



Tokyo Gakugei University Repository

東京学芸大学リポジトリ

<http://ir.u-gakugei.ac.jp/>

Title	アルキメデスの原理により生じる浮力に関する素朴概念(fulltext)
Author(s)	松本,益明
Citation	東京学芸大学紀要. 自然科学系, 68: 31-37
Issue Date	2016-09-30
URL	<a href="http://hdl.handle.net/2309/145948">http://hdl.handle.net/2309/145948</a>
Publisher	東京学芸大学学術情報委員会
Rights	

## アルキメデスの原理により生じる浮力に関する素朴概念

松 本 益 明\*

物理科学分野

(2016年5月25日受理)

MATSUMOTO, M.: Naive conception about buoyancy caused by Archimedes' principle. Bull. Tokyo Gakugei Univ. Div. Nat. Sci., **68**: 31-37. (2016) ISSN 1880-4330

### Abstract

Conceptual survey of buoyancy to the first year undergraduate students revealed that many students have misconception or naive conception caused by Archimedes' principle. In the present curriculum, students are expected to learn buoyancy as a phenomenon caused by pressure difference at junior high school. Many of them, however, are taught it by Archimedes' principle before they enter junior high school. Though Archimedes' principle is quite useful to estimate approximate quantity of the buoyant force, there is a problem that no concepts of pressure are included in the principle. Therefore, they came to think buoyant force is not caused by pressure difference between up and down side of the object but just by displacement of the fluid by the object. Since the misconception formed in the childhood is very firm and difficult to be repaired, it is important to correctly explain buoyancy by pressure difference, not by Greek mind-set using displacement of the fluid when they learn for the first time.

**Keywords:** misconception, naive conception, buoyancy, pressure, Archimedes' principle

*Department of Physics, Tokyo Gakugei University, 4-1-1 Nukuikita-machi, Koganei-shi, Tokyo 184-8501, Japan*

**要旨:** 本学の大学1年生を対象に浮力に関する概念調査を行ったところ、浮力をアルキメデスの原理を用いて理解しているために生じていると思われる誤概念・素朴概念が存在していることが分かった。現行の教育課程において、浮力は中学校において圧力により生じる現象の一つとして学ぶことになっているが、多くの場合小学校やそれ以前にアルキメデスの原理により教えられている。アルキメデスの原理は浮力の大きさを概算するためには極めて有用であるが、この原理は圧力の概念を用いない形で浮力を説明しているため、浮力が圧力と無関係に、単に流体を押し続けているために生じていると考えるようになっていくと思われる。幼い頃に形成された誤概念・素朴概念は簡単には修正できないため、この原理を用いつつも、「流体の排除」のようなギリシャ的な考え方ではなく、最初からきちんと圧力差を用いて説明することが必要である。

---

\* 東京学芸大学 基礎自然科学講座 物理科学分野 (184-8501 小金井市貫井北町 4-1-1)

## 1. はじめに

学生が学び始める前から経験則として持っている概念の中で、特に学校の教育課程で学習する現在正しいと考えられている法則と整合しないようなものは、「誤概念」もしくは「素朴概念」という言葉で呼ばれ、最近注目されるようになってきた。物理教育においては、特に力学分野を中心に米国において研究が始まり<sup>1-3</sup>、最近日本においても調査や研究、さらにはそれを克服するための教育実践が行われるようになってきている<sup>4-7</sup>。筆者自身も本学の基礎物理学の講義においてピアインストラクションというアクティブラーニング型の講義を導入して実践し、誤概念・素朴概念の調査・研究を行っている。これまで研究が進んでいるのは主に力学分野と電磁気学分野の一部であり、その他の分野についてはあまり研究が進んでいない。高校までの物理学における力学では主に大きさを持たない質点を取り扱うため、大きさを持つことではじめて生じる圧力や浮力は力学とは別の形で取り扱う必要があるため、そのため、日常生活において極めてよく接しているにもかかわらずあまり深く取り扱われていないように思える。現行の学習指導要領において、圧力は小学校においてボイルの法則を概念として学んだ後、本格的には中学校で学ぶことになっており、浮力は圧力を学ぶ際に圧力により生じる現象の1つとして学ぶ。圧力についてはパスカルの原理を用いて教えられており、浮力についてはアルキメデスの原理を用いると比較的に理解できるため、多くの子供は、圧力を学習する前のおそらくは小学校の段階で、親や先生から何らかの形で教えられていると思われる。アルキメデスの原理を用いると、比較的簡単に浮力の大きさを見積もることができるので、あまり深く考えることなく、原理として覚えて済まされているのかもしれない。ここ15年ほどの物理教育誌や大学への物理教育誌に掲載された浮力に関する論文としては、旧課程が始まる際に書かれた浮力の教育に関する論文<sup>8</sup>とアルキメデスの逸話に関する論文<sup>9</sup>の他、科学おもちゃの1つである浮沈子についての論文が3本<sup>10-12</sup>、その他の実験に関する論文が3本<sup>13-16</sup>見当たるとはいえず、あまり多くない。これらの論文の中で物体の上下の圧力差を明確に意識したものは矢野による「下面に働く水圧で浮力が生じることを示す実験」という研究報告<sup>16</sup>だけであった。

Redish著「科学をどう教えるか」<sup>3</sup>には、誤概念・素朴概念の選択肢を含んだいくつかの問題が掲載されており、その中に浮力に関する設問がある。そこに書

かれている問題を用いて、大学に入学して間もない段階での学生が浮力に関してどのような概念を持っているのか調査を行ったところ、浮力が圧力と関係無く、アルキメデスの原理により流体を押しよけることにより発生していると覚えることで誤概念・素朴概念が形成されていることを示す結果が得られたので報告する。

## 2. 浮力の要因

物体の重さは、流体中において、物体が押しよけている体積分の流体の重さだけ浮力が発生して小さくなるというのがよく知られたアルキメデスの原理であり<sup>8</sup>、このような浮力の存在について我々は日常生活の中でよく実感している。物体が水に浮くのは浮力が物体に働く重力よりも大きくなる場合であり、そのおかげで鉄のように密度の大きな物質も密度の小さな物質と組み合わせることで水に浮くことができる。また、水に入ると体が軽く感じ、さらに海水では真水よりも浮力が大きく浮きやすいといった形でも幼い頃から体験している。浮力は水中だけではなく、空気中でも生じている。空気の密度は室温の1気圧で約 $1.2\text{mg}\cdot\text{cm}^{-3}$ であり、約 $1\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ の水の密度の約1/850に過ぎないため、人が直接空気の浮力を感じることはないが、ヘリウムガス風船や熱気球、温めた空気が上昇するといった事で空気にも浮力があることを(きちんと意識してはいないかもしれないが)知っている。

アルキメデスがこの原理を発見した当時は圧力という概念がなかったため「原理」であると考えられていたが、17世紀にパスカルが導入した圧力の概念とパスカルの原理により科学的に説明されたため、もはや原理とは呼べないようにも思う。しかしながら、現在でも理解しやすさの点からアルキメデスの原理という名前のまま浮力の説明に用いられており、浮力の大きさを見積もるのには極めて有用である。大気のように開いた系に存在する流体の圧力は重力により生じている。流体中に仮想的な平面を考えると、パスカルの原理によりその平面に両側から働く力は等しくなるため、流体が及ぼす力は全方向に等方的に働く。物体が台の上に置いてある場合、物体と台の間にすき間が無いように思えても、通常流体を構成する分子にとっては十分大きなすき間であるため、流体は周囲からの圧力によって物体の下にも広がり、力の向きを変えて、下面に対する上向きの圧力を及ぼす。パスカルの原理の元でも圧力は高さによって異なっており、下面に働く上向きの圧力が上面に働く下向きの圧力よりも大き

いため、この圧力差が浮力となっている。簡単のために流体の密度 $\rho$ が高さによらず一定であるとして、その流体中にある底面積 $S$ で高さ $h$ の直方体（体積は $V = Sh$ 、質量 $m$ ）に対する浮力を計算する。直方体の上面に下向きに働く圧力を $p_1$ 、下面に上向きに働く圧力を $p_2$ 、重力加速度の大きさを $g$ とすると、物体の有無と関係無く、高さが低いほどその上に存在する流体が多いため圧力は大きく、その差は $p_2 - p_1 = \rho gh$ となる。直方体と同じ体積の流体の質量を $M = \rho V$ とすると、物体が存在する場合、その存在が流体の圧力に影響を与えなければ、上向きに次のような浮力 $F_b$ が働く。 $F_b$ は

$$F_b = S(p_2 - p_1) = S\rho gh = Mg = \rho Vg \quad (1)$$

と書け、アルキメデスの原理に一致する。複雑な構造をした物体の場合は、小さな直方体の集合体として考えれば(1)式で理解される。具体的に一辺の長さが10cmの立方体の場合に $\rho Vg$ を計算すると、体積は $V = 1\ell = 10^{-3}\text{m}^3$ なので、水中で9.8 N、つまり約1 kg重の重さに相当する。

水のような液体の場合、圧力による体積変化（圧縮率）が小さいため、全体積に渡って密度が一樣という近似が大体成り立つが、気体のように圧縮率の高い流体については(1)式では単純化しすぎである。空気を分子量29の理想気体と考えると、状態方程式は

$$p = \frac{nRT}{V} = \frac{mRT}{VM} = \rho \frac{RT}{M} \quad (2)$$

である。ここで $p$ は気体の圧力、 $V$ は体積、 $n$ はその体積に含まれる気体のモル数、 $m$ はその質量、 $M = 0.0288\text{kg mol}^{-1}$ は気体のモル質量、 $\rho$ は気体の密度、 $R = 8.31\text{J mol}^{-1}\text{K}^{-1}$ は気体定数、 $T$ は気体の温度である。従って温度が場所によらず一定であれば、圧力は密度に依存している。つまり上面と下面の密度の違いにより浮力が生じているため、(1)式で $\rho$ を一定としては気体の浮力を正しく求めることはできない。単純に水の場合と同じ様に気体も圧縮されないと仮定して、室温（300 K）において一辺の長さが10cmの立方体の場合に $\rho Vg$ を計算すると、0.0116Nとなり、約1.2g重の重さに相当する。一辺の長さが10cmの立方体の場合にこの大きさの浮力を生じるのは、上面と下面の圧力差が1.16Paの場合であり、 $1.3 \times 10^{-8}\text{g cm}^{-3}$ の密度差に過ぎない。これは1気圧での圧力や密度の1/10万程度と極めて小さいため、高低差が小さい場合には、密度が一樣と近似しても実際には問題無い。飛行機のよ

うに数百トンもあるものであっても働いている浮力を生じさせる気圧差（密度差）は数%に過ぎない。1気圧は $1013\text{hPa} = 1.013 \times 10^5\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$ であり、 $1\text{cm}^2$ 当たり約10N（約1kg重）もの大きさがあり、大気圧により及ぼされる力は、普段意識することはあまりないが非常に大きい。大気圧の元に置かれた水の場合、水圧は水面において大気圧と平衡になっているため、ほぼ1気圧となっている。水の密度を $1\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ とすると、1気圧の圧力を生じる水の高さは

$$\frac{1.013 \times 10^5\text{N}\cdot\text{m}^{-2}}{1.0 \times 10^3\text{kg}\cdot\text{m}^{-3} \times 9.8\text{m}\cdot\text{s}^{-2}} = 10.3\text{m}$$

であり、約10m潜る毎に水圧は1気圧上昇する。従って水深1m以下での水圧は1気圧よりも少し（10%以下）大きい程度に過ぎない。

### 3. 浮力に関する誤概念・素朴概念調査

浮力に関する調査は、筆者が担当している基礎物理学の講義を履修している学部一年生90名を対象にピアインストラクション型の授業においておこなった<sup>2,7</sup>。ほとんどの学生は初等教育課程理科選修の学生であり、高校において9割の学生は物理基礎・物理Iを履修しており、5割の学生がそれに加えて物理学・物理IIを履修していた。旧課程の学生も若干含まれているが多くは新課程で教育を受けた学生である。ピアインストラクションでは、簡単な説明を行った後、計算よりも概念の理解を重視した選択式の質問（コンセプトテスト）について、最初は生徒が1人で考えた解答を、クリッカーという機械を用いて教員のパソコンとの通信により集計して全員に結果を示す。その時点では多くの場合大きくばらついた結果が得られる。その結果を受けて学生はグループ内で討論を行い、もう一度討論後の解答を上と同様にして集計するといった形で授業を進めていく。

まず最初に、水中、空気中、真空中で物体をはかりに乗せた時の指示がどうなるかを尋ねたところ、討論前の1回目の調査の段階では、75%の学生が水中の方が空気中での指示よりも小さいと答え、真空中での指示がどうなるかについては意見が半々に分かれていた。学生同士の討論をおこなった後ではほぼ全員が水中での指示の方が小さいと答え、70%が真空中での指示が最も大きいと答えるといった結果となった。

次に、Redishの本の第4章「学習評価の方法とその高度化：宿題と試験」にある次の問題について調査した<sup>3</sup>。

## 4. 考察

本が机の上に置かれており、静止している。本には次の力のうちどれが働いているか。

- A 重力による下向きの力
- B 机による上向きの力
- C 大気圧による正味下向きの力
- D 大気圧による正味上向きの力

(上記の組み合わせが選択肢として示されている)

結果は「A, B」が26%, 「A, B, C」が50%, 「A, B, D」が22%という結果であった。共通しているのはAとBであり、重力と垂直抗力についてはほぼ全員が働いていると考えていたのに対し、大気圧の力については、正味下向きの力を選んだ人が最も多かった。

そこで宿題の形でもう一度考えさせ、理由についても聞いてみたところ、学生同士の討論なども行われたためと思うが、講義中での調査とは異なる結果となった。「A, B」を選んだ学生はあまり変化せず29%であったが、「A, B, C」が18%と大きく減少し、「A, B, D」が52%と大きく増加した。理由については、「A, B, D」と答えた学生は全員浮力が働くためと考えており、「A, B, C」と答えた学生は圧力が上からだけ働くと考えていた。

最後に、浮力と圧力の関係を理解しているかどうかを調べるために、宿題の形で次のような問題を出題した。

ア 空気中 イ 水中 ウ 真空中の3つの場合で、物体を台の上に載せた時、物体に働く垂直抗力の大小関係はどうなるか？ただし、物体と台は完全に密着しており、間に何も入らないとする。

この問いでは、物体が台と完全に密着していて、間には何も入らないとしており、物体の下側には水や空気からの圧力が働いていない。このことが浮力に対してどのような影響を与えるかを考える問いになっている。

調査の結果、垂直抗力が大きな方から順番に真空中、空気中、水中を選んだ学生が約2/3 (66%)で最も多く、水中、空気中、真空中の順番を選んだ学生が18%、空気中、真空中、水中の順番を選んだ学生が10%であった。

最初の問いに対する討論前の調査から、水中ではかなり大きな浮力が働くということをほとんどの学生が最初から理解していたことが分かる。空気中で働く浮力については、水の浮力に比べて極めて小さく、日常生活の中であまり感じていないこともあって、浮力が存在することをはっきりとは認識していないようである。しかしながら、学生同士の討論により、多くの学生は正しい方向に導かれ、空気中での浮力の存在に気が付く結果となった。

次のRedishの本に書かれている問題については、本文中において「多くの高校生や大学生の一部は、大気圧が重力の原因になっており、物体をその上の空気の重さによって下向きに押し込んでいると考えており、このため「A, B, C」の選択肢がそういった学生にとってひっきりやすい誘導的な誤答になっている」と書かれている。

討論前の段階では、Redishの考える誤答を選んだ学生が最も多いという結果であったが、宿題として考えさせた後では「A, B, D」の浮力が働くという解答が最も多くなった。

この問題の状況を表す概略図を図1に示す。この図は物体が台に載っている様子を表しており、一般に重力と垂直抗力による力のつりあいを示すためによく描かれるものである。力の書かれていない形でこの図が示されて、特に断わりなく、物体に働く力を図中に描け、という問題が出されたら、高校で物理を習ってきた学生であれば、おそらく当然図1(a)のように重力 $mg$ と垂直抗力 $N$ だけを描くだろうと思われる。その理由は、高校の物理学においては、たとえ物体が大きな四角形で描いてあったとしても、それは大きさを持たない質点であると見なしているか、もしくは、特に断わっていないとしても、それは真空中、つまり圧力の存在しない空間に置かれていると見なしてしまっているためである。これは物体の落下において空気抵抗を無視することと同じような仮定である。

しかし、このRedishの問題のように、大気圧による力を考えるためには物体を質点と見なすことはできないため、物体の表面を考え、図1(b)のように、全ての面への圧力を考えなければならない。もちろん、圧力は対向する2つの面に同じように働くためほとんどつり合っているが、垂直抗力と重力もつり合っており、大気圧が上述のように $1\text{ kg重/cm}^2$ もの大きさで、人が持ち上げることのできる多くの物体では重力よりも大きい事を考えると、大気圧を無視して図1

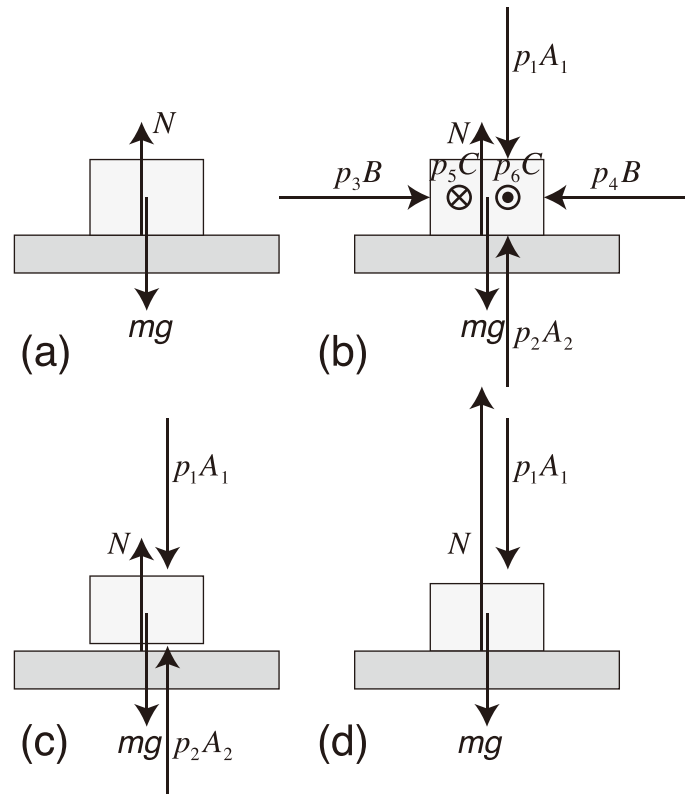


図1 (a) 物体に働く重力と垂直抗力。(b) (a)に流体の圧力を加えた図。(c) 物体と台の間にあるすき間を強調した図。(d) 物体と台が密着している時に物体に働く力。(c) と (d) において、圧力による力は上下のみを残してある。 $A_1$ ,  $A_2$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ は各面の面積。

(a) のように書くのはおかしいようにも感じる。質点を扱う高校物理の範囲ではそれもやむを得ないと思うが、圧力を教える際には図1 (d) のように重力と垂直抗力の大きさが大きく異なる場合もあることを教えることが望ましい。

調査結果において、当初「A, B, C」を選んでいるということは上からの圧力が大きいと考えていたことになるが、理由を聞いてみたところ、Redishが指摘するような「大気圧が重力の原因」と考えていた学生は存在していない。この辺りは日米での重力についての教え方の違いが現れているのかもしれない。

図1 (a) と (b) にはもう一つ明記されていない仮定が存在する。それは、図では物体と台の間にすき間が無いように描かれているが、実際にはすき間が存在しているということである。Redishの問題のように本の場合には、描くべき図はすき間の多い格子状の物体であるし、中の詰った金属片であっても、通常は台との間には空気や水の入り得るすき間がある。しかし、図1 (a) と (b) のような概略図で考えてしまうと、物体と台の間にすき間がないため、 $p_2$  のような下からの圧力は働かないと考える人がいてもおかしくない。物理の教員はこのような図が描かれていたとしても、物体と台の間には空気が入り込む充分なすき間があること

を認識しているが、学生の多くは圧力の存在を意識していないため、改めてその存在を問われると混乱してしまうようである。実際、空気が入らないほどぴったりとくっつけることができれば $p_2$ の圧力は働かないため、大気圧による正味の力は下向きになり、Redishが誤概念・素朴概念と考えている選択肢が正しい解答となる。講義中におこなった最初の調査で「A, B, C」の選択肢を選んだ学生が多かったのは、おそらくこのような抽象的な図で考えた結果、圧力が上からしか働いていないと考えたためではないかと思われる。米国でもそのように考えている学生は数多く存在すると思われる。実際ほとんどの物体ではたとえ一見平坦な底面を持つ物体を平坦な台に乗せた場合でも、それらは密着することはなく、底面のほとんどの部分は流体からの圧力を受けていると考えられる。このような様子を明確に表すには、図1 (c) の様に浮き上がった図とするか、より現実的にはぎざぎざの面同士が接触しているような図を描く必要がある。

実際に図1 (b) の $p_1 A_1$ と $p_2 A_2$ のどちらが大きいのかという問題は、かなり微妙な問題である。具体的に適当な大きさの本(15cm × 20cm, 厚さ3cm, 重さ800g重)を完全な直方体であると仮定すると上面と下面の圧力差は0.353Paである。本と台の接触面は、図1

(c)に近い状態にあるが、実際には本と台が接していて空気が入らない面積が多少存在していると思われる、下面の面積は上面に比べてその分だけ小さい。面積の違いによる効果が圧力差による効果よりも小さく、浮力が働くのは、真の接触面積が $0.1\text{mm}^2$ よりも小さい場合である。真の接触面積は本の表紙の材質や湿度などの条件によって異なっている。例えば、柔らかいビニールなどのカバーが付いている本を平坦な台の上に置くと、ビニール自体に粘着性が無い場合であっても台にくっついてしまっていて剥がすのに苦労した経験があると思うが、これは真の接触面積が大きく、正味下向きの力が働いているためと考えることができる。従って上の設問のCとDのどちらが正しいかは与えられた条件だけでは判断できない。実際、Redishがこの質問で確認したいと考えているのは「大気圧が重力の原因になって」と考えているかどうかであり、期待している正解は「A, B」である。

最後の空気中、水中、真空中の3つの場合について垂直抗力の大きさの大小関係を問う問題についてはその場ですぐに答えさせずに宿題の形をとったため、学生同士で討論をしたり、何らかの形で調べる時間があった。物体が台と完全に密着していると書いてあるにもかかわらず、2/3もの多くの学生が通常の（密着していない）場合と同じように密度の大きな水で浮力が働き垂直抗力が小さくなるという結論に至っており、理由を調べると、多くの学生は単純にアルキメデスの原理のみを用いて考えているということが分かった。彼らは、浮力を圧力と完全に切り離して、「物体が流体を押し上げる結果として浮力が働く」というアルキメデスの原理が成り立っていると考えており、下側にも流体があって、圧力を及ぼすことではじめて浮力が働くとは考えていない。このように考える学生は、無重力下で上下の概念が無い条件であっても、空気が存在するだけで何らかの形で浮力が働くと考えるかもしれない。これは、アルキメデスの原理があまりにも有名で合理的であるため、かえって誤概念・素朴概念が生じてしまっている1つの例なのではないかと思う。

上記の学生に比べるとわずかであるが、一部の学生は空気中においては下からの圧力が働かないため空気中の方が垂直抗力が大きいと考えていたにも関わらず、水中においては、やはり浮力が働くと考えていた。大気圧は上で述べたように大きな力を及ぼすが、普段感じる事が少ないため、大気圧によって生じる力よりも水の浮力の方がはるかに大きいと考えているようである。実際には上述のように、1m以下の水深

での圧力は、空気中に比べて10%程度大きい程度に過ぎないためそれほど大きな違いは無い。

さらに、物体が密着する状態を作るための方法について考えてもらったところ、吸盤も含めて物体と床のすき間を何らかの形で真空にすると考えた学生が多く、次いで接着剤で付けると答えた学生が多かった。あとは実現できるかどうかはともかく平坦にすると答えた学生も何人か存在した。接着剤の場合は粘着性のある高分子材料を用いており、状況は異なっているが、吸盤の場合には、壁や台との間を真空にすることにより下からの圧力を小さくし、上からの大気圧を用いて押さえつけている。上述したように、1気圧は $1\text{kg重}/\text{cm}^2$ と極めて大きいため、わずかな圧力差であっても強い力となり得る。密着している状態と下面が真空になっている状態が同じ力を及ぼすということに気が付くと、この条件が吸盤と同じであるということに思い当たると思われるが、その様な答を書くことができた学生は10%であった。吸盤のように物体が床に密着している場合、床が物体を引っ張っているように錯覚している者もいるが、実際には図1(d)に示されているように、物体には重力以外にも上から働く圧力による大きな力が働いており、それにつり合うように大きな垂直抗力が働いている。柔らかくて空気を通しにくいものであれば吸盤のゴムの代りの役割を果たしうるため、図1(d)のような状況は案外多く発生している。物体と床のすき間に水が存在する場合、水がすき間を完全に埋めるほど多ければ浮力が働き摩擦は小さくなるが、すき間が小さく水の膜が吸盤のゴムの働きをするような場合には図1(d)のような状況が発生して垂直抗力が大きくなり、結果的に横方向に滑らせる際の摩擦が大きくなる可能性がある。水がすき間に入ることでかえって摩擦が大きくなるような経験を、結構多くの方がしているのではないだろうか。

今回調査した学生の構成は上述の通りであるが、その中で浮力が圧力とは関係無く働くという誤概念・素朴概念を持っていると思われる学生の割合は、物理基礎・物理Iのみを履修した学生の70%、物理学・物理IIを履修した学生の63%であり、それほど大きな違いは無かった。このことはこの誤概念・素朴概念が形成されたのが中学校までの最初に浮力を習った段階であることを示している。高校での物理教育により若干の改善は見られているものの、一度原理として教えられた概念を修正することがかなり困難であることが分かる。

圧力に関係するもう一つの原理であるパスカルの原理についても成り立たないことがあることが知られてい

る。パスカルの原理は圧力の原因が分子衝突により分子が及ぼす力積であると考えれば、作用・反作用の法則で説明できる。つまり、流体中の仮想平面上で衝突する分子は作用・反作用の法則により互いに等しい力積を及ぼすため、両面に及ぼされる単位面積当たりの力積が等しいことから両面の圧力が等しくなるためパスカルの原理が成り立つ。この原理は通常の大気圧に近い条件の下では正しいが、圧力が低くなって流体を構成する分子同士の衝突がほとんど起きないような圧力領域（分子流領域と呼ばれる）では、成り立たない。分子流領域で平衡状態においては2つの流体の境界では圧力が等しくなるのではなく、入射分子の入射頻度が等しくなる。入射頻度は圧力を $p$ 、温度を $T$ とすると、 $p/\sqrt{T}$ に比例するため温度が等しい場合には圧力も等しくなるが、接触する2つの容器の温度が異なる場合には圧力が大きく異なった状態で平衡に達する。例えば片方が室温（300 K）でもう片方が液体ヘリウム温度（4.2 K）の場合には、温度の高い方の圧力は低い方の圧力の約8.5倍である。この現象は熱遷移と呼ばれている。分子流領域となる圧力は接触部分の直径が数cmの場合には $10^{-6}$ 気圧とかなり低いが、現在ではこの程度の圧力は容易に実現可能であり、宇宙ステーションの飛ぶ高度や月面、工業用の真空容器などにおいてはこの現象の方が普通に生じているため、熱遷移は真空技術者にとって必要な考え方の一つである。従って、このような低い圧力領域における現象を正しく取り扱うためにはパスカルの原理に基づいた考え方を払拭する必要があるが、これもまた強固な概念を形成してしまっているため、誤概念・素朴概念となりうる。

また、図1(a)のような図を使って物体に働く力を考えることは、別の誤概念の要因になっていると思われる。それは、この図に描かれている2つの力が互いに作用・反作用の関係にあるというものである。上と同じ母集団で調査したところ、このような誤概念を持っている学生が約60%存在していた。作用・反作用の関係にある力は、対となる物体が互いに及ぼす力であるため、1つの物体に働く2つの力ではありえないのだが、図1(a)の図を見る機会が多く、紋切型に大きさが同じで逆向きと教えられることから誤概念を形成する原因になっているのではないかと思われる。図1(d)のように、垂直抗力の大きさが重力と全く異なる場合があることをきちんと教えればこのよう

な誤概念も克服できるように思う。

## 5. おわりに

今回の調査により高校卒業後間もない段階では、圧力と無関係にアルキメデスの原理によって浮力が働くという誤概念・素朴概念が形成されているということが明らかになったが、この原理を用いた説明は明快で理解しやすく、浮力の大きさを概算する点で実用的であるという点では捨てがたい魅力があり、今後も利用されていくだろうと思われる。しかし、「流体の排除」のようなギリシヤ的な考え方で教えてしまうと誤概念・素朴概念を形成してしまう可能性がある。幼い頃に原理という形で覚え込まされて身に付けた誤概念・素朴概念は、なかなか修正することが困難であると思われるため、最初の段階から浮力を教える際に、これが流体を排除する結果生じるのではなく、圧力差によって生じていることをきちんと説明することが重要である。

## 参考文献

- [1] D. Hestenes, M. Wells and G. Swackhamer, Phys. Teach. **30**, 141 (1992).
- [2] Eric Mazur 『Peer Instruction: A User's Manual』 Pearson Prentice Hall (1997).
- [3] エドワード・F・レディッシュ 『科学をどう教えるか』丸善出版 (2012).
- [4] 新田英雄, 覧具博義, 物理教育 **56**, 132 (2012).
- [5] 新田英雄, 塚本浩司, 大学の物理教育 **17**, 16 (2011).
- [6] 新田英雄, 物理教育 **60**, 17 (2012).
- [7] 新田英雄, 松浦執, 工藤知草, 科学教育研究 **38**, 12 (2014).
- [8] 森井清博, 物理教育 **49**, 145 (2000).
- [9] 橋本萬平, 大学の物理教育 **2002-3**, 4 (2002).
- [10] 青野 修, 物理教育 **48**, 515 (2000).
- [11] 柿原聖治, 物理教育 **50**, 250 (2002).
- [12] 霜田光一, 物理教育 **55**, 1 (2007).
- [13] 小池守, 高見澤一男, 高津戸秀, 定本嘉郎, 物理教育, **53**, 145 (2005).
- [14] 柿原聖治, 物理教育 **59**, 267 (2011).
- [15] 矢野幸夫, 物理教育 **60**, 194 (2012).
- [16] 矢野幸夫, 物理教育 **61**, 57 (2013).