

## 居住性研究と決定論的カオス

著者	服部 芳明, 田島 英俊, 寺床 勝也, 藤田 晋輔, 橘田 紘洋
雑誌名	鹿児島大学農学部演習林研究報告
巻	24
ページ	95-103
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10232/1151">http://hdl.handle.net/10232/1151</a>

## 居住性研究と決定論的カオス<sup>\*1, \*2</sup>

服部 芳明<sup>\*\*</sup>・田島 英俊<sup>\*\*</sup>・寺床 勝也<sup>\*\*</sup>・藤田 晋輔<sup>\*\*</sup>・橘田 紘洋<sup>\*\*\*</sup>

### 抄 録

様々な研究組織が感性についての研究が重要であると認識し、実際に、いくつかの研究プロジェクトが実施されている。感性に関わる居住快適性の研究に決定論的カオスを導入することが意味のあることと考え、この研究が実施された。

この論文の目的として、まず、決定論的カオスに関する研究をレビューすること、さらに、試行された一つのアプローチ研究を紹介することが挙げられている。

決定論的カオスは、生体リズムの解析のための方法として有用であることが示された。また、カオスの解析には一つの有力な方法が見い出されているわけではなく、様々な方法を組み合わせて解析する必要のあることが指摘された。

キーワード：決定論的カオス、指尖脈波、居住性、リアプノフ指数

### はじめに

近年、国民の生活の充実、質的向上への要求が高まり、これに答える研究が様々な分野で図られている。これらの研究におけるキーワードは「快適性」、「感性」である。「快適性」研究の重要性、必要性は各界において認識されだし、研究機関、組織の動きも活発である<sup>29)</sup>。

感性に関わる研究のアプローチには大きく2つあると考えられる。一つは、刺激に対する反応をアンケート調査やヒアリング調査によって求める方法であり、多変量解析や多次元尺度法などを適用して数量化をおこなって分析する方法である。いま一つは、生理学的アプローチをベースにするもので、外界の刺激に対する生体の反応を脳波などの生理学的測定によってとらえようとするものである。

筆者らはこれまでに前者のアプローチに属する方法を用いて、木造校舎を主対象にそこで生活している教員、児童、生徒に対して「疲労感」をキーワードとして広範囲なアンケート調査を実施し、分析結果を報告してきた<sup>10-15)</sup>。これらの調査の結果、疲労感（自覚症状）において木質環境の良さが際立っていた。

後者のアプローチとして指尖脈波を手始めに生体情報を用いた居住性評価方法の開発に着手し<sup>16)</sup>、計測システムを構築している。中心に据えているキーワードは「カオス」である。

本文では、「カオス」研究の状況と課題について述べ、居住快適性との関連において考察する。さらに、一つのアプローチの例を紹介する。

### 「カオス」の定義とバイオカオス

「カオス」は科学全般の広い分野で取り上げられている。「ファジイ→ニューロ→カオス」という家電製品の名称にみられる皮相的流行として聞き流す人もいれば、これぞ二十世紀の三大発見の一つ（相対論、量子力学、カオス）と認識している人もいる。「カオス」は歴史の浅い研究対象であるために、定義さえも研究する立場によって様々である。まず、本研究における「カオス」を定義する。

#### (1) 「カオス」の定義

「カオス」の定義は今のところ定まってははいない。小

\*1 HATTORI, Y., TAJIMA, H., TERATOKO, K., FUJITA, S., KITSUTA, K.:

**Some Considerations on the Study of Indoor Environment and Deterministic Chaos.**

\*2 本論文は、日本木材学会、居住性研究会秋期講演会（1995年11月、東京）における講演資料に加筆したものである。また、本研究の一部は、文部省科学研究費補助金（課題番号07660225）の補助による。

\*\* 鹿児島大学農学部生物環境学科森林資源環境学講座

Department of Environmental Science and Technology, Faculty of Agriculture, Kagoshima University, Kagoshima 890

\*\*\* 愛知教育大学技術科、愛知県刈谷市井ヶ谷町広沢1

Aichi University of Education, Kariya, Aichi 448

室は「カオスを定義する」とは、「普遍的なカオスの定義を見いだすのではなく、ある限定された対象に対して通用する『カオスの特徴付け』をおこなうこと」と提案している<sup>25)</sup>。他にも定義に関して様々提案がなされている<sup>25)</sup>。

本文では「決定論的カオス」を「カオス」呼ぶことにする。「決定論的カオス」とは、「常微分方程式系に付随するカオス」<sup>42)</sup>である。言いかえると、ある系が不規則に振舞うとき、その系がカオスを示すのであれば、その振舞いはその系に固有なものであり、外部からのノイズが付加されたためには起こらないことになる。すなわち、不規則な振舞いがその系に内在しているものであり、完全に決定論的な方程式によって記述され得るようなカオスが決定論的カオスである。そして、変数パラメータがある領域にあると不規則に振舞うという現象を示す<sup>42)</sup>。これをここでは「カオス」と称する。

生体システムは自由度の非常に大きなブラックボックスととらえることができる。生体情報を扱うことを考えると、ある限られた範囲の時系列データが大きな自由度を有するブラックボックスから得られるだけである。したがって、少数自由度の決定論的方程式で記述できるものではない。上述の定義では、カオスの存在の確証を得ることはほとんど不可能になる。そこで、決定論的カオスを厳密に特定するよりは、むしろ「カオス的」振舞いの程度が、周囲環境条件の違いに応じてどう変化するかを定量化することの方が当研究分野では役立つと考える。すなわち、①周期運動にノイズが単にかぶさったものと非線形力学に由来するものとを区別すること、②それがどの程度のカオス的振舞いをするのかを定量化すること、が現時点におけるカオスの取扱い方になると思う。そして、カオス的振舞いの程度が、客観的な指標たり得るかを検討することが当面の課題となる。観測された時系列データが「カオス」であるのかどうかよりも、どれだけ定量的に「カオス」的であるのかが今後の議論の中心となろう。

## (2) バイオカオス

「カオス」は自然物、人工物を問わず非線形システムに当たり前に生じる現象と言われている。そのため「カオス」研究は極めて学際的である<sup>1-3)</sup>。生物系に見られる「カオス」的現象はまとめて「バイオカオス」と総称され<sup>4)</sup>、研究報告も多い。キーワード「CHAOS」を用いて医学、生物学関係のデータベース (MEDLINE EXPRESS) を検索すると論文件数が660件にのぼる。もちろん農学分野にも広がっている<sup>36,37)</sup>。「感性工学」,

「ストレス工学」等も応用可能な分野として期待されている<sup>2)</sup>。

居住性の研究には様々なアプローチがあるが、カオス論的な解析法の導入は必然的なものと思う。生体情報をもとにした居住環境の評価が試みられている<sup>40)</sup>が、そこで扱う自律神経系、中枢神経系に関連する計測データそのものがバイオカオスの研究のターゲットでもある。

## カオスの診断法

ある観測された時系列データがカオスの特徴を有するかを判断する方法として、以下の検討項目があげられる<sup>42)</sup>。

①再構成されたアトラクタの特徴、②相関次元、③リアプノフスペクトラム、最大リアプノフ指数、④KSエントロピーなどである。ほかに、ポアンカレ写像 (リターンマップ)、非線形予測法、平均方向ベクトルを用いる方法が使用されている<sup>5)</sup>。ここでは、代表的な判定法について述べる。

### (1) アトラクタの再構成<sup>23)</sup>

生体システムから得られる情報は、理論モデルもなく、対象システムからある限られた時系列データだけが観測できる場合がほとんどである。

この場合には、カオスの存在をはっきりと検証することは、先に述べたように本質的に不可能である。一方、近年、時系列の解析手法が大きく進展している。その基礎となっている手法は、「時間遅れ座標を用いて、時系列データからアトラクタを再構成する」方法である<sup>4)</sup>。これはターケンスの埋め込み定理としてよく知られ、この定理によって、少なくとも1本の時系列データから本来のアトラクタと同相な構造を再構成するというアトラクタ再構成の手法が数学的に保証された<sup>19)</sup>。

アトラクタの再構成には、時系列データ  $x(t)$  から、一定の時間遅れ ( $\tau$ ) ごとの差分を用いて、軌道を再構成する。具体的には以下の操作を行うことになる。

1変数の時系列データが観測されるとすると、この時系列データ  $x(t)$  は適当な時間間隔 (サンプリング周期) でサンプリングされる。

得られた離散時系列データ

$$\{x(t_1), x(t_2), x(t_3), \dots, x(t_n), \dots\} \quad (1)$$

から、以下のデータセット ( $n$ 次元ベクトル) を作る。

$$\begin{aligned} &\{x(t_1), x(t_1+\tau), \dots, x(t_1+(n-1)\tau)\} \\ &\{x(t_2), x(t_2+\tau), \dots, x(t_2+(n-1)\tau)\} \end{aligned}$$

$$\begin{array}{ccc} : & : & : \\ \{x(t_i), x(t_i+\tau), \dots, x(t_i+(n-1)\tau)\} & & \\ : & : & : \\ \{x(t_m), x(t_m+\tau), \dots, x(t_m+(n-1)\tau)\} & & \end{array} \quad (2)$$

ここで、 $t_k = k \cdot \Delta t$  ( $k=1, 2, \dots, m$ )  
 $\tau = a \cdot \Delta t$  ( $a$ : 固定)  
 $\Delta t$ : サンプルング周期

である。上式(2)の  $i$  番目のデータセットをベクトル  $X_i$  で表現する。

$$X_i = \{x(t_i), x(t_i+\tau), \dots, x(t_i+(n-1)\tau)\} \quad (3)$$

この  $n$  次元ベクトル (データセット) を  $n$  次元の再構成空間に作成する。たとえば、4次元の再構成空間に作成するには、 $x(t_i), x(t_i+\tau), x(t_i+2\tau), x(t_i+3\tau)$  という4組のデータを4つの座標軸 X, Y, Z, W 軸に対応させることになる。このとき、 $n$  が十分に大きければ、本来のアトラクタの構造と本質的に同じ性質の軌道を描くことができる。

時間遅れ( $\tau$ )の決定法については、幾つかの目安があるが<sup>19)</sup>、最適な設定法については未だ答は出ていない<sup>17)</sup>。

相空間に再構成されたアトラクタがカオスの特徴としての「ストレンジアトラクタ」<sup>32)</sup>である、ということが一つのカオスの目安として用いられる。

(2) 相関次元<sup>18)</sup>

Grassberger と Procaccia(1983年)<sup>9)</sup>によって提案された相関積分を用いた次元推定アルゴリズム (G P 法) によって求められる次元を相関次元と称する。相関次元解析法とは、カオスの力学的構造の特徴である自己相似性を調べる解析法である。そのアルゴリズムは比較的シンプルであるためよく用いられ、脳波など生体情報 (時系列データ) をカオスとしてとらえようとする研究が急速に広がった<sup>17)</sup>。このアルゴリズムを次に述べる。

ターケンスの埋込み定理を用いて再構成したアトラクタに対して、相関積分と呼ばれる量を計算する。まず、 $n$  次元空間において再構成されたアトラクタの軌道から中心となる点  $X_i$  ( $i=1, 2, \dots, m$ ) を選び出す。次に、残りの  $(m-1)$  個の点に対して中心  $X_i$  から半径  $r$  の  $n$  次元超球内に入る点  $X_j$  ( $j=1, 2, \dots, m, i \neq j$ ) を数える。この計算をすべての  $X_i$  を中心にして繰り返すことによって、式(4)のような2次の相関積分と呼ばれる量が得られる<sup>18,32)</sup>。

$$C^n(r) = \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{1}{m^2} \sum_{i,j=1}^m H(r - |X_j - X_i|) \quad (4)$$

ここで、 $H$  はヘビサイト関数と呼ばれ、

$$H(x) = \begin{cases} 1 & (x \geq 0) \\ 0 & (x < 0) \end{cases}$$

である。なお、式(4)の距離  $|X_j - X_i|$  としてユークリッド距離や絶対値距離などが用いられる<sup>32)</sup>。

このように計算された相関積分が、 $r$  の適当な領域で式(5)のようにスケーリングされる時、

$$C^n(r) \propto r^{d(n)} \quad (5)$$

スケーリング指数  $d(n)$  を相関指数と呼ぶ。通常、式(5)の両辺の対数をとると、

$$\log C^n(r) \propto d(n) \log r \quad (6)$$

となり、 $d(n)$  は  $\log r$  対  $\log C^n(r)$  のグラフにおいて、適当な  $r$  の範囲内での直線の傾きから求められる。実データの解析には、次元  $n$  は未知であるため、 $d(n)$  が飽和するまで  $n$  を順次増加させ、飽和状態である一定値に収束した時の  $d(n)$  をもって相関次元とする。

近年になって上述のG P法よりも客観的な相関次元推定アルゴリズムが提案されている (Judd 法)<sup>22)</sup>。

カオスと判定されるのは相関次元が収束する場合である。得られた次元が小さければ、もともとの系が多自由度であっても、運動は少数の自由度で実質的には記述され得ることを意味する。

(3) リアプノフ指数<sup>32)</sup>

リアプノフ指数は位相空間内の接近している軌道の対が時間経過とともにお互いに指数的に離れていく程度を示す指標である。この指数によってカオスの特徴であるアトラクタの軌道不安定性を定量的に示すことができる。

最大リアプノフ指数  $\lambda$  は式(7)で定義される。

$$\lambda = \frac{1}{t_m - t_0} \sum_{j=0}^{m-1} \log_2 \frac{L'_{j+1}}{L_j} \quad (7)$$

ここで、 $L$  はアトラクタ上の点とその近傍点との距離を表し、 $L'$  はこれらの点が時間経過とともに変化した後の距離を表す。

次元数が2以上の系では、各次元ごとにリアプノフ指数が対応するため、全ての次元のそれを全体としてリアプノフスペクトラムと称する<sup>17)</sup>。

カオスとしての判定基準は、最大リアプノフ指数が正、あるいは、リアプノフスペクトラムのうち1つでも正の値をとる成分が存在することである。リアプノフ数の推

定アルゴリズムの一つに Wolf らの方法がある<sup>49)</sup>。

#### (4) K S エントロピー

カオスの特徴の一つである予測不能性を表す K S エントロピーの上限は、正のリアプノフ指数の和として評価できる<sup>17)</sup>。

### バイオカオス研究の現状と動向

#### (1) 脳波のカオス

カオスの研究では特異的に脳の研究が注目を集めている<sup>31)</sup>。脳波は、大脳皮質内の非常に多数の神経細胞の活動電位が重なり合った信号であり、脳の機能を巨視的にとらえたものと考えられている。脳波の解析方法は古くから議論されてきたが、近年、多くの研究者が、覚醒状態や各睡眠段階、てんかん患者などの脳波におけるカオス性を検証した結果を報告している。

脳波のカオスは池口が詳しくレビュー<sup>21)</sup>しているように、これまでに脳波がカオスであることを「示唆」する結果は数多く報告されている。しかし、「らしい」と推量されているにすぎず、カオスであると断定するには至っていない。また、脳波のカオス解析に広く用いられている G P 法の問題点の指摘もなされている。さらに、脳波の定常性も解析上の制約となっている<sup>21)</sup>。すなわち、脳は内的、外的要因によって常に変動しており、カオスの解析にはある必要な期間にわたって定常状態に保たれることが重要であるが、定常状態にあることはまれだからである。

しかし、脳波の相関次元の推定に成功している結果<sup>21)</sup>を見ると、①脳波の相関次元は様々な状態に応じて推定される次元が異なること、②精神作業時において相関次元が高くなることが読み取れる。

脳波の特定周波数成分における振幅の揺らぎを対象にした例もある。その結果、揺らぎの成分のリアプノフ指数は正となり、周波数成分の振幅の揺らぎはカオスの挙動を持つことが示されている<sup>24,25)</sup>。

脳波源信号の周波数帯のうち、脳波  $\alpha$  波成分は環境質評価指標として注目されている。しかし、 $\alpha$  波は目を開くことによって消失または減弱するという定説があるため<sup>34)</sup>、閉眼安静という人間活動にとって極めて特殊な状態しか検討対象として取り上げてこれなかった。最近では、目を開いた状態でもしばしば  $\alpha$  波が観察されること<sup>21)</sup>から、従来の定説は、古典的計測法にともなう拘束感等が被験者の生理的・心理的状态に影響を及ぼし、これが  $\alpha$  波の挙動に抑圧的作用を与えていたのではないかとの仮説から、 $\alpha$  波のそうした潜在的可能性を

掘り起こす検討が始められているのが注目される<sup>8)</sup>。

#### (2) 心臓血管系のカオス

生理機能系のカオスについては、心臓血管系についての研究が多い。心臓血管系がカオスを発生するダイナミックシステムである可能性があるとして、その根拠に、①交感神経と副交感神経の複雑な非線形相互作用による制御機構、②呼吸や血圧、体温等に関連した時間遅れを持つフィードバック機構の存在が挙げられている<sup>38,33)</sup>。

現在までに、心拍<sup>33)</sup>、指尖脈波<sup>47)</sup>などでカオス的な観測結果が得られているが、決定論的カオスの同定には至っていない<sup>38)</sup>。

心電図を用いた解析例を見ると、心電図の最大リアプノフ指数は0.02と正であることから、カオスの特徴である軌道不安定性が示されている<sup>30)</sup>。心拍 R-R 間隔の相関次元の推定値は7.3次元程度<sup>30)</sup>、 $5.44 \pm 0.52$ <sup>27)</sup>であり、自己相似性を有することが示されている。別の実験では、R-R 間隔のリアプノフ指数は0.008程度の正值が示されている<sup>7)</sup>。非線形モデルによるシミュレーション技法によって決定論的カオスの考察が行われている<sup>39)</sup>。

「ストレス評価」の研究では自律神経系の活動を指標とする評価法が代表的であり、R-R 間隔が簡易に測定できるという理由からよく用いられる。近年、機器の携帯化により血圧の連続測定ができるようになり<sup>41)</sup>、自律神経系の活動を評価する指標を見いだすための研究が行われ、生理学的な変動が直接反映される解析法を求めて模索されている<sup>43)</sup>。上述した、R-R 間隔や血圧の変動リズムの他に、呼吸性リズム<sup>5)</sup>、体温調節のリズムなど生体情報には様々なリズムがある。今後は、各種の無拘束計測法を用いてこれらのリズムのカオスの振舞いが明らかにされていくと思われる。

#### (3) 脈波のカオス

血管系のカオスとして脈波も調べられ、カオス的な振舞いを示すという報告がある<sup>47)</sup>。しかし、決定論的カオスの同定には至っていない。

脈波とは、一般に、心臓から駆出された血液が動脈系を通して末梢方向に波及する波動をいう<sup>6)</sup>。脈動を圧力変化として計測する圧脈波、血管の容積変化として測定する容積脈波がある。容積変化の検出に光を用いる方法があり、これは光電式脈波計測法と称されている。光電脈波は応用範囲が広く、血圧や血管弾性の計測にも応用されている<sup>6)</sup>。指先の脈波を指尖脈波と称する。指尖脈波のような脊髄神経支配を受ける抹消血管系は心身状態を敏感に反映しやすいと言われている<sup>48)</sup>。

指尖脈波を用いてヒトの状態依存を定量化する研究が幾つかある。指尖脈波の振幅は指先の血流量の指標になる。この振幅を利用して、自律神経活動を「緊張している」、「緊張していない」の2状態に分類する試みを行い、この分類結果が視察による結果に近いことが報告されている<sup>50)</sup>。また、立体映像を観察している際のヒトの状態を脈波によってモニターし、生理・心理的な影響(状態依存)を定量化して平面視映像観察時の状態を比較した例があり、2状態の間に差があることを示唆する結果が得られている<sup>35)</sup>。

指尖脈波のカオス解析も行われている。津田、田原らの研究<sup>45,46,47,48)</sup>は指尖脈波がカオスの視点から詳細に検討できる対象であることを示した。さらに、心拍よりも指尖脈波のほうが、心身の全体状態への依存度が高く、リラックス、集中、快不快、疲労など、心理状態や生理状態をよく反映しやすいことを明らかにした。

### 一つのアプローチ例

生体に対する木質居住環境の特性評価手法の確立をめざして行っている実験を紹介する。

目的は、指尖脈波用の計測装置を試作し、試作装置によって指尖脈波のカオス的な振舞いを定量的にとらえることにある。

すでに述べたように指尖脈波は非線形ダイナミクスという観点からは、系が複雑すぎて決定論的カオスの有無を議論する対象には不向きと思われる。しかし、あえて指尖脈波を取り上げた理由は、①心身全体の心理状態や生理状態を反映しやすいという特徴を有する。②測定系が比較的単純である。これに付随して③小型・携帯化が可能。そうすると④フィールドでの測定が可能となる。また、⑤投入経費に対する成果の割合が大きいと期待できる。以上の理由があげられる。もし、指尖脈波がカオス的な振舞いをするならば、その振舞いの程度の定量化は、生体情報による居住環境評価の指標に成り得る。

#### (1) 試作装置の概要

光電式脈波計測装置は Tsuda<sup>47)</sup>らの論文をヒントにして製作した。

##### (a) センサー部

一対の発光ダイオードとフォト・トランジスタから構成される。赤外線発光ダイオード(GL514A, SHARP製、ピーク発光波長950nm)から照射された光の反射光量の変動を、赤外域に感度を有するフォト・トランジスタ(TPS603, 東芝製)を用いて電圧変動に変換する。指先用カフはスポンジ中に一対の素子を埋め込んだ構造にし

た。

指尖に照射した赤外線の反射光量は、指尖部の毛細血管の血流量などに左右される。特定波長の赤外線は、血液中の酸化ヘモグロビンの量が指尖中に多いとき、すなわち、血管が膨張している時に多く吸収されるため、反射光量の変動によって毛細血管の容積変動がとらえられる。

##### (b) アンプ部

アンプは、高精度オペアンプ(OP-07CH, ANALOG DEVICES製)を用い、80dB(10,000倍)の高利得を得た。増幅回路は、フォト・トランジスタのコレクタ電圧をオペアンプの反転入力端子に入れ、非反転入力端子にバイアス電圧をかけた(石川の回路<sup>20)</sup>を参考)。この増幅回路の後に出力バッファとして汎用オペアンプ(TL074, LM324N等)を用いた。

##### (c) A/D変換

市販の12ビットA/Dコンバータボード(R&D(株)製ADC-12あるいはADI12-8CLなど)を用いた。サンプリング時間間隔は4.10mSecである。10,240点の測定に42秒要する。脈波時系列データのアトラクターへの再構成にはパーソナルコンピュータを用いた。

#### (2) 時系列データとアトラクタ

Fig.1に指尖脈波時系列データの一例を示す。アトラクタの例をFig.2に示す。埋め込み空間は4次元空間とした。アトラクタの4次元から3次元への投影、さらに、2次元(Fig.2)への投影には宮崎らの方法<sup>28)</sup>を用いた。投影に際しての視線方向単位ベクトル $n$ としてTsudaらによって用いられた値、 $n=(3/4, 1/4, 1/4, \sqrt{5}/4)$ <sup>47)</sup>を採用した。

#### (3) カオス性の診断

カオス性の判定法は種々あるが、ここでは最大リアプノフ指数を取り上げた。リアプノフ指数を求めるアルゴリズムとしてはA. Wolfらの方法<sup>49)</sup>を用いた。

まず、既知の決定論的カオスのモデルであるレスラーモデルとローレンツモデルを用いて当プログラムの検定をした。例としてレスラーモデル( $a=0.2, b=0.2, \delta t=0.025$ )についてのターケンスプロットと最大リアプノフ指数の収束の様子をFig.3, 4に示す。レスラーモデルのリアプノフ指数( $\lambda$ )の文献値は0.072であった<sup>22)</sup>。当プログラムによって求めた値はこの文献値と一致したことから、リアプノフ指数の計算プログラムが正しいことが確認できた。

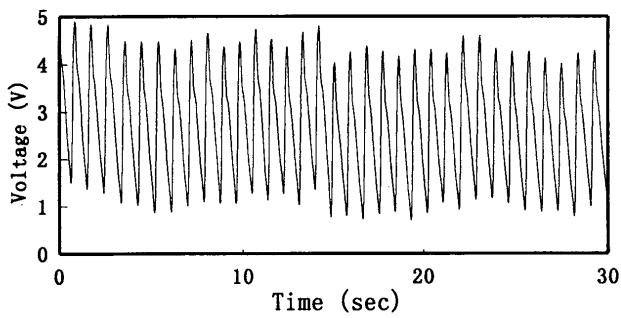


Fig.1. A typical time series of a pulsation of the capillary vessels.

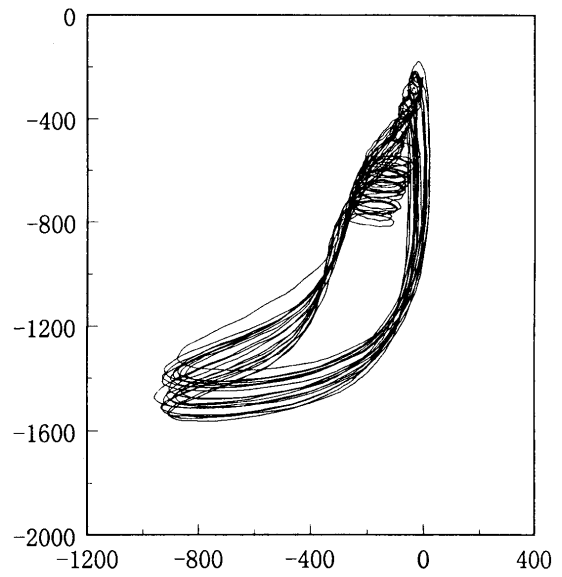


Fig.2. A two dimensional phase portrait of a pulsation of the capillary vessels. Its trajectory was embedded into four dimensions. The maximum Lyapunov exponents is 0.004.

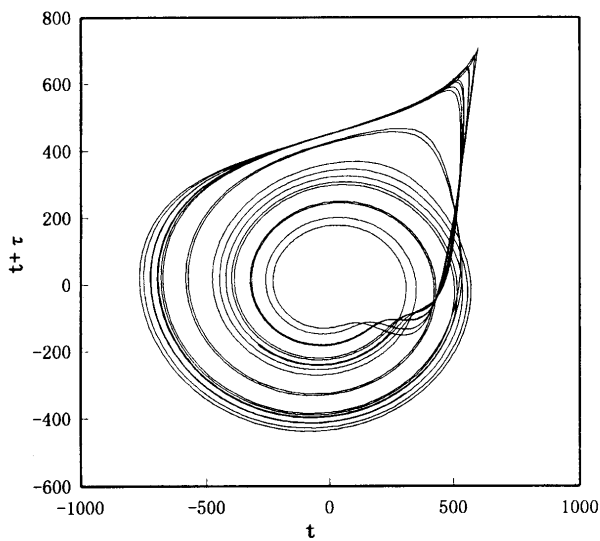


Fig.3. A phase portrait of the Rössler model.

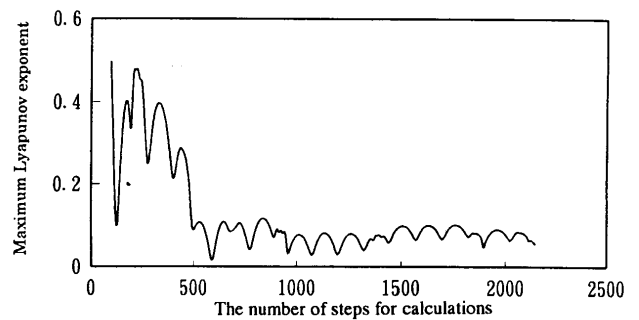


Fig.4. Convergence in maximum Lyapunov exponents in the case of Rössler model.

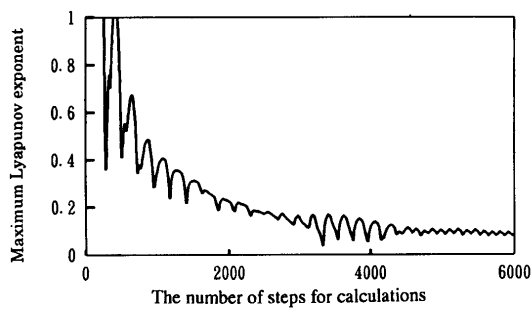


Fig.5. Convergence in maximum Lyapunov exponents in the case of a pulsation of the capillary vessels.

(4) 指尖脈波のアトラクタとリアプノフ指数

指尖脈波の最大リアプノフ指数の収束の様子を Fig.5 に示す。収束するには5～6千回の演算回数が必要であった。

Fig.2 に示した指尖脈波では、最大リアプノフ数は0.004という正の値が得られた。ただし、必ずしも正值であるとは限らず、Fig.6 に示す指尖脈波では-0.015という負値になった。これまでの測定事例について最大リアプノフ指数を求めると、正值が得られる場合が数倍程度多かった。

(5) 指尖脈波の相関次元

Fig.7 に指尖脈波の相関指数を、1次元から10次元について示す。相関次元は、すでに述べたように、 $\log r$  と  $\log C(r)$  のグラフの傾きから求められるが、Fig.7 に示すように、いずれの次元においても明瞭な直線領域が認められなかった。

小川らは立体視知覚下のヒトの状態依存を定量化するために指尖脈波を計測したが、その結果は Fig.7 と同様に直線領域が明瞭でなかった<sup>35)</sup>。相関次元を推定するためのアルゴリズムとしてG P法を用いているが、G P法自体に問題点を有することを指摘している。このようにカオス性の定量化にはある一つの判定法によって行えるのではないことがわかる。

ま と め

以上のように、指尖脈波という一つの生体情報からカオス性を評価するシステムが構築できた。測定事例は少ないため一般的な結論を引き出すことは現時点では難しいが、現在までに得られた結果から次のことが言える。

- 1) 試作したディテクタを用いて指尖脈波からカオス的なアトラクタが描画ができる。
- 2) 指尖脈波はカオスの振舞いをする場合があることが、リアプノフ指数の符号から確認できた。ただし、測定事例の全てがカオスの振舞いを示すわけではない。また、相関次元は定まらなかった。
- 3) カオスアトラクタは心身の状態や個人によって異なった形態を示す。

指尖脈波用カオスディテクタは比較的容易かつ廉価に製作でき、当装置によって脈波がカオスの特徴を有することが多いと確認できた。カオス診断法にはいくつかのアルゴリズムがあるが、できるだけ多くのアルゴリズムを用いて指尖脈波のカオス的な振舞いの程度を定量化することが必要であろう。次に、どのアルゴリズムによる定量値が身体の状態を忠実に表現するのかを明らかにする

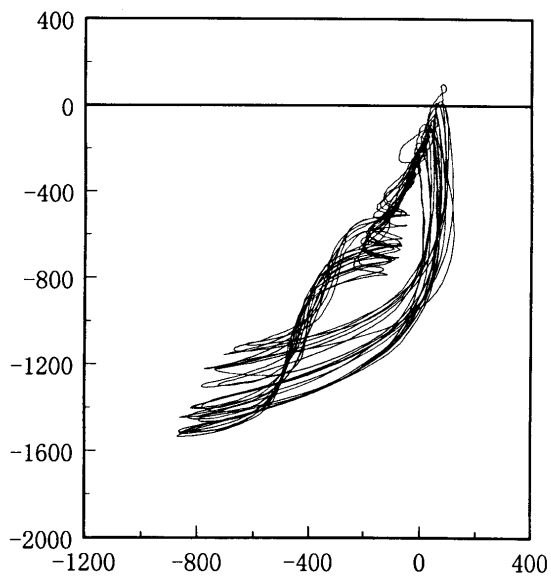


Fig.6. A phase portrait of a pulsation of the capillary vessels. The maximum Lyapunov exponent is -0.015.

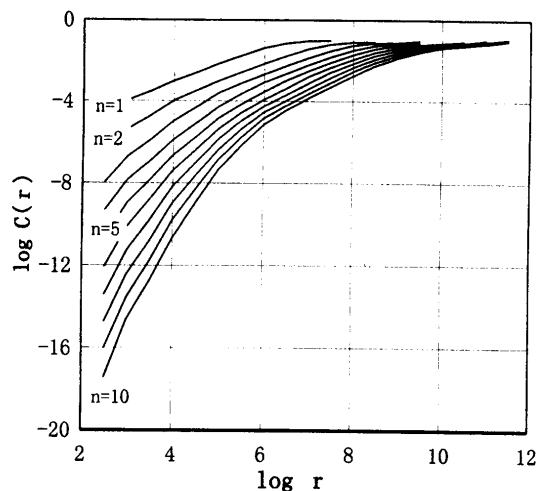


Fig.7. Correlation integrals for each embedded dimensions (n).

必要がある。さらに、測定事例を蓄積し、アトラクタの特徴と被験者の心身の状態との関連性を明確にし、一般化することが必要である。この分野のこれまでの研究は、カオスの有無の発見に研究の主眼が置かれており、身体状態、生理状態、心理状態との関連を調べた例はまだ少ない。生体情報とカオスとの関係についての基礎的研究を蓄積することが必要な段階であろう。



## 引用文献

- 1) 合原一幸：“ニューラルシステムにおけるカオス”，合原一幸編，東京電気大学出版局，1993年
- 2) 合原一幸：“応用カオス—カオスそして複雑系に挑む”，合原一幸編，サイエンス社，1994年，p.3-12
- 3) 合原一幸：“カオス—カオス理論の基礎と応用”，合原一幸編，サイエンス社，1994年，p.3-12
- 4) 合原一幸：生命・カオス・工学，数理科学，No.381，5-10 (1995)
- 5) 赤木美智男：“呼吸とカオス”，数理科学，381，48-52 (1995)
- 6) 安藤譲二，山越憲一，神谷 瞭：“光電式脈波計測の応用” BME，**4**，24-32 (1990)
- 7) 藤原義久，源野広和，河田 宏：心電図R-R間隔のカオス解析，信学技報，MBE**93**-99，47-52 (1993)
- 8) 不破本義孝ら：目を開いた状態で観察される  $\alpha$  波活性を指標とする情報環境の評価法について，第9回ヒューマンインターフェイスシンポジウム論文集，1993年，p.209-216
- 9) P. Grassberger, I. Procaccia : Characterization of Strange Attractors, Physical Review Letters, **50**, 346-349 (1983)
- 10) 服部芳明：ぬくもりとうるおいの実現を，スクールアメニティ，**107**，17-22 (1995)
- 11) 服部芳明，橋田紘洋，高橋正記，藤田晋輔：校舎構造および内装仕上げ材料と教室イメージ，鹿大農学部学術報告，**45**，77-88 (1995)
- 12) 服部芳明，橋田紘洋：木造ならびに内装仕上げに木材を用いた鉄筋コンクリート校舎の教室環境に対する教員のイメージ，鹿大農学部学術報告，**44**，73-81 (1994)
- 13) 服部芳明，橋田紘洋：校舎構造材料の及ぼす児童の身体の調子への影響，鹿大農学部演習林報告，**21**，1-18 (1993)
- 14) 服部芳明，橋田紘洋：教室環境および教師の身体の調子への校舎構造の影響調査，鹿大農学部学術報告，**43**，77-85 (1993)
- 15) 服部芳明，橋田紘洋：最近の木造学校校舎の教室環境に関する研究(1)，鹿大農学部演習林報告，**20**，165-182 (1992)
- 16) 服部芳明，中島 寛，寺床勝也，藤田晋輔，橋田紘洋：指尖脈波用カオスディテクターの試作，第45回日本木材学会大会発表要旨集，東京，528 (1995)
- 17) 池口 徹：脳波とカオス，数理科学，381，36-43 (1995)
- 18) 池口 徹，合原一幸，伊東 晋，宇都宮敏男：カオスニューラルネットワークの次元解析，信学誌，**J73**-A，486-494 (1990)
- 19) 池口 徹，合原一幸：“脳波 (EEG) のカオス”，ニューラルシステムにおけるカオス，合原一幸編，東京電気大学出版局，1993年，p.92-124
- 20) 石川碩哉：“電子回路ノウハウ すぐ役立つセンサ回路”，日本放送出版協会，1988年
- 21) 井上 健，篠崎和弘：アルファ波(Ⅲ)，臨床脳波，**33**，52-58 (1991)
- 22) K. Judd : An improved estimator of dimension and some comments on providing confidence intervals, Physica D**56**, 216-228 (1992)
- 23) 片山洋志，市瀬夏洋：カオスを見る，“カオスセミナー”，合原一幸編，海文堂，1994年，p.31-54
- 24) 小河清隆，中川匡弘：脳波におけるカオスとフラクタル性，MBE**93**-135，17-24 (1994)
- 25) 小森幸樹，中川匡弘：脳波の固有空間とそのフラクタル性に関する研究，MBE**95**-5，29-36 (1995)
- 26) 小室元政：“カオスの定義”，カオスセミナー，合原一幸編，海文堂，1994年，p.1-29
- 27) 松岡伸明，村山伸樹，佐藤義則：カオス理論を用いた心電図RR間隔ゆらぎの解析，信学技報，MBE**93**-111，61-67 (1994)
- 28) 宮崎興二，石原慶一：“4次元グラフィクス 高次元CGへの道”，朝倉書店，1991年
- 29) 森田 健，宮崎良文：“快適性研究の現状と考察”，人間と環境，**19**，90-98 (1993)
- 30) 中村知道，伊東 晋，宇都宮敏男：心電図における非線形現象，信学技報，MBE**94**-145，55-62 (1995)
- 31) 奈良重俊，ピーター デイビス：カオスと記憶，数理科学，No.373，27-34 (1994)
- 32) 長島弘幸，馬場良和：カオス入門—現象の解析と数理—，培風館，1993年，p.74-118
- 33) 西江 弘：“生理機能系のカオス”，応用カオス，合原一幸編，サイエンス社，1994年，327-354
- 34) 大熊輝雄：臨床脳波学，医学書院，1991年，p.75-80
- 35) 小川 聡，池口 徹，的崎 健：立体視知覚の脈波による定量化，信学技報，MBE**93**-137，33-40 (1993)
- 36) 酒井憲司：農業機械のカオス振動，“カオスセミナー”，合原一幸編，海文堂，1994年，p.223-237
- 37) 酒井憲司：耕地のカオス，数理科学，No.381 (1995)
- 38) 佐光興亜：“心臓血管系のカオス”，数理科学，381，44-47 (1995)
- 39) 佐光興亜，遠藤順一：心臓血管系非線形モデルとカオス，電子情報通信学会総合大会要旨，D-184 (1995)
- 40) 島上和則：生理応答の測定，木材工業，**18**，510-518 (1993)
- 41) 嶋津秀明，川原田淳：無拘束血圧連続測定，BME，**4**，18-26 (1990)
- 42) 下條隆嗣：“カオス力学入門”，近代科学社，1994年
- 43) 鈴木正幸，志賀利一，西尾添幸，齊藤 誠：精神作業時の連続血圧特性の解析と評価，第9回ヒューマンインターフェイスシンポジウム論文集，221-224 (1993)
- 44) 高橋正記，服部芳明，橋田紘洋，藤田晋輔，古川恵子：九州地方における疲労自覚症状の校舎構造別比較，鹿大農学部学術報告，**45**，89-96 (1995)
- 45) 田原 孝：“カオスで生体機能をさぐる”，エレクトロニクス，1993年，1月号
- 46) 田原 孝：“カオスと健康”，からだの科学 (日本評論社)，No.161，p.94-102 (1991)
- 47) I. Tsuda, T. Tahara, H. Iwanaga : Chaotic pulsation in human capillary vessels and its dependence on mental and physical conditions, Int. J. Bifurcation and Chaos, **2**, 313-324 (1992)
- 48) 津田一郎：“カオス力学系の情報処理”，日本ファジイ学会

- 誌, 4, 220-228 (1992)
- 49) A. Wolf, J.B. Swift, H.L. Swinney, J.A. Vastano : Determining Lyapunov Exponents from a time series, *Physica* **16D**, 285-317 (1985)
- 50) 山崎敏正, 剣持聡久, 福住伸一 : 指尖脈波を利用した心身状態分類の自動化に関する考察, *信学技報*, **MBE95-18**, 17-24 (1995)

### Summary

"Comfort and pleasantness" of dwelling environment are key words in the current research projects of several organizations. We recognize that human chaos is the important general idea for evaluating and understanding the dwelling environment.

In the present paper, firstly the studies on human chaos are reviewed. Secondly, the capillary chaos is discussed with our original experimental data.

The results are as follows. A chaotic pulsation was detected in a finger's capillary vessels with our original experimental system. According to calculated Lyapunov exponents, the vessel pulsation was not always chaotic. It was confirmed that the figure of attractor depended on some conditions of a subject.

**Key words:** deterministic chaos; finger's capillary vessels; Lyapunov exponent; livability.