

運動を支配する神経系にみられるゆらぎ

野崎 大地

序 -問題の所在-

身体運動のほとんどは、大脳より発した指令が脊髄の運動ニューロンを介して、効果器である骨格筋に伝達されることによって生ずる。したがって、同じ“指令”に対して同じ“効果”が発現するためには、運動ニューロン（単一の神経細胞というよりもその集合体—運動ニューロンプール）の興奮性が一定に維持される必要がある。逆に、この一定性が侵された場合、意図する運動を正確に遂行することができないという状況も起こりうる。このような動作の“安定性”は、従来体育学の分野でskillと呼ばれてきたものであるが、これは運動ニューロンプールの興奮水準に影響される。特に、運動指令の大きさが相対的に小さい場合（このときskillはfine motor skillとも呼ばれる）、もし脊髄レベルでの興奮水準に変動がみられれば、その影響は予想以上に大きいであろう。

本論文は、脊髄運動ニューロンプールの興奮性を示すとされるHoffmann reflex（H反射）にみられる変動について扱ったものである。H反射とは、Ia求心性神経に経皮的に電気刺激を与えることによって得られる単シナプス反射であり、ヒトの神経回路、機序の同定手段としても神経生理学の分野を中心に広く用いられてきた。本来、同一の測定条件のもとでは、ほぼ一定の大きさのH反射が得られるべきであるが、安静時にH反射を誘発すると、その大きさは試行の度になりに大きな変動を示す。従来、このような変動はある真値まわりの雑音とみなされ、その影響を除去するために、H反射の評価には加算平均が用いられてきた。

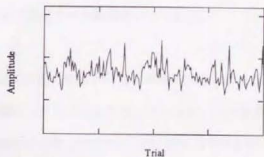
ここで疑問が生ずる。本当に加算平均によってその雑音の効果を除去できるのだろうか。そもそも、H反射の変動を雑音とみなすことは本当に妥当なことなのだろうか。

このような疑念が頭をもたげてくるのは、実は現在の科学の流れと無縁ではない。古くからの科学のやり方であるベーコン、デカルト以来の要素還元的方法のもとでは、研究対象が複雑な振る舞いをする場合、その複雑性の根源を要素に求めた。しかし、ここ20年の科学は個々の要素が単純なものであっても、その相互作用によっては非常に複雑な振る舞いを示すものがあることを指摘してきた（May, 1976; Haken, 1980; Prigogine and Stengers, 1982; 清

水, 1990; Nicholis and Prigogine, 1992)。これは逆にいえば、如何に複雑な振る舞いをみせるものがあったとしても、その背後に非常に簡単な仕組みが存在する可能性を示唆する。

確かにH反射の振幅の大きさを200回分も並べると(図I)、一見、非常に不規則にみえ、単なる雑音とみなされてしまうことも無理からぬことではある。しかし、今や、不規則ならば無意味であるとの単純な論理の展開は適切ではない。それは不規則ながらも、単なる雑音ではなく、その背後に何らかの構造あるいは秩序を有する可能性がある。

以上のような観点から、本論文が目的とするのは、H反射時系列の時間的性質を解析し、その変動が本当にランダムな雑音なのかどうか、そして雑音でないとしたらどのような性質を持ち、どのような起源からそのような性質がもたらされているのかを検討することである。



図I H反射振幅の変動

健康者のヒラメ筋より誘発したH反射振幅の大きさを200回分並べたもの

H反射テストは、現在までにヒトの神経機序の同定に頻繁に用いられてきた試験方法である。もし仮にH反射時系列の変動が時間的に意味を持つという結果が得られた場合、それが、H反射テストの評価において意味するところは非常に重大である。既に述べたように、H反射にはある程度の変動が不可避であるため、数試行の加算平均を以て評価値とする。このような手続きは、H反射の変動が時間的にランダム、あるいはほとんど時間的な相関をもたない雑音であるという前提のもとでのみ妥当といえる。

しかし、例えば、一見不規則な変動の中にはフラクタルとよばれる自己相似的な性質を持つものがある(Mandelbrot, 1983; Feder, 1988)。この性質を持った信号は、一見非常に不規

則ながらも一定の秩序を有し、そのフラクタルの性質によっては非常に長期の時間相関を持つ。そして、その時間相関ゆえに数学的に非定常とみなされることもある。数学的に非定常であるとは、その統計的性質が時刻に依存することを意味し、この場合、もはや時刻に依存しない統計的性質（平均値など）を定義することが不可能となる。すなわち、H反射時系列がフラクタルの性質を持っている場合には、変動がランダムであるという前提がもはや成り立たなくなってしまう可能性がある。

このようにH反射の変動の時間的な特性を調べることは、それが運動神経系機序の同定という重要な役割を担っている以上、重要な意味を持つものと考えられる。しかし、現在まで、H反射の変動の性質が研究対象として扱われることはなかった。それは、H反射の変動が図1に示すように非常に不規則であるために、意味のないものという既存の概念に研究者がとられていたからと思われる。H反射テストで用いられる加算平均という方法が妥当か否かの検討は本研究で検証すべき課題の一つである。

また、H反射時系列の変動が何らかの時間的な意味を持つという事実は神経生理学の分野でも重要な認識を与えることになる。この場合、従来無意味であると切り捨ててきた変動の中から、神経回路の性質、仕組みについて新たな情報が抽出できる可能性もある。古くから、一定強度の刺激によって誘発する単シナプス反射の大きさがかなりの変動をみせることは神経生理学の分野で不思議ごとの一つであった。この変動の発生機序、存在意義が議論されてきたものの、それについて完全な理解が得られているわけではない。本研究において明らかにされるH反射時系列の動的な性質は、このような問題に対しても一つの新たな視点を提供しうる。

H反射の変動は、運動ニューロンプールの興奮性の変動、あるいはもっと広義には単シナプス反射のゲインの変動を意味する。このようなレベルにおいて変動が存在する場合、冒頭にも述べたとおり、運動制御における正確さは大きく乱されることになろう。まず、運動ニューロンプールの興奮性に変動がある場合には、大脳皮質から皮質脊髄路を通じて一定の運動指令が伝達されても、その時の興奮性のレベルによって運動ニューロンプールからの出

力が変わってしまうという事態が生じる。また、Ia求心性線維から運動ニューロンへの伝達経路に変動を生じうる要因がある場合を考えよう¹。単シナプス反射経路は筋が伸張を受けると、それに抗して筋を収縮させるといういわゆるネガティブフィードバック回路を構成している。この回路にある設定値（筋長）が与えられると、回路自体のフィードバック機構により反射的にその設定値が達成されるという、サーボ機構による運動制御がかかって提唱された²ように、この回路は運動制御において重要な役割を担っている経路であると考えられている。この回路のゲインに変動があることは、そのようなフィードバック機構に大きな誤差要因を招くことになりかねない。

本研究で扱うのはこのような運動の不正確さを招来しうる、運動ニューロンプールレベルに内在するゆらぎの時間的性質である。H反射時系列の変動が単なる雑音ではないことが示されたならば、運動の不正確さはランダムに誘起されるのではないということになる。

さらに、それは、H反射の変動がもはや受動的なものではなく、より積極的な意味を持って生成されている可能性をも意味する。ヒトの運動制御は確かに厳密な意味で正確とはいえないかもしれないが、動作の多様性、融通性に富む。そして、我々は、学習によって様々な動作を習得し、外界の多様な必要性にも適応してゆくことができる。実際にヒトが生きていく上では、厳密な正確さよりも、そのような融通のきく運動制御の方がより重要ではないだろうか。本論文で実証しようとしているH反射時系列のゆらぎとは、このような運動制御を可能にしていることのあらわれなのかもしれないのである。

1 これは具体的にはシナプス前抑制の変動を意味する。シナプス前抑制については第1章を参照のこと。

2 そのような運動制御を実現させるには反射のゲインが小さすぎるため、現在では、それのみで制御が説明されるわけではなく、あくまで補助的な役割を果たしているのだという見方がなされている。しかしながら、制御にかかわる信号の大きさが相対的に小さい場合、興奮水準の変動は無視できないものと思われる。

本論文の流れ

1章では、H反射とはどのような方法なのか、またH反射を用いた運動神経系の同定、いかなる方法論上の妥当性をもって行われるようになったのかについて説明した。さらに、ヒトの神経機序の解明において、H反射テストがこれまでに挙げてきた具体的成果について触れた。

H反射の変動の性質等がほとんど調べられてこなかったのに対し、ネコなどの実験動物から誘発する単シナプス性反射については、それがかなり大きな変動を示すことが1950年代から知られており、その発生機序、存在意義が研究対象となっていた。これらの研究手法、結果は、H反射の変動を解析する上で何らかの参考になると思われる。2章では、そのような単シナプス性反射の変動についての研究を概観し、どのような知見が得られたかについて概説する。

しかし、これらの研究によって、必ずしもその変動の存在意義、発生機序が明らかにされたわけではない。そのような現状に対して、本論文では、過去の研究が見落としてきたと思われるH反射の変動の時間的な性質に着目した。H反射時系列は確かに一見不規則ではあるものの、カオス、フラクタルの概念を用いることによって、その背後に潜む何らかの秩序を明らかにできる可能性がある。これらの概念の理解は4、5、6章で必須となるため、3章で、カオスおよびフラクタルの概念について触れるとともに、実際にどのような解析を行えばこれらの性質を時系列データから抽出できるのか、具体的な方法論について説明した。

第4章では、第3章に挙げた時系列解析をヒトのH反射時系列に適用した結果を示す。その結果、H反射の変動が時間的にランダムではなく、非常に長期の時間相関を伴ったフラクタルの性質を有するという、本研究の第一の結論を述べる。さらに、運動神経への直接刺激によって得られるM波時系列が持つ性質との比較によって、それが神経の伝導特性などではなく、脊髄内のレベルで生み出された性質であることを実証する。

第4章で得られた結果および、多くの生体信号がフラクタルの性質を有するという近年の報告を考慮にいれると、そのフラクタル性が生体を統括制御している高位中枢に起源を持つものではないかという疑問が生じる。第5章では、H反射時系列のフラクタル性が脊髄上位からの入力を反映しているのではないかという仮説の検証をおこなう。この仮説を検証する

ために、被検者として、脊髄上位からの入力遮断されている脊髄損傷患者に参加してもらい、健常者についての結果と比較を行った。

第6章の総括論議では、第4、5章の結果を踏まえ、H反射の変動を、H反射テストの評価に際してどう捉えるべきかという実面的側面、そのような変動の起源、また、それが実際の運動制御において発現されるのかについての考察を行った。

本論文の内容の一部は、以下の雑誌に掲載、掲載予定である。

1. 野崎大地、山本義春。(1994) 生体の $1/t^\beta$ ゆらぎとその解析法。BME 8 (10):5-12
2. Nozaki D, Nakazawa K, Yamamoto Y (1995) Fractal correlation in human H-reflex. *Experimental Brain Research*, 1995 in press

目次

1 H反射テストとは？	1
1.1 H反射テストの妥当性	1
1.2 H反射テストによる運動神経系の同定	7
2. 単シナプス反射が示す変動	13
2.1 単シナプス反射の変動	13
2.2 H反射が示す変動の新たな捉え方	20
3. フラクタルとカオス -変動の新しい理解-	24
3.1 $1/f^{\beta}$ ゆらぎとフラクタル	24
3.2 決定論的カオス	39
4. H反射振幅の時系列が示すフラクタル性	49
4.1 目的	49
4.2 方法	51
4.3 結果	54
4.4 論議	60
4.5 小括	67
5. H反射時系列のフラクタル相関に対する脊髓上位の関与	68
5.1 目的	68
5.2 方法	69
5.3 結果	71
5.4 論議	75
5.5 小括	78
6. 総括論議	79
6.1 H反射テストの方法論の再考	79
6.2 H反射フラクタル変動の意味	81
6.3 フラクタル変動の発現	89
6.4 運動制御とのかかわり	95
参考文献	97
謝辞	106

1 H反射テストとは？

1910年、ドイツの生理学者であったHoffmannは、ヒトの脛骨神経に電気刺激を与えると下腿三頭筋に短潜時の反射性筋電図が誘発されることを発見した。彼は驚くべきことに、当時すでに、この反射性の筋活動が単シナプス性に誘発されることなど、この反射の持つ重要な特徴について指摘していた。後にMagladeryらが、この反射性の筋活動は、Hoffmannのいうように筋紡錘由来のIa求心性線維の発火によって単シナプス性に誘発されたものであることを確認した。H反射という名称は、Magladeryらが、その生理学的意義、臨床的価値の重要性から、Hoffmannの名にちなんで名付けたものである（Hoffmann reflex）。

H反射の神経生理学の分野における重要性は、単シナプス性に誘発されるがゆえに、その大きさを脊髄運動ニューロンプールの興奮性を示す指標として用いることができる点にある。しかも、電気刺激自体、被検者に対して苦痛を与えないものであり、意識を鮮明に保ったヒトのシナプス機序を容易に測ることができる。実際、ここおよそ30年の間にH反射テストによって、多くの新たな知見が得られることになった。

本章では、まず、H反射テストがいかなる妥当性をもって神経機序の同定に用いられるようになったのかについて、その歴史に触れながら概観する。その後、このテスト法がヒトの運動に関わる神経機序解明にどのような役割を果たしてきたのかについて総説する。

1.1 H反射テストの妥当性

(1) H反射の発見

1910年にHoffmannは、ヒトの脛骨神経に経皮的に電気刺激を加えると、下腿三頭筋に収縮が起こることを報告した。電気刺激装置、増幅器等が十分でない、さらには神経伝導速度に関する知見も十分でない時代で、彼はすでに、この収縮について以下のような知見を述べている（田中, 1986）。

①反射時間は約30msであり、おそらく単シナプス性に誘発されるものである。

②随意収縮をおこなうと、反射が大きくなる。

③拮抗筋の収縮によって反射が抑制される。

Hoffmannによるこれらの知見のうちで最も重要な①は、1950年代にはいつ、Magladeryらによってようやく確かめられた (Magladery, 1955)。彼らは発見者であるHoffmannの名にちなんでこの反射をHoffmann reflex (H反射) と命名した。彼らの研究によって、Hoffmannが発見したH反射を、神経機序の同定、あるいは臨床検査の手段として用いるための信頼性、妥当性を証明する基礎が築かれた。

(2) H反射の発生機序と神経生理学における重要性

脊髄灰白質の第7層には、四肢の筋を支配する運動ニューロンプールが存在する。これらの運動ニューロンプールは、それ自体が支配する筋、すなわち同名筋の筋紡錘に由来するIa求心性線維から単シナプス性の興奮性入力を受ける (図1-1)。筋紡錘が伸ばされると、その一次終末に活動電位が生じ、Ia求心性線維を介して脊髄内に伝達される。この求心性入力、運動ニューロンの活動電位を促し、筋が反射的に収縮する。以上のように、この回路は筋の伸張に抗して働く反射回路であるため、単シナプス性の伸張反射回路と呼ばれる。臨床検査で、膝蓋骨直下にある大腿四頭筋の腱をハンマーで叩くと、膝関節が無意識のうちに伸展するのはこの反射回路が作動する例である。生理学的条件では、このように筋が急激な伸張を受ける場合に伸張反射回路が顕著な作動をおこなう。単シナプス伸張反射回路は筋が伸張を検知すると、反射的にそれに抗して筋が収縮するという一種のネガティブフィードバック回路を構成している。

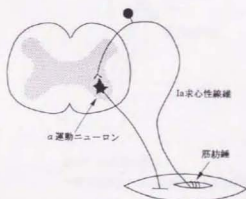


図1-1 伸張反射回路

筋の伸張は筋紡錘によって検知され、Ia求心性線維を通して、脊髄α運動ニューロンに伝達される。その結果、α運動ニューロンに活動電位が生じ、筋が収縮する。

H反射とは経皮的にIa求心性線維に電気刺激を与えることによって、この反射回路を人為的に作動させて得られる反射である(図1-2)。筋より表面筋電図を導出すると、刺激に対し潜時30msで、図1-3に示すH波と呼ばれる波形が得られる。通常、反射の大きさの評価値として、H波の振幅の大きさ、あるいは波形を全波整流したものの面積が用いられる。

H反射の重要性は、それが単に人為的に誘発することのできる反射であるという点にあるのではない。脊髄運動ニューロンプールには高位中枢、あるいは脊髄分節性の入力が多数収束しており、その興奮性は身体に課された状態に応じて変化するものと推測できる。運動神経系に生ずる現象の機序解明には、この変化を如何にして測定するかが重要となるが、通常この変化は閾値下で起こるため、直接測定することは不可能である。ところが、Ia求心性線維に電気刺激を与えてやると、この閾値下の変化は、閾値上の変化、すなわち反射の大きさの変化として反映されることになる。つまり、ある強度の電気刺激をIa求心性線維に与えた場合、運動ニューロンプールの興奮性が低ければ誘発される反射の大きさは小さく抑えられ、逆に興奮性が高ければ誘発される反射は大きくなる。H反射が誘発できることの重要性とは、このような理屈によって、運動ニューロンプールの興奮性の変化を明らかにできることに他ならない。

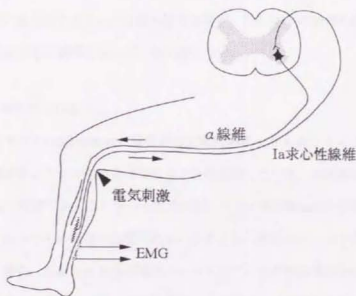


図1-2 H反射の誘発

下腿三頭筋よりH反射を誘発する方法を示す。膝窩部にある脛骨神経に経皮的に電気刺激を与えると、Ia求心性線維に活動電位が生じ脊髄α運動ニューロンプールの興奮を誘発する。脛骨神経は混合神経であり、電気刺激の際、運動神経線維(α線維)も同時に刺激されることに注意。

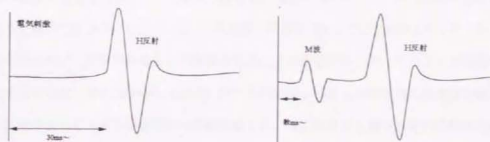


図1-3 H波とM波

1 MT以下の強度ではH波のみ（左図）、1 MT以上の強度ではM波が同時に誘発される（右図）。M波は運動神経線維に電気刺激が直接与えられることによって誘発される。

例えば、H反射を他の条件刺激と組み合わせれば、運動神経系の結合パターンを特定することは容易である。ある神経線維が運動ニューロンとどのような結合を持つのかを知りたいとしよう。その神経線維に電気刺激を与えたときに、H反射の大きさが抑制されれば、おそらくそれは運動ニューロンに対して抑制性の結合を持ち、逆に促進されれば興奮性の結合を持つものと結論できる。しかもH反射の誘発法自体が苦痛を伴わない非侵襲的な方法であるため、ヒトにおける神経機序を探ることができ、さらにそれは運動課題を与えたときの遂行過程にさえ適用できる。H反射テストという方法がなければ、このような運動神経系の仕組みを探るには、動物実験や解剖学、筋電図（これは運動ニューロンプール興奮性の閾値上の変化を示す）などのアプローチを取らざるを得ず、特にヒトの神経回路、神経機序に関する知見の獲得は非常に困難になっていたに違いない。

（3）H反射テストの妥当性

1910年代すでにHoffmannは、脛骨神経に電気刺激を与えることによって得られる下腿三頭筋の収縮が単シナプス性のものであることを主張していた。H反射を運動ニューロンプールの興奮性の指標であることをいうためには、それがHoffmannの主張のように、単シナプス性反射であることの確認が必要である。なぜなら、介在ニューロンを介した多シナプス反射だとした場合、反射の大きさが運動ニューロンプールの興奮性ばかりでなく、介在ニューロン群の興奮性の影響も含むことになる。その場合、H反射の大きさの変化が、筋を支配する運動ニューロンの調節に関連したものであるとは断定できまい。一方、H反射が単シナ

プス性の反射であるならば、その大きさの変化は、運動ニューロンプールに調節が及んだ結果であると断定できよう。したがって、神経機序の同定手段としての妥当性を示すためには、H反射が単シナプス反射であるという確認を得ることが必要であった。このような問題を明らかにするために、Magladeryら（1955）はヒトの腰椎レベルの脊柱管内に針電極を刺し、H反射誘発によって生ずる活動電位を直接記録した。求心性電位と遠心性電位の潜時の時間差は、第一腰椎レベルで1.5msであり、それに神経の伝導時間を考慮した結果、中枢性潜時が0.9msであることを報告した。その結果から、彼らは遠心性電位が単シナプス性反射によるものであると結論づけた。

しかしそれでもなお、Ia求心性線維は直接運動ニューロンに投射するのみならず、介在ニューロンを介して乏シナプスな経路によって運動ニューロンに影響を与えているという報告もある（Burke et al., 1984）。さらに電気刺激はIa求心性線維のみを選択的に発火させるのではなく、腱紡錘由来のIb求心性線維や皮膚感覚神経にも影響を与えている可能性も指摘されている（Pierrot-Deseilligny et al., 1981b; Burke et al., 1983）。ただし、Ia求心性線維からの入力によって運動ニューロンに発生するシナプス後電位（EPSP）が立ち上がる速度は、非常に素早く（2ms以内）、このような短時間の間にはIa求心性線維以外からの入力は加重されないとはいえと考えられており、現在のところH反射テストの妥当性を否定するにはいたっていない（田中, 1986; Schieppati, 1987）。

これまで、H反射が単シナプス性の反射であり、したがって、ある一定の電気刺激を加えることによって得られる反射の大きさが運動ニューロンプールの興奮性を表すという議論をおこなった。これは入出力に影響を与えうるのが運動ニューロンプールへの直接の入力である（シナプス後における効果）という前提に立ったものである。しかし、運動ニューロンプールへの入出力関係を変化させる機構として、シナプス後への効果のみではなく、1961年にEcclesらによって発見されたシナプス前抑制の関与も考慮する必要がある。

この抑制はIa求心性線維終末に働き、神経伝達物質の放出量を減少させる（Rudomin, 1990）。通常のシナプス後抑制がニューロン自体の興奮性に抑制効果を及ぼすのに対し、シナプス前抑制はある求心性線維からの入力を選択的に抑制できる点に特徴がある。したがって、Ia求心性線維に働くシナプス前抑制の度合いが変化すると、運動ニューロンプールの興

興奮性が一定であってもH反射の大きさは変化しうる（図1-4）。このような抑制の関与を考えると、H反射の大きさの変化が運動ニューロンプールの興奮性の変化と必ずしも一対一に対応するわけではないことが理解できよう。いずれにせよ、H反射の大きさの変化がIa求心性線維→運動ニューロンプールという単シナプス性の伸張反射経路に何らかの変化が生じた、あるいは調節が及んだことを示すことは明らかなのではあるが、このような種類の抑制の存在は、H反射を神経機序の同定に用いる場合、その大きさの変化がシナプス前、後のどちらの効果によるものかを注意深く検討する必要性を意味する。

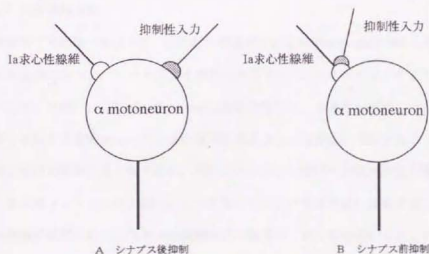


図1-4 シナプス後抑制とシナプス前抑制

シナプス後抑制は α 運動ニューロンの細胞体にIPSPを生じさせるのに対し（A）、シナプス前抑制はIa求心性線維終末に働き、伝達物質の数を減少させることによってIa求心性線維からの活動電位の伝播を抑える（B）。シナプス前抑制は、 α 運動ニューロンプールの興奮性とは無関係に、Ia求心性線維からの入力を選択的に抑制する。

1.2 H反射テストによる運動神経系の同定

以上に示したようにH反射を単シナプス性反射とみなしてよいことが、系統だった実験によって確認されてきた。また、その誘発経路の特定があつてこそ、H反射が脊髄内のシナプス機序を特定できる方法として確立することにつながったことを前節で述べてきた。H反射テストが神経生理の分野で重要視されるのは、何といっても、ヒトにおける神経機序を探ることができる点にある。また、運動ニューロンプールに対する高位中枢からの入力をも評価できることは、それ以外の決定的な方法がない以上、その重要性をさらに強調するものといえよう。本節では、主にヒトの運動神経系の仕組みの同定にH反射テストがいかなる寄与を果たしてきたのかについて、いくつかの具体例を挙げていくこととする。なおこれらの点については、Schieppati (1987) や Dietz (1992) の総説に詳しい。

(1) 相反神経支配

前節ですでに述べたように、H反射の発見者であるHoffmannは1918年の段階で、前脛骨筋の収縮をおこなうと、ヒラメ筋より誘発されるH反射の大きさが減少することに気づいていた(田中, 1986)。これは、Sherrington卿が提唱した、主働筋が収縮しているとき、その拮抗筋を支配する運動ニューロンは中枢神経系によって能動的に抑制されるといういわゆる相反神経支配の原理の具体例である。拮抗筋のIa求心性線維への電気刺激が主働筋運動ニューロンを介しニューロンを1個介して(すなわち2シナプス性)に抑制するという相反神経支配の機構が確認されたのはネコの実験からであるが、H反射を用いることによって、このような機構がヒトにおいても実際に存在することが示された。Dayら(1984)らは、ヒトの橈骨神経に条件刺激を加えると、手首の屈筋群から誘発されるH反射が相反抑制を受けることを示した。Rothwellら(1984)は、大脳皮質への電気刺激によって前腕屈筋群のH反射を促進させた場合、その拮抗筋のH反射が抑制を受けることを示した。これは脊髄上位からの入力为主働筋の α 運動ニューロンに収束すると同時に、一方で拮抗筋を抑制するIa介在ニューロンにも収束することを意味している(図1-5)。

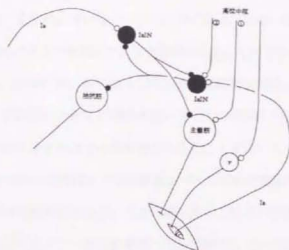


図1-5 相反神経支配

拮抗筋由来のIa求心性線維は、主働筋を抑制するIa介在ニューロンに興奮性の入力を与える。また、高位中枢からの指令は主働筋運動ニューロンに収束するだけでなく、拮抗筋を抑制するIa介在ニューロンにも収束する(②)。図中の○は興奮性、●は抑制性の結合、IaINはIa抑制性介在ニューロンを示す(Schieppati, 1987を改変)

また、下肢の筋群についてみると、例えば、ヒラメ筋から誘発されるH反射の大きさは、前脛骨筋を随意収縮させると短潜時の抑制を受ける(Tanaka, 1972; 1974)。さらに興味深い事実として、前脛骨筋を収縮させると、前脛骨筋から筋電図が発現する以前に(70~80ms前に)、ヒラメ筋のH反射の大きさが減少、すなわち前脛骨筋からヒラメ筋への相反抑制が強化されるという(Tanaka, 1983)。また、近年、主働筋-拮抗筋間の相反抑制が、対側のIa求心性線維への条件刺激によって強化されるという知見も得られてきた(Delwaide and Pepin, 1991)。

(2) 起立、歩行、走行

歩行中、下腿三頭筋から誘発されるH反射の大きさはステップサイクルにわたって、大きな変化を示す。それは、立脚期の最後にその大きさは最も大きくなり、遊脚期、および立脚期初期には逆に小さく抑えられる(Capaday and Stein, 1986)。立脚期の最後にH反射の大きさが大きくなることは、伸張反射回路のゲインが増加が足部が地面を蹴るときに補助的な役割を果たしていることを示す。また、遊脚期から立脚期初期にかけてそのゲインが小さく抑えられることは、足関節の背屈に伴う下腿三頭筋の伸張によって伸張反射が誘発されないよ

うに制御されていることを示している。大腿四頭筋から誘発されるH反射は、足の接地と同時に大きくなり、立脚期にはいと徐々に小さくなる (Dietz et al., 1990)。これは、接地時に伸張反射回路のゲインを高めて、体重保持に貢献しているものと考えられている。また、CapadayとStein (1986) は、歩行および起立時にH反射を誘発し、バックグラウンドの筋電図の大きさと、H反射の大きさの関係を調べた。その結果、同じ筋電図レベルに対して、H反射の大きさが歩行中にかなり小さく抑えられることを示した (図1-6)。同様に、Morinら (1982) は、歩行中の立脚期と同じ筋電図レベルの収縮を随意的に行っても、H反射の大きさは随意収縮中の方が大きくなることを報告した。これらの報告は、伸張反射回路のゲインが単に α 運動ニューロンプールの興奮性レベルに依存しているのではなく、歩行中にはシナプス前抑制がIa求心性線維に大きく影響していることを示すものである。

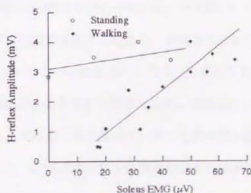


図1-6 歩行および起立中のヒラメ筋のバックグラウンドEMGとH反射の大きさの関係
○は起立中、◆は歩行中。同じEMGレベルに対して、誘発されるH反射の大きさは起立時の方が大きい。これは歩行中に強い強いシナプス前抑制がIa求心性線維終末に働いているものと理解できる。(Capaday and Stein, 1986を改変)

一方、走行中には、H反射は歩行中に比べ抑えられる (Capaday and Stein, 1987)。このようなH反射の大きさの減少が、単に運動速度、運動ニューロンプールの興奮度の変化でないことは、Edamuraら (1991) の研究結果が実証している。彼らは走行と歩行がオーバーラップする程度の速度でH反射を誘発しても、やはり走行中の方がH反射の大きさが小さいことを報告し、伸張反射経路がロコモーションの形態によって異なった調節を受けていることを示した。

Pierrot-Desceignyらのグループは、腓腹筋由来の求心性線維に電気刺激を加えると、大腿四頭筋から誘発されるH反射の大きさが短潜時では促進を受け (Ia求心性線維由来)、引き続き抑制を受ける (Ib求心性線維由来) ことを明らかにした (Pierrot-Desceigny et al., 1981a)。さらに、これらの効果のうち、Ib求心性線維による抑制効果は、同側の皮膚感覚性の神経線維 (腓骨神経) の電気刺激によって消失する (Pierrot-Desceigny et al., 1981b)。一方、対側への皮膚感覚刺激は、Ib求心性線維による抑制効果を強化する。これらの結果を前述の歩行中のH反射の大きさの変化と対応させてみると面白い。すなわち、立脚期において足関節伸筋群は受動的な伸張を受ける。その際、Ia求心性線維からの入力は大腿四頭筋の運動ニューロンの興奮性をさらに高め、体重の保持に貢献する。一方、Ib求心性線維の大腿四頭筋運動ニューロンへの抑制的な入力は、足部に皮膚刺激が加わっているために抑制され、Ia求心性線維による促進効果を阻害しない。遊脚期には、対側の足底部からの皮膚感覚性の刺激によって、大腿四頭筋運動ニューロンの興奮性は抑制を受ける。これらの研究は、ヒトの二足歩行では、足関節伸筋群と膝関節伸筋群が協同筋群として働くとともに、皮膚感覚神経さえもそこに貢献していることを示す興味深い例である。

H反射テストは、他の方法と相補的に用いられ、それによって神経機序の特定が行われる場合もある。例えば、走行中に筋が伸張されることによって反射性に生ずる筋電図の大きさ自体は、安静時にそれと同様な速度で受動的に伸張を受ける場合に発生する筋電図の大きさより大きい。ところが、走行中、H反射の大きさは安静時よりも抑制される (Capaday and Stein, 1987)。この一見相反する2つの実験結果は、伸張反射の増大が動的な γ 運動ニューロンの相動性の活動によるものであることを示唆する (Prochazka, 1989)。

(3) 随意運動

ヒラメ筋運動ニューロンプールの興奮性は、随意収縮以前に既に変化するものとされてきた。この興奮性の変化が運動自体に関与しているのか、運動の準備に関与しているのかを調べるために研究者は次のような実験系を組んだ。

合図にあわせて片側の足底屈をおこなう。その際、合図の前に予告信号を与える試行をランダムに与える。予告信号がない場合、収縮をおこなう側のヒラメ筋のH反射の大きさは合図の前に既に増加する (Schieppati et al., 1986)。対側のヒラメ筋のH反射に変化はない。したがって、収縮側のH反射の増加は、合図の予期に関連したものであるとされた。予告信号を与えた場合、その信号の後、両脚のH反射に小さく短時間の促進が認められる。その後、合図が近づくにつれ、対側のH反射が促進されたままなのに対し、収縮側のH反射の大きさは平常時まで回復あるいはそれよりも抑制される (Gerilovsky et al., 1983)。

合図後には、収縮側のH反射は急激に増大する。この増大は、筋電図が生ずる50~80ms前にすでに観測される。これらの予期時間、および随意収縮初期にみられるH反射の変化は主にシナプス前抑制に関与していると考えられている。Hultbornら (1987a) はH反射テストに条件刺激を組み合わせることで、ヒトのシナプス前抑制を調べるための新しい測定法を開発した。彼らは、この方法を用いて足底屈時に、ヒラメ筋の伸張反射のゲインが増大し、逆に大腿四頭筋の伸張反射のゲインが抑制されること、そしてそれはシナプス前抑制によって達成されるものであることを報告した (Hultborn et al., 1987b)。また、このようなシナプス前抑制の脱抑制作用による主働筋の伸張反射回路のゲインの増大は、筋の収縮がある程度続くと中枢性に消失し、長時間高いゲインを保つことによりフィードバック系が振動状態に陥らないようになっていくという (Meunier and Pierrot-Deseilligny, 1989)。これらの実験結果は高位中枢がシナプス前抑制を用いて、より選択的な筋収縮を達成できることを示した例である。

H反射テストは以上に挙げた例のように、ヒトの神経回路の同定に多大な貢献を果たしてきた。このようにH反射テストが神経生理学の分野で重要な方法となったのも、それが単シナプス反射であることの確認が十分になされてきたからである。なぜならば、繰り返し強調

してきたように、その場合のみ、H反射の大きさの変化を単シナプス性の伸張反射回路経路に作用が働いたことの帰結であると特定できるからである。

H反射テストが様々な条件を課したときに、安静時（コントロール）に比べて、その大きさがどう変化するかを調べるものである以上、その第一の前提は、Ia求心性線維へ与える刺激強度、条件が同一であれば、誘発されるH波の振幅の大きさもほぼ一定の値を示すということであろう。しかし、実際にはH反射の振幅の大きさはかなりの変動を示す。したがって、このような変動の影響を軽減させるために加算平均などの処理をとるのが慣例となっている。H反射が変動を示すことが不可避である以上、その変動の統計的性質、あるいは発生機序などを十分に検討しておくことは方法論的にも重要であると考えられるが、この点を検討した研究は、H反射の誘発機序に関して詳細に研究が行われてきたのとは対照的に、ほとんど行われていない。その一方で、かなり以前より、一定強度の電気刺激によって誘発される単シナプス反射がかなりの変動を持つことが知られ、その変動が何に起因していてどんな意味を持つかが研究の対象となってきた。H反射の変動について取り扱った研究報告がない以上、単シナプス反射の変動を扱った研究が何らかの指針を与えてくれるはずである。本章では、単シナプス反射が示す変動を扱った研究報告を概説する。

2. 単シナプス反射が示す変動

H反射テストとは、例えば、ある神経線維への条件刺激を加えたときに、H波の振幅がコントロール時（すなわち条件刺激を与えない場合）に比べてどう変化するかによって、その神経とH反射を誘発している筋の運動ニューロンプールとの結合状態を同定する方法であることは1章で既に述べた。この反射が単シナプス性の反射弓を介して誘発されるという事実が実験によって確かめられている限り、H反射テストの方法としての妥当性は疑いようもない。

しかし、ネコなどの実験動物を用いて行った研究では、単シナプス性反射の大きさは刺激強度が一定であってもかなりの変動を示すことが知られており、神経生理学の分野ではこの変動に何の意味があるのかについて古くから興味が持たれてきた。H反射も同一の反射弓を持つので、当然のことながらその大きさは変動する。H反射に変動が不可避であるということとは、それが持つ意味はさておき、その大きさいかによっては微小な大きさの変化を検出できないという、方法論自体の欠点にもつながろう。ところが、このような変動については、その不規則性のためか単なる雑音とみなされ、無意味なものと切り捨てられるのが普通で、それ自体を詳しく検討した研究報告はない。H反射がその発生機序という点に関して多くの研究が行われ、その方法論としての妥当性が確認されたのと同様に、その変動自体についても検討が加えられる必要があるのではないだろうか。

本章は、以上のような観点から、H反射の変動を考える上での参考とするために、単シナプス性反射に内在する変動についての研究報告について概観する。

2.1 単シナプス反射の変動

「単シナプス反射は、刺激強度が一定であっても、その大きさは試行ごとにかかなりの変動を示す。」このような事実は、すでに1950年代に報告されていた (Hunt, 1955; Lloyd and

McIntyre, 1955; Rall and Hunt, 1956)。なお、ここでいう単シナプス反射とは、ネコなどの実験動物を用いたもので、H反射のように経皮的な電気刺激を与えることによって誘発される反射の大きさを表面筋電図によって評価するやり方は異なり、直接Ia求心性線維に電気刺激を加え、反射成分についても直接運動ニューロンの軸索から測定したものを指す。H反射と比べた場合、刺激を与える際に皮膚を介さないこと、あるいは評価が筋電図のように間接的なものでないことから測定誤差その他の影響を受けにくく、反射回路の入出力関係をより正確に反映しているものと考えられる。誤差の要素が比較的少ないと考えられる単シナプス性反射にさえ大きな変動がみられることを考えれば、H反射が同程度の変動を示すとしても驚くにはあたらない。

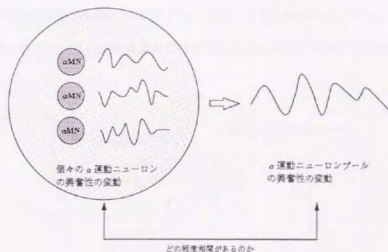


図2-1 運動ニューロンプールの興奮性と個々の運動ニューロンの興奮性の関係

個々の運動ニューロンの興奮性の変動を、マクロにみると運動ニューロンプール興奮性の変動となる。単シナプス反射の変動を扱った研究は、この両者にどの程度相関があるのかに着目した。

まず、単シナプス性反射が示す変動に対する疑問点は、それが（反射の大きさの変動は運動ニューロンプールの興奮性の変動を示している）、個々の運動ニューロンの興奮性の変動とどの程度相関があるのかということであった（図2-1）。1955年にHuntは、断頭したネコの腓腹筋のIa求心性線維に電気刺激を与え単シナプス性の反射を誘発し、反射の大きさの分布を調べた。その結果、それがほぼ正規分布をなすことを示した（図2-2）。反射の大き

さが近似的に、活動する運動ニューロンの数を表すものだとすれば、その刺激強度に対し、常に活動を誘発される運動ニューロンの数（これを firing index 100 の運動ニューロン（その刺激強度に対し 100% 発火するという意味）と呼ぶこととする）は、反射の大きさの最小値（ \approx ニューロンの数）と同じか、あるいはそれよりも少ない。また同様に、その刺激強度に対し、一度でも誘発されることのある運動ニューロンの数は、反射の大きさの最大値と同じかそれよりも多い。もし、個々の運動ニューロンと運動ニューロンプールの変動に完全に相関があれば、運動ニューロンプールの反応の最小値と、firing index 100 の運動ニューロンの数は一致する。逆に完全に相関がない場合、firing index が中間の値を取る運動ニューロンが発火するか否かは全くの偶然に従う。その場合、反射の大きさのレンジ（最大値-最小値）は、相関がある場合に比べて小さいはずである。彼は、反射の大きさのレンジ（最大値-最小値）が予測される値（Lloyd and McIntyre, 1955）よりも小さいことから、運動ニューロンプールと個々のニューロンの興奮性の変動の間に完全な相関があるわけではないと結論づけた。

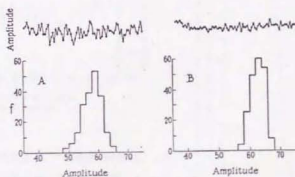


図2-2 単シナプス反射の変動と、反射振幅の度数分布

断頭したネコの脚腹筋より誘発したもの。Aはコントロール、Bは ryanesin を投与時の時系列。（Hunt, 1955より引用）

Lloyd and McIntyre (1955) は、刺激強度を変えたときに発火する運動ニューロンの数を反射の大きさと近似し、その累積度数分布をつくった。この分布をもとに、ある刺激強度に対して個々の運動ニューロンがどのくらいの確率で発火するのかわかる“firing index”を調べると、その分布が図2-3に示すようなU字型を示すことを報告した。ある刺激強度に対し、個々

の運動ニューロンと運動ニューロンプールの興奮性が完全に相関しているならば、個々の運動ニューロンの“firing index”は0か100の値をとるはずである。これは、刺激強度が一定でなく、変動していたとしても正しい。ところが図2-3に示すようにその中間の“firing index”を有する運動ニューロンが少なくながらも存在することは、個々の運動ニューロンに特有の興奮性の変動が存在すること、つまり運動ニューロンプール全体の興奮性と相関のない変動成分が存在することを示している。また、単シナプス性反射の変動の分布について、Hunt同様、それが正規分布であることについて言及し、それゆえに反射の大きさの評価を平均値を以ておこなうことの妥当性を明言している。

さらに、Hunt (1955) は、介在ニューロン群の活動を薬理遮断 (Myanesin) すると、単シナプス反射の変動が劇的に小さくなることから (図2-2)、変動が運動ニューロンに収束する脊髄介在ニューロン群の活動を反映したものであるとの見解を示した。

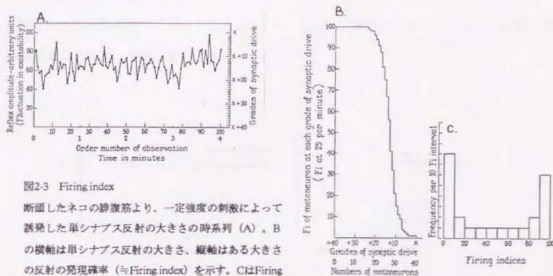


図2-3 Firing index

断頭したネコの静置筋より、一定強度の刺激によって誘発した単シナプス反射の大きさの時系列 (A)。Bの縦軸は単シナプス反射の大きさ、横軸はある大きさの反射の出現確率 (与Firing index) を示す。CはFiring index ごと の度数分布を示す。(Lloyd and McIntyre, 1956より引用)

ただし、Huntの実験結果を説明する仕組みとして別の機構も考えられる。Rudominらの研究グループは、変動を説明するものとして、Huntがいうようなシナプス後の効果だけでなく、シナプス前の効果も考えられるとし、どちらの機構がより変動に寄与しているのかを詳細に調べた (Rudomin and Dutton, 1967; 1969a; 1969b; Rudomin et al., 1969; Rudomin and Madrid, 1972; Rudomin et al., 1974; 1975)。もちろん1章で述べたように、シナプス前抑制

の存在が哺乳類で初めて確認されたのが1961年のことであるから、Huntがこのような機構について触れなかったのも無理はない。RudominとDutton (1967) は脊髄ネコの腓腹筋より誘発した単シナプス反射に、2種類の条件刺激を加えその効果を観察した。1つは腓骨神経への刺激で、これはシナプス前抑制の効果を腓腹筋のIa求心性線維に対してもたす。もう1つはPL-FDHL (plantaris flexor digitorum et hallucis longus) 由来の求心性神経線維への刺激で、これは腓腹筋運動ニューロンプールに対してシナプス後抑制の効果をもたらす。その結果、シナプス後抑制をかけても、反射の大きさの変動の大きさは小さくならないのに対し、シナプス前への効果によって、変動が小さくなることを示した(図2-4)。また、腓骨神経(皮膚感覚神経)への刺激や屈筋群由来のI群求心性線維に条件刺激を加えても、変動が小さくなることを報告した(Rudomin and Dutton, 1969a; Rudomin et al., 1974)。以上の結果から、彼らは、単シナプス性反射の変動の一部はシナプス前のレベルで生じていると結論した。また、彼らは得られた反射の大きさの変動が、個々のニューロンがランダムに変動していると仮定した場合の反射の変動よりも大きかったことから、個々の運動ニューロンの変動の間には相関があるという推測を行った。

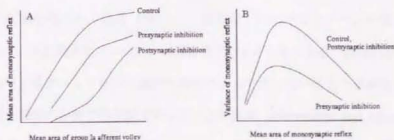


図2-4 単シナプス反射の変動に及ぼす条件刺激の効果

ネコの腓腹筋より誘発した単シナプス反射の大きさは、シナプス後抑制(PL-FDHLへの刺激)、シナプス前抑制(腓骨神経への刺激)によって減少する(A)。ところが、反射の大きさと分散の関係を見ると、シナプス後抑制は影響しないのに対し、シナプス前抑制は分散の大きさを減少させることがわかる(B)。(Rudomin and Dutton, 1967を改変)

さらにRudominとDutton (1969b) は、運動ニューロンに電気刺激を直接与えることによってIa求心性線維終末に生ずる逆行性の活動電位の変動が、運動神経線維から得られる順行性の活動電位の変動よりも大きいこと、また、その変動の大きさが、屈筋群のI群線維に

対する条件刺激や、pentobarbital投与によって減少することを報告した。これらの結果から、Ia求心性線維終末の脱分極 (Primary Afferent Depolarization: PAD) を引き起こす複シナプス経路のバックグラウンドの活動によって、単シナプス反射の変動が生じているものと結論した。

また、複数の運動ニューロンの興奮性と運動ニューロンプールの興奮性を記録し、条件刺激、薬理適用によって生ずる変動の大きさの減少は、個々の運動ニューロン間の興奮性の相関が失われることによって起こることを報告した³ (Rudomin et al., 1969; Rudomin and Madrid, 1972; Rudomin et al., 1975)。そして、個々の運動ニューロン間に相関が存在するのは、シナプス前抑制を引き起こす介在ニューロン群のコヒーレントな活動によるものと結論づけた (Rudomin et al., 1975)。

最近になって、Gossardら (1994) は、単シナプス性反射の大きさの変動に対し、シナプス前、後のどちらの寄与が大きいか、またそれは各運動ニューロンの興奮性の変動とどの程度の相関があるのかという問題を再検討した。彼らの実験結果は、基本的には、HuntおよびRudominグループの見解の両方を指示するものであった。シナプス前、後どちらの効果も反射の変動に影響しているとともに、それはある程度個々のニューロンの変動とも相関があるという結論を得たのである (図2.5)。彼らは、ニューロンプール全体の興奮性に影響を与えるのは、主に個々のニューロンの興奮性であるとしながらも、相関のないものの変動が、Ia求心性線維と運動ニューロンの機能特異性によって生じているとの見解をあげている。これは、神経生理学の分野での定説であるサイズの原理 (Henneman and Mendel, 1981) への反例として興味深いところではある。すなわち、個々の運動ニューロンが単シナプス性反射に参与するか否かは、運動ニューロンプールの活動度に応じて一律に決定しているといううなものではなく、状況に応じて変化する。この結論を考慮すれば、変動の起源をある単純なものに特定し、そこから何らかの意味を引き出していくことは困難である。

3 これは例えば、0と1という2値を50%の確率でとるニューロン100個がニューロンプールを構成している状況を思い浮かべればよい。個々のニューロンの変動に相関が全くない場合、ニューロンプール全体の興奮性の値は2項分布に従い、その平均値は $100 \times 0.5 = 50$ 、分散は $100 \times 0.5 \times 0.5 = 25$ となる。逆に、全てのニューロンの変動が完全に相関している場合にはニューロンプールの値は0か100をとることになるから、相関がない場合にくらべ変動の大きさが大きくなる。

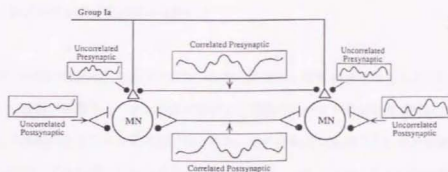


図2-5 単シナプス反射の変動を引き起こす要因
(Gossard et al., 1994より引用)

上記の報告によって単シナプス性反射の変動についてそれがどこに起因するのか（シナプス前か後か）、個々のニューロンの興奮性の変化が、ニューロンプール全体の興奮性の変化とどの程度相関しているのかについて、一応の結論は得られてきたといえよう。それでは、その変動は、生体にとって何らかの機能的意義を持つものなのだろうか。それともやはり単なるノイズなのであろうか。この件について、Hunt (1955) は、運動ニューロンの興奮性にゆらぎがなければ、個々の運動ニューロンが活動するか否かは、指令に応じて決定してしまいが、確率的な変動がある場合には同じ指令に対しても運動ニューロンが活動する場合としない場合があるため、より精緻な力発揮に貢献するのではないかと述べている（つまり、前者の場合、力のグレーディング≒運動ニューロンの数となるのに対し、後者では力のグレーディング>運動ニューロンの数となる）。また、Rudominらのグループは、2つの個々の運動ニューロンを介して伝達されるShannonの情報量を計算すると、ある条件刺激を加えた場合にはコントロール時にくらべて、両ニューロン間の相関が減少し、結果的に伝達情報量が増加することを指摘した（Rudomin and Madrid, 1972）。つまり、シナプス前の効果を生み出すニューロン群の相関によって、Ia求心性脳椎から運動ニューロンプールに伝達される情報量が調節されるものと推測した（例えば、通常時には、伸張反射経路に相関のある雑音を加えて、不適切な情報が運動ニューロンに伝達しないようにしている.....など；Rudomin et al., 1975）。このような説があるにせよ、今だになぜ単シナプス性反射が変動を示す必要性があるのかという問いに明確な解答は得られていない。

2.2 H反射が示す変動の新たな捉え方

再度、H反射自体の原理を述べると「Ia求心性線維に電気刺激を加えると、Ia求心性線維によって刺激が運動ニューロンの発火を促す。運動ニューロンの発火は最終的に筋の収縮を起こし、収縮にともなった筋電図が得られる。その筋電図の振幅の大きさは刺激強度および諸条件が同じであれば、多少のばらつきはあっても、ほぼ一定の大きさを示すだろう。したがって、その大きさの変化は、脊髄内に生じた運動ニューロンプール興奮性の変化を反映するものとして用いることができる。」ということになる。ところが、すでに前節で単シナプス性反射の大きさ自体が元々かなり大きな変動を示すのだということをみてきた。

それでは、この変動自身が何らかの意味をもつものなのだろうか。RudominとMadrid (1972) は、論文の中で「ほとんどの研究はニューロンプールの反応のうち一次のモーメント、すなわち平均値のみを取り扱い、二次のモーメント（分散）やさらに高次のモーメントに着目したものはないようだ」と述べ、平均値以外のものから情報が引き出せることに注目していた。実際、彼らの研究は、単に、単シナプス性反射の変動がIa求心性線維のシナプス前に与えられる効果と関連していることを示しただけのものではない。ある条件刺激に対しては、単シナプス性反射の大きさ自体は変化せずに、その変動の大きさ（分散）のみが影響をうける場合があるという事実は、平均値だけではなく変動の大きさ自体に神経回路構造の何らかの仕組みが反映されることを示しているのである。同様に、SomjenとHeath (1966) の研究では、様々な筋群の運動ニューロンプールから単シナプス性反射を誘発し、ネコの状態の変化（脊髄ネコか、断頭ネコか、除脳ネコか）、あるいは薬理的な手続きによって、その平均値よりむしろ、その変動の大きさがいかなる影響を被るのかを調べている。彼らもまた、変動に含まれる情報に着目していたのである。

一方で、H反射の変動については、現在までのところ、全くといってよいほど手がつけられていない。これは、過去の研究がH反射の誘発機序の見地から、その妥当性、信頼性を示そうと努力を傾けてきたのとは対照的である。同じ機序で誘発される単シナプス反射の変動についての研究がなされていたにも関わらず、H反射の変動に対してそのような興味もたれなかったことは不思議でさえもある。そこでは、Rudominのいうように、反応の平均値に

についてしか議論の対象とならなかったのである。

では、なぜH反射の振幅の変動に興味をもたれてこなかったのだろうか。H反射の振幅が変動しないわけではない。図2-6に、ある先行研究から抜粋したH反射振幅の平均値と標準偏差を示した図を示す。一見すると、その標準偏差は平均値のおよそ10%にも達しており、動物を用いた単シナプス反射同様の大きさの変動を持つことがわかる。なぜH反射の変動がほとんど興味を持たれなかったかという問題を取り扱った研究者は過去にいないが、ここでは私見を述べてみたい。まず、H反射テストが、経皮的な刺激を用いており、しかもその反射成分を筋の収縮に伴う筋電図の大きさで評価するというように、単シナプス性反射の動物実験に比べ、単シナプス性伸張反射回路の微細なシステムの構造を云々するには信頼性が低いことが挙げられる。つまり、その変動には、回路自体に内在する変動以外の成分が混入しやすく、たとえ変動を解析したとしても、信頼できる結果は得られない。変動についての問題は、動物実験で直接、単シナプス反射を誘発して調べるべき問題である、と過去の研究者が考えたとしても無理はない。第二に、H反射の振幅の変動が非常に不規則な挙動を示すので、これはおそらく単なる真値まわりの雑音だろうという捉え方をされていた可能性もある。いずれの理由にせよ、H反射の変動はほとんど意味をもたないものとみなされてきたことは間違いない。

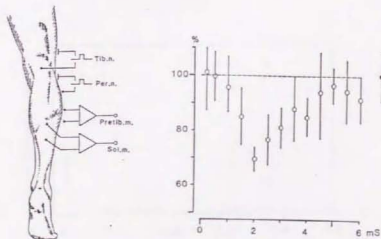


図2-6 H反射の変動の大きさ

脛骨神経刺激に起脚骨神経への条件刺激を加え、相互抑制を調べた結果。縦軸は条件一試験刺激間隔、●はコントロールでこの値を100%として縦軸に示している。ヒラメ筋より誘発したH反射の大きさの標準偏差がかなり大きいことに注目。(田中, 1986より引用)

ただし、単シナプス反射の変動を扱った研究にしても、変動の持つ意味を完全に明らかにしたというわけではない。Gossardら（1994）が示した、単シナプス反射の変動にはいろいろな要因が関与しているという実験結果を考慮すると、単シナプス反射の変動が持つ意味を明らかにするには、先行研究のように変動の静的な性質を調べるだけではもはや限界があると考えられる。本研究では、その限界への対応として、H反射の変動の動的性質に着目する。例えば、ある変動が順に2、3、5、6、4、6、2という値をとるとしよう（平均値は4、分散は3）。動的な性質を調べるとは、この変動を単に平均値4で分散3の変動であるとみなすのではなく、その値の出現の順番にも意味を求める見方である。変動の動的性質は、古典的な統計性質（平均値、分散など）を調べるだけでは、決して明らかにできない。そして、もしH反射の変動が何らかの機能的意義を反映したものであれば、それが時間的に何らかの意味をもつ可能性は十分に考えられるところである。

通常、変動の時間的な性質の解析にはスペクトル解析が用いられることが多い。スペクトル解析を用いると、変動中の周期的成分は周波数領域上でピークとして認識でき、その変動の生成にその周波数で振動する何らかの原因が関与しているものと推測できる。しかし、H反射の時系列にスペクトル解析を適用したところで、周波数領域上でピークを持たず、単なる雑音と大差ない特性を示す（図2-7）。

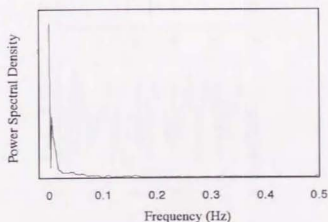


図2-7 H反射時系列のスペクトル

健康者のヒラメ筋より誘発したH反射時系列のパワースペクトル。低周波数帯域にパワーが集中しており、特徴的なピークはみられない。

それでは、やはりH反射の変動は時間的意味をもたないものなのだろうか。近年、一見雑音に見えるが、実はそうでない変動が存在することが明らかとなってきた。たとえば、 $X_{N+1}=aX_N(1-X_N)$ という写像を例に挙げよう。これはロジスティック写像と呼ばれ、 a および初期値 x_1 の値によっては、非常に不規則な振る舞いをみせる (May, 1976)。図2-8の上図はロジスティック写像において初期値 $x_1=0.2$ 、 $a=0.39$ として計算したものであり、下図はコンピュータ上で生成した単なる一様乱数である。どちらの時系列も非常に不規則にみえ、パワースペクトルを求めても特徴的な周波数成分が抽出されるわけでもない。しかし、上図の場合に限ってはその変動はランダムではない。なぜなら、その背後には変動を生成する非常に簡単な仕組みが存在するからである。この例のように、従来の方法では、雑音としかみなされなかったものの中にも、ある秩序が潜んでいる場合があり、それがH反射時系列の変動についても該当するのではないかというのが本論文で検証すべき課題である。

次章では、不規則な変動に秩序が存在する場合とはどのような場合なのかについて説明する。また、それを明らかにするにはどのような解析法が必要となるのかについて解説する。

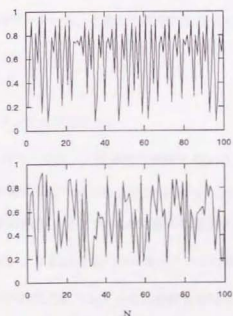


図2-8 ロジスティック写像から得られた時系列と一様乱数

上図はロジスティック写像から得られた時系列。下図はコンピュータ上で発生させた一様乱数。時系列を見る限りどちらもランダムな雑音のようにみえる。

3. フラクタルとカオス -変動の新しい理解-

通常、時系列の時間的な特性を調べる場合、スペクトル解析が用いられることが多い。しかし、前章の最後の部分で例に挙げたように、時間的な意味があってもパワースペクトルにピークが認められず、一見雑音と変わらないものがある。ただし、パワースペクトルに特徴的なピークがないからといって、単なる雑音と決めつけるわけにはいかない。スペクトル解析とは、本来、変動の背後に時不変な線形な振動子の存在を仮定する方法であり、元々のシステムが例えば非線形な振動子を持っている場合には、その特徴がパワースペクトル上のピークとして認識できないこともある (Mayer-Kress et al., 1988)。生体のシステムはどう考えても線形なシステムとはいえず、そこから得られる生体信号の解析にスペクトル解析のような線形解析を用いただけでは十分であるとはいえない。

本章では、まず最初に、このような非線形なシステムから産み出されるような信号の中には、フラクタルとして捉えることによって、その信号の時間的な性質を定量化できる場合があることを示す。また、一見複雑な変動が決定論的な非線形なダイナミクスから産み出される場合がある。時系列データから、これらの時間的な性質を抽出し、定量化する方法論についても説明を加える。

3.1 $1/f^\beta$ ゆらぎとランダムフラクタル

図3-1Aに示す時系列データは、一見非常に複雑に見える。パワースペクトルを計算してみても (図3-1B)、特徴的なピークはみとめられない。しかし、両対数軸上でみると、そのパワースペクトルは負の傾き ($-\beta$; 図3-1の時系列の場合は $\beta=1$) を持つ直線になっていることがわかる (図3-1C)。これはそのパワースペクトルの形から、通常 $1/f^\beta$ ゆらぎと呼ばれる変動である。時系列が時間的にランダムな白色雑音の場合には、パワースペクトルは平坦 ($\beta=0$) となるので、 $\beta>0$ の場合にはもはや時間的にランダムな雑音とはいえない。

このような $1/f^\beta$ 型のパワースペクトルを持つ変動は、自然界の至るところに遍在することから、その発生機序が議論されてきたが、いまだその解答は得られていない (武者, 1982; 中

村, 1991; 佐治, 1993)。その発生機序はともかく、ある変動が $1/f^\beta$ ゆらぎの性質を持つ場合、その変動の時間的性質は β という1個のパラメータで特徴づけられるということが重要である。本節では $1/f^\beta$ ゆらぎの時間的性質が β にどのように依存するのか、その変動の解釈の方法、解析方法について説明する。

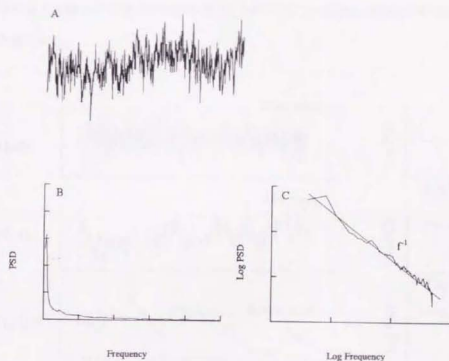


図3-1 $1/f$ ゆらぎとパワースペクトル

Aに示す時系列は一見不規則に見え、そのパワースペクトルを調べても特徴的なピークを示さない(B)。しかしパワースペクトルを対数軸で表示する(C)と、負の傾きをもった直線の関係にあることがわかる。このようなパワースペクトルの特性からAの時系列は $1/f$ ゆらぎと呼ばれる。

(1) $1/f^\beta$ ゆらぎの性質

$1/f^\beta$ ゆらぎは通常 $0 \leq \beta \leq 3$ の値を範囲で調べられることが多いが、このようなゆらぎが具体的にどのような時系列であるのかをまず確認しておく。そのために、逆フーリエ変換によって、 $1/f^\beta$ 型パワースペクトルをもつ時系列をつくってみることにしよう。図3-2に β が0、1、2、3の場合の時系列データを示す。 β が0の場合がいわゆる白色雑音に相当する。 β が増加すると変動の不規則さが減少することがわかる。 β は時系列の持つ不規則さ、“複雑さ”を定量化する。

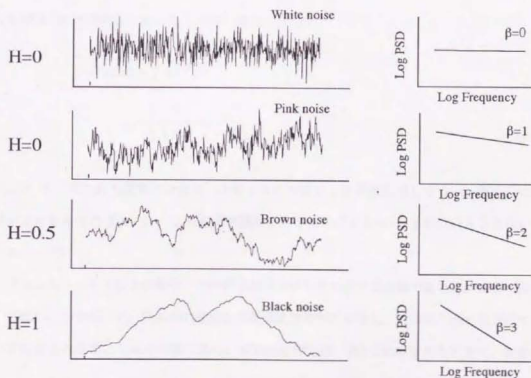


図3-2 $1/f^\beta$ 型パワースペクトルを持つ時系列の振る舞い

上から $\beta = 0, 1, 2, 3$ の場合の時系列を示す。 β が大きくなると変動の不規則さが減少する。 H はハースト指数(後述)。

定常な振る舞いをする不規則雑音 $X(t)$ をとりあえず、平均値0の定常過程とみなしておくことにしよう。その場合、その時系列の相関関数 $R(\tau) = \langle X(t)X(t+\tau) \rangle$ は ($\langle \rangle$ はアンサンブル平均を示す) は、Wiener-Khinchine定理より、スペクトル密度 $S(\omega)$ の逆フーリエ変換として表される (日野, 1977, ただし $\omega = 2\pi f$, f は周波数)。

$$R(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega\tau} S(\omega) d\omega \quad (3.1)$$

(3.1) 式で $\tau=0$ の場合を考える。この場合相関関数は時系列の分散に等しい。

$$\langle X(t)^2 \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) d\omega \quad (3.2)$$

$S(\omega)$ が $\omega^{-\beta}$ に比例するとおくと、(3.2) 式は

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) d\omega &= \int_{-\infty}^{\infty} \omega^{-\beta} d\omega \\ &= \left[\frac{1}{1-\beta} \omega^{1-\beta} \right]_{-\infty}^{\infty} \end{aligned} \quad (3.3)$$

(3.3) 式、すなわち変動の分散は、 β が1より大きいとき発散してしまう (ω が十分に小さいときを考えればよい)。これは定常過程という仮定が $\beta \geq 1$ のときには成り立たないことを示している。

すなわち、 β が1以上の場合、その時系列は非定常性を有する変動であるといえる (高安, 1986)。したがって、時系列の統計的性質は絶対時刻に依存し、局所的な平均値を以て真の平均値とみなすことは不可能である。直観的にいえば、図3-2にみられるとおり、変動自体が大きくなうねりをもっているため局所平均の値が一定値に落ちつかない (純粋な $1/t^\beta$ ゆらぎの場合、この傾向は平均時間によらず観察されるという (武者, 1982))。一方、 $0 \leq \beta < 1$ の場合には、その変動は定常であり、真の平均値を局所平均から推定することが一応可能である。

しかしながら、生体信号を観測することを考えれば、 $\beta < 1$ の場合でさえも、真値を局所平均から求めることが困難な場合がある。これは生体を一定の条件下で測定できる時間が限

られていることに起因する。例えば、正弦波状の変動の平均値を求めたいとしよう。その場合少なくとも正弦波一周分の間は測定を続けていることが望ましい。これを一般化すれば、測定に必要な時間のオーダーは、おおそ自己相関関数が0になるまで、すなわち自己相関が消失する時間であるといえるだろう（図3-3）。 $1/t^\beta$ ゆらぎ（ $0 < \beta < 1$ ）の自己相関関数はWiener-Khinchine定理より、 $\propto \tau^{\beta-1}$ と求められる（ただし、 τ はラグ）。このようなべき型の自己相関関数は非常に長時間の自己相関をもち、例えば $\beta=0.8$ の場合には、自己相関関数（ $\propto \tau^{-0.2}$ ）の値をラグ τ が1秒のときの10%以下に落とすには、 10^5 秒もの時間を必要とする。このような長時間、生体の状態を一定に保って測定をおこなうことは現実的には不可能であるため、 β が1に近い $1/t^\beta$ ゆらぎを定常な変動とみなすことは必ずしも適当とはいえない。このように $1/t^\beta$ ゆらぎは β が0より十分に大きい場合、非常に長期の時間相関をもつ。

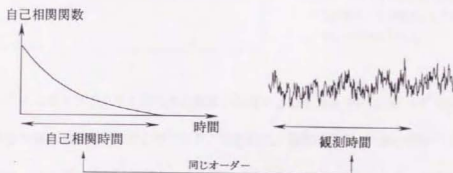
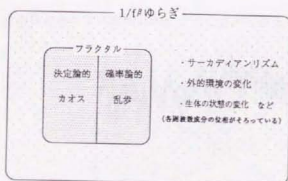


図3-3 自己相関と観測時間

変動の平均値を精度よく求めるために必要な観測時間は、自己相関時間が十分に小さくなるまでの時間とはほぼ同じオーダーである。

(2) ランダムフラクタルとしての捉え方

パワースペクトルが $1/f^\beta$ 型になるということは、変動のサンプリングレートや観測時間を変えてもパワースペクトルの形が不変であることを示す。このようなゆらぎが生成される原理を考えると、そのパワースペクトルに捕らわれた考え方をすれば、べき型にスケールされた多数の周波数成分がつくりだされる仕組みが必要となる。しかし、もっと単純なシステムから $1/f^\beta$ ゆらぎは生成される。一つはフラクタル的乱歩であり (Mandelbrot, 1983)、もう一つは非線形システムがうみだすカオスである (Farmer, 1982) (図3-4)。前者は確率論的、後者は決定論的というように両者のシステムは全く異なる。 $1/f^\beta$ 型のスペクトルを持つ時系列を解析したところで、どちらのシステムが関与しているのかを完全に識別することは困難とされている (Osborne and Provenzale, 1989) が、ひとまずその変動の性質を定量化するために、変動をフラクタル的乱歩とみなすことを考えてみよう。

図3-4 $1/f^\beta$ ゆらぎの分類

$1/f^\beta$ ゆらぎは、非正弦波状の規則的な変化によってつくられるものと、不規則さによってつくられるものの二つがある。前者は、各周波数成分の位相が全てそろっているものとして識別可能である。さらに、不規則な $1/f^\beta$ ゆらぎはフラクタルとしての性質を有しており、その起源として確率過程、カオスの二つが考えられる。

$1/f^\beta$ ゆらぎをフラクタル的乱歩の軌跡とみなすという捉え方により、 $1/f^\beta$ ゆらぎの特徴の理解を大幅に簡略化することができる。たとえば、通常の乱歩（一步一步がランダムなガウス分布；ブラウン運動）の場合、その軌跡は $\beta=2$ の $1/f^\beta$ ゆらぎとなる。フラクタル的乱歩は、通常の乱歩の一步の踏み出しをパラメータ $0 \leq H \leq 1$ を用いて、滑らかに拡張させたもので (図3-2)、その軌跡は統計的に、

$$\langle X(ht) \rangle = h^H \langle X(t) \rangle \quad (3.4)$$

の関係を満たす ($\langle \rangle$ はアンサンブル平均) (Mandelbrot, 1983, 1985; Feder, 1988; Voss, 1989)。これは時間の尺度を h 倍にして構築した時系列 $X(ht)$ の分布型が、大きさが h^H 倍になる他は、もとの $X(t)$ の分布型と同一であるという自己相似 (自己アフィン) の性質を示し (図3-5)、それゆえこのような性質をもつ乱歩はフラクタル的と呼ばれるのである。純粋なフラクタル的乱歩の場合、 H の値は β から求められるため (後述)、 β を求めることが変動のフラクタルとしての性質を明らかにすることにつながる。すでに述べたように $1/f^\beta$ ゆらぎは長期の時間相関をもつ。 $1/f^\beta$ ゆらぎをフラクタルと捉える考え方からすれば、このような長期の時間相関は、変動の自己相似性 (すなわちフラクタル性) に起因するといってもよい (Bassingthwaite and Beyer, 1991; Genn RW et al., 1991)。そこで、本論文では以後この時間相関のことをフラクタル相関と呼ぶことにする。

ここで、一度要約しておこう。

「生体の信号の中にはフラクタルの性質を持つものがあり、その性質は β (あるいは H) を求めることによって明らかにすることができる。」

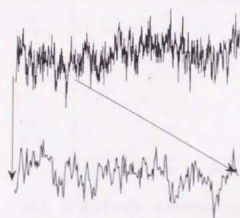


図3-5 $1/f^\beta$ ゆらぎをもつ自己相似な性質

$1/f^\beta$ ゆらぎ (図では $\beta = 1$) の一部分を拡大すると、再び同様な性質を持つ時系列が現れる。このような性質を自己相似あるいは自己アフィンという。

ただし、以上のようなシナリオが成り立たない場合があることに注意しなくてはならない。実は $1/f^\beta$ 型のパワースペクトルを持つ変動を必ずしもフラクタルとみなすことはできない。Higuchi (1990) は、 $1/f^\beta$ 型のパワースペクトルを持つ時系列であっても、各周波数成分の

位相が十分に混ざっていない場合、その時系列はもはやフラクタル的といえないことを示した。実は、図3-2は逆フーリエ変換の際に各周波数成分の位相を $[0, 2\pi]$ の一様乱数としている。それでは、各周波数成分の位相を全てそろえてしまうと、どのような時系列が得られるだろうか。 $1/f^\beta$ 型のパワースペクトルの各周波数成分の位相をそろえて逆フーリエ変換した時系列を図3-6に示す。この場合、時系列に不規則さはみられない。同じ $1/f^\beta$ 型のパワースペクトルをもっている、各周波数成分の位相の混ざり具合によって時系列の様相が全く異なったものになることは $1/f^\beta$ ゆらぎの解釈に際して十分認識しておかねばならない。

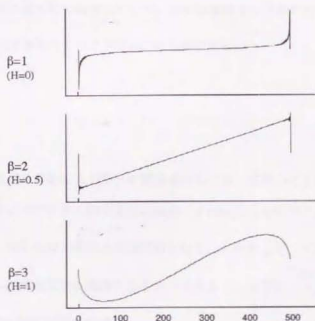


図3-6 $1/f^\beta$ ゆらぎの様相 (各周波数成分の位相がすべてそろっている場合)

$1/f^\beta$ 型のパワースペクトルを構成する各周波数成分の位相を全てそろえて、逆フーリエ変換したものである。この場合、時系列に不規則さはみられない。

この例にみるとおり、生体の応答が示す $1/f^\beta$ ゆらぎが、図3-2のような不規則な変動からの帰結であるのか、また例えば、数日単位で測定した生体の応答を解析したときのようにサーカディアンリズムなどに対応した非正弦波的な振動を含んでいるのかは、そのフーリエスペクトルを観察しただけでは一般にわからない。図3-6に示すような非正弦波上の規則的な変

化は、生体のおかれている外的環境や、生体に課せられている条件が測定途中で変化する場合に観察されるかもしれない。しかし、生体の状態を一定に保持しているにもかかわらず、その応答が $1/f^\beta$ ゆらぎとなる場合、その起源を図3-6のような単純な変化に帰することができない。この場合、生体の応答に内在している図3-2のような不規則さが、 $1/f^\beta$ 型のパワースペクトルをつくりだしているものと解釈してよいだろう。

以上のように $1/f^\beta$ ゆらぎとひと口にいても、その $1/f^\beta$ 性の起源は、非正弦波状の規則的な変化によるものと変動の不規則さ自体によるものの2つに分けられる(図3-4)。前者については、環境などの変化を反映した結果であるとの説明がつく場合もあるが、後者については、その不規則性が何に起因していて、どんな意味をもつか自明ではない。本論文で対象とすべきなのはまさにこのような $1/f^\beta$ ゆらぎである。

(3) 解析法

このような変動の解析にまず第一に要求されるのは、当然のことながら β の値の正確な推定である。純粋にフラクタル的な変動の場合、 β の推定はそのフラクタルとしての性質を解析すること、すなわち目の推定とほぼ同値となる。したがって、この場合 $1/f^\beta$ ゆらぎの解析にはフラクタルの解析方法を適用することができよう。以下に、フラクタルの解析方法を含めた $1/f^\beta$ ゆらぎの解析方法を挙げる。

①パワースペクトルを用いた方法

FFTを用いて変動のパワースペクトルを推定し、その両対数グラフの傾きより β を求めることは、変動が純粋なフラクタルであれば、非常に精度の高い方法であることが確認されている(Shepers et al., 1992)。しかし、現実の時系列データに適用する場合には注意を要する。まず第一に図3-4、図3-6に示したように $1/f^\beta$ 型のパワースペクトルを持つことが、必ず

しもフラクタルであることの十分条件ではない。また第二に、変動がフラクタルな成分だけでなく明らかな周期的成分を含む場合、パワースペクトルのある周波数帯域にピークが現れ、正確に β を求めることが困難となる。例えば心拍変動のパワースペクトルには呼吸、あるいは血圧の圧反射に起因する周期的な変動の成分が現れ (図3-7)、 β の推定の妨げとなる。

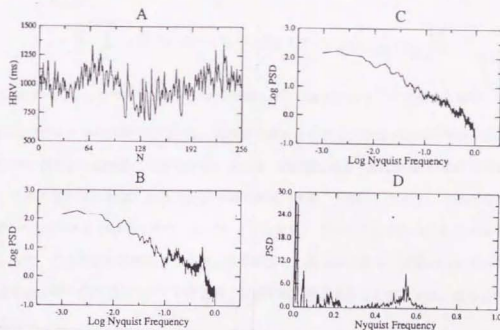


図3-7 心拍変動とそのパワースペクトル

AはR-R間隔を256点ならべた時系列。そのパワースペクトル (全8500点より推定) はBのように1/f型を示すが、対数周波数 (ナイキスト表示) で-0.3Hz付近のピーク (呼吸に起因するものと考えられる) のために β の正確な推定は困難である。CGSA法 (Yamamoto and Hughson, 1993; 本文も参照) によって、このような周期的成分 (D) を除去すると、変動の背後に存在するフラクタル成分の性質を正確に調べる事ができる (C) (Yamamoto and Hughson, 1993より引用)。

②Higuchi (1988) の方法

フラクタルな時系列が式 (3.4) を満たすことは、ある意味で変動の軌跡が自己相似性を持った曲線 (折れ線) であることを示す。この方法はその時系列の軌跡のフラクタル性に着目した方法である。離散的な時系列 $X(i)$ ($i=1, 2, \dots, N$) を考える。この時系列を元に新しい次のような時系列をつくる。

$$\begin{aligned}
 &X_{\tau}^m: X(m), X(m+\tau), X(m+2\tau), \\
 &\dots, X(m + [(N-m)/\tau]\tau) \\
 &(m = 1, 2, \dots, \tau)
 \end{aligned}
 \tag{3.5}$$

ただし [] はガウス記号である。この時系列は、元の変動に対し、サンプリングレートを $1/\tau$ 倍にして得られる時系列である。この時系列をグラフにプロットしたときのその曲線の長さを、時間の尺度で規格化し以下のように定義する。

$$L_m(\tau) = \left\{ \left\{ \sum_{i=1}^{\lfloor (N-m)/\tau \rfloor} |X(m+i\tau) - X(m+(i-1)\tau)| \times \frac{N-1}{\lfloor (N-m)/\tau \rfloor \tau} \right\}^2 \right\}^{1/2} \quad (3.6)$$

$L_m(\tau)$ をすべての m についてアンサンブル平均した $\langle L_m(\tau) \rangle$ が τ^{-D} に比例する場合、時系列 $X(i)$ はフラクタル次元 D ($0 < D < 2$) のフラクタルといえる。 D は $\langle L_m(\tau) \rangle$ と τ の両対数グラフの傾きから求めることができる。 β 、 D 、 H の間には $\beta = 5-2D = 2H+1$ の関係があるため、これらは容易に換算しあうことが可能である (高安, 1986)。ただし、この方法では β が 0 から 1 までのものは全て $H=0$ ($D=2$) となるため、これらの区別をつけることはできない。また、この方法は変動のフラクタル性を前提とした方法であり、変動の中にそれとは異なる特徴を持つ変動が混入している場合、 H を正確に推定することができなくなるという欠点を持つ。

③粗視化スペクトル法 (CGSA法) (Yamamoto and Hughson, 1991; 1993)

①、②の方法の欠点は、フラクタル変動と周期的あるいは規則的変動が混在したものを分析する上で、それらの区別をつけることができない点にある。CGSA法は明らかな周期的成分や位相のそろった広帯域信号と、フラクタル的な成分を分離するための方法である。この方法の原理を以下に示そう。

観測した時系列 $X(i)$ ($i=1, 2, \dots, N$) を一つおきにサンプリングして新しい時系列 $X_2(i)$ をつくる ($X_2(i)$ は元の時系列を「粗視化」した時系列である)。 $X(i)$ と $X_2(i)$ のクロススペクトルを計算してみよう。変動に周波数 f の周期的な変動が独立して混入しているとする、粗視化した時系列ではこの周期的変動の周波数は $2f$ となる (図3-8)。したがって、 $X(i)$ と $X_2(i)$ のクロススペクトルのゲインには、このような周期的変動の持つパワーは測定されない (周

波数 f と $2f$ の正弦波のクロススペクトルは0になる)。一方、式(3.1)を満たすフラクタルな変動の場合には、粗視化した時系列にも、同じ周波数の成分があらわれるためクロススペクトルのゲインが0となることはない。(3.4)式より、統計的には $X_2(i)$ は $X(i)$ の 2^H 倍の振幅をもつから、クロススペクトルのゲインを 2^H で除して規格化すれば、周期的変動のパワーを除いたフラクタルな変動のパワーを求めることができる。 $X(i)$ の各値を2回数えてつくった時系列 $X_{1/2}(i)$ についても同様な計算を行った場合には、フラクタルな変動のパワーは 2^{-H} で規格化される。これらの幾何平均をとると 2^H と 2^{-H} がキャンセルされ、 H の値を事前に知ることなくフラクタル変動のパワーを求めることができるのである。

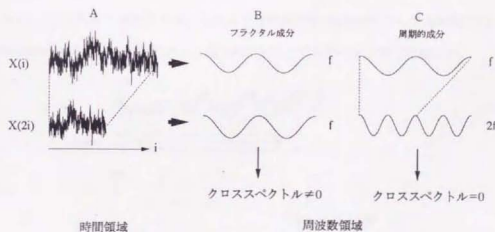


図3-8 CGSA法の原理 I

時系列 $X(i)$ を1点ごとにサンプリングして時系列 $X(2i)$ をつくる (A; $X(2i)$ は $X(i)$ を「粗視化」した時系列である)。時系列 $X(i)$ に含まれる周波数 f の周期的成分は、時系列 $X(2i)$ では周波数 $2f$ をもつ (C)。したがって、両者のクロススペクトルは0になる。一方、時系列 $X(i)$ にフラクタル成分として周波数 f の周期的成分が含まれている場合、時系列 $X(2i)$ にも再び同じ周波数をもつ周期的成分が現れるため、クロススペクトルを計算しても0にならない (B)。

ただし、この手続きでは、互いに可約な周期を持つ周期的成分が複数含まれるとき、それらのパワーもフラクタル成分として勘定される事態が生じることになってしまう。また、同様な理屈で、位相の揃った $1/f^\beta$ ゆらぎ (図3-6) を区別することもできない。このような問題は、元時系列と粗視化した時系列のクロススペクトルの位相に着目することによって解決

できる (Yamamoto and Hughson, 1993)。クロスベクトルのうち真のフラクタルな成分の位相は時間経過とともに不規則に変化するが、周期的成分、位相の揃った成分の位相は規則的に変化する。この性質を以下のように用いるとよい。全データを均等な時間ずらしたsubsetに分割し (図3-9A)、クロスベクトルをそれぞれのsubsetについて求める。最初の2つのsubsetのクロスベクトルの位相の差 ($\delta\theta$) を計算する。3番目のsubsetのクロスベクトルの位相を $\pi/2 - \delta\theta$ だけずらす。もし、周期的あるいは位相の揃った成分であれば、この手続きにより2番目 ($S'_{xxh,2}$) と位相をずらした3番目のクロスベクトル ($S'_{xxh,3}$) は複素平面上で直交する (図3-9B)。一方、フラクタル成分の場合は直交化することはない (図3-9C)。したがって、 $S_{xxh,3}$ のうち $S'_{xxh,3}$ の $S_{xxh,2}$ と直交する成分を除いた、

$$G_3 = \frac{\|S_{xxh,2} \cdot S'_{xxh,3}\|}{\|S_{xxh,2}\|} \quad (3.7)$$

を以て、フラクタル成分とする。このような作業を他のsubsetに対しても同様に行い、最終的にはsubsetから求めたフラクタル成分のアンサンブル平均を計算すればよい。

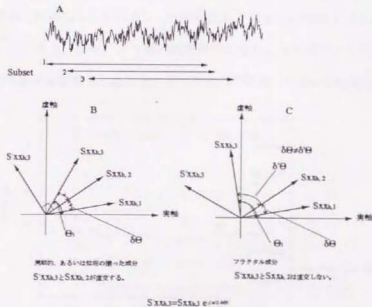


図3-9 CGSA法の原理II

時系列をAに示すように分割し、それぞれのSubsetについて、元時系列Xと粗視化した時系列X_hのクロスベクトル (S_{xxh}) を求める。クロスベクトルが周期的成分、あるいは位相のそろった成分によるものであれば、その位相は時間とともに規則的に変化する。このような場合、S_{xxh,1}とS_{xxh,2}の位相の差とS_{xxh,2}とS_{xxh,3}の位相の差は等しい (B)。したがって、S_{xxh,3}を $\pi/2 - \delta\theta$ だけ回転すれば (S'_{xxh,3})、S_{xxh,2}とS'_{xxh,3}を直交させることができる (B)。それに対し、フラクタル成分の場合、クロスベクトルの位相はSubsetごとにランダムな値をとるので上記の作業によって直交化することができない (C)。

以上のような主に2つの原理を用い、CGSA法は周波数領域でフラクタル成分と非フラクタル成分の分離をおこなうことができるのである。CGSA法によって以下の指標が計算される。

・ %Fractal

時系列の変動が持つパワーのうち何%がフラクタル成分のパワーであるかを示す。時系列が純粋にフラクタルな時系列の場合、この値は理論上100%になる。

・ β および H

CGSA法によってフラクタル成分のみのパワースペクトルを求めることができる。これを両対数グラフに表示すると、その傾きが β を与える(図3-2)。 H の値は

$$\begin{aligned} H &= (\beta - 1)/2, & 1 \leq \beta \leq 3 \\ H &= 0, & 0 \leq \beta \leq 1 \end{aligned} \quad (3.8)$$

より換算することができる(Mandelbrot, 1983; Higuchi, 1990)。

これまでに確認されたCGSA法の精度的側面として、まず8500点のフラクタル時系列+複合正弦波の時系列に適用した結果より、理論値どおりの%Fractalおよび β が得られることが確認されている。また、近年、より短い時系列からでも、 β の値が2以下であれば、ほぼ理論値どおりの%Fractalが得られることが示された(図3-10、Yamamoto et al., 1995)。

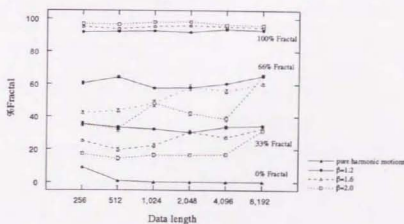


図3-10 %Fractalとデータ長の関係

いろいろな値の β (1.2, 1.6, 2.0)をもつフラクタル成分を0, 33, 66, 100%含む時系列をコンピュータ上でつくり、CGSA法を適用した結果、 β が1.2程度のフラクタル成分を含む場合には、ほぼ理論値どおりの%Fractalの値が得られている。(Yamamoto et al., 1995より引用)

また $1/f^{\beta}$ 型で位相のそろったパワースペクトルをもつ時系列を分析すると、%Fractalの計算値も20%とかなり小さく計算されることが示された (Yamamoto and Hughson, 1993)。

以上から、CGSA法は $1/f^{\beta}$ 雑音あるいはフラクタルな時系列の解析において、従来問題とされてきた点をクリアし、しかも時系列の時間的な特徴を正確に抽出できる方法であるといえる。

3.2 決定論的カオス

前節で触れたフラクタル解析は、その変動が確率論的か決定論的にかかわらず、ともかく、その変動のフラクタルとしての特徴を抽出し、定量化する方法であった。それに対し、時系列がカオスか否かを検証することとは、時系列を生成する背後にある決定論的な仕組みの存在を明らかにすること、またその変動がどの程度の自由度によって生成されているのかを検証することである。

(1) カオスとは？

「カオスとは決定論的なシステムにおける予測できない振る舞いである」との定義がある (Elbert et al., 1994)。つまり、一見すると雑音のようにみえるが、その振る舞いは決定論的なシステムによって完全に記述できるもののことを指す。このような振る舞いは、システムの非線形性によってもたらされることがここ30年の間に明らかとなってきた。

カオスの具体例として次に示すローレンツの方程式を挙げよう。これは、外部入力のない自律系で微分方程式は次式で与えられる。

$$\begin{aligned}\dot{x} &= -10(x - y) \\ \dot{y} &= -y + 28x - xz \\ \dot{z} &= -\frac{8}{3}z + xz\end{aligned}\quad (3.9)$$

この微分方程式をコンピュータ上で、4次のルンゲクッタ法を用いて解くと図3-11のような時系列が得られる。どの時系列もはっきりとした周期性を持たない複雑な振る舞いをみせる。仮に図3-11の最上段に示されている時系列 x を観測したとしよう。通常、このような不規則な変動の時間的性質を調べる場合にはスペクトル解析が用いられる。しかし、図3-12に示すように、時系列 x のバースペクトルは広帯域な特性を持ち、特徴的な周波数成分をそこに見いだすことはできない。あるいは、両対数表示したバースペクトルをみても、前節で示したフラクタル解析を用いたところで少数のパラメータで特徴づけられるような性質を抽出できそうもない。この場合、時系列 x は単なる雑音とみなされてしまう危険性がある。

しかし、時系列 x の生成は式 (3.9) に示す、少数自由度の決定論的システムが関与しているため、明らかに雑音ではない。

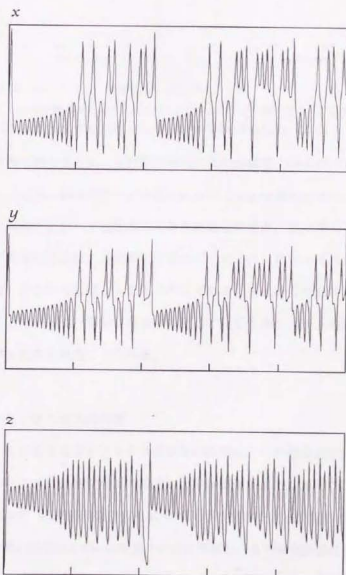


図3-11 ローレンツ系の時系列 x , y , z

式 (3.9) の微分方程式を4次のルンゲクッタ法を用いてコンピュータ上で解いた。

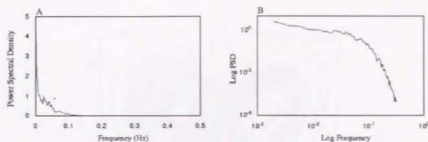
図3-12 ローレンツ系、時系列 x のパワースペクトル

図3-11に示す時系列 x のパワースペクトルを求めても特徴的なピークはみられない (A)。

両対数軸で表示しても、図3-2のような $1/f^{1.7}$ ゆらぎとはならない (B)。

ローレンツ系の例のように、比較的少数自由度の非線形力学系が一見するとランダムな振る舞いを示すことは、時系列データの解析において大きな意味を持つことになる。なぜならば、従来、生体などにおいて観測されてきた複雑な変動が、実は単なる雑音ではなく、その背後に存在する少数自由度の非線形力学系のダイナミクスによって決定論的に作り出されているのではないかという疑問をもたらすからである。もしそうであるなら、その自由度を明らかにすることによって、変動自体を作り出している生体システムの理解、解明に向けて、大きな情報をもたらされることになる。

(2) カオスダイナミクスの特徴

それでは、そのようなダイナミクスの存在の証明は、いかなる方法によって可能なのだろうか。ダイナミクスは位相空間上で記述した方が都合がよい。ふたたびローレンツ系を例にとろう。式 (3.9) の非線形微分方程式中の3つの変数を x, y, z 空間内にプロットする。ローレンツ系の力学系の状態はこの x, y, z 空間上の点に相当し、その時間発展は軌道として表される。ローレンツ系の場合、位相空間上では、図3-13のように蝶が羽を広げたような構造が現れ、各変数を眺めるだけでは明らかではない秩序だった構造が明らかになる。カオス的なダイナミクスは位相空間上では、このような無限の数の軌道がお互いに決して交わることなく折り畳まれた特殊な構造を有する。また、式 (3.9) を解く場合、初期値をあらかじめ決めておく必要があるが、どのような初期値を与えても、各変数は位相空間上でこの図形に引き込まれる。これらの意味でこの図形はストレンジアトラクターと呼ばれる。

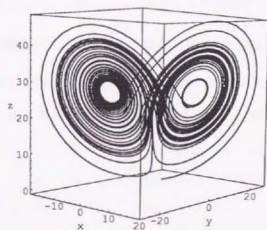


図3-13 ローレンツのストレンジアトラクタ

図3-11に示す時系列 x , y , z を3次元空間で表示したもの。各時系列を時間軸上で観測したときにはみられない秩序ある構造が現れている。

カオスダイナミクスの存在の証明、およびその自由度の特定をおこなうためには、位相空間上でのアトラクターの性質を調べればよい。アトラクターの性質を特徴づける代表的な測度として、以下の2つがある。

①アトラクターの幾何学的な構造

カオス的なダイナミクスのアトラクターは無限の決して交差しない軌道が有限の体積の中に畳み込まれた構造を有している。その結果、そのアトラクターのどんなに小さな一部分を拡大しても、再び無限の数の軌道を含む構造が現れる。すなわち、カオスのダイナミクスのアトラクターはフラクタル構造を持つ。

②軌道の不安定性

図3-13に示すローレンツアトラクターをみると、羽のような構造の中心部分に軌道がさしかかるとき、軌道がそのまま羽の片側を進むのか、あるいはもう片方の羽に進むのかは予測できない。これは、どんなに近く隣接している軌道についても当てはまる。このような性質

から、カオスのシステムでは、その振る舞いが初期値に鋭敏に依存することになる (May, 1976; Elbert et al., 1994)。例えば、ロジスティック写像で ($X_{N+1}=aX_N(1-X_N)$)、 $a=3.9$ 、初期値を2とした場合と2.0000001とした場合の例を図3-14に示す。初期値の違いは 10^{-7} というオーダーであるにも関わらず、25サイクル以降には全く異なる振る舞いを示すことが分かる。カオスのダイナミクスを持つ系は、決定論的でありながら、位相空間上で軌道不安定性を有する。

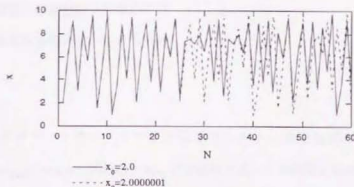


図3-14 ロジスティック写像の初期値に対する鋭敏な依存性

ロジスティック方程式 ($X_{N+1}=aX_N(1-X_N)$; $a=3.9$) を初期値2 (実線) と2.0000001 (点線) として計算。初期値の違いはわずかであるが、25サイクル以降は全く異なる振る舞いを示す。これはカオス系の特徴の一つである。

(3) 解析法

ある時系列の変動がカオスダイナミクスからの帰結であることを示すには、以上のようなアトラクタの性質を調べればよい。しかし、一般に我々はそのダイナミクスを記述するのに必要な変数を全て観測することは不可能であり、多くの場合、そのうちの1つのみの変数 ($x_1, x_2, x_3, \dots, x_9, \dots$) を観測できるにすぎない。

Takensは、単一の時系列から、元の n 次元位相空間でのアトラクタの軌道と等価な構造を再構築する定理を与えた (池口と合原, 1993)。具体的には、時系列データ x_t から、時間遅れの大きさを τ として以下のような n 次元ベクトルをつくる。

$$\begin{aligned}
 X_1 &= (x_1, x_{1+\tau}, \dots, x_{1+(n-1)\tau}) \\
 X_2 &= (x_2, x_{2+\tau}, \dots, x_{2+(n-1)\tau}) \\
 &\vdots \\
 X_i &= (x_i, x_{i+\tau}, \dots, x_{i+(n-1)\tau}) \\
 &\vdots
 \end{aligned}
 \tag{3.10}$$

このように単一の時系列を埋め込む (embedding) ことによって再構築したアトラクタの性質を定量化することによってカオスの存在を検証する。

ただし、(3.10) 式において時間遅れ τ の選択は重要な問題である。 τ の選択の基準として以下のものが提案されている。

- ・自己相関関数が最初に 0 になる時刻
- ・相互情報量が最初に極小をとる時刻

①相関次元

カオスダイナミクスのアトラクタはフラクタルな構造を持つことは既に述べた。Grassberger and Procaccia (1983a,b) は、埋め込みによって再構築されたアトラクタに対して、相関積分という量を計算することにより、そのフラクタル次元を近似的に求める方法を提案した。相関積分とは、

$$C(r) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N^2} \sum_{i \neq j}^N H(r - |X_i - X_j|) \tag{3.11}$$

で与えられる量である。ここで $H(t)$ はヘビサイド関数であり、 $t \geq 0$ の場合 $H(t)=1$ 、 $t < 0$ の場合 $H(t)=0$ をとる関数である。すなわち、相関積分とは n 次元アトラクタ上の全ての点 X_i から半径 r の n 次元球内に含まれる X_j ($i \neq j$) の点数を表す (実際には全ての組み合わせに対する割合)。

このようにして得られた相関積分が、 r と以下のような関係式で表されるとしよう。

$$C(r) \propto r^d \tag{3.12}$$

このとき d を相関指数 (correlation exponent) という。式 (3.12) の両辺の対数をとれば、 d は $\log C(r)$ と $\log r$ を軸としたプロットの直線の傾きとして求めることができる (図3-15)。

実際の時系列については (3.10) 式における埋め込み次元 n があらかじめ分かっているわけではない。本来のカオスダイナミクスのアトラクタが有している次元を D としよう。 $D > n$ の場合、軌道が埋め込みによって得られる位相空間を埋め尽くしてしまうため、 $d \equiv n$ となる。埋め込み次元 n を徐々に増やしていくと、埋め込み次元が本来の次元に達するので d が飽和し、近似的に D を与える。これが相関次元 (correlation dimension) である (図3-16)。

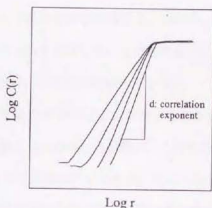


図3-15 相関積分と相関指数

フラクタル構造を持つアトラクタの場合、相関積分 $C(r)$ と r を両対数軸上でプロットすると直線関係を示す (べき型にスケールリングされている)。相関指数 d はこの直線の傾きとして求めることができる。

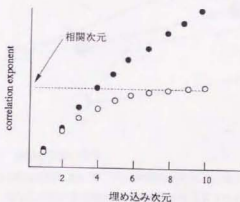


図3-16 相関指数と埋め込み次元の関係

低次元カオスダイナミクスを有する時系列の場合、埋め込み次元を増加していくと、相関指数がある一定値に飽和する (○)。しかし、時系列が単なる雑音の場合には、埋め込み次元に関わらず、データによって位相空間が埋め尽くされるため、埋め込み次元をいくら増加させても一定値に収束しない (●)。

調べようとしている時系列の変動がカオス的なシステムに起因しない雑音の場合には、埋め込み次元に関わらず、位相空間が埋め尽くされ、相関指数は埋め込み次元を増やせばそれとともに飽和することなく増加してゆく。

②非線形予測

カオス的なシステムの場合、アトラクタの軌道は短期的には予測可能であるが、予測時間が長くなるとその予測の精度は激減する。1990年、SugiharaとMayはカオスが持つこのような性質を利用した方法を提案した。その方法とは以下のとおりである。

式(3.10)に従い、 n 次元で埋め込みを行い、アトラクタを再構成する。アトラクタ上での予測とは、ある点 X_i が次にどこに移動するのかを求めることに相当する。予測をおこなうために、 X_i に最も近い点を $n+1$ 個選ぶ。これらの $n+1$ 個の点は n 次元空間上で多様体を形成するが、 X_i はその多様体の中に含まれることになる。ある時間 T_p 後に $n+1$ 個の点が移動した先の点はまた多様体を形成する。予測性が高ければ、 X_i の T_p 後に移動した点も、この多様体の中に含まれているはずである(図3-17に $n=3$ の場合を示す)。

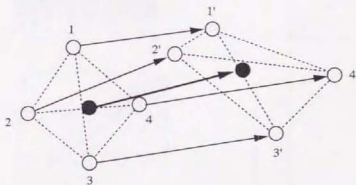


図3-17 非線形予測の原理

3次元の位相空間において、 X_i は時間 T_p 後にどこにあるかを予測するために、 X_i に最も近い4点を選び、それらが成す多様体の中に X_i が含まれるようにする。アトラクタの軌道が安定しているならば、 T_p 後の X_i の位置は、4点が移動してできた多様体の中に再び含まれることが予測できる。

予測によって求めた T_p 後の X_i を X_{i_prd} としよう。実際の T_p 後の X_i は与えられているため($X_{i'}$)、この予測が全体的にどの程度うまく当てはまっているのかを調べるができる

(図3-18)。カオス的なアトラクタの場合、 T_p が小さいうちには予測がうまくいくが、 T_p が増加するとその予測性は急激に低下する。すなわち、 X_i^1 と $X_i^1\text{prd}$ の相関が T_p が小さいうちには高いが、 T_p が大きくなると相関が急激に小さくなってしまふ(図3-18)。単なる雑音の場合には、その予測性は T_p に依存しない。SugiharaとMayはさらに、このようなカオス的な特徴は埋め込み次元が最適であるときに顕著にみられるとし、それがアトラクタの次元を与えることを報告した。

アトラクタの軌道不安定性や長期予測不能性は、この方法の他にもそれぞれリアプノフ指数、K-エントロピーを計算することによって評価できるが、それらについては、本論文では割愛する。これらの詳細については、Elbert et al., (1994)などを参照のこと。

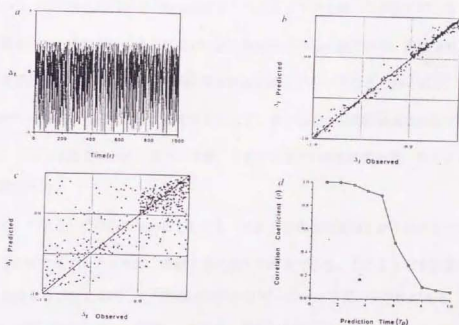


図3-18 非線形予測

aの時系列は、テント写像 ($X_{t+1}=2X_t$, $0 < X_t < 0.5$; $X_{t+1}=2-2X_t$, $0.5 < X_t < 1$) の差分をとったものである。この時系列に対し、埋め込み次元を3とする。図3-17に示す予測方法により、予測した値と実際の値の相関を調べる (b, c)。2ステップ後では予測値と実際の値はよく一致しているが (b)、5ステップ後になると予測はあまりうまくいっていない (c)。予測の尺度として、相関係数を計算すると、カオス的なダイナミクスの特性をもつ時系列の場合、短期予測はうまくいくが、長期になるとその予測度は急激に低下する (d) (Sugihara and May, 1990より引用)。

3.3 H反射時系列の解析に向けて

一見ランダムな変動を示す時系列が、カオスであるという可能性を検証することは非常に興味深いことではあるが、上に示した相関次元、非線形予測には少なからず欠点もある。

OsborneとProvenzale (1989) が指摘したように、 $1/f^{\beta}$ 型のスペクトルを持つ時系列（いわゆる有色雑音）は、それが有する線形相関ゆえに確率的に生成されたものであっても、相関次元が有限値に収束してしまう。そして、実際に $1/f^{\beta}$ ゆらぎを作り出すカオス的な系が存在する（Farmer, 1982）ことは問題をさらに深刻なものにしている。

非線形予測に関しても同様に有色雑音の場合、予測性が一見するとカオス的になってしまう。SugiharaとMay (1990) は、埋め込み次元と予測性の関係から、有色雑音はカオスと見分けられるのではないかと述べているが、理論的な裏付けは乏しい。

したがって、H反射時系列が時間的な意味をもつのかどうかを調べる場合には、まずフラクタル解析を行い、それが $1/f^{\beta}$ ゆらぎなのかどうかを確かめるべきである。本論文で、まず検証すべき仮説がH反射時系列が時間的にランダムではないということである以上、フラクタル解析を行い $1/f^{\beta}$ ゆらぎであることを示すことで、まずはその目的が達成されるものと考えられる。このような立場から、以下、4章、5章では主にH反射時系列をフラクタル性の立場から検証する。

とはいえ、たとえ $1/f^{\beta}$ ゆらぎであるとしても、それが少数自由度のカオス系ダイナミクスから生成されているのかどうかは、検証するに値する概念である。このような有色雑音とカオスとを見分ける方法として、近年提唱されたサロゲーションを用いた方法がある（Schiff and Chang, 1992; Theiler et al., 1992）。これは、得られた時系列と同じパワースペクトルを有する確率的データを人工的に生成し、それらのデータと元のデータに適用したカオス解析の結果を比較するものである。本論文では、この方法を利用した結果について第6章で触れる。

4. H反射振幅の時系列が示すフラクタル性

1章で述べたように、H反射テストがその発生機序について、神経生理学者のコンセンサスを得、その結果、ヒトの随意運動などに関する神経機序を調べるうえで多大な貢献を果たしてきたことは疑いない。しかしその一方で、2章で示したように、上位脳の影響を除去した動物においてさえ、単シナプス反射を誘発した場合、その振幅にはかなりの変動が観察される。同様に、H反射の振幅についてもかなりの変動を示すが、この変動は一見非常に不規則であるため、従来はある平均値まわりのノイズとみなされてきた。ところが、3章で説明したように、最近発展を遂げてきたカオス・フラクタル理論によって、このような一見不規則に見える変動の中には、実は時間的にランダムではなく、時間的な意味を持つものがあることが示されてきた。過去の単シナプス性反射の変動を扱った研究は、古典的な統計的手法（平均値、分散、変動係数）による解析が主であるが、これらはあくまで時系列という見方ではなく、多くの測定値全体の静的な特徴を引き出すものであって、その時系列が持つ動的な性質については言及してはいない。本章では、H反射の変動が実はランダムではなく、時間的な意味を持つ変動ではないのかという仮説の検証をおこなう。

4.1 目的

単シナプス性反射の大きさは、2章で述べたようにそれが脊髄ネコのように上位中枢からの入力に影響を受けない状態であっても、かなりの変動を示す。単シナプス性反射の変動を扱った先行研究は、その変動に古典的な統計手法を適用し、変動の起源を明らかにしようとした。2章で紹介した研究によって、その目的に対する解答は一応得られたといえる。しかし、単シナプス反射経路に、なぜそのような変動が存在する必要があるのかについては今だ謎のままである。この謎に迫るためには、なによりも最初にこの変動が時間的にランダムな変動なのかどうかを見極める必要がある。もし、それがランダムでないとなれば、生体の運動制御にとって何らかの意味を持つ可能性があると考えられるからである。変動が時間的にランダムなのかどうかの検証に対して、古典的な統計手法は無力である。そのような方法では変動が持つ動的な性質を決して評価することができない。

SchiffとChang (1992) は、初めて、H反射時系列の動的な性質について検討した。彼らは、H反射時系列が時間的にランダムな変動ではなく、それが低次元のカオスの性質を有しているのではないかとする仮説をたて、非線形時系列解析を行った。1000回のH反射を誘発して得られた時系列の相関次元、Kolmogorovエントロピーを計算した結果では、例えば相関次元についてみれば、埋め込み次元を11次元にしても相関指数が飽和しないことから、その時系列がカオス的なダイナミクスから生成されるという仮説を棄却した。一方で彼らは時系列のハースト指数を計算し、それがホワイトノイズ同様に0を持つこと、しかしながら、自己相関時間が 23 ± 17 sと比較的長期の相関を有していること、またそのパワースペクトルが広帯域な特性をもつことなどから、H反射時系列がランダムフラクタルの性質を持つ可能性を指摘した。

彼らの指摘は、それがもし真であれば、H反射時系列は一見非常に不規則なふるまいを持つにも関わらず、ある一定の秩序を有し、そのフラクタル性によっては非常に長期の時間相関をもつ可能性を意味する（3章を参照のこと）。H反射の時系列が長期の時間相関をもつとすれば、それは少なくとも2つの意味で重要である。まず、第一の点はH反射テストの評価法に関する疑問である。通常、H反射テストの評価には数回の測定値の平均値が用いられる。しかし、ランダムフラクタルな時系列は、そのフラクタル性いかによっては非定常性を持つため、平均値自体が定義できない可能性が考えられる。H反射テストは、その発生機序（単シナプス反射であること）の妥当性、信頼性についてはかなりしっかりした実験的証明の裏付けがあるものの、その変動がもつ時間的な特性についての研究は、驚くべきことにほとんど行われていない。このような観点からもその時間的な特性を明らかにすることは重要である。

第二に重要な点として、そのような長期相関はどこから生じているのかという点が挙げられる。H反射を誘発する際の刺激頻度の影響について調べた研究によると、約8秒間前刺激の効果が持続する (Crone and Nielsen, 1989) とされているが、時系列が持つフラクタル性によってはそれをはるかに凌駕する長期相関（フラクタル相関）を持つ可能性もあり、そのような長期相関をこれまでの神経生理学で説明できるのかという疑問が生じる。そして、このような変動が、やはり生体にとって何らかの意味をもっているのではないかと期待

を抱かせるのである。

SchiffとChangの研究では、H反射を誘発する際の電気刺激強度などの方法の面で具体的な記述が欠如しているばかりでなく、そのフラクタル性がどこに起因するものなのかについては、全く言及されていない。おそらく、彼らの頭の中には、H反射の変動≡高位中枢からの調節という認識があったのだろうが、それは自明ではなく、H反射時系列のフラクタル性が、神経線維の伝導等、末梢のレベルによって生ずる可能性も否定できない。ただし、単シナプス性反射の変動が、Hunt (1955) やRudomin (1967) がいうように運動ニューロンプールあるいは、単シナプス性の反射弓に直接作用を及ぼす介在ニューロンの活動を反映しているのだとすれば、H反射時系列のフラクタル性は、電気刺激強度の変動、神経線維の伝導、神経伝達物質の放出量の変動などによって生じるのではなく、少なくともIa求心性線維が運動ニューロンに結合する脊髄レベルで作り出されるものと推測できよう。

本実験の目的は、①H反射時系列は強い時間相関を持つフラクタルである、②そのような特性は脊髄レベルで生み出される、という以上2つの仮説を検証することであった。

4.2 方法

(1) 実験設定

本実験には5名の健康者が被検者として参加した。各被検者に対して、実験の意義について説明を行い、実験参加の同意を得た。

被検者には座位安静をとらせた状態で実験を行った。膝窩部の脛骨神経に幅1msの矩形波の電気刺激を経皮的に与え、ヒラメ筋よりH反射を誘発した。ヒラメ筋の筋腹に3cm間隔で電極を貼り付け表面筋電図を導出した。筋収縮に伴う二次的な影響を除去するために、足関節を固定した。刺激の頻度は毎秒1回とし、1050回のH反射を連続的に誘発した。ヒラメ筋から導出した筋電図は、AD変換器で10kHzでサンプリングしコンピュータに取り込み、H波（およびM波）の振幅をハードディスクに記録した。

刺激強度には1.2MT (Motor Threshold) と0.9MTの2つの強度を用いた。測定は各強度について2回ずつ実施した。1.2MTの条件では、H波に加え、M波が誘発されるが、0.9MTの条件ではH波のみが誘発される（図4-1）。M波は、電気刺激によって運動ニューロンの軸索

が直接興奮させられ生じた活動であり、脊髓レベルの調節とは独立している。つまり、H反射時系列のフラクタル特性が脊髓レベルで生じていることの確認は、同時に誘発されるM波時系列の性質と比較することによって可能となる。すなわち、もしM波時系列にH波時系列同様のフラクタル的な性質が認められる場合、その性質の生成には脊髓レベルは無関係であり、例えば神経線維の伝導、刺激強度の変動等によって生成されるのだらうと結論づけることができる。

ところが、1.2MTにおいてH反射時系列のみに特有のフラクタル性がみられたからといって、ただちにそれを脊髓レベルで生じているものと決めつけるわけにはいかない。M波が誘発される場合、それはH反射誘発以前に筋が収縮していることを示すが、その前筋収縮が影響を与える。また、1MT以上の強度では、運動ニューロン軸索に逆伝播性のインパルスが生じ、これがH反射を誘発する成分と衝突し、閉塞現象が生じる(図4-1a)。つまりM波の存在自体によって、H反射のフラクタル性が生成される可能性は依然として捨てきれない。したがって、1.2MTの実験に加え、1MT以下の強度の実験を行って、なおもH反射時系列のフラクタル性が保存されるか否かを検討する必要がある。本研究では、このような必要性から0.9MTの測定を実施した。

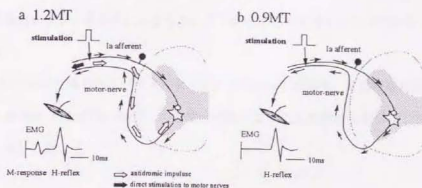


図4-1 実験設定

刺激強度が1MTより大きい場合、H波に加え、運動神経線維に対する直接刺激によってM波が誘発される(a; 1.2MT)。M波の誘発には脊髓内の構造は一切関与していない。もしH波、M波の同時系列に同様のフラクタル性がみられた場合、そのようなフラクタル性は、神経線維の伝導性や神経筋接合部の性質によってうみだされるものと理解できる。一方、M波時系列にないフラクタル性がH波時系列にみられた場合、その性質の生成は脊髓レベルで行われているものと推測できる。とはいえ、刺激強度が1MT以上の場合、M波による筋収縮、運動神経に発生する逆伝播性の活動電位が生じ、これらによってH波時系列のフラクタル性が生成される可能性も否定できない。そこで、1MT以下の強度で実験を行い、M波がない状態でもH波時系列に1.2MT時同様フラクタル性が観察されるかどうかを確かめる必要がある(b)。

また、H反射テストでは毎秒1回程度の刺激頻度では、刺激の後効果が残存するといわれており、このような後効果がH波時系列の長期相関を促し、その結果フラクタル性が作り出される可能性も考えられる。そこで被検者2名について、3sに1回の刺激頻度でH反射を誘発し、毎秒1回の刺激頻度を用いた場合の結果との比較を行った。

(2) データ解析

H波、M波(1.2MTのみ)の各時系列のフラクタル性を調べるために、粗視化スペクトル法(CGSA法)を用いた。3章に示したように時系列のフラクタル性を調べる方法はいろいろなのがあるが、この方法を用いた理由は、以下のとおりである。まず第一に、SchiffとChangはH反射時系列のハースト指数が0であることを報告しているが、この場合、通常のフラクタル解析ではホワイトノイズと同等なものとして扱われ、その時間的特性の差異について言及することができない可能性がある。そのため、本研究では、フラクタルの特性を表すものとしてスペクトル指数(β)を求めることが適当であると考えられる。また、 $1/f^\beta$ 型のパワースペクトルが、必ずしもフラクタルを意味しないことに注意しなければならない。CGSA法は、時系列に占めるフラクタル成分の割合を調べることで、 $1/f^\beta$ 型のパワースペクトルが時系列のフラクタル性によるものかどうかを明らかにすることができる点において信頼性が高い。

CGSA法を用いて得られるパラメータ(β , %Fractal)のH波、M波時系列間の差異、および測定条件間(1.2MTと0.9MT)の差異の比較には、二元配置の分散分析を用いた。有意水準は5%とした。

(3) サロゲート解析

H反射時系列のランダムフラクタルの特性をより明確に示すために、コンピュータ上で生成されたサロゲートデータ(Surrogate data)に対し、CGSA法による解析を行った。サロゲートデータとして以下の2種類のものを用いた。

①測定したH反射時系列の順番をランダムに並びかえたデータ (Iso-distribution surrogate

data: 以下DS)

②測定したH反射時系列と同じパワースペクトルを持つが、各周波数成分の位相がそろっているデータ (Iso-spectrum surrogate data: 以下SP)

DSは、まず時系列データと同じデータ数の一様乱数をコンピュータ上で生成し、時系列データに割り付け、乱数をキーとして降順にソートすることによって得た。SPは、時系列データのパワースペクトルを計算し、各周波数成分の位相をそろえて逆フーリエ変換することによって得た。DSは元のデータと同じ平均値、標準偏差を持つが、時系列の時間の情報が失われる。そのため、元のデータに存在するかもしれない時間相関は、並びかえによって完全に消失するはずである。この場合、 β がほぼ0になることが予想される。一方、SPは、パワースペクトルが $1/f^\beta$ 型を示したとしても、各周波数成分の位相が増っている場合には、時系列をランダムフラクタルとみなせないこと (Higuchi, 1990) を確認するものである。このデータでは、そのことは%Fractalが劇的に減少することによって示せよう。

4.3 結果

図4-2に、典型的な時系列の一例を示す。1.2MTの条件で得られた時系列をみると、H反射の変動はかなり大きいことがわかる。この時系列の平均値と標準偏差は 3.34 ± 0.34 (mV)であるが、これは先行研究の値のばらつきの程度と比べても異常ではなく、本実験の測定が妥当なものであることが確認できた。H反射時系列に比べM波時系列は一見して変動が小さい。H反射の変動が大きいことが、その絶対値の大きさに依存しているのではないことは、図4-2の0.9MT条件で誘発したH反射時系列のグラフを見れば理解できよう。この場合、反射の大きさ自体は、1.2MTにおけるM波の大きさと大差ないものの、依然として時系列には大きな変動があることが観察される。Hunt (1955) は単シナプス性反射の変動についても同様に、刺激強度を変えても、変動の分散があまり変化しないことを報告している。

時系列の%Fractalは、 $93.3 \pm 2.3\%$ (1.2MT: H波)、 $91.6 \pm 3.1\%$ (0.9MT: H波)、 $94.3 \pm 3.3\%$ (0.9MT: M波) とすべて90%以上の高い値を示した (表4-1)。この結果は、H波、

M波の時系列を取り扱う場合、それはランダムフラクタルとして扱うことが適当であることを示す。なお、これらの値の間に統計的な有意差はみられなかった。

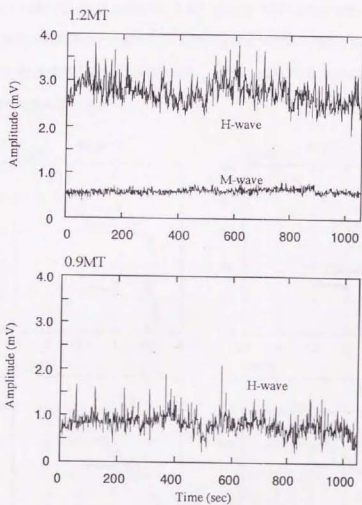


図4-2 H波、M波振幅の時系列

H波、M波振幅の時系列の典型例。H反射時系列は刺激強度に関わらず大きな変動を示すが、M波時系列は比較的安定した値を示す。

図4-3に、時系列にCGSA法を適用することによって求めたフラクタル成分のパワースペクトルの典型例を両対数軸グラフで示す。H波時系列のパワースペクトルは負の傾きを持つのに対し、M波時系列はホワイトノイズと同様な平坦なパワースペクトルを示した。本研究では、スペクトル指数(β)を対数周波数で-1.5Hz(約30s周期に相当)から-0.5Hz(3sに相当)における回帰直線の傾きとして求めた。その結果は、表4-1に示すとおり、1.2MTのH波は 0.75 ± 0.26 、0.9MTのH波は 0.80 ± 0.39 、1.2MTのM波は 0.26 ± 0.14 であった。1.2MTにおいてH波、M波両時系列間の β の値は0.1%水準で有意にH波時系列の β の方が大きい値を示した(すべての被検者でH波の $\beta > \text{M波の}\beta$)。また、1.2MTと0.9MTのH波時系列の β には有意差は認められなかった。

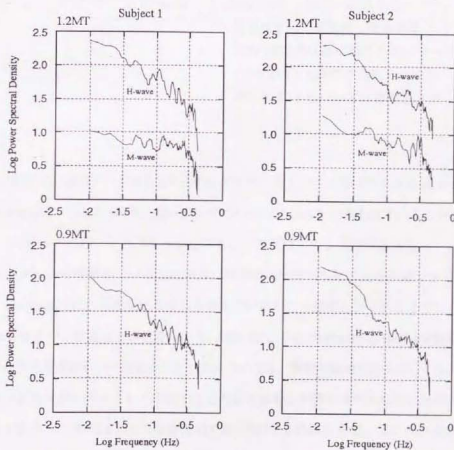


図4-3 フラクタル成分のパワースペクトル

H反射、M波時系列から求めたフラクタル成分のパワースペクトルを被検者2名について示す。H反射時系列は刺激強度に関わらず、負の傾きをもったパワースペクトルを示しているが、M波時系列はホワイトノイズ同様の平坦なパワースペクトルをもつ。

刺激頻度 3 s に 1 回を用いた場合も、被検者数は 2 名と少数例ではあるため統計的処理は行っていないが、1 s に 1 回の刺激頻度を用いたときとはほぼ同様な結果が得られた。

表4-1 CGSA法の結果

		% Fractal	β
1.2MT	H-wave	93.3 \pm 2.3	0.75 \pm 0.26*
	M-wave	94.3 \pm 3.3	0.26 \pm 0.14
0.9MT	H-wave	91.6 \pm 3.1	0.80 \pm 0.39
stimulation interval: 3s	H-wave	95.9; 92.7	0.73; 0.66
	M-wave	89.9; 97.8	0.26; 0.46

数値はすべて平均値±標準偏差

1.2MTおよび0.9MTの各カテゴリーはn=10

* P<0.001: 1.2MTのM波との比較

刺激頻度3 s については被検者 2 名

図4-4に測定時系列データとDSデータのグラフ、および各々のフラクタル成分のパワースペクトルを示す。DSデータは、元のデータにみられる「うねり」が失われていることがわかる。実際、DSデータのパワースペクトルをみると、両対数グラフ上で平坦となり、ホワイトノイズのパターンに酷似していることから、時間相関が消失したことを認識できる。DSデータは、その生成方法から周期的な成分を含んでいないことは明らかであるように、実際のその%Fractalはすべて80%以上の値を示した(表4-2)。DSの%Fractalの値がH反射時系列で元データよりも有意に小さい値を示したことについては、検討の余地はあるが、ここでは元データをランダムフラクタルとしてみなすことの妥当性をより強く示す肯定的な結果として捉えるべきであろう。DSの β はH反射時系列では1.2MT、0.9MTともに、元データよりも有意(P<0.001)に小さくなった。これは、図4-4のパワースペクトルにみられるように、DSデータにおいて時間相関が消失したことを示す。一方、M波時系列については、DSと元データとの間に β の有意な差異は認められず、元M波時系列がほぼホワイトノイズ同様な性質を有していることがわかる。

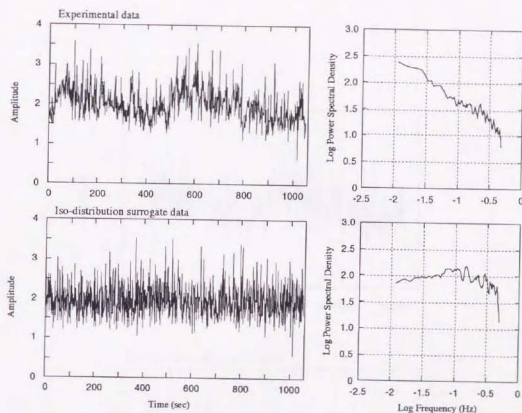


図4-4 元データとDSデータ (Iso-distribution surrogate data)

上段は元データの時系列とパワースペクトルを示す。下段には上段の時系列のDSおよびそのパワースペクトルを示す。DSには元データにみられる「うねり」が失われていることが分かる。DSは元データに存在する時間の情報を持っているため、そのパワースペクトルは平坦なものとなる。

図4-5は図4-4と同じ測定時系列データとそのSPデータを示したものである。両者は同じパワースペクトルを持つにも関わらず、SPデータでは、予想通り、元データにあった不規則さがかなり軽減されている。実際、SPデータの%Fractalの値はおよそ50%となり、元データに対し有意 ($P < 0.001$) かつ、劇的な減少を示した (表4-2)。なお、SPはもはやランダムフラクタルとしてみなすことが適当でないため、表3-2に示した β の値は (網掛けの欄) 元々のフラクタルとしての意義を失っていることに注意すべきである。

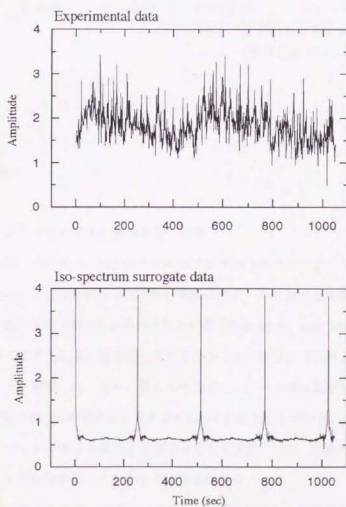


図4-5 元データとSPデータ (Iso-spectrum surrogate data)

上段の元データのSPデータを下段に示す。SPには元データにある不規則さが失われており、もはやフラクタル的ではない。

表4.2 サロゲートデータに対する解析結果

		iso-distribution surrogate		iso-spectrum surrogate	
		%Fractal	β	%Fractal	β
1.2MT	H-wave	86.2 \pm 3.1†	0.12 \pm 0.10*	52.9 \pm 1.9*	0.87 \pm 0.25
	M-wave	86.4 \pm 2.3	0.11 \pm 0.07	54.4 \pm 1.9*	0.54 \pm 0.14
0.9MT	H-wave	87.6 \pm 2.8†	0.12 \pm 0.10*	53.0 \pm 3.2*	0.92 \pm 0.32

数値は全て平均値±標準偏差

†P<0.005, *P<0.001: 元データとの比較

4.4 論議

(1) ランダムフラクタルの性質をもつ変動

本実験の第一の目的は、H反射時系列がランダムフラクタルとみなせるかどうかを検証することであった。CGSA法を心拍変動の8000点のデータに適用した先行研究では、得られた%Fractalの値が平均で85.5%と報告されている(Yamamoto and Hughson, 1994)。彼らは%Fractalがこのように高い値を示したことから、心拍変動がランダムフラクタルの性質を有していることを確認した。また、彼らの報告では、データの点数が8000点より少ない場合、%Fractalの値が8000点の場合よりも小さく見積もられるとしている。本研究の、1050点のデータ長で%Fractalが90%よりも大きな値を示した結果は、H波、M波両時系列が確かにランダムフラクタルとみなせることを示しているといえる。

さらに測定データと同じパワースペクトルを持ちながら、各周波数成分の位相差を0にすることによって得られるSPに対する解析結果は、上記の結論の確信度をより強めるものである。従来、 $1/f^{\beta}$ 型のパワースペクトルを持つこと自体がランダムフラクタルであることの必要十分条件のようにみなされてきたが、Higuchi (1990) が指摘しているように、これは必ずしも真とはいえない。 $1/f^{\beta}$ 型パワースペクトルの各周波数成分の位相が十分に混合されていなければ、その時系列をフラクタルとはみなすことは適切ではない(図3-6)。図4-5は

非常に極端な形でそれを示している。たしかに、図4-5のような時系列を前にしてフラクタル解析を試みる研究者はいないにしても、時系列の中に図4-5のような成分が一部含まれていて、結局 $1/f^\beta$ 型のパワースペクトルの大部分はその成分によって説明されるというようなことが起こらないとも限らない。通常のパワースペクトルを用いたフラクタル解析では、この区別をはっきりとつけることができなかったのである。ただし、SPの%Fractalの値は表4-2に示すように0%になったわけではなく、50%と比較的高い値を示した。YamamotoとHughson (1993) は、8000点のSPデータに対し、CGSA法を適用するとその%Fractalの値が20%になることを報告しているので、本研究でのSPに対する比較的高い%Fractalの値は、データ長が1050点と短いことに起因しているのかもしれない。いずれにせよ、SPデータの%Fractalが元データと比較しておよそ半分にまで減ぜられることは、たとえそのパワースペクトルが $1/f^\beta$ 型であっても、非フラクタルな成分のかかなりのパワーがCGSA法によって除去されているということを示している。

(2) フラクタル相関

(1) のH反射時系列がランダムフラクタルとしてみなせるという結果自体は、取り立てて新しい見解ではない。なぜなら、本論文におけるランダムフラクタルの定義では、全く時間相関を持たないホワイトノイズまでもがその範疇に含まれるからである。いくらH反射時系列がランダムフラクタルといったところで、それが単なるホワイトノイズであったとすれば、それはH反射の変動を雑音とみなす従来と同様な見解を言い換えただけにすぎない。この実験結果の重要なポイントは、H反射の時系列がホワイトノイズとは異なり、非常に長期の相関を持つところにある。表4-1に示すように、H反射時系列の β は約0.8であり、ホワイトノイズの場合($\beta \approx 0$) に比べてかなり大きな値を示す。ランダムフラクタル時系列は β の値が大きくなるほど長期の時間相関を有する。本論文では、時間相関の強弱がその時系列のフラクタル性に依存しているという意味で、この時間相関をフラクタル相関と呼ぶことにした。一方で、M波時系列の β はH反射時系列に比べ小さく、ホワイトノイズに近い時間的性質を有している。H反射時系列はM波時系列に対して、刺激強度が一定であっても独特の“うねり”があることに注目してもらいたい(図4-2)。

H反射時系列が有するフラクタル相関を、より明確に示すために時系列の順番をランダムに並び替えたデータ (DS) に対してCGSA法を適用した。このような並び換えによって時系列がもつ時間の情報が除去されるため、 β は0に近くなる (図4-4、表4-2)。したがって、H反射時系列のフラクタル相関が、H反射振幅の分布型によって生じているのではないことが理解できるだろう。しばしば、フラクタルの性質が、値の変動の大きさと対応しているかのように誤解されることがあるが、それは誤りである。強いフラクタル相関はあくまで、時系列の値の順番に依存しているのであって、変動の絶対値の大きさに依存しているのではない。過去の単シナプス反射の変動を扱った研究が、時系列を一旦プールしておいて、全体としてみたときの特性、いわば静的な特性を調べることを目的としてきたのに対し、本研究はそのデータの、時間に依存した出現の仕方に注目したものである。

CroneとNielsen (1989) がH反射を誘発する際、その刺激間隔は8 s以上あけるべきであるとしているのに従えば、本実験で用いた毎秒1回の刺激頻度では、刺激後の効果が残存し、それゆえにH反射の時系列にフラクタル相関が生成される可能性も考えられる。刺激頻度を毎秒1回としたのは、この頻度がH反射テストに実際に用いられる頻度であること (田中, 1986)、例えば3 sに1回の刺激頻度を用いた場合、1回の測定時間が60分にも達し、被検者の姿勢その他の状態を一定に保つことが難しくなることが理由であった。しかし、2名の被検者について、3 sに1回の刺激頻度を適用したところ、得られた結果には顕著な差異はみとめられなかった (表4-1)。3 sに1回の電気刺激を用いたとしても、おそらく本実験の結果を変更させるような事態には至らないと考えられる。そもそも、後述するように、本研究で明らかとなった変動の時間相関のオーダーは、刺激頻度の時間のオーダーよりもはるかに大きい。

(3) フラクタル相関を生み出す経路

M波時系列のフラクタル相関はホワイトノイズと大差ないものであったのに対し (β が0に近い)、H反射時系列にはかなり強いフラクタル相関が認められた (図4-6に全被検者から得られたパワースペクトルのアンサンブル平均を示す)。この結果は、H反射時系列に観察されるフラクタル相関が、神経線維の伝導、神経筋接合部の性質 (アセチルコリンの放出量など)、筋の収縮などのレベルで作られていないののではないことを示す。なぜなら、も

しそうであるならば、M波時系列にもH反射時系列同様のフラクタル相関が認められるはずである（上に挙げた中では、神経筋接合部のアセチルコリンの放出はランダム過程であるという報告が既になされてはいる（del Castillo and Katz, 1954））。しかし、なおも、M波の存在自体によってH反射時系列のフラクタル相関が生成されるのではないかという疑問が残る。例えば、M波が存在することは、同時に電気刺激のIa求心性線維に運動ニューロンに向かう逆行性の成分が存在することを意味するし、またH反射以前にM波によって筋が収縮を起こすという影響も十分に考えられる（図4-1）。しかし、0.9MTの条件でもなおH反射時系列に同等のフラクタル相関が認められたことは、M波の存在がH反射のフラクタル相関に無関係であることを示している。以上から、H反射時系列のフラクタル相関が、少なくとも脊髓内のIa求心性線維→運動ニューロンのレベルで生じていると結論づけることができた。

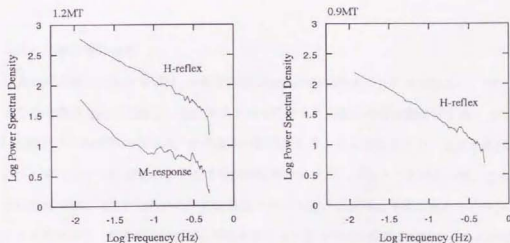


図4-5 フラクタル成分のパワースペクトル（全被験者のアンサンブル平均）

フラクタル成分のパワースペクトルを全被験者の全試行分をアンサンブル平均したもの。H反射時系列の強いフラクタル相関（傾きが急）に対し、M波時系列の弱いフラクタル相関（平坦）という特徴がよく現れている。

上記の結果を考えると、H反射時系列にみられる強いフラクタル相関の生成として、主に2つの経路からの影響を考えることができる。すなわち、脊髄分節性の影響、および脊髄上位からの影響の2つである。脊髄ネコなどを用い、脊髄上位からの入力を遮断した状態で行われた単シナプス反射の変動を扱った先行研究は、そのような状態ですら、反射にかなりの変動があることを示している。これらの先行研究に則れば、まず最初にフラクタル相関の起源として脊髄分節性の影響を考える必要があるだろう。例えば、拮抗筋のIa求心性線維は介在ニューロンを介して、被検筋運動ニューロンに収束するIa求心性線維にシナプス前抑制を与えることが知られている (Morin et al., 1984)。筋紡錘は、持続的にIa求心性線維を活動させていることから、このような拮抗筋の筋紡錘からの入力フラクタル変動の一要因となっている可能性もある。また、脊髄上位からの効果も無視できない要因である。確かに高位中枢の影響がなくとも単シナプス反射の大きさが変動を示すことは確かであるが、その変動がフラクタル相関を持つか否かはまた別問題である。脊髄上位の影響があつて初めて、無秩序な変動の中に時間相関という秩序が現れてくるという可能性も考えられる。この問題については、次章において詳細に取り扱う。

(4) 実験結果の意味

本研究の第一の発見事項は、H反射振幅の変動が時間的にランダムではなく、フラクタルとしての秩序を有しており、そのフラクタル性ゆえに長期の時間相関を有することであった。H反射テストの暗黙の仮定は、その変動が時間的にランダムであること、換言すれば、運動ニューロンプールに影響を与える効果が時間的にランダムであることであった。このような仮定の元では、H反射振幅が多少の変動をみせても、その変動は平均値まわりのランダムなノイズであつて、複数回の測定値を平均することによってその影響を軽減することができる。しかし、本研究の結果は、このような暗黙の仮定に警鐘をならすものである。なぜなら、H反射の振幅(≡運動ニューロンプールの興奮性)の変動は、時間に依存する特性を有しているからである。

ある時系列が $1/f^\beta$ 型のパワースペクトルを持つとしよう。 β が1より大きい場合、その時系列はもはや定常過程とはみなせない (Mandelbrot, 1983)。非定常過程では、統計的性質

が絶対時間に依存するため、絶対時間に依存しない平均値を定義することができない(日野, 1977; 野崎と山本, 1994)。H反射時系列の場合は表3-1に示すように β は約0.8程度の値を示す。したがって、その変動は数学的には一応定常過程の範疇に入る。この場合には、自己相関関数が定義できるが、それはラグタイムを τ とすると $\tau^{\beta-1}$ と表される(3章を参照)。

自己相関関数が $\tau^{\beta-1}$ のようにべき型を示す場合、それが0に収束するのは非常に遅い(Bassingthwaite et al., 1994)。H反射時系列と同程度の β が0.8の場合を考えると、理想的な $1/\tau^{\beta}$ ノイズの場合(パワースペクトルの周波数領域の上下下限がない場合)、その自己相関関数は $\tau^{\beta-1}$ と表されるが、これを最初の10分の1の値に収束させるために 10^5 秒もの時間が必要となる。もちろん、H反射時系列の場合はそのような長い測定を続けているわけではないので、パワースペクトルがそのような低周波数域まで $1/\tau^{\beta}$ 型を示すのかどうかは分からないし、また実際、そのような長期の測定も不可能である。しかし、少なくとも、今回 β を求める際に用いた対数周波数にして1.5Hz、すなわち30 sの間は自己相関が残存することは間違いない。また、各被検者のフラクタル成分のパワースペクトルを見たところでは、このような $1/\tau^{\beta}$ 型のパワースペクトルが、かなり低い周波数域まで延びている(図4-3, 4-6)ことから、さらに長期間、自己相関が残存している可能性が高い。

Nonparametric Run Test

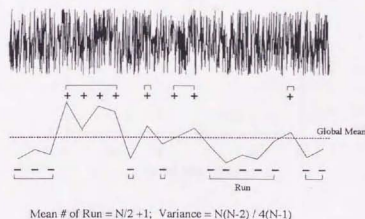


図4-7 連続検定の概念図

説明は本文を参照のこと。

平均値が如何に時間に依存しているかを実際に示すために、測定したH反射時系列に連の検定を適用してみよう。連の検定とは、時系列の定常性をノンパラメトリックに検定する方法である。図4-7に連の検定の説明図を示す。上段には、いわゆるホワイトノイズが1000点分示してある。いま仮にこの変動を50点ごとに平均化したとすると（下段）、これらの局所平均は、全体の平均値まわりをゆらぐ。全体平均よりも大きいものを「+」、小さいものを「-」とすれば、+および-の連（Run）ができるが、平均値が定常である時系列では、この連の総数が、局所平均の総数をNとして、平均 $N/2+1$ 、分散 $N(N-2)/4(N-1)$ の正規分布に従う（Yamamoto and Hughson, 1994; 野崎と山本, 1994）。図4-7の例では、連の総数は9であるから、上段のホワイトノイズは予想通り定常とみなしてよい。測定データ1050点を50点ごとに分割し、連の検定を適用した結果を図4-8に示す。縦軸は、データの内からランダムに50点の区間を選んだときの平均値、横軸はデータ全体の平均値を示す。連の検定によって非定常と判定されたものについては黒塗りのプロットで示してある。測定時系列20例の内、10例が非定常であると判定されていることから、やはり、H反射の変動は定常とはいえないようである。

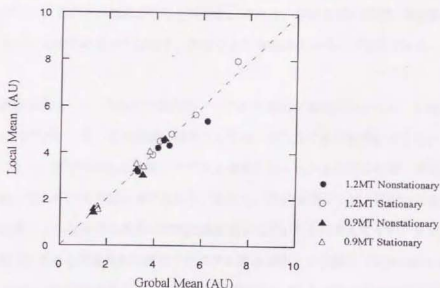


図4-8 連検定の結果

本実験で得られたH反射時系列（計20例）について連検定を適用した結果。縦軸は無作為に抽出した局所の平均値、横軸に全体の平均値を示す。連検定によって非定常と判定されたものを黒丸で示す。その結果20例中10例が非定常と判定された。

H反射がその方法論としての妥当性を検討される上で、1章で述べたようにその機序に関してはかなり系統だった裏付けがとられているのに対し、それが示す変動には注意が払われず、何の評価もなされてこなかったことは、ある意味で神経生理学における盲点であったといえる。その原因は、従来の概念のもとでは、不規則な変動の中に何らかの情報が隠されていることを認識できなかったことにある。不規則なものが秩序を持つという考え自体が近年のカオス・フラクタル理論によって一般的になってきたことを考えれば、これもやむを得ないことなのかもしれない。本研究の結果は、理想的な測定時間などを具体的に提示するものではないが、H反射時系列がもつ時間的特性が非定常的であるため、H反射テストの評価はそれを踏まえた上で慎重におこなう必要性を提示するものである。

4.5 小括

ヒトのヒラメ筋より1050回のH反射を誘発し、その時系列にCGSA法を適用した。その結果、H反射時系列はスペクトル指数(β)が約0.8の強い時間相関を有するランダムフラクタルであるのに対し、M波時系列は β が約0.3とホワイトノイズに近い性質を有するランダムフラクタルであることが証明された。この結果から、ヒトのH反射時系列は強いフラクタル相関を持っていることが確認されると同時に、それは、神経線維の伝導、神経筋接合部の性質等によって生成されるのではなく、少なくとも脊髄内のレベルで生じていることが示された。

本章の実験系によって、H反射時系列のフラクタル相関が脊髄内のレベルで生成されたことが確認されたとはいえ、その生成の起源としては、まだ多くの可能性が考えられる。ざっと見積もっても、まずIa求心性線維シナプスと運動ニューロンとの間の性質、脊髄分節性の入力、脊髄上位からの入力等が挙げられる。ただし、この中でシナプス終末での性質が、本章の実験結果のような非常に長期の相関に直接関与しているとは考えにくい。また、自律神経系の支配下にある心拍変動が同様なフラクタル性を示すという報告(Yamamoto and Hughson, 1991; 1994)を考えると、上に挙げた要因の中でも、共通の支配器官である高位中枢、すなわち脳の関与を疑いたくなる。次章では、H反射のフラクタル相関と脊髄上位との関連という見地から、その起源について検討する。

5. H反射時系列のフラクタル相関に対する高位中枢の関与

5.1 目的

4章では、H反射時系列の一見不規則な変動が、時間的にランダムな変動ではなく、強い時間相関を有するランダムフラクタルの性質を有すること、またそれは脊髄内の何らかの要因によって生成されるものであることを示した。運動ニューロンプールは常に、脊髄上位からの影響、あるいはさまざまな脊髄分節性の入力（拮抗筋との相反神経支配、皮膚感覚神経からの入力等）などの影響を受けている。また、Ia求心性線維と運動ニューロンの間のシナプス結合における神経伝達物質の放出量の変動の影響も考えられる。あるいは、これら単独の効果というよりはその相互作用が関係しているのかもしれない。一体、H反射時系列のフラクタル相関はどこに起源を持つものなのだろうか。

近年報告された研究結果、たとえばネコの中脳網様体のニューロンの自発的な発火間隔のパワースペクトルが $1/f$ 型になること（Yamamoto et al., 1987）、またヒトの脳波の変動がフラクタルの性質を有するという報告（Inoue et al., 1994; Woynshville and Calabrese, 1994）は、神経系の総司令塔である脳のニューロン（群）の振る舞いにすでにランダムフラクタルの性質が備わっている可能性を示す。さらに、心拍変動についてフラクタル解析を行った研究報告（Kobayashi and Musha, 1982; Yamamoto and Hughson, 1994）は、心自律神経系にもH反射同様のフラクタル相関が存在することを示しており、この観点からも、自律神経系および体性神経系の統合器官である高位中枢の影響の可能性は十分に考えられるところである。本章では、H反射時系列の強いフラクタル相関には脊髄上位による調節が関与しているという仮説を検証するための実験を行った。

本章で、H反射時系列のフラクタル相関に対する脊髄上位の関与という仮説をたてる理由は、もう一つある。例えば、ある脊髄分節性の入力の影響（例えば拮抗筋の影響）を仮定し、その関与を示唆する実験結果が得られたとしよう。その場合、フラクタル相関を生み出す経路を特定する問題は、その拮抗筋からの影響がフラクタル相関を生み出すのはなぜかというさらなる問題に先送りされるにすぎない。その意味からも、まず脊髄上位が関与するか否かを調べた方が効率がよい。

5.2 方法

(1) 実験方法

被検者は6名の健常者(NS)と7名の脊髄損傷患者(SCI)であった。SCIの脊髄損傷に至った経緯、受傷部位、および受傷年等のプロフィールを表5-1に示す。なお、実験に先立ち、研究目的、意義について説明を行い、実験参加の同意を得た。

表5-1 脊髄損傷患者のプロフィール

被検者	受傷年月	原因	受傷部位	診断	H反射
NO.1	S63.11	交通事故	C-11,12	完全	○
NO.2	H5.5	交通事故	C-12	不完全	○
NO.3	H3.9	交通事故	C-10	完全	1回は右脚のみ
NO.4	H4.4	交通事故	C-8	完全	○
NO.5	H3.10	交通事故	C-8	完全	○
NO.6	H2.7	交通事故	C-6	完全	右脚のみ
NO.7	H4.1	交通事故	C-4,5,6	不完全	○*

*注：被検者NO.7は不自由ながら左脚を動かすことができる。

実験は被検者に座位安静をとらせた状態で行った。両脚の膝窩部の脛骨神経に幅1msの矩形波の電気刺激を同時に与え、両脚のヒラメ筋よりH反射を誘発した。電気刺激の強度は小さなM波が得られる程度の強度(≈ 1 MT)を用いた。ヒラメ筋の筋腹に3cm間隔で電極を貼り付け表面筋電図を導出した。筋収縮に伴う二次的な影響を除去するために、足関節を固定した。刺激の頻度は毎秒1回とし、1050回のH反射を連続的に誘発した。ヒラメ筋から導出した筋電図は、AD変換器で10kHzでサンプリングしコンピュータに取り込み、H波の振幅をハードディスクに記録した。図5-1に測定方法を示す。なお測定は、各被検者について2回ずつ行った。

NSについては、全ての被検者で両脚より安定したH反射を誘発することができたが、SCI

については、神経線維が萎縮のためか、経皮的な電気刺激ではH反射が誘発できない、あるいは筋電図が非常に小さく、その振幅がノイズに埋もれてしまうことなど不都合が生じた場合がある。両脚ともにH反射を誘発できなかったSCIは被検者の数には入れていないが、片脚のみしか誘発できなかった被検者が7名中2名いた。また、被検者によっては、M波の閾値が高い場合があり（おそらく、運動神経線維の萎縮が原因と考えられる）、その際1MTという刺激強度では、筋収縮等の残存効果が強すぎるので、電気刺激強度を適当な強度に調節した。表4-1の被検者NO.7は、左脚は不自由ながらも随意的に動かすことができたことを明記しておく。

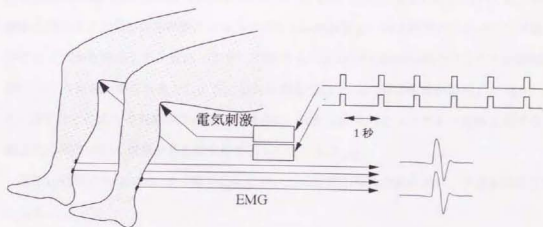


図5-1 測定の設定

刺激強度1MTで両脚のヒラメ筋より同時に1050回のH反射を誘発する。

(2) データ解析

本実験で観察した項目は以下のとおりである。

- ①NSの両脚から得られたH反射時系列は、4章の実験結果同様のフラクタル相関を示すのか。
- ②SCIにおいて誘発されるH反射時系列が、4章の実験結果およびNS同様の強いフラクタル相関を持つのか。
- ③NS、SCIの両グループの被検者から得られたH反射時系列の変動は、両脚間で同期しているのか。

①、②については、それぞれの時系列に4章同様にCGSA法を適用することによって解析を行った。①では、両脚に同時に電気刺激を与えるという手続きがH反射時系列のフラクタル性を変化させないということの確認をおこなう。②では、もしSCIの時系列にNSのような強いフラクタル相関が認められない場合、それは、目的の項で述べた仮説のとおり、フラクタル相関に脊髄上位からの入力に関与していることを示すことになる。③については左右の脚から得られたH反射時系列間のクロススペクトルを計算し、両変動間のコヒーレンスおよびフェイズから評価した。仮に、②で、NSにくらべSCIのH反射時系列のフラクタル相関が弱いという結果が得られたとしよう。それに加えて③でNSで両変動間が同期しており、逆にSCIではそのような同期がみられない場合は、H反射時系列のフラクタル相関に対する脊髄上位の関与という仮説をさらに支持するものといえよう。

SCIとNS間の%Fractal、 β の値の比較には、二元配置の分散分析を用い、有意水準を5%とした。

5.3 結果

まず、結果を分析、解釈する前に、両脚の電気刺激が互いに影響を与えあっていないことを確認しておく必要がある。NS 1名に対し、右脚への電気刺激強度を一定に保ちつつ(1MT)、左脚への電気刺激の強度をH反射の閾値下のレベルから最大M波が得られるレベルまで2Vずつ増加させ、再びH反射閾値下の強度に下げたとき(各強度で10回ずつ刺激)、右脚から得られるH反射振幅がどう影響を受けるのかについて調べた。それを示し

たのが図5-2である。左脚への刺激を変化させても、右脚から得られるH反射振幅が全く影響を受けていないことがわかる。したがって、両脚間の刺激が互いに影響を及ぼしあっていないことが確認された。

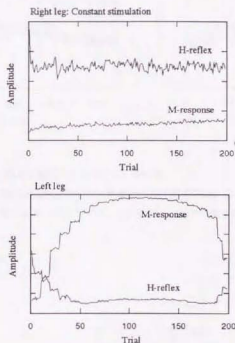


図5-2 両脚に与える電気刺激にクロストークがないことの確認

右脚に与える電気刺激を一定強度に保ち、左脚に与える刺激強度を変化させる。左脚への刺激強度の変化は、右脚から誘発されるH反射の変動に影響がないことがわかる。

図5-3にNSおよびSCIより得られたH反射時系列の典型例を示す。NSの時系列をみると、両脚のH反射の変動が同期していることがうかがえるが、SCIではそのような特徴がみられない。実際、これらの時系列のクロススペクトルを計算するとその特徴が明らかとなる。図5-4は図5-3に示した左右の時系列間のコヒーレンスとフェイズである。コヒーレンスは、時系列間と同じ周波数成分の同期の程度を示し、完全に同期している場合、その値は1となる。フェイズは周波数成分の位相のずれを示し、0の場合、両周波数成分は同じ位相で変動していることを示している（日野, 1977）。NSのコヒーレンスがおよそ0から0.2Hzの間で高い値を示しているのに対し、SCIではそのようなコヒーレンスの高い周波数区間は認められない。さらにNSでは、コヒーレンスの高い区間のフェイズは揃っていた。

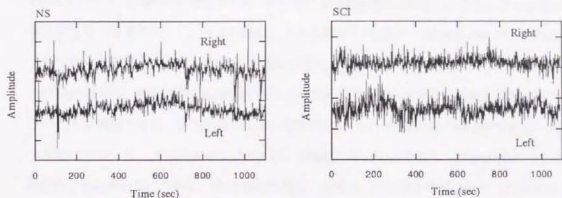


図5-3 左右の脚より誘発されるH反射の時系列

上段にNS、下段にSCIから得られた時系列の典型例を示す。よく見ると、NSから得られる時系列の変動は左右でよく一致している。それに対し、SCIではそのような一致はみとめられない。

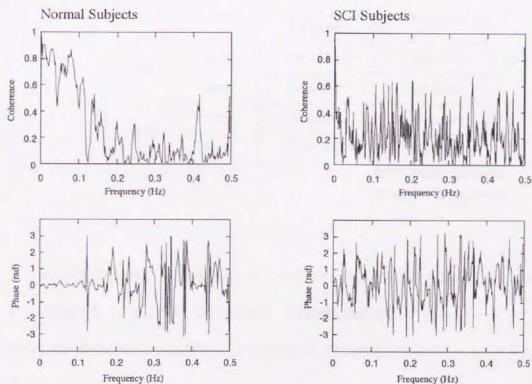


図5-4 クロススペクトル解析の結果

両脚から得られたH反射の変動のクロススペクトルを計算した結果を示す。NSでは0~0.2Hzの周波数域において高いコヒーレンスがみられる。またこの周波数域においてフェイズがそろっている。これは、両脚より誘発されるH反射の変動がよく一致していることを示す。それに対し、SCIでは、NSのように明らかにコヒーレンスの高い周波数域はみられない。

表5-2には、NS、SCIのH反射時系列にCGSA法を適用した結果を示す。NSの%Fractalは左脚が 93.3 ± 4.2 、右脚が $94.5 \pm 2.6\%$ と4章における実験結果(表4-1)とほとんど変わらない値を示した(有意差なし)。また同様に、 β は左脚が 0.84 ± 0.33 、右脚が 0.88 ± 0.34 であり、4章で得られた実験結果と統計的に有意な差異はみとめられなかった。したがって、図5-2の結果に加えて、両脚を同時に刺激することがH反射時系列の時間的特性に影響を与えていないことが確認できた。SCIの%Fractalは左脚が 89.6 ± 4.0 、右脚が $92.7 \pm 4.8\%$ であり、NSと有意差はなかった。 β は左脚が 0.35 ± 0.16 、右脚が 0.41 ± 0.19 であり、両脚の β には有意差は認められなかった。しかし、NSと比べた場合、有意に小さい値と判定された($P < 0.001$)。

表5-2 CGSA法の結果

		%Fractal	β
NS	Left	94.3 ± 4.2	0.84 ± 0.33
	Right	94.5 ± 2.6	0.88 ± 0.34
SCI	Left	89.6 ± 4.0	$0.35 \pm 0.16^*$
	Right	92.7 ± 4.8	$0.41 \pm 0.19^*$

数字は平均値±標準偏差

* $P < 0.001$: NSとの比較

フラクタル成分のNS、SCI全被検者分についてのアンサンブル平均を図5-5に示す。表5-1の β に反映されているように、NSでは図4-3、4-6同様に典型的な $1/f^\beta$ 型のパワースペクトルを示しているのに対し、SCIは図4-3、4-6のM波のように比較的平坦なパワースペクトルをもつ。

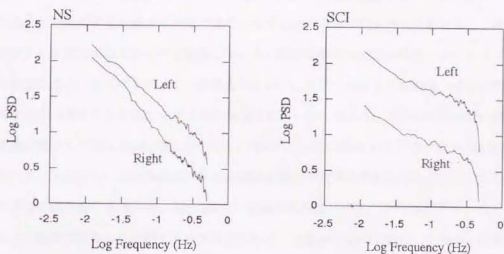


図5-5 フラクタル成分のパワースペクトル

NS、SCI各々について誘発したH反射時系列から求めたフラクタル成分のパワースペクトルを示す。NSでは、左右の脚ともに傾きの急なパワースペクトルをもつに対し、SCIでは図4-3に示すM波時系列に類似した平坦なパワースペクトルを示す。

5.4 論議

(1) NSとSCI間のH反射時系列がもつフラクタル相関の比較

表5-1、図5-5に示すように、NSのH反射時系列が4章の結果(表4-1)同様の強いフラクタル相関を示したのに対し、SCIのH反射時系列はそれよりもかなり小さな値を示した。SCIでは脊髄に損傷を負っているため、基本的には脊髄上位からの入力運動ニューロンプールにおよんでいないものと考えられる。したがって、NSのH反射時系列の強いフラクタル相関は基本的に上位中枢(大脳、脳幹等)の影響を受けていると考えてよさそうである。ただし、表4-1をみると、たとえば右脚の β は 0.41 ± 0.19 と、4章においてのM波より大きな値を示している(ただし、有意差はない)。本実験に参加したSCIのほとんどが臨床的には完全脊髄断裂の診断を受けているが、それは必ずしも脊髄上位の効果が全く脊髄内のニューラルネットワークに及んでいないことを保証しない。何らかの脊髄上位からの影響が β の値に反映されている可能性もある。

(2) 左右脚から誘発したH反射時系列間のコヒーレンス

図5-3、5-4に示したようにNSで両脚の変動間に0.0-0.2Hzの区間で高いコヒーレンスがみられたことは注目するに値する事実である。まずこのことは、H反射の変動を単なる雑音とみなすことが適当ではないことを意味している。単なる雑音が両脚の運動ニューロンプールに同様な効果をもたらすということは考えにくいし、また、そのような場合、それが時間的な特性を持つ持たないに関わらずもはや雑音とはいえないだろう。図5-4のNSの図の横軸を対数周波数にして示したのが図5-6である。今回CGSA法で得られたフラクタル成分のパワースペクトルに対し、 β を求める時の上限周波数を対数周波数にして0.5Hzとしたことは第4章の方法の節でも述べた。図5-6は、 β を求めるのに用いたパワースペクトル成分のほとんどが両脚で同期した変動によって説明されることを示すものである。つまり、両脚のH反射時系列の強いフラクタル相関は共通の起源を持っていることになる。実際、図5-7に示すようにNSの両脚の β の値に高い相関がみられた結果もこの見解を肯定するものといえよう。さらに、一方でSCIのH反射時系列にはこのようなコヒーレンスが認められなかったことは、左右の運動ニューロンの興奮度が全く無関係に変動していることを示す。NSとSCIの対比から、NSのコヒーレントな両脚のH反射振幅の変動には脊髄上位からの入力に関与しているものと考えられる。

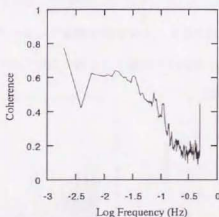
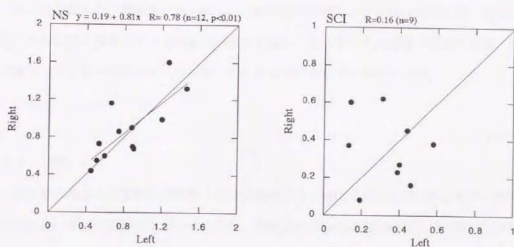


図5-6 両脚から誘発されるH反射の変動間のコヒーレンス (NSについて; 横軸を対数周波数にしたもの)

図5-4に示したNSのコヒーレンスのグラフの横軸を対数周波数軸にした。本研究では β を求める際に、回帰直線の計算区間を対数周波数で0.5Hzまでとしたが、その範囲内で、両脚より得られるH反射の変動が高いコヒーレンスを有していることがわかる。

図5-7 両脚のH反射時系列より得られる β

NSでは両脚から得られる β の間に高い相関関係があるが、SCIではそのような相関関係がみられない。

興味深い例として、表5-1の被検者NO.7の結果を挙げよう。彼は、右脚は随意的に動かすことは不可能であるが、左脚は不完全ながらも動かすことができる（杖を用いて立てるぐらいである）。また、脚の皮膚の触覚も残存している。したがって、彼は他のSCIに比べ、脊髄内の介在ニューロン群その他に対し、脊髄上位から受ける影響が大きいと推測される。彼のH反射時系列の β は左脚が0.388, 0.582, 右脚は0.232, 0.381と左脚の方が大きい値を示した。また、両脚間のコヒーレンスを図5-8に示す。他のSCIに比べ（図5-8ではSubject NO.5）、殆どの周波数帯でコヒーレンスは高い値を示し、よりNSに近い傾向（図5-6）を有している。このような傾向は他のSCIでは一例として認められなかった。

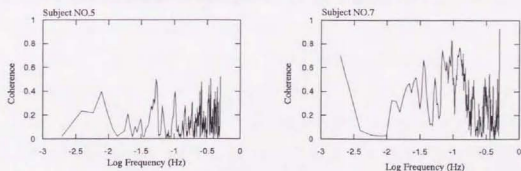


図5-8 両脚から誘発されるH反射の変動間のコヒーレンス（SCIについて；横軸を対数周波数にしたもの）

被検者No.5は左右とも完全に運動機能が失われている被検者。それに対し被検者No.7は不自由ながらも左脚を動かすことができる。被検者No.5の左右脚のH反射の変動間にはコヒーレンスがみとめられないが、被検者No.7についてみると、NSほど顕著ではないが、コヒーレンスの高い周波数域がある。

以上の結果から、健常者にみられるH反射時系列の強いフラクタル相関には、脊髓上位からの入力が強く関係している可能性が非常に高い。そして、その脊髓上位の効果は、同時に両脚のヒラメ筋の運動ニューロンプールに及んでいるものと考えられる。

5.5 小括

健常者6名および脊髄損傷患者7名の両脚のヒラメ筋より同時にH反射を毎秒1回の刺激頻度によって1050回誘発した。その結果、健常者にみられるH反射時系列の強いフラクタル相関が脊髄損傷患者にはみられなかった。さらに、健常者の両脚から得られるH反射時系列の変動が高いコヒーレンスを有していたのに対し、脊髄損傷患者ではそのような高いコヒーレンスはみられなかった。これらの結果から、以下の事柄が明らかになった。

- ①健常者のH反射時系列の強いフラクタル相関は脊髓上位の効果によって生じている。
- ②この脊髓上位からの調節は、両脚のヒラメ筋の運動ニューロンプールに同じような効果を及ぼしている。

ヒトの運動を考える場合、伸張反射回路は運動の制御に深く関係しているとされるが、この回路自体に変動があること自体は、おそらく都合のよいことではなかろう。合目的か否かに関していえば、本論文で示した結果はヒトの運動にとっては合目的とはいえないのかもしれない。しかも、その変動には脊髓上位の器官が大きく関与しているのである。このような一見不必要とも思える変動が何故、運動神経系で最も単純な伸張反射回路に存在するのだろうか。次章でこの変動が持つ意味論的なことについて検討していくこととする。

6. 総括論議

6.1 H反射テストの方法論の再考

本論文で得られた結果は、まず第一にH反射テストの評価法の見直しを提起する。H反射振幅の変動を真値まわりの単なる雑音とみなし、加算平均をとることによってその影響を除去しようという手続きは、H反射の方法論の妥当性（単シナプス性反射か否か）が論議された20～30年前であれば、一般的に受け入れられる手続きであった。確かに、H反射振幅の分布は正規分布とみなすことができ、そのような手続きをとることは妥当であるようにも思える。実際、現在の研究の現場においても、そのような手続きを直感的にとりたくなることがよくある。例えば、我々は、安静時心拍数を測定するときに、30秒間に30回脈を打ったから、安静時心拍数は60だと考える。もっと科学的に精度をあげてやるなら、心電図のR-R間隔を調べて瞬時心拍数（ \approx R-R間隔の逆数）を何回か求めて、それを平均するのもよい。「平均すれば真値に近づく」、このような作業を、通常、人は何の疑惑も抱かないで至極妥当なものとして受け入れる。しかし、近年の研究結果報告はこの手続きを肯定しない。心拍変動のパワースペクトルは1/f型を示し、これは心拍変動が統計的に非正常であることを意味するからである（Yamamoto and Hughson, 1994；3章も参照のこと）。

もちろん、真の値が存在しなくとも、ある程度の値が分かっていればいいではないか、という意見を持つ人もいよう。しかし、それはあくまで実面的な面における手続きにおいてであって、生理学が生命の理を探究する学問であるかぎり、その背後に存在する非正常性の認識が前提としてできているのどうかは重要な問題である。例えば、ヒトの体温は平均的にみれば36℃であるが、サーカディアンリズムに従った変動をみせることは周知のとおりである。これを無視して、ヒトの体温は36℃と断言するのは、いつでも受け入れられるものではない。

2章でも触れたように、単シナプス性反射の変動については、Rudominらの研究をはじめとする精力的な研究がなされてきた。単シナプス性反射の変動を対象とした研究は、変動の特性を調べることによって、神経系の仕組みを明らかにしようというスタンスにたつたものであった。彼らは、条件刺激の中には、単シナプス性反射の大きさ自体ではなく、その変動の大きさのみを変化させるものがあることを示した。このような多数の研究に対して、H反

射の変動が研究の対象とならなかったのは、そこに、本質的に不確定な変動（刺激が経皮的である、大きさの評価が筋電図である、等）が重畳する可能性が高く、変動を対象とするだけの精度が保証できないことが原因となっていたのかもしれない。しかし、神経系の解明という役割をH反射の変動自体に求めないまでも、H反射テストが神経系の解明という役割を担っている以上、方法論の妥当性、信頼性を検討する見地から、その変動の性質について系統だった研究が行われる必要があったのではないだろうか。

H反射テストは、その誘発方法についての解説書も多い。ある解説書で、H反射の変動について触れてある部分を引用してみよう。そこでは、「H反射の振幅は、最初の数回は振幅が次第に減少していくが、数発後には一定した値を保つようになる。H反射の評価には、したがって、最初の数発を除いた分の平均をとればよい。」とされている。しかし、本研究で得られた時系列（図4-2）は、明らかに、H反射の変動がそのような単純なものではないことを示している。したがって、「」内の記述にはその根拠がありませんといえる。そもそも単シナプス性反射の変動の研究は、その大きさが「」内に示すような減衰の仕方をしないことを示してくれている（図2-2参照）。この結果を知っている限り、このような記述がなされていること自体、あまり意味がないといえないだろうか。H反射の時間的性質に対するこのような認識不足は、肢位の影響、刺激頻度など、変動に影響を及ぼしうる比較的確定的な要素について詳細な調査がなされてきたのとは対照的である。確定的な変動の要素については徹底的に調べなければならないが、それ以外のH反射の変動は不確定な要因によって生じるわけであるから、そのような不確定なものは無視してよいという考え方を直感的に受け入れてしまっていたと思われる。

本研究は、このように従来無視されてきたH反射の変動に改めて焦点を当てた研究である。まず、それが単なる雑音でない可能性があることは、フラクタルなどという概念を持ち出すまでもなく、図5-3を見れば理解できよう。図5-3の上図は健康者の左右の脚より誘発したH反射時系列の間の相関について示したものであるが、両時系列間の変動がよく一致していることが分かる。H反射時系列の変動が単なる雑音であると仮定した場合、両脚から得られるH反射時系列がこのような同期した変動を持つとは考えがたい。もし、そうだとすると、その同期した変動を生み出す神経機序とは何なのかを議論する必要がある。

3章でH反射時系列が心拍変動同様のフラクタル性を持ち、それゆえに非常に強い時間相

関を持つということを示した。したがって、H反射時系列は時間的な特性をみても単なる雑音ではない。そして、この事実、H反射時系列は非定常性が強く、数学的には平均値を定義することが困難であることを意味する。

ただし、本研究は、現在までのH反射テストを用いた研究結果を否定しようとしているのではない。むしろ、H反射の変動の特性を明らかにすることによって、今まで検出できなかったような差異を明らかにできる、あるいは新しい情報がそこから引き出せるのではないかという積極的なスタンスにたっていることを強調しておきたい。

6.2 H反射フラクタル変動の意味

単シナプス性の伸張反射回路は、筋が伸張を受けると、それに抗して、筋が収縮するように働く回路であり、いわゆるネガティブフィードバック回路を構成している。このことから、例えば単シナプス性伸張反射回路は姿勢の保持に貢献している、あるいは、随意運動の際、この回路に設定値（例えば関節角度）が上位中枢から与えられると、反射性の調節によって設定値が達成されるという説（サーボ制御仮説）が提案された。現在では、姿勢制御に関しては、外乱等を用いた実験から、姿勢保持に対して、主に長潜時反射が有意に働き、単シナプス性伸張反射はほとんど貢献していないこと（Dietz, 1992）が明らかになっているし、また、随意運動時のサーボ機構についても、伸張反射回路のゲインがそのような機能を実現するには小さいことから、今のところ、あくまでそれが補助的な役割しか果たしていないという見方（補助サーボ説）が有力である（Matthews, 1964）。とはいえ、Hultbornら（1987b）が示したように、随意運動の際、主働筋の運動ニューロンに収束するIa求心性線維に作用するシナプス前抑制が緩和するのに対し、主働筋以外の筋ではシナプス前抑制が強化される、すなわち伸張反射回路のゲインの調節が選択的に行われていることを考えれば、伸張反射回路が運動制御に果たす役割は決して小さくないことが推測できる。

本研究は、高位中枢が関与しているにも関わらず、単シナプス性の伸張反射回路のゲインが一定に保たれず、何らかの意味のある変動を持つことを示した。このような不規則な変動がフィードバックループに内在することは、従来の運動制御理論から考えると、合目的とはいえない。ただし、2章で触れたように、実験動物を用いた研究は、脊髄上位からの影響

がなくても、単シナプス反射の大きさがもともとかんりの変動を持つことを示している。したがって、脊髄内の神経回路網に固有の変動に対して、高位中枢が調節を加えているという解釈の仕方もある。本節ではH反射時系列のフラクタル変動が、運動制御系にとってどんな影響を持ち、そもそもなぜそのような性質を持つのかについて検討する。

(1) 運動ニューロンプール興奮性の保持

まず、H反射時系列が $\beta=0.8$ なるフラクタルの性質を有することが、運動制御において障壁とならないかどうかを考えてみよう。フラクタルな変動が生体にとって何らかの意味を持つのか、という見地に立った研究報告はそれほど多くない。'ほとんどの研究は、「何々の変動がフラクタルである」というような記述的なレベルにとどまっている。そのような状況ではあるが、YamamotoとHughson (1994) は、心拍変動のパワースペクトルが $1/f$ 型を示すフラクタルの性質を持つことを実証するばかりでなく、そのフラクタルとしての性質が生体にとってどのような意味を持っているのかについて、興味深い考え方を提示している。その考え方を紹介する前にランダムフラクタルな時系列を持つ2つの重要な性質について触れておくことにしよう。

①ランダムフラクタルの性質を持つ時系列は式(3.4)に示すような自己アフィンの関係を満たす。現時点での値を $X(0)=0$ として、時刻 $-t$ だけ過去から現在までの増分 $X(0)-X(-t)=-X(-t)$ と現在から時刻 t だけ未来の増分 $X(t)-X(0)=X(t)$ の間の相関関数 $C(t)$ は、次の関係で表される (Mandelbrot, 1983; Feder, 1988)。

$$C(t) = \frac{\langle -X(-t)X(t) \rangle}{\langle X(t)^2 \rangle} = 2^{2H-1} - 1 \quad (6.1)$$

ここで H はハースト指数であり、 $\langle \rangle$ はアンサンブル平均を表す。例えば、 $H=0.5$ ($\beta=2$) の場合、(6.1) 式は0となり、過去と未来の増分の間に相関はない (ブラウン運動すなわち乱歩がこれに該当する)。 $H>0.5$ ($\beta>2$) の場合は、(6.1) 式は常に正となるが、これは過去に増加の傾向があると未来にも増加の傾向があること (持続性) を意味している。逆に $H<0.5$ ($\beta<2$) の場合、過去の増加傾向は逆に未来には減少傾向に変わること (反持

続性)を示す。しかも、式(6.1)の右辺には時間の項が含まれないため、以上の性質が任意の時間スケールについて成り立つ。

②フラクタル変動が原点に復帰する点の集合もまたフラクタルとなり、ある意味でその頻度を示すフラクタル次元は $1-H$ と表される(Mandelbrot, 1983)。 $H=1$ ($\beta=3$)の場合、変動は原点にほとんど復帰しない。 $\beta=1$ の場合、原点に復帰する頻度は、白色雑音($\beta=0$)と同様である(どちらの場合も $H=0$ であることに注意)。

YamamotoとHughson(1994)は、フラクタルな性質を有する時系列の以上のような性質を、心拍変動の持つフラクタル性($\beta \approx 1$, $H=0$)と照らし合わせることによって以下の提言を行っている。

心拍変動の β が1であれば、過去において心拍数が上昇(低下)すれば、将来それは低下(上昇)する確率が高くなる(①の性質)。その結果、心拍数をある水準に保つことができる(②の性質)。

さらに彼らのグループは、身体運動(Nakamura et al., 1993)や、重力負荷(Butler et al., 1993)、による循環系のストレス時、あるいは加齢によって、 β が2に近づくことを報告しているが、これは、上記のような調節能が相対的に失われてくることを示しているものといえる。

H反射時系列のフラクタル性の意味を考える上でも、同様な考え方が可能である。心拍数同様に、運動ニューロンプールの興奮性(正確には単シナプス伸張反射回路のゲイン)が、ある一定の水準内に保たれることは、運動制御においても重要なことであろう。H反射時系列の β が約0.8になることは、フラクタルの①②の性質から考えて、確かにその必要性を満たしているといえる。つまり、先に伸張反射回路のゲインに変動があることは運動制御において都合が悪いことかもしれないと述べたが、この点を考えると、必ずしも非合目的とはいえない。

(2) $\beta=0.8$ の意味 -カオスの可能性-

しかし、実は、フラクタルの性質を用いた考え方を以てしても、それが心拍変動、あるいは

はH反射時系列の β がほぼ1を示すことの積極的理由にはなっていない。ある水準を保つことに目的を有するという上記の議論に従えば、 β が1である必然性はなく、例えばホワイトノイズ($\beta=0$)でも構わない。 $0 \leq \beta \leq 1$ であればHは全て0となり、フラクタルの性質①②に関して同様な性質を持つからである。この意味でいえば、SCIのH反射時系列が $\beta=0.3 \sim 0.4$ 程度のフラクタル変動となることも、やはり一定の水準を保つという必要性を満たしている。したがって、上記の心拍変動の理屈自体は、安静時($\beta=1$)と循環系へのストレス時($\beta=2$)という対比の下では確かに興味深いものの、それ自体は β が1であることの積極的な説明とはなっていない。

この問題に対して明確な解答を述べることはできないが、 β が0.8(H反射時系列)、あるいは1(心拍変動)というように比較的大きな値をとる場合、それはもはや雑音ではなく、能動的な調節が働いている現れである可能性がある。まず心拍変動の場合について考えよう。例えば、Sze toら(1992)は、羊の胎児の心拍変動の β の値が、成熟に伴って0から1に近づいていくことを報告し、こうした β の増加が心血管系の調節能が獲得されていくプロセスをあらわしているのではないかと考えた。このようなフラクタル性をもつ心拍変動については、それが何か決定論的な仕組み、つまりカオス的なダイナミクスから生じているのではないかという仮説が10年くらい以前より提案されてきた(Goldberger et al., 1990)。従来、生体のホメオスタシスの保持は、あらかじめ決められた設定値に対するフィードバックによって保たれると考えられていた。しかし、生体がそのようなフィードバックというやり方のみ採用しているのではなく、カオス的なシステムによって、多少変動しながらもある一定の値を保持しているという概念は非常に魅力的である。カオス的なダイナミクスは有界なアトラクタを持ち、しかも、外乱、あるいは新たな状況にも柔軟にしかも素早く対応できる(Goldberger et al., 1990)。これは例えば、Chaotic Homeostasis (Elbert et al., 1994)、あるいはHomeodynamics (合原, 1995) などとも呼ばれる新しい生体システム観である。Goldbergerら(1990)は、生体信号のカオス的な振る舞いこそが正常であり、このような複雑さがなくなった状態は病的であるとさえ述べている。

1988年にBabloyantzとDestexheは、心拍変動の相関次元を調べたところ、その値が有限な次元に収束するという、実際にカオスのシステムが生体に存在するという仮説を支持する結果を報告した。しかし、その後、第3章で触れたように、心拍変動のような1/f型のパワー

スペクトルを持ついわゆる有色雑音の場合、それが確率論的に生成されたものであっても、その相関次元はそれが持つ時間相関ゆえに有限な値に収束することが指摘された (Osborne and Provenzale, 1989)。このような指摘は、その報告以前のように、単に時系列からアトラクタを再構築し、アトラクタの相関次元が収束するという事実だけでは、カオスの証拠とはならないことを示した。

このような問題点を克服するべく、その変動が決定論的、確率論的なシステムのどちらに起因しているのかを確かめる方法として、サロゲーションの手法が提案された (Schiff and Chang, 1992; Theiler et al., 1992)。これは、時系列データの caos 性が、時系列の線形相関に起因しているのかどうかを調べるために、元の時系列と同じパワースペクトルを有するサロゲートデータに対しても同じ解析を適用するというものである。サロゲートデータにおいては各周波数成分の位相の情報が失われており、明らかに決定論的なシステムから生成されたものではない。もし、サロゲートデータの解析結果が元データに対する解析結果と同じものである場合、例えば相関次元が有限値に収束したとしても、それが単に確率論的な性質からの帰結であるという帰無仮説を棄却できないことになる。Yamamoto and Hughson (1993) はこのような手法を用い、心拍変動の元の時系列がそのサロゲートデータにみられないカオス的な性質を有していることを報告している。彼らの報告は、確かに心拍変動が単なる確率論的なシステム以上のダイナミクスを有しているという可能性を示すものである。

H 反射時系列の場合を考えよう。H 反射時系列がホワイトノイズになることとは、運動ニューロンプールにいろいろなソースからランダムに入力がある場合と理解できる。まさに、これは SCI の H 反射の時系列の場合に該当する。この場合、変動はすべて雑音にすぎない。しかし、SCI と NS の両脚の H 反射時系列間のコヒーレンスの有無の差異や、SCI の H 反射時系列に NS のような強いフラクタル相関が認められなかった結果を考えると、H 反射時系列の変動はそのような受動的な雑音ではなく、そのほとんどが高位中枢によって能動的に生成された変動であり、その結果として時系列の β が 0.8 となっている可能性が高い。強いフラクタル相関を有する H 反射の変動が、高位中枢の何らかの働きを反映しているものであることはもはや疑いない。その存在意義をあえて考えるとすれば、Rudomin ら (1972) が単シナプス性反射の変動について述べたように、雑音にさらされている伸張反射経路に高位中枢が能動的に雑音ではない変動を加え、雑音の影響を消去しているというようなことも挙げられ

る。この場合、変動自体が高位中枢の支配下にあるということになり、ある意味で高位中枢は、運動ニューロンの興奮性の度合い、あるいは伸張反射のゲインの状態を“知っている”ことになる。

本研究の結果を考えると、H反射時系列の β が0.8である所以を求めるとするならば、高位中枢に由来するものとしてとらえることが適当である。近年、脳の活動がカオス的な特徴を有するのではないかとする研究報告が数多くなされた (Babloyantz and Destexhe, 1986; Skarda and Freeman, 1987; Freeman, 1991, 1994; Schiff et al., 1994a; 1994b)。H反射時系列のフラクタル性は脳のそのような性質を反映したもののなのであろうか。

本論文の4章で得られたH反射時系列およびM波時系列に対して、相関次元解析および非線形予測のアルゴリズム (3章を参照のこと) を適用した。H反射時系列のパワースペクトルは $1/f^\beta$ 型であるため、先述したように、その相関次元は時系列が決定論的システムから生成されているか否かに関わらず有限値に収束してしまう可能性がある。そのため元の時系列のパワースペクトルを逆フーリエ変換することによって得られたサロゲートデータに対しても同じ解析を行い、元データに対する解析結果と比較した。

図6-1はH反射時系列 (1.2MT、および0.9MT)、M波時系列の相関次元解析の結果である。やはり、SchiffとChangが報告したように、その相関指数は埋め込み次元が12次元まででは、一定値に収束する傾向を示さなかった。この傾向はサロゲートデータについても同様にみとめられた。また、非線形予測の結果、H反射時系列には予測時間の増加とともに予測度が急激に低下するという一見カオス的な特徴が得られたが、このような特徴は同様にサロゲートデータについてもみとめられた (図6-2)。したがって、H反射時系列が低次元のカオスであるという確証は得ることができなかった。しかし、それがより高次元の非線形ダイナミクスによって生み出されている可能性も依然として否定できるわけではない。最近になって、Changら (1994) は、除脳ネコの下肢の筋 (主に腓腹筋) から誘発した単シナプス反射の大きな時系列4例中2例にカオスの特徴がみられたことを報告している。そして、このような特徴は脊髄ネコから誘発した反射時系列にはみられなかったという。彼らの推測しているように、H反射の変動が高位中枢のカオス的な性質に関連しているのかという点の解明に関しては、方法論も含め、今後新たなアプローチが必要となるだろう。

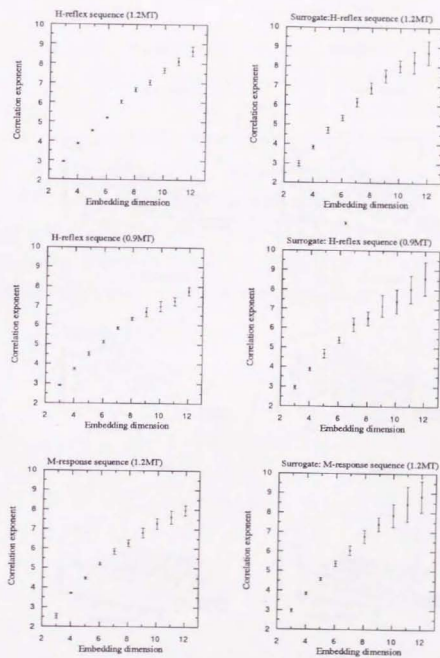


図6-1 相関次元解析の結果

Aは元時系列の結果、Bはサロゲートデータの結果。全てのデータで、埋め込み次元を増やしていても、相関次元は一定値に収束しなかった。

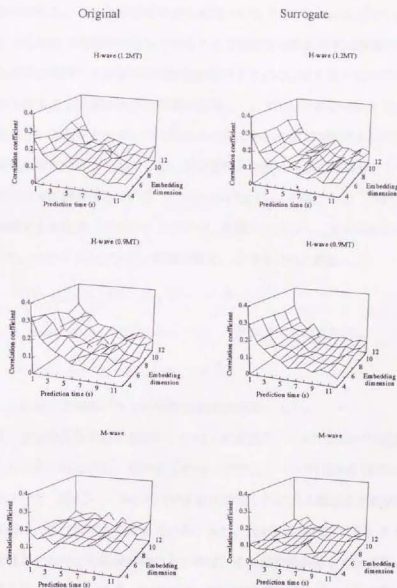


図6-2 非線形予測解析の結果

Aは元時系列、Bはサロゲートデータの結果。H反射時系列では、予測性が、短期の予測時間では高く、それ以後急激に減少するというカオスの特徴がみられたが、同様な特徴はサロゲートデータについても認められた。M波時系列の予測性は予測時間によらず低いほぼ一定の値を示した。

6.3 フラクタル変動の発現

本研究で得られたH反射時系列のフラクタル性の結果はあくまで安静時のものであり、実際の運動遂行時にこのような特性がなおも観察されるかどうかはわからない。ただし、運動中にこのような変動の性質が発現していることを確認する実験設定は困難である。例えば、一定の足底屈力を発揮した状態でH反射を誘発するなどの方法も考えられるが、解析に十分なデータ長を得ることが疲労などの影響から難しく、またH反射誘発による筋収縮自体が一定の足底屈力という条件を乱す、などの点から満足のいく実験系は得られるとは思えない。

実際の運動制御における一例として、起立姿勢中の足圧中心の軌跡がランダムフラクタルの性質を持つことが報告されている (Collins and De Luca, 1993; 1994)。彼らは、足圧中心の軌跡を相関のある乱歩 (フラクタルブラウン運動) とみなし、その軌跡の時系列データからHを求めた。フラクタルブラウン運動の場合、その増分の分散は、

$$V(t-t_0) = \langle (y(t) - y(t_0))^2 \rangle \sim |t-t_0|^{2H} \quad (6.2)$$

で与えられる (Mandelbrot, 1983; Feder, 1988)。離散データの場合には、

$$\langle \Delta y^2 \rangle = \langle (y_i - y_{i-1})^2 \rangle \sim \tau^{2H} \quad (6.3)$$

となるが、この両辺の対数グラフの傾きを求めれば2Hとなる。

その結果、彼らは足圧中心の軌跡が、0~1 s の時間スケールではH=0.8程度の持続性のあるフラクタルであるのに対し、それ以上の長い時間スケールではH=0.2程度のフラクタルになることを示した (図6-3)。本研究でH反射を誘発したヒラメ筋はまさに姿勢保持筋であり、姿勢制御に大きな役割を果たしている。もし、H反射時系列がフラクタルであることが実際の運動制御においても影響を持つとすれば、それは姿勢保持中の足圧中心の変動と何らかの同一性を持つ可能性がある。本節では、直立姿勢保持時の足圧中心の軌跡がCollinsとDe Lucaのいうようなフラクタル性を持つのかどうかを追証し、それがH反射時系列のフラクタル性とどのような関係があるかについて検討する。

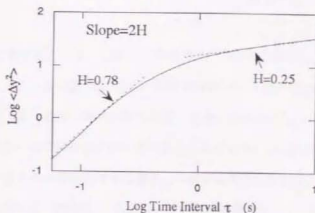


図6-3 Hを求める方法 (Collins and De Luca, 1993; 1994)

式 (6.3) において、いろいろの τ のついて $\langle \Delta y^2 \rangle$ を計算する。これらの値を対数グラフに表示すると、グラフの傾きが $2H$ となることから、 H の値を求めることができる。

Collins and De Luca (1993; 1994) は、足圧中心の変動は 2 つの H を持つことを報告した。

○ 足圧中心軌跡のフラクタル性

本実験には健康者 3 名が参加した。実験に参加する前に本研究の意義を説明し、同意を得た。被検者はフォースプレート (キスラー社) 上で、 30 秒間、直立姿勢をとった。測定は開眼および閉眼の 2 条件について、各被検者についてそれぞれ 5 試行を行った。フォースプレートの鉛直方向の力のデータは 100Hz でサンプリングし、コンピュータに取り込んだ。足圧中心の位置は次の式から計算した (図6-4も参照)。

$$x = \frac{F_1 + F_2 - F_3 - F_4}{F_1 + F_2 + F_3 + F_4} \frac{a}{2} \quad (6.4)$$

$$y = \frac{F_1 + F_3 - F_2 - F_4}{F_1 + F_2 + F_3 + F_4} \frac{b}{2}$$

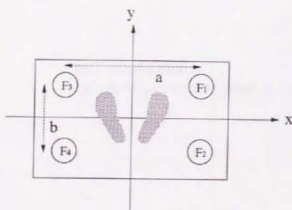


図6-4 フォースプレート上における変量の定義
式 (6.4) の各変数の定義。フォースプレートの中心を座標 $(0,0)$ とする。

図6-5に測定例を示す。これらの時系列にCGSA法を適用し、得られたフラクタル成分のパワースペクトルを図6-6に示す。対数周波数0.5~1 Hz付近を境に、異なるパワースペクトルの傾き (β) を持つ傾向が得られた。また、CollinsとDe Lucaの研究では、およそ1sという時間スケールでHの値が切り替わるとされている。CGSA法のようにパワースペクトルを用いてフラクタル性を解析する場合、1s以下に局限した時間スケールの特性に触れることは困難であるため(図6-7)、本研究では対数周波数0Hz (= 1 Hz) 以下の周波数帯のデータは除去した。その上で、2本の回帰直線によってパワースペクトルを回帰した。その際、残差の二乗が最小となるようにした。それによって、 β が切り替わる周波数、その周波数前後の β の値が求まることになる(図6-8)。表6-1にその結果を示す。

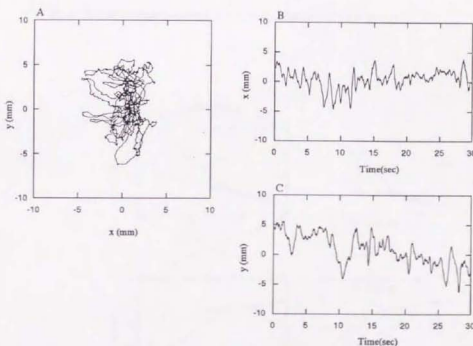


図6-5 足圧中心の変動

Aは二次元平面上での足圧中心の軌跡。B、Cはそれぞれx、yの時間変動を示す。

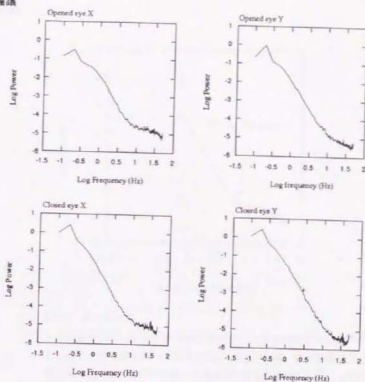


図6-6 足圧中心の変動から得られたフラクタル成分のパワースペクトル

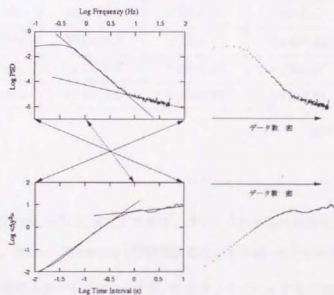
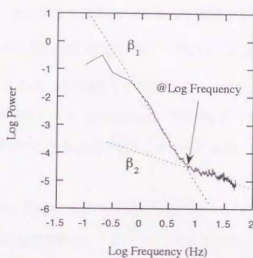


図6-7 CGSA法とCollins, De Luca (1993; 1994)の方法の比較

CGSA法(上图)では、プロットの点数が低周波帯域で少なく、高周波帯域になるにつれて多くなっていく。すなわち、高い周波数の変動について信頼性の高い結果が得られる。それに対し、CollinsとDe Lucaの方法では、時間間隔 τ が大きいほどプロットの点数が多く、信頼性が高い結果が得られる。

図6-8 β の求め方

まず対数周波数0Hz以下の周波数帯域のデータは除外する。残りの二乗が最小となるように2本の直線を用いて回帰する。低周波帯域、高周波帯域での直線の傾きをそれぞれ β_1 、 β_2 、これらが切り替わる対数周波数を@Log Frequencyと呼ぶことにする。

表6-1 足圧中心軌跡の性質

	Eye	%Fractal	@Log Frequency	β_1	β_2
X	Open	78.3±13.2	0.78±0.18	3.09±0.51	0.68±0.08
	Close	79.6±14.9	0.78±0.16	3.44±0.43	0.68±0.06
Y	Open	72.3±19.0	0.97±0.22	3.10±0.26	0.73±0.06
	Close	72.1±15.4	0.99±0.20	3.47±0.33	0.72±0.07

数字は平均値±標準偏差

どの時系列の%Fractalも70-80%程度であり、フラクタルとしての取り扱いが適切であることを確認できた。@Log Frequency (対数周波数およそ1Hz) 以上では β の値(β_2)は1以下であり、その時間スケール(100ms以下)ではフィードバック系が働いているか、あるいは単に変動に重畳したノイズをあらわしているものとも考えられる。生理学的にいえば、長潜時反射などがその役割を果たしている可能性もある(Dietz, 1992)。このようなすばやい動揺に関しては、フォースプレートの応答特性などの点から満足いく考察が困難である

と思われるので、以下では主に β_1 の方に絞って議論することとする。一方周波数1Hz (対数周波数0Hz) から10Hz (対数周波数1 Hz) の間の β_1 は3あまりと非常に大きな値を示した。

β の値が3ということは、Hに換算してほぼ1となり、フラクタルとしてみた場合、非常に強い持続性がこの時間スケール (100ms~1s) で存在することを示す。姿勢保持とは元来、重心を一定の位置に保つことが必要であると考えられるが、本研究の結果はそのような必要性に一見矛盾する。

CollinsとDe Luca (1993;1994) も同様に時間スケール1s以下では、Hがおよそ0.8になることを報告し、これを姿勢制御におけるフィードフォワード成分を示すものとした。一方で、彼らは、1s以上の時間スケールではHが0.2と反持続性を示すことを報告し、これを姿勢制御のフィードバック成分とみなした。すなわち、彼らの図式では、直立姿勢の保持は、短時間のスケールにおけるフィードフォワード制御、長時間のスケールにおけるフィードバック制御の両者の働きが関与しているものとされた。ただし、彼らの図式によるフィードバック成分はともかく、フィードフォワード成分についてはその存在意義に関する理解は困難である。

姿勢保持制御が重心を一定位置に保つことを目的としている以上、時間スケール1s以下で見られる持続性は制御の結果というよりも、むしろヒトが制御系を受けない状態で、立つという行為をおこなう場合の変動を示しているものと解釈すべきである (もちろんその場合すぐに転倒してしまうだろう)。ここで、姿勢の制御が全く効いていない状況、すなわち姿勢保持筋 (主に下腿三頭筋と前脛骨筋) の活動レベルが一定の状況を考えてみよう。ただし、筋の収縮レベルは一定とはいっても完全に一定ではなく、そのレベルまわりにある程度の変動を示すはずである。筋の活動が変化するとそれに伴って、足圧中心の位置が移動する。新たな足圧中心位置においても、同様な状況が生じる。したがって、足圧中心の変動は、筋の活動レベルの変動を積分したような特性を持つことが予想される。例えば、筋の活動レベルが完全にランダムな変動を示す場合、足圧中心の軌跡は、白色雑音の積分であるブラウン運動 ($\beta=2$, $H=0.5$) になるだろう。一般に、スペクトル指数 β のフラクタル変動を積分した変動のスペクトル指数は $\beta+2$ となる。仮に、筋の活動レベルの変動が、安静時のH反射時系列にみられる変動と同様な特性 ($\beta \approx 0.8$) を持つものとしよう。その場合、上の考え

方を適用すれば、足圧中心の変動の軌跡は $\beta=0.8+2=2.8$ 程度のフラクタル特性を持つものと予想できる。この値は、本研究で得られた足圧中心の変動の β の値とほぼ等しい。

以上に挙げた姿勢保持時の例だけでなく、歩行中の一步の時間間隔の変動が $1/n$ 程度であるという最近の報告 (Hausdorff et al., 1995) を考えると、H反射の時系列の変動の特性が、実際の運動制御の場面にも現れてくる可能性は十分に考えられるところである。

6.4 運動制御との関わり - 本研究の意味するところ -

前節で、実際の運動制御の場においても、H反射時系列にみられるフラクタル変動の特性が発現される可能性があることを、姿勢制御を例に挙げながら指摘した。それでは、ヒラメ筋以外の筋についても、このようなフラクタル性がみとめられるだろうか。これを検証するために、被験者3名から橈側手根屈筋から誘発したH反射時系列にCGSA法による解析を適用した。各被験者につき2回の測定を行った。各被験者に実験の意義を説明し、実験参加の同意を得た。図6-9には、橈側手根屈筋より誘発したH反射時系列およびそのフラクタル成分のパワースペクトルを示す。橈側手根屈筋から誘発したH反射時系列にもヒラメ筋同様のフラクタル相関が認められた ($\%Fractal=89.7\pm 7.4\%$ 、 $\beta=0.76\pm 0.16$ 、平均値±標準偏差)。この結果からも、上位中枢による運動系の制御には、筋によらず普遍的にフラクタル変動が伴うものであることはもはや否定しがたい。

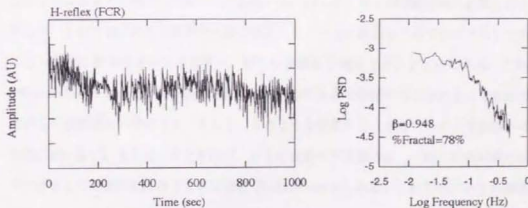


図6-9 FCR (橈側手根屈筋) より誘発したH反射時系列とそのパワースペクトル
ヒラメ筋から誘発した時系列同様のフラクタル性を持つ。

本論文の序文で、ヒトの運動には不確定さ、不正確さが伴うことを指摘した。ヒトが文字を書くときのことを思い浮かべてみよう。何年来も書き慣れてきた自分の名前でもその文字の形は書くたびに微妙に異なる。もし、ロボットであれば、毎回寸分違わぬ形の文字を書くことができるだろう。このような不正確さとは、従来の概念では、ヒトの運動制御における厳密さの限界を意味するものであった。しかし、本研究の結果は、そのような変動がそのような受動的な意味を持つのではなく、積極的な何らかの役割を果たしている、あるいは役割のあらわれである可能性を示唆している。

H反射時系列が低次元のカオスであるという確証が、本研究で得られたわけではないが、そのような性質を持つものと仮定して話を進めよう。Freeman (1991; 1994) は、ウサギの嗅球に約60個の微小電極を貼り、いろいろなにおいをウサギに嗅がせたときに嗅球に発生する電位のパターンについて調べた。その結果、臭いはそれぞれのニューロンの電位の変化として認識されるのではなく、嗅球全体の電位の空間的パターンとして認識されるのだということを見出した。彼によれば、このような嗅球の活動はカオス的であり、臭いはそのアトラクタのパターンとして認識されるという。そして、カオス的な活動が、神経回路の基底状態として脳に本質的に内在するものであり、外界からの情報に対応した新しい活動パターンの生成を可能にしていると考えているのである。

本論文のまとめとして、運動制御についても同様な考え方が当てはまる可能性を述べたい。確かに、ヒトの運動は厳密に言えば正確とはいえない。しかし、ヒトが生きていく上で厳密な正確さはあまり必要とされないのではないか。むしろ、ヒトの運動制御に必要とされる制御とは、多様で融通のきく動作が可能であること、そしてあらかじめプログラムしておかなくとも新たな動作パターンを習得し、新たな状況にも適応できるところにある。これは、Freemanのいうように、基底状態として存在するゆらぎを利用することによって可能になっている可能性はないだろうか。そして、このような性質こそ、生きていく上で必要不可欠な性質に違いない。もしそうだとすれば、ヒトの運動の不正確さを、一概に運動制御の正確さの欠如として否定的にみなすことは適切ではないのかもしれない。むしろ、ヒトの運動の不正確さこそがヒトの運動制御の優れた性質をうみだしているのではないかという提案を行いつつ本論文を終えたいと思う。

参考文献

- 合原一幸 (1995) 生命・カオス・工学。数理科学 381: 5-10
- Babloyantz A, Destexhe A (1986) Low-dimensional chaos in an instance of epilepsy. *Proc Natl Acad Sci USA* 83: 3513-3517
- Babloyantz A, Destexhe A (1988) Is the normal heart a periodic oscillator? *Biol Cybern* 58: 203-211
- Bassingthwaighe JB, Beyer RP (1991) Fractal correlation in heterogeneous systems. *Physica* 53D: 71-84
- Bassingthwaighe JB, Lievovitch LS, West BJ (1994) *Fractal Physiology*. Oxford University Press, New York
- Burke D, Gandevia SC, McKeon B (1983) The afferent volley responsible for spinal proprioceptive reflexes in man. *J Physiol* 339: 535-552
- Burke D, Gandevia SC, McKeon B (1984) Monosynaptic and oligosynaptic contributions to human ankle jerk and H-reflex. *J Neurophysiol* 52: 435-448
- Butler GC, Yamamoto Y, Hughson RL (1993) Heart rate variability and fractal dimension during orthostatic challenges. *J Appl Physiol* 75: 2602-2612
- Capaday C, Stein RB (1986) Amplitude modulation of the soleus H-reflex in the human during walking and standing. *J Neurosci* 6: 1308-1313
- Capaday C, Stein RB (1987) Difference in the amplitude of the human soleus H-reflex during walking and running. *J Physiol* 392: 513-522
- Chang T, Schiff SJ, Sauer T, Gossard JP, Burke RE (1994) Stochastic versus deterministic variability in simple neuronal circuits: I. Monosynaptic spinal cord reflexes. *Biophys J* 67: 671-683
- Collins JJ, De Luca CJ (1993) Open-loop and closed-loop control of posture: a random-walk analysis of center-of-pressure trajectories. *Exp Brain Res* 95: 308-311

- Collins JJ, De Luca CJ (1994) Random walking during quiet standing. *Phys Rev Lett* 73: 764-767
- Crone C, Nielsen J (1989) Methodological implications of the post activation depression of the soleus H-reflex in man. *Exp Brain Res* 78: 28-32
- Day BL, Marsden CD, Obeso JA, Rothwell JC (1984) Reciprocal inhibition between the stimulation of the human forearm. *J Physiol* 349: 519-534
- del Castillo J, Katz B (1954) Quantal components of the end-plate potential. *J Physiol* 124: 560-573
- Delwaide PJ, Pepin JL (1991) The influence of contralateral primary afferents on Ia inhibitory interneurons in humans. *J Physiol* 439: 161-179
- Dietz V, Faist M, Pierrot-Deseilligny E (1990) Amplitude modulation of the quadriceps H-reflex in the human during the early stance phase of gait. *Exp Brain Res* 79: 221-224
- Dietz V (1992) Human neuronal control of automatic functional movements: Interaction between central programs and afferent input. *Physiol Rev* 72: 33-69
- Eccles JC, Eccles RM, Magni F (1961) Central inhibitory action attributable to presynaptic depolarization produced by muscle afferent volleys. *J Physiol* 159: 147-166
- Edamura M, Yang JF, Stein RB (1991) Factors that determine the magnitude and time course of human H-reflexes in locomotion. *J Neurosci* 11: 537-550
- Elbert T, Ray WJ, Kowalik ZJ, Skinner JE, Graf KE, Birbaumer N (1994) Chaos and Physiology: Deterministic chaos in excitable cell assemblies. *Physiol Rev* 74: 1-47
- Farmer JD (1982) Chaotic attractors of an infinite-dimensional dynamics system. *Physica* 4D: 366-393
- Feder J (1988) *Fractals*. Plenum Press, New York
- Freeman WJ (1991) The physiology of perception. *Sci Am* 264: 78-85
- Freeman WJ (1994) Neural networks and chaos. *J theor Biol* 171: 13-18

- Gerilovsky L, Struppler A, Altmann H, Velho F (1983) Spindle activity and monosynaptic reflex excitability during foreperiod. *Electroenceph clin Neurophysiol* 56: 487-493
- Glenny RW, Robertson HT, Yamashiro S, Bassingthwaite JB (1991) Applications of fractal analysis to physiology. *J Appl Physiol* 70: 2351-2367
- Gossard JP, Floeter MK, Kawai Y, Burke RE, Chang T, Schiff SJ (1994) Fluctuation of excitability in the monosynaptic reflex pathway to lumbar motoneurons in the cat. *J Neurophysiol* 72: 1227-1239
- Goldberger AL, Rigney DR, West BJ (1990) Chaos and fractals in human physiology. *Sci Am* 34-41
- Grassberger P, Procaccia I (1983a) Measuring strangeness of strange attractors. *Physica* 9D: 189-208
- Grassberger P, Procaccia I (1983b) Characterization of strange attractors. *Phys Rev Lett* 50: 346-349
- Hausdorff JM, Peng CK, Ladin Z, Wei JY, Goldberger AL (1995) Is walking a random walk? Evidence for long-range correlations in stride interval of human gait. *J Appl Physiol* 78: 349-358
- Haken H (1978) *Synergetics - An introduction, nonequilibrium phase transitions and self-organization in physics, chemistry and biology*. Springer-Verlag, Berlin
- 協同現象の数理. 牧島邦夫、小森尚志 (訳)。東海大学出版社、東京。
- Hennemann E, Mendell LM (1981) Organization of the motoneuron pool and its inputs. In: *Handbook of Physiology. The Nervous System. Motor Control*. Bethesda MD: Am Physiol Soc, sect 1, vol 2, p 423-507
- Higuchi T (1988) Approach to an irregular time series on the basis of the fractal theory. *Physica* 31D: 277-283
- Higuchi T (1990) Relationship between the fractal dimension and the power law index for a time series: a numerical investigation. *Physica* 46D: 254-264
- 日野幹雄 (1977) *スペクトル解析*. 朝倉書店、東京
- Hultborn H, Meunier S, Morin C, Peerrot-Descilligny E (1987a) Assessing changes in presynaptic inhibition of Ia fibres: A study in man and the cat. *J Physiol* 389: 729-756

Hultborn H, Meunier S, Pierrot-Deseilligny E, Shindo M (1987b) Changes in presynaptic inhibition of Ia fibres at the onset of voluntary contraction in man. *J Physiol* 389: 757-772

Hunt CC (1955) Temporal fluctuation in excitability of spinal motoneurons and its influence on monosynaptic response. *J Gen Physiol* 38: 801-811

池口徹, 合原一幸 (1993) 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 編著。東京電機大学出版局、東京。

Inoue T, Ukai S, Shinosaki K, Iyama A, Matsumoto Y, Toi S (1994) Changes in the fractal dimension of alpha envelope from wakefulness to drowsiness in the human electroencephalogram. *Neurosci Lett* 174: 105-108

Kobayashi M, Musha T (1982) 1/f fluctuation of heartbeat period. *IEEE Trans Biomed Eng* 29: 456-457

Lloyd DPC, McIntyre AK (1955) Monosynaptic reflex responses of individual motoneurons. *J Gen Physiol* 38: 771-787

Magladery JW (1955) Some observations on spinal reflexes pathways. *Pflüg Archiv* 261: 302-321

Matthews PBC (1964) Muscle spindles and their motor control. *Physiol Rev* 44: 219-288

Mandelbrot BB (1983) The fractal geometry of nature. WH Freeman and Company, New York

Mandelbrot BB (1985) Self-affine fractals and fractal dimension. *Physica Scripta* 32: 257-260

May RM (1976) Simple mathematical models with very complicated dynamics. *Nature* 261: 459-467

Mayer-Kress G, Yates FE, Benton L, Keidel M, Tirsch W, Pöppel SJ, Geist K (1988) Dimensional analysis of nonlinear oscillations in brain, heart, and muscle. 90: 155-182

Meunier S, Pierrot-Deseilligny E (1989) Gating of the afferent volley of the monosynaptic stretch reflex during movement in man. *J Physiol* 419: 753-763

- Morin C, Katz R, Mazieres L, Pierrot-Deseilligny E (1982) Comparison of soleus H-reflex facilitation at the onset of soleus contractions produced voluntarily and during the stance phase of human gait. *Neurosci Lett* 33: 47-53
- Morin C, Pierrot-Deseilligny E, Hultborn H (1984) Evidence for presynaptic inhibition of muscle spindle Ia afferents in man. *Neurosci Lett* 44: 137-142
- 武者利光 (1980) ゆらぎの世界。講談社、東京
- 中村好男、山本義春。(1991) 心拍変動のスペクトルとフラクタル。体育の科学 41: 515-523
- Nakamura Y, Yamamoto Y, Muraoka I (1993) Autonomic control of heart rate during physical exercise and fractal dimension of heart rate variability. *J Appl Physiol* 74: 875-881
- Nicholis G, Prigogine I (1989) Exploring complexity. An introduction. R Piper GmbH & Co. KG Verlag, München
- 複雑性の探求。安孫子誠也、北原和夫 (訳)。みすず書房、東京。
- 野崎大地、山本義春。(1994) 生体の $1/f^{\beta}$ ゆらぎとその解析法。BME 8 (10): 5-12
- Nozaki D, Nakazawa K, Yamamoto Y (1995) Fractal fluctuation in human H-reflex. *Exp Brain Res in press*
- Osborne AR, Provenzale A (1989) A finite correlation dimension for stochastic systems with power-law spectra. *Physica* 35D: 357-381
- Pierrot-Deseilligny E, Morin C, Bergego C, Tankow N (1981a) Pattern of group I fibre projections from ankle flexor and extensor muscles in man. *Exp Brain Res* 42: 337-350
- Pierrot-Deseilligny E, Bergego C, Katz R, Morin C (1981b) Cutaneous depression of Ib reflex pathways to motoneurons in man. *Exp Brain Res* 42: 351-361
- Prigogine I, Stengers I (1984) Order out of chaos. Alvin Toffler Bantam Books, New York
- 混沌からの秩序。伏見康治、伏見謙、松枝秀明 (訳)。みすず書房、東京。

- Prochazka A (1989) Sensorimotor gain control: a basic strategy of motor system? *Prog Neurobiol* 33: 281-307
- Rall W, Hunt CC (1956) Analysis of reflex variability in terms of partially correlated excitability fluctuation in a population of motoneurons. *J Gen Physiol* 39: 397-422
- Rothwell JC, Day BL, Bearadelli A, Marsden CD (1984) Effects of motor cortex stimulation on spinal interneurons in intact man. *Exp Brain Res* 50: 293-298
- Rudomin P, Dutton H (1967) Effects of presynaptic and postsynaptic inhibition on the variability of the monosynaptic reflex. *Nature* 216: 292-293
- Rudomin P, Dutton H (1969a) Effects of conditioning afferent volleys on variability of monosynaptic responses of extensor motoneurons. *J Neurophysiol* 32: 140-157
- Rudomin P, Dutton H (1969b) Effects of muscle and cutaneous afferent nerve volleys on excitability fluctuations of Ia terminals. *J Neurophysiol* 32: 158-169
- Rudomin P, Dutton H, Munoz-Martinez J (1969) Changes in correlation between monosynaptic reflexes produced by conditioning afferent volleys. *J Neurophysiol* 32: 759-772
- Rudomin P, Madrid J (1972) Changes in correlation between monosynaptic responses of single motoneurons and in information transmission produced by conditioning volleys to cutaneous nerves. *J Neurophysiol* 35: 44-64
- Rudomin P, Nunez R, Madrid J, Burke RE (1974) Primary afferent hyperpolarization and presynaptic facilitation of Ia afferent terminals induced by large cutaneous fibers. *J Neurophysiol* 37: 413-429
- Rudomin P, Burke BE, Nunez R, Madrid J, Dutton H (1975) Control by presynaptic correlation: A mechanism affecting information transmission from Ia fibers to motoneuron. *J Neurophysiol* 38: 267-284
- Rudomin P (1990) Presynaptic inhibition of muscle spindle and tendon organ afferents in the mammalian spinal cord. *Trends Neurosci* 13: 499-505
- 佐治晴夫 (1993) "1/fゆらぎ"とその応用. システム 制御/情報 37: 689-695

- Schepers HE, van Beek JHG, Bassingthwaite JB (1992) Four methods to estimate the fractal dimension from self-affine signals. *IEEE Eng Med Biol* 11: 57-71
- Schieppati M, Nardone A, Musazzi M (1986) Modulation of the Hoffmann reflex by rapid muscle contraction or release. *Human Neurobiol* 5: 59-66
- Schieppati M (1987) The Hoffmann reflex: a means of assessing spinal reflex excitability and its descending control in man. *Prog Neurobiol* 28: 345-376
- Schiff SJ, Chang T (1992) Differentiation of linearly correlated noise from chaos in a biologic system using surrogate data. *Biol Cybern* 67: 387-393
- Schiff SJ, Jerger K, Chang T, Sauer T, Aitken PG (1994a) Stochastic versus deterministic variability in simple neuronal circuits: II. Hippocampal slice. *Biophys J* 67: 684-691
- Schiff SJ, Jerger K, Duong DH, Chang T, Spano ML, Ditto WL (1994b) Controlling chaos in the brain. *Nature* 370: 615-620
- 清水博 (1990) 生命を捉えなおす 増補版. 中公新書、東京。
- Skarda CA, Freeman WJ (1987) How brains make chaos in order to make sense of the world. *Behav Brain Sci* 10: 161-195
- Somjen GG, Hearsh CJ (1966) Covariation of monosynaptic reflexes in spinal and decerebrate cats. *Exp Neurol* 15: 79-99
- Stein RB, Capaday C (1988) The modulation of human reflexes during functional motor tasks. *Trend Neurosci* 11: 328-332
- Sugihara G, May RM (1990) Nonlinear forecasting as a way of distinguishing chaos from measurement error in time series. *Nature* 344: 734-741
- Szeto HH, Cheng PY, Decena JA, Cheng Y, Wu D, Dwyer G (1992) Fractal properties in fetal breathing dynamics. *Am J Physiol* 263: R141-R147
- 高安秀樹 (1986) フラクタル。朝倉書店、東京。

Tanaka R (1972) Activation of reciprocal Ia inhibitory pathway during voluntary motor performance in man. *Brain Res* 43: 649-652

Tanaka R (1974) Reciprocal Ia inhibition during voluntary movements in man. *Exp Brain Res* 21: 529-540

Tanaka R (1983) Reciprocal Ia inhibitory pathway in normal man and in patients with motor disorders. *Advances in Neurology* 39: 433-441

田中勲作 (1986) H反射 - ヒトにおける神経生理学研究の一技法。日本生理誌 48: 719-734

Theiler J, Eubank S, Longtin A, Galdrikian B, Farmer JD (1992) Testing for nonlinearity in time series: the method of surrogate data. *Physica* 58D: 77-94

Thompson JMT, Stewart HB (1986) *Nonlinear dynamics and chaos*. John Wiley & Sons Ltd
邦訳 非線形力学とカオス、武者利光、橋口住久 (訳)。オーム社、東京。

Voss RF (1989) Random fractals: self-affinity in noise, music, mountains, and clouds. *Physica D* 38: 362-371

Woysville MJ, Calabrese JR (1994) Quantification of occipital EEG changes in Alzheimer's disease utilizing a new metric: The fractal dimension. *Biol Psychiatry* 35: 381-387

Yamamoto M, Nakahama H, Shima K, Kodama T, Mushiaki G (1986) Markov-dependency and spectral analyses on spike-counts in mesencephalic reticular neurons during sleep and attentive state. *Brain Res*: 279-289

Yamamoto Y, Hughson RL (1991) Coarse-graining spectral analysis: new method for studying heart rate variability. *J Appl Physiol* 71: 1143-1150

Yamamoto Y, Hughson RL (1993) Extracting fractal components from time series. *Physica* 68D: 250-264

Yamamoto Y, Hughson RL (1993) Failure in rejecting a null hypothesis of stochastic human heart rate variability with 1/f spectra. Noise in physical systems and 1/f fluctuations. American Institute of Physics. New York: 697-700

Yamamoto Y, Hughson RL (1994) On the fractal nature of heart rate variability in humans: effects of data length and β -adrenergic blockade. *Am J Physiol* 266: R40-R49

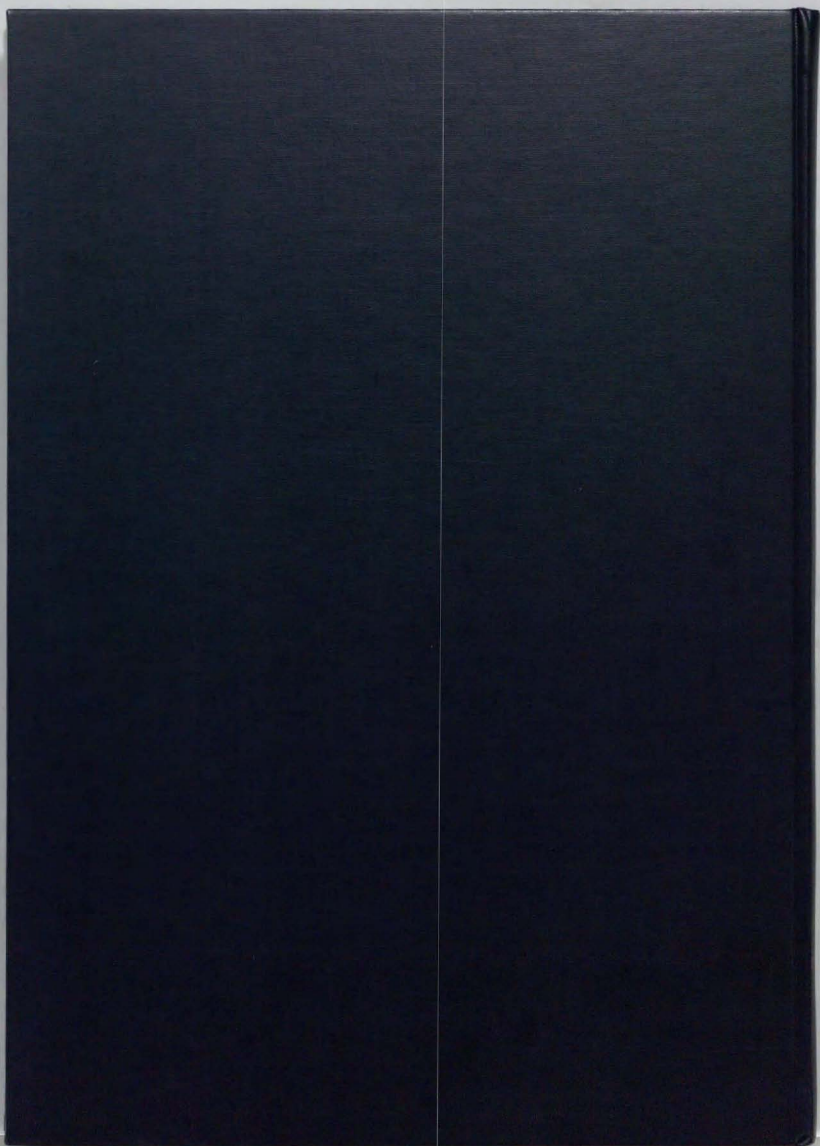
Yamamoto Y, Fortrat JO, Hughson RL (1995) On the fractal nature of heart rate variability in humans: effects of respiratory sinus arrhythmia. *Am J Physiol (Regulatory Integrative Comp Physiol)* in press

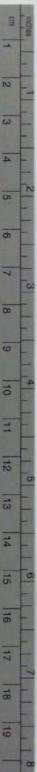
謝辞

本研究は宮下充正教授ならびに山本義春講師の指導のもとで行われた。著者にこのような研究の機会を与え、適時批判と助言を下さった両氏に心から謝意を表する。

H反射の誘発方法の指導、被検者の手配等、実験面で全面的に協力していただいた、国立身障者リハビリセンターの矢野英男氏、中澤公孝氏に深く感謝の意を表する。

また、東京大学教育学部体育学研究室の多くの人々に被検者として、あるいは貴重な意見の提供者として協力をいただいた。深く感謝の意を表する。





Kodak Color Control Patches

© Kodak, 2007 TM Kodak

Blue Cyan Green Yellow Red Magenta White 3/Color Black



Kodak Gray Scale



© Kodak, 2007 TM Kodak

A 1 2 3 4 5 6 M 8 9 10 11 12 13 14 15 B 17 18 19

