

一万ガウス前後で使う電磁石の設計方針と性能

熊谷 寛夫, 庄野 久夫

On the Design Principle and Performance of an Electromagnet for Use in 10000 Oer. Region

Hiroo KUMAGAI and Hisao SHONO

ABSTRACT: In electromagnets, the magnetic field H increases at first linearly with exciting current, and then it drops than the linear line, reaching a saturation value. In some cases the saturation field is as low as 6000 Oer., whereas the saturation induction of iron is larger than 15000 gauss. In our design, in which the section of iron core increases in the exciting coil, the magnetic field is linear to exciting current up to 15000 Oer. Brief history and fundamental principles of electromagnet design are also given. Details of the construction are given in appendix. (Received March 5, 1952)

§ 1. まえがき

我々は最近 10,000 エルステッド前後でつかう電磁石を設計、製作したので、ここに、設計における考えのすゝめ方について述べたい。

電磁石の設計方針を実用になる程度に記述してある書物は今まで殆んどなかった。そのために筆者の一人は十数年の研究生活の間に、いろいろの人と討論をし、又設計のための実験も行つて来た。

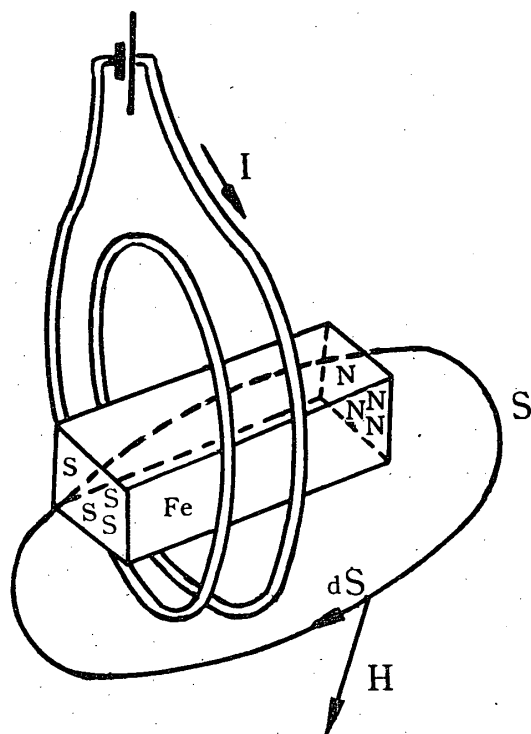
更にこんどの設計のために、考をすゝめ、実験も行つたのであるが、実験をしてから同じような考えや実験が過去において外国でたくさん行われて、論文として発表されていることを知つた。

このようなわけで、ここに述べることは独創的なことではない。しかし過去において発表された論文をまとめておかないと、これからあとで設計する人が、我々と同じようなまわり道をしなければならないので、ここにすじ道をたてながら考え方を述べたい。

内容は独創的ではないが、電磁石は電磁気学の立場からどのように考えるべきものであるかを示した点、いゝかえると電磁石の設計の出発点をつきりさせたのは、いままでの数多い論文では示

されていなかったものであると思う。

さて物理学の実験に使う電磁石は実験をする場所を提供するために空気間隙を持つている。この空気間隙を全く無くすれば磁路は変圧器の場合に



第 1 図 磁界の積分定理

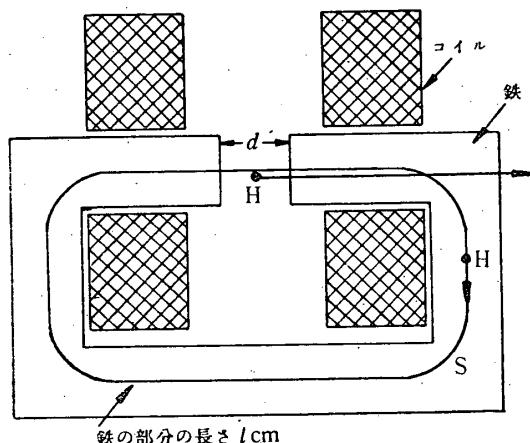
なるのであつて、変圧器についてはすでに立派な設計方針が確立しているわけである。しかし空気間隙が相当に大きいときには、特別なことが起るが、これは電磁気学の根本から考えるべき問題である。

電磁石の問題は勿論準定常であるから変位電流を考える必要はない、第 1 図において任意の閉曲線 S について積分をとると、

$$\oint_S (\mathbf{H} \cdot d\mathbf{S}) = 4\pi \Sigma I \quad (1)$$

であつて、 ΣI は S を貫く電流の和である。この定理の S は図のように鉄などの物質の中を通つてもよい。このときに鉄が磁化してあらわれる磁荷（磁極）によつて作られる磁界と、電流が作る磁界の和が(1)式の中の H である。(1)は電磁石の性能をきめる根本の式である。

さて第 2 図の実際の電磁石の磁路に沿つて閉曲線 S をえらんでみる。空気間隙と鉄の中では



第 2 図 磁路と磁界の積分定理

磁気誘導 B が連続であるから鉄の中の平均の H' は $H' = B/\mu$ によつて空気間隙の磁界 $H = B$ にくらべて非常に小さい。空気間隙の長さを d cm, 磁路の鉄の部分を l cm とすれば、(1)の積分は

$$H \times d + H' \times l = 4\pi NI \quad (2)$$

となり、 N はコイルの巻き数であり、 I (e. m. u.) は電流である。多くの電磁石では $H' \times l$ は $H \times d$ にくらべてはるかに小さい。たとえば $d = 3$ cm, $l = 100$ cm, $\mu = 2,000$ とすれば $H' \times l$ は $H \times d$ の 1.5% の程度である。このときは近似的に

$$Hd = 4\pi NI \quad (3)$$

となつて、 d が一定ならば H は電流 I に比例する。

この関係は磁界が小さいときにはよく成立ち、

この比例関係が成立つ範囲では、(3)の式には d だけが入つていて、磁極の形が入っていないので、空気間隙の近くの磁極の形状を変えても磁界は変化しない、このときには磁極をいわゆる“しぼる”ようにしても、同じ d では磁場は強くなるということが実験してみると分る。しかし“しぼつて”も磁場が強くないのは磁場が飽和していないときであつて、磁極などが飽和しているとき、たとえば 15,000 エルステッド以上の磁界を作るときには“しぼつて”磁界を強くすることができ、事実この方法で 3 万又は 5 万エルステッドの磁場を作ることができる。

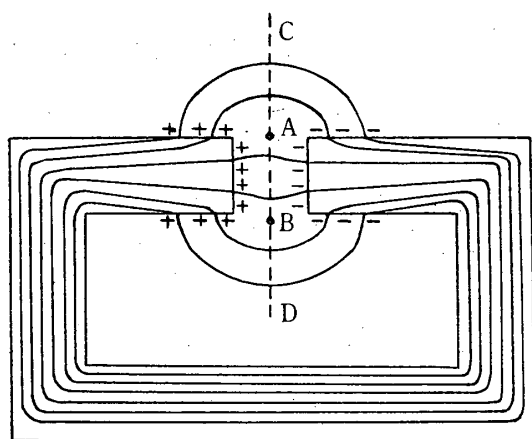
さて鉄が飽和して μ が小さくなると (3) の近似が困難になつて、 H と I の比例関係が成立しなくなることが期待される。鉄は大抵のものが大体 $B = 15,000$ ガウスになつて飽和するから、(3)の関係が $H = 15,000$ エルステッドまで成立つと考えられる。ところが (3) 式の比例関係はもつと小さい磁界において成立しなくなり、場合によつては 4,000~5,000 エルステッドでも成立しない。 H が I に比例しないときには同じ磁界を作るために、大きい電流が必要であつて、大きい電源が必要になる。物理学の精密な実験には電源が小さくてすむ方が具合がよいのである。

5,000 エルステッドくらいで比例しなくなるとは不思議なことであつて、この事実の原因をたしかめたことがこの論文の要点である。これについていろいろ考えた上で、空気間隙では 5,000 エルステッド位でも磁路の大部分では磁気誘導が 15,000 ガウスになっているより外に原因を求めることはできないと考えて次の実験を行つてみた。

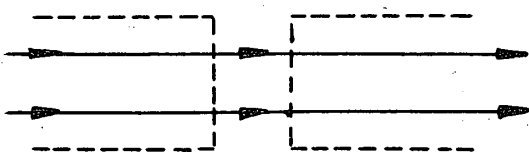
§ 2. 一つの電磁石に関する測定

電磁石では第 3 図 (a) のように、磁極の側面を通る漏洩磁束がある。これが磁極の断面 AB を通る磁束に比較して 2 倍程度であれば、図のように AB では $H = 5,000$ エルステッドでも、磁路の大部分は $B = 15,000$ ガウス程度になるから飽和が起るわけである。このような予想のもとに $CABD$ 面の磁界を測定して、積分によつて磁束を求めると、実際に CA 及び BD の間の磁束は AB の間のその 2 倍近くあつた。

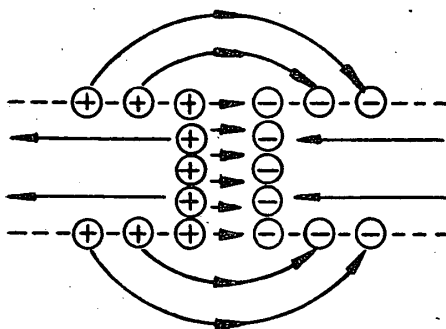
漏洩磁束の本質については次のように考えるこ



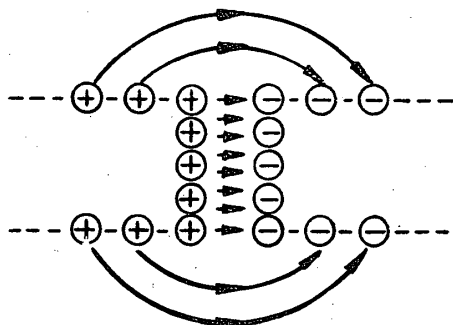
(a) 漏洩磁束を示す



(b) コイルの作る磁界



(c) 表面磁荷の作る磁界

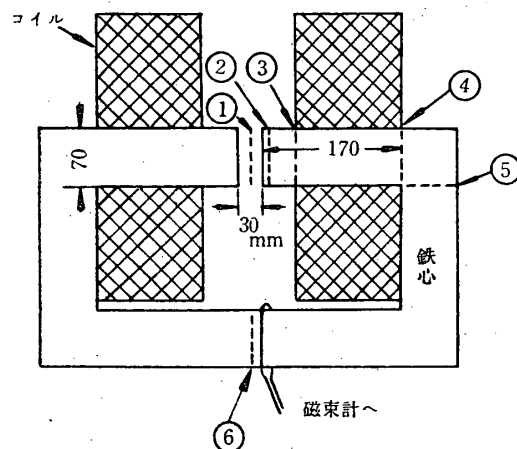
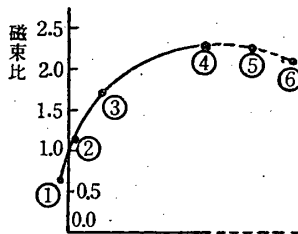


(d) (b) と (c) を重ねた磁界

第3図 コイルの作る磁界と磁荷がつくる磁界とができる。電磁石の場合には磁界はコイルの作る磁界と、磁荷分布がクーロンの法則によつて作る磁界を加えたものである。このときに鉄の中では μ が大きいから磁界が小さく、近似的には零とみなしてよい。さてコイルの作る磁界は第3図(b)のように磁路の部分では一様であるから、(c)図の磁荷分布による磁界が鉄の中では

(b) 図のものを打ち消して、(d) 図にならねばならない。(c) 図の磁界がこの妨らきをするためには、磁荷は図のように磁極の両側にも分布する必要がある。これは磁極の向いつている AB の部分に一様に正負の磁荷が分布したのでは、鉄の中で (b) 図の磁界を消すための一様な磁界をつくることができないからである。側面に磁荷が分布することは、そこで鉄が外面方向に向つて分極していることであつて、そこから磁気誘導 B が外に出ていることに外ならない。いまは鉄の中の磁場が零であると考えているから鉄が $\mu = \infty$ であつても漏洩磁束は存在するものである。ちなみに磁極の空気間隙では (b) と (c) 磁界が加え合つて、大きい磁界になるのである。

漏洩磁束の量をもつと定量的に知るために第4図の実験を行つた。こ



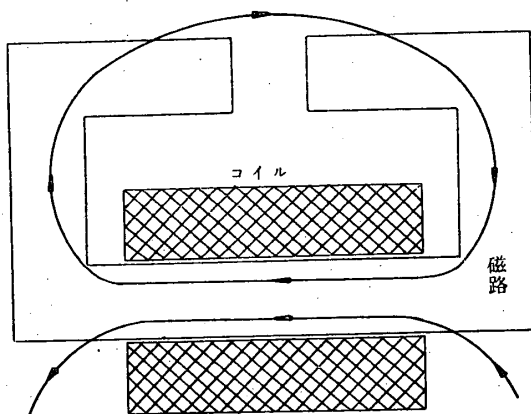
第4図 一つの電磁石の実験

の実験はすでに 1924 年に P. Villard⁽⁸⁾ が行つたものと同じである。図のように磁路の各部分にサーチコイルとして、1 又は 2 捲きのエナメル線を捲き、磁極の中央にも同じサーチコイルを置く。このサーチコイルを磁束計につないで磁束を測るわけであるが、このサーチコイルは動かすことができないから、磁石の励磁コイルの電流を断続して磁路を通つている全磁束を測るのである。磁極の端面を通る磁束を 1 として、他の点の磁束を示すと図のようになる。磁極に近い励磁コイルのはし ③ ではこの比は約 1.7 であり、励磁コイルの他の端 ④ では 2.3 である。磁路の中央 ① では

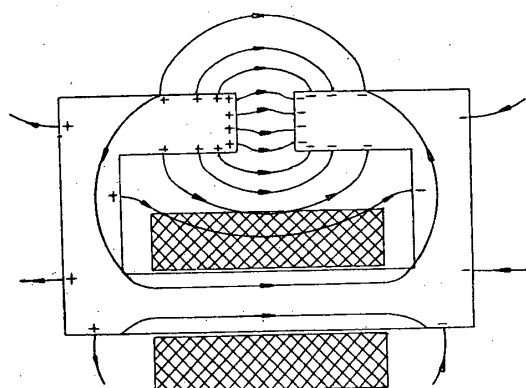
この比は約 0.7 である。したがって ① のところで 5,000 ガウスでも ⑥ のところでは約 15,000 ガウスになり鉄が飽和することが容易に分る。このために磁路の中の磁場の大きさを無視することができないために、(3) 式が成立しなくなつて、 H と I の関係が直線から外れて来るのである。そして図のような磁石では 6,000 ガウス以上を作ることができない。このような事情を改善してもつと強い磁場まで、磁場と励磁電流との比例関係を成り立たせるにはどうしたらよいであろうか。第 3 図で反省したようにたとえ $\mu = \infty$ としても、漏洩磁束は少くならない。事実、第 4 図の磁束比の実験を励磁電流のいろいろな値で行つても同じ結果となり、磁場が弱いときに磁束比が小さくなるようなことは認められない。

電解鉄のように磁化し易い鉄を使つても、磁化が容易なのは約 15,000 ガウスまでのことであつて、それ以上では飽和してしまうので殆んど意味がない。それで次のようにするより外仕方がないことになる。図の ② ③ ④ と磁束 Φ が増すにつれて、磁路の断面積 S も増加せしめて磁気誘導 $B = \Phi/S$ を一定にすることである。そのためにまず第 4 図の磁束比の変化と同じ割合に磁路の断面積を変化させると、実際にはこの場合の磁束比は第 4 図の時とはちがつて来て、 B を一定にすることはできないという心配もあるが、第 3 図の考察によつて S を変化せしめても Φ はそれほど変わらなくて、 B を一定にすることは可能であると見透しをつけることができる。

§. 3. 電磁石設計の歴史

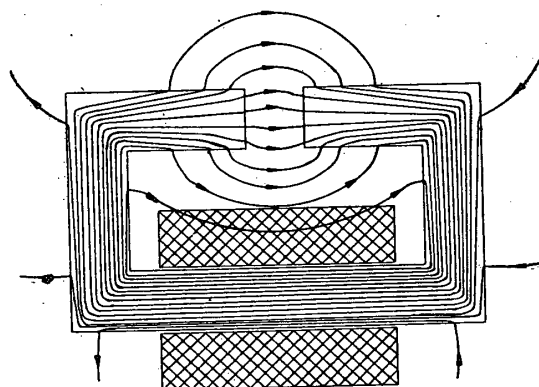


コイルの作る磁場
第 5 図 (a)

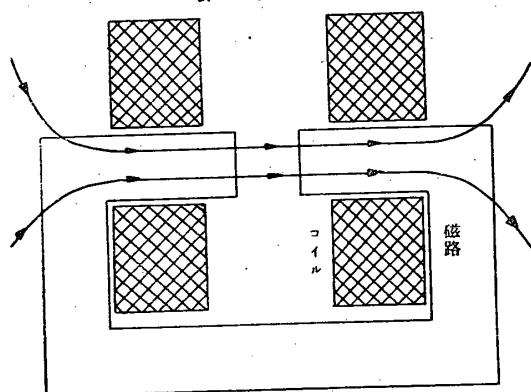


磁荷の作る磁場は磁路の中でコイルの作る磁場と反対になる

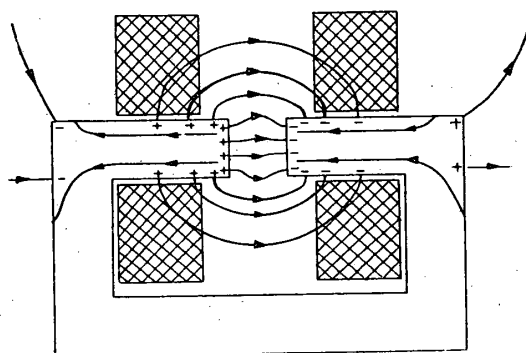
第 5 図 (b)



磁気誘導線
第 5 図 (c)

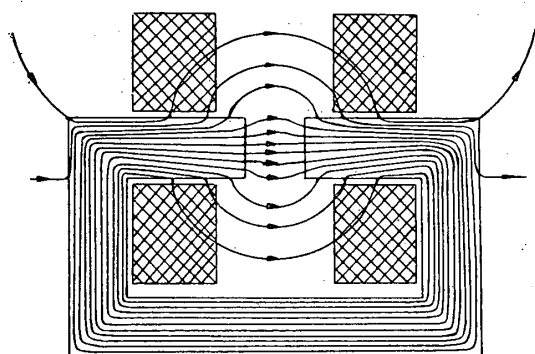


コイルの作る磁場
第 6 図 (a)



磁荷の作る磁場は磁路の中でコイルの作る磁場と反対になる

第 6 図 (b)



磁気誘導線
第6図 (c)

ここで電磁石の設計の歴史をふりかえってみよう。電磁石ははじめ第5図のように作られたが、これは強い磁場を作るのに適しないので、年代がはつきりしないが1900年より前にRuhmkorffは第6図のようにした。これは磁極間隙になるべく近く励磁コイルを置く設計である。このようにすると漏洩磁束が少くなるのであるが、その理由は第3図のような考察によつて了解できるが、その考え方を第5図と第6図に示してある。(a)はコイルのつくる磁界、(b)は表面磁荷のつくる磁界で、これの合成されたものが実際の磁界であり、(c)図は磁気誘導線である。また第6図のコイルの位置がよいことは1913年にdu Boas⁽⁴⁾が実験によつても指摘している。現在電磁石の設計は殆どRuhmkorffの設計の方針によるものである。

現在日本の物理の実験室で多くつかわれている、いわゆるWeiss Magnetといわれるものは1907年のWeiss⁽¹⁾の発表によるものであるが、Weissはすでにこの論文で、漏洩磁束のために磁路が飽和することが、強い磁場を作ることにはまたげになるからといって、磁路はコイルを出てから太くして断面積を約1.3倍にしている、日本の長岡半太郎博士の設計のものもコイルを出てから磁路を太くし、鉄を多量に使った設計である。§1で述べたように、鉄に飽和現象がなければ、磁場は間隙距離 d と電流だけできまつて磁極の形状には無関係である。しかし鉄の飽和現象のために一般に、できるだけ強い磁場を作るためには、磁極の形を適当にしなければならない。この形として最も簡単なものはEwingが1900年頃に計算したもので、軸と約 54° をなす円錐状

の磁極である。この計算はEwingの著書

“*Magnetic Induction in Iron and other*

Metals”に述べてある。しかしこれは計算の

立場があまり単純であつたので現在あまり重く見られていない。du Boas⁽³⁾はいろいろの形の磁極について計算し、又Fuller⁽⁶⁾は当時の無線通信のPoulsen Arcのための電磁石の設計においていろいろの形の磁極について計算している。彼はその結果として、もつともよい形をすいしようしている。しかしこれらの論文では磁極の形状は励磁コイルの外で問題にしていて、コイルの中はいつも円筒状である。一方コイルの中でも磁路の断面積をだんだんと大きくする設計はVillard⁽⁸⁾がすいしようして、すでにCotton⁽⁹⁾、⁽¹⁰⁾がフランスで、Dreyfus⁽¹²⁾がスウェーデンでこの方式によつて何十吨という大きい電磁石を作っている。また殆ど同じ年代にBoas⁽⁷⁾が発表した設計でも、磁路は階段状に太くなっている。またもつとさかのぼれば1914年にDeslandres⁽⁵⁾の発表したものも磁路はコイルの中でだんだんと太くなっている。磁路が励磁コイルの中で断面積が変化している設計にはこの外にもたくさんあつて、Walerstein等⁽¹¹⁾、Howe等⁽¹⁷⁾、Freed⁽¹⁸⁾、又最近のBitterの設計⁽¹⁹⁾がそれである。強い磁場を作るのには磁路の設計に意を用いねばならないことは以上のようなのであるが、大切なことをはつきり示したのはVillard⁽⁸⁾の実験である。また最近米国のM. I. T. 教官が編んだ磁気回路の書物⁽²⁰⁾には空気間隙のある電磁石の問題が論じてある。ここではVillardや我々が実験によつて求める数値を、設計のときに磁極の形から実用公式によつて求めることが工夫されている。またサイクロトロン設計の論文の中で、電磁石の磁路の設計を論じたものもあるが⁽¹⁶⁾、サイクロトロン用電磁石ではコイルの中の磁路が太くて短いために第4図の磁束比が小さくて1.3程度である。電磁石の磁極の形状の問題はH. Betheが1938年頃に扱つていて、Howe⁽¹⁷⁾はこの結果だけを示し、Henderson⁽¹⁶⁾も言及しているが、発表されていないのでどんな物理的内容のものか知ることができない。

§4. 電磁石の2種類

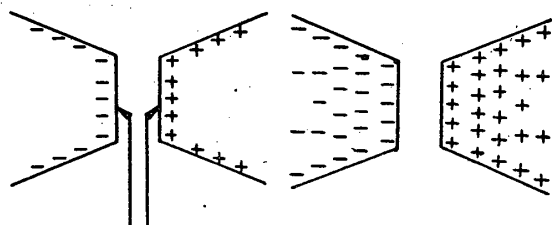
前節に数多くの電磁石設計の文献をあげたが、

電磁石は 2 つの種類に分けられる。それは

(1) 鉄の磁気誘導の飽和値 (15,000~20,000 ガウス) 以下でのみ使うもの

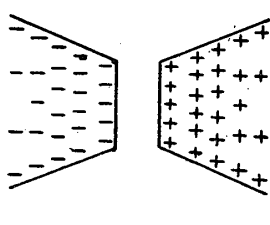
(2) 鉄の磁気誘導の飽和値 (15,000~20,000 ガウス) 以上でも使うもの

の 2 種類である。(1) では、間隙でも磁路でも磁場や磁気誘導が鉄の飽和値以上にならないように設計すればよい。このようにすれば鉄の中の磁場 H は小さくなり、大体において (3) 式が成立つ。このときに鉄の μ が大きいから静電気学でいうように導体の中では電荷が存在しないことに相当して、磁極は第 7 図のように鉄の表面にだけ分布する。向い合っている磁極の表面の磁荷



表面密度 $\pm P$

第 7 図 鉄の飽和値以下で使う電磁石



第 8 図 鉄の飽和値以上で使う電磁石

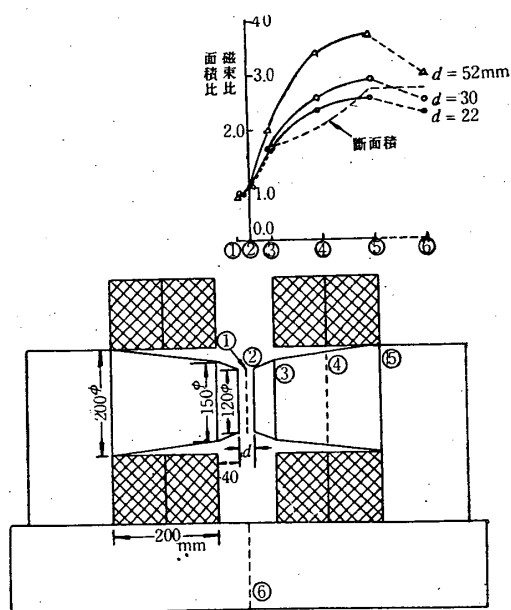
密度を $\pm P$ とすれば、その中の磁場は $4\pi P$ である。 P の飽和値 P_0 による $4\pi P_0$ まで磁場を大きくすることができる。

次に (2) の種類では、問題の磁場が鉄の飽和値を越すのであるから、磁路の少くとも一部分では磁気誘導が飽和値を越すのである。この部分では H が大きくなる。このような部分の長さをできるだけ短くすることが必要である。一方この種類の電磁石について考えるべきことは、鉄の磁化は飽和値以上にはならないから、表面にある磁荷密度はどんな場合でも P_0 を越えないことである。励磁コイル自身が作る磁場は小さいので、表面磁荷だけによつて作られる磁場は鉄の飽和値を越えることはできない。実際にこれより強い磁場を作っているときには第 8 図のように磁荷が表面だけでなく、体積の中にも分布している筈である。これが間隙に近く、しかも多量に分布することが望ましいのである。このために磁極は適当な形をしていなければならない。このために磁極の断面積を“しぼる”必要がある。このように (2) の

種類の電磁石では体積磁荷が大切であることはすでに du Boas⁽³⁾ が指摘し、又 Bitter⁽¹⁴⁾ の論文もこの線にそつたものである。しかし我々のこの論文では (2) の種類の電磁石については全くふれないことにする。

§ 5. 新しく作った磁石とその性能

第 9 図は新しく作った磁石のスケッチである。設計の条件は次のようである。



第 9 図

(a) 間隙における磁極の直径 12 cm

(b) 間隙 2 cm で 10,000 エルステッドを作るのに電源が 50 V, 6 A 程度ですむこと。

この 2 つの条件のうち (a) は磁場の均一度を良くするために直径を大きくしたものであり、(b) は (3) 式のように磁場と電流が比例するならば、励磁コイルの銅線の太さを 2, 3 種類に変えて設計してみると、電源 50V, 6A 程度で (b) の条件の磁場を作ることが可能なことが分る。ここであくまで磁場と電流が比例することが大切な条件であつて、この点が設計の主要な点である。このための資料を § 3 で求めたわけである。

そこで磁路の形状としてえらんだものは第 9 図のものである。図で (1) から (5) までの部分と、左でそれに相当する部分が断面が円形であり、他の部分は断面が矩形である。矩形の部分の断面積は円形部の (5) のところと同じにしてある。(2) では直径 120 mm, (5) では 200 mm であるからこ

ここで断面積 S は約 2.8 倍になる。② と ⑤ の間で断面積の変化をどうすればよいかという事が問題になる。以上をきめるには次のような近似的な考えによつた。それは第 4 図の実験によつて、増大する磁束と断面積が比例するように切口をきめる。これは曲線になるから適当に直線の集りに直す。このときに次の 2 つの点を考慮することが必要である。まず第 1 に第 4 図は磁路の断面積が変わらないときのものであるから、磁路の断面積を変化させたときには、磁束の増大の有様も変つてきて、大きくなるわけである。第 2 は磁束の増大のありさまは磁極の直径 $2a$ と、磁極間隙 d との比によつても変化することを第 4 図には示していないが、実験によつて知つてゐる。 $2a$ にくらべて d が小さくなれば変圧器の磁路に近づくわけであるから磁束比の変化が小さくなることは当然である。新しい電磁石は第 4 図のときにくらべて、直径が大きく間隙が小さいときに使用する予定であるから、このために磁束比は小さくなる。

この第 1 と第 2 の点を考慮すれば、上のようにしてきめた磁路は、使用するありさまでは、磁束の増大と断面積の増大が平行して大体 $B = \Phi/S = \text{一定}$ となることができると、“見当”をつけたわけである。この見当はあとで述べるように大体あたつてゐた。

磁路の材料としては次の 2 つの理由で熱処理をした電解鉄又は純鉄が望ましい。

(1), ヒステリシスが普通鉄の $1/2$ 又は $1/3$ である。

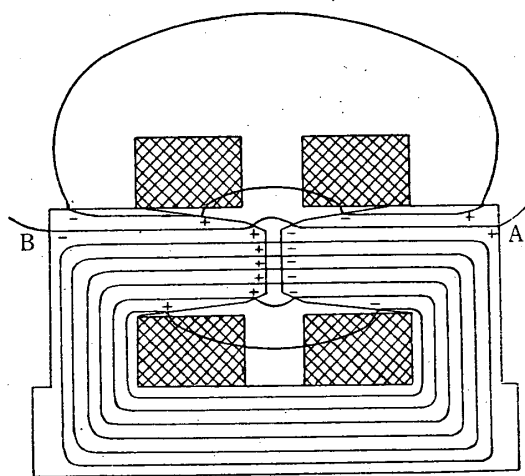
(2), (3) 式は (2) 式で磁路の中の積分 $H' \times l$ を無視したものであるが、 $H' \times l$ が普通鉄より少い。

しかし費用の点と、電解鉄が板の形で作られていて、第 9 図のような磁路をつくるために技術的困難があることの 2 つの理由で、普通鉄のうち炭素の少ないものを使うことにした。このために、同じ磁場を作るために電解鉄を使うときにくらべて 3~4% だけ大きい電流が必要である。これは大したことではないが、ヒステリシスの稍大きいことは不便なことである。しかし電解鉄でもヒステリシスは零にはならないので、多額の費用でもないかぎり電解鉄を用いることはあまり意味のないことと思う。要するに電磁石では磁路の形

の設計が第 1 に大切であつて、材料の選択は第 2 に大切なことである。

さて第 9 図の電磁石ができ上つてから、第 4 図と同じように、①②③④⑤⑥ 点における磁束を測定した結果を第 9 図の上部に示してある。磁極間隙 d を 22, 30, 52mm の 3 種に変えて実験をした。図の点線は設計された磁路の断面積の変化を示したものである。図でみるように $d=22$ mm のときに大体 $B = \Phi/S$ が一定になつてゐる。 $d=30$ mm では B は増大し、 $d=50$ mm では更に大きい。測定はないが、逆に d が小さくなつて $d=10$ mm くらいでは、③④⑤ の順序で $B = \Phi/S$ が減少しているはずである。

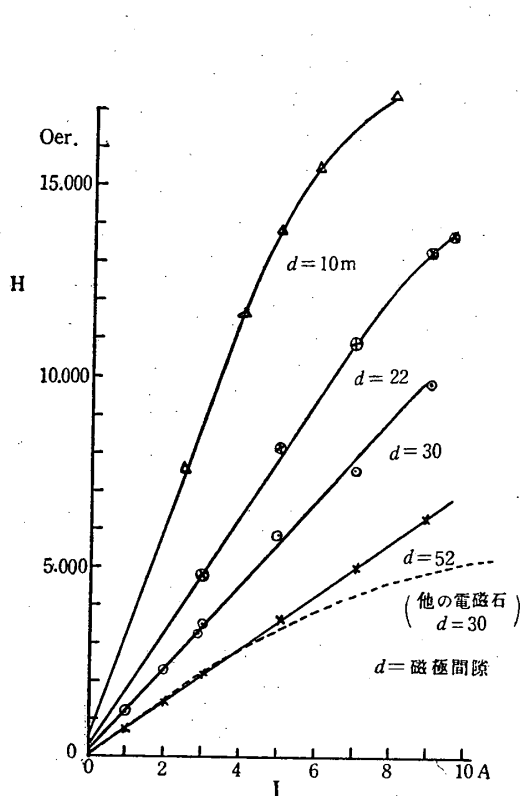
ここに注意したいことは、磁路の間隙と反対の中央 ⑥ 点ではいつも磁束が減少していて、 $d=50$ mm のときに大きい変化を示している、このことは第 4 図の磁石でも認められた。したがつて磁気誘導 B の分布は第 10 図のようになつてゐるわけである。これは第 5 図 (c) にも示してあ



第 10 図 磁気誘導線

る。この分布は前にも述べたように、 μ が小さくて起るものでなく、 $\mu = \infty$ の近似においてもこのようになるものである。第 10 図のように無視できない磁束が空中をまわつてゐるわけであるが、この磁束は非常に広い面積を通るから磁場は小さいものである。又第 10 図の A 部と B 部にも磁束分布のために図のように磁荷が分布している。この部分が鉄片を吸いよせることはよく知られてゐるが、その原因は上のようである。

さてこの電磁石の電流と磁場の関係を 4 種の間隙距離において実測した結果を第 11 図に示す。

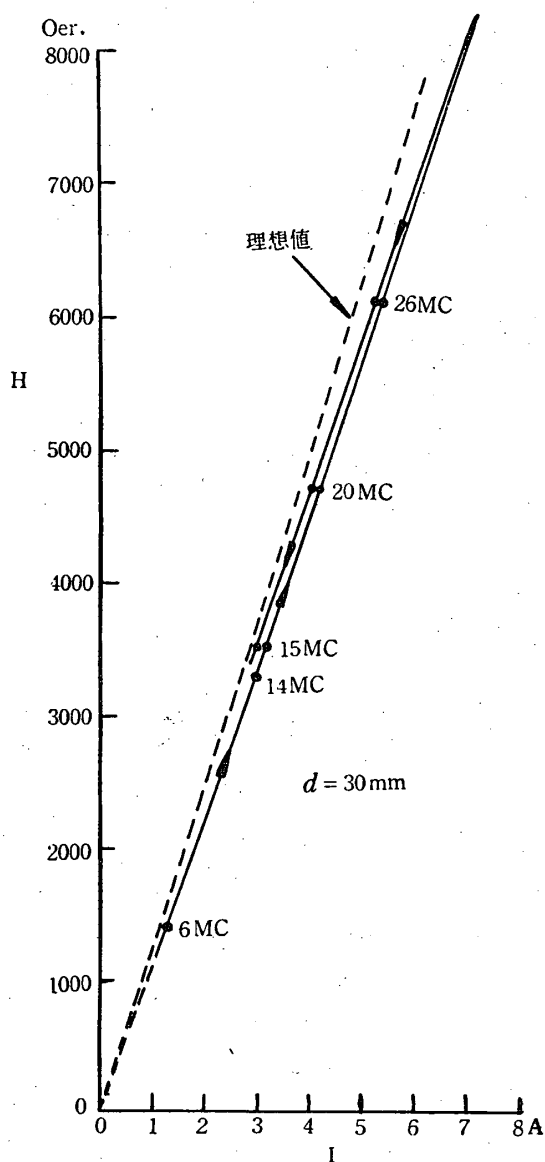


第11図 電流と磁場

磁場の測定には陽子共鳴吸収をつかつて校正した磁束計を用いた。図の点線は第4図の電磁石の $d=30\text{mm}$ の実測である。これでは H と I の関係は、 $H=3000$ エルステッドから始まり始め、 $H=6000$ エルステッドより上の磁場は作れない。新しい磁石については電源が約 90V で、 10A 以上は流れないので、 $d=30, 52\text{mm}$ では $10,000$ エルステッド以上は出ていない。 $d=22\text{mm}$ では $12,000$ エルステッドまで H と I は比例し、 $d=10\text{mm}$ では $13,000$ エルステッドまで出ている。この電磁石でマイクロ波共鳴吸収の実験を行っているが、電源は 6V 、 60AH の実験室用蓄電池を $10\sim 15$ 個用いている。

§ 6. 性能の吟味

附録で述べるように、励磁コイルは我々の手で捲いた。このときに捲き数を誤りなく数えることに注意した、それは $N=2,927$ 捲きである。これに注意したのは (2) 式の $H \times d$ と $H' \times l$ の比を知りたいためであつた。それで陽子共鳴吸収によつて正確に磁場を知つて、 $d=30\text{mm}$ の場合に第12図のように精密に実験してみた。磁場は磁束計をつかわずに、直接陽子共鳴吸収のおこる電



第12図 磁場と電流

流値をしらべた。実際には陽子共鳴吸収の電波の波長を例えば 15MC にきめておいて、共鳴吸収の起る電流値を、電流が増すときと、減少するときの二つの場合を知るわけである。図には用いた周波数も書き込んである。このとき磁場と周波数の関係は

$$H = 2.3488 \times 10^{-4} \nu \quad (H, \text{エルステッド} \\ \nu, \text{cycle/sec})$$

である。図の点線は磁路の中の $H' \times l$ を無視したとき、すなわち $H = 4\pi NI/d$ によつて計算したところの磁場の理想値を示すものである。実際の磁場はこの理想値よりも 8% 程度低くなつてい。これで $H' \times l$ の値を知ることができた。 l は大体 200cm であるから H' を知ることができ、これによると $B=6,100$ ガウスのとき $H'=9$ エ

ルステッドであつて $\mu=700$ 程度になつて、熱処理してないためか、 μ は大きくない。しかし熱処理するか又は、もつとよい鉄をつかつても、図の理想値に近づくだけであつて、磁場の大きさはあまりかわらない。

ヒステリシスの影響は、電流の最大値としてどこまで増してから、もどつて来るかによつて違う。図は 7.3 A まで増してからもどるときのもので、行きともどりでは同じ磁場をつくるのに大体 0.15 A のちがひがある。最大値がそれぞれ 1.7 A, 3.6 A, 10.5 A のときはヒステリシスによる電流のちがひはそれぞれ、0.03 A, 0.09 A, 0.16 A であつた。

磁場を一樣にするために、磁極は Rose⁽²¹⁾ の資料によつて周辺に厚さ 1 mm, 巾 2.11 mm の突起部をもっている。また磁極の面は 5/1000 mm 程度まで平面に仕上げ、2 つの磁極の間には精密に仕上げた真鍮スペーサー 3 個を入れる。このようにして磁場の一樣性を陽子共鳴吸収の wiggle によつて見ると、3,292 エルステッドのところで、最良の場所では 1 cm の範囲で約 0.01 エルステッドの変化しかない。しかしこのような程度の一樣性を作るには磁極間隙 d を一樣にするほかに、鉄の材料の一樣性が大切である。このために磁極を熱処理することが大切であるといわれる⁽²²⁾。磁極は厚さ 4 cm の部分がとり外せるので、熱処理をして更に実験をする予定である。尙これに関連してこの取替可能の磁極をしめつけるボルトが、中心を避けて位置しているが、これは磁場の一樣性に対する影響を少なくするためであつた。このボルトの 1 本を取り去つても、上の程度の一樣性では、一樣性に変化がなかつた。これは一樣性については間隙の近傍の材料だけが大切であることを示している。しかしこのような電磁石でどの位に一樣な磁場を作ることができるかの問題はこれからの研究題目である。

§ 7. むすび

以上、空気間隙をもつ電磁石の設計における基礎的な考え方を示し、それによつて設計した 1 例の性能について述べた。

なお本研究は理工学研究所特別研究費によつて行われたものである。

設計にあつて御助言を得た茅誠司教授ならび

に茅研究室の田岡忠美氏に御礼を申しのべる。また考えをすゝめる初期において、いろいろの鉄の磁化曲線を測定していただいた島田順二氏に感謝する。次に電磁石の製作にあつて、労苦を惜まず協力された研究所の工作工場の方々に心からの御礼を申しのべる。また絶縁塗料について指導を賜つた日本ベークライト株式会社研究所長上中三男二氏並に塗料を供与された同社の御好意に感謝する。なお電磁石の製作、性能の測定などに協力された柿内研究室小松八郎氏並に写真版の製作をしていただいた本研究所の福井四郎氏に対し御礼を申し述べる。

文 献

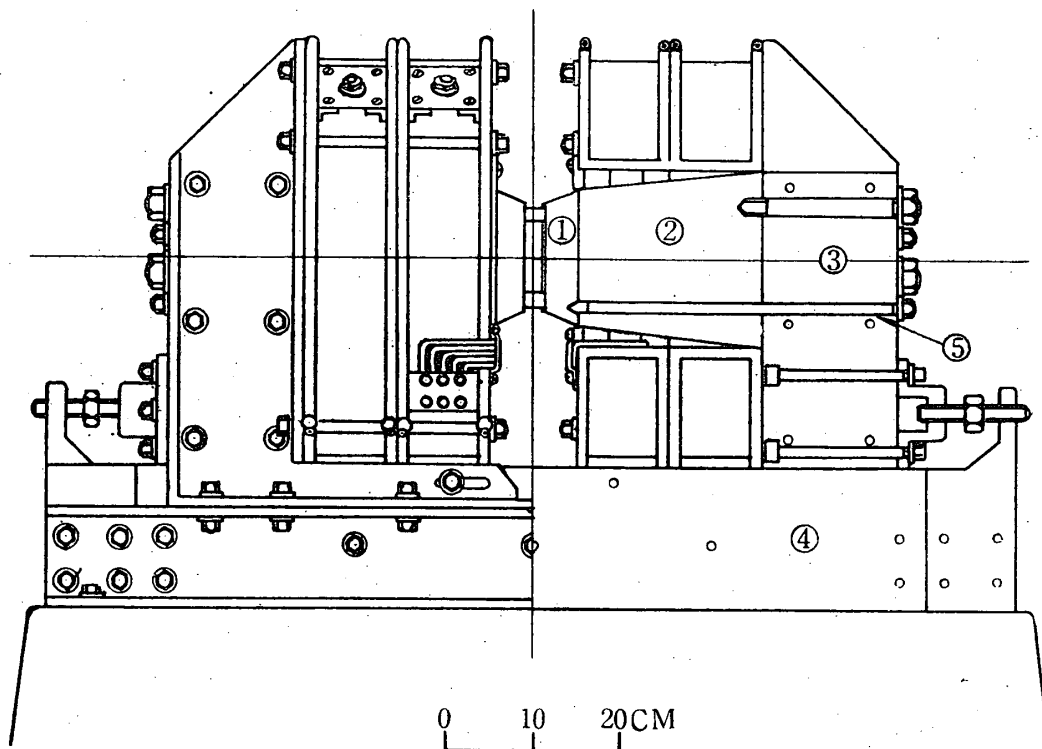
- (1) M. P. Weiss: *J. de Phys.*, 6, (1907), 353.
- (2) M. P. Weiss: *C. R.*, 156, (1913), 1970.
- (3) H. du Bois: *Ann. d. Phys.*, 42, (1913), 903.
- (4) H. du Bois: *Ann. d. Phys.*, 42, (1913), 953.
- (5) H. Deslandres and A. Perot: *C. R.*, 158, (1914), 226.
- (6) L. F. Fuller: *Proc. I.R.E.* 7, (1919), 449.
- (7) H. Boas and Th. Pederzani: *Zeit. f. Phys.*, 19, (1923), 351.
- (8) P. Villard: *C. R.*, 179, (1924), 1365.
- (9) A. Cotton: *C. R.*, 187, (1928), 77.
- (10) A. Cotton: *C. R.*, 190, (1930), 544.
- (11) I. Walerstein and A. I. May: *R. S. I.*, 3, (1932), 136.
- (12) L. Dreyfus: *Electrotech. und Maschinenbau*, 53, (1935), 205.
- (13) H. B. Durrant and C. F. Abt: *R. S. I.*, 7, (1936), 144.
- (14) F. Bitter: *R. S. I.*, 7, (1936), 479, 482.
- (15) F. Bitter: *R. S. I.*, 8, (1937), 318.
- (16) M. C. Henderson and M. G. White: *R. S. I.*, 9, (1938), 19.
- (17) J. D. Howe and J. Walerstein: *R. S. I.*, 9, (1938), 53.
- (18) S. Freed: *R. S. I.*, 11, (1940), 117.
- (19) F. Bitter and F. E. Reed: *R. S. I.*, 22, (1951), 171.
- (20) M. I. T. 教官編, 尾本義一, 宮本茂業訳, 磁気回路と変圧器 (上): 71-102.
- (21) M. H. Rose: *Phys. Rev.*, 53, (1938), 715.
- (22) H. S. Gutowsky and C. J. Hoffman: *Jour. Chem. Phys.*, 19, (1951), 1259.

(附 録) 製 作 過 程

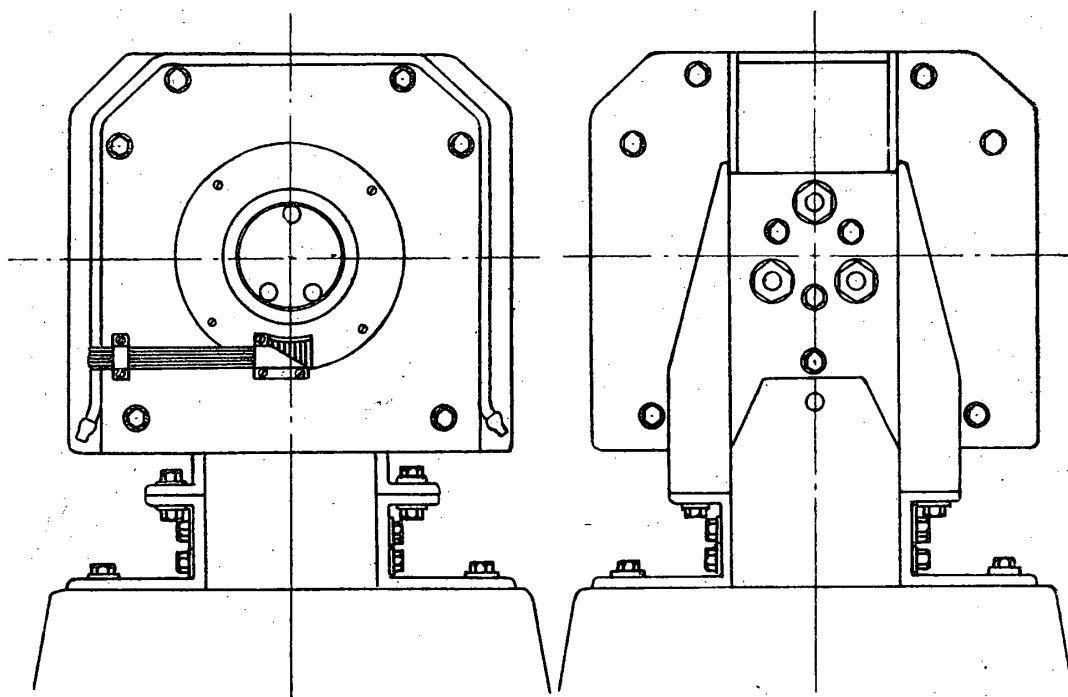
§ 1. 磁路

設計における組立図を第 1 図と第 2 図に、でき
上り写真を第 3 図と第 4 図に示す。設計図の①
② は断面円形, ③ と④ の断面は $160 \times 200 \text{mm}^2$

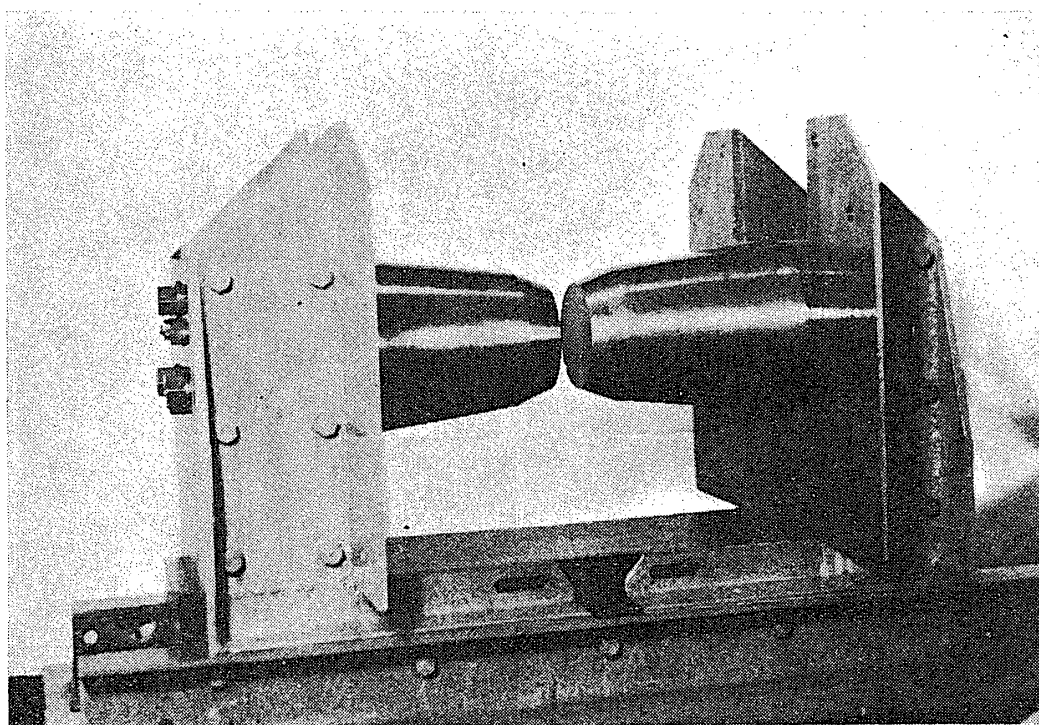
の短形である。寸法は本文の第 9 図に示してあ
る。① と② の部分は鍛造した軟鉄を仕上げたも
ので、炭素の含有量は夫々 0.1~0.2% と、0.2~
0.3% であつた。また垂直部と下部の水平部の磁



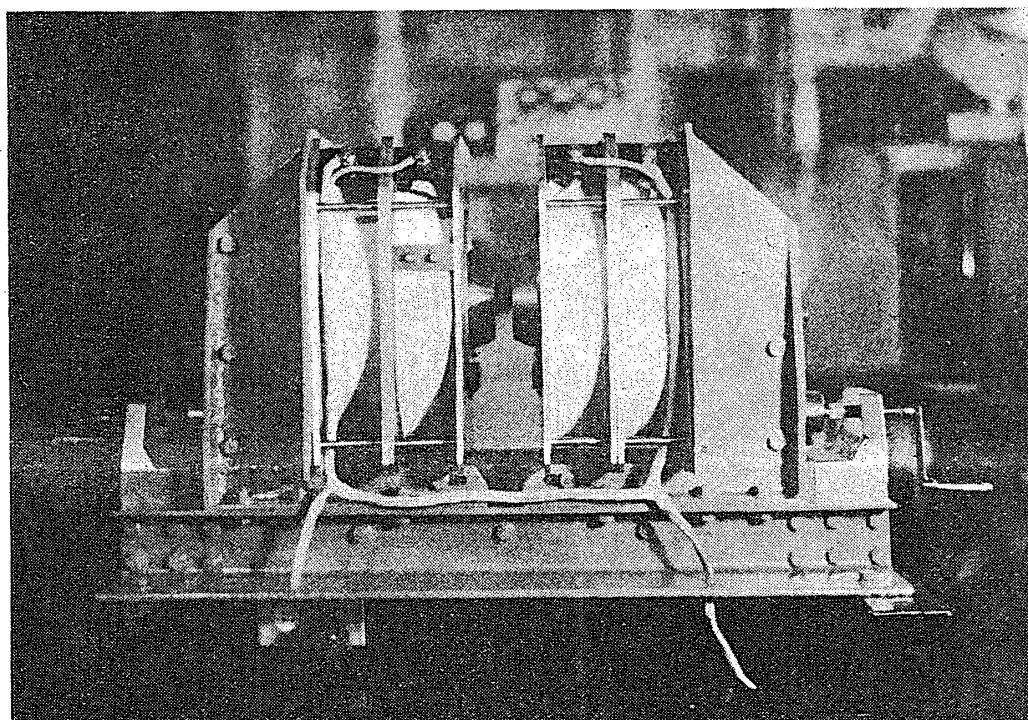
第 1 図



第 2 図



第 3 図



第 4 図

路は主として 10 mm 厚の鉄板を切断して重ねて仕上げたもので、これらの炭素含有量はそれぞれ 0.2% と 0.1% 程度のものであつた。これらの検査には使用材料を研磨する場合の火花の飛跡によつて、標準品と比較し乍ら判定した値である。磁極 ① は取換えることができるが、これを支えるには図のように長いボルト ⑤ を 3 本用いて、

周辺部におき、中央部を避けた。この目的は磁場を一様にするための配慮である。

§ 2. 励磁コイル

励磁コイルは図のように円形のもの 4 個にした。2 個でなくて 4 個にしたのはコイルを小さくして、コイル 1 個当りの重量を減らし、捲線と取扱いを容易にしたのと、コイルから出る熱の

伝導、放熱をよくするためである。コイルの枠は眞鍮にする予定であつたが、費用の関係からアルミニウム合金にした。このために、コイル枠にとりつける予定であつた水冷管は取つてなかつた。したがつてコイルは全く自然冷却である。普通の使用状態では励磁電力は僅かに 500 W 前後であるために強制的に冷却する必要はない。

コイルの捲線は次のようにした。はじめに 4 つのコイルの捲枠の内張りを行い、絶縁を行うこととなり、長年月に亘つて変化の最も少い、また容易に入手し易く、又加工の便利な点などから晒木線を 3 重に適当な絶縁塗料で固めることにした。塗料は始めに松脂をアルコールに溶かしたものをういたが、これはやはり酸性のものである事が判り、更にその上をフェノール系の酒精空気乾性ワニスで、日本ベークライト株式会社の P-430 号ベークライトワニスを用いて塗り固めた。これに捲き込む銅線は古河電線製の $4 \times 1.5 \text{ m/m}$ 平角線で、これは黒色の絶縁塗料を含浸させてある 2 重綿捲線で、全重量は約 160 kg であつた。この線の端は $0.3 \times 25 \text{ m/m}$ の銅板を折曲げて、完全にハンダ付を行い、その上をなるべく平になるよう綿テープで重に捲き、これをテープで捲枠の底に捲きつけ、充分上記の塗料を浸みこませて用いた。捲く場合には枠の 1 個を先づ垂直面内で軽く廻転ができるよう、枠の中央の穴より少し大きい角材 2 本を、穴に合つたように一部分を削り取り、この面で合わせて、これをボルトで止めて一体とし、この中央に約 30 m/m の金属棒を貫かせ、これを両方で 2 又の上に支えて廻転させた。一方大型木製ボビンの上に捲かれた銅線を、水平面内に自由に回転できる台の上にのせ、これを少しづつ、ほぐし乍ら磁石のコイル枠に捲き取つて行つた。コイルの一層は殆んど 17 回で一杯になつたが、時折り 16, 18 回の事もあり、平角線を充分平にし乍ら捲く事に注意して、ベークライトの板などで線を整頓し乍らまいて行つた。これを 5 層毎に木綿布で巻き、また端の部分に生じやすい溝などは、テープを丸めて押込み、全體として凹凸をなくするようにしながら、重ねて行つた。この際の綿布などにはベークライトワニスを充分浸み込ませて、乾燥を待たずに次々と巻いた。捲き終りは充分固くテープでコイルに締めつ

け、引出線の部分は更にテープで 3 重に包み、上記塗料を塗つて固めた。コイルは数回綿布でまき、その上を厚い帯蕊地の綿布で覆つて保護とした。なお 4 つのコイルの捲線方向は組上つた場合に占める位置を考慮して、すべて一つの方からみて、同じ方向になるようにまいたが、購入された時の線長の関係と、コイルの途中でなるべく線を接続することをさけたので、各コイルの捲線数は同一でなくて、 $683 \frac{1}{4}$, $779 \frac{3}{4}$, $780 \frac{1}{4}$, $683 \frac{3}{4}$ というになつた。捲数は作業中別に 1 人の記録係を設け、各層毎に記録をとり正確を期した。実際に使用する場合はこれをすべて直列として用いたので、総捲数は 2,927 回で、4 つのコイルを直列につなぐと全抵抗は約 10Ω であつた。またコイルと巻枠との絶縁は大切なものであるが、その実測の結果は次のようであつた。

第 1 表 巻枠とコイルの絶縁抵抗

コイル番号 試験年月日	1	2	3	4
1951 年 8 月 3 日	16.6	31.5	28.5	63 k Ω
〃 9 月 15 日	210	210	157	630 k Ω
〃 12 月 25 日	4.2	6.2	6.3	3.2 M Ω

絶縁の塗料は乾燥を待たずに捲線を行つたために、はじめはコイルと巻枠の絶縁が低くて心配したが、4 ヶ月後には充分な絶縁になつている。

4 個のコイルのうち 1 個は熱電対が入つていて、捲線の中央の温度が測定できる。コイルに 8 Amp. 流したときの温度変化は次のようであつた。

第 2 表 捲線中央の温度変化

スイッチを入れてからの時間	I=8 Amp のときの温度 (室温 25°C)
2 時間	43°C
2 $\frac{2}{3}$ 〃	53°C
4 $\frac{1}{3}$ 〃	69.7°C
5 $\frac{1}{3}$ 〃	75.5°C
5 $\frac{5}{6}$ 〃	77.7°C (飽和)

この電流でも最高温度は 100°C 以下であるから、塗料や木綿が劣化する心配はない。コイルの絶縁に関する心配はスイッチを切るときに誘起さ

れる過渡電圧である。これは陰極線オシログラフで測定すると次のようであつた。測定は空気間隙が 3cm の場合で、4 個のコイルを直列につないだ場合である。この誘起電圧は巻棒その他の中の渦電流のためはかなり小さくなる筈であるが、それでも次のような値であつた、

第 3 表 電流を切った時の誘起電圧

	励磁電流 A	誘起電圧 V
蓄電器なし	0.19	240
	0.38	300 以上
コイルと並列に 4 μ fd の蓄電器を入れる	0.19	100
	0.60	355
	1.0	550
	1.5	850

この電圧でコイルと巻棒がショートすることを避けるために、絶縁が充分でないときには、コイルと並列に定電圧放電管を入れて電圧を抑えるとともに、大電流のまゝではスイッチを切らないことにした。

§ 3. 変調及び補償用コイル

磁路は円錐形であり、励磁コイルの内面は円筒状であるから、2 つの間に隙間があるので、ここに左右で合計 6 ケの、細い線で巻いたコイルを入れて、補償と変調を行うことにした。

この巻き棒は主励磁コイルと同様な方法で内面を絶縁し、その上に 0.3 m/m のエナメル銅線をまいたが、棒の底面が傾斜して居り、線が細い爲もあり層状に捲くのは困難であつたので、所謂乱捲とした。捲棒は水平回転台の上に置き固定し、

手動で捲いた。回数は電気度数計を回転台の下部に設けた開閉器によつて働作させて計つた。コイル棒の 3 つの溝の深さがそれぞれ異なっているが、一番深い溝に 500 回、他の溝には 1000 回づつまいた。なおこの際に各々の溝毎に別々の捲線とし、合計 6 個のコイルは別々に端子板にみちびかれている。これは場合に応じて適当に直列並列にして用いることを考慮したためである。これらのコイルは夫々 500 回の所にワニスめをつたテープの絶縁層を入れ、引出線もすべてテープで捲いて同じくワニスで固めた。

§ 4. 使用電源

簡単な電源でできるようにするのがこの電磁石の設計の大きい目的である。実際に 6 V, 60 AH の実験室用蓄電池を 10 乃至 15 個を用いている。しかし多少の変動があつてもよいときには水銀整流器の 100 V の電源を用いる。たとえば § 2 で $I=8$ Amp. を流したときの温度上昇の実験の場合には、水銀整流器を電源にした。

§ 5. 塗装

磁路の各部分、コイルの捲棒など仕上げた面は大部分コイルの絶縁用に用いたペークライトワニスを塗つて保護した。そのためこのワニスはコイルの絶縁用も含めての使用量は約 3.5 l であつた。

また磁石のコイル棒の取付板や、アングル並に鉄の黒皮の部分全体は、先づ錆止めの光明円を塗り、その上に合成樹脂エナメル約 1/5 l を用いて塗装した。

(1952 年 3 月 5 日受理)