交通流動における社会ジレンマの構造に関する解析的研究

萱田，慎司

出版情報：Kyushu University, 2018, 博士（工学），課程博士
バージョン：
権利関係：

学位論文

交通流動における社会ジレンマの構造に関する解析的研究

Analytic studies on social dilemma structures observed in urban traffic flow

2018 年　12 月

九州大学　総合理工学府　環境エネルギー工学専攻

萓田　慎司

目次

第 1 章　序章

1.1 緒言

持続可能な社会を構築することは，長年社会全体の目標の一つとして掲げられてきたが，現代社会が抱える環境問題は深刻化の一途をたどっている．持続可能な社会を構築するために，科学技術は日々進歩を重ねている．身近な製品をとっても，省エネ商品で溢れ，自動車でもハイブリットカーやＥＶの普及率が上がってきている．発電に目を向ければ，太陽光発電や地熱発電・風力発電など，再生可能エネルギーを用いる発電方法も注目されている．このような技術進歩・技術革新が進む一方で，環境問題は相反して深刻化が止まっていないといえる．日本国内においては CO_2 の排出量や電力消費量で評価しても，ここ 20 年で殆ど変わっておらず，逆に世界全体で評価すれば悪化の一途を辿っており，その勢いは中国やその他新興国の急成長により寧ろ加速しているといえるだろう．このことから，科学技術の発展は持続可能な社会の構築に貢献するための手段として用いられているが，それだけでは持続可能な社会の構築は達成できない現状がある．

ここで社会の動きに目を向けてみる．世界中で環境問題に強く関心を持ち，様々な立場・地域・国の人々が議論を重ね，ときには社会の規律として法律や条例を作り，環境問題に対応しようしている．それに応じるかのように，各個人や団体でも，決められたルールに従い，環境を意識した活動・行動をとっている．にもかかわらず，世界全体で見れば，環境問題は深刻化していることから，結局現状の持続不可能な社会に行き着いてしまっている．社会の形成は，その社会に属している人間の行動や生活により生み出される現象であり，言い換えれば，各個人やその集合体同士の様々な思惑が絡み合った産物であるといえる．つまり社会の形成には，個人では持続可能な社会を作りたいという目標を掲げているものの，全体で見れば目指していた目標とは異なる社会が出来上がってしまっているという，単純でない問題が潜在しているといえる．

以上をまとめると，環境問題はそれだけを見ていても解決することは難しく，図 1.1 のような人間－環境－社会の相互作用によって構成される，複雑なシステムとして捉えることが必要となる．

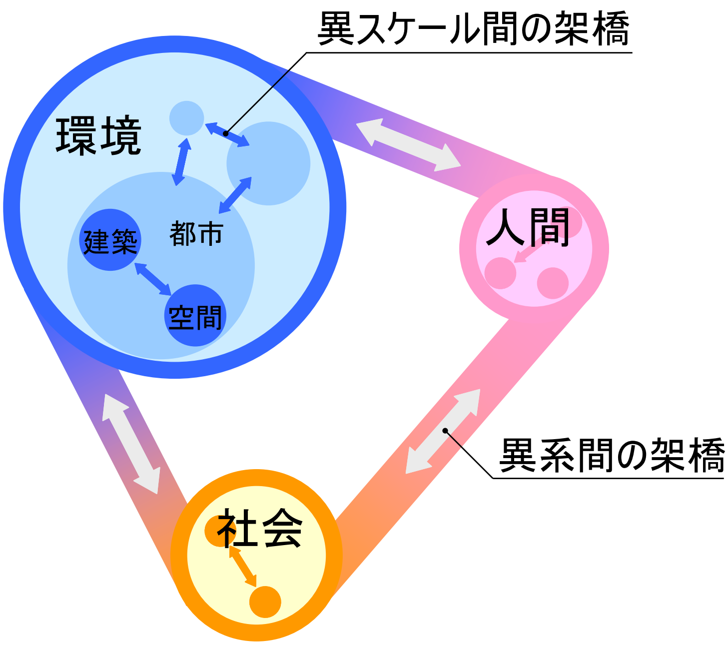


図 1.1　人間－環境－社会システムの概念図[1]

しかし，この統合モデルの構築は，現時点では非常に難しいと言わざるを得ない．なぜなら，それぞれのシステムのモデル化に関して，未だ十分な知見がストックされているとは言い難く，かつ，各々のシステム，またはそれらの複合体が複雑系となっていると考えられるからである．複雑系とは，多数の構成要素が，相互に，かつ全体に影響を与えるような系をいう．構成要素の作用が全体に，または個々にフィードバックされ，さらにそれが個々，全体に作用を与えるため，系の振る舞いを記述することが極めて困難である．

しかし，近年の研究により，この問題にアプローチ可能な理論が構築されつつある．

先ず，マルチエージェントシミュレーションが挙げられる．これは，先ほど述べた要素還元的な手法ではなく，社会的な組織，個人（一般にエージェントと呼ばれる）と仮想的な環境（人工社会）を計算機上に構築し，エージェント間，エージェント－環境間に関してミクロなルールを設定し，人工社会を稼働させることにより，システムの複雑な振る舞いを再現する，構成論的手法である．この手法であれば，複雑な現象をできる限り複雑なままモデル化するため，創発現象もモデルで再現することが可能である．さらなる利点として，大規模な社会実験を行うことなく多くの複雑な現象を取り扱うことができ，近年の計算機の進歩に伴って，大規模な系を取り扱うことができるようになったため，多様な分野で応用されている．

環境問題のひとつに挙げられる，交通渋滞に関しても，このマルチエージェントシミュレーションを用いた，交通流動研究が進められている．マクロな流れ場である交通流動は，その系を成す運転者一人一人の行動選択（たとえば，アクセルを踏むか，ブレーキを踏むか）の積み重ねにより構成されている流れ場であり，その行動選択の基準となるミクロなルールをいかにモデル化するか，日々研究が重ねられている．

一方で，NS 方程式で記述される流れ場の物理と理解されていた交通流の裏側に社会ジレンマ構造が潜んでいると睨んで，その構造を解析する研究も行われている．ここで言う社会ジレンマ構造とは，各個が自らの利益を追求した行動を行うことで，結果として系全体が破綻，あるいは高い利益を上げられない構造を意味する．このような系同士，または人間の相互作用を取り扱う理論として，進化ゲーム理論が有用である．これは，ゲーム理論に，遺伝的アルゴリズムやレプリケータ・ダイナミクスなどの，ダーウィン的淘汰機構に基づく戦略変化のダイナミクスを導入したものである．これにより，人間の意志決定が適応的に変化していく社会を考察することが可能となる．

また，進化ゲーム理論を用いることにより，環境問題の本質的な構造をジレンマゲームとして記述することが可能である．一例として，エネルギー問題について述べる．自ら（自国）は化石燃料を大量消費して快適な生活を過ごしたいが，全員（全世界）が同様に振る舞うと甚大な環境破壊，または化石燃料の枯渇に至り，己を含む全員の生活レベルの低下を余儀なくされる（このジレンマは Tragedy of Commons (TOC) というモデルで表される[1]．また，廃棄物不法投棄問題に例えると，不法投棄を行えば，自らはゴミ処理のコストを負担せずに済むが，全員が不法投棄を行えば，誰もゴミ処理のコストを負担しないため，同様にゴミ処理システムは崩壊してしまう（このようなジレンマモデルは Public Goods Game (PGG) [3]として定式化されている）．これらのモデルを一般的に多人数ジレンマゲームといい，これらによって基本的な社会のジレンマ構造は記述できる．さらに，多人数ジレンマゲームの本質は，よりシンプルな，Prisoner’s Dilemma Game (PDG) に代表される，2x2 ジレンマゲーム[4] (2 人 2 戦略のジレンマゲームで，戦略は一般に協調 Cooperate (C) と裏切り Defect (D) で表される）で表される．

交通流動にも同様の構造が潜んでいるのではないか，との観点から，本論では一般的な車線変更により惹起される，社会ジレンマ構造を解析する．車線変更とは，交通流動における各エージェントの行動選択の一つであり，そもそもは自らの利得を上げる（早く進む）ための行為であるが，車線変更を行うことによって，後続車のブレーキを誘発するなど，結果として系全体の利得を下げる（渋滞を引き起こす）効果を持っている可能性があると考える．

1.2　構成

上記を踏まえて，本論では，車線変更の背後に潜む，数理ジレンマ構造の解明を目的とする．各章の関係は図 1-2 に示すとおりである．

まず，第２章及び第３章にて，本論の骨格となる理論である，交通流理論およびゲーム理論について説明をする．第２章では，交通流研究の基礎ならびに，本研究で用いるミクロモデルとしてのマルチエージェントシミュレーション方法について紹介を行なう．また第３章では，ゲーム理論の基礎となる戦略およびジレンマの定義についての紹介を行なう。続いて第４章では交通流動の演繹アプローチとして，Fukui-Ishibashi (FI)モデル及び Quick-Start (QS) モデルの解析解の導出について述べる．第５章では実際の交通流動の計測を行なった，実測データの収集・検証に関する研究について述べる．そして第６章にて，第２章・第３章で紹介した交通流理論ならびにゲーム理論を用いた研究について述べる．まずマルチエージェントシミュレーションを用いた車線変更解析モデルの説明を行い，この車線変更という行為にゲーム理論の考え方を導入し，車線変更モデルに基づくシミュレーション結果を示し，車線変更の背景に潜在する数理ジレンマ構造についての解析を行ない，第７章にて本論の総括を述べる．

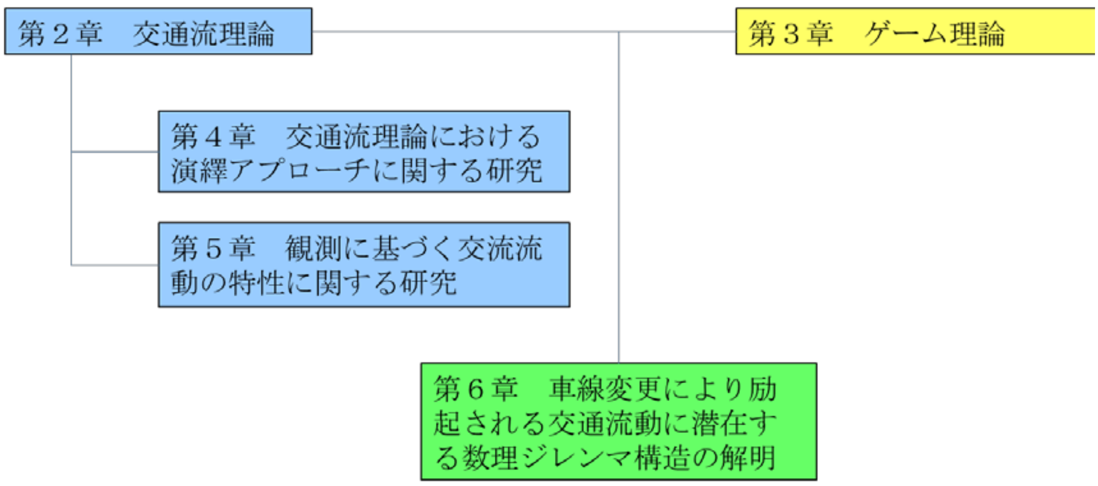


図１−２　本論文の構成

参考文献

1)　谷本潤，谷本教授の（努力すれば）誰にでもわかる環境システムの数理解析基礎 − 収支式の成り立ちから時間発展，数値解析まで，九州大学出版会，2012.

2)　Hardin, G.,　“The Tragedy of the Commons”, Science, 162 1243-1248 (1968).

3) Sugden, R., “The Economics of Rights, Co-operation and Welfare”, Blackwell, (1986).

4) Axelrod, R., “The Evolution of Cooperation, Basic Books”, (1984).

第 2 章　交通流理論

2.1 交通流研究の基礎

交通渋滞を解消する事を目的とした交通流研究は，まずその根底にある基本的な物理機構を解明するために，様々な角度からのアプローチで取り組まれ，特に交通流をモデル化しシミュレーションにより解析する手法によって盛んに行われている．[1-3]

交通流をモデル化する方法は，交通流を巨視的にモデル化する方法（マクロモデル）と，微視的にモデル化する方法（ミクロモデル）に分けられる．車の流れを流体として見て，Burgers 方程式を適用する考え方はマクロモデルである．[4-9] ミクロモデルについては，追従モデルに代表されるような個々の車両粒子を連続系として扱う考え方［10-18］と，セルオートマトン（Cellular Automaton, CA）に代表されるように離散的な自己駆動粒子とみなすアプローチ［23-58］がある．観測データと CA を主とするミクロモデルによる数値的アプローチを併用することで，交通流動の基本的な物理機構が徐々に明らかになりつつある．例えば，高速道路など比較的単純な流れ場の実測データからは，高密度化するに伴い，自由流相から混雑相へ相転位し，その間にはきわめて不安定で不可逆性をもつ高流動状態（メタ安定相）が出現することが観察される．新たな数理モデルを考える際に，これらの相転移を良好に再現出来ることが，適切なモデルであるための一つの指標となっている．

2.2 セルオートマトン（Cellular Automaton, CA）

2.2.1 CA 法とは

現在，様々な物理現象や自然現象などの解析は，現象を微分方程式などの数式を用いて表し，その解を導くことによって解析されてきた．しかし，現象によっては，数式に表すことが困難な，複雑な現象もある．これらを複雑系というが，これはあまりに多くの要因が複合して全体の挙動を決定していて，個々の挙動からは推定が困難なものをいう．例としては地球規模の気象変化や経済構造の変動が挙げられ，交通流問題もそのうちの一つである．

この複雑現象を解明する有効な方法の一つとして， CA 法がある．これは，空間を格子（セル）で敷き詰め，隣接するセルとの相互作用をある規則の下で繰り返すことで，生き物の複雑なパターンや振る舞いを再現させようとする方法である．[19]

2.2.2 交通流 CA モデル

交通流中で各々の車の挙動は周囲の車の挙動に左右されるため，交通流の状態として起こりうる様々な状況を網羅した微分方程式を立てることは困難である．そこで CA を用いて交通流をモデル化すると，単純ではあるがある程度，現実の状態を再現できる．具体的には，道路をセルとし，それぞれのセルは車がいるかいないか（車がいる状態を 1，いない状態を 0）の 2 つの状態をとるとする．これは同時に，1 セルには 2 台以上の車が存在し得ない体積排除効果といった意味も含まれている．あとは車の挙動を周囲のセルの状態との相互作用からルール化することで，交通流 CA モデルが完成する．

現実の高速道路で測定された密度とフラックス（＝密度×速度）の関係図を一般に基本図といい，図 2-1 に示した．低密度ではフラックスは密度と比例して大きくなっている（この領域を自由相という）が，ある密度（臨界密度）を超えると減少方向に転じ，同密度でフラックスにばらつきが見られる相（この領域を混雑相という）に転移していることが分かる．さらに基本図のもう一つの特徴は，渋滞への相転移付近で高流動相が発生していることである．この高流動相をメタ安定相といい，非常に不安定で，擾乱が加わることで流動効率が不可逆に低下することが知られている．交通流をモデル化する際に留意すべき点は，この渋滞現象が再現できているか，そしてメタ安定相が発現しているか，である．

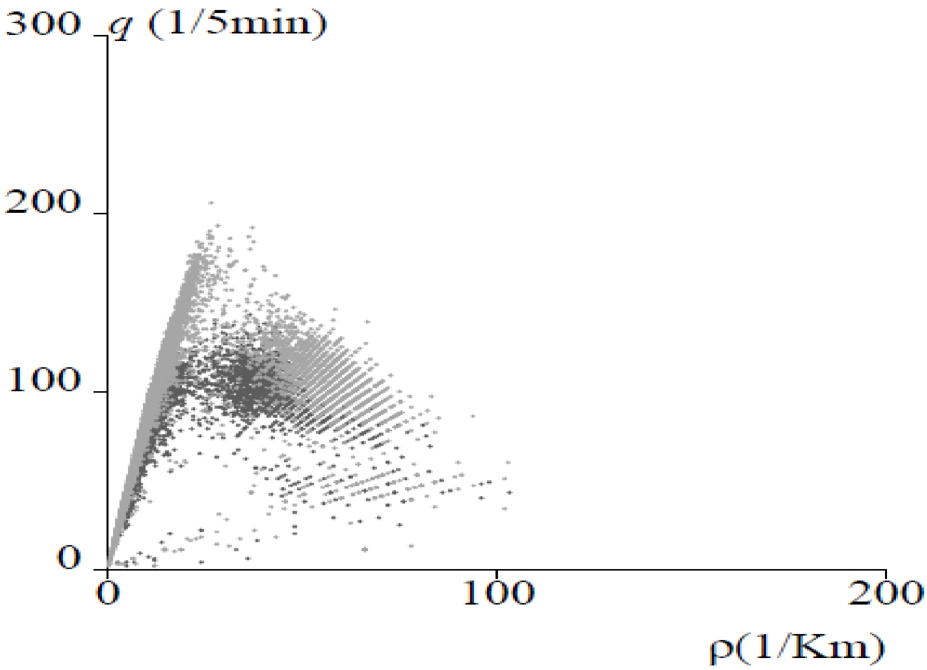


図 2–1：基本図，実測データ[2]

2.2.3 一次元 CA

ここで CA について詳しく理解するために Wolfram [20] が用いた一次元 CA の 2 状態 3 近傍ルールについて説明する．まず格子が 1 列に並んだ一次元空間を考える．独立変数として空間格子 j と整数時間 t，従属変数として U を与える．そして，あるセル j における時間 t でのセルの状態を （ は 0 か 1 のみをとる）と表現する．ここでセルの状態の時間変化を

$$U_j^{t+1} = f(U_{j-1}^t, U_j^t, U_{j+1}^t) \tag{2.1}$$

と表す．ここで $f(U_{j-1,}^t U_j^t, U_{j+1}^t)$ も 0 か 1 のみをとるとする．するとこの条件下ではセルの状態は時間に関わらず 0 か 1 しかとり得ないことになる．更に $(U_{j-1,}^t U_j^t, U_{j+1}^t)$ の組み合わせが の 8 通りしかなく，その各々が 0 か 1 しかとらないことから，この関数 $f(U_{j-1,}^t U_j^t, U_{j+1}^t)$ の場合の数は $2^8 = 256$ 通りであることもわかる．ここで f_0 から f_7 までを $f_0 = (0,0,0), f_1 = (0,0,1), \mathrm{L}\ , f_7 = (1,1,1)$ で与え，$(f_0, f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6, f_7)$ を 2 進数とみなしたときの数値をルール番号とする．例えば，

$(f_0, f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6, f_7) = (0,0,0,1,1,1,0,1)$ は $2^3 + 2^4 + 2^5 + 2^7 = 184$ でルール 184 となる．このルール 184 について詳しくみると，前が空いていれば進むという単純な車の動きを表現している．これは交通流 CA の基礎となるルールで Elementary CA (ECA) と呼ぶ．ECA の時間方向に発展した図を図 2-2 に示す．

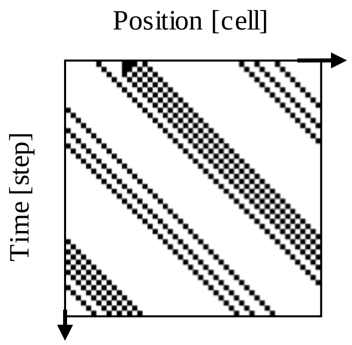


図 2–2：横軸に位置，縦軸に時間をとった ECA による時間発展の様子．

2.3 Burgers 方程式の超離散化

本節では，マクロモデルである Burgers 方程式と，ミクロモデルである Burgers CA の関連性について紹介する．[2],[21-22]

2.3.1 拡散方程式と Burgers 方程式

今 f(x, t)に関する拡散方程式

$$f_t = f_{xx} \tag{2.2}$$

を考える．ここで添え字の x, t はそれぞれの変数に関する偏微分を表しており，添え字の個数が，微分の階級を表す．さらに $f(x, t)$ から $u(x, t)$ への変数変換

$$u = (\log f)_x = \frac{f_x}{f} \tag{2.3}$$

を考える．この変数変換をコール･ホップ変換という．式（2.2）と式（2.3）から u が満たされるべき偏微分方程式が導かれる．まず式（2.3）の両辺を t で微分すると

$$u_t = \frac{f_{tx} f - f_x f_t}{f^2} \tag{2.4}$$

を得る．この式（2.4）の右辺に式（2.2）を代入すると

$$u_t = \frac{f_{xxx} f - f_x f_{xx}}{f^2} \tag{2.5}$$

となる．次に式（2.3）を x で微分すると

$$u_x = \frac{f_{xx}}{f} - \frac{{f_x}^2}{f^2}$$

$$u_{xx} = \frac{f_{xxx}}{f} - 3\frac{f_{xx} f_x}{f^2} + 2\frac{{f_x}^3}{f^3} \tag{2.6}$$

式（2.5）式（2.6）より

$$u_t = 2uu_x + u_{xx} \tag{2.7}$$

が導かれる．この式が一次元流体の衝撃波を示す Burgers 方程式である．

以上をまとめると次のようになる．

$$f_t = f_{xx} \qquad \text{(拡散方程式)} \tag{2.8}$$

$$\downarrow\ u = (\log f)_x \qquad \text{(コール･ホップ変換)} \tag{2.9}$$

$$u_t = 2uu_x + u_{xx} \qquad \text{(Burgers 方程式)} \tag{2.10}$$

2.3.2 差分 Burgers 方程式

Burgers 方程式はコール･ホップ変換により拡散方程式と結びついた．ここではこの図式をそのまま差分化することを考える．まず，dx，dt をそれぞれ空間格子，時間格子の間隔とし，拡散方程式の差分化を

$$\frac{1}{\Delta t}(f_j^{t+1} - f_j^t) = \frac{1}{(\Delta x)^2}(f_{j+1}^t - 2 f_j^t + f_{j-1}^t) \tag{2.11}$$

とする．簡単のため $\frac{dt}{(dx)^2} = \frac{1}{2}$ として式（2.8）を整理すると

$$f_j^{t+1} = \frac{1}{2}(f_{j+1}^t + f_{j-1}^t) \tag{2.12}$$

となる．次にコール･ホップ変換の差分化を

$$u_j^t = \frac{1}{\Delta x}(\log f_{j+1}^t - \log f_{j-1}^t) \tag{2.13}$$

とする．式の表示を簡単にするために u_j^t から v_j^t への変数変換 $v_j^t = \exp(\Delta x u_j^t)$ を用いて式（2.10）を

$$v_j^t = \frac{f_{j+1}^t}{f_j^t} \tag{2.14}$$

と書き換える．ここで式（2.12）と式（2.14）を用いて v_j^t の時間発展方程式を導くと

$$\begin{aligned} v_j^{t+1} &= \frac{f_{j+1}^{t+1}}{f_j^{t+1}} \\ &= \frac{f_{j+2}^t + f_j^t}{f_{j+1}^t + f_{j-1}^t} \\ &= \frac{f_{j+1}^t}{f_j^t} \frac{f_{j+2}^t / f_{j+1}^t + f_j^t / f_{j+1}^t}{f_{j+1}^t / f_j^t + f_{j-1}^t / f_j^t} \\ &= v_j^t \frac{v_{j+1}^t + 1/v_j^t}{v_j^t + 1/v_{j-1}^t} \end{aligned} \tag{2.15}$$

が得られる．これが差分 Burgers 方程式である．

以上をまとめると，差分の場合でも以下のようになる．

$$f_j^{t+1} = \frac{1}{2}(f_{j+1}^t + f_{j-1}^t) \qquad \text{（差分拡散方程式）} \tag{2.16}$$

$$\downarrow\ v_j^t = \frac{f_{j+1}^t}{f_j^t}$$ （コール・ホップ変換） (2.17)

$$v_j^{t+1} = v_j^t\,\frac{v_{j+1}^t + 1/v_j^t}{v_j^t + 1/v_{j-1}^t}$$ （差分 Burgers 方程式） (2.18)

2.3.3 超離散 Burgers 方程式

前節で Burgers 方程式の差分化の図式が得られたので，最後に超離散化の Burgers 方程式を導く．

まず超離散化する際に用いる次の公式がある．

$$\lim_{\varepsilon\to+0}\varepsilon\log(e^{A_1/\varepsilon}+e^{A_2/\varepsilon}+\cdots+e^{A_n/\varepsilon})=\max(A_1+A_2+\cdots+A_n) \tag{2.19}$$

これは次のように証明される．まず $\max(A_1+A_2+\cdots+A_n)=A_i$ とおく．

そして式（2.19）の左辺の log の中身を $\exp(A_i/\varepsilon)$ でくくると

$$\lim_{\varepsilon\to+0}\varepsilon\log\{(e^{A_i/\varepsilon})(e^{(A_1-A_i)/\varepsilon}+e^{(A_2-A_i)/\varepsilon}+\cdots+1+\cdots+e^{(A_n-A_i)/\varepsilon})\}$$

$$=\lim_{\varepsilon\to+0}\varepsilon\{\log(e^{A_i/\varepsilon})+\log(e^{A_1-A_i/\varepsilon}+e^{A_2-A_i/\varepsilon}+\cdots+1+\cdots+e^{A_n-A_i/\varepsilon})\}$$

$$=\lim_{\varepsilon\to+0}\{A_i+\varepsilon\log(e^{A_1-A_i/\varepsilon}+e^{A_2-A_i/\varepsilon}+\cdots+1+\cdots+e^{A_n-A_i/\varepsilon})\} \tag{2.20}$$

となる．ここで式（2.20）の log を評価すると，

$A_k - A_i < 0(k=0,1,\cdots,i-1,i+1,\cdots,n)$ であるので

$\varepsilon\to+0$ で log は 0 に収束し，

$$Eq.(2.20)=A_i \tag{2.21}$$

となる．

この極限公式（2.19）を用いて超離散化を行う．

まず ε をパラメータとして式（2.16），及び式（2.18）の f_j^t, v_j^t から F_j^t, U_j^t への変数変換

$$f_j^t = 2^{-t}e^{F_j^t/\varepsilon},\ v_j^t = e^{(U_j^t-L/2)/\varepsilon} \tag{2.22}$$

を用いる．V から U への変数変換で用いた L は定数である．

この変数変換により式（2.16）～（2.18）は

$$F_j^{t+1}=\varepsilon\log(e^{F_{j+1}^t/\varepsilon}+e^{F_{j-1}^t/\varepsilon}) \tag{2.23}$$

$$\downarrow U_j^t = F_{j+1}^t - F_j^t + \frac{L}{2} \tag{2.24}$$

$$U_j^{t+1} = U_j^t + \varepsilon \log\{e^{(U_{j-1}^t - L/2)/\varepsilon} + e^{-(U_j^t - L/2)/\varepsilon}\} - \varepsilon \log\{e^{(U_j^t - L/2)/\varepsilon} + e^{-(U_{j-1}^t - L/2)/\varepsilon}\} \tag{2.25}$$

となる．ここで極限公式（2.19）を使うと

$$F_j^{t+1} = \max(F_{j+1}^t, F_{j-1}^t) \quad \text{（超離散拡散方程式）} \tag{2.26}$$

$$\downarrow U_j^t = F_{j+1}^t - F_j^t + \frac{L}{2} \quad \text{（超離散コール･ホップ変換）} \tag{2.27}$$

$$U_j^{t+1} = U_j^t + \min(U_{j-1}^t, L - U_j^t) - \min(U_j^t, L - U_{j+1}^t) \quad \text{（超離散 Burgers 方程式）} \tag{2.28}$$

が得られる．

2.3.4 Burgers 方程式と CA の関連性

超離散 Burgers 方程式（2.28）で，任意の j に対して $0 \le U_j^t \le L$ であると仮定する．式（2.28）を変形すると

$$U_j^t = \min(U_{j-1}^t + U_j^t, L) - \min(U_j^t, L - U_{j+1}^t) \tag{2.29}$$

となる．右辺第一項の min は L 以下であり，上の仮定より第二項の min は 0 以上であるので，U_j^{t+1} は L 以下の値になる．さらに式（32）の右辺を別の形に変形して

$$U_j^{t+1} = \min(U_{j-1}^t, L - U_j^t) - \min(0, L - U_j^t - U_{j+1}^t) \tag{2.30}$$

とすると，右辺第一項の min は上の仮定より 0 以上であり，第二項の min は 0 以下であるので，U_j^{t+1} が 0 以上の値になる．結局，$0 \le U_j^t \le L$ ならば $0 \le U_j^{t+1} \le L$ が証明された．さらに，任意の j で U_j^t が整数ならば U_j^{t+1} も整数となる．つまり，もし初期時刻 $t = 0$ で U_j^0 の値をすべて 0 から L までの整数のみで与えたなら，それ以降の任意の時刻でも U_j^t は 0 から L までの整数値しかとらない．以上から，超離散 Burgers 方程式は初期値に制限を設けることで CA になる（Burgers CA）．さらに，L=1 の場合について考えると，前節で説明した ECA と一致する．

2.4 様々な交通流 CA モデル

2.4.1 Asymmetric simple exclusion process(ASEP)

ASEP は一次元非対称単純排他過程と呼ばれる非平衡統計力学模型である．[23] ルールは一次元格子の空間において，前のセルが空いていれば一定確率 p（hop 確率）で前に 1 セル進むという単純なもので，ECA のルールを確率過程にしたものになる（図 2-3）．

ASEP の流量密度関係式は

$$Q = \frac{1-\sqrt{1-4pk(1-k)}}{2} \tag{2.31}$$

という厳密解を持つことがわかっている．[24] ここで Q はフラックス，k は密度である．なお ASEP ではメタ安定相が出現しない．次に，後述する開放系境界条件（流入確率 α で左端から車両が生成され流出確率 β で右端から車両が消滅する）において，α，β を変化させてフラックスを測定した場合の関係図を α - β 相図と呼び，ASEP においては図 2-4 のようになる．この図には流出確率 β が流入確率 α よりも大きい時に見られる自由相，逆の場合の渋滞相，両方が共に 1/2 よりも大きい時に見られる高密度相，そして両方とも 1/2 以下かつ $\alpha=\beta$ の時に見られる衝撃波の 4 つの相が観察できる．

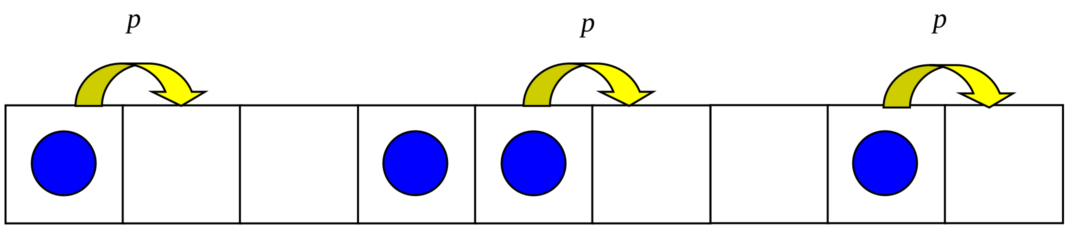


図 2–3；ASEP での車両の動き

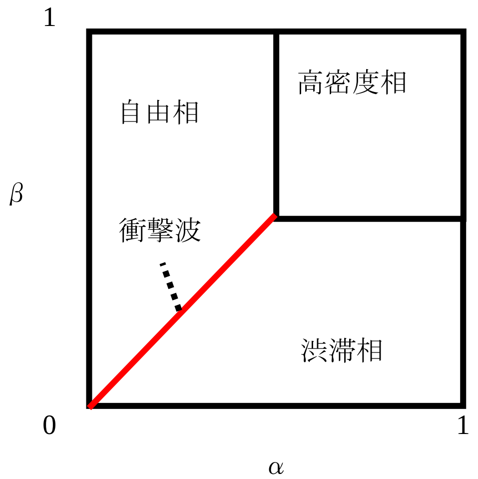


図 2–4：ASEP の開放系境界条件で得られる
α−β相図

2.4.2 Zero Range Process(ZRP)

ASEP の hop 確率が一定であったのに対し，ZRP は hop 確率が車両の前方車間距離に応じて決まるモデルである．[25] 一次元格子の空間において，車間距離が大きいと hop 確率は高くなり，車間距離が小さいと hop 確率も低くなる（図 2-5）．ZRP の流量密度関係式は

$$Q = k\left(1 - \frac{1-\sqrt{1-4(1-P)k(1-k)}}{2(1-P)(1-k)}\right) \tag{2.32}$$

という厳密解を持つことがわかっている．[26] ここで Q はフラックス，k は密度，P は車間距離が 1 のときの hop 確率である．このが大きいほど ASEP の基本図に近づく．なお ZRP でもメタ安定相が出現しない．

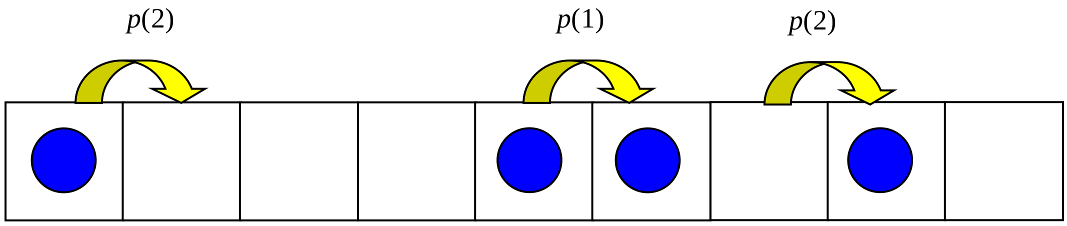


図 2–5；ZRP での車両の動き

2.4.3 Slow Start(SlS)モデル

SlS モデルは ECA モデルに車の慣性の効果を入れたものである．[27]

つまり，車が止まるときはある程度早く止まることができるが，一方で一度止まった車は次に動き出しにくいことをルールに組み込んだものである．ルール上は，一度停止した車は前が動ける状況ができても，1 時間ステップ待ってから動き始めるというものになる．

SlS モデルはメタ安定分岐が現れる最も簡単なモデルである．現在，メタ安定分岐をうまく表現するのはこのスロースタート効果が最も有効であると考えられている．しかし，初期状態をうまく設定しなければ，基本図ではっきりとしたメタ安定分岐は見えてこない．これは現実には高密度自由走行が，不安定でほとんど出現しないことに対応していると考えられる．

$$\begin{aligned} U_j^{t+1} = U_j^t &+ \min\{U_{j-1}^t - (U_{j-1}^{t-1} - \min(U_{j-1}^{t-1}, L - U_j^{t-1})), L - U_j^t\} \\ &- \min\{U_j^t - (U_j^{t-1} - \min(U_j^{t-1}, L - U_{j+1}^{t-1})), L - U_{j+1}^t\} \end{aligned} \tag{2.33}$$

2.4.4 Quick Start(QS)モデル

QS モデルは BurgersCA に見通しの概念を入れたモデルであり，2 セル先まで見て移動する．[28] つまり，前のセル j にいる車のうち何台かはそのさらに前のセル $j+1$ に移動するから，次のセル j には BuregersCA よりも先に移動できるというものである．

このモデルではメタ安定分岐は見られない．また，見通しがあるので基本図上で BurgersCA に比べて高流量部分が密度の高い領域に寄る．

$$U_j^{t+1} = U_j^t + \min(U_{j-1}^t, L - U_j^t + \min(U_j^t, L - U_{j+1}^t)) - \min(U_j^t, L - U_{j+1}^t + \min(U_{j+1}^t.L - U_{j+2}^t))$$
$$= U_j^t + \min(U_{j-1}^t, 2L - U_j^t - U_{j+1}^t) - \min(U_j^t, 2L - U_{j+1}^t - U_{j+2}^t) \qquad (2.34)$$

2.4.5 Fukui Ishibashi(FI)モデル

FI モデルは ECA の最高速度を $v>1$ に拡張したモデルであり，前が v セル以上空いていれば v セル進むことが出来る．[29] v セルよりも空きセルが小さければ，前方の車両を追い越すことが出来ないので，空きセルの分だけ進む．最高速度が 2 である場合，以下となる．

$$U_j^{t+1} = U_j^t + \min(b_{j-1}^t + a_{j-2}^t, 1 - U_j^t) - \min(b_j^t + a_{j-1}^t, 1 - U_{j+1}^t) \qquad (2.35)$$

但し；

$$a_j^t = \min(U_j^t, 1 - U_{j+1}^t, 1 - U_{j+2}^t) \qquad \text{(速度 2 で走る車両数)} \qquad (2.36)$$

$$b_j^t = \min(U_j^t, 1 - U_{j+1}^t) \qquad \text{(速度 1 で走る車両数)} \qquad (2.37)$$

2.4.6 Nagel Schreckenberg(NS)モデル

他の多くのモデルが確率の入っていない決定論的なモデルであるのに対し，1992 年に Nagel と Schreckenberg がセルオートマンに確率を導入することで，ランダム性を組み込んだ確率セルオートマトンモデルが提案された．[30]

このルールの最も重要な点は，確率 p で車の速度を減速させる（ランダムブレーキ）概念を導入したという点である．決定論的なモデルは立式が可能であるが，乱数を組み込んだ確率論的なモデルは立式が難しく，アップデートのルールで表現する．以下にアップデートのルールを示す．

Step1　加速

車の速度が $V_{\max}$ よりも小さく（$v < V_{\max}$），かつ前方の車との距離が $v+1$ よりも大きければ，速度を 1 だけ上げる（$v \to v+1$）．

Step2　衝突回避

車がセル i に存在し，その前の車がセル $i+j$ に存在する時， $j \le v$ ならばセル i に存在する車は衝突を避けるために減速し，速度を j -1 にする（$v \to j-1$）.

Step3　ランダムブレーキ

車が停止していない時（$v \neq 0$），確率 p で速度を 1 下げる（$v \to v-1$）.

Step4　移動

各車をパラレルアップデート（後述）で進める.

Step1～Step4 で 1 時間ステップ進むものとする.

2.4.7 Stochastic Nishinari Fukui Schadschneider(S-NFS)モデル

S-NFS モデルは，慣性により一旦停止した車両の再起動が遅れる特性（スロースタート効果），直近先行車両の前にいる複数の先行車両の状況を勘案して加減速する（見通し効果），ランダムブレーキ効果を総合的に考慮可能な，現実の流れ場を良好に再現し得る CA モデルである. [31] S-NFS モデルにおける車両エージェントの 1 時間ステップ間の更新ルールの漸化式表現は以下となる.

$$v_i^{(1)} = \min\{V_{\max}, v_i^{(0)}+1\} \tag{2.38}$$

$$v_i^{(2)} = \min\{v_i^{(1)}, x_{i+s_i}^{t-1} - x_i^{t-1} - s_i\} \tag{2.39}$$

$$v_i^{(3)} = \min\{v_i^{(2)}, x_{i+s_i}^{t} - x_i^{t} - s_i\} \tag{2.40}$$

$$v_i^{(4)} = \max\{0, v_i^{(3)}-1\} \tag{2.41}$$

$$v_i^{(5)} = \min\{v_i^{(4)}, x_{i+1}^{t} - x_i^{t} - 1 + v_{i+1}^{(4)}\} \tag{2.42}$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{(5)} \tag{2.43}$$

ここで， x_i^t は時刻ステップ t における車番号 i の位置， $v_i^{(0)}$ は現在時間ステップにおける更新前の速度を意味し， $x_i^t - x_i^{t-1}$ で与えられる. S_i は見通し台数， V_{max} は最高速度を意味する. 各式は，（2.38）加速，（2.39）スロースタート効果，（2.40）見通し効果，（2.41）ランダムブレーキ，（2.42）衝突回避，（2.43）車両移動を意味する. また，互いに独立な確率 p, q, r を設定する. それぞれ，確率 1-p で式（2.41），確率 q で式（2.39）の更新ルールを適用し，確率 r で $\boldsymbol{s_i}$ =S, 確率 1-r で $\boldsymbol{s_i}$ =1 とする. 時間進行にはパラレルアップデートを適用するが，ある車両エージェントを取り上げた場合，上記の漸化式を逐次適用して次エージェントの処理を行うのではなく，夫々の漸化式に対してパ

ラレルアップデートを適用し全てのエージェントの処理を終えてから，次の漸化式処理を行い，式（2.43）による更新が終了することで当該時間ステップの処理が完了する．

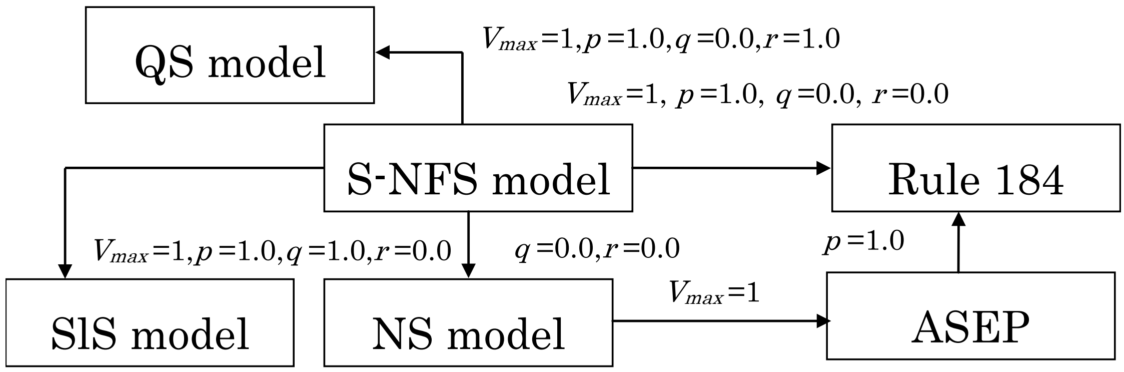


図 2–6；セルオートマトンモデルの間の関係

2.4.8 その他の CA モデル

上記の他にも，現実に考えうる要素を考慮した様々な CA モデルが提案されている．例えば，ゆるやかな減速を再現したモデル[59]，1step 中の最大加減速度を考慮したモデル[60]，運転者の反応時間遅れを考慮したモデル[61]，後続車のあおりの効果を考慮したモデル[62]，そして多くのモデルが速度を決定するモデルに対し加減速度を決定するモデル[63]などがある．また，一車線系に限らず多車線系での解析も行われている．

多車線系のシステムを扱う場合，車線変更を表現する CA モデルが必要となる．それは扱う速度更新の CA モデルに応じていくつか開発されている．その多くは 2 つの条件，車線変更を行う動機に関わるインセンティブ条件と安全に車線変更を行うための安全条件，から成り立つ．多くの既往研究では，前後直近車両との車間距離によるモデルが開発されている．［64-67］一方で前後直近車両との車間距離のみでなく速度差も考慮したモデルも開発されている．［68］また車線変更の方向によって条件を変える非対称なモデルも開発されている．［69］

2.5 アップデート方法

アップデートの方法は，大きくパラレルアップデート（シンクロ更新）とランダムアップデート（アシンクロ更新）の二つに分類される．パラレルアップデートとは，系の粒子

全体を同時に更新させる方法で，ランダムアップデートとは系の粒子個々について，ランダムに一つずつ更新させる方法である．

2.6 境界条件

境界条件とは系の境界部での条件のことで，周期系境界条件と開放系境界条件とがある．周期系境界条件とは，系の両端が接続している，つまり図 2-7(A)のようなサーキット状の系を扱う条件である．一方開放系境界条件とは，図 2-7(B)のように系に対して流入出確率を用いる条件である．

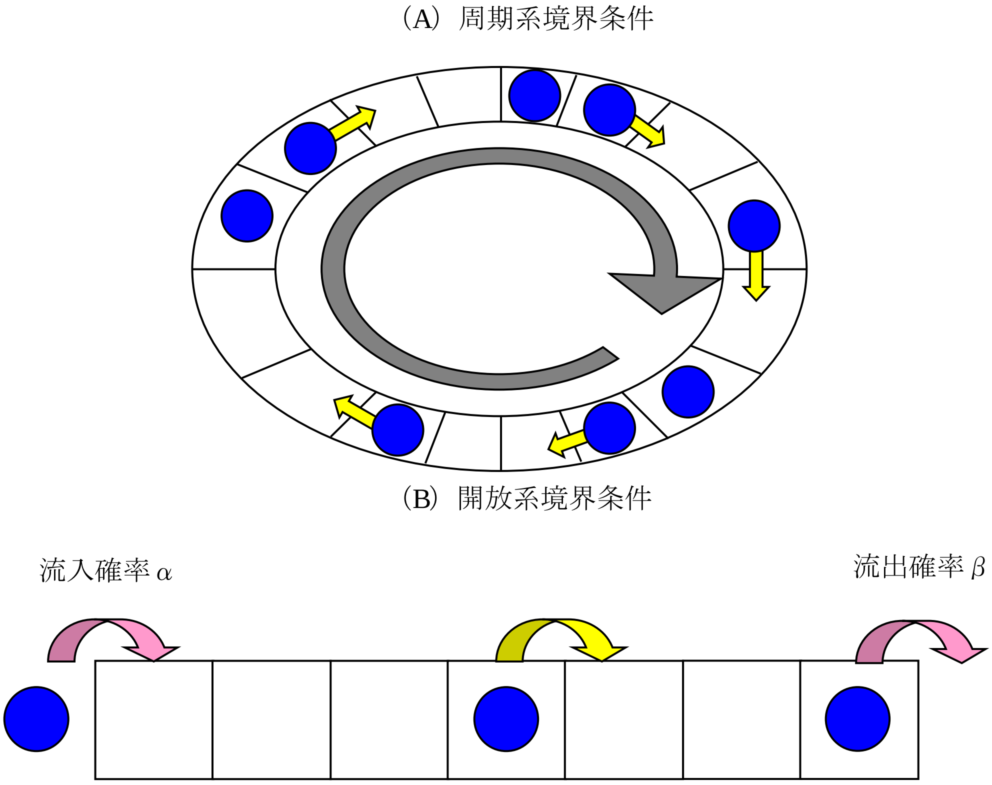


図 2–7：セルオートマトンモデルでの周期系境界条件（A）と
開放系境界条件（B）の定義

2.7 3 相交通流理論

交通流は free flow（自由流）である F 相，synchronized flow（シンクロ流）である S 相，そして wide moving jam である J 相の 3 相により構成されているとみなすものを 3 相交通流理論という．[68]

F 相から密度がある程度大きくなる（メタ安定相）と混雑相の流れに転移する．つまり，渋滞が発生する．これは，運転者の過剰反応のために起こる．前方の車両が不意に減速すると，後続車両の運転者は衝突を避けるため前方車両の減速よりも余分に減速してしまう．これを overdeceleration という．この減速がさらに後続で連鎖的に起こるため，結果的に渋滞が発生する．Kerner の報告以前では，この F 相高密度での不安定さが，渋滞が発生する時の最初の相転移の原因であり，F 相から wide moving jam への相転移（F→J 相転移）を引き起こしているとされていた．しかし，実際の交通流では F→J 相転移は観測されていない．実際の交通流では，渋滞の発生は最初に free flow から synchronized flow への相転移（F→S 相転移）が起こり，wide moving jam は synchronized flow からしか生起しない（S→J 相転移）．つまり，wide moving jam は F→S→J の相転移を経て生起する．初期の交通流理論やモデルでは F→S→J 相転移の説明ができなかったが， Kerner の 3 相交通流理論によって説明できるようになった．

3 相のうちの 2 相，synchronized flow と wide moving jam は混雑相であり，夫々異なる特徴を持っている．wide moving jam には，高密かつ車両速度は非常に小さい集合，所謂渋滞クラスターが存在する．そしてこの渋滞クラスターは上流側へ低速度で伝播していき，ボトルネック部すらも突き抜けて伝播する．この渋滞クラスターによってフラックスは著しく減少する．一方 synchronized flow では車両速度はゼロにならず，所謂ノロノロ運転状態となる．特筆すべきは synchronized flow でのフラックスは free flow 時のそれを維持することが出来る点である．また，synchronized flow の下流の先頭部分はボトルネック部で解消されることが多い．

図 2-8 に各相における時空図を示す．時空図とは，横軸に位置，縦軸に時間をとった，車両の軌跡を表す図である．上記した各相の様子が見て取れる．

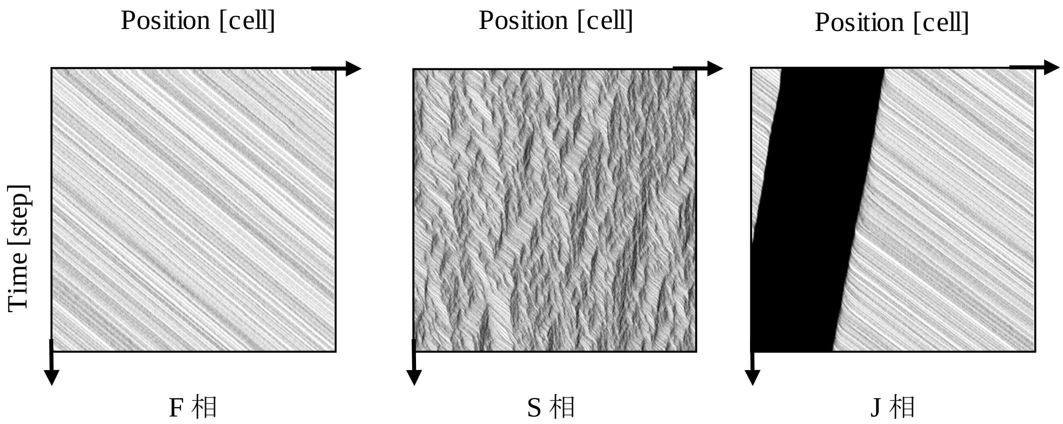


図 2–8：3 相交通流理論での各相における時空図

参考文献

1) 応用数理 vol.12 No.2, June, 2002.

2) R.Harberman; Mathematical Models: Mechanical Vibrations, Population Dynamics, and Traffic Flow , Society for Industrial Mathematics, 1987.

3) 杉山雄規; 交通流の物理, ながれ 22(95), 2003

4) B. S. Kerner, P. Konhäuser; Cluster effect in initially homogeneous traffic flow, Physical Review E 48, R2335-R2338, 1993.

5) Rui Jiang, Qing-Song Wu and Zuo-Jin Zhu; A new continuum model for traffic flow and numerical tests, Transportation Reseach Part B: Methodological Volume 36, Issue 5, June 2002

6) Tang,T.-Q., Huang,H.-J., Shang,H.-Y.; Effects of the number of on-ramps on the ring traffic flow, Chinese Physics B 19(59),#050517, 2010.

7) McCrea,J., Moutari,S.; A hybrid macroscopic based model for traffic flow in road networks, European Journal of Operational Research 207, 676-684, 2010

8) Gupta,A.K., Sharma,S.; Nonlinear analysis of traffic jams in an anisotropic continum model, Chinese Physics B 19(11),#110503, 2010

9) Ngoduy,D., Hoogendoorn,S.P., Liu,R.; Continuum modeling of cooperative traffic flow dynamics, Physica A 388, 2705-2716, 2009.

10) Masukura,S., Nagatani,T., Tanaka,K.; Jamming transitions induced by a slow vehicle in traffic flow on a multi-lane highway, Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, P04002, 2009.

11) Tanaka,K., Nagatani,T., Masukawa,S.; Fundamental diagram in traffic flow of mixed vehicles on multi-lane highway, Physica A 387, 5583-5596, 2008.

12) Komada,K., Masukura,S., Nagatani,T.; Effect of gravitational force upon traffic flow with gradients, Physica A 388, 2880-2894, 2009.

13) Tian,J.-F.-, Jia,B., Li,X.-G., Gao,Z.-Y.; A new car-following model considering velocity anticipation, Chinese Physics B 19 (1), #010511, 2010.

14) He,S., Guan,W., Song,L.; Explaining traffic patterns at on-ramp vic

inity by a driver perception model in the framework of three-phase traffic theory, Physica A 389, 825-836, 2010.

15) Lan,L.,W., Chiou,Y.-C., Lin,Z.-S., Hsu,C.-C.; Cellular automaton simulations for mixed traffic with erratic motorcycle's behaviours, Physica A 389, 2077-2089, 2010.

16) Tang,T.Q., Huang,H.J.; A new car-following model with the consideration of the driver's forecast effect, Physical Letter A 374, 3951-3956, 2010.

17) Naito,Y., Nagatani,T.; Safety-collision induced by lane changing in traffic flow, Physical Letter A 375, 1319-1322, 2011.

18) Lv,W., Song,W.-G., Fang,Z.-M.; Three-lane changing behavior simulation using a modified optimal velocity model, Physica A 390, 2303-2314, 2011.

19) 森下信；セルオートマトン，養賢堂，2003.

20) S.Wolfram; Theory and Applications of Cellular Automata, World Scientific, Singapore, 1986.

21) 友枝明保；超離散化法，及びセルオートマトンモデルによる交通流の研究，大阪大学大学院修士論文，2006.

22) 広田良吾，高橋大輔；差分と超離散，共立出版，2003

23) B. Derrida, M. R. Evans, V. Hakim, and V. Pasquier; Exact solution of a 1D asymmetric exclusion model using a matrix formulation, Journal of Physics A: Mathematical and General 26, 1493, 1993

24) A Schadschneider and M Schreckenberg; Cellular automation models and traffic flow, Journal of Physics A: Mathematical and General 26, L679, 1993.

25) O. J. O'Loan, M. R. Evans, and M. E. Cates; Jamming transition in a homogeneous one-dimensional system: The bus route model, Physical Review E 58, 1404-1418, 1998.

26) K. Klauck, A. Shadshneider; On the ubiquity of matrix-product states in one-dimensional stochastic processes with boundary interactions, Physica A 271, 102, 1999

27) Nishinari K., Takahashi D.; Multi-value cellular automaton models and metastable states in a congested phase, Journal of Physics A: Mathematical and General 33, 7709, 2000

28) R. Barlovic, L. Santen, A. Schadschneider and M. Schreckenberg; Metastable states in cellular automata for traffic flow, The European Physical Journal B 5, 793, 1988

29) Fukui M., Ishibashi Y.; Traffic flow in 1D Cellular Automaton Model including Cars Moving with High Speed, Journal of the Physical Society of Japan 65, No.6, 1868, 1996.

30) Nagel K., Schreckenberg M.; Journal de Physique I 2, 2221-2229, 1992.

31) Sakai.S, Nishinari.K, Iida.S; A new stochastic cellular automaton model on traffic flow and jamming phase transition, Transactions of the Japan Society for Industrial and Applied Mathematics 16(4), 371-384, 2006.

32) Tomoeda A, Nishinari K, Chowdhury D, Schadschneider A.; An information-based traffic control in a public conveyance system: Reduced clustering and enhanced efficiency, Physica A 384 (2): 600-612, 2007.

33) Zhu,H.-B., Ge,H.-X., Dai,S.-Q.; A new cellular automaton model for

trafic flow with different probability for drivers, International Journal of Modern Physics C 18 (5), 773-782, 2007.

34) Zhao,X.M., Gao,Z.Y., Jia,B.; The capacity drop caused by the combined effect of the intersection and the bus stop in a CA model, Physica A 385, 645-658, 2007.

35) Li,F., Gao,Z.-Y., Jia,B.; Traffic behavior in the on-ramp system with signal controlling, Physica A 385, 333-342,2007.

36) Hu,S.X., Gao,K., Wang,B.H., Lu,Y.F. Fu,C.J.; Abnormal hysteresis effect and phase transitions in a velocity-difference dependent randomization CA model, Physica A 386, 397-406, 2008.

37) Knospe,W. Santen,L. Schadschneider,A. and Schreckenberg,M.; Toward a realistic microscopic description of highway traffic, Journal of Physics A 33, L477-L485, 2000.

38) Gundaliya,P.J., Mathew,T.,V., Dhingra,S.L.; Heterogeneous traffic flow modeling for an arterial using grid based approach, Journal of Advanced Transportation 42 (4), 467-491, 2007.

39) Nuemann,T.; TASEP related models with traffic light boundary, The European Physical Journal B 67,133-138, 2009.

40) Schadschneider,A.; Modelling of transport and traffic problems, Lecture Note Computer Science 5 (ACRI 2008), 22-31,2008.

41) Li,X.-G.-, Gao,Z.-Z.-, Jia,B., Jiang,R.; Deceleration in advance in the Nagel-Schreckenberg traffic flow model, Physica A 388, 2051-2060, 2009.

42) Sheng,P., Zhao,S.-L.-, Wang,J.-F.-, Tang,P., Gao,L.; The effect of stochastic acceleration and delay probability on the velocity and the gap between vehicles in traffic flow, Chinese Physics B 18 (8), 3347-3354, 2009.

43) Hua,W., Zhou,F.-Y.-, Chen,J.-H.; The effects of offsetting and wedging cell lattices in the on-ramp system, International Journal of Modern Physics C 20 (7), 1039-1047, 2009.

44) Jun-fang Tian , Bin Jia ,Xin-gang Li , Rui Jiang , Xiao-mei Zhao , Zi-you Gao; Synchronized traffic flow simulating with cellular automata model, Physica A 388, 4827-4837, 2009.

45) Nagatani,T.; Traffic states and fundamental diagram in cellular automaton model of vehicular traffic controlled by signals, Physica A 388, 1673-16814, 2009.

46) Sun,X.-Y., Jiang,R., Wang,B.-H.; Increase of traffic flux in two-route systems by disobeying the provided information, Chinese Physics Letters 27, #058902, 2010.

47) Chen,X.-Q., Xie,W.-J., Shi,J., Shi,Q.-X.; Perturbation and stability analysis of the multi-anticipative intelligent driver model, International Journal of Modern Physics C 21 (5), 647-668, 2010.

48) Li,Q.-L., Wang,B.-H., Liu,M.-R.; Phase diagrams properties of mixed traffic flow on a crossroad, Physica A 389, 5045-5052, 2010.

49) Sun,D.J., Kondyli,A.; Modeling vehicle interaction during lane-changing behavior on arterial street, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering 25, 557-571, 2010.

50) Zamith,M. et al.; A probabilistic cellular automata model for highway traffic simulation, Procedia Computer Science 1, 337-345, 2010.

51) Xie,D.-F., Gao,Z.-Y., Zhao,Z.-M.; Combined cellular automaton model

for mixed traffic flow with non-motorized vehicles, International Journal of Modern Physics C 21 (12), 1443-1455, 2010.

52) Moussa,N.；Simulation study of traffic accidents in bidirectional traffic models, International Journal of Modern Physics C 21 (12), 1501-1515, 2010.

53) Meng,Q.，Weng,J.；Cellular automata model for work zone traffic, Transportation Research Record 2188, 131-138, 2011.

54) Gayah,V.V.，Daganzo,C.F.；Clockwise hysteresis loops in the Macroscopic Fundamental Diagram: An effect of network instability, Transportation Research Part B 45, 643-655, 2011.

55) De Gier,J.，Garoni,T.M.，Rojas,O.；Traffic flow on realistic road networks with adaptive traffic lights, Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, P04008, 2011.

56) Ding,Z.-J.，Jiang,R.，Huang,W.，Wang,B.-H.；Effect of randomization in the Biham Middleton Levibe traffic flow mode, Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, P06017, 2011.

57) Jin,C.-J.，Wang,W.，Gao,K.，Jian,R.；Effect of acceleration threshold on the phase transition in a cellular automaton traffic model, Chinese Physics B 20 (6), 064501, 2011.

58) Jin,C.-J.，Wang,W.，Jian,R.，Gao,K,；On the first-order phase transition in a cellular automaton traffic flow model without a slow-to-start effect, Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, #P03018, 2010.

59) Gao,K.，Jiang,R.，Wang,B.-H.-, Wu,Q.-S.-；Discontinuous transition from free flow to synchronized flow induced by short-range interaction between vehicles in a three-phase traffic flow mode, Physica A 388, 3233-3243, 2009.

60) Peng,Y.，Shang,H.-Y.，Lu,H.-P.；Analysis of phase transition in traffic flow based on a new model of driving decision, Communications in Theoretical Physics 56, 177-183, 2011.

61) Ez-Zahraouy,H.，Benyoussel,A.；Disorder effect on the traffic flow behavior, The European Physical Journal B 64, 573-583, 2008.

62) L. Zheng, S. Ma, S. Zhong; Analysis of honk effect on the traffic flow in a cellular automaton model, Physica A 390, 1072-1084, 2011.

63) He,H.-D.，Lu,W.-Z.，Dong,L.-Y.；An improved cellular automaton model considering the effect of traffic lights and driving behavior, Chinese Physics B 20 (4), 040514, 2011.

64) Zhang,W.-W.- et al; Traffic dynamics in a two-lane mixed traffic system: effect of four lane changing regulations, Physica A 387, 5583-5596, 2008.

65) Qian,Y.-S.. et al.；A study on the effects of the transit parking time on traffic flow based on cellular automata theory, Chinese physics B 19 (4), #048201, 2010.

66) Jetto,K.，Zahraouy,E.Z.-, Benyoussef,A.；The effect of the heterogeneity on the traffic flow behavior, International Journal of Modern Physics C 21 (22), 1311-1327, 2010.

67) Kanai,M.；Two- lane traffic-flow model with an exact steady-state solution, Physical Review E 82, 066107, 2011.

68) B.S.Kerner, S.L.Klenov; Phase transition in traffic flow on multila

ne roads, Physical Review E 80, 056101, 2009.

69) Zhu,H.B., Dai,S.Q.; Two-lane traffic simulations with a blockage induced by an accident car, Physica A 388, 2903-2910, 2009.

第 3 章　ゲーム理論

3.1　ゲーム理論

ゲーム理論では複数の意思決定主体が存在する中で，連携的ではなく個人的な目的で合理的に意思を決定する非協力ゲームを考える．本章ではこの個体をエージェント i，エージェントの取る行動の根拠となるものを戦略 S_i と呼ぶ．エージェントはゲームにおいてある戦略を取ることで何かしらの結果を得ることになる．この結果を一般に利得と呼ぶ．非協調ゲームにおいての合理的な行動とは，つまりこの利得を最大にするように戦略を取ることに相当する．[1]

ここで戦略について少し詳しく触れると，戦略には大きくわけて純粋戦略と混合戦略がある．前者は行動の選択肢一つ一つを意味し，混合戦略は，その選択肢をどう取るかを意味する．じゃんけんを例にとれば，グー，チョキ，バーの夫々が純粋戦略であり，それを全て 1/3 の確率で出すことが混合戦略に相当する．本論では戦略と表記した場合は純粋戦略を示しているものとする．

現実的には対戦するエージェントの数は多数いることも考えられるが，非協力ゲームの場合対戦相手は一度に一人であることが多い．ここでエージェント 1（自分）の戦略が $S_1^1, S_2^1, \cdots, S_m^1$ の m 個，エージェント 2（相手）の戦略が $S_1^2, S_2^2, \cdots, S_n^2$ の n 個の場合を $m \times n$ ゲームという．この場合お互いの取る戦略の組み合わせによって決まる利得を，表 3.1 のように $m \times n$ 行列に表すことが出来る．

表 3.1　m×n ゲームの利得表

2 1	S_1^2	S_2^2	…	S_n^2
S_1^1	u_{11}^1, u_{11}^2	u_{12}^1, u_{12}^2	…	u_{1n}^1, u_{1n}^2
S_2^1	u_{21}^1, u_{21}^2	u_{22}^1, u_{22}^2	…	u_{2n}^1, u_{2n}^2
:	:	:	…	:
S_m^1	u_{m1}^1, u_{m1}^2	u_{2m}^1, u_{2m}^2	…	u_{mn}^1, u_{mn}^2

合理的に自分の戦略を決めようとするとき，相手の戦略によって自分の最適戦略，つまり利得を最大にする戦略は異なるし，当然相手もその状況に置かれている．ここで，相手が「ある戦略」をとっているときの自分の最適戦略において，相手にとっての最適戦略が「ある戦略」であるとき，これをナッシュ均衡と言う．このナッシュ均衡はどのようなゲ

ームに置いても必ず存在するが，必ずしも一つとは限らない．表 3.2 にある 3×3 ゲーム
におけるナッシュ均衡の例を示した．

表 3.2　利得行列上でのナッシュ均衡探索

1 \ 2	S_1^2	S_2^2	S_3^2
S_1^1	**4,4**	**3**, 1	2, 3
S_2^1	1, **3**	2, 2	4, 2
S_3^1	3, 2	2, 4	**5,5**

太字で示した要素がそれぞれの相手の戦略に対しての最大利得を示している．この例を詳しく見てみる．例えば仮に相手が S_1^2 の戦略をとると仮定する．その場合自分は S_1^1 をとることが最適である．このことは相手にも言えるため，S_1^1，S_1^2 の組み合わせはナッシュ均衡である．次に相手が S_2^2 の戦略をとる場合を考える．この場合自分は S_1^1 を表とることが最適であるが，相手からするとこの S_1^1 を取る場合 S_2^2 をとることは適当ではない．このように考えると，ナッシュ均衡であるためには同一ブロックで両方とも太字となっている場合であることがわかる．よってこの場合は S_3^1，S_3^2 の組み合わせもナッシュ均衡である．

表 3.2 を更に詳しく見てみる．両者にとって理想的な帰結は，お互いが 5 の利得を上げることが出来る S_3^1，S_3^2 の組み合わせである．一般に，全エージェントにとって状態 A の方が状態 B より望ましいとき，A は B よりパレート優位であるとい，B は A よりパレート劣位であるという．更に A が全ての状態において最良の状況であるとき A はパレート最適であるといい，この例ではまさに S_3^1，S_3^2 の組み合わせがパレート最適である．しかしこの例ではこの組み合わせ以外にもナッシュ均衡が存在している．このように，パレート最適以外にも均衡を持つ状況を，非協調ゲームではジレンマという．

3.1.1　2x2 ゲーム

m×n ゲームにおいて m=2，n=2 であり，さらに両者条件が同じである場合を 2×2 ゲームという．この場合の利得表を表 3.3 に示す．なお表中の戦略 C，D は夫々Cooperation，Defection の頭文字を表す．

表 3.3　2×2 ゲームの利得表

	C	D
C	R, R	S, T
D	T, S	P, P

ここで R は Reward，S は Saint，T は Temptation，P は Punishment の頭文字を夫々表している．両者が同じ条件下にいる場合は，行列が対称になるために，表 3.4 のように簡単に表すことができる．

表 3.4　簡易表現した 2×2 ゲームの利得表

	C	D
C	R	S
D	T	P

以後本論ではこのような表現をした場合は対称ゲームを示しているものとする．
この 2×2 ゲームは非常に単純でありながらも非常に興味深い性質を有するので，ゲーム理論の議論に頻繁に登場する．この 2×2 ゲームは大きく 4 つのゲームに分類することが出来る．

3.1.2 非ジレンマゲーム（Trivial Game）

表 3.4 の要素 R，S，T，P において $R>T$，$S>P$ が成立している場合，非ジレンマゲームとなる．例を表 3.5 に示した．この場合ナッシュ均衡とパレート最適が一致していることがわかる．よってジレンマは存在しない．

表 3.5　非ジレンマゲームの利得表

	C	D
C	**4,4**	**2**,3
D	3,**2**	1,1

3.1.3 保障ゲーム

保障ゲームとは，$R>T$，$S<P$の条件を満たしている場合のゲームである．Tanimoto & Sagara [9]に倣えばリスク回避型のジレンマ $D_r=P-S>0$ である場合ということになる．表3.6はその一例である．お互いが協力する場合（以後C-Cのように表記）がパレート最適であり，これがナッシュ均衡でもあるがD-Dもナッシュ均衡となっている．このゲームの合理性に関する解釈としては，当然パレート最適となるために相手がCを出すだろうと推測できる一方で，もし相手が裏切ってきたらとの懐疑心から自分が陥れられるリスクを回避しようとしてD-Dもナッシュ均衡になるということである．

表3.6　保障ゲームの利得表

	C	D
C	**4,4**	1,3
D	3,1	**2,2**

3.1.4 チキンゲーム

チキンゲームとは，$R<T$，$S>P$の条件を満たしているゲームのことである．Tanimoto & Sagara [2]に倣えばチキン型のジレンマ $D_g=T-R>0$ である場合ということになる．表3.7には例をいくつか示した．どのチキンゲームでもナッシュ均衡がC-D，D-Cの二つ存在していることがわかるが，保障ゲームと違い，合理的な戦略の議論が容易でない．チキンゲームの場合は相手と別の手をとることが最適となる．となれば，自分の意思を相手に伝えるか，相手の意思を聞くか出来ればいいのだが，非協力ゲームではそれは認めない．となれば，確率的に戦略を選択する，まさに混合戦略をとることが必要になる．このとき

$$x=\frac{S-P}{T+S-R-P} \tag{3.1}$$

の確率でCを出すことが望ましい．このときの期待利得Eは

$$E=\frac{TS-RP}{T+S-R-P} \tag{3.2}$$

となるが，これはパレート最適の利得からすると低いことからジレンマが存在すると考えることが出来る．

表 3.7　チキンゲームの利得表．(*a*)は狭義のチキンゲーム，(*b*)はリーダーゲーム，(*c*)は英雄ゲーム．

(*a*)狭義のチキンゲーム

	C	D
C	3,3	**1,4**
D	**4,1**	0,0

(*b*)リーダーゲーム

	C		D
C	3,3		**2,5**
D	**5,2**		0,0

(*c*)英雄ゲーム

	C	D
C	2,2	**3,4**
D	**3,4**	0,0

3.1.5　囚人のジレンマゲーム（PDG）

$R<T$，$S<P$，主には更に $2R>S+T$ である場合を PDG という．言いかえれば $D_r>0$，$D_g>0$ である．このゲームの一例を表 3.8 に示した．このゲームではナッシュ均衡が D-D のみであり，完全にパレート最適と一致していないことがわかる．

表 3.8　囚人のジレンマゲームの利得表

	C	D
C	3,3	1,**4**
D	**4**,1	**2,2**

3.2 進化ゲーム理論

3.2.1　進化論

生物の進化の概念は，Darwin による進化論の登場以降，遺伝，変異，淘汰の三つの要素からなると理解されている．説明を補足すると，種は自分のコピーを後生に遺伝することで基本的に種の存続をはかるが，そのコピーは精密なものではないため，変異によってその種から派生する種が登場する．それら種の存続能力にはそれぞれ差があり，その差による競争がまさに淘汰を生む，との理解である．この進化の過程は状態の時間発展に他ならず，これを力学系ダイナミクスとして捉えた研究は無限に存在する．そしてその中の一つが進化ゲームである．

3.2.2　ゲーム理論の進化への適用

ゲーム理論においてゲームを構成しているのはエージェント，戦略，利得のみである．このうち，エージェントは種を構成する個体に対応することは容易に想像がつく．残るは

戦略と利得だが，これらは一体何を意味するのか．進化論における三要素のうちゲーム的状況で表現できるのは淘汰であると考えるのが自然である．とすれば種間競争による適応度の差が戦略間のゲームにおける利得によって決められると考えられる．ここで進化に関する議論においてしばしば適応度の定義について追求することがあったらしいが，少なくとも共通していえるのが「殖えやすいものは殖える」という概念である．よって，取得利得が相対的な適応度の大小に相当する．ここで敢えて相対的としたのは，このゲームの帰結はエージェント間の相互作用によって生じたものであり，他の様々な要因によって最終的に決まる適応度と必ずしも一致するとは限らないからである．またゲーム理論では，ある状況における合理的行動を目的としたが，進化における種はエージェントにとって不変であることから，戦略はエージェントそれぞれが生まれながらにして所有しているもの，例えば種や遺伝子に相当し，合理性は無視して構わない．[1，3]

3.2.3 力学系ダイナミクス

これでゲームを構成している要素が全て進化に対応させることができた．しかし進化にはまだ遺伝と変異が依然として残る．これはゲーム理論に時間の概念が存在しないためにおこる．そこで新たに力学系ダイナミクスを導入する必要がある．これをレプリケータダイナミクスという．このレプリケータダイナミクスは利得が高いものほど殖えるという概念を，状態変化の微分方程式で表現したものである．まずはこのレプリケータダイナミクスを理解する上で幾つかの力学系ダイナミクスの理解が必要となるので，そちらを簡単に紹介していく．

ある一つの種についてのダイナミクスを考えるとき，種の数 x は増殖率を r とすれば

$$\dot{x} = rx \tag{3.3}$$

と表すことが出来る．単純なモデルを考えるならば増殖率は出生と死亡によって変化するので，出生率を b，死亡率を d とすれば，

$$r = b - d \tag{3.4}$$

となる．このモデルでは $b<d$ では絶滅，$b=d$ では一定，$b>d$ では無限に増殖し続けることとなる．$b=d$ はある瞬間起こりえても，これが一定期間続くとは考えにくく不安定な状況である．また $b<d$ となって絶滅する状況は起こりえても，$b<d$ の無限に増殖する状況は環境や自然の容量の問題から非現実であり，何処かで頭打ちをくらうはずである．これを表現したのがロジスティック方程式と呼ばれるもので，

$$r = a(1 - x / K) \tag{3.5}$$

の場合である．ここで $x \doteqdot 0$ の場合 $r = a$ となることから a は個体数が少ない状況での繁殖率を表し，固体が増殖し $x = K$ に到達すると $r = 0$ となることから，K は環境収容能力を表す．このロジスティック方程式は解が求まり

$$x(t) = \frac{Kx_0 e^{rt}}{K + x_0(e^{rt} - 1)} \tag{3.6}$$

となる．
次に種が複数存在し，相互に影響を及ぼし合う場合のダイナミクスを考える．簡単の為にまず二種しか存在しない場合を考える．二種 X と Y の個体数 x と y の淘汰ダイナミクスは夫々の増殖率を a と b とすれば

$$\begin{aligned} \dot{x} &= ax \\ \dot{y} &= by \end{aligned} \tag{3.7}$$

となり，ある時間でのそれぞれの個体数はこの方程式を解くと

$$\begin{aligned} x(t) &= x_0 e^{at} \\ y(t) &= y_0 e^{bt} \end{aligned} \tag{3.8}$$

となる．ここで個体数の割合を $\rho = x/y$ とするならば

$$\rho(t) = \rho_0 e^{(a-b)t} \tag{3.9}$$

となる．これから，$a>b$ ならば X はその割合を増やし Y は衰退するし，逆もまた然りである．

次に全個体数の合計が一定である環境収容能力がある場合を考える．この場合においては両者の個体数よりもその生存の割合に興味があるため夫々の個体数の割合を x と y で表す．つまり $x+y=1$ が成立することを意味する．夫々の淘汰ダイナミクスは

$$\begin{aligned} \dot{x} &= (a - \phi)x \\ \dot{y} &= (b - \phi)y \end{aligned} \tag{3.10}$$

と表せる．$\dot{x} + \dot{y} = 0$，$x+y=1$ に留意すると $f=ax+by$ となる．更に $x+y=1$ の条件から y は消去できることから式(2.10)は次のように書き換えられる．

$$\dot{x} = x(1-x)(a-b) \tag{3.11}$$

これは二つの自明な均衡点 $x=0$，$x=1$ を持つ．この二点のうち安定な点は片方である．それは a と b の大小によって決まり，$a>b$ ならば $\dot{x}$ は常に正であり，$x=1$ が安定，逆に $a<b$ ならば $x=0$ が安定な点である．これは初期に両者がどのような存在比にあっても必ず適応度が大きい方だけが生き残ることを意味する．

次に複数種が存在する場合にこれを拡張する．存在する種を i=0，1，…，n とし，i 種の適応度を f_i とする．それぞれの存在比を $x_i(t)$ とする．集団の状態はベクトルで表現できて $\vec{x} = (x_1, x_2, \cdots x_{i,} \cdots, x_n)$ となる．夫々の種の淘汰ダイナミクスは

$$\dot{x}_i = (f_i - \phi)x_i \qquad (\phi = \sum_{i=1}^{n} x_i f_i) \tag{3.12}$$

と表される．ここで□は集団の平均適応度である．これはつまりその種の適応度 f_i が f よりも大きければその種は増加するし，小さければ減少することを表している．

3.2.4 レプリケータダイナミクス

いよいよレプリケータダイナミクスの登場である．ここでもう一度ゲーム理論と進化の対応をおさらいすると，エージェントは戦略を持って他のエージェントとゲームをすることで適合度に対応する利得を得るのであった．つまりこれまでの議論から戦略を i=0，1，…，n とし夫々の戦略エージェント数を p_i と表す．i 戦略の個体数ダイナミクスは

$$\dot{p}_i = (a + fi)p_i \tag{3.13}$$

となる．ここで a は自然増殖率，f_i は i 戦略がゲームにより生じた増殖率を表す．ゲーム理論では a はここでは戦略によらず一定であると仮定する．

次に戦略分布ベクトルを $\vec{x} = (x_1, x_2, \cdots x_{i,} \cdots, x_n)$ とする．ここで p を総エージェント数とすれば $x_i = p_i/p$ を意味している．ここで p を左辺に移項し時間微分をとると

$$\dot{p}_i = p_i\dot{x}_i + \dot{p}_i x_i \tag{3.14}$$

が得られるこれから以下の式が導かれる

$$p_i\dot{x}_i = \dot{p}_i - \dot{p}x_i = (a + fi)p_i - (a + f)px_i \tag{3.15}$$

ここで f は系全体の増殖率である．$x_i = p_i/p$ に留意すると両辺を p_i で割れば最終的に

$$\dot{x}_i = (fi - f)x_i \tag{3.16}$$

が導かれる．この式(3.16)をレプリケータダイナミクスという．ここで利得行列を $\vec{A}$ とすれば，式(3.16)は

$$\dot{x}_i = (S_i\vec{A}\vec{x} - \vec{x}\cdot\vec{A}\vec{x})x_i \tag{3.17}$$

と表すこともできる．

ここでレプリケータダイナミクスの式(3.16)と淘汰ダイナミクス式(3.12)とは同じ形をしていることがわかる．つまり進化ゲームにおいてはゲームによって得る利得が平均より多ければ増殖し，少なければ減衰することを意味していることがわかる．

3.2.5 多人数 2 戦略ゲームのレプリケータダイナミクス

表 3.4 の利得行列を用いて C 戦略のダイナミクスを考える．ここでは 2 戦略しか存在しないため，$\dot{x}_c = -\dot{x}_d$ となり，片方を考えることで十分である．戦略ベクトルが x_c，x_d で与えられたとすると C 戦略の時間変化は式(3.17)に代入して

$$\dot{x}_c = \left\{ (1,0)\begin{pmatrix} R & S \\ T & P \end{pmatrix}\begin{pmatrix} x_c \\ x_d \end{pmatrix} - (x_x, x_d)\begin{pmatrix} R & S \\ T & P \end{pmatrix}\begin{pmatrix} x_c \\ x_d \end{pmatrix} \right\} x_c \tag{3.18}$$

となる．ここで $x_c+x_d=1$ であることに留意し，D_g，D_r を用いてこれを纏めると

$$\dot{x}_c = \{ (D_r - D_g) x_c - D_r \} x_c (1 - x_c) \tag{3.19}$$

となる．ここで，$0 \le x_c \le 1$ であることから式(3.19)において $x_c=0$，1 の二つの自明な均衡点がわかり，もう一つの均衡点 $x_c=D_r/(D_r-D_g)$ がどこにあるかと D_r-D_g の符号がわかれば x_c のダイナミクスの全容がわかる．これを場合分けすると最終的に 2×2 ゲームでクラス分けした条件で 4 通りに区分できる．夫々の場合の $\dot{x}_c$ と x_c の関係を図 3-1 に示した．

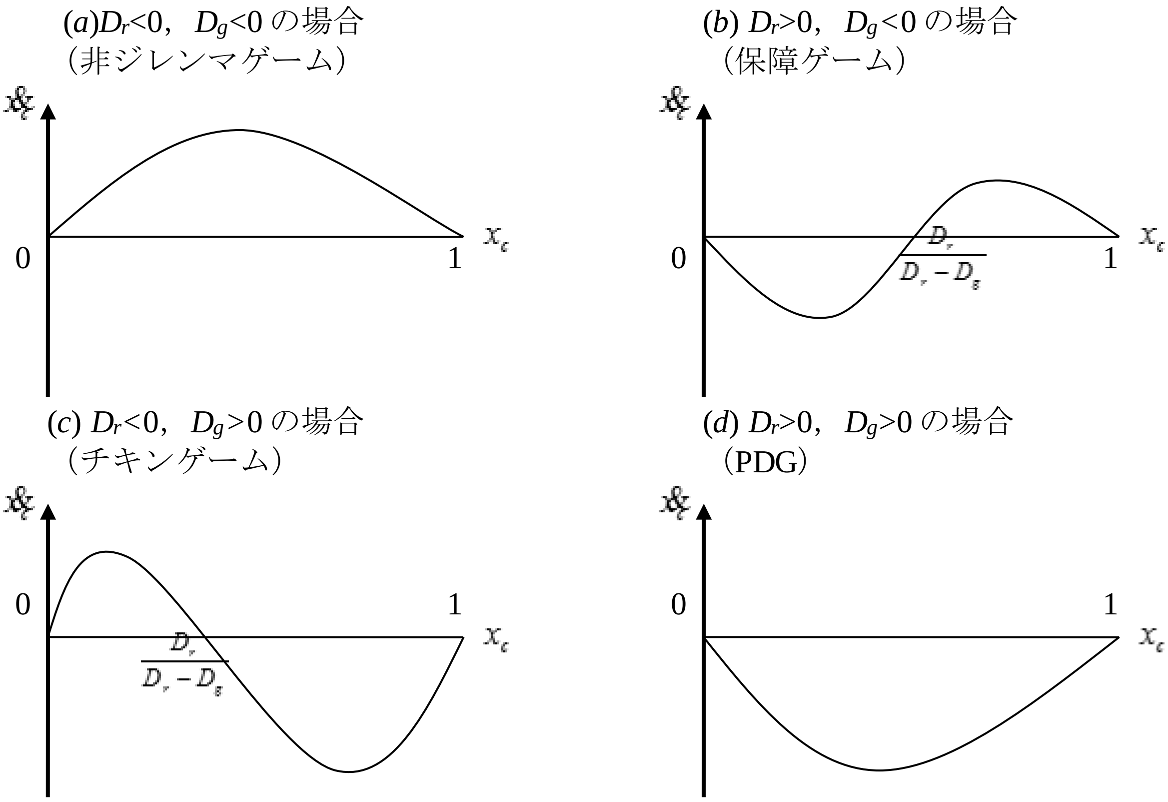


図 3–1　クラス別の $\dot{x}_c$ と x_c の関係図．(*a*)は非ジレンマゲーム，(*b*)は保障ゲーム，(*c*)はチキンゲーム，(*d*)は PDG を夫々表している．

図 3-1 を見ると，2×2 ゲームの帰結から推測できるダイナミクスになっていることがわかる．非ジレンマゲームでは最終的に C 戦略だけが生き残る，保障ゲームでは，初期に D 戦略が多いと懐疑心から D 戦略を選択するエージェントが増えるが，初期に C 戦略が多ければ安心して C を出すエージェントが増える，初期値依存性を持つダイナミクスになっている．チキンゲームでは相手と違う戦略をとることが望ましいゲームであるため，最終的には初期値に依存せずにある戦略分布に吸引される．そして PDG は最終的に D 戦略だけが生き残るダイナミクスになっている．

3.3　交通流研究への応用

交通流では同時に複数の周辺車両エージェントとの相互作用を考慮するため，3.2.5 で述べた多人数ゲームとして扱うことが出来る．ここで多人数 2 戦略ゲームとして考えると，車両エージェントは夫々C か D のどちらかの戦略を有することになる．このとき各戦略を持つ車両エージェントを，夫々C-agents 及び D-agents と呼ぶことにする．ゲーム理

論でいう各エージェントの利得及び社会利得は，交通流でいう各エージェントの平均速度及びフラックスに相当する．このときパレート最適となるのは社会利得であるフラックスが最大となるときである．一方ナッシュ均衡は次のように決まる．車両エージェントは自らの平均速度を高くするために，どちらの戦略を取ればよいか合理的に選択する．つまりC-agents の平均速度が D-agents の平均速度よりも大きければ C 戦略を選択し，C-agents の平均速度が D-agents の平均速度よりも小さければ D 戦略を選択する．全エージェントが同様に考えた結果ある社会に行き着き，ナッシュ均衡となる．

参考文献

1) 石原英樹，金井雅之，進化的意思決定；朝倉書店，2002.
2) Tanimoto, J., Sagara, H., Relationship between dilemma occurrence and the existence of a weakly dominant strategy in a two-player symmetric game, BioSystems 90 (1), 105-114, 2007.
3) Nowak, M.A., Evolutionary Dynamics: Exploring the Equations of Life, Belknap Press of Harvard University Press, 2006.

第 4 章　交通流動の演繹アプローチ－Fukui-Ishibashi (FI) モデルと Quick-Start (QS)モデルの解析解に関する研究

4.1 緒言

本章では，第２章で紹介した既存の CA モデルである Fukui-Ishibashi（FI）モデルと Quick-Start（QS)モデルの解析解に関する説明をする．既往研究においてルール 184 や ASEP 及び ZRP に関しては，ある密度に対し流量が一意に決まるので，厳密解が導出されている[1-2]．一方，FI モデル[3]や QS モデル[4]は厳密解が導出されていないが、決定論的なモデルであるから，最高速度や見通し台数によって，最高流量とそのときの臨界密度が求まれば，厳密解が得られる筈である．

本章では，両モデルの厳密解の導出方法について述べる．

4.2 FI モデルの厳密解

FI モデルの速度決定は次のように行われる．

$$if\,(gap \geq V_{\max})then(v_i = V_{\max})$$

$$if\,(gap < V_{\max})then(v_i = gap)$$

ここで gap は前方車両との車間距離，V_{max} は最高速度，v_i は自車両の速度である．このときの臨界密度 k_{cri} は，図 4-1 から明らかなように $\frac{1}{V_{\max}+1}$ となり，最大流量は $\frac{V_{\max}}{V_{\max}+1}$ である．

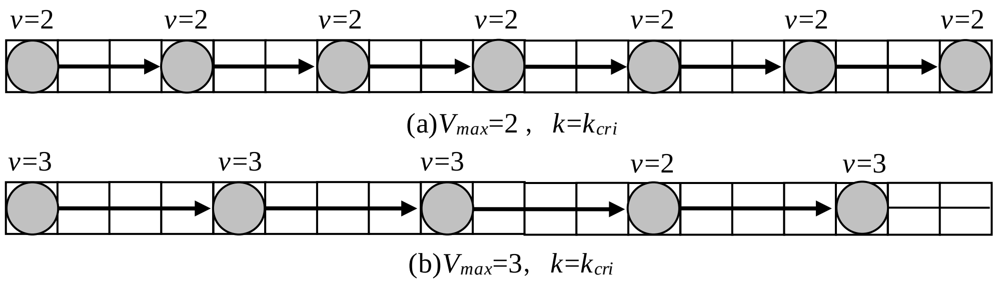


図 4–1：FI モデルによる流れ場の一例

続いて，FI モデルの厳密解について，基本図の形状から導出を試みる．

密度 $k < kcri$ のとき，原点を通り，傾き $Vmax$ の直線となることは自明である．

密度 $k > kcri$ のときを考える．図 4-2 に密度 $k > kcri$ のときの流れ場の一例を示す．ここで定義より

（平均速度）＝（全粒子の速度和）÷（全粒子の数）

であるから，図 4-2 より（全粒子の速度和）＝（1−k）がいえるので

（平均速度）＝（1−k）/k

従ってフラックスは

$Q(k)= 1-k$

$Q(k)$は k の一次関数であるから，直線であり，また点$\left(\dfrac{1}{V_{\max}+1}, \dfrac{V_{\max}}{V_{\max}+1}\right)$及び(1, 0)を通る．

以上から FI モデルの基本図はこの点を頂点とした非対称なテント型で描かれる．

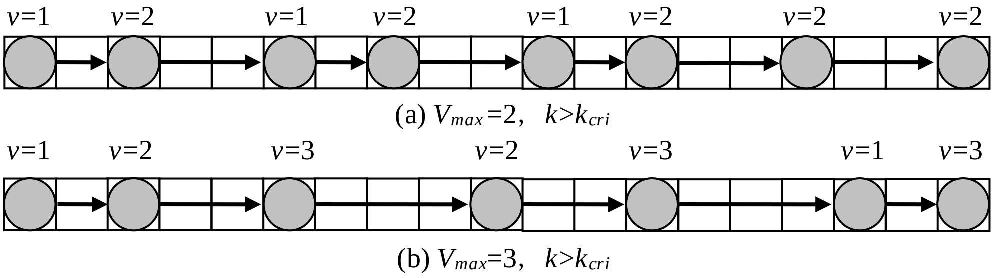


図 4–2：FI モデルによる流れ場の一例

この結論を用いて，FI モデルの厳密解の導出を行う．

ここで，2 本の直線を接続したテント型関数の陽的表現形式について説明する．

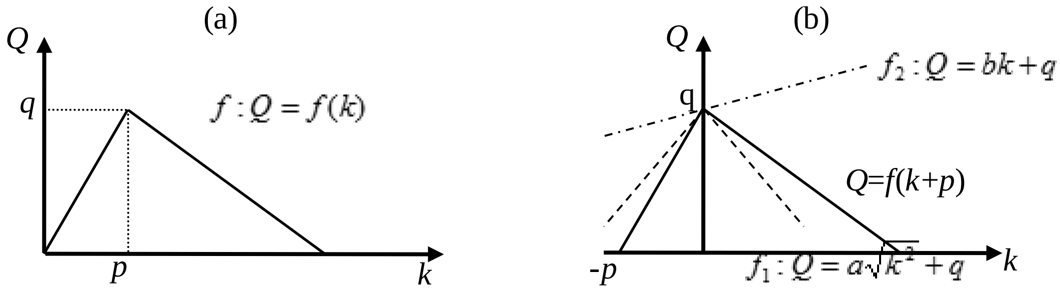


図 4–3：非対称なテント型関数

2 本の直線を接続したテント型関数の方程式 $f : Q = F(k)$を求める(図 4-3(a))．関数を k 軸方向に－p だけ平行移動すると，$Q=f(k+p)$となる(図 4-3(b))．

一方，$(k, Q)=(0, q)$で交わる 2 つの方程式 $f1$，$f2$ を

$$f_1 : Q = a\sqrt{k^2} + q \qquad (4.1)$$

$$f_2 : Q = bk + q \qquad (4.2)$$

とする．f_1は Q 軸に対称な折れ線関数である．実線のテント型関数はこれら 2 直線の重合により得られるから，以下のように表される．

$$Q = f(k+p) \equiv f_1 + f_2 - q$$

ここで式(4.1) (4.2)を代入すると

$$f(k+p) = a\sqrt{k^2} + bk + q \tag{4.3}$$

平方根の場合分けを考えると以下となる.

if（*k<0*）の場合

$$f(k+p) = (-a+b)k + q \equiv D_1 k + q \tag{4.4}$$

if（*k>0*）の場合

$$f(k+p) = (a+b)k + q \equiv D_2 k + q \tag{4.5}$$

ここで、FI モデルにおいては、

$$(p,q) = \left(\frac{1}{V_{\max}+1}, \frac{V_{\max}}{V_{\max}+1}\right)$$

$$D_1 = V_{\max}, D_2 = -1$$

以上の条件から式(4.4) (4.5)を解くと

$$a = -\frac{V_{\max}+1}{2}, b = \frac{V_{\max}-1}{2} \tag{4.6}$$

式(4.2)に代入して

$$f(k+p) = -\frac{V_{\max}+1}{2}\sqrt{k^2} + \frac{V_{\max}-1}{2}k + q \tag{4.7}$$

従って求める方程式 *f(k)*は

$$f(k) = -\frac{V_{\max}+1}{2}\sqrt{(k-p)^2} + \frac{V_{\max}-1}{2}(k-p) + q$$

$$Q = \frac{V_{\max}}{1+V_{\max}} - \left\{\frac{1+V_{\max}}{2}\sqrt{\left(k - \frac{1}{1+V_{\max}}\right)^2} + \frac{1-V_{\max}}{2}\left(k - \frac{1}{1+V_{\max}}\right)\right\} \tag{4.8}$$

ここで *Q* はフラックス，*k* は密度を表している．図 4-4 に $V_{\max}$=1，2，3，4 としたときの式(4.8)による基本図を示す.

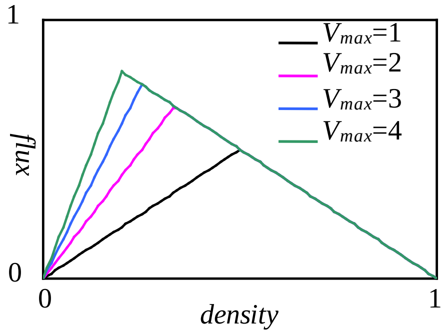


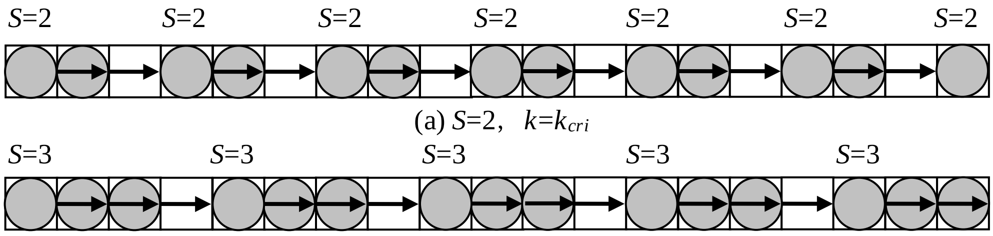
図 4–4：式(4.8)による基本図.

4.3 QS モデルの厳密解

QS モデルの速度決定は，次のように行われる．

前方 S セルのうち，空きセルがあれば進むことが出来る．

ここで S は見通し台数を表す．このときの臨界密度は，図 4-5 から明らかなように $\frac{S}{S+1}$ となり，最大流量は $\frac{S}{S+1}$ である．



(a) S=2，$k=k_{cri}$

(b) S=3，$k=k_{cri}$

図 4–5：QS モデルによる流れ場の一例

続いて、QS モデルの基本図の厳密解の形状について検討する。

密度 $k<kcri$ のとき，原点を通り傾き 1 の直線となることは自明である．

密度 $k>kcri$ のときを考える．図 4-6 に密度 $k>kcri$ のときの流れ場の一例を示す．ここで

（平均速度）＝（全粒子の速度和）÷（全粒子の数）

　　　　　　＝（動いた粒子の数）÷（全粒子の数）

であるから，図 4-6 より空セルの後方 S 個の粒子が動くことが出来る．従って（動いた粒子の数）＝$(1-k)S$ がいえるので

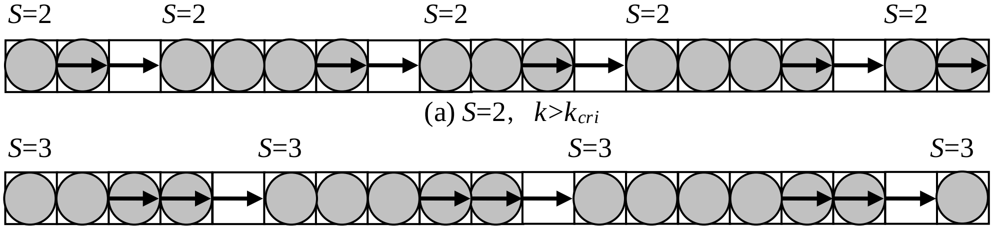
（平均速度）＝$(1-k)S/k$

従ってフラックスは

$Q(k)=(1-k)S$

$Q(k)$は k の一次関数であるから，直線であり，また点$\left(\frac{S}{S+1}, \frac{S}{S+1}\right)$及び$(1,0)$を通る．

以上から QS モデルの基本図はこの点を頂点とした非対称なテント型で描かれる．



(a) S=2，$k>k_{cri}$

(b) S=3，$k>k_{cri}$

図 4-6：QS モデルによる流れ場の一例

続いて、QS モデルの厳密解の導出を行う。

2 本の直線を接続したテント型関数の陽的表現形式(4.1)～(4.5)にて示したとおりである。

ここで QS モデルにおいては、

$$(p,q)=\left(\frac{S}{S+1},\frac{S}{S+1}\right)$$

$$D_1=1, D_2=-S$$

以上の条件から式(4.4) (4.5)を解くと

$$a=-\frac{S+1}{2}, b=-\frac{S-1}{2} \tag{4.9}$$

式(4.2)に代入して

$$f(k+p)=-\frac{S+1}{2}\sqrt{k^2}-\frac{S-1}{2}k+q \tag{4.10}$$

従って求める方程式 $f(k)$は

$$f(k)=-\frac{S+1}{2}\sqrt{(k-p)^2}-\frac{S-1}{2}(k-p)+q$$

$$Q=\frac{S}{S+1}-\left\{\frac{S+1}{2}\sqrt{\left(k-\frac{S}{S+1}\right)^2}+\frac{S-1}{2}\left(k-\frac{S}{S+1}\right)\right\} \tag{4.11}$$

図 4-7 に S =1，2 としたときの式(4.11)による基本図を示す.

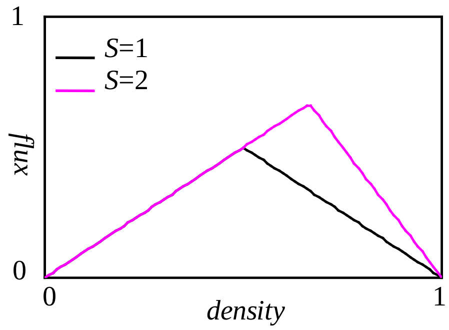


図 4–7：式(4.11)による基本図.

参考文献

1) A Schadschneider and M Schreckenberg; Cellular automation models and traffic flow, Journal of Physics A: Mathematical and General 26, L679, 1993.

2) K. Klauck, A. Shadshneider; On the ubiquity of matrix-product states in one-dimensional stochastic processes with boundary interactions, Physica A 271, 102, 1999

3) Fukui M., Ishibashi Y.; Traffic flow in 1D Cellular Automaton Model including Cars Moving with High Speed, Journal of the Physical Society of Japan 65, No.6, 1868, 1996.

4) Nishinari K., Takahashi D.; Multi-value cellular automaton models and metastable states in a congested phase, Journal of Physics A: Mathematical and General 33, 7709, 2000

第 5 章　観測に基づく交流流動の特性に関する研究

5.1 緒言

交通渋滞問題の社会的関心が高まるにつれて，多くの統計物理学者は，巨視的または微視的概念に基づいて様々なモデルを確立してきた．実行可能なシミュレーションモデルを確立するためには，当然ながら厳格な検証プロセスが不可欠である．最近のモデル，特に微視的概念に基づくいわゆるセルオートマトンを用いたいくつかのモデルでは，ドライバーの車線変更のような，交通流のより洗練された側面を再現しようとしている[1]．この検証プロセスには，シミュレーションデータと実際の観測データとの比較によって，そのモデルが適切であるかどうかを確認することが必要となる．しかし現在行われている実測研究では，実験や測定にてデータを収集しているものの，十分なデータ量が蓄積されているとはいえない．

実験や実際の交通流の観測を含む過去の研究に関して，いくつか参考となる研究があった．中でも，只木らの研究[2]では，「制御不能な」外的環境からもたらされるノイズを取り除いた，屋内環境に設置されたサーキットレーン上に配置された実車両の群を用いた新しい実験結果を必要とするため，最も偉業といえるかもしれない．この研究では，運転者の行動に起因する変動などが含まれ，相転移などの交通流の詳細なプロセス，ノイズに関連するいわゆるメタ安定相の安定性に関心のある，他の研究者が参照できる非常に正確で実現可能で堅牢なデータセットを提供している．

Kerner[3]の 3 相理論の観点から，Neuber らの研究[4]では，ドイツの高速道路から得られた一連のフィールド測定データに基づく時系列分析を含む統計的分析を提供し，また Rehborn ら[5]は，ドイツだけでなく英国や米国でも収集された実測データを比較した．
これまでの研究の大部分は，特定の期間に亘る車両の総数を合計することによって車両フラックスを直接獲得した高速道路に埋め込まれたループ検出器に依存し，2 つの近くの埋め込み検出器から得られた信号から間接的に車両速度を決定した．これは間接的かつ非視覚的な手順のため，事実上，車線変更行動に関する情報は入手できていない．しかし，Singh&Li ら[6]は，いくつかの基本的な仮定を用いてループ検出器のデータセットから導出された車線変更確率を推定するために，Karman filter 理論に基づいた有用なフレームワークを提案した．

Duret ら[7]は，通常の小型車と小型車だけでなく，大型および大型の車両（トラックやバス）だけでなく，基本的なダイアグラムにも精通している混合流の条件について，フランスの高速道路で観測された印象的な現場測定結果を提供した車両利用率のほか， Lv ら[8]は，ループ検出器データではなく，ビデオカメラによって取得されたデータに基づい

て，基本図と車線変更頻度との関係を示した．ただし残念なことに，車線使用率に関する情報は含まれていなかった．

Kerner ら[9]は近年，実際の交通時空構造の調査に向けて新しい手順を適用した．この目的のために，研究者らは，無線通信によってサポートされる様々なカーナビゲーション装置によって生成された車両データを取得した．これは，ループ検出器およびビデオカメラデータに依存する従来の手順とは全く異なる．

一方，著者らは，囚人のジレンマによって特定される典型的な社会的ジレンマが，交通密度に応じて頻繁な車線変更を伴う通常の交通流の背景に隠れていることを明らかにした，進化論的ゲーム理論による蟻継ぎの新しい交通モデルの確立を検討した[10][11]．進化論の理論の領域において研究された社会的ジレンマを解消するためのいくつかのプロトコルを適用することで，他者よりも速く動くことを求める運転者の意思決定プロセスから生じるこの種の社会的ジレンマを解決することによって，より効率的な交通流を得る可能性があることを示している．

この種の今後の研究は，ドライバーが頼りにした現実的な車線変更行動を考慮して，現実的な交通流を再現するモデルを確立することを強く求めている．また，新しいモデルを構築するための重大な障害の１つは，検証するために現場測定データが十分ではない．上記の代表的な研究のくつかを引用してきたように，多くの立派の先行研究者によってフィールド測定データはかなりの数が報告されているが，それらのデータセットはどれも現実的な車線変更をモデル化する上で活用するには不十分である．なぜなら，これらの研究では基本となる３つの情報;フラックス – 交通密度（基本図），車線使用率 –密度の関係，そして車線変更頻度 – 交通密度の関係を同時に揃えていない．そこで本章では，これらの実測データの測定，および検証を行う．

運転者の車線変更行動を考慮したモデリングの視点から，あるフィールド測定において，基本図と，速度密度，車線使用率―密度，車線変更頻度―密度の関係を含む適切な妥当性検証データセットが必要となる．

したがって，本章では，日本の高速道路での観測を行い，上記のポイントを包括した完全なデータセットを報告する．

5.2 計測方法およびデータ収集方法

5.2.1 計測概要

現場測定は，2012 年 4 月 28 日から 5 月 3 日の間，福岡都市高速道路の一部を見下ろす形でデータ蓄積用のノート型 PC および，それと個別に接続された 3 つのウェブカメラを使用して実施した．計測状況の概要を図 5-１に示す．観測場所は，図 5-1(a)に示す通り三和シャッタービルの屋上に位置し，高速道路を見下ろす形で設置し，そのカメラで計４車線を計測した．また図 5-1(b)には，実際の計測空間を示す．

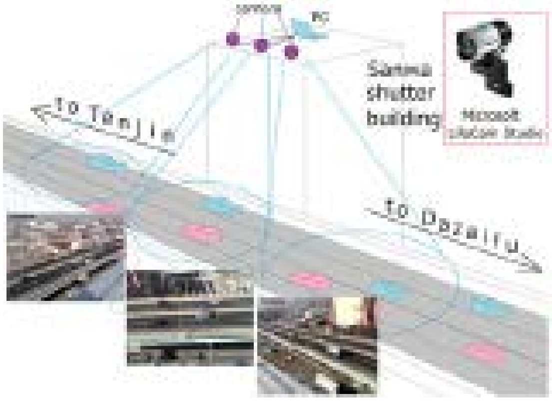


図 5-1(a) 計測設備の概要（福岡都市高速道路のそばの三和シャッタービルの屋上に設置された 3 台のウェブカメラとその視野角）を示す．

図 5-1(b) 交通量，平均速度，密度，車線使用率，車線変更の頻度を測定するために使用される制御空間と断面の定義を示す．

5.2.2 データ収集方法

ループ検出器のデータとは異なり，動画像データは，いわゆるラグランジュ(Lagrangian) アプローチによって各車両の解析を可能にする．

本章では，図 5-2 に示す 12 種類の車両クラスと，それぞれの等価長さ（EL）を標準セダン型車両の実際の長さで正規化したものを定義する．

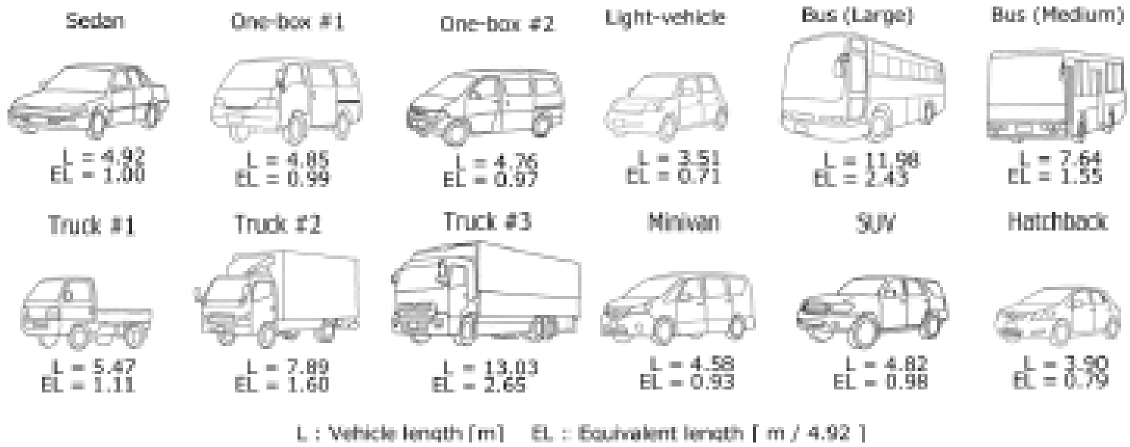


図 5-2 12 種類のクラス分けされた車両のそれぞれの実際の車の長さ（L）と等価長さ（EL）.

車線利用率は，15 秒ごとの静止画に基づいて，制御空間内の 12 車種に分類した車両数を数え，2 車線の密度を個別に算出し，そして，それぞれの 2 車線の密度の比をとって車線使用率を描いている.

続いて，制御空間の中心に設定された単位時間当たりの断面を通る車両の数を図 5-2 にて定義した車両クラスごとに個別にカウントする．具体的には，N_i' ［車両数/分]を計測する．ここで，N_i'は通過する車両数を示し，i は 12 クラスのそれぞれを示す．さらに，N_i'の代わりに同等の台数の$N_i' * EL_i = N_i$［車両数/分]を使用する. ここで，N_i'を標準セダン型車の数とし，それぞれの車両クラスの等価長さであるEL_iを乗して定義する．例えば，バス（大）は 2.43 台分と軽自動車は 0.71 台分として横断面を通過すると見なす．これによりN_iは流量q_i ［車両数/秒]に変換することができる．したがって，全体の流量は$\sum q_i$で求めることができる．同時に，測定期間中に計測空間を通過する各車両に焦点を当てると，制御空間の上流から下流の境界を通る車両の走行時間を計測し，この情報を車両の速度に変換する．このデータ解析により，各クラスの平均速度v_i ［m/s]を算出する．1 分間にわたって流量および速度を測定し、$\sum \rho_i = L_{sedan} \sum q_i/v_i$を計算することによって，密度 ρ [m / m]を推定することができる．密度 ρ は，2 つの車線のそれぞれについて算出可能である.

車線変更頻度については，車線変更が左車線から右車線（すなわち高速車線）に，または右車線から左車線に移動したかどうかに関わらず，単位時間（1 分）当たりの制御空間に発生する車線変更事象の数を集計する.

5.3 結果および考察

図 5-3 に，車線ごとの計測データより得られた基本図を示す．この図から，高速車線の最大流量は明らかに低速車線の最大流量よりも大きい．また，高速車線の最大流量を示す密度は，低速車線の最大流量よりも大きい．これは，高速車線においては，低速車線と比較して車間距離が短くかつ高速で運転していることを意味する．別の見方をすれば，各車線のデータの整然とした配列とより分散したプロットの 2 つの分割領域の存在である．高速車線のデータにおいて，いわゆるメタ安定相は，低速車線のものよりもはっきりと表示されている．これは，高速車線ではいわゆる小隊のように運転する（車間距離が短い状態で運転する）ことを可能にしているためである．

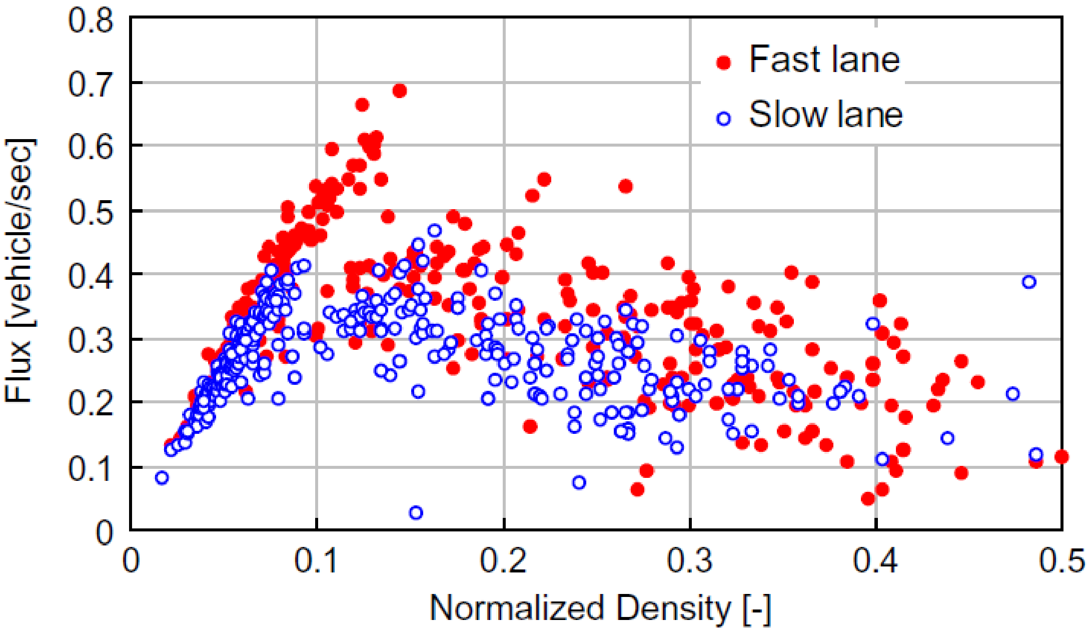


図 5-3　横軸に各車線密度を、縦軸にフラックスを記載した基本図．閉じた赤色および開いた青色のデータ点は，それぞれ高速車線および低速車線のデータを示す．

図 5-4 は，車線ごとの速度と密度との間の関係を示す．両方のプロットは散在しているが，高速車線の速度は一貫して低速車線の速度よりも速いことがわかる．高速および低速車線の速度差が明らかに認められ，図 5-3 からもわかるように，その密度はメタ安定相から混雑相への相変移する密度と一致することが明らかである．図 5-3 および図 5-4 において，横軸はそれぞれ 2 つの車線の各密度（以下，局所密度）である．興味深い点の 1 つは，低速および高速車線の局所密度の平均（以下，全体密度）を横軸として取った場合の速度との関係であり，その結果を図 5-5 に示す．図 5-5 の横軸は平均正規化密度とも呼ば

れる．図 5-5 にて、同じ瞬間における低速車線速度と高速車線速度の両方が同じ密度値でプロットすることができる．これが図 5-4 の ρ=0.1 付近で観測された，2 つの車線のそれぞれについて一貫して現れる速度差の原因である．これは，高速車線と同時に低速車線に速度差が生じることを意味する．図 5-4 と図 5-5 から， ρ=0.5 付近での平均速度が約 10km / h と小さすぎるように思えるかもしれないが，乗り物は一般的に，高速道路での先行車との車間距離が一般道のそれよりも長くなる傾向があることから、特異なデータではないと考える。

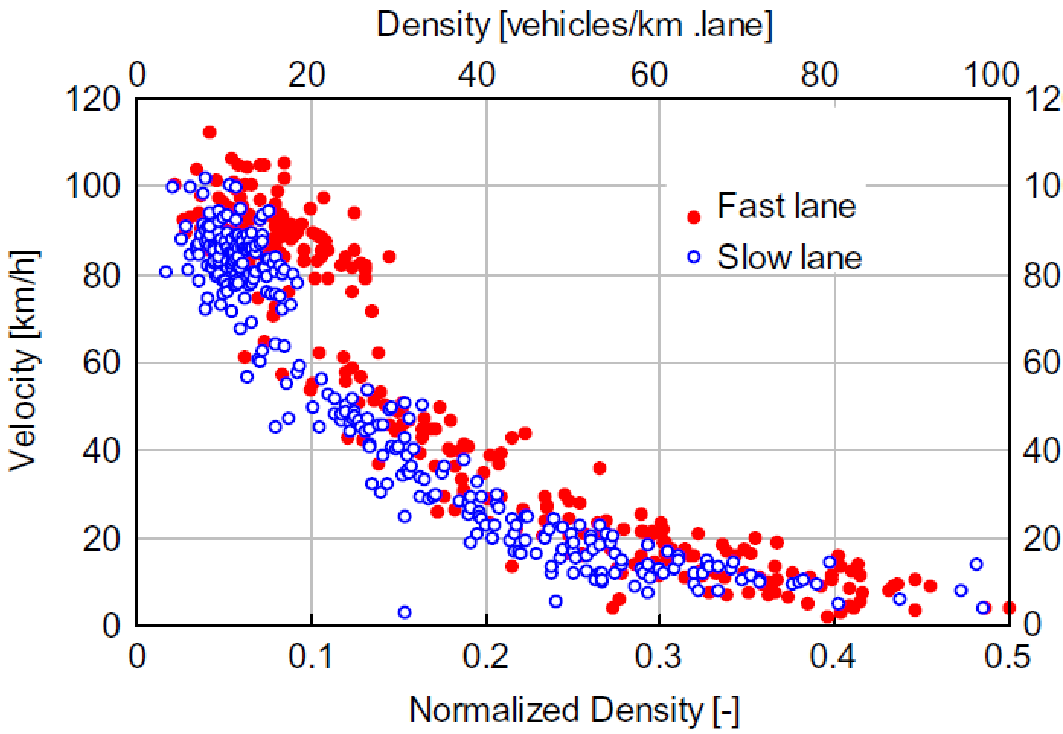


図 5-4 速度[m/s]と規格化密度[m / m]の関係図．横軸は，局所密度を示す．閉じた赤色および開いた青色のデータ点は，それぞれ高速車線および低速車線のデータを示す．

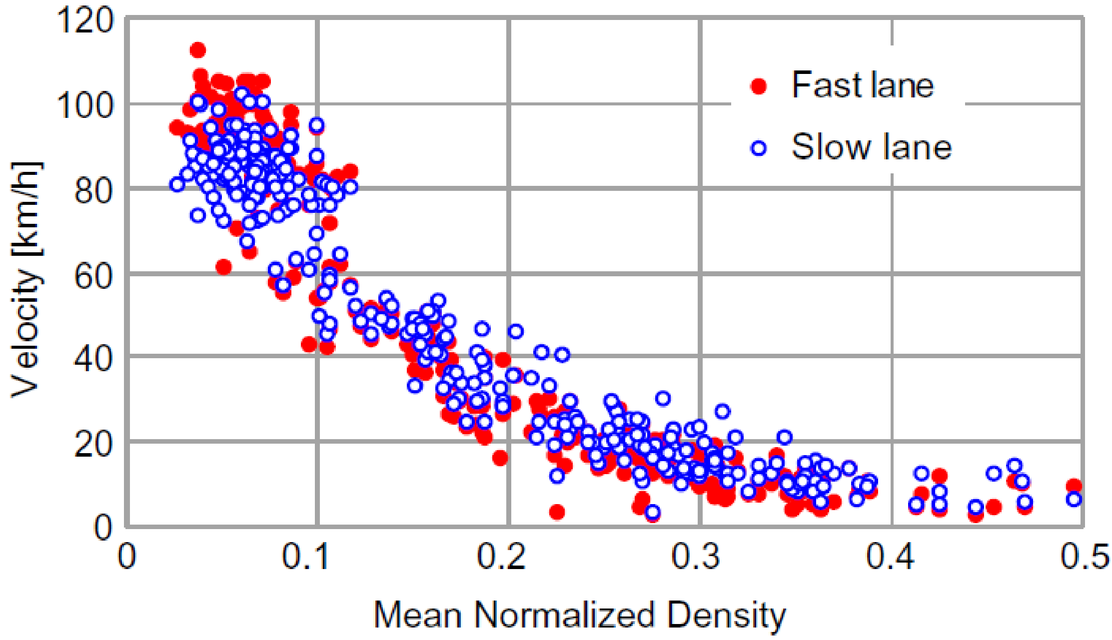


図 5-5 速度[m / s] - 平均規格化密度[m / m]の関係図．平均規格化密度（全体密度）は，低速および高速車線の密度を平均して算出する．閉じた赤色および開いた青色のデータ点は，それぞれ高速車線および低速車線のデータを示す．

図 5-6 は，車線使用率と実際の物理的次元[車両数/ km]で表される全体密度と二次横軸としての平均正規化密度との関係を示している．車線使用率は大きければ低速車線を走行している割合が増え、1 で 100%の車両が低速車線を走行していることを意味する。傾向として，全体密度が低い（データポイントが 0.05 未満の地域にも散在している範囲）に限り，多くの車両が低速車線に留まり，密度が高まると，低速車線より高速車線を走行する確率が高くなる．この観察結果より，すべての車両が最大速度で運転されている限り，低速車線から高速車線に車線を変更するインセンティブがないこと，また高密度での流れ場では頻繁な車線変更を許さず，高速車線にとどまることの利点があることがいえる．

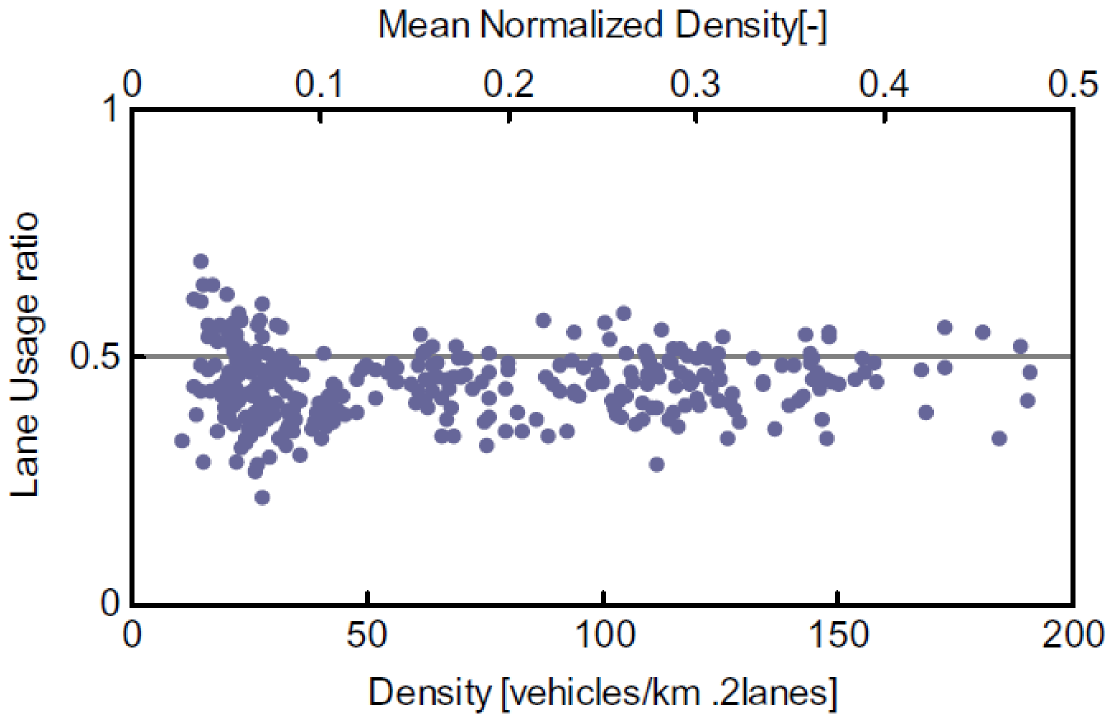


図 5-6 車線使用率と全体密度の関係図．縦軸は単位道路長（1km）あたりの低速車線にいる車両数の割合を示す．

図 5-7 は，車線変更率と平均正規化密度[m / m]との関係を示している．車線変更率は，制御空間内の 1 分間隔ごとに行われる実際の車線変更回数と，平均正規化密度で表されるイベントの数との比として定義する．「率」とは表現するものの，値そのものは 1 を超えることがある．これは，制御空間内で 1 分に 2 回車線変更が可能であるためである．元のデータは非常にばらつきがあるため，平均正規化密度 0.02 増分ごとに含まれるすべてのデータの平均を取った．データポイントのサイズおよび付随する値は，各密度域で観察される車線変更イベントの総数を示す．たとえば、密度 0.08～0.10 で観測された場面が 10 回あり、そのうち 4 回車線変更を行ったとすると、車線変更率は 0.4 となり、データポイントに付随する値は 4 となる。傾向として車線変更率は平均正規化密度が低下するにつれて単調に増加することがわかる．極密度域に属するデータポイントは観察されていない．車両がごく少数しか存在しない状況下では車線変更に対するインセンティブを持たないことが予想されるため，データポイントとして存在しないと言える．赤い点線のボックスで表示したデータポイントは明らかなスパイクとして存在するが，車線変更回数が 16 回と、決して少なくない値であるため、一概に無視は出来ないが、この要因はさらに検討を進める必要がある。

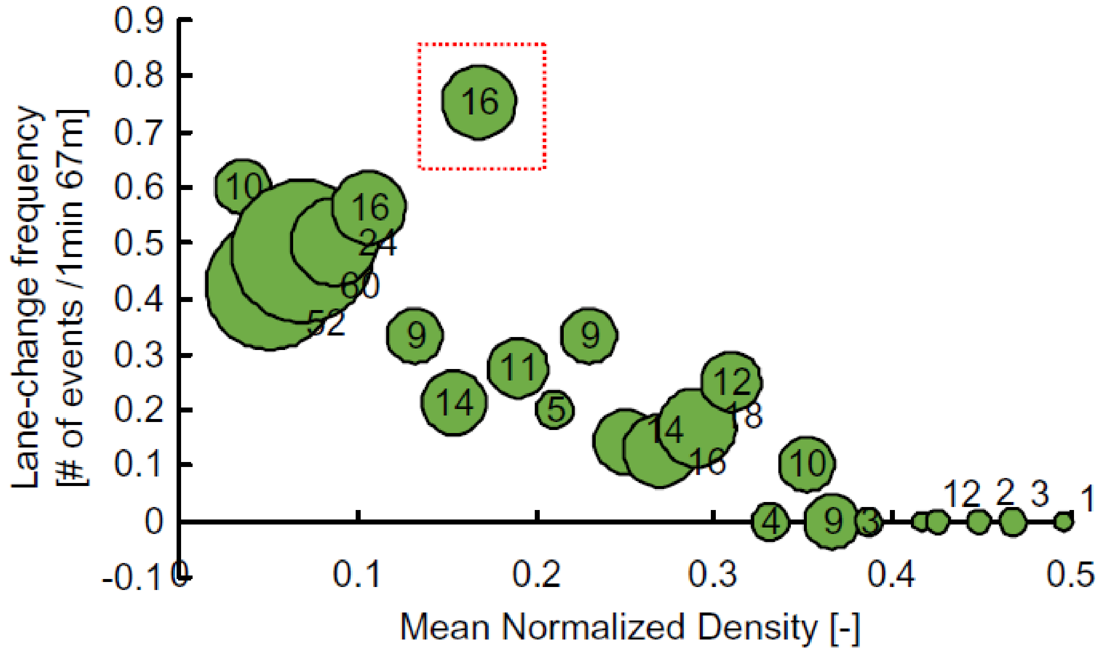


図 5-7 車線変更頻度と平均正規化密度[m / m]の関係図．各プロットは，平均正規化密度の 0.02 ごとに含まれるすべてのデータにわたる平均を表す．データポイントのサイズおよび付随する値は，各密度域で観察される車線変更回数を示す．

図 5-7 で観察された高車線変更率に対応する平均正規化密度は，$\rho = 0.1$ の直前に発生し，これは図 5-5 に関連して説明した速度差をもたらす平均正規化密度と一致する．これは，頻繁な車線変更を実行することによって車両が高速を維持しようとしているが，混雑状態への相転移により大きな速度低下が避けられないという可能性のあるシナリオの 1 つを意味する．さらに，図 5-6 に関連して，比較的大部分の車両が高速車線で運転されている偏った状態が，この特定の密度（$\rho = 0.1$ の直前）のまわりで発生している．これはまた，高速車線を走行している車両の速度が低下して渋滞を伴う平衡状態になることを意味する．

5.4 結論

2 本の車線から成り交差点も信号もない都市高速道路で観測された現場計測データを得ることにより，そのデータから基本図，速度―密度関係図，車線利用率 – 密度関係図，車線変更率―密度関係図を得た．これは，セルオートマトンなどのミクロモデルの検証に役立つことが期待される．

速度低下は混雑した交通状態への相転移に対応して一貫して観測される．また，高速車線側へ偏った状態は，速度低下が観測された直前の密度で発生する高い車線変更率により，平衡状態へ速やかに回復されることが分かった．これは，車両が車線変更によって高速を維持しようと試みるが，混雑相への移行を伴う速度低下に遭遇すると必然的に失敗することを示している．

参考文献

1) S. Kukida, J. Tanimoto and A. Hagishima, Int. J. Mod. Phys. C 22, 1 (2011).

2) S. Tadaki, M. Kikuchi, M. Fukui, A. Nakayama, K. Nishinari, A. Shibata, Y. Sugiyama, T. Yoshida and S. Yukawa, New J. Phys. 15, 103034 (2013).

3) B. S. Kerner, The Physics of Tra±c: Empirical Freeway Pattern Features, Engineering Applications, and Theory (Springer, New York, 2004).

4) L. Neubert, L. Santen, A. Schadschneider and M. Schreckenberg, Phys. Rev. E 60, 6480 (1999).

5) H. Rehborn, S. Klenov and J. Palmer, Physica A 390, 4466 (2011).

6) K. Singh and B. Li, IEEE Transactions on Industrial Electronics 59, 4369 (2012).

7) A. Duret, S. Ahn and C. Buisson, Transport. Res. C 24, 157 (2012).

8) W. Lv, W.-G. Song, X.-D. Liu and J. Ma, Physica A 392, 1142 (2013).

9) B. S. Kerner, H. Rehborn, R.-P. Schafer, S. L. Klenopv, J. Palmer, S. Lorkowski and N. Witte, Physica A 392, 221 (2013).

10) A. Yamauchi, J. Tanimoto, A. Hagishima and H. Sagara, Phys. Rev. E 79, 036104 (2009).

11) M. Nakata, A. Yamauchi, J. Tanimoto and A. Hagishima, Physica A 389, 5353 (2010).

第 6 章　車線変更により励起される交通流動に潜在する数理ジレンマ構造の解明

6.1 緒言

第２章で紹介した交通流理論に基づき，本章では CA 法を用いて，２車線交通流をモデル化し，解析を行う．ここで，車線変更という行為にゲーム理論を導入し，車線変更を行なわず流れ場に沿って運転する者（強調），車線変更を行ない自分の利得の最大限を目指す者（裏切り）として定義する．これら車線変更を行なう・行わない者の存在比率を変更したときに，全体の流れ場としての利得，つまり交通流量へどのように影響するかについて検証する．

6.2 車線変更モデル

6.2.1 車両エージェントの進行方向に用いるモデル

車両エージェントの進行方向ダイナミクスには，2 章で述べた S-NFS モデルを基礎として，更に現実の交通を再現できるモデルである revised S-NFS モデルを適用する．[1]

速度決定の漸化式の前に，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．

$$if(g_i \geq G)$$

$$p_i = P_1 \qquad \cdots(6.1)$$

$$if(g_i < G)$$

$$p_i = P_2 \qquad \text{for} \quad v_i^{(0)} < v_{i+1}^{(0)} \qquad \cdots(6.2)$$

$$p_i = P_3 \qquad \text{for} \quad v_i^{(0)} = v_{i+1}^{(0)} \qquad \cdots(6.3)$$

$$p_i = P_4 \qquad \text{for} \quad v_i^{(0)} > v_{i+1}^{(0)} \qquad \cdots(6.4)$$

但し，g_i は自車と前方車両との車間距離，G はモデルパラメータである閾値，p_i は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．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，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．

revised 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”

$$v_i^{(1)} = \min\{V_{\max}, v_i^{(0)} + 1\} \qquad \cdots(6.5)$$

(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”

$$v_i^{(2)} = \min\{v_i^{(1)}, x_{i+S}^{t-1} - x_i^{t-1} - s_i\} \qquad \cdots(6.6)$$

(only if rand()≤q then Rule 2 is applied)

and (if rand()≤r then s_i=S else s_i=1).

Rule 3. “Perspective (Quick start)”

$$v_i^{(3)} = \min\{v_i^{(2)}, x_{i+S}^{t} - x_i^{t} - s_i\} \qquad \cdots(6.7)$$

Rule 4. “Random brake”

$$v_i^{(4)} = \max\{1, v_i^{(3)} - 1\} \qquad \cdots(6.8)$$

(if rand()<1−p_i then Rule 4 is applied).

Rule 5. “Avoid collision”

$$v_i^{(5)} = \min\{v_i^{(4)}, x_{i+1}^{t} - x_i^{t} - 1 + v_{i+1}^{(4)}\} \qquad \cdots(6.9)$$

Rule 6. “Moving forward”

$$x_i^{t+1} = x_i^{t} + v_i^{(5)} \qquad \cdots(6.10)$$

但し，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}は最高速度，s_iは見通し台数である．本論では各式についてパラレルアップデートを採用する.

6.2.2 車線変更モデル

車線変更モデルは前後直近車両との車間距離及び速度差を考慮したモデルを用いる. [2] 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；

$$gap_p^f \leq v_i^{(p)} - v_{i+1}^{(p)} \cap gap_n^f > v_i^{(p)} - v_{i+1}^{(n)} \qquad \cdots(6.11)$$

安全基準；

$$gap_n^b \geq v_{i-1}^{(n)} - v_i^{(p)} \qquad \cdots(6.12)$$

ここで gap_p^f は前方車両との車間距離 gap_n^f 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 P_{LC} で車線変更を行う．また，左右の車線に区別は無く対称として扱う．車線変更は各車両エージェントごとにランダムアップデートで適用する．

6.3 境界条件

境界条件は開放系境界条件・周期系境界条件の両条件下で解析を行う．それらの結果を比較し，車線変更が系に及ぼす影響について検証する．

6.3.1 S-NFS モデルの開放系境界条件の更新方法

S-NFS モデルにおける開放系境界条件の 1 時間ステップの処理は以下で規定される．[3]

（1）システムサイズを L とする（セル番号 $0,1,\ldots,L-2,L-1$）．

（2）システム左端にセル番号 $-(V_{\max}+S),\ldots,-1$ を用意する．システム中の最後尾の車の位置を x_i^t とすれば，初期速度 $V_{\max}$ の新規エージェントをセル番号 $x_i^t-(V_{\max}+S),\cdots,x_i^t-(V_{\max}+1)$ に各々確率 α で発生させる．これは，新規に登場する車両エージェントが速度 $V_{\max}$ でシステムに流入するための処理である．なお，新規生成エージェントの生成される位置がシステム内になる場合，プレ・システム内で生成することにする．

（3）システムの右端にセル番号 $L,\ldots,L+S-1$ を用意し，それぞれのセルに確率 $1-\beta$ で車を発生させる．このルールを排反事象として記述すると，システム右端隣接部から確率 β で車を流出させることを意味する．

（4）更なる右端にセル番号 $L+S,\ldots,L+2S-1$ を用意し，それぞれのセルに必ず車を発生させる．これは見通し効果適用のため S 台先の車が必ず存在する状況を作っておくための処理である．

（5）セル番号 $-(V_{\max}+S),\ldots,L+S-1$ に存在する車両に S-NFS モデルの更新ルールを適用する．ただし，スロースタート効果（式（5.6））はシステム内（$0 \le x_i^t \le L-1$）に存在する車両のみに適用する．

(6) プレ・システム，ポスト・システムに存在するすべての車両エージェント，すなわちセル番号$-(V_{\max}+S),\ldots,-1,L,\ldots,L+2S-1$に存在する車両をすべて削除する．

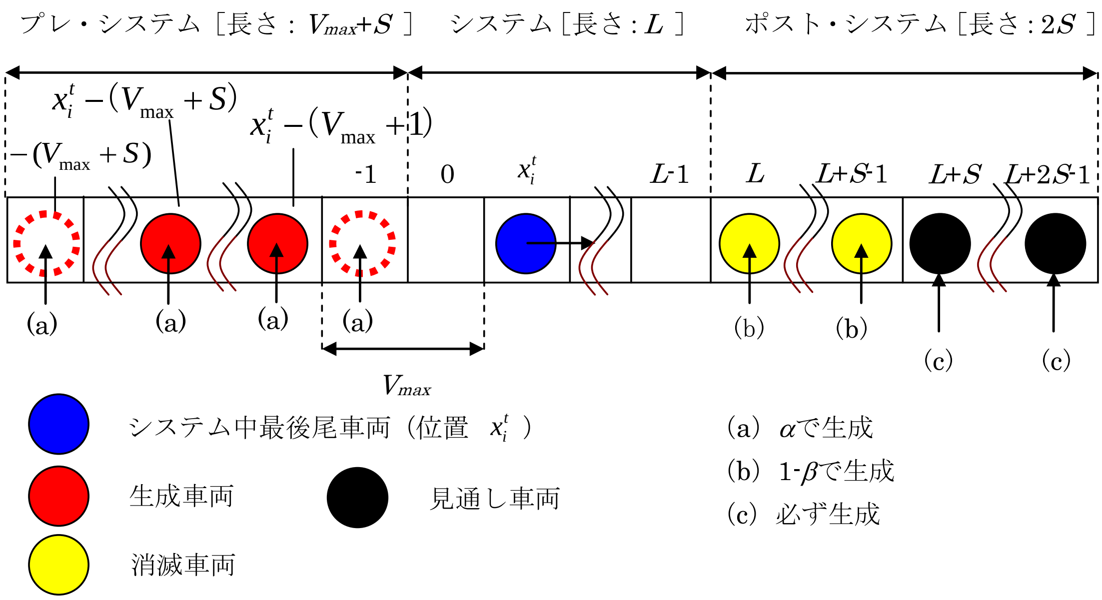


図 6-1：開放系境界条件での S–NFS モデルの扱い

6.4 戦略の定義

車両エージェントは常に車線変更をすることなく走る協調戦略（Cooperation，C 戦略）と必要に応じて車線変更を行いながら走行する裏切り戦略（Defect，D 戦略）のどちらかの戦略を持つと仮定する．D 戦略を持つエージェント（D-agents）は式（6.11）（6.12）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，フラックスは低下しても D-agents 自身の平均速度が高ければ，D 戦略を採るインセンティブが存在し，皆が C 戦略を採る（全員が車線変更することなく秩序だって走行する）という社会的互恵関係は崩壊するだろう．本論では一連の数値実験により，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．

6.5 開放系境界条件下での解析

6.5.1 実験条件

6.5.2 結果および考察

まず，2 車線系システムを開放系境界条件下で数値実験を行う．全エージェント中の C-agents の比（協調率 P_C）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．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 P_c で C 戦略を，1-P_c で D 戦略をとる．

(ii)D-agents は車線変更条件（式（6.11）（6.12））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．（式（6.1）～（6.4））

(iv)すべての車両の速度を計算する．（式（6.5）～（6.9））

(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．（式（6.10））

前出パラメータを q = 0.99，r = 0.99，S = 2，V_{max}= 5，P_1 = 0.999，P_2 = 0.99，P_3 = 0.98，P_4 = 0.01，G = 15，P_{LC}=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 P_c 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 ごとに流出した車両台数及び流出した車両エージェントの旅行時間から平均速度（＝システム長/旅行時間）を計量して，解析対象とした．アンサンブル回数は全領域において 100 回とした．社会利得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．

6.5.2 結果および考察

図 6-2 にはジレンマクラスごとに色分けした基本図を，図 6-3 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．

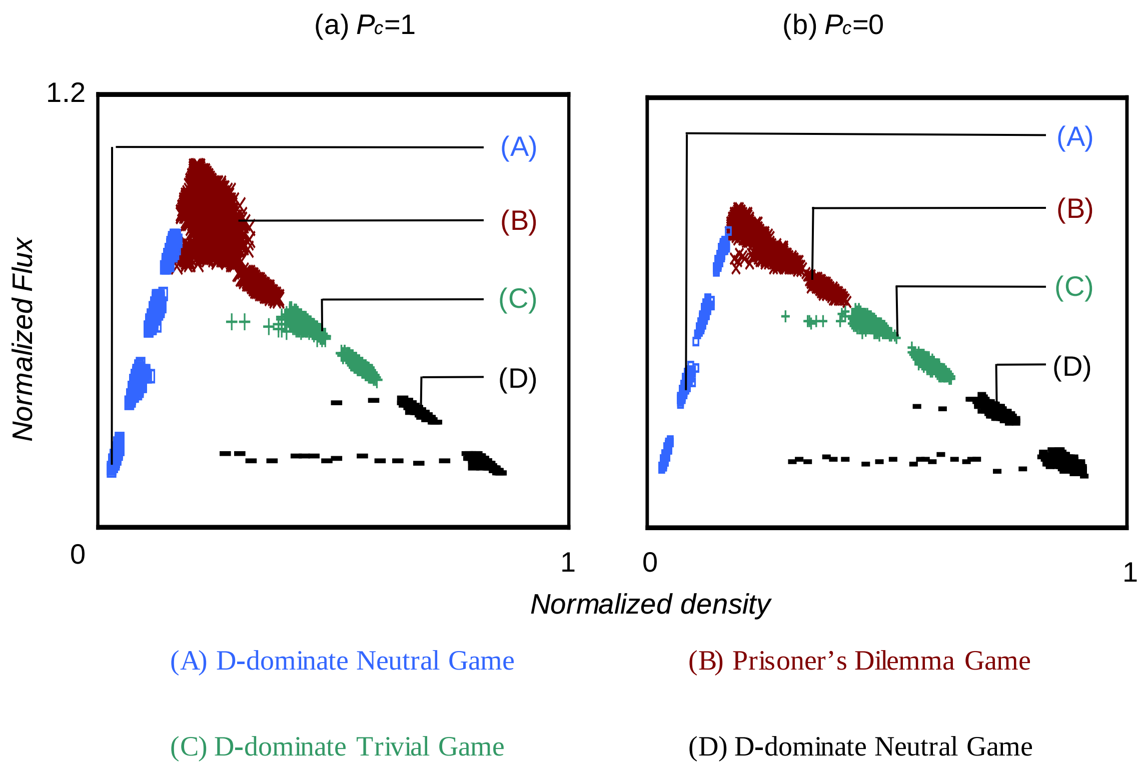


図 6–2：開放系境界条件による基本図．以下で示すジレンマクラスごとに色分けされている．(a)P_c=1, (b)P_c=0.

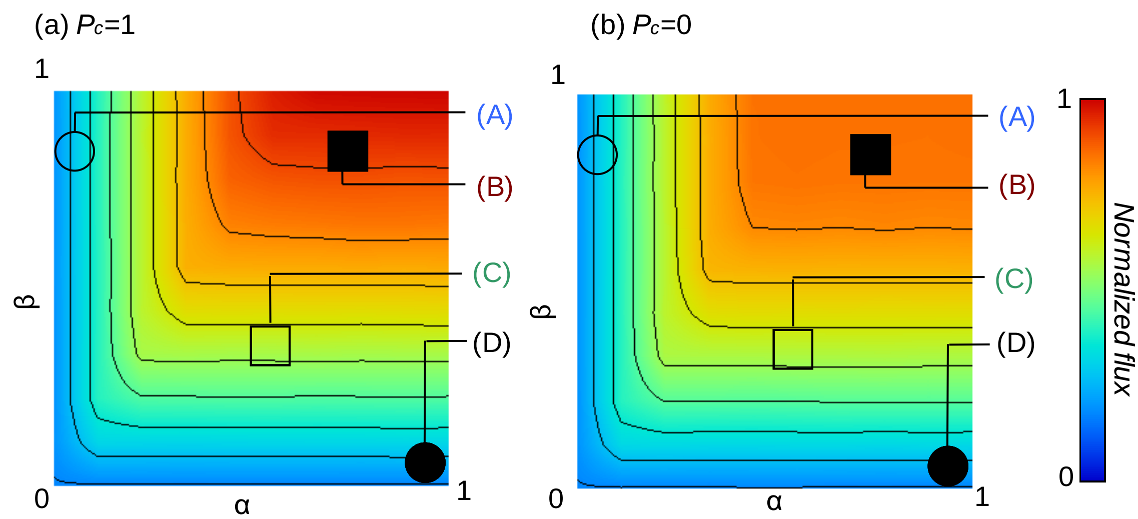


図 6–3：各 α 及び β におけるフラックスを示すコンター図．図中の 4 つのプロットは以下で示す異なるジレンマクラスの代表点を示している．(a)P_c=1, (b)P_c=0.

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．図 6-4〜7 にある α， β についての利得構造関数及び密度・速度分布関数を示した．利得構造関数は各

戦略の利得および社会利得と P_c の関係を示しており，この図は多人数ゲームの利得構造関数（Sect.3.2.5）と同様に読めばよい．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，これと社会利得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．また密度・速度分布関数は各 P_c における平均密度及び速度分布を示している．

図 6-4 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 の利得よりも僅かであるが高いため，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利得は P_c に依存しない．Yamauchi ら[1]や Nakata ら[2]は社会利得が 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，均衡点と社会利得の最大点が一致するゲームクラスであるため，本論ではこのような構造を Neutral Game と呼び Trivial Game と区別す

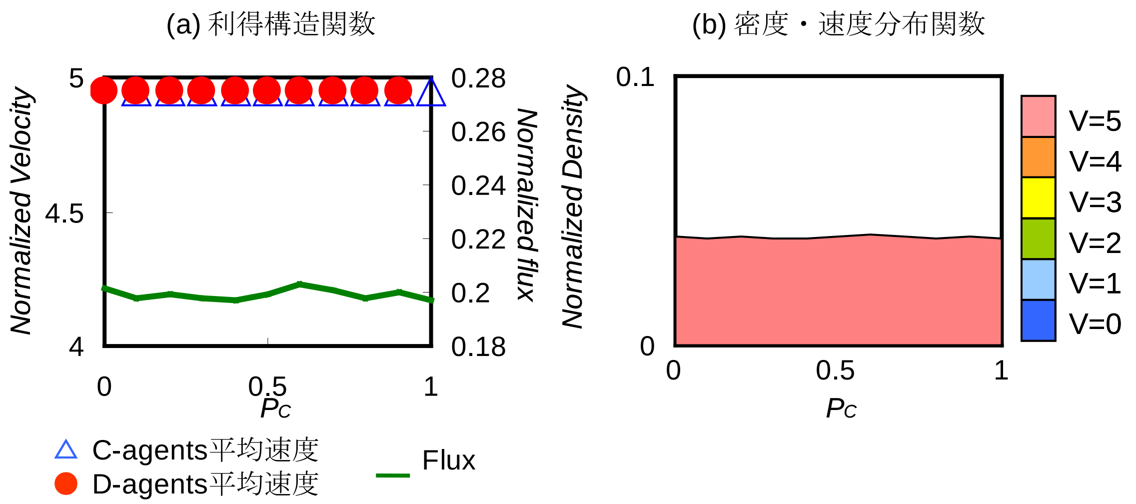


図 6–4：(A)α=0.1,β=0.9 における結果.

る．従って，この流れ場は D-dominate Neutral Game の構造を持つ．

図 6-5 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．一方社会利得は全員が 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．図 6-2 に観たように全運転者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，社会利得は押し下げられる．通常の多人数ゲームにおける PDG 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．しかし，同協調率で C と D 戦略の平均利得の大小を判定するには平均速度はよい指標になっており，他に代替え出来る適切な特性パラメータもないので本研究では平均速度を各戦

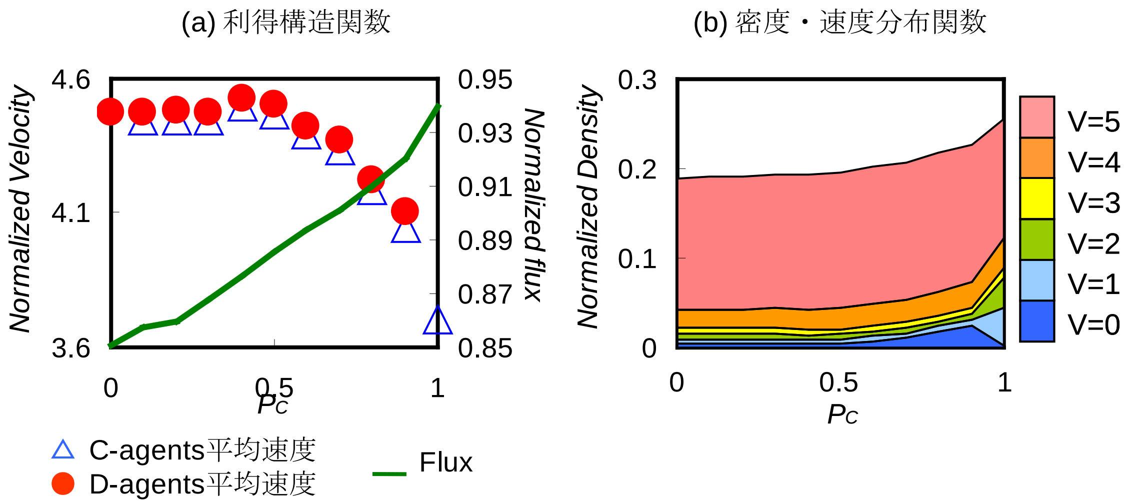


図 6–5：(B)α=0.8,β=0.9 における結果.

略の平均利得と定義した．

図 6-6 は，α が高く，β は図 6-5 よりは低く図 6-7 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．一方社会利得も全員が 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，図 6-5 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．

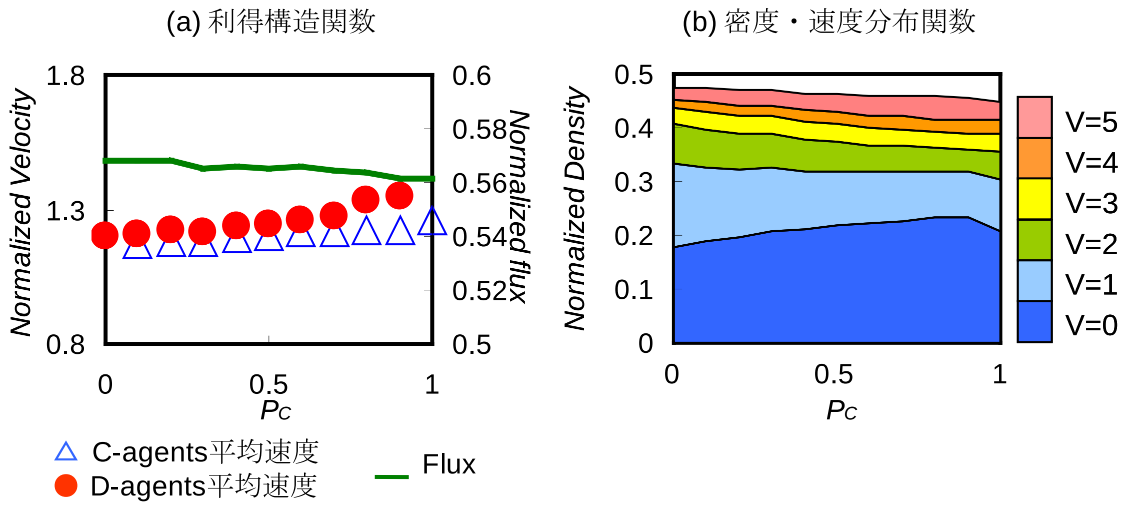


図 6–6：(C)α=0.6,β=0.4 における結果.

図 6-7 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．一方社会利得は 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．前記の図 7-5 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．

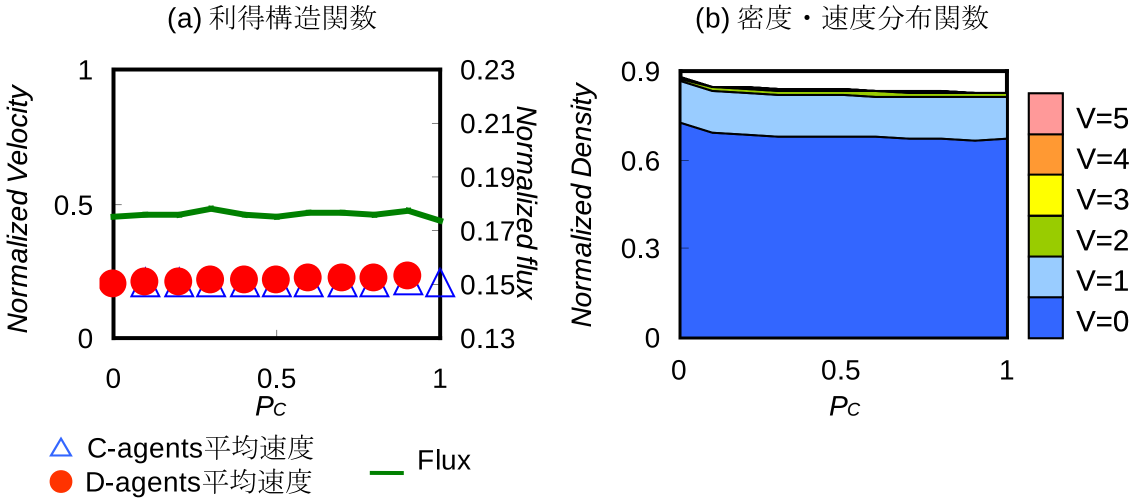


図 6–7：(D)α=1.0,β=0.1 における結果.

次にジレンマ強さについて考察する．ジレンマ強さ η は以下で定義される．

$$\eta = \frac{flux_{\max} - flux_{equ}}{flux_{\max}} \tag{6.13}$$

ここで $flux_{max}$ は社会最大利得，$flux_{equ}$ は均衡点における社会利得を示す．図 6-8 に各 α，β におけるジレンマ強さのコンター図を示し，更にジレンマクラス毎に区別した．α，β 共に大きな領域，つまり PDG を示す領域で強いジレンマを示した．この領域は自由走行相から渋滞相に転移する密度域で，不安定ながらも高いフラックスを示す領域である．そのような流れ場では，車線変更によって系が大きく乱されてしまう．

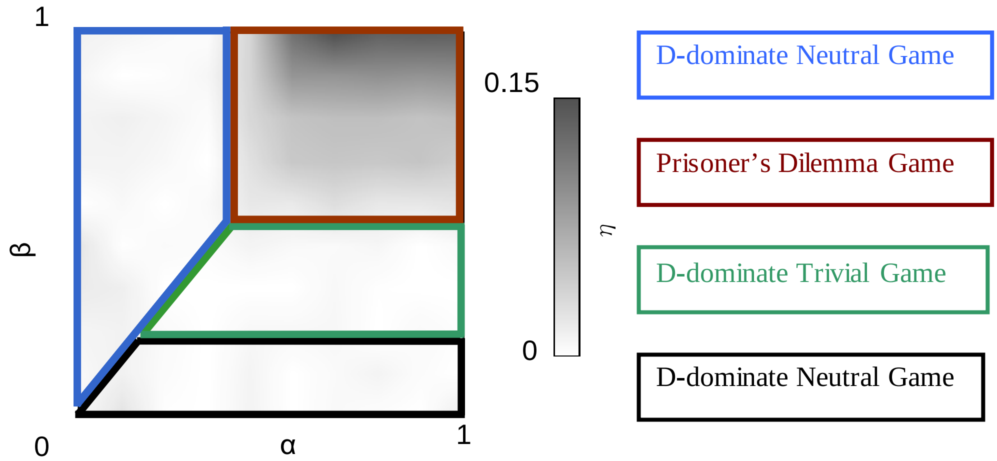


図 6–8：各 α，β におけるジレンマ強さのコンター図.

6.6 周期系境界条件下での解析

開放系境界条件下では，β<1 のとき流出部にボトルネックを形成してしまい，車線変更によるボトルネック効果そのものによってもたらされるジレンマ構造を確認する事が出来ない．そこで周期系境界条件下での解析により，車線変更によるボトルネック効果がもたらすジレンマ構造を解明する．

6.6.1 実験条件

2 車線系システムを周期系境界条件下で数値実験を行う．全エージェント中の C-agents の比（協調率 P_C）および系の車両エージェント台数 N_{size} を変化させながら流動状態を解析する．1 アンサンブル中のシステムのアップデートは以下の(i)～(v)，1 time step 中のシステムのアップデートは以下の(ii)～(v)である．

（i）車両はシステム内全域にランダムに N_{size} 台数生成される．その戦略は協調率 P_c で C 戦略を，1-P_c で D 戦略をとる．

(ii)D-agents は車線変更条件（式（6.11）（6.12））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．（式（6.1）～（6.4））

(iv)すべての車両の速度を計算する．（式（6.5）～（6.9））

(v）アップデートする．（式（6.10））

前出パラメータを q = 0.99，r = 0.99，S = 2，V_{max}= 5，　P_1 = 0.999，P_2 = 0.99，P_3 = 0.98，P_4 = 0.01，G = 15，P_{LC}=1.0，システム長 L=500 とする．

N_{size} を 50 から 950 まで 10 台ずつ変化させ，密度毎に P_c を 0 から 1 まで 0.1 ずつ変化させて流れ場解析を行う．ここで中密度域では，初期車両配置によって異なる相を形成する（例えばメタ安定相，渋滞相）ため，より詳細な解析が必要となる．したがって中密度域（$0.12 \le k \le 0.35$）に限り，N_{size} の変化幅を 1 台として解析を行う．

また十分に流れが発達するために必要な助走期間及び十分な測定結果を得るために必要な測定期間は流れ場の特性によって異なるため，以下のような場合分けをした．

$if(k \le 0.65)$　　助走期間 1000step，測定期間 500step

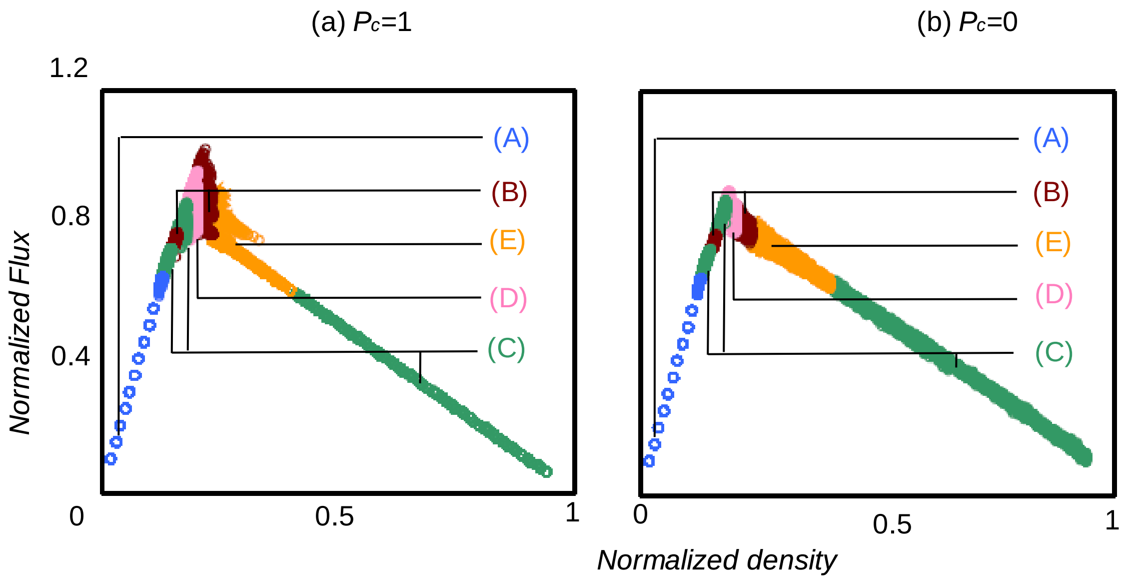
$if(0.65 < k \le 0.82)$　　助走期間 2500step，測定期間 2500step

$if(0.82 < k \le 0.95)$　　助走期間 5000step，測定期間 5000step

測定期間ごとに流出した車両台数及び流出した車両エージェントの旅行時間から平均速度（＝システム長/旅行時間）を計量して，解析対象とした．アンサンブル回数は全領域において 100 回とした．社会利得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．

6.6.2 結果および考察

図 6-9 にはジレンマクラスごとに色分けした基本図を示す．図 6-2 と比較すると，周期系境界条件下でも同様の流れ場を再現できているといえる．



(A) Neutral Game　　(B) Prisoner’s Dilemma Game

(C) D-dominate Trivial Game　　(D) D-dominate quasi-PD Game

(E) D-dominate quasi-Trivial Game

図 6–9：開放系境界条件による基本図．以下で示すジレンマクラスごとに色分けされている．(a)P_c=1, (b)P_c=0.

以下では，周期系境界条件下で観られたジレンマ構造について考察する．図 7-9~17 に特定の密度について利得構造関数及び密度・速度分布関数を示した．

図 6-10 では，密度 k≤0.128 の領域での利得構造を示す．すべての *Pc* において，C-agents の利得と D-agents の利得の差は殆ど無い．また社会利得も *Pc* に依存しない．この領域では密度が小さく車線変更をする必要が無いため D-agents は車線変更をすることなく走行すると考えられる．つまり C-agents と D-agents に区別が無い状態といえるので Neutral Game の構造を持つ．

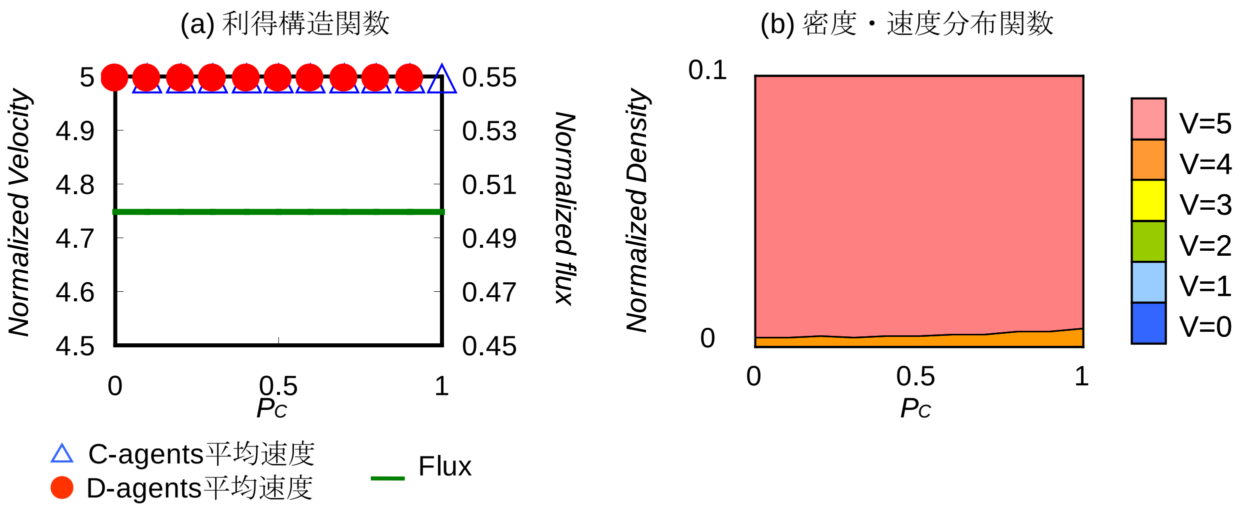


図 6–10：(A)密度 k=0.1 における結果.

図 6-11～13 では， $0.129 \le k \le 0.148$，$0.16 \le k \le 0.181$，$0.41 \le k \le 0.94$ の領域での利得構造を示す．すべての Pc 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．一方社会利得は P_c=0 で最大となる．従って D-dominate Trivial Game の構造を持つ．$0.129 \le k \le 0.148$ では，車線変更が社会利得を上げる効果を持つ．この理由は，先行車両がランダムブレーキによりまれに減速した場合に車線変更をすることで自身が減速することを回避することが出来るためであると考えられる．$0.16 \le k \le 0.181$ では先行車両がランダムブレーキによりまれに減速した場合に車線変更をすることで自身が減速することを回避することが出来るためであると考えられる．また Pc=1 での社会利得が大きく減少している．これは速度分布関数を見ると，Pc=1 における v≦3 の割合が大きい．これは車線変更を許容しないことにより，初期配置によって生じてしまった渋滞クラスターが解消されないことが利いているといえる．$0.41 \le k \le 0.94$ では，渋滞を形成しているため，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．

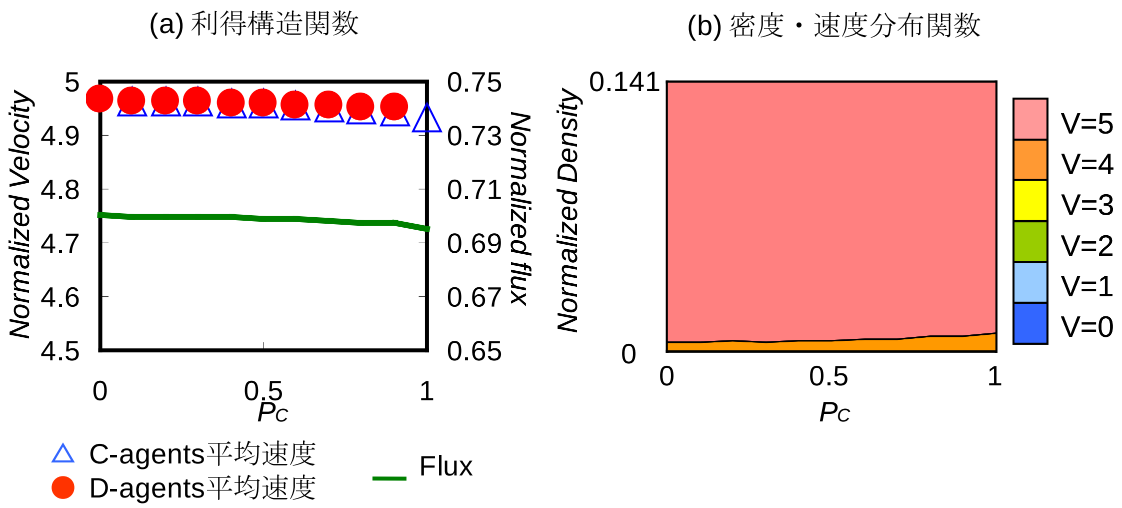


図 6–11：(C)密度 k=0.141 における結果.

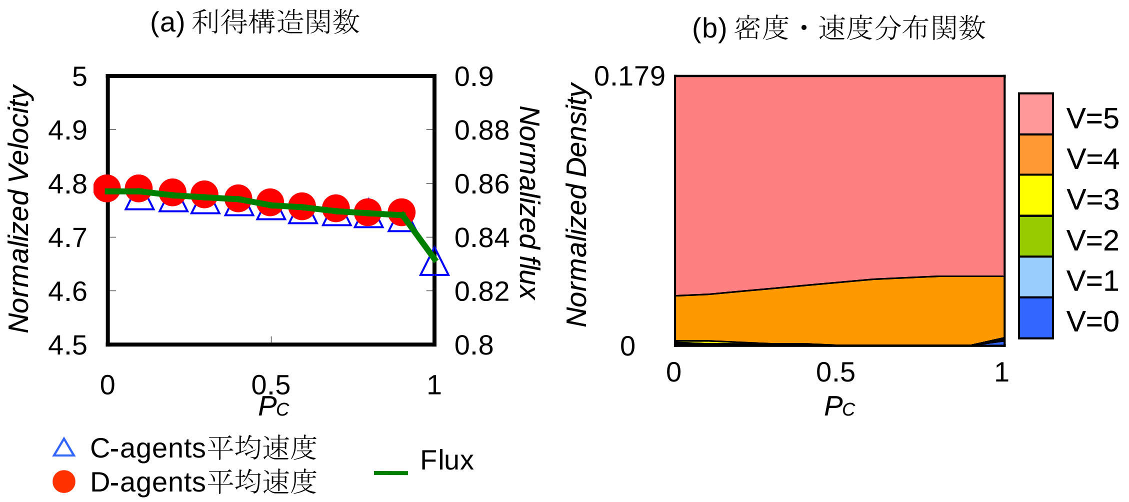


図 6–12：(C)密度 k=0.179 における結果.

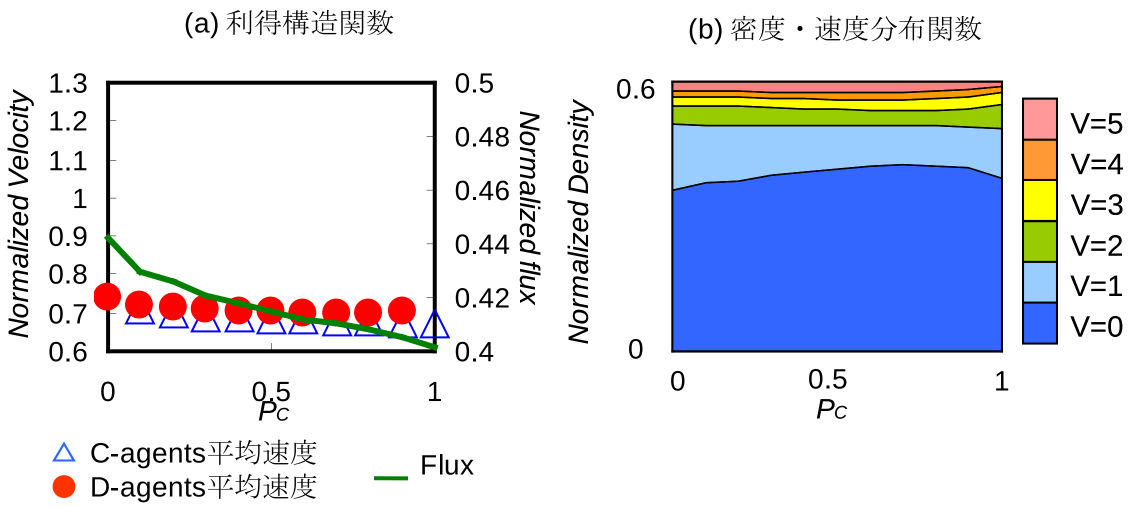


図 6–13：(C)密度 k=0.6 における結果.

図 6-14〜15 では，$0.149 \le k \le 0.159$，$0.203 \le k \le 0.234$ の領域での利得構造を示す．すべての Pc 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．一方社会利得は P_c=1 で最大となる．従って Prisoner’s Dilemma Game の構造を持つ．$0.149 \le k \le 0.159$ では，車線変更により自身の減速を回避するメリットよりも，その車線変更により後続車両にブレーキを踏ませるデメリットが上回っているためであると考えられる．$0.203 \le k \le 0.234$ では，Pc=1 の場合の社会利得が他と比べ非常に大きい．これは車線変更をしないことでメタ安定相を形成できるからと言える．

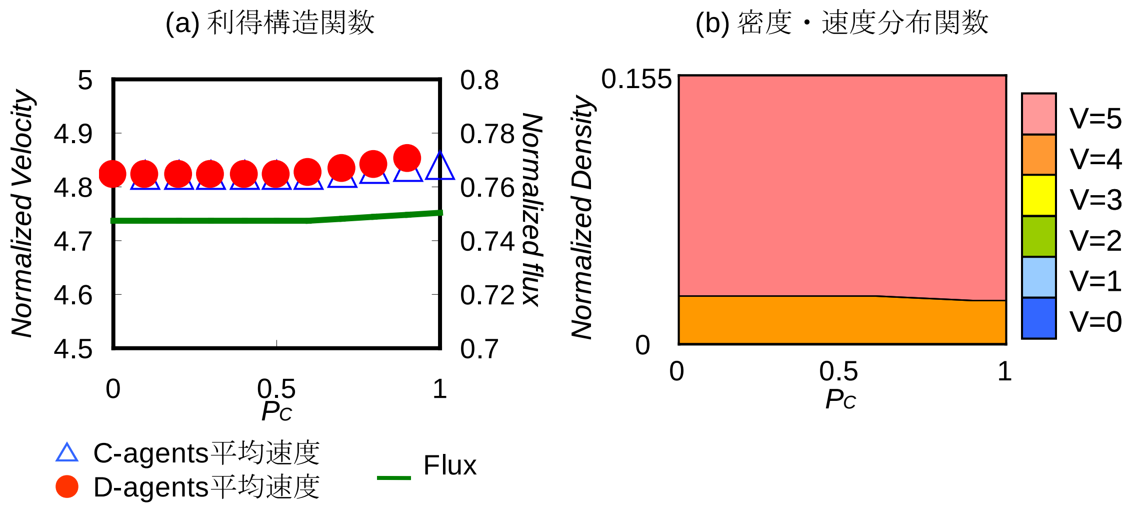


図 6–14：(B)密度 k=0.155 における結果.

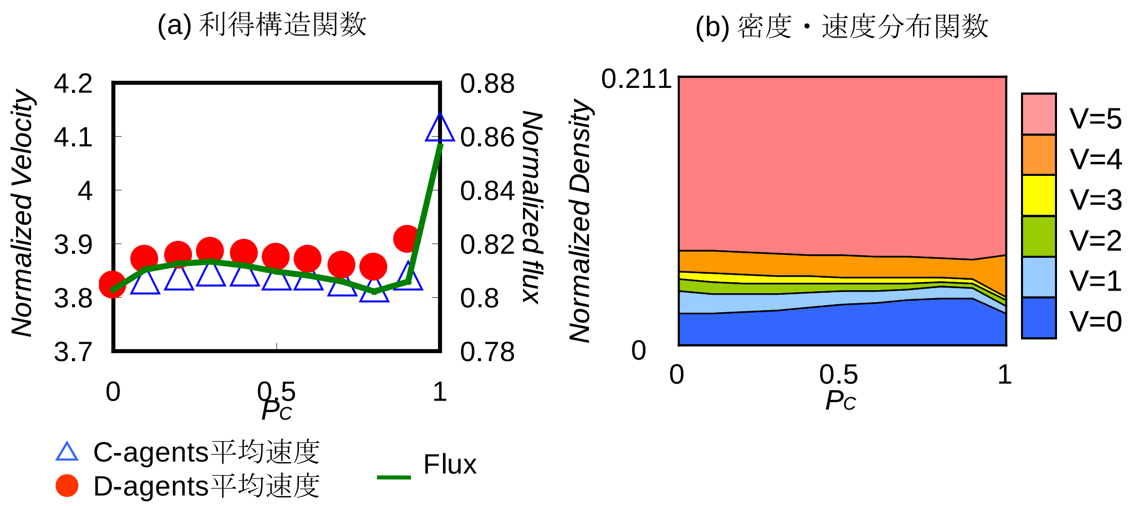


図 6–15：(B)密度 k=0.211 における結果.

図 6-16〜18 では，$0.182\le k\le 0.202$，$0.235\le k\le 0.265$，$0.266\le k\le 0.4$ の領域での利得構造を示す．すべての Pc 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．一方社会利得は密度域によって多少異なる．$0.182\le k\le 0.202$ では P_c=0.8 付近で最大となり，少しの D-agents が存在する事が社会的に高い利得を上げることが出来る．均衡点が P_c =0 であるのに対し，社会利得最大を示す P_c が 0.5 よりも大きいこのようなゲーム構造を，D-dominate quasi-Prisoner’s Dilemma Game（D-dominate qPDG）と呼ぶことにする．$0.235\le k\le 0.4$ では P_c=0.1 付近で最大となる．均衡点が P_c =0 であるのに対し，社会利得最大を示す P_c が 0.5 よりも小さいこのようなゲーム構造を，D-dominate quasi-Trivial Game（D-dominate qTG）と呼ぶことにする．また $0.235\le k\le 0.265$ では Pc=1 でも高い Flux を示している．

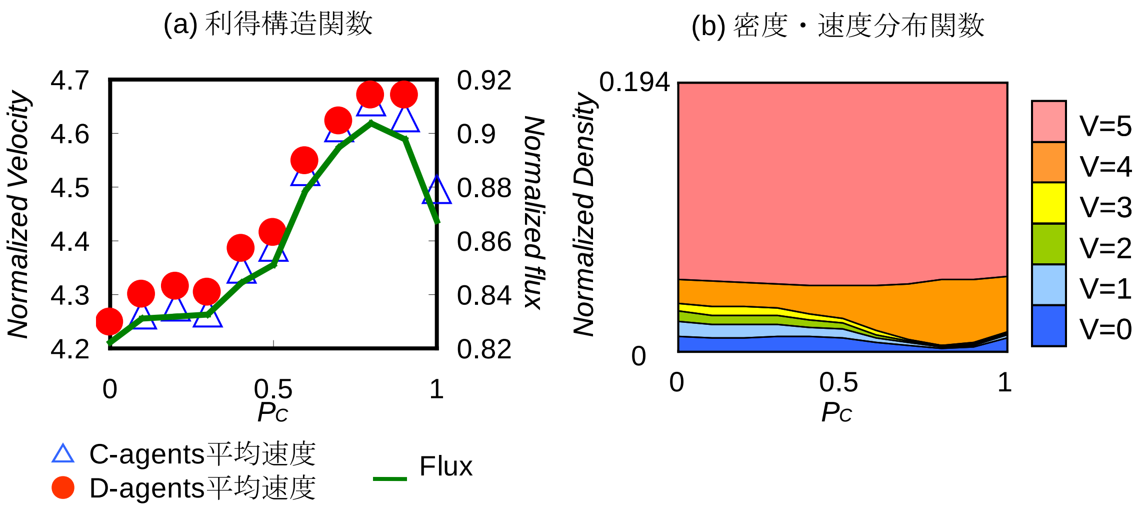


図 6–16：(D)密度 k=0.194 における結果.

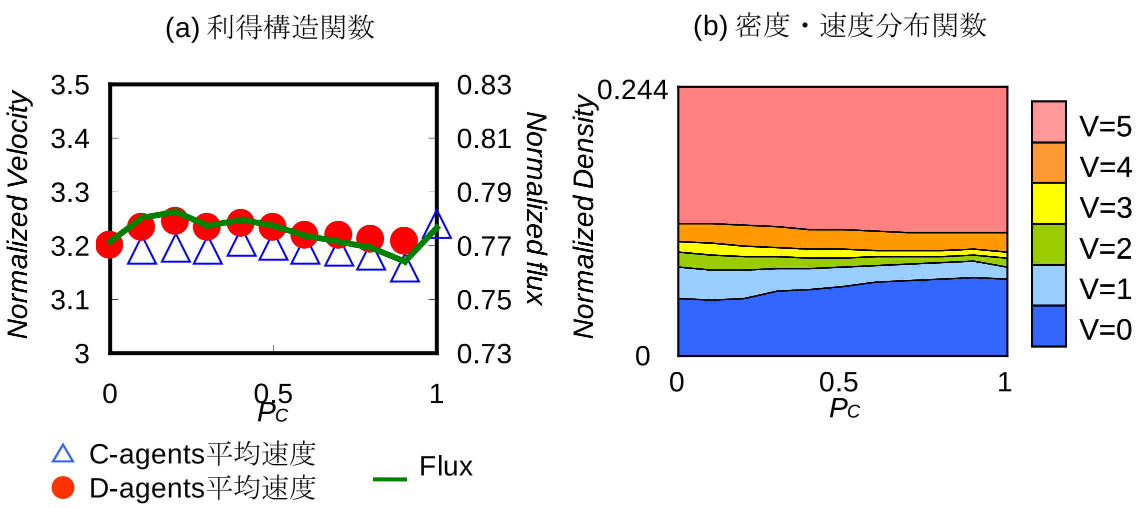


図 6–17：(E)密度 k=0.244 における結果.

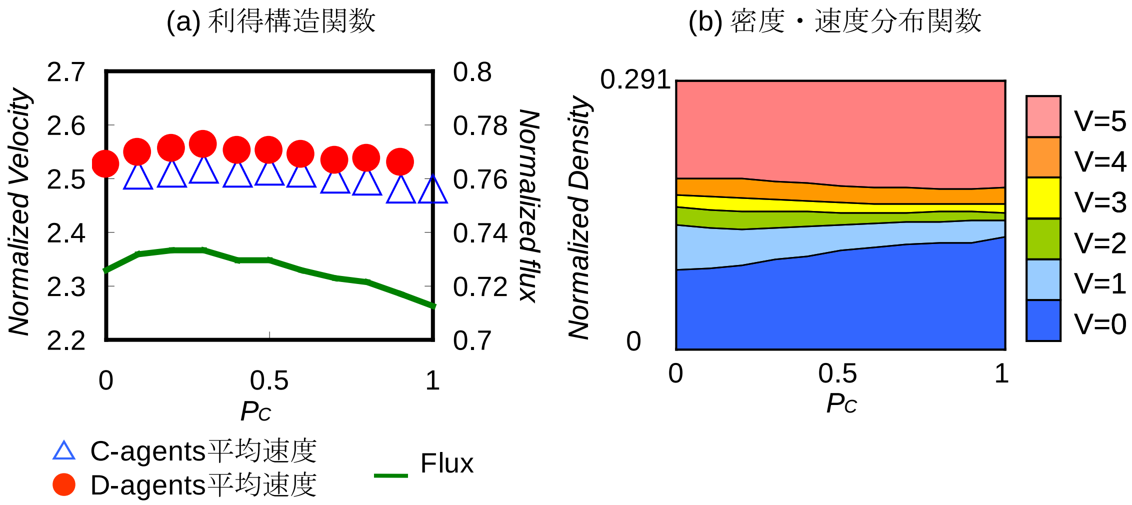


図 6–18：(E)密度 k=0.291 における結果.

これらの領域では図 6-9 から分かるように，フラックスのばらつきが見られる．そのためこれらの領域では，同密度で自由走行相や渋滞相が存在している．それらを平均化して利得構造関数を描いているため，特異な傾向が見えたといえる．これらについてもう少し細かく解析する．特にプロットのばらつきが顕著に見られたのは，図 6-15, 16, 17 の領域で *Pc*=1 のときである．図 6-19 に以下で述べる 3 つの密度域で見られた流動相を記した基本図を示す．

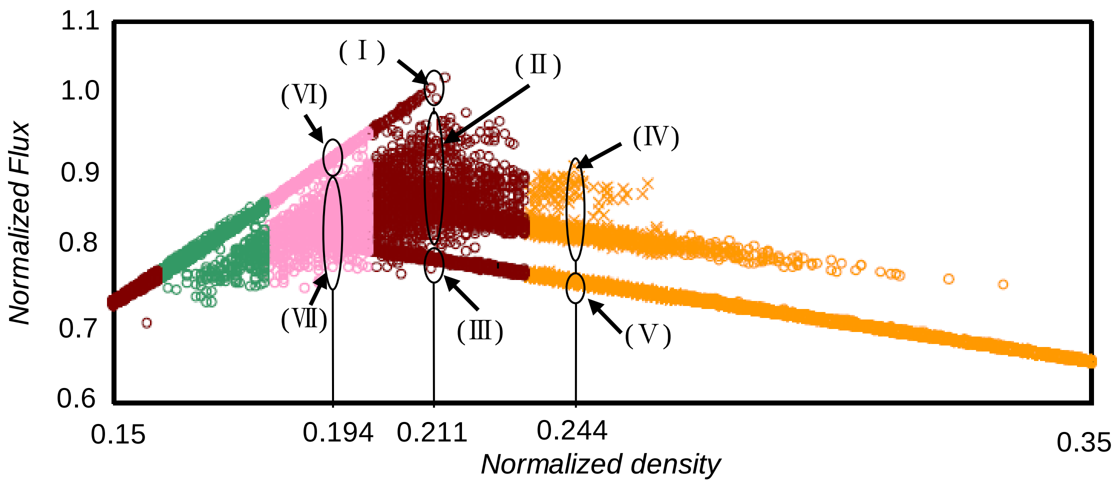


図 6-19：中密度域における基本図

まず図 6-15 の領域について考察する．図 6-20 (a)に *k*=0. 211, *Pc*=1 におけるフラックスの解析データを降べきの順に並べた図を示す．フラックスがほぼ一定のプロットは同様の流動相による結果であるといえるから，この密度では大きく 3 つの流動様相を形成していることがわかる．流動相ごとに利得構造関数を描き，図 6-20(b)に示した．このとき，

あるひとつの初期状態に対し全ての協調率で解析を行った．比較的高いフラックスを示す(Ⅰ)(Ⅱ)は PD のゲーム構造を示し，（Ⅲ）は図 6-18 と同様の D-dominate qTG の構造を示した．更に図 6-20(c)に各流動相それぞれの 2 車線の時空図を示す．この密度域では，初期状態に渋滞クラスターを形成しなければ，高いフラックスを維持することが出来るが，車線変更による擾乱が加わると，途端に渋滞クラスターを形成してしまう．一方初期状態に渋滞クラスターを形成してしまった場合には，車線変更による擾乱が加わる場合よりも低いフラックスとなってしまう．

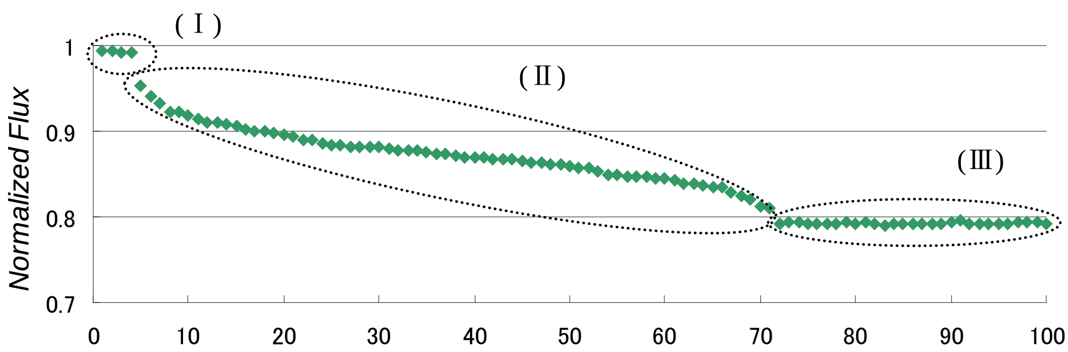


図 6–20(a)：k=0.211, Pc=1 における解析データ（100 プロット）

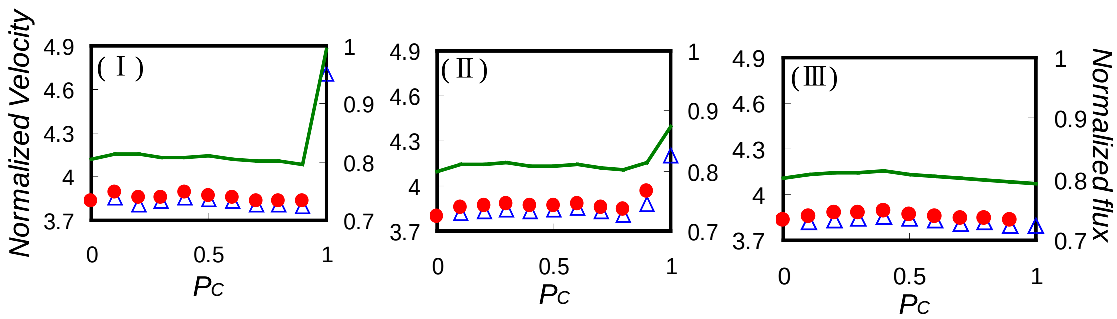


図 6–20(b)：k=0.211,各流動相の利得構造関数

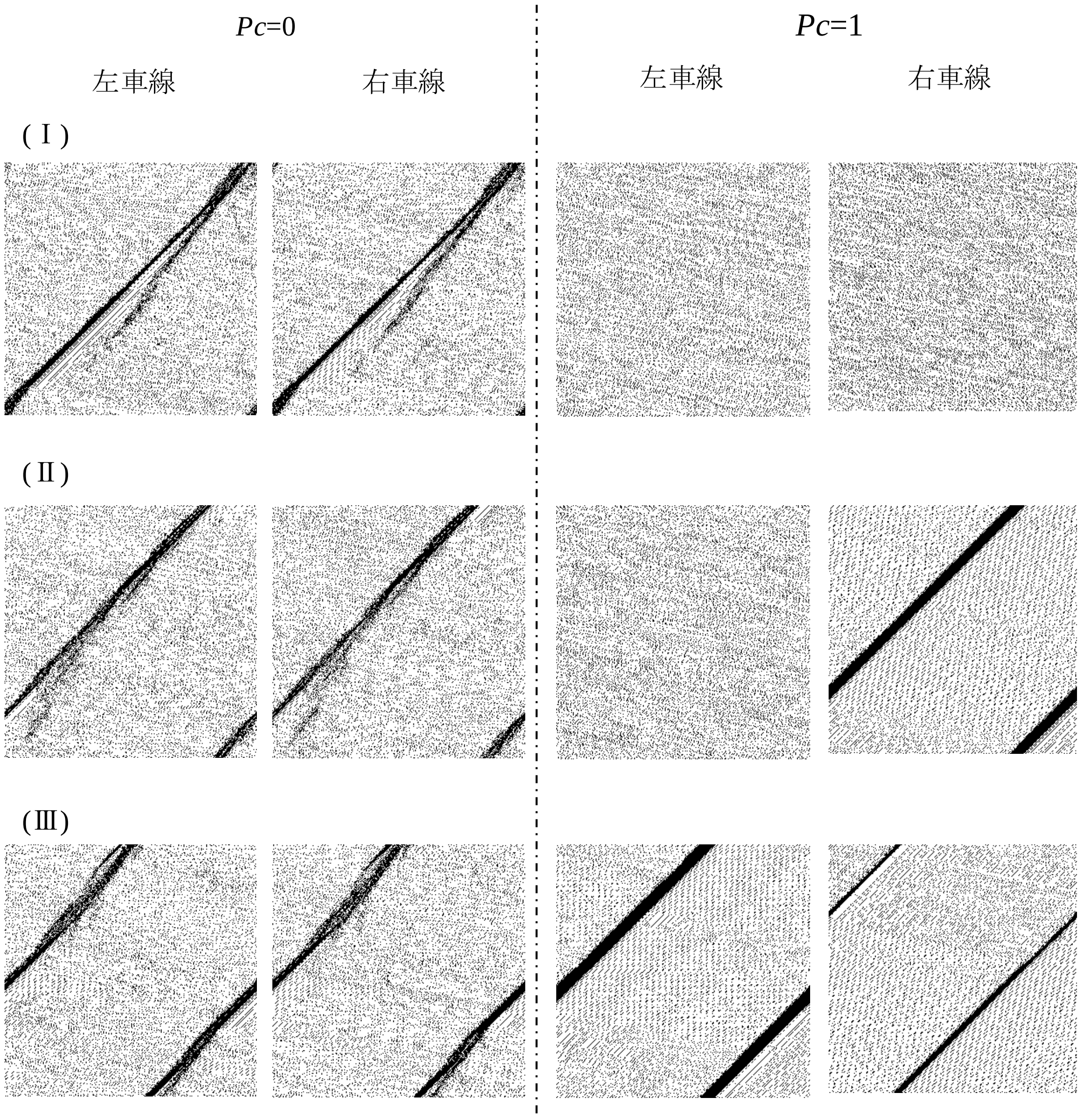


図 6–20(c)：各流動相の時空図

次に図 6-17 の領域について考察する．図 6-21(a)に k=0.244，Pc=1 におけるフラックスの解析データを降べきの順に並べた図を示す．この密度では大きく 2 つの流動様相を形成していることがわかる．流動相ごとの利得構造関数を図 6-21(b)に示した．このとき，あるひとつの初期状態に対し全ての協調率で解析を行った．比較的高いフラックスを示す(Ⅳ)は PD のゲーム構造を示し，（Ⅴ）は図 6-18 と同様の D-dominate qTG の利得構造を示した．このことからこの領域で見られた N 型の利得構造は，PD と D-dominate qTG から構成されていることが分かる．

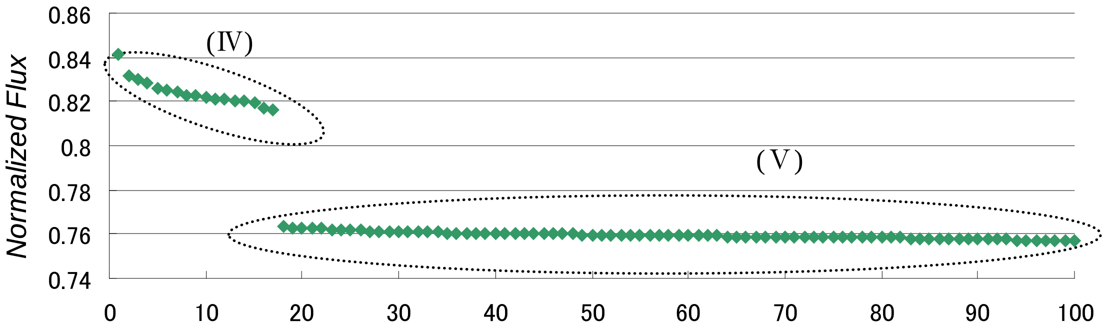


図 6–21(a)：*k*=0.244, *Pc*=1 における解析データ（100 プロット）

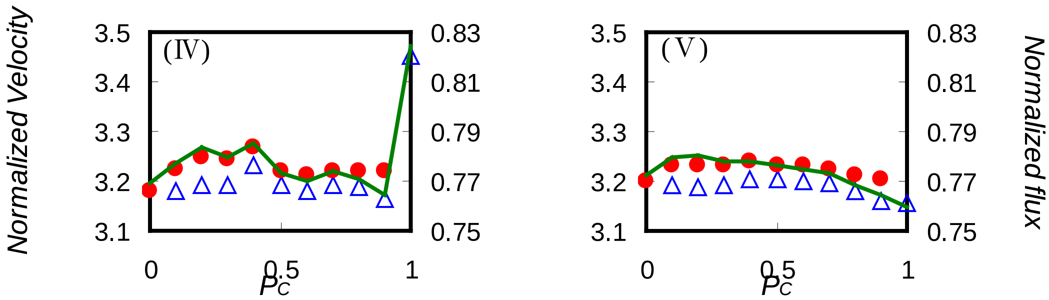


図 6–21(b)：*k*=0.244, 各流動相の利得構造関数

最後に，図 6-16 の領域について考察する．図 6-22(a)に *k*=0.194, *Pc*=1 におけるフラックスの解析データを降べきの順に並べた図を示す．この密度では大きく 2 つの流動様相を形成していることがわかる．流動相ごとの利得構造関数を図 6-22(b)に示した．比較的高いフラックスを示す(Ⅵ)は PD のゲーム構造を示し，（Ⅶ）は Pc=0.8 付近で最大利得を得る D-dominate qPDG 構造を示した．更に図 6-22(c)に *k*=0.194, *Pc*=0.9 におけるフラックスの解析データを降べきの順に並べた図，図 6-22(d)に各流動相それぞれの 2 車線の時空図を示す．時空図を見ると，わずかに車線変更をすることで渋滞クラスターを形成してしまう(Ⅵ)⇒(ⅶ)や，初期配置によって生じた渋滞クラスターを解消する(Ⅶ)⇒(ⅵ)のような現象が見られた．

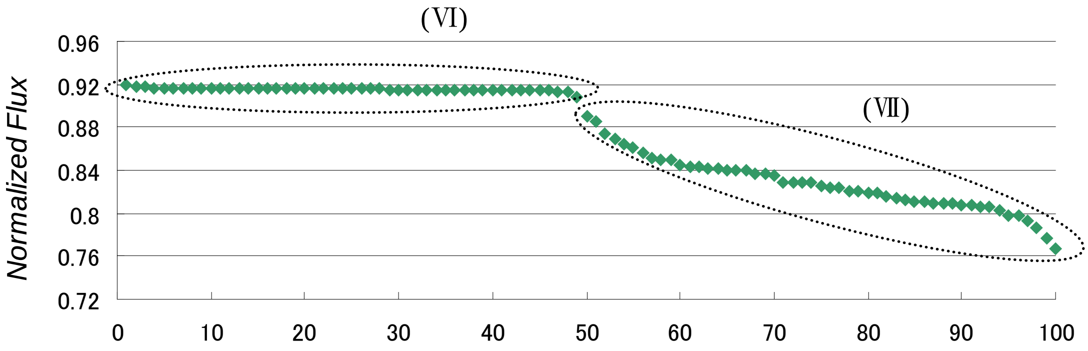


図 6–22(a)：*k*=0.194, *Pc*=1 における解析データ（100 プロット）

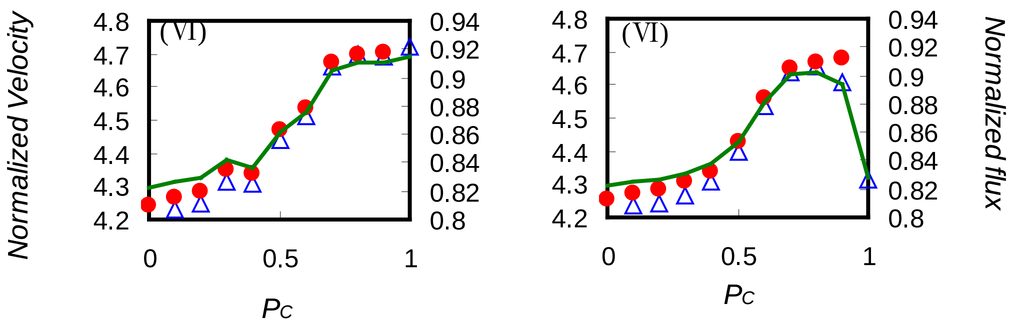


図 6–22(b)：*k*=0.194, 各流動相の利得構造関数

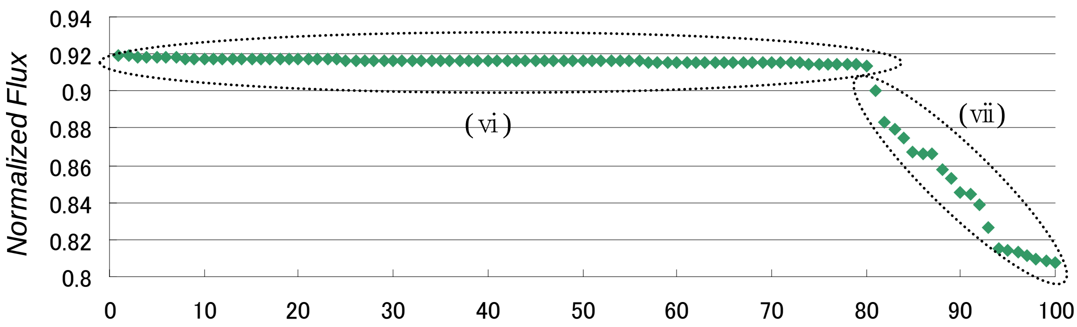


図 6–22(c)：*k*=0.194, *Pc*=1 における解析データ（100 プロット）

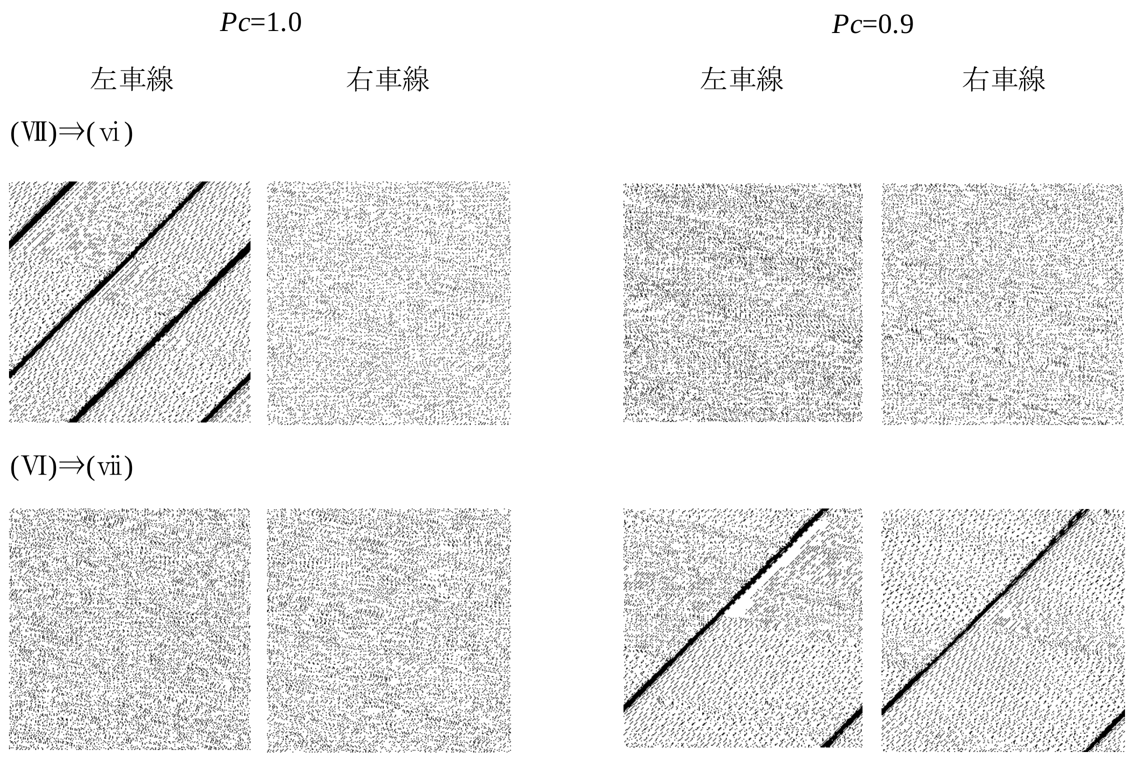


図 6–22(d)：各流動相の時空図

図 6-23 では，各密度に対するジレンマ強さ η を示す．基本図と比較すると，図 6-12, 16 の領域で大きな値を示している．ここはメタ安定相が形成される密度域に相当し，次いで高密度相を形成する図 6-17, 18 の領域で大きな値を示している．これは開放系条件下での解析結果と合致する．異なる点としては，F 相中にも弱いジレンマが見られた事である．

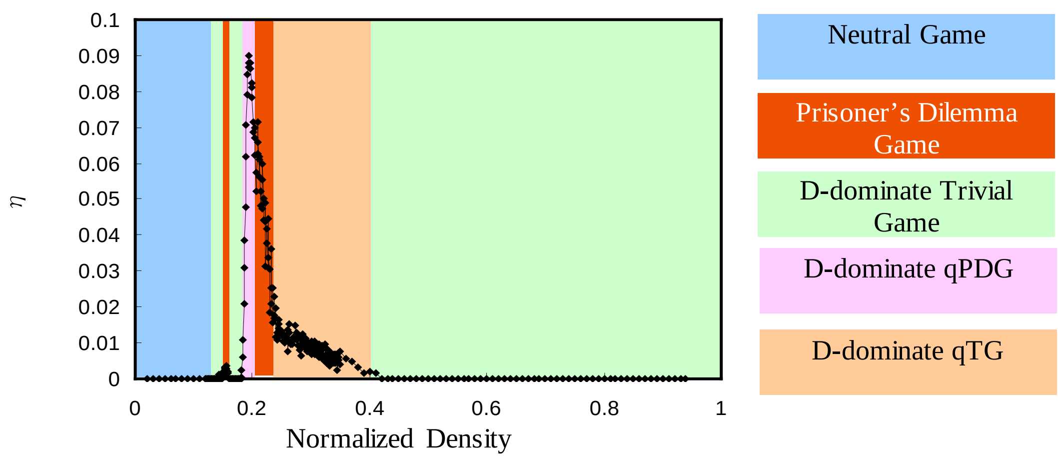


図 6–23：各密度におけるジレンマ強さ η .

6.7 境界条件による解析結果の比較

各境界条件下で観られたジレンマ構造を以下にまとめる．

- 開放系境界条件

D-dominate Neutral Game

Prisoner’s Dilemma Game

D-dominate Trivial Game

全領域で D-dominate であった．これは free flow であったとしても流出部のボトルネックを車線変更によりうまく回避することができるため利得差が生じたと考えられる．

- 周期系境界条件

Neutral Game

Prisoner’s Dilemma Game

D-dominate Trivial Game

D-dominate quasi-PDG

D-dominate quasi-TG

社会利得最大となる Pc が 0 か 1 でないジレンマ構造が見られた．これより車線変更が系に及ぼす影響は，同様の密度域・流動相においてもその頻度によって大きく異なると考えられる．特に高いフラックスを示す密度域では最も強く影響する．

参考文献

1) Kokubo.S.; Tanimoto.J.; Hagishima.A.; A new Cellular Automata Model including a decelerating damping effect to reproduce Kerner's three-phase theory, Physica A 390(4), 561-568, 2011.
2) Kukida.S.; Tanimoto.J.; Hagishima.A.; Analysis of the influence of lane changing on traffic-flow dynamics based on the cellular automaton model, International Journal of Modern Physics C 22(3), 1-11,2011.
3) Sakai.S, Nishinari.K, Iida.S; A new stochastic cellular automaton model on traffic flow and jamming phase transition, Journal of Physics A 39, 15327-15339, 2006.
4) 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, #F036104,2009.

5) 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

第 7 章　総括結論

7.1 結論

本論では人間―環境―社会システムに内在するジレンマの事例として、交通流動中の車線変更の振る舞いにより励起される数理ジレンマ構造を解析するために記したものである。

第１章にて、昨今の環境問題は、異なるスケール間にて複雑に相互作用することで深刻化しており、物事のある一部分のみを切り取って考察するのではなく、人間―環境―社会システムという統合的なシステムと見なして考察する必要があり、それには複雑系化学と進化ゲームによる組み合わせによるアプローチが有効であることを説明した。それは交通渋滞にも当てはまると考え、本論では交通流としてマルチエージェントシュミレーションの手法を用い、進化ゲームの基礎であるゲーム理論を組み合わせ、車線変更という個人に利益のある行為を行なうことが、流れ場全体へ及ぼす影響について解析を行った。

第２章・第３章は既往文献を参考に作成したものであり、新たな知見は示していないが、第４章以降での報告を理解する上で必要な情報となる．第２章では、第４章から第６章で用いる交通流研究の理論について、主にマルチエージェントシュミレーションに関して説明した。第３章にて、第６章にて交通流の解析モデルに用いる、ゲーム理論の基礎について説明した。基本となる戦略の定義から、ジレンマ構造が発生する構造についても説明し、また交通流へ適用させたときの基本的な考え方についても述べた。

第４章では、第２章で紹介した代表的なマルチエージェントシュミレーションモデルである、FI モデルおよび QS モデルの厳密解の導出に関する報告を記した。ここでは、各モデルの特徴から自明である事象を基に、演繹により厳密解を導出する過程を述べている。

第５章では、実際の交通流動の観測データの収集・分析を行なった。交通流研究として流れ場をモデル化しシミュレーションによる考察を行なう上で、そのモデルの妥当性を評価するためには、実際の交通流動の観測データによりその妥当性を検証することが必要となる．ここでは，既往研究で十分なデータが収集されていなかった、基本図と，速度密度，車線使用率―密度，車線変更頻度―密度の関係を含む適切な妥当性検証データセットを収集した。まず基本図より、高速車線のほうが低速車線よりも高速で走行している状態が観測され、メタ安定相が顕著に観測された。また、同密度での平均密度での速度比較結果より、低密度域では同様に高速車線のほうが早い速度で流れていることが観測されたが、10%程度の密度域において、車線ごとの密度に対する平均速度は高速車線のほうが速い一方で、系全体の密度に対する車線ごとの平均速度はほぼ同じ数値であった。これは 10%程度の密度域において、それぞれの車線に密度差が生じている、つまり高速車線が 10%程度の密度のときは、系全体はそれよりも低く、高速車線に偏った密度バランスで、高速運転、つまりメタ安定相を形成し、一方で低速車線が 10%程度の場合、系全体はそれよりも密度

は高く、高速車線に偏った密度バランスで渋滞相を形成していることがわかる。これは車線利用率と密度の関係からも見て取れる。また、車線変更回数は密度に反比例しており、メタ安定相から相転移が起こる密度域にて、最大数となっている。これは実際に、車線変更を行なう動機が生まれる（車線変更したほうがより早く進めそう）環境が多く発生しうる流れ場となっており、またその影響で相転移（メタ安定相⇒渋滞相）が生じていることもわかる。この実測データからは、高速車線と低速車線の非対称性および密度と車線変更との相関がわかるデータが得られた。交通流モデルの妥当性評価をするにあたり、有意な知見を得たと言える。

第６章では２車線交通流をモデル化し、車線変更を行なうかどうかを戦略として定義し、その各戦略を持つエージェントの存在比率により、流れ場全体に及ぼす影響を考察した。車両の進行方向のモデルには、現実の流動特性をよく表す指標として挙げられるメタ安定相を再現でき、かつ３相交通流理論でいう F 相をも再現可能な、Revised S-NFS モデルを採用した。車線変更のモデルは、個人の利得が上がる、つまりより多く進むことができると判断した場合に行なうよう、自らの前方車線の状況と移り先の前方車両の状況を比較し、移り先のほうがより多く進むことができる場合に車線変更をする動機を持つという条件（インセンティブ条件）に、さらに後続車両からの追突の危険などが無いことを確認する条件（安全条件）を組み合わせることでモデル化した。このモデルを異なる境界条件下で解析を行ない、それぞれの流れ場で車線変更が及ぼす影響について解析を行なった。

まず開放系境界条件において、流入確率および流出確率を変化させて解析を行なった。結果として、全条件において、車線変更を行なう車両のほうが、行なわない車両よりも高い利得をあげる、D-dominate の構造を示した。このことから、開放系境界条件下では、社会全体が車線変更を行なう選択を選ぶ、つまり強調率０へ至る。一方で社会全体の利得を見ると、高流入確率、高流出確率の条件において、強調率１、つまり全員が車線変更を行なわない流れ場のほうが、高い利得を示す結果となった。この状態は所謂囚人のジレンマ構造となる。これは、流れ場がメタ安定相として高速かつ不十分な車間距離を保って高い流量を示しているなかで、車線変更を行なうことで流れ場に擾乱を招き、たちまち十体操へ転移してしまうことが原因と考えられる。

続いて、周期系境界条件下での解析では、下流側での境界において、流出時のボトルネックというものが発生しないため、車線変更による影響がより顕著に確認できたと考えられる。まず各戦略の利得からみると、低密度域を除き、開放系境界条件と同様、車線変更を行なう車両のほうが、行なわない車両よりも高い利得をあげる、D-dominate の構造を示した。このことから、周期系境界条件下では、社会全体が車線変更を行なう選択を選ぶ、

つまり強調率０へ至る。低密度域では利得に差が出ず、Nutral Game の構造を示した。これは、車両数が少なく、車線変更をするインセンティブ条件が満たされなかったため、D 戦略だろうと実際の振る舞いは C 戦略車と同様に、ほぼ車線変更をしていなかったためである。逆に開放系境界条件の場合、下流側での境界において、一定確率で流出するため、どうしてもボトルネックとなる場合があり、それを回避するインセンティブが、D 戦略優位の結果を示したと考えられる。次に社会全体の利得を見ると、中密度域、およびさらに高い密度域において開放系境界条件と異なる結果が見られた。まず中密度域、つまりメタ安定相を形成しうる密度域においては、利得構造からいえば開放系境界条件と同様に囚人のジレンマ構造が見られた。一方で強調率１でも低い利得しか上げられず、強調率 0.8 程度で最大利得を上げる場合も見られた。これは初期配置で渋滞クラスターが形成されていた際に、強調率 1 では車線変更が許容されていないために延々とこの渋滞クラスターを解消することができないが、少数派の D 戦略が車線変更を行なうことで、渋滞クラスターから脱出し、結果として渋滞クラスターの減少・解消につながり、全体の利得を向上させたと考えられる。さらに高い密度域においては、車線変更を行なうことで、社会全体の利得も向上する、Trivial Game の構造を示した。これは渋滞が発生している流れ場においては、車線変更をすることで系に与える影響が少なく、各個人の利得の向上分がそのまま系全体の利得の向上につながったと考えられる。

7.2 今後の展望

本論では、車線変更が系全体にもたらす影響について解析を行なった。これはすぐ現実の交通渋滞の解消につながるアプリケーションを提示できるといった類のものではないが、数多の要素が絡み合って発生している交通渋滞解消へのアプローチのひとつとして、十分な成果として考えられる。というのも、渋滞解消のアプローチとしては、サグ部による速度低下解消のために標識を追加するなど、直接的な手法は導入されつつあるが、本論のように根幹に潜む事象を解析しておくことで、２次的・３次的な対策を検討する上で重要となってくるであろう。

一方で、昨今の技術革新により、自動運転や自己学習よる運転最適化がますます進むことで、より詳細な実測データの収集や、自己学習を利用したモデル構築といった、新たな手法での研究が展開できる環境になりつつある。これらは膨大な情報を入手することができ、またより現実に即したモデル構築を可能にすると考えられるが、実際の複雑な要因が絡まった状態を再現しているため、根幹で何が作用して表面的な現象に繋がるのか、を解析することは非常に難解となるであろう。そこで本論で用いたような、交通流にゲーム理

論の概念を導入するなど、ミクロなルールは至極単純なものではあるが、系全体として複雑な様相を示す手法にて、複雑な様相をもたらす要因を分析することができる。

そういった際に、本論で新たに得られた知見を用いることで、関連分野の発展に寄与できれば、幸いである。