

5. 質量の異なる弾性体の連続衝突に関する研究

塚本 栄世
神奈川県立小田原高等学校

【要約】

質量の異なる弾性体の連続衝突におけるボールどうしの接触の有無およびボールに生じる歪みを調べた結果、この現象は基本的には隣りあった2個のボールの連続衝突ではあるが、瞬間的には3体衝突になる（つまり、隣りあった3個のボールが同時に力を加えあう瞬間がある）ことが分かった。

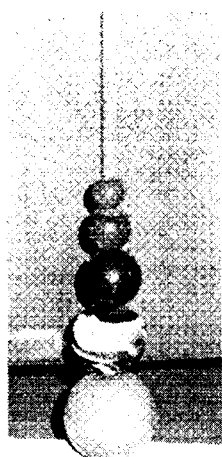
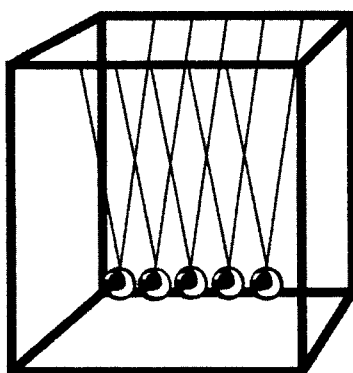
【キーワード】 衝突、運動量保存の法則、歪ゲージ

1. はじめに

衝突現象の演示実験に広く用いられるフラボール（図1参照）は弾性衝突および連続衝突の基本的実験を行なう優れた装置だが、運動物体の動きが小さいという欠点がある。

これに対して、質量の異なる2個以上のスーパーボールを質量の順に重ねて（上のボールほど質量が小さい）自由落下させると、床との衝突後にボールどうしの連続衝突が起き、最上部のボールが元の高さよりはるかに高くはね上がる実験装置（写真1参照）を作ることができる。この装置を用いた演示実験ではボールのダイナミックな動きと意外性のために衝突現象に対する生徒の興味を引きつけ、理解を深めることができる。

ところで、なぜこのような現象が起きるかに



ボール5
ボール4
ボール3
ボール2
ボール1

板A

ついて検討する際、隣り合った2個のボールの連続衝突であるとして計算すると、「ボールどうしのはねかえり係数がボールどうしの質量比より大きければ、衝突によってはね上がる速さが増す。」という結果が出る（参考文献(1),(2)参照）が、実際に隣り合った2個のボールの連続衝突になっているかどうかについて実験によって確認する必要がある。

このための実験として、ボールに歪ゲージを貼り付けてボールの瞬間的な変形を直接調べる実験を実施したので、報告する。

2. 実験の方法

質量の異なるスーパーボールの連続衝突について解析するために歪みゲージ、直流増幅器、デジタルオシロスコープを用いて歪みの経時変化を測定した。

2-1 歪ゲージについて

実験に使用した歪みゲージは(株)共和電業の【KFG-02-120-C1-11L3M2R、単軸、箔フェノール、エポキシゲージ、接着剤はCC-33Aを使用、グリッドの長さ0.2mm、グリッドの幅1.3mm、ベースの長さ3.3mm、ベースの幅2.4mm、抵抗値120Ω、ゲージ率2.1】であり、ホイートストンブリッジを組み、1ゲージ法で測定した。

2-2 直流増幅器について

直流増幅器 6L62(日本電気三栄(株))、増幅率1000倍、遮断周波数 DC~100kHz(-3dB)

2-3 デジタルオシロスコープについて

リーダー電子(株) Model 3040A、垂直軸分解能 8bit(256 ポイント)、水平軸分解能 11bit(2048 ポイント)、デジタルストレージ機能…最高サンプリング 20MS/s、立ち上がり時間 0.2 μ s

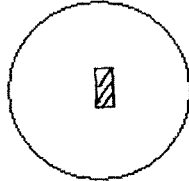
2-4 歪みゲージの貼り方について

歪みゲージの貼り方については以下の3通りの方法で行った。

①ボールの外側に軸方向に貼る方法

…「貼り方A」と名付ける。図2参照。

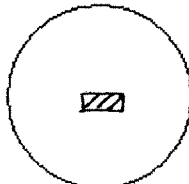
ボールの衝突により歪みゲージの長さ方向に圧縮応力が加わり、歪みの経時変化を表す波形は+側に振れる。ボールが小さいときは歪みゲージのリード線がボールどうしの衝突を妨げることになり、歪みゲージを貼るのが難しい。



②ボールの外側に軸方向と直角に貼る方法

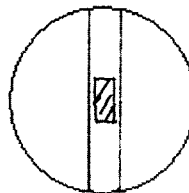
…「貼り方B」と名付ける。図3参照。

ボールの衝突により歪みゲージの長さ方向に引っ張り応力が加わり、歪みの経時変化を表す波形は-側に振れる。ボールが小さいときも歪みゲージのリード線がボールどうしの衝突を妨げることがないので、歪みゲージを貼るのが容易である。



③ボールの貫通穴の内側に軸方向に貼る方法…「貼り方C」と名付ける。図4参照。

ボールを貫通穴を含むように軸方向に2つに割り、貫通穴の内側に軸方向に歪みゲージを貼り(歪みゲージのリード線はボールにあけた穴から外に引き出す)、アクリルパイプを貫通穴の内側に接着してからゴム系接着剤(「ボンドG17」、コニシ(株))で全体を貼りあわせる方法で作る。ボールの衝突により歪みゲージの長さ方向に圧縮応力が加わり、歪みの経時変化を表す波形は+側に振れる。



2-5 ドータイトについて

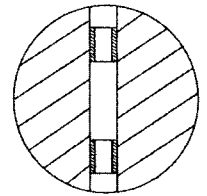
ボールどうしの接触の有無を調べるため、

小さな銀の粒子を含む導電性塗料である「ドータイト」を用いた。具体的には、ボールの表面に銅箔テープを貼り、その上にリード線をハンダ付けした後、ボールの接触部および銅箔テープの上からドータイトを塗る。次に、乾電池と抵抗を接続して、ドータイトを表面に塗ったボールどうしが接触すると回路に電流が流れるようにすると、抵抗に発生する電圧を信号として取り出すことで、ボールどうしの接触の有無を測定することができる。以下に「ドータイト」について示す。

「ドータイト FA-312」樹脂はポリエステル 耐屈曲性良好のフレキシブル回路タイプ…最も一般的な「ドータイト D-500」は、ボールどうしの衝突による衝撃により剥離してしまう。

3. 実験結果

重心を通る貫通穴を開け、その中にアクリルパイプを圧入(図5参照)したボール m_1 ~ m_5 を直径3mmのステンレス棒に順番(m_1 が一番下、 m_5 が一番上)に通し、5個のボールを重ねて5cmの高さから落下させた場合



(衝突直前の速さは約 0.99m/s)の m_1 ~ m_5 に生じた歪の波形およびボールや板Aの接触時間について比較検討(横軸の1DIVは5ms)した。 m_1 ~ m_5 には「貼り方B」により歪みゲージを貼って、実験した。

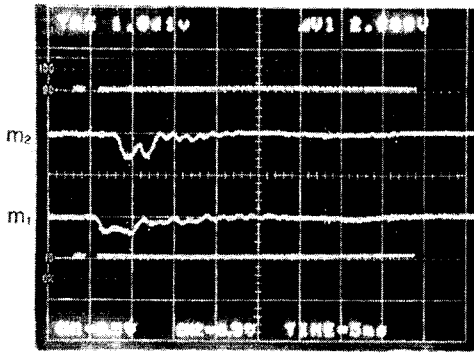
(1) ボール m_1 ~ m_5 に生じる歪の波形について…写真2~写真5参照

板Aとボール m_1 の接触開始信号を外部トリガーとしている。

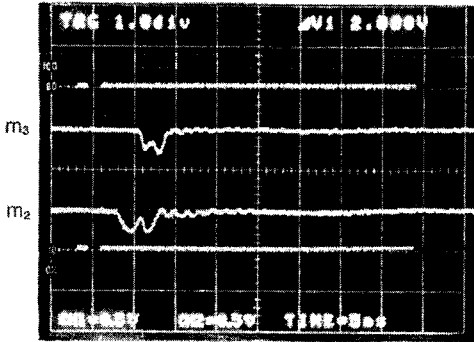
① m_1 → m_2 → m_3 → m_4 → m_5 と順々に歪が伝わっていく。

歪が生じ始める時刻を比較すると、 m_1 と m_2 、 m_2 と m_3 、 m_3 と m_4 、 m_4 と m_5 の衝突により、 m_1 → m_2 → m_3 → m_4 → m_5 と順々に歪が伝わっていくことが分かる。

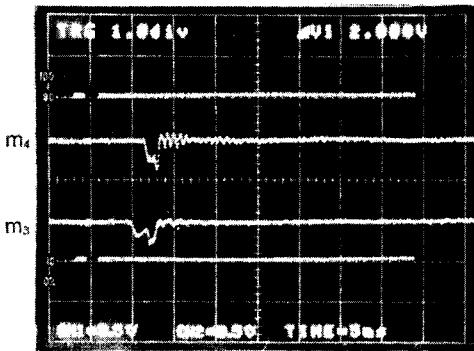
②ボールに生じる歪の波形には2度の立下りが見られる。



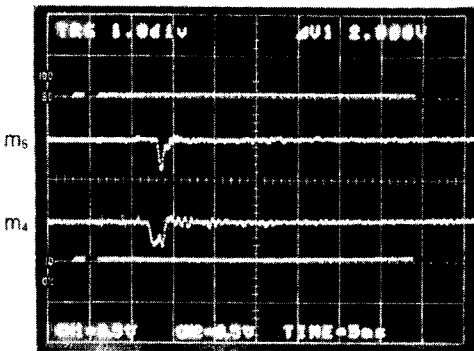
(写真3)から分かるように、 m_2 の波形の中で2度の立下りが見られるが、1回目は



m_1 との衝突、2回目は m_3 との衝突に相当すると考えられる。同様のことが、 m_1 、 m_3 、 m_4 の波形についてもいえる。それに対して、最上部のボール m_5 の波形



についてはそのようなことはなく、1度の立下りがあるのみである。



③3体衝突が起きている。

m_1 と m_2 と m_3 、 m_2 と m_3 と m_4 、 m_3 と m_4

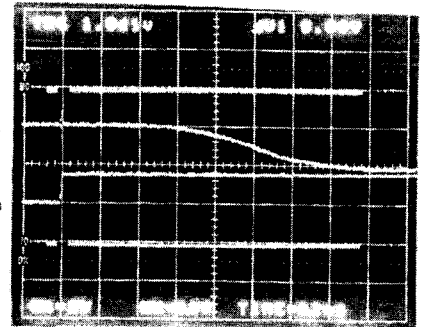
と m_5 が同時に力を加えあっている瞬間がある。つまり、この衝突現象は2体衝突の連続ではなく、瞬間的には3体衝突である。

④ボールが小さいほど応力が加わる時間が短い。

なお、以上の結果は10cmの高さから落下させた場合(衝突直前の速さは約1.4m/s)にもなりたつ。

(2) ボール m_1 に生じる歪の波形と接触時間について…写真6参照

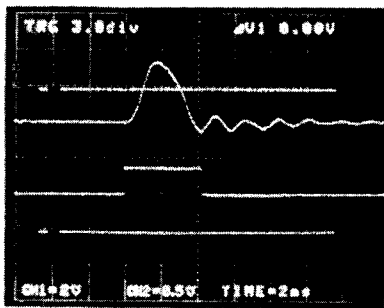
写真6は5個のボール $m_1 \sim m_5$ を重ねて5cm



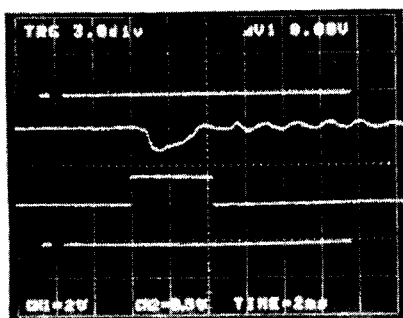
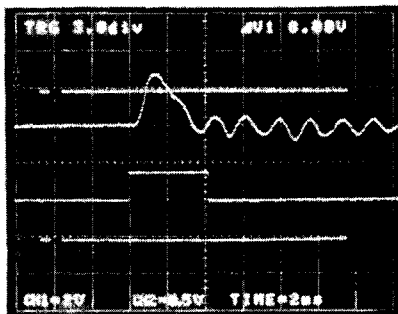
の高さから落下させた場合の m_1 に生じた歪の波形とボール m_1 と板Aの接触時間(横軸の1DIVは0.2ms)を比較したものである。 m_1 の波形の立下り時刻が板Aとの接触開始時刻より約0.6ms遅れているが、 m_1 の板Aとの接点から歪ゲージが貼られている位置までの距離が約42mm、弾性波の速さの実測値が55.3m/sであることから、弾性波が、 m_1 の板Aとの接点から歪ゲージが貼られている位置まで伝わるのに要する時間の計算値は約0.76msとなり、オーダー的にはほぼあっている。なお、ボールの中を伝わる弾性波の速さの測定は、平行な2つの平面によってボールの上部および下部を切り取った11個のボール m_3 をゴム系接着剤で数珠つなぎに接着したものを用いて測定した。

(3) 歪ゲージの貼り方および落下させるボールの個数の違いと歪の波形および接触時間の関係を調べる実験

写真7、写真8、写真9はそれぞれ「貼り方C」、「貼り方A」、「貼り方B」によりボール m_1 に歪ゲージを貼り、 m_1 1個だけを10cmの高さから落下させた場合の歪および m_1 と板Aの接触時間を示す波形（横軸の1DIVは



2ms) であり、写真10、写真11、写真12はそれぞれ写真7、写真8、写真9の m_1 の上に歪ゲージを貼っていない $m_2 \sim m_5$ をのせて落下させた場合の波形である。① m_1 1個だけを落下させた場合、 m_1



と板Aとの接触時間については、歪ゲージの貼り方によらず一定（約4ms）である。同様に、

m_1 に歪が生じる時間の長さについては、歪ゲージの貼り方によらず一定（約3ms）である。② m_1 1個だけを落下させた場合に比べ、 m_1 の上に $m_2 \sim m_5$ をのせて落下させた場合は、 m_1 と板Aとの接触時間は9~11msと長くなる。同様に、 m_1 に歪が生じる時間の長さについては、歪ゲージの貼り方によらず一定（約8~10ms）である。つまり、 m_1 の上に $m_2 \sim m_5$ をのせて落下させた場合の方が板Aとの接触時間が長くなり、板Aから大きな力積を受ける。

③ m_1 1個だけを落下させた場合に比べ、 m_1 の上に $m_2 \sim m_5$ をのせて落下させた場合は、 m_1 の歪の波形は $m_2 \sim m_5$ の影響で複雑なも

の（ $m_2 \sim m_5$ からの反射波の影響と思われる）となる。

4. まとめ
ドータイトや歪ゲージを用いて、質量の異なる弾性体の連続衝突に

おけるボールどうしの接触の有無およびボールに生じる歪みを調べた結果、この現象は基本的には隣りあった2個のボールの連続衝突ではあるが、瞬間的には3体衝突になる（つまり、隣りあった3個のボールが同

時に力を加えあう瞬間がある）こと、 m_1 1個だけを落下させた場合に比べ、 m_1 の上に $m_2 \sim m_5$ をのせて落下させた場合は、 m_1 と板Aとの接触時間が長くなり、板Aから大きな力積を受けることが分かった。

5. 参考文献

- (1) 塚本栄世：日本理化学協会研究紀要、第21巻（1989年度）
- (2) 塚本栄世：平成元年度全国理科教育大会富山大会研究発表資料集（第11巻）

6. 補遺

本研究は平成4年度日本板硝子材料工学助成会の助成を受けて実施したものである。

