

実験項目10「磁気エネルギー」

計測・解析に関する手引き(ソフトウェアの使用法を中心に)

(2002/09/13)

実験を始める前の諸注意

1. ゴム手袋の着用

電磁石には約 400V の電圧が印加されています。感電しないように電極は樹脂で塗り固めてあります。但しこれを過信せず、磁石の間隙に手を入れて作業するときは、万が一に備えて必ずゴム手袋を着用する。

2. 主に使用する探査コイルを取り間違えないこと

今回の実験で使用する探査コイルは 2 種類あります。主に使用するのはコイルの断面積が小さい No.1 の方です。



No1 コイル

3. バックアップはこまめに（後で泣かないように）

今回の実験で使用するソフトウェアは、デジタルマルチメータからの出力を記録する IntuiLink(Excel のアドインソフト)とグラフ作製用の Origin の 2 種類です。ソフトウェアが制御不能、あるいは誤ってソフトウェアを終了してしまった等の原因でこれまでの作業を無駄に

してしまわないよう、どちらのソフトウェアも作業の途中でこまめに作業内容(プロジェクト)を保存する。

1. 装置の準備

作業テーブルに接した壁面にある 100V と 200V のブレーカーを通電状態にする。

コンピュータ及びデジタルマルチメータを起動する。

デジタルマルチメータのフロントパネルを操作して測定モードを AC,V に設定する。

探査コイル No1 を測定台に取り付ける。測定台のアームが水平となるように 4 本の脚を調節する。

測定台からの出力ケーブルをデジタルマルチメータの測定端子に接続する。



IntuiLink のアイコンをダブルクリックし、プログラムを起動する。

図 1a-1d の手順で IntuiLink にデジタルマルチメータを認識させる。

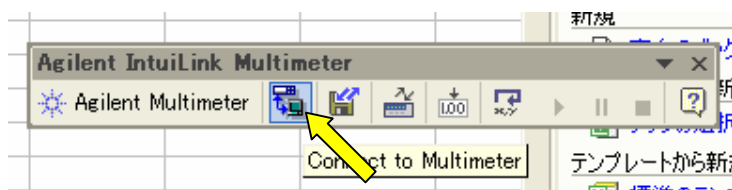


図 1a

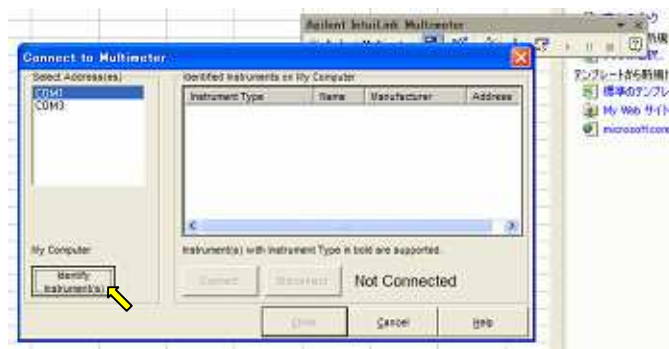


図 1b

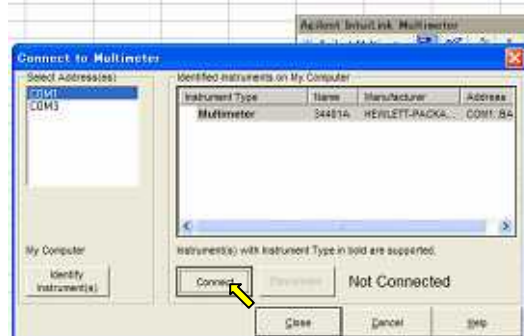


図 1c

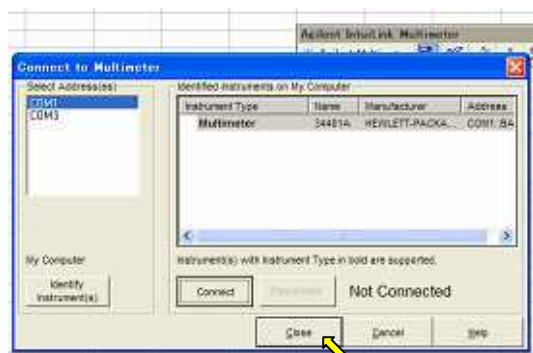


図 1d

図 2a-2b の手順に従い、デジタルマルチメータの測定モードを AC,V

に設定する。

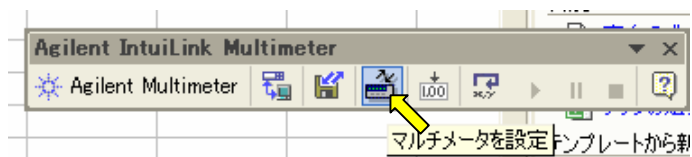


図 2a

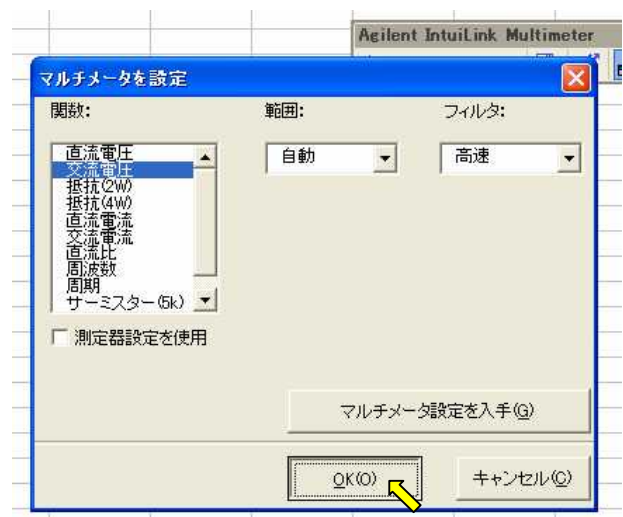


図 2b

2. 電磁石に印加された電流・電圧を記録

実験を行っている最中は磁石のコイルに終始一定の電流が流れていることが望ましい。実際には、商用電源の電圧には変動がある。また、コイル自体の発熱による抵抗変化の可能性もある。実験開始と終了の時点で電磁石に印加されている電流・電圧を記録し、その変動の程度を把握する。

3. 磁石の間隙の中心を決定.

教科書の(10-15)、(10-16)式を見てわかる様に、磁気エネルギーを求める体積積分は、実験的には和分に置き換えられている。磁石の間隙の中は前後(x 軸方向)、左右(y 軸方向)に対称であるため、実際の和分は $x>0$, $y>0$ の第一象限についてのみ行えばよい。こうして得られた値を4倍したものが間隙中の全領域にわたる和分に等しいと見なす。このような省力化によって誤差を生じさせないために、間隙の中心($x=y=0$)は正確に決定しておかなければならない。以下にその手順を説明する。



図1

[3.1 誘導起電力をコンピュータに読み込む](#)



図 2

図 1 に示すように、探査コイルを磁石の手前に据える。このとき、探査コイルの位置は左右方向に関してほぼ中央($y=0$)の地点であること。測定台のアームを前後(x 軸方向)に 1cm 刻みに動かし、その都度探査コイルが発生する誘導起電力をコンピュータに取り込む(Excel のワークシートに記録する)。以下にその手順を説明する。

Excel のワークシートの第 1 列に、測定台のアームに記されている目盛りに対応した 1cm 刻みの数値を記入する(図 2 には、探査コイルが磁石の間隙に入る直前の時点でのアームの目盛りが 2 である場合を示している)。マウス或いはキーボード操作で、ワークシート上のプロンプトを第 2 列の先頭にもってくる(図 2)。IntuiLink ツールバーの中の「読み取りを一回行う」ボタンを押す(図 3)。以上の操

作でワークシートの B1 欄にデジタルマルチメータの値が記録される (図 4)。

次いで、探査コイルを前方に 1cm 移動し、ワークシート上のプロンプトを B2 欄に移動する。再び「読み取りを一回行う」ボタンを押し、今度は B2 欄にデジタルマルチメータの値を取り込む。以下同様にして、探査コイルを 1cm 移動する都度、誘導起電力の値をワークシートに取り込む。最終的には図 5 のようにワークシートが完成する。

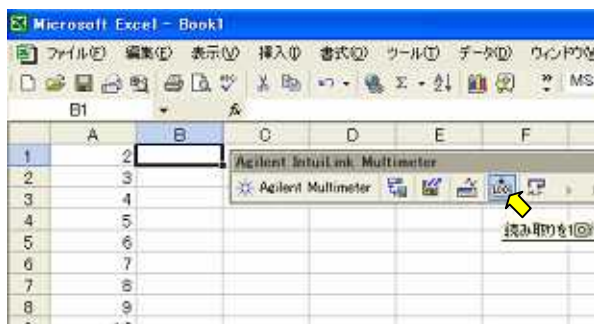


図 3

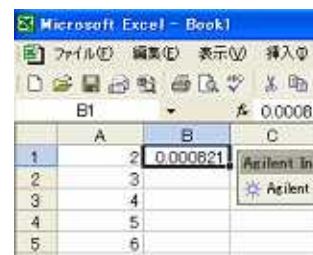


図 4

	A	B	C
1	2	0.000821	
2	3	0.001418	
3	4	0.002379	
4	5	0.003705	
5	6	0.006013	
6	7	0.010438	
7	8	0.018796	
8	9	0.021681	
9	10	0.021805	
10	11	0.021766	
11	12	0.021806	
12	13	0.021913	
13	14	0.022015	
14	15	0.022271	
15	16	0.022514	
16	17	0.022703	
17	18	0.019684	
18	19	0.011885	
19	20	0.007897	
20	21	0.005879	
21	22	0.004475	

図 5

3.2 グラフから $x=0$ を決定する

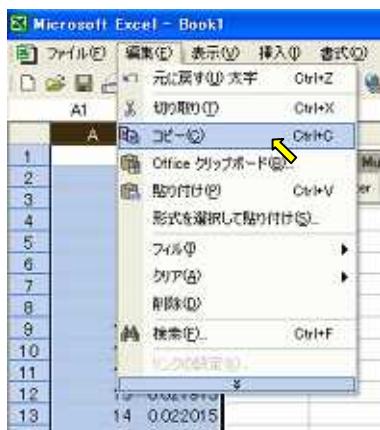


図 6

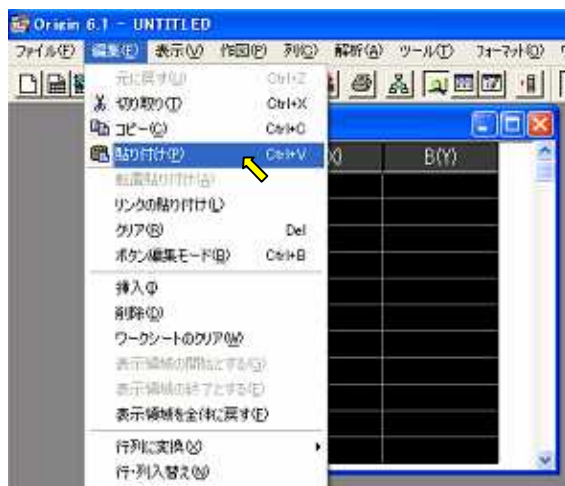


図 7

Origin を起動する。Excel のワークシートの第 1 列と第 2 列を選択し、「編集_コピー」コマンドを実行する(図 6)。次いで、Origin のワークシートの第 1 列と第 2 列を選択し、「編集_貼り付け」コマンドを実行する(図 7)。ワークシートの第 2 列を選択し、「作図_折れ線」コマンドを実行する。図 8a のように作図されたグラフが表示される。

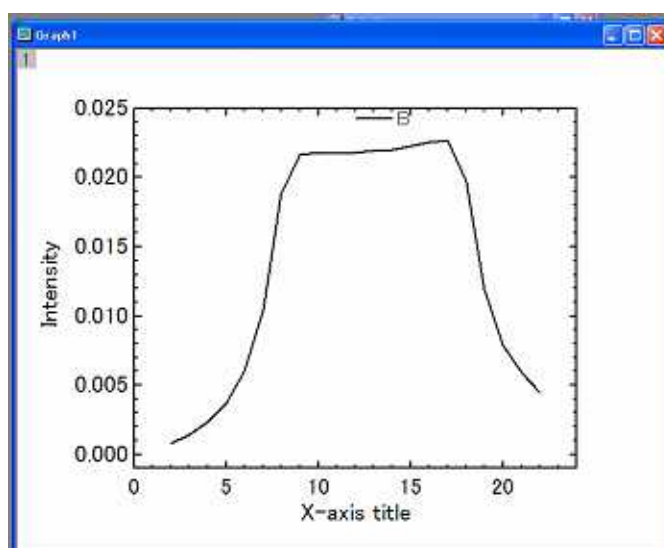


図 8a

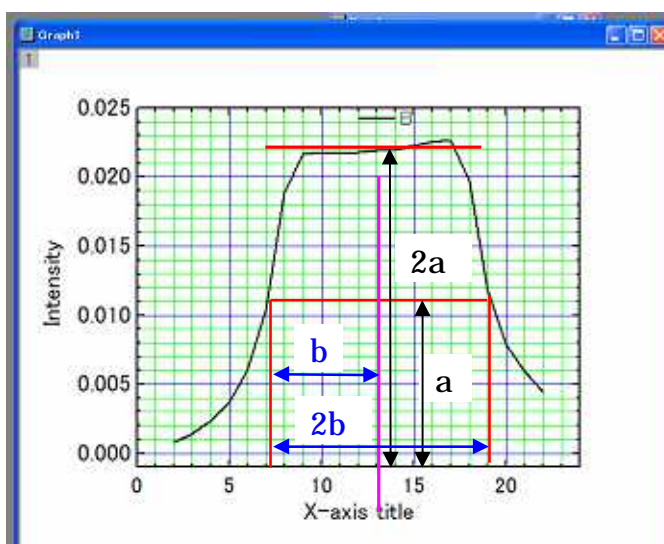


図 8b

これを以下に述べる手順で、

図 8b のようにグリッド付きのグラフに変更する。グラフの x 軸或いは y 軸をダブルクリックすると、「軸」ダイアログが表示される(図 9)。ダイアログの「グリッド線」タブをクリックする(図 9)。水平方向・垂直方向ともにチェックボックスをオン状態にする(図 10)。以上でグラフのグリッド表示が完了する。図 8b を例にすれば、探査コイルの前後方向の動きを示す目盛りが 13.1 の時、探査コイルは磁石間隙の $x=0$ の地点にすることがグラフより決定される。



図 9



図 10

3.3 グラフから $y=0$ を決定する

探査コイルを $x=0$ の線上で左右に 1cm 刻みに動かしその都度、誘導起電力を Excel のワークシートに記録する。 $x=0$ を決定した場合と同様のグラフを、Origin を使って描画する(図 12)。起電力の変化の最も急な 2 点の中間点を $y=0$ として決定する(図 9b 参照)。

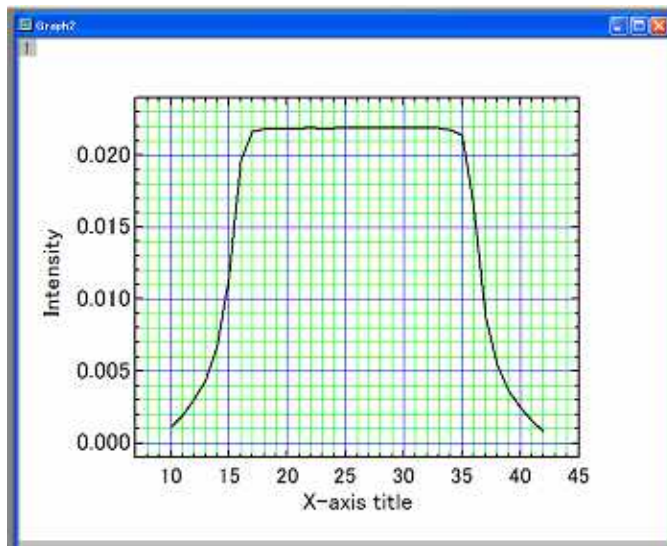


図 11

4. 間隙中の磁束密度分布の測定

4.1 誘導起電力の記録

Excel の新しいワークシート(sheet2)を用意する。電磁石の間隙の中心

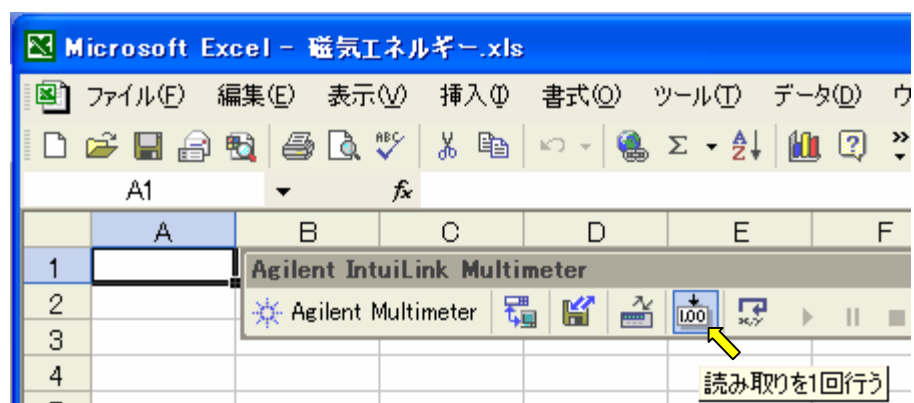


図 1

($x=y=0$) に探査コイルを置く。そこから手前に 5mm、右に 5mm 動かす。この地点における誘導起電力を A1 欄に取り込む(図 1)。次いで、ワークシートのプロンプトを A2 欄に移動する。探査コイルを手前に 1cm 動かす。誘導起電力を A2 欄に取り込む。以下同様にして、第一象限で起電力が最大値の 5%以上(1mV 以上)の場所をワークシートに記録し尽くす。そろそろファイルをセーブしておく。

4.2 誘導起電力の 2 乗和の算出

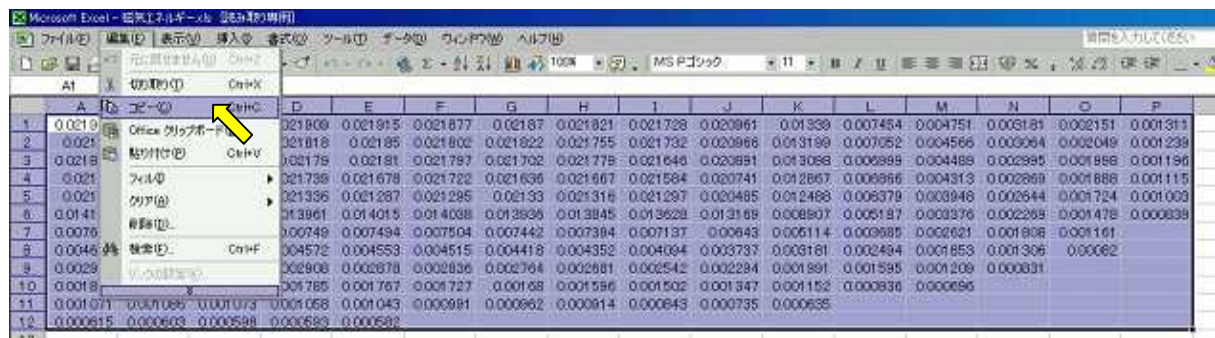


図 2

誘導起電力 $e(i, j)$ の 2 乗和 $\sum_{i,j} e(i, j)^2$ の算出に Excel を利用する。sheet2 のデータ全体を選択し、「編集_コピー」コマンドを実行する(図 2)。このデータを貼り付けるのに必要な行数だけ、新しいワークシート(sheet3)の行を選択する(図 3)。「編集_貼り付け」コマンドを実行し、データを貼り付ける(図 3)。「編集_切り取り」コマンドと「編集_貼り付け」コマンドを繰り返し用いて sheet3 のデータを A 列に縦 1 列に並べ替える(図 4)。B1 欄をプロンプトにする。”=a1^2” とキーボード入力する(図 5)。最後にエンターキーを押すと、A1 欄の値

を 2 乗したものが B1 欄に出力される。プロンプトを再び B1 欄に戻す。B1 欄の右下に表示されている小さい黒四角(図 6a)を、A 列のデータが終わる行番号までドラッグ&ドロップする(図 6b)。A 列の全ての数値の 2 乗が B 列に出力される(図 6c)。B 列のデータが全て選択されている状態でオートサムのコマンドボタンをクリックする(図 7)。B 列の最後に B 列の数値全ての和、即ち $\sum_{i,j} e(i,j)^2$ が出力される(図 8)。



図 3

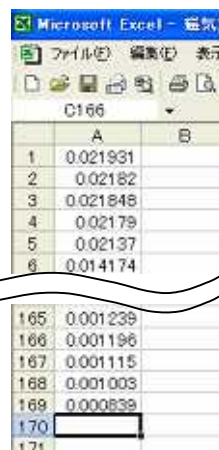


図 4

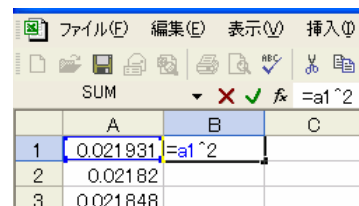


図 5

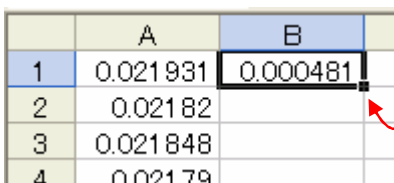


図 6a

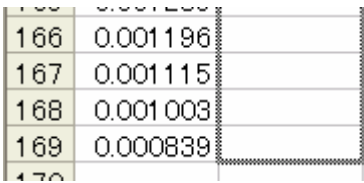


図 6b

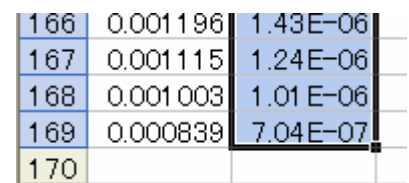


図 6c

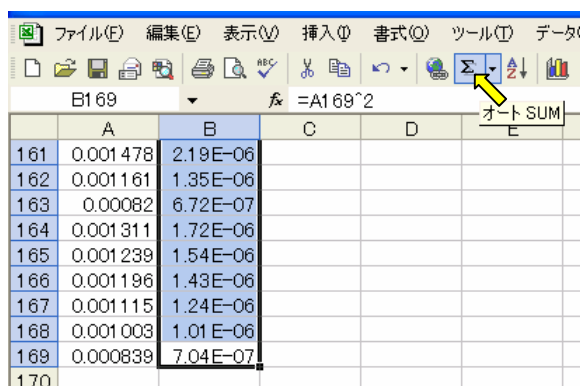


図 7

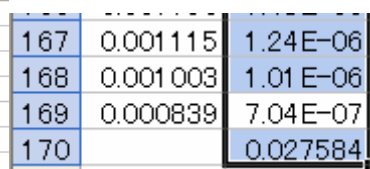


図 8

5. 誘導起電力の較正

探査コイル No1 は直径が 2.6mm でしかない。一方 No2 コイルの直径は 12mm ある。従って、No2 コイルと比較して No1 コイルは、空間分解能に優れる。但し、No1 コイルは公称断面積に含まれる誤差の割合が大きいため、誘導起電力から換算した磁束密度の絶対値には誤差が大きい。これを補正するため、以下の処置を施す。空間的に磁束密度の変動の小さい地点で (即ち、電磁石の間隙の中心近くで) 上記 2 つのコイルを用いて測定した磁束密度の値をそれぞれ $B1$ 、 $B2$ とする。任意の地点において No1 コイルを用いて測定した磁束密度に補正係数として ($B2/B1$) を乗ずる。

6. 磁気エネルギー (U_M) の算出

以下の式に従って磁気エネルギーを求める。

$$U_M = 4\Delta x\Delta y\Delta l \sum_{i,j} \{B(i,j)\}^2 / 2\mu_0 = \frac{2\Delta x\Delta y\Delta l}{\mu_0} \left\{ \frac{1}{n\omega S_1} \left(\frac{B_2}{B_1} \right) \right\}^2 \sum_{i,j} \{e(i,j)\}^2$$

ここで、 $\Delta x = \Delta y = 1.0\text{cm}$ 、 $\Delta l = 2.0\text{cm}$ であり、 $\Delta x \Delta y \Delta l$ が和分のさいの 1 微小区画の体積を表す。 S_1 は No1 コイルの断面積を表し、 μ_0 は真空透磁率 ($=4 \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$)。

7. 一回巻きコイルの誘導起電力の測定

電磁石の鉄心にケーブルが一回巻きつけられている。この一回巻きコイルの両端が端子台に固定されている (図中の黄色の楕円)。
端子台とデジタルマルチメータの間を接続して、一回巻きコイルに誘起される起電力を測定する。

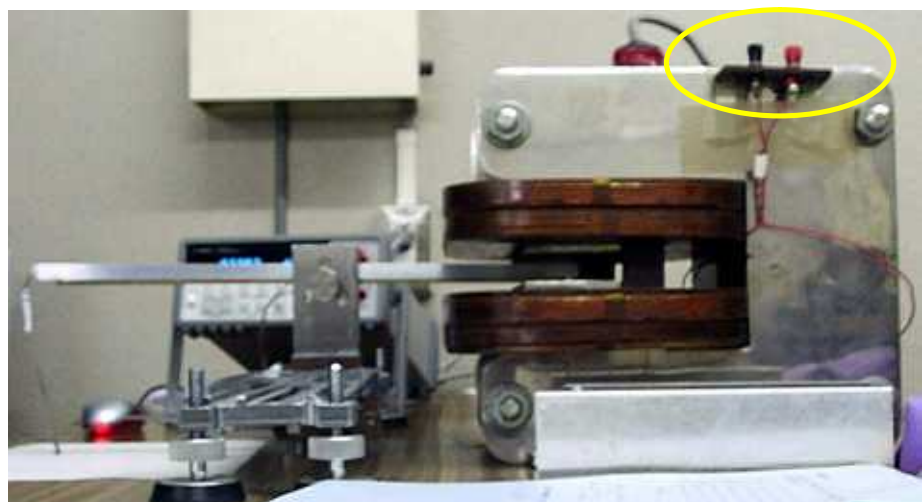


図 1

8. 電気エネルギー (U_I) の算出

一回巻きコイルに生じる誘導起電力を $e_1 \cos(\omega t)$ とすれば、 N 巻きの電磁石のコイル自身に生ずる起電力は

$$V = Ne_1 \cos(\omega t)$$

である。一方、コイルの自己インダクタンスを L とおけば、

$$V = L \frac{dI(t)}{dt} = L\omega I \cos(\omega t)$$

であるから結局、

$$L = \frac{Ne_1}{\omega I}$$

を得る。インダクタンス L のコイルに電流 I が流れているとき、そこに蓄えられているエネルギー (電流を 0 から I [A] まで増やすために為された仕事) は以下の式で表される。

$$U_I = \frac{1}{2} LI^2$$