

## 小学校理科に関連した水の冷却実験

平松 和彦<sup>(1)</sup>

### Experiments on the cooling process of water related to primary science studies

HIRAMATSU Kazuhiko<sup>(1)</sup>

In this paper we deal with how to teach the property of water in primary school science. Through carrying out of simple experiments on measurements of temperature in process of water cooling using data loggers, it was found that the temperature of maximum density of water is 4 degree centigrade and super cooling is appeared. These topics is indispensable for teachers to explain the roles of water in a global environment.

Keywords : property of water, density, super cooling, temperature measurement

#### 1 研究の背景と目的

小学校理科カリキュラムの中で「水のすがた」は、身近な水を素材にして物質の状態変化を学ぶ重要な単元のひとつである。この単元は水を加熱したり冷却したりする実験を行うことによって、器具を使った実験の基礎を習得すると同時に、水の特性を正しく理解することによって、地球環境について学ぶスタートラインとなる部分である。

試験管に入れた水を、食塩と氷による寒剤によって冷却して水の融点が0℃であることを明らかにする実験が教科書で紹介されているが、現実には過冷却現象が頻繁に起こり、掲載されているグラフのような結果がなかなか得られないことについては、すでに別稿において議論した。<sup>(1～5)</sup>

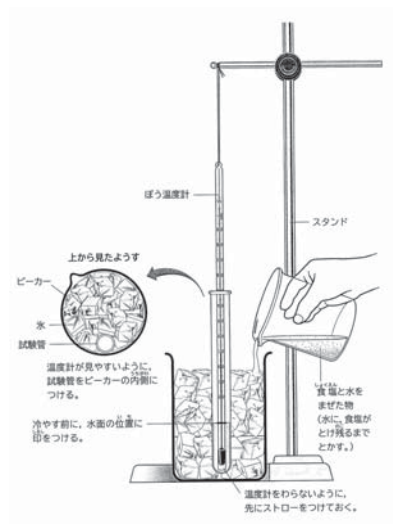


図1 教科書記載の実験

<sup>(1)</sup> 福山市立大学教育学部児童教育学科

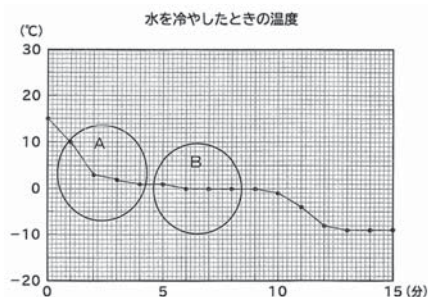


図2 実験結果を示すグラフ

グラフ(図2)では0℃近くまで冷やされてくると温度の下降が緩やかになり(A)、0℃ちょうどになった後、時間をかけて水が氷に変化していく様子(B)が示されている。Aの過程でグラフの勾配が緩やかになるのは、水の密度が最大になる温度(以下、最大密度温度と記す)が4℃であることの反映である。4℃まで冷やされた水はそれよりも低い温度の水よりも下降するから、4℃まで冷却した水が底の方に下降(対流)している間はなかなか底部の水温は下がっていかない。これは試験管を放置して静かに冷却すると得られる曲線である。

その一方で0℃まで冷却した水は静かに放置しておく限り、このグラフのように0℃ちょうどで、しばらく横ばいを保つという結果にはなり得ない。このようなスムーズな曲線を得るためには、過冷却現象を避けるために攪拌し続けることが必要だからである。

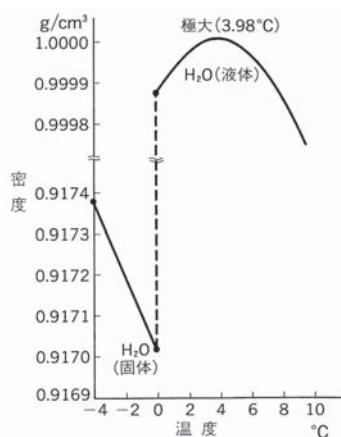


図3 H<sub>2</sub>Oの密度<sup>(6)</sup>

水の密度は約0.9 g/cm<sup>3</sup>で水よりも小さいが、氷分子の構造は水の中にまだ残っている。一方、熱運動の

ために温度が高くなるほど水の体積は大きく、密度は小さくなるので、そこだけを考慮すると0℃の水が最も高密度になるはずだが、氷の分子構造の残存により、4℃が密度のピークとなるのである。

真水の湖が水面から冷えるときに水温4℃以上では、冷えた表面の水は重いので次々と沈んで深い水と入れ替わり、対流する。湖の水温がすべて4℃になると対流は止まり、さらに冷えた表面水は水中の4℃の水より軽くて沈まないでそのまま表面だけ冷える。表面が0℃に達してさらに冷やされると表面に薄氷が張り、あとは次第に氷が厚くなっていくという過程が再現されていることになる。

したがって、冬季に氷点下の寒気にさらされた湖水でも、水が4℃まではそれよりも低い水温の水の下へともぐりこみ、鉛直方向の対流が生まれ、表面が0℃になって氷が張っても、氷の下で魚が生息することができる。

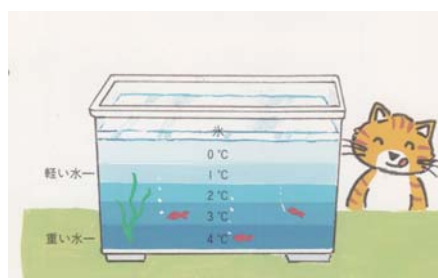


図4 水の下の様子<sup>(7)</sup>

図1に示した教科書の実験では、試験管中の上部と下部で温度に差が生じており、局所的に過冷却が起こって、まずこの部分の過冷却が破れて氷結晶が生じてから凍結が全体へと波及する。実際にどこからどのように凍っていくものなのか、試験管の実験だけでは子どもたちにも教員側にも割り切れなさが残る問題である。ここで念のために過冷却について簡単に触れておこう。

過冷却とは本来ならば固体へと状態変化するはずの凝固点より低い温度でも液体を維持している現象をいう。<sup>(8)</sup>

実際に真水を入れた試験管を、ドライアイスを入れた箱の中にぶら下げる形にして周囲から静かに冷却する実験を行ってみると、温度を計測すると図5のようなグラフになるのが普通で、過冷却を経てから氷へと

変化する。その際に状態変化に伴う凝結熱を放出するために温度が0℃まで上昇するのである。

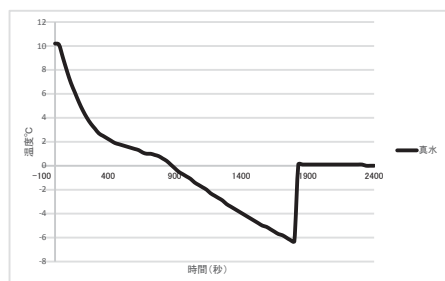


図5 静かに冷却した真水の温度変化

本研究では、試験管より容量の大きいプラスチック製の容器を使用して冷却する実験を行い、経時的な温度変化を詳しく測定ことによって、水の最大密度温度が明らかにできないかという問題意識を背景にして、まずこれを実験的に確かめることを第一の目的とする。

さらに、同じ実験を通して、水が実際に凍り始めるときに過冷却がどの部分から起こって、全体に波及していくのかを温度曲線から推定し、検証することを第二の目的とする。

水の最大密度温度が4℃であることは、小学校の理科教育の中では通常触れない項目であるが、まさに水特有の性質こそが、地球環境が生命を維持している大きな要因になっているから、たとえ小学校であっても教える側は基本的な知識として必ず正しく理解していなければならない。その点、教える側の水の特性に関する知識や理解が不足していることは否めない。

教員の講習会におけるインタビューや、教員養成系大学の学生を対象に質問紙調査をする機会を得て、水の密度が最大になる温度を問うたところ、化学を学んできた現職の高等学校理科教員を除くと、ほぼ皆無という状態であった。水の最大密度が4℃であることによって池や湖の水は表面から凍っても、氷の下には0℃よりも暖かい水が存在することが可能となり、生態系が維持されるのである。これは理科の学習にとどまらず、広く環境を扱う総合学習などの指導の際においても基本となる知識である。<sup>(9)</sup>

本稿では後述するように、試験管ではなくプラスチック製品を使用して、種々の実験を行い、水の冷却過程について考察する。そのねらいは、温度計測の結果を示すことにより、予想される児童の質問に対して教

員に正しく指導をしてもらいたいということ、さらに試験管よりも大きい容器を使うことで池や湖の水がどのようにして凍っていくのか、小型の簡単な装置で自然現象の一端を再現できるということを示したいということである。

従来の研究を見渡すと、工学的な見地から過冷却現象をあつかった研究は多いが、教育実験として扱ったものは少ない。最近になって微水滴のどの部分が過冷却になるのか最先端の機器を使用して解明を試みた研究がある。過冷却という現象自体は興味を引くものだが、こうした基礎研究は短時間で実益に結びつかないこともあり、今回のような簡単な装置で行う素朴な実験例が少ないと推察される。<sup>(10)</sup>

## 2 実験方法

### 2-1 使用する容器と水の量

容器は市販の廉価なプラスチック製のものを使用する。これは水が氷に変化する際に約9%の膨張を伴うため、ガラス製容器では破損を避けることができないためである。実際に試験管に10mLの真水を入れて-20℃のフリーザーで冷却すると約2割が破壊される。また図6に示す種々のプラスチック製容器はその若干の伸縮性のために膨張に耐える場合が多いだけではなく、切断などの加工が容易で実験装置をアレンジできるという利点を持っている。



図6

左からA：プラスチック製ビーカー、B：ポリバケツ、C：ポリエチレン製円筒型容器（上部を切断したもの）、D：PET製円筒型容器

A：プラスチック製ビーカー

上端直径12cm、下端直径9.5cm、高さ15cm：1270mL

B：ポリバケツ

上端直径18cm、下端直径13cm、高14cm：1235mL

C : ポリエチレン製円筒型容器  
直径6.0cm, 高さ15.5cm : 435mL  
D : P E T 製円筒型容器  
直径5.7cm, 高さ15.5cm : 370mL

## 2-2 冷却装置

冷却手段として使用したのは、市販のスターリングエンジン搭載の小型フリーザーである。(図7)

これは $-40^{\circ}\text{C}$ まで $1^{\circ}\text{C}$ おきに任意で温度設定ができる仕様になっている。(ツインバード社製 ディープフリーザーDF25)



図7 ディープフリーザー

## 2-3 温度計測装置

今回の実験では1秒間隔で16000個のデータ(約4時間)を連続記録することができるデジタル温度計を使用した。(T & D社製おんどりJr. : TR52i)

さらに、容器内の多点で同時に温度変化を把握するために、5個のセンサーを等間隔で竹の棒に固定して多チャンネルの計測装置を自作した。(図8)



図8 5チャンネル仕様のセンサー部

## 2-4 計測ポイント

前述の研究目的で触れたように鉛直方向の温度分布を知るために3cm間隔でセンサー部を固定し、5点(表記上、表面、中上部、中央部、中下部、底部とす

る)での計測の場合には全てのセンサーを使用し、3点の場合には下半部の3つのセンサー部を使用する。(図9)

また温度の水平分布を調べるために容器の中心と壁側にセンサーを垂直に固定するものとした。同時に5つの軸方向で計測する際には、便宜上地図上の位置に見立てて、Oを中心軸として手前をS軸、奥側をN軸、左側をW軸、右側をE軸と表現した。これは装置の置かれた方角(東西南北)と一致させているわけではなく、便宜的なものである。



図9 プラスチック製ビーカーで測定

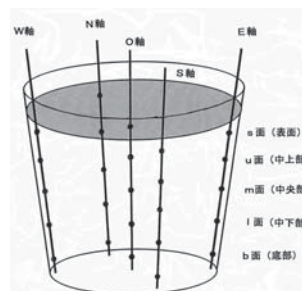


図10 温度センサーの位置(温度測定点)

## 3 実験結果

3-1 プラスチック製ビーカー(合計25点での計測を行った場合)

3-1-1 (1回目)

O軸における温度変化

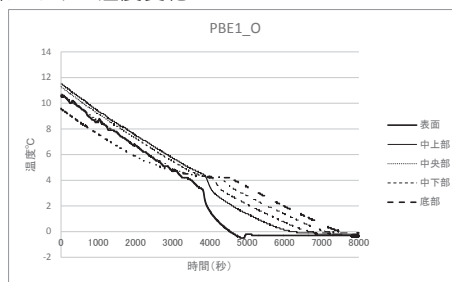


図11

### N 軸における温度変化

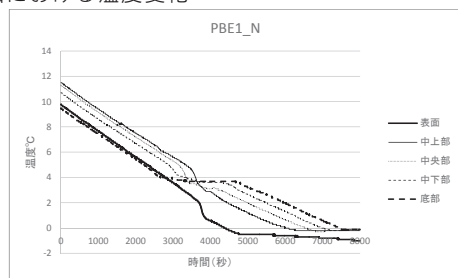


図 12

### E 軸における温度変化

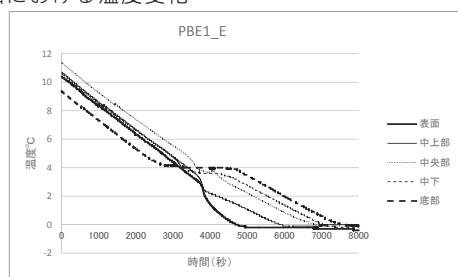


図 13

### S 軸における温度変化

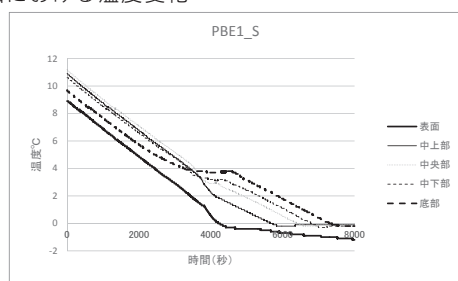


図 14

### W 軸における温度変化

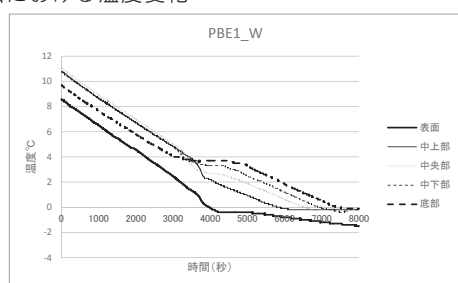


図 15

結果：①この実験から表層部の中心部部分が過冷却となりこれが破れて氷が生じて全体へと広がっていたと推定される。②表面は寒気に直接触れることにより、

それより下位の中上部よりも低い温度を示す。③4℃まで冷却したところで温度の鉛直分布は高低が逆になっており、これは予想通りの結果である。

### 3-1-2 (2回目)

#### O 軸における温度変化

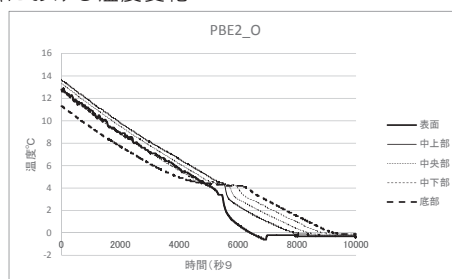


図 16

#### N 軸における温度変化

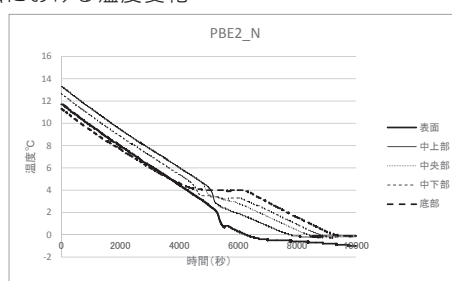


図 17

#### E 軸における温度変化

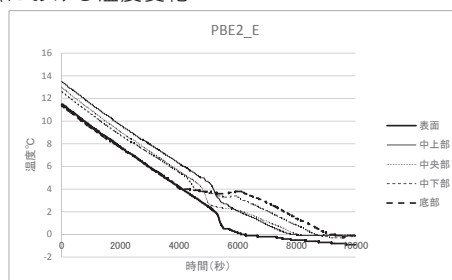


図 18

### S 軸における温度変化

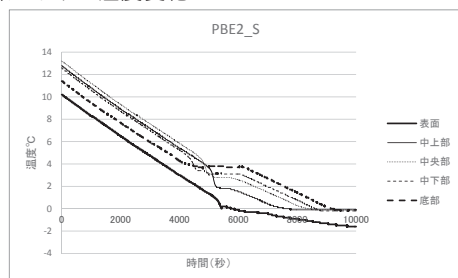


図 19

### O 軸における温度変化

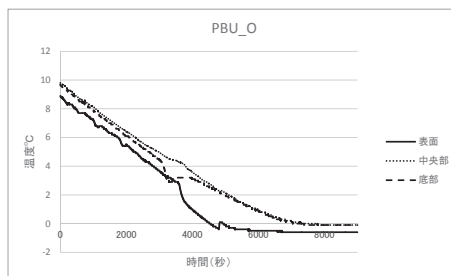


図 22

### W 軸における温度変化

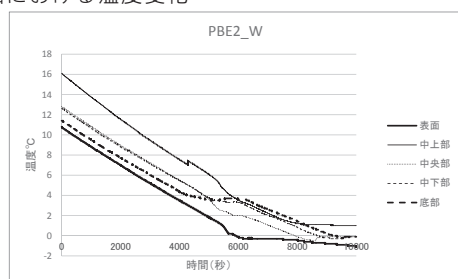


図 20

### N 軸における温度変化

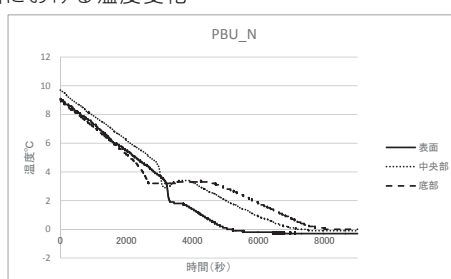


図 23

結果：1 回目と違うのは、過冷却になって破れる状態を示す温度上昇する時刻が分散している点である。過冷却が破れることを示した部分のグラフを抽出してみると、以下ようになる。（図21）

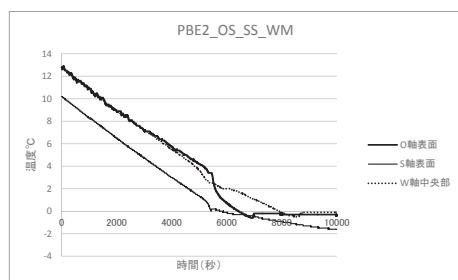


図 21 過冷却が現れた 3 点を比較したグラフ

### 3-2 ポリバケツ型容器（合計15点での温度計測を行った場合）

5 つの軸でそれぞれ表面、中央部、底部の 3 つの深さで温度を計測した。

### E 軸における温度変化

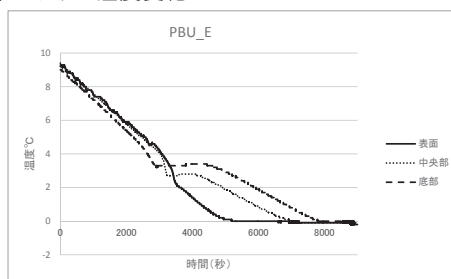


図 24

### S 軸における温度変化

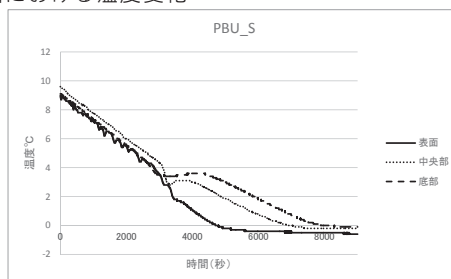


図 25

## W 軸における温度変化

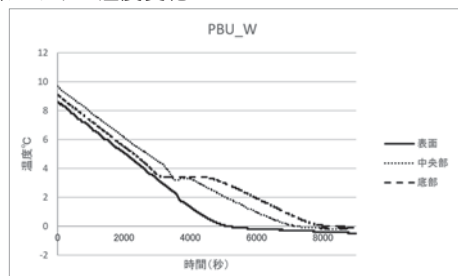


図26

結果：3-1のプラスチックビーカーのときと同様，表層部の中心から凍結が始まり，そこから全体へと波及していったと推定される。



図27 (ポリバケツでの実験の様子)

## 3-3 円筒型ボトル型容器 (合計25点計測を行った場合)

## O 軸における温度変化

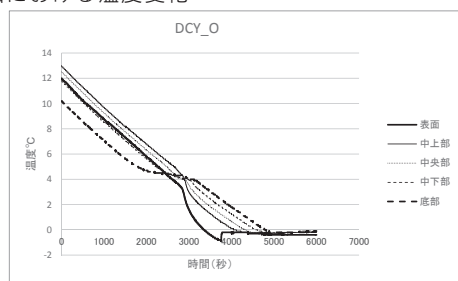


図28

## N 軸における温度変化

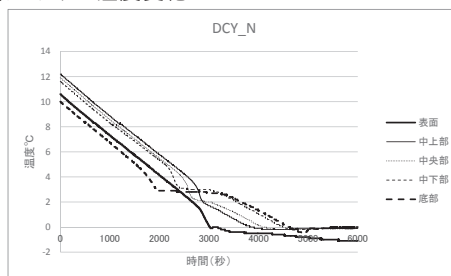


図29

## E 軸における温度変化

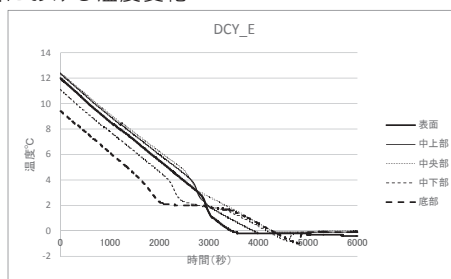


図30

## S 軸における温度変化

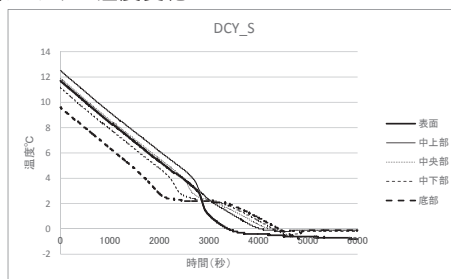


図31

## W 軸における温度変化

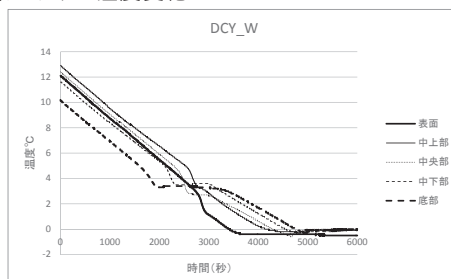


図32

結果：この実験では違う時刻に2か所でパラパラに過冷却が破れている。その2か所での温度変化は以下のようなになる。



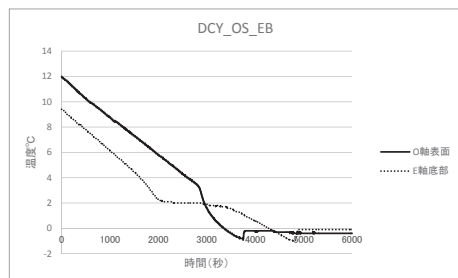


図33 過冷却が現れた2か所を比較したグラフ

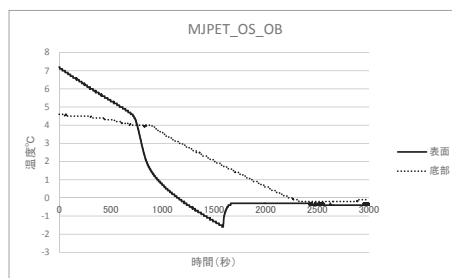


図36 表面と底部の比較

### 3-4 ボトル型容器（中心のO軸のみで、5点計測を行った場合

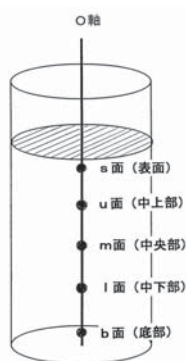


図34 (O軸の計測点)

#### O軸における温度変化

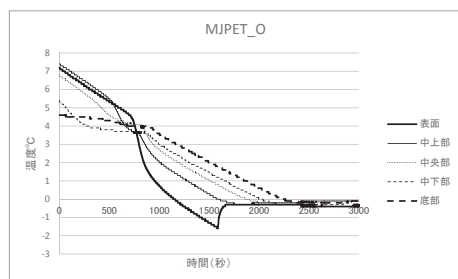


図35

結果：ボトルがバケツなどにくらべて小さい分，熱容量も少なくなり，短時間で冷却される。そのため，過冷却度も大きい部分が生じて，そこの過冷却状態が破れると一気に全体が凍っていくと推定される。

時間の経過とともに，表層部と底部の水温は4℃を境界にして逆転していることが明らかになった。（図36）

### 4 考察

(1) 水温が4℃よりも高い場合には表面から下位に向かって低くなるはずだが，表面の温度が中上部よりも低い値を示している。この原因は何だろうか。1つには寒気に直接触れていることにより1秒おきでの計測では鉛直方向の対流よりも早く反応することが考えられる。また使用しているセンサー内部で冷凍庫の冷氣による熱の移動があり，センサーが容器内の水温とセンサー内での熱伝導による冷熱の両方に対して反応しているということも考えられる。1つの軸において水深の違いから生まれる温度の鉛直方向の差異は，表面の温度を除く限り，きわめて安定な成層構造を示している。つまり4℃以上の場合には暖かい水が上に，冷たい水が下に存在していることになる。

(2) 過冷却現象は今回の実験装置を使った場合に限れば，表層部で起こることが多かった。だが，熱容量が大きくなるにつれて過冷却度は少ない傾向になることがグラフの比較から読み取れる。

(3) また水塊の全体が一気に過冷却になるのではなく，局所的に過冷却になったところで，まず水から氷への変化が生じ，その後氷結晶が広がっていくことが確認できる。最終的に全体が凍ることもあるし，いったん凍っても全体に行きわたらず，別の場所があらたに過冷却になりそこが凍るなど，瞬間的に氷が広がっていくわけではないことが判明した。これは同じ水深で水平方向の温度分布を測定することから判明したことである。温度分布水が氷へと状態変化する際に発生する潜熱（凝固熱）により，氷の温度は0℃近くになるが，いったん氷が生じて0℃になると，周囲の水温も上昇し，過冷却度が下がると考えられる。自然界との比較で考えても，湖水などのように全体の水の温度が一定でない場合と同様に，バケツ程度の大きさの容



器でも全体が均一の温度にはなりにくい。したがって、ある部分が過冷却を経て凍結し、別の部分は過冷却が維持していて時を経て凍るということになる。実際に試験管で10mL程度の水を冷却した場合でも、過冷却度がわずかであれば、一部だけが凍って液体部分が残ることが確認されているが、同じことが大きな容器ではより起こりやすく、いったん一部が凍り始めても、その際に吐き出される潜熱によって0℃近くまで水温が上昇し、ふたたび0℃からさがって新たな過冷却が生じていると予想される。

(4) だが過冷却がどこから起こるかについて、このような室内実験で特定できるのだろうか？冷却する機材は小型のもので、側面からの距離など、均一に冷却しているのか疑問が残る。これを今回の実験結果とどう対応させられるかは、実際には非常に困難だが、解明のためには冷凍庫内部の温度分布について考察する余地がある。その点、研究所や科学館に設置された低温実験室の中で容器全体を一樣に冷却していく実験を行うことが望ましい。

## 5 結論と課題

(1) プラスチック製の容器を使用することによって、水の氷への体積変化に伴う圧力で容器の破損を避けることができる。これを使用して、水を冷却する過程での水温の経時的変化を1秒間隔で明らかにすることによって、温度の鉛直分布を明らかにした。水深の違いによって温度に対応した密度の差による分布が明示され、水の最大密度温度が4℃であることが証明できた。これまで、比重計を使って密度を計測する例はあったが、今回のように容器内に多数の測定ポイントを決めて、水温変化を調べることで、比較的容易に数値を導くことができることがわかった。

(2) 過冷却現象について、試験管よりも容量の大きい大きな容器を使用した結果、過冷却が起こるのが局所的な1つの点で、そこから容器に満たされた全体が一気に凍結するわけではないということが確認できた。水の容量が大きければ、過冷却になるのはごく一部で、そこで過冷却が維持できなくなると氷へと変化する。だがその際の潜熱の発生により、過冷却は解消される。したがって、大きな容量の水塊が最終的に凍結する際には、複数の場所がそれぞれ独立したタイミングで凍っていくことが判明した。

(3) 教室で行う実験として扱うには、今回使用した機器は高価なため、実現は困難であろう。より手軽な実験として発展させるために、教室に常備されている棒状温度計を使用して、冷凍庫以外に蓄冷剤などを活用した冷却実験も試してみたが、十分な結果は残せなかった。今後も簡単な方法の開発を目指して、同様の実験を継続し、教材化に向けて再検討していきたい。

## 謝辞

本研究の遂行にあたり、予備実験を行うために旭川市立科学館の低温実験室および北海道立オホーツク流水科学センターの低温展示室を使用させていただいた。ここに記して関係者の皆様に感謝の意を表したい。

(本稿で紹介した実験の遂行にあたり、2016年度重点研究費の一部を活用しました。)

## 引用・参考文献

- 1) 啓林館、2015：わくわく理科4（平成27年度用小学校教科書）
- 2) 啓林館、2012：わくわく理科4（平成24年度用小学校教科書）
- 3) 東京書籍、2015：新編新しい理科4（平成27年度用小学校教科書）
- 4) 東京書籍、2015：新しい理科4教師用指導書資料編
- 5) 平松和彦、2015：試験管で水の凍結を観察する実験、福山市立大学教育学部研究紀要、N0.4、pp.85-92、147pp.
- 6) 上野英一ほか、1999：化学の小事典、360pp. 岩波書店
- 7) 青田昌秋、1993：白い海、凍る海 オホーツク海のふしぎ、62pp. 東海大学出版会
- 8) 吉村壽次（編）、2009：化学辞典第2版、p.304、森北出版
- 9) 吉野輝雄、2016：水の性質と役割、文部科学省  
[http://www.mext.go.jp/b\\_menu/shingi/gijyutu/gijyutu0/shiryo/attach/1331537.htm](http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu0/shiryo/attach/1331537.htm)（2016年9月7日閲覧）
- 10) 田中澤、守田克彰、守裕也、福島直哉、山本誠、2016：Dual-Luminescent Imagingを用いた過冷却水の温度計測、雪氷研究大会（2016・名古屋）講演要旨集、p.122、322pp.
- 11) 上羽牧夫編、2002：結晶成長のしくみを探る、共立出版、166pp.

- 12) 平松和彦, 2008 : 過冷却水の凍結実験, 理科の探検, 2  
月号, pp. 7-9
- 13) 吉本直弘, 川島啓司, 2013 : 水の凍結実験において過冷  
却を抑制する工夫, 日本理科教育学会第63回全国大会論  
文集, p. 198, 510pp.
- 14) 前野紀一, 平松和彦, 1999 : 「一瞬で水が凍る!?', 化  
学Vol. 54, No. 11, pp. 39-40, 隸化学同人
- 15) 日本雪氷学会編, 2005 : 雪と氷の事典, pp. 272-273,  
735pp. 朝倉書店
- 16) 平松和彦, 2016 : 過冷却とは何ですか?, 雪と氷の疑問  
60, pp42-45, 186pp. 成山堂
- 17) 青田昌秋, 2013 : 流水の世界, 158pp. 成山堂
- 18) 河村公隆 (編) 2016 : 低温環境の科学事典, 411pp. 朝  
倉書店

(2016年10月24日受稿, 2016年11月18日受理)