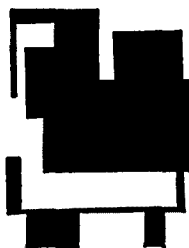


解 説 1



5.4, 12.6

生 体 情 報 と $1/f$ ゆ ら ぎ

武 者 利 光

東京工業大学大学院総合理工学研究科 ▼227 横浜市緑区長津田 4259

(1984 年 12 月 6 日 受理)

心拍周期の変動, 打鍵運動をするときの時間間隔のゆらぎ, アフリカマイマイの自励発振ニューロンの発振周期変動は, すべて $1/f$ 型のパワースペクトル密度をもっている。さらに, 神経軸索にランダムに励起された活動電位スパイク列は軸索の非線形性により $1/f$ 型の密度変調を受けて安定化する。このように $1/f$ ゆらぎは生体と深い関係をもっているが, $1/f$ ゆらぎは情報の不確定さを一定に保つという特別な機能をもっている。

1. ま え が き

暗闇の中で生活していても, われわれはほぼ 1 日 (正確に言えば 1 日より少し長い) の周期で寝たり起きたりするそうである。このような生体のリズムをサーカディアンリズム (circadian rhythm) と呼んでおり¹⁾, この生体時計は脳の松果体に存在しているとも言われている²⁾。少し話は変わるが, 絶対音感というものがある。音を聴いたときに, その音の周波数 (または, 音楽でいう音名) を言い当てる能力である。絶対音感がない人でも, 一つの音が与えられたときに 1 オクターブだけ離れた音を自分でつく成することは, それほど難しいことではない。これと同様に, 1 秒間隔でリズムを刻むのは簡単ではないが, 自分の好きな一定の間隔でリズムを刻む (実際は, 「一定の間隔でリズムを刻もうと努力をする」と表現したほうが正しい) ことはそれほど難しいことではない。

このように短時間間隔でリズムを刻もうと努力をするときに, われわれは一体何を時間の基準にしているのだろうか。生体の中には, サーカディアンリズムの刻む周期よりも, もっと短い周期をもったリズムがある。例えば心拍がよい例である。それらの周期現象の周期はどのようにゆらいでいるのであろうか。われわれの経験によれば, 生体内に生起している現象はそれぞれ合目的性をもっているが, 生体の刻むリズムのゆらぎも何かの合目

的性をもっているのかもしれない。これから, いくつかの生体リズムのゆらぎの例をあげるのだから, それが, どんな合目的性をもっているのかについて推論をしてみたい。

2. 心拍周期のゆらぎ

サーカディアンリズムよりも短い周期をもった周期現象としてまず思いつくのは, 上にも述べたように心臓の拍動であろう。ガリレオが等時性を発見したときに彼は自分の脈拍を時計の代わりに用いたことは (真偽のほどは別にして) 有名な逸話である。しかし, 不整脈という言葉があるのとおり, 脈は厳密な意味では等時性をもっていない。それでは, その周期のゆらぎ方はどうなっているであろうか。心電図を用いれば心拍間隔を自動的に計測することができるが, そのゆらぎの性質をパワースペクトル密度を用いて表わしてみよう。

Fig.1 は正常な成人の心拍周期ゆらぎのスペクトルである³⁾。0.3 Hz のところにある小さなピークは呼吸の影響によるもので, 呼吸に応じて心拍周期がわずかではあるがゆらいでいることを示している。呼吸による引き込み現象によるものかどうかかわからないが, 0.3 Hz のピークの両側でスペクトルのレベルが低くなっており, その部分を除けば, スペクトルの傾きは周波数に逆比例している。このスペクトルを「 $1/f$ スペクトル」と呼ぶことにする。

スペクトル密度は自己相関と同じ情報量をもっており, 自己相関がデルタ関数状であると, 周波数に無関係ないいわゆる白色スペクトルが得られる。 $1/f$ スペクトルが周波数がゼロになるまで続くとなると, ゆらぎの 2 乗平均値は無限大に発散してしまうので (ゼロ周波数は無限

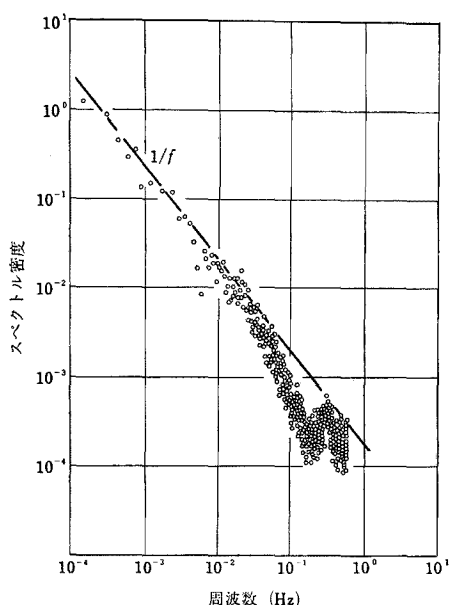


Fig. 1 心拍周期ゆらぎのパワースペクトル密度.

に長い測定時間に対応するので物理的には意味がない), これを $1/(f_0^2 + f^2)^{1/2}$ という関数で近似して Wiener-Khinchin の定理によって自己相関関数を計算すると, t が大きいところで $-\log(t) + \text{定数}$ という形になることがわかる. つまり, ゆらいでいる心拍間隔には記憶効果があり, その記憶がほぼ対数的に減衰していることになる. いろいろな心臓病患者の心拍についても調べてみたが, 心臓の異常はスペクトルの比較的高周波数の部分に現われるが, $0.05 \text{ Hz} \sim 0.1 \text{ Hz}$ よりも低い周波数では, いずれの場合にもスペクトルは $1/f$ 型になることがわかった.

胎児の心拍も $1/f$ 型のスペクトルを示すのであるが, 母体が妊娠中毒になると胎児の心拍周期ゆらぎの2乗平均値 (variance) は小さくなり, 母体の健康が回復すると胎児の心拍周期ゆらぎの variance もまた増大するという結果が得られている. つまり, この場合のゆらぎは胎児のバイタリティーの指標になっているといえるであろう.

3. 自励発振をする細胞のゆらぎ

心臓の拍動は, 右心房の上部にある洞結節内の自励発振をしている細胞から発射される電気パルス (活動電位) によってトリガーされている. しかし, 心拍周期ゆらぎは中枢の支配を受けている可能性があるので, 自励発振をする単一細胞の発振周期のゆらぎがどうなっているかを調べてみた. この目的にふさわしい自励発振をする巨大ニューロン (tonically autoactive neuron, 略称 TAN)

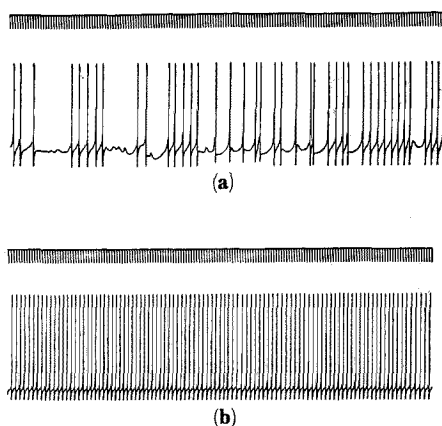


Fig. 2 アフリカマイマイ巨大ニューロンの活動電位波形. (a) ピペット刺し入れの影響で非常に不規則性が大きい場合. (b) 安定な発振状態.

をもっているのがアフリカマイマイ (*Achatina fulica ferussac*) という「かたつむり」である. これは, 沖縄や小笠原諸島にいる大きなかたつむりで, 野菜などを食欲に食い荒らす害虫として, 本州に持ち込むことは禁止されている (学術用に用いる場合には特別の許可がいる).

TAN の大きさは $0.15 \sim 0.2 \text{ mm}$ で, この部分だけ (といっても周囲の組織は若干付着しているが) を体から切り取って生理的食塩水に浸し, その中にガラスのマイクロピペットを差し込み, 細胞外の食塩水に浸した外部電極に対する細胞内電位を測定すると, 負電位から正電位の方向に向かって振れるスパイク電位が周期的に得られる. この波形を記録したのが Fig. 2 である. Fig. 2 の (a) はピペットを刺したばかりの状態, スパイクの発射は非常に不規則である. (b) はそれから大分時間がたち発振が安定になった状態である. 安定な発振といっても, わずかながら間隔に不規則性があり, そのゆらぎのスペクトルを計算すると Fig. 3 のようになる. この場合にも心拍間隔ゆらぎの場合と同様に, $1/f$ 型のスペクトルをもっていることがわかる⁴⁾.

Fig. 2(a) を見るとわかるように, 細胞内の電位は時間の経過とともに上昇し, あるしきい値に達するとスパイク状に急上昇してから急激に元の電位に戻るようみえる. この過程が繰り返されてスパイク列ができるのである. Fig. 2(b) では細胞内電位の上昇過程でゆらぎが生じて, しきい値に達するまでの時間にゆらぎが生じているのが読みとれる. また, しきい値がゆらいでも, スパイクの時間間隔にゆらぎが生じる可能性がある. おそらく, これら両方のメカニズムがスパイク間隔ゆらぎに寄与しているものと思われるが, どちらがどのように寄

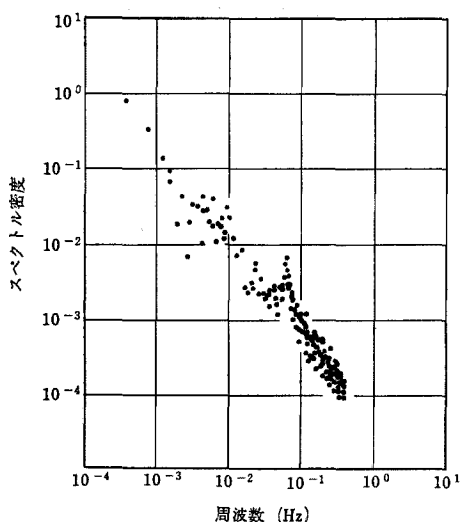


Fig. 3 Fig. 2(b) のパワースペクトル密度.

与しているかは、現在までのところ、わかっていない。また、神経軸索内の電位自体が $1/f$ 型のスペクトル密度をもってゆらいていることは、すでに報告されており^{5,6)}、筆者自身もヤリイカの巨大神経軸索を用いて測定して、このことを確認している。

4. タッピング周期のゆらぎは？

さて、われわれは音楽を演奏するときにリズムを刻む。生体内部のどのような現象を利用してリズムを刻むことができるのか筆者は知らないが、時計のようなものを用いずにリズムを刻んだときに、そのリズムはどのようなゆらぎを示すであろうか？ 実験としては、被験者にキーをたたかせ、その間隔を計測することになるが、文献を調べてみると、パーキンソン病のような神経性の病状を調べるために、このような実験がすでに行なわれている。ところが、これらのテストでは打鍵間隔のばらつきが興味の対象になっており、動的特性、つまり、ゆらぎのスペクトルがどうなっているかを調べた研究は見当たらなかった。そこでカスタネットの中にスイッチを仕込み、これをたたくことによってリズムのゆらぎを計測し、そのスペクトル解析を行なってみた。

この実験は二つのモードで行なった。モード1では、被験者は電子メトロノームの音を聴きながらカスタネットを1600~1700回連続してたたき、この操作を7回繰り返した。モード2では、はじめの10秒間だけメトロノームを聴いたあとでそのスイッチを切り、覚えたリズムを頼りにしてモード1と同様のプログラムに従ってカスタネットをたたいた。

5人の被験者についてこれらの実験を行ない、次のよ

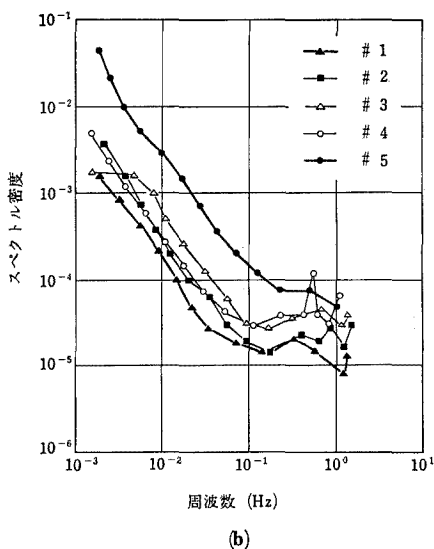
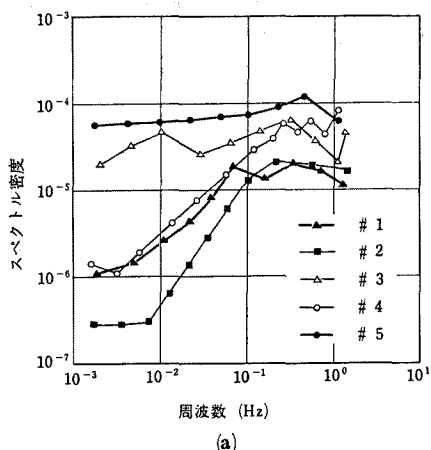


Fig. 4 カスタネットをたたいたときの時間間隔ゆらぎのパワースペクトル密度。(a)電子メトロノームを聴きながら打鍵した場合。(b)メトロノームを聴かずに打鍵した場合。

うな結果が得られた。メトロノームを聴きながら打鍵をすると、時間間隔ゆらぎのパワースペクトル密度は、すべての周波数にわたってほぼ白色であるか、または、0.1 Hz 以上が白色で、それ以下は低周波数に向かってレベルが下がっていく。いずれになるかは、被験者の過去の経験による（例えば、楽器を演奏したことがあるとか、ダンスの訓練を積んでいるとかいう経験があると、スペクトルは低周波数に向かって下がる傾向がある。つまり、長い時間スケールでは基準のリズムによりよく同期する傾向がある）。それに対して、自由打鍵の場合は、どの被験者も同じ型のスペクトルを示す。すなわち、0.1 Hz 以上では白色スペクトルになり、それ以下の周

波数ではほぼ $1/f$ 型のスペクトルを示す。これらの結果を Fig. 4(a), (b) に示した⁷⁾。

この実験結果は、次のように解釈することができる。メトロノームを聴いても聴かなくても 10 秒程度の time scale では、生体は一定の基準時間間隔からのズレを検知できないか、または検知できてもそのズレを補正することができない。それよりも長い time scale (10 秒以上) に関しては、メトロノームを聴くことによって time keeping に関するメモリーは消去されてしまうが、自由打鍵ではメモリーが減衰しながらも持続し、その減衰の仕方が $1/f$ スペクトルを与えるようになっているのか、または自分の中にある基準のリズムそのものが $1/f$ 的にゆらいているのかのいずれかである。

これら 5 人の被験者とは別に、何人かの被験者について自由打鍵のみの実験を行なったが、被験者の中で 1 人だけ $1/f$ 型ではなくて $1/f^2$ 型のスペクトルを示す人がいた。その人は禅の経験があるというので、この傾向が禅経験の有無と関係があるのかどうかを調べるために、静岡市の臨濟寺という禅寺を訪れ、早朝の修業が終わった後で 2 人の禅僧に打鍵実験の被験者になってもらった。禅僧の動作は非常にダイナミックで、マイクロスイッチ(カスターネットは音が出てうるさいのでマイクロスイッチを用いた)を 1 秒間に 6~7 回というハイピッチで、1 時間にわたってたたき続けた(途中で 6 回休みをとった)。2 人のうちの 1 人は打鍵のリズムに合わせて経文を恍惚として唱えながらマイクロスイッチをたたいたが、彼の打鍵リズムは予期したように $1/f^2$ 型のスペクトルを示した。もう 1 人の僧は終始冷静な様子で打鍵をしたが、彼の場合はわれわれ凡人と同じ $1/f$ 型のスペクトルを示した。例が少ないので何とも断定はできないが、興味のあることだと思う。打鍵と同時に心電図も記録したが、禅僧といえども心拍間隔のゆらぎは $1/f$ 型であった。

5. 生体情報伝送になぜ $1/f$ ゆらぎが必要か？

これらの実験に先立ち、筆者らは別の実験を行なった。生体内では情報が神経軸索に沿うスパイク状の活動電位列に符号化されて伝達されるが、伝搬する過程でそれらのスパイクの間の時間関係はどのような変化を受けるであろうかという疑問が、この実験を行なおうとした動機である。ヤリイカ (*Doriteuthis bleekeri*) から巨大神経軸索を取り出し(太さは 0.5~0.7 mm, 長さは約 5 cm) てそれを海水に浸し、軸索の内部に電極を挿入した。内部電極と外部の海水に置いた電極との間にパルス電流を流すとその部分にスパイク状の活動電位が励起され、それが軸索に沿って走るのである。ランダムな電

流パルスでランダムにスパイク状の活動電位列を励起して軸索上を走らせると、スパイク間の時間関係が徐々に変化することが観測された⁸⁾。

軸索に沿って並べた簾状の電極でピックアップした活動電位波形を Fig. 5 に示す。短い時間間隔において二つの電流パルスを軸索に与えると、活動電位は励起されないか、または励起されたとしても短い伝搬距離で消えてしまう様子がこの図から読みとれる。それよりもやや長い時間間隔で励起された活動電位は、先行する活動電位スパイクよりも遅い速度で進行するので、間隔が次第に開いてくる。このようにして、入力スパイク列と出力スパイク列とは同じ形にならないのである。つまり、生体情報は神経軸索上を伝搬する活動電位のスパイク列の密度として符号化されるので、生体情報は常に変形された形で伝送されるといわざるをえない。

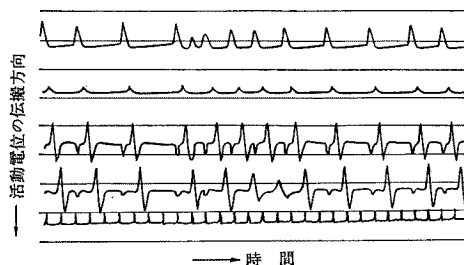


Fig. 5 ヤリイカの巨大神経軸索上を伝搬する活動電位配列の変化。軸索に沿う 4 本の電極で検出した波形を示す。

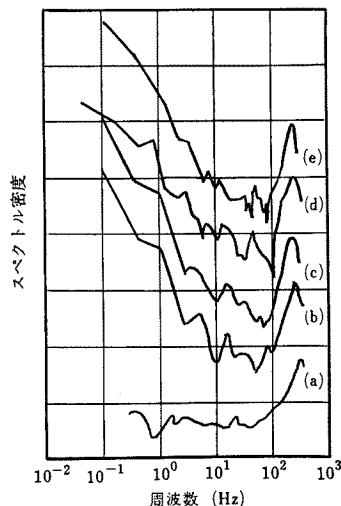


Fig. 6 Fig. 5 に示されたインパルス列の密度変調スペクトル。(a) 入力パルス列, (b) 1 回伝搬したとき, (c) 2 回伝搬したとき, (d) 3 回伝搬したとき, (e) 4 回伝搬したとき。

いろいろなスパイク列を用いて実験したが、その中で最も興味があるのは、ランダムなスパイク列によって活動電位を励起した場合である。その場合の、スパイク密度のスペクトル変化の様子を Fig. 6 に示す。

Fig. 6(a) はコンピューターで発生したランダムパルス列のスペクトルで白色スペクトルになっている。(b) は、(a) で示されたパルス列によって励起された活動電位スパイク列が 44 mm の軸索を伝搬したあとで示す密度変調のスペクトルである。このスパイク列をデータレコーダーに記録し、入力側から再び軸索を刺激して活動電位を励起したときの出力スパイク列のスペクトル密度を示したのが(c)である。このような手続きを繰り返して得られたスペクトルが(d), (e)である。(b), (c), (d), (e)はほとんど同じ形をしており、44 mm の軸索を伝搬したあとでは活動電位スパイクの密度変調は定常に達しているものと考えられる。そして、そのスペクトルはほぼ 1/f 型になっているのである。先行する活動電位スパイクによって、追従する活動電位スパイクの速度が影響を受けるのでこのような現象が生じるものと思われるが、その詳細はまだ明らかにされていない。神経軸索は非線形伝送路なので、その非線形性によって 1/f 型のスパイク密度変調が生じるのであろう。

これまでの実験結果によると、生体内の時計はどうも常に 1/f 型のゆらぎをしているように思われるが、1/f ゆらぎというものは他の種類のゆらぎに比べて、一体どのような特徴をもっているのだろうか。

6. 1/f ゆらぎとアランバリエンス

われわれが観測によって、ある量を求めようとする場合を考えよう。測定量には測定誤差などの影響で必ずゆらぎが伴う。このゆらぎを含めた観測量を $X(t)$ としよう。誤差を除いて真の測定値を得るために行なわれる操作は「時間平均」である。平均時間を長くすればするほど、得られた結果は真の値に近づくものと信じられている。しかし、この信念は常に真であるとは限らない。

$X(t)$ を t から $t+\tau$ まで平均した値を $Y(0)$, $t+\tau$ から $t+2\tau$ で平均した値を $Y(1)$, ... としよう。これらの平均値は一定の値の周りにばらつくであろうから、 Y のばらつき標準偏差を $\sigma(\tau)$ とおくと、 $X(t)$ のパワースペクトル密度 $S(f)$ と $\sigma(\tau)$ との間には次の関係が成り立つ。

$$\sigma^2(\tau) = \frac{4}{\pi\tau^2} \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \int_{\varepsilon}^{\infty} \frac{d\omega}{\omega^2} S(\omega) \sin^4\left(\frac{\omega\tau}{2}\right)$$

例えば $S(f)$ が白色スペクトルの場合には、 $\sigma^2(\tau)$ は 1/ τ に比例するので、平均時間を大にすれば平均値の間のばらつきは小になり、得られた平均値は真の値に近くなる。これが、上に述べた信念の根拠である。ところが、

$S(f)$ が 1/ f に比例する場合には σ は τ に無関係になり、いくら平均時間を長くしても得られた平均値の間のばらつきは少しも改善されない。真の値に近づくわけでもないし、そうかといって遠ざかるわけでもない。これが、1/f ゆらぎのもつ著しい特徴である。

ここで、生体情報伝送の問題に戻って考えてみよう。末端の感覚受容器に与えられた外部からの刺激は、活動電位スパイク列の密度に符号化される。そして、スパイク列の密度が 1/f ゆらぎをしている状況のもとで、スパイク列によって運ばれてきた信号は中枢のどこかで解読されるわけであるが、スパイク密度を解読するためには、一定の時間（積分時間）をかけてスパイクの数を数えてその値を積分時間で割り算しなければならない。しかし、積分時間を一定に保ったとしても、解読した平均密度はある標準偏差をもってゆらいでいるはずである。ところが、スパイク密度は 1/f ゆらぎをしているので、いかなる積分時間に対しても信号としてのスパイク密度ゆらぎの標準偏差は一定に保たれる。生体のことであるから、一定の積分時間を期待することはできないが、積分時間の不確定性にもかかわらず解読される信号（または、情報）の質は、1/f ゆらぎのお陰で、一定に保たれる。

末端の感覚器に与えられる刺激の強さが変化すると、軸索を伝搬する活動電位スパイクの平均密度が変化するので信号解読の積分時間もそれに応じて変化するに違いないのであるが、もしも、外部刺激が変化して平均のスパイク密度が大幅に変わったときにも、解読された生体信号の標準偏差が常に一定に保たれていることが実験的に確認されれば、筆者がいま述べた推理は一層裏づけられることになる。

7. 時実利彦氏が発見した $\bar{\tau}$ -S 則

私があるところで講演をしたときに、若林勲先生が私の研究にとって非常に重要な文献を教えてくださいました。それは時実利彦氏の古い論文で、その中の一節を次に引用する⁹⁾。

「筋肉が全く弛緩しているときには活動電位は全然現れないが、ごくわずかでも収縮を始めると、その強さに応じて（中略）持続時間の短い活動電流（普通 10 ms 以下）が周期的に反復して現われる（スパイク発射）。このスパイクの振幅は収縮の強さには関係なく常に一定であって、収縮の強さとともに変わるものは反復の頻度だけである。すなわち、収縮が弱いときには反復頻度が遅く、収縮が強くなるにつれて速い頻度で反復するようになる。そこでこのスパイク発射の反復頻度の変化に着目して運動系の機序を分析してゆこうとするのが私たち

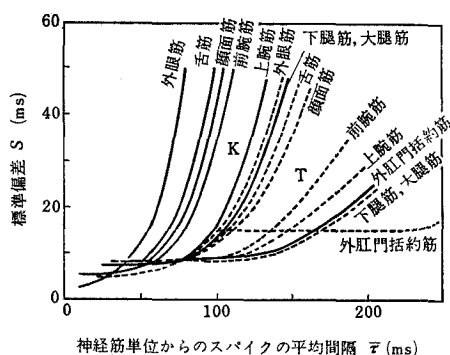


Fig. 7 神経筋単位から放射されるスパイクの平均間隔 $\bar{\tau}$ と標準偏差 S との関係⁹⁾.

の方法の着眼である。(中略)そこで一つの筋肉について、いろいろの部位からの NMU (神経筋単位) の発射を、収縮の強さを種々の程度に変化させて、同様な処理をして、できるだけ多くの $\bar{\tau}$ - S 点 (筆者注: $\bar{\tau}$ はスパイクの平均間隔, S はスパイク間隔ゆらぎの標準偏差) を求めてみる。(中略) K 曲線に沿って発射活動をする NMU は、1 秒間に約 15 回の頻度の発射までは、おのおの発射間隔の変動が最小に抑えられていて、それよりも遅い頻度の発射では変動が次第に大きくなっていく。ところが T 曲線に沿う NMU は毎秒 15 回の頻度ではまだ変動が小さく、さらに弱い収縮の毎秒 8 回の頻度を越えると、はじめて変動が増していき、(後略)。(Fig. 7 参照)

つまり、筋肉の緊張を緩めていくとスパイクの頻度が次第に小さくなるが、そのゆらぎの標準偏差は一定に保たれている。しかし、筋肉があまりにも弛緩しスパイクの間隔があまりにも大きくなると標準偏差は急に増大し始める、というのである。ヤリイカの神経軸索についての筆者らの実験結果と時実氏の観測結果を結合すると、次の結論に達する。

「一定の刺激を与えたときのスパイク列の示す標準偏差の一定性 ($1/f$ ゆらぎによる) は、刺激の強さを変えてもそのまま保たれる ($\bar{\tau}$ - S 則による)」

生体情報の担い手としての活動電位スパイク列が示す情報の不確実性が常に一定に保たれていることに、どのような意味づけができるであろうか? 生体现象の合目的性から考えると、たぶん何か積極的な機能をもっているに違いないと私は考えているが、その正体が何であるかはこれから解決すべき問題であろう。

8. 音楽との関係

音楽というものは、なぜ聴く者に快感を与えるのだろうか? いってみれば、音楽というものは音響振動の

周波数とパワーのゆらぎを楽しむものに他ならない。雑音と音楽とは両者とも音響振動のゆらぎという点では物理的に同じ現象であるにもかかわらず、音楽のほうは、われわれに快感を与えるが、雑音はその逆に激しい不快感を与えるのはなぜだろうか? その違いはゆらぎの仕方の相違にあることは間違いない。音楽と雑音のスペクトル上の相違を調べれば、この違いがどこにあるかがわかるであろう。

楽譜から音楽のスペクトル解析をするのは、はなはだしく手間がかかり、ちょっとやる気が起こらないが、演奏音をテープにとり、A/D 変換器を用いてそのままコンピューターに取り込むのであれば、比較的簡単に解析することができる。音響振動の時系列を一定の短い (数十 ms) 間隔で次々に切断し、おのおのの区間での音圧のゼロクロス回数を計算して平均周波数を求める。このよ

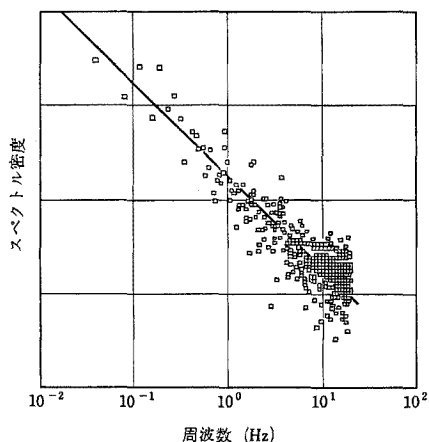


Fig. 8 ベートーベン「田園交響曲」の周波数ゆらぎのパワースペクトル。

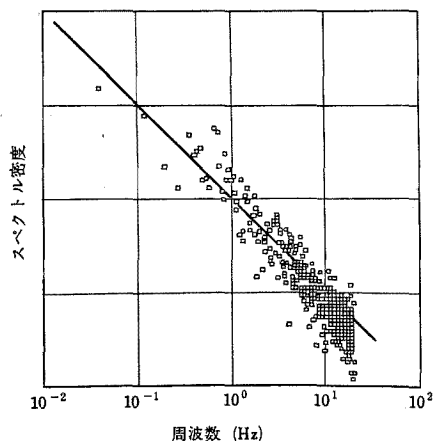


Fig. 9 佐藤宗幸「青葉城恋唄」の周波数ゆらぎのパワースペクトル。

うな手続きで、周波数ゆらぎのパワースペクトル密度を計算することができる。それと同時に、それぞれの区間での平均音響パワーを求めてやれば、音響パワーゆらぎのスペクトル密度をも計算することができる。

このようにして、いろいろな音楽作品の性質を調べてみたところ、次の事実が明らかになった¹⁰⁾。まず結果を示そう。Fig. 8 はベートーベンの交響曲「田園」第一章の周波数ゆらぎのパワースペクトルである。Fig. 9 は佐藤宗幸の「青葉城恋唄」の周波数ゆらぎのパワースペクトルである。これらの曲に限らず、古今東西を通じてわれわれが（少なくとも、私が）聴いて「いいなあ」と感じる曲は、すべて $1/f$ 型の周波数ゆらぎを示す。ただし、音響パワーのゆらぎに関してはこの限りではない。よく見ると、 $1/f$ 型のスペクトルに加えて、それぞれの曲の個性を示す微細構造が存在する。つまり、 $1/f$ スペクトルという共通性に微細構造という個性が加わっている。また、私が聴いて楽しめない、いわゆる現代音楽は $1/f$ 型のスペクトルを示さない。結論的にいうと、いわゆる easy listening の音楽はすべて $1/f$ 型の周波数ゆらぎをもっているといえそうである。

多くの音楽作品が大衆に受け入れられることを別な面からみると、それなりの何か共通性が存在するはずである。その共通性が周波数ゆらぎに現われている $1/f$ スペクトルではないかと私は真面目に考えている。つまり、音楽のもつ音響振動の周波数ゆらぎが、われわれの体内にあるゆらぎと同じ統計的性質をもっていること

が、それを聴く者に快感を与えるのではないだろうか。古今東西の名作曲家たちは経験として、この秘訣を知っていたのであろう。

さて、最後の結論は応用物理学会誌の記事としてはふさわしくない論理の飛躍があるが、いずれにしても、ゆらぎというものは、今までいらざるものとして軽視されてきているが、それにはそれなりの存在理由があるということに注目していただければ幸いである。

文 献

- 1) 井上昌次郎：蛋白質核酸酵素 **271** (1982) 341.
- 2) 山口武夫：月刊薬事 **24** (1982) 1551.
- 3) M. Kobayashi and T. Musha: IEEE Trans. Bio-Med. Eng. **BME-29** (1982) 456.
- 4) T. Musha, H. Takeuchi and K. Inoue: IEEE Trans. Bio-Med. Eng. **BME-30** (1983) 194.
- 5) A. A. Verveen and H. E. Derksen: Kybernetik **2** (1965) 152.
- 6) A. A. Verveen and H. E. Derksen: IEEE Trans. Bio-Med. Eng. **BME-30** (1983) 194.
- 7) 桂井久美子，寺町康昌，武者利光：電子通信学会技術研究報告 MBE 84-1 (1984).
- 8) T. Musha, Y. Kosugi, G. Matsumoto and M. Suzuki: IEEE Trans. Bio-Med. Eng. **BME-28** (1981) 616.
- 9) 時実利彦：科学 **5** (1955) 229, および **6** (1955) 291.
- 10) 武者利光，井上 健：音楽音響研究会資料 MA 83-6 (1983).