

電磁石の設計と製作

ジュール熱による温度上昇

知能機械システム工学科 野尻・百田研究室

1010203 福本 泰章

目次

1	研究の目的	1
2	電磁石における熱現象	2
	A．ジュール熱の発生	2
	B．伝導による熱の移動	2
	C．放射による熱の散逸	2
	D．熱平衡	3
3	温度測定の方法	3
4	今回設計、製作した電磁石	4
	4 - 1 電磁石の組立図	4
	4 - 2 熱現象	5
	A．ジュール熱による発熱量	5
	B．伝導によってコイルが失う熱量	5
	C．放射によってコイルが失う熱量	5
	D．平衡温度	6
5	温度測定	6
6	考察	7
7	結論および今後の課題	7

謝辞

今回の研究にあたり、物理とはどのようなものであるのかという根源的な部分をはじめ、様々のご指導、ご鞭撻を賜りました野尻 洋一先生、連日深夜にまで及ぶ作業や論文の添削などに多忙な中、時間を割いて深夜までご指導くださった百田 佐田生先生に深く感謝いたします。

また、共に本研究を行い、電磁石の設計や強度計算などを担当してくれた松岡 寛君、熱量計算などの手伝いをしてくれた坂本 麻子さん、材料の調達に奔走してくれた八木 宏樹君、強度計算の手伝いをしてくれた浜口 顕典君をはじめとして、本研究にご協力くださった全ての方々に対しこの場を借りて深く感謝いたします。

1. 本研究の目的について

現在、電磁石はモーターやスピーカーをはじめとする身近なものから、リニアモーターカーの浮遊、駆動装置やイオンビームの偏向装置といった先端の研究分野においても数多く利用されている。だが、電磁石は電流を扱うため抵抗による発熱を伴い、設計や製作においては熱的な安全性を考慮に入れなければ十分な機能を発揮できないだけでなく、破損や発火といった危険な状況が考えられる。そこで、今回の研究では電磁石における熱学的モデルを想定、検証し熱的に安全な電磁石を設計、製作することを目的とした。

電磁石は主にコイル、磁極、リターンヨークの3つの部分からなっており、今回使用したH型電磁石では図1のような断面となる。

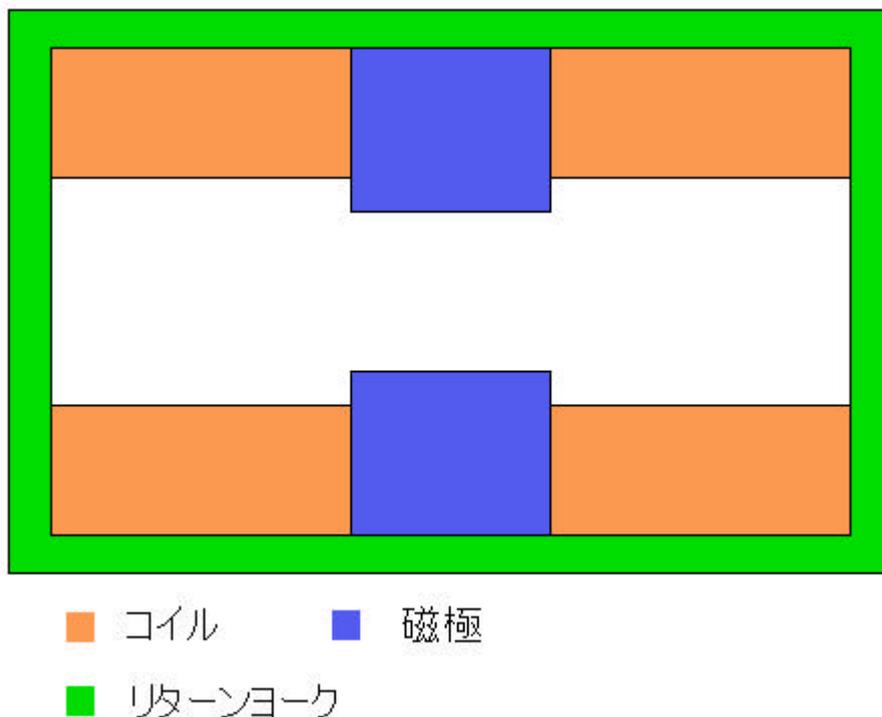


図1 H型電磁石の断面形状

また、各部の働きは以下の通りである。

1. コイルに電流を流すことにより磁場が発生する。
2. 磁極は、コイルによって発生した磁場を強める。
3. リターンヨークは、コイルによって発生した磁場の漏洩を防ぐ。

2. 電磁石における熱現象

電磁石のコイルで発生した熱による電磁石の温度変化を以下の4つのプロセスで考える。

- A : ジュール熱
- B : 熱伝導
- C : 放射
- D : 熱平衡

A : ジュール熱による熱の発生

コイルに電流を流す事で、コイル部分の抵抗によるジュール熱が発生する。

ジュール熱によって発生する熱量は、抵抗値と電流値によって決まり、

$$Q = P t = I^2 R t \quad \text{- 式 1}$$

(Q : 発生熱量 P : 消費電力 I : 電流 R : 抵抗)

で求められる。

B : 伝導による熱の移動

コイルで発生した熱は、伝導によってコイルと接触する周囲の物体に移動する。

伝導によって移動した熱量は、コイルや周囲の物体の温度変化によって決まり、

$$Q_1 = -m_1 C_1 (T_2 - T_1) \quad \text{- 式 2}$$

および

$$Q_2 = m_2 C_2 (T_2 - T_0) \quad \text{- 式 3}$$

(Q_1 : コイルの失う熱量 m_1 : コイルの質量 C_1 : コイルの熱容量

T_1 : 熱伝導前のコイルの温度 Q_2 : 周囲の物体が受け取る熱量

m_2 : 周囲の物体の質量 C_2 : 周囲の物体の熱容量

T_0 : 周囲の物体の初期温度 (常温) T_2 : 熱伝導後の温度)

という式で表現できる。

式 2, 3 を代入することにより、熱が外部に逃げないと仮定すると $Q_1 = Q_2$ となり

$$T = \frac{m_1 C_1 T_1 + m_2 C_2 T_0}{m_1 C_1 + m_2 C_2} \quad \text{- 式 4}$$

と表現することができる。

C : 放射による熱の散逸

電磁石に発生した熱は、放射によって空気中に放出される。

放射によって放出される熱量はコイルと周囲の気温及び表面状態によって決まり、

$$Q = A e (T^4 - T_0^4) \quad \text{- 式 5}$$

(Q : 放射によって単位時間あたりに失われる熱量 : ステファン・ボルツマン定数

A : コイルの表面積 e : 放射率 T : 電磁石の温度 T_0 : 空気の初期温度)

という式で表現される。

D：熱平衡

最終的にはAによって発生する熱量から、B及びCによる熱量の損失を差し引いたものがコイルの温度上昇に使われることとなる。また、電流を流しはじめてから十分な時間が経過すると、Aによって発生する熱量とB及びCによる熱量の損失が等しくなり、電磁石の温度が一定となる。このような状態を動的な平衡状態と呼び、このときの温度を平衡温度と呼ぶ。

3．温度測定の方法

温度を測定する方法には、以下のような方法がある

- 1．アルコール温度計や水銀温度計を用いた直接測定
- 2．サーモグラフィのような赤外線放射を捉える間接測定
- 3．物質の物理的特性などを利用して温度を導出する間接測定

直接測定は直接的に温度測定を行うものであり、間接測定は物理特性などを利用して温度を導出するという違いがある。

今回は3を利用し、特にコイル部分に用いた銅の抵抗率が温度によって変化する事を利用し、電流と電圧の変化から温度を求める間接測定を行った。

この方法を採用した理由は、表面だけでなくコイル内部の情報もわかるからである。

1では温度計をコイル内部に配置する事は極めて困難であり、2ではサーモグラフィを用いて赤外線放射を捉えるための特殊な機材が必要となり扱いづらい上、コイル表面の温度しか測定できない。

1, 2とは対照的に、今回用いた測定方法であればコイル部分の抵抗の変化を捉えるためコイル全体の平均的な温度を測定することが可能となる。従ってコイル内部の温度の直接測定により近い測定が可能となるといった特徴があり、また、電流と電圧の変化のみを測定するため測定が容易であるという利点もある。

温度変化と抵抗率の関係は

$$T = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{R}{R_0} - 1 \right) \quad \text{式 6}$$

(T : 温度変化 α : 抵抗の温度係数 R : 温度変化後の抵抗 R₀ : 温度変化前の抵抗)
という式で表現される。

4. 今回設計、製作した電磁石

4 - 1 電磁石の組立図

今回設計、製作した電磁石の組立図を次の図2～図4に示す。

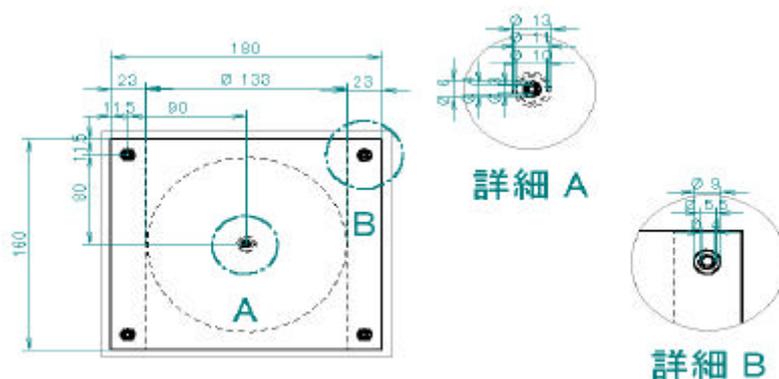


図2
電磁石の組立図
(俯瞰図)

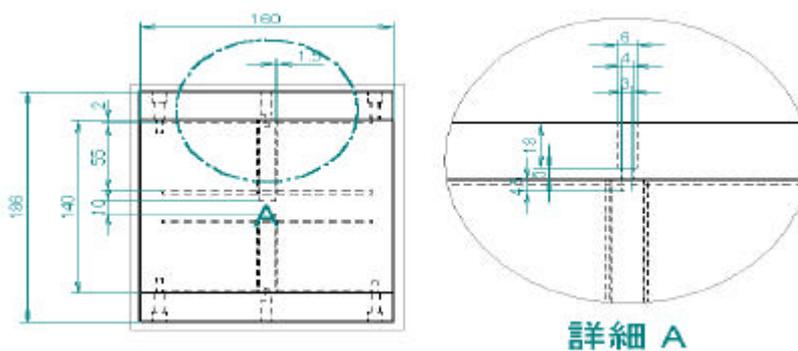


図3
電磁石の組立図
(側面図1)

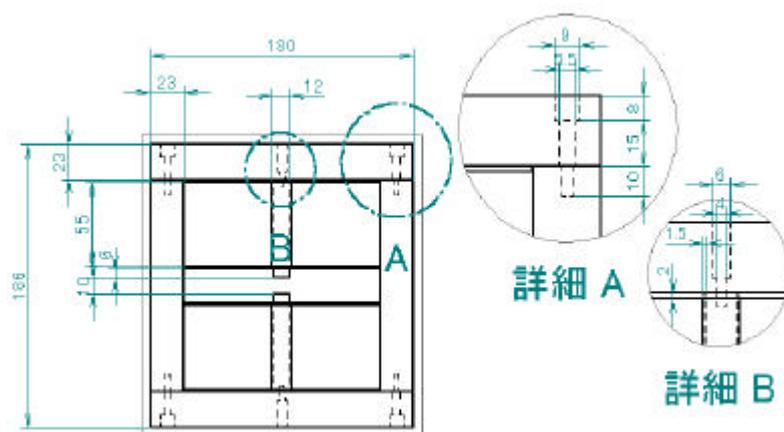


図4
電磁石の組立図
(側面図2)

今回は磁極およびリターンヨーク部分には純鉄を用い、コイル部分には直径2mmの銅線を用いた。また、銅線被膜には塩化ビニル樹脂を用いている。

ここで、耐熱温度が最も低く、かつ最も温度が高くなる部分がコイル、特に被膜部分であり、その耐熱温度は155である。

4 - 2 熱現象

設計した電磁石について2章で述べた各熱現象を考える。

A . ジュール熱による発熱量

設計図面より銅線の長さは約81mとなる。銅の抵抗率が $2.0 \times 10^{-8} \text{ } \cdot \text{m}$ であるため、コイル1個の抵抗は約0.51 となる。

また設計段階でコイルに流す電流は10Aとしたため、コイル1個が1秒あたりに消費する電力は

消費電力 $P = 10 \times 10 \times 0.51 = 51 \text{ (J/s)}$ となり、

発生熱量 $Q_1 = P t = 51 t \text{ (J)}$ となる。

以上により1秒あたりにコイルから発生する熱量は51Jとなる。

また、温度上昇と発生熱量の間には

$$T = \frac{Q}{m_1 C_1} \quad \text{- 式7}$$

という関係があるため、他への熱の移動を考えなければ

1秒あたりのコイルの温度上昇は

$$T = \frac{51}{2.2 \times 387} = 0.06 \text{ (/s)} \quad \text{- 式8}$$

となる。

B . 伝導によってコイルが失う熱量

コイルが伝導によって失う熱量は式4より

$$T_2 = \frac{2.2 \times 387 \times T_1 + 4.1 \times 448 \times 20}{2.2 \times 387 + 4.1 \times 448} = \frac{8.51 \times 10^2 T_1 + 3.67 \times 10^5}{2.69 \times 10^3} \quad \text{- 式9}$$

となる。

このとき、 T_1 は先に求めたジュール熱による温度上昇を含んでいるため、このときの温度も時間とともに上昇しつづけることになり、その上昇率は

$$\frac{T}{t} = 0.013 \text{ (/s)}$$

となる。

C . 放射によってコイルが1秒間あたりに失う熱量

放射によって空气中に散逸する熱量を考え、常温を20 とすることで式5より

$$Q = 5.67 \times 10^{-4} \times 0.048 \times 0.052 \times (T^4 - 293^4) \text{ (J/t)}$$

となる。

D．平衡温度

平衡温度を求めるため、ジュール熱によって発生する熱量と、放射や伝導によって失われる熱量が等しくなったと仮定すると式1と式5が等しくなるため

$$P t = A e (T^4 - T_0^4) t \text{ となり、それぞれの計算結果から}$$

$$51 = 5.67 \times 10^{-8} \times 0.15 \times 0.06 (T^4 - 293^4)$$

$$T = 84 (\quad) \text{ となる。}$$

また、上昇温度 T は約 64 と推測される。

5．温度測定

温度測定は図5のようにして行った。安定電源には日本スタビライザー工業株式会社製 SIC-1A10 を、電流計には Hewlett-Packard 社製 Handheld Multimeter E2377A を、電圧計には Hewlett-Packard 34401A Mutimeter を用いた。

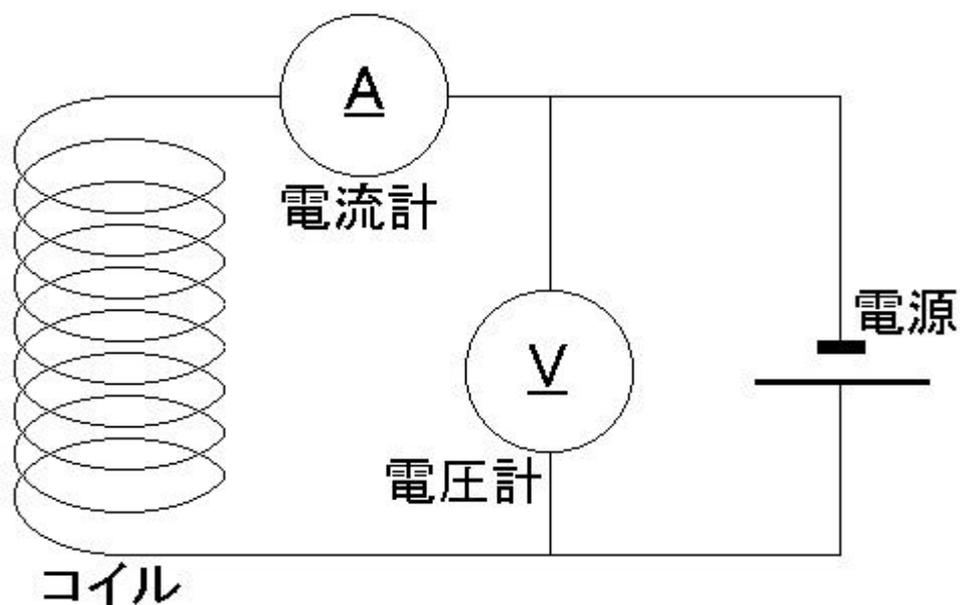


図5 温度の測定方法

4 - 2 で求めた予測値および測定の結果を表1と図4に示す。

電源 SIC-1A10 は定電圧電源として用い、電流計、電圧計の誤差は、電流が 0.1 (A) 電圧が 0.01 (V) であった。温度の誤差は測定値に対して約 1% 程度である。

6．考察

予測値は約64の上昇となり熱的には安全であると推測されたが、測定された上昇温度も徐々に予測値に近づく形で収束しており、今回想定したモデルに基づく平衡温度の予測は正しかったと言える。

だが、温度が上昇する過程において予測値と実測値が大きく食い違っている事が判る。

これは、温度上昇を予測する際に最も危険な条件を考え、上昇過程においては放射や伝導による熱の損失をほぼ0として扱ったことが原因であると推測される。

そのため、放射や伝導による熱の損失を含めて予測を行えば予測値は現在の値よりも小さくなる事が推測され、実測値もこれを証明しているといえる。

7．結論および今後の課題

今回設計、製作した電磁石は熱的に安全であると推測され、またそれを実証することができたといえる。だが、今回想定したモデルでは温度が上昇していく過程において予測値と実測値が大きく異なるため、今後は上昇過程においても予測と実測が一致するようモデルを改訂する必要があるといえる。

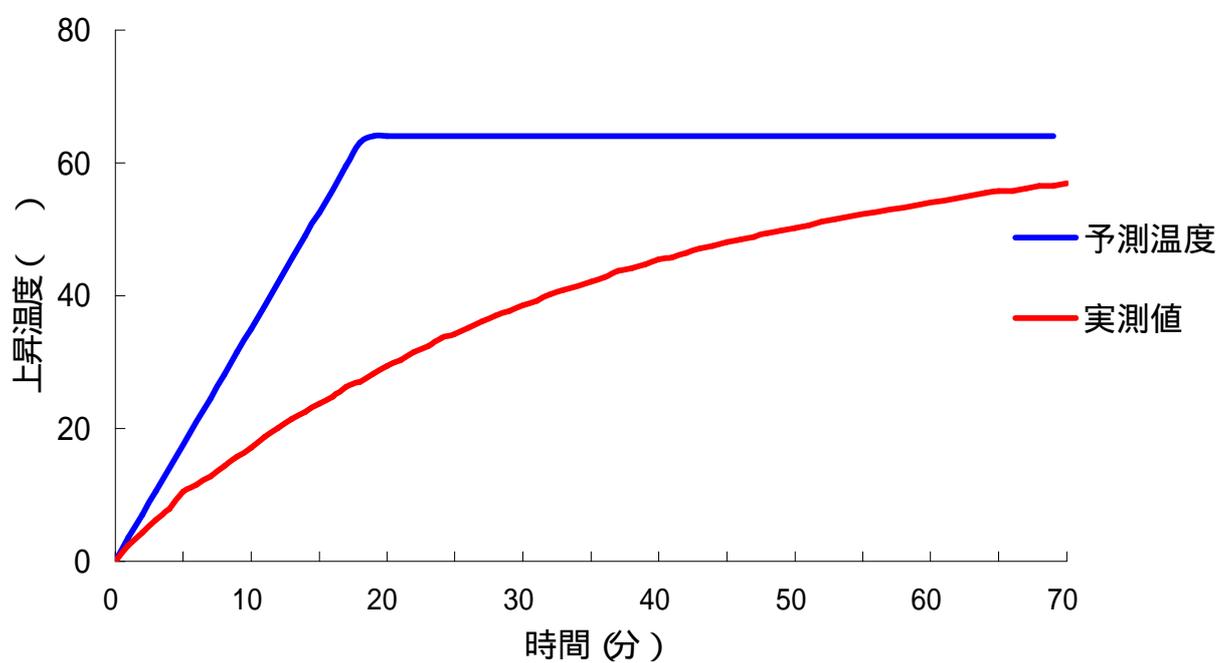
表1 予測値と測定値

時間(分)	電圧(V)	電流(A)	抵抗()	上昇温度()	予測上昇温度()
0	11.03	10	1.10	0.00	0
1	11.03	9.9	1.11	2.33	3.5
2	11.03	9.82	1.12	4.23	7
3	11.03	9.74	1.13	6.19	10.5
4	11.03	9.67	1.14	7.92	14
5	11.03	9.57	1.15	10.41	17.5
6	11.04	9.53	1.16	11.52	21
7	11.04	9.48	1.16	12.82	24.5
8	11.04	9.42	1.17	14.38	28
9	11.04	9.37	1.18	15.71	31.5
10	11.04	9.32	1.18	17.03	35
11	11.04	9.26	1.19	18.65	38.5
12	11.04	9.21	1.20	20.01	42
13	11.04	9.16	1.21	21.41	45.5
14	11.04	9.12	1.21	22.50	49
15	11.04	9.08	1.22	23.63	52.5
16	11.04	9.04	1.22	24.76	56
17	11.04	8.99	1.23	26.20	59.5
18	11.04	8.96	1.23	27.06	63
19	11.04	8.92	1.24	28.24	64
20	11.04	8.88	1.24	29.41	64
21	11.04	8.85	1.25	30.29	64
22	11.04	8.81	1.25	31.50	64
23	11.04	8.78	1.26	32.40	64
24	11.04	8.74	1.26	33.61	64
25	11.04	8.72	1.27	34.24	64
26	11.04	8.69	1.27	35.15	64
27	11.04	8.66	1.28	36.07	64
28	11.04	8.63	1.28	37.01	64
29	11.05	8.61	1.28	37.65	64
30	11.05	8.58	1.29	38.59	64
31	11.05	8.56	1.29	39.22	64
32	11.05	8.53	1.29	40.17	64
33	11.05	8.51	1.30	40.82	64

時間(分)	電圧(V)	電流(A)	抵抗()	上昇温度()	予測上昇温度()
34	11.05	8.49	1.30	41.47	64
35	11.05	8.47	1.30	42.11	64
36	11.05	8.45	1.31	42.76	64
37	11.05	8.42	1.31	43.75	64
38	11.05	8.41	1.31	44.08	64
39	11.05	8.39	1.32	44.74	64
40	11.05	8.37	1.32	45.40	64
41	11.05	8.36	1.32	45.73	64
42	11.05	8.34	1.32	46.39	64
43	11.05	8.32	1.33	47.09	64
44	11.05	8.31	1.33	47.42	64
45	11.05	8.29	1.33	48.09	64
46	11.05	8.28	1.33	48.43	64
47	11.05	8.27	1.34	48.77	64
48	11.05	8.25	1.34	49.47	64
49	11.05	8.24	1.34	49.81	64
50	11.05	8.23	1.34	50.15	64
51	11.05	8.22	1.34	50.49	64
52	11.05	8.2	1.35	51.18	64
53	11.05	8.19	1.35	51.53	64
54	11.05	8.18	1.35	51.87	64
55	11.05	8.17	1.35	52.22	64
56	11.05	8.16	1.35	52.56	64
57	11.05	8.15	1.36	52.94	64
58	11.05	8.14	1.36	53.29	64
59	11.05	8.13	1.36	53.64	64
60	11.05	8.12	1.36	53.99	64
61	11.05	8.11	1.36	54.34	64
62	11.05	8.1	1.36	54.69	64
63	11.05	8.09	1.37	55.04	64
64	11.05	8.08	1.37	55.40	64
65	11.05	8.07	1.37	55.75	64
66	11.05	8.07	1.37	55.75	64
67	11.05	8.06	1.37	56.11	64
68	11.05	8.05	1.37	56.46	64

時間(分)	電圧(V)	電流(A)	抵抗()	上昇温度()	予測上昇温度()
69	11.05	8.05	1.37	56.49	64
70	11.05	8.04	1.37	56.85	64

図4 予測値と測定値のグラフ



付録・今回の研究における課題等について

- 1 . 設計段階において磁極が非常に細く、加工が困難であった。
設計段階ではより強い磁場を出すにはコイルの巻き数が多い方が良いと判断し、磁極を細くすることでコイル部分の容積を増やすという手法を取ったが、実際に磁極に加工を行うにあたってはドリルやタップの破損といった問題が発生した。

これは設計段階において加工方法等の検討を行っておらず、図面から実際のものをイメージできなかった事が原因と言える。

今後はこのような事が起こらないよう、図面を元にどの程度の大きさとなるのか、またそれをどのように加工するのかといったことを検討すべきであるといえる。
- 2 . 磁場計算ソフトP o i s s o n S u p e r F i s hの使い方に習熟していなかった。
今回磁場計算に使用したP o i s s o n S u p e r F i s hであるが、使い方が非常に複雑であるため、その習熟に時間を取られることとなった。また、入力手順等がわかりづらいという問題点も浮き彫りとなった。

これは、実際にどの程度の磁場が出るのかが判っている電磁石などを用いて、どのような数値を入力すれば実際の数値に近い計算結果が得られるかという試行錯誤を行う時間が取れなかったのが原因であると言える。

そのため、以降もこのソフトウェアを使うのならば、すでに判っている測定値を元にして、ソフトウェアの使い方を習熟すべきであると感じた。