



生活環境教材研究(IV) :  
熱の仕事当量と熱効率実験の簡易化

メタデータ	言語: jpn 出版者: 宮崎大学教育文化学部 公開日: 2007-11-16 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 恵下, 斂, 秋山, 博臣, 作田, 俊美, Sakuda, Toshimi メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10458/927">http://hdl.handle.net/10458/927</a>

## 生活環境教材研究IV

### 「熱の仕事当量と熱効率実験の簡易化」

恵下 敏・秋山博臣・作田俊美

Study on the Teaching Materials for the Life and Environment Education IV

"Simplifications of Experiments on the Mechanical Equivalence of Heat  
and the Heat Efficiency"

Osamu EGE, Hiroomi AKIYAMA, and Toshimi SAKUDA

#### 要 旨

生活環境基礎実験として、簡単で比較的精度がよくしかも低価格な熱力学的実験教材を作製した。

① それらの一つは水の容器として発泡スチロールのカップを使用した熱量計で、水当量などの複雑さを考慮に入れないで、熱の仕事当量を測ることができる。

② もう一つは熱湯が入ったフラスコのノズルから噴射される蒸気によって回転するプロペラを持つ蒸気エンジンである。この蒸気エンジンは熱効率の観点で電動モーターと比較された。このことから、多回数エネルギーが変換される場合には、回数に応じて熱効率が下がることがわかった。

これらの実験方法は通常の物理実験の方法よりも簡単なので、生活環境コースの学生など自然科学を専門に勉強していない学生に適用するべきである。

これらの教材は物理学基礎実験として、生活環境コースの学生に適用され、彼らのやる気を高揚させるのに効果があった。我々の教材の一例がこの報告書の文末にある。

We made thermodynamic teaching materials which were simple and low cost but had good efficiency, aiming to apply them to experiments for students of the Life and Environment education program.

① One is a calorimeter made using a Styrofoam cup containing water, which is employed to measure the mechanical equivalence of heat, free of complexities such as water equivalence.

② The other is a steam engine made with a propeller driven by steam blown from the nozzle of a container of boiling water. The heat efficiency of this steam engine was compared with that of an electric motor. The result showed that heat efficiency decreased with each energy transformation.

As measurements using these systems are simpler than those in the physics field generally, they

should be utilized by students in Life and Environment education who are not majoring in natural sciences.

They were employed in basic experiments for the students in Life and Environment education and were effective in increasing their motivation. An example of our teaching material is shown in the appendix.

## 1. はじめに

生活環境に関する分野はまだ学術的に定着しているとはいえ、大学だけでなく県や市町村あるいは国など様々なところで様々な取り組みが現在進行形で行われているのが現状ではないかと思われる。我々のところでも、小規模ではあるがこれまでいくつかの取り組みをしてきた[1-3]。ここでは、簡単で比較的精度が良くしかも低価格な熱力学的実験教材（①簡易化された熱の仕事当量測定と、②エネルギー変換効率測定の実験教材）を紹介する。

①簡易化された熱の仕事当量測定：生活環境基礎実験あるいは物理学基礎実験などの熱力学的分野における教材として、「熱の仕事当量」の測定はこれまでよくとりあげられてきた。もともと力学的エネルギーを水などの温度上昇に換えて熱と仕事の関係を調べていたものであるが、それには大掛かりな装置を必要とするため学校教材には不向きで、実際には電気のエネルギーを水などの温度上昇に換えて、熱と仕事の関係を調べる実験が普及している。ここでもその方法をとっている。その場合、熱量計に使われている容器や温度計などについて、もしもそれらが水であったならばと仮定し、水当量というファクターを導入して実験結果を補正するのが普通である。しかしこのことは、理科を専攻していない学生や高校生などにとってかなり負担になってきたように思われる。そこで、銅などの容器に代えて、たとえばインスタント食品のカップなどに使われている熱容量が小さくて熱伝導性が低い発泡スチロールの容器などを利用し、さらに熱容量の小さいデジタル温度計を使用することで、水当量を考慮しなくても十分な精度が得られる簡易化された実験教材を作製し、学生実験に供用して一応満足できる結果が得られた。これはまた熱力学第1法則的な実験とみることもできる。

②エネルギー変換効率測定の実験教材：環境教育に学ぶ学生の基礎実験におけるテーマの一つとして、エネルギー変換あるいはその効率等について簡単に実験するために、素朴な回転翼タービンを使った蒸気エンジンを作り、その効率について測定するシステムを構成した。しかし、このシステムは作業物質に水蒸気を使用しているため、常圧ならば100℃以上の環境でないと作業せず、効率が非常に低いものとなった。そこで比較のために、廃品利用の小型モーターを使って電気エネルギーを直接仕事に変える少し効率のよいシステムを作り、それらの効率を比較した。その結果、熱を伴うかたちでエネルギー変換がなされる場合には、比較的大きいエネルギーが周囲に逃げて失われていくことが多く、このことは環境の温度上昇をもたらすおそれがあることを示唆しているので、生活環境を考えていく学生にとってこの実験は効果的なヒントをもつ教材の一つになると考えられる。これはまた熱力学第2法則的な実験とみることもできそうである。

## 2. 実験教材の構成

### (1) 「①簡易化した熱の仕事当量測定」について：

図1（写真）にあるように、水を入れる容器としてインスタント食品の発泡スチロール製カップを利用し、ニクロム線に電流を流して水を温める形で電気エネルギーをジュール単位で与え、これを仕事エネルギーと仮定し、それによって発生した熱エネルギーをカロリー単位で測って、ジュールとカロリーの単位間の比を求めて熱の仕事当量とした。

実験器材： 熱量計（発泡スチロールカップ入り断熱箱、ヒーター、温度計、攪拌棒）、直流定電圧電源、直流電圧計、直流電流計、秤量計、ストップウォッチ

水当量については考慮しないが、測定や計算その他については通常の方法によった。たとえば入る熱と出ていく熱を相殺するために氷の一片を入れ、室温以下から始めて室温より同程度高くなったところまで測るのも通常のように行った。

計算過程としては、 $R[\Omega]$ の抵抗（ニクロム線）に $I[A]$ の電流を流した時、この抵抗には1秒間に $I^2R[W]$ あるいは（電圧が $V[V]$ とすると） $VI[W]$ のエネルギーが熱として発生する。これで水を $t[s]$ 熱したとすると、発生する熱エネルギーは、 $VI t[J]$ と考えられる。他方、それによって発生した熱量は $m[g]$ の水が $T[^\circ C]$ 温度上昇して、 $mT[cal]$ となる。したがって熱の仕事当量 $J_{qw}$ は、単位間の関係 $1[cal] = J_{qw}[J]$ から求まる。

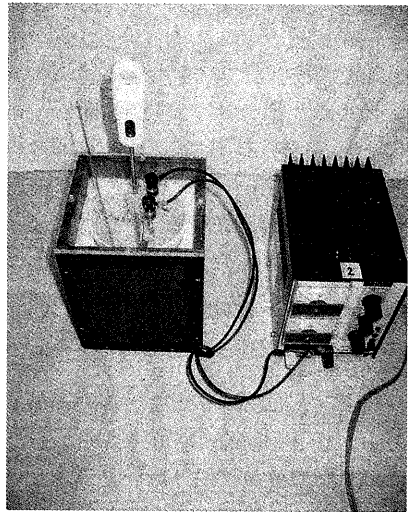


図1

### (2) 「②エネルギー変換効率の測定」について：

図2（写真）にあるように、ニス塗った厚紙のタービンを持つ蒸気エンジンを構成し、ある質量を巻き上げる仕事をさせて効率を測定した。また図3（写真、参考資料にはない）にあるように、廃物利用の小型モーターを使ってやはり巻き上げて仕事をさせる装置を作り、両者の効率を比較した。

実験器材： 蒸気発生器（フラスコ、ヒーター、ノズル）、スライダック電源、交流電圧計、交流電流計、小型モーター、巻き上げ装置、ストップウォッチ、ビニール袋入り1円玉50個（50g）

蒸気エネルギーを仕事に変える場合は、蒸気を作り出すフラスコ周囲を被服するなど、保温を十分にしない

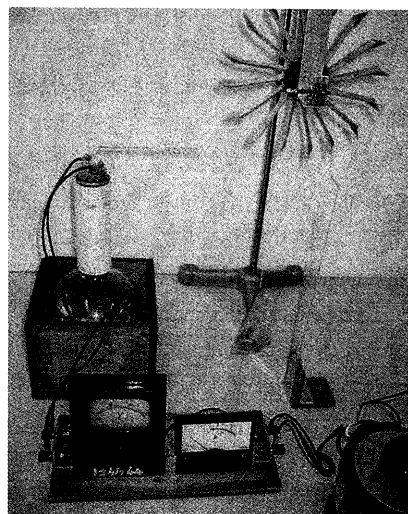


図2

と効率はさらに低くなる。また、ノズルから100℃の水蒸気が噴出するのでくれぐれも注意することが必要である。

計算過程としては、与える電気エネルギーは図2図3で共に、 $E_A = VIt$  [J]であるが、図2の場合は蒸気を発生させてタービンを回し、図3の場合は電動モーターによって、それぞれ質量  $m$  [kg]の物体を高さ  $h$  [m]だけ巻き上げるので、共に  $E_B = mgh$  [J]のエネルギーの仕事させることになる（ここで  $g \approx 9.8$  [m/s<sup>2</sup>]）。したがって熱効率  $\eta$  はそれぞれ  $\eta = \frac{E_B}{E_A}$  で計算される。

測定例としては、図2の場合の効率が約0.0003%であり、図3の場合が約0.5%であった。廃棄物から再利用の小型モーターとはいえ意外なほど低い効率ではあったが、それでもやはり蒸気に変換する場合に比べて直接的な場合の効率は圧倒的に良かった。

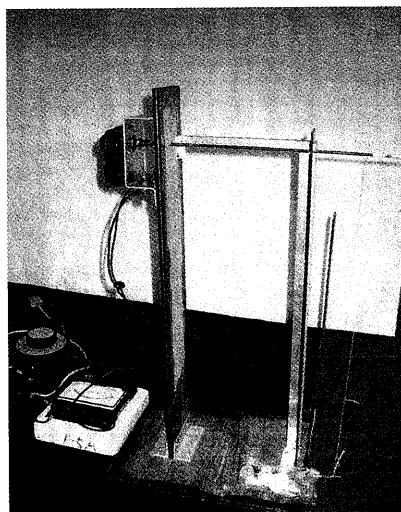


図3

### 3. まとめ

この実験教材は、①では従来のように水当量を考慮する必要がないので、理科を非専門とする学生にとっても扱いやすい感じがうかがえた。発泡スチロールの代わりにポリ袋なども使ってみたが、質量の計量がむずかしいことと、使っているうちに穴があくことがあり実用性の面で多少問題があった。

②の蒸気タービンについては圧力が簡単に失われる構造のために非常に低効率のエンジンとなってしまったが、作業物質や系全体の温度まで考えさせられるので、逆に教材としては新鮮な一面も持っているように思われた。この実験で測定された値に直接的な意味はないが、それらは比較のために使われるので相対的な意味はある。

これらの実験にとって交流直流はどちらでもよいが、精密な実験をするときは直流のほうがよいとしても、直流の場合では電気分解あるいは接点の銅の溶け出しがあり、水が青く着色するので、大きな電流を流すときには交流にしたほうがよいように思われた。またこれまで物理測定にあまり慣れていない環境について学ぶ学生にとって、測定するというそのものに意味があるように思われた。

これらの実験は適当にアレンジすることにより、高校物理や大学初等理科の教材にも活用できるものと思われる。これまでの型の熱量計についての文献は多くあるが、水当量を考慮しないものはあまりないように思われた。これまで当方で開発した環境教育に関するその他の教材について参考文献として紹介する[1-3]。

参 考 文 献

- [1] 宮崎県の河川「大淀川」の環境調査と教材化宮崎大学教育文化学部紀要自然第1号1999年9月
- [2] 生活環境教材研究Ⅱ「ミニチュア風洞の作製とシミュレーション実験」宮崎大学教育文化学部紀要自然第4号2001年3月
- [3] 生活環境教材研究Ⅲ「川の流れを測る簡便な方法」宮崎大学教育文化学部紀要自然第6号2002年3月

(2004年9月30日受理)

### ＜熱の仕事等量①と熱効率②＞

1. 目的 実験①（熱力学第一法則関連） 熱の単位 cal（カロリー）と仕事の単位 J（ジュール）の関係（ $1\text{cal} \doteq 4.2\text{J}$ ）を確かめる。従来の熱量計では、水と接触する容器や温度計について水等量なるものを仮定して、やや面倒な取り扱いがなされていたが、ここではそういった煩わしさを省略し測定を簡素化するが、精度は悪くない一つの方法を実験する。

実験②（熱力学第二法則関連） 熱を仕事に変える場合、加えた熱の何%が仕事に変換されるか、いわゆる熱効率を求める簡便な一つの方法を実験する。またその効率を少しでも上げるための方法を考える。

2. 理論： ①  $R$  [ $\Omega$ , オーム]の抵抗（電熱線）に  $I$  [A, アンペア]の電流を流した時、この抵抗には1秒間に  $I^2 R$  [W, ワット]のエネルギーが熱として発生する。 $V=IR$ なので、それは  $VI$  [W]（ $V$ は電圧で単位は[V, ボルト]）であり、これで水を  $t$  [s, 秒]熱したとすると、発生する熱エネルギーは、 $VI t$  [J, ジュール]と考えられる。しかし実際に発生した熱量は、 $m$  [g, グラム]の水を  $T$  [ $^{\circ}\text{C}$ ]温度上昇させること、つまり  $mT$  [cal, カロリー]で測定される。したがって、次式から[J]と[cal]の単位間の比例定数となる熱の仕事等量  $J_{QW}$  を求めることができる。

$$VI t \text{ [J]} = mT \text{ [cal]}, \quad \therefore [\text{cal}] = \frac{VI t}{mT} \text{ [J]} = J_{QW} \text{ [J]}$$

$$\therefore J_{QW} = \frac{[\text{cal}]}{[\text{J}]} = \frac{VI t}{mT}$$

となる。この値は  $J_{QW} \doteq 4.2$ であることがジュール等により確かめられている。

② 水に熱を与えて蒸気を発生させ、タービンを回し、その力で質量  $m$  [kg]の物体をある高さ  $h$  [m]だけ吊り上げるとき、与えた熱エネルギー  $E_A = VI t$  [J]のどれだけが仕事  $E_B = mgh$  [J]に使われたかを示す熱効率  $\eta$ は、 $E_B$ を  $E_A$ で割り算して求められる。すなわち、

$$\eta = \frac{E_B}{E_A} \quad (\text{[J/J]となり単位のない無名数、したがって小数あるいは\%で示される})$$

3. 装置： ① 熱量計（発泡スチロールカップ入り断熱箱、ヒーター、デジタル温度計、攪拌棒）、定電圧電源（電圧計・電流計）、リード線、秤量計、氷（冷蔵庫）。

② ノズル付き蒸気発生フラスコ、スライダック、交流電圧電流計、巻上ギヤ付き蒸気ター

ビン、垂直スケール、1円玉（複数）。

4. ① 測定例その1：

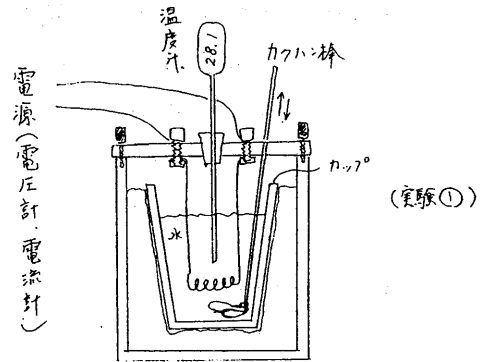
(i) まず図1のように配線し、熱量計をセットする。いったんフタをとり、発泡スチロールカップに適当量の水を入れ、氷を1片と攪拌棒も入れた状態で質量を測る (例 329 [g])。

(ii) 再びセットして攪拌し、氷が溶けて温度が一定したら温度を読む (例 16.8℃)。電源スイッチを入れ、2.0 [A]程度流れるように電圧を調節して、ストップウォッチを押す(実験のはじまり)。ここで電圧と電流を読む(例 2.0 [A], 13.1 [V])。

(iii) ていねいに攪拌しながら温度上昇を待つ。室温 (例 21.1℃) を通り過ぎて30℃前後になると、湯気でフタがくもるようになるが、そうなると気化熱の誤差が入るので、その前に止める。電源スイッチを切ってストップウォッチも止める (例 10分7秒)。攪拌をよく行って温度を読む (例 28.2℃)。計算結果を例示すると、

$$2.0 \times 13.1 \times (10 \times 60 + 7) = 15903.4 \text{ [J]} \quad ; \quad 329 \times (28.2 - 16.8) = 3750.6 \text{ [cal]}$$

$$J_{QW} = 15903.4 \div 3750.6 = 4.24 \text{ [J/cal]}$$

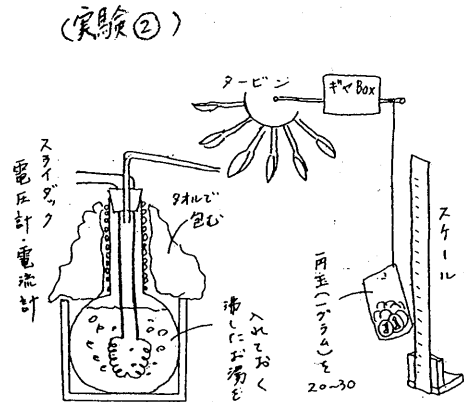


② 測定例その2：

蒸気タービンを用いて、ある質量をある高さまで持ち上げる仕事をさせ、効率を求めるのであるが、熱力学の第二法則に「効率は100%にできない」とあるが、この実験では非常に低いものとなる。少しでも効率を上げるためにはどうしたらよいか考えながら実験する。

(i) 図2のように配線配管し、蒸気タービンなどをセットする。別にヤカンなどで沸かしたお湯を、フラスコの丸い部分ががまほいっばいになる程度入れる。電源スイッチを入れさらに沸かす。電圧と電流を読む (例 4.5 [A], 38 [V])。このとき効率を上げるために、フラスコ周りにタオルの布等を巻いて保温する。

(ii) フラスコの水が沸騰し、ノズルから蒸気が勢いよく出て、タービンがよく回るようになってから測定をはじめ。1円玉を 50 個程度(1個は 1 g)入れ吊り下げたビニール袋が





巻き上がりははじめると、垂直スケールで高さの初期値を測り（例 11.0cm）、ストップウォッチを押す（実験のはじまり）。適当な高さまで吊り上がったらストップウォッチを止めて（例 2分12秒）電源を切る。、吊り上った高さを読む（例 25.0cm）。その結果と計算（例）は、

$$4.5 \times 38 \times (2 \times 60 + 12) = 22572 \text{ [J]}$$

$$0.05 \times 9.8 \times (0.25 - 0.11) = 0.0686 \text{ [J]}$$

$$\eta = 0.0686 \div 22572 \approx 0.000003 \text{ (0.0003\%)}$$

のように効率が求まる。

5. 考察： 一般的な考察に加えて、特に②の実験結果について、大体蒸気機関車の効率が10%以下であり、ディーゼルカーが30%、ガソリン車が40%、電動車が50%くらいといわれている。それに比べて、この実験の効率は非常に低い。なぜそうであるか、その原因がどのあたりにどのようにあるのか考えてみよう。

#### 6. 注意：

(1) 特に②では高温蒸気を扱うので、くれぐれもヤケドをしないように十分注意すること。指や手などにあたってヤケドをしたら水でよく冷やす。

(2) ①の実験で十分攪拌を行わなければならないが、攪拌棒を上下させるときヒーターなどにあたりやすいので注意すること。

(3) 説明文中の（例）にある数字はあくまで参考であって、もちろんそれぞれ実測して求めなければならない。

#### 7. 設問：

(1) ①の実験で熱量計カップ内のヒータの電気抵抗  $R$  はいくらか。また②の実験のフラスコ内のヒータの電気抵抗  $R'$  はいくらか。

(2) ①の実験の後水の色が少し青みを帯び、カップの周囲に青色の付着物があることに気づく。これらの原因について考えてみよう。

(3) ②の実験でフラスコ内に生じた熱エネルギーのうち、物を持ち上げる仕事に使われなかったエネルギーは何[cal]（あるいは何[J]）か。またそれはいったいどうなったと考えられるか。

(4) 注射器のピストンを蒸気圧で押す装置などを工夫すれば、それもまた気体の膨張による仕事として測定することができて、効率も得られると思われる。どのような物理量を測定して、どのように効率が得られるか考えてみよう。