

コイルガンのエネルギー変換の効率

The efficient of hand-made coilgun

菅 健太 佐光 悠 西山 佳祐 山口 友輔

Kan Kenta , Samitsu Yu , Nishiyama Keisuke , Yamaguchi Yusuke

A. 研究目的

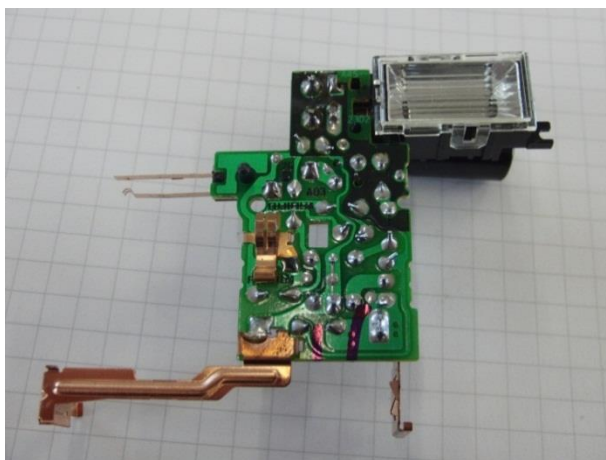
私たちは身近にある電気について知りたいと思い、コイルガンについて調べることにした。私たちの当初の目標はより速い球を打ち出すことを目標にしていた。実験を重ねるたびにどのようにすれば速くなるのかを考えたところ、投入エネルギーには上限があるためコイルの変換効率に着目することにした。以降私たちはコイルの変換効率を上げるためにはコイルについて重点的に調べることにした。コイルガンによく似たものとしてレールガンがありそのイメージからコイルを長くし、たくさん巻くことで変換効率は高い値が出ると予想したが、私たちの予想とは大きく異なった結果が得られた。

B. 研究方法

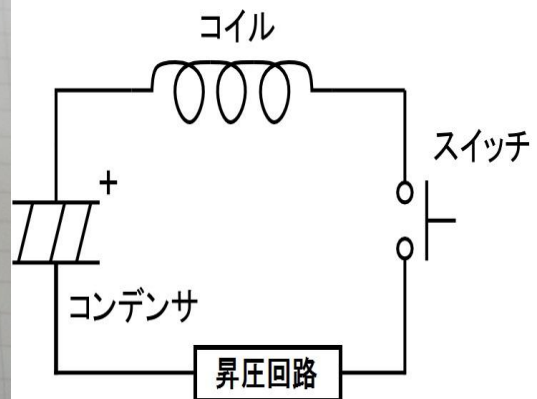
コイルガンを作成し、鉄球を発射する。発射された鉄球のスピードを計測することでコイルの変換効率を求めることができる。

コイルガンの回路はインスタントカメラの回路とよく似ているため、インスタントカメラの回路を改造したものを使用する。カメラの回路からフラッシュであるキセノン管とコンデンサを取り除き、キセノン管が接続してあった部分にコイルを、コンデンサの部分に独自に用意したコンデンサを接続する。カメラにもとから着いていたコンデンサは容量が不明であり、耐電圧も充分でないからである。充電を任意のタイミング、電圧で行えるよう、スイッチの部分にトグルスイッチを、エネルギー投入部である電池設置部に電源装置を繋げられるよう、改造を施してある。発射のタイミングも合わせられるように、放電の際にもプッシュスイッチを押せば放電されるようにした。以上の作業には全てはんだごてを使用した。

コンデンサは、耐電圧 400V、電気容量 1000 μ F のものを用意した。2500 円程度である。



カメラの回路



コイルガンの回路

上記の様なコイルガンの作成方法は実験初期に確立したものの、故障が多く実験はなかなか進まなかった。故障の原因はもとからついていたコンデンサを取り外す際の方法であった。最初とっていた放電（感電しない様ショートさせる必要がある）させてからコンデンサを取り外す、という方法では第一の手順としてコンデンサの両足にニッパなどを触れさせショートさせる。この方法では「バチッ」という大きな音とともに、火花が飛び散る。飛び散った火花は回路にダメージを与えていたようで、この原因が判明するまでたくさんの回路と時間を無駄にしてしまった。正しいコンデンサの外し方は、コンデンサの両足にニッパが触れない様気を付けながら、片方ずつ足を切る。ショートは取り外した後に行うことで、回路へのダメージを無くすることができる。

コイルガンの回路ができた後は、様々なコイルを作成してそれぞれ鉄球を発射させる。鉄球、電圧を統一させることで純にスピードを比べただけで変換効率を求めることができる考えた。使用したのは直径 0.7 cm 5.45g の鉄球である。一回目の実験以外では電圧は 360V で統一して実験を行う。

発射された弾は、コイルによっては 15m/s を超えるため、肉眼で追うことはほとんど不可能である。また、弾の速さを測定する方法を試行錯誤した結果、ハイスピードカメラによって撮影したスロー映像を解析するという方法に帰着した。弾道の上にメジャーを設置し、弾が発射される一瞬前に撮影をスタートする。1200 枚/秒で撮影した動画をコマ送りにすると、1/1200 秒で弾が進んだ距離が確認できる。一つのコイルについて動画を 5 本撮影し、さらに一つの動画について、上記の解析を 5 回行った。平均値を弾速として記載する。

また電気の変換効率を求める方法として、上記の方法で計測した速度と投入したエネルギーを比べる方法を利用する。投入したエネルギーは、コンデンサの静電容量を $C[F]$ 、ためた電圧を $V[V]$ とすると

$E[J] = \frac{1}{2} \times C[F] \times V^2[V^2]$ で求まり、電圧と使用するコンデンサをあらかじめ決めておくことで投入エネルギーを固定することができる。次に運動エネルギーは発射する弾丸の質量を $m[kg]$ 速度を $v[m/s]$ とすると

$$E'[J] = \frac{1}{2} \times m[kg] \times v^2[m^2/s^2]$$
 で表せられる。

この二つのエネルギーの値を比べ、 E'/E を求めることで投入されたエネルギーをどれだけコイルが変換したかを求めることができる。

C.実験(1)とその結果

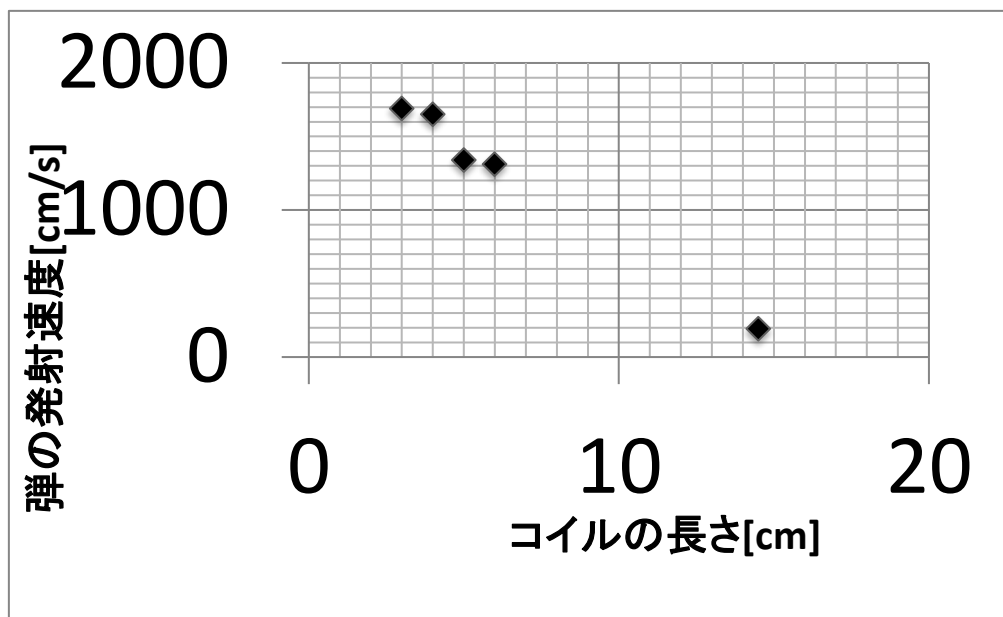
まず一つ目の実験として投入するエネルギーを 450V で固定し、使用するコイルのみを変えろという実験をした。コイルの違いは長さのみであり 14.5cm のコイルは全体として一層のエナメル線でまかれており、3.0cm のコイルは 4 層のエナメル線でまかれている。また、使用する材質は同じものである。

コイル	速さ
14.5 cm	192.0 cm/s
3.0 cm	1689.5 cm/s

二つのコイルでの結果(上図)を見たところ、電圧は一定でも使用するコイルによって大きく速度が異なることが判明した。これは使用するコイルによってエネルギー変換効率が大きく異なるということを意味している。よってこの実験からより速く弾を発射する場合は投入エネルギーに注目して、それを増やすよりもコンデンサーに蓄電された電気エネルギーを弾の運動エネルギーに変換するコイルに注目し、変換効率の良いコイルを探した方がより速く弾を発射できるのではないかという結論に至ったのでこれからの実験はコイルに注目することにした。

C.実験(2)とその結果

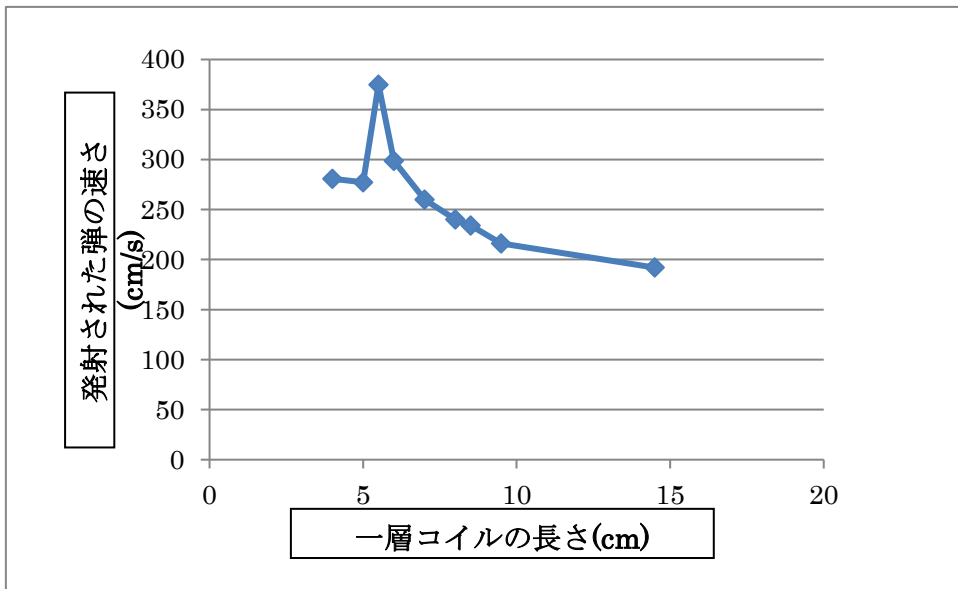
この実験としてさまざまなコイルを制作し、コイル以外は一定の条件で弾の速度を調べる実験をした。コイルの種類として 3.0cm,4.0cm(以上二つは 4 層コイル),5.0cm,6.0cm(以上二つは 3 層コイル),14.5cm(1 層コイル)のコイルを用意した。電圧は 450V で一定である。



結果は上図のようになり層が同じコイルでは似たような値をとるといようなことが判明した。しかし同じ層数でのデータが少ないために結果から同じ層数のコイルが似たような値をとるといことを明言するには不十分であったので、次の実験をすることにした。

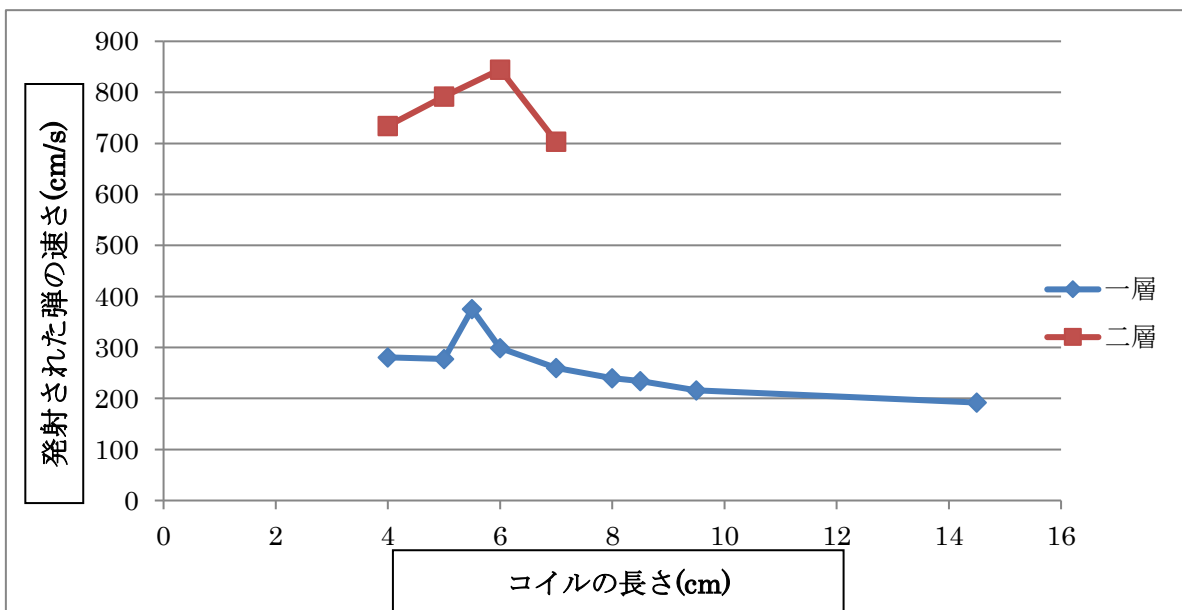
C.実験(3)とその結果

この実験として一層コイルで長さの違うコイル(5.0cm, 5.5cm, 6.0cm, 7.0cm, 8.0cm, 9.5cm, 14.5cm)を用意し、電圧を 450V で固定した時のそれぞれ速度を計測した。



結果は上図のようになり、長さを短くするにつれて、7cm の時点で一旦速度のピークを迎え、そのあと短くすると大きく速度が下降していることがわかる。この現象の理由については考察に記してある。

次に二層ではどのような振る舞いを見せるかを調べるために同様の実験を 2 層のコイルでも行うことにした。



結果は上図のようになり長さを短くするにつれて、6.0cm の時点で一旦速度のピークを迎え、そのあと短くすると大きく速度が下降していることがわかる。これは 1 層のコイルと同様の結果であることがわかり、一般的にどの層でも長さを短くすると速度のピークを迎え、そのあと速度が一旦下落するということが判明した。

研究方法の項目に示したように、変換効率を求めるため、上記の実験で得られた実際の値を代入していく。実験初期の変換効率は、 m :弾丸の質量[kg]、 v :弾丸の初速[m/s]、 V :電圧[V]、 C :静電容量[F] とすると

$$\frac{E'[J]=\frac{1}{2}\times m[\text{kg}]\times v^2[m^2/s^2]}{E[J]=\frac{1}{2}\times C[F]\times V^2[V^2]}\times 100=\frac{\frac{1}{2}\times 5.65\times 10^{-3}\times 4.56^2}{\frac{1}{2}\times 120\times 10^{-6}\times 360^2\times 20}\times 100=0.0035\%$$

であった。最も速い速度で弾が発射された場合の変換効率は

$$\frac{E'[J]=\frac{1}{2}\times m[\text{kg}]\times v^2[m^2/s^2]}{E[J]=\frac{1}{2}\times C[F]\times V^2[V^2]}\times 100=\frac{\frac{1}{2}\times 5.65\times 10^{-3}\times 16.8^2}{\frac{1}{2}\times 1000\times 10^{-6}\times 450^2\times 1}\times 100=0.76\%$$

まで上昇することができた。3 ページ目のグラフの一番左の点の値を使用している。

実験初期は 120 μ F のコンデンサを 20 個並列につないで実験を行っていたのに対し、実験後期は 1000 μ F のコンデンサを使用していた。分母の値の違いはそのためである。

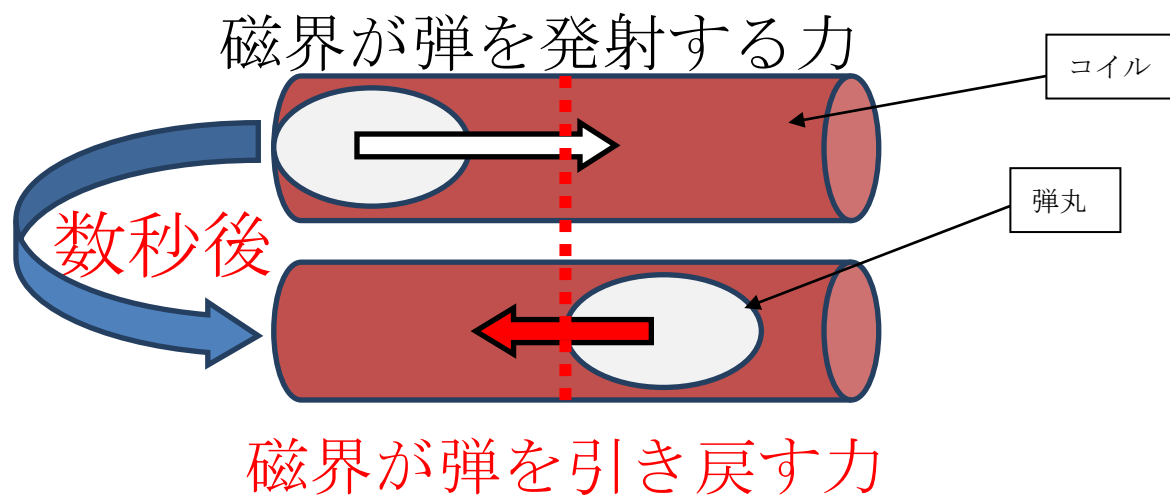
ここで今までの実験の結果をまとめておく。

層	コイル[cm]	速さ[cm/s]
1	14.5	192
	9.5	216
	8.5	234
	8.0	240
	7.0	260
	6.0	299
	5.5	375
	5.0	277
	4.0	281
	7.0	703
2	6.0	845
	5.0	792
	4.0	734
3	6.0	1310
	5.0	1339
4	4.0	1651
	3.0	1690

D.考察

上記のようにコイルが一定の長さで弾丸の速度が最大になった理由として、私たちは電流が流れる時間に注目した。コイルガンの説明として、短時間に電流を流して磁界を作り、球を発射するといったが、この電流の流れる時間という物が大きく影響を与えていると考えた。

電流が流れる時間は一瞬だが、その一瞬の間に球が移動しコイルの中点を越えた場合、発生した磁場によって逆方向に球が引き込まれる。



よって理想的なコイルは、電流を流している微小時間に球がコイルの中点を丁度通過する長さであると推測した。

これ以降の実験の方針としては、コイルの層数を増やして実験を繰り返し、変換効率の上昇の度合いや中点の位置との法則性を調べたい。また、時間が足りずに行うことのできなかったオシロスコープを用いた実験も興味深い。これを用いることで電圧のかかる時間を測定できれば、最適な長さのコイルを一発で作ることも可能になると推測している。

今回の実験での測定方法は、ハイスピードカメラで撮影した映像をコマ送りで読み取るというもので、画質が粗い映像の数値の測定を手作業で行った。ここでの数値は1200倍されるので、少しの目盛の読み違えでデータに大きなズレが出てしまう可能性があった。実験中盤で赤外線センサーを貸して頂いたが、計測方法の統一を考えて使用しなかった。これらの器具についてよく調べ、利用することで、実験の効率化やより正確なデータを計測することができるだろう。

E.結論

コイルガンの弾の速度を上げることとしては、使用する電圧を大きくする、コイルによる電気エネルギーの変換効率を高くする方法がある。コイルの変換効率の改善法としてはコイルの構造に大きく関わっていることが分かった。同じ層のコイルでは単純に長さに比例するわけではなくある長さを境に速さが遅くなるということが分かった。

実験から、最適なコイルの作成は、巻き数を増やすことに加え電流が流れている時間に弾が中点まで到達できる長さに調節し、同線を何層にも重ねて巻けば速度を向上させることができるという法則を発見した。

一年半の試行錯誤の結果、コイルによる電気エネルギーの変換効率を0.0035%から0.76%まで強化した。研究の成果として最初に作成したコイルの約217倍まで効率を上げることに成功した。

一般的に研究されているコイルの変換効率が1~10%とされているので、まだ改善の余地があるといえる。

例えば、先ほど述べたようにコイルを何層にも巻いたり、回路を改良してロスを減らせれば更なる速度の向上が期待できるだろう。

F.謝辞

今回の実験にあたってカメラを何度も提供して下さった スタジオうえはら様
実験についての指導をして下さった 高田先生、佐藤先生、小谷先生
プレゼンの指導をして下さった 竹本校長先生

本当にありがとうございました

G.参考文献

EML 製作記録

<http://emllaboratory.blog.fc2.com/blog-entry-4.html>

コイルガンの基本

<http://www.higashino.jp/rctank/coil/basic/index.html>

ハンドコイルガンの製作

<http://bebop.s54.xrea.com/handcoilgun.html>