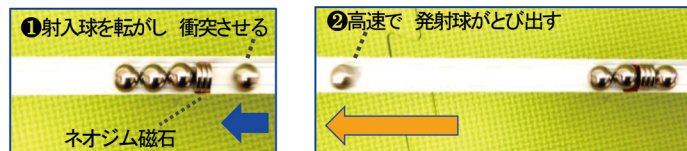


どうしたらガウス加速器の発射球を飛ばせるか？ ～ 射入球速度の検証 ～

新宿区立鶴巻小学校 6年 田上 穂高

研究の動機

ガウス加速器は2個以上の鉄球とネオジム磁石を並べた装置で、磁石側に鉄球(射入球)を転がすと、反対側の鉄球(発射球)がとても速い速度で飛び出す。



その意外な速さに驚いて、昨年は自由研究でガウス加速器の発射球を勢いよく遠くへ飛ばせる装置を研究した。装置の条件を様々に変えて発射球の飛距離を測ると、「磁石3枚・並べる球3つ・装置の数3つ」の時に最高記録が出た。転がした射入球よりも発射球がかなり高速で飛び出すのは、ネオジム磁石の吸引力が目には分からないほどの一瞬で射入球を引っ付け加速するからだ。発射球は衝突された勢いで磁石の吸引力をふり切って飛び出す。衝突の時、他の球は飛び出さず、「発射球だけが飛び出すような磁石の適度な強さ(枚数)」、「発射球と磁石との距離のバランス」が飛距離を左右した。

しかし、射入球については、説明が難しかった。射入球をゆっくり転がした方が発射球の加速は強くなったが、飛距離を最高にすることはできなかった。射入球を速くしてゆくと発射球の飛距離は伸びた。しかし、射入球を速く転がすほど発射球が遠くまで飛ぶと思ったのに、速くしすぎると飛距離は少し短くなった。装置もずれることが多くなり、装置を2つ以上置くと、衝突でお互いにくっついて、発射球が飛び出さなくなった。

射入球の速さによって、発射球の飛距離や加速がどのように変化するかという疑問が、今後の課題として残った。

今年はその課題を解決するために、射入球速度を変えると磁石による加速がどのように変わるのか、また、射入球を速くしすぎるとなぜ発射球の飛距離は短くなったのか、その理由を検証したい。

実験前の学習と予想

発射球を遠くまで飛ばすには大きな運動エネルギーを与える必要がある。衝突ではエネルギー保存の法則で、無駄なくエネルギーが伝われば、衝突前後の運動エネルギーの大きさは変わらない。しかし実際は音や装置のずれに使われて、射入球の運動エネルギーの損失が起きる。装置のずれが大きいくほど、運動エネルギーの損失も大きくなり、発射球の勢いは弱まり、速度は遅くなるだろうと思う。

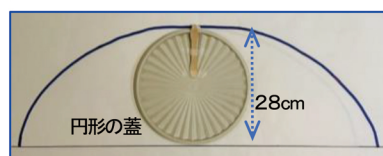
だが、発射球の勢いが弱まる原因は、装置のずれだけではなさそうだった。なぜなら、高速で射入球を衝突させると、装置が偶然ずれなかったときも、加速しなかったからだ。

速さと運動エネルギーの関係は次の式で表される。

$$(\text{運動エネルギー}) = (\text{質量}) \times (\text{速さ})^2 \times 1/2$$

運動エネルギーは速さが2倍になると4倍に増える。速度が速いほど発射球は遠くまで飛ぶ。そこで速度測定器を使い正確に球の速度を測ることにした。

研究の方法

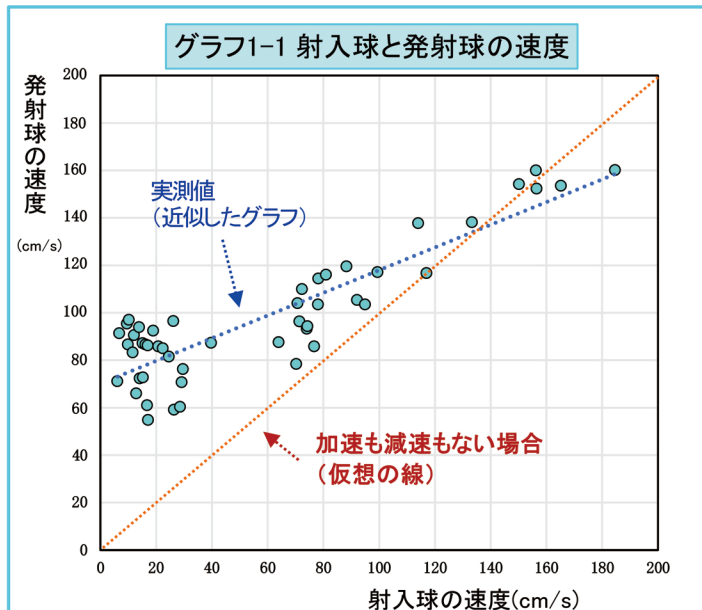


射入球をガウス加速器に衝突させ、射入球と発射球速度を測る。球を高速で滑らかに転がすことができるレールを作った。理科の授業で教わった最速落下曲線(サイクロイド曲線)を円形の蓋を使って描き、その真ん中から水平な直線を伸ばした形にした。段ボールをその形に切り、配線用モールを貼り付けた。水平部分に速度測定器2台、間にガウス加速器を置き、方眼紙で位置目盛りをつけた。



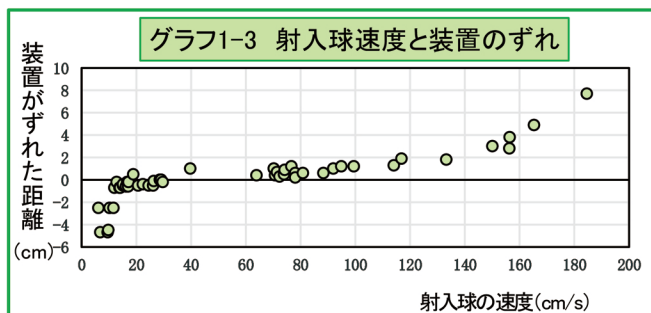
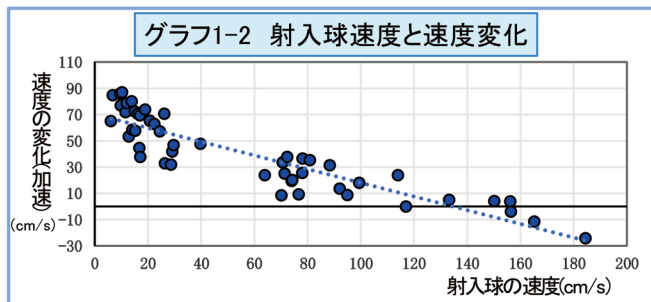
実験 1 装置を固定せず、射入球を様々な速度でガウス加速器に衝突させた。射入球と発射球の速度、装置のずれを50回測定した。

結果 1 測定した値をグラフに表すと次のようになった。



$$\text{速度の変化} = \text{発射球速度} - \text{射入球速度}$$

で計算し、射入球速度と速度変化は次のグラフのようになった。



考察 1

グラフ1-1から射入球の速度が速いほど、発射球の速度自体は速くなっていた。測定した値(●)と、衝突で発射球速度が変化しないと仮定した場合の線(.....)を比べると、射入球を速くしてゆくににつれ、グラフの差(加速)は小さくなり、やがて実際の発射球速度は仮定の線(.....)を下回った。射入球速度が遅いほど、グラフの差(加速)が大きくなり、発射球の運動エネルギーのほとんどが磁石の力になっていった。

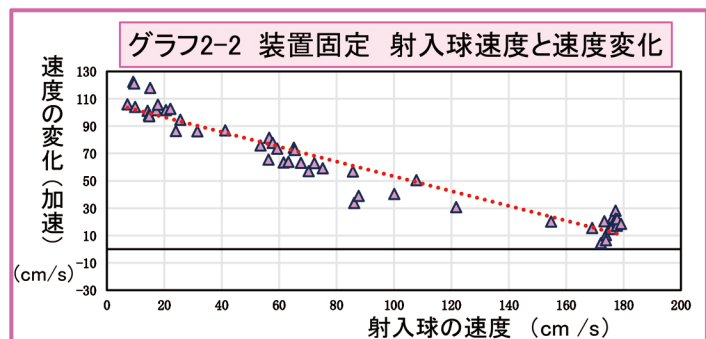
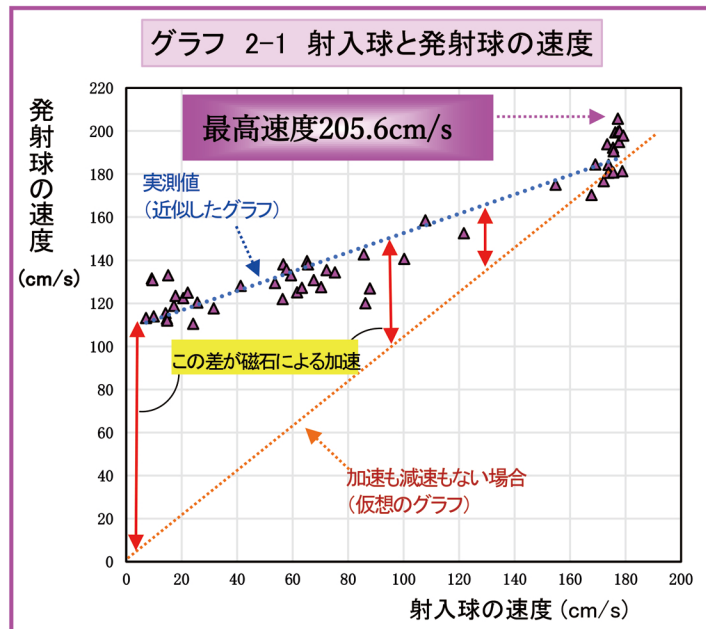
実際に発射球速度が射入球速度からどのくらい加速されたか、速度変化(加速)を取り出しグラフを描いた。射入球速度と速度変化(加速)の関係はグラフ1-2のように右下がりの直線に近い形になった。射入球の速度が120～130 cm/sを超えると加速は0を下回り、発射球はかえって減速していた。

射入球速度と装置のずれを表したグラフ1-3から、射入球の速度が遅いほど、射入球が衝突する前に装置は磁石と射入球の間の強い吸引力によって引っ張られて装置は射入球側(→)に動き、射入球速度が速いほど、衝突時に装置は射入球の勢いで押されて発射球側(+)に大きくずれていた。

ずれによる運動エネルギーの損失は、発射球の速度や加速の大きさについていどう影響するのかを調べるため、装置を固定して実験することにした。

実験 2 ガウス加速器(発射球以外)をテープでレールに固定して、同じように射入球と発射球の速度を 50 回測定した。

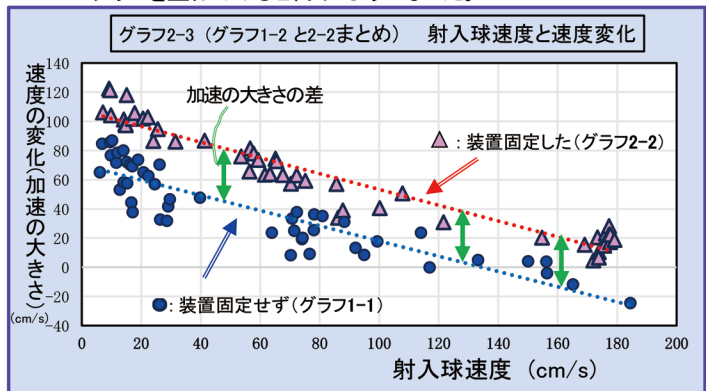
結果 2 実験1と同様に測定値と計算で出した速度変化をグラフに表す。



考察 2

装置を固定し射入球自体の大きな運動エネルギーが損失なく装置に伝わり磁石による加速を得ると、発射球は最高速度 205.6cm/s に達した。実験 1 と同じように、射入球が高速になるほど磁石による発射球の加速は小さくなり、速度変化のグラフ 2-2 もグラフ 1-2 のように右下がりの直線に近くなった。しかも、グラフ 1-2 とグラフ 2-2 は直線の傾きがほとんど同じに見える。

2 つのグラフを重ねてみると、次のようになった。



グラフ 1-1 は、グラフ 2-1 を下にほぼ平行移動した形に見える。装置を固定しない場合、装置を固定した時よりも、射入球速度にかかわらず発射球の加速の大きさが 40~50cm/s 減っている。加速が減るのは、装置のずれで運動エネルギーが失われるためだ。そして、グラフ 1-3 と合わせて考えると、射入球速度・装置のずれの距離・ずれの向きにかかわらず、装置がずれることによる運動エネルギーの損失は一定値のようだ。

最終的な発射球の速度は、次のように決まると考える。

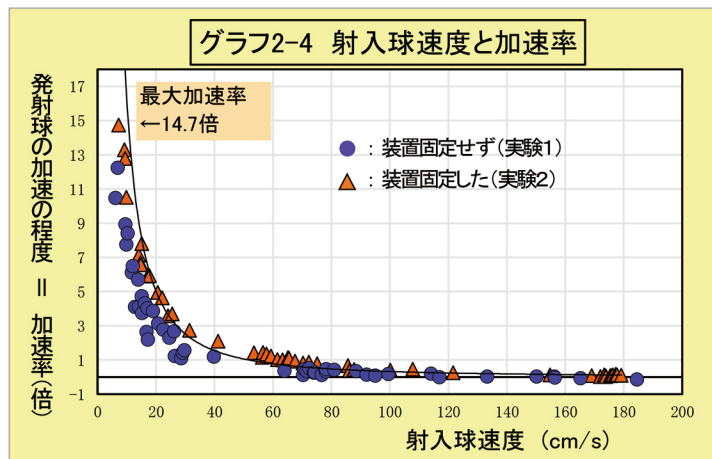
$$\text{発射球速度} = \text{射入球速度} + \text{磁石による速度変化} - \text{運動エネルギーの損失による減速(一定)}$$

装置を固定してもしなくても、「射入球速度」と「加速の大きさ」のグラフの傾き

が一定であることから、「射入球の大きさ」は、「射入球速度」によって決まると考えた。そこで、「加速の大きさ」が元の「射入球速度」に対して何倍かという「加速の程度＝加速率」を、測定した値から次の式で計算した。

$$\text{加速率} = (\text{発射球速度} - \text{射入球速度}) \div \text{射入球速度}$$

「加速率」と「射入球速度」の関係をグラフ 2-4 に表す。



このように装置固定に関係なく、反比例のグラフよりも深いカーブの曲線のグラフになったことに驚いた。そして、特に射入球速度が 20cm/s より遅い時、射入球が遅いほど加速率はとても大きくなって行き、発射球は磁石によって元の射入球の何倍もの速度に加速されるようになることが分かった。

装置を固定しない時(●)と装置を固定した時(△)を比べると、曲線のカーブの形はほとんど変わらなかった。装置のずれで値がばらつきたり加速率が少し低くなったりするが、加速率と射入球速度の関係は変化しないようだ。

研究のまとめ

一つ目の疑問の、射入球速度によって磁石による加速がどのように変わるのかについては、「射入球が低速であるほど加速が大きくなる」ということがわかった。特に射入球速度が 20cm/s より遅い時、磁石によってとても大きく加速される。今回は装置固定で射入球が 7.2cm/s という低速の時、加速率は最高値 14.7 倍(約 15 倍)を記録した。15 倍の加速とは、歩く速さのものが、一瞬で自動車の速さになって飛び出すような爆発的な加速だ。あらためて磁石の力のすごさを実感した。

二つ目の疑問の、射入球が速すぎるとなぜ発射球の飛距離が少し短くなるのかについては、昨年は装置を固定しておらず、「射入球が高速だと射入球自体の運動エネルギーは大きい、磁石による加速が小さくなり、装置のずれによる運動エネルギーの損失を補えなかったため」と考えた。

装置を固定しても、射入球が高速の時は磁石による「加速」がわずかになってしまう。なぜ射入球が速いほど加速がわずかになり、遅いほど加速が急激に大きくなるのかについて考える。磁石と射入球の間の吸引力は、クーロンの法則で距離の 2 乗に反比例し、衝突寸前で急激に大きくなる。射入球が低速だと、射入球は衝突寸前に磁石の強い吸引力を充分に受ける「時間」があるので、磁石の吸引力にまかせて衝突する。しかし、射入球が高速だと、強い磁力がはたらく場を、射入球が磁力を受ける間もなく通過してしまい、磁石の吸引力を充分に受ける前に衝突するからではないか、と考えた。磁力がはたらくには、磁石のごく近くにいる「時間」が必要なのだと考えた。

発射球の「速度」を最大にするには、装置固定で運動エネルギーの損失をなくし、射入球の速度をできるだけ速くする。しかしそれでは通常の衝突とあまり変わらない。ガウス加速器の「加速」を最大限引き出すには、射入球速度をできるだけ遅くして、磁石に近づく「時間」を確保して衝突させるのが効果的である。今回の実験を通して磁石による加速の大きさを実感し、これほどの加速を起こす磁石の力が日常でどう使われているのかも調べた。この実験で使ったネオジム磁石は小型でも強力、電気自動車の駆動用モーターの小型化やパワーステアリングで電力を効率よく駆動エネルギーに変えることに役立っている。磁石の力を電流で制御する電磁石は、エレベーターや医療機器(MRI 等)、リニアモーターカーなどでも利用されている。

昨年感じた「目で見た現象を説明する難しさ」を、今年は測定した実験結果のグラフの形から自分なりに検証し、考察できたと思う。

参考文献 竹内秀夫 (2013)「基礎から学ぶ力学」現代数学社

谷腰欣司 (2000)「図解 磁石と磁気のしくみ」日本実業出版社