

位相推移を考慮せる高周波誘電特性の一測定法

押 山 保 常
相 川 孝 作
中 沢 章

Measurement of Dielectric Properties at Radio Frequencies

Yasutsune Oshiyama, Kōsaku Aikawa and Akira Nakazawa

Synopsis: Generally speaking, it is too difficult to find the resonance point of the circuit which has the very low Q , for instance $Q=1$ or 2 .

The causes of such a low Q mainly depend upon dielectric losses and ohmic loss at very high frequencies.

Some electrolytes, water having impurity and wet woods have ordinarily such a high loss that we can hardly measure the dielectric properties of them by resonance method.

As for the counter-measure of it, we propose the method that we take the phase shift of the resonant circuit at resonance frequency, i.e. we take the point of the phase shift equal zero.

By this idea, we are contented with the measurement of dielectric properties of some substances at radio frequencies.

1. 緒 言

同調回路の同調点を求めその結果から物質の高周波損失、誘電定数等を決定する諸方法に於て、物質の高周波損失が大きくなると、同調点が扁平になつて、同調点を把握し難い。殊に不純な水、種々の電解溶液に於ては、殆んど同調点を見出し得ない。この対策としては検出回路に特殊な装置を附加することが行はれてゐる¹⁾。本文で述べる方法は原理的にはこれ等の方法と異り同調点附近に於ける位相変化に着目し、位相推移零の点をおさえて検出せんとする方法で一種の零位法である。この測定方法はもちろん高周波損失の少ないものにも適用出来るが、ねらいは損失の多い物質に適用せんとするものである。

2. 原 理

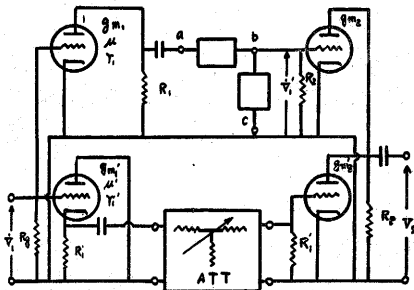


Fig. 1

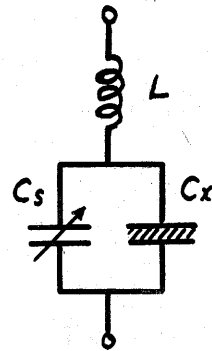


Fig. 2

第1図に示す接続に於て伝送回路は上下二段に別れている。入力電圧 \dot{V}_1 は共通に與えられ、出力電圧 \dot{V}_2 も又共通に取り出しこれを検出器としての真空管電圧計に加える。図から明らかなる様に、上下両伝送回路の位相は π だけの位相差をもっているから、もし両出力電圧が同大になれば、出力電圧は零となる。実際には上下何れかの側に試料を挿入し同調コンデンサーを一定とし \dot{V}_1 の周波数を連続的に変化するか、周波数を一定とし挿入コンデンサーを調整するかして試料挿入側の同調をとり他の側に減衰器か入れて減衰器挿入側の出力電圧を試料挿入側の出力電圧に合わせればよい。その場合の接続は第2図の直列共振回路を(a) — (b)間に直列に又は(b) — (c)間に並列に接続する。

(1) (a) - (b)間に測定回路を挿入した場合、今上下両段の増巾度を計算すると
上段：

$$\begin{aligned} \dot{V}_1' &= \frac{-\mu}{r_i + \frac{R_1(R_2+r)}{R_1+R_2+r}} \cdot \frac{R_1 R_2}{R_1+R_2+r} \\ \dot{A} = \frac{\dot{V}_2}{\dot{V}_1} &= \frac{-\mu \cdot g_{m2} \cdot R_P}{r_i + \frac{R_1(R_2+r)}{R_1+R_2+r}} \cdot \frac{R_1 R_2}{(R_1+R_2+r)} \\ &= \frac{-\mu g_{m2} \cdot R_P}{r_i} \cdot \frac{R_1 \cdot R_2}{(R_1+R_2+r)} \\ &\quad \left(\frac{R_1(R_2+r)}{R_1+R_2+r} \ll r_i \right) \\ &= -g_{m2}^2 \cdot R_P \cdot \frac{R_1 R_2}{(R_1+R_2+r)} \\ \dot{V}_2 &= -\dot{V}_1 \cdot g_{m2}^2 R_P \cdot \frac{R_1 R_2}{R_1+R_2+r} \quad (1) \end{aligned}$$

但し r は測定回路の同調時に於ける直列等価抵抗である。

下段：

減衰器は送受両端ともインピーダンス整合の状態であると入力電圧 v_1 と出力電圧 v_2 との関係は

$$\frac{v_1}{v_2} = 10^{\frac{A}{20}}$$

として與えられる。但し A は db で表はした減衰量である。

下段の等価回路は次の二つに分けて考えられる。

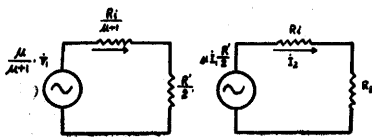


Fig. 3

$$\dot{I}_1 R_1' = \frac{\frac{\mu'}{\mu'+1} \cdot \dot{V}_1}{\frac{r_i'}{\mu'+1} + \frac{R_1'}{2}} \cdot \frac{R_1'}{2}$$

若し $1 \ll \mu'$

$$\approx \frac{\dot{V}_1}{\frac{r_i'}{\mu'} + \frac{R_1'}{2}} \cdot \frac{R_1'}{2} = \frac{\dot{V}_1'}{\frac{1}{g_{m2}'} + \frac{R_1'}{2}} \cdot \frac{R_1'}{2}$$

若し減衰量があれば第二真空管の入力電圧は

$$\frac{\dot{V}_1}{\frac{1}{g_{m2}} + \frac{R_1'}{2}} \cdot \frac{R_1'}{2} \cdot 10^{-\frac{A}{20}} \quad \text{となる}$$

故に出力電圧 $\dot{I}_2 R_P$ は

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = \dot{I}_2 R_P &= \frac{\dot{V}_1}{\frac{1}{g_{m2}'} + \frac{R_1'}{2}} \cdot \frac{R_1'}{2} \cdot \frac{\mu' R_P}{r_i' + R_P} \\ &= \frac{\dot{V}_1}{\frac{1}{g_{m2}'} + \frac{R_1'}{2}} \cdot \frac{R_1'}{2} \cdot \frac{g_{m2}' R_P}{1 + \frac{R_P}{r_i'}} \\ &= \frac{\dot{V}_1}{\frac{1}{g_{m2}'} + \frac{R_1'}{2}} \cdot \frac{R_1'}{2} \cdot \frac{g_{m2}' \cdot R_P}{1 + \frac{R_P}{r_i'}} \quad \text{for } n=0 \\ &= \frac{\dot{V}_1}{\frac{1}{g_{m2}'} + \frac{R_1'}{2}} \cdot \frac{R_1'}{2} \cdot \frac{g_{m2}' \cdot R_P}{1 + \frac{R_P}{r_i'}} \cdot 10^{-\frac{A}{20}} \\ &\quad \text{for } n \end{aligned} \quad (2)$$

検出器の振れが零になつたときは (1) (2) が大いさ等しく位相が π だけ異なるのであるから (1) (2) 式を等しいとおいて共振時の等価抵抗を計算出来る。即ち

$$\frac{R_1'}{2 + R_1' g_{m2}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_P}{r_i'}} \cdot 10^{-\frac{A}{20}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{(R_1+R_2+r)} \quad (3)$$

若し $R_P \gg r_i'$

$$\frac{R_1'}{2 + R_1' g_{m2}} \cdot 10^{-\frac{A}{20}} = \frac{R_1 R_2}{(R_1+R_2+r)} \quad (4)$$

但し上下両段に於ける各真空管の g_m は等しいとした (3) (4) 式を書き直すと

$$r = \frac{R_1 \cdot R_2}{\frac{R_1'}{2 + R_1' g_{m2}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_P}{r_i'}} \cdot 10^{-\frac{A}{20}} - (R_1+R_2)} \quad (3')$$

$$r = \frac{R_1 \cdot R_2}{\frac{R_1'}{2 + R_1' g_{m2}} \cdot 10^{-\frac{A}{20}} - (R_1+R_2)} \left(\frac{R_P}{r_i'} \ll 1 \right) \quad (4')$$

(2) (b) - (c)間に測定回路を挿入した場合、 R_P に流れる電流を求めると次の如くなる。

上段：

$$\dot{I}_p = g_{m2} \dot{V}_1' = -g_{m2} \frac{\mu \dot{V}_1 R_1 r}{r_1(R_1+r) + R_1 r} \quad (5)$$

下段：

$$\dot{I}_p' = g_{m2}' \dot{V}_1'' = -g_{m2}' \frac{\mu' \dot{V}_1 R_1'}{2\{r_1' + \frac{R_1'}{2}(1+\mu')\}} \cdot 10^{-\frac{A}{20}} \quad (6)$$

これらの式に於てもし $g_{m2} = g_{m2}'$, $\mu = \mu'$, $r_1 = r_1'$, $R_1' (1+\mu') \ll 2r_1'$, $r_1 \gg R_1$ なる条件が成立すれば検出器の出力電圧零の場合に (5) 式 = (6) 式において r は次式で表はされる。

$$r = \frac{R_1' R_1}{(2R_1 \cdot 10^{\frac{A}{20}} - R_1')} \quad (7)$$

とした、しかし (5) 式は $g_m R_1 \ll 2$ な条件が充たされているとした場合の簡略式で若しこの条件が満足され

ていないときは

$$r = \frac{R_1' R_1}{R_1(2 + g_{m1} R_1') 10^{\frac{A}{20}} - R_1'} \quad (8)$$

となる。但しこの場合 $\frac{R_1 r}{R_1} \ll (R_1 + r)$ とした

g_{m1} は初段の真空管の相互コンダクタンスである。
 r の算出は 試料挿入回路が同調した時の上段の出力電圧に、下段の減衰器の減衰を加減して両者の釣合をとつたとき(8)式から計算されるものである。勿論試料のみの r を分離しなければならないが、これは試料を挿入しない前に同じ実験をして予め試料挿入回路の等価直列抵抗を測定しておいて差し引けばよい。

次に $\tan \delta$ の算出であるが、第4図に示す如く測定で得られた等価直列抵抗は(a)図に示す r であるから

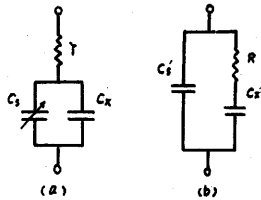


Fig. 4

此の値から $\tan \delta = \omega C_x r$ とすることは出来ない。其処で(a)図と等価な(b)図を考える、若し $C_s = C_s'$ 、 $C_x = C_x'$ なる条件が成立していれば

$$\tan \delta = \omega C_x R \quad (9)$$

として C_x なる測定値を使つて求められた R から $\tan \delta$ が計算出来る

(a) 図と (b) 図の等価条件は

$$\left. \begin{aligned} \text{Real part } \frac{\omega^2(C_s' + C_x')^2 r}{1^2 + \omega^2(C_s' + C_x')^2 r^2} &= \frac{\omega^2 C_x R}{1^2 + \omega^2 C_x^2 R^2} \\ \text{Imaginary part } \frac{(C_s' + C_x')}{1^2 + \omega^2(C_s' + C_x')^2 r^2} &= \frac{(C_s + C_x) + \omega^2 C_s C_x R^2}{1^2 + \omega^2 C_x^2 R^2} \end{aligned} \right\} (10)$$

$\omega^2(C_s' + C_x')^2 r^2 \ll 1$, $\omega^2 C_x^2 R^2 \ll 1$ が成立すれば

Real part から

$$R = \left(\frac{C_s' + C_x'}{C_x} \right)^2 r = \left(\frac{C_s + C_x}{C_x} \right)^2 r \quad (11)$$

Imaginary part から

$$(C_s' + C_x') = (C_s + C_x) \quad (12)$$

となる。

3. 実験結果

(1) 第2節(1)の場合

此の場合は測定すべき試料が接地出来ないので実験も単に理論を検討するにとどめた。

(a)-(b) 間に $L=250\mu H$, $C=137PF$, $r=200\Omega$ ($Q=8$ に相当する)を挿入したとき減水量 $4db$ を得た。
 $R_1'=80\Omega$, $g_{m2}=1000\mu v$, $r_i=100K\Omega$, $R_P=10K\Omega$,
 $R_1=60\Omega$, $R_2=200\Omega$, $f=864KC$ として(4')式より $r=214\Omega$ となる。

(2) 第2節(2)の場合

この方法によつて蒸溜水、ベークライト、導体ゴムの高周波誘電特性を調べた。第5図は水の誘電特性第6図はベークライトの誘電特性、第7図は導体ゴムの誘電特性である。終りに記した文献(2)の第4図(温度をパラメーターとした周波数-誘電体損失角の曲線)の一部を第8図に示してあるが、本方法の結果とよく一致している。即ち $f=1MC$ にて文献(2)では

$$\tan \delta = 320 \times 10^{-4} (\text{at } 11.2^\circ C) \text{ となり本実験では}$$

$$\tan \delta = 422 \times 10^{-4} (\text{at } 15.4^\circ C) \text{ となつている。}$$

今実験結果処理の一例を記すと

蒸溜水の場合

$$f=1MC, C_x=247PF, r=r_1-r_2=4.5-1.3=3.2$$

$$R = \left(\frac{C_s + C_x}{C_x} \right)^2 r = \left(\frac{479 + 247}{247} \right)^2 \times 3.2 = 27.6\Omega$$

$$\tan \delta = \omega C_x R = 422 \times 10^{-4}$$

ベークライトの場合

$$f=300KC, C_x=26PF$$

$$r=r_1-r_2=5.8-4.35=1.45\Omega$$

$$R = \left(\frac{C_s + C_x}{C_x} \right)^2 r = \left(\frac{533 + 26}{26} \right)^2 \times 1.45 = 670\Omega$$

Dielectric character of water

15.4t

$$\epsilon = \frac{C_x}{C_s} \quad C_P 3.12$$

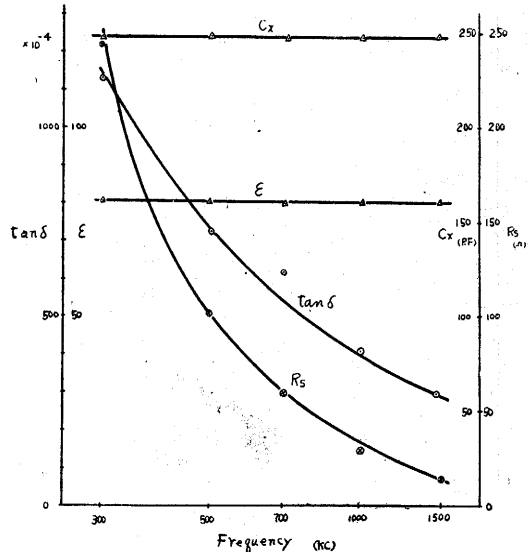


Fig. 5

$$\tan\delta = \omega C_e R = 325 \times 10^{-4}$$

r_1 は試料挿入時の等価直列抵抗、 r_2 は試料挿入なき時の等価直列抵抗である。又試料とした導体ゴムは先に報告³⁾した導体ゴム No. 1 であるが、日数の経過により試料自体の性質が変化したものと思われる。

Dielctric character of Bakelite

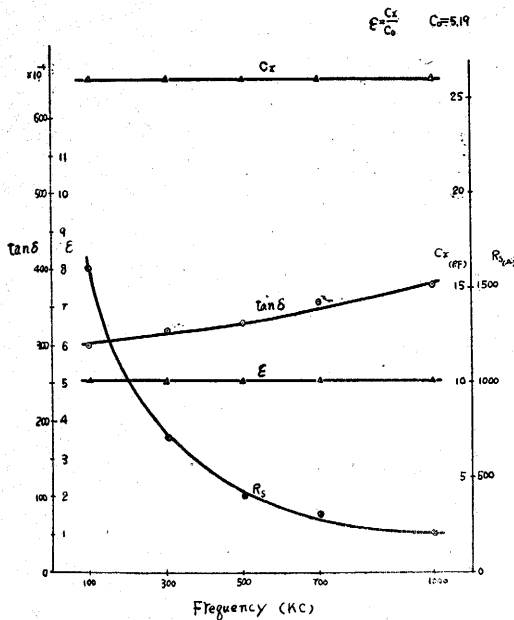


Fig. 6

Dielectric character of conductive Rubber

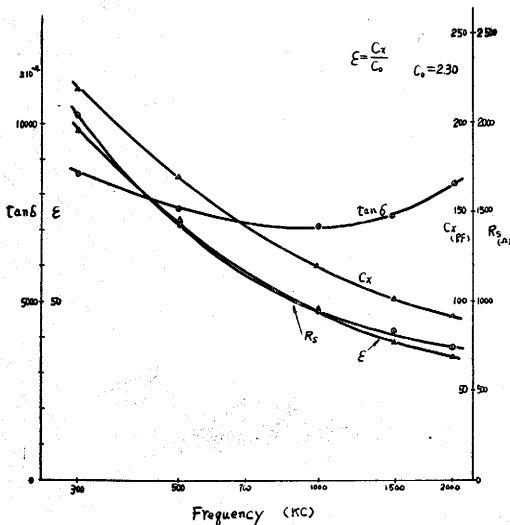


Fig. 7

$\tan\delta$ of water

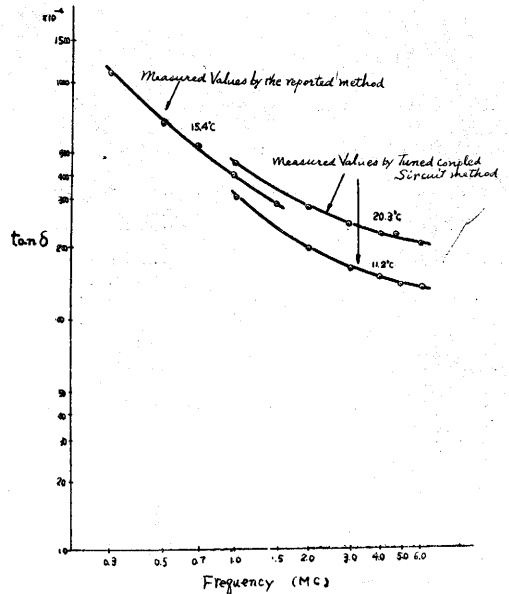


Fig. 8

4. 結 言

(1) 第2節 (1) (2) の比較

直列に挿入した場合には $R_1 \ll (r + R_2)$ において第一真空管の出力電圧は一定と考えられるが、並列に挿入した時は出力電圧が変化する。従つて前者では単に r と R_2 との電圧分配が変化して第二段の真空管の出力の変化として現われるが、後者では若し $R_1 < r$ のような場合には第二真空管の出力変化は少い、夫故 r が比較的大なるときは R_1 もそれにつれて大きくしなければならない。又前者は同調蓄電器を接地出来ない欠点がある。そのため筆者等の測定には後者を多く採用した。

(2) 測定周波数を中域周波数 (100KC~3MC) に限定すれば、電極間容量、漂遊容量等は検出器としての真空管電圧計の零目感読みとりに困難を感じない。勿論結合コンデンサーは $R_1 R'$ 等に比して大きくする必要がある。

(3) 上段回路と下段回路の漂遊結合があると釣合がとりにくくなる。

(4) 特定の周波数において上段、下段に使用されている真空管が全く同じ動作をしているとき (8) 式が成立つのである。故に真空管が同じ動作状態にあるとしたとき $r = \infty$ になるための減衰量の条件は (8) 式から次のように計算される。

$$10^{\frac{A}{20}} = \frac{R_1'}{R_1(2+g_m R_1')} = \frac{80}{20(2+3000 \times 10^{-6} \times 80)} = 1.78$$

$$A = 5db$$

$r = \infty$ とは試料挿入回路を開放したときと考えればよい。これによつて試料挿入回路を開放して減衰器のダイヤルを $5db$ に置き上段、下段の出力電圧が釣合ふように真空管の働作点の調整（例えばバイアス電圧を僅に変化して）をやればよい。それが一種の零点調整となる、この調整して測定を行えば便利である。

本測定回路を用いて、導体ゴムのごとき電気導電率の大きな物質の試料の静電容量 C_s 、誘電体損失角 $\tan \delta$ 等の測定が出来得る事を知つた。この結果から今までリアクタンス変化法、抵抗置換法等では測定が困難で

あつた Q の低い物質の誘電特性の測定も可能のように思われる。尙本研究は文部省総合研究含濕量計委員会（委員長東大星合正治教授）の仕事の一部として行われたものである。

文 献

- 1) 一条、新井 半導体の誘電率、損失角の新測定法
電学誌 74, 263 (昭29)
- 2) 押山、相川、中沢 複同調回路法による蒸溜水の
高周波誘電特性 本号、別稿
- 3) 押山、相川、中沢 導体ゴムの高周波誘電特性
本報告誌 (昭28年)