

22. 1円玉飛ばし機のコイルと1円玉の とびに関する研究

静岡県立科学技術高等学校 自然科学部

2年 原田大輔 望月亮佑 佐藤亜藍 柚木孝太

1 動機

使い捨てカメラのコンデンサーを利用した1円玉飛ばし機(図1)を知り、1円玉をより高く飛ばそうとコイルの巻き数を増やしたところ、巻き数と飛ぶ高さが比例しない(図2)ことに驚きその理由を探りたいと考えた。

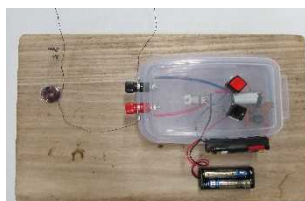


図1 1円玉飛ばし機

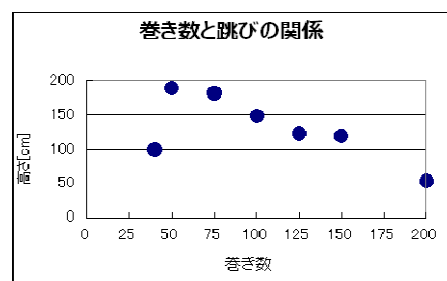


図2 コイルの巻き数と1円玉の とびの関係 (予備実験)

2 1円玉飛ばし機の原理

1円玉飛ばし機の原理は、図3に示すように、増幅回路により大容量のコンデンサーを300V超の電圧で充電し、その電気をコイルに向かって一気に放電する。それによってコイルは磁力の変化する電磁石となる。その磁力変化が1円玉に電磁誘導を引き起こし、1円玉に逆向きの磁力が生じるため、コイルと反発しあい1円玉が飛び上がる。

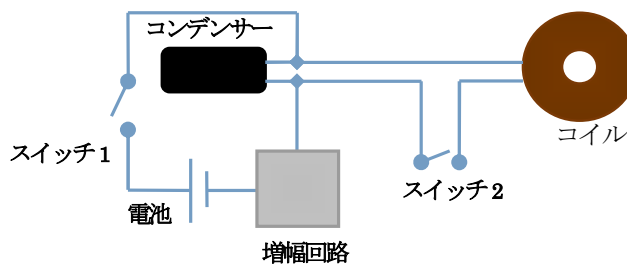


図3 1円玉飛ばし機の原理

3 目的

1円玉飛ばし機で1円玉をより高く飛ばすコイルの条件や、より効率よく電磁誘導を起こす金属の検討を行う。

4 仮説

1円玉をより高く飛ばすには、コイルの磁力を強くすればよいと考えた。コイルに生じる磁束密度は以下の式で表される。

$$B = \mu N \frac{I}{2r}$$

B =磁束密度	μ =透磁率	N =コイルの巻き数
r =円形電流の半径	I =電流	

そこで電流 (エナメル線の抵抗値に反比例)、コイルの直径、巻き数を変数とした実験を行うことで1円玉を高く飛ばすための条件を見つけることができると考えた。

5 実験方法

- (1) 自作した1円玉飛ばし機(図1)を使って1円玉を飛ばす。その様子をデジタルカメラで撮影し(図4)、コマ送りで1円玉の最高点を探し、その高さを壁に設置した巻き尺から読み、データとして記録する。カメラは試しに飛ばしたときの高さを目安に位置、画角を合わせ、1円玉が飛んだ高さとはほぼ同じ高さに設置する。何度も測定を行い、なるべくまっすぐ飛んだ時を記録し、10回の平均値をとる。
- (2) 1円玉飛ばし機を設置した木の板にコイルをセロハンテープで固定して、その上に1円玉を乗せた(図1)。特記がない限りコイルはすべて直径0.4mmのエナメル線を使って渦巻き状に作成



図4 測定風景

した。実験は電圧 300Vで行うためコンデンサーの電圧をテスターで直接測りながら充電する(図5)。

(3) 固定値、変数を変化させた以下に示す5種類の実験を行う。

ア 実験Ⅰ：コイルの巻き数を変数とした実験 エナメル線の長さを 500cm、コイル直径 2.0cm に固定し、巻き数を 25、50、75、

90、100、110、125 巻きのコイルを用意し(図6)、実験を行う。

イ 実験Ⅱ：エナメル線の長さを変数とした実験 コイルの直径を 2.0cm に固定し、巻き数を 50、75 巻きの2種類に決め、エナメル線の長さを 180 cm から 20 cm 間隔、360 cm までとする。

ウ 実験Ⅲ：コイルの外径を変数とした実験 エナメル線の長さを 300 cm、巻き数を 50 巻きに固定し、コイルの直径を 1.0cm、1.5cm、2.0cm、2.5cm、3.1cm、3.5cm にする。

エ 実験Ⅳ：エナメル線径を変数とした実験 エナメル線の長さを 200cm、巻き数を 50 巻き、コイルの直径を 2.0cm に固定し、エナメル線径を 0.3mm、0.4mm、0.5mm、0.8mm にする。

オ 実験Ⅴ：コイルの内径を変数とした実験 コイルの外径 2.0cm、巻き数を 50 巻きに固定し、コイルの内径を 0.1cm、0.38cm、0.34cm、0.45cm、0.43cm、0.73cm、0.97cm、1.58cm で、それに対応するエナメル線長は 300cm、300cm、200cm、200cm、300cm、200cm、300cm、200cm とした。

(4) コイルの性質に関する以下の2種類の実験を行う。

ア 実験Ⅵ：コイルの磁力測定 電源装置から 0.1A の直流電流をコイルに流し、その時に方位磁石が傾いた角度を測定する。コイルに生じる磁場の強さは、地球の磁場の強さと $\tan \theta$ の値で求まる(図7)。すなわち、 $\tan \theta$ の値が磁場の強さを表す。

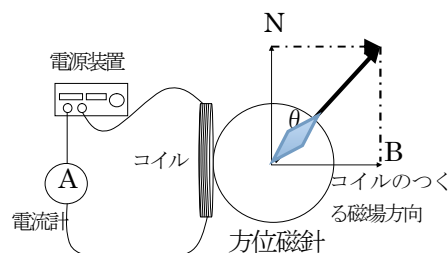


図7 コイルに生じる磁力の測定

イ 実験Ⅶ：コイルのインダクタンスの測定 PLC メーターで各コイルの自己インダクタンスを測定する(図8)。

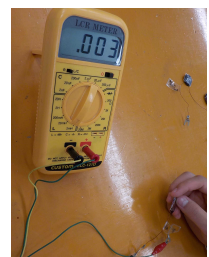


図8 自己インダクタンスの測定

(5) 実験Ⅷ：効率よく電磁誘導を起こす金属の検討 アルミ板 0.3mm 厚、0.5mm 厚 0.9mm 厚、銅板 0.3mm 厚、ステンレス板 0.3mm 厚、真鍮板 0.3mm 厚を 1 円玉と同様の 20mm 径の円盤に切り出したものを用いて、コイル上部に乗せた時のとび高の測定を行う。

6 実験結果と考察

(1) 実験Ⅰ：図9より、コイルの巻き数が 25 巻きから 100 巻きにかけて右上がりにとび高は増加していくことから、コイルの巻き数が増えていくほど 1 円玉のとび高が高くなることが分かる。しかし、100 巻きをピークに巻き数が増えても、とび高は増加せずコイルの巻き数 100 前後の 90、110 巻きでは、とび高は減少し、その差は 50cm 程度と大きかった。100 巻きのコイルは 3 個作り、測定を行った。1 つのコイルではとび高が 50cm と低かったが(▲マーク) 残りの 2 個はほぼ同じ

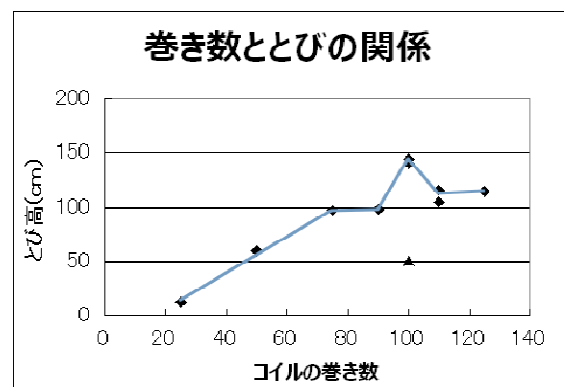


図9 実験Ⅰの結果

とび高で最高値を示した。90 巻きと 100 巻きについては 2 個ずつコイルを作り、測定した。ここでは、巻き数は多ければ多いほどとび高が高くなるという結果ではなく、100 巻きをピークに巻き数が増えてもとび高は増加しなかった。ピークが現れるという点において予備実験と同じであった。

- (2) 実験Ⅱ：図 10 より、50 巻きコイルでは全体的にエナメル線の長さが長くなるほど 1 円玉のとび高は減少していく。しかしエナメル線の長さが 200cm より短い 180cm についてはとび高は小さいため、結果として 200cm をピークにとび高は減少していくように見える。75 巻きコイルでは全体的にとび高は長さによって大きく変化していないように見える。エナメル線の長さが長くなれば、コイル全体の抵抗値が増え電流量が減り、発生する磁力が弱くなるため、1 円玉はとばなくなると考えた。しかし、その傾向は 50 巻きでは概ね見られたが、75 巻きのコイルではその傾向は見られない。

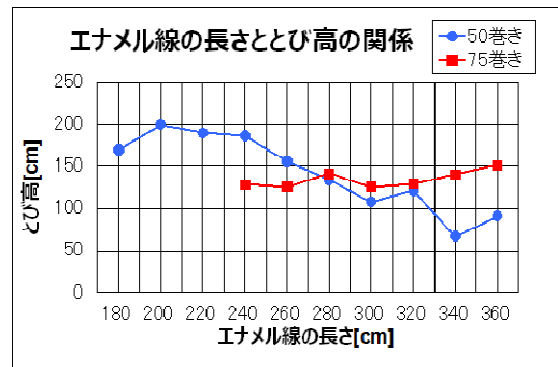


図 10 実験Ⅱの結果

- (3) 実験Ⅲ：図 11 よりコイルの外径 1.0cm の時、とび高は約 5.3cm と最低値を示している。コイルの外径が増えるに従ってとび高が上昇し、外径 2.0cm から外径 3.0cm までとび高に大きな変化は見られない。外径 3.5cm ではとび高は減少した。コイルの外径が小さいほど磁力は集中し、よくとぶと考えられたが、結果は小さいほうがとばなかった。1 円玉の直径に近い外径のコイルで 1 円玉がよくとび、1 円玉の直径ちょうどよりも少し大きい外径のコイルで一番よくとんだ。このことからコイルと 1 円玉が触れている面積が大きいほど、1 円玉に与える影響が大きく、大きな誘導電流を導くと考えられる。

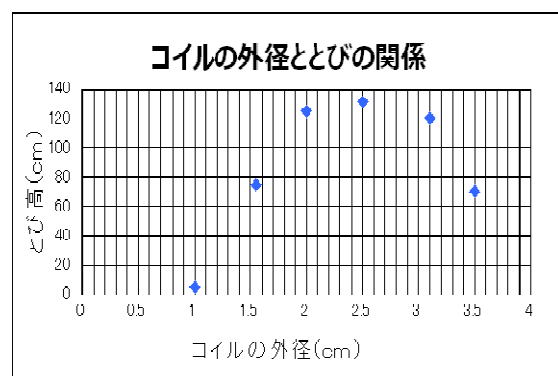


図 11 実験Ⅲの結果

- (4) 実験Ⅳ：図 12 より、エナメル線径 0.3mm、0.4mm、0.5mm でとび高が上昇し、0.8mm ではとび高が減少した。0.3mm 径のコイルではとび高 50cm 程度で、0.8mm 径のコイルではとび高 75cm 程度でありエナメル線長 0.4mm、0.5mm では 200cm 程度とんだ。また、0.3mm、0.8mm に比べ 0.4mm と 0.5mm のとび高の差は顕著であった。最大のとび高は 0.5mm で 202.1cm であった。予想では 0.8mm 径のコイルがエナメル線の抵抗が小さいので、最もよくとぶと考えた。しかし 0.8mm 径のコイルよりも 0.5mm 径のコイルの方が良くとんだ。抵抗が小さく電流が多く流れやすい 0.8mm が 0.5mm よりもとばないのは、流れる電流が大きいため磁力が大きくなり、それと同時にコイルに生じる逆起電力も大きくなるからだと考えた。逆起電力が大きくなると、コイルに生じる磁力は小さくなり、1 円玉に生じる誘導電流が減少してしまうと考えた。

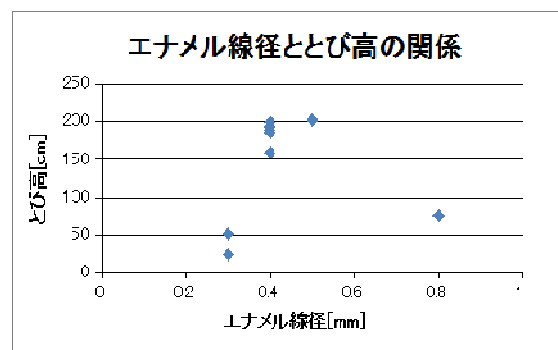


図 12 実験Ⅳの結果

- (5) 実験Ⅴ：本実験では技術的な面で、エナメル線の長さを統一できず、正確に比較することが出来ないため、参考程度でここでは扱うこととする。エナメル線の長さは、およそ 200cm は＊、およそ 300cm は◆で表した。図 13 より、同じエナメル線長では、内径によるとび高の差は小さくなく、それほど関係が強いようには見えない。ただし、200cm でみると、内径 0.34～0.73cm の時に 1 円玉はよくとび、大きい時も小さい時もとび高は減少しているように見える。すなわち、

コイルの内径は1円玉の直径に対して、小さすぎても大きすぎてもとび高は低くなるということが考えられる。

- (6) 実験：図14より、エナメル線長500cmのコイルでは巻き数が増えていくにつれ、磁力の強さが上昇している。しかし、75巻き以降は磁力の強さにあまり変化はないように見える。また、グラフの☆印は巻き方の悪く作りが雑なコイルの値を示している。巻き方の悪い100巻きコイルは予想に反して磁力が強かったが、直流電源下で電流量を一定にした時の磁力が、強くてもとばないことから、コイル自身の磁力にとび高は直接関係が無いように見える。

- (7) 実験Ⅶ：図15のグラフを見ると、コイルの磁力の強さとインダクタンスには $\tan \theta$ の値が2から4までのデータが無いいため、一見相関が無いように見えるが、全体としてみると磁力の増加に伴って自己インダクタンスが増えているようにも見える。測定結果は理論的にはもっともな結果と思われる。磁力が大きくなると、逆起電力が大きくなり、1円玉に生じる磁力変化が相殺されて減少してしまう。これが、とび高にピークを生じる原因ではないだろうかと考えた。

- (8) 実験Ⅷ：図16を見ると、アルミ板でとび高を比較した場合、厚さが厚い方がとび高は高い。真鍮板、ステンレス板ではとび高はかなり低く、ステンレス板においてはとぶことさえなかった。アルミ板同士で比べると1.0g以下の質量において、

厚さの厚い質量が大きいものの方がとび高は高いという予想外の結果を得た。同じ0.3mmの厚さで比べると、アルミニウムより銅の方がとび高は高く、同じ体積の場合、銅の方が電流は流れ易いので理論通りの結果といえる。真鍮とステンレスは抵抗が他の金属よりも大きいので、電流が流れにくくなり、とび高が減少したと考えられる。伝導率が高い方が高くとんだので理論通りの結果といえる。

7 全体考察

- (1) 1円玉を飛ばすことができる条件

結論として、エナメル線径0.4mm、エナメル線長200cm、内径0.73cm、外径2.0cm、巻き数47巻きがとび高202.7cmと1円玉を最もよく飛ばすことができた。すなわち、われわれの実験においては、エナメル線長200cm程度で50巻を1円玉のサイズ程度につくったものがよく飛ぶという結果になった。

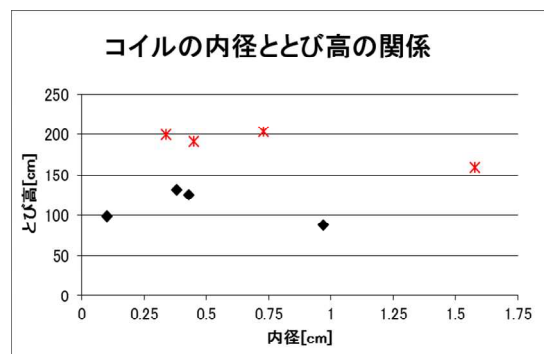


図13 実験Ⅴの結果

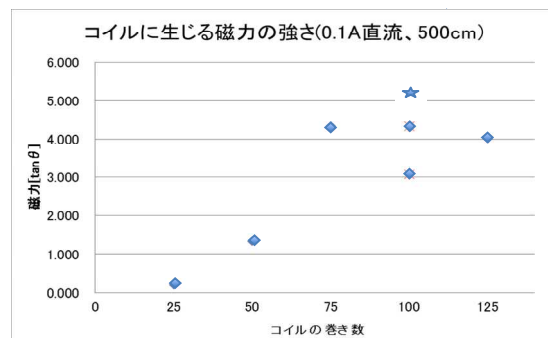


図14 実験Ⅵの結果

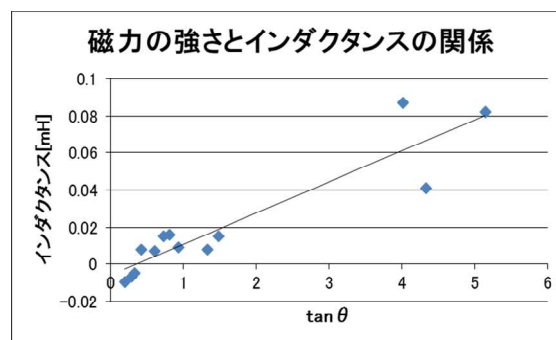


図15 実験Ⅶの結果

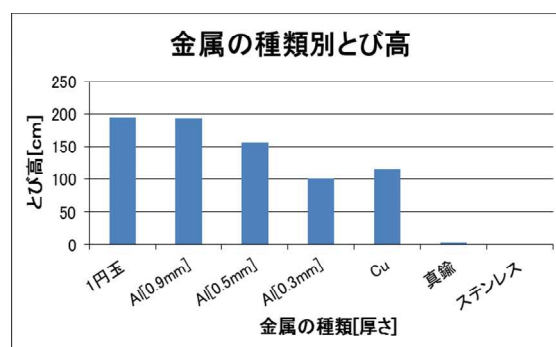


図16 実験Ⅷの結果

(2) ピークが現われる原因

変数を1つに限定して実験を行えば、変数ととび高の間には比例関係がみられると考えたが、そのような相関はどの実験でも見られず、ほぼ全ての実験結果のグラフには予想に反してピークが現れた。これは我々が考えている変数以外にさらに別の変数が存在しているからだと考えられる。そのひとつがコイルの自己インダクタンスと考えている。

1円玉のとび高は1円玉に流れる誘導電流が大きくなるほど大きくなると考えられるので、コイルに生じる磁力というのは1円玉に流れる誘導電流の量を決定する間接的な要因であることに気づく。すなわち、コイルに生じる磁力を大きくすれば1円玉に生じる誘導電流も大きくなると考えたが、1円玉に生じる磁力は、コイルの磁力が変化する速さに比例することになるので、コイルそのものの磁力が大きくても磁力が変化する速さ（以後、磁力変化速度と記す）が小さければ、1円玉に与えることができる磁力は弱くなってしまう。また、コイルの磁力が小さくとも、磁力変化速度が大きければ1円玉に与えることができる磁力は大きくなるので、結果的に1円玉のとび高が上がると考えられる。

実験中、我々はコンデンサーからコイルに流れてくる電流量は電圧300V一定ならばどの実験でも同じであると考えていた。しかし、コイル自体の抵抗値が大きかったり、コイルに電流が流れることによって発生する逆起電力が大きかったりすることで、コンデンサーからの電流の流れ出し方が遅くなるという可能性も考えられる。すなわち、コイルだけでなく回路自体にも変数があるということになり、それがとび高のピークの原因ではないだろうかと考えた。そこで、疑問の解決にはコンデンサーからコイル取り付け端子までの電流量を、オシロスコープを用いて視覚化するなど、電流量を直接確認する必要があると考える。

(3) コイル上部に乗せる物質の検討

1円玉よりも軽いアルミニウムの方がとぶと思い、実験を行ったが、予想に反して一番重い1円玉が最もよくとんだ。また、初めは金属で円盤状のものならすべてとぶと考えていたが、ステンレスではとび高が0.0cmという結果になった。このことから、抵抗が大きい金属や、金属以外で電流を流す、例えば炭素では電流が流れにくいと、とび高が低い、もしくはとばないという結果になることが推察できる。

8 今後の課題

なぜ同じようにエナメル線の長さだけを変化させているにも関わらず、50巻きコイルのとび高に変化が見られるのに対し、75巻きに変化が見られないのだろうか。また、同じ巻き数のコイルでも自己インダクタンスや磁力の値が散逸になってしまったように、コイルの渦巻形状がどのようにコイルの磁力や自己インダクタンスに影響するのか。実験が進むにつれて謎が増えてくる。これらの疑問を調べる方法を今後見つけていきたい。

さらに、回路自体の電流量、主にコンデンサーからコイル取り付け端子までの抵抗値や、逆起電力、電流の流れる速さなどを視覚化し、1円玉飛ばし機の精度向上を図りたい。

他の金属または、金属以外のもののとび高の測定をする。また、1円玉よりも効率よく電磁誘導を起こすことができる物質の検討をさらに進めていきたい。

9 参考文献

(1) 数研出版 物理

(2) 藤本直明/中島秀太：チャレンジ電子工作 1円玉飛ばし機の製作

www.eleki-jack.com/news/.../Elc12_020~021...hallenge02_04.pdf

(3) 脇島修：「電磁石の強さの考察」大阪と科学教育 19、3-6、大阪区教育センター（2005）

(4) 各種物質の性質：金属の電気抵抗 - 八光電機

www.hakko.co.jp/qa/qakit/html/h01100.htm