物理基礎編

第２章

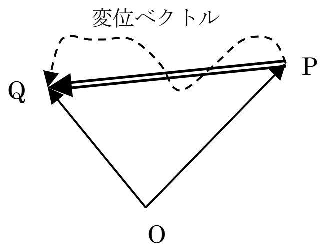
～　力学　～

【速度】

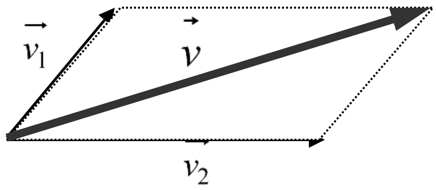
■変位と位置ベクトル■

基準点から注目する点まで引いたベクトルを位置ベクトルという。

物体が点Ｐから点Ｑまで移動したとする。このときの物体の位置の変化を変位という。



■速度の合成と分解■



〇速度の合成

速度$\vec{v_1}$と$\vec{v_2}$を合成すると，$\vec{v} = \vec{v_1} + \vec{v_2}$

〇速度の分解

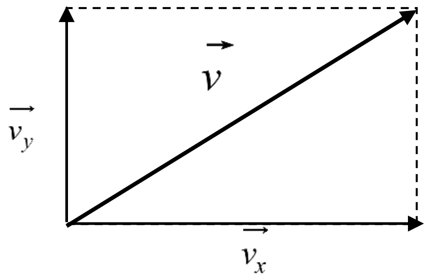
速度$\vec{v}$は，２つの速度$\vec{v_1}$，$\vec{v_2}$に分解することができる。速度の分解は何通りでも考えることができるが，一般的には，たがいに垂直な２方向に分解することが多い。

速度$\vec{v}$を，たがいに垂直なx軸，y軸方向の速度$\vec{v_x}$，$\vec{v_y}$に分解した場合を考える。

$\vec{v}$の大きさをv，$\vec{v}$がx軸の正の向きとなす角をθとすると，

$v_x = v\cos\theta$，$v_y = v\sin\theta$

で表される。



〇相対速度

Ａ，Ｂの２物体が運動しているとき，基準となる物体（観測者）Ａに対するＢの速度をＡに対するＢの相対速度という。

Ａから見たＢの速度

$\overrightarrow{v_{AB}} = \vec{v_B} - \vec{v_A}$

＜例題１＞

直線道路上を，2 台の自動車Ａ，Ｂが走っている。Ａの速さが 15m/s，Ｂの速さが 10m/s のとき，次の場合についてＡに対するＢの相対速度を求めよ。

（１）Ａ，Ｂが同じ向きに走る場合

（２）Ａ，Ｂが反対向きに走る場合

＜例題２＞

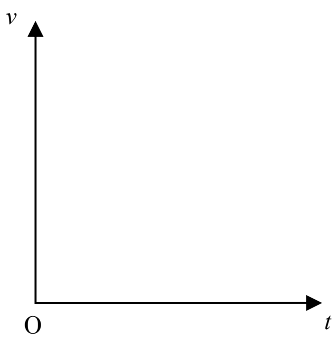
道路が新幹線の線路と斜めに立体交差をしている。道路を 80km/h で走る自動車の真下を，新幹線が 160km/h の速さで，自動車の進路と 60°の角度で通過していった。このとき，自動車内の人は新幹線の速度をどのように観測するか。

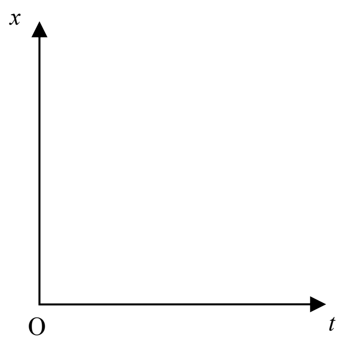
■等速直線運動■

一直線上を一定の速さで進む運動。

位置 x 〔m〕，経過時間 t 〔s〕，速度 v 〔m/s〕とする。

$$v = \frac{dx}{dt} \quad \Rightarrow \quad x = vt$$

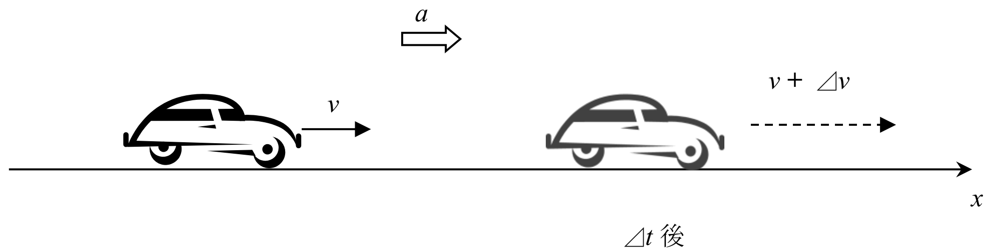




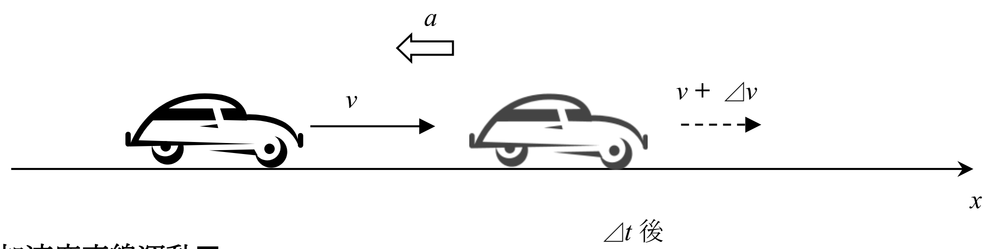
【加速度】

加速度とは，速度の変化率のこと。(ベクトル量)　つまり，$a = \dfrac{dv}{dt} = \dfrac{d^2x}{dt^2}$ 〔m/s²〕

・$a > 0$ のとき，$\varDelta v > 0$ である。

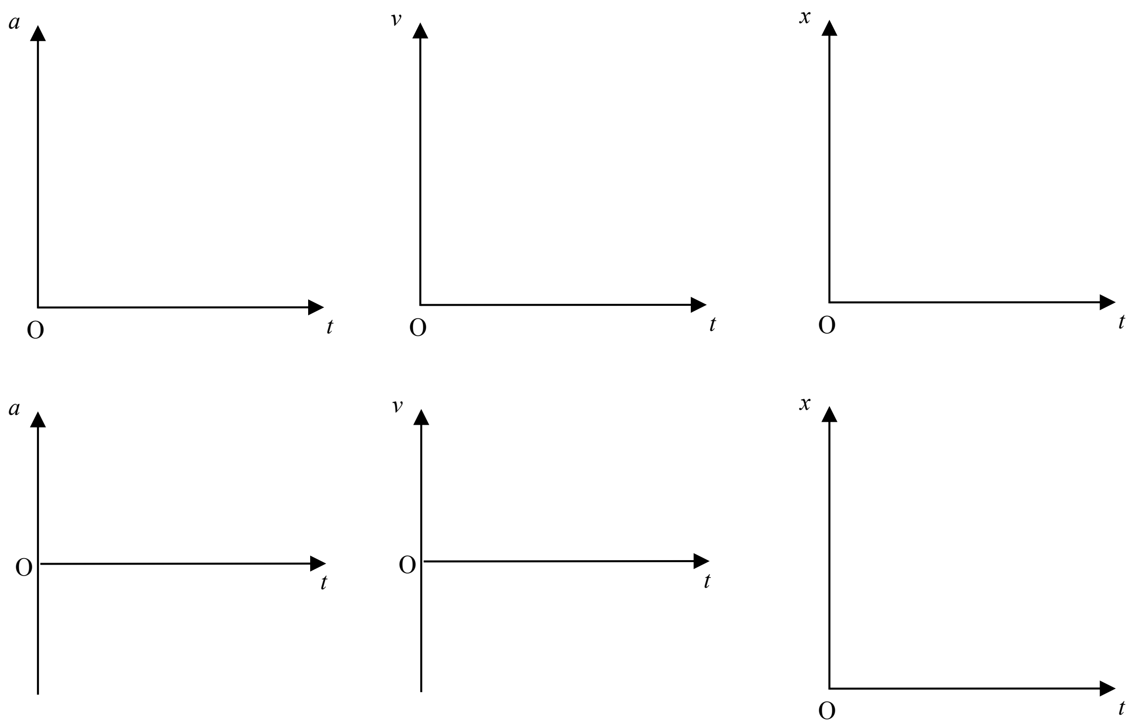


・$a < 0$ のとき，$\varDelta v < 0$ である。



■等加速度直線運動■

$$\begin{cases} v = at + v_0 \\ x = \dfrac{1}{2}at^2 + v_0 t \\ v^2 - {v_0}^2 = 2ax \end{cases}$$



※相対加速度：物体 A の加速度を $\overrightarrow{\alpha_A}$，物体 B の加速度を $\overrightarrow{\alpha_B}$ とすると，

A に対する B の相対加速度は $\overrightarrow{\alpha_{AB}} = \overrightarrow{\alpha_B} - \overrightarrow{\alpha_A}$

<例題>

一直線上を一定の加速度で進む物体が，点 A を速さ 8m/s で右向きに通過したのち，点 A から 6m 離れた点 B を速さ 4m/s で右向きに通過した。

（１）物体の加速度 a 〔m/s²〕を求めよ。

（２）物体が点 A から点 B まで移動するのに要する時間 t_0 〔s〕を求めよ。

（３）物体が点 A から最も右方の地点へ到達するまでに要する時間 t_1 〔s〕はいくらか。またその地点と点 A との距離はいくらか。

（４）物体が点 A を通過してからふたたびもどってくるまでに要する時間 t_2 〔s〕はいくらか。またそのときの物体の速度はいくらか。

【落体の運動】

重力加速度 g ≒9.8 [m/s^2]　（*cf.* 運動方程式）

※特に指定のない限り空気抵抗は無視する。

自由落下
鉛直投げ下げ・投げ上げ

等加速度直線運動

① 座標軸の設定。

② 等加速度直線運動の公式に当てはめる。

水平投射
斜方投射

鉛直成分:等加速度直線運動
水平成分:等速直線運動

① 座標軸の設定。

② 鉛直成分：等加速度直線運動の公式に当てはめる。
　水平成分：等速直線運動として考える。

③ 速度：分解により成分ごとに考える。（経路の曲線の接線方向）
　時間：共通

※よく利用するもの：最高点で速度 0，対称性

＜例題１＞（鉛直投げ上げ）

あるビルの屋上から，小球を鉛直上方に 29.4m/s の速さで投げ上げた。重力加速度の大きさを 9.80m/s² とする。

（１）小球が最高点に達するまでの時間 t_1 は何秒か。

（２）最高点の高さ h は屋上から何 m か。

（３）小球が屋上にもどるまでの時間 t_2 は何秒か。

（４）投げてから 7.00 秒後に小球が地上に落下するとき，ビルの高さを求めよ。

＜例題２＞（水平投射）

地上 58.8m の高さから小球を水平方向に初速度 19.6m/s で投げた。重力加速度の大きさを 9.80m/s² とする。

（１）小球が地面に当たるまでの時間 t を求めよ。

（２）投げた点から地面に当たる点までの水平距離 x を求めよ。

（３）小球が地面に当たるときの速度の大きさ V，地面となす角 θ を求めよ。

＜例題３＞（斜方投射）

　地上から水平より 30° 上向きに，初速度 39.2m/s で小球を投げ上げた。重力加速度の大きさを 9.80m/s² とする。

（１）小球が最高点に達する時間 t_1 を求めよ。

（２）小球の最高点の高さ h，および投げた点からの水平距離 x_1 を求めよ。

（３）再び地上にもどるまでの時間 t_2 と，水平到達距離 x_2 を求めよ。

＜例題４＞（2000 年　東京薬科大）

　等速度 2.3m/s で鉛直に上昇する気球から小石を投げ上げた。気球から見た小石の初速度は，水平に対し 30° 上向きに 15m/s であった。このとき，気球は地面より 73.5m の高さにあった。次の各問いに有効数字 2 桁で答えよ。ただし，小石にはたらく空気抵抗は無視するものとし，重力加速度の大きさは 9.8m/s² とする。

（１）小石が最高点に到達するのは，小石を投げてから何秒後か。

（２）気球から小石の最高点までの水平距離は何 m か。

（３）地面から小石の最高点までの高さは何 m か。

（４）気球から小石の落下点までの水平距離は何 m か。

（５）小石が地面に衝突する直前の速さは何 m/s か。

【１】橋の上から，小石を真下に向かって 4.9m/s の速さで投げ下ろしたところ，
3.0 秒後に水面に当たった。

（１）投げた点から水面までの距離はいくらか。

（２）小石が水面に当たるときの速さはいくらか。

（３）投げる速さを 4 倍にすると，水面に当たるまでの時間はいくらになるか。

【２】高さ 29.4m のビルの屋上から鉛直上向きに 4.9m/s の初速度で物体を投げ上げた。

（１）物体が達する最高点の高さは，地面からいくらか。

（２）地面に達するまでの時間はいくらか。

（３）地面に達する直前の物体の速度はいくらか。

【３】一定の速度 4.4m/s で鉛直に上昇中の気球から，鉛直上方に小石を投げ上げたところ，4.0 秒後に気球とすれちがった。ただし，小石を投げ上げても気球の速度は変わらないものとする。

（１）小石を投げ上げたときの小石の初速度は，地上から見ていくらか。

（２）すれちがうときに，気球に乗っている人から見た小石の速度はいくらか。

（３）小石は気球とすれちがってから 2.0 秒後に地面に落下した。小石を投げ上げたときの気球の高さは，地上からいくらか。

【４】ビルの屋上からボールを水平方向に 25m/s の速度で投げたら，地面に対して 45°の角度で衝突した。

（１）地面に衝突する直前の鉛直成分はいくらか。

（２）ボールが地面に衝突するまでの時間はいくらか。

（３）ビルの真下から衝突地点までの水平距離はいくらか。

【５】地上から水平より斜め上方 30°の向きに，初速度 58.8m/s でボールを投げだした。
有効数字 2 桁で答えよ。

（１）初速度の水平成分と鉛直成分はそれぞれいくらか。

（２）投げてから 2.0 秒後のボールの位置はどこか。また，そのときの速度の水平成分と鉛直成分はそれぞれいくらか。

（３）ボールが最高点に達するまでの時間はいくらか。また，その高さはいくらか。

（４）ボールが地面に達するまでの時間はいくらか。また，地面に達する直前の速さはいくらか。

■発展問題■

【１】（芝浦工大）

＜モンキーハンティング＞

次の空欄(ア)，(イ)，(ウ)，(エ)，(オ)を正しく埋めよ。

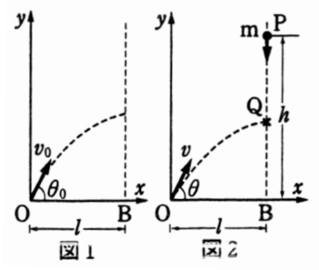


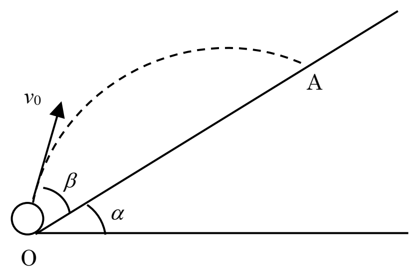
図１のように，水平な地表上の点Ｏを原点にとり，鉛直面内にx軸，y軸をとる。いま，Ｏから小物体Ｍを初速v_0，傾角θ_0でxy平面内に投げ上げた。ＭがＯから距離lだけ離れた点Ｂの真上を通過するとき，Ｍの速度の向きはx軸に平行であった。このことからv_0の大きさは重力加速度の大きさをgとすると$\boxed{\text{ア}}$と表せる。次に，図２のように，ＯからＭを初速v，傾角θでxy面内に投げ上げると同時に，点Ｂの真上の高さhの点Ｐから小物体ｍを自由落下させた。投げ上げた時刻を０とすると，時刻t（２物体が衝突する前の時刻）におけるＭとｍの間の距離は$\boxed{\text{イ}}$である。その後，ＭとｍはＢとＰを結ぶ線上の点Ｑで衝突した。このことからhは$\boxed{\text{ウ}}$と表せる。この衝突が，Ｍが描く軌道の最高点h_0で起きたとすると，h_0はhを用いて$h_0 = \boxed{\text{エ}}$，vはg，h，lを用いて$v = \boxed{\text{オ}}$と表せる。

【２】

右図のように，傾角αの斜面上の点Ｏから斜面に対して角度βをなす方向に初速度 v_0 で小球を投げたところ，点Ａに落下した。

（１）点Ａに落下するまでの時間を求めよ。

（２）点Ｏと点Ａの距離を求めよ。



■練習問題■

【１】地上より高さ 78.4m の所から，小球を自由落下させた。
（１）落下し始めてから 2.0 秒後の小球の地上からの高さはいくらか。
（２）40m 落下したときの小球の速さはいくらか。
（３）地上に達するまでの時間はいくらか。また，そのときの速さはいくらか。

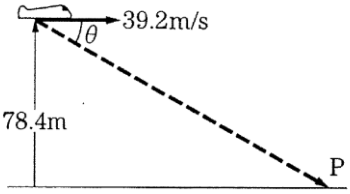
【２】小球 A を自由落下させて 1.0 秒後に小球 B を投げ下ろしたところ，B を投げてから 2.0 秒後に A に追いついた。
（１）B は A に追いつくまでに何 m 落下したか。
（２）そのときの A の速さはいくらか。
（３）投げ下ろした B の初速度の大きさはいくらか。

【３】高さ 120m の所から物体 A を静かに落とすと同時に，その真下の地面から 30m/s の初速度で物体 B を真上に投げ上げた。
（１）A と B はいつ，どこで出会うか。
（２）A と B が出会うときの B の速度はいくらか。

【４】高さ 78.4m のビルの屋上から，水平方向に 39.2m/s の速度でボールを投げた。有効数字 2 桁で答えよ。
（１）ボールが地面に達するまでの時間はいくらか。
（２）ビルの真下から落下地点までの水平距離はいくらか。
（３）地面に達する直前のボールの速さはいくらか。

【５】鉛直な壁面から水平に 20m 離れた地点から，小球を投げたところ，高さ 10m の壁面上の点に垂直に当たった。小球を投げてから壁面に当たるまでの時間と，投げ出したときの初速度の大きさを求めよ。

【６】地上 78.4m の高さを 39.2m/s の速度で水平飛行している飛行機から荷物を静かに落とし，地上の目標 P に命中させたい。有効数字 2 桁で答えよ。



（１）飛行機から見て，P がどの方向に見えるときに落とせばよいか。図の角θ の tan の値を求めよ。
（２）飛行機から見ると，荷物の運動はどんな運動に見えるか。
（３）荷物が P 点に落ちたときの速さはいくらか。

【７】高さ 14.7m のビルの屋上から，斜め上方にボールを打ち上げたところ，ボールは地面より最高の高さ 19.6m まで上がり，水平方向には 29.4m の所まで飛んだ。
有効数字 2 桁で答えよ。

（１）ボールの初速度の鉛直成分はいくらか。

（２）ボールが飛んでいた時間はいくらか。

（３）ボールの初速度の水平成分はいくらか。

【いろいろな力とつりあい】

■力の表し方■

○力とは　　：物体に作用してその運動状態や形を変える原因となる働きのこと

○力の三要素：大きさ，向き，作用点（ベクトル量）

○力の図示　：ベクトル

矢印の長さ：大きさ

矢印の向き：力の向き

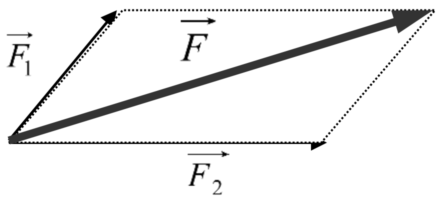
矢印の始点：作用点

矢印を含む直線：作用線

○力の単位　：ニュートン(N)

■力の合成・分解■

○力の合成



力 $\vec{F_1}$ と $\vec{F_2}$ を合成すると，$\vec{F} = \vec{F_1} + \vec{F_2}$

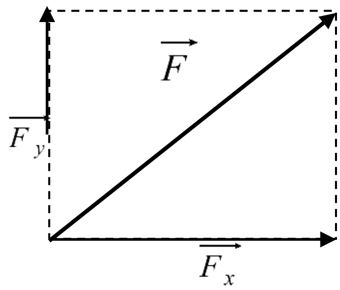
○力の分解

力 $\vec{F}$ を，たがいに垂直な x 軸，y 軸方向の力 $\vec{F_x}$，$\vec{F_y}$ に分解した場合を考える。

$\vec{F}$ の大きさを F，$\vec{F}$ が x 軸の正の向きとなす角を θ とすると，

$F_x = F\cos\theta$，$F_y = F\sin\theta$

で表される。



■力のつり合い■

つりあいの状態：物体が静止または等速直線運動

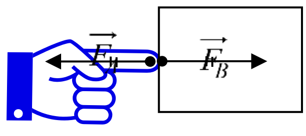
⇒　物体にはたらく力の合力が 0 となっている。

①　**１つの物体**に着目

②　すべての力を x 成分，y 成分に分解する。

③　成分ごとに力の合成（ベクトルの和）

■作用反作用の法則■

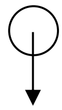


A が B に力 $\vec{F_B}$（作用）をはたらかせると，反対に B は A に

同一作用線上で大きさが等しく逆向きの力 $\vec{F_A}$（反作用）を及ぼす。$\vec{F_A} = -\vec{F_B}$

物体間（接している面）に着目　※ただし，遠隔的にはたらく力を除く。

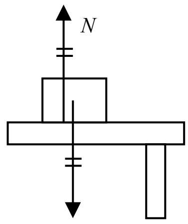
■いろいろな力■



○重力　　：地球が物体を引く力 $W = mg$[N]（cf.万有引力）
作用点…物体の重心

○静電気力：２つの帯電体間にはたらく力 $F = k\dfrac{q_1 q_2}{r^2}$ [N]

○磁気力　：２つの磁石の磁極間にはたらく力 $F = k\dfrac{m_1 m_2}{r^2}$ [N]



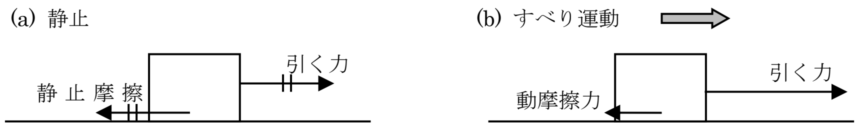
○垂直抗力：接触面が物体を垂直に押す力（力のつり合いで考える）

○摩擦力　：あらい面と接触しているとき，面に平行な運動を妨げる力

・静止摩擦力　－　物体と面が相対的に静止しているとき
大きさ：0 から最大静止摩擦力 μN まで
（μ [無名数]：静止摩擦係数…物体間の接触面の状態によって決まる定数）
向き　：力のつり合いで考える。

・動摩擦力　　－　物体と面が相対的にすべっているとき（＜最大静止摩擦力）
大きさ：$\mu' N$　（μ' [無名数]：動摩擦係数）
向き　：相対的な運動方向と逆向き

※摩擦のある面をあらい面，摩擦を無視できる面をなめらかな面という。



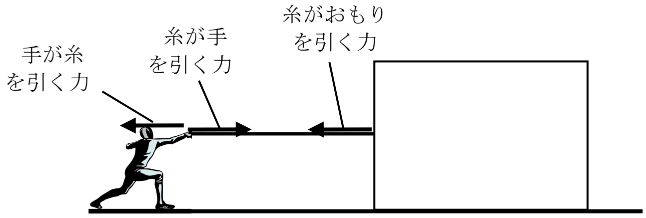
※摩擦角…面を傾けたとき，物体がすべりだす直前の傾角 θ について $\mu = \tan\theta$

○粘性抵抗：流体（液体や気体）から受ける抵抗力 $F = kv$
向き　：相対的な運動方向と逆向き

○張力　　：糸が物体を引く力

張力の向き…糸に沿って，物体から糸へ向かう。

※軽い糸…重さが無視できる

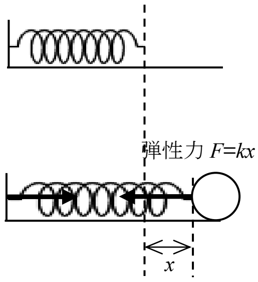


○弾性力　：ばねが自然長から伸びた（縮んだ）とき物体を引く（押す）力 $F=-kx$ [N]（k [N/m]：ばね定数）

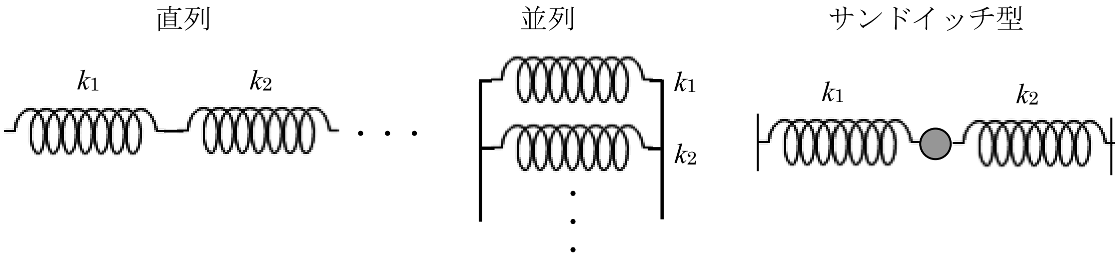
弾性力の向き…伸びているときは縮む向き，縮んでいるときは伸びる向き

ばね定数 k …ばねの太さに比例し，長さに反比例。

ばねの伸び x …自然長からの伸び（ばね全体の長さやつり合いの位置からの伸び縮みではない。）



※合成ばね定数について



$$\frac{1}{k'} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \cdots$$

$$k' = k_1 + k_2 + \cdots$$

$$k' = k_1 + k_2$$

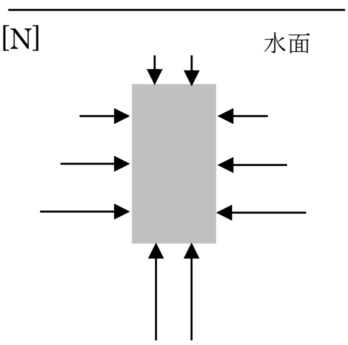
※ばねを半分に切ると？

○浮力　：液体・気体（流体）中の物体を押し上げる力 $F=\rho Vg$ [N]

（ρ [kg/m³]：流体の密度，V [m³]：物体の体積）

浮力の向き…鉛直の上向き

浮力の大きさ…物体が排除した流体の重さと同じ

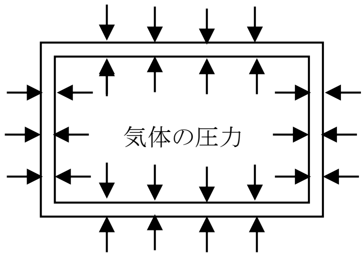


■圧力■

単位面積あたりにかかる力 $P=\frac{F}{S}$　（単位[N/m²]=[Pa]）

○気体の圧力：容器の壁に垂直で，大きさはどこでも等しい。

大気圧 1atm＝1.013×10⁵Pa=760mmHg



○水圧：水の入った容器の壁や底面は，水から押されている。

また，内部でも，水の小部分に着目すれば周囲から押されている。

水圧の向き…容器の壁面には垂直に，水中では，どの方向にも面（仮定した面）に垂直にはたらく。

水圧の大きさ…同じ深さでは，水圧はどの方向にも同じ大きさである。

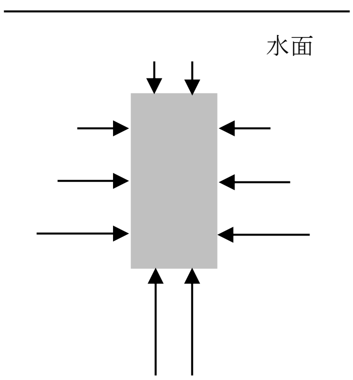
$p=\rho hg$[N/m²]（ρ [kg/m³]：水の密度，h[m]：水深）

○アルキメデスの原理

流体中の物体は，それが排除している流体の重さに等しい大きさの浮力を受ける。

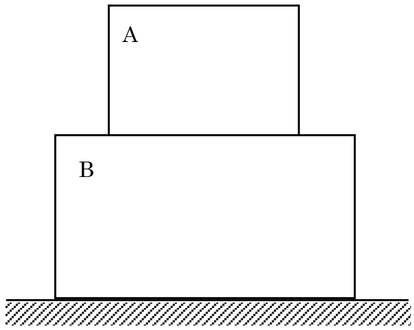
浮力 $F=\rho Vg$[N]

※ ρ [kg/m³]は流体の密度，V [m³]は物体の流体中にある部分の体積である。



＜例題１＞

図のように，地球から受ける重力の大きさがそれぞれW_AとW_Bの物体 A，B が水平面上に重ねて置かれている。



（１）物体 A，物体 B，水平面にはたらく力を矢印で示し，
それらの力を上から順に，F_1，F_2，F_3，・・・とせよ。

（２）（１）の力は，それぞれ何にはたらく力か。

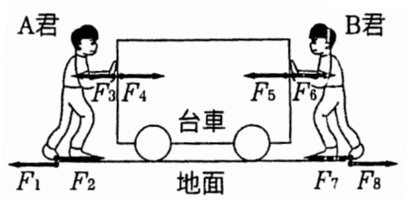
（３）（１）の力はそれぞれ何から受ける力か。

（４）（１）の力のうち，つり合いの関係にあるものを答えよ。
また，作用・反作用の関係にあるものを答えよ。

（５）（１）の力の大きさを，W_A，W_Bを用いて表せ。

＜例題２＞

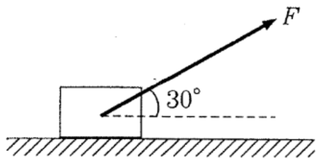
図の矢印は水平方向の力である。それぞれの力は，何にはたらく力か。また，台車が動かないとき，水平方向のつり合いの関係にある力と，作用・反作用の関係にある力を答えよ。さらに，人や台車が右向きに動き出すとき，力の大小を答えよ。



＜例題３＞

板の上に物体をのせ，板を少しずつ傾けていったところ，板の傾きの角が 30° を超えたとき，物体はすべり出した。物体と板との間の静止摩擦係数はいくらか。

＜例題４＞



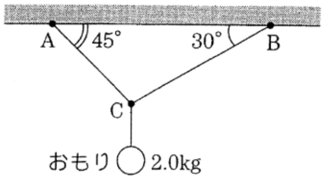
図のように，水平であらい面をもつ机の上に質量 1.0kg の物体が置いてある。これをひもで引き，水平から上方 30° の向きに力 F を加えた。机の面と物体との間の静止摩擦係数を 0.577($\fallingdotseq 1/\sqrt{3}$)とする。

（１） F= 4.0[N]の力を加えたところ，物体は動かなかった。物体にはたらく摩擦力の大きさはいくらか。

（２） Fの値をいくらより大きくしたとき，物体はすべり出すか。

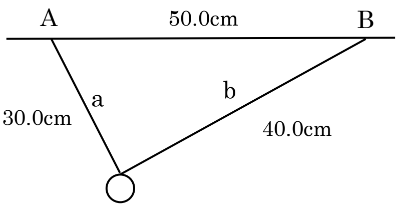
＜例題５＞

図のように，質量 2.0kg のおもりをひもでつり下げた。ひも AC と BC にはたらく力の大きさはそれぞれいくらか。ただし，重力加速度を $9.8\mathrm{m/s^2}$ とする。



【1】

天井の２点 A，B から長さ 30.0cm と 40.0cm の糸 a，b で質量 5.00kg のおもりをつり下げた。AB 間が 50.0cm のとき，糸 a，b の張力 T，S の大きさを求めよ。ただし，重力加速度の大きさを $9.80\mathrm{m/s^2}$ とする。



<例題６>

傾角 30° の斜面上に質量 $m = 20\,\mathrm{kg}$ の物体が静止している。

静止摩擦係数を $\mu = \dfrac{\sqrt{3}}{2}$，$g = 9.8\,\mathrm{m/s^2}$ とする。

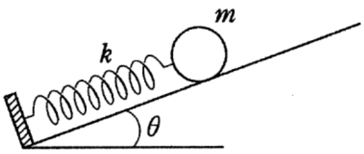
（１）50N の力を斜面に沿って上向きに加えている。静止摩擦力の大きさと向きを求めよ。

（２）斜面に沿って上向きに力を加えても物体が静止し続けるための，力の最大値 f_1 はいくらか。

（３）同様に，斜面に沿って下向きに加える場合の力の最大値 f_2 はいくらか。

（４）斜面に対し 30° 上向きに加えた場合の力の最大値 f_3 はいくらか。

【２】傾き θ のなめらかな斜面の下端にばね定数 k のばねの一端をつけ，他端に質量 m のおもりをつけて斜面上に置いたら，ばねが少し縮んで静止した。重力加速度の大きさを g とする。

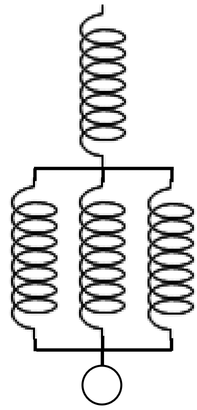


（１）垂直抗力 N の大きさを求めよ。

（２）ばねが縮んだ長さ x を求めよ。

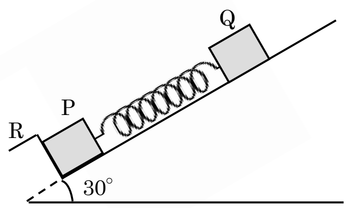
【３】

質量を無視できるばね定数k [N/m]のばね４本を図のように連結して合成ばねを作った。このばねに質量m [kg]の物体をつけるとばねののびはいくらか。



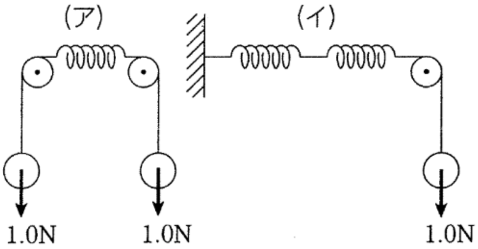
【４】

同じ質量mの物体P，Qが軽いばねで結ばれ，傾角30°のなめらかな斜面上に置かれている。斜面の下端には止め具Rがあり，Pは図のようにRに支えられて静止しており，ばねの長さはl_1であった。次に，Qを斜面に沿って静かに引き上げたところ，ばねの長さがl_2になったときにPがRから離れた。

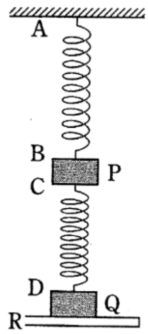


重力加速度の大きさをgとし，このばねの自然の長さl_0とばね定数kを求めよ。

【５】ばね定数 20N/m のばねがある。
右の図(ア)，(イ)の場合，それぞれのばねの伸びはいくらか。



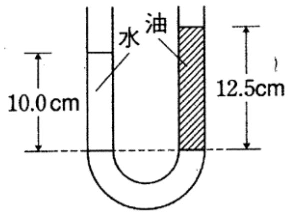
【６】自然の長さ 20cm の軽いつる巻きばね AB の上端を固定し，B に重さ 10N の物体 P を下げたら，AB の長さℓ_1は 24cm になった。次に，P の下に AB と等しいばね CD をつけ，その下に重さ 20N の物体 Q をつけて Q を板 R で支える。AB，CD がつねに１鉛直線上にあるように R を上下に動かして AB が次の長さになるようにしたとき，CD の長さℓ_2と，R が Q を押す力の大きさ F とを求めよ。



（１）18cm　　（２）20cm　　（３）28cm

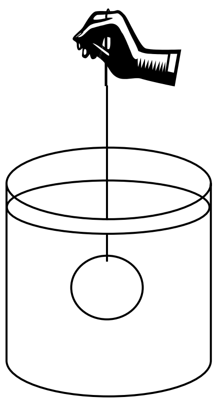
＜例題７＞

一様な太さのＵ字管に入れた水と油が図の位置でつりあっている。水と油の境界面から液面までの高さはそれぞれ 10.0cm，12.5cm である。水の密度を $1.0 \times 10^3 \mathrm{kg/m^3}$ として，油の密度を求めよ。



＜例題８＞

質量 0.40kg の鉄球に糸をつけてつるし，図のように，全体を水の中に沈めた。このとき，糸が鉄球を引く力の大きさを T [N]を求めよ。ただし，水，鉄の密度をそれぞれ 1.0×10^3 kg/m^3 ，8.0×10^3 kg/m^3 とする。



【７】質量 50g のビーカーに水 350mℓ を入れて台ばかりにのせる。密度 1.5g/cm^3，体積 100cm^3 の球をばねばかりにつるし，球を水中でビーカーに触れない位置で静止させたとき，ばねばかり，台ばかりは何 N をさすか。重力加速度の大きさを 9.8m/s^2，水の密度を 1.0g/cm^3 とする。

【８】（2006 年　大阪府立大）

底面積が S [m²]，高さが L [m]の中空の円柱容器に物質を入れて水に浮かべ，浮力の実験を行った。以下，円柱容器に入れた物質も含めて円柱とよぶ。円柱の運動は鉛直方向に限られるものとする。水の密度は深さによらず一定で，円柱の運動にともなう水からの抵抗，水面の変化および円柱容器自身の質量は無視する。ここで，水の密度を ρ_0 [kg/m³]，重力加速度の大きさを g [m/s²]として次の問いに答えよ。

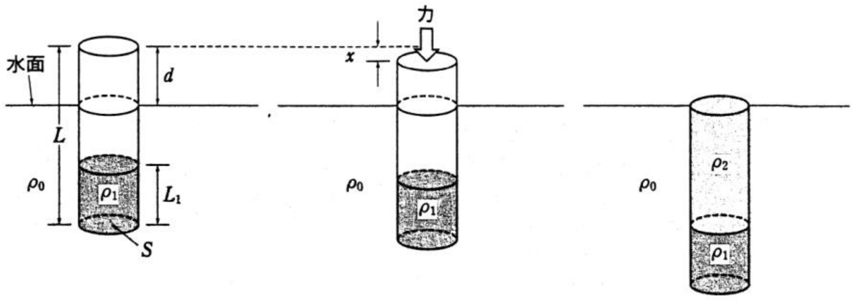


図1　図2　図3

（１）円柱の下部に密度が ρ_1 [kg/m³]（ただし，$\rho_1 > \rho_0$）の物質を高さ L_1 [m]だけ入れて水に浮かべると，図１のように長さ d [m]だけ水面上に出て静止した。このとき円柱が受ける重力の大きさは $\boxed{\quad ア \quad}$ [N]である。水中の物体は，その物体が押しのけた体積の水が受ける重力の大きさに等しい浮力を鉛直上向きに受けるので，円柱が受ける浮力の大きさは $\boxed{\quad イ \quad}$ [N]となる。

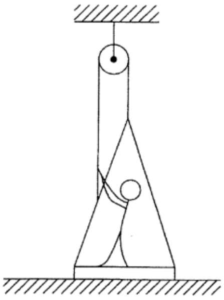
（２）（１）における長さ d [m]を求めよ。

（３）円柱が静止した状態で，図２に示すように上から力を加え，長さ x[m]だけ沈めた。ただし，x は d に比べて十分小さいとする。このとき円柱が受ける重力と浮力の合力の大きさ F [N]を求めよ。

（４）円柱の残りの空間を密度が ρ_2 [kg/m³]（ただし，$\rho_1 > \rho_2$）の物質で完全に満たして水に入れた。このとき，図 ３ のように円柱の上面が水面とちょうど同じ位置になって静止したとする。物質の密度 ρ_2 [kg/m³]を求めよ。

＜例題９＞

図のように，なめらかに動く定滑車に軽い綱を通し，綱の一端に 200N の重力を受ける台をつり下げる。綱の他端を台上に乗った 500N の重力を受ける人が引く。



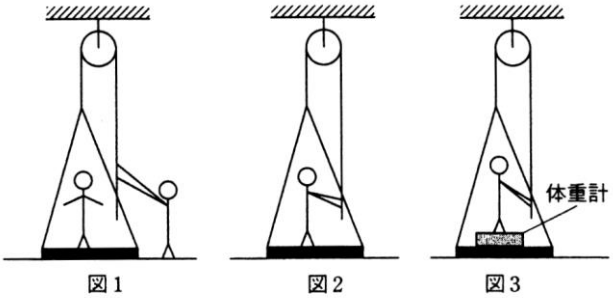
（１）人が綱を引く力の大きさが 100N のとき，人が台を押す力の大きさはいくらか。

（２）（１）のとき，台が地面を押す力の大きさはいくらか。

（３）台が地面から離れるためには，人が綱を引く力の大きさをいくらより大きくしなければならないか。

【９】(2009 年　神戸学院大)

図 1～3 のように，なめらかに回転する滑車が天井に取り付けられ，滑車にかけられたひもの一端には人を乗せた板がつながれている。板の質量は 10.0kg，人の質量は 50.0kg，重力加速度の大きさを 9.80m/s² とする。滑車，ひもの質量は無視できるものとする。



（１）図 1 に示すように，人を乗せた板をつり下げたひもの他端を引き，板を床から浮かせるためには，少なくとも何 N の力が必要か。

（２）図 2 に示すように，板上の人が自分でひもを引き，板を床から浮かすことはできるか。できるのであれば，少なくとも何 N より大きな力で引く必要があるか。

（３）図 3 に示すように，板上に質量 2.00kg の体重計を置き，その上に人が乗った状態とする。自分でひもを静かに引いた場合，人を乗せた板を床から浮かすことができるか。できるのであれば，床から板が離れたときに体重計は何 kg をさしているか。

【いろいろな力と運動方程式】

■慣性の法則■

物体に外部から力がはたらかないとき，または，いくつかの力がはたらいてもそれらの力がつりあっているときは，止まっている物体はいつまでも静止を続け，動いている物体は等速直線運動を続ける。

■運動方程式■

$\vec{F} = m\vec{a}$　　・加速度があるところに力あり。

（$F = m\dfrac{d^2x}{dt^2}$）　・加速度の向きと，合成された力の向きは一致。

・物体１つずつに適用すること。（一体となった物体でも可）

運動方程式のたて方

①　各物体ごとに力の図示

②　運動の向きに合わせて座標軸と正の向きを決める

③　物体にはたらいている力を，加速度の方向とこれに垂直な方向とに分解

④　加速度の方向にはたらく力を，正負を考慮して，$F = ma$ に代入（垂直方向の確認）

○質量と重さの違い

質量[kg]…物質の量を表し，物体に固有のもので，どこにあっても値が変わらない。

重さ[N]or[kgw]…地球が物体を引く力（重力）の大きさで，場所によって値が異なる。

○ニュートンの運動の３法則　第一法則…慣性の法則

第二法則…運動の法則（運動方程式）

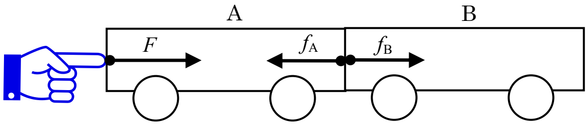
第三法則…作用反作用の法則

○　離れない条件：離れないとして求めた垂直抗力 $N \geqq 0$

たるまない条件：たるまないとして求めた糸が引く力 $T \geqq 0$

すべらない条件：すべらないとして求めた静止摩擦力 $F \leqq \mu N$

■物体系の運動■



物体系：ひとまとまりとした複数の物体

内力　：物体系内の物体どうしがたがいに及ぼしあっている力。

（右図Ａ，Ｂを物体系とすると f_A と f_B）

外力　：物体系以外のものから，物体系内の物体にはたらく力

（右図Ａ，Ｂを物体系とすると F）

○複数の物体が相互に力を及ぼしあう場合における物体の運動方程式の立て方

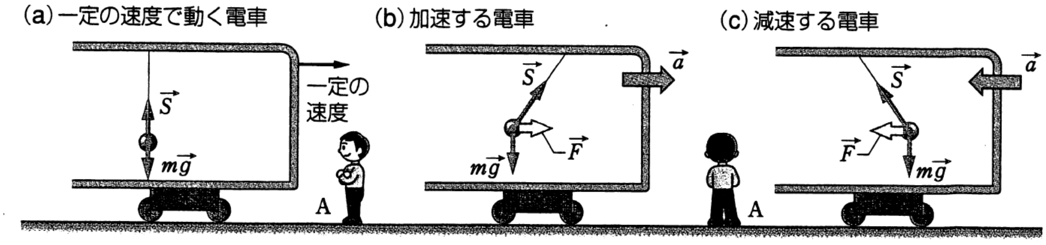
（ｉ）原則は，物体１つ１つについて，個別に運動方程式をたてる。

（ⅱ）一体となった運動の場合，物体系全体をまとめて１つの物体と考えることができる。その際，内力は打ち消しあい，考慮しない。

■慣性力■

（ｉ） 慣性系（静止・等速直線運動をする観測者から見る）

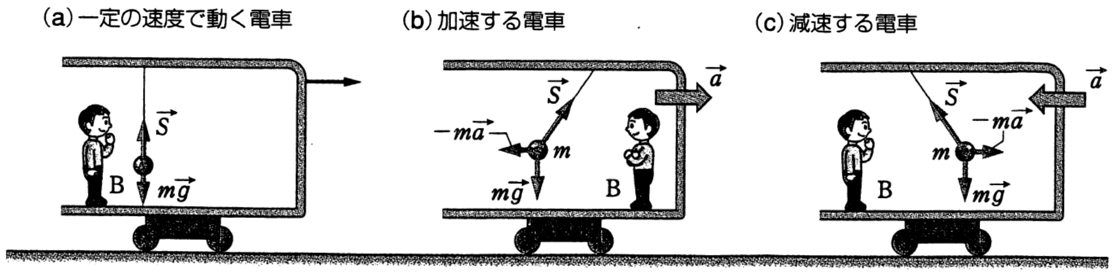
⇒運動方程式



（ⅱ） 非慣性系（加速度運動をする観測者から見る）

慣性力：加速度$\vec{a}$で運動する観測者から見た場合，物体（質量m）にはたらく$\vec{a}$と反対の向きのみかけの力$-m\vec{a}$

⇒慣性力を考慮した式をたてる。



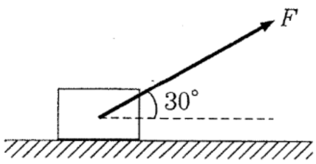
※みかけの重力加速度

(ⅱ)(b)の場合，大きさ$\sqrt{a^2+g^2}$の重力加速度がかかっているように見える。

・エレベーターの場合は？

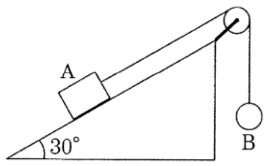
＜例題 1＞

図のように，水平であらい面をもつ机の上に質量 1.0kg の物体が置いてある。これをひもで引き，水平から上方 30° の向きに力 F= 8.0[N]を加えたときの物体の加速度の大きさはいくらか。机の面と物体との間の動摩擦係数を 0.50 とする。



＜例題２＞

傾角 30° のなめらかな斜面上に置いた質量 2.0kg の物体 A に糸の一端をとりつけ，滑車を通して糸の他端を質量 5.0kg の物体 B に結び付け，静かにはなす。このとき物体の加速度の大きさと糸の張力の大きさを求めよ。



【１】

あらい水平面上に質量m[kg]の物体を置き，糸をつけて水平に引く。物体と水平面の間の静止摩擦係数を2μ，動摩擦係数をμ，重力加速度の大きさをg [m/s²]，進行方向を正とする。

（１）糸の張力Tが何Ｎより大きいと物体はすべりだすか。

（２）張力Tが（１）の２倍のとき，物体がすべる加速度a_1を求めよ。

（３）（２）で，すべっている途中で糸をはなした。この後の物体の加速度a_2を求めよ。

（４）糸を水平から30°上方に張力mg [N]で引いたとき，物体は水平面から浮き上がることなくすべった。このときの物体の加速度a_3を求めよ。

【２】

あらい斜面上に質量m[kg]の物体を置き，面を徐々に傾けていくと，傾角θのときすべりだした。物体と斜面の間の静止摩擦係数をμ，動摩擦係数をμ'，重力加速度の大きさをg [m/s²]とする。ただし，（２），（３）は進行方向を正の向きとせよ。

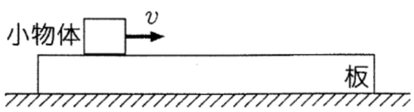
（１）θとμの関係を求めよ。

（２）この角度で，物体を斜面の下方へすべらせたときの加速度a_1を求めよ。

（３）この角度で，物体を斜面の上方へすべらせたときの加速度a_2を求めよ。

＜例題３＞

図のように，なめらかな床の上に置かれた質量 M の板の上に，質量 m の小物体が乗っている。小物体と板との間の動摩擦係数は μ である。時刻 $t=0$ において，小物体に右向きに初速度 v を与えると，板も同時に異なる速度で動きはじめた。



重力加速度の大きさを g とする。

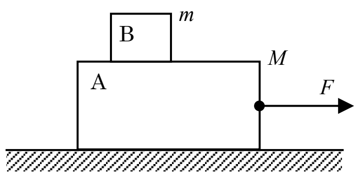
（１）小物体の加速度はいくらか。

（２）板の加速度はいくらか。

（３）小物体が板に対して静止する時刻を求めよ。

【３】

床の上に物体 A，B が乗っている。A と B の質量をそれぞれ M，m[kg]，重力加速度の大きさを g [m/s²] とする。A と床との間の摩擦は無視できる。A と B との間の静止摩擦係数を μ，動摩擦係数を μ' とする。



A を力 F [N]で水平に引く。

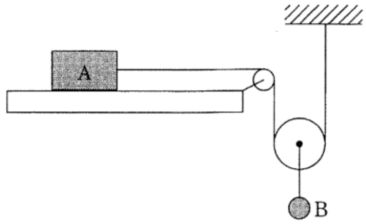
（１） F が小さいときは，静止摩擦のため A と B は一体になって運動する。
このときの A の加速度 a，B にはたらく摩擦力 f を求めよ。

（２） F がある大きさ F_0 を超えると，B は A の上ですべるようになる F_0 を求めよ。

（３）引く力 F が F_0 より大きいとき，B は A の上ですべりだす。このときの
A および B の加速度 a_A， a_B を求めよ。

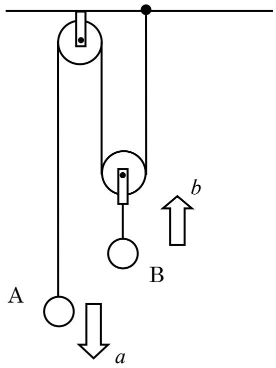
＜例題４＞

図のように，なめらかな水平面上に質量 M [kg]の物体 A を置き，A にとりつけた糸を滑車に通し，糸の他端を天井に固定する。動滑車に質量 m [kg]の物体 B をつるす。滑車の質量や摩擦は無視できるものとし，重力加速度の大きさを g [m/s^2]として，物体 B の加速度の大きさを求めよ。



【４】

図のように，定滑車と動滑車に糸をかけて質量 M，m [kg]のおもり A，B をつるし，A と B が同じ高さになるように支えてはなす。重力加速度の大きさを g [m/s^2]とし，糸と動滑車の質量，糸と滑車の間の摩擦を無視する。



（１）A の加速度の大きさを a [m/s^2]として，B の加速度の大きさ b を a を用いて表せ。

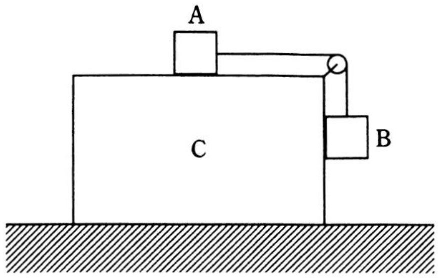
（２）糸が A を引く力を T [N]として，動滑車が B を引く力 S を T を用いて表せ。

（３）A が下降するとして，A の加速度の大きさ a を求めよ。

（４）動き始めてから AB 間の高さが h [m]になるまでの時間 t を求めよ。

【５】(2009 年　福岡大)

図のように，なめらかで水平な床の上に質量 M の直方体の物体 C が置かれている。C の上には質量 m_{A} の物体 A があり，A から軽い糸を水平に張って滑車を通し，その糸の先端に質量 m_{B} の物体 B を取り付け，鉛直につり下げる。B の側面は C と接しており，A と C，B と C の間には摩擦力ははたらかないものとする。重力加速度の大きさを g として，次の問いに答えよ。



[A]　A，B，C を静止させるために，A には水平方向左向きに，C には水平方向右向きに手で押して力を加える。

（１）A を押す力の大きさはいくらか。

（２）C を押す力の大きさはいくらか。

[B]　C が動かないように手で水平方向右向きに力を加え，A から静かに手をはなすと，A と B は運動を始めた。

（３）糸の張力の大きさを T，B の落下の加速度の大きさを a として，A の水平方向の運動方程式を書け。

（４）B の鉛直方向の運動方程式を書け。

（５）a を m_{A}，m_{B}，g を用いて表せ。

（６）T を m_{A}，m_{B}，g を用いて表せ。

（７）A と B が運動しているとき，手が C に加えている力の大きさを m_{A}，m_{B}，g を用いて表せ。

（８）C にはたらく床からの垂直抗力の大きさを，M，m_{A}，m_{B}，g を用いて表せ。

[C]　C を押す水平方向右向きの力を大きくすると，A，B，C は同じ加速度で等加速度運動をするようになった。

（９）加速度の大きさを m_{A}，m_{B}，g を用いて表せ。

＜例題５＞

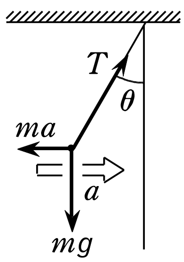
エレベーターの床に台ばかりを置いておもりをのせる。エレベーターが静止しているとき，目盛りは 49N を示した。重力加速度の大きさを 9.8m/s² とする。

（１）エレベーターが上向きに 1.2m/s² の加速度で動いているとき，はかりの針は何 N を示すか。

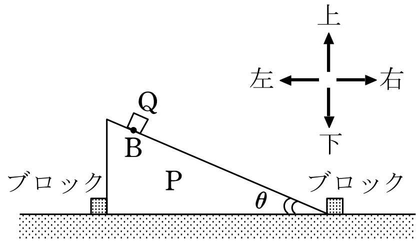
（２）はかりの針が 40N を示しているとき，エレベーターはどんな運動をしているか。

＜例題６＞

水平な一直線上を，一定の加速度 a（$a > 0$）で加速している電車がある。この電車の天井からつるしたおもりの糸が鉛直線となす角を θ として，$\tan\theta$ の値を求めよ。重力加速度の大きさを g とする。



【６】図のように，水平でなめらかな床に，質量M の三角形の台 P を置き，ブロックで両側を固定した。P は床と角度θ をなすなめらかな斜面をもつ。斜面上の点 B に質量m の小物体 Q を置き，静かにはなしたところ，Q は斜面をすべり落ちた。重力加速度の大きさをg として，次の問いに答えよ。



（１）Q が斜面をすべっているとき，Q の加速度の大きさはいくらか。

（２）点 B から斜面にそって距離dだけすべったときの Q の速さはいくらか。

次に，両側のブロックを取り除いて，すべり落ちた Q を再び点 B に置いた状態で，P と Q を保持した。

P と Q を同時に静かにはなしたところ，Q は斜面をすべり，P は加速度Aの等加速度運動をした。Q が P から受ける垂直抗力の大きさをN とする。

（３）加速度Aの向きは，図中の上下左右のいずれか。

（４）P の水平方向の運動方程式を記せ。

（５）Q の運動を，等加速度運動する P から見たとき，

(a)　Q にはたらく慣性力の向きは，図中の上下左右のいずれか。

(b)　Q にはたらく慣性力の大きさはいくらか。

(c)　斜面に垂直な方向についての Q の運動方程式を記せ。

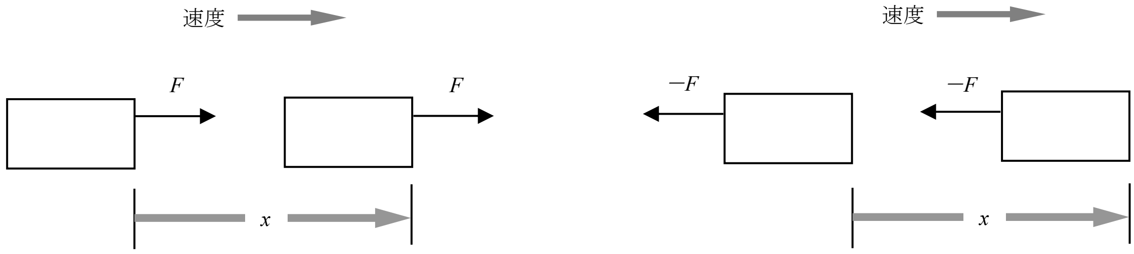
（６）前問（４）と（５）(c)で得られた式からA とNを求め，それぞれをM，m，g，θ で表せ。

【力学的エネルギーと仕事】

■仕事■

物体に力 F が働いて，加えている力の向き（**一直線上**）に物体が位置 x_1 から x_2 まで変位したとき，この力が物体にした仕事（スカラー量）

$$W = \int_{x_1}^{x_2} F dx = \overline{F}(x_2 - x_1)\ [\mathrm{J}]=[\mathrm{N}\cdot\mathrm{m}]$$



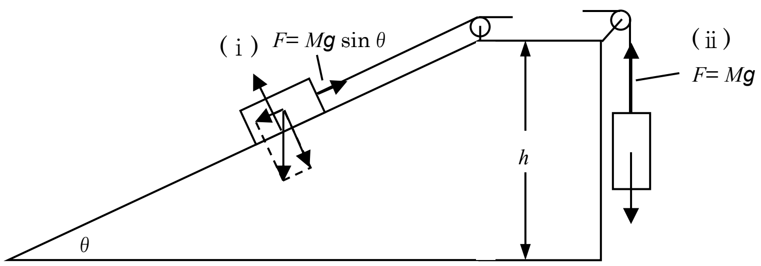
$W=Fx>0$
力は正の仕事をする

$W=-Fx<0$
力は負の仕事をする

※斜め方向に力がはたらくときは？

○仕事の原理

傾角を θ とするなめらかな斜面に沿って，質量 M [kg]の物体を高さ h [m]引き上げる場合，物体を引き上げる力の仕事について



（ｉ)のように斜面に沿って引き上げる場合，物体にはたらく重力の斜面方向の分力は $Mg\ \sin\theta$ [N]となるため，（ⅱ)鉛直上向きに直接引き上げる場合に比べて小さい力ですむ。しかし，高さ h[m]引き上げるには，斜面上の移動距離は，$\dfrac{h}{\sin\ \theta}$ となって長くなる。

斜面方向の分力のする仕事は $W = Mg \sin\theta \times \dfrac{h}{\sin\theta} = Mgh$ となり，直接引き上げるときと同じ仕事量になる。物体を重力に逆らって上方に引き上げるとき，機械を使って小さい力で行なうことはできるが，仕事で得することはできない。これを仕事の原理という。

※物体には斜面からの垂直抗力もはたらくが，これは重力の斜面に垂直な方向の分力とつりあい，また，物体の移動方向と直角の方向であるから，この力は仕事をしない。

○仕事率

１秒間当たりにする仕事の割合を，仕事率という。

t[s]間に W[J]の仕事をするときの仕事率 $P = \dfrac{dW}{dt} = \dfrac{dW}{dx}\cdot\dfrac{dx}{dt} = Fv$ [W]または[J/s]

■エネルギー■

物体が仕事をする能力をもっているとき物体はエネルギーをもっているという。
つまり，エネルギーとは仕事をする能力を示すもの。（スカラー量）
※物体のエネルギーの変化＝された仕事となる。（エネルギーの原理）
単位は仕事と同じく[J]である。

力学的エネルギー

○運動エネルギー

質量 m [kg]の物体が速さ v [m/s]で運動しているとき

運動エネルギー $\boxed{K = \dfrac{1}{2}mv^2}$ [J]

○重力による位置エネルギー

基準面から h[m]の高さにある質量 m [kg]の物体

位置エネルギー $\boxed{U = mgh}$ [J]

○弾性力による位置エネルギー

ばね定数 k[N/m]のばねにつけられた物体が**自然長から x[m]**だけ伸びたとき

位置エネルギー $\boxed{U = \dfrac{1}{2}kx^2}$ [J]

○保存力

物体が動くとき，物体にはたらく力のする仕事が経路に関係なく，始点と終点の位置だけで決まるような場合，その力を保存力という。重力や弾性力など。

○力学的エネルギーが保存される場合

保存力（重力，弾性力，静電気力，磁気力）以外の外力が仕事をしないとき
力学的エネルギーは保存される。
力学的エネルギー保存則：

運動エネルギー＋重力による位置エネルギー＋弾性力による位置エネルギー＝一定

（※重力による位置エネルギーの基準面は自分で決めてよい。）

・鉛直につるしたばねでは $mgh + \frac{1}{2}kx^2$ （x：自然長からの伸び）のかわりに，$\dfrac{1}{2}ky^2$
（y：つりあいの位置からの伸び）を用いてもよい。

○力学的エネルギーが保存されない場合

物体に保存力以外の力が仕事をするとき，力学的エネルギーは変化する。

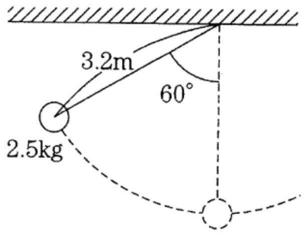
最初の力学的エネルギー ＋ 非保存力のした仕事 ＝ その後の力学的エネルギー

＜例題１＞

静止している質量 1.5[kg]の物体に，27[J]の仕事を加えると，物体の速さは何[m/s]になるか。

＜例題２＞

図の位置から振り子が動きはじめた。おもりが最初に最下点を通過するまでに，



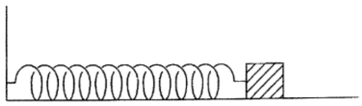
（１）糸がおもりを引く力（張力）がした仕事と重力がした仕事をそれぞれ求めよ。

（２）最下点を重力による位置エネルギーの基準とすると，最初の位置での重力による位置エネルギーはいくらか。

（３）最下点でのおもりの速さを求めよ。

＜例題３＞

なめらかな水平面上で，ばね定数 8.0N/m のばねの一端を固定し，他端に質量 2.0kg の物体を取り付ける。ばねを 0.50m 引っ張ってはなした。

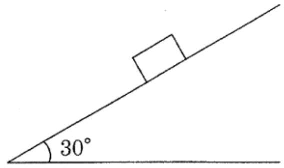


（１）ばねが自然長になったときのおもりの速さはいくらか。

（２）ばねが自然長より 0.30m 伸びた所を通過する瞬間のおもりの速さはいくらか。

＜例題４＞

図のような傾き 30°の斜面上を質量 2.0kg の物体が，初速度 0 で斜面にそって 16m すべりおりた。このとき，物体の速さが 8.0m/s になった。物体と面との間の動摩擦力の大きさを求めよ。



【１】

なめらかな水平台上に質量 4.5kg の物体をおき，一定の大きさの力を水平に加えて，物体が 3.0m 直進したとき力を加えるのをやめた。このとき物体の速さは 4.0m/s であった。重力加速度の大きさを 9.8m/s² とする。

（１）力のした仕事 W [J]を求めよ。　　（２）力の大きさ F [N]を求めよ。

次に，別の水平台に物体を移して，前問と同じ力を加え，同じ距離だけ直進したとき力を加えるのをやめたところ，物体はさらに 1.0m 直進して止まった。

（３）物体と台との間の動摩擦係数 μ' を求めよ。

【２】

図１のように，水平な床面となす角が θ のなめらかな斜面上に，ばね定数 k のばねの下端を固定し上端に軽い板をとりつける。このとき，ばねの長さは自然長であった。次に，図２のように板を a だけ押し下げて Q の位置におき，この板の上に質量が m の物体をおいてから，静かに手を離した。その後，物体はばねの自然長の点 P において板から離れ，斜面上の点 R まで上って止まり，もどり始めた。重力加速度の大きさを g とする。

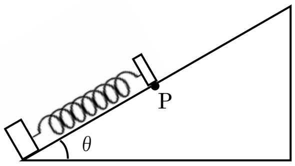


図１

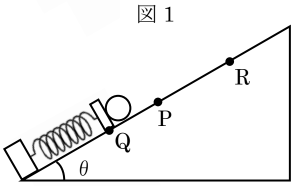


図２

（１）図２のとき，弾性力による位置エネルギー U を求めよ。

（２）物体が板から離れるときの物体の速さ v を求めよ。

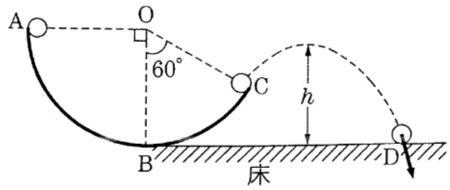
（３）QR 間の距離 l を求めよ。

【３】ばね定数 k のばねの上端を天井に固定し，下端に質量 m のおもりをつけてつりあわせる。重力加速度の大きさを g とし，空気の抵抗を無視するとき，次の問いに答えよ。

（１）おもりがつりあいの位置にあるとき，ばねの自然長からの伸び a を求めよ。

（２）つりあいの位置からおもりをさらに b だけ引き下げて手を離す。おもりが(1)のつりあいの位置を通過するときの速さ v を求めよ。

＜例題５＞



右図のように，断面がO点を中心とした半径3.2mの円形をしたなめらかなすべり台がある。いま，Oと同じ高さの点Aから物体を静かにすべらせたところ，物体はC点から空中に飛び出した。

（１）O点の真下の点Bを物体が通過するときの速さはいくらか。

（２）C点から飛び出すときの物体の速さはいくらか。$\angle COB = 60°$ とする。

（３）C点から飛び出した後，物体はB点よりいくらの高さ（図の h）まで上がるか。

（４）物体は，その後，B点と同じ高さの点Dで床に衝突したとすると，D点に衝突する直前の物体の速さはいくらか。

【４】（センター試験'97 本）

図１のようになめらかな斜面 AB とそれにつづく水平面があり，斜面上の点 A に質量 m の小物体を置く。点 A から静かにすべり出した小物体は点 B から空中に飛び出し，水平面上の点 C に落下する。点 A の水平面からの高さは h，点 B で飛び出すときの速さは v_0，そのときの角度は水平面に対し θ($0^\circ \leqq \theta \leqq 90^\circ$)とする。また，重力加速度を g とし，空気の抵抗は無視できるものとする。

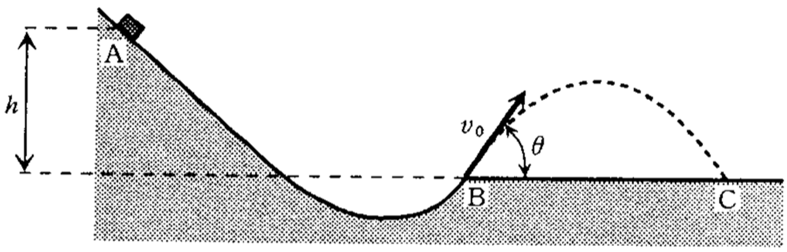


図　1

（１）点 B での小物体の速さ v_0 はいくらか。

（２）点 B を飛び出した小物体はある時間の後，軌道の最高点に達する。水平面から測った最高点の高さはいくらか。

（３）小物体は最高点を通過したのち点 C に落下する。2 点 BC 間の水平距離 x はいくらか。

（４）角度 θ をいくらにとると，水平到達距離 x が最大となるか。

【５】（2010 年 北九州市立大）

図のように，斜面と水平面がなめらかにつながっている。水平面には，ばね定数 k[N/m]の質量が無視できるばねがあり，その右端は壁に固定されている。ばねは自然の長さで静止している。また，水平面上の BC 間以外はすべて摩擦のない滑らかな面となっている。今，水平面から高さ h[m]の斜面上の点 A に大きさが無視できる質量 m[kg]の小物体を置き，静かに手を離したところ，小物体は斜面を滑っていった。このとき，以下の空欄$\boxed{}$に入れるのに適した数式を解答箇所に記入せよ。ただし，水平面上の BC 間は距離 S[m]の摩擦のある粗い面となっており，小物体と粗い面の間の動摩擦係数は μ とする。また，重力加速度の大きさは g[m/s^2]とし，空気の抵抗は無視できるとする。なお，空欄$\boxed{}$に入れる数式に用いてよい記号は，与えられた量の記号 k，h，m，S，μ，g のみとする。

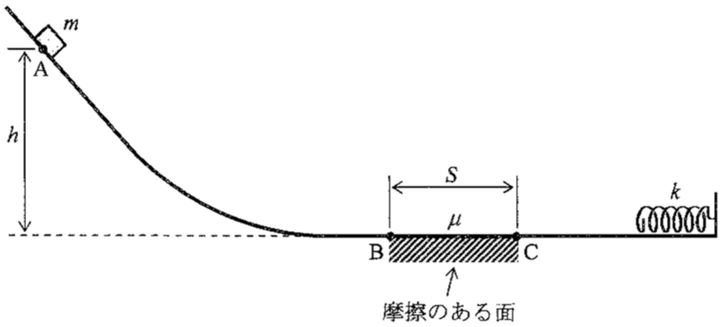


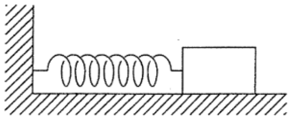
図 1.1　第 1 問の問題図

重力による位置エネルギーの基準面を水平面上に取ると，力学的エネルギー保存の法則により，点 A に静止している状態の小物体がもつ位置エネルギーは，この小物体が斜面を滑り降り，点 B に達する直前の小物体がもつ運動エネルギーと等しくなる。よって，点 B に達する直前の小物体の速さを v_B とすると，$v_B = \boxed{ア}$ [m/s]となる。

つぎに，この小物体が BC 間を通過する際に，小物体が受ける摩擦力の大きさは，$\boxed{イ}$ [N]であるので，小物体 BC 間を通過する間に失う力学的エネルギーは$\boxed{ウ}$ [J]となる。したがって，点 C を通過した直後の小物体がもつ力学的エネルギーは$\boxed{エ}$ [J]となる。また，点 C を通過した直後の小物体の速さを v_C とすると，$v_c = \boxed{オ}$ [m/s]となる。

点 C を通過した小物体は水平面上でばね側へ運動を続けてばねに衝突した。衝突によってばねは自然の長さから x[m]だけ縮んで小物体の速さは 0 になった。このとき，力学的エネルギー保存の法則により，$\boxed{エ} = \boxed{カ} \cdot x^2$
の関係が成り立ち，$x = \boxed{キ}$ [m]となる。

【６】図のように，摩擦のある水平面上で，ばね定数 k [N/m]のばねの左端を固定し，右端に質量 m [kg]の物体を取り付ける。自然長より d [m]だけばねを引き伸ばし静かにはなしたところ，物体は左向きにすべり，ばねが自然長になるところを通過した。物体と面との動摩擦係数を μ とし，重力加速度の大きさを g [m/s^2]とする。

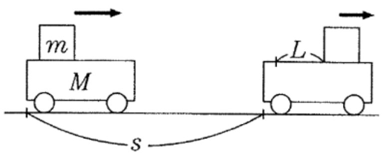


（１）ばねが自然長になるところを，物体が最初に通過するときの速さはいくらか。

（２）物体が最初に止まる所は，ばねの縮みがいくらのところか。

（３）物体が最初に止まったところで，そのまま動き出さない場合，物体と面との間の静止摩擦係数はいくら以上か。

【７】水平でなめらかな床の上に，質量 M [kg]の台車を置き，台車の上に質量 m [kg]の物体を乗せる。物体に初速度 v_0[m/s]を与えたところ，物体は台に対して L [m]すべった後，台車と同じ速度になった。このときまでに，台車は床に対して s [m]動いていた。物体と台車との間の動摩擦力を f [N]，重力加速度の大きさを g [m/s^2]とする。



（１）台車と物体に摩擦力がした仕事をそれぞれ求めよ。

（２）物体に初速を与えてから，物体と台車が同じ速度になるまでに，全体の力学的エネルギーはいくら変化したか。

（３）同じ速度になったときの台車の速さを f ，L ，m ，M ，v_0 を用いて表せ。