

電流と熱

□ 目的

物体に電流を流したとき、熱が発生することをたしかめ、発生したジュール熱によって水の比熱を算出する。

□ 実験用具

熱量計、デジタル温度計、直流電流計、直流電圧計、直流電源、スライド抵抗器、ストップウォッチ、はかり

□ 原理

物体に電流を流すと熱が発生する。この電流の発熱作用は、便利な熱源として広く利用されている。

物体に電流を流す—電気量（電荷）をもつ粒子（キャリア；電子、イオンなど）を物体の中で移動させる—には、外部からそのキャリアを動かす力を加えなければならない。物体中をキャリアが動くときは抵抗力を受けるので、持続的に電流を流すためには電荷の運び手を絶えず供給するとともに抵抗力によって失われるエネルギーを供給することが必要である。このようにキャリアに対して仕事をし、電流を生じさせる原因となるものを起電力といい、その大きさは物体の両端に加えた電位差（電圧）であらわす。

電位差（電圧）が1ボルト [V] というのは1クーロン [C] の電気量を運ぶときになされる仕事が1ジュール [J] であるような電位の差をいう。1秒間 [s] に1 [C] の電気量が移動する電流の強さが1アンペア [A] であるから、1 [V] の電位差で1 [A] の電流が流れるときには、1 [s] に1 [J] の仕事をしていることになる。1 [s] につき1 [J] の割合とする仕事率を1ワット [W] という。

電気抵抗 R オーム [Ω] の物体（この実験ではニクロム線）に V [V] の電位差を加えて I [A] の電流を t [s] の間流すとすれば、 t [s] の間になされる仕事（＝消費される電気エネルギー） W [J] は

$$W = I^2 R t = I V t \quad (1)$$

である。物体（ニクロム線）に電流を流したとき発生する熱は、この電流を流すためになされる仕事によっておきる。この仕事（電気エネルギー）は物体内の自由電子の運動エネルギーとなる。電子の運動エネルギーは原子や陽イオンなどとの衝突によって、物体の内部エネルギー（分子の運動エネルギーと分子間の力による位置エネルギーとの総和）になり、その結果、物体の温度が上がる。このようにして物体に電流を流すことによって発生する熱をジュール熱という。熱力学第1法則（エネルギー保存則）により、このとき

なされた仕事 W [J] と発生する熱量 Q [J] ^{*1}とは等しくなくてはならない。すなわち、 $W = Q$ である。

この実験の概要を 図 1 に示す。

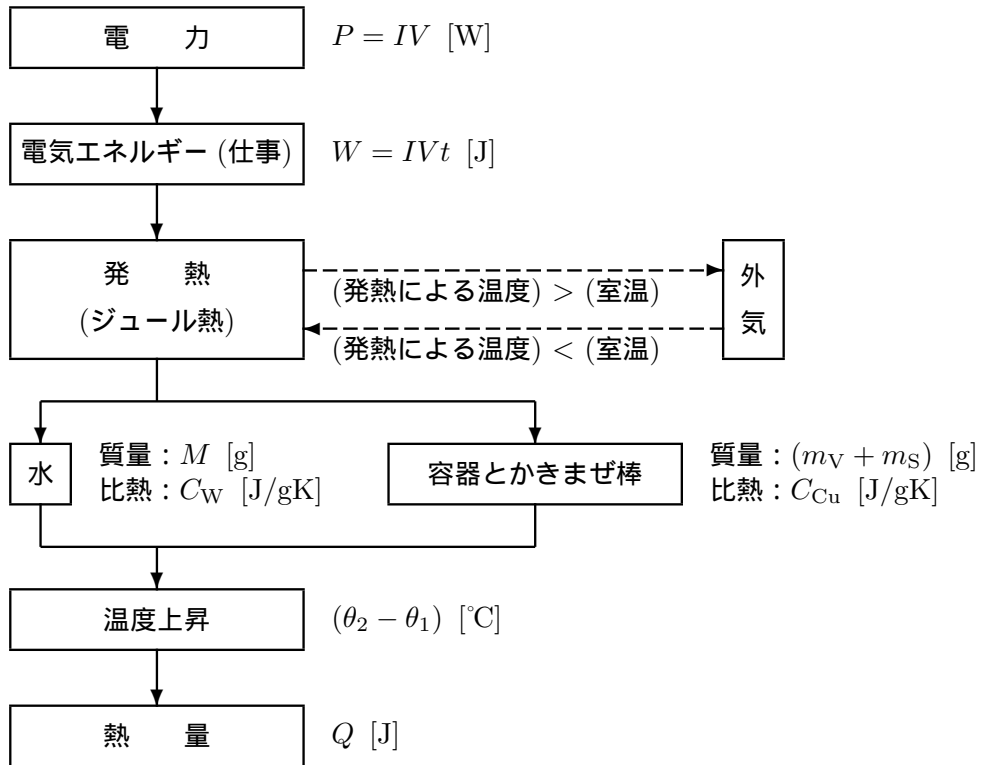


図 1 実験の概要

ニクロム線を水の中に浸し、電流を流す。水の質量を M [g] とし、ニクロム線に電流を時間 t_1 [s] から t_2 [s] の間流すと、発生するジュール熱 Q [J] によって水温は θ_1 [°C] から θ_2 [°C] まで上昇する。水に、ジュール熱以外に外気から出入りする熱がないものとする、発生した熱量 Q [J] は水 (Water) の比熱を C_W [J/gK] とすると

$$Q = MC_W(\theta_2 - \theta_1) \quad (2)$$

とあらわされる。したがって、この熱量 Q [J] を正確に測定すれば、水の比熱 C_W [J/gK] が求められる。^{*2}

^{*1} 現在、熱量の単位として国際単位系 (SI) ではジュールを用いている。しかし、熱量をカロリーを用いてあらわすこともある。このときには、仕事 W ジュールと発生した熱量 Q' カロリーとの間には比例の関係がある。すなわち、 $W = JQ'$ である。この比例定数 J [J/cal] を熱の仕事当量という。

^{*2} 比熱の単位は [J/gK] のように、絶対温度目盛 K を用いてあらわされるが、この実験では水温の差が問題になるので、水温の測定は°C を用いて読み取って差し支えない。

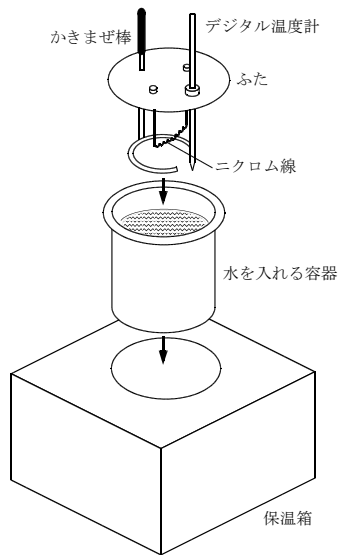


図2 熱量計

発熱量 Q [J] を水の温度変化の測定から求めるために、ここでは図2のような熱量計を使う。熱量計の水を入れる容器は、電気エネルギーによる発熱以外の熱が外気から水に入りしないようにするために、断熱材で囲んで保温箱の中におさめてある。

実際には、ジュール熱は水の温度のほかに、水を入れる容器、かきまぜ棒などの温度も上昇させる。水温上昇以外に使われたこれらの分の熱量も加えなければ、ニクロム線から発生した熱量を全部測定したことになる。

熱量計の水を入れる容器 (Vessel : 質量 m_V [g]) と かきまぜ棒 (Stirrer : 質量 m_S [g]) はともに銅製である。銅 (Cu) の比熱を C_{Cu} [J/gK] とすると、温度が θ_1 [°C] から θ_2 [°C] まで上昇する間に、容器とかきまぜ棒の得た熱量は $(m_V + m_S)C_{Cu}(\theta_2 - \theta_1)$ [J] である。

したがって、これらを考えに入れると発生した熱の総量 Q [J] は

$$Q = \{MC_W + (m_V + m_S)C_{Cu}\}(\theta_2 - \theta_1) \quad (3)$$

となる。 $W = Q$ だから、(1) 式と (3) 式から水の比熱 C_W [J/gK] を求めれば

$$C_W = \frac{IVt}{M(\theta_2 - \theta_1)} - \frac{(m_V + m_S)C_{Cu}}{M} \quad (4)$$

となる。

熱の仕事当量

熱は1720年ごろからおよそ100年間ほどの間、熱素(カロリック)と呼ばれる目に見えず測定もできないほど小さい質量をもった物質が物体に含まれているためと考えられていた(熱素説という)。この熱素説によって多くの熱現象をうまく説明することができたのである。たとえば熱伝導は物質中の熱素が物体間を移動することとして、また熱膨張は物体のすきまに熱素が入り込むことによると考えられた。しかし、物体を摩擦すればほとんど無限に熱を生じるという摩擦熱に関する現象については、「熱素は熱的变化の前後で等量に保たれる」とした熱素説の考えでは力学的な仕事と熱との関連を説明することはできなかった。その後、ランフォード(Count Rumford; 1798) デイヴィ(H. Davy; 1799)などによって、熱は摩擦のような力学的な仕事の原因となって発生するエネルギーの一種であることが実験的に示された。さらにジュール(J. P. Joule 1818~1889)は力学的エネルギーが熱に変るとき、この2つは定数 J で結びついていることを実験によって確かめた。すなわち、仕事 W [J]によって発生した熱量 Q' をカロリーであらわすと $W = JQ'$ の関係があるという。ジュールは水中においた羽根車をまわし、この J の値を測定した(1847)。この比例定数 J を熱の仕事当量という。ジュールの実験は熱が物質ではなくエネルギーの一種であることを実験によって量的に示したものとして高く評価されている。

J の値はその後いろいろな方法で測定され、いずれもかなりよく一致している。現在では、 J の値は4.18605 [J/cal]とされている。

□ 実験方法

- (1) m_V 、 m_S および M を以下のようにして測定する。ここで、 m_V : 水を入れる容器の質量、 m_S : かきまぜ棒の質量、 M : 水の質量である。熱量計から、水を入れる容器とかきまぜ棒をはずし、それぞれの質量 m_V [g]、 m_S [g] をはかりで測定する(かきまぜ棒の柄のつまみの部分は含まない)。

つぎに、容器に水を入れる。水はニクロム線が十分浸るくらいの分量を入れなければならない。(図3参照)

水を入れた容器の質量(総量: Gross) M_G [g] を測定し、容器の質量 m_V [g] を差し引いて水の質量 M [g] を求めると

$$M = M_G - m_V$$

となる。

- (2) 図3のように配線をする。

直流電源、スライド抵抗器、直流電流計、熱量計の中のニクロム線を直列^{*3}に接続する。

直流電圧計はニクロム線と並列に接続する。

電流の流れる方向に注意して、直流電流計に逆向きに電流が流れないように配線する。直流電圧計を接続するときにもこの注意が必要である。

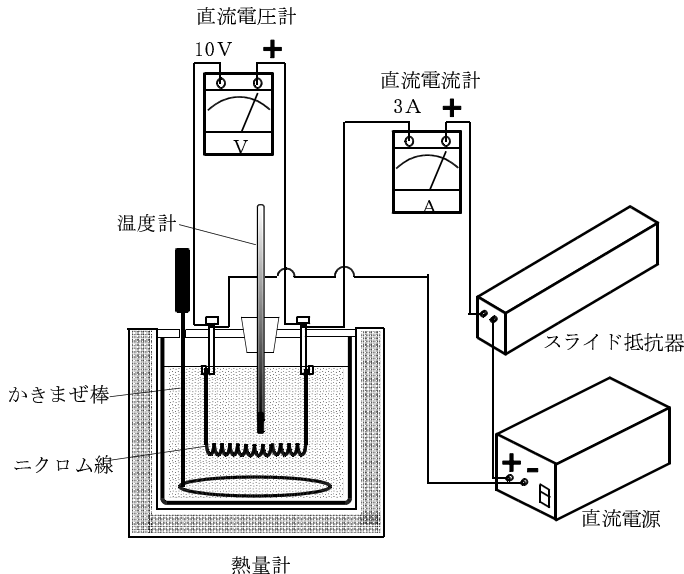


図3 接続図

(3) 回路を流れる電流の調節をする。

直流電源のスイッチを入れて (ON)、この回路を流れる電流が $1.5 \sim 2$ [A] になるように直流電流計の指示を見ながらスライド抵抗器を手早く調節し、すぐスイッチを切る (OFF)。

つぎに、かきまぜ棒で水を十分かきまぜて水温を均一にする。

(4) 室温 (外気温) θ_0 [°C] を読み、記録する。

(5) 水温を測定する。

室温を読み取ったのち、直ちに直流電源のスイッチを入れ (この時刻を t_1 とする) 同時にストップウォッチを押す。このときの温度計の読み (水温) θ_1 [°C]、直流電流計の読み I [A]、直流電圧計の読み V [V] をそれぞれ記録する。

実験中はかきまぜ棒をたえずゆっくりと上下して水を十分にかきまぜ、水温が均一になるようにする。

^{*3} 抵抗、メーターなどを1列につないで、そのつないだリード線の両端だけを電源の端子につないだとき、その抵抗、メーターなどは電源に直列になっているという。また、抵抗、メーターなどのそれぞれの両端を電源の端子に直接に同時につないだとき、抵抗、メーターなどは電源に並列になっているという。

以後、30 秒ごとに温度計の読み θ [$^{\circ}\text{C}$]、直流電流計の読み I [A]、直流電圧計の読み V [V] を記録する。

300 秒たったらスイッチを切る（この時刻を t_2 とする）。水温を測定するとき、温度計の示度は実際の水温の上昇速度に追従できず、多少低い温度を示している。そのため、スイッチを切ってもまだ水温は少しの間上昇する。したがって、スイッチを切ってもしばらく水をかきまぜ、水温の測定を続ける。スイッチを切った直後の水温の変化は、スイッチを切る以前よりも詳しく（10 秒間隔程度に）測定し、水温が最高温度に達した後、下降状態に移ったことを確かめて測定を打ち切る。

- (6) 測定データをグラフに描く（図 4）。横軸に時間 t [s]、縦軸に水温 θ [$^{\circ}\text{C}$] をとって水温の変化をグラフにあらわす。
- (7) グラフから時刻 t_1 のときの水温 θ_1 [$^{\circ}\text{C}$] および水温の最高値 θ_2 [$^{\circ}\text{C}$] を読み取る。
- (8) (4) 式を用いて、水の比熱 C_w [J/gK] を求める。

注 1 ジュール熱は、水と水を入れる容器およびかきまぜ棒の温度を上昇させると同時に、ニクロム線と温度計の水につかっている部分の温度も上昇させる。しかし、これらに使われる熱量は、水と水を入れる容器およびかきまぜ棒の温度上昇に使われる熱量の合計に比べて非常に小さいので、ここでは無視した。

注 2 この実験では、熱量計の水を入れる容器は断熱材で囲まれているので、容器を通して外気との熱の出入りはなく、発生した熱は全部、水と水を入れる容器およびかきまぜ棒の温度を上昇させるのに使われると考えた。しかし、実際には、外気との若干の熱の出入りは避けられない。ジュール熱は、容器の内外の温度差にほぼ比例して、水温が外気温より高いときは、容器を通して外気に逃げる。また、水温が外気温よりも低いときには、外気から熱がはいり込む。したがって、外気温 θ_0 [$^{\circ}\text{C}$] が、はじめの水温 θ_1 [$^{\circ}\text{C}$] と水温の最高値 θ_2 [$^{\circ}\text{C}$] との中央の値であるような条件を選ぶことができたとき、熱量計と外気との間に入出入りする熱量が打ち消される。この状態が実験の状況としては理想的である。

□ 実験例

時間 t [s]	水温 θ [°C]	電流 I [A]	電圧 V [V]	
スイッチ ON	$0 = t_1$	19.8	2.00	8.6
	30	20.2	2.00	8.6
	60	20.7	2.00	8.6
	90	21.1	2.00	8.6
	120	21.6	2.00	8.5
	150	22.0	2.00	8.5
	180	22.5	2.00	8.6
	210	22.9	2.00	8.6
	240	23.4	2.00	8.6
	270	23.8	2.00	8.6
スイッチ OFF	$300 = t_2$	24.3	2.00	8.6
	310	24.4	2.00 (平均)	8.6 (平均)
	320	24.4		
	330	24.4		
	340	24.3		
	350	24.3		
	360	24.3		

容器の質量

$$m_V = 83.46 \text{ [g]}$$

かきまぜ棒の質量

$$m_S = 11.31 \text{ [g]}$$

容器、水の質量の和

$$M_G = 343.12 \text{ [g]}$$

容器、かきまぜ棒の質量の和

$$m_V + m_S = 94.77 \text{ [g]}$$

水の質量

$$M = M_G - m_V = 259.66 \text{ [g]}$$

銅の比熱

$$C_{Cu} = 0.385 \text{ [J/gK]}$$

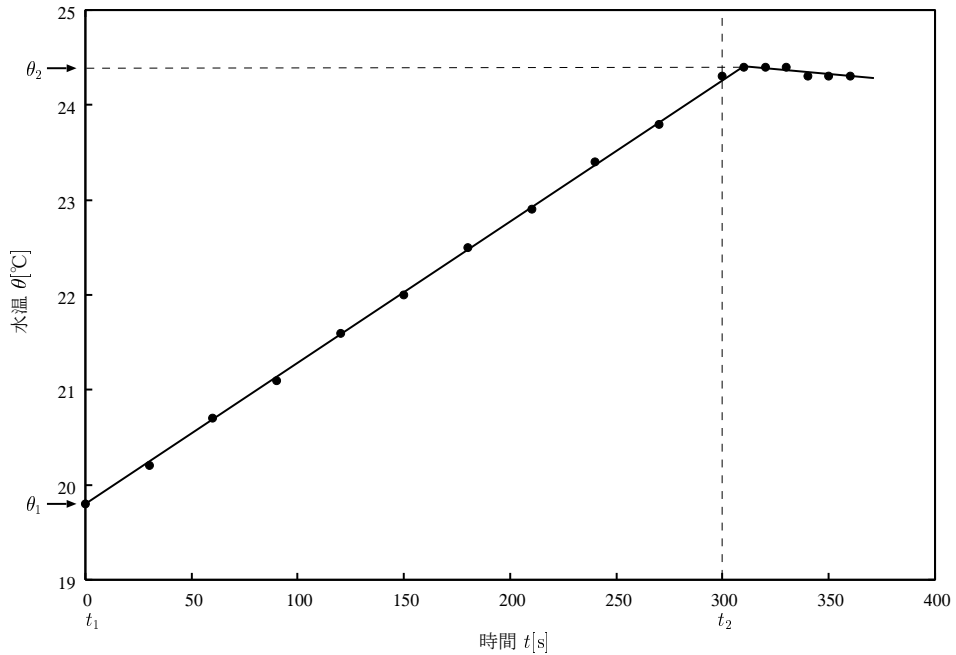


図 4

室温（外気温）	$\theta_0 = 20.2$ [°C]
時刻 t_1 の時の水温	$\theta_1 = 19.8$ [°C]
水温の最高値	$\theta_2 = 24.4$ [°C]
水温の上昇	$\theta_2 - \theta_1 = 24.4 - 19.8 = 4.6$ [°C]
通電時間	$t = 300$ [s]
電流の平均	$\bar{I} = 2.00$ [A]
電圧の平均	$\bar{V} = 8.6$ [V]

したがって、水の比熱 C_W [J/gK] は

$$\begin{aligned}
 C_W &= \frac{\bar{I}\bar{V}t}{M(\theta_2 - \theta_1)} - \frac{(m_V + m_S)C_{Cu}}{M} \\
 &= \frac{2.00 \times 8.6 \times 300}{259.66 \times 4.6} - \frac{94.77 \times 0.385}{259.66} \\
 &= 4.32 - 0.14 \\
 &= 4.2 \text{ [J/gK]}
 \end{aligned}$$

となる。