

# 小学校6年の電磁石教材に関する基礎的研究

—電磁石の磁力測定を中心にして—

右 近 次 男<sup>\*</sup>

この研究は、小学校6年教材の棒状電磁石について、その磁気モーメントおよび磁極端近傍における磁束密度を、コイルの巻き数、コイルに流れる電流の大きさ、鉄心の形状などとの関連で追究している。そして、これらをもとに、児童実験法の問題点を検討し、定量実験への試みとして、「接点法」について言及している。

## 1 はじめに

小学校6年の電流の磁気作用の学習では、「電磁石」が大きな位置をしめている<sup>1)</sup>。それは、定量的な実験をとおして磁力の学習をすすめるには、電流が流れている導線のまわりの磁力は一般に弱いので、電磁石の実験が中心となるからである。電流の磁気作用を電磁石をとおして探究する方法は、鉄心の特性が、あらたに加わってくるため、導線のみの磁力を調べる方法より条件が複雑になるという欠点をもっている。そのため、いわゆる電磁石の磁力の定量的実験法がいろいろと試みられているが、確実な方法が見いだされていない状況にある。

この研究では、電流の磁化するはたらきを、電磁石の磁気モーメントおよび磁極端近傍の磁束密度で測定し、それから得た資料をもとに、磁化するはたらきの大きさを、電磁石で探究する方法について検討し、新しい定量的実験法について述べる。

## 2 電磁石の磁力に関する理論

### (1) 鉄心の磁化過程

電磁石はコイルと鉄心からなり、電磁石の磁力はほとんど、鉄心の磁化でまゐる。鉄心の磁化の強さ  $I$  ( $\text{Wb}/\text{m}^2$ ) と、コイルによる外部磁界  $H_{ex}$  ( $\text{A}/\text{m}$ ) との関係は、図1のAで示される。また、磁化された鉄心は、両極に生じた磁荷により、その内部に反磁界  $H_{de}$  を生ずる。そのため、外部磁界  $H_{ex}$  の一部は打ち消される。反磁界の大きさは、鉄心の形状によってきまり、太く、短いほど大きい<sup>2)</sup>。実際の電磁石では、反磁界の影響が大きく、図1のBで示すよ

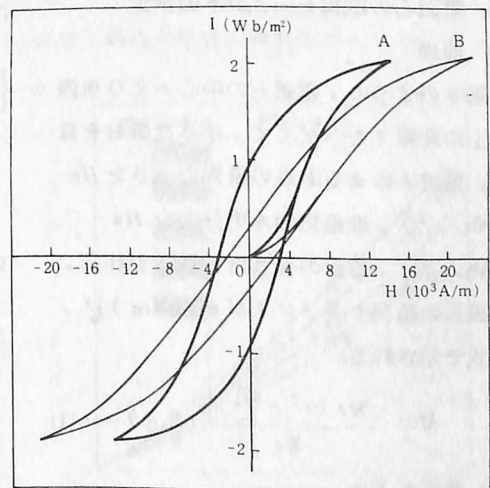


図1 軟鉄の磁化過程

\* 理科長期研修員（五泉市立理科教育センター，中蒲原郡亀田町立亀田小学校）

うに勾配のゆるやかな曲線となる。

(2) 強磁性体が磁界から受ける力

いわゆる「電磁石の強さくらべ」では、鉄片などが磁極に引きつけられる力で比較することが多いが、一般に強磁性体が電磁石の磁極にひきつけられるのは、電磁石がつくる磁界の磁束密度の空間的変化率でさまる。

図2のaは均一磁界中に探り(小強磁性体)を置いた場合を示すが、ここでは磁束密度の空間的変化率は0であるから、探りは力を受けない。bは不均一磁界であるから、そこに置かれた探りは矢印の向きに力を受ける。

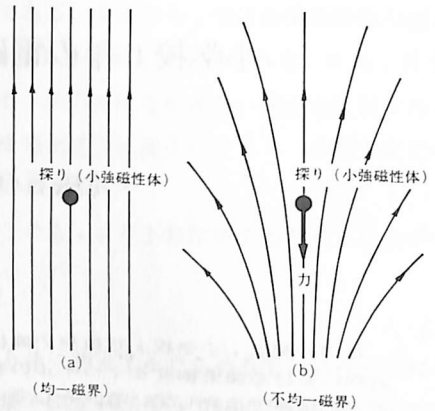


図2 強磁性体が磁界から受ける力

3 電磁石の磁化の強さの測定

児童実験の電磁石の磁力の測定法を分類すると次のようになる。

- ① 電磁石から一定の距離をへだてた場所の磁力を磁針の振れ角ではかる方法
- ② 電磁石の磁極に吸引される強磁性体の数や重さをはかったり、吸引された強磁性体をひきはなす力をはかる方法

これらは、本質的に測定している物理量が異なり、①は電磁石の磁気モーメントの大きさを、②は磁極端近傍の磁束密度の変化率を測定していることになる。

ここでは、電磁石の磁気モーメントと磁極端近傍の磁束密度を測定し「電磁石の強さくらべ」の基礎資料を得たい。

(1) 電磁石の磁気モーメントの測定

(a) 原理

図3のように、電磁石の中心oより東西w軸上に距離rをへだてて、小さな磁針を置く。電磁石によるP点の磁界の強さを  $H_p$  ( $\text{Wb}/\text{m}^2$ )、地磁気の水平分力を  $H_e$  ( $\text{Wb}/\text{m}^2$ )、磁針の振れ角を  $\theta$  とすれば、電磁石の磁気モーメント  $M$  ( $\text{Wb} \cdot \text{m}$ ) は、次式で示される。<sup>3)</sup>

$$M = \frac{H_e (r^2 - \frac{l^2}{4})^2}{2r} \tan \theta \dots (1)$$

(b) 装置と方法

図4のように、地磁気の東西軸上に電磁石とクリノメーターを30cmはなしてセッ

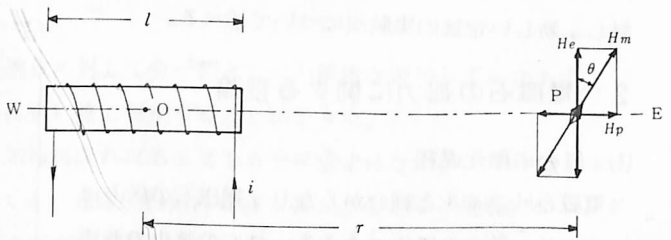


図3 電磁石の磁気モーメント測定原理



図4 電磁石の磁気モーメント測定装置

トする。電磁石に流す電流をかえて、クリノメーターの振れ角  $\theta$  を読み、磁気モーメントを求める。

つぎに鉄心の太さ、長さ、磁極の形状を変えた場合についても測定する。

(c) 結果と考察

図5は、鉄心を磁化するはたらきの大きさと磁気モーメントの大きさの関係を、鉄心の長さを一定にし、太さをかえた場合について示したものである。いずれも、図1のBの軟鉄の磁化過程と一致する。

また、鉄心が細いほどはやくから磁気飽和の傾向が見られる。

なお、①の測定値は、コイルの巻きかたを、60回巻きごとにタップをだした場合であり、②、③は、一層(60回巻き)ごとにタップをだした場合である。一層ごとにタップをだす巻きかたのほうが測定値のばらつきが少ないことがわかる。

図6は、鉄心の太さ、コイルの巻き数を一定にし、鉄心の長さをかえた場合、図7は、鉄心の長さ、コイルの巻き数を一定にし、鉄心の太さをかえた場合の磁気モーメントを測定した結果である。磁気モーメントの大きさは、鉄心の長さ、太さによってきまり、鉄心を磁化するはたらきが小さいときは、磁気モーメント

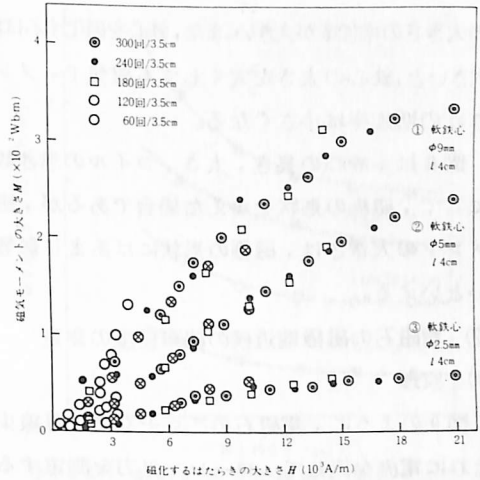


図5 鉄心を磁化するはたらきの大きさと

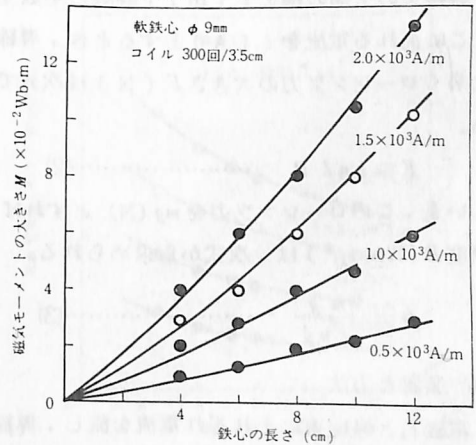


図6 鉄心の長さ と 磁気モーメント

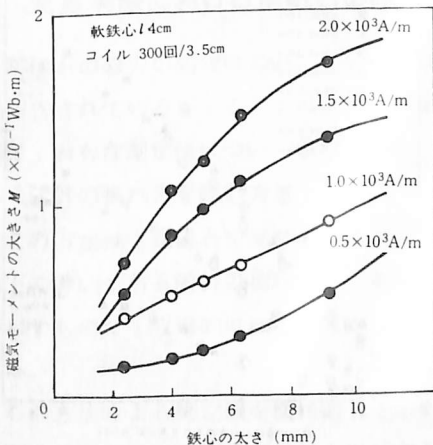


図7 鉄心の太さと磁気モーメント

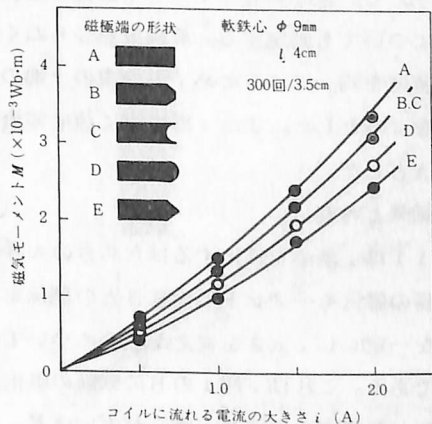


図8 磁極端の形状と磁気モーメント

の大きさの増加率が大きい。また、鉄心を磁化するはたらきが大きいと、鉄心の太さを太くしても磁気モーメントの大きさの増加率は小さくなる。

図8は、鉄心の長さ、太さ、コイルの巻き数を一定にして、磁極の形状をかえた場合であるが、磁気モーメントの大きさは、磁極の形状にはあまり影響されな

(2) 電磁石の磁極端近傍の磁束密度の測定

(a) 原理

図9のように、電磁石のごく近くに、導線束をおきそれに電流を流して、ローレンツ力を測定する。

導線束の上端の幅を  $l$  (m)、導線の本数を  $n$  (本) そこに流れる電流を  $i$  (A) とするとき、導線束にはたらくローレンツ力の大きさ  $F$  (N) は次式で示される。

$$F = i n l B \dots\dots\dots(2)$$

いま、このローレンツ力を  $mg$  (N) とすれば、磁束密度  $B$  ( $\text{Wb}/\text{m}^2$ ) は、次式から求められる。

$$B = \frac{m g}{i n l} \dots\dots\dots(3)$$

(b) 装置と方法

電磁石と導線束にそれぞれ電流を流し、導線束にはたらく、ローレンツ力を三かん天秤ではかり、磁束密度を求める。鉄心の長さ、太さ、磁極の形状を変えた場合についても測定する。導線束をつらぬく磁力線の磁束密度を均一にするため、導線束の上端の幅を3mm厚さを2mmとした。また、導線束に流す電流は、つねに2Aとした。

(c) 結果と考察

図11は、鉄心を磁化するはたらきの大きさと磁極端近傍の磁気モーメントの大きさとの関係を、鉄心の長さを一定にし、太さを変えた場合について測定した結果である。これは、図1のBの軟鉄の磁化過程とほぼ一致した傾向を示すが、鉄心が太いほど、増加率は小さく、図の①は、まだ飽和の傾向を示さない。①、

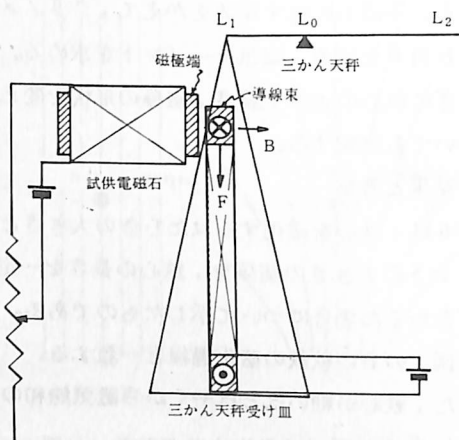


図9 磁極端近傍の磁束密度の測定原理



図10 磁極端近傍の磁束密度の測定装置

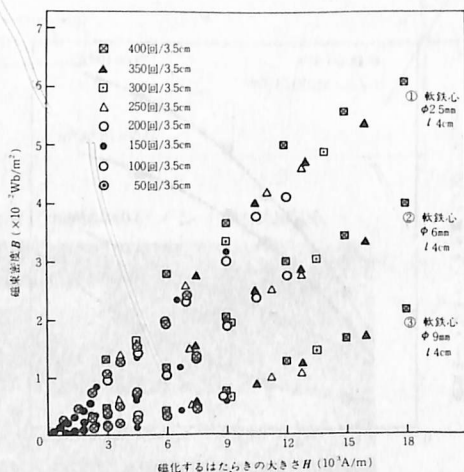


図11 鉄心を磁化するはたらきの大きさと磁束密度

②, ③を比較すると, 鉄心が細いほど磁束密度は大きく, その増加率は大きいことがわかる。

図12は, 鉄心の太さ, コイルの巻き数を一定にし, 鉄心の長さを変えて, 磁束密度の大きさを測定した結果である。コイルに対して, 鉄心が長くなると, 磁極端近傍での磁束密度は急に減ってくる。これは, コイルの外にでている鉄心からは, 磁力線が側面から漏れいているためと思われる。

図13は, 鉄心の長さ, コイルの巻き数を一定にし, 鉄心の太さを変えて磁束密度を測定した結果である。この結果によれば, 鉄心が太くなると, 磁極端近傍での磁束密度は小さくなる。このことは磁化するはたらきの大きさが一定であれば, 鉄心が太いほど, 反磁界が大きく影響することを意味している。

図14は, 鉄心の長さ, 太さ, コイルの巻き数を一定にして, 磁極の形状を変えて, 磁束密度を測定した結果である。これによれば, 磁極の形状が, 磁極端近傍の磁束密度に与える影響は大きいといえる。磁極の形状は電磁石を作る上で, とくに考慮すべきことで, 概して, 磁化するはたらきの大きさが一定であれば, 円錐台状の磁極を持つ電磁石が最も大きな磁束密度を示す結果を得た。

### 3 児童実験における電磁石の磁力測定法の検討

電磁石の磁力の測定について, いろいろな児童実験が報告されているが, ここでは, 前述の結果をもとにして, おもな測定法について検討する。

#### (1) 磁針の振れ角を読む方法

この方法は, 電磁石を東西方向に水平に置き, その軸上においてある磁針の振れ角で, 電磁石の磁力をあらわすもので, 原理的には, 磁気モーメントの測定である。

この方法による測定例を図15のAで示す。これは3の(1)で測定した磁気モーメントの傾向と一致する。

しかし, 電磁石の軸を東西軸からずらした場合, 振

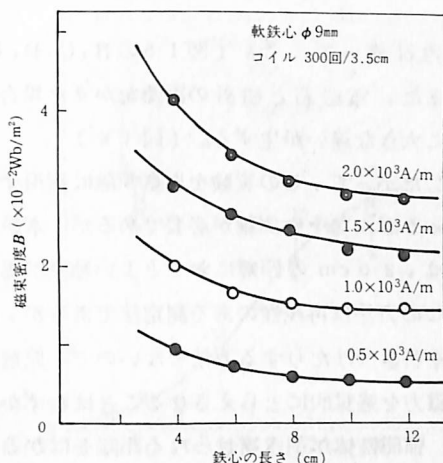


図12 鉄心の長さ と 磁束密度

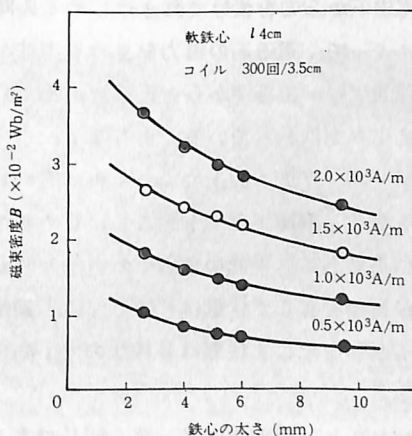


図13 鉄心の太さ と 磁束密度

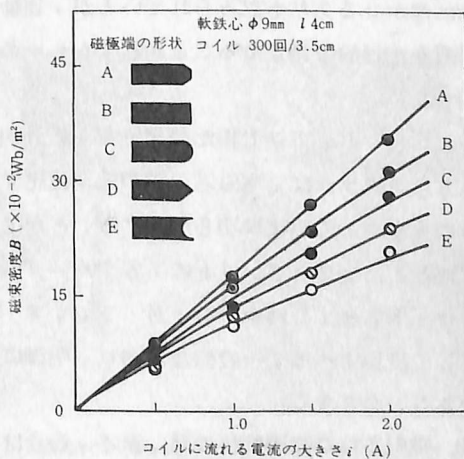


図14 磁極の形状 と 磁束密度



れ角は違ってくる。(図15のB, C, D, E, 参照)

また、電磁石と磁針の距離をかえた場合も、測定値に大きな違いが生ずる。(図16)

したがって、この実験を児童実験に採用するまえに、じゅうぶんな予備実験が必要であるが、本研究の条件では、20 cm の距離におくとよい結果が得られた。

この方法は再現性のある測定法であるが、直接、物体を引きつけたりする方法でないので、児童に電磁石の磁力を感覚的にとらえさせることはむずかしい。

(2) 強磁性体が引き寄せられる距離をはかる方法

水平な台の上に、電磁石と小鋼球を置いて、小鋼球が、電磁石から力を受けて動きはじめる距離をはかることによって、電磁石の磁力をきめる方法がある。

原理的には、磁極端から一定距離にある点の磁束密度の変化率をはかっていることになる。

図17は、ガラス板上で、コイルに流れる電流の大きさをかえ、鋼球が運動を起こしはじめる距離を測定した結果である。平面のまさつの微妙なちがいから、鋼球が運動を起こす状態は一樣でない。鋼球が大きいほど、運動を起こす状態は多様なので、測定に再現性がない。

この方法と、原理的にまったく同じであるが、平面でのまさつをさけるため、強磁性体を水面、または空中に浮かせる方法も試みられているが、運動を起こす距離を定量的に測定することがむずかしいので、一般的でない。

しかし、この方法で得た測定値を、統計的に処理する方法を講ずれば、電磁石の磁力と、磁化するはたらきの大きさとの関係は明らかにすることができる。

たとえば、T・Pシートに、各グループの測定値をプロットさせ、これを、O・H・Pで、オーバーラップして投影すれば、一般的な傾向は、明確にとらえさせることができる。

(3) 吸引された強磁性体の数、重さ、ひぎはなす力をはかる方法

この方法は磁極端に強磁性体を吸引させ、電流を断

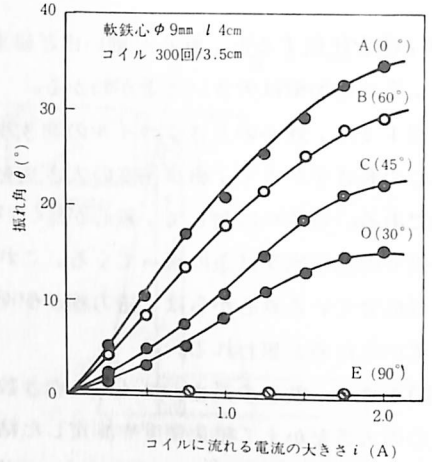


図15 電磁石の置き方と磁針の振れ角

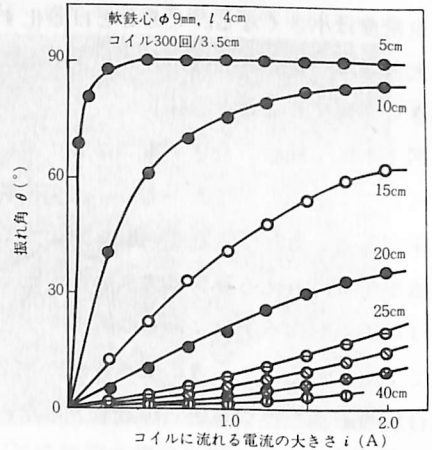


図16 電磁石と磁針との距離と振れ角

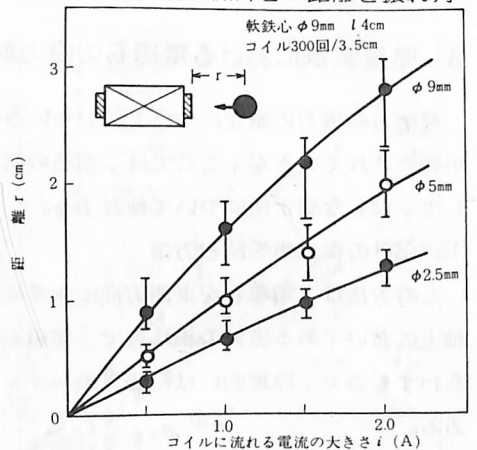


図17 コイルに流れる電流と鋼球の動く距離

ったあと、その数や重さをはかったり、吸引された強磁性体をひきはなす力をばねばかりではかったりして電磁石の磁力をきめようとする方法で、原理的には、前述の(2)の方法と同じである。

図18は、磁極の中央部に、クリップを1個づついいねいにつけて測定した場合(・印)と、雑然とつけた場合(○印)を示すものであるが、いいねいにつけた場合は、測定値にばらつきが少なく、3の(2)で測定した磁極端近傍の磁束密度の変化のしかたと一致した傾向を示す。

また、磁極端についた鉄片をひきはなす力をばねばかりではかった場合には、鉄片がはなれるとき、横すべりしたり、回転したり、測定のためにはなれかたが異なるので、再現性のある測定ができない。

この方法は、児童実験法として一般的であるが、測定値がばらつくので、授業を混乱させることがある。

## 5 児童実験における電磁石の磁力測定法の改善

### (1) 再現性について

以上の検討から、電磁石の磁力の測定法で、もっとも大きな問題点は、測定値がばらつくということである。その原因は強磁性体を磁極端からひきはなすとき、磁極端の磁束分布状態が、測定のために、ちがってくるためである。

図19は、ゼムクリップのつけたちのちがいによる磁束分布の状態を示す。

ここでは、測定値のばらつきをさけるために、磁束分布の変化のしかたが、測定のためごとに、同じ傾向になる方法を検討し、再現性のある測定法について考察する。

### (2) 接点法

図20のように、磁極端に接する強磁性体を小さくすると、磁束分布状態はあまり乱されない。したがって磁極端に吸引させる強磁性体を小さくして測定するほう

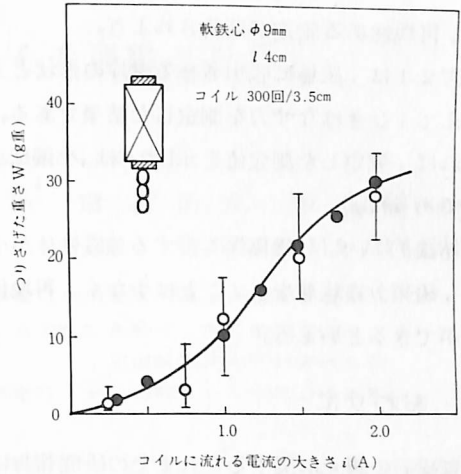


図18 磁化するはたらきの大きさと吸引されたクリップの数

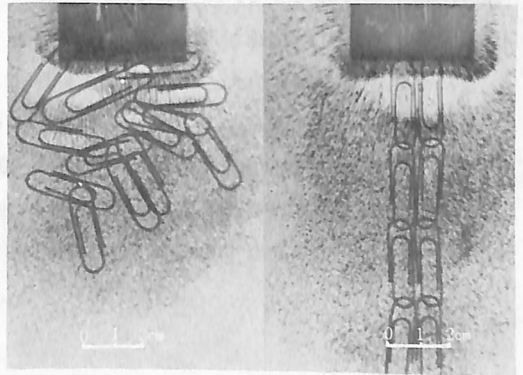


図19 ゼムクリップのつけたちのちがいによる磁束分布のようす

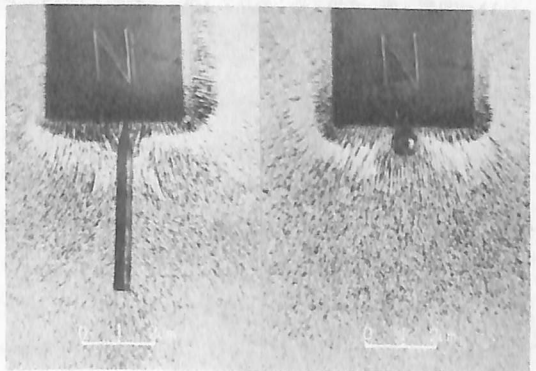


図20 吸引される強磁性体の大きさと磁束分布のようす

が、再現性ある測定が期待されよう。

図21は、磁極に吸引させる鉄片の形状と大きさをかえて、ひきはなす力を測定した結果である。これによれば、安定した測定値を示したのは、小鋼球と針状鉄棒であった。

結論的にいえば、磁極端に接する強磁性体が小さければ、磁束分布状態を乱すことは少なく、再現性ある測定ができるといえる。

## 6 おわりに

電磁石の単元に関するこれまでの研究報告には、しばしば、電磁石の磁力が、電流や巻き数に比例する関係を示めようと努力しているものがある。しかし、本研究で明らかのように、鉄心を使った電磁石でそれを期待することは意味がない。

また、測定値のばらつきをなくするには、吸引する強磁性体を小さくすればよいことがわかった。

しかし、測定値のばらつきの原因を測定のたびごとに、磁極端の磁束分布状態の変化のようすがちがうためであると考えて論をすすめてきたが、電磁石の磁極端近くに強磁性体を置くととき、置かないとき、また、強磁性体が吸引あるいははなれるときの、磁束分布状態がどう変化するかということろまでは、詳細に追究していない。これは、今後の研究課題である。

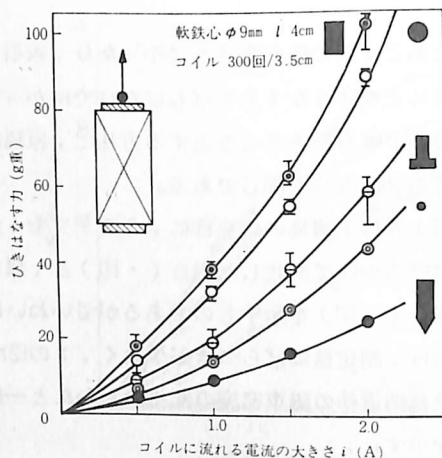


図21 鉄片の形状・大きさと測定値のばらつき

## 文 献

- 1) 文部省：小学校指導書理科編(1969) P 125
- 2) エル・キレンスキー：磁性体の物理，総合化学出版(1973) P 44
- 3) 吉田卯三郎 武居文助：物理学実験，三省堂(1965) P 240