

内臓体壁反射—Skin Impedance Bridge の試作 および皮電点の交流 Impedance—

金沢大学大学院医学研究科第二病理学講座(主任: 石川太刀雄教授)
金沢大学大学院医学研究科第二外科学講座(主任: 本庄一夫教授)

坂 東 平 一

(昭和39年1月17日受付)

内臓に障害があるとき、脊髄を介して皮膚に様々な反応—即ち内臓太壁反射群があらわれる。これには、知覚異常を来たす知覚性反射、筋肉硬直、牽縮等をあらかず運動性反射、発汗異常等の分泌性反射、栄養性反射、それに石川教授並びにその学派によつて発見、研究されてきた所謂内臓体壁(血管)反射がある。

内臓体壁(血管)反応に関しては、石川、岡本の報告をはじめ多くの報告がなされているが、内臓からの刺激が脊髄を介して、対応する皮膚分節の皮下小動脈分岐部に投影し、小動脈が神経性に収縮する結果、その支配下の皮膚領域に血行不全がなり立ち、皮膚に微少な、直径約0.5mmの点状の変化、即ち皮電点があらわれる。

この皮電点は組織学的には皮下小動脈分岐部附近に水腫性の変化ととしてあらわれ、次第に変化の度をまして拡がり、白血球浸潤をみるようになり、時に出血性変化を伴つて遂には楔状の半壊死にいたる一連の滲出性変化を示すものである。また組織学的に皮電点と汗腺とは明らかに区別される。

これらの組織学的な変化と相まつて、皮電点は生理学的変化を伴うもので、強い分極性と著しい抵抗の減

弱および容量の増加を示す

且つその臨床診断学的意義については私共の教室からの一連の報告が提出されてきた。

皮膚の電氣的性質の変化の測定に関しては、まず皮膚に直流電圧を加えると、電脈は所謂“初期の尖角”を作り、数 msec. 以内に定常状態となる“残留電流”があることが知られている。前者の初期の尖角、即ち過渡現象については、Einthoven & Bijtel (1923)、朴沢 (1928)、橋田 (1935) らによる報告があり、後者の残留電流については通常の電流計測定による直流抵抗で示されるもので、Wang (1958) ら、および藤森らによる皮膚電流反射 galvanic skin reflex の通電法の研究として知られている。皮電点の直流抵抗に関しては岡本 (1959) によつて詳細に報告された。

次に様々な周波数の正弦波電圧を皮膚に通ずることによつて、皮膚の impedance 変化を調べる方法がある。これに関しては Gildemeister (1928)、朴沢 (1932)、本川、岩間 (1949) らの業績があげられ、皮膚の impedance は周波数によつて変化することが知られていた。従つて正弦波電圧印加による皮膚の特性を知るためには、広い周波数の範囲にわたつてこれを測定する必要がある。

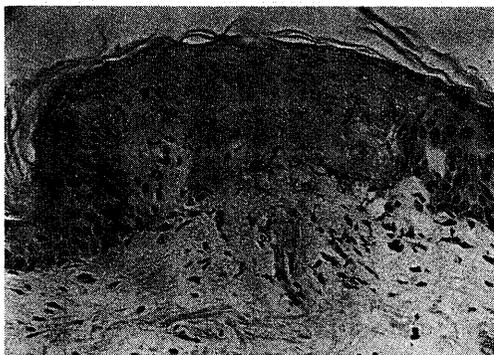
そこで著者は electronicus の最近の技術を取り入れ、Skin impedance bridge を試作した。更にこれを用いて 10 c/s~50 kc/s にわたり皮電点の impedance および損失角の周波数特性を求め、皮電点の電気刺激に対する反応性に関する電気生理学的な特徴の一端を明らかにすることにした。次にそのことを述べる。

実験方法

1. 皮膚の等価回路

皮膚の impedance を測定する場合、皮膚の2個所に電極を置いて生体に電流を通す方法をとつているの

第 1 図



Viscero-Cutaneous Reflex—A Design in Skin Impedance Bridge and an Electric Impedance of the Electro-Dermal Point. Heiichi Bando, Department of Pathology (Director: Prof. T. Ischikawa), School of Medicine, Kanazawa University.

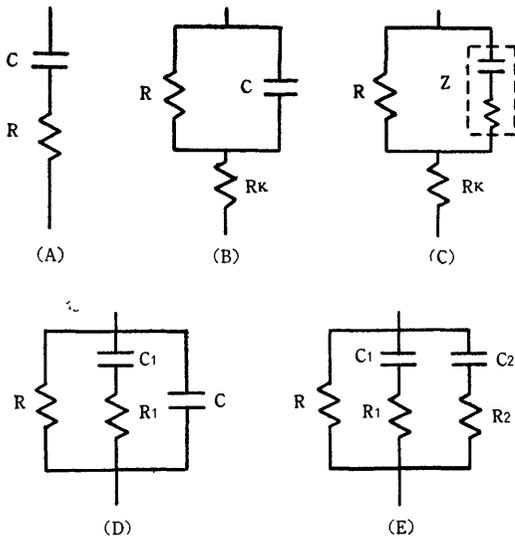
で、厳密には生体の impedance を測定しているわけであるが、皮膚以外の部分の impedance は非常に小さく無視しうるのでその殆んどが皮膚に由来すると考えてよい。これを習慣的に皮膚の impedance と呼んでいる。また一般に任意の周波数の正弦波に対する impedance は、抵抗と容量および inductance の適当な組合せによつてあらわれるものであるが、生体組織の inductance は無視できるほど小さいとみなされるので、抵抗と容量の組合せで impedance をあらわす方法がとられてきた。

皮膚の等価回路は抵抗と容量で構成され、それが如何に複雑な構造であつても総合された impedance は一般に

$$Z = R - jXc \tag{1}$$

という形であらわされる。ここで R は抵抗、jXc は reactance で、 $j = \sqrt{-1}$ である。これは抵抗と容量と直

第2図 皮膚の等価回路



- (A) CR 直列回路
- (B) 分極曲線がらの側定回路
- (C) Cole の complex circuit
- (D) 私共の等価回路
- (E) 皮電点の等回路 (岡本)

列に接続した回路に還元したのと同じことであり、等比な交流 bridge の一つの臂に CR 直列回路を挿入し、これを調整して生体の impedance と平衡させると、その読みから直ちに抵抗と容量を求めることができる。Gildemeister (1928), 朴沢 (1932) はこのような CR 直列回路によつて皮膚の impedance を現わしたとき、Wien (1896) が電解液の分極について見出した位相角一定の法則が 1000c/s 以上についてなり立つこ

とを見出した。ところが過渡現象および残留抵抗に対する矛盾が生ずることから、直流電圧印加による過渡現象から皮膚の impedance を求める場合には、もつぱら第2図Bのような回路が用いられており、McClelland, Hemingway (1932) らは正弦波においてもこの回路が合理的であるという立場をとつている。回路の Rk は周波数無限大における抵抗であると考え、15 kc/s の正弦波に対する抵抗からまず近似値を求め、次いでそのように決められた抵抗に CR 並列回路を接続して、1 kc/s に対する皮膚の impedance と平衡させた。

その後 Cole (1932) は第2図Cのような回路を採用すると、いろいろな周波数に対する生体組織の impedance を一元的にあらわしうることを示した。この回路の Z は分極に直接関与する成分で、直列の抵抗と容量よりなり、両者の大きさは周波数によつて変るが、Z の位相角は周波数と無関係に一定である。また Rk, R も周波数と無関係に一定であると考えた。

教室同人岡本は、30c/s から 30kc/s にわたる正弦波電圧による電流周波数特性曲線より正常皮膚、および皮電点の等価回路を第2図 D, E のように決めた。私共は目下のところこれらがかなり忠実な皮膚の等価回路であると考えている。そして皮膚の示す impedance は、交流電圧と直流電圧とはその性質は異なつたものであると考え、正弦波の任意の周波数において、impedance Z は式 (1) であらわされ、その位相角 ϕ は

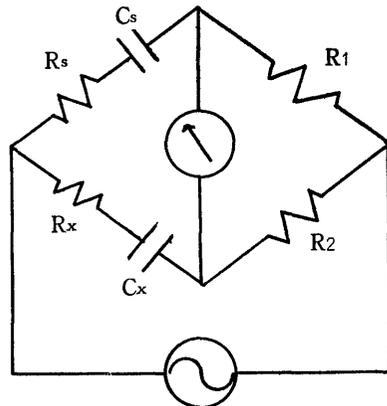
$$\phi = \tan^{-1} \frac{Xc}{R} \tag{2}$$

であらわされるものと解した。

従つて私共は測定回路として、CR 並列回路を採用した。

2. Skin impedance bridge の試作

第3図 従来の impedance bridge



皮膚の電気特性は抵抗と容量の複雑な組合せさあらわされる。しかし交流電圧印加によつて測定する場合周波数依存性が強いことから考えて、その特性を知るためには、広い周波数の範囲にわたつて、その性質を測定する必要がある。

従来用いられてきた impedance bridge は第 3 図の如き回路構成で示される。ここで R_1 、 R_2 は比例辺の純抵抗、 R_s 、 C_s は標準可変抵抗 および容量、 R_x 、 C_x は皮膚の抵抗および容量をあらわし、平衡条件は

$$\frac{C_x}{C_s} = \frac{R_x}{R_s} = \frac{R_1}{R_2} \quad (3)$$

である。

しかし、従来の bridge では吾々の実験目的に充分でない。即ち

- ① 検出装置の入力 impedance
- ② Oscillator の電源その他からの hum
- ③ 測定可能な周波数等の問題である。

私共は新たにこれらを解決するために、東芝中央研究所三浦茂博士の御指導により次のような bridge を試作した。4 図はその block-diagram である。

a. 検査装置の入力 impedance について

予備実験において測定された正常の人体皮膚の容量および抵抗は $1k c/s$ ではほぼ $150 \sim 200 PF$ 、 $1 \sim 3.5 M\Omega$ である。その測定精度を 5% 以上とすれば、入力容量は $3 \sim 4 PF$ 以下、抵抗は $50 M\Omega$ 以上が要求される。

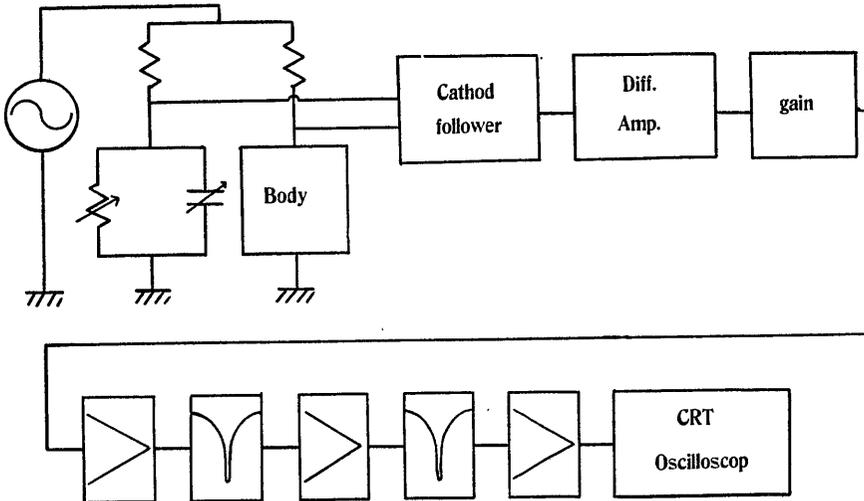
この際、比較的容易に入力容量を減ずるために本装置の前増幅には第 5 図 A の如き回路を用いた。これを等価的に示すと第 5 図 B である。

更に、入力抵抗を $50 M\Omega$ 以上が要求されるため、前増幅の入力回路に cathod follower 回路を用いた。これによつてその入力 impedance は ∞ となる。

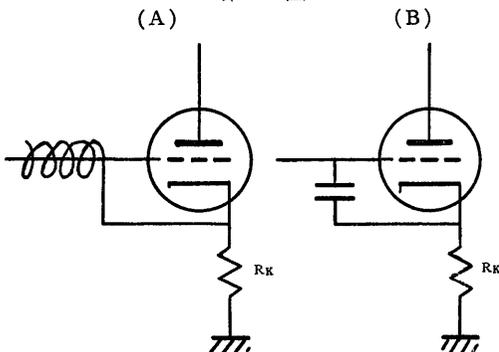
b. 減算回路

Cathod follower は差動増幅器入力 impedance を高める意味もあるが、更に差動増幅器で完全に減算を

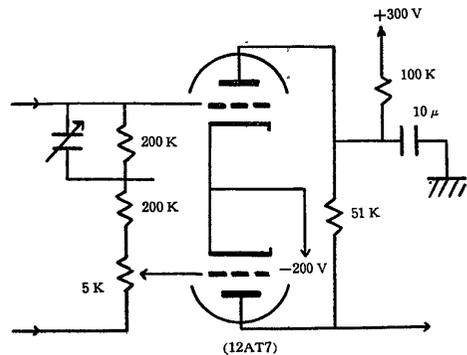
第 4 図 Skin impedance bridge の Block diagram



第 5 図



第 6 図 減算回路



行なうため、その入力に変抵抗器を挿入しなければならぬこともある。

減算回路の性能によつて bridge の平衡条件および検出精度が左右されるので第 6 図の如き回路を用いた。この回路によると、50kc/s まで $\pm 0.2\%$ の誤差で減算が行なえる。

c. Hum の問題

Oscillator からの hum を除去するために bridge の接地を吟味する必要がある。bridge の接地方法には第 7 図のような 3 通りの方法が考えられる。

A は増幅器設計のためには極めて都合な構成であるが人体が R_2 によつて浮いているため、誘導 hum の影響が大きく現われる。bridge 回路の平衡精度を高めるためには $Z_s=R_1=R_2$ であることが望ましいが実際上困難である。しかしなるべく R_1, R_2 を大きくする必要があるので A 方式では C 方式よりも hum 混

入が大きくなる。B は実際上考えられない回路である。

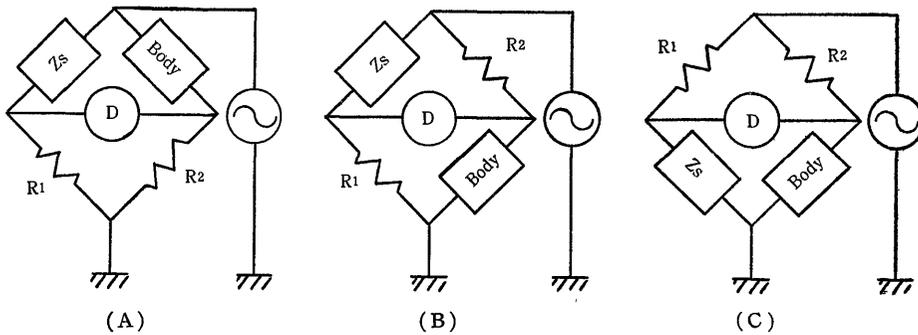
従つて差動増幅器の設計に多少の困難があつても、hum 電圧を低くするため、本回路では C の方式を用いた。

Hum の除去: 前述の如く電源による hum および人体の誘導 hum はその bridge の一端を接地させることによつてかなり減少させることができるが、更に測定精度と 0.5% 程度とするためには S/N は -30db を要し (S は人体に印加する電圧, N は人体接地したとき、人体に誘導される hum の電圧)、hum 除去回路には -50db の discrimination が必要でこのために、T 型 C-R フィルター回路を 2 段 (第 7 図) 使用した。

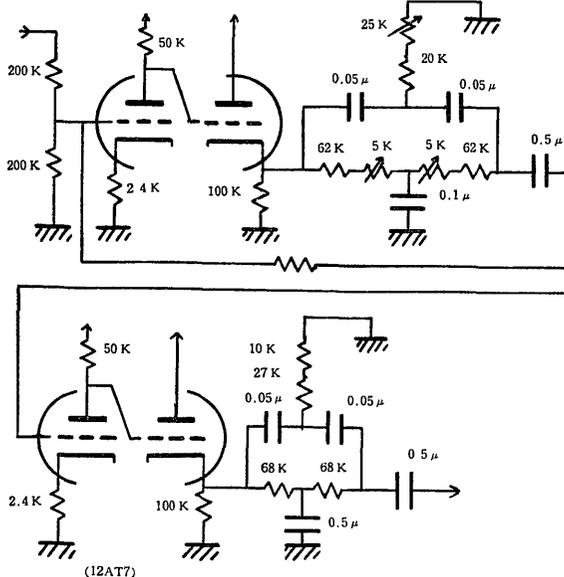
d. 固定抵抗と測定可能な周波数の問題

第 8 図のように入力端子電圧 e_i , 開放出力端子電圧

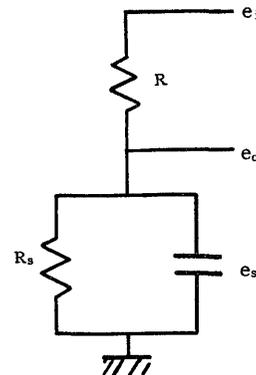
第 7 図



第 8 図



第 9 図



e_0 とし, e_0 の変化部分 de_0 のときの R_s, C_s の変化部分をそれぞれ dR_s, dC_s とすると

$$e_0 = \frac{R_s}{R + R_s + j\omega C_s R R_s} e_i \quad (4)$$

$$\frac{de_0}{e_0} = \frac{R(R + R_s)}{(R + R_s)^2 + \omega^2 C_s^2 R^2 R_s^2} \cdot \frac{dR_s}{R_s} \quad (5)$$

$$= \frac{-\omega^2 C_s^2 R^2 R_s^2}{(R + R_s)^2 + \omega^2 C_s^2 R^2 R_s^2} \cdot \frac{dC_s}{C_s} \quad (6)$$

である. 更に (5) を R について微分すると

$$R = \frac{R_s}{\omega C_s R_s - 1} \approx \frac{1}{\omega C_s} \quad (7)$$

従つて CR 並列回路において, 広い周波数の範囲にわたつて impedance を測定するとき, 低周波部分では容量の, 高周波部分では抵抗の検出精度が低下し, また R は ωC_s の函数で表わされる. これらを解決するために, 予備実験の値より考えて, 200c/s 以下では固定抵抗 100 k Ω と 1 M Ω を用いた $\times 10$ Range (容量は $\times 1/10$) を作り, 10 c/s までは 100 k Ω の $\times 1$ Range, 10kc/s 以上は 20k Ω を用いた $\times 1$ Range を作った. なお固定抵抗は等比であるから, 抵抗と容量は直した値で与えられる.

この装置によつて測定誤差は 50k c/s 以下では 1~2%, 100kc/s までは 5~6% とすることができた.

e. 検出装置

検出装置のためには CRT-Oscilloscope を用いた.

その規格は

使用ブラウン管	40A B 15
最低掃引周波数	1 c/s
最高掃引周波数	5 kc/s
掃引回路方式	kippe 回路
使用サイラトロン	1 G 84
偏光減度	$x \rightarrow 152 \times 10^{-3} v/cm$
	$Y \rightarrow 144 \times 10^{-3} v/cm$

である.

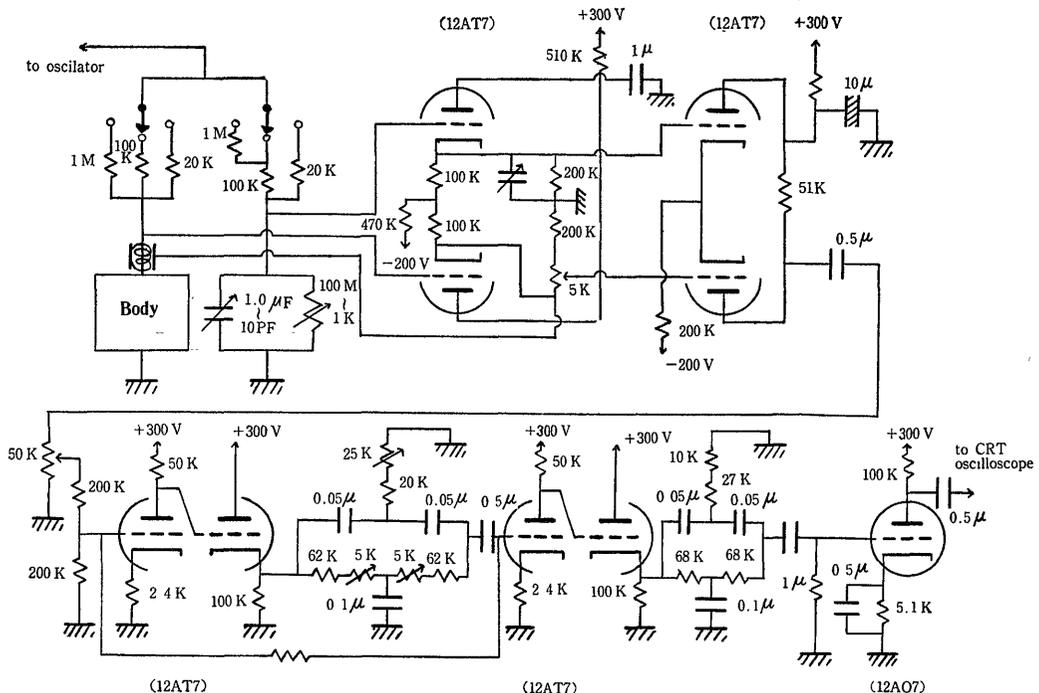
以上述べたような bridge 回路, 減算回路, 増幅回路および filter 回路の総合された回路を示すと第10図の如くである.

3. 測定方法

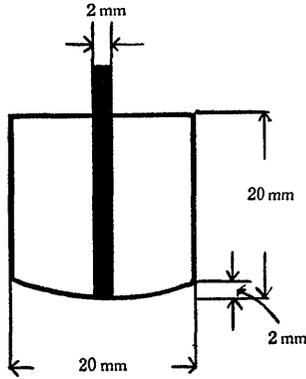
検査はすべて軀幹部の皮電点と対象した. 電極は銀一塩化電銀極を用い, 関電極は直径 2 mm の棒電極で, 直径 2 cm, 高さ 2 cm の透明プラスチック製の円筒の心にはめこみ, 皮膚に接する面は図のような彎曲を持つた球面とした (第11図). 不関電極は 50 cm² で生理的食塩水で浸したガーゼで包み, 下腿に固定し, これを接地した. 測定は関電極を皮膚上に装着して 5 分後より実施した.

測定回路は第 4 図に示したような回路で, skin impedance bridge を用い, 各周波数において抵抗と容量を調節して平衡させた. 測定した周波数の範囲は 10

第 10 図



第11図 電 極



c/s~50 kc/s, 実際には 10, 20, 30, 100, 200, 500, 1k, 2 k, 5 k, 10 k, 20 k, 50 kc/s の 12 種類の周波数の正弦波による測定を行ない, 測定時間は 5 ないし 7 分で行なうことができた. この際使用した発振器は CR 型発振器で, 平衡条件で皮膚にかかる電圧は 0.5 volt とした.

皮電点の探索には石川式皮電計 SDI を用いた.

被検者は仰臥位または腹臥位で安静に保ち, 室温は 18°~21°に保つた.

実 験 成 績

1. 正常皮膚の交流 impedance

皮電点の電気的性質を吟味するためには, まず正常皮膚の性質をも同時に吟味しなければならない. 正常皮膚の電気的性質については, 教室同人小田島によつて報告されるが, その概要を次に述べよう. その交流正弦波電圧による impedance の周波数特性曲線は第 12 図に示す如くである.

Impedance の位相角は便宜上損失角 δ で表わした.

δ は

$$\tan \delta = \tan (90^\circ - \phi) = \frac{1}{\omega CR} \quad (8)$$

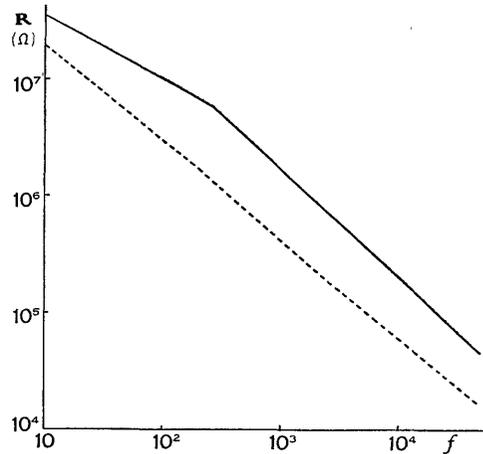
であらわされる. 因みに図表の坐表目盛には, 周波数, 抵抗成分, および容量成分はそれぞれの対数目盛を用いてある.

周波数による皮膚の impedance 曲線は, 実験結果からみて, 便宜上 3 相の部分に分けることができる. 即ち第 1 相は 10 c/s から 200 c/s の低周波部分, 第 2 相は 200 c/s より 2~5 kc/s の中間周波部分および 2~5 kc/s から 50 kc/s までの高周波部分である.

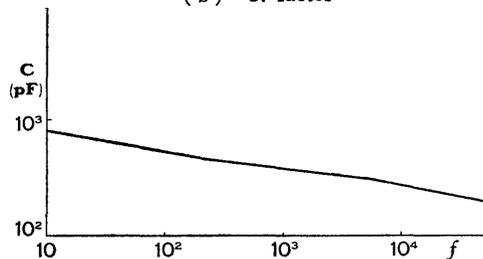
正常皮膚の impedance 測定値は第 1 表, 第 2 表に对照として示した.

抵抗成分は第 12 図 a に示すように, 周波数が大きく

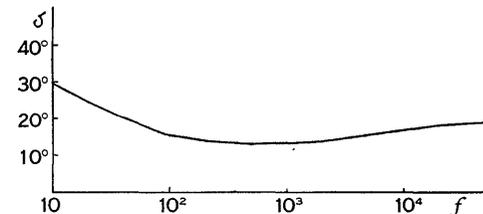
第 12 図 正常皮膚の交流 impedance
(a) R. factor



(b) C. factor



(c) loss angle



なると共に小さくなる. 10 c/s では数十 MΩ の値を示し, その周波数特性曲線は 200 c/s 以下の第 1 相では直線性を画いて, 周波数と共に小さくなり, 200 c/s でその勾配が変わり, 200 c/s 以上の第 2 相, 第 3 相の部分は周波数に対して一定の勾配を持った直線を画く. 容量成分の周波数特性曲線は 3 相にわかれ (第 12 図 b), 各々ほぼ直線性を示し, 第 2 相は第 3 相に比べて小さな勾配を持つている. 容量成分を reactance 成分であらわしたものが, 第 12 図 a の点線で示される. それは抵抗成分より少し小さな値を示し, その周波数特性曲線は抵抗曲線の少し下方にある. その形もほぼ種似し, 容量と同じく, 図のように 200 c/s 並びに 2k c/s 付近で少し勾配を変ええる 3 相の 3 直線

を画く。

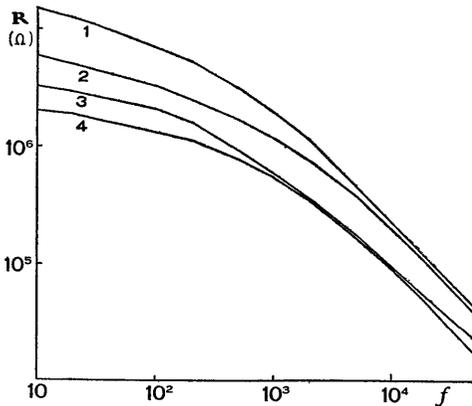
損失角の周波数による変化は、第1相では、10 c/sでは20~40°を示し次第に周波数を増すと共にその値が小さくなり、200 c/sでは10~17°程度のゆるい傾きを持った曲線を画く。第2相の中間周波部分では10~17°で、人によつてほぼ一定の損失角である。損失角は reactance 成分と抵抗成分の比であらわされるが、第12図 a に示すようにそこでは両曲線は平行でないことから、損失角は第2相ではほぼ一定の値であるが、厳密には一定ではないことが理解される。第3相は、第2相のほぼ一定の損失角から周波数が大きくなると共に次第に大きくなる曲線を画く(第12図 c)。

2. 皮電点の impedance

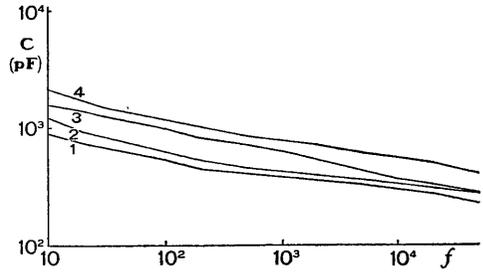
皮電点の位置: 広い皮膚の表面から、潜在性水腫としての皮電点——肉眼的には正常皮膚と全く変わらない、わずか直径 0.5 mm ほどの点をさぐり出すことは非常に困難である。皮電点の電気生理学的性質を利用して皮電点探索用に設計された皮電計を用いると、非常に容易であるけれども、後で述べるように通電後皮電点自身の電気生理学的成質が非常に変ってくる。しかし内臓に疾患があるとき、相当した Dermatome に反応点が現われ、更に各臓器疾患に特有の、かなりの確率で現われる皮電点があることがよく知られている。それで私共はまず被検者の疾患に従い皮電点の最も出現確率の高い皮膚の部分に関電極を置いて既に述べた方法で測定、しかる後に皮電計で皮電点であることを確かめられたものを採用するという方法をとつた。対照としての正常皮膚は皮電点附近の皮膚より選んだ。

第I表は選ばれた皮電点10例の測定結果である。4R は皮電点と対象とした正常皮膚の抵抗の比をあら

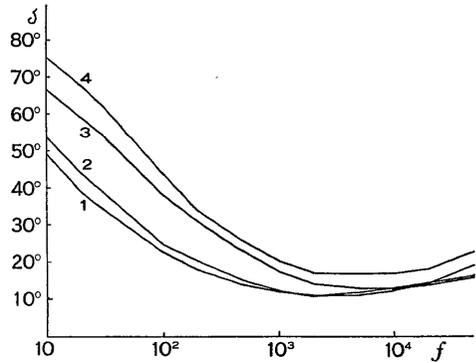
第13図 皮電点の交流 impedance
(a) R. factor



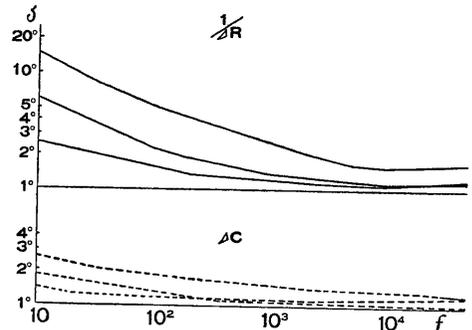
(b) C. factor



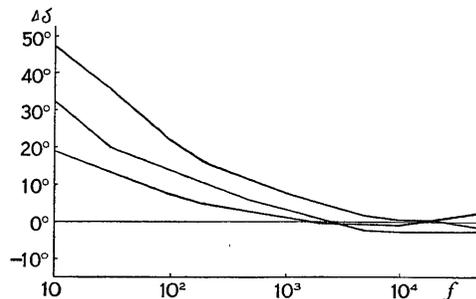
(c) loss angle



第14図 皮電点の impedance 成分の変化率
(a)



(b)



わし、 $4C$ は容量の比である。

皮電点の交流 impedance は、正常皮膚のそれに比べて低周波部分で特徴的な変化を示している。

抵抗成分は周波数の低い部分の第1相、第2相に著しい変化をあらわすもので、その周波数特性曲線は2~5 kc/s 以上の高周波部分ではその勾配は正常皮膚それと殆んど同じで、その抵抗値も殆んど同じであるか、かすかに小さいが、周波数が小さくなるに従つて勾配は小さくなり直線性を示さず、正常皮膚の曲線より次第にはなれ、10 c/s では数 $M\Omega$ から十数 $M\Omega$ の値を示す(第13図 a)。

正常皮膚の impedance は第1表および第2表に示されるように個人差があるため、対照として測定した正常皮膚の抵抗成分に対す比 $4R$ をとると、 $1/4R$ (抵抗成分の変化率) は各皮電点により大きな差がみられ、10 c/s では2~40を示し、周波数が大きくなると共に $1/4R$ は小さくなって、2~5 kc/s 以上の周波数ではほぼ一定の値を示す(第14図 a)。

容量成分の周波数特性は第13図 b に示すように、正常皮膚の曲線とほぼ同じ値を示すものから相当大きな値を示すものまでであるが、 $4C$ (容量の変化率) の値は、200 c/s 以下の低周波部分では、高周波部分に比して、わずかに大きく、200 c/s 以上ではほぼ一定で、大部分は1に近い値を示す。

第1表より明らかなように、抵抗の変化率の大きいものは容量の変化率も大きい。更に各皮電点共に抵抗の変化率が容量の変化率を上廻る。従つて損失角も大きく変つてくる。 $1/4R$ と $4C$ は或る周波数以上ではほぼ一定の値を示すが $4R$ 、 $4C$ がほぼ1に近いときは当然損失角は正常皮膚のそれと近似する。

損失角周波数特性曲線を描くと(第13図 c)、損失角は正常皮膚のそれに比べて、第1相、第2相の部分でより大きい値を示し、10 c/s で 50° から 80° の大きな損失角を示すものもある。損失角は周波数が大きくなると共に小さくなり、次第に正常曲線に近づいてくる。更に2~10 kc/s で最も小さい値を示し、その後周波数が大きくなると共に損失角も大きくなる傾向を示している。

前述の如く、正常皮膚の損失角は各個体によつて多少異なっているから、各皮電点の損失角と正常皮膚の損失角の差は第14図 b で示される。周波数が小さいほど損失角の差は大きく、10 c/s で 11.4° から 46.7° 位の大きな差を示すものもあり、第2相では殆んど差を示さないものから 10° 以上の差を示すものまでである。

皮電点の impedance 成分および損失角の変化は各皮電点によつて様々で、非常に大きな差を示すものか

ら、第1相にわずかに変化を示し、第2相、第3相では殆んど差を示さないものまで様々である。これは全く皮電点の組織学的所見と平行して理解されるものである。即ち皮電点自体は皮膚基底細胞層附近に始まる分子状水腫より、拡大した点状水腫、楔状変性、更に点状出血等にいたる一連の変化を示すもので、上記の電気生理学的な性質はこのような組織学的変化に平行するものであろう。

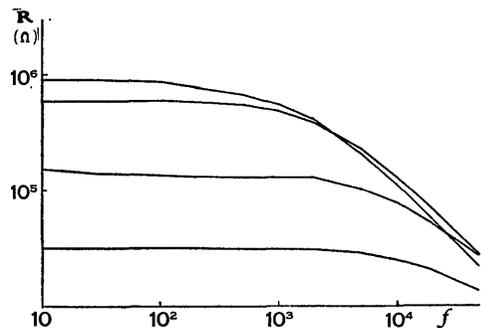
3. 皮電点(通電後)の交流 impedance

前節では予め通電によつて乱されることのない皮電点の周波数特性について述べたが、皮電計で皮電点であることを確かめた後(10 volt で通電)、同じ方法で測定した成績を述べる。

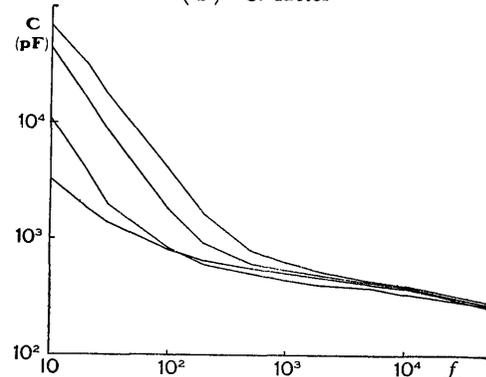
第2表は皮電計で検出した皮電点10例の測定結果である。Impedance成分および損失角の変化は前節に述べた皮電点のそれよりも非常に大きく、第3相の高周波の範囲でも相当に大きな変化を示すものが多い。

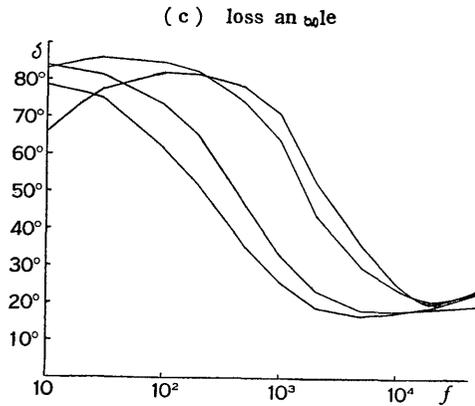
抵抗成分は第1相、数十 $K\Omega$ から数百 $K\Omega$ と或る周波数(各点によつて異ななが、大体 500 c/s ~ 5 kc/s)までは殆んど一定の値を示し、それより大きな周波数では周波数が大きくなると共に次第に正常皮膚の勾配

第15図 皮電点(通電)の交流 impedance
(a) R. factor

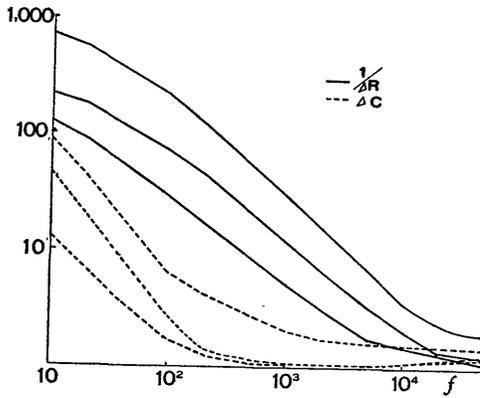


(b) C. factor

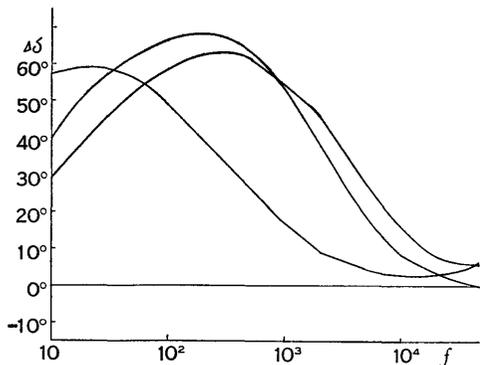




第16図 皮電点(通電)の impedance 成分の変化率 (a)



(b)



に近づく曲線を書く(第15図 a)。従つて $1/\Delta R$ は10 c/sでは $10^2 \sim 10^3$ の値を示すが、周波数と共に小さくなり、50k c/sでも1.5~2ほどの大きな値を示す(第16図 a)。

容量成分は第1相において非常に大きく、10 c/sでは数千 pF から数万 pF を示すほどのものがあるが

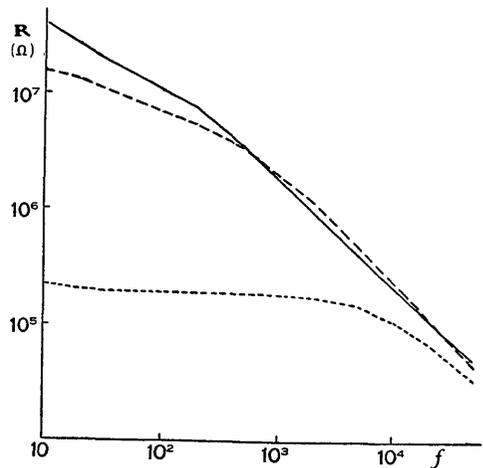
(第15図 b), 1~2 kc/s の附近では殆んどが正常皮膚の曲線とほぼ平行になる。 ΔC は10c/sでは $10 \sim 10^2$ の値を示すが周波数と共に小さくなり、1~2 kc/s 以上では殆んど一定の値(1~1.8)を示す。

損失角は第1相では非常に大きく殆んどが 65° 以上を示し、その周波数特性曲線は100 c/s~200 c/s 附近に頂点を持つ凸形を画くものが約半数にみられる。500 c/s~1k c/s より損失角は次第に周波数と共に小さくなり、5~50 kc/s で 20° 前後の最小損失角を示す。また正常皮膚の損失角との差を求めると、第1相および第2相の部分の周波数では 30° 以上を示し、その周波数特性曲線(第16図 b)を画くと、すべての皮電点が100~500 c/s で頂点を有する凸形を画く。

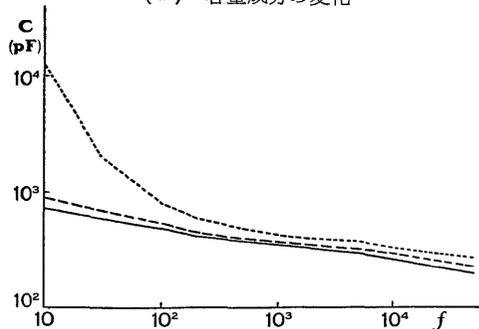
第2表より明らかのように、抵抗の変化率の大きな皮電点は容量の変化も強く、損失角は高周波部分でも相当に大きな値を示し、損失角周波数特性曲線は100 c/s 附近で凸部を作るようになり、高周波部分の最小損失角を示す周波数はより高周波側に移動する。

例として第17図に示したものは、第1表の3に示し

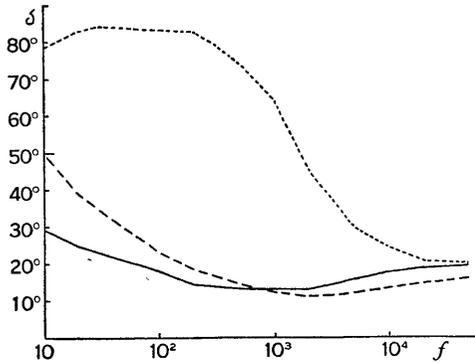
第17図 皮電点の通電効果 (a) 抵抗成分の変化



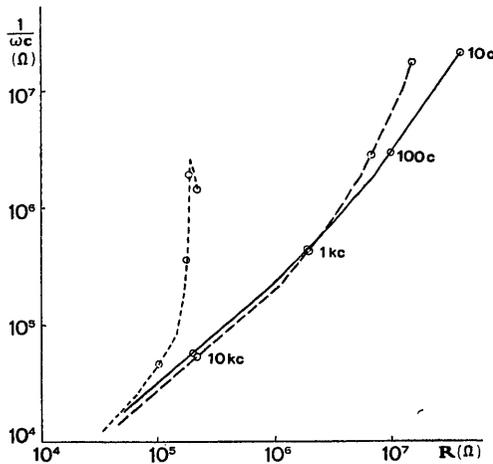
(b) 容量成分の変化



(c) 損失角の変化



(d) Vector の変化



た例である。破線で示したものが皮電点、点線はその通電後、そして実線は対照とした正常皮膚の成績である。正常皮膚に対する皮電点の impedance 成分および損失角の変化は、通電前に比して、通電後は非常に大きな変化を示し、第 2 相の部分においては通電前の皮電点の画く impedance 成分および損失角の曲線は正常皮膚のそれと大きな差は示さないが、通電後は非常に大きな変化を示している。横軸に抵抗成分、縦軸に reactance 成分をとり impedance の Vector の軌跡を画くと (第 17 図 d), 通電後の軌跡は大きく変わり、impedance の絶対値も小さくなる。(ある周波数における impedance の Vector の絶対値は、坐標の原点と軌跡上のある周波数の点を結ぶ直線の長さで与えられ、その直線が坐標軸となす角が位相角または損失角である)。

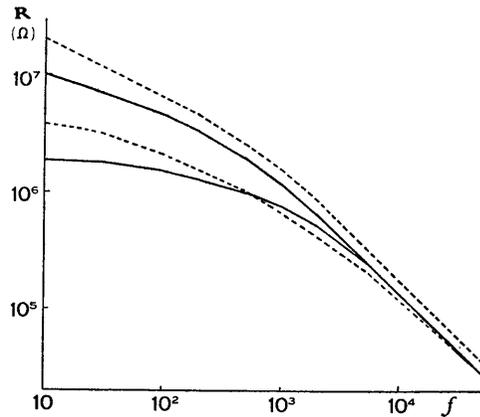
4. 皮電点の impedance の通電効果の回復

皮電点は電気刺激に対して非常によく反応し、その impedance 成分は 20~50 kc/s の高周波部分にいた

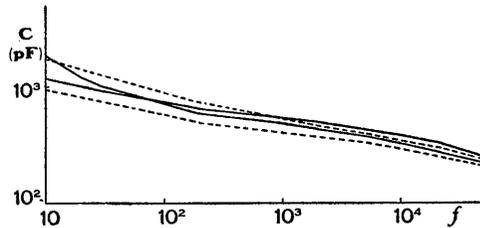
るまで小さく、損失角は非常に大きくなる。次に皮電点を皮電計で確かめた後、被検者を安静に保ち 30 分または 60 分後に同様の方法で測定した結果を第 3 表 (30 分後)、および第 4 表 (60 分後) に示した。

以上をグラフに示したものが第 18 図である。実線は 30 分後、点線は 60 分後に測定したものを示す。Impedance 成分および 損失角周波数特性曲線はいずれの場合も第 8 図の皮電点のそれと、ほぼ類似した曲線を描くようになる。即ち抵抗成分は 10~30 c/s の低周波部分では殆んど数 MQ 以上を示し、周波数によつて横

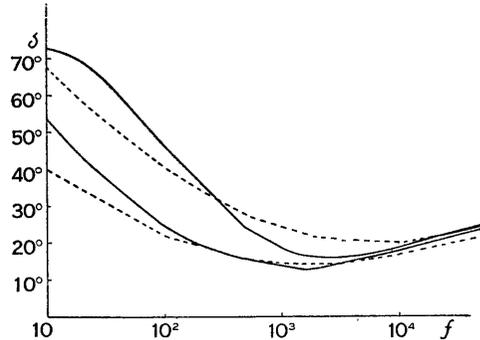
第 18 図 皮電点 (通電後 30 分および 60 分) の交流 impedance
(a) R. factor



(b) C. factor



(c) loss angle



軸と平行な曲線を描くものは少ない。容量成分も 200 c/s 以下で正常皮膚のそれに比べて、わずかに大きな値を示すが、200~500 c/s 以上は正常皮膚のそれと殆んど同じかわずかに大きい曲線を描く。

損失角は、第 1 相の部分では相当に大きな値を示し、第 2 相でも正常皮膚のそれと比べて、かなりの差を示す曲線を描くものから、正常皮膚とほぼ同じ曲線を描くものまで様々である。

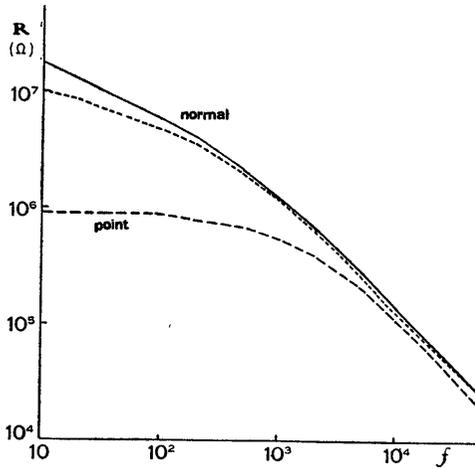
第 19 図はその 1 例で、破線は皮電計による検出直後（第 2 表 2 に示した点）の曲線で、点線は測定後 30 分間電極を皮膚から外して後に測定した曲線である。実線に対照として測定した皮電点附近の正常皮膚の値を示した。30 分の休息と共に抵抗、容量、損失角の周波数特性曲線および impedance の Vector の軌跡はいずれも正常皮膚の曲線の側に近づいている。

以上述べたように、この抵抗、容量両成分および損失角の周波数特性曲線は、第 13 図に示した皮電点の曲線とほぼ同じであることから、電気刺激によつて大きく変つた皮電点正弦波交流に対する性質は 30 分~60 分

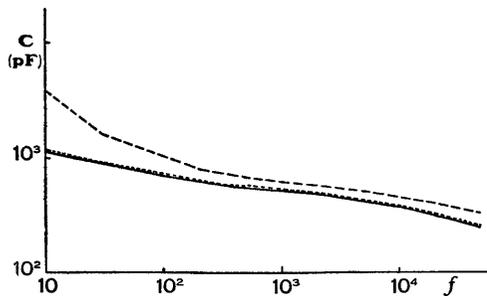
にはほぼ元の状態に戻るものと考えられる。

以上の impedance の回復に伴う周波数特性曲線の時間的推移を示すと第 20 図の如くである。Impedance 成分および損失角は曲線 1, 2, 3, 4 の順に変化して行く。また興味あることには、関電極を外しておく回復は早く 30~60 分で既に安定域に達し、それ以後は

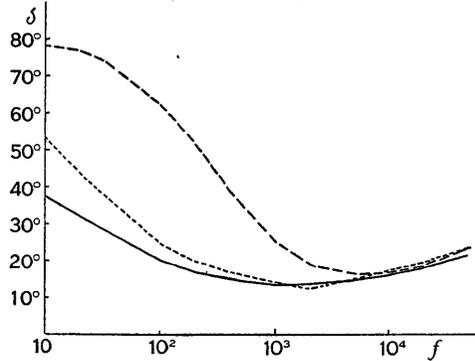
第 19 図 皮電点の通電効果の回復の例
(a) R. factor



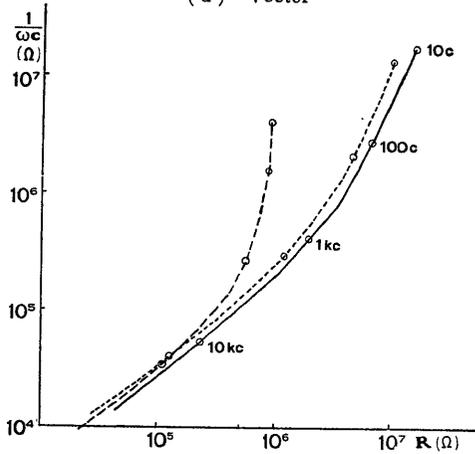
(b) C. factor



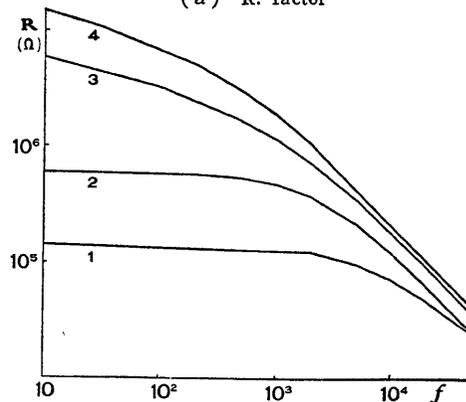
(c) loss angle



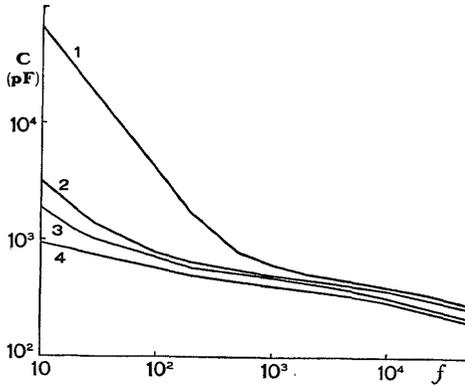
(d) Vector



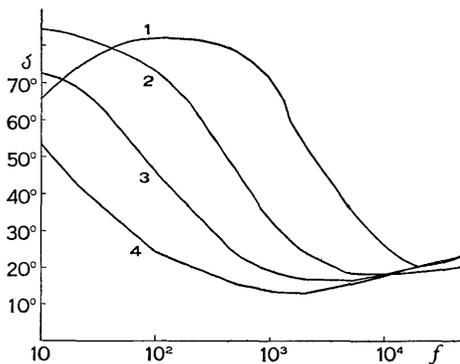
第 20 図 皮電点の通電効果の回復過程
(a) R. factor



(b) C. factor



(c) loss angle



ほとんど変化を示さないが、関電極を附着したままにしておくと、回復は非常にゆるやかで、2時間後でもまだ impedance は変化をつづけている。このことは、関電極を皮膚上に長時間にわたって装着しておくとき、その電氣的或いは機械的刺戟が皮電点の部分に作用して、通電効果の回復がゆるやかになるものと解される。

考 按

皮電点の正弦波電圧による impedance の特徴的な変化は 1k c/s 以下の低周波部分に著明である。そして周波数が大きくなるに従つて正常皮膚との差は小さくなる。

即ち正常皮膚に比べて抵抗成分は小さくなり、容量成分は大きくなる。その変化率は周波数が小さいほど大きく、また抵抗成分の変化率は容量成分の変化率より、低周波部分では大きい。損失角は抵抗成分および reactance 成分の比で表わされるから、損失角は低周波部分では正常皮膚のそれよりも大きくなるが、周波数が大きくなるに従つて抵抗成分および容量成分の変化率は次第に小さくなり、或の周波数以上ではほぼ一

定になる。このとき容量成分の変化率が抵抗成分のそれよりも大きいときは、正常皮膚と皮電点の周波数特性曲線は第17図に示すように交叉する。

皮電計で検出した後の皮電点の impedance の変化は更に大きく、その抵抗成分および容量成分の変化率は測定した全周波数にわたつて大きく、損失角周波数特性曲線は正常皮膚のそれと交叉するものは非常に少なく、もし交叉しても非常に高周波部分である。

しかし、皮電点の impedance 成分および損失角は大きく変化しているが、これらに一定の値は得られず、各皮電点によつて様々である。これは皮電点のもつ一連の滲出性変化に平行するものであろう。

教室同人大場は主として滲出性皮膚変化のあるの炎症性疾患を著者と同じ方法で測定し、その impedance および損失角を求めた結果、その病変部が存在する皮膚の深さによつて、impedance に大きな差が認められることを報告している。即ち皮膚の impedance は組織学的所見に平行するのである。これによると、皮下組織および真皮層下層に滲出性変化が存在するときは、測定した全周波数にわたつて impedance 成分は正常皮膚に対して殆んど変化を示さない。真皮上層に及ぶ病変があるとき、impedance 成分はわずかに変化する。即ち抵抗成分は第1相の部分でやや小さくなり、容量成分はほぼ全周波数にわたつてわずかに大きくなり、その結果損失角は第1相の部分で正常皮膚のそれより少し大きい値を示し、その損失角周波数特性曲線の交点は平均 800 c/s である。滲出性変化が表皮層に及ぶと、impedance 成分の変化は大きくなるが、その変化率の大きい低周波部分では、病変が表皮層内の浅層に波及するに従つて impedance の変化率は大きく、損失角も大きくなり、損失角周波数特性曲線が正常皮膚のそれと交わる周波数は次第に高周波側へ移行することを示している。

表皮層内のそれぞれの深さにある滲出性病変の impedance 成分および損失角の周波数特性曲線は皮電点のいろいろの段階のもの一致し、その病変が角下層直下の表皮層に及んだ subcorneous Vesicle のそれは皮電計による通電で検出した皮電点のそれと類似した曲線を描く。

従つて皮電点の impedance 成分および損失角が様々な段階の値を示すのは、基底細胞層附近に始まる皮電点の滲出性変化および半壊死が次第に拡大して表皮層内の浅層に波及して行く段階とほぼ平行していると考えられる。即ち第13図に示す曲線1は直皮上層から表皮基底細胞層附近の小さな滲出性変化によるものであり、その変化が拡大して次第に浅層に波及するに従

つて曲線 2, 3, 4 の順に変化して行くものであろう。

しかし impedance 成分の値および周波数特性曲線から考えると、滲出性変化並びに半壊死が、表皮層の上層に及ぶことは非常に少ないものであろう。血行不全による皮電点の並びに半壊死変化はその失調如何によつて様々であるが、その多くは顕微鏡的にはじめて認められるもので、極く少数のもののみが肉眼的に可視的な丘疹等に発展する。しかしその大部分は乳頭部血管蹄係に接する表皮層基底細胞層に始まり、表皮細胞層深層の範囲内で消長出沒するとの記載(石川)によく一致する。

このように impedance の低い皮電点に皮電計によつて通電すると (10 volt), その通電時間は殆んど瞬間的であるが、電流は少しでも低い impedance の部分を通る性質を持つため、相当大量の電気が皮電点の部分の皮膚を流れる。その結果相当の部分の表皮組織が障害を受け、皮電点の滲出性変化の周囲およびその表層の細胞の膜容量、透過性が変わり、更に流れる電氣量が強いとき滲出性変化が伴ってくる。即ち皮電点の血行不全による変化の程度が強くなり、範囲大きくなつたと同じような変化が理解されるのである、その結果第15図に示したように impedance により大きな変化を示すにいたるものと考えられる。しかし表皮細胞自体の細胞が完全に破壊されるほど大きな電氣量が流れないため、通電によつて大きく変つた細胞膜の透過性および膜容量は、30~60分後にはほぼ元の状態に回復するものであろう。但し皮電点を 10 volt ほどの電圧で刺戟すると角化層が障害をうけ、その結果 impedance が最も大きく変化するとも考えられる。しかしながら大場によれば、皮膚の滲出性病変による障害が角化層に及ぶとき、impedance の変化は、表皮層のそれよりも更に大きくなり、変化率の小さな 50 kc/s でも抵抗成分の変化率はほぼ10の値を示すと述べている。これに対し皮電点のそれは、殆んどが2以下であること、impedance の変化の回復が非常に速やかであること、および組織学的の変化がみられないことなどから、所謂皮電点では角化層に大きな障害を伴っていないと考えられる。

いい換えれば、皮電点は正常皮膚では影響をうけない程度の電氣量の刺戟によつて容易に動揺するほどの反応性に富んだ皮膚部分であるともいえよう。しかしこの基盤には、あくまで血行不全による表皮層深部に組織学的、電氣生理学的な変化が存在している。

結 論

1. 広範囲の周波数にわたつて皮膚の impedance を

測定する目的で skin impedance bridge を試作した。周波数による測定誤差を小さくするために、検出回路の前置増幅に cathod bollower を採用し、その入力 impedance を ∞ とした。hum を少なくするため bridge 回路の一部を接地した。bridge 回路の固定抵抗を周波数によつて 3 段階に切換える、等の工夫を加えた。

2. 更にこの bridge を使用して 10 c/s~50 c/s にわたつて皮電点の交流 impedance を測定した。皮電点の impedance 成分は正常皮膚と比較して 1 kc/s 以下の低周波部分で著明な変化を示し、抵抗成分は小さく、容量成分は大きく、その損失角は大きくなる。これらの変化は周波数が小さいほど著明である。

3. 皮電点を皮電計で刺戟すると impedance 成分の変化は更に大きくなり、2 kc/s 以上の周波数でも著しい変化を示すが、30分~60分後にはほぼ元の状態に回復する。

4. 皮電点は正常皮膚は影響されない程度の電氣量の刺戟によつて、その電氣的性質が容易に動揺するほどの反応性に富んだ皮膚部分であることが確かめられた。

稿を終るにあたり、終始御指導、御鞭撻を賜つた恩師石川太刀雄教授、本庄一夫教授、教室小田島講師を始めとする「生物々理のグループ」の諸氏、並びに skin impedance bridge の試作に際して、多大の御助言と御指導をうけた東芝中央研究所三浦茂博士に深甚な感謝の意を表します。

文 献

- 1) Einthoven, W. u. Bijtel, J. : Pflüger's Arch., 198, 439 (1923).
- 2) 朴沢 進 : (I) Pflüger's Arch., 219, 111 (1928). (II) Zeit. Biol., 96, 586 (1932). (III) 生理学講座, 生体の電氣現象 (II), 1~30 (1952).
- 3) Gilde-meister, M. : (I) Pflüger's Arch., 195, 112 (1922). (II) Bethes Handbuch d. norm. u. path. physiol. 8/2, 658~682 u. 775~784 (1928).
- 4) 橋田邦彦 : Jap. J. Med. Sci. III Biophysics 4, 118 (1935).
- 5) 石川太刀雄 : 内臓体壁反射, 医学書院, 東京, (1962).
- 6) 岡本義郎 : 十全医会誌, 63, 9~37 (1959).
- 7) 藤森聞一 : 臨床電氣生理学, 医学書院, 東京, (1955).
- 8) Wang, G. H. : Am. J. phys. Med. 36, 259~320 (1958).
- 9) 本川弘一・岩間吉也 : Tohoku J. exp. Med., 49, 89~98 (1947).
- 10) 谷内省三 : 十全医会誌, 68, 405~430 (1962).
- 11) 中村保雄 : 十全医会誌, 68, 302 (1962).
- 12) 古野美喜夫 :

- 印刷中. 13) Wien, M. : Ann. phys. Chem., 58, 37~72 (1896). 14) McClendon, J. F. & Hemingway, A. : Am. J. physiol., 94, 77~83 (1930). 15) Cole, K. S. : J. gen. physiol., 15, 641~649 (1932). 16) 竹山惣一 : 十全医会誌, 69, (1) (1963).
- 17) 本川弘一 : 医学生物学電気的実験法, 第3版, 南山堂, (1953). 18) 酒井 洋 : ブリッヂ回路, 日刊工業新聞社, 東京, (1962). 19) 川上正光 : 電子回路V, 共立全書, 東京, (1961). 20) 小田島藤夫 : 未発表. 21) 大場 昭 : 印刷中.

Abstract

1. A skin impedance bridge was designed for measuring the impedance of the human skin over the wide frequency range of alternating current.

In order to reduce the error produced by measuring the wide frequency, the cathod follower was employed for preamplifier of detecting circuit to make its input impedance infinite; a part of bridge circuit was earthed to reduce the hum; and the fixed resistance of bridge circuit was changed at three steps according to the frequency.

2. Impedance of the Electro-dermal point (E. D. P.) was measured with the bridge over the frequency range 10c/s~50kc/s.

The impedance component of E.D.P. showed an evident variation as compared with the normal skin at the frequency below 1kc/s, i. e. the resistance factor became lower, the capacity factor became larger and the loss angle of impedance increased, and the lower frequency was, the more eminent these variation were.

3. Measurement of the impedance components at E.D.P. which was stimulated with our Electro-dermo-meter showed the greatest variation, and that was obvious even at a high frequency range more than 2 kc/s.

But 30~60 minutes after E.D.P. was stimulated the impedance component showed a nearly normal value of the E.D.P.

4. It was confirmed that E.D.P. was a part of the skin of which electro-physiological properties were easily disturbed by an electric stimulus that produced no effect upon the normal skin.

附表

第1表 皮電点の交流 impedance

番号	F(c/s)	皮 電 点			対 照			1/4R	4C	$\delta_P - \delta_N$
		R (K Ω)	C (pF)	δ_P	R (Ω)	C (pF)	δ_N			
1	10	12,000	980	53.6°	30,000	750	35.2°	2.5	1.31	18.4°
	20	9,700	850	44.0	22,000	680	27.8	2.27	1.25	16.2
	30	8,300	800	38.6	18,000	630	25.0	2.18	1.27	13.6
	100	5,300	660	24.5	9,200	560	17.3	1.7	1.18	7.2
	200	3,700	580	20.4	5,900	480	15.7	1.36	1.2	4.7
	500	2,260	515	15.3	3,200	437	12.8	1.41	1.18	2.5
	1,000	1,460	490	12.5	1,850	415	11.7	1.26	1.18	0.8
	2,000	900	455	11.0	1,060	379	10.9	1.18	1.12	-0.1
	5,000	375	420	11.4	413	355	12.3	1.1	1.18	-0.9
	10,000	185	390	12.4	204	330	13.3	1.1	1.18	-1.1
	20,000	86.1	356	14.5	100	297	15.0	1.16	1.19	0.5
50,000	29.6	300	19.7	36	253	15.5	1.22	1.18	4.2	
2	10	2,000	2,000	75.2	12,000	1,400	43.5	6.0	1.5	31.7
	20	1,900	1,700	67.9	8,900	1,200	36.6	4.56	1.14	33.3
	30	1,800	1,530	62.4	7,200	1,100	33.8	3.1	1.1	28.4
	100	1,400	1,199	43.8	3,800	867	25.8	2.27	1.1	18.0
	200	1,150	1,030	33.8	2,650	738	22.1	1.87	1.11	11.1
	500	780	862	25.4	1,480	641	18.5	1.53	1.1	6.9
	1,000	546	786	20.2	940	594	15.9	1.37	1.09	5.3
	2,000	360	720	17.1	581	549	14.0	1.31	1.09	3.1
	5,000	168	628	16.7	251	493	14.4	1.26	1.06	2.3
	10,000	93	564	16.9	130	452	15.2	1.12	1.03	1.7
	20,000	47.6	510	18.1	63.0	408	17.2	1.17	1.02	0.9
50,000	18.0	418	22.6	23.1	335	22.3	1.11	1.01	0.3	
3	10	15,000	885	47.4	40,000	750	28.0	2.54	1.18	11.4
	20	13,000	760	38.8	27,000	640	24.7	2.08	1.19	14.0
	30	11,000	700	34.6	20,000	590	24.2	1.82	1.19	10.2
	100	6,800	550	23.0	10,000	500	17.7	1.47	1.1	3.6
	200	5,380	450	18.2	7,400	430	14.1	1.38	1.04	4.1
	500	3,140	408	14.0	3,430	390	13.4	1.09	1.04	0.6
	1,000	1,950	380	12.1	1,900	365	12.9	0.98	1.04	-0.8
	2,000	1,150	360	10.9	1,015	340	13.0	0.89	1.06	-2.1
	5,000	460	323	12.1	375	300	15.8	0.82	1.08	-3.7
	10,000	230	298	13.1	193	264	17.3	0.84	1.13	-4.2
	20,000	114	270	14.5	103	231	18.5	0.91	1.17	-4.0
50,000	45.8	230	15.9	47	195	19.2	1.03	1.18	-3.3	
4	10	5,800	1,200	66.4	26,000	920	33.6	4.49	1.71	32.8
	20	5,100	930	59.0	18,000	820	28.3	3.52	1.13	20.7
	30	4,500	840	54.6	15,000	770	24.6	3.33	1.09	20.0
	100	3,230	630	38.0	7,200	620	19.6	2.05	1.02	18.4
	200	2,500	530	30.9	4,620	526	18.1	1.83	1.00	11.2
	500	1,650	462	22.8	2,530	475	14.8	1.53	0.97	6.0
	1,000	1,180	429	17.5	1,460	437	14.0	1.23	0.97	3.5
	2,000	770	400	14.5	830	408	13.2	1.08	0.98	1.3
	5,000	386	360	13.2	326	359	15.2	0.84	1.00	-2.0
	10,000	206	334	13.0	196	328	16.0	0.82	1.02	-3.0
	20,000	105	310	14.4	89.5	290	17.1	0.86	1.07	-2.7
50,000	40.1	271	16.6	36.8	244	19.5	0.92	1.11	-2.9	

5	10	6,200	950	69.7	48,200	670	26.2	7.75	1.42	43.5
	20	5,900	830	58.4	33,000	609	21.6	5.91	1.37	36.8
	30	5,500	750	52.1	23,800	585	20.8	4.33	1.28	31.3
	100	4,300	620	30.8	11,300	500	15.7	2.63	1.25	15.1
	200	3,360	530	24.2	6,930	431	14.9	2.06	1.23	9.3
	500	2,170	470	17.4	3,080	395	14.6	1.42	1.19	2.8
	1,000	1,340	440	15.1	1,540	360	16.0	1.15	1.22	-0.9
	2,000	750	400	14.9	755	323	18.0	1.01	1.24	-3.1
	5,000	305	356	16.3	310	268	21.0	1.02	1.17	-4.7
	10,000	142	320	19.3	161	220	24.2	1.14	1.45	-4.1
	20,000	72.5	290	20.9	88	180	26.7	1.21	1.61	-6.0
50,000	28.0	250	24.4	38	138	31.2	1.36	1.85	-6.8	
6	10	3,210	1,530	72.9	48,200	670	26.2	1.50	2.28	46.7
	20	2,900	1,380	63.3	33,000	609	21.6	1.14	2.27	41.7
	30	2,700	1,280	57.0	23,800	585	20.8	8.7	2.19	36.2
	100	2,100	1,010	36.9	11,300	500	15.7	5.38	2.03	21.2
	200	1,600	834	30.8	6,930	431	14.9	4.33	1.94	15.9
	500	932	693	26.2	3,080	395	14.6	3.3	1.75	11.6
	1,000	591	608	23.8	1,540	360	16.0	2.6	1.69	7.8
	2,000	358	530	22.8	755	323	18.0	2.1	1.64	4.8
	5,000	178	435	22.4	310	268	21.0	1.74	1.62	1.4
	10,000	96.4	362	24.5	161	220	24.2	1.67	1.64	0.3
	20,000	52.0	300	27.0	88	180	26.7	1.71	1.67	0.3
50,000	24.0	235	29.4	38	138	31.2	1.74	1.7	-1.8	
7	10	2,520	2,500	68.4	27,000	930	32.4	10.7	2.68	34.0
	20	2,150	1,800	62.8	19,000	820	27.1	8.9	2.2	35.7
	30	1,930	1,590	60.0	15,000	760	24.9	7.8	2.09	35.1
	100	1,380	1,050	47.8	7,600	600	19.2	5.5	1.6	28.6
	200	1,130	846	39.8	5,400	511	16.1	4.78	1.65	13.7
	500	838	690	28.8	3,030	462	12.8	3.6	1.49	16.0
	1,000	618	610	22.8	1,790	430	11.7	2.9	1.42	11.1
	2,000	436	552	18.3	1,040	400	10.8	2.38	1.38	7.5
	5,000	237	489	15.4	422	368	11.6	1.78	1.38	3.8
	10,000	135	448	14.7	200	330	13.6	1.48	1.35	1.1
	20,000	68	400	16.3	91	295	16.5	1.34	1.35	-0.2
50,000	27.3	340	18.9	35.4	250	19.8	1.3	1.36	-0.9	
8	10	3,500	2,900	57.4	22,000	1,120	32.8	4.68	1.81	24.2
	20	2,850	2,280	50.8	16,400	1,000	25.9	4.31	1.67	24.0
	30	2,380	1,980	48.8	12,500	920	24.7	3.79	1.58	24.1
	100	1,530	1,420	36.2	6,500	760	17.9	2.96	1.40	18.3
	200	1,080	1,100	32.4	4,120	674	16.0	2.74	1.17	16.4
	500	663	970	26.4	2,100	610	13.9	2.24	1.12	12.5
	1,000	429	852	23.5	1,140	579	13.7	1.92	1.11	9.8
	2,000	264	763	21.6	610	532	13.8	1.59	1.09	7.8
	5,000	117	640	23.0	219	467	17.3	1.47	1.08	5.7
	10,000	61.2	543	25.6	108	420	19.3	1.46	1.02	6.3
	20,000	31.2	440	30.1	50.4	330	25.5	1.29	1.08	4.6
50,000	14.0	306	34.8	23	295	26.7	1.21	0.91	8.9	

9	10	4,700	2,030	59.0	22,000	1,120	32.8	7.7	2.59	27.2
	20	3,800	1,670	51.4	16,400	1,000	25.9	5.75	2.28	25.5
	30	3,300	1,450	48.0	12,500	920	24.7	5.25	2.12	23.8
	100	2,200	1,060	34.3	6,500	760	17.9	4.25	1.87	16.4
	200	1,540	890	30.2	4,120	674	16.0	3.81	1.72	14.2
	500	940	755	24.2	2,100	610	13.9	3.17	1.59	10.1
	1,000	595	675	21.7	1,140	579	13.7	2.34	1.49	8.0
	2,000	335	578	22.4	610	532	13.8	2.01	1.43	6.6
	5,000	149	505	22.3	219	467	17.3	1.87	1.37	5.0
	10,000	74	430	22.9	108	420	19.3	1.77	1.27	3.6
	20,000	41.5	358	25.6	50.4	330	25.5	1.73	1.34	0.1
50,000	19	250	28.1	23	295	26.7	1.64	1.11	1.4	
10	10	2,950	2,800	62.4	10,000	1,500	45.8	3.4	1.86	16.6
	20	2,500	5,100	56.6	7,000	1,350	40.0	2.8	1.55	16.6
	30	2,300	1,710	53.4	5,600	1,230	37.6	2.44	1.49	15.8
	100	1,540	1,210	40.4	3,240	840	30.4	2.1	1.44	10.0
	200	1,160	980	35.0	2,320	675	26.9	2.0	1.45	8.1
	500	770	788	27.7	1,240	550	25.0	1.87	1.43	2.7
	1,000	519	680	24.1	777	480	23.1	1.49	1.42	1.0
	2,000	432	595	21.4	468	410	22.5	1.37	1.45	-1.1
	5,000	178	498	19.8	228	330	22.9	1.28	1.51	-3.1
	10,000	109	440	18.4	141	280	21.9	1.29	1.57	-3.3
	20,000	60.5	390	18.6	85	234	21.8	1.4	1.67	-3.2
50,000	26.4	330	20.0	45.1	198	19.6	1.7	1.77	0.4	

第2表 皮電点 (通電後) の交流 impedance

番号	F(c/s)	皮 電 点			対 照			1/4R	4C	$\delta_P - \delta_N$
		R (K Ω)	C (pF)	δ_P	R (Ω)	C (pF)	δ_N			
1	10	162	44,600	65.5°	35,000	940	25.8°	213	47.4	39.7°
	20	143	16,600	73.4	24,100	830	21.7	175	20.0	51.7
	30	141	8,700	77.0	18,500	790	19.8	131	11.0	57.2
	100	134	1,800	81.4	9,500	670	14.0	71	2.69	67.4
	200	132	930	81.2	5,900	590	12.9	44.7	1.39	68.3
	500	132	612	75.8	2,750	538	12.1	20.8	1.14	63.7
	1,000	132	534	66.4	1,430	500	12.6	11.2	1.07	53.8
	2,000	128	485	52.0	690	455	14.2	6.59	1.07	37.8
	5,000	105	429	35.3	267	392	16.9	3.48	1.09	18.4
	10,000	79	385	27.6	137	337	19.0	1.74	1.14	8.6
	20,000	52	335	24.6	73	285	20.9	1.4	1.18	3.7
50,000	27	271	23.5	34	221	23.6	1.26	1.23	0.1	

2	10	112	70,000	64.8	35,000	800	29.6	713	106	35.2
	20	93.2	33,000	68.8	26,000	690	24.0	565	56	44.8
	30	87.1	18,000	73.5	20,400	647	21.8	440	32.5	51.7
	100	83.0	4,000	78.2	10,700	547	15.2	218	8.01	53.0
	200	83.3	1,620	80.4	6,890	468	13.9	120	2.44	66.5
	500	84.3	820	77.7	3,270	421	13.0	49.5	2.05	64.7
	1,000	83.0	634	71.7	1,800	395	13.4	29.5	1.67	58.3
	2,000	80.6	525	62.0	933	355	13.5	15.4	1.5	48.5
	5,000	72.0	440	45.2	373	310	15.4	6.8	1.42	29.8
	10,000	59.8	395	33.9	195	278	16.4	3.42	1.44	17.5
	20,000	44.4	347	27.4	103	240	17.9	2.39	1.45	9.5
50,000	24.5	290	24.1	46.3	198	19.1	1.94	1.44	5.0	
3	10	463	9,620	74.3	56,000	730	21.2	121	113.2	53.1
	20	460	4,400	77.0	40,000	630	17.6	87	7.0	59.4
	30	474	2,700	76.4	30,800	590	16.3	65	4.58	60.1
	100	481	870	75.2	14,200	513	12.3	28.5	1.7	62.9
	200	427	565	72.1	8,440	446	12.0	19.7	1.27	60.1
	500	406	430	61.3	3,640	400	12.4	8.75	1.07	58.9
	1,000	367	388	48.2	1,920	380	12.3	5.05	1.02	35.9
	2,000	299	357	36.7	918	340	12.3	3.07	1.05	24.4
	5,000	195	310	27.8	348	290	17.5	1.79	1.07	10.3
	10,000	120	284	25.0	182	250	19.3	1.52	1.13	5.7
	20,000	68	258	24.4	98.5	212	20.9	1.45	1.22	3.5
50,000	41	227	23.7	48	165	21.9	1.17	1.37	2.0	
4	10	880	3,850	78.0	60,000	700	20.7	68	5.5	57.3
	20	888	2,220	76.1	42,000	620	17.0	47.2	3.58	59.1
	30	890	1,620	74.8	32,000	580	16.0	36	2.89	58.8
	100	870	1,010	61.0	15,000	510	11.8	17.2	1.98	49.2
	200	775	820	51.4	10,000	480	9.3	12.9	1.71	42.1
	500	673	685	34.6	4,940	420	8.7	7.34	1.63	21.9
	1,000	549	620	25.1	2,540	400	8.9	4.63	1.55	16.2
	2,000	401	570	19.2	1,190	375	10.1	2.96	1.52	9.1
	5,000	212	510	16.4	438	336	12.2	2.06	1.52	4.2
	10,000	112	460	17.3	203	300	14.7	1.91	1.54	2.6
	20,000	57.5	410	18.7	103	270	16.0	1.79	1.52	2.7
50,000	22	330	23.7	43.3	225	18.1	1.97	1.47	5.6	
5	10	536	3,300	83.7	48,200	670	26.2	90	4.92	57.5
	20	569	1,900	82.2	33,000	609	21.6	58	3.12	60.6
	30	585	1,400	81.2	23,800	585	20.8	40.6	2.4	60.4
	100	595	800	73.3	11,300	500	15.7	19	1.6	57.5
	200	578	657	64.4	6,930	431	14.9	12	1.36	49.5
	500	545	560	46.3	3,080	395	14.6	5.65	1.42	31.7
	1,000	485	514	22.6	1,540	360	16.0	3.18	1.43	16.6
	2,000	389	475	23.3	755	323	18.0	1.94	1.47	5.8
	5,000	236	422	17.7	310	268	21.0	1.3	1.58	-3.3
	10,000	132	380	17.6	161	220	24.2		1.73	-6.6
	20,000	69.9	336	17.8	88	180	26.7	1.38	1.87	-8.0
50,000	27.6	268	23.3	38	138	31.2	1.92	1.94	-7.9	

6	10	137	53,700	65.2	17,400	1,200	37.4	127	44.7	29
	20	118	19,800	71.7	12,800	1,000	31.9	109	19.8	29.8
	30	114	12,500	75.0	10,500	910	29.0	83.8	13.7	46
	100	108	2,900	78.9	5,900	740	20.0	54.7	3.92	58.9
	200	107	1,270	80.3	4,060	640	17.0	38	1.99	63.0
	500	108	666	77.2	2,160	570	14.5	20	1.34	62.8
	1,000	107	584	68.2	1,240	528	13.1	11.7	1.1	54.6
	2,000	104	505	56.7	690	480	14.4	6.74	1.05	46.6
	5,000	88.5	438	39.4	288	430	14.4	3.27	1.01	27.2
	10,000	69.4	390	30.5	140	385	16.4	2.05	1.01	15.8
	20,000	52.3	341	24.0	70.4	330	18.5	1.34	1.01	8.0
50,000	25.7	280	23.9	28.0	270	22.8	1.09	1.04	5.8	
7	10	220	11,000	83.1	40,000	750	28.0	182	13.7	55.1
	20	210	4,060	83.9	27,000	640	24.7	128	6.45	59.2
	30	190	2,000	85.9	20,000	590	24.2	105	3.39	61.7
	100	189	806	84.5	10,000	500	17.7	67	1.61	66.8
	200	186	610	81.9	7,400	430	14.1	39.8	1.42	67.9
	500	185	500	73.8	3,430	390	13.4	18.5	1.28	60.4
	1,000	179	440	63.8	1,900	365	12.9	10.6	1.24	50.9
	2,000	169	410	44.0	1,015	340	13.0	6.0	1.2	31
	5,000	148	382	29.4	375	300	15.8	2.54	1.27	13.6
	10,000	104	340	24.2	193	264	17.3	1.51	1.29	6.9
	20,000	68.4	310	20.6	103	231	18.5	1.41	1.34	2.1
50,000	33.2	270	19.5	47	195	19.2	1.53	1.38	0.3	
8	10	120	13,000	84.4	35,000	900	26.8	291	14.5	57.6
	20	116	6,200	84.8	24,000	780	23.0	207	8.05	61.8
	30	114	4,300	84.8	19,000	700	21.7	166	6.15	63.1
	100	111	2,610	79.4	9,420	570	16.5	85	4.58	62.9
	200	104	2,000	75.3	6,340	496	14.2	60.8	4.04	61.1
	500	94.1	1,400	67.5	3,420	451	11.7	36.3	3.1	55.8
	1,000	85.4	1,130	58.8	1,930	426	11.0	22.6	2.65	47.8
	2,000	76.5	850	50.8	1,020	400	11.1	13.3	2.12	39.7
	5,000	69.1	710	32.9	383	360	13.0	2.55	1.97	19.9
	10,000	52	620	26.2	187	329	14.5	3.59	1.87	11.7
	20,000	34	540	23.4	88	294	17.1	2.58	1.84	6.3
50,000	16	443	24.2	35	239	20.8	2.18	1.85	3.4	
9	10	32.0	80,000	80.9	26,000	920	33.6	812	87.0	47.3
	20	31.5	35,000	82.1	18,000	820	28.3	570	42.7	53.8
	30	31.0	19,000	83.5	15,000	770	24.6	435	24.7	58.9
	100	31.0	4,000	85.5	7,200	620	19.6	232	6.45	65.6
	200	32.1	2,250	84.8	4,620	526	18.1	144	4.27	66.7
	500	31.9	1,320	82.5	2,530	475	14.8	79.5	2.78	67.7
	1,000	31.8	870	79.9	1,460	437	14.0	45.9	2.04	65.9
	2,000	31.5	720	74.1	830	408	13.2	26.3	1.76	60.9
	5,000	29.2	585	61.8	326	359	15.2	11.1	1.63	46.6
	10,000	25.8	520	49.9	169	328	16.0	6.55	1.58	33.9
	20,000	20.9	460	39.6	89.5	290	17.1	4.28	1.58	22.5
50,000	13.7	385	31.2	36.8	244	19.5	2.69	1.58	11.7	

10	10	480	7,000	85.2	34,000	700	30.4	56.4	7.54	54.8
	20	450	3,000	80.4	20,300	610	30.0	42.3	3.66	50.4
	30	440	2,200	79.8	17,400	570	28.1	34.2	2.9	51.7
	100	413.5	1,100	47.1	10,100	447	19.5	18.4	1.87	54.6
	200	399	855	66.8	7,200	375	16.4	13.5	1.67	52.4
	500	394	720	48.2	4,200	337	12.7	7.7	1.56	35.5
	1,000	355	650	34.6	2,500	320	11.3	5.05	1.51	23.3
	2,000	298	600	24.0	1,380	300	10.9	3.5	1.5	13.1
	5,000	180	540	18.1	530	272	12.5	2.34	1.47	5.6
	10,000	101.3	487	16.4	251	246	14.5	1.97	1.47	1.9
	20,000	53.9	430	19.0	120	220	16.7	1.72	1.46	2.3
50,000	23.9	350	20.9	51	179	19.2	1.18	1.4	1.7	

第3表 皮電点の交流 impedance (通電30分後)

F(c/s)	番号			番号			番号			番号		
	R(KΩ)	C(pF)	δ	R(KR)	C(pF)	δ	R(KΩ)	C(pF)	δ	R(KΩ)	C(pF)	δ
	1			2			3			4		
10	2,690	1,830	72.8°	9,900	1,180	53.7°	1,800	1,310	81.6°	1,600	1,500	81.4°
20	2,540	1,200	69.1	8,300	1,010	43.5	1,810	1,150	75.4	1,530	1,310	75.9
30	2,390	1,010	65.6	7,100	930	38.8	1,820	1,040	70.4	1,460	1,174	72.1
100	2,140	720	45.9	4,700	750	24.3	1,520	838	51.4	1,200	783.9	59.4
200	1,810	600	36.2	3,430	645	19.6	1,240	705	42.4	1,020	609	52.0
500	1,370	530	23.7	1,980	580	15.5	997	620	27.2	847	495	37.2
1,000	1,020	490	17.7	1,182	540	14.0	764	567	20.4	697	445	26.6
2,000	628	444	15.9	655	498	13.1	513	515	16.8	544	415	19.1
5,000	272	390	16.6	268	438	15.2	263	453	15.0	323	374	14.7
10,000	138	339	18.8	128	390	17.7	132	408	16.5	189	349	13.6
20,000	69.7	285	21.8	66	338	19.6	69	360	7.8	99.3	324	13.9
50,000	31.4	227	24.0	27.4	265	23.7	28.2	295	20.9	34.2	284	18.2
	5			6			7			8		
10	6,800	1,630	59.3°	920	1,990	83.4°	13,000	940	52.4°	6,800	1,140	67.3°
20	5,600	1,350	46.5	900	1,350	81.3	10,800	800	42.8	5,600	890	57.8
30	4,800	1,200	42.3	890	1,100	79.5	9,300	700	39.2	5,100	810	52.1
100	3,000	920	30.0	800	750	69.4	5,500	517	29.3	3,600	601	36.3
200	2,390	730	25.5	710	640	60.4	4,000	416	25.5	2,820	483	30.3
500	1,570	642	18.1	608	565	42.4	2,410	354	20.5	1,810	410	23.2
1,000	1,050	595	14.3	549	525	28.9	1,510	318	18.3	1,180	351	21.0
2,000	660	550	12.4	433	490	20.5	954	286	16.2	769	312	18.4
5,000	290	500	12.4	255	450	15.5	469	245	15.5	380	269	17.3
10,000	143	465	13.5	117	433	15.5	230	221	15.2	239	237	16.3
20,000	66	415	16.2	56	400	19.6	151	200	14.8	133	215	15.6
50,000	25.2	345	20.1	22	335	23.4	71	178	14.1	64	188	14.8

第4表 皮電点の交流 impedance (通電後60分)

F(c/s) 番号	R(K Ω)	C(pF)	δ									
	1			2			3			4		
10	8,600	1,300	54.9°	2,800	1,700	73.4°	3,800	1,750	67.3°	20,000	960	39.8°
20	7,200	1,080	45.7	2,600	1,420	65.1	3,500	1,400	58.4	14,700	800	34.2
30	6,240	970	41.2	2,400	1,300	59.5	3,220	1,260	52.6	11,900	730	31.4
100	3,950	720	29.2	1,800	990	41.8	2,130	910	39.4	6,510	580	22.9
200	2,850	610	24.6	1,430	828	33.9	1,580	742	34.2	4,730	485	19.1
500	1,840	530	18.1	1,020	716	23.5	1,400	610	26.7	2,610	438	15.6
1,000	1,210	480	15.3	735	655	18.3	672	528	24.1	1,570	400	14.3
2,000	794	440	13.9	480	610	15.2	432	465	21.6	893	375	13.4
5,000	367	400	12.2	222	540	14.9	221	400	20.7	363	330	14.9
10,000	187	376	12.8	117	490	15.5	125	352	19.8	179	298	16.9
20,000	86.6	340	15.1	58.1	436	17.4	66.3	305	21.5	90	255	19.1
50,000	31.5	284	19.6	23.7	340	20.2	30.1	242	23.6	39.3	210	21.1
	5			6			7			8		
10	14,000	700	58.4°	6,600	740	73.0°	450	2,000	86.8°	18,000	700	51.7°
20	11,200	560	47.1	6,000	580	66.4	440	1,300	85.9	14,300	540	45.8
30	11,000	500	44.0	5,650	520	61.0	432	1,026	85.2	12,600	480	41.2
100	7,000	380	30.9	4,170	375	45.5	412	506	82.5	8,160	380	27.2
200	5,200	300	27.0	3,340	294	38.3	358	410	79.0	6,970	300	20.8
500	3,200	262	20.8	2,260	241	30.3	346	335	70.9	3,970	275	16.3
1,000	1,970	233	19.2	1,530	214	25.9	311	310	56.0	2,640	250	13.6
2,000	1,190	214	17.4	1,010	188	22.8	279	290	44.5	1,630	240	11.5
5,000	550	182	17.6	502	154	22.3	222	265	28.4	702	215	9.7
10,000	292	160	18.8	281	135	22.7	157	248	22.0	338	200	13.3
20,000	158	136	20.3	150	120	23.8	97.9	225	19.8	161	180	15.3
50,000	81	112	19.3	66	108	24.0	46	198	21.4	68	147	17.5