

サロゲートデータ法を用いた指尖容積脈波の非線形解析

清水健一郎

要 旨：指尖容積脈波の非線形性についてサロゲートデータ法を用いて再検討した。オリジナルデータをランダムに並び換えたrandom shuffle, スペクトルの位相のみをランダム化したFourier shuffle, 脈波の各波形を並び換えたperiod-shuffleの各サロゲートを比較の対照としたところ, 軌道不安定性を示す最大リアプノフ指数は, オリジナルデータではいずれのサロゲートとも有意に異なった。脈波は, 決定論的ダイナミクスのもと, 1 拍ごとの波形がダイナミカルに結合し, カオスの挙動を示すものと推測された。(J. Jpn. Coll. Angiol., 2003; **43**: 15-19)

Key words : Finger plethysmogram, Chaos, Non-linear dynamics, Surrogate data, Lyapunov exponent

序 言

指尖容積脈波は, 心拍出にともなう血液の容積変動を指尖で記録したものであり, 他のいくつかの生体信号と同様¹⁻⁴⁾, 入力と出力との間に比例関係の成り立たない非線形システムに基づくものと考えられている。脈波をみると, 同じような波形が連続するが, その挙動は単純ではなく, カオス的であることが指摘されている⁵⁻⁸⁾。カオスとは, 一見複雑ではあるが, 実はその挙動は初期状態によって決定されており(注: 単純な数式で表現される場合もある), 規則的な“コスモス”とまったくのデタラメである“ランダム”との中間に位置づけられる, 決定論的非線形システムに基づく現象である^{9, 10)}。

時系列の挙動を視覚的にとらえる方法の1つに時間遅れ座標軸を用いた描出がある¹¹⁾。たとえば, 時系列 $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ から, $(X_1, X_{31}, X_{61}), (X_2, X_{32}, X_{62}), \dots, (X_{n-60}, X_{n-30}, X_n)$ という $(n-60)$ 組のデータを作り出し, それを3次元表示した場合, 時間遅れ30データ, 3次元状態空間への埋め込みというが, これに脈波時系列を埋め込むと, カオスに特徴的な奇妙な(ストレンジ)アトラクターを描く(Fig. 1)。もし, 脈波が規則的な周期変動であるならば, その軌道は円を描く(リミットサイクル), あるいはドーナツ状の軌跡(トーラス)を示し, 逆にランダムな現象であるならば形ある軌跡を呈

さない^{9, 10)}。

ストレンジアトラクターは奇妙な形ではあるが一応は有界である。しかし, この上の近接する2点は, はじめのうちは同様な挙動を示し, 接近しているが, 時間とともに2点間の距離は指数関数的に離れ, 長期的な挙動が予測不可能となる(注: カオスの複雑さはあくまでも有界であるアトラクター内での現象であり, ランダムのようにまったくデタラメな挙動とは異なる)^{9, 10)}。これは軌道不安定性と称され, カオスの重要な性質の1つであるが, その指数関数的に離れていく程度を数値化したリアプノフ指数はカオスでは正值を示す(注: 周期的運動では近接する2点は時間が経っても近接しており, リアプノフ指数はゼロとなる。逆に, 時間とともにある一定の値に収束するような場合はリアプノフ指数は負となり, いずれもカオスとは異なる)^{9, 10)}。

しかしながら, こうした非線形指標はカオスに適用された場合に意味を有するものである。単なる雑音でも正のリアプノフ指数を示すことがあるため⁹⁾, 非線形解析においては, 解析と並行して時系列の性質を検討する必要がある。Theilerらは, オリジナルデータをもとに, 平均や分散, あるいはスペクトルといった時系列の特徴を同じくするデータを複数作成し, これをオリジナルデータとの比較のためのコントロールの代理(サロゲート)とする手法を提案した^{12, 13)}。オリジナルデータをランダムに並び換えたrandom shuffle, フーリ

商工中金健康管理センター, 慶應義塾大学医学部老年内科

2002年6月4日受付 2002年10月23日受理

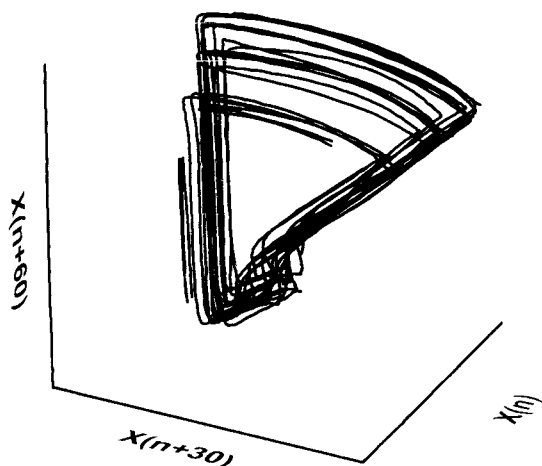


Figure 1 Attractor of pulse wave data embedded into a three-dimensional state-space. $X(n)$ indicates the n -th observation. The lag time is 30 sample times, or 150 ms.

エ変換を利用したFourier shuffleなどのサロゲートデータが代表的であり、オリジナルデータから求めた非線形指標がサロゲートのそれと有意に異なった場合、オリジナルデータの非線形性を主張するものである。

脈波のカオス性についてはTsudaらによって記述されているが⁶⁾、そこではサロゲートデータ法による検討はなされていない。

本研究は、脈波解析に相当と考える 3 種類のサロゲートデータを用い、脈波の非線形性についてあらためて検討するものである。

材料と方法

指尖容積脈波は、光電脈波計BACS detector(Computer Convenience Inc.,福岡)を用いて、15分の安静後、坐位にて40歳健康常男子の右示指より収集し、サンプリングレート200HzでA/D変換した後、パーソナルコンピュータ(PC98, NEC, 東京)に取り込んだ。そのうち、任意の整脈の連続20拍分を切り出し、オリジナルデータとした(データ点数2765点)。

本研究では、オリジナルデータ(Fig. 2a)をもとに、以下の 3 種類のサロゲートデータを39個ずつ作製した^{9, 12~14)}。Random shuffleサロゲートは、オリジナルデータを乱数表に基づいて並び換えて作製した(Fig. 2b)。Fourier shuffleサロゲートは、オリジナルデータをフーリエ変換後、その位相のみをランダム化し、ついで

フーリエ逆変換を施行し、ここで得られた時系列のランク(大小の順)を保つように、オリジナルデータを並び換えて作製した(Fig. 2c)。Period-shuffleサロゲートは、オリジナルデータを周期ごとに切り出し、それらを乱数表を用いてランダムに並び換えて作製した(Fig. 2d)。

リアプノフ指数は、佐野・沢田法に基づき¹⁵⁾、LYSAソフトウェア(Computer Convenience Inc.,福岡)を用いて、埋め込み次元⁴⁾、時間遅れ150ms(=30データ点数)で計算した。リアプノフ指数は次元の数だけ存在するが、そのうち最大のもの(最大リアプノフ指数)を解析に供した。一般に、時系列がある一点に収束する場合(安定平衡点)には最大リアプノフ指数は負値、リミットサイクルやトラスのような周期的変動の場合はゼロ、カオスでは正値をとるとされる^{9, 10)}。時間遅れは脈波の自己相関関数が最初にゼロとなる時間とした⁹⁾。3次元の状態空間に埋め込まれた脈波アトラクターをみると(Fig. 1)、一部に重なる部分が見られ、十分に描出されているとはいえず、埋め込み次元はそれより1つ多い4次元とした。算出されたリアプノフ指数は、その分布が正規分布を示すかどうか確定していない。そのため、オリジナルデータとサロゲートデータとの比較にはモンテカルロ有意性検定を用いた(有意水準 $P<0.05$)¹⁶⁾。サロゲートデータから得られた39個の最大リアプノフ指数を降順に並び換え、オリジナルデータのそれが、大きいほうから $(N+1)\alpha/2$ 番目、あるいは小さいほうから $(N+1)\alpha/2$ 番目の間に挟まれていなければ、有意に異なると判定する検定法である。ここに、 N はサロゲートデータの数、 α は有意水準であり、本研究の場合、 $N=39$ 、 $\alpha=0.05$ より $(N+1)\alpha/2=1$ となるため、オリジナルデータの最大リアプノフ指数が、サロゲートデータすべてのそれらよりも大きい、あるいは小さい場合にのみ有意と判定される。

成績

オリジナルデータの最大リアプノフ指数は1.95 bits/0.005s(Fig. 3)、random shuffleサロゲートデータのそれは46.13~51.97(中央値49.55)、Fourier shuffleサロゲートデータは0.06~1.70(中央値0.75)、period-shuffleサロゲートデータは4.28~23.61(中央値7.30)であった。

オリジナルデータの最大リアプノフ指数はrandom shuffleおよびperiod-shuffleサロゲートよりも有意に小さ

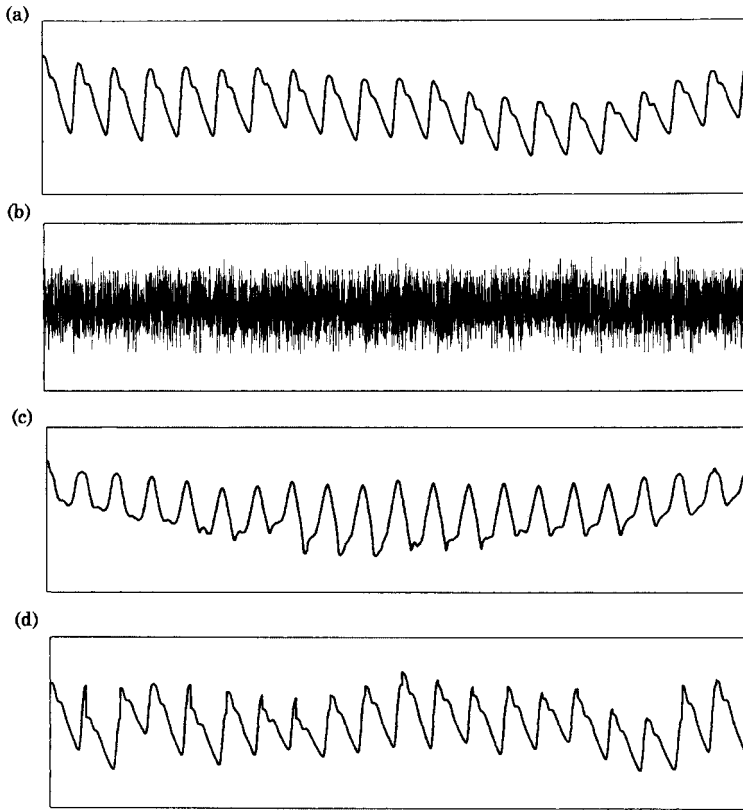


Figure 2 Pulse wave data and its surrogate. (a) original data, (b) random shuffle surrogate data, (c) Fourier shuffle surrogate data, and (d) period-shuffle surrogate data. The x-axis indicates the time. Maximal Lyapunov exponent was calculated as 1.95, 48.81, 0.88, and 8.30(bits/0.005s), respectively.

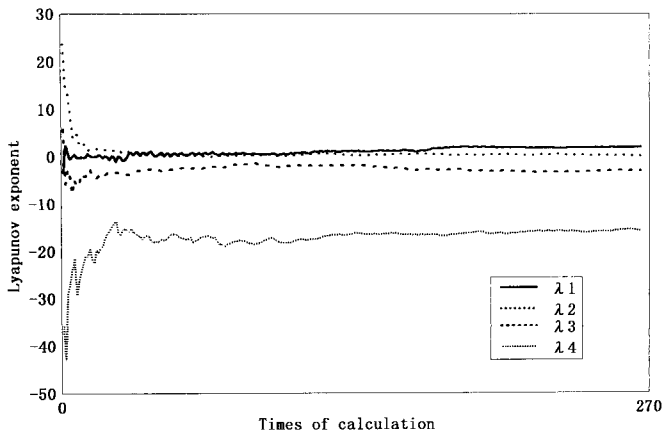


Figure 3 Lyapunov exponent for the original data. In the present study, four Lyapunov exponents were calculated; $\lambda_1=1.95$, $\lambda_2=0.07$, $\lambda_3=-3.09$, and $\lambda_4=-15.78$ bits/0.005s. Maximal Lyapunov exponent is designated as the largest one of the four exponents. The positive value of the maximal Lyapunov exponent indicates chaos.

く、Fourier shuffleサロゲートよりも有意に大きい、と判定された。

考 案

非線形解析は従来、実データからリアプノフ指数と

いった非線形指標を計算し、その値でカオス性を評価していた。そこには通常の統計学的検討で用いられる信頼区間や有意水準といった尺度はなく、結果の信頼性については不明であった。また、データを入力すれば何らかの数値が出力されるため、複雑な挙動を示す

時系列をカオスと誤る危険性も指摘された⁹⁾。サロゲートデータ法は、これに答える1つの手法であり、現時点ではサロゲートとの比較がなされていない非線形解析の評価は高くないとされる⁹⁾。

サロゲートデータ法では、いかなるサロゲートを用いるかが重要となる。サロゲートデータは、既知の規則に基づいてオリジナルデータから作製されたものである。したがって、オリジナルデータから求めた非線形指標がサロゲートと有意に異なる場合、オリジナルデータを記述するシステムがサロゲートデータのそれと同じであるという(帰無)仮説を棄却する検定方法であり、通常の統計学的検定に準じたものである。

本研究では3種類のサロゲートを用いた。帰無仮説は順に、①random shuffleではオリジナルデータは確率過程にしたがう、②Fourier shuffleではオリジナルデータが正弦波の重ね合わせ(線形結合)で記述される、③period-shuffleでは脈波の各周期にはダイナミカルな相関が存在しない、となる。したがって、これらが棄却された場合に、オリジナルデータは、①確率的ではない、②正弦波の線形結合で記述されない、③各周期が無意味に並んでいるのではない、すなわち、①決定論的である、②非線形結合で記述される、③周期間にダイナミクスが存在する、と推測するものである。

本研究で用いたサロゲートのうち、period-shuffleサロゲートデータは、Theilerがてんかん脳波の解析に用いたものである¹⁴⁾。てんかん発作時、脳波には異常スパイク波が頻発する。脈波も連続したスパイク信号とみなせるため、各波形間に存在するダイナミクスを検討するうえで、このサロゲートは重要と考える。period-shuffleサロゲートの意義については以下の音声解析の結果が参考となる。日本語の母音“a”は、音声解析上、一様な波形がピッチ周期ごとに繰り返す時系列をなすが、まったく一定ではなく、波形や周期に微妙な変化が観察される。このうち、「音声としての自然性」には、32個程度のピッチ波形が正しい順序で並んでいることがきわめて重要とされる¹⁷⁾。音声時系列は単なるピッチ波形が無意味に連続したものではないのである。したがって、周期性を示す時系列データを周期ごとに区切り、その順番を変えた時、時系列としての性質がどう変化するかを観察することにより、その背後に存在するダイナミクスが検討可能となる。

本研究の結果、オリジナルデータの最大リアプノフ

指数は、いずれのサロゲートとも有意に異なっていた。リアプノフ指数の大小はカオスの挙動の“複雑さ”を反映するが、その値が大きいほど軌道の不安定性、予測不可能性が増す^{9,10)}。本研究の結果から、脈波時系列は、ランダムとしてのデータラメな“複雑さ”ではなく、しかし、正弦波の重畳として記述できる“単純さ”でもない。脈波は、1拍ごとの波形が無意味に並んでいるのではなく、背後に存在する決定論的ダイナミクスのもと、結果として低次元カオスとしての挙動を呈するものと推測される。脈波に限らず、ある時系列の非線形性を検討する場合は、症例ごとにサロゲートデータ法を用いて、そのカオス性の有意さを確認するべきであろう。

脈波のカオス性は被検者の精神的な要因によっても変化するため、これを利用したストレス度の計測が試みられている^{18,19)}。これらのデータが集積されれば、簡易ストレス度検査として定期健康診断等に取り入れることも可能であろう。脈波のカオス性と精神的緊張度との間に何らかの関連が見出せれば、血圧測定時に脈波を記録することによって、血圧高値を示した場合、それが白衣現象によるものか、あるいは「真の」高血圧であるのかの鑑別にも利用できるかもしれない。また、脈波は、その拍動源である心臓のみならず、それ以遠の血管の状態をも含む生体信号であるため、動脈硬化の非侵襲的診断に応用できる可能性がある。すでに、脈波波形の微細な変化を強調するため、それを2次微分した加速度脈波から“血管年齢”を推定する試みがなされている²⁰⁻²³⁾。脈波のカオス性を応用した循環機能評価についてはいまだ緒についたところであり^{24,25)}、更なる検討が望まれる。

結 論

サロゲートデータ法を用いた解析から、脈波のカオス性が再確認された。用いたサロゲートの特性から、脈波は、決定論的ダイナミクスのもと、1拍ごとの波形がダイナミカルに結合した低次元カオスと推測された。

文 献

- 1) Denton TA, Diamond GA, Helfant RH et al: Fascinating rhythm- a primer on chaos theory and its application to cardiology. Am Heart J, 1990; **120**: 1419-1440.
- 2) 大塚邦明: 時間医学とヤマス医学. メディカルビュー社, 東京, 1998.

- 3) Richter M, Schreiber T: Phase space embedding of electrocardiograms. *Phys Rev E*, 1998, **58**: 6392-6398.
- 4) Babloyantz A, Salazar JM, Nicolis C: Evidence of chaotic dynamics of brain activity during the sleep cycle. *Phys Lett A*, 1985, **11**: 152-156.
- 5) 奥秋勝彦, 高沢謙二, 山科 章: 心疾患とカオス. 医学のあゆみ, 2001, **197**: 839-842.
- 6) Tsuda I, Tahara T, Iwanaga H: Chaotic pulsation in human capillary vessels and its dependence on mental and physical conditions. *Int J Bifurcat Chaos*, 1994, **2**: 313-324.
- 7) 金子邦彦, 津田一郎: 複雑系のカオスのシナリオ, 朝倉書店, 東京, 1996.
- 8) 津田一郎: カオスの脳観, サイエンス社, 東京, 1990.
- 9) 合原一幸: カオス時系列解析の基礎と応用, 産業図書, 東京, 2000.
- 10) 松葉育雄: 非線形時系列解析, 朝倉書店, 東京, 2000.
- 11) Takens F: Detecting strange attractors in turbulence. *Lecture notes in mathematics*, 1981, **898**: 366-381.
- 12) Theiler J, Eubank S, Longtin A et al: Testing for non linearity in time series: the method of surrogate data. *Physica D*, 1992, **58**: 77-94.
- 13) Theiler J, Rapp PE: Re-examination of the evidence for low-dimensional, nonlinear structure in the human encephalogram. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, 1996, **98**: 213-222.
- 14) Theiler J: On the evidence for low-dimensional chaos in an epileptic electroencephalogram. *Phys Lett A*, 1995, **196**: 335-341.
- 15) Sano M, Sawada Y: Measurement of the Lyapunov spectrum from a chaotic time series. *Phys Rev Lett*, 1985, **55**: 1082-1085.
- 16) Theiler J, Prichard D: Constrained-realization Monte-Carlo method for hypothesis testing. *Physica D*, 1996, **94**: 221-235.
- 17) 伊福部達, 橋場参生, 松島純一: 母音の自然性における「波形ゆらぎ」の役割. *日本音響学会誌*, 1991, **47**: 903-910.
- 18) 田原 孝: カオスと健康. *からだの科学*, 1991, **161**: 94-102.
- 19) 田中敦士: カオス理論による職業的疲労感検出システム開発の可能性—最大負荷運動前後の指尖容積脈波のカオスアトラクターとリアプノフ指数の分析から—, 障害者職業総合センター研究紀要, 1999, **8**: 27-37.
- 20) Takada H, Washino K, Harrel JS et al: Acceleration plethysmography to evaluate aging effect in cardiovascular system. *Med Prog Thechnol*, 1997, **21**: 205-210.
- 21) Takazawa K, Tanaka N, Fujita M et al: Assessment of vasoactive agents and vascular aging by the second derivative of photoplethysmogram waveform. *Hypertension*, 1998, **32**: 365-370.
- 22) Takada H, Mirbod SM, Iwata H: The relative vascular age derived from acceleration plethysmogram: a new attempt. *Jpn J Appl Physiol*, 1998, **28**: 115-121.
- 23) Bortolotto LA, Blacher J, Kondo T et al: Assessment of vascular aging and atherosclerosis in hypertensive subjects: Second derivative of photoplethysmogram versus pulse wave velocity. *Am J Hypertens*, 2000, **13**: 165-171.
- 24) 奥秋勝彦, 高沢謙二, 伊吹山千晴他: 虚血性心疾患患者における指尖容積脈波のカオスアトラクター変化. *日本臨床生理学会雑誌*, 1999, **29**: 363-366.
- 25) 奥秋勝彦, 高沢謙二, 大塚邦明他: 虚血性心疾患患者における冠動脈形成術後の再狭窄と最大リアプノフ指数変化. *日本臨床生理学会雑誌*, 2000, **30**: 205-207.

Non-linear Analysis of Finger Plethysmogram Using the Surrogate Data Method

Kenichiro Shimizu

Health Care Center, Shokochukin Bank, Tokyo, Japan
Division of Geriatric Medicine, Department of Internal Medicine,
Keio University School of Medicine, Tokyo, Japan

Key words: Finger plethysmogram, Chaos, Non-linear dynamics, Surrogate data, Lyapunov exponent

We investigated non-linearity of finger plethysmogram using the surrogate data method. Three different types of surrogate data were considered in the present study; random shuffle surrogate data in which original data were randomly re-arranged, Fourier shuffle surrogate data in which only phase spectrum differed between the original and surrogate data, and period-shuffle surrogate data in which each periodic component of the original data was randomly re-arranged. Maximal Lyapunov exponent, reflecting orbital instability of chaos, for the original data was significantly different from that for all those surrogate data. These results indicate that pulse wave data may be determined based on non-linear dynamics to show a low-dimensional chaos.

(*J. Jpn. Coll. Angiol.*, 2003; **43**: 15-19)