

卒業論文

電磁石の耐変形のための 強度計算

物理工学科研究室

知能機械システム工学科

学籍番号 1020117

高巢 正人

共同研究者

小川 浜川 濱口 八木

卒業論文目次

第1章 序論	4
1 - 1 研究目的	
第2章 電磁石の概要	5
2 - 1 電磁石とは	
2 - 2 電磁石各部位の働き	
2 - 3 電磁石の利用例	
第3章 電磁石の作成	7
3 - 1 電磁石の材料・製作手順	
3 - 2 電磁石の製作	
第4章 電磁石の強度計算	10
4 - 1 強度計算の目的	
4 - 2 強度計算（磁極と天板を締結するネジ）	
4 - 3 強度計算（側板にかかる圧縮応力）	
4 - 4 強度計算（天板にかかる集中荷重）	
第5章 ひずみ測定	15
5 - 1 測定方法	
5 - 2 測定結果と計算値の比較	

第6章 結論	18
6 - 1まとめ	
6 - 2問題点	
参考文献	19
付録	20
謝辞	21

第1章

序論

1 - 1 研究目的

私達、物理工学研究室では物作りの作業を身につけることを目的にしています。物作りには立案から始まり、計画（タイムスケジュール）設計、強度計算、材料選定、材料発注、加工、製作、計測をし、得られた測定値などをまとめて発表することが必要とされているのです。この一連の流れを実際に行うことによって、他のいろいろな物作りに対応できる能力が身につく。物作りの一連の流れで、材料の性質、強度計算の結果などの確かな裏付けがあって初めて材料の加工ができ、破壊・変形がなく機能を果たすことのできる物を作り上げることができます。

今回私達の研究テーマとして、H型電磁石の設計・製作を行った。私が所属している物理工学研究室ではイオンビームの研究が行われています。その装置に使用している電磁石のその性能、電磁石の原理を調べます。そこで、電磁石の理解を深めるために電磁石の製作を卒研のテーマとした。まず私達は、昨年度の卒業生が作ったH型電磁石の、性能（磁場強度、強度、材料）を検討して改善点を見つけ出した。その結果に基づいて新たにH型電磁石設計、製作をしました。

H型電磁石の設計・製作は5人のグループで行っており、私が主に担当したのは強度計算です。強度計算は、材料の変形・破壊がないかを検討するために必要であり以下の手順で行った。

物体に作用する力によって物体がどのように変形するか、また内部にはどのような力が作用するかを明かにする。

強度計算を行うときは、物体全体を部分に分けて各部分に作用する力と変形の間関係を調べる。物体に力が作用したとき強度的に安全であるか、さらに変形は実用上支障がないほど小さく、使用する材料の負荷条件に対して十分強度を有しているかを検討する。

第2章 電磁石の概要

2 - 1 電磁石とは

導線に電流を流すことでそれらを磁化させ、磁場を発生させる装置である。

図1のような断面を持つ電磁石をH型電磁石という。これは、ヨークが両側についているために、鉄の飽和の影響の現れる高磁場においても磁極間に一様性の高い磁場分布を作り出せることができる。

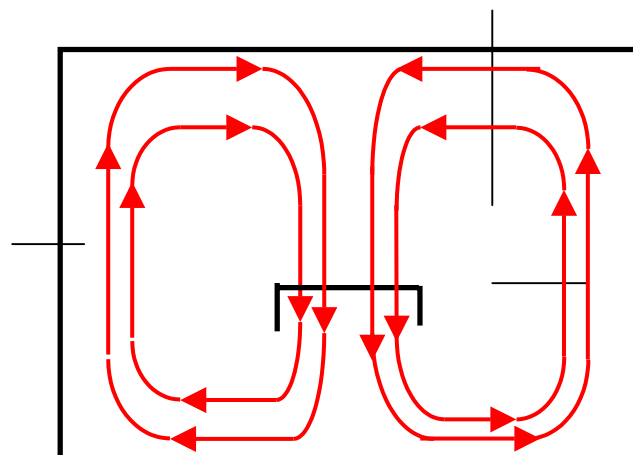


図1

H型電磁石は加速器においてビーム軌道を偏向、集束するとき用いられる。また、偏向電磁石としても利用されている。荷電粒子が偏向電磁石中の磁場の中を進むと、進行方向に直角にローレンツ力を受け運動の向きを変える。(参考文献)

2 - 2 電磁石各部位の働き

H型電磁石は図1のように、主に次の3つの部分から構成されている。

コイル 磁場を発生させる役割を持つ。コイルに巻く導線の巻数によって発生させる磁場の強さが変わる。また鉄心を磁化する働きがあり、電流の向きが変わると、電磁石の極が変わる。

ポールピース コイルで作られた磁場を増強する役割を持つ。

リターンヨーク 磁力線が外に拡散しないようにする。電流値を増やすと鉄が飽和し、磁束がリターンヨークの外に漏れるのを防ぐ。

2 - 3 電磁石の利用例

電磁石の利用例として、電磁気利用の電信機は、コイルが発生する磁界によって、磁針を振れさせて文字を読み取る方式でした。しかし、強力な電磁石の応用により、電流の ON/OFF を機械的運動として伝えることができるようになった。電磁石のおかげでモールス電信はできました。モールス電信の受信機は、コイルに電流が送られてくると、電磁石の鉄心が磁化されて、バネと結んだ可動鉄片（接極子）が吸いつけられ、電流が切れると可動鉄片はバネで戻される。可動鉄片にペンを接続すると、ON/OFF の状態が紙に記録されます。このように、電磁石の発展により、いままでの機能以上をだすことができるようになった。他に偏向電磁石は、荷電粒子ビームを用いて、原子・原子物理学の研究、イオン照射によるガンの治療など様々な分野で利用されている。（参考文献 ）

第3章 電磁石の作成

3 - 1 電磁石の材料・製作手順

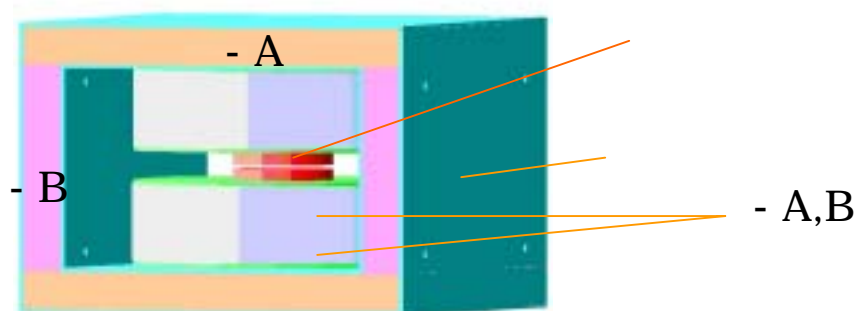


図2

図2のようなH型電磁石製作のために、使用する材料は以下のとおりである。

リターンヨーク

天板、底板に使用

- A 無方向電磁鋼板 50RM250(鋼板のすべての方向にほぼ均一な磁気特性が得られるように製造されており、低鉄損、高磁束密度が達成される電磁鋼板である。また、優れた板厚精度とコーティングを有して加工性も備えている。)

両測板に使用

- B 方向性電磁鋼板 35RGH115N(鉄の磁化しやすい結晶方位が圧延方向のみに揃うように製造された電磁鋼板であり、高透磁率低鉄損、低磁歪等の優れた特性を持っている。)

リターンヨークの強度を増すための補強板として使用

- ・ アルミニウム板 (薄い電磁鋼板を挟みこむようにして、電磁鋼板の両側を挟みボルトで締める)

コイルとボビン

- ・ - A ボビン (アルミニウム製のものを使用)

- ・ - B 銅線（直径が 1 mm、ポリエステルで被膜、直径 0.05mm）

ポールピース

- ・ 鉄（コイル内に鉄芯を入れることによって、磁界内の磁気抵抗が著しく低下し、発生磁束が増加する。）(参考文献)

図に記載されていないが、部品同志を固定するためにネジ（M 6 サイズ）ナット、L 字金具を使用した。

3 - 2 電磁石の製作

3 - 1 であげた材料で H 型電磁石を製作した。その手順は以下のとおりである。

測板に使用した方向性電磁鋼板（35RGH115N）の厚さは 0.35mm であり、これを 5 7 枚重ね合わせることで測板の厚さを 19.95mm にした。天板も同様に厚さ 0.5mm の無方向電磁鋼板（50RM250）を 40 枚重ね合わせ、20mm の厚さにした。

重ね合わせた電磁鋼板に、設計図通りに穴を開けるため、定規を使ってけがいた。次に穴の中心にポンチで窪みをつけた。

重ね合わせた電磁鋼板に開ける穴の位置にずれが生じないようにアルミニウム板で電磁鋼板を挟んで固定した。

ボール盤を使い板にネジ穴を開けた。このときに板を固定するために、バイス、クランプを使用した。

天板とポールピースを締結するためのネジ穴をポールピースに 4 個開ける。（設計上、天板とポールピースを締結するのに 4 箇所ネジで固定する。このためネジ穴を 4 個開ける）

このときも定規を使ってけがき、穴の中心にポンチで窪みをつけた。

ボビンに導線（直径が 1 mm、ポリエステルで被膜、直径 0.05mm）を巻きつけた。ここでは、ボビンと導線が通電しないように、ボビンの内側の表面に紙を貼り絶縁させた。上

下2つのボビンに導線をそれぞれ2056回、2011回巻いた。

L字金具を用いてアルミニウム板で挟んだ電磁鋼板の天板、測板を組み合わせた。この時コイルを巻いたボビンもあらかじめ組み込んだ。(この組み立ての順番は付録を参照)

最後にリターンヨークを固定するネジの締りを確認した。

図3 電磁石完成写真

正面写真



横写真



上からの写真

第 4 章

電磁石の強度計算

4 - 1 強度計算の目的

電磁石は、コイルに電流を流すことで磁極に強い磁場が発生する。これによって磁極どうしが、強力なクーロン力で引き合う。このことを考慮して強度計算を行った。実際の電磁石は、電磁鋼板をアルミ板や固定具で補強した。ここでは、電磁鋼板のみでの強度計算を行った。この強度計算で補償されれば実際の電磁石にも同じことがいえる。

H型電磁石に力がかかることで変形・破壊がおきやすい箇所を以下の3点に特定し、強度計算を行った。

磁極と天板を締結するネジにかかる応力

側板にかかる圧縮応力

天板にかかる集中荷重

4 - 2 強度計算（磁極と天板を締結するネジ）



写真の上部分を天板といい中央部にあるネジが磁極と天板を締結している

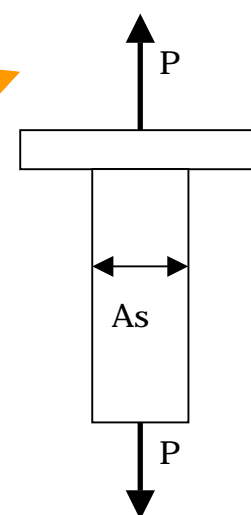


図 4

図 4 は磁極と天板を締結するネジに生じる力を図示したものである。ネジには、磁極の自荷重と磁極どうしが引き合う力が下向きに力が加わるため、ネジの断面積に引っ張り応力

がかかる。ネジの断面積として有効断面積 A_s を用いる。

有効断面積 A_s は

$$A_s = \frac{1}{4} \left(\frac{d_1 + d_2}{2} \right)^2 \quad (\text{mm}) \quad \begin{array}{l} d_1: \text{ネジの有効径} \\ d_2: \text{谷の径} \end{array} \quad (\text{参考文献})$$

と表される。

このネジに働く P は磁極の自荷重 P_1 、磁極が引き合う力 P_2 を加えたものである。

$$P_1 : (0.025)^2 \times 0.05 \times 9.8 \times 7.87 \times 10^3 = 7.57 \quad (\text{N})$$

磁極が引き合うクーロン力は、仮想変位の原理を使う。これは、ある物体に働く力を求めようとするときの X 方向に X だけ変位させて系のエネルギーが減少する方向に力が働くことを利用して力を求める方法である。電磁石の磁極に X だけ仮想変位を与える。 X の部分の面積を S とするとその部分のエネルギーは、

$$\text{変位前 } E_0 = \frac{B^2}{2\mu_0} X S$$

$$\text{変位後 } E_1 = \frac{B^2}{2\mu} X S$$

従ってポテンシャルエネルギーの差 W は

$$W = E_1 - E_0 = \left(\frac{1}{\mu} - \frac{1}{\mu_0} \right) \frac{B^2}{2} X S \quad (\text{N} \cdot \text{m})$$

となる。磁極間に働く力は

$$F = - \frac{W}{X} = \left(\frac{1}{\mu} - \frac{1}{\mu_0} \right) \frac{B^2 S}{2} = 126 \quad (\text{N})$$

$$\text{真空の透磁率 } \mu_0 : 4 \times 10^{-7}$$

$$\text{純鉄の透磁率 } \mu : 3.14 \times 10^{-4}$$

$$\text{磁束密度 } B : 4.2 \times 10^{-1} \quad (\text{T})$$

$$\text{磁極面積 } S : 1.8 \times 10^{-3} \text{ (m}^2 \text{)}$$

よって

$$P = 133 \text{ (N)}$$

応力 は荷重を有効断面積で割ることで求められる

$$= \frac{P}{As} = 6.61 \text{ (N/mm}^2 \text{)} \text{ (参考文献)}$$

この数値はネジ 1 本で磁極を固定する場合であり、第 3 章電磁石の作成で述べたように磁極を 4 本のネジで固定するので、ネジ 1 本で支える力は

$$\begin{aligned} &= \frac{6.61}{4} \\ &= 1.65 \text{ (N/mm}^2 \text{)} \end{aligned}$$

となる。この数値がネジの許容応力であるかは、

$$\text{保証荷重} = \text{引張り強さ} \times As \quad \text{(参考文献)}$$

で確かめることができる。

$$\begin{aligned} \text{保証荷重} &= 450 \times 20.1 \\ &= 9045 \text{ (N)} \end{aligned}$$

ネジ 1 本で支える力と保証荷重の単位を統一する

$$1.65 \times 20.1 = 31.6 \text{ (N)}$$

計算値とこの数値を比べると、十分に耐えられる範囲なので、磁極と天板を締結するネジに対して変形・破壊はない。

4 - 3 強度計算 (側板にかかる圧縮応力)

右写真の表面に見える板を測板という

側板には天板との接触面に働く圧縮応力によって縮みが生じる。ここでは、先ほど求めた磁極間の引き合うクーロン力 P と



磁極の自荷重 P_1 、さらに天板の自荷重が加わった力 P_2 が働く。

ここで P_2 は 2.34×10^{-1} (N) だから

$$P_3 = P + P_1 + P_2 = 133 \text{ (N)}$$

となる。部材に働く応力の大きさ σ は断面積 A と作用する力 P_3 を使って

$$\sigma = \frac{P_3}{A} = 3.32 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

と表せる。この値を、引っ張り圧縮のフックの法則に適用すると

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} = 1.91 \times 10^{-2} \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

ϵ : ひずみ (単位長さ当たりの伸びまたは縮みを表す。)

E : ヤング率 (電磁鋼板ヤング率 173Mpa)

となる。ここで σ が弾性範囲内にあるとして計算した。

単位長さ当たりの伸びまたは縮みを表すひずみ ϵ は、そのものの大きさより材料の変形の程度を表すのに適している。

$$\Delta L = \epsilon \cdot L = 2.1 \times 10^{-1}$$

ΔL : 初期状態からの伸び

L : 初期の長さ 11 (mm)

(参考文献)

この数値は構造物の寸法に比べて、小さく微小なため材料の変形・破壊を考えなくてよい。

4 - 4 強度計算（天板にかかる集中荷重）

下の写真の上部分にある板を天板という

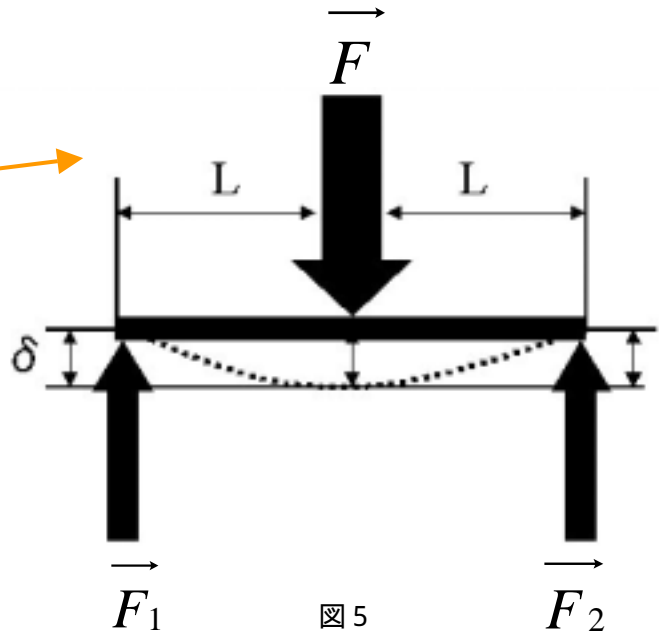


図5のようなものを単純支持はりといい、2つの片持ちはりから構成されている。図5の \vec{F} は磁極の自荷重と磁極の引き合うクーロン力が天板に集中荷重としてかかることを示している。 \vec{F}_1, \vec{F}_2 は、側板が上向きの力で天板を支えていることを示している。 δ は集中荷重による天板のたわみを意味する。

天板には磁極を締結しているネジを通して磁極の自荷重と磁極の引き合うクーロン力による集中荷重がかかる。この力によって天板にたわみが生じる。図5の単純支持はりの問題を解くためにミオソテスの方法を使う。

ミオソテスの方法より

$$= \frac{P_3 L^3}{48EI} \quad (\text{参考文献})$$

E : 電磁鋼板のヤング率 = 173 (MPa)

$$I : \text{天板の断面二次モーメント} = \frac{L h^3}{12}$$

$$= 6.67 \times 10^4 (\text{mm}^4)$$

$$h : \text{天板の厚さ} = 2.0 \times 10 (\text{mm})$$

$$L : \text{天板の長さ} = 1.0 \times 10^2 (\text{mm})$$

$$P : \text{天板にかかる力} = 133 (\text{N})$$

この式に数値を代入すると、 $\delta = 2.41 \times 10^{-1} (\text{mm})$ となりポールピースのギャップが 5 mm で変化の範囲 8% より小さく微小なので天板の変形・破壊は考えなくてよい。

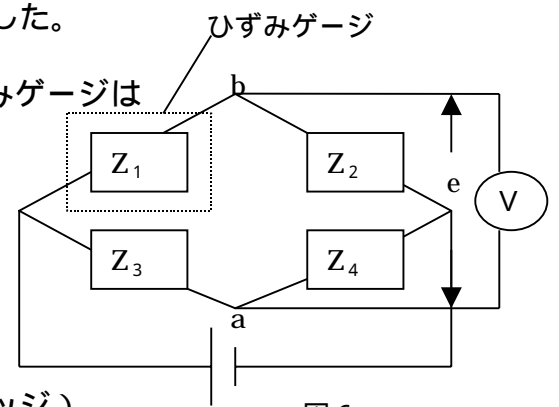
第5章 ひずみ測定

5 - 1 測定方法

第4章で計算した測板の圧縮応力によるひずみを確認するため、製作した電磁石に電流を流して磁場を発生させた状態で測板に生じるひずみを測定した。

ひずみの測定のためにひずみゲージを使用した。ひずみゲージは物体の圧縮ひずみが生じると、ブリッジボックス内部の電気抵抗の変化による、電気信号の変化として観測される。

ブリッジボックスの仕組みとしては、図6のような回路をしている。この回路をブリッジ型回路（4辺ブリッジ）



という。端子 a-b 間で出力電圧 e を測定する。平衡条件は $Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3$ のときである。

(参考文献)

ひずみゲージは、集中定数のインピーダンスを比較する回路で、インピーダンス測定を通じて試料の誘電・磁気および導電特性測定に用いられる。Z は抵抗を表しており、ひずみが生じると電気抵抗が変化し、その変化値を電気信号に変える。黒点のところでひずみゲージとつながっている。

測定装置の配置図

図7

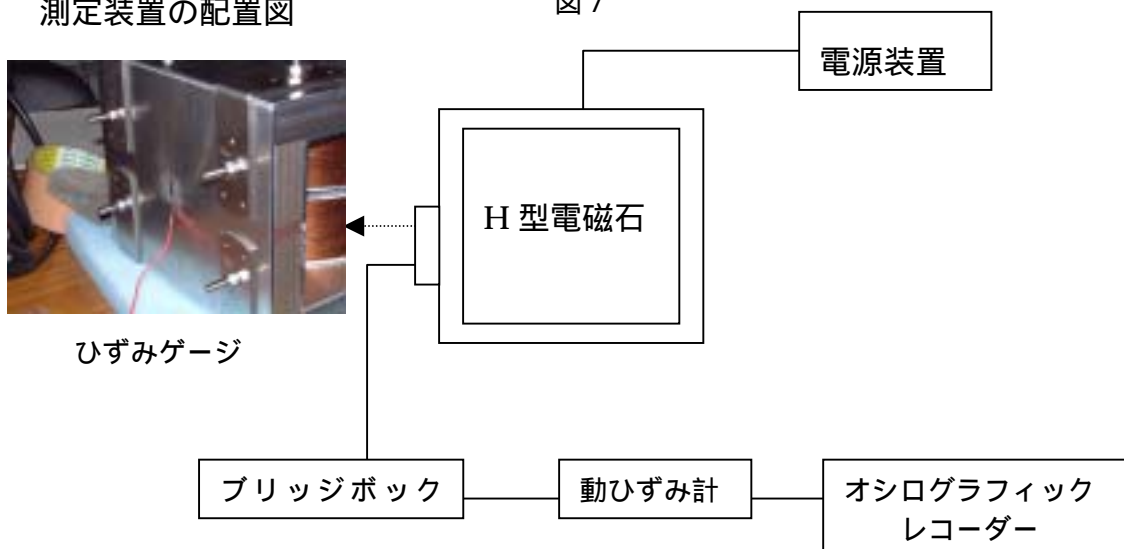




図 8 ひずみの測定風景

測定手順

ひずみを測りたい箇所を紙やすりで円を描くように磨き、アセトンできれいに汚れを拭く、そこに接着剤でひずみゲージを貼る。

ひずみゲージとブリッジボックスを接続する。また、動ひずみ計とオシログラフィックレコーダーもつなげて電源を入れる。

電磁石に磁場強度を測定したときと同じ電流を流す。ひずみが生じると予想される大きさのひずみを校正ひずみとする。

校正ひずみと実際にひずみが生じたときの記録を比較する。

* 測定時 電流 1.14A 流し、磁極中心で最大磁場強度 4.6KG 発生、側板に対して 126 (N) 磁極間の引き合うクーロン力と磁極の自荷重、さらに天板の自荷重が加わった力が働く。

5 - 2 測定結果と計算値の比較

この測定では測板のひずみについて、計算値と測定値の比較をするために行った。しかし、今回使用した動ひずみ計は測定できるひずみの最小限界が $10^{2\sim 3}$ であったため、製作したH型電磁石の測板に生じるひずみはこの値 $10^{2\sim 3}$ より小さかった。そのため強度計算で求めた測板のひずみは、

$$= 1.91 \times 10^{-2}$$

であり、 $10^{2\sim 3}$ より小さいということは証明できた。

第6章

結論

6 - 1 まとめ

私達が製作したH型電磁石は、変形、破壊することもなく中心では4.6KGの磁場を発生させる事ができた。このことは、第4章で行った強度計算に間違いはなく、物体に力が作用したとき強度的に安全であり、使用する材料は負荷条件に対して十分強度を有していたことを意味する。

6 - 2 問題点

今回H型電磁石の強度計算を行ったことで、予定よりも遅れたため材料の発注に支障を与えた。また、ひずみの測定結果が、使用した装置の測定限界の問題のため計算値との比較のデータがあまり参考にならなかった。

ひずみの測定の改善点

今回使用した動ひずみ計、オシログラフィックレコーダーを、もっと微小なひずみを感知できるような測定器に変える。

参考文献

物理学辞典 倍風館

<http://www.tdk.co.jp/tjdaa01/daa00611.htm>

http://www.tepco.co.jp/corp-com/elect-dict/file/de_012-j.html

ねじのおはなし 山本 晃 著

材料力学 村上 敬宣 著

J I Sハンドブックねじ 1996

材料の科学と工学 北篠 英光 編著

岩波 理化学辞典 第5版 岩波書店

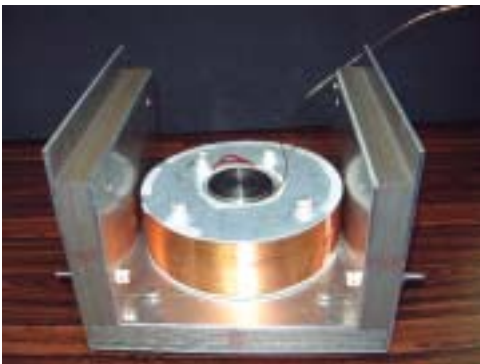
付録



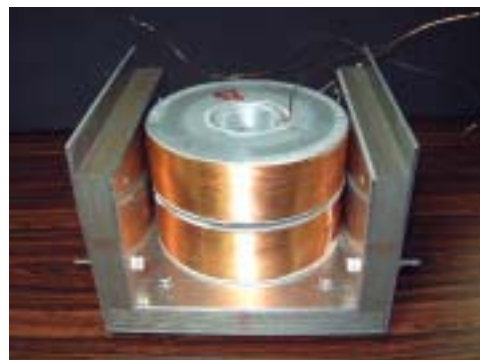
リターンヨークの底板を組みL字金具を付ける。



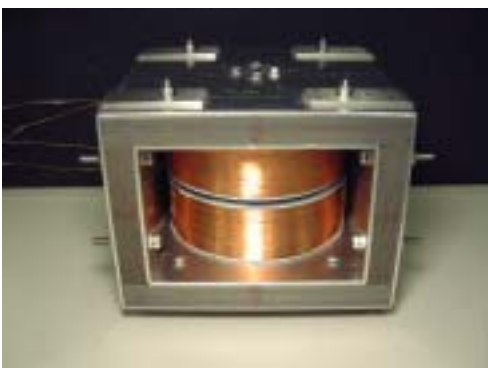
側板をはめてネジを締める。



下のコイルを巻いたボビンを入れる。



上のボビンも置く



天板をはめ込みL字金具で固定し完成。

謝辞

今回電磁石の製作をするにあたって、以下の方々の、ご指導とご協力を承りました。

論文、卒研発表の仕方のご指導を下された野尻洋一教授、百田佐多生講師、齋原光和子、坂本麻子さん。

ともに研究を進めていった小川和秀、浜川恒圭、濱口顕典、八木宏樹。

ひずみゲージの測定するとき測定方法、測定器具の説明を下された坂本研究室の方。

パワーポイントの書き方をアドバイスしてくれた佐野岳志、河本章。

皆様のおかげでこのようにして論文を書くことが出来ました。誠に有難うございました。