

卒業論文

野尻・百田研究室

電磁石製作における
マネージメント

知能機械システム工学科

1020158

八木 宏樹

共同研究者

小川 高巢 浜川 濱口

卒業論文目次

1.序論

1.1 研究目的

2.電磁石とは

2.1 電磁石の原理

2.2 電磁石の用途

3.電磁石の材料

3.1 今回使用した電磁石の材料

3.2 リターンヨークについて

3.3 銅線について

4.銅線の長さや質量の決定と発注

4.1 銅線発注までの手順

銅線の長さの計算

銅線の質量の計算

取り扱い業者の決定

4.2 銅線の発注

4.3 実際にコイルとして巻いた銅線の長さ

5.作業の手順と予定表の役割

5.1 作業の手順

5.2 予定表で見る予定と遅れの実際

5.3 作業の遅れの原因と解決法

6.結論

6.1 マネージメントについて

6.2 銅線について

A.付録

A.1 完成品と設計図

A.2 去年のコイルと今年のコイル

A.3 作製した電磁石の測定結果

参考文献

1. 序論

1.1 研究目的

全体の目的

この研究の目的は、1つの物を作り上げることである。1つの物を作り上げるには、多くの技術(今回の電磁石製作では、設計、磁場計算、強度設計、材料(その製品に合った材料を調べる、調達)、熱量計算、加工技術、測定技術など)が必要である。この目的を達成する事によって、技術の習得が可能となる。

また、今回は昨年度製作した電磁石(昨年度の卒業生が製作した電磁石)よりも強い磁場を発生させる電磁石を作製することも全体の目的である。昨年度製作した電磁石の問題点を探し出し、解決法を見つけ、さらに性能の良い電磁石を製作することである。

個人の目的

上記の大目的を達成するために各個人で磁場計算、強度計算、設計、材料調達、マネージメントなどの役割を分担した。私の役割は以下の二つである。

予定表を作り電磁石を作り上げ、データ収集、発表対策まで期限内に終わらせる。(マネージメント)

銅線に関して発注まで行う。

マネージメントとは、作業全体を管理することである。今回、私はそのマネージメントに挑戦した。電磁石を製作する上での予定表を作り、各個人が担当することが予定通りに進んでいるかどうか判断し期限内に終わらせる。もし、予定表よりも遅れたのなら、なぜ遅れたのかを見極め、遅れを修正する。最終的に、電磁石を作り上げ、データ収集、発表対策まで全てを期限内に終わらせる事が私の第一目的である。

次に、私の担当する電磁石を製作する材料で、特に銅線の素材調査(皮膜)や、長さ、質量の計算をし、発注まで行う。

2 電磁石とは

2.1 電磁石の原理

導線に電流を流すと磁場が発生する。電磁石とは、導線でコイルを作り、そのコイル（導線）に電流を流すことによって磁場を発生させる。また、コイルの中心に強磁性体を入れることによって磁場を増幅させる。その磁場をリターンヨークによって外に漏れないようにしたものである。

電磁石はその役割によって3つの部分に分けることができる。

- ・ コイル 電流を流した時に磁場を発生させる
- ・ ポールピース コイルで発生した磁場を増幅させる
- ・ リターンヨーク 磁力線が外に漏れないようにする

(図 1 参照)

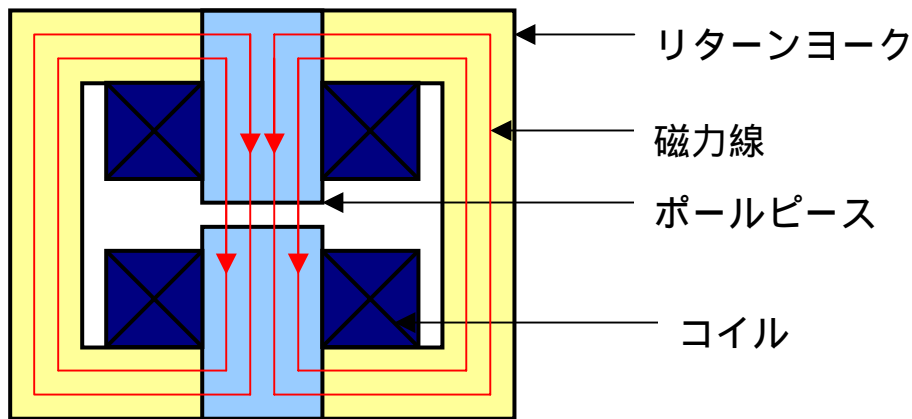


図 1 ・ H 型電磁石の断面図

2.2 電磁石の用途

電磁石はさまざまな分野で使われている。メーター、変圧器、モーター、粒子加速器あるいは拡声器などのような装置にも使われている。強力な電磁石は重いもの（金属）を持ち上げるのに使われ、スクラップ工場などでよく見かけられる。今回製作した電磁石（付録 A.1 参照）は H 型電磁石と呼ばれるもので、応用例として偏向電磁石があげられる。偏向電磁石は、イオンビームの加速器で荷電粒子を偏向させるのに用いられている。

3. 電磁石の材料

3.1 今回使用した電磁石の材料

電磁石は、リターンヨーク、ポールピース、コイルから構成されている。今回の電磁石では、リターンヨーク部で、電磁鋼板、アルミニウム板を、ポールピースでは純鉄を、コイル部では、銅線、アルミのボビンを材料としている。ここではリターンヨークとコイルに着目する。昨年度の電磁石よりも強い磁場を発生させるために行ったことは、

1 リターンヨーク部の材料

2 線の太さ、巻き方

の 2 点に改良をした。この 2 点を 3.2、3.3 で説明する。

3.2 リターンヨークについて

昨年度は、リターンヨーク部で使用したのは純鉄だったのだが、不純物が何%入っているのか分からない材料を使ったので、今回は、成分が分かっている電磁鋼板を材料として選んだことである。電磁鋼板は優れた透磁性（磁性体の磁化しやすさを示す量）を持つ材料である。電磁鋼板には方向性電磁鋼板と無方向性電磁鋼板の 2 種類がある。

方向性電磁鋼板

- ・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

無方向性電磁鋼板

- ・鋼帯の全ての方向にほぼ均一な磁気特性が得られるように製造

方向性と無方向性の違いは、電磁鋼板の磁化する向きが静か、動かである（図2参照）。このことより電磁石の上下を方向性電磁鋼板、電磁石の両横を無方向性電磁鋼板にすることに決めた。しかし、一枚の電磁鋼板が薄い（方向性 0.35 mmと無方向性 0.5 mm）ため何枚も重ねる必要があった。

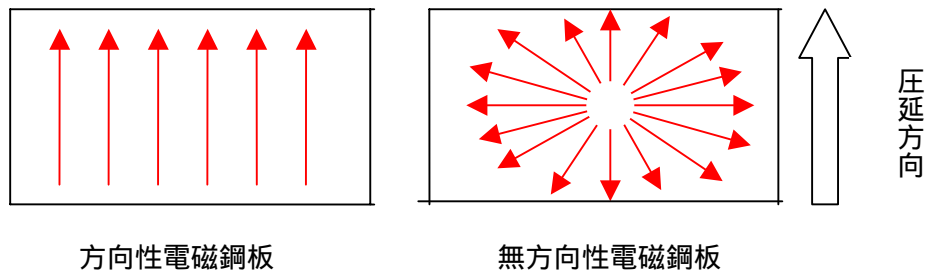


図2・電磁鋼板の違い：赤い矢印は磁化する向き

3.3 銅線について

銅線に関しては、巻きやすい太さにした。昨年度は、直径 0.5 mmと 2 mmで蜜に巻くことができなかつたからだ。（付録：A.2 参照）0.5 mmだと細すぎて蜜に巻くのが困難だった。2 mmだと太すぎて銅線が硬く巻きにくかつた。また、銅線が太いため巻き数も多く出来なかつたからだ。昨年度のコイルよりも導線の巻き数を多くし、蜜に（きれいに）巻くことによって、コイルの発生する磁束密度は昨年度よりも強くなる。よって今回の銅線は直径 1 mmに決めた。（付録 A.2）

使用した銅線は

皮膜の種類 ポリエステル線

直径 1 mm

皮膜の耐熱温度 155度

皮膜の厚さ 0.05 mm

である。ポリエステル線を選んだのは、耐熱温度が高いし価格もあまり高くなかつたからだ。

4.銅線の長さや質量の決定と発注

4.1 銅線発注までの手順

銅線の発注のために銅線の質量を決定した。その決定は以下の手順で行った。

設計に基づき銅線の長さを決定した。

その長さに基づき質量を決定した。

なぜ質量まで出すのかと言うと、導線の発注は長さではなく、質量で量を指定するからである。

銅線の長さの決定

等差数列を使って、電磁石内、上下コイルとして巻く銅線の長さを求める。

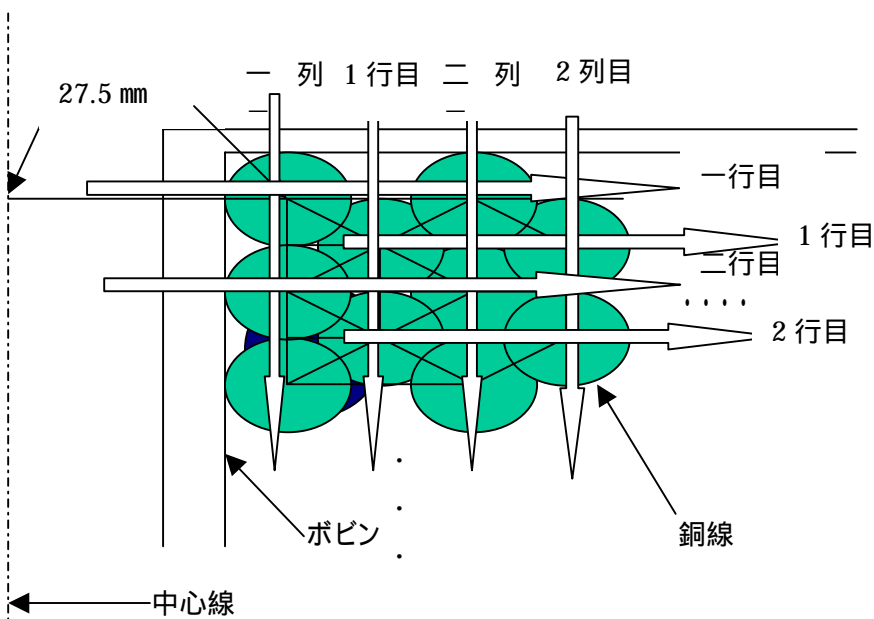


図3・コイルの断面図

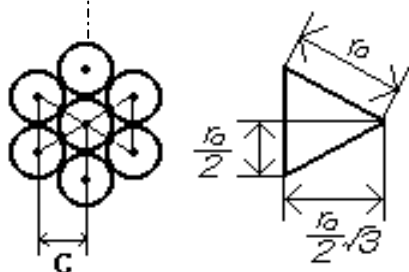


図4・青い部分の拡大図：コイルの中の銅線

L_n 、 K_n : n 周目の銅線の長さ

r_n : コイルの中心から n 列目までの距離

A_n : n 列目までの和 (漢数字)

B_n : n 列目までの和 (数字)

コイルの一周目の銅線の長さ L_1 が初項となる。

$$\begin{aligned} L_1 &= 2 \quad r_1 \\ &= 175.84 \text{ 【mm】} \end{aligned}$$

二周目の長さ L_2 は、

$$\begin{aligned} L_2 &= 2 \quad r_2 \\ &= 186.72 \text{ 【mm】} \end{aligned}$$

公差 dL は L_2 と L_1 との差なので

$$\begin{aligned} dL &= L_2 - L_1 \\ &= 186.72 - 175.84 \\ &= 10.88 \text{ 【mm】} \end{aligned}$$

一行目の銅線の巻数 n は 27 なので、
等差数列より初項 L_1 と公差 dL を使うと、

$$\begin{aligned} A_{27} &= n \{ 2 L_1 + dL(n - 1) \} / 2 \\ &= 8566.56 \text{ 【mm】 (一行目の和)} \end{aligned}$$

これが、四十一列あるので、

$$\begin{aligned} A_{27} \times 41 &= 351228.96 \text{ 【mm】} \cdot \cdot \\ & \text{(一行目から四十一行目までの銅線の長さの和)} \end{aligned}$$

1 行目の初項 K_1 は図 3 のように c だけ大きいので $r+c$ とする。

(図 3 参照)

1 行目の初項 K_1 は、

$$\begin{aligned} K_1 &= 2 (c+r) \\ &= 181.29 \text{ 【mm】} \end{aligned}$$

公差 dL は、同じなので

$$dL = 10.88 \text{ 【mm】}$$

1 行目の銅線の数も 27 なので、
等差数列より初項 K_1 と公差 dL を使うと、

$$\begin{aligned} B_{27} &= n \{ 2 K_1 + dL(n - 1) \} / 2 \\ &= 8713.71 \text{ 【mm】} \text{ (1 行目の和)} \end{aligned}$$

これが、40 列あるので、同じように、

$$B_{27} \times 40 = 348548.4 \text{ 【mm】} \cdot \cdot$$

(1 行目から 40 行目までの銅線の長さの和)

と をたせば銅線の長さ L が出る。

$$\begin{aligned} L &= \quad + \\ &= 699777.36 \text{ 【mm】} \\ &= 699.78 \text{ 【m】} \text{ となる。} \end{aligned}$$

巻き数 N は行の個数 \times 列の個数を足せばいいので、

$$\begin{aligned} N &= 41 \times 27 + 40 \times 27 \\ &= 2187 \text{ 【回】} \text{ となる。} \end{aligned}$$

銅線の質量の決定

上で求めた銅線の長さを使って質量を出す。

質量 M は体積 V と密度 を使って

$$M = V \times \quad \text{と表せる。}$$

V はコイルの数 n 、断面積 A 、長さ L として、

$$V = n \times A \times L \text{ となる。}$$

ここでコイルの数 n は上下 2 個、断面積 A は銅線の断面積なので、

$$V = 2 \times (0.0005)^2 \times \quad \times 699.78$$

$$1.10 \times 10^{-3} \text{ 【m}^3\text{】}$$

銅の密度 = $8.96 \times 10^3 \text{ 【kg/m}^3\text{】}$ なので

$$M = V \times$$

$$= 1.10 \times 10^{-3} \times 8.96 \times 10^3$$

$$= 9.856 \text{ 【kg】 となる。}$$

4.2 銅線の発注

まず、Web サイトを使って銅線を取り扱っている業者を探した。二、三社電話を掛けたが、全て 30 kg 以上でしか銅線を取り扱っていなかった。今回必要とした量は約 10 kg である。従ってより少量の銅線を購入できる業者を探す必要があった。すると、先輩から紹介された芸陽社・(有)旭電子に電話したところ 5 kg 単位で購入が可能だったので、そこで発注することに決めた。最初は、計算上、質量 4.22 kg だったので、5 kg の銅線を発注した。しかし、銅線の長さの計算ミスにより全部で 9.85 kg の銅線を必要と分かりさらに 5 kg 発注した。

4.3 実際にコイルとして巻いた

銅線の長さ

実際にコイルとして巻いた銅線の長さは以下の2つの手順で求めた。

質量の導出

長さの導出

質量を導出し、その質量と銅の密度から体積を出す。その体積を断面積で割れば長さが導出できる。

銅線の質量の導出

始めにボビンの質量を測っておき、コイルの質量からボビンの質量を引くと銅線の質量が出る。

$$\text{コイル上} : 4.81 - 0.21 = 4.60 \text{ 【kg】}$$

$$\text{コイル下} : 4.96 - 0.21 = 4.75 \text{ 【kg】}$$

長さの導出

銅線の結果の括弧内の長さは以下の様に求めた。

コイル上の計算

銅線の質量 : $M_1 = 4.63 \text{ 【kg】}$

銅の密度 : $= 8.96 \times 10^3 \text{ 【kg/ m}^3\text{】}$

まず体積 V_1 を求める

$$V_1 = M_1 /$$

$$V_1 = 5.14 \times 10^{-4} \text{ 【m}^3\text{】}$$

次にこれを断面積 S で割ると長さ L_1 が出てくる

$$L_1 = (V_1 / S) / 2$$

$$= (5.14 \times 10^{-4} / 7.85 \times 10^{-7}) / 2$$

$$= 327.05 \text{ 【m】}$$

(2で割るのはコイル上1つの計算だからである。)

コイル下の計算

銅線の質量 : $M_2 = 4.755$ 【kg】

銅の密度 : $= 8.96 \times 10^3$ 【kg/ m³】

同じように体積 V_2 は

$$\begin{aligned} V_2 &= M_2 / \\ &= 5.31 \times 10^{-4} \text{ 【m}^3\text{】} \end{aligned}$$

長さ L_2 は

$$\begin{aligned} L_2 &= (V_2 / S) / 2 \\ &= (5.31 \times 10^{-4} / 7.85 \times 10^{-7}) / 2 \\ &= 337.85 \text{ 【m】} \end{aligned}$$

(2 で割るのはコイル下 1 つの計算だからである。)

銅線全体の長さ L は

$$\begin{aligned} L &= L_1 + L_2 \\ &= 664.9 \text{ 【m】 となる。} \end{aligned}$$

5.作業の手順と予定表の役割

5.1 作業の手順

作業には手順がある。どんなことでも順序は必要である。なぜならば、始めの仕事が終わらないと次の仕事が始められない為である。今回の電磁石製作の手順は図5の通りである。

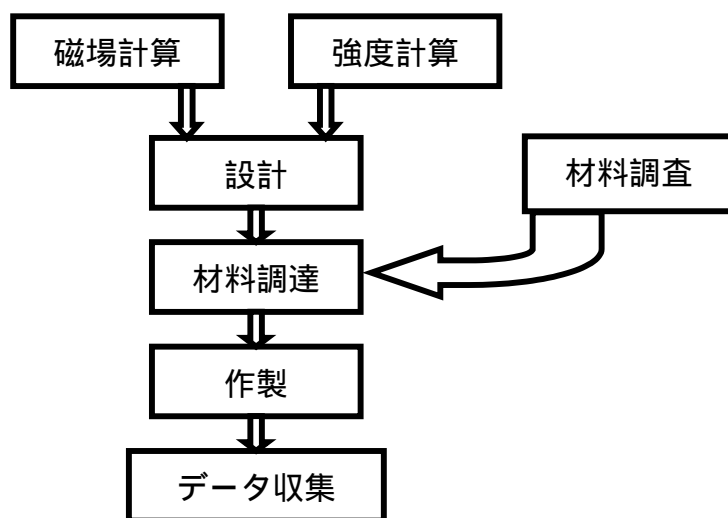


図5・作業の手順

それぞれの役割の内容は以下のとおりである

磁場計算・・・パソコンに電磁石の各パーツのサイズ、材料の透磁率、電流を入力し、磁場強度、磁場分布を計算により導き出す。

強度計算・・・製作した電磁石が壊れないようにするために、磁極の自荷重やリターンヨークの荷重を計算し、電磁石が壊れない値を出す。

設計・・・磁場計算、強度計算の結果に基づいて組み立て図と部品図を作製する。(付録 A.1 参照)

材料調達 (材料調査)・・・強い磁場を発生させる為の電磁石部品を決定し設計に合わせてそれぞれ材料を発注する。

製作・・・調達した材料で電磁石を作製する。

データ収集・・・製作した電磁石で磁場測定、強度測定をし、計算結果と比較する。

5.2 予定表で見る

作業の予定と遅れの実際

11月からの予定表

日時		磁場計算		強度計算		設計		材料調達		製作		データ収集		発表対策	
月	日	予定	実際	予定	実際	予定	実際	予定	実際	予定	実際	予定	実際	予定	実際
11	6	■	■	■	■	■	■								
	13	■		■	■	■	■								
	20			■	■	■	■								
	27			■	■	■	■	■							
12	5			■	■	■	■	■	■						
	12				■	■	■	■	■	■	■				
	19						■	■	■	■	■				
	26							■	■	■	■				
1	2							■	■	■	■	■			
	9							■	■	■	■	■		■	
	16									■	■	■	■	■	
	23										■	■	■	■	■
	28										■	■	■	■	■
2	1													■	■
	6														

これは、十月中旬（作業の直前）に立てた予定表である。最終的には期限内に終わっているのだが、このように見ると中の作業が遅れているのが分かる。では、遅れの原因は何だろう。そして、その対策はどうしたらよかったのだろう。

5.3 作業の遅れの原因と解決法

作業の遅れの原因は以下の5つである。

- 強度設計の遅れ
- 材料の発注から到着までの日数の見込み違い
- クロスチェックがなかったことによる発注ミス
- 製作日数の誤算
- 予定表の作り方

強度設計の遅れ

強度設計のことを先生に指摘されるまで、やること自体忘れており、強度設計に取り掛かるのが遅くなった。そのことで一週間以上も作業が遅れ、それが後の作業に影響した。まず、作業をする前にどのような仕事があるか全て確認する必要があった。また、手の空いている人を手伝わせれば遅れなかっただろう。この遅れで設計が遅れ、材料の発注が遅れた。

材料の発注から到着までの日数の見込みちがい

材料の発注から到着までの日数が、前回(昨年度の卒業生が製作した電磁石)の時のことをふまえた私の予想(一週間)以上にかかったことだろう。

	発注	到着	納入までの 日数	予想日数
電磁鋼板	12月7日	12月25日	18日	7日
銅線	12月12日	12月19日	7日	7日
	12月26日	1月7日	12日	7日
アルミ・ボビン	12月7日	12月16日	9日	7日

- ・銅線は計算ミスにより二回発注(4.2参照)
- ・ナット、ボルトは直接購入したため発注はなし。(1月7日購入)

予想した日数はすべて一週間だが、電磁鋼板は十八日間もかかっている。発注をかける時に業者のほうに納期を聞き、遅くなるようであれば業者に少し急がせる必要があった。

クロスチェック

銅線は、長さの計算ミス(ボビンの中心から銅線の中心までが半径なのだがボビンの中心ではなく内側の板からの距離で計算した)により二度発注しなければならなかった。(4.3参照)計算するときは、一人ではなく何人かで計算しクロスチェックが必要だった。

製作日数の誤算

電磁鋼板に穴あけ加工を外部に依頼すると一万円余分にかかるので自分たちで穴あけをした。自分たちで穴あけ加工をしなくてはならなくなったので、その加工時間が一週間の遅れとなった。その理由として、電磁鋼板は薄いため一度に何十枚の穴あけをすると、隙間に穴あけで出たかすがつまり、一枚一枚拭かないといけなかったためだ。また、業者に頼んだ場合、約一週間ぐらいたるうが、業者の方で穴あけの時間にどのくらいかかるか聴く必要があった。あまり時間がかからないようであったら、お金はかかるが業者の方に頼んだほうが正確な穴あけができただろう。また、工作室が使える時間が限られていたため、長い時間の作業ができなかったのもある。みんなの空き時間を聞き、いつ工作をするのかを割り振る必要があった。そうすれば製作日数も短縮できただろう。

予定表の作り方

予定表を作成するのが遅かったのが第一である。一番始めにしないとけないはずのマネジメントを後回しにしてしまったためだろう。また、材料(銅線)のことに時間を費やしてしまい、マネジメントに取り掛かるのが遅かったせいでもある。よって、予定表を始めに作成すれば遅れることもなかっただろう。

マネジメント(作業全体の把握)をしている私が、作業の遅れているところを指摘し、手の空いている人を手伝わせ、各役割の人に適切な指示を与えれば作業全体が遅れることはなかっただろう。

6 . 結論

6.1 マネージメントについて

データ収集、発表対策は予定表の期限内に終わることができた。よって、今回のマネージメントの一部は成功と言える。しかし、予定表の期限内に電磁石を作り上げるという目標は達成できなかった。ゆとりのある予定表を作らなかったために全体的に遅れを修正することができなかった。全体的な見直し（やらなければならないこと）、確認（クロスチェック）の時間を取ることが抜けていたせいでもあろう。もうすこし自分にゆとりを持ち、全体を把握できるようにならなくてはならない。また、今回のマネージメントでは、コスト面は触れなかったが、マネージメントとはそういうのも全部含めたものである。今後は、全部含めたマネージメントやっけて行くつもりである。

今回のマネージメントに挑戦した為に、作業の流れを把握する能力や全体を見渡さないといけないという事を身につけることによって、今後物作りのマネージメントをする時は期限内に出来るだろう。

6.2 銅線について

計算と実測の比較				
	計算 1	計算 2		実測
長さ (m)	699.78	625.91		[6 6 4 . 9]
(長さに関しては計算で出した。実測ではない。)				
巻数 (回)	2187	2058	コイル上	2058
			コイル下	2011
質量 (kg)	9.85	8.85		9.358

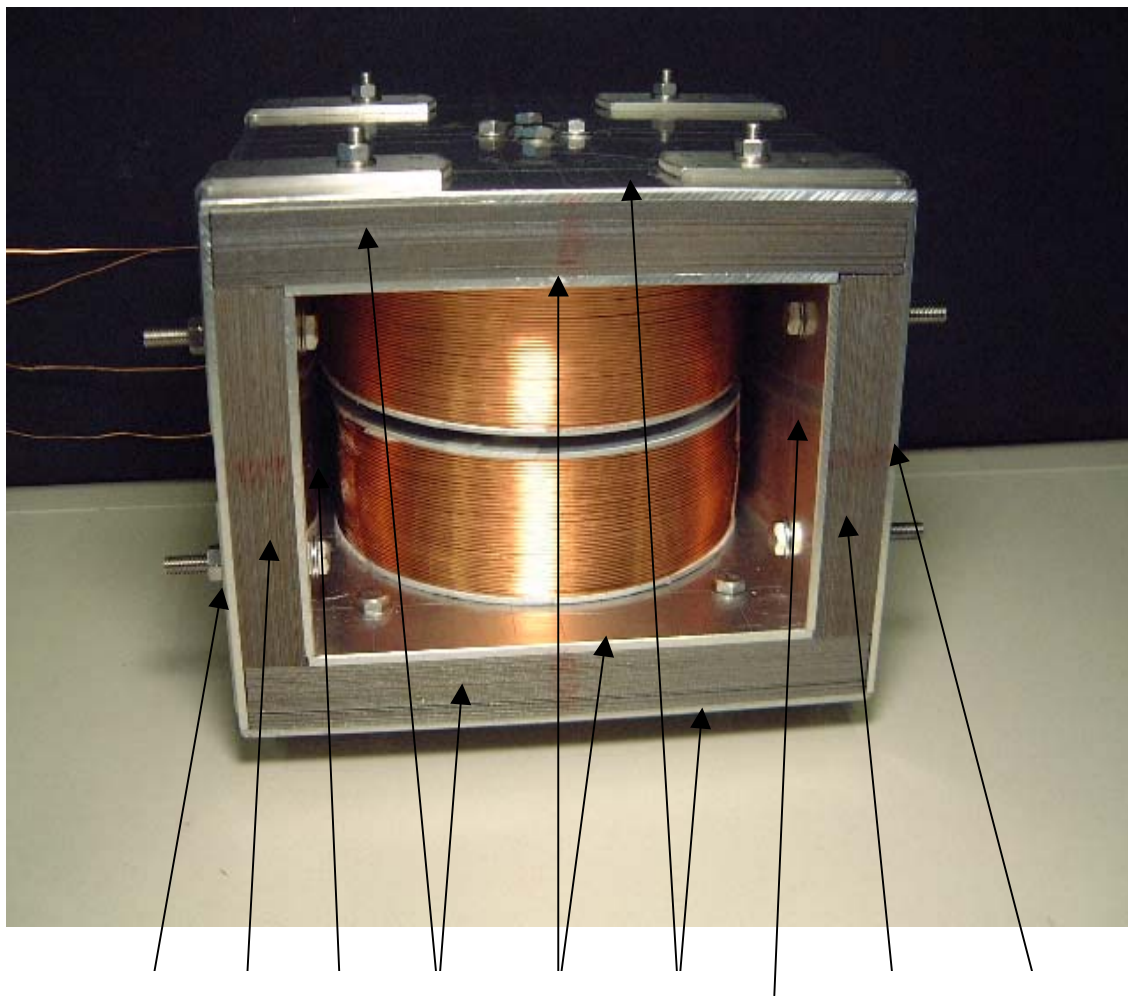
- ・計算1は発注する前の計算
- ・計算2は巻き数をコイル上に合わせて計算したもの

このことにより、約 0.5 kg の誤差（コイルは手巻きだったため）はあったものの計算値とほぼ合っており、発注をかけた値に近い証明になった。よって発注をかけた値は正しいと言える。

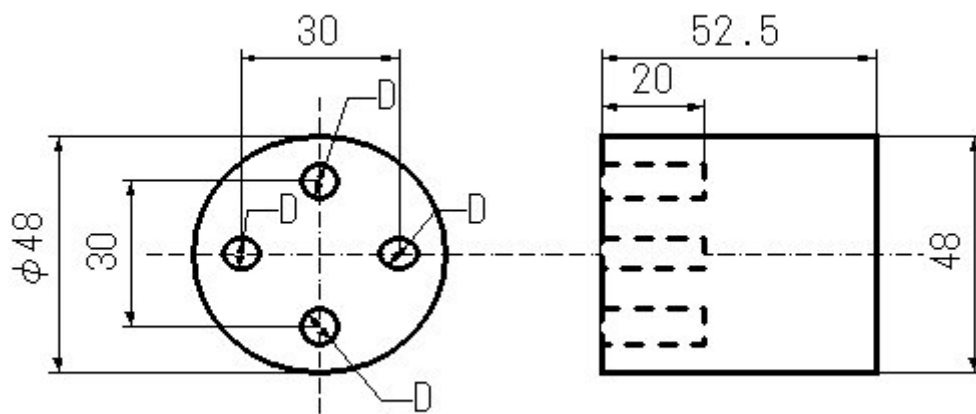
A. 付録

A. 1 完成品と設計図

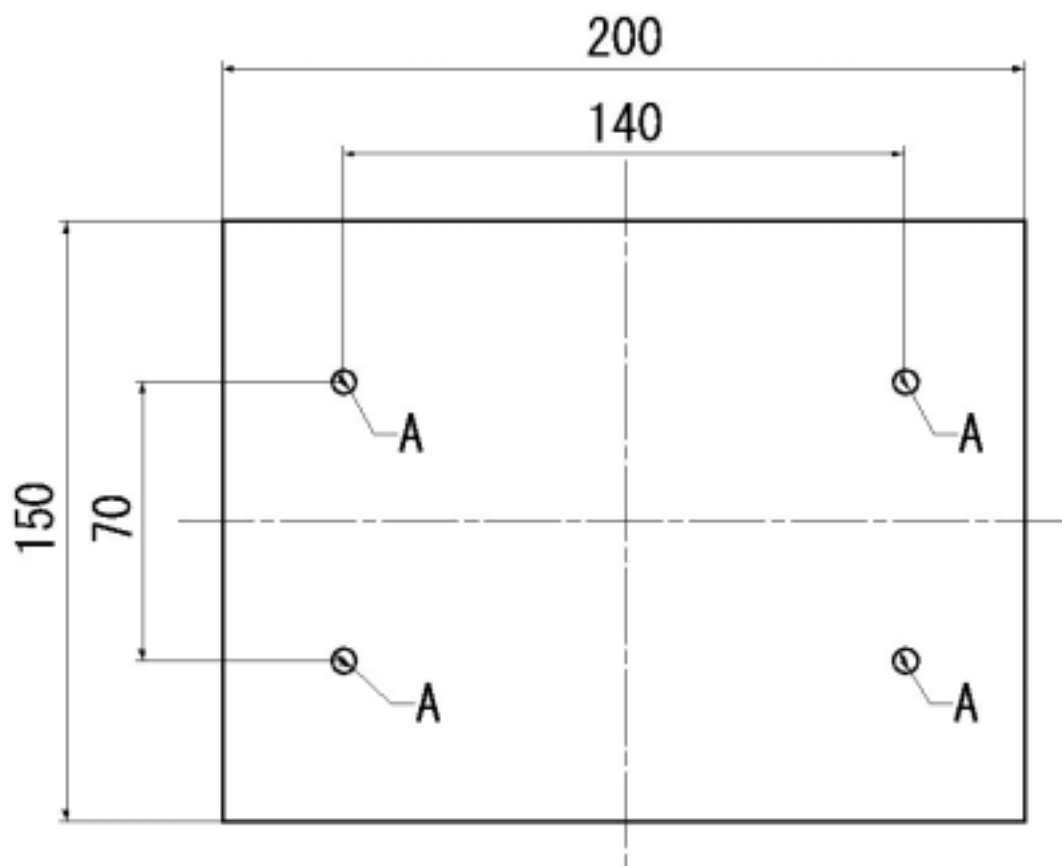
完成図



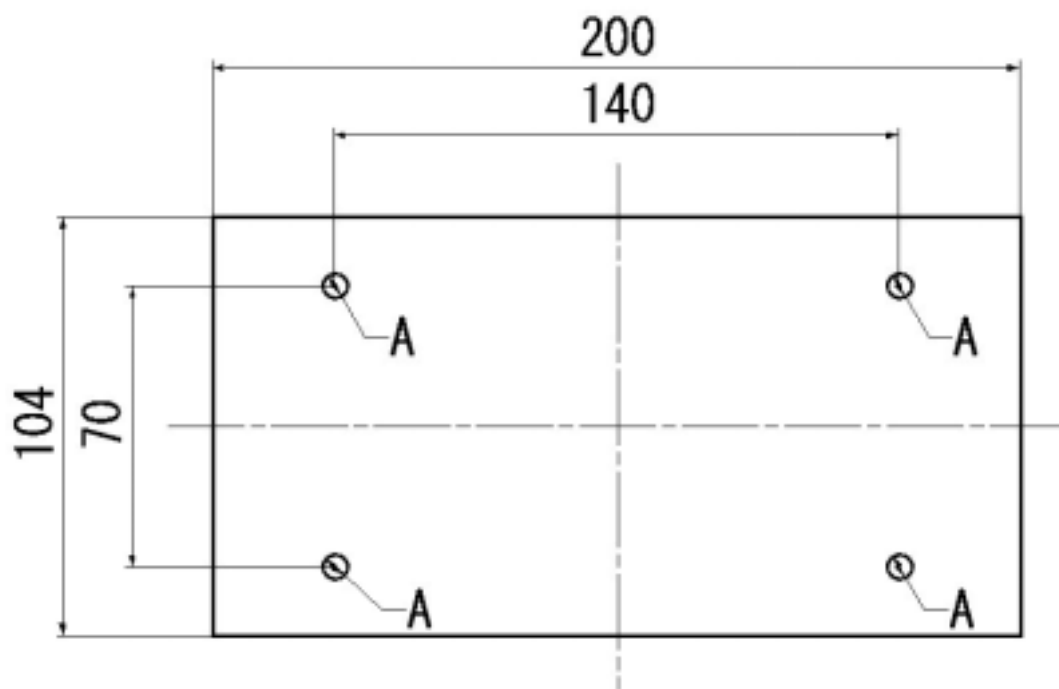
この数字は設計図の部品番号と対応する。



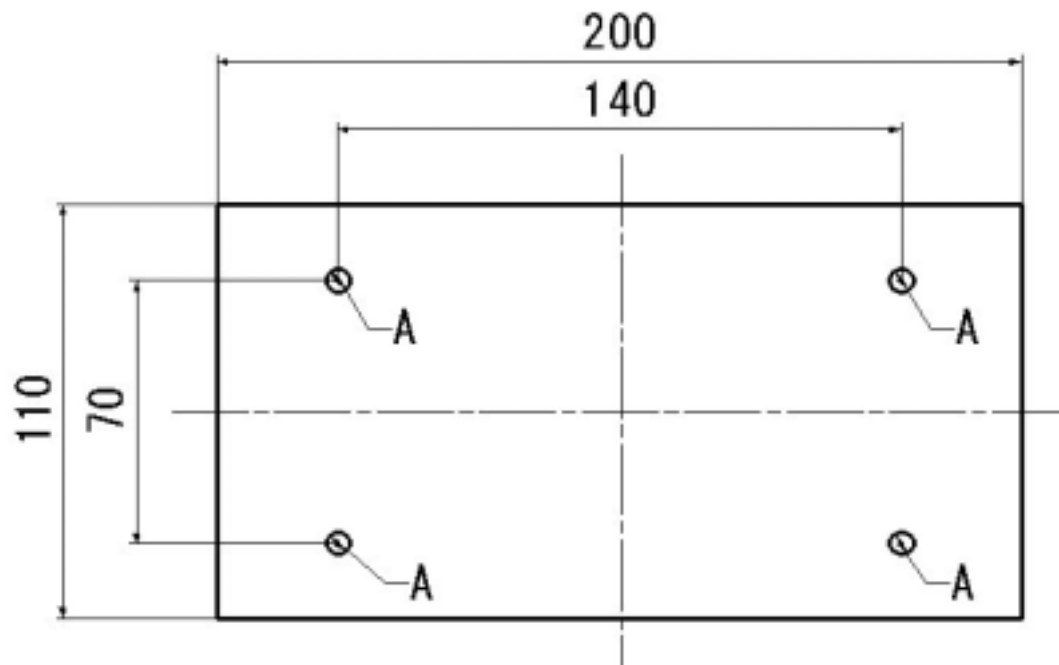
ポールピース



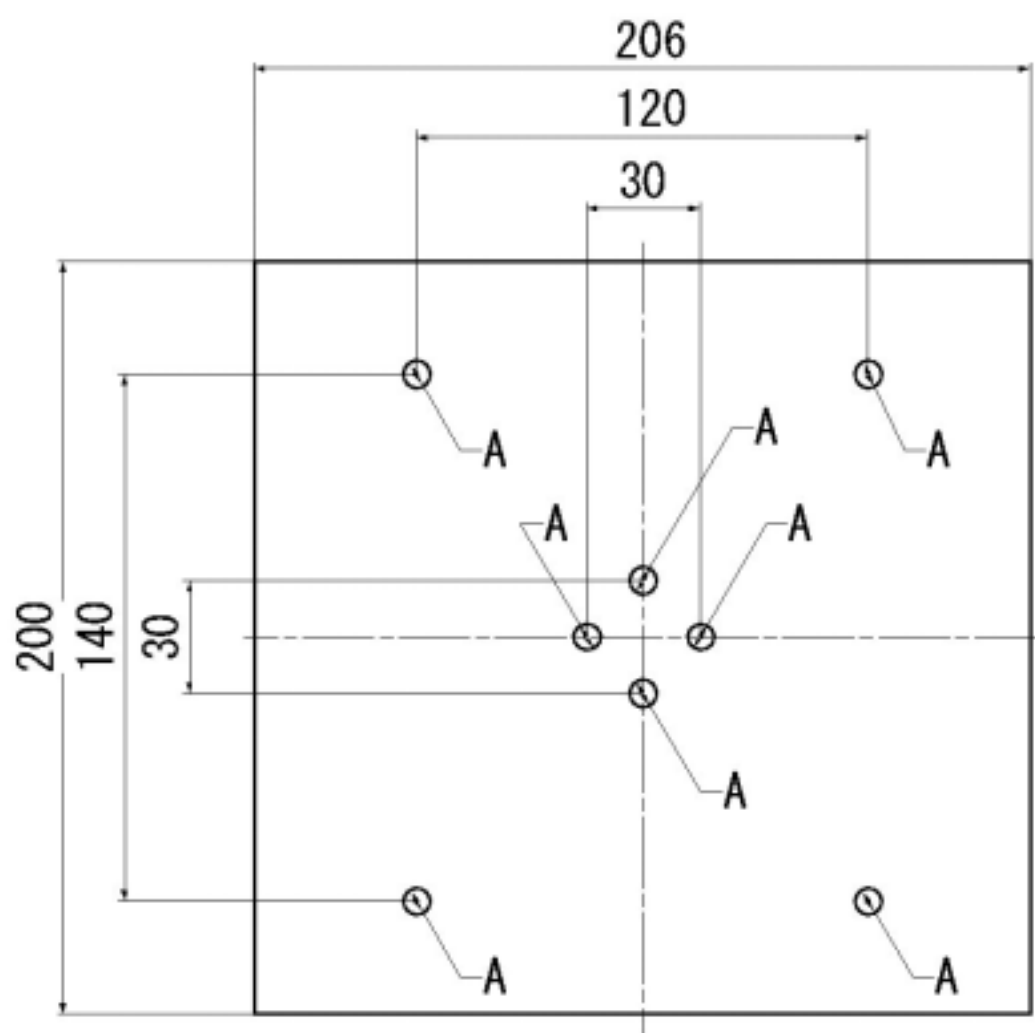
アルミ横板



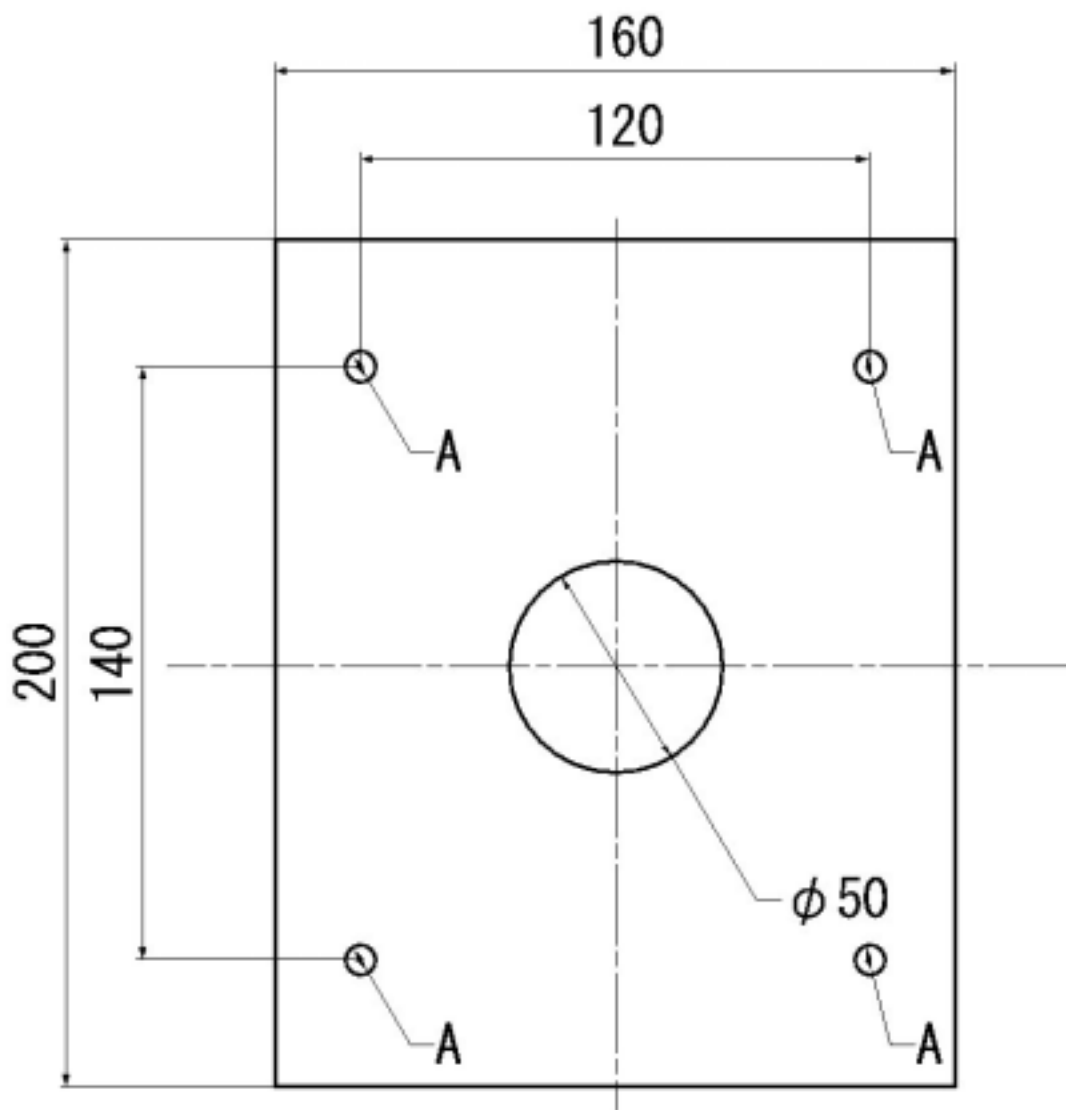
アルミ横板



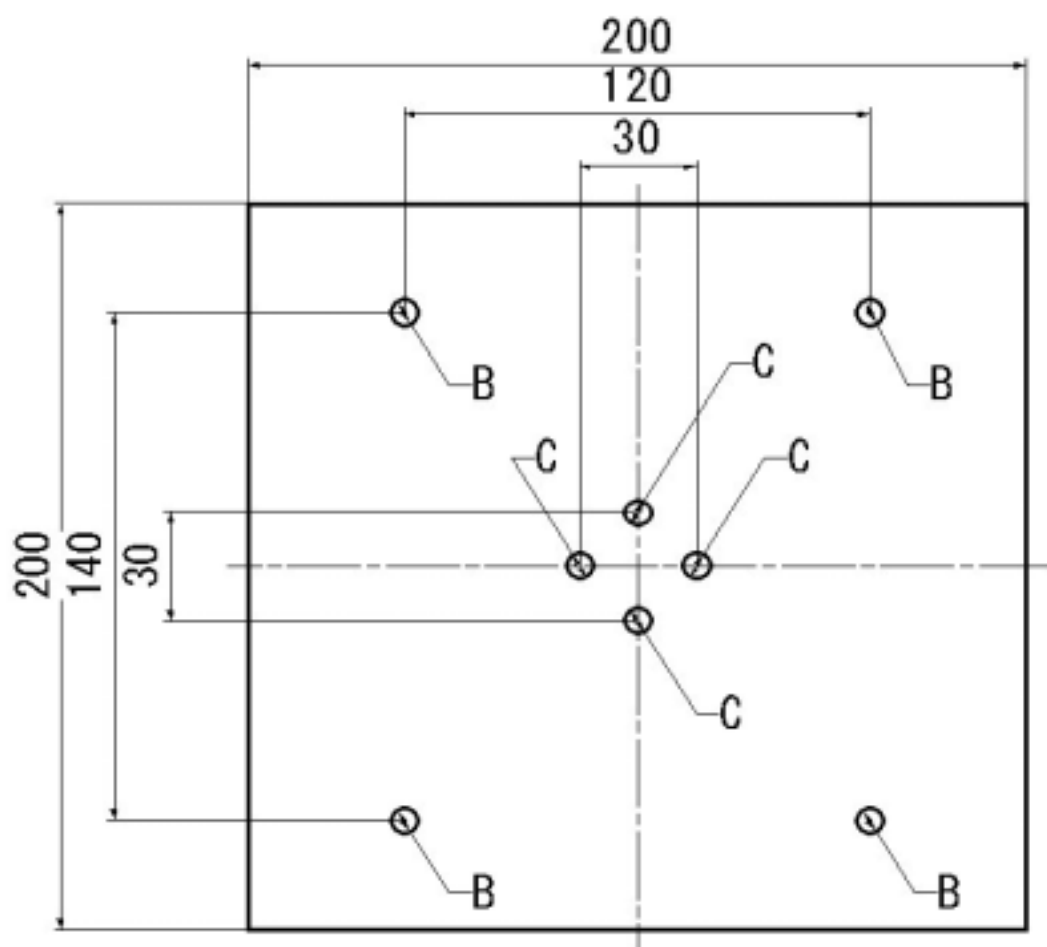
無方向性電磁鋼板



アルミ天板、底板



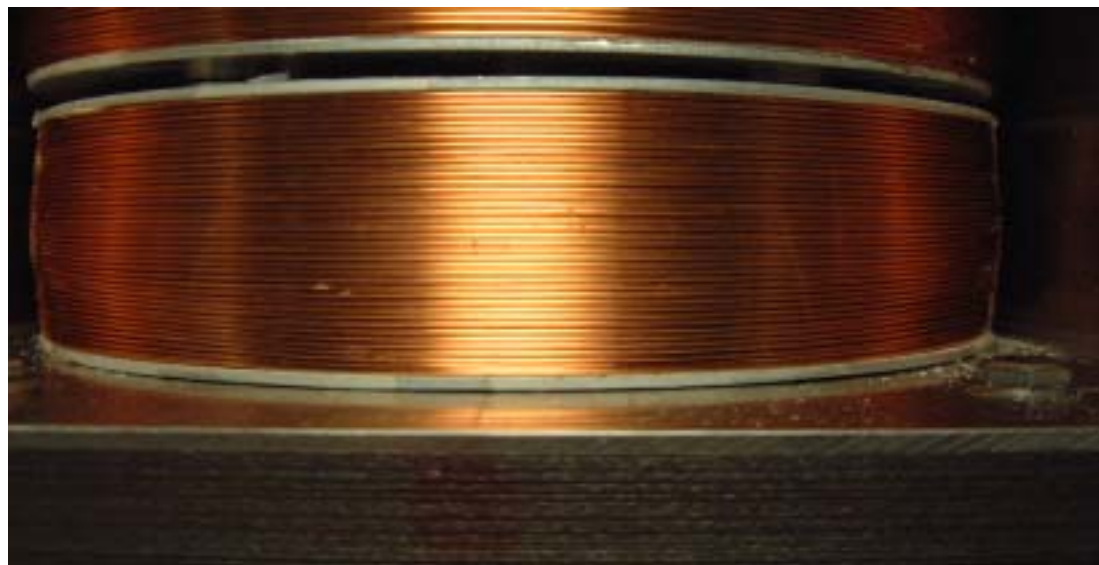
アルミ天板、底板



方向性電磁鋼板

A. 2 昨年度のコイルと今年のコイル

今年作製したコイル



昨年度作製したコイル (銅線の直径 0.5 mm)



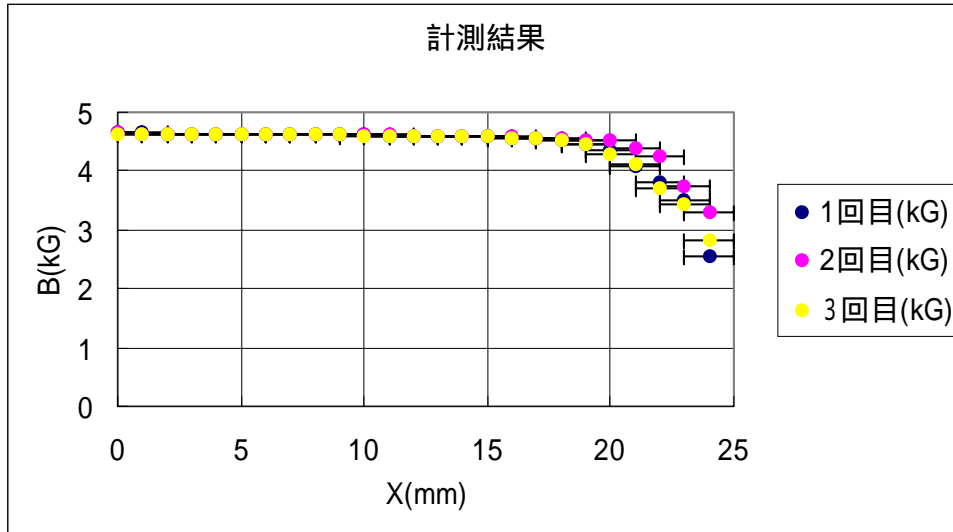
昨年度に比べると、今年は密 (きれい) に巻けている事がわかる。
(3.2 の付録)

A.3 作製した電磁石の

磁場強度測定結果

上下それぞれのコイルと電源をつなぎ、それぞれに 0.57【A】ずつ電流を流す。電磁石と磁極間にガウスメータを固定し、ポールピースの磁極面の中心を $X=0$ として、外側に向かって 1【mm】ずつ動かしながら、ガウスメータで磁場を測定していった

X(mm)	1 回目(kG)	2 回目(kG)	3 回目(kG)	平均(kG)
0	4.67	4.66	4.64	4.66
1	4.66	4.64	4.64	4.65
2	4.64	4.64	4.64	4.64
3	4.63	4.64	4.63	4.63
4	4.63	4.63	4.63	4.63
5	4.63	4.63	4.62	4.63
6	4.63	4.62	4.62	4.62
7	4.62	4.62	4.61	4.62
8	4.61	4.62	4.61	4.61
9	4.61	4.61	4.61	4.61
10	4.61	4.61	4.59	4.60
11	4.59	4.61	4.59	4.60
12	4.59	4.59	4.59	4.59
13	4.59	4.59	4.58	4.59
14	4.58	4.58	4.58	4.58
15	4.58	4.58	4.58	4.58
16	4.57	4.58	4.55	4.57
17	4.55	4.57	4.55	4.56
18	4.51	4.57	4.53	4.54
19	4.46	4.54	4.47	4.49
20	4.36	4.51	4.29	4.39
21	4.07	4.4	4.1	4.19
22	3.82	4.24	3.72	3.93
23	3.49	3.73	3.42	3.55
24	2.55	3.29	2.81	2.88



参考文献

科学者と技術者のための物理学 電磁気学

R・A・サーウェイ 著

村松 博之 訳

学術図書出版社

金属材料の弾性係数

日本機械学会

改訂版 物理学辞典 [縮刷版]

物理学辞典編集委員会編

培風館

謝辞

今回の卒業研究にあたり、さまざまな助言やご指導して下さった野尻 洋一先生。繰り返し論文を添削していただき、またご指導して下さった百田 佐多生先生。心から感謝の意を表します。

また、さまざまな助言をして下さった齋原 光和子さん、坂本 麻子さん、大変感謝いたします。

共同研究者の小川 和秀君、高巢 正人君、浜川 恒圭君、濱口 顕典君。皆様のおかげで卒業研究を終える事が出来ました。この場を借りて深く感謝の意を表します。