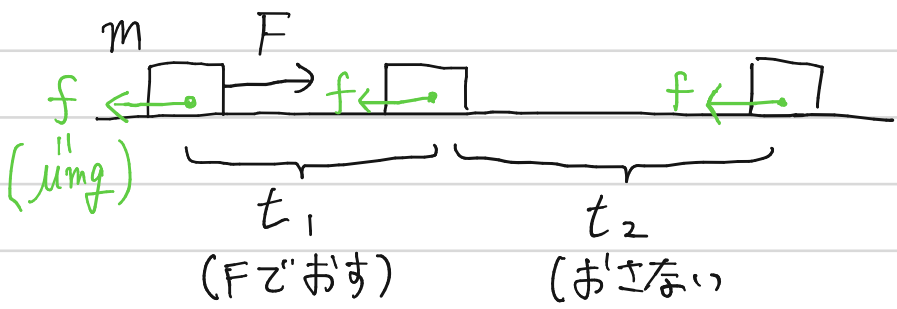
79



準備

つりあいより

$N = mg$

$f = \mu N$ より

$f = \mu mg$

(1) 力積 $I = F\Delta t$ より

$$I_1 = Ft_1 + (-\mu mg)t_1$$

$$= \underline{(F-\mu mg)t_1}$$

← 合力 × 時間 でも計算できるということ.

(2) 同様に考えて

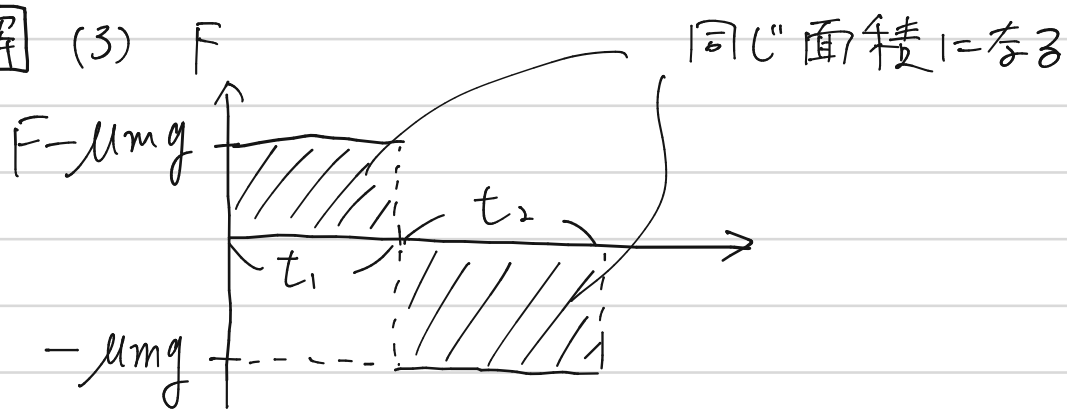
$$I_2 = -\mu mg t_2$$

(3) 動きだしてから とまるまでの 全 運動量変化は 0 なので

$$0 = (F-\mu mg)t_1 - \mu mg t_2$$

$$\therefore \frac{t_2}{t_1} = \underline{\frac{F-\mu mg}{\mu mg}}$$

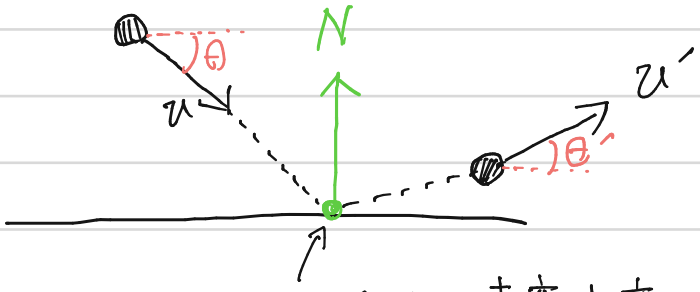
別解 (3)



$$(F-\mu mg)t_1 = \mu mg t_2$$

$$\Rightarrow \underline{\frac{t_2}{t_1} = \frac{F-\mu mg}{\mu mg}}$$

80 力を受ける向きしか運動量は変化しないので
方向の運動量は変化しない。⇒ vの変化も
これと同じ



Nの向きの速度は変化する
⇒ 変化を反発係数 e で分析できる

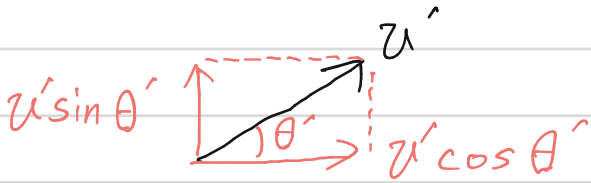
$\boxed{\text{平行方向}}$ 変化しない

$$v\cos\theta = v'\cos\theta' \quad \cdots ①$$

$\boxed{\text{垂直方向}}$ e で分析

$$e = \frac{v'\sin\theta'}{v\sin\theta} \Rightarrow ev\sin\theta = v'\sin\theta' \cdots ②$$

(1) 後の速度ベクトル v' を書くと、



と書けるので

$$v' = \sqrt{(v'\sin\theta')^2 + (v'\cos\theta')^2}$$

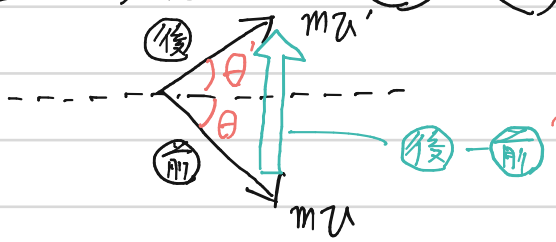
①,②を代入して

$$v' = \sqrt{(v\cos\theta)^2 + (ev\sin\theta)^2}$$

$$v' = v\sqrt{\cos^2\theta + e^2\sin^2\theta}$$

80 続き

(2) 平面の変化なので 後 − 前 をベクトルの引き算で行う



水平成分は同じ大きさなので真上になる。
(垂直抗力の向きにしか変化しないから、という説明もできる)

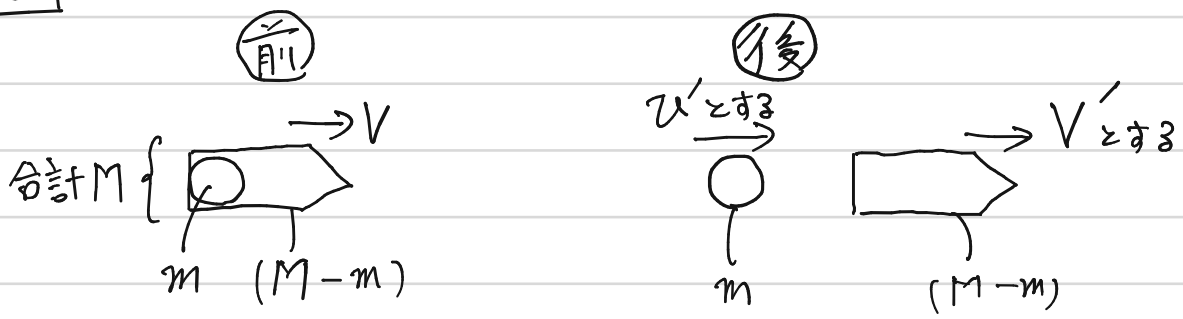
⇧ の大きさは $mv'\sin\theta' + mv\sin\theta$ といえる。

② 式を使って整理して

$$emv\sin\theta + mv\sin\theta$$

$$\Rightarrow \underline{(e+1)\,mv\sin\theta}$$

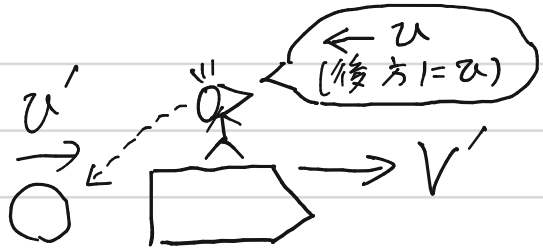
81



運動量の保存より

$$MV = mv' + (M-m)V' \quad \cdots ①$$

相対速度の情報は下図のように整理できる



よって　(みられる)−(みる)＝(相対速度)

$$v' - V' = -v$$

$$\Rightarrow \quad v' = V' - v \quad \cdots ②$$

①に②を代入して

$$MV = m(V'-v) + (M-m)V'$$

$$\Rightarrow MV = mV' - mv + MV' - mV'$$

$$MV' = MV + mv$$

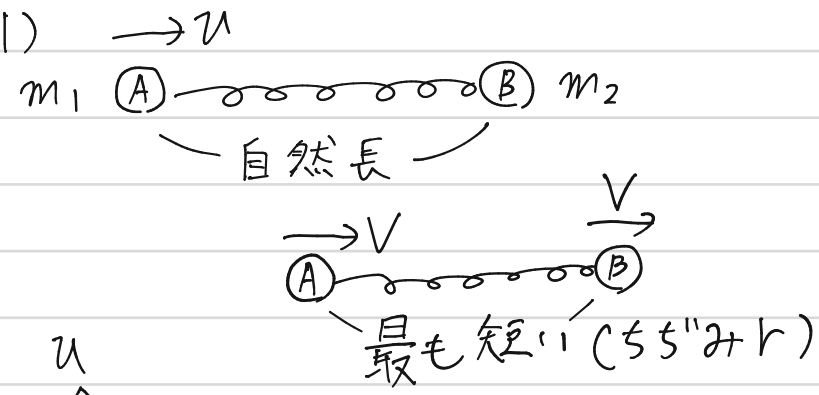
$$\therefore V' = \frac{MV + mv}{M} \quad //$$

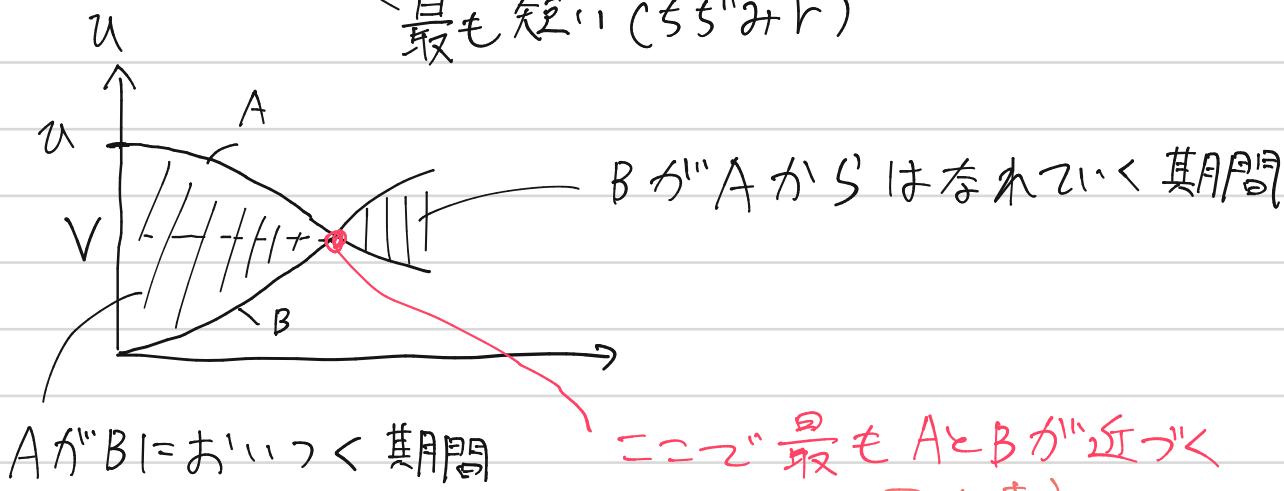
②に代入して

$$v' = \frac{MV + mv}{M} - v$$

$$\therefore v' = \frac{M(V-v) + mv}{M} \quad //$$

$\boxed{82}$ (1)





運動量の保存より

$$m_1 v = m_1 V + m_2 V \quad \cdots ①$$

$$\therefore \underline{V = \frac{m_1}{m_1+m_2} v}$$

熱の発生なし ⇒ 系全体のエネルギー保存

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 = \frac{1}{2} m_1 V^2 + \frac{1}{2} k r^2 + \frac{1}{2} m_2 V^2 \quad \cdots ②$$

求めたVを代入して

$$\frac{1}{2} m_1 v^2 = \frac{1}{2}(m_1+m_2)\cdot\left(\frac{m_1}{m_1+m_2} v\right)^2 + \frac{1}{2} k r^2$$

$$\cancel{\frac{1}{2}} m_1 v^2 = \cancel{\frac{1}{2}} \cdot \frac{m_1^2}{m_1+m_2} v^2 + \cancel{\frac{1}{2}} k r^2$$

$$k r^2 = v^2 \left(\frac{m_1 m_2}{m_1+m_2}\right)$$

$$\underline{r = v\sqrt{\frac{m_1 m_2}{k(m_1+m_2)}}}$$

82 続き

(2) 運動量保存と、エネルギー保存を連立する.

前　　後

$$m_1 v = m_1 v_1 + m_2 v_2 \quad \cdots ③$$

$$\frac{1}{2} m_1 v^2 = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 \cdots ④$$

③より

$$m_2 v_2 = m_1 v - m_1 v_1$$

$$\Rightarrow m_2 v_2^2 = m_1 v v_2 - m_1 v_1 v_2 \cdots ③'$$

③'を④に代入して

$$\cancel{\frac{1}{2}} \cancel{m_1} v^2 = \cancel{\frac{1}{2}} \cancel{m_1} v_1^2 + \cancel{\frac{1}{2}} (\cancel{m_1} v v_2 - \cancel{m_1} v_1 v_2)$$

$$v^2 = v_1^2 + v v_2 - v_1 v_2$$

$$v_2 (v - v_1) = v^2 - v_1^2$$

$$v_2 (v - v_1) = (v + v_1)(v - v_1)$$

$$v_2 = v + v_1 \cdots ④'$$

← 体系物理の解答とちがう出し方になりました。

③に④'を代入して

$$m_1 v = m_1 v_1 + m_2 (v + v_1)$$

$$m_1 v = m_1 v_1 + m_2 v + m_2 v_1$$

$$v_1 = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} v$$

④'に代入して v_2 について解いて

$$v_2 = \frac{2 m_1}{m_1 + m_2} v$$

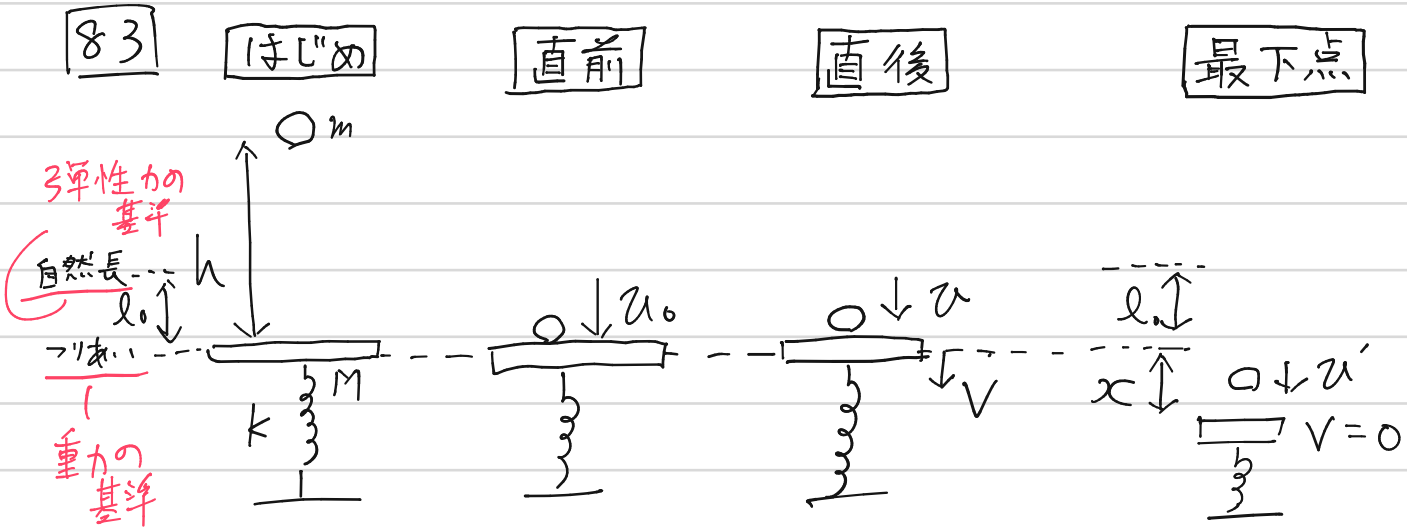
82 続き

(2) 別解『$e=1$の衝突とみなす』について

ばねの伸縮を2物体が時間をかけて衝突していると見なしている。
そして、はじめ ⇒ 最後 で力学エネが保存しているので $e=1$ の衝突である、と見なせるのだ。

しかし一方で、
(1)の段階では、同じ速度になっている
↓それなら
$e=0$ とみなせるのだろうか？
↓それなら
エネルギー損失があるはず、しかし保存している。
↓
(m_1+m_2の系)から損失した分が、一時的にばねにたくわえられている、という見方をすれば、この考え方は成立する。

83



(1) $\boxed{m\text{単体}}$

$$mgh = \frac{1}{2}mu_0^2$$

$$\therefore\ u_0 = \sqrt{2gh}$$

(2) $\boxed{m+M\text{の系}}$

運動量の保存（直前＝直後）

$$mu_0 + 0 = mu + MV \quad \cdots ①$$

反発係数の式

$$e = \frac{|\text{遠ざかる}|}{|\text{近づく}|}$$

$$e = \frac{V-u}{u_0} \quad \cdots ②$$

②を変形

$$eu_0 = V - u \Rightarrow V = eu_0 + u \cdots ②'$$

②'を①に代入して

$$mu_0 = mu + M(eu_0 + u)$$

$$\therefore\ u = \frac{m-eM}{m+M}u = \frac{m-eM}{m+M}\sqrt{2gh}$$

②'に代入して

$$V = \frac{(1+e)m}{m+M}u_0 = \frac{(1+e)m}{m+M}\sqrt{2gh}$$

$\boxed{83}$ 続き

(3) $e=1$ を代入して

$$u_1 = \frac{m-M}{m+M}\sqrt{2gh} \qquad V_1 = \frac{2m}{m+M}\sqrt{2gh}$$

(4) $\boxed{M\ 単体}$ は $\boxed{直後}$ → $\boxed{最下点}$ でエネルギー保存

(準備) $\boxed{はじめ}$ のつりあいより

$$Mg = kl_0$$

$$\therefore l_0 = \frac{Mg}{k}$$

(エネ保存)

$$\frac{1}{2}MV_1^2 + \frac{1}{2}kl_0^2 = \frac{1}{2}k(l_0+x_1)^2 - Mgx_1$$

$$\Rightarrow \frac{1}{2}MV_1^2 + \cancel{\frac{1}{2}kl_0^2} = \cancel{\frac{1}{2}kl_0^2} + kl_0x_1 + \frac{1}{2}kx_1^2 - Mgx_1$$

l_0を代入すると

$$\frac{1}{2}MV_1^2 = k\cdot\cancel{\frac{Mg}{k}}\cdot x_1 + \frac{1}{2}kx_1^2 - \cancel{Mgx_1}$$

$$\frac{1}{2}MV_1^2 = \frac{1}{2}kx_1^2$$

つりあいを新たな自然長とすれば、あたかも重力を無視したような式となる。(単振動の計算テクを使った式)

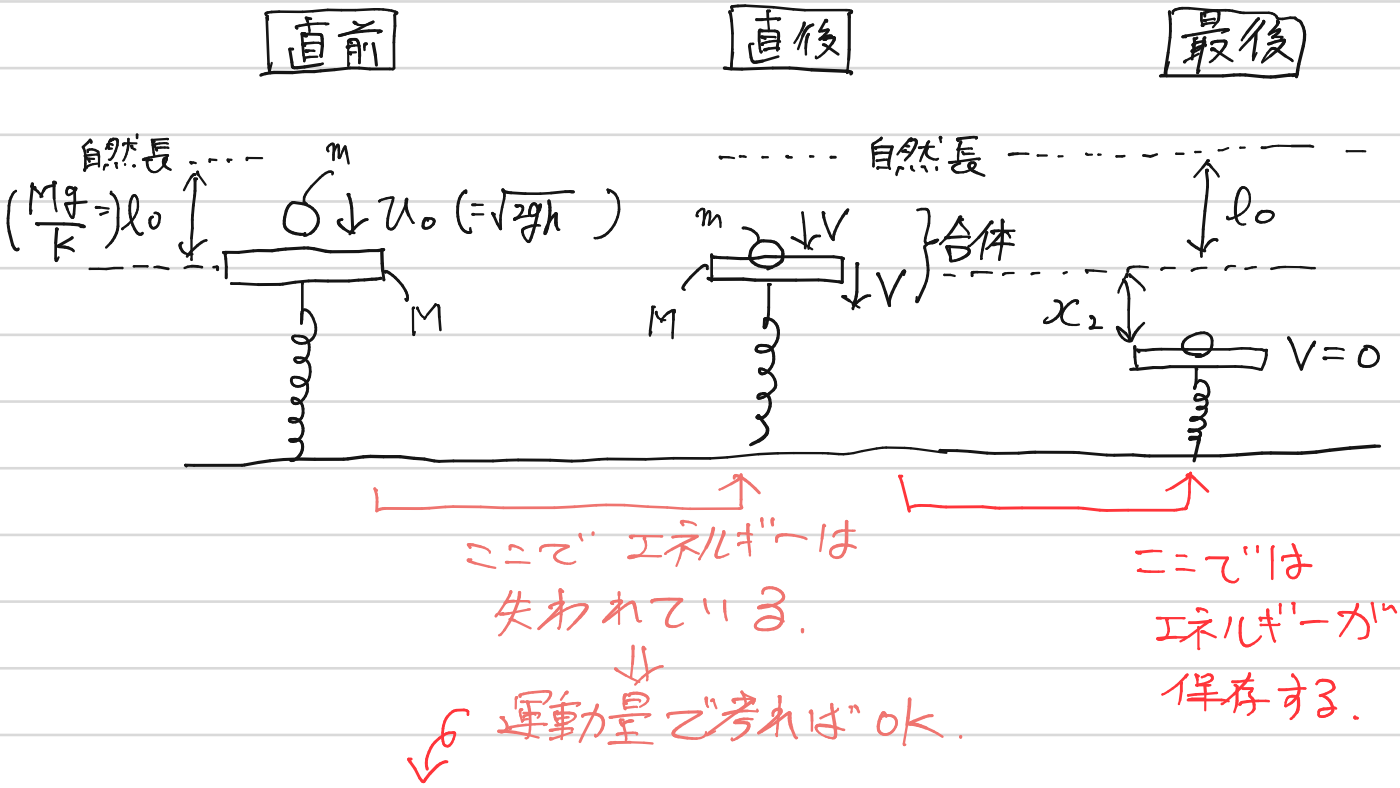
$$\therefore x_1 = V_1\sqrt{\frac{M}{k}}$$

どの系がどのタイミングで保存則を成立させるか、落ち着いて見極める。直感で考えない。

83 続き

(5) $e=0$ → 合体するということ.

↳ エネルギーは損失する.



$$mv_0 = (m+M)V$$

$$V = \frac{m}{m+M}v_0 = \frac{m}{m+M}\sqrt{2gh}$$

(6) 直後 → 最後では エネルギーが保存している.

$$\frac{1}{2}(m+M)V^2 + \frac{1}{2}kl_0^2 + 0 = 0 + \frac{1}{2}k(l_0+x_2)^2 - (m+M)gx_2$$

$l_0 = \frac{Mg}{k}$ を代入して

$$\frac{1}{2}(m+M)V^2 + \frac{1}{2}k\left(\frac{Mg}{k}\right)^2 + 0 = 0 + \frac{1}{2}k\left(\frac{Mg}{k}+x_2\right)^2 - (m+M)gx_2$$

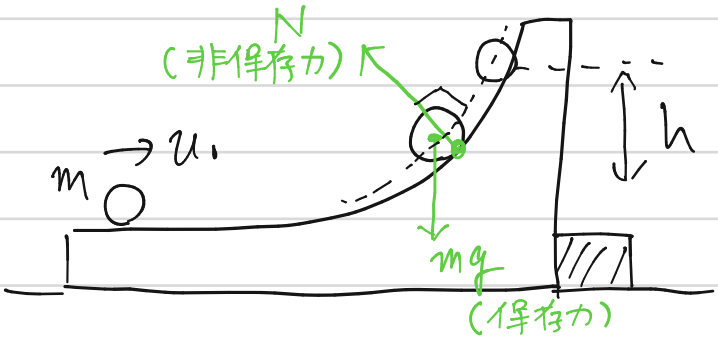
(x_2について解くのは結構大変なので省略されているのだと思います.)

$\boxed{84}$ 相互作用が常にある

⇒ 系全体で見ることを意識する.

(1) 台をとめてる

→ 台は地球の一部 → 球のみに注目でok.



Nが軌道と90°なので仕事をしない.

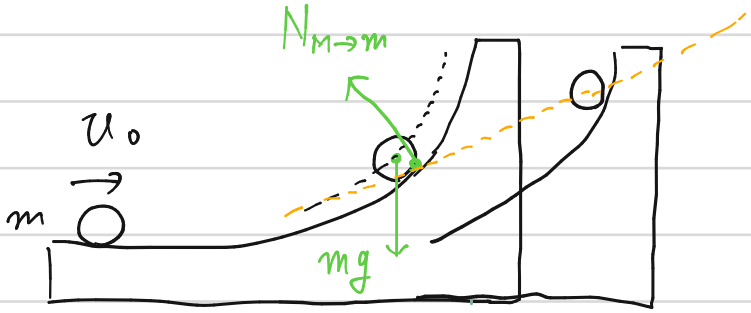
⇒ 非保存力の仕事が0 ⇒ 力学エネ保存

$$\frac{1}{2}mv_0^2 = mgh$$

$$\therefore\ h = \frac{v_0^2}{2g}$$

(2) 条件を整理してみる

① 単体で考えてみる.



進行方向は斜面よりゆるやか.

⇓

$N_{M\to m}$ は m に負の仕事をする.

(エネ保存は不成立)

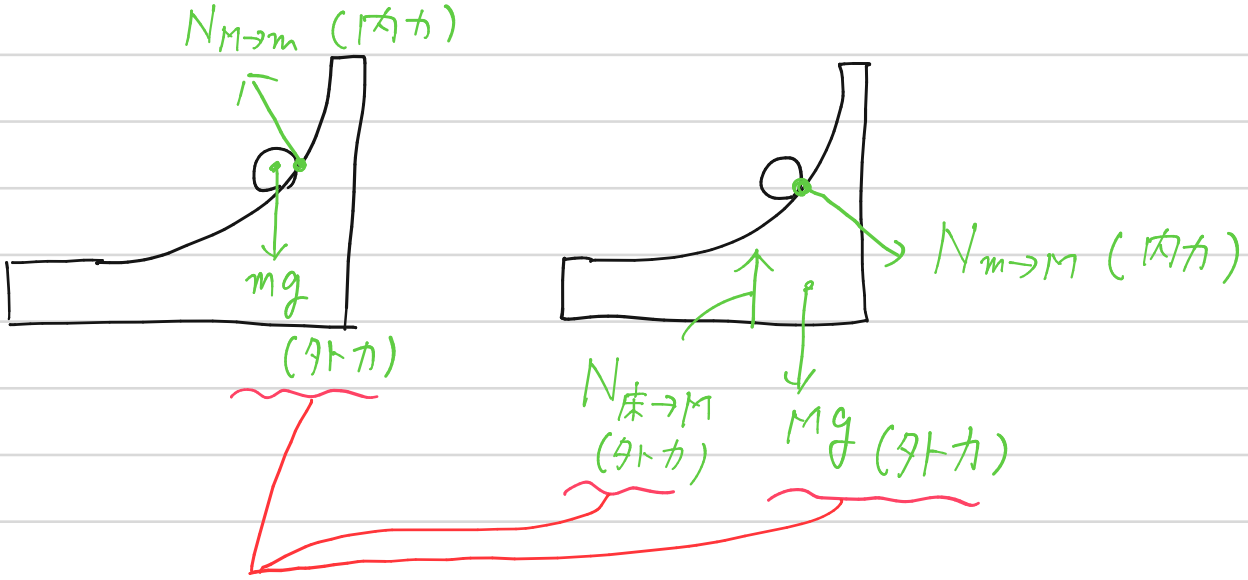
単体で考えるのはきびしいので.

球と台を1つの系として. 系全体で考える

84 (2) 続き

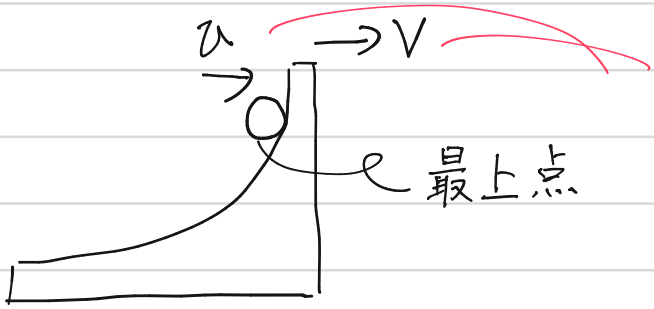
② 系全体のエネ
⇒ 摩擦熱、衝突熱がなければ成立
⇒ 成立.

③ 系全体の運動量 ⇒外力がなければ成立



外力は全て鉛直方向
⇒ 水平成分は成立.
鉛直成分は不成立.

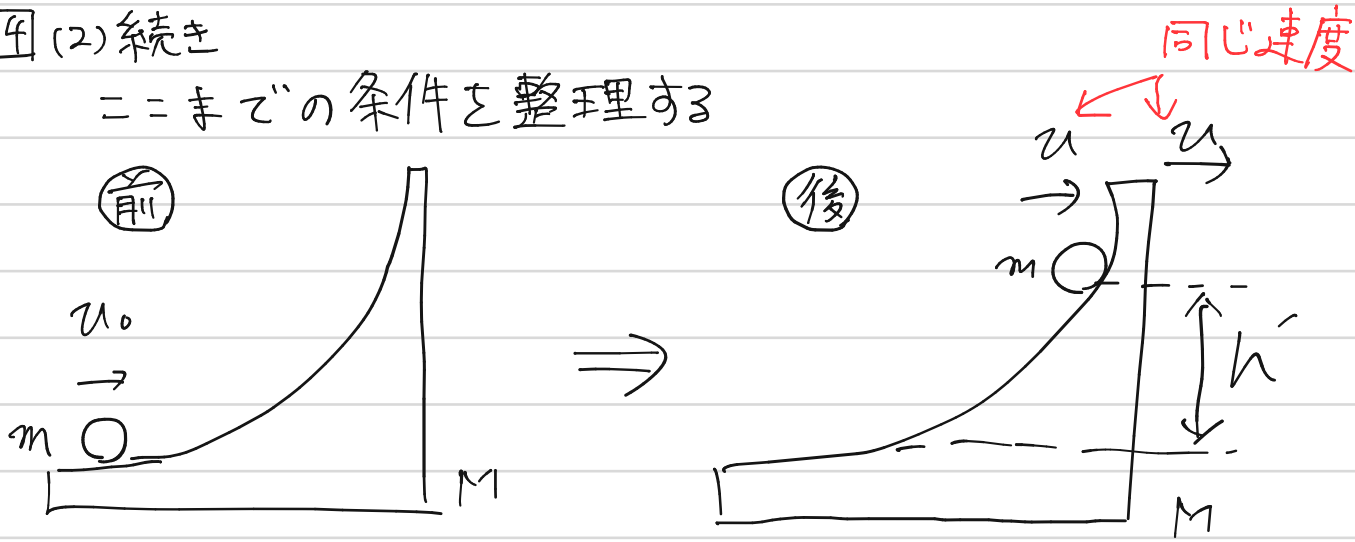
④ 束縛条件から立式する



面から離れないなら、
⇒ u=V

$\boxed{84}$ (2) 続き

ここまでの条件を整理する



水平の運動量保存より

$$mv_0 = mv + Mv$$

$$\therefore\ v = \frac{m}{m+M} v_0$$

(3) 系全体のエネルギー保存より

$$\frac{1}{2}mv_0^2 = \frac{1}{2}mv^2 + mgh' + \frac{1}{2}Mv^2$$

$$\Rightarrow mgh' = \frac{1}{2}mv_0^2 - \frac{1}{2}(m+M)v^2$$

vを代入して

$$mgh' = \frac{1}{2}mv_0^2 - \frac{1}{2}(m+M)\left(\frac{m}{m+M}v_0\right)^2$$

$$mgh' = \frac{1}{2}mv_0^2 - \frac{1}{2}\frac{m^2}{m+M}v_0^2$$

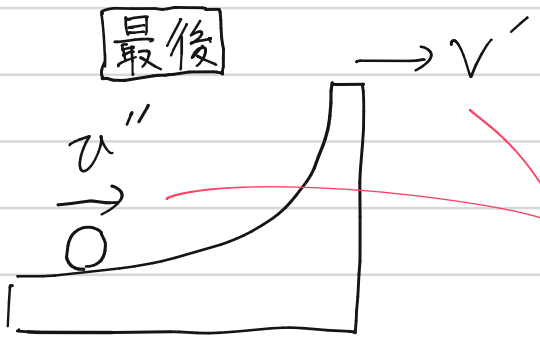
$$mgh' = \frac{1}{2}\left(m - \frac{m^2}{m+M}\right)v_0^2$$

$$mgh' = \frac{1}{2}\frac{mM}{m+M}v_0^2$$

$$h' = \frac{Mv_0^2}{2(m+M)g}$$

$\boxed{84}$ 続き

(4)



・正に設定

・束縛条件はないので $v'' \neq V'$

水平の運動量保存

前 = 最後

$$mv_0 = mv'' + MV' \quad \cdots ①$$

系全体の力学エネ保存

$$\frac{1}{2}mv_0^2 = \frac{1}{2}mv''^2 + \frac{1}{2}MV'^2 \quad \cdots ②$$

① を変形

$$MV'^2 = mV'(v_0 - v'') \quad \cdots ①'$$

② を変形

$$MV'^2 = m(v_0^2 - v''^2)$$

$$MV'^2 = m(v_0 + v'')(v_0 - v'') \quad \cdots ②'$$

①′ を ②′ に代入して

$$mV'(v_0 - v'') = m(v_0 + v'')(v_0 - v'')$$

$$V' = v_0 + v'' \quad \cdots ③$$

① に ③ を代入して

$$mv_0 = mv'' + M(v_0 + v'')$$

$$(m+M)v'' = (m-M)v_0$$

$$\therefore v'' = \frac{m-M}{m+M}v_0$$

(Mが大きいと左向きの速度)

$\boxed{84}$ (4) 続き

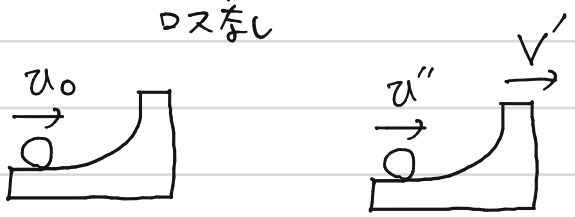
③ に代入して

$$V' = v_0 + \frac{m-M}{m+M} v_0$$

$$\therefore V' = \frac{2m}{m+M} v_0$$

※ 解答の『$e=1$と見なせる』について

$\boxed{\text{最初}} \xrightarrow[\text{エネルギーのロスなし}]{} \boxed{\text{最後}}$



時間をかけた衝突と見なしており、
エネルギーのロスが無いので $e=1$ の衝突
といえるのだ

$$e = \frac{|\text{遠ざかる}|}{|\text{近づく}|} \quad \text{より}$$

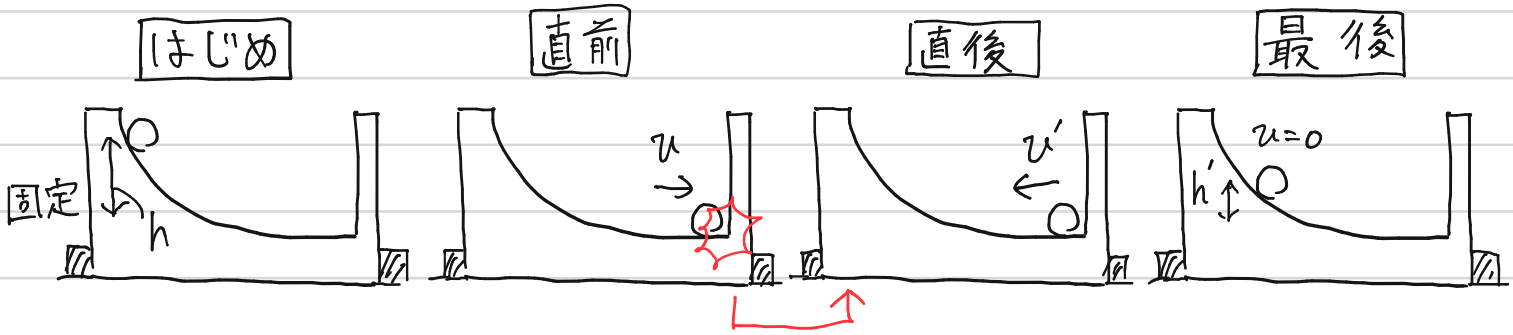
$$1 = \frac{V' - v''}{v_0}$$

$$\Rightarrow v_0 = V' - v''$$

$$\underline{V' = v_0 + v'' \cdots ③\text{式}}$$ が導ける

85 相互作用あり → 系全体に着目することを意識する

[A]



衝突熱でエネルギーロス

はじめ = 直前

直後 = 最後

直前 と 直後 は保存しない

(1) (はじめ) = (直前) の エネ保存

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

$$\therefore v = \sqrt{2gh}$$

(2) (直前) → (直後) での反発係数の式 $e = \frac{|\text{遠ざかる}|}{|\text{近づく}|}$ より

$$e = \frac{v'}{v} \Rightarrow v' = ev \Rightarrow v' = e\sqrt{2gh}$$

(直後) = (最後) のエネルギー保存より

$$\frac{1}{2}mv'^2 = mgh'$$

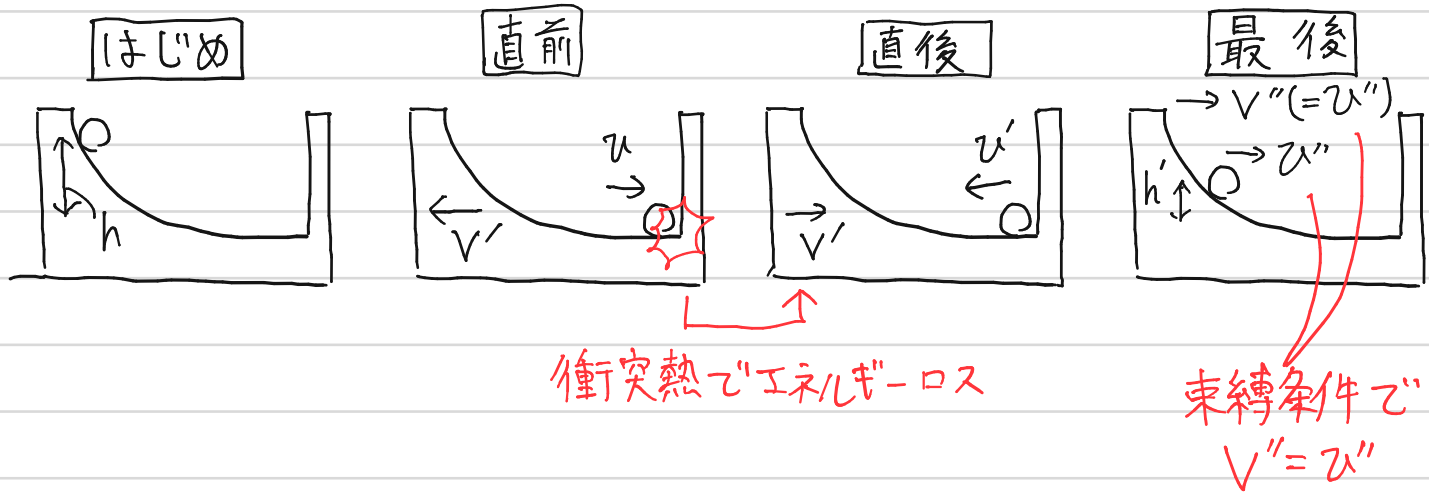
$$\Rightarrow \frac{1}{2}m\cdot(e\sqrt{2gh})^2 = mgh'$$

$$\Rightarrow \frac{1}{2}me^2\cdot 2gh = mgh'$$

$$\therefore h' = e^2h \Rightarrow e^2\text{倍}$$

85 続き

[B]



(3) 水平の運動量保存より

(はじめ) = (直前)

$$0 = mv - MV \Rightarrow mv = MV \cdots ①$$

系全体のエネルギー保存より

(はじめ) = (直前)

$$mgh = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}MV^2 \cdots ②$$

①, ②を連立して

$$v = \sqrt{\frac{2M}{M+m}gh} \qquad V = \frac{m}{M}\sqrt{\frac{2M}{M+m}gh}$$

※計算過程

$$mgh = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}M\left(\frac{m}{M}v\right)^2 \quad \left(\because V = \frac{m}{M}v\right)$$

$$\Rightarrow mgh = \frac{1}{2}\left(m + \frac{m^2}{M}\right)v^2$$

$$\cancel{m}gh = \frac{1}{2}\left(\frac{\cancel{m}M + m^{\cancel{2}}}{M}\right)v^2$$

$$v^2 = \frac{2M}{M+m}gh \qquad \therefore v = \sqrt{\frac{2M}{M+m}gh}$$

85 続き

(4) 水平の運動量保存より

(直前) = (直後)

$$mv - MV = -mv' + MV'$$

これで解くと大変なので他のところで保存則をたてる。

⇓

(はじめ) = (直後)

$$0 = -mv' + MV'$$

$$\Rightarrow V' = \frac{m}{M}v' \cdots ③$$

(はじめ) = (直前)

$$0 = mv - MV$$

$$\Rightarrow V = \frac{m}{M}v \cdots ③$$

反発係数の式より

$$e = \frac{v' + V'}{v + V}$$

$$\Rightarrow e(v+V) = v' + V' \cdots ④$$

④に③を代入して

$$e\left(v + \frac{m}{M}v\right) = v' + \frac{m}{M}v'$$

$$\Rightarrow ev\left(\cancel{1 + \frac{m}{M}}\right) = v'\left(\cancel{1 + \frac{m}{M}}\right)$$

$$\Rightarrow \underline{v' = ev} \quad \left(v' = e\sqrt{\frac{2M}{M+m}gh}\right)$$

同様に v, v' を消すように計算して

$$\underline{V' = eV} \quad \left(V' = e\frac{m}{M}\sqrt{\frac{2M}{M+m}gh}\right)$$

この形を要求されることもある。計算練習は必要!!

$\boxed{85}$ 続き

(5) エネルギーは衝突でのロスがあるので
(直後)→(最後)でたてるしかない

$$\frac{1}{2}mv'^2 + \frac{1}{2}MV'^2 = \frac{1}{2}mV''^2 + \frac{1}{2}MV''^2 + mgh' \quad \cdots ⑤$$

水平の運動量保存より
(はじめ) = (最後)

$$0 = mV'' + MV'' \Rightarrow \underline{V'' = 0}$$

⑤に代入して

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

(4)の $v' = ev$, $V' = eV$ を代入して

$$\frac{1}{2}m(ev)^2 + \frac{1}{2}M(eV)^2 = mgh'$$

$$\Rightarrow e^2\left(\frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}MV^2\right) = mgh'$$

$\boxed{\text{はじめ}}$ = $\boxed{\text{直前}}$ のエネ保存より

$$mgh = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}mV^2$$

なので、代入して

$$e^2 \cdot mgh = mgh'$$

$$\therefore h' = \underline{e^2 h}$$

85 続き

(6) ・運動量はキョリの議論は苦手
・エネルギーは、鉛直方向の距離や、ばねの長さに関しては得意だが、曲面のキョリや水平距離は苦手

という感じなので、(6)のような水平距離はどちらでも考えづらいのだ。

そこで、『重心の速度』を用いると、出せることがある。

重心の公式

$$x_G = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2}{m_1 + m_2}$$

⇓

重心の速度

$$v_G = \frac{\Delta x_G}{\Delta t} = \frac{m_1 \frac{\Delta x_1}{\Delta t} + m_2 \frac{\Delta x_2}{\Delta t}}{m_1 + m_2} = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}$$

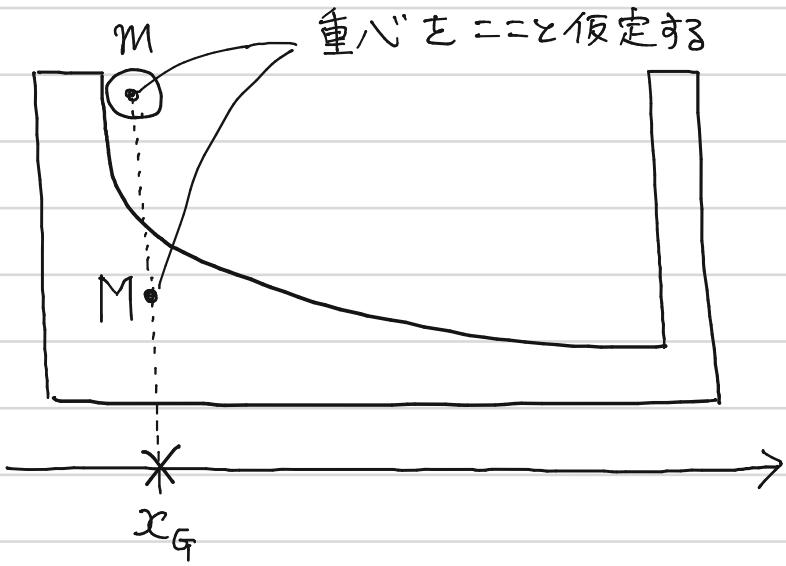
運動量の和が保存するなら
v_G = (一定) といえるのだ

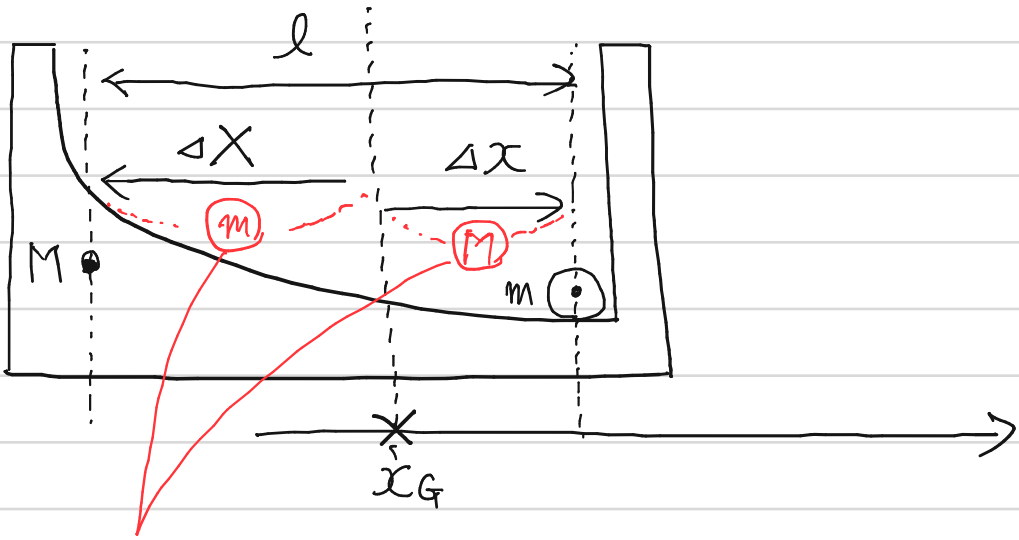
今回、はじめの運動量の和が0なので

$$v_G = 0$$

であり、重心の位置は変わらないといえるのである。

85 (6)続き





重心は質量の逆比で内分した点となる

この図より

$$l = \Delta X + \Delta x \Rightarrow \Delta x = l - \Delta X \quad \cdots ⑥$$

かつ

$$\Delta X : \Delta x = m : M$$

$$\Rightarrow m\Delta x = M\Delta X \quad \cdots ⑦$$

⑥を⑦に代入して

$$m(l - \Delta X) = M\Delta X$$

$$\Rightarrow ml - m\Delta X = M\Delta X$$

$$\therefore \Delta X = \frac{m}{m+M} l$$

$M \to \infty$ ならほぼうごかないといえる。

$\boxed{86}$ $$x_G = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2}{m_1 + m_2} \quad \cdots ①$$ （重心の公式）

(1)

(イ) 速度は位置の微分という関係 $v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$ があるので

$$v_G = \frac{dx_G}{dt}$$

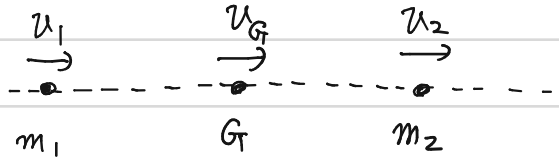
$$= \frac{m_1 \frac{dx_1}{dt} + m_2 \frac{dx_2}{dt}}{m_1 + m_2} = \underline{\frac{m v_1 + m v_2}{m_1 + m_2}} \quad \cdots ②$$ // (イ)

(ロ) 運動量が保存するとき，$(m v_1 + m v_2)$ が保存するので

$$v_G = \frac{m v_1 + m v_2}{m_1 + m_2}$$

も保存する。（<u>一定になる</u>）//

(2)



重心から見た相対速度は

$$v_{G\to 1} = u_1 = \overset{(みられる)-(みる)}{v_1 - v_G}$$

$$v_{G\to 2} = u_2 = v_2 - v_G$$

ここで重心に対する運動量の和は，

$$m_1 u_1 + m_2 u_2 = m_1 (v_1 - v_G) + m_2 (v_2 - v_G)$$

$$= m_1 v_1 + m_2 v_2 - (m_1 + m_2) v_G$$

$$\boxed{② より\ v_G = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}}$$

$$= m_1 v_1 + m_2 v_2 - (m_1 + m_2) \frac{m v_1 + m v_2}{m_1 + m_2}$$

$$= \underline{0}$$ //

$\boxed{86}$ 続き

(3) $v_1 = u_1 + v_G$, $v_2 = u_2 + v_G$ を用いて.

運動エネルギーの和を求めると、

$$\frac{1}{2}m_1 v_1^2 + \frac{1}{2}m_2 v_2^2$$

$$= \frac{1}{2}m_1 (u_1 + v_G)^2 + \frac{1}{2}m_2 (u_2 + v_G)^2$$

$$= \frac{1}{2}m_1 (u_1^2 + 2u_1 v_G + v_G^2) + \frac{1}{2}m_2 (u_2^2 + 2u_2 v_G + v_G^2)$$

$$= \frac{1}{2}(m_1 + m_2) v_G^2 + \underbrace{(m_1 u_1 + m_2 u_2)}_{\boxed{\text{(2)の答えより } m_1 u_1 + m_2 u_2 = 0}} v_G + \left(\frac{1}{2}m_1 u_1^2 + \frac{1}{2}m_2 u_2^2\right)$$

$$= \underbrace{\frac{1}{2}(m_1 + m_2) v_G^2}_{\#(=)} + \left(\frac{1}{2}m_1 u_1^2 + \frac{1}{2}m_2 u_2^2\right) \quad \cdots ③$$

⇓ 重心の運動エネ $\underset{\#(木)}{}$ ＋ ⇓ 重心に対する相対運動の運動エネ

※ 運動量は

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = (m_1 + m_2) v_G$$

が成り立つけれど、

エネルギーは

$$\frac{1}{2}m_1 v_1^2 + \frac{1}{2}m_2 v_2^2 = \frac{1}{2}(m_1 + m_2) v_G^2$$

とならない、ということがポイントである。

(4) ③式：$\frac{1}{2}m_1 v_1^2 + \frac{1}{2}m_2 v_2^2 = \frac{1}{2}(m_1 + m_2) v_G^2 + \left(\frac{1}{2}m_1 u_1^2 + \frac{1}{2}m_2 u_2^2\right)$

$$\Rightarrow \frac{1}{2}m_1 u_1^2 + \frac{1}{2}m_2 u_2^2$$

$$= \frac{1}{2}m_1 v_1^2 + \frac{1}{2}m_2 v_2^2 - \frac{1}{2}(m_1 + m_2) v_G^2$$

$$= \frac{1}{2}m_1 v_1^2 + \frac{1}{2}m_2 v_2^2 - \frac{1}{2}(m_1 + m_2)\left(\frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}\right)^2$$

$\boxed{86}$ 続き

$$= \frac{m_1 v_1^2(m_1+m_2) + m_2 v_2^2(m_1+m_2) - (m_1 v_1 + m_2 v_2)^2}{2(m_1+m_2)}$$

$$= \frac{\cancel{m_1^2 v_1^2} + m_1 m_2 v_1^2 + m_1 m_2 v_2^2 + \cancel{m_2^2 v_2^2} - \cancel{(m_1 v_1)^2} - 2m_1 m_2 v_1 v_2 - \cancel{(m_2 v_2)^2}}{2(m_1+m_2)}$$

$$= \frac{1}{2} \cdot \frac{m_1 m_2}{m_1+m_2} \left(v_1^2 - 2v_1 v_2 + v_2^2 \right)$$

$$= \frac{1}{2} \cdot \frac{m_1 m_2}{m_1+m_2} (v_2 - v_1)^2 \quad //$$

※ $$\underbrace{\frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2}_{\text{運動エネルギーの和}} = \underbrace{\frac{1}{2}(m_1+m_2) v_G^2}_{\text{重心の運動エネ}} + \underbrace{\frac{1}{2} \cdot \frac{m_1 m_2}{m_1+m_2} (v_2 - v_1)^2}_{\text{換算質量を考えた、相対運動のエネルギー}}$$

という関係が見出だせる.