

電子管式磁束計について

吉城 肇*・熊谷寛夫

(1954 年 11 月 30 日受理)

On a Recording Magnetic Flux Meter

Hajime YOSHIKI and Hiroo KUMAGAI

(Received November 30, 1954)

ABSTRACT: A recording fluxmeter, the idea of which was first proposed by Prof. Dicke and applied in the Chicago cyclotron, has been set up for the purpose of measuring the magnetic field distribution of the 16" cyclotron now being built at the Institute of Science and Technology, University of Tokyo. Even a slight leak current exerts considerable influence on the behaviour of the circuit, therefore care was taken in this respect. Through proper arrangement, we can make A , the ratio of out put voltage V to current through galvanometer ig , equal to 10^{11} ohms resulting in the effective time constant τ of 10^4 sec. To overcome drift, we do not use "zero drift control," but instead adjust the relative position between galvanometer and phototube. The sensitivity obtained is about 1.5 gauss/volt and the over-all error is not more than a few percent. The stability is very high. The contents of this report is as follows: 1. Introduction, 2. Action of the circuit, a) general, b) how it acts when it is left without measurement, c) how it acts during measurement, d) problem of leak current, 3. Practical application of the circuit, 4. On the measurement and its accuracy, 5. How to design another recording flux meter under different circumstances, 6. Acknowledgement.

1. は し が き

従来磁場測定には主として磁束計が用いられていたことは周知の通りである。しかしこれには次の様な欠点がある。即ち (1) 測定コイルを含めた内部抵抗に限りがあるので、零点に戻る時間をある程度以上長くすることが出来ない。特にこの欠点は測定コイルの巻数をふやして感度を上げれば上げる程顕著になつてくる。従つて読取がむづかしくて誤差が大きくなつて来る。大きな電磁石の全磁束を計りたい時等は勵磁するのに時間がかか

るのでとても普通の磁束計では計れない。

(2) 沢山の磁場を多量に計ろうとすると非常な労力と時間を要する。

この欠点を除いて現れたのが Chicago 大学で始めて使われた電子管式磁束計⁽¹⁾である。簡単な紹介は既に田島英三氏によつて行われ⁽²⁾, 科研, 阪大, 京大のサイクロトロン⁽³⁾の電磁石の測定に利用されている。今回熊谷研究室でもその試作が行われ, 建設中の理工研サイクロトロン⁽⁴⁾の磁場測定に用いられて充分な成果を収め得たが, この磁束計についての Chicago 大学の報告に充分でない所があると思われるので, 我々の経験を報告したい。

* 修士コース東京大学大学院学生

2. 回路のはたらき

a) はたらきの原理的な説明

簡単に言えば、この回路は検流計と双子光電管を組み合わせた自動制御回路で、見掛けの検流計の周期を無限大にしようとしたものである。Fig. 2.1 は其の回路の最も本質的な部分を示す。

検流計—光電管系を自動制御に応用した例は Dicke, 高橋氏⁽³⁾ 等の報告にも見えている。又 Cioffi⁽⁴⁾ は磁性体の磁化曲線を描くために、これと殆ど同じ装置を使用している。

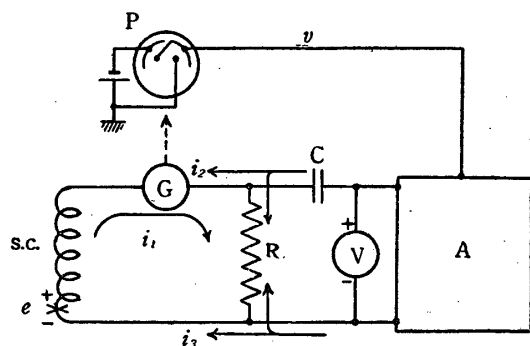


Fig. 2.1 The main part of the circuit of the recording fluxmeter.

さて回路のはたらきを簡単に説明しよう。始め検流計 G から出る光線を、図の様に直列に結線した双子光電管 P の二つの光電面に丁度またがる様に調節しておく。今測定コイル $s.c.$ の磁束が変化したために e という起電力が与えられたために $s.c.$ —検流計—抵抗 R に電流 i_1 が流れたとしよう。するとこの結果、検流計の鏡から発する光線はその位置を変え、二つの光電面に当たる光の量の比が今迄と違ってくる。このため、二つの光電管を結ぶ点の接地に対する電圧 v もそれに応じて変化してくる。この変化を直流増巾器 A で増巾して電圧計 V に出て来た電圧 V の極性が図のようになる様にしてフィードバックしてやる。(ここに注意すべきことは、こうして出来た電圧 V は始めの起電力 e に比べて、比べものにならない程大きいことである。それは増巾器 A によるのみならず、むしろ検流計—光電管系に依るところが大きい。) こうして発生した V は回路の蓄電器 C を充電する。この時充電電流の一部 i_2 が i_1 の向きとは逆に流れる。実際の場合は i_1 が流れると殆んど同時に i_2 が流れるので検流計に流れる電流はこの両者の攻め合いで決定される。そこ

で検流計から発する光線の行動を説明の都合上、微分化して述べると、この攻め合いで光線が光電管のある位置に暫時とどまっていたとすると、 v 及び V の変化はおこらない。極めてわずかの時間の後、 C は充電され i_2 は消える。すると i_1 の勢力が打勝つて光線は更に少し振れ次の攻め合いの位置迄進むことになる。この様にして起電力 e が与えられている限り V は増大を続け(後の計算でもわかる通り) $\int e dt$ が V 上に記録されて行くことになるのである。この時検流計のふれは有限ではあるが、極めて僅かである。さて起電力 e が次に取り去られた場合を考えよう。すると e が消え、若し C に充電電流が流れていれば i_2 がのこる。このため検流計の位置は自分自身の復元力と相俟つて元の位置に戻らうとするが、直ちにそれは光電管を通して増巾器の出力に V の減少となつてあらはれてくる、さうして C の両極間の電圧が V より大きくなつた時直ちに状態は充電の状態から放電の状態に一変する。實際上、 C の電極間電位差と V それ自身の電位差とは極めて僅かの差しかないので、この過程は全く無視してよいと言つてよく、回路は起電力 e の消えた瞬間、放電の状態に移ると言つて良い。すると電流は今度は i_3 方向に流れ出す。これは検流計を現在位置にとどめようという作用をなす。このため C の放電は実際の時定数、 $C \times (C$ に直列に入っている抵抗値、 $RR_0/(R + R_0))$ よりはるかに緩慢に行はれ、従つて V も一度とつた値を長い間保ちつづける。この様にしてこの系は見掛けの周期の極めて長い、感度の極めて高い磁束計として使ふことが出来るのである。

これの C を短絡してしまつたものは既に Gilbert⁽⁵⁾ によつて考えられている。Gilbert の場合は、検流計—光電管の助けをかりて外部の起電力 e を自動的に零点法で測らうといふものであるが、この回路は更にそれに蓄電器 C をつけて $\int e dt$ を電圧計 V の上に得て行かうとするものである。

b) 磁場測定をせずに放置していた場合

我々はここでもう少し立入つて上に述べた事柄を数量的に考えて見よう。

Fig. 2.2 に示された様に検流計 G を持つ回路、及び蓄電器 C を持つ回路に流れる電流をそれぞれ i_g, i_c とし測定コイル及び検流計の内部抵抗の和

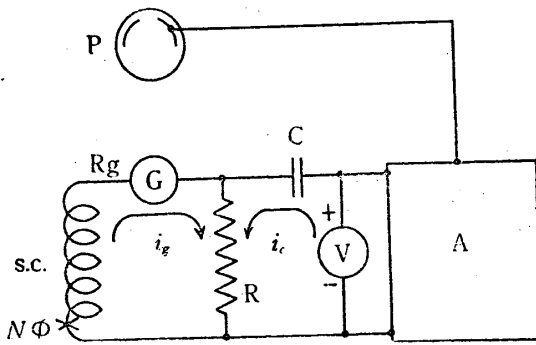


Fig. 2.2. The equivalent circuit for the circuit analysis.

を R_g , それと並列に入っている抵抗を R , 増巾器の出力電圧を V とすれば次の方程式が成立つ (M. K. S.).

$$V = R(i_c + i_g) + \frac{1}{C} \int i_c dt \quad (1)$$

$$N\dot{\phi} = (R_g + R)i_g + Ri_c \quad (2)$$

ここに ϕ は測定コイルを貫く磁束, N は測定コイルの巻数で (2) の左辺は測定コイルに発生する起電力を与える. 更に我々は検流計の振れが光電管, 増巾器を通じて V にフィードバックされることから第三の式を仮定する.

$$V = Ai_g + \delta \quad (3)$$

但し, δ は検流計と光電管の相対的位置によつてきまる任意の常数である. この仮定は次の様な事柄を根拠にしている. 検流計の運動方程式は検流計の振れを θ とすると

$$K\ddot{\theta} + p\dot{\theta} + k\theta = mi_g \quad (4)$$

であるが, (但し茲に K は回転部分の慣性モーメント, p は回転に対する制動作用 (渦電流, 空気の抵抗等) を表はす因子, k はよじれの常数である) ここで $K\ddot{\theta}$, $p\dot{\theta}$ を省略する. あとの計算では $\ddot{\theta}$ や $\dot{\theta}$ が無視できる程に θ の変化がゆつくりしているときを取扱っているのである. 即ち i_g と θ の間には完全な比例関係が成立し θ にレスポンスの遅れはないものとする. 更に光電管以後, V といふ出力の間にも位相の遅れはないものと仮定している. 即ち全体として (3) には i_g に対する V のおくれはないという前提が必要である. 実際問題としてこの前提が完全には成立たないので系の発振に対する対策を講じなければならない. $K\ddot{\theta}$ や $p\dot{\theta}$ を省略したのであるが θ の速い変化分に対してはこれも考える必要がある.

(1) (2) 及び (3) の三式が出たので先づ測定を

せずに放置した場合について調べて見よう. 放置した場合 $N\dot{\phi} = 0$ であるから, (2) の左辺を零と置いて (1) (2) (3) を解き, 且蓄電器の両極電圧 $V' = \frac{1}{C} \int i_c dt$ も一緒に求めてみると

$$V = -\alpha \frac{AR}{R + R_g} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + \delta \quad (5)$$

$$V' = -\alpha \frac{\tau}{C} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + \delta \quad (6)$$

$$i_c = \alpha \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (7)$$

$$i_g = -\frac{\alpha R}{R + R_g} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (8)$$

茲に

$$\tau = \frac{(A + R_g)RC}{R + R_g} \quad (9)$$

α は $t=0$ に於ける i_c の値である. i_g の初期値もこれと大体の値が等しいが, この回路では i_g は 10^{-9} アンペアを越えることはないので $0 \leq \alpha \leq 10^{-9}$ である.

τ は $(A + R_g)$ といふ因子を含んでいる. A は (3) で定義されるものであるが, 検流計, 光電管及び増巾器を適当に選べば 10^{11} 位にすることは容易である. R_g は 10^3 , R は $10^2 \sim 10^4$, C は 10^{-6} 程度にして見ると τ は 10^4 秒前後になる. V , V' , i_c 及び i_g はそれぞれこの有効時定数 τ で δ (ヴォルト) 或ひは 0 (アンペア) に指数函数的に収斂して行く. 測定に従事する時間が τ よりも充分短ければ (普通 5 分位) これは積分回路として役立つことを示している.

c) 磁場測定るときはどうか

次に実際変化する磁物の中で測定コイルを動かして測定を行つて見よう. (1) (2) (3) を書き直して

$$\dot{V} + \frac{V}{\tau} = \frac{ARC}{R + R_g} \frac{1}{\tau} \left(\frac{N(R + R_g)}{R} \ddot{\phi} + \frac{N}{RC} \dot{\phi} \right) \quad (10)$$

簡単のため $t=0$ のとき $\phi=0$, $t=T$ のとき $\phi=\Phi$ としその間の磁束の変化は時間に比例すると仮定しよう. 即ち

$$\ddot{\phi} = 0, \quad \dot{\phi} = \Phi/T, \quad (0 \leq t \leq T) \quad (11)$$

(10) は

$$\dot{V} + \frac{V}{\tau} = \frac{AN}{R + R_g} \frac{1}{\tau} \frac{\Phi}{T} \quad (12)$$

これを $t=0$, $V=0$ の初期条件で解くと

$$V = \frac{AN}{R+R_0} \frac{\phi}{T} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (0 \leq t \leq T). \quad (13)$$

$t \rightarrow \infty$ の時 $V = \frac{AN\phi}{(R_0+R)T}$ で、これは $\dot{\phi}$ に關聯して V に飽和値があることを示している。しかし実際はこんなところでは使はない ($\tau \gg T$)。即ち $\tau \gg t$ が成立つ範囲では

$$V = \frac{A}{R+R_0} \frac{N\phi}{T} \left(\frac{t}{\tau} \right) \quad (14)$$

で t に比例して増加する。特に $t=T$ では

$$\begin{aligned} V &= \frac{A}{R_0+R} \frac{N\phi}{\tau} \\ &= \frac{AN\phi}{(A+R_0)RC} \simeq \frac{N\phi}{RC} \end{aligned} \quad (15)$$

となり、注目すべきことに $A \gg R_0$ ならば V は A によらない。

但しこの結果には $\ddot{\phi}=0$ といふ条件が入っている。一般の $\phi(t)$ を用いて計算しても結果は殆んど変らない。

有効時定数は RC に比例し、出力 V は RC に反比例するから RC を用いて片方を有利にしようとするならば片方を犠牲にしなければならない。われわれは RC として $10^{-4} \sim 10^{-2}$ を使っている。

d) 漏洩の問題

かうして一応回路の動作の解析が終つてもいざ実際に装置を組んで働かせて見ると思ふ様にいかなかった。思ふ様に行かない一つの原因として漏洩の問題がある。この点に関して Chicago 大学の報告は充分でない。検流計を流れる電流は多くて 10^{-9} アンペアといふ僅かなものであるから、一寸した漏洩でも動作に大きな影響を及ぼす。これら漏洩の中で i) 蓄電器の漏洩と ii) 近くの高い電位をもつたものから、検流計の周辺の回路へ流れこむ漏洩がある。i) の場合について考えよう。

Fig. 2.2 の回路から更に C の両端を R' (これが漏洩抵抗に相当する) で結んで見よう。(Fig. 2.3) 新しく出来た輪を流れる電流を i_i として再び方程式を作ると

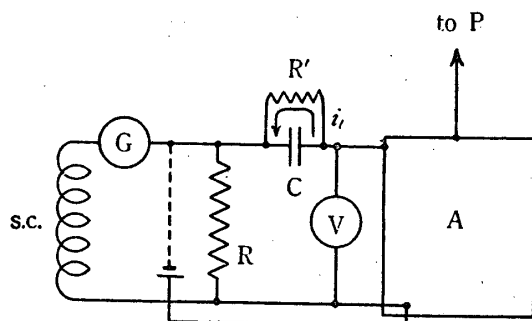


Fig. 2.3. The equivalent circuit when leaks are considered.

$$\left. \begin{aligned} V &= R(i_c + i_g) + \frac{1}{C} \int (i_c - i_i) dt \\ N\dot{\phi} &= (R_0 + R)i_g + Ri_c \\ 0 &= R'i_i + \frac{1}{C} \int (i_i - i_c) dt \\ V &= Ai_g + \delta \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

再び $\dot{\phi}=0$ のとき V を解くと

$$V = -\alpha' \frac{AR}{R+R_0} \left(1 - \frac{R'C}{\tau'} \right) \exp\left(-\frac{t}{\tau'}\right) + \delta \quad (17)$$

茲に

$$\tau' = \frac{R'C}{1 + \frac{R'(R+R_0)}{(A+R_0)R}} = \frac{R'C}{1 + \frac{R'C}{\tau}} \quad (18)$$

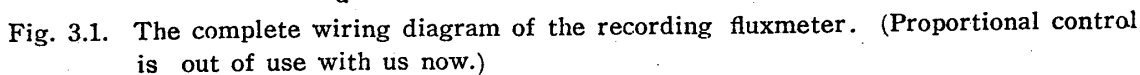
であり

$$\lim_{R' \rightarrow \infty} \alpha' \left(1 - \frac{R'C}{\tau} \right) = \alpha$$

でなくてはならない。

(18)からわかる通り $R'C$ が小さい時 $\tau' \simeq R'C$ であり $R'C$ が非常に大きい時 $\tau' \simeq \tau$ である。時定数 τ' は C の漏洩による時定数 $R'C$ をこえることは出来ない。このことから C に漏洩のある限り、いかに τ を大きくしても τ' で押えられて徒勞であることがわかる。若し τ' を τ と同じ程度の大きさにしようと思へば、漏洩に対する補償回路を設けるか、少くとも $R'C$ を τ と同じ程度、即ち 10^4 秒位まで大きくしなければならない。

次に ii) の種類の漏洩について簡単に述べれば、たとえ検流計周辺の回路の近くに、検流計回路自身と 1 ヴオルトの電位差をもつたものがあつたとしても、若しそのものと回路の一部分の間に抵抗値が一万メガオーム以下のところがあれば (Fig. 2.3, 点線で示す) 検流計には 10^{-10} アンペアの電流が流れるので出力電圧は (13) の場合と同じ様にどんどんと drift することになる。理



This document is provided by JAXA.

シャーシから切りはなして光電管（次節参照）と共に別な小さいシャーシ上に組んで前置増巾器を形成している。（点線の内部，Fig. 3.1.a）この前置増巾器の中には電池が内蔵されていて V_1 のグリッドをその電池の方に接続すれば直ちに約 $1/200$ V が V_1 のグリッドに与えられ，出力のよみと比較することによつてその時の利得を知るのに役立つ。これは V_1 , V_2 , (及び V_1' , V_2') の間に設けた $100 \mu\text{A}$ の電流計と共に増巾器の動作状態を監視するのに非常に有用なものであらう。ヒーターは全部蓄電池を floating しながら使用した。

現在利得は 150 倍に調節して使っている。この点が最も使いやすい安定な点であることが経験上知られた。

記録に用いた電圧計は横河の記録電圧計 (KR 型) で，内部抵抗 $7.5 \text{ k}\Omega$, 2 mA まで測定できる。そこで V_3' の陰極からはダミー抵抗 $7.5 \text{ k}\Omega$ を出して接地し， V_3 の陰極はこの記録計を通して接地した。但しこの記録計をいためないために一応 $7.5 \text{ k}\Omega$ を直列につないだパネル型の電流計を身代りにおき，必要なときだけ記録計の方に切換える様にしてある。（ S_0 ）

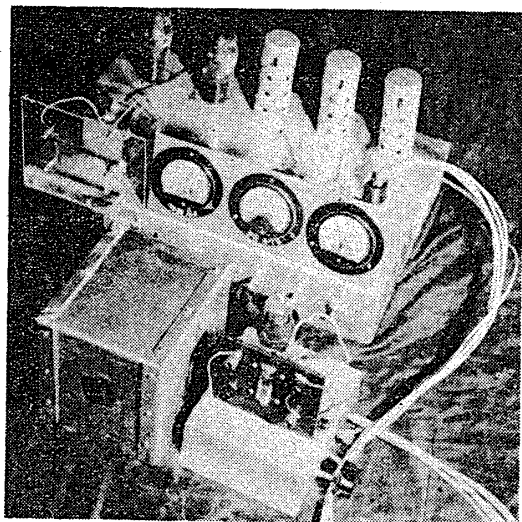


Fig. 3.2 The amplifier and pre-amplifier with the shielding box.

c) 検流計，光電管，光源

次にこの装置の中で最も重要な部品について順を追って述べて行くことにしよう。先ず検流計はあり合せの d'Arsonval 検流計でその電圧感度は $2.5 \times 10^{-7} \text{ volt/mm}$ ，内部抵抗は約 $1 \text{ k}\Omega$ であるものを用いた。周期は約 5 秒である。このよ

うに同じ電圧感度に対して一般のものより高い内部抵抗の検流計を使用することが，この磁束計のために損であるか得であるか早急に判断を下すことは難しい。 R_0/R があまり大きくなると次第に検流計に電流が流れなくなるので，その対策として R_0 が大きい時は適当に R をふやさなくてはならない。このため R^{-1} に比例する感度はそれだけ落ちるが，その代りとして測定コイルは常に R_0 と同程度の値になる迄は巻けるので巻き数をふやして感度を上げてやる事が出来る。この点では損得はない。但し測定コイルの幾何学的大きさが大きくなることは仕方がないことである。次に有効時定数 τ の方を考えるとこれは増巾器の増巾度及び検流計の電圧感度が同じならば R_0 の大きい方が得である。何故ならば $V = Ai_0 + \delta = A'R_0i_0 + \delta$ とすれば A' は同じ電圧感度の検流計に対しては変らないから

$$\tau = \frac{A'R_0RC}{R+R_0} = \frac{A'RC}{1+\frac{R}{R_0}} \quad (19)$$

となり，同じ RC に対して R_0 が大きい程 τ が大きい。

R_0/R が大きくなつても回路が安定して働く様になるためには恐らく検流計，光電管或いは絶縁物等を改良する必要があるあらう。それは丁度天秤で言えば支点を金属製から宝石に改める様な又ちがつた種類の改良に属するのではあると思はれる。

R_0/R が大きいといふことは検流計—光電管系の負フィードバックの量が小さくなるといふことである。又 R が小さいと発振が始まるがこの回路ではそれは渦電流による検流計のレスポンスの遅れが大きくなつてくるためであらう。一般に $R_0/R > 100$ になると drift や発振で実用的には使用が難しくなつてくる様である。

後に述べるようにこの装置では特に “drift” の調整を検流計と光電管の相対的位置で行はうとしたので (δ をかえること) 調整を微細にするため，検流計と光電管の位置を充分大きく 1.5 m 程に設計した。このため検流計の前面にある凸レンズは 60 度の老眼鏡を用いた。

始めに述べた様に，この回路に用いられる光電管は二つの光電管を直列につないだものである。この目的のためには従来の光電管を二つ向い合はせてその間にプリズムを置き検流計から来る光を

二つに分けて使つてもよいし、特にこうした目的のために二つの光電管を並べて一つのガラスの中に封じたオクタルベース (920) が米国で生産されている。しかし我々の場合は既に日本で発売されている模写電送用の双子光電管を特に日本電気 KK で改造したものを用いた (Fig. 3.3) これは 920 に比べ小型なので電流はあまり沢山はとれない。この磁束計のはたらきを充分に考慮した上で設計すると 1 V でせいぜいとれて $0.1 \mu\text{A}$ 程度である。この様に入力インピーダンスはきはめて高いものであるから光電管の導線の出し口はビースワックスで処理し漏洩を防ぎ 6C6 を光電管のすぐ後に立てて前置増巾器を作った。全体は光の入るところを除いてシールドしてある。(Fig. 3.2) 数ボルト程度で光電流が飽和することから、光電管に与えた電圧は 1.5 V を、直列につないだ両端に与えている。

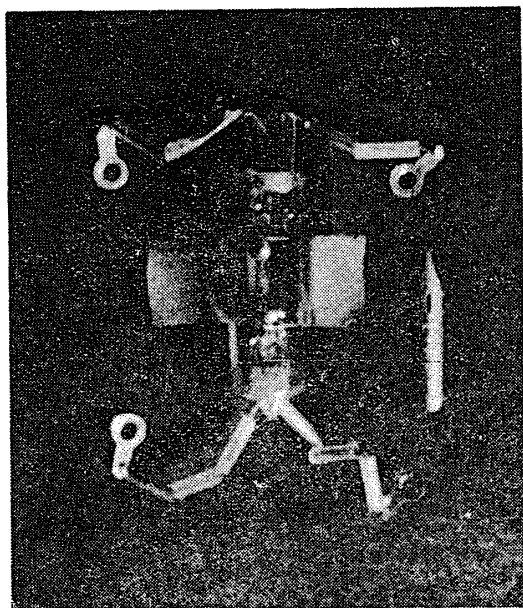


Fig. 3.3 The twin phototube now in use.

光電管を照らすために用いた光線は出来るだけ多く光電流をとらうといふ目的から明るいものを設計し、幻灯用の 100 V 350 W の電球にした。直径 10 cm のコンデンサーレンズで、検流計の鏡の上にこの電球の像をつくり検流計に附属したレンズと共にリレーコンデンサー系を形成させる。コンデンサーのすぐ近くに真鍮板で $3 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 位の縦長のスリットをつくり、この実像を光電管の二つの光電面にまたがる様な位置に結ばせる。光電管からグリッドに行く電圧の変化は二つの光電面にあたっている光の面積の比の変化

に比例するから同じ角度だけ検流計がふれたとしてもスリットの中の狭い方が v に対する感度は高くなる。我々はスリットの中を 3 mm と比較的狭く、感度の高くなる様にえらび、増巾度は検流計—光電管系で稼ぎ、増巾器はむしろ電力増巾に用いている。その代り縦の方は光電面の長さ一杯にして出来るだけ光の面積を大きくし少しでも電流を余計にとれる様にしている。

d) 抵抗 R, 蓄電器 C, 漏洩電流

Fig. 3.1. b の回路の中で検流計と直列に入っている抵抗は普通の固定抵抗を P. O. Box で計量したものをいくつも用意しておき適当なものを選んで用いた。始めこれは回路の中に組込む予定だったが、其の後自分の好きな値に取替えることが出来る様にエポナイト板の上にターミナルを出してそれにとりつけられる様にした。このエポナイト板は他に測定コイルと補償コイルへ行くターミナルをもつていて検流計や切換スイッチと一緒にアルミ板で内張りした一つの蓋つき杉箱の中に納められている (Fig. 3.1. b で点線で thermal shield と囲んだ部分) 検流計には余計な起電力による電流が流れては困る。熱起電力もその一つで、これを防ぐためにはこの回路に温度傾斜をつくらぬこと、出来るだけ接点の数 (例えばターミナル等) をへらすことが必要であるが、杉の箱の中に納めたのは前者の目的のためである。これで充分熱的な影響を除く目的は達せられた様で、ターミナル等接点の数が増しても大した厄介な事は今のところ起つていない。

この杉の箱と前述の前置増巾器を更に Fig. 3.4 に示す様な大きな箱の中に納める。箱の長さは約 1.8 m で下駄箱の様に側方の蓋 (真中で左右二つに切つてある) が開けたて出来る。図は開けたところで左に見えるのが検流計を納めた杉箱 (これも蓋が開いている) 右に見えるのが前置増巾器である。光源は箱の外にあり、穴から光が投射される。Fig. 3.1. b の点線で囲んだ中にある切換えスイッチ S_3, S_4, S_5 等は当然杉箱の中に収められねばならないので長い軸を通して大箱の上で遠隔操作出来る様にしている。杉箱は大箱の内側に太いネジ釘で極めてしつかり固定してあるので切換時の振動が検流計をゆらすことはない。

次に蓄電器 C について少し述べることにしよう

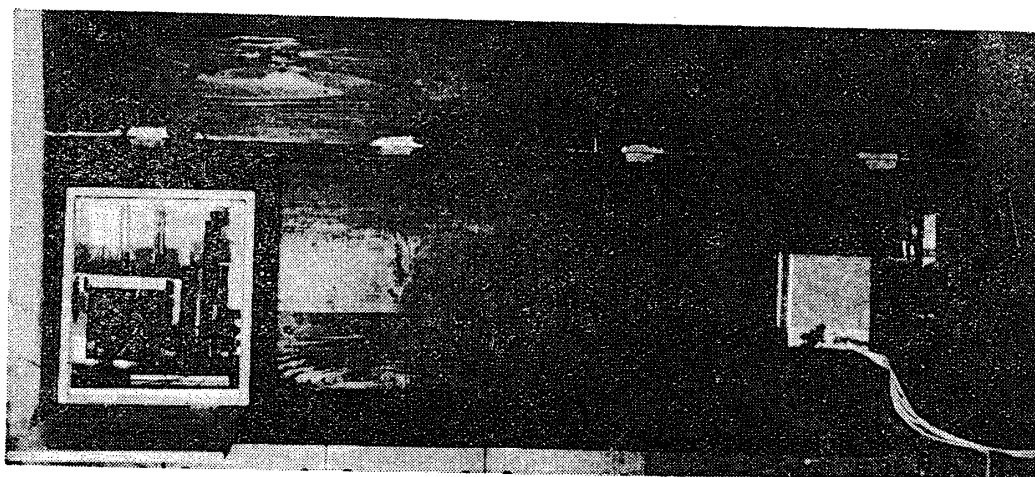


Fig. 3.4 The optical system of the recording fluxmeter.

う。前にも述べた通りこの蓄電器が本回路中で最も厳格な試験を受けなければならない。何故ならばこれに漏洩があるとその漏洩抵抗を R' とすれば時定数 $R'C$ で放電してしまふからである。このためこの $R'C$ が短ければ如何に回路自身の方が長い有効時定数をもつていても無駄である。 $R'C$ が有効時定数 τ よりも長いもの即ち蓄電器に高い絶縁が要求される。この絶縁試験は箔検電器を用いて行はれた。検電器の箔が半分閉ぢる迄に約二時間かかった某製作所の $2\mu F$ の O.F. 蓄電器が使用された。しかし吸収現象のある蓄電器は測定用としてあまり奨められるべきものではないことは明かである。O.F. 蓄電器はこの点疑はしい。^{*}しかし漏洩が仮にあつたとしても Fig. 3.1.b に示す “proportional control” (Dicke に依つて命名された) を用いれば漏洩を補償することが可能である。“proportional control” は検流計に流れる電流を助長して（だから検流計そのものに対しては正フィードバック）検流計—光電管の間の負フィードバックを強くする作用もあるが配線は一応したが現在我々は全くこれを使用していない。

次に Fig. 3.1.b にもある通り実用上の目的からこの蓄電器を外部から充電したり放電したりすることによつて自分で出力の電圧計の針の位置を自由に変えられる様にする必要がある (S_1 , S_2)。ところがこの際用いられるスイッチは始め

^{*}この論文を書いている頃から高梨製作所提供に依る、ポリエチレン蓄電器 $1\mu F$ を使用しはじめたが絶縁度、吸収現象の点で非常に良好な結果を得引続き測定に使用している。

ベークライト製のものを用いていたが、それでは漏洩が多くて殆んど使いものにならず（台風の過ぎた後等 $100 M\Omega$ 以下に落ちてしまふ）結局アクリル酸樹脂でスイッチを自作した。この系統のものは絶縁も高く、安心して使用することが出来る。(Fig. 3.2 増巾器の前面左方にある透明なスイッチ)。一般に測定コイルの起電力によつて発生する真の電流以外に検流計回路内を流れる電流はこの磁束計にとつて最大の敵である。上に述べた蓄電器の漏洩もその一つであるが其の外に前述の熱起電力による電流や近くにある高い電位のものから漏洩して検流計回路の中に流れ込む場合等がある。これらの影響を防ぐために設計は常に細心の注意を以て行ふ必要がある。例えば後者の場合として我々は蓄電器を増巾器のシャシーの上にとりつけたが検流計からそこへ引張つて来る電線はそれが極めて接地電位に近いものであつたとしても高圧ケーブルを用い、シャシーのターミナルは先ずアルミの部分を取り除きその代りにアクリル酸樹脂の板をはりつけて、そこに初めてターミナルをとりつける様にした。又ターミナルから蓄電器迄の配線も、細かいことの様ではあるが、高い電位をもつたところから検流計回路に流れ込もうとする電荷があつたら保護環の理を応用してシャシーの方に逃がしてやる様な考慮を配線のとき出来るだけしてやる。こうしてやれば実際 Dicke が最初考えた “zero drift control” 等という unnecessary 電流を補償しようという回路はいらないのである。

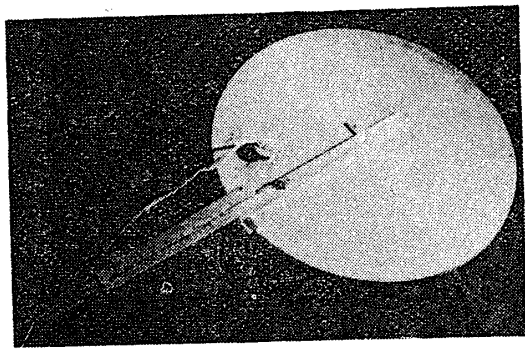


Fig. 3.5 Measuring equipment for the field. (The search and bucking coil can be seen on the disk which is fixed on the pole tip of the cyclotron magnet)

e) 測定コイル 補償コイル及び測定器具

前にも述べた通り測定コイルの巻数は検流計の内部抵抗と同じ位巻いても差支えない。我々は $0.1\text{ mm}\phi$ のエナメル線を高さ 10 mm 、芯の太さ $5\text{ mm}\phi$ のベークライト製ボビンに約千百回巻きつけて全体の直径を 15 mm にしたものを測定コイルにした。これを Fig. 3.5 に示す様な測定器具にとりつけた。測定器具は電磁石の pole tip の上にのせられる。リード線は $0.4\text{ mm}\phi$ で、ボビンのところでコイルの線と半田すけし糸でとめ、そこから直ちにきつちりとより合はせて検流計を納めた杉の箱迄もつて行っている。要所要所はニスで固定し断線を防いでいる。この測定コイルの大きさは決して理想的な大きさとはいえないが現在のサイクロトロン磁場の分布を測定するには充分である。

磁場は励磁電流の変動によつて常に一定であることは難しいのでこの測定コイルと逆方向に同じ数だけ巻いたコイルを測定コイルと直列に入れてその変動を補償する。このコイルを補償コイルという。この目的からも想像がつく通り、完全に補償が可能ならば、補償コイルの大きさは測定コイルと同じ大きさである必要はない。取扱いには大きい方が便利であるので我々は直径 $20\text{ mm}\phi$ の真鍮製ボビンに $0.2\text{ mm}\phi$ のエナメル線を約 200 回巻きつけ、最後の一回はボビンにつけたフアイバーのフランジに穴を開けて丁度磁場の変動を補償する位置で巻き止めた。これも $0.4\text{ mm}\phi$ のリード線につなぐ。補償コイルの存在によつて測定コイルだけの場合の $1/300$ に磁場の変動を補償す

ることが出来た。 $1/300$ 残つたのは未だ補償が完全でないためである。補償コイルは磁場の半径方向を測定する場合は磁場の中心の近くに置き、角方向を測定する場合はその測定している半径の上の一点に固定する。

Fig. 3.5 に示す測定器具は熊谷研究室で話し合つた未設計されたもので全部手動である。一つは半径方向に 5 mm の間隔で測定コイルを動かすことが出来る。他の一つは角方向に 2° の間隔で動かすことが出来る。始め映画の間歇運動に似た機構で自動的に測定コイルを動かす案もあつたが、その後非常に磁場の変化のはげしいところではゆつくりと測定コイルを動かさないと検流計の光線が追尾出来なくて光電管から飛び出してしまふことが実験の結果わかつたので手動の方が安全であろう。これに用いる材料は（我々の場合は真鍮及び軽合金）全部非磁性のものをを用いなくてはならない。材料を $20,000\text{ gauss}$ の磁場の近くにもつて来て磁性を感じなければ合格とした。

4. 使用結果及び精度

適当に R をえらんで直列に 3. d) でのべたエポナイト上のターミナルにつないで置く。例えば 13.5Ω , 95.5Ω , 242Ω , $1.09\text{ k}\Omega$, $15.0\text{ k}\Omega$ という風に。切換スイッチ S_3 を R が小さくなる方にきりかえて行けば感度は高くなってくる。増巾器のヒーターを予熱しておき、光源を点火して、増巾器に B 電圧をかけると検流計はふれて直ちに前置増巾器の中の光電管にスリットの像は吸い込まれる。こうした時我々は光線が“trap”されたと呼んでいる。正常に磁束計全体が働いている時はこの trap がすぐおこるが、故障がおこると先ずこれがおかしな発振をおこしたりするので直ちに他の部分を検査しなければいけない。我々の機械の場合、完成後は未だそうしたことは起つていない。 B を入れたとき出力を監視していると始めの零ボルトをさしたまゝの時も、動き出してある所で止る場合もあるのでアクリル酸樹脂でつくつたスイッチ S_1 又は S_2 を用いて自分の好きなところへ出力の針をもつて行く。この時プレート回路に入れた二つのマイクロアンメーターがそれぞれ反対方向に大きく振れる筈である。これが振

れれば光線は trap されているし振れなければいつの間にか光線が光電管から飛び出して検流計—光電管の結合が切れて回路が働いていないことを示す。大きく振れてもどちらかの電流が $100\ \mu\text{A}$ 以上流れそうになつたら直ちにスイッチ (S_1 或いは S_2) を切る。プレート電流はその儘光線の位置に関係があるから我々の場合 $100\ \mu\text{A}$ 以上になると光線がもう光電管から飛び出しそうなところまで来ていることを示しているからである。その代りスイッチを入れていた間に C に流れ込んだ電荷はそのままそこに残っているから、そういうことをくり返すうちに次第に自分の思うところに出力の針をもつてくることが可能である。針が $+1\ \text{V}$ 位のところに来たら切換スイッチ S_6 で記録計の方にきりかえる。(あまり高い電圧のところで切換えると切換えのときの衝撃で光線がとび出してしまふ。) 次に再び S_1, S_2 を適当に使つて 10 ボルト位のところに針をもつて来たら記録計の時計をうごかして記録紙を流しはじめる。大抵の場合 drift が認められるであろう。このとき前置増巾器の位置、即ち光電管の位置を光線に直角に移動させて (θ をかえる) drift が収まる様な所を探す。これが案外時間のかかる仕事で、その補償する前置増巾器の位置も日によつてわずかながら異なる。とにかく drift がなくなつたら始めて測定が可能になる。

現在のところ、こうして測定されるこの磁束計の稼働率は 100% といつてよい。

上の例に示された R をとつたとき、最も感度を落した時は full scale 25,000 gauss 相当、最も感度をあげた時 full scale 20 gauss 相当の測定が可能である (full scale は 15 ボルト)。較正は 10,000 gauss 附近の三ヶ所でプロトン共鳴吸収を行つたが磁束計で計つたものはこの中一点を合はせると他の二点はぴたりと一致して三点の平均をとる必要を認めない。10,000 gauss を覆はない範囲の R については、 R に感度は逆比例することを用いて良い。 R は、だから、予めその値を正確に知つておく必要がある。

精度の限界を考えると、誤差として入ってくるものの中に;

- i) 横河の記録計そのものに入る誤差
(これが一番大きい) 2%

- ii) drift a) 例えば蓄電器に吸収現象が多少あると思われる等磁束計自身の不完全さに依るもの

b) 勵磁電流の変化によるもの
これらは感度を高くする程大きくなるが最大 1% とみれば充分である。

- iii) τ の有限によるもの。5 分の測定で 1%

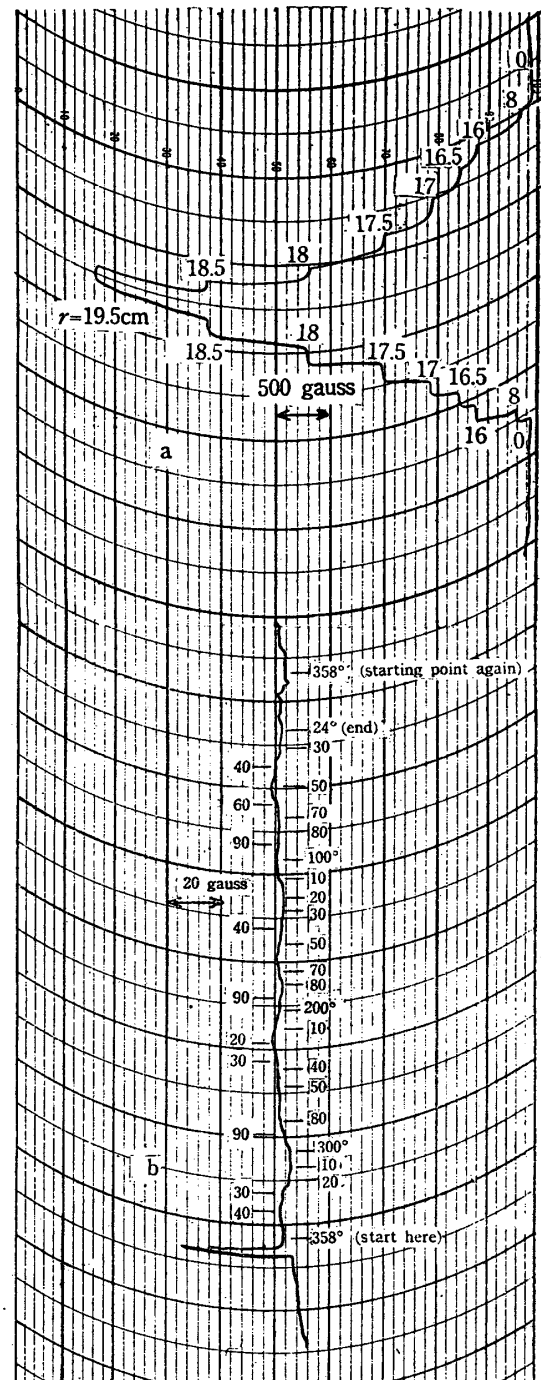


Fig. 4.1. Two examples of the recorded distribution curves.

- a) radial distribution of the magnetic field which is 19,000 gauss at $r=0$.
- b) azimuthal distribution at $r=14\ \text{cm}$ of the magnetic field of 18,000 gauss.

以下.

これらの中で i) は恒常誤差で使用法に慣れれば極めて僅かにすることが出来る. どんな場合でも誤差が測定値の 2~3% をこえることは先ずあるまいと思われる. したがって 1/300 に補償した補償コイルを使えば 1/10000 の測定が可能である. こうして測つた二三の例を Fig. 4.1. a, b に示す. 種々の結果については既に学会で発表された⁽⁷⁾.

5. 若し新たに装置を組むとしたら

現在こうしたら一番早く組めるだろうと思われることを述べておく.

先ず検流計の内部抵抗を測定すること. 次にこの内部抵抗と同じ位の内部抵抗になる迄, 測定コイルを巻いてしまうこと. これで N がきまる. 持ち合はせの記録計の full scale の電圧 V (例えば我々の場合だと 15 V) を知ること. 次にこの full scale を何 gauss にしたいか, 実験の方の要求からきめ, それから磁束変化 ϕ を求めること. (例えば full scale 100 gauss (10^{-2} weber/m²) にしたく, 測定コイルの面積が 1 cm² (10^{-4} m²) だつたら ϕ は 100 Maxwell (10^{-6} weber)) (15) から RC が直ちに求められてくる. 次に R_0/R は精々 100 以上にすることは難しいのでこれから C がきまってくる. 例えば $R_0 = 100\Omega$, $N = 100$ turn とすると, R はうまくいっても 1Ω 以下にすることは難しい,

$$C = \frac{10^2 \times 10^{-6}}{15 \times 1} = 6.7 \mu\text{F}.$$

又 $R_0 = 10\Omega$, $N = 30$ turn, 測定コイルの面積 10^{-1} cm², 所要感度 10 gauss/full scale ならば $R = 0.1$ として

$$C = \frac{30 \times 10^{-8}}{15 \times 0.1} = 0.2 \mu\text{F}$$

等の結果を得る. 一般に C が大きい回路程使い

易いが, 上のそれぞれの場合について C が上に与えられる値をこえると目的とする感度を安定に得るのは難しくなつてくると言えそうである. C をきめてしまえば実験の方から要求される τ を基として A の値が定まつて来る. 例えば $\tau = 10^4$ とすれば, 前の場合に対しては 1.5×10^{11} , 後の場合に対しては 5×10^{12} 位が要求される. 前の場合はとにかく, 後の場合の値を得ることは難しいであらう. このときは "proportional control" 等で τ をのばす別の工夫をしなければならないであらう.

6. 結 び

終りに臨み, 我々は次の方々に心から感謝の意を表したい. 困難な点で常に有益な指導と助言を惜まれなかつた大野助教授, 助言に工作に貴重な時間をさいて下さつた, 阿部, 庄野, 黒田各氏, その他, 我々をとりまく総ての人々の助力によつてこの磁束計が働いたことを我々は深い喜びと感謝の念を以つて自覚する. 又光電管を特に我々のために提供された日本電気株式会社の方々にもお礼申し上げる. 更に蓄電器を提供された高梨製作所の方々に感謝の意を表する.

なほ Fig. 3.5 にある測定装置は工場の辻氏其の他の方々に依るもので, その点も合はせてお礼申し上げる次第である.

文 献

- (1) D. S. Banks: The University of Chicago 170" Synchrocyclotron Progress Report I 130.
- (2) 田島英三; 科学 21 449 (1951)
- (3) 高橋秀俊, 荒井昌昭; 応用物理 17 182 (1948)
- (4) P. P. Cioffi; R.S.I. 21 624 (1950)
- (5) R. W. Gilbert; R.S.I. 7 41 (1936)
- (6) 霜田光一; 応用物理 18 326 (1949)
- (7) 熊谷, 庄野, 吉城; 第9回日本物理学会年会