複雑系経済学に基づく人工市場に関する研究*

貝原 俊也[†]・藤井 進[‡]・大家 健司[†]

A Study on Artificial Market based on Economics of Complex Systems*

Toshiya KAIHARA[†], Susumu FUJII[‡] and Kenji OHYA[†]

We propose a complex market-oriented programming framework based on the economics of complex systems, and develop a complex artificial market with multi-agent paradigm in this paper. Three types of heterogeneous agents are defined in the complex artificial market. It is confirmed that their interactions with micro behaviour emerge a macro order of the artificial market, and the clearing price dynamism can be analysed in economic terms. The applicability of the framework into resource allocation problem for B2B commerce is also discussed.

1. はじめに

最近の情報技術の発達が目覚ましく、それに伴って取引者が得られる情報は以前と比較して格段に多量となり、かつ情報が得られるまでの時間は大幅に短くなっている。また生産現場においては、消費者の嗜好の多様化などから従来の少品種大量生産から変種変量生産体制への移行が見られる。このような社会の動きに伴い、電子商取引といった新しい取引形態も多く見られるようになったが、そのことにより企業の取引形態は多様化し、取引における意思決定はますます複雑になってきている。そこで、これらの取引ではどのような現象が生じるかを見るため、企業の取引場として、計算機上に仮想的な市場である「人工市場」の構築を試みる。

人工市場を構築することの重要なポイントとして「ミクロ-マクロ問題」を取り扱えるという点がある。つまり市場における価格の形成などといったマクロな現象を、個々のエージェントの行動や意思決定といったミクロな要素に関連付けて考えることができる [1]。

人工市場を構築する際の経済モデルとして、本研究で

は複雑系経済学で提唱されているモデルに着目する [2,3]。複雑系経済学は、従来の経済学として主流である「新古典派経済学」における現実と乖離した「理論的に必要な仮定」に代わり、人間の合理性には限界があるという限定合理性や、規模に関する収穫逓増を前提としておくことにより経済理論を再構成しようとしている [4]。

本研究では複雑系経済学に基づく人工市場を計算機上に構築し、市場における価格決定などのマクロなメカニズムを個々の取引エージェントの動きといったミクロな観点から解析することを目的とする。

2. 複雑系経済学

モデルを構築する際に用いた複雑系経済学には、以下の三つの特徴が挙げられる [5]。

- 限定合理性…人間の合理的な推論能力・計算能力・思考能力には限界がある。
- 自己組織系…市場経済は相対取引の繰り返しから自己組織される秩序である。
- 規模に関する収穫逓増…生産要素の投入量が多くなるほど生産量の増加の度合いが大きくなる。

2.1 限定合理性

新古典派経済学においては、理論の単純化を実現するために経済人は全知・全能であるという仮定を置いてきたが、現実社会における経済主体は全知・全能の存在ではないことは明らかである。そこで複雑系経済学では、「合理性の限界」に注目し、複雑さの帰結に正面から取り組むことを試みている。具体的には、人間の能力には

* 原稿受付 2003年9月4日

[†] 神戸大学 大学院 自然科学研究科 Graduate School of Science and Technology, Kobe University; 1-1, Rokko-dai, Nada, Kobe, Hyogo 657-8501, JAPAN

[‡] 神戸大学 工学部 Faculty of Engineering, Kobe University; 1-1, Rokkodai, Nada, Kobe, Hyogo 657-8501, JAPAN

Key Words: artificial market, market-oriented programming, multi-agent, economics of complex systems.

以下の三つの限界があると考えている。

- (1) 視野の限界…情報収集能力に対する限界
- (2) 合理性の限界…計算能力や思考能力に対する限界
- (3) 作用の限界…実現可能な成果に対する限界

これら三つの限界に条件付けられた人間が複雑な環境の中でどう判断し行動しているか、といった問題設定から出発するのが複雑系経済学であり、限定合理性は複雑系経済学を構成する大きな要素の一つである。

2.2 自己組織系

実際の経済において、取引は新古典派経済学で仮定している集中取引よりも一対一の取引である相対取引の方が一般的である [5]。また、相対取引を繰り返すことによって自然に生まれてくる秩序、自生的に作られる秩序が市場経済と考えるのが自然である。これを「自己組織系」とよび、複雑系経済学ではこの点に注目している。

2.3 規模に関する収穫逓増

規模に関する収穫逓増 (increasing returns to scale) とは、ある製品を生産する際に、費用や労働力などの生産要素の投入量 (input) が多くなるほど、その製品の生産量 (output) の増加の割合が大きくなることをいう。収穫法則を表すグラフを Fig. 1 に示す。

Fig. 1 Law of increasing/diminishing/constant returns

大部分の企業におけるほとんどの製品は、短期の問題においては設備・機械などについて容量限界に至るまでは収穫逓増であると考えられる。また長期の問題においては、生産量拡大の際に対費用効果のより良いものを選ぶことができるという点で規模の経済——収穫逓増が成り立つ。よって複雑系経済学では規模に関する収穫逓増が成り立つことを前提として理論を構築している。

3. 構築した人工市場

本研究では企業間電子商取引を視野に入れた人工市場モデルを構築する。今回構築した人工市場には以下の3種のエージェントが存在する。

- 生産エージェント (Supply Agent)
財を生産するエージェント
- 消費エージェント (Customer Agent)

財を消費するエージェント

● 仲介エージェント (Intermediate Agent)

オークション場を提供し、生産エージェントと消費エージェントとの取引の仲立ちをするエージェント
生産エージェントは、資本(ここではお金)を使ってある財を生産し、その財を必要とする企業へ売ることによって利益をあげ運営し続ける企業を想定し、消費エージェントは、財を購入しそれらを下層の安定市場に供給(流通)する企業を想定している。また仲介エージェントは、近年のe-マーケットプレイスなどに相当するものである。

まず各エージェントは2次元セル空間として表現される市場内に散在し、エージェントが得られる情報は局所的なものであるとする。さらに仲介エージェントは視野を持ち、その視野内に存在するエージェントのみが取引を行うことができるものとする。ここで仲介エージェントの視野は現実の世界における情報の広がりを意味し、財に関する情報を得た者のみが取引を行うことができるという事実を表している。財とお金のやり取りは、仲介エージェントを介して生産エージェントと消費エージェントの間で直接行われる(相対取引)ものとし、仲介エージェントはその際、3.3にて後述する4-Heapアルゴリズム [6] を用いて取引相手の決定を行う。なお本研究では、まずは提案する人工市場の基本特性を把握することを目的として、各エージェントは人工市場内での移動を行わないものとする。以下では、人工市場を構成する各エージェントについて定式化を行う。

3.1 生産エージェント (s)

生産エージェントは、資本(ここではお金)を使ってある財 (x) を生産し、その生産財を必要とする企業へ売ることによって収益をあげる。

(a) 目的 現時刻 (t) の保持金額 (M_s^t) を最大にする。

$$M_s^t \rightarrow \max \quad (1)$$

(b) 行動

Step 1 前ステップで求めた生産量 (O_{sx}^t) 分だけ財の生産を行い、保持財の資産 (G_{sx}^t) を増やす。

$$G_{sx}^t = G_{sx}^{t-1} + O_{sx}^t \quad (2)$$

Step 2 次式にて示される予想利益 ($EPro_{sx}^t$) の値が正となり利益が期待できる場合には、在庫量すべてを売り出し (Case 1) Step 3へ、そうでない場合は売り出しを見送り (Case 2) Step 4へ。

$$EPro_{sx}^t = P_{sx}^t - C_{O_{sx}} \quad (3)$$

ただし、 P_{sx}^t : 売希望価格、 $C_{O_{sx}}$: 製造単価

Step 3 仲介エージェントの情報に基づき取引を行う。ここでお金と財のやり取りが行われ、(4)式で示される売り上げ (SL_{sx}^t) 分だけ資本 (M_s^t) を増やし、取引総量 ($\sum_d n_{sxd}^t$) 分だけ財を減らすこ

とになる．なお，裁定価格や取引量の求め方など取引の詳細については3.3で説明する．

$$SL_{sx}^t = \sum_d \{(MP_{sxd}^t - C_{O_{sx}}) * n_{sxd}^t\} \quad (4)$$

$$M_s^{t+1} = M_s^t + \sum_x SL_{sx}^t \quad (5)$$

$$G_{sx}^{t+1} = G_{sx}^t - \sum_d n_{sxd}^t \quad (6)$$

ただし， MP_{sxd}^t ：裁定価格， n_{sxd}^t ：取引量， $C_{O_{sx}}$ ：製造単価

Step 4 次ステップ ($t+1$) の財 (x) に対する売希望価格 (P_{sx}^{t+1}) を決定する．

$$P_{sx}^{t+1} = \begin{cases} P_{sx}^t * \alpha_{sx} & \text{Case 1} \\ P_{sx}^t + \pi & \text{Case 2} \end{cases} \quad (7)$$

ただし， α_{sx} ：価格変更係数， π ：価格上昇幅
Case 1 の場合，Step 3 の取引後に判明する消費エージェントの取引財 (x) への購買意欲に基づいて次ステップの売希望価格をコントロールするために，次に述べる価格変更係数 α_{sx} を用いる．Case 2 では，今回は売希望価格が製造単価を下回ったことで取引市場に参加できなかったため，次ステップには取引市場に参加するために現ステップの売希望価格にある値（価格上昇幅 π ）を加えたものを次ステップの売希望価格とする．

【価格変更係数 (α_{sx})】 財の取引量（販売量）によって価格を変動させるパラメータである．売希望量分の財が売れた場合は，生産エージェントはより高い利益を追求するために $\alpha_{sx} = u_+$ として次ステップの希望価格を高く設定し，全く売れなかった場合は， $\alpha_{sx} = u_-$ として希望価格を低く抑えることで次の取引実現を目指す．また，それ以外の場合は，希望価格は据え置く．なお，以上の振る舞いは，現実の市場原理に従う一般的なものと考えられる．

$$\alpha_{sx} = \begin{cases} u_+ & (\sum_d n_{sxd}^t = H_{sx}^t) \\ u_0 & (0 < \sum_d n_{sxd}^t < H_{sx}^t) \\ u_- & (\sum_d n_{sxd}^t = 0) \end{cases} \quad (8)$$

ただし， $\sum_d n_{sxd}^t$ ：取引総量， H_{sx}^t ：売希望量， $u_0=1.0$ ， $u_+ > 1.0$ ， $u_- < 1.0$ の任意の定数

【価格上昇幅 (π)】 売希望価格が製造単価を下回った場合 (Case 2)，次ステップでは売希望価格が製造単価を上回るように売希望価格を上げ，市場への参画を図るためのパラメータである．

Step 5 次ステップの財の生産量 (O_{sx}^{t+1}) を以下の非線形計画問題 $\mathcal{P}$ を解くことで決定する．

問題 $\mathcal{P}$ ：

$$\text{Maximize: } \Pi = P_{sx}^{t+1} O_{sx}^{t+1} - (C_{O_{sx}} R_{sx}^{t+1} + C_s) \quad (9)$$

$$\text{Sub to: } O_{sx}^{t+1} \leq f(R_{sx}^{t+1}) \quad (10)$$

ただし， $C_{O_{sx}}$ ：材料単価， R_{sx}^{t+1} ：材料投入量， C_s ：固定費用

ここで (9) 式の Π は利潤を表し，(10) 式の f は生産関数を表す．生産者は生産関数の制約の中で利潤を最大化することを目的として操業するので，その行動はこのような利潤最大化問題 $\mathcal{P}$ として定式化することができる．なお生産者は，生産に必要な量の材料を仕入れるのが一般的であり，購買した材料をすべて生産に利用すると考えることができるため，本研究では，問題 $\mathcal{P}$ における不等式制約を等式制約として最適解を求める．

【生産関数】 生産関数とは，生産要素の投入量と最大可能生産量との関係を示すものである [7]．本研究では，生産関数を Fig. 2 で表されるような S 字曲線を描く関数としている．このことで，投入量が比較的小さな時は，投入量の規模が拡大するとそれ以上に生産量が大きくなる「規模に関する収穫逓増」の性質を表すことができる．また資源を利用して生産する以上，投入量の規模が拡大するにつれ生産量が無限に逓増することはない必ず最終的には逓減に向かうため，このような S 字カーブと考えるのが一般的である [8]．

Fig. 2 Production function

今回構築したモデルでは，この S 字関数を実現するために三次関数（の逆関数）を用いており，最終的に (10) 式は以下の (11) 式のようになる．

$$\text{Sub to: } l(O_{sx}^{t+1} - a)^3 + m(O_{sx}^{t+1} - a)^2 + n(O_{sx}^{t+1} - a) = R_{sx}^{t+1} - b \quad (11)$$

(l, m, n, a, b : 任意の定数)

(c) 撤退条件 保持金額が 0 になるとその生産エージェン

トは市場から撤退する。

$$M_s^t = 0 \quad (12)$$

3.2 消費エージェント (d)

財を購入しそれらを下層の安定市場に一定量ずつ供給 (流通) し続ける企業を想定したエージェントである。

(a) 目的 現時刻 (t) における保持金額 (M_d^t) および保持財の資産 (=在庫量) (G_{dx}^t) を最大にする。

$$M_d^t \rightarrow \max \quad \wedge \quad G_{dx}^t \rightarrow \max \quad (13)$$

(b) 行動

Step 1 販売収入 (C_{Md}) より資本 (M_d^t) を増やす。

$$M_d^t = M_d^{t-1} + C_{Md} \quad (14)$$

Step 2 仲介エージェントの情報に基づき取引を行う。ここでお金と財のやり取りが行われ、購入分 ($\sum_s n_{dxs}^t$) だけ財を増やし、財の購入によって支払った分 (PY_{dx}^t) だけ資本を減らす。ここでの取引の詳細については 3.3 で説明する。

$$PY_{dx}^t = \sum_s MP_{dxs}^t * n_{dxs}^t \quad (15)$$

$$G_{dx}^{t+1} = G_{dx}^t + \sum_s n_{dxs}^t \quad (16)$$

$$M_d^{t+1} = M_d^t - \sum_x PY_{dx}^t \quad (17)$$

Step 3 次ステップ ($t+1$) の買取希望価格 (P_{dx}^{t+1}) を決定する。ただし、 α_{dx} は価格変更係数である。

$$P_{dx}^{t+1} = P_{dx}^t * \alpha_{dx} \quad (18)$$

(18) 式は 3.1 の行動の Step 3 と基本的には同じ考え方に基づく式である。ただし消費エージェントは、財取引において生産エージェントとは逆の対場にあるため、希望する量が購入できた時は次ステップでの希望価格を下げ、まったく購入できなかった時は上げ、それ以外の時には価格を据え置く。ただし、 H_{dx}^t は購入希望量である。

$$\alpha_{dx} = \begin{cases} u_+ & (\sum_s n_{dxs}^t = 0) \\ u_0 & (0 < \sum_s n_{dxs}^t < H_{dx}^t) \\ u_- & (\sum_s n_{dxs}^t = H_{dx}^t) \end{cases} \quad (19)$$

Step 4 次ステップの買取希望量 (H_{dx}^{t+1}) を (20), (21) 式の連立方程式を解くことによって決定する。

$$M_d^{t+1} = \sum_x P_{dx}^{t+1} H_{dx}^{t+1} \quad (20)$$

$$\frac{P_{dx_1}^{t+1} H_{dx_1}^{t+1}}{P_{dx_2}^{t+1} H_{dx_2}^{t+1}} = MRS_{x_1 x_2}^{t+1} \quad (21)$$

(20) 式は予算制約を表す式で、保持金を財の購入に充てることを意味している。また、(21) 式は限界代替率 ($MRS_{x_1 x_2}^t$) に応じて財の購入の割合を決定することを意味している。ここで限界代替率とは、財 x_1 に対する財 x_2 の相対的な保持量を表すもので、次に定義される厚生関数を用いて以下のように求められる。

【厚生関数 (W_d^t)】 財保持量による裕福度を表すものである [9]。

$$W_d^t = \prod_x G_{dx}^t \lambda_{dx} \quad (s.t. \sum_x \lambda_{dx} = 1) \quad (22)$$

ただし、 $\lambda_{dx} = \mu_{dx} / \sum_x \mu_{dx} > 0$

μ_{dx} は一ステップ当たりの財の消費量を表す。

(22) 式は Cobb-Douglas 型関数とよばれる関数で、経済学で一般的に用いられる関数である。Cobb-Douglas 型関数は n 回偏微分可能で、偏微分後も同じ Cobb-Douglas 型関数となるので、非常に扱いやすいのが大きな特徴である。 G_{dx}^t が大きくなればなるほど W_d^t は大きくなり、単位時間当たりの財の消費量が大きい財 (つまり λ_{dx} が大きい財) ほど財の保有量が多くないと W_d^t の値は大きくなりえないといった性質から、この関数は厚生関数として適していると考えられる。

【限界代替率 ($MRS_{x_1 x_2}^t$)】 財 x_1 に対する財 x_2 の相対的な保持量を表すものである [9]。

$$\begin{aligned} MRS_{x_1 x_2}^t &= \frac{dG_{dx_2}^t}{dG_{dx_1}^t} = \frac{\partial W_d^t / \partial G_{dx_1}^t}{\partial W_d^t / \partial G_{dx_2}^t} \\ &= \frac{\lambda_{dx_1} G_{dx_1}^{t(\lambda_{dx_1}-1)} G_{dx_2}^{t\lambda_{dx_2}}}{\lambda_{dx_2} G_{dx_1}^{t\lambda_{dx_1}} G_{dx_2}^{t(\lambda_{dx_2}-1)}} \\ &= \frac{\mu_{dx_1} G_{dx_2}^t}{\mu_{dx_2} G_{dx_1}^t} = \frac{G_{dx_2}^t / \mu_{dx_2}}{G_{dx_1}^t / \mu_{dx_1}} = \frac{\tau_{dx_2}}{\tau_{dx_1}} \end{aligned} \quad (23)$$

ここで τ_{dx} は、消費エージェント d の財 x に対する寿命を表し、(24) 式のようになる。

$$\tau_{dx} = \frac{G_{dx}^t}{\mu_{dx}} \quad (24)$$

(c) 撤退条件 保持金額が 0 になる、もしくは、いずれかひとつの保持財在庫量が 0 になる。

$$M_d^t = 0 \quad \vee \quad G_{dx}^t = 0 \quad (25)$$

3.3 仲介エージェント

近年の e-マーケットプレイスなどを想定した、恒常的にオークション場を提供し、生産エージェントと消費エージェントの取引の仲立ちをするエージェントである。

また、このエージェントは視野を持っており、その視野の広がり方はロジスティック関数に従うものとしている。これは、実際の市場においてある新商品が投入されたとき、初期段階ではごく狭い範囲にしかその商品の存在は知られていないが、時間が経つにつれより広い範囲へ急速にその情報は広がっていき、最終的には伝播速度をゆるめながら全体に知れ渡る、といった商品情報の一般的な広がりを表すものである。今回のモデルでは視野の広さ (V_i^t) を (26) 式のように定義している。

$$V_i^t = \frac{A}{2} \cdot \frac{\exp(C_{V_i} t)}{1 + \exp(C_{V_i} t)} \quad (26)$$

ただし、 A : 市場の対角線距離, C_{V_i} : 任意の定数

ここで、視野に入っている生産・消費エージェント群にのみ取引参加を許し、各ステップごとに 4-Heap アルゴリズム [6] を用いて取引のペアリングを行う。4-Heap アルゴリズムは、部分順序付き木を高速に生成するヒープソートの特徴をオークションの裁定メカニズムに適用したものであり、以下にそのアルゴリズムについて述べる。

【4-Heap アルゴリズム】 4-Heap アルゴリズムでは、Fig. 3 に示すように取引市場に四つの Heap¹ が存在する。

Fig. 3 Schematic diagram of bids arranged in the four heaps

B_{in} , B_{out} , S_{in} , S_{out} は各 Heap の名前を表し、 B は買い注文、 S は売り注文、 in は取引可能、 out は取引不能を意味している。また b_{in} , b_{out} , s_{in} , s_{out} は各 Heap の根のノードを表している。これらのノードには恒常的に以下の不等式が成立する。なお、 $V(n)$ はノード n の値を表している。

$$V(b_{in}) \geq V(b_{out}) \quad (27)$$

$$V(s_{out}) \geq V(s_{in}) \quad (28)$$

$$V(s_{out}) > V(b_{out}) \quad (29)$$

$$V(b_{in}) \geq V(s_{in}) \quad (30)$$

取引注文が入ってくるたびに、以上の不等式を満足しつつ各木を操作することで、 B_{in} と S_{in} のノード数が常に同値に保たれ、注文の入札が終わった時点で B_{in} , S_{in} に含まれる注文が取引可能注文となり、それぞれの取引相手を決定することができる。なお今回構築した市場では、 B_{in} においては高い方から、 S_{in} においては低い方から取引相手が決定される。また本研究では、入札される商品 1 単位個数ごとにノードを構成するものとする。

以下に、仲介エージェントの行動を示す。

Step 1 視野の範囲内に入っている生産・消費エージェントに取引への参加を呼びかける。

Step 2 取引に参加する各生産エージェントから売希望価格と売希望量を、各消費エージェントから買希望価格と買希望量を、それぞれ確認する。

Step 3 4-Heap アルゴリズムで取引のペアリングを行う。いま仮に生産エージェント s^* と消費エージェント d^* が取引相手として選ばれたとする。この時、 s^* と d^* との取引量 $n_{s^*d^*}^t (= n_{d^*s^*}^t)$ は 4-Heap アルゴリズムにて得られた入札商品のペアリングノード数により自動的に決定され、取引 (裁定) 価格 $MP_{s^*d^*}^t (= MP_{d^*s^*}^t)$ は次式にて示されるような s^* の売希望価格と d^* の買希望価格の平均値とする。

$$MP_{s^*d^*}^t (= MP_{d^*s^*}^t) = \frac{P_{s^*x}^t + P_{d^*x}^t}{2} \quad (31)$$

Step 4 取引内容を各エージェントに報告する。

Step 5 生産・消費エージェントは仲介エージェントからの情報に従い資金と財の取引を実施する。

4. 計算機実験

ここでは今回構築した人工市場において行った実験の説明と結果に対する考察を示す。

4.1 実験条件

今回対象とする人工市場モデルでは、基本特性解析を第一義として、小規模な市場を想定した計算機実験を行う。まず取り扱う財は 2 種類とし、生産エージェントは 2 種類の財のうちどちらか一方の財のみを生産し、消費エージェントはその 2 種類の財をステップごとに一定量ずつ消費するものとする。また、生産エージェントと消費エージェントがそれぞれ 20 個ずつ、仲介エージェントが 1 個存在するプリミティブな状況の評価対象とする。

シミュレーション実験における各パラメータを Table 1 に示す。なお、Table 1 において、 $U(\min, \max)$ は上限 $\max$ 、下限 $\min$ の一様乱数、 $N(\mu, \sigma^2)$ は平均 μ 、分散 σ^2 の正規分布を表す。また実験試行回数は各 100 回である。

本研究では、二つの特性評価結果について示す。まず特性評価 1 としては、複雑系人工市場の基本特性把握として、価格収束のダイナミズムおよび視野の限界が価格収束に与える影響について示す。つぎに特性評価 2 では、

¹ 部分順序付き木。各頂点の値がその左右いずれの下位のノードが持つ値よりも大きく (小さく) なるようにした 2 分木のこと。

複雑系人工市場が持つミクロマクロ特性の解析を行うために、取引エージェントのミクロな効用と、交渉の結果として裁定されるマクロな市場の取引価格との関係について明らかにする。

Table 1 Experimental parameters

Supply Agent		Demand Agent	
M_s^0	10000	M_d^0	20000
P_{sx}^0	U(400,500)	P_{dx}^0	U(450,550)
O_{s1}^0	10	G_{dx}^0	N(50,25)
O_{s2}^0	15	μ_{d1}	5
C_{O_s1}	5	μ_{d2}	6
C_{O_s2}	4	C_{MD}	5000
π	10		
C_s	100		

4.2 特性評価1～基本特性解析

生産エージェントと消費エージェントにおける財1の取引価格の時系列推移について、Figs. 4, 5に示す。なおこれらの図では、最終取引に参与したエージェントの結果を示している。これらの図より、時刻の経過とともに取引価格がある範囲内に収束していることが明らかである。この結果、新古典派経済学が有する価格調整機能を積極的に具備していない複雑系人工市場においても、定常過程論に従い取引価格が収束する状況の存在が明らかとなった。また、必ずしも全エージェントが取引に参与するのではなく、各エージェントにたまたま与えられた初期条件や交渉過程における相互のインタラクションによってエージェント個体の財や資金の保有量などに差異が発生することが明らかとなった（この詳細については、本章の最後に示す）。これは、構築した人工市場が複雑系特有の初期値鋭敏性を有していることを意味する。

つぎに数多くの試行の結果、この取引価格の安定性には、仲介エージェントの持つ視野が重要な役割を果たすことが明らかとなった。個々の結果の詳細については紙面制約により割愛するが、視野パラメータ (C_{V_i}) と取引価格の変動係数との関係について、以下のFig. 6に示す。なおシミュレーション試行は各100回である。

この図より、視野パラメータ (C_{V_i}) が0.1に近づくにつれ視野（＝製品情報）の拡大（＝伝播）速度が充分に速くなり、取引が安定化する傾向にあることがわかる。この結果、複雑系人工市場における取引解の収束には視野の限界が大きな影響を持ち、換言すると、複雑系人工市場においては限界条件を緩和することで、完全視野（全知）の条件下で取引解の均衡特性を実現する新古典派経済学に接近することが明らかになった。

4.3 特性評価2～ミクロマクロ特性解析

本節では、エージェントが有するミクロな効用の変化がマクロな市場取引価格へ与える影響について調べる。ここで前節では、実際の価格変動を理解する目的で取引

Fig. 4 Price of product 1 (Suppliers)

Fig. 5 Price of product 1 (Customers)

Fig. 6 Coefficient of variation

価格そのものを評価対象とした。しかし本節では、価格変動の把握をさらに容易にするために、新たに自己相関関数を導入した解析を行う。以降では、まず用いた自己相関関数について簡単に示す。

【自己相関関数】時系列データの特性を把握する際、時系列変化を考える必要があり、それを表現する一つの指標として以下に示す自己相関関数 [10] が挙げられる。

まず、ある時系列を

$$x(t), \quad t=0,1,2,\dots,N \quad (32)$$

と表現したとき、自己相関関数は (33) 式のようにになる。

$$\phi(\tau) = \frac{\sum_{t=0}^{N-\tau} (x(t) \times x(t+\tau))}{\sum_{t=0}^{N-\tau} (x(t)^2)} \quad (33)$$

厳密には長さが無限大の時系列について、(33) 式の右辺

を $N \rightarrow \infty$ と極限を取るものが自己相関関数であるが、実験的には (33) 式で近似するのが一般的である。

自己相関関数には、i) ランダムな時系列データの自己相関関数は $\tau=0$ を除き 0 である、ii) 周期関数の自己相関関数は周期関数になる、iii) 自己相関関数は元の時系列のランダム性を消去して周期関数を検出する、といった特徴がある。以降では、価格の時系列変化の結果に対しこの自己相関関数を用いることで、そのランダム性を極力排除した人工市場のマクロ特性評価を試みる。

現実の取引場において、取引価格に対する効用は、市場に提供される財の購入者である消費者の方が多様である。したがって、エージェントの効用 (ミクロ) と取引価格 (マクロ) の関係を把握するための基本実験として、本研究では消費エージェントの効用に着目することとする。具体的には、消費エージェントのもつ価格変更係数 (α_{dx}) が市場取引価格に与える影響について解析する。

以下に、消費エージェントの価格変更係数を ($\alpha_{dx} = 0.001, 0.02, 0.05$) とした場合における取引価格の自己相関関数の変化について、それぞれ Figs. 7~9 に示す。これらの図において、横軸と縦軸は、それぞれ時間差 (時刻) と取引価格の自己相関 (関数) 値を表している。

またこれらの結果をまとめるうえで、価格変更係数の各値における自己相関関数の最大値・最小値・平均値・標準偏差について Fig. 10 に示す。なお図中、棒グラフは標準偏差を示す。

これらの結果より、以下のことが明らかとなった。

- 消費エージェントの価格変更係数が小さい ($\alpha_{dx}=0.001$) 場合、取引価格の自己相関値は大きく振動しながら徐々に減少している。この結果より、消費エージェントが生産エージェントの効用変化に対する追従が鈍いため、安定的な取引が確立されていないことがわかる。
- 価格変更係数が大きい ($\alpha_{dx}=0.05$) 場合、自己相関値が細かく振動しながら急速にある値へ収束する。振幅幅が小さくなるのは、生産エージェントの効用変化に対する消費エージェントの価格変更が激しいためであり、生産エージェントが市場変化に追従できないので、急速に取引市場は不活性化していく。
- 価格変更係数が中程度 ($\alpha_{dx}=0.02$) の場合には、生産エージェントの効用変化に呼応する形で消費エージェントが価格交渉を行うため、ある価格帯で周期性をもつ振幅を繰り返しながら取引が安定化していることがわかる。

以上の結果、消費エージェントの価格変更係数は形成される市場価格に対して大きな影響を与え、エージェントのもつミクロな交渉パラメータを適切にチューニングすることにより、陽に均衡価格調整機能を有していない複雑系人工市場においても、定常過程論に従う均衡価格の形成が実現可能であることが明らかとなった。

Fig. 7 $\alpha = 0.001$

Fig. 8 $\alpha = 0.02$

Fig. 9 $\alpha = 0.05$

Fig. 10 Autocorrelation value

我々の日常生活においては相対取引が一般的であり、経済行為の主体である人間は、本研究で着目したさまざまな限界を一般に有している。また、現実の経済社会において、財の相場は急激に変化することはまれであり、現実の市場には財の価格を柔軟に変化させる何らかの価格調整機能が存在することは明らかである。このような状況は、今回の実験で得られた結果にもある程度当ては

まり、提案する複雑系人工市場によって、現実的な経済社会が有している自己組織的な価格形成過程の一端を説明することが可能であると考えている。

最後に、複雑系人工市場が持つ初期値鋭敏性の確認のため、時刻($t=1000$)における各エージェントの資金分布結果の一例を Figs. 11, 12 に示す。この図において、 x, y 軸はそれぞれ各エージェントが存在する座標を示している。また、結果を見やすくするために、仲介エージェントの位置を中心座標としている。

この結果より、エージェントに対して偶然与えられた場所や相互の相対位置関係が、時間経過とともに変化する各エージェントの交渉過程に強く影響し、最終的な市場に大きな差異を生み出していることがわかる。

Fig. 11 Final-landscape (Suppliers)

Fig. 12 Final-landscape (Customers)

5. おわりに

本研究では、多様化する企業取引形態に関してマーケットプレイスなどの新しい取引場に着眼し、計算機上に人工市場の構築を試みた。その際、複雑系経済学を理論的背景として、相対取引を基本とする自己組織的な市場モデルを目指し、生産・消費・仲介エージェントよりなる複雑系人工市場を提案した。まずは、各エージェントについて定式化を行った後、計算機実験により、市場における価格裁定などのマクロなメカニズムに対して、個々の取引エージェントの動きといったミクロな観点から解析を行った。その結果、提案する複雑系人工市場における取引価格のダイナミズム特性や視野の限界との関連性、および自己相関関数を用いた人工市場のもつミクロ・マクロ特性、などについてその一端を明らかにした。また提案市場が、現実の経済社会と同様に定常過程論に従う自己組織的な価格調整機能を有することを示した。

現段階では、まだ複雑系人工市場が持つ基本特性の一端を明らかにしたにすぎず、さらに詳細な特性解析が今後の課題である。その際、対象とする市場構造については、市場の大規模化や取り扱う財の多品種化、取引の多階層化などが、またエージェントが持つ合理性の追求としては、交渉ロジックの精緻化や学習要素の付加などが検討項目として挙げられる。

参考文献

- [1] 和泉, 植田: 人工市場入門; 人工知能学会誌, Vol. 15, No. 6, pp. 941-950 (2000)
- [2] 貝原, 藤井, 原田: 自己創発による市場価格の決定法に関する研究; 第44回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, pp. 41-42 (2000)
- [3] 大家, 貝原, 藤井: 複雑系経済学に基づく人工市場モデルに関する基礎研究; 第46回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, pp. 569-570 (2002)
- [4] 西村: 複雑系経済学とは何か; 東京情報大学研究論集, Vol. 2, No. 3, pp. 147-168 (1998)
- [5] 塩沢: 複雑系経済学入門, 生産性出版 (1997)
- [6] P. R. Wurman, W. E. Walsh and M. P. Wellman: *Flexible Double Auctions for Eledtronic Commerce: Theory and Implementation*, University of Michigan Artificial Intelligence Laboratory (1997)
- [7] 西村: ミクロ経済学 (現代経済学入門), 岩波書店 (1996)
- [8] 西村ほか: 複雑系経済学とその周辺—経済動学から複雑系へ—, サイエンス社 (2000)
- [9] J.M.Epstein and R. Axtell(服部, 木村訳): 人工社会, 共立出版 (1999)
- [10] 市川: 複雑系の科学, オーム社 (2002)