

卒業論文

ヘルムホルツコイルを使った  
ガウスメーターの較正

高知工科大学 知能機械システム工学科

量子ビーム研究室

1030088

秋山 太一

## 目次

- 1 . 研究目的
- 2 . ヘルムホルツコイルが作る磁場
  - 2 - 1 リターンヨークの役割
  - 2 - 2 ヘルムホルツコイルが作る磁場
- 3 . ヘルムホルツコイルの設計
  - 3 - 1 磁場計算
  - 3 - 2 構造 設計
  - 3 - 3 材料
  - 3 - 4 設計図
- 4 . ヘルムホルツコイルの製作
  - 4 - 1 ヘルムホルツコイルの製作手順
  - 4 - 2 完成図
- 5 . 磁場の測定
  - 5 - 1 測定装置
  - 5 - 2 測定方法
  - 5 - 3 測定結果
- 6 . 考察
- 7 . 結論
- 8 . 参考文献

## 1.研究目的

### ガウスメーターの較正

ガウスメーターの較正を行う磁石には次の条件が必要である。

- ・ 中心付近での磁場強度の一様性
- ・ 磁場強度の再現性

今回上記の条件を満たすのにヘルムホルツコイルを製作してガウスメーターを較正した。

### ものづくりの技術の習得

ヘルムホルツコイルを製作するにあたって様々な技術能力を身につける。

今回は特に下記の能力が身についた。

- ・ CAD 操作
- ・ 工作技術
- ・ 磁場測定

## 2.ヘルムホルツコイルが作る磁場

### 2-1 リターンヨークの役割

	リターンヨークあり	リターンヨークなし
強磁性体	ある	ない
ヒステリシスループ	ある	ない
磁場強度の再現性	あまりない	ある
磁場強度	強い	弱い

表 1 リターンヨーク有無の比較

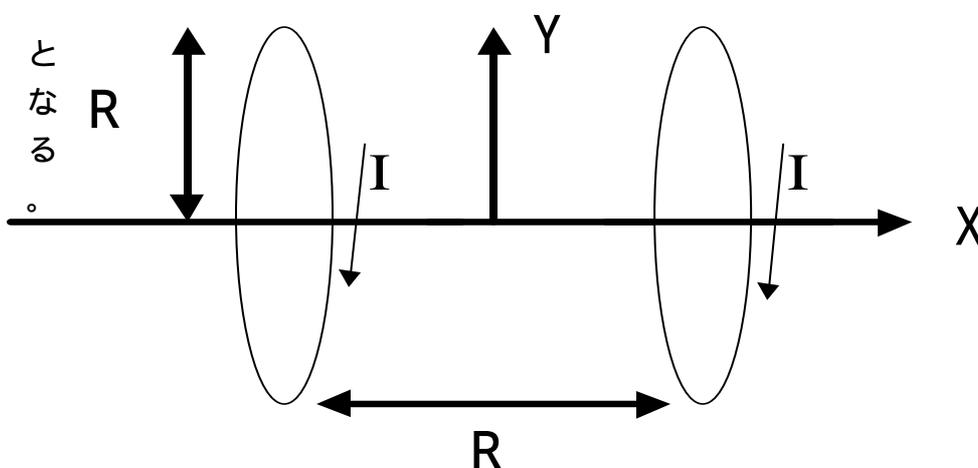
表 1 からリターンヨークがあるほうでは磁場強度の再現性があまりない。これは一度強磁性体が磁化してしまうと電流を流さない状態でも、磁束密度が残ってしまう（残留磁化）ため磁場校正の観点から磁性体は使えない。そのためガウスマーターの校正をするためには、磁場強度の再現性がある空芯コイルが適当であると判断した。

### 2-2 ヘルムホルツコイルが作る磁場

ヘルムホルツコイルの特徴は空芯であることである。強磁性体をヨークとして使用していないので、ヒステリシスループがなく磁場の再現性が良い。また2つのコイルの距離をそのコイルの半径と等しく配置すると中心付近では一様性のある磁場分布が得られる。以上の事は磁束密度を測定する装置であるガウスマーターの校正に適している。

ヘルムホルツコイルが作る磁束密度は以下の式で表される。

$$B = \mu_0 \times \left(0.716 \frac{I}{r}\right) \times 10^4 \text{ 「G」}$$



### 3. ヘルムホルツコイルの設計

#### 3 - 1 磁場強度計算の目的

ヘルムホルツコイルの製作で一番重要な点は設定した磁束密度を正確にコイルの中心に発生させる事である。この目的のためにはヘルムホルツコイルが適当である事を前の章で述べた。今回は、導線の直径 1 mm で 5 A 流したときに磁場密度  $B = 100 \text{ G}$  発生するヘルムホルツコイルを製作することを目標とした。この目標を達成するように、コイルのサイズと巻き数を決定した。

#### ・磁場計算

円電流が周囲に発生する磁場  $H$  は

$$H = \frac{ia^2}{2(a^2 + b^2)^{3/2}}$$

参考文献 3

$i$  = 電流

$a$  = 円の半径

$b$  = 中心からの測定距離

となる。

ヘルムホルツコイルは大きさの等しい 2 つのコイルの距離を図 4 のように、半径の距離と等しくなるように並べたものである。だからヘルムホルツコイルの発生する磁場は  $b = a/2$  として式 を 2 倍すると、

$$H = \frac{2ia^2}{2(a^2 + (a/2)^2)^{3/2}} = \frac{i}{a} \frac{1}{(\frac{5}{4})^{3/2}} = 0.716 \frac{i}{a}$$

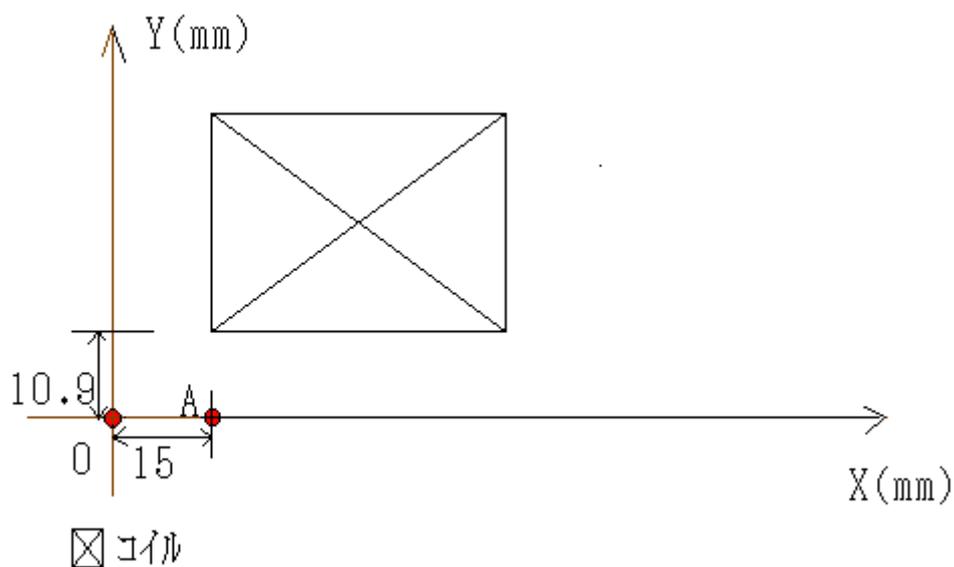
またこの式にコイルの巻き数  $n$  をかけると

$$H = 0.716 \frac{ni}{a}$$

$n$  = 巻き数

となる。この式を使えば原理的にヘルムホルツコイルが発生する中心の磁場計算する事ができる。しかし実際のヘルムホルツコイルを流れる電流は空間的に広がっているので計算が複雑である。そのため磁場解析ソフト Poisson-superfish (参考文献 ) を使いコイルの中心面で、 $X$  軸方向に 0 ~ 10 mm までの磁束密度を計算した。計算に使用した Input file を付録に示す。

磁場計算で使用した座標の取り方  
Poisson-superfish を使った磁束密度の計算のための座標の取り方を図に示す。



図ヘルムホルツコイルの断面図

図はヘルムホルツコイルの 1/4 断面図である。断面図の中心を 0 として水平方向を X 軸、垂直方向を Y 軸とする。中心 0 から X 軸方向に 15 mm 離れた点を A とする。0 ~ A 間を 1mm 間隔に分割して、磁束密度を計算する点とした。15mm はコイルの内径に等しい。

・計算結果

磁場計算によってサイズが半径24mmのボビンで巻き数86turnにすると、ヘルムホルツコイルの中心に約100G発生することがわかった。Input fileで設定した各点での磁場強度計算を図3.4に示す。図3はコイルの中心付近の一様性を見るためBの値を0~120Gまでで表示してある。図4は詳細な磁場分布を見るため90~110Gの区間で表示している。計算結果では中心付近が一様になっており左右対称である。

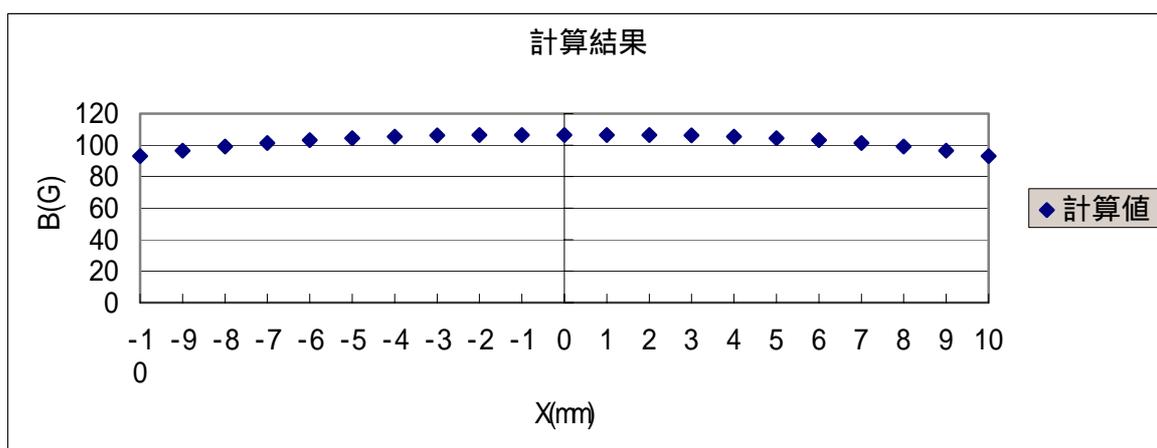


図3

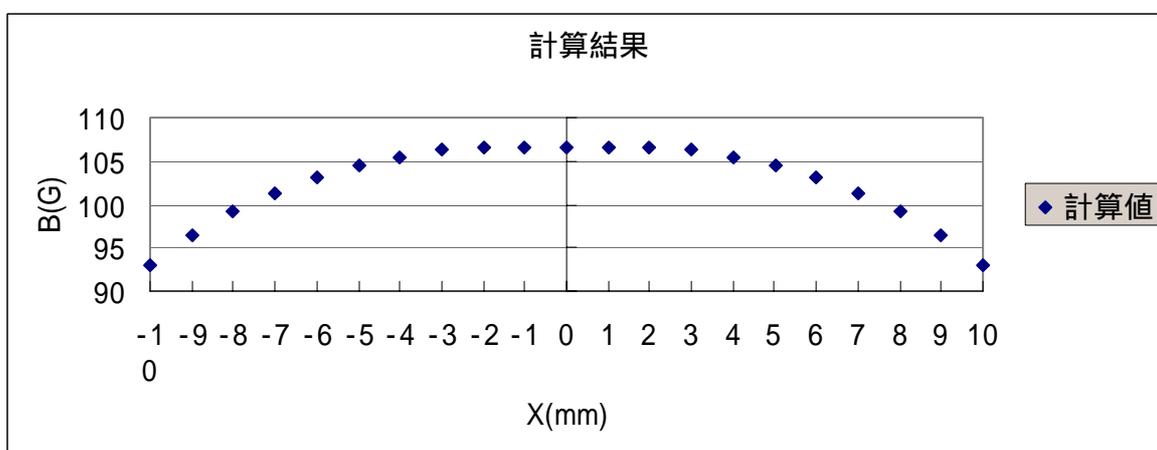


図4

### 3 - 2 構造 設計

計算結果を参考にしてボビンの半径を24 mmにした。このときボビンの内径は15 mmである。また巻き数は86 turn である。ボビンの素材には透磁率が $2.3 \times 10^{-5}$ なので磁場に影響を及ぼさないアルミをもちいた。製作するにあたって昨年度の問題点を改善した。昨年度の電磁石作製時に発生した問題点は以下のとおりである。

1 昨年度は導線を巻くとき外側に力がかかりボビン がたわんでしまった

今年はボビン を厚くして4 mmにした。

2 昨年度はボビンを発注した際 と を溶接で接合していたために導線を巻く部分が盛り上がっていた

今年はアルミ素材上記で述べたよう を厚くし 、 はボルトで接合した。

さらに今回はコイルの中心には強磁性体を配置しないため、コイル同志を固定するものだけというシンプルな構造になった。発生する磁場が100 Gのときにコイル同志に働く力が小さいため、ボビン同志の固定には加工しやすいアクリル板を使う事にした。ボビンとアクリル板の固定には接着剤を使う。またボビンの温度も室温から20 ぐらいしかあがらないので、ボビンに巻く導線の固定にも接着剤を使用した。

## ヘルムホルツコイルの設計

### 3 - 3 ヘルムホルツコイルの材料

材料の条件として 非磁性体である事 強度を視野に入れ検討した。

図2のようなヘルムホルツコイル製作のために、使用した材料は下記のとおりである。

- ・ アルミ素材部番  
外径 48mm 内径 20mm  $\mu = 2.3 \times 10^{-5}$
- ・ アルミ素材部番  
外径 30mm 内径 20mm  $\mu = 2.3 \times 10^{-5}$

部番 と部番 は島産業に製作を依頼し購入した。

- ・ アクリル板  $\mu =$  空気中と同等  
60×60mm 厚さ 5mm (二枚) 60×12mm 厚さ 10mm (2本) 60×20mm 厚さ 5mm
- ・ アクリルネジ  $\mu =$  空気中と同等  
M3×10mm 8本
- ・ 導線 (銅)  $\mu = 5.76 \times 10^{-7}$   
1mm 皮膜ポリエステル 0.15mm
- ・ ステンレスネジ  $\mu = 4.68 \times 10^{-7}$   
M3×10mm 16本

導線以外はホームセンターで購入した。

導線は (有) 芸陽社旭店で購入した。

### 3 - 4 設計図

以上の事を考慮に入れてヘルムホルツコイルの設計図を製作した。

設計図は付録に示す。

#### 4 . ヘルムホルツコイルの製作

##### 4 - 1 ヘルムホルツコイルの製作手順

###### ・ボビンの製作

- 1、 と の穴をあける位置をけがいた。次に穴の中心位置をポンチで窪みをつけた。
- 2、部番 と部番 をポール板を使い穴をあけた。このとき部番 には 3.3mm の穴をあけた。部番 は M3 のネジ穴を設けたいので 2.5 mm のドリルで下穴を開けた。下穴の数は十字にあけ計 8 箇所 × 2 である。
- 3、次に部番 の方は導線を通す 1.5mm の穴をあけた。
- 4、 と を 8 箇所のネジで固定した。
- 5、まきまき君 3 号改を使いボビンに導線を巻いた。このとき絶縁のためボビンと導線の間には紙 0.13mm を敷いた。巻き終わった導線を固定するため側面に接着剤をつけた。電流を流している間の導線の温度は 40 ぐらいと計算で導き出した。この接着剤 (スーパー X) は 90 まで耐えることができる。
- 6、ボビンは 2 個あるため上記のことを二回行った。

###### ・アクリル台

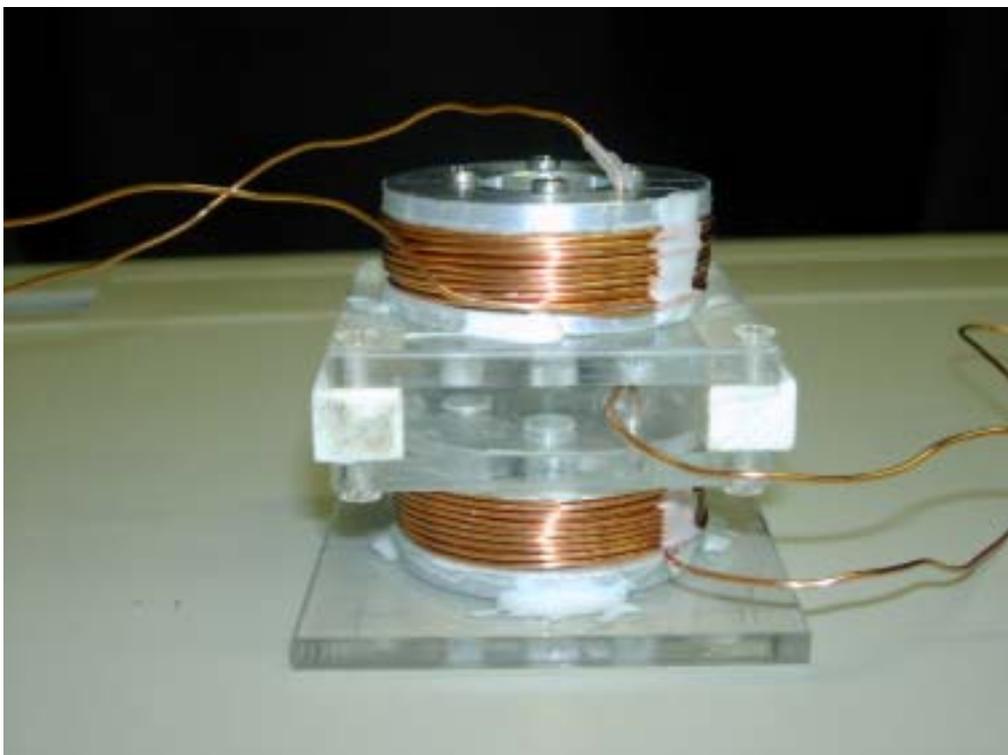
- 1、アクリル板の高さをヘルムホルツコイルの間隔 20 mm に合わせるため図 3 のように重ね合わせた。
- 2、2.5mm の穴をあけ、ネジ止めを行った。またボビンのネジ止め位置と同じ所に少し大きめの穴をあけ、ボビンとアクリル版が水平になるようにした
- 3、上下方向の強度を増すため一側面にアクリル板をつける事で補強を施した。

###### ボビンとアクリル板の接合

- 1、アクリル板の上下にボビンをのせ上下の面の平行度を信用して、y 軸方向の位置をノギスで測り側面からボンドで固定した。
- 2、x 軸はアクリル板の平行度により上下のボビンは平行であり、y 軸は上記で述べた事から y 軸、x 軸を固定し測定を行った。

#### 4-2.完成図

製作したヘルムホルツコイルを示す。



これより上のボビンをボビン A,下のボビンをボビン B とする。

## 5.磁場の測定

### 5 - 1 . 測定装置

磁場強度を測定するための装置は以下の通りである。

- ・ 電源 NIPPON STABILIZER INDUSTRAY CO.LTD.  
DC POWER SUPPLY SIC-1V10
- ・ 電流計 KENWOOD DIGITAL MULTIMETER  
MODEL DL-712
- ・ ガウスメーター 東洋テクニカ  
5080 型ハンディーガウスメーター

用意する器具

- ・ 定盤 UNI . SEIKI
- ・ 高さゲージ code No514-102 Model Hs-30
- ・ ジャッキ
- ・ ノギス Mitutoyo No7579540
- ・ 定規 シンク CN9510

以上の装置から図のような配置で測定を行った。

電源とコイル A とコイル B は直列につないである。そしてコイル A とコイル B の間に電流計を設置した。コイルに電流 5.00A を流し発生した磁場強度をガウスメーターで測定した。測定位置はヘルムホルツコイルの中心から X 軸方向に - 10 ~ + 10mm の間を 1 mm きざみで移動させた。この測定を 7 回行った。

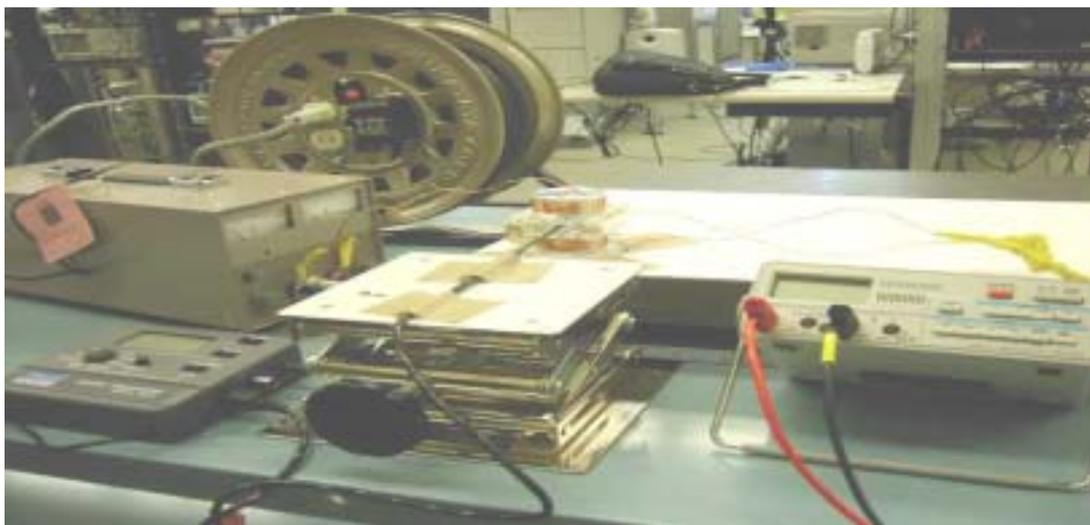
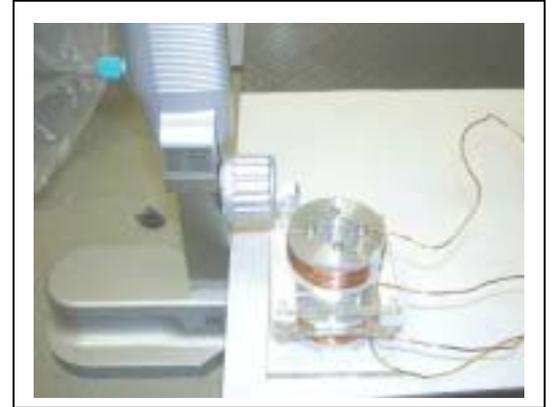


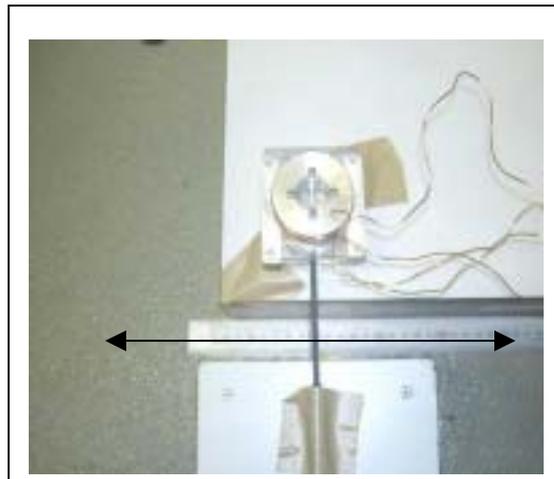
図 5

## 5 - 2 . 測定方法

- 1 . 定盤の上にボビンを載せる。このとき絶縁のためヘルムホルツコイルの下に紙を敷く。定盤の側面と高さゲージの側面を合わせ、高さゲージとアクリル台の垂直面を合わせる。アクリル台の側面はあらかじめ垂直に取り付けてある。
- 2 . ボビンの中心を決定するため高さゲージで平衡台の高さと、ボビンとボビンの間の距離を測る。ボビンとボビンの中心をとりジャッキをその高さにあわせガウスメーターを取り付ける。
- 3 . ガウスメーターの設置面が中心位置より高くホール素子部分の先端が少し上がっている為、そのずれ考慮し高さを調整する。



- 4 . 平衡台とジャッキの間に定規を設置し 1 mm づつずらして各位置の磁場強度を測定する。



### 5-3 測定結果

測定結果を図 6 , 7 に示す。

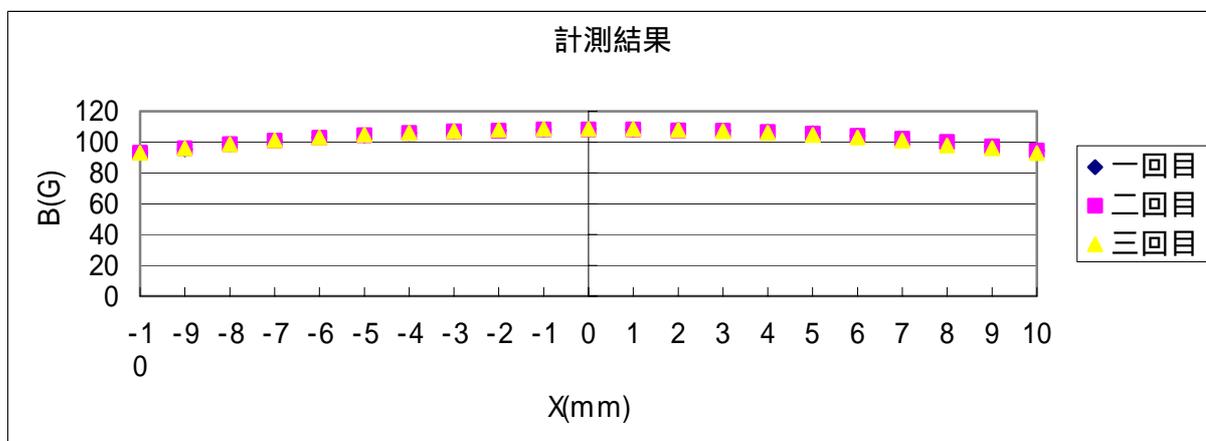


図 6

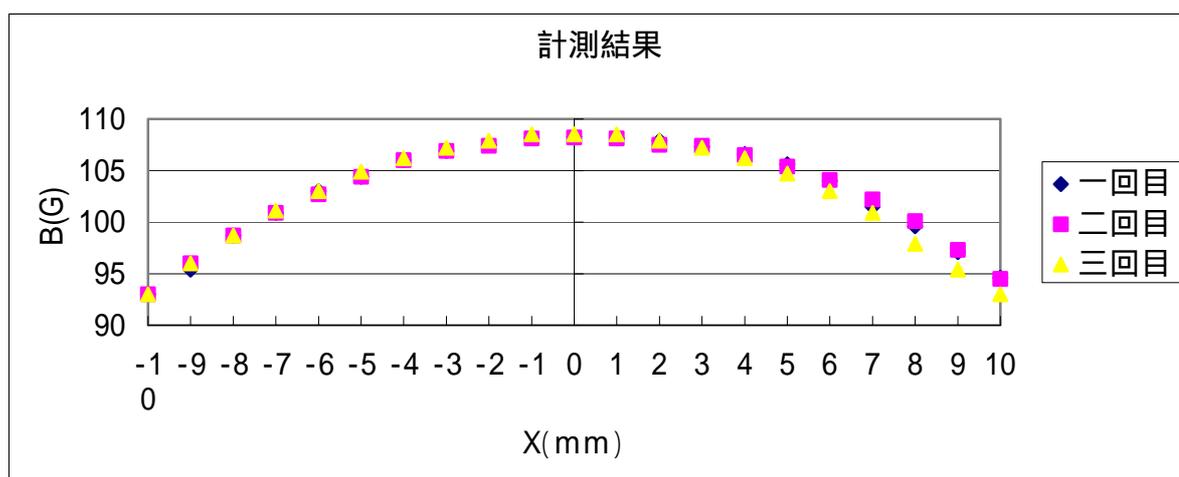


図 7

ヘルムホルツコイルの中心付近で一様な磁場が発生していることがわかる。中心から離れるに従って、徐々に磁場強度が小さくなる。また  $X=0$  を中心にして対称な分布だということがわかる。

図 6 は各磁場強度の再現性を見るため縦軸を 90~110G に拡大したものである。測定は計 3 回行った。1 回目と 2 回目は気温 19 で、日を変えて測定したものである。三回目は磁場強度の再現性を見るため気温は同じで測定器具を組み直して測定を行った。3 つの測定値の相対誤差は  $\pm 0.3$  以内であった。3 回目の磁場分布が少しずれているのは中心からのホール素子の位置決めが少しずれたためであると考えられる。

## 6 . 考察

### 6 - 1 計算値と実測値の磁場強度比較

計算値と実測値の磁場強度を図 8 , 9 に示す。

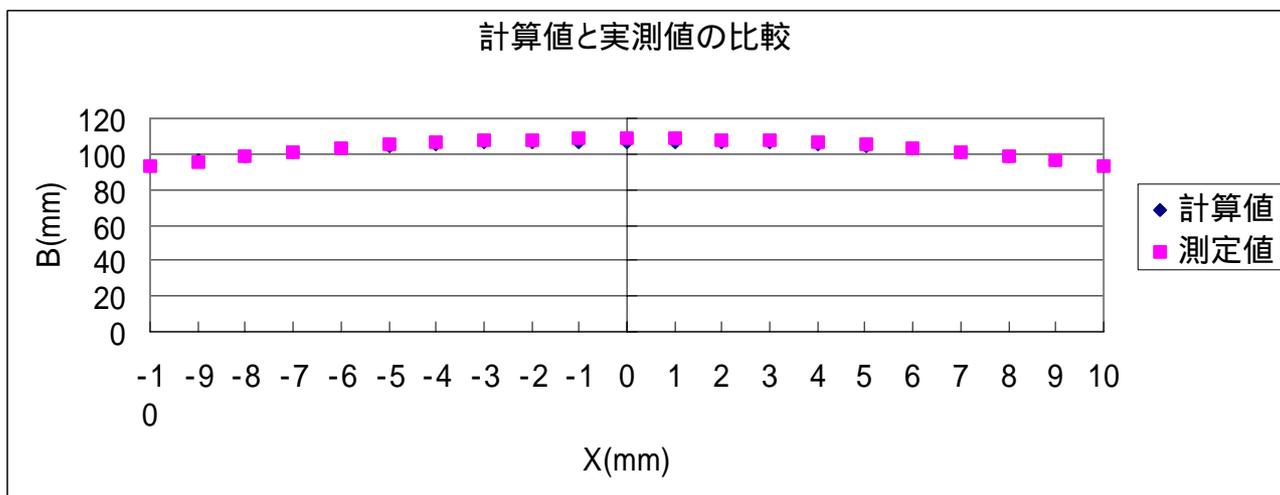


図 8

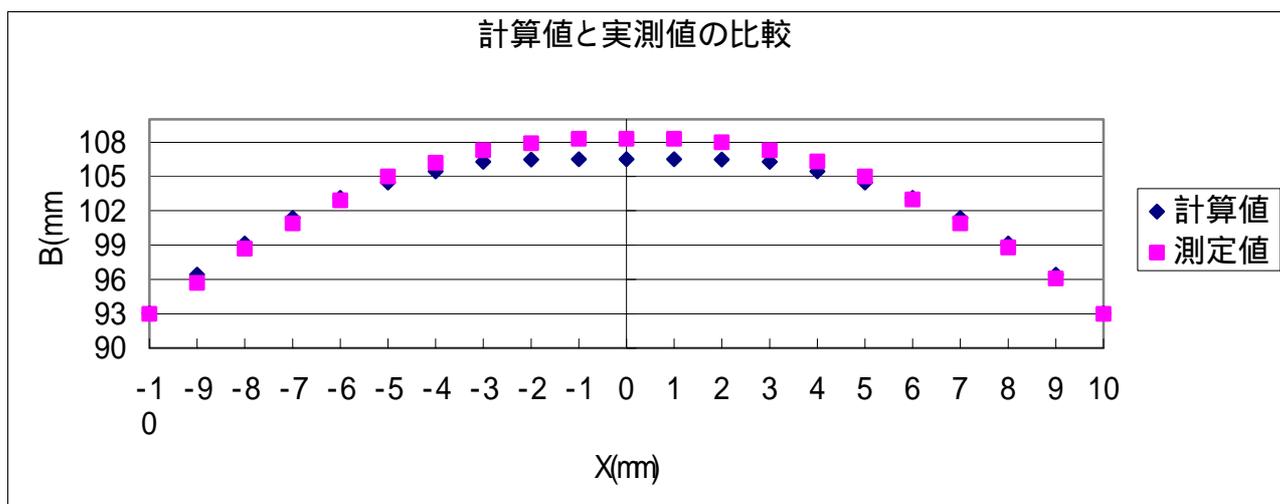


図 9

計算値と実測値の平均誤差が 0.5% になった。また中心付近での誤差が大きく 1.2% にもなった。誤差のグラフを付録に示す。その原因としてアクリル板に対するボビンの傾きが考えられる。製作の際ボビン B がアクリル板に対して平行に接着できず傾いてしまった。そのためボビン B が水平方向から 1 . 1 mm 傾いているのでその効果を Input file に入れ Poisson-superfish で再度計算を行った。

ボビンの傾きを考慮に入れた磁場計算の結果は図 10 ,11 のようになる。

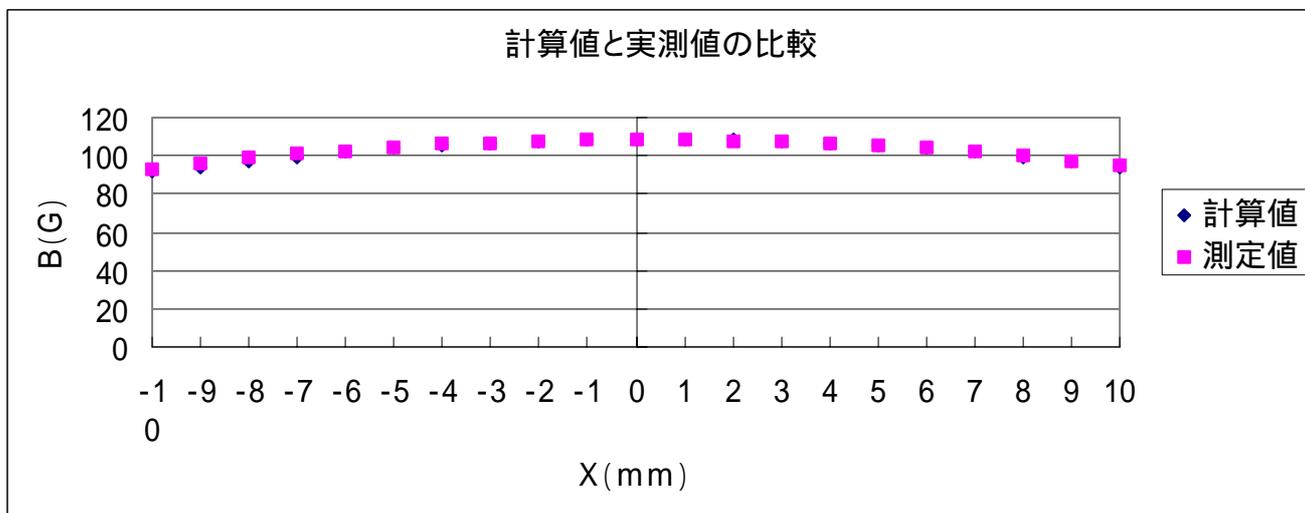


図 10

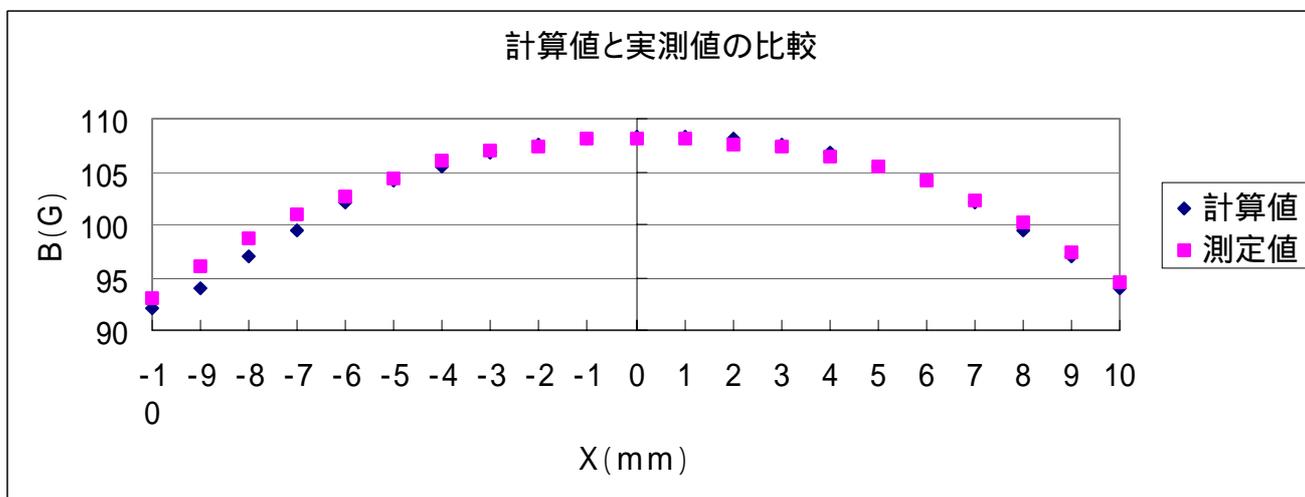


図 11

誤差を加えた計算値と実測値の平均誤差は $\pm 0.04\%$ となり、中心付近での誤差は $\pm 0.09\%$ となった。

## 7. 結論

今回目標通りのガウスメーター較正に使用できるヘルムホルツコイルの製作ができた。しかしボビンBがアクリル板に対して傾いているため中心付近で最初の計算値からのずれが生じてしまった。だが実際に製作したコイルの傾きを考慮に入れて計算しなおすと実測値と近い値がはじき出された。

1. 磁場強度の再現性が立証された。

5-2 で示したような測定方法で磁場強度の測定をしてもホール素子の位置が同じであれば常に前の値と同じ数値を測定することができる。

2. 中心付近での磁場強度の一様性が立証された。

中心付近では常に一様な磁場が発生していることがわかった。

以上のことから今まで使用していたガウスメーターの磁場強度測定値は信頼できるものと断言できる。また今回製作したヘルムホルツコイルはガウスメーター較正装置として使用できる。

## 8 . 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-7405-END-36 の下で作りに出されたものです。入手場所については下記の URL を参照して下さい。

<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 . 「磁気工学の基礎」

株式会社 共立出版

太田恵造 著

### 4 . 電磁気ハンドブック

株式会社 聖文社

霜田光一 著

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=15.,ymax=10      ;Upper limits of geometry boundary
mode=0.1,              ;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=-15,xmaxf=15    ;X range for field interpolation
yminf=-10,ymaxf=10    ;Y range
xbzero=0.,ybzero=0
icyli=0&
```

```
&po x=0.,y=0.&         ;Start of the air-region points
&po x=15.,y=0.&
&po x=15.,y=10.&
&po x=0.,y=10.&
&po x=0.,y=0.&
```

```
&reg mat=1, cur=-437.5.&           ;流す電流と導線の巻き数の積
&po x=0.15.,y=0.13.&
&po x=0.24.,y=0.13.&
&po x=0.24.,y=1.13.&
&po x=0.15.,y=1.13.&
&po x=0.15.,y=0.13.&
```

&reg mat=1, cur= 437.5.&

; ボビン右下の座標

&po x= 0.15.,y=0.24.&

&po x= 0.24.,y=0.24.&

&po x= 0.24.,y=1.24.&

&po x= 0.15.,y=1.24.&

&po x= 0.15.,y=0.24.&

&reg mat=1, cur=437.5.&

; ボビン左上の座標

&po x=0.15.,y= 0.13.&

&po x=0.24.,y= 0.13.&

&po x=0.24.,y= 1.13.&

&po x=0.15.,y= 1.13.&

&po x=0.15.,y= 0.13.&

&reg mat=1, cur= 437.5.&

; ボビン左下の座標

&po x= 0.15.,y= 0.13.&

&po x= 0.24.,y= 0.13.&

&po x= 0.24.,y= 1.13.&

&po x= 0.15.,y= 1.13.&

&po x= 0.15.,y= 0.13.&

傾きを考慮した 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.

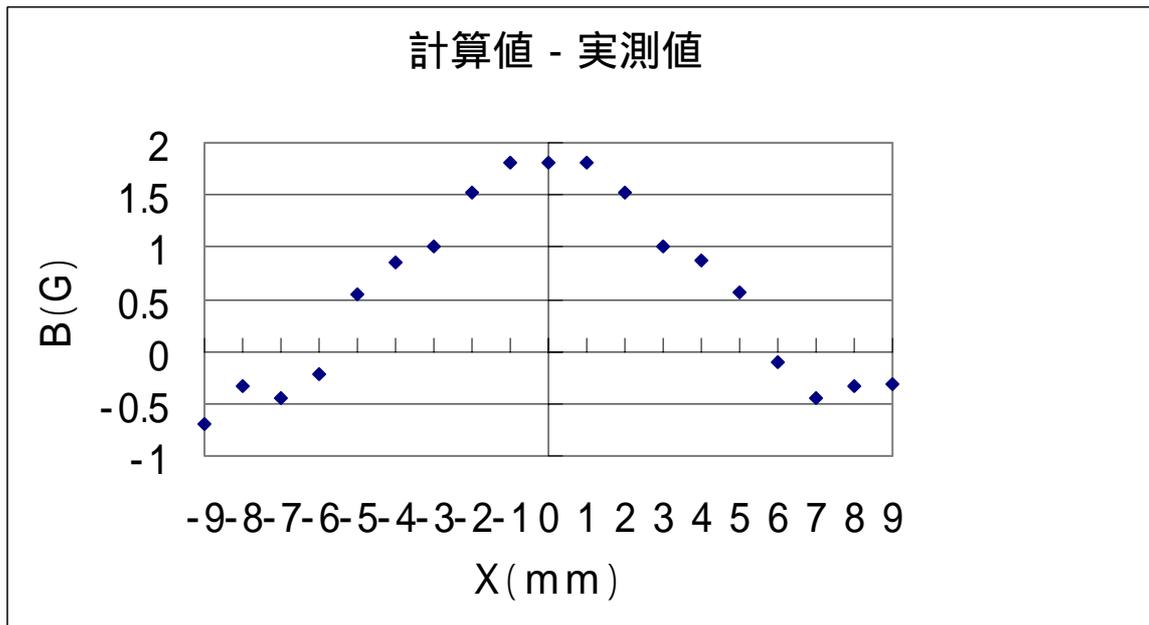
```
&reg kprob=0,           ;Declares a POISSON problem
dx=0.1                 ;mesh interval
xmax=15.,ymax=10      ;Upper limits of geometry boundary
mode=0.1,              ;Use B,gamma table for material 2
ktop=25,               ;Field interpolation at 4 points along X
ltop=1,                ;Field interpolation at 3 points along Y
xminf=-15,xmaxf=15    ;X range for field interpolation
yminf=-10,ymaxf=10    ;Y range
xbzero=0.,ybzero=0
icyli=0&
```

```
&po x=0.,y=0.&         ;Start of the air-region points
&po x=15.,y=0.&
&po x=15.,y=10.&
&po x=0.,y=10.&
&po x=0.,y=0.&
```

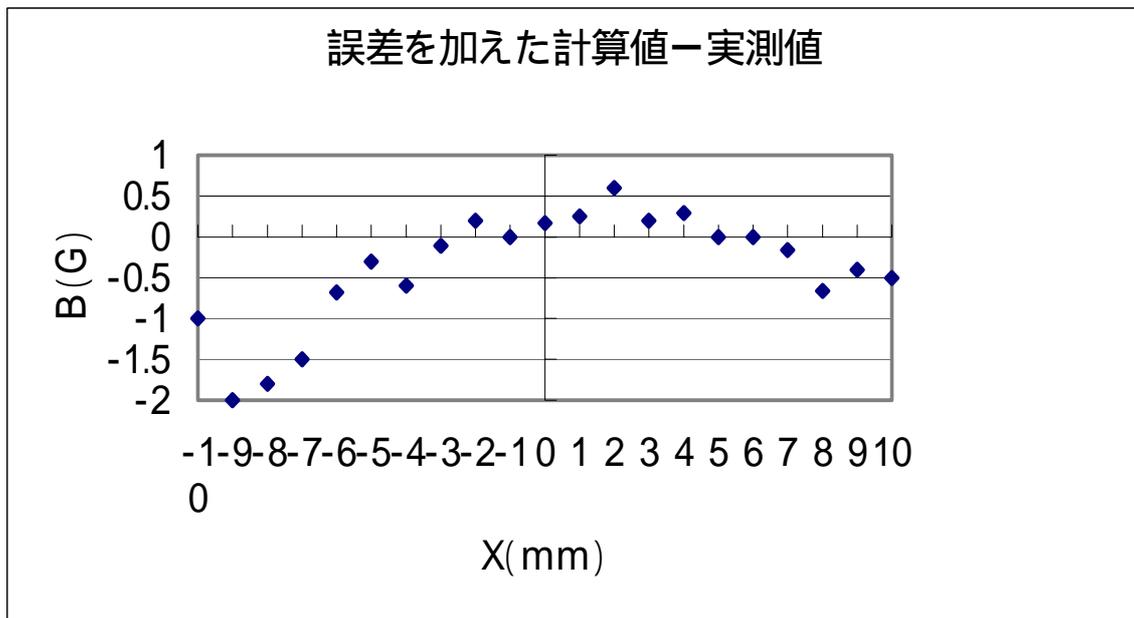
```
&reg mat=1, cur=-437.5.&
積
```

;流す電流と導線の巻き数の

```
&po x=0.15.,y=0.13.&
&po x=0.24.,y=0.13.&
&po x=0.24.,y=1.13.&
&po x=0.15.,y=1.13.&
&po x=0.15.,y=0.13.&
```



実測値から計算値の差をグラフ化したものである。最大で 1.81mmずれており最小で 0.1mmのズレがみられた。



中心付近の誤差は ±0.09% となった。

## 謝辞

終わりにのぞみ終始懇篤なご指導を下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）に物理学的物事を考える力と人生についての貴重な助言とご指導をいただきました事を深く感謝いたします。

修士2年の斎原光和子さん、坂本麻子さん、修士1年の浜川恒圭さん、浜口顕典さん助言や製作協力ありがとうございました。土居歩さん熱量計算ありがとうございました。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。