

卒業論文

電磁石の製作と磁場測定
電磁石の材料と加工方法

知能機械システム工学科

野尻・百田研究室

1020098

小川 和秀

共同研究者

高巢正人 浜川恒圭 浜口顕典 八木宏樹

INDEX

1 . 緒言

2 . 目的

3 . 電磁石の原理と各部の名称

4 . 材料選択

- 4 - 1 サンプル測定
- 4 - 2 サンプル測定方法
- 4 - 3 サンプル測定結果
- 4 - 4 サンプル測定結果からの結論

5 . 設計

- 5 - 1 リターンヨークの設計
- 5 - 2 コイルを巻くボビンの設計と巻く方法

6 . 加工

- 6 - 1 コイル巻き機の製作
- 6 - 2 リターンヨークの穴あけ加工

7 . 組み立て

8 . 磁場測定

9 . 測定結果

10 . 結論

11 . 付録

参照
参考文献
謝辞

1 . 諸言

現在私が所属する物理工学研究室野尻・百田グループでは、イオン加速器を使って研究しています。イオン加速器を使ってできる事は、微細加工や新素材の開発などです。

1) 微細加工：イオン加速器によって加速されたイオンを物質に照射してその衝突エネルギーにより物質に穴をあけて加工をします。

2) 新素材の開発：加速されたイオンを物質にあてます。そして物質の中にイオンを入れることにより新しい材料を作ります。

これらの研究や開発に使用するイオン加速器の中で重要な部分の一つがイオン発生装置からでてきたイオンの方向を曲げる偏向電磁石です。その電磁石には非常に強い磁場を発生させる事が要求されます。

その電磁石に興味を持ったことと、物を作る過程が大事と言う理念から電磁石を作ることにしました。今回の研究課題は電磁石を実際作ることによって、立案・計画・材料発注・作成・測定・実験結果など一連の工程を体験することです。物作りでは体験する事がとても重要なので今回は体験ができ大変有意義になると思いました。

2 . 目的

電磁石の性能・性質を決めるものには磁場の強さ・磁場の一様性・消費電力・サイズ・重さ・発熱量があります。今回はより強い磁場を発生させる電磁石を製作する事にしました。発生させる磁場を強くするために必要な事は コイルの巻き数を増やす コイルに流す電流を上げる 電磁石自身の材質をより磁化しやすい材質に変えるなどがあります。今回製作する電磁石を昨年度の卒業生が製作した電磁石と比較をするために以下の条件を設けました。

- 1 . ポールピース間の間隔を 5 mmにする。
- 2 . 巻き数×電流 (A・turn) の値を同じにする。
- 3 . H型電磁石にする
- 4 . 体積は 300mm×300mm×300mm 以内にする
- 5 . コストはなるべく安く抑える

そして私は材料選びとコイルの改良と全般の加工を担当しました。

3 . 電磁石の原理と各部の役割

製作する H 型電磁石は図 3 . 1 のような構造を持ちその断面図は図 3 . 2 のようになります。

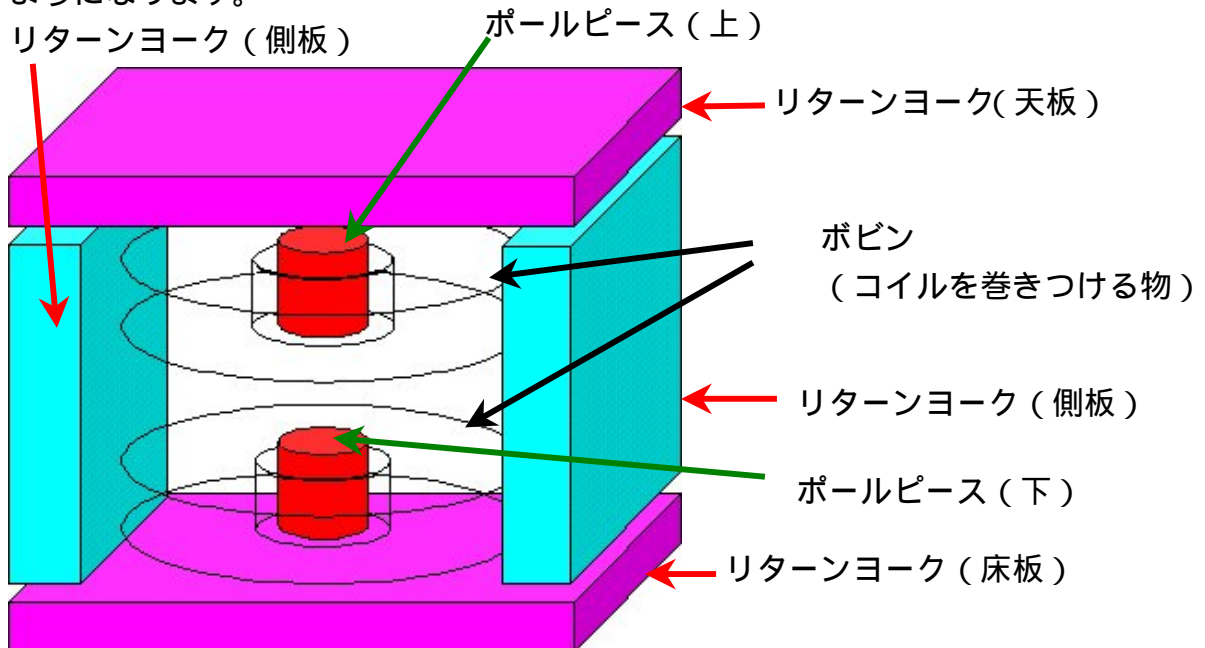


図 3 . 1 電磁石の組み立て図と各部の名称

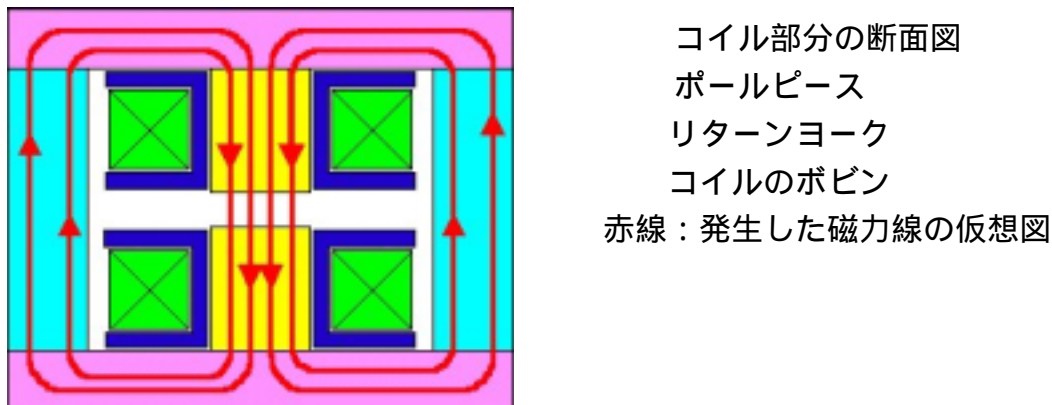


図 3 . 2 電磁石の断面図と磁力線の仮想図

部品のそれぞれの役割は以下の通りである。

コイルは磁場を発生する

ポールピースはコイルの発生させた磁力を強めるもの。

リターンヨークは発生した磁力線を外部に漏らさなくする物。

ボビンはコイルを巻きやすくし、また形を保つための物

4 . 磁性材料の選択（リターンヨーク）

昨年度の卒業生が使用した電磁石のポールピースの材料は純鉄^{*1}でした。純鉄は透磁率が高いので電磁石に適しています。しかし前回リターンヨークの材料に使用した純鉄の組成比の詳細は不明でした。そこで電磁石のリターンヨークの材料に適していてなおかつ組成も分かるものを探しました。

鉄の中でも純鉄は鉄^{*2}と言う結晶構造が強磁性体（磁力線を通しやすい物質）を示します。前回使用した純鉄も高価で入手が困難です。またパーマロイ^{*3}と呼ばれる金属もありますが、これも非常に高価で入手が困難なため今回の電磁石に採用しませんでした。

上記の材料以外にリターンヨークに向いている金属はないかと調査していたときに、電磁鋼板という存在を知った。文献^{*5}や Web サイト^{*6}で電磁鋼板について調べた結果、電磁鋼板には種類があることが分かりました。

電磁鋼板（珪素鋼板とも呼ばれていた）には無方向性、一方向性と二方向性^{*4}があります。電磁鋼板の磁気的特性を自分で評価するため、企業^{*5}にサンプルを送った。送ってもらったサンプルを使って、方向の違いによる磁気特性の違いを実際に調べることにしました。

4 - 1 サンプルの磁場特性測定

入手した一方向性電磁鋼板のサンプルは幅 20 mm 長さ約 350 mm 厚さ 0.23 mm であった。サンプルを 20 mm ずつに切り分けた。20 mm × 20 mm のサンプル片を 16 枚重ねた。間に瞬間接着剤を塗りしやこ万で固定し接着して厚さ約 4 mm の測定サンプルにしました。

次に外径が 26 mm 長さ 21 mm の塩化ビニルのパイプに直径 1 mm の銅のより線を 65 回巻きつけコイルとした。このコイルの中に入れたサンプルからコイルの中心軸方向に 12 mm の位置の磁束密度 (B) をガウスメーター^{*6}で測りました。(図 4.1)



図4.1 サンプルの磁気特性の測定装置の配置

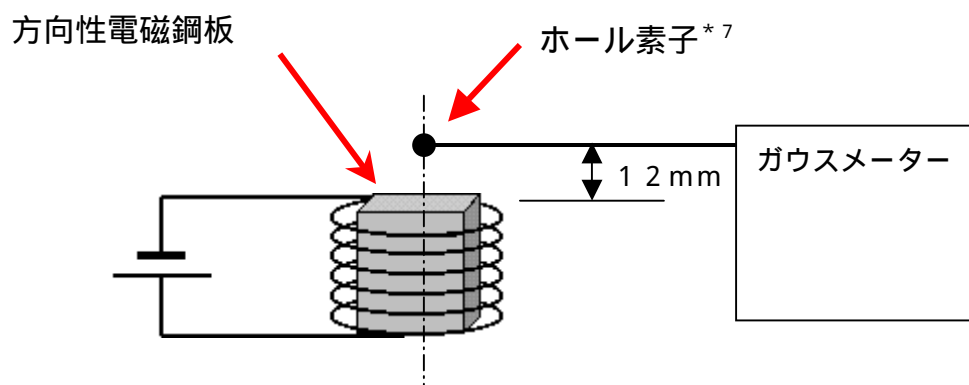


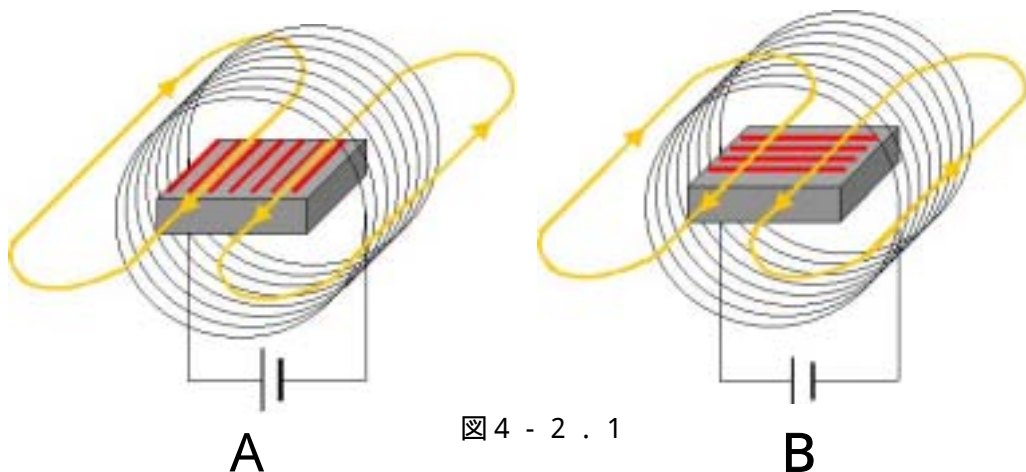
図4.2 サンプル測定の配線図

4 - 2 測定方法

図4 - 2 . 1のような2種類の配置で磁束密度を測定をして比較した。

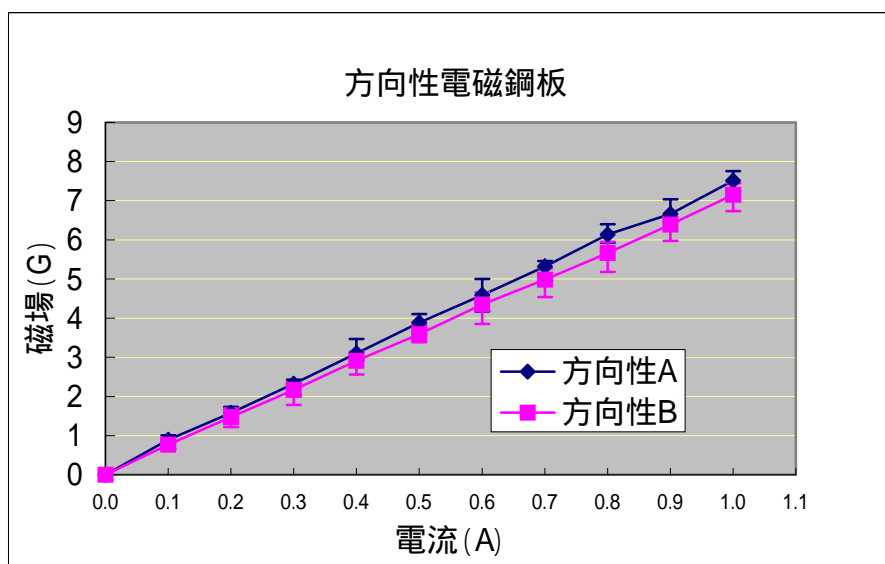
A: コイルが発生する磁力線の向きと方向性電磁鋼板の磁気特性の向きを一致させた

B: コイルが発生する磁力線の向きを方向性電磁鋼板の磁気特性の向きとを直交させた。



コイルに流す電流を0 (A) から1 (A) まで0 . 1 (A) 刻みで磁場の計測をしました。各電流でそれぞれ4回ずつ磁場を測り平均を出しました。

4 - 3 測定結果

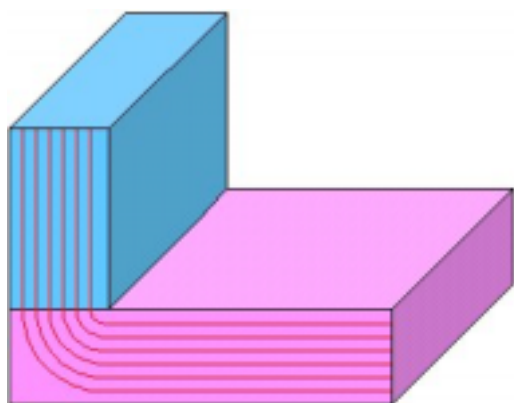


平均値の誤差は4回の測定の最大値と最小値を値とした

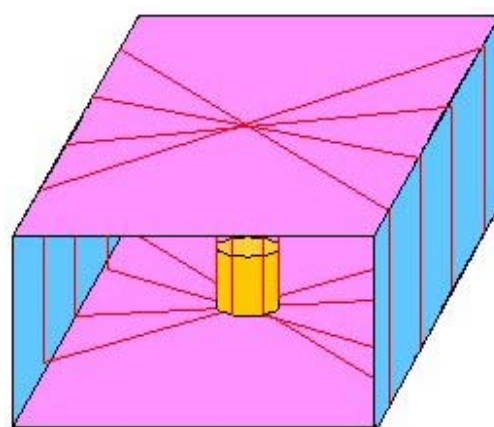
4 - 4 測定結果からの結論

配置 A と配置 B で測定した磁束密度の差は約 5 % で、磁束密度に余り大きい差が出ない様に思えた。確認のためにメーカー^{*7}に問い合わせてみると、サンプルが小さいと磁場の差が出にくいといわれました。実際サンプルの方向性電磁鋼板が 20 mm 角でしたが、実際に作る電磁石のリターンヨークはこれより大きなものになるので、磁気特性の差がより現われると予想できた。そこで実際のリターンヨークの材料として以下のように使うことにしました。

リターンヨーク内の磁力線の予想図



リターンヨークの側板と床板の
接触部の磁力線予想図



天板と側板の中の磁力線予想図

図 4 - 4 . 1

リターンヨーク中の磁力線を図 4 - 4 . 1 のようになると仮定しました。すると青色で示されたリターンヨークの側部では磁力線は揃っていて、ピンク色で示された上下の部分では磁力線の向きが一定ではありません。そこで方向性電磁鋼板はその磁気特性を利用してリターンヨークの側板に採用し、無方向性電磁鋼板は磁気特性の方向がないという事を利用してリターンヨークの天板や床板に使うことにしました。

5 . 設計

昨年度の電磁石から以下の3点を改良した。

リターンヨーク コイルを巻くボビンの設計 コイルの巻き方

5 - 1 リターンヨークの設計

昨年度の卒業生が製作した電磁石は図5 . 1に示すような構造でした。このリターンヨークでは組み合わせ部分の加工が困難で加工誤差が大きく組み合わせ部分に隙間が開いてしまいました。組み合わせ部分に隙間ができると磁場を弱める影響が出るのでこの組み合わせを改良した。さらに今回リターンヨークに採用した電磁鋼板は、一般に流通している物は約0 . 2 mmから0 . 5 mmと極端に薄いためにリターンヨークとして利用するには何枚も重ね層にする必要が生じた。電磁鋼板だけでは磁場発生による磁極同士が引き合う力に対する強度に不安があったため、電磁鋼板の層の両側をアルミニウム板で挟みこみ、ネジで固定し補強することにしました。(図5 . 2)

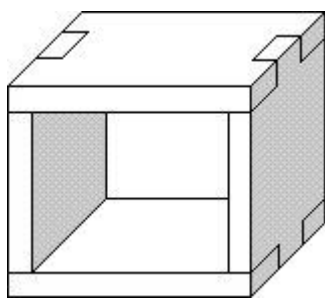


図5 . 1 昨年度のリターンヨーク

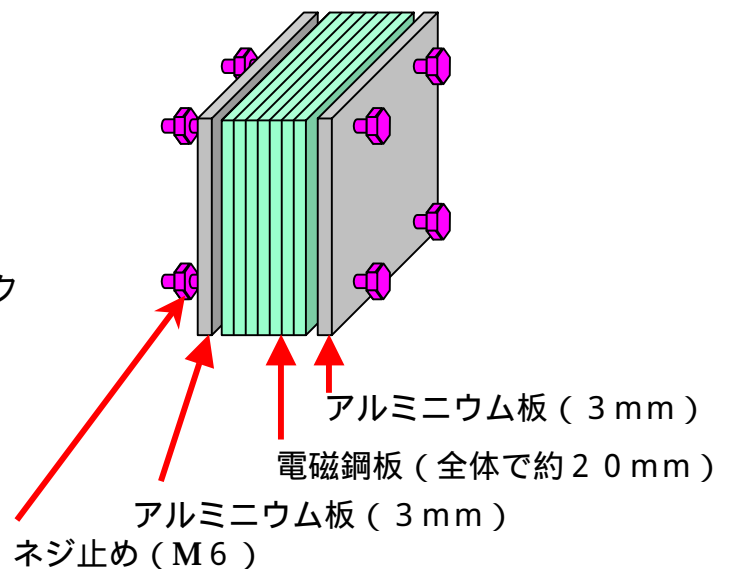


図5 . 2 今年度のリターンヨーク

5 - 2 コイルを巻くボビンの設計

昨年度のボビンにあったボビンカバーをなくしました。昨年度はボビンにコイルを巻きつけて銅線が外側に出てくる可能性があるから、カバーをつけたと言っている状態になっていました。しかし私は出てくる事ないと考えたからです。またカバーがない方が放熱性をあがると考えました。そして何よりコストを低く抑える事につながります。

5 - 3 コイルをボビンに巻く方法

昨年度ボビンに銅線を巻きつける作業を見ていてその巻き方に疑問を持ちコイルをボビンにうまく巻きつける方法はないものかと考えた。そして手動でコイルを巻きつける装置を設計し製作しました。

昨年度もコイルを巻く装置がありましたが、導線を密に巻くことができませんでした。そのためコイルを巻く専用の道具を作る必要がありました。

コイルを密に巻く理由は、電磁石が強い磁場を発生させるためです。

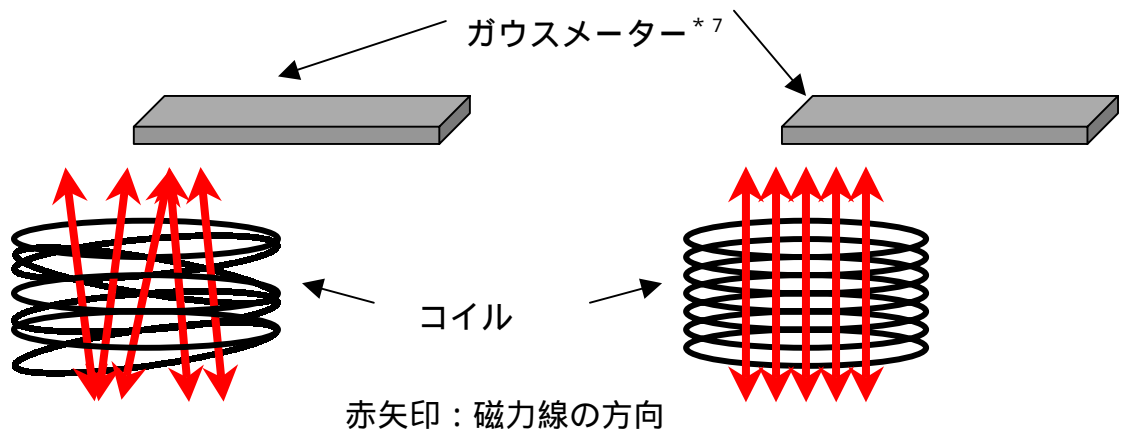


図5 - 3 . 1

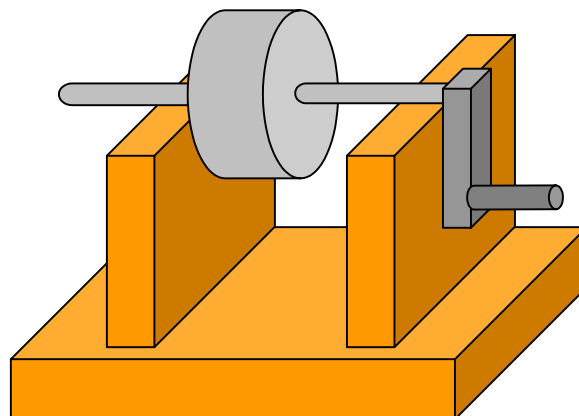


図5 - 3 . 2 コイル巻き機 (まきまき君3号) 完成概略図

6 . 加工

コイルを巻く装置の製作と、リターンヨークの穴あけ加工を担当しました。

6 - 1 コイル巻き機の製作

図6 . 1 の様なコイル巻き機を設計し製作した。装置の土台は木をベースに金具で固定しました。

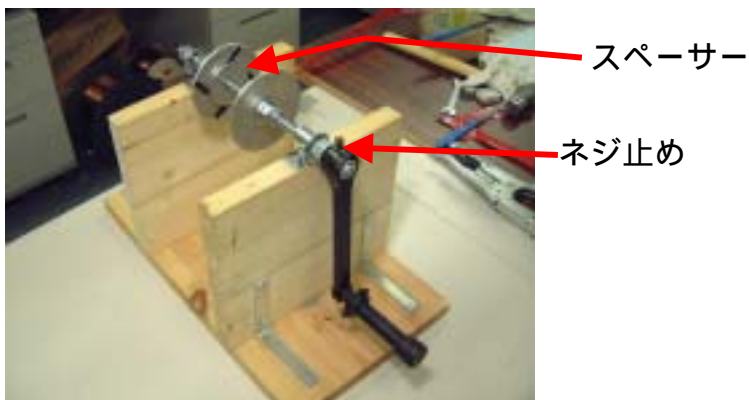


図6 . 1 コイル巻き機 (まきまき君3号)

コイル巻き機の製作に工夫した点は以下の3点です。

- 1 . コイルを巻くボビンの内径が51mmと大きく中心の軸となるネジと大きな隙間ができるので、スペーサーを作り間を埋めました。
- 2 . コストを低く抑えるためにハンドルは自転車のクランクを流用した
- 3 . コイルを巻くときにハンドルと軸に大きな力がかかり軸とクランクが空回りをするのを防ぐために軸を少し平らに削りクランクに穴をあけタップを切りネジ止めをした。(図6 . 2)

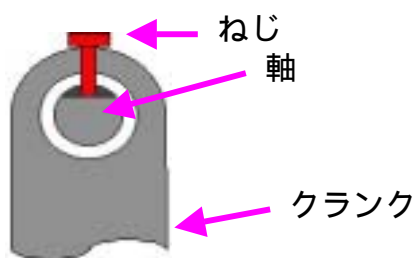


図6 . 2

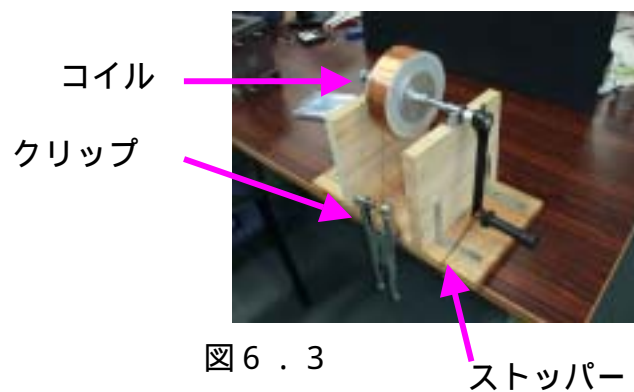


図6 . 3

昨年度のコイルと今年度まきまき君3号を使って製作したコイルを図6.4に示します。

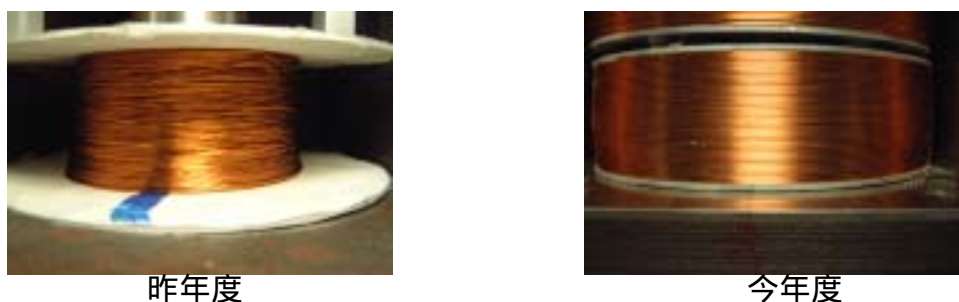


図6.4 昨年度と今年度のコイルの比較

図6.4から分かるように昨年度のコイルより今年度のコイルは導線どうしの隙間も少なく密に巻けました。しかしまきまき君3号を使って巻く時にコイルを巻き付ける力が入りすぎたためにポビンに図6.5のような変形が生じた。

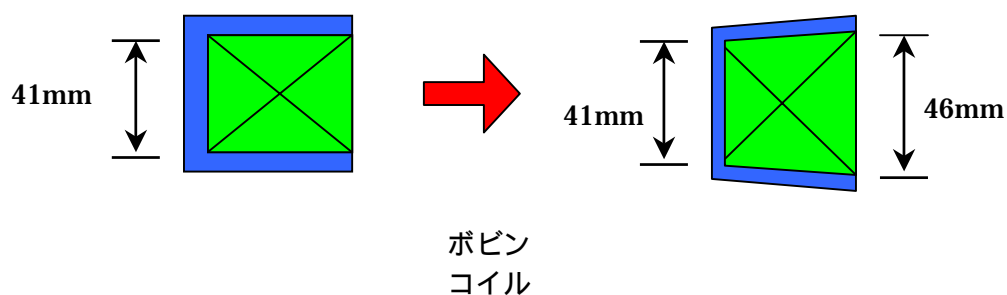


図6.5 ポビンの変形

6 - 2 リターンヨークの穴あけ加工

購入したリターンヨークの方向性電磁鋼板は $200 \times 110 \times 0.35$ [mm]が114枚、無方向性電磁鋼板は $200 \times 200 \times 0.50$ [mm]が80枚です。どちらの電磁鋼板も薄くて面積が広くまた大量にあるため、重ねて加工することにしました。重ねた電磁鋼板が加工中にずれないようにリターンヨークの電磁鋼板の固定用に使用予定のアルミニウム板で電磁鋼板を挟み込みました。そしてアルミニウム板と電磁鋼板を同時に穴をあけることにしました。(図6 - 2 . 1)

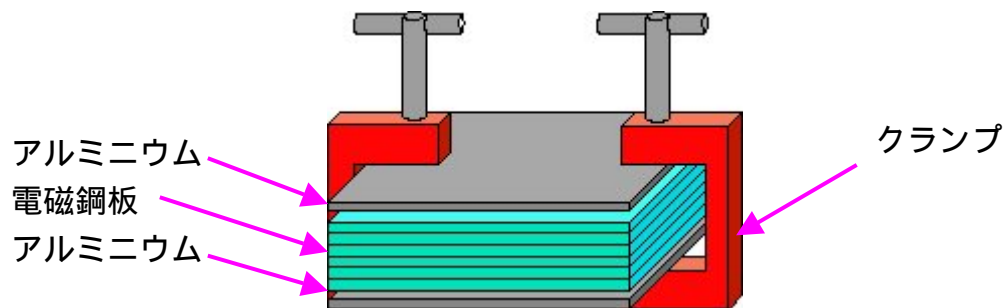


図6 - 2 . 1 挟みこみ

今回私が加工した方法で穴あけ加工をすると、電磁鋼板の層間に切削ごみや油が少しずつ入り込んでいきました。そのためリターンヨークの穴をあけた部分の周りが膨らんでしまいました。その油や切削ゴミやバリを取り除くためにティッシュで油や切削ゴミをふき取り、やすりでバリを削り取りました。

7 . 組み立て

今回製作した電磁石はリターンヨークとその固定具の組み合わせが少し複雑なため、組み立てるのに以下の順序と手法が必要でした。

- 1 . リターンヨーク床板にポールピースをネジで固定しL字金具を 4 カ所に取り付ける（仮止め）。同じく天板も作る

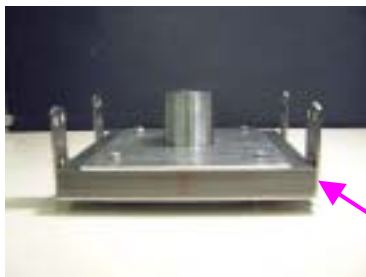


図 7 . 1

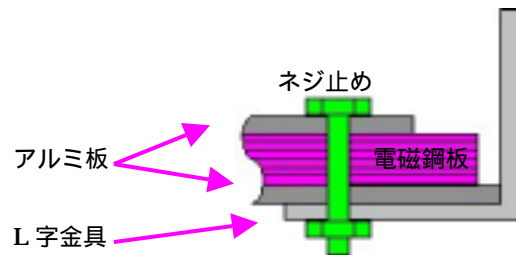


図 7 . 1 . 1

- 2 . 左右の側板をネジで固定する。

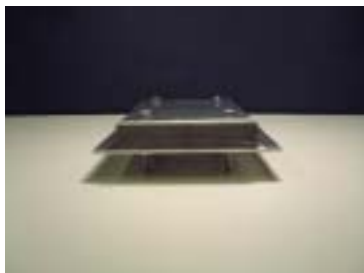


図 7 . 2

- 3 . リターンヨーク側板（上のネジ二つだけで固定）を床板にはめ込み、下のネジで固定する。そして側板の上のネジをはずす。



図 7 . 3

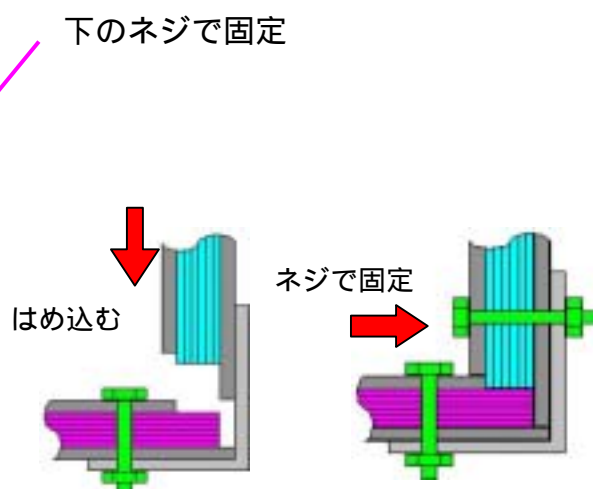


図 7 . 3 . 1

- 4 . コイルを巻いたボビンを床板のポールピースにはめ込む。この時に上下のボビン同士の間隔を保つためスペーサーとしてカットしたアルミニウム棒 (13mm×長さ5～10mmの範囲) を入れる

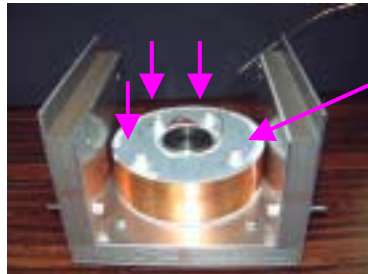


図7.4

スペーサー (× 4)

ボビンが変形している為にボビン同士の間隔が一定でなく、そのためスペーサーの長さは場所によってばらつきがある

- 5 . 二つ目のコイルを巻いたボビンをスペーサーの上に載せる。

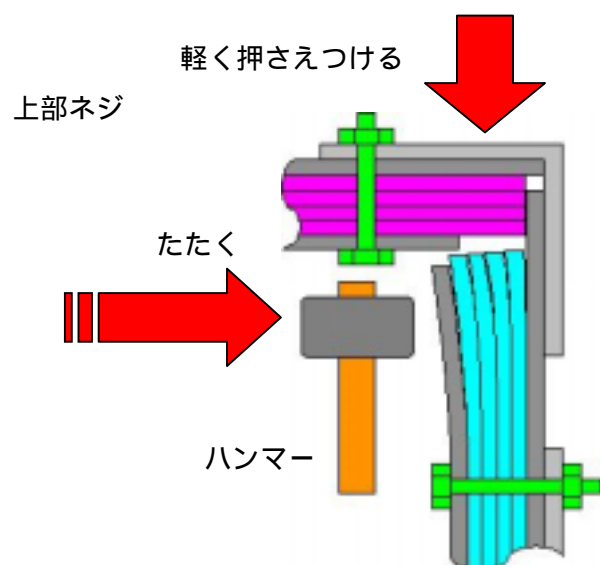


図7.5

- 6 . 上板リターンヨークを載せる。このとき側板上部のネジははずしておく必要があるため、側板が少し膨らんでいた。そのため上板と側板をはめ込む事が出来なかった。そこで側板を内側からハンマーで少したたいて、側板の膨らみを最小限にすると同時に天板のリターンヨークを上から押さえつける事によって、リターンヨークをはめ込む事ができました。



図7.5 完成



8 . 磁場測定

昨年度は上下合計 4 6 8 6 回巻きのコイルに 0 . 5 A づつ電流を流してポールピース中心部から 1 mm ずつ外の方の方向にずらしてそれぞれの位置で磁場を測定しました。

昨年度のコイルと今年度のコイルを比較するために、電流と巻き数をかけたもの (A ・ Turn) を同じにしました。

前回 4 6 8 6 (巻き数) × 1 (A) = 4 6 8 6

今回 4 0 6 9 (巻き数) × X (A) = 4 0 6 9 X

この右辺同士の 4 6 8 6 と 4 0 6 9 X を同じ値にします。

$$X = 4 6 8 6 / 4 0 6 9 \text{ ----- (1)}$$

式 (1) より今年度のコイルの上下の合計電流 X は 1 . 1 4 (A) を流す事にします。

今年度のコイル A (下部) が 2 0 5 8 回巻きで、コイル B (上部) が 2 0 1 1 回巻きです。故に 1 . 1 4 (A) を 2 0 5 8 : 2 0 1 1 で比とると 0 . 5 9 (A) : 0 . 5 5 (A) となります。

コイル A (下部) には 0 . 5 9 (A) 、コイル B (上部) には 0 . 5 5 (A) の電流を流しました。

測定場所はポールピース間の中心にホール素子を置く。電流を一定に保ったまま、ホール素子をポールピースの中心水平方向に 1 mm づつ 2 4 mm までずらして磁場を測った。これと同じ測定を 3 回測り平均を取りました。(図 8 . 1)

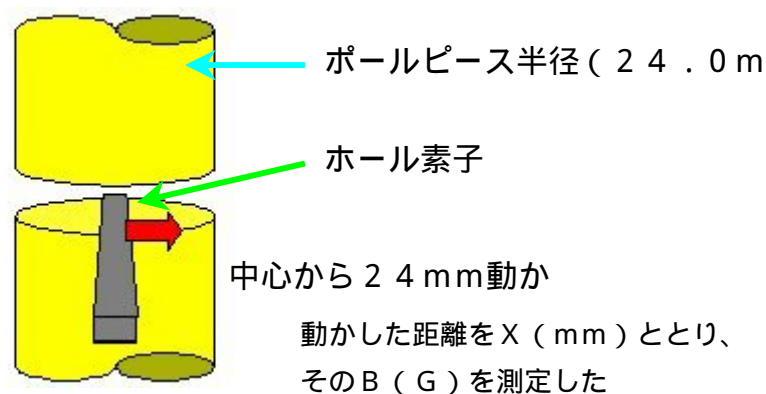


図 8 . 1 計測方法図

9 . 測定の結果

8章の方法で測定した磁場を図9 . 1 と図9 . 2 に示します。

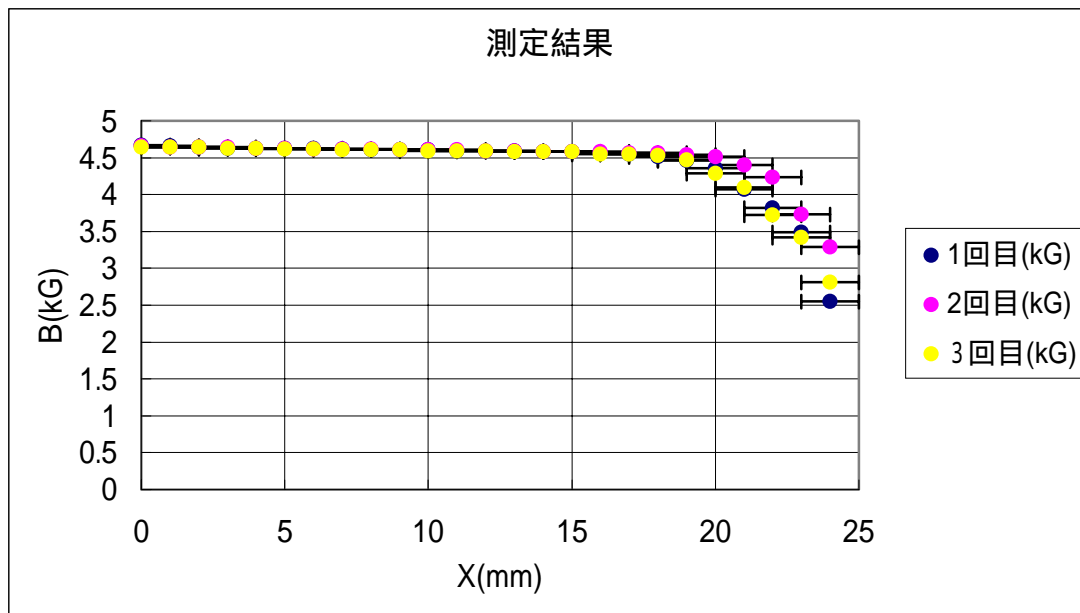


図9 . 1 計測結果

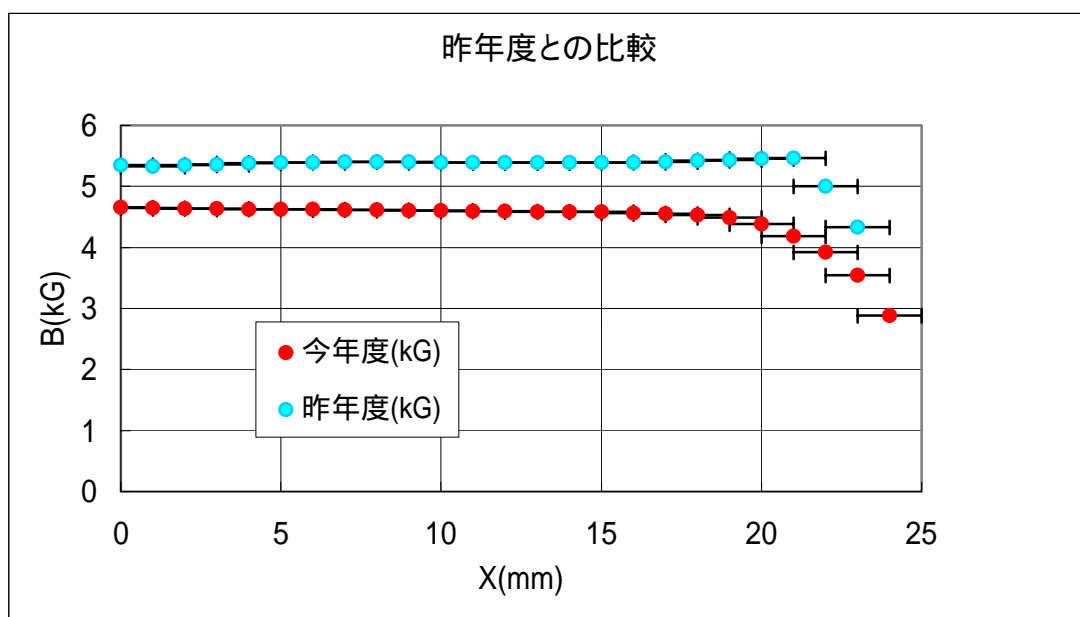


図9 . 2 去年との比較

昨年度の電磁石がポールピースの中心で発生する磁場が5 . 3 K Gです。今回の電磁石が4 . 6 K Gになりました。

10 . 結論

昨年度の電磁石より強い磁場を発生させる電磁石を作るために私は、

- リターンヨークの材料
- ターンヨークの穴あけ加工
- コイルの巻き方の改良

この三つを調査・製作しました。昨年度の電磁石より強い磁場を発生させる電磁石は作れませんでした。私の担当した範囲の中で考えると、次の点が考えられます、

リターンヨークの材質は、電磁鋼板より値段が高いと言うことで断念した純鉄やパーマロイを選べばより強い磁場を発生する事が出来たと思います。

それよりもっと重要なことはリターンヨークの穴あけ加工精度（穴あけ位置）をもっと上げる事です。ボール盤で穴開け作業時に材料とボール盤とを固定するのが難しく、穴が設計よりずれてしまいました。その結果、リターンヨークを組み上げた時にそれぞれの部品同士に隙間ができてしまいました。穴を開ける時の方法はよかったと思いますが、もっと穴に近い周りを固定した方がより切削ゴミが間に詰まらなかったと予想できます。

コイルの巻き方を改良するためにまきまき君3号を作り、銅線を整然と密に巻く事に成功しました。

これらをより改善すればより強い磁場を発生させる電磁石が作れると思います。最後に卒業研究で電磁石の製作を通して、いろいろな加工方法を体験しました。企業に直接 Advice をもらったり発注をしたりして社会勉強をしました。チームワークの大切さを実感できたこともあります。これらの体験が自分にとって大いにプラスになりました。

1 1 . 付録

参照

* 1 純鉄

不純物のきわめて少ない鉄を純鉄と呼ぶ、室温から 9 1 0 の間では純鉄は体心立方格子 (BCC) をしておりこれを 鉄と呼ぶ。

参考文献 1

* 2 鉄

常温から 9 1 0 の間では、純鉄は体心立方構造 (BCC) をしておりこれを 鉄と呼ぶ。 鉄は強磁性体であるが、7 6 8 (キュリー点) 以上に加熱すれば磁性は消失する。

炭素原子を固溶した 鉄を フェライト、または単にフェライト呼ぶ。フェライトへの炭素の固溶はきわめてわずかであり、 鉄は 7 2 3 において最大 0 . 0 2 % の C を固溶する。 フェライトの C の溶解度は温度が下がるとともに低下し、0 で 0 , 0 0 8 % となる。

参考文献 1

* 3 セメントナイト

セメントナイトは 1 2 の鉄原子と 4 個の炭素原子からなる正斜方晶の構造である。セメントナイト中の C の重量%は鉄の原子 5 6、C の炭素量 1 2 であるから、 $1 2 / (5 6 \times 3 + 1 2) = 0 . 0 6 6 7 (6 . 6 7 \%)$ である。セメントナイトは非常に硬くて、ガラスのように脆い白色の炭化物である。

参考文献 1

* 4 パーマロイ

鉄・ニッケルを主成分とする透磁率の高い軟質磁性材料。

その代表的製品として、高磁束密度を特徴とする 45%ニッケル系のパーマロイと、高透磁率で低損失を特徴とする 78%ニッケル系のパーマロイがあり、それぞれの特徴を活かして使われている。

当社のパーマロイはオーディオ用磁気ヘッド、時計用ステッピングモータ、漏電しゃ断器用コア、各種電流センサーなど、エレクトロニクス製品の電磁変換部分に広く採用されているほか、磁気シールド用にも使用されている。

* 5 一方向性ケイ素鋼板 (Grain oriented silicon steel sheet)

鉄およびケイ素鋼の容易磁化方向は $\langle 100 \rangle$ である。したがってこの方向に結晶粒の方向をそろえ、それを磁化方向と一致させれば非常によい磁気特性をもつ材料が得られる。ところが Fe-Si 合金圧延板の優先方向は一般に(001)面が圧延面に平行になり、 $\langle 100 \rangle$ 方向が圧延方向にそろう傾向を持っている。しかし、冷間圧延と焼きなましの交互くり返しにより、圧延面が(011)面、圧延方向が $\langle 100 \rangle$ 方向であるような再結晶集合組織を作り出すと、圧延方向の透磁率がこれに直角な方向より高くなる。このように磁気特性を一方向に持たせた 1~3%Si 電磁鋼板を一方向性ケイ素鋼板という。また圧延面に(100)面が平行になり、圧延方向に $\langle 100 \rangle$ 方向が平行になると、圧延方向とこれに直角な方向が容易磁化方向となるため二方向の透磁率が高くなるので、これを二方向性ケイ素鋼板とよぶ。なお、熱間圧延のままのものは集合組織がないため方向性がなく無方向性ケイ素鋼板といい、方向性ケイ素鋼板より鉄損が大きく、磁束密度が低い。用途は方向性ケイ素鋼板(電磁鋼板)は圧延方向に優れた磁気特性を持つので変圧器などの静止器に多く用いられ、無方向性ケイ素鋼板は発電機や電動機など回転機に多く使用される。

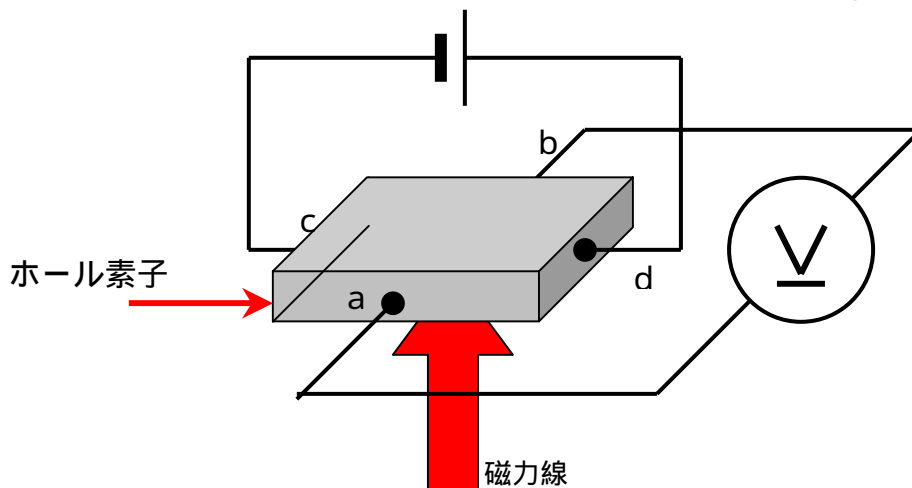
JIS C 2552 無方向性電磁鋼帯、JIS C 2553 方向性ケイ素鋼帯

* 6 呉竹電鋼株式会社

<http://www.kuretake-co.jp/index2.html>

* 7 ガウスマーター

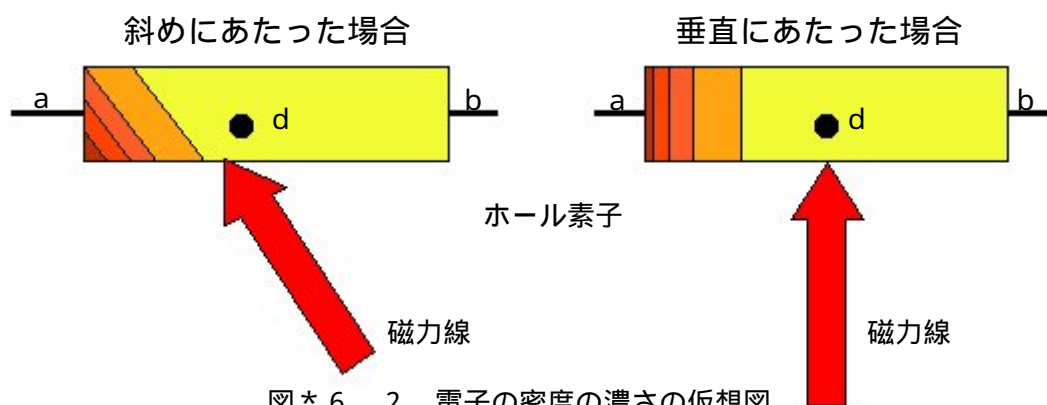
ガウスマーターで磁束密度を計測するセンサーはホール素子と呼ばれます。



図* 7 . 1 ホール素子による磁場測定

c dの方向に電流を流している状態で磁力線がホール素子に垂直に入射する時に“フレミングの左手の法則”によりホール素子の中心からaの向きにc d方向に流れている電子に力が働きます。そしてc dに流れる電子がaの方に進む向きを変えながら進みます。このため、aとbの間に電子の密度の違い(電位差)が生じ、それが電圧計で測る事が出来ます。

なぜガウスマーターに磁力線が垂直にあたると磁場が強く測定できるのか
図* 6 . 1のdからcの方向へ見ると



図* 6 . 2 電子の密度の濃さの仮想図

磁力線が斜めにあたった方は一番電子の密度が濃いところを測る事が出来ないの
で正確な電位差を測る事が出来ません。

* 8 珪鋼商事株式会社

<http://www.keiko-choji.com>

参考文献

- 1 . 基礎機械工学シリーズ2
機械材料学
平河賢満 大谷泰夫 遠藤正弘 坂本東男 著
朝倉書店
- 2 . 住友特殊金属
<http://www.ssmc.co.jp/kinzoku.html>
- 3 . 料名の辞典
長崎 誠三 ほか編
アグネ技術センター

謝辞

ご指導して下さった野尻洋一教授 百田佐多生講師
共同研究者で電磁石の材料強度を担当してくれた高巢正人君
磁場強度を計算してくれた浜川恒圭君
すべての設計図を書いてくれた浜口顕典君
マネージメントの八木宏樹君
ポピンヤリターンヨークに使用するアルミ会社を紹介してくれた飯田一生さん
色々な助言をしてくれた齊原光和子さん 坂本麻子さん
電磁鋼板を販売して下さった珪鋼商事株式会社の事務の野村勝昭さん
電磁鋼板についてアドバイスして下さった珪鋼商事小社加工開発担当の清瀬さん