

# 熱エネルギー

## §1 実験の目的

熱がエネルギーの一形態であることを確認し、熱の仕事当量を測定する。

## §2 実験原理

巨視的な系(物質)に力学的あるいは電気的な仕事を加えられると、系が熱を発生することが知られている。エネルギー保存則によれば、これは力学的・電気的エネルギーが熱エネルギーに変換されたことを意味する。熱エネルギーの量を cal の単位で表わすならば、仕事の単位 J との換算量  $J_0$  は、

$$J_0 = \frac{W}{Q} \quad [\text{J/cal}] \quad (1)$$

と書かれる。この量を熱の仕事当量と呼ぶ。今日認められている熱の仕事当量は、

$$J_0 = 4.18605 \text{ J/cal}$$

である。

本実験では、ニクロム線を用いて電気エネルギーを水に導入し、水の発熱量を測定することにより、熱の仕事当量を測定する。抵抗  $R$  [ $\Omega$ ] のニクロム線の両端に電圧  $V$  [V] をかけ、電流  $I$  [A] を流すとき、ニクロム線で消費される電力は  $VI$  [J/s] である。従って、 $\Delta t$  [s] に消費される電気エネルギーは次式で与えられる。

$$W = VI\Delta t \quad (2)$$

このとき、水に発生する熱量は全て加えられた電気エネルギーによる水の内部エネルギー増加分であるとする。水の比熱を  $C$  [cal/g K] とし、水の質量を  $M$  [g]、さらに容器と温度計の全水当量を  $w$  [g] とすれば、水+容器+温度計の系に与えられた熱量  $Q$  [cal] は、水温の増加分を  $\Delta \theta$  [K] として以下のように書かれる。

$$Q = C(M+w)\Delta \theta \quad (3)$$

従って、供給電力が一定ならば、水温は時間に比例して上昇する。(1)(2)から熱の仕事当量は次のように書かれる。

$$J_0 = \frac{VI\Delta t}{C(M+w)\Delta \theta} \quad (4)$$

## §3 実験方法

水熱量計の銅製容器と攪拌棒の質量、及び水を加えたときのこれらの質量を電子天秤(感度1mg)で測定し、 $M$  及び  $w$  を計算する。水の比熱は  $C = 1.00 \text{ cal}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  とする。水量はニクロム線の全長がほぼ浸かる程度の量とする。ニクロム線に、直流電源から流し、電流計(1級)・電圧計(1級)を用いて電力を 3W 未満程度に調節する。これにより、10分間の通電による温度上昇を $3^\circ\text{C}$ 未満とすることができる。

周囲から熱量計への熱の流入・流出を調べるために、通電加熱前後に10分間づつ無通電で水温測定する。水温測定には感度 $0.2^\circ\text{C}$ の水銀温度計を用いる。測定中は定常的に水を攪拌棒で攪拌し、水温の均一に保つ。温度計の水当量は、温度計の水没体積をメスシリンダーを用いて測定する。

[ここに実験装置図を描く]

## §4 実験結果

表1に熱量計内水温の時間変化の測定値を示した。また、表2には測定器の水量・水当量などの実測値及び測定誤差を示した。なお、本実験では水の比熱、銅の比熱、水銀の比熱、水銀の比重などの直接測定していない量については測定誤差の見積もりを行わなかった。

	経過時間 $t$ [min]	水温 $\theta$ [°C]
通電なし	0	□□.□
	1	□□.□
	2	□□.□
	3	□□.□
	4	□□.□
通電開始	5	□□.□
	6	□□.□
	7	□□.□
	8	□□.□
	9	□□.□
	10	□□.□
	11	□□.□
	12	□□.□
	13	□□.□
	14	□□.□
通電終了	15	□□.□
	16	□□.□
	17	□□.□
	18	□□.□
	19	□□.□
	20	□□.□

表1. 熱量計内水温の時間変化

各時刻での水温は水銀温度計での測定値を示す。通電開始から終了までは一定電力を熱量計内のニクロム線に供給している。全測定時間にわたって、熱量計内の水には一定の攪拌を継続している。

項目	測定値	測定器の感度及び測定誤差
熱量計本体の質量 $m_1$	□□.□□□g	電子天秤の感度(最少目盛単位) $\Delta m_1 = \square.\square\square\square g$
(熱量計+蒸留水)の質量 $m_2$	□□□.□□□g	電子天秤の感度(最少目盛単位) $\Delta m_2 = \square.\square\square\square g$
蒸留水の質量 $M = m_2 - m_1$	□□□.□□□g	$\Delta M = \Delta m_1 + \Delta m_2$ $= \square.\square\square\square g$
熱量計の水当量=(銅の比熱×容器の質量)/(水の比熱) $w_1$	□.□□□g	(銅の比熱×電子天秤の感度)/(水の比熱) $\Delta w_1 = \square.\square\square\square g$
温度計の水当量(0.45× $v$ (水没体積)) $w_2$	□.□□□g	(0.45×メスシリンダーの最少目盛の1/10) $\Delta w_2 = \square.\square\square\square g$
全水当量 $w = w_1 + w_2$	□.□□□g	$\Delta w = \Delta w_1 + \Delta w_2 = \square.\square\square g$
供給電流 $I$	□.□□A	電流計(class 1)の使用最大目盛□Aの1% $\Delta I = \square.\square\square A$
供給電圧 $V$	□.□□V	電圧計(class 1)の使用最大目盛□Vの1% $\Delta V = \square.\square\square V$

表2. 熱容量及び電力関係の測定値

表1の測定値をもとに熱量計内の水温の時間変化を図1にプロットした。

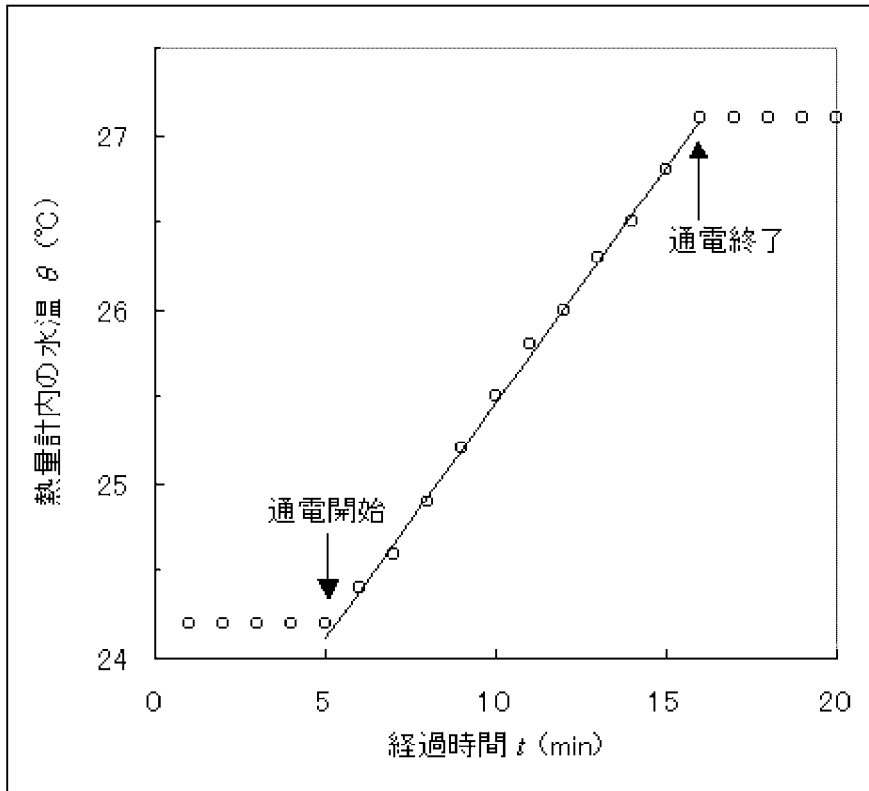


図1. 熱量計内の水温の時間変化

○は測定値。実線の直線は通電時間中の水温変化に対して最少自乗法を適用して得た近似直線である。近似直線の勾配、即ち温度の時間変化率  $\Delta\theta/\Delta t$  は  $\Delta\theta/\Delta t = \square.\square\square \times 10^{\square}$  deg/secであった。

図に見られるように、一定電力を供給している間は水温は時間に比例して増加する。これは電気エネルギーが熱量計内の熱エネルギーに変換されていることを意味する。

図1から電力供給時の時間変化率  $\Delta\theta/\Delta t$  は線形最少自乗法を適用することにより以下のように求められた。

$$\Delta\theta/\Delta t = (\square.\square\square \pm \square.\square\square) \times 10^{\square} \text{ deg/sec}$$

次に(4)式を用いて熱の仕事当量の算出を行う。

$$J_0 = \frac{VI}{C(M+w) \frac{\Delta\theta}{\Delta t}} = \frac{\dots \times \dots}{\dots (\dots + \dots) \times \dots \times 10^{\dots}}$$

$$= \square.\square\square \text{ J/cal}$$

また以下の関係式に基づいて熱の仕事当量の測定誤差  $\Delta J_0$  の見積もりを行う。

$$\frac{\Delta J_0}{J_0} = \frac{\Delta V}{V} + \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta M + \Delta w}{M + w} + \frac{\Delta \left( \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \right)}{\frac{\Delta\theta}{\Delta t}}$$

これを变形して表2の数値を代入すると、以下のように  $\Delta J_0$  の値を得る。

$$\Delta J_0 = \left\{ \frac{\Delta V}{V} + \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta M + \Delta w}{M + w} + \frac{\Delta \left( \frac{\Delta \theta}{\Delta t} \right)}{\frac{\Delta \theta}{\Delta t}} \right\} \times J_0 = \dots [J / \text{cal}]$$

以上から熱の仕事当量は以下のように求められた。

$$J_0 = \square.\square\square \pm \square.\square\square \text{ J/cal} \quad (5)$$

## §5 考察

測定結果(5)を、一般に知られている熱の仕事当量の値  $J_0 = 4.18605 \text{ J/cal}$  (6)と比較すると、測定結果は(6)と(測定誤差の範囲で一致した)・(測定誤差の範囲を超えて大きな値になった)・(測定誤差の範囲を超えて小さな値になった)。

「図1に見られるように、通電前後では温度変化がない。これは電力供給が無い状態では熱量計内への熱エネルギーの正味の供給がないことを意味している。」

「図1に見られるように、通電後には水温の減少があった。これは熱量計から外界への熱の流出が生じていることを意味する。従って、通電中も同様に熱の流出が起きていたことが推測される。熱の流出がある場合には、

$$C(M+w)\Delta\theta = VI\Delta t - (\text{熱の流出})$$

となるため、温度上昇  $\Delta\theta$  が熱の流出の無いときに比べて小さくなる。このため熱の仕事当量の測定値が見かけ上大きくなってしまふ。」

「図1に見られるように、通電後にわずかな水温上昇があった。外部からエネルギーの供給が無いのに、熱量計内の温度上昇があるように測定される原因としては、熱量計内の水の攪拌が不十分であったことが考えられる。水の攪拌が不十分だと、ニクロム線周囲の加熱された水は比重が減少して上昇し、水面付近の水温が底に比べて高くなる。電力供給後も攪拌は継続するので、次第に水温が均一化する。この過程で温度計付近の水温が実質的に上昇したものと判断される。

電力供給中の攪拌が不十分であったとすると、水温の測定値は、実際の水温の平均値よりも小さいことが推測される。水温が不均一な場合、温度計で測定している水温の時間的な上昇率も正しくない可能性がある。これは熱の仕事当量の測定結果を望ましい値からのはずれの原因になる。」

「攪拌が不十分で、水面近くの温度が高くなっている場合、水面から空気中への熱の流出効果が大きくなる。これが時間的に積算するために、水温上昇が望ましい値よりも低くなる可能性がある。熱の流出は温度差に比例するので、水面温度が空気の温度より高くなるにつれて流出効果は高まる。このため、水温上昇率は望ましい値に比べて小さくなっている可能性がある。」

「電力供給時に、電流計・電圧計の指示値が揺らいでいた。これは水の攪拌などの操作に伴ってニクロム線の結合部が緩み、回路の接触不安定が起きていた可能性を示唆する。この場合、実際の電力供給量は初期設定値よりも低くなり、仕事当量の値は見かけ上大きな値になってしまう。」

「図1に見られるように、電力供給時の水温上昇は直線的でなく、かなりの揺らぎがある。これは攪拌の不十分、回路の接触の不安定があったことを示唆する。」

## §6 結論

電気エネルギーが熱に転化することが確かめられ、熱の仕事当量  $J_0$  は、

$$J_0 = \square.\square\square \pm \square.\square\square \text{ J/cal}$$

と求められた。

実験のヒント(レポートに書く必要はありません)

### <実験前のチェック>

- 水量は適当か

蒸留水の量は、ニクロム線が完全に水没して、止めネジは水面に触れない程度にする。ニクロム線が空気に触れているとそこから熱が空気中に散逸してしまい、水への熱量供給のロスが生じる。止めネジが水没していると、水没している部分のネジの熱容量を考慮せねばならなくなる。

- 回路の結線がゆるんでいないか。  
導線をつなぐターミナルなどが緩んでいると、接触抵抗が生じて熱が発生し、そこで熱量供給のロスが生じる。
- ニクロム線が熱量計の壁面に触れたり、からまっていないか  
攪拌棒を動かしたとき、ニクロム線に振れてしまわないか注意。

#### <実験中のチェック>

- 攪拌を丁寧に  
かき混ぜ方が不十分だと水温が均一にならず、温度計の温度上昇が鈍くなったりする。
  - 電流計・電圧計の指示を時々チェックする  
かき混ぜている過程で電力が変動したり揺らぐことがあるので、時々確認する。結線が緩んだり、ニクロム線が止めネジにしっかり止められていないと、このことが起きる。
  - 10分で3°C上昇する程度  
水温と室温の差が大きくなるほど、水から外気に熱が逃げていきやすくなる。水温が上がりすぎたらやり直し。
-