

# 経路選択問題に潜在する数理ジレンマ構造に関する研究

中村光佑<sup>1</sup>, 谷本潤<sup>2</sup>, 萩島理<sup>2</sup>, 池谷直樹<sup>2</sup>, 藤木拓也<sup>3</sup>, 莖田慎司<sup>3</sup>

<sup>1</sup>九州大学 工学部 エネルギー科学科

<sup>2</sup>九州大学大学院 総合理工学研究院 エネルギー環境共生工学部門

<sup>3</sup>九州大学大学院 総合理工学府 環境エネルギー工学専攻

## 概要

Yamauchi ら[1], Nakata ら[2]により 2 車線合流狭窄部に生じるボトルネックでの割り込み流れの背後に, また, 莖田ら[3]により明示的なボトルネックの無い 2 車線交通での車線変更の背後に, 囚人のジレンマ (Prisoner's Dilemma; PD) の数理構造が存在することが明らかにされた. 本論では, Whale ら[4], Zheng-Tao ら[5]により解析された経路選択交通流動問題の系においてどのような数理ジレンマ構造が潜んでいるのかを解明した. 旅行時間に従って経路選択する裏切り戦略, ランダムに経路選択する協調戦略を併存させてジレンマ解析を行ったところ, ある密度域では, 数理ジレンマの 1 つであるチキンゲーム (Chicken Game) の数理構造が確認された.

## Traffic flow analysis on a social dilemma hidden in route selection problem

Kousuke Nakamura<sup>1</sup>, Jun Tanimoto<sup>2</sup>, Aya Hagishima<sup>2</sup>, Naoki Ikegaya<sup>2</sup>, Takuya Fujiki<sup>2</sup>, Shinji Kukida<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Energy and Engineering, School of Engineering, Kyushu University

<sup>2</sup>Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University

## Abstract

Yamauchi et al. [1] and Nakata et al. [2] investigated whether a traffic flow with lane closing contains social dilemma, and Kukida et al. [3] also investigated whether an ordinal lane-changing in 2 lanes traffic flow without any evident bottlenecks brings about social dilemma. They revealed that there can be observed Prisoner's dilemma in a certain flow density region. This time, we investigated whether there is social dilemma in the traffic flow with route selection problem originally analyzed by Whale et al. [4] and Zheng-Tao et al. [5]. We define agents, who select one of the two routes with shorter trip-time, defectors, and agents, who randomly select a route, cooperators. Simulation result reveals that Chicken-type dilemma is underlying in a certain traffic density region.

## 1 緒言

著者らの研究グループでは, 交通流動が道路という有限の資源を車両 agent 同士が奪い合う, 所謂, 資源割り当て問題の様相を呈し, そこには数理的ジレンマゲームとの関連性があると考え, 研究を継続している. Yamauchi ら[1], Nakata ら[2]は, 2 車線合流狭窄部のボトルネックにおいて輸送効率が低下する現象の背景には, 囚人のジレンマ (Prisoner's Dilemma; PD) ゲームの数理構造が潜在することを発見した. また, 莖田ら[3]は, 2 車線交通において過剰な車線変更が効率的流動を阻害する場合にも同様に, PD ゲームの数理ジレンマ構造が潜在することを発見した. 本稿では, 次世代 ITS (Intelligent Transport

Systems) 技術を適用し, 車両に適切な情報を教示することで渋滞緩和を図ろうとの発想の元, Whale ら[4]や Zheng-Tao ら[5]により解析された経路選択問題の交通流に, 進化ゲーム理論の枠組みを適用して, どのような数理ジレンマ構造が潜在しているかを解明する.

## 2 モデル

### 2.1 NS モデル

本稿では車両 agent の進行方向ダイナミクスには, Nagel と Schreckenberg [6]が提案した NS モデルを用いる. アップデートルールを以下に示す. ここで,  $x_i^t$  は時刻  $t$  における番号  $i$  の車両位置,  $v_i^{(0)}$  は現在速度 ( $=x_i^t - x_i^{t-1}$ ),  $V_{max}$  は車両の最高速度,  $p$  はランダ

ムブレーキ確率である。本稿では、各式についてパラレルアップデートを採用する。

**Rule 1.** “Acceleration”

$$v_i^{(1)} = \min\{V_{max}, v_i^{(0)} + 1\} \quad \dots(1)$$

**Rule 2.** “Avoid collision”

$$v_i^{(2)} = \min\{v_i^{(1)}, x_{i+1}^t - x_i^t - 1\} \quad \dots(2)$$

**Rule 3.** “Random brake”

$$v_i^{(3)} = \max\{0, v_i^{(2)} - 1\} \quad \dots(3)$$

(if  $\text{rand}() < p$  then Rule 3 is applied)

**Rule 4.** “Moving forward”

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{(3)} \quad \dots(4)$$

## 2.2 経路選択と情報

図1に本稿で用いた交通モデルを示す。このモデルは Zheng-Tao ら[5]により解析された経路選択問題の交通を基本としたモデルである。彼らのモデルでは、系の入口において道路が2本に分岐しており、車両はどちらか1つの経路を選択して走行する。両路の長さ  $L$  は等しく、それぞれ1車線系であり、両端以外で車線変更はできない。Zheng-Tao ら[5]はこの系に進入する車両へどのような情報を与えれば、両路の flux (交通流量) の和を最大化できるかを検討している。彼らが与える交通情報の1つに旅行時間がある。旅行時間とは車両が系に進入してから退出するまでにかかる時間である。車両は系から退出する際に入口の掲示板に旅行時間を送信し、更新する。その時間までに通過した全ての車両の旅行時間を合計し、通過した台数で割るという平均操作などの計算処理を本稿では用いない。情報を送信する際には時間遅れは存在しない。また、交通情報は全ての車両が利用するのではなく、一部の車両は情報を無視してランダムに経路を選択する車両が存在する。出口における両路の合流部はボトルネックを構成し、1 time step で1台のみ通ることができる。もし、両路の先頭車両が同時に、系から退出できる場合、以下の順番で系から退出できる priority が与えられる。

- 位置が出口により近い車
- 出口までの距離が等しい場合、速度がより大きい車
- 位置も速度も同じ場合、ランダムでどちらかの車に priority を与える。

また、priority が与えられなかった車両は速度を変更し、出口の1つ手前のセルに移動する。Zheng-Tao ら[5]は開放系の境界条件を用いたが、本稿では、系内の車両密度  $\rho$  を一定にするために、周期境界条件を用いた。1 time step 中の系の更新手順は以下のとおりである。

- すべて車両の速度を計算する。(式(1)~(3))
- 次の位置更新(式(4))で先頭車両が系を出ることが可能な位置と速度であれば、その車両に priority を与える(両路の先頭車両が同じ time step に系から退出できる場合は、(a)~(c)の順に priority を与える)。
- priority を持った車がいる場合、その車が走行していた経路の旅行時間を更新する。

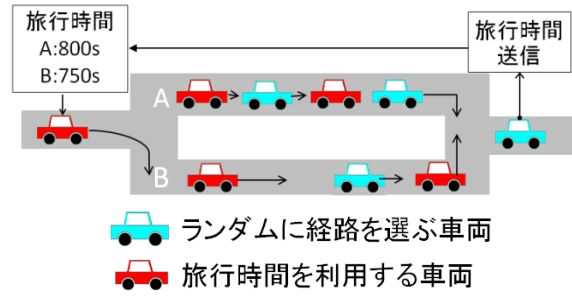


図1 旅行時間フィードバックを用いた経路選択交通の模式図[5]

- priority を持った車両は、位置をシステム長  $L$  だけ後退、その車両の戦略に沿って経路を選択する。その後、その車両が現行の速度では先行車に衝突する場合、衝突を回避できる速度に変更する。

- 位置の更新を行う。(式(4))

## 2.3 戦略定義とゲーム構造解析

車両 agent は、旅行時間を無視してランダムに経路を選択する協調 agent (Cooperative agent; C-agent)、旅行時間に従って経路選択する裏切り agent (Defective agent; D-agent) の2種類を定義する。本稿では、全車両中の C-agent の比(協調率  $P_c$ )および系全体の密度  $\rho$  を変化させながら、両戦略の平均利得(両戦略の平均速度)及び社会全体の利得(系全体の平均 flux) と  $P_c$  との関係(利得構造関数)を得て、以下のように数理ジレンマ構造を判定する。図2(d)の利得構造関数では、任意の  $P_c$  において、ある D-agent が C-agent に転向すると、D-agent の時より高い利得が得られる構造になっている。交通流の問題に擬えると、D-agent は個人的に C 戦略に変更した方が、このまま D-agent でいる場合よりも大きな速度で走ることができるため、D 戦略を採るインセンティブは生じず、全 agent が C 戦略を採ることになる。これをナッシュ均衡が  $P_c=1$  であるという。一方、社会利得最大点(公平なパレート最適)も  $P_c=1$  で、ナッシュ均衡と等しい。ジレンマとはナッシュ均衡と公平なパレート最適が一致しない場合に存在するものであるため、(d)はジレンマが存在しない。このゲームは Trivial ゲームと呼ばれる。図2(a)は各戦略の平均利得の大小関係が Trivial とは逆であるため、(a)のナッシュ均衡は  $P_c=0$  である。また、パレート最適は  $P_c=1$  とナッシュ均衡と一致しないため、(a)のゲームにはジレンマが存在し、特にこの数理ジレンマ構造を囚人のジレンマ (Prisoner's Dilemma; PD) ゲームという。図2(b)では各戦略の平均利得が交差している。 $P_c$  がその交点より小さい範囲では Trivial ゲームのように C-agents が増加、 $P_c$  が交点より大きい範囲では PD のように C-agents が減少する方向に社会ダイナミクスが進む。結果として、(b)のゲーム構造はナッシュ均衡が内部に存在する Chicken ゲームを有する。(c)は初期の協調率により均衡点が分岐する Bi-stable な均衡を有する Stag-Hunt (SH) ゲームと呼ばれる。

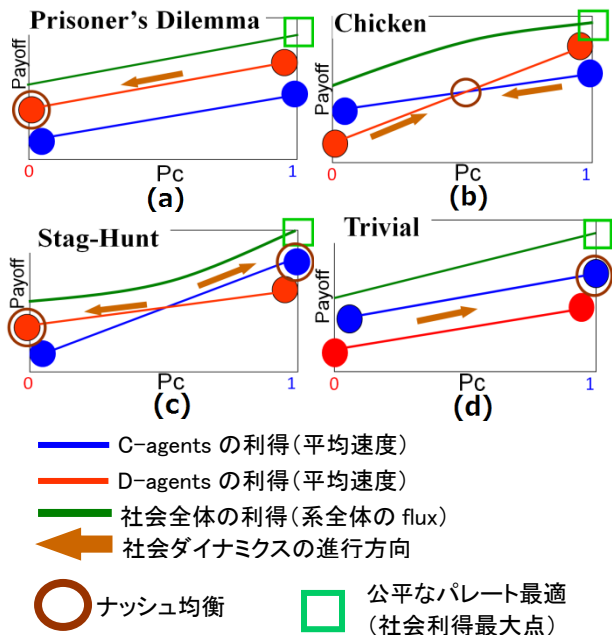


図2 多人数2戦略ゲームにおける4つの代表的な数理ジレンマ構造

### 2.4 実験条件

系全体の車両密度  $\rho$  を0から1まで0.01ずつ変化させ、その  $\rho$  の値ごとに協調率  $P_c$  を0から1まで0.05ずつ変化させて系の解析を行う。全車両のうち、 $P_c$  の割合でC戦略を、 $1-P_c$  の割合でD戦略を採る。車両の初期位置はランダムに決定する。旅行時間とは入口から出口までにかかる時間であるため、シミュレーションの開始直後は適切な旅行時間を決定できない。適切な旅行時間を設定するために、最初に全車両をC戦略(ランダムに経路選択)で3周させる。その後、流れを定常にするために20,000steps間、車両を走行させた後、10,000steps間、車両 agent の利得である平均速度と社会全体の利得である系全体の flux を計量して、解析対象とした。前述パラメータは Zheng-Tao ら[5]が用いたパラメータを参照して、 $\rho=0.25$ ,  $V_{max}=3$ , システム長  $L=1000$  とする。

### 3 結果及び考察

図3は、4つの車両密度  $\rho$  における利得構造関数を示す。この図の中で、ナッシュ均衡と公平なパレート最適との関係から、ジレンマ解析を行う。

図3(a)では、 $\rho=0.05$  と低密度であるため、全車両が片方のレーンに集中する場合でも、ほとんどの車両が最大速度で走ることができる。その結果、agent の平均速度には戦略による違いが生じない。このため、各戦略の平均速度は協調率に感度を持たなくなり、図2に示した数理ジレンマ構造に分類できず、ゲーム性がそもそも存在しないと言える。

中密度の図3(b)の  $P_c < 0.75$  ではDよりCの利得(平均速度)が高く、 $P_c > 0.75$  ではCよりDの利得が高いので、社会ダイナミクスは内部均衡点 ( $P_c$

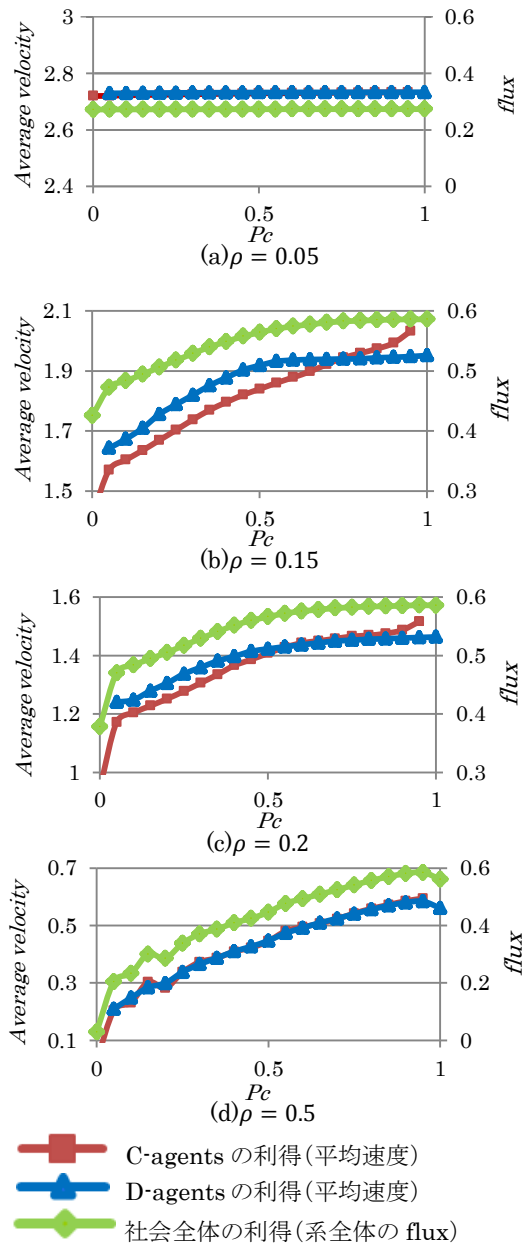


図3 各密度における利得構造関数

$=0.75$ ) に吸引される Chicken ゲームの様相を呈する。また、図3(c)の  $P_c$  が0.55から0.7の範囲で両戦略の平均利得はほとんど差が無く、どちらも  $P_c$  に関して単調増加している。従って、この範囲ではC戦略が増加する方向へ社会ダイナミクスは進む。 $P_c < 0.55$  でもC戦略が増加する方向へ、 $P_c > 0.7$  ではD戦略が増加する方向へ社会ダイナミクスは進む。よって、(c)の交通には  $P_c=0.7$  の均衡点を持つ Chicken ゲームのジレンマ構造を有する。

図4に  $P_c=0$  と  $P_c=1$  の基本図を示す。flux と  $\rho$  は両路の平均を採った。図1に示したように、終端部にボトルネックがあるため、比較的低密度と云える  $\rho > 0.1$  で渋滞が発生している。図3(b)(c)の中密度

域では、 $P_c$  が低い（情報参照車が多い）場合、旅行時間の参照により D-agent は片方の経路に遍在し、それが時間と共に摂動する典型的なマイノリティゲームの状況[7]となって D-agent の平均利得は低下する。対して、 $P_c$  が高い（情報参照車が少ない）場合、D-agent は旅行時間を参照することで、より渋滞の長さが短い経路を選択することができる。従って、D 戦略の平均利得は C 戦略のそれより上回る。即ち、中密度域では  $P_c$  の高低で情報参照の優位性が変化するため、Chicken ゲームの特性が現れたと言える。

$\rho=0.5$  と高密度の図 3(d)では、多くの時間帯で両路に渋滞が発生している。 $P_c$  が高い場合、図 3(b) と(c)の中密度域であれば、D 戦略の情報優位性が効くのだが、高密度では両路のどちらを選択しようとしてどこかで渋滞に遭う可能性が高く、各戦略の平均利得に差が生じなくなる。 $P_c$  が低い場合には、前述の図 3(b)と(c)ではランダム選択する C-agent が有利であるが、高密度域では、両路のどちらを採ろうと渋滞に遭う可能性が高くなり、D 戦略との利得差は小さくなってしまふ。しかし、D-agent の経路選択の挙動は両路間に車両偏在の摂動を引き起こすので、 $P_c$  が高いほど全体の flux は大きくなる。社会ダイナミクスの進行方向を考えると、 $P_c < 0.95$  の範囲では C 戦略が増加する方向、 $P_c > 0.95$  の範囲は、C 戦略が減少する方向へ進む。従って、均衡点は  $P_c=0.95$  である。また、公平なパレート最適も  $P_c=0.95$  でナッシュ均衡と一致しているため、 $\rho=0.5$  には、Trivial ゲームが存在する。

図 5 は Nakata ら[2]が定義していたジレンマ強さと密度との関係を示している。ジレンマ強さ  $\eta$  を次式で定義する。

$$\eta = (flux_{max} - flux_{equ}) / flux_{max} \quad (\eta \geq 0)$$

ここで、 $flux_{max}$  は利得構造関数における社会利得最大点の flux であり、 $flux_{equ}$  は均衡点の flux である。数理ジレンマの存否は公平なパレート最適とゲームの均衡が一致するか否かに依存する。 $\eta=0$  では Trivial ゲームを有するか、もしくは図 3 (a)で考察したようにそもそもゲーム性が存在しないことが考えられる。また、 $\eta$  の値が大きいほど、強いジレンマが存在することを意味する（数理ジレンマ構造が PD, Chicken か SH かは判別できない）。低密度の場合は、ゲーム性が存在せず、高密度では両路での渋滞が激しく Trivial ゲームとなる。そして、中密度 ( $0.13 \leq \rho \leq 0.44$ ) では、Chicken ゲームに属するジレンマが生じている。

## 4 結語

経路選択交通の背後に潜む数理ジレンマ構造を解明するために、Zheng-Tao ら[5]のモデルを基本とした NS モデルによるセルオートマタモデルを構築し、旅行時間の情報を利用する D-agent と経路をランダム選択する C-agent の 2 種類の agent でシミュレーションを行った。その結果、中密度域で Chicken に属する数理ジレンマが存在した。

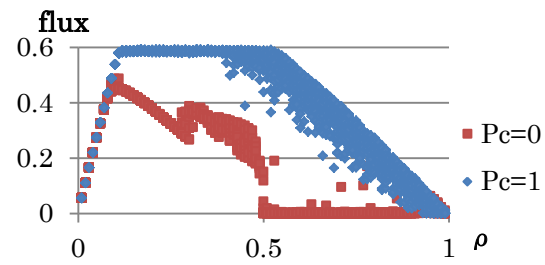


図 4 基本図(flux - density)

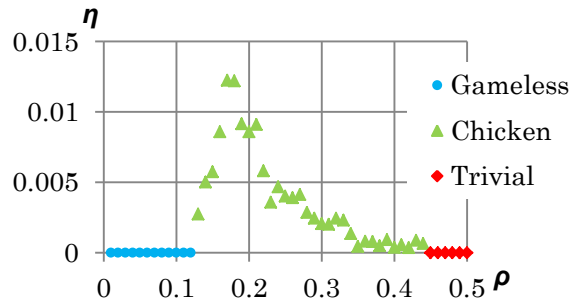


図 5 ジレンマ強さ  $\eta$  と密度  $\rho$  の関係

## 5 謝辞

本研究の一部は、科研費萌芽研究 (#25560165)、ファイザーヘルス研究財団による。記して謝意を表する。

## 参考文献

- [1] Yamauchi.A., Tanimoto.J., Hagishima.A., Sagara.H.; Dilemma Game Structure Observed in Traffic Flow at a 2-to-1 Lane Junction, *Physical Review E* 79, 036104, 2009.
- [2] Nakata.M., Yamauchi.A., Tanimoto.J., Hagishima.A.; Dilemma game structure hidden in traffic flow at a bottleneck due to a 2 into 1 lane junction, *Physica A* 389, 5353-5361, 2010
- [3] 荻田慎司, 谷本潤, 萩島理, 車線変更が交通流にもたらすジレンマ構造の解析, 第 17 回交通流のシミュレーションシンポジウム, 17-20,2011.12.
- [4] Whale J., Bazzan A L C., Klugl F. and Schreckenberg M.; Decision Dynamics in a Traffic Scenario 2000 *Physica A* 287 669
- [5] Xiang Zheng-Tao and Xiong Li ;Aweighted mean velocity feedback strategy in intelligent two-route traffic systems, *Chinese Physics B*, Vol.22, No.2 (2013) 028901
- [6] Nagel K and Schreckenberg M; A cellular automaton model for freeway traffic, *J. de Phys.* (1992) 2221-2229
- [7] W. B. Arthur; Inductive reasoning and bounded rationality, *American Economic Review*, Vol. 84, p. 406, 1994