



第2回 授業のデザインに生徒の素朴概念を反映させる



早稲田大学高等学院教諭

勝田 仁之

1. はじめに

本稿は、連載企画「PER 実践紹介」の第2回である。PERとは、Physics Education Researchの略で、学問領域としての物理教育研究のことである。本連載第1回では、新田英雄氏（東京学芸大学）が「PERとは何か」という題目で、授業実践を意識しながらPERの全体像を解説された。その解説記事によれば：

- 多くの生徒が、物理法則に反する「素朴概念」を共通して保持している
- 素朴概念は強固であり、物理学を学んだ後でも解消されずに残っている
- 生徒がどのような素朴概念を把握しており、どの程度正しい物理概念へと変容したかは、概念調査紙を用いて定量的に測定できる
- 素朴概念を保持したままでも、典型的な演習問題は、公式に基づいて正解できる
- 講義型授業では、素朴概念はあまり克服されない
- 素朴概念を正しい物理概念へ変容させるには、アクティブ・ラーニング型の授業が有効である

ということが、すでに明らかになっている。

一方で、「素朴概念の変容にはアクティブ・ラーニング型授業が有効」と言われても、具体的な教材や授業のイメージが湧かない読者も多いのではないだろうか。また、生徒の素朴概念とはどのようなものか、力学分野はなんとなく想像がつくとしても、他分野についてはいまひとつピンとこない方もいるだろう。そこで本稿では、熱学分野に焦点を当てて、生徒の保持する素朴概念と、その克服に向けた授業例を紹介する。

2. 熱学の素朴概念の例：熱平衡

熱学分野の素朴概念とはどのようなものか、著者の

授業実践と絡めつつ、紹介したい。なお、紹介する授業例はすべて、著者が2024年度に前勤務校（筑波大学附属高校）で行った、2年「物理基礎」のものである。

まず、「熱平衡」に関する授業例を紹介する。熱平衡とは、高温物体から低温物体に熱が移動して同じ温度に落ち着くという、すべての熱現象を考えるうえで基本となる経験事実である。そこで、下図1の課題を扱った。

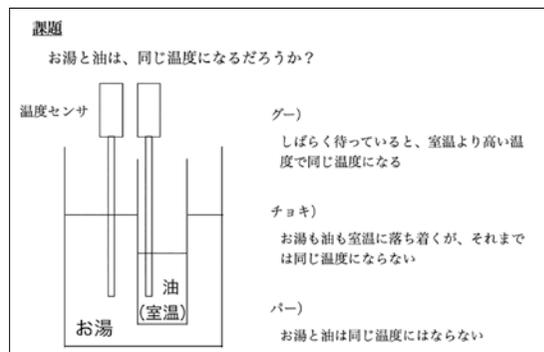


図1 熱平衡に関する授業課題
(著者の授業スライドから抜粋)

図1のように、ビーカーに湯を張り、食用油（室温）の入った試験管を、ビーカー内に入れる。このとき、湯と油の温度が同じになるかどうか、生徒たちに問う。グー・チョキ・パーの3つの選択肢から自分の考えに近いものを選び、さらにどのように考えたかを文章で記述させる。

各生徒の予想がまとまったところで、手をグー・チョキ・パーのいずれかにして同時挙手させることで、意見分布をとる。さて、もしも読者が自分の担当クラスでこの課題を扱ったとしたら、どのような分布になるだろうか？想像してほしい。

著者は3クラスを担当したが、個人予想の段階で正解選択肢（グー：湯と油は同じ温度になる）を選んだのは、どのクラスにおいても半数程度であった。授業では何人

かの生徒を指名して、どのように考えたか発表してもらう。グーを選んだ生徒は、「湯と油に温度差がある限りは熱の移動があるだろうから、同じ温度になるまで続くのではないか」という考えや、あるいは生活経験やイメージから同じ温度に落ち着くと考えたようだった。

では、誤答選択肢を選んだ生徒たちはどのように考えていたのだろうか。チョコ：湯も油も室温に落ち着くが、それまでは同じ温度にならない、の誤答選択肢を選ぶ生徒は、高温物体は環境へ放熱して冷めていく、という生活経験に基づいた概念を活用していた。しかし、どうして室温まで冷めるのか、ということは考えておらず、あくまで経験事実として捉えている。温度差がなくなるまで熱の移動が起こるとい物理法則に基づいているわけではないのである。したがって、湯と油の間における熱の移動や、温度変化には着目できていない。

パー：湯と油は同じ温度にならない、の選択肢を選ぶ生徒は、湯と油は混ざらないから、という考えを述べていた。また、パーを選ぶ生徒たちは、室温環境に置かれたもの——たとえば机やベン、が室温と同じ温度である、という根本的な事実をそもそも認識していない。しかしながら、私たちの体温が室温とは無関係に 36℃ 程度を維持していたり、物質に触れたときの冷感が材質によって大きく異なったりすることを考えれば、パーを選ぶ生徒の考えは無下に切り捨てられないだろう。各生徒の考えを尊重することは、アクティブ・ラーニング型授業が成立するための必須の要素である。

個人の予想を発表してもらった後は、3～4名程度の班ごとにグループ討論を行い、再度の意見分布をとって、演示実験で決着をつける。この授業の流れは、PER に基づき D.Sokoloff らが考案した授業法 Interactive Lecture Demonstrations (ILDs) を参考にしている。

演示実験は、図1のように、湯と油にそれぞれワイヤレス温度センサを挿すことで、リアルタイムに温度-時間のグラフを表示するようにした。結果を図2に示す。なお、ワイヤレス温度センサは PASCO 社の PS-3201 を利用した。

3. 素朴概念を知れば、授業が変わる

さて、読者の皆さんは自身の授業において、熱平衡をどのように扱っているだろうか。先にも述べたように、熱平衡はすべての熱現象を考えるうえで基本となる経験事実であるが、学習前の生徒たちがこれだけ多様な

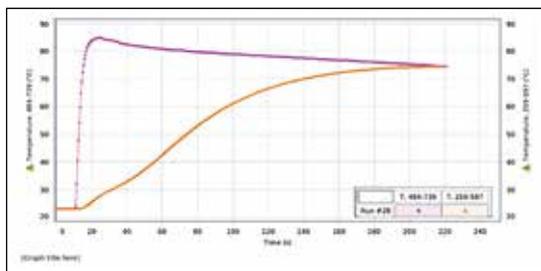


図2 湯と油が熱平衡化する際の温度-時間グラフ
上側(桃色)の曲線が湯、下側(橙色)が油の温度

素朴概念を抱えていることを、認識しているだろうか。また、熱の単元の学習後、これらの素朴概念は解消されているだろうか。

実際、熱学単元における学習事項の多くが、熱平衡の考え方を前提としている。たとえば、定番実験のひとつである、金属の比熱(比熱容量)測定を考えてみよう。昔からよく行われている方法は、図3のように室温の水の中に温度計を挿し、そこへ沸騰水の中から金属塊を移して温度上昇を測定することで、金属の比熱を測定するというものである。

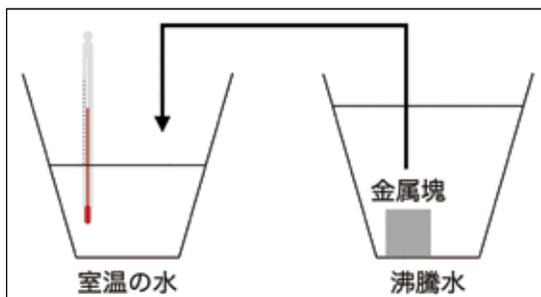


図3 金属の比熱測定の実験図

金属塊の比熱を求めるにあたっては、当然ながら金属塊の温度に注目するわけだが、金属塊の温度は一度も直接測定されていないということにお気づきだろうか。熱平衡の考え方に基づく2つの事実——①沸騰水の中の金属塊は、沸騰水と同じ温度であること、および②金属塊を室温の水に移すと、金属塊から室温の水へと熱が移動し、両者が同じ温度になるまで水の温度が上昇すること——を前提として、この測定は成立している。もしも、熱平衡の考え方が理解されないままの生徒がクラスにいて、比熱測定の実験課題が教員から課されたと仮定してみよう。その生徒にできることは、実験プリントに指示された手順に従い、意味もわからないまま温

度計の値を読み、公式に値を代入することくらいではないだろうか。

一方で、生徒がどのような素朴概念を抱えているかを教員が事前に把握していれば、それを反映した熱学単元の授業をデザインすることができる。これこそが、PERの価値である！熱平衡について、教科書の記述量は必ずしも多くはないが、だからといって授業で扱う時間も短くて済むというわけではない。むしろ、熱学単元の1時間目に時間をかけて、熱平衡に関する生徒の素朴概念を引き出しつつ、それと矛盾する他者の意見や実験事実と葛藤させ、正しい概念へと変容させるべきだろう。そして、熱平衡の考え方を、熱学単元の学習を進めるうえでの基礎に据えるという共通理解を確立できれば、その後の授業展開はかなりスムーズになるはずだ。

また、熱平衡の考え方それ自体が、一種の理論モデルであることにも注意が必要である。前章において、図1の課題でパーの誤答選択肢を選んだ生徒の考えについて言及した際にも触れたが、私たちの体温は室温とは無関係に一定に保たれている。生体は非平衡系であり、生とはある意味で、体内でエネルギーを消費し続けて環境に放熱することで、熱平衡に抗うことであるといえる。生体にとって熱平衡とは、死に他ならず、「冷たくなる」と表現されることもある。よって私たちは、環境に“イイ感じに”放熱できるような温度環境を快適だと感じ、その温度は体温よりも10℃以上低い。近年の夏においては、気温が体温を上回ることはまったく珍しくなくなった。周囲への放熱が行えなくなる、つまり熱中症のリスクは高まるばかりである。

いま述べた内容は、必ずしも高校物理の学習内容とはいえないが、生徒の素朴概念に配慮すれば、授業でも少しは触れておきたい。そこで、図4の課題を、著者は毎年扱っている。

図4にあるように、コアラとナマケモノは同程度の大きさの草食動物で、生態も似ているにも関わらず、エサの量はコアラの方が数十倍も多い。これは、ナマケモノが変温動物であるのに対して、コアラが恒温動物であるためである。一般に恒温動物は、環境温度と体温の差が大きいため、変温動物に比してエネルギー消費量が大きく、その分だけエサも必要とする。

ここで例に挙げた生体に限らず、「宇宙の熱的死」という概念があるように、この“生き生きとした”自然界は、本質的に非平衡系である。従って、平衡系の熱力

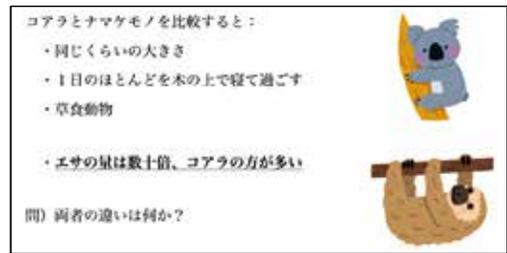


図4 コアラとナマケモノのエサの量の比較
(著者の授業スライドから抜粋)

学の理論を現実の現象にあてはめるとき、私たちは必ず何かしらの単純化やモデル化をしている。どのような理論モデルを選択しているか、考慮の対象から何を外したか、今考えている現象は理論モデルの適用限界を超えていないか。教員は常に生徒と共有しながら、授業を展開しなければならない。

4. 他の素朴概念と授業例

もちろん熱平衡以外にも、生徒たちは多くの素朴概念を抱えている。本稿の結びに、他の素朴概念と授業例を3つ紹介したい。

(1) 熱と温度

多くの生徒が、熱と温度の区別がつかずに、混同してしまっている。日常においても、「熱を測る」と言いながら温度を測る。いわゆるコロナ禍においては、著者の前勤務校でも「発熱時は登校禁止」と生徒に指導していたが、だったら誰一人登校できないよな、と著者は授業で軽口をたたいていた。読者も自身の授業において、生徒が「温度が移る」といった表現をするのを、経験したことがあるのではないだろうか。

熱と温度の混同は、冷温の体感が絡むと、より顕著になる。そこで、図5の授業課題を扱っている。

授業ではまず、各班の机の上にゴム板とアルミ板を置いておき、それぞれを指で触らせる。ゴム板よりもアルミ板の方が冷たく感じることを確認する。次に、それぞれの板の上に氷を置いたら、どちらが先に溶け終わるかを問う。

この課題は、どのクラスにおいても意見が3つの選択肢に同数程度割れるので、非常に盛り上がる。

正解選択肢のゲー：アルミ板の方が先に溶ける、を選ぶ生徒は、アルミに触ると冷たく感じることから、ゴムに比べて熱を伝えやすい物質であるとの考えに基づいていた。誤答選択肢のチョキ：同時に溶ける、を選んだ生徒は、アルミの方が冷たく感じていても、アルミ板

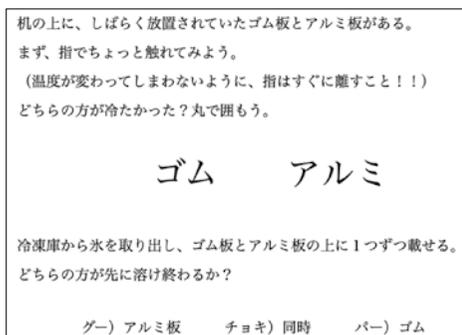


図5 熱と温度を区別するための授業課題
 (著者の授業スライドより抜粋)

もゴム板も室温で熱平衡となっているはずであり、両者は同じ温度なのだから同時に溶けるという考えに基づいていた。パー：ゴムの方が先に溶ける、を選んだ生徒は、触ったときにアルミの方が冷たく感じたことから、ゴム板はアルミ板よりも高温であり、氷が早く溶けるとの考えに基づいていた。

討論後には、各班で実験をして確かめる。その様子を図6に示した。アルミ板に氷を載せると、すぐに溶けはじめ、正解選択肢を選んだ生徒たちも驚くほどである。また、アルミ板とゴム板の、氷から離れた角の部分に指で触れるように指示すると、アルミ板の方はキンキンに冷えており、歓声が上がった。

熱と温度の混同はかなり根深く、理工系の大学生でも、等温過程と断熱過程の区別がつかない学生は珍しくない。日常では、高温・低温をそれぞれ熱い・冷たいと表現するが、少なくとも授業中の言葉遣いや教材の記述などでは、そのような表現を避けるよう、教員は注意すべきだろう。

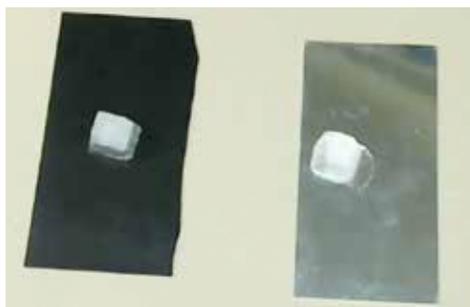


図6 ゴム板(左)とアルミ板(右)上の氷の様子
 アルミ板上の氷は溶けているが、ゴム板の方は溶けていない。

(2) 比熱 (比熱容量)

比熱(比熱容量)については、すでに第3章冒頭で定番の生徒実験について触れた。ここではさらに、比熱それ自体について生徒が抱える素朴概念について紹介する。

ところで、読者の授業では、どのように比熱という物理量を導入しているだろうか。それ以前に、比熱という物理量をなぜ新たに定義するのか、そもそも伝えているだろうか。著者の授業ではまず、図7の2つの課題を扱い、比熱を導入する準備としている。

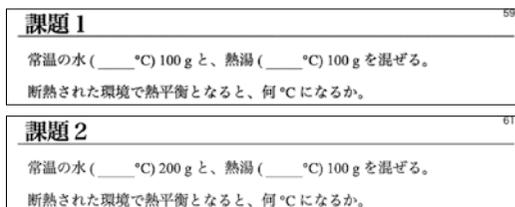


図7 比熱を導入する準備となる授業課題

授業では実際に、温度センサの値をスクリーンに表示しながら、フタつきの真空断熱タンブラーの中で混ぜ合わせる演示実験を行う。常温を20°C、湯の温度を80°Cとすれば、課題1では水も湯も同量あるため、真ん中の50°Cで熱平衡となる。これは全生徒が正解した。課題2では水が200g、湯が100gなので、その逆比でそれぞれの温度を内分した、40°Cで熱平衡となる。この課題は、自力では正解できない生徒もいたが、班での話し合いによって解決できた。

さらに、「この2つの実験事実から、熱と温度の関係についてどのようなことが考えられるか、2つ挙げよ」と問う。すると、生徒たちの考えは、

(i) 移動する熱量と、温度変化が比例関係にある

(ii) 同じ熱量に対し、温度変化は質量に反比例する

という2つの考えに落ち着く。このことから、「1°Cあたり」あるいは「1gあたり」の熱量という考え方が芽生えだす。そこでさらに、図8の課題3によって、比熱を導入するための、いや、せざるを得ない動機を与える。

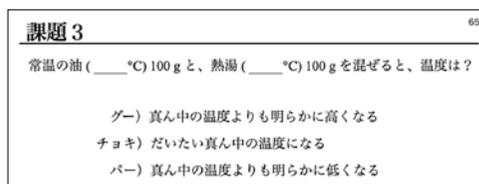


図8 比熱の導入を動機づける授業課題

課題3において、誤答選択肢のチョコキ：油と湯を同量混ぜると真ん中の温度になる、を選ぶ生徒はクラスの半数近かった。つまり、水と油の「温まりやすさ」という概念を保持していない、あるいは活用されなかった、ということである。このような生徒たちに対して、ただ比熱の定義式を説明するだけでは、何のためにそのような物理量をわざわざ定義するか、理解されると著者には思えない。実際に実験してみると、もちろん真ん中よりも高い温度で熱平衡となる。この実験により、先の熱と温度の関係 (i), (ii) に加え、

(iii) 同じ温度変化に必要な熱量は、物質により異なるが見出される。生徒の素朴概念を引き出しながら、(i) ~ (iii) の関係を生徒と共有できたからこそ、比熱という物理量を定義することができる。どのような物理量でも、必ず動機や必要性をもとに、新たに定義されてきたのである。その動機とは、教科書に載っているとか、入試に出題されるとか、つまらないものではない。何かを探りたい、作りたい、測りたいというような、生き生きとしたものである。

ところで、正解選択肢のゲー：真ん中よりも高い温度を選んだ生徒は、油は水よりも温まりやすいということを生か経験から獲得していた。一方で、誤答選択肢のパー：真ん中よりも低い温度、を選んだ生徒は、「油は水よりも温まりにくい」と考えていた。どのような根拠で、そのように考えていたか、読者は想像がつくだろうか。著者はこの課題を毎年実施しているが、必ず出てくる考えのひとつは、「油は100℃になっても沸騰しないから、水より温まりにくい」というものである。素朴概念とは、本当に多様である。

(3) 潜熱

潜熱とは相転移(状態変化)に伴い移動する熱のことである。沸騰水の温度が沸点に保たれるように、相転移の最中、熱の流入出があっても物質の温度は変化せず、すべて相転移すること自体に使われる。また、相転移の最中は、液体の水と水蒸気のように複数の相が同じ温度で共存する。このことは義務教育段階でも学習するが、正しく理解している生徒は少ない。そこで、図9の授業課題を扱った。ビーカーに入れた水を湯煎にかけたら、沸騰するかを問うものである。

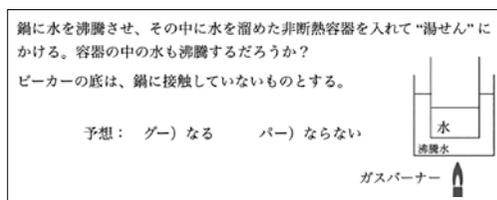


図9 水を湯煎にかける授業課題
(著者の授業スライドより抜粋)

沸騰すると考える生徒は、熱平衡の考えに基づき、ビーカー内の水も沸点に達するという考えに基づいている。沸騰しないと考える生徒は、沸点に達することはできても、そこでビーカー内の水と沸騰水が同じ温度になるため熱の移動が起こらず、蒸発熱を得られないという正しい考えに基づく生徒もいる。一方、ビーカー内の水は沸点に達することができない(沸騰していない水は沸点に達していない)と考える生徒や、沸騰水の中の気泡(水蒸気)は、沸騰する際に蒸発熱を消費したため沸点より温度が低い、と考える生徒もいた。

その後、いくら待ってもビーカー内の水が沸騰しないことを実際に確認したうえで、ガスバーナーの火を止め、ビーカーを取り出す。次に、沸騰しなくなった湯に、エタノールを注ぐと、すぐに沸騰して蒸発することを演示する。また、鍋で湯を沸かすとき、水蒸気の気泡は、高温物体である鍋底からのみ発生し、他の場所にある水が水蒸気へと相転移することはない。これらの事実も織り交ぜながら、図9の課題で出た意見を再検討し、物理学として妥当な解釈につなげていった。

5. おわりに

本稿では、熱学分野において、生徒がどのような素朴概念を抱えているか、またそれを知ったうえで著者がどのような授業課題を扱ったかを紹介した。第3章で述べたように、生徒が抱える素朴概念を教員が事前に把握していれば、それを授業のデザインに反映させることができる。また、物理学の各分野において、生徒がどのような素朴概念を抱えているかは、PERによってかなり明らかになっており、論文や書籍の形で報告されている。これまでにPERに縁がなかった読者もぜひ、PERの成果を授業のデザインに反映させてほしい。本稿で紹介した課題を自身の授業で試すことも、もちろん歓迎する。本稿が読者の授業デザインの一助となることを願い、筆を置く。