

# 振動容量電位計の直読化

中田 一郎・小川 岩雄

振動容量電位計は接触電位差、表面電位、微小電流等の測定装置として重要な役割を演じており、装置の詳細や実用上の諸問題については既に多くの報文<sup>(1)</sup>がありここに繰返す必要はない。しかしその応用面の拡大につれて望ましくなる装置の簡便化の点では種々工夫の余地が残されている。その一つとして行つた電位の直読化に就いては本誌に速報した。既に電位の自記装置は本邦及び諸外国において完成しているので、今更直読化といつても変つたことでもなさそうに見えるが、費用の点や、ポータブルな微小電流積算器等に使用するときには、自記式よりはむしろ手軽な直読化の方が便利になる。われわれは試作後一年余りの使用によりそのような直読回路の種々の特性や使用上注意すべき点を知ることができたので、この機会に解説をかねた報告を行う次第である。

## 原理

第1図に示すように一般に異種の導体の接触するとき、接触電位差が生じ  $AB$  面には正負の電荷が現われる。説明をわかり易くするために  $A$  は  $B$  より仕事函数が小さくて、 $A$  には正、 $B$  には負の電荷が現われているとする。 $AB$  間の容量を  $C$ 、接触電位差を  $V$  とするとき  $AB$  にたまる電荷  $Q$  は  $Q=CV$  により与えられる。ここで両電極のうち  $B$  は固定して  $A$  を  $B$  より遠ざけ、 $C$  を  $(C-\Delta C)$  とすると、 $V$  は変わらないから電極上の電荷は

$$\Delta Q = \Delta C \cdot V$$

できる  $\Delta Q$  だけ減少する。この  $\Delta Q$  は  $AB$  を結ぶ回路を流れるから、ここに電流計を挿するば針が振れるはずである。しかしこの電流は非常に小さく、例えば  $V$  が 1 volt のとき

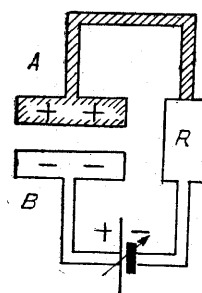
かんたんな位相整流ならびに直流饋還回路を用いて直読化した振動容量電位計は、微小電位差の測定・微小電流の積算などに好適な新装置として賞用され始めている。ここではいろいろの型式の回路の比較、設計・使用に当つて注意すべき点などについてしらべた結果を紹介する。とくに電極駆動を共振周波数附近で行う場合には、位相のゆらぎの除去が重要となることを強調したい。

$C$  が  $1/100$  秒の間にさつと 1 pf 変化しても電流は  $10^{-10}$  amp 程度で、ガルバノメータによつて漸く測定にかかる程度に過ぎない。ところがこの回路に第2図のように 1000 MΩ位の高い抵抗を入れて、その両端の電圧を真空管で増幅すると、 $10^{-12}$  amp は容易に測定しうる。上の式から電流  $i$  は

$$i = \Delta Q / \Delta t = V(\Delta C / \Delta t)$$

となり、 $\Delta C / \Delta t$  がわかれば  $i$  を測定して  $V$  すなわち接触電位差を求めることができる。

しかし一般に  $\Delta C / \Delta t$  や  $i$  を測定するための増幅器の利得を一定に保つことはむづかしいので、これをさける簡便なる方法として零位法を用いる。第3図に示すように



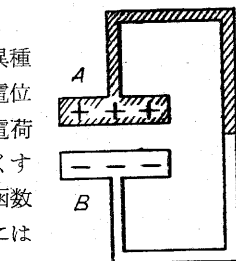
第3図

電位差計を回路に挿入して逆起電力を加え、接触電位差をちょうど打消して  $i$  が 0 となるときの電圧を読めば  $\Delta C / \Delta t$  や利得が変動しても困らない。

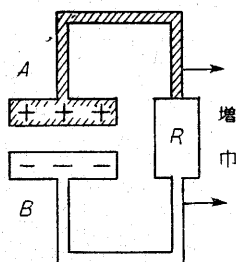
ところで  $A$  電極を電磁石等を使つて数百サイクルで振動させておくことにすれば、普通の交流信号と同様に増幅することができて都合がよい。そこで振動容量電位

計が生れたわけである。この際逆起電力を供給する電位差計としては、扱い易さのために手働式のものが広く使用されるが、これを自動式にすれば測定上大変便利である。

その一つの方法としては、零点以外において現われる信号電圧を適当に整流して直流化し、これを逆起電力として利用することが考えられる。そこで振動容量から出る信号電圧の波形を調べてみる。例えば第3図のように始めに  $A$  が正で  $B$  が負であつたとして、それを電位差計で打消すときに逆起電力をかけすぎると、反対に  $A$  が負で  $B$  が正となつて増幅器に入る交流電圧の位相が  $180^\circ$  ずれる。したがつてこの位相が逆転することを利用して、 $A$  が正のときは負の電圧を、 $A$  が負のときは正の電圧を作り出すような整流方法を工夫して、 $A$  電極にその電圧を饋還すれば、電位が上りすぎると下げ、下



第1図

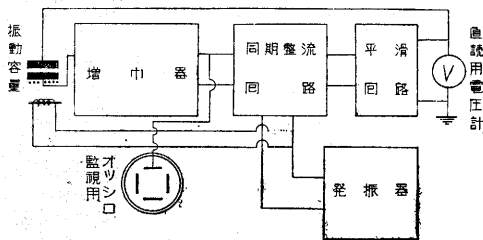


第2図

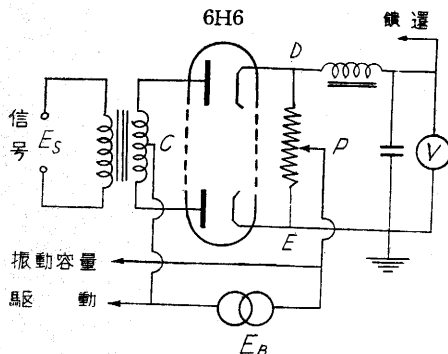
がりすぎると上げるようにして零点を指させることができる。これにはよく知られた方法であるが同じ周波数の交番電圧を適当な位相で重ねる同期整流法<sup>(2)</sup>を利用すればよい。一般の自記式の装置では、この方法で位相モータを動かして自記するとともに電位差計を連動して零点を指させる。

### 同期整流回路

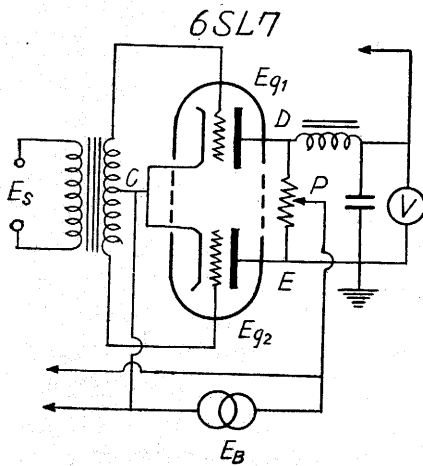
第4図は同期整流回路を組込んだときの全体のブロック・ダイアグラムであつて、第5, 6, 7, 8図に同期整流回路の例を示す。このうちで第6図を使用したときの全体の回路の模様をやや詳しく第9図にかかげる。なお振動



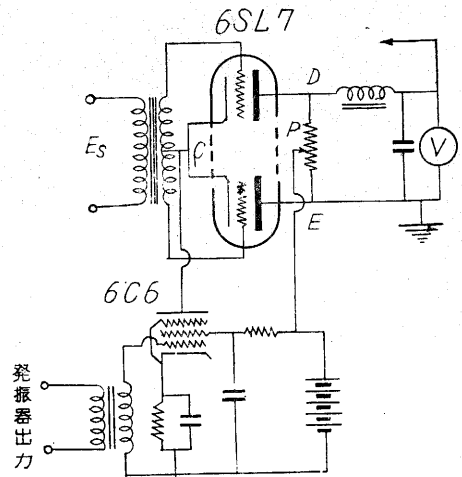
第 4 図



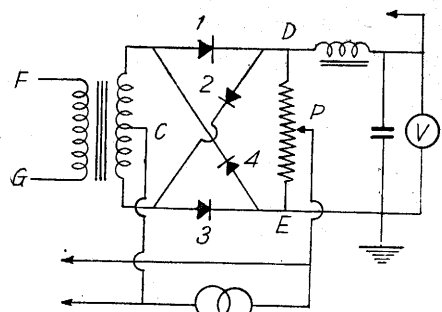
第 5 図



第 6 図



第 7 図



第 8 図

容量電位計は特殊な用途を除いては  $-10V$  から  $+10V$  迄位の逆起電力を用意すれば充分であるので回路もその積りで設計してある。

第6図のものは、格子電圧  $E_g$  を  $\mu E_g$  なる陽極電圧と等価であると考えれば第5図の双二極管の動作に帰着されるので、両者は本質的には同じ型である。説明の都合上第6図のものについて簡単に同期整流の原理を述べる。

まず発振器の出力を二つに分けて、その一つは電力増幅して 6SL7 の脈動 B 電圧  $E_B$  として使用し、他で振動電極を駆動する。振動容量部から増幅されてくる信号電圧  $E_s$  は、中間タップを有する低周波変圧器を通して 6SL7 の二つの格子に逆位相でかける。いま、 $E_B$ 、 $E_s$  はベクトルの同方向で

$$E_B = E_0 \sin \omega t$$

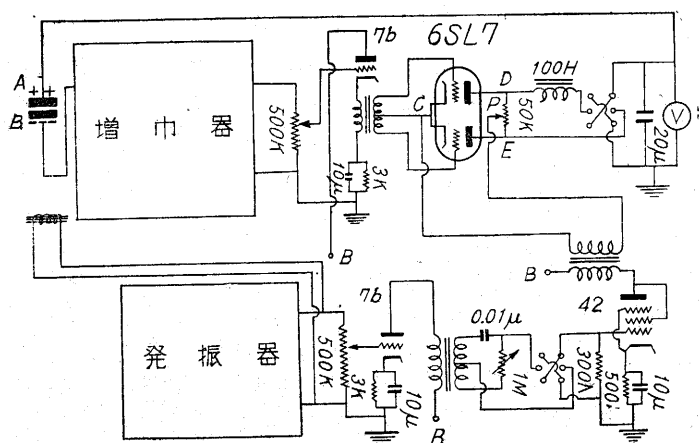
$$E_{g1} = E_{s0} \sin \omega t$$

$$E_{g2} = E_{s0} \sin (\omega t + \pi)$$

で表わされるとする。ただし、 $E_{g1}$  及び  $E_{g2}$  はそれぞれの格子にかかる信号電圧である。この場合には、陽極側が正の半周期には  $E_{g1}$  は常に正で  $E_{g2}$  は負であるから、図の PD 間の電圧降下は常に PE 間の電圧降下より大

きくなるので、平均として  $D$  の電位は  $E$  より低くなる。従つて  $DE$  間に電圧計を入れると、 $E$  が  $D$  に対して正になるように針が振れる。次に信号電圧の位相が逆転すると上の式の  $E_{g1}$  と  $E_{g2}$  の関係が入れ代るから、電流の流れ工合は先と反対になり、 $DE$  間の電圧計も逆に振れる。結局  $DE$  間の電位差は 信号電圧の位相の逆転に対応して正又は負の値をとる。

次にこの回路を組込んである第9図について全体の動作を考えてみる。発振器からの出力の一つは電極  $B$  を



第 9 图

駆動するが、接触電位差のために  $A$  電極は  $B$  電極より高い電位にあるとする。生じた信号電圧は増幅されて  $E_s$  となり  $E_{g1}, E_{g2}$  として二つの格子にかかる。発振器出力から分れた他の一つは、6SL7 の脈動  $B$  電圧  $E_B$  となる。 $E_s$  は種々の理由で位相がずれるから、 $E_B$  は予め移相回路を通して、 $E_s, E_B$  が先に説明したと同じ位相関係をとるようにする。この状態では  $E$  をアース電位とすると  $D$  は負の電位になり、 $LC$  の平滑回路を通過して直流化して  $A$  電極に饋還する。負の電圧が供給されるので、振動容量の接触電位差は次第に打消されて、丁度零点に達するとき信号電圧は消失する。そのとき  $DE$  の電位差は零になるが、平滑回路の  $LC$  のために饋還電圧は零点を通り越す。したがって  $AB$  の正負関係の入れ代りのために、信号電圧の位相は逆転して  $DE$  には逆符号の脈動電圧が現われるから、行き過ぎの饋還を引きもどす方向に働くことになり、指示電圧は示零電圧の上下にハンテイングを起す。平滑が充分のときは電圧計の指針の脈動は別に認められない。

なお、電圧計の内部抵抗は 6SL7 の動作を乱さないために、高くとらなくてはならない。筆者の使用したものは全目盛 5 V で内部抵抗 30 k $\Omega$  のものである。平滑回路には抵抗を用いないで 100 ヘンリーの塞流線輪を使用し、饋還電圧になるべく余裕をもたせている。使用した平滑容量は 20  $\mu$ F のケミコンであるが、饋還電圧が場合

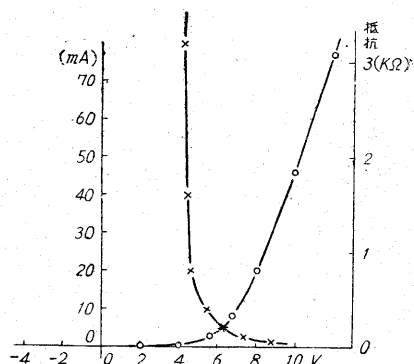
によつて、正にも負にもなるから、極性の関係上電圧計とともに切換えて使用している。

以上で第6図の同期整流回路による直読方式を説明した。一般に使用されている自記式の装置では、先にも述べたように電位差計を連動して常に零点に保つ方法をとっているが、上に述べた直読法では零点に留る事はできず、示零電圧の上下に脈動する動的平衡状態を保つことになる。

残りの第7,8図の回路について簡単な説明を加える。

第7図は 6C6 の内部抵抗を  $E_s$  と同期して変えることにより、二つの三極管の一方にのみ大部分の電流を流すようにして  $DE$  の電位差を作る。これは  $E_B$  のための電力増幅を必要としない点はすぐれているが、アースの点が特殊なために外の回路とは別の  $B$  電圧を必要とする。

第8図は、真空管を使用しない点で以上のものと異つてみえるが、整流器の正方向の抵抗が電圧によつて変化する性質を利用して、電流を流れ易くしたり、流れにくくしたりする点で原理的には同じである。この回路では整流器の正方向の電圧抵抗特性を有効に使わなければならない。筆者は 100 V 用のセレン整流器を四等分したもので試した。整流特性は第10図に示してあり、四個とも大体揃つていて、5 V 辺りか



第 10 回 図

—○— 電源器の電壓——電流振性  
—×— 電壓——抵抗特性

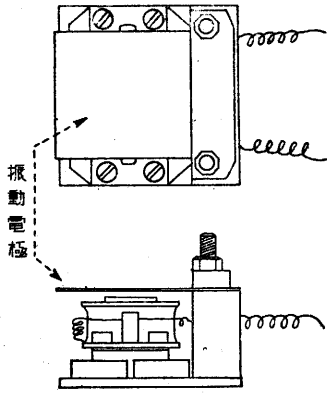
ら急に電流が増加し出すので、有効な動作範囲は大体  $\pm 4V$  である。この回路では発振器からの交流は信号のないときには、上下に分れて対称的に流れるから  $DE$  には電圧を生じないが、振動容量部からの信号電圧が、 $FG$  に加わると、(1, 2) 又は (3, 4) の抵抗が交互に下るので、発振器からの電流は上下非対称に流れることになって、 $DE$  に脈動電圧をつくる。

以上同期整流回路の動作を二、三の例について説明した。実用上はいろいろ変形したものが用いられている。

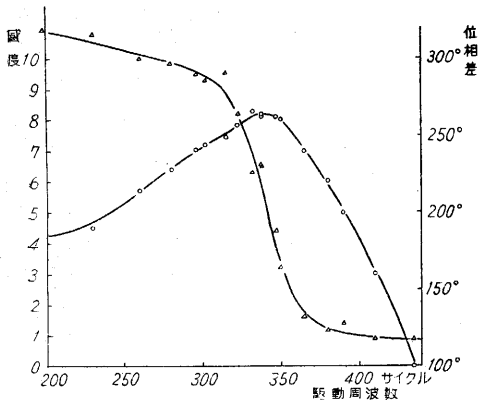
が、原理的にはすべて同様である。なお、使用の際に起る種々の問題の要点を以下に述べる。

### 位相について

信号電圧  $E_s$  と発振器出力  $E_B$  を重ねるとき、位相を適当に調節して、 $E_s$  と  $E_B$  がベクトルの同一方向をとつてくれることが望ましい。実際に調べてみると、なかなかピッタリ重ならない。その原因として考えられるものは、増幅器を通過する際の位相のずれと、振動電極の機械的振動とその駆動電圧の間に必然的に伴う位相のずれとである。このうち前者は結合の  $CR$  を充分大きくとれば、ほとんど問題にならないが、後者は共振点の附近においては特に著しい。第 11 図に示す駆動方式の振動電極に



第 11 図



第 12 図

- △— 駆動電圧と電極の機械的振動の間の位相差
- 電位計の感度、縦軸の目盛は感度の高さを表わすが値には意味がない

ついて、感度と位相差を調べると第 12 図に示す結果がえられた。駆動は受話器用の電磁石を使用し、振動電極はハムの除去をかねて広い鉄板を用いた。共振点は 340 サイクルにあり、ここを境にして位相が急に逆転している。第 12 図の感度曲線からわかるように、感度の最も高いところで位相の変化が最も大きいのであるから、位相を問題とする同期整流方式としては一つの厄介な問題である。しかし質のよい発振器を使えば周波数の変動は小さいので、半日乃至一日の実験では大した心配はいらないが、全然調節しないで何年も使用しようとするとき

には困る。このような場合は感度は相当低下しても共振点を避けるのが常識であろう。

なお位相とは関係ないが、駆動に軟鉄電磁石を使用するとき、機械的振動は駆動周波数の 2 倍になるから同期整流できなくなるので、この場合は必ず受話器用電磁石のように、剛磁石を併用しなくてはならない。

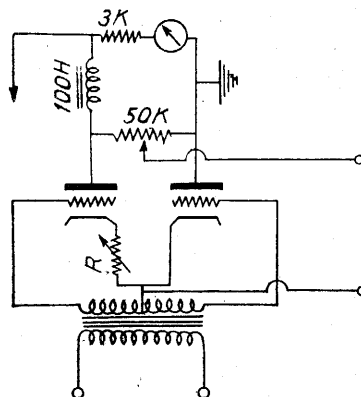
### 雑音

一般に振動容量電位計は直流電圧を交流電圧に変換するときの変換率がたかだか 0.1 程度の小さい値を取るため、 $100 \mu V$  の感度を得るためには  $10 \mu V$  以下の信号電圧を増幅しなくてはならない。ところがそのような小さい電圧を扱うときには、高い入力インピーダンスを使っているために初段管での熱雑音及び散射雑音が問題になる。雑音の大きさを調べてみると、入力インピーダンスが  $100 M\Omega$  のとき熱雑音は  $20 \mu V$  程度、散射雑音は格子電流を  $10^{-10}$  amp として  $5 \mu V$  程度になるから、 $10 \mu V$  以下の信号電圧を増幅することはむづかしい。同期整流回路を使用する場合には、平滑回路の時定数を大きくとれば信号に重なってくる雑音は平均されて大体零になるので直読の電圧計には感じないはずであるが、実際には真空管の飽和のために信号及び雑音波形が矩形波形的になつていて、 $CR$  を通して平均しても、雑音を完全に消すことはできない。従つて増幅器には双 T 濾波回路を挿入して、予め雑音をできるだけ落している。

### 双三極管の特性について

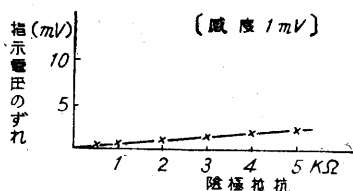
同期整流に使用する双三極または双二極管の左右の動作はいずれも対称で、信号電圧の位相が逆転した場合には両方の真空管の働きが全く同じ様に入れ替ることが望ましい。しかし実際には全く特性の揃つたものを得ることはできないわけであるので、示零電圧の附近のハンテイングにおいては優劣を生ずるために指示電圧は示零電圧より、いずれかにずれる。その影響を調べておくこと

が必要であるので、第 13 図のように、一方の陰極回路に抵抗を挿入して両者の特性を不揃にして読みがどの程度変わるかをみた。6SL7 についての結果を第 14 図に示す。感度は  $1 mV$ 。横軸は一方の陰極回路に挿入し



第 13 図

た抵抗値で縦軸は指示電圧の変化である。4k $\Omega$ を挿入してようやく2mVのずれであるので、特性の不揃いは余り問題にならないことがわかる。



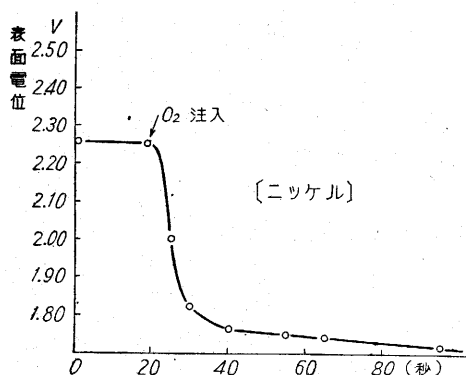
第 14 図

以上により振動容量電位計の直読化についての要点を述べたが、筆者の使用中的ものは、零点の波形は電位差計によるものと同程度で、指示に要する時間は3~4秒である。

#### 測定の実例：金属蒸着面の表面電位の時間的变化

新鮮な金属面は多くの報告が示すように可成り速かに酸素・水素等の気体を吸着するが、この際気体によつては金属面に吸着する単原子層が表面電位を1V程度もかえるので、振動容量電位計によつてこの変化を1mV程度迄読めば、単原子層の $1/1000$ 程度迄の挙動がうかがえるわけで、表面現象の研究上甚だ重要なインフォメーションとなる。

この急速な変化を追いかける際には直読式はなかなか便利であつて、ここにはその例としてニッケルを第15図に、亜鉛を第16図に示す。蒸着後の新鮮面に1mm

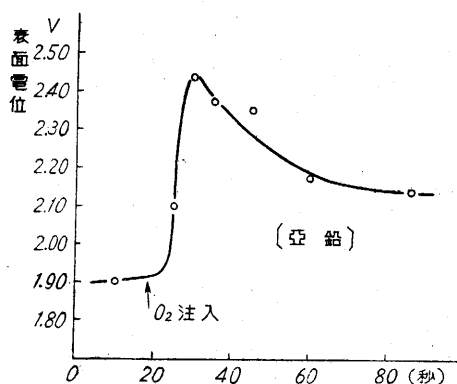


第 15 図

ニッケル蒸着面に酸素を注入したときの表面電位の時間的变化

Hg 程度の酸素を注入するとき、いずれも2~3分で大体的変化を終る<sup>(3)</sup>。最初の変化は速かで、殊に亜鉛の場合には手動式では到底追いつけない。

なお、この直読方式は古賀氏<sup>(4)</sup>のもつてPHメーターに用いられており、同期整流回路自体は各方面において使用されていて、自動制御をはじめ、歪計、真空漏洩検出器等枚挙にいとまがない。



第 16 図

亜鉛の蒸着面に酸素を注入したときの表面電位の時間的变化

#### 結語

以上詳しく説明したように、振動容量電位計はかんたんな同期整流及び直流饋還回路を用いることによつて、容易に直読化することができるが、その際次の二、三の点に注意しなければならない。

- i) 駆動用交流電圧と機械的振動との間の位相差が共振点の前後で急激に変わる。
- ii) 同期整流回路は雑音の濫波にも役立っているが、増幅器中で雑音を減らしておく方が、動作は滑らかである。
- iii) 双二極及び三極管の左右の特性は、ある程度までは不揃いでもよい。

このような考慮のもとに、すぐれた新鋭測定器としての電位計が続々と製作され、研究用としてはもちろん広く工業諸分野に活用されるよう衷心より期待している。

終りに、有益な助言を賜つた第一部鳥飼安生助教授、第三部沢井研究室、鴨井章氏、及び金属蒸着膜の表面電位測定については、協同実験者、道家忠義氏に厚く謝意を表する。(1953.1.27)

#### 文 献

- (1) H. Palevsky, R. K. Swank & R. Grenchik: Rev. Sci. Instr. **18** 298~314 (1947)  
S. A. Scherbatskoy, T. H. Gilmartin & G. Swift: Rev. Sci. Instr. **18** 415~421 (1947)  
古賀正三・加賀美幾三: 応用物理 **17** 197~202 (1948)  
小川岩雄: 応用物理 **19** 189~198 (1950)
- (2) H. Palevsky, et al: ibid.  
Scherbatskoy, et al: ibid.  
中田一郎・小川岩雄: 生産研究 **4** 97 (1952)  
内田光雄・吉谷豊: 応用物理 **21** 323~324 (1952)
- (3) 小川岩雄・道家忠義・中田一郎: 応用物理 **21** 223~224 (1952)
- (4) 古賀正三・吉谷豊・内田光雄: 応用物理学会講演会 1952年4月