

熱学法則理解のための体験的学習の実践と分析

— エントロピー論の基礎となる認識の形成 II —

奈良県立高田高等学校 桐山信一

1 はじめに

平成 11 年 12 月に出された、中央環境審議会答申「これからの環境教育・環境学習—持続可能な社会を目指して—」では、テサロニキ宣言の内容を踏まえ、全地球的に求められている持続可能性に向けた教育内容の再構成を、日本の学校教育のすべてに求めている。そのひとつの方向性として、エネルギー・環境教育がある。

物理における環境教育では、電磁波、放射線に関する学習や太陽紫外線の観察のように自然環境・生活環境への関わりの考察という意味での環境理解に直接結びつき易いものがある。さらに、物理法則(熱学第 1 則、第 2 則)の理解をもとに、環境問題の本質である熱や物質の廃棄の意味を考察しようとする物理独自の教材化・実践がある。そのためには、

①学習者のもつ熱量概念を、どのように熱エネルギー概念に変容させていくのか。

②エネルギー保存則とエネルギー消費の物理学的な理解はどのようにして可能になるのか。

の 2 つの基本的課題があり、そのための学習過程が設けられなければならない。

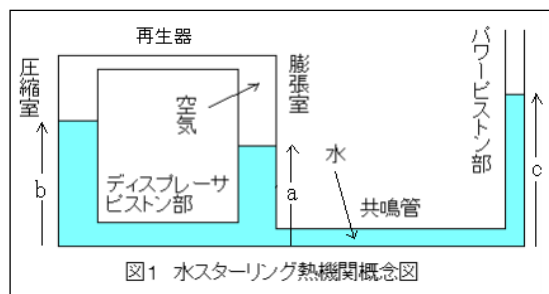
本稿では、後者の実践例として、本校科学部の活動のひとつである熱効率の測定を題材にした内容を報告したい。科学部の活動も、単なる体験的活動ととらえるのではなく、「活動を通して自然環境への関心・興味を育み、理解を深めることができる。」という教育的見通しをもつてのぞむならば、上述のような物理学習の一環として実施することができる。活動後に自己評価などを行えば、学習者が

- ・活動前後でどう変容したのか。
- ・活動内容をどう評価しているのか。

を知ることが可能である。

2 水スターリング熱機関の教材化

水スターリング熱機関は、1969 年に英国エネルギー省ハーウエル研究所で発明された。一般には、フルダイン式スターリング熱機関とよばれる液柱が上下振動するエンジンのことで、液体に水を用いたものを水スターリング熱機関とよぶ¹⁾。装置の概念図を図 1 に示す。

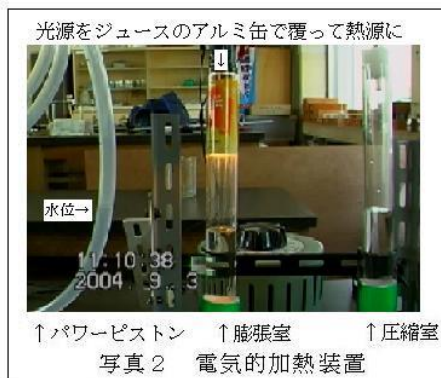
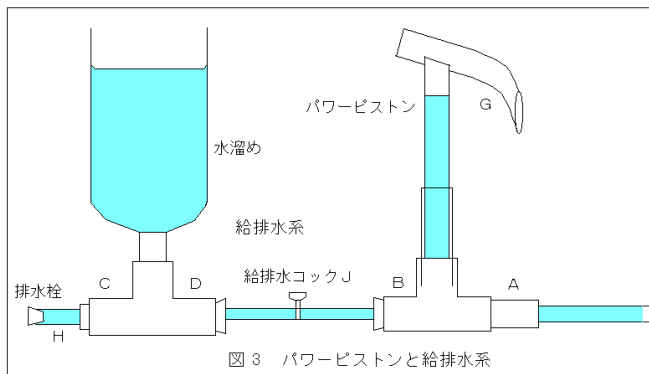
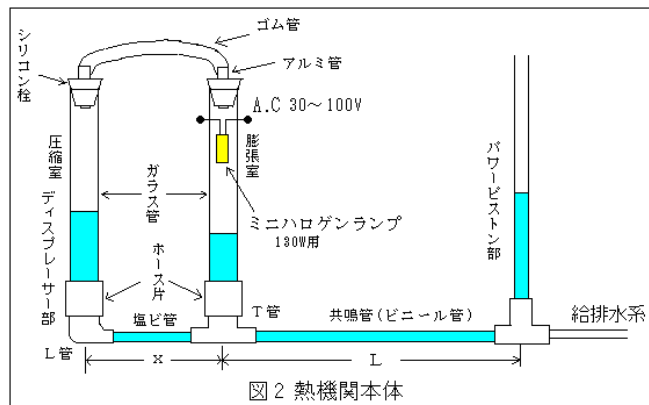


機関本体には膨張室と圧縮室があり、適量の空気が入っている。また 2 つの縦管中の水は他の熱機関のピストンに相当する部分であり、ディスプレイサピストンとよばれる。膨張室は加熱されて機関の高温部となり、圧縮室は冷却されて低温部となる。膨張室の下部に接続された共鳴管とよばれる管の先には、垂直に管が取り付けられパワーピストンとよばれる。この系は、両室に温度差がない場合にも、外部から揺らせば U 字管内の水と同様に振動する。この振動は水と管などに働く摩擦によってすぐに止まってしまう。ところが、高温部と低温部に温度差があり、しかもそれがある値以上になると、熱から得られる仕事が摩擦によるエネルギー散逸に勝り、ディスプレイサピストン部に有限振幅の振動が定常的に持続するようになる。この状態を励振とよぶ。このとき、パワーピストンも振動するので、適当な仕組みにより、その運動を外部に仕事として取り出すことができる。熱学的作動原理を下記に示す。

- A 膨張室側の空気が再生器を通じて圧縮室側に定容で移動し、空気の圧力が低下する。
- B 圧縮室側で空気は等温で収縮し、外部から仕事をされる。
- C 低温の空気が再生器を通じて定容で膨張室側に移動する。空気の圧力は上昇する。
- D 空気は等温的に膨張し、外部に仕事を行う。そして A の行程にもどる。

これまで、装置の加熱はアルコールランプかガスバーナーで行われていた。平成 16 年には、電氣的に制御しながら加熱する装置を開発した(図 2)。膨張室の熱源には、スポット光源用のミニハロゲンランプを用いることができる(写真 1 左)。ガラス管内で点灯させると、管内はすぐに高温になる(写真 1 右)。光源を薄いアルミ板などで覆うと、光エネルギーが熱化して膨張室内が有効に加熱される(写真 2)。ソケットを用いるとニクロム線などを加工する必要が無く、製作が比較的簡単でかつ安全である。また、

スライダックを用いて 100 ボルトよりも低い電圧で動作させることが可能で、中学や高校での理科教材として有用である。熱効率測定のために、図3のように二方コックを用いてパワーピストン部にペットボトルの水溜めを接続した。パワーピストンの振動に同期させて二方コックを手動で開閉するか、二方コックを半開程度に開いておけば、パワーピストンに接続したガイドGを通して水溜めから水が汲み出される。水を汲み出す仕事を熱機関の外にする仕事と考える。そして、熱機関の吸熱は、ミニハロゲンランプの消費電力から見積もられる。



3 エントロピー論の基礎と学校の理科学習

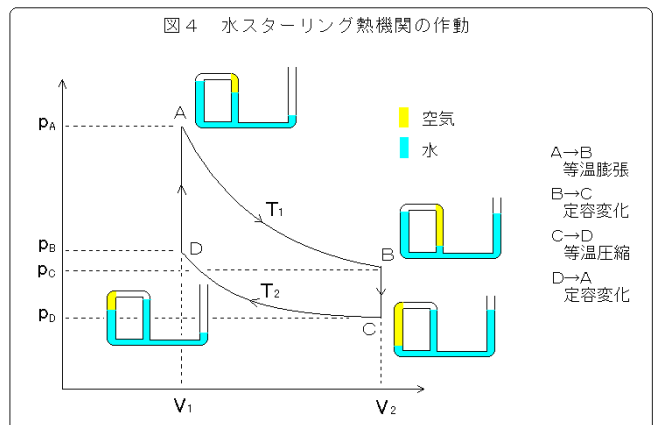
熱機関の概念は、

- ①周期的動作を行う。
- ②熱の一部が仕事に転換する。

であり、これらはエントロピー論（環境理解のための熱学的なものの方）の基礎となる認識である。

(1) 周期的動作（運動的側面）

作動気体（空気）の周期的な運動は、水ピストンの周期的運動として現れる。これは、力学的側面であり、膨張室、圧縮室、パワーピストンの水位の時間変化である。前回報告では、本校科学部の活動として、作動の様子をビデオにとり、そのコマ送り再生画像を解析して3つの水位 a、b、c（図1）の関係を導かせた²⁾。もう一つは、周期的運動の熱学的側面であり、作動気体の圧力 p と体積 V の時間変化あるいは $p-V$ 平面上での周期的運動（ $p-V$ 図）である。周期的動作を構成するのは要素過程であり、定容変化、等温変化、定圧変化、断熱変化が考えられる。理想型としての水スターリング熱機関の場合は、定容変化と等温変化を繰り返す（図4）。



$p-V$ 図を理解するためには、要素過程を気体の法則（ボイル・シャルル則）と関連させて学ばなければならない。新学習指導要領が平成 15 年から完全実施され、気体の法則と要素過程は全ての生徒の選択必修科目である物理 I、化学 I からはずされ、理科系の生徒しか学ばなくなった（下表）。ここで、旧課程の I B 科目は選択必修、II 科目は自由選択（主として理科系）であった。新課程でも、I 科目は選択必修、II 科目は自由選択（主として理科系）である。

	旧課程	新課程
気体の法則	化学 I B、物理 I B	化学 II、物理 II
状態方程式	化学 II、物理 II	化学 II、物理 II
要素過程	物理 I B	物理 II

(2) 熱の一部の仕事への転換 (エネルギー的側面)

熱機関における高熱源からの吸熱 q_1 は、1 サイクルでその一部が外部への仕事 W に転換する。仕事に転換しなかった熱 q_2 は低熱源 (環境) に捨てられる。仕事に転換する割合については、熱効率 $e = W/q_1$ の考え方の導入により可能になる。そして、義務教育で学習している (であろう?) エネルギー保存の考え方から、関係 $q_1 = q_2 + W$ を導くことができる。熱学法則 (エネルギー保存と熱効率における制約) の学習内容は、さいわい必修選択の物理 I にある。しかし、文系に進んで生物 I をとれば物理 I はとれないことが多いので、エネルギーに関する学習は不十分になる。

4 水位変化と連動した p V 図の理解

— 熱学法則理解に向けた体験的学習例 1 —

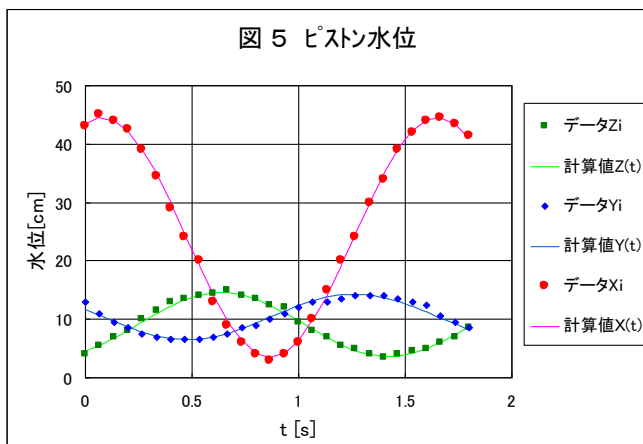
図 5 は、3 つのピストンの水位の時間変化に正弦関数をあてはめたものである。

膨張室 $Z(t) = 6.0\sin(4.0t + 5.3) + 9.1$
 圧縮室 $Y(t) = 3.9\sin(4.0t + 2.8) + 10.4$
 パワーピストン $X(t) = 20.5\sin(4.0t + 1.25) + 24.0$

sin の中身から、

振動の周期 $T = 2\pi/\omega = 6.28/4.0 = 1.57$ s
 位相差 143° 膨張室と圧縮室
 89° 圧縮室とパワーピストン

がわかる。これらを再現するための教材としては、



周期と位相差のデータから、3 つのピストンの動きを正弦関数で計算させて円柱グラフなどで表現し、それと連動させて p V 点の時間変化を追うようなものが考えられる。エクセルを使ってグラフ上で円柱や点を動かすには、マクロ機能が有効である。同様のプログラムだが、図 4 の理念型を表現させるようにして作成したのが図 6、7 である。図 6 は、3 つのピストンの水位 (水と空気) を円柱グラフで表現

したものだが、これは正弦関数では表現できない。図 7 は図 6 の水位変化と連動させた p V 点を示す。マクロを起動すると水位が上下し p V 点が時計回りに要素過程をたどりながら回転する。2 つを見比べることにより、現象にそって p V の周期的変化の理解が容易になる。このような教材は、観察と理論をつなぐ橋渡し教材である。マクロ (VBA) は、時刻を変えながら 3 つの水位と p、V の値を再計算させるだけの機能で、数行で書ける簡単なものである。

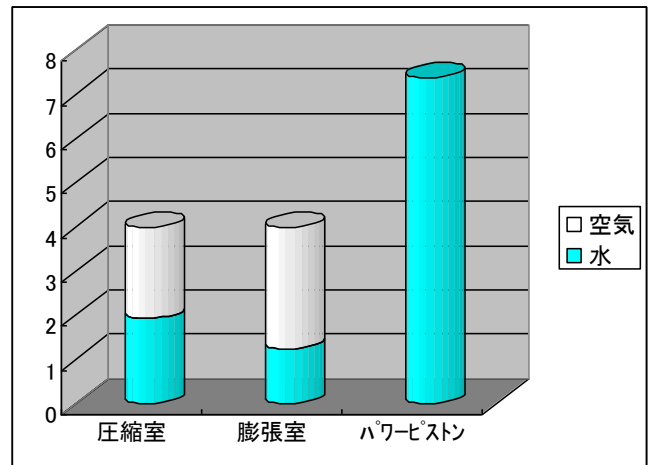


図 6 エクセルの機能を使った水位変化

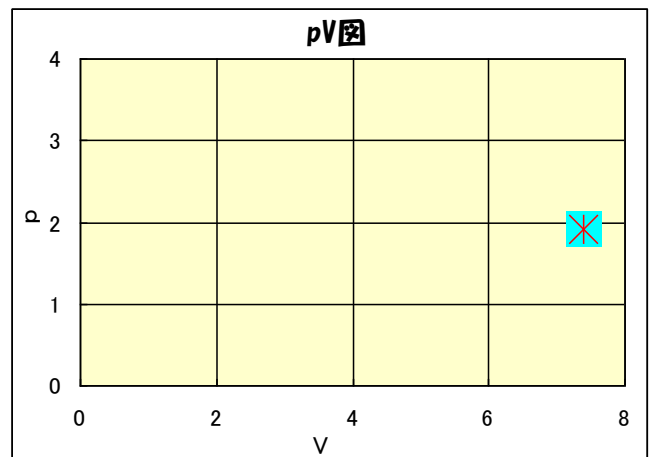


図 7 エクセルの機能を使った p V 点

3 の (1) で述べたことから、このようなシミュレーションは、理科系の物理 II 選択者 (3 年) でないと理解できなくなった。科学部員で物理 II 選択 H 君と、同僚の物理教員 S 先生に実演してみたところ、
 ・水の動き方が現実とは違うが、原理的なことはよくわかった (H 君)。
 ・実物観察では現象が複雑だが、これをみて作動の原理がよくわかった (S 先生)。
 といった感想がよせられた。H 君の発言「装置では、気体の体積が最大になるのは、膨張室の気体が圧縮室へ入れかわろうとするときでしょう (図 5)。シミュレーションでは、理論的には膨張室で膨張しき

ったときが体積最大で、入れかわるときその体積は変わらないということですか。」から、要素過程をふまえた理念型の理解がうかがえる。

5 熱効率の測定

ー熱学法則理解に向けた体験的学習例 2ー

以下、物理実験室で科学部員によって行われた熱効率測定について示す。

実施日 2005年 8月9日(火)

時間帯 AM9:30~12:30 (約3時間)

部員 12名 1年生男子4名

2年生男子1名、女子1名

3年生男子2名、女子4名

4人ずつの3グループ(A、B、C班)に分け、ディスプレイサ一部、共鳴管・パワーピストン部、給排水部をそれぞれ分担しながら装置を組み立て、密封検査を行いデータをとった。下記の(1)~(5)は科学部員に手渡したプリントにある説明文である。

(1) 装置の組み立て

①ディスプレイサ一部 (図2)

膨張室に加熱部(ミニハロゲンランプ)を挿入し、ビニールテープで密封する。



②共鳴管・パワーピストン部 (図3)

共鳴管を膨張室下部の管に挿入してビニールテープでとめ、ディスプレイサ一部とつなぐ。次に、共鳴管の他端をパワーピストン下部の管Aに挿入し、ビニールテープでとめる。

次に、パワーピストン先端に、汲み取った水をビーカーに移すためのガイドGを取り付ける。次に、パワーピストン下部の管Bに、二方コックの一方のゴム栓を取り付ける。パワーピストン部を垂直に立てるためのアダプターをはめる。

③給排水系 (図3)

水貯め下部の管の一方Cに、排水管Hを取り付け、配水管の終端をゴム栓(排水栓)で封じる。次に、二方コックの一方のゴム栓を水貯め下部の管Dに取

り付ける。

(2) 密封検査 (図3)

①給排水系のコックJを閉じ、水路を閉じる。

②圧縮室のシリコン栓をあげ、パワーピストンが満杯になるまで水を入れる。

③コックJを開け、水が流れないことを確認する。もし、水が流れてディスプレイサ部の水位が減るならば空気漏れがあるので、これを塞ぐ。

(3) 熱機関の運転

①加熱部に電源(スライダックの出力)、電流計を直列に接続する。

②圧縮室にペーパータオルを巻き、水で濡らしてその蒸発熱で冷却する。

③出力を70Vにして励振させ、安定になるまで待つ。



(4) 熱効率の考え方

熱機関が1サイクル(1振動)する間に、吸収した熱量(熱エネルギー)を Q_1 、その間に外部にした仕事を W とする。このとき、

$$\text{入力} = Q_1$$

$$\text{出力} = W$$

である。熱効率は、入力に対する出力の割合とする。100をかけると%で求まる。

$$\text{熱効率 } e = W/Q_1$$

実際の測定では、1分間の値(何サイクルかの合計)で考える。

$$\text{入力 } Q_1 = \text{発熱量 [J]}$$

$$= \text{ハロゲンランプの消費電力} \times \text{時間}$$

$$= \text{電流} \times \text{電圧} \times \text{時間}$$

ただし、時間=60s とする。

$$\text{出力 } W = \text{水を汲み出す仕事 [J]}$$

$$= \text{水の重さ [N]} \times \text{汲み出した高さ [m]}$$

ただし、100gの重さ=1N とする。

(5) 熱効率の測定

①パワーピストン水位が上昇してきたときコックJを開くと、水がビーカーに汲み出される。

②パワーピストン水位が下降し始めたときコックJ

を閉じる。

③操作①②を繰り返し、汲みだし操作に慣れる。

④70Vの状態、ビーカーを空にして新たに1分間の汲み出した水量[g]を記録する。

⑤操作④を5回ほど繰り返し、安定な値が得られたらそれを汲み出した水量とする。

⑥90Vにして、安定になれば汲み出し操作⑤を行う。



6 実践—熱効率の測定—の分析

(1) 生徒による測定

①データ1

ランプの電圧=70V	汲んだ水の質量=110g
電流=0.80A	汲んだ水の重量=1.1N
消費電力=56W	汲み出した高さ=0.18m
発熱量 $Q_1=3360$ J	汲み出す仕事 $W=0.20$ J

熱効率 $e = W/Q_1$

$$= 0.2/3360$$

$$= 0.000059 \quad \text{約 } 0.006\%$$

②データ2

ランプの電圧=90V	汲んだ水の質量=180g
電流=0.95A	汲んだ水の重量=1.8N
消費電力=86W	汲み出した高さ=0.18m
発熱量 $Q_1=5130$ J	汲み出す仕事 $W=0.32$ J

熱効率 $e = W/Q_1$

$$= 0.32/5130$$

$$= 0.000063 \quad \text{約 } 0.006\%$$

10名の生徒が測定前に予想を立てていた。

<1%台 2人、10%台 5人、20%台 3人>
測定値のあまりの小ささに驚いていた。

(2) 結果と考察

生徒の理解を促すための質問（生徒にわたしたプリントにあり）に対し、グループで話し合いながらまとめていった。（ ）内の斜体字は生徒が書き込んでいく事柄である。

①出力Wの値は、入力 Q_1 の値にくらべるとどうか。

②発熱量 Q_1 と外への仕事Wの差 $Q_1 - W$ は何を意味するか。これを Q_2 とする。

③ Q_2 はどこからどのように失われたと考えたらよ

いか。

④ Q_1 、W、 Q_2 はどのような関係か。

⑤ $e = 1$ または $W = Q_1$ または $Q_2 = (0)$ となることは可能か。

⑥ $Q_2 = 0$ とすることができないのはなぜか。

⑦ Q_1 と Q_2 は、同じ熱でも熱の（温度）が違う。同じ熱でも

Q_1 は、熱（エネルギー）

Q_2 は、熱（汚染）といわれる。

⑧高温熱が低温熱になっていくことを、エネルギーを（消費）するという。

「なお、実際のガソリンエンジンでは、ガソリンと空気の混合気体を燃焼させて得られる化学エネルギー Q_1 を消費し、その一部がピストンを回転させる仕事Wになる。 Q_2 は窒素酸化物のような排気ガスの廃熱として環境に捨てられる。ただし、その仕事Wも、タイヤと道路に生じた摩擦熱のような低温熱として環境に放出されていき、環境の温度上昇の一因となる。」（教師が読んで説明する。）

⑨わかったことをまとめると、次のようになる。

第1法則 $Q_1 = (Q_2 + W)$

意味：エネルギーの保存

第2法則 $e < (1)$

意味：熱エネルギーを利用するときの制約

ここで、問④⑥が、法則理解につながる重要な問いである。④については、A、B班から、

$$Q_1 = Q_2 + W \quad \dots (a)$$

が出たが、C班では不等式

$$Q_1 > Q_2 > W \quad \dots (b)$$

が出た。式(a)で式(b)の $Q_1 > Q_2$ が導かれるが、討論では、 $Q_2 > W$ については一概に言えないことが納得された。こうして、全員に式(a)が受け入れられた。問⑥についてはなかなか理解されず、周期的動作で継続的に仕事を取り出すための条件としてまとめた。次のような説明を試みた。 Q_2 には2つの要素があり、

$$Q_2 = Q_0 + \Delta q \quad \dots (c)$$

Q_0 は空気が圧縮室に入ったときに捨てられる熱で、これが周期的動作には必要なものである。一方、 Δq は空気やガラス、水などへ捨てられる熱で、これを少なくすれば熱効率を上げることができる。

(3) 自己評価の分析

（今日は、水スターリング熱機関の組立て、熱効率測定のためのデータ取りを行いました。また、熱エネルギーが力学的な仕事になる現象を物理法則を

用いて考えてみました。)この文章を読ませた後、以下5項目を5段階で評価させた。

- ①水スターリング熱機関に関心・興味が持てましたか。具体的には、どんなことに?
- ②実験の技能は身に付きましたか。具体的には、どんなことが?
- ③1つめの法則(エネルギー保存)は理解できましたか。疑問点があれば書くこと。
- ④2つめの法則(熱エネルギーを利用するときの制約)は理解できましたか。疑問点があれば書くこと。
- ⑤今日の活動で、環境やエネルギーについてこれまでより関心が向きましたか。

12名の生徒の平均値は次のとおりである。

①4.1 ②3.4 ③4.5 ④4.0 ⑤3.8

③の数値が高く、エネルギー保存の考え方の基礎は理解できたと考えられる。

<生徒の疑問> ここでは2つ取り上げる。

ア) イマイチよくわからない。中学校で習っていない言葉がたくさんあったから理解できなかった。(eは)1より大きくなるのか?(1年男子)

など。中学の理科で、

・エネルギーという物理量ではなく言葉だけが教えられている。

・効率というような考え方が教えられていない。

といったことがあげられるのではないか。この生徒には、1万円小遣いをもらって(Q_1)、850円でCDを買う(という仕事W)をすれば、財布にはいくら残るか(Q_2)?といった問いから入って説明していった。生徒は、 $Q_1=Q_2+W$ を納得し、その結果として $e < 1$ も理解できた。

イ) 汲み出す水量は、水溜めの水位の影響があるのではないか(3年男子)。

このように、よく理解しているコメントもある。実際、パワーピストンの水位より水溜めの水位が少し高くなっていた。本来は、両水位は同じ(あるいは水溜めの水位の方が低い)でないといけないが、それには、水が汲み出されても水位が変化しないくらいの大きな水溜めが必要となる。ここでは、1つの方法として、両水位の差 δ で汲み出す水量mがどう変わるかを調べ、 $\delta \rightarrow 0$ の値mを推定した。次の実験では、大きな水溜めの用意も検討している。

<生徒の感想>

ウ) 水が上下に動くことに興味をもった。ヒートアイランドなどに関心が向いた(1年男子)。

エ) 水が動くのに驚いた。温暖化に関心が向いた(1年男子)。

ウ) サイクル的にエネルギーを取り出すには、 Q_2 は必ずあるということ。熱効率と環境を結びつけて考えたことがなかったから、あらためて考えて興味を持った(3年男子)。

カ) 廃棄物が出ずとてもクリーンなエネルギーなので、環境に影響が少なくなり良いんじゃないかなと思いました(3年女子)。

などが見られる。水スターリング熱機関という物理教材を通して、環境やエネルギーについて関心・興味を高めることができたと考えている。

7 おわりに

熱効率は、周期的動作をするという事実の上に成り立つ考え方である。作動気体の周期的動作は、生きることの基盤である物質循環を理解するための重要な概念である。その周期的動作の理解の基礎となる要素過程や気体の法則を、大半の高校生が学ばないというのはいかがなものだろうか。

2つの熱学法則は、次のように広げて書くことができる。生きることと関連させた書き方である。

①第1則

物質循環を行わせるには、循環を駆動するためのエネルギーが必要である。

②第2則

物質循環が成り立つためには、エネルギーの一部を環境に捨てなければならない。

このような指導、まとめ方は、高等学校理科でも可能である。そのためには、学習を環境と関連させながら目標をもった教材化が必要である。このような学習内容を通して、物理法則に代表される科学やその応用である技術は、

- ・私たちにとっていったいどういう存在であり、
- ・何のためにあるのか。

を考え、学ぶことが大切ではなかろうか。

単に、科学は好奇心を満たし、技術は利便性を追求するためではないということ。

【参考文献】

- 1) 兵働 務ほか：スターリングエンジン—その生い立ちと原理—、パワー社 1992、pp71—82
- 2) 桐山信一：エントロピー学会第22回シンポジウムプログラム・予稿集 2004、pp28—33