

卒業論文

H型電磁石の製作

磁場強度・磁場分布の計算値と実測値の比較

高知工科大学 知能機械システム工学科

野尻・百田研究室

1020139

浜川 恒圭

共同研究者

小川 高巢 濱口 八木

目次

1. 研究目的
2. 電磁石
 - 2-1 電磁石の原理
 - 2-2 H型電磁石
3. 電磁石の設計
 - 3-1 概略図
 - 3-2 各部品の役割

4. 完成図
5. 昨年度と今年度との構造比較
 - 5-1 コイルの巻き方
 - 5-2 リターンヨークの材質
6. 計算
 - 6-1 計算方法
 - 6-2 **Input file**
 - 6-3 座標の取り方
 - 6-4 計算結果
7. 測定装置
8. 測定結果
9. 考察
 - 9-1 実測値、計算値、昨年度との磁場強度比較
 - 9-2 リターンヨークの隙間が磁場強度に及ぼす影響
10. 結論
11. 参考文献

- A. 付録
 - A-1 **Input file**
 - A-2 部品図

1.研究目的

H 型電磁石の製作を通じて「ものづくり」に必要とされる下記の技術を身につける。

- ・ 磁場強度計算
- ・ 強度計算
- ・ 材料選定
- ・ 材料発注
- ・ 工作技術
- ・ CAD 操作
- ・ 計測技術

これらを実行する過程で生じる様々なトラブルに対応する能力を身につける。今回私が担当した「磁場強度計算」は H 型電磁石の磁場強度を予測し、目的通りの磁場を発生させるために必要な技術である。

私の目的は次の条件を満たし、計算によって磁場強度を予測し実際に H 型電磁石を製作し実証する事である。

- ・ 昨年度の 4 年生が製作した H 型電磁石の磁場強度 5.3(kG)を以下の 2 つの条件で上回る。

- 1) 電流と(I)コイルの巻数(N)の積を同一にする。

$$NI=4686[A \cdot \text{Turn}]$$

- 2) 磁極間の距離 d を同一にする。

$$d=5(\text{mm})$$

2. 電磁石

2-1 電磁石の原理

直線導線に電流を流すとその周囲に図1のような磁場が発生する。導線を螺旋状に巻き、電流を流す。これが電磁石である。また、螺旋状に巻いた導線の中に強磁性体を置くことによって強磁性体が磁化し、導線が発生させる磁場を増幅する。

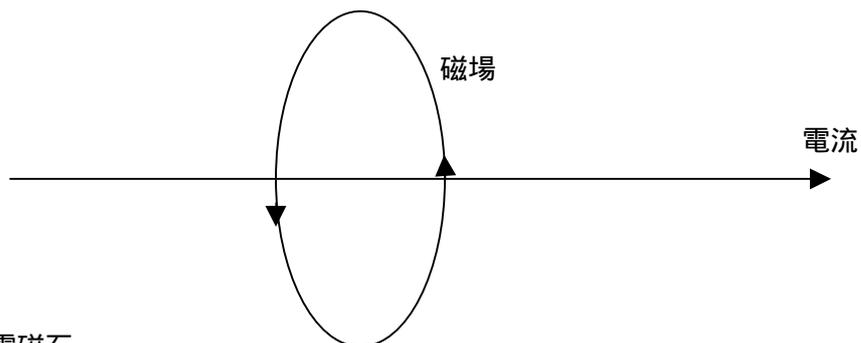


図 1

2-2 H型電磁石

今回製作する H 型電磁石の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を偏向するのに用いられる。図 2 に野尻百田研究室で使われている偏向電磁石を示す。

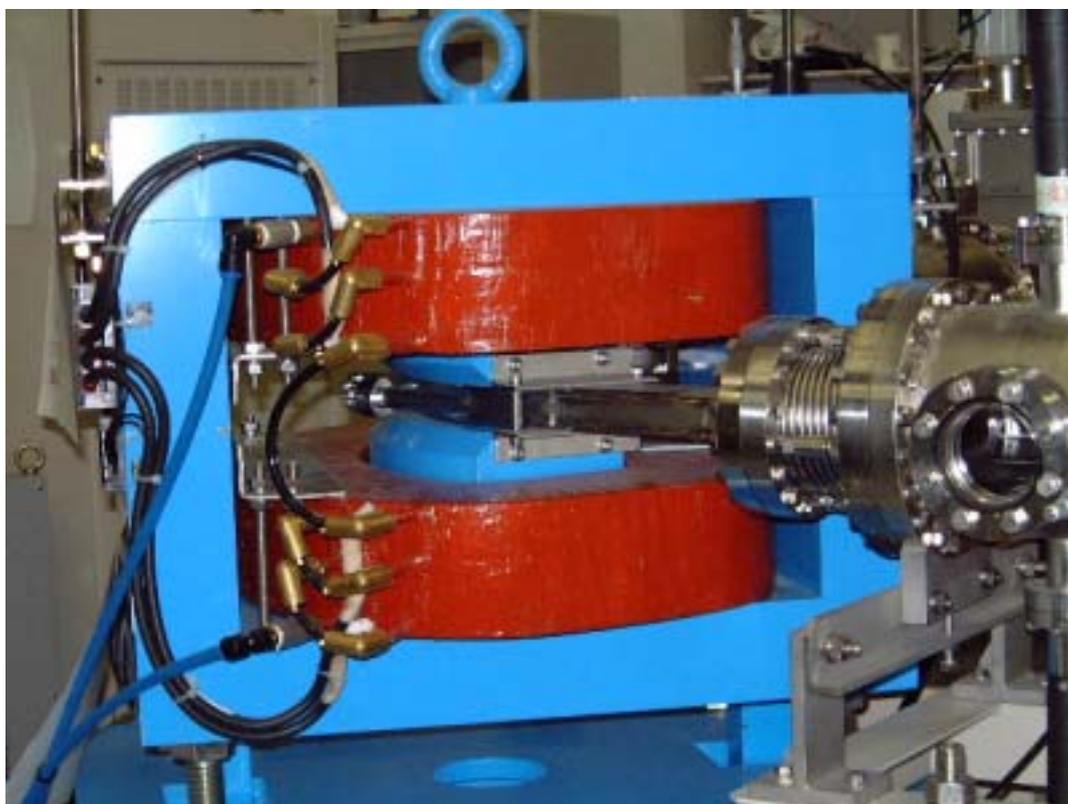
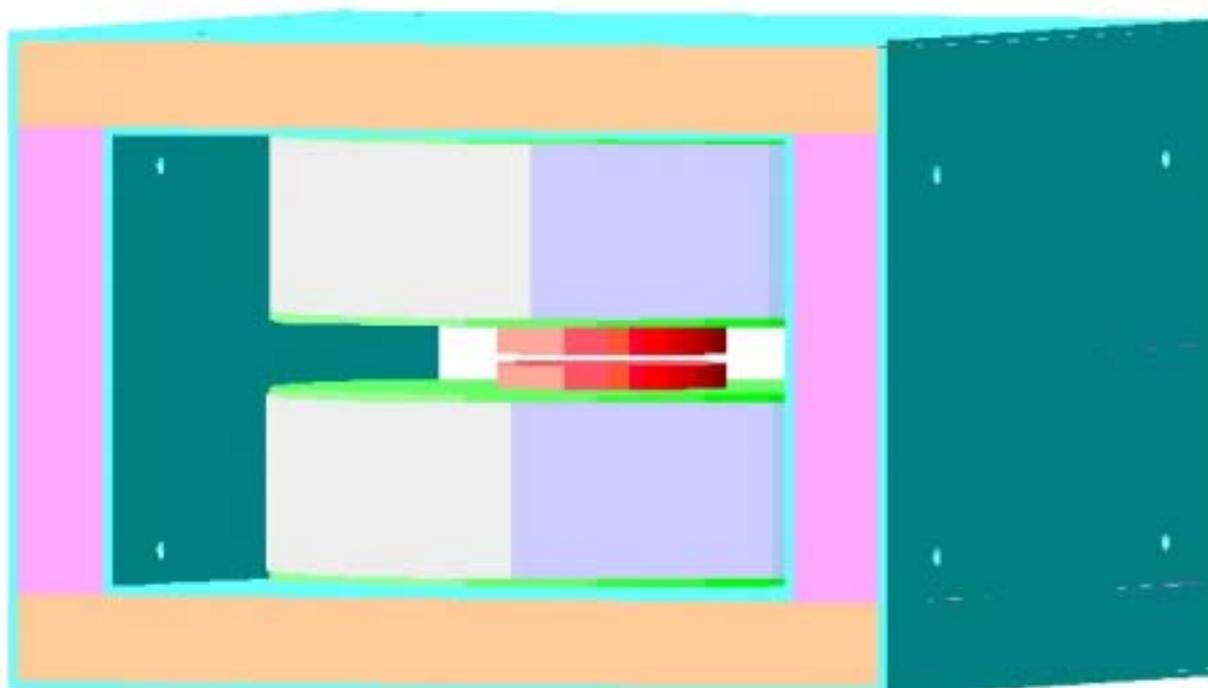


図 2 偏向電磁石

3. 電磁石の設計

3-1 概略図

実際に製作する H 型電磁石の 3 D 概略図である。



今回製作した H 型電磁石の特徴は垂直方向に比べ水平方向に長いことである。
「ループ電流が軸線上に作る磁場」の式より水平方向に長い形状にする。

ループ電流が軸線上に作る磁場

$$B = \frac{\mu_0 \times I \times r^2}{2(X^2 + r^2)^{\frac{3}{2}}} \quad \text{式 1} \quad \text{参考文献 1}$$

μ_0 : 真空の透磁率
A : ループの面積
r : ループの半径

I : 電流
X : 測定位置までの距離

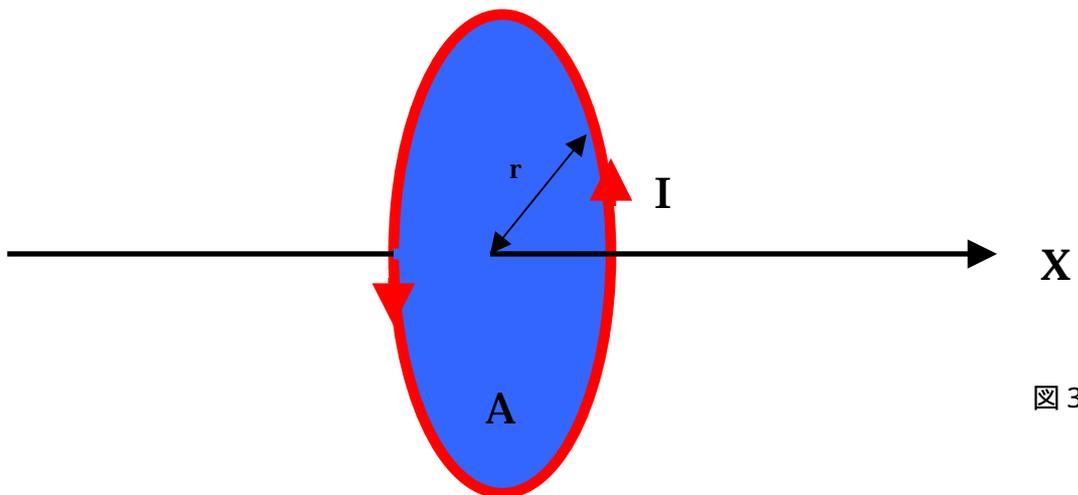


図 3

図 3 のようにループ電流 I が発生させる磁場 B は式 1 によって決まる。 μ_0 は一定であり、I, X を一定とすると B は A によって決定される。このため導線を水平方向に多く巻くことにした。よって全体の形状を横長にする。

3-2 各部品の役割

図 4 は今回製作した H 型電磁石の断面図である。

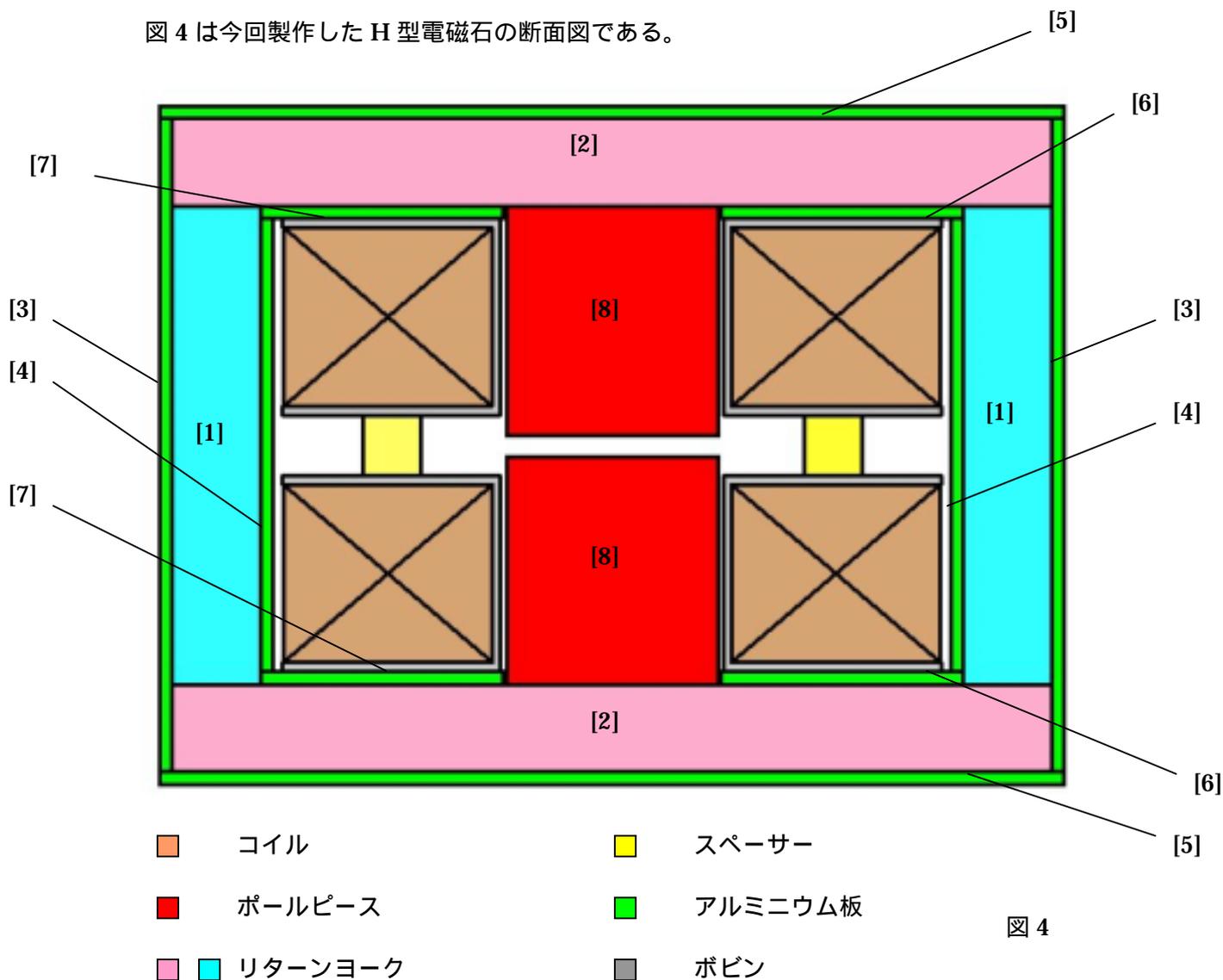


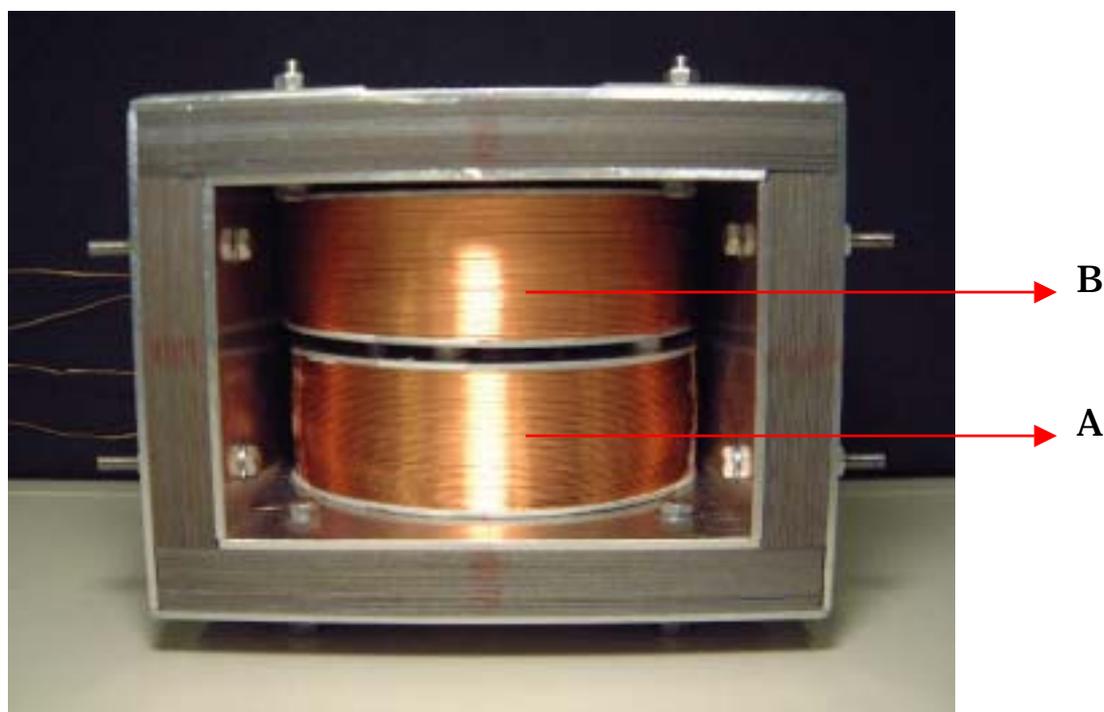
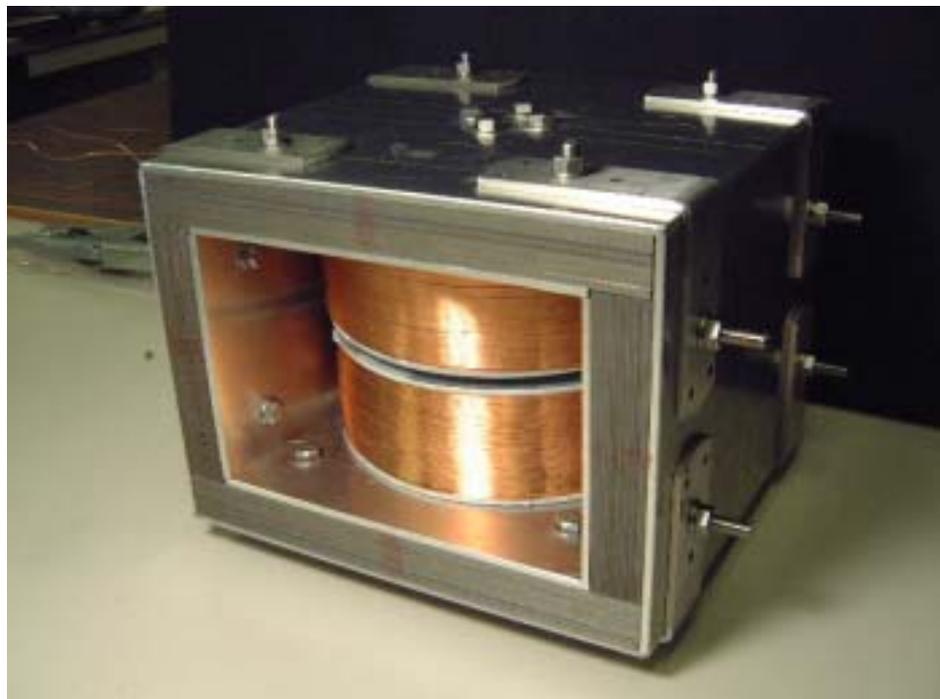
図 4

- ・ コイル コイル状に巻いた銅線に電流を流すことによって磁場を発生させる。
- ・ ポールピース コイルによって発生した磁場を増幅する。
- ・ リターンヨーク 増幅された磁場を外部に発散させないようにする。
- ・ アルミニウム板 リターンヨークに使用した層状の電磁鋼板をはさみ固定する。
- ・ スペーサー 上下のコイル間隔を保持する。
- ・ ボビン コイルの形状を保持する。

部品図を付録 A-2 に示す。

4. 完成図

実際に製作した H 型電磁石を示す。



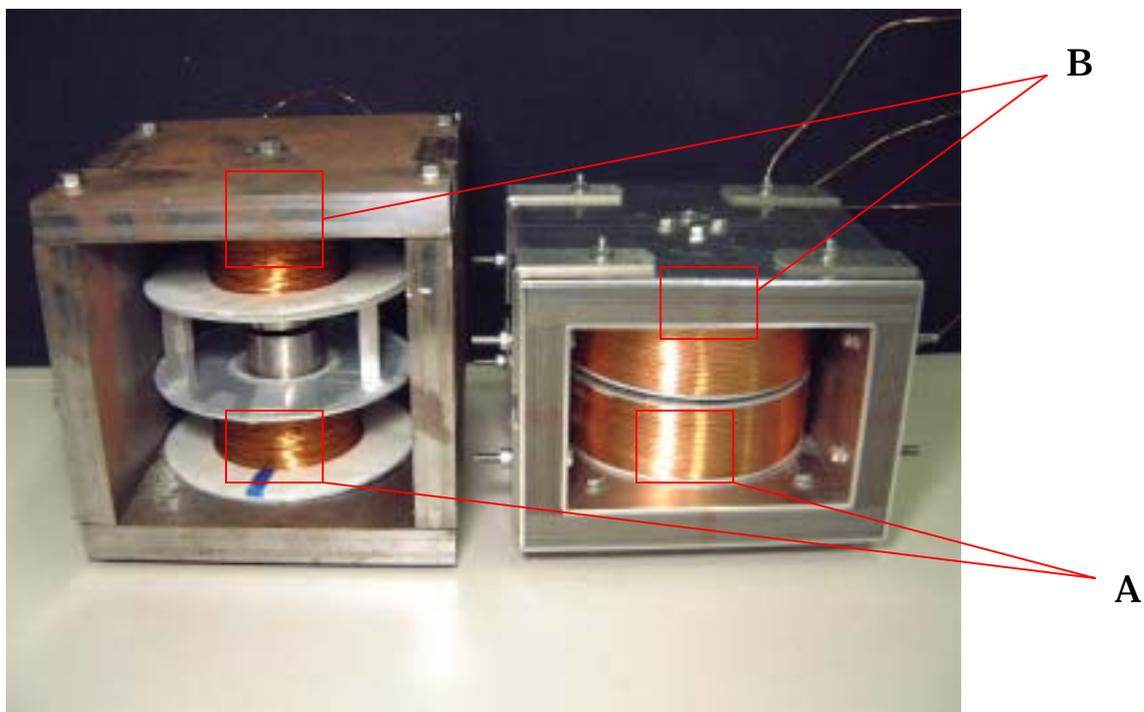
これ以降、上のコイルを B、下のコイルを A とする。

5. 昨年度と今年度の構造比較

昨年度の H 型電磁石と素材と形状の主な違いは以下の 2 点である。

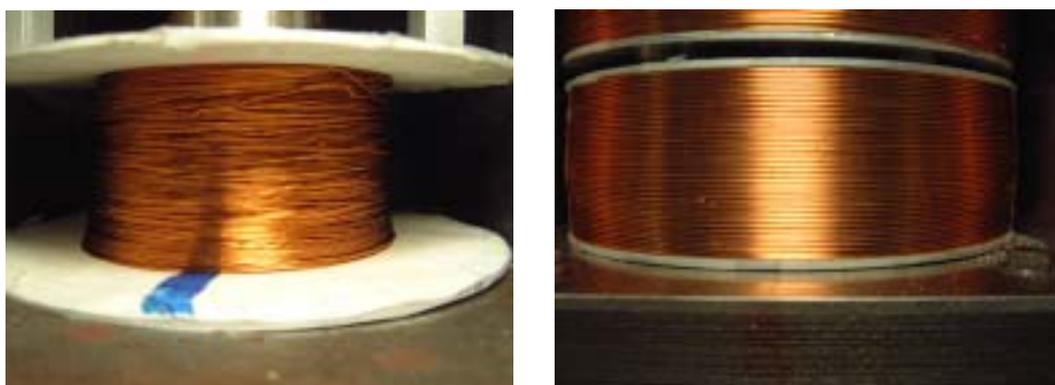
A: コイルの巻き方

B: リターンヨークの材質



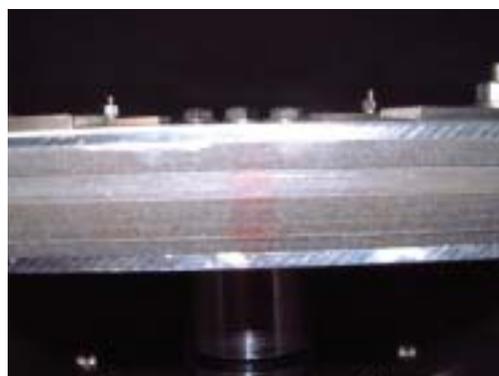
左 昨年度
右 今年度

5-1 コイルの巻き方



昨年度のコイルは導線が整然と巻かれていない。そのため発生する磁場が相殺し磁場強度に影響するのではないかと考えた。そこで今年度は導線を整然と密に巻くため共同研究者の小川君が作成した「巻巻君 3 号」を使用した。これにより整然と密に巻くことに成功した。

5-2 リターンヨークの材質



昨年度の電磁石はリターンヨークに純鉄を使用した。今年度はリターンヨークに電磁鋼板を使用している。これは、純鉄よりある方向に磁化しやすいためである。電磁鋼板は圧延により磁化方向を決めている。よって、厚さが0.5mmと薄いため層状に重ねてリターンヨークとして使用する必要が生じた。また、薄いためたわみやすくなっているためアルミ板で強度を補強する必要が生じた。

	今年度	昨年度
リターンヨーク(左右)	方向性電磁鋼板	純鉄
リターンヨーク(上下)	無方向性電磁鋼板	純鉄
ポールピース	純鉄	純鉄
ボビン	アルミニウム	アルミニウム

表1 素材

	コイルA	コイルB	昨年度コイル(上下)
巻き数(回)	2058	2011	4686
電流(A)	0.54	0.59	片方 0.5(並列)
抵抗()	15.6	15.1	95
銅線の直径(mm)	1.0	1.0	0.5

表2 コイル

6. 計算

6-1 計算方法

磁場強度計算は磁場解析ソフトの Poisson-Superfish(1)を使用する。Poisson-Superfish は 2次元でかつ閉じた形状でないと解析できない。よって図 5 のように構造物を永遠に続く長方形の断面と仮定した形で計算する。図 6 に Poisson-Superfish を使った計算の流れを示す。

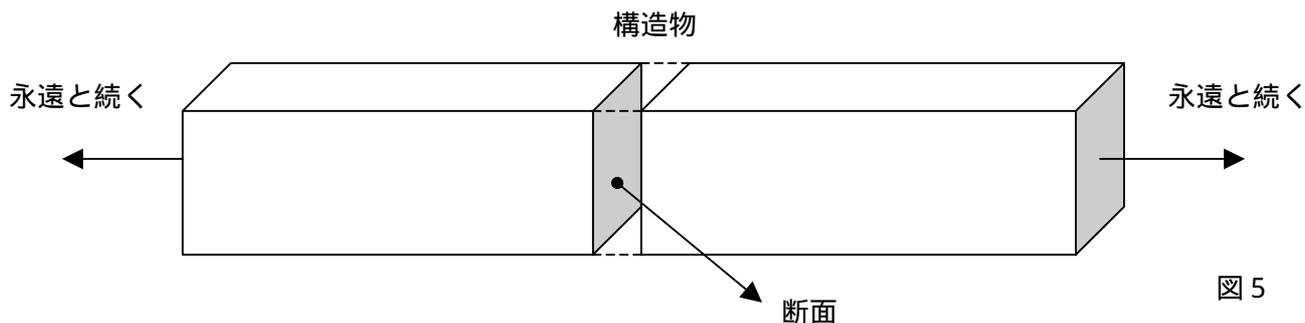


図 5

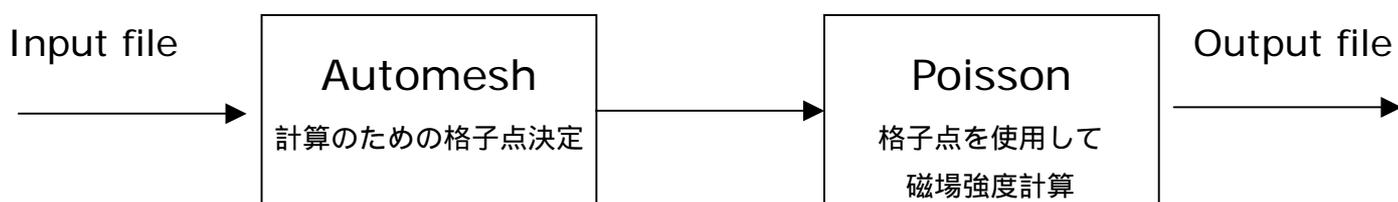


図 6

図 6 で示すように Input file (2) を Automesh、Poisson を通すことによって Output file に計算結果が出力される。Automesh は対象物に格子点を製作する。Poisson は Automesh により製作された格子点における磁場強度を計算する。これにより磁場強度を求める。

6-2 Input file

Input file には次に示すデータを入力する。

- ・ 構造物の幾何学的形状
- ・ 格子点の間隔
- ・ 導線の巻数と電流の積
- ・ 磁性体の磁化曲線
- ・ Output File 出力する測定位置の範囲

今回リターンヨークに使用する方向性電磁鋼板、無方向性電磁鋼板の磁化曲線を図 7 (3) に示す

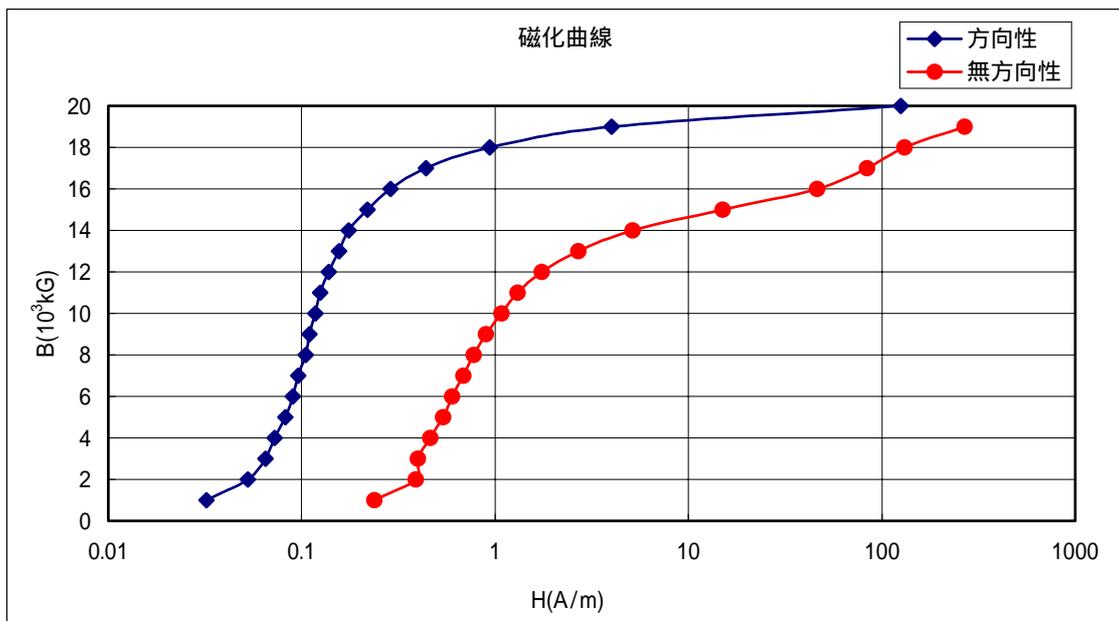
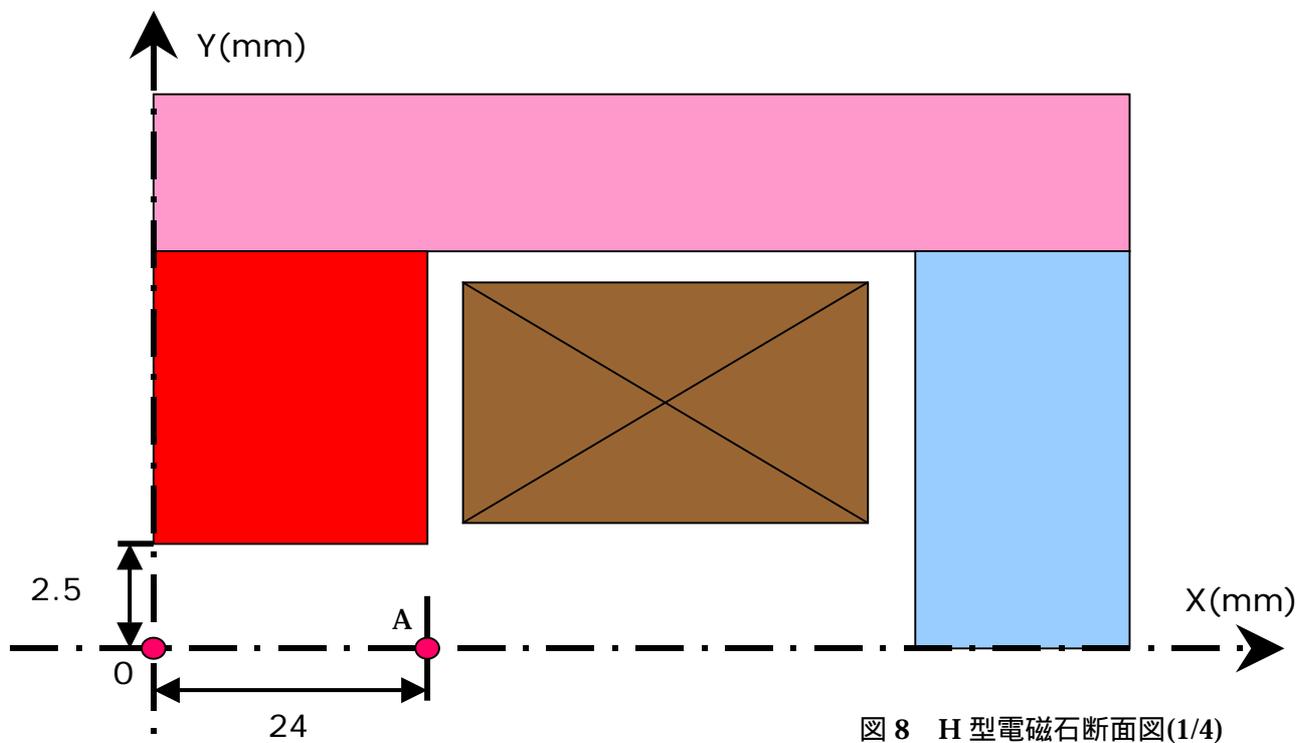


図 7 磁化曲線

- 1, 参考文献 1 を参照
- 2, 付録 A-1 を参照
- 3, 参考文献 4 を参照

6-3 座標の取り方

Poisson-superfish を使った計算での座標の取り方を図 8 に示す。



- コイル
- ポールピース
- ■ リターンヨーク

図 8 は H 型電磁石の 1/4 断面図である。断面図の中心を 0 とし水平方向を X 軸、垂直方向を Y 軸とする。中心 0 と中心から水平方向に 24mm 離れた点を A とする。0 ~ A 間を 1mm 間隔と設定し、出力する計算点、実際に計測する計測点として選択した。24mm は磁極面の半径に等しい。

6-4 計算結果

6-3 で設定した各点での磁場強度の計算結果を図 9 に示す。各計算値の X 軸方向に誤差棒がついている。これは格子点の間隔を 1mm と設定しているためである。

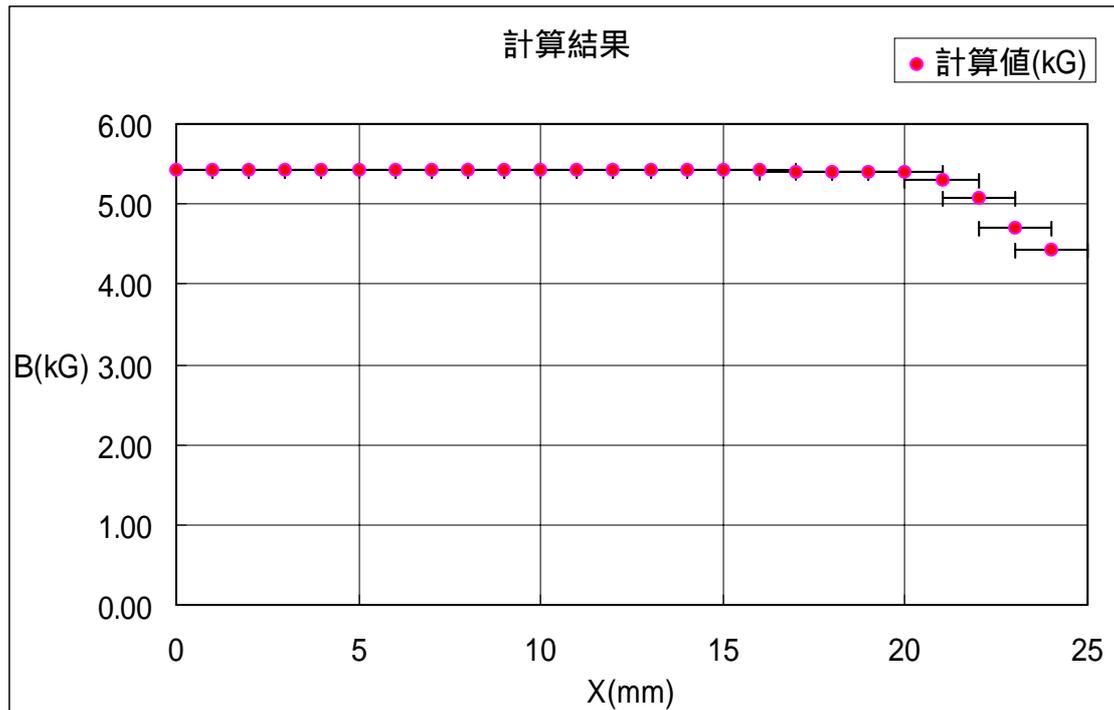


図 9 計算結果

7. 測定装置

磁場強度を測定するための装置を図 10 に示す。

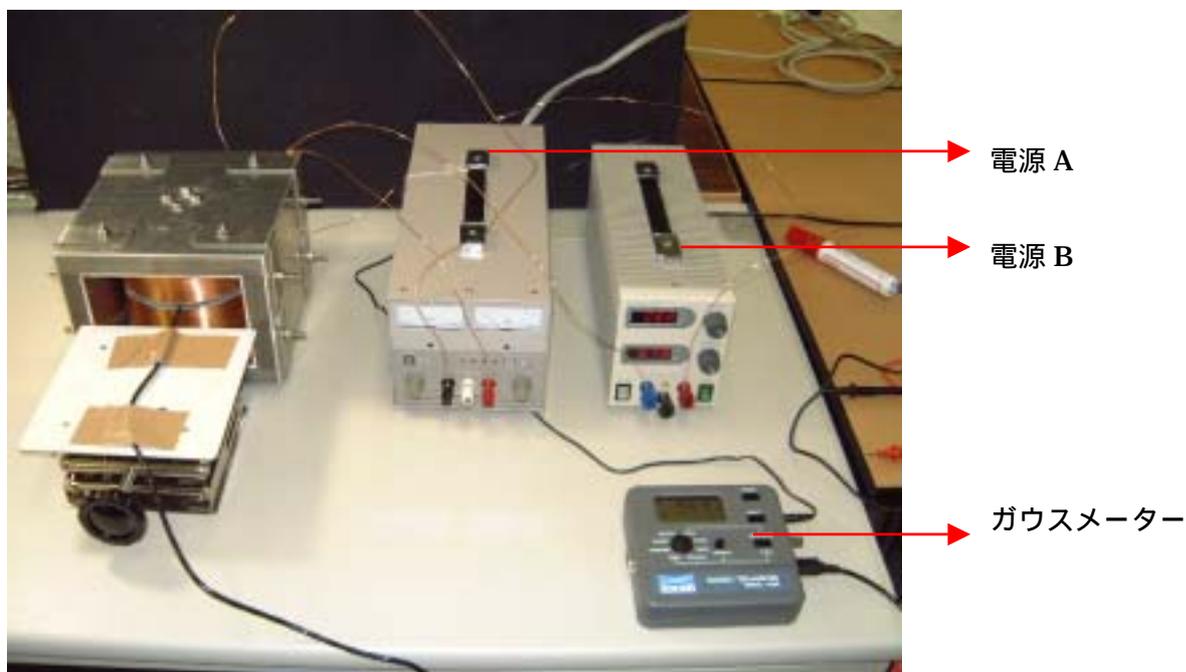
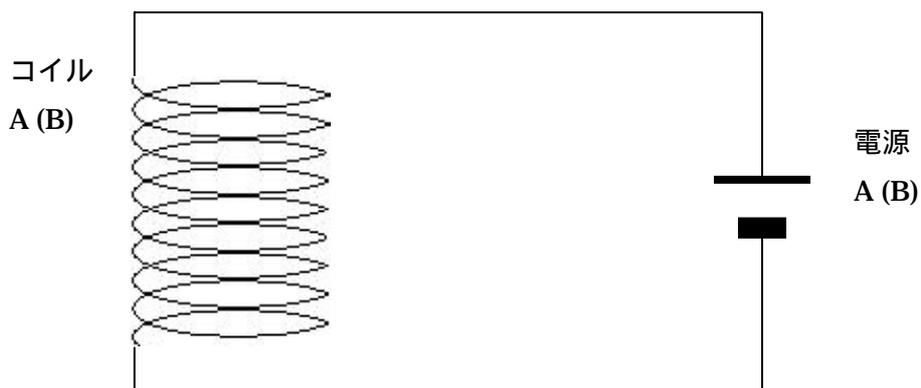


図 10 磁場強度測定装置

- ・ 電源 A NIPPON STABILIZER INDUSTRY CO.,LTD.
DC POWER SUPPLY SIC-1V10
- ・ 電源 B TAKASAGO
REGULATED DC POWER SUPPLY TPO120-06D
- ・ ガウスマーター 東陽テクニカ
5080 型ハンディーガウスマーター

電源 A はコイル A、電源 B はコイル B にそれぞれ直列につないである。そして電流を流し計測される磁場強度をガウスマーターで測定する。測定位置については 6-3 で示した各測定位置である。図 8 の 0 ~ A までガウスマーターを移動させる。これを 3 回行った。



8. 測定結果

測定結果を図 1 1 に示す。

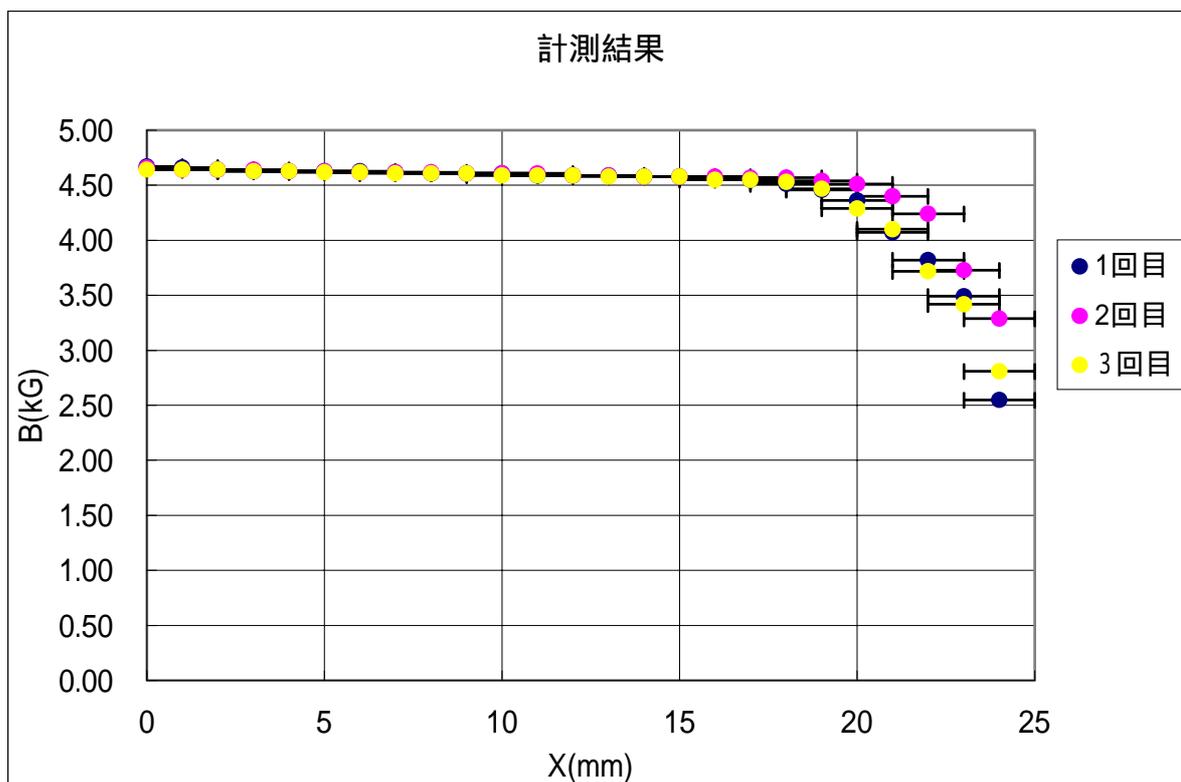


図 1 1 測定結果

$X > 18\text{mm}$ の測定位置で 3 回の測定にばらつきが見られる。これは測定位置の再現性と磁場強度の一意性に原因があると思われる。ポールピースの中心から離れた場所では磁場強度の一意が悪くなる。 $\frac{dB}{dX}$ が大きいところでは X が少しずれても (dX 小) B の変化が大きくなる。 $\frac{dB}{dX}$ の大小によって位置のばらつきが B に及ぼす影響の大小が決まる。今回必要とされるデータは中心部なのでこのばらつきは問題視しなくてよい。また、各計測結果には誤差棒がついている。これは、計測間隔が 1mm としたためである。

9. 考察

9-1 実測値、計算値、昨年度との磁場強度比較

図 1 2 に実測値と昨年度の磁場強度、図 1 3 に実測値と計算値の比較を示す。実測値は計測結果の平均をとったものである。

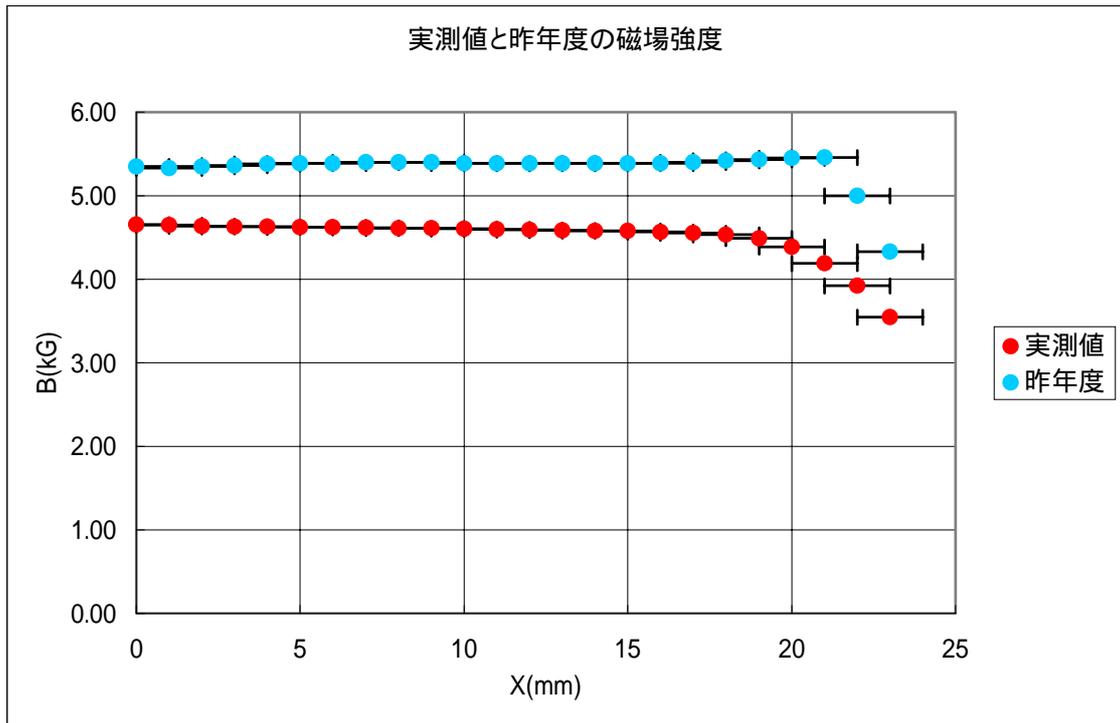


図 1 2

今年度は去年度に比べポールピースの直径が 2mm 短い。そのため磁場強度が急激に減少する位置が去年度よりポールピースに近い位置で確認できる。

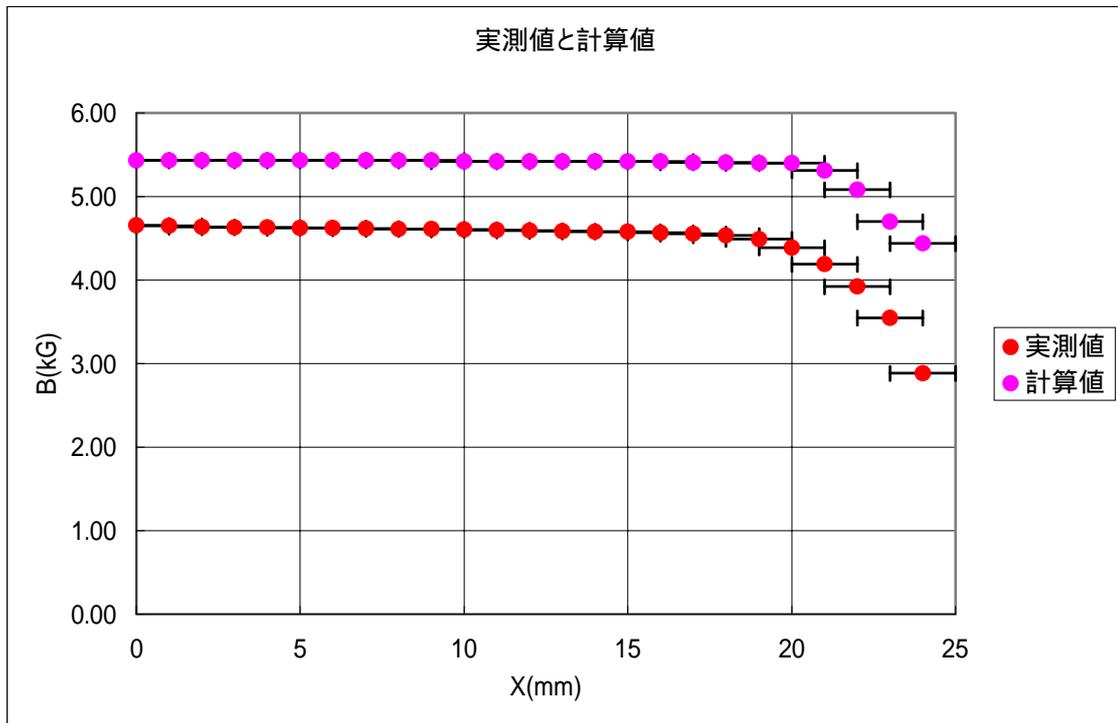


図 1 3 実測値と計算値

中心で実測値は計算値の 83% となった。では実測値と計算値に生じた理由を検証してみる。

- A. ボルト用の穴あけ精度が悪い
- B. 電磁鋼板の加工精度が悪いため寸法にばらつきがある。

	設計誤差(mm)	加工誤差(mm)
A	±0.1	±1.0
B	±0.1	±0.2

A と B のためにリターンヨークの接合部分に 0.7mm の隙間ができてしまった。磁力線は N 極から S 極へと閉曲線を描く。そのため磁力線が空気を通過する隙間では磁場強度が弱くなり全体に影響を与えると予想される。これが計算値と実測値に 17% の差を出した原因ではないかと予想する。次にこの隙間を検証してみる

9-2 リターンヨークの隙間が磁場強度に及ぼす影響

図 1 4 に示すようにリターンヨークに 0.7mm の隙間を作った電磁石の磁場強度を Poisson-Superfish を使い計算する。0.7mm の隙間は実際に製作した H 型電磁石の隙間を測定したものである。

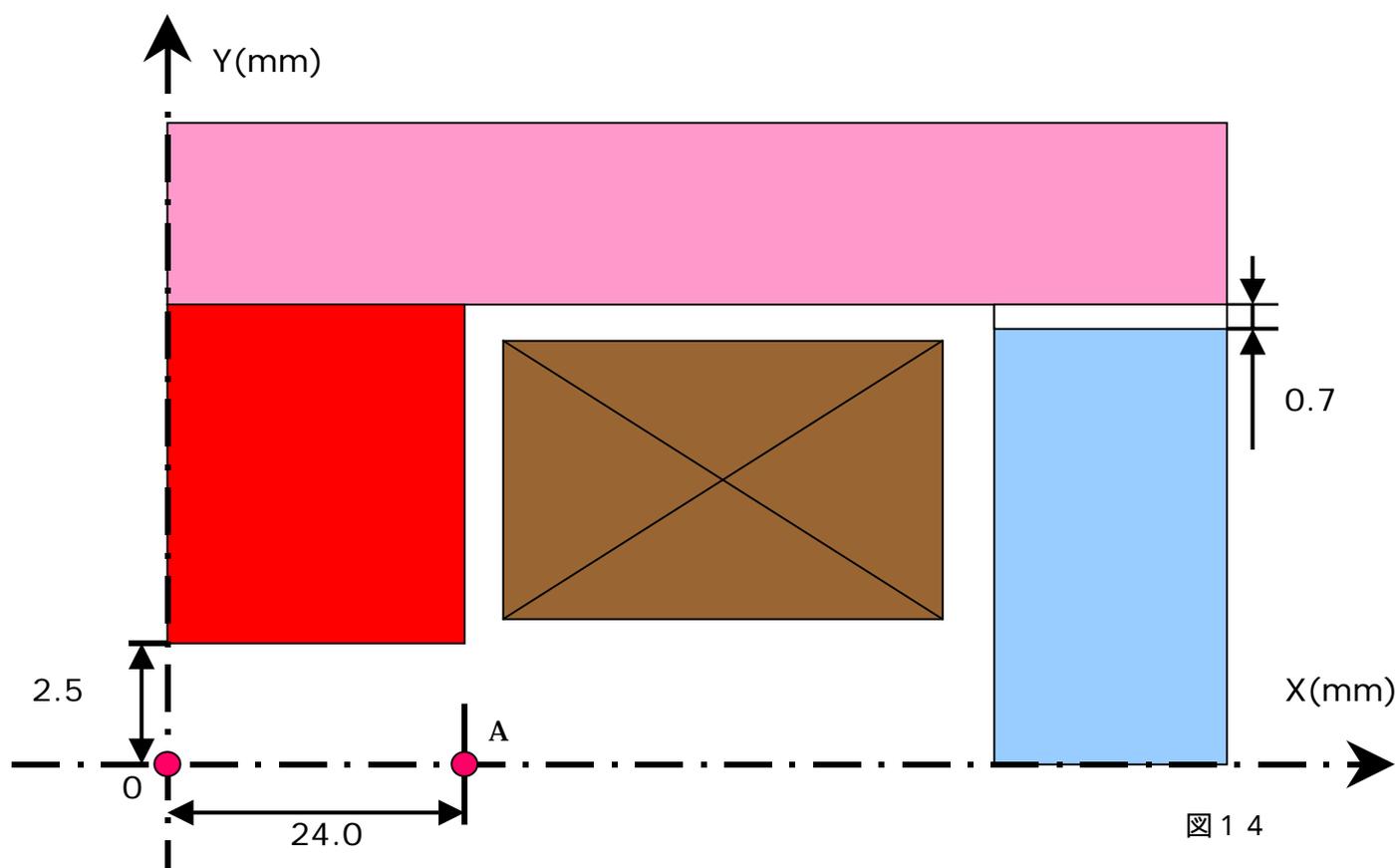


図 1 5 に実測値を基準としたときの隙間が磁場強度に及ぼす影響を示す。

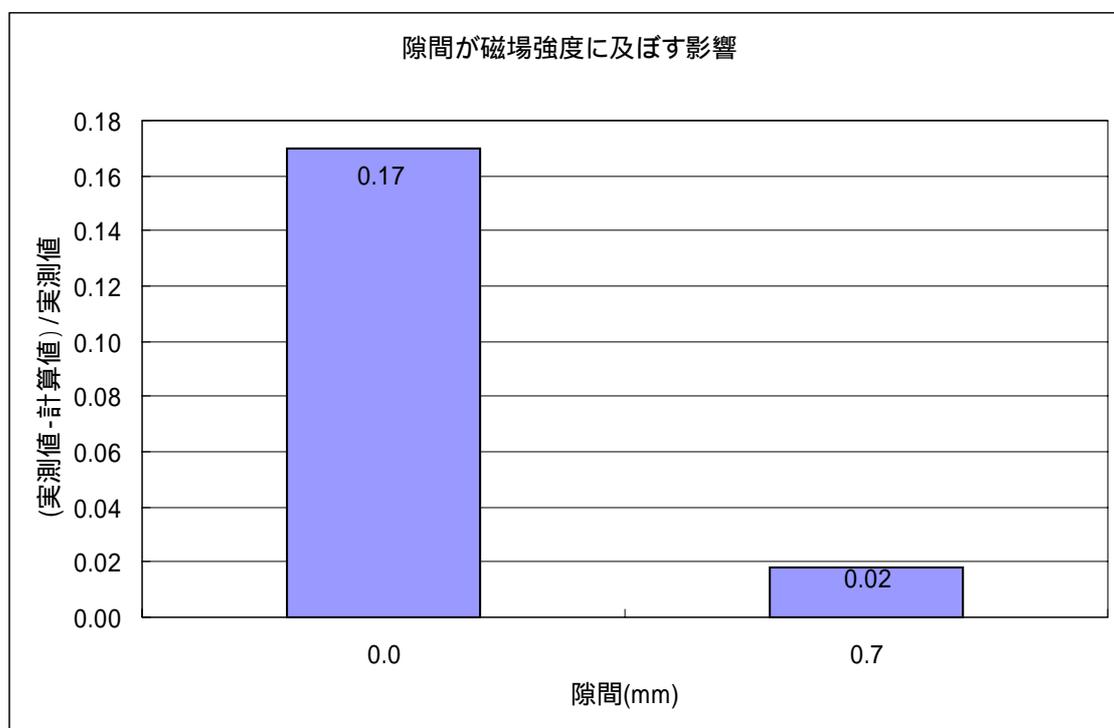


図 1 5 隙間が磁場強度に及ぼす影響

この 0.7mm の隙間を考慮に入れることにより計算値と実測値の差は約 2%になる。計測に用いたガウスメーターの精度 1%を考えるとほぼ一致する。よって最初の実測値と計算値の差は主にリターンヨーク間の隙間に原因があると考えられる。また磁性体の透磁率を 5%変化させても磁場に及ぼす影響は約 0.4%である。

10. 結論

今回の研究によってある条件下で実測値と計算値の差を 2%にすることができた。ある条件とは 0.7mm の隙間を設計段階で考慮することである。この形状の変化は加工時に発生した「加工誤差」である。設計段階で形状の変化を考慮すれば計算値は実測値を $\pm 2\%$ の精度で再現することができる。

11. 参考文献

1. Poisson-superfish

このソフトウェアはロスアラモス国立研究所によって合衆国政府契約W - 7 4 0 5 - ENG - 3 6の下で作り出されたものです。入手場所については下記のURLを参照してください。

<http://laacg1.lanl.gov/laacg/services/possup.html>

2. 「科学者と技術者のための物理学」

学術図書出版社

Raymond A. Serway 著

松村 博之 訳

3. 改訂版「物理学事典」縮刷版

株式会社 培風館

4. 珪鋼商事株式会社

URL : <http://www.keikou-shoji.com>

E-mail : info@keiko-shoji.com

小社加工開発部 清瀬さんに図7「磁化曲線」をいただきました。

A. 付録

A-1 Input file

Input file の内容を示す。

H-Shaped Magnet with special options [User's Guide 10.2]

; Copyright 1998, by the University of California.

; Unauthorized commercial use is prohibited.

```
&reg kprob=0,           ; Declares a POISSON problem
dx=0.1                 ; Mesh interval
xmax=10.,ymax=7.5,     ; Upper limits of geometry boundary
mode=0,                ; Use B,gamma table for material 2
ktop=25,               ; Field interpolation at 4 points along X
ltop=1,                ; Field interpolation at 3 points along Y
xminf=0,xmaxf=2.4,     ; X range for field interpolation
yminf=0,ymaxf=0.2,     ; Y range
xbzero=0.,ybzero=0.
icylin=0 &
```

```
&po x=0.,y=0. &        ; Start of the air-region points
&po x=10.,y=0. &
&po x=10.,y=7.5 &
&po x=0.,y=7.5 &
&po x=0.,y=0. &
```

```
&reg mat=2, mtid=2, mshape=-1 &           ; Start of the iron region
&po x=0.,y=0.25 &
&po x=2.4,y=0.25 &
&po x=2.4,y=5.5 &
&po x=0.0,y=5.5 &
&po x=0.0,y=0.25 &
```

```
&mt mtid=2,           ;ポールピースの透磁率
```

mu=300 &

® mat=3, mtid=3, mshape=0 &

; 方向性電磁鋼板

&po x=0.,y=7.5 &

&po x=0.,y=5.5 &

&po x=10.,y=5.5 &

&po x=10.,y=7.5 &

&po x=0.,y=7.5 &

&mt mtid=3,

; 方向性電磁鋼板の磁化曲線

bh=0.1e+04 0.238

0.2e+04 0.388

0.3e+04 0.400

0.4e+04 0.463

0.5e+04 0.538

0.6e+04 0.600

0.7e+04 0.688

0.8e+04 0.776

0.9e+04 0.901

1.0e+04 1.080

1.1e+04 1.310

1.2e+04 1.750

1.3e+04 2.690

1.4e+04 5.130

1.5e+04 15.000

1.6e+04 46.300

1.7e+04 83.800

1.8e+04 131.000

1.9e+04 269.000 &

® mat=4, mtid=4, mshape=0 &

; 無方向性電磁鋼板

&po x=8.,y=0. &

&po x=10.,y=0. &

&po x=10.,y=5.5 &
&po x=8.,y=5.5 &
&po x=8.,y=0. &

&mt mtid=4,
bh=0.1e+04 0.0322
0.2e+04 0.0525
0.3e+04 0.0651
0.4e+04 0.0726
0.5e+04 0.0826
0.6e+04 0.0901
0.7e+04 0.0963
0.8e+04 0.1050
0.9e+04 0.1100
1.0e+04 0.1180
1.1e+04 0.1250
1.2e+04 0.1380
1.3e+04 0.1560
1.4e+04 0.1750
1.5e+04 0.2190
1.6e+04 0.2880
1.7e+04 0.4380
1.8e+04 0.9380
1.9e+04 4.0000
2.0e+04 125.0000 &

; 無方向性電磁鋼板の透磁率

® mat=1,cur=-1173. &
&po x=2.6,y=.5 &
&po x=7.8,y=.5 &
&po x=7.8,y=5. &
&po x=2.6,y=5. &
&po x=2.6,y=.5 &

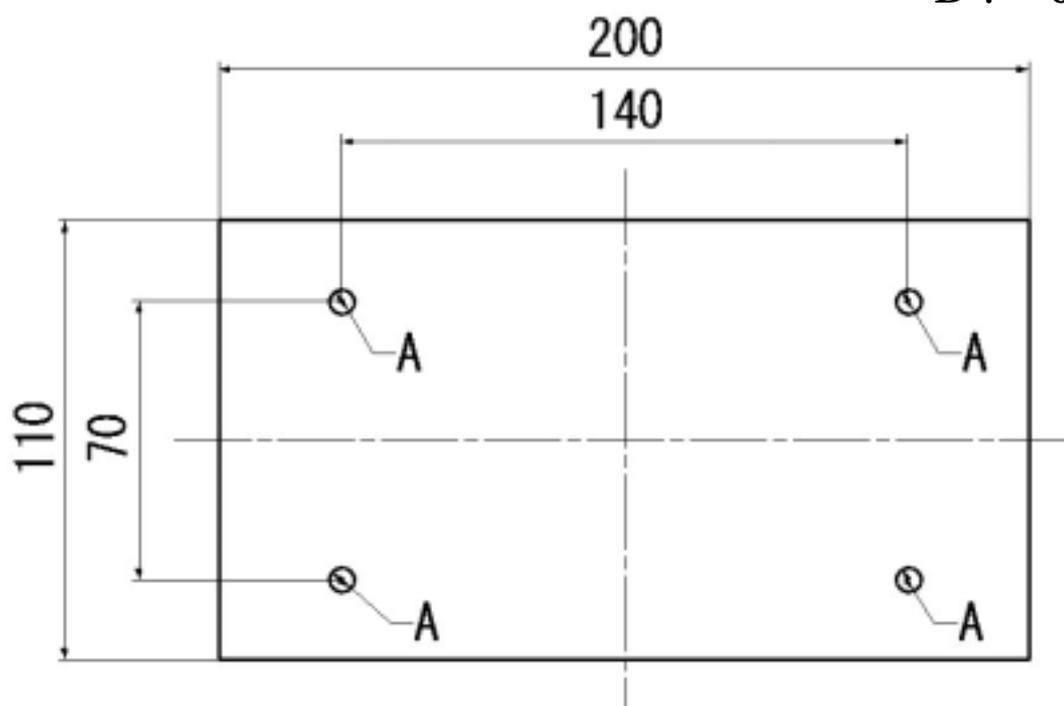
; 流す電流と導線の巻き数の積

A-2 部品図

[1] 方向性電磁鋼板

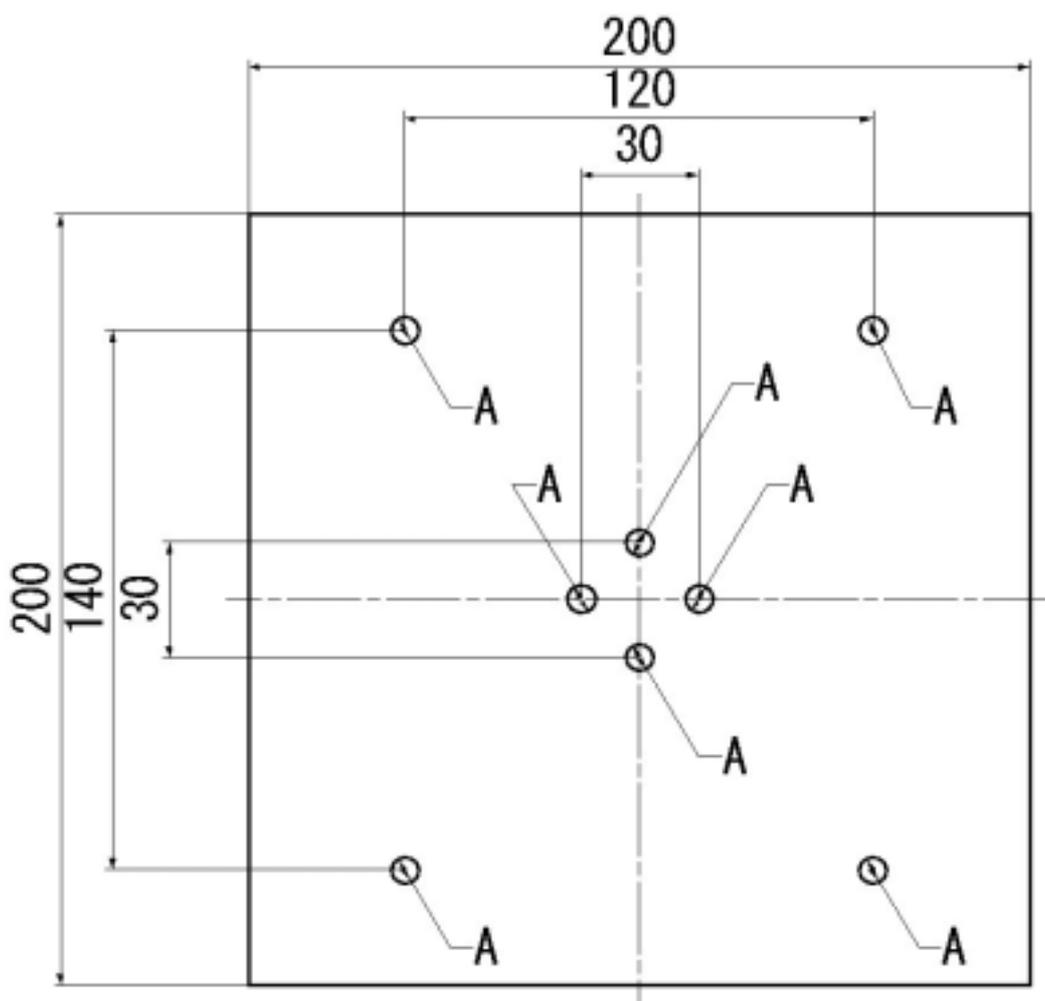
A : 7

D : 6



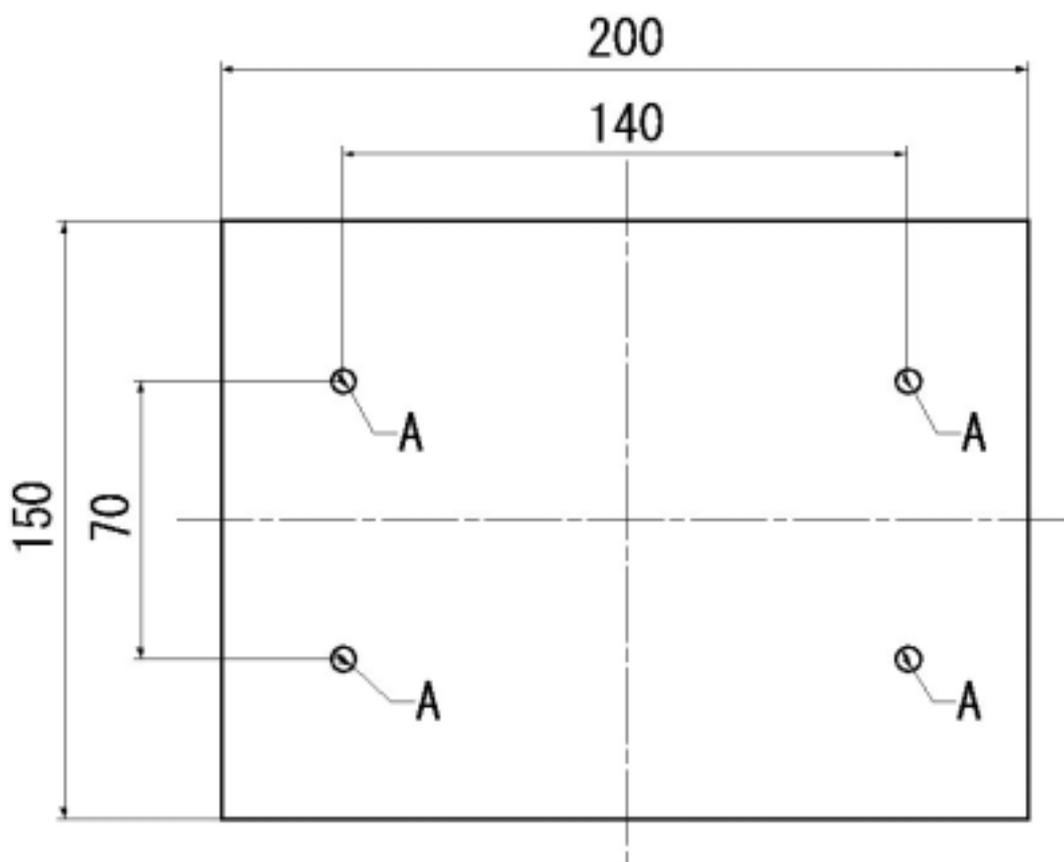
リターンヨークの横板に使用している方向性電磁鋼板である。200mmを水平方向とすると垂直方向に磁化しやすい特性である。厚さ0.35mmのものを57枚重ねて使用する。

[2] 無方向性電磁鋼板



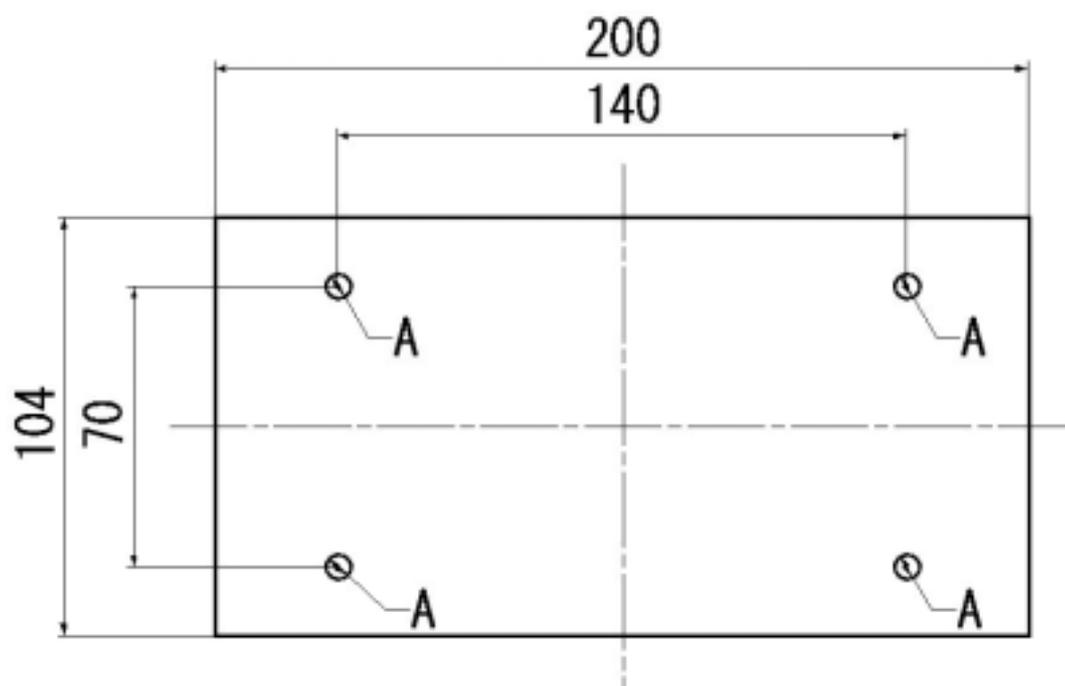
リターンヨークの上部と下部に使用している無方向性電磁鋼板である。磁化特性に方向性を持たない磁性材料である。厚さが 0.5mm のものを 40 枚重ねて使用する。

[3] アルミニウム側板 1



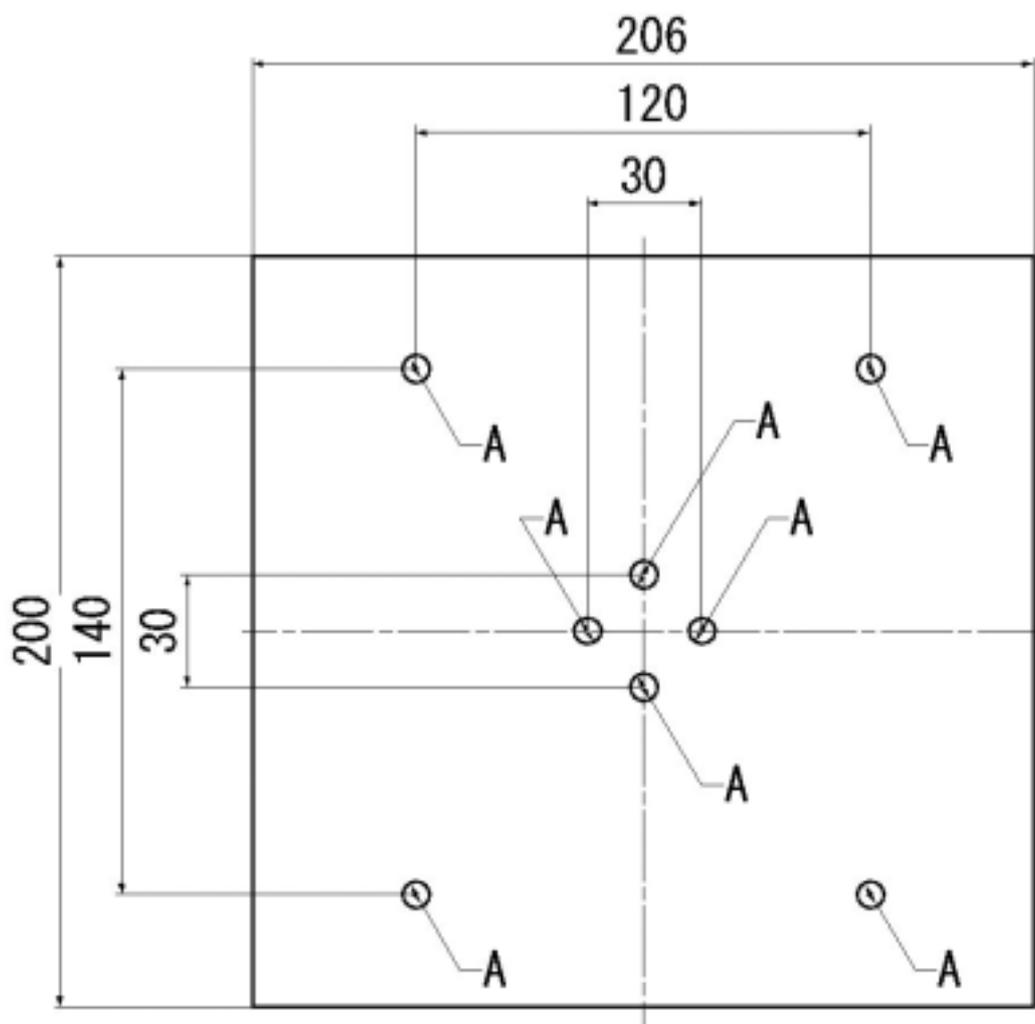
層状の方向性電磁鋼板を挟んで固定するためのアルミニウム板の側板で外側に使用する。

[4] アルミニウム側板 2



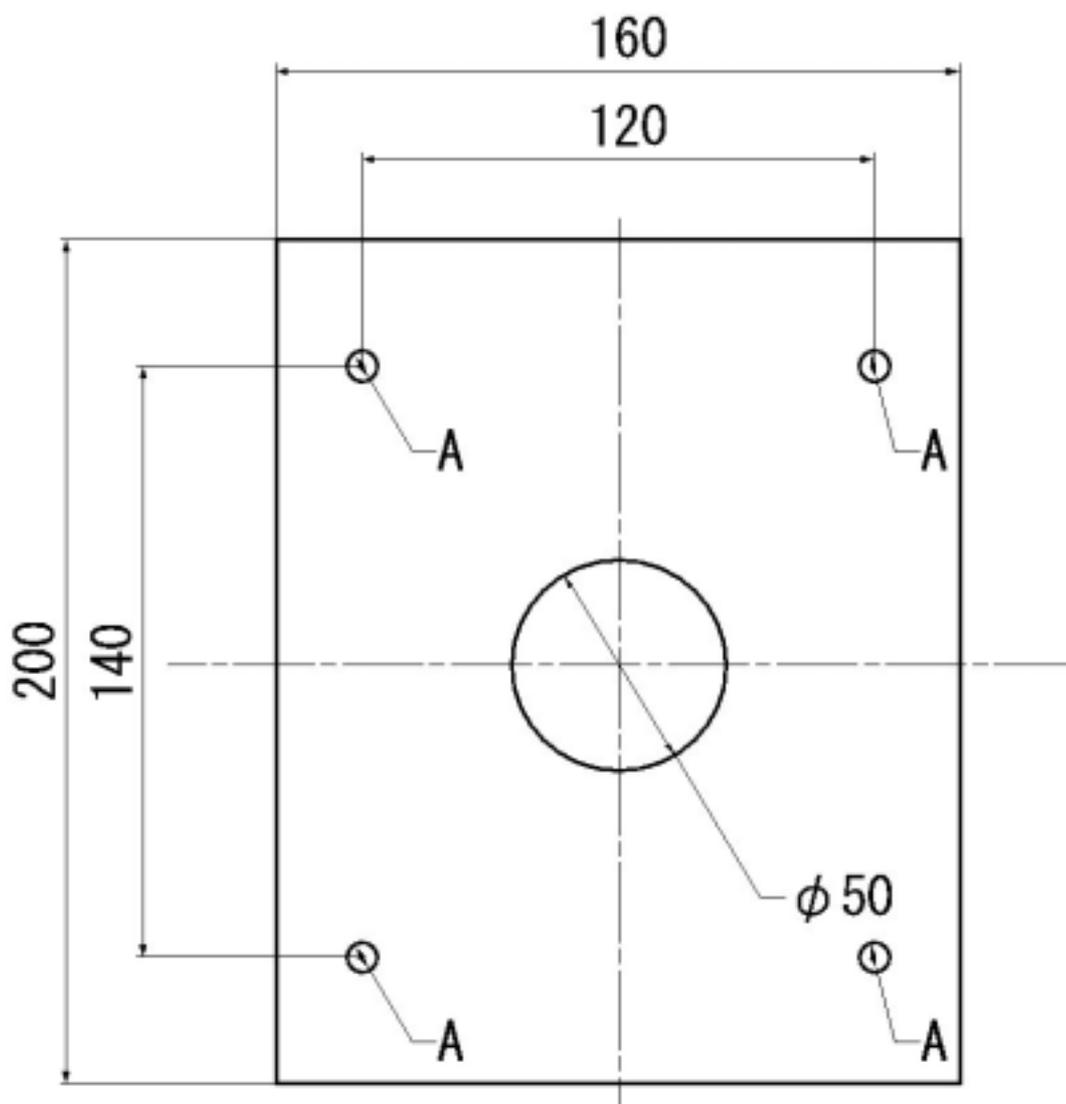
層状の方向性電磁鋼板を挟んで固定するためのアルミニウム板で側板の内側に使用する。

[5] アルミニウム天板 1



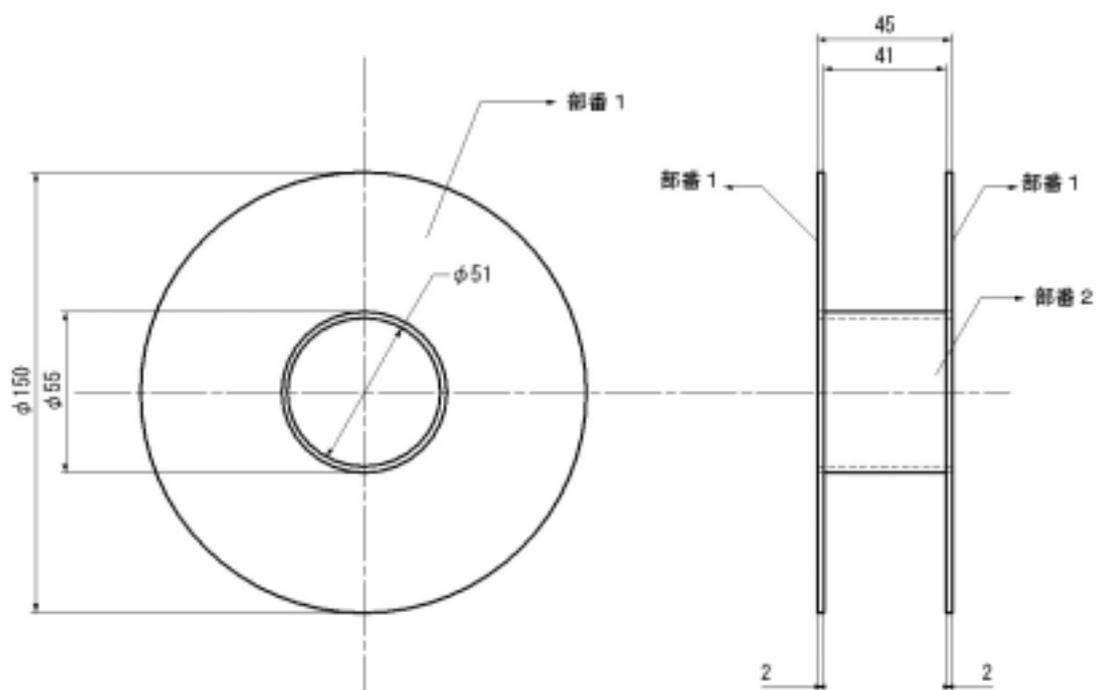
層状の無方向性電磁鋼板を挟んで固定するためのアルミニウム板で天板の外側に使用する。

[6] アルミニウム天板 2



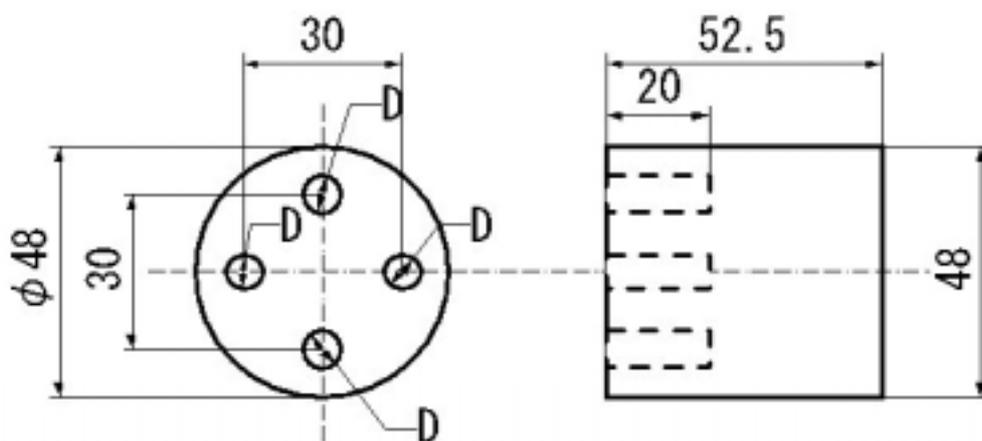
層状の無方向性電磁鋼板を挟んで固定するためのアルミニウム板で天板の内側に使用する。

[7] ボビン



コイル状に巻いた導線を固定するためのボビンである。

[8] ポールピース



強磁性体である純鉄を使用する。

謝辞

最後に終始監督助言をくださいました百田佐多生先生（現高知工科大学 知能機械システム工学科講師）に心から感謝いたします。また、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）に物理学に関して貴重な助言とご指導をいただきましたことを深く感謝いたします。

Vector works を用いた設計図製作をしてくれた濱口君。強度計算を担当してくれた高巢君。材料選定、「巻巻君3号」の製作をしてくれた小川君。皆様のおかげで卒業研究を無事終えることができました。この場を借りて心より感謝の意を表します。