



# HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	非線形時系列データ解析 : 5. "MemCalc"を用いた医学・生物学分野の時系列データの解析
Author(s)	大友, 詔雄; Ohtomo, Norio; 高橋, 延昭 他
Citation	北海道大學工学部研究報告, 163, 35-46
Issue Date	1993-03-15
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/42355">https://hdl.handle.net/2115/42355</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	163_35-46.pdf



## 非線形時系列データ解析

### —5.“MemCalc”を用いた医学・生物学分野の時系列データの解析—

大友 詔雄\*) 高橋 延昭\*\*) 神山 昭男\*\*\*) 岩佐 浩克\*)  
寺地 三朗+) 田中 幸雄++)

(平成4年10月1日受理)

## Nonlinear Time Series Analysis

### —5. An Analysis of Time-Series Data in Medical and Biological Branches by The Use of “MemCalc”—

Norio OHTOMO\*), Nobuaki TAKAHASHI\*\*), Akio KOYAMA\*\*\*)  
Hirokazu IWASA\*), Saburo TERACHI+) and Yukio TANAKA++)

(Received October 1, 1992)

## Abstract

Time-series data in medical and biological branches, such as temporal variations of human body temperatures, pulse waves of the blood pressure, heart rate, amount of rat's spontaneous activity and brain waves, are analyzed by the use of MemCalc system, which is a newly-devised realization of nonlinear analysis (see paper 2 in the present series). PSD's (power spectral densities), autocorrelation functions and the best fitting curves for these time-series data are calculated by MemCalc. The PSD spectra of these indicate a power law of  $1/f$  ( $f$ : frequency) at low frequencies, which is considered to reflect the intermittent chaos phenomena. The effects of the log-transformation and the moving-average are discussed.

## 1. はじめに

自然界は極めて多様な周期的変動を示す現象を内在させている。生物は進化の過程で、この周期的変動の影響を受け、多くの生理機能に固有リズム(生物リズム)を形成して来た。今日、生物学をはじめ医学や農林水産学、獣医学、社会学、労働科学などの、人間を含めた生命に関わるあらゆる分野の諸現象の理解・解明に、生物リズムが重要な役割を果たしている。<sup>1)</sup>しかし同時に、生物リズムに関する客観的且つ定量的な知識の必要性の増大に伴って、これまででない新しい解

\*)北海道大学工学部原子工学科

\*\*)札幌医科大学付属臨海医学研究所

\*\*\*)北海道大学医学部衛生学講座

+)北海道工業大学経営工学科

++) (有)諏訪トラスト。

析方法の開発と確立が待望され、膨大に蓄積されている時間生物学上の時系列データの本格的解析が求められている。

本シリーズで紹介している解析方法<sup>2)</sup>はこうした要求にこたえるものである。とりわけ、この解析方法の中軸である“MemCalc”システム<sup>3)</sup>は、現在、多くの研究者によって実際の研究に利用され、その有効性が実証されつつある。また、“MemCalc”を医学・生物学データに適用し得られた成果の一部については、既に「生物リズムの構造-MemCalcによる生物時系列データの解析-」<sup>4)</sup>にまとめられている。

本報告では、典型的な医学・生物学上の時系列データ（人の直腸温、心臓の拍動による血圧の脈動、ラットの活動量、心拍数、脳波の5種類）について、“MemCalc”システムを適用して得られた結果をまとめて紹介する。

## 2. 時系列データ

図1は、解析対象とした人の直腸温、心臓の拍動による血圧の脈動、ラットの活動量、心拍数、脳波の5種類の時系列データである。

人の直腸温：図-1 (a)は、健常人の直腸温を30分毎に53時間（2日余）にわたって測定した結果である。図中の縦軸は温度（℃）、横軸は時刻（24時間表示）を示している。このデータは、午前0時頃の最低温時期の後、体温は徐々に上昇する時期、午前8時頃の体温の急上昇時期を経て、午後8時頃の最高温時期に至るまでの高体温時期、及びその後の急低下時期など、規則的な日内リズムの存在が明瞭に認められる。

この変動パターンからは、ほぼ24時間の概日リズムの存在が容易に見てとれるが、単純にそれだけのリズムだけではない。環境変動や被験者の活動などの外的諸条件に起因すると見られるリズムが重なっていると考えられる。“MemCalc”システムは、こうした複数のリズムの重なりによる変動パターンを解析するのに極めて有効である。

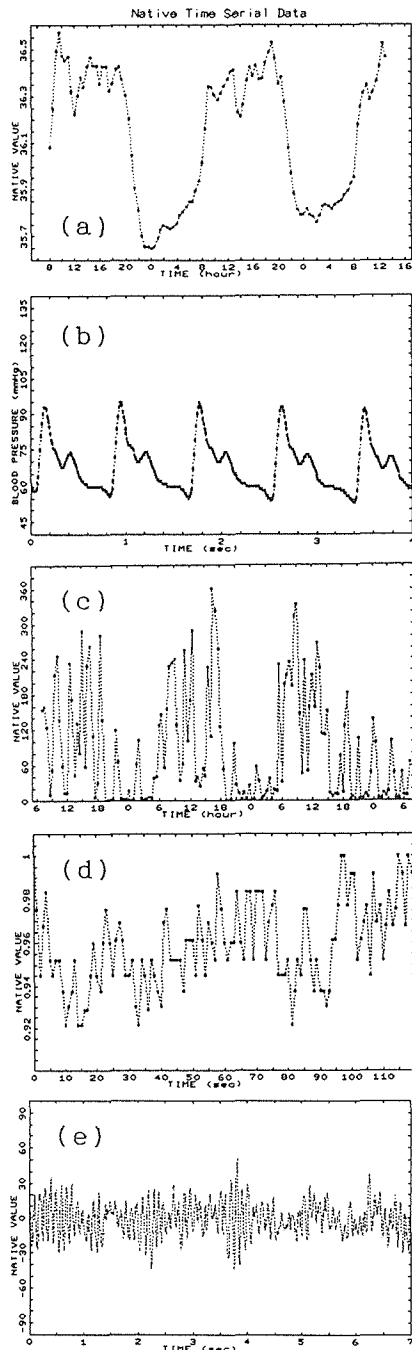


図-1 時系列データ  
(a)人の直腸温、(b)人の血圧の脈動、(c)ラットの活動量、(d)人の心拍数、(e)人の脳波

心臓の拍動による血圧の脈動：図-1 (b)は、心臓の拍動毎に上昇・下降を繰り返す血圧（縦軸：単位 mmHg）の変動パターンである。図に示されているのは、測定の時間間隔 10 ミリ秒、4 秒間、400 点の時系列データであり、ほぼ 5 拍動の変動が観測されている。

こうした血圧の変動は、心臓の規則正しい拍動に追隨して生じる。即ち、心臓の収縮によって血圧値が上昇し（収縮期）ながら、ピークに達し（収縮期血圧または最大血圧）、その後、心臓の拡張により血圧値が低下し（拡張期）、そして最低値に至る（拡張期血圧あるいは最小血圧）。

この強い周期性は、心臓の拍動の最も顕著な特性を反映したものである。しかし注意深い解析によって、この血圧の脈動には、微妙な揺らぎが内在していることが分かる。この揺らぎは、カオス現象によると考えられるが、血圧変動をカオス現象として見る報告はない。

ラットの活動量：図-1 (c)は、一定時間当たりのラットの輪回し運動量を、3分毎、3日間にわたって測定した結果である。データ点数は 145 である。

基底変動として、1日の周期特性が観測されるが、かなり複雑な周期特性パターンをもち、更にそれに加えて間歇的な大きなゆらぎ変動を伴う複雑な時系列である。この変動パターンに内在する周期構造を明らかにすることは興味深い。

心拍数：図-1 (d)は、臥位状態の成人に対して測定された、1秒毎2分間の心拍数の揺らぎの時系列データである（データ点数 120）。

大きくうねる基底変動を除くと、大きな振幅をもつゆらぎ成分が主体をなす時系列データである。このゆらぎは、心臓のカオス特性 (cardiac chaos) を反映していると考えられ、白色雑音ではなく  $1/f$ -スペクトル特性を示すことが知られている。<sup>5-7)</sup>

脳波：図-1 (e)は、安静・閉眼状態の脳波の時系列データである。サンプリング時間は 10 ミリ秒、測定時間は 7 秒間、700 点のデータである。

著者らは、既に、脳波の揺らぎがフラクタル構造をもっていることを紹介し、スペクトル特性として  $1/f$ -スペクトル特性を示すことを明らかにした (文献 2)。更に文献 4 で、脳波スペクトルに見いだされた  $1/f$ 、 $1/f^2$ 、 $1/f^3$ -スペクトル特性とその源泉について詳細に論じた。<sup>8)</sup>

本報告では、これらの 5 種類の時系列データについて、最大エントロピー法 (MEM) に基づくスペクトル解析とこれと連結させた非線形最小二乗法を組み込んだ汎用時系列データ解析システム MemCalc<sup>3)</sup>を適用し、スペクトル解析 (PSD と自己相関関数の計算)、非線形最小二乗 fitting (最適あてはめ曲線の計算)を行う。また、カオス解析への発展として、“アトラクタ”も求める。

### 3. PSD と自己相関関数

与えられた時系列データ (図-1) の MEM-PSD と自己相関関数が図-2 に示されている。上から順に、人の直腸温、心臓の拍動による血圧の脈動、ラットの活動量、心拍数、脳波についての MEM-PSD (左) と自己相関関数 (右) である。

人の直腸温：図-2 (a)に示される人の直腸温変動の MEM-PSD には、顕著なピークとして、周期値 23.79 時間の卓越ピーク (相対強度 1) に次いで、周期値 12.26 時間 (相対強度 0.0028)、8.

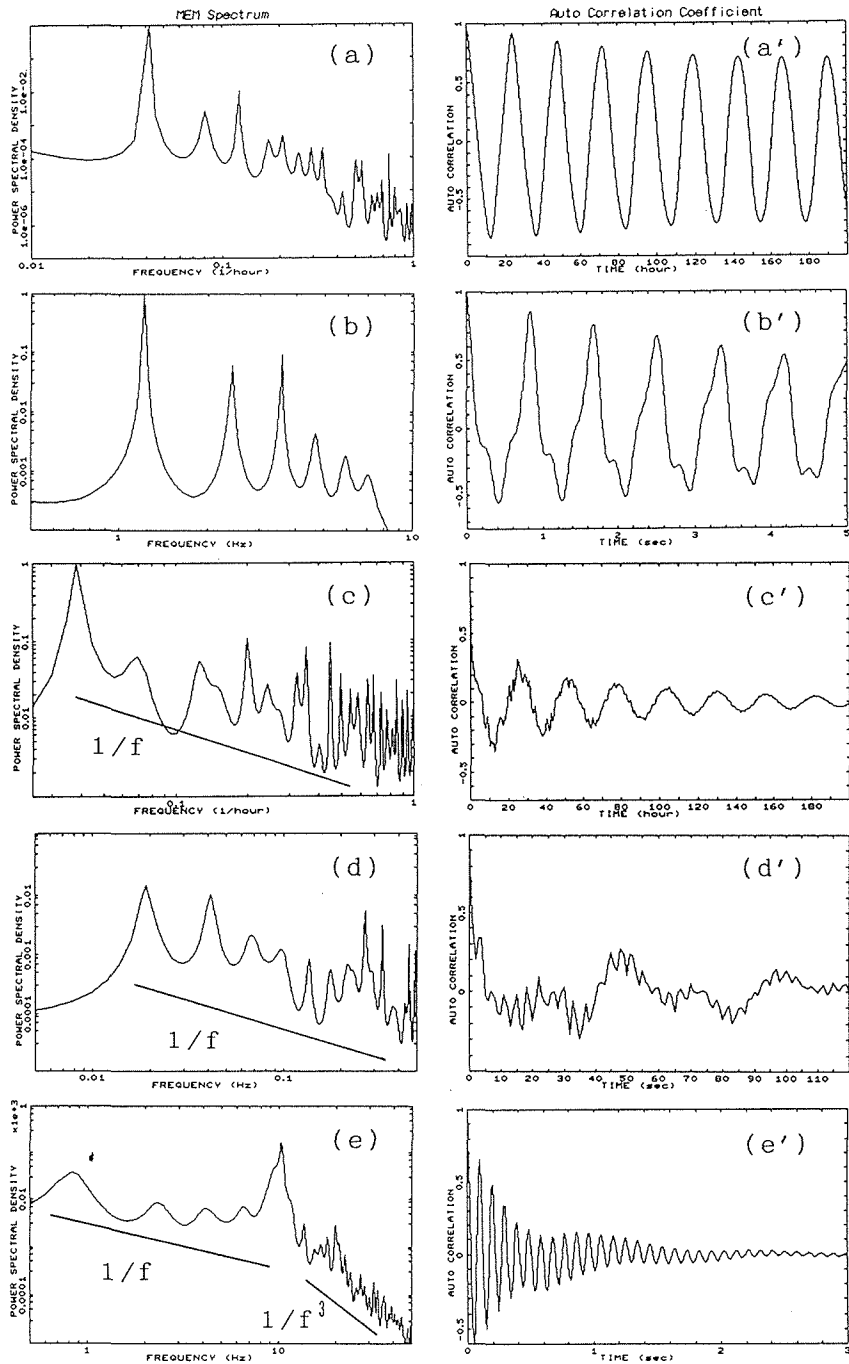


図-2 MHD-PSD(a)~(e)と自己相関関数(a')~(e')  
 (a), (a')人の直腸温, (b), (b')人の血圧の脈同, (c), (c')ラットの活動量, (d), (d')人の心拍数, (e), (e')人の脳波

16時間（相対強度 0.0112）などが観測される。

このことは、図-2 (a') に示される自己相関関数の振る舞いからも十分に理解できる。自己相関関数の振動は、基本的に卓越ピークの周期によっている。

こうして人の直腸温の変動には、ほぼ 24 時間の概日リズムが確認される。他に、12 時間や 8 時間のリズムも見られるが、これらは被験者の内的生物リズムとしてではなく、むしろ環境因子や生活リズムの影響であると考えられる。というのは、これらの周期は、1 日目と 2 日目では明らかに違い、また個人差も見られることによる。

**血圧の脈動：**図-2 (b) に示されるように、心臓拍動毎の血圧の脈動の MEM-PSD の卓越ピーク（相対強度 1）は、周期値 0.8232 秒にあり、極めて急峻なピークである。この周期が脈動の基本周期である。このピークに次いで、周期値 0.4158 秒（相対強度 0.0610）と 0.2812 秒（相対強度 0.0940）の 2 つの孤立ピークが観測される。この時系列パターンの基底変動はこれら 3 つの周期変動の重ね合わせによると考えられる。このことは、図-2 (b') に示される自己相関関数の振動にも認められる。即ち、0.8 秒の卓越周期を基本として、これに 0.3 秒と 0.4 秒の 2 つの周期が重なっている。

心臓は安静時に 1 分間に 70 回（周期 0.86 秒）ほどの収縮と拡張を繰り返す。卓越ピークはこれを反映している。また、心臓の拍動を持続させるメカニズムである膜の脱分極と再分極の繰り返しはほぼ 300 ミリ秒である。これが 0.28 秒の周期として観測されている。その他、心臓の右心房洞結節から発する興奮が、刺激伝達系を介して心房、心室中隔、心室へと伝播するときの脈動も観測されていると思われる。

**ラットの活動量：**図-2 (c) に示されるラットの一定時間当たりの輪回し回数の MEM-PSD の卓越ピークは、23.62 時間（相対強度 1）の周期をもつ幅の広いピークである。次いで 7.96 時間（相対強度 0.0742）と 4.93 時間（相対強度 0.0802）の幅広い 2 つのピーク、更には 2.91 時間（相対強度 0.0992）の周期のピークが見られる。基底変動はこの幅の広い 3 つの周期が主要な寄与をなすと考えられる。卓越ピークの周期は概日リズムを示しており、このピークの幅が広がるのは、無数の連続的に変動する周期値の重ね合わせから成っていることを意味している。こうなる理由は、時系列に観測された不規則に大きく揺らぐ変動にある。図-2 (c') に示される自己相関関数の大きな減衰する変動パターンは、こうした状況を良く反映している。

PSD の全体的な減衰傾向が  $1/f$ -スペクトルになっていることから、このラットの行動量の不規則性はカオス的であると考えられる。

**心拍数：**心拍数のゆらぎの MEM-PSD（図-2 (d)）は、周期値 52.39 秒（相対強度 1）と 24.17 秒（相対強度 0.6857）の 2 つのモードを基本周期として、これに 14.73 秒（相対強度 0.15）のピークが重なり、さらに 3～4 秒の周期（相対強度 0.2～0.4）の振動が重なっていることを示している。

図-2 (d') の自己相関関数の変動は以上の状況を良く反映している。基本周期の幅の広いピークは、自己相関関数の大きな変動が漸次減衰することに反映しており、3～4 秒の周期の変動が小刻みの変動になっている。

心拍数の揺らぎのスペクトルは、これまで、0.3 Hz（周期約 3 秒）と 0.1 Hz 付近のピークが観測され、交感神経機能および副交感神経機能との関連について議論がなされている。<sup>5)</sup>しかし、そ

れらは、図-2 (d)に示されるように、必ずしも明瞭な単一ピークとして観測されるものでもないし、0.02 Hz, 0.04 Hz 付近の低周波数モードも観測される。これらのピークを系統的に把握しその由来を明らかにすることは今後の重要な課題である。

脳波：図-2 (e)の MEM-PSD は、脳波に対する典型的なパターンである。10 Hz (周期値 0.0965: 相対強度 1) の  $\alpha$  波のピーク、そのピークを境にして、その低周波数側の  $1/f$ -特性 (この例では、大きな  $\alpha$  波や  $\theta$  波の影響が  $1/f$ -特性を平坦化している)、その高周波数側の  $1/f^3$ -特性が観測されている。

一般に、脳波は、0.5 から 3 Hz までの  $\delta$  波、4 から 7 Hz の  $\theta$  波、8 から 13 Hz の  $\alpha$  波、そして 14 Hz 以上が  $\beta$  波と分類されている。しかし、これらの波が複数の波の合成であることがわかる。

自己相関関数 (図-2 (e')) には、 $\alpha$  波の強い振動 (10 Hz) が、緩やかなうねり (1 Hz のオーダー) に乗りながら漸次減衰している状況が見られる。この状況は PSD のパターンと整合的である。

#### 4. 最適あてはめ曲線

MemCalc を用いて計算された最適あてはめ曲線が、図-3 に示されている (点線: 原時系列データ, 実線: 最適あてはめ曲線)。(a)は人の直腸温, (b)は心臓の拍動による血圧の脈動, (c)はラットの活動量, (d)は心拍数についての結果である。脳波のゆらぎについては、基底変動部分はなく、ランダムに激しく変動するゆらぎ成分が主体であるため、最適あてはめ曲線は  $\alpha$  波の変動パターンについて行なった (図-4)。

人の直腸温：図-3 (a)は、人の直腸温変動の MEM-PSD において観測されたピークから決めた周期値 23.79 時間, 12.26 時間, 8.16 時間の 3 つの周期値を用いて計算された最適あてはめ曲線である。顕著な概日リズムに重なった特異なパターンにもかかわらず、原時系列データは、これらの周期をもつ 3 つの余弦周期関数の重畳によって基本的に再現されていると見てよい。これらの周期成分の寄与については後述される。

血圧の脈動：図-3 (b)は、周期値 0.82 秒, 0.42 秒, 0.28 秒の 3 つの周期値を用いて計算された最適あてはめ曲線である。これらの周期成分の寄与についても後述される。

ラットの活動量：図-3 (c)は、周期値 23.62 時間, 7.96 時間, 4.93 時間の 3 つの周期値を用いて計算された最適あてはめ曲線である。元の時系列データは、不規則な大きな揺らぎ変動をもつ複雑なパターンであるが、このパターンの基底変動はこの 3 つの周期をもつ周期関数の重畳によって基本的に再現される。

心拍数：図-3 (d)は、周期値 52.39 秒, 24.17 秒, 14.73 秒の 3 つの周期値を用いて計算された基底変動に、3.7 秒の周期値の変動を重ねて求めた最適あてはめ曲線である。3.7 秒の周期の変動の寄与が大きい、本質的にカオスの揺らぎであるから、最適曲線であてはめることは出来ない。

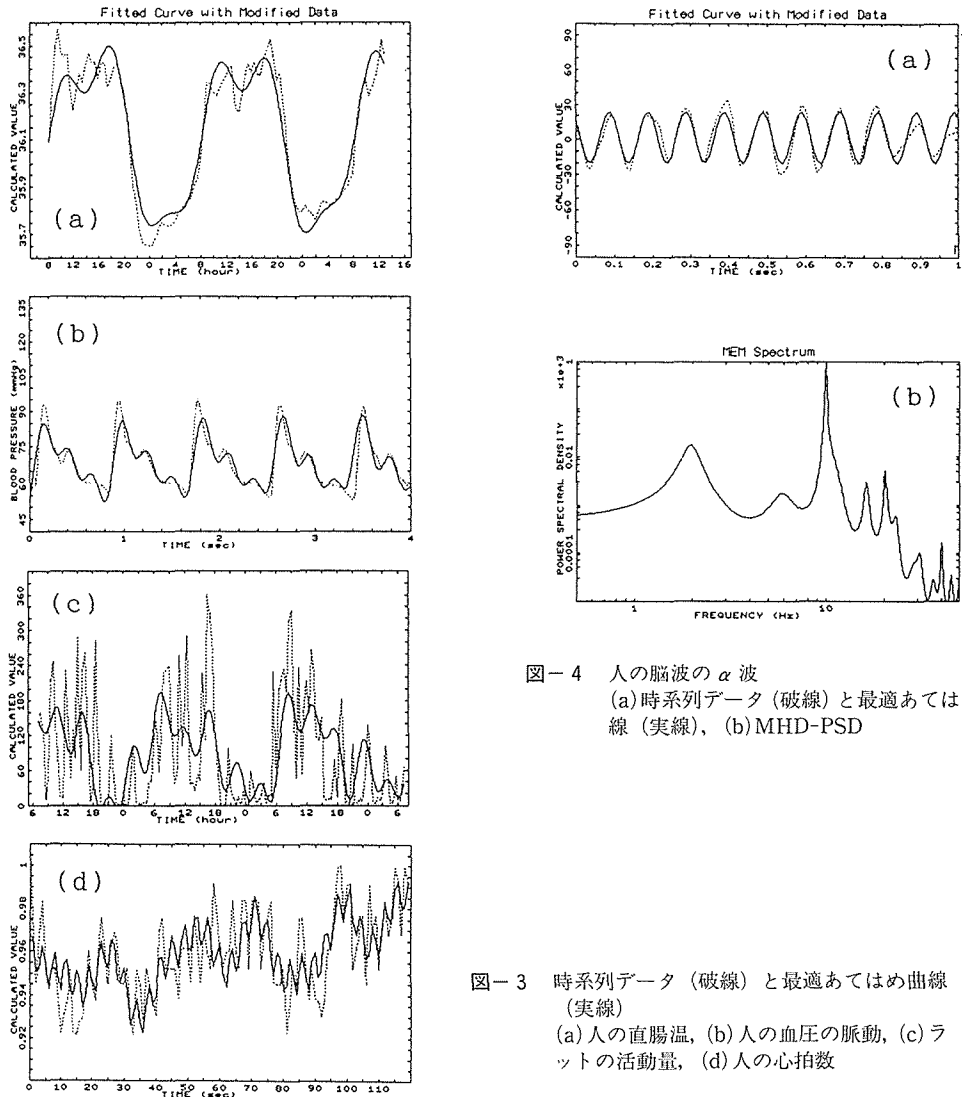


図-4 人の脳波の $\alpha$ 波  
(a)時系列データ(破線)と最適あてはめ曲線(実線)、(b)MHD-PSD

図-3 時系列データ(破線)と最適あてはめ曲線(実線)  
(a)人の直腸温、(b)人の血圧の脈動、(c)ラットの活動量、(d)人の心拍数

脳波：図-4 (a) (破線) は、脳波の時系列データ (図-1 (e)) の1秒間の変動パターンである。このデータの PSD (図-4 (b)) は、極めて顕著な $\alpha$ 波の卓越ピーク (周波数 9.98 Hz) として観測されている。この $\alpha$ 波の周期値 (0.1002 秒) を用いて計算された最適あてはめ曲線が(a)図の実線で示されている。この結果から、この変動は基本的に $\alpha$ 波であることが確認出来る。

脳波の揺らぎも基本的にはカオス的であると考えられるから、 $\alpha$ 波が支配的な元の時系列データ値と最適あてはめ曲線との間には微妙な周期的ずれが見られる。これは $\alpha$ 波の周期が揺らいでいるものであり、 $\alpha$ 波の周期が擬周期的(quasi-periodic)なものであることを意味し、この揺らぎの性質を解明することは興味深い。

### 5. アトラクタ表示

図-5は、本報で取り扱っている5種類の時系列データのアトラクタを描いたものである。それぞれ5通りの特徴的なアトラクタとなっている。“アトラクタ”は、時系列データに秘められて

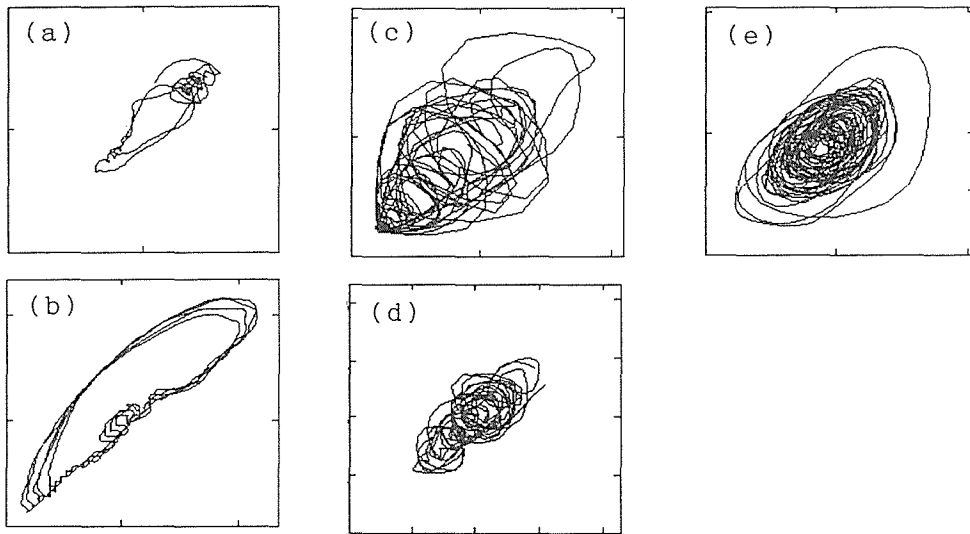


図-5 時系列データのアトラクタ  
 (a)人の直腸温, (b)人の血圧の脈動, (c)ラットの活動量, (d)人の心拍数, (e)人の脳波

いる内在的な固有の特性を可視化するのに役立つ。

“ $1/f$  スペクトル”をもたらず脳波や心拍数データのアトラクタ (図-5 (e), (d)) は、カオスのアトラクタとなっている。また、ラットの輪回し量の変動もカオス的である。これらに対して、人の直腸温や血圧変動も本質的にカオス的であると考えられるが、対象とした時系列長ではリミットサイクルが支配的である。

## 6. 議 論

### 6-1. 周期成分の寄与

図-3 に示した最適あてはめ曲線は、3つないしは4つの主要な周期モードを取り込んで求められたものである。これらの周期モードそれぞれの寄与をみるために、脳波データを除く4種類のデータについて、長周期モードから順に取り込んであてはめ曲線を求めた結果が、図-6 にまとめて示されている。

**血圧の脈動:** 図-6 (1-a~1-c) は、上から順に、1周期モード(0.82秒), 2周期モード(0.82+0.42秒), 3周期モード(0.82+0.42+0.28秒)の結果である。各々の周期モードは、MEM-PSDのピーク位置から求めたものである。2周期モードの結果は、0.4秒の周期成分の寄与は顕著ではなく、むしろ3周期モードの場合、即ち、0.28秒の周期成分を取り込むことがfitting上は重要である。また、この3周期モードの結果を、0.21秒の周期モードを取り込んだ4周期モードの結果(図-6 (1-d))と、更に0.17秒の周期モードを取り込んだ5周期モードの結果(図-6 (1-e))と比べてみてもほとんど差がなく、0.28秒の周期成分の寄与を取り込むかどうか最適あてはめ曲線を定める上では決定的である。こうして、3周期モードの結果を最適あてはめ曲線とすることが出来る。

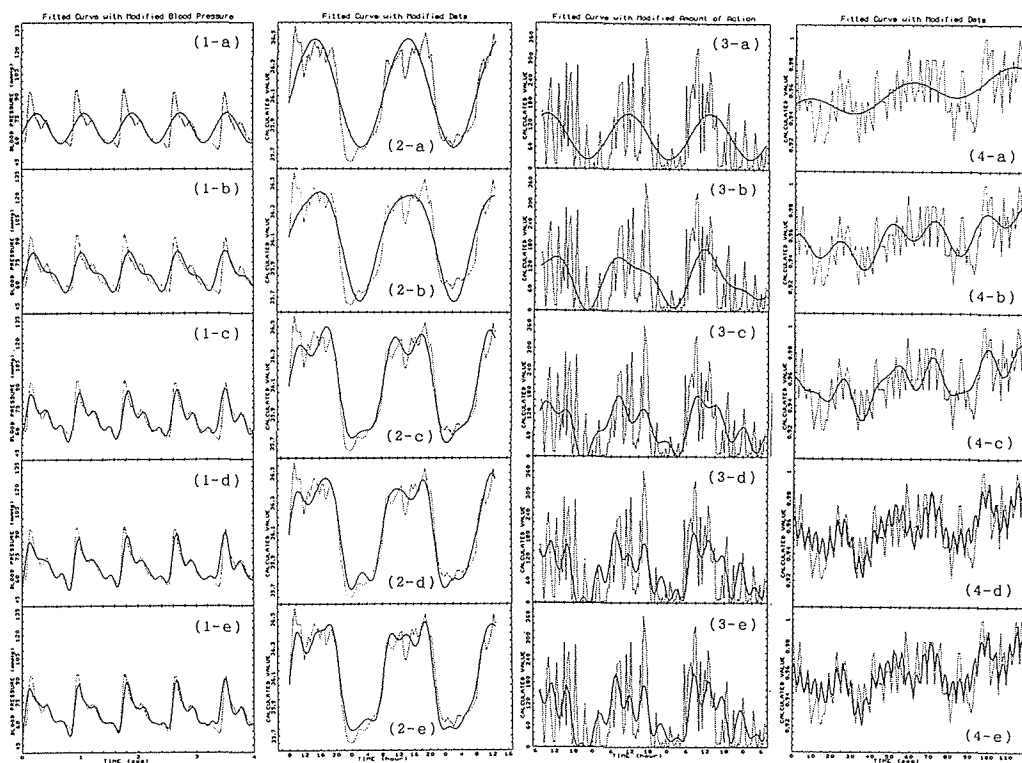


図-6 最適あてはめ曲線に対する周期モードの寄与  
 (1)人の血圧の脈動, (2)人の直腸温, (3)ラットの活動量, (4)人の心拍数

人の直腸温：図-6 (2-a~2-e)は、上から順に、1周期モード(23.8時間)、2周期モード(23.8+12.3時間)、3周期モード(23.8+12.3+8.2時間)、4周期モード(23.8+12.3+8.2+5.7時間)、5周期モード(23.8+12.3+8.2+5.7+4.8時間)の結果である。卓越周期モードである概日リズム(23.8時間)で、基本的に最適あてはめ曲線が実現されている。また、3つの周期モードをもつ周期関数の重畳によって時系列データの基本変動が基本的に再現されていると見てよい。

ラットの活動量：図-6 (3-a~3-e)は、上から順に、1周期モード(23.6時間)、2周期モード(23.6+8.0時間)、3周期モード(23.6+8.0+4.9時間)、4周期モード(23.6+8.0+4.9+2.9時間)、5周期モード(23.6+8.0+4.9+2.9+2.2時間)の結果である。元の時系列データは、不規則な大きな揺らぎ変動をもつ複雑なパターンであるが、このパターンの基底変動はこの3つの周期をもつ周期関数の重畳によって再現されることが理解される。しかし、大きく変動する揺らぎは、カオス的であることが分かっているから、周期関数の重畳で元の時系列データの変動を再現することは出来ない。

心拍数：図-6 (4-a~4-e)は、上から順に、1周期モード(52.4秒)、2周期モード(52.4+24.2秒)、3周期モード(52.4+24.2+14.7秒)、4周期モード(52.4+24.2+14.7+3.7秒)、5周期モード(52.4+24.2+14.7+3.7+3.0秒)の結果である。3.7秒を取り込んだ3周期モードの

段階で、ほぼ最適あてはめ曲線が実現されている。心拍数の揺らぎもカオス的であると考えられるから、周期関数の重畳で元の時系列データの変動を再現することは出来ない。

## 6-2. 対数変換処理

時系列データの対数変換は、非定常時系列データの解析に利用される変換であり、太陽黒点数や河川流量などの時系列データの解析に有効である。<sup>9)</sup>ここでは、ラットの活動量のデータについて対数変換を行ない(図-7(c)の破線)、得られたPSD(図-7(a))、自己相関関数(図-7(b))、および最適あてはめ曲線の計算結果(図-7(c)の実線)が示されている。

対数変換時系列データ(図-7(c)の破線)に対する自己相関関数と原時系列データ(図-1(c))に対する自己相関関数(図-2(c'))とを比べると、対数変換データについての自己相関関数への顕著な影響が良くわかる。これは対数変換によって、間歇的なバースト状のゆらぎ成分が丸められ、周期的基底変動成分が強められた結果、ほぼ単一周期モードが支配的になっていることが分かる。

(c)図には、対数変換時系列データ(破線)に対する最適あてはめ曲線(実線)が示されている。複雑な基底変動パターンが良く再現されている。このように、対数変換処理は単なる数学的変換に過ぎないのであるが、時系列データの性質によっては高い有効性を発揮する。しかし、逆に時系列データの揺らぎを白色化する傾向をもち、時系列データのゆらぎ成分が本来もっていた情報を喪失させる場合もあるので注意が必要である。<sup>10)</sup>

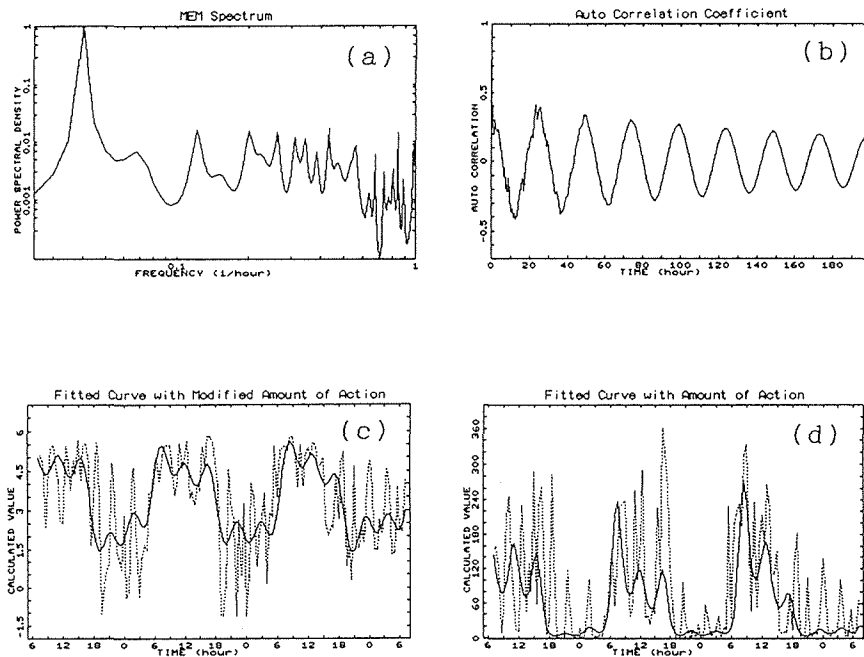


図-7 対数変換処理の効果

(a)対数変換処理された時系列データのPSD, (b)対数変換処理された時系列データの自己相関関数, (c)対数変換処理された時系列データへの最適あてはめ曲線, (d)元の時系列データへの最適あてはめ曲線

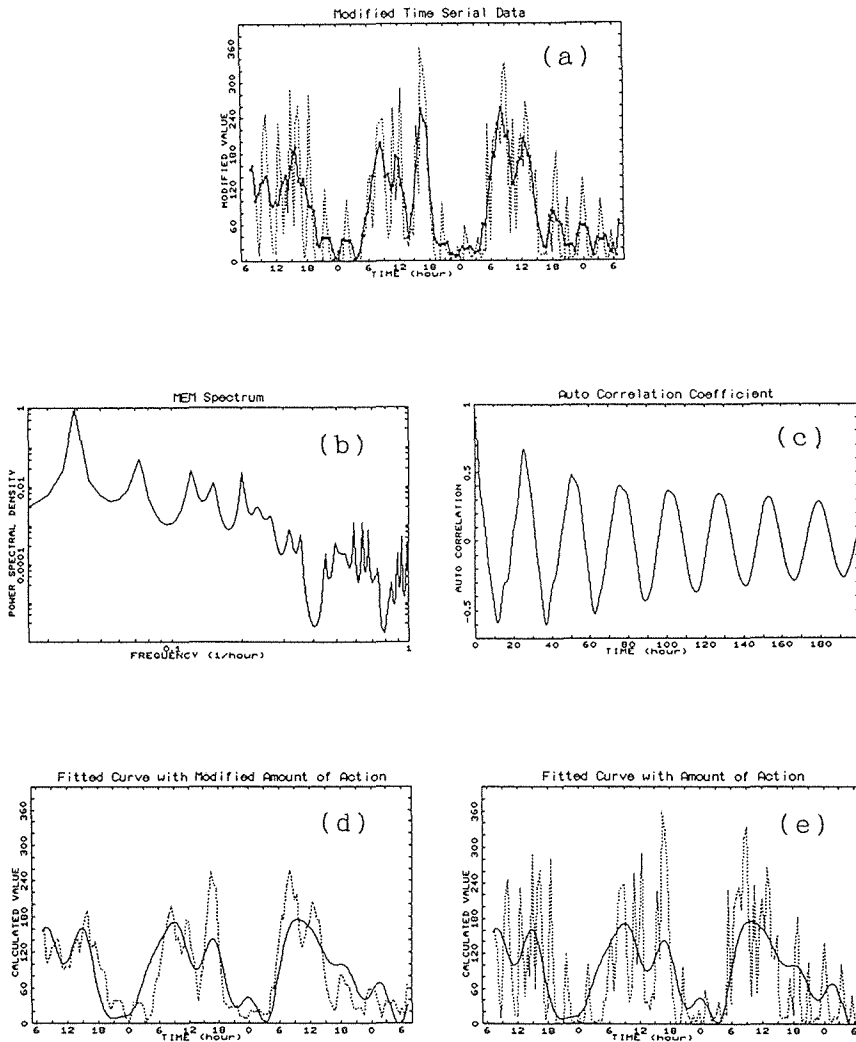


図-8 移動平均処理の効果

(a) 移動平均処理された時系列データのPSD, (b) 移動平均処理された時系列データの自己相関関数, (c) 移動平均処理された時系列データへの最適あてはめ曲線, (d) 元の時系列データへの最適あてはめ曲線

### 6-3. 移動平均処理

図-8は、MemCalcに時系列データの前処理ルーチンとして組み込まれている移動平均処理を行なって解析を進めた結果である。ここでも、ラットの活動量のデータ(図-8(a)の破線)を解析対象とした。

図-8(a)の実線が、均等荷重5点移動平均処理を行なった結果である。この移動平均処理されたデータに対するMEM-PSDが、図-7(b)に示されている。ピークは、周期値25.60日(相対強度1)、13.82日(相対強度0.0521)、8.27日(相対強度0.0274)、6.65日(相対強度0.0138)、5.00日(相対強度0.0244)などに観測される。また、自己相関関数(図-7(c))は、移動平均の影響で、図-2(c)よりも滑らかになり、また周期性が強調されている。

図-7(d)には、5周期モード(25.6+13.8+8.3+6.7+5.0時間)の場合の、移動平均処理さ

れた時系列データ(破線)とそれに対する最適あてはめ曲線(実線)とが比較されている。(e)は元の時系列データ(破線)と比べたものである。移動平均処理を行わない場合の結果(図-3(c))と比べると、移動平均処理の効果が良く理解出来る。

#### 引用文献

- 1) 千葉喜彦, 高橋清久編: 時間生物学ハンドブック, (1991), 朝倉書店
- 2) 大友詔雄, 寺地三朗, 田中幸雄: 非線形時系列データ解析 1. 解析法と基礎理論, 北海道大学工学部研究報告, 第158号, (1992), 43. [第1報]
- 3) 田中幸雄, 大友詔雄, 寺地三朗: 非線形時系列データ解析 2. 汎用時系列データ解析システム "MemCalc", 北海道大学工学部研究報告, 第160号, (1992), 11. [第2報]
- 4) 三宅浩次監修, 高橋延昭, 神山昭男, 大友詔雄編: 生物リズムの構造-MemCalcによる生物時系列データの解析-, (1992), 富士書院.
- 5) Glass L., Hunter P. & McCulloch A. ed.: Theory of Heart-Biomechanics, Biophysics, and Nonlinear Dynamics of Cardiac Function-, (1991), Springer-Verlag.
- 6) Goldberger A.L., Rigney D.R.: Nonlinear Dynamics at the Bedside, in Ref.5, pp.583-605.
- 7) Goldberger A.L., Rigney D.R., Mietus J., Antman E.M. & Greenwald S.: Nonlinear Dynamics in Sudden Cardiac Death Syndrome: Heart rate Oscillations and Bifurcations, *Experientia*, 44, (1988), 983.
- 8) 大友詔雄, 神山昭男: 脳波の  $1/f$ ,  $1/f^2$ ,  $1/f^3$  スペクトル, 生物リズムの構造-MemCalcによる生物時系列データの解析- (三宅浩次監修, 高橋延昭, 神山昭男, 大友詔雄編, 1992, 富士書院), 167.
- 9) 大友詔雄, 寺地三朗, 田中幸雄: 非線形時系列データ解析 3. "MemCalc"を用いた理工学分野の時系列データの解析, 北海道大学工学部研究報告, 第160号, (1992), 26. [第3報]
- 10) 大友詔雄, 田中幸雄, 神山昭男, 三宅浩次: 感染症発生変動のカオス, 生物リズムの構造-MemCalcによる生物時系列データの解析- (三宅浩次監修, 高橋延昭, 神山昭男, 大友詔雄編, 1992, 富士書院), 271.