

中華民國第 61 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國中組 物理科

030115

「凝」記在心

學校名稱：桃園市立建國國民中學

| | |
|---|------------------|
| 作者： 國三 謝念祖 國三 蔡玉琳 國三 劉宇安 | 指導老師： 莊健暉 |
|---|------------------|

關鍵詞：凝固、冰芯、成核現象

摘要

生活中的常見冰，大多具有冰芯結構，偶然之下，發現冰芯旁出現無數條放射狀微細空氣柱。本研究藉由文獻資料探討冰芯與微細空氣柱之成因，其與水溶液凝固時冰晶網狀結構、凝固點變化、與固液介面上氣體成核現象有關。並進行實驗設計探討不同容器、水溶液與環境控制對於冰芯與微細空氣柱之影響。發現熱導率低之容器，溶液內降溫速度較不穩定，使得空氣成核有中斷現象，形成具方向性、斷裂的微細空氣柱。水溶液中的真溶液與膠體溶液 TDS 值越小，會形成微細空氣柱；TDS 值越大，冰芯體積越大，空氣成核較少。在環境控制下，冰芯會沿著牆壁夾角角平分線偏移，且角度越大，偏離容器中心越多。冰芯結構之美，可藉由容器、水溶液種類、冷凍環境來進行控制。

壹、研究動機

七年級園遊會班上賣分層飲料，在結束時發現蝶豆花水沒有用完，有同學將剩下的蝶豆花水又加了不少水稀釋後，放入冰箱冰起來，隔天發現蝶豆花冰它並不是整塊冰都是紫藍色的，而是瓶子外圍大部分是透明的冰，中間還有一條長長的深紫色色素柱，色素柱的外圍還有很多條細細的，並向中間色素柱集中的放射狀微細空氣柱，那畫面令人印象深刻也覺得很有趣。到國二時，理化課教到水溶液與水的三態變化，老師提到水溶液的凝固點下降與溶質有關。我們提起七年級蝶豆花冰的狀況，老師鼓勵我們去搜尋文獻資料了解冰芯與微細空氣柱的成因是什麼，進而去設計實驗來探討有哪些因素會影響到冰芯與細微空氣柱的生成。便開啟這趟「凝」記在心之旅。

貳、研究目的

- 一、藉由文獻資料查詢，探討冰芯與微細空氣柱的形成原因。
- 二、實際觀測水溶液冰芯與微細空氣柱的形成經過。
- 三、探討容器對於冰芯與微細空氣柱的影響。
- 四、探討水溶液對於冰芯與微細空氣柱的影響。
- 五、探討環境控制對於冰芯與微細空氣柱的影響。

參、文獻探討

一、冰芯

(一) 水的凝固與結晶

凝固是指在溫度降低時，物質由液態變為固態的過程，物質凝固時的溫度稱為凝固點。許多液體在凝固時會結晶，形成晶體的固體。結晶的過程是一階的熱力學相變化，在液態固態共存的期間，系統的平衡溫度不變，等於凝固點。結晶主要包括二個現象：成核和晶體生長。成核是指分子開始聚集形成晶核，在奈米尺度已定義的週期形式排列，其排列方式決定了晶體結構。晶體生長就是晶體持續的變大，最後到達晶核的臨界大小。[1]

水的密度異常是由於低溫下的「氫鍵網狀結構擴張」所造成的，所謂氫鍵指的是水分子之間微弱的作用力。冰的結構是一種立體的網狀結構，由於其間隙多所以造成冰的密度比水

來得小。濱口宏夫所領軍的交大團隊在研究中證明這樣的網狀結構擴張是因為奈米冰(Nano-ice)的產生所導致的。因為生成了懸浮於水中的奈米冰，也抑制了原本該增加的液態水密度，因此最終表現出水於 4°C 時密度最大的異常行為。奈米冰於溫度低於 10°C 時開始生成，因此低於 10°C 的水嚴格來說不能視為純液體。[2]

當水中含有電解質離子、有機分子、色素或部分溶於水的氣體(統稱雜質)時，由於水在結冰的過程中，水分子形成冰晶結構時，冰晶內部及冰晶與冰晶之間呈現間格空隙，水分子因作規則排列而將其他物質趕出。在英文中 Cloudy Ice(多雲的冰)就在形容此含有雜質的冰。[3]

(二) 水溶液的凝固點

依拉午耳定律可知，與純溶劑中加入非揮發性溶液時，會使得蒸氣壓下降，溶液的蒸氣壓會低於純溶劑的蒸氣壓，當溫度降到純溶劑的凝固點時，由於溶液的蒸氣壓未達當時的大氣壓力，因此溶液必須降至比純溶劑更低的溫度才會凝固，此現象稱為凝固點下降(圖 1)。

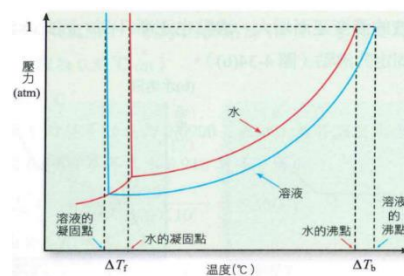


圖 1 純水與水溶液的相圖[4]

將非揮發性、非電解質溶質加入溶劑中，稀薄溶液的凝固點下降度數與溶質的重量莫耳濃度成正比。[4]

依數性 (Colligative Property) 是指溶液所具有的一類性質，這類性質只取決於溶質在溶劑中的「粒子」數量，而與溶質的本性無關。溶液的依數性包括：溶劑蒸氣壓的降低導致溶液凝固點下降、沸點上升和滲透壓改變等性質。通過測量稀的非離子水溶液（例如尿素或葡萄糖的水溶液）中的依數性，可以求得溶質的相對分子質量的精確值。另外，測量離子溶液的依數性則可以估計溶質電離的百分比。[5]

綜合上述可知，水溶液中的溶質粒子數量多寡會因具依數性，使得溶液凝固點下降。於一大氣壓下，將水溶液降溫，當溫度逐漸下降，愈來愈多的水凝固成冰，水溶液的濃度逐漸增大，凝固點則逐步下降，因此水溶液沒有固定的凝固點。水溶液在凝固過程中，溫度低於 10°C 時，水中的奈米冰開始生成，使得冰晶結構形成立體的網狀結構，將溶質推擠到尚未結冰的區域，且因各部分結冰速率的差異，形成各種形狀的冰芯。

二、水溶液內氣體成核現象[6]

氣體在固體中的溶解度遠小於在液體中的溶解度。所以含有氣體的溶液在固化過程中，前進中的固體介面 (muzzy zone) 會排擠出氣體到溶液中，使固液介面上溶液中的氣體濃度增加。當固液介面上溶液中的氣體濃度達到氣體的飽和濃度，並滿足一定的過飽和狀態，此時會成核而產生氣孔，然後陷入固體中並愈來愈大(圖 2)。

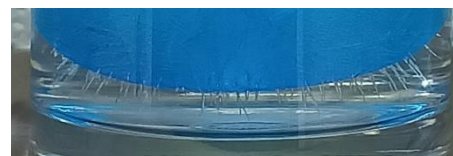


圖 2 固液介面氣體成核

水結成冰會成不透明即是因為水在結冰的同時持續的吸溶氣體，因此冰中會有氣孔的產生，而冰塊中的這些氣孔就會使我們在看冰塊時覺得那是不透明的。當濃度提高到過飽和狀態為 30 倍的臨界值時氣孔會出現在固液介面上。氣體在固體中的濃度 C_s 通常遠小於氣體在固液介面上液體的濃度 C_l (即 $C_s/C_l = k_p < 1$)，故結晶過程中，氣體會不斷地累積在移動的

液面介面上。

若考慮氣體濃度在分佈於固液兩相時氣孔產生的主要原因，那麼**如果氣體在液體中的濃度低於此液體在凝固點的標準濃度時，就不會產生氣孔**。另外還可推斷，氣孔為液體中的氣體（二氧化碳、氧氣）所構成，當然上述氣體是指未溶解於溶液中的。以去離子水煮沸後在大氣中冷卻，並使之結冰，依然存有很多的氣孔，尤其是到最後時。因此將水煮沸後再置於大氣中冷卻，接著使其降溫形成有方向性的結冰，就可觀察到介面氣孔的長成。

綜合上述可知，氣體在溶液為固態時的溶解度遠小於在液態溶液時的溶解度時，氣體成核會在固液介面產生，此處正是未溶解於溶液中之氣體排出處。氣體成核產生的氣泡就會導致固體氣孔的產生。若降溫形成有方向性的結冰，就可以觀察到介面氣孔的長成，也便是在冰中形成不規則線條的微細空氣柱成因(圖 3)。



圖 3 不規則線條的微細空氣柱

三、歷屆作品分析

(一)「冰炫風」-第 51 屆全國科展國中組物理科[7]

兩支容器以上的排列，有色冰柱皆向新的排列中心移動，且色柱最後結冰形狀並非圓柱狀，反而有點類似溜滑梯。上緣幾乎相連成排列的多邊形，有色冰柱的下部皆會和器壁分離形成透明帶(圖 4)。



圖 4 有色冰柱往排列中心集中[7]

(二)「被冰封的漩渦流-探討放熱式漩渦的氣體逃逸路線」-第 58 屆全國科展國中組物理科[8]

1. 加入鹽巴溶質(濃度 6.25%)，降低水體凝固點的情況下，冰心與微細空氣柱消失，破壞了放熱式漩渦形成的條件。
2. 將透明容器靠近在一起的藍心會向中間集中，三個靠近的會變成一個大水體，藍心也會集中。

(三)「色藏冰芯-探討水結冰之純化作用」-第 59 屆全國科展國中組物理科[3]

1. 加入色素後自來水的結冰情形和沒加色素的自然結冰冰塊結果相似，而中間的藍芯略粗，是因為此冰塊比自然冰多添加了色素所造成。蒸餾水加入色素時，藍色冰芯比自來水加入色素結冰顯得較細瘦，而在添加相同的色素下，上半部的區域顏色較深。
2. 溶質如黑豆水或牛奶等水結冰過程，不易進行純化作用，而不易形成冰芯與奈米冰晶。
3. 因器壁材質與包覆產生的冷卻速率差異，的確會改變純化作用的強弱與方向。
4. 藍芯形狀大體上會與容器形狀相似具有重現性。

綜合以往三件作品我們已經得知因器壁材質與包覆產生的冷卻速率差異，會改變水凝固作用期間的強弱與方向。溶質與溶劑的不同對於冰芯與空氣成核的形成會有所影響。且三項作品均以透明 PET 容器為主要容器。因而我們想就「容器」、「溶質」、「環境控制」等三項變因對於冰芯與空氣成核形成的影響進行實驗設計與探討。並添購了桌上型冷凍展示冰箱，近距離觀察水溶液結冰過程的形成，有別於前三件作品在結冰的各時間點，取出離開冷凍環境拍照觀測。

肆、研究設備器材

一、冷凍系統 (如圖5)

1. A冷凍環境

瑞興45L桌上型冷凍展示冰箱(2019)，型號：RS-F5760。設定冷凍室溫度為 -20°C 度，冷凍溫度 $-16^{\circ}\text{C}\sim-21^{\circ}\text{C}$ (108/12/10每15分鐘使用冰箱溫度計與電子溫度顯示觀測冷凍庫溫度紀錄6小時)。

2. B冷凍環境

東元TECO-239L風冷式雙門冰箱(冷凍64L)，型號：R2551HS。設定冷凍室調節為強，冷凍溫度 $-16^{\circ}\text{C}\sim-20^{\circ}\text{C}$ (108/11/17每1小時使用冰箱溫度計觀測冷凍庫溫度紀錄4小時)。



A 冷凍環境



B 冷凍環境

圖 5

二、容器設備 (如圖6)

1. PET圓柱罐(使用原因：耐冷、耐酸鹼且易取得)

(1)材料性質[9][10]

耐熱溫度 $60\sim 180^{\circ}\text{C}$ ，耐冷 -70°C ，耐酸鹼、油性、高韌性、具有高透明度。

(2)材料規格

口徑5.5cm，高度12cm；口徑6.5cm，高度12cm；
口徑7.5cm，高度12cm；口徑10cm，高度12cm；
口徑8.5cm，高度15cm

2. 玻璃杯

(1)直圓柱杯：口徑6.5cm，高度12cm；口徑7.5cm，高度7cm

(2)截頂圓錐杯：口徑7cm、底部直徑4cm、高度7cm；
口徑8.5cm、底部直徑5.5cm、高度7cm

3. 鐵罐：口徑6.5cm，高度10cm

4. 鋁罐：口徑6.5cm，高度10cm

5. 紙杯(截頂圓錐)：口徑8.5cm，底部直徑6.5cm，高度9cm；
口徑6cm，底部直徑5cm，高度8cm



PET 圓柱罐



玻璃杯



紙杯

鋁罐

鐵罐

圖 6

三、溶質及溶劑

1. 溶劑：飲用水(兩道過濾系統-第一組纖維濾心、第二組活性炭濾心)、自來水。

2. 溶質：食用色素(食用藍色一號、食用紅色六號、食用黃色四號)、檸檬酸、小蘇打、鹽、鹽、一號砂糖、二號砂糖、低筋麵粉、蝶豆花水、咖啡、無糖豆漿、全脂牛奶等。



圓柱鐵桶

圓柱紙桶

圖 7

四、環境控制器材 (如圖 7)

1. 圓柱型鐵桶：口徑 15cm，高度 16cm

2. 圓柱型紙桶：口徑 18cm，高度 16cm

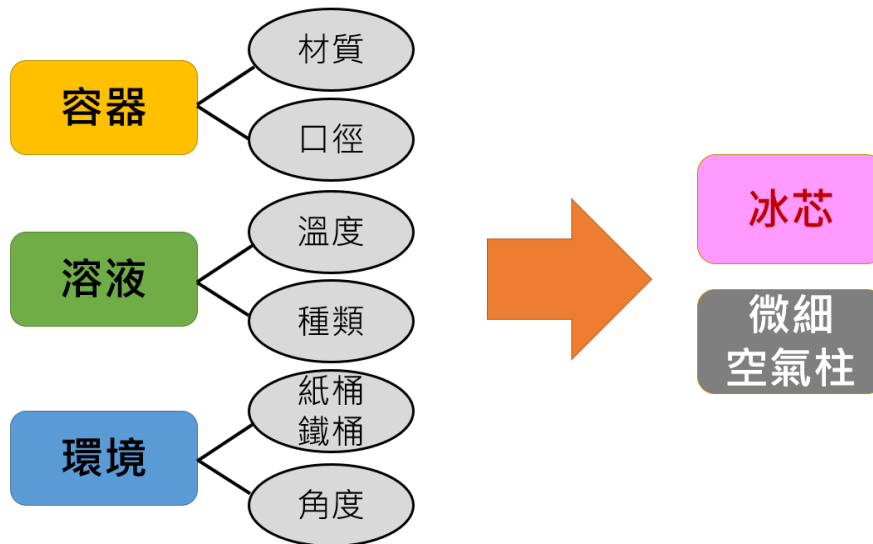
五、測量儀器

1. **影像處理軟體 ImageJ**：計算色塊面積、長度、角度。
2. **小米 TDS 水質檢測筆**：測量溶液的總溶解固體值(TDS)，指水中全部溶質的總量 (mg/L)，包括無機物和有機物兩者的含量。
3. **手機拍照功能**：1200 萬畫素。

六、其他：量筒、量杯、玻璃棒、**保鮮膜(材質 PVDC，耐熱度-60~140°C，透氣度低)**、橡皮筋、瓦楞紙板、冰箱溫度計(-30~50°C)、溫度計(0~100°C)、尺、濾紙、銅棒、鋅棒、碳棒等。

伍、研究方法與結果、討論

一、實驗設計



二、食用色素水溶液凝固時，冰芯與微細空氣柱的形成


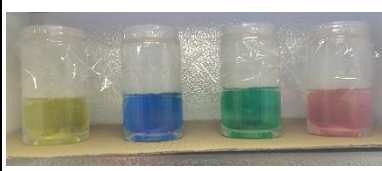

前置實驗

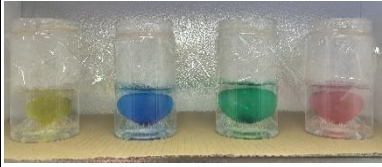
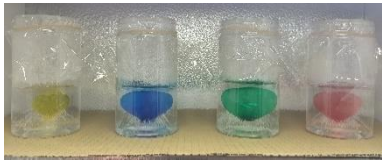
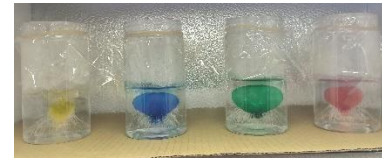
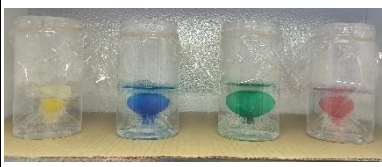
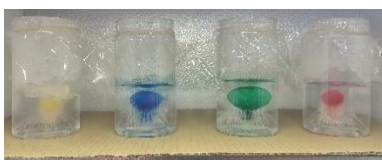
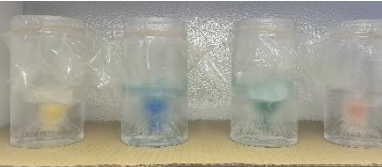
容器：PET 圓柱罐(口徑 6.5cm、高度 12cm)

溶劑：飲用水 150ml

溶質：食用藍色一號 1 滴、食用紅色六號 1 滴、
食用黃色四號 1 滴、綠色(藍色一號+黃色四號)1 滴

實驗日期：109/2/12-2/13

| 時間 | 12：06 | 15：31(3 小時半) | 17：09(5 小時) |
|------|---|--|---|
| 凝固狀態 |  |  |  |
| 說明 | 實驗樣本放入 A 冷凍環境 | 底部與水面上方有透明結冰層，空氣成核現象出現在下方固液介面，上方沒有。 | 側面開始結冰，色素向中心下方集中。原先空氣成核點繼續向固液介面延伸形成細長微細空氣柱。 |

| 時間 | 17:40(5 小時半) | 18:10(6 小時) | 18:45(6 小時半) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------|---|--|---|-------------------|--------|--------|--------|-------------------|----|-----|---|-----|-----|----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|---|-----|----|-----|-----|-----|-----|
| 凝固狀態 |  |  |  | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 說明 | 色素集中於中心下方，下方固液介面繼續往上提升。 | 中間色素集中並往下沉到中間下方的微細空氣柱。 | 固液介面持續往中間集中，中心的色素沉澱愈加明顯。上方及兩側固液介面未觀察到有空氣成核現象。 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 時間 | 19:01(7 小時) | 19:30(7 小時半) | 109/2/13 10:18 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 凝固狀態 |  |  |  | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 說明 | 兩側固液介面出現空氣成核現象，上方固液介面未觀察到。 | 側面上方出現之微細空氣柱為側面空氣成核之向中間延伸產生。正上方固液介面仍未觀察到有空氣成核現象。 | 完全凝固，色素冰芯正上方被上方透明冰層覆蓋，未觀察到微細空氣柱。冰芯四周呈現放射狀微細空氣柱。 單位：公分 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>上方透明冰層</th> <th>下方透明冰層</th> <th>色素冰芯長度</th> <th>微細空氣柱上下放射線分界與底部距離</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>黃色</td> <td>0.5</td> <td>1</td> <td>4.5</td> <td>3.5</td> </tr> <tr> <td>藍色</td> <td>0.5</td> <td>1.2</td> <td>4.5</td> <td>3.2</td> </tr> <tr> <td>綠色</td> <td>0.8</td> <td>1.4</td> <td>5</td> <td>4.3</td> </tr> <tr> <td>紅色</td> <td>0.5</td> <td>0.7</td> <td>4.5</td> <td>3.5</td> </tr> </tbody> </table> | | 上方透明冰層 | 下方透明冰層 | 色素冰芯長度 | 微細空氣柱上下放射線分界與底部距離 | 黃色 | 0.5 | 1 | 4.5 | 3.5 | 藍色 | 0.5 | 1.2 | 4.5 | 3.2 | 綠色 | 0.8 | 1.4 | 5 | 4.3 | 紅色 | 0.5 | 0.7 | 4.5 | 3.5 |
| | 上方透明冰層 | 下方透明冰層 | 色素冰芯長度 | 微細空氣柱上下放射線分界與底部距離 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 黃色 | 0.5 | 1 | 4.5 | 3.5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 藍色 | 0.5 | 1.2 | 4.5 | 3.2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 綠色 | 0.8 | 1.4 | 5 | 4.3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 紅色 | 0.5 | 0.7 | 4.5 | 3.5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

觀察發現如下：

- 食用色素水溶液在 PET 圓柱罐容器內降溫凝固，水的凝固速率方向為上下左右→中間，冰的結構將食用色素水溶液推擠集中，食用色素因重力作用集中沉澱至下方形成之微細空氣柱內，形成色素冰芯。
- 空氣成核現象會先出現在下方固液介面，並持續延伸形成微細空氣柱。側面空氣成核現象較晚出現。原因可能是因重力作用，色素往中間及下方集中，使得下方固液介面細微顆粒較多，空氣較容易出現成核現象。
- 色素冰芯上方未觀察到空氣成核現象。原因可能因為正上方已有透明冰層覆蓋，固液介面由下方、側面往中間集中，即使有出現空氣成核，亦會被包覆在未凝固的水溶液中。

三、探討容器對於冰芯與微細空氣柱的影響

(一) 實驗設計想法

在文獻探討中，均以 PET 透明杯(直圓柱、截頂圓錐)為水溶液冷凍的容器。我們猜測容器本身的熱導率與比熱，對於水結冰的放熱反應速率也許會有影響。便設計實驗使用不同材質容器與規格來探討容器對於冰芯與微細空氣柱的影響。

(二) 實驗假說

- 容器材質的熱導率越大，冰芯的俯視、側視面積越小。
- 色素柱側視面積會與容器口徑大小有關，水溶液量越多色素柱側視面積越大。

(三) 實驗變因

1. 控制變因：A 冷凍環境、飲用水(TDS-0ppm)、自來水(雜質 TDS-115ppm)、水位高度、藍色食用色素(增加溶劑原 TDS 值之 3ppm)。
2. 操作變因：材質與規格不同的容器
3. 應變變因：冰芯的俯視面積與側視面積、微細空氣柱分布狀態

(四) 實驗步驟

1. 確認實驗器材、實驗環境

實驗環境：在 A 冷凍環境冰箱底部放置紙瓦楞板，降低冰箱底部對於樣本冷凍速率之影響。

實驗 1. 容器：PET 圓柱罐(口徑 6.5cm，高度 12cm)、鐵罐(口徑 6.5cm，高度 10cm) 鋁罐(口徑 6.5cm，高度 10cm)、玻璃杯(直圓柱口徑 6.5cm，高度 12cm)、紙杯(截頂圓錐杯口徑 8.5cm，底部直徑 6.5cm，高度 9cm)

溶質：藍色一號色素，溶劑：飲用水

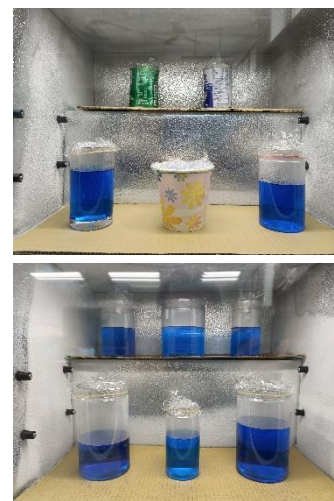
水溶液：150ml(TDS-3ppm)藍色一號色素水溶液

實驗 2. 容器：五種不同口徑的 PET 圓柱罐

溶質：藍色一號色素，溶劑：飲用水、自來水

水溶液：TDS-3ppm 藍色一號色素飲用水溶液

TDS-118ppm 藍色一號色素自來水溶液



A 冷凍環境樣本放置方式
圖 8

2. 調配水溶液與分裝

在最大的 PET 圓柱罐(口徑 10cm，高度 12cm)中，調配 900ml(TDS-3ppm)藍色一號色素水溶液，再使用量筒進行分裝。並在容器開口處使用保鮮膜覆蓋，橡皮筋固定。(保鮮膜可阻隔水分，防止空氣與食物直接接觸，因而可避免水溶液蒸發時，造成樣本間的互相干擾)

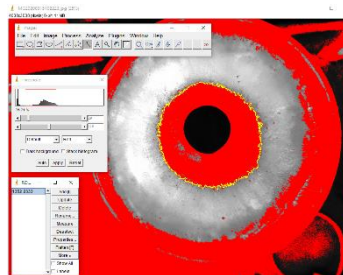
在實驗 2-2 中，因自來水的雜質 TDS 值為 115ppm，在調配藍色一號色素自來水溶液時，增加原 TDS 值 3ppm，因此藍色一號色素自來水溶液 TDS 值為 118ppm。

3. 樣本放置冷凍系統

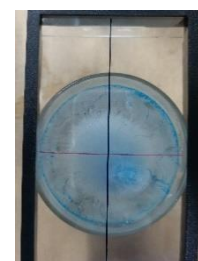
將實驗樣本放入 A 冷凍環境 24 小時以上。樣本之間間隔 5-10cm(圖 8)。

4. 樣本拍攝、觀察記錄與測量

拍攝結冰過程與結果(俯視、側視)，使用影像處理軟體 ImageJ 進行冰芯色塊面積及長度測量(圖 9)，並觀察微細空氣柱的分布狀態。



影像處理軟體 ImageJ
圖 9



透明片十字測量
圖 10

備註：在一開始討論測量方式時，曾在透明片上畫十字進行測量與紀錄(圖 10)。但發現在進行重複量測同一樣本時，誤差值會達 0.3cm 以上。因而改採使用影像測量。






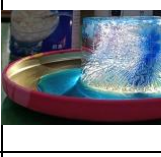




(五) 實驗數據

1. 實驗 1：不同材質容器對於冰芯與微細空氣柱的影響(表 1)

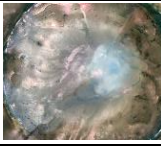
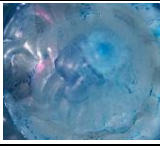
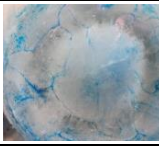
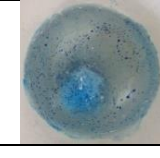
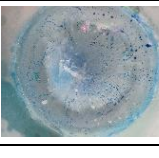





表 1 不同材質容器對於冰芯與微細空氣柱的影響-實驗數據

| 容器材質 | 鐵罐 | 鋁罐 | 紙杯 | 玻璃杯 | PET 杯 |
|----------------------------|-------|-----------|--------------|---------|----------------|
| 口徑(cm) | 6.5 | 6.5(下有凹槽) | 上 8.5、下 6.5 | 6.5 | 6.5 |
| 高度(cm) | 10 | 10 | 9 | 12 | 12 |
| 熱導率($Wm^{-1}K^{-1}$)[維基] | 80(鐵) | 237(鋁) | 0.06-0.13(紙) | 1.1(玻璃) | 0.15-0.24(PET) |

實驗日期：109/2/16-2/17

| 容器材質 | 鐵罐 | 鋁罐 | 紙杯 | 玻璃杯 | PET 杯 |
|----------------------|--|--|--|--|--|
| 俯視實驗照片 |  |  |  |  |  |
| 俯視冰芯面積(藍色)(mm^2) | 165.3 | 157.6 | 855.7 | 191.1 | 445.8 |
| 側視實驗照片 |  |  |  |  |  |
| 側視冰芯面積(藍色)(mm^2) | 485.0 | 599.5 | 736.4 | 1025.7 | 376.7 |
| 微細空氣柱分布狀態 | 密集放射狀 | 密集放射狀 | 稀疏放射狀 | 密集放射狀 | 密集放射狀 |

實驗日期：109/3/14-3/15


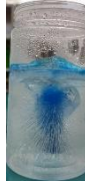

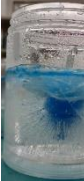
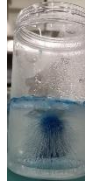







| 容器材質 | 鐵罐 | 鋁罐 | 紙杯 | 玻璃杯 | PET 杯 |
|----------------------|---|---|--|---|---|
| 俯視實驗照片 |  |  |  |  |  |
| 俯視冰芯面積(藍色)(mm^2) | 150.1 | 212.5 | 109.2 | 328.2 | 225.8 |
| 側視實驗照片 |  |  |  |  |  |
| 側視冰芯面積(藍色)(mm^2) | 1046.3 | 1045.5 | 475.2 | 1574.1 | 431.4 |
| 微細空氣柱分布狀態 | 密集放射狀 | 密集放射狀 | 側面稀疏放射狀 下方密集放射狀 | 密集放射狀 | 密集放射狀 |

2. 實驗 2：PET 容器不同規格對於冰芯與微細空氣柱的影響(表 2)

(1) 實驗 2-1：溶劑為飲用水，五種不同規格的 PET 容器，實驗數據如表 2。

表 2 PET 容器不同規格對於冰芯與微細空氣柱的影響(溶劑：飲用水)-實驗數據







實驗日期：109/2/10-2/11

| | | | | | | |
|------------------------------|---|---|---|--|---|---|
| 容器口徑(cm) | 5.5 | 6.5 | 7.5 | 10 | 8.5 | 8.5 |
| 容器高度(cm) | 12 | 12 | 12 | 12 | 15 | 15 |
| 水溶液高度(cm) | 5.7 | 5.7 | 5.7 | 5.7 | 5.7 | 8.7 |
| 水溶液體積(ml) | 156 | 200 | 251 | 450 | 286 | 536 |
| 冰面距離底部高度(cm) | 7.2 | 7.1 | 6.7 | 7.4 | 5.8 | 10.9 |
| 上方透明結冰層厚度(cm) | 0.7 | 1.1 | 1 | 1.3 | 1 | 1.3 |
| 側視實驗照片 (冰芯偏移最靠近拍攝者) |  |  |  |  |  |  |
| 俯視冰芯面積(藍色)(mm ²) | 221.803 | 320.654 | 422.622 | 1805.03 | 1082.954 | 517.028 |
| 俯視冰芯與杯口面積比值 | 0.23 | 0.28 | 0.31 | 0.23 | 0.20 | 0.23 |
| 側視實驗照片 (逆時鐘旋轉 90 度拍攝) |  |  |  |  |  |  |
| 側視冰芯面積(藍色)(mm ²) | 566.167 | 725.93 | 742.426 | 676.386 | 743.54 | 1556.278 |
| 側視冰芯與側面面積比值 | 0.58 | 0.62 | 0.55 | 0.38 | 0.49 | 0.69 |

(2) 實驗 2-2：溶劑為自來水，五種不同規格的 PET 容器，實驗數據如表 3。

表 3 PET 容器不同規格對於冰芯與微細空氣柱的影響(溶劑：自來水)-實驗數據

實驗日期：109/2/11-2/12

| | | | | | | |
|------------------------------|---|---|---|--|---|---|
| 容器口徑(cm) | 5.5 | 6.5 | 7.5 | 10 | 8.5 | 8.5 |
| 容器高度(cm) | 12 | 12 | 12 | 12 | 15 | 15 |
| 水溶液高度(cm) | 5.7 | 5.7 | 5.7 | 5.7 | 5.7 | 8.7 |
| 水溶液體積(ml) | 156 | 198 | 251 | 450 | 286 | 536 |
| 冰面距離底部高度(cm) | 7.6 | 7.4 | 7.4 | 7 | 6.8 | 11.5 |
| 上方透明結冰層厚度(cm) | 0.9 | 1.2 | 1 | 1.2 | 1.1 | 1.2 |
| 側視實驗照片 (冰芯偏移最靠近拍攝者) |  |  |  |  |  |  |
| 側視冰芯面積(藍色)(mm ²) | 2049.67 | 2457.185 | 3118.639 | 4782.191 | 3317.819 | 5472.821 |
| 側視冰芯與側面面積比值 | 0.65 | 0.66 | 0.73 | 0.84 | 0.68 | 0.77 |

PET容器不同口徑與冰芯側面面積

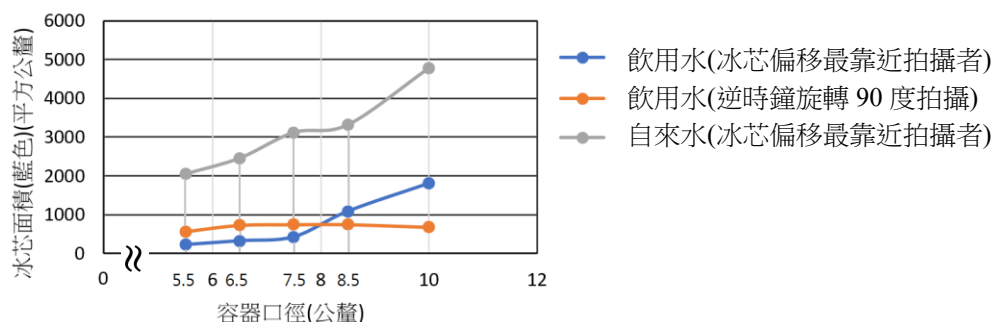


圖 11 在 PET 容器不同口徑中同水溶液水位高度與冰芯側面面積變化

(六) 實驗結果與討論

實驗假說：

1. 容器材質的熱導率越大，冰芯的側視面積越小。
2. 色素柱的側視面積會與容器口徑大小有關，水量越大色素柱側視面積也越大。

【結果】

實驗 1

1. 鐵罐、鋁罐、玻璃杯、PET 圓柱罐容器微細空氣柱分布狀態呈現密集放射狀；紙杯則呈現較為疏鬆放射狀，有不少條微細空氣柱的延伸有斷裂情形。
2. 從表 1 中，俯視冰芯面積大小，第一次實驗：紙杯>PET 杯>玻璃杯>鐵罐>鋁罐；
第二次實驗：玻璃杯>PET 杯>鋁罐>鐵罐>紙杯。
側視冰芯面積大小，第一次實驗：玻璃杯>紙杯>鋁罐>鐵罐>PET 杯。
第二次實驗：玻璃杯>鐵罐>鋁罐>紙杯>PET 杯。
3. 從表 1 中，可觀察到紙杯俯視面積第一次實驗是最大，第二次實驗是最小。

實驗 2

1. 從表 2、表 3 中，可知上方透明冰層厚度在 0.7-1.3cm。
2. 從圖 11 中，可看出飲用水與自來水溶劑在從同一視角(冰芯偏移最靠近拍攝者)觀測到的容器口徑與側面冰芯面積關係：口徑越大，冰芯側面面積越大。
3. 容器口徑 8.5cm，TDS 值相同，水量越多，冰芯色素分布面積就越大。
4. 不同口徑、同水位高度時，自來水的側視冰芯與容器側面面積比值比飲用水大。
5. 目測口徑不同，同水位高度的容器實驗中，口徑越大，下方形成的微細空氣柱延伸長度越長。

【討論】

1. 在實驗結果中，容器材質的熱導率越大，冰芯的俯視、側視面積不會越小。且除了側視冰芯最大都是玻璃杯(圓柱狀)，最小都是 PET 杯(圓柱狀)之外，其他俯視冰芯面積與側視面積大小排序均有改變。這可能跟容器的形狀與擺放的冷凍環境位置導致凝固速率不同有關。
2. 紙杯中的微細空氣柱下方呈現密集放射狀、側面呈現疏鬆放射狀，可能是因為紙杯的熱導率低，使得水溶液在凝固時，溶液內的降溫速度較不穩定，空氣成核會有中斷現象，形成方向性的微細空氣柱時有斷裂情形。PET 圓柱罐內的微細空氣柱也有幾根明顯的斷裂現象。
3. PET 圓柱罐側面冰芯面積其他材質容器小，可能是因為熱導率低且容器為圓柱狀，凝固時間較鐵罐、鋁罐、玻璃杯慢，結冰時將色素推擠到尚未結冰的區域會較為集中。
4. 紙杯俯視冰芯面積的不穩定，可能在於上方透明冰層的厚度影響，導致在觀測時無法準確量測。因而接下來的實驗中，無法度量透明冰層厚度對於色素冰芯的透光遮蔽狀況，俯視面積的數值僅會呈現，不作太多探討。
5. 水位高度、TDS 值相同時，容器口徑越大，表示水中全部溶質的總量越多，與從同一視角觀測到的側面冰芯面積會越大一致。需再進行同水量，不同 TDS 值之水溶液實驗，觀測其冰芯形成的側視面積，再做結論。

6. 從表 2、表 3 中，口徑不同，水位高度不同的容器實驗中，上方透明冰層厚度在 0.7-1.3cm 之間，差異不大，猜測是因容器上方的冷空氣環境使得水溶液上方表面結冰速度一樣導致。
7. 目測口徑不同，同水位高度的容器實驗中，口徑越大，下方形成的微細空氣柱延伸長度越長。可能是因為下方的水結冰與空氣成核的高度位置差不多，結冰時，色素水溶液往中心推擠的距離隨著口徑大小而不同，使得口徑越大，下方形成的微細空氣柱延伸長度越長。

【結論】

1. 容器材質的熱導率越低(如紙杯 $0.06-0.13\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)，會使得容器內水溶液在凝固時，溶液內的降溫速度較不穩定，空氣成核會有中斷現象，使得方向性微細空氣柱形成時有斷裂情形產生。

【實驗設計改進】

1. 實驗次數太少，需多準備再進行實驗。
2. 本次實驗的鋁罐與紙杯並非圓柱型，可盡量尋找容器形狀、高度、材質厚度相同的容器進行實驗。
3. 思考容器放置於冷凍環境的位置，如何使其降低冰芯偏移中心的狀況。

三、探討水溶液對於冰芯與微細空氣柱的影響

(一) 實驗設計想法

微細空氣柱的形成，為氣體在溶液為固態時的溶解度遠小於在液態溶液時的溶解度，因此氣泡會在固液介面產生。因而水溶液濃度與溫度在凝固過程中對於空氣在溶液中成核現象可能會有所有影響。我們調配不同的水溶液、TDS 值與水溫來探討水溶液對於冰芯與微細空氣柱形成的影響。

(二) 實驗假說

1. 水溶液的溶解性固體總量值(TDS)越大，冰芯的體積越大。
2. 水溶液中的真溶液與膠體溶液在溶解性固體總量值(TDS)越小時，會產生出微細空氣柱。
3. 水溶液的溫度，不影響冰芯的體積大小。

(三) 實驗變因

1. 實驗 3：溶質與 TDS 數值對於冰芯與微細空氣柱的影響

(1) 實驗 3-1：藍色一號食用色素不同 TDS 數值對於冰芯與微細空氣柱的影響

控制變因：A 冷凍環境、飲用水(TDS-0ppm)、溶液體積、水位高度、玻璃杯(直圓柱口徑 6.5cm、高度 12cm)、藍色一號食用色素。

操作變因：藍色一號色素水溶液 TDS 值 10ppm、20ppm、30ppm、40ppm

應變變因：冰芯的俯視面積與側視面積、微細空氣柱狀態

(2) 實驗 3-2：同溶質不同 TDS 數值對於冰芯與微細空氣柱的影響

控制變因：B 冷凍環境、飲用水(TDS-0ppm)、溶液體積、同溶質同容器(玻璃杯、PET 圓柱罐)。

操作變因：檸檬酸、小蘇打、鹽、無糖豆漿、低筋麵粉、無糖咖啡、一號砂糖、二號砂糖、蝶豆花

應變變因：冰芯的俯視面積與側視面積、微細空氣柱狀態

2. 實驗 4：不同溫度水溶液對於冰芯與微細空氣柱的影響

控制變因：A 冷凍環境、飲用水(TDS-0ppm)、溶液體積、玻璃杯(口徑 6.5cm、高度 12cm)、藍色一號色素水溶液 TDS 值 3ppm。

操作變因：飲用水的初始溫度(冷水、溫水、熱水)

應變變因：冰芯的俯視面積與側視面積、微細空氣柱狀態

(四) 實驗步驟

1. 確認實驗器材、實驗環境

實驗環境：在 A 冷凍環境冰箱底部放置紙瓦楞板，降低冰箱底部對於樣本冷凍速率之影響；B 冷凍環境冰箱內冷凍食品清空，僅放入實驗樣本(圖 12)。



B 冷凍環境樣本放置方式
圖 12

實驗 3-1 容器：玻璃杯(直圓柱口徑 6.5cm、高度 12cm)

溶質：藍色一號色素，溶劑：飲用水

水溶液：不同 TDS 值藍色一號色素水溶液 200ml

實驗 3-2 容器：玻璃杯(直圓柱杯-口徑6.5cm，高度12cm；口徑7.5cm，高度7cm)
(截頂圓錐杯-口徑7cm、底部直徑4cm、高度7cm)

PET圓柱罐(口徑6.5cm，高度12cm)

溶質：檸檬酸、小蘇打、鹽、無糖豆漿、低筋麵粉、無糖咖啡、一號砂糖、二號砂糖、蝶豆花

溶劑：飲用水

實驗 4. 容器：玻璃杯(直圓柱口徑 6.5cm、高度 12cm)

溶質：藍色一號色素，溶劑：飲用水(16°C)

水溶液：TDS-3ppm 藍色一號色素水溶液

2. 調配水溶液與分裝

實驗 3-1 在最大的 PET 圓柱罐(口徑 10cm，高度 12cm)中，調配 900ml(TDS-10ppm)藍色一號色素水溶液，在使用量筒進行分裝 200ml 至玻璃杯。再繼續調配 TDS-20ppm 藍色一號色素水溶液，進行分裝 200ml 至玻璃杯。依此順序，調配 TDS-30ppm、40ppm 藍色一號色素水溶液並個別分裝 200ml 至玻璃杯。

實驗 3-2 在最大的玻璃杯(直圓柱口徑 7.5cm，高度 7cm)中，調配 400ml 不同溶質與 TDS 值的水溶液，並經過濾紙過濾後，在使用量筒進行分裝至玻璃杯。(因像麵粉、蝶豆花等大顆粒溶質不易均勻溶解而沉澱)

實驗 4 直接取用飲水機的冷、溫、熱水，並量測其溫度。除其中一杯為 100ml 溫水+100ml 熱水之外，為能保持其原先氣體溶解狀態，不再另外進行加熱或降溫調整其溫度。因為 100°C 熱水無法量測 TDS 值，且需在量測完溫度後，短時間內調配完實驗樣本放進冷凍庫，因而藍色一號色素採用以滴入 1 滴方式調配。

以上實驗樣本均在容器開口處使用保鮮膜覆蓋，橡皮筋固定。

3. 樣本放置冷凍系統

將實驗樣本放入 A 冷凍環境、B 冷凍環境 24 小時以上。樣本之間間隔 5-10cm。

4. 樣本拍攝、觀察記錄與測量

拍攝結冰過程與結果(俯視、側視)，使用影像處理軟體 ImageJ 進行冰芯色塊面積及長度測量，並觀察微細空氣柱的分布狀態。

(五) 實驗數據

1. 實驗 3：溶質與 TDS 數值對於冰芯與微細空氣柱的影響

(1) 實驗 3-1：藍色一號食用色素不同 TDS 數值對於冰芯與微細空氣柱的影響(表 3、表 4)

表 3 藍色一號食用色素不同 TDS 數值對於冰芯與微細空氣柱的影響-實驗數據

實驗日期：109/2/18-2/19





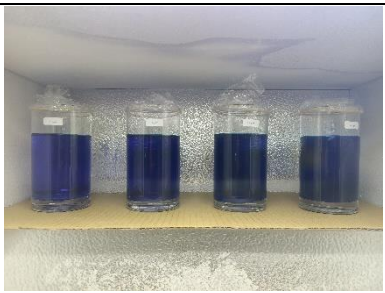
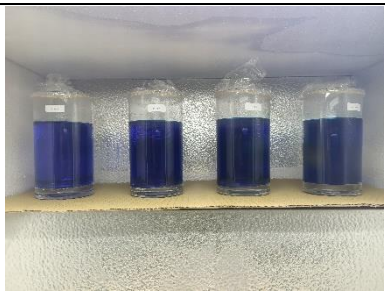













| 藍色一號色素水溶液 200ml TDS 值(ppm) | 10 | 20 | 30 | 40 |
|-------------------------------|---|---|--|---|
| 冰箱上層擺放順序 (由左至右) | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 實驗照片 |  |  |  |  |
| 上方透明結冰層厚度(cm) | 1 | 1.1 | 1.2 | 1 |
| 俯視冰芯面積(藍色)(mm ²) | 370.161 | 364.155 | 415.771 | 759.738 |
| 俯視冰芯與杯口面積比值 | 0.11 | 0.11 | 0.13 | 0.23 |
| 側視冰芯面積(藍色)(mm ²) | 1686.042 | 1444.098 | 1669.758 | 2624.288 |
| 側視冰芯與側面面積比值 | 0.32 | 0.28 | 0.32 | 0.50 |
| 微細空氣柱分布狀態 | 密集放射狀 | 密集放射狀 | 密集放射狀 | 稀疏放射狀 |

表 4 藍色一號食用色素不同 TDS 數值對於冰芯與微細空氣柱的影響-凝固實驗觀察紀錄

實驗日期：109/2/18-2/19 (約每半小時進行拍攝，觀察紀錄僅呈現較有變化之時刻)

| 時間 | 10：24 | 11：02(半小時) | 12：05(1 小時半) |
|------|---|--|--|
| 凝固狀態 |  |  |  |
| 說明 | 實驗樣本放入 A 冷凍環境 | 水溶液上方因覆蓋保鮮膜，透明玻璃壁有水蒸氣凝結。 | 10ppm、20ppm、30ppm 下方已有薄薄透明冰層形成。40ppm 則無。 |
| 時間 | 13：02(2 小時半) | 13：32(3 小時) | 14：08(3 小時半) |
| 凝固狀態 |  |  |  |
| 說明 | 1. 下方微細空氣柱形成：10ppm(多且細)> 20ppm(稀少)> 30ppm(稀少) 2. 20ppm、30ppm 中間色素集中並往下沉到中間下方至透明冰層停止。 3. 40ppm 下方形成薄薄透明冰層。 | 1. 固液介面持續往上、中間集中。 2. 10ppm、20ppm 水溶液上方已出現透明冰層。 3. 40ppm 下方凝固時呈藍色混濁，尚未出現氣體成核現象。 | 1. 4 杯水溶液上方均有透明冰層。 2. 10ppm 色素集中於中間下方並沉澱進入下方微細空氣柱內。 3. 目測底部色素沉澱冰芯面積：40ppm>30ppm>20ppm>10ppm 4. 40ppm 下方形成稀少微細空氣柱。 |

| | | | |
|------|---|--|---|
| 時間 | 15 : 33(5 小時) | 16 : 03(5 小時半) | 18 : 00(7 小時半) |
| 凝固狀態 |  |  |  |
| 說明 | 10ppm 側面固液介面已開始遠離玻璃壁面。 | 4 杯水溶液側面固液介面已開始遠離玻璃壁面。 | 1. 4 杯水溶液的固液介面持續往上、中間集中，且液面上方堆疊 2-3 層透明冰層。 2. 目測 40ppm 固液介面內藍色色素水溶液面積呈現比 30ppm 小。 |
| 時間 | 19 : 20(9 小時) | 20 : 00(9 小時半) | 20 : 30(10 小時) |
| 凝固狀態 |  |  |  |
| 說明 | 10ppm 固液介面內藍色色素水溶液頂端逐漸凝固，固液介面上方無微細空氣柱形成。 | 10ppm 已凝固，40ppm 固液介面內藍色色素水溶液頂端逐漸凝固。 | 40ppm 已凝固，20ppm 固液介面內藍色色素水溶液頂端逐漸凝固。 |
| 時間 | 20 : 50(10 小時半) | 22 : 00(11 小時半) | 109/2/19 08 : 39 |
| 凝固狀態 |  |  |  |
| 說明 | 20ppm 已凝固，30ppm 固液介面內藍色色素水溶液頂端逐漸凝固。 | 30ppm 已凝固。 | 隔天早上拍照並與昨日 22 : 00 照片比對後無差異。 |
| 備註 | 完全凝固時間先後順序：10ppm→40ppm→20ppm→30ppm | | |

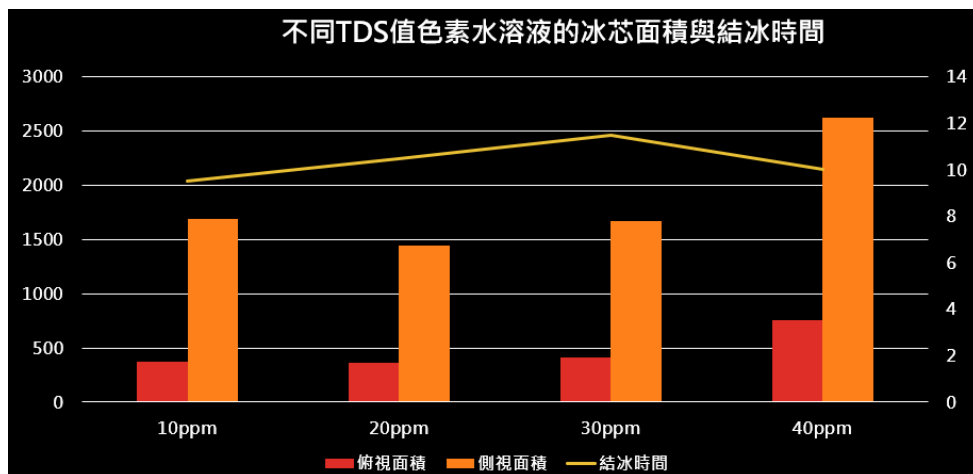

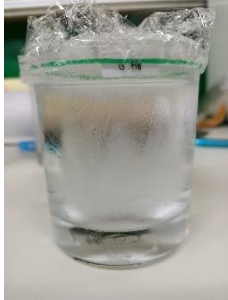
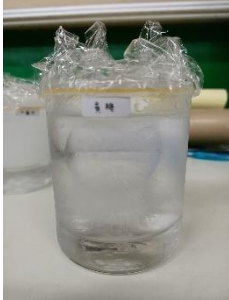
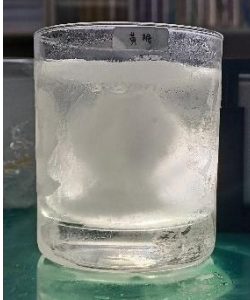







圖 13 不同 TDS 值色素水溶液的冰芯面積與結冰時間

(2) 實驗 3-2：同溶質不同 TDS 數值對於冰芯與微細空氣柱的影響(表 5)

表 5 同溶質不同 TDS 數值對於冰芯與微細空氣柱的影響-實驗觀察

實驗日期：109/2/9-2/13

| 溶質 | 實驗觀察 | | |
|------|---|---|---|
| 一號砂糖 |  <p>水溶液：238ml (109/2/12-2/13) TDS：1ppm 冰芯：因冰層破碎無法觀測 可觀測到明顯放射狀微細空氣柱</p> |  <p>水溶液：238ml(109/2/12) TDS：600ppm 冰芯：透明橢圓狀 無法觀測到微細空氣柱</p> | |
| 二號砂糖 |  <p>水溶液：238ml (109/2/12) TDS：4ppm 冰芯：透明橢圓狀 可觀測到下方有明顯放射狀微細空氣柱</p> |  <p>水溶液：238ml (109/2/12-2/13) TDS：8ppm 冰芯：透明橢圓狀 無法觀測到微細空氣柱</p> | |
| 食鹽 |  <p>水溶液：150ml (109/2/12) TDS：3ppm 冰芯：圓柱霧狀 可觀測到明顯放射狀微細空氣柱</p> |  <p>水溶液：150ml (109/2/12-2/13) TDS：5570ppm 冰芯：整杯白色霧狀 無法觀測到微細空氣柱</p> | |
| 小蘇打 |  <p>水溶液：150ml (109/2/12-2/13) TDS：3ppm 冰芯：圓柱霧狀 可觀測到明顯放射狀微細空氣柱</p> |  <p>水溶液：150ml (109/2/12-2/13) TDS：51ppm 冰芯：圓柱霧狀 無法觀測到微細空氣柱</p> |  <p>水溶液：150ml (109/2/12) TDS：470ppm 冰芯：與杯壁有隔些許透明冰層的白色霧狀 無法觀測到微細空氣柱</p> |





| | | | |
|------|---|---|---|
| 檸檬酸 |  <p>水溶液：150ml (109/2/12-2/13) TDS：3ppm 冰芯：透明橢圓狀 可觀測到明顯放射狀微細空氣柱</p> |  <p>水溶液：150ml (109/2/12-2/13) TDS：76ppm 冰芯：圓柱霧狀 無法觀測到微細空氣柱</p> |  <p>水溶液：150ml (109/2/12) TDS：158ppm 冰芯：橢圓霧狀 無法觀測到微細空氣柱</p> |
| 蝶豆花水 |  <p>水溶液：150ml (109/2/12) TDS：5ppm 冰芯：結冰過程中，固液介面呈橢圓狀向中心集中。凝固後，因微細空氣柱密集無法觀測冰芯。 可觀測到細小且密集的微細空氣柱</p> | | |
| 無糖咖啡 |  <p>水溶液：150ml (109/2/12) TDS：4ppm 冰芯：褐色漏斗狀 可觀測到明顯放射狀微細空氣柱</p> |  <p>水溶液：200ml (109/2/12-2/13) TDS：73ppm 冰芯：褐色圓柱狀 無法觀測到微細空氣柱</p> | |
| 低筋麵粉 |  <p>容器：玻璃杯 (109/2/12-2/13) 水溶液：150ml TDS：3ppm 冰芯：因冰層破碎無法觀測 可觀測到明顯放射狀微細空氣柱</p> |  <p>容器：PET 圓柱罐(109/2/6-2/7) 水溶液：300ml TDS：48ppm 冰芯：整杯白色霧狀 無法觀測到微細空氣柱</p> | |

| | | | |
|------|---|--|--|
| 全脂鮮奶 |  <p>容器：PET 圓柱罐(109/2/6-2/7) 水溶液：300ml TDS：6ppm 冰芯：因冰層破碎無法觀測 可觀測到明顯放射狀微細空氣柱</p> | | |
| 無糖豆漿 |  <p>容器：PET 圓柱罐(109/2/6-2/7) 水溶液：300ml TDS：4ppm 冰芯：因冰層破碎無法觀測 可觀測到下方明顯放射狀微細空氣柱</p> | | |

2. 實驗 4：不同溫度水溶液對於冰芯與微細空氣柱的影響(表 6、表 7)

表 6 不同溫度水溶液對於冰芯與微細空氣柱的影響-實驗數據

實驗日期：109/2/17-2/18

| 藍色一號色素水溶液 溫度(°C) | 7(冷水) | 17(溫水) | 47(冷水+熱水) | 100(熱水) |
|------------------------------|---|---|--|---|
| 冰箱上層擺放順序 (由左至右) | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 實驗照片 |  |  |  |  |
| 上方透明結冰層厚度(cm) | 1.2 | 1.2 | 1.1 | 1 |
| 俯視冰芯面積(藍色)(mm ²) | 606.514 | 498.242 | 423.42 | 494.455 |
| 俯視冰芯與杯口面積比值 | 0.18 | 0.15 | 0.13 | 0.15 |
| 側視冰芯面積(藍色)(mm ²) | 1983.787 | 1478.663 | 2003.647 | 1951.818 |
| 側視冰芯與側面面積比值 | 0.38 | 0.28 | 0.39 | 0.38 |
| 微細空氣柱分布狀態 | 密集放射狀 | 密集放射狀 | 密集放射狀 | 密集放射狀 |

實驗日期：109/3/1-3/2
















| | | | | |
|------------------------------|---|---|--|---|
| 藍色一號色素水溶液 溫度(°C) | 40(溫水+熱水) | 100(熱水) | 36(溫水+熱水) | 100(熱水) |
| 冰箱上層擺放順序 (由左至右) | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 實驗照片 |  |  |  |  |
| 上方透明結冰層厚度(cm) | 0.9 | 1.1 | 1.2 | 1.1 |
| 俯視冰芯面積(藍色)(mm ²) | 479.52 | 511.652 | 463.622 | 339.253 |
| 俯視冰芯與杯口面積比值 | 0.14 | 0.15 | 0.14 | 0.10 |
| 側視冰芯面積(藍色)(mm ²) | 1919.595 | 1394.031 | 1666.98 | 893.023 |
| 側視冰芯與側面面積比值 | 0.37 | 0.27 | 0.32 | 0.17 |
| 微細空氣柱分布狀態 | 密集放射狀 | 密集放射狀 | 密集放射狀 | 密集放射狀 |




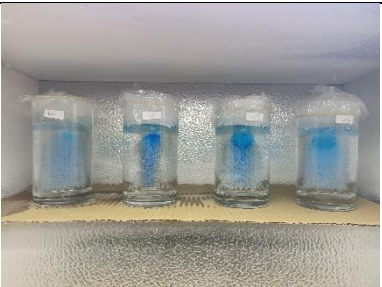


表 7 不同溫度水溶液對於冰芯與微細空氣柱的影響-凝固實驗觀察紀錄

實驗日期：109/2/17-2/18 (10：57 將實驗樣本放入冰箱，約每半小時進行拍攝，觀察紀錄僅呈現較有變化之時刻)

| | | | |
|----------|---|--|---|
| 時間 | 13：33(2 小時半) | 15：33(4 小時半) | 15：59(5 小時) |
| 凝固 狀態 |  |  |  |
| 說明 | 7°C、17°C 下方已有薄薄透明冰層形成，47°C、100°C 則無。 | 1. 7°C、17°C、47°C 下方微細空氣柱形成，且水溶液上方已結冰，在水溶液中可以看見大塊透明冰晶體痕跡。 2. 100°C 下方已有薄薄透明冰層形成，水溶液較其他三杯混濁。 | 1. 7°C、17°C、47°C 色素集中於中間下方並沉澱進入下方微細空氣柱內。 2. 100°C 下方有稀少微細空氣柱形成。 |
| 時間 | 16：33(4 小時半) | 18：31(6 小時半) | 20：30(8 小時半) |
| 凝固 狀態 |  |  |  |
| 說明 | 1. 100°C 下方微細空氣柱形成，且水溶液上方已結冰，水溶液仍舊混濁。 2. 4 杯水溶液固液介面持續往上、中間集中。 | 1. 100°C 色素集中於中間下方並沉澱進入下方微細空氣柱內。 2. 下方固液介面上升高度 7°C>17°C>47°C>100°C 3. 7°C、17°C、47°C 液面上方堆疊 2-4 層透明冰層，100°C 透明冰層較薄。 | 1. 7°C 固液介面頂端逐漸凝固，固液介面上方無微細空氣柱形成。 2. 100°C 水溶液仍舊混濁，且於固液介面向下方空氣成核現象區域比其他三杯同高度時較廣。 3. 100°C 液面上方堆疊 4 層透明冰層。 |

| | | | |
|------|---|--|---|
| 時間 | 21:50(10 小時) | 22:30(10 小時半) | 22:40(10 小時半) |
| 凝固狀態 |  |  |  |
| 說明 | 1. 7°C 已凝固。 2. 17°C 固液介面頂端逐漸凝固，固液介面上方無微細空氣柱形成。 3. 100°C 的固液介面上升高度與 47°C 切齊。 | 1. 17°C 已凝固。 2. 100°C 固液介面頂端逐漸凝固，固液介面上方無微細空氣柱形成。 | 1. 100°C 已凝固。 2. 47°C 固液介面頂端逐漸凝固，固液介面上方無微細空氣柱形成。 |
| 時間 | 23:00(11 小時) | 109/2/18 08:30 | |
| 凝固狀態 |  |  | |
| 說明 | 47°C 已凝固 | 隔天早上拍照並與昨日 23:00 照片比對後無差異。 | |
| 備註 | 完全凝固時間先後順序：7°C→17°C→100°C→47°C | | |

實驗日期：109/3/1 (約每半小時進行拍攝，觀察紀錄僅呈現較有變化之時刻)

| | | | |
|------|---|--|---|
| 時間 | 10:29 | 16:33(6 小時) | 17:59(7 小時半) |
| 凝固狀態 |  |  |  |
| 說明 | 將實驗樣本放入 A 冷凍環境。 | 4 杯水溶液的固液介面高度，越往左邊上升較高。 | 40°C 已凝固。右邊 36°C、100°C 固液介面高度切齊。 |
| 時間 | 19:12(9 小時半) | 19:31(10 小時) | 19:42(10 小時) |
| 凝固狀態 |  |  |  |
| 說明 | 左邊 100°C 固液介面頂端逐漸凝固，固液介面上方無微細空氣柱形成。 | 右邊 100°C 固液介面頂端逐漸凝固，固液介面上方無微細空氣柱形成。 | 4 杯已凝固。(與 19:57 照片比對無差異) |
| 備註 | 完全凝固時間先後順序：40°C→左 100°C→右 100°C→36°C | | |

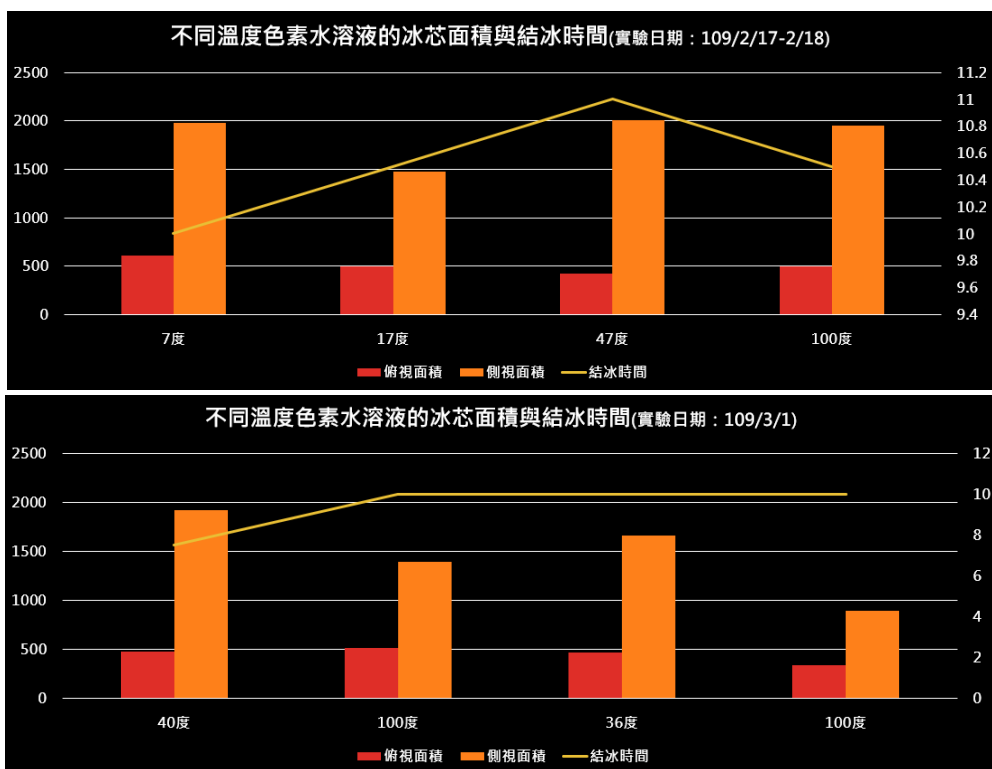


圖 14 不同溫度色素水溶液的冰芯面積與結冰時間

(六) 實驗結果與討論

實驗假說：

1. 水溶液的溶解性固體總量值(TDS)越大，冰芯的體積越大。
2. 水溶液中的真溶液與膠體溶液在溶解性固體總量值(TDS)越小時，會產生出微細空氣柱。
3. 水溶液的溫度，不影響冰芯體積的大小

【結果】

實驗 3

1. 同容器、水量，不同 TDS 值的藍色食用色素水溶液凝固時，從表 3 中可知：
 - (1) 上方透明結冰層厚度在 1-1.2cm 之間。
 - (2) TDS 值為 40ppm 時，側視冰芯與容器側面面積比值最大，達 0.5。
 - (3) TDS 值越大，微細空氣柱形成越少越稀疏。
2. 同容器、水量，不同 TDS 值的藍色食用色素水溶液凝固時，從表 4、圖 13 中可知：
 - (1) 可觀測到下方形成透明冰層時間，40ppm 最慢。
 - (2) 下方微細空氣柱形成狀態：10ppm(多且細)>20ppm(稀少)>30ppm(稀少)>40ppm(稀疏)
 - (3) 完全凝固時間先後順序：10ppm→40ppm→20ppm→30ppm
3. 同溶質不同 TDS 數值的水溶液凝固時，從表 5 中可知：
 - (1) TDS 值越大，越無法觀測到微細空氣柱的產生。
 - (2) 水溶液中的真溶液、膠體溶液，在 TDS 值越小時，都會形成放射狀微細空氣柱。
 - (3) 不同溶質水溶液的冰芯形狀不同，TDS 值越大冰芯越不易觀察。一號砂糖、二號砂糖呈現透明橢圓狀；檸檬酸呈現橢圓霧狀。

實驗 4

1. 同容器、水量、TDS 值，不同溫度的藍色食用色素水溶液凝固時，從表 6、圖 14 中可知：
 - (1) 上方透明結冰層厚度在 0.9-1.2cm 之間。
 - (2) 47°C 色素水溶液側視冰芯面積最大。
2. 從表 7、圖 14 中，第一次實驗完全凝固時間先後順序：7°C→17°C→100°C→47°C；第二次實驗完全凝固時間先後順序：40°C→左 100°C→右 100°C→36°C。
3. 從表 7 中，100°C 水溶液於固液介面下方空氣成核現象區域比其他三杯在同高度時較廣。

【討論】

1. 在實驗 3-1 中，同容器、水量，不同 TDS 值的色素水溶液凝固時，上方透明結冰層厚度在 1-1.2cm 之間；在實驗 4 中，同容器、水量、TDS 值，不同溫度的水溶液凝固時，上方透明結冰層厚度在 0.9-1.2cm 之間。兩項實驗在上方透明結冰層度差異不大的結果與實驗 2 中的觀察一致。
2. 在實驗 3-1 中，色素水溶液 TDS 值越大時，能觀測到下方形成透明冰層的時間需越長。可能是因為下方形成水凝結成冰時，受重力作用，水中全部溶質的總量越大，冰晶要將溶質往上推擠的所費時間越長。
3. 在實驗 3-1 中，色素水溶液 TDS 值為 40ppm 時，側視冰芯與容器側面面積的比值最大。但可能受到冷凍環境影響，10ppm、20ppm、30ppm、40ppm 的側面面積，並未隨著 TDS 值越大，側面面積越大，需再多做重複實驗檢驗。
4. 在實驗 3-2 中，不同溶質水溶液中，TDS 值越小，都會形成微細空氣柱。TDS 值越大，越不易觀察到微細空氣柱的形成。與實驗 3-1 的不同 TDS 值色素水溶液的觀察記錄一致。表示當水溶液中純水溶劑的體積比例越大，空氣成核的現象發生機會較大。
5. 在實驗 4 中，觀測到 100°C 色素水溶液的凝固情形，一開始確實比其他溫度凝固的慢，但在最後的完全凝固時間卻與其他溫度差不多，甚至還快。猜測這與尚未解決的彭巴效應問題有關。需再多做重複實驗，記錄環境與水溶液凝固時的變化，了解其中的原因。
6. 在實驗 4 中，水溶液的起始溫度會影響到冰晶形成的時間長短、下方氣體成核時間與位置及固液介面內未凝固之色素水溶液溫度變化，且對於最後凝固時冰芯色素柱體積都有所影響。目前發現 40°C、47°C 的冰芯色素柱側面面積較大，需再多做重複實驗，了解是否水溫在 47°C 上下，冰芯色素柱側面面積最大。

【結論】

1. 在冷凍條件差異性不大的環境下，TDS 值與水溶液溫度的改變對於色素水溶液的上方透明結冰層厚度影響甚小。
2. 水溶液中的真溶液與膠體溶液在溶解性固體總量值(TDS)越小(約 3ppm)時，會產生出微細空氣柱。

【實驗設計改進】

1. 實驗次數太少，需多準備再進行實驗。
2. 實驗 3-2，可在就同溶質水溶液不同 TDS 值做更多的樣本實驗，找到其觀測不到微細空氣柱生成的臨界點。

四、探討環境控制對於冰芯與微細空氣柱的影響

(一) 實驗設計想法

在「冰漩渦」與「被冰封的漩渦流」兩件歷屆科展作品，都有提到將相同容器排成環狀後，冰芯會往環狀幾何中心偏移(如圖 4)。以及在實驗過程中，冰箱內部壓縮機輸出的冷空氣在對流之下，給予水溶液容器側面不均勻的受冷速率情形，導致實驗樣本之冰芯形成大多會偏離中心位置。因而我們想設計不同的降溫環境控制來探討其與冰芯形成位置之關係。

(二) 實驗假說

1. 水溶液容器處於直圓柱降溫環境之中，冰芯不偏移容器中心。
2. 若將容器靠於角度牆壁的兩側時，牆壁夾角角度($0^\circ < \text{夾角度數} < 180^\circ$)越大，冰芯偏離容器中心越遠，且落在牆壁夾角的角平分線上。

(三) 實驗變因

1. 實驗 5：不同環境控制對於冰芯與微細空氣柱的影響

在實驗 5 設計之前，曾先試著使用紙板進行不同角度牆壁對於冰芯與微細空氣柱的影響實驗(圖 15)，實驗結果冰芯有明顯的偏移，但考量到是在整個冷凍庫的環境控制仍不夠嚴謹，進而想使用圓柱型紙桶、鐵桶來控制實驗環境。



A 冷凍環境不同角度實驗
圖 15

(1) 實驗 5-1：不同溶劑在圓柱型紙桶、鐵桶環境凝固對於冰芯與微細空氣柱的影響

控制變因：A 冷凍環境、水溶液體積 536ml、藍色一號食用色素
PET 圓柱罐(口徑 8.5cm、高度 15cm)。

操作變因：1. 降溫凝固環境：圓柱型紙桶、圓柱型鐵桶(圖 16)

2. 溶劑：飲用水(TDS-0ppm)、

自來水(紙桶-TDS-104ppm；鐵桶-TDS-114ppm)

應變變因：冰芯的俯視與側視的面積與形成位置、微細空氣柱狀態



圖 16 圓柱型紙桶、鐵桶環境



圖 17 不同角度牆壁

(2) 實驗 5-2：不同角度牆壁對於冰芯與微細空氣柱的影響

控制變因：飲用水(TDS-0ppm)、水溶液體積 700ml、

PET 圓柱罐(口徑 10cm，高度 12cm)、藍色一號食用色素。

- 操作變因：1. 降溫凝固環境：A 冷凍環境下層、圓柱型鐵桶
2. 不同角度瓦楞紙板牆壁(45 度、135 度；60 度、120 度) (圖 17)

應變變因：冰芯的俯視與側視的面積與形成位置、微細空氣柱狀態

2. 實驗 6：水溶液容器中心放置不同材質導熱固體對於冰芯與微細空氣柱的影響

控制變因：A 冷凍環境、飲用水(TDS-0ppm)、水溶液體積 200ml、玻璃杯(截頂圓錐杯-口徑 7cm、底部直徑 4cm、高度 7cm)、藍色一號色素水溶液 TDS 值 3ppm。

操作變因：銅棒、鋅棒、碳棒

應變變因：冰芯的俯視與側視的面積與形成位置、微細空氣柱狀態

(四) 實驗步驟

1. 確認實驗器材、實驗環境

實驗環境：在 A 冷凍環境冰箱底部放置紙瓦楞板，降低冰箱底部對於樣本冷凍速率之影響。

實驗器材：(1)容器：PET 圓柱罐(口徑 8.5cm、高度 15cm；口徑 10cm，高度 12cm)、玻璃杯(截頂圓錐杯-口徑 7cm、底部直徑 4cm、高度 7cm)。在實驗 5-2 在 PET 圓柱罐旁及保鮮膜上標示角平分線 2 點及圓柱罐貼牆壁之切點 2 點，以利量測與觀察冰芯偏移狀態。

(2)溶質：藍色一號色素，溶劑：飲用水、自來水

(3)降溫凝固環境：紙桶、鐵桶、不同角度瓦楞紙板牆壁(45 度、135 度；60 度、120 度)

(4)導熱固體：銅棒、鋅棒、碳棒

2. 調配水溶液與分裝

實驗 5-1 在最大的 PET 圓柱罐(口徑 10cm，高度 12cm)中，調配 800ml(TDS-3ppm)藍色一號色素水溶液(飲用水)，在使用量筒進行分裝 536ml 至 PET 圓柱罐(口徑 8.5cm、高度 15cm)；調配 800ml(紙桶 TDS-107ppm、鐵桶 TDS-117ppm，實驗日期不同)藍色一號色素水溶液(飲用水)，在使用量筒進行分裝 536ml 至 PET 圓柱罐(口徑 8.5cm、高度 15cm)。

實驗 5-2 在最大的 PET 圓柱罐(10cm，高度 12cm)中，調配 800ml(TDS-3ppm)藍色一號色素水溶液(飲用水)，在使用量筒進行分裝 700ml 至 PET 圓柱罐(口徑 10cm，高度 12cm)。

實驗 6 在最大的 PET 圓柱罐(口徑 10cm，高度 12cm)中，調配 800ml(TDS-3ppm)藍色一號色素水溶液(飲用水)，在使用量筒進行分裝 200ml 至玻璃杯(截頂圓錐杯-口徑 7cm、底部直徑 4cm、高度 7cm)。

以上實驗樣本均在容器開口處使用保鮮膜覆蓋，橡皮筋固定。

3. 樣本放置冷凍系統

將實驗樣本放入 A 冷凍環境 24 小時以上。

4. 樣本拍攝、觀察記錄與測量

拍攝結冰過程與結果(俯視、側視)，使用影像處理軟體 ImageJ 進行冰芯色塊面積及長度測量，並觀察微細空氣柱的分布狀態。

(五) 實驗數據





1. 實驗 5：不同環境控制對於冰芯與微細空氣柱的影響

(1) 實驗 5-1：不同溶劑在圓柱型紙桶、鐵桶環境凝固對於冰芯與微細空氣柱的影響

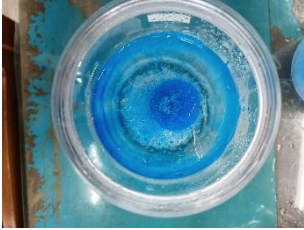

(表 8)



表 8 不同溶劑在圓柱型紙桶、鐵桶環境凝固對於冰芯與微細空氣柱的影響

實驗日期：圓柱型鐵桶環境 109/2/11-2/13

| | 飲用水 | 自來水 |
|------------------------------|--|--|
| 俯視實驗照片 |  |  |
| 俯視冰芯面積(藍色)(mm ²) | 650.66 | 659.164 |
| 俯視冰芯與杯口面積比值 | 0.03 | 0.03 |
| 側視實驗照片 |  |  |
| 側視冰芯面積(藍色)(mm ²) | 1270.138 | 2511.322 |
| 側視冰芯與側面面積比值 | 0.16 | 0.31 |
| 冰芯形成狀態 | 漏斗狀 | 圓柱狀 |
| 微細空氣柱狀態 | 密集曲折放射線 | 稀疏曲折放射線 |

實驗日期：圓柱型紙桶環境 109/2/12-2/13


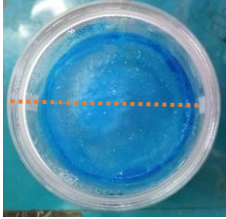




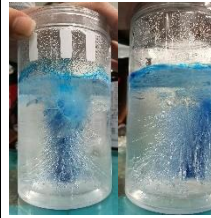

| | 飲用水 | 自來水 |
|------------------------------|---|---|
| 俯視實驗照片 |  |  |
| 俯視冰芯面積(藍色)(mm ²) | 1549.727 | 1927.999 |
| 俯視冰芯與杯口面積比值 | 0.02 | 0.02 |

| | | |
|----------------------|---|---|
| 側視實驗照片 |  |  |
| 側視冰芯面積(藍色)(mm^2) | 1302.577 | 2219.351 |
| 側視冰芯與側面面積比值 | 0.15 | 0.36 |
| 冰芯形成狀態 | 漏斗狀 | 圓柱狀 |
| 微細空氣柱狀態 | 密集曲折放射線 | 稀疏曲折放射線 |

(2) 實驗 5-2：不同角度牆壁對於冰芯與微細空氣柱的影響(表 9)

表 9 藍色食用色素水溶液在圓柱型鐵桶不同角度牆壁環境凝固對於冰芯與微細空氣柱的影響

實驗日期：圓柱型鐵桶環境 109/2/14-2/16

| 牆壁角度 | 45 度 | 60 度 | 120 度 | 135 度 |
|---------------------------|---|---|--|---|
| 俯視實驗照片 |  |  |  |  |
| 偏離中心位置(mm) | 11.42147 | 18.74487 | 20.33249 | 28.01931 |
| 俯視冰芯面積(藍色)(mm^2) | 387.996 | 553.352 | 329.451 | 296.242 |
| 面積比 | 0.012357 | 0.017623 | 0.010492 | 0.009434 |
| 側視實驗照片 (側面正前方、轉 180 度) |  |  |  |  |
| 側視冰芯面積(藍色)(mm^2) | 1572.325 | 1273.359 | 1292.139 | 1278.282 |
| 面積比 | 0.174703 | 0.141484 | 0.143571 | 0.142031 |

不同角度牆壁與冰芯偏離中心位置

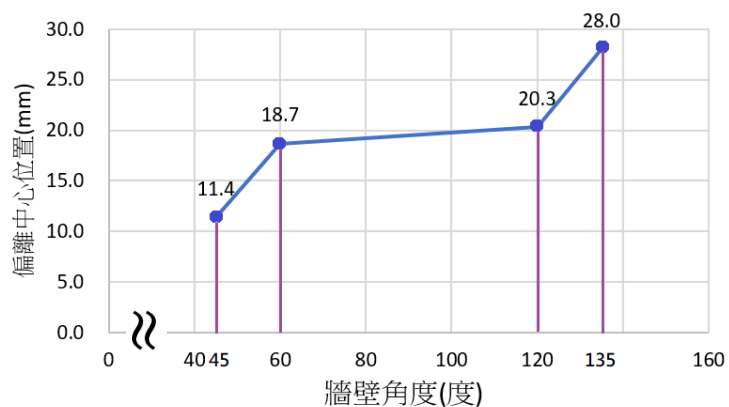
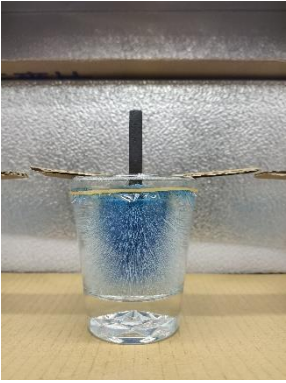


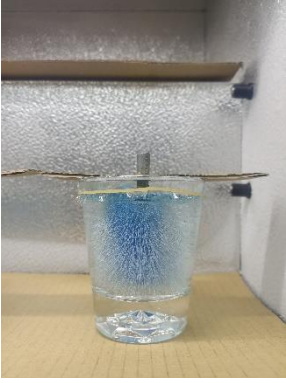
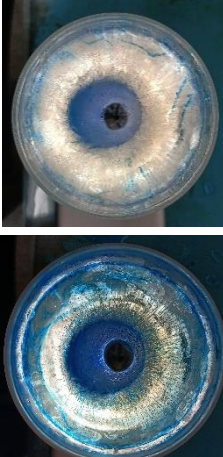

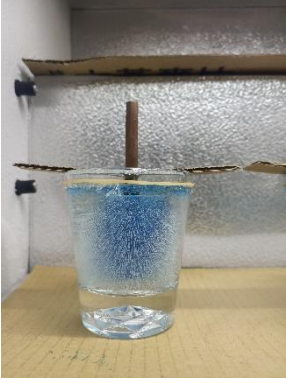

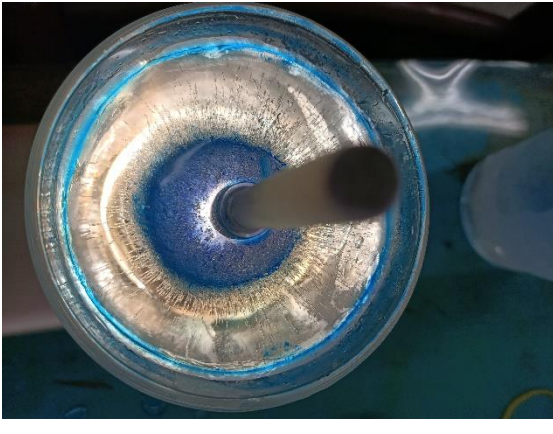


圖 18 不同角度牆壁與冰芯偏離中心位置

2. 實驗 6：水溶液容器中心放置不同材質導熱固體對於冰芯與微細空氣柱的影響(表 10)

表 10 藍色食用色素水溶液容器中心放置不同材質導熱固體對於冰芯與微細空氣柱的影響

實驗日期：A 冷凍環境 109/3/14-3/15

| 中心棒 導熱材質 | A 冷凍環境凍結狀態 | 俯視實驗照片 (起初、加些許熱水) | 中心棒冰芯產生情形 |
|-------------|---|---|--|
| 碳 |  |  |  |
| 鋅 |  |  |  |
| 銅 |  |  |  |

(六) 實驗結果與討論

實驗假說：

1. 水溶液容器處於直圓柱降溫環境之中，冰芯不偏移容器中心。
2. 若將容器靠於角度牆壁的兩側時，牆壁夾角角度($0^\circ < \text{夾角度數} < 180^\circ$)越大，冰芯偏離容器中心越遠，且落在牆壁夾角的角平分線上。

【結果】

實驗 5

1. 從表 8 中，在圓柱型鐵桶、紙桶環境下，冰芯較不偏移容器中心點，冰芯的俯視面積與側視面積差異不大。但在紙桶中之飲用水、自來水色素水溶液的微細空氣柱生成比鐵桶中的粗。但微細空氣柱的密集狀況，飲用水>自來水。
2. 從表 8 的實驗數據中，在圓柱型鐵桶、紙筒環境下，自來水的冰芯俯視與側視面積都大於飲用水的冰芯。
3. 從表 9、圖 18 中，冰芯偏離中心距離：牆壁角度 135 度>120 度>60 度>45 度。
4. 從表 9 側視實驗照片中，發現冰芯是從底部中心逐步沿著角度牆壁的角平分線往上，向角的頂點前進。

實驗 6

1. 從表 9 中實驗照片，觀察到碳棒、鋅棒、銅棒在水溶液凝固後，中心棒的周圍都有出現透明冰層的存在，在中心棒附近有空氣成核現象生成，形成不少條微細空氣柱。在內部微細空氣柱與外部微細空氣柱的生成過程中，色素被擠壓成一個圓環狀。

【討論】

1. 在圓柱型鐵桶、紙桶環境下，可能因為圓柱型環境中的空氣冷卻狀況與流動狀態較 A 冷凍環境穩定，使得冰芯較不偏移容器中心點，冰芯的俯視面積與側視面積差異不大。
2. 同水量的自來水冰芯俯視、側視面積都大於飲用水的冰芯，可能是因為自來水的 TDS 值大於飲用水，表示自來水內的有機物與無機物溶解固體值多於飲用水，在水凝固過程中，被排除的雜質也會越多。
3. 在實驗 5-1 中，觀察到放在紙桶內的放射狀微細空氣柱都較鐵桶環境更曲折彎曲，說明紙桶中的水結冰速率較不均勻。
4. 在實驗 5-2 中，水溶液凝固的環境在圓柱型鐵桶內，熱量均勻釋放，所以結冰速率相對穩定。冰芯的偏移，可能是因為角度牆壁會使得冷凍環境中的冷空氣循環產生阻礙，未被遮蔽的容器方向較容易結冰，導致冰芯會沿著角度牆壁的角平分線往上，向角的頂點前進，且牆壁角度越大(135 度內)，冰芯偏離中心越多。
5. 從圖 18 中，不同角度牆壁與冰芯偏離中心位置關係，我們嘗試用分段定義函數來進行表示： x 為牆壁角度(單位：度)， $f(x)$ 為冰芯偏離中心位置(單位：mm)

$$f(x) = \begin{cases} \frac{73}{150}x - 10.5, & 45 \leq x \leq 60 \\ \frac{2}{75}x + 17.1, & 60 < x < 120 \\ \frac{77}{150}x - 41.3, & 120 \leq x \leq 135 \end{cases}$$

6. 在實驗 6 中，中心棒會將水溶液的熱量傳導釋放，使得中心棒附近的水溶液溫度降低達到冰晶產生之溫度，故會在中心棒附近產生一圈透明冰層。並因為水溶液的溫度降低，影響中心棒附近水溶液的空氣溶解度，使得出現空氣成核現象的生成，形成不少條微細空氣柱。在內部微細空氣柱與外部微細空氣柱的生成過程中，色素被擠壓成一個圓環狀。

【結論】

1. 將水溶液容器放置在圓柱型冷凍環境的正中心，熱量均勻釋放，水溶液結冰速率相對穩定，冰芯位置接近正中心不偏移。
2. 水溶液的 TDS 值越大，形成的冰芯體積越大，空氣成核現象較少。
3. 在 45 度-135 度牆壁角度環境下，冰芯會沿著牆壁夾角角平分線向角的頂點偏移，且牆壁角度越大，冰芯偏離中心越多。
4. 在 $-16^{\circ}\text{C}\sim-21^{\circ}\text{C}$ 的冷凍環境下，將 TDS 為 3ppm 之 700ml 藍色食用色素水溶液裝入 PET 圓柱灌(口徑 10cm，高度 12cm)後，放入圓柱型鐵桶(口徑 15cm，高度 16cm)進行凝固，不同角度牆壁使其冰芯偏離中心位置距離預測關係如下：(圖 18 所示)

x 為牆壁角度(單位：度)， $f(x)$ 為冰芯偏離中心位置(單位：mm)

$$f(x) = \begin{cases} \frac{73}{150}x - 10.5, & 45 \leq x \leq 60 \\ \frac{2}{75}x + 17.1, & 60 < x < 120 \\ \frac{77}{150}x - 41.3, & 120 \leq x \leq 135 \end{cases}$$

【實驗設計改進】

1. 實驗次數太少，需多準備再進行實驗。
2. 實驗 5-2，可在將牆壁角度分為 30 度、40 度、50 度、…、150 度，並使用不同口徑的容器，量測冰芯偏離中心距離，觀察牆壁角度、容器口徑對於冰芯偏離中心距離是否具有預測力。
3. 不同材質中心棒，要找同長度與寬度之圓柱棒進行實驗，量測色素聚集圓環區域才具實驗數據參考價值。

陸、結論

1. 從文獻探討可知冰芯與微細空氣柱之成因如下：
 - (1) 水溶液中的溶質粒子數量多寡會因具依數性，使得溶液凝固點下降。於一大氣壓下，將水溶液降溫，當溫度逐漸下降，愈來愈多的水凝固成冰，水溶液的濃度逐漸增大，凝固點則逐步下降，因此水溶液沒有固定的凝固點。水溶液在凝固過程中，溫度低於 10°C 時，水中的奈米冰開始生成，使得冰晶結構形成立體的網狀結構，將溶質推擠到尚未結冰的區域，且因各部分結冰速率的差異，形成各種形狀的冰芯。
 - (2) 氣體在溶液為固態時的溶解度遠小於在液態溶液時的溶解度時，氣體成核會在固液介面產生，此處正是未溶解於溶液中之氣體排出處。氣體成核產生的氣泡就會導致固體氣孔的產生。若降溫形成有方向性的結冰，就可以觀察到介面氣孔的長成，也便是在冰中形成不規則線條的微細空氣柱成因。

2. 從長時間實驗觀察食用色素水溶液之冰芯與微細空氣柱形成，結論如下：
 - (1) 食用色素水溶液在 PET 圓柱罐容器內降溫凝固，水的凝固速率方向為上下左右→中間，冰的結構將食用色素水溶液推擠集中，食用色素因重力作用集中沉澱至下方形成之微細空氣柱內，形成色素冰芯。
 - (2) 空氣成核現象會先出現在下方固液介面，並持續延伸形成微細空氣柱。側面空氣成核現象較晚出現。原因可能是因重力作用，色素往中間及下方集中，使得下方固液介面細微顆粒較多，空氣較容易出現成核現象。
3. 容器材質的熱導率越低(如紙杯 $0.06-0.13\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)，會使得容器內水溶液在凝固時，溶液內的降溫速度較不穩定，空氣成核會有中斷現象，使得方向性微細空氣柱形成時有斷裂情形產生。
4. 在冷凍條件差異性不大的環境下，TDS 值與水溶液溫度的改變對於色素水溶液的上方透明結冰層厚度影響甚小。
5. 水溶液中的真溶液與膠體溶液在溶解性固體總量值(TDS)越小時，會產生出微細空氣柱。水溶液的 TDS 值越大，形成的冰芯體積越大，空氣成核現象較少。
6. 將水溶液容器放置在圓柱型鐵桶冷凍環境的正中心，熱量均勻釋放，水溶液結冰速率相對穩定，冰芯位置接近正中心不偏移。
7. 在 45 度-135 度牆壁角度環境下，冰芯會沿著牆壁夾角角平分線向角的頂點偏移，且牆壁角度越大(約 120-135 度)，冰芯偏離中心越多。
8. 在 $-16^{\circ}\text{C}\sim-21^{\circ}\text{C}$ 的冷凍環境下，將 TDS 為 3ppm 之 700ml 藍色食用色素水溶液裝入 PET 圓柱罐(口徑 10cm，高度 12cm)後，放入圓柱型鐵桶(口徑 15cm，高度 16cm)進行凝固，不同角度牆壁使其冰芯偏離中心位置距離預測關係如下：

x 為牆壁角度(單位：度)， $f(x)$ 為冰芯偏離中心位置(單位：mm)

$$f(x) = \begin{cases} \frac{73}{150}x - 10.5, & 45 \leq x \leq 60 \\ \frac{2}{75}x + 17.1, & 60 < x < 120 \\ \frac{77}{150}x - 41.3, & 120 \leq x \leq 135 \end{cases}$$

柒、未來展望

1. 製作相同規格之不同材質容器，觀測不同熱導率材質容器對於冰芯與微細空氣柱的影響。
2. 調製不同 TDS 值溶質水溶液，觀測其微細空氣柱生成情形與無法觀測或未生成微細空氣柱之臨界值。
3. 重複實驗不同溫度、溶質之水溶液，觀測是否有彭巴效應的產生。
4. 可在將牆壁角度進行細分，並使用不同口徑的容器，量測冰芯偏離中心距離，觀察牆壁角度、容器口徑對於冰芯偏離中心距離是否具有預測力。

捌、參考文獻

1. 凝固-維基百科 <https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%87%9D%E5%9B%BA>
2. 解開水之謎交大團隊新發現 將改寫理化課本
<http://www.nctu.edu.tw/component/k2/item/3074-2018-06-29-05-52-41>
3. 郭嘉翰 (2019)。色藏冰芯-探討水結冰之純化作用。中華民國第 59 屆中小學科展國中組物理科。國立臺灣科學教育館，臺北。
4. 黃得時(主編) (2014)。普通高級中學選修化學上冊。新北市：龍騰。
5. 依數性-維基百科 <https://zh.wikipedia.org/wiki/%E4%BE%9D%E6%95%B0%E6%80%A7>
6. 黃昶誠 (2003)。水冰介面固化成核現象之研究 (碩士論文)。取自臺灣博碩士論文系統。
7. 劉婕宇等 (2011)。冰漩渦。中華民國第 51 屆中小學科展國中組物理科。國立臺灣科學教育館，臺北。
8. 曾柏睿等 (2018)。被冰封的漩渦流-探討放熱式漩渦的氣體逃逸路線。中華民國第 58 屆中小學科展國中組物理科。國立臺灣科學教育館，臺北。
9. 衛生福利部食品藥物管理署 <https://plasticspackage.pidc.org.tw/index.php>。
10. YOUNG SHANG。PET 塑料透明瓶的優點。取自
<https://www.youngshang.com.tw/zh-TW/news/2014-news-004.html>
11. 郭重吉(主編) (2019)。國中自然與生活科技第三冊。臺南市：翰林。

【評語】 030115

本作品研究了水凝結過程中，色素水溶液在不同條件下的凝固狀態。包含了研究 TDS 與附帶生成的細微空氣柱的現象，並同時探討是否靠近牆壁造成色芯冰柱的偏移等。整體實作的部分相當的多，建議可以再做進一步細膩的實驗調整與分析。

作品簡報



「凝」記在心

國中組物理科

壹、研究動機與目的

容器

冰芯



冷凍環境

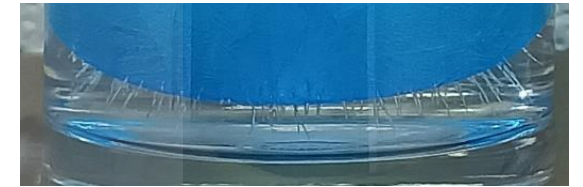
水溶液

微細空氣柱

貳、文獻探討

一、冰芯^{[1][2][3][4][5]}

1. 溶質粒子數量多寡因具**依數性**，影響**溶液凝固點**。
2. 若水溶液**低於10°C**時，**奈米冰**開始生成，冰的立體網狀結構，將溶質推擠至未結冰區，形成**冰芯**。



固液介面氣體成核

二、水溶液內氣體成核現象^{[6][9]}

1. 氣體在溶液為固態時的溶解度遠小於在液態溶液時的溶解度，因此**氣泡**會在**固液介面**產生。
2. 若**降溫**形成**有方向性的結冰**，可觀察到固液介面氣孔生成，便是冰中形成不規則線條的**微細空氣柱**成因。



不規則線條的微細空氣柱

三、歷屆作品分析^{[3][7][8]}

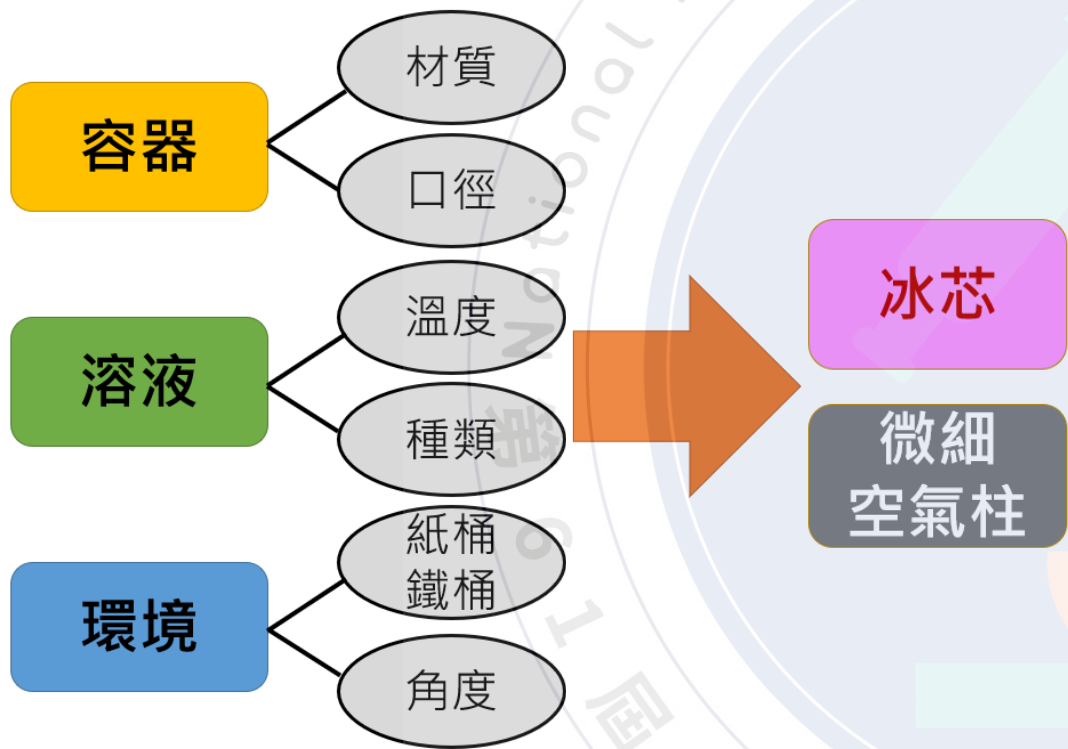
1. 因**壁器材質與包覆**產生的冷卻速率差異，改變純化作用的強弱與方向。
2. 水溶液溶質為**鹽、黑豆水、牛奶**等，**不易形成微細空氣柱**。
3. 將數個透明容器**靠近一起**，**冰芯向中間集中**。



有色冰柱往排列中心集中^[7]

參、研究方法

一、實驗設計



近距離觀察水溶液結冰的形成過程，有別於歷屆科展作品在結冰的各時間點，取出離開冷凍環境拍照觀測。

二、實驗步驟



- 冰箱底部放置**紙瓦楞板**，降低冰箱底部對於樣本冷凍速率之影響。
- 在容器開口處使用**保鮮膜**覆蓋，橡皮筋固定。

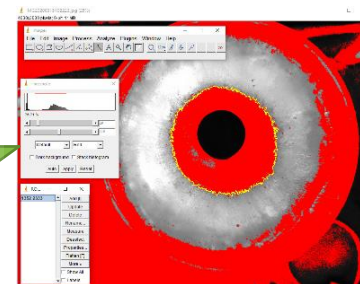


A 冷凍環境(-16°C~-21°C)



透明片十字測量

測量工具改良



影像處理軟體ImageJ

肆、研究結果與討論

一、食用色素水溶液凝固時，冰芯與微細空氣柱的形成

前置實驗

PET圓柱罐(口徑6.5cm、高度12cm)
飲用水150ml。黃、藍、綠、紅色色素



實驗樣本放入A冷凍環境

3小時半



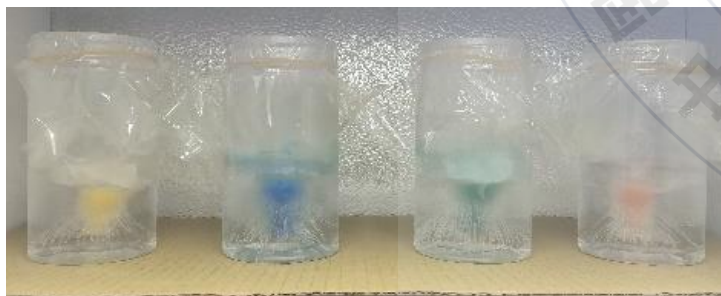
底部與水面上方結冰。空氣成核現象出現在下方固液介面，上方則沒有。

6小時



中間色素集中並往下沉到中間下方的微細空氣柱。

隔天拍攝



單位：公分

| | 黃色 | 藍色 | 綠色 | 紅色 |
|--------|-----|-----|-----|-----|
| 上方透明冰層 | 0.5 | 0.5 | 0.8 | 0.5 |
| 下方透明冰層 | 1 | 1.2 | 1.4 | 0.7 |
| 色素冰芯長度 | 4.5 | 4.5 | 5 | 4.5 |

觀察發現如下：

1. 凝固速率方向(上下左右→中間)，食用色素因重力作用集中沉澱至下方形成之微細空氣柱內，形成色素冰芯。
2. 空氣成核現象會先出現在下方固液介面。
3. 色素冰芯上方未觀察到空氣成核現象。

肆、研究結果與討論




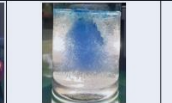
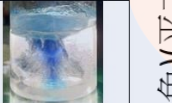
二、探討容器對於冰芯與微細空氣柱的影響

(一) 實驗變因

容器(材質熱導率、口徑)→冰芯、微細空氣柱

(二) 實驗數據

實驗1：不同材質容器對於冰芯與微細空氣柱的影響

| 容器材質 | 鐵罐 | 鋁罐 | 紙杯 | 玻璃杯 | PET 杯 |
|----------------------------|---|---|---|--|---|
| 口徑(cm) | 6.5 | 6.5(下有凹槽) | 上 8.5、下 6.5 | 6.5 | 6.5 |
| 高度(cm) | 10 | 10 | 9 | 12 | 12 |
| 熱導率($Wm^{-1}K^{-1}$)[維基] | 80 | 237 | 0.06-0.13 | 1.1 | 0.15-0.24 |
| 側視實驗照片 |  |  |  |  |  |
| 側視冰芯面積(藍色)(mm^2) | 485.0 | 599.5 | 736.4 | 1025.7 | 376.7 |
| 微細空氣柱分布狀態 | 密集放射狀 | 密集放射狀 | 稀疏放射狀 | 密集放射狀 | 密集放射狀 |

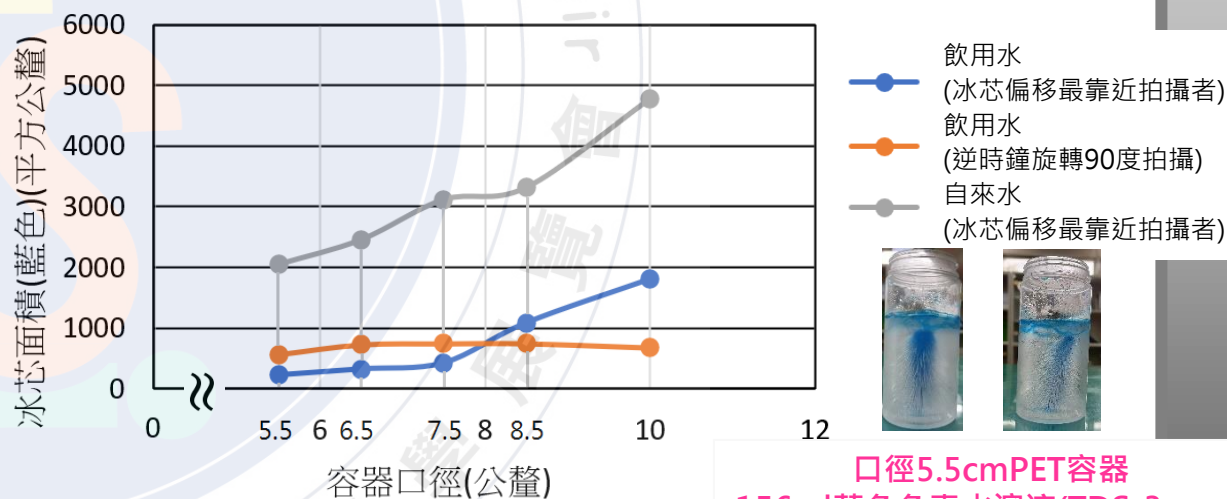


實驗2：PET容器不同規格對於冰芯與微細空氣柱的影響

實驗2-1：溶劑為飲用水，五種不同規格的PET容器

實驗2-2：溶劑為自來水，五種不同規格的PET容器

PET容器不同口徑與冰芯側面面積



容器材質的熱導率越低，會使得容器內水溶液凝固時，溶液內的降溫速度較不穩定，空氣成核會有中斷現象，使得方向性微細空氣柱形成時有斷裂情形產生。

肆、研究結果與討論

四、探討水溶液對於冰芯與微細空氣柱的影響

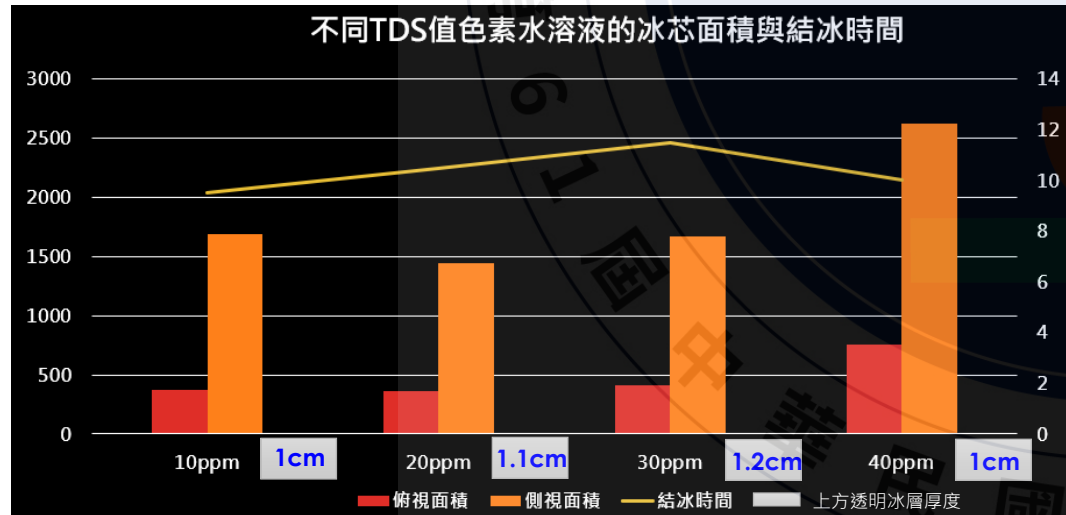
(一) 實驗變因

水溶液(種類、TDS值、溫度)→冰芯、微細空氣柱

(二) 實驗數據

實驗3：溶質與TDS數值對於冰芯與微細空氣柱的影響

實驗3-1：藍色一號食用色素不同TDS數值對於冰芯與微細空氣柱的影響



完全凝固先後順序：10ppm→40ppm→20ppm→30ppm

實驗3-2：同溶質不同TDS數值對於冰芯與微細空氣柱的影響

檸檬酸



冰芯：透明橢圓狀

小蘇打



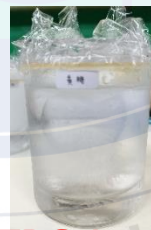
冰芯：圓柱霧狀

食鹽



冰芯：圓柱霧狀

二號砂糖



TDS:4ppm

低筋麵粉



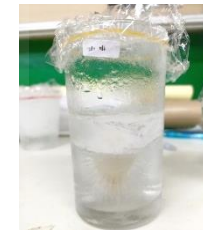
TDS:3ppm

全脂鮮乳



TDS:6ppm

無糖咖啡



TDS:4ppm

無糖豆漿

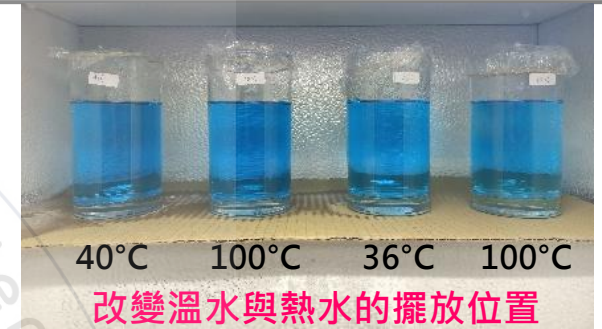


TDS:4ppm

水溶液TDS值越小時，可觀測到明顯放射狀微細空氣柱。

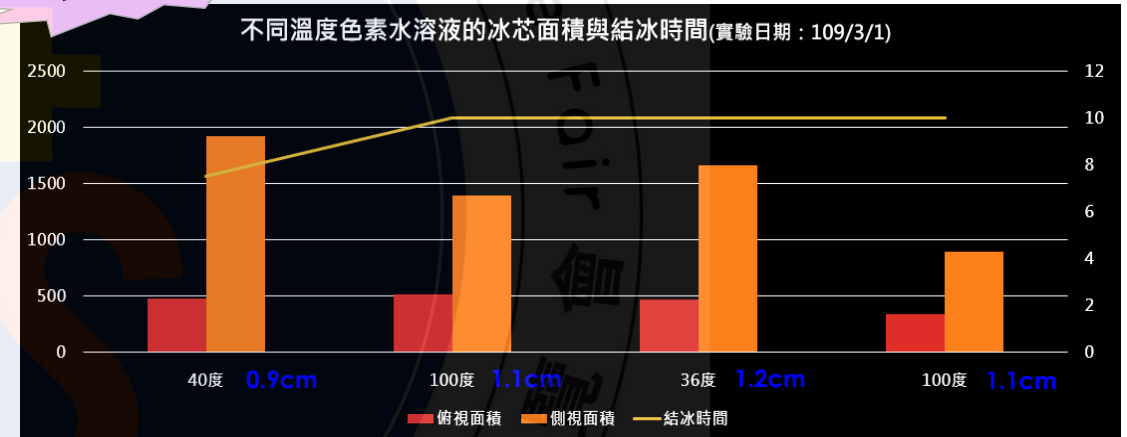
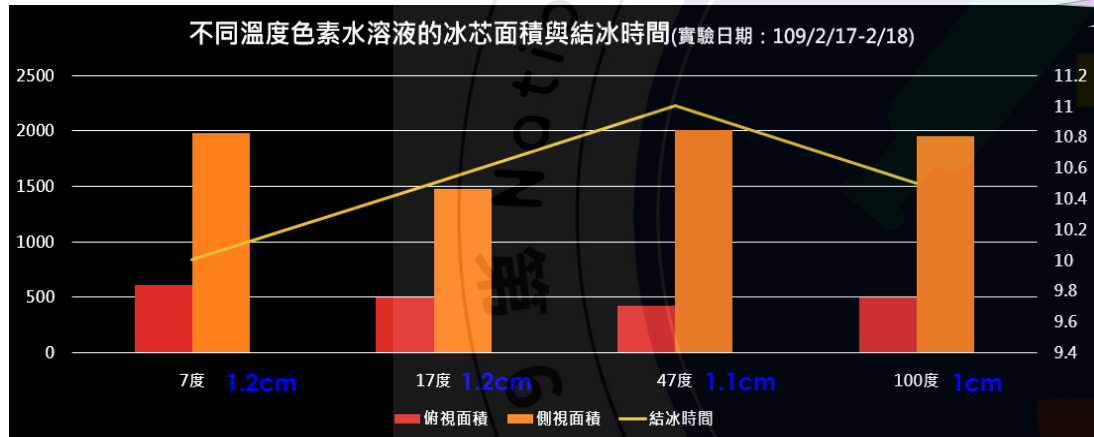
肆、研究結果與討論

四、探討水溶液對於冰芯與微細空氣柱的影響



實驗4：不同溫度水溶液對於冰芯與微細空氣柱的影響

彭巴效應？



擺放順序(由左至右)：7°C、17°C、47°C、100°C
完全凝固先後順序：7°C→17°C→100°C→47°C

改變溫水與熱水的擺放位置，進行水溶液凝固期間的觀察。
完全凝固先後順序：40°C→左100°C→右100°C→36°C

(三)實驗結論

- 1.在差異不大的冷凍環境下，TDS值與水溶液溫度的改變對於色素柱的上方透明冰層厚度影響甚小。
- 2.水溶液中的真溶液與膠體溶液在溶解性固體總量值(TDS)越小(約3ppm)時，會產生出微細空氣柱。

肆、研究結果與討論

五、探討環境控制對於冰芯與微細空氣柱的影響

(一) 實驗變因

冷凍環境、牆壁夾角度數 → 冰芯、微細空氣柱

(二) 實驗數據

實驗5：不同環境控制對於冰芯與微細空氣柱的影響

實驗5-1：不同溶劑在圓柱型紙桶、鐵桶環境凝固對於冰芯與微細空氣柱的影響



圓柱型鐵桶環境



圓柱型紙桶環境

| 降溫凝固環境 | 圓柱型鐵桶環境 | | 圓柱型紙桶環境 | |
|------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| 溶劑 | 飲用水 | 自來水 | 飲用水 | 自來水 |
| TDS 值(ppm) | 3 | 117 | 3 | 107 |
| 俯視實驗照片 | | | | |
| 俯視冰芯面積(藍色)(mm ²) | 650.66 | 659.164 | 1549.727 | 1927.999 |
| 側視實驗照片 | | | | |
| 側視冰芯面積(藍色)(mm ²) | 1270.138 | 2511.322 | 1302.577 | 2219.351 |
| 冰芯形成狀態 | 漏斗狀 | 圓柱狀 | 漏斗狀 | 圓柱狀 |
| 微細空氣柱分布 | 密集 | 稀疏 | 密集 | 稀疏 |

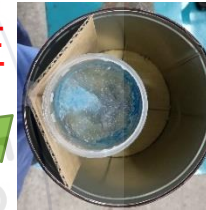


第51屆科展-有色冰柱往排列中心集中

實驗5-2：不同角度牆壁對於冰芯與微細空氣柱的影響



冷凍環境控制修正



在圓柱型鐵桶內之不同角度牆壁

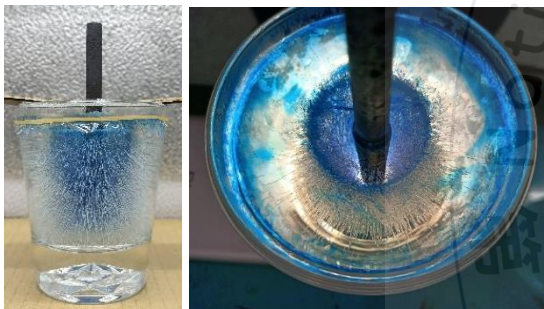
| 牆壁角度 | 45 度 | 60 度 | 120 度 | 135 度 |
|------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| 俯視實驗照片 | | | | |
| 偏離中心位置(mm) | 11.42147 | 18.74487 | 20.33249 | 28.01931 |
| 俯視冰芯面積(藍色)(mm ²) | 387.996 | 553.352 | 329.451 | 296.242 |
| 側視實驗照片(側面正前方、轉 90 度) | | | | |
| 側視冰芯面積(藍色)(mm ²) | 1572.325 | 1273.359 | 1292.139 | 1278.282 |

肆、研究結果與討論

五、探討環境控制對於冰芯與微細空氣柱的影響

實驗6：水溶液容器中心放置不同材質導熱固體
對於冰芯與微細空氣柱的影響

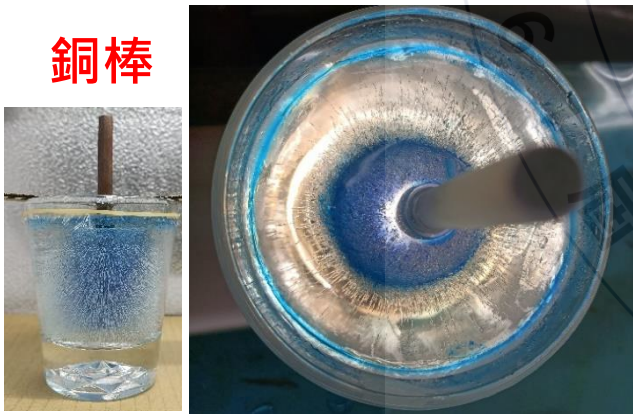
碳棒



鋅棒



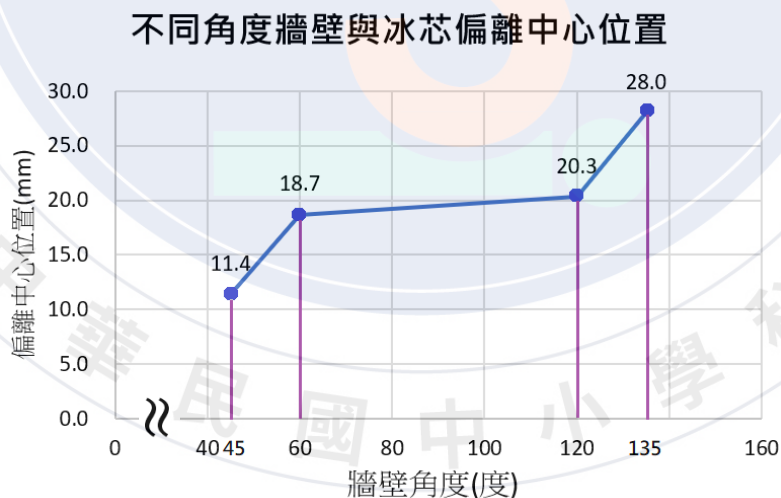
銅棒



中心棒附近均有透明冰層與微細空氣柱之形成。冰芯呈現圓環狀夾層。

(三)實驗結論

1. 將水溶液容器放置在圓柱型冷凍環境的正中心，熱量均勻釋放，水溶液結冰速率相對穩定，冰芯位置接近正中心不偏移。
2. 水溶液的TDS值越大，形成的冰芯體積越大，空氣成核現象較少。
3. 在 $-16^{\circ}\text{C} \sim -21^{\circ}\text{C}$ 的冷凍環境下，將TDS為3 ppm之700 ml 藍色食用色素水溶液裝入PET直圓柱罐(口徑10cm，高度12cm)後，放入圓柱鐵桶(口徑15cm，高16cm)進行凝固，不同角度牆壁使冰芯偏離中心位置距離預測關係如下：



x 為牆壁角度(單位：度)，

$f(x)$ 為冰芯偏離中心位置(單位：mm)

$$f(x) = \begin{cases} \frac{73}{150}x - 10.5, & 45 \leq x \leq 60 \\ \frac{2}{75}x + 17.1, & 60 < x < 120 \\ \frac{77}{150}x - 41.3, & 120 \leq x \leq 135 \end{cases}$$

伍、結論

食用色素
水溶液冰芯、
微細空氣柱
的形成

容器

水溶液

冷凍環境

1. 食用色素水溶液在開口容器內降溫凝固，凝固速率方向(上下左右→中間)，下方食用色素因**重力作用集中沉澱**至下方形成之微細空氣柱內，形成色素冰芯。
2. 空氣成核現象會先出現在**下方固液介面**，並持續延伸形成微細空氣柱。**側面空氣成核現象較晚出現**。原因可能是因重力作用，色素往中間及下方集中，使得下方固液介面細微顆粒較多，空氣較容易出現成核現象。
3. 容器材質的**熱導率越低(如紙杯 $0.06-0.13\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)**，會使得容器內水溶液在凝固時，**溶液內的降溫速度較不穩定**，空氣成核會有中斷現象，使得**方向性微細空氣柱形成時有斷裂情形**產生。
4. 在冷凍條件差異性不大的環境下，**TDS值與水溶液溫度的改變對於色素水溶液的上方透明結冰層厚度影響甚小**。
5. 水溶液中的**真溶液與膠體溶液在溶解性固體總量值(TDS)越小(約3ppm)時**，會產生出**微細空氣柱**。水溶液的TDS值越大，形成的冰芯體積越大，空氣成核現象較少。
6. 將水溶液容器放置在**圓柱型冷凍環境**的正中心，**冰芯位置接近正中心不偏移**。
7. 在45度-135度牆壁角度環境下，冰芯會沿著**牆壁夾角角平分線向角的頂點偏移**，且**牆壁角度越大(約120-135度)**，**冰芯偏離中心越多**。

陸、未來展望

1. 製作**相同規格之不同材質容器**，觀測不同熱導率材質容器對於冰芯與微細空氣柱的影響。
2. 調製**不同TDS值溶質水溶液**，觀測其微細空氣柱生成情形與無法觀測或未生成微細空氣柱之臨界值。
3. **重複實驗不同溫度、溶質之水溶液**，觀測是否有彭巴效應的產生。
4. 可在**將牆壁角度進行細分，並使用不同口徑的容器**，量測冰芯偏離中心距離，觀察牆壁角度、容器口徑對於冰芯偏離中心距離是否具有預測力。

柒、參考文獻

1. 凝固-維基百科<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%87%9D%E5%9B%BA>
2. 解開水之謎交大團隊新發現 將改寫理化課本
<http://www.nctu.edu.tw/component/k2/item/3074-2018-06-29-05-52-41>
3. 郭嘉翰 (2019) 。色藏冰芯-探討水結冰之純化作用。中華民國第59屆中小學科展國中組物理科。國立臺灣科學教育館，臺北。
4. 黃得時(主編) (2014) 。普通高級中學選修化學上冊。新北市：龍騰。
5. 依數性-維基百科<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E4%BE%9D%E6%95%B0%E6%80%A7>
6. 黃昶誠 (2003) 。水冰介面固化成核現象之研究 (碩士論文) 。取自臺灣博碩士論文系統。
7. 劉婕宇等 (2011) 。冰漩渦。中華民國第51屆中小學科展國中組物理科。國立臺灣科學教育館，臺北。
8. 曾柏睿等 (2018) 。被冰封的漩渦流-探討放熱式漩渦的氣體逃逸路線。中華民國第58屆中小學科展國中組物理科。國立臺灣科學教育館，臺北。
9. 郭重吉(主編) (2019) 。國中自然與生活科技第三冊。臺南市：翰林。