

# 複雑二重ネットワークモデル —知識と人のネットワークで社会を観る—

寺野 隆雄

本稿では、エージェント指向の社会シミュレーションの新しい手法として、複雑二重ネットワークモデルの概念を紹介する。複雑二重ネットワークモデルでは、個々の個体のもつ知識をエージェント内のネットワークで表現し、個体間の関係を社会ネットワークで表現する。これによって、社会ネットワーク上のエージェント間のインタラクションから生ずる個々のエージェント内の知識の変化ならびに社会ネットワークそのものの変化を動的に分析し、新しい知見を得ようとする。本稿では、最近の研究成果の例として貨幣概念の創発メカニズムの分析を述べるとともに、このような研究アプローチの今後について考察する。

キーワード：エージェント・シミュレーション，社会ネットワーク，複雑二重ネットワークモデル，貨幣の創発メカニズム

## 1. はじめに

口コミ，流行，世論の生成と消滅など，社会ネットワークの中で，情報がどのように伝わっていくかを知ることが興味深いし，その原理を知ることが知識社会に生きる我々にとって重要なことである。ここには，エージェントの内部のデザイン，インタラクションの方式，ミクロ・マクロ・リンクの形成に関する議論が本質的である。実際に，この目的でさまざまなネットワークモデルが提案されているし，また，適用例も多い[1][2]。

最近，このような問題に対して，計算論的な観点から社会科学の諸問題に接近しようという研究が活発になってきている。この分野については，計算的文化モデリング (Computational Cultural Modeling)，計算的社会行動モデリング (Computational Social and Behavioral Modeling) あるいは計算的文化力学 (Computational Cultural Dynamics) という用語が使われるようになってきている[3]。

一方，人間の知識とその変化をやはり頭の中のネットワークとして表現しようという研究が，人工知能の分野で盛んになされていた時期がある。この典型的な知識表現方法に意味ネットワークという概念がある[4]。これは，知識をノードとエッジを用いて構造化

し推論を行うための手法である。これは，オブジェクト指向の考え方とも近い。本稿の範囲では，意味ネットワークとは，ノードが，対象領域の概念や実体を表し，エッジは，意味的なラベルをもち，複数の要素間の関係を表すグラフ構造であるという理解で十分である。

本稿では，社会と知識のネットワーク構造を統一的に表現し，社会シミュレーションの諸問題に適用する試みを紹介する。それは，我々の研究グループの活動の中で開発してきた「複雑二重ネットワーク」というモデルである[5][6][7]。これは，ひとことでいえば，社会の構造と知識の構造とをともにネットワークとして表現して，この時間的な変化を数理的方法もしくはエージェント・シミュレーションの方法によって分析するものである。

複雑二重ネットワークはごく一般的な表現方法であり，社会システムに関連するさまざまな領域の問題に適用可能である。ここで，「複雑」ということばをモデルに採用したのは，いわゆる「複雑ネットワーク」の手法がモデルで利用可能なためである[1][8]。

複雑二重ネットワークの手法を紹介するために，本稿では，まず，社会シミュレーションでしばしば用いられる Schelling の分居モデルと Axelrod のタグモデルの説明を行う。そしてこれらの拡張としての複雑二重ネットワークモデルを提示し，これを用いた，貨幣の創発現象の研究例について報告する。貨幣の概念に関する議論[9][10]は最近でも経済学の大きなテーマであり，この問題に我々の接近法の妥当性を主張す

てらの たかお

東京工業大学 知能システム科学専攻  
〒226-8502 横浜市緑区長津田町 4259

ることは難しい面もある。しかしながら、社会シミュレーションの諸問題について操作的あるいは計算論的に接近しようとするこのような問題にすぐに直面する。本稿では、最後に今後について論じて結びとする。

## 2. Schelling の分居モデル

Schelling は、個人の嗜好とそれによってもたらされる社会の分居の関係を分析する目的で、以下のようなモデルを提案した[11]。個人（エージェント）は、近隣のエージェントの配置によって、近隣に存在する同じ種類のエージェントの数が与えられた閾値より多いか少ないかによって、自らが満足か不満足かを意思決定する。そして不満足な場合は満足できる場所を求めて移動する。その結果として社会全体に同じ嗜好をもつエージェントが分居し、複雑なパターンを形成する。

彼のモデルで示した結果が興味深いのは次の点である。エージェントにはふたつの種類しかなく、しかも、別の種類のエージェントに対する、個々の好みの差異がさほど大きくない場合でも、分居状態が創発する。すなわち、他者との相互作用が個々のレベルでは非常に弱いものであっても、結果として、社会的には大きな差が発生する可能性がある。わずかな嗜好の差が、アメリカの都市において、白人の居住区と黒人の居住区が発生する要因となっているという主張である。

このエージェント・シミュレーション・モデルの実現はきわめて容易であり、例えば、文献[12]などのテキストにプログラム例が紹介されている。また、より詳しい解説は、文献[13]においてもなされている。

## 3. Axelrod のタグモデル

人々は互いに性格が似ていればその習慣や文化を受け入れやすい。これによって、自らの考え方が徐々に変化していく。こうして形成される同質的なグループの存在はしばしば体験されることである。これが文化の伝播である。一方、世代の差、宗教の違いなど人々の（ちょっとした）考え方の違いにより、グループ間に理解しがたいほど深刻な壁が発生することもよく知られている。これが文化の棲み分けの現象である。これによって、隣同士の関係から国家のレベルに至るまで、大小さまざまなグループが形成されること、いったんグループ間の争いが発生するとそれが信じられないほど長く深いレベルまで継続してしまうこと、いったん形成されたように見える同質なグループがいつの

まにか分裂してしまうこと、などの現象が説明できる。

Axelrod は、前述した Schelling のモデルを改良し、エージェントの知識が変化する、あるいは、学習するモデルを提案し、これを、文化の流布モデルと呼んだ。この考え方は、今日では、タグモデルとして知られている[14][15]。

タグモデルでは、個々のエージェントの知識は、適当な長さの数字列で表現される。これがタグである。そしてタグの内容がエージェント間のインタラクションによって書き写され、知識・文化の伝播が生ずる。この際に、ふたつのエージェントの知識の類似度をエージェントのタグの一致度で計測し、似たエージェント同士の間では知識の伝播が発生しやすくする。この様子を示したのが図1である。

Axelrod のモデルでは、エージェント群を2次元に配置し、上下左右のエージェント同士で知識のインタラクションを行うものとした。エージェント群全体でもつ「知識」を「文化」と考え、その種類やパターンの変化をシミュレーションで分析するのが彼の考え方である。このような単純なモデルにもかかわらず、Schelling のモデルと同様、初期条件に応じて、エージェント群の文化のパターンは、1種類にまたは数種類に収束したり、複数の文化が変化しながら同時に存在しつづけたりするなどさまざまな結果が観測される。

これをもって、彼は次のように記述している：「共同社会が進化していくプロセスのカギは、グループの人間が共同作業できるくらい十分に共有された文化の発生にある。……私が主として興味を抱いているのは、強力な政府の活動を支えるうえで、あるいは活動以前に、文化の流布がどれだけの作用をしているかという点であった。」[15]

タグモデルの実現も非常に容易であり、詳細なモデル化の方法は、文献[15]などにも紹介されている。また、タグモデルに対しシュガースケープモデル[13]で

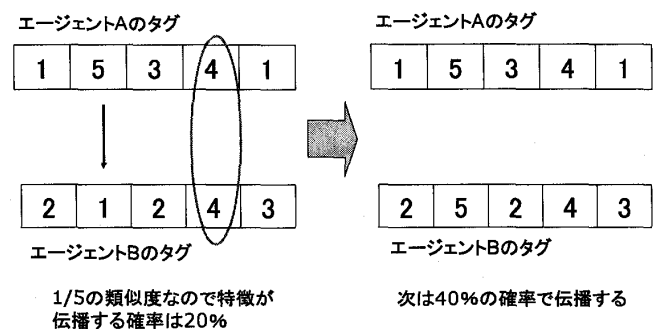


図1 Axelrod のタグモデルの考え方

は、格子空間上に資源の生産と消費・交換等の現象をモデル化することにより、様々な社会シミュレーションが展開されている。

これから、想像できるように、複雑二重ネットワークモデルは、エージェントの知識をタグ形式からネットワーク形式に拡張し、エージェント間のインタラクションを格子上の空間からエージェントの社会ネットワーク上に拡張したものになっている。

#### 4. 複雑二重ネットワークの定式化

我々の提案する複雑二重ネットワークモデルは、図2のような構造をもち、図3のように形式的に定義される[5]。

ここで  $G^S$  はエージェント外部の社会構造を表す社会ネットワーク、 $G^I$  は個々のエージェント内部の知識状態を表す内部ネットワークであり、二重ネットワークは、各エージェントの内部の状態を表すネットワークを外部の社会構造を表すネットワークで「束ねた」ものになっている。

二重ネットワークでは社会ネットワークと内部ネットワークは異なる階層に属する、質的に別のネットワークである。また当然のことながら「外部ネットワーク」と「内部ネットワーク」は連結されていない。このことから、二重ネットワークは、ニューラルネット・自己組織化マップ等で使用されているモジュラーネットとは、本質的に異なる形式である。

さらに、社会ネットワークと内部ネットワークは、必要に応じ其々無向グラフ/有向グラフのどちらでもかまわない。

この二重ネットワークにおいて社会ネットワークのノード（エージェント）間の相互作用による内部ネットワークの状態変化（エッジの接続・切断）を与えることにより伝播・学習のモデルが定義される。このと

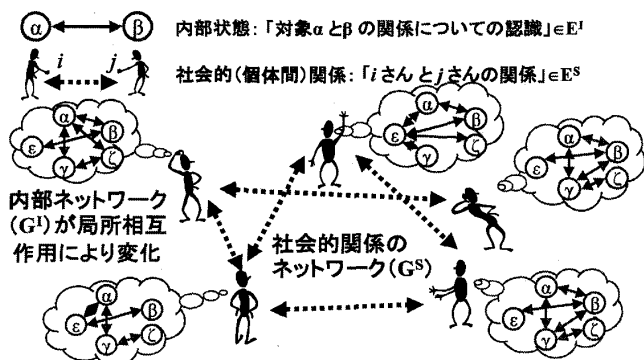


図2 複雑二重ネットワークモデル

き社会ネットワーク側にも変化がある場合を動的社会の二重ネットワークモデル、ない場合を静的社会の二重ネットワークモデルと呼ぶ。また内部ネットワークの状態変化が社会ネットワークにおける隣接エージェントの内部ネットワークの状態のみに依存して生起する場合を、二重ネットワーク上の1次のコンタクトプロセスと呼び、さらに内部ネットワークの状態変化が隣接エージェントとそのまた隣接エージェントの内部状態とそれらの相互作用に依存して生起する場合を、2次のコンタクトプロセスと呼ぶことにする。

ここで、すべての状態について其々の状態変化が確率1で決定される（すなわち決定論的な変化）の場合、二重ネットワークモデルはオートマトンとして記述されることになる。したがって二重ネットワークモデルにおいても動的に複雑な挙動[16]におけるクラス3（カオス）あるいはクラス4（カオスの縁）は原理的に存在し得る。

複雑二重ネットワークによる利点・優位性は以下のとおりである。

- 内部ネットワークの形態によって認識の状態を直接記述することができる。
- 内部ネットワークの形態自身によって自律的に引き起こされる変化（内部ネットワーク自身の成長法則や禁止則）をモデルに取り入れることができる。
- 社会ネットワークの形態・性質が内部ネットワークの変化に与える影響（マクロ→ミクロ）と、個々の内部ネットワークの集合的状态が社会ネットワークのマクロ的性質に与える影響（ミクロ→マクロ）というミクロ-マクロの階層間における相互作用を記述することができる。

#### 社会ネットワーク

- $G^S = (V^S, E^S)$ ,  $V^S = \{v_1^S, v_2^S, \dots, v_N^S\}$ ,  $E^S \subseteq V^S \times V^S$   
 $V$ は頂点集合、 $E$ は辺の集合を表す、上添え字Sは社会を、Iは内部を表す  
 下添え字  $i=1 \sim N$  は、エージェントを表す

#### 内部ネットワーク

- $G^I_i = (V^I_i, E^I_i)$  ( $i=1 \sim N$ ),  $V^I_i = \{v_1^I, v_2^I, \dots, v_M^I\}$ ,  $E^I_i \subseteq V^I_i \times V^I_i$

#### 社会の2重ネットワーク

- $G^D = \{ \{ (v_i^S, G^I_i) \}_{i=1 \sim N} \}, E^S$

#### 社会の2重ネットワークモデル(～時間(t)発展)

- $G^D_{t+dt} = F(t, G^D_t)$
- $G^I_{i,t+dt} = f_i(t, G^D_t)$  ( $i=1 \sim N$ ) (静的社会)
- $G^I_{i,t+dt} = f_i(t, \{G^I_{j,t}(v_j^S, v_j^S) \in E^S\})$  ( $i=1 \sim N$ )  
 コンタクトプロセス(1次)

図3 複雑二重ネットワークの定義

## 5. 複雑二重ネットワーク上による貨幣概念創発のモデル

前節で記述したモデルは、単体ではネットワークの変化を駆動する仕組みを欠く。その挙動を解析するためには具体的な社会的学習・伝播現象に適用し、エージェント間およびエージェント内の相互作用を実装する必要がある。そこで本節では、文献[5][6]に基づき、二重ネットワークモデルを貨幣の創発と共存という現象[9]に適用しその特徴を用いた解析を行う。

### 5.1 貨幣概念への興味

貨幣の創発を適用対象とするのは以下の理由による。

- 貨幣が財であると同時に交換・取引という社会的コミュニケーションを担っていることから、その創発モデルが他の社会的コミュニケーションの媒体（言語、行動様式、マナー等）の創発についても有益な知見を与えることが期待される[1]。
- 特に貨幣の「交換の媒体」としての地位が、社会を構成する個々のエージェント内部における認識のマクロ的な同調によって成立しているという点で、ミクロ-マクロの階層間における相互作用による自己組織化の適切な事例と考えられる。

貨幣創発の二重ネットワークモデルでは、社会的ネットワークはエージェント間の交換・取引関係のつながりを表し、個々のエージェント内部における認識ネットワークは、財と財の交換可能性についての認識を表す。ある財が貨幣的として本質的な性質（一般受容性）を獲得する現象は、貨幣創発の二重ネットワークモデルによりエージェント内のミクロな認識のネットワーク構造が、社会ネットワーク上における伝播学習によりマクロレベルで共有されるという、ミクロ-マクロの階層間における相互作用による自己組織化現象として表現される。

### 5.2 貨幣創発の二重ネットワークモデル

ここでは、図2の二重ネットワークモデルに貨幣の創発を扱うためのメカニズムを具体的に指定する。社会ネットワーク上において社会（エージェント間）ネットワークは、エージェント（添字： $i, j$ で表示、全  $N$  人）同士の経済・社会的な「付き合い」のトポロジーを反映し、（当面）所与とする。

一方エージェントの内部ネットワークは、財と財（添字： $\alpha, \beta, \gamma$ で表示、全  $M$  種類）の交換可能性に関する当該エージェントの個人的認識を示し、その

隣接行列要素は、エージェント  $i$  が、「 $\alpha$  と  $\beta$  が交換可能」という認識を持つとき  $(\alpha, \beta)_i = 1$ 、持たないとき  $(\alpha, \beta)_i = 0$  とする。このエージェント内ネットワークが、エージェント間の付き合いを通して相互に学習され変化するものとする。

本稿では、ある財が一般受容性（「誰とでも、何とでも交換できる」こと）を獲得すること、すなわち「原貨幣」の創発をもって「貨幣の創発」とする。もちろん「原貨幣」であることは、貨幣であることの必要条件であり、貨幣経済の成立までには、他の様々なプロセスが必要である。しかしながら一般受容性の成立は、それらのプロセスに先立って必要であると考えられる。

すなわち、ある財  $\alpha$  が原貨幣として創発した状態は、二重ネットワークモデル上では、ほとんどのエージェント内ネットワークが、 $\alpha$  をハブ・ノード（他のほとんどのノードと連結しているノード）とするスター状ネットワークになるよう自己組織化されることを意味する（図4）。一般受容性がスター状ネットワークで表現できることは「何とでも交換できる」という性質が「誰とでも」共有されてゆくプロセスを社会的ネットワークの形質に関連させて動的に取扱うことができる。前節の定義に従えば、貨幣創発の二重ネットワークモデルは2次のコンタクトプロセスになる。

### 5.3 貨幣創発モデルにおける相互作用

我々の貨幣創発のモデルでは、エージェントは以下の相互作用（取引および学習）を行うものとする。

取引：社会ネットワーク上で隣接するエージェント  $i$  と  $j$  は、交換可能性の認識が一致  $((\alpha, \beta)_i = (\alpha, \beta)_j = 1)$  するならば取引を行い、確率  $P_E$  で双方に利得を得る。

学習：エージェントは以下のように相互学習する。

- ① 模倣 (Imitate)：エージェント  $i$  が  $(\alpha, \beta)_i = 0$

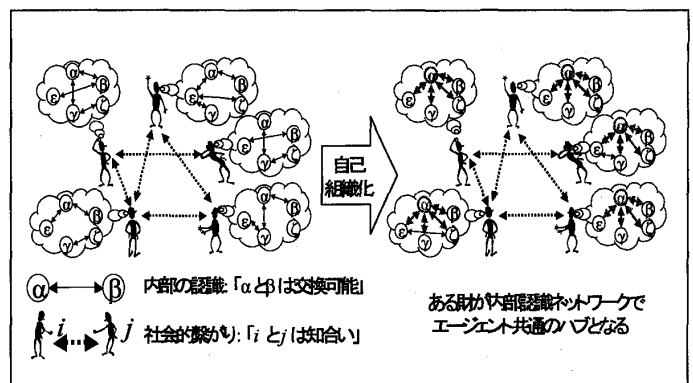


図4 二重ネットワーク上における貨幣の創発

のとき、 $i$ に隣接する $i'$ と $i'$ に隣接する $i''$ が $\alpha$ 、 $\beta$ の取引で利得を得たならば、確率 $P_T$ で $(\alpha, \beta)i=1$ にする。

② 刈込み (Trim) : エージェント $i$ が $(\alpha, \beta)i=(\beta, \gamma)i=(\gamma, \alpha)i=1$ のとき、 $(\alpha, \beta)i$ 、 $(\beta, \gamma)i$ 、 $(\gamma, \alpha)i$ のどれかひとつを確率 $P_T$ で0にする。循環の解消は、限定合理的なエージェントにとっての思考を節約であるとともに、Kiyotaki, Wrightの議論[10]とも整合的である。

貨幣の創発のためには、模倣と刈込みの2つが本質的と考えるが、過早な収束/絶滅および過剰な初期値依存を防止するための自然な「ゆらぎ」として、想起と忘却を付加的に導入する。

③ 想起 (Conceive) : エージェント $i$ において $(\alpha, \beta)i=0$ のとき、確率 $P_C$ で $(\alpha, \beta)i=1$ にする。

④ 忘却 (Forget) : エージェント $i$ において $(\alpha, \beta)i=1$ のとき、確率 $P_F$ で $(\alpha, \beta)i=0$ にする。

#### 5.4 貨幣の創発プロセスの分析

ここで示したモデルは数理的な接近法とエージェント・シミュレーションの接近法とで分析することができる。モデルを単純化することで得られる数理的方法では、貨幣の創発現象の大域的な性質を得ることができる一方、現実に近いネットワーク構造は複雑で扱えない。また、シミュレーションの接近では、上の操作をそのまま実現することで複雑な状況の観察は可能だが、これを一般的な知見にまとめることは難しい。両者の接近法は相補的である。

紙数の関係で詳細は省くが、数理的な方法では、次のような定式化が可能である[5]。

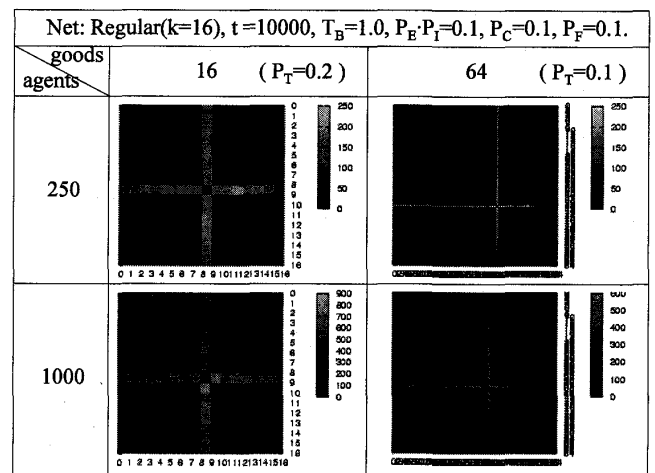
例えば、社会ネットワークをノードの次数 $k$ によって分類する。そして異なった次数 $k$ 毎の平均として、状態変数： $x_{\alpha,k}$ を「財 $\alpha$ の次数 $k$ の主体における受容性」と定義し、「 $\alpha$ がどれかの財と交換可能となる確率」あるいは、「 $M$ 財中 $\alpha$ と交換できる財の割合」と同一視する。これによって、上の4つの操作によって発生する系全体の変化は状態変数 $x_{\alpha,k}$ に関する微分方程式系で記述できる。これを平均場近似やアイソクライン法などの標準的な方法[17][18]で処理することにより、ネットワーク次数の値に応じて、次のような知見が得られる。

- 財の性質が全く同じでも、僅かな経路の違いが拡大し特定の財が原貨幣として創発する。
- 社会ネットワークにおけるつながりの次数 $k$ が小さいと創発が起こらない。

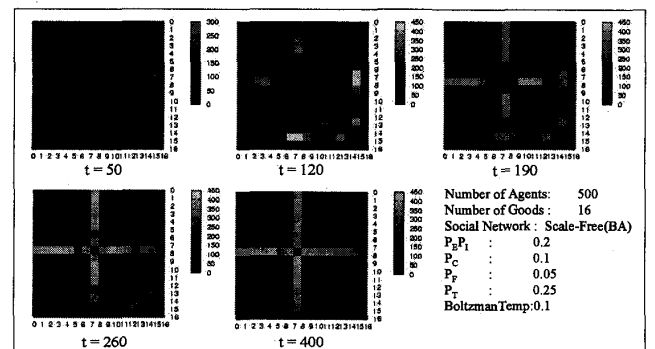
- 同次数 $k$ が大きくなると一つの財のみが原貨幣として創発する。
- 同次数 $k$ がさらに大きくなると原貨幣の複数創発(共存)が起こる。
- 創発した原貨幣が消滅することがある。

一方、エージェント・シミュレーションによる方法では、図5に示すような結果が得られる[6]。図5では、エージェントの内部ネットワークを表す隣接行列をすべてのエージェントについて足し合わせて正規化した行列 $M$ を表示している。

ひとつのエージェントにおいて財 $\alpha$ のみが「何とでも交換できると認識されている」ことは内部ネットワーク隣接行列の $\alpha$ 行 $\alpha$ 列のみが1として値をもつことで表現され、さらに「 $\alpha$ が何とでも交換できることが誰とでも成り立つ」ためには、行列 $M$ の $\alpha$ 行 $\alpha$ 列のみが1の値をもつことで表現できる。図では、行列 $M$ の要素を0.0が黒、1.0が白となるグレイスケールで表している。



(a) 大きさの異なるレギュラー社会ネットワーク：人口と財の数が増えたときの創発現象



(b) 創発にいたる時間経過：スケールフリーな社会ネットワーク上での創発現象

図5 エージェント・シミュレーションによる貨幣創発実験の例

シミュレーション結果から、社会ネットワーク、エージェントの性質に応じたパラメタの組み合わせから、一般受容性をもつ財、すなわち貨幣が創発することが示されている。さらに、条件を変えた実験では、社会ネットワーク上のハブエージェントが創発に大きな影響を与えること、社会ネットワークの Scale-Free 性や Small-World 性[8]が大きな影響を与えることなどが確認されている。

## 6. おわりに

本稿では、エージェントベース社会シミュレーションのための新しいモデルとして複雑二重ネットワークモデルの考え方を紹介した。我々はこれまでさまざまなタスク・ドメインにおいてエージェント・アプローチの有用性を示すモデルを提案してきた[19]~[22]。複雑二重ネットワークはその中でももっとも新しいものであり、さまざまな分野での適用が可能である[6][7][8][21]。計算的文化力学の分野では、学際的なアプローチとともに、数理的方法と計算的方法の両者が研究に不可欠である[19][23]。数理に偏らず、また、シミュレーションのみに集中しないことが重要であろう。

## 参考文献

[1] OR 機関誌：特集：複雑ネットワークの世界—ネットワーク研究の新展開—, オペレーションズ・リサーチ, Vol. 53, No. 9, 2008.

[2] 人工知能学会誌：特集：「繋がり科学」, 人工知能学会誌, Vol. 23, No. 5, pp. 629-664, 2008.

[3] IEEE Intelligent Systems: Special Issue: Computational Cultural Dynamics, IEEE Intelligent Systems, Vol. 23, No. 4, pp. 18-64, 2008.

[4] 人工知能学会 (編): 人工知能学事典, 2005.

[5] 國上真章, 小林正人, 山寺智, 寺野隆雄: 複雑二重ネットワークモデルによる貨幣の創発現象の分析, 情報処理学会論文誌: 数理モデル化と応用 (TOM) (07-Special-15), 2008.

[6] 小林正人, 國上真章, 山寺智, 山田隆志, 寺野隆雄: 複雑二重ネットワークモデルによる貨幣創発のエージェント・シミュレーション, コンピュータソフトウェア, Vol. 25, No. 4, pp. 261-268, 2008.

[7] 松山科子, 國上真章, 寺野隆雄: ABS によるコンテンツ流通メカニズムの解析, 日本ソフトウェア科学会ネットワークが創発する知能研究会, JWEIN 2007 予稿集, 2007.

[8] 増田直紀, 今野紀雄: 複雑ネットワークの科学, 産業図

書, 2005.

[9] 安富歩: 貨幣の複雑性—生成と崩壊の理論, 創文社, 2000.

[10] Kiyotaki, N. and Wright, R.: On Money as a Medium of Exchange, Journal of Political Economy, Vol. 97, pp. 927-54, 1989.

[11] Schelling, T. C.: Dynamic Models of Segregation, Journal of Mathematical Sociology. Vol. 1, pp. 143-186, 1971.

[12] 山影進, 服部正太: コンピュータの中の人工社会, 共立出版, 2002.

[13] Epstein, J. and Axtell, R.: Growing Artificial Societies, Brookings Institution Press, The MIT Press, 1996 (服部正太, 木村香代子(訳): 人工社会, 共立出版, 1999).

[14] Axelrod, R.: The Dissemination of Culture: A Model with Local Convergence and Global Polarization, Journal of Conflict Resolution, Vol. 41, pp. 203-326, 1997.

[15] Axelrod, R.: The Complexity of Cooperation, Princeton Univ. Press, 1999 (寺野隆雄(監訳): 対立と協調の科学—エージェント・ベース・モデルによる複雑系の解明—, ダイアモンド社, 2003).

[16] Langton, C.: Computation at the Edge of Chaos, Physica D, Vol. 42, pp. 12-37, 1990.

[17] 出口弘: 複雑系としての経済学, 日科技連, 2000.

[18] Hofbauer, J. and Sigmund, K.: Evolutionary Games and Population Dynamics, Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1998.

[19] 寺野隆雄: エージェント・ベース・モデリングへの招待, オペレーションズ・リサーチ, Vol. 49, No. 3, pp. 131-136, 2004.

[20] 横川大, 高橋徹, 山田隆志, 寺野隆雄: エージェント・シミュレーションによる産業集積におけるオンラインものづくりの分析, 合同エージェントワークショップ & シンポジウム 2008 (JAWS-2008) 予稿集, 2008.

[21] 小林正人, 國上真章, 山寺智, 山田隆志, 寺野隆雄: 複雑二重ネットワークモデルによるポイント交換システムの分析, 合同エージェントワークショップ & シンポジウム 2008 (JAWS-2008) 予稿集, 2008.

[22] 菊地剛正, 鳥山正博, 山田隆志, 寺野隆雄: エージェント・シミュレーションを用いた組織構造最適化の研究—スキーマ認識モデル—合同エージェントワークショップ & シンポジウム 2008 (JAWS-2008) 予稿集, 2008.

[23] 寺野隆雄: エージェント・ベース・モデリング: その楽しさと難しさ, 計測と制御, Vol. 43, No. 12, pp. 927-931, 2004.