

こう教えればもっとわかる“運動の法則”

飯田洋治

大学生も間違える問題

力学を習う前の高校生は、根強い経験的概念をもっている。力学を習った後の大学生でも同じような傾向を示す。

次の問題は高校生と大学生に、力と運動の関係を調査*1したものである。

【問題1】は、一定の力で台車を引くことどのような運動をするかという問題である(図1)。調査によれば、「どんどん速くなる」と正しく答えた高校生(力学未修)は25%にすぎなかった。「ずっと一定の速さ」という生徒は25%、半数は「はじめのうち速くなり、すぐ

一定の速さになる」と答えた。やはり自転車などに乗った経験から、こう考える生徒が多いのであろう。すでに高校で力学を習ったはずの国立大学理科学部学生の正答率は63%であった。

【問題2】は自動車が等速度運動をしているとき、前向きと後向きとではどちらの力が大きいかという問題である(図2)。正解は「力はつり合っている」であるが、「前向きの力のほうが大きい」と答えた高校生は7割を超える。高校生の大多数は、「つり合っていたら動けない」、「動いている以上前向き

の力のほうが大きいはずだ」と考える。大学生の正答率は66%であった。

【問題3】では、高校生の全問正解者は171名中1名もいなかった(図3)。彼らの圧倒的多数は進行方向への力を描き、そのために間違えたのである。力学を習ったはずの大学生でも、正答率は4割程度であった。やはり彼らの2割近くが前向きの力を描いている。

以上の3問だけで、力学を習っていない高校生はほぼ完全に、「運動=力あり」と考えていることがわかる。大学生の各問の正答率はそれほど悪くはないが、3問とも正解であった大学生はわずか25%程度であった。

【問題4】になると、結果はもっと深刻である(図4)。振れている振り子の最下点では「糸の張力 T と重力 W がつり合っている」と答えた大学生は実に84%にもものぼる。正解は $T > W$ である。正解だった大学生は、わずか13%にすぎなかった。高校生より出来が悪い。

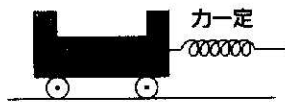
【問題5】は「等速円運動している物体に働く力」を聞いた問題である(図5)。正答率は大学生でも4割程度、高校生ではゼロであった。高校生の間違いの圧倒的多数は、9割以上が進行方向へ力があり、8割以上が中心から外向きの力があると答えたためである。

この調査はかなり古いものであるが、現在までにたびたび高校生に同様な調査を行った結果から見ても、この傾向は昔もいまもほとんど変わっていない。このことは、高校や大学で力学を教えるさいに、こうした経験的自然観が根強く存在するという事実を明確に認識しておくべきことを示している。生徒のもつ前概念や誤概念を正確に把握することなしに、克服すべき概

【問題1】

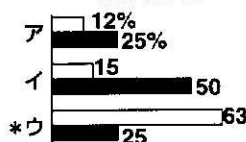
摩擦が大変小さい台車を同じ大きさの力で引き続けたら、その間、車はどのように動くか。

- (ア) ずっと一定の速さで動く。
 (イ) はじめのうち速くなり、すぐ一定の速さになる。
 (ウ) どんどん速くなる。



□ 大学生(114名) ■ 高校生(171名) *印 正解

【調査結果】

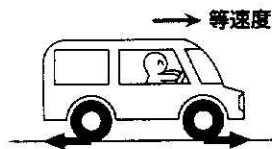


〈図1〉

【問題2】

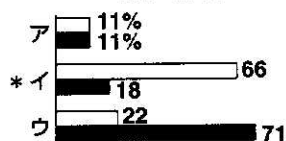
自動車が等速でまっすぐ走っているとき、次の力はどちらが大きいか。

- A. 車に前向きにかかる力
 B. 車に後向きにかかる力(空気抵抗や摩擦力など)
 (ア) $A < B$ (イ) $A = B$ (ウ) $A > B$



□ 大学生(114名) ■ 高校生(171名) *印 正解

【調査結果】



〈図2〉

*1 この調査は、力学を習っていない工業高校2年171名(1983.4調査)と、国立大学理科系学部1年114名(1983.6調査)、国立工業大学1年106名(1983.7調査)を対象として行ったものである。2つの大学の間には結果に大きな差はなかった。

念、科学的概念の形成は難しい。

「前向きの力」を描く理由

ほとんどの生徒が等速度運動している物体に、前向きの力を描く。それには彼らなりにのはっきりした理由がある。その理由はおおよそ次のようになる。

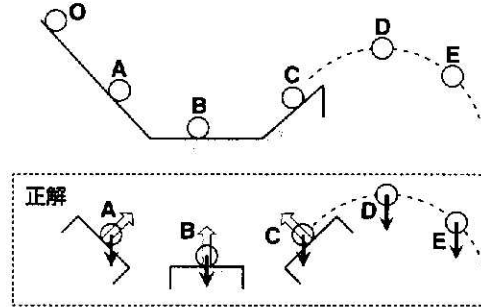
- (i) 「運動と静止はもともと違うもの」であり、「その区別は見ただけですぐわかる」と生徒はいう。生徒はこの考えを前提として、すべての力学現象を判断しようとする。
- (ii) 「何もしなければ止まったまま、これが本来の姿だ」(静止の自然観)。
- (iii) 「運動するものには、何か運動の理由があるはずだ」。そこで彼らはその理由を、自分の経験の中に求める。「何もせずにはじめから動いているものなど、どこにもない。自動車だって、たとえ等速度で走っていてもガソリンを使う」「だから動き続けるためにはたえず力が必要だ」と。

つまり、彼らは現在の運動を、過去の原因にさかのぼって判断しようとする。たしかに静止している状態から動き出すまでには力が必要である。しかし、この考えが拡大されて、等速度運動をしているときにも使われてしまうのである。だからはじめ加えた力がそのまま働いていたり、「こめられた力」「運動する力」「勢い」になったりするわけである。このように、彼らの誤りにははっきりとした法則性が存在する。

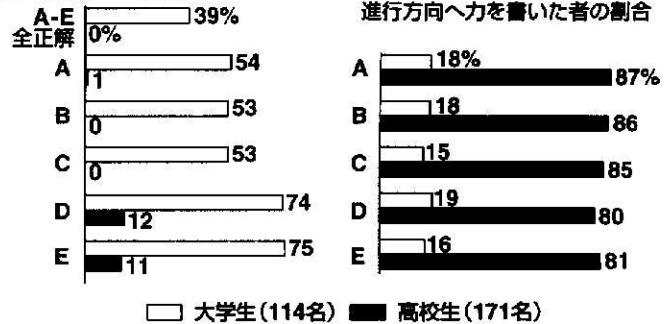
少なくとも、こうした自然観を放置したまま、正しい結論を強引に押しつけければ、彼らはただ知識として詰め込むしか方法がなく、心の中ではまったく信じる事ができないのである。こ

【問題3】

空気抵抗や摩擦が無視できるとして、O点から落とした球がA～Eにおいて受けている力をすべて矢印で描き込め。



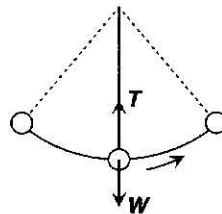
【調査結果】 正解率



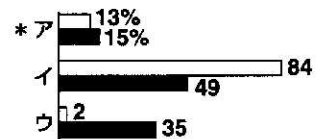
〈図3〉

【問題4】

振り子が振れているとき、図の最下点では糸の張力Tと重力Wはどちらが大きいか。
(ア) $T > W$ (イ) $T = W$ (ウ) $T < W$



【調査結果】

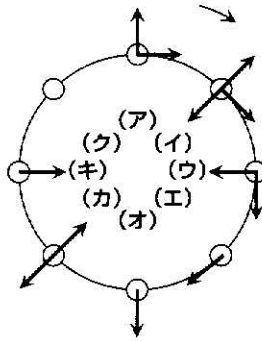


□ 大学生(114名) ■ 高校生(171名) *印 正解

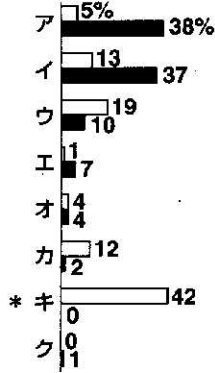
〈図4〉

【問題5】

等速円運動をしている物体がある。物体に働く力は次のどれが正しいか。ただし、物体の外から見ているとする。



【調査結果】



□ 大学生(114名) ■ 高校生(171名) *印 正解

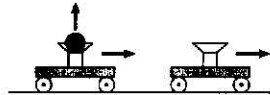
<図5>

【問題6】

台車が一定の速さで走っているとき、球を真上に打ち上げたらどこに落ちると思うか。

予想

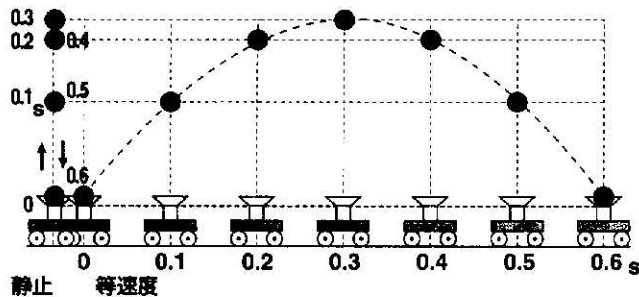
- (ア) 球は打ち出し口に落ちる
- (イ) 球は打ち出し口の後に落ちる
- (ウ) 球は打ち出し口の前に落ちる



<図6>

【作業】

台車の動きを0.1秒ごとに描くと図のようになる。0.1秒ごとの球の位置を図の中に描き入れ、0.1、0.2、…秒後の打ち出し口と球の位置を赤線で結びなさい。



<図7>

れでは大部分の高校生は力学がいやになり、わからなくなってもあたりまえではなからうか。

**等速度と静止の力学的同等性
——相対性原理を前提にした
慣性の法則**

30年ほど前から私は、ガリレオの相対性原理を事実上の前提とした導入を図れば、たいへんわかりやすい授業展開ができると主張し、実践してきた^{1)・3)}。ここではその中のいくつかの典型例を取り上げて述べたい。

この種の問題は、誰でも「ちょっと待てよ、本当はどっちかなあ」と戸惑い議論したくなる問題である<図6>。自分のもつ“静止の自然観”と衝突するから、おもしろい議論が展開される。実験で打ち出し口にスポッと球が入ると、いっせいに歓声とどよめき上がる。

その後で、ていねいに一定時間ごとのボールの位置と打ち出し口を赤線で結んでいく<図7>。球はいついかなるときも、打ち出し口の真上にある。つまり、この作業を通して「等速度運動しているものの上では、静止に比べて何ひとつ力学的違いが見つからない(静止と等速度の力学的同等性、ガリレオの相対性原理)」ことを確認するわけである。

この実験では、水平方向にまったく力を加えなかったのに、球は前へ一定の速さで動き続けているのだ。「何もせずに初めから動いている状態」、まさに水平方向には「自然に動いている状態」が実現しているのである。この事実を前にして、いつも「動いているか、止まっているか」で判断する彼らの考えは、まったく通用しなくなって

しまう。

実は、この問題は列車や船、飛行機の中の出来事と同じであることがわかる。私たちは、たとえ大地が動いていても、その動きをけって感じる事ができない。地球という宇宙船に乗っているからだ。相対性原理の発見は、動きを感じない世界の発見であったのである。

■ 等速度で動くのに力はいらぬ ——力は速度を変える

もちろん、いくら事実としての相対性原理を納得できたとしても、“動く力”の考えはそう簡単には消えない。どうしても、力との関係で、正面から生徒の経験的自然観と対決する必要がある。認識調査に使った【問題1】、【問題2】のような問題を、直接授業にかけるのである。経験的概念と科学的概念との対立点が明確なだけに、どちらの問題もまず間違いなく議論が起きる。

これは、静力学で学んだ力の原理の発展問題として位置づけることができる。実験は、【問題1】では、ゴムヒモの長さが一定になるようにして台車をひっぱるだけである。【問題2】では、台車の後に砂袋をつけてほぼ等速で動かし、台車の前後のバネののびの大きさを比べるだけでどちらが正しいか、簡単に実験で決着がつく。対立点が明確であるだけに、討論が白熱したときは感動的な実験になる。

こうして、「一定の力が働くと速くなるしかない」、「等速度のとき力はつり合っている。これが慣性の法則だ」という認識ができてくると、“動く力”の考えは大きくゆらいでくる。「運動=力あり、静止=力なし」と見る見

方ではなく、

「合力≠0→速度変化あり」：
力の原理

「合力=0→速度変化なし」：
(等速度、静止)
慣性の法則

と見る事が決定的に重要であることがわかってくるのである。

ここで初めて、原理をもとに力を定義する。「動く力」というような相手がなく、運動物体がもつものは、後で学ぶ運動量とか運動エネルギーとよぶもので、これは力とはいわない。力はものがもつ量ではない。だから「これからは、力というときは、ものを変形させるとか、運動に変化を生じさせるものだけを力とよぶことにしよう」と力を定義する。

このように“力の原理”と“相対性原理”を、たしかに成り立つ根本原理として導入し、生徒がもっている未分化な力の概念を分化させていく。そのためには一連の問題の積み重ねが必要なことはいうまでもない²⁾。“力の原理”を満たさない“力”は力ではない。“動く力”は力とはまったく別ものであり、力なしに動くというのが“慣性の法則”なのだということに確信がもてるようになると、生徒は急速に変わり始めるのである。

■ 慣性質量概念の形成

運動の第2法則 $ma = F$ を導くのに、まず $F \propto a$ を確認してから、その比例定数として m を導入するやり方では、慣性質量 m の運動において果たす役割はまったく浮かび上がってこない。

台車をゴムヒモ2本で引っ張ったとき、ゴムヒモ1本で同じだけのばしたときと同じ加速度運動をするようにす

るには、台車の質量を何倍にすればよいかと問うのである。2倍の力に対して、2倍の質量にしなければ加速度は同じにならない。 F に対応して m を決めるのである。こうすると、慣性質量が運動の変化を妨げる(等速度で動くとする)役割を果たしていることが、くっきりと浮かび上がってくる。式で書くと、

$$a = \frac{F}{m} \dots\dots \text{運動を変化させる}$$
$$a = \frac{F}{m} \dots\dots \text{運動の変化を妨げる}$$

となる。

落下法則が質量に関係しないのは、「重力が10倍となれば、10倍の速度変化が生じてよいはずなのに、慣性質量がちょうど10倍となっていて、10倍速度変化を妨げるために、それらがちょうど打ち消してしまうから」、つまり m と F がいつも比例しているということを明らかにする。

■ 形の原理から形成の原理へ

【問題4、5】のような問題に対して、生徒が誤った判断を下すのは、次のような理由が考えられる。

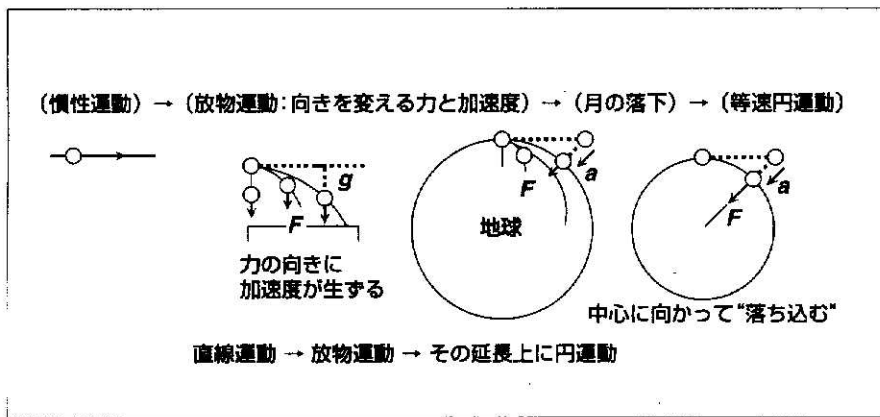
(i)「カーブするときは必ず遠心力が働く」

この言葉は身近な乗り物の経験から常識となっている。たしかに車の中にいる人は遠心力(慣性力)を感じるが、彼らはこの遠心力を観測系に関係なく、曲線運動に必ず付随する力だと判断してしまう。これが加速度系からみたときのみ生ずる力だとは考えないのである。

(ii)「つり合ったままカーブする」

「等速円運動には加速度はない」

彼らがこう考えるのは円運動などの曲線運動の形をあらかじめ与えられたものとして判断するからであ



〈図8〉

る。「運動の形が力によって形成される」とは考えない。

(iii)「等速度でも前向きに力が働く」

この点についてはすでに検討した。高校生・大学生のこのような誤りは、「向きを変える力」と「慣性運動の直線性」が、意識的に教えられなければ当然のことである。

歴史的に見ても、慣性の法則を発見したガリレオ自身、その直線性を明確に把握していなかった。地上での水平運動が直線であっても、天体規模に拡大すればそれは円の一部となる。だから、ガリレオの慣性の法則は天体では等速円運動であった。古代ギリシャ以来、天体の運動を、円という“形を原理”にして考える見方はまったく疑われることがなかった。コペルニクスも例外ではなかった。慣性運動の直線性を明確に指摘したのはデカルトである。円という“形の原理”を投げ捨て、惑星運動が直線運動からずれるのを、太陽からの力の作用によって説明しようとしたのはケプラーであった。デカルト、ケプラーの貢献があったから、ニュートンは万有引力の法則の発見ができたのである。このように、ケプラーからニュートンに至る過程には、“形をそのまま原理にする見方”から“形を生み出す原理”，つまり“形成の原理”の追求という重要な飛躍があることに注目したい。

ニュートンの運動方程式 $ma = F$ は“形成の原理”を表している。これを2

つに分けて考えると、「速さを変えるのも力だが、運動の向きを変えるのも力である」ということになる。つまり、力は運動を形成するとともに、その形も形成するのである。

私は、“向きを変える力”に視点を絞った教え方を通して、“形を生み出す原理”の把握をめざしたい。

円運動は中心への“落ち込み”

力学を習う前の高校生に、「等速円運動をしている物体は加速度運動しているか?」と聞くと、ほとんどすべてが加速度はないと答える。等速のただし書きに戸惑うだけでなく、いつも半径一定で動いているので中心向きに加速しているようには思えないのである。いくらベクトルを使って中心向きの加速度を導きだしても、インチキくさくて仕方がない。

実際私自身、高校時代にわかった気がしなかった。円運動と放物運動の本質的つながりもわからず、まったく別の運動として公式をおぼえこんだ。

この問題が一気に氷解したのは、私が教師になってから、「月は地球に落下している」というニュートンの着想を知ってからである。

等速円運動というのは、「たえず中心に向かって“落ち込んでいる”」と考えればよい。図で示すと〈図8〉のようになる。こう考えると、円運動に中心向きの加速度があるのは当たり前であるし、天体と地上の物体の運動を区

別する必要もない。ようするに、“向きを変える力”と“慣性運動の直線性”という視点から、どのように運動が形成されるかを理解することが重要なのである。こうすれば、放物運動と円運動の本質的つながりだけでなく、天体の運動が楕円になることも自然に理解できるようになるであろう。

すでに述べたように、生徒は根強い経験的概念をもっている。これまで力学の理解がたいへん困難であると思われてきたのは、この経験的概念を放置したまま教え込もうとしてきたからではないか。それに対して、この経験的概念と科学的概念の対立点を意識的に明確にして生徒の前に提示すると、彼らは見違えるように議論を始める。そして、実験で決着をつけるのである。

少なくとも、このような授業展開ができるためには、生徒のもつ前概念や誤概念をきちんと掌握すると同時に、彼らの前概念や誤概念に照らして物理の基本的概念や法則の有効性を、学ぶ側から分析し直す試みがどうしても必要とされる。学の体系として確立された概念を、単に解説し伝えるだけではだめなのである。

参考文献

- 1) 飯田洋治：力と運動をむすぶもの——物の慣性——、「理科教室」新生出版(1971.8～12)。
- 2) 川勝博，三井伸雄，飯田洋治：「学ぶ側からみた力学の再構成」新生出版(1992)。
- 3) 板倉聖宣：「力と運動」の授業書、「科学教育研究」No.6 1971年10月号。