生体の1/f ゆらぎと情報処理

—— 快感工学 ——

東京工業大学大学院総合理工学研究科 武者利光

Fluctuations in the heartbeat rate, the spike interval of spontaneous emission of action potential impulses of a neuron, and the human tapping interval have a common spectral density which is proportional to $1/f$ (f is frequency). The $1/f$ fluctuations are very basic in a biological body, and it is speculated that external stimulations with $1/f$ spectrum give a comfortable feeling.

$1/f$ fluctuations / biology / music / rhythm / neuron / control / Allan variance

1. 主観的な判断の基準は何か？

生物物理のようなアカデミックな雑誌に上記の表題のような文章を書くのはいささかためらいがあるが、編集者からの依頼なので敢えて筆を取ることにした。というのは、「 $1/f$ ゆらぎに関係した生体情報処理」にしても「快感工学」にしても、いろいろなことが分かっていていところであって、事実を羅列する以外に何かを云おうとすると、すべてスペキュレーションになってしまい、きっちりした証拠にもとづいたすっきりとした話にはならないからである。こういうことは本来はものに書いたりしないで、ただ自分の胸の中にしまっておいて自分だけの研究の手がかりにすればよいので、もしスペキュレーションがはずれていれば黙っていればよいのである。しかし編集部の依頼人の研究室でついしゃべりすぎた結果がこうなったので、これから研究を進めて行くために誰かの心の中で何らかのヒントの種にでも成長すれば幸いであるという期待のもとに私の考えていることを簡単に述べてみたい。

「快感」とか「面白い」とかいう主観的な言葉で表現される内容を客観的な言葉ないし数式で表現せよという問題を出されたときに、これにどのような態度で取り組んだらよいであろうか。価値判断という行為はそれを行う主体に準拠したものであるから、常に人体の中で起こっている何らかの生理現象が基準になって

いて、それに比較して客観的な実体の姿がどうであるかという判断になっているはずである。最近「快感」を与える刺激を外部から受けると脳の内部である物質が放出されることが明らかになってきたそうであるが、すべての快感をそこまで追い詰めることが出来るのかどうか分からない。例えば、ある絵を見てそれが「よい」とか「悪い」とかという判断の基準は煎じ詰めれば、何らかの生理現象に帰着されるに違いないが、それが何かの化学物質の放射に置き換えられる程単純な過程に帰着されるのかどうか甚だ疑問ではあるが、ともかく芸術的な価値判断は何らかの生理現象に基準をもつことは間違い無かろう。

音楽を例に取ってみよう。われわれの耳が受け取る「音楽」は単なる音響振動である。楽器から出る音響振動は「音楽である」が、自動車やジェット機の出す音響振動は「音楽ではない」という判断は一体どこから発生するのであろうか。音楽にしても絵画にしても、細かいことは別にして、大まかな価値判断の結果は共通したものがある。よく考えてみると、これは不思議なことであって、われわれが生理的に同じ構造を持っているということと深い関係があると考えざるを得ない。そして、あまり沢山の例がないから断定的には云えないが、われわれの体の中にある基本的なゆらぎと同型の統計的性質を持った刺激を外部から受けるとそれを「快感」と感じるらしい。また、電流パルスによる徐痛効果について、高倉らは電流パルスの周波数連続通電時間を、生体の基本的なゆらぎと同じにすると、徐痛効果が一段と向上するという結果を得ている¹⁾。それでは、その基本的な「ゆらぎ」とはどういうものであろうか。

1/f Fluctuations in Biological Information Processing

Toshimitsu MUSHA

Department of Applied Electronics, Tokyo Institute of Technology

2. 生体に固有なリズムのゆらぎ

演奏された音楽の音響振動は、曲により異なった波形を持っているから、多分音響振動の統計的な性質に何かの鍵があるのではないかとすることが予想される。われわれの耳が音を聴いたときに、振動数と振幅の時間変化によってその音の特徴を捉えていることは間違いあるまい。音楽の演奏音の波形のある短い時間間隔ごとに分離して、その間の平均のゼロクロスの回数から振動数を定義し、またそれらの時間区間での音響パワーの平均値を同様にして定義することが出来る。それらが時間的に変動する様子から、それらの統計的な性質をあらわす量としてパワースペクトル密度を求めてみると、不思議なことにどの曲も非常によく似たスペクトル構造を持っていることが分かる。この性質はすでに IBM の Voss 氏によって指摘されている²⁾。実際にバロックから現代の曲について解析してみるとパワースペクトル密度は、フーリエ周波数 f に逆比例するいわゆる $1/f$ 型になっており、それに曲毎に異なる微細構造が重なっていることが分かる。さらに詳しく調べてみると音響パワーよりも振動数のパワースペクトル密度に音楽としての共通な性質がよく現われている。音響パワーの方は演奏スタイルにも依存してくる^{3,4)}。

スペクトルは時間的な変動の相関を表わしているから、スペクトルが基本的に同じであるということは、音の周波数（ピッチ）の動き方に共通な性質があると云うことになる。この共通な性質が、ある種の音響振動をして音楽たらしめている原因であるらしい。

$1/f$ 型のスペクトル構造を持った音響振動が、われわれ人間に対してなぜ特異な性質を示すのであろうか。この点を明らかにするには、われわれの体の中にある生理的な性質を調べてみる必要がある。われわれの体が刻むリズムの中で最も典型的なものは心臓の拍動である。心拍の間隔はほぼ一定であることは経験的に知っているが、実際には $\pm 10\%$ くらいのゆらぎをしている。そこで、このゆらぎの部分だけを取り出してパワースペクトル密度を計算すると、非常に奇麗な $1/f$ 型のスペクトルを持っていることが分かった⁵⁾。心臓の拍動は洞結節にあるニューロンから送り出される活動電位パルスによってトリガーされているので、自発発火しているニューロンの発火間隔ゆらぎに起因するものと考えられる。アフリカマイマイの巨大ニューロンについて永年研究しておられる岐阜大学の竹内宏教授と一緒に実験を行う機会が得られたので、約200

μ にもおよぶ巨大なニューロンを切出し、それにガラスのマイクロピペットを挿入して電位変化を測定した。自発発火のパルス間隔をパソコンに付けた A/D 変換器で直接計測し記録してスペクトル解析をした結果、驚くべきことにこれも見事な $1/f$ 型のスペクトルを持つことが明らかになった⁶⁾。そのほかに、ヤリイカの巨大神経軸索を用いた活動電位パルスの伝送実験によって、パルス密度が $1/f$ 型のゆらぎをしているときにパルス間隔の配置が変形することなく安定に伝送されることが見いだされた^{7,8)}。またここで詳しく述べることは出来ないが（文献⁹⁾参照）、時実らが見いだした S- τ 法則は、パルス密度の $1/f$ ゆらぎと深い関係がある¹⁰⁾。

手拍子を打ったときの間隔のゆらぎも興味ある性質を示す。耳で聞いてもそのゆらぎはほとんど認識できないが、マイクロスイッチを叩く動作によってそのゆらぎのスペクトルを求めてみると次のようなことが分かった。自由に打鍵すると意外なほど正確に一定の間隔を保つことができ、そのゆらぎのスペクトルはほぼ $1/f$ 型になる。計算機のクロックパルスに相当する生体時計のゆらぎがそのまま現われているのであろうか。これに対して、メトロノームに合わせてリズムを刻むと、もはや生体時計に頼ることをしなくなるのであろう。ゆらぎのスペクトルはほとんど白色になる。つまり毎回のゆらぎに相関がなくなる¹¹⁾。

3. ゆらぎと制御

これらのことを総合して考えると、体の生理的なリズムの変動が基本的に $1/f$ 型のパワースペクトル密度を持っているのではないと思われる。どのような仕組みでこの種のゆらぎが発生するのか今のところ明らかではないが、このゆらぎは他のゆらぎに比べて特異な性質をもっている。その性質を生体が積極的に利用しているのでないかと想像される。その特異な性質と言うのはこうである。ゆらぎの量を時間の関数として $x(t)$ とする。時間を T ずつの区間に分けて、 n 番目の区間で計算した x の平均値を

$$y_n = (1/T) \int_m^{m+T} x(t) dt \quad (1)$$

とする。このとき、これらの平均値の間の分散を σ^2 として次式で定義する。

$$\sigma(T)^2 = (1/2) \langle (y_n - y_{n+1})^2 \rangle \quad (2)$$

これは「2 値分散」とか「アラン分散」と呼ばれてい

るもので、 $x(t)$ のパワースペクトル密度 $S(f)$ と $\sigma(T)^2$ との間には次の変換式が導かれる¹²⁾

$$\sigma(T)^2 = 2/(\pi T)^2 \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \int_{\epsilon}^{\infty} (df/f^2) S(f) |\sin(\pi f T)|^4$$

ここで、

$$S(f) = C \rightarrow \sigma(T)^2 = C/(2T) \quad (3)$$

$$S(f) = C/f \rightarrow \sigma(T)^2 = 2C \log 2 \quad (4)$$

となる、ゆらぎが無相関であるとスペクトルは f に無関係に一定になる。これが式(3)の場合で、分散は T に逆比例して減少する。「平均時間を長くすれば平均値の誤差が小さくなる」という常識の定量的な表現がこれである。ところが、ゆらぎが $1/f$ スペクトルを持つときにはこの常識に反して平均値の間のバラツキは平均時間に無関係に一定に保たれることが式(4)から分かる。つまり、パルス密度が $1/f$ ゆらぎをしているときには、時間 T でパルス密度を解読すると区間毎の情報のゆらぎは T の大小に関係無く一定に保たれることになる。

これは、解読のための積分時間が変動しても情報の不確かさが一定に保たれることである。時実の $S-\tau$ 法則は、生体情報の内容が(たとえば皮膚に与えられた刺激の強さ)が変動しても、パルス密度ゆらぎのバリエーションが一定に保たれるということに相当している。1/f ゆらぎと合わせて考えると、生体情報を解読するための積分時間の変動に対して情報の不確かさの大きさは一定に保たれ、しかもこの不確かさの大きさは信号の強度の変動に対しても一定に保たれるということになる。しからば、この情報の不確かさ幅はどのような意味をもっているのであろうか。

確たる証拠があるわけではないが、生体のように複雑でしかも信号の遅延時間の大きい系での制御にゆらぎが何か積極的な役割を果たしているのではないかと考えている。生体信号の符号化と生体制御は今後興味あ

る発展が期待されるので、この小文によってこの問題に興味をもつ研究者が一人でも増えれば幸である。

文 献

- 1) K. Takakura, K. Sano, Y. Kosugi and J. Ikebe (1979) "Pain control by transcutaneous electrical nerve stimulation using irregular pulse of $1/f$ fluctuations," *Applied Neurophysiology*, vol. 42, p. 314.
- 2) R. F. Voss and J. Clarke (1975) " $1/f$ noise in music and speech," *Nature*, vol. 258, p. 317.
- 3) 武者利光, 富田 勲: (1985) 「電子のゆらぎが宇宙を騒ぐ」朝日出版 (1985).
- 4) 寺本 英, 広田良吾, 山口昌哉, 武者利光 (1985) 「無限・ゆらぎ・カオス」培風館.
- 5) M. Kobayashi and T. Musha (1982) " $1/f$ fluctuations of heart beat period," *IEEE Trans.*, vol. BEM-29, p. 456.
- 6) T. Musha, H. Takeuchi, and K. Inoue (1983) " $1/f$ fluctuations in the spontaneous spike discharge intervals of a giant snail neurons," *IEEE Trans.*, vol. BEM-30, p. 194.
- 7) T. Musha, Y. Kosugi, G. Matsumoto, and M. Suzuki (1981) "Modulation of the time relation of action potential impulses propagating along an axon," *IEEE Trans.*, vol. BEM-28, p. 616.
- 8) G. Matsumoto, N. Takahashi, and Y. Hanyu (1986) "Chaos, phase locking and bifurcation in normal squid axons," (to be published in "Chaos in Biological Systems" NATO ARW Workshop).
- 9) 時実利彦 (1955) 人間の骨格筋の機能分化 I, II 科学 25, P. 229, P. 291.
- 10) 武者利光 (1985) 生体情報と $1/f$ ゆらぎ応用物理 54 P. 429 (1985)
- 11) T. Musha, K. Katurai, and Y. Teramachi (1985) "Fluctuations in human tapping intervals," *IEEE Trans.*, vol. BEM-32, p. 578.
- 12) C. M. van Vliet and P. H. Handel (1982) "A new transform theorem for stochastic processes with special application to counting statistics," *Physica*, vol. 113A, p. 261.

むしや としみつ

1954年東京大学理学部物理学科卒業。電電公社電気通信研究所、マサチューセッツ工科大学(アメリカ)、王立工科大学(スウェーデン)、RCA 東京研究所を経て現在は東京工業大学大学院総合理工学研究科教授。現在は電気抵抗の $1/f$ ゆらぎ発生機構の実験的研究および頭蓋内部の電気的興奮部位の高速追跡法の開発研究を行っている。

☎ (045) 922-1111 内線2546