



愛知県立惟信高等学校 林 熙 崇*
 (業績分担者) 名古屋市立桜台高等学校 杉 本 憲 広**

目 的

理科教材として市販されている教具に「弾性ボール」と「非弾性ボール」がある。「弾性ボール」は指で压すと硬い感じを受ける。 $e = 0.8$ ぐらいである。一方「非弾性ボール」は压すと柔らかい感じを受ける。そしてほとんど跳ねない。両者を台秤の皿の上に落とすと「弾性ボール」の方が明らかに針が大きく揺れる。しかし同じボールを頭に当てた場合は指で压したときに柔らかい感触を受けた「非弾性ボール」の方がめちゃ痛い。一見パラドックスのように見えるこの問題の解決には「力」と「力積」を区別して見られる装置の開発が必要であった。

概 要

一見矛盾するようなこの物理現象を説明するために弾性体及び非弾性体を取りつけた力学台車を静止した同質量の力学台車に衝突させ、ぶつけられた台車の速度とその時間微分をオッシロスコープに表示できるようにした実験装置を開発した。この実験結果から衝突中に受けた「力積」は弾性衝突の方が約2倍くらい大きい「力」のピーク値は非弾性衝突の方が数倍大きくなること解った。次に「弾性ボール」、「非弾性ボール」の衝突中の力積を見ることが出来る装置を開発した。それはスピーカーコーン紙にペットボトルで作った筒を接着し、その筒に亜鉛製のおもりを直列にとりつけ、そのおもりに「弾性ボール」、「非弾性ボール」をぶつける。その時ボイスコイルに発生するおもりの速度に比例した誘導起電力を時間微分をしてオッシロスコープに表示できるようにした装置である。実験結果はやはり「弾性ボール」では「力積」は大きい「力」のピーク値は小さく、「非弾性ボール」ではその逆になることが確認された。

台秤で計った衝撃は「力積」で

あることは明らかである。そして頭に当たったときの痛覚で計った衝撃は「力」のピーク値であろうと思われる。

教材・教具の製作方法

1. 力学台車衝突中の運動量、力積を見る装置
- (1) 全体構成図(図1、写真1)



写真1 実験装置全景

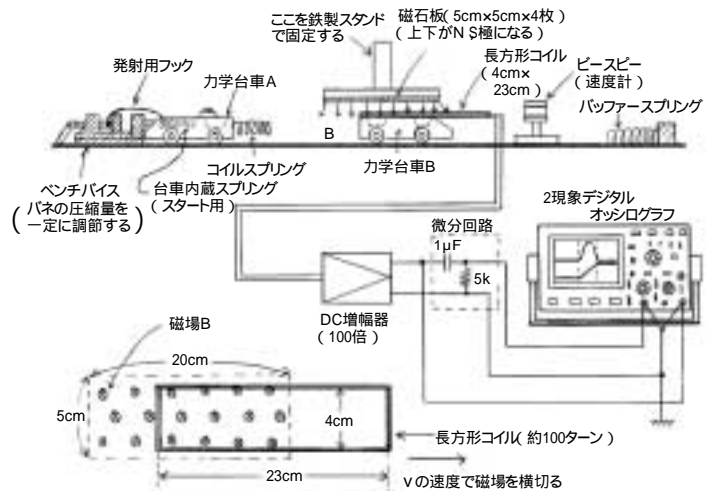


図1 装置の全体構成図

* はやし ひろたか 愛知県立惟信高等学校 教諭 〒455-0823 名古屋市港区惟信町2-262

(052) 382-1355 E-mail h_hayasi@tcp-ip.or.jp

** すぎもと のりひろ 名古屋市立桜台高等学校 教諭 〒457-0033 名古屋市南区霞町21 (052) 321-0186

(2) 設計の基本と特徴

長方形コイル(約100ターン)を力学台車(垂鉛ダイキャスト製)上部にとりつけ、コイルの上方に2~4cm離して磁石板を固定する。コイルが磁場をvの速度で横切ると $V = nvBI$ の誘導起電力が発生する。図のような磁石板(5cm x 5cm x 4個)を用いるとBがほぼ一定になりV vとなった。

コイルの巻き数を増やすと電磁ノイズを多く拾うので100回ほどにとどめた。台車の速度が0.5~1.0 m/s程度なので出力電圧が小さい。そこでDC増幅器で約100倍に増幅してオシロスコープに送った。

DC増幅器の出力電圧はvに比例している。この出力電圧をC、Rで構成した微分回路を通すと加速度に比例した電圧になる。

の電圧をデジタルオシロスコープで観測すると0.1秒単位で起こったゆっくりした現象を静止して見ることができる。

(3) 測定結果

オシロスコープの波形から「力積」と「力」を求める。写真のこぶの形を台形と近似すると $1/2 \times f \times (t_1 + t_2) = m \cdot v$ であるから $f = 2m \cdot v / (t_1 + t_2)$ となり

その時受けた力の絶対値が解る(オシロスコープ上のvの値はピースピー(速度計)で求めた絶対速度でキャリブレーションする)。

微分回路の時定数は $C = 1\mu F, R = 5k$ で $CR = 5ms = 1/200s$ である。

オシロスコープの時間軸は1目盛り20msである。

写真2は弾性衝突、写真3は非弾性衝突のF-tグラフとmv-tグラフである。衝突中に受けた力の最大値は非弾性衝突の方が弾性衝突の場合のほぼ3倍になっている。

「力積」は写真2、3の山形の部分を切り抜いて電子天秤で質量を計り面積を比べた。すると弾性衝突の「力積」は非弾性衝突の2倍強の値になった。

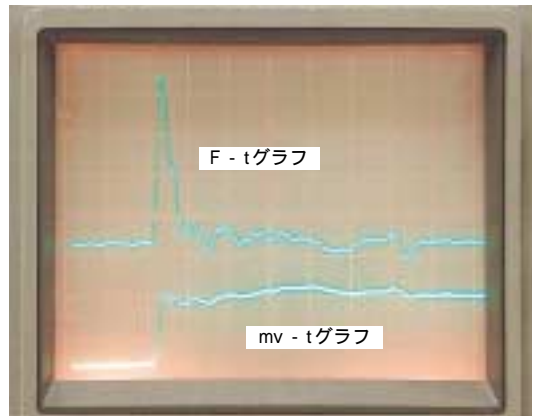


写真3 非弾性衝突
 横軸 1目盛 t - 20ms
 縦軸 1目盛 $\left\{ \begin{array}{l} F - \text{約} 6.7N \\ mv - \text{約} 1.5 \times 10^{-1} \text{kgm/s} \end{array} \right.$

mv-tグラフの方を見ると弾性衝突の運動量の变化は非弾性衝突のそれの2倍強になっていての力積とほぼ一致する。

2. 弾性ボール、非弾性ボールの衝撃を見る装置
 (1) 全体構成図(図2、写真4)

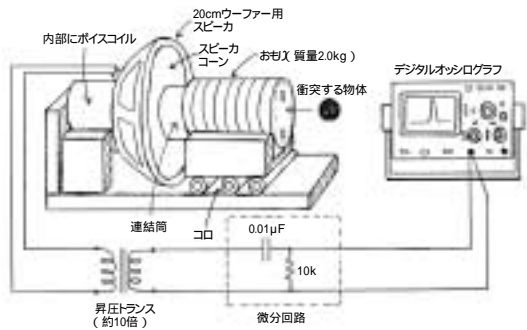


図2 装置の全体構成図

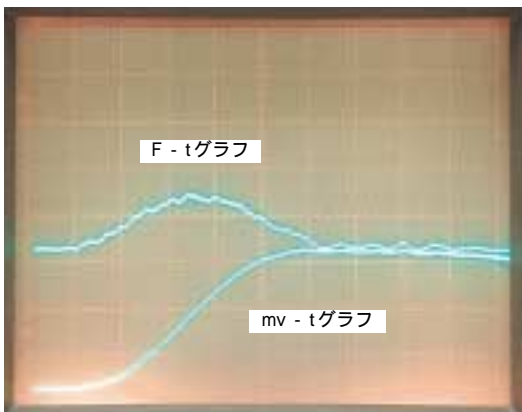


写真2 弾性衝突
 横軸 1目盛 t - 20ms
 縦軸 1目盛 $\left\{ \begin{array}{l} F - \text{約} 6.7N \\ mv - \text{約} 1.5 \times 10^{-1} \text{kgm/s} \end{array} \right.$



写真4 実験装置全景

(2) 設計の基本と特徴

ボール等が壁にぶつかったときに撃力が作用する時間は力学台車衝突時の約1/20 ~ 1/50である。そのため検出コイルと可動おもりが直列に結合されておもりの運動がダイレクトに検出コイルを押す構造になっていなければいけない。

ボイスコイルの可動範囲が大きい20cm ウーハー用スピーカーのコーン紙に連結筒（直径5.0cm、長さ3.0cm、材質ペットボトル）をアロンアルファ接着剤でくっつけ、その連結筒に質量2.0kgの亜鉛ダイキャスト製のおもり（力学台車用のおもり250g × 8）を直列に両面テープで接続する。おもりブロック部分はコロに乗せて摩擦力を減らす。

非弾性ボールが衝突したときの撃力の作用時間は1 ~ 2msとなる。そこで微分回路の時定数を100 μ sに設定した（0.01 μ F × 10k = 100 μ s）。

微分回路が外部ノイズを拾いやすいのでボイスコイルの出力電圧をオーディオ用昇圧トランスで10倍増幅してオシロスコープの入力感度を下げたようにした。

(3) 測定結果

弾性ボールの力積は非弾性ボールの力積の約1.8倍になっている（質量、速度を等しくして計測する）（写真5、6）。

しかし力のピーク値は非弾性ボールの方が大きい（写真5、6）。

弾性ボールに比べて非弾性ボール衝突の方が力の立ち上がりが大変鋭い。同様の鋭さは鉄球の衝突の場合にも見られる。両者とも頭に当たったときは石をぶつけられたような痛さである。これらの結果からボールがぶつかったとき、「力の立ち上がりの鋭いものが痛く感じる」と考えられる。

写真7は手作りの非弾性スポンジ（スポンジに水飴を吸収させて作ったもの）をぶつけたときのF-tグラフである。この非弾性スポンジは指で圧さるとグニグニした柔らかい感触の物体である。しかしこれを頭にぶつけると石でたたかれたようにめちゃ痛い。非弾性ボールと同じである。グラフの波形もやはり鋭い立ち上がりをしている。

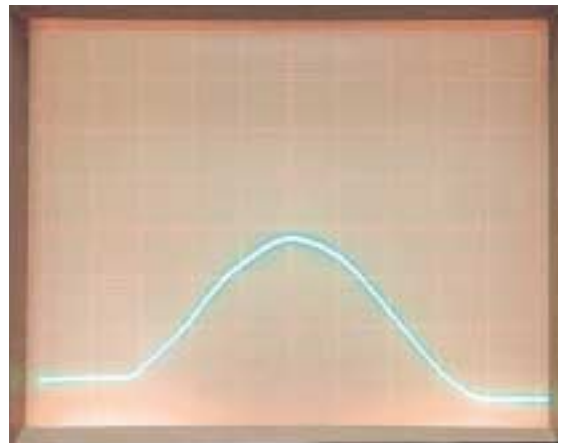


写真5 弾性ボール衝突中の力積

横軸 1目盛 1ms
縦軸 1目盛 約2.6N

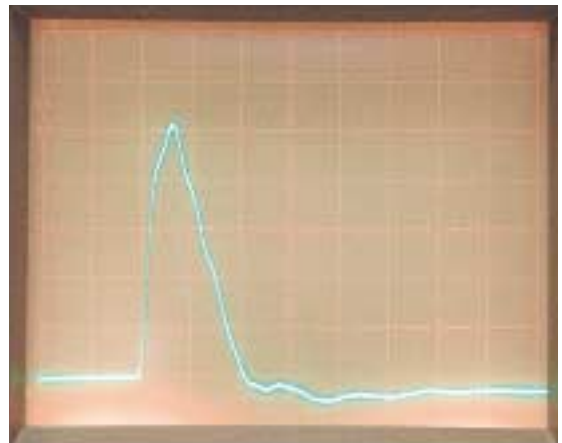


写真6 非弾性ボール衝突中の力積

横軸 1目盛 1ms
縦軸 1目盛 約2.6N

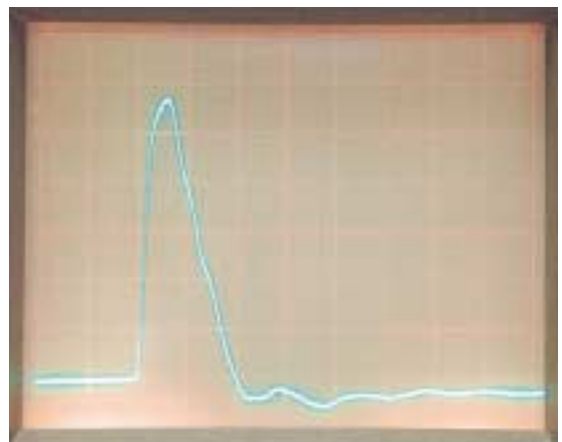


写真7 非弾性スポンジ衝突中の力積

横軸 1目盛 1ms
縦軸 1目盛 約2.6N

学習指導方法

運動量と力積の学習がある程度進んだところで次のような質問をした。「同じ質量の弾性ボールと非弾性ボールが同じ速度で台ばかりに衝突したとき、はかりの針はどちらのボールの方が大きく振れるか？」

生徒の意見は分かれた。実験してみると明らかに弾性ボールの方が大きな針の揺れになっていた。

次に「これらの弾性ボールと非弾性ボールが頭にぶつかったときどちらが痛いか？」と質問する。生徒は指でボールを圧さえてその感触を見る（頭にはまだぶつけない）。

生徒の意見は圧倒的に「弾性ボールの方が痛い」であった。それでは実験。生徒は非弾性ボールの痛さにびっくりする。台秤の針の振れや指で圧したときの感触と全く逆の結果になるので生徒は多いに疑問を持つ。問題の解決は「力を見えることだ」と力学台車による弾性衝突ならびに非弾性衝突の $F-t$ グラフ、 $mv-t$ グラフを比較する。台車の弾性衝突、非弾性衝突はモデル的であり良くわかる。

次に弾性ボール、非弾性ボールの衝突を見る装置でボールがぶつかったときの力のピーク値、力積の関係を見る。最後に弾性ボール、非弾性スポンジを瓦にぶつけたときの予想を立て、実験する。

実践効果

教師と生徒が活発に活動できた。そして「力」と「力積」の学習が深まった。

活発に活動できた原動力の一つは弾性ボールと非弾性ボールがつくるパラドックスの面白さでその内容が高校物理で理解できる内容であったこと。

原動力の二つ目は予想し検証する過程が体験できること。

教科書の知識的な科学から本当の自然を相手にしている科学へ参加することができた。

瓦にボールをぶつける実験で弾性ボールの場合は男子生徒がいくら強くたたきつけても跳ね返されたものが手作りの非弾性スポンジだといとも簡単に一撃で粉みじんにしてしまった（写真8、9）。

この瓦割の実験は驚きの中で楽しくしかも迫力を持って「力積」と「力」の違いをはっきりさせた。



写真8 瓦に弾性ボールをぶつける



写真9 瓦に非弾性ボールをぶつける

その他補遺事項

島津理化器械(株)から市販されている弾性ボール、非弾性ボールだけでこの一連の実験は可能であるが非弾性体として非弾性スポンジ（台所用のスポンジに水飴を吸収させて作った粘弾性体）を作って実験すると意外性、ダイナミック性が一段と増し、さらに効果的になる。この物体は指で圧さえたときには非弾性ボール以上に柔らかく感じるが頭にぶつけると非弾性ボールの痛さを越える。木綿の靴下等に入れて瓦を叩くと瓦が粉々に破壊される（注・水飴は常温では粘性が高いためスポンジにはほとんどしみ込まない。そこで電子レンジで加熱し、水飴をさらさらの状態にしてしみ込ませる）。