

2.11 摩擦力とは

摩擦力とは何でしょう？実生活でも結構耳にする言葉ですよね。しかし、当然物理においては明確な定義とそれによる式が必要です。しっかりと理解しましょう！（実際は摩擦力の原因は接触する両物質の表面分子における分子間力によるものなのですが、ここでは古典的に物質表面の凹凸による説明にしておきます。）

摩擦力と言えば、なにがしかの抵抗力とだけ漠然と認識しているかも知れませんね。では、次の図をご覧ください。



図 1: 石磨き

少年が石を矢印の方向へ磨いています。何故かなんてことはどうでもいいです... (^^;)

さて、彼の石磨きにはどのような摩擦力が働くのでしょうか？...まず摩擦力が働く場所ですが、それはもう当然分かりますよね？

そうです。接触点でした。ですから、図 2 の場所となります。

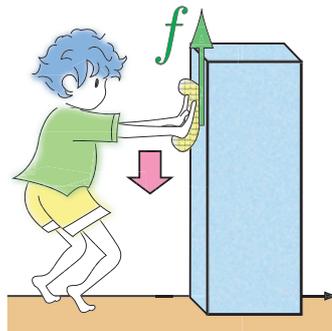


図 2: 摩擦力の発生場所とその方向

下向きに磨くわけですから、感覚的に上向きに抵抗があるのは納得してもらえそうです。（後々、感覚ではなくしっかりと理解してもらいますが、今は感覚的で結構です。）

では、この摩擦力の大きさは何に因って決まるのでしょうか？イメージしてみてください！

一つ目は「**接触する 2 物体の材質と表面の具合**」に因ります。例えば、「水に濡れた氷の壁」に同じく「水に濡れた氷」を接触させて擦っても、ツルツルで**ほとんど摩擦力を感じない**のに対して、「普通の壁」を「雑

巾」で擦るとしっかりと摩擦を感じるでしょう。

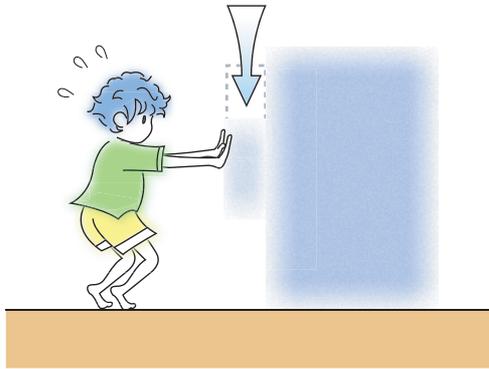


図 3: 水で濡れた氷同士

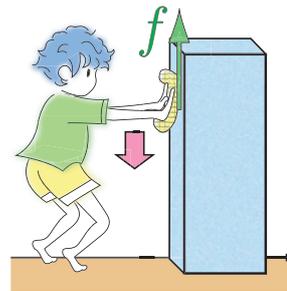


図 4: 壁を雑巾でこする

しかし、「水に濡れた氷の壁」がギザギザしていて、それを擦る側の「氷」も同じくギザギザしていたら、多少の摩擦力は感じそうですね。ですから、材質だけに依存するのではなく、**材質とその材質の表面の形状に依存する**のです。

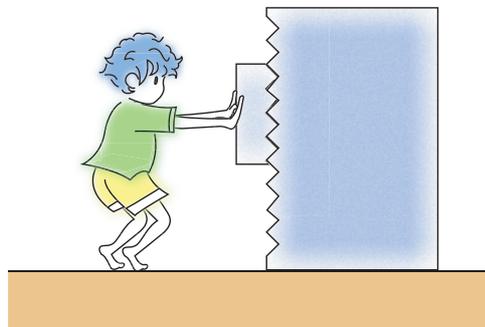


図 5: 表面がギザギザした氷同士の摩擦

さらにもう一つ摩擦力に影響を与えるものがあります。それは何でしょう？

実は「摩擦を生じる物体同士をくっつけるために押し付ける力」です。どんなに互いの材質と表面の状態が起因して摩擦が生じやすい状況にあっても、とても軽～く接触しているだけだったらさほど摩擦力を感じることなく動けるはず。しかし、それらを強く押し付けあっている状態で動かそうとすると大変ですよ。

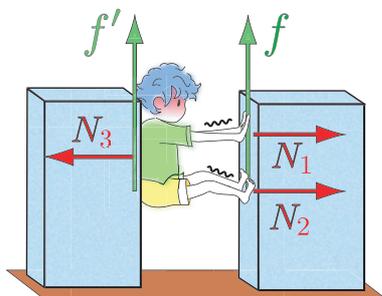


図 6: 強く押し付ける

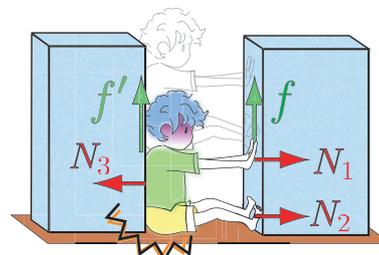


図 7: 力を抜いちゃった...

この状態、昔経験がありますよね？図 6 では摩擦を生じている手足・背中と壁を思いっきり押し付けているから摩擦力が大きく働き、下に落ちることはありません。それに対して、力を抜いてしまった図 7 においては、押し付ける力が弱くなったので、下に落ちてしまいました…。

この面に対して垂直に押し付ける力を「**垂直抗力**」と言います。つまりこの垂直抗力が大きければ、**摩擦力も比例して大きくなる**ということなのです！

結局、摩擦力は

- 接触する物質同士の材質と、その表面の状態に依存
- 接触する物質同士を押し付ける垂直抗力に依存

ということが分かりました。では、これを物理ではどのような式に表すのでしょうか？

接触する物質同士の材質とその表面の状態によって決まる定数を μ (ミュー) としておくと、押し付ける垂直抗力 $N[N]$ と μ により摩擦力 $f[N]$ は

$$f = \mu N \quad (1)$$

というように、それぞれの積で表されます。つまり、どんなに材質と接触面がザラザラしていても、押し付ける垂直抗力 N を $0[N]$ とすると、**摩擦力は全く働かない**し、逆にどんなに強く押し付けようとも、接触面が限りなくツルツルしている状態だったら ($\mu = 0$)、これもまた**摩擦力は全く働かない**ということです。

イメージ出来たでしょうか？

しかし、ここには実は大きな落とし穴が用意されているのです…。



2.12 摩擦力の場合分け

実は摩擦力には場合分けが必要になります。しかしそんなに大したことはありません。ちゃんとルールさえ守っていれば、絶対に間違はずなどないのです。…でも、守らない人が多いから、どうしてもひっかかってしまうんですね…自分が仕掛けた落とし穴に…。そうならないために、しっかりと理解して覚えましょう。

では摩擦力をどのように場合分けするのでしょうか？ 次の図をご覧ください。

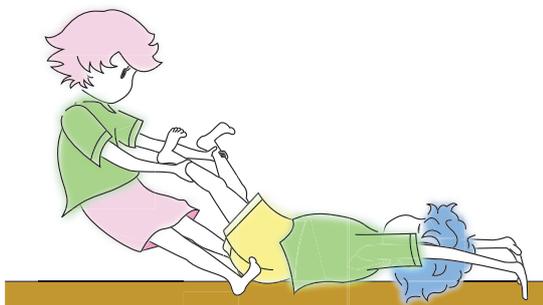


図 8: お兄ちゃん…邪魔！

掃除するときに、寝ているお兄ちゃんが邪魔なようです。妹は起こしても起きないお兄ちゃんの足を持ってズリ動かそうと思っています。さて、このとき**お兄ちゃんと床との間**にどのような摩擦力が発生しているのでしょうか？

ちょっとモデルを考えてみましょう。

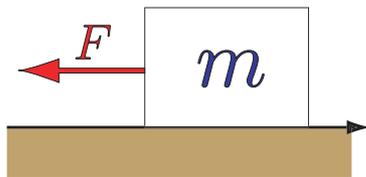


図 9: 簡易モデル

何やら一気に寂しい図になってしまいましたが、先ほどの寝ているお兄ちゃんを妹が引いている様子を表しています。つまりお兄ちゃんが四角い箱（質量 $m[\text{kg}]$ ）で、妹は力のみ $F[\text{N}]$ になっています。皆さんがよく見る物理のモデルそのままです。では、摩擦力を考えるツールを与えましょう。次のように、摩擦力が発生する面に三角形を2つ描いてください。

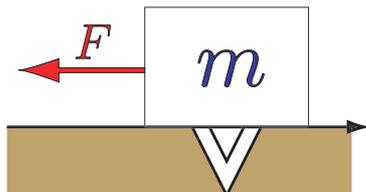


図 10: 摩擦を考えるツール

この三角形がどのような意味を持っているのかは次の図をご覧になっていただければすぐに分かると思います。

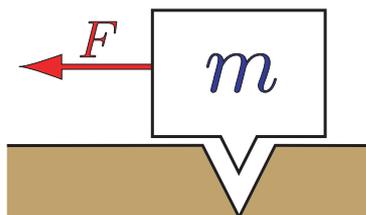


図 11: 2つの三角形の意味

実際の問題を解く場合にはこのように再度図示し直している暇はないので、図 10 のように2つを物体にくっつけて描きますが、小さな内側の三角形は実は上の物体の表面の凹凸を表した物体についている三角形で、大きな外側の三角形は下の物体（今回は地面）の表面の凹凸具合を表した、地面に付いている三角形です。

次に、これをどのように使うかと言いますと...、**運動の原因となっている外力に注目**するんです。今回、摩擦力が働く運動の原因となっているのは外力 $F[\text{N}]$ ですね。ですから、その $F[\text{N}]$ によって動く物体をわずかに動かしたときのことを考えてみるんです。そうすると図 12 のようになります。

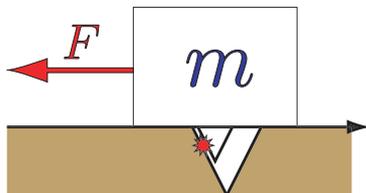


図 12: 物体を少し動かす

図 12 に示すように、物体を動かすことにより、2つの三角形の間で形成されていたV型の溝のうち左側の溝が接触します。実際はこれを頭の中で想像してV型溝の右と左、どちらが接触するかが分かったら図 13 のように2つの三角形の間の溝に書き込みます。

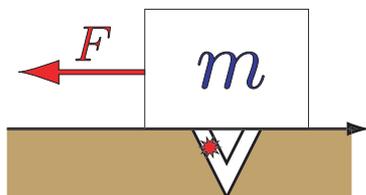


図 13: 状態を想像し、溝に接触点を書き込む

そうすると、摩擦力が勝手に見えてきます。では考えてみましょう。力はどこに発生するんだったでしょう？当然**接触点**ですよ。

見える力というのはどのような力だったでしょう。当然**受けている力**でしたね。そうすると、接触点により働き、物体から見える摩擦力が発生する場所は当然図 14 の点になりますし、もし必要なら地面から見える摩擦力が発生する場所は図 15 の点となります。



図 14: 摩擦力が働く点（視点：物体）



図 15: 摩擦力が働く点（視点：地面）

それをふまえて、物体に働く摩擦力 f [N] を描いてみると図 16 のようになります。接触点から垂直に発生するんですけどね。今回は垂直ではなく軸に沿った形に描いています。理由は簡単で、摩擦力とは動かしている方向と平行に（軸方向に）働くからです。あくまで三角形はモデルですから。

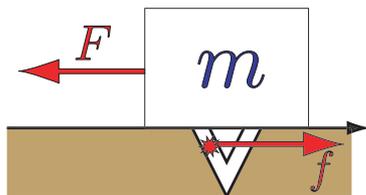


図 16: 物体に働く摩擦力の方向

今回は関係ないですが、地面に働く摩擦力を考える場合は図 17 のようになります。

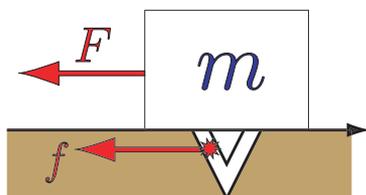


図 17: 地面に働く摩擦力の方向

当然**物体に働く摩擦力** f [N] と**地面に働く摩擦力** f [N] は方向は逆ですが、大きさは同じものとなりますね。なぜならばそれらは作用・反作用の関係にあるからです。

これで摩擦力を考えるツールの勉強は終わりました。では実際にこれを使って摩擦力を考えていきましょう。もう一度兄妹に出てきてもらいます。

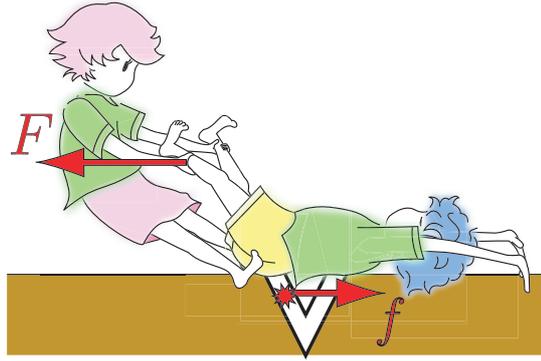


図 18: お兄ちゃん...やっぱり邪魔!

今度は摩擦力も描いてあります。さてこの摩擦力がどういう値になるか考えます。

2.12.1 お兄ちゃんが全然動きそうにないとき

妹が割りとは手加減して引っ張っています。ですからお兄ちゃんは全く動き出しそうにありません。このときの様子を図 19 に描いてみます。

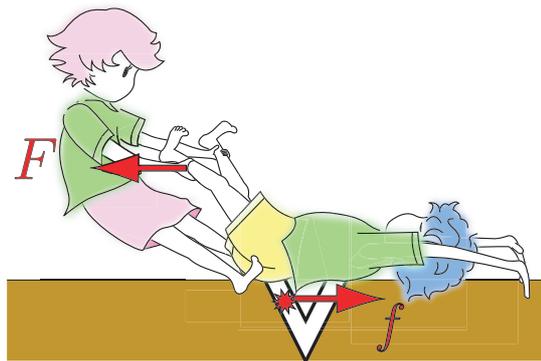


図 19: う...動かない...

さてこのときの摩擦力はいくらでしょうか? お兄ちゃんと床の触れ合う材質と表面によって決まる定数である**摩擦係数** μ というものがありました。実はこの摩擦係数には 2 種類あります。

$$\text{静摩擦係数: } \mu_0 \quad (2)$$

$$\text{動摩擦係数: } \mu' \quad (3)$$

よく間違ってしまうのですが、静摩擦係数は**物体が動き出そうとしている瞬間**の摩擦力にしか使えません。静摩擦係数とは言っているものの静止しているときに**常に使えるわけではない**のです。

動摩擦係数は呼んで字の如く**動いているとき**には常に使ってよい値です。では、このことをふまえてお兄ちゃんにどのくらいの摩擦力が生じているかを考えてみましょう。

今妹が $F[\text{N}]$ の力で軸と反対方向へ引っ張っています。つまりお兄ちゃんの足には、妹から引っ張られている手によって軸と反対方向へ力 $F[\text{N}]$ が働いているわけです。**しかしお兄ちゃんはまだ動いていない**わけです。

よね。動いていないということは当然お兄ちゃんの体に働いている力が**つりあっている**ということでした。では軸の方向を向いている力が必要になります。それが、摩擦力 $f[N]$ ですね。

したがって、摩擦力 $f[N]$ と妹が引く力 $F[N]$ には次のような関係があります。

$$F = f \quad (4)$$

アレ？さっき勉強した摩擦力 $f = \mu N$ を使ってないぞ？と思った方もいるかも知れません。しかし使いませんよ。よくこのときの摩擦力を $\mu_0 N[N]$ とする方がいます。しかし、それは実際には変な話です。先ほども言いましたように、 μ_0 は動き出す直前に**初めて**使える摩擦係数です。

動き出す直前の摩擦力を考えてください。相当大きな摩擦力になっていますよね。「もう動かすには無理だ！」と悲鳴を上げてしまう直前の摩擦力です。ですから μ_0 は大きな値となります。($N[N]$ が一定であることはもしかしたらこの時点ではまだ分かっただけでないかも知れませんが、そのうち分かりますので気にせずに進めてください。)

ですから、例えば $5[N]$ の力までお兄ちゃんは動かずに耐えられるとしましょう。つまり最大静止摩擦力が $5[N]$ だということです。今妹がお兄ちゃんを $1[N]$ の力で引きました。このとき床とお兄ちゃんの間働く摩擦力はいきなり最大静止摩擦力 $5[N]$ になるのでしょうか？

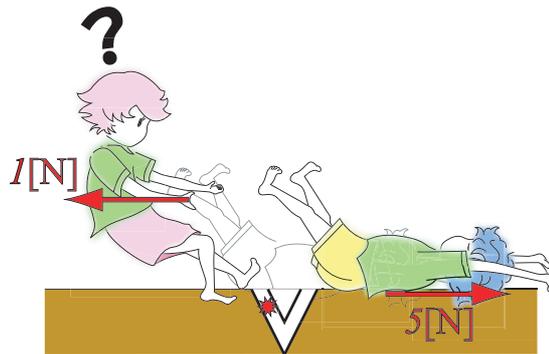


図 20: 寝ている状態で急に動き出すお兄ちゃん

ちょっと足を触って引っ張るといきなり背中だけで逆方向へ進みだすお兄ちゃんがいたら...ちょっと気味が悪いですね (^;)

現実にも考えてもそういう現象は起きません。つまり、あくまでも動き出す直前になるまでは、**引いた力 $F[N]$ と同じ大きさの摩擦力 $f[N]$** が発生するわけです。

2.12.2 お兄ちゃんが動き出す直前

さて、妹は徐々に力を入れていき、とうとうお兄ちゃんが動かずに耐えられる限界の状態になりました。ここでようやく先ほどの静止摩擦係数 μ_0 が使えます。接触している面同士を押し付ける力(垂直抗力) $N[N]$ も図に書き込むと図 21 のようになります。

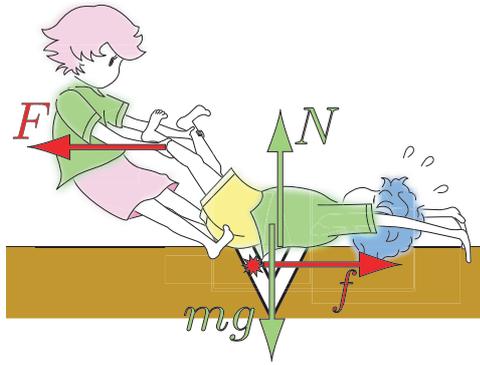


図 21: もう耐えられない!

このときの軸と鉛直方向の力のつりあいを見てみましょう。図を見ると一目瞭然ですね。

$$N = mg \quad (5)$$

となります。ですから、お兄ちゃんに働く摩擦力 f [N] は式 (5) より

$$\begin{aligned} f &= \mu_0 N \\ &= \mu_0 mg \end{aligned} \quad (6)$$

という結果になります。この式 (6) の $\mu_0 mg$ [N] を**最大静止摩擦**力と言います。

2.12.3 お兄ちゃんを動かしている最中の摩擦

さて、とうとうお兄ちゃんは動き出してしまいます。

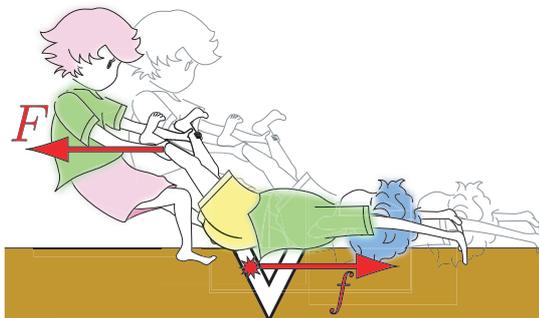


図 22: とうとう動き出す

そうしますと、お兄ちゃんに働く摩擦力は...先ほど動摩擦係数なるものがありましたよね。 μ' となっていたものです。動き出すとどんな力で引こうともほぼ同じ摩擦力になりますので、高校物理では常に一定の動摩擦係数 μ' で統一して扱います。つまり摩擦力は

$$\begin{aligned} f &= \mu' N \\ &= \mu' mg \end{aligned} \quad (7)$$

となります。

ではここでイメージしてみてください。**最大静止摩擦**力 $\mu_0 mg$ [N] と**動摩擦**力 $\mu' mg$ [N] はどちらが大きいのでしょうか？

体験的にも**最大静止摩擦**力 $\mu_0 mg$ [N] の方が大きいことは分かっていただけだと思います。つまり

$$\mu_0 mg > \mu' mg$$

つまり

$$\mu_0 > \mu' \tag{8}$$

という関係があります。これは2つの三角形で考えていただいても何となく想像がつくと思いますが、きっちりハマっている2つの三角形の状態から動かそうとするのは大変ですが、一度動き出すと小さな三角形はもう一度きっちりハマる前にまた次の大きな三角形に行き、そしてハマる前に...を繰り返すので動き出すときほどの力は必要ない。そう考えると、最も摩擦力が大きくなるのは**物体が動き出す直前**となるのも納得できますね。(まああくまでこれは三角形のモデルでのお話であり、摩擦力を物質間の表面の分子間力と考えた場合にはあてはまりません。しかし高校物理において摩擦をイメージする際に、まずは三角形モデルで考えていてよいのではないかと私は思っておりますので、ここではこのような形で公開しております。)