

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年3月31日現在

機関番号:17102

研究種目:挑戦的萌芽研究

研究期間:2011~2012

課題番号:23651156

研究課題名(和文) 渋滞学における車両エージェント動力学およびマクロ現象への進化ゲーム理論適用の試み

研究課題名(英文) A challenge; Evolutionary Game theory applying to dynamics of vehicle agents in traffic jam and its understanding of macroscopic phenomenon.

研究代表者

谷本 潤(TANIMOTO JUN)

九州大学・総合理工学研究院・教授

研究者番号:60227238

研究成果の概要(和文):

圧縮性流体あるいは自己駆動多粒子系ダイナミクスとして理解されてきた交通流に人間の意志決定の数学モデルである進化ゲーム理論を適用することにより、車線狭窄などの explicit なボトルネック、あるいは車線変更、強引な割り込みなど implicit なボトルネック等々が、どのように交通流を乱し、生じた乱流がどう流動効率の低下を招き、それが運転者の意志決定と如何に関係付けられ、如何なる数理ジレンマを惹起するのかに関する包括的解析手法を理論構成し、系統的な解析を行った。

研究成果の概要(英文):

Following previous works by Yamauchi et al. (PRE 79) and Nakata et al. (Physica A 389), who investigated whether a traffic flow with lane closing instinctively contains social dilemma, another question of whether lane changes in a traffic flow without any evident bottlenecks bring about social dilemma structures. Simulation result reveals that flow phases featured with high flux and high density have obvious social dilemma classified with Prisoner's Dilemma, where all drivers tend to take the strategy trying lane changes as long as possible, and this causes the worst beneficial situation from social benefit point of view. Whereas, in flow regimes having local jams but much more flux than entire jam phase, frequent lane changes can rather improve the total social payoff, defined by averaged flux, because driving with lane changes can earn pretty small forward gains, leading to larger flux than driving without any lane changes.

交付決定額

(金額単位:円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野:複合新領域

科研費の分科・細目:社会・安全システム科学/社会システム工学・安全システム

キーワード:モデリング、渋滞学、進化ゲーム理論

1. 研究開始当初の背景

申請者は車線狭窄のボトルネックで割り込みにより交通流に乱れが生じ、これにより流動効率が低下、渋滞に至る現象を、交通流動の解析手法であり近年進展著しいセルオートマタ(CA)に進化ゲーム理論を埋め込む解析手法を開発して適用、流動相に応じて生じる社会的数理ジレンマ構造について先蹤的な報告をした [Tanimoto & Hagishima et al.;

Dilemma Game Structure Observed in Traffic Flow at a 2-to-1 Lane Junction, Physical Review E 79, #036104 (2009)]. 申請者の発見は純粋な流れ場の科学により支配されると考えられてきた交通流に社会ジレンマの数理構造が潜むことを見出したものであり、大きな反響を呼んでいる。理論構築はまだ緒に就いたばかりであり、交通流動の物理学に進化ゲーム理論を埋め込むことで、割り込み、車線変更、

サグやボトルネック等で流れが乱される構造と運転者である人間の意志決定に端を發する数理ジレンマがどう関連づけられるのかを包括的に解明する必要がある。申請者の論文発表以降、世界の多くの物理学者がこの点に注目しており、早急な研究進捗をはかれないと新発見のアドバンテージを失うことになる。また、この研究提案により、流れ場と数理ジレンマのクラスとの関係が明らかにされれば、これまで進化ゲーム理論で培われてきたジレンマを解消・緩解する様々なプロトコルを応用して、渋滞緩和の工学的対策や法規改正など社会方策の具体的提案を成ることが可能である。

2. 研究の目的

圧縮性流体あるいは自己駆動多粒子系ダイナミクスとして理解されてきた交通流に人間の意志決定の数学モデルである進化ゲーム理論を適用することにより、車線狭窄などの **explicit** なボトルネック、あるいは車線変更、強引な割り込みなど **implicit** なボトルネック等々が、どのように交通流を乱し、生じた乱流がどう流動効率の低下を招き、それが運転者の意志決定と如何に関係付けられ、如何なる数理ジレンマを惹起するのかに関する包括的解析手法を理論構成し、系統的な解析を行う。

3. 研究の方法

現実交通流の再現に供するモデルとして CA が頻用されているが、これはマクロモデルにみられない柔軟性があるため、合流、分岐、割り込みその他の現実の交通流に観察される様々なイベントの再現に対して頑強なモデル化が可能であることが挙げられる。本研究では、申請者らの既往研究により、2 車線狭窄合流部のボトルネックでの割り込みにより流動相に擾乱が生じ輸送効率が低下する現象の背景に囚人のジレンマ (Prisoner's Dilemma, PD) ゲームの数理構造が潜在するとの発見を受け、流動相への擾乱を付加することと数理ジレンマ性との因果があるのだとすれば、通常走行時の過剰な車線変更が効率的流動を阻害する現象にも同様の、もしくは異なるクラスのジレンマ性が潜在するとを数値実験により解明する。本研究では現実のドライバー挙動として尤もらしいスロースタート効果、見通し効果、ランダムブレーキ効果を確率的に組み込んだ枠組みで、現実の交通流に対して高い再現性を示すことが確認されている。S-NFS モデル (Stochastic Nishinari Fukui Schadschneider Model) S-NFS モデルを改良した Revised S-NFS モデルを適用する。具体的には、まず、一般多車線系

CA モデルを構築し、開放系境界条件を設定した一連のシミュレーションにより、車線変更の背後に潜む数理ジレンマ構造を解明した。

4. 研究成果

4-1 モデル

改良 S-NFS モデル

S-NFS モデルの適用前に、focal 車両と前方車両との速度差および車間距離を考慮してランダムブレーキ確率 $1-p_i$ を決定する。

$$\text{if } (g_i \geq G) \\ p_i = P_1 \quad \dots(1)$$

$$\text{if } (g_i < G) \\ p_i = P_2 \quad \text{for } v_i^{(0)} < v_{i+1}^{(0)} \quad \dots(2)$$

$$p_i = P_3 \quad \text{for } v_i^{(0)} = v_{i+1}^{(0)} \quad \dots(3)$$

$$p_i = P_4 \quad \text{for } v_i^{(0)} > v_{i+1}^{(0)} \quad \dots(4)$$

但し、 G はモデルパラメータである閾値、 g_i と p_i はそれぞれ自車と前方車両との車間距離、ランダムブレーキ確率である。 $v_i^{(0)}$ は自車の速度、 $v_{i+1}^{(0)}$ は前方車両の速度を示す。上式では、ランダムブレーキ確率の大小を車間距離で大きく 2 つにクラス分けしており、車間距離が短いときは、前方車両との速度差の関係により更に 3 つにクラス分けする。 $P_1 > P_2 > P_3 > P_4$ を仮定するので、車間距離が短く、前方車両より速い場合ほどランダムブレーキが発動されやすい (確率 $1-p_i$ でランダムブレーキが発動するため)。これにより、S-NFS モデルに見られた 2 つの問題点、すなわち先行車に衝突するように急減速する非現実的減速ダイナミクスと、Kerner の 3 相交通流理論でいう **synchronized flow** が適切に再現されていない点、が解消されるという。

改良 S-NFS モデルの 1 時間ステップにおける漸化式表現は以下のように表される。

Rule 1. "Acceleration"

$$v_i^{(1)} = \min \{ V_{\max}, v_i^{(0)} + 1 \} \dots(5)$$

(only if $g_i \geq G \cup v_i^{(0)} \leq v_{i+1}^{(0)}$ then Rule 1 is applied)

Rule 2. "Slow-to-start"

$$v_i^{(2)} = \min \{ v_i^{(1)}, x_{i+S}^{t-1} - x_i^{t-1} - s_i \} \dots(6)$$

(only if $\text{rand}() \leq q$ then Rule 2 is applied)

and (if $\text{rand}() \leq r$ then $s_i = S$ else $s_i = 1$).

Rule 3. "Perspective (Quick start)"

$$v_i^{(3)} = \min \{ v_i^{(2)}, x_{i+S}^t - x_i^t - s_i \} \dots(7)$$

Rule 4. "Random brake"

$$v_i^{(4)} = \max \{ 1, v_i^{(3)} - 1 \} \dots(8)$$

(if $\text{rand}() < 1-p_i$ then Rule 4 is applied).

Rule 5. "Avoid collision"

$$v_i^{(5)} = \min \{ v_i^{(4)}, x_{i+1}^t - x_i^t - 1 + v_{i+1}^{(4)} \} \dots(9)$$

Rule 6. "Moving forward"

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{(5)} \dots(10)$$

但し、 x_i^t は時刻 t における番号 i の車両位置、 v_i^t は現在速度 ($= x_i^t - x_i^{t-1}$)、 V_{\max} は最高速度、 s_i は見通し台数である。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。また、互いに独立な確率 π_i, q, r を設定し、確率 $1-\pi_i$ で (8) 式、確率 q で (6) 式の更新ルールを適用、確率 r で $s_i=S$ 、確率 $1-r$ で $s_i=1$ とする。
車線変更モデル

インセンティブ基準と安全基準を以下で付与する。

インセンティブ基準；

$$gap_n^f \leq v_i^{(p)} - v_{i+1}^{(p)} \cap gap_n^f > v_i^{(p)} - v_{i+1}^{(n)} \dots (11)$$

安全基準；

$$gap_n^b \geq v_{i-1}^{(n)} - v_i^{(p)} \dots (12)$$

ここで gap_n^f は前方車両との車間距離、 gap_n^b は車線変更した場合の前方車両との車間距離、 gap_n^b は車線変更した場合の後続車両との車間距離を表しており $v_i^{(p)}$ は車両の現在速度を表している。また $v_{i+1}^{(p)}$ は先行車両の速度、 $v_{i+1}^{(n)}$ は車線変更した時の先行車両の速度、 $v_{i-1}^{(n)}$ は車線変更した時の後続車両の速度を表している。隣に車両が無く、これらの条件を同時に満たした車両は確率 PLC で車線変更を行う。

実験条件

車両エージェントには、常に車線変更をすることなく走る協調エージェント (Cooperation, C-agents) と車線変更を行いながら走行する裏切りエージェント (Defect, D-agents) がいると仮定する。D-agents は(11), (12)式で述べた条件に従って車線変更を行う。渋滞が生じる手前の比較的高密度の流動状況下ではD-agentsの存在が流れに擾乱を惹起して著しい渋滞を引き起こすことが想像される。その場合、社会効率(フラックスで定義)は低下してもD-agents自身の利得(D agentの平均速度で定義)が高ければ、D戦略を採るインセンティブが存在し、皆が車線変更することなく秩序だって走行する(全員がC戦略を採る)という社会的互惠関係は崩壊するだろう。本稿では一連の数値実験により、全エージェント中のC-agentsの比(協調率 PC) および系への車両エージェント流入出パラメータ α, β を変化させながら流動状態を解析することで、社会ダイナミクスの均衡点において協調戦略が生き残り得るのか、或いは強い社会ジレンマが存在してC戦略は淘汰されてしまうのかを数理的に解明していく。システムは2車線系開放系境界条件を扱う。1 time step中のシステムのアップデートは以下のとおりである。

- (i) 車両は各車線の流入部に流入確率 α で生成される。その戦略は協調率 Pc でC戦略を、 $1-Pc$ でD戦略をとる。
- (ii) D-agentsは車線変更条件に従い、車線変更を実行する。
- (iii) すべての車両のランダムブレーキ確率を決定する。(1)~(4)式
- (iv) すべての車両の速度を計算する。(5)~(9)式

(v) アップデートする。このとき、流出確率 β でシステムから流出する。(10)式

前出パラメータを $q=0.99, r=0.99, S=2, V_{max}=5, P1=0.999, P2=0.99, P3=0.98, P4=0.01, G=15, PLC=1.0$ 、システム長 $L=500$ とする。

α 及び β を0から1まで0.1ずつ変化させ、各 α, β ごとに Pc を0から1まで0.1ずつ変化させて流れ場解析を行う。十分に流れが発達した3000step以降、測定期間500stepごとに密度、車両エージェント平均の速度を計量して(100アンサンブル平均して)、解析対象とした。社会効率をあらわすフラックスは系内全エージェントの平均速度と密度の積で計測する。

4-2 結果及び考察

Fig.1にはジレンマクラスごとに色分けした基本図を、Fig.2には各 α, β におけるFluxの相図をそれぞれ示す。 α, β の高い領域において、 $Pc=1$ の方が $Pc=0$ よりも高いフラックスを示していることがわかる。これは車線変更を許容することで系に擾乱が加わり、メタ安定相の維持が困難となることに起因している。

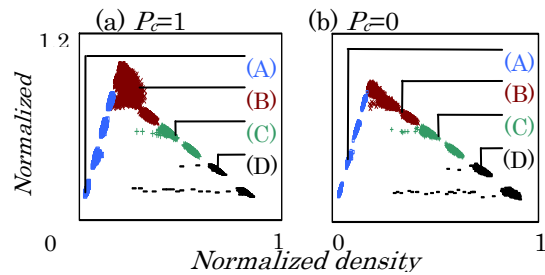


Fig.1 Fundamental diagrams. Four colors (blue, brown, green and black) are representative points of Dilemma-class "A", "B", "C" and "D" phases as shown in Fig.3. (a) $Pc=1$, (b) $Pc=0$.

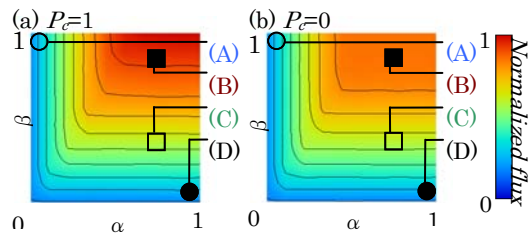


Fig.2 Contour showing the normalized flux to each α and β . Four symbols (open and closed circles, open and closed squares) are representative points of Dilemma-class "A" ($\alpha=0.1, \beta=1.0$), Dilemma-class "D" ($\alpha=1.0, \beta=0.1$), Dilemma-class "C" ($\alpha=0.8, \beta=0.3$), and Dilemma-class "B" ($\alpha=0.8, \beta=0.9$) phases as shown in Fig.3. (a) $Pc=1$, (b) $Pc=0$.

以下では、車線変更により発生するボトルネック効果について解析する。Fig.3に特定の α, β について利得構造関数、各戦略の利得および社会効率と Pc の関係を示した。この図は多人数ゲームの利得構造関数と同様に読めばよく、ある Pc においてD-agentsの利得(平均速度)がC-agentsの利得よりも高ければD戦略が増える向きに、低ければC戦略が増える向きに社会ダイナミクスが進化する

ることを意味する。各戦略の利得構造関数の極小値がダイナミクスの均衡点を表し、これと社会効率最大点との関係から、ジレンマのクラス分類が可能である。Fig.3 に示した4つのパネルは、本解析で確認された異なる4つのジレンマクラスにおける代表点における利得構造である。

Fig.3(A)では、 α が低く、 β が高い領域の利得構造を示す。すべての P_c において D-agents の利得の方が C-agents の利得よりも高いため、社会のダイナミクスは全員が D 戦略 ($P_c=0$) に吸引される。しかしこの流れ場では社会効率は P_c に依存しない。Yamauchiら[1]やNakataら[2]は社会効率が P_c に依存しないゲーム構造を Trivial game の構造としていたが、Trivial game は本来、均衡点と社会効率の最大点が一致するゲームクラスであるため、本稿ではこのような構造を Neutral game と呼び Trivial Game と区別する。従って、この流れ場は D-dominate Neutral game の構造を持つ。

Fig.3(B)では、 α が高く、 β も高い領域の利得構造を示す。すべての P_c において D-agents の利得の方が C-agents の利得よりも高いため、社会のダイナミクスは全員が D 戦略 ($P_c=0$) に吸引される。一方社会効率は全員が C 戦略 ($P_c=1$) で最大となる。従ってこの流れ場はジレンマを持つ Prisoner's Dilemma game の構造を持つ。この流れ場は、元来、メタ安定や高密度相の流動相にあるため、車線変更条件を満たす状態が生じやすい。Fig.1 に観たように全ドライバーがみな協調的であるとの理想的状況下では高フラックスのメタ安定、高密度相を維持できるが、現実には裏切り戦略へのインセンティブにより、高頻な車線変更を招来して、壊されてしまう。その結果、社会効率は押し下げられる。通常の多人数ゲームにおける PD 構造では、C 戦略、D 戦略の平均利得は協調率の低下とともに減少するが、本結果では逆に協調率ゼロで最大、1 で最小となっている。これは、戦略の平均利得を平均速度に採っているからであり、上記したゲーム構造の本質とは無関係である。

Fig.3(C)は、 α が高く、 β は Fig.(B)よりは低く Fig.3(D)よりは高い領域における代表的利得構造である。すべての P_c において D-agents の利得の方が C-agents の利得よりも高いため、社会のダイナミクスは全員が D 戦略 ($P_c=0$) に吸引される。一方社会効率も全員が D 戦略 ($P_c=0$) で最大となる。従ってこの流れ場は D-dominate Trivial game の構造を持つ。この流れ場では、(B)に比べ、 β が小さいことが利いて、系内で部分的に stop-and-go 波が生じ、流動状況は悪化している。このような流れ場では、車線変更をすることが、ローカルに生じた隙間を埋めて、僅かではあるが前方移動に寄与し、D 戦略支配

でありながら Trivial なゲーム構造を持つとの結果に繋がったといえる。

Fig.3(D)では、 α が高く、 β が低い領域の利得構造を示す。すべての P_c において D-agents の利得の方が C-agents の利得よりも高いため、社会のダイナミクスは全員が D 戦略 ($P_c=0$) に吸引される。一方社会効率は P_c に依存しない。従って D-dominate Neutral game の構造を持つ。この流れ場では平均速度がきわめて小さく、渋滞相となっている。前記の(C)と比べると、より深刻な渋滞が起きている流動相では、車線変更をする方がしない車両より僅かに平均速度は速くなるが、皆が車線変更をしたとて社会全体の効率向上には殆ど結びつかないと言える。

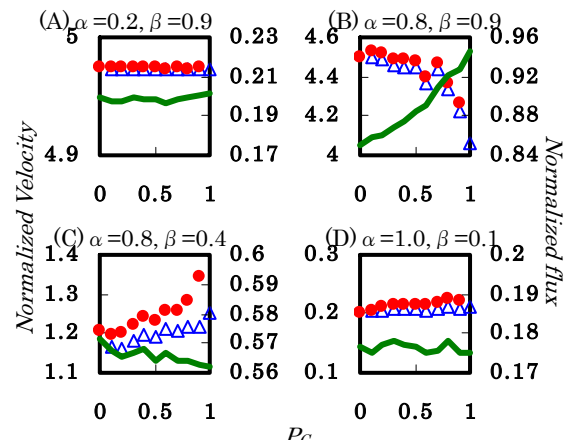


Fig.3. Payoff structure functions of both C(triangles) and D(circles)-agents with social average(line). The payoff implies normalized velocity of-agents. The social average indicates a normalized flux of the traffic. (A) $\alpha=0.1,\beta=1.0$, (B) $\alpha=0.3,\beta=1.0$, (C) $\alpha=0.9,\beta=0.8$, (D) $\alpha=1.0,\beta=0.1$, (e) $\alpha=0.7,\beta=0.4$.

4-3 総括

車線変更の背後に潜む数理ジレンマ構造を解明するために、明示的なボトルネックのない一般的な2車線系の道路を想定し、開放系境界条件下で改良 S-NFS モデルを基にした CA モデルを適用して流れ場解析を行った。その結果、車線変更の影響により、流れ場の様相によって異なるジレンマ構造が潜んでいることが分かった。概してフラックスの大きい領域では PD ゲームの構造が見られ、フラックス小さい領域ではジレンマのない構造が見られた。これは先行研究とも一致する。しかし本研究では、ローカルに渋滞が生じはじめるような流動相下にあつては、車線変更をすることが寧ろ社会効率を上昇させる効果を示し、D-dominate Trivial Game の構造が観られた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計4件)

- (1) 藤木拓也, 谷本潤, 萩島理, 池谷直樹;
交通流における2体ダイナミクスを考慮
した車線変更 CA モデルの開発, 第 18
回交通流のシミュレーションシンポジ
ウム, 25-28, 2012.12.13.
- (2) 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.
- (3) Tanimoto,J., Nakata,M., Hagishima,A.,
Ikegaya,N.; Spatially correlated
heterogeneous aspirations to enhance
network reciprocity, Physica A 391 (3),
680-685, 2011.
- (4) Shigaki,K., Tanimoto,J., Hagishima,A.; A
Revised Stochastic Optimal Velocity Model
Considering the Velocity Gap with a
Preceding Vehicle, International Journal of
Modern Physics C 22 (9), 1005-1014, 2011.

〔学会発表〕(計2件)

上記(1)および(4)-は査読付き論文週を発刊す
るとともに講演発表も行っている.

〔その他〕

ホームページ等

<http://ktlabo.cm.kyushu-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

谷本 潤 (TANIMOTO JUN)

九州大学・総合理工学研究院・教授

研究者番号 : 60227338

(2)研究分担者

萩島 理 (HAGISHIMA AYA)

九州大学・総合理工学研究院・准教授

研究者番号 : 60294980

(3)連携研究者

()

研究者番号 :