の均衡点となる． ［**例7終り**］

［**ゲーム例8**］ゲーム例6において，南北ドライバー（プレイヤー2）が利他行動を非常に心理的負担と考える場合（$\mathrm{PE}(1)=0, \mathrm{PE}(2)=-2$）を想定しよう．すると，$\boldsymbol{A},\boldsymbol{B}$ は(21),(22)となり，以下の1つの均衡点1を持つ．

均衡点1 ： $(x_1=0, x_2=1), (y_1=1, y_2=0)$,
$u=-1, v=1$

$$\boldsymbol{A}=\begin{pmatrix}-2 & 1\\ -1 & -1\end{pmatrix} \quad (21)$$

$$\boldsymbol{B}=\begin{pmatrix}-1 & -2\\ 1 & 0\end{pmatrix} \quad (22)$$

ゲーム例6では3つの均衡点を持ったが，本例では例6の均衡点2のみが残り，他は消滅した．［**例8終り**］

5. おわりに

一方通行一車線の十文字交差点で遭遇した二人のドライバー（プレイヤー）の様々な競合状態を2人非零和非協力2 × 2行列ゲームとしてモデル化し、各ドライバーがとるであろう行動（特に，相手に道をゆずる等の利他行動）をゲーム理論的に分析した．

各種のパラメタ(心理的影響度、通過利得、衝突罰金、など）が均衡戦略解構造に与える影響の分析、一方通行一車線の十文字交差点を模擬する８の字型サーキット上での車両走行シミュレーション検証実験、などが今後の課題である。

参考文献

[1] 丸茂喜高，鈴木宏典，片山硬：ドライバの善行運転に対する動機づけの検討，自動車技術会学術講演会前刷集，No. 143-10，(2010)，pp. 7-10。