

4℃前後における水の対流モデル

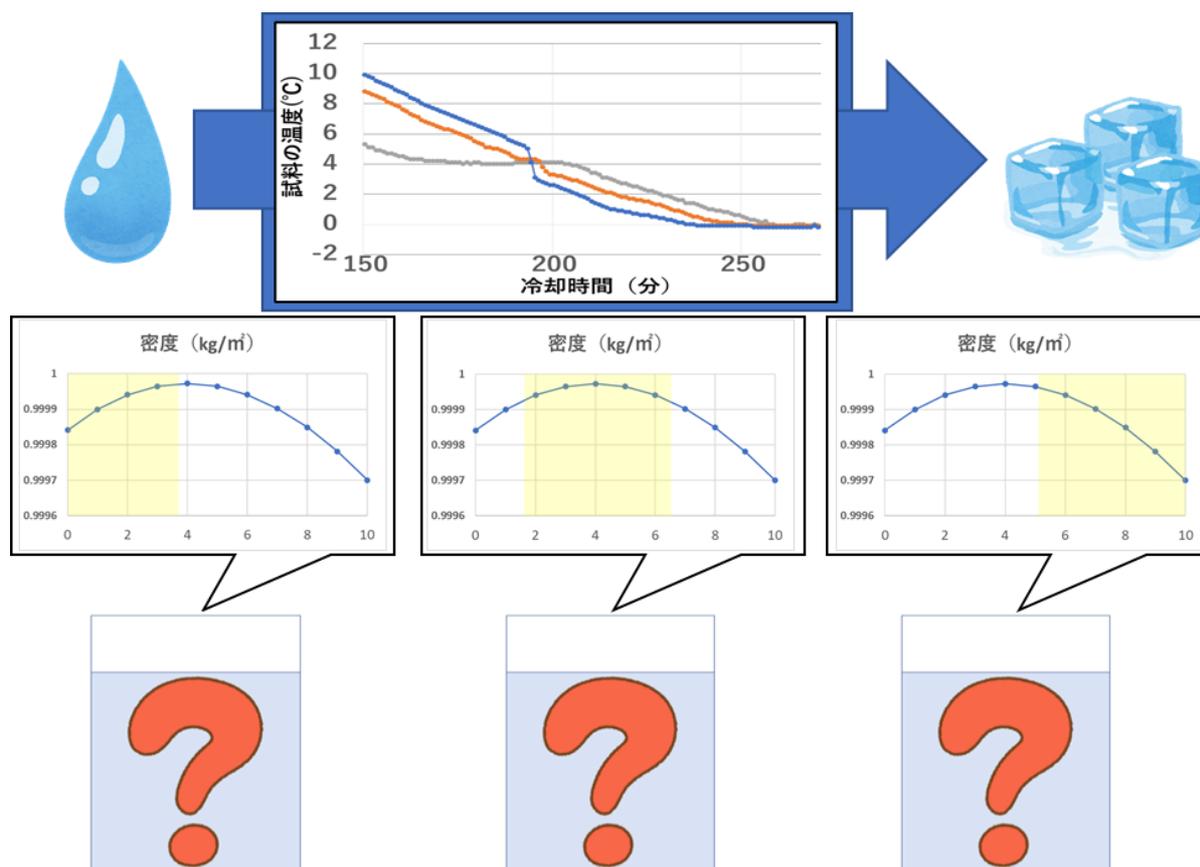
大阪府立天王寺高等学校

松永絢也子・柿花官志・鎌井愛子・川井等之

指導教員:尾崎祐介

研究概要

わたしたち天王寺高等学校化学研究部は昨年度、水の冷却実験をした際に、教科書の記述とは異なり、水の冷却曲線が4℃で折れ曲がることを発見した。この4℃での折れ曲がりには、密度が4℃において最大になるという水の特異性が関わっていると考えられる。しかし、十分なデータが揃っていないために、その関連性を裏付ける根拠はなく、詳細な考察をするには至らなかった。そこで今回、わたしたちは試料内の高さの異なる3地点に温度計を設置し、同時に温度測定することで、試料全体の温度変化の様子を解明することをめざした。その結果、試料の温度分布が層状になっていること、また、4℃前後で試料内の温度分布が上下で逆転することが分かった。また、その結果から冷却時の水の対流モデルを考案し、水の冷却時における4℃前後の現象について説明を試みた。



1. 背景と目的

わたしたち天王寺高校化学研究部は昨年度、水冷却曲線が教科書の記述とは異なり 4℃において折れ曲がることを発見した(参考文献1)。水冷却曲線の4℃における折れ曲がり、密度が4℃において最大になるという水の特異性が関係していると予想できるが、それを確実に裏付けるデータを得るには至らなかった。今回、わたしたちは冷却中の水試料の温度分布がどのように変化しているかを明らかにすることで、冷却時の水の対流モデルの作成をめざした。

2. 方法

水の冷却には様々な要素が関係している。そのため、再現性のある冷却を行うためにはそれらの要素の制御が必要である。そこで、表1のように冷却に関する要素を制御して冷却実験を行った。水試料はイオン交換水を800 mL用い、水試料を表1の方法で下準備し、冷蔵庫(富士フィルム和光純薬株式会社 Medifridge メディカルフリーザー)に入れ-10℃の環境で冷却した。温度計は図1の様に容器の中心から等距離になるように3か所設置し、上層・中層・下層の3地点の温度変化を同時に測定した。

表1. 各要素と制御方法

	要素	制御方法
i	溶質	不純物を含まないイオン交換水を水試料として用いた。
ii	試料の量	外部からの影響を抑えるため、大容量(800 mL)の水試料を用いた。
iii	溶存気体	試料を加熱することで溶存気体を除いた。
iv	試料内の温度むら	温度むらを小さくするため、40℃に設定したウォーターバス内で試料を20分以上静置した。試料内の温度むらを0.2℃以内にそろえた。
v	蒸発	蓋をして蒸発を防いだ。

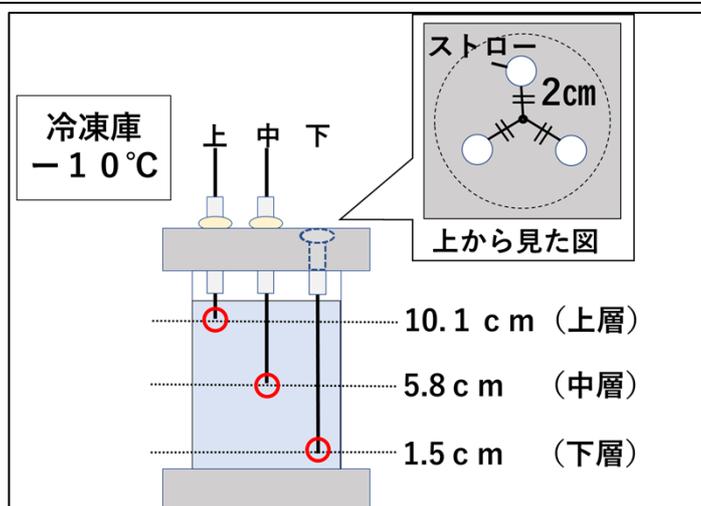


図1. 実験装置

- 容器の下に断熱材を敷き、冷蔵庫底の金属部分に容器が直接触れないようにした。
- 容器の上下で断熱材の有無による差が生じるのを防ぐため、容器の上も断熱材で蓋をした。
- 安定した冷却を行うため、冷蔵庫を設定上限温度の-10℃に設定し、冷却速度を小さくした。
- 3つの温度センサーについて、中層のセンサーの感温部を試料の高さの半分の位置に配置し、上層と下層のセンサーの感温部は中層のセンサーに関して対称になるように配置した。

3. 結果

測定結果は図2のようになった。冷却時間を(1)4°C以上の区間、(2)4°Cの水が存在する区間、(3)4°C以下の区間の3つに区切ると、各区間で以下のことが読み取れた。

(1)4°C以上の区間

- ・冷却開始直後の上層・中層・下層の温度むらは0.2°C以内であった。しかし、時間の経過に伴い、試料の温度は上層ほど高く、下層ほど低くなり、温度分布が層状に変化した。

(2)試料内に4°Cの水が存在する区間

- ・下層において、4°Cちょうどで温度の停滞が見られ、最長10分持続した。
- ・上層において、(1)の4°C以上の区間では、3回とも2分間で0.2~0.3°Cのほぼ一定の速度で温度が低下していた。それに対し、(2)の4°Cの水が存在する区間では、2分間で最大で5.1°Cから2.8°Cと、2.3°Cも温度が低下するような温度低下の速度が急激に増加する部分がみられた。

(3)4°C以下の区間

- ・試料の温度は下層ほど高く、上層ほど低くなり、(1)の区間とは温度分布が逆転した。

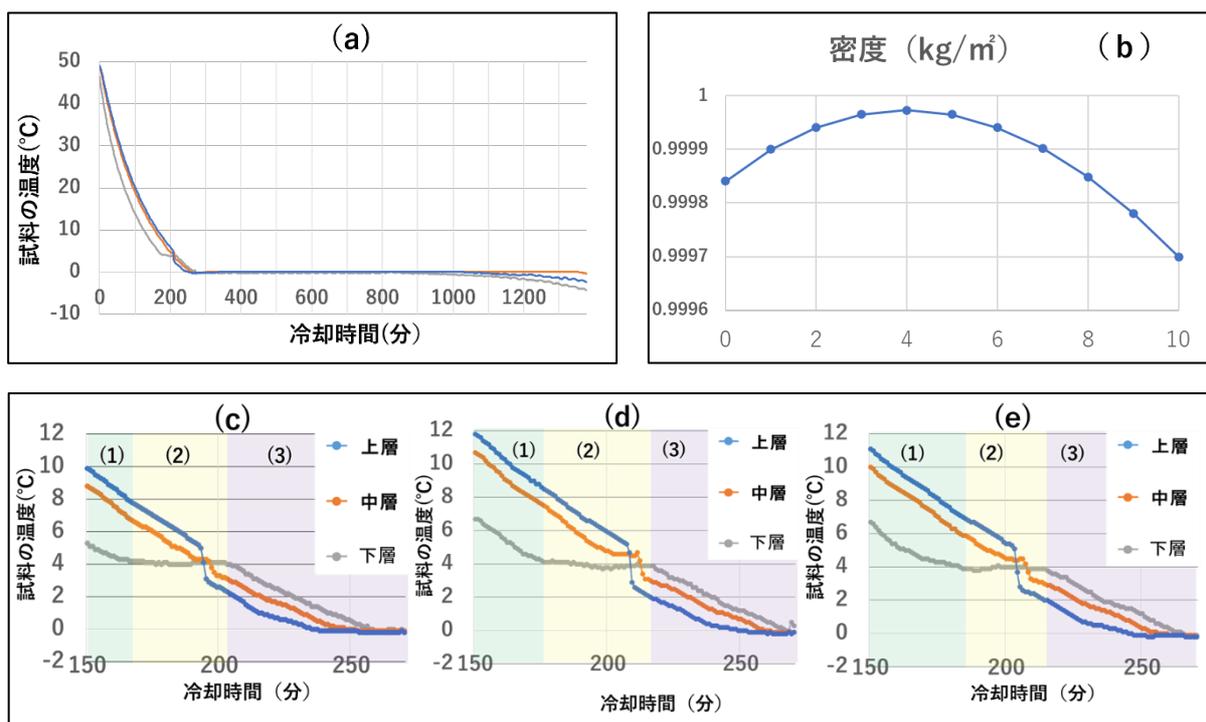


図2. (a)冷却曲線の全体図 (b)水の温度と密度の関係

(c)~(e)3回の実験の4°C付近拡大図

3回とも同様の結果を示し、再現性のある実験をおこなうことができた。

4. 考察

実験の結果から、わたしたちは図3のような対流モデルを考案した。はじめは上中下の全ての層で温度が等しいが、冷却に伴い温度による密度差が生じ、上層に温度が高い水が、下層に温度が低い水が溜まり温度分布が層状になる ((1)の区間)。そして冷却が進み、4°C付近に達すると、水の密度は4°Cで最大となるので、試料内に4°Cの水が存在する間、下層に4°Cの水が溜まり、下層の冷却曲線の4°Cでの停滞が見られたといえる。また同じ頃上層では4°C以上の密度が小さい水が分布している。下層の4°Cの水がさらに冷やされて4°C以下になると密度が小さくなり、上層へと流れ込むため、それに伴い上層では急激な温度低下が見られたと考えられる。また、下層の4°C以下の冷たい水の上層への流れ込みにより、上層に温度が低い水が、下層に温度が高い水が存在することになり(1)の区間のときとは逆の温度分布になると考えられる ((3)の区間)。

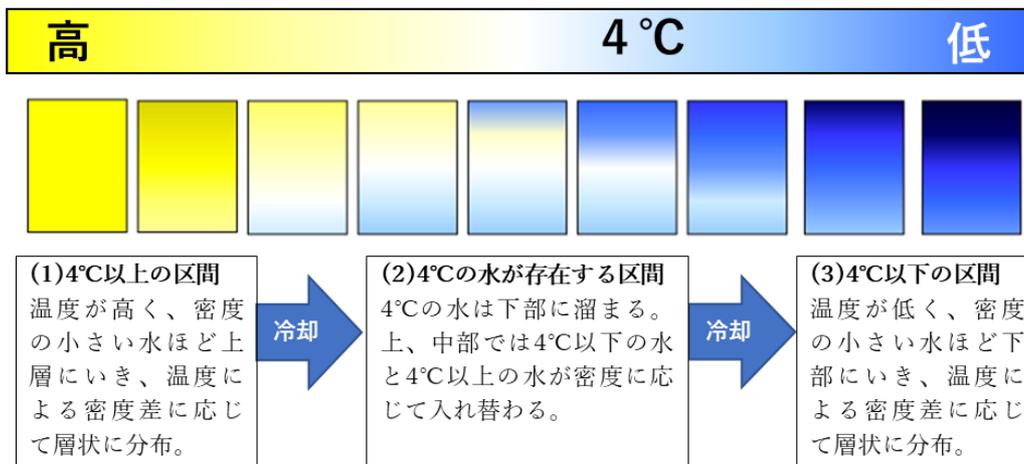


図3. 冷却時の対流モデル

5. 追加実験

冷却実験を受け、私たちは、0°C近くの水を温めた場合にも、同様のことが言えるのではないかと考えた。そこで、0°C近くまで冷やした800mLのイオン交換水を、10°Cに設定した恒温機(三菱エンジニアリング株式会社の小型恒温機)で加熱して実験を行った。

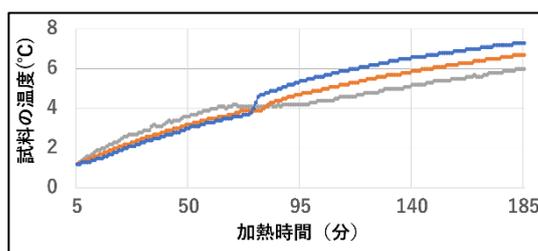


図4. 加熱時の試料の温度変化
試料を加熱した時も、冷却時と同様に温度分布が層状になることと、4°C付近で温度分布の逆転がみられた。このことから、冷却時と加熱時で可逆性があることが確認できた。

6. まとめ

わたしたちは昨年度、水冷却曲線が教科書の記述と異なり4°Cで折れ曲がることを発見したが、なぜ折れ曲がるかについては十分なデータがないため詳細な考察をするには至らなかった。そこで、わたしたちは、高さを変えて試料内の3地点に温度計を設置して同時に温度測定する手法を試みた。結果、試料の冷却時に水試料の温度分布が層状になることと、4°Cを境に温度分布が上下で逆転することがわかり、冷却過程における詳細な対流モデルを作成することに成功した。

7. 参考資料

1) 「4°Cでの冷却曲線の折れ曲がり」(大阪府立天王寺高等学校 化学研究部 2020年8月)