

ガウス加速器のメカニズムとエネルギー解析

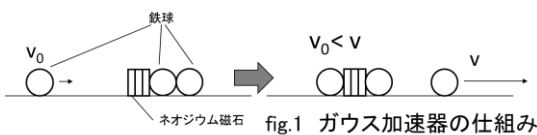
兵庫県立豊岡高等学校 生物・自然科学部
 2年 南條拓希, 松井公佑, 早田和典
 1年 岩本柊吾, 藤原征樹

1. 動機及び目的

ガウス加速器は磁力を利用した簡単な加速器の1つである。この加速器の利点は火薬燃料を使わずに物体を加速できる点である。このメカニズムを解析することで、将来的に電磁気を利用した既存の粒子加速器の発展に寄与する可能性がある。ガウス加速器の先行研究として、力積を用いた解析¹⁾や、磁気エネルギーの測定²⁾などがある。本研究では、仕事とエネルギーの観点からガウス加速器の加速のメカニズムを解析することを試みた。

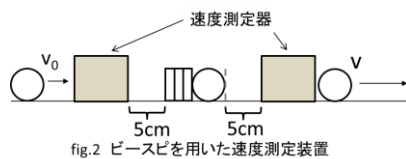
2. ガウス加速器の仕組み

永久磁石に鉄球を複数個くっつけて反対側から別の鉄球を近づけると、この鉄球は磁力によって急激に加速され磁石に衝突する。この衝突と同時に反対側にくっつけていた鉄球のうち最も外側の鉄球が大きな速度で発射される。³⁾ (fig. 2) (以降最初に転がした鉄球を入射球、反対側から飛び出した鉄球を射出球、またそれぞれの速度を入射速度、射出速度と呼ぶ。)



実験 1

等質量 (4.08g) の鉄球 3 個とネオジウム磁石を用いて fig. 2 の装置を組み立てた。様々な速度で入射球を転がすことで入射速度と射出速度を測定しその関係を調べた。速度の測定には速度測定器 (ビースピ) を用いた。



(結果)

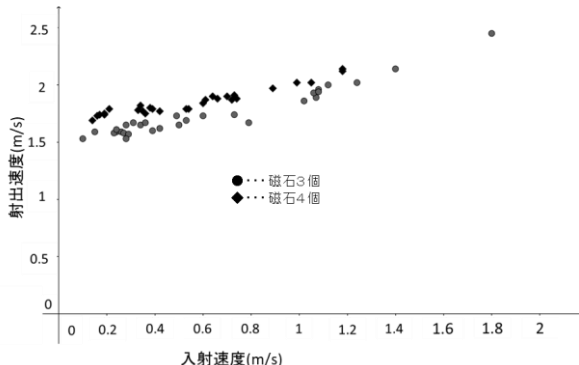
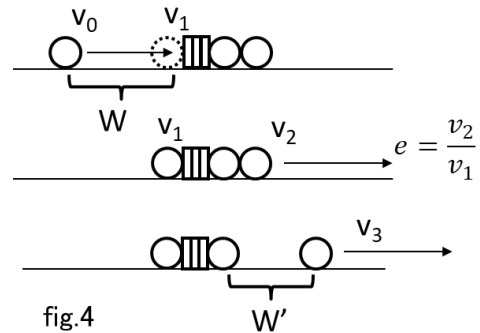


fig.3 入射球と射出球の関係

fig. 3 より入射速度が増加するにつれて射出速度も増加することが分かった。しかしその増加は単純な直線的な増加ではなく、入射速度によって傾きが異なるように見てとれた。またビースピを用いた測定では、鉄球とレールの摩擦によるエネルギー損失がある点、ビースピの構造上平均速度としてしか測定できない点から測定の精密さには限界が生じると判断した。そこで先行研究⁴⁾を参考に水平投射による射出速度の測定を考案した。(考察)



実験 1 の結果をもとに、ガウス加速器は以下のようなプロセスで射出球が大きな速度で発射されているという仮説を立てた。

- ・入射球が磁石から受ける仕事 W

$$\frac{1}{2}mv_0^2 + W = \frac{1}{2}mv_1^2$$
- ・本体装置を介した非弾性衝突による反発係数 e

$$e = \frac{v_2}{v_1}$$
- ・射出球が磁石から受ける負の仕事 W'

$$\frac{1}{2}mv_2^2 + W' = \frac{1}{2}mv_3^2$$

これらより入射球と射出球との関係は以下のように考えられる。

$$v_3 = \sqrt{e^2 \left(v_0^2 + \frac{2W}{m} \right) + \frac{2W'}{m}} \quad \dots \textcircled{1}$$

実験 2

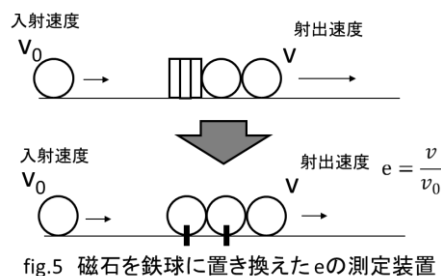


fig. 5 の衝突直前の速度と射出の瞬間の速度を比較した。この衝突は非弾性衝突であり v_0 と v の値は一致しない。そこで本体装置を介した反発係数 e の測定を試みた。磁石を用いると磁力により鉄球が加速されるため正確な速度の測定はできない。今回は鉄球とネオジウムの反発係数はほぼ一致するものと仮定し、磁石を鉄球に置き換えた形で反発係数の測定を行った。また本体に相当する真ん中の鉄球 2 個分は固定をした。

(結果)

入射球を様々な速度に変えて 10 回測定をすると、 $e=0.947(\pm 2.36 \times 10^{-3})$ という結果が得られた。これより本体装置を介することで、入射速度に関係なく約 5.3% の速度損失を伴うことが分かった。

実験 3

磁石が鉄球に行った仕事を調べるために、磁力と磁石-鉄球間の距離との関係を測定する必要がある。そこで、fig. 6 の装置を組み立て、磁石-鉄球間の距離を変えた時のそれぞれの磁力を測定した。容器にビュレットで水を滴下し、鉄球が磁石から離れた瞬間の水の滴下量を測定し容器に働く重力の大きさから磁力 F を求めた。この時、磁石-鉄球間の距離を挟む厚紙の枚数を変え、各点で 5 回ずつ測定した。鉄球を 2 個つなげた状態でも同様の測定を試み、射出球が受ける磁力 f を求めた。また F, f を x について積分することでそれぞれが受ける仕事を求めた。

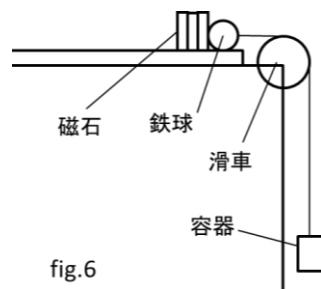


fig.6

(結果)

鉄球が受ける磁力と距離の関係を fig. 7 に示す。

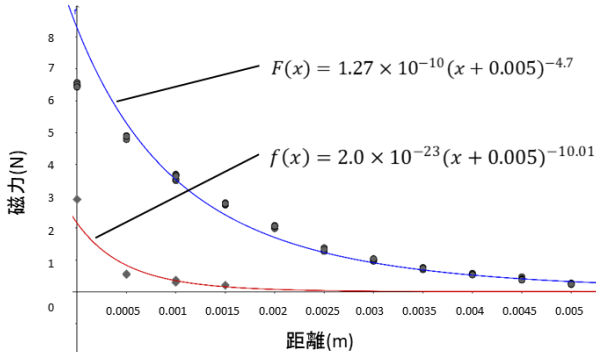


fig.7 磁力と鉄球の距離との関係

鉄球と磁石の距離を大きくすると磁力も小さくなることが分かった。一般的に 2 磁極間では磁力は距離の 2 乗に反比例する(クーロンの法則)ことが知られている。しかし今回は片方が磁石ではなく鉄球であることから必ずしもクーロンの法則に一致するわけではないと判断し、実測値に近い関数で近似することにした。その結果、入射球と射出球が受ける磁力と距離の関数はそれぞれ

$$F(x) = 1.27 \times 10^{-10} (x + 0.005)^{-4.7}$$
$$f(x) = 2.0 \times 10^{-23} (x + 0.005)^{-10.01}$$

となった。また入射球が磁石から受ける仕事 W は

$$W = \int_0^{0.05} F(x) dx \approx 0.0112 \text{ (J)}$$

となった。同様に射出球が受ける負の仕事 W' は

$$W' \approx -0.00120 \text{ (J)}$$

と求まった。^{5) 6)}

実験 4

再度任意の速度で入射球を転がし、入射速度と射出速度の関係を調べた。実験 4 では本体装置を固定し、射出速度はビースピと水平投射の 2 通りの方法で測定した。また、実験 2, 3 で測定した値を式①に代入し入射速度と射出速度の関数として算出、実測値との比較を行い仮説の検証を行った。(結果)

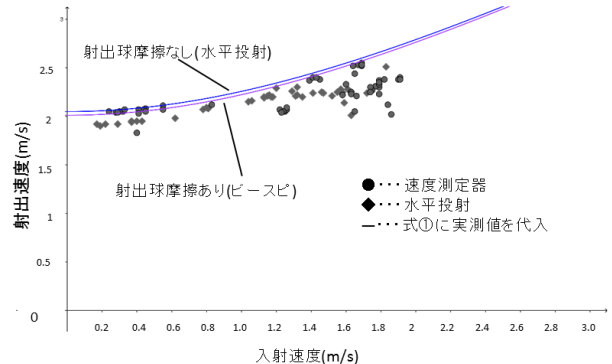


fig.8 入射速度と射出速度との関係及び式①との比較

式①に加え、鉄球が転がる時に受ける摩擦による負の仕事と考慮すると実測値によく一致した。これより、式①を用いた入射速度と射出速度の関係についての仮説が立証された。また式①より入射速度と射出速度の関係は単純な直線的な増加関係ではなく、入射速度 v_0 を大きくするにつれて発射速度の増加が小さくなり $v_3 = ev_0$ という、非弾性衝突の式に漸近していくことが予想される。

3. まとめと考察

式①を用いることでガウス加速器のメカニズムの解析に成功した。今回理論値に一致しなかった実測値の誤差の原因として、本体の真の反発係数が測定できなかった点、ガウス加速器の性質上磁化されていない鉄球を磁場に入射するため、その瞬間に各点における磁場が一定ではなかった可能性などが挙げられる。今後は上記の点についてさらなる精密な測定を試みたい。

参考文献

- 1) 岩井駿之介 他, “力積を用いたガウス加速器の性能の解析”, H29 年度 SSH 生徒研究発表会
- 2) 牧原義一 杉本佳隆 “ガウス加速器における仕事とエネルギーの測定”, 三重大学教育学部研究紀要, 2012, 6, 3, p1~5
- 3) 「理科教室」, 2006 年 4 月号 p17~p21, 右近修治, 「ガウス加速器の物理法則にメスを入れる」
- 4) David Kagan, “Energy and Momentum in the Gauss Accelerator”, The Physics Teacher, vol42, p24~26
- 5) 数学ソフト GeoGebra 5. 0. 352. 0-3D
- 6) WolframAlpha, <http://www.wolframalpha.com> (2017 年 9 月 26 日閲覧)

パラシュート付き水ロケットの研究

兵庫県立芦屋国際中等教育学校

4年 速水 陸生、陳 強、春名 海里、橋本 空
嘉数 民生、箸尾 浩一、イエンセン 樹杏

1. 水ロケットとは

ペットボトルで作ったロケットで、中に水と空気を入れて飛ばすもの。(下の写真)



2. 研究の動機

今まで飛ばしてきた水ロケットは高速(時速100 km以上になることもある)で飛行して落下するため、広い敷地を必要としていた。また飛ばす度に破損して修理の必要がある。そこで広い敷地を必要とせず、低速で落下して安全に回収でき、再利用できるパラシュートがついたロケットの開発を考えた。パラシュート付き水ロケットの作り方については、インターネットなどにも載っていたが、その通りに作ってもなかなかパラシュートが開かず、どのようにすればパラシュートが開くのか書かれているものがなかった。その条件を調べようと思った。また入れる気圧と高度の間にどのような関係があるかということにも興味があったので調べた。

3. 目的

- (1) パラシュートが開く条件を調べる。
- (2) 入れる気圧、最高点、初速度の関係を調べる。
- (3) カメラで学校周辺の空撮を行う。

4. 準備物

1.5 Lの炭酸飲料のペットボトル2本 糸
油粘土 クリアファイル ビニールテープ
下敷き 気圧を測れる空気入れ ビニール袋
水ロケットの発射装置 高度計 小型カメラ

5. 作成方法

- ① ペットボトルとクリアファイルを切り、重心が前に来るように、先に粘土を入れて、中に高度計を貼り付ける。(写真1)
- ② 右写真のように、下敷きとペットボトルを切ってはりつける。(写真2)
- ③ ビニール袋で一边30 cmの正六角形を作り、中心に一边6 cmの正六角形の穴をあける。



写真1

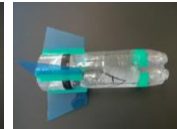


写真2



写真3

- ④ パラシュートの各角に50 cmの糸をつけ、たんでロケットにつなぐ。(写真3)
- ⑤ パラシュートが開いたときに、空撮できる位置にカメラを糸につける。



- ⑥ ロケットを発射装置と空気入れに繋ぐ。

6. 実験の方法と結果

- (1) パラシュートが開く条件を調べる

- ① 校舎の3階から3回ロケットを投げた。

結果: 3回連続でパラシュートが開いた。

- ② ロケットを発射して開くか調べる

- i) グラウンドで8回飛ばした。

結果: 8回中5回パラシュートが開いた。

- ii) ロケットの連結部分【考察(1)の写真の丸の部分】を上にならして、グラウンドで8回飛ばした。

結果: 8回連続でパラシュートが開いた。

(2) 入れる気圧と最高点との関係調べる
 確実にパラシュートが開くようになってから、ロケットの質量を270g、入れる水の量を500mlとして、入れる気圧を4.0atm、4.5atm、5.0atm、5.5atm、6.0atmと変えて3~4回ずつ飛ばして、それぞれの高度を調べた。

調べた高度から初速度を求める。一瞬で全ての水を放出されると仮定する。そうすると、空気抵抗を無視したときのロケットの位置エネルギー

mgh より、最初の運動エネルギー $\frac{1}{2}mv^2$ は

$mgh = \frac{1}{2}mv^2$ となるので、そこから求められる。

しかし実際は空気抵抗があり、水も一瞬で放出されないので、ロケットの初速度はこれより速いと考えられる。

空気が水にした仕事を、実際には断熱変化と考えられるが等圧変化として pV から求め、その仕事の何%が位置エネルギー mgh に変わっているかを求めて表にまとめた。

結果 各気圧での高度と初速度、変換率

日	4.0atm	4.5atm	5.0atm	5.5atm	6.0atm
9/8		37m	40m	40m	
9/11	31m	33m	40m	39m	42m
9/14	29m	33m	39m	37m	
9/28	25m	31m	38m	39m	45m/42m
平均	30m	34m	39m	39m	43m
初速	24m/s	26m/s	28m/s	28m/s	29m/s
変換率	40%	40%	41%	38%	38%

参考：各回の月日と天候

月/日	9/8	9/11	9/14	9/28	単位
気温	27.5	28.0	28.0	25.0	°C
湿度	55	54	55	48	%
天気	快晴	曇り	晴れ	晴れ	
気圧	1004	1006	1013	1002	hPa
風向	北西	南南西	北	北西	
風速	2.2	4.8	5.5	2.3	m/s
最大瞬間風速	5.2	7.6	7.8	4.6	m/s

(3) カメラでの空撮

結果：パラシュートが開いたとき、空撮に成功した（右の写真）。



7. 考察

(1) パラシュートが開く条件
 上部と下部が分離できている



ときにパラシュートが開く。パラシュートが開かないときは、下部のロケットが上部のロケットにはさまっていた。

そこでペットボトルを切って、上の写真の丸の部分の部品をつけると、はさまることがなくなりパラシュートが確実に開くようになった。

(2) 入れる気圧と最高点との関係

水がした仕事からロケットの位置エネルギーへの変換率は、おおむね40%ぐらいになった。実際は断熱変化なので、この数値よりも大きいと考えられる。

4.5~5.0atmのときは変換率が40%以上だが、5.5atmを超えると変換率が下がった。5.5atmを超えると発射時にロケットが激しく振動したためそうなったと考えられる。

9/28に4.0atmで発射したロケットは、上部が発射直後に大きくずれて鉛直に飛ばなかったため平均の高度を求める時には含めない。

8. 反省と課題

回数をあまり飛ばすことができなかったのので、来年までにはより多くの回数を飛ばしてより正確な結果が出るようにしたい。

どの気圧を入れたときから激しい振動が起こるのかを調べたい。また断熱変化による気体が行った仕事と高度との関係を調べたい。

9. 参考文献

気象庁ホームページ

<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>

物理基礎、物理の教科書（数研出版）

水面波で浮遊物が動くメカニズムの考察

県立加古川東高等学校 自然科学部物理班
2年 小林秀太 多湖崇人 前谷風弥
1年 国村亮太 鈴木光希 田中翔

1. はじめに

筆者らは昨年度、上下の振動装置で水面に波を発生させて、ため池に浮かぶアゾラという外来性の植物を回収するための研究をしていた。そして、アゾラは40Hzのみで動き、それ以外の物質(BB弾や紙)ではどの周波数でも動いた。しかし、媒質の周期的な回転運動である波がどうして浮遊物を動かすことができるのか、なぜアゾラは40Hzでしか動かないのかという疑問については未解決であった。本研究の目的は周波数による波の違いを考察するとともに、浮遊物が動くメカニズムを解明することである。

2. 実験

2-1 周波数と波の形の関係性について

アゾラが動く40Hzの振動では水面に特異な網目模様(図1)ができていた。この網目模様にはアゾラが動く理由があると考え、波数と模様をつくる波の形との関係性について、下図の実験装置(図2)を用いて調べることにした。この装置で



図1 網目模様



図2 実験装置 (ViCE1)

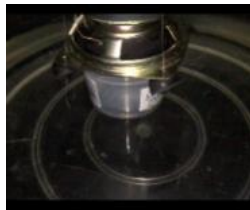


図3 装置内部

は、暗い環境で水面に光を当てて実験を行うことで波の形を比較的鮮明に観察することができる。装置内部には、水深を6cmにした水槽を設置し、スピーカーを振動装置として上部よりひもでつるして水面に接する位置に設置した(図3)。また、スピーカーの周波数を変更するために音源ソフト『振動数と音源「発音」』を使用した。

実験では、10秒間一定の周波数を正弦波で発生させ、水やスピーカーの挙動をスローモーション(240fps)で撮影した。波が通常の正弦波の波形である場合には×、網目模様を描いている場合には○と評価した。周波数は10Hzから100Hzまでを10Hzずつ変化させた。結果は以下の通りである。

表1 周波数[Hz]と模様の関係

周波数	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
評価	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○

実験中のスピーカーの挙動を観察すると周波数が40Hzに近づくほどスピーカーの横方向へのブレ(初期位置からのずれ)が大きくなった。このことから網目模様が発生する理由はスピーカーの横方向へのブレによって合成波が作られていることにあると考えた。また、40Hzでは水しぶきによってさらに多くの波が発生していた。

2-2 波で浮遊物が動くメカニズムの仮説

網目模様が見られないにも関わらず、アゾラ以外は10Hzで動いていることから、合成波が形成されていない10Hzでの浮遊物の動きに着目した。まず、浮遊物を水面に浮かべて振動装置で振動(10Hz)をおこした時の波と浮遊物の動きをスローモーション(240fps)で撮影した。その動画を解析し、浮遊物が動くメカニズムの仮説を立てた。解析した浮遊物の動きのモデルが図4であ

る。

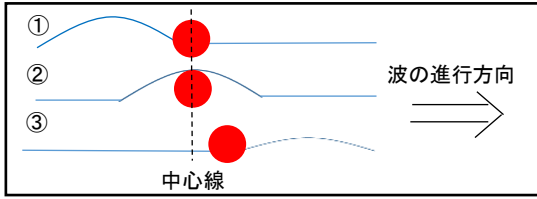


図4 実験動画の解析から得た波による浮遊物の動き

①では波が矢印方向に向かって伝搬している。②で波が浮遊物に達したとき、浮遊物は波に飲み込まれる。波が浮遊物を超えてから浮遊物が波の進行方向に移動し、その後の波は減衰する(③)。ここから、浮遊物が動くのは、水分子の回転運動が浮遊物の運動に変化するからであると考えた。

2-3 浮遊物が動くメカニズムの仮説から、浮遊物と波の関係を立式し、実験結果と比較する

まず、水分子の回転運動から考える。
水分子1つの運動量変化は

$$m_p v_1 - m_p v_0 = I_p$$

1つの山の水分子の個数をかけて、波1つの運動量の変化は

$$n_1 m_p v_1 - n_0 m_p v_0 = I$$

$$v = r\omega = 2\pi f A \text{ を代入}$$

$$2\pi m_p f (n_1 A_1 - n_0 A_0) = I$$

1つの山の水分子の個数はその体積によって決まるので

$$n = \frac{\rho V N_A}{M} = \frac{\rho \lambda l N_A}{M \pi}$$

$$\text{これと } m_p = \frac{M}{N_A} \text{ を代入し、}$$

$$2f\rho\lambda l(A_1^2 - A_0^2) = I = F\Delta t$$

2-2 のメカニズムの仮説より、この力Fが浮遊物にかかる力に等しくなればよいので

$$F = \frac{2f\rho\lambda l(A_1^2 - A_0^2)}{\Delta t} = m_B a_B$$

m_p : 水分子一つの質量[kg] ρ : 水の密度[kg/cm³]

v_0 : 水分子一つの衝突前の速度[m/s] λ : 波長[m]

v_1 : 水分子一つの衝突後の速度[m/s]

I_p : 水分子一つに加わった力積 f : 振動数[Hz]

n_0 : 衝突前の山の水分子の個数

M : 水のモル質量[g/mol] Δt : 力が加わった時間

n_1 : 衝突後の山の水分子の個数 I : 山が加えた力積

N_A : アボガドロ定数 A_0 : 衝突前の振幅 [m]

A_1 : 衝突後の振幅[m] F : BB弾へ加わる力

l : BB弾の浸水部分の平均の長さ

m_B : BB弾の質量 a_B : BB弾の加速度

2-4 結果・考察

動画から調べた変位を2回微分した値を実験値として、理論値と比較した。

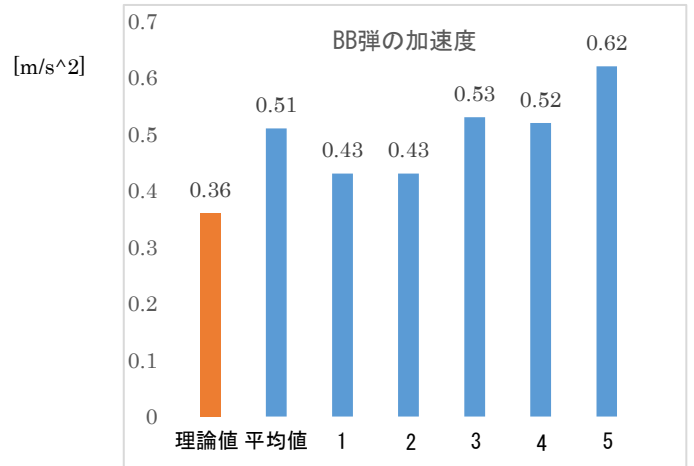


図5 実験値と理論値の比較

(実験回数:5回)

この実験より、実験値と理論値ではかなり差がみられることが分かった。これは理論の l や A が正確ではないことや、動画を解析する際の誤差などが原因である可能性も考えられる。今後、計測方法などを見直し、理論の正誤を確かめる必要がある。

3. 今後の課題

20Hz以上の網目模様のできる波でも理論モデルを立てて、浮遊物の体積や形によって最適な周波数を数理的に考察する。

4. 参考文献

佐藤文隆 松下康雄「波のしくみ」(2007), 他