

内部ダイナミクスを持つエージェントによる 動的社会シミュレーション

Dynamic Social Simulation with Multi-Agent having Internal Dynamics

佐藤 尚*¹ 橋本 敬*²
Takashi Sato Takashi Hashimoto

北陸先端科学技術大学院大学 知識科学研究科

School of Knowledge Science, Japan Advanced Institute of Science and Technology (JAIST)

In this paper, we discuss a viewpoint to regard individuals in a society as cognitive agents having internal dynamics, in order to study the dynamical nature of social structures. Internal dynamics is the autonomous changes of internal states upon which an agent's behavior depends. We first discuss what can be gained by taking internal dynamics into consideration when thinking about humans and the dynamics of society. Then we propose an extended simple recurrent network (extended-SRN) as a model of an agent having internal dynamics. We report the results of our simulation, in which the agents play the minority game as a social interaction. In the simulation, we observed the dynamics of game as a macro structure iterated among various dynamical states such as fixed points and periodic motions via aperiodic motions. This itinerant change of the macro structure is shown to have been induced by internal dynamics of the agents.

1. 序論

我々の住む社会には階級、制度、役割など様々な社会構造が見られる。このようなマクロレベルの社会構造はミ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と考えられる。内生的に創発した社会構造は、ミ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、マクロレベルからの影響によって社会成員の行動が変化すること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。このようなミクロとマクロの両方のレベルが相互に依存し合う関係は「ミクロマクロ・ループ」と呼ばれる [Shiozawa 97a][Shiozawa 97b]。とりわけ、マクロレベルの社会構造の成り立ちや変化過程を観察したい場合、その形成および変化に深く関わっているミクロレベルの社会成員は切り離すことができない。すなわち、人間をどのように捉えるべきか、という新たな問題が生じる。

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持ち、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 [Egashira 04]。本研究では、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え。ここでは自律的な内部状態の変化を「内部ダイナミクス」と呼ぶ。内部ダイナミクスの存在は例えばサーカディアンリズムや Necker Cube による視覚実験の結果などが示している。また、多くの研究者が人間あるいは生物を動的な存在として捉えることの重要性を主張している [Port 95][van Gelder 95][Varela 91]。

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の意義を示すことである。本論では、特に次の三つを行う。1) 内部ダイナミクスを持つエージェントのモデルを提案する。本モデルは、社会シミュレーションでは殆ど用いられたことのない単純再帰型ネットワークを拡張したものとして表現される。2) マルチエージェント・

システムによって、動的な社会シミュレーションを構成する。本研究では、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。更に、本シミュレーションでは、エージェント間での社会的相互作用として Minority Game [Challet 97] を採用する。3) 動的な社会シミュレーションによって、ミクロとマクロの両方のレベルで永続的な変化が生じること、そしてその変化が、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ことを示す。

2. 内部ダイナミクス

2.1 内部ダイナミクスの重要性

人間を状態遷移機械だと捉える機械論的な見方がある。それは、人間は内部に状態を持ち、外からの刺激によって内部状態が変化し、その変化に対応した反応を返すという考え方である。

しかし、人間の内部状態は外的刺激によってのみ変化するわけではないため、この見方は不十分である。また、人間を状態遷移機械として捉えた場合、「多様性」と「因果性」という人間の行動の特徴を同時に説明することが困難である。ここで行動の多様性とは、人間は同じ状況においても様々な振る舞いを行うという性質である。また、人間が行う行動はそれぞれでたらいに行われるのではなく、行動間には何らかの関係性や首尾一貫性があるように見える。この特徴を因果性と呼んでいる。

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「因果性」をまとめて説明することができる。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「一對多の関係」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ことができる。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

連絡先: stakashi@jaist.ac.jp(*1), hash@jaist.ac.jp(*2)

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相関することになるため、行動の因果性が生じるのである。

2.2 内部ダイナミクスを持つエージェント

基本的に、我々はエージェントの内部状態と行動が時間的に変化するものであると考える。そして、時間に依存して変化するエージェントの行動はエージェントの内部状態に依存すると仮定する。また、内部状態は外的刺激や過去に行われた行動から影響を受ける。これらの仮定に対応する内部ダイナミクスを持つエージェントのモデルとしては、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)」[Elman 90] が適当であると思われる。しかし、SRN は過去の振る舞いから直接自身が影響を受けるような構造にはなっていない。そこで本研究では、その点を拡張したものを内部ダイナミクスを持つエージェントのモデルとして提案する。我々は本モデルを「拡張版 SRN」と呼ぶ。拡張版 SRN の構造を図 1 に示す。

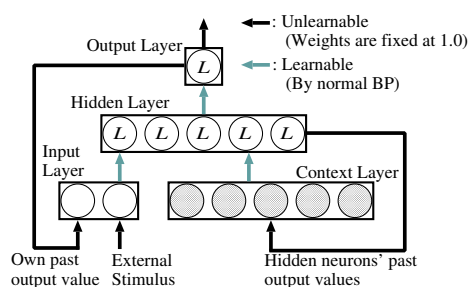


図 1: 内部ダイナミクスを持つエージェントの構造 (拡張版 SRN)。「L」は値域が-1.0 から 1.0 である微分可能な非線形関数。提案するネットワークは入力層と出力層との間に再帰結合を持つ特殊な SRN である。なお、全ての結合線は描画していない。

拡張版 SRN は一般的な階層型ニューラルネットワークと同様に、外部から刺激を受け取る「入力層」、受け取った刺激を基に出力値を決定する「出力層」、そして、入力層と出力層の間にある「隠れ層」を持つ。更に第 4 の層として「文脈層」を持つ。隠れ層のニューロンは文脈層のニューロンと一対一に再帰結合し、隠れ層の状態を文脈層にコピーするようになっている。すなわち、ある時刻でのネットワークの状態は過去の状態の履歴とその時に外から受け取る情報を混ぜたものから決められることになる。拡張版 SRN は、更に出力ニューロンから入力ニューロンへの再帰結合を持つ。この結合があることによって、拡張版 SRN は外部からの刺激だけでなく、自分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。

3. マルチエージェント・システムによる動的な社会シミュレーション

前節で提案した内部ダイナミクスを持つエージェントを用いた動的な社会シミュレーションについて説明する。本シミュレーションでは、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)[Challet 97] 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*1。2) 少数派に属したプレーヤを勝ちとする。

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、10000 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 10000 ステップをまとめて「1 ターン」と呼ぶ。

4. シミュレーション実験の結果

前節で導入した MG のマルチエージェント・シミュレーションの結果を述べる。本シミュレーションにおいて、我々はエージェント数を 101 とした。また、拡張版 SRN の構造としては、入力層のニューロン数を 2、出力層のニューロン数を 1、隠れ層および文脈層のニューロン数をそれぞれ 5 とした。

4.1 マクロレベルの履歴ダイナミクス

我々は、まず全エージェントの振る舞いから作られる少数派の手の時系列に、どのようなパターンが現れるのかを確かめた。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 6 種類の変化パターンが生じることを確認した。具体的には、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 種類である。

ここでは、まずはじめに 2 および 3 番目のパターンに注目する。どちらも少数派の手のダイナミクスは固定点であるが、勝者数は周期あるいは非周期的に変化する。これはエージェント集団の中に、同じ外的刺激を受け取り続けてもまったく同じ振る舞いをするのではなく、様々な振る舞いを見せる、すなわち外的刺激と行動との間の一対多の関係を形成するエージェントが存在することを示している。次に 6 番目のパターン、すなわち、少数派の手も勝者数も非周期的に変化するパターンに注目しよう。本シミュレーションでは、様々な非周期的変化パターンが見られる。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*2。

*1 拡張版 SRN は -1.0 から 1.0 までの範囲の実数を出力する。ここでは MG に合わせて、0.0 を境にその実数を -1 か 1 のどちらかに割り振っている。

*2 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。

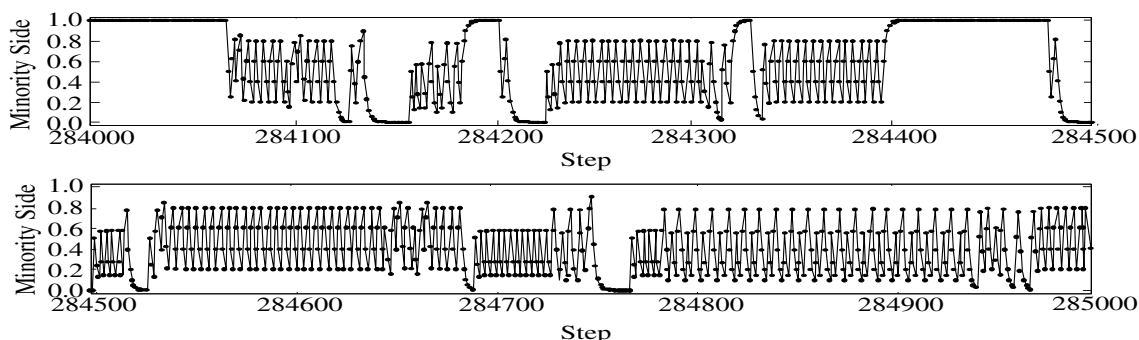


図 2: 1 ターン内におけるマクロレベルの遍歴ダイナミクスの例。各図の x 軸はステップ、そして y 軸は 0 から 1 までの範囲の実数に変換した少数派の手である。ゲームの力学状態が非周期的変化を経て、固定点や様々な周期的変化へと遍歴している。

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^{*3}。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くてもかかわらず、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ことが確かめられたのである。

4.2 エージェントの戦略の創発

前節では、エージェントの振る舞いからボトムアップに形成される複雑なマクロレベルのダイナミクスを示した。少数派の手の変化パターンがどのようなエージェントによって作られるのかを調べるために、本節では、エージェントの振る舞いと内部ダイナミクスの関係を詳しく見ていくことにする。

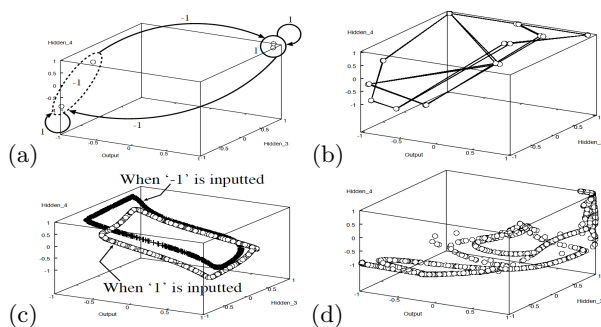


図 3: エージェントが獲得する戦略の例。各図の x , y そして z 軸はそれぞれ出力ニューロンの値、第 3 隠れニューロンの値、第 4 隠れニューロンの値である。(a) 2 状態の単純な有限状態オートマトンで記述できる戦略。(b) 12 状態の有限状態オートマトンで記述できる戦略。(c) 2 つのリミットサイクルとして表現される戦略。(d) ストレンジアトラクタに似た複雑な形で表現される戦略。

全エージェントは、MG での相互作用と学習プロセスを通して、どのような外的刺激に対してどのように振る舞うかということを決定するためのある種の「戦略」をそれぞれが別々に

獲得する^{*4}。図 3 は、エージェントの出力ニューロンの値と内部ダイナミクス、すなわち、隠れニューロンの値との関係を示したものである^{*5}。我々は、3 次元相空間上に現れるパターンからエージェントがどのような戦略を獲得しているのかを知ることができる。

図 3(a) のエージェントの戦略は、2 状態の単純な決定論的有限状態オートマトンとして記述可能である。また、図 3(b) のエージェントの戦略も、決定論的有限状態オートマトンとして記述可能であるが、こちらは状態数が 12 となっている。どちらも、エージェントの行動が完全にマクロレベルのダイナミクスと同期している。一方、図 3(c) のエージェントは 2 つのリミットサイクルとして戦略が表現されている。これは「-1」と「1」という 2 種類の入力のそれぞれに対して、独立にエージェントがどのような行動をすべきかということを決めるための 2 つのローカル・ルールを持ち、それらを入力に合わせて適宜切り替える戦略であることを意味する。更に、 x 軸 (出力値) 上に点が散在していることから、このエージェントが、同じ入力に対して様々な振る舞いを示す、すなわち、外的刺激と行動との間の一对多の関係形成しているということが分かる。最後に、図 3(d) のエージェントを見てみよう。このエージェントの戦略はストレンジアトラクタに似た非常に複雑な形で特徴付けられている。このエージェントの出力値の時系列を詳しく調べてみたところ、リアプノフ指数は約 0.02 (埋め込み次元が 17) であり、相関次元は約 0.9 次元であった。すなわち、そのエージェントのダイナミクスは弱い非線形性を持つ高次元カオスであることが確かめられた。更に興味深いことに、このエージェントは、少数派の手が「-1」に固定されたターン内で、学習によるエージェントの内部構造の修正無しに、図に示されるような非常に複雑な振る舞いを示したのである。これらの結果は、図 3(d) のエージェントが、原理的には同じ外的刺激に対して無限種類の振る舞いを示すことが可能であることを意味する。そして同時に、エージェントが内部ダイナミクスを持つことによって、エージェントは行動の多様性を獲得できるということが確かめられたことになる。

5. 議論

本研究では、カオス的な振る舞いを示すエージェントの存在が確かめられた。カオス・ダイナミクスは、小さな変化を指

*3 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 [Kaneko 96]」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。

*4 各エージェントの戦略は獲得後に固定化されるわけではなく、10000 ステップおきに行われる学習によって変わる。

*5 我々のシミュレーションでは、様々なエージェントの戦略が見られるが、ここでは典型的な 4 種類の例のみを示す。

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 [Ott 93]。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「一对無限の関係」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。

このシナリオ通りであるかどうかを確かめるために、4.1節で示したマクロレベルでの6種類の変化パターンのそれぞれが、どのような振る舞いを示すエージェント達によって作られるのかを調べてみた。その結果のまとめを表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。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して続けたりはせず、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、カオスの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。

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

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。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。

また、マクロレベルでの遍歴ダイナミクスは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。これは、エージェント社会に現れたある種の社会的な構造が壊れては再び新しい構造が現れる、という社会構造のダイナミクスと見なすこともできる。そして、単純な固定点や周期的変化はその背後に何らかの規則性を感じさせる。すなわち、少数派の手の時系列が固定点や様々な周期ダイナミクスとなっている時には、その背後に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)」が生じていると考えることができる。このことから、本研究を通して「制度」や「規範」などマクロなルールと考えられるものの形成と崩壊のダイナミクスについて、更に議論することができるかもしれない。

6. 結論

我々は、社会構造の創発やそのダイナミックな変化について考える際、社会の成員である人間を、内部ダイナミクスを持つ認知エージェントとして捉えることの重要性を議論した。更に、その重要性を具体的に示すために、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、拡張版単純再帰型ネットワーク(拡張版SRN)を提案した。我々が提案したエージェントで構成され、マイクロマクロ・ループが実装された動的な社会シミュレーションを用いることによって、我々はマイクロとマクロの両方のレベルにおいて複雑なダイナミクスが生じることを示した。そしてその変化が、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「一对無限の関係」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、我々の提案した拡張版SRN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社会的エージェントを採用した意義は大きいと思われる。

我々のシステムでは、社会構造の動的な変化を内部ダイナミクスを持つエージェントによって示すことができた。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

- [Challet 97] Challet, D., Zhang, Y.C., Emergence of Cooperation and Organization in An Evolutionary Game, *Physica A*, **246**, 407-418, 1997.
- [Egashira 04] 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 (in press).
- [Elman 90] Elman, J.L., Finding Structure in Time, *Cognitive Science*, **14**(2), 179-211, 1990.
- [Kaneko 96] Kaneko, K., Tsuda, I., Chaos: Focus Issue on Chaotic Itinerancy, *Chaos*, **13**(3), 926-936, 2003.
- [Ott 93] Ott, E., *Chaos in Dynamical Systems*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1993.
- [Port 95] Port, R., van Gelder, T., *Mind as Motion: Explorations in the Dynamics of Cognition*, MIT Press, Cambridge MA, 1995.
- [Shiozawa 97a] 塩沢由典, 複雑さの帰結, NTT 出版, 東京, 1997.
- [Shiozawa 97b] 塩沢由典, 複雑系経済学入門, 生産性出版, 東京, 1997.
- [van Gelder 95] van Gelder, T., The Dynamical Hypothesis in Cognitive Science, *Brain and Behavioral Sciences*, **21**, 615-665, 1998.
- [Varela 91] Varela, F.J., Thompson, E., Rosch, E., *The Embodied Mind -Cognitive Science and Human Experience-*, MIT Press, Cambridge MA, 1991.