

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[†]

社会を動的に変化するものとしてとら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種類の秩序のパターンを非周期的変化を経て繰り返し遍歴するという社会構造のダイナミクスが示されることがある。本論では、社会構造のダイナミクスの発生要因の1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、内生的な社会構造の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。

Effects of Internal Dynamics and Micro-Macro Loop on Dynamics of Social Structures

TAKASHI SATO[†] and TAKASHI HASHIMOTO[†]

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 kinds of ordered patterns via aperiodic motion. Further, we report results of analyses investigating an 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 dynamics of social structure.

1. 序 論

社会には階級、制度、そして規範など、様々な社会構造が見られる。マクロレベルの社会構造は、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ものがある。そのような内生的に創発する社会構造は、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、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。このミ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^{20),21)}。

社会や社会構造を動的に変化するものとしてとらえ

る見方は様々な研究者によって支持されてきた。たとえば、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、「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²⁵⁾。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²⁹⁾。

本論では、このように社会をダイナミックなものとしてとらえる見方を「動的社會観」と呼ぶ。そして、この動的社會観の立場に立ち、社会構造の形成/維持/変化に対するマイクロ・マクロ・ループの重要性に着目する。この観点からは、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ミ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。これは、すなわち、人間をどのようにとらえるべきか、という問題を同時に考えなければならないことを意味する。

[†] 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
現在、独立行政法人科学技術振興機構沖縄大学院大学先行的研究事業
Presently with Initial Research Project, Okinawa Institute of Science and Technology, JST

社会や社会構造とともに、社会の中の人間というテーマは社会科学の創成期から論じられ、様々な人間像が提示されてきた。主流派経済学では、人間の効用あるいは選好は所与とされ、人間が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。しかし、この非現実的な仮定は多くの論議を呼び、経済学内部においても多くの研究者によって批判された。Simonの限定合理性²²⁾やKnightの不確実性¹⁴⁾はその典型例といえる。また、人間の持つ価値観や認知能力などが所与とされ、それが動的なものとして扱われることがほとんどなかった時代に、人間の認識内部の秩序と社会的な秩序の関係を重視し、人間の認識枠組みの形成において、他者の「模倣」が重要な意味を持つことを指摘したHayek⁹⁾は高く評価できる。しかし、これらの合理主義批判をした経済学者たちは、問題の本質をとらえてはいたが、彼ら自身が主流派経済学の全知全能型合理的経済主体の代替モデルを提出できたわけではない。さらに、自然科学の考え方や方法論が持ち込まれることによって生まれた、同じ「経済」と名の付く経済物理学では、社会科学において重要であると考えられる「主体の人間像」〔あるいは主意主義(voluntarism)〕を取り去り、客観的なマクロレベルのデータを扱うことで、経済現象を物理学的にとらえている²⁴⁾。

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」として人間をとらえている⁵⁾。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⁸⁾。しかし、彼らは人間の内的な認知枠組みのダイナミックな形成過程を考慮した人間のモデル化を試みてはいたが、実際に採用されたモデルは自身の内部状態の更新が他者との相互作用に依存しており、自律的に変わらないという意味では静的なモデルといえる。また、そのモデルを用いた実験では、一度できた制度は変化しない。一般に、マクロ構造からミクロへの影響がミ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えられる。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、自発的な社会構造のダイナミクスを示した¹⁹⁾。

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。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たとえば概日リズム(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、社会心理学、そして、発達心理学などの分野では、内部ダイナミクスが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とらえることの重要性を主張している。たとえば、Varelaらは、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²⁸⁾。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变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¹³⁾。さらに、Gelderらは人間が外的環境との、そして、内的な自身との相互作用によって変化する動的な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ことを標榜している^{26),27)}。

本研究で目指していることは、社会で見られる様々な現象(マクロレベル)とそれを生起させているであろう社会成員(ミクロレベル)との間の動的な関係性を明らかにすることを通じて、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とらえること、および時間的に変化するものとして社会構造をとらえる、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。したがって、我々はある特定の社会/経済現象にのみ着目し、その説明を試みようとしているのではない。そのために、本研究では抽象的なゲーム論

Necker Cubeによる視覚実験では、客観的に同一の図形の知覚的な見え方が時間とともに変わるとい現象が確かめられている。この実験結果は、内部状態の自律的な変化により、同じ刺激に対して多様な認知処理がなされることを示唆するものである。近年、カオスニューラルネットワーク、すなわち、内部ダイナミクスを持つ動的なニューラルネットワークを用いた、多義図形認識に関する研究も行われている^{16),18)}。

的状況を設定し、マイクロレベルとマクロレベルの双方の特徴を反映する形で構成したモデルを「動かす」ことを通してそのモデルを理解する「構成論的アプローチ^{11),12)}」によって、2つの異なるレベルにおける普遍的性質を探究することを目標としている。

先に示したように、我々はすでに動的認知主体のモデルとして SRN-SIC を提案し、多数の SRN-SIC で構成した「動的社会シミュレーション」を用いて、社会構造のダイナミクスがエージェント社会において内生的に生じることを示した¹⁹⁾。しかしながら、社会構造のダイナミクスを形成/維持するための条件は明らかにされていない。そこで本論では、この社会構造のダイナミクスに対して、エージェントの内部ダイナミクスとマイクロマクロ・ループがどのように影響しているのかを調べることを目的とする。

本論の構成は以下のとおりである。まず2章では、動的認知主体のモデルとして我々が提案した SRN-SIC、および動的社会シミュレーションの実験結果を概観する。次に3章では、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、社会構造の内生的なダイナミクスの形成/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。4章では、マイクロマクロ・ループの切断実験によって得られた結果から、社会構造のダイナミクスを形成/維持するための条件について議論し、5章で結論を述べる。

2. 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

2.1 内部ダイナミクスの重要性

人間は、外的刺激がない状態、あるいは一定の外的刺激が与えられた状態であっても内部状態は自律的に変化する。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、人間の行動における「多様性」と「一貫性」を矛盾なく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/同じ刺激に対しても様々な振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めに行われるのではなく、行動と行動の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、たとえ同じ外的刺激を受け取り続けていたとしても内部状態は独立に変わる。したがって、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「一对多の関係」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、人間は何らかの行動を行ったとき、その行動に関わる体の部位を「動かした」という情報が脳にフィードバックされることにより、自身の行った行動を認識できる。これは、内部状態が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からも影響されることを意味する。すなわち、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。したがって、そのようなダイナミクスを持った内部状態に基づく行動は、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、行動の一貫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のモデル

ここでは、我々が提案した動的認知主体モデルを簡単に紹介する。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)⁶⁾」を、過去の自身の振舞いからも直接影響を受ける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¹⁹⁾。

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

我々は、時間に依存して変化する社会構造のダイナミクスを示すことができるシミュレーションのことを「動的社会シミュレーション」と呼ぶ。この動的社会シミュレーションでは、マイクロとマクロの2つのレベルに対するマイクロマクロ・ループの効果を、具体的かつ実際に検証することができる。よって、概念的な議論にとどまりがちなマイクロマクロ・ループに関する研究を進展させるものとなる。我々はこの動的社会シミュレーションによって、社会構造のダイナミクスの力学的理解を目指す。

仮に、人間の内部状態を心、内臓などの状態や血液の循環、心拍数、あるいは思考や表象としてとらえるならば、人間の内部状態が自律的に変化するということに関しては想像に難しくないであろう。また、五感が奪われても人間は思考することができる、ということなどからも、さらに、先に示したように Necker Cube などの多義図形による視覚実験からも明らかである。

体のある部位を動かそうとしたとき、脳からその部位を動かすための運動指令が出される。この運動指令を伝達するための回路を遠心路(あるいは遠心性回路)と呼ぶ。一方、体のある部位を動かしているときに、その動いているという情報を脳に返すための回路もあり、それを求心路(あるいは求心性回路)と呼ぶ。人間はこれら2つの回路を持っていることにより、自身の行動をモニタリングできる^{17),23)}。Giddens は、人間は社会との関わりの中で自身の行動がどのように位置づけられるかをたえずモニタリングしていると主張し、人間のこのような動的な性質を「再帰的モニタリング」と呼んだ⁷⁾。

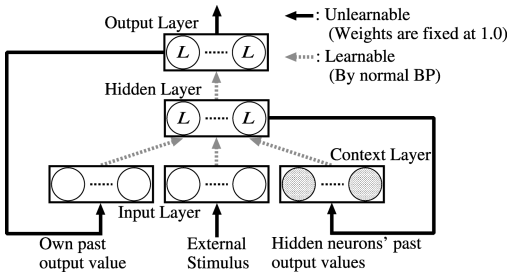


図 1 内部ダイナミクスを持つエージェント（自己影響結合付き SRN, SRN-SIC）の構造

Fig.1 Architecture of agent having internal dynamics, called Simple Recurrent Network with Self-Influential Connection (SRN-SIC).

力層と出力層の間に「隠れ層」を持つ。さらに第 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とき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。SRN-SIC は、さらに出力層のニューロンと入力層のニューロンが一対一に再帰結合している。この結合線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。

次に、SRN-SIC の具体的な数理表現を示す。入力および文脈ニューロンを除く各ニューロンの出力関数は、値域が -1.0 から 1.0 である微分可能な非線形関数である。その関数を式 (1) で表す。

$$L(net) = \tanh(\beta net) \tag{1}$$

ここで、 net は重み付けされた入力値の和、 β は関数 L の非線形性の強さである。

SRN-SIC の出力値は式 (2) および (3) によって決定される。

$$o_k(t) = L(net_k(t)) \tag{2}$$

$$net_k(t) = \sum_j w_{kj} v_j(t) + \theta_k \tag{3}$$

$o_k(t)$ は時刻 t での k 番目の出力ニューロンの出力値、 w_{kj} は k 番目の出力ニューロンと j 番目の隠れニューロンを結ぶ結合線の重み、 $v_j(t)$ は時刻 t での j 番目の隠れニューロンの出力値、そして、 θ_k は k 番目の出力ニューロンのバイアスである。

隠れニューロンの出力値は式 (4) および (5) によって決定される。

$$v_j(t) = L(net_j(t)) \tag{4}$$

$$net_j(t) = \sum_i w_{ji} x_i(t) + \sum_h w_{jh} v_h(t-1) + \sum_l w_{jl} o_l(t-1) + \theta_j \tag{5}$$

w_{ji} は j 番目の隠れニューロンと i 番目の入力ニューロンを結ぶ結合線の重み、 $x_i(t)$ は時刻 t での i 番目の入力ニューロンが受け取る入力値、 w_{jh} は j 番目の隠れニューロンと h 番目の文脈ニューロンを結ぶ結合線の重み、 $v_h(t-1)$ は時刻 $t-1$ での h 番目の隠れニューロンの出力値、 w_{jl} は j 番目の隠れニューロンと l 番目の出力ニューロンの過去の出力値を受け取るニューロンを結ぶ結合線の重み、 $o_l(t-1)$ は時刻 $t-1$ での l 番目の出力ニューロンの出力値、 θ_j は j 番目の隠れニューロンのバイアスである。

SRN-SIC におけるすべての再帰結合線の結合重みは「1.0」が割り当てられており、これらは変化しない。すなわち、文脈ニューロンも出力ニューロンの過去の出力値を受け取るニューロンも、各時刻においては入力ニューロン的一种と見なすことができる。つまり、SRN-SIC は、各時刻においてある種の階層型ニューラルネットワークとしてとらえられる。したがって、学習方法としては、一般的な誤差逆伝搬法を用いることができる。

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 らによって提案された Minority Game (MG)³⁾ を採用した。MG は、非常に単純化した株式市場のモデルと見なすこともできる³¹⁾。このゲームは、以下に示すように、全プレイヤー同時参加型のゲームで、勝敗が全員の振舞いによって決定される。また、ゲームの結果をプレイヤーに公共情報として開示することにより、プレイヤー全員の相互作用の結果を各プレイヤーに反映させられる。したがって、MG はゲーム理論の研究でよく用いられる 2 人ゲームよりも自然な形でマイクロマクロ・ループを考慮することができるゲームであると考えられる。MG の基本ルールは以下のとおりである。

- (1) n (奇数) 人のプレイヤーが各時刻で 2 つある手（「売る」or「買う」あるいは「-1」or「1」など）のうちの 1 つを各自独立に選択する。
- (2) 少数派に属したプレイヤーを勝ちとする。

SRN-SIC の出力関数は -1.0 から 1.0 までの範囲の実数を出力する。本研究では MG に合わせて、出力ニューロンの数は 1 とし、さらにその出力値は 0.0 を境に -1 か 1 のどちらかに割り振っている。

本シミュレーションでは、マイクロマクロ・ループを次のようにとらえる。まず、マイクロおよびマクロレベルを考えなければならない。ここでは、MG をプレイする全プレーヤがある社会における社会成員に相当すると考える。すなわち、それらはマイクロレベルに属するものとしてとらえられる。そして、MG の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何らかのパターンが現れる場合、それはマイクロレベルから作られるマクロレベルのある種の構造を反映したものととらえられる。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、全プレーヤに直前のゲームにおける少数派の手を外的刺激として与えるという形で、また、過去の少数派の手の時系列を学習させるという形でループを構成する。

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、過去の少数派の手、そして過去の自分の内部状態を基にそれぞれ独立に手 (-1 or 1) を決定する。次に、全エージェントの手を基に少数派の手が決まる。ここまでのプロセスをまとめて「1 ステップ」とし、10,000 ステップ繰り返した後に、全エージェントは過去 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。

動的社会シミュレーションの実験結果を概説する前に、ここで実験条件を示す。

- エージェント (SRN-SIC) の数は 101 とする。
- 各 SRN-SIC は 1 個の出力ニューロン、5 個の隠れおよび文脈ニューロン、2 個の入力ニューロン (1 つは外的刺激を受け取るための、そしてもう 1 つは出力ニューロンの過去の出力値を受け取るためのものである) を持つ。
- 各 SRN-SIC の入力および文脈ニューロンに初期値として、0.0 をセットする。
- 各 SRN-SIC の全結合線の初期重みとして、-0.5 から 0.5 までの範囲の一樣乱数をセットする。ただし、各再帰結合線の重みは 1.0 とし、学習によって変更されないものとする。
- MG は 1,000,000 ステップまで繰り返し行われる。
- 前述のとおり、学習プロセスは 1 ターン (10,000 ステップ) ごとに行われる。
- 過去 100 ステップ分の少数派の手の時系列を通して学習することを 1 エポックと呼び、学習プロセスでは 10 エポック繰り返す。

- 学習は誤差が 0.01 以下になったとき、終了する。
- 学習率は 0.01、モーメント係数は 0.8、各出力関数の非線形性の強さは 0.8 とする。

本シミュレーションでは、マクロレベルでの様々な変化が観察された。ここでは、マクロレベルでの少数派の手の変化の仕方にのみ注目し、そのダイナミクスを分類する。本研究では、マクロレベルでの少数派の手の時系列に見られる、数十ステップ以上のあるまとまった長さを持つ固定点または周期的変化を「秩序的パターン」と呼ぶ。

マクロレベルでの様々な変化のうち、固定点、周期的および非周期的変化のすべてが「1 ターン内」で見られるという興味深い複雑な少数派の手の変化が確認された。その複雑な少数派の手の変化の一部を 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。我々は、図 2 に示されるような、バリエーションに富んだ複数種類の秩序的パターンが、非周期的変化を経て繰り返し 1 ターン内で変遷するというマクロレベルでの少数派の手の変化を「遍歴ダイナミクス」と名付けた。

本シミュレーションでは、遍歴ダイナミクスのほかに 3 種類のマクロレベルでのダイナミクスが観察された。3 種類のダイナミクスのそれぞれには、以下のように名前を与え、遍歴ダイナミクスと区別する (表 1)。秩序的パターンがまったく生じず、1 ターンの始まりから終わりまで非周期的に変化するダイナミクスを「非周期的ダイナミクス」と呼ぶ。また、固定点または周期的変化のどちらかに収束し、1 ターン内で別の秩序的パターンには変化しないダイナミクスを「単一ダイナミクス」と呼ぶ。さらに、1 ターン内で 1 種類

マクロレベルでの少数派の手の変化の仕方を固定、周期、非周期の 3 種類、そして、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 種類の変化が観察された¹⁹⁾。

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。

このようなダイナミクスは、金子らが提唱している「カオスの遍歴¹⁰⁾」に類似しているように見える。カオスの遍歴は、秩序状態の遍歴の仕方がカオスになっているということで特徴付けられる。しかし、そのような観点から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、まだ確かめられていない。よって、カオスの遍歴という名前を使う代わりに、本研究ではあえて遍歴ダイナミクスという名前を使っている。

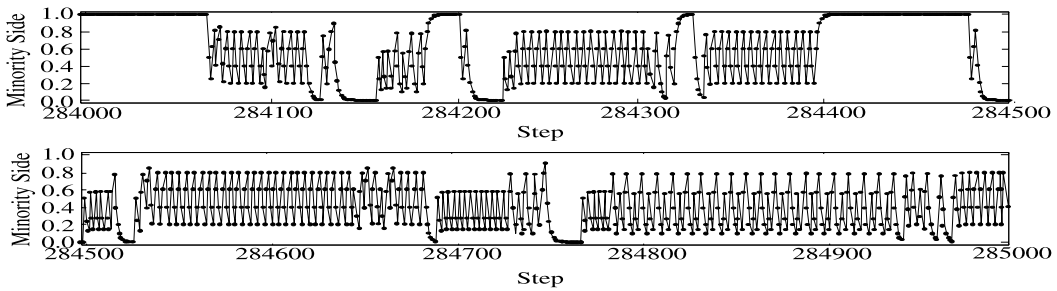


図 2 1 ターン内におけるマクロレベルの遍歴ダイナミクスの例

Fig. 2 An example of the itinerant dynamics at the macro level in one turn.

表 1 1 ターン内で観察されるマクロレベルでのダイナミクスの分類
Table 1 Classification of dynamics observed at the macro level in one turn.

ダイナミクスの種類	1ターンで見られるダイナミクス
非周期的ダイナミクス	非周期のみ
単一ダイナミクス	1種類の秩序的パターンのみ
間欠性ダイナミクス	1種類の秩序的パターン +非周期
遍歴ダイナミクス	複数種類の秩序的パターン +非周期

の秩序的パターンと非周期的変化が交互に繰り返し生じるダイナミクスを「間欠性ダイナミクス」と呼ぶ。

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マクロレベルを介したエージェント間の相互作用と彼らの内部ダイナミクスによって引き起こされ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固定点や周期的変化などの秩序的パターンは、簡単な力学系で記述可能である。すなわち、ある秩序的パターンがマクロレベルで生じているときには、ミクロレベルの各エージェントを支配する何らかの「規則(ルール)」が生じていると見なすことができる。

別の視点からは次のように考えることができる。マクロレベルにおいてある秩序的パターンが生じるためには、ミクロレベルの多くのエージェントが似たような行動をする必要がある。そして、ミクロレベルの多くのエージェントが同調的に振る舞うためには、似たような振舞いを示すための内部構造を各エージェントが獲得している必要がある。Veblen は「制度」を

「人々の総体に共通なものとして定着した思考の習慣」と定義した³⁰⁾。また、江頭と橋本は Veblen の制度の定義を「ある集団が、外部からの刺激を認識、解釈し、反応する場合の処理様式である」と解釈した⁵⁾。この制度に関する Veblen の定義や江頭らの解釈に従うならば、マクロレベルである秩序的パターンが見られる場合、エージェントの社会においてある種の制度、つまり「社会構造」が形成されたと解釈できる。

このような観点から、表 1 に示される 4 種類のマクロレベルでのダイナミクスは次のように解釈できる。非周期的ダイナミクスは、まったく秩序的パターンが見られないダイナミクスであるので、社会構造が形成されていない状態であると解釈できる。単一ダイナミクスは、1 ターン内で崩壊しない安定した 1 つの社会構造が形成されている様子、そして、間欠性ダイナミクスは、1 つの社会構造が形成と崩壊を繰り返す様子を表す。また、遍歴ダイナミクスは様々な社会構造が形成と崩壊を繰り返しながら変遷している様子を表す。よって、遍歴ダイナミクスはエージェント社会において内生的に生じた「社会構造のダイナミクス」としてとらえることができる。

Challet らが提案した MG³⁾ を用いた研究では、エージェントのメモリサイズに応じて、マクロレベルのダイナミクスが周期あるいは非周期となることが示されている^{4),15)}。しかし、様々な秩序的パターンを非周期的変化を経て変遷するという遍歴ダイナミクスを示す MG 研究ははまだ見られない。MG 研究のほとんどが静的なエージェントモデルを採用しているのに対し、本研究では内部ダイナミクスを持つ動的なエージェントモデルを採用している。すなわち、本研究で得られた結果は、MG 研究において静的なエージェントモデルを採用するのでは見えない世界があることを示唆している。

3. 動的社会シミュレーションにおけるマイクロマクロ・ループの効果

マイクロマクロ・ループは、社会構造のダイナミクスの発生要因の1つとして考えられる。前章では、動的な社会シミュレーションにおいて、社会構造のダイナミクスとしてとら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での相互作用によって内生的に生じることを示した。ここでは、マイクロマクロ・ループの効果を確認するために、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の結果を示す。

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値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、様々な秩序的パターンを非周期的変化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。ここで「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、ということの意味する。

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ターンで見られた。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く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、マイ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なくなることはない、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、全エージェントに与える。ここでは、1) $-1.0, 0.0$ 、または 1.0 の固定値、そして2) 様々な乱数幅の1様乱数という2種類の人工的な入力を別々に与える。

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ときに形成されるマクロレベルで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彼らに与え始めると、遍歴ダイナミクスは崩壊して、非周期的ダイナミクスや間欠性ダイナミクスが生じる。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全エージェントに与え始めると、遍歴ダイナミクスは再生する。

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1様乱数を与える実験の結果を示す。図4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(c) -1.0 から 1.0 までの範囲の1様乱数を外的刺激として全エージェントに与えたときのマクロレベルで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全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、非周期的ダイナミクスや間欠性ダイナミクスに変化することを示している(図4(a)~(c)の左側)。そして、再び、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ことを示している(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への入力

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、マクロレベルで固定点および周期的な単一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、つねに遍歴ダイナミクスが形成されるわけではなく、図5(b)に示されるように、間欠性ダイナミクスなども形成される場合がある。さらに、遍歴ダイナミクスの影響を受けず、固定点のまままった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。

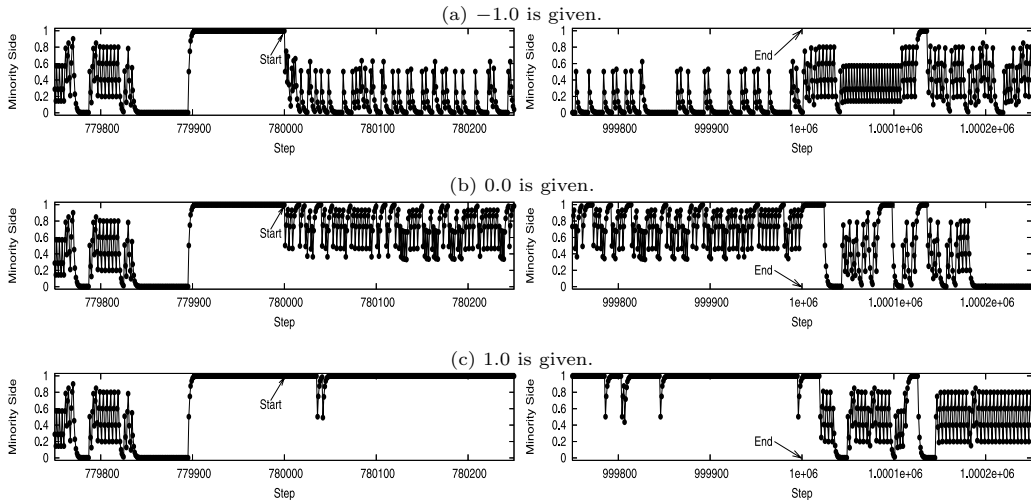


図 3 人工的な固定値の入力開始および終了による遍歴ダイナミクスの崩壊と再生
 Fig. 3 Collapse and regeneration of the itinerant dynamics by starting and ending of the artificial fixed inputs.

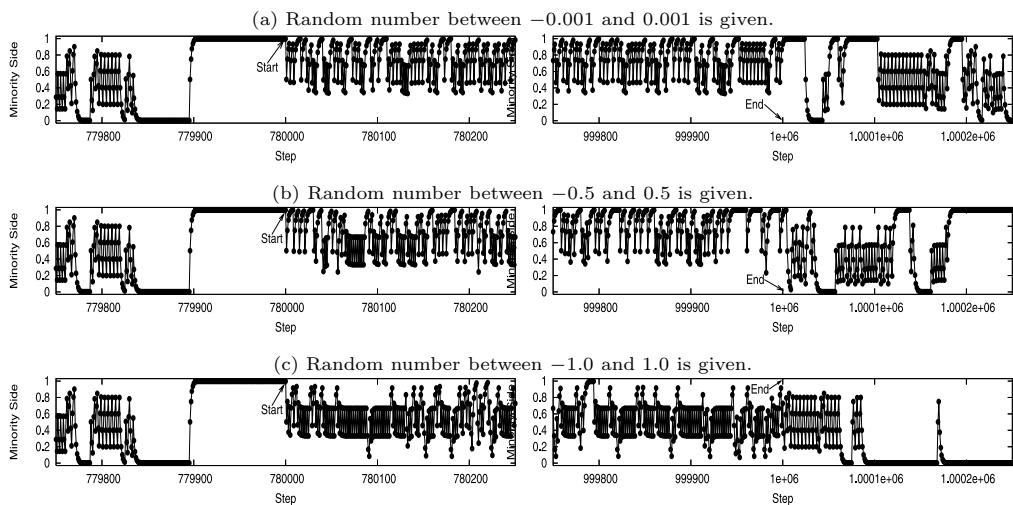


図 4 様々な乱数幅での人工的な一様乱数の入力開始および終了による遍歴ダイナミクスの崩壊と再生
 Fig. 4 Collapse and regeneration of the itinerant dynamics by starting and ending of the uniform random inputs with various range.

全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、ほとんどすべての場合、図 5 (a) および (b) のそれぞれの右端に示されるように、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固定点 (a) または 4 周期 (b) などの元のマクロダイナミクスが再生する。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異なる遍歴ダイナミクスが形成されたとしても、その時系列が全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ことが分かった。

4. 議論——遍歴ダイナミクスを形成・維持するための条件

本論では、社会構造のダイナミクスとしてとらえられる遍歴ダイナミクスに対するマイクロマクロ・ループの効果を調べる実験を行った。その結果を表 2 にまとめる。

例外として、元のマクロダイナミクスとは異なる周期などの単純な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。

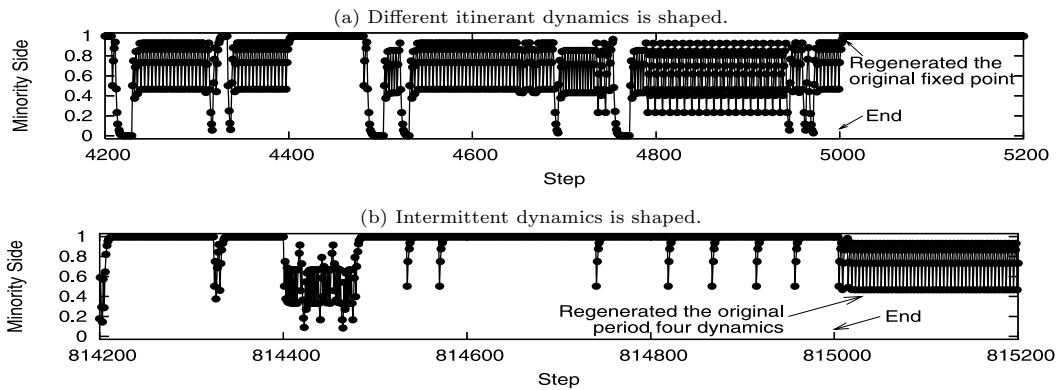


図5 固定点 (a) または周期的 (b) 単一ダイナミクスを形成するエージェントに遍歴ダイナミクスの時系列を与えた場合に見られるマクロレベルでのダイナミクス

Fig.5 Dynamics at the macro level when the itinerant dynamics is input to the agents shaping (a) single fixed and (b) single periodic dynamics.

表2 ミクロマクロ・ループを一時的に切断する実験のまとめ
Table 2 Summary of the experiments in which the micro-macro loop is temporarily cut off.

入力時系列	社会構造のダイナミクス		社会構造のダイナミクスを形成・維持する機構
	入力開始	入力終了	
固定点	崩壊	形成	マイクロマクロ・ループ
一様乱数	崩壊	形成	
遍歴ダイナミクス	形成 (例外あり)	崩壊	ある種の内部構造を持つエージェント群

まず、遍歴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全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れ、非周期的ダイナミクスや間欠性ダイナミクスが生じた。しかし、マイクロマクロ・ループを元に戻すと遍歴ダイナミクスは例外なく再生した。これらの実験の結果は、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ないし維持するために必要である可能性があることを支持するものである。

さらに、単一ダイナミクスが生じるターンで、遍歴ダイナミクスの時系列を全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止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

表3 マクロレベルでの変化とエージェントの行動との対応関係
Table 3 The correspondence between dynamics at the macro level and the configuration of agents at the micro level.

マクロレベル		マイクロレベル		
少数派の手の変化	勝者数の変化	固定点	周期的変化	非周期的変化
固定点	固定点	101	0	0
固定点	周期的変化	84	17	0
固定点	非周期的変化	50	46	5
周期的変化	周期的変化	63	38	0
周期的変化	非周期的変化	20	77	4
遍歴的変化	非周期的変化	8	6	87

ナミクスは例外なく崩壊した。そのうえ、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、どのようなエージェントでもよいというわけではなく、マイクロマクロ・ループのほか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、どのようなエージェントが遍歴ダイナミクスを形成しているのかを明らかにするために、マイクロレベルにおける各エージェントの行動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3に示す。表3の左側の2つの列は、それぞれマクロレベルの少数派の手の変化の仕方と勝者数の変化の仕方、表の右側の各数字はそれぞれ固定、

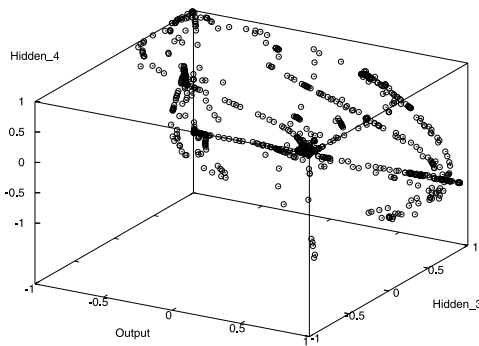


図 6 遍歴ダイナミクスを形成するエージェントのうち、行動のダイナミクスがカオスであるエージェントの戦略

Fig.6 The strategy of agent showing chaotic behavior in the group shaping the itinerant dynamics.

周期、非周期的な振舞いを示すエージェントの数である。表 3 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が生じる場合は、約 90% の非周期的な振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。

次に、遍歴ダイナミクスを形成するエージェントの内、非周期的な振舞いを示す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調べた。その結果、非周期的な振舞いを示すエージェントは、図 6 に示されるように、ストレンジアトラクタに似た形状で記述される非常に複雑な「戦略」を獲得していることが分かった。さらに、このエージェントの出力値の時系列を解析した結果、行動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、カオス・ダイナミクスには無限種類の周期が含まれることから、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と考えられる。すなわち、カオス的な振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の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とり続けたり、有限種類の行動を周期的に繰り返し続けたりはせず、単純な振舞いから複雑な振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でのダイナミクスが、限りのない無限種類のカオス的な行動を示す数多くの人間によって引き起こされていることを示唆する。

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発生要因を論じた。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を行い、社会構造のダイナミクスの発生要因の 1 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、社会構造のダイナミクスとしてとら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一対無限の関係によるカオス的な振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可能性があることを支持する結果が得られた。

我々のシミュレーション実験の結果は、ダイナミック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示唆するものである。よって、我々は、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おいて重要な可能性がある結論する。また、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うえで、我々の提案した SRN-SIC は内部ダイナミクスを持つ動的な認知エージェントの有効なモデルの 1 つであると考えられる。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

エージェントの出力値と内部ダイナミクスの関係を表す 3 次元相空間上に現れる点集合の形状から、エージェントの振る舞い方を決定するためのある種の戦略がどのようなものであるかを知ることができる。ここで 3 次元相空間の x, y , そして z 軸は、それぞれ出力ニューロン、第 3 隠れニューロン、第 4 隠れニューロンの出力値である。なお、他の隠れニューロンとの組合せであっても、ほぼ同様の図が得られることが確かめられている。たとえば、3 次元相空間上に有限個の点のクラスタが示される場合、エージェントが有限状態遷移機械で表現可能な戦略を獲得しているということが分かる。一方、図 6 では、3 次元相空間上にストレンジアトラクタに似た非常に複雑な形状の点集合が表されることから、ここで例示したエージェントの行動のダイナミクスはカオスであることが示唆される。事実、このエージェントの行動のダイナミクスは、その出力値の時系列解析によってカオスであることが確かめられている。

レベルの相互作用という形ではほとん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。

本研究では、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、さらに、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いうことに対しては、より深く、か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。

謝辞 本研究を進めるにあたり、小樽商科大学の江頭進助教授、大阪市立大学の中島義裕助教授、北陸先端科学技術大学院大学の並川淳氏、京都産業大学の舛本現氏、慶應義塾大学の井庭崇専任講師には有益な議論をしていただいた。これらの方々にお礼申し上げます。また、本研究は文部科学省科学研究費補助金(No.15700183)の補助を受けている。ここに謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Aoki, M.: *Towards A Comparative Institutional Analysis*, MIT Press (2001).
- 2) Blumer, H.G.: *Symbolic Interactionism: Perspective and Method*, Prentice-Hall (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. and Zhang, Y.C.: Emergence of Cooperation and Organization in An Evolutionary Game, *Physica A*, Vol.246, pp.407-418 (1997).
- 4) Challet, D.: The Minority Game's web page. <http://www.unifr.ch/econophysics/minority/>
- 5) 江頭 進, 橋本 敬: 社会科学における人間の認知の位置, 進化経済学のフロンティア, 西部忠(編), 第7章, 日本評論社, pp.159-180 (2004).
- 6) Elman, J.L.: Finding Structure in Time, *Cognitive Science*, Vol.14, No.2, pp.179-211 (1990).
- 7) Giddens, A.: *New Rules of Sociological Method*, Hutchinson (1976) (1993, 2nd Ed.). 松尾精文, 藤井達也, 小幡正敏(訳): 社会学の新しい方法規準, 而立書房 (1987) (2000, 2nd Ed.).
- 8) Hashimoto, T. and Egashira, S.: Formation of Social Norms in Communications Agents with Cognitive Frameworks, *Journal of Systems Science and Complexity*, Vol.14, No.1, pp.54-74 (2001).
- 9) Hayek, F.: Rules, Perception and Intelligibility, *Studies in Philosophy, Politics and Economics*, Univ. of Chicago Press (1967).
- 10) Kaneko, K. and Tsuda, I.: Chaos: Focus Issue on Chaotic Itinerancy, *Chaos*, Vol.13, No.3, pp.926-936 (2003).
- 11) 金子邦彦, 津田一郎: 複雑系のカオス的シナリオ, 朝倉書店 (1997).
- 12) 金子邦彦, 池上高志: 複雑系の進化的シナリオ, 朝倉書店 (1998).
- 13) Karmiloff-Smith, A.: *Beyond Modularity: A Developmental perspective on Cognitive Science*, MIT Press (1992).
- 14) Knight, F.H.: *Risk, Uncertainty and Profit*, Univ. of Chicago Press (1921).
- 15) Moro, E.: The Minority Game: An Introductory Guide, *Advances in Condensed Matter and Statistical Mechanics*, Korutcheva, E. and Cuerno, R. (Eds.), Nova Science (2004). <http://arxiv.org/abs/cond-mat/0402651>
- 16) Nagao, N., Nishimura, H. and Matsui, N.: A Neural Chaos Model of Multistable Perception, *Neural Processing Letters*, Vol.12, No.3, pp.267-276 (2000).
- 17) 西野仁雄, 柳原 大: 運動の神経科学 — 基礎から応用まで, ナップ (2000).
- 18) Nishimura, H., Nagao, N. and Matsui, N.: A Perception Model of Ambiguous Figures based on the Neural Chaos, *Progress in Connectionist-Based Information Systems*, Kasabov, et al. (Eds.), Vol.1, pp.89-92, Springer-Verlag (1997).
- 19) Sato, T. and Hashimoto, T.: Dynamic Social Simulation with Multi-Agents having Internal Dynamics, *New Frontiers in Artificial Intelligence: Joint Proc. 17th and 18th Annual Conferences of the Japanese Society for Artificial Intelligence*, Hasida, K. and Nitta, K. (Eds.), LNCS, Springer-Verlag (2005, To be published).
- 20) 塩沢由典: 複雑さの帰結, NTT 出版 (1997).
- 21) 塩沢由典: 複雑系経済学入門, 生産性出版 (1997).
- 22) Simon, H.A.: *Models of Man*, John Wiley &

Sons (1957).

- 23) 鈴木良次：手のなかの脳，東京大学出版会 (1994).
- 24) 高安秀樹，高安美佐子：エコノフィジックス — 市場に潜む物理法則，日本経済新聞社 (2001).
- 25) 横山 滋：模倣の社会学，丸善ライブラリー 008 (1995).
- 26) van Gelder, T. and Rort, R.: Its About Time: An Overview of the Dynamical Approach to Cognition, *Mind as Motion: Explorations in the Dynamics of Cognition*, Port, R. and van Gelder, T (Eds.), MIT Press (1995).
- 27) van Gelder, T.: The Dynamical Hypothesis in Cognitive Science, *Brain and Behavioral Sciences*, Vol.21, pp.615–665 (1998).
- 28) Varela, F.J., Thompson, E. and Rosch, E.: *The Embodied Mind —Cognitive Science and Human Experience*, MIT Press (1991).
- 29) Veblen, T.: Why is Economics Not an Evolutionary Science, *The Quarterly Journal of Economics*, Vol.12 (1898).
- 30) Veblen, T.: *The Place of Science in Modern Civilisation and Other Essays*, Huebsch (1919).
- 31) Zhang, Y.C.: Modeling Market Mechanism with Evolutionary Games, *Europhys. News*, Vol.29, pp.51–54 (1998).

(平成 16 年 11 月 19 日受付)

(平成 17 年 1 月 8 日再受付)

(平成 17 年 1 月 17 日採録)



佐藤 尚 (正会員)

1974 年生．2005 年北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科知識システム基礎学専攻修了．同年独立行政法人科学技術振興機構沖縄大学院大学先行の研究事業常勤研究員．知識科学博士．動的認知エージェントおよびマイクロマクロ・ループに関する研究に従事．専門分野は進化論的計算，人工生命，マルチエージェント・システム．進化経済学会，人工知能学会各会員．2004 年度人工知能学会全国大会 (第 18 回) 優秀賞．



橋本 敬

1967 年生．1990 年神戸大学理学部物理学卒業．1996 年東京大学大学院総合文化研究科広域システム専攻修了．同年理化学研究所基礎科学特別研究員．1999 年北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科助教授．1998 年 Sony Computer Science Laboratory-Paris 客員研究員．2001～2002 年イギリス，エディンバラ大学客員研究員．学術博士．複雑系，進化言語学等の研究に従事．日本物理学会，数理生物学会，日本認知科学会，国際人工生命学会各会員．