

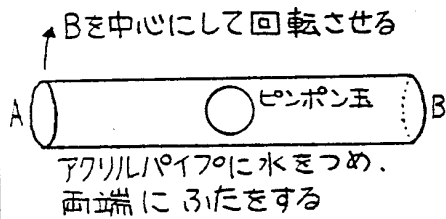
非慣性系に浮かぶ風船

村田憲治（加納高）

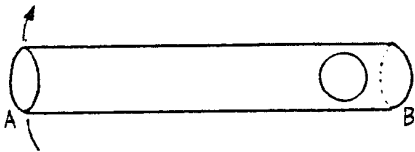
① 「おしえて！ガリレオ」の問題

最近、「おしえて！ガリレオ」という科学クイズ番組が人気なのですが、どうも気になる問題があります。次の3つは、すべてこの番組でそれぞれ異なる時期に放送されたものですが、みな本質的に同じ問題です。

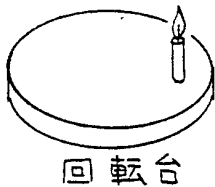
【問題1】ピンポン玉はどうなる？



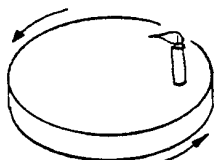
(答) Bの方へ寄ってくる



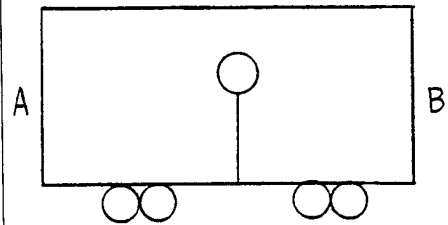
【問題2】台を回転させるとロウソクの炎はどうなる？



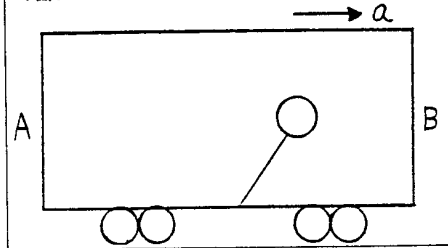
(答) 炎は中心方向へなびく



【問題3】電車が右向きに加速すると風船はどうなる？



(答) Bの方へ傾く



それで、気になっているのは、答の解説なのですが、

例えば問題1については、

「パイプの中の水とピンポン玉にはたらく遠心力を比較すると質量の大きい水にはたらく遠心力の方が大きいので、水は外側へ、ピンポン玉は、この水によって回転運動の中心方向へ押しやられる。」

問題2についても同様で、

「ロウソクの炎にはたらく遠心力より、回りの空気にはたらく遠心力の方が大きいので炎は空気によって中心方向へ押しやられる。」

問題3も、

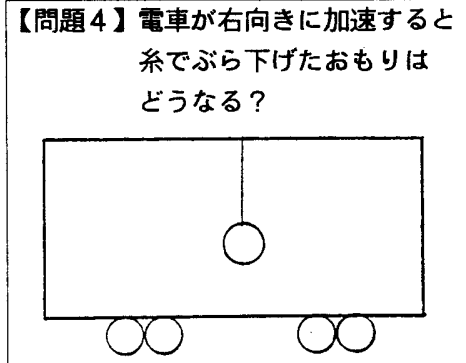
「風船にはたらく慣性力より、空気にはたらく慣性力の方が大きいので、風船は空気によって前へ押しやられる。」といった具合です。

よく授業でやるように、力の矢印を書

きこんでスッキリ説明できないものでしょうか？ それに、この解説では風船がどれくらい傾くかも説明できないので面白くありません。

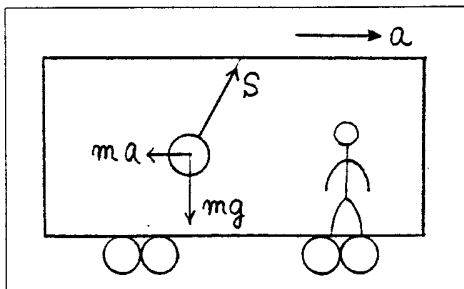
② 上下の問題

問題3については、高校の物理の教科書に次のような類似の問題があります。



答えは、もちろん次の図のように傾く、というのが正解です。

おもりが受けている力は、加速する電車内（非慣性系）でみれば、重力、慣性力、糸の張力の3つで、この3力がつりあっておもりは静止しているわけです。



風船の問題もこういう説明の仕方をしたいのです。風船はどんな力を受けているのでしょうか？

こう考えてみましょう。

風船と床をつないでいる糸を切ったら風船はどうなるでしょう？

当然、風船は斜め上に上昇していくはずですよ。

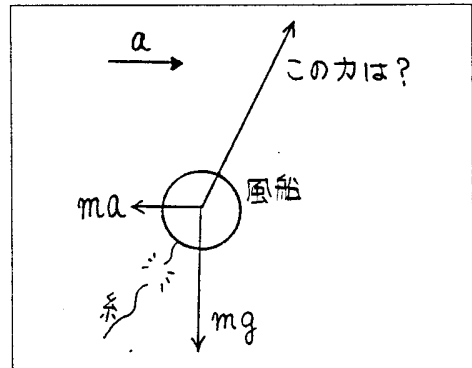
風船にも重力と、電車の加速度とは逆方向の慣性力がはたらいていますから、そ

の合力は斜め下を向きます。

風船ではなく、もっと密度の大きい物体なら、斜め下に落下するはずですよ。

落下の加速度の大きさは $\sqrt{g^2 + a^2}$ です。

さて、風船は斜め上に上昇していくわけですから、この合力と同じ方向で、この合力より大きく、斜め上を向いている力があるはずですよ。



この力は「浮力」ですよ。

浮力が斜め上にはたらくとはどういうことでしょうか？

僕たちは、なにげなく「浮力は上向きにはたらく。」と言いますが、そもそも「上」とは、どの向きなのでしょう？

この場合のような加速する電車の中では、風船の上昇する向きが「上」で、その反対向きが「下」である、と考えるべきですよ。したがって、「下」は次のように定義できるでしょう。

『下』とは、
物体が自由落下する向きである。

僕たちは、普段「上・下」の問題などをあらたまって考えることはありませんが、この風船の問題はそれを突き付けてくれます。

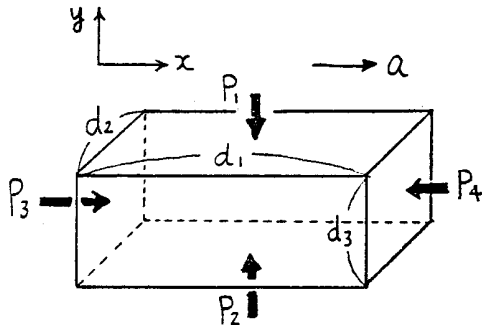
それは、問題4でも同様なのですが、気にしなければ、それで済んでしまうところ

るが問題4の物足りない点です。
逆に問題3の優れているのは、このように、どうしても「上下問題」にぶつかる点です。

③ x軸方向の浮力

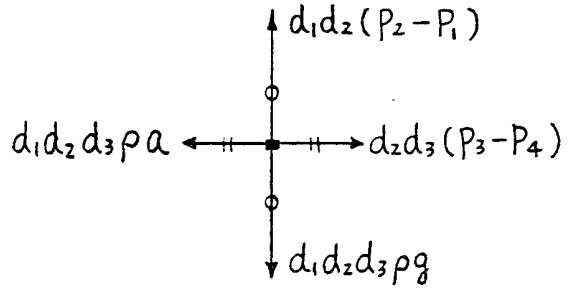
なお、蛇足ながら、浮力が斜め上を向く理由について大気圧の観点から考えてみましょう。

いま、x軸正方向に加速度 a で運動する電車内の空気中に空気と同じ密度の小物体(空中の鉄の塊でもいい)を考えます。
物体は直方体で各辺の長さを d_1, d_2, d_3 , 空気(小物体)の密度を ρ , 各面が受ける大気圧を図のように p_1, p_2, p_3, p_4 とします。



小物体が受ける重力は、 $-d_1 d_2 d_3 \rho g$,
小物体が受ける慣性力は、 $-d_1 d_2 d_3 \rho a$ です。
大気圧により小物体が受ける力は、
y軸方向は $d_1 d_2 (p_2 - p_1)$,
x軸方向は $d_2 d_3 (p_3 - p_4)$ となります。
x, y方向でそれぞれ力がつりあっているはずで、
 $d_1 d_2 (p_2 - p_1)$ と $d_2 d_3 (p_3 - p_4)$ は、それぞれx軸方向、y軸方向の浮力そのものです。

y軸方向の浮力 $= d_1 d_2 d_3 \rho g \dots (1)$
x軸方向の浮力 $= d_1 d_2 d_3 \rho a \dots (2)$



結局(1), (2)の合力として、斜め方向に浮力がはたらくことが理解できます。
普段、僕たちが当然のように浮力は上向き(y軸正方向)にはたらくと考えているのは、単に(2)式の $a = 0$ である世界(近畿)に住んでいるからにすぎません。
また、浮力がはたらくということは、その方向で圧力差が生じているということです。力のつりあいの式からそれを求めてみると、

y軸方向の圧力差 $p_2 - p_1 = d_3 \rho g$
x軸方向の圧力差 $p_3 - p_4 = d_1 \rho a$

となります。
x軸方向に圧力差が生じるのは、気体分子が慣性力を受けて、気体分子の分布がx軸方向で様でなくなる、つまり電車内の後ろの方の空気の密度が大きくなるのが原因です。
あ、知らないうちに「おしえて！ガリレオ」の説明みたいになってきた。ははは。

ともかく、以上のことから、少なくとも浮力の話をするときには、y軸正方向のことを安易に「上」と呼ぶのはやめたほうがいいように思います。

④ 一般相対論への入口？

これはひよっとすると、「等価原理(重力質量 = 慣性質量)」, そしてそこ

から結論づけられる「慣性力と真の重力とを局所的に区別することはできない」という相対論の話まで、あと一步のところまできているのかもしれませんが。

高校の教科書では、慣性力が「みかけの力」、電車内での真の重力と慣性力の合力が「みかけの重力」などと不当に差別的な呼ばれ方をしていますが、これはなんだかカワイソな気がします。

加速する電車の中の観測者に、電車が加速しているのか、後方に突然、巨大な質量をもつ物体が出現したか（あるいは電車が突然傾いたか）を原理的に区別することはできないわけですから、慣性系だけを特別扱う理由はなににもないわけです。

教科書をニュートン力学で貫くには仕方ないことかもしれませんが、運動の第一法則を教えるときに、少々迷いを感じることも（よくある）あります。

だいたい、等価原理の話が高校の教科書でほとんど触れられていないのはどんなものかな～と思わないでもありません。

多くの人がいろいろな実験に取り組んで、慣性質量と重力質量が極めて高い精度で一致していることを確かめてきた歴史的事実（エートヴェツシュの実験など）を「お話」としてくらいは書いてもいいようにも思います。

教科書がそうっていないのは、力学の学習のはじめの段階で、重力を万有引力で教えることを避けて、運動の第二法則 $F = ma$ (この m は、ちから 慣性質量) を前提に、重力 $= mg$ として重力と質量を定義しているようなところがあるせいかもしれません。

もともと重力質量と慣性質量を明確に区別していないので、等価原理もへったくれもないのでしょうか。

あるいは、ひよっとしたら等価原理を

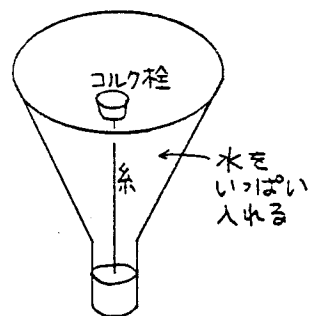
当然ものとして認めて、意識的に区別していないのかもしれませんが、そうなら慣性力を「みかけの力」などと呼ぶのはますます不当であるといわざるをえません。

別にあげ足取りをしようというつもりはありませんが、どういう教え方が初学者にとってベストなのでしょうか？

まあ、それはともかく、少なくとも授業で、

「『上』というのはどっち？」
なんて問いを投げかけて、生徒さんの足をぐらぐらさせてみるのは面白いと思います。

ちなみに、教室で簡単に問題4の実験をするには次の図のようなものを作ればOKです。三角フラスコ、コルク栓、ゴム栓、ひも、水を用意すれば、10分たらずでつくれます。



これを手に持って左右に振ってみると、加速度の方向にコルク栓が傾きます。また、これを手に持って自分がぐるぐる回転してみると、コルク栓が自分の方（円運動の中心の向き、つまり向心加速度の向き）に傾きます。問題4に慣れた頭には、不思議な光景です。お試しあれ。 (8)