

## 臨床におけるカオスの応用

田原 孝\*

### 1. はじめに

カオスとは「ある系が決定論的法則に従って変化しているにもかかわらず、複雑で不規則、不安定な振る舞いをして、遠い将来における状態が予測不能になる現象」と一般的にいられている。そして、カオスは系の持つ非線形性と鋭敏な初期値依存性により生み出され自然のなかに遍在する。

カオスの理論や解析方法は発展途上にあるが、その発展とともに生体のカオスを解析し生命や健康のあり方へ応用するとともにその本質に迫ろうとする研究が盛んになっている。ここでは、生体カオスの事例から、その特徴や意味、新たな概念や医療における展開などを考えてみたい。

### 2. CAPにおける生体カオスの抽出

最近、生体から器官の種類や被験者の身体状態、精神・心理状態、年齢などによって特有の像と変化を示すカオスが抽出、分析されるようになった。

我々は生体からカオスを抽出、再構成し、得られたカオスの構造をアトラクターとして視覚的に表示すると共にカオスが持つ機能を解析するシステムを開発し、CAP(Chaos Attractogram Processor)と名付けて活用している。CAPは生体の種々の時系列信号に対応したカオスを抽出し解析することが可能である。

カオスの解析には

- ① アトラクターの幾何学的表示
- ② アトラクターの不安定性を示すリアプノフ指数の値の計算
- ③ アトラクターを情報プロセッサと見たとき、アトラクターがもつ情報処理能力(相互情報量)の解析の組を「カオスの形」と我々は呼び、カオスの評価指標としている。CAPはこの機能を搭載している。

生体の現象がカオスであることの検証や解析には、まず、一次元時系列データからフラクタル次元(相関

次元)を測定し、この次元に時系列データを埋め込み(enbedding)、位相空間にアトラクターを再構築する。得られたアトラクターを3次元に投影し、さらに2次元へ写影しアトラクターの幾何的性質を解析する。アトラクターは系の振る舞いや特徴を反映するので、系の構造を全体的な幾何図形として視覚的かつ直観的にとらえることができる。さらにポアンカレ写像を得、同時に最大リアプノフ指数(第1リアプノフ指数)を計算し、それが正の値をとることで実際的なカオスの指標とすることができる。しかし、リアプノフ指数によっても現象がカオスであるか否かの判断は原理的な困難さが伴う。また、時系列データを何次元の位相空間に埋め込むかは非常に大きな問題である。アトラクターに一様性が保証されればフラクタル次元の測定を行ない、埋め込み次元を決定できる。しかし、生体のカオスは一般に非一様カオスなので、その決定には困難が付きまとう。従って、現実点では真のカオスと最大リアプノフ指数によって特徴づけられる現象を区別する整合的な方法はない。それで、その区別は「カオスの形」を目安にして、目下のところ経験的にならざるを得ない。

カオスのアトラクターは高次の情報処理プロセッサとして機能し、その軌道は情報チャンネルとして働く。アトラクターの相互情報量は、あるアトラクターと別のアトラクターをコンピューター上で結合し両者に共有される情報の時間的推移を計算するものである。この方法を生体から得たアトラクターに応用すると、アトラクター間に流れた情報の相対量と方向を測定することができる。

### 3. 生体カオスの特徴

健康な生体はカオスに満ちている。生体において決定論的カオスの存在が一般的であることが実証的にわかってきた。カオスは生命の源であると共に、それを支える装置であり、その過程であり、結果であると考えられることができる。

生体におけるカオスの例は、指尖容積脈波、心臓電位、心拍、脳波、視調節系の機能、検索的眼球運動、体の各部分の協調運動、感染患者数の変動、解糖系の活動、ホルモン分泌、血球数の変動、神経細胞の活動、心筋細胞の活動など枚挙にいとまがない。

1995年2月23日受付

\* 国立肥前療養所

〒842-01 佐賀県神埼郡東背振村

キーワード：カオス(Chaos)アトラクター(Attractor)カオスの遍歴(Chaotic Itinerary)ホメオダイナミクス(Homeodynamics)カオスの健康観(Chaotic Health)

生体から得られるカオスは非一様カオスであり器官や個人など、対象により程度の差はあるものの次の様な特徴をもつ。

(1) カオス的な力学過程としての生体

健康な生体は定常的かつ、規則的で完全に秩序だった挙動をする系ではなく、カオス的な力学過程に従う系であると考えられる。

(2) 生体カオスと数学的に証明されたカオスモデルの一致

図1に指尖容積脈波と視調節系の瞳孔面積の経時変化のアトラクターとカオスのトポロジーに対するモデルを示した。

得られたアトラクターの最大リアプノフ指数はいずれも正であり、また「カオスの形」から判断するとカオスと考えてよい。いずれも4次元の位相空間に埋め込み、3次元に投影し、2次元に写影したものである。

指尖脈波のカオスのアトラクターは、ほぼ4次元に埋め込まれたトーラスがその骨格である。図は3次元トーラスの3次元ポアンカレ写像を想定して描いている。指尖脈波の変動は主として、心拍、呼吸、血圧変

化がそれぞれ非整合的な周波数を持って振動し、かつ、それらの間に非線形相互作用が存在するために生ずると考えられる。従って、ルエル・ターケンスの定理によってトーラス運動が不安定化しストレンジアトラクターが出現する。

視調節系における瞳孔面積、レンズの厚さ(屈折率)の経時変化はいずれもシルニコフ(Shilnikov)型の骨格をもつアトラクターである。軌道はホモクリニック軌道とヘテロクリニック軌道が縮退して形成され、北極と南極の2つの極をもち、それぞれ交感神経と副交感神経の支配を受けている(図4参照)。

脳波のカオスもシルニコフ型といわれている。

このように、生体の1変数時系列から、埋め込み方法で現象の背後に潜む力学構造を抜き出すことができた生体のカオスの多くが、現象とは独立に構造化されていた数学モデルによく一致する。これは非常に興味深いことである。

(3) 生体カオスの状態依存性

図2~4にカオスの状態依存性の例を、図5に発達・老化、健康・不健康の関係を示した。生体カオス、特

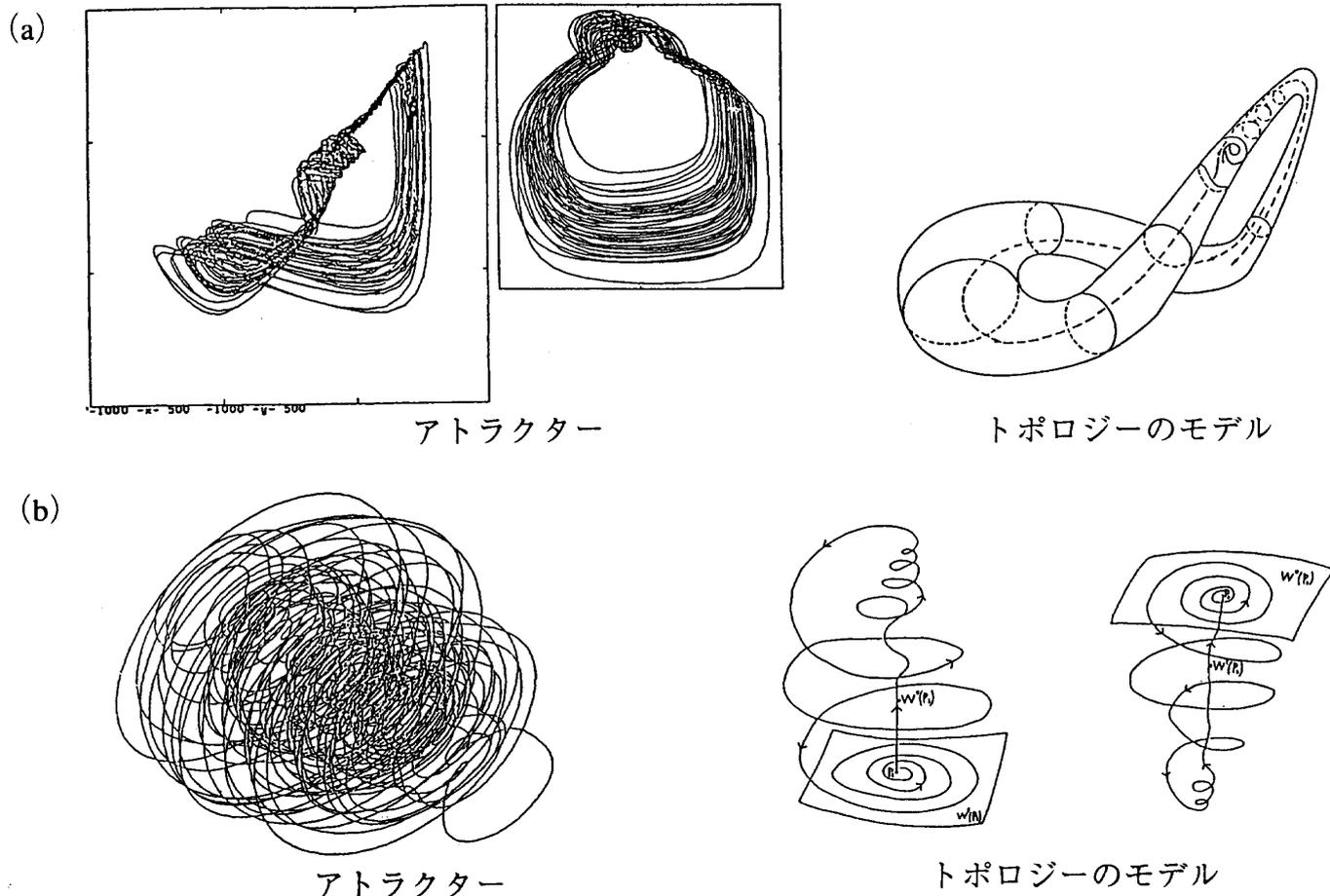


図1 指尖容積脈波と視調節系のアトラクターとカオスのトポロジーのモデル  
(a) 指尖容積脈波 (b) 視調節系(瞳孔面積)

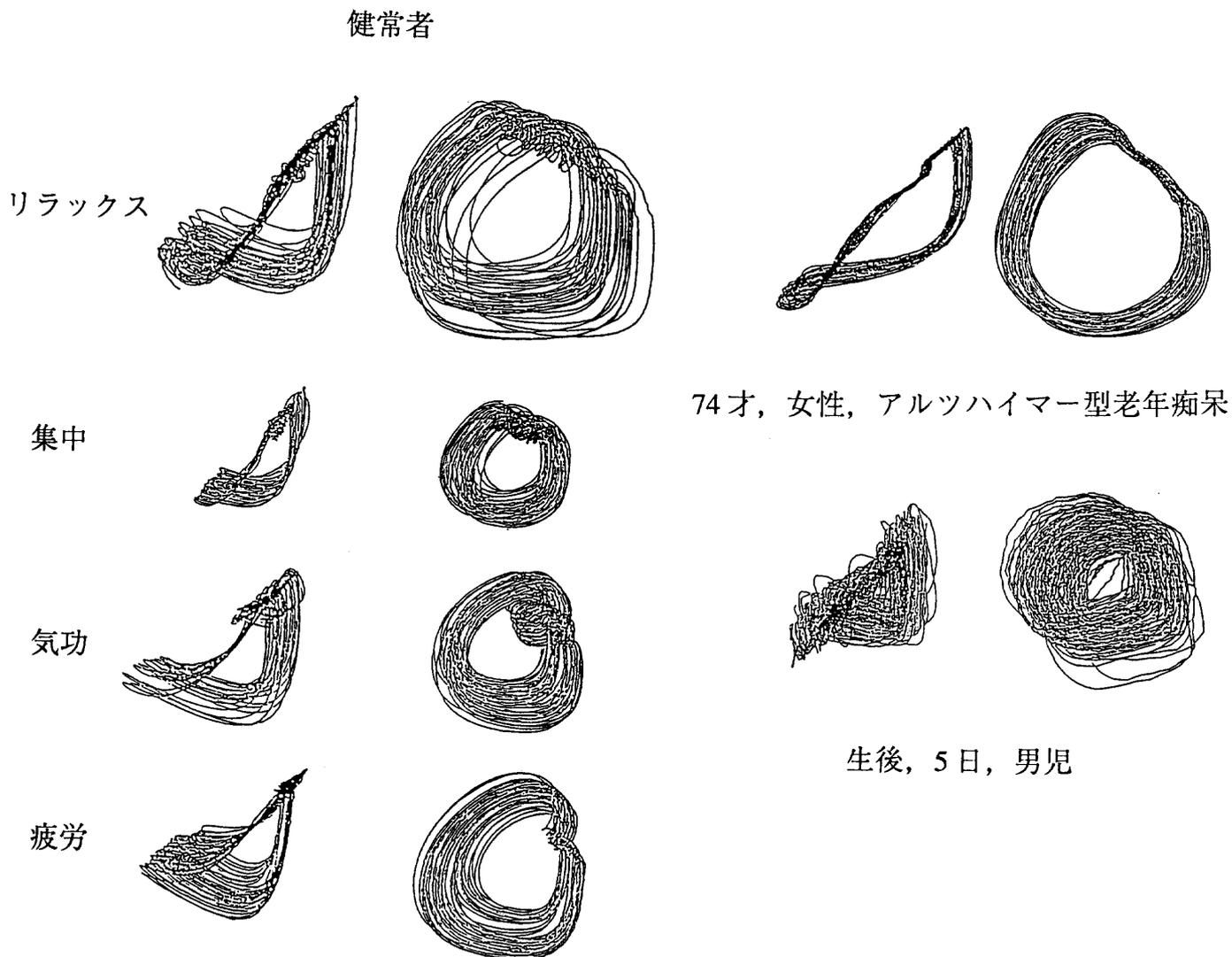


図2 指尖容積脈波のカオスアトラクターの状態依存性

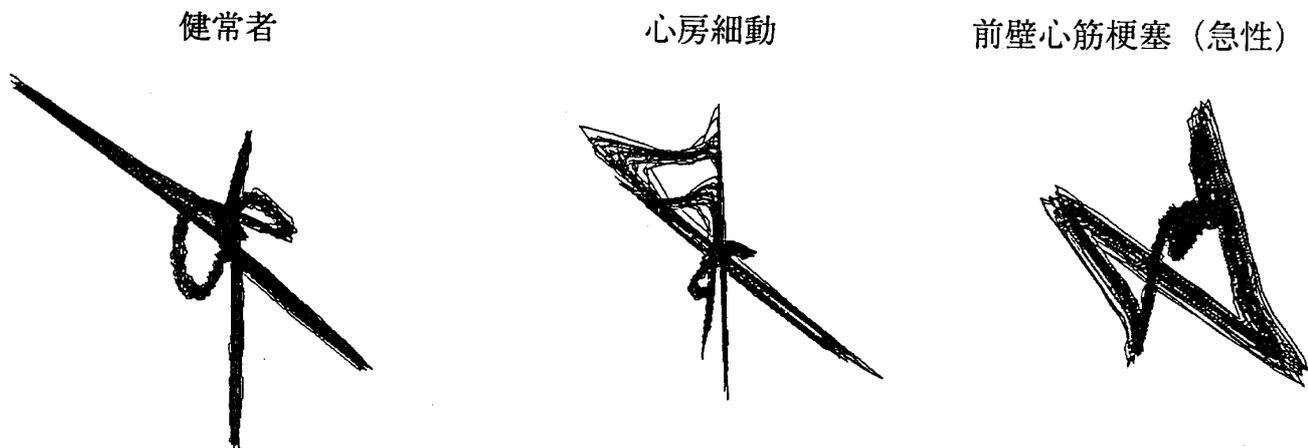


図3 心臓電位のカオスアトラクターの状態依存性(心電計V<sub>4</sub>誘導からのアトラクター)

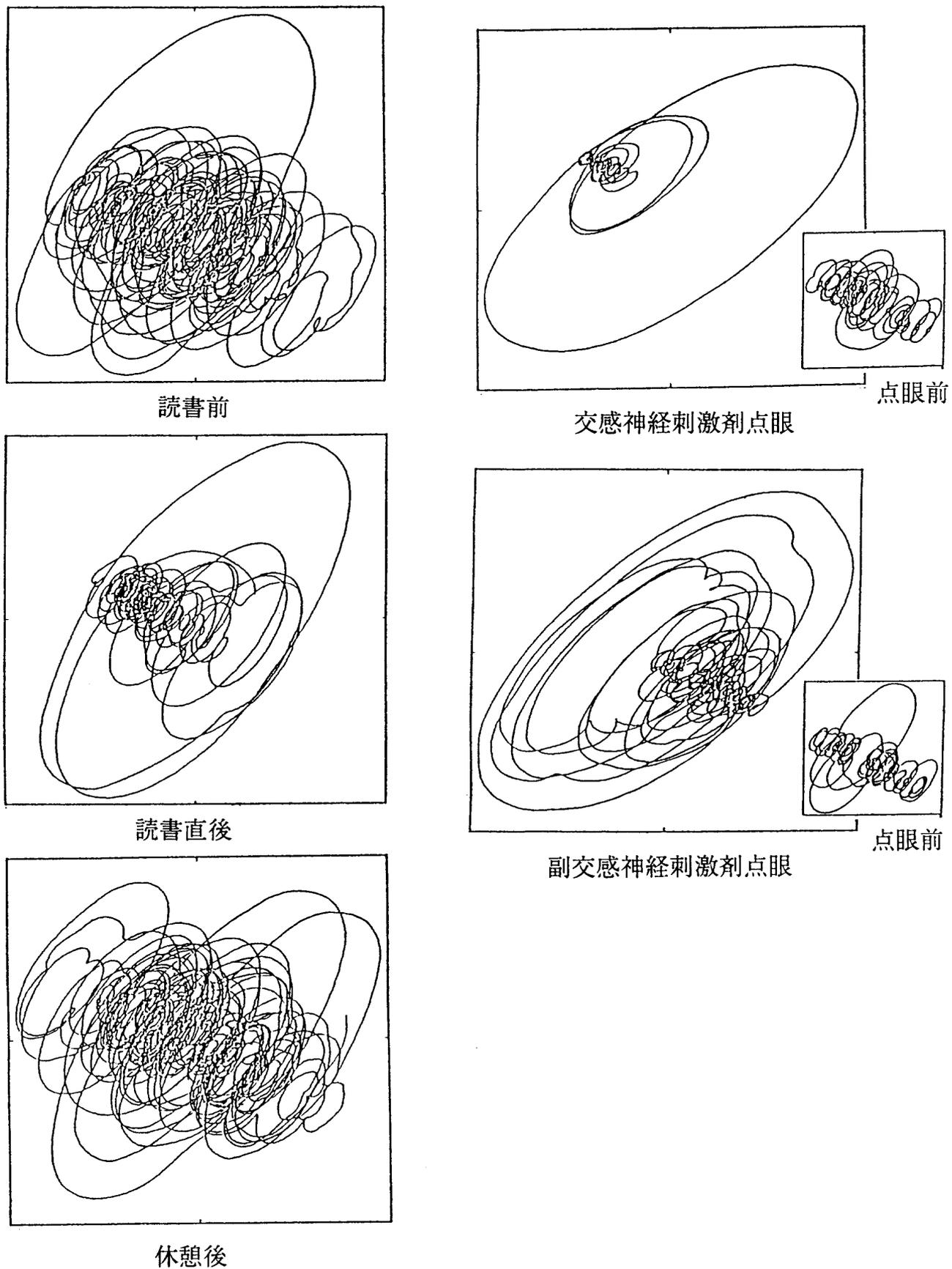


図4 視調節系(瞳孔面積)のカオスアトラクターの状態依存性

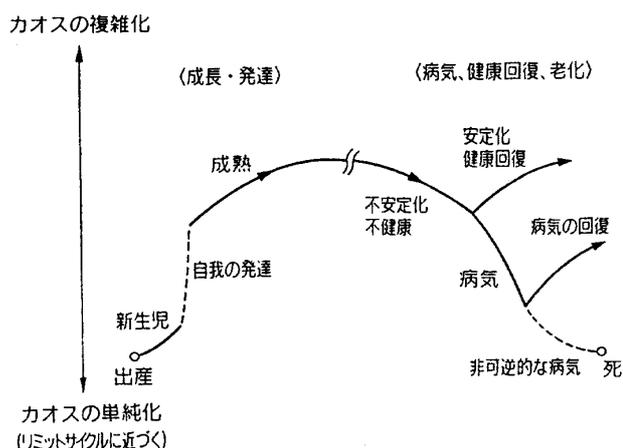


図5 指尖容積脈波を例にしたカオスと発達・老化、健康・不健康の関係

に指尖脈波や視調節系は器官の状態のみならず、人の精神・心理状態、病気、成熟に関係している。図2、図5のように、指尖容積脈波では、新生児のアトラクターは基本的に無構造であり、初めはカオスというよりノイズに近い。成長するにつれて構造化が進み比較的次元のカオスになる。構造化が進んだところでは4次元位相空間に埋め込まれたトーラス崩壊後のカオスとなる。そして、集中すると局所構造をもつより複雑で強いカオスへと変化し、リラックスすると複雑さの程度が落ちたカオスへと変化する。疲労したり、ストレスがかかる、健康度が落ちる、もしくは老化が進むとカオスの複雑な程度が落ちて、アトラクターは規則的で単純さの構造になり、リミットサイクルに近い周期状態の弱いカオスになる。健康を回復すると元のカオスに戻る。重症の老年痴呆の患者では相関次元も小さくなり、リミットサイクルを呈し、ゆらぎが消失し規則正しい機械的な振動リズムとなる。規則的で周期構造のみになれば死を意味する。

図4に示すように視調節系でも読書後の眠精疲労状態ではアトラクターは一方の極に引きつけられ、かつ、周期的な軌道となり、休憩すると可逆的に元に戻り2つの極が出現し密な軌道となる。視調節系に、例えば眼内レンズなどの疾患があるとアトラクターは単純で規則的になり、重篤な場合は無構造化する。

図6は、48才、うつ病の男性の治療に伴う指尖容積脈波のアトラクター、第1リアプノフ指数( $\lambda_1$ )、第2リアプノフ指数( $\lambda_2$ )とハミルトンのうつ状態評価尺度(Hamilton's Rating Scale, H.R.S.)の経時変化を示した。

ハミルトンのうつ状態評価尺度は、うつ症状を要素的に評価する尺度で、点数が高いほどうつ症状が強

く、症状が軽減すると低い点数となり0点は症状がないことを示す。

治療による症状改善と共に $\lambda_1$ は増加し、 $\lambda_2$ は減少し、いずれも一定値に近づく傾向を示す。健康回復と共にアトラクターの構造は弱い単純なカオスから強く複雑なカオスへと変化することがわかる。

指尖容積脈波は指先の血管運動反応に起因するため情動の微妙な変化を反映する。

母と乳幼児の指尖容積脈波を同時測定してその非言語的なコミュニケーションを調べると、母親が子供の体に手を触れると、母子のアトラクターは相似形をなし、母子が同調しあう精神状態になる。一方、実母子でない場合には非言語的な身体接触を行なっても同調傾向は生じない。このように人と人とのコミュニケーションにもカオスは関与している。

さらに、学習や認知の成立過程、体の強調運動が実現している状態では強い複雑なカオスが生じ、学習や認知が成立するとリミットサイクルに近い単純な弱いカオスに変化することがわかっている。

#### (4) 生体カオスの情報保持機能

生体カオスは普通、非一様カオスであるので、高時の情報プロセッサとして機能する。すなわち、カオスに外部から入力された情報は時間に対して線形に消失せず指数関数的に減衰する。これは、非一様カオスがその軌道に外部情報を動的に保持できることを意味する。この時、情報損失の割合はリアプノフ指数に一致する。この性質にもとづいて計算した相互情報量は被験者の身体状態や精神・心理状態に依存し変化する。

図7にローレンツカオスから指尖脈波データに正味流れた相互情報量  $I(t)$  の時間変化を示したが上記のことがはっきりと現われている。

この相互情報量の測定は実測データ間に流れた情報量の測定にも有効である。種々の状態から得たアトラクターをコンピューター上で2個ずつ結合して、アトラクター間に流れた相互情報量の時間変化を測定する。この相互情報量の時間変化の割合から、2つのアトラクター間に流れた情報の方向と時間変化量を知ることができる。

このようにして得たカオスの情報受容能力には序列があることがわかってきた。興味深いことには、指尖容積脈波の情報受容能力と健康状態の序列がよく対応する。これを図8に示した。

すなわち、健康でリラックスした状態での指尖容積脈波のカオスの情報受容能力が最も高く、集中すると低下する。病気になるとカオスの情報受容能力はさら

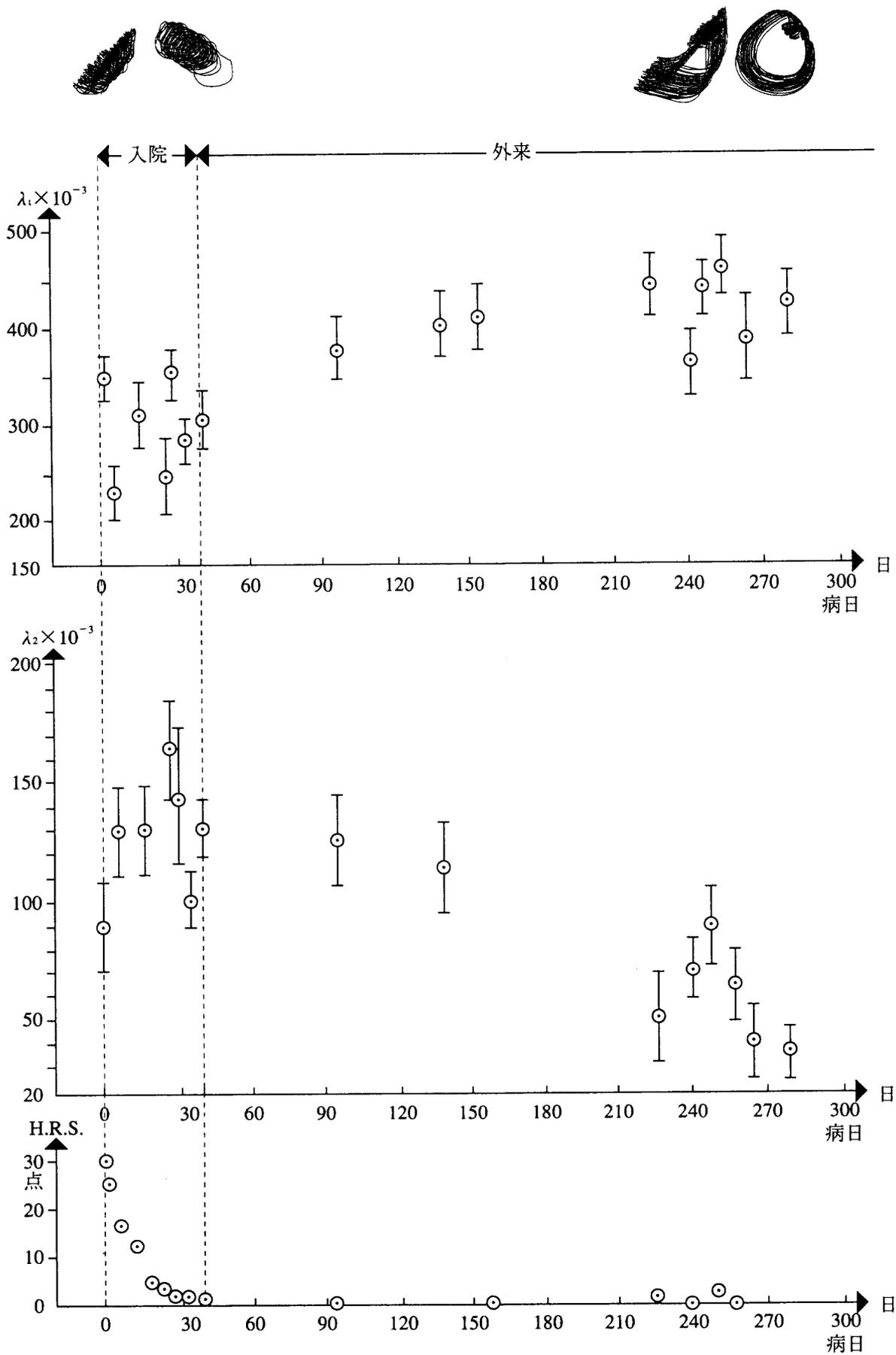


図6 治療に伴う症状変化と指尖容積脈波のカオスアトラクター, リアプノフ指数の変化

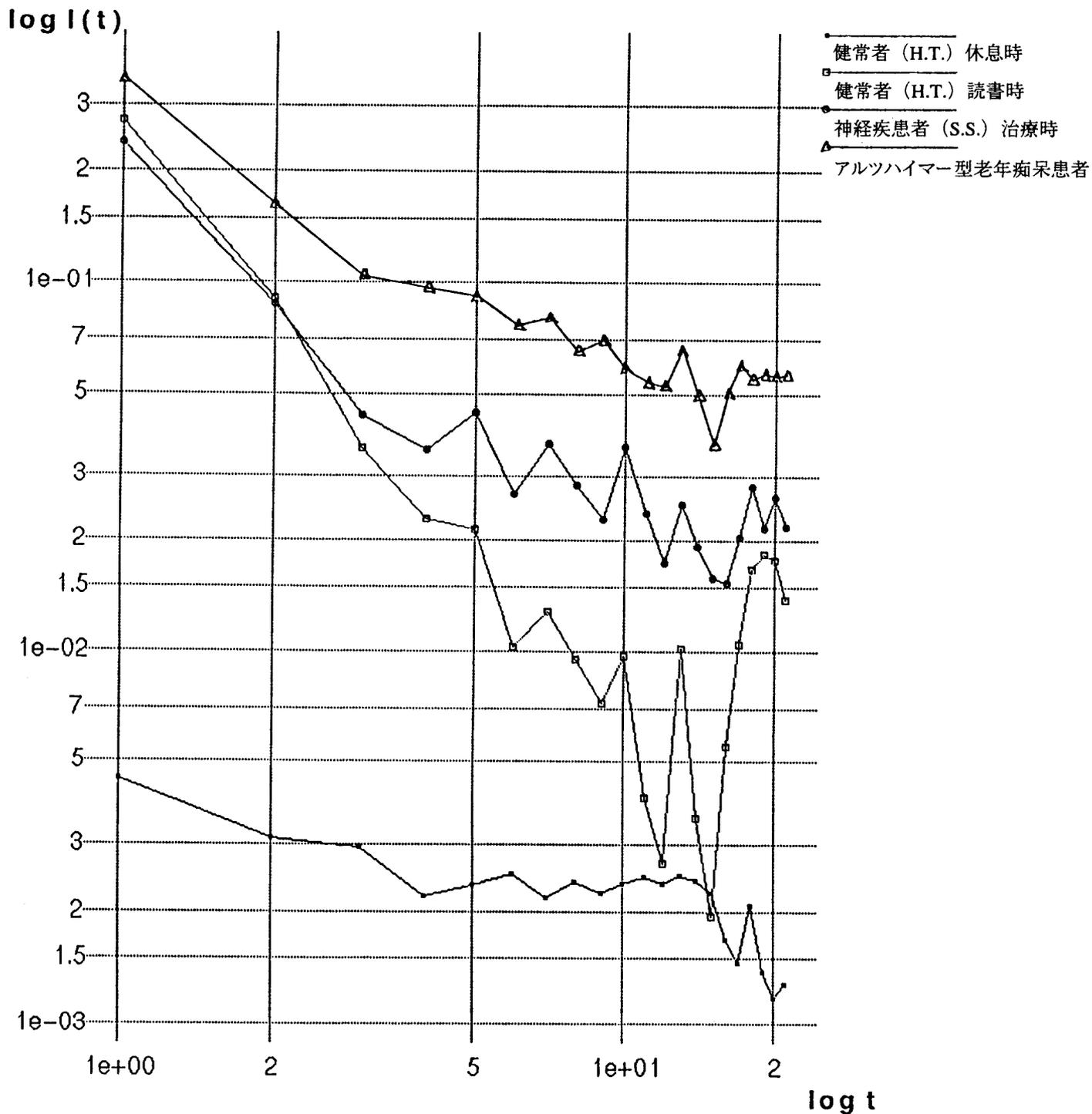


図7 ローレンツカオスから指尖容積脈波データに正味流れた情報量

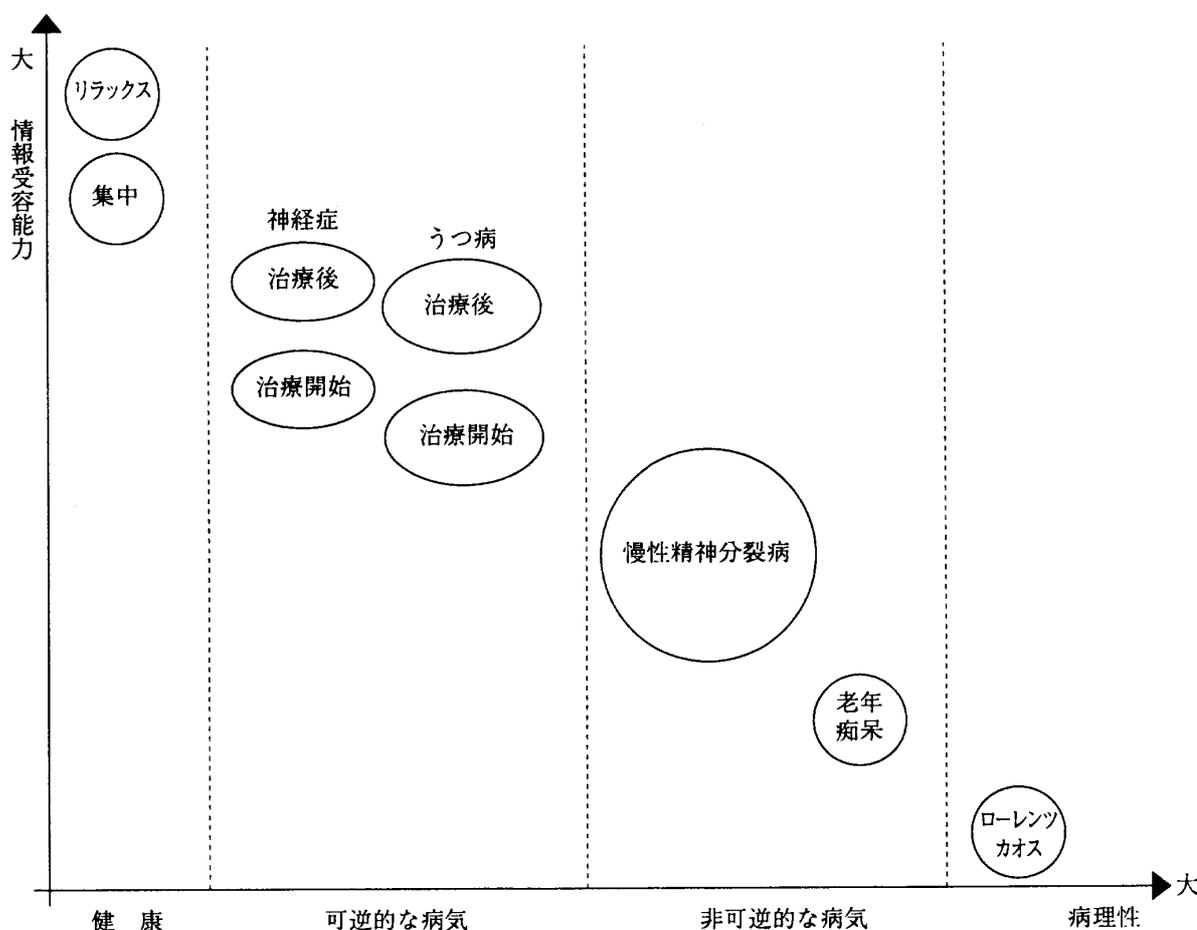


図8 指尖容積脈波カオスの情報受容能力と健康状態の対応

に低下する。それは、神経症、うつ病、ある一群の精神分裂病の順に低下し、老年痴呆は最も低い情報受容能力を示す。この序列は精神・心理的な疾病の病理性の深さの順と一致する。

病気が回復するとカオスの情報受容能力は高くなり上位の序列に戻る。悪化する、非可逆的な病気になると下位に移る。

つまり、健康な状態では構造のみならず、情報処理能力についても強いカオスを示し、健康度の低下やストレスにより、構造や情報処理能力においても弱いカオスとなるのである。

#### (5) 生体カオスの履歴による個別性の発現

上述の(3)(4)はいずれも対象の過去の履歴に依存し変化する(カオスの遍歴)。これはカオスが非線形の因果律の連鎖のなかで、一連の構造と機能を創り出してはそれを崩し、再び別の疑似的な秩序を組み立てていくことから生ずる。この履歴の多様性が対象の個別性を生み出していると考えられる。

#### 4. 生体におけるカオスの意味

多くの事例は、健康な生体はカオスに満ちており、生命の基盤には分子レベルからマクロな思考や行動のレベルまでカオスが潜み、生体の構造や機能がカオスから生まれることを示している。生体カオスの発生は決して無秩序なものではなく、あるルールをもっている。細胞や器官、心身の状態に応じた特有の振る舞いを見せ、その状態を同定する。内外の環境からゆらぎを自らの状態に引き込んだり、引き込まれたりしながら、変化に対処するために過去の履歴に従いながら生体はカオスを生成し、生体に適応性や柔軟性や学習の強化をもたらす。

#### 5. ホメオダイナミクス(Homeodynamics)の提唱

事例が示すように健康な生体から得られるデータはことごとくカオスを示す。生体が健康な時にはカオス的なゆらぎを持ち、不健康になると規則的で機械的になる。また、生体の物理過程と心理過程はそれ程明確には区別されない、これらの結果は従来の生体や健康

観に対する見方に大きな変更をせまる。

従来は、生体は一定の定常状態を維持し、基本的には変化を避け、変化に対してはできるだけそれを小さくするように働くとするホメオスタシス(Homeostasis)の概念が常識であった。この恒常性の維持は細胞などのミクロなレベルから組織や個体のマクロなレベルにまで通用するルールであり、これによって生命が維持されているという考え方である。

しかし、健康な生体から得られる事実がすべてカオスであるということは、生命維持や適応の仕組みがもっとダイナミックなものであることを示している。つまり、カオスの非定常の状態が健康であり、変化のない静的な状態や周期的、機械的リズムに向うホメオスタシスはむしろ異常な状態であると考えられる。

生体はその状態を定常的に一定に維持するよりも、比較的コントロールされた次元の低いカオス状態を恒常的に創り出している。動的なゆらぎがミクロからマクロなレベルまで積極的に生成され、これによって生命が維持し、コントロールされ、健康状態が保たれていると考えられる。そして、カオス状態を生成し維持することは、外界の変化を情報としてとり入れ、これに柔軟に対応して生体を動的に安定させる役を果す。

このような動的で協調的な生体機能の維持やコントロールを「ホメオダイナミクス(Homeodynamics)」と意識的に呼ぼうというのである。この概念は20世紀の常識であったホメオスタシスの考えを覆す新しい概念である。従来のホメオスタシスを静的恒常性の維持機構と呼ぶとすると、ホメオダイナミクスは動的恒常性の維持機構と呼ぶべき概念である。

健康な生体では、生体を外界や各器官に対して協調的かつ、創造的にコントロールするために強い複雑なカオスが生まれ、ホメオダイナミクスを実現する。生体と環境が不調和を起こしたり、病気になると弱いカオスや周期的なリズムに変わり、外界との情動的なやりとりを制限し、変化を最小限にして回復を図ろうとする。これがホメオスタシスだと考えられる。

ホメオダイナミクスとホメオスタシスはいずれも動的に変化する生体の側面であり、両者は相反するように見えるが、より総合的な視点に立つと生体の異なった状態をとらえているものと理解できる。

## 6. カオスの健康感の提唱

個体は物理的、社会的環境と絶えず相互作用し、環境に影響されるだけでなく、環境に働きかけて関係を形成する。また、個体を形成する各器官もこのような環境と個体との相互作用のなかで、それぞれ補完的

密接な関係を持ち、全体的な協調と調和を実現する。

健康とはこのように相互に依存し補完的な関係を形成する身体的、心理的、社会的、生態的側面を包含する多元的な現象である。生命体の自然なバランスには、自己主張や自立や個別性という方向とこれらと相反する統合という2つの方向が含まれる。それらのバランスがうまく統合され創造的に成長していく時、日常的にも高い幸福感が得られる。

人間は本質的には身体と精神の区別はなく、相互に依存し補完しあう統合体である。ただ、身体的な世界と精神・心理的な世界を切り離し、要素分析的で加算的な視点で理解できる側面をかなりもっているため、従来から両者を分けてきた。この要素還元的な考えは救急や急性疾患には大きな効果を発揮してきたため、身体の部分や臓器が故障なく良い機能を表わすことが健康と考えられるようになった。しかし、英語のHealth(健康)とWhole(全体)の語源的意味が同じであることが示すように、人間は各部分が相互に結びつけられた1個の生命システムである。

従って、健康とは単に臓器の故障がなく病気でないといった部分的な機能の発現ではないし、それのみを追求することでもない。身体と精神が調和しながら成長し、さらに個人をとりまく世界ともダイナミックなバランスを取りつつ調和していくことである。これは主観的な経験であり、幸せな体験である。

カオスによるホメオダイナミクスの視点に立つと健康とは、相互作用によるダイナミックな関係形成とその調和的変更であるといえる。あらゆる生命体は治癒力を持ち、崩れたバランスを回復しようとする生得的な傾向を持っているのである。

このような健康観を「カオスの健康観」として提唱している。

相互作用や関係形成、調和的変更などが円滑にすすまず、阻害されたり停留し固定される時、人は悩み苦しむ。そのひとつが不健康であり病気である。しかし、病気は危機であると共に生活のスタイルや考え方に新しい質を獲得できるチャンスでもある。ダイナミックな関係形成の状態であれば、一時的な病気の局面を通過することを糧として学習し成長していける。病気であっても人は健康に生きることができるのである。その好例は、ターミナル・ケアであり、共生の考え方である。この「カオスの健康観」は医療の発生以前から看護領域におけるケアの概念や実践に生かされており、古くて新しい概念である。

## 7. 臨床への応用

1970年代後半から80年代にかけてカオスの現象が知られるようになると、数学や物理以外の広い分野でカオスが学際的に研究されるようになった。その中で、生体に関する研究には3つの方向がみてとれる。

1つは、生体におけるカオスの本質的意味を数学的に追求する方向である。微分方程式などでモデルをたてシミュレートするなどがこの例である。第2は、生体の複雑な現象にカオスを見出し、その意味や意義をさぐる方向であり、本稿で今迄に述べてきたことがこの例である。第3は、生体カオス現象の臨床的応用である。

この第3の立場では、生体を運動と振動の場としてとらえ、病気をホメオダイナミクスの変化や破綻として理解する。健康な生体は、正常に振動するリズムを保ちながら一定のゆらぎを持っているが、病気はその系が停止したり、系の振動を担うマイクロやマクロな要素が、ある刺激や外力で異常な振動をはじめ、正常では発現しないような状態になると考えるのである。この種の疾病には、不整脈、心房細動、心筋梗塞などの心疾患、あえぎ、チェーン・ストークス呼吸などの呼吸異常などがある。白血球が規則的に増減を繰り返すタイプの白血病や赤血球、血小板、リンパ球などのバランスを崩す動的な血液異常もそうであるといわれている。また、精神・神経疾患でも、柔軟な思考や行動が失われ異常な常同行為が出現するパーキンソン病、クロイツフェルト・ヤコブ病、てんかん、そううつ病、それに精神分裂病もこのような疾患にはいると考える人もいる。精神分裂病の思考や感情や行動の柔軟性の欠如、常同行為などのパターンは、自己防衛として自閉的に安定した患者が、カオス的な柔軟性を失ったことによる身体現象と考えられる。

生体カオス現象の応用には、健康状態や病気の評価や診断、病気のコントロール、健康状態や病気の予測の3つがあげられる。

健康状態や病気の評価、診断に生体のカオス現象を利用すると単に器官としての、つまり、ハードウェアとしての体の状態だけでなく、ソフトウェアとしての心の状態やコミュニケーションのあり方も把握できるのではないかと考えられる。

指尖容積脈波、視調節系の機能、眼球運動、脳波などのカオスは心理状態やコミュニケーションやストレス状態を反映しうる。いくつかの測定装置と解析装置を組み合わせたシステム(カオス・セット)でいろいろな精神・心理状態での「カオスの形」をあらかじめ調べておく。これを対照にして、その人の精神・心理状態

やストレス状態をモニターすれば、健康やストレスの自己評価やコントロール、病気の回復の評価に使える。この臨床試験や睡眠状態の評価、手術中の麻酔の深さの評価さらに人と人とのコミュニケーションや快、不快の評価などに利用する研究がすすめられている。

また、ホメオダイナミクスやカオス的健康観に立つと、従来の病理診断に加え、病気や不健康な人の不適応行動や反応の診断が臨床的に必要になる。前者の診断は時間に独立であり後者の診断は治療と共に変化し、両者は相補的な診断体系を構成する。このような新たな診断体系による実践はすでに臨床の場で試みられ、有用性が実証されつつある。

病気のコントロールは、実験段階ではあるが興味ある結果が得られつつある。

一般にカオスが生成される時には無限個の不安定周期解が存在し、各不安定周期解にはその解から離れていこうとする不安定方向とその解に近づいていこうとする安定方向が存在する。そして、特定の不安定周期解の近傍では線形近似が成立し、線形パラメーターを制御することで、見かけ上近傍の解の流れを周期解へ収束する安定方向への流れに変えることができる。このような制御方式が米国の Ott E, Grebogi C, Yorke J. A. が開発した O. G. Y. 法であり、カオスそのものを制御する有効な方法である。

Ditto らは、ウサギの摘出心臓にウワバインを注入して不整脈をおこし、O. G. Y. 法で心臓を電気刺激した。O. G. Y. 法によると不整脈は改善され、ランダムや周期的な刺激では逆に悪化することもあった。彼らは O. G. Y. 法に改善を加え人の不整脈を制御する研究を行っている。こうした技術は、より優れたペースメーカーや除細動器の開発を念頭においたものである。てんかんの発作もこの方法で制御しようという研究がラットの脳切片で研究されている。

予測については、決定論的非線形予測の方法が代表的である。

予測不可能なカオス現象の予測は短期予測に限ってのことである。短期予測であれば、カオスの持つ決定論的因果性が残っている臨界時間以前での線形近似による予測が可能である。

この例としては、予防接種が普及する以前の麻疹の患者数の増減がカオスであり、決定論的非線形予測により1~2ヶ月先の短期予報が可能であることがわかっている。しかし、感染症の患者数変化がすべてカオスという訳ではなく、ニューヨークやセントルイス、札幌市を除いた北海道の水痘患者の変動はカオスという

より周期変化に近い。ちなみにエイズの患者数は目下のところ増加の一方で過渡的状态にあり、カオスの特徴を抽出する状態には至っていないと考えられている。

カオスを利用したこのような分析、予測の試みは患者数などの近未来の変動を予測し、予防対策などに活用できる可能性を持っている。

## 8. おわりに

筆者のカオスに関する研究は臨床医療、特に健康の自己管理や精神医療の現場からの問題意識に端を発している。精神医療では、cure と並んで care の概念がことさら重要である。精神や心ひいては体をも病む患者には、患者の能力に応じた自律と自立を促すと共に、患者と共にあるケアが重要である。

臨床現場ではそれらのあり方が常に模索され、日常的な実践を通して考察される。カオスの概念や方法、ホメオダイナミクスの概念やカオス的健康観などは、このような現場に新たな考えと方法を持ちこみつめる。

臨床ではケアする者とケアされる者が1つの系を構成する。そして、ケアする側自身が相手に影響を与える世界の中において、かつ、その介入を最小にできるようなインターフェイスを見つけることが重要である。人の情報系を反映するカオスはこのような目安になるかもしれない。

一般的には、カオスとフラクタルは非常にはっきりした関係が両者にあり、アトラクターはフラクタル構造をもつ。しかし、生体カオスに関しては、今後、多くの研究が必要である。

## 参考文献

- 1) J. グリック：カオス，新潮社，東京(1991)
- 2) 津田一郎：カオス的悩観，サイエンス社，東京(1990)
- 3) 合原一幸：カオス，講談社(1993)
- 4) N. H. Packard, J. P. Crutchfield, J. D. Farmer and R. S. Shaw : Geometry from a time series, Phys, Rev, Lett, 45, 712-715(1990)
- 5) F. Takens : Detecting strange attractors in turbulence, Lecture Notes in Mathematics, 898, 366-381, Springer-Verlag, Berlin(1981)
- 6) 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(2), 313-324(1992)
- 7) T. Sumida, T. Tahara, H. Iwanaga : A physiological significance of Shilnikov phenomenon in the focal accomodation systems of human eyes, Int. J. Bifurcation and Chaos, 4(1), 231-236(1994)
- 8) 田原孝：カオスアトラクトグラムプロセッサの開発，新医療，19(5), 35-38(1992)
- 9) 田原孝：カオスで生体機能をさぐる，エレクトロニクス，38(1), 38-41(1993)
- 10) 田原孝，岩永浩明，津田一郎：森田療法の治療過程における身体指標，(財)メンタルヘルス岡本記念財団研究助成報告集，(4), 203-207(1991)
- 11) 田原孝：森田治療の治療過程における身体指標，(財)メンタルヘルス岡本記念財団研究助成報告集，(5), 173-175(1992)
- 12) 内村英幸，田原孝：分裂病病因に関するトランスミッター研究の現況，精神医学，36(5), 563-570(1994)
- 13) 田原孝：生体におけるカオスの解析とその意義，医療情報学(医療情報学会10周年記念特集号)(1995)(印刷中)
- 14) 田原孝：医フロンティア(生体とカオス)，日本経済新聞，1994年11月2日～1995年2月22日連載，日本経済新聞社
- 15) D. Ruelle and F. Takens : On the nature of turbulence, Commun. Math, Phys. (20), 167(1971)
- 16) P. Grassberger and I. Procaccia : Measuring the strangeness of strange attractors, Physica D9, 189(1983)
- 17) A. Wolf, J. B. Swift, H. L. Swinney and J. A. Vastano : Determining Lyapunov exponents from a time series, Physica D 16, 285(1985)
- 18) M. Sano and Y. Sawado : Measurement of the Lyapunov spectrum from a chaotic time series, Phy. Rev. Lett. 55, 1092(1985)
- 19) J. P. Eckman, S. O. Kamphorst, D. Ruelle and S. Ciliberto : Lyapunov exponents from time series, Phys. Rev, A34, 4971(1986)
- 20) A. J. Mandell : Dynamical complexity and pathological order in the cardiac monitoring problem, Physica 27D, 235(1987)
- 21) K. Matsumoto and I. Tsuda : Calculation of information flow rate from mutual information, J. Phys, A : Math, Gen. 21. 1405-1414(1988)
- 22) W. Freeman : Searching for signal and noise in the chaos of brain waves, The Proceeding of the San Francisco Meeting of American Association for the Ad-

- vancement of Science, 1-10(1989)
- 23) W. J. フリーマン：臭いを識別するカオス, 日経サイエンス, 21(4), 72-81. 日経サイエンス社, 東京(1990)
  - 24) A. L. ゴールドバーガー：身体の中のカオスとフラクタル, 日経サイエンス, 20(4), 56-65, 日経サイエンス社, 東京(1990)
  - 25) A. Babloyantz and A. Destexhe : Is the normal heart a periodic oscillator ?, Biological Cybernetics 58, 203-211(1988)
  - 26) A. Babloyantz and A. Destexhe : Low-dimensional chaos in an instance of epilepsy, Proc, Natl. Acad, Sci, USA, 87, 3513-3517(1986)
  - 27) K. Aihara : Periodic and non-periodic responses of a periodically forced Hodgkin-Huxley oscillator, J. Theor. Biol., 109, 249-269(1984)
  - 28) D. R. Chialvo : Low dimensional chaos in caordiac tissue, Nature, 343, 563-657(1990)
  - 29) M. D. Markus : Chaotic dynamics in yeast glycolysis under periodic substrate input flux, FEBS Lett., 172, 235-238(1984)
  - 30) E. ott ; C. Grebogi and J. A. Yorke : Controllong chaos, Phys, Rev, Lett., 64, 1196-1199(1990)
  - 31) W. L. デイトウ, L. M. ペコラ：カオスの制御と応用, 日経サイエンス社, 23(10), 70-81, 日経サイエンス社, 東京(1993)
  - 32) S. J. Schiff et. al : Controlling chaos in brain, Nature, 370(25), 615-620(1994)
  - 33) 山田憲政：自己組織化で身体運動はどこまで説明できるか, J. J. Sports Sciences, 12(12), 811-815(1993)
  - 34) 小林小夜子：カオス理論と母子のコミュニケーション分析(平成5年度文部省科学研究費補助金研究A05710107)

田原 孝(たはら たかし)

昭和41年九州大学理学部卒業。昭和47年, 同大学院博士課程(物理化学系)修了。九州大学理学部, 久留米大学医学部教官を経て, 昭和52年大阪大学医学部編入学。昭和56年同学部卒業。プライマリーケアを経て, 昭和58年より国立肥前療養所勤務。理学博士, 医学博士, 精神科医長, 医療情報室長。カオス研究とともに医療情報システム, 看護情報システムの構築や医療評価にたずさわる。