

電磁石の製作に於けるマネージメント

高知工科大学 知能機械システム工学科 物理学研究室 野尻・百田組

学籍番号 1010117

飯田 一生

共同研究者 齊原 光和子

目次

第一章 序論	1
第二章 電磁石の概要	2
2.1 電磁石とは	2
2.2 電磁石及び各部位の働き	3
2.3 電磁石の特性及び用途	4
第三章 タイム・スケジュール	5
3.1 仕事の流れ	5
3.2 タイム・スケジュール	6
第四章 電磁石の設計	7
4.1 製作条件	7
4.2 設計手順	8
4.3 最終設計	23
第五章 電磁石の製作工程	35
5.1 磁極の製作	35
5.2 リターンヨークの製作	36
5.3 コイル固定具の製作	39
5.4 コイルの製作	41
5.5 製作した電磁石の諸元	41
第六章 磁場測定	43
6.1 測定器具	43
6.2 磁場の測定方法	44
6.3 測定結果	45
6.4 理論値との比較	46

第七章 結論	48
7.1 電磁石の性能	48
7.2 製作期限	49
7.3 コスト	50
7.4 マネージメント	50
参考文献	51
私的会話	51
注釈	52
謝辞	52

第一章 序論

プロジェクトを遂行するにあたり、マネージメントを行うことは大変重要である。マネージメントとはプロジェクトを遂行するにあたって定めるべき計画の管理のことである。プロジェクトには定められた条件があり、期限通りに定められた予算内で目標を達成しなくてはならない。またプロジェクトは複数名によって行われるため、プロジェクトのメンバーに対する計画遂行の指針が必要となる。計画の管理を行うことによりプロジェクトはより認識しやすくなり、強いてはスムーズな計画遂行に繋がる。これは何かを製作する事だけに限ったものではなく、プロジェクトと呼ばれるものには須くいえることである。

マネージメントを行わずにプロジェクトを遂行した場合、当初予定した通りの結果が得られないことがある。今回の我々のように、何かを製作する場合は予定通りのものが製作できない、もしくは製作そのものを行うことができない。これはプロジェクトとしては考え得る最も良くない結果を得ることとなる。

また予算と時間の問題がある。計画性の無いプロジェクトは往々にして多くの無駄な予算と時間を消費することとなる。これはプロジェクト遂行にあたって問題点が生じたときに多い。問題というのは当初予期していなかった仕事が生じた時や、計画が予定通り遂行されなかった時に生じる場合が多い。またその場合予算だけでは無く時間も同時に消費される場合が多いため、同時に計画の遅延に繋がる。それを回避するため予期される問題を計画実行の前段階として列挙しタイム・スケジュールを作成する必要性がある。

今回我々は偏向電磁石と呼ばれる電磁石を製作した。偏向電磁石とはイオンビームの軌道を曲げる働きをするものであり、それにより必要なイオンのみを選択することが可能となる。従って偏向電磁石はイオンビームを用いたあらゆる分野で利用される。

今回は偏向電磁石を製作し、設計時に想定した性能が出ていることを確認することをプロジェクトとした。本論文はその製作プロジェクトとマネージメントについて記したものである。

第二章 電磁石の概要

2.1 電磁石とは

導線に電流を流すと、電流を流す方向と垂直に磁場が形成される。電磁石とは導線を強磁性体で製作された芯の周りに螺旋状（もしくは円筒状、環状）に巻き、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。

今回製作する電磁石は偏向電磁石である。図2は変更電磁石の一例であり、加速されたイオンビームをローレンツ力により曲げる働きをする物である。

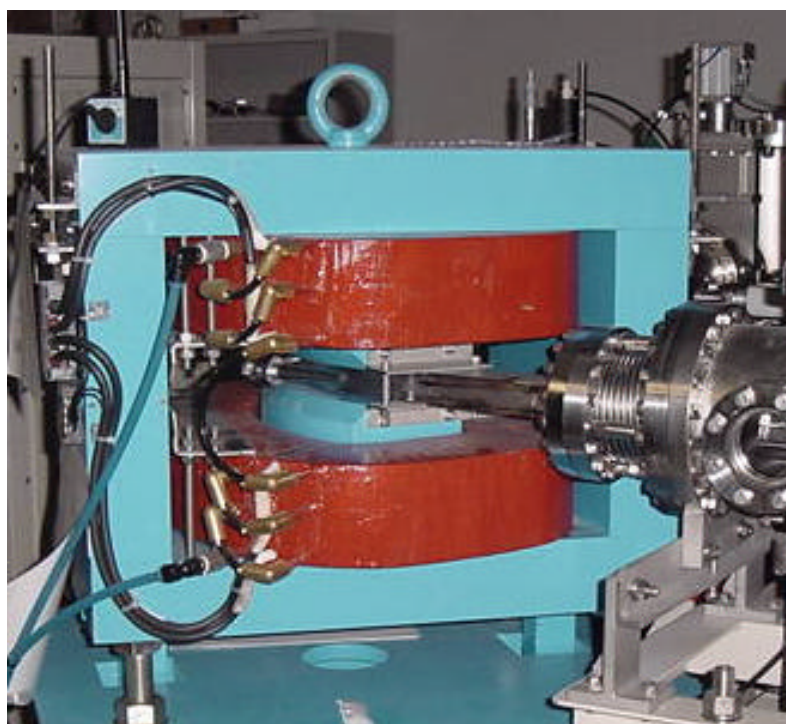


図1

2.2 電磁石及び各部位の働き

偏向電磁石の各部位の説明を以下に記す。

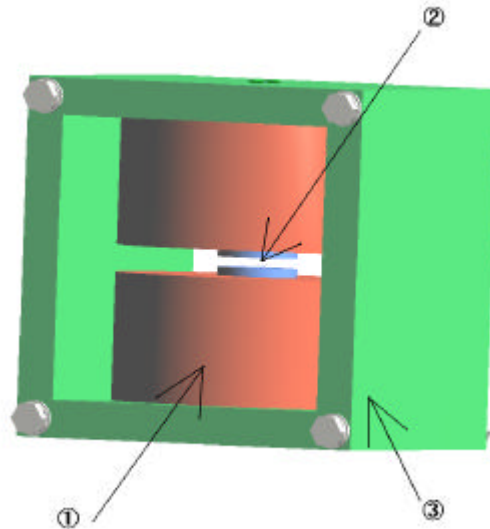


図 2

1. コイル (図 2 に於ける ① の部位)

磁場を発生させる役割を持つ。これは以下の (1) 式にしめす
ビオ・サヴァールの法則によるものである。

ビオ・サヴァールの法則

$$dB = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \frac{1}{r^2} ds \quad (1)$$

dB : 導線から r の長さだけ離れた点に於ける磁束密度

ds : 導線の微少部分の長さ

μ_0 : 真空の透磁率

i : 流される電流

(参考文献 1)

2. 磁極 (図 2 に於ける ② の部位)

コイルで発生した磁束密度を増幅する役割を持つ。

3 . リターンヨーク（図2に於ける の部位）

リターンヨークは、磁極と同様磁束密度を増幅させる役割を持つ。これはリターンヨークも磁極と同様強磁性体で製作されているため磁場を通しやすくなり、リターンヨークを通った磁力線が再び磁極に導かれ、磁場を増幅するのである。

よってリターンヨークを用いた場合の方が用いない場合に比べ、磁極間おける磁束密度がより大きなものとなる。

2 . 3 電磁石の特性及び用途

偏向電磁石はイオンビーム、すなわち電荷を帯びた粒子の軌道を曲げる働きをする。荷電粒子の磁場中での曲率半径は質量や電荷によって異なる。したがって、偏向電磁石を用いることにより必要なイオンのみを選択することが可能となる。

偏向電磁石はイオンビームを用いた、あらゆる分野で用いられる。その一例を以下に記す。

- 1 . 原子、原子核物理学の研究
- 2 . 半導体などの物質への ion implantation による材料、素子の製造
- 3 . 物質の結晶構造の解析
- 4 . イオン照射によるガン治療
- 5 . 微細加工

第三章 タイム・スケジュール

3.1 仕事の流れ

プロジェクトの遂行にあたって、よりスムーズに計画を進行させるために仕事の流れを考えなくてはならない。今回のプロジェクトの仕事の流れをチャート化したのが以下の図3である。

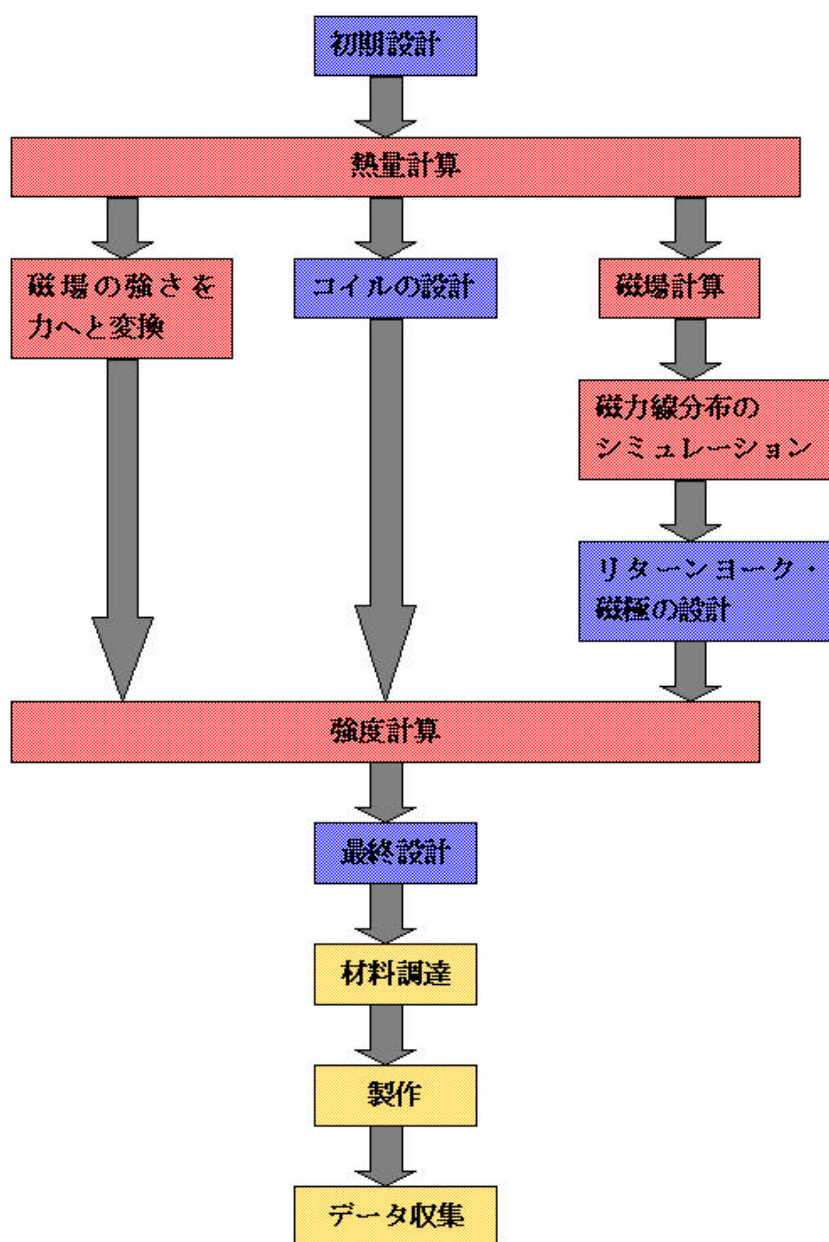


図3

3.2 タイム・スケジュール

【3.1】で述べた仕事の流れと【4.1】における製作条件を考慮に入れ、製作したタイム・スケジュールを表1に記す。

月		10				11				12				1		2	
日		24	31	7	14	20	29	5	15	25	31	15	26	2	6		
熱量計算	予定																
	実状																
磁場計算	予定																
	実状																
コイルの設計	予定																
	実状																
磁力線の分布を調べる	予定																
	実状																
リターンヨークの設計	予定																
	実状																
磁極の設計	予定																
	実状																
磁場強度を力へと変換	予定																
	実状																
強度計算	予定																
	実状																
設計	予定																
	実状																
材料調達完了	予定																
	実状																
製作完了	予定																
	実状																
データ収集	予定																
	実状																

表1

表1に於いて緑色で記された部分がプロジェクト開始時に製作した計画進行表である。

第四章 電磁石の設計

4.1 製作条件

今回製作した電磁石の製作条件を以下に記す。図4は図2の断面図である。

1. 本体の外寸が200mm立方ほどであること。
2. 磁極間（図4に於ける の範囲）での磁束密度が500（G）以上であること。
3. 磁極間に於ける（図4における の範囲）磁束密度の一様性が10%以内であること。
 - ・偏向電磁石は磁極間にイオンビームを通すことでイオンビームを偏向させるため、磁極間での磁束密度は一様でなくてはならない。
4. 最低5分間の連続稼働が出来ること。
 - ・磁束密度を測定するにあたり、最低限必要だと考えられる時間で決定。
5. 製作予算を10万円以内に納めること。
6. コイルに用いる導線は接着してはならない。
7. 2001年2月6日迄にデータ収集を終えること。

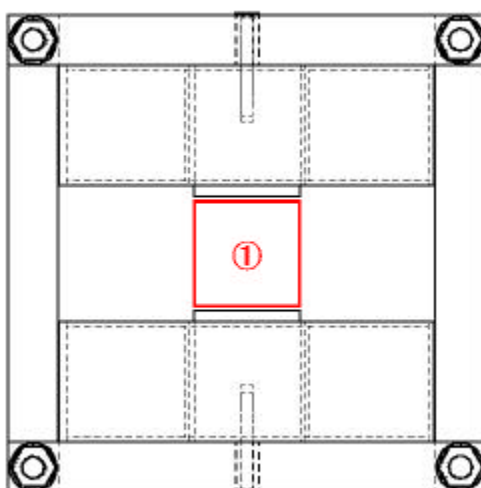


図4

4.2 設計手順

各種計算

() 磁場計算

磁束密度はビオ・サヴァールの法則により、以下の(4)式によって定義される。

$$B = \frac{\Phi}{S} \quad (2)$$

$$\Phi = \frac{SNI}{\frac{l_a}{\mu_0} + \frac{l_m}{\mu}} \quad (3)$$

(2) \ (3) 式より

$$B = \frac{NI}{l_a + \frac{l_m}{\mu}} \quad (4)$$

B : 磁束密度 (G)

N : コイルの巻き数 (Turn)

I : コイルに流す電流 (A)

l_a : 磁極間のギャップ (m) 図5に於ける の寸法

l_m : リターンヨークの外周 (m) . . 図5に於ける の寸法

μ : リターンヨーク及び磁極の透磁率

が得られる。

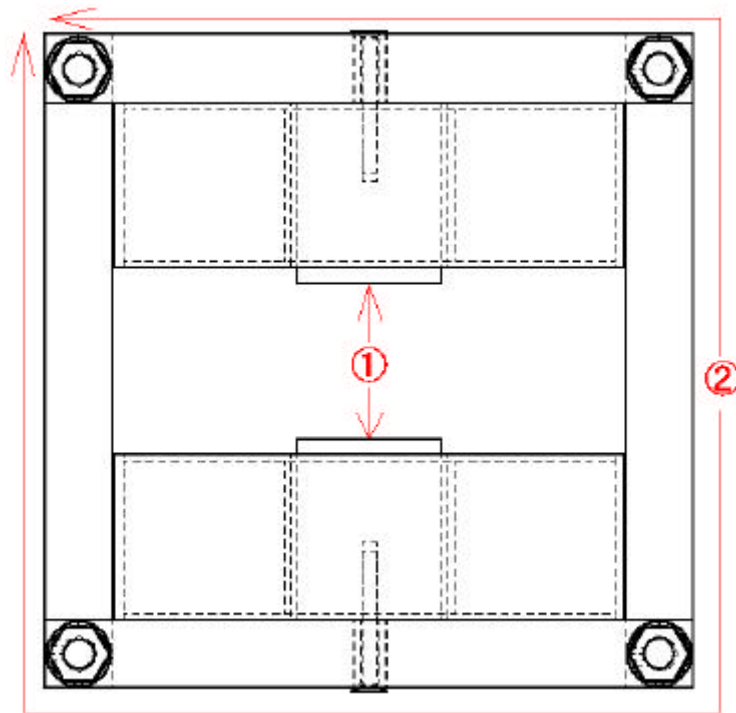


図 5

(4) 式による磁場計算は粗いものであるため、正確な値及び磁場分布を導き出すために poisson superfish を用いた。

(参考文献 1)

(参考文献 2)

(私的会話 1)

() 熱量計算

・ 導線の長さ (コイルの並びが粗の場合)

図6はコイル部分の断面の一部であり、電磁石の中心からの距離が r である。

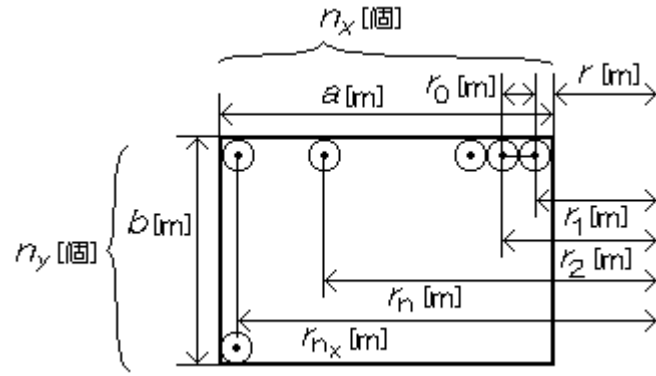


図6

各辺に入る銅線の数

$$n_x = \frac{a}{r_0} \quad [\text{個}] \quad (5)$$

$$n_y = \frac{b}{r_0} \quad [\text{個}] \quad (6)$$

磁極の中心から各銅線の中心までの距離

$$\begin{aligned} r_n &= r_1 + r_0(n-1) \\ &= \left(r + \frac{r_0}{2} \right) + r_0 n - r_0 \\ &= \left(r - \frac{r_0}{2} \right) + r_0 n \quad [\text{m}] \end{aligned} \quad (7)$$

($n = 1, 2, 3, \dots, n_x$)

銅線の長さ

$$\begin{aligned} l &= n_y \sum_{k=1}^{n_x} r_k \\ &= n_y \left\{ \left(r - \frac{r_0}{2} \right) n_x + r_0 \frac{1}{2} n_x (n_x + 1) \right\} = \left(\frac{r_0}{2} n_x + r \right) n_x n_y \quad [\text{m}] \end{aligned} \quad (8)$$

・ 導線の長さ（コイルの並びが密の場合）

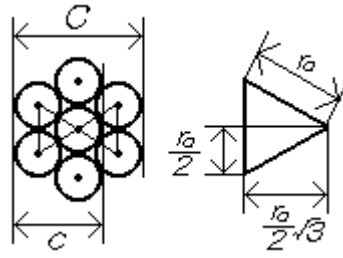


図 7

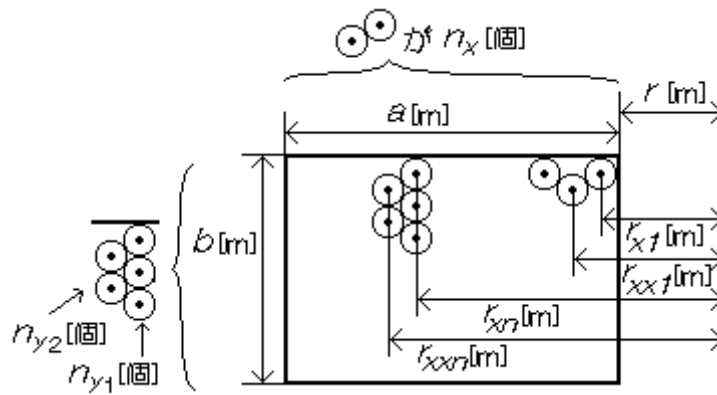


図 8

図 7 に示すような導線の束を並べたものが、図 8 である。
また図 8 は図 6 と同様の断面である。

$$\begin{aligned}
 C &= r_0 + 2 \frac{r_0}{2} \sqrt{3} \\
 &= (1 + \sqrt{3}) r_0
 \end{aligned} \tag{9}$$

各辺に入る銅線の数

$$n_x = \frac{a}{c} \quad \text{[個]} \tag{10}$$

$$n_{y1} = \frac{b}{r_0} \quad \text{[個]} \tag{11}$$

$$n_{y2} = n_{y1} - 1 \quad \text{[個]} \tag{12}$$

磁極の中心から各銅線の中心までの距離

$$\begin{aligned}
 r_{xn} &= r_{x1} + c(n-1) \\
 &= \left(r + \frac{r_0}{2} \right) + \frac{2+\sqrt{3}}{2} r_0 n - \frac{2+\sqrt{3}}{2} r_0 \\
 &= \left(r - \frac{1+\sqrt{3}}{2} r_0 \right) + \frac{2+\sqrt{3}}{2} r_0 n \quad [\text{m}] \quad (13)
 \end{aligned}$$

($n = 1, 2, 3, \dots, n_x$)

$$\begin{aligned}
 r_{xyn} &= r_{xx1} + c(n-1) \\
 &= \left(r + \frac{1+\sqrt{3}}{2} r_0 \right) + \frac{2+\sqrt{3}}{2} r_0 n - \frac{2+\sqrt{3}}{2} r_0 \\
 &= \left(r - \frac{r_0}{2} \right) + \frac{2+\sqrt{3}}{2} r_0 n \quad [\text{m}] \quad (14)
 \end{aligned}$$

($n = 1, 2, 3, \dots, n_x$)

銅線の長さ

$$\begin{aligned}
 l_1 &= n_{y1} \sum_{k=1}^{n_x} r_{xk} \\
 &= n_{y1} \left\{ \left(r - \frac{1+\sqrt{3}}{2} r_0 \right) n_x + \frac{2+\sqrt{3}}{2} r_0 \frac{1}{2} n_x (n_x + 1) \right\} \\
 &= \left(r + \frac{2+\sqrt{3}}{4} r_0 n_x - \frac{\sqrt{3}}{4} r_0 \right) n_x n_{y1} \quad [\text{m}] \quad (15)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 l_2 &= n_{y2} \sum_{k=1}^{n_x} r_{xk} \\
 &= n_{y2} \left\{ \left(r - \frac{1}{2} r_0 \right) n_x + \frac{2+\sqrt{3}}{2} r_0 \frac{1}{2} n_x (n_x + 1) \right\} \\
 &= \left(r + \frac{2+\sqrt{3}}{4} r_0 n_x + \frac{\sqrt{3}}{4} r_0 \right) n_x n_{y2} \quad [\text{m}] \quad (16)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 l &= l_1 + l_2 \\
 &= \left(r + \frac{2+\sqrt{3}}{4} r_0 n_x \right) n_x (n_{y1} + n_{y2}) - \frac{\sqrt{3}}{4} r_0 (n_{y1} - n_{y2}) \quad [\text{m}] \quad (17)
 \end{aligned}$$

- ・ **コイルの抵抗**

抵抗： $R = r_r \frac{l}{A}$ [] (18)

r_r [\cdot m] : 銅の抵抗率

$A = \rho \left(\frac{r_0}{2} \right)^2$ [m²] : 銅線の断面積

l : 導線の長さ

- ・ **発生する熱量**

導線に電流を流すことにより、発生する熱量は以下の (20) 式のように定義される。

消費電力： $P = IV = I^2 R$

$$= \frac{I^2 r_r l}{A} \text{ [W]} \quad ([\text{W}] = [\text{J/s}]) \quad (19)$$

I [A] : 電流

V [V] : 電圧

この消費電力がすべて熱エネルギーに変換されると考える。

熱量： $Q = Pt$

$$= \frac{I^2 r_r l t}{A} \text{ [J]} \quad (20)$$

t [s]間で銅線に発生する熱量。

t [s] : コイルに電流を流した時間

- ・ **熱伝導が存在しないと仮定したときのコイルの上昇温度**

$$Q = mc\Delta T$$

上昇温度： $\Delta T = \frac{Q}{mc}$

$$= \frac{I^2 r_r l t}{A r_m A l c}$$

$$= \frac{I^2 r_r t}{r_m A^2 c} \quad [\quad] \text{or} [\text{K}] \quad (21)$$

$m = r_m Al$ [kg] : 導線の質量

r_m [kg/m³] : 導線に用いる物質の密度

c [J/kg·] : 導線に用いる物質の熱容量

・ コイルとリターンヨーク間で熱伝導が存在するときの上昇温度

(21)式より導いた値を用いて、コイルとリターンヨーク間での熱伝導を考慮に入れたときの上昇温度を導く式が(24)式である。ただしこの時点では空気への熱の放射は考えない。

$$Q = mc\Delta T$$

コイルに与えられる熱量 : $Q = -m_c c_c (T - T_c)$ (22)

リターンヨークに与えられる熱量 : $Q = m_j c_j (T - T_0)$ (23)

$$-m_c c_c (T - T_c) = m_j c_j (T - T_0)$$

温度 : $T = \frac{m_c c_c T_c + m_j c_j T_0}{m_c c_c + m_j c_j}$ [] (24)

m_c [kg] : コイルの質量 (導線の質量)

c_c [J/kg·] : コイルの熱容量

$T_c = T_0 + \Delta T$ [] : コイルの温度

m_j [kg] : リターンヨークの質量

c_j [J/kg·] : リターンヨークの熱容量

T_0 [] : 常温 (リターンヨークの温度)

・ コイル、リターンヨークから空気への熱の放射

コイルとリターンヨークでは熱の放射率が違うため、コイルとリターンヨークの温度に相違が見られるが、ここでは考えないものとする。

物体が失う熱量 : $Q = sAe(T^4 - T_0^4)$ (25)

$s = 5.67 \times 10^{-8}$ [w/m² · K⁴] : ステファンボルツマン定数

A [m²] : 物体の表面積

- e : 物体によって決まる放射率
- T [K] : 物体の温度
- T_0 [K] : 物体のまわり (空気) の温度 , (常温)
- t [s] : 時間コイルに電流を流した時間

下降温度 : $\Delta T = \frac{Q}{mc}$

$$= \frac{SAe(T^4 - T_0^4)}{mc} \quad [\quad] \text{or [K]} \quad (26)$$

- m [kg] : 物体の質量
- c [J/kg·] : 物体の熱容量

・ **コイルとリターンヨーク、それぞれの上昇温度**

実際のコイルの上昇温度はコイルとリターンヨーク間の熱伝導と、発生した熱が空気に逃げる事を考慮に入れなくてはならない。従って (24) (26) 式より (27) 式が得られる。

$$T = \frac{m_C c_C T_C + m_J c_J T_0}{m_C c_C + m_J c_J} - \frac{S A e (T^4 - T_0^4)}{mc} \quad (27)$$

・ **熱放射後のコイルとリターンヨークそれぞれの温度**

(27) 式を用いて導いたコイル温度を導く式が (28) 式、リターンヨークの温度を導く式が (29) 式である。

コイル :

$$T_C = \frac{m_C c_C T_C + m_J c_J T_0}{m_C c_C + m_J c_J} - \frac{S_C A_C e (T^4 - T_0^4)}{m_C c_C} \quad [\quad] \quad (28)$$

リターンヨーク :

$$T_R = \frac{m_C c_C T_C + m_J c_J T_0}{m_C c_C + m_J c_J} - \frac{S_J A_J e (T^4 - T_0^4)}{m_J c_J} \quad [\quad] \quad (29)$$

・ **最終的な電磁石の温度**

放射を考えている間はコイルとリターンヨーク間の熱伝導は考えていなかった。よって2つの間に温度差が出来る。そこで熱伝導の式を用いて最終的な電磁石の温度を求める。

$$T = \frac{m_C c_C T_C + m_J c_J T_R}{m_C c_C + m_J c_J} \quad [\quad] \quad (30)$$

(参考文献3)

() **磁極面が引き合う力の導出**

電磁石を起動させると、電磁石本体の自重に加え磁場による力も加わる。強度計算を行う前段階として、電磁石に加わる磁場による力を導き出す必要性がある。

磁束密度と力の関係はクーロンの法則より以下の(31)式のように与えられる。

$$F = L \frac{\Phi_1 \Phi_2}{l_a^2} \quad (31)$$

(但し $L = \frac{\mu_0}{4\pi}$ として与えられる。)

F : 力 (N)

μ_0 : 真空の透磁率 $4 \times 10^{-7} \text{ (N/A}^2\text{)}$

Φ_1, Φ_2 : 磁気量 (Wb)

(31)式を用いるためには、磁束密度(G)を磁気量(Wb)へと変換しなくてはならないため、次の(32)式が必要となる。

$$\Phi = BA \cdots \cdots (32)$$

B : 磁束密度 (T)

A : 磁極面の面積 (m^2)

但し、 $1 \text{ (T)} = 1 \times 10^4 \text{ (G)}$

よって(31)、(32)式より磁束密度を磁極面が引き合う力へと変換する式は(33)式となる。

$$F = L \frac{(BA)^2}{l_a^2} \quad (33)$$

(参考文献1)

() 強度計算

・ リターンヨーク上下部の強度計算

リターンヨーク上下部の単純化した仮装断面図を図9に記す。また、図9の中心部のたわみ角は0°となるため、図10に記すような単純支持はりとして考えられる。

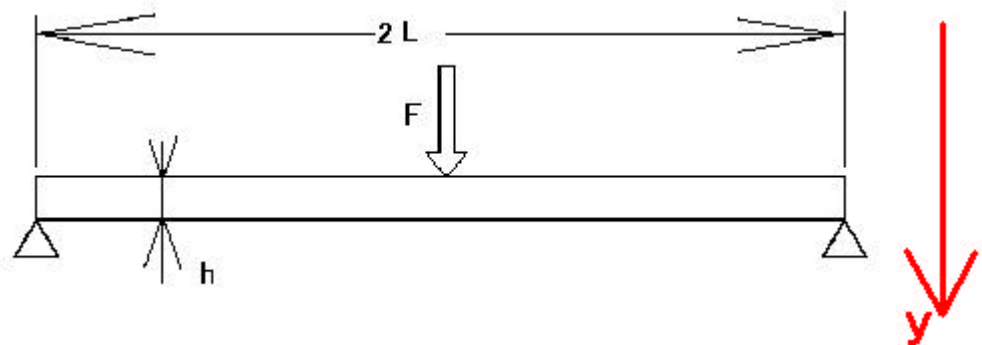


図9

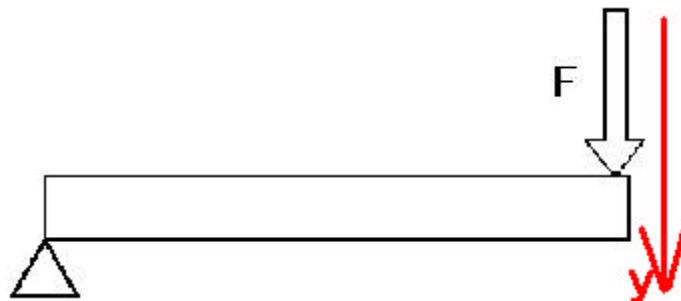


図10

図10は単純支持はりであるため、リターンヨーク上下部のたわみ計算は以下の通りとなる。

・ 断面二次モーメント I の導出

$$\begin{aligned} I &= \int_A y^2 dA \\ &= \int_A L y^2 dy \\ &= 2L \int_0^{\frac{h}{2}} y^2 dy && (34) \\ &= 2L \left[\frac{y^3}{3} \right]_0^{\frac{h}{2}} \\ &= \frac{Lh^3}{12} \end{aligned}$$

) ひずみの導出

集中荷重の場合

図 10 における F の矢印の位置に集中荷重が加わる場合、ひずみは以下の式にて導かれる。

$$d = \frac{FL^3}{3EI} \quad (35)$$

E : ヤング率

分布荷重の場合

図 10 の単純支持はりに均等に分布荷重が加わった場合、ひずみは以下の式によって導かれる。

$$\begin{aligned} d &= \frac{\frac{F}{L} L^3}{8EI} && (36) \\ &= \frac{FL^3}{8EI} \end{aligned}$$

・ リターンヨーク側部の強度計算

リターンヨーク側部も上下部と同様に単純化して考える。またそのモデルを図 11 に記す。

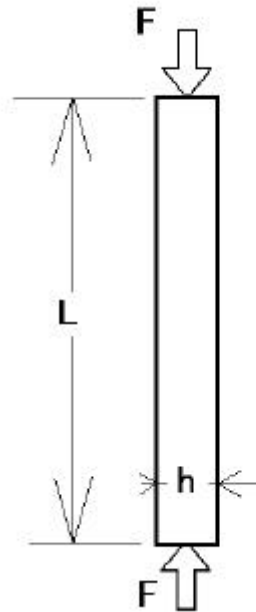


図 1.1

ひずみは以下の(37)式で求められる。

$$d = \frac{F L}{2 EA} \quad (37)$$

- ・ **コイル固定具の強度計算**

コイルの固定具に力が加わる部分の断面を単純化すると、リターンヨーク上下部と同様に単純支持はりとなるため、用いる計算式は同様に(35)(36)式となる。

(参考文献4)

設計

() 初期設計

この時点の設計は製作条件に応じて鉄の自重、発生する磁力等を考慮に入れ初期設計を行う。この設計を元として各種計算を行い、プロジェクトの進行に伴い必要に応じて設計を変更していく。

() **磁極の設計**

磁極の径、磁極間の間隔、磁極面の設計を行う。磁極の径及び磁極間の間隔は磁束密度と磁力線の分布に影響を与え、磁極間の間隔と磁極面の形状は磁場の一様性に影響を与えるため、磁場計算及び磁力線の分布のシミュレーションより得られたデータを元として設計を行う。

() **リターンヨークの設計**

リターンヨークは磁場分布及び磁石本体の機械的強度に影響を与える。そこで poisson superfish による磁力線分布のシミュレーションと強度計算に基づいてリターンヨークの設計を行う。

() **コイルの設計**

導線の径及び長さは (4) (2 1) 式より磁束密度の値およびコイルの温度上昇に大きな影響を与える。そのため熱量計算、磁場計算を元として設計を行う。

() **コイル固定具の設計**

コイル固定具は透磁率の変化による磁場分布への影響や、発生する熱の伝導、コイルの自重及び起動時に加わる力想定した強度の問題等を考慮に入れ設計を行う。

各設計における材料の選択は次の【 4 . 2 】の事項に記す。

材料の決定

() **磁極の材料の決定**

磁極材料は磁束密度に大きく影響を与えるため、強磁性体と呼ばれる透磁率の高い物質を選ぶ必要がある。一般的な強磁性体としては鉄やパーマロイがあり、今回用いる材料としての候補となった。それらの物性データを表 1 に記す。パーマロイは鉄、ニッケル、コバルトを主成分とした合金である。

物質	透磁率	融点(°C)	価格(kg/円)
純鉄	2.0 × 10 ³ ~ 1.2 × 10 ⁴	1535	260
パーマロイ	6.0 × 10 ⁴ ~ 2.5 × 10 ⁵	不明	2000

表 2

(参考文献 5)

(私的会話 2)

(注釈 1)

() リターンヨークの材料の決定

リターンヨークの素材を決定するにあたり、最も重要なのが透磁率である。そのため磁極同様強磁性体でなくてはならない。

() コイルの材料の決定

発生する熱量を少なくするため抵抗の小さい材質でなくてはならない。そこで導線の材質として考えられるものとして、抵抗が小さい銅と金が挙げられる。それらの物性データを表 3 に記す。

物質	抵抗率 (Ω/m)	磁化率 (cm^3/g)	融点 ($^{\circ}C$)	価格 (kg/円)
銅	3.2 ($0^{\circ}C$)	-0.086 $\times 10^{-6}$	1084.6	1.05
金	1.55 ($0^{\circ}C$)	-0.142 $\times 10^{-6}$	1064.2	1000

表 3

(参考文献 5)

(参考文献 6)

(注釈 2)

() コイル固定具の材料の決定

コイルの固定具は磁場への影響を少なくするため磁化率が小さいものを選ばなくてはならない。また、コイルで発生した熱を逃がすために熱伝導率の良いものでなくてはならない。今回はアルミニウムを候補として挙げた。アルミニウムの物性データと比較のため空気のものと共に表 3 に記す。

物質	磁化率 (cm^3/g)	熱伝導率 ($W/m \cdot K$)	融点 ($^{\circ}C$)	価格 (kg/円)
アルミニウム	0.61×10^{-6}	236 ($0^{\circ}C$)	1083.4	10
空気	24.1×10^{-6}	2.41×10^{-2} ($0^{\circ}C$)		

表 4

(参考文献5)

(注釈3)

4.3 最終設計

最終設計図

最終設計図を次頁以降に記す。また表5に各図面の要目表を、表6にコイルの要目表を記す。

要目表の材料については、【4.3】にて触れることとする。

要目表				
図面番号	名称	材料	縮尺比	数量
①	三次元立体図			
②	全体図		0.5	
③	磁極	純鉄	1	2
④	リターンヨーク上下部	純鉄	1	2
⑤	リターンヨーク側部	純鉄	1	2
⑥	コイル固定具	アルミニウム	1	2
⑦	コイル固定具 側面カバー	アルミニウム	1	2

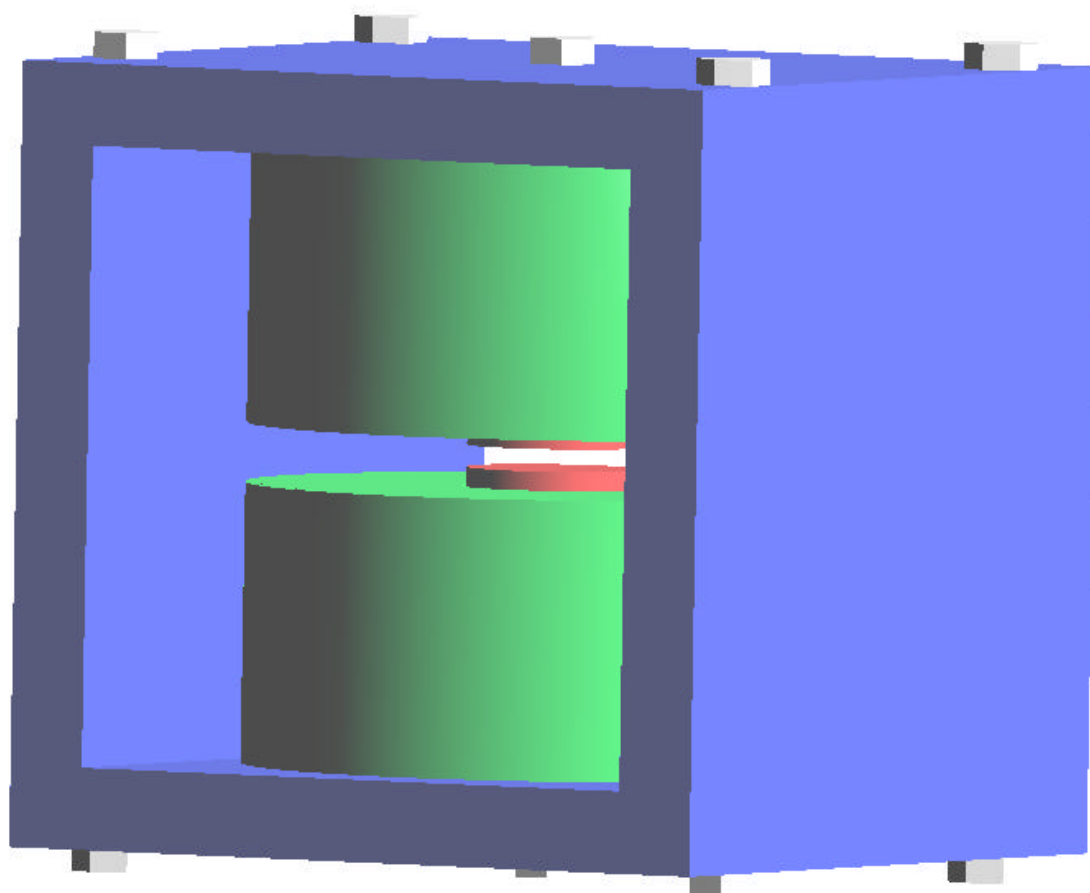
表5

コイルの要目表	
材料	銅
導線の径	0.5(mm)
導線の長さ	335.6(m)
流す電流	0.5(A)
抵抗	28(Ω)
消費電力	28.5(W)
巻き数	7960(Turn)
導線の密度	$8.96 \times 10^3(\text{kg}/\text{m}^3)$
熱容量	$3.87 \times 10^2(\text{J}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$

表6

図面

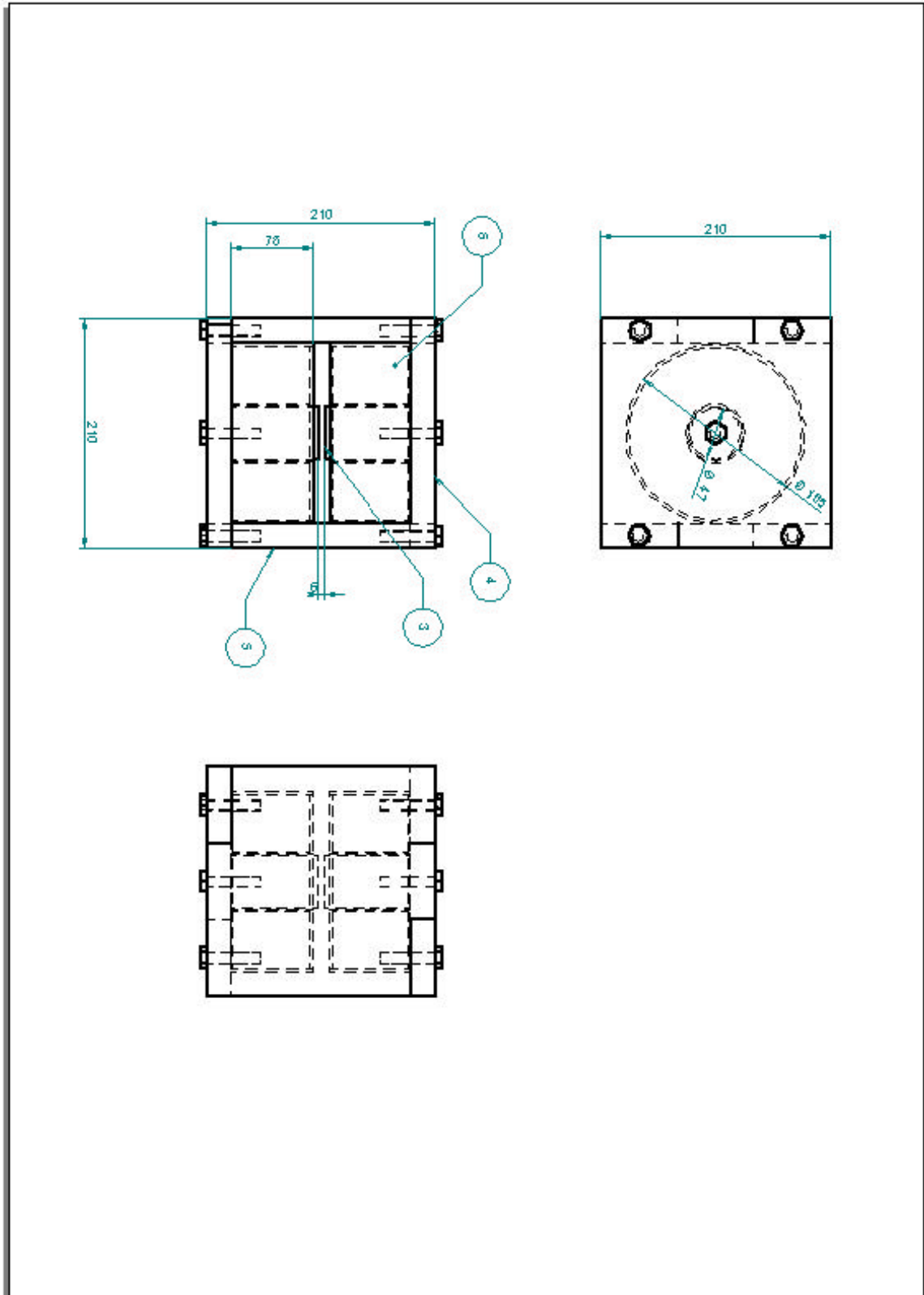
- 3次元立体図 -



要目表		
配色	各部名称	備考
赤	磁極	図面③参照
青	リターンヨーク	図面④、⑤参照
緑	コイル固定具	図面⑥、⑦参照
白	ボルト	φ10のボルト

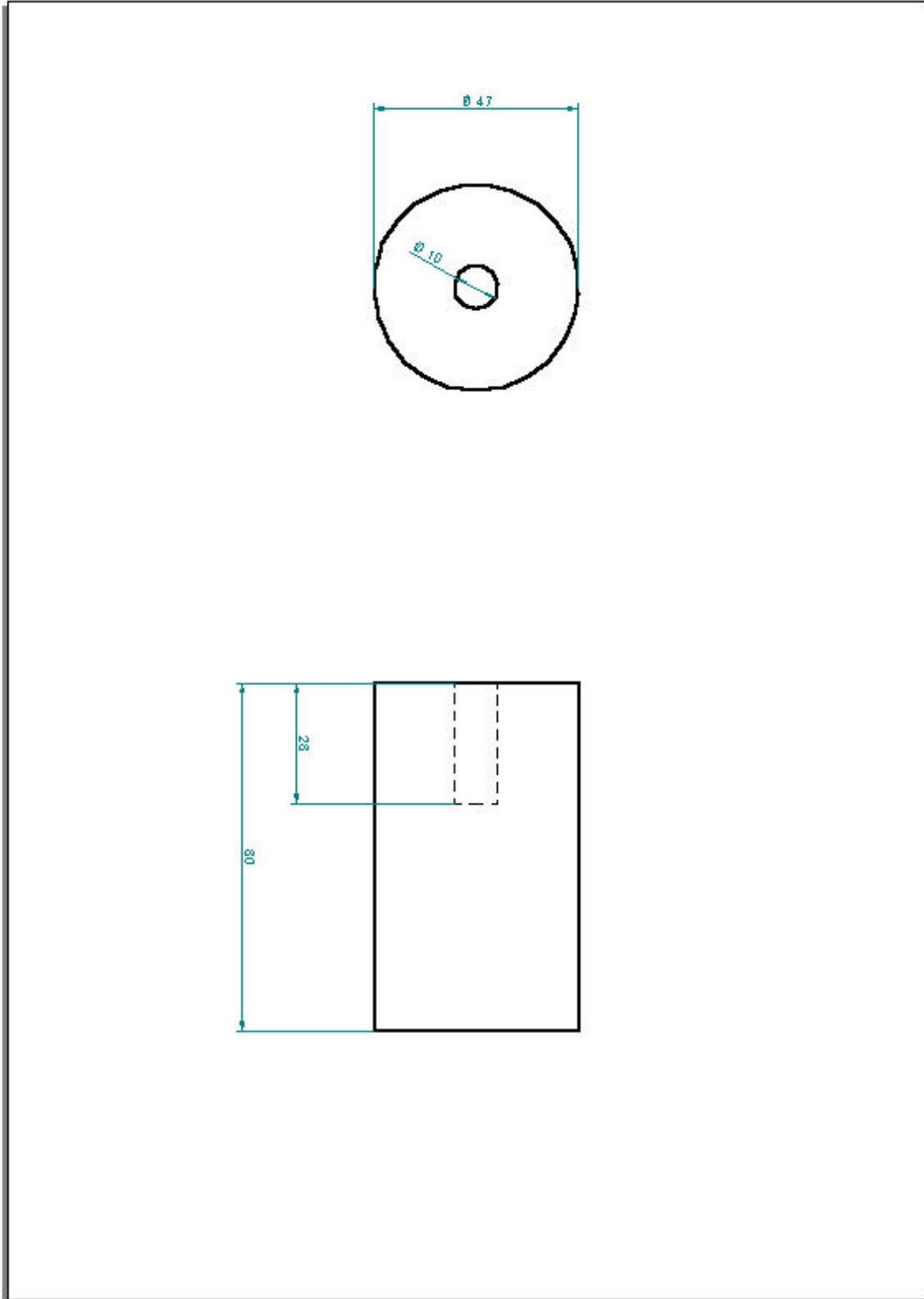
図面

全体図



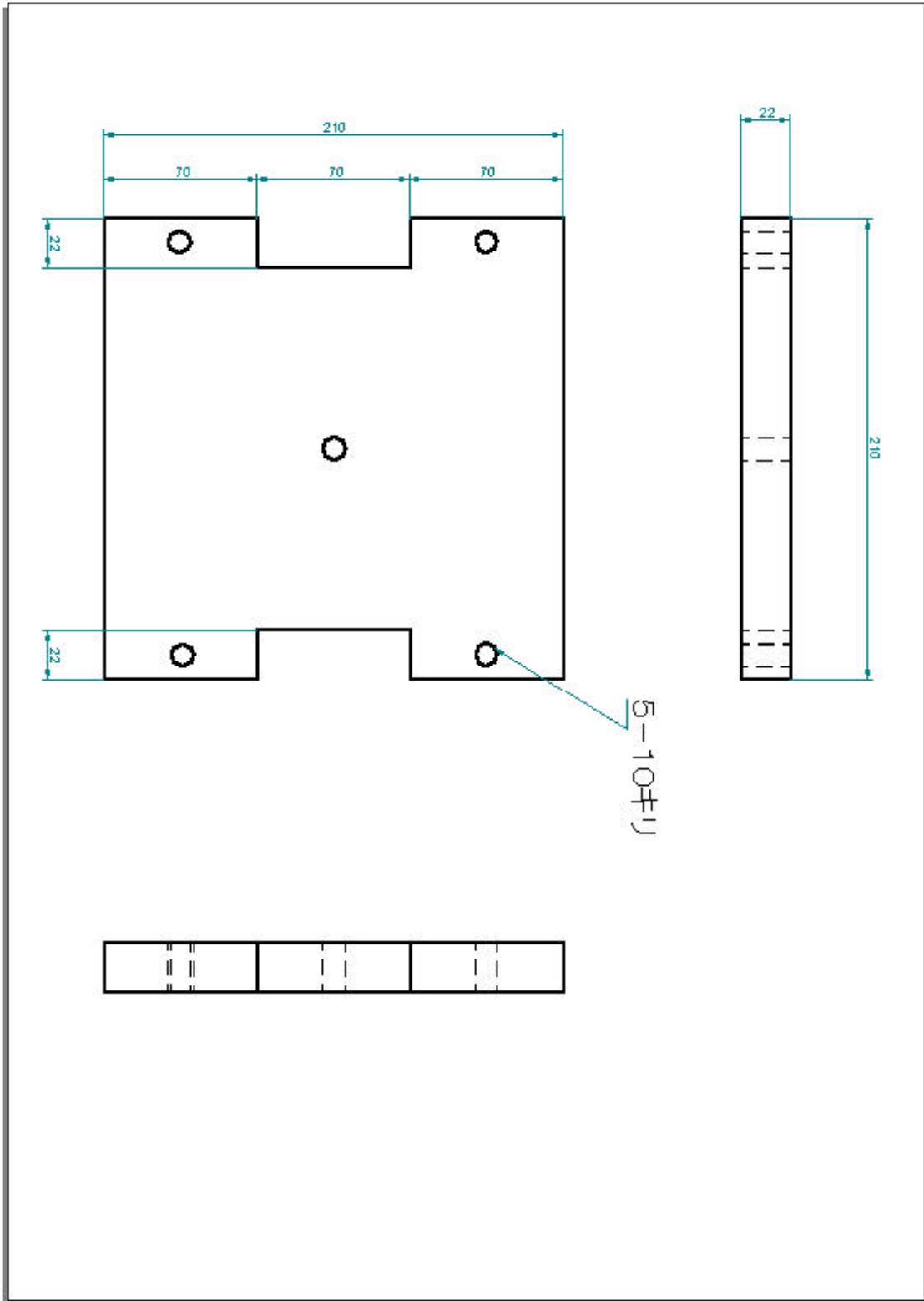
図面

磁極



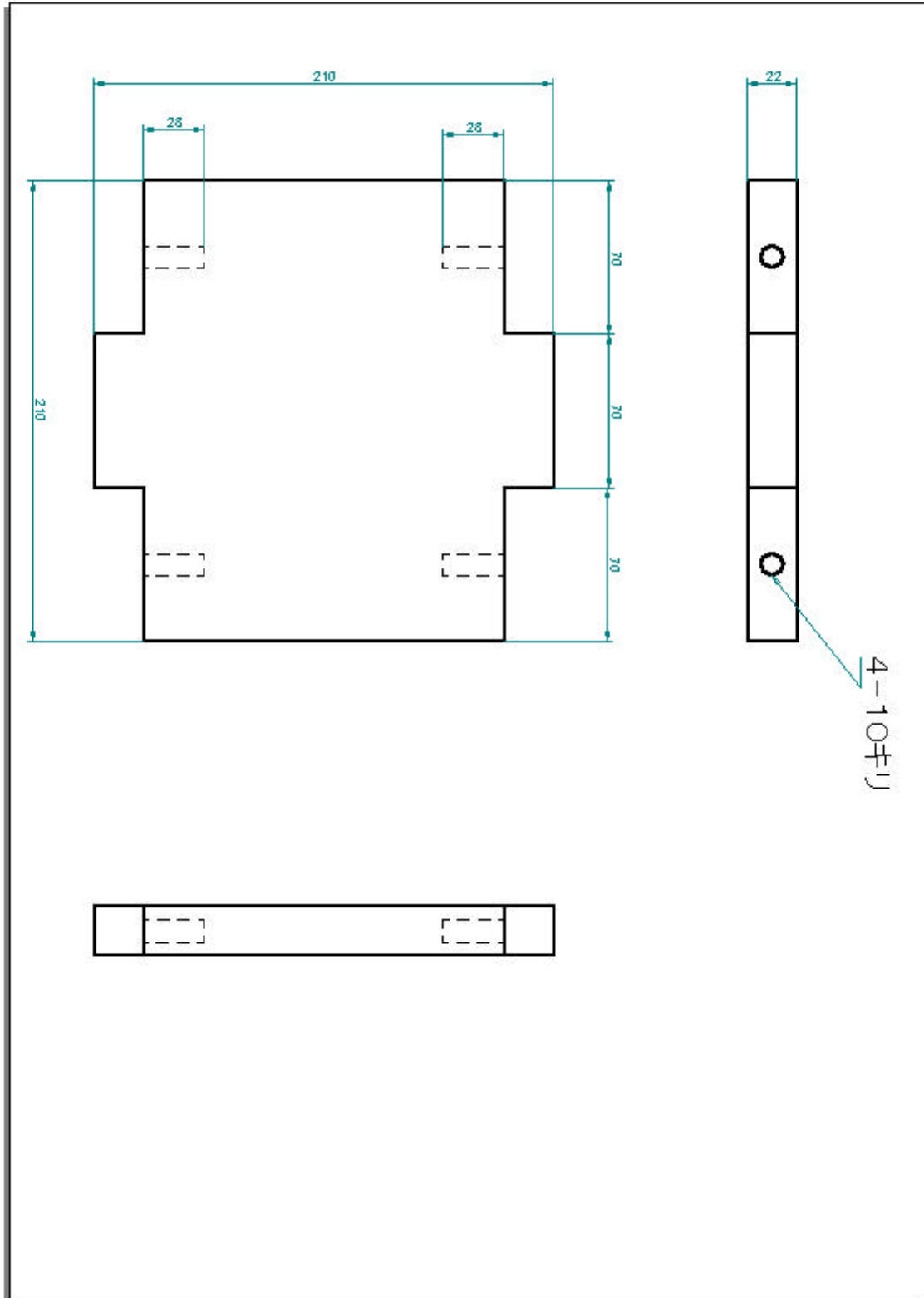
図面

リターンヨーク上下部



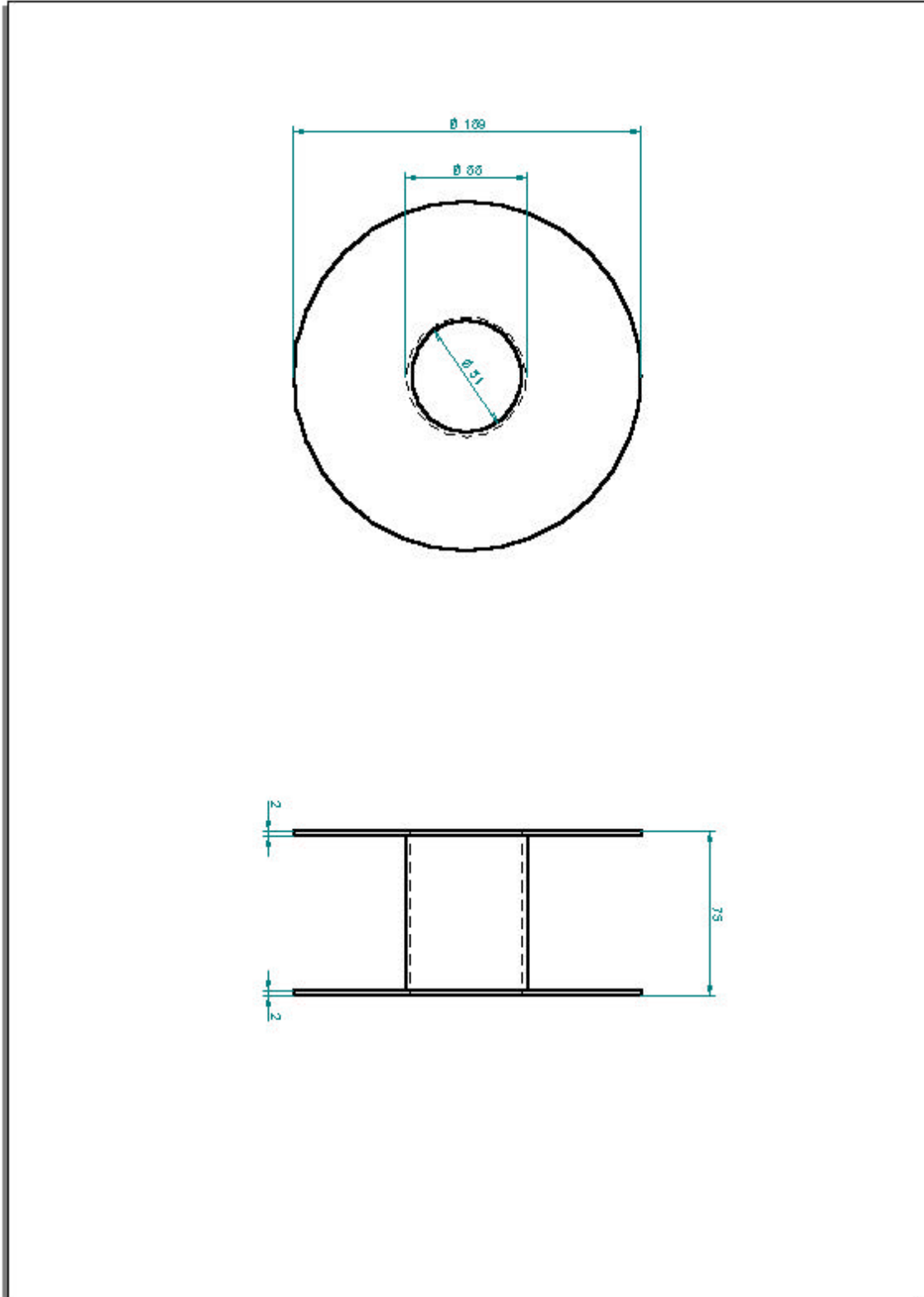
図面

リターンヨーク側部



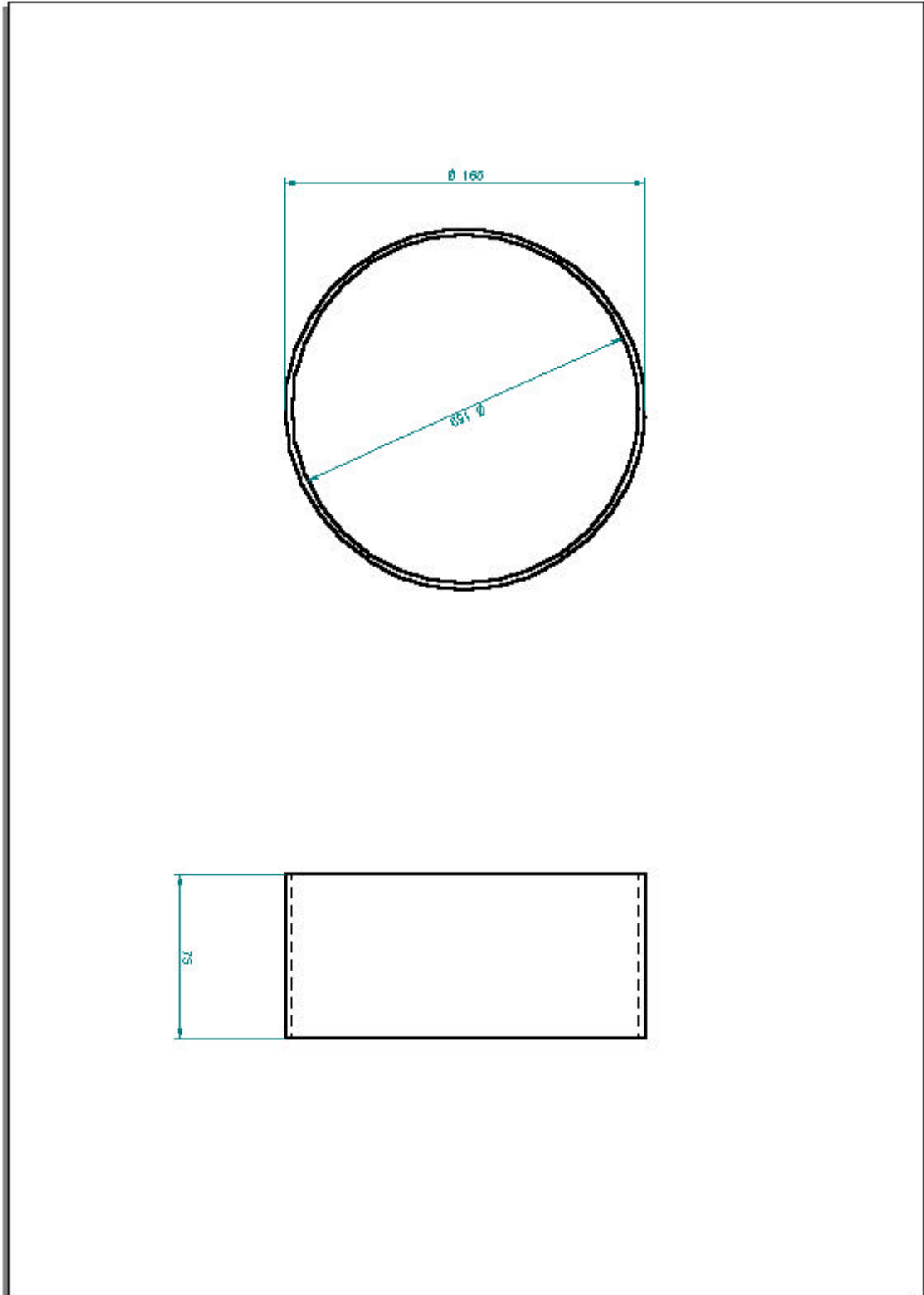
図面

コイル固定具



図面

コイル固定具 側部カバー



各部使用材料

() 磁極の材料

表2よりパーマロイの方がより透磁率の値が大きく大きい磁束密度を得ることが出来る。

しかしコストのことを考慮に入れると、パーマロイの価格は純鉄のその約10倍であるために現実的とはいえない。

今回製作する電磁石の使用を考えると、純鉄でも十分に欲するだけの磁束密度が得られることから、磁極材料には純鉄を用いることとした。

() リターンヨークの材料

【4.2 ()】よりリターンヨークの材質の条件は磁極のそれと同様となるため、リターンヨークの材料も純鉄を用いることとした。

() コイルの材料

表3より金の抵抗率は銅のその約1/2であるが、価格が1000倍もする。今回の場合、銅線を用いても十分に役割を果たしうる。費用対効果を考慮に入れて導線の材料として銅を選んだ。

() コイルの固定具の材料

アルミニウムの磁化率は空気のそれと近くて十分小さいことと表3よりわかる。また熱伝導率もよく、安価であることから材料としては適している。

よって、コイル固定具に用いる材料はアルミニウムとした。

磁場計算結果

磁場計算を poisson superfish を用いて行った。

透磁率 : 200

電流 : 1 (A)

巻き数 : 4686 (回)

以上の条件の時、表7のようなデータが得られた。ただし電流は直列であり、巻き数は上下をあわせたものである。

x[mm]	By[kG]
0	7.141088
1	7.141014
2	7.140774
3	7.14037
4	7.139801
5	7.139062
6	7.138149
7	7.137055
8	7.135774
9	7.134296
10	7.132608
11	7.130696
12	7.12854
13	7.126115
14	7.123383
15	7.120281
16	7.116673
17	7.112197
18	7.105756
19	7.093753
20	7.064191
21	6.978715
22	6.736458
23	6.196838

表7

表7のデータは図12の様に座標軸を取ったときの、 $y = 0$ 、 $x = 0 \sim 23$ としたときの、磁束密度 B_y の値である。

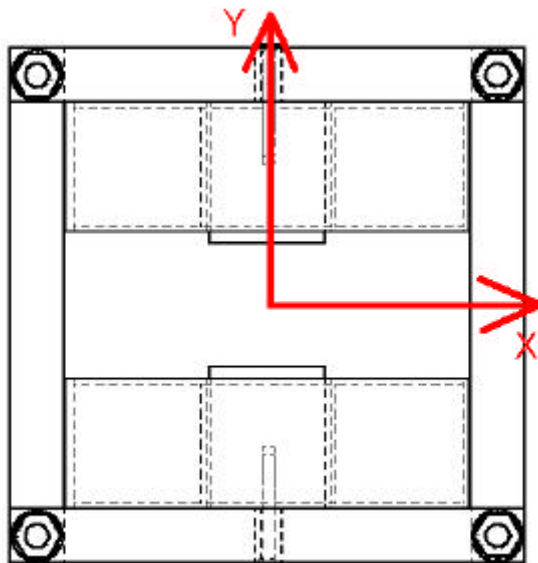
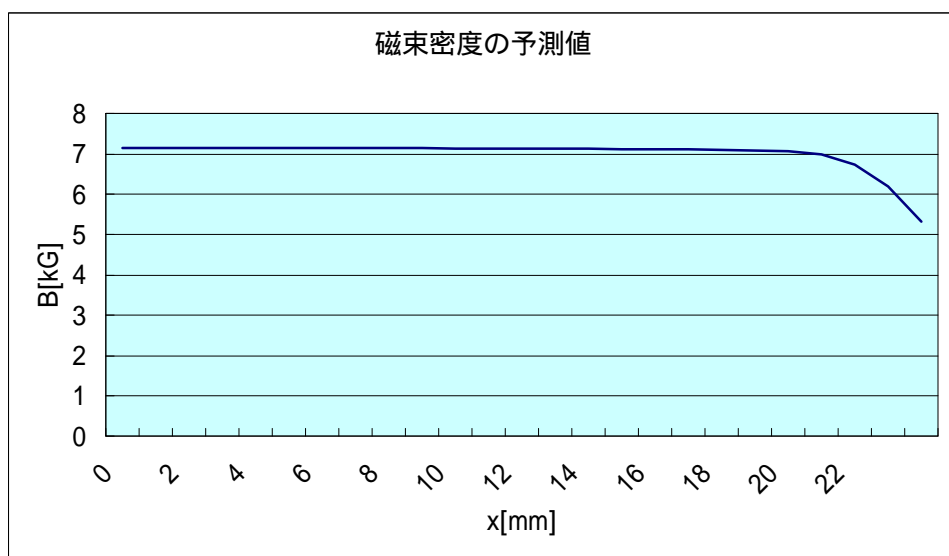


図 1 2

また表 7 をグラフ化したものを以下のグラフ 1 に記す。



グラフ 1

得られる磁束密度は約 6 2 0 0 ~ 7 1 0 0 (G) の範囲で変動しており、この時磁束密度の一樣性は約 1 5 % となるため、磁束密度の条件は満たしているが、一樣性の条件は満たさないと想定される。

熱量計算結果

熱量計算より電流 0.5 A、稼働時間 5 分の条件下で 45℃ 上昇する。ただし、この時点で平衡温度に達しているため、それ以上温度は上昇する事はない。

したがって、電磁石に用いているどの材料も融点に達することが無いため、十分に安全と言える。

強度計算結果

磁場計算及び熱量計算と同様の条件下で計算を行うと、電磁石に加わる磁極間が引き合う力は、自重による力 167.9 (N) 起動時に加わる力 0.068 (N) となり、総計で 168.06 (N) となる。

この時リターンヨーク上部に集中加重がかかったとすると、たわみは 1.23×10^{-6} となり、分布加重の時は 4.61×10^{-7} となる。これらは非常に小さい値であるためリターンヨーク上部は十分に耐えうると言える。

またリターンヨーク側部はひずみが 2.61×10^{-11} となりこちらも非常に小さい値となるため、十分に耐えうると言える。

第五章 電磁石の製作工程

製作にあたり用いた工作機械は

- ・ 旋盤
- ・ フライス盤
- ・ ボール盤
- ・ 両頭グラインダー
- ・ ハンドグラインダー

である。

5.1 磁極の製作

47mm、80mmの丸棒を加工し、磁極を製作した。製作する形状のモデルを図13に記す。

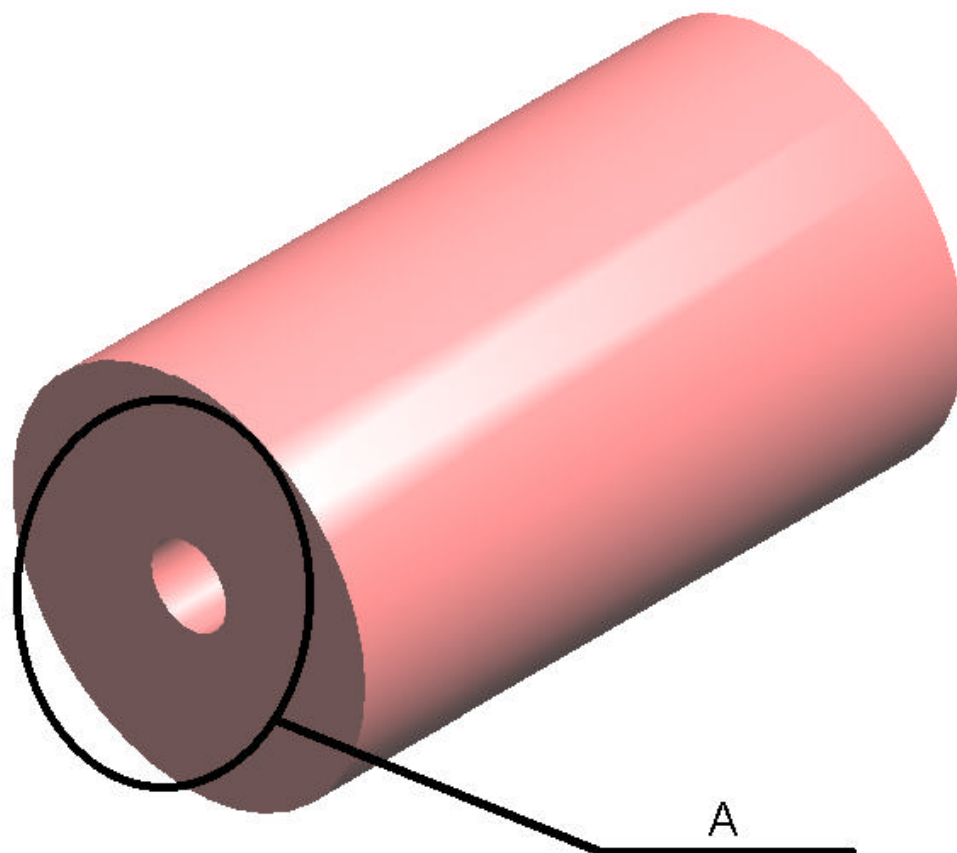


図13

図13に示すAの加工はボール盤を用いて穴あけを施した後にタップを用いてねじ切りを行い、M10の雌ねじを磁極面の一方に設ける。

5.2 リターンヨークの製作

・ リターンヨークの製作

リターンヨークは上下部、側部とも200mm×200mm×22mmの鉄板を加工することで製作を行った。

・ 上下部

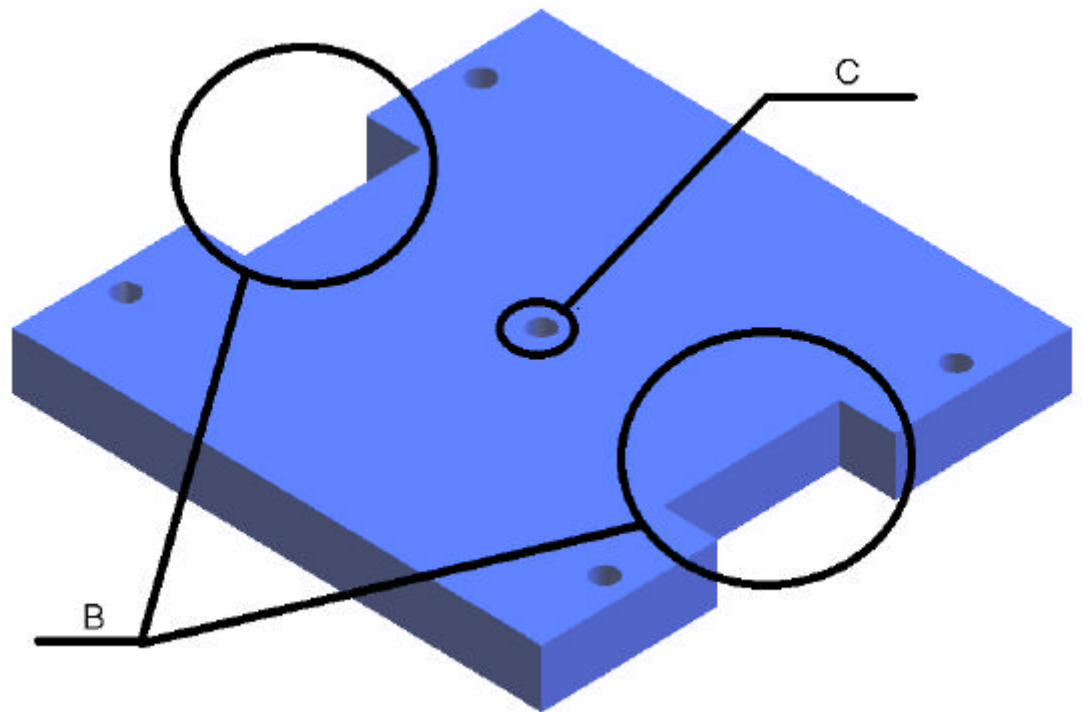


図14

リターンヨーク上下部の加工で困難であったのは図14に示すBの部分の加工であった。本来ならば、放電加工やレーザー加工などを施すべき部分であるが、製作条件により製作機械が限られていたために以下の方法を用いた。まず切り取る部分をボール盤で穴あけを行い、弓鋸やヤスリなどで不要部分を切り取る。その後ハンドグラインダー、及びフライス盤で仕上げ加工を行った。

この時【5.1】と同様に製作時間の関係上、ハンドグラインダーで加工した後に、フライス盤による仕上げを行う予定であったが、ハンドグラインダーのみの加工箇所が出来たため工作精度が十分といえるものにはならなかった。これは側部も同様である。

また、Cの部分はじめとする5つの通し穴はボール盤で加工を行った。

・ 側部

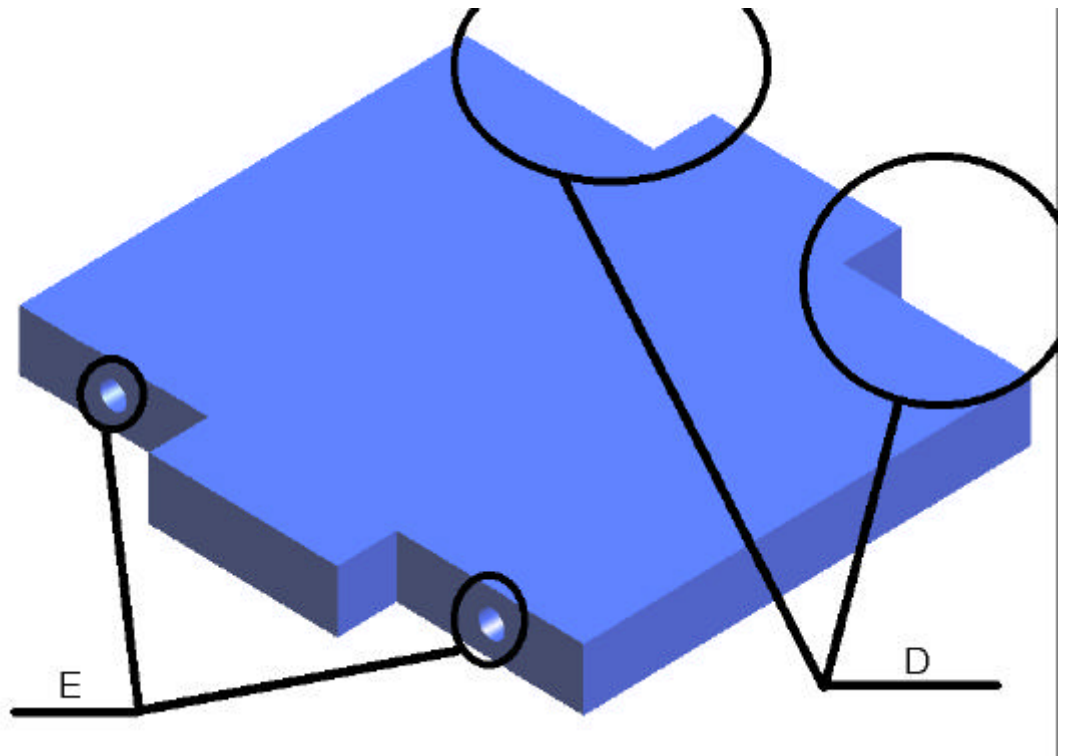


図 1 5

リターンヨーク側部も上部と同様図 1 5 の D の部分が加工困難であった。製作方法は図 1 4 の B のそれとほぼ同様である。また E の穴は D の加工を施した、後にボール盤による穴明け作業を行い M 1 0 の雌ねじを作成した。

リターンヨーク上下部、側部の製作に 3 日間を要した。

- ・ 組み立て

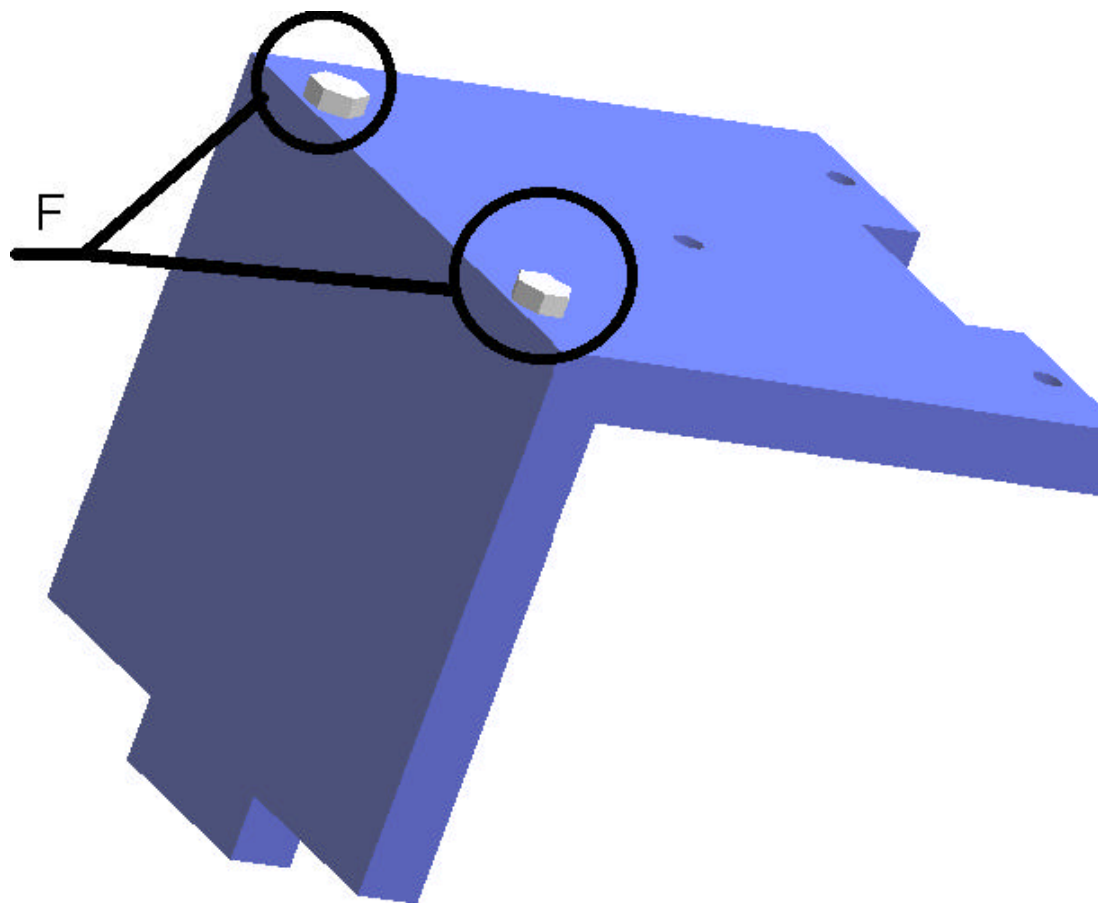


図 1 6

リターンヨーク上下部及び側部の締結は、図 1 4 の B の部位に図 1 5 の凸の部分をはめ込み、その後図 1 6 の F に示すように 1 0 mm のボルトで締結を行った。

5.3 コイル固定具の製作

- ・ コイル固定具本体

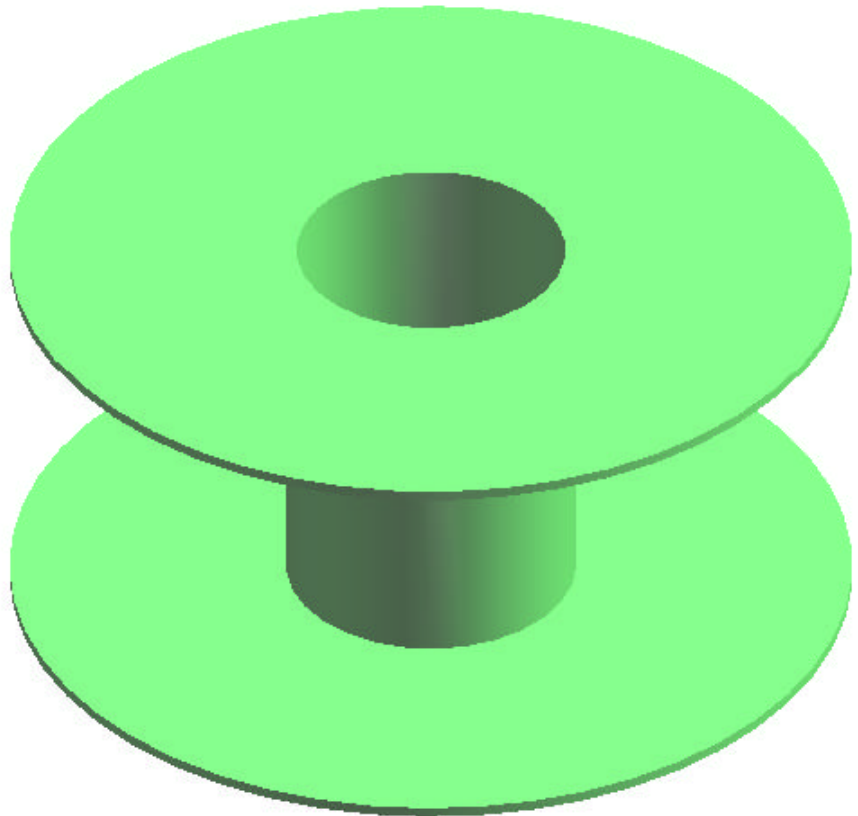


図 1 7

コイル固定具は図 1 7 に示すような形状であったため、学科工作室での製作が困難であったために、加工を外部に頼んだ。

コイルの固定具は磁束密度への影響を極力小さくするために断面積を小さくしなくてはならなかった。上下の板とそれらを繋ぐ円筒の寸法上の問題で、ボルト止め等の方法は行うことが出来ない為、溶接加工を施す事となった。

外注することとなった要因は、製作条件を見てもわかる様に溶接機材がないこと。またアルミの溶接加工は溶接加工の経験者のいない我々では製作困難と判断したためである。

- ・ コイル固定具側部カバー

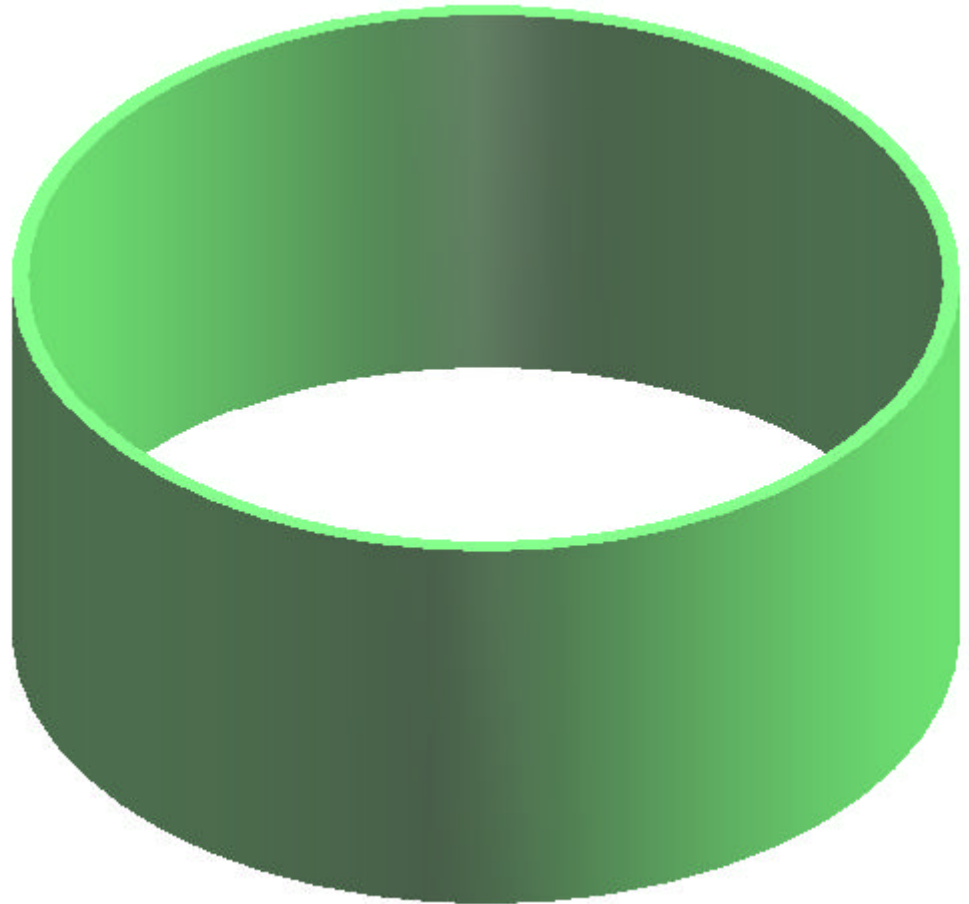


図 1 8

図 1 7 に示すコイル固定具のみでは、導線が外側に出てくる事も考えられた為、図 1 8 の様なコイル固定具の側部カバーも同様に発注して製作を行った。この内寸は図 1 7 のコイル固定具の外寸と同じであるため、コイル固定具の上からかぶせるような形となる。

また製作方法として一枚板を円筒状に丸め、溶接を施したものである。

5.4 コイルの製作

コイル製作にあたり、今回は導線を接着しないという製作条件を課した。そこでコイル固定具に導線を巻き、それをカバーを被せることで導線を固定した。

このとき導線はより強い磁束密度を得るために、巻き数を増やさなくてはならない。そのため密となる様に導線を巻かなくてはならない。【4.2 ()】を参照。

5.5 製作した電磁石の諸元

製作した電磁石の諸元を表8、電磁石の外観を図19に記す。

電磁石の諸元表		
寸法	縦	210mm
	横	210mm
	高さ	210mm
磁極間のギャップ		6mm
コイル	巻き数	4686回
	流す電流	1A
	抵抗	28.5Ω
	消費電力	28.5W
上昇温度		45℃
磁場強度		7000G
磁場の一様性		15%

表8

このデータは理論値を元としたものである。

また電流は直流であり、巻き数は上下のコイルの巻き数をあわせたものである。

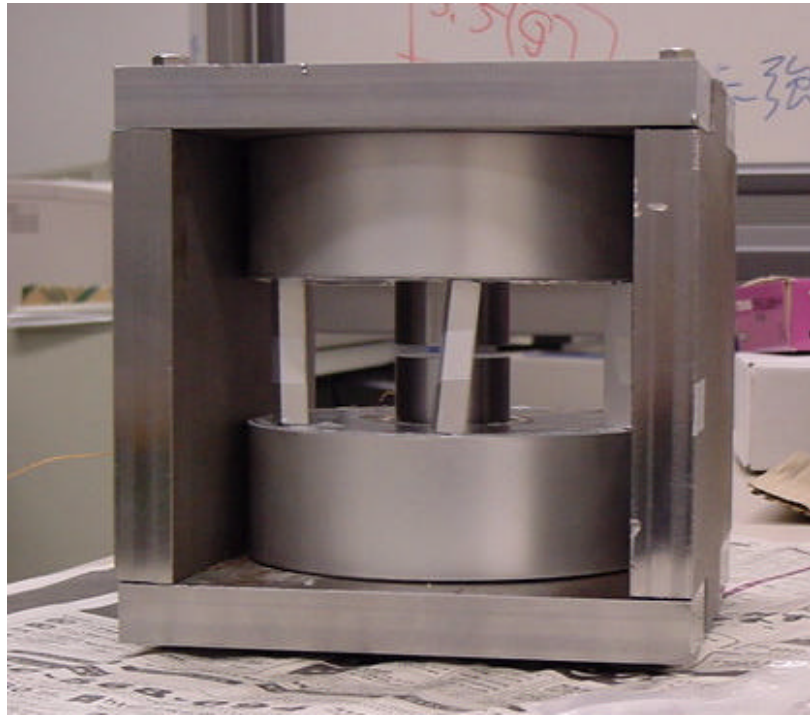


图 19

第六章 磁場測定

6.1 測定器具

電磁石に電流を流し、ガウスメートルと呼ばれる磁場測定器を用いて磁場の測定を行った。ガウスメートルは図20の様な形状をしており、先端部にホール素子がある。

ホール素子は電流及び磁場と直角方向に電流と磁場に比例する起電力を発生させる素子である。ガウスメートルはこの起電力を磁束密度として読みとる。

また磁場測定の座標位置を決めるために、図21に示す様な小型のジャッキの上にガウスメートルを固定した。

ガウスメートル及び電源の使用は以下の通りである。

- ・ ガウスメートル

商品名	: 5080型ハンディガウスメートル
MODEL 番号	: 5080
シリアルナンバー	: 9645450
社名	: 東洋テクニカ

- ・ 電源

商品名	: DC POWER SUPPLY
MODEL 番号	: SIC - 1V10
シリアルナンバー	: H6078
社名	: 日本スタビライザー工業(株)

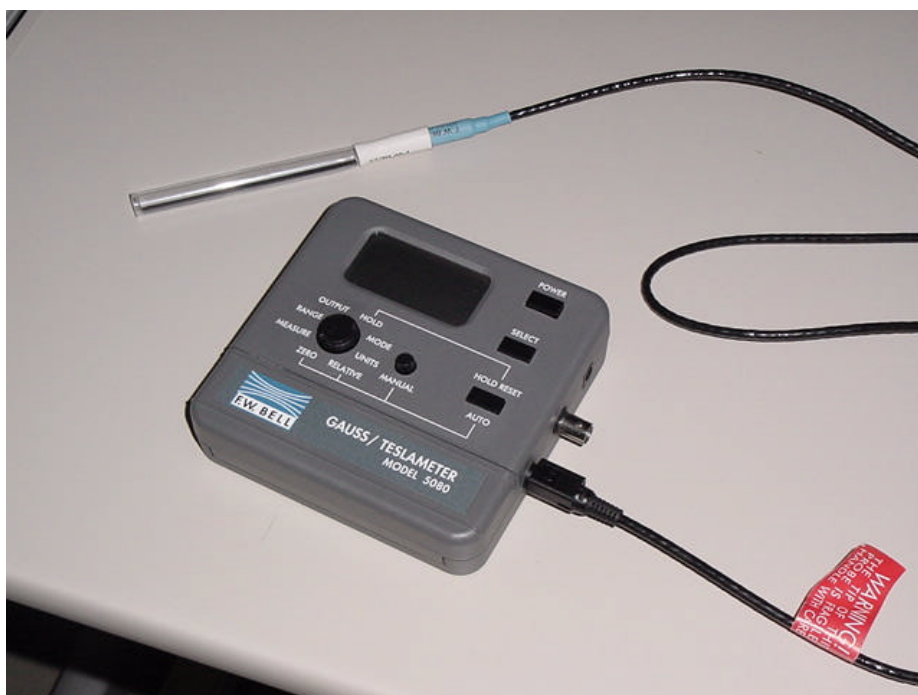


図 2 0

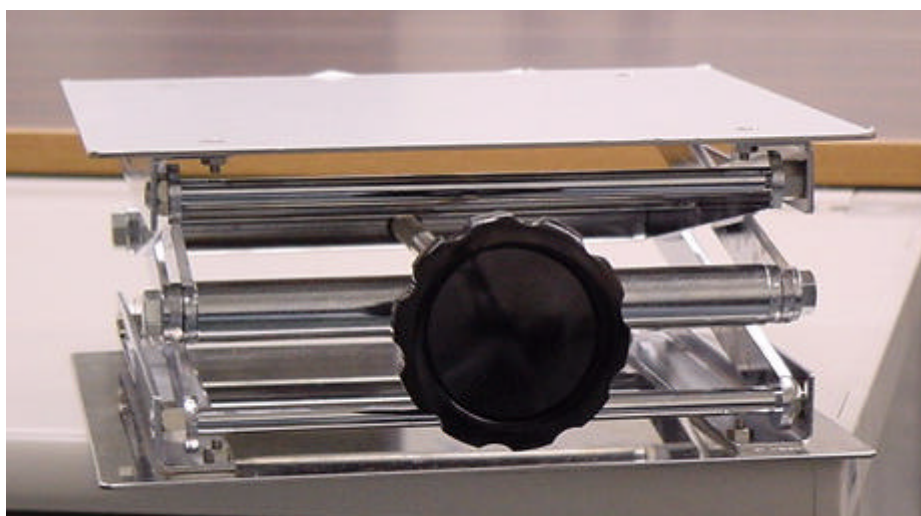


図 2 1

6 . 2 磁場の測定方法

電源から電磁石の上下のコイルを直列につなぎ、それぞれ $0.5 (A)$ ずつ合計 $1 (A)$ の電流を流し、ガウスメーターで各座標位置での磁束密度の測定を行った。

6.3 測定結果

磁束密度の測定結果を表9とグラフ2に示す。

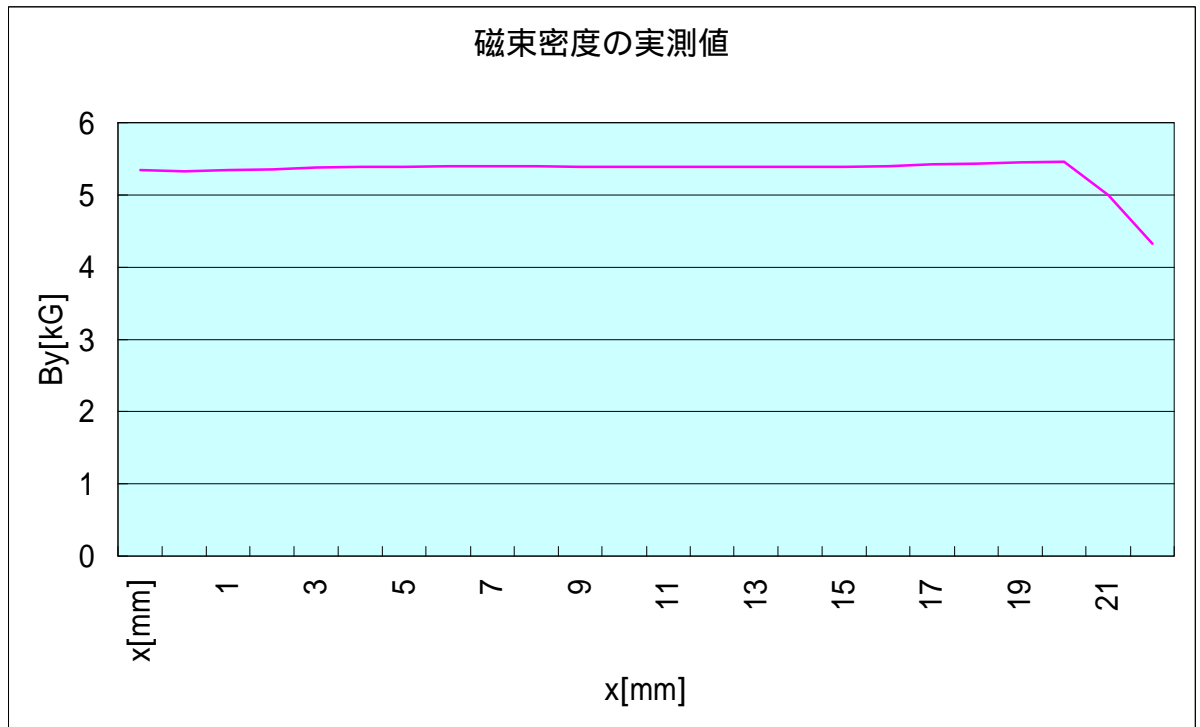
x[mm]	B[kG]
0	5.35
1	5.33
2	5.35
3	5.36
4	5.38
5	5.39
6	5.39
7	5.4
8	5.4
9	5.4
10	5.39
11	5.39
12	5.39
13	5.39
14	5.39
15	5.39
16	5.39
17	5.4
18	5.42
19	5.43
20	5.45
21	5.46
22	5
23	4.33

表9

x = 24の点は磁極面からは外れているため、測定を行わなかった。

磁束密度は理論値よりは1800(G)ほど低い値だが、5300(G)ほどの磁束密度を得ることが出来た。

また磁束密度の一様性は5%以内に収まっていることが確認できた。



グラフ 2

6.4 理論値との比較

理論値及び実測値を比較したものを表 10、グラフ化したものをグラフ 3 に記す。

- ・ 磁束密度

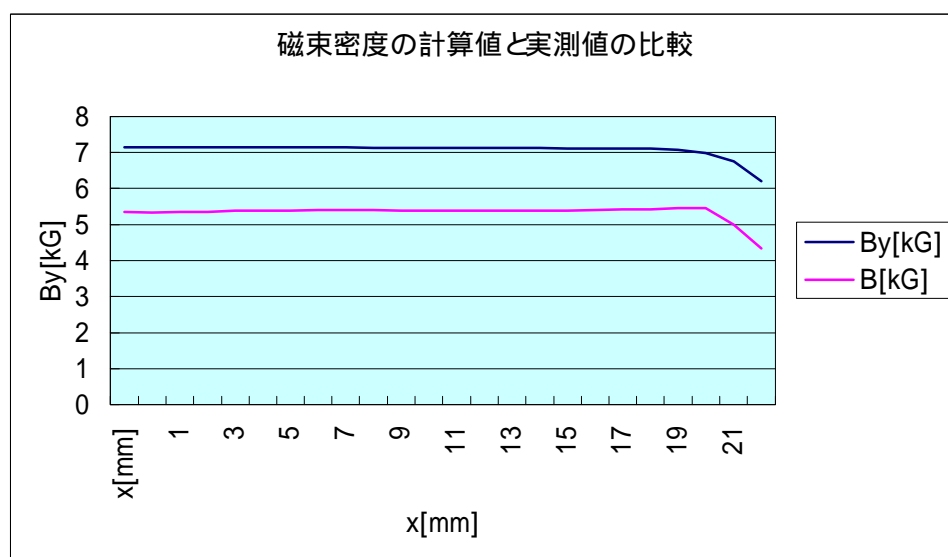
理論値通りの磁束密度を得ることが出来なかった。これは製作したコイルの巻き数が、理論値のそれと比べ少ないかったことと、純鉄の透磁率が計算時に用いたそれと異なっていたため想定される。

- ・ 磁束密度の一様性

実測すると約 4900 G ~ 5100 の間での変動が確認できた。この変動の割合は 5% 以内である。これは理論値よりも良い数値である。

x[mm]	By[kG](理論値)	B[kG](実測値)
0	7.141088	5.35
1	7.141014	5.33
2	7.140774	5.35
3	7.14037	5.36
4	7.139801	5.38
5	7.139062	5.39
6	7.138149	5.39
7	7.137055	5.4
8	7.135774	5.4
9	7.134296	5.4
10	7.132608	5.39
11	7.130696	5.39
12	7.12854	5.39
13	7.126115	5.39
14	7.123383	5.39
15	7.120281	5.39
16	7.116673	5.39
17	7.112197	5.4
18	7.105756	5.42
19	7.093753	5.43
20	7.064191	5.45
21	6.978715	5.46
22	6.736458	5
23	6.196838	4.33

表 1 0



グラフ 3

第七章 結論

7.1 電磁石の性能

- ・ 寸法

「本体の外寸は200mm立方ほどでなくてはならない。」という条件であったが、製作した電磁石は210mm立方であった。しかしながら今回の200mm立方という規定はあくまで目安としてのものである。

従って210mmという寸法値は十分に条件を満たしているといえる。

- ・ 磁束密度

「磁極間で500(G)以上の磁束密度が得られること。」という条件に対しては5000(G)という予測していた値よりは小さかったものの、条件を満たす磁束密度が得られた。

- ・ 磁束密度の一様性

「磁極間に於ける磁束密度の一様性が10%以内であること。」これに対しても磁束密度の条件と同様、十分に条件を満たした。

磁極面の形状処理を行えばより良いデータが得られることが予想される。

- ・ 稼働時間

「最低5分間の連続稼働が出来ること。」これはシビアな条件ではなかった。電磁石の温度が稼働時間内に使用している物質の融点に達した場合に電磁石が使用不可能となる。

今回の電磁石はある50で平衡温度に達し、電磁石に用いているどの物質の融点にも達することがない。従ってこの条件は満たした。

7.2 製作期限

2001年2月6日までにデータ収集を終えるという条件を満たした。

しかし、表10に見られるようにタイム・スケジュールに遅延が見られた。

遅延の原因はメンバーへの仕事分担の割り振りが適材適所であったとは言えない事が挙げられる。実際にメンバーの中での仕事量に違いが見られ、手の空いている人員が居たのは事実である。

従ってプロジェクトの遅延問題の解決手法としては、プロジェクト進行と共に仕事の割り振りの再考を行い、タイム・スケジュール変更することなどが挙げられる。

月		10				11				12				1		2	
日		24	31	7	14	20	29	5	15	25	31	15	26	2	6		
熱量計算	予定	■	■														
	実状	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■						
磁場計算	予定	■	■														
	実状	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■						
コイルの設計	予定	■	■	■													
	実状	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
磁力線の分布を調べる	予定	■	■	■	■												
	実状	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■						
リターンヨークの設計	予定	■	■	■	■												
	実状	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■						
磁極の設計	予定	■	■	■	■												
	実状	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■						
磁場強度を力へと変換	予定	■	■	■	■	■											
	実状	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■						
強度計算	予定	■	■	■	■	■	■										
	実状	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■						
設計	予定	■	■	■	■	■	■	■	■	■							
	実状	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
材料調達完了	予定	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
	実状	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
製作完了	予定	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
	実状	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
データ収集	予定	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
	実状	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		

表10

7.3 コスト

- ・ **リターンヨーク、磁極**

リターンヨーク及び磁極に用いた純鉄のコストは5万円である。このうち純鉄自体の価格よりは素材から板材、丸棒に加工する加工費が大半を占めている。

- ・ **導線**

0.5mmのポリエステル皮膜の導線のコストは1万5千円となった。

- ・ **コイル固定具**

コイル固定具は本体が約6000円、固定具のカバーが2000円となった。これは共に溶接などの加工費込みの価格である。

またこれらは二つずつ必要となるため、総計でかかったコストは1万6千円となった。

以上より、電磁石製作に要したコストは8万円ほどとなり、コストの条件もみたすことができた。

7.4 マネージメント

以上の条件を満たしたことから今回のマネージメントは成功したと言える。

しかし【7.2】に記す通り問題やそれに伴う製作時の問題があったため、それら問題を改善しなくてはならない。

参考文献

- 1 . 改訂新版 基礎教養 物理学
大槻 義彦 著
学術図書出版社
- 2 . 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
松村 博之 訳
学術図書出版社
- 3 . 科学者と技術者のための物理学 熱力学
R・A・サーウェイ 著
松村 博之 訳
学術図書出版社
- 4 . 材料力学入門
高尾 健一著
西日本法規出版
- 5 . 改訂版 物理学事典 [縮刷版]
物理学辞典編集委員会編
培風館
- 6 . http://www.mmaj.go.jp/mric_web/chiri/ch990601.html

私的会話

- 1 . 百田 佐多男先生
(現高知工科大学 知能機械システム工学科 講師)
ビオ・サヴァールの式から導き出された(2)、(3)式について。

2. 浜川 恒圭君
(現高知工科大学 知能機械システム工学科 3回生)
パーマロイ k gあたりの単価について。

注釈

1. 純鉄の k g 単価は加工費込みの価格である。
2. 銅の k g 単価は加工費込みの価格である。
3. アルミニウムの k g 単価は製作物の加工費込みの価格である。

謝辞

今回の卒業研究に当たり、様々な助言をいただいた野尻洋一先生
(現高知工科大学 知能機械システム工学科 教授)。

忙しい中、連日夜遅くまでご指導いただき、工作までお手伝いいただいた百田 佐多男先生(現高知工科大学 知能機械システム工学科 講師)。

共同研究者であり、poisson superfish を用いた、磁場計算及び磁力線分布のシミュレーションを担当してくれた齊原 光和子さん。電磁石の製作にあたり様々なことを調査してくれた浜川 恒圭君。年末で多くの企業が店終する中で、材料調達に奔走してくれた高巢 正人君。夜遅くまで工作を手伝ってくれた小川 和秀君。また製作グループが違うにも関わらず、熱量計算で多くのことを手伝っていただいた坂本 麻子さん。

皆様のおかげで無事卒業研究を終えることが出来ました。この場を借りて心より感謝の意を表します。