

「強い電磁石」を作るための一考察

宮城障害者職業能力開発校 新妻 幹也

1. はじめに

電磁石の製作は小学校の理科でも習う、大変ポピュラーなテーマです。また、いわゆる「強い電磁石を作るには・・・」というテーマについても、多くの方がその答えを求めて質問し、それに多くの方々も答えています。ただ、残念なことに、「これだ」という記述には出会えていないのが現状ではないでしょうか。

このテーマの答えは、一見、小学校の理科で答えが出ていて、今さら、ほかに強い電磁石を作る方法などあるの？と思われるでしょう。

しかし、多くの一般的理論だけでは、強い電磁石を作る助けになっていないように思います。

そこで、今回は、強い電磁石を作るために実践的に何が重要なのかについて記述してみたいと思います。ぜひ、これを参考に本当の意味で強い電磁石を作る一助にいただければと思います。

2. 強い電磁石とは

改めて、いわゆる[強い電磁石]とはどのようなものなのかを確認してみたいと思います。

クレーンの先につけた大型電磁石で、鉄のスクラップを吸着して移動させる重機があります。これに使われている電磁石は間違いなく「強い電磁石」だと思います。そうです。強い電磁石の条件・・・それは・・・重量が大きい

ということです。逆の言い方をすれば、軽い電磁石は

弱い（それほど強くない）ということになります。

しかし、これでは、みなさん納得はしないと思います。

「強い電磁石は作りたいが、重量が大きくなっては困る」ということになるのではないのでしょうか。

実は、ここが重要なところで、一般的にいわれている強い電磁石を作るファクターである、●巻き数を多くする、●電流を多く流す、●鉄心を太くする、●コイルを密に巻くということにだけ気を取られていては目的を達成することができません。これらの条件の「巻き数を多くする」と「鉄心を太くする」については、大きくすればするほど重くなることは明白です。したがって、単純には、強い電磁石＝重くなる ということになります。

重い電磁石が強いことは明白ですから、なるべく軽くても強い電磁石にすることが目標になるわけです。これを達成したかどうかを判定するには、次のような至極単純な指数 α を求めて検証すれば、簡単に真の意味で「強い電磁石」になったかどうかを判定することができます。ここでは、「強い」という意味を電磁石の吸着力 F でみることにします。

電磁石の質量を W とすると、指数 α を

$$\alpha = F(g) / W(g)$$

で表すことにします。

電磁石を鉄板に吸着させて、引っ張り、吸着が離れたときの値 $F(g)$ を読み、その値を電磁石そのものの質量で割り算します。

例えば、重さが100gの電磁石で、吸着が3kgで外れたとすると、 $\alpha = 3000 \div 100 = 30$ ということになります。もし、重さが1kgの電磁石で吸着が30kgで外れたとすると、やはり $\alpha = 30000 \div 1000 = 30$ ということになり、この指数でいう限り、これら2つの電磁石の強さは同じということになります。

吸着力が3kgと30kgで、同じ強さの電磁石ということには抵抗があるかもしれませんが、この指数では、そのようになります。むしろこの指数の使い方は、50gの電磁石で吸着力が2kgだった場合、 $\alpha = 2000 \div 50 = 40$ となり、こちらの電磁石のほうが、100gで3kgの吸着力のものより強い、というように使ったほうが理解しやすいかもしれません。50gで2kgの電磁石を2つ使えば当然100gで4kgの吸着力が得られるわけですから、こちらのほうが強いということは明白です。

このようにこの指数 α を用いて製作した電磁石を客観的に見ることが、強い電磁石を作る目安になります。

ここで、この α 指数を大きくすることが強い電磁石の条件であるということはおわかりいただけたと思います。ですから、この α を上げる努力をすることが求められます。では、 α を上げるにはどのようにすればよいのでしょうか。式だけからいえば、分母を小さくして、分子を大きくすることになります。

分母を小さくするという事は、電磁石そのものの重さを小さくすることです。

このために考えられることは、

- 鉄心を小さくする（鉄心を使わない）
- 鉄心の比重を軽くする（鉄より軽い比重の強磁性体を使う）
- コイルはたくさん巻かない
- コイル線の比重を軽くする

となります。しかし、これらはいずれも一般的に強い電磁石を作るためのファクターに反するものばかりです。コイルの比重を軽くするには、電気伝導率が良くて比重の軽い金属線を使えばよいということになりますが、これも、銅線以外に適当なものはありません。

唯一、重量を増やさずに増やせるファクターは電

流を多く流すことです。超伝導磁石がこれに当たるのだと思います。ただ、超伝導磁石は別の面で一般的ではありません。超伝導磁石でなく、多くの電流を流すことは、できそうでできません。発熱の問題がありますし、そもそもコイル線を太くしなくてはいけないので、その部分で重量が増してしまいます。

では、分子を大きくすることではどうでしょう。分子は吸着力そのものですから、ここを上げるには、やはり一般的にいわれている強くするためのファクターを上げていくしかありません。

しかし、上げようとする、分母も大きくなるという矛盾が出てきます。

つまり、ここに試行錯誤の研究が必要になってくるのです。机上の一般論のみで強い電磁石を作ろうとすれば、単純に重い電磁石になってしまうだけのです。

3. 吸着力を測定する

電磁石が強い、弱いは前述した指数 α によってみていくことにします。このために必要となるのが、吸着力です。もちろん電磁石そのものの質量も必要ですが、これを測定するのは市販のデジタルばかり（写真2）を使えば簡単です。問題は吸着力の測定です。単純に、鉄板に吸着させた電磁石をばねばかりに引っ掛けて計ってもよさそうですが、吸着が外れたときに大変危険なので、やめたほうがよいでしょう。では、どうするかということになります。大学や研究機関であれば、引っ張り試験機などがあると思いますので、それを使えば簡単に測定することができると思います。しかし、一般の訓練機関などでは、そのようなものがないので、安価でおおよその吸着力を測定できる引っ張り試験機なる物を作ってみることにしました。

写真1が作成した試験機です。

市販のデジタル体重計（LED表示）に測定のためのアタッチメントをつけただけの単純な物です。

ギアードモータの出力軸にモジュール1のウォームギアを取り付け、 $\phi 8$ のねじシャフトを駆動し、

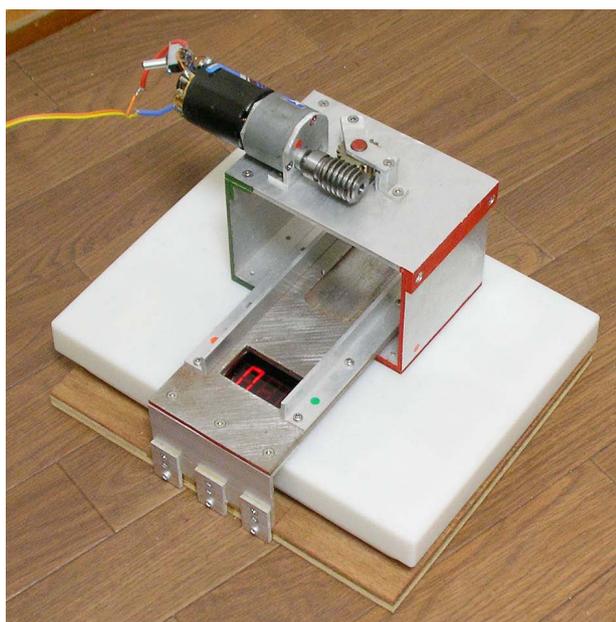


写真1 吸着力測定装置

それによってそのシャフトにつけたナットを引き上げる構造です。

このナットにワイヤー（1mmのポリウレタン線）をつけ作成した電磁石に固定します（写真2）。

電磁石をアタッチメントの鉄板に吸着させたあと、モータの電源を入れ、ナットにつけた電磁石を引っ張り上げる構造です。これにより、結果的にアタッチメントが体重計を押し、吸着力を測定できる仕組みです。吸着が外れても、ばねばかりのような危険性は全くありません。吸着が外れる瞬間の表示を読み取ります。

これで、指数 α を求めることができます。

ただし、この体重計で読み取れる最小値は1kg程

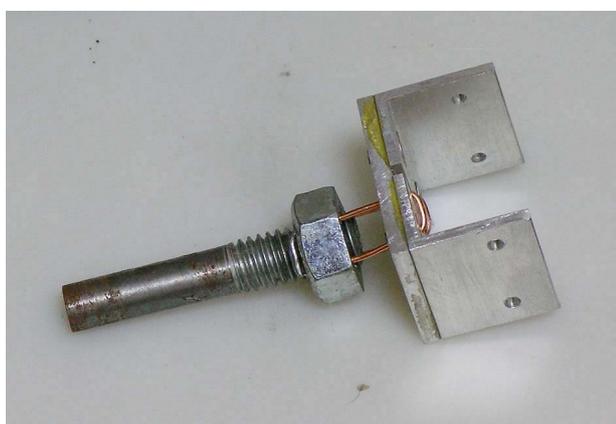


写真2 引き上げシャフト

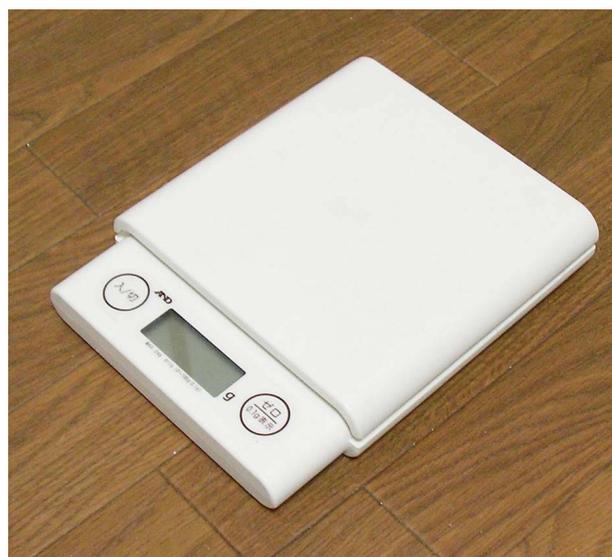


写真3 1g単位で3kgまで測定できるキッチン用ばかり

度ですので、吸着力が1kgに満たないような場合には、もっと小さな値まで読み取れる電子ばかり（写真3）などを使う必要があります。その場合でも、同様の構造を使って装置を作ればよいと思います。

4. 試行錯誤を繰り返す

この引っ張り試験機の製作にかかった費用は体重計が2,000円ぐらいですから、その他の部品を合わせても5,000円もかからない安価なものですが、きちんと機能は果たしてくれます。体重計ですから、100kgぐらいまでの吸着力は測定できます。

これにより、製作した電磁石を客観的に評価できます。こうなると、高い α 値を出すことが楽しくなってきます。

まず、どんな電磁石でもいいので、「こうすればきっと強い電磁石になるだろう」という物を作成し、どれぐらいの α 値が出るかやってみてください。最初は期待とは裏腹な結果になるかもしれません。

ここまで、読んでこられた方の中には「この実験を行うに当たって電流値はどうすればいいのか、電流を多く流せば（電圧を上げれば）いくらかでも α は上がるんじゃないの？」と思われる方もいらっしゃるかもしれません。しかし、実際には、

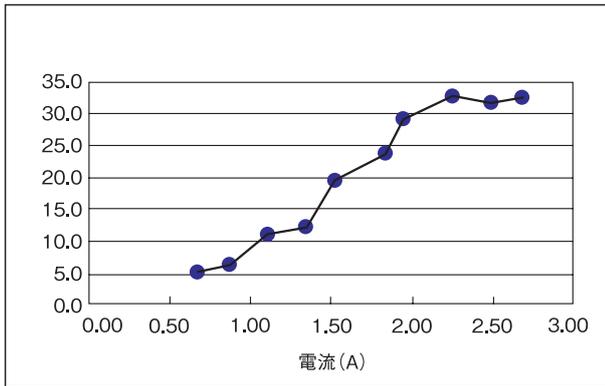


図4 電流と吸着力

そのようにはなりません。他の多くの文献でも書かれているように鉄心に鉄などの強磁性体を使った場合、飽和する点があり、ある一定以上の電流を流しても、それ以上に吸着力は上がりません。私が実験した一例を示します。

このグラフ（図4）は、ある電圧からスタートして、吸着が離れた時点での体重計の値をそのつど読んでプロットしたものです。

この場合、2.5Aぐらいからは、飽和してそれ以上は吸着力が上がりません。わかります。

電流は電圧に比例して上がりますので、この実験では、実験用の安定化電源器を使い、5Vぐらいから、1Vごとに電圧を上げる方法で行いました。

5. 電磁石を作る指針

さて、ここからは実際に電磁石を作る指針についていくつか述べたいと思います。とにかく強い電磁石を作りたいという漠然とした目標はあっても、とりあえずどうやっていったらいいのかということは、かなり難しいことです。なぜなら、「電磁石はこのような形でこう作る」などというものはないか

らです。使う人によって用途や大きさなどのさまざまな違いがあるからです。

今回は単純に吸着力にテーマを絞っていますが、モータの電磁石のように吸着力と反発力の両方を使うパターンなどもあり、そのような場合は吸着電磁石とは異なり、電磁石とするための構造そのものも全く異なるものになるからです。

今回は、吸着にテーマを絞っていますので、その場合に

- 1) どれぐらいの鉄心に（太さ、長さ）
- 2) どれぐらいの太さの線を
- 3) 何回ぐらい巻いたら（コイル外周を何mmに）
- 4) 何グラムの電磁石になり
- 5) 何ボルトを掛けたとき、何アンペアが流れ
- 6) 何kg（吸着力）ぐらいの電磁石が

できるのかを作る前に知ることができる1つの指針を述べたいと思います。ただし、これは、あくまで指針であって、どのような構造の電磁石にするかを決める要素は含まれません。つまり、どのような構造の電磁石にするかはあくまでも、使う人の用途によって各人が決定しなくてはならないということです。

次に示した表は、上述した要素の1), 2), 3) ぐらいを入れると4), 5), 6) が自動的に計算される便利なものです。これにより、目的の電磁石を作る助けになります。Excelを使った簡単な表です。4), 5), 6) の各項目には、計算式が設定されているだけです。

ただし、電磁石指数の α は自分で設定する必要があります。なぜならば、この指数はどのような構造の電磁石にしたかによって大きく異なるからです。

同じ構造の電磁石であれば、同じ α を使って吸着力を推定できます。

表1

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	
	入力値				定数値	計算値										入力値	計算値				
	鉄心(φ)	長さ(L)	コイルの外径(mm)	巻線径	銅非伝導率	水平層n	巻数(回)	線の長さ(m)	線重量(コイル重量)	線断面積(m ²)	抵抗値(Ω)	2.0A時電圧(V)	使用想定電圧	使用想定電圧時の電圧(A)	INS値	鉄心半径(mm(r))	鉄心重量(g)	ヨーク対コイル比	トータル重量	指数 $\alpha=100$ 想定推定最大吸着力	
パターン1	12	10	24.0	0.35	1.72E-08	17	476	26.8	22.2	9.621E-08	4.80	9.60	7.20	1.50	807.7	6	8.8	0.4	31.0	11.8	
パターン2	15	15	28.0	0.45	1.72E-08	14	462	30.9	42.3	1.590E-07	3.34	6.69	7.20	2.15	1758.2	7.5	20.7	0.5	63.0	23.9	
パターン3	20	25	38.0	0.6	1.72E-08	15	615	56.0	136.2	2.827E-07	3.41	6.82	7.20	2.11	4081.3	10	61.3	0.4	197.5	75.1	

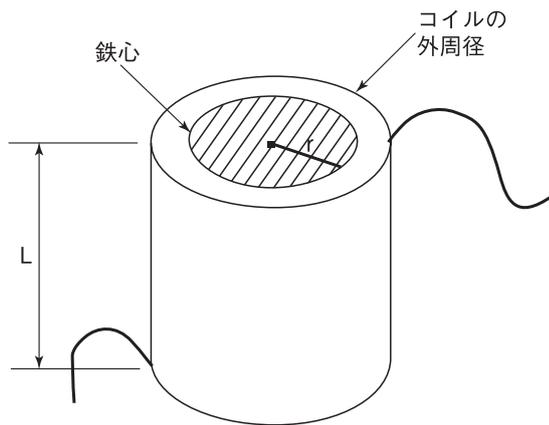


図5 電磁石の各要素

6. 表の各項目について

では、表の各セルの説明とセルに割り当てられている計算式について説明します。

入力する項目については、図1のように単純な電磁石コイルを想定しています。

難しい部分は特にないと思いますが、コイルの外周径を入力することについては、「なぜだろう？」と思われる方もいると思うので説明します。

コイルの外周は、巻き線の太さと何回巻くかによって決まります。完成したときの電磁石の大きさを「これぐらいの大きさまでにとどめたい」と考えるほうが自然なので、外周径から計算によって、何回巻きの何層になり、コイル抵抗が何Ωになるかを求めます。

では、入力値セル以外の部分について説明します。

○銅非伝導率

これは、コイル線にポリウレタン線などの銅線を巻くことを前提にした定数です。この定数を使うことで何mmの太さで何mの線を巻くと電気抵抗が何Ωになるかを求めることができます。銅以外の線を巻くことはないと思いますが、この値を変えれば異なる金属線でも求めることができます。

○水平層

ここには、次式が当てられています。

$$= \text{ROUNDDOWN} ((D3-B3) / 2 / E3,0)$$

小数点は切り捨てていますので、おおよその目安

です。密に巻いた場合、水平に何本分の線が巻かれるかを示したものです。

○巻き数

ここには、次式が当てられています。

$$= \text{ROUNDDOWN} (C4/E4,0) * G4$$

入力した項目の場合に巻き数が何回になるかを示したものです。

○線の長さ

ここには、次式が当てられています。

$$= (B4 * G4 + E4 * G4 * G4) * 3.1416 * \text{ROUNDDOWN} (C4 / E4,0) / 1000$$

これは、トータルのコイルの長さが示されます。なぜこのような式になるのかを学生に求めさせるのもよい課題かもしれません。コイルをどんどん巻いていくと当然その直径は線の太さの分だけ大きくなっていきますから、単純に鉄心の直径と巻き数を掛け算しただけで求めることはできません。

○線重量 (コイル重量)

ここには、次式が当てられています。

$$= \text{POWER} (E4 / 10 / 2, 2) * 3.1416 * I4 * 100 * 8.6$$

特に説明の必要はないと思いますが、最後の8.6は銅の比重ですので、銅以外の線を使う場合はその金属の比重に変更してください。

○線断面積 (m²)

ここには、次式が当てられています。

$$= \text{POWER} (E4 / 2 / 1000, 2) * 3.1416$$

これは、電気抵抗を求めるときに必要となります。

○抵抗値 (Ω)

ここには、次式が当てられています。

$$= I4 * F4 / K4$$

○2.0A時電圧 (V)

ここには、次式が当てられています。

$$= 2 * L4$$

なぜ2Aかという、厳密な意味はありません。あくまでも目安です。何A流すかは、あくまでも飽和点直前までです。それと、もう1つは後述しますが、コイル線の太さによる流せる電流の限界を超えないことです。したがって、1Aとか異なる値を設定する必要がでてくる場合も当然あります。

○使用想定電圧時の (A)

ここには、次式が当てられています。

$$=N4/L4$$

これは、直前に入力した「使用想定電圧」における電流値になります。実際の使用時には必ずバッテリーなどの電源電圧からくる制限がありますから、その際にどれだけの電流が流れるかを見ます。

○INS値

これは、電磁石の強さを示す式です。

Iは電流、Nはコイルの巻き数、Sは鉄心の面積です。

この値が大きいほど強い電磁石になるはずですが。

ただし、何度も言いますが、飽和しない前提です。

○鉄心半径mm (r)

$$=B4/2$$

○鉄心重量 (g)

ここには、次式が当てられています。

$$=Q4*Q4*0.001*C4*3.1416*7.8$$

最後の7.8は鉄の比重です。鉄心に鉄以外の強磁性体を使う場合にはその金属の比重に変えてください。

○ヨーク対コイル比

ここには、次式が当てられています。

$$=R4/J4$$

式は何の変哲もないものですが、この値を何に使うかという、強い電磁石の条件を探るための指針と捉えてもらえばよいと思います。つまり、最初に述べたように強い電磁石を作ると、とにかく重くなるわけです。

では、鉄心を大きくしたほうがよいのか、コイルをたくさん巻いて重くしたほうがよいのか……。現時点ではわからないわけです。よって、作成した電磁石の結果を見て、この値が「どうだと、こうだ。」というような使い方ができると思います。

○トータル重量

$$=J4+R4$$

○指数α=100想定 の推定最大吸着力

ここには、次式が当てられています。

$$=100*T4/1000 \quad (\alpha \text{を} 100 \text{とした場合})$$

この式は指数αを使って、完成したときの電磁石

の強さを想定するものです。αは全くの第一作目では設定できませんので、2作目以降同様の形状の電磁石を作るときに機能してくる部分です。

7. コイル線に流せる最大電流について

強い電磁石のファクターとして電流を多く流すということは飽和しない範囲で重要なことです。

しかし、細い線と太い線では当然流せる電流に違いが出てきます。次の表はメーカーが示しているマグネット用ポリウレタン線に許容できる電流値を示しています。

表2

線径	1.0mm	0.8mm	0.6mm	0.5mm	0.4mm	0.3mm	0.2mm	0.1mm
許容電流 (A)	2	1.28	0.72	0.5	0.32	0.18	0.08	0.02

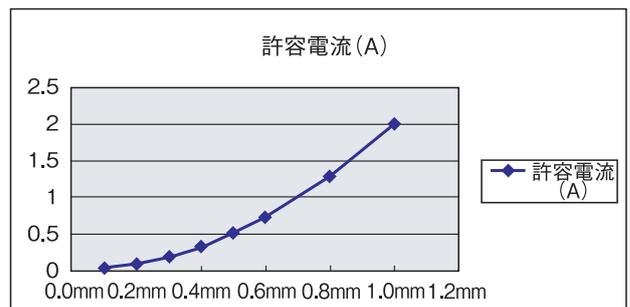


表2を見る限り、1A以上を流して安全に使おうとすると0.8mm以上の線が必要になることがわかります。

電磁石のようなほぼ、かけた電圧に比例した電流が流れてしまうような負荷では、この表の範囲を超えた電流をかけると、発熱が大きくなります。

では、0.4mmや0.3mmで作ったコイルに1A以上の電流を流してはいけないのか？ということになりますが、これも、そうとは言い切れません。

発熱が大きくなると、なぜいけないのでしょうか。2つの理由があげられますが、1つは、発熱によって、電磁石そのものの電気抵抗が増す、もう1つは、発熱によって線表面の皮膜が破損しショートする危険性があるということです。

ただ、発熱というのは電流を流した瞬間にすぐに出てくるものではなく、徐々に上がってくるもので

す。

したがって、それほど長時間流し続けるのでなければ、上記表の値を超えたとしても、十分安全に機能させることはできると思います。ただ、どの線の太さならどこまで許容できるかなども、実験して経験値として蓄えていくしかないと思います。なお、ポリウレタン線の許容温度は130度です。100度でも素手では触れない温度ですから、触れないほど熱くてもまだ、許容できる温度の場合である可能性もありますので、ここもきちんと測定して限界値を見極める必要があります。

ちなみに、メーカーが示している許容電流値では発熱することはほとんどありません。

8. コイル巻上げ装置

装置というほど大げさではありませんが、コイルをきちんと密にきれいに巻くには、写真4のような巻

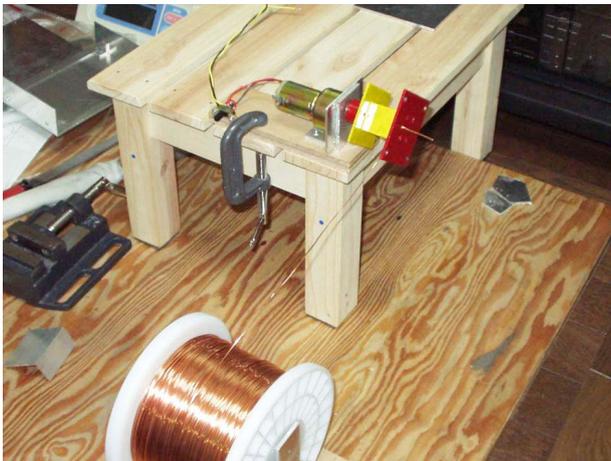


写真4 電磁石巻上げ装置

上げ装置を作ると意外に簡単にしっかり巻くことができます。

20:1程度のギアードモータの出力軸に電磁石の鉄心を固定して回転させるだけです。このとき重要なことは、モータの正転と逆転をできるように切り替えスイッチをつけておくことです。これがあると、ちょっとした巻きトラブルに対処できます。また、モータを回すためのスイッチはフットスイッチにしておくと、さらに便利です。巻くときには両手がふさがってしまう（片手でもできなくはないが）ので、やはり、トラブル時にすぐにスイッチを切れる状態にしておくと便利だからです。巻き上げの回転スピードは最初は1秒1回転程度のゆっくりとした巻き上げで行っていましたが、最近は慣れてきたので、1秒2回転ぐらいかそれ以上で巻いています。

最後に

いかがでしたでしょうか。もっと詳しく説明したいところもあったのですが、紙面の都合上、これぐらいにしておきたいと思います。小学校で行うポピュラーな製作実験ではありますが、実はかなり奥が深いことに気づかされます。私がこれまでに作成した電磁石の例を示すことをあえてしませんでした。ぜひ、一から挑戦してみたいと思います。指数 $\alpha=300$ を超えることは十分可能だとだけ言っておきたいと思います。

学生を対象に、電磁石 α 指数コンテストなどを実施してみるのも、おもしろいかもしれません。