

抗力の弾性モデルの功罪

～作用反作用誤概念への落とし穴～

山本 明利 (北里大学理学部・教職課程センター)

学生アンケートの結果から

大学初年次の学生 (中高理科教職課程履修者) に毎年アンケート調査を実施する。調査項目の一つに、作用反作用と力のつり合いの誤概念に関する問いがある。「机の上のリンゴにはたらく重力の反作用は何？」(記述式) という問いに対して、正答できる者はほとんどいない。物理学の学生においてさえ壊滅的な状況である¹⁾。

誤答のほとんどは重力の反作用として「抗力」「垂直抗力」「机がリンゴを支える(押す)力」などと答えるもので、間違っているとはいえ「抗力」「垂直抗力」という用語の定着率は非常に良い。おそらく8～9割に達するであろう。高等学校で「物理Ⅰ」(旧課程)や「物理基礎」(現行課程)を学ばなかった学生も少なくない状況でのこの定着率の高さは、中学校での学習の影響力の大きさを物語っている。

これらの用語が、中学校の学習指導要領には明記されていないにもかかわらず、中学校の教科書にほぼ例外なく記載され、しかも誤った概念として定着しているという実態は看過できない。石井信也氏が1983年に「汎日本的に誤解されている『作用・反作用』²⁾と表現した実態は、その後もほとんど改善されていないように見える。そこには、理科教育界に深く根を下ろした、手強い誤概念があるのではなからうか。

そもそも「抗力」とは何か

大きさのある物体同士が接触するとき、触れあう面間に互いにはたらく力が「抗力」である。抗力の面に垂直な分力は「垂直抗力」とよばれ、面に平行な分力が「摩擦力」である。垂直抗力

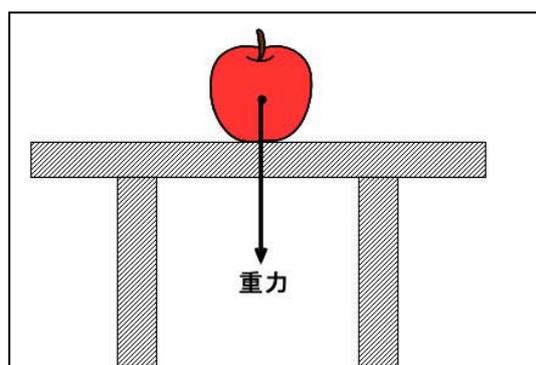


図1 リンゴにはたらく重力の反作用は？

正解は「リンゴが地球を引く力(万有引力)」である。この場合の重力は「リンゴと地球の引き合い」という相互作用であって、机はその相手ではない。

と摩擦力は、中学・高校では別々の力として扱われることが多いが、「抗力」として一本化して扱う方が、正しい作用点・作用線を見だしやすく、教育的であることが石井信也氏らによって主張されてきた³⁾。本稿では摩擦力を含む現象には踏み込まないので、「垂直抗力」の意味に限定して「抗力」と略称している。

ところで、中学・高校で学ぶ初等力学では、大きさのある物体は「剛体」として扱う。「剛体」とは外力を受けても変形しない物体のことで、質量のみで大きさを持たない「質点」や「伸びない軽い糸」や「滑らかな面」などと同様、理想化された実体である。こうした理想化は非現実的な印象も与えるが、単純化により本質的な中心概念を際立たせるための重要な思考手段である。初等力学はこうした理想化のもとに閉じた理論体系を形成している。

その中であって「抗力」は主として運動の束縛力として物体の軌道を限定するために登場する。複数の物体が押し合いながらその抗力の方向に動くような運動も高校では扱うが、いずれにしても「抗力」の大きさはつり合いの式や運動方程式を満たすように任意の値をとりうる。そんなつかみ所のない力だから初学者に教えるには工夫が必要になる。

学習指導要領と教科書における「抗力」の扱い

中学校学習指導要領および解説のいずれにも、「抗力」「垂直抗力」という用語はあらわには書かれていない。例えば新学習指導要領解説・理科編⁴⁾では「机の面が物体を押し上げている力」と表現している。力の及ぼし手と受け手を明記している点で、この表現はわかりやすく教育的である。

それでは教科書での記述はどうだろうか。手元の中学校理科の教科書から拾ってみよう。こちらは現行本である。下線は筆者が施した。

啓林館・未来へひろがるサイエンス1⁵⁾

抗力(垂直抗力) 物体を机の上に置くと、机がわずかに変形する。この変形した机が元に戻ろうとして、物体を面に垂直に押し返すようにはたらく。

啓林館・未来へひろがるサイエンス3⁶⁾

物体を机の上に置いたとき、地球が物体を引く重力と机が物体を押し返す抗力とがつり合って、物体は静止している。

大日本図書・理科の世界1年⁷⁾

「トピック・力のつり合い」

机は物体の重力によってわずかに変形し、その変形による弾性力が生じる。物体にはたらく重力と弾性力がつり合うのである。物体と机の間にスポンジをはさむと、物体の重力によるスポンジの大きな変形が観察できる。

大日本図書・理科の世界3年⁸⁾

「トピック・つり合う二つの力」

①机の上に物体を置くと、物体にはたらく

重力を受けて机はわずかに変形し、それにより生じる力(弾性力)で物体を支える。机の変形はわずかだが、たとえばスポンジなら、大きく変形する。しかし、弾性力で物体を支えていることに変わりはない。このように、面に接した物体が面から垂直に受ける力を垂直抗力という。

学校図書・中学校科学3⁹⁾

抗力はどのようにして生じるか

机などの面は、どのようにして抗力を生じさせているのでしょうか。うすい板を橋のように渡し、その上に物体を置くと(図a)、板は物体によって下向きに押され、変形します。変形した板は、もとの形にもどろうとして、ばねのような弾性力(変形した物体がもとにもどろうとして生じる力)を生じさせ、物体は上向きの力を受けます。

机の上に物体を置いた場合には、厚い板でできた机の面は変形するようには見えません。しかし、実際はわずかに変形しています。このとき生じた弾性力が、机の面から物体に加えられる抗力となります。

紙面の都合で、特に問題のなかった東京書籍と教育出版の引用は割愛した。各社とも学習指導要領の表現ではなく、あえて「抗力」「垂直抗力」という用語を用いている。

そして、東京書籍と教育出版を除く各社は、変形と弾性により抗力が発生するという主旨の説明をしている。いわゆる「抗力の弾性モデル」である。このモデルのルーツはよくわからないが、板倉聖宣氏の人気の授業書等¹⁰⁾¹¹⁾が普及に一役買ったことは想像に難くない。

なお、大日本図書版は、1年用も3年用も物体にはたらく重力がその物体を通して下の机やスポンジにはたらくとする典型的な「力のすり抜け」の誤概念を含んでいる。何が何におよぼす力なのかをしっかりと意識しないとこういうことになる。初歩的な誤りであるが、本稿の主題から外れるのでこれ以上深追いはしない。

意思を持つ物体？

さて、抗力の弾性モデルの何が問題なのか。科教協メンバーによる運動の甲斐もあって、さすがに反作用まで弾性力で説明してしまう教科書はなかったが、上記各教科書の記述にはまだ気になる表現が残る。それは「もとにもどろうとして」とか「押し返す」という表現である。

前者は「落ちようとする力」、「進もうとする力」のように、「物体が何々しようとする力」のたぐいである。あたかも物体が主体性を持って自主的に行動するかのような表現だ。これはアリストテレス流の自然観に通じる素朴概念である。初学者はともすればそうした素朴概念にとらわれがちであるからこそ、それを助長するような表現は物理教育の場では慎みたい。

ニュートン力学は、物体には慣性がある、外力がはたらかない限りその運動状態を維持すると教える。静止している物体は、いわば外力を受けるからしぶしぶ動くのであって、自ら進んで動こうとはしない。

次に後者の「押し返す」という表現である。「押されると変形し、戻ろうとして押し返す」これが「抗力の弾性モデル」のロジックである。しかし、石井信也氏の主張¹²⁾のように、「～し返す」という表現にはタイムラグが感じられ、押されたことが原因で、結果として押し返す力が発生したというニュアンスが伴う。しかし、この2力は作用反作用の対で、押し合いの相互作用だから、同時に発生し、順序性はない。これもまずい表現である。

かつて文部省（当時）もこんな誤りを犯したことがある。昭和43年告示の小学校学習指導要領¹³⁾の理科〔第6学年〕である。（下線筆者）

「(4)力の大きさは物の重さに置き替えられることを理解させる。

ア おもりをつるして静止したつるまきばねでは、ばねのもとにもどろうとする力とおもりの重さがつり合っていること。」

下線部が何から何にはたらく力なのか不透明な表現だったため、各社の教科書には「引

く力とばねがもどろうとする力がつりあう」のような表現があふれ、しかもそのまま検定合格してしまったので現場は大混乱に陥った¹⁴⁾¹⁵⁾。この誤った検定教科書により誤概念をすり込まれた世代（45～53歳）はまだ現役である。

批判を浴びたためか、次の改訂（昭和52年）以降、ばねが小学校から消えた。中学校から作用反作用の記述が消えたのもこのときである。後者は平成元年以降「内容の取扱い」で控えめに復活することになるが。

モデルの限界・禁断の領域

机や床がその上の物体に力を及ぼしていることが理解しにくいという学習者に、例えば光弾性の実験（図2）を示して、表面に力が加わると物体内部に変形が生じることを視覚化して示すことは説得力があるだろう。このときに注目させたいのは、力を及ぼし合う両物体が同時に変形していることである。両物体は、作用反作用の関係を保ちながら、互いに等しい大きさの力（共に抗力）を逆向きにおよぼし合いつつ、しだいに変形を進めていくのである。

変形が進行していく短時間の途中では、力は

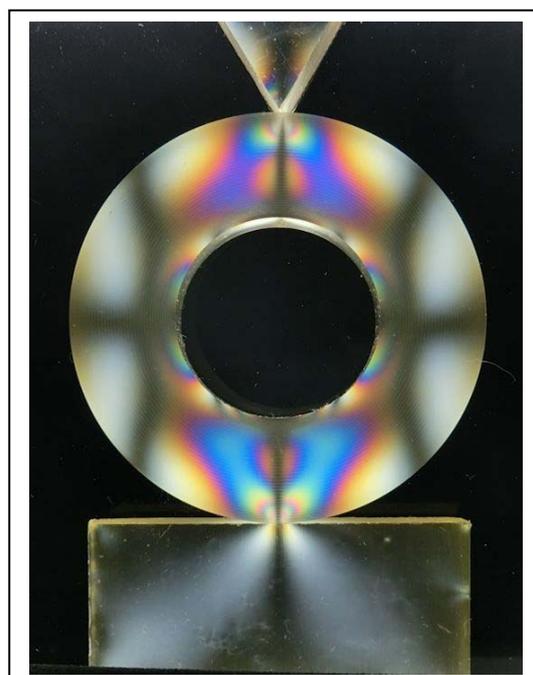


図2 光弾性の実験

つり合っていない過程もある。その場合でも両物体が押し合う「抗力」同士はどの瞬間にも等しく作用反作用の関係を保つ。

「光弾性」というぐらいだから、これはまさに物体の「弾性」の観察である。それを物体の構成粒子のレベルまで還元して、変形が原子間距離の変化によるとして「原子論的」に表現することはかまわない。しかし、モデル化して良いのはそこまでである。その先に待ち受ける、魅力的な禁断の領域に十分警戒しよう。

実在の固体が外部から力を受けると多かれ少なかれ変形することは事実である。それを「ものはみんなばねだ」と表現したり、さらにそれを原子論的に解説することは、それが生徒にとってわかりやすいならば差し支えない。

しかし、その先、「元の形に戻ろうとして抗力が生じる」と言うてはいけないし、いわんや「それが反作用の原因だ」などと口を滑らせてはいけない。これが禁断の領域である。

抗力は双方の物体が相互におよぼし合っており、変形は双方に同時に生じている。どちらが先でも後でもない。作用反作用の法則に原因などはないのである。

光弾性の実験を見せて、「ほら、机もリングも互いに相手から力を受けてひずんでいるのがわかるでしょう。お互いに力をおよぼし合っているんだね。」というだけで十分ではないか。その先に進むことで朝生邦夫氏らが言う「説明主義」¹⁰⁾に陥ることを恐れる。

鈴木亨氏は参考文献 17)の中で次のように警告している。

『反作用弾性力説』は、因果的な思考の枠組み、因果スキーマにみごとに合致する。すなわち、机上に置いた物体について、

①物体に重力が働く→②物体が机を押す→③机がわずかに変形する→④変形を戻そうと力が働く→⑤よって、物体に働く力がつり合うと解釈することで、因果の輪が完結し、これによって、認知的な安定に至る。ある程度学習を進めた生徒や大人が、誤概念を強固な信念とし

て形成する原因となっているのである。」

言い過ぎが言い訳を生み、しだいに説明のための説明に陥っていく泥沼の落とし穴がそこにはある。モデルは非科学にならない範囲で用いるのが理科教育の正しいスタンスだと思う。

鈴木健夫氏は「抗力」「垂直抗力」という言葉を使わず、弾性モデルに頼らない中学校の力学の再構築に取り組んでいる¹⁸⁾¹⁹⁾。その研究成果に注目したい。

参考文献

- 1)山本明利「初等力学教育における抗力と作用反作用の誤概念」北里大学教職課程センター教育研究第3号 2017年
- 2)石井信也「汎日本的に誤解されている『作用・反作用』」理科教室(新星出版)1983年12月号 p32
- 3)石井信也「抗力の作用点は？」理科教室(新星出版)1984年8月号 p.84
- 4)中学校学習指導要領解説・理科編(文部科学省)2017年6月
- 5)未来へひろがるサイエンス1(啓林館)平成27年2月 p.184
- 6)未来へひろがるサイエンス3(啓林館)平成27年2月 p.124
- 7)理科の世界1年(大日本図書)平成26年2月 p.178
- 8)理科の世界3年(大日本図書)平成27年2月 p.10
- 9)中学校科学3(学校図書)平成27年2月 p.12
- 10)板倉聖宣「授業書・ばねと力」(仮説社)1964年初版、1996年増刷
- 11)板倉聖宣「仮説実験授業—授業書〈ばねと力〉によるその具体化」(仮説社)1974年初版、1994年6刷
- 12)石井信也「〈～し返す力〉はやめよう」理科教室(新星出版)2000年11月増刊 p100
- 13)小学校学習指導要領(文部省)1968年(昭和43年7月告示、昭和46年4月施行)
- 14)三井伸雄「教科書の「力学教材」の問題点(1)」

理科教室 (国土社) 1971 年 1 月 p89

15) 三井伸雄「教科書の「力学教材」の問題点(2)」

理科教室 (国土社) 1971 年 5 月 p86

16) 朝倉邦夫「静力学でこそ「力」の基本を教えたい」理科教室 (新星出版) 1988 年 11 月増刊 p134

17) 鈴木亨「作用反作用の法則の説明論理に見られる誤概念の起源」物理教育 2008 年 Vol.56 No.4p.272-277

18) 鈴木健夫「力の学習の順序について (作用反作用の扱い)」科教協埼玉大会 2009 年 8 月

19) 鈴木健夫「力の学習—抗力を弾性で説明しない」科教協兵庫大会 2010 年 8 月