

# 中華民國第 58 屆中小學科學展覽會 作品說明書

---

國中組 物理科

佳作

030118

被冰封的漩渦流

-探討放熱式漩渦的氣體逃逸路線

學校名稱：臺北市立天母國民中學

作者：  國二 曾柏睿  國二 涂心瑜  國二 譚采芸	指導老師：  許馨云  羅文杰
---	-----------------------------

關鍵詞：氣體逃逸線、放熱式漩渦、凝固

## 摘要

所謂的放熱式漩渦，推測是一種類似對流的結果，由於水結冰前(4°C→0°C)體積變大而往上流動，加上與水中所析出氣體的逃逸路線(往上)相同，提供漩渦的動能，實驗發現渦流的旋轉方向皆有可能，故應屬於水體為平衡渦流動能系統的因應結果，導致整體旋轉的方向會保持一致。

所以我們利用色素水在結冰前的純化作用，從所排擠出的色素範圍形狀，及溶解的氣體由水中析出後的行進路徑來觀察，便能看出水體在凝固前，放熱式漩渦所形成的特殊結構，研究發現：

水在凝固結冰時的型態會受到容器的形狀、大小及冷卻部位差異的影響，就算不同的獨立水體靠近後，依舊會彼此相互影響，這些都會產生不同型式的放熱式漩渦流動。

## 壹、研究動機

由去年對於觀察冰塊的實驗中發現，它並不是整塊都是無色透明的，有時中間有一條條白色的冰柱，有時透過冰塊結冰後裡面各種白色冰柱的形狀、排列與彎曲弧度，都可以判斷它結冰時的環境條件，甚至還能知道它是如何結冰的，真的是很神奇。因此延續去年的想法，今年我們決定要再更深入的探討冰塊在不同變項間的相互影響，想對冰塊的研究能夠再進行更深入的探討。

## 貳、研究目的

- 一、觀察水結冰時放熱式漩渦的結構。
- 二、探討不同冷卻變項，對放熱式漩渦結構的影響。
- 三、探討不同冷卻變項間，對放熱式漩渦的相互影響。
- 四、由實驗發現歸納放熱式漩渦形成的原因。

## 參、研究設備及器材

### 一、花青素染料電池製作材料

#### (一)染料電池材料

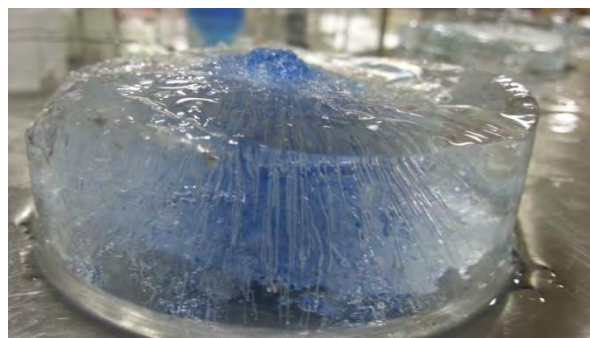
名稱	規格	數量	名稱	規格	數量
食用色素	藍色液狀	100mL	透明容器	直徑 9.4cm、高 10.5cm	50
自來水	一般家用	30L	透明容器	直徑 7.5cm、高 10.5cm	2
冰塊	自製	30L	透明容器	直徑 5.3cm、高 10.5cm	2
尺	30cm	1	透明容器	直徑 9.4cm、高 8.5cm	2
鋸子	木工用	1	透明容器	直徑 9.4cm、高 4.5cm	2
溫度計	數字型	1	保力龍板	100cm*100cm	1
冰櫃	-18°C	1	隔熱泡棉	120cm*120cm	1
量筒	100mL	2	泡綿膠	一般文具用	1
相機	數位	1			

## 肆、研究過程或方法

### 一、相關文獻整理

查閱了相關資料後，發現有關水結冰過程時會產生漩渦式流動現象的資料如下：

『水結冰時的放熱方式是漩渦式的流動，且其強度和溫度有關。以染色的水讓其結冰時，透過染色物的集中方式發現此結論。因容器中各部分水結冰的時間不同，當色素粒子結冰後即難以再流動，而尚未結冰的色素粒子則繼續流動，可捕捉到水結冰時水流的影像。而不同的受冷方式，可輕易控制某些非水分子的集中位置，甚至可造出令人驚嘆的美麗形狀。另外將有色冰柱解剖，竟發現正中心顏色較淺，狀似颱風眼。由粒沙見世界，也許颱風的形成、或大如銀河系的形成也和受冷放熱的漩渦式流動有關。』(引自：冰漩渦)



透過空氣柱及藍心可呈現放熱式漩渦

為何水在放熱時會產生漩渦式的流動呢？而且溫差越大，所產生的漩渦現象就越明顯。對於這種現象要如何：

(一)透過適當的工具及方法來看出這種放熱式漩渦的現象？

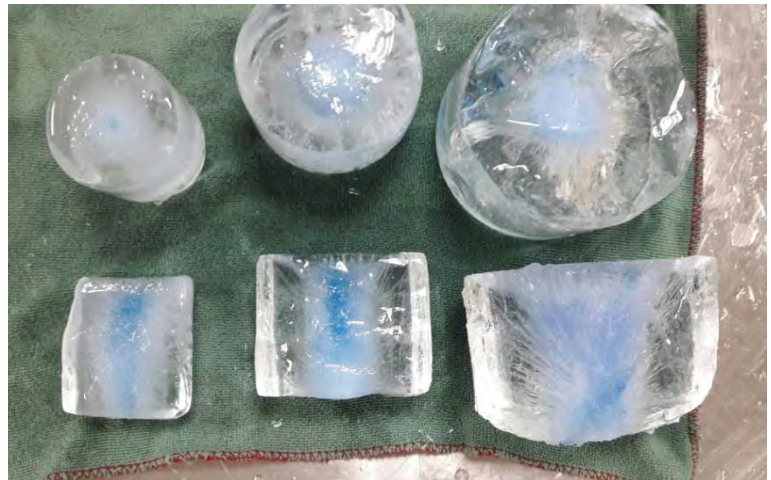
(二)如何定義漩渦流動的方向與強度？

(三)如何透過操控變因來找出產生放熱式漩渦的原因？

## 二、放熱式漩渦觀察定義

**藍心成因：**將色素顏料溶解在水中後，拿到冷凍庫冰存，因為水在結成冰時需要透過水分子中氫鍵角度的相互排列連接才能形成，為了維持這種需要純為水分子才能形成的結構，因此會將其他非水分子結構的物質排擠出去，而產生所謂的純化現象，造成不是水分子構成的藍色顏料，會被排擠到還沒有結冰的水分子團中，所以我們便可由冰柱中藍心的形狀，看出水在結冰時的先後順序與方向。

**空氣柱成因：**水中本來就溶解許多空氣，在加熱時的沸騰，除了溶解在水中的氣體因為溶解度降低而逸出，但有更多的是水分子因受熱而氣化為水蒸氣跑出。而本研究所定義的空氣柱則是以水在降溫時，原本溶解在水中的氣體，因為溶解度的改變而逸出時所產生的氣泡，但由於氣泡在快要結冰的水中移動，便會產生所謂空氣柱的現象。其實溶解在水中的氣體是均勻分布的，但在結冰的過程中，水體中每個位置的氣體都是呈現均勻逸出的，但先結冰的位置氣泡可能就先被固著在冰內，而後結冰的位置，有可能因先前的氣體都已逸出，導致最後結冰時空氣柱的分布會不均勻，所以由空氣柱的疏密程度其實也可以判斷結冰時的先後順序。



**(一)漩渦強度：**由空氣柱的長度，可以判斷放熱式漩渦的強度，通常空氣柱越長，表示漩渦強度越強；反之，空氣柱越短，則表示漩渦強度越弱。



## (二)漩渦流動方向：氣泡在快要結冰的水中

移動時，所產生的空氣柱不是均勻的管狀，而是前端圓大，而尾端因拉長呈尖細狀，所以由空氣柱的前、後端形狀，除了可以判斷漩渦的方向外，還可以從空氣柱的弧度形狀來拼湊出漩渦的形狀。



## (三)放熱方向：由冰柱與藍心的比例與形狀可以

看出結冰的先後順序，所以便能透過藍心做為觀測水體放熱方向時的一個指標。



## 伍、研究結果

### 實驗一：加入不同溶質觀察放熱式漩渦的結構

**步驟：**在兩個裝有 600ml 水的容器中分別加入 50g 的鹽和糖，攪拌後使其溶解(濃度為 6.25%)，

接著在室溫中等待熱平衡後放入冰櫃中冷凍，等結冰後再取出容器，分析不同溶質對冰漩渦的影響。



放上秤量紙歸零



鹽 50 公克



糖 50 公克

**預測結果：**加了糖和鹽皆會使凝固點降低，結冰速度較慢，藍心較細，鹽會使凝固點下降更多，藍心最細。溶液裡大部分的水會先結冰，剩下的是較濃的糖或鹽溶液。

### 實際結果：

1.加入糖：糖並未被水分子推擠至中央形成柱體，依然均勻分布於水中，且形成一個上凸、下凹的特殊現象。

2.加入食鹽：食鹽並未被水分子推擠至中央形成柱體，依然均勻分布於水中，造成冰塊結構脆弱，輕壓即碎裂。



鹽水結冰

糖水結冰

### 實驗發現推論：

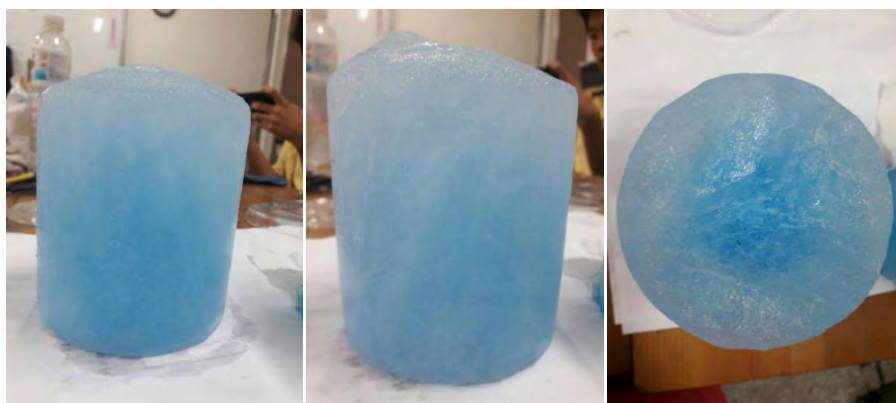
1.鹽水和糖水在結冰時不一定能讓冰產生純化作用，但為何海上的浮冰卻是淡水，

2.推論可能是因鹽水讓水的冰點降低，造成鹽水瞬間結冰，或因濃度過高，導致容器邊緣的鹽水無法被純化而形成鹽心。

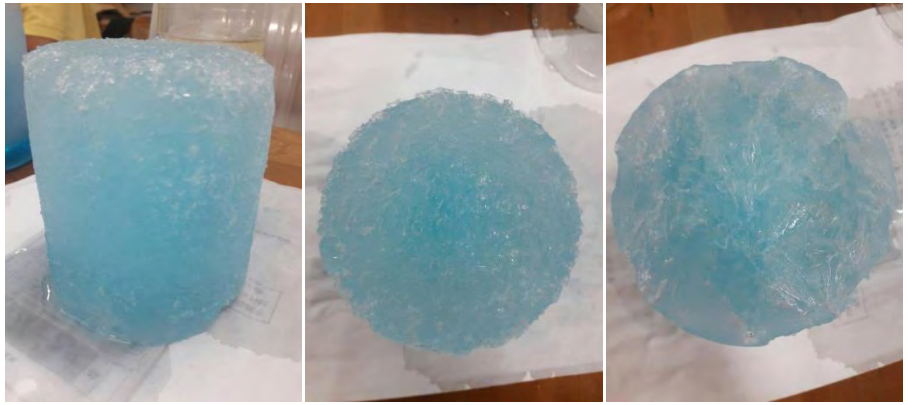
3.針對兩種可能情況，因此將鹽水與糖水的濃度降為3%，重複上述相同的步驟，觀察不同溶質對放熱式漩渦結構的影響。

### 推論印證結果：

1.糖水的濃度降到3%，在結冰時，由色素所產生的藍心可看出，水體已產生純化現象，糖便被推擠到中央。



2.鹽水濃度降到 3% ，  
在結冰時，水體同樣  
也會產生純化現象，  
同時也發現，藍心的  
結構變得很脆弱。推  
測鹽被排擠到中央，



破壞了水分子之間在結冰時的氫鍵結構，這可由在外圍外圍純化的水所結成的冰較堅硬可印證出此一推論。

## 實驗二、水體不對稱的冷卻對放熱式漩渦結構的影響

器材：設備與材料：冰櫃、三個相同容器、水、藍色色素、泡棉、隔熱墊

步驟：

- 1.在三個容器中加入 650ml 的水和一滴色素
- 2.分別用泡棉和隔熱墊包上下 左右 還有一個不加泡棉
- 3.在室溫中放置一段時間等待熱平衡
- 4.放入冰櫃
- 5.靜置
- 6.取出容器，並分析受冷處的不同對冰漩渦的影響

預測結果：加了泡棉的部分結冰較慢，藍心和空氣柱會偏向加了泡棉的位置。上下加泡棉的冰漩渦，藍心較細。

實際結果：藍心和空氣柱會偏向有加泡棉的地方，上下加泡棉的冰塊藍心結冰的情況和沒有加的一樣。所以受冷處應該不是上下。全部包的就不會完全結冰。可見水體受冷應該不是由上下的面接受的。

- (1)將透明容器直接放入冰庫以此所產生的藍心為基準來進行比較。
- (2)完全包覆：將透明容器外全包覆保力龍板，藍心變細且空氣柱有拉長的現象

(3) 露出瓶口：將透明容器外包覆保力龍板露出瓶口，藍心被向下擠壓下來且直徑變粗，形成蕈狀，上方依然潔淨透明，空氣柱在藍心上端以橫向向外擴散藍心呈蘿蔔狀。氣泡把冰塊分成上下兩半。下層空氣柱較明顯。上層空氣柱較不明顯，氣泡圍繞在藍心上呈放射狀。藍色色素最多的地方在最下層，只有兩個點最深，其他都比較淺。

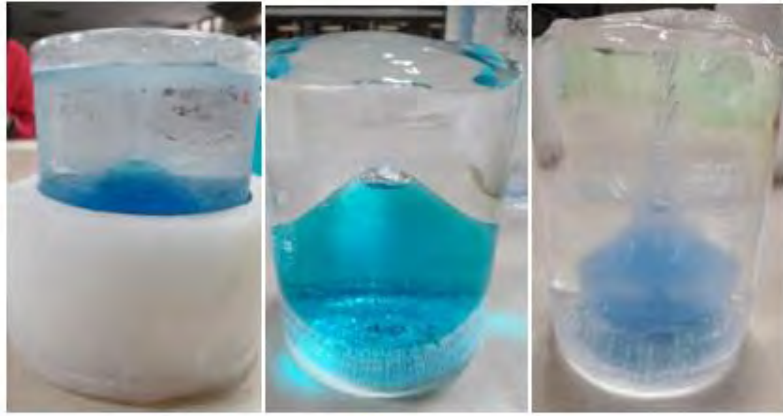


(4) 露出瓶底：將透明容器外包覆保力龍板，僅露出瓶底，藍心被向上提起但範圍縮小，上方透明冰塊厚度變薄，到頂部的空氣柱數量變多，且移動的路徑變得比較傾斜

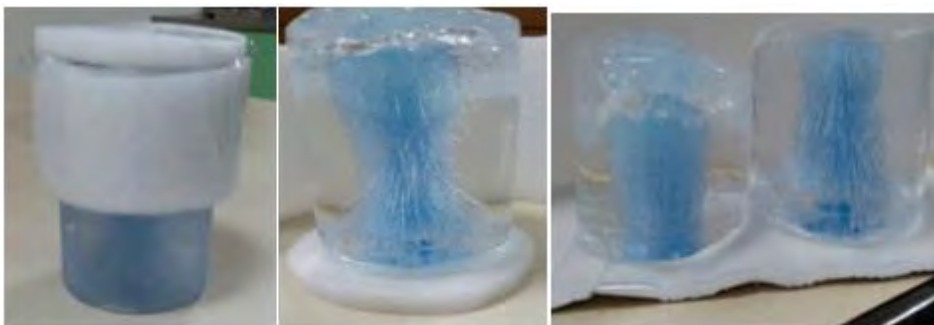


(5) 露出上半部：將透明容器下半部包覆保力龍，形成上冷下熱，藍心被向下擠壓下來且直徑變粗，形成蕈狀，上方依然潔淨透明，空氣柱在藍心上端以橫向的方向往外擴散





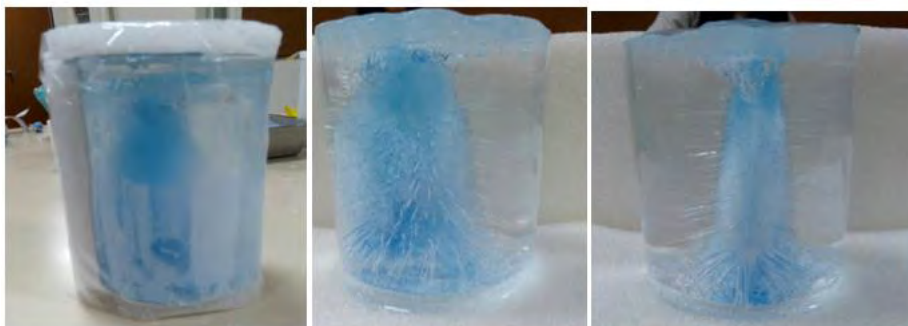
(6)露出下半部:將透明容器上半部包覆保力龍，形成上熱下冷，藍心被向上提起且範圍增加，上方透明冰塊的厚度變薄，到頂部的空氣柱數量有比較多，且移動的徑路變得比較傾斜。



(7)露出瓶身：將透明容器外包覆保力龍板，僅露出瓶身，藍心和未包覆冷凍的差異不大，可能是所包覆的範圍還不夠，無法看到差異冷卻的效應



(8)露出瓶身一側:透明容器外包覆保力龍板並露出一側，形成單邊受冷，藍心被推向無包泡棉的另一邊，即單邊受冷，有藍心將出現於對稱的另一邊，幾乎延伸到液面。而下方也沒有完全被推走。



(9)露出瓶身兩側:將透明容器外包覆保力龍板露出兩側，形成雙邊受冷，藍心被推到與兩側開口相互垂直的位置，且中央也呈現透明狀，同時空氣柱則由中間往兩側的藍心處移動



(10)露出瓶口和瓶底:將透明容器外包覆保力龍板，僅露出瓶口和瓶底中央的藍心比例和基準的差不多，只是上、下兩端的透明範圍略為增加，空氣柱的路徑依舊往上移動，但不是很明顯 中間偏上有一圈氣泡環繞，其中一面較低另一面較高。下層有明顯的空氣柱。藍心成圓球狀。上層氣泡成圓筒狀。藍心由氣泡組成。其中一面：較靠近藍心空氣柱形狀扭曲，遠離藍心空氣柱較直；另一面：空氣柱較直。

### 實驗三：加入塑膠片阻斷漩渦流動對冰塊結冰的影響

設備與材料：冰櫃、六個相同形狀容器、塑膠片、刀片、水、色素

1. 切割出如圖的五個塑膠片
2. 放入五個塑膠容器中
3. 在六個容器中加入 650g 水、一滴色素
4. 在室溫中放置一段時間等待熱平衡
5. 放入冰櫃
6. 靜置
7. 取出容器，並分析加入塑膠片對冰漩渦的影響

阻隔的塑膠片樣式

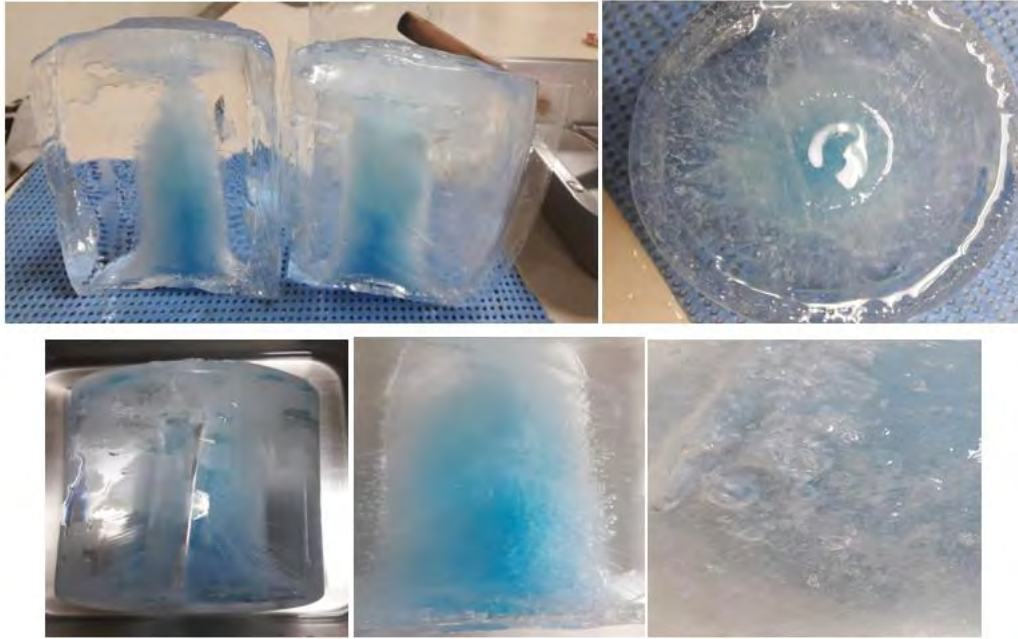
(一)將塑膠片剪成圓形



**預測結果：**藍心會分成兩半，不會各自獨立，氣泡會吸附在塑膠隔板上。

**實際結果：**分上下的冰塊，類似各有一個獨立的藍心，但是中間有相連。我們可以發現，空氣柱較一般的水體來說較少，但氣泡變多，尤其是在和塑膠片接觸的兩個面，我們推測是因為水體被分成兩個部分，塑膠片變成上半部的底部，而變成下半部的上端，兩個部分的水體為了將非水分子的物體排擠出去，使先前溶於水中的氣體逸出而形成氣泡，聚集在上部及下部，中間的塑膠片同有了上部及下部，所以氣泡較多。

(二)將塑膠片剪成長方形



分左右的冰塊，藍心並未改變，只是中間有塑膠板將兩邊隔開而已，所以藍心只有一個。

#### 實驗四：不同容器形狀對冰塊結冰的影響

設備與材料：冰櫃、圓柱體容器、橢圓體容器、水、色素

##### 實驗步驟

- 1.在兩個容器中加入 650g 水和一滴色素
- 2.在室溫中放置一段時間等待熱平衡
- 3.放入冰櫃
- 4.靜置
- 5.取出容器，並分析不同容器形狀對冰漩渦的影響

**預測結果：**藍心會因容器形狀而改變漩渦方向。漩渦也有可能變成容器的相似形。藍心色素的集中位置也不一樣。

**實驗結果：**



## 實驗五：不同容器大小對冰塊結冰的影響

設備與材料：冰櫃、三個不同高矮胖瘦的容器、水、色素

步驟：

- 1.在三個容器中分別加入 650g 水和一滴色素
- 2.在室溫中放置一段時間等待熱平衡
- 3.放入冰櫃
- 4.靜置
- 5.取出容器，並分析不同容器大小對冰漩渦的影響。

**預測結果：**不同容器大小對藍心有很大的影響，可能會造成漩渦無法形成。

**實際結果：**藍心只是放大和縮小而已，並沒有形狀上的改變。



## 實驗六：加入空心的塑膠塊狀物對冰塊結冰的影響

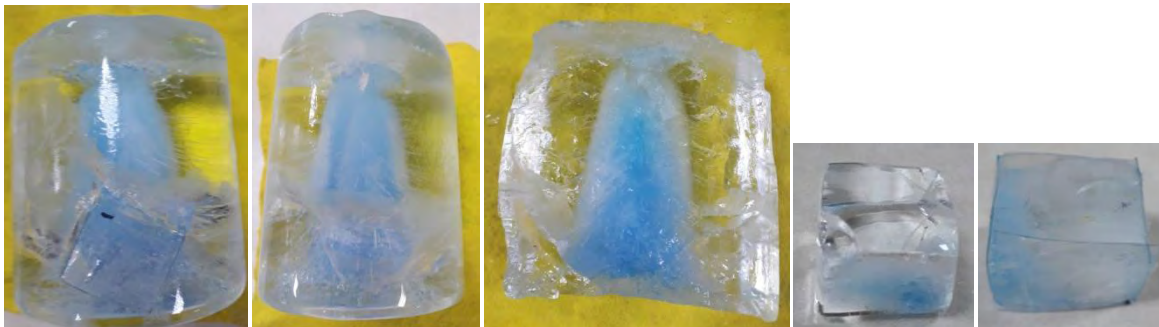
設備與材料：冰櫃、塑膠圓柱體容器、自製正方體空心塑膠塊狀物、水、色素

步驟：

- 1.在容器中加入 650g 水、空心塑膠塊狀物(水裝一半)和一滴色素
- 2.在室溫中放置一段時間等待熱平衡
- 3.放入冰櫃
- 4.靜置
- 5.取出容器，並分析空心塑膠塊狀物對冰漩渦的影響

**預測結果：**藍心因為空心塑膠塊狀物改變形狀；或是藍心把空心塑膠物包在裡面，藍心不受影響。藍色色素不會進入空新塑膠塊狀物。

**實際結果：**塑膠塊狀物會慢慢下降，塊狀物裡的藍色色素會和水體的色素一樣向內集中，所以塊狀物的一部分會在藍心裡面。



## 實驗七：排列擺放位置對冰塊結冰的影響

設備與材料：冰櫃、十三個相同形狀的容器、水、色素

步驟：

- 1.在十三個容器中分別加入 650g 水和一滴色素
- 2.放入冰櫃，分單一水體、兩個靠近、三個靠近、三個環繞、四個環繞
- 3.在室溫中放置一段時間等待熱平衡
- 4.放入冰櫃
- 5.靜置
- 6.取出容器，並分析擺放位置對冰漩渦的影響

**預測結果：**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。

**實際結果：**靠在一起的容器相當於一個大水體，所以藍心是向中心集中的。



## 實驗八：將一邊底部放硬物使容器傾斜及橫放對冰塊結冰的影響

設備與材料：冰櫃、硬物、相同形狀的容器、水、色素

步驟：

- 1.在容器中加入 650g 水和一滴色素
- 2.在室溫中放置一段時間等待熱平衡
- 3.放入冰櫃和放置硬物位置
- 4.靜置
- 5.取出容器，並分析傾斜程度對藍心的影響

**預測結果：**藍心會和冰箱夾層平行，藍心可能成不規則狀。

**實際結果：**藍心像一個被墊高的靴子，鞋跟的部分比較高，鞋尖的地方色素沉澱較多。空氣柱是上面的往上，下面的往下。

傾斜



橫放



前視

側視

俯視



## 實驗九：不同時間點對凝固中的放熱式漩渦結構的影響

設備與材料：冰櫃、圓柱體容器、水、色素

步驟：

- 1.在容器中加入 650g 水和一滴色素
- 2.放入冰櫃
- 3.每隔一個小時將容器從冰櫃中取出
- 4.觀察不同時間冰柱的變化

結果：



- 1.不同時間點的結冰順序，可以從中央藍心的形狀變化來看，剛開始最外圍的藍色水體顏色漸漸變淡，然後中央的藍心則是越來越濃。
  - 2.此外結冰的順序雖然是從上而下，由周圍到中間，若加上各個時間點來看，便能比較出上面的結冰速度會比周圍要快。
  - 3.空氣柱的形成，在還沒有結冰時是不太明顯，但有看到一些氣泡形成，附著在杯壁或冰塊邊緣，但結冰時，就可以看到氣泡被包在冰裡面，而先前的空氣柱還不是很明顯，等到冰塊結越多時，空氣柱就會越來越多，而且明顯拉長。
- 1.水在未凝固之前，氣泡的行進幾乎都是往上移動，方向不受放熱式漩渦的方向所影響，但等到開始凝固時，水中鬆散交錯的細冰使水流受阻，連帶也使氣泡容易停留在冰隙中，此時放熱式漩渦的導引作用，便開始影響氣泡的行進路線，透過不同時間點的凝固便能看到此現象。
  - 2.冰在凝固時雖然是由上往下，由周圍到中間，但在一層層加厚的同時，冰與水的界面，其實是夾雜著交錯的細冰，所以氣泡便不會立刻跑掉，還能在這裡面微幅的移動，造成最後所看到的空氣柱。

## 陸、討 論

### 一、歸納實驗發現

#### (一)實驗一歸納

- 1.水對不同溶質所形成的水溶液，在結冰時都會產生純化的作用。
- 2.水在結冰純化的過程中若溶液中的溶質濃度過高或改變冰點的溫度，都會影響水在結冰時的純化效果。

#### (一)實驗二歸納

- 1.冰塊是從未包泡棉的部分開始結冰，這證明了隔熱泡棉確實有隔熱效果，能影響冰塊的結冰順序。
- 2.藍心會明顯地偏向有包泡棉的部分且最晚結冰，代表水在結冰時會將非水分子之物質推向溫度較高處，直到藍色色素無處可去時才會結冰形成藍心。

#### (二)實驗三歸納

- 1.放入塑膠片對藍心沒有太大的影響。
- 2.空氣柱變少且氣泡變多，可能是因為氣體在移動時會被塑膠片阻擋，沒辦法形成長條型的空氣柱，氣體只能附著在塑膠片上形成氣泡。
- 3.這幾項發現使我們認為:過去學長姐的理論是錯的，水在結冰時並不會形成漩渦而是單純的從溫度較低的外部向溫度高的內部結冰而已。
- 4.藍心會形成垂直的柱體，不會在冰塊的正中央形成球體的原因是容器的受冷不平均底部因直接接觸冰櫃所以溫度較其他面還低，結冰也較快。

#### (三)實驗七歸納

- 1.藍心會偏向多個容器的交接處，因為交接處最不易受冷，所以藍色色素就會被推擠向交接處結冰。

#### (四)實驗九歸納

- 1.水在未凝固之前，氣泡的行進幾乎都是往上移動，方向不受放熱式漩渦的方向所影響，但等到開始凝固時，水中鬆散交錯的細冰使水流受阻，連帶也使氣泡容易停留在冰隙中，此時放熱式漩渦的導引作用，便開始影響氣泡的行進路線，透過不同時間點的凝

固便能看到此現象。

2.冰在凝固時雖然是由上往下，由周圍到中間，但在一層層加厚的同時，冰與水的交界面，其實是夾雜著交錯的細冰，所以氣泡便不會立刻跑掉，還能在這裡面微幅的移動，造成最後所看到的空氣柱。

## 二、由實驗發現推論放熱式漩渦形成原因

(一)由藍心和空氣柱的形狀推測，冰在凝固時雖然是由上往下，由周圍到中間，但在一層層加厚的同時，冰與水的交界面，其實是夾雜著交錯的細冰，所以氣泡就不會立刻跑掉，還能在這裡面微幅的移動。

(二)氣泡若能停留在水中，還能留下尾端空氣柱的痕跡，原本以為是水因為溫度降低，產生黏滯性造成，但觀察零度的水，流動性不受影響之後，所以推測應該是水在凝固前，因為折射的關係看不到水中交錯的細冰，這種細冰會對氣泡的行進產生一定程度的攔阻作用，但又不會完全將氣泡固著包覆起來。

(三)我們一直感到好奇在想，放熱式漩渦的流動是受到哪種力量的引導？原本是想到熱對流，當水體在冷卻時會往下沉，但氣泡卻是往上飄移，兩者方向相反，漩渦應該不容易導引氣泡走向，但後來看到空氣柱的方向也有橫向水平後，便斷定結冰前，水中交錯圍阻的細冰，反而有助於將氣泡原本向上漂移的力量給阻隔，才有機會使放熱式漩渦引導的力量出現。

(四)但為何這種類似對流的放熱式漩渦方向不是垂直，而是呈現漩渦式的轉動？這又讓我們思考了許久，後來推測一般的熱對流，不管是熱往上，還是冷往下，由於對流的垂直方向的作用力，明顯相對於因水阻所可能產生的側向力就被稀釋而不明顯，相反的，漩渦的對流行程可能是由於水體的溫度都是接近零度，在體積最小的四度，到結冰的零度時，水的體積有微幅變大的情況下，這時水應該會產生向上的流動的作用力，與氣泡向上漂移的路徑相同，便有加乘的效果。

(五)還有漩渦式的對流方向，是否與造成颱風旋轉的科氏力有關，但後來覺得尺度過小，科氏力應該不足以對漩渦方向產生影響，反而水中細冰所造成的水阻，無法讓水流順暢無阻的垂直向上移動，因而改採斜面路線的方向，以避開行進時的最大阻力方向。

(六)至於漩渦方向，到底是順時針轉，還是逆時針轉？因為發現兩主方向都有出現，甚至也有直線，所以旋轉的方向可能不一定，但方向一定都是整體一致相同。推測這應該要看當時獨立水體系統，在產生放熱式流動時，哪一個方向比較容易產生力的平衡來決定，而影響這種結果的因素就很多，包括罐子形狀、內壁的光滑程度和水體的勻稱都會影響。

### 三、定義放熱式漩渦模型

(一)形成溫度範圍： $4^{\circ}\text{C} \rightarrow 0^{\circ}\text{C}$  (溫度下界會隨溶液的凝固點而改變)

(二)藍心冰柱型態

1.形成條件：水體凝固時水的純化現象，使溶質往未結冰的水體集中。

2.形成位置：水體在結冰前溶質最後所集中的範圍。

3.放熱條件：

(1)結冰速度：凝固時間越短(長)，藍心柱體的直徑就越粗(細)。

(2)結冰順序：先凝固的水體析出溶質呈透明，後凝固的水體則含溶質(藍心)。

4.放熱範圍：

(1)藍心範圍、形狀判斷，水體放熱方向是由內而外、由下而上。

(2)獨立水體靠近聚合後，會以整個水體群由內而外、由下而上的方向放熱。

(三)空氣管柱型態

1.氣泡形成：水體凝固時由液態變成固態，使溶解的氣體因溶解度降低而析出。

2.形成位置：空氣柱起點即水體凝固的初始位置。

3.管柱口徑：尾端細前端粗，由孔徑粗細可判斷軌跡方向。

4.軌跡方向：

(1)由外側往中心並向上移動。

(2)受到水體的力平衡決定，方向雖然不固定但整體卻很一致。

(3)空氣柱形成方向即放熱式漩渦流動的方向。

5.管柱長度：

(1)渦流速度：渦流流速越快(慢)，空氣管柱長度越長(短)。

(2)結冰速度：結冰速度越快(慢)，空氣管柱長度越短(長)。

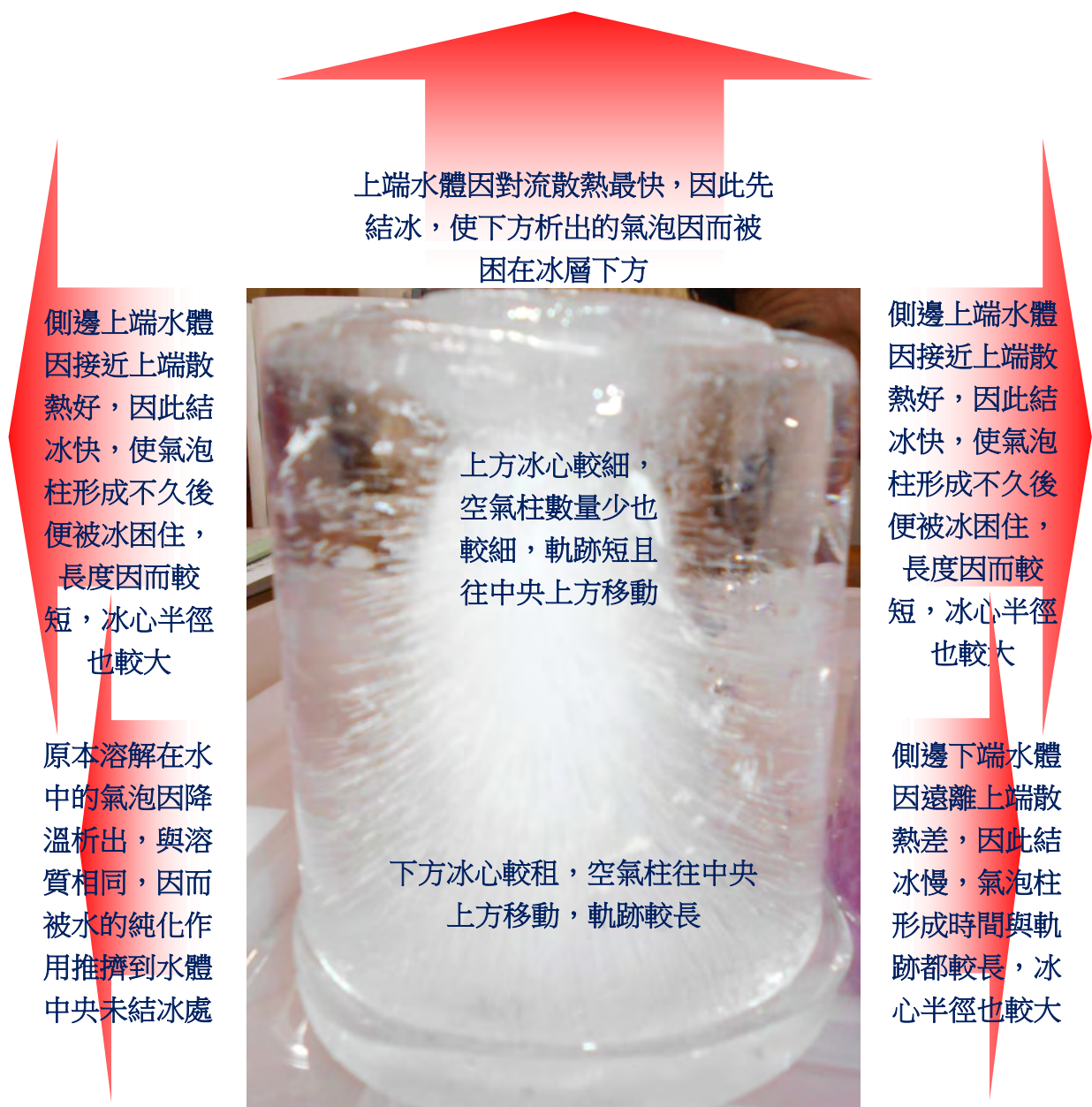
#### 四、放熱式漩渦結構

(一)形成條件：水體在  $4^{\circ}\text{C} \rightarrow 0^{\circ}\text{C}$  結冰前體積膨脹，使水體向中央、上方流動。

(二)推論依據：

- 1.冰心範圍形狀：水體放熱位置的「快慢」與「先後順序」(原理：水結冰的純化現象)
- 2.空氣柱：從空氣管柱口徑、長度、方向等記錄，可判斷放熱式漩渦水體的流動依據(原理：降溫時水的溶解度降低使空氣析出)

(三)放熱式漩渦圖解結構說明



## 五、影響放熱式漩渦結構的其他條件

(一)加入色素溶質，不改變水體凝固點的情況下，放熱式漩渦的冰心與空氣柱變得更明顯



色素所形成的冰心可作為判斷水體是否產生純化現象的主要依據

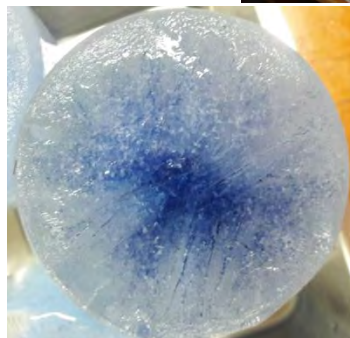
(二)加入鹽巴溶質，降低水體凝固點的情況下，冰心與空氣柱消失，破壞了放熱式漩渦形成的條件。(右圖)



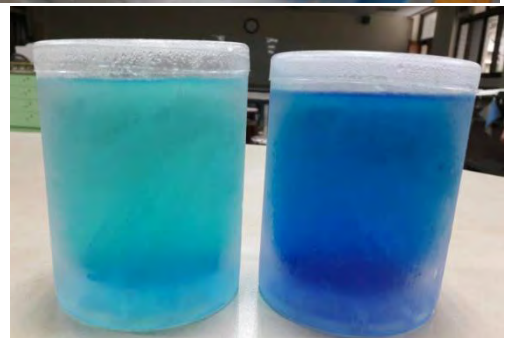
(三)水體內溶質濃度過高，即使沒改變凝固點溫度，依舊可能破壞放熱式漩渦結構。



色素濃度低氣泡較少



色素濃度低氣泡較多



色素濃度與冰心結構比較



色素濃度不同會影響水體的結冰速度與冰心結構

(四)獨立水體相互靠近後，放熱中心會移轉到聚合的水體中央。



藍心往聚合後的獨立水體中心移動

偏移的藍心與藍心的剖面

## 柒、結 論

- 一、水在凝固結冰時會受到容器的形狀、大小及冷卻部位的差異，而且就算相互獨立的水體在靠近後依舊會彼此相互影響，而產生不同過程型態的凝固結果。
- 二、將色素溶於水中冷卻凝固時，會先將非水分子的物質排擠出去，才能形成氫鍵而結冰，這種純化現象會將色素推擠到尚未凝固的位置，由色素的深淺及位置就能看出冰塊結冰的先後順序。
- 三、水在凝固過程中，因溫度而使溶解度改變，會使先前溶於水中的氣體逸出而形成氣泡，而凝固前的水中也會先產生看不到的交錯細小冰粒，因而使氣泡逃逸的路線受阻，以致形成空氣柱的軌跡，由此便可看出放熱式漩渦旋轉的結構。

四、放熱式漩渦的形成，推測是一種類似對流的結果，由於水在結冰前(4°C -->0°C)體積會變大而往上流動，再加上與溶出的氣體逃逸路線(往上)相同，提供漩渦流動的動能，至於旋轉的方向發現皆有可能，故推測應該是屬於水體系統在平衡整個渦流動能時的結果，才造成同一水體系統內的流向都是一致的。

五、所以利用溶解在水中色素與氣體，在凝固順序差異過程中，因色素被排擠而造成不同藍心的形狀，及氣體在逸出時的路徑，所形成的空氣柱軌跡，便能看出水體在凝固前，所形成放熱式漩渦的特殊結構。

六、未來發展

(一)對於放熱式漩渦成因的解釋，目前只能透過實驗進行有限度的推論，希望日後能設計出更精準的操作變項實驗，讓解釋更趨完備。

(二)對於其他液體在冷卻時，是否也會產生放熱式漩渦的現象，值得探討，這將有助於定義這種特殊條件下所形成的渦流型態。

## 心得感想

沒想到只是透過溶解在水中的色素，凝固後就能知道結冰時的先後順序，還有平常看到冰箱中的冰塊，有時候是透明潔淨，也有的時候好像也會佈滿一絲絲的紋路，後來才知道這是氣泡所形成的空氣柱，從凝固時顏料和空氣柱的形狀，這些日常生活中不足為奇的現象，竟然能解釋出令人驚訝的發現，真是令我大開眼界。

## 參考資料

劉婕宇、林子珉、林品君(2011)：冰漩渦。中華民國第 51 屆中小學科學展覽會。

楊祐韶、涂心瑜、楊承翰(2017)：多樣的冰封漩渦-從氣體逃逸線探討放熱式漩渦。台北市第 50 屆中小學科學展覽會。



## 【評語】 030118

1. 研究主題清楚且聚焦。對相關研究領域雖有貢獻但未能用可用之科學方法檢驗。具教材之相關性。
2. 創意、學術或實用價值有原創性不足，方法頗具可行性。
3. 科學方法設計周全之研究計畫。控因及變因清楚、適當及完整。結果具有再現性。觀察到的現象足以證實推論及釋義。
4. 展示及表達能力海報資料具邏輯性且海報有清晰之圖表及圖例。備實驗紀錄簿(研究日誌)及參考文獻。回答問題，清楚、簡潔、且思考縝密。了解結果與結論之釋義及限制。

# 摘要

所謂**放熱式漩渦**，推測是一種類似**對流**的結果，由於水結冰前(4°C → 0°C)體積**變大**而**往上流動**，加上與水中所析出**氣體逃逸路線**(往上)相同，提供漩渦的動能，實驗發現漩渦旋轉方向皆有可能，故應屬於水體為**平衡渦流動能系統**的因應結果，導致整體旋轉的方向會保持一致。

利用**色素水**結冰前的**純化作用**，從所排擠**色素形狀**，及氣體由水中**析出**後的**行進路徑**觀察，便能看出水體凝固前，放熱式漩渦的特殊**結構**，發現：

水在凝固結冰時會受**容器形狀、大小及冷卻差異**影響，就算不同的獨立水體靠近，依舊會彼此相互影響，這些都會產生不同型式的放熱式漩渦流動。



關鍵詞：氣體逃逸線、放熱式漩渦、凝固

## 壹、研究動機

由去年對於觀察冰塊的實驗中發現，它並不是整塊都是無色透明的，有時中間有一條條**白色的冰柱**，有時透過冰塊結冰後裡面各種白色冰柱的形狀、排列與彎曲弧度，都可以判斷它結冰時的**環境條件**，甚至還能知道它是如何結冰的，對於這個現象我們覺得非常有趣。因此延續去年的想法，今年我們決定要再更深入的探討冰塊在不同變項間的相互影響，想對冰塊的研究能夠再進行更深入的探討。



## 貳、研究目的

- 一、觀察水結冰時放熱式漩渦的結構。
- 二、探討放熱式漩渦在不同變項間的結構變化。
- 三、探討放熱式漩渦在不同變項間的相互影響。
- 四、由實驗發現歸納放熱式漩渦形成的原因。



## 參、研究設備及器材

### 一、放熱式漩渦實驗材料

名稱	規格	數量	名稱	規格	數量
食用色素	藍色液狀	100mL	透明容器	直徑9.4cm、高10.5cm	50
自來水	一般家用	30L	透明容器	直徑7.5cm、高10.5cm	2
冰塊	自製	30L	透明容器	直徑5.3cm、高10.5cm	2
尺	30cm	1	透明容器	直徑9.4cm、高8.5cm	2
鋸子	木工用	1	透明容器	直徑9.4cm、高4.5cm	2
溫度計	數字型	1	保力龍板	100cm*100cm	1
冰櫃	-18°C	1	隔熱泡棉	120cm*120cm	1
量筒	100mL	2	泡綿膠	一般文具用	1
相機	數位	1			



## 肆、研究過程與方法

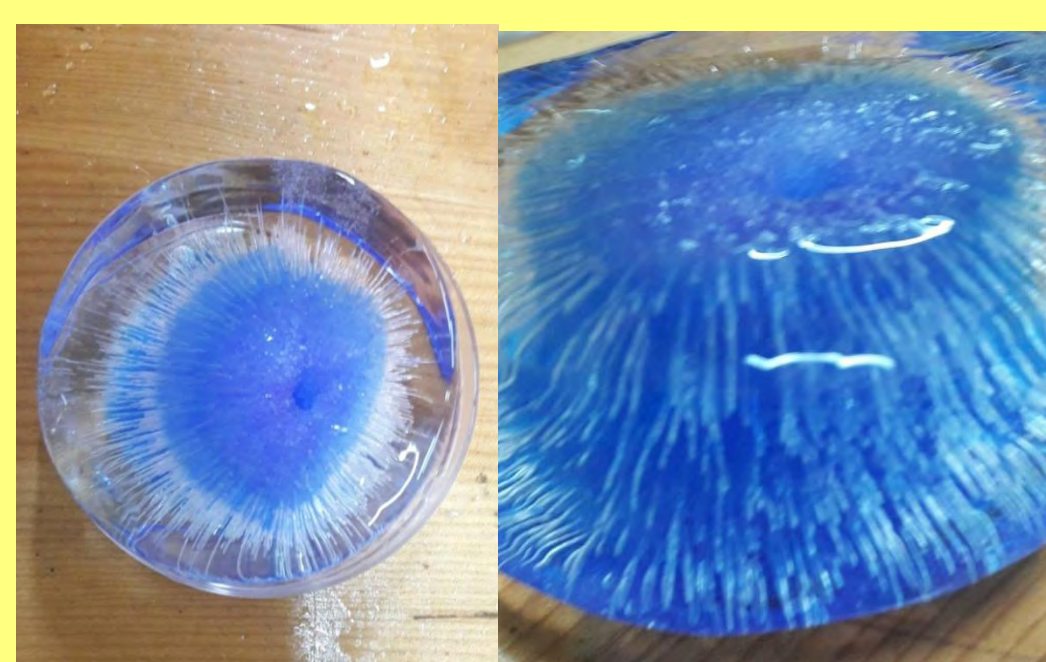
### 一、相關文獻整理

水結冰時容器各部分水結冰時間不同，色素粒子結冰即難以流動，尚未結冰色素粒子則繼續流動，透過不同的受冷方式，可輕易控制某些非水分子的集中位置與析出溶解氣體的行進路徑，如此便可捕捉到水結冰時水體**熱量範圍**的變化與**放熱式漩渦流動方向**的影像。

### 二、放熱式漩渦觀察定義

**藍心**：水結冰時需要透過水分子中**氫鍵**角度的相互排列連接，為維持這種水分子才能形成的結構，排擠非水分子的產生**純化現象**，造成藍色顏料被排擠到未結冰的水分子團中，所以由冰柱中藍心形狀，看出水結冰時**順序與方向**。

**空氣柱**：本研究所定義的空氣柱是以水降溫時，原本溶解在水中的**氣體**因**溶解度**改變而逸出時所產生的氣泡在快要結冰的水中移動，便會產生所謂**空氣柱**的現象。



不同條件所產生的藍心與空氣柱

**(一)漩渦強度**：空氣柱越長，表示漩渦強度越強；反之，空氣柱越短，則表示漩渦強度越弱。

**(二)漩渦流動方向**：空氣柱是前端圓大而尾端呈尖細狀，所以由空氣柱的前、後端形狀，可判斷漩渦方向還可從弧度來拼湊出漩渦的形狀。

**(三)放熱方向**：由冰柱與藍心的比例與形狀可以看出結冰的先後順序。



## 伍、研究結果與討論

### 實驗一：不同凝固時間點的放熱式漩渦結構

#### 結果：

- 1.從藍心形狀變化看出不同時間點結冰順序，最外圍藍色水體顏色變淡，然後中央藍心則是越來越濃。
- 2.結冰順序從上而下，由周圍到中間，加上各時間點便能比較出上面的結冰速度會比周圍要快。
- 3.水未凝固前，氣泡幾乎都往上移動，不受放熱式漩渦所影響，等到開始凝固，水中鬆散交錯細冰使水流受阻，連帶使氣泡停留在冰隙中，此時放熱式漩渦的導引作用影響氣泡路線，由各時間凝固便能看到此現象。
- 4.空氣柱還沒結冰時不太明顯，但有看到一些氣泡形成，附著在杯壁或冰塊邊緣，結冰時就可看到氣泡被包在冰裡，而空氣柱還不明顯，等冰塊越多空氣柱就會越來越多，而且明顯拉長。
- 5.冰在凝固時冰與水的交界面，其實是夾雜著交錯的細冰，所以氣泡便不會立刻跑掉，還能在這裡面微幅的移動，造成最後所看到的空氣柱。



一小時 三小時 六小時 九小時 十二小時

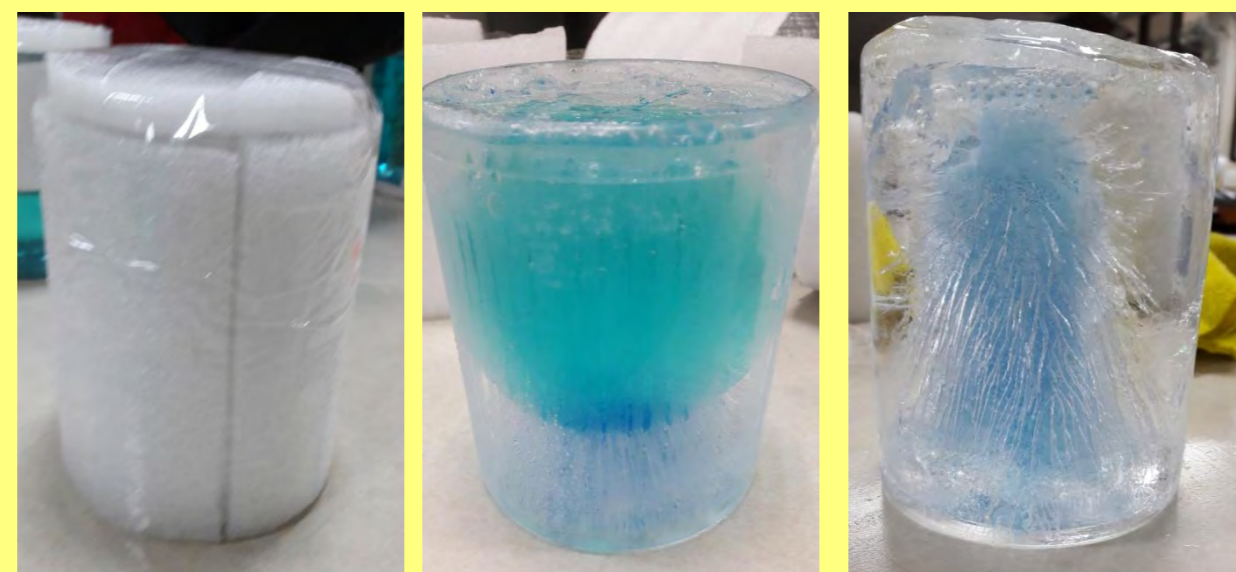
### 實驗二：受冷處對冰塊結冰的影響

#### 結果：

- 1.完全包覆：藍心變細且空氣柱有拉長的現象。
- 2.露出瓶口：藍心被向下擠壓且直徑變粗，形成蕈狀，上方依然潔淨透明，空氣柱在藍心上端以橫向擴散藍心呈蘿蔔狀。氣泡把冰塊分成上下兩半。下層空氣柱較明顯。上層空氣柱較不明顯，氣泡圍繞在藍心上呈放射狀。藍色色素最多的地方在最下層，只有兩個點最深，其他都比較淺。



- 3.露出瓶底：將透明容器外包覆保力龍板，僅露出瓶底，藍心被向上提起但範圍縮小，上方透明冰塊厚度變薄到頂部的空氣柱數量變多，且移動的路徑變得比較傾斜。

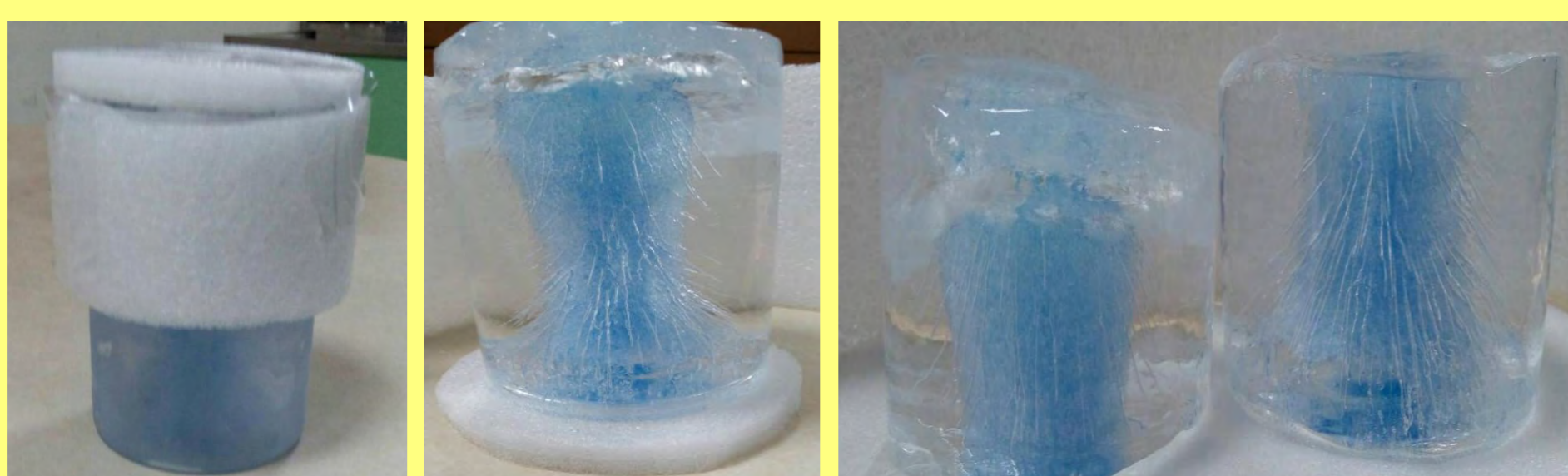


- 4.露出上半部：將透明容器下半部包覆保力龍，形成上冷下熱，藍心被向下擠壓下來且直徑變粗，形成蕈狀，上方依然潔淨透明空氣柱在藍心上端以橫向的方向往外擴散。



- 5.露出下半部：將透明容器上半部包覆保力龍，形成上熱下冷，藍心被向上提起且範圍增加，上方透明冰塊的厚度開始變薄，到頂部位置時空氣柱的數量變得有

比較多且移動的徑路變得比較傾斜。

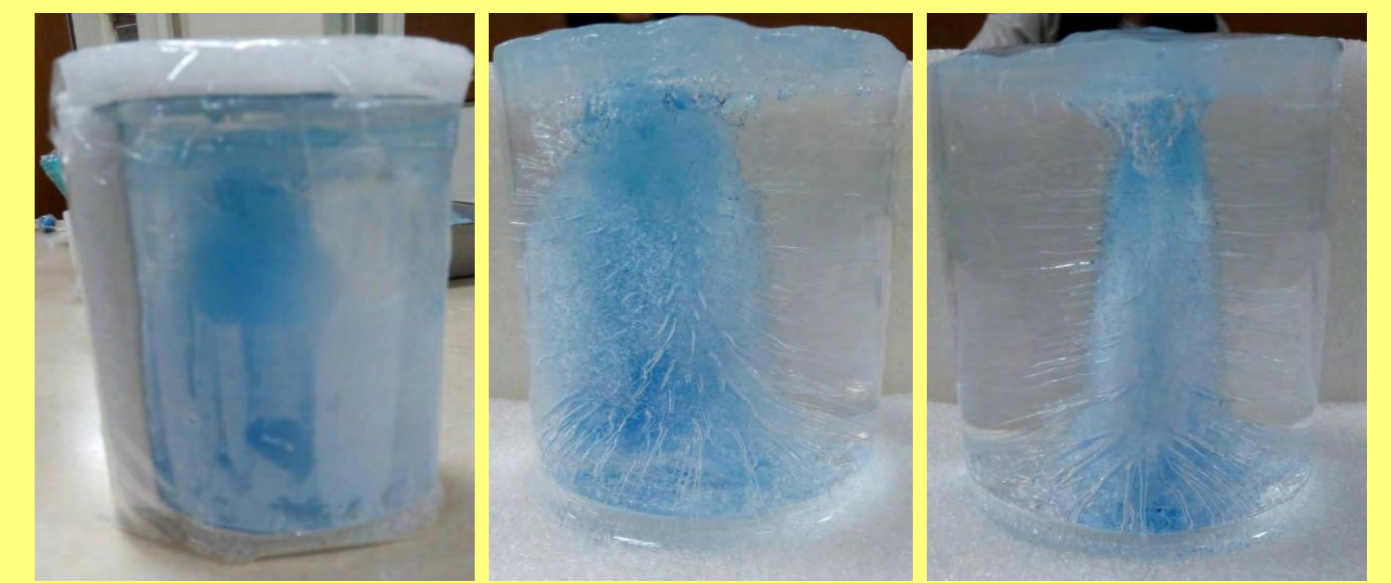


- 6.露出瓶身：將透明容器外包覆保力龍板，僅露出瓶身，藍心和未包覆冷凍的差異不大，可能是所包覆的範圍還不夠，無法看到差異冷卻的效應。



- 7.露出瓶身一側：透明容器外包覆保力龍板並露出一側，形成單邊受冷，藍心被推向包泡棉的那一邊

，即單邊受冷，有藍心將出現於對稱的另一邊，幾乎延伸到液面。而下方也沒有完全被推走。



### 實驗三：排列擺放位置對冰塊結冰的影響

結果：由藍心轉向朝相互聚合容器群的中心點方向來集中的趨勢可看出，彼此獨立但相互靠近的水體，會隔著容器相互聚合成一個新的放熱系統的大水體。



### 實驗四：加入不同溶質觀察放熱式漩渦的結構

- 1.加入糖：糖水的濃度降到3%，在結冰時，由色素所產生的藍心可看出，水體已產生純化現象，糖便被推擠到中央，造成糖的水體上方凸出來。
- 2.加入食鹽：鹽水濃度降到3%，在結冰時，水體同樣也會產生純化現象，同時也發現，藍心的結構變得很脆弱。

討論：推測鹽和糖被排擠到中央，破壞了水分子之間在結冰時的氫鍵。



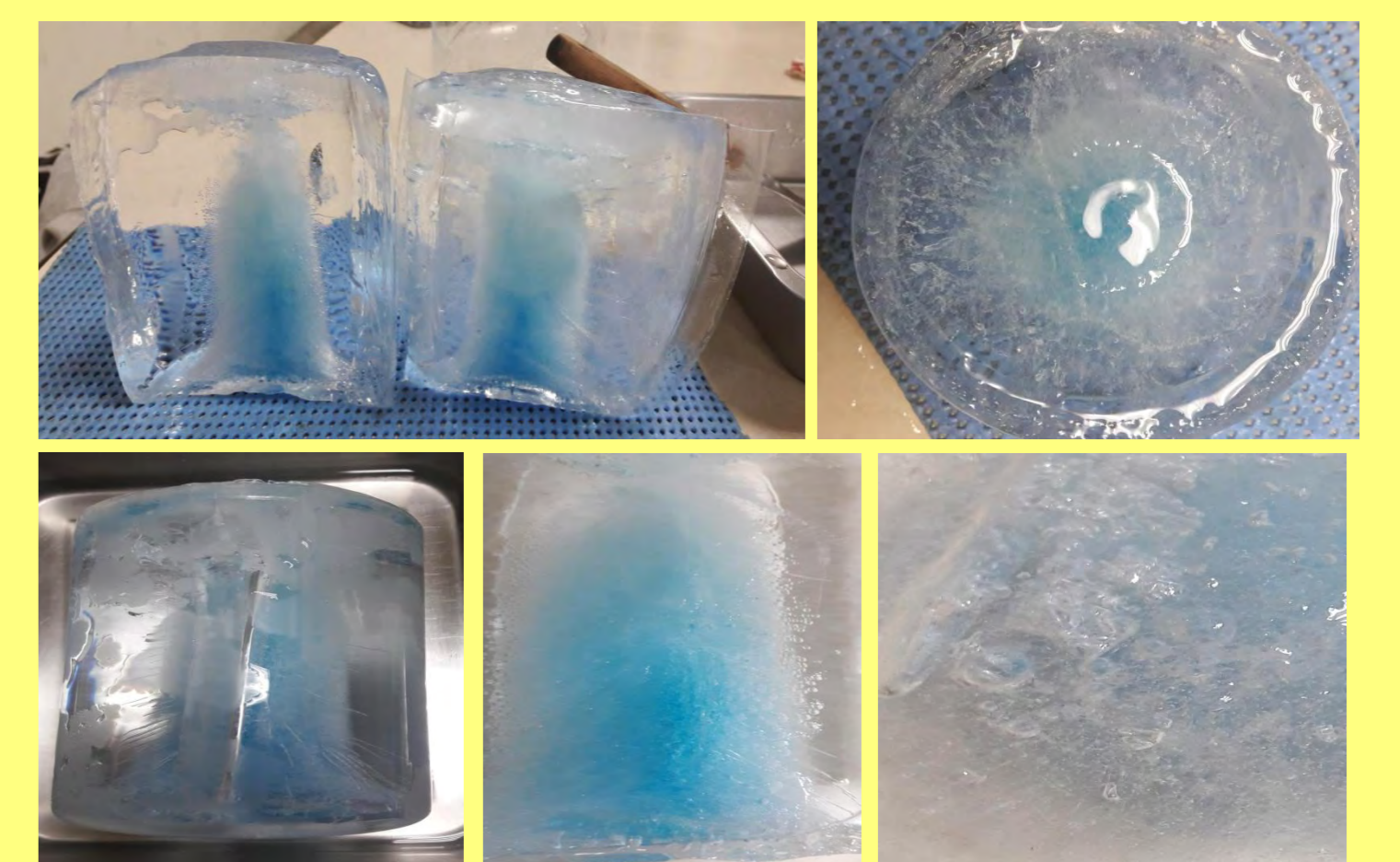
糖水結冰

鹽水結冰

因連結變弱，造成結構脆弱輕壓即碎的結果；而冰柱上方突起，則可能是周圍結冰速度較快，使得中央晚結冰的水體空間受限，只能往上方的空間膨脹。

### 實驗五：加入塑膠片阻斷漩渦流動對冰塊結冰的影響

結果：分上下各有一個獨立的藍心，但中間相連。空氣柱較一般水體少，但氣泡變多，尤其與塑膠片接觸的兩面，推測因水體被分成兩部分，兩個水體為將非水分子排擠出去，使溶於水中的氣體逸出而聚集在上部及下部，中間塑膠片有了上部及下部，所以氣泡較多。若用塑膠板隔成左右兩邊時，藍心維持不變只有一個。



### 實驗六：不同容器形狀對冰塊結冰的影響

結果：藍心會因容器形狀而變成與容器相似的形狀，容器形狀也會改變漩渦方向而與容器形狀類似。



## 實驗七：不同容器大小對冰塊結冰的影響

**結果：**容器大小會對藍心範圍造成等比例的縮放，但整體藍心的放熱趨勢範圍則是沒有太大的改變。



## 實驗八：容器傾斜與橫放對冰塊結冰的影響

**結果：**藍心會和冰箱夾層垂直，藍心可能成不規則狀。像一個被墊高的靴子，鞋跟的部分位置比較高，鞋尖的地方色素沉澱較多。空氣柱是上面的往上，下面的往下。



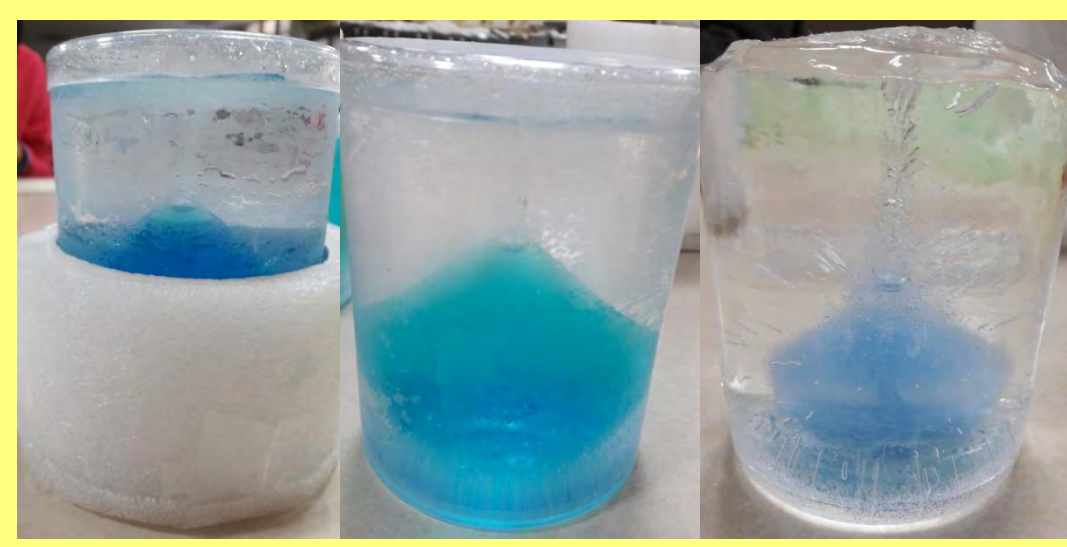
# 陸、討 論

### 一、推論放熱式漩渦成因

- (一)冰在凝固前與水的交界面，因夾雜**細冰**，使氣泡在裡面微幅移動。
- (二)凝固前因**折射**看不到交錯細冰，會**攔阻**氣泡又不會將氣泡包覆。
- (三)結冰前水中細冰將氣泡向上漂移力量阻隔，才使放熱式漩渦引導力量出現。
- (四)放熱式漩渦在四度到結冰的零度時，因**體積變大**產生向上的流動而與氣泡路徑相同。
- (五)漩渦流動方向因尺度過小與科氏力無關，而是水中細冰不易讓水流動，改採傾斜路徑以避開水阻。
- (六)漩渦方向一定都**整體一致**，推測因**力的平衡**造成，如**形狀**、**光滑度**和**勻稱度**等都會影響。

### 二、放熱式漩渦結構

- (一)形成條件：水體在  $4^{\circ}\text{C} \rightarrow 0^{\circ}\text{C}$  結冰前體積膨脹，使水體向中央、上方流動。
- (二)推論依據：
  - 1.冰心範圍形狀：水體放熱位置的「快慢」與「先後順序」(原理：水結冰的純化現象)
  - 2.空氣柱：從空氣管柱口徑、長度、方向等記錄，可判斷放熱式漩渦水體的流動依據(原理：降溫時水的溶解度降低使空氣析出)



藍心範圍可知結冰順序  
空氣柱可看出渦流方向

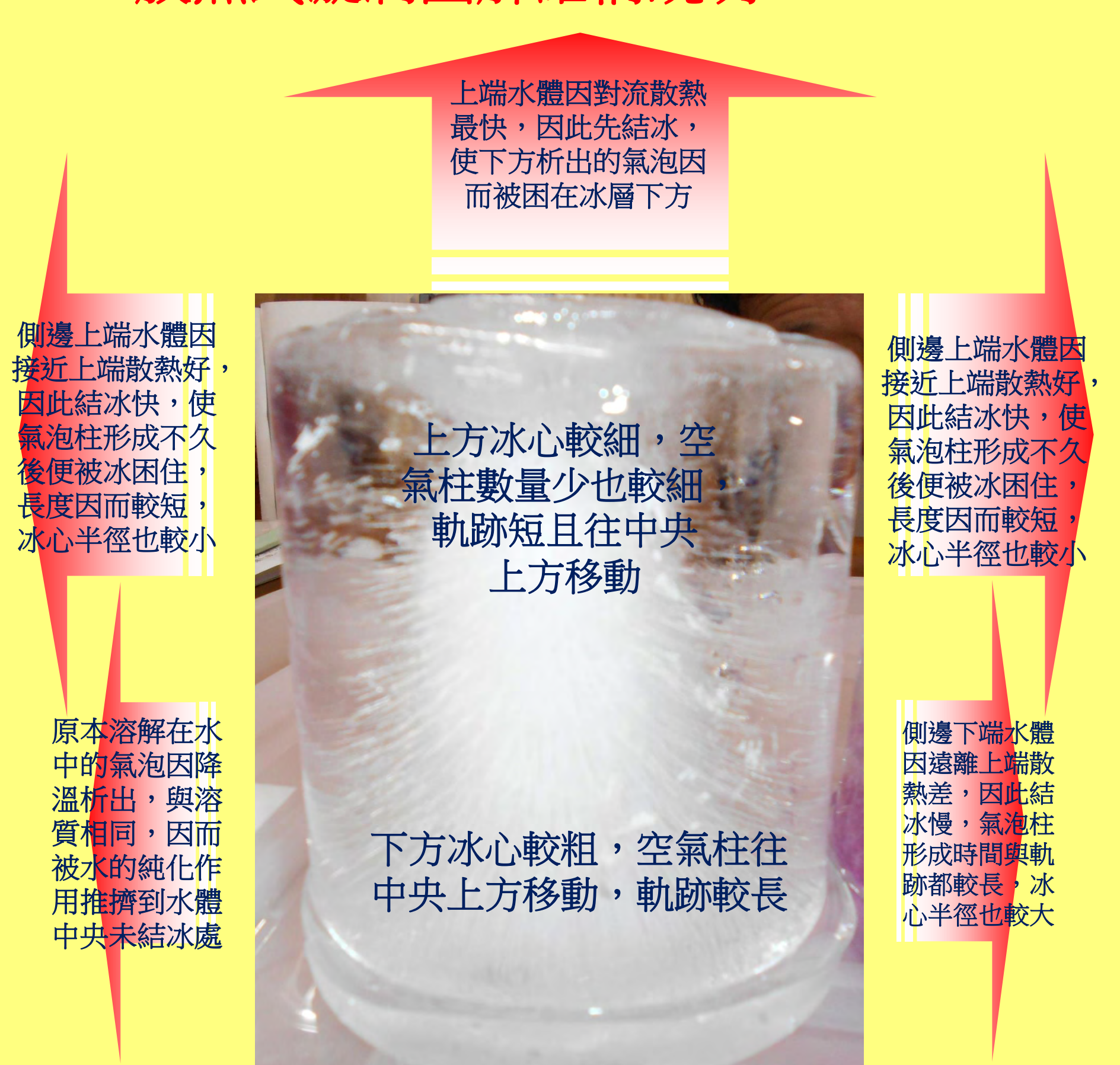


藍心會隨容器大小成等比例縮放



藍心受容器靠近的相互影響而聚合

### 三、放熱式漩渦圖解結構說明



# 柒、結 論

- 一、水在凝固結冰時會受到容器的**形狀**、**大小**及**冷卻部位**的差異，而且就算相互獨立的水體在**靠近**後依舊會彼此相互影響，而產生不同過程型態的凝固結果。
- 二、將色素溶於水中冷卻凝固時，會先將**非水分子**的物質**排擠**出去，才能形成**氫鍵**而**結冰**，這種純化現象會將色素推擠到尚未凝固的位置，由**色素的深淺**及**位置**就能看出冰塊結冰的先後順序。
- 三、水在凝固過程中，因**溫度**而使**溶解度**改變，會使先前溶於水中的氣體逸出而形成**氣泡**，而凝固前的水中也會先產生看不到的交錯細小**冰粒**，因而使氣泡逃逸的路線受阻，以致形成空氣柱的軌跡，由此便可看出放熱式漩渦旋轉的**結構**。
- 四、**放熱式漩渦**形成推測是一種類似**對流**結果，由於水在結冰前( $4^{\circ}\text{C} \rightarrow 0^{\circ}\text{C}$ )**體積變大**往上流動，加上與溶出的氣體逃逸路線(往上)相同，提供漩渦流動的**動能**，至於旋轉的方向發現皆有可能，故推測應該是屬於水體系統在平衡整個渦流動能時的結果，才造成同一水體系統內的流向都是一致的。
- 五、利用溶解在水中**色素**與**氣體**，在凝固順序差異過程中因色素被排擠造成不同**藍心的形狀**及**氣體在逸出時的路徑**，所形成的**空氣柱軌跡**，便能看出水體在凝固前，所形成放熱式漩渦的特殊結構。
- 六、未來發展
  - (一)對於放熱式漩渦成因的解釋，目前只能透過實驗進行有限度的推論，希望日後能設計出更精準的操作變項實驗，讓解釋更趨完備。

**心得感想：**沒想到只是透過溶解在水中的色素，凝固後就能知道結冰時的先後順序，還有平常看到冰箱中的冰塊，有時候是透明潔淨，也有時候好像也會佈滿一絲絲的紋路，後來才知道這是氣泡所形成的空氣柱，從凝固時顏料和空氣柱的形狀，這些日常生活中不足為奇的現象，竟然能解釋出令人驚訝的發現，真是令我大開眼界。

## 參考資料

劉婕宇、林子珉、林品君(2011)：冰漩渦。中華民國第51屆中小學科學展覽會。  
楊祐韶、涂心瑜、楊承翰(2017)：多樣的冰封漩渦-從氣體逃逸線探討放熱式漩渦。台北市第50屆中小學科學展覽會。