

## — 総 合 報 告 —

## 回 転 型 電 界 測 定 器

竹 内 利 雄

## I. ま え が き

雷の研究に当って空中の電位傾度を測定する事は、電荷の位置及び運動を知る有力な一つ的手段となる。この目的に適した測定器の一つに標題の回転型電界測定器がある。この装置は導体の表面に電界の作用によって生じた分極電荷を利用するもので、ゆるやかな電界の変化から速やかな変化に至る迄測定出来る為に、雷放電等による空中電界の急変化を調べるのにも適している。この装置については現在迄に多くの型式のものが製作されているが、当研究室においても雷観測の必要上これ等について若干調査した。以下にそのあらましを述べる。

## II. 構 成

この測定器は分極電荷を生ずる集電部と増幅器、記録器等を含む部分とに大別される。前者は特に回転型電界測定器に特有な部分である。

## III. 集 電 部

## 1. 原 理

各の測定器により多少の差はあるが、大体において集電部の原理は次の様である。

電位傾度  $E$  の電界に集電部電極を露出する事により、その露出される側の表面とその反対側の表面に各、

$$Q_1 = -KE \quad (1a)$$

$$Q_2 = KE \quad (1b)$$

なる分極電荷が表われる。ここに  $K$  は測定器の構造に関する定数である。もちろん

$$|Q_1| = |Q_2| \quad (2)$$

である。今  $Q_2$  を抵抗  $R$  を通じて他の部分—多くの場合は大地—に放電すれば、抵抗  $R$  には

$$I = Q_2 \exp\left(-\frac{t}{CR}\right) \quad (3)$$

なる電流が流れる。ここに  $C$  は電極の  $Q_2$  を生じた側、即ち露出しない側と他の部分、例えば大地との間の静電容量であり、 $t$  は放電開始よりの時間を表わす。この  $I$  を種々の方法で測定すれば  $Q_2$  従って  $E$  を知る事

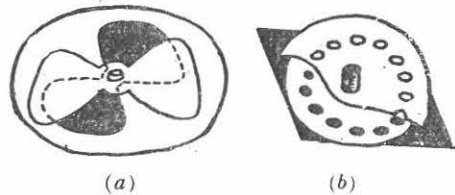
が出来るし、更にこの事をくりかえす事により、常時空中静電界の強さを知る事が出来る。

## 2. 構 造

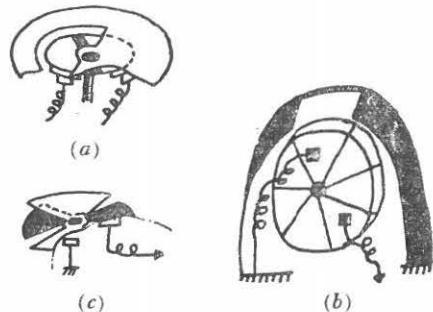
各製作者によって夫々工夫されているので、その構造は様々であるが、多くは電極の周期的に遮蔽、露出する型式を取って居る。実際には或るものは遮蔽板を、或るものは電極を回転する事によりこの作用を行う。又遮蔽板を用いないものも総べて電極或はそれに関係のある部分を回転する。回転型とはこの為つけられた名称である。以下これ等各型式について述べる。

A. 固定した電極の上を遮蔽板が回転する型式のものは、第1図(a)及び(b)に示す様な構造を持って居り、(a)に示す様に僅か1対の電極と遮蔽板を有するものから、<sup>(4)</sup> (b)の様に1枚の絶縁板に20個近くの電極をはめ込み、その上を電極の位置に一致した穴を有する遮蔽板が回転するもの迄ある。<sup>(9)</sup> この場合各電極は導線で全部結ばれ抵抗を通して接地されている。

第1図 遮蔽板回転型集電部の構成型式



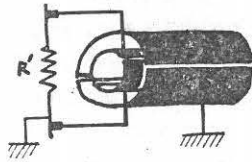
第2図 電極回転型集電部の構成型式



B. Aとは逆に電極を取付けた絶縁板を回転し、その上部を窓のある遮蔽板で覆っておく事もある。この例を第2図に示す。(a)の様に互に絶縁された電極の下に刷子をつけ整流して検流計を動作させる方式、<sup>(10)</sup> (b)の様に露出された時には接地されて、遮蔽されて居る間のある時期に電位計に接続されるもの、<sup>(3)</sup> 更に(c)に示す様に(b)とは反対の接続になって居るもの等がある。<sup>(3)</sup>

C. その他にも種々の型式のものが考案されている。即ち飛行機や気球に積みこんで高所の空中電界の様子を測定する目的の為、直角座標の3成分に電界の成分を分解する型のものも考案されている。<sup>(11)</sup> 又遮蔽板を使用しないものの例を第3図に示す。これは2個の同心円筒を各、図の様に半分に切る。外部の半円筒の一方は絶縁材料で支えられ空中電界中に露出される。この為絶縁材料で支えられた半円筒には分極電荷を生じ、更にこの電荷により外部の半円筒の一方の内部には電界が生ずる。この電界中で内部の半円筒の一方を回転させ、これに生じた分極電荷を抵抗 $R'$ を通じて放電すれば、 $R'$ の両端には交流電圧を生ずる。<sup>(1)</sup> この様に集電部の型式は種々様々である。

第3図 遮蔽板のない回転型集電部の構成型式



### 3. 設 計

今設計の1例として多電極として、静電界急変化を記録する事の可能な第1図の型式の集電部を設計する為の考察を行う。

A. 感度 感度は後に続く増幅器、指示器更に使用目的によって決定される。静かな日の地表面における電位傾度は100 V/m程度であるから、増幅器等をつけて完成した測定器はそれより少し少ない電位傾度で動作する様設計すれば、いずれの場合でも充分であり、更に感度を上昇しても、いたずらに種々のじょう乱に悩まされるのみである。集電部における感度と関係する要素は次の様なものが考えられる。

- 電極の露出面積
- 遮蔽板による電界の歪による電極表面の電界の変化
- 遮蔽板の回転速度

d. 電極大地間の静電容量及び導線等と大地の間の浮遊容量

e. 電極大地間の電気抵抗

f. 電極露出面積の時間的变化

これ等の諸因の感度に対する影響は実際の場合には実測に待つ他はないが、簡単な場合には近似値を計算によって推定する事も可能である。

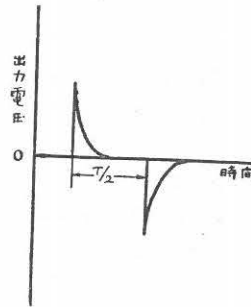
B. 速応性 実際の場合には感度と同様に非常に複雑になり実測に頼る他はないのであるが、非常に簡単な有様に仮定した場合には計算によって求める事も可能である。今電極は瞬間的に全部露出され、又遮蔽され、更にその時間間隔は等しいものとする。電極と大地の間の電気抵抗を $R$ とし、電極大地間の静電容量及び浮遊容量の和を $C$ とする。 $C$ は電極が遮蔽された場合は露出された場合よりも電極の露出される側の表面と遮蔽板との間で構成される容量だけ増すが、今この様な事は無視する。電極の数を $P$ とし、遮蔽板の毎秒の回転数を $S$ とすると、 $R$ の両端の電圧の周期 $T$ は

$$T = \frac{1}{PS} \quad (4)$$

となる。

装置の時定数 $CR$ が $T/2$ に比べて充分小さい時には、 $R$ の両端の電圧は第4図の様になる。即ちこの測定方法では速応性は $T/2$ 以上にはならない。更に速応性を上げるには $P$ か $S$ を大にしなければならない。

第4図  $CR$ が充分小さい時の出力電圧



次に $CR$ が $T/2$ と同じ位か、それより大きい場合を考える。<sup>(9)</sup> 簡単の為に始電界が $O$ 即ち $R$ の両端の電圧は $0$ であったとする。電界が階段状に突然ある値になり、その瞬間電極が露出したと仮定すれば、 $R$ の両端には $V_0$ なる電圧が生ずる。次に電極が遮蔽された瞬間に $R$ の両端には

$$V_1 = -V_0 \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{T}{2}/CR\right) \right\} \quad (5)$$

なる電圧が生じ、次に電極が露出した瞬間には

$$V_2 = V_0 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{T}{2}/CR\right) + \left\{ \exp\left(-\frac{T}{2}/CR\right) \right\}^2 \right] \quad (6)$$

なる電圧が生ずる。同様にして  $n+1$  番目に現れる電圧は

$$V_n = (-1)^n V_0 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{T}{2}/CR\right) + \left\{ \exp\left(-\frac{T}{2}/CR\right) \right\}^2 - \dots + (-1)^n \left\{ \exp\left(-\frac{T}{2}/CR\right) \right\}^n \right] \quad (7)$$

となる。符号を考えなければ  $n$  が非常に大きい場合 (7) 式は

$$V_0 / \left\{ 1 + \exp\left(-\frac{T}{2}/CR\right) \right\} \quad (8)$$

となる。(7) 式の値が例えば (8) 式の 99%—1 製作者の望む値—に達する  $n$  の値をどの位にするかにより、 $CR$  の値が決定される。

#### 4. 製作上の注意

集電部を製作するに当っては、機械的、電気的に種々注意しなければならないが次にそのうちの主な項目を述べる。

A. 一般に集電部は屋外で使用し、しかも我々の目的では雨天の時の使用が多いから防水には充分気をつけなければならない。特に電極を支持する電気絶縁部が雨水により絶縁不良にならないようにしなければならない。

B. 多くの装置は集電部と前置増幅器とを一つの箱の中に入れてあるが、回転による振動や、電動機等よりの磁束が前置増幅器に影響を与えない様注意しなければならない。

C. 回転軸等の摩擦によって生ずる電荷は、軸を接地する事等により完全に除かれないと、じょう乱に悩まされるおそれがあるから、充分に注意する必要がある。

D. 回転部分は平衡がとれていて、回転した場合に振動が少なくなっている必要がある。

E. 遮蔽板と電極とが平行である事が良い出力電圧の波形を得る為に必要である。

#### IV. 増幅部

多くの装置では、電極に誘導された電荷を抵抗  $R$  を通して放電し、 $R$  の両端に現れた電圧を増幅する。この場合  $R$  の両端に現れる電圧は交流電圧であり、これをそのまま増幅するものが多い。これは交流電圧の増

幅は直流電圧の増幅に比べて容易な為である。

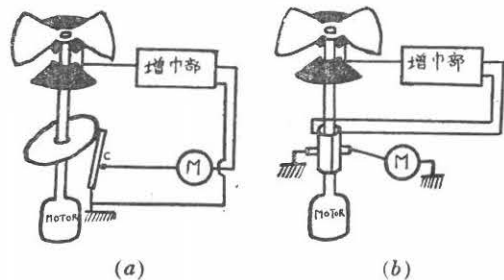
強い電界から弱い電界迄測定する事が出来る様にするには、増幅器の中に適当な減衰器を入れる必要がある。電界の弱い方は 100 V/m 程度と考えてよく、<sup>(2)</sup> 強い方は直接雷雲中を飛行している飛行機に、雷撃のあった直前の電界が  $-340,000$  V/m であったという記録がある。<sup>(7)</sup> 又地上で電界を測定するときは誘導雷撃の場合でも  $-11,000$  V/m 程度になる事があるし、<sup>(6)</sup> 更に雷放電の寸前  $+20,000$  V/m の電場も観測されている。以上の観測例から考えると測定器としては 100 V/m から 100,000 V/m 程度は測定出来る事が望ましいから、増幅器、減衰器はこれを満足出来る様な設計にしなければならない。更に不必要な周波数領域の増幅はいたずらに測定記録のじょう乱を増すのみであるから、増幅器には適当な濾波器を用い無用な妨害から逃れる必要がある。又実際の製作に当っては電源部分と、部品の配置には特に注意し干渉を起さない様組立てなければならない。

#### V. 電界の符号識別装置

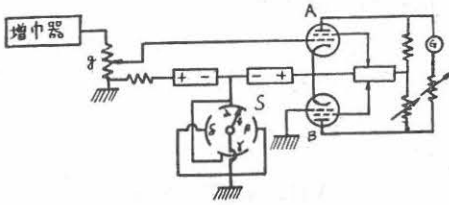
電界の符号を識別する方法も集電部と同じ様に、各製作者によって夫々工夫されている。この場合大体において回転する軸を利用するものと、電極を利用するものとは大別する事が出来る。

A. 回転軸を利用するものは、出力電圧と回転とが同期している事を利用して機械的に整流するものである。次に種々な例をあげる。第 5 図 (a) に示す方法は、回転する遮蔽板の軸にカムを取付け、接点 C で半波整流を行う。使用する電流計は正負何れにも振れる様にしてあるから、その符号と大きさにより電界の符号と強さを知る事が出来る。<sup>(5)</sup> 第 5 図 (b) に示す方法は、電極の回転軸に整流子を取付け、刷子を適当な角度だけ軸のまわりに回転して、位相を調整出来る様しておく。電界の符号が変れば当然電流の方向も変る。<sup>(4)</sup> 更に真空管を組合せた方法を第 6 図に示す。図において S は回転遮蔽板と共に回転する。刷子 b が  $\alpha$  又は  $\gamma$

第 5 図 機械的な電場の符号識別装置



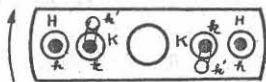
第6図 真空管回路と機械的方法の組合せによる電界の符号識別装置



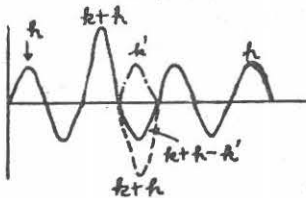
の位置では真空管 A, B は陽極電流が流れなくなり,  $\beta, \delta$  の位置では動作状態となる。今入力電圧の無い時には検流計 G に電流が流れない様に, A B を平衡させておく。S は遮蔽板の軸と結合して、軸の周囲に適当な角度だけ位相差を持たせて回転軸に固定出来る様にしてある。従ってこれは入力信号と同期して回転するから,  $b$  が  $\beta$  又は  $\delta$  に位置する時に, 電界の符号の変化に応じて抵抗  $g$  を流れる電流の方向が変わり, 従って G を流れる電流の方向も変る。(4)

B. 電極を利用するものの1例を第7図に示す。これは第1図(b)の一部分を示したもので, H は遮蔽板の穴を示し,  $h$  はその下にある絶縁体にはめ込まれた電極を示す。K は遮蔽板にあげられた特別の一組の穴である。K の下には特別な電極  $k$  があり, 図の様に  $k'$  の電極が溝の中にはめ込まれている。溝に沿って少し動かす事が出来る様になっている。 $k, k'$  の4個の電極は下面で, 他の電極の下面を結ぶ導線に接続されている。遮蔽板が矢の方向に回転すると,  $k$  と  $h$  が同時に露出する為分極電荷による電流が大になり, 従って出力が増大する。 $k'$  は他の電極が総て遮蔽された時露出する様にしておく。 $k'$  の位置を適当に調整する事により,  $k$  が露出された次の  $k$  が遮蔽される半周期における出力を,  $k$  の影響の全くない時の大きさに限定する事が出来る(第8図参照)。従ってこれ等補助電極を増

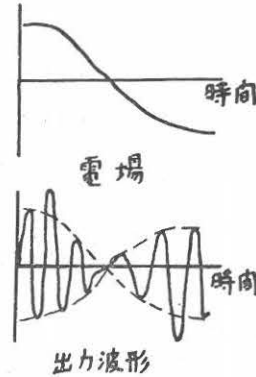
第7図 電極を利用した電界符号識別装置



第8図



第9図 電界と出力波形



設すると,  $k$  の露出した半周期のみ出力を増大させる事が出来るから, 電界の符号が反対になれば山の出る方向が反対になる。第9図に実際の電界の変化と得られる出力の図形を示す。(9)

C. A で述べた方法は, 集電部で発生した交流電圧をそのまま増幅して最後に整流する方法であり, B で述べた方法も結局交流電圧を符号付で増幅してゆくのであるが, 更に集電部で直ちに刷子式に機械的整流を行う方法もある。これは第2図に示す様な場合で既に述べたので省略する。(3)(10)

製作に当たっての注意は, A 及び C の方法においては特に整流子と刷子等の接触部に充分注意しなければならない。

## VI. 記録部

記録部の如何も亦測定器の性能を決定する重要な要素であって, 例えば集電部において充分な速応性を有しても, 記録部がそれと同じ程度の速応性を有しないならば無意味である。又電界の変化を記録する場合にもその目的により種々の方法がとられる。記録部の方式を決定するに当たって, 第一に決定しなくてはならない事は, 長時間連続で比較的ゆるやかな速度で記録するか, 或は短時間非常に速やかな変化を記録するかと云う事である。前者も後者も記録したい時は, 前者の記録速度を高めるよりも, 変化の速やかな時には両者を併用し, 変化のゆるやかな時には前者のみ動作させる様にした方が, 経済的, 能率的立場より見て望ましい。長時間連続的に記録する場合はペン書電流計等を使用すれば良い。又電流計を撮影機を使用して低速度で写す方法を用いた例もある。この装置の使用人は音声録音器を同時に使用して, 電流計に表す事の出来ない事項を録音する様にしている。(6) 近来磁気録音器が発達して来たので, これを利用した例もあ

るが、この方法は記録を磁氣的記録に変換しておき、後でこれを電圧に変化してその有様をブラウン管オシログラフで見ている、必要な部分を写真に写すのである。使用済のテープは再び消磁して使用出来るのと、比較的速かな速度で長時間連続記録出来る点非常に有利である。(12) 次に短時間速やかな変化を記録する方法の例を述べる。その1例は増幅された出力電圧をブラウン管の水平方向の偏向板に与え、常時直線を描かしておく。次にこの直線を覆う様に、黒い短冊型の紙片をブラウン管の表面にはりつける。この為通常は輝点は見えない。雷放電の初期に起る先駆放電から放射される電磁波によって、ブラウン管の垂直方向の偏向板に一定時間矩形波偏倚電圧が加る様に起動回路をつけておく。即ち雷放電の起った場合にのみ輝点が現れ、水平方向に振れる様にしておく。一方水平方向に軸を持つ回転円筒にフィルムを巻きつけた写真機をブラウン管表面に対して設備し、円筒を常に回転しておく(第10図(a)参照)。この装置により雷放電の起った瞬間のみの電界の変化を記録する事が出来る。しかしこの場合先駆放電の初部分の変化は観測出来ない。(6) 次に同じ様にブラウン管を使用するが、起動回路を用いないものの例を示す。集電部に発生した交流電圧に同期した時間軸を垂直方向に振動させ、出力電圧を水平方向に与えると、ブラウン管の表面には一定周期の波形が現れる。細長い水平方向の細隙を有する紙を、波形の頂上を残して全部覆う様にブラウン管表面にはる(第10図(b)参照)。細隙

の中央に小さな円形の紙片をはり、電界の状態が定常的であるか、変化の速度のゆるやかな時は、細隙に現れて居る頂上輝点が円板に覆われている様に水平方向の偏向板に直流電圧を加える。電界が急激に変化すると波形の頂点が円板より外れ、電界の強さに応じてその位置を変化する。これを前と同じ写真機により記録する。(9)

## VII. 平面更正

製作された装置の示す値を電界の強さに変換するには、二つの方法がある。一つは人工的に既知の電界を作り、その中で測定器の性能を調べる方法であり、他の一つは、既に電界の強さの値を示す様になっている標準となる装置と同時観測をする方法である。人工電界による方法は、測定器の上方に集電部の表面積に比して、充分面積の大きい導体平板を大地と平行に置き、これと大地との間に適宜な電位差を与え、その際の測定器の指示を読み取る。この場合は大地が平坦で導体板が充分広くないと、電界に歪が出来るので正しい更正値が得られない。他の一つの方法は、更正済の測定器と比較するのであるが広い平坦な場所で行わないと誤差が入るから注意しなければならない。又更正をする日は静かな晴天の日で、電界の有様が正常な日を選んで行う必要がある。なお測定器を簡単なモデルに置換すれば、計算により求める事も可能である。(2)(8)

## 引用文献

- (1) Ross Gunn: Phys. Rev., **40**, 302 (1932).
- (2) 畠山: 岩波講座物理学, **XII C**, 3, 5 (1939).
- (3) 長谷川: 地球物理, **4**, 161 (1940).
- (4) 青木: 電気試験所彙報, **8**, 145 (1944).
- (5) Waddel R. C., Drutowski R. C. and Blatt W. N.: P.I.R.E., **34**, 161 (1946).
- (6) 畠山: 中央気象台附属気象技官養成所研究報告, **1**, 52 (1946).
- (7) Ross Gunn: J. Appl. Phys., **19**, 481 (1948).
- (8) 夏目: 電気試験所彙報, **14**, 497 (1950).
- (9) Malan D. J. and Schonland B. F. J.: Proc. Phys. Soc. B., **63**, 402 (1950).
- (10) 本多: 雷の研究, 117 (1950).
- (11) Kasemir H. W.: Tellus, **3**, 240 (1951).
- (12) 北川・飯塚・村井・小林: 雷研究報告会資料, 第8回, 4 (1953).

第10図 ブラウン管による高速度記録器の例

