

微小容量変化の検出

野 村 民 也

歪・振動・壓力などの精密測定には、電気容量変化を利用することが實に多い。微小な容量変化を検出する回路は昔からいろいろ發表されており、とくに井上回路は有名であるが、ここには筆者の研究した、簡單でしかも性能のよい新回路について、實際的な解説をした。

いろいろの物理量、たとえば変位とか壓力などの測定にあつて、これらを静電容量の變化に變換し、その容量の變化を電氣的に検出することによつて、測定の目的を達している場合がよくある。こうした測定法は、要するに容量の變化を電壓や電流の變化に變換する回路を媒介としているのであつて、一たん電壓、電流の變化として與えられれば、電子管をつかつての増幅は簡單で、きわめて微小な變化を測定することもでき、また記録させることも容易である。電子管による増幅が、増幅度を容易に高くできること、運動部分をもたないこと、またきわめて急速な時間的變化をとともう現象にも追隨しうること、遠隔的操作が可能であることなどは、ほかの方法とくらべてみた場合の一大特徴であつて、これらはまた一般にいろいろの物理量測定の媒介手段として、電気技術が盛んにつかわれている所以である。

電気容量の變化を電壓、電流の變化に變換する場合、單位静電容量の變化に對する電壓、電流の變化が大きいこと、すなわち感度が高い方が有利なことはいうまでもあるまい、もちろん、發達した電気回路技術から考えて増幅度が高く、かつ安定な増幅回路を構成することができから、感度だけを云々することはあまり意味がないところで、安定性をあわせ考へて初めて變換回路の評価ができるわけである。つまり、變換回路の感度と不安定性との双方で検知しうる最小變化量がきまり、この量以下の變化はいかに増幅度をあげても、不安定さにおおわれて測定できなくなるからである。

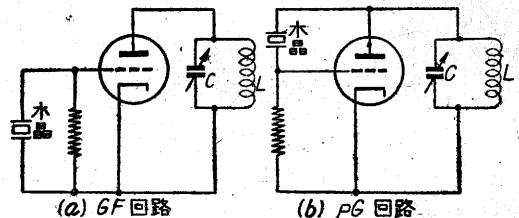
從來、微小容量変化の検出回路としては井上回路⁽¹⁾が有名であり、これは L, C の共振回路の共振點附近で容量の僅かの變化で位相角が急峻に變化する性質を利用した巧妙な回路であつて、井上氏の發表した例では、感度は $1.9 \times 10^8 \text{ V}/\mu\text{F}$ 。その後各方面でいろいろの目的に實用し、その優秀さが認められている。

筆者がこれから述べる變換回路は、ピース水晶發振回路の特性を利用したものであつて、井上回路と比較する

と回路構成は非常に簡單であるが、感度、安定度ともに遜色ない。この記事がこの方面のことに少しでも役立てば、幸甚と考えている。

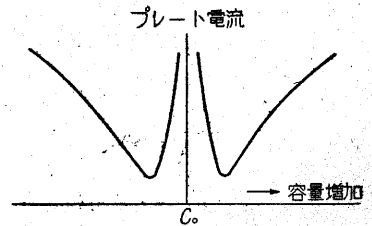
ピース回路の特性

ピース回路というのは第1圖に示した回路で、水晶の壓電氣効果を利用した發振器であり、水晶片の挿入位置によつて、(a) GF 回路・(b) PG 回路の二通りがある。



第1圖 ピース回路

動作特性としてたとえばプレート電流をとつてみると容量の變化にともなつて第2圖のように變化する。 C_0 は共振回路が丁度水晶の固有周波數に同調する容量の値であつて、これを境に左側が GF 回路、右側が PG 回路の特性である。



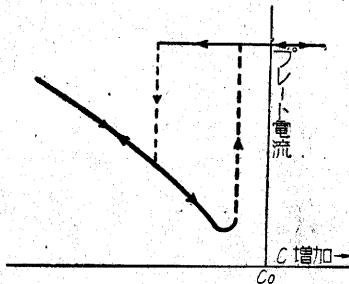
すなわち、GF 回路は容量が C_0 より小さい範圍、PG 回路では C_0 より大きい範圍で、それぞれ發振するのであるが、いずれも C_0 の附近に發振停止點があり、その附近では容量の微小變化によつて陽極電流が大きく變化する性質がある。したがつて、物理量に應じて變化する容量をプレートの共振回路に並列に接続し、全體の容量をこの發振停止點附近にあわせておけば、容量の微小變化をプレート電

流の大幅な変化に変換することができる。これが本変換回路の原理である。

タップ附共振回路

回路に含まれる諸定数中、停止点附近の電流変化の急峻さにもつとも影響が深いものは、プレート共振回路の Q （共振特性の尖どさを示す量）である。そのためにはできるだけ損失の少ないコイルを使う必要があるが、さらには真空管の内部抵抗による特性の劣化をきたさないために、五極管をつかうことが望ましい。

このような注意の下に回路を構成すると、容量の変化に対する電流の変化特性は、第3図のようになるのが普通である。この図はGF回路の場合であるが、発振状態で容量を増していくと、図に示した通りプレート電流は徐々に減っていく。やがて最小値に到達しそれ以後幾分増加する。



第3図 発振停止点附近のヒステリシス

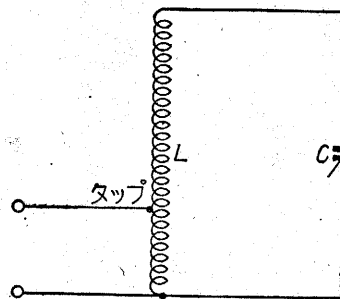
が、或点で突然不連続的にプレート電流が増加する。この点をすぎれば回路はもはや発振していないから、プレート電流は真空管に加わっている各部電圧によって決る或値になつていて、容量を変化しても変化はない。

次に一たん発振を停止した状態から逆に容量を減らしていくと、さきに発振を停止した点にいたつても発振は生起せず、その点をすぎてさらに或値だけ容量が減じた点ではじめて発振状態に入るのであるが、この入り方がやはり不連続的であつて、したがつてプレート電流も不連続的に減少して、容量を増加するにあつて求めた曲線上の上の一点に復歸する。すなわち、発振の停止、生起には明瞭にヒステリシスをともなつてゐるのである。

これは回路の損失が少ないため、プレートの負荷インピーダンスが相當高いので、いきおいプレート電圧の交流成分の振幅が著しく大きくなりすぎて、いわゆる過電圧状態におちることが原因である。バイス回路を容量変化検出回路として利用する場合に、感度が高いのは発振停止点の附近であるから、以上のような特性では都合がわるい。

過電圧状態におちる原因は要するにプレートのインピーダンスが高すぎるのであるから、これを下げる工夫が必要となつてくる。このインピーダンスは Q と L/C に比例しているから、そのいづれかを下げれば良いわけであるが、こうすると感度を下げてしまう。したがつてこうした量に変化をもたらないで、インピーダンスだけを小さくしたい要求がおこる。これにかなうものが表

記のタップ附共振回路であつて、第4図のように L に



第4図 タップ附共振回路

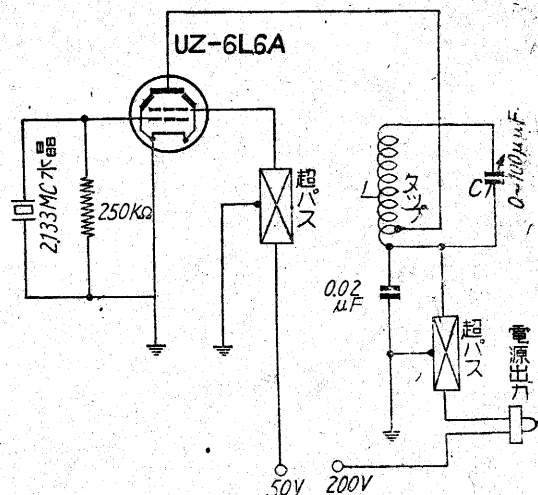
タップを設け、その点とコイルの一端とを二端子のインピーダンスとして利用するやり方である。この二端子にはさまれたインダクタンスが少なくなればなる程

（これをタップの位置を下げるという）インピーダンスは小さくなる。すなわち Q や L/C に獨立に、インピーダンスのみを変化しうるといふ特徴をもつた回路である。

容量変化検出回路——その1: 電流型

ここに電流型というのは、容量変化が主として電流の変化に変換されるもので、そのままである程度までの微小容量変化を、電流型の記録装置（自動記録計、電磁オシログラフ）などにかけることのできるものをいう。

回路構成を第5図に示す。真空管としては電力増幅用



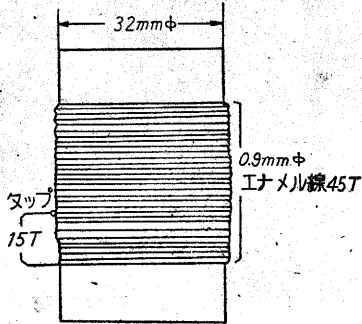
第5図 電流型回路

五極管を使い、GF回路を用いる。ここでは相互コンダクタンスが高い程感度がよくなる点、および電流変化を大幅にとれるという理由でUZ-6L6Aを用いているが多少感度の犠牲をしのべばUZ-42でもよい。使用すべき周波数には別に制限はないが、周波数が高い方が容量変化の絶対値に対する感度はよくなる。しかし、あまり高くするといろいろと技術的な困難をますから、1~2Mc位が適當であろう。ここではたまたま手許にあつた2.133 Mcの水晶をつかつてゐる。

格子漏洩抵抗は高い方が感度はよくなる。ただし感度は抵抗値の増加とともに飽和する傾向があり、また高ず

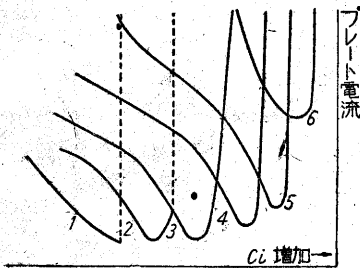
ぎては不安定さを増すから自ら限度がある。図示の $250\text{k}\Omega$ はこうして決めたものである。

プレート共振回路の L の設計は一例を第6圖に示す。タップの位置をいろいろにかえて特性をとると、第7圖のようになる。曲線についている番號の多いほどタップの位置が下りインピーダンスが小さくなっている。



第6圖

第7圖で明瞭にわかるように、ある程度タップをさげてやると、發振停止



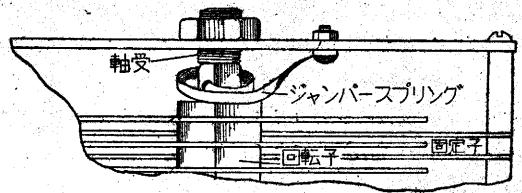
第7圖

附近の電流變化のヒステレシスが消滅する。これは過電壓状態の影響がなくなつて、動作が正規になつたことを意味する。さらにタップを下げると、それにつ

れて感度はよくなつていくが、あまり下げすぎでは發振も困難となり、不安定さもふえてくるから、適當な點に固定してやる。

電源電壓として、遮蔽格子電壓は感度にほとんど影響しないが、プレート電壓は高い方がよい。これはプレート電壓が高いほど過電壓状態の影響が少なくなる點から考えても當然であろう。プレート電流を擴大して仔細に觀察すると、全電流の 10^{-4} 程度の不規則な雜音的變動を含んでいるが、これは回路を構成する各部の微小な不安定が、綜合、累積されてあらわれるもので、相當注意をはらつてもこの程度は残るようである。電流の傳達を接觸によつて行つていような部分、たとえば真空管のピンとソケットとか、可變コンデンサの回転子の接觸部などは、こうした不安定さの大きな原因となつていようである。とくに可變コンデンサの回転子は、普通面スラストで外側の支え板に接續されるか、はなはだしい場合には玉軸受などで保持されている。ここは交流分の大きな電流が流れるところであるから、この一寸した不安定が全體にいちじるしい影響をもつている。したがつて、第8圖のように、回転子の軸にジャンパー・スプリングをハンダづけし、それを介して直接外部回路と接續するようにした可變蓄電器を使うことが望ましい。上記の 10^{-4} という數字は、こうして極力不安定さの原因となりそうな部分をへらしておいたもので、遮蔽格子電壓を低くすると動作點電流が小さくなるから、變動

の絶對値が小さくなり、したがつて檢出可能最小容量を小さくすることができる。こうした意味を考へて、遮蔽格子電壓 50V、陽極 B 電壓 200V としてあるのである。

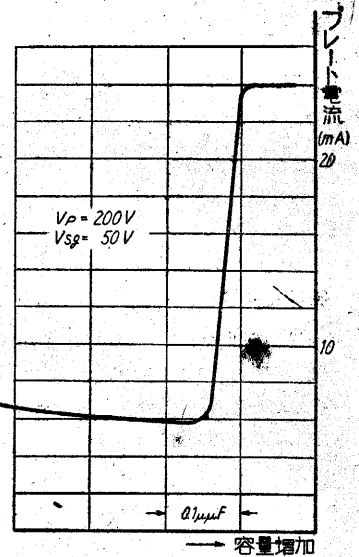


第8圖

この状態での特性は第9圖のようになる。直線性もよく、感度は $390\text{ mA}/\mu\text{F}$ となつている。同じ回路構成で UZ-47 を使つたときは、 $140\text{ mA}/\mu\text{F}$ 程度の感度となつている。

容量變化檢出回路
—その2:
(電壓型)

電壓型というのは、容量變化を主として電壓の變化



第9圖 電流型の特

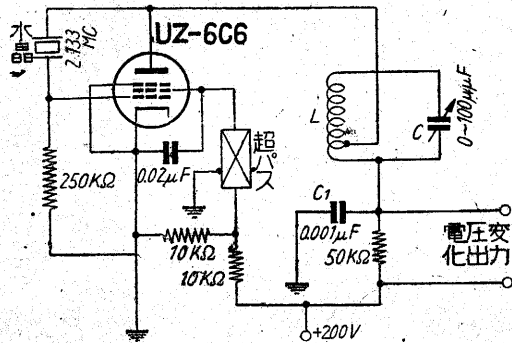
性は、容量變化を主として電壓の變化に變換するもので、電壓的な裝置、たとえば真空管増幅器とか、靜電偏向型陰極線オシロスコープと組合わせるためのものである。

前述の電流型變換回路で、プレート電源に直列に高抵抗を挿入し、この兩端の電壓降下が電流の變化に比例することを考えれば、それでただちに電壓型回路ができそうに思われる。しかし、感度を高くしたいためには相當高い値の抵抗が必要で、そうすると動作點電流の大きい電流型回路では、直流の電壓降下が大きくなるため動作状態がいちじるしく變つてしまうので満足な動作をしてくれないのである。

前に述べたように使用すべき真空管としては五極管がよいが、五極管でプレート電流の小さいものという、高周波増幅につかうもの (UZ-6 C6, UZ-57, OS-6 SJ7 など) しかない。これらの真空管ではいずれも C_{pg} (プレートと制御格子間の靜電容量) が非常に小さい ($0.007\mu\text{F}$ 程度) ので、元來この C_{pg} で發振をおこさせている GF 回路は、そのまゝでは使うことができない。もちろん別に小容量の蓄電器を外で足してやればよい。

が、それよりは水晶自身を饋送要素としてつかい、そうした問題のない PG 回路をつかった方が簡単である。

回路構成は第 10 図である。この場合、水晶片は前の

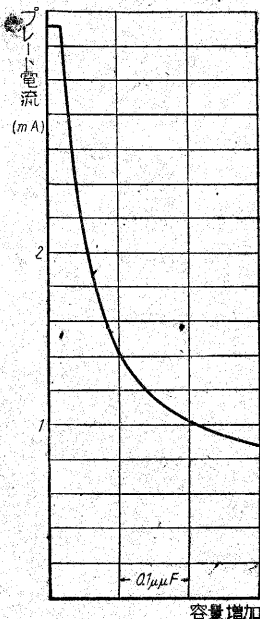


第 10 図 電圧型変換回路

と同じ、共振回路も前と同じで略々満足すべき結果がえられている。プレート電流の變化を電壓の變化に変換する抵抗は、高くするにつけ感度が飽和する傾向をもつから、あまり高くすることは意味もないし、またこの直流電壓降下がきいて特性もわるくなってくる。

プレート回路に高抵抗が入っている場合には、普通遮蔽格子電壓を適當にしてやらないと、動作特性を害することが多い。またその與え方もいろいろの方式が考えられるが、第5圖のように別々の電源からとることは、電池を使うならいざしらず、交流式に動作させたいようなためには、あまり適當したやり方ではない。プレート電源から直列抵抗による電壓降下を利用するか、あるいはブリーダーによって適當な電壓に調節する。いろいろの實驗を行つた結果、圖示のようにするのが最も特性的に良好であつた。この回路定數のもとにおいて、電壓感度は約 $2.1 \times 10^3 \text{ V}/\mu\text{F}$ となり、井上回路と略々同程度となつている。特性を第 11 圖に示す。

この回路ではプレート電流中の高周波成分をバイパスする容量(第 10 圖の C_1)が抵抗と並列に入っておりこの容量値が或程度以下にできない關係上、被測定容量が時間的に變化する場合には、時間的變化が或程度以上急速になると感度が下がってしまう。すなわち、被測定容量が同一振幅で周期的な變化するとすると、周波数の高い方では感度がわるくなってしまうのであ



第11圖 電圧型の特性曲線

つて、この回路構成でほぼ一樣な感度と見られる範囲はせいぜい 1kc 程度迄である。

この點は目的によっては大きな缺點であるが第 10 圖の C_1 のかわりに小線輪を組合わせた濾波回路を入れれば或程度改善できる。さらに抵抗値をずつと小さくしてそれにもなる感度の減少は 6AC7, 6302 といった高 gm 管 ($gm \approx 10\text{mS}$) をつかうことによつておきなつてやるようにすれば、20kc 位迄は追隨できるような回路を構成することができる。

電源について

電流型にしても電壓型にしても、きわめて敏感な回路であるだけに、電源の安定には十分注意をはらう必要がある。上記の回路では、B 電源電壓の 1% の變動は、容量として $10^{-3} \mu\text{F}$ 程度の變化がおこつたことに相當するから、微細な容量變化を觀察するには電源の安定は大きな問題である。新しい鉛蓄電池を電源として使用するときは、測定があまり長時間にわたらないかぎりつかえる。比較的長時間にわたるときには、いわゆるフローティング方式を用いてやると、ほぼ安定した動作を望みうが、この場合には安定化する迄時間が永くかかるようである。なお、交流式電源としては電子管を用いた定電壓装置があるが、このような目的に對するものとしてはまだ問題が多く残つている。この方面については筆者の研究室でも基礎的な實驗を進めており、現在だいたい満足すべき結果をえているが、それとの組合せによる結果はまた改めて紹介したいと思つている。

應用について

容量變化を媒介とした測定としては、微小變化の測定微小壓力の測定、微小振動の測定など、非常に多岐多様にわたつたものが考えられる。また最近では纖維や紙、さらには油のごとき材料の誘電率が含水量によつて變化する性質に着目し、容量變化による含水量の測定からそれをもととする生産工程の自動制御にいたる應用が、各方面で行われている。

本器は原理的にいうと、外部回路條件と、真空管の特性によつて決まる一つの安定状態を基準にするのであつてこの點常に零位を保つよう、制御力を與えている自動平衡型橋絡回路などとは本質的にことなる。すなわち、あくまで真空管の特性そのものを使つてゐるから、たとえ外部條件を注意して一定にしても、真空管の特性が變化するので、動作點の移動がおこるのである。現在實用的真空管はすべて酸化物陰極をつかつてゐるから、その特性は使用中必らず變化していく。したがつて本装置は原理的にいつても、完全に長時間にわたる安定動作はのぞめないものであることを常に念頭において、應用すべき方面を決定する必要があるのである。

こうした見地よりすれば、本装置の應用は、靜的なものより、たとえば振動の測定などにもつとも適しているといえるのであつて、たとえば本所鳥飼助教授による應用(生産研究 1949 年 12 月號参照)などはそのいちじらしい例である。

こうした應用に當つて注意すべき點は、前に述べたように、この回路は損失をできるだけ小さく保つことによつて高感度をえているのであるから、未知容量を共振回路の可變コンデンサーに並列に加えるとすれば、その容

量はできるだけ損失の小さいものでなくてはならないということである。そして敏感であるということは、一寸した不注意がおのずから不安定の要素となりやすいということと同意語である點を十分認識されて、回路構成その他を十分堅固に、丁寧に仕上げる必要があるのである。

文 献

(1) 第 4 回日本工學會大會電氣部豫選：昭和 15 年 4 月

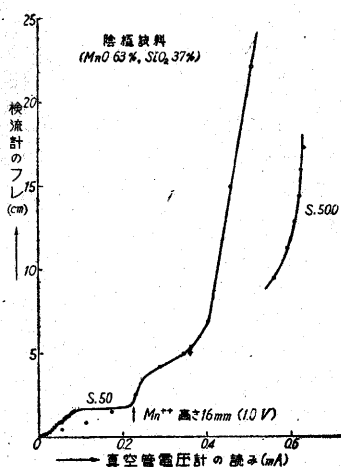
速報 43

熔融スラッグの 電 解 效 果

松 下 幸 雄 (冶金)

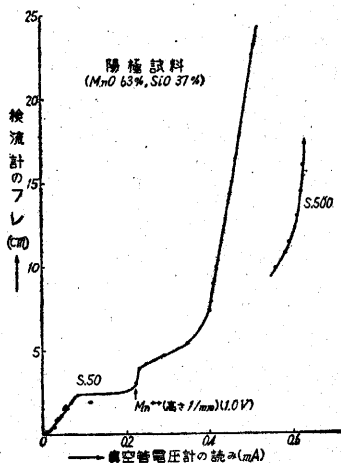
當研究室で從來、人工或は現場スラッグの熔融體についてその電導性を實測してきたが、その本質はイオン電導であつて Ca^{++} , Fe^{++} , Mn^{++} 等や O^{--} , SiO_4^{4-} 等が電荷を運ぶと思われる。そこでそれ等イオンの動きの速さを知らうとして、分解電壓以上の端子電壓で若干電解を試みている。ここにその最近の成果の一部を紹介する。まず SiO_2 37%, MnO 63% の組成のものをマグネシアルツボ中に熔かし、1,300~1,400°C において黒鉛棒を兩極として直流電解してみた。今迄の實驗事實から、イオンの移動にともなつて濃度勾配を生ずることを知つていたので、電解後も通電したまま試料を爐中に冷し、ついに凝固して全く電流計の讀みがなくなつてから兩極近傍の試料を注意して取り、細

かく碎いて白金ルツボ中でアルカリ熔融し、 HCl と溫湯に溶かして後その溶液をポラログラフ法の原理に従つて電氣分析して第 1, 2 圖を得た。即ち Mn^{++} についていえば、その曲線の屈曲點より水平部にいたる山の高さに比例する濃度の差だけ勾配を生じている。また SiO_2 - FeO 系を 1,360°C 位で純鐵ルツボの中で純鐵棒の極で電解して得た。Fayalite ($2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$) については第 3 圖のように Fe^{++} を認めた。これを丹念に繰返すと、(1) $\text{O}^{--} \rightarrow \text{O}_2$ が陽極で認められることから O^{--} の存在が實證できる。(2) $\text{SiO}_4^{4-} \rightarrow \text{SiO}_2$ も陽極で起り、後の HCl 處理の時 SiO_2 ゲルの状態で認められる。(3) 電氣分析を使つて、100mg 程度の僅かな試料で數多くのイオンの存在量を同時に知つて、電解に伴う相對的なイオン移動を簡便に求めることができる。これは現在研究進行中で、窮極の目的は各イオンの易動度を求め、電導の機構を知つてその反應性の資料とすることである。(1950.4.11)



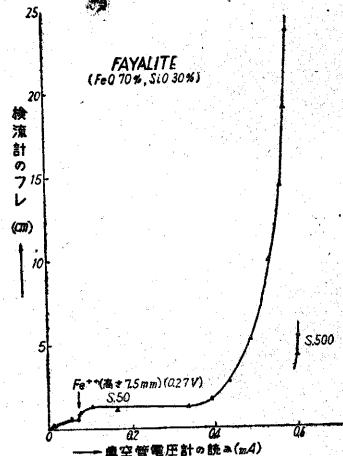
第 1 圖

MnO-SiO_2 系スラッグ試料
を電解した後の電位差分析
曲線 (陰極近傍部)



第 2 圖

MnO-SiO_2 系スラッグ試料
を電解した後の電位差分析
曲線 (陽極近傍試料)



第 3 圖

ファイアライトを電解した
後の陰極近傍試料の電位差
分析曲線