

磁気あるいは磁性という言葉は、英語では「magnetism」という。この言葉には、「(知的)魅力」とか「人を引きつける力」という意味もある。magnetism は、私たちを不思議な磁気の世界へ言葉としてふさわしい。本プログラムでは日常、頻繁に用いられるフェライト磁石について磁力の消し方と作り方を学ぶ。

【解説】

1.磁化と磁束密度

一般に、物質は外部から磁界を加えられると、多かれ少なかれ磁気モーメントをもつようになる。このことを、物質は磁界により**磁化**するという。例えば、鉄は強く磁化し、アルミニウムは弱く磁化する。磁化する物質を磁性体とよぶことにすれば、どんな物質でも磁性体といえる。鉄の様に強く磁化する磁性体を、特に、**強磁性体**とよんでいる。

物質が一様に磁化するとき、その物質の単位堆積あたりの磁気モーメントを、**磁化の強さ**あるいは単に**磁化**と呼んでいる。すなわち磁化した物質の体積を $V[m^3]$ 、その磁気モーメントを M (物質) $[Wb \cdot m]$ とすると磁化 I は

$$I = \frac{M}{V} [Wb/m^2] \dots\dots\dots (1)$$

いま、図1・1のような長さ l [m] で断面積 S $[m^2]$ の円柱状の磁性体が一様に磁化しているとしよう。この磁性体のもつ磁気モーメントを M とすると、体積 $V=Sl$ であるから(1)式より磁化 I は

$$I = \frac{M}{Sl} \dots\dots\dots (2)$$

となる。一方、図の1・1のようにこの磁性体の両端面には正負の磁極が現れている。この磁極の強さを m $[Wb]$ とすると、 M (物質) $=ml$ となるから、(2)式は

$$I = \frac{ml}{Sl} = \frac{m}{S} [Wb/m^2] \dots\dots\dots (3)$$

と表される。すなわち、この場合の磁化の強さは、磁性体の端面に現れる磁極の単位面積あたりの強さに等しいことがわかる。

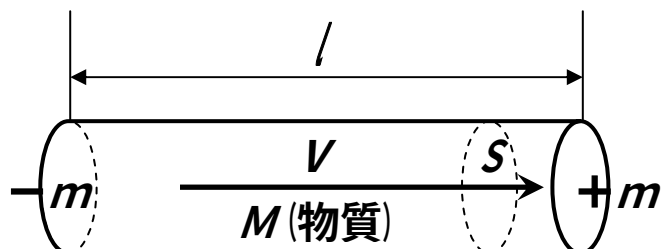


図1・1 磁化と磁性体の磁気モーメント

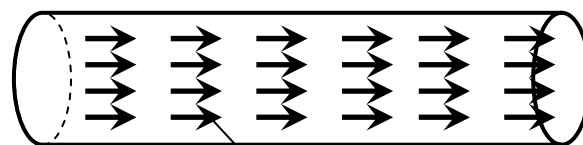
また,図 1・2 のように,磁性体の内部で,ミクロな磁気モーメント M (要素) $[\text{Wb} \cdot \text{m}]$ が向きをそろえて配列しているとき,単位体積 M (要素) の数を N $[\text{1/m}^3]$ とすれば,磁化は

$$I = NM \dots\dots\dots(4)$$

で与えられる。このミクロな磁気モーメントの起源については後に述べる。

磁性体に磁界 H $[\text{A/m}]$ を加えたとき,
磁化 I が H に比例して生ずる場合には

$$I = \chi H \dots\dots\dots(5)$$



M (要素)

図 1・2 磁化とミクロな磁気モーメント

と表すことができる。この比例定数 χ を
磁化率とよんでいる。

さて,磁性体が存在しない場合でも真空中に磁界 H があるとき,そこに $B = \mu_0 H$ の磁束密度が生じている。いま,この $\mu_0 H$ は真空中に磁界を加えることで生じた,いわば“真空の磁化”であると考えてはどうだろう。そうすると,磁性体が存在する場合には,この“真空の磁化” $\mu_0 H$ に磁性体の磁化 I を加えた量を磁束密度と定義できる。すなわち,

$$B = \mu_0 H + I = (\mu_0 + \chi) H = \mu H \dots\dots\dots(6)$$

と表すことができる。

2.磁化曲線

一般に強磁性体の磁化 I と磁界 H ,あるいは磁束密度 B と磁界 H とは,比例関係ではなく,非線形である。図 2 (a)に $I - H$ 曲線,2・1(b)に $B - H$ 曲線を示す。これらの曲線は一般に磁化曲線とよばれている。図 2 (a)で消磁状態($H=0$ で $I=0$ または $B=0$ の状態) a で磁場を加えていくともうこれ以上磁化しない飽和磁化 I_s に達する。この I_s は強磁性体本来がもつ磁化として考えられるので自発磁化ともよばれる。さらに H を増加させても通常の手段では I の増加は観測されない。(b)の方は,飽和磁束密度 $B_s = (\mu_0 H + I_s)$ に達した後,それ以降は H とともに $\mu_0 H$ だけ増加していく。

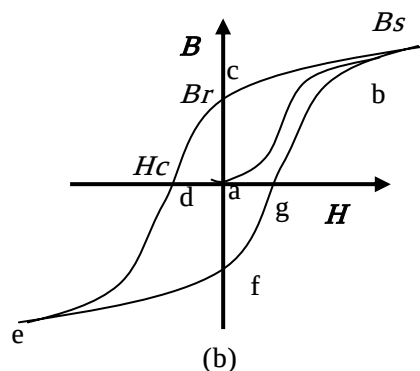
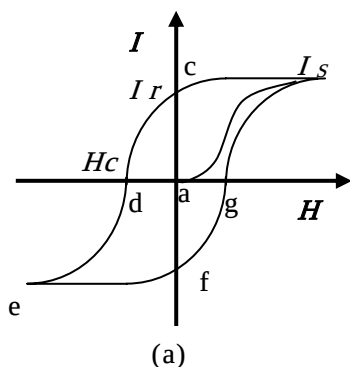


図2 磁化曲線

これらの曲線は**初磁化曲線**とよばれている。さて、飽和に達した後、 H を減少させていくと、初磁化曲線に沿って戻らないで、 $b \rightarrow c$ のように減少していく。 $H=0$ になっても $I r$ だけの**残留磁化**と $B r$ だけの**残留磁束密度**が残る。 $H=0$ であるから $I r = B r$ である。さらに反対向きの磁場を加えていくと、 $c \rightarrow d$ のように減少し、 $H c$ で $I=0, B=0$ となる。 $H c$ を**保磁力**とか**抗磁力**とよぶ。そのまま反対向きの磁場を印加していくと逆向きの飽和点に達する。ここで、逆向きの磁場を減少させていくと・・・以下これの繰り返しである。これらの曲線を**履歴曲線**とか**ヒステリシス曲線**という。永久磁石の材料としては、ヒステリシス曲線の線幅が広く、 $H c$ の値が大きくて、 $I r$ または $B r$ の大きい材料が適している。これらの材料は硬（ハード）磁性材料とよばれている。

3. 磁性の原因

図3・1のように、棒磁石を何度も細部に割って、いくら細かくしても、細片の一端にはN極が、他極にはS極が生じる。N極とS極はいつもペアを組んでいる。それでは、どんどん細かくしていったって、物質を構成している原子までに到達したらどうなるか。現代の物理学では、何種類かの原子にはN極とS極が対になっていることを明らかにしている。つまり、磁気モーメントを持っている原子がある。そのような原子は**磁性原子**とよばれている。典型的な磁性原子として、鉄（Fe）、コバルト（Co）、ニッケル（Ni）の原子である。磁性原子のもつ原子磁気モーメントの原因は何か、簡単な原子模型を基にして考えてみよう。

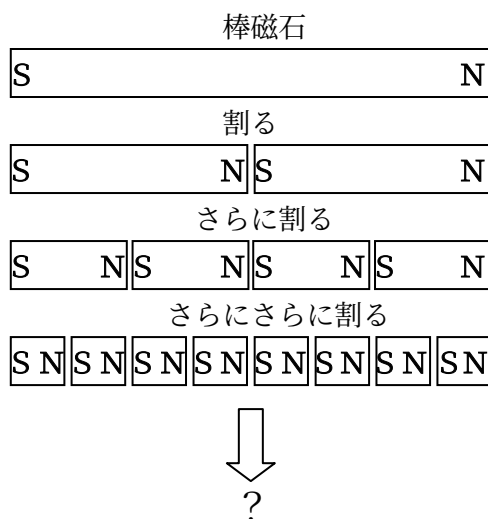


図3・1 棒磁石を細かく分割していく

3・1 電子の軌道磁気モーメント

原子は中心に原子核があって、そのまわりを電子がまわっている。電子は負の電荷をもっているから、電子の運動方向と逆向きに電流が流れていることに相当する。つまり小さな円コイルに電流が流れているのと同様で、そのまわりに小さな磁石作のような磁力線を生じている。このように、電子の軌道運動が磁気モーメントをつくっているのである。さて、この磁気モーメントは、**軌道磁気モーメント**とよばれている。これを求めてみよう。

電子（質量 m 、電荷 $-e$ ）が中心の原子核のまわりを速度 v 、半径 a の円軌道を描いて等速円運動しているとする。このとき、電子は中心に関する角運動量

$$J_0 = a m v \cdots \cdots \cdots (7)$$

をもつ。これを軌道角運動量とよんでいる。図3・2にその方向を示す。

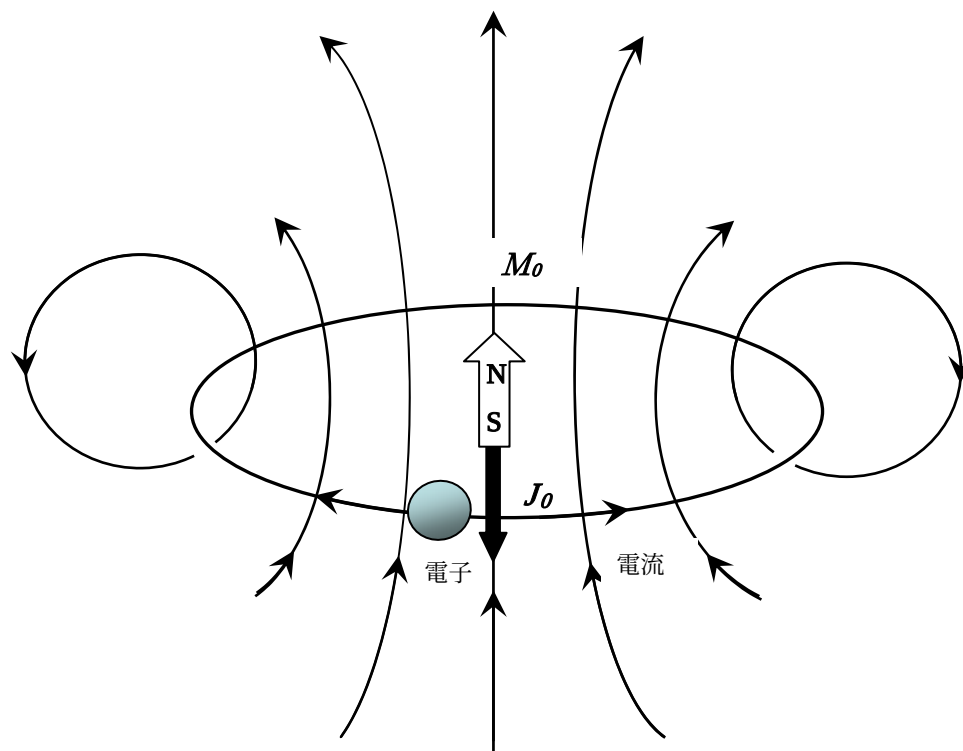


図 3・2 軌道角運動量と軌道磁気モーメント

一方,電子のこのような円軌道運動は,円電流

$$I_0 = -ev / 2\pi a [A] \cdots \cdots \cdots (8)$$

が流れていることに相当する。この円電流がつくる面積は $\pi a^2 [\text{m}^2]$ である。ここで,この円電流のつくる磁気モーメントは

$$M_0 = \mu_0 (-ev / 2\pi a) \pi a^2 = -\mu_0 eva / 2 \cdots \cdots (9)$$

となる。これは (7) 式を用いると,

$$M_0 = -(\mu_0 e / 2m) J_0 \cdots \cdots \cdots (10)$$

と表される。この軌道磁気モーメント M_0 は,軌道角運動量 J_0 に比例し,その方向は J_0 に逆向きである (図 3・2)

3・2 電子のスピン磁気モーメント

一方,電子は自分自身の固有の角運動量をもっている。これをスピン角運動量とよび, J_s で表すことにする。図 3・3 に示すように,電子は負の電荷をもつ球が回転 (スピン) しているようなもの,と考える。このようなモデルでは,電子のまわりには磁力線が生じている,すなわち電子自身が磁気モーメントをもっている,というイメージである。電子のもつ固有の磁気モーメントをスピン磁気モーメントとよび, M_s で表す。スピン磁気モーメント M_s は J_s と密接な関係があり,

$$M_s = -(\mu_0 e / m) J_s \cdots \cdots \cdots (11)$$

となることがわかっている。 M_s は J_s に比例し,その向きは J_s に逆向きである。また J_s は $J_s = h/4\pi$ で与えられる。

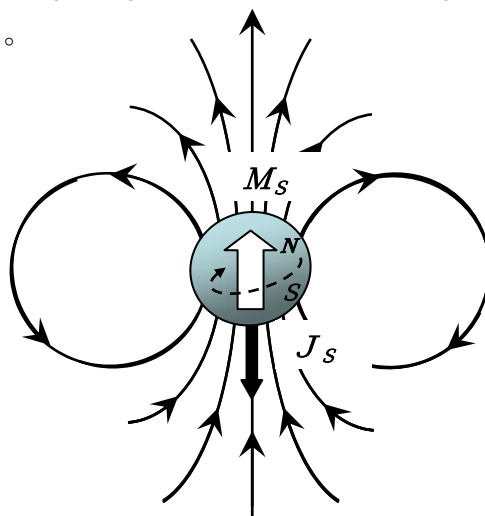


図 3・3 スピン角運動量とスピン磁気モーメント

以上から,磁性の源になるものはいくつかあり,しかし物質の磁性の源になるもの,あるいは磁性材料の磁化を担うものは何かと考えると,それは電子の磁気モーメントであると考えることができる(これが磁性体内部のミクロな磁気モーメントの正体である)。それらが複数個集まることで磁性体としての振る舞いをみせるのである。

4. 強磁性体の性質

4.1 磁区と磁壁 3.の冒頭で述べたとおり,磁性原子として鉄,コバルト,ニッケルがある。これらは外部磁場に対して,強く磁化することから**強磁性体**とよばれている。強磁性体の内部をみるといくつか自発磁化が集まって区画を形成しているのがわかる。(図 4・1)

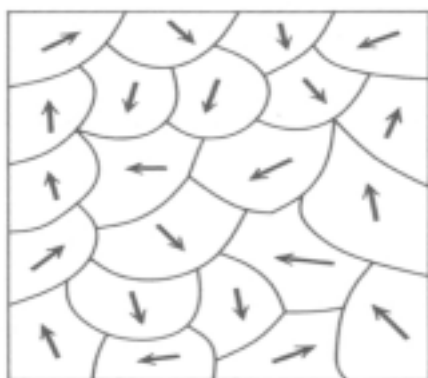


図 4・1 磁区構造

おのおのの磁区内で磁化は自発磁化の値をとるがその方向はそれぞれの磁区で異なり,お互いの磁化を打ち消し合い,巨視的な全磁化が0になっている。これを消磁状態という。磁区と磁区との間には有限の厚さの磁壁とよばれる遷移層があり,その中で磁気モーメントが回転している。

強磁性体の磁化過程は,この磁壁が移動して磁化が外部磁場の方向成分をもった磁区の体積が増す過程と,磁区内の磁気モーメントが外部磁場の方向へ回転する過程が考えられる。

前者の過程は比較的弱い磁場範囲で起こる。さて,2.で磁化曲線について述べた。いま,消磁状態にある強磁性体に外部磁場を加えると磁化し,その磁化の強さは磁場の強さを増すにつれて増えていく。このような強磁性体の磁化過程は内部の磁区分布が変化していく過程に対応している。このことを簡単なモデルでみてみよう(図 4・2)。図 4・2(a)は消磁状態

にある強磁性体の磁区構造を示している。体積の等しい4種類の磁区に別れ、各磁区の自発磁化がお互い打ち消しあって全体の磁化が0となっている。(b)のように横方向に磁場を加えると、この磁場の向きの自発磁化をもつ磁区の体積が増すように磁壁が移動する。さらに磁場を強くすると最終的には(c)のように磁場の方向を向いた磁区のみが残り単一の磁区となる。これが飽和点に達した**飽和磁化**に他ならない。このことから**飽和磁化は自発磁化**に等しいことがわかる。

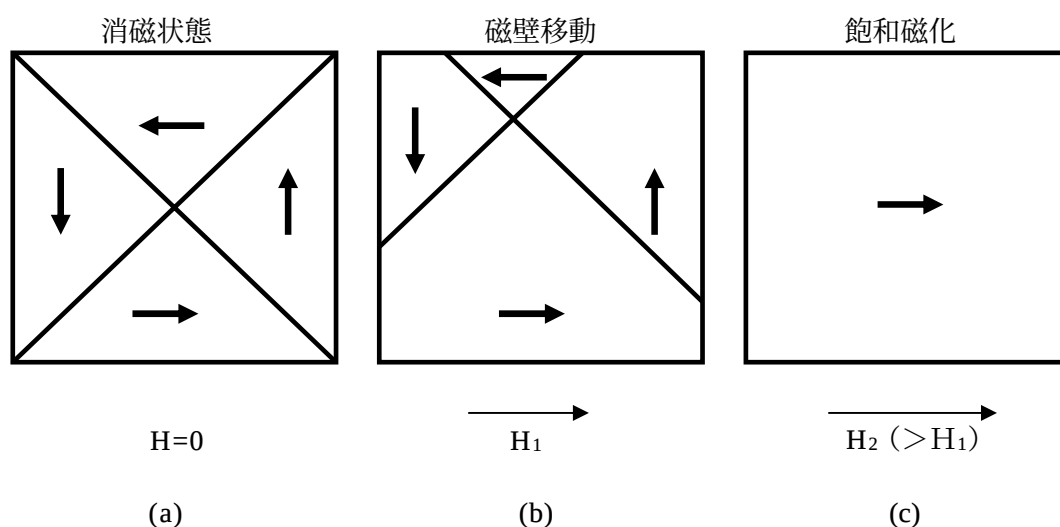


図 4・2 磁壁移動による磁化過程

4・2 自発磁化とキュリー温度

強磁性体の中では、スピンの平行に配列することで自発磁化を担っている。この平行配列は温度が上昇すると熱運動により配列が乱されて自発磁化が減少する。

最終的には**キュリー温度 T_c** で消磁状態となる。一度 T_c に達すると温度を下げてみたところで磁化が元に戻ることはない。

この T_c は強磁性体に固有のものであり、例えば鉄ならば 770°C 、ニッケルは 354°C である。

今テーマで使う、永久磁石である、フェライト、ネオジウムは T_c はそれぞれ、 470°C 、 310°C である。

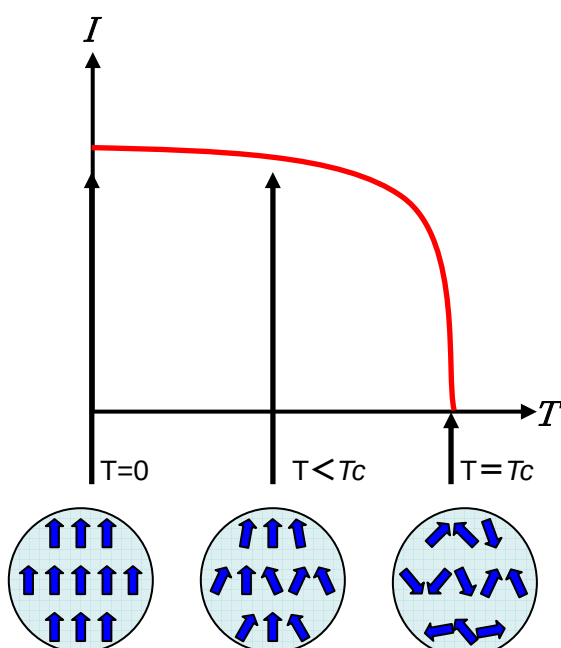
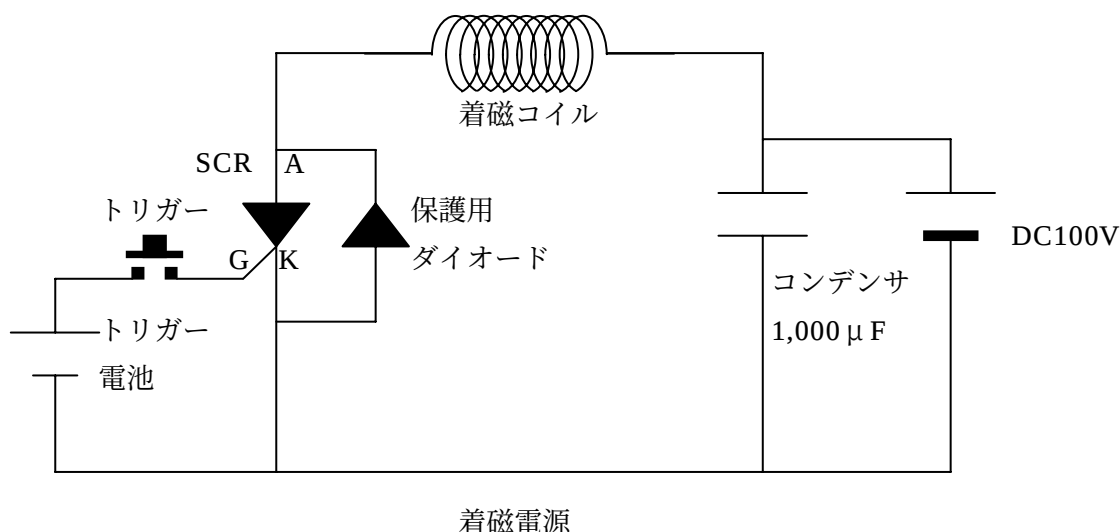


図 4・3 自発磁化とキュリー温度

【実験】

永久磁石のガスバーナーで T_c まで加熱して磁力がなくなっていることを確認してもらう。その後、着磁電源を作製し、磁化をして再び磁石に戻っていることを確認してもらう。

1. 着磁電源の作製



上図のような回路をユニバーサル基板上に作製し、脱磁した磁石に着磁を行なう。

サイリスター(SCR)は高速スイッチング素子とよばれる半導体素子である。着磁実験には相当量の電流が必要であり、高電流を扱うことから小さい抵抗に対しても大きな損失を伴う。高電流を扱う場合、損失をなるべく少なくするように工夫する必要がある。そこでシステムの損失が1～3%と少ないSCRが最適である。SCRは通常アノード-カソード間は絶縁されていて、ゲートに一定の電圧を感じるとアノード-カソード間を瞬時に短絡し電流を流し、アノード-カソード間を流れる電流がなくなるとまた絶縁する性質をもち高速なスイッチングが可能である。保護用ダイオードはスイッチオフになったあとに発生する逆向きの起電力からの回路へのダメージを抑えるためにある。

着磁コイル内に脱磁した磁石をセットし、コンデンサに充電を開始する。コンデンサの充電が完了し、トリガーを押すと、サイリスタのゲートにトリガー電池からの電圧が印加されコンデンサに溜まった電荷が一気に放出されコイルにパルス電流が流れる。その瞬間にコイルにはパルス磁場が発生し、その磁場により磁石を磁化するのである。

着磁した磁石が脱磁前と同じくらいの磁力をもてば成功である。

余談だが、この着磁電源に溜められるエネルギーはコンデンサの帯電エネルギーの式から、

$$E_C = \frac{1}{2} C V^2 \dots\dots\dots (12)$$

で与えられる。ここで、Cはコンデンサの静電容量、Vはコンデンサの両端にかかる電圧である。いま、コンデンサの静電容量Cは 1,000 μF、コンデンサの両端にかかる電圧は 100V とする。すると帯電エネルギーは、

$$E_C = \frac{1}{2} 1,000 \mu \times (100)^2 [FV^2] = 5[J] \dots\dots\dots (13)$$

である。5J のエネルギーがどれ程か想像できない人がいるかもしれない。そういう人は 5J の位置エネルギーがどれくらいか考えてみよう。位置エネルギーは mgh で与えられる。ここで m は質量[kg]、 g は重力加速度 10[m/s²]、 h は高さ[m]である。すなわち 5J とは 1 m の高さから 500 g の PET ボトルを落としたときのエネルギーに等しいことがわかる。

さて、人間の致死エネルギーは 50J である。これは 5J の 10 倍なので 5kg の鉄アレイを……。ということである。以上から充電されたコンデンサには凄まじいエネルギーが蓄えられていることがご理解いただけただろうか。充電中の回路に触ることは命にかかわるので、感電に十分注意した上で実験を行なっていただきたい。