

18 すっとびボールの運動の研究

静岡立科学技術高等学校 自然科学部

2年 杉山倭王 藤田啓二 増永康平 1年 赤池駿一

1. 研究の動機

昨年度先輩方が図 1 のようなすっとびボールという「大小の順番でスーパーボール（弾性球）を重ねたもの」について床面との衝突前後におけるエネルギーや運動量の変化の球の質量比の比較を行った。そこで、私たちは図 2 のように大小上下の順番を入れ替えたらどうなるのかという課題に興味を持ち調べてみることにした。



図 1. すっとびボール



図 2. 逆転すっとびボール

2. 2011 年度の先行研究について

昨年度の研究では、図 3 のように大中小の 3 種類の弾性球を 2 球ずつ組み合わせて実験し、衝突において上部球の飛距離と弾性球の質量比の関係や、力学的エネルギー、運動量がどの程度変化するかを調べた。

結果として、弾性球の組み合わせの質量比と上部球の飛距離には相関があることが示された。また、力学的エネルギーと運動量ともに衝突前よりも後の方が減少しており、その減少量も弾性球の質量比と関係があることがうかがえた。

しかしながら、運動量自体がどうして減少するのかについて、ワイヤーと弾性球の間の摩擦以外に他の原因があるのではないかと疑問が残った。そこでさらに、弾性球の組合せや上下の順番を変えたときではどのような違いが見られるのかなど、多様な衝突を調べていくことで衝突の様子が解明できるのではないかと課題が示された。

そこで、すっとびボールが床と衝突する際、床が球に及ぼす影響はどのようなものなのかを踏まえて、すっとびボールの運動を分析していく必要があると考えた。

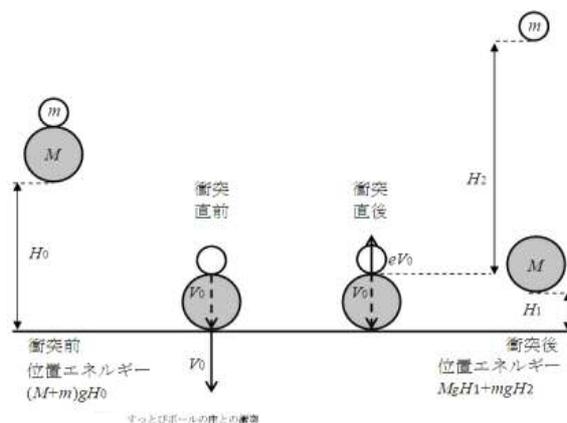


図 3. すっとびボールの床との衝突

3. 研究の目的

大小の順番を入れ替えたすっとびボールの床との衝突における跳ね上がった高さや衝突前後における力学的エネルギーの変化などを調べ、上下逆転させたすっとびボールの跳ね上がる原理を考える。

4. 予想

通常のすっとびボールでは衝突時にまず下部球が床と衝突し、その後衝突した下部球が上部球と衝突し、運動量が質量の大きい下部球から質量の小さい上部球に伝わり上部球が下部球の飛んできた方向へ跳びあがっていくと考えられている。

一方、上下を逆転させた場合、衝突時にまず下部球が床と衝突しその後衝突した下部球が上部球と衝突するが、下部球の質量は小さいため質量が大きく速度の大きい上部球とぶつかり、下部

球の飛んできた方向へ跳ぶとは考えにくい。2球はともに下方に向かう速度ベクトルを持つと考えるのが普通である。しかし、下部球は床と接しているため、下方には跳べない。そこで、上部球のみが、下部球の上で跳ね上がり、下部球は止まってしまうのではないかと考えた。上部球について考えれば、運動量をわずかでも下部球から受け取ることにより、跳ね上がる高さは単に床に落とした時よりは大きくなるのではないかと考えた。

5. 研究方法

(1) 装置について

装置は図4に示したものである。2011年に作製したものを使用した。天井から吊るしたワイヤーをピンと張り、そのワイヤーに穴を開けた弾性球を通して実験を行なった。

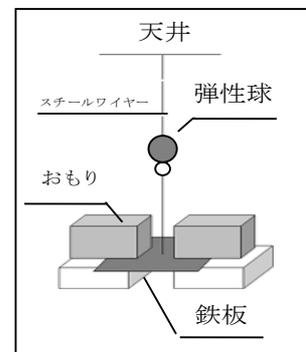


図4. 装置の模式図

(2) 使用した弾性球

弾性球は市販のスーパーボールを使用した。質量比の違いと跳ね上がり方の関係を調べるために図5の大球、中球、小球の3種類を使用し、小大、中大、小中の球の組み合わせで実験を行なった。各球の物理量および、鉄板との反発係数を表1に示す。



図5. 弾性球

表1. 弾性球のデータ

弾性球	直径(cm)	質量(g)	質量比	鉄板との反発係数
大球	4.7	51.23	16	0.84
中球	3.04	13.74	4	0.86
小球	1.96	3.4	1	0.76

(3) 測定方法

測定はワイヤーの後ろにスチール定規を立て、上部球と下部球それぞれの跳ね上がった高さを測定した。上部球については目視で測定を行い、下部球の跳ね上がった高さは、目視では読み取れなかったため、ハイスピードカメラによるビデオ映像を使って測定した。下部球と上部球の測定は同時に行い記録した。測定にあたっては摩擦の影響の少ない時にどの程度跳ね上がるか何度かの試行によって確認した上で、測定を行った。落とす高さは10,15,30,40,50cmに設定した。

6. 実験の種類

予備実験を行った結果、下部球が予想外に跳ね上がる現象が見られたが、その跳ね上がりを通常のすつとびボールと同じ理屈で説明することが難しいと考えた。そこで、どのような衝突が起こっているのかを考えるために以下の2つの仮説を立てた。

仮説1、床と衝突した下部球が上部球と衝突するのではなく、下部球と上部球は一体となっているかのごとくに床と衝突をしているのではないかと。

仮説2、下部球が床と衝突し、跳ね上がる前に上部球が下部球に衝突しており、上部球は下部球をクッションにして飛び跳ねているのではないかと。

そこで、その2つの仮説を確かめるために、図6のような上下逆転のすつとびボールの実験のほかに、2つの実験を行うこととした。その詳細を以下に記す。

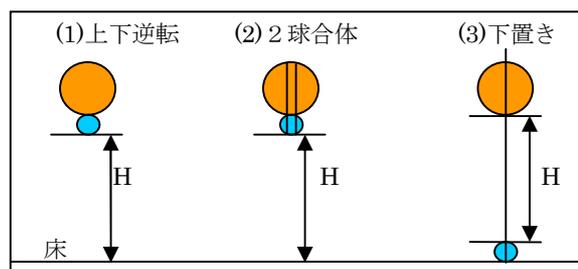


図6. 実験の種類

(1) 上下逆転のすつとび (すつとび)

下部球を指で持ち、下部球の底面が落下距離になるようにしてそれぞれ独立した下部球と上部球を落とす。結果の中で、下部球が最も高く飛んだものを最高値、6回以上のデータをとった中で平均を平均値とした。

(2) 上下球の合体 (2球合体)

下部球と上部球を内側のストローを通して一体化させて落とす。なお、ストローで一体化した場合、ストローを使用せず外側をセロハンテープなどで一体化にして落とした場合の結果はほとんど大差がなかったため、ストローで一体化させたデータを使用する。これを2球合体と呼ぶ。

(3) 下部球の下置き (下置)

下部球を下に置いておいた状態で上から上部球を落とす実験、これを下置と呼ぶ。

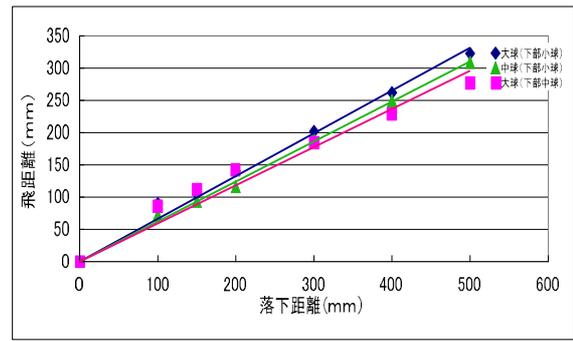


図7. 各組合せにおける上部球のグラフ

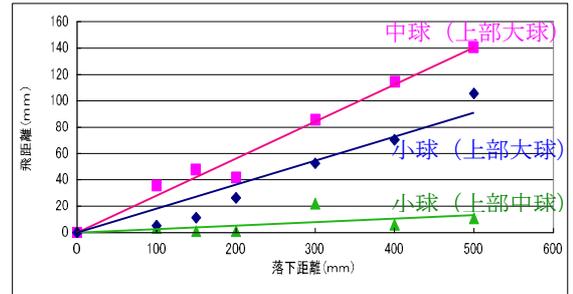


図8. 各組合せにおける下部球のグラフ

7. 研究結果

(1) 実験1 逆転すつとびボール実験

上部球と下部球の飛距離を上部球のみで比較したグラフを図7に、下部球のみで比較したグラフを図8に示した。

図7から上部球は下部球に関わらず、ほとんど飛距離が同じなのに対して、図8より下部球の飛距離の程度には異なる傾向が見られる。

図8より上部球が大球の場合、中球は小球の2倍ほど飛距離が大きい。しかしながら、大球と中球の質量比とほぼ同じ質量比である中球と小球の組合せでは下部球の小球はほとんど跳ねなかった。下部球の飛距離の大きさは上部球も下部球も大きい方がより大きくなるように見える。

(2) 実験2 2球合体実験

図9は2球合体実験のデータをグラフにしたものである。

グラフから、2球合体させた場合は2球の質量比よりも上部球と下部球の2球の合計の質量は小さい方が飛距離はより大きいことがわかる。それぞれの合計の質量は大中 (65g) 大小 (55g) 中小 (17g) である。

(3) 実験3 下置き実験

飛距離を上部球でまとめてみると、図10のようになる。グラフから、各組合せで上部球の

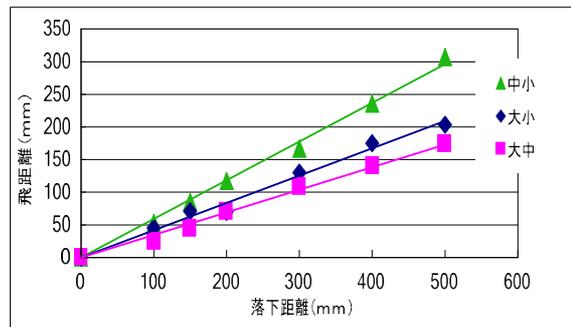


図9. 2球合体実験のグラフ

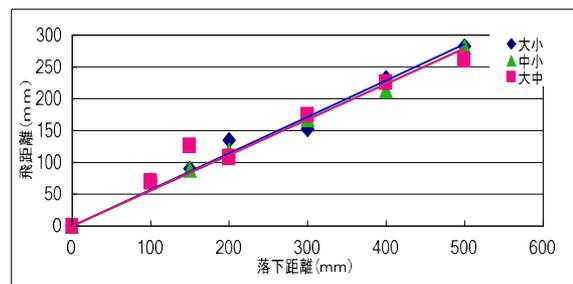


図10. 各組合せにおける下置の上部球の飛距離のグラフ

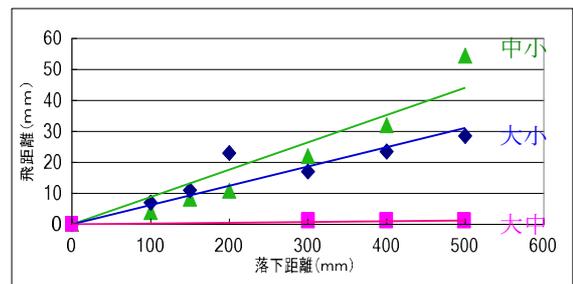


図11. 各組合せにおける下置の下部球の飛距離のグラフ

飛距離は下部球によらず、ほとんど同じであることがわかる。

一方、下部球でまとめると図 11 のようになる。下置きに小球を使った 2 つの実験を見てみると、50cm からの実験以外は飛距離に大きな差がなく、小球を下置きした 2 つの実験の結果はほぼ同じであることが分かる。ここから、下置き球が小球の時に高く跳ねるが、中球ではほとんど跳ねないことがわかった。

8. 考察

(1) 3 実験の結果の比較

3 種類の実験結果から上部球と下部球の衝突における振る舞いについて考えてみる。

ア 実験 1 逆転すつとびボール実験

上部球：どの組合せも飛距離はほぼ同じ

下部球：上部球に大球を使う時、下部球は小球より中球の方が飛距離は大きくなる。中球と小球の組合せでは、小球はほとんど跳ね上がらなかった。質量比に対する関係性は見られなかった。

イ 実験 2 2 球合体実験

質量合計の小さいものほど飛距離が大きい。

ウ 実験 3 下置き実験

上部球：どの組合せでも飛距離はほぼ同じ。

下部球：小球は跳ね上がるが、中球はほとんど跳ね上がらない。組合せによる違いはあまり見られない。

(2) 上部球、下部球の振る舞い

ア 上部球の振る舞い

すつとびの上部球の振る舞いに関しては、上記のまとめより下置きの結果と似ていることが分る。また、3 種類の実験を各組合せで見ても、すつとびの飛距離と下置の飛距離はわずかにすつとびのほうが大きい、ほとんど同じである。このことから、上部球は下部球をクッションにして跳ね上がっているのと同様な振る舞い方をしていると考えることができる。

イ 下部球の振る舞い

3 種類の実験を各組合せで見ると、下部球の振る舞いは球の組合せによって特徴が異なる。また、上部球が大球の場合は、下部球は質量が大きい球の方が飛距離は大きかった。下置実験では、下部球が小球の場合の方が良くはねたことから、すつとびの下部球は上部球による変形のみを要因として跳ね上がっている訳ではないと言える。質量の大きい中球の方が高く跳ね上がることから、もともと持っている運動量は大きい方が飛距離は大きくなるが、中小の組み合わせで下部球がほとんど跳ねなかったことから、上部球の質量が衝突時の変形などに影響して飛距離を変えるのではないだろうか。

表 2. エネルギー減少率

(3) エネルギー減少率

3 種類の実験において、床面との衝突の前後で力学的エネルギーを算出し、その減少率を求めた結果を表 2 に示す。

比較すると大小、大中の組合せでは、2 球合体での実験が最もエネルギーの減少率

が高く、すつとびが最も小さいという結果になった。共に上部球は大球であり、下部球の跳ね上がりとしては中球のほうが飛距離は大きかったが、力学的エネルギーの減少率は中球のほうが大きい。また、昨年の実験（通常のすつとびボール）と比べると減少率はおよそ 2 倍に増加していた。上下の弾性球が入れ替わることで力学的エネルギーは大きく減少することから、変形などに

組合せ	エネルギーの減少率[%]		
	大小	大中	中小
すつとび	41	52	56
下置き	49	63	49
2球合体	57	68	43

よる影響が大きいのではないかと考えられる。

(4) 反発係数

それぞれの実験を大球の跳ね上がった高さを比較するために衝突における反発係数として算出した。これらの結果を比較すると、上部球はどの実験においても弾性球単体で落下させるよりも飛距離が小さいことが分かる。当初の予想で、上部球は多少なりとも下部球から運動量を受け取り、単体で落とすよりも高く跳ね上がると考えたが、実際にはそうになっていないことになる。

参考のため、昨年の実験値より 2 球間の反発係数を求め表 4 に示す。

表 3. 各組合せにおける上部球の反発係数

上部球	組合せ	反発係数		
		すつとび	下置き	2球合体
大球	大小	0.81	0.76	0.65
大球	大中	0.77	0.75	0.59
中球	中小	0.78	0.75	0.77

表 4. 弾性球単体の鉄板との反発係数

上部球	下部球	反発係数
大球	小球	0.82
大球	中球	0.89
中球	小球	0.81

(5) 上下逆転すつとびボールの床との衝突について

ここまでの分析結果から、上下逆転すつとびボールの衝突について考えてみる。衝突の様子を図 12 にまとめた。

上部球は、(b) で下から向かってくる下部球との衝突で速度が小さくなった状態(V_1)で床に向かって戻っていく下部球の上面を衝突面として跳ね上がっていく。

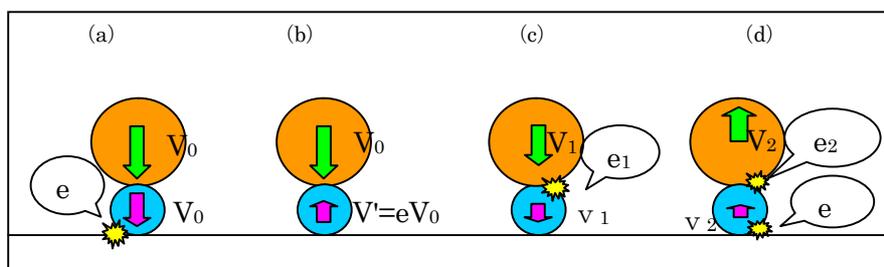


図 12. 上下逆転のすつとびボールの床との衝突について

一方、下部球は (b) で上から向かってくる上部球と衝突し、下方へ跳ね返された(速度 v_1)後、再び床面と衝突して跳ね上がっているのではないだろうか。即ち、(a) での反発係数 e は、床との衝突の際の反発係数となり、(b) で 2 球が衝突する際は 2 球間の反発係数 e_1 (表 4) となるが、(d) における衝突時は 2 球間の反発係数は e_2 となる。 e_2 はすつとびの結果が下置きより大きかったことから、下置き実験時の反発係数よりは大きくなるのではないだろうか。こうした 2 度の衝突もしくはそれ以上の衝突がわずかな時間の中で起こっていると考えることができる。

9. まとめ

今回使用した上下逆転させたすつとびボールは、下部球はほとんど跳ねず上部球は単体で落とすより跳ねると予想したが、予備実験で下部球は思いの外よく跳ね上がった。上下球それぞれの振り舞いを分析するために 2 球合体と下置実験を行い比較したところ、結果として、上部球に関しては下置実験の結果と近く、どの組合せでも飛距離があまり変わらないことから、上部球は下部球をクッションにして跳ね上がっているという結論に至った。下部球については組合せによって振り舞い方が違うため、厳密には現象を特定するには至らなかったが、衝突の際の短い時間の中で、下部球が何度か上部球と床との間で衝突を繰り返している可能性について提案した。

10. 参考資料

- (1) 「すつとびボールの運動の研究」 静岡県立科学技術高等学校 自然科学部平成 23 年度研究
- (2) 「すつとびボール」の研究史 塚本浩司, 物理教育第 49 巻, 第 6 号, 2001