

トレーダの取引行動の遅延を要因として複雑さを生じる市場モデル

知久慎太郎[†] 荒井 秀一[†] 宮内 新[†]

† 武蔵工業大学
〒 158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1
E-mail: †chiku@la.cs.musashi-tech.ac.jp

あらまし 本研究は、経済市場の複雑さを生み出す一要因である“働きかけの限界”を、市場での取引行動における時間的な制約と捉え、トレーダの行動に遅延を組み込んだ市場のモデル化を行う。本モデルにて人工市場を形成しシミュレーションを行い、得られた価格系列を相関次元分析することで本モデルの振舞いは複雑系を形成することを確認し、“働きかけの限界”が複雑さを生む一要因であることを示す。また、振舞いの複雑さを定量的に表象するために決定論的カオスが存在し得ることを分析し、フラクタル次元を用いて定量化を行う。実験より、トレーダの取引行動の遅延幅を増加させることで複雑さが増加することを確認し、“働きかけの限界”を考慮した本モデルは、これまでに提案されている“視野の限界”として捉えた市場モデルとほぼ同程度の複雑さを生み出すことが可能であることを示す。

キーワード 複雑系, 人工市場, 働きかけの限界, 時間遅延, 決定論的カオス, フラクタル次元

A Market Model of Complex Phenomena by Delay of Trader's Action

Shintaro CHIKU[†], Shuichi ARAI[†], and Arata MIYAUCHI[†]

† Musashi Institute of Technology,
Tamazutsumi 1-28-1, Setagaya-ku, Tokyo, 158-0087 Japan
E-mail: †chiku@la.cs.musashi-tech.ac.jp

Abstract This study describes the research about a relationship between delay of trader's action and behavior of artificial markets. We hypothesize delay of trader's action caused complexity of market behavior. We propose the market model using trader with delay of dealing action. We examined the hypothesis using simulation and adopt correlation dimension analysis in order to this model's behavior is complex system, and quantified complexity using fractal dimension. As a result, we found that the model is possible to produce as complicated as the market including limit of scope.

Key words Complex System, Artificial Market, Limit of Trader Working, Delay of trader's action, Deterministic Chaos, Fractal Dimension

1. ま え が き

近年、経済市場をモデル化することで、その複雑な振舞いのメカニズムを分析しようとする研究が数多く行われており、市場の安定性に関する研究 [1] [2] [3] や、トレーダの予測精度と市場の複雑さの関係に関する研究 [4] [5]、情報源と市場の複雑さの関係に関する研究 [6] などが報告されている。その経済市場の振舞いを複雑にする要因として、人間の能力の限界である限定合理性が一要因であると言われている [7]。限定合理性という観点から従来の研究を見てみると、“視野の限界”、“合理性の限界”をモデル化しようとする研究は行われている [4] [6] が、“働きかけの限界”が市場の複雑さの要因であるとした市場のモデル化はこれまで行われていなかった。そこで本研究では、“働

きかけの限界”を考慮した人工市場モデルを提案する。

トレーダが注文を決定するために情報処理に要する時間はトレーダ毎に異なり、この情報処理に要する時間の違いが複雑さを生む要因であると考えられる。そこで、市場におけるトレーダの取引行動の時間的な制約を“働きかけの限界”として捉え、人工市場モデルを構築した。本モデルにおいてシミュレーションを行い、観測される現象を相関次元分析することで、“働きかけの限界”が市場の複雑さの要因になり得ることを確認する。

また本モデルと、これまでに提案されている市場モデルを複雑さの面から比較をするために、複雑さの定量化を行う。市場のマクロ構造のカオス性を見出しフラクタル次元を推定することで、複雑さの尺度として用いる。複雑さを定量化することで、異なる環境の人工市場より観測した現象の複雑さを直接比較す

ることが可能となり、これまでに提案されている“視野の限界”として捉えた市場モデルの複雑さを測定し、“働きかけの限界”を考慮した市場モデルが“視野の限界”を考慮した市場モデルとほぼ同等の複雑な振舞いをすることを示す。

2. 限定合理性を基にした従来研究の分類

経済市場の複雑さの要因は多数考えられ、その要因に基づいて複雑な振舞いをする市場のモデル化が多数試みられている。中でも、人間の能力の限界は複雑さの一要因であると言われており、限定合理性と呼ばれている。人間の能力の限界としては“視野の限界”、“合理性の限界”、“働きかけの限界”が挙げられる[8]。そこで、従来行われている研究をこれら3つの限界に基づいて分類することを試みる。

まず、兼平らが行ったトレーダの情報源と市場の複雑さの関係について示した研究[6]は、売買を行うそれぞれのトレーダに異なる情報源を基に注文を決定させ、市場の振舞いの複雑さとの関係を示しているため、“視野の限界”をモデル化した研究と捉えることができる。

次に、和泉の行ったトレーダの予測精度と市場の複雑さの関係について示した研究[4]は、トレーダの予測次元と市場の振舞いの複雑さとの関係を示しており、“合理性の限界”をモデル化した研究と捉えることができる。

このように“視野の限界”、“合理性の限界”については、市場の複雑さの要因としてモデル化を試みると捉えることのできる研究はなされている。しかし、これまでに“働きかけの限界”に注目したモデル化は行われていなかった。そこで、本研究では“働きかけの限界”を要因として複雑な振舞いをする市場のモデル化を試みる。

3. “働きかけの限界”として捉えた時間的制約

従来の経済学では“働きかけの限界”が考慮されておらず、人間は情報の処理を瞬時にできるものとしていた。現実の市場におけるトレーダは、分析手段の選択、知識や過去の経験の考慮、価格の予測や学習など、情報処理には多くの時間を費している。このように、トレーダは情報処理に多くの時間を要することから、必要であると判断した行動の全てを行うことができないと考えられる。そこで本研究では、トレーダの情報処理における時間的な制約が“働きかけの限界”の要因であると考え、トレーダの取引行動に時間的な制約を組み込んだ市場を“働きかけの限界”が存在する市場としてモデル化を行う。

モデル化に先立ち、トレーダの取引行動を時間的な観点から見てみる。市場におけるトレーダの取引行動は図1のように行われると考えた。トレーダは市場から取引価格・取引量などの情報を取得する(1)。その情報を分析し(2)、注文の決定、注文を行う(3)。さらに、市場において決定された取引価格から知識の更新を行う(4)。どの行動に関しても時間を要するものであるが、市場に対する働きかけといった、市場とトレーダの関係から考えてみると、市場に対する影響を考える必要があるのは、情報を受け取り、注文を出すまでの時間である。また、市場より取得した情報を用いて注文を出すまでの期間が、情報処

理に費した期間と捉えることができる。このことから、トレーダに対し時間的な制約を組み込む方法として、トレーダの情報取得から注文までの入出力間に時間の遅延を与える。つまり、情報の取得から注文までを瞬時に行うのではなく時間遅延を組み込むことで、情報処理に時間を費したことを再現し、“働きかけの限界”をモデル化する。

また、実際の市場でトレーダが必要とする処理時間は、市場を構成する全てのトレーダで共通ではない。市場内には、処理に長い時間を必要とするトレーダや、短い処理時間のトレーダが存在する。この必要とする処理時間の違いがそれぞれのトレーダの性質を表しており、市場を複雑にする要因となるのではないかと考えられる。そこで、トレーダ毎に異なる遅延幅を組み込むこととした。

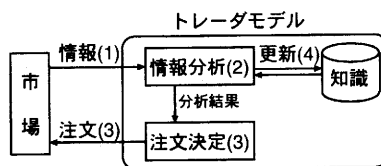


図1 トレーダの情報の流れ

Fig.1 The flow of a trader's information

4. 市場のモデル化

4.1 市場の構成

“働きかけの限界”としてトレーダの取引行動に遅延を組み込んだ市場のモデル化を行う。市場における取引は、リスク資産1種類と無リスク資産1種類により行い、取引価格は、売買注文の需要と供給の均衡する価格とした。市場を構成するトレーダは、市場から情報を取得し、その情報に基づいて取引を行う。

4.2 トレーダの取引行動の遅延

市場における取引価格は、各トレーダからの注文を集計し決定する。決定した価格の情報を基に、トレーダはさらに注文を行うということを繰り返す。市場では、情報配信・注文受信・取引価格決定の一連の処理を1ステップで行い、ステップ毎に取引価格を決定するために板寄せの方式を用いる。市場の状態はステップに従って変化するため、このステップ毎の状態の変化を時間の流れと捉えることとする。行動に遅延を与えないトレーダは毎ステップ、情報取得・分析・注文を行うものとする。遅延を与えたトレーダは、情報の取得後、注文までに遅れを持たせるために行動を行わないステップを組み込む。

図2にトレーダに遅延を組み込んだ例を示す。Trader.Aは情報取得後、次のステップで注文を出す。Trader.BはTrader.Aの注文後2ステップ経過してから注文を出している。これはTrader.BのほうがTrader.Aに比べ時間遅延が長いことを意味する。また、Trader.AとTrader.Bが同時に注文を出しているステップにおいて、Trader.Bが行った注文はTrader.Aが用いた情報より時間が経過した古い情報を基に決定した注文である。このように入力から出力の間に待ち時間として行動を実行しないステップを加え、取引行動の遅延をトレーダに組み込む。

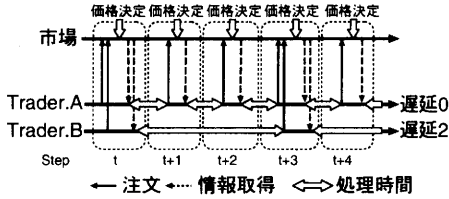


図2 トレーダに組み込む行動の遅延
Fig. 2 Action delay given to traders

また、本市場モデルでは、1ステップでトレーダが情報の取得から注文までを行い、遅延を与えるトレーダにはステップ単位の遅延を与えることとしたため、ステップを実時間で捉えると、数分から数十分と考えることができる。

4.3 トレーダの取引行動の処理の流れ

トレーダの取引行動における処理は図1に示す通りであり、情報判断、注文の決定方法は資産量最適指向アルゴリズム[6]を用いる。この方法は、前期の取引価格、取引量を用いて価格の予測変動量を計算し、注文価格と注文量を決定する方法である。資産量最適指向アルゴリズムでは以下の(1)~(4)に示す処理を行い、各処理について4.4節にて定式化する。

- (1) 時系列の価格から算出される情報 I を取得する。
- (2) 情報 I から予測価格変動値 d を計算する。
- (3) 予測価格変動値 d から予測価格を求め、注文 o を出す。
- (4) 成立した取引価格 p から学習を行う。

4.4 トレーダが用いる情報源

トレーダが取引判断に用いる情報は、現実のトレーダが最も多く用いている情報であるテクニカル情報を用いる。中でも最も一般的に用いられる取引価格の移動平均、取引量を用いて、以下の8ビット $I = (i_1, i_2, \dots, i_8)$ で表現することとした。それぞれの条件を満たせば1、満たさなければ0とするビット列で表現する。トレーダの情報源や予測方法、注文決定方法は、比較のために従来行われている研究[6]と同様に行うものとする。

- i_1 : t-1期の価格がt-2期の価格より高い。
- i_2 : t-1期の中期移動平均がt-2期の中期移動平均より高い。
- i_3 : t-1期の長期移動平均がt-2期の長期移動平均より高い。
- i_4 : t-1期の価格がt-1期の中期移動平均より高い。
- i_5 : t-1期の価格がt-1期の長期移動平均より高い。
- i_6 : t-1期の中期移動平均がt-2期の長期移動平均より高い。
- i_7 : t-1期の長期移動平均がt-2期の中期移動平均より高い。
- i_8 : t-1期の取引量がt-2期の取引量より多い。

4.5 価格変動値の予測

トレーダは注文を決定するために、取得した情報 I を基に価格変動の予測を行う。予測はトレーダ n が保持する8ビットの入力情報 I に対応した分類パターン m を用いて行う。分類パターン m は $(0, 1, \#)$ の値をとるコンディション部 $(j_1^m, j_2^m, \dots, j_8^m)$ と、それに対応する予測価格変化率 $a_t^{n,m}$ で構成する。# は入力情報が1,0のどちらであっても一致したと見なすための値である。この分類パターン m の初期値はトレーダ毎にランダムな値が生成される。

入力情報 $I = (i_1, i_2, \dots, i_8)$ による予測は、式(1)が成り立

つ分類パターン m を選択し、予測価格変化率 $a_t^{n,m}$ を求める。

$$i_k = j_k^m \quad \text{or} \quad j_k^m = \# \quad (1)$$

この予測価格変化率 $a_t^{n,m}$ と1ステップ前の時刻 $t-1$ の価格 p_{t-1} から式(2)により時刻 t の予測価格変動値 d_t^n を算出する。

$$d_t^n = a_t^{n,m} \cdot p_{t-1} \quad (2)$$

4.6 注文の決定

予測価格変動値 d_t^n が決定すれば、時刻 t における、トレーダ n の最適ナリスク資産保有量 \hat{q}_t^n は式(3)を用いて表される。

$$\hat{q}_t^n = \text{round}\left(\frac{d_t^n}{\lambda^n \cdot \sigma_t^{n,m}}\right) \quad (3)$$

$\text{round}()$ は実数を四捨五入し整数にする関数であり $\sigma_t^{n,m}$ は時刻 t におけるトレーダ n の分類パターン m による予測価格変化率の分散を表すが、予測変動値は入力情報により決定しているため入力情報により変化する $\sigma_t^{n,m}$ は本研究では一定とした。

λ^n はリスクに対する性質を示しており、ハイリスク・ハイリターン、ローリスク・ローリターンの性質を決定する値である。市場は多様なトレーダが存在することから、本研究ではトレーダ毎にランダムな値を与えることとした。

次に注文価格 s_t^n を決定する。予測価格変動値 d_t^n 、 $t-1$ ステップの価格 p_{t-1} を用いて、 $s_t^n = d_t^n \cdot p_{t-1}$ と表される。最適ナリスク資産保有量 \hat{q}_t^n が決定すれば、現在のリスク資産保有量を q_{t-1}^n として、注文量 $o_{q_t}^n$ は式(4)で計算できる。

$$o_{q_t}^n = \hat{q}_t^n - q_{t-1}^n \quad (4)$$

注文価格 $o_{p_t}^n$ は式(5)で決定する。

$$o_{p_t}^n = p_{t-1} + d_t \quad (5)$$

これよりトレーダは、 $o_{q_t}^n$ の値が正ならば価格 $o_{p_t}^n$ 、数量 $o_{q_t}^n$ の買い注文、負ならば価格 $o_{p_t}^n$ 、数量 $-o_{q_t}^n$ の売り注文を出す。

4.7 予測の更新

各トレーダが予測をし注文を出すことで、市場において取引価格 p_t が決定する。この価格 p_t からトレーダ n は予測に用いた分類パターン m の予測価格変化率 $a_t^{n,m}$ の更新を行う。

時刻 $t-1$ の価格と時刻 t の取引価格より価格変化率 r_t を式(6)より算出し、予測価格変化率 $a_t^{n,m}$ を式(7)により更新する。

$$r_t = \frac{p_t - p_{t-1}}{p_{t-1}} \quad (6)$$

$$a_{t+1}^{n,m} = (a_t^{n,m} + r_t) / 2 \quad (7)$$

5. 実験

5.1 人工市場モデルの評価

“働きかけの限界”としてトレーダの取引行動に遅延を組み込んだモデルが、複雑な振舞いをすることを確認するためにシミュレーションを行い、分析する。シミュレーションを行うための人工市場は X-Economy System [9] を用いて構築した。

ここでは比較のために、“働きかけの限界”として取引行動に遅延を与えた市場と、与えない市場を用意し、各々シミュレー

表 1 設定したパラメータの値

Table 1 Traders parameters	
分類パターン数	200
シミュレーション期間	50000
$\sigma_t^{n,m}$	1.0
$1/\lambda^n$	rand(0,10)
$a^{(n,m)}_0$	rand(-0.1,0.1)
中期移動平均期間	5step
長期移動平均期間	10step

表 2 “働きかけの限界”が存在する市場の構成

Table 2 Composition of the market by agents with delay of action

市場	遅延ステップ	トレーダ数
取引行動の遅延なし	0	100
取引行動の遅延あり	0~4	各 20

シミュレーションを行う。シミュレーションを行う際の市場におけるパラメータを表 1 に示す。

また、“働きかけの限界”が存在する市場に関しては、表 2 のようにトレーダに組み込む遅延幅とトレーダ数とした。

以上の条件におけるシミュレーションをそれぞれ 10 試行を行った。また、得られた価格系列の一例を図 3 に示す。

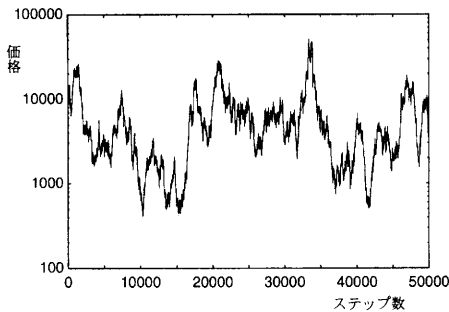


図 3 “働きかけの限界”が存在する場合の価格系列の例

Fig. 3 Example of price series

ここで、市場のマクロ構造を分析するために、価格系列を再構成空間に埋め込み、相関次元分析を行う [10][11]。取引行動に遅延を与えない市場と、取引行動に遅延を与えた市場より得た価格系列に対し、相関次元分析を行った結果を図 4 に示す。

図 4 のグラフはそれぞれ 10 回試行の平均であり、埋め込み次元の増加とともに相関次元の値が飽和していること、グラフの形状が上に凸の形状をしていることが確認できる。上に凸の形状をしている場合は、市場の振舞いがランダムウォークではなく、何らかの構造が存在し、決定論的な振舞いをしていることになる [10][11]。

したがって、取引行動に遅延を与えたモデルが、複雑な振舞いをする人工市場モデルとして構築できたことが示された。

5.2 複雑さの定量評価

“働きかけの限界”を組み込んだモデルが複雑な振舞いをしていないことを確認することはできたが、複雑さの増分を計測する

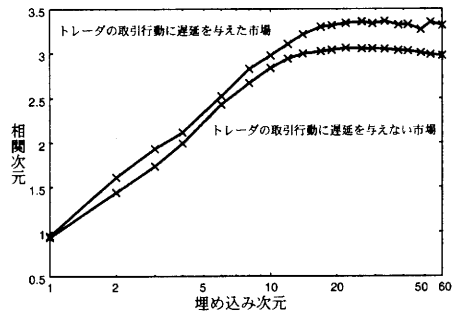


図 4 “働きかけの限界”が存在する市場の振舞いの複雑さ

Fig. 4 Complexity of the market by delay of trader's action

ためには、複雑さの定量化が必要となる。

本研究では、複雑さの定量化のために価格系列のフラクタル次元を用いることとした。フラクタル次元は、現象の自由度を推定するために、複雑系科学の分野でよく用いられている [12]。しかし、フラクタル次元はフラクタル性を定量化した値であるため、複雑さの尺度として用いるためには、価格系列に決定論的カオスが存在しなければならない。複雑な振舞いに決定論的カオスが存在する場合、自己相似性・軌道不安定性の特徴が現れる。そこで本研究では、それぞれの特徴を分析するために、価格系列に対して相関次元分析・リアプノフ解析 [13] を行う。ただし、相関次元の飽和が価格系列のトレンドの影響である可能性も否めないの [14] で、周波数分析も同時に行う。これらを分析した上で、決定論的カオスが存在し得ることを示し、フラクタル次元を用いて人工市場の振舞いの複雑さを定量的に評価する。

5.3 取引行動の遅延幅による市場の複雑さ

“働きかけの限界”を与えることによって変化した複雑さを定量化するために、市場の振舞いのカオス性を分析し、フラクタル次元を求める。また、“働きかけの限界”をトレーダの取引行動の遅延として 5.2 節では最大 4 ステップの遅延幅を与えていたが、さらに遅延幅を増加させたときの市場の複雑さへの影響を測定する。

トレーダに組み込む遅延幅とトレーダ数を表 3 の通りとしてシミュレーションを行った。

表 3 取引行動の遅延幅とトレーダ数

Table 3 The delay width and the number of traders

遅延ステップ	トレーダ数
0	100
0~4	各 20
0~7	遅延幅 0 が 16、その他各 12
0~9	各 10
0,2,4, ..., 18	各 10
0,3,6, ..., 27	各 10

シミュレーションより得た価格系列の相関次元分析結果を図 5 に示す。

図 5 より、遅延幅なし、最大遅延幅 4 ステップ、7 ステップ

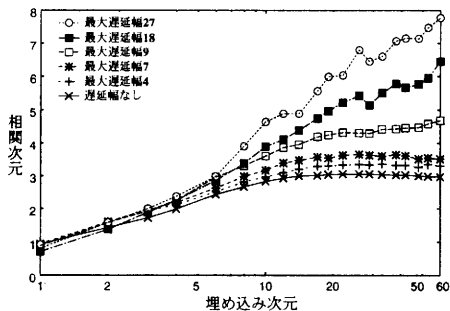


図5 遅延幅と相関次元

Fig.5 The delay width and correlation dimension

のトレーダで構成した市場では相関次元が飽和した。これより自己相似性があると言える。しかし、最大遅延幅を9ステップ以上としたときの相関次元は飽和していない状態である。グラフ形状が直線の場合、構造が特定できない状態であり自己相似性があるとは言えない。

また、最大遅延幅7ステップ以下について、トレンドの有無を調べるためパワースペクトルを求めた。図6に最大遅延幅7ステップのときの価格系列のパワースペクトルを示す。

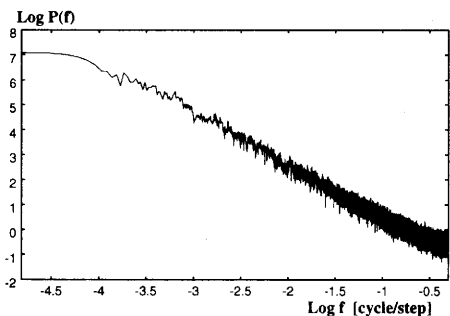


図6 最大遅延幅7ステップのときの価格系列のパワースペクトル

Fig.6 The power spectrum of a price series by the agent with 7 steps delay action

図6より、パワースペクトルに急激な変化はなく、低周波数から高周波数にかけて偏りなく生じている。ピークも存在しないことからトレンドは含まれていないと言える。遅延を与えない場合、最大遅延幅4ステップの場合も図6とほぼ同様の形状を示した。

次に、軌道不安定性を分析するためにリアプノフ解析を行った。リアプノフ解析にて得た最大リアプノフ指数を表4に示す。

表4 遅延幅と最大リアプノフ指数

Table 4 The delay width and largest Lyapunov exponents

遅延ステップ	最大リアプノフ指数
0	1.381
0~4	1.378
0~7	1.400

表4より、最大リアプノフ指数が正の値をとることが確認で

き、軌道不安定性があることが示された。

遅延幅なし、最大遅延幅5ステップ、7ステップの市場においては、自己相似性、軌道不安定性があることが確認できた。よって、これらの市場の振舞いには決定論的カオスが存在し得ることが示されたので、フラクタル次元を用いて複雑さを定量化した。それぞれの市場におけるフラクタル次元は、図5の相関次元が飽和した値であり、表5に示す。

表5 遅延幅の違いによる複雑さ

Table 5 Complexity by delay width

遅延ステップ	フラクタル次元
0	2.98
0~4	3.31
0~7	3.51

表5より、トレーダの取引行動に最大4ステップの遅延を与えることで市場の複雑さは2.98から3.31へと0.33次元増加し、最大7ステップの遅延を与えることで複雑さは3.51とさらに0.20次元増加することが確認できた。これより、トレーダに対し組み込む遅延幅を増加させると、市場の振舞いはより複雑になることが分かった。しかし、最大9ステップ以上の遅延を与えるとマクロ構造の複雑さを推定できない状態となった。これは、トレーダが注文決定に使用した情報が時間経過により古くなり、情報の価値が失われたためであると考えられる。そのため、トレーダの行動にランダム性が生じ、市場は確率的な振舞いを始めたのではないかと考えられる。

5.4 トレーダの入力情報の遅延幅による劣化検証

トレーダが市場に出す注文は、取得した情報を基に判断しているが、遅延幅が大きくなることで情報が時間経過とともに古くなっていると考えられる。そこで、トレーダが注文決定に用いる8ビットのテクニカル情報が時間経過とともにどれほど変化していくのかを検証した。

時刻 t における8ビット情報 $I(t) = (i_1(t), i_2(t), \dots, i_8(t))$ と、 k ステップ前の情報 $I(t-k)$ の一致率 $P(k)$ を式8と定義する。

$$P(k) = \frac{\sum_{t=0}^T \sum_{n=1}^8 E(In(t), In(t-k))}{8 \cdot T} \quad (8)$$

ただし、 $E(In(t), In(t-k))$

$$= \begin{cases} 1 & (i_n(t) = i_n(t-k)) \\ 0 & (i_n(t) \neq i_n(t-k)) \end{cases}$$

遅延幅なしの市場より得た価格系列に対し、 k を0から30ステップまで増加させたときの $P(k)$ の変化を図7に示す。

図7より、 k が増加するとともに $P(k)$ が減少していくことが確認できる。そして $P(k) = 0.5$ に漸近しているが、このとき $I(t-k)$ は $I(t)$ との一致率がランダム的になったと言える。この結果より、時間の経過とともに情報は古くなっていき、遅延を与えたトレーダが用いる情報は、遅延を与えないトレーダが用いる情報とは異なっていくことが確認できた。

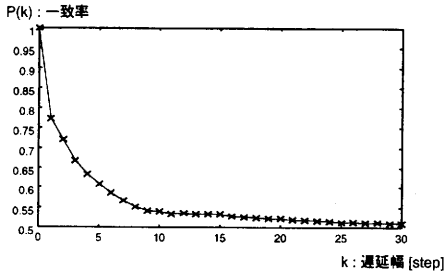


図7 遅延幅と情報の一致率

Fig. 7 The delay width and the rate of congruity

5.5 “視野の限界”に基づく市場の複雑さとの比較

複雑さを生む要因として、“働きかけの限界”を考慮した市場を分析してきたが、従来行われていた“視野の限界”を考慮した市場との複雑さの比較を行う。兼平、川村らが行った研究[6]は、“視野の限界”を考慮したモデルとして捉えることができ、本モデル上でも再現可能である。そこで、“視野の限界”を考慮したモデルを再現し、その市場の複雑さを測定することで、“働きかけの限界”を考慮した市場が生み出す複雑さとの比較を行った。

兼平、川村らの研究[6]では、トレーダ毎にランダムな情報を追加することで複雑な現象を再現している。共通情報である $i_1 \sim i_8$ に加えて、トレーダ毎に異なるランダム情報 (0 or 1) を2ビット (i_9, i_{10}) 加え10ビットの情報を情報源として用いる。本研究でも同様に情報源の追加を行い、“視野の限界”を考慮したモデルを構築した。

“視野の限界”を考慮したモデルを用いてシミュレーションを行い、得られた価格系列に対し相関次元分析を行った結果、埋め込み次元の増加とともに相関次元は飽和した。また、周波数分析を行った結果、パワースペクトルに偏り・ピークはなくトレンドは含まれていなかった。そして、リアプノフ解析の結果、最大リアプノフ数は1.340と、正の値を示すことが確認できた。

この結果、“視野の限界”を与えた市場の振舞いには自己相似性、軌道不安定性があり、決定論的カオスが存在し得ると言える。そこで、フラクタル次元を用いて複雑さの定量化を行った。比較のため、0~7ステップの遅延幅を与えた市場のフラクタル次元も同時に表6に示す。

表6 “視野の限界”が存在する市場の複雑さとの比較

Table 6 Complexity by source of information

“働きかけの限界”	“視野の限界”	フラクタル次元
なし	あり	3.56
0~7ステップの遅延	なし	3.51

表6より、“視野の限界”を与えた市場のフラクタル次元は3.56次元となり、“働きかけの限界”として0~7ステップの遅延を与えた市場は、“視野の限界”を与えた市場とほぼ同等のフラクタル次元を示すことが確認できた。この結果、“働きかけの限界”を考慮した人工市場モデルは、これまでに提案されている“視野の限界”と捉えた人工市場モデルと、ほぼ同程度の複

雑さを生み出していることが確認できた。

6. あとがき

本研究は、“働きかけの限界”をトレーダの時間的制約と捉え、トレーダの取引行動に遅延を与えることで“働きかけの限界”を考慮した人工市場のモデル化を行った。本モデルが複雑な振舞いをすることを確認するために、シミュレーションを行い、得られた価格系列に対し相関次元分析を行った。その結果、本モデルが複雑な振舞いをしていることが確認でき、“働きかけの限界”を考慮した人工市場モデルとして構築できたことを示した。

次に、“働きかけの限界”を考慮することで増加した複雑さを定量化するために、市場の複雑な振舞いに決定論的カオスが存在し得ることを示し、フラクタル次元の推定を行った。フラクタル次元を求めることで、市場が生み出した複雑さを定量化し、市場間での複雑さの比較を可能とした。そして実験により“働きかけの限界”として与えるトレーダの取引行動の遅延幅を増加させることで、市場の複雑さが増すことを確認した。

最後に、本モデルが示す複雑さを従来研究と比較するために、“視野の限界”を考慮したと捉えた人工市場研究を本モデル上でも構築し、複雑さの測定を行った。その結果、“働きかけの限界”を考慮した市場モデルは、“視野の限界”として捉えた市場とほぼ同程度の複雑さを生み出すことが可能であることを示した。

文 献

- [1] 佐々木雄一, 川村秀憲, 車谷浩一, 大内東: 通貨取引エージェントを導入した国際貿易モデルにおける市場の安定性に関する研究, 信学技報, AI2001-74(2002).
- [2] 篠原修二: 市場性に基づく主体の需要行動と貨幣の生成, 情報処理学会研究報告, 数理モデルと問題解決 24-6(1999).
- [3] 長谷川教士, 植田一博: 人工社会と貨幣交換, 信学技報, AI99-70(2000).
- [4] 和泉潔: 個人の複雑さ, 市場の複雑さ, 信学技報, AI2000-44(2001).
- [5] K. Izumi: Complexity of Agents and Complexity of Markets, in Proceedings of JSAI 2001 International Workshop on Agent-based Approaches in Economic and Social Complex Systems (AESCS 2001).
- [6] 兼平大輔, 川村秀憲, 車谷浩一, 大内東: 人工市場における価格学習エージェント群の情報解釈と市場マクロ構造に関する研究, 信学技報, AI2001-75(2002).
- [7] Simon, Herbert A.: Administrative Behavior, 1945, 2ed. (1957). 松田武彦ほか訳『経営行動』ダイヤモンド社, (1965).
- [8] 塩沢由典: 複雑系経済学入門, 生産性出版 (1997).
- [9] 川原秀憲, 車谷浩一, 大内東: X-Economy プロジェクトの紹介, 電子情報通信学会, 情報処理学会, FIT2002, OE1-5(2002).
- [10] 中島義裕: 経済現象に見られる決定論的性質と確率論的性質の両義性, 情報処理学会論文誌: 「数理モデル化と応用」, Vol.40, No.SIG9(TOM2), (1999).
- [11] 中島義裕: 経済の揺らぎとフラクタル, 方法としての進化, 第7章, シュプリンガー・フェアラーク東京 (2000).
- [12] Franc M.Z., and T.Stengo: Measuring the strangeness of gold and silver rates of return, Review of Economic Studies 56, pp.553-568 (1989).
- [13] 合原一幸: カオス時系列解析の基礎と応用, 産業図書 (2000).
- [14] 高木康順, 秋山裕, 田中辰雄: 応用計量経済学, 多賀出版 (1997).