

## 社会構造のダイナミクスに対する 内部ダイナミクスとマイクロマクロ・ループの効果

佐藤 尚 橋本 敬

北陸先端科学技術大学院大学 知識科学研究科

抄録 社会を動的に変化するものと捉える動的社會観の立場から、マルチエージェント・システムを用いて社会構造のダイナミクスが生じる条件を考察する。はじめに、内部ダイナミクスを持つエージェントを用いたマルチエージェント・シミュレーションの実験結果を紹介する。この実験では、マクロレベルにおいて様々な秩序状態を無秩序状態を経て遍歴するという社会構造ダイナミクスが示されることがある。本論では、社会構造ダイナミクスの発生要因の一つと考えられるマイクロマクロ・ループの効果について調べた実験の結果を報告する。これらの結果の分析より、内生的な社会構造ダイナミクスの形成および維持にはエージェントの内部ダイナミクスとマイクロマクロ・ループが必要であることを論じる。

## Effect of Internal Dynamics and Micro-Macro Loop on Dynamics of Social Structures

Takashi Sato and Takashi Hashimoto

School of Knowledge Science, Japan Advanced Institute of Science and Technology

**Abstract** We discuss a condition required for forming and maintaining dynamics of macro structure in a society from the dynamical view of society, which regards social structure as dynamically changing with time. We summarize results of a multi-agent simulation composed of agents having internal dynamics. In the simulation, we observe the dynamics of a macro structure iterating among various ordered states via disordered states. Further, we report results of analyses in order to investigate effect of the micro-macro loop on dynamics of social structures. Based on the analyses, we conclude that internal dynamics of agents and micro-macro loop are necessary to form and maintain an endogenous dynamic social structure.

### 1 序論

社会には階級、制度、規範など様々な社会構造が見られる。マクロレベルの社会構造はマイクロレベルにおける社会成員間の相互作用からボトムアップ的に形成されることが考えられる。内生的に創発する社会構造はマイクロレベルの社会成員に対して何らかの影響を与える。そして、社会成員の行動はマクロレベルからの影響によって変化する。これにより新たな社会構造が作られる、あるいは既存の社会構造が変化する。マイクロとマクロの両方のレベルが相互に依存/影響し合う関係は「マイクロマクロ・ループ」と呼ばれる [11, 12]。本論では、社会や社会構造を動的に変化するものとして捉える見方/立場を「動的社會観」と呼ぶ。この動的社會観に相当する社会の捉え方は様々な研究者によって支持された。例えば、Blumer は、人間は対象に対して積極的に働きかける主体的存在となり、社会は人間によって構成され、動的に変化する過程的なものであると主張し

た [2]。また、あらゆる社会現象の根元が模倣にあるとする「模倣説」を提唱した Tarde はその学説において、発明とその模倣という循環があり、社会はそのような循環によって発展/変化すると主張した [13]。制度学派経済学の創始者である Veblen は「なぜ経済学は進化的科学ではないのか?」という問いかけの中で、経済学が現実的な問題を扱うためには社会における累積的变化を対象としなければならないと説いた [16]。本論では、これらの研究者と同様に動的社會観の立場に立ち、社会構造のダイナミクスが生じる条件についての説明を試みる。この場合、先に示したようにマクロレベルのダイナミクスに深く関わっているマイクロレベルの社会成員を切り離して考えることはできない。すなわち、人間をどのように捉えるべきか、という問題が生じる。

主流派経済学において、人間は独立に効用あるいは選好を所与とされ、他者や環境から孤立した存在であるとししばしば仮定される。これに対して江頭と橋本は、外界を認識するための機構を持ち、その認

識機構が他者との相互作用を通して形成されていくような「社会的個人」として人間を捉えている [4]。そして、彼らのシミュレーション実験では、そのような社会的個人の間で共通した思考様式としての制度が創発する様子が示されている [6]。しかし、その実験では一度できた制度は変化しない。一般に、マクロ構造からマイクロへの影響がマイクロの行動を制御する自己拘束的な働きを持つならば、制度の創発と維持が可能だと考えられる [1]。しかし、このような場合、社会構造の自発的な変化は見られなくなる。一方、我々は江頭と橋本の主張を支持しつつ、人間は他者や環境と関わり合いながら自身の内部状態が変わるばかりでなく、その内部状態が自律的に変わるような動的な認知主体であると考察した。そして、その動的認知主体のモデルとして「自己影響結合付き単純再帰型ネットワーク (Simple Recurrent Network with Self-Influential Connection; SRN-SIC)」を提案し、多数の SRN-SIC で構成したマルチエージェント・シミュレーションにおいて、自発的なマクロ構造のダイナミクスを示した [10]。

我々の提案した SRN-SIC には、人間の動的な性質を説明するために「内部ダイナミクス」という概念を導入した。この内部ダイナミクスとは自律的な内部状態の変化のことである。内部ダイナミクスの存在は例えば概日リズム (circadian rhythm) や Necker Cube による視覚実験の結果などにより示されている。また、認知科学の分野では、人間の動的な性質を説明するための重要な概念として注目され、多くの研究者が人間あるいは生物を自律的かつ動的な存在として捉えることの重要性を主張している。例えば、Varela は、認知システムの内部状態と環境が互いに影響し合いながら変化し、適切に結合するという「構造的カップリング」の重要性を指摘している [15]。また Karmiloff-Smith は、心の内部にある暗黙的情報を明示的知識へと変換するプロセス、すなわち、内的な表象の自己改変的書き換えプロセスが認知発達において重要な役割を果たしていると論じた [8]。更に、Gelder は人間が外的環境との、そして、自身の内部での相互作用によって変化する認知システムであると考察した。また、力学系の時間発展に見られる複雑な振る舞いが人間の認知的な現象をよく説明できると考えた。Gelder はこれらの考察から、動的な認知システムとしての人間を力学系の一種と見なすことができると標榜している [9, 14]。

本研究の目的は、内部ダイナミクスを持つ動的な認知エージェントとして人間を捉えること、および時間的に変化するものとして社会や社会構造を捉える、つまり動的な社会観の立場に立つことの意義を示

すことである。本論では、まずはじめに、動的認知主体のモデルとして我々が提案した SRN-SIC [10] を簡単に紹介する。次に、多数の SRN-SIC で構成される「動的な社会シミュレーション」<sup>1</sup> の実験結果を概観する。そして最後に、マイクロレベルとマクロレベルの相互依存関係を一時的に壊す、すなわち、マイクロマクロ・ループを一時的に断つ実験を通して、マクロ構造の内生的なダイナミクスの形成および維持において、動的な認知エージェントの内部ダイナミクスとマイクロマクロ・ループが果たす役割を見る。

## 2 内部ダイナミクスを持つエージェントによる動的な社会シミュレーション

### 2.1 内部ダイナミクスの重要性

人間は、外的刺激が無い、あるいは一定であっても内部状態は変化する。この自律的な内部状態の変化を我々は「内部ダイナミクス」と呼ぶ。内部ダイナミクスという概念を導入することにより、我々は人間行動における「多様性」と「一貫性」をまとめて説明することができる。ここで行動の多様性とは、人間はたとえ同じ状況においても/同じ刺激に対して様々な振る舞いを示すという性質である。また、人間が行う行動はそれぞれでたらしめられるのではなく、行動間には何らかの関係性や因果性があるように見える。この特徴を一貫性と呼んでいる。

内部状態が自律的に変化するならば、例え同じ外的刺激を受け取り続けていても内部状態は独立に変わっている。行動が内部状態に依存しているならば、外的刺激と行動との間に「一対多の関係」を形成することができる。すなわち、同じ状況でも様々な行動を見せるという行動の多様性を実現できる。また、内部状態の変化には、外的刺激や過去の内部状態だけでなく、以前に行われた自身の行動が影響を及ぼす。よって、内部状態には過去の行動、過去の内部状態、そして外的刺激の履歴情報が蓄積されることになる。すなわち、そのようなダイナミクスを持った内部状態に基づいた行動は、過去の内部状態の履歴と少なからず関連することになるため、行動の一貫性が生じるのである。

<sup>1</sup>我々は、時間に依存して変化する動的な社会構造のダイナミクスの力学的理解を目的としたシミュレーションのことを「動的な社会シミュレーション」と呼ぶ。

## 2.2 内部ダイナミクスを持つエージェントのモデル

ここでは、我々が提案した動的認知主体モデルの構造を簡単に紹介する<sup>2</sup>。本モデルは、図1に示されるように、Elmanによって提案された「単純再帰型ネットワーク (Simple Recurrent Network; SRN)」<sup>[5]</sup>を過去の自身の振る舞いからも直接影響を受けように変更したものである。我々は本モデルを「自己影響結合付きSRN (SRN with Self-Influential Connection; SRN-SIC)」と呼ぶ。

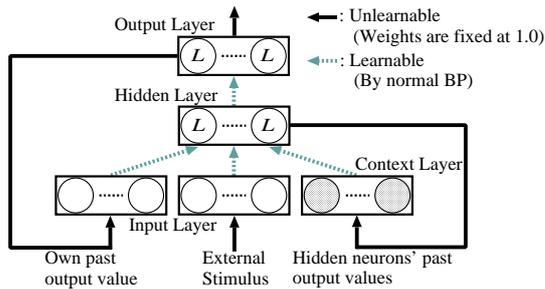


図1: 内部ダイナミクスを持つエージェント (SRN-SIC) の構造。「L」は値域が-1.0から1.0である微分可能な非線形関数。提案するネットワークは入力層と出力層との間に再帰結合を持つ特殊なSRNである。なお、全ての結合線は描画していない。

SRNは入力層、隠れ層、出力層、そして文脈層を持つ再帰型ニューラルネットワークである。文脈層は隠れ層の状態を一時的に保存するために用いられる。この文脈層を持つことにより、ある時刻でのSRNの状態は過去の隠れ層の状態の履歴とその時刻に外から受け取る情報を混ぜたものから決められる。SRN-SICは、更に出力層から入力層への再帰結合を持つ。この結合があることによって、SRN-SICは外部からの刺激だけでなく、自身の過去の行動も考慮して次の行動を決定するモデルとなる。

## 2.3 動的社会シミュレーションにおける遍歴ダイナミクス

本シミュレーションにおいて、我々はエージェント間の社会的相互作用としてChalletとZhangによって提案されたMinority Game (MG) <sup>[3]</sup>を採用した。MGは次の二つの基本ルールで特徴付けられる。1)  $n$ (奇数)人のプレーヤが各時刻で二つある手(-1 or 1あるいは、売る or 買う等)の内の一つを各自独立に選択する<sup>3</sup>。2) 少数派に属したプレーヤ

<sup>2</sup>詳しくは文献 [10] を参照されたい。

<sup>3</sup>SRN-SICの出力関数は-1.0から1.0までの範囲の実数を入力する。本研究ではMGに合わせて、出力ニューロンの数は

を勝ちとする。

更に、本シミュレーションの中でマイクロマクロ・ループは次のように実現される。まず、各時刻における少数派の手は全プレーヤの二者択一という行動によって決められる。したがって、少数派の手の時系列に現れるパターンはマイクロレベルから作られるマクロレベルの構造と見なせる。次に、マクロレベルからマイクロレベルへの影響の伝達を考えなければならない。ここでは、マイクロレベルの振る舞いから作られた少数派の手の時系列を全プレーヤに学習させるという形で、また、過去の少数派の手を外的刺激として与えるという形でループを完成させる。

具体的なシミュレーションは次の手順で実行される。各エージェントは、過去の自分の手と過去の少数派の手を基にそれぞれ独立に手(-1 or 1)を決定する。そして、全エージェントの手を基に少数派の手が決まる。これを「1ステップ」とし、10,000ステップ繰り返した後に、過去100ステップ分の少数派の手の時系列を学習する。学習終了後から学習開始直前までの10,000ステップをまとめて「1ターン」と呼ぶ。

本シミュレーションでは、マクロレベルで様々な変化パターンが見られた<sup>4</sup>。中でも興味深いものとして、固定点、周期的および非周期的変化の全てが1ターン内で見られるという複雑なパターンが確認された。その複雑なパターンの一部を図2に示す。この図は、少数派の手の時系列を0から1までの範囲の実数に変換して表示したものである<sup>5</sup>。

この図から分かるように、少数派の手の変化パターンが固定点や様々な周期的変化の間を非周期的変化を経ながら遍歴している<sup>6</sup>。先述したように、図2に示される遍歴ダイナミクスは1ターン内で観察されたものである。すなわち、学習によってエージェントの内部構造が修正されないにもかかわらず、マクロレベルでの複雑な変化が各エージェントの内部ダイナミクスによって引き起こされるという

<sup>1</sup>とし、更にその出力値は0.0を境に-1か1のどちらかに割り振っている。

<sup>4</sup>マクロレベルでの変化パターンは、少数派の手の変化の仕方を固定、周期、非周期の3種類、勝者数の変化の仕方を固定、周期、非周期の3種類に分けて分類した。結果として、異なるターンにおいて、1) 少数派の手と勝者数が固定、2) 少数派の手が固定、勝者数が周期、3) 少数派の手が固定、勝者数が非周期、4) 少数派の手と勝者数が周期、5) 少数派の手が周期、勝者数が非周期、6) 少数派の手と勝者数が非周期という6種類の変化パターンが見られた。

<sup>5</sup>まず、-1, 0, 1, 1と対応させ、20ステップ分の少数派の手の時系列を作る。これを二進小数と見なし、十進小数に変換している。

<sup>6</sup>このようなダイナミクスは、金子、津田らが提唱している「カオスの遍歴 [7]」に類似しているように見える。しかし、本研究で得られたマクロレベルの遍歴ダイナミクスがカオスの遍歴であるかどうかは、また確かめられていない。

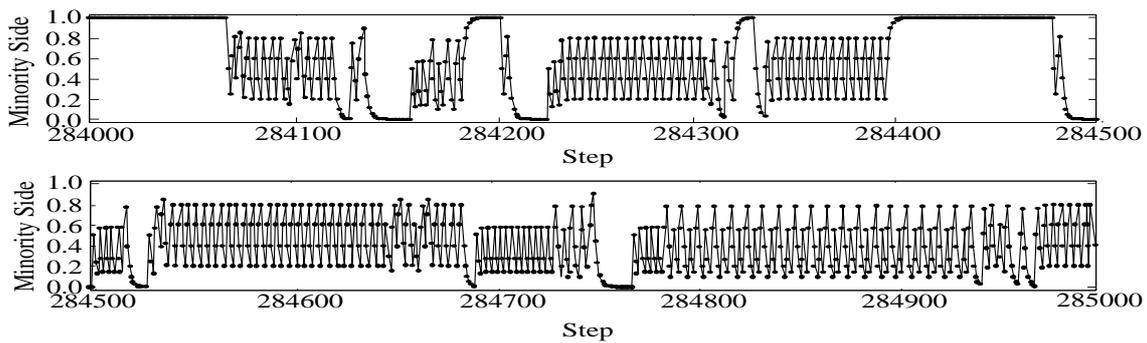


図 2: 1 ターン内におけるマクロレベルの遍歴ダイナミクスの例。各図の  $x$  軸はステップ、そして  $y$  軸は 0 から 1 までの範囲の実数に変換した少数派の手である。ゲームの力学状態が非周期的変化を経て、固定点や様々な周期的変化へと遍歴している。

ことが確かめられたのである。

また、遍歴ダイナミクスに見られる単純な固定点や周期的変化などの低次元ダイナミクスは簡単な力学系で記述可能である。すなわち、低次元ダイナミクスが生じている時には、マイクロレベルの全エージェントを支配する何らかの「規則(ルール)」がマクロレベルにおいて生じていると見なすことができる。換言するならば、ある種の社会構造がエージェントの社会において生じていると考えることができる。しかも、その社会構造は自律的に生成と崩壊を繰り返している。故に、遍歴ダイナミクスは内生的に生じた「社会構造のダイナミクス」として捉えることができる。

### 3 動的な社会シミュレーションにおけるミクロマクロ・ループの効果

我々のシステムに実装されたミクロマクロ・ループは社会構造ダイナミクスの発生要因の一つとして考えられる。前節では、社会構造のダイナミクスとして捉えられるマクロレベルでの遍歴ダイナミクスが、マイクロレベルにおけるエージェント間相互作用によって内生的に生じるという動的な社会シミュレーションの結果を示した。我々は、ミクロマクロ・ループの効果を確かめるためにマクロからマイクロへの直接的な影響を無効化するいくつかの実験を行った。

#### 3.1 遍歴ダイナミクスを形成するエージェントへの固定点およびランダム時系列の入力

遍歴ダイナミクスは、図 2 に示されるように、様々な秩序状態を無秩序状態を経て遍歴する非常に興味深いマクロダイナミクスである。この遍歴ダイナミクスを形成・維持するための条件を明らかにするた

めに、我々は遍歴ダイナミクスを形成するエージェントが過去の少数派の手の代わりに外的刺激として人工的な入力を連続的に受ける場合、遍歴ダイナミクスがどのように変化するかを調べた<sup>7</sup>。「人工的」とは、全エージェントが彼らによって形成される少数派の手の時系列とは異なる別の入力を外的刺激として受け取る、という意味である。ここでは、次の 2 種類の人工的な入力を与える。1)  $-1.0$ ,  $0.0$ 、または  $1.0$  の固定値。2) 様々な乱数幅の一樣乱数。

図 3(a)~(c) はそれぞれ全エージェントが  $-1.0$ ,  $0.0$ 、そして  $1.0$  の固定値を受け取った時に形成される少数派の手のダイナミクスである。各図の左側は上記人工的な入力を与え始めるところを、そして、右側には与え終わるところを示す。図 3(a)~(c) の左側に示されるように、全エージェントによって形成された過去の少数派の手の代わりに固定値を与え始めると、遍歴ダイナミクスは崩壊する。しかしながら、図 3(a)~(c) の右側に示されるように、固定値の入力をやめて再び直前のゲームでの少数派の手を各エージェントに与え始めると、遍歴ダイナミクスは再生される。

次に、全エージェントに対して過去の少数派の手の代わりに様々な乱数幅の一樣乱数を与える実験の結果を示す。図 4 は、(a)  $-0.001$  から  $0.001$  まで、(b)  $-0.5$  から  $0.5$  まで、そして (c)  $-1.0$  から  $1.0$  まで

<sup>7</sup> 観察対象となる遍歴ダイナミクスは 280,000 から 290,000 ステップ、つまり、28 ターンで見られる。人工的な入力に対する遍歴ダイナミクスの応答を長期間観察するために、我々は 28 ターンの長さを 10,000 ステップから 1,000,000 ステップに拡張する。すなわち、エージェントの学習が 280,000 ステップから 1,280,000 ステップまで行われなないようにするのである。ここで注意すべきことは、28 ターンの長さを上記のように拡張しても、ミクロとマクロのループが切られていない場合には、遍歴ダイナミクスはターンの途中で崩壊することがない、ということである。以下に示す実験において、我々は上述の人工的な入力を 780,000 から 1,000,000 ステップの間、全てのエージェントに与える。

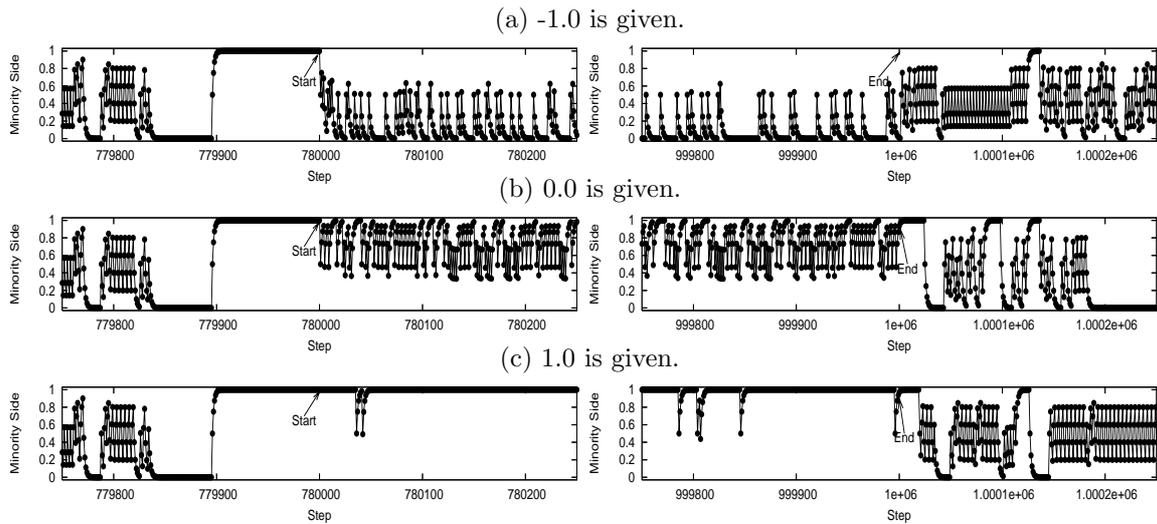


図 3: 人工的な固定値の入力開始および終了による遍歴ダイナミクスの崩壊と再生。各図の  $x$  軸はステップ、そして  $y$  軸は 0 から 1 までの範囲の実数に変換した少数派の手である。これらの図は各エージェントがステップ毎に外的刺激として (a)-1.0、(b)0.0、そして (c)1.0 を受け取った場合に見られるマクロレベルのダイナミクスである。各図の右側は固定値の入力開始付近である 779,750~780,250 ステップ、そして左側は固定値の入力終了付近である 999,750~1,000,250 ステップでの遍歴ダイナミクスの変化の様子を示す。各固定値は「Start」とラベル付けされた 780,000 から「End」とラベル付けされた 1,000,000 ステップ間で全てのエージェントに入力される。遍歴ダイナミクスは人工的な固定値を各エージェントに入力すると壊される。しかし、全エージェントが彼ら自身によって形成された過去の少数派の手を再び受け取り始めると、遍歴ダイナミクスは再生する。

の範囲の一樣乱数を外的刺激としてエージェントに与えた時のマクロレベルの変化の様子を示す。これらの実験結果は前述の人工的な固定値をエージェントに与える実験と同様に、人工的な乱数が全エージェントに与えられることによって、遍歴ダイナミクスの崩壊が生じる (図 4(a)~(c) の左側)。そして、切断されていたマイクロマクロ・ループを元に戻すことによって、すなわち、全エージェントに対してそれら自身が作った過去の少数派の手を与えることによって、内生的に遍歴ダイナミクスの再生が例外なく生じる (図 4(a)~(c) の右側)。

### 3.2 固定点および周期的ダイナミクスを形成するエージェントへの遍歴ダイナミクスの入力

ここでは、遍歴ダイナミクス自体の影響力を明らかにするために、固定点または周期的マクロダイナミクスを形成するエージェントが遍歴ダイナミクスの時系列を外的刺激として受け取る場合に、マクロレベルでのダイナミクスがどのように変化するかを調べる実験の結果を示す。これらの実験では、28 ターンで形成される遍歴ダイナミクス (図 2) の時系列を、ターンの最初から半分までエージェントに対して与える。結果として、遍歴ダイナミクスの時

系列を全エージェントに与える間、その入力とは異なる遍歴ダイナミクスがしばしば形成される。異なる遍歴ダイナミクスが形成される様子を図 5(a) に示す。なお、遍歴ダイナミクスは常に形成されるわけではなく、図 5(b) に示されるように、固定点に殆ど収束しつつも時々振動するようなマクロダイナミクスも創発する。更に、遍歴ダイナミクスの影響を受けず、固定点のまま全く変化しないという例も見られる。これらの結果から、たとえ遍歴ダイナミクスの時系列が全エージェントに与えられるとしても、遍歴ダイナミクスがマクロレベルにおいて確実に形成される保証はない、ということが分かる。

各エージェントが遍歴ダイナミクスの時系列を受け取ることをやめると、すなわち、彼ら自身によって形成された過去の少数派の手を再び受け取り始めると、殆ど全ての場合、図 5(a)~(b) のそれぞれの後半に示されるように、外的刺激として遍歴ダイナミクスの時系列を受け取る前に見られた元のマクロダイナミクスが再生される<sup>8</sup>。したがって、たとえ入力された遍歴ダイナミクスの時系列からマクロレベルにおいて遍歴ダイナミクスが形成されたとし

<sup>8</sup>例外として、元のマクロダイナミクスとは異なるダイナミクスがエージェントによって形成される場合もある。

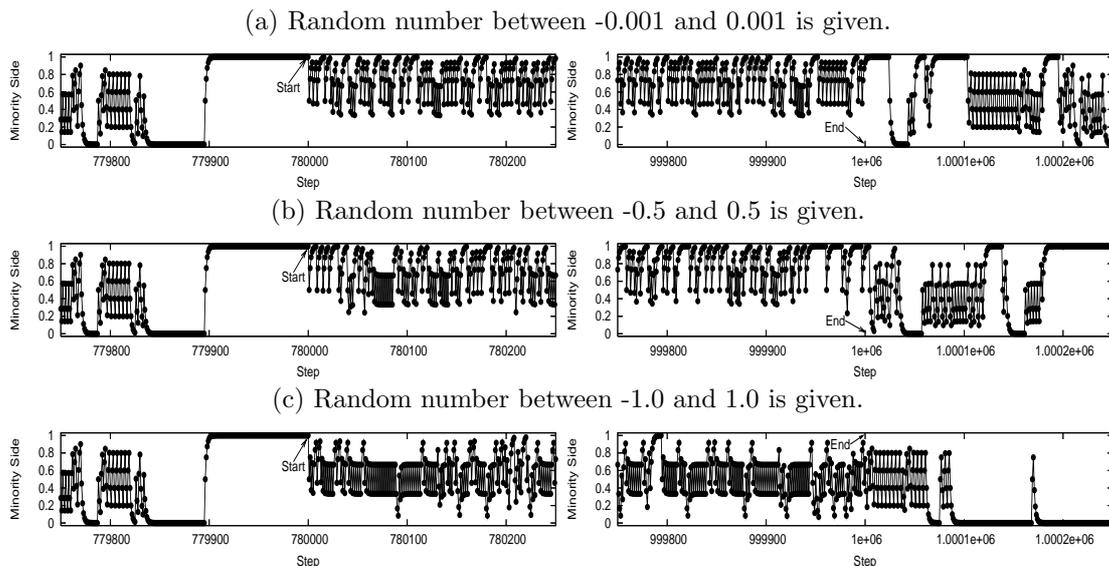


図 4: 様々な乱数幅での人工的な一様乱数の入力開始および終了による遍歴ダイナミクスの崩壊と再生。各図の  $x$  軸はステップ、そして  $y$  軸は 0 から 1 までの範囲の実数に変換した少数派の手である。ここでは例として、(a)-0.001 から 0.001 まで、(b)-0.5 から 0.5 まで、そして-1.0 から 1.0 までの範囲の一様乱数をエージェントに外的刺激として与えたときに形成される少数派の手のダイナミクスを示す。乱数の入力開始および終了ステップは図 3 と同じである。遍歴ダイナミクスは乱数の入力が始まると崩壊し、入力が終了すると再生する。

ても、その時系列が各エージェントに与えられ続けなければ、遍歴ダイナミクスは維持され得ないのである。

#### 4 議論—遍歴ダイナミクスを形成・維持するための条件—

本研究では、遍歴的マクロダイナミクスが生じるターンにおいて、固定値や様々な乱数幅の一様乱数をエージェントに与える実験を行った。これらの実験では、マイクロマクロ・ループを切断している間はマクロレベルでの遍歴ダイナミクスが壊され、マイクロマクロ・ループを元に戻すと再び遍歴ダイナミクスが再生された。これらの実験により、マイクロマクロ・ループがマクロレベルでの遍歴ダイナミクスを形成および維持するために必要であることが確かめられた。更に、固定点や周期的マクロダイナミクスが生じるターンにおいて、遍歴ダイナミクスの時系列をエージェントに与える実験では、外的刺激としての遍歴ダイナミクスとは異なる遍歴ダイナミクスがマクロレベルにおいて形成された。しかし、エージェントへの人工的な入力をとめて元のマイクロマクロ・ループに戻すと、その異なる遍歴ダイナミクスは例外なく崩壊した。その上、人工的な入力から遍歴ダイナミクスは必ず形成されるわけではなく、マ

クロレベルでは様々な変化が見られた。これらの結果は、遍歴ダイナミクスが内生的に形成されるためには、マイクロマクロ・ループの他に何らかの構造を持つエージェントがマイクロレベルにおいて必要であることを示唆する。

そこでマイクロレベルにおけるエージェント達のダイナミクスと、マクロレベルでのダイナミクスの関係を調べた。その結果を表 1 に示す。表 1 の最下行に示されるように、マクロレベルの遍歴ダイナミクスは、約 90 % の非周期的な振る舞いを見せるエージェントでマイクロレベルが占められる時に生じていた。更に、遍歴ダイナミクスを形成するエージェントの内、非周期的な振る舞いを示すエージェントの出力値の時系列を解析した結果、そのエージェントのダイナミクスがカオスであることが確かめられた。

カオス・ダイナミクスは、小さな変化を指数関数的に拡大する性質、すなわち、軌道不安定性(あるいは初期値鋭敏性)を持つ。また、このような性質を持つエージェントは、原理的に無限種類の行動を示すことが可能である。すなわち、カオス的な振る舞いを示すことができるエージェントは内部に外的刺激と行動との間の「一対無限の関係」を形成していると考えられる。したがって、カオス的な振る舞

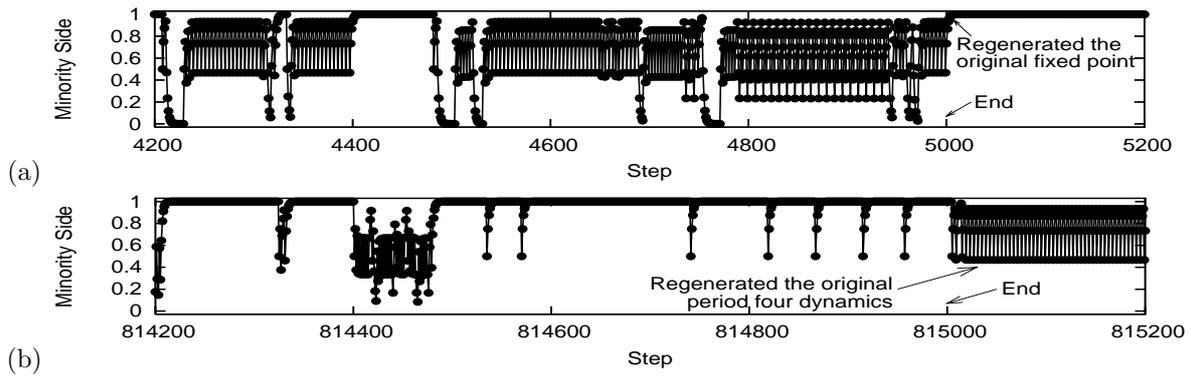


図 5: 固定点または周期的マクロダイナミクスを形成するエージェントに遍歴ダイナミクスの時系列を与えた場合に見られる少数派の手の時系列の例。各図の  $x$  軸はステップ、そして  $y$  軸は 0 から 1 までの範囲の実数に変換した少数派の手である。図 (a) は入力された時系列から形成された遍歴ダイナミクスの例である。この遍歴ダイナミクスはエージェントに入力される遍歴ダイナミクスとは異なるものである。図 (b) は時々振動する固定点の例である。いずれにしても、図の後半部に示されるように、(a) 固定点や (b) 4 周期などの元のダイナミクスがエージェントへの遍歴ダイナミクスの時系列の入力を止めると再生される。

表 1: マクロレベルでの変化パターンとそのパターンを形成したエージェントの行動パターンとの対応関係。表の左側の 2 つの列はマクロレベルで確認された 6 種類の変化パターンの組み合わせを示している。この変化パターンは、少数派の手の変化の仕方を固定、周期、非周期の 3 種類、勝者数の変化の仕方を固定、周期、非周期の 3 種類に分けて分類した。表の右側の各数字はそれぞれ固定、周期、非周期的な振る舞いを示すエージェントの数である。なお、表の各アルファベットの意味は次の通りである。F: 固定点、P: 周期的変化、A: 非周期的変化、I: 遍歴ダイナミクス

| Macro Level   |              | Micro Level |    |    |
|---------------|--------------|-------------|----|----|
| Minority Side | # of Winners | F           | P  | A  |
| F             | F            | 101         | 0  | 0  |
| F             | P            | 84          | 17 | 0  |
| F             | A            | 50          | 46 | 5  |
| P             | P            | 63          | 38 | 0  |
| P             | A            | 20          | 77 | 4  |
| I             | I            | 8           | 6  | 87 |

いを示す多くのエージェントがマイクロレベルを占める場合、マイクロレベルで生じたエージェント行動の些細な変化が拡大されることによって、マクロレベルでの複雑なダイナミクスが引き起こされると考え

られる。

実際の社会において、人間は永続的に同じ行動を取り続けたり、有限種類の行動を周期的に繰り返す続けたりはせず、単純な振る舞いから複雑な振る舞いまで様々な行動を見せる。ここで示した結果は、実際の社会における複雑なマクロレベルのダイナミクスが、カオス的行動を示す数多くの人間によって引き起こされるということを示唆する。

## 5 結論

本研究では、我々の提案した自己影響結合付き単純再帰型ネットワーク (SRN-SIC) を用いた動的な社会シミュレーションで観察される、社会構造の複雑なダイナミクスの原因を論じた。そのために、外的刺激として人工的な入力をエージェントに与える実験によって、社会構造のダイナミクスの発生要因の一つと考えられるマイクロマクロ・ループの効果について調べた。この実験から、社会構造ダイナミクスとして捉えられる遍歴ダイナミクスが、エージェントに内部ダイナミクスを導入したことで形成可能となった外的刺激とエージェントの行動との間の対無限の関係によるカオス的な振る舞いから引き起こされ、マイクロマクロ・ループによって維持されるということを示す結果が得られた。

我々のシミュレーション実験の結果は、動的な社会構造の形成および維持のために、エージェントの内部ダイナミクスとマイクロマクロ・ループが重要な役割を担っていることを実証するものである。よって、内部ダイナミクスとマイクロマクロ・ループが動

的な社会構造の形成および維持に必要であり、そのような社会構造のダイナミクスが見られる動的な社会シミュレーションを構成する上で、我々の提案したSRN-SICが内部ダイナミクスを持つ社会的エージェントのモデルとして有効であると我々は結論する。とりわけ、内部ダイナミクスの重要性を説き、静的なモデルが採用されることの多い社会シミュレーションに、内部ダイナミクスを持つ動的なエージェントを採用したこと、そして社会シミュレーションではマイクロレベルとマクロレベルの相互作用という形では殆ど扱われることのなかったマイクロマクロ・ループを明示的に導入し、その効果を示した意義は大きいと思われる。

内部ダイナミクスを持つエージェントによって構成されるマイクロマクロ・ループを考慮した動的な社会シミュレーションにおいて、社会構造の動的な変化を示すことができた。しかし、我々はその変化がどのように生じるのかをまだ完全には明らかにしていない。我々の今後の課題は、マイクロレベルのエージェントの内部ダイナミクスがエージェントの行動に対して、更に、エージェントの行動を介してエージェント社会の構造にどのような影響を及ぼしているのかをより明らかにすることである。また、ここで得られた結果が、現実の社会において、どのような含意を持つのかと云うことに対して、より深く、且つ具体的に論じなければならない。これらの課題を進めていくことによって、より現実的な問題にも対応しうる社会的エージェントを提案できるだろう。そして、そのようなエージェントを用いることによって、現実社会のダイナミクスをよりよく分析できる動的な社会シミュレーションが可能となるだろう。

## 参考文献

- [1] Aoki, M., *Towards A Comparative Institutional Analysis*, MIT Press, Cambridge MA, 2001.
- [2] Blumer, H.G., *Symbolic Interactionism: Perspective and Method*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1969. (後藤将之訳, 「シンボリック相互作用論: パースペクティブと方法」, 勁草書房, 1991.)
- [3] Challet, D., Zhang, Y.C., Emergence of Cooperation and Organization in An Evolutionary Game, *Physica A*, **246**, 407-418, 1997.
- [4] 江頭進, 橋本敬, 社会科学における人間の認知の位置, 西部忠(編), 「進化経済学のフロンティア」, 日本評論社, 東京, 2004.
- [5] Elman, J.L., Finding Structure in Time, *Cognitive Science*, **14**(2), 179-211, 1990.
- [6] Hashimoto, T., Egashira, S., *Journal of Systems Science and Complexity*, **14**(1), 54-74, 2001.
- [7] Kaneko, K., Tsuda, I., Chaos: Focus Issue on Chaotic Itinerancy, *Chaos*, **13**(3), 926-936, 2003.
- [8] Karmiloff-Smith, A., *Beyond Modularity: A Developmental perspective on Cognitive Science*, MIT Press, Cambridge MA, 1992.
- [9] Port, R., van Gelder, T., *Mind as Motion: Explorations in the Dynamics of Cognition*, MIT Press, Cambridge MA, 1995.
- [10] Sato, T., Hashimoto, T., Dynamic Social Simulation with Multi-Agents having Internal Dynamics, In: Hasida, K., Nitta, K (eds.), *New Frontiers in Artificial Intelligence: Joint Proceeding of the 17th and 18th Annual Conferences of the Japanese Society for Artificial Intelligence*, LNCS, Springer-Verlag, 2005 (To be published).
- [11] 塩沢由典, 「複雑さの帰結」, NTT出版, 東京, 1997.
- [12] 塩沢由典, 「複雑系経済学入門」, 生産性出版, 東京, 1997.
- [13] 横山滋, 「模倣の社会学」, 丸善ライブラリー008, 東京, 1995.
- [14] van Gelder, T., The Dynamical Hypothesis in Cognitive Science, *Brain and Behavioral Sciences*, **21**, 615-665, 1998.
- [15] Varela, F.J., Thompson, E., Rosch, E., *The Embodied Mind -Cognitive Science and Human Experience-*, MIT Press, Cambridge MA, 1991.
- [16] Veblen, T., Why is Economics Not an Evolutionary Science, *The Quarterly Journal of Economics*, **12**, 1989.