

# 電氣化學の測定に用いる直流増幅器の展望

菊池 眞一・坂口 喜堅

## 1. 緒 言

物理的測定による分析法は急速に發展しつつある。最近わが國でも話題を提供しつつあるものに自記分光光度計<sup>1)</sup>、赤外線記録分光計<sup>2)</sup>があつたとせば天然色映畫の色の研究や、有機化合物(たとえば BHC の各異性體)の分析などに活躍している。電氣化學の分野においても、電位滴定法、ポーログラフ法、電流滴定法など一連の方法も電氣化學の理論的立場からは、それぞれ研究課題ではあるが、ひるがえつて電氣化學的分析に使用するため自動化、ペン記録化と進歩しつつある<sup>3)</sup>。いうまでもなく電氣化學的な研究は必ずしも増幅器によらねばならないということではなく、入力インピーダンスの大きいものは静電型電壓計、微少電壓にはアイントーフエン絨線流計、或は電位差計を用いれば解決されるのであるが、時々刻々入力の変る現象、たとえば電位滴定、電導度滴定、ポーログラフ法などではとても追いついて測定できない。それで連続して測定しかつ記録させるパワーを出させるために増幅器が必要となつてくる。これらの自動装置の記録計を分類すると次の二つになる。その一つは上に述べた入力現象を増幅して記録電流計に書かせるものであり、他の一つは記録電位差計によるものである。前者は必然的に真空管増幅器(ほとんどすべてが直流増幅器)を必要とするから増幅器そのものに問題が多くなる。すなわち安定度のよいこと、入力と出力との関係が直線的であること、経時變化のなるべく少いことなどが最少限要求される。これに對して後者は真空管増幅器は本質的には必要ではなく機械的に傳達する方式も可能で又たとえ真空管増幅器を使用するとしてもそれは主に交流増幅器であり又差動式であるから増幅器の特性は関係がないという利點をもつている。その他、兩者の特徴缺點を比較して見ると第 1 表のようになる。

第 1 表 二種の記録計の利害得失

比較 條項	真空管増幅器について				被検物	計 器
	必要性	安定度	直線性	経時變化		
種別					インピー ダンス	週期 價格
直流増幅器 と記録電流 計式	必要	重要	重要	なるべく 少く	高くても 可	1 秒 以下 低廉
記録電位差 計式	必ずし もいら ぬ	適當	適當	適當	なるべく 低く	數秒 高價

最近では増幅器に難の少い記録電位差計(差動式)が優位

をしめているが、直流増幅器も入力インピーダンス、週期、利得(gain)において差動式では追従できないものがある。たとえば Rutherford Instrument Co. のポーログラフ装置<sup>4)</sup>、脳波記録装置<sup>5)</sup>、などに利用され成功しているのもそのよい例である。筆者等は寫真材料に用いる微量有機物添加劑の銀電位滴定による研究<sup>26)55)</sup>を行つてゐるが、この電位滴定に用いている装置も直流増幅記録電流計式のものである<sup>6)</sup>のでこの目的の直流増幅器についてしらべた。この報告はこれらの研究をまとめたもので、その特徴をのべると共に筆者等が用いた増幅器を御紹介したものである。

## 2. 蓄電池を電源とする直流増幅器

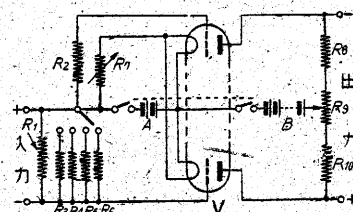
### (1) 専門真空管による方式

今までの研究の多くはこの章に入るもので鉛蓄電池などの起電力が長く一定に保たれる特性を利用したものである。改良されてそれ自身 B 電壓の影響を受け難いものもある。現在でも FP 54, D 96475<sup>7)</sup> などによる微少電流増幅器はすべてこの方式である。これらについては小寺嘉秀氏の總説<sup>8)</sup>を参照されたい。例として鈴木伸氏<sup>9)</sup>の装置があり  $10^{-12}$  A が検出される。

### (2) 實用管による方式

上記の F 54 などの高價なものまでは必要としない増幅に用いられるもので、例えばエーコン管 954 を空間電荷四極管として用いる電壓計が森・富田<sup>10)</sup> 兩氏により發表されている。入力絶縁抵抗は  $10^{12} \sim 10^{13} \Omega$  あるという。又 1G4/GT-G を用い、安定性よく、極性がかえられ交直兩用の電壓計<sup>11)</sup>の記載あり。0~1.75 V, 0~17.5 V に切替えられ入力インピーダンスは一定で 10.11 M $\Omega$  である。

筆者等の製作したものの中、自記ポーログラフ装置増幅器の初段電流増幅器は UZ 30 MC をバランス式に用いたものでこの分類に入る。電壓増幅度は約 6 倍である。第 1 圖がその配線圖である。A, B 電源とも



第 1 圖

乾電池を用ひるのであるがA電池の消耗が後段増幅器をつないだ時や、影響していることがわかる。本器だけならば問題はない。A電池を鉛蓄電池にすれば超安定になるであろうが絶縁と移動性がむづかしくなるであろう。

### 3. 交流 100 V を電源とする直流増幅器

交流を電源とする方式は實用を主にしているのであつて、これを用いる増幅器は極めて微少な電壓、電流の測定には向かない。しかし電気化学で測定される最少値は電壓では數 mV、電流では數  $\mu$ A のものがほとんどであるから、この程度のもは保守煩雜、移動困難、又しばしば絶縁不良の問題を起す鉛蓄電池を用いる増幅器よりは本方式の方が全く安直便利で實用性が大きいのである。しかしながら交流電源の電壓の変動、サイクルの変動などは増幅器、殊に直流増幅器に致命的な打撃を与えるのである。これがために直流増幅器は嫌われていると思う。しかし多くの研究がこの困難をのりこえて安定なものゝ報告されつゝある。

増幅器の安定性を A, B 兩電源が入力側の電壓などに影響されないようにした安定器に求めるものと、増幅器自身の平衡に求めるものとある。兩者を組合せれば超安定なものとなるのはもちろんである。

#### (1) 電壓安定器

現在知られている方法として、飽和鐵心を利用したもの、真空管を利用したもの、定電壓放電管を使用したもの、安定抵抗管を使用したもの、以上4種類があげられる。これら安定法の精細は總説<sup>12,13)</sup>にまつこととする。安定抵抗管による方式は簡単なノート<sup>14)</sup>がある。真空管式安定器は野村、中村兩氏の研究<sup>15)</sup>がある。

筆者等は増幅器自身の平衡を主にしているので簡単にマツダの電壓安定器(飽和鐵心)を用いてすましてはこれだけではやゝ不満足という結果を得ているので、以上のような安定法のいくつかを合併した方式が理想と考えている。

#### (2) 安定性を真空管の同一特性に求める方式

全く同一特性の真空管をホイートストン電橋の兩腕に入れば零點變動は起らない理である、全く同一というものは絶無に近いからこの方式では大したものではないが、選出次第で實用になるものができる。

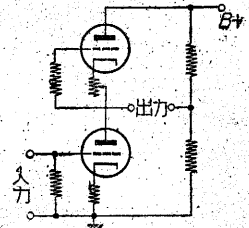
i) ブリッジ式 最も典型的なものは大森氏<sup>16)</sup>のもので作り方が記載されている。又ほとんど同様なものが高橋氏<sup>17)</sup>の報告にある。筆者等<sup>18)</sup>もほとんど同様なものを作つて発表した。回路は文献(16)と類似である。

UN 954, 2 本によるブリッジ式のもは岸川氏<sup>19)</sup>の研究がある。以上の真空管電壓計は電流計として 100  $\mu$ A, 200  $\mu$ A 計を用いて全目盛で 0.5~1V が最高感度である。電流計は小型のパネル用で結構で、これ以上の精密級電流計にとりかえても指示變動が目立つようになり

何等精度向上に貢献しない。精密級電流計を用いるには直流増幅器を改良する必要がある。文献(18)の増幅器は電源状態が極めて悪いとパネル用電流計でも指示變動が大で、電池化してしまつた例<sup>20)</sup>である。

A, B 電源を真空管式で極めて安定にしておいでブリッジを數段組合せた利得の高い生物學實驗用の増幅器<sup>21)</sup>が報告されている。

ii) 直列補償式 本方式の基本回路は第2圖のようである。i) では第1圖のようにホイートストンブリッジの左右の腕に真空管が入るのに対して上下の腕に入るのである。これも特性が全く同一ならばフィラメントのエミシヨンを接觸電位差の變化を除くことができる。この式では工夫すると<sup>22)</sup> 數段組合せても出力側をアースと同電位にすることができるが負饋還(Negative feed back)のために感度が低い。一段だけならば容易に用いられる。カソードフォロアにして直接記録装置や指示装置を動作できる<sup>22)</sup>。



第2圖

筆者等も 6C6, 76, 6ZDH3, 42 など各2本ずつ用いた直流増幅器を作つたが一段で成功しても多段式では變動多く失敗した経験がある。

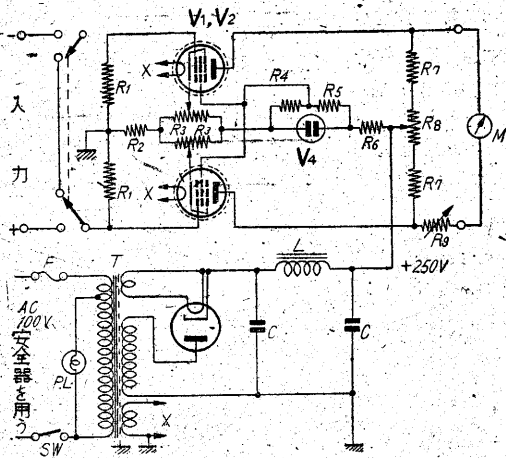
iii) ブリッジ・直列合併式 前記 i), ii) の特徴を入れたもので4本の 6C6 を2本ずつ直列式で平衡させその出力を2本の 38 のブリッジ式で増幅する平衡を徹底的に利用した直流増幅器が霧田氏<sup>23)</sup>により發表された。本器は最低 30  $\mu$ V が測れるという驚異的なもので、Horton 氏<sup>24)</sup>の回路のブリッジ化をはかつたものである。

#### (3) 強制的に平衡させる方式

増幅率平衡式はこれに屬する。ブリッジ式では同一特性の真空管にたよるのであるが、多少の差を強制的に平衡させるのがこの方法である。増幅率平衡とは

$$\mu = \left( -\frac{dE_p}{dE_g} \right) I_p$$

(ただし  $\mu$  は増幅率、 $I_p$  は陽極電流、 $E_p$  は陽極電壓、 $E_g$  は格子電壓) を利用したもので  $-(dE_p/dE_g) = \mu$  にしておけば  $I_p$  一定という理であつて Harnwell と Voorhis 兩氏<sup>7)</sup>により述べられている。この方法は真空管1本でもよいわけで、この式は別名レフレックス真空管電壓計<sup>25)</sup>と稱せられ測定範囲は 5V 位のものが安定にできる。しかもつと感度のよいものは二つ組合せてブリッジにし安定度を上げることにより達成される。筆者等<sup>26)</sup>はこの方式で全目盛で 0.3V、直線性の極めて優れた電壓計を作り實用化している。その回路を第3圖に示した。



抵抗で特にことわらぬものは 1/2~1W

- $R_1=10\text{ M}\Omega$
- $R_2=20\ \Omega$
- $R_3=100\ \Omega$  バリオーーム
- $R_4=10\text{ k}\Omega$  (1W)
- $R_5=4\text{ k}\Omega$
- $R_6=3\text{ k}\Omega$
- $R_7=10\text{ k}\Omega$
- $T=1$  次 100V, 2 次 300V A.C., 5V A.C., 6.3V A.C. (40W)
- $M=$  横河電機 M.P.S. 12L 型 0.1, 0.3, 1, 3 mA 計
- $R_8=1\text{ k}\Omega$  バリオーーム
- $R_9=2\text{ k}\Omega$  "
- $V_1, V_2=UZ6\text{ C}6$
- $V_3=KX\ 80\text{ HK}$
- $V_4=VRB\ 150/60$
- $L=60\text{ mA}, 30\text{ H}$
- $C=2\ \mu\text{F}$  オイルコンデンサー

第 3 圖

この回路で増幅率平衡をとる方法<sup>7)</sup>は、6C6 の陽極回路に電流計 (1~3 mA 計) を入れ  $E_p$  を変化させても  $I_p$  の変化のないように 100  $\Omega$  の可変抵抗を動かして平衡をとる。同じことを他方の 6C6 でも行う。最後に出力側に電流計 (1 mA 計以下) を入れて  $E_p$  を変化させても電流計に変化のないように 100  $\Omega$  の抵抗をわずかに動かして仕上の調整をする。(陽極回路に入れた電流計などの影響を除くため) このようにするとこの増幅器は極めて安定になる。各 6C6 はそれぞれ平衡がとれるが、特性が異ると平衡時の  $I_p$  が左右で異り  $E_p$  変化に対して弱力となるからなるべくそろつたものの方がよい。また  $E_f$  (フィラメント電圧) を変化させても  $I_p$  が変化したが、この変化分まで含めて平衡をとることができる。たとえば電源電圧が上ると  $E_p, E_f$  が上り  $I_p$  が増すが増幅率平衡を強くかけて変化のあつた時は、 $I_p$  がただちに減少する位にしておくと少し後にエミッションが増大し  $I_p$  を、決められた一定値にすることができる。これらはなれば大した苦勞をしないで平衡をとることができる。本増幅器の性能は横河電機の MPS 12L 型電流計の 100  $\mu\text{A}$ , 300  $\mu\text{A}$ , 1 mA, 3 mA, の各範囲を用いて全目盛で約 100 mV, 約 300 mV, 約 1V, 約 3V, とかえられる。精確には各箇に補正すればよい。電流計の読みと電圧とは極めてよい直線関係でその函数関係は四範囲に共通であつた。電位差 0.5V の電池を測定する時流れる電流は入力抵抗が 20 M $\Omega$  であるから  $2.5 \times 10^{-8}$  A であり、この大きさはポテンシオメーターの測定時に流

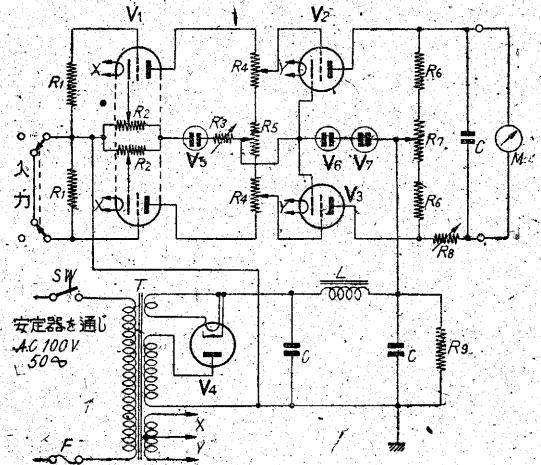
す電流と同程度である。飽和鐵心安定器を通じて零點變動を見ると 100  $\mu\text{A}$  計にした時やゝ目立つが實用にはなる。1 mA, 3 mA 計としたときは指針は全く動かない。それでこの場合では安定器がなくとも實用になる。

この配線で實驗する時は入力側の絶縁、シールドのよいことが要求される。それのでき難い時は入力を兩 6C6 のグリッドに加えず、片方の 6C6 のグリッド(符號-) とアース間に入力を加えれば人體による影響等のふらふらする現象はなくなるが、こうすると電流計と電圧との直線関係がやゝ悪くなるが止むを得ない。(實用上誤差の範囲内である)

やはりこの式で UZ2A6, を 1 本用いたのが Huntton 氏の報告<sup>27)</sup>にある。二極管部と三極管部で平衡させるのであるから大體が無理で、筆者等はこれを追試して失敗した。現在では優秀な双三極管 6SL7GT があるからこれを用いるべきである。絶縁抵抗向上のためグリッドがガラス上部に出ているものを特にえらぶならば第 3 圖の回路、または 6ZDH3, 2 本を用いればよい。

6C6, 2 本; 6ZDH3, 2 本; 42, 2 本を用い大體は霧田氏<sup>23)</sup>の回路と近似であるが 6C6, 2 本にはこの増幅率平衡を採用し (1 本の 6C6 と直列に 6ZDH3 が入る) より一層安定性のよいものが馬野氏<sup>28)</sup>により發表された。50  $\mu\text{V}$  の感度を有するといわれる。

次に筆者等は横河電機の KR-1 型 2 mA 記録電流計を用いて熱力學的な電池の起電力を連続記録させるようにした<sup>6)</sup>。この場合は 3 圖のものより感度が高く、出力の大きいことが必要で、そのため 6SL7GT に増幅率平



- $R_1=3\text{ M}\Omega$
- $R_2=100\ \Omega$  バリオーーム
- $R_3=600\ \Omega$  "
- $R_4=50\text{ k}\Omega$  "
- $R_5=20\text{ k}\Omega$  "
- $R_6=10\text{ k}\Omega$
- $R_7=2\text{ k}\Omega$  バリオーーム
- $R_8=5\text{ k}\Omega$  "
- $R_9=1\text{ M}\Omega$
- $V_1=6\text{ SL}7\text{ GT}$
- $V_2, V_3=UY\ 76$
- $V_4=KX\ 80\text{ HK}$
- $V_5=VRD\ 90/50$
- $V_6, V_7=VRB\ 135/60$
- $L=80\text{ mA}, 10\text{ H}$
- $C=4\ \mu\text{F}$ , オイルコンデンサー
- $T=1$  次 100V 40 W 2 次 350V A.C., 5V A.C., 6.3V A.C.  $\times 2$
- $M=$  横河電機 KR-1 型記録電流計 2 mA 内部抵抗 5 k $\Omega$  週期 1 秒

第 4 圖

衡を加えて前段増幅器とし後段は 76 のブリッジ式の直流増幅器を組立てた。その配線圖を第 4 圖にあげる。

本増幅器は 2 mA 記録電流計を全目盛振らせるに要する最少電壓は 400 mV である。入力抵抗は 3 MΩ で第 3 圖の 20 MΩ にくらべて低い。記録電流計については Munch 氏<sup>29)</sup>の小文がある。第 4 圖の装置を飽和鐵心安定器を通して用いると充分使用できる。筆者等はこの増幅器と第 1 圖の増幅器とを結合してペン記録ポラログラフを作つた。<sup>30)</sup>

目下 B 電源を二つ持ち、増幅率平衡を前段、後段ともに備えた超安定な増幅器を検討中で 6 SL 7 GT と 12 SN 7 GT その他を用いる豫定である。

#### (4) その他の直流増幅器

i) 振動容量式電位計<sup>31)32)</sup> 金屬表面などの表面電位を振動する對向電極と組合せて容量を形成し、こゝに發生した交流電流を高抵抗を通じて電壓を生じさせ、これを交流増幅し、たとえば受話器で音を聞き、あらかじめ金屬表面などと對向電極間に加えてあつた電壓を加減して消音點を求め、この時の電壓と符號の反對の電壓が兩極間にあつたというように使う電壓計で、入力インピーダンスが極めて高いから電位計とよばれるのである。本式は原理的に差動式であり、交流増幅器を用いるから零點變動なく、高利得が得られる。この式で自記するには自記ポテンシオメーターを用いるのが最も理想的で、Kraus 氏および二氏の研究<sup>33)</sup>があり Brown 會社製の自記ポテンシオメーターを用い入力インピーダンスは  $10^{12} \Omega$  あつても容易に測定できるといふ。

ii) 逆真空管電壓計 真空管の陽極を負に、陰極を正にして入力を加えるのであつて、たとえば UY807 を用いてスクリーングリッドはアース、陰極はアースに對して正のバイアス電壓を持たせたものでむしろ高電壓(數 10 キロボルトまで)向きである。しかし石井氏<sup>34)</sup>は 30  $\mu$ A 計を用い全目盛で 4 V のものを發表されており、入力インピーダンスは  $10^8 \Omega$  あるといふ。本式は前記 i) 同様原理的に入力インピーダンスが非常に大きく、特に入力電壓が大きくなる程大きくなるのが特徴で、たとえば全目盛で 70 V 用のものは  $10^{10} \Omega$  以上あるといふ。たゞ  $I_p$  が原理的に少いので後段増幅器なしでは自記できない。

iii) 一度交流に變調して交流増幅する直流増幅器 増幅すべき直流にて一定の發振電流を變調し、これを交流増幅した後整流する方式<sup>35)</sup>で直結合増幅器より信頼性があるといわれるが、段数が多いので容易とも思われない。増幅度を極めて高くする時は本方式より他に方法はないと思うが、電氣化學の分野では半刀の感が深い。

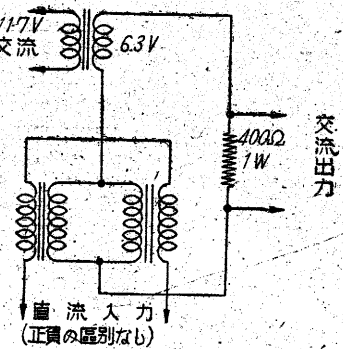
iv) 磁氣増幅器<sup>36)37)</sup> 原理圖は第 5 圖のようなもので飽和リアクターの鐵心が適當な磁氣的性質を持つておれば直流巻線を通じた微少の直流により他の巻線を通

る交流電流をかなり大きく變化させることができる。

これによれば真空管なしでも微少直流を測定できる。

入力インピーダンスが 500  $\Omega$  のもの<sup>38)</sup>が報告されている。増幅する

としても交流増幅が用いられるから、今後の増幅式ポラログラフ用増幅器として考えなければならぬと思われる。



第 5 圖

#### 4. 直流増幅器の電氣化學への應用

これらの直流増幅器が電氣化學のいかなる分野に使われるかを検討しよう。その場合、各種の有機化合物はどのような電氣的測定により分析され得るかを述べた Lykken 氏の總論<sup>39)</sup>は有用なものとなるであろう。

##### (1) 電位差滴定(電位滴定もふくめて)

ほとんどすべてが自記ポテンシオメーター式で多數文献がある<sup>40)41)</sup>。増幅器は筆者等<sup>26)6)</sup>のもの、吉田・服部兩氏<sup>42)</sup>(本増幅器は電導度滴定用にもなる)のもの、Bloom と Butler 兩氏<sup>43)</sup>の装置がある。特にガラス電極用のものもいくつかの研究がある<sup>17)33)44)</sup>。直流増幅器用のガラス電極は抵抗の少ないものがよい(できれば 10 MΩ 以下)が、これには Perley 氏の報告<sup>45)</sup>がある。電位差滴定をマジックアイを用いて<sup>46)47)</sup>當量點でこれがまばたくことを利用し終點を決める装置も安定な直流増幅器を必要とする。又、同期電動機驅動による注射器で滴定液を注入し、終點である一定電位に達した時に電動機の電源を切り、滴定始めからの回転數より分析を行う装置<sup>48)</sup>も主體は直流増幅器である。

##### (2) ポラログラフ、電流滴定装置

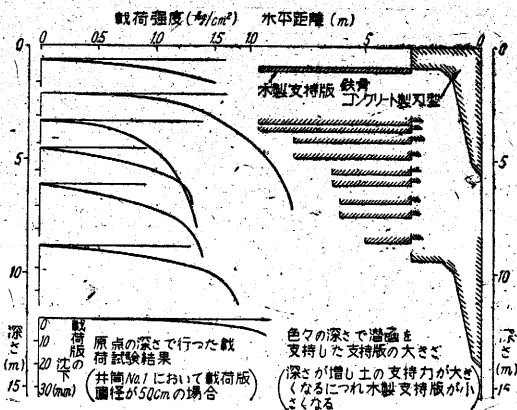
これも多くは自記ポテンシオメーター式で<sup>4)</sup>、中に直流増幅式のものがある。Rutherford 會社のものがそれであることは前に述べた。又ポラログラフ、電流滴定用の増幅器としては筆者等<sup>30)</sup>のもの他、いくつかある<sup>28)49)</sup>。

最近發達しつつある陰極線ポラログラフは直流増幅器その他を巧妙に組合せたもので Snowden, Page 兩氏の報告<sup>50)</sup>がある。微分ポラログラフなど<sup>4)</sup>單なる直流増幅器だけではないが着々と回路の研究が發表されつつある<sup>51)</sup>。

##### (3) 表面電位

振動容量式電位計を用いて金屬表面の銹反應の研究<sup>52)53)</sup>、脂肪酸の金屬面への吸着を扱つた研究<sup>52)</sup>がある。

(50 頁へ續く)



第6圖 載荷試験結果と支持版の大きさ

試験方法の簡易なことでも補うことにより實用性を持たせ得るものと判断される。

上述の豫備調査結果から、前後を通じてほぼ一定重量の潜函を極めて支持力の弱い 3~5m の箇所を通してそれが次第に強くなる深さ 15m 以上に迄(深くなると潜

函外壁と土との摩擦抵抗も次第に大きくなる) 徐々に洗設させる必要がはつきりしたので、これに對應するためには最初の軟弱層に對しては潜函下部周辺の固定した鉄骨コンクリート製双型の内側に取外し可能な木製支持版を設けて支持力を補うことにし、以後土の支持力に應じてこの幅を減じながら沈下を成功させた。この關係を圖示したのが第6圖である。

文 献

(1) 日活國際會館の地盤調査(生研ニュース), 生産研究, 1949年10月號, p. 35  
 (2) 土の載荷試験装置(展示品解説の口繪) 生産研究, 1950年2月號, p. 40  
 (3) 建造物の基礎地盤調査(展示研究事項の解説) 生産研究, 1950年2月號 p. 46  
 (4) 三木五三郎・大井元雄: 日活國際會館と委託研究(口繪), 生産研究, 1951年6月號, pp. 206~207  
 (5) 岡本舜三・末七郎: 建設工事現場に達した歪測定装置の試作, 生産研究 1951年6月號 pp. 224~226  
 (6) 藤本治義編: 「關東の地質」, 1932年  
 (7) 復興局建築部: 「東京及横濱地質調査報告」および「附圖」, 1929年  
 (8) 福田理: 日活國際會館建築場地地質調査報告, 1950年4月  
 (9) 三木五三郎: 新しい東京地下鐵建設工事のための土質調査, 生産研究, 1951年6月號, pp. 220~223  
 (10) 星基和: 土の試験法, 生産研究, 1951年7月號, pp. 249~251

(46 頁から續く)。「電氣化學用直流増幅器」

又金屬の單極電位を測定しようとする試み<sup>31)54)</sup>もある。

以上で大體直流増幅器と電氣化學との關係についてのべた。あやまり或は記載洩れもあると思うがその點は御教示にまつこととして筆をおく次第である。

文 献

(1) 安達直義: 科學朝日 10 No. 5 66~7 及 グラビア (1950)  
 (2) 武内次夫: 化學の領域 4 No. 9 490~7 (1950)  
 (3) 鈴木 信: 同上 4 No. 1 52~9 (1950)  
 品川謙明: 同上 4 No. 10 530~5 (1950)  
 武藤義一: 生産研究 2 No. 6 254~7 (1950)  
 (4) J. J. Lingane: Anal. Chem. 21 No. 1 45~60 (1949)  
 (5) 糸川英夫: 生産研究 2 No. 3 78~84 (1950)  
 (6) 菊池眞一・坂口喜堅: 生産研究 3 No. 4 161~2 (1951)  
 (7) G. P. Harnwell・S. N. Van Voorhis: Rev. Sci. Instr. 5 244 (1934)  
 (8) 小寺嘉秀: 工業物理化學第2輯 163. コロナ社 (1948)  
 (9) 鈴木 伸: 工業化學雜誌 52 No. 3 77~9 (1949)  
 (10) 森大吉郎・富田文治: 生産研究 1 No. 2 63 (1949)  
 (11) R. P. Turner: Radio Television News 日本語版 1 No. 9 36~40 (1950)  
 (12) Fund・Hickmann: Rev. Sci. Instr. 10 No. 1 6~21 (1939)  
 (13) 鈴木 潮: ラジオ技術 3 No. 11 44~7 (1949)  
 (14) 横山 宏: 無線と實驗 35 No. 2 19 (1948)  
 (15) 野村民也・中村純介: 東大生研電氣談話會報告 1 No. 20 (1950)  
 (16) 大森俊一: 電波科學 150 7~10 (1947)  
 (17) 高橋正雄: 電氣化學 18 No. 5 147 (1950)  
 (18) 菊池眞一・坂口喜堅: 日本電氣學會 177 例會にて發表 (1948)  
 菊池眞一・野崎 弘: 生産研究 2 No. 2 グラビア (1950)  
 (19) 岸川 登: ラジオ技術 3 No. 1 30~2 (1949)  
 (20) 古關端夫・東條 英: 日本電氣學會誌 12 No. 4 1~2 (1950)  
 (21) P. O. Bishop・E. J. Harris: Rev. Sci. Instr. 21 No. 4 366~77 (1950)  
 (22) G. A. Korn・T. M. Korn: R. T. N. 日本語版 1 No. 3 50~3 (1950)  
 (23) 霧田光一: 應用物理 18 No. 10~12 合本 (1949)  
 (24) J. W. Horton: Journ. Frank. Inst. 216 749 (1933)  
 (25) M. G. Scroggie: ラジオ技術 4 No. 4 附録 29~33 (1950)  
 (26) 菊池眞一・坂口喜堅: 日本電氣學會誌 13 No. 4 126~131 (1951)  
 (27) R. D. Huntoon: Rev. Sci. Instr. 8 322 (1935)  
 (28) 馬野周二: 電氣化學協會秋季講演會にて (1950)  
 (29) R. H. Munch: Ind. Eng. Chem. June 91A~92A (1949)  
 (30) 菊池眞一・坂口喜堅・木多健一: 日本化學會第4年會に發表 (1951)  
 (31) 小川岩雄: 生産研究 2 No. 3 92~6 (1950)  
 (32) 古賀正三・加賀美幾三・佐藤正一郎: 化學の領域 4 No. 3 162~4 (1950)  
 (33) K. A. Kraus・R. W. Holmberg・C. J. Borkowski: Anal. Chem. 22 No. 2 341 (1950)  
 (34) 石井好隆: 無線と實驗 36 No. 12 24~5 (1949)  
 (35) S. Freedman: R. T. N. 日本語版 1 No. 9 87~9 (1950)  
 (36) R. H. Munch: Ind. Eng. Chem. 42 No. 9 (1950)  
 (37) P. M. Kintner・G. H. Flett: R. T. N. 日本語版 2 No. 1 32~5 (1951)  
 (38) J. Kauke: 同上 2 No. 1 78~80 (1951)  
 (39) L. Lykken: Anal. Chem. 22 No. 3 396~401 (1950)  
 (40) J. J. Lingane: 同上 20 285~92, 797 (1948)  
 (41) R. H. Munch: Ind. Eng. Chem. 42 No. 5 61A~62A (1950)  
 (42) 吉田 忠・服部 裕: 工業化學雜誌 53 No. 3 103~5 (1950)  
 (43) H. Bloem・G. W. Butler: Rev. Sci. Instr. 21 No. 4 (1950)  
 (44) 岡田辰三・西 朋大: 電氣化學 11 441 (1942)  
 (45) G. A. Perley: Anal. Chem. 21 391, 394, 559, (1949)  
 (46) C. D. Mckinney・R. T. Hall: Ind. Eng. Chem. Anal. Ed. 15 460~2 (1943)  
 (47) R. Kieselbach: Anal. Chem. 21 No. 11 1578~9 (1949)  
 (48) R. H. Munch・J. J. Lingane: Anal. Chem. 20 No. 9 795~7 (1948)  
 (49) P. Delahay: Anal. Chem. 21 No. 11 1425~6 (1949)  
 (50) F. C. Snowden・H. T. Page: 同上 22 No. 8 969~81 (1950)  
 (51) C. A. 44 No. 20. 10月25日號, 電氣化學の項. [J. Heyrovsky Chem. Listy 43, 149~54 (1949)]  
 (52) 古賀正三・加賀美幾三: 應用物理 17 No. 7 197~202 (1948)  
 (53) 古賀正三: 科學 19 No. 12 563~4  
 (54) 小川岩雄・辻 泰: 生産研究 2 No. 2 56 (1950)  
 (55) 菊池眞一・坂口喜堅: 日本電氣學會誌 12 No. 4 3~7 (1950)