

2.4 電車の問題をもう一つ

以下の文章は、「おもしろくても理科」（清水義範著・講談社文庫）からの引用である。

漫画家の西原理恵子さんが、週刊紙にエッセイを連載していて、これがなかなか面白い。麻雀ばかりしている独身の変な女性漫画家の頭の中が、あまりにとてつもなく奇妙で笑ってしまうのだ。

その、西原さんのエッセイの中に、次のような疑問を投げかけたものがあった。

実は私にはずーっと不思議だったのだが、バカにされるかもしれないので人前では言えなかった疑問がある。こっそりきいて、何度教えてもらってもわからないのだ。思いきって言う。

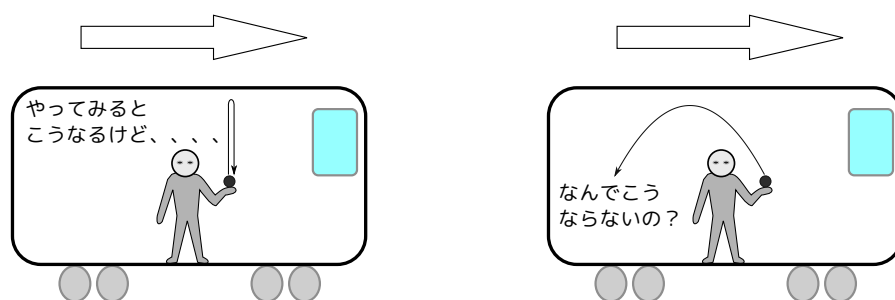
走っている電車の中で飛びあがった時、どうして飛び上がったその、同じ地点におりてくるのだ。変じゃないか。

西原さんの疑問にあなたは答えられるだろうか？—「おもしろくても理科」の中では、著者の清水義範氏が、この説明に悪戦苦闘している。理科を教えられた人の中に生まれたこういう「素朴な問い」は、「バカにされるかもしれないので言えなかった」とならず、早めに解消しておきたいところだ（自然への疑問を解決することが理科という教科の使命である）。

動く物体は人間みたいな複雑な物体じゃない方が考えやすいので、ジャンプじゃなくボール投げにして、以下のような問題を考えていくことにしよう。

素朴な問い

走っている電車の中でボールを真上に投げ上げると、ちゃんと手元に戻ってくるが、どうして電車が進んだぶん後ろに落ちないのか？



という問いに対してちゃんと答えられるだろうか？

図による説明が次ページにある。答えを予想してから開いてみよう。

物理法則による説明は後で行うとして、この疑問には、「電車内と電車外のそれぞれの立場でちゃんと絵を描く」ことで答えることができる(右の図参照^{*15})ので、まず絵を見よう。

電車内で「まっすぐ真上に投げ上げて手元に戻ってくる」という現象の時間経過を図にすると右の図の左の列のようになる。

これを電車外から見たのが図の右の列である。電車や人はみな右側に運動しているので、放物線を描いて物体が運動していることになる。

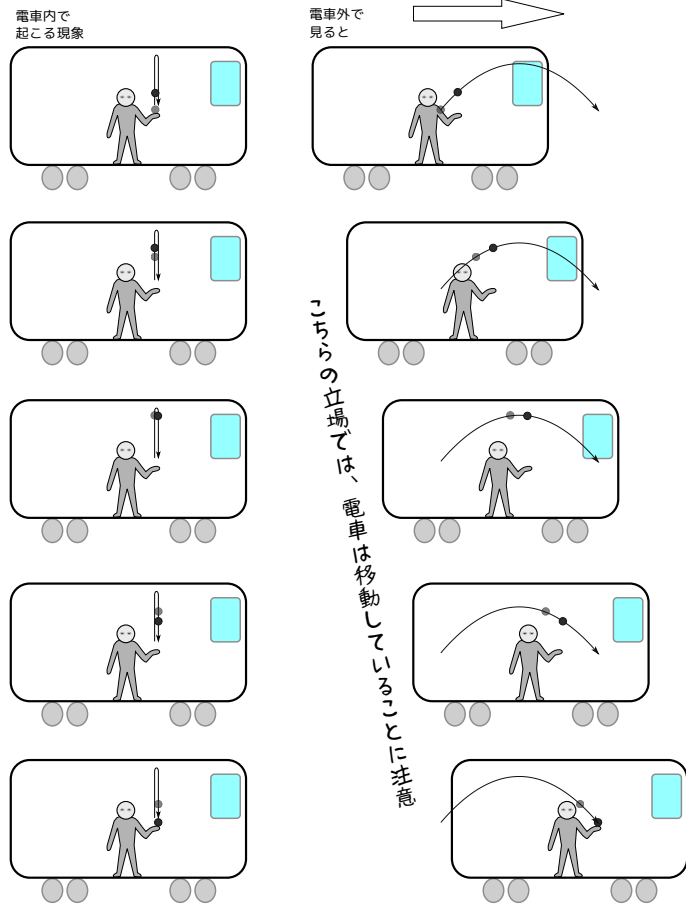
じゃあなぜ物体(投げ上げられたボール)は電車外で見ると放物線を描く運動になるかというと、実は投げ上げる前から、ボールは図の右向き速度を持っているのである。

電車内で見ると真上に投げ上げられた物体は、実は電車外から見ると斜め上に投げ上げられたことになる(「相対運動」という概念も持っていないと、この問いには答えられない)。

電車内の人、自分は投げ上げるという動作によって、ボールに ● のような速度を与えたつもりでいる。そして、電車内ではその速度を「初速度」とする運動 ● が起こる。

ところが同じ現象を電車外で見ると、ボールは投げ上げられる前から、 ● のような速度を持っている。これに、人によって加えられた速度 ● が足されることで、ボールの初速度は ● のようになる。

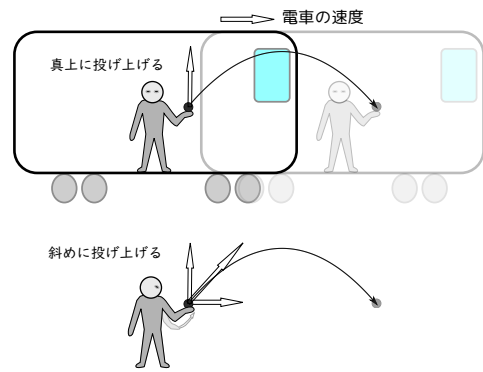
この初速度を持ったボールは、その後 ● のような運動をする。



*15 動かせるアニメーションプログラムが

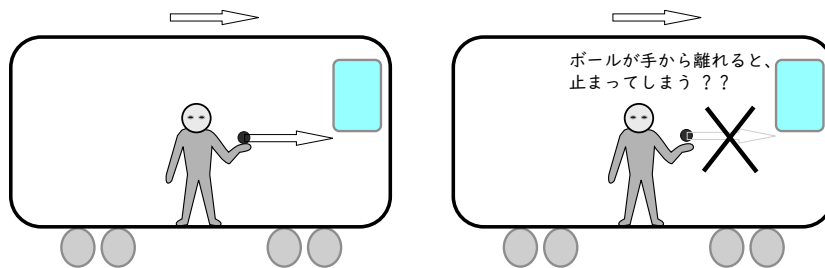
<http://www.phys.u-ryukyu.ac.jp/maeno/physgairon2019/denshanai.html> にある。

この放物線を描く運動は、電車の外で斜めにボールを放り上げた場合の運動と（電車外で見れば）同じ運動である（右の図参照）。この運動を電車内から見ると「真上に上がって真下に落ちてくる」という運動になる。

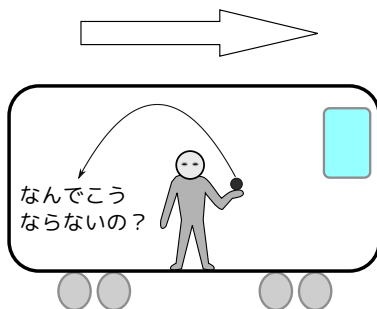


「人が投げ上げる前」を考えると、このボールは電車と同じ速度で走っていた。この「人が投げ上げる前に持っていた速度」は、人がボールを投げた後も消えずに残っている。これを「手を離れると速度は消えてしまう（残らない）」というふうに考えると「自分より後に落ちるのでは？」という考えをしたくなるのである。

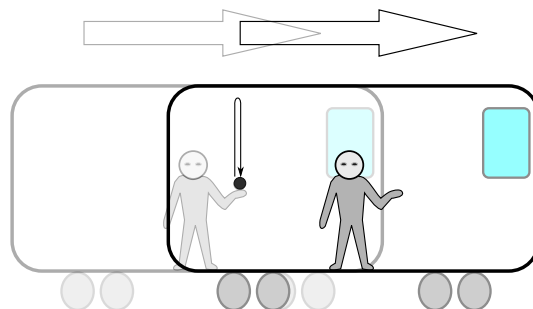
この電車の誤解が起こる理由は、いろいろな要素が混じっているのだが、上のように「ボールが手から離れると、もう『誰もボールを運んでいない』から止まってしまうのではないか」という誤解をしてしまうことはその要素の一つであろう。



電車内でこうなるのでは？という誤解は



電車外でこうなるのでは？という誤解



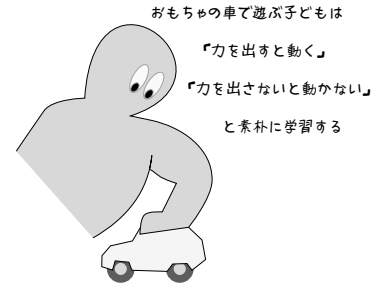
人類がずっともっていたこのような誤解を正したのが、力学の3法則の一つ（第1法則）でもある

慣性の法則

力が働いていない物体は静止もしくは等速直線運動を続ける。

である（「または」以降が重要だ）。

この法則は日常の感覚（床にボールを転がすと、いつかは止まる）にはあわないが、それは日常生活においては「力が働いていない」ことは（ほぼ）ありえないからである。むしろ「押せば動く」というのが我々の素朴概念である。これは子供の頃、おもちゃの車を押して動かしたころから持っている「根強い素朴概念」である。



ガリレオは斜面を用いた実験を繰り返すことで「摩擦」や「空気抵抗」など、「運動を邪魔する力」がない場合に何が起こるかをイメージし、それから「法則」を見つけることができた。我々の‘常識’は摩擦などの「邪魔」によって隠された世界の中で作られたものなので、その「邪魔」を注意深く取り除いていくことで、本当の法則が見えてくる。

なお、この法則を発見したガリレオが天動説を唱えて「地球は動いている」と言った人でもあるというのは偶然でもなんでもない。「地球が動いているなら我々は落ちてしまうはずだ」というのが「慣性の法則を知らない人たち」の常識だったからなのである。

この慣性の法則があるおかげで電車でジャンプすると「元の場所」に降りるし、人類が秒速 30 キロメートルで動いている地球から放り出されることもない*16。

2.5 運動方程式と MIF 誤概念

2.5.1 運動方程式

慣性の法則でも、「人間の直観は物理法則に合わない」という話をした。運動の 3 法則のうち、第 1 法則（慣性の法則）と第 3 法則（作用・反作用の法則）はどちらも直観に反する（しかし、正しい）。では残った第 2 法則（運動方程式）はといえば、これも直観に反する点を含んでいる。「運動方程式は？」と聞かれたら、おそらくほとんどの人が「 $F = ma$ 」と答えることができるだろう。だが、教える立場に立つ人は

「式が言える」だけではその本質がわかっているとは限らない。

ことに注意しなくてはいけない*17。

多くの人が陥ってしまう誤概念に「MIF 誤概念」というものがある。MIF は「Motion

*16 ここで「でも地球や太陽は円運動しているのでは??」と疑問を持った人もいるかもしれない。円運動は厳密には「等速直線運動」ではないので話は少し違うのだが、幸いなことに、円運動と言っても十分な大きな半径の円ならば、直線運動と考えても大きな差は出ない（小さな差なら出る）。

*17 「式が言えるなら、問題が解けるんだからそれでいいじゃん」と思う人も、もしかしたらいるかもしれないが、それは全く違う。物理という教科（学問）の目標は「自然現象を理解すること」なのであり、式が言えたってそれだけでは目標は達成されていないのである。「それでいいじゃん」と思ってしまった人は、この後の「誤解の例」をよく見て「これでいいか？」を自問して欲しい。

implies a force」(運動があれば力がある^{*18})の略である。誤概念と名がついている通り、間違っているのだが、非常に強固に存在する間違いなのである。MIF 誤概念は無理に式で書くなら「 $F = mv$ 」となる。人間の直観は MIF 誤概念をサポートする方向なので、「ちゃんと物理を勉強してない人」は皆この誤概念にハマると思ってい

例として、2018年の11月に実施された「大学入学共通テスト施行問題」の物理基礎の問題(問題番号などは書き直した)を見てみよう。

重力加速度の大きさが a の惑星で、惑星表面からの高さ h の位置から、物体を鉛直上向きに速さ v_0 で投げた。惑星の大気の影響は無視できるものとする。

問 図1は物体の位置と時刻の関係を示したものである。Rで物体にはたらく力の向きと大きさを図4のオのように示すとき、P、Q、Sで物体にはたらく力の向きと大きさを示す図は、それぞれ図2のア～カのどれか。その記号として最も適当なものを、下の1～6のうちから一つずつ選べ。ただし、同じものを繰り返し選んでもよい。

P : Q : S :

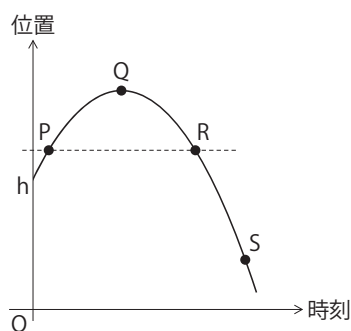


図 1

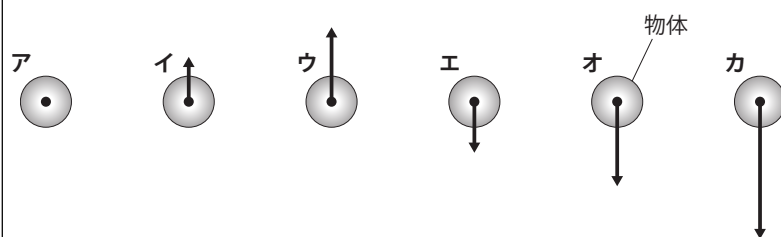


図 2

正解は次のページだが、答えを見るまえに自分でも考えてみることを。

^{*18} これは意識であり、implies(原型は imply) は「(必然的に) 含む」「ほのめかす」「暗示する」などの意味を持つ動詞で、「A implies B」は「A ならば B だろう」という推論が成り立つことを表現する。よって、MIF が「運動があれば必然的にそこに力がある」という意味になる。

正解はすべて オ である。どう運動しているかに関係なく、働く力は重力のみであり、それは下向きに決まっている（間違っただけかな？）。

大学入試センターが公表している、この問題の正解率はそれぞれ、30.1%、23.0%、34.2% である。驚くべきことに*19、正解できた生徒の数は3割を切っている。なお、この問題を含む物理基礎の問題の平均得点率は約58%なので、この試験を受けた人は「平均点60点ぐらいの得点はできる人」なのに、この大事なところがわかってないのである。

「重力は下向きに働く」とか「力は加速度に比例する」とか、中学の理科の先生、高校の物理の先生は教えているはずであるが、この問題を見て正しく解答できる人は23%より少ない—この現状に関して「教える側」の我々はどう思うべきだろうか？

なお、誤回答としては、

- P点では上に動いているから、力は上向きのウ
- Q点では止まっているから、力が働いてないア
- S点ではR点より速いから、R点より力が強くなってカ

のように間違える人が多かったのではないかと予測される。これは典型的な MIF 誤概念である。

この誤概念は、単純に「 $F = mv$ なのか $F = ma$ なのかを間違える」という問題ではなくて、そもそも「力とは何か、速度とは何か」という概念が正しく形成されていない、曖昧模糊とした状態にある（しかも、そのぼんやりと曖昧な状態のまま、その先の物理を勉強している）人が多いのではないかと推測される。

チェックテストでも力や速度の向きを図示する問題を出したが、その結果を見ても、このような誤概念が根強いことがわかる。

力学においての原理とは運動の3法則である。運動方程式 $\vec{F} = m \frac{d\vec{v}}{dt}$ を思い出したい*20。

運動方程式 $\vec{F} = m \frac{d\vec{v}}{dt}$ を信じるなら（もちろん信じていいのだ！）、速度と力には直接の関係はない。直接関係しているのは「速度の変化」である加速度の方である。だから、例えば上の問題で「止まっているときは力は0」のように考えてしまう人は、 $\vec{F} = m\vec{v}$ のような誤った考えにとらわれているということになる。

「力が速度に比例する」のであれば、 $\vec{F} = m\vec{v}$ のような式になってしまうけど、これはアリストテレス的な考え方で、これを破壊するところから現代物理が始まった。アリスト

*19 これに「驚く」かどうかは人によるだろう。このテキストを読んでいる人の中でも、正解がすぐにわかる人（むしろこれの何が難しいかわからない人）から、正解が オ だと聞いて「信じられない」と思った人まで、いろいろいると思う。物理を教える立場にいる人は「困ったことだ」と認識しなくては行けないだろう。

*20 困ったときは「原理」に戻れ！—は物理に限らず、科学をやるうえで大事なことである。

テレス的力学はガリレオが現れるまで千年以上信じられていたほどに強固であるが、ガリレオやニュートンによる実験と観察のおかげで物理法則はアリストテレス的でないことが示されたわけである（現代人である我々は先人が作ってくれた原理を拠り所にして考えていくことができる）。

なお、この「速度と力は直接関係しない」というのは運動方程式だけではなく、慣性の法則にすでに現れている。「動いている物体に力を加えなければ、ずっと同じ運動を続ける」という法則を持っていないと、先の電車の問題に正しく答えられない^{*21}。ガリレオ本人は航行する船のマストの上から物を落とす話で同様の考察をしている。ガリレオの時代に比べ、現代人である我々は「等速運動する乗り物内で起こる物理現象」をよく知っているのだから、慣性の法則や運動方程式を（アリストテレスに比べて）より実感しやすいはずである。

「お前の心の中のアリストテレスを殺せ」

というのを標語の一つにしておこう。

2.5.2 〈チェックテスト3〉

ここで、前にやってもらったチェックテストを思い出そう。

チェックテスト

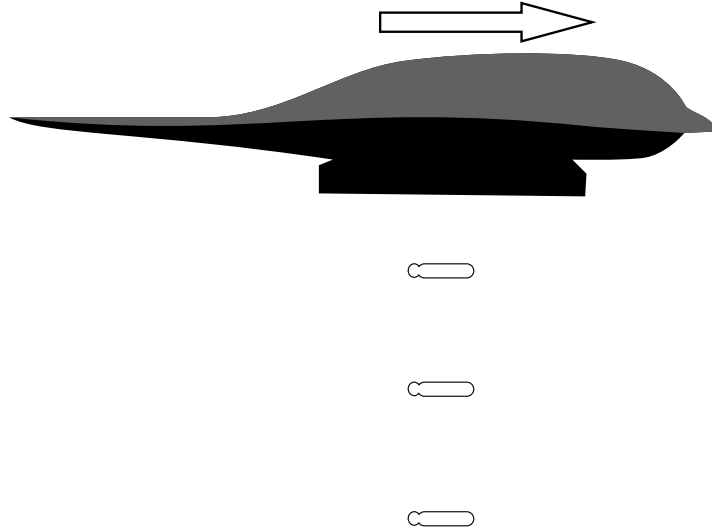
☆ 〈チェックテスト3〉

下の図は、爆撃を行っている爆撃機の写真である。



^{*21} 現代の見方からすると、運動方程式で力を0にすると $\vec{v} = \text{一定}$ になるので、第1法則は第3法則に含まれているのでは？—という考え方もある。しかしニュートンの時代では「第1法則」として強調していくことが必要だったのだ。

下の図は写真の状況を模式的に表したもの（爆弾は代表して三つのみ描いた）である。

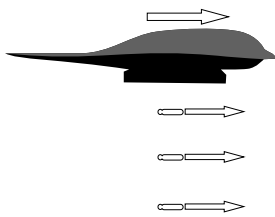


三つの爆弾それぞれに働いている力を●→（●が作用点）を使って、速度を→を使って矢印で表し、上の図に描き加えよ。

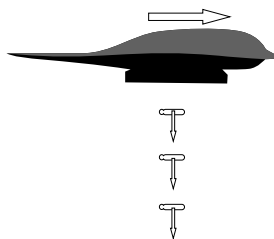
以下で、この問題をある年度の学生さんたちにやってもらった結果について説明しよう。

〈チェックテスト3〉の速度

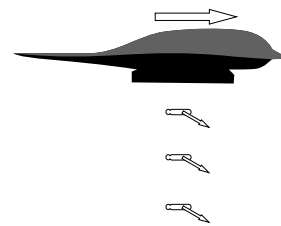
速度に関する解答は、大きく分けて、



速度が右向き



速度が下向き



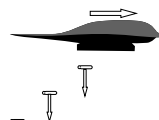
速度が右斜下向き


のような3種類が出現する（まれに、左斜め下も現れる）。3種類の解答（細かく分けるともっと種類は多い）が出るのは面白いところである。

人数分布は以下の通り。

	2018 年度	2019 年度	合計	割合
速度が右向きで一定	8	16	24	31.2%
速度が右向きで下ほど遅い	5	6	11	14.3%
速度が下向きで一定	2	0	2	2.6%
速度が下向きで下ほど速い	0	10	10	13.0%
速度が斜め右下向きで一定	11	0	11	14.3%
速度が斜め右下向きで下ほど遅い	0	2	2	2.6%
速度が斜め右下向きで下ほど傾き、速い	0	8	8	10.4%
速度が斜め左下向きで一定	1	1	2	2.6%
速度が斜め左下向きで下ほど遅い	0	1	1	1.3%
解答なし:	3	3	6	7.8%

速度が真下を向いてしまう人は、爆撃機から外に出ると「速度」という物理量も（これまでどうだったかとは）関係なくなってしまうという考え方をしているが、実は速度は（力が掛からない限りは）変わらないのが正しい（慣性の法則）のである。



爆撃機から出ると速度が消えてしまうのなら、のように爆弾は飛行機より後ろにいることになるはずである。写真でそうになっていないということからこれが違うことはわかるはずなのだが、物理現象を読み取ることができていない。

速度が真右を向いてしまう人は、「落ちている」という現象を忘れてしまっているようだ。

なお、右向きの速度を持っていること自体は正しいのだが、速度が右向きの成分を持つ理由を質問してみると、

爆撃機から力を受けているから

もしくは
爆撃機に力を与えられているから

という解答が返ってくることもある。これらは、「速度」と「力」の概念が分離できていない回答だと思う。運動=力ではないのであるが、そこが理解できていない。誰かが「力」を込めた結果^{*22}が物体の運動であることには違いはないのだが、そこが曖昧なままの理解になっている^{*23}。

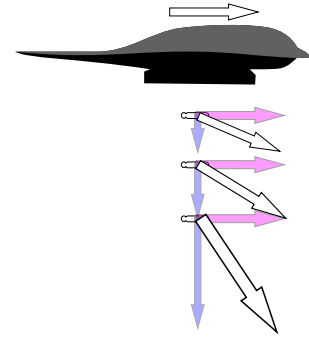
なお、左斜め下の速度を描いてしまう人も少しいる。これは無意識に「爆撃機に乗っている人」に視点が変わってしまったのかもしれないし、後で説明する「空気抵抗」を考えて、しかも「力=速度」になってしまったのかもしれない。

*22 この場合は爆撃機に乗っている間に速度は与えられており、その速度がそのまま残っている（慣性の法則）。

*23 これは熱力学の話でも重要になる「stock」と「flow」の違いがわかっていない例であるとも考えられる。

全体に、「速度の向き」と「力の向き」がごっちゃになってしまっている回答が多かった。

正解を図解しておくと、右の図のように、速度は右斜め下向きであり、右向き成分は変わらないままに下向き成分が増えていく。



つまり、上の典型例の中には、厳密な意味での正解者はいない。実際にテストを行った結果でも、斜めに速度を書いている人も、一定の大きさと一定の角度で描かれている場合が多く、完全に正解と言える解答はとても少ない。


なお、正解のアニメーションが

<http://www.phys.u-ryukyu.ac.jp/maeno/physgairon2018/bomber.html>にある。

よくある質問

水平方向の速度ってほんとに変化してないでしょうか？—若干変化してたりしませんか？？

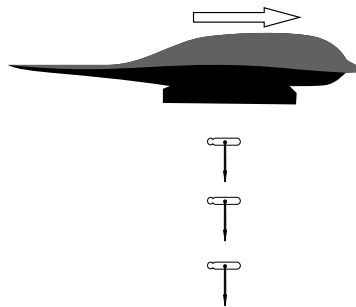
「若干」って言葉の定義による（実際のところ、空気抵抗があるわけだし）けど、それは確かに変化することもあるでしょうね。ところがここでは最初



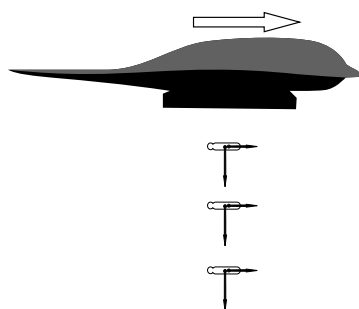
という写真から話が始まっているよね。ここでもし、爆弾の水平方向の速度が爆撃機に比べて変化してしまっていたら、こういうふうに爆弾と爆撃機が縦一列に並んだりしない。つまり水平方向の速度は変化していたとしても「目に見えるほど」ではないことがわかる。写真という形で「目に見える現象」に関する理解ができていれば、ここでは悩むことはない。

〈チェックテスト3〉の力

力の方は下の図が正解である。



しかし、下の図のように存在しない「右向きの力」を描いている解答がかなり多かった。



人数分布は以下の通り

下向きの力のみ（正解）	15
上・下・右の三つの力	6
下・右の二つの力	4
下・左の二つの力	1
下・右・斜め右下の三つの力	2
上・下の二つの力	1
下・右の二つの力だが、右の力は下に行くと消える	1

ここでも「力」と「速度」の混同が見られる。このような間違いは「MIF 誤概念」と名前がついている、非常に強固な「直観的な思い込み」によって起こる。

MIF とは「motion implies force」の略。つまり「運動があれば力がある」という間違いである。人間の直観は MIF 誤概念をサポートする方向なので、「ちゃんと物理を勉強してない人」は皆この誤概念にハマると思ってい。

では誤概念にハマらないためにはどうすれば、ということで、ここでも

困ったときは「原理」に戻れ！

を思い出したいところだ。

運動方程式 $\vec{F} = m \frac{d\vec{v}}{dt}$ を信じるなら（もちろん信じていいのだ！）、力が働かない水平方向の速度は変化しない。あるいは逆に、水平方向の速度が変化してないと観察されることから、水平方向の力はないとわかる。

ここで「水平方向に力が働いてないのにどうして水平方向に動くの？」と考えてしまう人は、まだ MIF 誤概念から抜け出せていない。