

浮力を扱う高校入試問題の問題点

北里大学・教職課程センター
山本 明利

また出た「着底問題」

2021 年 2 月に YPC (横浜物理サークル) のメーリングリストで、同月実施された千葉県の高校入試の理科の問題¹⁾が話題となった。

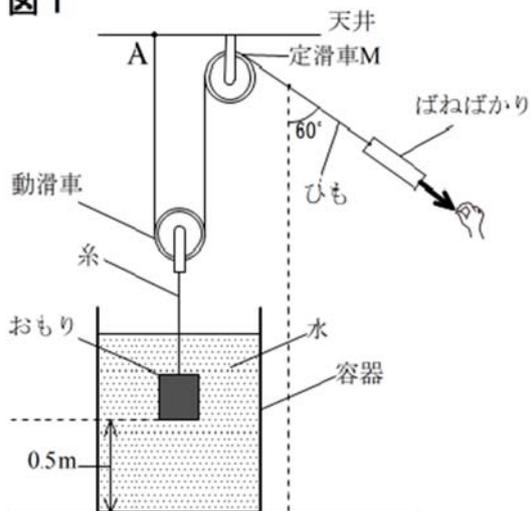
水を入れた容器の底に沈んでいる物体にはたらく浮力を問う問題である。以下、この種の問題を「着底問題」と呼ぶことにする。今回の千葉県の着底問題の概略はこうである。

大問 9 では力のつりあいに関して 3 つの実験を行う。そのうちの実験 1 が浮力に関連していて、図 1 の装置が示されている。図はリライとした。糸やひも、滑車の質量は考えない。

はじめ容器の底に沈んでいた質量 1kg のおもりを、容器の底から 0.5m の高さまで引き上げたとき、ばねばかりが示す力の大きさは 4N だった。さらにばねばかりを同じ向きに引き、おもりが完全に水から出たところでは、ばねばかりは 5N を示した。実験は続くが、以下は省略する。

問題の設問は「② 実験 1 の①で、水の入った

図 1



容器の底にあるおもりにはたらく浮力は何 N か、書きなさい。」である。下線は筆者が施した。実施後に公開された正答は「2N」だった。詳しくは参考文献 1) を参照されたい。

ばねばかりの読みから動滑車のおもりを吊っている糸の張力を推定し、その水中と水の外での差が、浮力分に相当するとした上で、浮力が深さによらないという知識を用いて正答に至る、というのが出題者側の筋書きだと思われる。

一体この問題のどこが「問題」なのだろうか。

着底問題を問題視する立場の人は、着底した物体と容器の底面の間に水が存在するかどうか注目する。問題がそのことに一言も触れていないと条件不備で混乱する受検者がいるかもしれないというわけである。

現実問題としては、物体の表面は濡れているであろうから、物体と容器の底面の間には薄い水の層があって、なおかつ何力所かの直接の点接触もあり、物体は水からの浮力も底面からの垂直抗力も両方受けているのであろう。しかし、そのことは無条件に仮定してよいのか。中学生に理解できるのか。そしてもし、着底物体と容器の底の間に水がないとしたら何が起るのだろうか。以上が課題である。

あらためて「浮力」の定義と教え方

今更であるが、浮力の定義を確認しておこう。岩波理化学辞典²⁾の記事は以下の通りである。

「浮力: 地球上のように重力の場中で、流体内にある物体がその表面に作用する流体の圧力の合力として受ける鉛直上向きの力をいう。浮力の

大きさや作用点とは、物体のおしよけた流体の重さと重心とに一致する(アルキメデスの原理)。浮力の作用点を浮心(center of buoyancy)とよぶ。」

おおかたの物理の本はこれと類似の記述で、流体から受ける圧力を表面積分した力として浮力を定義している。現在の物理学の教程は、この流れであるといつてよい。

この流れをふまえて、中学校学習指導要領解説³⁾⁴⁾(以下「解説」)を見てみる。なお、中学校は2021年4月から平成29年3月告示の学習指導要領での授業が始まっているので、以下ではこれを「新課程」とよび、それまでの学習指導要領(平成20年3月告示、平成27年3月一部改正)を「旧課程」と呼ぶことにする。今回の入試は旧課程のもとで行われている。

旧課程では、イ 力と圧力、(イ) 圧力の(内容の取り扱い)で、「イの(イ)については、水中にある物体にはあらゆる向きから圧力が働くことにも触れること。また、水中では物体に浮力が働くことにも触れること。」としており、解説³⁾では「浮力については、例えば、ばねばかりにつるした物体を水中に沈めると、ばねばかりの指標が小さくなることなどから、浮力の存在に触れる。」と例示している。

旧課程の中学校教科書(5社・文献5~9)の当該箇所を調べてみると、例外なく水中に没した直方体もしくは円柱と見られる物体の図があり、それぞれの面に圧力を示す複数の矢印を配して、水圧と浮力の関係について解説している。

なお、東京書籍⁵⁾と学校図書⁹⁾の2社は、「アルキメデスの原理」を載せていない。記載のある教科書もすべて「発展」扱いだっただ。

冒頭に紹介した千葉県の問題は、あえてアルキメデスの原理によらず、実験からの推論によって浮力を推定するという流れになっており、学習指導要領の記述に沿っていて、公式主義を避けている点が評価できる。

参考までに、新課程の方も見ておこう。(ア) 力のつり合いと合成・分解、㊸ 水中の物体に働く力

(内容の取り扱い)で、「ア(ア)の㊸については、水中にある物体には、あらゆる向きから圧力が働くことにも触れること。また、物体に働く水圧と浮力との定性的な関係にも触れること。」と、一歩踏み込んだ記述になっている。新課程では浮力の扱いが1学年から3学年に移ったためと思われる。解説⁴⁾も「浮力を、例えば水中にある直方体や円柱などの物体の上面と下面の水圧の差から定性的に捉えさせる。」としている。

アルキメデスの原理の高校レベルの説明

物体にはたらく浮力を高等学校流に文字式で表現すれば、以下のようなになる。簡単のため、図2のように、密度 ρ なる円柱または直方体(底面積 S 、高さ h)の物体を考えよう。これが密度 ρ_1 の液体中に没しているとする。密度の大小関係は問わない。重力加速度の大きさを g 、液面での大気圧を P_0 とすると、

$$\text{物体上面での圧力 } P_0 + \rho_1 d' g$$

$$\text{物体下面での圧力 } P_0 + \rho_1 (d' + h) g$$

である。側面にはたらく力はつり合うから、物体が受ける浮力 F_B は面積をかけ算して

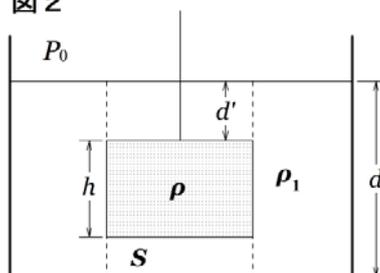
$$F_B = \{P_0 + \rho_1 (d' + h) g - (P_0 + \rho_1 d' g)\} S \\ = \rho_1 h S g = \rho_1 V g$$

となる。 $V = hS$ は物体の体積である。したがって「浮力の大きさは物体が排除した液体にはたらく重力の大きさに等しい」ということになる。これがいわゆるアルキメデスの原理である。

ここで浮力 F_B が、物体の密度 ρ 、液の深さ d や物体が没している深さ d' 、および液面の大気圧 P_0 のいずれにもよらないことが重要である。

また別の説明のしかたもある。図2の物体の体積部分をすべて周囲と同じ液体で置き換えて

図2



しまうと、当然つり合いが成り立って液体は動かない。したがって物体の位置にある液体はそれ自身にはたらく重力と同じ大きさ $\rho_1 Vg$ の上向きの力「浮力」を受けていなければならない。この事情は水を元通り物体に置き戻しても変わらないはずだから物体が受ける浮力も $\rho_1 Vg$ である。説明としてはこの方がエレガントだ。

「着底問題」の実験

ところで、物体がすきまなくぴったりと着底してしまって下の水が排除されてしまったら何が起こるのだろうか。上記の考察における「物体下面での圧力」がなくなるわけだから物体には上向きの浮力ははたらかなくなるはずだ。

矢野幸夫氏¹⁰⁾は、水槽の底に物体の底面と同程度の穴を開けた装置を作り、さらにその装置全体を一回り大きな水槽に入れて、物体底面に働く水圧を制御し、下からの水圧が浮力を発生させることを明快に演示する実験を行っている。

この論文¹⁰⁾はネットで読めるのでぜひ参照してほしい。下に水がない場合、物体は水より密度が小さくても、上から受ける水圧で押しえつけられて浮いてこない。下向きの力だから「浮力」とは呼べないだろうということになる。

2019年の青森県の例

もう一つ、比較的記憶に新しい着底問題の事例を検討しよう。2019年3月に青森県が実施した高校入試問題¹¹⁾の大問5である。

その実験2で一辺4cmの立方体の物体B(空気中では2.70Nの重さ)が図3(リライトした)のように着底した状態が描かれており、設問(2)のイで「図3のとき、容器の底面が物体Bを上向きに押す力は何Nか、求めなさい。」と問う。着底条件については特に示されていない。

この問題では当初公表された正答に対し、他にも若干違う数値を導く解答の道筋があることが分かって、2度にわたって採点基準の訂正がなされるという一幕もあった。数値が一致しないのはややお粗末だったが、複数の解答方法が

あること自体は何の問題もない。むしろ、物議を醸したのは以下の件だった。

この問題は物体にはたらく浮力を問うているわけではない。求められているのは

容器の底面が物体に及ぼす垂直抗力である。物体と容器の底の間に水があつて浮力がはたらき、なおかつ垂直抗力もはたらいたら、普通に力のつり合いを考えて解答を得ることができる。

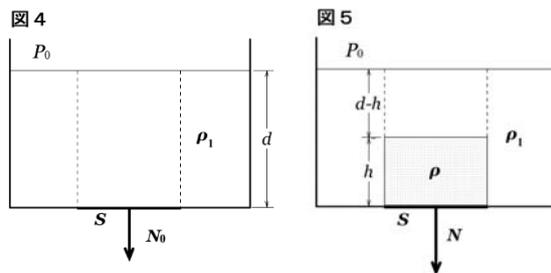
しかし、もし物体が底に密着しており、物体と底の間に水がないとしたらどうだろう。ここで注目しておきたいのはThe Physics Teacherに掲載されたGrafの論文¹²⁾である。国内では右近修治氏がいち早くその内容を紹介している¹³⁾。

関連部分だけ要約すると次のようである。図4のように水だけがあるとき容器の底面の面積 S が受ける力を N_0 とすると、 $N_0 = P_0 S + \rho_1 d S g$ である。なお、Grafの論文にはない大気圧 P_0 の項を加えた。

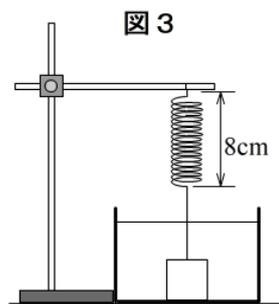
これを基準にして図5のように水没した物体が S にぴったり密着した状態を考えて、底が受ける力がどれだけ増加するかを求めてみる。間に水はないものとする。 S が受ける力 N は

$$\begin{aligned} N &= P_0 S + \rho_1 (d-h) S g + \rho h S g \\ &= P_0 S + \rho_1 d S g + \rho h S g - \rho_1 h S g \\ &= N_0 + m g - \rho_1 V g \end{aligned}$$

となる。ただし $m = \rho h S$ 、 $V = h S$ を用いた。



つまり、物体を沈めたときの N は、それがな
いときの N_0 に比べて $m g - \rho_1 V g$ だけ増している。



これが「容器の底が感じる物体の見かけの重さ」だと解釈すると、真の重さ mg よりも $\rho_l Vg$ すなわち浮力に相当する分だけ軽く感じているということになる。あたかも浮力がはたらいっているかのように。

右近氏も紹介しているように¹³⁾、アルキメデス自身が着底物体についてはこう述べていて、浮力という表現をあえて避けているようである。「命題七 液体よりも(比重の)重い立体は、液体の中に落とされると、底に沈み、そして液体の中における立体の重さは、立体の容量に等しい容量の液体の重さだけ、ほんとうの重さよりも軽くなるであろう。」¹⁴⁾

では、浮力を問うてはいない青森県の問題はセーフなのかというと、残念ながらそうではない。物体と底の間に水が入り込んでいけば、下からの水圧で、大気圧の寄与分 P_0S はキャンセルされるが、密着していて水がないとなると、図5の N の反作用を答えなければならぬから、大気圧 P_0 に関する情報がないとこの問題は解けない。

出題者への要望

着底問題は、YPCの例会だけでも、2000年の高杉強さんの演示をはじめとして4回も取り上げられている^{15)~18)}。他のMLなどでもたびたび話題になってきた。それほどにこの問題は難解な「大人の話」なのである。

学習指導要領や教科書の範囲も逸脱しているので、着底問題を中学生に出題してはならない。浮力を問うなら、物体の底部が同じ流体に触れていることを明記すべきである。さもないと、出題者以上によく分かっている生徒に混乱と不利益を与えかねないからである。以上を切に要望して本稿の結びとする。

引用文献・参考文献

1) 【速報】千葉県発表 公立高校学力検査問題・解答(理社)、千葉日報、2021年2月25日
<https://www.chibanippo.co.jp/news/local/767458>

- 2) 『岩波理化学辞典 第5版』、岩波書店、2001年
- 3) 文部科学省『中学校学習指導要領解説・理科編(平成20年7月)』、2008年
- 4) 文部科学省『中学校学習指導要領解説・理科編(平成29年7月)』、2017年
- 5) 『新しい科学 1年』、東京書籍、2013年、p.175-176
- 6) 『未来へひろがるサイエンス1』、啓林館、2015年、p.195-197
- 7) 『理科の世界 1年』、大日本図書、2015年、p.185-187
- 8) 『自然の探求 中学校理科1』、教育出版、2015年、p.98
- 9) 『中学校 科学1』、学校図書、2015年、p.104
- 10) 矢野幸夫「下面にはたらく水圧で浮力が生じることを示す実験」、『物理教育 第61巻第2号』、日本物理教育学会、2013年、p.57-60
https://www.jstage.jst.go.jp/article/pesj/61/2/61_KJ00008722419/_article/-char/ja/
- 11) 青森県「平成31年度青森県立高等学校入学者選抜学力検査問題・理科」、青森県教育委員会学校教育課、2019年
https://www.pref.aomori.lg.jp/bunka/education/senbatsu-ac_2019.html
- 12) Erlend H. Graf 「Just What Did Archimedes Say About Buoyancy?」、『The Physics Teacher 42, 296』、AAPT、2004年
<https://pdfs.semanticscholar.org/0293/19ea770377741163035e26838fa3f4c07af5.pdf>
- 13) 右近修治「アルキメデスは浮力の原理をどう説明したか」、『物理教育通信 No117』、物理教育研究会、2004年、p.40-44
- 14) 三田博雄「アルキメデスの科学」、『世界の名著9・ギリシアの科学』、中央公論社、1972年、p.480-482
- 15) YPC2000年3月例会：
<http://www2.hamajima.co.jp/~tenjin/ypc/ypc003.htm>
- 16) YPC2004年5月例会：
<http://www2.hamajima.co.jp/~tenjin/ypc/ypc045.htm>
- 17) YPC2019年4月例会：

<http://www2.hamajima.co.jp/~tenjin/ypc/ypc194.htm>

18) YPC2019年12月例会 :

<http://www2.hamajima.co.jp/~tenjin/ypc/ypc19z.htm>