第 019 講 運動方程式を立てる

この講でできるようになること

- 運動を調べる物体を一つ選び、その物体が受けるすべての外力を図に表すことができる。
- 座標軸と正方向を決め、力の向きを符号に反映して運動方程式を立てることができる。
- 運動方程式から加速度や未知の力を求め、単位と符号の意味を説明できる。
- 複数の物体が接触して動く場合にも、物体ごとに運動方程式を立てることができる。

1. 力と加速度を結びつける

力が働くと、運動はどう変わるか

滑らかな水平面に置いた台車を、右向きに押す場合を考える。台車には右向きの力が働き、台車の速度は右向きに変化していく。

一方、台車に右向きの力と左向きの力が同時に働く場合、運動を決めるのはどちらか一方の力だけではない。**台車が受けるすべての力を合わせた結果**が重要である。

物体に働く複数の力を、向きも考慮して一つにまとめた力を**合力**という。

運動方程式（ニュートンの運動の第二法則）

一定質量の物体について、慣性系では、物体が受ける外力の合力は、質量と加速度の積に等しい。

一次元では、正方向を決めて次のように表す。

$$F_{\text{合}} = ma$$

- $F_{\text{合}}$：物体に働く外力の合力（符号付き、単位 N）
- m：物体の質量（単位 kg）
- a：物体の加速度（符号付き、単位 $\mathrm{m/s^2}$）

合力と加速度の向きは一致する。質量 m は正の値であるため、合力が正なら加速度も正、合力が負なら加速度も負となる。

この式を**運動方程式**という。

重要なのは、左辺が「物体に働く力のうちの一つ」ではなく、「その物体が受ける外力の合力」である点である。

例えば、右向きに 4.0 N、左向きに 2.0 N の力が働くとき、右を正とした合力は

$$F_{\text{合}} = +4.0\,\mathrm{N} - 2.0\,\mathrm{N} = +2.0\,\mathrm{N}$$

となる。右向きの 4.0 N を、そのまま合力として運動方程式の左辺に置いてはいけない。

本講では、物体の質量が一定で、地上に固定された観測者を近似的に慣性系とみなせる状況を扱う。物体を力と加速度の関係で調べ、回転の効果は扱わない。

©ミライコーチング

力の単位と質量の単位

質量と力は異なる物理量である。

物理量	記号の例	単位	意味
質量	m	kg	物体の運動の変わりにくさを表す量
力	F、W、N	N	物体の運動を変化させる原因となる量
加速度	a	$\mathrm{m/s^2}$	単位時間当たりの速度の変化

力の単位 N は「ニュートン」と読み、

$$1\,\mathrm{N} = 1\,\mathrm{kg}\cdot\mathrm{m/s^2}$$

という関係がある。

したがって、運動方程式の右辺の単位は

$$\mathrm{kg}\times\mathrm{m/s^2} = \mathrm{N}$$

となり、左辺の力の単位と一致する。

2. 運動方程式を立てるための判断

最初に物体を一つ選ぶ

運動方程式を立てるとき、最初に決めるのは計算式ではなく、**どの物体の運動を調べるか**である。

滑らかな水平面上の物体 A を右向きに押す場合を考える。物体 A の質量を $0.50\,\mathrm{kg}$、右向きに加える力を $F = 4.0\,\mathrm{N}$ とする。重力加速度は $g = 9.8\,\mathrm{m/s^2}$ とし、空気抵抗などは無視する。

物体 A が床に接したまま水平に運動し、鉛直方向の加速度が 0 である場合、物体 A が受ける外力は次の三つである。

- 右向き：外から加えられた力 F
- 上向き：床から受ける垂直抗力 N
- 下向き：地球から受ける重力 W

ここで、N は垂直抗力の**記号**であり、力の単位 N と区別する。

地球が物体 A に及ぼす重力の大きさは

$$W = mg = (0.50\,\mathrm{kg})\times(9.8\,\mathrm{m/s^2}) = 4.9\,\mathrm{N}$$

である。

次の図は、物体 A が受ける外力をすべて示したものである。

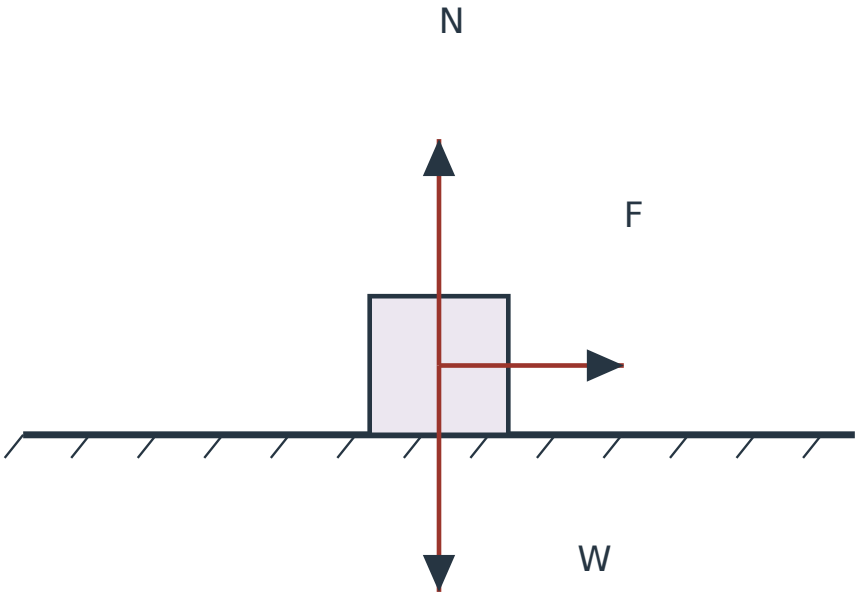

図 1　滑らかな水平面上の物体 A が受ける三つの外力。矢印の長さは力の大きさに比例する

力の図では、物体を一つ取り出し、**その物体が受ける力だけ**を描く。ここでは物体 A を質点として扱うため、各力の矢印を代表点から描いている。矢印が床や物体の輪郭を横切っていても、力の作用する相手が変わるわけではない。

速度や加速度は力そのものではないため、この全力図には描かない。

正方向を決めて、力を足す

物体 A が動く水平方向に x 軸を取り、右向きを正とする。

この例では、水平方向の外力は右向きの F だけである。したがって、水平方向の合力は

$$F_{\text{合},x} = +F$$

となる。

水平方向の運動方程式は

$$F = ma_x$$

である。

数値を代入すると

$$4.0\,\mathrm{N} = (0.50\,\mathrm{kg})a_x$$

より、

$$a_x = +8.0\,\mathrm{m/s^2}$$

となる。

正の符号は、加速度が決めた正方向、すなわち右向きであることを意味する。

ここで求めた加速度は、物体 A の速度が右向きであることを直接示すものではない。加速度は**速度がどちらの向きに変化するか**を表している。

鉛直方向にも式を立てる

床に接したまま水平に動く物体 A は、鉛直方向には加速しない。

上向きを y 軸の正方向に選ぶと、鉛直方向の加速度は

$$a_y = 0$$

である。

上向きの垂直抗力を $+N$、下向きの重力を $-W$ として、鉛直方向の運動方程式を立てる。

$$N - W = ma_y$$

$W = mg$、$a_y = 0$ を代入すると

$$N - mg = 0$$

となるため、

$$N = mg = 4.9\,\mathrm{N}$$

が得られる。

垂直抗力は常に重力と等しいわけではない

$N = mg$ は、今回のように鉛直方向の加速度が 0 であり、鉛直方向に働く外力が垂直抗力と重力だけである場合に成立する。

鉛直方向にほかの力が働く場合や、物体が鉛直方向に加速する場合には、同じ式になるとは限らない。また、物体が床と接していなければ、その床からの垂直抗力は存在しない。

垂直抗力を求めるときも、まず外力をすべて挙げて運動方程式を立てることが必要である。

立式の順序

運動方程式を立てる操作は、次の順序で整理できる。

1. **対象物体を選ぶ。** どの物体の加速度を求めるのか決める。
2. **外力をすべて挙げる。** 選んだ物体が受ける力を、向きとともに図に描く。
3. **座標軸と正方向を決める。** 水平・鉛直など、調べる方向をはっきりさせる。
4. **符号付き合力を求める。** 正方向の力を正、逆方向の力を負として足す。
5. **方向ごとに運動方程式を立てる。** それぞれの方向で「合力＝質量×加速度」を使う。
6. **単位と符号を解釈する。** 求めた加速度や力の大きさと向きが、条件に合っているか確かめる。

物体が複数ある場合でも、この操作を各物体に対して行う。

3. 加速度の符号から運動を読み取る

負の加速度は必ずしも減速ではない

右向きを正とすると、加速度 $a_x < 0$ は速度が左向きに変化することを意味する。

しかし、これだけで物体の速さが小さくなっているとは判断できない。

速度の向き	加速度の向き	その瞬間の速さの変化
右向き（$v_x > 0$）	右向き（$a_x > 0$）	大きくなる
右向き（$v_x > 0$）	左向き（$a_x < 0$）	小さくなる
左向き（$v_x < 0$）	右向き（$a_x > 0$）	小さくなる
左向き（$v_x < 0$）	左向き（$a_x < 0$）	大きくなる

この表は、その瞬間の速度が 0 でない場合を表している。

例えば、左向きに進んでいる物体が左向きの加速度を持つなら、速度の負の値の絶対値が大きくなり、速さは増加する。

一方、物体が左向きに進んでいるとき、加速度が右向きなら、その瞬間の速さは減少する。

つまり、**速くなるか遅くなるかは、加速度だけでなく速度の向きと合わせて判断する**必要がある。

合力がゼロなら、加速度はゼロ

運動方程式から、質量が正の物体について

$$F_{\text{合}} = 0 \quad \Longrightarrow \quad a = 0$$

となる。

これは速度が変化しないことを意味する。物体が静止している場合だけでなく、一定の速度で直線運動している場合も含む。

逆に、ある瞬間に速度が 0 であっても、加速度まで 0 とは限らない。例えば上向きに投げた物体は、最高点で一瞬速度が 0 になるが、重力による下向きの加速度を持ち続ける。

4. 運動方程式を使って求める

1

水平な床の上を右向きに動く物体 A がある。質量は 0.50 kg であり、右向きに 4.0 N の力 F が加えられている。

物体 A には、運動方向と反対の左向きに、大きさ 2.0 N の一定の抵抗力 f も働く。重力加速度を $g = 9.8\,\mathrm{m/s^2}$ とする。物体 A は床に接したまま水平に運動し、鉛直方向の加速度は 0 である。これら以外の外力は無視する。

右向きを x 軸の正方向、上向きを y 軸の正方向とする。

(1) 物体 A が受ける外力をすべて挙げよ。

(2) 水平方向の運動方程式を立て、加速度を求めよ。

(3) 鉛直方向の運動方程式から、垂直抗力の大きさを求めよ。

解答・解説

(1) 物体 A が受ける外力は、右向きの外力 F、左向きの抵抗力 f、上向きの垂直抗力 N、下向きの重力 W の四つである。

重力の大きさは

$$W = mg = (0.50\,\mathrm{kg}) \times (9.8\,\mathrm{m/s^2}) = 4.9\,\mathrm{N}$$

である。

物体 A が受ける全外力を図に示す。

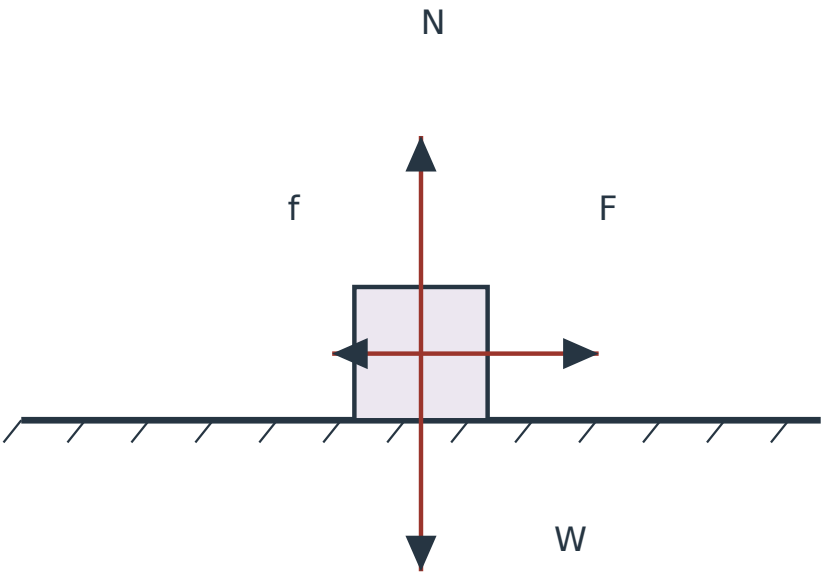

図 2　物体 A の全力図。F は右向き 4.0 N、f は左向き 2.0 N、N と W はそれぞれ 4.9 N。矢印の長さは力の大きさに比例する

(2) 右向きを正として、右向きの F を正、左向きの f を負とする。

水平方向の合力は

$$F_{\text{合},x} = F - f$$

であるから、運動方程式は

$$F - f = ma_x$$

となる。

数値を代入すると

$$4.0\,\mathrm{N} - 2.0\,\mathrm{N} = (0.50\,\mathrm{kg})a_x$$

$$a_x = \frac{2.0\,\mathrm{N}}{0.50\,\mathrm{kg}} = +4.0\,\mathrm{m/s^2}$$

となる。

したがって、加速度は**右向きに** $4.0\,\mathrm{m/s^2}$ である。

右向きに動いている物体の速度と加速度が同じ右向きなので、この運動では速さが増加する。

(3) 鉛直方向の加速度は 0 である。

鉛直方向の運動方程式は

$$N - W = ma_y = 0$$

であるため、

$$N = W = mg$$

となる。

よって、

$$N = 4.9\,\mathrm{N}$$

である。

ここでは鉛直方向の加速度が 0 であり、鉛直方向には垂直抗力と重力しか働かないため、二つの力の大きさが等しくなっている。

抵抗力を無視した場合との比較

例題 1 と同じ物体に、右向きの 4.0 N だけが水平方向に働き、抵抗力が存在しない場合を考える。

条件	水平合力	加速度
抵抗力なし	右向き 4.0 N	右向き $8.0\,\mathrm{m/s^2}$
左向き抵抗力 2.0 N あり	右向き 2.0 N	右向き $4.0\,\mathrm{m/s^2}$

質量が同じであれば、合力が小さくなるほど加速度の大きさも小さくなる。

また、同じ合力が働く場合には、質量が大きいほど加速度の大きさは小さくなる。これは $a = \frac{F_{\text{合}}}{m}$ から分かる関係である。

5. 鉛直方向の運動にも同じ法則を使う

2

質量 $0.50\,\mathrm{kg}$ の小球を鉛直上向きに投げた。小球が最高点に達した瞬間を考える。

空気抵抗は無視でき、重力加速度の大きさを $g = 9.8\,\mathrm{m/s^2}$ とする。鉛直上向きを正方向とする。

(1) 最高点で小球が受ける外力をすべて挙げ、その大きさと向きを答えよ。

(2) 最高点での速度と加速度をそれぞれ答えよ。

(3) 「最高点で速度が 0 なので、働く力の合力も 0 である」という説明が正しいか判断せよ。

解答・解説

(1) 小球は空中にあり、床や手とは接していない。空気抵抗も無視するため、小球が受ける外力は地球による重力だけである。

その大きさは

$$W = mg = (0.50\,\mathrm{kg}) \times (9.8\,\mathrm{m/s^2}) = 4.9\,\mathrm{N}$$

であり、向きは鉛直下向きである。

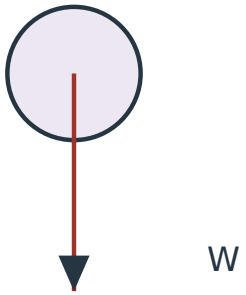

図 3　最高点にある小球の全力図。空気抵抗を無視すると、働く外力は下向きの重力 W だけである

(2) 最高点では上昇から下降へ移るため、その瞬間の速度は

$$v_y = 0\,\mathrm{m/s}$$

である。

一方、上向きを正とした重力の符号は負である。

運動方程式は

$$-W = ma_y$$

であるから、

$$-4.9\,\mathrm{N} = (0.50\,\mathrm{kg})a_y$$

$$a_y = -9.8\,\mathrm{m/s^2}$$

となる。

加速度は下向きであり、最高点でもゼロにならない。

(3) 説明は誤りである。

最高点での速度は一瞬 0 になるが、重力は働き続けている。したがって合力は下向きに 4.9 N であり、加速度も下向きである。

速度がゼロであることと、加速度がゼロであることは別の条件である。

6. 物体が二つある場合は、それぞれに式を立てる

接触して動く二つの物体

一つの物体について運動方程式を立てる方法は、物体が複数ある場合にも使える。

滑らかな水平面に、質量がともに 0.50 kg の物体 A と物体 B を隣り合わせに置く。左側が A、右側が B である。

物体 A を右向きに 4.0 N の力 F で押し、A と B が接触を保ったまま右向きに運動する場合を考える。重力加速度は $g = 9.8\,\mathrm{m/s^2}$ とする。鉛直方向には加速せず、空気抵抗などは無視する。

二つの物体が接触を維持し、接触面が互いに離れず、めり込まない条件では、接触方向の加速度は共通となる。

ただし、A と B が受ける力は同じではない。

3

上記の物体 A と B について、右向きを正方向とする。

(1) A と B のそれぞれが受ける外力を挙げ、物体ごとの水平方向の運動方程式を立てよ。

(2) 共通の加速度 a を求めよ。

(3) A が B を押す力の大きさ C を求めよ。

(4) A が B を押す力と、B が A を押す力が作用反作用の関係にあることを説明せよ。

物体の配置は次のとおりである。図は接触関係を示す模式図であり、力の大きさは示していない。

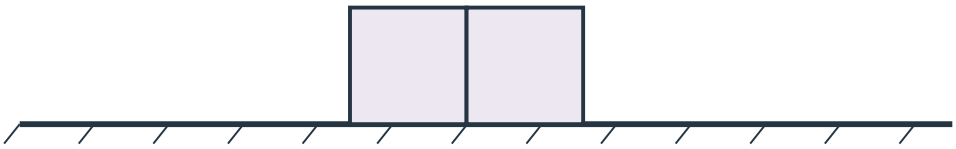

図 4　滑らかな水平面上の配置。左が物体 A、右が物体 B。A を右向きに押し、二つの物体は接触を保つ

解答・解説

(1) A と B をそれぞれ別の物体として考える。

物体 A が受ける外力は、右向きの外力 F、B から受ける左向きの接触力、床からの上向きの垂直抗力、下向きの重力である。

物体 B が受ける外力は、A から受ける右向きの接触力、床からの上向きの垂直抗力、下向きの重力である。

接触力の大きさを C とする。A が B を押す力と B が A を押す力は、大きさが等しく、向きが反対である。

右向きを正とすると、A について

$$F - C = m_A a$$

B について

$$C = m_B a$$

となる。

ここで、$m_A = m_B = 0.50\,\mathrm{kg}$、$F = 4.0\,\mathrm{N}$ であるから、

$$4.0\,\mathrm{N} - C = (0.50\,\mathrm{kg})a$$

$$C = (0.50\,\mathrm{kg})a$$

という二つの式が得られる。

(2) B の式から得られる $C = (0.50\,\mathrm{kg})a$ を、A の式に代入する。

$$4.0\,\mathrm{N} - (0.50\,\mathrm{kg})a = (0.50\,\mathrm{kg})a$$

$$4.0\,\mathrm{N} = (1.00\,\mathrm{kg})a$$

したがって、

$$a = +4.0\,\mathrm{m/s^2}$$

である。

A と B は接触を維持しているため、どちらも右向きに $4.0\,\mathrm{m/s^2}$ の加速度を持つ。

(3) B の運動方程式から、

$$C = (0.50\,\mathrm{kg}) \times \left(4.0\,\mathrm{m/s^2}\right) = 2.0\,\mathrm{N}$$

である。

両物体の鉛直方向の加速度は 0 で、鉛直方向の外力は垂直抗力と重力だけである。

それぞれについて

$$N_A = W_A = m_A g = 4.9\,\mathrm{N}$$

$$N_B = W_B = m_B g = 4.9\,\mathrm{N}$$

となる。

求めた各力の大きさを用いて、A と B の全力図を別々に描く。

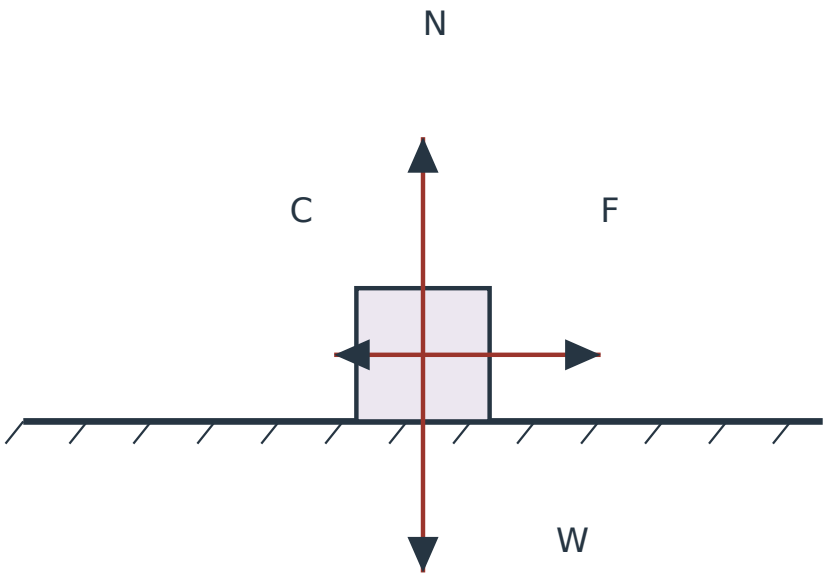

図 5　物体 A の全力図。右向きの F は 4.0 N、B から受ける左向きの C は 2.0 N、N と W は各 4.9 N

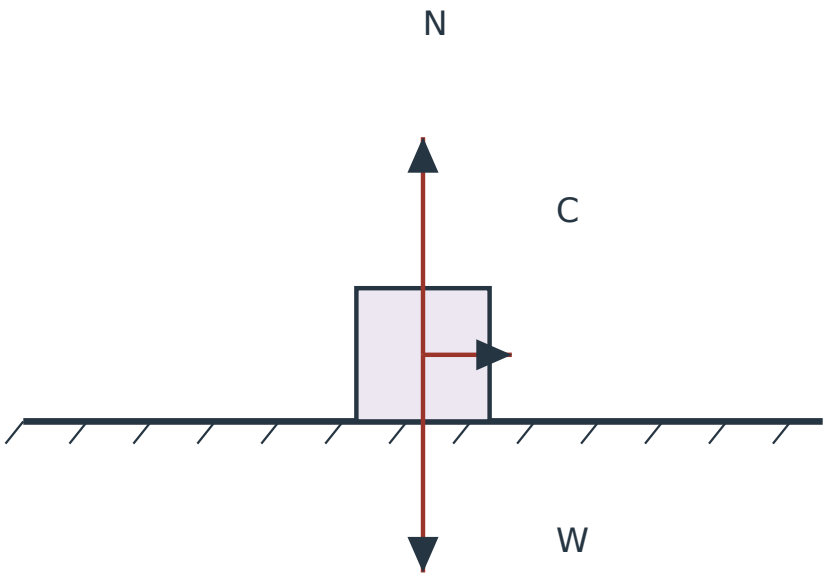

図 6　物体 B の全力図。A から受ける右向きの C は 2.0 N、N と W は各 4.9 N

(4) A が B を押す力は、**B が受ける右向きの力**である。

一方、B が A を押す力は、**A が受ける左向きの力**である。

両者は大きさがともに 2.0 N で向きが反対だが、受け手が異なる。

したがって作用反作用の関係にあり、同一物体の運動方程式の中で互いに打ち消すことはできない。

複数物体でも、まず物体ごとに考える

二つの物体が同じ加速度で動いていても、受ける外力が同じとは限らない。

各物体に対して外力をすべて挙げ、それぞれの運動方程式を立てる。そのうえで共通の加速度や接触力の関係を使うと、未知量を求められる。

作用反作用の二つの力は、必ず異なる物体に働く。どちらの物体が受ける力なのかを確認することが重要である。

演習問題

1

滑らかな水平面上に、質量 $0.50\,\mathrm{kg}$ の物体 A がある。物体 A に右向きの一定の力 $F = 3.0\,\mathrm{N}$ を加える。

物体 A は床に接したまま水平に動き、鉛直方向の加速度は 0 である。重力加速度を $g = 10\,\mathrm{m/s^2}$ とし、空気抵抗などは無視する。

右向きを x 軸の正方向、上向きを y 軸の正方向とする。

(1) 物体 A が受けるすべての外力を挙げ、全力図を描け。

(2) 水平方向と鉛直方向の運動方程式をそれぞれ立てよ。

(3) 物体 A の加速度と、床から受ける垂直抗力の大きさを求めよ。

(4) 力を加え始めた瞬間、物体 A が左向きに動いていたとする。その瞬間、物体 A の速さは増加するか減少するか。理由とともに説明せよ。

2

水平な床の上を左向きに動く、質量 $1.0\,\mathrm{kg}$ の物体 B がある。

物体 B には、左向きに大きさ $3.0\,\mathrm{N}$ の外力 F と、速度と反対の右向きに大きさ $1.0\,\mathrm{N}$ の一定の抵抗力 f が働く。物体 B は床に接したまま水平に動き、鉛直方向の加速度は 0 である。

重力加速度を $g = 10\,\mathrm{m/s^2}$ とし、これら以外の外力は無視する。右向きを x 軸の正方向、上向きを y 軸の正方向とする。

ある生徒は、水平方向の運動方程式を

$$F - f = ma_x$$

と立てた。

(1) この式は正しいか。誤っている場合は、どの力の符号が違うのかを説明し、正しい式に直せ。

(2) 物体 B の加速度を求め、向きを答えよ。

(3) 物体 B の速さは増加するか減少するか。理由とともに答えよ。

(4) 鉛直方向の運動方程式を立て、垂直抗力の大きさを求めよ。

©ミライコーチング

3

質量 0.50 kg の物体 C が、鉛直方向のロープにつるされて空中にある。

ロープは物体 C を鉛直上向きに引いており、物体 C は鉛直上向きに $2.0\,\mathrm{m/s^2}$ の加速度で運動している。

重力加速度を $g = 10\,\mathrm{m/s^2}$ とし、空気抵抗は無視する。鉛直上向きを正方向とする。

(1) 物体 C が受けるすべての外力を挙げ、全力図を描け。

(2) ロープが物体 C を引く力の大きさを T として、運動方程式を立てよ。

(3) T の大きさを求めよ。

(4) 「物体には重力が働くので、必ず $N = mg$ の垂直抗力も働く」という説明が誤りである理由を述べよ。

4

滑らかな水平面に、質量 0.40 kg の物体 A と質量 0.60 kg の物体 B を接触させて置く。左側が A、右側が B である。

物体 A を右向きに 5.0 N の一定の外力 F で押すと、A と B は接触を保ったまま右向きに運動した。

両物体の鉛直方向の加速度は 0 である。重力加速度を $g = 10\,\mathrm{m/s^2}$ とし、空気抵抗などは無視する。右向きを x 軸の正方向、上向きを y 軸の正方向とする。

A と B の共通の加速度を a、A が B を押す力の大きさを C とする。

(1) A と B のそれぞれについて、水平方向の運動方程式を立てよ。

(2) 共通の加速度 a と接触力の大きさ C を求めよ。

(3) 求めた値を使い、A と B がそれぞれ受けるすべての外力を別々の全力図に表せ。

(4) 「A が B を押す力と B が A を押す力は大きさが等しく逆向きだから、A の運動方程式の中で打ち消し合う」という考え方が誤りである理由を説明せよ。

©ミライコーチング

演習問題の解答・解説

1

(1) 物体 A が受ける外力は三つである。

- 右向き：加えられた力 $F = 3.0\,\mathrm{N}$
- 上向き：床からの垂直抗力 N
- 下向き：重力 $W = mg$

重力の大きさは

$$W = (0.50\,\mathrm{kg}) \times (10\,\mathrm{m/s^2}) = 5.0\,\mathrm{N}$$

である。

全力図を次に示す。鉛直方向の加速度が 0 であるため、垂直抗力は 5.0 N となる。

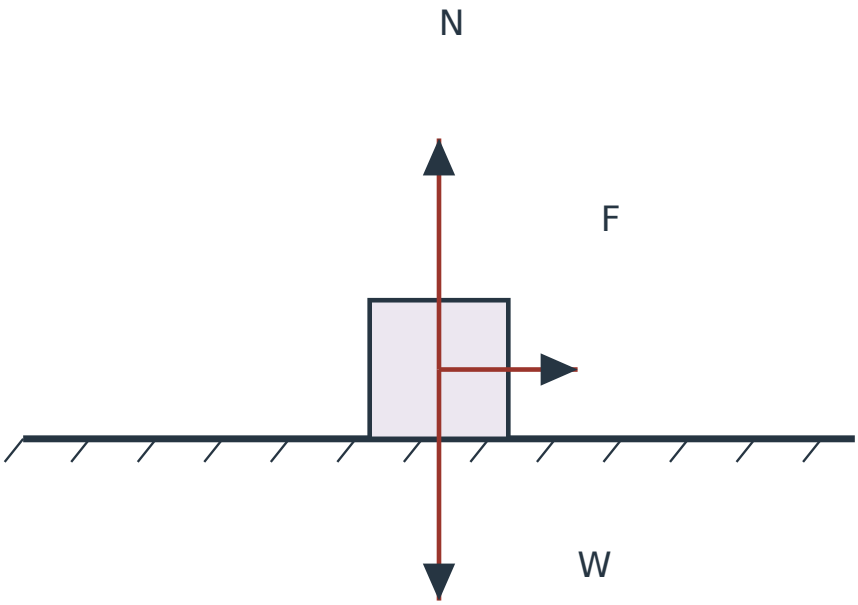

図 7　演習 1 の物体 A の全力図。右向き F は 3.0 N、上向き N と下向き W は各 5.0 N

(2) 水平方向の外力は右向きの F のみである。したがって

$$F = ma_x$$

が水平方向の運動方程式である。

鉛直方向については、上向きの垂直抗力と下向きの重力が働く。鉛直加速度が 0 であるため、

$$N - mg = ma_y = 0$$

となる。

(3) 水平方向の式から

$$3.0\,\mathrm{N} = (0.50\,\mathrm{kg})a_x$$

$$a_x = +6.0\,\mathrm{m/s^2}$$

である。

加速度は右向きに $6.0\,\mathrm{m/s^2}$ となる。

鉛直方向の式から

$$N = mg = (0.50\,\mathrm{kg}) \times (10\,\mathrm{m/s^2}) = 5.0\,\mathrm{N}$$

である。

(4) その瞬間の速さは減少する。

物体 A は左向きに動いているが、加速度は右向きである。速度と加速度の向きが反対なので、物体 A が左向きに動いている間は速さが小さくなる。

その後、物体 A が停止して右向きに動き始めたなら、速さは増加する。加速度が右向きであることだけから、運動の全期間で減速すると判断してはいけない。

2

(1) 生徒の式は誤りである。

右向きを正としているため、左向きの外力 F は負、右向きの抵抗力 f は正となる。

したがって、正しい水平方向の運動方程式は

$$f - F = ma_x$$

である。

元の式では、F と f の両方の符号が逆になっている。

(2) 数値を代入すると

$$1.0\,\mathrm{N} - 3.0\,\mathrm{N} = (1.0\,\mathrm{kg})a_x$$

$$a_x = -2.0\,\mathrm{m/s^2}$$

である。

したがって、加速度は左向きに $2.0\,\mathrm{m/s^2}$ である。

(3) 速さは増加する。

物体 B は左向きに動いており、加速度も左向きである。速度と加速度が同じ向きなので、速さは大きくなる。

加速度の符号が負であることは、減速を意味するわけではない。

(4) 物体 B の鉛直方向には、上向きの垂直抗力 N と下向きの重力 W が働く。

鉛直方向の加速度は 0 なので、

$$N - mg = 0$$

となる。

したがって、

$$N = mg = (1.0\,\mathrm{kg}) \times \left(10\,\mathrm{m/s^2}\right) = 10\,\mathrm{N}$$

である。

抵抗力と左向きの外力はともに水平方向の力であり、今回の鉛直方向の合力には含まれない。

3

(1) 物体 C が受ける外力は次の二つである。

- 上向き：ロープが物体 C を引く力 T
- 下向き：地球が物体 C を引く重力 W

物体 C は床に接していないため、床からの垂直抗力は働かない。

重力の大きさは

$$W = mg = (0.50\,\mathrm{kg}) \times (10\,\mathrm{m/s^2}) = 5.0\,\mathrm{N}$$

である。

運動方程式から求めるとロープの張力は 6.0 N となる。全力図は次のとおりである。

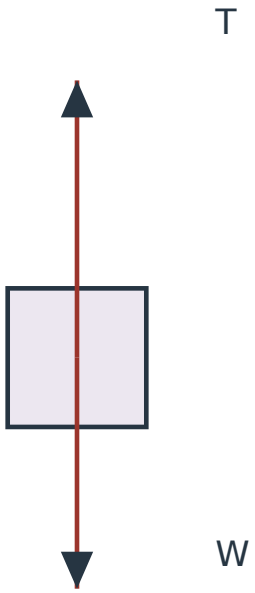

図 8　演習 3 の物体 C の全力図。ロープから受ける上向き T は 6.0 N、下向き W は 5.0 N。床からの垂直抗力はない

(2) 鉛直上向きを正方向に取る。

上向きの張力は $+T$、下向きの重力は $-W$ であるから、

$$T - W = ma$$

となる。

$W = mg$ を用いると、

$$T - mg = ma$$

である。

(3) 加速度は上向きに $2.0\,\mathrm{m/s^2}$ なので、正の符号を付けて代入する。

$$T - (0.50\,\mathrm{kg}) \times (10\,\mathrm{m/s^2}) = (0.50\,\mathrm{kg}) \times (2.0\,\mathrm{m/s^2})$$

$$T - 5.0\,\mathrm{N} = 1.0\,\mathrm{N}$$

$$T = 6.0\,\mathrm{N}$$

したがって、ロープが物体 C を引く力は上向きに $6.0\,\mathrm{N}$ である。

張力の大きさが重力の $5.0\,\mathrm{N}$ より大きいため、上向きの合力が生じている。

(4) 垂直抗力は、物体が接触している面などから受ける力である。

今回の物体 C は空中でロープにつられており、床とは接触していない。そのため、床からの垂直抗力 N は存在しない。

また、$N = mg$ はどの場面でも成り立つ公式ではない。物体が接触している状況でも、すべての外力と加速度の条件から運動方程式を立てて判断する必要がある。

4

(1) まず、物体 A だけに注目する。

物体 A は右向きの外力 F を受け、物体 B から左向きの接触力 C を受ける。

したがって、A の水平方向の運動方程式は

$$F - C = m_A a$$

となる。

数値を代入すると

$$5.0\,\mathrm{N} - C = (0.40\,\mathrm{kg})a$$

である。

次に、物体 B だけに注目する。

物体 B が水平方向に受ける外力は、物体 A から受ける右向きの接触力 C だけである。

したがって、B の水平方向の運動方程式は

$$C = m_B a$$

となる。

数値を代入すると

$$C = (0.60\,\mathrm{kg})a$$

である。

(2) B の式 $C = (0.60\,\mathrm{kg})a$ を A の式に代入する。

$$5.0\,\mathrm{N} - (0.60\,\mathrm{kg})a = (0.40\,\mathrm{kg})a$$

$$5.0\,\mathrm{N} = (1.00\,\mathrm{kg})a$$

したがって、

$$a = +5.0\,\mathrm{m/s^2}$$

である。

接触力については

$$C = (0.60\,\mathrm{kg}) \times (5.0\,\mathrm{m/s^2}) = 3.0\,\mathrm{N}$$

となる。

よって、共通の加速度は右向きに $5.0\,\mathrm{m/s^2}$、接触力の大きさは $3.0\,\mathrm{N}$ である。

(3) 物体 A と物体 B の鉛直方向の加速度は、どちらも 0 である。

A の重力と垂直抗力の大きさは、

$$W_A = m_A g = (0.40\,\mathrm{kg}) \times \left(10\,\mathrm{m/s^2}\right) = 4.0\,\mathrm{N}$$

$$N_A = 4.0\,\mathrm{N}$$

となる。

B については、

$$W_B = m_B g = (0.60\,\mathrm{kg}) \times \left(10\,\mathrm{m/s^2}\right) = 6.0\,\mathrm{N}$$

$$N_B = 6.0\,\mathrm{N}$$

となる。

物体 A の全力図

物体 A には、右向きの $F = 5.0\,\mathrm{N}$、左向きの接触力 $C = 3.0\,\mathrm{N}$、上向きの垂直抗力 $N_A = 4.0\,\mathrm{N}$、下向きの重力 $W_A = 4.0\,\mathrm{N}$ が働く。

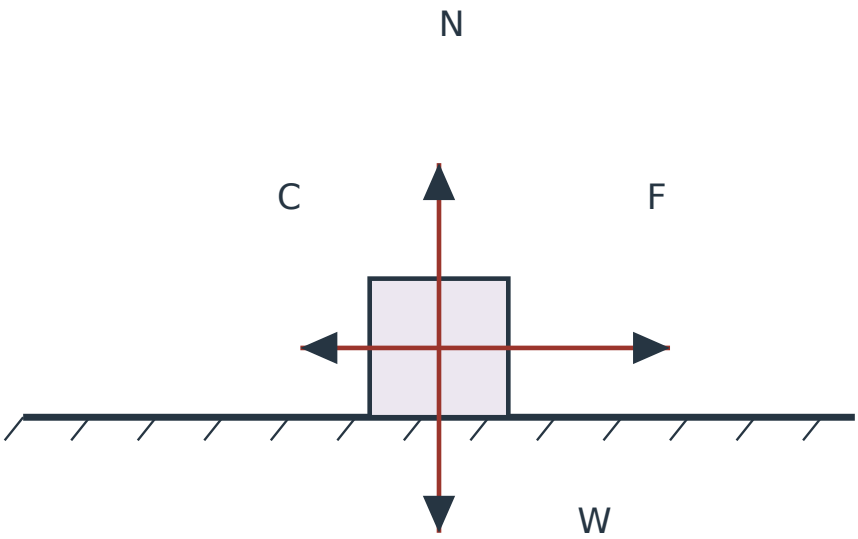

図 9　演習 4 の物体 A の全力図。F は右向き 5.0 N、C は左向き 3.0 N、N と W は各 4.0 N

物体 B の全力図

物体 B には、右向きの接触力 $C = 3.0\,\mathrm{N}$、上向きの垂直抗力 $N_B = 6.0\,\mathrm{N}$、下向きの重力 $W_B = 6.0\,\mathrm{N}$ が働く。

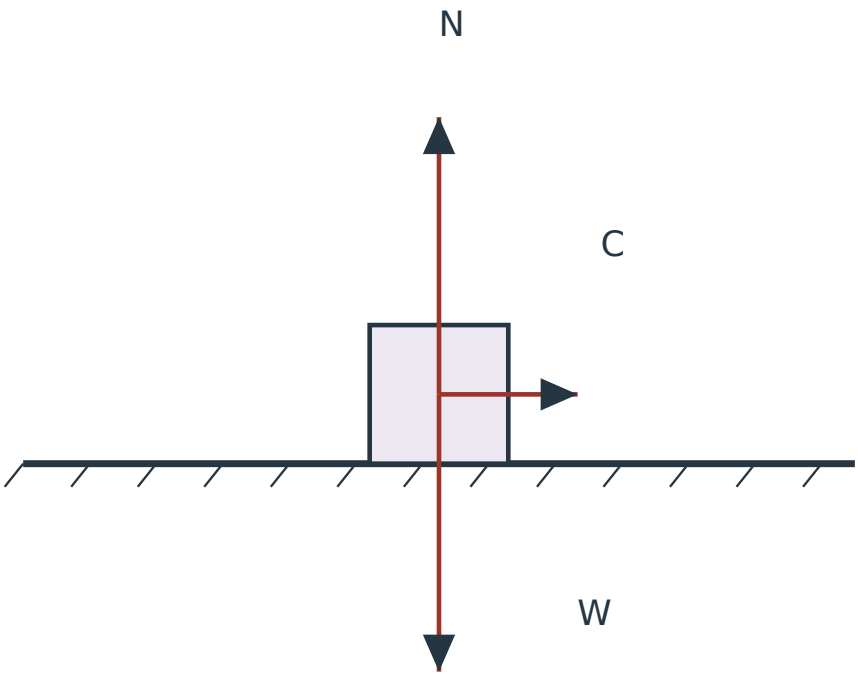

図 10　演習 4 の物体 B の全力図。C は右向き 3.0 N、N と W は各 6.0 N

二つの図では、力の大きさに対して同じ矢印の尺度を使っている。A の垂直抗力と重力よりも、質量が大きい B の垂直抗力と重力の矢印が長い。

A が B を押す力と B が A を押す力は、ともに 3.0 N なので、接触力の矢印は等しい長さで逆向きとなる。

(4) 考え方は誤りである。

A が B を押す力は **B に働く力**である。B が A を押す力は **A に働く力**である。

この二つの力は作用反作用の関係にあり、大きさが等しく向きが反対である。しかし、受け手が異なるため、物体 A だけについて立てた運動方程式の中で相殺できない。

実際に A の水平方向の合力は

$$F_{\text{合},A,x} = 5.0\,\mathrm{N} - 3.0\,\mathrm{N} = +2.0\,\mathrm{N}$$

である。

これは

$$m_A a = (0.40\,\mathrm{kg}) \times \left(5.0\,\mathrm{m/s^2}\right) = 2.0\,\mathrm{N}$$

と一致する。

一方、B の水平方向の合力は

$$F_{\text{合},B,x} = +3.0\,\mathrm{N}$$

であり、

$$m_B a = (0.60\,\mathrm{kg}) \times \left(5.0\,\mathrm{m/s^2}\right) = 3.0\,\mathrm{N}$$

と一致する。

A と B は同じ加速度で動いているが、質量が異なるため、それぞれが受ける合力の大きさは異なる。

このように、**対象物体を明確にし、その物体だけに働く外力をすべて足し合わせること**が、運動方程式を正しく立てるための基本となる。