

運動量保存則 I

— 保存則とは何か —

授業スライド PDF・動画
Google Classroom (クラスコード: dknje09)

1

課題

どうして正しく予想できたのか、説明せよ。

3

課題

ホットケーキミックス _____ g、牛乳 _____ g、
卵 _____ g、バター _____ g がある。

さて、これらを混ぜると、何 g になるか？

予想

結果

2

課題

ホットケーキを焼く。焼きあがった後に質量を測ると、変化はあるか？

グー) 焼く前よりも質量は小さくなる。

チョキ) 焼く前と同じ質量である。

パー) 焼く前よりも質量が大きくなる。

予想

このガラスに 1/2 L は 111 g。

結果

4

課題

- (1) 変化した分の質量は、この宇宙から消えてしまったのか？

- (2) 焼いたホットケーキは、焼く前の生地と、化学的に異なる物質(分子)である。どうして、異なる物質になっても、質量は保存するのか？

- (3) 質量を変化させない調理法を考えよ。

5

これからの学習内容

ここから数時間の授業の目標は、以下の通り。

- ・運動に関する保存量を見つける。

- ・その保存則を用いて、具体的な現象を解析する。

- ・その保存則と、夏休みまでに学んだ運動方程式との関係を知る。

7

Note：保存量と保存則

何かしらの変化の前後で、一定に保たれる量のことを、「保存量」と呼ぶ。また、その法則を「～保存則 or ～保存の法則」と呼ぶ。

保存量は、全宇宙で考えたとき、あるいはその量を内部のみでやりとりし、外部とやりとりしない場合に保存する。その注目する「内部」全体のことを、「系(system)」と呼ぶ。

問：これまでに学んだ保存量には、どんなものがあったか？

6

物理基礎 2019 (勝田)

運動量保存則Ⅱ

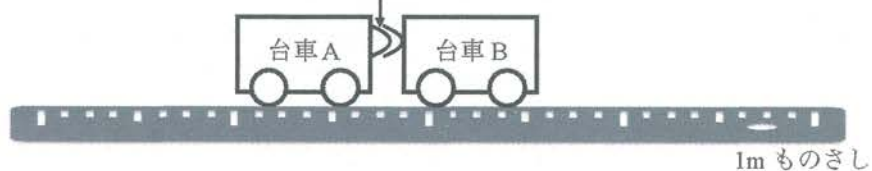
－ 分裂における保存量 －

授業スライド PDF・動画
Google Classroom (クラスコード：dknje09)

9

実験

ゴム(パッチンカップ：裏返してしばらくすると跳ぶ)



パッチンカップを利用して、くっついて静止していた2つの台車A,Bを分裂させる。ここに、保存則を見出したい。

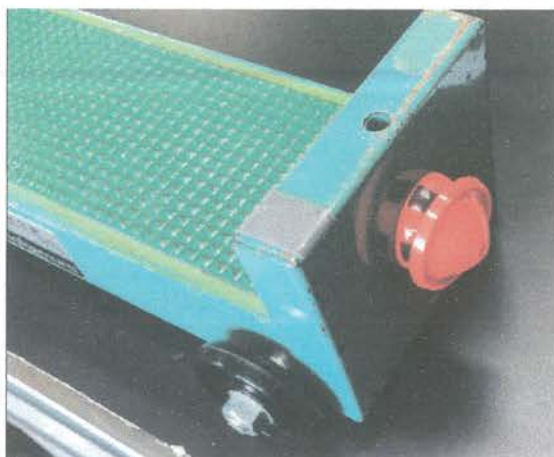
台車の質量を変えながら、分裂後の速度を測定する。分裂後の速度は変化しないはずである。(どうしてか?)

だから同時に両台車を手で押さえて、それまでの移動距離を測れば、速度と同等な量として扱える。

14

こうやるの。

片方の台車にはパッチンカップがすでに付いているので、もう1つのパッチンカップを裏返して重ねる。それを台車で挟んで、分裂するまで待つ。



15

結果 (結果はスプレッドシートにも入力)

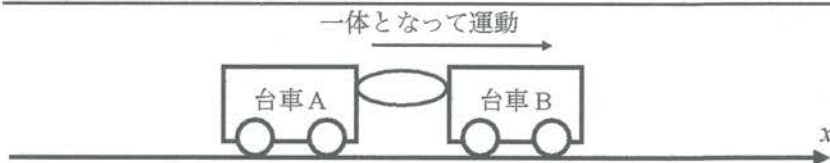
台車 A		台車 B	
質量 [kg]	移動距離 [cm]	質量 [kg]	移動距離 [cm]
1		1	
1		1.5	
1		2	

問) 3回の実験に共通する**規則性**が見出せるか?



16

演示実験



一定の速度で、台車A(250g)と台車B(500g)が、一体となって運動している。しばらくすると、両台車は分裂する。先の実験で見出した保存則は、運動しながら分裂するときも成り立つだろうか?

分裂前		分裂後	
台車Aの速度 [m/s]	台車Bの速度 [m/s]	台車Aの速度 [m/s]	台車Bの速度 [m/s]

17

課題

どのように考えれば、静止した状態からの分裂も、運動中の分裂も、同じ法則に基づくと解釈できるか？

18

Note：運動量保存則

物体の質量と速度の積を「運動量」と呼び、この量は分裂の前後で保存する。

$$\text{運動量 } p = mv$$

問) 先の実験結果について、運動量が保存していることを確かめよう。

このとき、「系」は何か？

20

Note：ちゃんと計算してみる

・止まっていた台車A(1 kg)と台車B(3 kg)の分裂

・一緒に運動していた台車A(0.25 kg)と台車B(0.50 kg)の分裂

19

物理基礎 2019 (勝田)

運動量保存則Ⅲ

－衝突における運動量－

授業スライドPDF・動画

Google Classroom (クラスコード：dknjeo9)

22

実験：合体における運動量

静止している台車Aに、台車Bが衝突し、合体して運動する。

このときにも、分裂の時と同様に、両台車を合わせた運動量は保存しているか調べよ。



台車A			台車B		
質量 [kg]	合体前の速度 [m/s]	合体後の速度 [m/s]	質量 [kg]	合体前の速度 [m/s]	合体後の速度 [m/s]
1	0		1		
1	0		2		

28

Note

合体前の運動量

台車A

台車B

合体後の運動量

台車A

台車B

29

memo

30

実験：両者が運動していたら？ (演習)

先の関係が、台車Aが最初から運動している場合にも成り立つか、実験してみよう。



台車A			台車B		
質量 [kg]	合体前の速度 [m/s]	合体後の速度 [m/s]	質量 [kg]	合体前の速度 [m/s]	合体後の速度 [m/s]
0.25			0.5		

31

Note

合体前の運動量

台車 A

台車 B

合体後の運動量

台車 A

台車 B

32

Note

衝突前の運動量

台車 A

台車 B

衝突後の運動量

台車 A

台車 B

34

実験：衝突における運動量

分裂だけでなく、合体する場合も運動量が保存していることが分かる。
ということは、一般の衝突 — 合体して分裂する — の場合にも、運動量は保存するはずだ！



台車 A			台車 B		
質量 [kg]	合体前の速度 [m/s]	合体後の速度 [m/s]	質量 [kg]	合体前の速度 [m/s]	合体後の速度 [m/s]
0.25			0.5		

33

課題

何かしらの理由で触りたくないものが、自分の方に向かって来ている。
自分に触れる前に、なんとか追い払いたい。

手元にあるのはスーパーボールと、粘土玉(くっつく!)だけ。どちらも同じ質量で、君が投げるとどちらも同じ速さでそいつにぶつかる。

さて、どちらを投げるのが効果的か？

グー) スーパーボール

チョキ) どちらでも変わらない

パー) 粘土玉

35

自分の予想

予想の理由を自分の言葉で説明せよ。

結論

なぜそうなるのか、どう考えるべきだったか、自分の言葉でまとめよう。

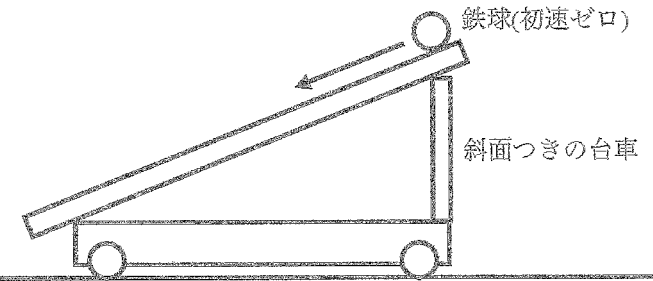
36

課題

下図の装置(台車上の斜面を鉄球が転がる)において、水平方向の運動量は保存する。(鉛直方向の運動は外界から影響(地球からの重力)を受けるので、運動量は保存しない!)

さて、台車の上に鉄球を転がすと、最終的に台車はどちら向きに動くか?(最終的には摩擦で止まる、とかそういうことを言っているのではない。)

グー) 左 チョキ) 静止 パー) 右



45

物理基礎 2019 (勝田)

運動量保存則IV

- 運動量保存則の活用 -

授業スライドPDF・動画

Google Classroom (クラスコード: dknjeo9)

38

自分の予想

予想の理由を自分の言葉で説明せよ。

だいたいの正解。

班で話し合って全員解決できる。

結果

なぜそうなるのか、どう考えるべきだったか、自分の言葉でまとめよう。

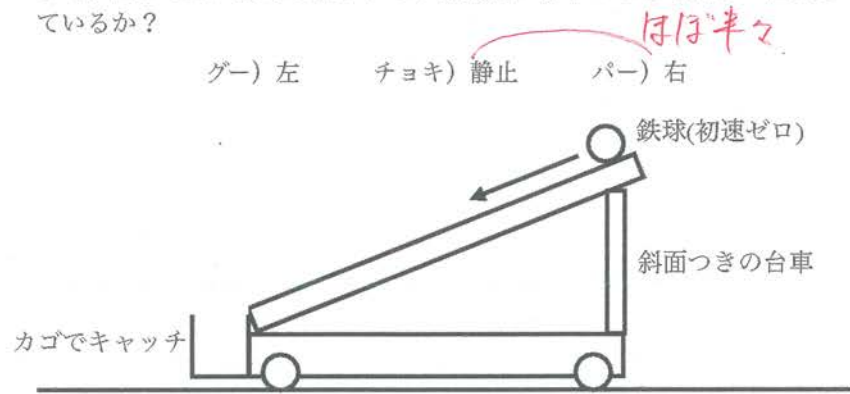
意見を話すとき、運動量の考え方で
アプロ-4している生徒は、
1人は発言せよ。

46

課題

台車にカゴを取り付け、斜面を転がった鉄球をキャッチできるようにする。

さて、台車の上に鉄球を転がすと、最終的に台車はどちら向きに運動しているか？

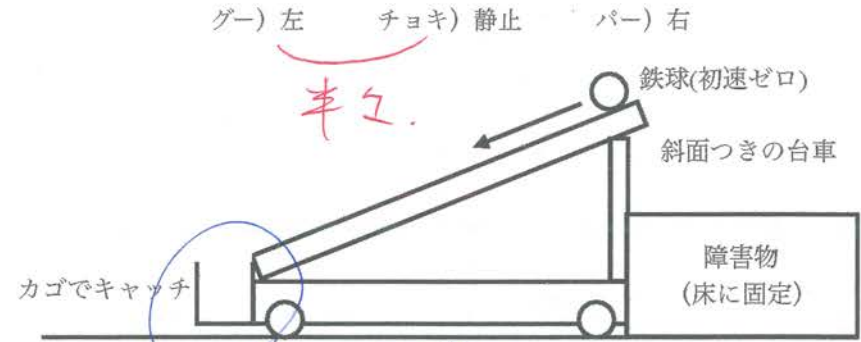


48

課題

カゴを取り付けた台車の右側に障害物を固定して、台車が右には動けないようにする。

さて、台車の上に鉄球を転がすと、最終的に台車はどちら向きに動くか？



50

カゴにキャッチされる直前後で運動量保存を考えた生徒も。

こちらの急激からは気づいているので対策が必要。

自分の予想

予想の理由を自分の言葉で説明せよ。

運動量で考えて「静止」となることは理解できても、どうしても「カ」に固執して考えようとする生徒が多い。

結果

なぜそうなるのか、どう考えるべきだったか、自分の言葉でまとめよう。

カは運動量が保存するからにはたらく、この自然界はそうではないか、といふ生徒が多い。

49

自分の予想

予想の理由を自分の言葉で説明せよ。

障害物を系外とみなす、系に含めるとどうなるのか？ という質問は複数。
系外からの力は台車にはたらくが、運動量を解くには鉄球と台車の外周に落ちる人も多い。

結果

なぜそうなるのか、どう考えるべきだったか、自分の言葉でまとめよう。

系」の急激に気づいておられた主旨の工夫が、授業後の「振り返り」の工夫にはよく見られた。

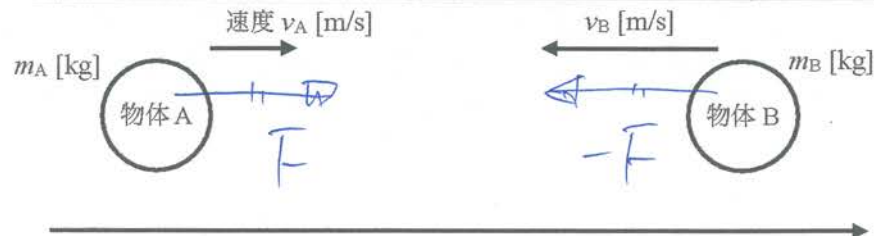
51

運動量保存則 V

－運動量保存則の一般化 & 力学法則の再考－

授業スライド PDF・動画
 Google Classroom (クラスコード: dknje09)

Newton の運動法則と運動量保存則



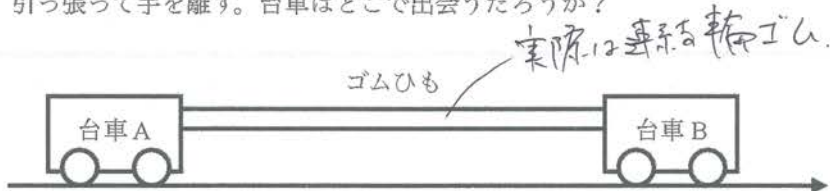
上図において、物体Aと物体Bが互いに（外部からではない！）力を及ぼしあっているとします。

物体Aが物体Bから受ける力を F [N] とすると、物体BがAから受ける力は？

運動量保存則の一般化

運動量保存則は、分裂や合体に限らず、一般に成立する。

例えば、下図の場合を考えてみよう。台車Aと台車Bをゴムでつなぎ、引っ張って手を離す。台車はどこで出会うだろうか？



結果

運動方程式による解析

物体A, Bそれぞれについて運動方程式を立てると：

$$\textcircled{A} \quad m_A a_A = F \Rightarrow a_A = \frac{F}{m_A}$$

$$\textcircled{B} \quad m_B a_B = -F \Rightarrow a_B = -\frac{F}{m_B}$$

時間が Δt [s] だけ経った後の、両台車の速度 v_A' , v_B' は：

$$v_A' = v_A + a_A \Delta t = v_A + \frac{F}{m_A} \Delta t$$

$$v_B' = v_B + a_B \Delta t = v_B - \frac{F}{m_B} \Delta t$$

続き

すると、全体の運動量は：

$$\begin{aligned} m_A v'_A + m_B v'_B &= m_A \left(v_A + \frac{F}{m_A} \Delta t \right) + m_B \left(v_B - \frac{F}{m_B} \Delta t \right) \\ &= m_A v_A + F \Delta t + m_B v_B - F \Delta t \\ &= m_A v_A + m_B v_B \quad (\text{保存}). \end{aligned}$$

つまり、運動量保存則は、Newton の力学法則(作用反作用の法則 & 運動方程式)と等価である。運動量保存則は新しい物理法則というより、物理の新しい見方、と言える。

どちらが先か、と考えるのは、鶏と卵のような話である。

63

発展：さらに進んでいくと...

今回は、作用反作用の法則に基づいて、運動量保存則が導出されるような説明をしたが、当然ながら逆も可能。運動量保存則を前提にすれば、作用・反作用の法則が導出できる。これらは等価な力学法則である。

つまり、「力は作用と反作用が等しくなる」ということから運動量保存則は導出できるが、「運動量が保存するためには力はどのようにはたらくか？」と考えると、「作用と反作用が等しい」ことが導出される。



65

衝突の問題を運動方程式を用いて解けるか？



上記の衝突の問題を、運動方程式を用いて解析できるだろうか？—もちろんできる！どうするか？ $ma=F$ を解けばよい。但し、そのためには衝突の最中、各時刻において何Nの力が働いているか、正確に知る必要がある。

運動量保存則ならば、衝突の最中の詳細はおいておいて、衝突の前後でどういうことが分かるか、ということを知ってほしい。

まあ、衝突の際の力は、力センサで測定できるけれども。これが2体の問題ではなく、 10^{23} 個の気体分子が運動をしている状況だったら？

— 運動量保存則とは、大変有用な考え方ではないか！

64

エネルギー I

－ エネルギーとは何か －

授業スライド PDF・動画
Google Classroom (クラスコード: dknjeo9)

2

仕事と熱

仕事

→ 力をかけて押ししたり引いたりすることによる, エネルギーの移動

熱

→ 仕事以外のエネルギーの移動

4

エネルギーを学ぶにあたり

エネルギーを何故学ぶか、その重要性は説明するでもないだろう。

では、エネルギーとは何か？これは実は、かなり答えづらい。

とりあえず、定義はなんとなく「エネルギーを使えば何かできる」くらいにしておくが、次の3つの性質を満足することが知られている。

- 1) 保存量である (つまり, 「系」に注目するのが大事!)
- 2) エネルギーは、他の種類のエネルギーへ変換できる
(これは運動量には無い性質である!)
- 3) 「仕事」「熱」の二形態で、他の物体とエネルギーをやり取りする

3

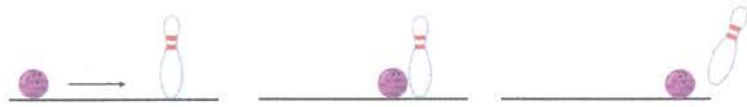
memo

5

課題

ボーリングの球が転がっている。

ボーリングの球がぶつかり、ピンは吹っ飛び、球は減速した。



- (1) 系を「ピン」だけとして、系のエネルギー変化について、説明せよ。
(増加したか、減少したか、それはどのようにして変化したのか?)
- (2) 系を「球」だけとして、系のエネルギー変化について、説明せよ。
- (3) 系を「ピン+球」として、系のエネルギー変化について説明せよ。

6

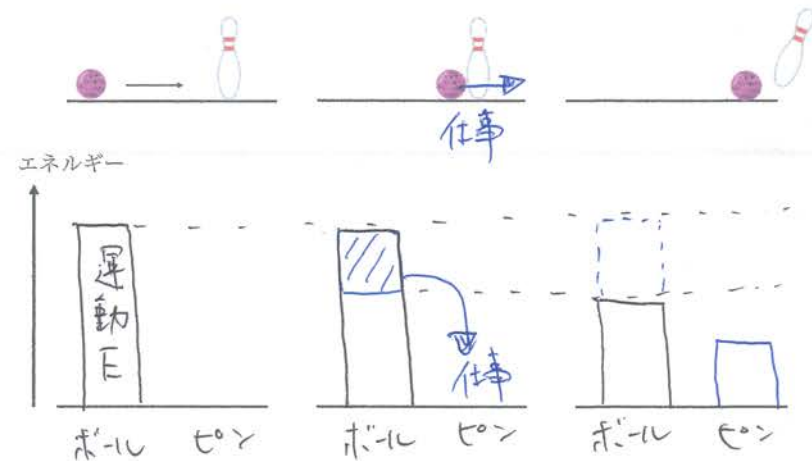
Note : 仕事と運動エネルギー

- (1) 外部(球)から仕事をしてエネルギーを得た
- (2) 外部(ピン)へ仕事をしてエネルギーを渡した
- (3) 外部とエネルギーのやり取りはなく、
系のエネルギーは一定(保存)

8

回答スペース

Note : グラフにしてみる



9

7

課題

止まっていた人が、走り出した。この人の運動エネルギーの変化を説明せよ。



注：同じ人

10

課題

野球部員が、ローラーを一定の速さで引いて、地面をならしている。



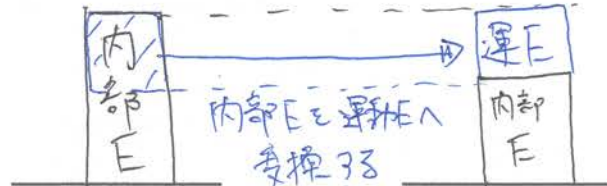
- (1) ローラーのエネルギー変化について説明せよ。
- (2) 野球部員のエネルギー変化について説明せよ。
- (3) エネルギーが保存していると考えerためには、系は何とすべきか？

12

Note : グラフにしてみる



エネルギー



11

回答スペース

13

Note: エネルギーの流れ

(1) 一定 (部員が仕事に投入エネルギーと同じ分だけ
熱として地面に捨てている)

(2) 内部Eを消費し続けている (捨てている)

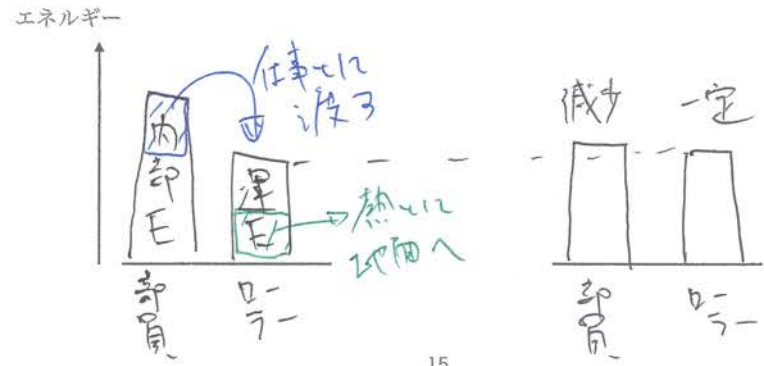
ローラーへ仕事して

(3) 部員 + ローラー + 地面

これからの戦略

- エネルギーを定量化しないと、何がどれくらい変化しているのか議論できない!
- まず、「仕事」を定量化し、そして他のエネルギーも定量化していく。
(仕事が定量化できれば、他のエネルギーの変化もわかるはず!)
- まずは話題を「力学」に絞る
 - 既に知識がある
- 当面の間、熱によるエネルギーのやりとりはないものとする
 - 内部エネルギーを持たないような物体/状況で考えていく!

Note: グラフにしてみる



物理基礎 2019 (勝田)

エネルギー II

- 仕事の定量化 -

授業スライド PDF・動画
Google Classroom (クラスコード: dknjeo9)

仕事の定量化

物体は、「仕事」を通して外部とエネルギーのやりとりをする。

つまり、「仕事」が定量化できれば、それを通じて増減するエネルギーも定量化することができる。

中学校でも既に学習した内容ではあるが、仕事をどのように定量化すべきか、実験を通じて考えてみよう。

今回は、「おもりに同じだけの仕事をして、ある高さまで持ち上げる」という実験を、3通りのやり方でやってもらう。

(同じ高さまで持ち上げたら、同じだけの仕事をしているはずだ！)

27

実験：結果を比較

同じ高さまでおもりを持ち上げるのに、「必要な力」と、「手を動かす距離」を3つの場合について比較せよ。なお、持ち上げるときはゆっくり（加速度ゼロで、力のつり合いを保ちながら）行うこと。

結果

・Bのやり方だと、Aのやり方に比べて

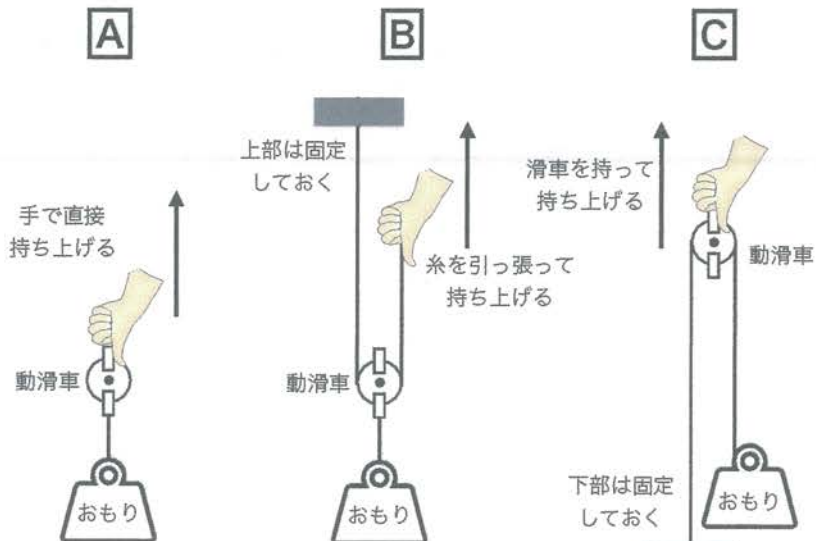
必要な力： 大きい 変わらない 小さい
手を動かす距離： 大きい 変わらない 小さい

・Cのやり方だと、Aのやり方に比べて

必要な力： 大きい 変わらない 小さい
手を動かす距離： 大きい 変わらない 小さい

29

実験：次の3通りの方法で仕事をせよ。



28

演示実験

具体的な値は、演示実験としてみてみよう。

	A	B	C
必要な力 [N]			
手を動かす距離[m]			
仕事			

30

仕事はどのように定量化されるべきか？

A～Cのどの場合においても、おもりは同じ高さまで持ち上げられている。ということは、おもりの得たエネルギーも、手がした仕事も、どの場合でも同じはずである。

では、先の実験結果を鑑みて、仕事はどのような量として定められるのが自然だろうか？

Note：仕事の定式化

物体にある力 F [N] が、 x [m] の距離に渡って加えられたとする。

このとき、その力 F が物体にした仕事 W は：

31

課題

今度は運動エネルギーで考えてみよう。

ある質量の台車が静止している。 F [N] の力で x [m] 動かしたときと、
 $2F$ [N] の力で $x/2$ [m] 動かしたときでは、同じ速さになることを示せ。

32

物理基礎 2019 (勝田)

エネルギーⅢ

－運動エネルギーの定式化－

授業スライド PDF・動画

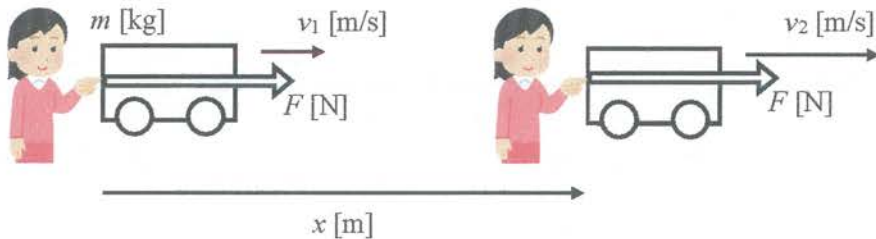
Google Classroom (クラスコード：dknjeo9)

35

運動エネルギーの定量化

前時で仕事を $W = F \times x$ というように定量化できたので、それを利用して各種のエネルギーも定量化しよう。まず、運動エネルギーから。

質量 m [kg] の台車が、速度 v_1 [m/s] で運動している。そこから台車を手で押していく。一定の力 F [N] で x [m] 押し続けたところ、速度は v_2 [m/s] になった。台車を系として、エネルギー変化をグラフで表す。



40

このエネルギー変化を、数式で表してみたい!

Note

$$(\text{速度 } v_2 \text{ のときの運動エネルギー}) - (\text{速度 } v_1 \text{ のときの運動エネルギー}) = (\text{手かいた仕事})$$

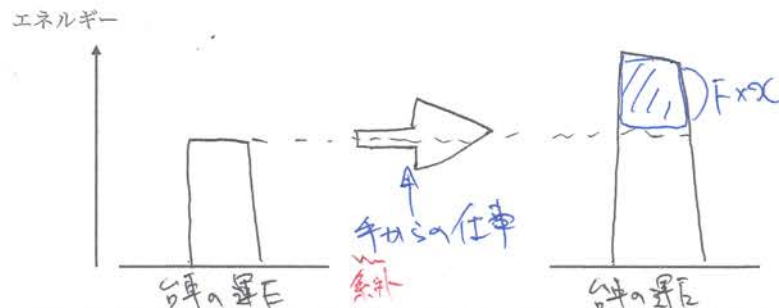
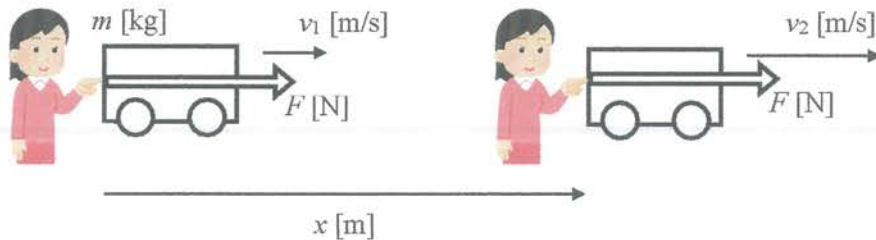
$$① - ② = F \times x$$

戦略

右辺の F や x を変形する。具体的には、運動方程式と結びつけて、質量や速度を用いた式に変形していく。最終的に、何かの差の形で変形できれば、その各項を運動エネルギーと呼んで良いはず。計算が長いので、まず勝田が説明し、その後班で再度確認。

42

グラフ化して考える



41

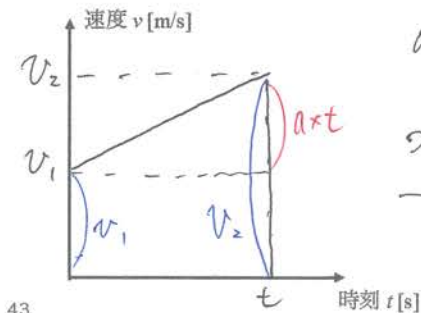
Note

速度が v_1 から v_2 になるまでに、かかった時間を t [s] としよう。また、その際の加速度は a [m/s²] とする。

運動方程式は: $ma = F$

仕事の F, x の内、運動方程式の中に F はあるが、 x が無い。

どうにかして移動距離 x と結びつけるために、 $v-t$ グラフの面積を考える。



$$a \times t = v_2 - v_1 \Rightarrow t = \frac{1}{a} (v_2 - v_1)$$

$$x = \frac{1}{2} (v_1 + v_2) \times t$$

43

Note : 続き

2つの式を連立して l を消去:

$$\mathcal{X} = \frac{l}{2}(v_1 + v_2) \times \frac{l}{a}(v_2 - v_1) = \frac{l^2}{2a}(v_2^2 - v_1^2)$$

$$\Rightarrow a = \frac{l^2}{2\mathcal{X}}(v_2^2 - v_1^2)$$

運動方程式の a に代入:

$$m \times \frac{l^2}{2\mathcal{X}}(v_2^2 - v_1^2) = F$$

当初の戦略に沿って、右辺を仕事 $F \times x$ にすると:

$$\frac{l^2}{2} m v_2^2 - \frac{l^2}{2} m v_1^2 = F \times \mathcal{X}$$

44

memo

46

Note : 続き

どうやら、台車は得た仕事の分だけ、「 $1/2 \times$ 質量 \times 速度の二乗」という量が増えるらしい。この量こそが「運動エネルギー」だろう。質量や速度が大きくなるほど、この量も大きくなるのも、直感的に運動エネルギーとして適切そうだ。

運動エネルギー

$$E_{\text{運}} = \frac{1}{2} m v^2$$

もちろん、本当にこう考えて良いのかは、実験で確かめていく。

45

課題

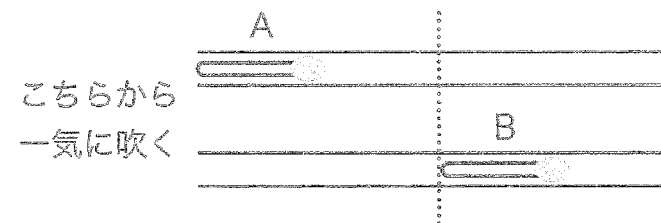
ストローとマッチ棒で吹き矢を作る。

一定の勢いで息を吹き続ければ、一定の力をマッチに及ぼすことができる。また、水平投射にすれば、飛距離はマッチの発射速度に比例する。

ストローを2本用意し、マッチAはストローの根元に設置し、

マッチBはストローの真ん中に設置する。同時に吹いて発射すると、

マッチAの飛距離はマッチBの何倍になるか?



47

自分の予想

予想の理由を自分の言葉で説明せよ。

同じになる $\Rightarrow F$ が同じで v も同じ
 4倍(質量) $\Rightarrow v$ が2倍, 距離 $\propto v^2$ で4倍.
 2倍 \Rightarrow 仕事も2倍だから.
 $\sqrt{2}$ 倍(長さ) \Rightarrow 正しく考えられている.

結果

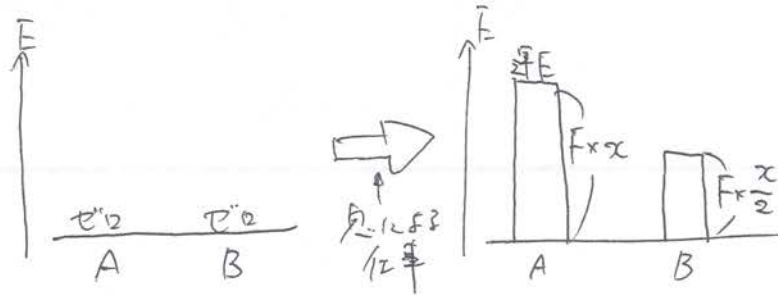
なぜそうなるのか、どう考えるべきだったか、自分の言葉でまとめよう。

48

memo

50

memo



$$F \cdot x = \frac{1}{2} m v^2 - 0$$

\Rightarrow 仕事 2倍 $\Rightarrow v^2$ が 2倍 $\Rightarrow v$ は $\sqrt{2}$ 倍.

49

課題

マッチを2本つないで、質量を2倍にしたマッチをCとする。

マッチAとマッチCをどちらも根元に設置し、同時に吹いて発射すると、マッチAの飛距離はマッチCの何倍になるか？



51

自分の予想

予想の理由を自分の言葉で説明せよ。

わりとできていたが、糸田が意見を変えて予断(有)のなかった。

結果

なぜそうなるのか、どう考えるべきだったか、自分の言葉でまとめよう。

52

エネルギーIV

— 仕事の定義の拡張 —

授業スライド PDF ・ 動画

Google Classroom (クラスコード : dknje09)

55

memo

糸の仕事を

ゼロ A ゼロ C

↑ F

↑ F

→ Fr x → Fr x

このとき同じ運動エネルギーになる

$$\frac{1}{2} m v_A^2 = \frac{1}{2} (2m) v_C^2$$

$$v_A = \sqrt{2} v_C$$

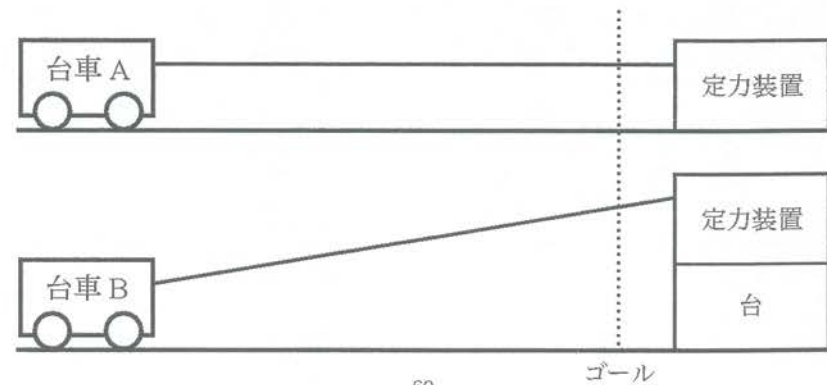
B = C 以外、同じ距離
 降る速度は $\frac{1}{\sqrt{2}}$ 倍
 降る速度は $\frac{1}{\sqrt{2}}$ 倍

53

課題

同じ大きさの力で同じ質量の台車を引っ張り、レール上を同じ距離だけ走らせる。ゴールしたときの速度を比べると、どちらの方が速いか？

ゲー) 台車A チョキ) 同じ速さ パー) 台車B



60

自分の予想

予想の理由を自分の言葉で説明せよ。

- 1) 力の分解や加速度
- 4) 力とキョリ同じ
- 11) 力は同じだが、ワイヤーは長い。

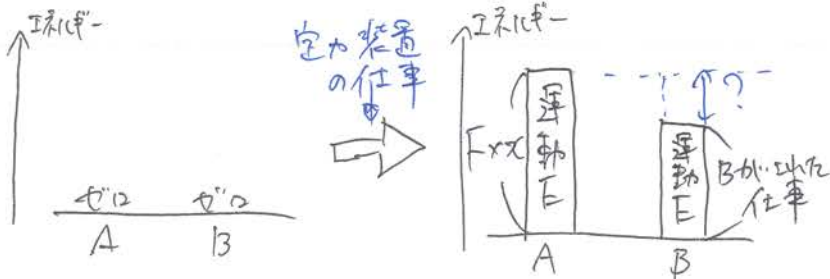
結果

なぜそうなるのか、どう考えるべきだったか、自分の言葉でまとめよう。

61

グラフにして比較

先の2つの実験では、台車は同じ大きさの力を受けて、同じ距離を運動している。しかしながら、台車が獲得した運動エネルギーは明らかに異なる。つまり、された仕事も明らかに異なる。グラフにしてみよう。



62

Note: 仕事の定義の拡張

これは、仕事の定義を拡張せざるを得ない。



拡張した仕事の定義

厳密にやりたい人は、力が斜めにはたらいたときの運動方程式を解いて、確かに上の定義の仕事が、獲得した運動 E になることを示してみよう。

63

課題 1

ナット (質量: 5.5 g) は、何 m の高さから自由落下させると、4.0 m/s になるだろうか? 仕事やエネルギーの考え方から求めよ。

また、実際にビースピとナットを利用して実験せよ。

64

課題2

4.0 m/s の初速度でナットを真上に投げると、何 m の高さまで上がるか？
また、落ちて戻ってきたときの速さは？仕事やエネルギーの考え方から求めよ。

65

Note：拡張された仕事の定義

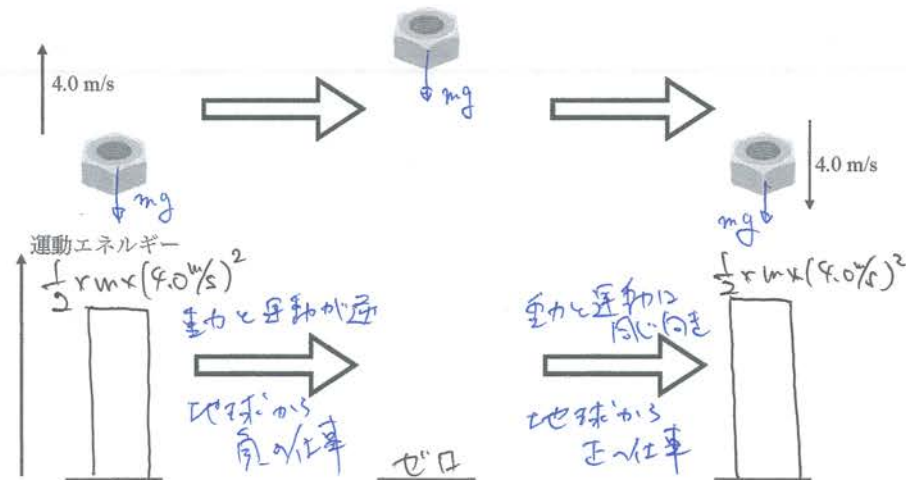
運動の向きと逆向きの力を受けると、物体は負の仕事がされ、運動エネルギーは減少する。 $W = F \cos\theta \times x$ という拡張された仕事の定義が、 $\theta > 90^\circ$ の領域でも妥当であるということだ。

問) 運動の向きと力の向きが垂直な場合、拡張された定義に当てはめると、仕事の値はいくらであると考えられるか？またそれに対応する具体的な例は？

67

Note：負の仕事

鉛直に投げ上げられたナットの運動エネルギーの変化を、グラフ化してみよう。系はナットのみ、外部(地球)から重力を受ける。



66

物理基礎 2019 (勝田)

エネルギーV

－位置エネルギーという考え方－

授業スライド PDF・動画
Google Classroom (クラスコード：dknje09)

69

落下運動に対する2つの見方

地面に置かれた質量 m [kg] のボールを、高さ h [m] のところまで手で持ち上げる。手を離すと球は地球からの重力を受けてどんどん加速、つまり球は運動エネルギーを獲得していく。

この現象を、2通りの「系」で考察してみよう。

① 系=ボールのみ

→ 系は外部(手 & 地球)から仕事をされて、エネルギーが変化する

② 系=ボールと地球

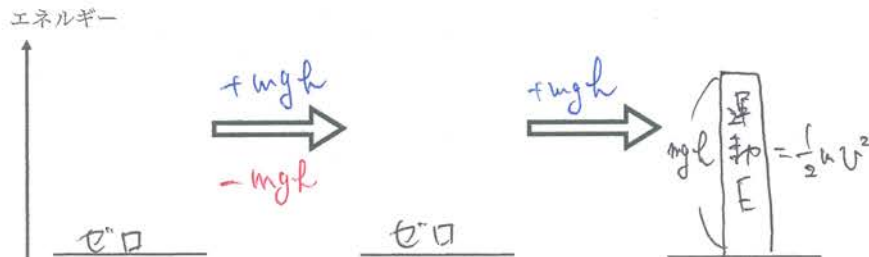
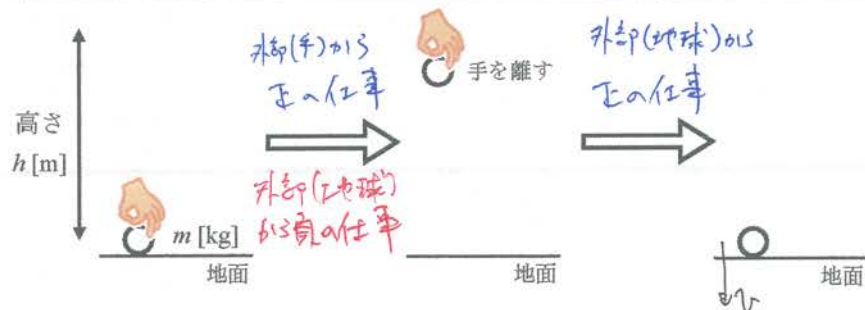
→ 系は外部(手)からされた仕事の分だけエネルギーが変化する。重力は系の内部である地球からの力なので、エネルギーを変化させない。

73

memo

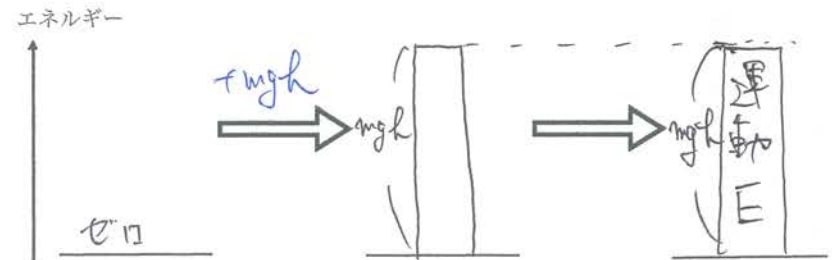
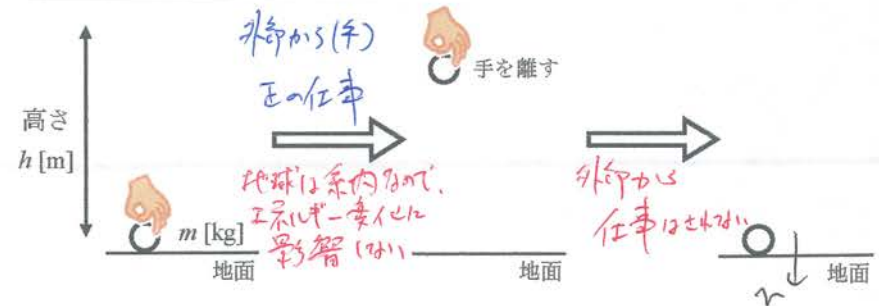
75

Note : ① 系=ボールのみ



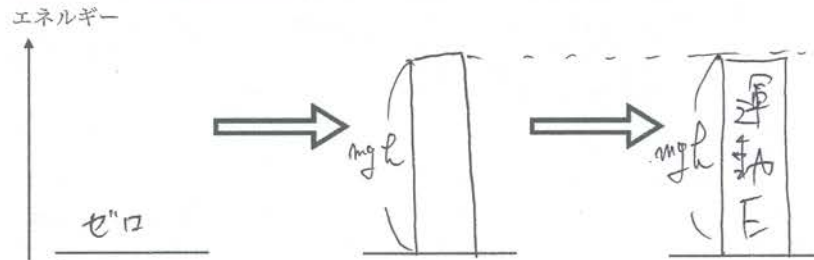
74

Note : ② 系=ボールと地球



76

Note : ② 系 = ボールと地球のエネルギーの内訳



(A) 球の $E = \text{ゼロ}$ 球の $E = \text{ゼロ}$ 球の $E = \frac{1}{2}mv^2$
 地球の $E = \text{ゼロ}$ 地球の $E = \text{ゼロ}$ 地球の $E = \text{ゼロ}$
 +
 重力による位置 $E = \text{ゼロ}$ 重力による位置 $E = \text{ゼロ}$ 重力による位置 $E = \text{ゼロ}$
 +
 重力による位置 $E = mgL$ 変換 重力による位置 $E = \text{ゼロ}$

Note : 位置エネルギー

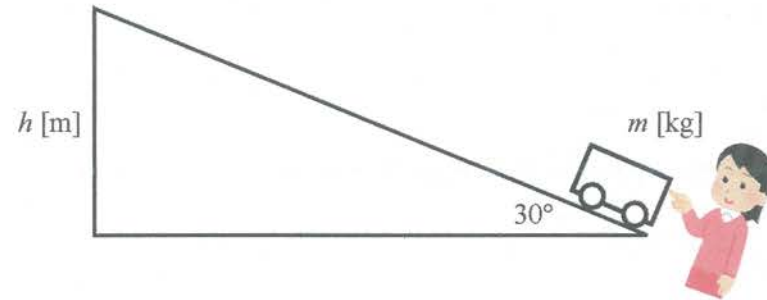
地球とボールを系としてみたとき、系内部の力である重力に注目して、「重力による位置エネルギー」というエネルギーを考えることができる。

最初に系の外部(手)から仕事をされて位置エネルギーが増える。落下中は、系内の位置エネルギーを運動エネルギーに変換している。では、重力による位置エネルギーの具体的な値はいくらなのか？求めていこう。実は、非常に魅力的な値なのだ。

ちなみに、重力による位置 E は、ボールと地球のどちらかが持つわけではなく、あくまでも系が持っている。系をボールだけにした場合、位置エネルギーというエネルギーは定義できない。でも、「ボールが持つ位置エネルギー」って書いてある本はたくさんあるので注意！

課題

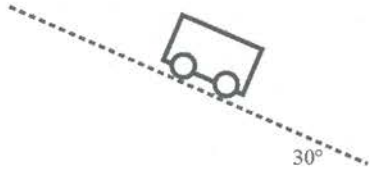
高さ h [m], 角度 30° の斜面に沿って、下から質量 m [kg] の台車を押し上げて、頂上まで運ぶ。このとき、系を台車+地球として、系が得た位置エネルギーを求めよ。



課題のスペース

Note：重力による位置エネルギー

Free-Body Diagram

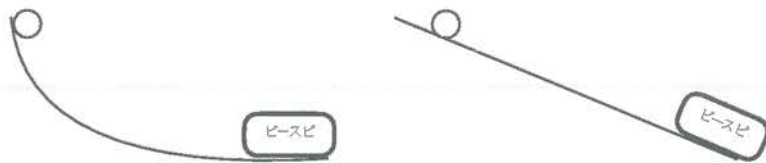


どんな場合でも結局同じで、重力による位置エネルギーの値は：

81

演示実験：位置エネルギーで考えるメリット

次の2つの斜面にボールを転がし、落ちてきたところの速さを考える。



位置エネルギーで考えると、はじめ系の位置エネルギーはどちらも同じなのだから、下に来たときのボールの運動エネルギーも同じはず。もちろん、地球は実質的に静止しているので、運動エネルギーはゼロとみなしている。

一方、仕事を計算しようとする、曲線の方はかなり大変である。

(曲線を方程式で表した上で、その曲線に沿って積分しないとできない)

82

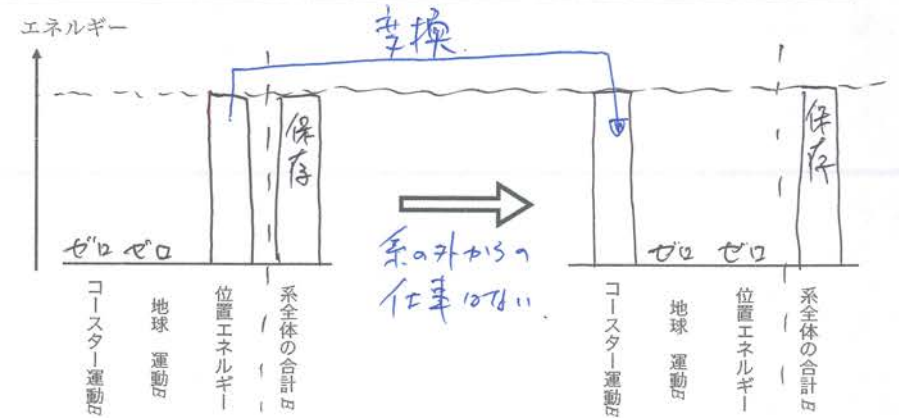
課題

東京ディズニーランドにあるジェットコースター「スプラッシュマウンテン」は、落差 16 m の滝を落ちていく。初速ほぼゼロの状態から落下すると考えて、滝下での速さを見積もれ。

TDL公式データでは、最高速度 62 km/h である。計算結果と比較せよ。

83

Note：グラフにしてみる



$$m[1g] \times 9.8 \frac{m}{s^2} \times 16m = \frac{1}{2} \times m \times v^2$$

84

エネルギーVI

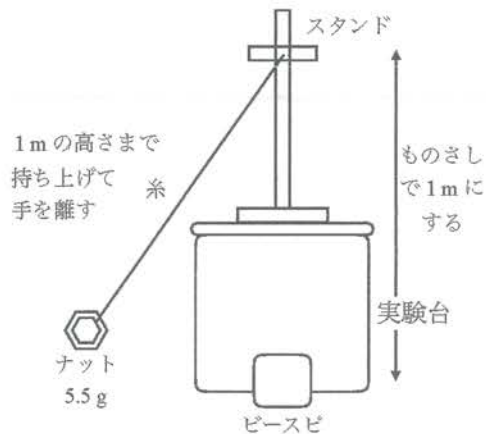
- 位置エネルギーの実験的検証 -

授業スライド PDF・動画
 Google Classroom (クラスコード: dknjeo9)

実験：ふりこのエネルギー

右図のようにふりこを作り、1mの高さまで持ち上げて手を離す。下を通過するときの、ふりこの速さを理論的に求めて実験的に検証する。

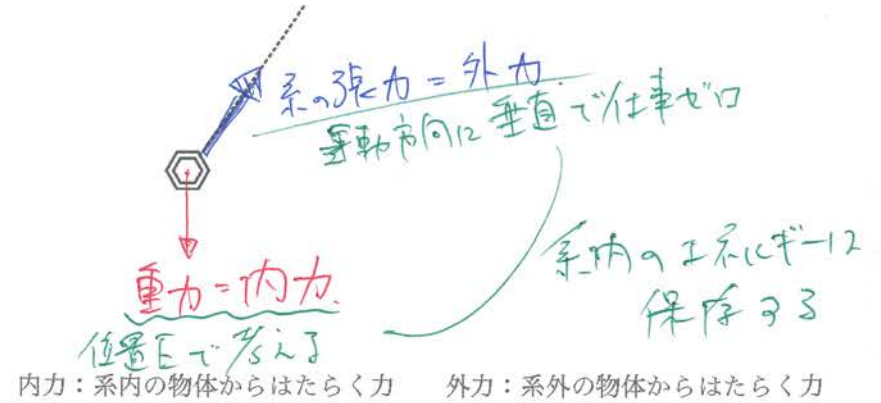
この実験を通して、運動エネルギーや位置エネルギーの理論の妥当性を検証しよう。



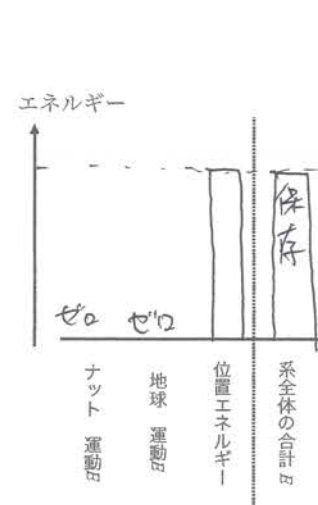
Free-Body Diagram

落下中、ナットにはたらく力は？

それぞれの力は、内力か？外力か？系のエネルギーを変化させるか？



グラフ1：手を離したときのエネルギー



ナットの運動エネルギー

~~あり~~ ゼロ

地球の運動エネルギー

ゼロ

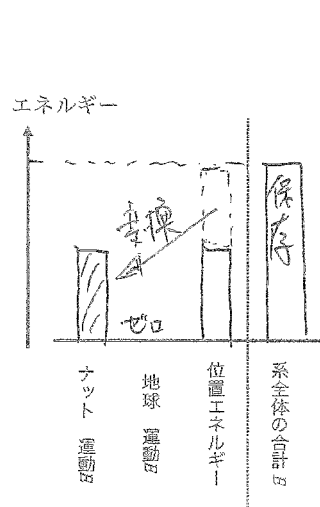
重力による位置エネルギー

$mg h$ ← 基準の位置で
 系内では生じる

系全体の合計

$mg h$

グラフ2：高さ 50 cm の地点を通過する際のエネルギー



ナットの運動エネルギー

$$\frac{1}{2}mv^2$$

地球の運動エネルギー

ゼロ

重力による位置エネルギー

$$mgh$$

系全体の合計

$$mgh$$

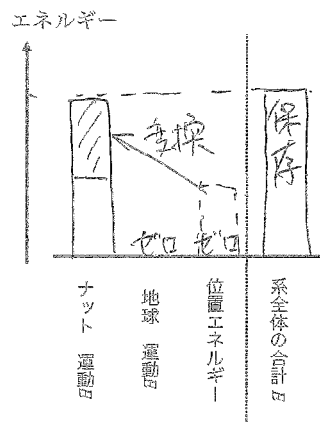
96

実験課題

- (1) ナットが下に来たときの速さを理論的に求め、実験で検証せよ。
- (2) 1 m の高さからナットを自由落下させたときの速さを実験的に求め、(1) の値と比較せよ。また、どうしてそうなるのか考えよ。
- (3) ふりこのナットが高さ 50 cm の地点を通過する際の速さを理論的に求め、実験で検証せよ。ふりがなが 50 cm の地点を通過する際の速さを実験的に検証することはできなくはないが難しいので、自由落下で置き換えても構わない。

98

グラフ3：下にきたときのエネルギー



ナットの運動エネルギー

$$\frac{1}{2}mv^2$$

地球の運動エネルギー

ゼロ

重力による位置エネルギー

ゼロ

系全体の合計

$$mgh$$

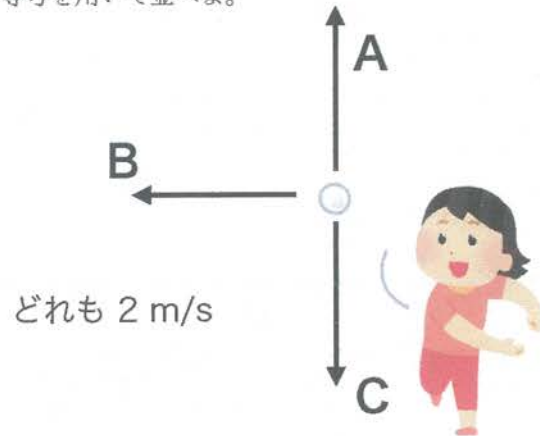
97

計算スペース

99

課題

100 g の小球を、2 m/s の初速で投射する。A は真上に、B は水平に、C は真下に投射する。地面に着くときの速さ v_A, v_B, v_C を、大きい順に等号や不等号を用いて並べよ。



100

物理基礎 2019 (勝田)

エネルギーVII

— たっぷりふりこ —

授業スライド PDF ・ 動画

Google Classroom (クラスコード: dknjeo9)

103

自分の予想

予想の理由を自分の言葉で説明せよ。

かなり内達入り

なぜそうなるのか、どう考えるべきだったか、自分の言葉でまとめよう。

結果

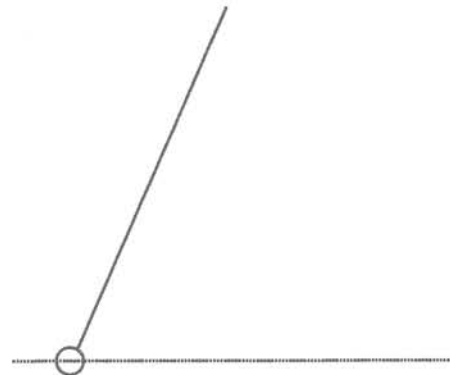
1/2 の方を理解した後でも、7/8 が分かった
鬼...このミスが有難。

101

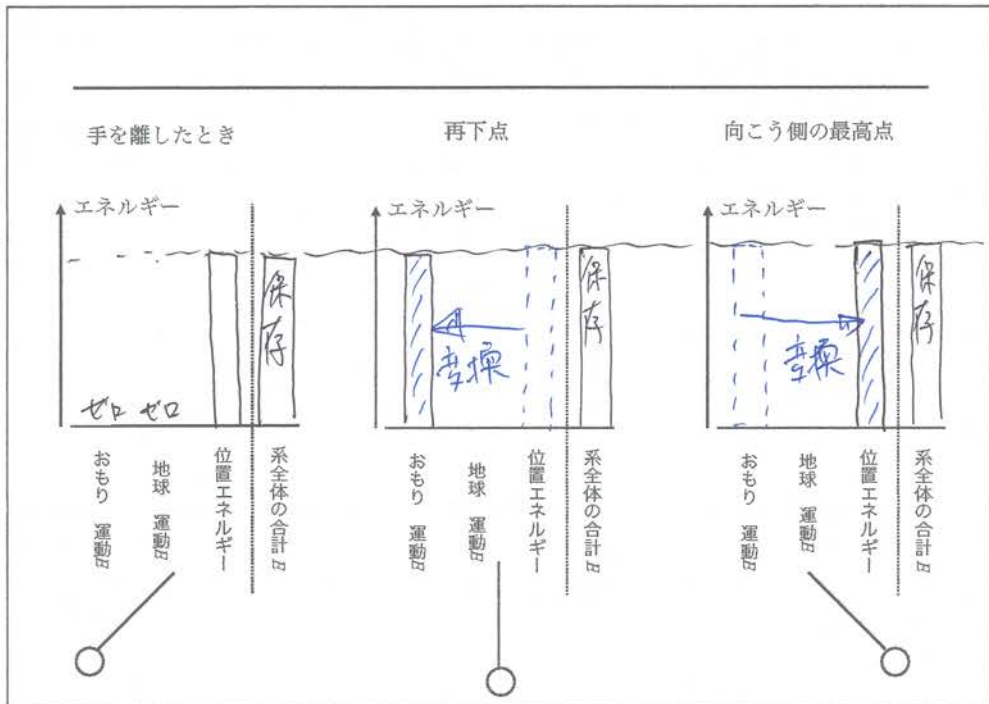
課題

ふりこのおもりを持ち上げて手を離すと、向こう側でも同じ高さに到達する。どうしてか？

手を離れたとき、最下点を通過するとき、最高点に達したときのエネルギーのグラフを完成させて、考えよ。



110



自分の予想 予想の理由を自分の言葉で説明せよ。

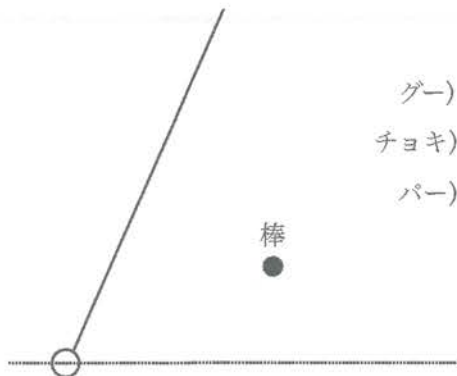
ゲ) 教人 ⇒ なんか勢いづく
 4) 1313 ⇒ 大体おもりでいる
 10) 教人 ⇒ 角度が同じいなる

結果 なぜそうなるのか、どう考えるべきだったか、自分の言葉でまとめよう。

113

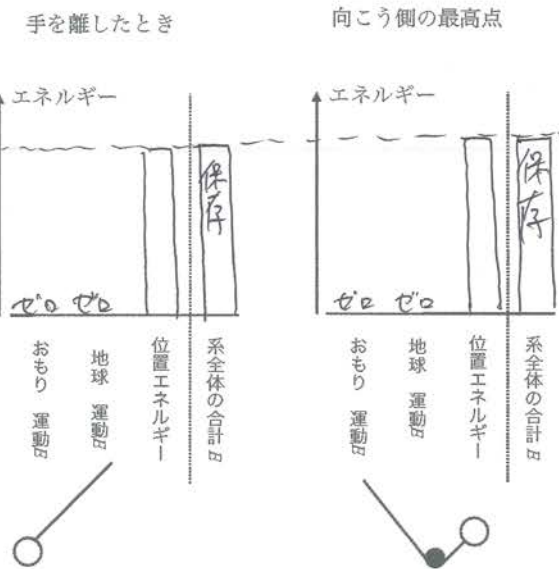
課題

ふりが運動する最中、図の位置に棒を立てて、糸が途中で引っかかるようにする。さて、このようにしても、ふりこは最初に手を離れた高さまで到達するのか？(棒でエネルギーが失われることはない)



- グー) 最初より高い位置にくる
- チョキ) 元の高さまでくる
- パー) 最初より低い位置までしかこない

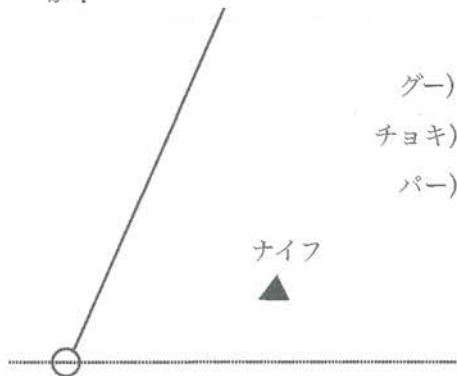
Note : グラフ化して考える



memo

課題

ふりが運動する最中、図の位置にナイフを立てて、糸が途中で切れるようにする。糸を切ることに、エネルギーはほぼ使われない。さて、糸が切れた後、ふりこのおもりは最初に手を離れた高さまで到達するのか？



- グー) 最初より高い位置にくる
- チョキ) 元の高さまでくる
- パー) 最初より低い位置までしかこない

自分の予想

予想の理由を自分の言葉で説明せよ。

チョキパーが正々らしい。
↑
こちらにも保存ナイフ
基ついている。

結果

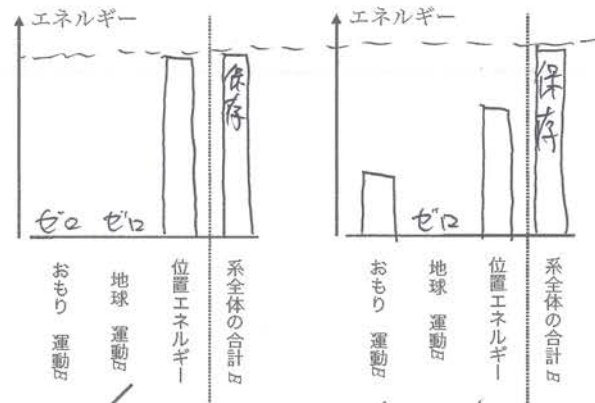
なぜそうなるのか、どう考えるべきだったか、自分の言葉でまとめよう。

生徒からの発言
「えいはい、スキーのジャンプで、最初より低い位置に
(かいた、ないよわ。) ←かなり糸内側させていた。

Note: グラフ化して考える

手を離れたとき

向こう側の最高点



斜射の頂点
では、速度はゼロ
ではない



エネルギー VIII

-弾性力による位置エネルギー-

授業スライド PDF・動画

Google Classroom (クラスコード: dknjeo9)

120

弾性エネルギー

エネルギーを考える対象をさらに広げていこう。位置エネルギーを、重力だけでなく、バネのような弾性力についても考えたい。

例) 棒高跳び

助走(運動 E) → 棒の弾性力の位置 E へ変換 → 重力の位置 E へ変換

また、物質内部での原子と原子の結合を、バネの力でモデル化できるなど、応用範囲は極めて広い。

まず、バネの弾性エネルギーを定量化していこう。

125

おなじみの2つの見方

バネ定数 k [N/m] のバネを、手で x [m] 押し縮めて離し、質量 m [kg] の台車を発射する。このとき、2つの見方ができる。

① 系は台車のみ、バネを系の外部とみなす

→ 外力(手&バネ)による仕事の分だけ、エネルギーが変化

② 系は台車とバネ、バネも系の内部とみなす

→ 外力(手)による仕事の分だけエネルギーが変化、内力である

バネの弾性力はエネルギーを変化させない。

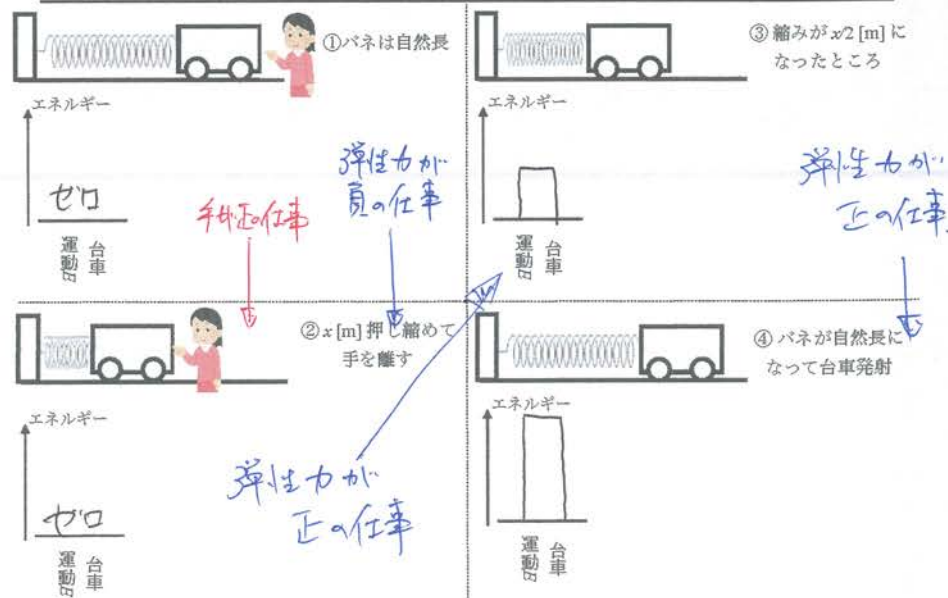
弾性力は位置エネルギーとして取り扱う。

注: バネは十分軽いものとして、運動エネルギーはゼロとする。

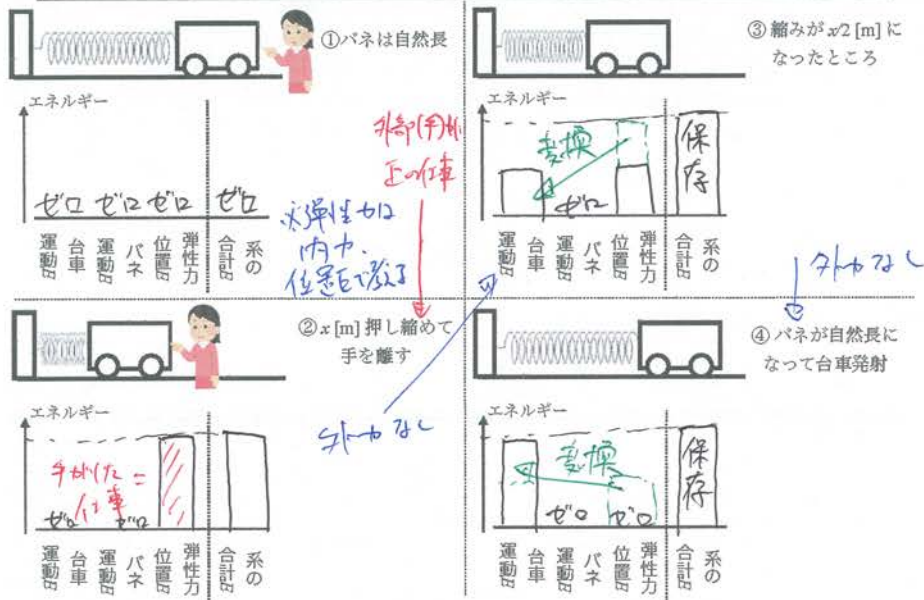
126

127

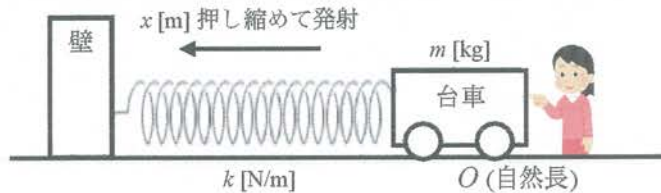
Note: ① 系 = 台車のみ



② Note: 系 = 台車とバネ



位置エネルギーの具体的な値は？



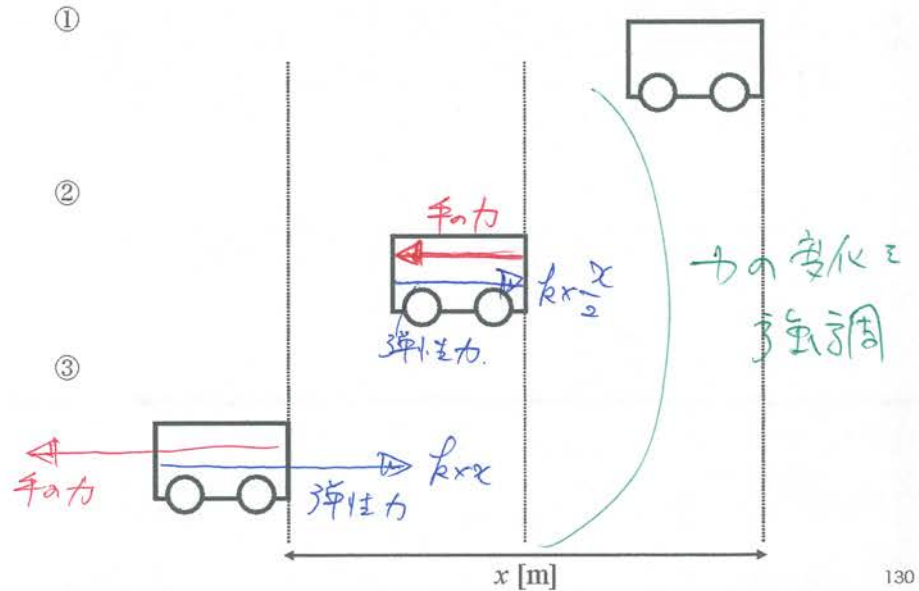
弾性力に逆らって、バネがx[m]縮むまで手がした仕事が、系に位置エネルギーとして蓄えられる。

よって、その仕事の値を計算すれば、位置エネルギーが求まる。

台車がバネと手から受ける力を、

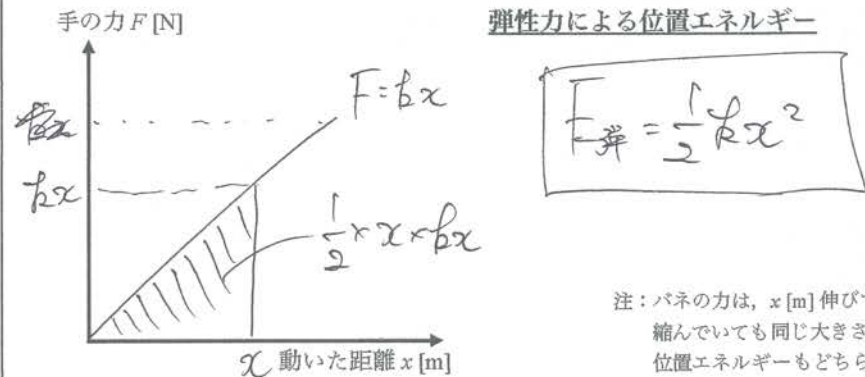
- ① 自然長のとき、② バネの縮みがx/2になった時、③ x[m]縮んだとき
- のそれぞれについて、Free-Body Diagramで表せ。

Free-Body Diagram



Note: 弾性力による位置エネルギー

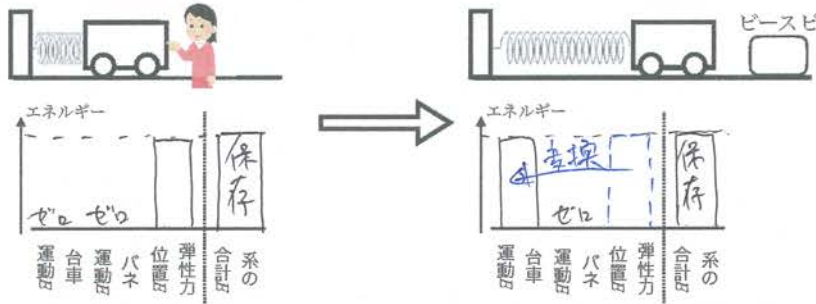
今、力の大きさが常に変化しているの、仕事を単純に力×距離で求める訳にはいかない。こういうとき、力と距離のグラフの面積で置き換えられるのだった。何故なのか分からない人は、v-tグラフの面積が、どうして変位になったのか、復習しておくこと。



注: バネの力は、x[m]伸びていても縮んでいても同じ大きさので、位置エネルギーもどちらも同じ。

課題：弾性力による位置エネルギーの検証

質量 1 kg の台車を、バネ定数 50 N/m のバネで 5 cm 押し縮めて発射する。発射速度を理論的に求め、ピースピで測定して確かめよ。



$$\frac{1}{2} k x^2 = \frac{1}{2} m v^2$$

$$\Rightarrow v = x \sqrt{\frac{k}{m}}$$

計算欄

勝田, APEJ. 物理教育通信
No.173. p49. (2018) を参照...

この課題は、前期に必死に Excel で計算を繰り返して近似的に求めたレポート課題である！運動方程式を解くのにすごく時間がかかったはず！

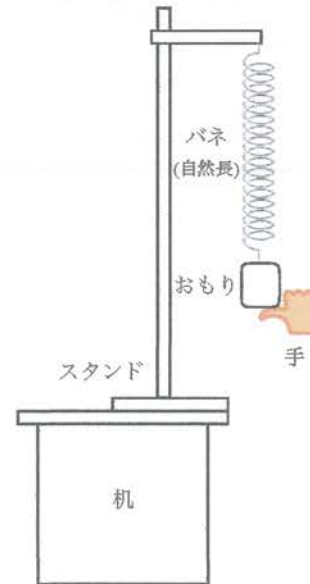
エネルギー IX

— バンジージャンプの物理学 —
(探究活動)

授業スライド PDF ・ 動画

Google Classroom (クラスコード : dknje09)

課題 1

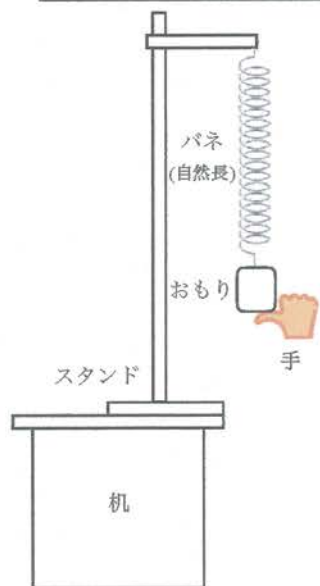


バンジージャンプのモデルとして、バネに吊るしたおもりの運動を考えよう。

左図のようにおもりをバネで吊るし、手で支える。自然長の状態から手をゆっくりと下げていくと、ある地点でおもりから手が離れ、おもりは静止して動かなくなる。この位置を「つり合いの位置」と呼ぶ。

つり合いの位置における、バネの自然長からの伸びを測定し、このバネのバネ定数を求めよ。

課題2



左図のようにおもりをバネで吊るし、手で支える。自然長の状態から、おもりに初速を与えないように、手をそっと離す。このとき、次の値を理論的に求め、実験で検証せよ。

- (1) つり合いの位置をおもりが通過する際の速さ
- (2) 最下点でのバネの伸び

なお、理論的に値を求める際は、系を「おもり・バネ・地球」として、エネルギーのグラフを描いて説明すること。このとき、位置エネルギーは重力によるものと弾性力によるもの、2つともあることに注意！また、地球やバネの運動エネルギーも省略しないこと。

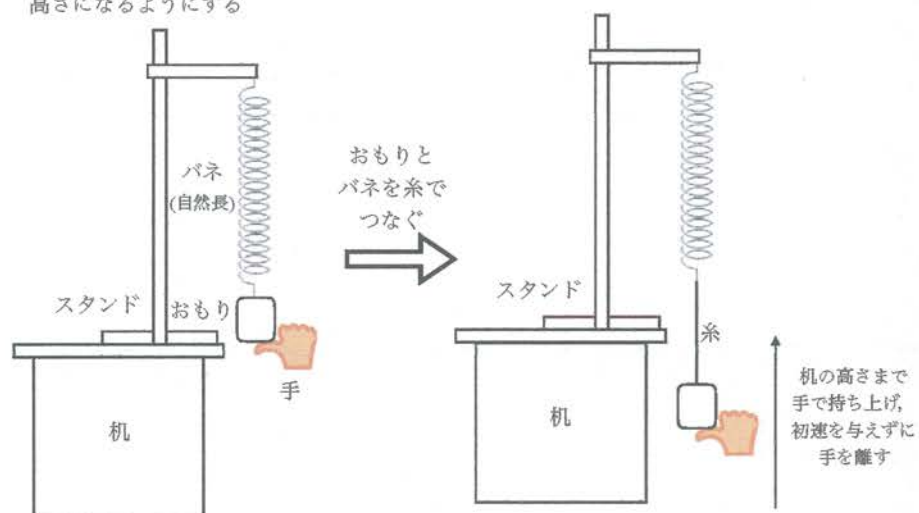
最後に、実験値と理論値を比較して考察を行うこと。

146

課題3の実験図：バンジージャンプ

148

自然長でおもりが机の高さになるようにする



課題3

次頁の図のように、まずバネとおもりを直接繋いだとき、自然長の状態でおもりの高さを机の高さに一致させる。

次に、バンジージャンプのモデルに近づけるため、適切な長さの糸で、おもりとバネを結ぶ。おもりを机の高さまで手で持ち上げ、初速を与えないように手を離す。すると、糸がたるんでいる間はおもりは自由落下するが、その後はバネの弾性力がはたらく。

糸を何 cm にすれば、おもりがギリギリ地面につかずに生還できるか？

理論的に求めてから、実験的に検証せよ。

なお、理論的に値を求める際は、系を「おもり・バネ・地球」として、エネルギーのグラフを描いて説明すること。このとき、手を離れたとき、最高速度の地点、最下点でのエネルギーは必ずグラフで示すこと。

最後に、実験値と理論値を比較して考察を行うこと。

147

レポート

- ・各班で1部作成し、紙媒体で提出せよ。
- ・表紙にクラス、番号と氏名(全員分)、提出日を書き、左上をホチキス留め。
- ・全員が執筆に関わり、誰がどこを書いたのかを明示すること。
- ・PCを利用してレポートを作成する場合、数式はきちんと数式エディタで書くか、手書きにすること。 x^2+3x-2 とかテキストで書かれても読めない。本文中に登場する数式(1文字でも数式!)も x ではなく x というような斜体フォントにすること。(Times New Roman がオススメ)

締切：12/2(月) 8:20 物理講義室後ろのレポート提出BOXへ。

遅刻提出：12/13(金)までに直接提出すれば、減点して評価を与える。

それまでに提出がなければ、学年末評価を「1」とする。

149

評価

何よりも重視するのは、再現性(レポートを見た他人が、同じことをして同じ結果を得られるかどうか)と論理性である。

観点\評価	A	B	C	D
課題1 再現性	読者が著者の行った測定を完全に再現できる	やや再現性に欠けるが、本質的な部分は再現できる	再現するために本質的な情報が不足している	論外 or 不誠実
課題1 論理性	飛躍なく論理が組み立てられている	やや論理性に欠けるが、意味は汲み取れる	論理が成り立っていない	論外 or 不誠実
課題2 再現性	読者が著者の行った測定を完全に再現できる	やや再現性に欠けるが、本質的な部分は再現できる	再現するために本質的な情報が不足している	論外 or 不誠実
課題2 論理性	飛躍なく論理が組み立てられている	やや論理性に欠けるが、意味は汲み取れる	論理が成り立っていない	論外 or 不誠実
課題2 考察	物理的にも論理的にも妥当	やや議論が荒いが、おおむね妥当	妥当でない	論外 or 不誠実
課題3 再現性	読者が著者の行った測定を完全に再現できる	やや再現性に欠けるが、本質的な部分は再現できる	再現するために本質的な情報が不足している	論外 or 不誠実
課題3 論理性	飛躍なく論理が組み立てられている	やや論理性に欠けるが、意味は汲み取れる	論理が成り立っていない	論外 or 不誠実
課題3 考察	物理的にも論理的にも妥当	やや議論が荒いが、おおむね妥当	妥当でない	論外 or 不誠実

物理基礎 2019 (勝田)

エネルギー X

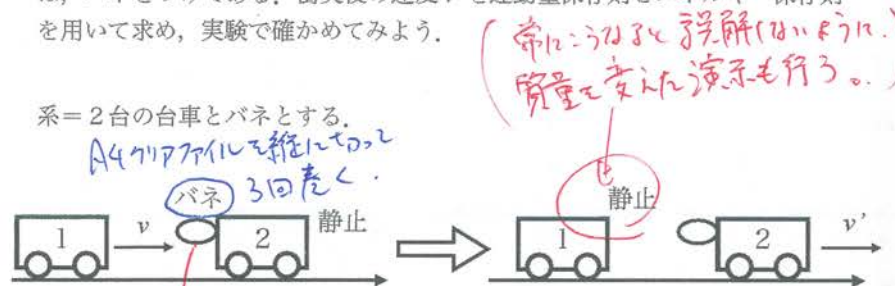
- エネルギー vs 運動量 -

授業スライド PDF・動画
 Google Classroom (クラスコード: dknjeo9)

運動量 vs エネルギー

これまでに、“運動量”と、“エネルギー”という、2つの保存量を学んだ。その2つを対比してみることで、より理解を深めよう。

下図のように、同じ質量の台車が速度 v で衝突する。衝突される方の台車には、バネをつけてある。衝突後の速度 v' を運動量保存則とエネルギー保存則を用いて求め、実験で確かめてみよう。

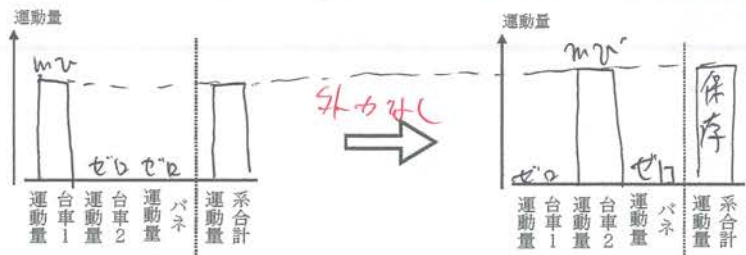


系 = 2台の台車とバネとする。

A4チップアールの紐にてバネを3回巻く。

下エトカトの磁石でやった方がうまいが、衝突の瞬間はバネが壊れる。

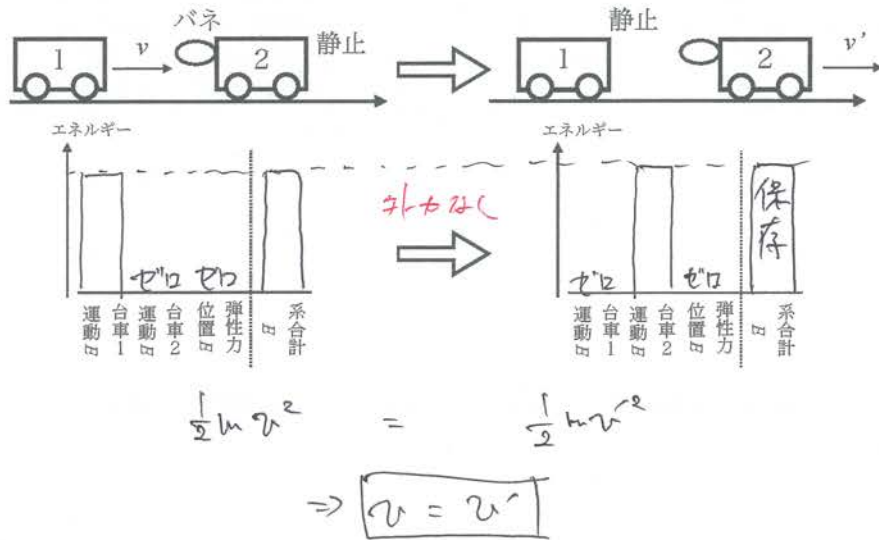
運動量で考える



$$mv = mv'$$

$$\Rightarrow v = v'$$

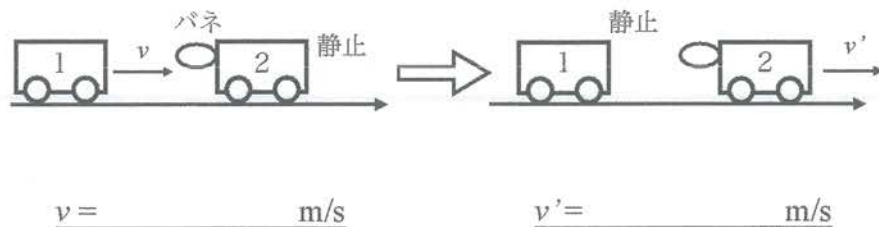
エネルギーで考える



155

演示実験

実際に実験する。



156

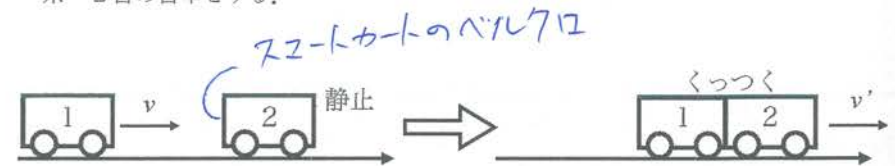
課題

では、今度は台車同士が衝突してくっつく場合を扱おう。

実はこのとき、運動量保存則で考えるのと、エネルギー保存則で考えるのとでは、異なる結果が出る。

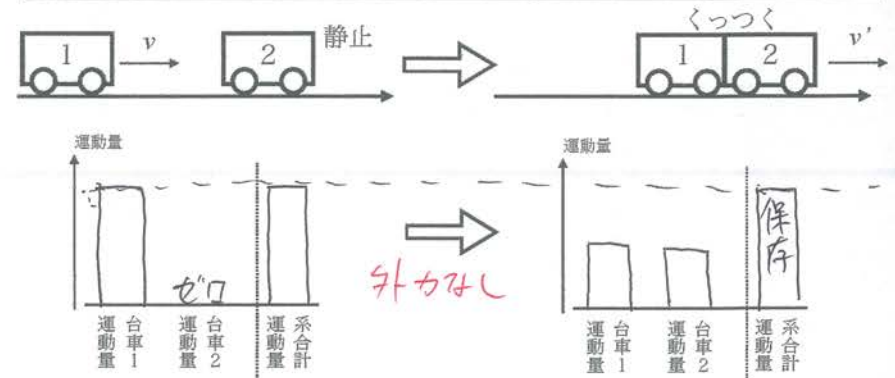
下図のように、同じ質量の台車が速度 v で衝突する。衝突すると2つの台車は、一体となって運動する。衝突後の速度 v' を運動量保存則とエネルギー保存則を用いて求め、実験で確かめてみよう。

系 = 2台の台車とする。



157

運動量で考える

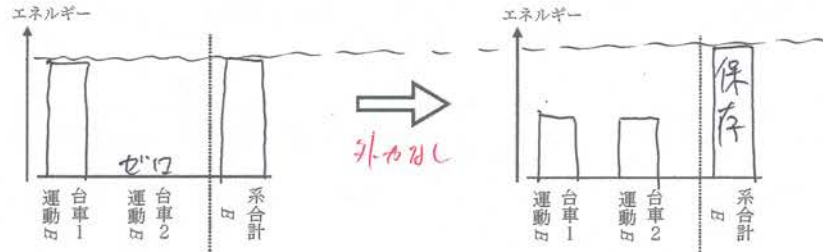
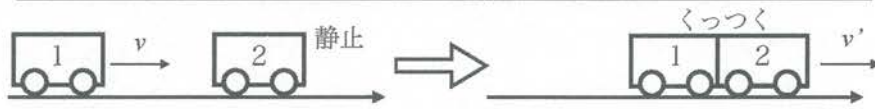


$$mv + 0 = mv' + mv'$$

$$\Rightarrow v' = \frac{1}{2}v$$

158

エネルギーで考える



$$\frac{1}{2}mv^2 + 0 = \frac{1}{2}mv'^2 + \frac{1}{2}mv'^2$$

$$\Rightarrow v' = \frac{v}{\sqrt{2}}$$

159

演示実験

実際に実験する。



$$v = \quad \text{m/s}$$

$$v' = \quad \text{m/s}$$

運動量で考えた結果

$$v' = \frac{1}{2}v = \quad \text{m/s} \quad \leftarrow \text{まち!}$$

エネルギーで考えた結果

$$v' = \frac{1}{\sqrt{2}}v = \quad \text{m/s}$$

160

エネルギーはどこに消えた？

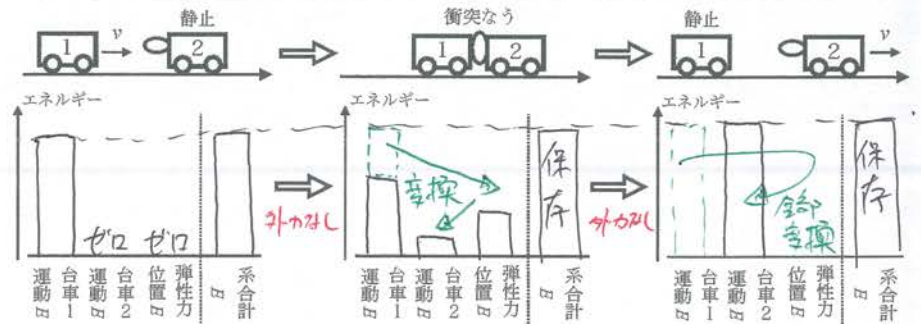
物理学が科学である以上、すべての理論より実験が正しい。

しかしながら、エネルギーは保存量であるし、今水平方向の外力はないのだから、系の運動量だけでなくエネルギーも保存しているはずである。我々のエネルギーの考察に何かしらのミスがあったに違いない。

2つの実験の違いは、衝突の過程だけなので、そこに注目するのが妥当だろう。衝突の最中、エネルギーの流れをグラフ化してみよう。

161

Note: バネで衝突する場合

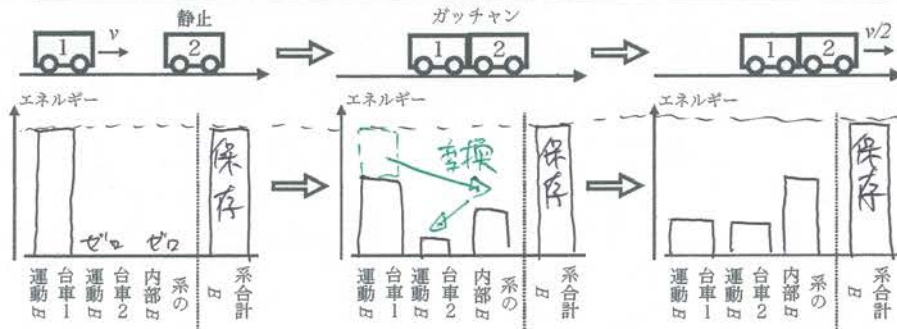


バネの衝突の場合、台車1の運動エネルギーはすべて弾性力による位置エネルギーに変換され、台車2の運動エネルギーに変換される。

エネルギーの変換は、運動Eと位置Eだけで、つまり力学的エネルギーだけで完結する。これを「弾性衝突」という。

162

Note : 衝突してくっつく場合



非弾性衝突の場合、台車1の運動エネルギーは、台車2の運動エネルギーだけでなく、系内の「何らかの」エネルギーに変換されたはずだ。この正体は考察の対象にないし、何種類のエネルギーになったのかもわからない。「内部エネルギー」と一括りにしておく。

エネルギー全体としては保存しているが、非弾性衝突を力学的エネルギーだけで考えてしまうと、保存していないように見えてしまう。

課題

棒高跳びも、走り高跳びも、助走の運動エネルギーはそう変わらないはずである。むしろ棒を持つと、かなり走りづらくて不利なはずである。

しかし、棒高跳びの世界記録が6.16 mであるのに対し、走高跳の世界記録は2.45 mと、半分以下である。走高跳の際、重力による位置エネルギーをはじめとする力学的エネルギーにならなかった分のエネルギーは、どこに消えたのか？

余談:
棒高跳びの世界記録が、
今後×1.2程度で
更新されることは……

165

課題

自動車のバンパーは、あえて非弾性的な物質で作られている。

バネのように弾性的な物質であれば、何かにぶつかっても元の形に戻るのに、なぜあえて非弾性的なのか？



164

物理基礎 2019 (勝田)

エネルギー XI

— 運動量とエネルギーの違いは? —

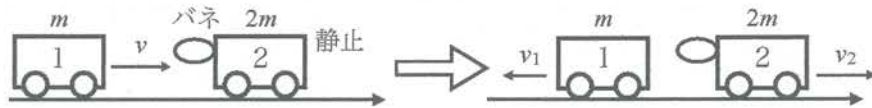
授業スライド PDF・動画

Google Classroom (クラスコード: dknjeo9)

167

課題

質量 m の台車 1 が速度 v で、静止している質量 $2m$ の台車 2 に弾性衝突する。衝突後の両台車の速度 v_1, v_2 を求めよ。



172

計算欄

173

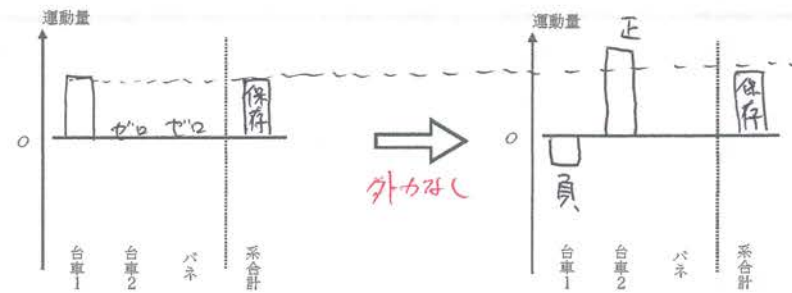
計算欄

174

解説



運動量保存則



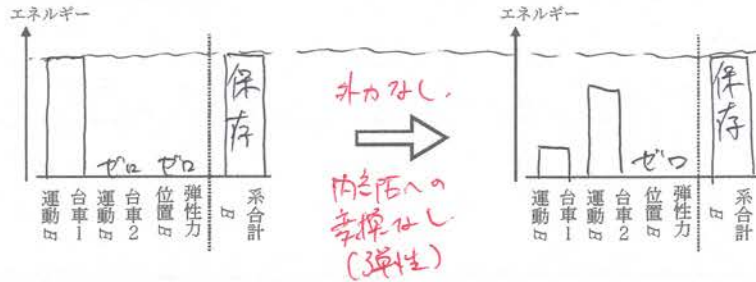
$$mv = \underbrace{mv_1}_{\text{負}} + \underbrace{2mv_2}_{\text{正}}$$

175

解説



エネルギー保存則



$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}mv_1^2 + \frac{1}{2}(2m)v_2^2$$

memo

続き

運動量には向きがある

今の計算の過程で注目したいことは、運動量はベクトルで向きがあり、正負がある値の和として保存することである。

一方で、運動エネルギーはスカラーで向きがない。どの向きに運動していようとも、運動エネルギーは必ず正である。

このことを念頭に置いて、次の実験を見て欲しい。

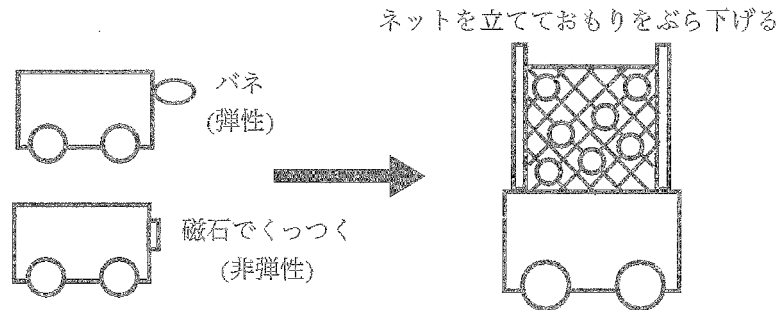
実験で検証する：

$v =$ m/s , $v_1 =$ m/s , $v_2 =$ m/s

実験

台車にネットを立てて、たくさんおもりをぶら下げる。

その台車に別の台車を、弾性／非弾性衝突させてみる。衝突後、おもりの挙動はどうなるか？



180

memo

182

結果からの考察

結果、弾性衝突ではおもりは微動だにしないが、非弾性衝突ではおもりが振動する。つまり、台車全体の運動エネルギーではなく、内部エネルギーに変換されたということである。

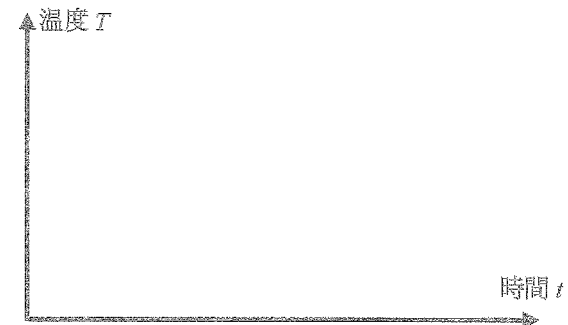
この結果から、物体と物体が弾性／非弾性衝突するとき、原子や分子レベルでの物質内部では、何が起きていると考えられるか？

また、どのような実験をすれば予想を確かめられるか？

181

実験：非弾性衝突による温度上昇

スーパーボール（弾性的）とハネナイトボール（非弾性的）を50回ずつ机に打ち付けて、温度変化を見る。



質点モデルの限界

非弾性衝突の際、系の力学的エネルギー（運動&位置 E ）は、内部エネルギーに変換されてしまう。それは例えば、原子や分子の振動するエネルギーである。

この事実は、我々が運動方程式から採用してきた質点モデル（物体を質量を持った大きさのない点とみなす）の限界を示している。

（価値がないということではない、かなりの現象を質点モデルで解析してきた！）

逆に言えば、エネルギーで考えていけば、物体の内部構造がいくらろうとも、「内部エネルギー」という一言で片付けられてしまうということだ。なかなか便利なモデルではないか！

184

物理基礎 2019 (勝田)

エネルギー XII

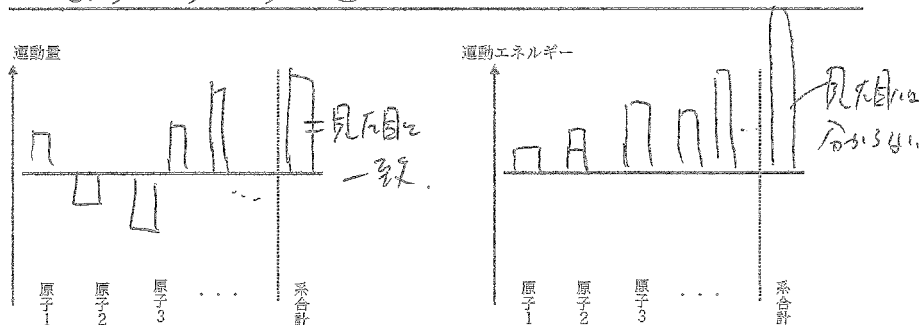
－非弾性衝突における内部エネルギー変換の規則性－

授業スライド PDF・動画

Google Classroom (クラスコード: dknjeo9)

187

つまりこういうこと



運動量は向きのある量なので、すべての原子の運動量を足し合わせたら、台車全体の“見た目の”運動量と必ず一致する。

運動エネルギーは向きのない値の和なので、すべての原子の運動 E の和が、台車全体の“見た目の”運動エネルギーと一致するとは限らない。

185

非弾性衝突を定量的に扱うには？

衝突が非弾性的であるとき、力学的エネルギーは内部構造へと変換される。

これまでは、バネのような弾性衝突と、完全にくっついてしまう非弾性衝突（完全非弾性衝突）のみを扱ってきたが、通常の衝突はその間にある。どの程度エネルギーが変換されるかは、物体同士の組み合わせによって異なる。

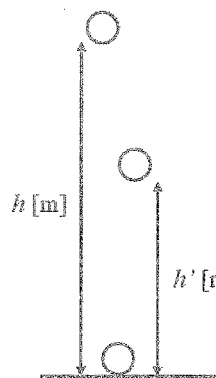
そこに何か規則性を見出さなければ、定量的な扱いはできない。

186

課題

高さ h [m] の地点からスーパーボールを自由落下させて、 h' [m] まで跳ね返ってきたとする。

(1) 床に衝突する直前の速さ v [m/s] を、 h を用いて表せ



(2) 床に衝突した直後の速さ v' を、 h' を用いて表せ

196

Note : 跳ね返り係数

物質同士の跳ね返りには、規則性があるらしい。

衝突前後での速さの比は定数となり、この値を跳ね返り係数と呼ぶ。

本来は、エネルギーの比で考えるべきだと思うのだけれど、まあ速さの比で考えることになっているので仕方ないか...

$$e = \frac{v'}{v} = \frac{\text{跳ね返った後の速さ}}{\text{跳ね返る前の速さ}}$$

e が 1 に近いほど弾性衝突に近く、0 に近いほど、衝突時にエネルギーが内部構造へと散逸してしまう。 e が 0 だと、全く跳ね返らずにくっつく。

例えばスポーツのボールなんかは、跳ね返り係数が指定されているね。

198

実験

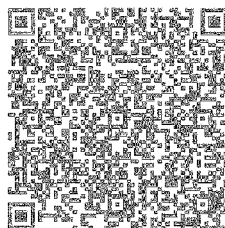
衝突前後の速さの比は、 $\frac{v'}{v} = \sqrt{\frac{h'}{h}}$ となるし、

エネルギーの比は、 $\frac{\frac{1}{2}mv'^2}{\frac{1}{2}mv^2} = \frac{h'}{h}$ となる。

この高さの比 h'/h を調べることで、規則性を見出そう。

様々な高さ h からスーパーボールを机に自由落下させ、跳ね返ってきた高さ h' をものさしで測定せよ。

各班 10 回測定して、スプレッドシートに入力せよ。



197

問

跳ね返り係数が e ということは、一回衝突するたびに、どれだけの運動エネルギーが内部エネルギーに変換されてしまうということか？

199

実験が早く終わっちゃた人用の難しい課題

測定した跳ね返り係数を利用して、1 m の高さから落としたスーパーボールが、跳ね返りを繰り返して静止するまで何秒かかるか求め、実験値と比較せよ。

200

今日の内容を考えるとわかる面白い現象

バスケットボールとかバレーボールの上に、テニスボールとかスーパーボールとか軽いボールを乗せて、自由落下させましょう。

どうしてそうなるかは自分で考えてください。

202