

## 実 験 報 告 書

題 目 熱の仕事当量及び固体の比熱

実 験 実 施 日

(西暦) 2023 年 5 月 29 日

提 出 日

(西暦) 2023 年 6 月 4 日

(再 提 出 日

(西暦) 年 月 日)

報告書作成者

学籍番号 8223036 氏名 栗山 淳

共同実験者

学籍番号 8223030 氏名 萱谷 碧

学籍番号 8223032 氏名 北村 天人

学籍番号 8223034 氏名 金 知賢

学籍番号 8223038 氏名 神山 友輝

学籍番号 8223040 氏名 小杉 温子

東京理科大学先進工学部マテリアル創成工学科

実験指導者記入欄	
提 出 日 /	署名
再提出指定日 /	
再 提 出 日 /	署名

## チェックリスト

- ☒ 「結論」が的確にまとめられているか。
- ☒ 「結論」の長さは適切か。日本語に誤りがないか(論旨，文法，単語)。
- ☒ 「結論」と「実験結果」の整合性がとれているか。
- ☒ 「結論」を導くために必要十分かつ適切な「実験結果」の表現が過不足なくされているか。
- ☒ 「実験結果」はわかりやすく，見やすく，正確に表現されているか。
- ☒ グラフの軸，表の項目，グラフや表のタイトルに漏れはないか，適切か。
- ☒ 有効数字は適切か。単位が漏れていないか。
- ☐ (写真を用いる場合) 写真の明るさやコントラストは適切か。
- ☒ 「実験結果」を得るために必要な「方法」が過不足なく表現されているか。
- ☒ 「目的」が明記されているか。「目的」と「結論」の整合性がとれているか。日本語が適切か。
- ☒ 「なぜこの目的で実験をしたか」が「背景」に的確に表現されているか。日本語が適切か。
- ☒ 必要に応じて適切に参考文献の引用情報が記述されているか。

参考文献：議論の裏付けを与えるものであるから，実験題目に関係がある文献を偏りがないようにできる限り引用する。文献の表記方法を参考として下記に記述しておく。

  - 1) 著者名，書籍名，発行所，ページ，発行年
  - 2) 著者名，雑誌名，巻，号，ページ，発行年
- ☒ 全体としてわかりやすいか。
- ☒ 「背景」が1ページを超えていないか。
- ☐ 「実験方法」が1ページを超えていないか。
- ☒ 「結論」が100字程度で記されているか。

## 1, 背景、目的

熱エネルギーは、人類の歴史を通じて重要な役割を果たしてきました<sup>1</sup>。古代ギリシャの哲学者たちから始まり<sup>2</sup>、熱の性質を研究する科学者たちの努力によって、その理解は進化してきました。18 世紀には、熱と仕事の関係を示す「ジュールの法則」が発見され、熱エネルギーと機械的な仕事の変換が定量的に理解されるようになりました<sup>3</sup>。さらに 19 世紀には、カルノーやクラウジウスなどの科学者が熱力学の基礎を築き<sup>4</sup>、熱エネルギーの特性や熱力学的な法則が明らかにされました。これらの発見は、蒸気機関の発展や産業革命に大いに貢献しました<sup>5</sup>。現代では、熱エネルギーはさまざまな分野で幅広く利用されています。発電所における燃料の燃焼による熱エネルギーの利用や、自動車のエンジンにおける燃焼熱の利用は一般的な例です。また、家庭や産業においても、暖房や冷房、調理、温水供給などの目的で熱エネルギーが利用されています。さらに、再生可能エネルギーの利用も増えており、太陽熱エネルギーや地熱エネルギーなどが積極的に開発されています。熱エネルギーは、物体の分子や原子の運動に関連しています。物体の温度は、その分子や原子の平均運動エネルギーの尺度として表されます。温度の差により、熱は高温から低温へと流れる傾向があります<sup>6</sup>。この現象は「熱伝導」と呼ばれ、熱エネルギーの移動を意味します。熱エネルギーは、物体の内部エネルギーの一形態であり、物体の状態を変化させることができます<sup>7</sup>。物体を加熱すると温度が上昇し、融解や蒸発といった相変化が起こる場合があります。また、物体の比熱は、単位質量あたりの熱エネルギーの変化量に対する温度の変化率を表す指標です<sup>8</sup>。これは、物質が熱を吸収したり放出したりする能力を示します。熱力学の法則に従えば、エネルギーは変換されることができですが、創造または破壊されることはありません。エネルギー保存の法則は熱力学の基本原則であり、エネルギーは一つの形態から他の形態に変換されるだけで総量は変わらないことを示しています<sup>9</sup>。以上が、熱エネルギーの歴史、現代の熱の利用、そして熱の原理についての概要です。このような知識は、熱エネルギーの理解と熱力学の応用に不可欠です。私たちは熱エネルギーを効果的に利用し、持続可能な社会の実現に向けた取り組みを進めることで、より良い未来を築くことができるでしょう。熱量と力学的仕事、および電気的な仕事はエネルギー保存則の観点から等価であることが知られています<sup>9</sup>。しかし、これらの関係を定量的に結びつけるためには、熱の仕事当量を正確に求める必要があります。具体的には、高精度ジュール熱実験装置である水熱量計を使用して熱の仕事当量を測定します。水熱量計は、電流を通すことで熱を発生させ、その熱量を正確に計測することができる装置です。この装置を用いることで、電気エネルギーから生じる熱エ

エネルギーを定量化し、熱の仕事当量を求めることが可能です。また、レニョー熱量計を用いて、予熱された各種金属の熱当量を測定し、固体の比熱を求めます。レニョー熱量計は、熱エネルギーの変化を計測する装置であり、金属試料の比熱を正確に測定するために使用されます。この実験を通じて、熱の仕事当量と固体の比熱についての理解を深めることが目的です。

## 2、原理

### 2-1 水当量

水当量は、物体や装置が熱エネルギーを吸収または放出する際に、その熱エネルギーの量を同等の水の質量に換算した値を指します。つまり、水当量は、物体や装置が水と同じ熱容量を持つ場合に必要な水の質量を表します。水当量は、熱の仕事当量の計算や熱の測定において重要な概念です。物体や装置が熱エネルギーを吸収すると、その熱エネルギーは物体や装置の温度上昇によって蓄積されます。水当量を考慮することで、物体や装置が水と同じ熱容量を持つ場合において、その熱エネルギーを水の質量に換算することができます。ある容器の水当量を $\omega$ としてある容器に混合した質量 $m$ と $M$ の水の温度変化をそれぞれ $\Delta t$ と $\Delta T$ とすると熱量保存の法則から(1)式が成り立つ。この時水の比熱は $c$ とした。

$$(\omega + m) \times c \times \Delta t = M \times c \times \Delta T \quad (1)$$

この式から水当量 $\omega$ は(2)式で求まる。

$$\omega = M \times \frac{\Delta T}{\Delta t} - m \quad (2)$$

よって水当量は上記の式で表される。

### 2-2 熱の仕事当量

熱の仕事当量は、物体に加えられた熱エネルギーがどれだけの仕事に変換されるかを示す物理量です。簡単に言えば、熱エネルギーと仕事の間の関係を表す指標です。熱の仕事当量を求めるためには、熱力学の基本法則である熱力学第一法則を用います。熱力学第一法則によれば、閉じた系に加えられる熱エネルギーは、仕事に変換されるか、または内部エネルギーの増加として蓄積されます。つまり、熱エネルギー( $Q$ )は仕事( $W$ )と内部エネルギーの変化( $\Delta U$ )の和として表されます。

$$Q = W + \Delta U \quad (3)$$

よって熱の仕事当量は $Q$ を $W$ で割った値で表せる。

## 2-3 比熱

固体の比熱は、物質の熱容量を表す物理量です。比熱は、単位質量あたりの物質の熱容量を示し、物質の熱エネルギー変化に対する応答性を示します。比熱は、物質の内部エネルギーの変化が温度変化に伴ってどれだけ変化するかを定量化します<sup>8</sup>。具体的には、物質に熱エネルギーが供給された場合、その物質の温度がどれだけ上昇するかを表します。異なる物質は比熱が異なり、それによって熱の伝導や温度変化に対する挙動が異なることがあります。固体の比熱を求めるためには、(4)式を用います。

$$Q = m \times c \times \Delta T \quad (4)$$

ここで、Q は物体に供給される熱エネルギー、m は物体の質量、c は物体の比熱、 $\Delta T$  は物体の温度変化を表します。この式は、供給される熱エネルギーが物体の温度変化によって変化することを示しています。比熱は物体の性質に依存する定数であり、物体の質量や温度変化によって熱エネルギーの変化量が決まります。

### 3. 方法

#### 3-1, 高精度ジュール熱実験装置を用いた仕事当量の測定

##### (1) 水当量の測定

まず、ビーカーに約 150ml の水を入れ、その質量を天秤で測り、その水を発泡スチロール容器に移し、再びビーカーの質量を計り、発泡スチロール容器に入れた水の質量  $m'$  を求めた。この水を入れた発泡スチロール容器中に回転子を入れて、回転子が容器の中心にくるように熱量計本体の位置を調整し、スターラーの速度調整つまみを時計回りに回し、回転子を適当な回転速度に設定してから蓋をかぶせた。温度計の示度が落ち着いたところで示度  $\theta^0$  を読み取った。ビーカーに温度が 51°C のお湯 100ml を入れ、その質量を天秤で測った。このお湯を発泡スチロール容器に加えて攪拌し、温度の経度変化を 10 秒間隔で 230 秒間測定して示度が落ち着いたところで平衡温度  $\theta''$  を決定した。再びビーカーの質量を計り、発泡スチロール容器に入れたお湯の質量  $m''$  を求め、水当量  $\omega$  を (5) 式で求めた。

$$\omega = m'' \times \frac{51 - \theta''}{\theta'' - \theta^0} - m' [g] \quad (5)$$

##### (2) 熱の仕事当量の測定

発泡スチロール容器の中に回転子を入れ質量  $m_1$  を天秤で測定し、その後発泡スチロール容器に一定量の水を入れ、質量  $m_2$  を天秤で測定し、その値から  $m_1$  を差し引いて、水の質量  $m$  を求めた。その水を入れた容器を熱量計本体中に置

き、スターラーの速度調節ツマミを時計方向に回し、回転子を適当な回転速度に設定してから蓋をかぶせて、温度計で水の温度を 1 分間隔で、3 分間測定し、 $\theta_1$ を決定した。次に図 1 のように敗戦した回路で電源を入れ、10 分間電流 2 A 流し、電圧計で電圧、電流計で電流、そして温度計で水の温度を 1 分間隔で測定し、電源 OFF 後も 3 分間温度を測定して温度が安定した所を  $\theta_2$ として決定し、測定結果より (6) 式で熱の仕事当量  $J$  を求めた。

$$J = \frac{V \times I \times t}{(\omega + m) \times (\theta^2 - \theta^1)} \quad \left[ \frac{J}{cal} \right] \quad (6)$$

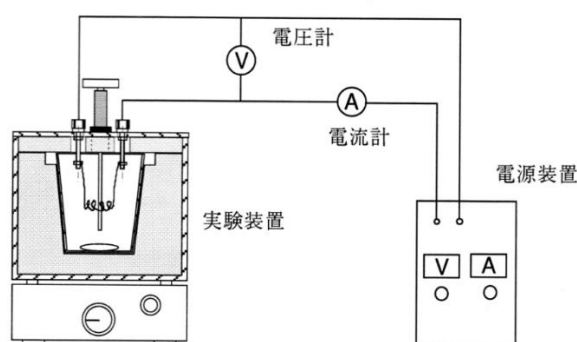


図 1

### 3-2 レニョー熱量計による固体の比熱の測定

#### (1) 装置の組み立てと設置

図 3 のように加熱槽をスタンドに取り付け、スタンドの位置は熱量計をスタンドベースの上に設置できる程度にし、温度コントローラをスタンド側に置き、温度センサをシリコンゴム栓に差し込み、シリコンゴム栓を加熱槽の上部口に蓋をするように取り付けた。ヒータにて加熱過程中は、熱量計に熱の影響がないように加熱槽を熱量計から離れた反対側（スタンドの後）に回し設置した。

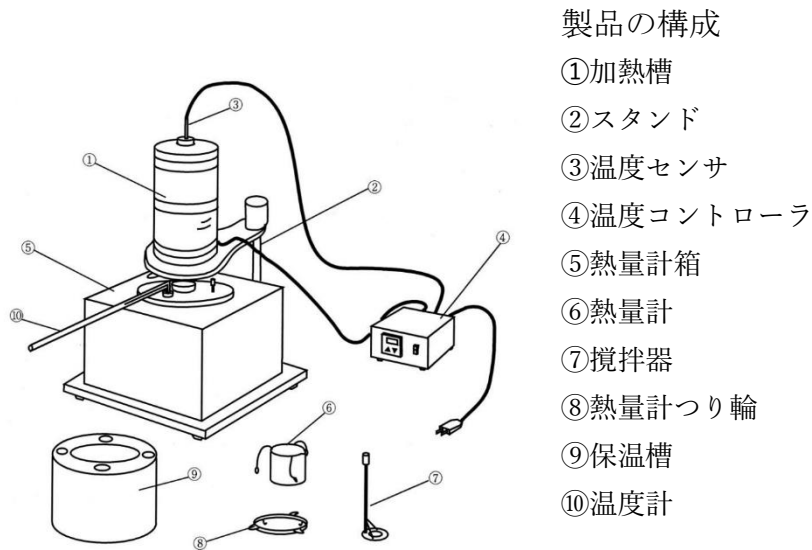


図 3

## (2) 比熱の測定

測定する金属試料を銅に選択し、その質量  $m_1$  を測った。測定試料を試料が熱量計の底まで達するのに十分な長さの糸で縛り、温度センサの先端部と接する高さになるように加熱槽内につり下げた。その後、電源スイッチを ON にして、加熱温度の目標値を  $100^{\circ}\text{C}$  に設定し加熱を開始した。保温槽に水を約 1700ml 入れ、熱量計箱の中に図 4 のように設置した。天秤で熱量計の質量  $M_1$  と攪拌器の質量  $M_2$  を測った。つぎに熱量計に水を 8 割程度入れて、天秤を用いてその重さを測り、 $M_1$  との差から水の質量  $m_2$  を求めた。つり輪を用い、熱量計に水を入れたままの状態を熱量計を保温槽中につり下げ、ふたを通して温度計および攪拌器を入れた。加熱槽で加熱中の試料が  $100^{\circ}\text{C}$  になるまで待ち、試料の温度が安定したことを確認した。熱量計の水をよく攪拌しながら温度計の示度を読み取り、これを  $t_1$  とする。 $t_1$  を記録後、ただちに熱量計のゴム栓を外し、加熱槽を熱量計の真上に移動させ、底のふたを開け試料を水中に入れた。試料は、静かにしかも素早く熱量計におろした。加熱槽を元の熱量計箱から遠い位置にもどし、攪拌を続けながら温度計の示度を 10 秒ごとに 300 秒間記録し、平衡温度を  $\theta$  とした。測定完了後、試料を取り出し、熱量計と保温槽の水を捨てた。温度コントローラの電源スイッチを OFF にして、加熱を中止した。電源コードをコンセントから外し、加熱槽は自然冷却させた。その後、水当量  $\omega_1$ 、 $\omega_2$  を (7)、(8) 式で計算した ( $\omega_3$  は既知で  $0.38\text{g}$  とした)。最後に (9) 式を用いて試料の比熱  $C$  を計算した。

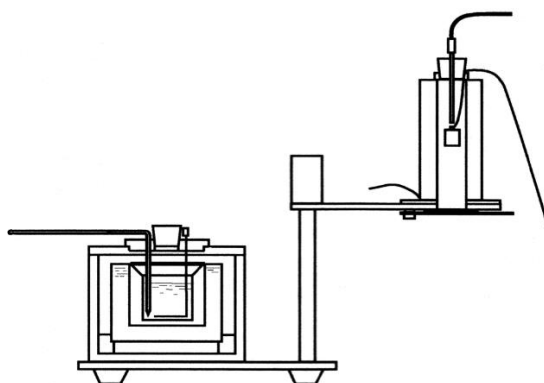


図 4

$$\omega^1 = M^1 \times 0.092 (\text{銅の比熱}) \quad (7)$$

$$\omega^2 = M^2 \times 0.092 (\text{銅の比熱}) \quad (8)$$

$$C = \frac{(m^2 + \omega^1 + \omega^2 + \omega^3) \times (\theta - t^1)}{m^1 \times (100 - \theta)} \quad (9)$$

#### 4, 結果、考察

3-1 の(1)の実験結果は下の表とグラフに示したようになった。

表 1 それぞれの質量

	測定値 [g]
ビーカー+水	178.7
ビーカー	30.5
ビーカー+お湯	130.6
ビーカー	30.2

表 2 発泡スチロール容器に入れた水とお湯の質量

	測定値 [g]
m'	148.2
m''	100.4



表 3 水の温度変化

$t$ [min]	$\theta_0$ [°C]
0	24.3
1	24.3
2	24.3
3	24.3

グラフ 1 お湯を加えた後の水の温度変化

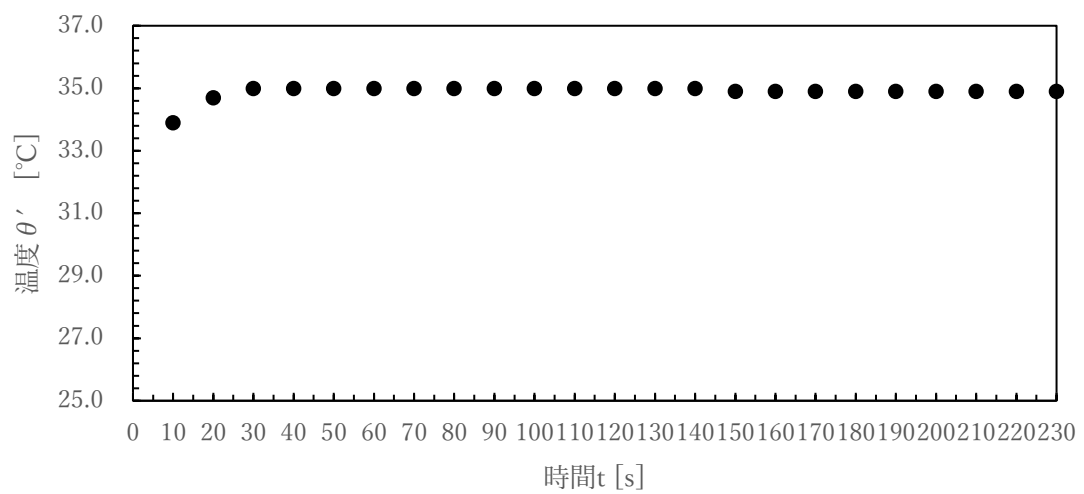


表 4 お湯を加えた後の水の温度の経度変化

$t$ [s]	$\theta''$ [°C]
0	24.6
10	33.9
20	34.7
30	35.0
40	35.0
50	35.0
60	35.0
70	35.0
80	35.0
90	35.0
100	35.0
110	35.0
120	35.0
130	35.0
140	35.0
150	34.9
160	34.9
170	34.9
180	34.9
190	34.9
200	34.9
210	34.9
220	34.9
230	34.9

上記の結果と(5)式から水当量 $\omega$ は次のように求まった。ただし $\theta_0$ は 24.3 とし、 $\theta''$  は温度が安定した 35.0 で計算した。

$$\begin{aligned}
 \omega &= m'' \times \frac{51 - \theta''}{\theta'' - \theta_0} - m' \\
 &= 100.4 \times \frac{51 - 35.0}{35.0 - 24.3} - 148.2 \\
 &= 1.93084112 \dots \\
 &\cong 1.93[\text{g}]
 \end{aligned}$$

3-1 の(2)の実験結果は下の表とグラフに示したようになった。

表 5 回転子を入れた発泡スチロール容器に入れた水の質量

測定値 [g]	
$m_1$	6.3
$m_2$	258.5
$m$	252.2

表 6 水の温度変化

$t$ [min]	$\theta_1$ [°C]
0	24.3
1	24.3
2	24.3
3	24.3

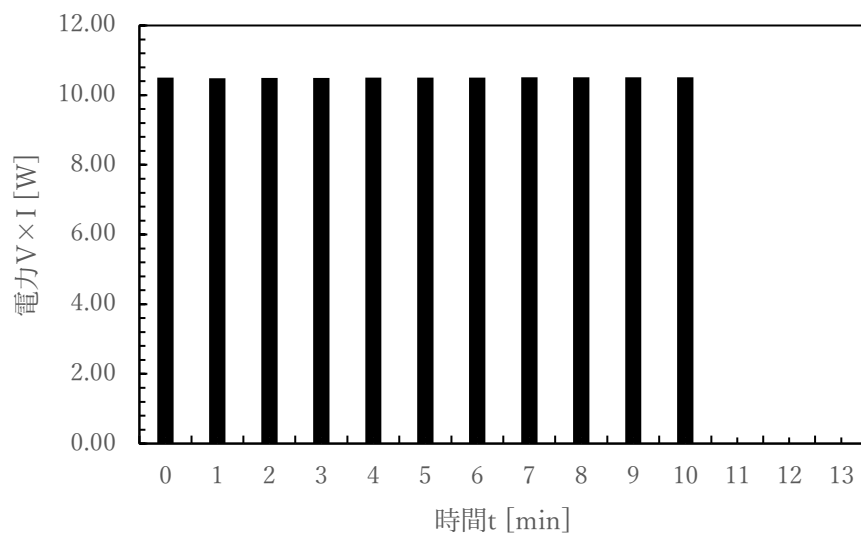
表 7 電流流した時の水の温度変化

電源	$t$ [min]	$\theta_2$ [°C]	$I$ [A]	$V$ [V]	$V \times I$ [W]
ON	0	24.3	1.989	5.28	10.50
ON	1	24.7	1.990	5.27	10.49
ON	2	25.2	1.992	5.27	10.50
ON	3	25.8	1.992	5.27	10.50
ON	4	26.2	1.993	5.27	10.50
ON	5	26.7	1.993	5.27	10.50
ON	6	27.3	1.993	5.27	10.50
ON	7	27.7	1.994	5.27	10.51
ON	8	28.3	1.994	5.27	10.51
ON	9	28.9	1.995	5.27	10.51
ON	10	29.3	1.995	5.27	10.51
OFF	11	29.3	0.000	0.00	0.00
OFF	12	29.3	0.000	0.00	0.00
OFF	13	29.3	0.000	0.00	0.00

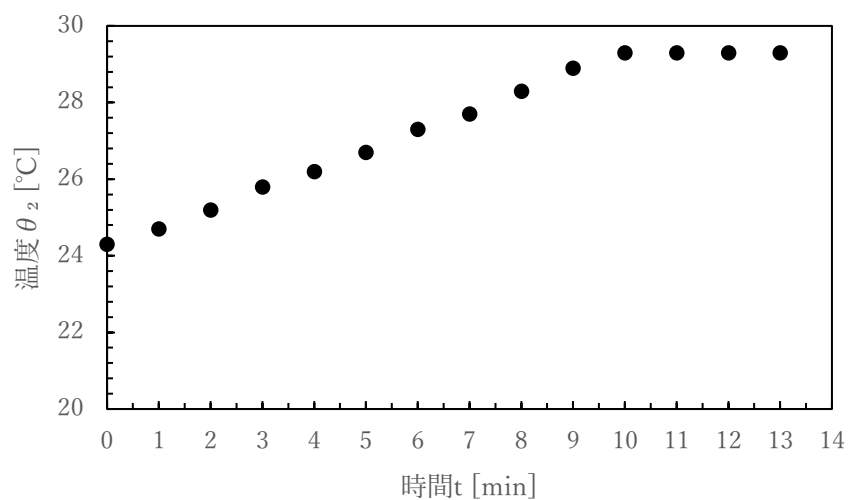
表 8 電流と電圧の平均値

	$I$ [A]	$V$ [V]
平均値	1.993	5.27

グラフ 2 時間と電力の関係



グラフ 3 電流を流した時の水の温度変化



上記の結果と(6)式から熱の仕事当量  $J$  は次のように求まった。ただし、 $\omega$  は 3-1(1)で求めた水当量の値、 $\theta_1=24.3$ 、 $\theta_2=29.3$ 、 $V$  は実験で 10 分間電流を流した時の電圧の平均値、 $I$  は電流の平均値、そして  $t$  は電流供給時間[s]として計算した。

$$\begin{aligned}
 J &= \frac{V \times I \times t}{(\omega + m) \times (\theta_2 - \theta_1)} \\
 &= \frac{5.27 \times 1.993 \times 600}{(1.93 + 252.2) \times (29.3 - 24.3)} \\
 &= 4.9595608 \dots \\
 &\approx 4.96 \left[ \frac{\text{J}}{\text{cal}} \right]
 \end{aligned}$$

3-2 の(2)の実験結果は下の表とグラフのようになった。

表 9 それぞれの質量

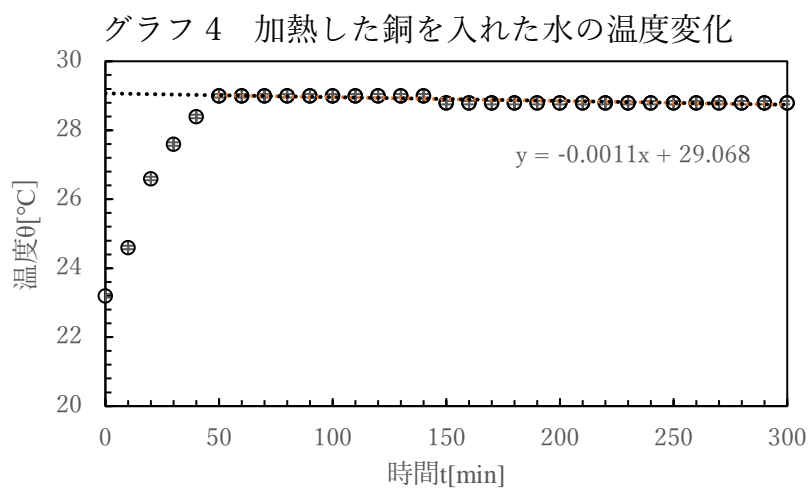
	測定値
水入りの熱量計	180.9
M <sub>1</sub>	80.8
M <sub>2</sub>	12.0
m <sub>1</sub>	100.0
m <sub>2</sub>	100.1

表 10 熱量計の水の温度変化

$t$ [min]	$t_f$ [°C]
0	23.2
1	23.2
2	23.2
3	23.2

表 11 加熱した銅を入れた水の温度変化

$t [\text{min}]$	$\theta [^{\circ}\text{C}]$
0	23.2
10	24.6
20	26.6
30	27.6
40	28.4
50	29
60	29
70	29
80	29
90	29
100	29
110	29
120	29
130	29
140	29
150	28.8
160	28.8
170	28.8
180	28.8
190	28.8
200	28.8
210	28.8
220	28.8
230	28.8
240	28.8
250	28.8
260	28.8
270	28.8
280	28.8
290	28.8
300	28.8



上記の結果と(7)、(8)、(9)式から銅の比熱  $c$  は次のように求まった。ただし、 $\omega_3$ は 0.38、 $\theta$ は 29.0、 $t_1$ は 23.2 として計算した。過熱した銅を含む水は、銅から熱エネルギーを受け取りつつも、空気中に熱エネルギーを放出し続けます。したがって、グラフ 4 の最高温度に達した時点でも、熱エネルギーの放出が継続されています。グラフ 4 において 50℃を超える部分は、銅が水に熱エネルギーを与えた後の段階であり、空気中に熱エネルギーを放出する過程だけが残っています。したがって、グラフ 4 の近似曲線と  $t=0$  の交点は、空気中への熱エネルギー放出を考慮せず銅が水にのみ熱エネルギーを与えたときの水の温度を表しており、それより私は  $\theta$  が 29.0 と等しいと考えた。

$$\begin{aligned}
 c &= \frac{(m_2 + \omega_1 + \omega_2 + \omega_3) \times (\theta - t_1)}{m_1 \times (100 - \theta)} \\
 &= \frac{(100.1 + 80.8 \times 0.092 + 12.0 \times 0.092 + 0.38) \times (29.0 - 23.2)}{100 \times (100 - 29.0)} \\
 &= 0.0890566 \dots \\
 &\approx 0.0891 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]
 \end{aligned}$$

今回の銅の比熱は上記のように  $0.0891[\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$ であるが文献値で銅の比熱は  $0.092[\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$ と表されている。実験値が文献値よりも小さくなっているのは式(9)から分母の値が大きくなっているか、分子が小さくなっていると考えられる。今回は実験値と文献値の差が小さいので誤差であると考えられるが、もし原因を考えるとすれば、過熱した銅を水に入れて温度を測るときにうまく攪拌できておらず、 $\theta$ の温度が下がってしまったのではないかと考える。

また、式(7)と(8)で使った銅の比熱は文献値で計算したが、ここを実験値で計算すると銅の比熱は下の式から求められる。

$$\begin{aligned}
 c &= \frac{(m_2 + \omega_1 + \omega_2 + \omega_3) \times (\theta - t_1)}{m_1 \times (100 - \theta)} \\
 &= \frac{(100.1 + 80.8 \times 0.0891 + 12.0 \times 0.0891 + 0.38) \times (29.0 - 23.2)}{100 \times (100 - 29.0)} \\
 &= 0.08883678 \dots \\
 &\approx 0.0888
 \end{aligned}$$

この銅の比熱は実験値 0.0891 とほぼ同じ値になっていることが分かる。

#### 5, 結論

今回の実験から熱の仕事当量は熱エネルギーの取り込みに関連しており、熱エネルギーの一部が物質内部に取り込まれ、その他の部分が熱エネルギーとして放出されることと、比熱は単位質量あたりの物質の熱容量を示し、物質の熱エネルギー変化に対する応答性を示すということから熱の仕事当量と固体の比熱が物質の熱エネルギー変換において重要な要素であることが分かった。

#### 6, 参考文献

- 1: 高田誠二、「熱エネルギーのおはなし」、5 ページ、1985 年 1 月 7 日
- 2: 高田誠二、「熱エネルギーのおはなし」、15～17. 19～20、1985 年 1 月 7 日
- 3: 北山直方、「絵とき熱力学のやさしい知識」、43～48、1997 年 12 月 10 日
- 4: 北山直方、「絵とき熱力学のやさしい知識」、93～96、1997 年 12 月 10 日  
高田誠二、「熱エネルギーのおはなし」、160～174、1985 年 1 月 7 日
- 5: 高田誠二、「熱エネルギーのおはなし」、86～87、1985 年 1 月 7 日
- 6: 北山直方、「絵とき熱力学のやさしい知識」、5～10、1997 年 12 月 10 日
- 7: 北山直方、「絵とき熱力学のやさしい知識」、10 ページ、1997 年 12 月 10 日
- 8: 北山直方、「絵とき熱力学のやさしい知識」、29 ページ、1997 年 12 月 10 日
- 9: 北山直方、「絵とき熱力学のやさしい知識」、45 ページ、1997 年 12 月 10 日