特集 カオス理論とその応用

カオスと経済[†]

寺崎 健*

1. はじめに

経済学におけるカオス的視点からの研究は、ここ10年ほどの間に進められてきた。研究内容は、マクロ経済における研究とファイナンス分野における研究の二つに大別される。前者は経済変量間の非線形微分方程式や差分方程式に基づいて解の挙動やありうる状態を分析する理論的な研究、後者は時系列データに基づいてそこにカオス性が存在するの否かを検討する実証分析的な研究が中心となっている。前者の代表的な研究としては、R. M. Goodwinの非線形景気循環論などがあるが[1-5]、本稿では、後者について、株価や為替など金融市場における時系列データを対象とした研究を紹介する。

株価変動は、その変動の分布に正規分布を仮定した幾何ブラウン運動(geometric Brownian motion)にしたがうものとして扱われることが多い[6,7]。しかし、株価変動の分布は、図1に示したように正規分布と比べて中央が突出しており、かつ、その裾野が厚い(fat tail)という特徴がある。

これは通常の正規分布にしたがう誤差変動などと比べて、株価変動の場合、一般的には非常に小さな変動を繰り返すことが多いが、希に非常に大

きく上昇したり、下降したりすることもあることを示している。

さらに、このような分布特性は、時間間隔を日次変動、月次変動、あるいは年次変動などに変えても維持され、そこにある種の自己相似性がみられることがMandelbrotによって指摘された[8]。

このような分布が生ずる理由として、いくつかのメカニズムを考えることができる。その一つとして、株価変動が正規分布とは異なる安定分布にしたがっているのではないかという考え方がある。正規分布にしたがう確率変数の和はやはり正規分布にしたがうが、このような性質をもった分布で正規分布以外のものを想定しようという訳である。この見解はMandelbrotにより主張されたものであるが、現在では後でも述べるように独立同一分布にしたがうという仮説はほぼ否定されている[9]。

図1 日経平均株価の日次対数収益率の分布 (1980年1月初～1990年12月末)

[†] Chaos and Economics

* Takeshi TERASAKI

株式会社 野村総合研究所 技術研究開発部

Information Technology Research Lab., Nomura Research Institute, Ltd.

それでは、市場がカオス力学系にしたがっているのではないかという仮説を立てた場合にはどうであろうか。その場合、一見ランダムに見えながらこのような大きな変化を生ずるような事象をうまく説明することができ、バブルだとか金融恐慌だとかも、そこから説明がつくのではないかと期待できる。

さらに、実際のデータがカオス性を有していれば、それを規定している力学系を推定することにより、精度のよい短期予測も可能になる。

また、カオス力学系の軌道は二度と同じ道を通らないので、歴史的な発展過程としての経済時系列を説明するのに都合がよいという点もある。

このように、ファイナンスにおいてカオスは非常に魅力的な対象であるが、果たして実際のデータはカオス性を示すのであろうか。

2. 経済時系列のカオス性解析

カオスの特徴としては、自己相似性、軌道不安定性、長期予測不能性などがあげられる[10,11]。以下、経済時系列データを対象にして、これらの各性質に関する分析の現状を見ていくことにする。

2.1 Takens の埋込み定理

時系列データのカオス性解析には、次のTakensの埋込み定理[12,13]が基本となる。

Takens の埋込み定理 M^n を n 次元のコンパクトな多様体、 $f: M^n \rightarrow M^n, g: M^n \rightarrow R$ を C^2 級写像とすると、 $m \geq 2n+1$ であれば、

$$h(x) = (g(x), g(f(x)), g(f^2(x)), \dots, g(f^{m-1}(x))) \quad (2.1)$$

で定義される写像 $h: M^n \rightarrow R^m$ は一般的に埋込みである。

たとえば、 $\{x_t\}$ を n 次元の決定論的力学系にしたがって生成される n 次元ベクトルの時系列と

し、それを $g: x_t \rightarrow \xi_t$ なる写像を通して1次元の時系列データ $\{\xi_t\}$ として観測しているものとする。このとき、 τ を時間遅れとして、次のような m 次元のベクトルを作成する。

$$\begin{aligned} X_1 &= (\xi_1, \xi_{1+\tau}, \dots, \xi_{1+(m-1)\tau}) \\ X_2 &= (\xi_2, \xi_{2+\tau}, \dots, \xi_{2+(m-1)\tau}) \\ &\dots \\ X_t &= (\xi_t, \xi_{t+\tau}, \dots, \xi_{t+(m-1)\tau}) \\ &\dots \end{aligned} \quad (2.2)$$

このとき、この定理によれば、 m が $2n+1$ 以上であれば上記のように再構成された空間に、元の力学系のアトラクタの構造が保存されるというわけである。

一般に観測される経済時系列データは、様々な経済活動の結果が反映されたものである。したがって、そのデータの背後に非常に多くの要因を考える必要があるのであるが、この定理は、もし決定論的な力学系にしたがっているならば、それに関連する1次元の観測データから、その構造が把握できることを示している。いわば一を聞いて十を知ることが出来ることを保証した定理であり、非常に興味深い内容を含んでいる。

なお、経済時系列データには一般にノイズが含まれることが多いが、ノイズを含んだ場合へと埋込み定理を拡張する研究も行われている[14]。

2.2 次元解析

経済時系列がもしカオス力学系にしたがっているならば、そのアトラクタは自己相似的なフラクタル構造をしているはずであり、その構造は先に述べたTakensの埋込み定理によって1次元の時系列データから再構成できるので、その次元解析を行うことによりそれを確かめることができる。

次元解析の手法としては、GrassbergerとProcacciaが開発したフラクタル次元の一つの尺度である相関次元を求める手法がよく用いられる[15]。相関次元は、1次元の時系列データを n 次元

空間に埋め込んで得られた点を $X_i (i=1, 2, \dots, N)$ としたとき、次式で定義される相関積分 (correlation integral) を用いて定義される。

$$C_n(\epsilon) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i < j} I_\epsilon(X_i - X_j) / N(N-1) \quad (2.3)$$

ただし、

$$I_\epsilon(x) = \begin{cases} 1 & (\|x\| < \epsilon \text{ のとき}) \\ 0 & (\|x\| \geq \epsilon \text{ のとき}) \end{cases} \quad (2.4)$$

時系列データが全くランダムな場合には、埋込み次元 n を上げていっても埋め込まれた点の集合は空間全体に様に分布するだけである。これに対し、点がアトラクタを中心に偏って分布し、自己相似的なアトラクタを形成している場合には、ある指数 $d(n)$ を用いて、

$$C_n(\epsilon) \propto \epsilon^{d(n)} \quad (2.5)$$

と表現できる。そして、埋込み次元 n を大きくするにしたがい $d(n)$ はある一定の値 D に収束する。この値 D を相関次元と呼んでいる。

相関次元解析は最もポピュラーな手法として、いろいろな時系列データに対して適用されてきた。経済時系列データも例外ではなく、株価、為替レート、GNP など、ファイナンスばかりでなくマクロ経済データも対象とされ、相関次元が一桁の数値として求められたという研究結果も提出されている [16-18]。

しかし、経済データの場合、自然科学と異なり利用できるデータ数が限られているため、相関次元解析には注意が必要である。この点に関して、たとえば D. Ruelle は、データ数が N の場合、相関次元の推定値が $2 \log_{10} N$ より十分低くない限り信用すべきでないと指摘している [13, 19]。

日経平均株価や円ドル為替レートの (daily あるいは tick by tick の) 時系列データに関する筆者らの分析では、少なくとも一桁程度の低次元ではないという結果が得られている [20]。

2.3 リアプノフスペクトラル解析

カオスの別の特徴の一つである軌道不安定性についてはどうであろうか。これはリアプノフスペクトラム解析によって分析することができる。こ

の分析から得られるリアプノフ指数は、ある時点での軌道の位置の差が時間的にどのように変化していくのかを表す指標であり、特に最大リアプノフ指数が正であるならば、一般に軌道不安定性を有することになる [11, 13]。

図2は日経平均株価の日次対数収益率に関して、各埋込み次元別にリアプノフスペクトラムを求め、これをプロットしたものである [20, 21]。

図2 日経平均株価の日次対数収益率のリアプノフスペクトラル解析結果 (1976年1月～1992年9月末)

なお、リアプノフスペクトラムの算出方法としては、佐野らによるヤコビ行列推定法をベースとしたものを用いている [13, 20, 22]。

この図から最大リアプノフ指数が正であること、埋込み次元を上げていった場合にも、このことは依然として成り立つであろうことが読みとれる。

円ドル為替レートなど他の経済時系列データについても同様の結果が得られており [20]、これらの結果は、経済時系列データがカオス性をもつのではないかという有力な証拠の一つとなる。

しかし、株価や為替などの最大リアプノフ指数が負として推定されたとの J. C. Vassilicos らによる報告もある [23]。この違いが、分析対象としたデータの違いに起因するものなのか、あるいは用いているアルゴリズム (彼らは Wolf らのアルゴリズム [24] を用いている) 等の手法の違いに起因するものなのか、さらに検討が必要であるように思われる。

2.4 決定論的非線形予測

カオスのもう一つの特徴として長期予測不可能性がある。これを見るには、1次元の時系列データから埋込みによって再構成されたベクトルの系列 $\{X_t\}$ に対して、

$$F: X_t \rightarrow X_{t+1} \quad (2.6)$$

なる関数 F が存在すると仮定し、その関数 F をデータから推定し、それに基づく非線形予測の結果を分析するという方法がある[25]。

もし、対象とする系が決定論的力学系にしたがっており、かつカオス性を有しているならば、このようにして予測された結果は、カオスの長期予測不可能性を反映し、短期予測では良好な結果が得られるものの予測時点が先になるほど予測精度が落ちていくはずである。

関数近似の手法としては、ニューラルネットワークの学習アルゴリズムとしてよく用いられる誤差逆伝播アルゴリズム(backpropagation algorithm)、ヤコビ行列推定法[13,22]、テセレーション法[26]などいろいろな方法が考えられる。

金融時系列にこの手法を適用したところ、日経平均株価、円ドル為替レートのいずれの場合でも生データの場合には、予測結果は実績データに対して非常に高い相関が得られたものの、変化分や(対数)収益率、ボラティリティ(収益率の標準偏差)などに関する予測では、殆ど見るべき結果が得られていない[20]。

これは、金融時系列が決定論的力学系にしたがっていないことを示しているのかも知れない。あるいは、決定論的力学系にしたがっているのだが、その次元が高いため、高々10次元程度までの埋込みでは対象とする系が十分表現できない可能性がある。

対象とする系が高次元カオスである場合には、データ数が限られているため多くの困難が生ずる。このような場合に有効な方法として、遺伝的アルゴリズムを利用した局所予測(local forecasting)と呼ばれる手法が T. P. Meyer と N. H. Packard によって提案されている[27]。このような手法の

経済時系列データへの適用とその有効性の確認は今後の課題である。

3. 経済時系列の確率モデル

経済時系列が決定論的力学系にしたがっているのではないかと考えるのは、一見ランダムに見えるデータの変動の裏側に何らかの決定論的メカニズムがあるのではないかという問題意識に基づいていた。

しかし、以上見たように金融時系列を対象とした場合には、カオス性を積極的に肯定する結果が比較的少なく、少なくとも低次元の決定論的力学系にしたがう典型的なカオスではないようである。それでは、ランダムウォークなどの確率過程による見方はどうであろうか。

3.1 ランダムウォーク仮説

株価変動に関しては、従来から一般的に理論家には、ランダムウォーク仮説が支持されており、その変動は全くランダムに起こるので、過去のデータに基づいて予測しようとする行為そのものが無意味であると信じられている[28,29]。

この考えは、通常ブラウン運動を用いて記述される。なお、ブラウン運動とは数学的には次のような条件を満たす確率過程 $\{W_t\}$ として定義される。

- (1) 増分 $[W_{t+s} - W_s]$ は正規分布 $N(0, \sigma^2 t)$ にしたがっている
- (2) 全ての排反な区間 $[t, s]$ における増分 $[W_s - W_t]$ は独立
- (3) W_t は $t=0$ において連続

特に、 $\sigma=1$ の場合を標準ブラウン運動と呼ぶ。

株価変動は、 $\{W_t\}$ を標準ブラウン運動とし、時点 t での株価を S_t とするとき、次のような確率微分方程式を満たす確率過程としてモデル化される[6,7]。

$$dS_t/S_t = \mu dt + \sigma dW_t \quad (3.1)$$

ただし、 μ 、 σ はパラメータとする。

このとき、株価変動 dS_t/S_t は平均 μdt 、分散 σ^2

dt の正規分布にしたがう。

しかし、本稿のはじめに、この正規分布という仮定に疑念を呈したのであった。

3.2 BDS 統計による検定

それでは、必ずしも正規分布ではなく、独立で同一分布にしたがうというように、これを一般化した場合にはどうなのであろうか。この場合のモデルは、時間を離散的とし、株価の対数

$$X_t = \ln S_t \quad (3.2)$$

を用いて表現した場合には、次のように書くことができる。

$$X_t = X_{t-1} + \mu + U_t \quad (3.3)$$

ただし、 U_t は独立で同一分布にしたがう平均 0 で有限の分散をもつ確率変数とする。

このとき、株価対数収益率 ($\ln S_t - \ln S_{t-1}$) は、独立で同一分布にしたがう確率変数、すなわち、IID (independent and identically distributed) であるということになる。果たしてこれは実証されるのだろうか。

これを検定するのに BDS 統計と呼ばれる統計量が開発されている。これは、データ系列 $\{x_t\}$ が IID であるという帰無仮説を検定するもので、相関積分を用いて Brock, Dechert, Scheinkman により定式化されたものである [30, 31] (付録参照)。

Brock, Hsieh, LeBaron によると、S&P 500 や円ドル為替レートの対数収益率などを対象に BDS 統計による検定を行った結果、いずれも IID であるという帰無仮説が棄却されたという [31]。したがって、本稿のはじめに述べたように非正規安定分布にしたがう IID という仮説も否定されるわけである。

さらに、かなり短い期間のデータに対しても同様の結果が得られているという [32]。したがって、ある構造変化が生じるまでの期間はある分布にしたがう IID で、構造変化後の期間には別の分布にしたがう IID であるという様な形式のモデルで定式化できる可能性も小さい。

3.3 非線形確率過程

確率過程 $\{X_t\}$ の中には、 X_t の間には自己相関は全くないにもかかわらず、 X_t と X_{t-1} とが明らかに独立でないというようなものがある。たとえば、次の ARCH モデルは、そのような非線形確率過程の代表的なものである。

$$X_t = [a + bX_{t-1}^2]^{1/2} U_t \quad (3.4)$$

ただし、 U_t : 正規分布 $N(0, 1)$ にしたがう IID
 a, b : 定数

BDS 統計による検定では、当然このようなモデルによって生成されたデータが IID であるという帰無仮説は棄却される [31, 32]。

したがって、株価変動や為替変動などの経済時系列は、このような ARCH タイプのモデルや、それを含むもっと一般的な非線形な確率微分方程式や非線形な確率差分方程式で規定される確率過程にしたがっている可能性もある [32-34]。

4. 進化する複雑系としての見方

筆者の見るところ、経済時系列がカオスであるという確固たる証拠はまだ提出されていない。一方で少なくとも低次元の典型的な決定論的力学系から生ずるカオスではないという、どちらかというところネガティブな結果は得られている。その一方で、独立で同一分布にしたがう全くのランダムな系列でもないようである。

したがって、高次元の決定論的な非線形力学系にしたがっている可能性も残されているが、非線形確率過程としてモデル化できる可能性も高い。いずれにしても、これらは現実的には識別するのが非常に難しい問題である。

他方で、経済は、気象、政治、価値観の変化、科学技術の進歩など経済以外の多くから影響を受けており、それだけで閉じてはいないという問題もある。

さらに、現実の経済は常に技術革新や新商品開発、制度の改廃などにより常に変化し、成長し、進化する生きた系でもあることを忘れてはならな

い。これは、そのダイナミクスをみた場合、常に構造変化が問題になり、データの面からみた場合、少しデータ期間を長くすると非定常となってしまうということにも現れている。

これらの観点からすると経済活動の結果が集約された経済時系列が、単純な決定論的なモデルや確率過程で記述されるような単純なものではなく、生命の進化プロセスにも似た生きた複雑系としてモデル化されるべきではないのかと思われる。このような問題意識による研究も、これまでいろいろ行われてきているが[35]、決定的なものはまだないようである。

5. おわりに

以上述べてきた中にも幾つか出てきたが、経済データの分析に関しては、いろいろな結果が出され見解が統一されていないケースが多い。その一つの理由として、経済自体が常に構造変化しているため、計測時期により多様な顔を見せるのではないかという考え方がある[36]。

また一方で、経済の場合データ面の制約が多いため、分析技術をその有効な範囲を超えて使ってしまうケースもあるように思われる。この点に関しては、筆者自身も必ずしも十分な自信がある訳ではないが、これは研究の発展段階の上では避けて通れないことなのかも知れない。

いずれにしても、経済の持つ複雑さは何なのか、それはどのようにしたら捉えることが出来るのかは、未解決な問題として残されている。特に、ここで取り上げたファイナンスにおける時系列データは、やっかいな代物ではあるが、興味の尽きない研究対象である。

参 考 文 献

- [1] R. M. Goodwin : Chaotic Economic Dynamics, Oxford University Press(1990). [有賀裕二訳：カオス経済動学, 多賀出版(1992)].
- [2] J. Benhabib : Cycles and Chaos in Economic Equilibrium, Princeton University Press(1992).
- [3] H. W. Lorenz : Nonlinear Dynamics and Chaotic Motion, Springer-Verlag(1989).
- [4] 有賀裕二：経済とカオス, 合原一幸編：応用カオス, サイエンス社(1994) 355-377所収.
- [5] 西村和男, 矢野誠：経済成長とカオス(連載1～連載12), 経済セミナー, 1993年4月号～1994年3月号.
- [6] J. Hull : Options, Futures, and Other Derivative Securities, Prentice Hall, Inc.(1989). [三菱銀行商品開発室訳：フィナンシャルエンジニアリングー金融派生商品開発入門, 金融財政事情研究会(1989)].
- [7] 森村英典, 木島正明：ファイナンスのための確率過程, 日科技連(1991).
- [8] B. B. Mandelbrot : The Fractal Geometry of Nature, W. H. Freeman and Company (1977). [広中平祐監訳：フラクタル幾何学, 日経サイエンス社(1985)].
- [9] 岸本一男：フラクタルに関連した2つの実証研究, 数理科学, 1994年4月号, 16-21.
- [10] 合原一幸：カオスーカオス理論の基礎と応用, サイエンス社(1990).
- [11] E. Ott, T. Sauer and J. A. Yorke : Coping with Chaos, John Wiley & Sons, Inc.(1994).
- [12] F. Takens : Detecting strange attractors in turbulence. In D. Rand and L. S. Young : Dynamical Systems and Turbulence, Springer (1981) 366-381.
- [13] 合原一幸：ニューラルシステムにおけるカオス, 東京電機大学出版局(1993).
- [14] M. Casdagli, S. Eubank, J. D. Farmer and J. Gibson : State space reconstruction in the presence of noise, Physica D51(1991) 52-98.
- [15] P. Grassberger and I. Procaccia : Measuring strangeness of strange attractors, Physica 9D (1983) 189-208.
- [16] J. Scheinkman and B. LeBaron : Nonlinear dynamics and stock returns, J. Business, 62, 3(1989) 311-338.
- [17] E. E. Peters : Chaos and Order in the Capital Markets, John Wiley & Sons, Inc.(1991). [新田功訳：カオスと資本市場, 白桃書房(1994)].
- [18] G. J. Deboeck : Trading on the Edge, John Wiley & Sons, Inc.(1994).
- [19] D. Ruelle : Deterministic chaos : the science and the fiction, Proc. R. Soc. London,

- A427(1990) 244-248.
- [20] 寺崎健, 池口徹, 合原一幸, 田中智: 経済時系列データの決定論的非線形ダイナミカル特性に関する解析, 電子情報通信学会投稿中.
- [21] 寺崎健: 複雑性の科学と経済予測—株価変動の非線形解析, KAST Report, 6, 2(1994) 4-7.
- [22] M. Sano and Y. Sawada: Measurement of the Lyapunov spectrum from a chaotic time series, Phys. Rev. Lett., 55, 10(1985) 1082-1085.
- [23] J.C. Vassilicos, A. Demos and F. Tata: No evidence of chaos but some evidence of multi-fractals in the foreign exchange and the stock markets. In A. J. Crilly, R. A. Earnshaw and H. Jones: Applications of Fractals and Chaos, Springer-Verlag(1993) 249-265.
- [24] A. Wolf, J.B. Swift, H.L. Swinney and J.A. Vastano: Determining Lyapunov exponents from a time series, Physica 16D(1985) 285-317.
- [25] G. Sugihara and R. M. May: Nonlinear forecasting as a way of distinguishing chaos from measurement error in time series, Nature, 344(1990) 734-741.
- [26] A. I. Mees: Tesselations and dynamical systems. In M. Casdagli and S. Eubank: Nonlinear Modeling and Forecasting, Addison-Wesley (1992) 3-24.
- [27] T. P. Meyer and N. H. Packard: Local forecasting of high-dimensional chaotic dynamics. In M. Casdagli and S. Eubank: Nonlinear Modeling and Forecasting, Addison-Wesley(1992) 249-263.
- [28] B.G. Malkiel: A Random Walk Down Wall Street, W.W. Norton & Company, Inc.(1990). [井手正介訳: ウォール街のランダム・ウォーク, 日本経済新聞社(1993)].
- [29] S. E. Landsberg: The Armchair Economist, The Free Press(1993). [佐和隆光監訳: ランチタイムの経済学, グイヤモンド社(1995)].
- [30] W. Brock, W. Dechert and J. Scheinkman: A test for independence based on the correlation dimension, University of Wisconsin, Madison, University of Houston, and University of Chicago(1987).
- [31] W. A. Brock, D. A. Hsieh and B. LeBaron: Nonlinear Dynamics, Chaos, and Instability: Statistical Theory and Economic Evidence, The MIT Press (1991).
- [32] D. A. Hsieh: Chaos and nonlinear dynamics: Application to financial markets, The Journal of Finance, XLVI, 5(1991) 1839-1877.
- [33] T. C. Mills: Nonlinear time series models in economics. In L. Oxley, D. A. R. George, C. J. Roberts and S. Sayer: Surveys in Econometrics, Blackwell(1995) 273-298.
- [34] J. Creedy and V. L. Martin: Chaos and Nonlinear Models in Economics, Edward Elgar (1994).
- [35] P. W. Anderson, K. J. Arrow and D. Pines: The Economy as an Evolving Complex System, Addison-Wesley(1988).
- [36] 矢島邦昭: アセット・アロケーション戦略とリスク管理—多様な価格変動特性のもとでの検討, 第8回応用時系列研究会報告資料(1993) 7/1-14.

付 録

BDS 統計(BDS statistic)とは, 1987年に Brock, Dechert, Scheinkman により考案された新しい統計的な検定手法で[30,31], あるデータ系列 $\{x_t\}$ が同一の確率分布から得られた独立なデータ系列である, すなわち, IID(independent and identically distributed)であるという帰無仮説を検定するものである. これは,

$$x_t^m = (x_t, x_{t+1}, \dots, x_{t+m-1}) \quad (\text{A.1})$$

とし, 相関積分(correlation integral)を

$$C_{m,T}(\epsilon) = 2 \sum_{t < s} I_\epsilon(x_t^m - x_s^m) / T_m(T_m - 1) \quad (\text{A.2})$$

ただし, T はデータ総数で,

$$T_m = T - m + 1 \quad (\text{A.3})$$

$$I_\epsilon(x) = 1 \quad (\|x\| < \epsilon \text{ のとき}) \\ = 0 \quad (\|x\| \geq \epsilon \text{ のとき}) \quad (\text{A.4})$$

と定義したとき, $\{x_t\}$ が IID ならば,

$$C_{m,T}(\epsilon) - C(\epsilon)^m \quad (\text{A.5})$$

が漸近的に平均0の正規分布に収束するという事実に基づいて作成されたもので, これを平均0, 分散1の正規分布に収束するように正規化することによって定義される. すなわち,

$$BDS_{m,T}(\epsilon) = T^{1/2} [C_{m,T}(\epsilon) - C(\epsilon)^m] / \sigma_{m,T}(\epsilon) \quad (\text{A.6})$$

ただし,

$$\sigma_{m,T}(\varepsilon)^2 = 4[K^m + 2\sum_{j=1}^{m-1} K^{m-j} C^{2j} + (m-1)^2 C^{2m} - m^2 K C^{2m-2}] \quad (\text{A.7})$$

$$C = C_{1,T}(\varepsilon) \quad (\text{A.8})$$

$$K = K_T(\varepsilon) = \sum_{t < s < r} h_\varepsilon(x_t^m, x_s^m, x_r^m) [6/T_m(T_m-1)(T_m-2)] \quad (\text{A.9})$$

$$h_\varepsilon(x, y, z) = [I_\varepsilon(x-y)I_\varepsilon(y-z) + I_\varepsilon(x-z)I_\varepsilon(z-y) + I_\varepsilon(y-x)I_\varepsilon(x-z)]/3 \quad (\text{A.10})$$

(1995年5月2日 受付)

[問い合わせ先]

〒240 横浜市保土ヶ谷区神戸町134

(株)野村総合研究所 技術研究開発部

寺崎 健

TEL: 045-336-8447

FAX: 045-336-1443

E-mail: t-terasaki@nri.co.jp

著者紹介

寺崎 健 (てらさき たけし)

(株)野村総合研究所 技術研究開発部

1977年 東京工業大学 大学院理工学研究科情報科学専攻修士課程修了。同年 (株)野村総合研究所入社。経営計画研究部、システムコンサルティング部などを経て、現在技術研究開発部主任研究員。非線形情報処理や知的情報処理の金融・保険などを含むビジネス領域全般への応用研究、応用システムの研究開発に従事。