

心臓搏動，呼吸および筋運動の電氣的応答およびスペクトラム分析

菊池 志げ子*

1 はじめに

地球の表面から数百米以内の鉱物体は，直流電気や0.1 Hz～数メガHzの交流電気で探査される。また地下数千メートルの深さにある石油鉱脈等は，人工地震波等によって探査される。

渡辺は，昭和47，48年の夏に，西オーストラリア政府の援助により，ジープ上に3メガHz附近の少し周波数のずれた2つの発信器に，各々異なる型のアンテナを附して両方の電波の差を検波しつつ，最高時速60 kmで地下鉱物体の上の砂漠を延べ数千km走行し，12ヶ所の既知鉱床のすべての探査に成功した。⁽¹⁾

渡辺は，上記の地上からの地下探鉱法を用いて，生体の表皮上から生体内部の筋肉や臓器の様子を探ろうと考えた。

直流電気は，つぼ(経穴)の探査に用いられた。⁽²⁾

また交流電気は生体の緩和周波数 f_{relax} の存在を示した。⁽³⁾

渡辺と宍戸は，各種の心電図をフーリエ級数に分解して，各種の心臓病について異なるスペクトラム分布を得た。⁽⁴⁾

菊池は，生体の左手—右手間の交流インピーダンス(総合抵抗反応)を調べて，ハムスター(こまねずみ)のインピーダンス・スペクトラム分布や，その死期のインピーダンスの変動などを測定した。

また f_{relax} は，生体の敏捷度と関係があるとした。⁽⁵⁾

今回，菊池と渡辺は，更に詳しく，受動的な生体電気応答度(生体が外部から刺激例えば電気とか光，熱，音圧を受けた時の反応)と，能動的な生体発電(心臓搏動，呼吸及び他の筋肉運動による発

電)のスペクトラム分析を試みた。

- (1) Geological Survey of Western Australia, Record No.1972/23, N.Watanabe and J.L. Baxter: Field Tests of a Prototype 3MHz Electromagnetic Method in Western Australia.
- (2) 菊池志げ子: 生体の皮膚電気抵抗。上田女子短期大学紀要へ昭和58年3月寄稿。
- (3) 渡辺直隆・宍戸敏雄: 生体インピーダンスの計測と等価回路に関する一考察，日本大学工学部紀要A-24，昭和58年3月，137—142頁。
- (4) 宍戸敏雄・渡辺直隆: 心電スペクトラムによる心疾患診断法に関する基礎的研究，日本大学工学部紀要A-24，昭和58年3月，127—136頁。
- (5) (2)に同じ。

2 本研究方法的説明

血管壁の硬さは50歳台より60歳台の方が大きくなっていく。その硬さのパラメータ(Stiffness Parameter)を超音波変位計で測った論文がある。⁽⁶⁾

菊池も昭和34年⁽⁷⁾および昭和58年^(8,9)に，人体の弾性ヤング率(力を加えると物体の伸び縮みする割合)の経年的変化の研究を発表した。

昭和58年3月末に，NHK TV⁽¹⁰⁾その他に発表された，日本新技術事業団が開発した，老人の脳内血管梗塞(脳卒中)の新らしい測定方法がある。頭部に供給する総合血流抵抗反応量 x_i は，脳内末端血管の梗塞度に比例する。

(総合血流抵抗反応) $x_i = r_i$ (血管の内面の血流抵抗) - jx_i (血管の弾力)，

$$x_i = \frac{1}{2\pi f C_i} \quad [1]$$

(抵抗 r_i が大きければ，末端血管の梗塞度が大きく， x_i が大きすぎると—容量 C_i が小さすぎると—

*長野大学，上田女子短期大学

血管壁が堅くなりすぎて脆くなっている)。

新技団では超音波測定機を深、浅と切り替えて、頸動脈部の血圧 p とそこを通過する血量 q とを測っている。

- (6) 川地健也：超音波変位計による総頸動脈管軸方向 Stiffness Parameter β 分布の計測—健常群、脳梗塞群の対比。日本老年学会雑誌，1982年11月，588—591頁。
- (7) 菊池志げ子：年齢別の日本人男性等価弾性常数外。人類学，人類遺伝学，体質論文集，慶応大医，昭和34年10月，101—103頁。
- (8) 菊池志げ子：一歳児に与える環境の重要性について，上田女子短期大学紀要，昭和58年3月寄稿
- (9) 菊池志げ子：人体のヤング率の経年的変化(附老人の歩行姿勢について)，長野大学紀要，昭和58年5月寄稿
- (10) NHK 昭和58年3月28日の放映ニュース：脳卒中の新測定法，慈恵医大吉村正蔵・古幡博・桜ヶ丘総合病院古平國泰：脳血管特性測定装置，教育学術新聞第1256号 昭和58年4月6日
日本技術事業団(理事長武安義光)の開発した「超音波による脳血管特性測定装置」によると，頸，脳の血管系を電気回路モデルにみたと，頸動脈の血液波と圧脈派からモデル回路のパラメーター値である末しょう抵抗 r_i ，末しょう容量 C_i を算

出し，こうして得られた特性値は，障害者の場合，末しょう抵抗は高い値を，末しょう容量は低い値を示す。この末しょう抵抗は脳血管の大きさを，末しょう容量は脳血管の弾力性を表わしているもので，脳血管が細くなり，ふさがりやすくなると末しょう抵抗が増加し，また脳血管が弾力性を失うと末しょう容量が低下する。一般に老人は若い人に比べ，末しょう抵抗は高く容量は低い傾向にある。

これより前に，1978年，Kanno R, et al は，機械学における水力学を用い，圧力(血圧) p の下で，管(血管)を流れる水量(血流量) q を測ることにより，管(血管)の性質 $Z \angle \phi$ (機械的綜合抵抗インピーダンス)を測定した。

いま菊池と渡辺は電氣量に等価化するために，[1]と同じように

$$\frac{p}{q} = Z_i \angle \phi_i = r_i - jx_i \quad [2]$$

と書き， r_i と x_i を分けてみる。 r_i は血管内部壁の血流の流体抵抗で，管が太く，コレステロールが溜っていなければ流体抵抗 r_i は小さく，従って血流は良い。 x_i は管の弾性抵抗で，足先なぞの毛細血管に弾力があれば，血のめぐりがよくて足先も暖かい。

$$x_i = \frac{n_i}{2\pi f} \text{ 又は } n_i = 2\pi f x_i \quad [3]$$

であって， x_i から血管の弾性常数 n_i または弾性ヤング率 e_i を計算することが出来る。(血圧が血液の流れにかかる時，血管が拡がる。この拡がる割合を剛性率の内の一つである弾性ヤング率という。血圧が低くなればもとに戻るが，又拡がり戻りを繰返す。つまり機械的交流回路であって，これを電氣で測定すれば，電氣回路モデルになる。)

心臓搏動は一種の重さ(jm)とバネ(-jx)と抵抗(r)の運動と考え，この電氣モデルを次のように作る。心臓搏動は，ペースメーカー細胞の数 $mV \rightarrow 100 mV$ への急な電氣のトリガー(ひき金)に始まるが，胸

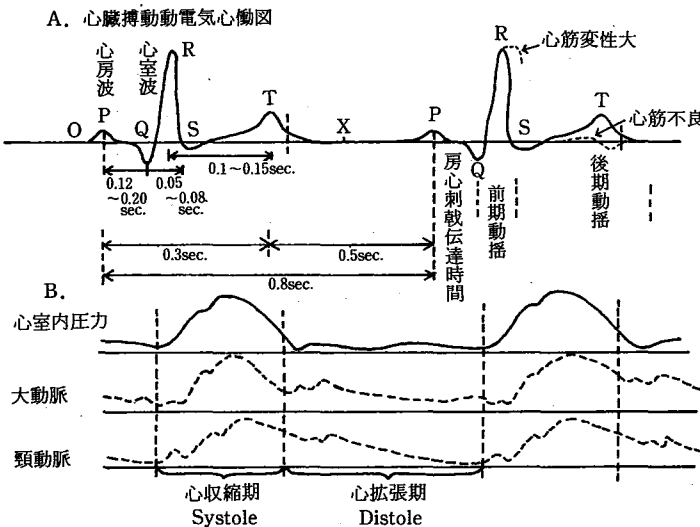


図1 A, B

部の心電図にはQRSのような棘波(微分波)として伝わる。Rの時間幅(τ_H)は非常に短かく心臓の丈夫な人程短かい。($\tau_H=0.02\sim 0.03$ 秒, その逆数のRとRの間を1秒とし, その間に $f_H=50\sim 33$ Hzで, τ_H を並べると $50\sim 33$ 個に相当する。)

実際の心電スペクトルでは, f_h を脈搏数として, f_H は f_h の数十倍でスペクトラムの凹部にある。kを常数として \sin 波を展開すると

$$e^{k\cos 2\pi f_h t} = e^k \left(1 + \frac{(\cos 2\pi f_h t)}{1!} + \frac{(\cos 2\pi f_h t)^2}{2!} + \frac{(\cos 2\pi f_h t)^3}{3!} + \dots \right) \quad [4]$$

の式となる。1は静電圧で, フーリエの展開では $A_n(\cos 2\pi n f_h t)$ の級数が加わる。(A_n は係数のいくつかnの場所で大きくなったり小さくなったりしている。(安戸, 渡辺, 図4(a)正常図, 文献⁽⁴⁾から引用したこの論文の図6(b)参照)

心臓筋の搏動運動や大動脈, 頸動脈, 手首動脈等では

$$1 + \cos 2\pi f_h t \quad [5]$$

の波形を歪ませたような非対称の波形として出て来る。図1A, B参照^(4,11)

- (11) 菊池志げ子: 骨格を基準とする人体の個有運動について, 人類学, 人類遺伝学, 体質論文集, 昭和34年10月, 68頁 Fig. IV-1A 図及 69頁(1)式

従って, 成人の心臓搏動 f_h (1.1 Hz) では, m_h を心臓の血液を含む運動重量 $360\text{g}^{(12)}$ とし, e_h を弾性ヤング率, r_h を心臓の動きをゆるめようとする反応の機械抵抗とすれば,

$$f_h = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{e_h}{m_h} - \left(\frac{r_h}{2m_h}\right)^2} \quad [6]$$

で, 健康な時には $r_h=0$ とし, Aをヤング率 e_h のかかる断面積とすれば,

$$f_h = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{e_h}{m_h}} \\ e_h = (2\pi \times 1.1)^2 \times 360\text{g/cm}^2 = 4777\text{g/cm}^2 \quad [7]$$

で有効断面積 A を $100\text{cm}^2\sim 50\text{cm}^2$ とすれば, そのヤング率 e_h は約 $50\text{g}\sim 100\text{g/cm}^2$ となり, ゴム

のヤング率の $20\text{g}\sim 800\text{g/cm}^2$ の値と殆んど同じである。

死後, 心臓筋が硬くなるに従って r_h が大きくなり, 従って f_h は [6]式により小さくなることがわかる。(ハムスターは死後54時間目に f_H は7Hzとなったから, その数十分の一の f_h は非常に小さくなる。遂には心臓搏動は停止するに到る。)

上記によって, 心臓搏動の機械的インピーダンス $z_h \angle \phi_h$ は

$$z_h \angle \phi_h = r_h - jx_h + jm_h \quad [8]$$

でこれを電気モデルに等価変換すれば

$$z \angle \phi = r - jx + jm \quad [9]$$

(機械抵抗は電気抵抗 r に, ヤング率はコンデンサの容量の逆数 $-jx$ となり, 重さはコイルの誘導 jm に変る)

となる。心臓搏動が遅くなるか, 停止すれば, jm は小さくなるか運動する重さが全くなり, 心臓の受動的構造は

$$z \angle \phi = r - jx \quad [10]$$

のように抵抗 r とバネの弾力 x だけとなる。これに電気刺激を加えると, バネ力が生きている限り, 重さがかがって再び動くことが出来る。(蘇生)

- (12) 心臓の重さは, 死体で体重の5%ぐらいで男280g, 女230gである。川嶋昭司, 図説生理学の基礎, 1982年, 42頁, 新思潮社

電気測定器(交流)による心臓動部の $r: -jx$ の部分は, いわゆる抵抗とコンデンサの組合せとなり, Cole-Coleの凹半円図が出来る。また心臓のバネ弾力が休んでいる期間中には重さだけが働き, つまり $r: jm$ だけとなった場合, いわゆる抵抗とコイルの組合せとなり, Cole-Coleの凸半円図が出来る。(これは心臓の拡張と収縮の働きを電気モデル化したものである。)従って, 心臓が完全に働いている場合には $r: -jx + jm$ は周波数 f の変化と共に小ループ(凹, 凸)を交互に描く。

交流電流を左手~右手間に通じてその周波数 f を変化しつつ, その電気インピーダンス $Z \angle \theta$ を測ると

$$Z \angle \theta = R - jX + jM$$

(Mは運動部分の等価有効重量) [11]

となる。いま運動は無く, 生体は静止していたと

すれば $jM=0$ だから、左手～右手間の受動的インピーダンスは

$$Z\angle\phi = R - jX \quad [12]$$

となる。これに身体内部の心臓の搏動の能動的インピーダンス $z\angle\phi = r - jx + jm$ が加わると、その総合インピーダンス $\bar{Z}\angle\bar{\theta}$ は

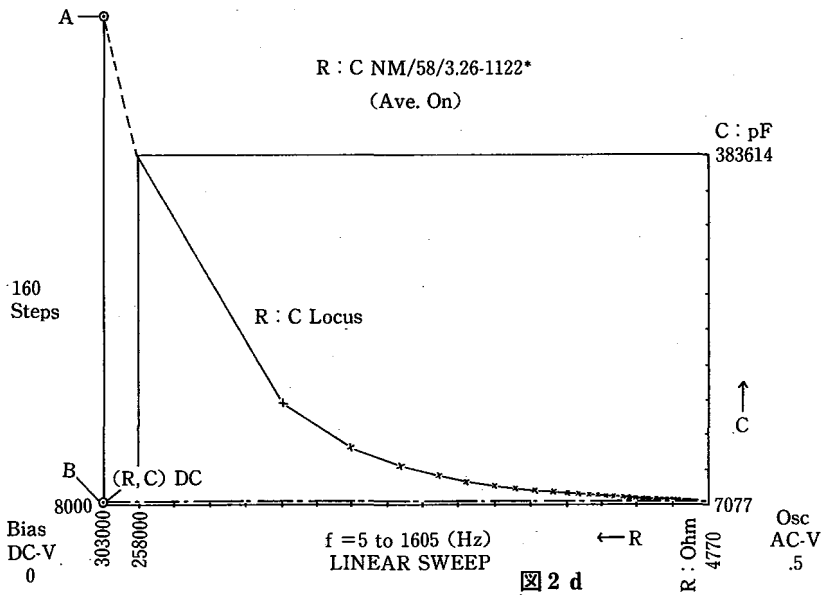
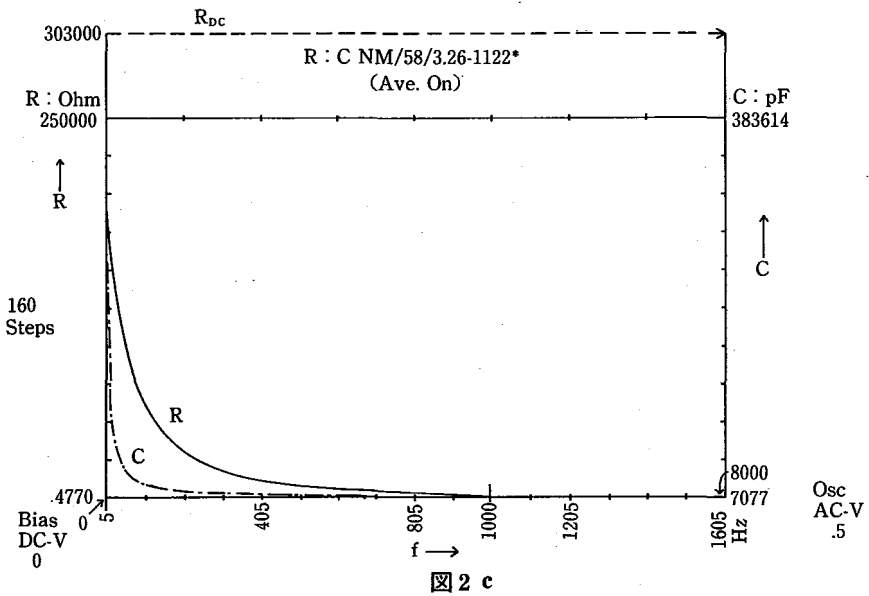
$$\begin{aligned} \bar{Z}\angle\bar{\theta} &= Z\angle\theta \pm z\angle\phi \\ &= [R - jX]\angle\theta \pm [r - jx + jm]\angle\phi \end{aligned}$$

(±は $\angle\theta$ と $\angle\phi$ との位相差で決る。) [13]

$[R - jX]\angle\theta$ は $\angle\theta$ のゆるやかな周波数 f に依存することにより、ゆるやかな Cole-Cole の凹半円図

を描き、その上に $\angle\phi$ の $0 \sim 2n\pi$ の角度の変化に対応するいくつかの f_n の場所に寄生小ループ群を作る。(いわゆるインピーダンスのスペクトラム分布が出来る。)この小ループ群は女性に多く現われる。インピーダンスの測定点を心臓附近に択むと、これらは一層大きく現われる。ついで肺呼吸の能動インピーダンスまででてくる。

左足と右足間のインピーダンスを測定すると、内臓中の運動器官(心臓、肺臓)の影響がはいらないから、Cole-Coleの凹半円図にそれらの寄生小ループ群は、はいらない。また緩和周波数の



f_{relax} も現われない。緩和周波数 f_{relax} は $R : -jX$ の Cole-Cole の凹曲線の最小点にあるが、心電スペクトラのうち最小スペクトラムの f_N と一致するかまたは相関関係にある。 f_{relax} の逆数の τ_{relax} を機敏度 (Quickness of the Body Response, 刺激があった後、生体の反応する速さ, Swiftness) という。

f_{relax} は次の通りであった。

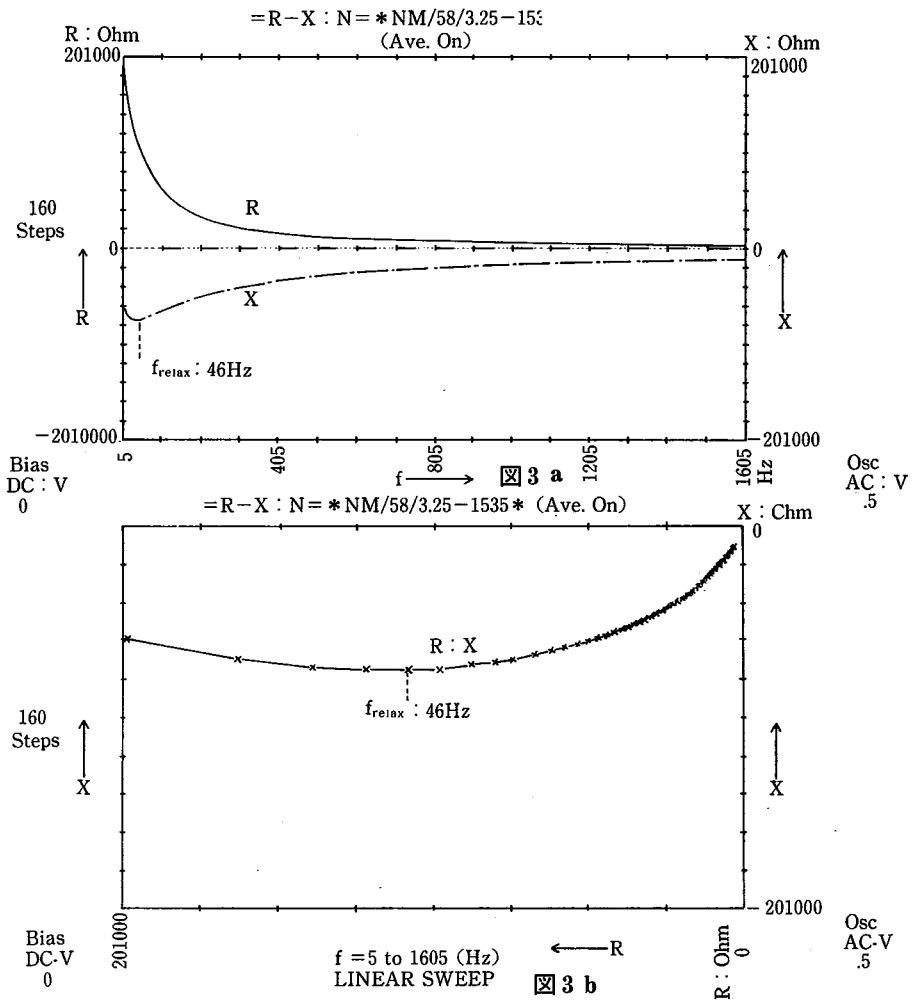
大運動選手	100 Hz 又はそれ以上
中運動家	70 Hz
平均的成人	40 Hz 前後
	(筋肉質の人に高い)
老人	20 Hz ~ 10 Hz 以下

大運動選手と老人との比は大よそ 10 : 2 ~ 1 位である。

本論文では生体を電気モデル化したので電氣的

計算法を用いた。父母から生れた子の遺伝体質は論理代数の乗算 (交る, and) による。従って、2つのインピーダンス(1つは両手間、1つは心臓から伝って来るインピーダンス) の加減乗除についても、他に適当な計算方法があるかも知れない。次に機械インピーダンスを電気インピーダンスに変換して、総合インピーダンスを加えるときは、パラメトリック変換を用いた方がよい⁽¹³⁾とされているが、本論文では交流電気計器でインピーダンスを測定し、その結果実際によく合ったので $Z \angle \theta = Z \angle \theta \pm z \angle \phi$ を使った。

(13) 秋山守雄：パラメトリック回路の解析法、84~85頁、電気書院、昭和39年11月



3 使用したZアナとスペアナ

横河ヒューレットパッカード YHR 製 Zアナ 4192A もスペアナ HP3582A も共に手動または自動測定方式で、自身コンピュータを内蔵し、計算し、データを蓄えたり、記憶したりすると共に、外部のコンピュータのプログラムに従い、遠方制御が可能で、その測定結果をグラフ化することも作図化（プロッタ化）することも出来る。渡辺は Zアナについては、1回の測定でメモリしたデータを、720種の電流量に表示できるようなプログラムを作った。可測周波数範囲は、Zアナでは 5 Hz ~ 13 MHz で、分解能は 10 kHz 以下の間では 0.001 Hz、1 MHz ~ 13 MHz の間では 1 Hz の高性能をもつ。スペアナは、0.002 Hz ~ 25 キロ Hz

の可測範囲をもち、分解能は 0 ~ 1 Hz の間で 0.006 Hz、その他の区間では 3 桁または 0.1 dB である。

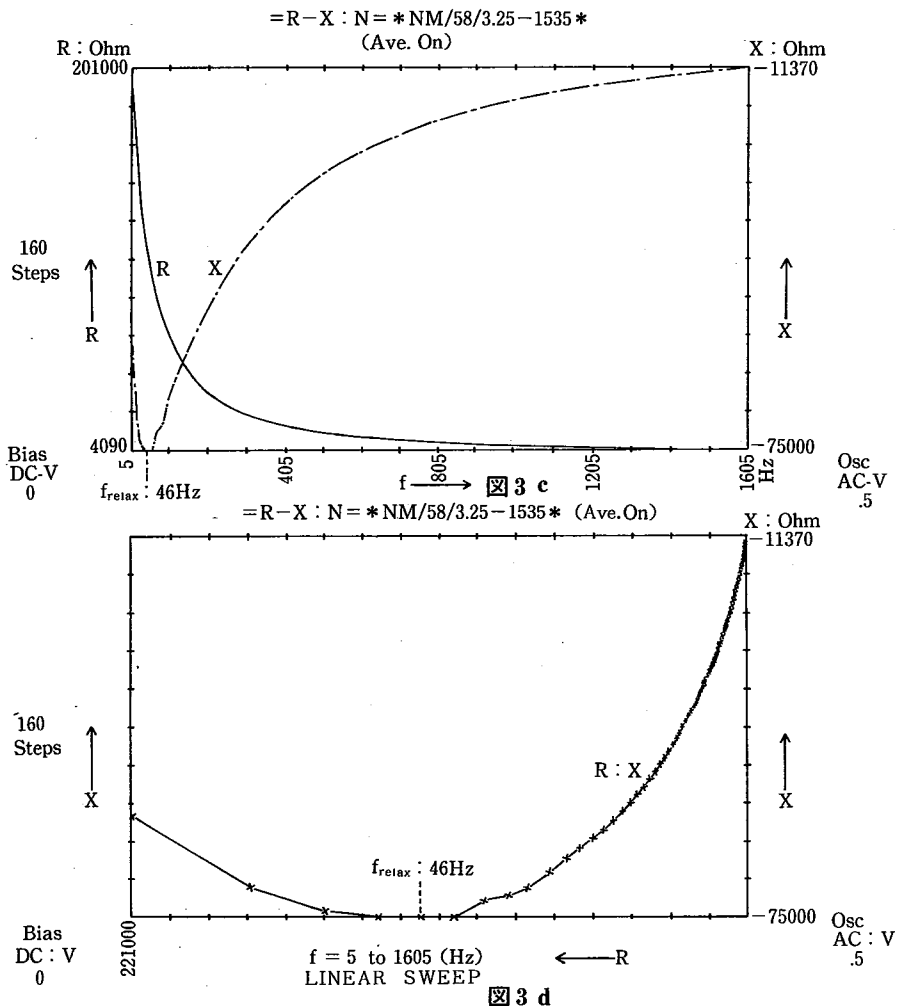
共に高速測定とふつうの測定と平均化測定 (Ave. On) が出来、また両者共に、周波数及び座標の一部を取り出して拡大する、いわゆるズーム化が可能である。

両者ともにベクトル計算が出来、従って振幅量 (Z または v) に附随した位相量 $\angle\theta$ 、 $\angle\psi$ が表示される。その分解能は 50° の範囲で 1° である。ベクトル出力の表示は次のとおりである

Zアナでは

$$Z_f \angle \theta_f = \sqrt{R_f^2 + X_f^2} \angle \tan^{-1} \frac{X_f}{R_f} \quad [14]$$

及びスペアナでは電圧は



$$v_f \angle \psi_f = \sqrt{u_f^2 + w_f^2} \angle \tan^{-1} \frac{w_f}{u_f} \quad [14]'$$

両測定器共、生体の2ヶ所の離れた場所に2組の双極を設置し、その間の伝達関係を調べる事ができる。

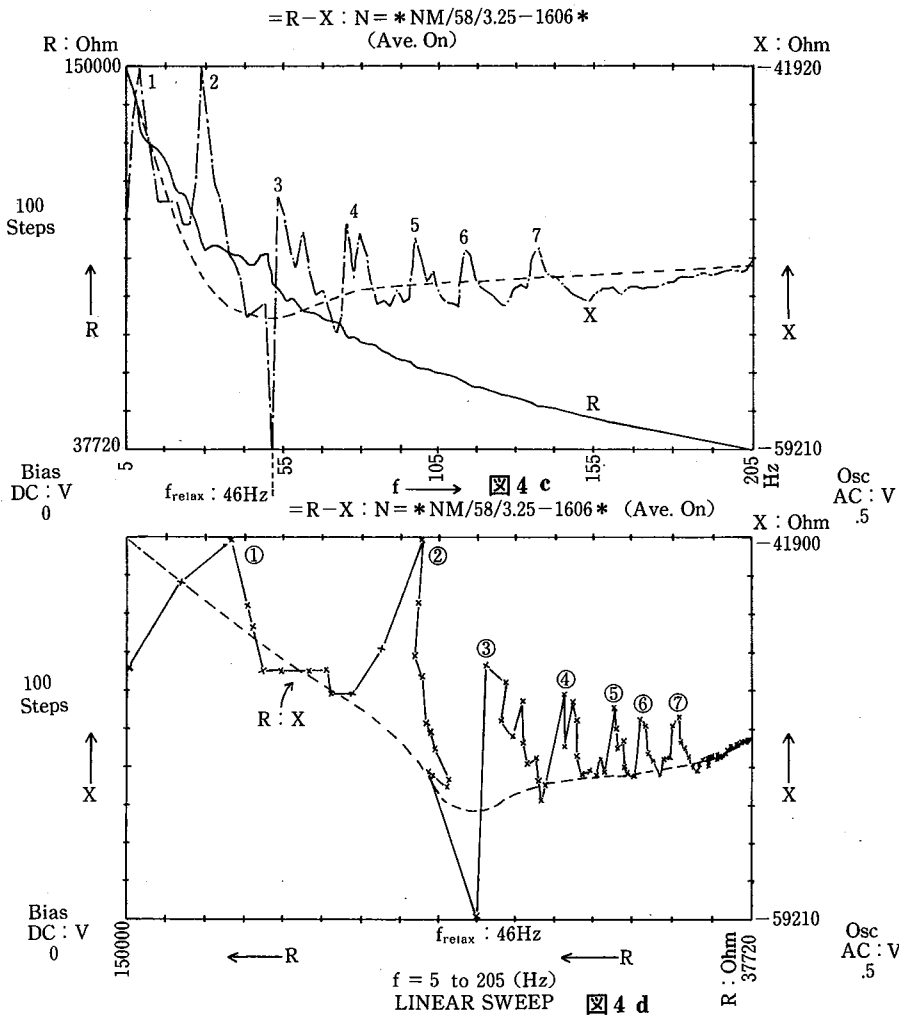
4 生体の二点間をZアナ及びスペアナで測定した結果

図2c, dは、健康な中年婦人NMの左手~右手間の $f: R, C$ および $R:C$ の5Hz~1605Hz間の周波数に対する変化図をZアナによって測定し、その結果 $R_{min} \sim R_{max}, C_{min} \sim C_{max}$ の間にズームした。図2c上の横の破線は、直流抵抗 R_{DC} (30300 オーム)を示すが、無機物又は水分のないミイラでは周波数 f に無関係のように、一定とな

って周波数をかえても、横の破線のように変化しない。

同様に図2dでは $C=0$ であるとして、 $C=80000$ pF (ピコファラド)よりわずかな下のB点即ち $(R, C)_{DC}$ の場所にあつて動かない。これに反して、人体は電解溶液(体液)を60%を含む一種の電解コンデンサであつて、図2dに示す $R:C$ の軌跡($R:C$ のLocus)はいわゆるCole-Coleの半円図を示す。

図3a,b,c,dは、 $R, -X$ の5Hz~1605Hzの大きな周波数の範囲で測定しa,bはこれを $0 \sim R_{max}, 0 \sim -X_{min}$ までの広範囲にプロットした、いわゆる標準波形である。この標準波形は各個体によって異なるから、個体の絶対比較に役立つ。図3c,dは、 $0 \sim R_{max}, 0 \sim -X_{min}$ の範囲に必要な狭い範囲内の $R_{min} \sim R_{max}, -X_{max} \sim -X_{min}$ にズームした図を示



す。図 3a,b,c,d の X が $f=46$ Hz の場所に $-X_{min}$ の場所があって、これが、いわゆる緩和周波数 f_{relax} で機敏度、生体の応答の速さ、Swiftness, Quickness of the Body Response と関係が深い。一日のうちでも、疲れた夕方の人体の f_{relax} は低くなる。

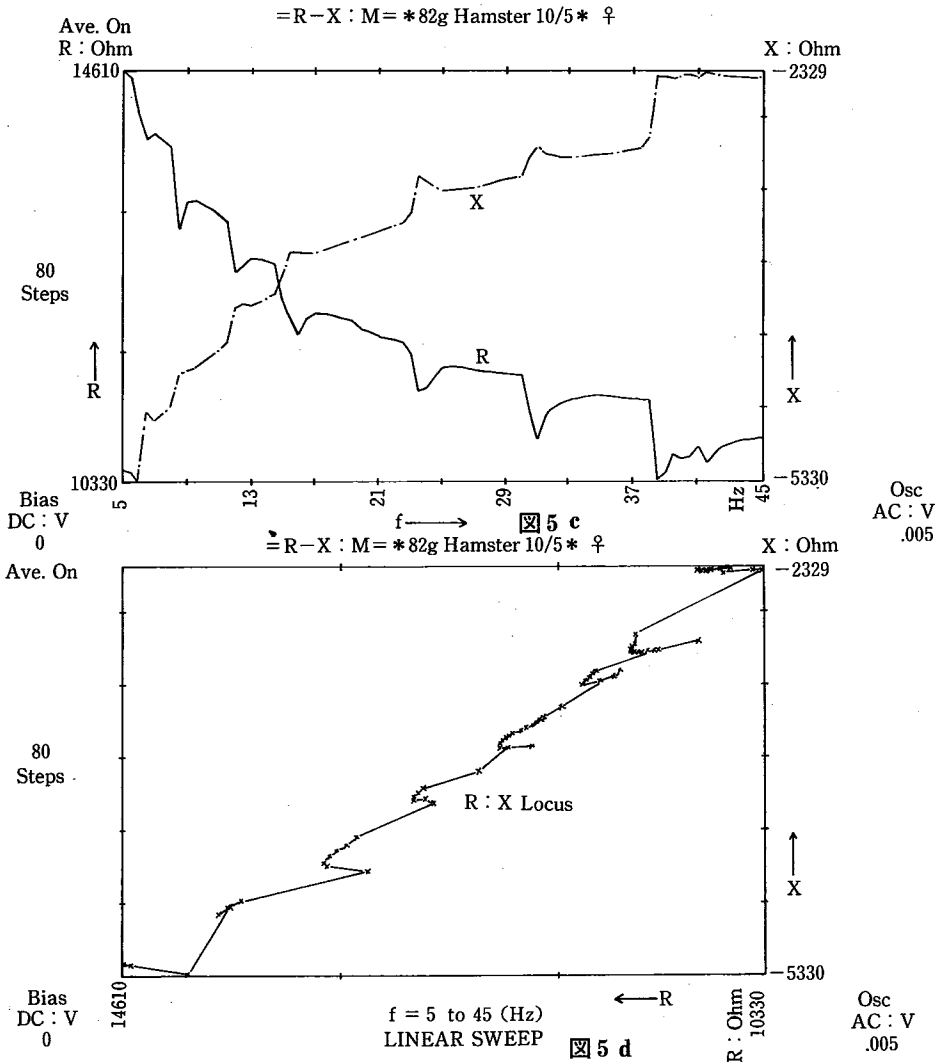
図 4c,d は、先の標準波形の周波数範囲を、大範囲の 5 Hz~1605 Hz から狭範囲の 5 Hz~205 Hz に狭めてズーム(局所拡大)した場合の $f: R, -X$ および $R: -X$ 図である。このズームした狭範囲の図上には緩和周波数 f_{relax} の $-X_{min}$ および $R: -X$ の凹所を含む Cole-Cole の半円図の上に 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 のような $-X$ のスペクトラム分布が認められる。各 Z_i のスペクトラムの間隔は 18.8

Hz であった。

この間隔 18.8 Hz は緩和周波数 f_{relax} の $46 \text{ Hz} \div 2.5 = 18.4 \text{ Hz}$ に近いが、はっきりしたことはわからない。

この図で明らかなことは、図 4d の $R: X$ の大きな Cole-Cole の半円(破線)の上に例えば、1~3 の間をとってみると、小さな上向きの半円($R: +j\omega$, Δ 形)と下向きの半円($R: -jX$, ∇ 形)とが互に周波数 f の増加に伴い、発生 (ΔV) していることである。(これは心臓のリズム搏動の周波数特性を示している。)

図 5c,d は体重 82 g のハムスタ(こまねずみ)の雌の左手~右手間の 5 Hz~45 Hz の狭い周波数範囲にズームした場合の $f: R, -X$ および $R: -X$



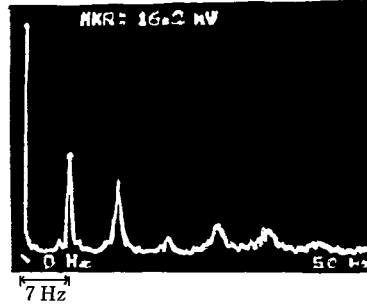
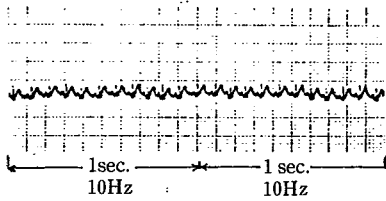
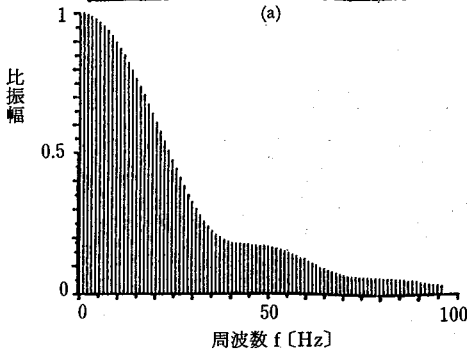
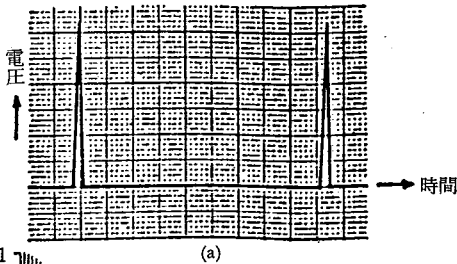
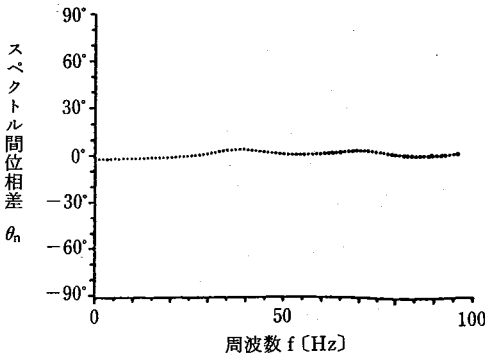


図 5 e



(a)



(b)

図 6 非対称三角波 (幅 $0.028 + 0.008$ 秒, 周期 0.94 秒) とその振幅および位相差スペクトル

図 6 (a), (b), (c)

X の Locus を示す。生体内部の心臓発電器の機械的インピーダンスの電気的性質は、その心臓の周波数特性の共振点が $-jx + jm = 0$ に在ることによって示される。(局所共振)。インピーダンスの共

振点では $-X$ は $-X + x$ だけふえ、反対に R は $R - r$ だけへる。往復性直線的 Cole-Cole 擬半円図は、周波数範囲を狭めてズームして測定すれば、再び半円形となるものである。がその半円の深さは浅い。

図 5e は上記ハムスタの左手～右手間の心電図とそのスペクトラム分布を示す。ハムスタは左手と右手は電極で懸吊されていたので多少興奮状態にあって心搏数は $10 \text{ Hz} \times 60/\text{分}$ であった。スペアナでのスペクトラム分布の測定の 4 回分を平均した場合には心搏数は $7 \text{ Hz} \times 60/\text{分}$ であった。

川嶋⁽¹²⁾の 48 頁によれば、動物の脈搏数/分は

ゾウ	25~30	ダイコクネズミ	250
ウマ	28~40	ハツカネズミ	600
イヌ	100~150	カナリヤ	1000
ウサギ	200	カエル	夏 40~50 冬 8~10

図 5e の左のスペクトラム分布は振幅 $v \angle \psi$ のうちの v の直線表示である。(位相角 ψ も出て来るが、図面上が複雑になるので省略した。)

図 6 (a), (b), (c) は、実戸、渡辺両氏の心尖搏動の振幅 v_f と位相 ψ_f の分布を、直線座標を用いて表示したものである。⁽⁴⁾

図 7a, b, c, d の左側は、ブラウン管の増幅器で増幅した、パルス幅 τ /繰返し周期 T を $1/48, 1/24, 1/16, 1/4$ と変化させたパルス図で、左側はそのスペクトラム電圧 $v \angle \psi$ の分布である。 $v \angle \psi$ は縦軸を対数目盛 (dB, デシベル) にとって、右辺の高周波部分の小さな $v (\angle \psi)$ を強調した。

図 8a, b, b', c, c', d, e, f のうち、図 8a の右側は心電図用の広帯域増幅器で増幅した場合の心電図であり、左側はそのスペクトラム分布である。図 8b は心電計用のモデル発振器 III の心電図とそのスペクトル分布であり、b' の右図は $0 \sim 10 \text{ Hz}$ の間にズームした場合のスペクトラム分布である。III とは左手、左足間の双極誘導の心電である。図 8c は健康な大学生の左手～右手間 (双極誘導の I に類似する) の心電図とそのスペクトラム分布である。図中 50 Hz の場所に電力線からの誘導波形が出たので、雑音として墨で消去した。図 8c' は心電計用のモデル発振器の V_F (単極誘導の左足 F) の出

カスペクトラム分布で、c 図によく似ている。これも不必要な 50 Hz の電力線の誘導 (-57.4 dB) は墨を似て消した。図 8d は中年婦人の左手~右手間の心電図とそのスペクトラム分布で、e は高年男性のそれである。高年男性のスペクトラムの電圧振幅 v_r は中年婦人のそれよりも 8 db 即ち半分程低く、且左手~右手との間の特に左手の骨、筋内部に疾病歴があった為、心電図中に雑音の混入が見られる。図 8f は高年男性の胸部附近に 2 つの電極をおいてその呼吸運動を心電図とスペクトラム分布図に表わしたものである。①②③が呼吸スペクトラムで④⑤……⑩は心臓搏動のスペクトラであるが、その心電図に雑音がない。従ってこの図を上 e 図と較べてみると、両腕の間のインピーダンスに雑音源に相当する異常があることが解る。これを解明するには、HP 製の Z アナヤスペアナで心臓附近と手先の 2 つの場所にそれぞれ 2 個の電極 (双極) を設置して、その間の伝

達関係を調べたらよいが、それは後日の問題とする。

図 9a は雌ハムスタの心電図とそのスペクトラム分布を示す。左図は 0~50 Hz の区画で、右図ではそれぞれを 0~10 Hz の区画にズームしたものである。図 9b は、上記雌ハムスタの死後 54 時間目の心臓(電極間隔は 1 cm で重さ約 1.5 g)の心電図スペクトラム分布であって、7 Hz 附近までの高調波をもつ心臓搏動を未だに示している。図 9c は、雌ハムスタの死後 27 時間目に切断した左大腿部切断面と左足掌とを電極としてスペアナにつなぎ、足掌を屈伸させた場合の筋電図とそのスペクトラム分布図を示す。屈伸はクオルツ時計の秒針の動きに合わせて、毎秒 1 回づつ行った。そのスペクトラム分布は左図 c' のように①~⑨に及んでいて、その形は自然対数的波形 (Exp., c, c' の上図) に対応している。(上は尖がり、下は円い波形) 即ち①②③④まで dB (対数) 単位をとると、直

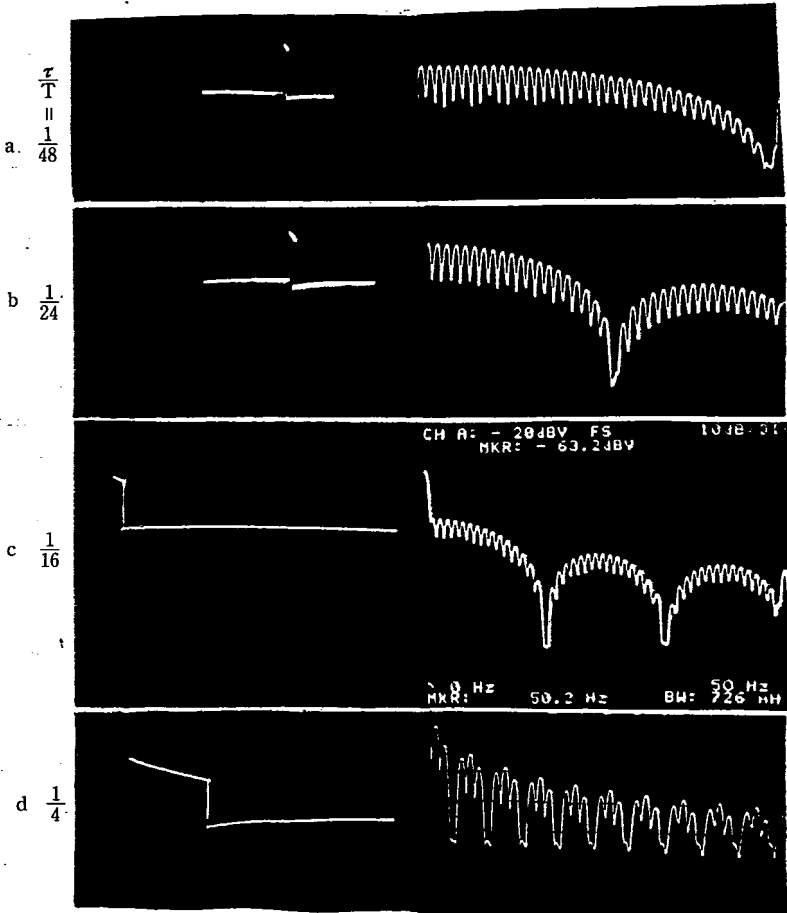


図 7 a, b, c, d

線となり、そのあとは曲線となる。足掌は5足骨：4足根骨：3足根骨：2脛・腓骨：1大腿骨の配列によって足掌で受信した圧力その他の信号を探知し、識別し、計算（積算）するが、そのうけとめかたは、Weber-Fecknerの自然対数則による。従って、足掌～大腿部間の屈伸運動の発電波形もまた準自然対数的（Quasi Exponential）的である。図c'の①～⑨のスペクトラム分布も、準自然対数的発電圧の形を示すものである。

図10aは男性の胸部の2点間に心電計をあてて、その呼吸波形とそこに乗せた心電波形を描いたものである。その波形は対数的な $\text{Exp. } B \cos 2\pi f_b t$ の形をしている。(B, bはBreathingsを表

わす。)図10a'の呼吸波は、直線性の縦軸上にスペクトラム分布を掃引（スキャン）したものである。周波数1, 2, 3が呼吸スペクトラムで、①～④が心尖搏動のスペクトラムである。図10bはハムスタの左手と胸部の2点間に心電計をあてて呼吸波形とを描いたもので、図10b'は対数性の縦軸上にスペクトラムな電圧 v_f の分布を周波数掃引（スキャン）したものである。1～5は呼吸スペクトラム分布で、直線からややはずれているが、準対数的である。①は心臓スペクトラムの第一波であって、その心搏数は $8.48 \times 60/\text{分}$ 、即ち約500回/分で、吊されていない通常の姿勢での心搏数の250～400回、平均約300回/分よりも高い。図10

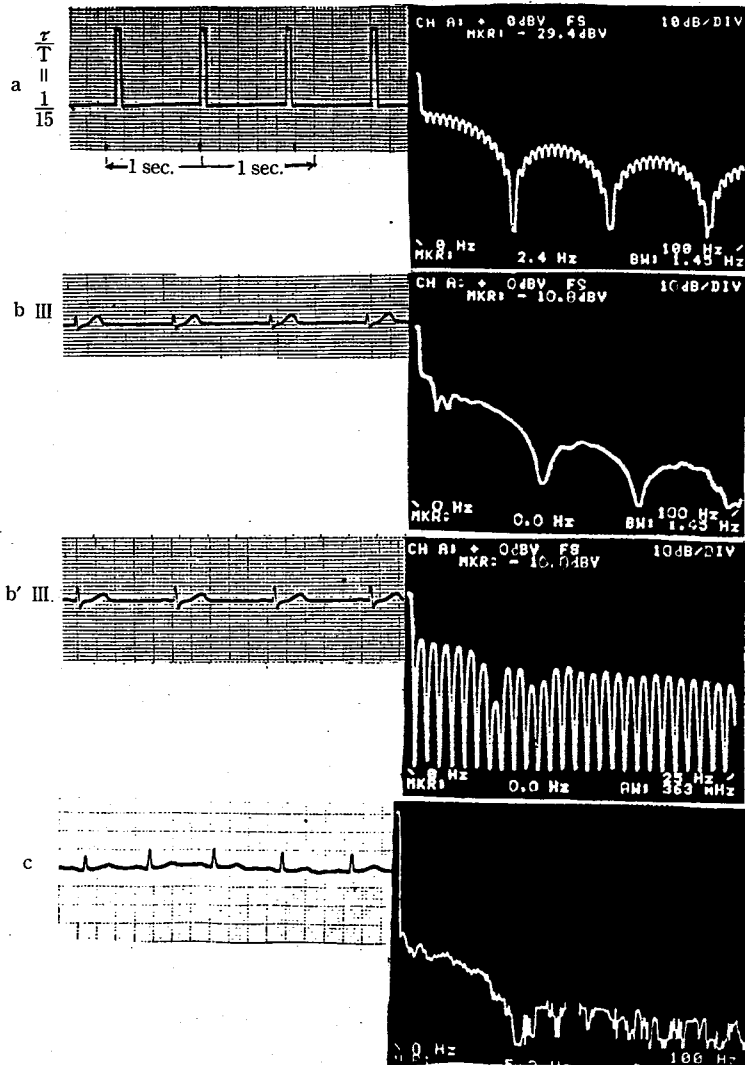


図8 a, b, b', c

c と d とは人体の遅い呼吸運動と速い呼吸運動の発電電圧 v_f を対数 (dB) で表わしたスペクトラム・分布を示す。両方の分布は共にその各 v_f の Maxs をつなぐ線が直線である。従って人体の元の呼吸運動の波形は純対数 (Exponential) 波であった。

図 11 A~H は、呼吸の各種波形を示す。⁽¹¹⁾ 正常呼吸波形は昔は図 B の高木の擬正弦波形かと思われていたが、今回人やハムスタの呼吸スペクトラム分布図 (図 10 c,d,b') およびハムスタの下脚の屈伸運動のスペクトラム分布図 (図 9c') などから、高次スペクトラムの系列が、弱い減衰を示し乍ら多くの場合対数的に続く所を見ると、やはり

ふつうの正弦波より、指数的正弦波形

$$\begin{aligned} \text{Exp.}(B \cos 2\pi f_0 t) &= e^{By} \\ &= e^B \left(1 + \frac{y^1}{1!} + \frac{y^2}{2!} + \frac{y^3}{3!} + \frac{y^4}{4!} + \dots \right) \quad (15) \end{aligned}$$

の形となっているのである。事実川嶋,⁽¹²⁾ 71 頁図 4-10 の正常呼吸波形 (本論文の) G 図は対数的正弦波形である。(波の上は尖り, 下は丸くなっている。) 前の図 10 c,d 参照。図 11 D' のエフェドリン注射後の呼吸波形のフーリエ分析は、渡辺が行った。これも無限級数のスペクトラム分布が認められるが、近次スペクトラム分布の所で、ジグザグの高低が見られた。図 E, F, H 等は死期のシャイネ・ストークス (Cheyne-Stokes) の呼吸波形であ

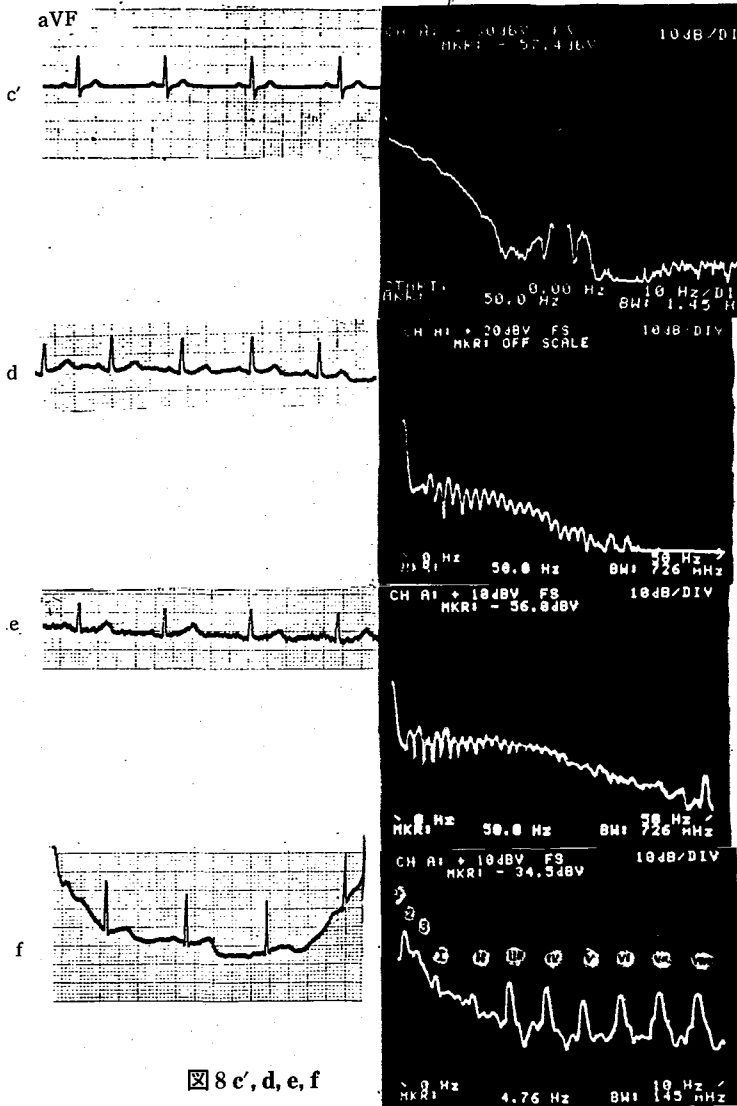


図 8 c', d, e, f

るが、死期の心臓波形(図6dの $\tau/T=1/4$)に似た(低次ではジグザグな分布をする)無限級数のスペクトラム分布が存在する。

図12A, Bは呼吸運動に対する機械的モデルと電気的モデルとを示す。⁽¹⁴⁾

- (14) 菊池志げ子：日本人呼吸波形より肋骨部上下運動の等価ヤング数および等価抵抗値の算出人類学，人類遺伝学，体験論文集。昭和34年10月105～106頁。

5 結 論

新しい型のインピーダン・アナライザ及びスペ

クトラム・アナライザを用いて、測定すべき生体表面の2点間を採み、大まかな測定および細かい周波数範囲と狭い座標範囲のズーム操作により、測定部分を拡大して、観測すると、かなり詳しく受動的構造(生体の外部刺激に対する反応)と能動的構造(心臓、筋等による生活発電)とが推定された。将来腫瘍やその他の生体内部の特殊部分に本研究を適用すれば、更に著しい発展が期待される。ズームの拡大度を大きくすると、直線的なCole-Cole半円も、本来の半円形に戻ってくる。

ア 生体の左手～右手間の交流インピーダンスの周波数特性式 [13] から

$$(R_1 - jx_1) \angle \theta \pm (r - jx + jm) \angle \phi \quad [16]$$

$$= Z_1 \pm z_1 \quad (\pm \text{は } \angle \theta \text{ と } \angle \phi \text{ との位相差による})$$

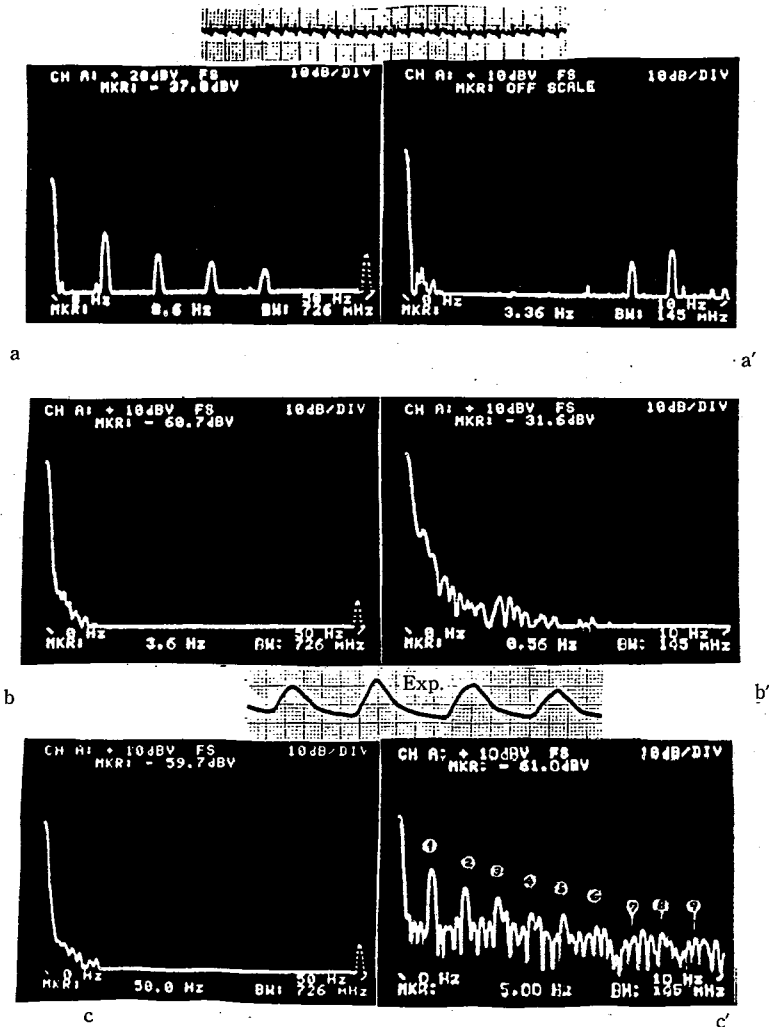


図9 a, a', b, b', c, c'

$$= \bar{Z} \angle \bar{\theta} = R - jX$$

のように2つに分けて、 $R: -X$ の軌跡を作れば、Cole-Coleの半円図が得られる。半円図には凹型、直線型及び往復直線型などがある。直線型は周波範囲を狭めて、ズームすれば半円に戻る。

イ 凹型 Cole-Cole の半円図では凹部の下方に緩和周波数 f_{relax} が認められる。 f_{relax} の逆数の τ_{relax} を敏捷時間というべきである。 f_{relax} は若年や運動選手で 50~100 Hz と大きく (小動物では更に大きく) 老年では 30~5 Hz と低い。また小さな籠の中で過栄養で育った運動不足のハムスタも老人と変らない程 f_{relax} は低くなっている。一日のうちでも疲れた夕刻には f_{relax} は小さくなる。 f_{relax} が 10 Hz のように小さいときには、 $R-jX$ の周波数に対する変化が小さいから、周波数範囲を

5~20 Hz のような小区間の局所にズームして拡大測定を行えば、Cole-Cole の半円が現われて、 f_{relax} を取り出すことが出来るが、この場合 Cole-Cole の凹型半円は浅い。(健康な生体の場合は深い。) 死後 54 時間目のハムスターの心臓 (約 1.5 g) の f_{relax} は 350 Hz であったが、川嶋 188 頁によれば心筋では、不応期が長いので⁽¹²⁾ 生きているハムスターの心臓不応期も長く、従ってその f_{relax} はもっと低い筈である。) 生活発電電気のスペクトラム分布は 7 Hz までしか見ることは出来なかった。従ってその基になる心搏数は、その数分の一の非常に低い周波数であり、やがて停止することを示していた。

ウ $R-jX$ のうちの R は若年や女性に小さく、皮膚や身体各部の血行が良好だと柔らかさや、した

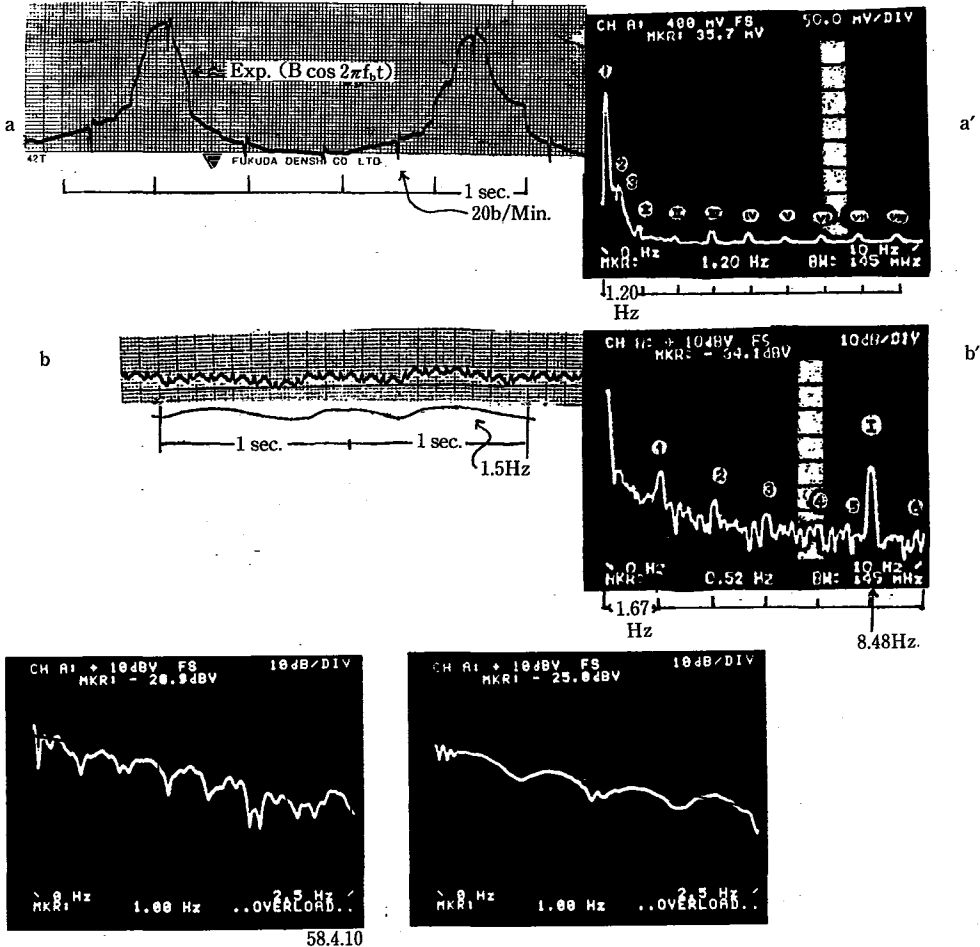


図10c おそい呼吸のスペクトラム波形

図10d 早い呼吸のスペクトラム波形

図10 a, a', b, b', c, d

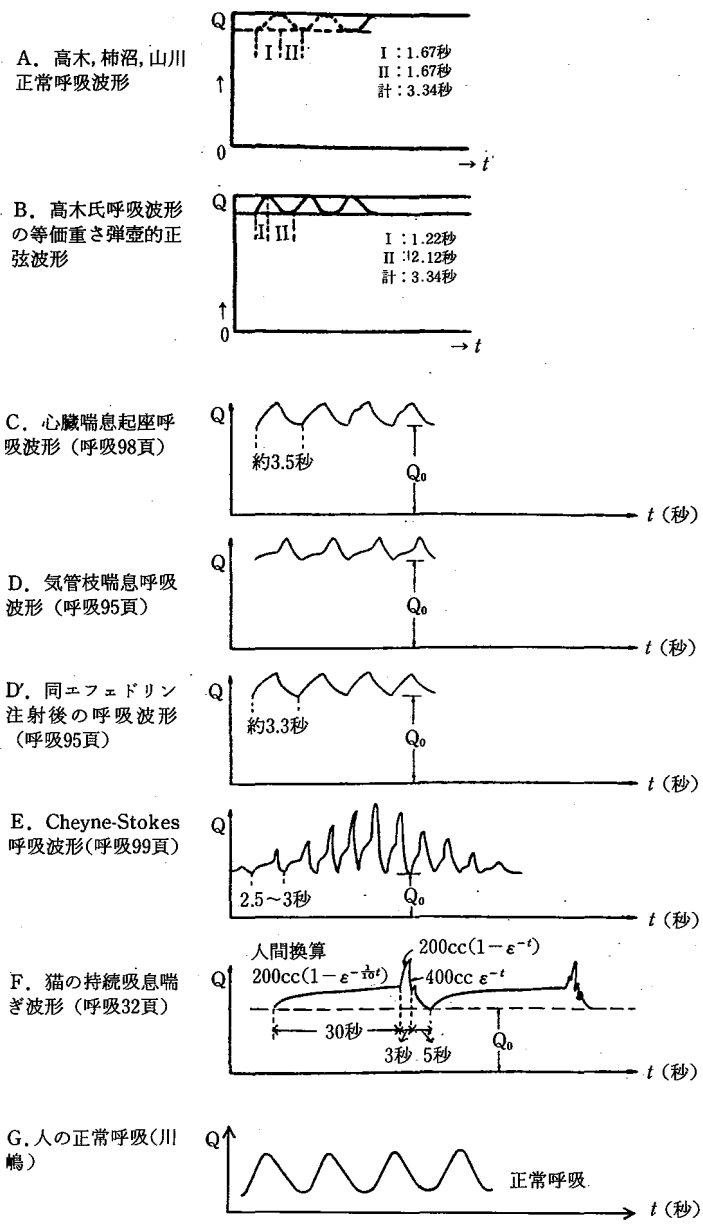
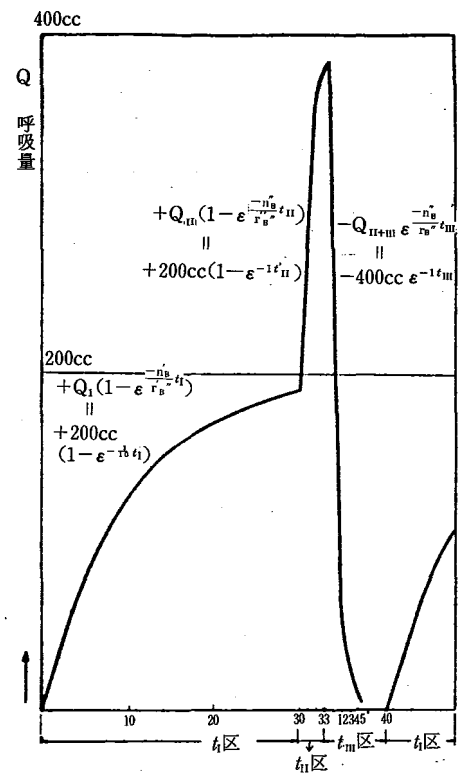
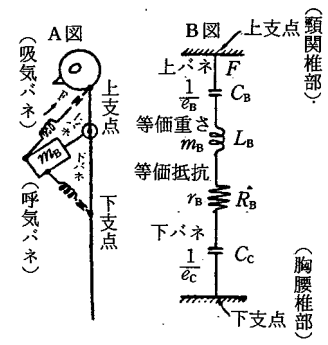


図 11 A~H



H. 人間の大きさの猫の持続吸息喘ぎ数波形
(Cheyne-stokes 氏波形と同形)
 n'_B, n''_B はそれぞれの期間 I, II, III
中の胸部の剛性率



A. 上部肋骨筋群腕木長さ復振子等価弾壺表示および
B. その重さ等価弾壺の電気回路表示

図 12 A, B

やかさが増す。

$$X = \frac{1}{2\pi f C} \quad (C \text{ はコンデンサの容量})$$
$$= \text{常数 } k \times \frac{e}{2\pi f}$$

e は機械的等価弾性ヤング率で、k は比例常数である。e が大きい(バネが強い)ということは、筋や腱やパテラ等の磨擦部分に充分な滑液があって、R が小さいと同時に電気容量の C の大きいことを示す。ロボットを設計する場合、このような周波数特性をもつ R と -X (と重量分の M) とを付与すれば、かなり人間に近接してくる。

エ 交流インピーダンスのズーム測定により、体内の発電体質を示す諸器官、例えば心臓、肺、その他能動体の持っている受動的インピーダンス特性 $z \angle \phi$ が体表面に浮び出て来て、その共振周波数の各所にいわゆるインピーダンス・スペクトラム分布を作る。それらは生体内の各器官が能動的に生活発電する電圧 $v \angle \psi$ の体表面のスペクトラム分布と相関関係にある。

オ 生体の仮死又は死期および死後の 1~3 日の頃まで、その機械的インピーダンスは低下し、時には逆転する。例としては、302 g のガマガエルは、両手に交流の 1 V をかけると、不応期の 20~30 Hz を超えた 40~50 Hz をすぎると仮死し、数ヶ所で $-jX$ は $+jX$ となり、 $+R$ も $-R$ となるような反転現象が起る。等価インピーダンスの $(r-jx+jm)$ は死期の場合、心臓なぞの生活電気はまだ残っていて、既に電気インピーダンスの小さくなった全身の $R-jX$ から引き去られ、その結果 $Z = -R+jX$ のような形をとることがある。これは生体から電磁波(霊波)がその身体をアンテナとして放射することを示すことに相当する。事実死後 54 時間のハムスターの心臓からは 7 Hz までの低周波帯の電圧スペクトラム分布が観測され、時々それが強まると、数米先の籠の中の生きている雄のハムスターは不安の表情を現わした。

カ 今回、我々は生体の表面の 2 点間の交流インピーダンスを、R と $-X$ とに分けて測定し、又 $R:-X$ の Cole-Cole 半円図をコンピューターにより自動的に描き、ズーム測定によってその半円上に交流インピーダンス・スペクトラム分布を付加することに成功した。

キ 人体の心電の棘波 QRS の電圧スペクトラム分布の最小点にあたる周波数 f_{\min} は T/τ にある。($T/\tau = 1 \text{ Hz}/\tau$, T はパルスの繰返し周期で脈搏が 60 搏/分 = 1 Hz とし、 τ は棘波 QRS の R の幅で、50~20 ミリ秒程度)。 τ が 50 ミリ秒ならば $f_{\min} = 20 \text{ Hz}$, τ が 20 ミリ秒なら 50 Hz である。普通の健康な成人だと f_{\min} は 30~50 Hz であって、病人や老人ではこれよりもずっと低く、はっきりしない場合も多い。 f_{\min} と f_{relax} はよく似ている。川嶋⁽¹²⁾ 192 頁によれば、筋に速い交流電気で刺戟すると強縮を起し、遂には刺戟に応じない不応期に達するというが、生体の不応周波数(人体では 30 Hz 位?) と f_{relax} 及び電気スペクトラムの f_{\min} との関連性については、今後興味がある。(筋肉は別々の性質の単繊維の束から成っていて複雑である。)

ク 生体の刺戟に対する感覚は Weber-Fechner の理論からおおよそ対数的である。生体の呼吸運動波形や、筋肉の運動波形による生活発電を見ると、対数的か準対数的であった。(そうでないと、生体は小運動から大運動に急速に移行出来ないのである。)

ケ おわりに。生体の運動(例えば呼吸)は対数的であった。筋電のスペクトラム分布も対数的であった。生体には敏捷度に対応する緩和周波数があった。それは $R:-jX$ のコール・コール半円の凹部にあった。能動的インピーダンス構造が、インピーダンス・スペクトラム分布として、コール・コール半円上に小ループ群を作っていた。それらの分布も準対数的であった。ガマガエルの筋肉の強縮周波数の 20~30 Hz⁽¹²⁾ を超える交流電気によって仮死し、時々 $R-jX$ は $-R+jX$ と反転した。死後 27 時間目のハムスターの両手間の $R-jX$ も時々 $-R+jX$ の反転が起り、更に死後 54 時間目には心臓の緩和周波数 350 Hz が認められ、7 Hz 以下の電磁波の放射があった。

コ 追記 図 13 a はガマガエル (Toad, Bullfrog) の両手間に強縮(不応期)周波数(20~30 Hz)以上の周波数の 1 V の交流電気を通じて仮死せしめた時の $-R, +jX$ の出現を見た。図 13 b, c はハムスターの死後 27 時間目に両手間に 0.1 V の交流電気を通じた時、90 Hz 附近で R と C とは不安定となり、165 Hz 附近で $-R$ と $-C$ の反転現

象の発生を示し、175 Hz で元の状態に戻った。

サ 本論文の電気工学的な部分は日本大学工学部渡辺直隆氏の援助に依る。昭和 58 年 4 月 20 日

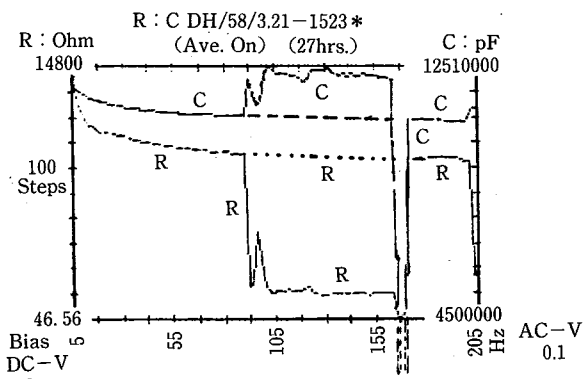
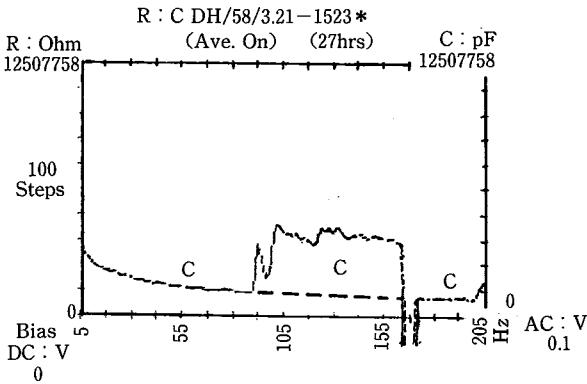
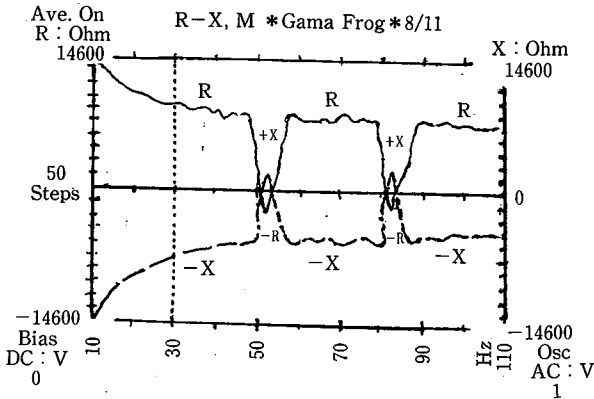


図13 a, b, c

用語集

- f 機械又は電気の周波数, サイクル/秒, ヘルツ Hz
- f_{relax} 緩和周波数, R : -X の半円軌跡の凹部の周波数

- f_h heart の搏動周波数, サイクル/秒, Hz
- f_H Heart の心電スペクトラの凹部の周波数で f_h の数十倍, Hz
- r 等価機械 (心臓) 又は流体抵抗
- jx 等価バネ抵抗
- x $(e/2\pi f) \times$ 常数 (心臓なぞの等価弾性抵抗)
- e バネの弾性ヤング率
- +jm 等価重さによる抵抗
- m $(2\pi f \mathcal{M}) \times$ 常数
- \mathcal{M} 運動に関する部分の重さ
- p 流体のある場所での圧力 (血圧等)
- q その場所での流量 (血流量)
- p/q=z 流体 (血流) の複素抵抗インピーダンス
- z 等価総合 (複素) 機械抵抗, インピーダンス
- z $z=r-jx+jm$, 等価機械又は流体インピーダンス
- $z \angle \phi$ 機械的インピーダンス
 $\angle \phi$ はインピーダンスの示す位相角
- z_l liquid (液流, 血流) の等価総合 (複素) 流体抵抗
- z_h heart (機械, 心臓) の等価総合 (複素) 機械抵抗
- v (心臓搏動, 呼吸又は筋運動等による) 生体の生活発電電圧
- $v \angle \psi$ 生体の発電電圧
 $\angle \psi$ はその位相角
- R 電気抵抗
- jX 電気容量抵抗
- X $(1/2\pi f C)$
- C 電気容量 (コンデンサのキャパシチ)
- +jM 電気誘導抵抗
- M $(2\pi f L)$
- L (コイルなぞの) 電気誘導
- V その場所の交流電圧
- I その場所を流れる交流電流
- Z V/I
- Z 交流複素抵抗 (インピーダンス)
- Z $R-jX+jM$
- $Z \angle \theta$ 電氣的インピーダンス
 $\angle \theta$ はインピーダンスを示す位相角
- $j = \sqrt{-1} = \sqrt{j j}$
- τ 心電図 R のパルス幅
- T パルスの繰返し周期