

# 振動容量形直流増幅器とその応用

## Vibrating Condenser Type D. C. Amplifiers and Their Applications

内 海 由 春\* 阿 部 善 右 工 門\*\*  
Yoshiharu Utsumi Zen'emom Abe

### 内 容 梗 概

振動容量形直流増幅器は入力抵抗がきわめて高く、ドリフトの少ない増幅器であって、理化学機器などに多くの応用分野を持つ。増幅器の性能は直交変換素子の振動容量の特性と回路設計によって決定される。ドリフトおよび残留電圧は振動容量を形成する電極の表面状態に関係し、電極には通常純銀メッキまたは銀蒸着を施し、乾燥空気または不活性ガス中に封入する。基礎的検討の結果、三種の振動容量を完成した。回路設計では変調回路定数を雑音レベルの検討の結果から選定した。また直結形直流増幅器との組合せ増幅器により広帯域増幅器を得た。これらは電位測定または微小電流測定用として pH メータ、質量分析計、放射線測定器などに応用されている。

### 1. 緒 言

振動容量形直流増幅器は一種の直交変換形増幅器であって、高入力抵抗、低ドリフト、高電流感度という特長があり、特に理化学機器用の増幅器として広い応用分野がある。直流増幅器全般あるいは微小な電荷、電位、電流などを測定するに適した増幅器、いわゆる増幅形電位計については種々述べられているが<sup>(1)~(3)</sup>、本報では日立製作所における振動容量形増幅器研究の概要とその応用例について報告する。

最近の増幅形電位計には、電位計管によるもの、振動容量形、チョップ変調形および半導体素子によるものがあるが、この増幅器は電流感度、電荷感度の点で最もすぐれており、ドリフトも振動容量形直交変換素子の製作技術によっては十分低い値に押えることができる。

振動容量形電位計は本来、表面電位計として Zisman 氏<sup>(4)</sup>により考案され、Palevsky 氏ら<sup>(5)(6)</sup>の研究によって、高入力抵抗の直交変換形直流増幅器として実用化された。第1図の基本変調回路において、振動容量  $C_v(t)$  を

$$C_v(t) = C_0 + C_1 \sin \omega_0 t \dots\dots\dots (1)$$

とすると、変調出力  $e_o(t)$  は定常状態において

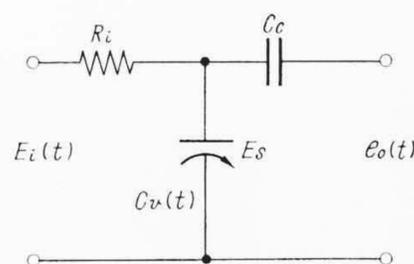
$$e_o(t) = \{E_i(t) + E_s\} \left\{ \frac{\omega T}{\sqrt{1 + \omega^2 T^2}} \frac{C_1}{C_0} \sin(\omega t + \phi_1) + \frac{\omega^2 T^2}{\sqrt{(1 + \omega^2 T^2)(1 + 4\omega^2 T^2)}} \left(\frac{C_1}{C_0}\right)^2 \sin(2\omega t + \phi_2) + \dots\dots \right\} \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{ここに } \phi_1 = \tan^{-1}(1/\omega T_0)$$

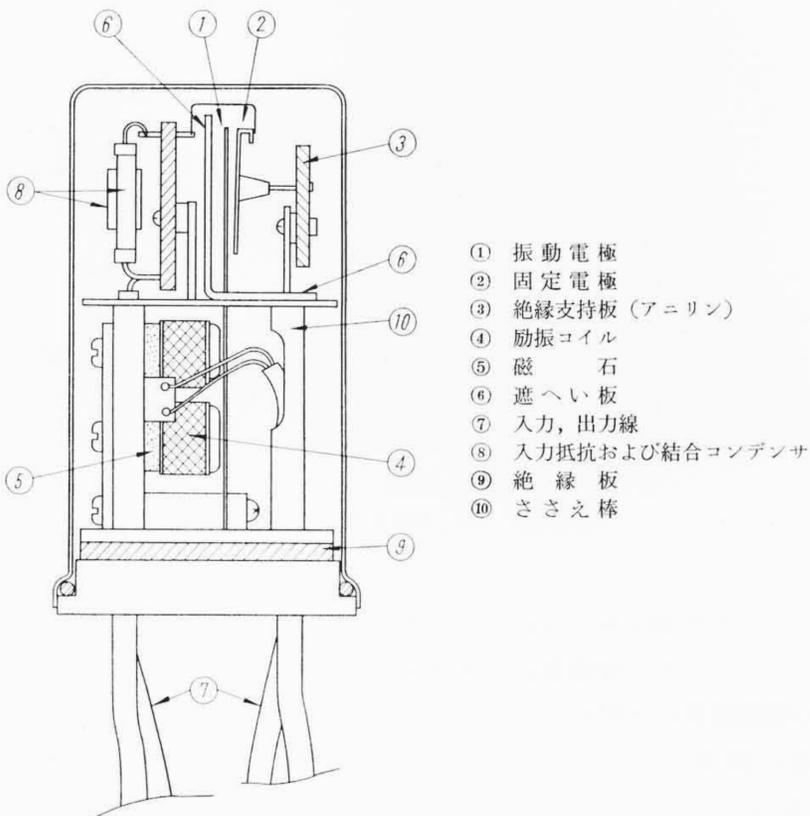
$$\phi_2 = \tan^{-1}(1/\omega T_0) - \tan^{-1}(1/2\omega T_0)$$

と表わされる。ただし、ここで  $E_i(t)$  は入力電圧で、その周波数成分は変調再周波数  $\omega_0$  および  $1/R_i C_0$  に比べて十分低いものとする。 $E_s$  は振動容量の表面電位差、 $T = R_i C_0$  である。 $C_1/C_0$  を励振率、入力電圧と変調出力電圧のそれぞれの変化分の比を変調率  $\eta$  で表わす。この変調回路が機械的チョップの場合と本質的に異なる点は無接触であること、信号源からの電気エネルギーをほとんど要しない点であって、本来高入力抵抗であり、振動容量の絶縁抵抗を  $10^{15} \Omega$  程度に高めることができるのである。

さて振動容量形増幅器においては直交変換素子としての振動容量の特性および回路設計の両者によってその性能が決定される。これらについて次に述べる。



第1図 基本変調回路



第2図 振動容量の構造例(a)

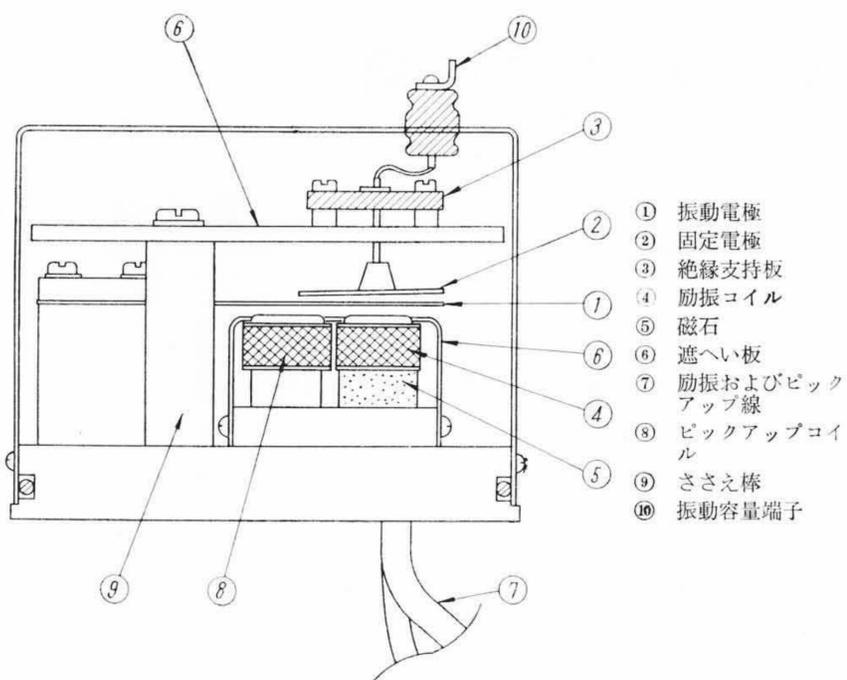
### 2. 直交変換器としての振動容量の特性

#### 2.1 振動容量の機械的構造

振動容量は高インピーダンス回路に接続して静電的に変調を行なうものであるから、励振回路からの誘導、振動、電極近傍の不安定電界を十分除去するとともに、直流増幅器としてのドリフトの原因である表面電位差を極力一定に保ちうるように(後述)密閉された構造とするのが普通である。第2、3図にその例を示す。これらの例はバイブレーショングリード形である。電極の近傍に電界を乱す物体があればその影響を受け、これを第3電極効果<sup>(7)</sup>と言っている。特に第3物体の表面が不良導体であるもの、絶縁物、絶縁されて浮いている導体などであれば、これらの電位は不安定であるから

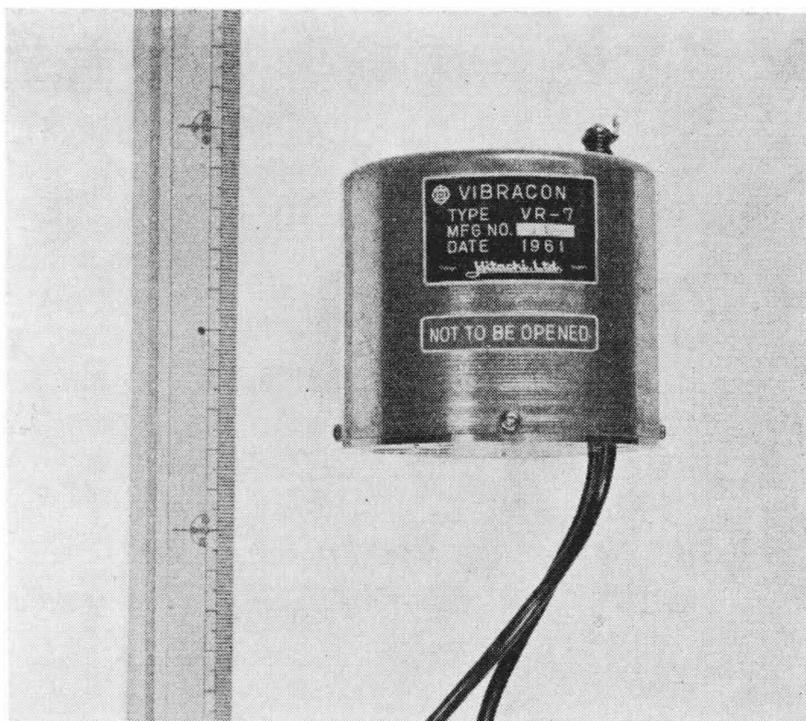
\* 日立製作所那珂工場

\*\* 日立製作所中央研究所 工博



- ① 振動電極
- ② 固定電極
- ③ 絶縁支持板
- ④ 励振コイル
- ⑤ 磁石
- ⑥ 遮へい板
- ⑦ 励振およびピックアップ線
- ⑧ ピックアップコイル
- ⑨ ささえ棒
- ⑩ 振動容量端子

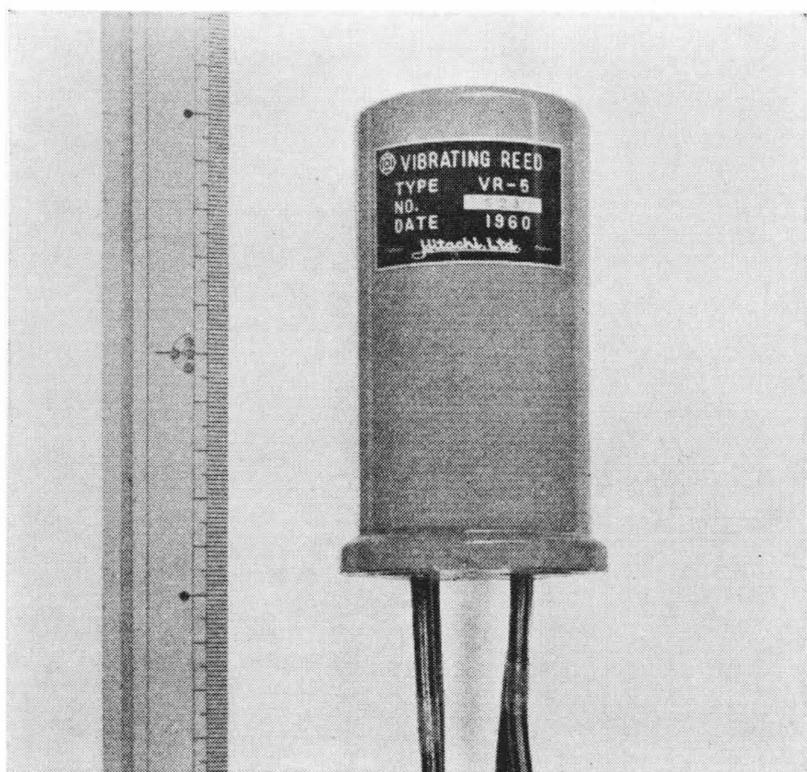
第 3 図 振動容量の構造例 (b)



第 5 図 VR-7 形振動容量増幅器外観  
(励振電圧 8 V, 周波数 380 c/s)

第 1 表 ドリフト試験した振動容量の電極処理

No.	1	2	3	4	5	6
表面処理	アルコール洗淨	アルコール洗淨	蒸留水洗淨	蒸留水洗淨	アルコール加熱乾燥	アルコール加熱乾燥
乾燥剤	シリカゲル封入	なし	シリカゲル封入	なし	シリカゲル封入	なし
電極製作法	高級仕上鋼板 0.5 mm 厚, Ni メッキ後 24 K Au メッキ, ケース内密封					



第 4 図 VR-5 形振動容量増幅器外観  
(励振電圧, 6 V, 周波数 50, 60 c/s)

と表わされ、 $\beta \approx 10^{-4}$  程度である。両電極に同種の金属を用いれば温度変化による表面電位差はきわめて小さいはずであるが、実際にはドリフトを生じ、これは純金属としての仕事関数からは定まらず吸着などによる電気二重層の変化とみられる。

励振電圧の変化によるドリフトは、表面電位差に分布<sup>(9)</sup>がある場合に生ずるが、この値は小さい。次に実験結果の数例を示す。

第 1 表は 6 個の異なったプラグイン形振動容量 (VR-7 形, 励振 6.3 V 50 c/s,  $\eta \approx 7 \sim 15\%$ ) の電極処理法および乾燥剤封入の有無を示す。

これらの振動容量による 10,000 時間ドリフトの実験結果は第 6 図のとおりであった。すなわち表面電位差は時間の経過とともに安定し、最初の 1,000 時間に生じたドリフトは以後の 9,000 時間に生じたドリフトにはほぼ等しい。また 4,600 時間以後アルゴンガス封入をした結果、安定性がやや良くなる傾向が認められた。シリカゲルの有無による差は明確でないが、1,000 時間平均ドリフトでは封入しないものの方が少なかった。また加熱乾燥は効果があると判断された。

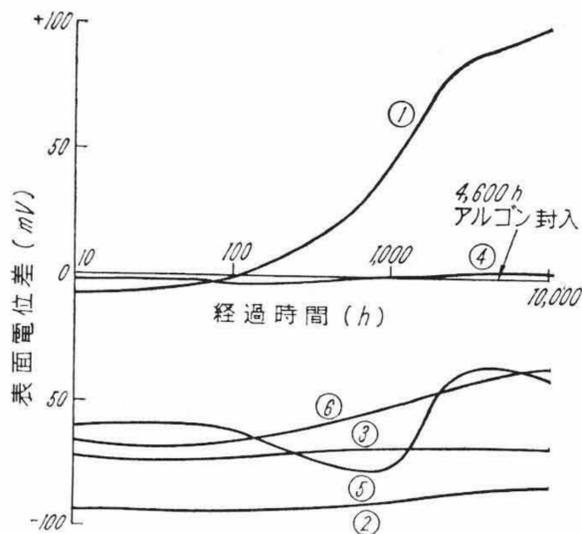
ドリフトや変調波形の乱れとなって現われる。図に示した振動容量では、こうした不安定電位を除去するために、振動容量を形成している電極近傍に空間をつくり、かつ表面が安定で、電極と表面電位の近い純金メッキを施した遮へい板を使用している。他方励振率  $G_1/C_0$  を大きくするように間げきを小さくし、振動容量単体で  $C_0 \approx 30$  pf, 励振率 0.3~0.4 を得ている。第 4, 5 図は変換器の外観写真である。

### 2.2 電極の表面処理とドリフト<sup>(8)</sup>

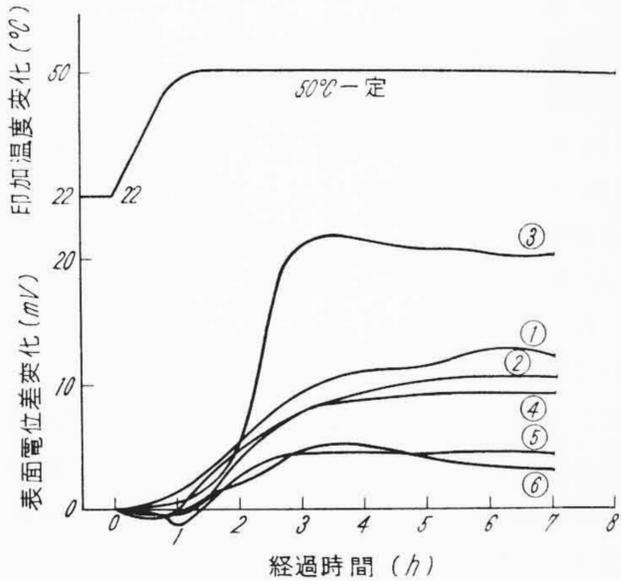
振動容量形直流増幅器のドリフトは、表面電位差の経時変化、温度または湿度による表面電位差の変化および励振振幅の変化による。これらは電極の表面処理に関係する。振動容量電極は通常その表面電位を一定に保つために 24 K 金メッキまたは金蒸着を施すが、この場合でも金の仕事関数 (3.9 eV) とは完全に一致しない。すなわちイオン、原子あるいは分子吸着による電気的三重層を生じ、その経時変化はドリフトとなって現われるから、電極の処理法、動作中のふん囲気は重要である。

また温度変化によるドリフトは、理論的には純金属の仕事関数  $\phi$  がわずかに温度の関数であって

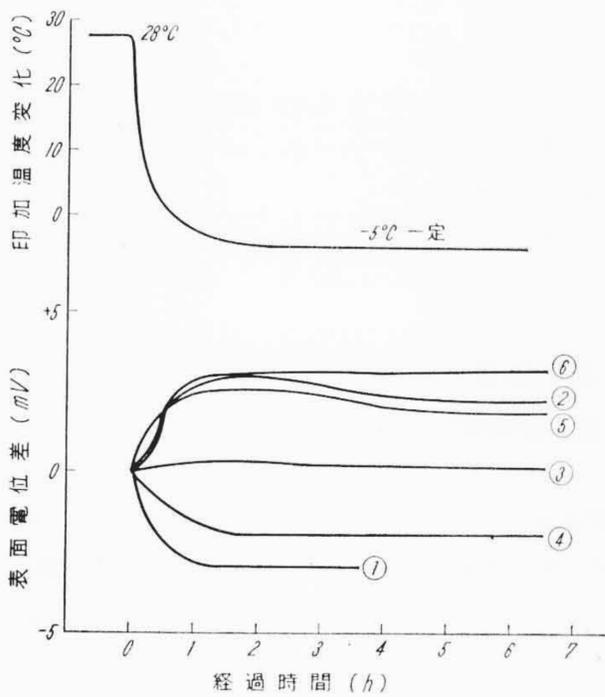
$$\phi(T^\circ K) = \phi(0^\circ K) + \beta T \dots\dots\dots (3)$$



第 6 図 10,000 時間ドリフト試験結果



第7図 温度変化による表面電位差のドリフト (温度上昇時)



第8図 温度変化による表面電位差のドリフト (温度降下時)

また温度変化によるドリフトは第7図および第8図に示すとおりである。温度上昇に際しては約1時間の遅れをもってドリフトを生じた。これらの結果は表面電位差の長期ドリフトや温度係数が電極の表面状態、おかれているふん囲気に密接に関係していることを示しており、実用上最も望ましいのは、純金メッキ後さらに金蒸着を施し、空気などに触れることなく不活性ガス中に封入することであると考えられる。

実験による温度依存性はやはり表面の電気的二重層の変化によるものであり、一定温度変化を与えた後も、ドリフトが若干継続する場合もある。

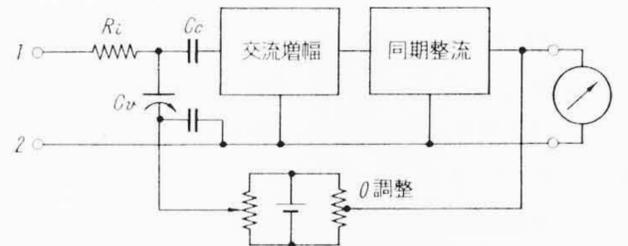
汎用の振動容量としては金メッキ、加熱乾燥、乾燥気中封入で満足すべき値が得られており、表面電位差  $\pm 50$  mV 以下、常温動作ドリフト 1 mV/10h 以下である。

### 2.3 振動容量形変調回路の残留電圧<sup>(10)</sup>

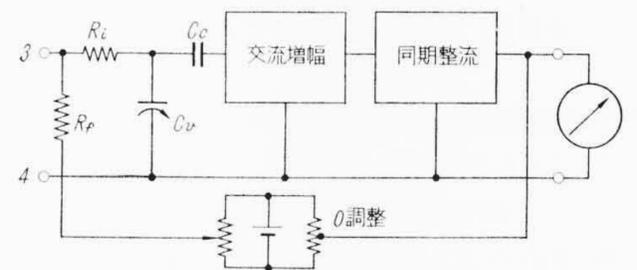
表面電位差に基づく電圧オフセットを打ち消すために、補償電圧を加えた場合、残留電圧が生ずる。これは、増幅回路に選択性を必要とし、また飽和のために最大利得を制限するから、極力小さいことが望ましい。残留電圧は表面電位差が電極面にわたって不均一な場合に生じ、電極各部を微小分割したモデルによる考察の結果、各部に位相差があれば基本波成分および高調波の残留電圧を生じ、通常適切な電極間げきの調整によって、おもに第2高調波からなる電圧のみとなることがわかった。その数値は、前記のような電極処理

第2表 各種振動容量の仕様の大略

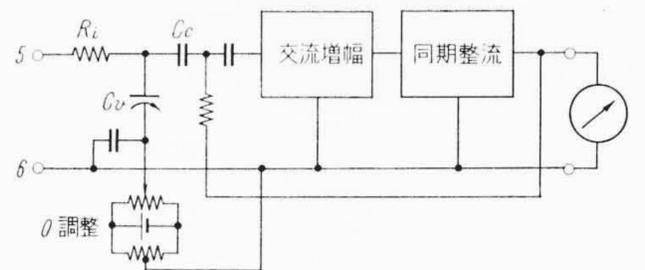
項目	名称	VR-5	VR-6	VR-7
励振		電圧 6.0V 周波数 50 または 60 c/s 電力 0.08W 方式 他励、振動片の共振点を使用せず		8.0V 380 c/s 0.18W ピックアップコイルを持ち、共振周波数で自励発振させる
表面電位差		$< \pm 50$ mV		$< \pm 50$ mV
ドリフト		$< 1$ mV/10時間		$< 1$ mV/10時間
入力抵抗		$> 1 \times 10^{13} \Omega$		$> 1 \times 10^{14} \Omega$
端子形式		リード線形	プラグイン形	固定端子



第9図(a) 振動容量形増幅器の帰還形式



第9図(b) 振動容量形増幅器の帰還形式



第9図(c) 振動容量形増幅器の帰還形式

をした場合、 $10 \sim 50 \mu\text{V}$  程度である。

このほか、振動容量を用いてきわめて高感度の電位計を構成した場合、材質の自然放射係数によるパルス性雑音発生の問題<sup>(3)</sup>もあるが、これは後述する。第2表は現用振動容量の仕様の大略であってVR-5、VR-6 両形は簡易形として、VR-7は高感度または速応形の増幅器用として設計したものである。

## 3. 振動容量形増幅回路の設計

### 3.1 振動容量形増幅器の方式と特長

通常大きなループ利得を持つ帰還増幅器として使用する。帰還の形式により、第9図(a)、(b)に示すものと(a)の変形として(c)がある。(a)では帰還は振動容量の接地側に加える。したがって入出力は同相となるが、(b)の帰還形式ではたがいに逆相となる。(a)方式の入力インピーダンス  $Z_i(j\omega)$  は

$$Z_i(j\omega) = \frac{Z_g'(j\omega)}{[Z_g'(j\omega) / \{1 + G_1(j\omega)\} j\omega C_0] + 1} \approx Z_g'(j\omega) \dots (4)$$

$$\text{ただし } Z_g'(j\omega) / \{1 + G_1(j\omega)\} j\omega C_0 \ll 1 \dots (5)$$

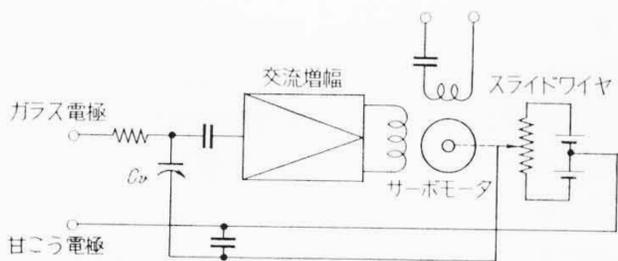
ここで  $Z_g'(j\omega)$ :  $C_0$  を除いた端子1の接地インピーダンス

$C_0$ : (1)式で与えられる振動容量の中心容量

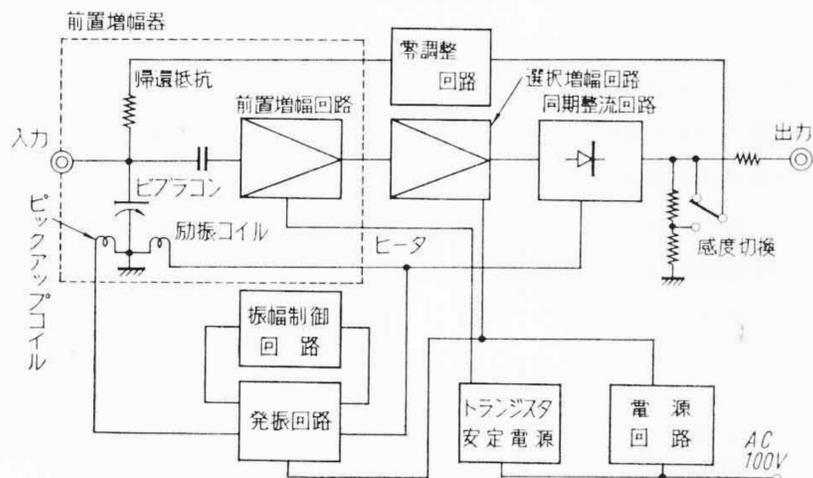
$G_1(j\omega)$ : 変復調を含めた増幅器利得

となり、直流的にはきわめて高い入力抵抗となり、pH計などの電位測定に応用される。(b)では帰還電圧は測定抵抗  $R_f$  を経て振動





第14図 自動平衡形 pH メータの構成



第15図 AU-12 形直流増幅器のブロックダイアグラム

第4表 AU-12 形直流増幅の性能

測定範囲	高感度形 (MODEL AU-12S) $1 \times 10^{-15} \text{ A} \sim 6 \times 10^{-12} \text{ A}$ $1 \times 10^{-14} \text{ A} \sim 6 \times 10^{-11} \text{ A}$ 2レンジ	速応形 (MODEL UA-12R) $1 \times 10^{-14} \text{ A} \sim 6 \times 10^{-11} \text{ A}$ $1 \times 10^{-13} \text{ A} \sim 6 \times 10^{-10} \text{ A}$ 2レンジ
離音レベル(ピーク値)	$1 \times 10^{-15} \text{ A}$	$1 \times 10^{-14} \text{ A}$
応答時間 (98%レスポンス)	2s	0.2s
ドリフト	$< 1 \times 10^{-15} \text{ A} / 10 \text{ 時間}$	$< 1 \times 10^{-14} \text{ A} / 10 \text{ 時間}$
$\alpha$ コンタミネーション	$< 20 \text{ 個/h}$	ほとんど影響なし
測定用高抵抗	$1 \times 10^{12} \Omega$	$1 \times 10^{11} \Omega$
測定精度および再現性	絶対精度は測定用高抵抗の誤差で制限されるが、少なくとも $\pm 10\%$ 以下で、定常動作状態で $0.2\% + 1 \times 10^{-15} \text{ A}$ (速応形では $0.2\% + 1 \times 10^{-14} \text{ A}$ ) よりも良い再現性を有する。	
出力条件	負荷抵抗 $1 \text{ k}\Omega$ 以下(定数変更により $5 \text{ k}\Omega$ まで可能)で、各レンジフルスケールするとき、それぞれ $3 \text{ mA}$ の出力電流を与える。	
所要電力	70VA, 100V $\pm 5\text{V}$ , 50 c/s または 60 c/s	

よる指示誤差が少なく、レコーダを接続すれば長時間の連続記録が可能である。

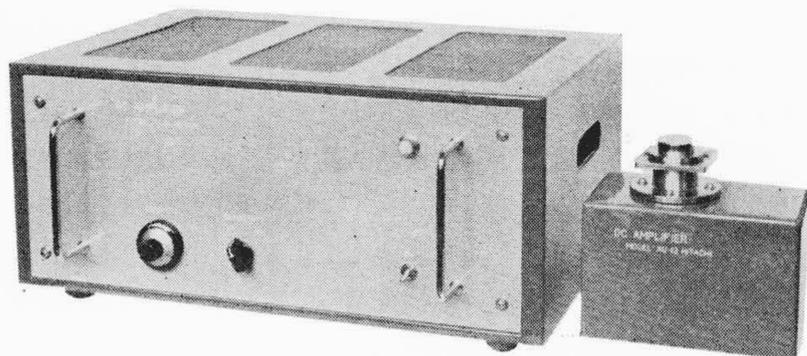
第13図はM-4形pHメータの全回路図であって、ループ利得は約40dBである。他方、日立VKP<sub>33</sub>形pHメータは振動容量を用いた自動平衡形のものであって第14図のような構成を採っている。サーボモータによって駆動されるポテンショメータ接点の電圧は直接振動容量の接地側に帰還され、振動容量両端の電位差が零となる点で平衡に達し、その時のポテンショメータ接点の位置がpHを指示する。使用している振動容量はいずれもVR-5形バイブレーショングリードである。

#### 4.2 電流測定用増幅器としての応用

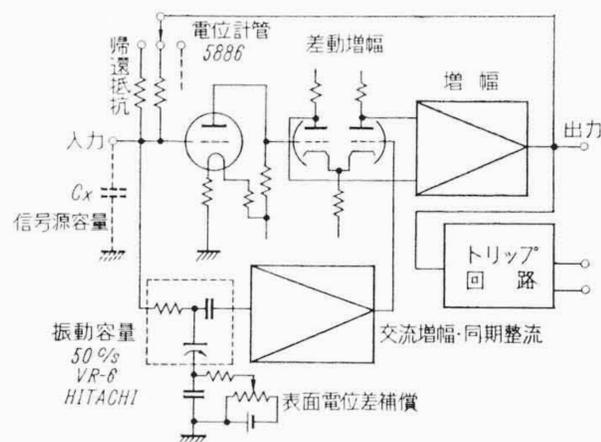
##### 4.2.1 質量分析計用AU-12形直流増幅器

質量分析計のコレクタにはいったイオン電流を測定する目的のものであって、第9図(b)の構成をとっている。ブロック図を第15図に示す。性能は第4表に示すとおりであって、帰還抵抗  $R_f$  の値により、測定電流感度および応答速度の異なる2種の増幅器として使い分けることができ、速応形の場合、通常の質量分析計に高感度形の場合、特に微量の分析計として使用される。

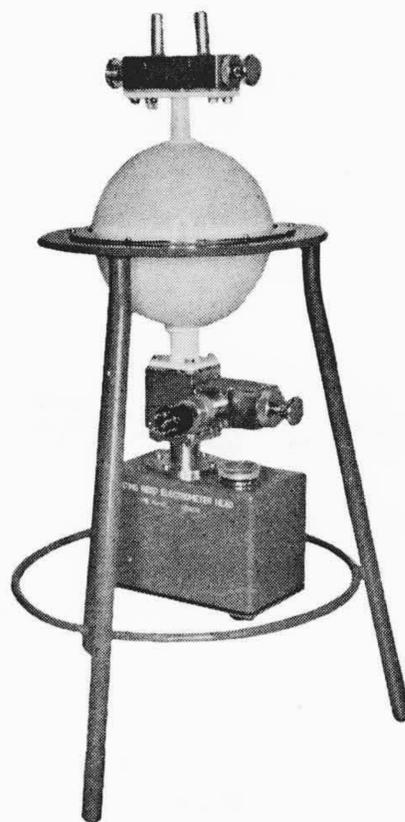
表中にも記されているように、高感度形とした場合、振動容量自体および前置増幅器入力部を構成する材料の自然放射係数によって、 $1 \sim 5 \times 10^{-15} \text{ A}$  程度のパルス性雑音が生じ、1時間あたり10~20



第16図 AU-12 形直流増幅器の外観



第17図 AU-11 形ステープルマイクロアンペアメータの構成



第18図 ガス汚染度測定装置の主要部

個程度観測されている。これは通常測定データと容易に区別できるので支障はないが、これを取り除くことはきわめて困難である。この増幅器にはVR-7形振動容量ビブラコンを使用している。外観写真を第16図に示す。

##### 4.2.2 分光光度計、ガスクロマトグラフなどへの応用

分光光度計における光電流増幅、Radio-Ionization 検出器または Flame-Ionization 検出器を使用したガスクロマトグラフの検出電流増幅器として使用されている。方式は第9図(b)であって速い応答を必要としないためにVR-5またはVR-6形を使用している。光電管電流の場合、暗電流の十分小さいものを使用すれば、増幅器のドリフトが小さいので、きわめて安定な指示が得られる。Ionization 検出器の場合は増幅回路が安定であるため、各検出器のプラトーレベルの安定さまで感度を高めることができた。このほか質量分析計を応用したリークデテクタのイオン電流増幅器に

も、測定抵抗に  $10^{12}\Omega$  を使用し、VR-5 形振動容量による簡易高感度形増幅器を採用している。

#### 4.2.3 放射線測定への応用

直結形増幅回路をチョッパ回路によってドリフト補償した組合せ形増幅器は、アナログコンピュータの演算増幅器などに用いられている。AU-11 形スティブルマイクロアンメータは、初段に電位計管を使用し、振動容量形増幅回路と組み合わせることにより安定化した広帯域微小電流増幅器であって、 $1 \times 10^{-13}A$  から  $10^{-3}A$  までの 10 けたの測定範囲を持ち、イオンチャンバに接続して原子炉制御またはモニタ用の安全増幅器として実用化されている。イオンチャンバと増幅器との間には無雑音ケーブルを使用し、ケーブルの振動などによる雑音電流を十分除去する必要がある。回路構成は第 17 図に示すとおりであって、振動容量に VR-6 形を用いた直列複合形を採用している。

また AU-12 形増幅器を改造した AU-13 形増幅器を用い、第 18 図のような球形イオンチャンバを前置増幅器に直結し、イオンチャンバ内に放射性を帯びたガスを導入し、その汚染度を測定するのにも応用されている。

### 5. 結 言

直交変換器としての振動容量の特性回路設計および増幅器としての応用例について述べた。振動容量形直流増幅器の特長は、リストラップ形と反対のものであって、高電流感度あるいは電荷感度をもつという点である。電圧感度自体は  $100\mu V$  程度を限度とし、高入力インピーダンス特性を利用して測定抵抗の値を大きくし、微小電流を測定するのに適する。したがって電圧を測定するのは信号源インピーダンスの高い場合、すなわち pH 計などの場合に限られ

る。真空管のみによる増幅器は、格子電流による限界とドリフトの点で振動容量形に劣るが、高感度を要しない場合には広く用いられている。半導体素子を用いた微小電流増幅回路も種々考案されている<sup>(3)</sup>が現状では真空管による性能以下の値しか得られていない。従来、振動容量形は高感度の点は知られていながら、振動容量の検討不足のために広くは用いられず、またとかく実験室的であったが、現在では機械的チョッパと同様に広く用いられつつあり、高感度の直流増幅器を必要とする理化学機器の分野で多くの応用を見いだしている。

終わりに日ごろご鞭撻いただいている日立製作所中央研究所只野文哉博士、日立製作所那珂工場牧野勇夫博士に深く感謝申しあげる。実験および応用に際しては中央研究所、那珂工場の多くの方々のご協力を得た。また振動容量の製作に当たっては試作以来、東京精密測器株式会社池田氏外の忍耐あるご協力をいただいた。ここに厚く謝意を表する。

#### 参 考 文 献

- (1) 宇都宮：電学誌 77, 960 (昭 32)
- (2) 阿部：自動制御 5, 78, 136 (昭 33)
- (3) 内海、永田：電学誌 81, 877, p.123 (昭 36)
- (4) W. A. Zisman: Rev. Sci. Instr., 3, 367 (1932)
- (5) H. Palevsky: Rev. Sci. Instr., 18, 298 (1947)
- (6) S. A. Sherbatskoy: Rev. Sci. Instr., 18, 415 (1947)
- (7) 小川：応物誌 19, 189 (昭 25)
- (8) 内海、米田、阿部：昭 36 電気通信全大 S6-12
- (9) 内海、阿部：昭 35 電四連大 No. 234
- (10) 内海、千葉、阿部：昭 36 電気東京支部大 28
- (11) 内海、米田、阿部：昭 36 電四連大 144
- (12) 内海、阿部：昭 35 電四連大 234



### 特 許 の 紹 介



特許 第 298698 号

小野口孝司

#### 枠 (わく) グリッド 巻線 方 法

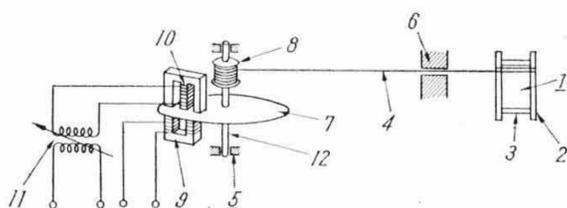
枠グリッドのグリッド線はグリッド枠支柱間に真直に張って巻かれていることが球の特性およびタッチ防止のために必要であるが、従来はグリッド線張力装置により巻線部全長にわたって同一巻線張力で巻線を行なっていたため、第 2 図に示すように巻線によってグリッド枠支柱部がたわみ、巻線部中央のグリッド線張力が弱くなり、巻線後グリッド線およびグリッド枠にメッキした金を溶かして、グリッド線とグリッド枠とを固定するブレイジング作業を行なえば枠のたわみはさらに増加し、ついにグリッド線にたるみを生じてしまうことが多かった。

この発明は上述のような欠点を除去し巻線後においてもグリッド線の張力がグリッド巻線部全長にわたって一定となるようにしたことである。第 1 図において 1 は枠グリッド、2 はその支柱、3 は橋帯、4 はグリッド線、5 はグリッド線張力装置、6 はグリッド線ガイドを示し、この発明においてはグリッド線張力装置としてたとえば積算電力計のような電気装置を用い、その回転円板 7 の軸 12 にグ

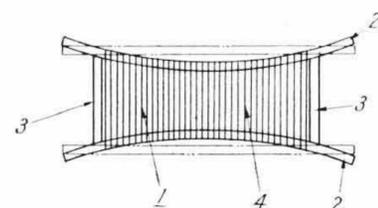
リッド線スプール 8 を取り付け、その電流コイル 9 に一定電流を供給し、電圧コイル 10 にはスライダック 11 により可変電圧を加えることができるようにし、橋帯 3 近い部分に巻線するときはスライダック 11 を調節して電圧コイル 10 に加わる電圧を低くし、回転円板 7 に生ずる回転トルクを小さくしてグリッド線の張力を弱めるとともに、巻線部中央においてはスライダック 11 を調節してグリッド線 4 の張力を強めて巻線を行なうようにする。

この発明方法においては上述のようにグリッド枠中央部のグリッド線張力をその両端部より大きくなるようにしたので、グリッド枠支柱 2 がたわんだ場合巻線部全域にわたってグリッド線張力が等しくなり、ブレイジング作業を行なってもグリッド線がたるむなどのおそれがなく特性のすぐれた枠グリッドを簡単容易に製造できる。

なお上述の説明においてはグリッド線張力装置として電力変化をトルク変化として利用する場合を述べたが、電気を使用せずに機械的手段によってもなし得ることはもちろんである。(福 田)



第 1 図



第 2 図