

高知工科大学 知能機械システム工学科

野尻・百田研究室

卒業論文

電磁石の設計と製作
磁場強度・磁場分布の計算値と実測値の
比較

1010147 齊原 光和子

共同実験者：飯田 一生

卒業論文目次

- 0 . 研究目的
- 1 . 電磁石の磁場分布
 - 2.1 電磁石の仕組み
 - 2.2 電磁石の外観図
 - 2.3 磁場計算
 - 2.4 計算結果
- 2 . 実験装置
- 3 . 測定
 - 4.1 測定装置
 - 4.2 測定方法
 - 4.3 測定結果
- 4 . 考察
 - 5.1 理論値と測定値の比較
 - 5.2 さらに一様性を向上させるための条件
- 5 . 結論
- 6 . 付録
 - 7.1 一様性を良くすることの利点
 - 7.2 磁場測定の理論
 - 7.3 透磁率の測定

1.目的

- ・ 磁極間中心で磁場強度が 500[G]以上出る
- ・ 磁極間での磁場強度の一様性が良い

この二つの条件を満たすような電磁石を設計し、製作する。その際、磁極間中心での磁場強度と磁場分布を計算により予測し、実際に製作したものと比較して磁場分布の一様性の良いものを作る。

2.電磁石の磁場分布

2.1 電磁石の仕組み

電磁石とは -

導線に電流を流すと、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。大きさと向きはビオ・サバールの法則で求まる。

今回製作する電磁石は図 1 の様な偏向電磁石である。

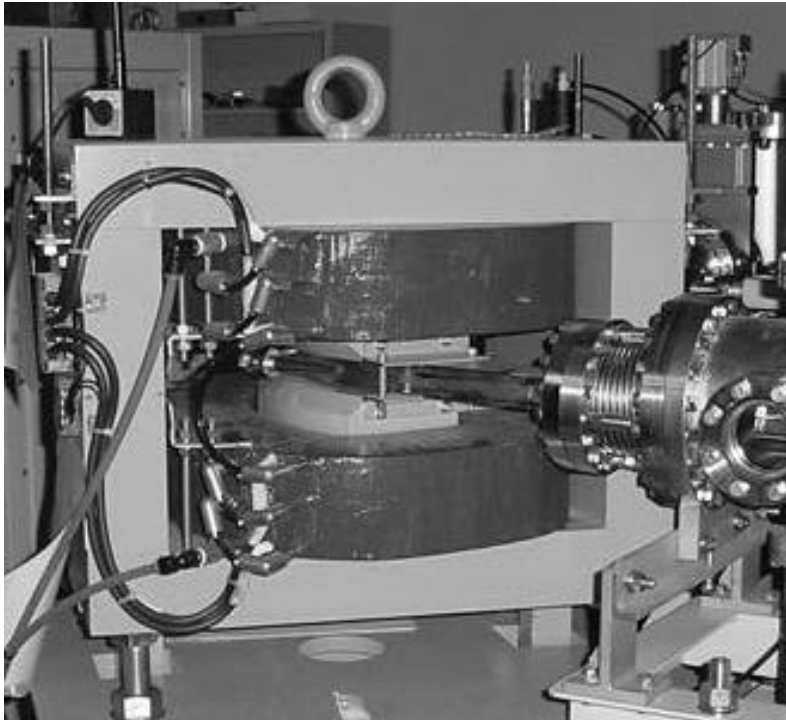


図 1 ・ 偏向電磁石

製作する電磁石は偏向電磁石として使用される、図 1 のような H 型磁石とし、材料としてリターンヨーク、ポールピース部に純鉄、コイルに銅を使用する。

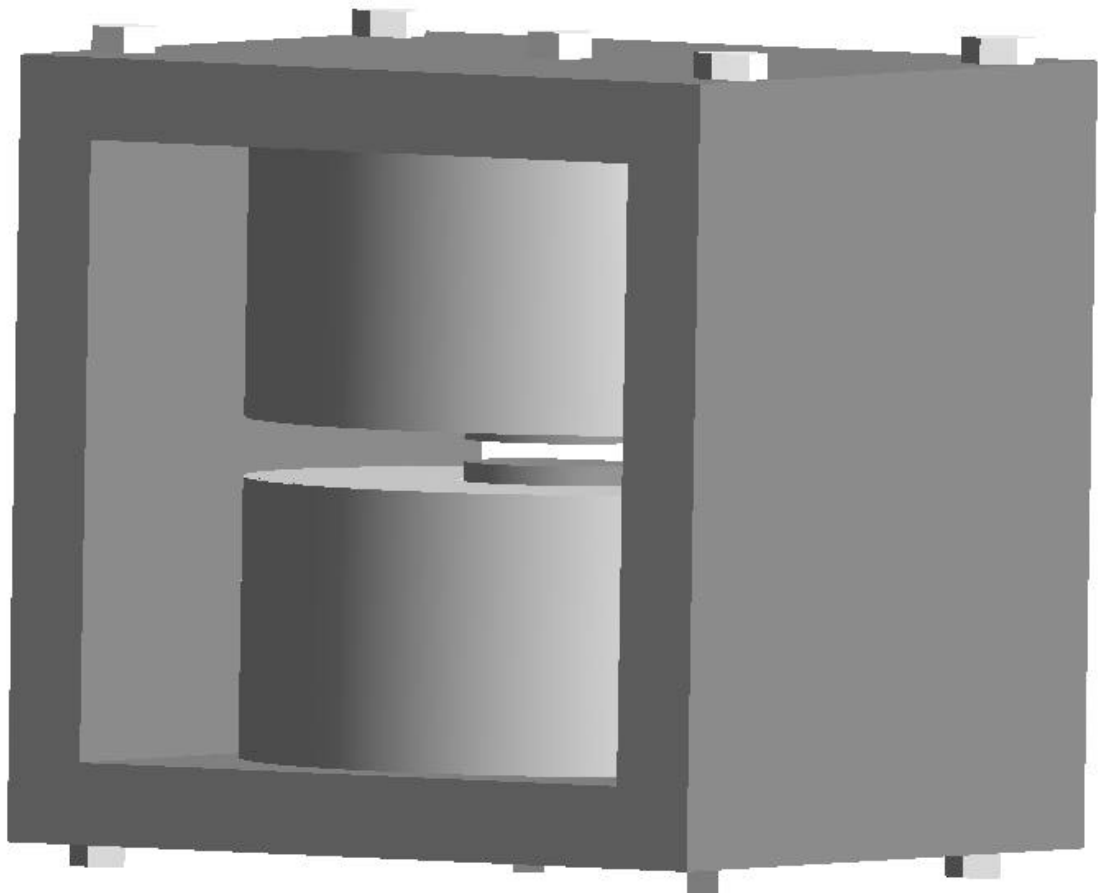


図 2 ・ H 型電磁石の 3 D 図

H 型電磁石は大きく分けると次の 3 つの部分からなる。

- ・ コイル 電流を流したときに磁場を発生させる働き
- ・ ポールピース コイルで作出した磁場を増強する働き
- ・ リターンヨーク 磁力線が外にもれないようにする働き

ここでいう磁極間とは図 2 の、ポールピースとポールピースの間の中心を指し、磁場強度や分布の計算および測定はこの部分を対象に行う。

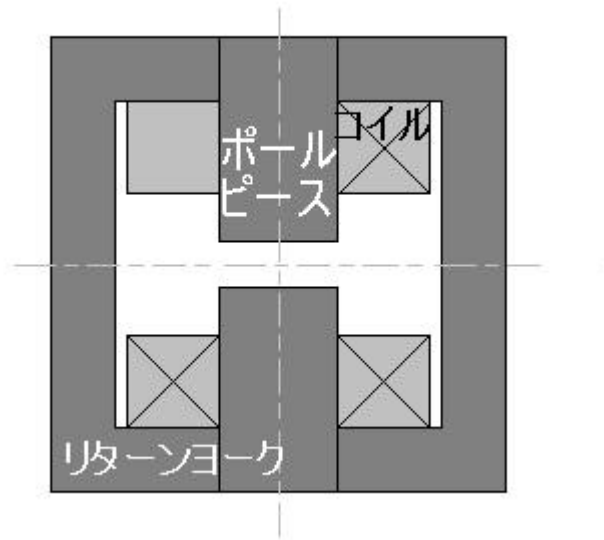


図3・H型電磁石の断面図

2.2 磁場計算

磁場強度、磁場分布を計算により導き出すために、Poisson-Superfish を使用する。これは、インプットファイルに

- ・電磁石の各パーツのサイズ
- ・材料の透磁率
- ・電流

を入力すると、

- ・指定した点での磁場強度と向き

を出力する。

Poisson-Superfish は、磁場計算をする際に電磁石の断面積を4分の1にした平面を横軸 X, 縦軸 Y にとり、Y=0, X=0 地点、Y=0, X=0.5 地点…という風に、0.5[cm]ずつずらしていった点で磁場強度を計算する。

2.3 計算結果

実際に作製する電磁石の情報を Poisson-Superfish に入力し、磁極間での磁場強度、磁場分布を計算する。Input file を付録 7.4 に示す。

ここでは以下の条件を強調する。

純鉄の透磁率： $\mu = 200$

コイルに流す電流： $I=0.5[A]$

コイル 2 つ分の巻き数：4686[turn]

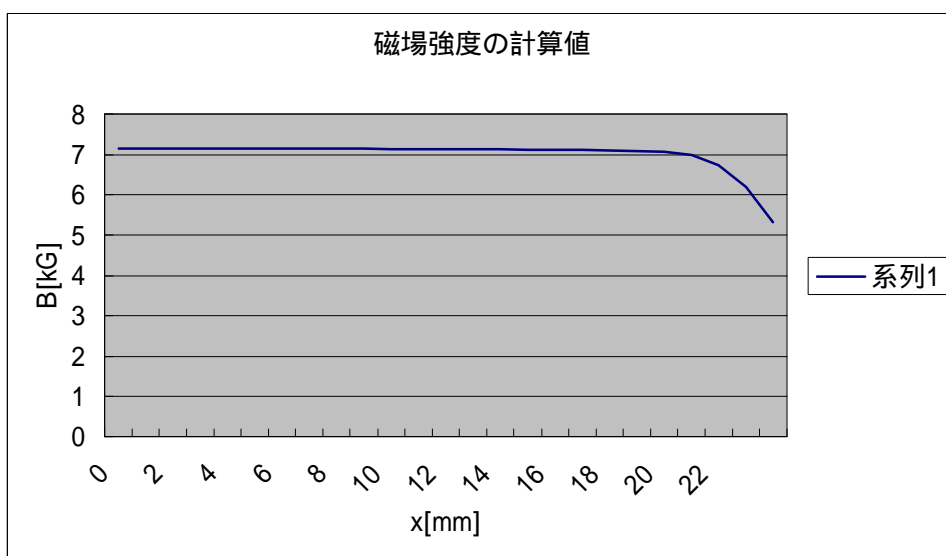
Output file を付録 7.5 に示す。Poisson-Superfish により算出された磁場強度、磁場分布の計算結果の部分を取り出すと表 1 のようになる。

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

7.093753	19
7.064191	20
6.978715	21
6.736458	22
6.196838	23
5.320686	24

表 1・X=0~2.35 における磁場強度の計算値

また、この値をグラフにすると、グラフ 1 のようになった。

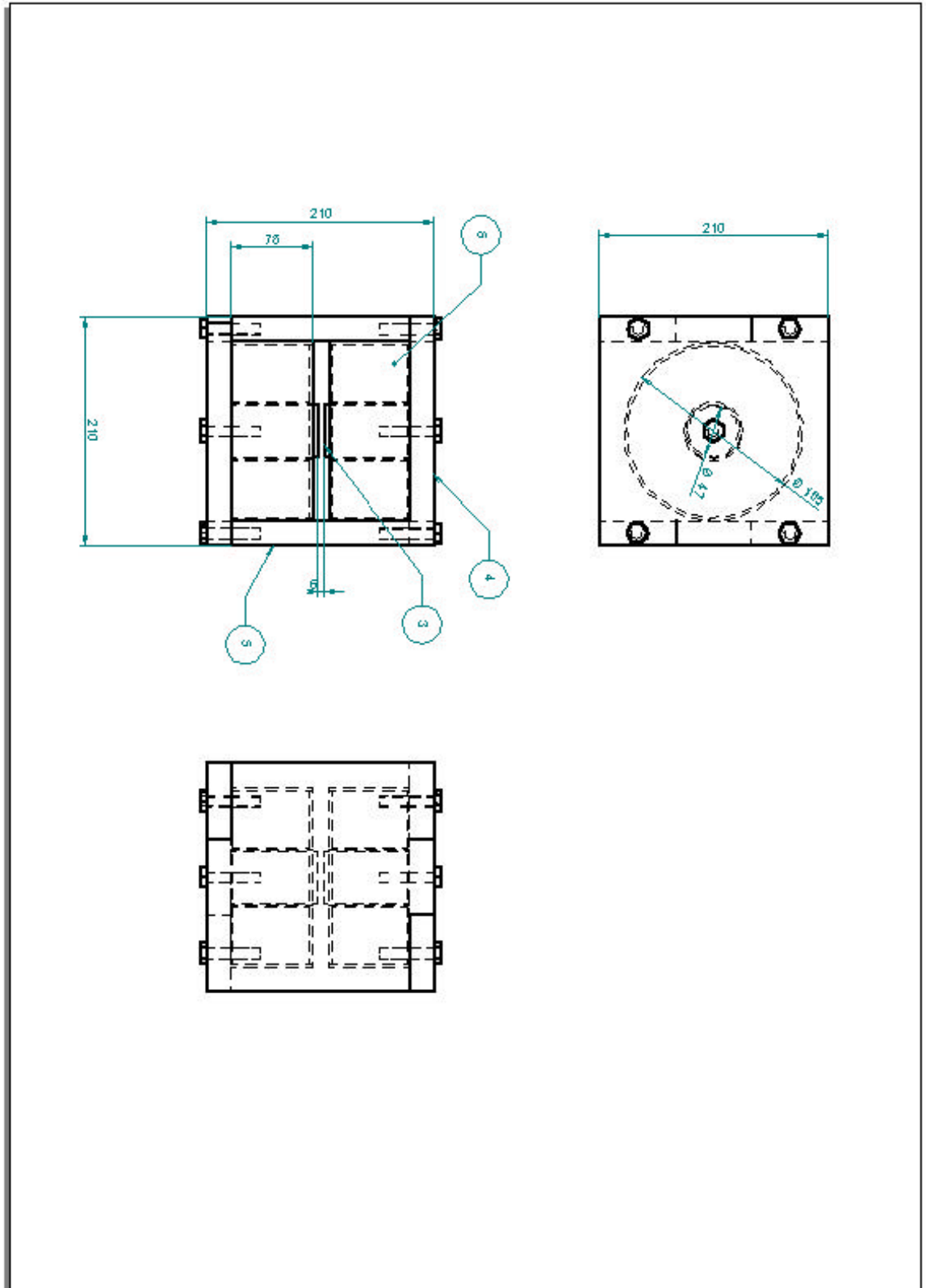


グラフ 1・磁場強度、分布の計算値

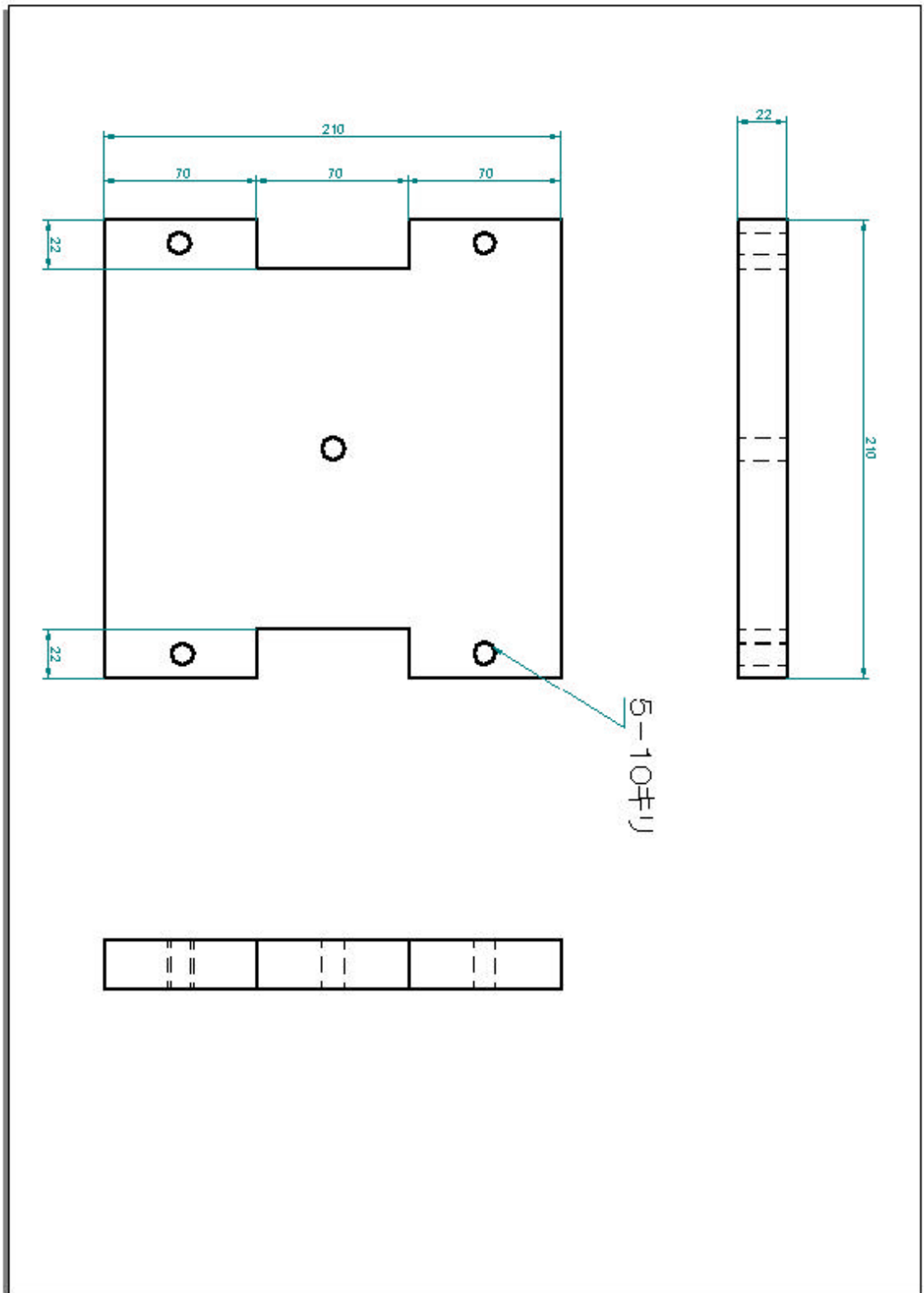
3.装置

実際に製作する電磁石は図 4 のようになる。

【全体図】



【磁極】



【リターンヨーク上下部】

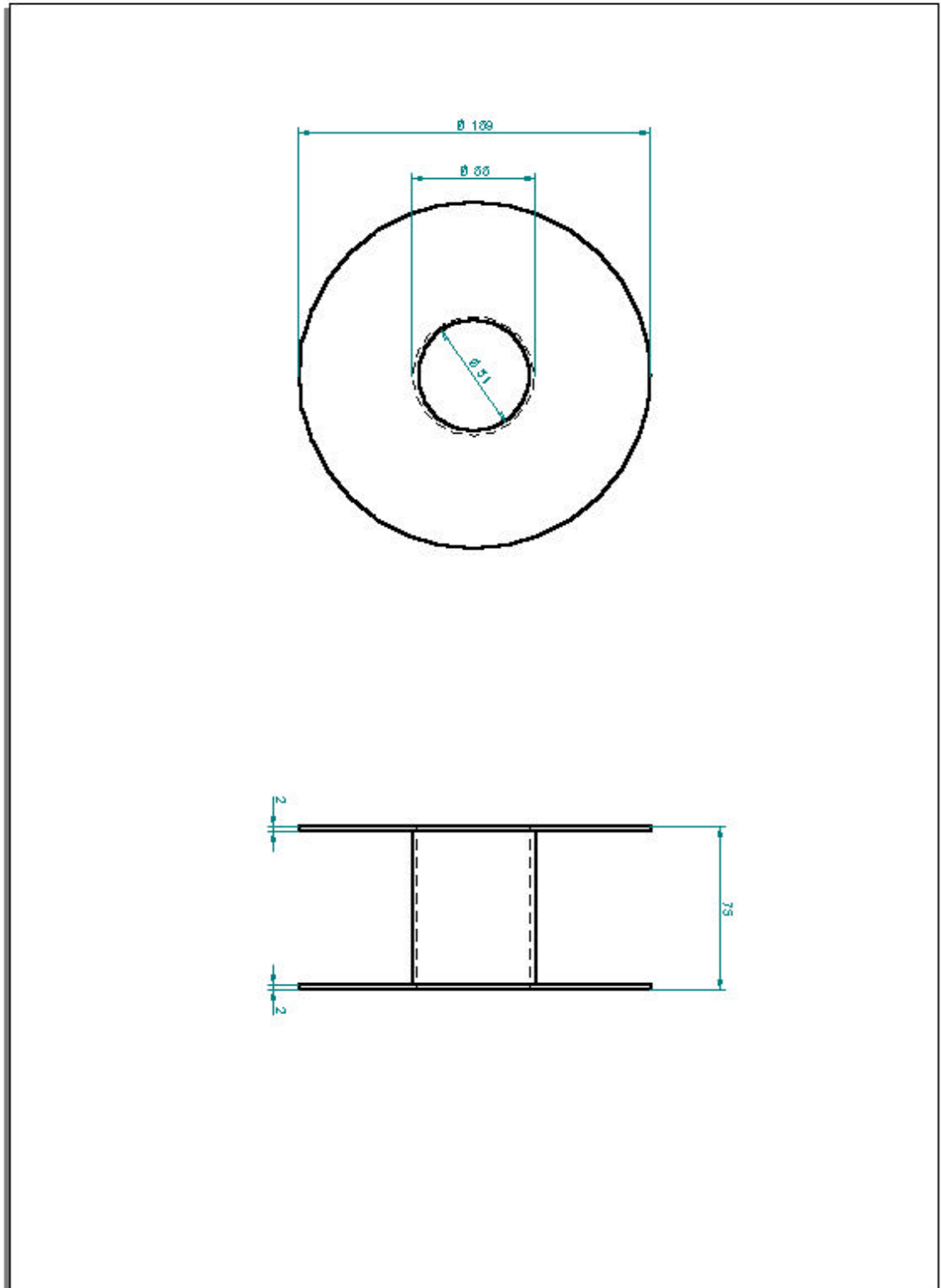


図 4 ・ 電磁石の設計図

実際に製作した電磁石の実物。

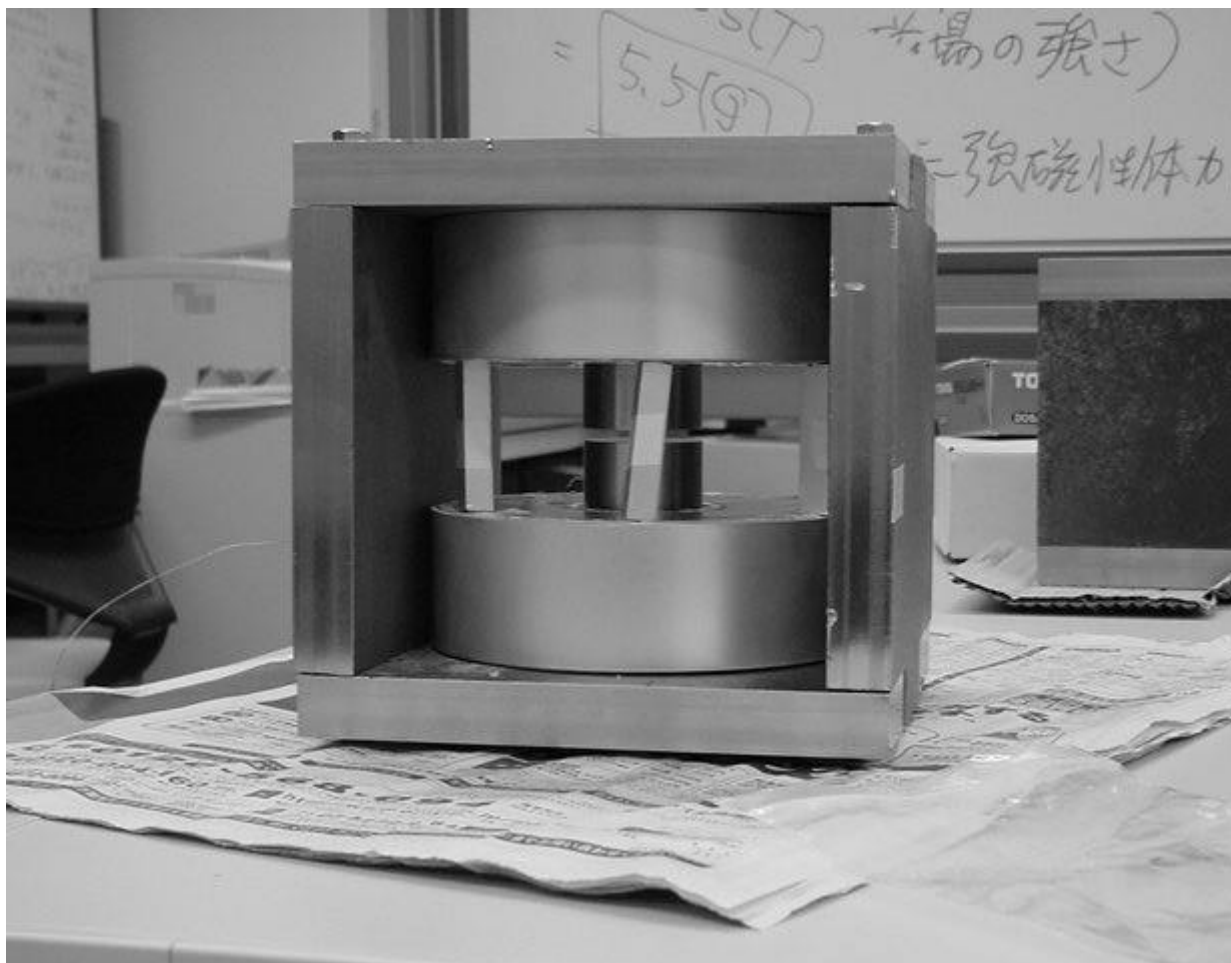


図5・実際に製作した電磁石

4．測定

4.1 測定装置

実際に製作した電磁石に電源をつなぎ、発生した磁場を測定する。測定するために使用した装置は以下の通りである。

- ・ ガウスメータ： MODEL 5080
GAUSS/TESLA METER
I.N. 115080
S/N 9645450
F.W.BELL
- ・ 電源： DC POWER SUPPLY
MODEL SIC-1V10
SERIAL H 6078

使用した電源は、最大出力が DC 36[V]、10[A]までである。。

4.2 測定方法

以上の装置を使って磁場の測定を行う。

測定はまず、電源の出力が電磁石のコイルを上下片方ずつテスターと電源に直列につなぎ、それぞれに 0.5[A]ずつ流して両方に流す電流を合計で 1[A]とした。

テスターをつないだのは、電源のアナログの電流計よりもテスターのデジタル表示の方が電流の設定が容易だったからである。

また、コイルをそれぞれ別に電源とつないだのは、電源の最大出力が 36[V]で、コイルの抵抗がコイル A = 49.4[Ω]、コイル B=45.6[Ω]なので

$$V = IR$$

$$V = 36[V]$$

$$R = 49.4[\Omega]$$

$$I = \frac{V}{R}$$

$$= \frac{36}{49.4}$$

$$= 0.73[A]$$

となり、2つ直列につなげると1[A]出せないことが分かる。

また、2つを並列につなげると $I=1[A]$ 、 $R=50[]$ で、

$V=IR$ より、

$$= 1 \cdot 50$$

$$= 50[V]$$

が必要となるので36[V]しか出ない電源では無理だと言うことが分かる。

よって、片方ずつ0.5[A]流すことによって両方で1[A]流れるようにした。

測定は図6のように行った。

上下それぞれのコイルをテスターと電源に直列につなぎ、それぞれに0.5[A]ずつ流す。電磁石の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強度を測定していく。

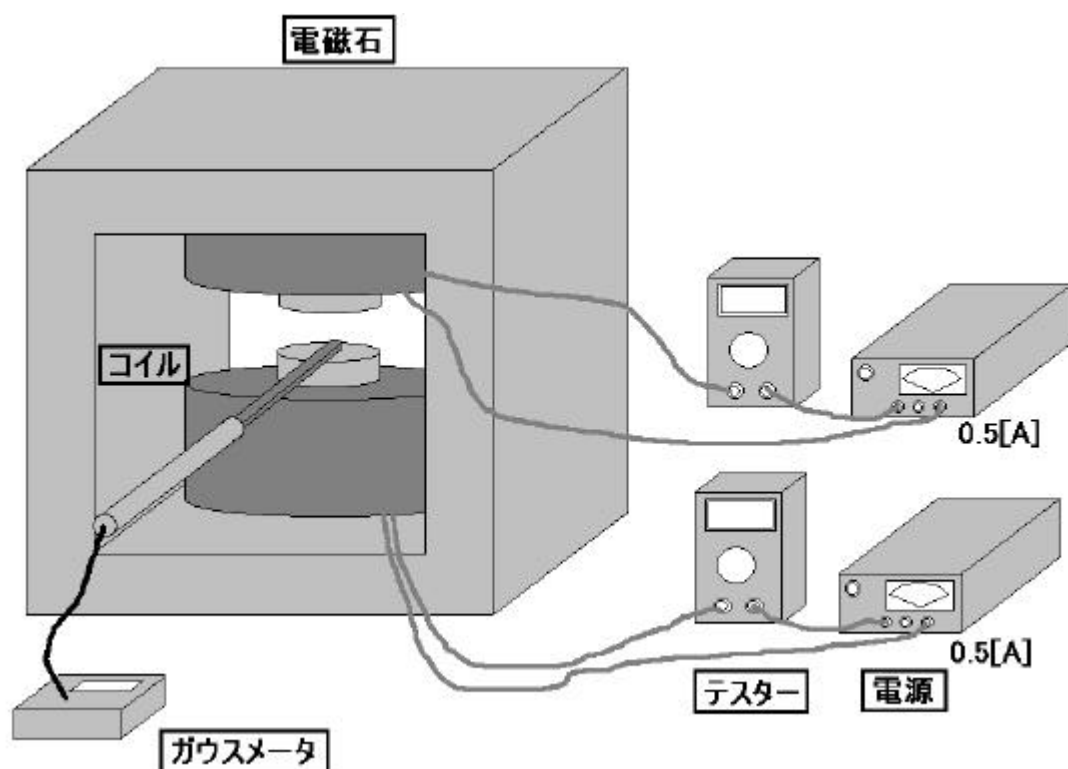


図 6 ・ 磁場強度の測定方法

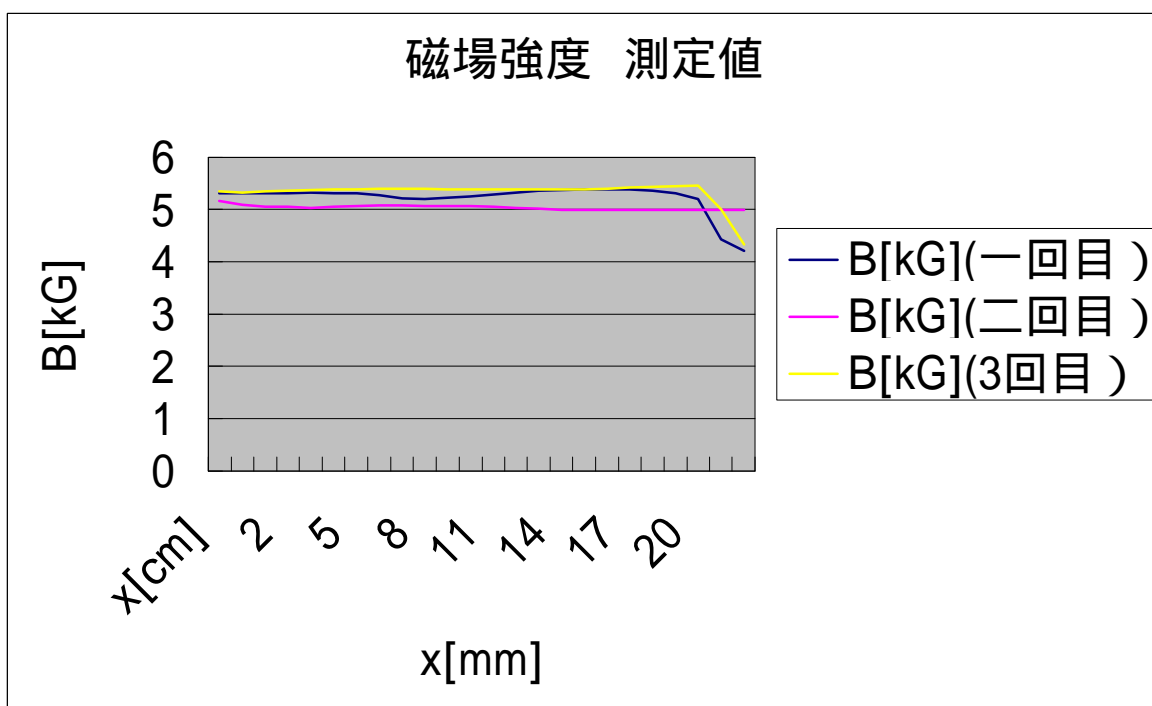
4.3 測定結果

表 2 は、以上の方法で磁極間中心における磁場強度を測定した結果である。測定は全部で 3 回行い、単位は[kG]である。

x[mm]	B[kG](一回目)	B[kG](二回目)	B[kG](3 回目)
0	5.31	5.16	5.35
1	5.31	5.09	5.33
2	5.32	5.05	5.35
3	5.32	5.05	5.36
4	5.33	5.03	5.38
5	5.32	5.05	5.39
6	5.31	5.06	5.39
7	5.28	5.08	5.4
8	5.21	5.08	5.4

9	5.2	5.06	5.4
10	5.22	5.06	5.39
11	5.25	5.06	5.39
12	5.29	5.05	5.39
13	5.33	5.03	5.39
14	5.36	5.02	5.39
15	5.38	4.99	5.39
16	5.39	4.99	5.39
17	5.39	4.99	5.4
18	5.39	4.99	5.42
19	5.36	4.99	5.43
20	5.32	4.99	5.45
21	5.2	4.99	5.46
22	4.43	4.99	5
23	4.2	4.99	4.33

さらに、以上の測定結果をグラフにすると、グラフ2の様になる。



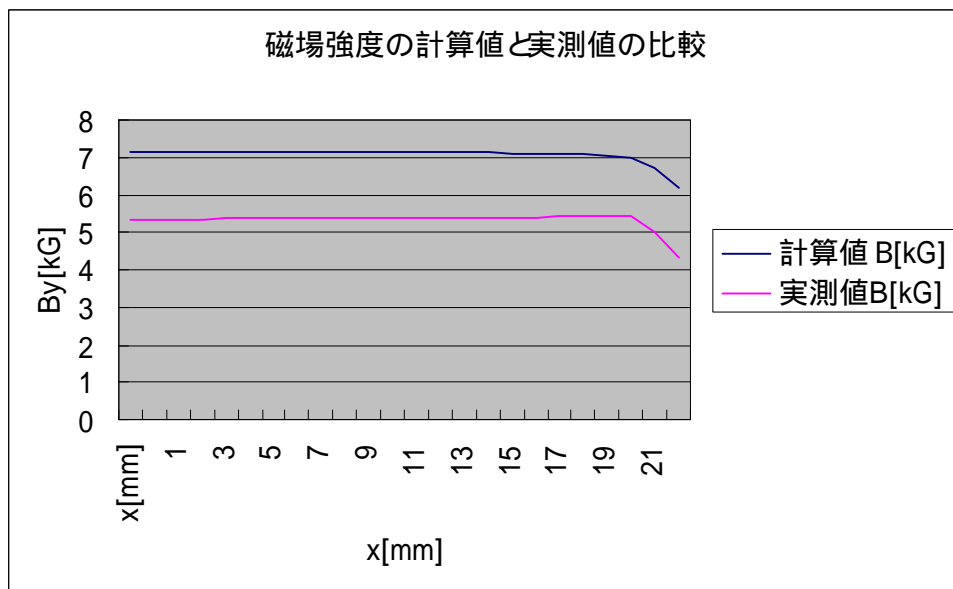
グラフ2・磁場強度 測定値

5 . 考察

5.1 理論値と実測値の比較

以上計算により導き出した磁場強度の理論値と、実際に測定した実測値を比較する。

二つの値を並べて同じグラフに表してみると、グラフ 3 のようになる。



グラフ 3 ・ 磁場強度の計算値と実測値の比較

理論値と実測値を比べると、磁場強度は、実測値が理論値の約 7 . 5 割となった。

理論値と実測値の食い違いの大きな原因としては、透磁率が考えられる。計算する上で使った透磁率の値は 2 0 0 で、これは純鉄の典型的な値であり、材料によってばらつきがあるため、実際はもっと小さい値であると考えられる。

では実際には μ はどのくらいになるのかを計算してみる。

$$m = \frac{B}{H}$$

$B_{\text{理論値}} = 7.14[\text{kG}]$ より、

$$200 = \frac{7.14}{H}$$

$H = 0.0357$ となる。

$B_{\text{実測}} = 5.35[\text{kG}]$ より、

$$m = \frac{5.35}{0.0357}$$

$= 149.86$ となる。

よって、実際の μ の値は約150となることが分かった。
透磁率の他に、理論値と実測値の食い違いの原因としては、

- ・ 計算ソフトの誤差：リターンヨークが計算上円柱の形になるため、実は2次元でしか計算していない。
- ・ 測定装置の誤差：電流計、ガウスメータ、測定位置
- ・ 電磁石作製時の誤差：傾き等

等が考えられる。

磁場分布は、理論では磁極面断面の中心から外側に行くにつれて磁場強度が下がるはずだが、実測では外に行くほど磁場強度は上がっている。

これは、ポールピースの平行度に問題があったためと考えられる。また、ガウスメータで測定するときの設置時の歪み等が考えられる。

5.2 更に一様性を向上させるための条件

実際に設計し製作した電磁石は磁極面が平らなものであった。更に磁極間での磁場の一様性をよくするために、どのようにすればいいのかをPoisson-Superfishを使った計算によって予測してみる。

磁極間の磁場の一様性を良くするためにはポールピースの磁極面断面のデザインが重要となってくる。

一様性を良くするための条件を定義すると、

1. 磁極間の間隔を小さくすること
2. 磁極の断面積を大きくすること
3. 磁極面に凹凸をつけて、外側より内側を凹ませること

この3つとなる。

ポールピースはコイルで発生させた磁場を増強させる働きをもっており、その磁極面の形が少し違えば磁極間中心での磁場強度とその一様性に大きく影響する。

ここでは3の磁極面の凹凸をどのようにつければ磁極間中心での磁場の一様性が良くなるのか、とすることに注目する。

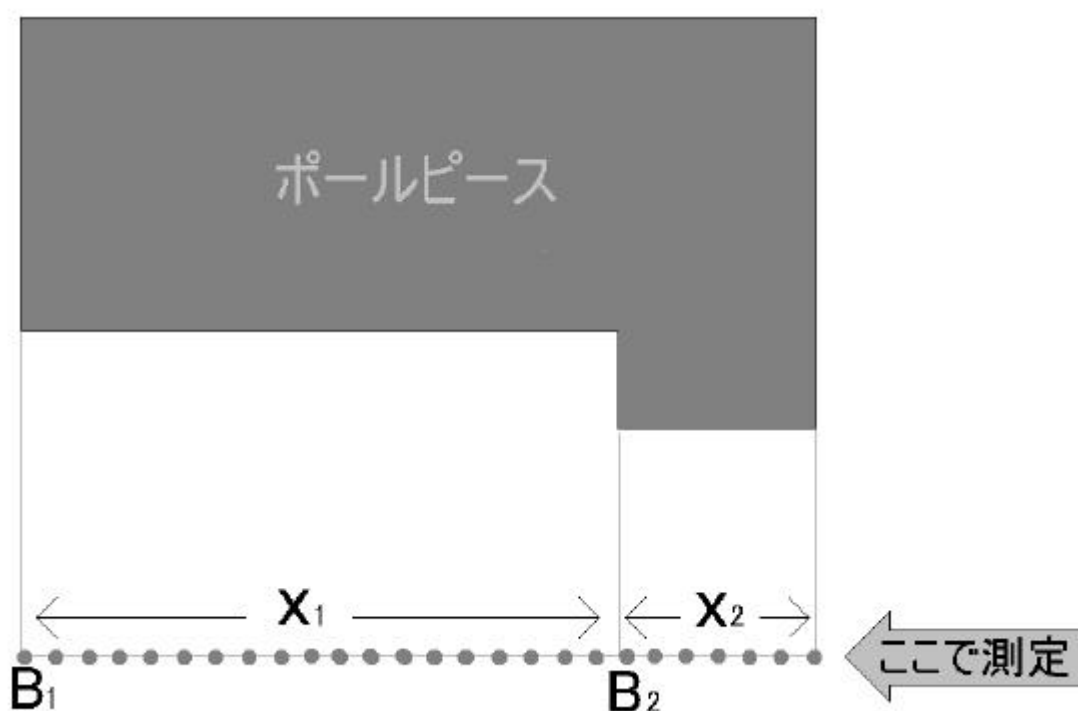


図7・ポールピースの縦断面図

図7は、ポールピースの縦断面図である。

この図において、ポールピースの横断面、つまり磁極面断面の断面積とその直径を固定し、

凹み部分の断面積の半径を A、

凹みの深さを B,とする。

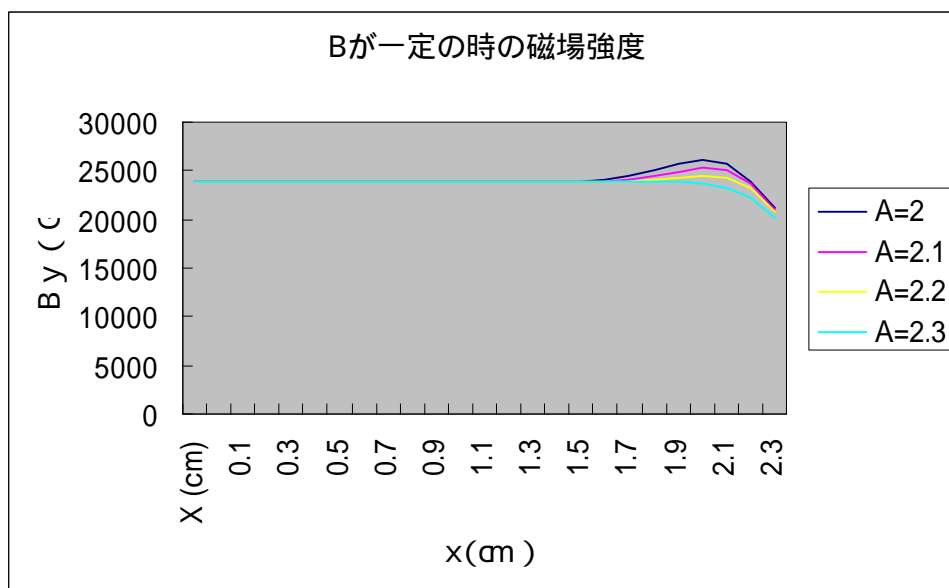
さらに、磁極面断面の中心での磁場強度を B_1 、磁極面断面の端での磁場強度を B_2 とし、磁場の一様性の定義を

$$\frac{(B_1 - B_2)}{B_1}$$

とする。

A と B をそれぞれ固定させたときの磁場強度を計算し一様性を表すグラフを作る。

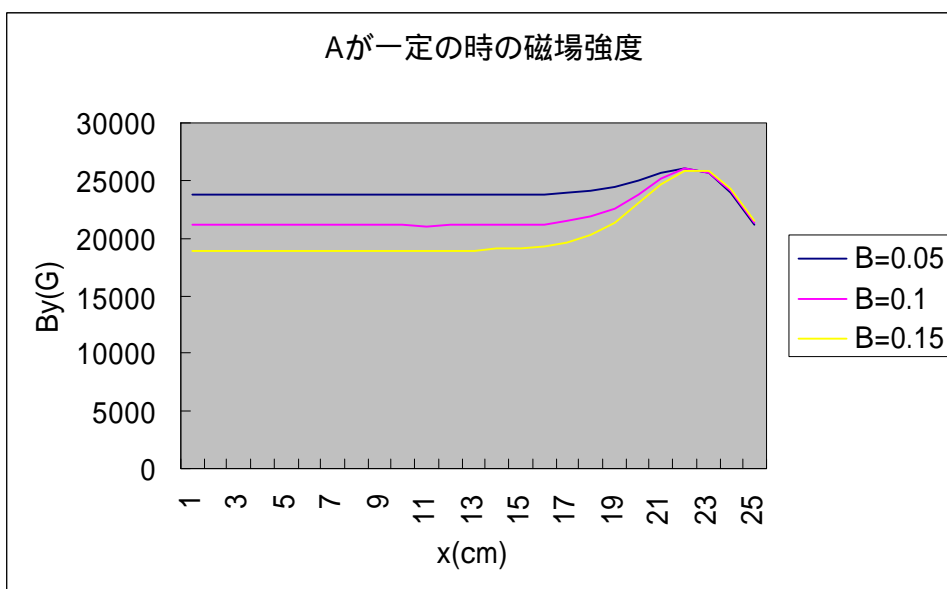
グラフ4は、Bを一定にしたときの磁場強度分布のグラフである。横軸には磁極面断面の中心から外側に向けての距離、縦軸はその位置での磁場強度を表す。



グラフ4・Bが一定の時の磁場強度のグラフ

このグラフから、 $A=2.3[\text{cm}]$ のときに磁極間での磁場の一様性が良くなる
ことが分かる。

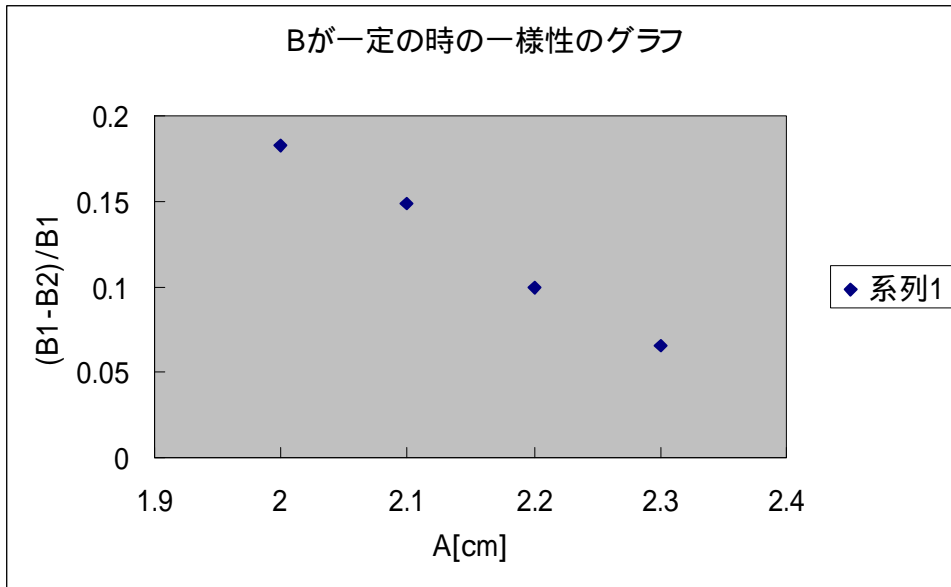
グラフ 5 は、 A を一定にしたときの磁場強度のグラフである。



グラフ 5 ・ A が一定の時の磁場強度のグラフ

このグラフから、 $B=0.05[\text{cm}]$ をとるときに最も磁場分布が一様となるこ
ことが分かる。

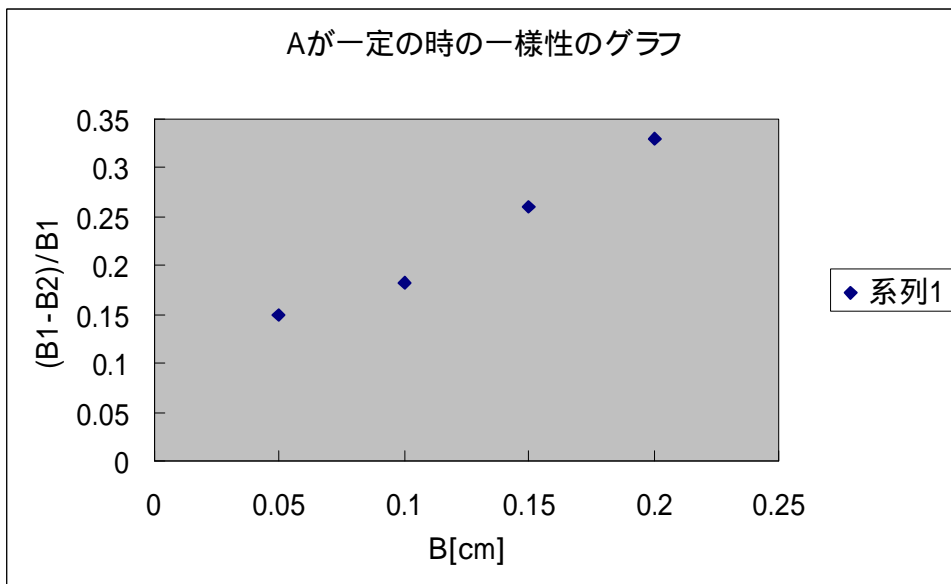
次に、グラフ 6 は B が一定のときの様性の値のグラフである。横軸は A 、
縦軸は一様性、 $\frac{(B_1 - B_2)}{B_1}$ である。



グラフ 6 ・ B が一定の時の一様性のグラフ

このグラフからも、やはり $A=2.3$ のときに一様性がもっとも良いことが分かる。

グラフ 7 は、 A が一定のときの磁場分布の一様性のグラフである。



グラフ 7 ・ A が一定の時の一様性のグラフ

このグラフからも、 $B=0.05$ [cm] となるとときに一様性がもっとも良いこと

が分かる。

6 . 結論

理論値と実測値を比較した結果、磁極面中心での磁場強度は実測値が理論値の約 7.5 割となった。

また、以上の計算の結果から、ポールピースの磁極面断面に中心から半径の外側に向け深さ 0.05[cm]、半径 2.3[cm]の凹みをつけるとさらに磁場の一様性を良くすることができることが予測できた。

図 8 は、ポールピースに深さ 0.05[cm]、半径 2.3[cm]の凹みをつけたときの磁力線の分布図である。

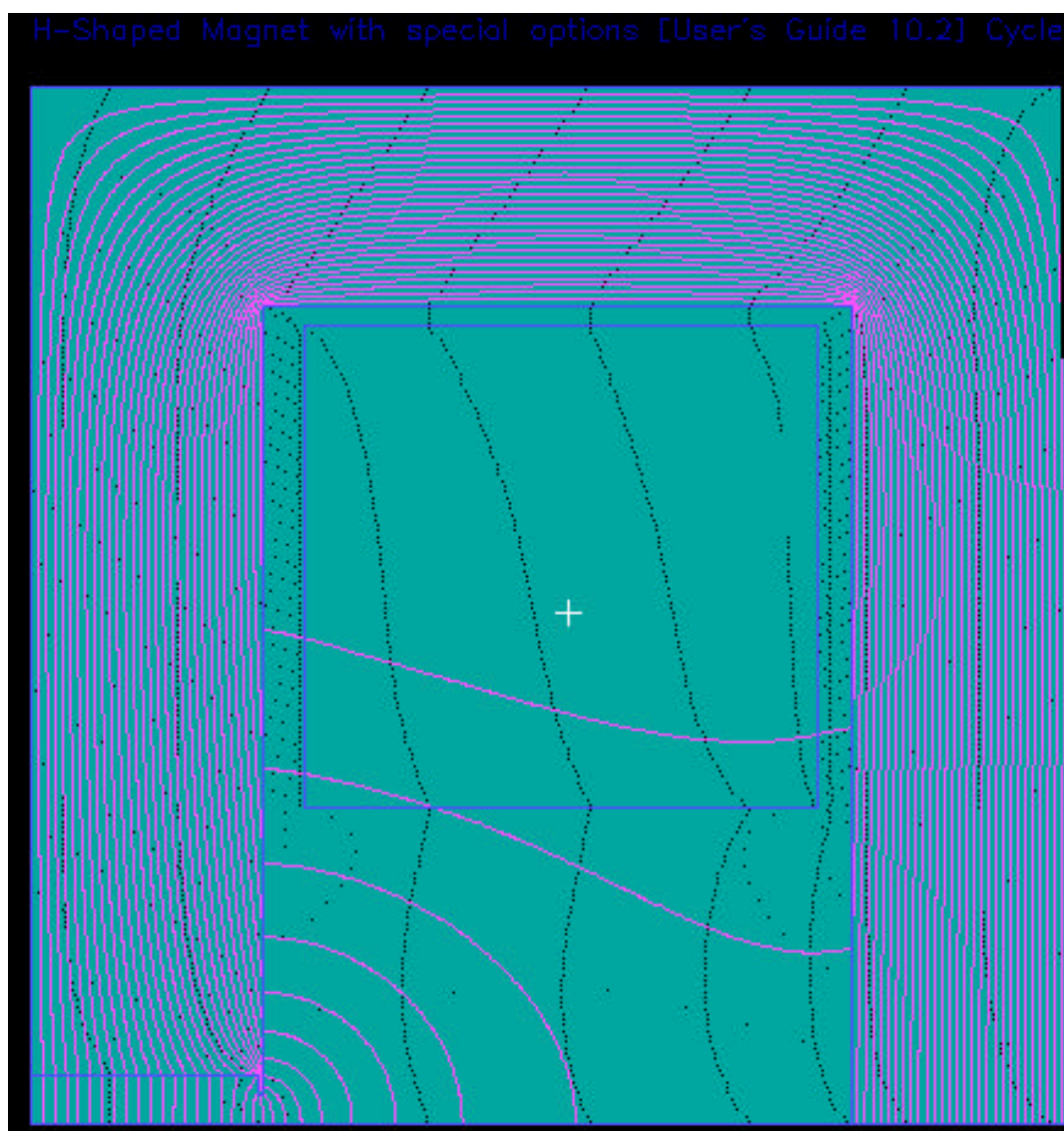


図 8 ・ ポールピースに凹みをつけたときの磁力線分布図

このように、ポールピースの磁極面に凹凸をつけると、凸の部分に磁力線が集中するため、平らなときには外に行くほど疎になる磁力線が補われるため、磁極間中心では磁場が一様になる。

7 . 付録

7.1 一様性を良くすることの利点

電磁石における磁場強度の一様性を良くすることでどのような利点が生まれるのか。

偏向電磁石に使用する際、イオンビームの軌道を曲げるときに磁場中での曲がり方は粒子の質量や電荷によって違うので、偏向電磁石によって必要なイオンのみを選択できるが、そのとき磁場が一様でないと必要なイオンのみを選択できないため、磁場強度の一様性を上げる必要がある。

7.2 磁場測定理論

磁場強度を測定する際に使用したガウスメータの仕組みを考えてみる。

ガウスメータには、ホール効果という現象が応用されている。

ホール効果とは、電流の流れる導体を磁場の中に置いたとき、導体に電流と磁場の双方に垂直な方向に電圧が発生する現象である。

これは、運動する荷電粒子が磁気力を受けて導体の一方側に偏ることによって起きる。

以下はホール効果の関係式である。

$$V_H = \frac{IB}{nqt}$$

V_H : ホール電圧

$\frac{1}{nq}$: ホール係数

以上の式より、導体にまたがって発生する電位差 V_H を測定することで磁場の大きさが分かる。

7.3 透磁率の測定

電磁石を作製するのに使用した材料は純鉄であったが、その透磁率を知るのに、5 . 1 で計算して150 という値を導き出した。では、実際にその純

鉄を使って透磁率を測定してみる。

測定方法：

まず純鉄の円柱を2本使い、それにコイルを巻いて電磁石を作る。

そのコイルの両端を電源につなぎ、0~10[A]の電流を流す。

2本の円柱の間にガウスメータを差し込み、そこで磁場強度を測定する。

巻き数：71[turn]

電磁石（ソレノイド）の長さ：16.3[cm]

1[m]当たりの巻き数：435[turn/m]

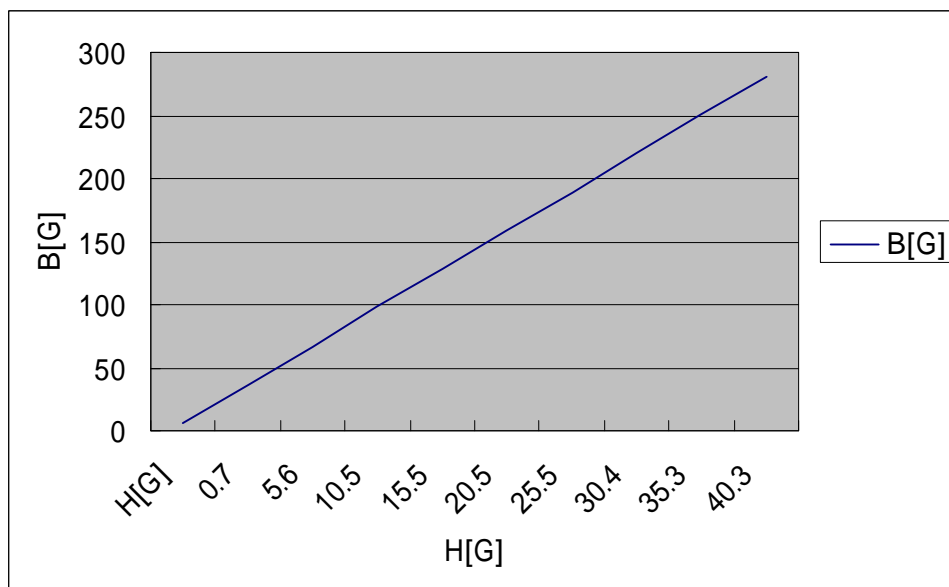
測定するに当たり、1[A]を流したときにまず磁場強度を測定し、その後1[A]を5分間流した後に同じように磁場強度を測定して、それを9[A]まで続けてみた。

表3が測定結果である。

I[A]	B[G](一回目)	B[G](二回目)	H[G]
0	6.7	6.8	0.7
1	36.9	37.6	5.6
1(5分後)	37	37.5	
2	67.1	68.5	10.5
2(5分後)	67.1	68.5	
3	97.8	99.2	15.5
3(5分後)	97.8	99.2	
4	128	129.8	20.5
4(5分後)	128	129.8	
5	158.9	160.5	25.5
5(5分後)	158.9	160.5	
6	189.5	191.3	30.4
6(5分後)	189.5	191.1	
7	220.5	221.9	35.3
7(5分後)	220.5	221.9	
8	251.1	252.3	40.3
8(5分後)	251.1	252.3	
9	281.6	282.5	45.3
9(5分後)	281.6	282.5	

表 3 ・ 磁場強度

この測定結果から、B - Hのグラフを作ってみると、下の様なグラフになる。



グラフ 8 ・ B - H グラフ

$$H = \mu_0 n I$$

$$H = 4\pi \times 10^{-7} \cdot 435 \cdot 1$$

$$= 0.000547 [T]$$

$$= 5.47 [G]$$

となり、実測値の 5 . 6 [G] とほぼ合う。

しかし、

$$m = \frac{B}{H}$$

$$= \frac{37}{5.6}$$

$$= 6.6$$

となり、5 . 1 で計算した $\mu = 150$ とは大きく異なる。

7.4 Poisson-Superfish \mathcal{O} Input file

H-Shaped Magnet with special options [User's Guide 10.2]
Adjust XJFACT to make $B = 16$ kG at $X, Y = 0.5, 0.25$.

; Copyright 1998, by the University of California.
; Unauthorized commercial use is prohibited.

```
&reg kprob=0,           ; Declares a POISSON problem
dx=.05,                ; Mesh interval
xmax=10.5,ymax=10.5,   ; Upper limits of geometry boundary
mode=-1,               ; Use B,gamma table for material 2
ktop=106,              ; Field interpolation at 4 points along X
ltop=106,              ; Field interpolation at 3 points along Y
xminf=0,xmaxf=10.5,   ; X range for field interpolation
yminf=0,ymaxf=10.5,   ; Y range
ktype=6,
nterm=7,
nptc=11,
rint=1.5,
angle=90,
rnorm=1.5&
```

```
&mt mtid=2
mu=200
&
```

```
&po x=0.,y=0. &       ; Start of the air-region points
&po x=10.5,y=0. &
&po x=10.5,y=10.5 &
&po x=0.,y=10.5 &
&po x=0.,y=0. &
```

```
&reg mat=2 mtid=2 &   ; Start of the iron region
```

```

&po x=0.,y=0.25 &
&po x=2.35,y=0.25 &
&po x=2.35,y=8.3 &
&po x=8.3,y=8.3 &
&po x=8.3,y=0. &
&po x=10.5,y=0. &
&po x=10.5,y=10.5 &
&po x=0.,y=10.5 &
&po x=0.,y=0.25 &

```

```

&reg mat=1,cur=-2343 & ; Start of the coil region
&po x=2.75,y=3.2 &
&po x=2.75,y=8.1 &
&po x=7.95,y=8.1 &
&po x=7.95,y=3.2 &
&po x=2.75,y=3.2 &

```

7.5 Poisson-Superfish \oslash Output file

Field interpolation at cycle 4910.

K	L	Az (G-cm)	X (cm)	Y (cm)	Bx (G)	By (G)	B (G)
1	1	0.000000E+00	0.00000	0.00000	0.000	5076.476	5076.476
		dBy/dy=-dBx/dx	dBy/dx	dBx/dy	Chi /d.f.	Fn	
		0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	3.62E-12	25	
3	1	-5.076476E+02	0.10000	0.00000	0.000	5076.422	5076.422
		0.0000E+00	-1.2666E+00	-1.2666E+00	5.84E-13	19	
5	1	-1.015284E+03	0.20000	0.00000	0.000	5076.246	5076.246
		0.0000E+00	-2.4683E+00	-2.4683E+00	1.84E-13	19	
7	1	-1.522896E+03	0.30000	0.00000	0.000	5075.951	5075.951
		0.0000E+00	-3.6874E+00	-3.6874E+00	8.92E-14	19	
9	1	-2.030473E+03	0.40000	0.00000	0.000	5075.535	5075.535
		0.0000E+00	-4.9294E+00	-4.9294E+00	5.36E-14	19	
11	1	-2.538002E+03	0.50000	0.00000	0.000	5074.994	5074.994
		0.0000E+00	-6.2027E+00	-6.2027E+00	3.68E-14	19	

13	1	-3.045471E+03	0.60000	0.00000	0.000	5074.326	5074.326
0.0000E+00		-7.5152E+00	-7.5152E+00	2.76E-14	19		
15	1	-3.552866E+03	0.70000	0.00000	0.000	5073.526	5073.526
0.0000E+00		-8.8737E+00	-8.8737E+00	2.19E-14	19		
17	1	-4.060175E+03	0.80000	0.00000	0.000	5072.589	5072.589
0.0000E+00		-1.0281E+01	-1.0281E+01	1.79E-14	19		
19	1	-4.567383E+03	0.90000	0.00000	0.000	5071.512	5071.512
0.0000E+00		-1.1730E+01	-1.1730E+01	1.44E-14	19		
21	1	-5.074476E+03	1.00000	0.00000	0.000	5070.292	5070.292
0.0000E+00		-1.3186E+01	-1.3186E+01	1.06E-14	19		
23	1	-5.581439E+03	1.10000	0.00000	0.000	5068.934	5068.934
0.0000E+00		-1.4552E+01	-1.4552E+01	6.20E-15	19		
25	1	-6.088261E+03	1.20000	0.00000	0.000	5067.462	5067.462
0.0000E+00		-1.5595E+01	-1.5595E+01	5.90E-15	19		
27	1	-6.594930E+03	1.30000	0.00000	0.000	5065.938	5065.938
0.0000E+00		-1.5764E+01	-1.5764E+01	3.96E-14	19		
29	1	-7.101448E+03	1.40000	0.00000	0.000	5064.523	5064.523
0.0000E+00		-1.3815E+01	-1.3815E+01	2.55E-13	19		
31	1	-7.607835E+03	1.50000	0.00000	0.000	5063.585	5063.585
0.0000E+00		-6.9895E+00	-6.9895E+00	1.31E-12	19		
33	1	-8.114166E+03	1.60000	0.00000	0.000	5063.949	5063.949
0.0000E+00		1.0708E+01	1.0708E+01	5.97E-12	19		
35	1	-8.620631E+03	1.70000	0.00000	0.000	5067.399	5067.399
0.0000E+00		5.1873E+01	5.1873E+01	2.44E-11	19		
37	1	-9.127658E+03	1.80000	0.00000	0.000	5077.576	5077.576
0.0000E+00		1.4112E+02	1.4112E+02	8.54E-11	19		
39	1	-9.636158E+03	1.90000	0.00000	0.000	5101.065	5101.065
0.0000E+00		3.1813E+02	3.1813E+02	2.13E-10	19		
41	1	-1.014784E+04	2.00000	0.00000	0.000	5146.180	5146.180
0.0000E+00		6.0785E+02	6.0785E+02	2.27E-10	19		
43	1	-1.066519E+04	2.10000	0.00000	0.000	5209.323	5209.323
0.0000E+00		8.3870E+02	8.3870E+02	1.55E-09	19		
45	1	-1.118952E+04	2.20000	0.00000	0.000	5235.842	5235.842
0.0000E+00		1.5168E+02	1.5168E+02	1.75E-08	19		
47	1	-1.171367E+04	2.30000	0.00000	0.000	5106.910	5106.910
0.0000E+00		-2.7120E+03	-2.7120E+03	2.30E-08	19		

49	1	-1.221183E+04	2.40000	0.00000	0.000	4713.024	4713.024
0.0000E+00		-6.1724E+03	-6.1724E+03	3.01E-09	19		

謝辞

終わりにのぞみ、終始懇篤なご指導を賜り論文校閲の労をとられた百田佐多生先生（現高知工科大学 知能機械システム工学科講師）に心から感謝致します。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致します。

共同研究者である飯田一生君、小川君、浜川君、高巢君、グループ違いであるにも関わらず、深夜まで加工や計算を手伝ってくれた坂本麻子さんにも心から感謝致します。