

ERRATA

Page	Line	Read	For
55	Fig. 2	A-part	A-pau
56	9	(i) 増幅回路の組立て	増幅回路の組立て
56	8 (from the bottom)	変動が出力電流に影響しないこと	変動に対して出力電流計が振れないこと
57	1, 2, 3, 12, 14	E_{nt}	Ent
57	14, 15	E_{pt}	Ept
58	3	電源電圧	電流電圧
58	7, 13	E_{pt}	Ept
58	16, 18	E_{nt}	Ent
59	5	同一管であっても特性の変化が	同一管であっても変化が
60	18	増幅器 B 部	増幅器 A 部

柿岡に於ける空地電流測定について

三崎方郎, 河村 諒, 近藤五郎

On the Measurement of the Air-Earth Current at Kakioka

By M. MISAKI, M. KAWAMURA and G. KONDO

Abstract

Recently, it has been emphasized by H. Israël and G. Lahmyer [1] and others that the continuous simultaneous observation of the three essential elements of atmospheric electricity, i. e. potential gradient, conductivity and air-earth current, is very important and necessary to study the origin of the world-wide atmospheric electric phenomena and the role of the undisturbed region on the maintenance of the earth's negative charge.

The last thirty years, the serial registration of potential gradient and the temporary eye-observation of conductivity are continued at Kakioka Magnetic Observatory. Now, it was chanced to realize in this International Geophysical Year that we observe continuously the air-earth current and conductivity. In present paper, we describe in detail of the principles of measurement of the air-earth current and of the operation of its measuring apparatus for the convenience of handling of it.

要約： 最近，晴天時の気象電気現象の原因と地球電荷の保持に於ける無擾乱域の役割との解明のために，気象電気三要素（大気電場，大気電気伝導度及び空地電流）の同時連続観測の重要性が Israël 等によって強調されて来た。

柿岡に於いては，過去約 30 年に亘る大気電場の連続自記観測と一定期間の大気伝導度の目視観測とが行われて来たが，偶々今度の国際地球観測年を機に空地電流及び伝導度の連続観測が実現した。今回は装置の取扱い上の便宜ということに主眼をおいて，測定装置の原理と操作とに就いて詳述する。

§ 1. 緒 言

空地電流を測定する方法は，感受板に流れ込む電流を直接に測定する直接法と電場及び伝導度を夫々測定してその測定値から電流を算出する間接法との二種に大別される。直接法は大気中を流れる全電流（伝導電流＋対流電流＋変位電流）として鉛直電流を測定するが，間

接法では伝導電流のみを取出して測定することになる。之迄直接法による空地電流の測定は Wilson [2], Simpson [3], Scrase [4], Chalmers and Little [5, 6], Kilinski [7] 及び Kasemir [8] 等によって行われている。Wilson は Universal portable electrometer と毛細管電位計とを使用したか、その方法は連続自記観測には余り適当でなかった。Simpson 及び Chalmers and Little は一定時間毎に集電面に受けた電気量を測定したが、特に Simpson の方法は変位電流の除去が困難であった。Scrase は電場の急変化を補償して空地電流のみを自記した。最近、Kilinski は感受板に受けた空地電流を交流に変換して増幅記録し、Kasemir は電気計管を用いて感受板に入って来た空地電流を直流増幅して観測している。我々は原理的にはこの Kasemir の方法を採用し、又時定数を適当にとって変位電流を除去し (Israel [9] 参照)、これと電場、伝導度の同時観測とを併用して、伝導電流と対流電流とを分離する。特に感受板装置及び増幅器は原理的或は技術上の困難の除去を目途として製作された。装置の製作及び予備的実験は本年6月迄に一応終了し、7月より連続観測が実施されている。

§ 2. 測定装置の概要

空地電流の測定装置は (i) 外部施設 (ii) 内部施設に大別出来る。外部施設は感受板装置と増幅器 A 部とより成り、内部施設は増幅器 B 部、電源蓄電池部及び記録電流計より成る。Fig. 1 は装置の概略図である。尚付属装置として 54 B 試験器、高抵抗管試験器がある。

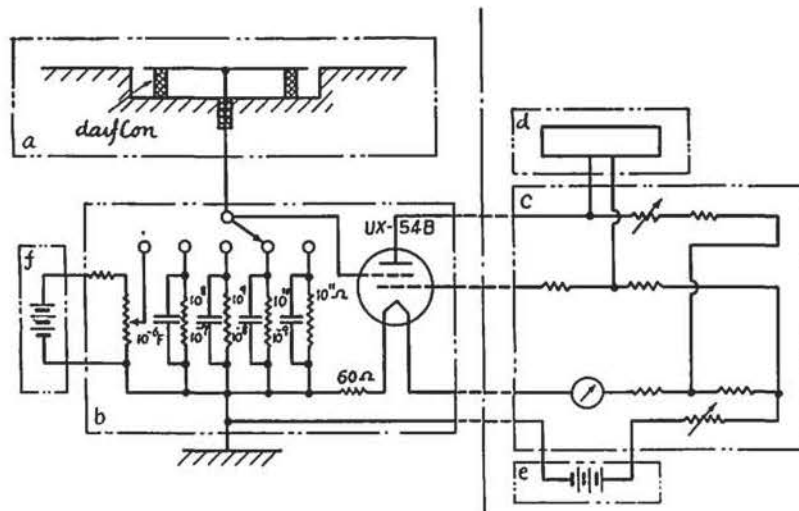


Fig. 1. Measuring apparatus of the air earth current.

- a : receiving plate, b : amplifier A-part,
 c : amplifier B-part, d : recording ammeter,
 e : B-supply battery, f : battery for sensitivity measurement.

§ 3. 感受板装置

感受板は1 m平方の真鍮板で、空中電気観測室北側露場中央に、地表面と同レベルにダイフロン脚で地面から絶縁されて設置されている (plate 1 参照)。この感受板は裏面にとりつけられたアングル製の骨によって彎曲しない様に補強されており、又板の四周には鉛直に幅 5 cm 程度の水切り板が付けられ、これが感受板の四縁に設けられた溝の中に垂れて、板の上に降った降水は、この溝の排水口から地中の土管を通して排出される。板の四隅を支える脚は、夫々金属部とダイフロン部とより成り、金属部はスクリーになっており、これによって板の水平が調整保護される。この金属部を載せるダイフロン部は直径 42 mm、高さ 5 cm の円柱で、下に置かれた反射板に固定されている。反射板は中央に狭い空気間隙を持った炭化コルク製の熱絶縁板の上面にはりつけられた薄いアルミニウム板で、日射及び夜間輻射によって起る感受板の温度変化の輻射による伝達を妨げる。この反射板と熱絶縁板との下は、四壁と底部に防水及び熱絶縁工事を施した地下室で、この地下室の中央に置かれた炭化コルク製熱絶縁箱中に増幅器 A 部が格納されている。即ち上記の反射板と熱絶縁板が地下室の天井を形づくっている。たとえ、反射板に幾分の温度変化が起っても、熱絶縁板があるので、地下室内の温度変化は一層僅かであろう。実測によるとこの地下室内の温度日変化は極めて僅かで、日々の温度変化だけを考慮すればよいと考えられる。反射板と熱絶縁箱には、夫々ダイフロンパイプが取り付けられ、導線はこの絶縁孔を通して、感受板裏面の端子を増幅器 A 部の入力端子に連結する。地下室内には生石灰を置いて防湿に努めている。Fig. 2 は感受板装置及び増幅器室を示す。この増幅器室の前方も人が入って操作出来る小

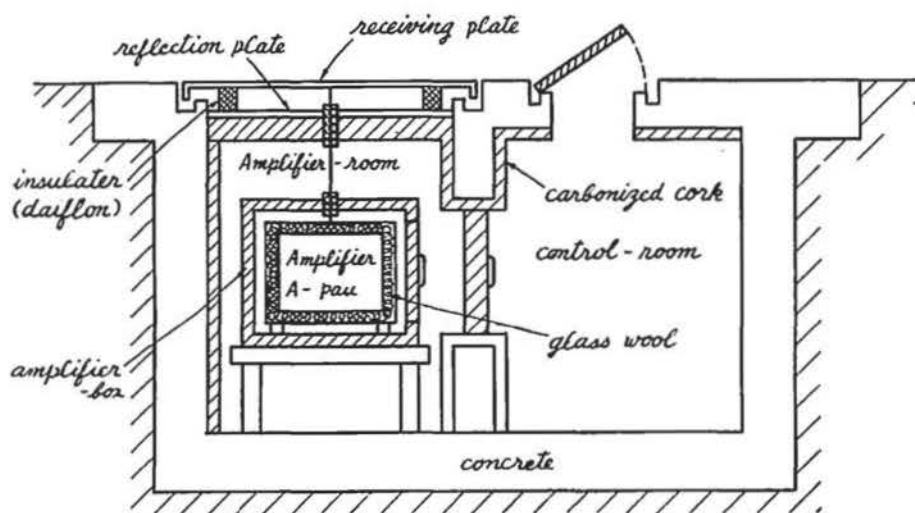


Fig. 2. The amplifier-room.

さな地下室になっており、操作は境の窓を開けて簡単に行われる。絶縁に用いたダイフロンは高い絶縁抵抗を持ち、且つアンプロイドに比して遙かに加工が容易であり吸湿性も殆んどなく、又酸、アルカリに対する耐性も強いので装置の製作に非常に便宜をえた。ダイフロンの固有体積抵抗は温度 25°C 、湿度 50 % で $1.2 \times 10^{18} \Omega$ である。尚念のために、感受板を支えるダイフロン脚にはヒーターを取付けて乾燥させている。

感受板表面は空气中に放置されるので、比較的短期間——特に降水があった場合——に一面に錆が生じ、又恐らくは放射性物質の付着によると思われる記録の異常が現われるので、その都度感受板表面を磨かなければならない。研磨後は記録が正常に復する。

§ 4. 直流増幅器

増幅回路の組立て 感受板に受けた電流は直流増幅された後、電子管式自動平衡記録器によって記録される。直流増幅器は UX-54 B を用いた Barth の回路 [10] である。回路中の各抵抗、電圧、電流の記号を Fig. 3 に示す。この回路の平衡とは次の二つの事柄を意味する。

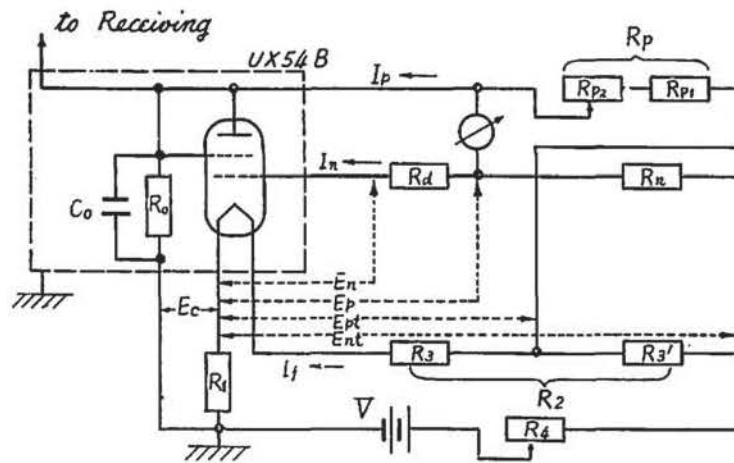


Fig. 3.

- (1) 入力がない時には出力電流計が振れないこと、
- (2) 電源電圧の少々の変動に対して出力電流計が振れないこと。

回路の電源には 60 AH, 6 V の蓄電池 2 個を直列に用いた。各抵抗値の決定は下記の手順で行われた。

a) R_1 の決定 $E_c = I_f R_1$. ここで I_f の規格値は 50 mA である。 E_c の規格値は -4 V であるが、格子電圧がこの値より下ると特性に直線性を欠いてしまうので、 -3 V と決めた。勿論、格子偏倚電圧を規定値より高くしたことによって、格子電流が増大し測定に支障を来す様なことのないことは初めに真空管の特性検査の際確認しておいた。従って R_1 は 60Ω と決定される、

b) R_2, R_4 の決定 Ent は出来るだけ大きくとっておく方が望ましい。何故ならば Ent が大きい程、この回路の安定範囲の幅が広がるからである。但し、電池の電圧低下に備えて、1 V. 程度の調整 (R_4) の予備をとっておく必要があるので、Ent は約 8 V とした。このうち、織糸電圧は約 2 V. であるので、 R_2 は 120Ω (6 V. の IR 降下を生ずる) と決定した。 R_4 は最大 100Ω のヘリコイド型摺動抵抗 (1 div : 0.1Ω) を用いた。 R_4 の調整によって I_f は常に 50 mA を保つ様にする。

c) R_n, R_a の決定 R_n, R_a, R_p, R_3 及び $R_3' (=R_2 - R_3)$ は一回の測定では決定されない。これは先づ凡その値を推定して回路を組立て、実験を数回試行して最終値を決定する。この時も先づ R_n, R_a を決定すべきであるが、これは次の手順による。

(イ) 使用真空管の検定表に記載されている特性曲線から、 $E_c = -3 \text{ V}$, $E_p = 6 \text{ V}$. (規格値), $E_n = 4 \text{ V}$ (規格値) での I_p, I_n を読み取る。

(ロ) この I_n の値を $I_n (R_n + R_a) = \text{Ent} - E_n$ に入れて、 $R_n + R_a$ の推定値を計算する。

(ハ) E_{pt} が $E_p (=6 \text{ V}) \sim \text{Ent} (\cong 8 \text{ V})$ の間の値をとるように、 R_3 を暫定的に適当に決める。この時の E_{pt} の値——ボルトメーターで測れる——と特性曲線より読み取った I_p とを $E_p = E_{pt} - I_p R_p$ に代入し、 E_p が規格値 (6 V) となる R_p を計算する。

(ニ) 上記の様に暫定的に決めた $R_p, R_n + R_a$ を用いて回路を作り、出力電流計回路は開いたままで、——従ってこの段階では $R_n + R_a$ は未だ R_n, R_a に分ける必要はない——実験により ($R_n + R_a$) 対 I_n 曲線を求め、 $I_n (R_n + R_a) = \text{Ent} - E_n$ となる I_n と $R_n + R_a$ とを決定する。(特性に変化がなければ、 $R_n + R_a$ の決定値は暫定値と殆ど差がない筈であるから、測定はその付近だけで行えば充分であるが、実際には相当の差があるので、検定表記載の値をそのまま用いる訳にはいかない)。

(ホ) 前項で決定された I_n を $(E_p - E_n) / I_n = R_a$ に入れて、 R_a が決定される。従って R_n も決まる訳である。

d) R_p の一応の決定 R_p を変えても I_n は変らないが、 $R_n + R_a$ を変えると I_p は変わるから、 R_p の決定は $R_n + R_a$ を決定した後に行っても一向差支えないし、又そうしなければならぬ。

R_p の決定は簡単である。即ち電流計回路を閉じて、電流計を通る電流が零になる様に R_p を調整すれば、第一の平衡条件 (前述) が満されると同時に、陽極には規格電圧が正しくかかっていることになる。

e) R_3, R_p の修正 ここで回路の第二の平衡条件が満足されているかどうかを調べてみなければならない。即ち、c) の (ハ) で R_3 を勝手にとった—— E_{pt} を適当に選んだ

—が、これが適正值であったならば、電源電圧の少々の変動に対して、出力電流計が殆んど動かない筈である。

これを調べるには、電流電圧を変えてみて、出力電流計の動きを見る訳であるが、測定の一

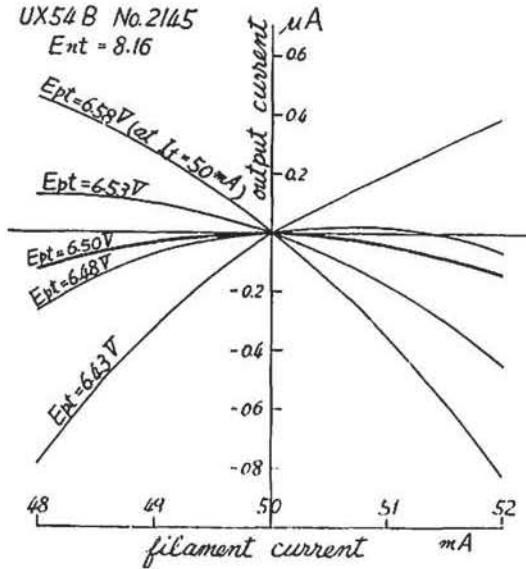


Fig. 4-a.

Ent が高い程、平衡範囲の幅が広いということとは、b) で述べたが、その一例を Fig. 4b に示す。Ent が 10.1 V の場合に比べて、8.16 V の場合の方が、調整が遙かに臨界的であることが、Fig. 4a と Fig. 4b とを比較するとわかるであろう。

以上の操作により決定された各抵抗値を用いて平衡回路が完成した訳である。一例として、Fig. 4 と同一の電気計管 UX 54 B, No. 2145 についての数値を Table 1 に示す。

Table 1. Circuit data at the balance point (UX 54B. No. 2145)

$R_1 = 60 \Omega$	$V = 12.30 \text{ V}$	$I_f = 50 \text{ mA}$
$R_2 = 120 \Omega$	$E_p = 6 \text{ V}$	$I_p = 54 \mu\text{A}$
$R_3 = 86.5 \Omega$	$E_n = 4 \text{ V}$	$I_n = 301 \mu\text{A}$
$R_n = 7200 \Omega$	$E_c = -3 \text{ V}$	
$R_d = 6600 \Omega$	$E_f = 1.90 \text{ V}$	
$R_p = 9085 \Omega$	$E_{nt} = 8.16 \text{ V}$	
	$E_{pt} = 6.50 \text{ V}$	

例を Fig. 4a に示す。織条電流が規格値の上下に $\pm 2 \text{ mA}$ の範囲で変えられる。これは電源電圧の $\pm 4\%$ の変動に相当する。

図中、Ept は何れも $I_f = 50 \text{ mA}$ の時の値であるが、6.43 V, 6.48 V は何れも低過ぎ、6.53 V, 6.58 V は何れも高過ぎる。適正值は 6.50 V である。斯様にして、 R_p, R_3 は数回の試行を経た後に同時に決定される。

平衡を得るには、この例でも明らかな様に、Ept で約 0.02 V の調整が可能であることを要するが、これは R_3 で約 0.5Ω の微調整を行うことに相当する。

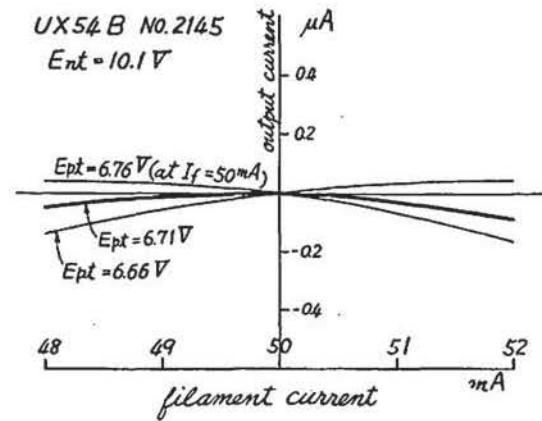


Fig. 4-b.

一度各抵抗値を決定した後、電気計管の特性が著しく変らない限り、出力電流計の零調整——入力が零の時、電流計を流れる電流を零ならしめる——は、 R_p の微調整によって行う。このため、 R_p の一部は可変とした。即ち、固定抵抗 R_{p1} に、最大 1000Ω ヘリコイド型摺動抵抗 (1 div: 1Ω) R_{p2} を付加した。

回路の各抵抗値は真空管を取り換えた場合は勿論、たとえ同一管であっても変化が推定される度に再決定をしなければならないので、決定実験が容易に行える様に、専用のセット (54 B 試験器) が組まれている。

(ii) 増幅度と確度

この平衡回路で制御格子への入力電圧と出力電流との関係、即ち感度曲線の一例を、Fig.

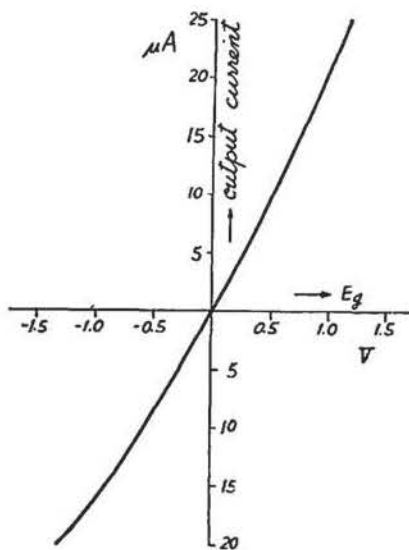


Fig. 5.

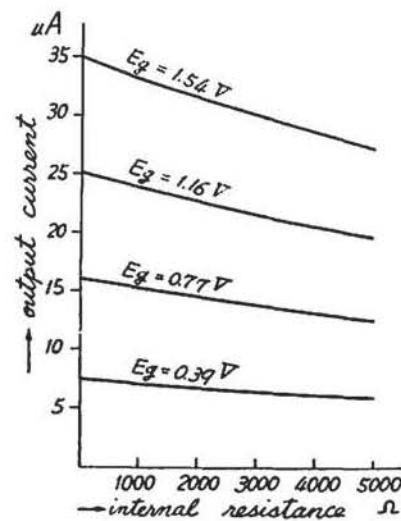


Fig. 6.

5 に示す。これは Table 1 と同一管に対するものである。

格子漏洩抵抗に $1 \times 10^{11} \Omega$ を使用したとすれば、この場合の電流増幅度は 2×10^6 である。この結果は内部抵抗 3.6Ω の検流計を用いて得たものであるが、出力インピーダンスが充分大きいので、出力電流は内部抵抗の大小には殆んど関係なく、 1000Ω の検流計を用いたとしても、電流は僅かに 5% 減の程度である。Fig. 6 に出力電流計の内部抵抗と出力電流との関係を示す。

今、入力電圧が 0.4 V あったとすると、出力電流は $8 \mu\text{A}$ である。一方電源電圧が $\pm 2\%$ 変動したとしても、(即ち、織糸電流が $49 \text{ mA} \sim 51 \text{ mA}$ に変動したとしても) ——実際はこの程度以内の変動に充分保守できる—— Fig. 4a によると、そのための不平衡電流は $0.1 \mu\text{A}$ 以下であって、結局、約 1% の誤差として抑えることができる。更に記録電流計としては、YEW 電子管式自動平衡記録器 ER 121 $70 \mu\text{A}$ 計を用いたが、この確度は $\pm 0.5\%$ 即ち、

$\pm 0.38 \mu\text{A}$ であって、電源電圧変動による誤差は記録器の確度内に十分に収まっていると言える。(plate 2 参照)

空地電流密度 $2 \times 10^{-16} \text{ A}$ を 1 m^2 の感受板に受けたとし、格子漏洩抵抗に $2 \times 10^{11} \Omega$ を用いたとすると、入力電圧は 0.4 V 、出力電流は $8 \mu\text{A}$ である。一方、ER 121 の全目盛が $70 \mu\text{A}$ で 180 mm であるから、自記紙上の振れ幅は約 20 mm となる。記録器の確度が $\pm 0.5\%$ 、即ち $\pm 0.9 \text{ mm}$ であるから、読み取りは 1 mm の桁迄有効である。

増幅器の零点移動 (Zero drift) については後述する。

(iii) 電気計管の遮蔽、格子漏洩抵抗、その他について。

増幅器の入力抵抗として、 $10^9 \sim 10^{13} \Omega$ の高抵抗を使用するために、実際の測定に当っては種々の困難が伴う。即ち、増幅器の外部より電磁誘導を極めて受け易いこと、又高抵抗の温度係数が可成り高い $-10\%/5^\circ\text{C}$ こと、その他、直流増幅器にとって本質的な零点移動 (zero drift) の問題等である。零点移動については回路そのものに依存するところが大部分で、特に電源電圧変動の影響は、前に詳述した如く、免れているが、前二者については、キャビネットの工作上で努力を払う以外に方法がない。それで電磁的に、及び光、熱、温度に対して効果的な遮蔽を行うために、回路を二つの部分に分ち、特に Fig. 3 の破線で囲まれた部分、即ち増幅器 A 部——電気計管、格子漏洩抵抗を含む部分——をステンレススチール板で二重に遮蔽し、その間隙にグラスウールを充填して断熱保温し、更に内部にシリカゲルを入れて乾燥した。回路の別の部分即ち増幅器 A 部をこの二重遮蔽箱より分離したのは、それが種々の調節を必要とする部分であり、そのため同一キャビネット中に収納することに、主として工作上的難しさがあったからである。電気計管の部分に収納しているキャビネットは前述の如く感受板の直下の熱絶縁箱中に設置され、その他の回路部分を収納したキャビネットは観測室内に設置されている。(plate 3a, b 参照)

増幅器 A 部と約 25 m 離れた観測室内部におかれた増幅器 B 部との連結には、ビニールシースシールドポリエチレン電線が使用されている。この電線は地中に埋設した土管の中に 50 cm 間隔で並べられた枕木の上に置かれ、地下水から保護されている。電線は数本の銅の芯線を厚いポリエチレン層で絶縁し、その表面をシールドして更にその外側をビニールで包んだもので、此の電線の 1 m 当りの絶縁抵抗は $10^{14} \Omega/\text{m}$ で、 25 m では $4 \times 10^{13} \Omega$ 程度になる。

電気計管の格子には 12 接点のスイッチをとりつけて、空地電流の大小に応じた感度の調節を漏洩抵抗の 4 段切換で行い、更に 8 段切換のポテンシオメーターによって感度測定が出来る様にした (Fig. 7)。

記録の零点は次の二通りの操作に対するものをとった。即ち、 S_1 を開くことによって無

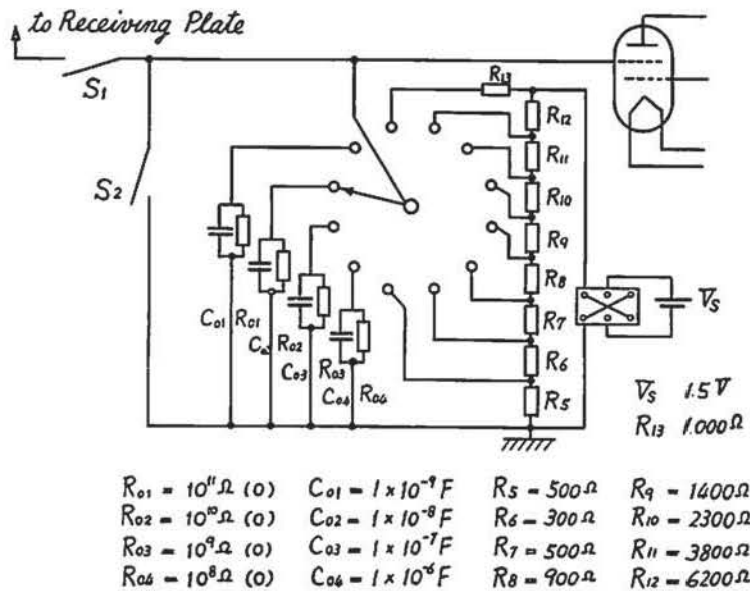


Fig. 7.

入力の状態に対するものと、 S_2 閉じることによって格子を直接接地したものである。この二通りの零点は本来ならば同一であるべきであるが、実際には僅かながら差がある。この差が大きい時は、接点の汚れによる接触電位差か、又は電気計管の特性変化によって格子電流が増加し、測定に支障を来す程度になったことを意味する。即ち、日常のこの操作によって、斯様な故障は直ちに発見できる。但し、 S_1 , S_2 の接点は極力滑浄に保っているにも拘らず、開閉の際には格子電位の跳びを免れないので、操作には手加減を要する。二通りの零点が一致しない場合のもう一つの原因として、格子漏洩抵抗が電池作用を持っていることがある。この高抵抗にはマツダ高抵抗管 1Q21 ($10^{11} \Omega$) を用いたが、14 本試験した中、3 本には 0.2~0.7 V 程度の電位差が抵抗の両端に生じた。この電位差は高抵抗単体をリンデマン電位計で測定しても容易に検出できる。高抵抗体を使用する時には一応注意を要する事柄である。

記録の零点検査には、先に述べた二通りの零点の検査の他に、もう一つ肝心なことがある。即ち、回路の平衡がくずれていないかどうかということである。日常の検査では、§4 i) の項で述べた平衡の第一条件の点検に止まり、第二の条件についてまで調べることはできない。一日に 1~2 回、格子接地の状態で出力電流計がふれていないかどうかを点検し、ふれていれば R_{p2} を調整して零位を保たせる。このずれは即ち直流増幅器に特有な零点移動であって、それも電源電圧の変動以外の要因、例えば抵抗値の変化、電気計管の変化等である。零点移動は R_{p2} を調整する前に必ず記録しておくが、その大きさは一日につき出力電流にして $0.2 \mu A$, 入力電圧に換算して 0.01 V 程度であった。これが著しく大きくなった

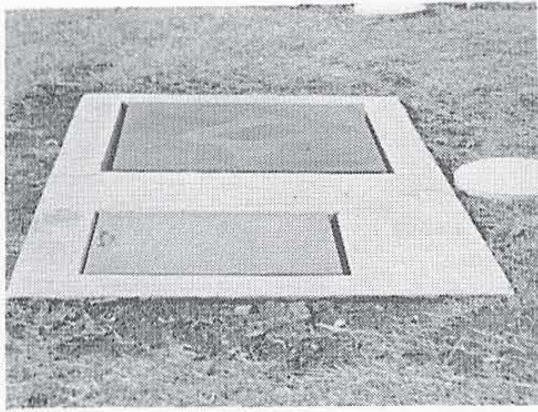


plate 1

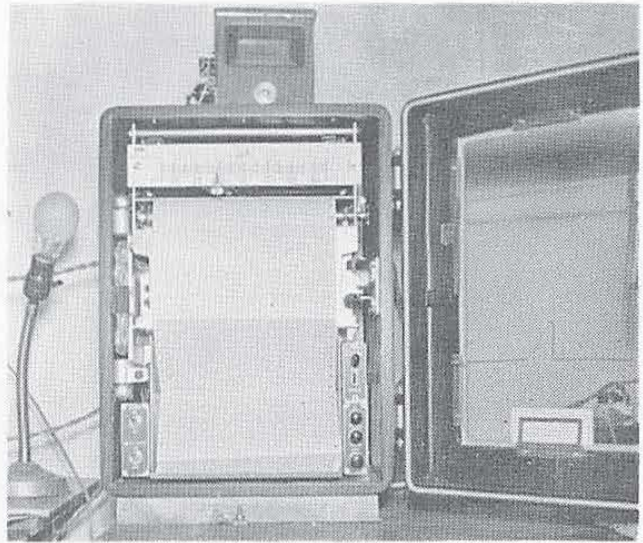


plate 2

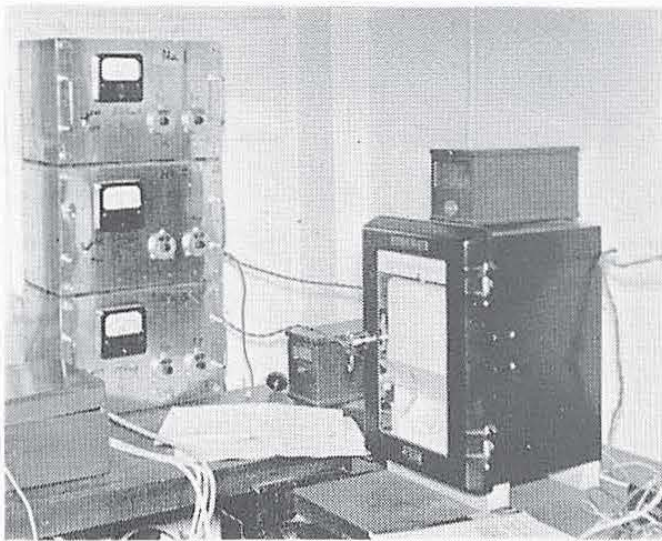


plate 3 a

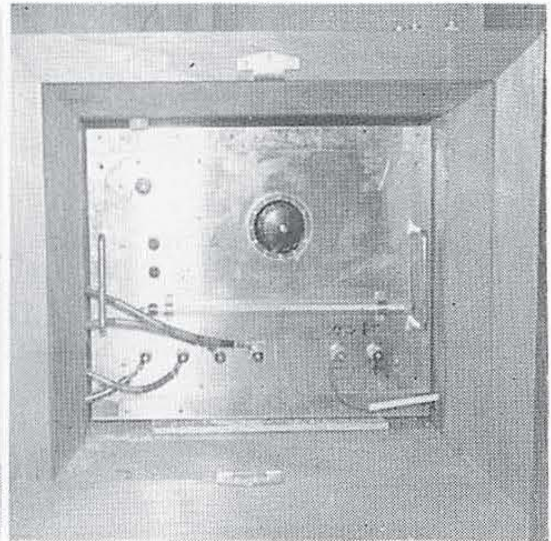


plate 3 b

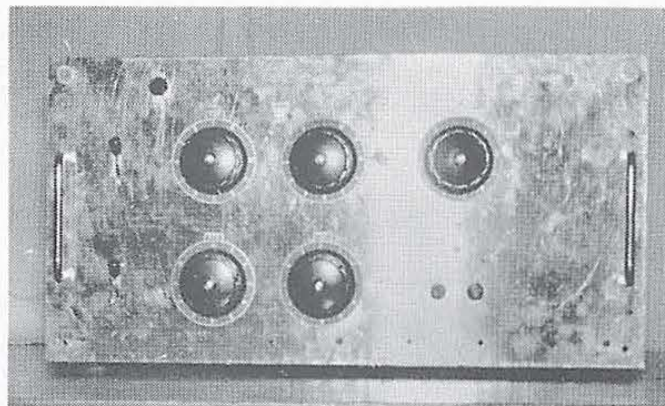


plate 4

時には、平衡の第二条件についても再検査を要する。

回路に適当な時定数を考えることによって、 dE/dt を除去できることは既に Kasemir(8) Kilinski (7) により述べられている。Israël(9) によると、この時定数は空気の relaxation time と一致させるのが最も有効であるということが明らかにされた。この装置では R_0 に並列に入れた容量 C_0 と、感受板系が大地に対して持つ容量とで、時定数が 200~300 秒程度になっている。 C_0 は並列に入れた高抵抗より少くとも 2 桁以上の絶縁が要求されるので、プラスチック薄膜の絶縁によるコンデンサーを用いたが、この絶縁抵抗は 10^{13} ~ $10^{14} \Omega$ 以上である。

格子漏洩抵抗 R_0 はその値が変化する可能性があるので、定期的に検定する必要がある。 $10^7 \Omega$ 以上の抵抗はホイートストン橋により、それより一桁小さい抵抗と比較して測定する。この場合の標準抵抗としては、 $1 \times 10^{10} \Omega$ のマンガニン抵抗を備えている。ホイートストン橋の不均衡のために検流計を流れる電流は、その最大抵抗辺の order によって大きさがおさえられるので、検流計の位置にはやはり UX 54 B による増幅器をおいて測定する。(plate 4 参照)

§ 5. 結 尾

今回は特に装置の取扱いに便利な様に、測定装置の原理とその操作方法とに就いて、出来るだけ詳しく説明した。実際の観測は本年 7 月に開始されており、若干の観測資料が得られているが、その結果に関する解析及び討論は後に譲り、ここでは、この装置に就いて、今後に残されている問題点を拾いあげておく。

第一に、高抵抗管に就いては、前述の如く、現在使用している 1Ω シリーズでは温度係数がかかなり高く、大体 10%/5°C 程度であるが、最近温度係数の極めて小さな (0.1~0.01 %/°C) 高抵抗 (10^8 ~ $10^{12} \Omega$) が製作され始めており、試験的に使用してみた後で、これと取換えることが考えられている。

次に感受板系の時定数は、変位電流を記録から取除くために予め知っておかなければならないが、そのためには感受板系の対地容量を観測時の状態で測定しなければならない。ところでこの容量は極めて小さく、且つ、容量測定中に流れ込む電流の影響が測定値を不確定にする恐れがあるので、この測定は出来るだけ迅速に行わなければならない。そのために、現在、この対地微小容量を迅速に測定する装置を考慮中である。

更に接点等に現われる接触電位差は、測定値に直接大きな影響を与え、時には測定を不能にすることもあるし又、操作に手加減を要するという事は望ましくないので、この除去が必要であり、そのために、接点物質の交換や、金渡金等が考えられる。

謝辞： 終りに臨み，増幅器の製作にあたり，特に御援助を賜りました理科大学今道周一教授及び関川俊男講師に衷心より謝意を表しますと共に，本所に於いて当初より計画と製作に参加され，途中で東京管区气象台に転出されました仁井田一郎技官の御骨折に負うところ多きことを付記致します。

引用文献

- [1] Israël, H. and G. Lahmeyer, (1948) : Terr. Mag. and Atm. Elec., 53, 373.
- [2] Wilson, C. T. R. (1916) : Proc. Roy. Soc. A, 92, 559.
- [3] Simpson, G. C. (1910) : Phil. Mag., 19, 715.
- [4] Scrase, F. J. (1933) : Met. off. Geoph. Mem., 58.
- [5] Chalmers, J. A. and E. W. R. Little (1940) : Terr. Mag. and Atm. Elec., 45, 451.
- [7] Kilinski, E. (1952) : Zs. f. Met., 6, 271.
- [8] Kasemir, H. W. (1951) : J. Atmosph. Terr. Phys., 2, 32.
- [9] Israël, H. (1955) : J. Atmosph. Terr. Phys., 6, 322.
- [10] Penick, D. B. (1935) : Rev. Sci. Instr., 6, 115.