第 020 講 摩擦の状態を見分ける

この講でできるようになること

- 接触する二つの面の滑りの有無から、静止摩擦力と動摩擦力を使い分けられる。
- 静止摩擦力の実際の大きさと最大値を区別し、滑り出す直前の条件を判断できる。
- 垂直抗力と摩擦係数から摩擦力を求め、運動方程式に結びつけられる。
- 接触面の相対的な動きから摩擦力の向きを判断し、物体に働く力を正しく図示できる。

1. 摩擦力は何を妨げるのか

机の上に置いた本を指で軽く押しても、本が動かないことがある。さらに強く押すと、本は滑り始める。

このとき、最初は本が動かないのに、あるところから動き始めるのはなぜだろうか。

本と机の接触面では、二つの面が互いに滑ることを妨げる力が働いている。この力が**摩擦力**である。

摩擦力

摩擦力は、接触している二つの物体の間に働き、接触面での相対的な滑り、または滑ろうとする傾向を妨げる力である。

接触している面が滑っていないときに働く摩擦力を**静止摩擦力**、滑っているときに働く摩擦力を**動摩擦力**という。

ここで重要なのは、地面に対して物体が動いているかどうかではなく、**接触している相手の面に対して滑っているかどうか**である。

例えば、動いているベルトの上に置かれた箱がベルトと一緒に動いている場合、箱は地面に対して動いていても、ベルトに対しては滑っていない。

このような接触では、静止摩擦力を考える。反対に、箱がベルトの上を滑っていれば動摩擦力を考える。

接触面の状態	用いる摩擦力	向きを決める手掛かり
相対的な滑りがない	静止摩擦力	滑ろうとする傾向
相対的な滑りがある	動摩擦力	実際の相対的な滑り

摩擦力の向きを考えるときも、最初に「どの物体が、どの面に対して滑るのか」を確定する必要がある。

2. 静止摩擦力は必要なだけ働く

2.1 押す力がゼロなら摩擦力もゼロになる

粗い水平な床に物体 A を置き、右向きの水平な力でゆっくり押す場面を考える。

ここから使う数値は、摩擦の性質を理解するために設定したものである。

物体 A の質量を $m = 0.50\,\mathrm{kg}$、重力加速度の大きさを $g = 10\,\mathrm{m/s^2}$ とする。鉛直方向に働く力は重力と床からの垂直抗力だけであり、鉛直加速度はゼロである。

物体が受ける重力の大きさを W とすると、

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

となる。

床が物体を上向きに押す力を**垂直抗力**といい、その大きさを N と表す。この条件では上下の力がつり合っているため、

$$N = W = 5.0\,\mathrm{N}$$

である。

ここで、記号 N は垂直抗力の大きさを表す。一方、数値の後に付ける N は力の単位ニュートンであり、意味が異なる。

まず、物体を水平方向に押していない状態を考える。

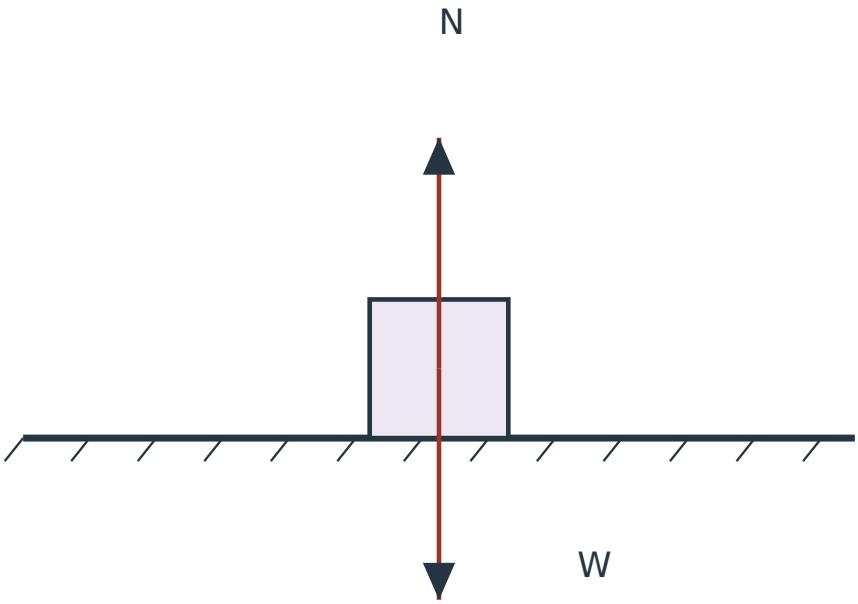

図 1　水平な粗い床の上で静止する物体 A。水平外力がないため静止摩擦力は 0 N であり、水平な摩擦の矢印は描かない。上下の矢印は共通尺度 20 px/N で描く

水平な外力がなく、物体が静止しているので、水平な力のつり合いから静止摩擦力の大きさは 0 N である。

粗い床に触れているだけで、一定の大きさの摩擦力が必ず働くわけではない。

2.2 押す力を強くすると静止摩擦力も変わる

右向きに 2.0 N の力 F を加えたところ、物体 A はまだ床に対して静止していたとする。

物体の水平加速度はゼロである。したがって、右向きの外力を打ち消すように、床から左向きの静止摩擦力が働く。

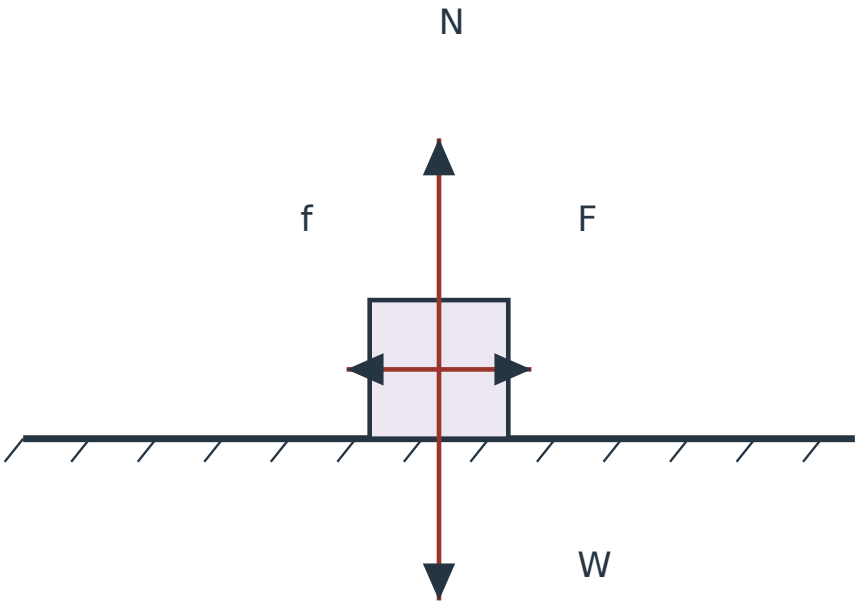

図 2　静止する物体 A の全力図。F は右向き 2.0 N、f は左向きの静止摩擦力 2.0 N。N と W は各 5.0 N。すべての力の矢印は共通尺度 20 px/N で描く

右向きを正として静止摩擦力の大きさを f_s と書くと、水平な力のつり合いは

$$F - f_s = 0\,\mathrm{N}$$

である。したがって、

$$f_s = F = 2.0\,\mathrm{N}$$

となる。

押す力が 2.0 N だから、静止摩擦力も 2.0 N になったのである。

このように、静止摩擦力の大きさは最初から決まった値ではない。滑らずにいられる範囲では、必要な大きさに変化する。

2.3 静止摩擦力には最大値がある

ただし、静止摩擦力が無制限に大きくなるわけではない。

静止摩擦力の大きさが取り得る最大値を**最大静止摩擦力**といい、$f_{s,\max}$ と表す。

高校物理で用いる基本的な摩擦モデルでは、最大静止摩擦力は垂直抗力の大きさ N に比例する。

最大静止摩擦力

$$f_{s,\max} = \mu_s N$$

- $f_{s,\max}$：最大静止摩擦力の大きさ（N）
- μ_s：静止摩擦係数
- N：垂直抗力の大きさ（N）

静止摩擦力の大きさ f_s は、滑りがない状態で

$$0 \leq f_s \leq \mu_s N$$

の範囲を取る。

静止摩擦係数 μ_s は、接触する面の組合せや状態によって決まる量として、問題では数値を与える。力を力で割った比に当たるため、単位を持たない**無次元量**である。

物体 A と床の静止摩擦係数を $\mu_s = 0.60$ とすると、

$$f_{s,\max} = \mu_s N = 0.60 \times 5.0\,\mathrm{N} = 3.0\,\mathrm{N}$$

となる。

つまり、この床との接触では、物体 A が静止していられるように働く静止摩擦力は最大 $3.0\,\mathrm{N}$ である。

右向きの外力をゆっくり増やし、$F = 3.0\,\mathrm{N}$ になった状態を考える。

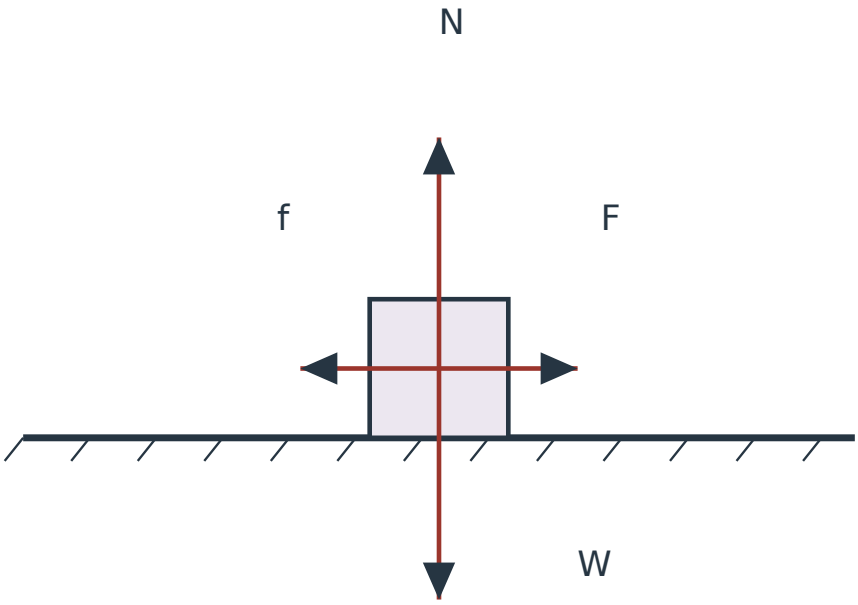

図 3　滑り出す直前の物体 A。右向きの F と左向きの静止摩擦力 f は各 3.0 N であり、最大静止摩擦力に達している。N と W は各 5.0 N。全力共通尺度 20 px/N

この状態では、静止摩擦力は限界に達している。しかし、**限界に達していることと、既に滑っていることは同じではない**。

限界とは、滑り出す直前の境界を表す。

押す力をさらに大きくすると、静止摩擦力では外力を打ち消せなくなる。したがって、物体は静止を続けられない。

ここまでの変化を比較すると、次のようになる。

右向きの外力 F	接触面の状態	静止摩擦力 f_s	判断
0 N	滑りなし	0 N	水平な力は働かない
2.0 N	滑りなし	2.0 N	力がつり合う
3.0 N	滑り出す直前	3.0 N	最大値に達する
3.0 N を超える	静止を維持できない	静止摩擦では対応不可	滑り始めた後は動摩擦を考える

©ミライコーチング

静止摩擦力はいつ最大になるのか

静止摩擦力の式 $f_s = \mu_s N$ は、滑り出す直前の限界に達した場合にだけ成立する。

それ以外では、まず物体が滑らずにいられるかを確認し、力のつり合いから実際の静止摩擦力を求める。

最大値は「いつも働いている摩擦力」ではなく、「静止摩擦力が取り得る上限」である。

1

質量 0.50 kg の物体 A が粗い水平な床の上で静止している。床との静止摩擦係数は 0.60、重力加速度の大きさは $10\,\mathrm{m/s^2}$ とする。鉛直方向には重力と垂直抗力だけが働き、鉛直加速度はゼロである。

物体 A に右向きの水平な力 2.4 N を加えた。

(1) 最大静止摩擦力を求めよ。

(2) 物体 A は静止したままでいられるか。実際に働く静止摩擦力の大きさと向きも答えよ。

(3) 外力をゆっくり増やすとき、滑り出す直前の外力の大きさを求めよ。

解答・解説

(1) 鉛直方向には加速度がないので、垂直抗力の大きさは重力の大きさと等しい。

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

したがって、

$$f_{s,\max} = 0.60 \times 5.0\,\mathrm{N} = 3.0\,\mathrm{N}$$

となる。

(2) 外力 2.4 N は最大静止摩擦力 3.0 N より小さい。したがって、左向きに 2.4 N の静止摩擦力が働けば、水平な力がつり合う。

物体 A は静止したままでいられる。実際の静止摩擦力は**左向きに** 2.4 N である。

最大静止摩擦力が 3.0 N だからといって、実際の静止摩擦力も 3.0 N になるわけではない。

(3) 滑り出す直前には、静止摩擦力が最大値に達する。

$$F = f_{s,\max} = 3.0\,\mathrm{N}$$

したがって、求める外力は 3.0 N である。この値は滑り出す直前の限界を示しており、既に滑っている状態を表すものではない。

3. 滑っているときは動摩擦力を使う

3.1 動摩擦力の大きさ

静止摩擦力で支えられる限界を超えて物体が滑り始めると、接触面の状態が変わる。

このときに働くのが動摩擦力である。

高校物理の基本的なモデルでは、滑っている間の動摩擦力の大きさを次の式で表す。

動摩擦力

$$f_k = \mu_k N$$

- f_k：動摩擦力の大きさ（N）
- μ_k：動摩擦係数
- N：垂直抗力の大きさ（N）

動摩擦係数 μ_k も無次元量である。滑っている間の動摩擦力の大きさは、この基本モデルでは垂直抗力と係数によって決まる。

静止摩擦係数と動摩擦係数は別の量である。実際の多くの面では動摩擦係数の方が小さいが、問題では与えられた値を用いて判断する。

引き続き物体 A について、$\mu_s = 0.60$、$\mu_k = 0.40$ と設定する。

垂直抗力が 5.0 N のとき、

$$f_k = \mu_k N = 0.40 \times 5.0\,\mathrm{N} = 2.0\,\mathrm{N}$$

となる。

この条件では、最大静止摩擦力は 3.0 N、動摩擦力は 2.0 N である。

ただし、物体が静止しているのか、既に滑っているのかを確認せずに、二つの値からどちらかを選んではならない。

3.2 動摩擦力と運動方程式

物体 A が床に対して右向きに滑っている場合、床から物体 A に働く動摩擦力は左向きである。

右向きの外力 F も働くとき、右向きを正に取ると、水平な運動方程式は

$$F - f_k = ma$$

である。

ここで F は右向きに加えた一つの外力の大きさであり、左辺全体が符号付きの合力を表す。

外力だけを ma に等しいと置くのではなく、摩擦力も含めて合力を求める必要がある。

2

質量 0.50 kg の物体 A が、粗い水平な床の上を既に右向きに滑っている。右向きに 4.0 N の一定の水平力を加え続ける。

動摩擦係数を 0.40、重力加速度の大きさを $10\,\mathrm{m/s^2}$ とする。鉛直方向には重力と垂直抗力だけが働き、鉛直加速度はゼロである。

(1) 動摩擦力の大きさと向きを求めよ。

(2) 物体 A の水平方向の加速度を求めよ。右向きを正とする。

(3) この滑走中の区間では、物体 A の速さは増加するか、減少するか。

解答・解説

(1) 鉛直方向の力のつり合いから、

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

である。

物体 A は既に右向きに滑っているので、用いるのは動摩擦力である。

$$f_k = 0.40 \times 5.0\,\mathrm{N} = 2.0\,\mathrm{N}$$

したがって、動摩擦力は**左向きに** 2.0 N である。

物体 A が受けるすべての力を図示すると、次のようになる。

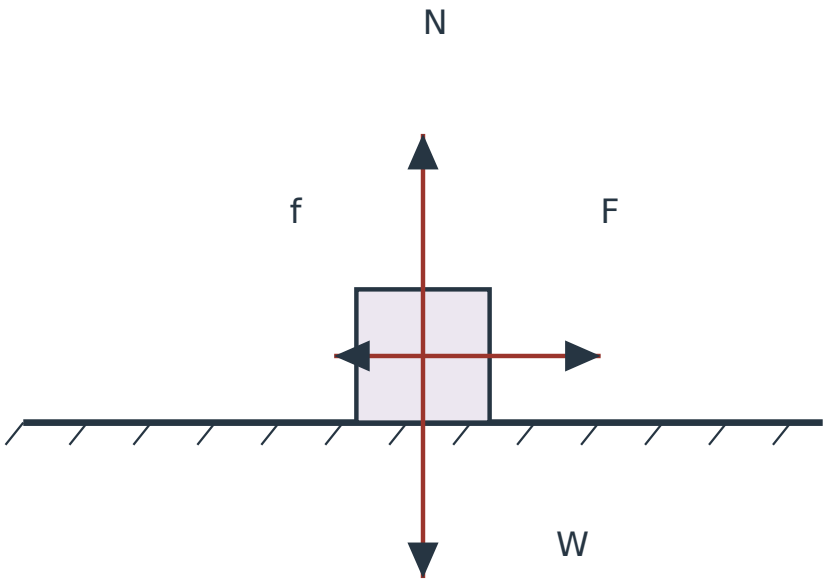

図 4　右向きに滑る物体 A の全力図。F は右向き 4.0 N、f は左向きの動摩擦力 2.0 N、N と W は各 5.0 N。力の作用を質点としてまとめ、全力共通尺度 20 px/N で描く

(2) 右向きを正にすると、水平な合力は

$$F - f_k = 4.0\,\mathrm{N} - 2.0\,\mathrm{N} = 2.0\,\mathrm{N}$$

である。

運動方程式 $F - f_k = ma$ より、

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

となる。

(3) 加速度は右向きであり、物体 A の速度も右向きである。速度と加速度が同じ向きなので、この滑走中の区間では速さは増加する。

なお、図の W は物体 A が受ける重力、N は床から物体 A が受ける垂直抗力である。物体 A が床を押す力など、別の物体が受ける反作用はこの全力図に含めない。

3.3 同じ外力でも摩擦の状態は変わる

摩擦の計算では、外力の大きさだけを見て静止摩擦か動摩擦かを決めてはならない。

次の二つの場面を比べる。いずれも物体 A の質量は 0.50 kg、垂直抗力は 5.0 N、静止摩擦係数は 0.60、動摩擦係数は 0.40、右向きの外力は 1.0 N とする。

条件	摩擦の種類	摩擦力の大きさ	加速度
初め静止している	静止摩擦	1.0 N	$0\,\mathrm{m/s^2}$
既に右向きに滑っている	動摩擦	2.0 N	$-2.0\,\mathrm{m/s^2}$

初め静止している場合、静止摩擦力が 1.0 N 働けば力がつり合う。その値は最大静止摩擦力 3.0 N 以下なので、静止を保てる。

一方、既に右向きに滑っている場合には動摩擦力が 2.0 N 働く。右向きを正にすると、

$$a = \frac{1.0\,\mathrm{N} - 2.0\,\mathrm{N}}{0.50\,\mathrm{kg}} = -2.0\,\mathrm{m/s^2}$$

となる。

この負の加速度は、右向きに動いている物体の速さが減少することを表す。

ただし、この運動方程式をそのまま物体が停止した後まで使ってはならない。停止して相対的な滑りがなくなったら、その時点の力の条件から静止摩擦力を考え直す必要がある。

状態を先に、式を後に

摩擦の問題では、次の順序で考える。

1. 力を受ける物体と、接触している相手の面を決める。
2. 初期状態と考える時間区間を確認し、相対的な滑りの有無を調べる。
3. 滑りがなければ静止摩擦力の限界を確認し、滑っていれば動摩擦力を用いる。
4. すべての外力を図示し、正方向を決めて合力を運動方程式に代入する。

外力の値だけで状態を決めないことが、最も重要である。

4. 垂直抗力が変わると摩擦力も変わる

4.1 垂直抗力はいつも重力と等しいわけではない

これまで、水平な床の上にある物体について、

$$N = mg$$

という関係を使ってきた。

しかし、この式はどの場面でも成立するわけではない。

鉛直方向に重力と垂直抗力だけが働き、鉛直加速度がゼロであるために成立した関係である。

ここで、物体 A を上からさらに押し付けることを考える。

物体 A には、重力 W に加えて、外部から鉛直下向きの力 P が働く。この P は重力とは別の力である。

物体が床に接触したままで鉛直方向の加速度がゼロなら、上向きの垂直抗力は二つの下向きの力の合計とつり合う。

したがって、

$$N - W - P = 0\,\mathrm{N}$$

すなわち、

$$N = W + P = mg + P$$

となる。

垂直抗力が大きくなると、摩擦係数が同じでも最大静止摩擦力や動摩擦力は大きくなる。

3

質量 $0.50\,\mathrm{kg}$ の物体 A を粗い水平な床に置く。静止摩擦係数は 0.60、重力加速度の大きさは $10\,\mathrm{m/s^2}$ である。

物体 A を鉛直下向きに $P = 5.0\,\mathrm{N}$ の力で押し付けながら、右向きに $F = 4.0\,\mathrm{N}$ の水平力を加える。物体 A は初め床に対して静止しており、鉛直加速度はゼロである。

(1) 床から受ける垂直抗力を求めよ。

(2) 最大静止摩擦力を求めよ。

(3) 物体 A は静止を保てるか。実際の静止摩擦力の大きさと向きも求めよ。

解答・解説

(1) 物体 A が受ける重力は

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

である。

下向きには重力 W と追加の力 P が働く。鉛直加速度はゼロなので、

$$N = W + P = 5.0\,\mathrm{N} + 5.0\,\mathrm{N} = 10.0\,\mathrm{N}$$

となる。

(2) 最大静止摩擦力は、

$$f_{s,\max} = 0.60 \times 10.0\,\mathrm{N} = 6.0\,\mathrm{N}$$

である。

(3) 右向きの水平力は 4.0 N であり、最大静止摩擦力 6.0 N より小さい。
したがって、左向きに 4.0 N の静止摩擦力が働けば、物体 A は静止を保てる。
実際に働くすべての力を示すと、次のようになる。

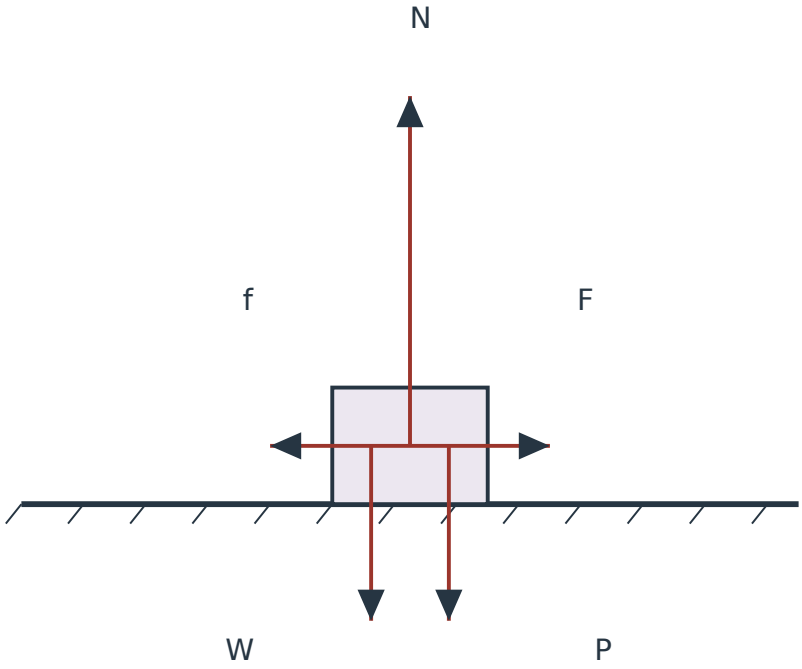

図 5　下向きに押されながら静止する物体 A。N は上向き 10.0 N、W と P は別々の下向き 5.0 N、F と静止摩擦力 f は反対向きに各 4.0 N。全力共通尺度 18 px/N。W と P の表示始点は識別のため左右へずらしたもので、回転や作用点の違いを計算しているわけではない

静止しているので、水平方向にも力がつり合っている。

$$F - f_s = 0\,\mathrm{N}$$

よって、

$$f_s = F = 4.0\,\mathrm{N}$$

である。

ここでも最大静止摩擦力は 6.0 N だが、実際に働く静止摩擦力は 4.0 N である。

同じ床・同じ物体について、押し付ける力の有無を比較する。

条件	垂直抗力	最大静止摩擦力
下向きの追加力なし	5.0 N	3.0 N
下向きに 5.0 N を追加	10.0 N	6.0 N

この比較では、質量、重力加速度、床との摩擦係数を同じに保ち、下向きの追加力だけを変えている。

その結果、垂直抗力が増えることで、最大静止摩擦力も増えることが分かる。

5. 摩擦力の向きは相手の面を基準に決める

摩擦力は「動いている物体に対して必ず運動方向と逆向きに働く」と覚えてしまいがちである。

しかし、これは地面に固定された床の上を滑る場合には当てはまっても、動く面と接触する場合には一般には正しくない。

5.1 動くベルトの上の物体

右向きに動く水平なベルトの上に、物体 A が置かれている場面を考える。

ある瞬間、地面に対するベルトの速度が右向きに 2.0 m/s、物体 A の速度が右向きに 1.0 m/s であり、物体 A はベルトに対して滑っているとする。

両方とも地面から見ると右向きに動いている。

しかし、ベルトの方が速いため、ベルトの上から見れば、物体 A は左へ滑っている。

右向きを正にすると、ベルトに対する物体 A の速度は

$$v_{\mathrm{A/ベルト}} = +1.0\,\mathrm{m/s} - (+2.0\,\mathrm{m/s}) = -1.0\,\mathrm{m/s}$$

である。

負の符号は、物体 A がベルトに対して左へ滑っていることを表す。

したがって、ベルトが物体 A に及ぼす動摩擦力は**右向き**である。

地面から見たもの	速度・向き
ベルト	右へ 2.0 m/s
物体 A	右へ 1.0 m/s
ベルトに対する物体 A	左へ 1.0 m/s
物体 A が受ける動摩擦力	右向き

物体 A 自身は地面に対して右へ動いているが、動摩擦力も右向きである。

これは摩擦力の向きが、地面に対する運動方向ではなく、接触面での相対的な滑りから決まるためである。

4

水平なベルトが地面に対して右向きに 2.0 m/s で動いている。

ある瞬間、ベルトの上にある物体 A は地面に対して右向きに 1.0 m/s で動いており、ベルトに対して滑っている。

(1) ベルトに対する物体 A の滑る向きを答えよ。

(2) ベルトが物体 A に及ぼす摩擦力の種類と向きを答えよ。

(3) 「物体 A は右へ動いているから、摩擦力は左向きである」という説明が正しいか判断し、理由を述べよ。

解答・解説

(1) ベルトの方が物体 A より右向きに速く動いている。そのため、物体 A はベルトに対して左へ滑っている。

(2) 接触面で実際に滑っているため、動摩擦力を用いる。

摩擦力は相対的な滑りを妨げる向きなので、物体 A が受ける動摩擦力は右向きである。

(3) 誤りである。

地面に対する物体 A の速度だけから摩擦力の向きを決めているためである。ベルトに対する物体 A の滑りは左向きなので、摩擦力はその逆の右向きとなる。

相対的に滑らない場合

物体 A がベルトと滑らずに一緒に動いている場合、静止摩擦力の範囲で考える。

ただし、相対的に滑っていないという事実だけから、静止摩擦力の大きさが決まるわけではない。物体 A に働くほかの水平な力と加速度を確認する必要がある。

例えば、水平なベルトと物体 A がともに一定速度で動き、物体 A に他の水平外力がない場合、物体 A の水平加速度はゼロであり、静止摩擦力も 0 N である。

演習問題

1

質量 0.50 kg の物体 A を粗い水平な床に置く。静止摩擦係数は 0.60、重力加速度の大きさは $10\ \mathrm{m/s^2}$ とする。鉛直方向には重力と垂直抗力だけが働き、鉛直加速度はゼロである。

物体 A は初め静止している。右向きの水平力 F を 0 N からゆっくり増やす。

(1) $F = 0\ \mathrm{N}$ のとき、実際の静止摩擦力の大きさを求めよ。

(2) $F = 1.5\ \mathrm{N}$ のとき、静止を保てるか。また、実際の静止摩擦力の大きさと向きを求めよ。

(3) $F = 3.0\ \mathrm{N}$ のとき、接触面はどのような状態にあるか説明せよ。静止摩擦力の大きさも求めよ。

(4) F を 3.6 N まで増やしたとき、物体 A は静止を続けられるか。理由を述べよ。

©ミライコーチング

2

質量 0.50 kg の物体 A が粗い水平な床に接している。静止摩擦係数を 0.60、動摩擦係数を 0.40、重力加速度の大きさを $10\,\mathrm{m/s^2}$ とする。

鉛直方向には重力と垂直抗力だけが働き、鉛直加速度はゼロである。右向きを正とする。

次の二つの場面では、どちらも右向きに 1.0 N の水平力が働いている。

- 場面 A：物体 A は初め床に対して静止しており、水平力を加えた後も滑っていない。
- 場面 B：物体 A は既に床に対して右向きに滑っており、水平力を加えている間も右向きに滑っている。

(1) 場面 A の摩擦力の種類、大きさ、向きを求めよ。

(2) 場面 B の摩擦力の種類、大きさ、向きを求めよ。

(3) 場面 B での加速度を求め、その区間で速さがどのように変化するか説明せよ。

(4) 場面 B の物体がその後停止したとき、滑走中に使った運動方程式をそのまま延長してよいか。理由とともに答えよ。

3

質量 0.50 kg の物体 A を粗い水平な床に置く。静止摩擦係数は 0.60、重力加速度の大きさは $10\,\mathrm{m/s^2}$ とする。

物体 A は初め静止しており、右向きに $F = 4.0\,\mathrm{N}$ の水平力を加える。床と物体 A は接触を保ち、鉛直加速度はゼロである。

次の二つの条件を比較する。

- 条件 A：鉛直方向の外力は重力と垂直抗力だけである。
- 条件 B：条件 A の力に加えて、鉛直下向きに $P = 5.0\,\mathrm{N}$ の力で物体 A を押し付ける。

(1) 条件 A、B のそれぞれについて、垂直抗力を求めよ。

(2) 条件 A、B のそれぞれについて、最大静止摩擦力を求めよ。

(3) 条件 A、B のそれぞれについて、右向きの水平力 4.0 N に対して静止を維持できるか判断せよ。

(4) 静止を維持できる条件では、実際に働く静止摩擦力の大きさと向きを求めよ。

©ミライコーチング

4

水平なベルトが地面に対して右向きに 3.0 m/s で動いている。

ある瞬間、ベルトの上にある物体 A は地面に対して右向きに 1.0 m/s で動き、ベルトに対して滑っている。

(1) ベルトに対する物体 A の相対速度を、右向きを正として求めよ。

(2) ベルトが物体 A に及ぼす摩擦力の種類と向きを答えよ。

(3) その後、物体 A とベルトが滑らず一緒に右向きの同じ一定速度で動いているとする。このとき、物体 A にはほかの水平外力が働かない。物体 A がベルトから受ける摩擦力の大きさを求めよ。

5

質量 0.50 kg の物体 A が、粗い水平な床の上を既に右向きに滑っている。

右向きに $F = 3.0\,\mathrm{N}$ の一定の水平力が働いており、動摩擦係数は 0.40、重力加速度の大きさは $10\,\mathrm{m/s^2}$ である。

鉛直方向には重力と垂直抗力だけが働き、鉛直加速度はゼロである。考える区間では物体 A は右向きに滑り続ける。

(1) 物体 A が受けるすべての外力を、向きと大きさが分かるように矢印で図示せよ。

(2) 水平方向の合力を、右向きを正として求めよ。

(3) 物体 A の加速度を求め、その向きと、滑走中の速さの変化を説明せよ。

©ミライコーチング

演習問題の解答・解説

1

(1) 鉛直加速度がゼロなので、垂直抗力は

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

である。

水平な外力がなく、物体 A は静止しているので、実際の静止摩擦力は 0 N である。

(2) 最大静止摩擦力は

$$f_{s,\max} = 0.60 \times 5.0\,\mathrm{N} = 3.0\,\mathrm{N}$$

となる。

1.5 N の右向き外力はこの最大値より小さいため、静止を保てる。

右向きの外力とつり合うように、実際の静止摩擦力は**左向きに** 1.5 N 働く。

(3) $F = 3.0\,\mathrm{N}$ は最大静止摩擦力と等しい。

したがって、物体 A は**滑り出す直前の限界状態**にある。静止摩擦力は左向きに 3.0 N である。

これは既に滑っていることを意味しない。動摩擦力へ切り替えるのは、接触面で滑りが起こった後である。

(4) 3.6 N は最大静止摩擦力 3.0 N を超えている。

静止摩擦力だけでは右向きの外力を打ち消せないため、静止を維持できない。

物体 A が滑り始めた後の運動を考える場合には、動摩擦力を用いて運動方程式を立て直す必要がある。

2

共通の条件から、

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

である。

(1) 場面 A では物体 A は滑っていないため、静止摩擦力を用いる。

最大静止摩擦力は

$$f_{s,\max} = 0.60 \times 5.0\,\mathrm{N} = 3.0\,\mathrm{N}$$

である。

右向きの外力は 1.0 N なので、この範囲内でつり合うことができる。

したがって、静止摩擦力は**左向きに** 1.0 N である。

(2) 場面 B では既に右向きに滑っているので、動摩擦力を用いる。

$$f_k = 0.40 \times 5.0\,\mathrm{N} = 2.0\,\mathrm{N}$$

よって、動摩擦力は**左向きに** 2.0 N である。

(3) 右向きを正として運動方程式を立てると、

$$1.0\,\mathrm{N} - 2.0\,\mathrm{N} = (0.50\,\mathrm{kg})a$$

したがって、

$$a = \frac{1.0\,\mathrm{N} - 2.0\,\mathrm{N}}{0.50\,\mathrm{kg}} = -2.0\,\mathrm{m/s^2}$$

となる。

加速度は左向きである。一方、物体 A の速度は右向きなので、この滑走中の区間では速さが減少する。

(4) そのまま延長してはならない。

停止して床に対する滑りがなくなれば、摩擦の状態が変わり得るためである。

この問題では、停止後も右向きの外力が 1.0 N のままなら、最大静止摩擦力 3.0 N の範囲内で左向きの静止摩擦力 1.0 N が働くことができる。

そのため、停止後は静止を維持できる。

同じ外力でも、初期状態と考える区間が違えば、摩擦力の種類と加速度が変わる。

3

(1) 物体 A に働く重力は

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

である。

条件 A では、鉛直方向に働くのは重力と垂直抗力だけであり、鉛直加速度はゼロである。

したがって、

$$N_A = W = 5.0\,\mathrm{N}$$

となる。

条件 B では、重力とは別に下向きの力 $P = 5.0\,\mathrm{N}$ が加わる。

鉛直加速度がゼロであることから、

$$N_B = W + P = 5.0\,\mathrm{N} + 5.0\,\mathrm{N} = 10.0\,\mathrm{N}$$

となる。

(2) 条件 A の最大静止摩擦力は、

$$f_{s,\max,A} = 0.60 \times 5.0\,\mathrm{N} = 3.0\,\mathrm{N}$$

である。

条件 B の最大静止摩擦力は、

$$f_{s,\max,B} = 0.60 \times 10.0\,\mathrm{N} = 6.0\,\mathrm{N}$$

である。

(3) 条件 A では、右向きの外力 4.0 N が最大静止摩擦力 3.0 N を超えているため、静止を維持できない。

条件 B では、右向きの外力 4.0 N は最大静止摩擦力 6.0 N 以下である。したがって、静止を維持できる。

(4) 静止を維持できるのは条件 B である。

物体 A は初め静止しているので、右向きの外力とつり合うように静止摩擦力が働く。

$$F - f_s = 0\,\mathrm{N}$$

より、

$$f_s = F = 4.0\,\mathrm{N}$$

である。

したがって、条件 B で実際に働く静止摩擦力は**左向きに** 4.0 N となる。

最大静止摩擦力が 6.0 N であっても、実際に必要なのは 4.0 N だけである。

4

(1) 右向きを正にすると、ベルトに対する物体 A の速度は

$$v_{\mathrm{A/ベルト}} = +1.0\,\mathrm{m/s} - (+3.0\,\mathrm{m/s}) = -2.0\,\mathrm{m/s}$$

となる。

したがって、ベルトに対する物体 A の相対速度は $-2.0\,\mathrm{m/s}$、すなわち左向きに $2.0\,\mathrm{m/s}$ である。

(2) 物体 A はベルトに対して左へ滑っている。

そのため、物体 A がベルトから受ける力は**右向きの動摩擦力**である。

(3) 物体 A とベルトが滑らず一緒に動いているため、接触面では動摩擦ではなく静止摩擦の範囲を考える。

物体 A の速度は一定なので、水平加速度はゼロである。また、ほかの水平外力は働かない。

したがって、水平な力のつり合いから、実際の静止摩擦力は 0 N となる。

接触面に滑りがない場合でも、摩擦力が必ずゼロでない値を取るわけではない。

5

(1) 物体 A が受ける外力は、右向きの水平力 F、左向きの動摩擦力 f_k、上向きの垂直抗力 N、下向きの重力 W の四つである。

鉛直方向の力のつり合いから、

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

となる。

動摩擦力の大きさは、

$$f_k = 0.40 \times 5.0\,\mathrm{N} = 2.0\,\mathrm{N}$$

である。

したがって、全力図は次のようになる。

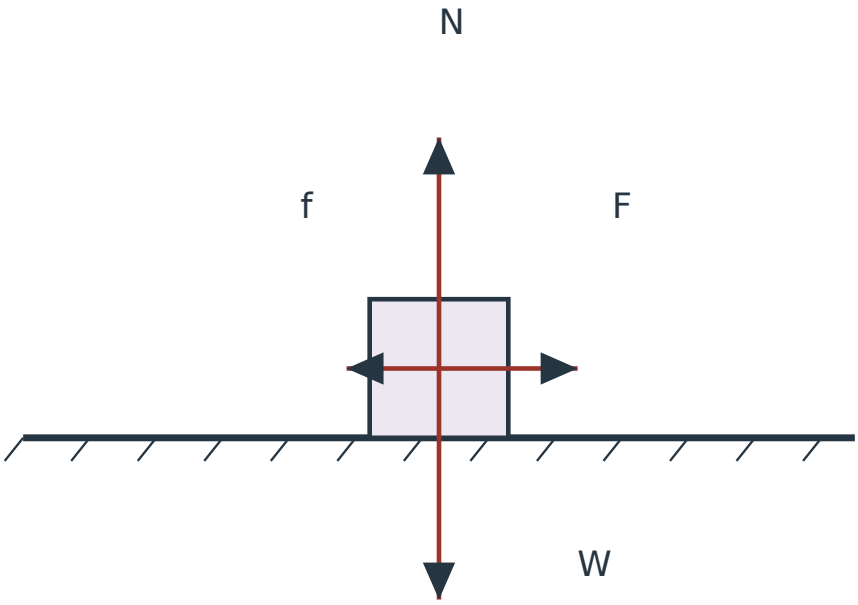

図 6　演習 5 の物体 A が受ける全力図。F は右向き 3.0 N、f は左向きの動摩擦力 2.0 N、N と W は各 5.0 N。すべて物体 A が受ける力であり、全力共通尺度 20 px/N で描く

図では、垂直抗力と重力の大きさが等しいので、上下の矢印は同じ長さである。

右向きの水平力は $3.0\,\mathrm{N}$、左向きの動摩擦力は $2.0\,\mathrm{N}$ なので、右向きの矢印の方が長くなる。

なお、ここでは既に滑っているという条件が与えられているため、静止摩擦力ではなく動摩擦力を描く。

(2) 右向きを正とする。

水平方向の合力は、

$$F - f_k = 3.0\,\mathrm{N} - 2.0\,\mathrm{N} = +1.0\,\mathrm{N}$$

である。

したがって、合力は **右向きに** $1.0\,\mathrm{N}$ となる。

(3) 水平方向の運動方程式は、

$$F - f_k = ma$$

である。

これに数値と単位を代入すると、

$$a = \frac{3.0\,\mathrm{N} - 2.0\,\mathrm{N}}{0.50\,\mathrm{kg}} = +2.0\,\mathrm{m/s^2}$$

となる。

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

物体 A は右向きに滑っており、加速度も右向きなので、この区間では速さが増加する。

摩擦力が働いていても、右向きの外力がそれを上回れば、右向きの合力が生じる。摩擦力の存在だけで減速すると決めることはできない。