

## 水の温まり方・冷え方の真実

津山工業高等専門学校 電気電子工学科第3学年 田中慎二  
指導教員 一般科目・化学 廣木一亮

### 1. 水の特異性

水とは、 $0^{\circ}\text{C}$ 以下で固体、 $0^{\circ}\text{C}\sim 100^{\circ}\text{C}$ で液体、 $100^{\circ}\text{C}$ 以上で気体の物質である。しかし、他の物質と異なる点がいくつかあるので、下に示す。

- 1) 一般的に物質は温度が小さくなればなるほど体積が小さくなるのだが、水は $4^{\circ}\text{C}$ の場合に体積が最も小さくなる。(図1)
- 2) 固体になった時に、液体の時よりも体積が大きくなる。
- 3) 分子構造的に、水は常温で気体であるのが妥当であると考えられるのに、常温では液体で存在する。

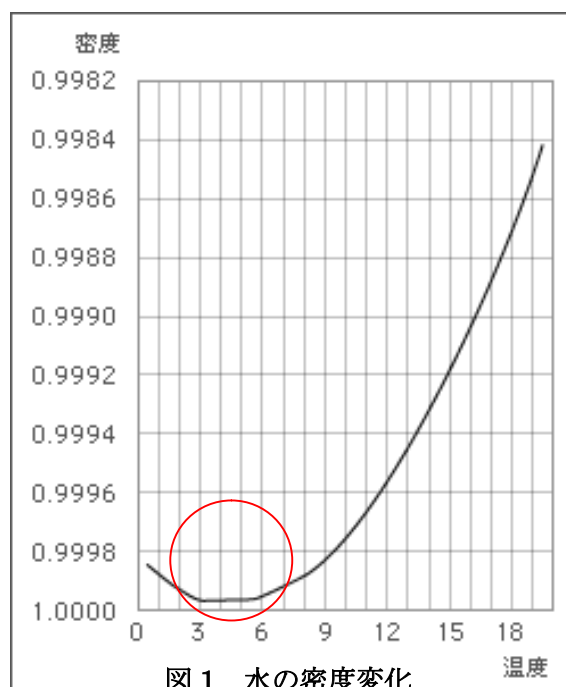


図1 水の密度変化

### 2. 水の温まり方

$4^{\circ}\text{C}$ 以上で水が温まっていく場合、通常、以下のような過程を経る。

- ①水が温められ密度が小さくなる。
- ②密度が小さな温かい水が密度の大きい冷たい水より上に移動する
- ③下に来た密度の大きい冷たい水が温められ密度が大きくなる。
- ④その水が上に移動する。

これを繰り返すこと、すなわち「対流」によって全体の温度が効率よく、スムーズに上昇していく。

しかし、これは水の初期温度が $4^{\circ}\text{C}$ 以上のときの話であり、 $4^{\circ}\text{C}$ 以下では密度が図1のように冷たい水と温かい水で逆転するため、 $4^{\circ}\text{C}$ 未満の温度から温めたときに水がどのような動きをするのかが分からない。(図2)

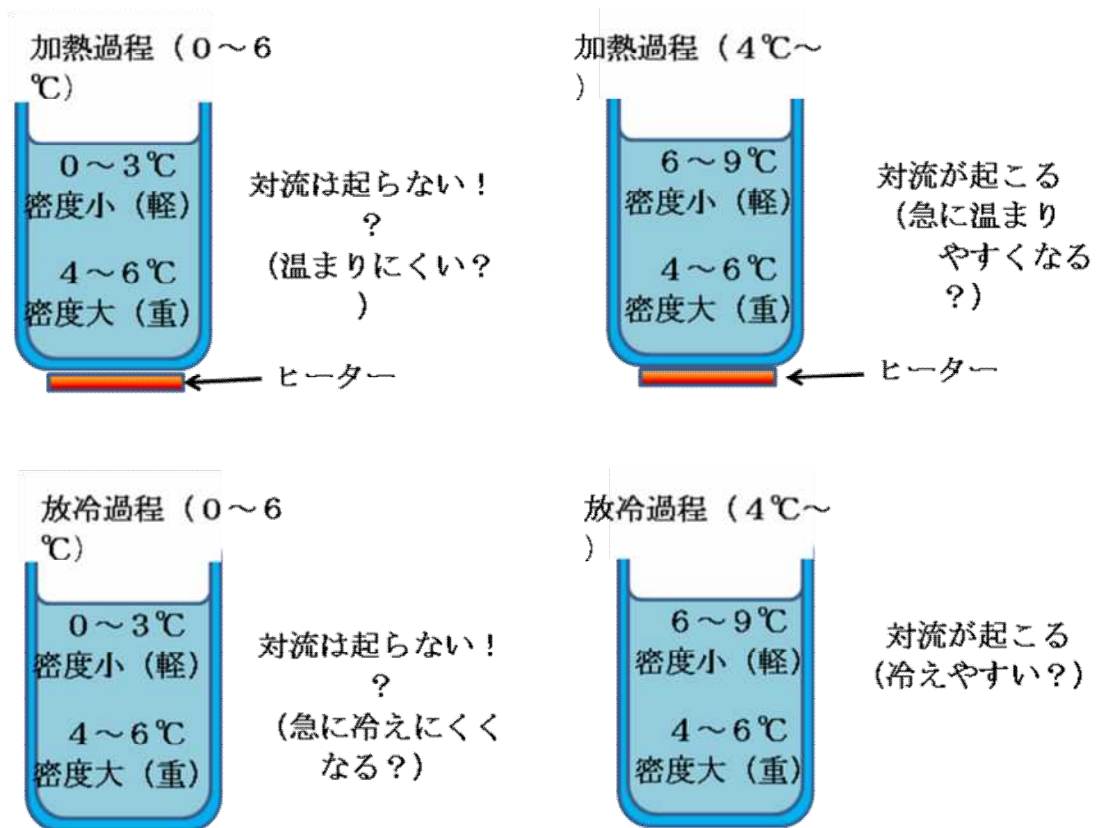


図2 水の密度変化と温まり方

### 3. 実験の目的

水が0~4℃のとき、温度が上がるにつれて密度が大きくなっていき、特異な挙動をしめすと考えられる。その付近の温度で、水が温まる過程における温度変化がどのようになっているのかを確認し、考察することを目的とする。

### 4. 測定方法の検討

#### 4.1 測定方法の案

- ①赤外線サーモグラフィを使用する
- ②サーモクロミック素材を用いる
- ③熱電対・デジタル温度計を使用する

## 4. 2 結果と考察

### ①サーモグラフィを使用する

赤外線サーモグラフィは、物体から放射されている赤外線を検知し、温度に換算、熱画像として可視化する装置である。それにより、温度の計測や解析を非接触で行うことができるという利点を持つ。

その反面、計測できるのは物体の表面温度に限られるため、内部温度の計測に使えるかどうか、使えたとしても正確であるかは検証してみる必要があった。

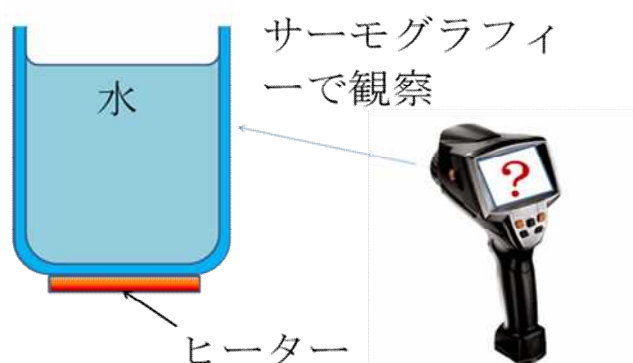


図3 サーモグラフィによる計測 (イメージ)

使用した赤外線サーモグラフィは日本アビオニクス社が出している高分解能サーモグラフィ (ネオサーモ TVS-600) を使用した。

しかしながら、ビーカーなどのガラス容器は鏡面を測定できない等の問題で変化が、うまく観測できなかった。熱伝導率などを考えた結果、容器を金属に変更したり、業者に相談して赤外線放射を見やすくする黒体スプレーなども検討したりが、微小な温度変化をサーモグラフィでとらえることは難しく、この実験方法は諦めざるを得ないという。結論に達した。

### ②サーモクロミック素材を用いる

サーモクロミック素材は温度によって、色が変化する物質であり、その色の変化によって温度の変化を可視化できる。しかし、0~4℃という範囲のしかも細かい温度変化に早く対応できる色素がないため、この観察方法は困難であるということが分かった。

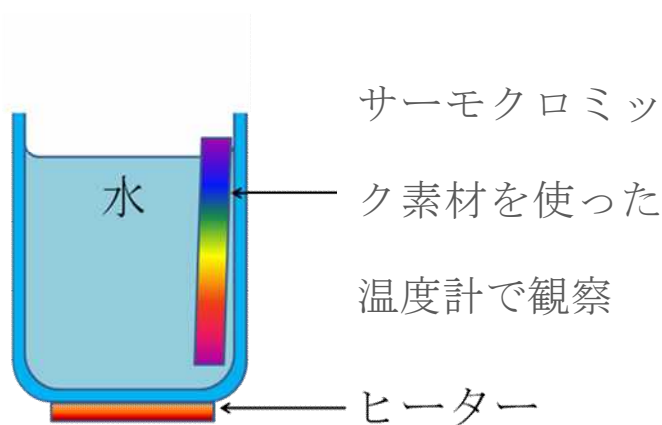


図4 サーモクロミック素材による観察 (イメージ)

③熱電対・デジタル温度計を使用する

多点測定できる熱電対を使用した測定を計画したが、業者の都合によるトラブル（データロガーに付属する熱電対が4個だったはずが、1個しか付属しておらず、交渉の結果、残り3個も納入されることとなった）に遭い、納品はレポート締め切り後ということになり、諦めざるを得なかった。

そこでデジタル温度計を使用した測定に切り替えた。デジタル温度計の

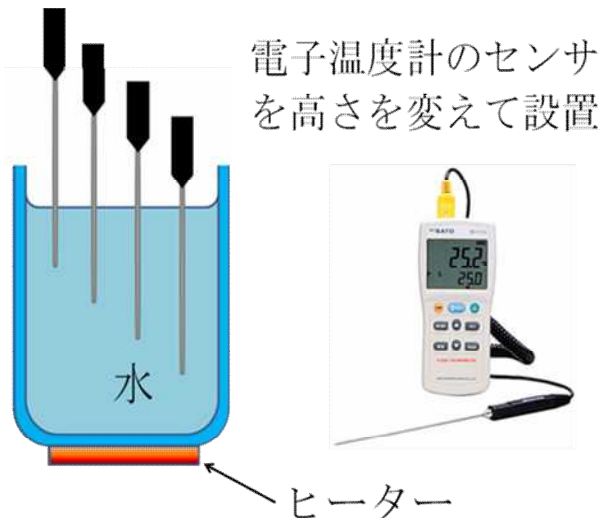


図4 デジタル温度計による観察（イメージ）

センサー部位をビーカーの中に4段階高さを変えて配置し、その温度の変化を観測できる。

その前にデジタル温度計の精度を確認した結果、校正用アルコール温度計と比較しても大きなずれはなく、デジタル温度計どうしの差もほとんど誤差範囲にとどまった(表1)。

精度が良好であったため、今回はこのデジタル温度計を使った測定方法で実験を行うこととした。

アルコール温度計 (°C)	デジタル温度計(°C)			
	温度計1	温度計2	温度計3	温度計4
0.0	0.0	0.0	0.1	0.0
6.7	6.6	6.7	6.7	6.6
11.2	11.2	11.3	11.3	11.2
20.0	19.9	20.1	19.8	19.8

表1 デジタル温度計の精度

## 5. 加熱方法の検証

### 5.1 加熱方法案

①ガスバーナーによる加熱

②シリコンラバーヒーター（八光電機より提供）による加熱

## 5. 2 実験器具

1L ビーカー、ガスバーナー、変圧器、  
Φ120 シリコンラバーヒーター、  
デジタルテスタ、デジタル温度計

## 5. 3 実験方法

ビーカーに蒸留水 800ml 入れ、その中にデジタル温度計 4 つ高さを変えて配置し、図 5 のように番号を振って、温度計①~④とした。(図 5)

そして、ビーカーを加熱し時間の経過と温度の変化を記録していく。



図 5 デジタル温度計による測定

## 5. 4 結果と考察

まず、ガスバーナーを使用して加熱した場合の結果を図 6 に示す。

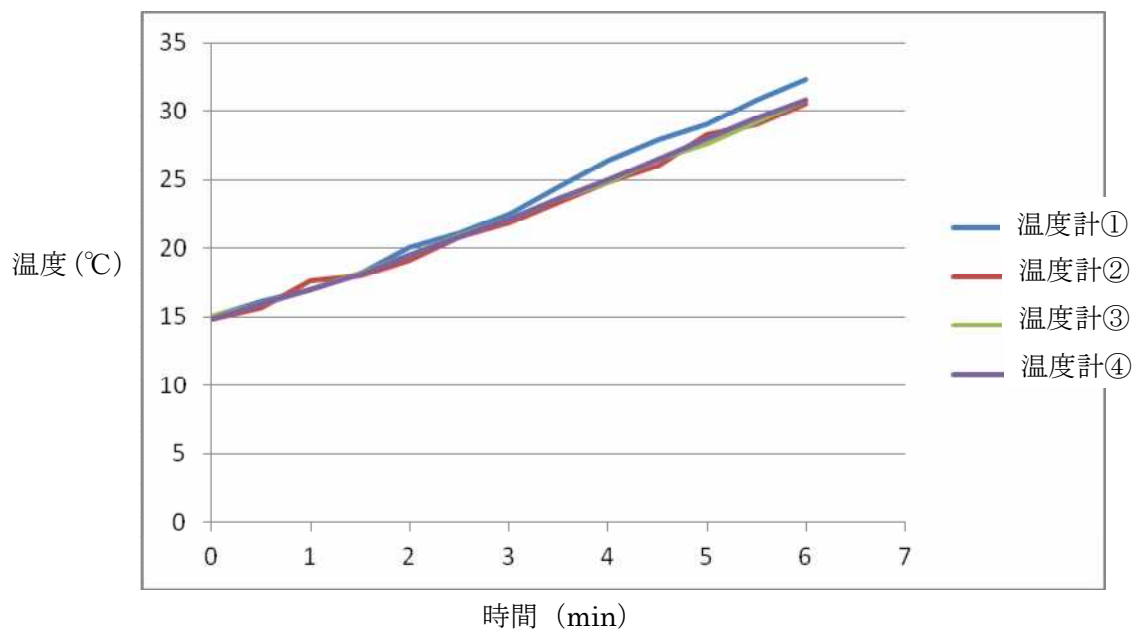


図 6 ガスバーナーで加熱した場合の温度変化

図のように時間とともにほぼ比例関係のまま温度が上昇していることがわかるが、炎でビーカーの底が急熱されるため、温度計①の温度変化が速すぎる。

また炎の大きさを同じ大きさにするのが難しく、水温の上昇スピードをコントロールするのが困難で、再現性にも問題があった。

次にシリコンラバーヒーターに 100V を印加して加熱した場合の結果を図 7 に示す。

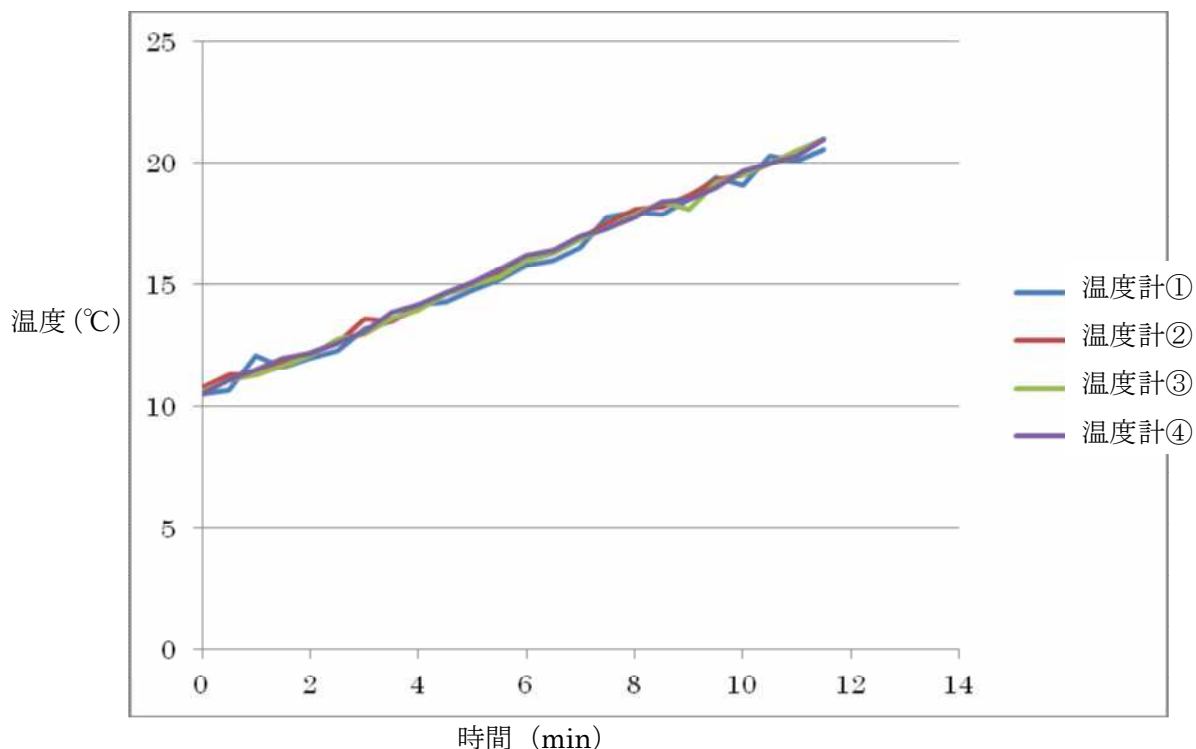


図 7 シリコンラバーヒーターで加熱した場合の温度変化

時間とともにほぼ比例関係で上昇していっていることは、ガスバーナーの場合と同様だが、シリコンラバーヒーターのほうが安定して緩やかに温度を上げることができる。各温度計のバラつきが小さく、電圧で発熱量が決まるため、再現性も高い。

以上の結果から、常に一定の出力で慎重に加熱できる得られる点で優れているため、シリコンラバーヒーターを加熱実験に使用することにした。

## 6. 実験

### 6. 1 実験器具

1L ビーカー、Φ120 シリコンラバーヒーター、変圧器、デジタルテスタ、デジタル温度計

### 6. 2 実験方法

0°C未満まで冷却した蒸留水 800ml をシリコンラバーヒーターに 100V を印加して加熱し、8°C温度が上がるまでの温度変化を観測した。

なお0°Cより温度が低いほうが密度は小さくなっていると考え、水を可能な限り冷却してから加熱を開始した。

### 6. 3 結果

0°C未満まで冷却した蒸留水 800ml をシリコンラバーヒーターで加熱した結果を図 8 に示す。

加熱開始時に-2.7°Cという過冷却状態からスタートしたが、氷ができるなどの様子もなく完全に水の状態のまま測定できた。

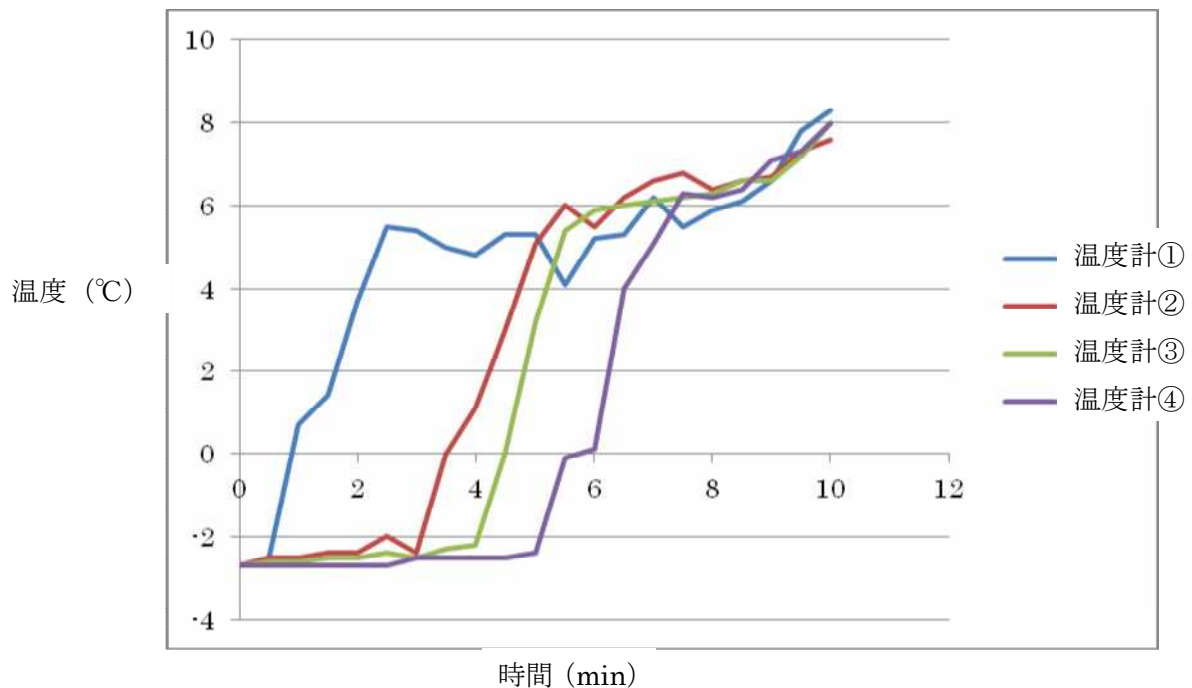


図 8 -2.7°C~8.0°Cの温度変化

### 6. 4 考察

図 7 と図 8 を比較すると、温度変化の仕方が違うことは明白である。

図7では、10°C~20°Cまで時間に比例して温度が上がっている。それに対して、図8では温度計の位置により、次のような違いがみられた。

最下部 温度計①加熱し始めてすぐに温度が一気に上昇し、加熱開始の2分30秒後には、5.5°Cに達している。この時点で、他の温度計はほぼ変化は見られない。

↓ 温度計②①に約2分30秒遅れて温度が急上昇しはじめ、加熱開始の5分30秒後に6.0°Cになり、そこから緩やかに水温が上昇。

↓ 温度計③①に約3分30秒遅れて温度が急上昇しはじめ、加熱開始の6分後に5.9°Cになり、②と同様に緩やかに水温が上昇。

最上部 温度計④①に約4分30秒遅れて温度が急上昇しはじめ、加熱開始の7分30秒後に6.3°Cになり、②、③と同様に緩やかに水温が上昇。

このように最下部から順に最上部へと時間差を持って熱は伝わっていき、急上昇してその後は緩やかに温度上昇するという傾向をもつ。

温度計①、②、③、④のセンサー付近の水の層をそれぞれA、B、C、Dとすると(図9)、

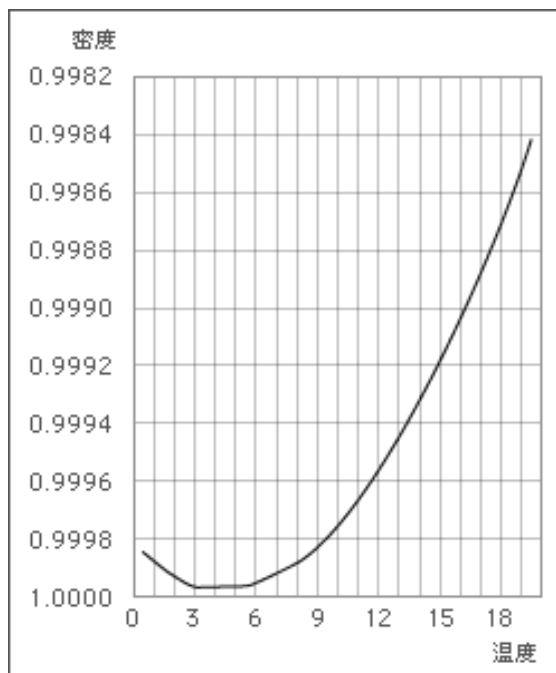
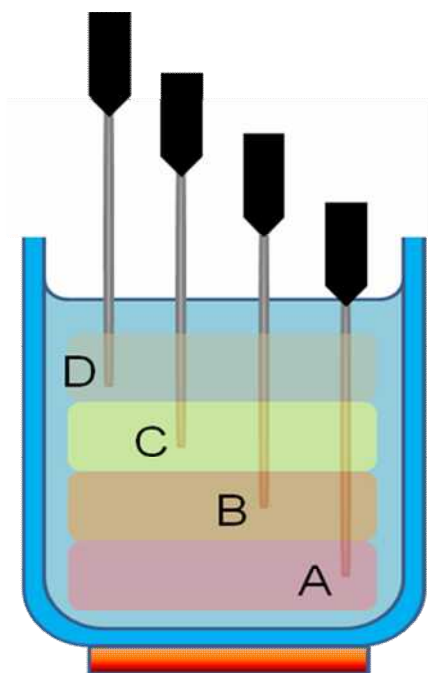


図9 センサー付近の水の層

図10 水の密度変化

以下、実験結果と水の密度表と比較しながら、議論を行う。

過程1 まずA層が温められるが、この時、6°C未満の温度では密度は大きくなっていき、6°C付近までは最も密度が大きいので、底に沈んだままである。その結果、温度計



- ①が6°Cを超えるまでは、それよりも高い位置にある3つの温度計に、変化はみられない。つまり密度の大きいA層は上に移動せずにそのまま留まり、加熱されていく。
- 過程2. A層は6°Cを超えた時、B層よりも密度が小さくなり、B層と混ざりながらB層の温度を上げていく。
- 過程3. B層が6°Cになった時、過程2と同様にしてB層とC層、C層とD層の順に混ざり合いながら、温度を上げていく。

水温の変化仕方が6°C以上の水と6°C以下の水では異なることが確認できた。これは当初の4°Cを境に傾向が変わるという予想とは異なるが、6°Cと言う温度を境に水の温度上昇は劇的に変化することが判明した。

図9では模式的に書いているが、デジタル温度計が感知している温度範囲はもっと小さく、より微視的な変化として、6°C以下の水では徐々に熱が伝わっていくという変化は起きていると予想できる。これは対流で一気に温度上昇する「液体」ではなく、むしろ徐々に熱が伝わっていく「固体」に近いといえる。

## 7 結論

私たちは「4°Cの水」も「8°Cの水」も、見た目はほとんど変わらないし、無色透明のサラサラした液体である同じ「水」に過ぎないと思っている。私自身も、また指導教員もこの実験を行うまでは、そう思っていた。

しかし、この実験結果をみても「4°Cの水」と「8°Cの水」には大きな違いがあることが明らかになった。密度表の上では、密度の違いは単なる数値の大小で、大きな違いには見えないが、3°Cから6°Cという水の密度が最も大きい領域を境に、水はまるで別の物質のようにふるまっている。

6°C以上の水は他の多くの液体と同じように、対流を起こして加熱時間に比例しながらスムーズに温度を上げていく。6°C以下の領域では、過冷却状態も含め、対流は起らない。この領域では、水は温まるほど密度が大きくなるため、対流は起らず、温められた水は容器の底に沈んだままである。この水が徐々に温まって6°Cを超えたとき、限られた範囲で混和が起り、これを繰り返して徐々に徐々に温度を上昇させていく。

つまり、この6°C以下の温度領域にある水は、温まり方という観点で見ると液体であるにもかかわらず、固体のそれに近い。あたかも「液状の氷」であると結論付ける。

## 8 感想

今回、熱コンに初めて参加してみて、たった半年の研究期間で多くの実験を計画的に行うことの大変さを知った。しかし、それを通じて「水を温める」という単純な行為にも、

科学の目で見ると様々な現象が潜んでいることを見出した。

今の知識や設備では実証することはできないが、もしかしたら水にはこの温度領域で、まだ知られていない水分子どうしの相互作用や構造の変化が起きているかもしれない。もっとも身近で不思議な物質「水」の面白さに改めて気づいた研究であった。