

# 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<sup>†</sup>, 荒井 秀一<sup>†</sup> 宮内 新<sup>†</sup>

本論文は、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とらえ、トレーダの行動に遅延を組み込んだ市場のモデルを提案する。提案モデルを組み込んだ人工市場で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、提案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した。さらに、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ていることを分析し、フラクタル次元を用いて定量化を行った。また、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た。最後に、“視野の限界”としてとらえた市場モデルの複雑さを計測し、提案モデルより得た複雑さと比較することで、本論文が提案する“働きかけの限界”を考慮したモデルは、これまでに提案されている“視野の限界”としてとらえた市場モデルと、ほぼ同程度の複雑さを生み出せることを確認した。

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

SHINTARO CHIKU,<sup>†</sup> SHUICHI ARAI<sup>†</sup> and ARATA MIYAUCHI<sup>†</sup>

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.

### 1. はじめに

自然現象をはじめ、社会現象や生命現象などの複雑な現象の発生メカニズムは現在までに解明できていない。このような現象は、系を構成する多数の主体が相互作用することで系全体の振舞いが決定する複雑系であると考えられる。従来行われている解析的手法では、個々の要素の現象しか解析できないため、個々の要素の振舞いの相互作用から系全体の振舞いが決定する複雑な現象の発生メカニズムは解明できなかった。このような現象の発生メカニズムを解明するために、複雑な現象をミクロとマクロのダイナミクスととらえた複雑系のモデル化が試みられている。複雑系の代表的な系であると考えられる経済市場は、系全体の振舞いが定量的な値として表象される系であるため、モデル化した現象の評価を行いやすい。そのため近年、人工市

場を用いて経済市場の現象を再現しようとする研究がさかんになってきている<sup>1)~4)</sup>。

現在行われている人工市場研究では、市場の安定性に関する研究<sup>5)~7)</sup>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<sup>8),9)</sup>、さらに、情報源と市場の複雑さの関係に関する研究<sup>10)</sup>などが報告されている。経済市場の振舞いを複雑にする要因は多数考えられるが、複雑系経済学においては人間の能力の限界である限定合理性が複雑さの要因であるといわれている<sup>11)</sup>。市場の複雑さの要因であると考えられている人間の能力の限界には、“視野の限界”、“合理性の限界”、“働きかけの限界”の3つの限界がある<sup>12)</sup>。

このような人間の能力の限界という観点から従来の研究を分類すると、“視野の限界”のモデル化ととらえられる研究として、情報源と市場の複雑さの関係に注目した研究が行われている<sup>10)</sup>。また、“合理性の限界”としてトレーダの予測精度と市場の複雑さの関係に注目した研究が行われている<sup>8)</sup>。このように、“視野の限界”、“合理性の限界”についてはモデル化を行ったと見なすことのできる研究がなされている。しかし、

<sup>†</sup> 武蔵工業大学

Musashi Institute of Technology

現在、日本電気株式会社

Presently with NEC corporation

“働きかけの限界”が市場の複雑さの要因であったとした市場のモデル化はこれまで行われていなかった。

そこで本論文では、トレーダの情報処理に時間的制約を組み込むことで、“働きかけの限界”を考慮した市場モデルを提案する。そして、提案モデルによっ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により、“働きかけの限界”が市場の複雑さの要因になりうることを確認する。

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的に表象するために、マクロ構造のカオス性を明らかにしフラクタル次元を推定する。フラクタル次元を用いて複雑さを定量化することで、異なるモデルより観測した現象の複雑さを定量的に比較することが可能となる。本論文では、これまでに提案されている“視野の限界”としてとら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と“視野の限界”を考慮した市場モデルの振舞いの複雑さを比較することで、提案モデルを評価する。

## 2. 限定合理性を基にした従来研究の分類

複雑系経済学では、人間の能力の限界である限定合理性が複雑さの一要因であると考えられている。そこで、限定合理性である“視野の限界”、“合理性の限界”、“働きかけの限界”に基づいて、人工市場研究の分類を試みる。

“視野の限界”とは、トレーダは市場に影響を与えるすべての情報を知ることにはできないという限界である。トレーダは取引判断を行うために情報を取得しようとするが、すべての情報を取得することはできず、限定的な情報しか取得できない。取得できる情報もトレーダごとに異なるため、各トレーダは異なる情報を用いて注文の決定を行っているといえる。つまり、それぞれのトレーダが異なる情報源を基に注文を決定していることが、市場の振舞いに複雑さを生じさせていると考えられる。このようにとらえると、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<sup>10)</sup>は、“視野の限界”をモデル化しようとする研究であると思えることができる。この研究では、各トレーダ間に共通な情報に加え、トレーダごとに異なる情報を情報源として用いることで、市場の振舞いが複雑になることが示されている。

“合理性の限界”とは、取引判断のために行うトレーダの価格予測は完全ではないという限界である。これは最適な取引行動を探索することが不可能であることを意味している。つまり、トレーダが完全な予測を行えないために市場に複雑さが生じていると考えられる。

このようにとらえると、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<sup>8)</sup>は、“合理性の限界”をモデル化しようとする研究であると思えることができる。この研究では、高次元な予測を行うトレーダが構成する市場では、確率的な振舞いが見られるが、低い次元の予測を行うトレーダが構成する市場では、決定論的な振舞いを示すことが報告されている。

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研究がなされている。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、本論文では“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”としてとらえた時間的制約

“働きかけの限界”とは、トレーダは行動すべきと判断した行動のすべてを実行することはできないという限界である。ここでの働きかけとは、トレーダが取引行動を行うことで市場に対して与える影響を意味している。

“働きかけの限界”が考慮されていない従来の経済学においては、人間は行動判断を瞬時に行えるものとしていた。しかし、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、行動判断には多くの時間を費している。一方、市場は時々刻々と変化しており、一定の時間制約内で取引が行われている。このように、トレーダは行動判断に多くの時間を要する一方、市場は一定の時間制約のもとで機能しているために、トレーダは必要であると判断した行動のすべてを行うことができないと考えられる。

そこで本論文では、トレーダの行動判断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”が存在する市場であるとして市場のモデル化を行う。

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現在の取引価格や、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、市場に対して注文を出す(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

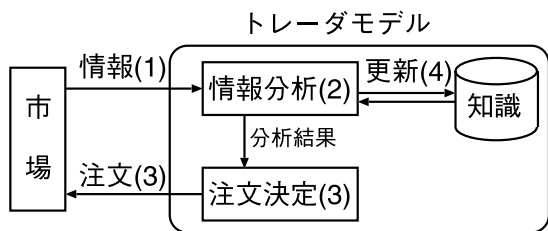


図 1 トレーダの情報の流れ  
Fig. 1 The flow of a trader's information.

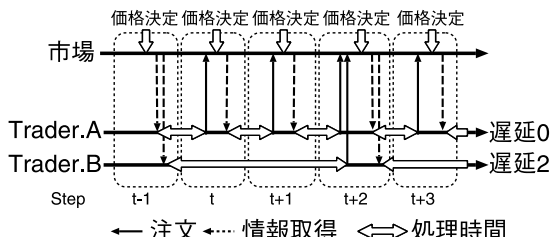


図 2 トレーダに組み込む行動の遅延  
Fig. 2 Action delay given to traders.

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と考えられる。

市場より取得した情報を用いて注文を出すまでの時間はトレーダごとに異なり、その要因には様々なものが考えられる。たとえば、(1)の段階で、どの程度の量の情報を入手するかは、“視野の限界”とも関係するが、トレーダの興味の範囲や、情報入手環境にも依存し、収集した情報の量によって(2)の情報分析に要する時間も変化する。(2)の情報分析では使用可能な分析手段の能力やトレーダ自身の情報処理能力に依存した時間が必要である。さらに、(3)の段階ではトレーダの判断力に依存した注文決定までの時間や、注文環境に依存した注文手続き時間が存在する。このように、トレーダに必要な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。

注文を出すまでに時間がかかった結果、市場が設定した期限内に間に合わなければ、トレーダの行動に遅延が生じる。ある時間内に行動ができない場合は、行動自体が無意味になる可能性もあるが、本研究では行動を遅延させて実行することとし、その行動に対する評価は市場に委ねることとした。たとえば、行動の遅延によって売買が成立しないという場合がこれにあたる。

これ以外にも様々な要因が“働きかけの限界”としては考えられるが、多くは市場とトレーダ間の時間制約に起因するものであるため、本論文では、まず時間遅延という条件をトレーダに組み込むことにした。

以上のように、本研究では、情報の取得から注文までを瞬時に行うのではなく、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ことで、上記のような様々な要因に該当する時間消費を再現し、“働きかけの限界”をモデル化する。

#### 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、注文受信・取引価格決定・情報配信の一連の処理を 1 ステップで行い、ステップごとに取引価格を決定するために板寄せの方式を用いる。ただし、実際の金融市場の板寄せ方式に厳密に対応させているのではなく、均衡型の価格決定として概念的なモデル化として板寄せ方式を利用している。

市場の状態はステップに従って変化するため、このステップごとの状態の変化を時間の流れととらえることとする。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。

また、本論文が提案する市場モデルでは、遅延を与えないトレーダは 1 ステップ分の時間でトレーダが情報の取得から注文までを行い、遅延を与えたトレーダに設定した遅延幅は、学習・予測などの心的演算に要する時間や、学習・予測方式の複雑さの違いにより発

生したものと考えているため、実時間でとらえると1ステップは数分～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に示すとおりであり、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<sup>10)</sup>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)に示す処理を行う。

- (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。

これらの各処理を4.4節において定式化する。

#### 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。なか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<sup>10)</sup>と同様に行うものとする。

- $i_1$ : t-1ステップの価格  $p_{t-1}$  が t-2ステップの価格  $p_{t-2}$  より高い。
- $i_2$ : t-1ステップにおける中期移動平均  $middleMA_{t-1}$  が t-2ステップにおける中期移動平均  $middleMA_{t-2}$  より高い。
- $i_3$ : t-1ステップにおける長期移動平均  $longMA_{t-1}$  が t-2ステップにおける長期移動平均  $longMA_{t-2}$  より高い。
- $i_4$ : t-1ステップの価格  $p_{t-1}$  が t-1ステップにおける中期移動平均  $middleMA_{t-1}$  より高い。
- $i_5$ : t-1ステップの価格  $p_{t-1}$  が t-1ステップにおける長期移動平均  $longMA_{t-1}$  より高い。
- $i_6$ : t-1ステップにおける中期移動平均  $middleMA_{t-1}$  が t-2ステップにおける長期移動平均  $longMA_{t-2}$  より高い。
- $i_7$ : t-1ステップにおける長期移動平均  $longMA_{t-1}$  が t-2ステップにおける中期移動平均  $middleMA_{t-2}$  より高い。
- $i_8$ : t-1ステップの取引量  $v_{t-1}$  が t-2ステップの取引量  $v_{t-2}$  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ごと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。

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

複数の分類パターンが適合する場合は、最初にマッチした分類パターンを選択する。このようにしても、分類子はトレーダごとに決定しているため、トレーダごとに異なる判断が行われる。また、個々のトレーダについては、最初に適合した分類パターンを選択することにより一様な行動をとる可能性があるが、これは人間が特定の判断基準を重視するのと同等の効果であると考えた。

この予測価格変化率  $a_t^{n,m}$  と t-1ステップの価格  $p_{t-1}$  から式(2)により tステップの予測価格変動値  $d_t^n$  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、tステップにおける、トレーダ  $n$  の最適ナリスク資産保有量  $q_t^n$  は式(3)を用いて表される<sup>2),19)</sup>。

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

$\text{round}()$  は実数を四捨五入し整数にする関数であり、 $\sigma_t^{n,m}$  は tステップにおけるトレーダ  $n$  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  $\sigma_t^{n,m}$  は本論文では一定とした。

危険回避度  $\lambda^n$  はリスクに対する性質を示しており、この値が小さいトレーダはリスク資産をより多く保有し、ハイリスク・ハイリターン傾向を示す。反対にこの値が大きいときはローリスク・ローリターンの性質であるといえる。市場には多様なトレーダが存在することから、本論文ではトレーダごとにランダムな値を与えることとした。

なお、式(3)は、tステップでのトレーダ  $n$  の総資

産  $W_t^n$  に関する絶対的危険回避度一定 (CARA) 型効用関数  $U(W_t^n)$  の期待効用最大化問題を解くことによって求められる<sup>2)</sup> .

$$U(W_t^n) \equiv -\exp(\lambda^n \cdot W_t^n) \quad (4)$$

最適リスク資産保有量  $\hat{q}_t^n$  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 (5) で計算できる .

$$o_{q_t}^n = \hat{q}_t^n - q_{t-1}^n \quad (5)$$

また、注文価格  $o_{p_t}^n$  は t-1 ステップの価格  $p_{t-1}$  と予測価格変動値  $d_t^n$  を用いて式 (6) のように決定する .

$$o_{p_t}^n = p_{t-1} + d_t^n \quad (6)$$

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 .

t-1 ステップの価格と t ステップの取引価格より価格変化率  $r_t$  を式 (7) より算出し、予測価格変化率  $a_t^{n,m}$  を式 (8) により更新する .

$$r_t = \frac{p_t - p_{t-1}}{p_{t-1}} \quad (7)$$

$$a_{t+1}^{n,m} = (a_t^{n,m} + r_t) / 2 \quad (8)$$

### 5. 実 験

#### 5.1 提案モデルの評価

“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かを、提案モデルに基づく人工市場のシミュレーションにより実験的に検証する . シミュレーションは X-Economy System<sup>13)</sup> に提案モデルを組み込んだ人工市場を構築して行うこととした . シミュレーションにより観測された価格系列に対し相関次元分析を行うことで、市場のマクロ構造を分析する .

本実験では、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、各々シミュレーションを行う . シミュレーションで用いるパラメータは表 1 のように設定した .

X-Economy System では、トレーダの予測価格変化率の初期値としてランダムな値を与えているので、ある程度の長さの価格系列を用いて予測価格変化率の学習を行った . 本実験で用いた 200 個の分類パターンに対応する予測価格変化率において、初期ランダム成分の影響を十分に小さくするための学習期間は実験的

表 1 設定したパラメータの値

Table 1 Traders parameters.

入力情報 $I$	8 [bit] (4.4 節参照)
分類パターン数	200
シミュレーション期間	50,000
$\sigma_t^{n,m}$	1.0
$1/\lambda^n$	rand(0,10)
$a_0^{n,m}$	rand(-0.1,0.1)
中期移動平均期間	5 [ステップ]
長期移動平均期間	10 [ステップ]

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	遅延幅 [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

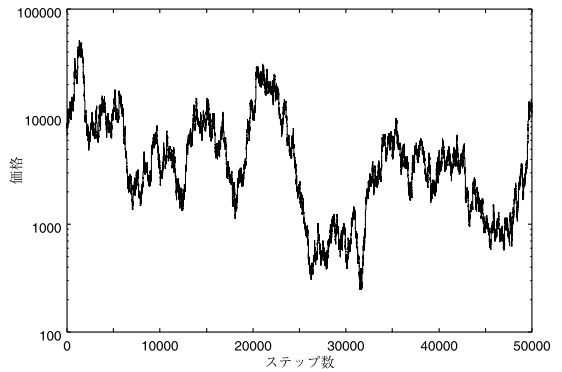


図 3 “働きかけの限界” が存在する市場においてシミュレーションより得た価格系列の例

Fig. 3 Example of price series.

に 5,000 ステップと定めた . この期間に得られる価格系列は以下の分析には用いていない .

また、トレーダの取引行動に遅延を与えない場合、与える場合それぞれについて、トレーダに組み込む遅延幅とトレーダ数は、表 2 のとおりとした . 取引行動に遅延を与えた市場と与えない市場で異なるのは、この遅延幅とトレーダ数の内訳のみであり、総トレーダ数や表 1 のパラメータなどは同一条件である .

以上の条件におけるシミュレーションより得られた価格系列の一例を図 3 に示す . 定性的ではあるが、まず最初に、この図のように価格系列には周期性が認められないことをすべての価格系列で確認したうえで、以下に示す分析を行った .

ここでは、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<sup>14),15)</sup> . 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

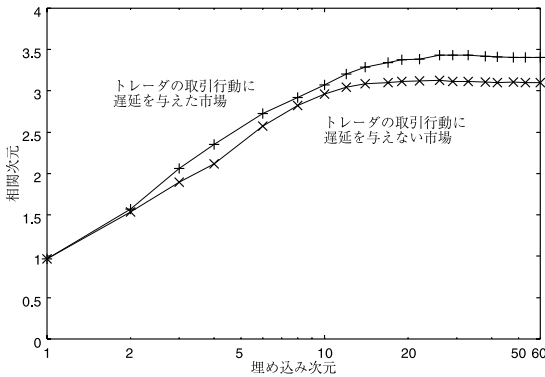


図4 “働きかけの限界”が存在する市場の振舞いの複雑さ

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

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の市場に対し10回試行の平均値を示している。

取引行動に遅延を与えない場合、与えた場合とも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を意味する<sup>15)</sup>。したがって、“働きかけの限界”を考慮しない従来のモデルによる市場も、“働きかけの限界”として取引行動に遅延を与えた本モデルによる市場も、確率論的ではない、複雑な振舞いをすることはこのグラフから明らかになった。グラフより2市場間に差異が存在するようにも見えるが、相関次元分析のみでは市場間の差異を論じることはできないので、次節以降で定量的にモデル評価を行っていく。

## 5.2 複雑さの定量評価

前節の相関次元分析より、“働きかけの限界”を考慮したモデルが複雑な振舞いをしていることを確認することはできたが、現象の複雑さや、“働きかけの限界”を考慮することで増加した複雑さを計測するためには、複雑さの定量化が必要となる。

本論文では、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<sup>16)</sup>。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。そこで本論文では、それぞれの特徴を分

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.

遅延幅 [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

析するために、価格系列に対して相関次元分析・リアプノフ解析を行う<sup>17)</sup>。まず、相関次元分析を行い相関次元が飽和するかを調べることで自己相似性の存在を確認する。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<sup>18)</sup>ので、周波数分析も同時に行う。次にリアプノフ解析を行い、最大リアプノフ指数が正の値であるかを調べることで軌道不安定性の存在を確認する。これらを分析することで、決定論的カオスが存在しうることを示したうえで、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

本モデルでは“働きかけの限界”としてトレーダの取引行動に遅延を与えることで、市場の振舞いに対する影響を分析しようとしているが、実際の市場について考えてみると、情報処理に要する時間が長いトレーダや短いトレーダなど様々なトレーダが存在する。この処理時間の違いにより市場の振舞いが複雑になっていると考えられるため、トレーダに与える遅延幅と市場の複雑さとの関係を検討するために以下の実験を行う。本実験では、5.1節で最大4ステップとしていた遅延幅をさらに増加させた市場を用意し、それぞれの市場の振舞いよりカオス性を分析する。カオス性が示された市場に対しては、フラクタル次元を用いて複雑さの定量化を行っていく。

トレーダに組み込む遅延幅とトレーダ数は表3に示す6種類とし、この条件で構築した6種の人工市場においてシミュレーションを行った。

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ステップは相関次元が飽和した。これより自己相似性があるといえる。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。グラフ形状が直線的な場合、構造が特定できない状態であり自己相似性があるとはいえない。

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。

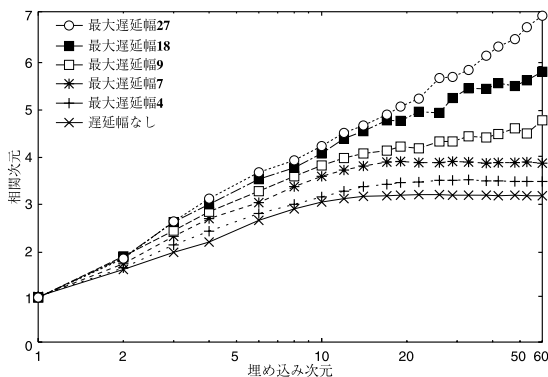


図 5 遅延幅と相関次元

Fig. 5 The delay width and correlation dimension.

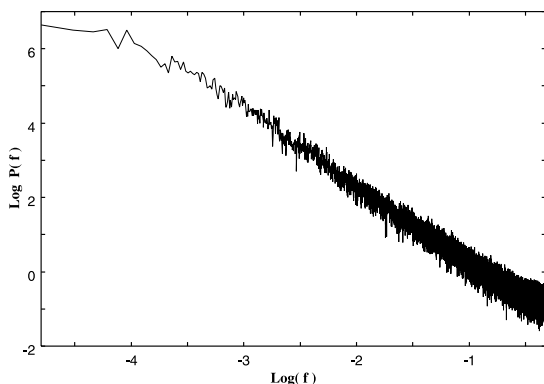


図 6 最大遅延幅 4 ステップのときの価格系列のワースペクトル  
Fig. 6 The power spectrum of a price series by the agent with 4 steps delay action.

表 4 遅延幅と最大リアプノフ指数

Table 4 The delay width and largest Lyapunov exponents.

遅延幅 [ステップ]	最大リアプノフ指数
0	1.337
0~4	1.388
0~7	1.370

図 6 に最大遅延幅 4 ステップのときの価格系列のワースペクトルを示す。

図 6 より、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ことが分かる。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いえる。遅延を与えない場合、最大遅延幅 7 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い、最大リアプノフ指数を推定した。リアプノフ解析の結果を表 4 に示す。

表 4 より、最大リアプノフ指数が正の値をとること

表 5 遅延幅の違いによる複雑さ  
Table 5 Complexity by delay width.

遅延幅 [ステップ]	フラクタル次元
0	3.10
0~4	3.41
0~7	3.80

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 4 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う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 のようになった。ここで求めた遅延幅 0 と遅延幅 0~4 のフラクタル次元、遅延幅 0~4 と遅延幅 0~7 のフラクタル次元に対して t 検定を行ったところ、有意水準 5% でこれらのフラクタル次元は異なることが確かめられた。

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 3.10 から 3.41 へと 0.31 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 3.80 と 0.70 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しはじめたのではないかと考えられる。

そこで、取得した情報が時間経過とともに古くなっているかどうかを検証するために、検証実験を行った。

#### 5.4 トレーダの入力情報の遅延幅による変化

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。一般的に、時間経過によるデータの変化を調べるためには自己相関がよく用いられるが、本論文でトレーダが注文決定に用いている情報は、価格系列のみでなく 4.4 節で述べたような 2 種類の移動平均値も用いているので、ある瞬時の価格に着目した自己相関から分析を行うのでは不十分である。そこで、情報の類似度を定量化するための一致率を次のように定義し、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

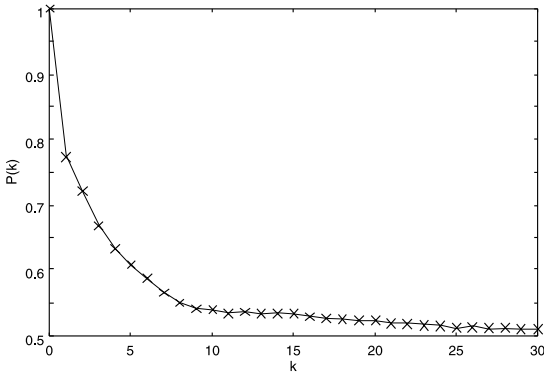


図 7 遅延幅と情報の一致率

Fig. 7 The delay width and the rate of congruity.

経過とともにどれほど変化していくのかを検証した。t ステップにおける 8 ビット情報  $I(t) = (i_1(t), i_2(t), \dots, i_8(t))$  と、t - k ステップの情報  $I(t - k)$  の一致率  $P(k)$  を式 (9) のように定義する。

$$P(k) = \frac{\sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^8 E(i_n(t), i_n(t - k))}{8 \cdot T} \quad (9)$$

ただし、 $E(i_n(t), i_n(t - k))$

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

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、 $P(k)$  は  $k = 9$  までは k の増加とともに急激に減少し、それ以上の遅延幅ではほぼ線形に  $P(k) = 0.5$  に漸近していくことが確認できる。  $P(k) = 0.5$  のとき、 $I(t - k)$  は  $I(t)$  との一致率がランダムな状態である。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ることが確認できた。

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。兼平らが行った研究<sup>10)</sup>は、“視野の限界”を考慮したモデルとしてとらえることができ、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。

兼平らの研究<sup>10)</sup>では、市場外からの情報としてト

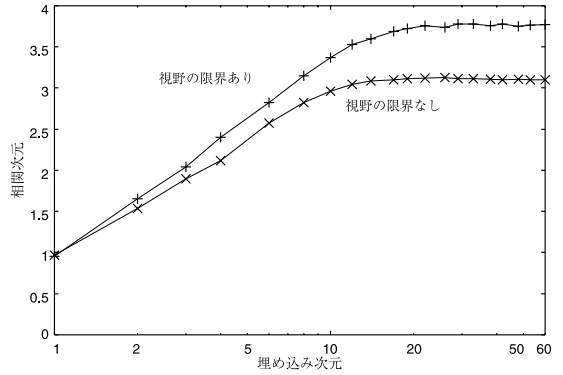


図 8 “視野の限界” と相関次元

Fig. 8 Source of information and correlation dimension.

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	なし	3.10
なし	あり	3.77
0~7 ステップの遅延	なし	3.80

レーダごと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。共通情報である市場内情報  $i_1 \sim i_8$  に加えて、トレーダごとに異なるランダム情報 (0 or 1) を 2 ビット ( $i_9, i_{10}$ ) 加え計 10 ビットの情報を情報源として用いる。本実験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。

このように、“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を図 8 に示す。また、比較のために“視野の限界”を与えない場合の結果も図 8 に同時に示す。

図 8 より、“視野の限界”を考慮した市場は、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、リアブノフ解析の結果、最大リアブノフ数は 1.261 と、正の値を示すことが確認できた。

これらの結果、“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するといえる。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、限界を与えない市場、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。“働きかけの限界”を与えた市場に関するフラクタル次元に関しては前述のように統計的に有意な値であることは確認済みなので、“視野の限界”を与えた市場から求めたフラクタル次元 3.77 を 3.10 に対して t 検定を行っ



たところ、有意水準 5% でこれらのフラクタル次元は異なることが確かめられた。

表 6 より、“視野の限界”を与えた市場のフラクタル次元は 3.77 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。“視野の限界”を与えた市場と“働きかけの限界”を与えた市場は限界を与えない市場をベースとして、それぞれ独自のモデルを追加したものである。その効果はフラクタル次元の差分値、約 0.7 次元にあたることを確認できた。このように、“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”ととらえた人工市場モデルとまったく異なるアプローチでモデル化を行っているが、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確認できた。

## 6. おわりに

本論文は、“働きかけの限界”をトレーダの時間的制約ととらえ、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モデルを提案した。提案した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、提案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ていることを示し、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。複雑さは最大で、トレーダに対し遅延幅を 0~7 ステップ与えた場合に、3.80 次元となることが計測できた。

最後に、これまでに提案されている“視野の限界”としてとらえた市場との比較を行うために、“視野の限界”を考慮した市場を用意し、複雑さの測定を行った。そして、“働きかけの限界”と“視野の限界”が生む複雑さを比較した結果、“働きかけの限界”を考慮した市場では 3.80 次元、“視野の限界”を考慮した市場では 3.77 次元の複雑な振舞いをするということが確認でき、本論文が提案する“働きかけの限界”を考慮した

市場モデルは、“視野の限界”としてとらえた市場モデルと、ほぼ同程度の複雑さを生み出すモデルであることが確認できた。

本論文では、“働きかけの限界”という観点から、複雑性を有する新たな人工市場モデルを提案し、複雑系経済学でいわれる限定合理性の 3 つの限界に対応したモデルが存在することを明らかにした。これにより、実際の市場で生じる現象のメカニズムの解明に向けて、より現実的なアプローチが可能になったと考える。今後は、限定合理性の 3 つの限界にどのような相互作用が存在するかを検討していく。また、今回提案したモデルの振舞いについて、個々のエージェントがどのように振る舞っているのかなどを詳細に検討していく予定である。

## 参考文献

- 1) 和泉 潔, 植田一博: 人工市場入門, 人工知能学会誌, Vol.15, No.6 (2000).
- 2) Arthur, W.B., Holland, J.H., LeBaron, B., Palmer, R. and Tayler, P.: Asset Pricing Under Endogenous Expectations in Artificial Stock Market, *The Economy as an Evolving Complex System II*, pp.15-44, Addison-Wesley Publishing (1997).
- 3) Lux, T.: Time Variation of Second Moments from a Noise Trade Infection Model, *Journal of Economic Dynamics and Control*, Vol.22, pp.1-38 (1997).
- 4) Arifovic, J.: The Behavior of the Exchange Rate in the Genetic Algorithm and Experimental Economies, *Journal of Political Economy*, Vol.104, No.3 (1996).
- 5) 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).
- 6) 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).
- 7) 長谷川敦士, 植田一博: 人工社会と貨幣交換, 信学技報, AI99-70 (2000).
- 8) 和泉 潔: 個人の複雑さ, 市場の複雑さ, 信学技報, AI2000-44 (2001).
- 9) Izumi, K.: Complexity of Agents and Complexity of Markets, *Proc. JSAI 2001 International Workshop on Agent-based Approaches in Economic and Social Complex Systems (AESCS 2001)* (2001).
- 10) 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).

- 11) Herbert, A.S.: *Administrative Behavior*, 1945, 2nd ed. (1957). 松田武彦ほか(訳): 経営行動, ダイヤモンド社 (1965).
- 12) 塩沢由典: 複雑系経済学入門, 生産性出版 (1997).
- 13) 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).
- 14) 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).
- 15) 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).
- 16) Franc, M.Z. and Stengo, T.: Measuring the strangeness of gold and silver rates of return, *Review of Economic Studies* 56, pp.553-568 (1989).
- 17) 合原一幸: カオス時系列解析の基礎と応用, 産業図書 (2000).
- 18) 高木康順, 秋山 裕, 田中辰雄: 応用計量経済学, 多賀出版 (1997).
- 19) Joshi, S., Parket, J. and Bedau, M.A.: Technical trading creates a prisoner's dilemma: Results from an agent-based model, *Computational Finance* 1999, pp.465-479, MIT Press (2000).

(平成 16 年 3 月 26 日受付)

(平成 17 年 10 月 11 日採録)



知久慎太郎

平成 13 年武蔵工業大学電子情報工学科卒業。平成 15 年同大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。人工市場, 複雑系経済学に関する研究に従事。現在, 日本電気株

式会社に勤務。



荒井 秀一(正会員)

昭和 59 年慶應義塾大学工学部電気工学科卒業。平成元年同大学大学院理工学研究科電気工学専攻博士課程修了。同年千葉工業大学工学部助手, 専任講師, 助教授を経て, 平成 9 年武蔵工業大学工学部助教授, 現在に至る。知識情報処理, メディア認識理解, 認知科学, 複雑系情報処理等に関する研究に従事。工学博士。電子情報通信学会, 日本音響学会, 信号処理学会, IEEE 各会員。



宮内 新(正会員)

昭和 58 年慶應義塾大学大学院工学研究科博士課程修了。同年相模工業大学(現湘南工科大学)情報工学科専任講師, 平成 2 年武蔵工業大学電子通信工学科助教授, 平成 9 年同

大学電子情報工学科助教授, 現在, 同大学コンピュータ・メディア工学科教授。知識情報処理, コンピュータアーキテクチャの研究に従事。工学博士。電子情報通信学会会員。