

## 第2章

# 力学：運動の法則

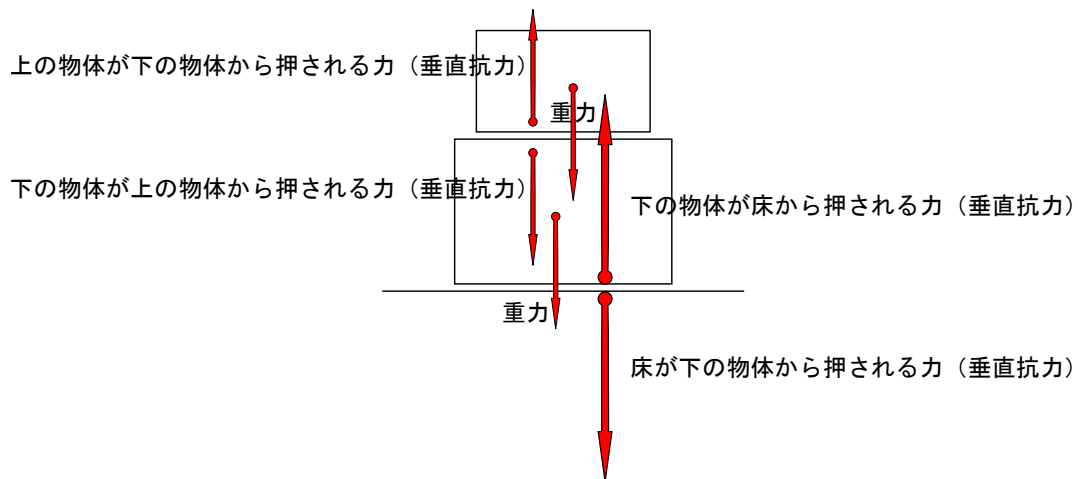
### 2.1 作用／反作用の誤解

最初のチェックテストについて考えていこう。

→ p6

#### 2.1.1 〈チェックテスト1〉

まず力の図の正解は次の通りである。それぞれの力の説明も加えた。



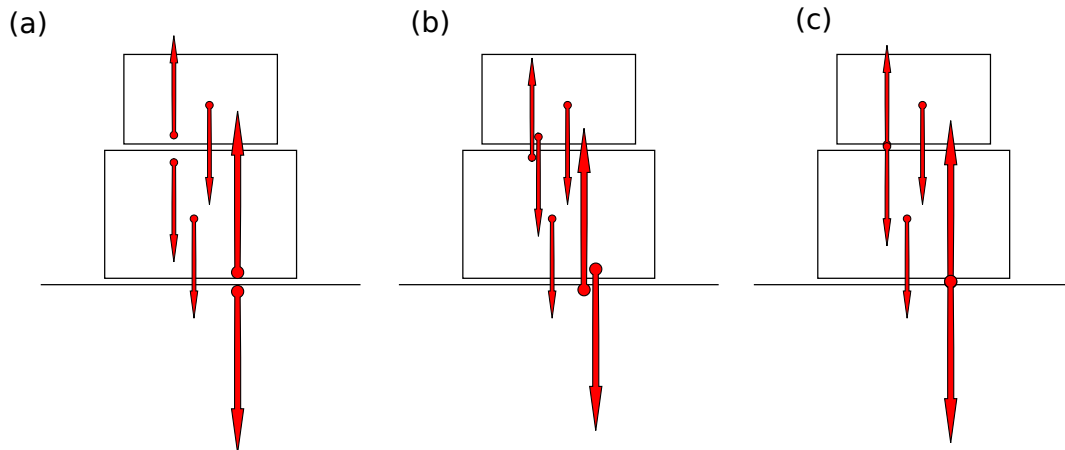
ところが、出題したこっちが驚くほどに、ちゃんと図が書けてないものが多い。頻出する間違いの、注意すべきポイントは

- 作用点の位置
- 作用・反作用のペア

である。

作用点の位置について述べよう。このようなチェックテストをやると典型的な解答（誤

答を含む) は以下のようなものだ。



上の (a) は正解である。(b) は「力の矢印の根本」を「作用点」すなわち「力がはたらくている点」ではなく「力を出している物体」に置いてしまっている間違いである。(c) は作用点を重ねて描いてしまったせいで「使いにくい図」になっている\*1。

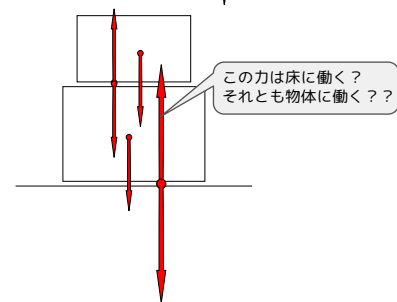
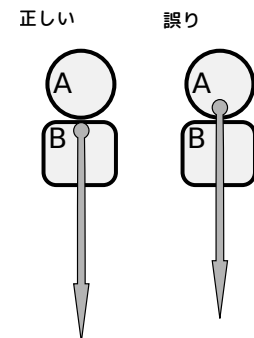
つまり (b)(c) は「作用点を明確にする」点に失敗しているのである。

「物体 A が物体 B を押す」力は、右の図のように、作用点の矢印が「押されている物体」である B の中にあるように描く。

「A が B を押すのだから、A から B へという力の流れがある」というイメージを持つと図の「誤り」の方の図を描きたくなるのかもしれないが、力の図を描くときは「誰が力の源か」よりも、「作用点」の方がずっと大事なのである。

なぜ作用点は明確でなくてはならないか。そもそも力の図を描く理由は「ある物体に働く力の和」を考えて、運動方程式やつりあいの式を作りたいからである。ということは「どの物体に働いている力か？」が明瞭でない図は、その用途の役に立たないのである。右の図は (c) の場合だが、この図をみて「さて物体に働く力のつりあいの式を作ろう」と思ったとき、「この力はどっちなんだっけ？」と悩むことになる。(b) のように書いた場合はもっと困るだろう\*2。

これが「どの物体に働いている力かはちゃんと認識しているが図に描けていない」のならまだ救いがあるのだが、図に描けないということは実は「どの物体に働いている力なの

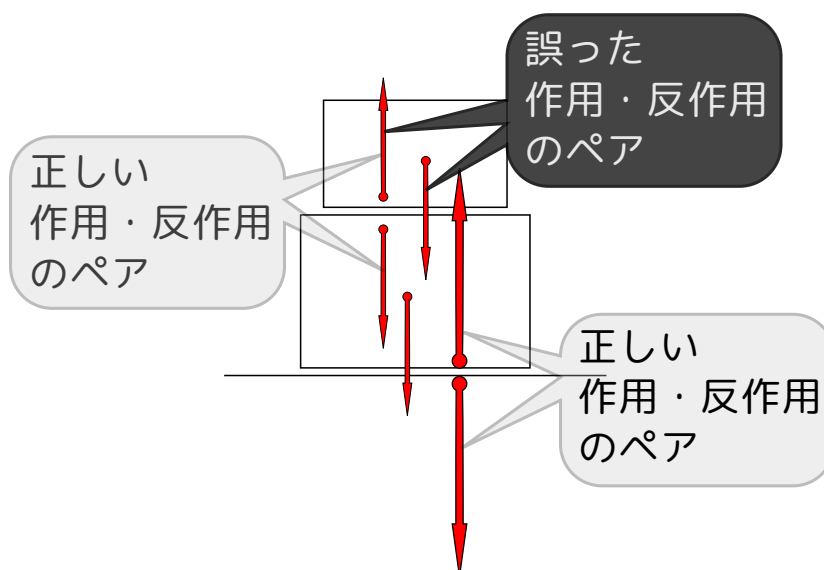


\*1 残念ながら、いくつかの本ではこの描き方がされているが、避けるべきである。

\*2 (b) のように間違える人は矢印の根元の●が「力を出している点」だと誤解しているのかもしれない。そういう人でも重力の矢印の●はちゃんと物体にある（このあたり、「重力」という言葉の意味に誤解がある可能性もある）。

かをちゃんと認識していない<sup>\*3</sup>」という可能性もあるわけである。

次に、作用と反作用のペアが何かについて。正解と、よくある間違いを下の図に示した。



図に書き込んだように「上の物体が下の物体から押される力（垂直抗力）」の反作用は、「下の物体が上の物体から押される力（垂直抗力）」である。ところが、「重力」の反作用が「上の物体が下の物体から押される力（垂直抗力）」だと思ってしまうという間違いが非常に多い<sup>\*4</sup>。

#### よくある質問

しかし、まず重力があり、その結果垂直抗力が生まれたのではないか？—これを「作用」と「反作用」と言てはいけないのか？

と思う人もいるようだが、それは「反作用」という言葉の響き（なんとなく「反対する作用」というイメージでとらえてしまう）に引っ張られて、物理の用語である「反作用」を間違えて解釈してしまっている。日常用語としてなら「作用が原因」となって反作用が起こる」というのは正しいが、物理における「作用・反作用」の関係はそうではない。

後で述べる話にも関係するのだが「作用・反作用」という言葉はあまりよくない。日常用語での「作用・反作用」という言葉は、「作用があつて、結果として反作用が生まれる」という「因果関係」を暗示しているため、そういう因果関係があるものならなんでも「作

<sup>\*3</sup> そもそも認識する必要があるのかもわかってない、「ぼんやりとした理解」の段階にある場合も、もちろんある。

<sup>\*4</sup> なお、この手の「どれとどれが作用・反作用？」という問題は高校入試でも頻出問題である。つまりは中学理科の段階でちゃんと理解しておかなくてはいけない事項なのだが、すでに述べたように、理系大学生ですら、しばしば間違える。

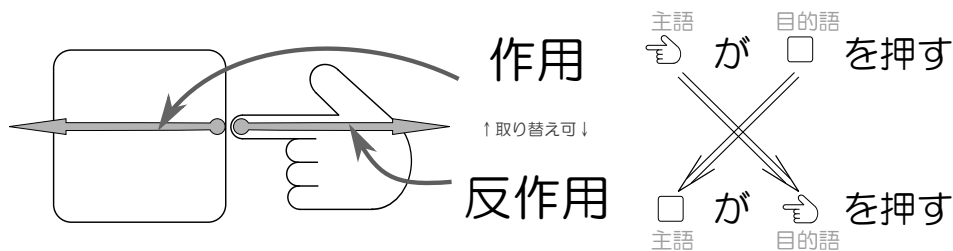
用と反作用」と呼びたくなるのである。ところが物理用語としての作用・反作用にはそんなものはない。

つりあいとの混同とも問題である。「つりあい」と「作用・反作用」は「力の和が0になる」という共通点があるために、ついつい混同してしまう人がいるようであるが、全く違う概念であることに注意しよう。「つりあい」とは「一つの物体に働く複数の力の和」が0になることであり、「作用・反作用」とは「物体 A から物体 B に働く力」と「物体 B から物体 A に働く力」の関係である。

- 「つりあい」は一物体に働く力の話
- 「作用・反作用」は別々の物体に働く力の話

をちゃんと区別しよう。

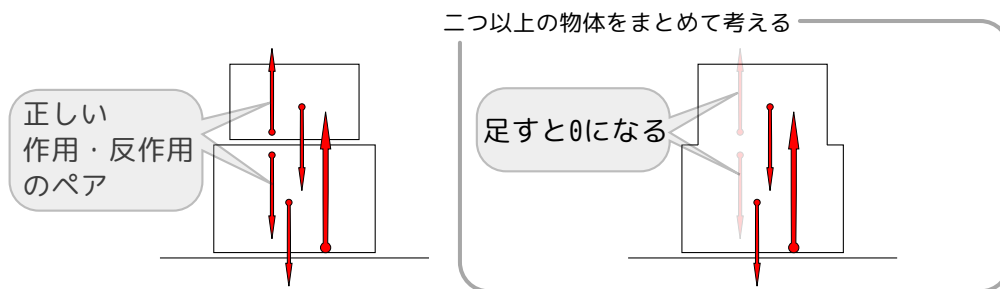
「作用・反作用ってつりあいますよね?」と、よく間違っている人がいるのだが、そんなことは絶対に起きない。なぜなら、作用・反作用の関係は



のようなものだからである。

二つの力が作用・反作用の関係にある時は、その力が働いている物体は必ず別の物体であり、いわば“主語と目的語を取り替えた関係”にある。「二つの力がつりあう」というのは「同じ物体に二つの力が働いて、足すと0になる」という意味なのだから、「作用・反作用がつりあう」ことは絶対にありえない。違う物体に働く力を足すことには意味がないからである。

なお、本当は二つの別々の物体であるものを「一つの物体とみなす」という考え方をする場合、「(一つの物体に働く)作用と(もう一つの物体に働く)反作用を(これら二つの物体を一つとみなせば同じ物体に働く力になるので)足すと0になる」と考えられる。



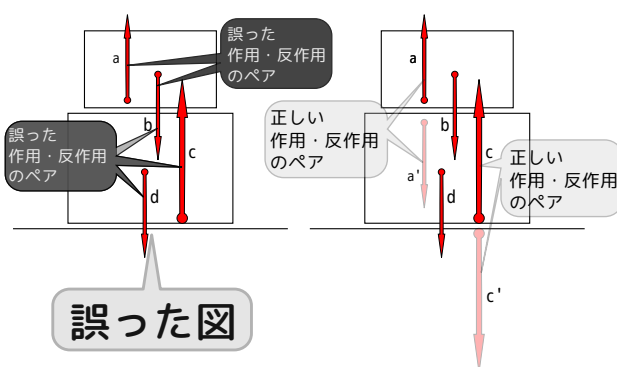
ただしこれは「二つ以上の物体をまとめて一つの物体として考える」ことをした時だけ

のことであり、二つの物体を別々に考えているときに「作用・反作用が足すと0になる」と考えるのは、やっぱり間違いである。

もう一つの頻出する間違いは、右の図のように力が足りない例である。

図のように「重力」「上の物体が下の物体から押される力（垂直抗力）」「下の物体が床から押される力（垂直抗力）」を描き込んだとすると、作用・反作用の法則（作用と反作用では「主語」と「目的語」が逆転する）からして「下の物体が上の物体から押される力」と「床が下の物体から押される力」が必要である。

しかしこの点を誤解していると、右の「誤った図」をみても「作用・反作用のペアがちゃんとある」と誤判断して思考停止してしまう。下の物体に働く力に関しては、「dとcが作用・反作用」の他に、「b+dとcが作用・反作用」という誤答もある。a'とc'を加えたものが正解である。



必要な力を補うと正解になるわけだが、これらの間違いが頻出するのは「作用・反作用をチェックする」という手順を踏んでいない結果であろう\*5。単に「手順を覚えてない」という意味ではなく「作用・反作用の法則の理解が何か足りない」という結果であろうと思われる（これは後でもわかる）。

#### よくある質問

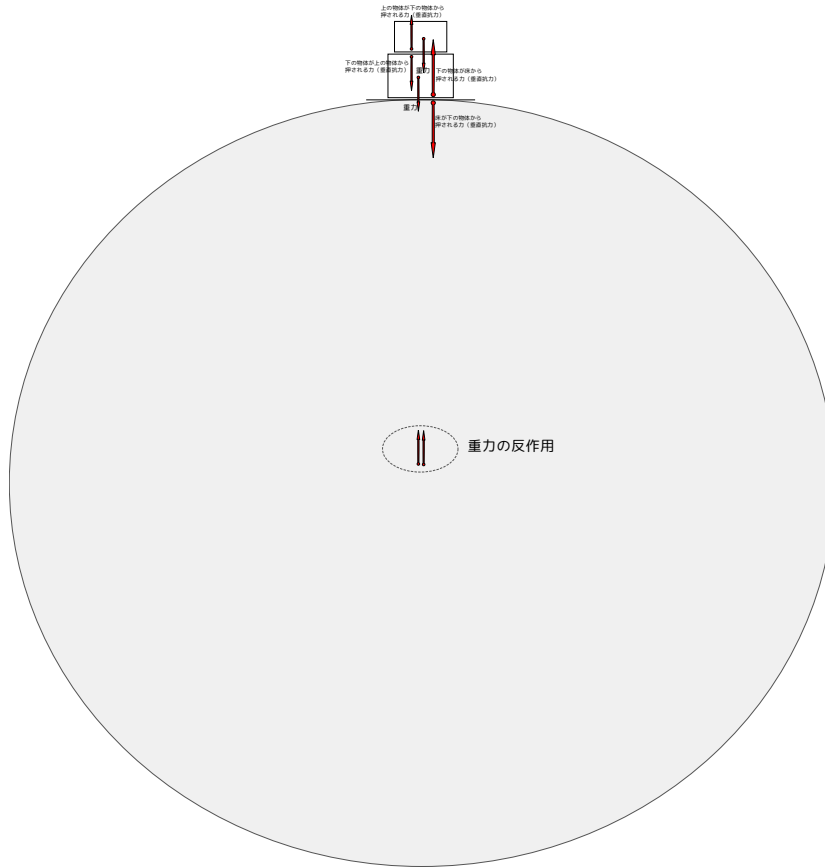
##### 重力には反作用がありませんが？

ある。図には描いてないだけである。

「重力」は「地球が物体を引っ張る力」だからその反作用は何が何を引っ張る力なのか??—と考えれば、図に描かれてない（正確に言うと、描いてはあるが考慮の埒外になっている）「物体」に反作用が働いていることがわかる。

重力の反作用も描いた図は、次のページ。答えを予想してから開いてみよう。

\*5 「床が下の物体から押される力」を忘れている場合については、「床のことも考えなくてはいけないということも忘れていた」といううっかりミスもあるのかもしれない。



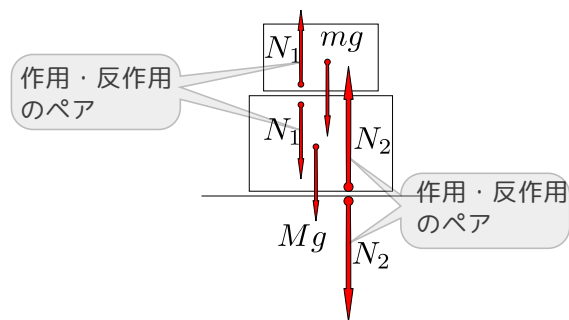
「重力」は「地球が物体を引っ張る力」だから、その反作用は「物体が地球を引っ張る力」である。万有引力の法則を習ったときに「万有引力は互いに引っ張り合う」ということを習ったはずである。

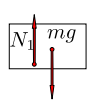
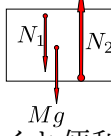
最後につりあいの式を出しておこう。  
右の図のように力の大きさを設定すると、  
2つの物体それぞれについて、

$$mg = N_1 \quad (2.1)$$

$$Mg + N_1 = N_2 \quad (2.2)$$

という2つの式が立つことがわかる。



この式をたてるときに、 と  のように物体ごとに分解して考えるときに、「作用点は物体の内側に」描いておくと便利なのである。

★【問い 2-1】

「地球」に対してつりあいの式を立てるとどうなるか？

## 2.1.2 〈チェックテスト2〉1.

次に

人間が壁を殴る（これを作用とする）。すると壁は目に見えないほど小さくではあるがいったんへこみ、弾力で元に戻る。戻ってくる時に人間のこぶしにあたる。この時働く力が反作用である。

を考えよう。これも間違い。実は作用・反作用は「同時に」働く。だから「壁を殴った」ときの作用はその瞬間に反作用があり、「壁が戻ってくる時」にはその瞬間にまた別の作用・反作用ペアがある。この「同時性」も「作用・反作用」という名前のせいで誤解されやすい部分である。

## 2.1.3 〈チェックテスト2〉2.

(2)の相撲取りと小学生を考えてみることにする。問題文は以下のものであった。

相撲取りと小学生が相撲を取っている。この時、相撲取りから小学生に及ぼされる力と、小学生から相撲取りに及ぼされる力を比べると、当然前者の方が大きい。

これに「○」をつけてしまう人が多いのは心情としては理解できる。確かに「相撲取りの方が力が強い」と言われたら「そりゃそうだ」と頷きたくなるものだろう<sup>\*6</sup>。

しかし、作用・反作用の法則を適用すれば、この二つの力の大きさは等しい。

よくある質問

じゃあどうして相撲取りが勝つの？

一言で言うなら、「働いている力はこの二つだけではないから」となる<sup>\*7</sup>。

人は、作用反作用の法則を習った後でも「力の強い方が相手に及ぼす力の方が強い」という素朴概念に勝てないものである。物理を教え学ぶには、このような「素朴概念」と戦って行かなくてははいけない<sup>\*8</sup>。どのように素朴概念が打破されて法則が打ち立てられて

<sup>\*6</sup> ちなみに「相撲取りよりも強い小学生がいるかもしれないから、こう言い切ったら間違いだ」という理由で×にした人もいた。「こいつは一本取られた」って感じだが、実は「相撲取りよりも強い小学生」がいたとしてもこの二つの力は等しいのである。

<sup>\*7</sup> また、働く力が水平でないということも関係してくる。

<sup>\*8</sup> 「素朴概念」という言葉だけを見るといい意味にとってしまいがちだが、理科教育の用語としての「素朴概念」は「児童生徒が勉強しなくても持っている、間違った概念」という意味なので、正していかななくてははいけない間違い、つまり「戦って行かなくてははいけない」敵なのである。

きたかという話は、この後でじっくりと話そう。

よくある質問

さっきの殴る話で言うと、殴ってないときは作用も反作用も0だから成り立っていないのでは？

作用・反作用の法則は「同じ大きさ」と言っているから、「作用がの大きさが0なら反作用の大きさも0」ってことで、作用・反作用の法則はちゃんとこの場合でも成り立っています。

### 2.1.4 〈チェックテスト2〉3.

作用・反作用の法則は物体がどんな運動をしていたとしても成り立つ法則である。

の答えは「○」である。理系大学生に聞くと、半数以上はあっているものの、いろいろおかしい理由付けで「×」とする人も出てくる。

以下、「×」とした人の「誤った理由付け」は、以下のようなものである。

物体が他の物体に力を及ぼす場合に成り立つ。

物体が互いに接触しているときに成り立つ。のように、制限つきで成り立っていると考えている人がいたが、及ぼさない場合にしろ接触してない場合にしろ、「力 = 0」ということであって、 $\underbrace{0}_{\text{作用}} = \underbrace{0}_{\text{反作用}}$  という形で成り立っている。なお、たとえば万有引力でも

作用反作用の法則は成り立つので、「接触している」に限るのはその点でもおかしい。

静止していれば成り立つという制限をつけている人は、おそらく「つりあい」と混同している。

変形があると成り立たないのような制限付けをする人もいるが、これも不要である。

二つの力が逆向きにはたらかなくてはいけないというのもあったが、それが作用反作用の法則であり、そうでない場合はこの世に存在しない。

そう、作用反作用の法則は「常に成り立つ」\*9からこそ「力学の基本原則である運動の法則」の第3法則となっているのである。

常に成り立つことがわかっている基本的な法則に対して「成り立たないこともある」という考え方を持っていては、正しく物理を教えることなどできない。

\*9 潔癖に徹すれば「我々は作用反作用の法則が成り立たない例を知らない」ということだ。これまでが人類が経験したすべての実験、観測したすべての現象において、作用反作用の法則が破れている証拠は見つかっていない。だから我々をこれを（少なくとも力学の範囲において）証明不可能な「要請（数学でいえば公理）」として扱う。



## 2.2 作用・反作用の法則に関するまとめ

作用・反作用の法則についてまとめておこう。

——— 運動の第三法則（作用・反作用の法則） ———

二つの物体 A,B があり、A から B に力が働く時には、必ず B から A にも力が働いている。この力は作用点を結ぶ直線の方にそって働き、互いに逆向きであって大きさは等しい。

である（「作用点を結ぶ直線の方にそって」の部分も大事なポイントではある）。

「つりあい」と「作用・反作用」は「力の和が0になる」という共通点があるために、ついつい混同してしまう人がいるようであるが、全く違う概念であることに注意しよう。「つりあい」とは「一つの物体に働く複数の力の和」が0になることであり、「作用・反作用」とは「物体 A から物体 B に働く力」と「物体 B から物体 A に働く力」の関係である。

- 「つりあい」は一物体に働く力の話
- 「作用・反作用」は別々の物体に働く力の話

をちゃんと区別しよう。

「作用」「反作用」という名前は実際のところ「悪い慣習」である。というのは、この言葉が、以下のような間違っただけ的印象を与えるからである。

——— これは間違い！！ ———

まず、物体 A から物体 B に「作用」という力が働くと、それが原因となって、物体 B から物体 A に「反作用」が返ってくる。

作用・反作用には時間差はないし、原因と結果という因果関係でもない（英語では action-reaction となって、ますます誤解が大きいように思われる）。

次の点も、よくある間違いである。

——— これも間違い！！ ———

物体 A が原因となって物体 B に力が働く時、物体 B に働く力が「作用」であって、物体 A に働くのが「反作用」である。

「作用・反作用」は「作用」が「主」、「反作用」が「従」という関係ではない。したがって、二つのペアとなる力のどちらを「作用」と呼び、どちらを「反作用」と呼ぶかは単に

「人の勝手」「その時の気分次第」である\*10。

この勘違いに連動して、このように間違っただけ概念を持っている人もいます。

——「作用→反作用」に連動した間違い——

私が壁を押す。壁は私を反作用で押し返す。私の力が主で壁の力はそれに応じて生じたものだから、

私の力の強さ > 壁の力の強さ

である。

そもそもないはずの「主従関係」を持ってしまったせいで、大小関係も勘違いしてしまうという間違いである。「作用・反作用」という名前に引きずられないように、注意しよう。

以上のような状況に対し、特に同様の誤解を持ってしまった人から「これは用語が悪い！」という感想が出てくることがある。ごもっともである。しかし、「教える立場」に立つ側としては、とりあえず今現在使われている用語を使って教えるしかないのだから、「悪い用語」を使いつつちゃんと教えるようにしていくしかない。誤解を持ったまま教えて「誤解の再生産」をしてしまうのが一番困る。

——よくある質問——

なぜ作用と反作用の大きさは等しいのか？

これは当然出てくる疑問であり、答えは明確に述べることができなくてはいけない。

これに対する正しい答えは「それが物理法則だから」ということになる。

教える側はどうしても生徒や学生の「なぜ？」という質問に（それらしい）答を返したくなるものであるが、上の質問に対してもっともらしい答えを用意することはよろしくない。ニュートン力学では「作用・反作用の法則」は証明できない物理法則（原理）である。

——補足——

「作用・反作用の法則は空間の並進対称性から証明できる」という立場も、あるにはある。その場合は「空間の並進対称性」を原理にしている。解析力学では、「作用\*11が並進対称性を持つ」ことから作用反作用の法則を導くことができる。

\*10 これに限らず、物理の世界では「人間の意図」などは現象に関係ないし、「何が主体として起こったのか」も実際に起こる現象がどうなるかは関係ない。

\*11 この「作用」は「作用」「反作用」の作用とは別の用語である。ややこしい。