

間違っていないですか？「作用反作用の法則」の理解

名前のイメージにダマされるな！

名前：山本明利

Romaji：YAMAMOTO Akitoshi

p38-41

リングにはたらく重力の反作用は？

「机の上に置いてあるリングにはたらく重力の反作用は？」教職課程の新入生に毎年行っているアンケートの1項目です。対象は中学・高校の理科の教員を目指す理系の学生です。「作用反作用の法則（ニュートンの運動の第3法則）」については中学3年の教科書に登場します。一時期、中学校学習指導要領から消えた時期もありましたが、現場ではずっと扱われてきたようです。したがって、「作用反作用」という言葉は学校などで一度は耳にしたことのある人が多いでしょう。

さて、アンケートの結果です。毎年約95%の学生が「(机からの)垂直抗力」「机がリングを押す(支える)力」などと答えます。あなたはどうか。「えっ、違うの？」とドキッとした方は、この後の記事をよく読んでください。学生の中には「学校で先生から確かにそう教わった」と強弁する者もいます。理科を教えている方、心当たりはありませんか。

生徒・学生ばかりではない

図1は「平成17年度佐賀県公立学校教員採用候補者選考専門試験・中学校理科」の問題1)の一部です。図は同様に書き直しました。

あなたはこの問題にどう解答しますか。出題者はどうやら、「重力の反作用」として机からの「垂直抗力」と答えさせたいらしく、その作

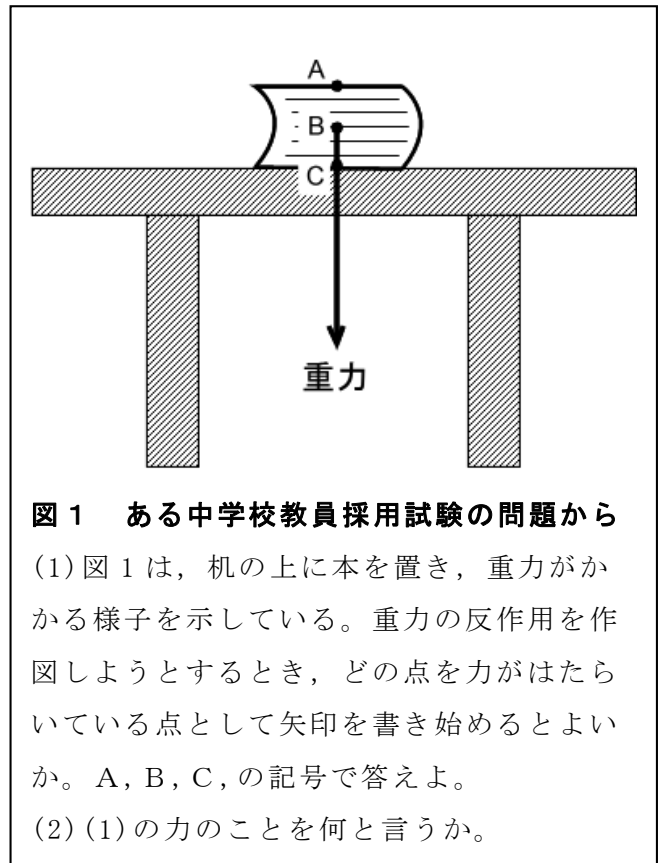


図1 ある中学校教員採用試験の問題から

- (1) 図1は、机の上に本を置き、重力がかかる様子を示している。重力の反作用を作図しようとするとき、どの点を力がはたらいっている点として矢印を書き始めるとよいか。A, B, C, の記号で答えよ。
- (2) (1)の力のことを何と言うか。

用点は机と本の接点Cにとるべきだと考えたようです。

この問題に関連して、筑波大学附属高校の鈴木亨さんが、中学校教諭を対象に実施したアンケートで図1と同様の図を示し、「本に働く重力の反作用にあたる力のことを中学生向けの言葉で言うと何と呼ばべよと思いますか。」とたずねたところ、回答した11名全員が、「机が本を押し返す力」「抗力」などと誤った力の名前を答えたとの報告があります²⁾。

大学の物理の先生の著作でもこんな例があります。参考文献3の著者は次のような記述を

繰り返しています。そう確信しているのです。

「作用力と反作用力の一例は 1.3 節に出てきた重力と垂直抗力です。」³⁾

「作用・反作用の法則：2つの物体が相互作用するとき、それらが静止または等速運動しているなら、それらに働く力は互いに逆向きで大きさが等しい。」³⁾ (傍線筆者)

読者の皆さんはそろそろお気づきでしょうか。以上の例はすべて、**作用反作用と力のつりあい**を混同したことによる典型的な誤りなのです。これは非常に手強い素朴概念です。

では正しくはどう考えたらよいのでしょうか。キホンのキに戻ってご説明しましょう。

反作用は主語と目的語を入れ替える

現行の高校「物理基礎」の教科書の表現を引用すると「作用反作用の法則」は次のように記述されています。他社も似たり寄ったりです。

「物体 A が物体 B に力を及ぼしているとき、物体 B は物体 A に対して、同一直線上で大きさが等しく、向きが反対の力を及ぼす。」⁴⁾

前章の記事で力学的な力は他動詞的な表現が可能だと述べました。この文章はまさにそうなっています。この文章の中には2つの力が登場しますが、前半の、物体 A が物体 B に及ぼす力では主語が A、目的語が B です。これに対して後半の、物体 B が物体 A に及ぼす力では主語が B、目的語が A となって入れ替わっています。前者を「作用」と呼ぶなら後者が「反作用」ですが、逆に呼んでも一向に構いません。両者は同時にはたらき、主従・前後の関係はありません。力は「相互作用」として常に一対で現れるものだからです。

反作用を判定する最も確実な方法は、力の他動詞的表現で主語と目的語を明らかにし、その上でそれらを単純に入れ替えることです。

前述の問題に適用してみましょう。「机の上のリンゴ（本）にはたらく重力」は他動詞的に表現すると何から何にはたらく力でしょうか。本誌 p. 35 の表 1 のとおり、重力は「地球が物体を引く力（万有引力）」なのですから、主語 A は地球、目的語 B はリンゴ（本）です。したがって、その反作用は A と B を交換して、

「リンゴ（本）が地球を引く力」と判定します。これが正解です。この力も万有引力です。万有引力のように空間を隔ててはたらく力でも、力は相互作用であり、物体同士が互いに引き合う形で一対で現れます。

結局、図 1 の佐賀県の問題は選択肢に正答がない欠陥問題だったこととなります。正しくは図 2 のように地球の中心に作用点を設けて、本にはたらく重力と同じ大きさで上向きの力を考えなければならないのです。

「本が地球を引くはずがないよ」などと根拠のない情緒的な判断をしてはいけません。あくまでも客観的に理詰めで考えることが、素朴概

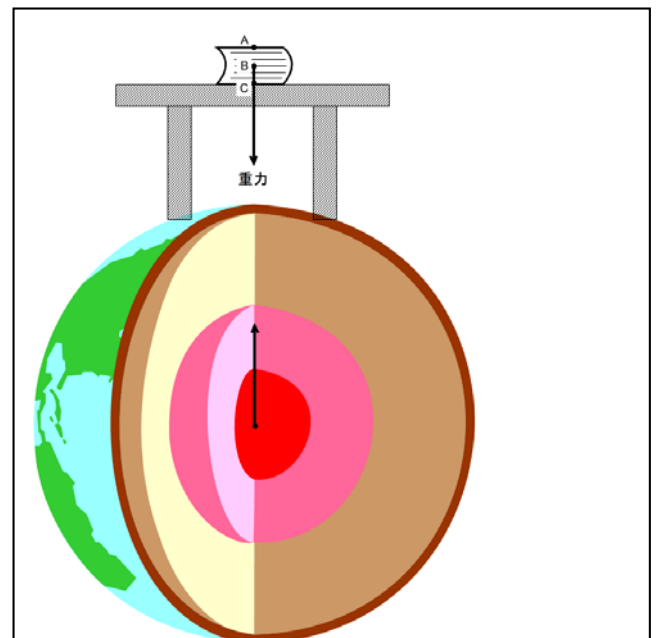


図 2 重力の反作用は？

重力は「地球が本を引く力」だから、その反作用は「本が地球を引く力」となる。机は一切関係がない。

念との戦いでは重要です。

冒頭の問題で「(机からの) 垂直抗力」「机がリンゴを押す(支える) 力」と誤答した方は、机を取り払ったらどうなるだろう、と考えてみるとよいでしょう。机がなくなると「リンゴにはたらく重力」はなくなるのでしょうか。そんなことはありませんね。机があろうとなかろうと、地球はリンゴに重力を及ぼしています。たとえ落下中でも・・・です。ですから、机は重力の反作用の相手ではあり得ません。机は誤答を誘う「目くらまし」だったのです。

重力が机を押すのではない

もうひとつ作用反作用に関して大事なチェックポイントがあります。相互作用としての一对の力である作用と反作用は、同種の力でなければなりません。一方が重力、他方が垂直抗力などという組み合わせはないのです。万有引力同士、抗力同士で一对の作用反作用となります。

それでは、冒頭の机の上のリンゴの問題で、机がリンゴを上向きに押す垂直抗力の反作用は何でしょう。先ほどの判定法を適用してみましよう。「机がリンゴを押す垂直抗力」の主語と目的語を入れ替えればよいのですから、「リンゴが机を押す垂直抗力」でいいのです。垂直抗力という力は物体同士が接触面に垂直に互いに押し合う力です。

さらにもう1問、その「リンゴが机を押す垂直抗力」は「リンゴの重さ」つまり重力だと言っただけではいけないのでしょうか。

これは断じて「否」です。前章で力は「持ち主」を意識することが大事だという話をしましたね。「持ち主」とは力の受け手、目的語のことです。「リンゴが机を押す垂直抗力」は机に、重力はリンゴにはたらく力なので、それぞれ持ち主が違います。これらは今の場合

はたまたま同じ大きさで同じ向きを向いていますが、全く別の力なのです。

リンゴにはたらく重力がそのまま伝わって机を押すと考えたくなりますが、それはまさに素朴概念です。前章でも強調したように、力は物体を伝わったり、通り抜けたりはしません。

作用反作用は「つりあう」ものではない

強い力士 A と弱い力士 B が相撲を取って、A が B を土俵の外へ押し出したとします。このとき、A が B を押した力と、B が A を押した力はどちらが大きかったのでしょうか。

「そりゃあ勝った方の力が強かったに決まってるよ。A が B を押した力の方が大きいはず。」と考えたあなたは、まだ素朴概念から脱出しきれていません。A が B を押した力と、B が A を押した力はまさに作用反作用の関係にありますからその大きさはいつでも等しいのです。2人の力士が組み合って静止してようと、加速度的に運動してようと、そんなことには関係なく、とにかく互いにおよぼし合う力は常に大きさが等しいのです。くどいようですがそれが作用反作用の法則の主張です。

それではこの押し相撲の勝負はなぜついたのでしょう。互いにおよぼし合う力が等しいならつり合って引き分けにならないのでしょうか。

ここでまた前章で学んだことを思い出してください。「力がつり合う」とは「合力が0になる」ことです。合力は複数の力をベクトル的に合成して求めますが、**合成できるのは同じ物体にはたらくしている力だけ**でした。作用と反作用は別々の物体にはたらく力なので合成することはできません。2物体間の作用反作用の関係にある力同士でつり合いを論じることはできないのです。

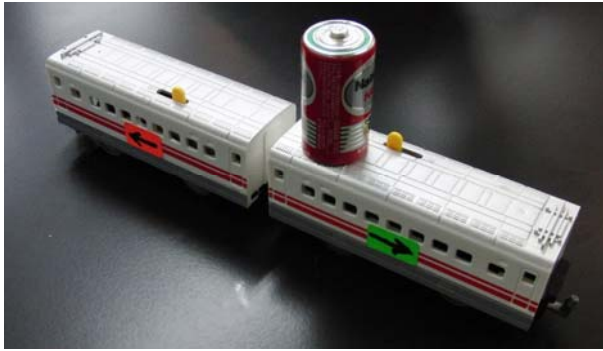


図3 電車の綱引き

おもりを載せた方が勝つ。

電車の綱引き

押し相撲の勝負がなぜついたかを考えるためにこんな実験をしてみましょう。おもちゃの電車の同じ動力車2台を互いに逆向きに連結して引き合いをさせてみます。動輪の滑り止めゴムは外しておきます。水平面上に置いてスイッチを入れると、双方とも車輪がスリップして動きません。まさに引き分けの状態です。

次に、一方の電池を故意に「弱った電池」にして車輪が弱々しく回転する状態で勝負すると、弱い方が引きずられると思いきや、やはり引き分けで動きません。

ところがこの状態で、図3のようにどちらか一方におもりを載せると、必ず載せた方が勝つのです。弱い電車もおもりを載せるだけで、元気の電車に勝てます。

勝った方の電車に注目すると、引き分けの時は、相手に引かれる力と面から受ける摩擦力が等しくて「つり合っていた」のですが、おもりを載せると摩擦力が増すのでつり合いが破れ、前進することができたのです。したがって綱引きも相撲も質量が大きいほど有利です。

名前のイメージにダマされるな

反作用という名前には、「作用を受けたことに反対／反応する」というような語感が感じら

れます。このため、作用反作用が力のつりあいと混同されやすいのではないのでしょうか。また、作用が原因となって結果として反作用が返ってくるというタイムラグの誤解が生じやすいのもこの語感のせいではないかと思います。

本誌 p. 71-73 の記事にあるように全てのものは力を受けると多かれ少なかれ変形しますが、変形したものが元に戻ろうとして反作用を生じるのだという説明をしたらそれは誤りです。作用と反作用には同時性と同等性があるのです。因果関係を求めてはいけません。このへんの議論は参考文献5, 6に詳しい解説があるので参照してください。

もうひとつ付け加えると、反作用は英語で reaction といいます。これまた「リアクションが返ってくる」という日常語の語感と結びついて誤解を生みやすい気がします。実は垂直抗力は英語で normal reaction というので（だから N という記号で表す）、きっと英語圏の人たちも作用反作用と力のつりあいを混同することが多いのだろうと想像します。

参考文献

- 1) 筑波大学附属学校教育局 (2005) 「試験問題から見る教員採用の現状と課題」時事通信出版局
- 2) 鈴木亨 (2006) 「作用反作用の法則にまつわる誤解」物理教育通信 No. 123
- 3) 飽本一裕 (2001) 「クイズで学ぶ大学の物理・たいくつな力学と波動がおもしろい」講談社ブルーバックス
- 4) 「物理基礎」(2・東書・物基301) 東京書籍 2013年
- 5) 石井信也「理科実験を楽しむ会」のHP http://sound.jp/oze_isihi/
- 6) 鈴木亨 (2002) 「理解と因果関係」物理教育通信 No. 107

RikaTan 原稿用紙

プロフィール

やまもとあきとし

北里大学で理科教員のタマゴを育てています。