

中華民國第 52 屆中小學科學展覽會  
作品說明書

---

國小組 物理科

第三名

080113

不可思議的小尖冰～探討水珠結冰的特殊現象

學校名稱：高雄市三民區東光國民小學

作者：  小五 許逸群  小五 潘辰瑜  小五 高靖媛  小五 陳奕臻  小五 曾英澤  小五 林蔚典	指導老師：  楊宜倫  陳為志
---	-----------------------------

關鍵詞：結冰、體積膨脹、冰尖凸

## 不可思議的小尖「冰」～探討水珠結冰的特殊現象

摘要：

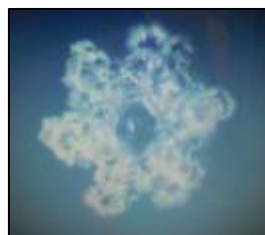
透過一顆小小水珠的結冰，我們發現令人驚奇的神奇現象！加蓋的水珠結冰時，底部與側邊會先結凍，內部的水最後結冰時只好往上頂出，因此形成像桃子狀的可愛冰尖凸。其結冰的過程，通常會有過冷現象，只要加入其他物質使其溶於水，就不會形成冰尖凸了。在有出風口的傳統冰箱下結冰，不加蓋比較不容易形成冰尖凸，冰尖凸的形成與否，深受風向干擾。而水珠的結冰，若是有冰尖凸的，高度的變形比大約為一點多倍，寬度則接近一倍，表示底部與側邊先行結冰時，底面積不會擴張，而是將水往水珠中央頂部推擠，才會形成冰尖凸。若沒有冰尖凸的，則高度與寬度會同步進行膨脹，但高度還是略比寬度多一些。另外，我們也嘗試尋找形成冰釘的條件，並與冰尖凸做比較。

### 壹、研究動機

有一天，老師拿一本「生命的答案水知道」的書讓我們看，告訴我們水結晶的世界是多麼神奇，並帶我們到一個實驗室，那裡有一台放在冷凍庫的顯微鏡，從顯微鏡當中我們看到了水珠結冰的尖端，長出了美麗的晶體，讓我們感到十分驚奇，原本想要以這個來當科展主題，但卻發現水結晶幾乎每個都長得不一樣，很難進行分析；於是，就對另一個令人感到好奇的水珠結冰進行探討，為什麼一顆小小的水珠結凍後會發生這樣的形變？以前上自然課談水的三態也都沒有提過這個現象，於是對它充滿疑問，找了許多資料，台灣也幾乎沒有相關的研究報告，更加深想要探究它的興趣。



一滴水珠結凍，竟然會產生尖凸，令人感到好奇。



這是尖凸點看到的水結晶，十分美麗。

### 貳、研究目的

- 一、探討「冰尖凸」形成的原因。
- 二、探討哪些因素會影響「冰尖凸」的形成？
- 三、探討結冰前後的變形比為何？變形前後的接觸角變化又是如何？
- 四、探討冰尖凸與冰釘產生條件的差別。



### 參、研究器材與設備

顯微鏡頭、三角架、手電筒（補光用）、電腦、photoimpact、Auto CAD 軟體、熱電偶、數據紀錄器、塑膠培養皿、燒杯、3c.c 與 1c.c 針筒、保麗龍箱、乾冰、2.5cm\*3ccm\*3mm 壓克力片、載玻片、鐵尺、鹽、糖、沙拉油、胡椒粉、醬油、蕃茄醬、雪碧、RO 水、自來水、礦泉水、水溝水、蒸餾水、去離子水、製冰盒、布丁盒。



我們以顯微鏡頭拍攝水珠的結冰情形。



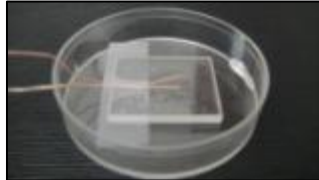
以保麗龍箱裡面放乾冰維持冰尖的形狀，並以電腦拍攝照片。



我們以 photoimpact 換算水珠的高度，並以 AutoCAD 計算水珠的接觸角。



三台傳統冰箱，上方有出風口，是我們的實驗環境。



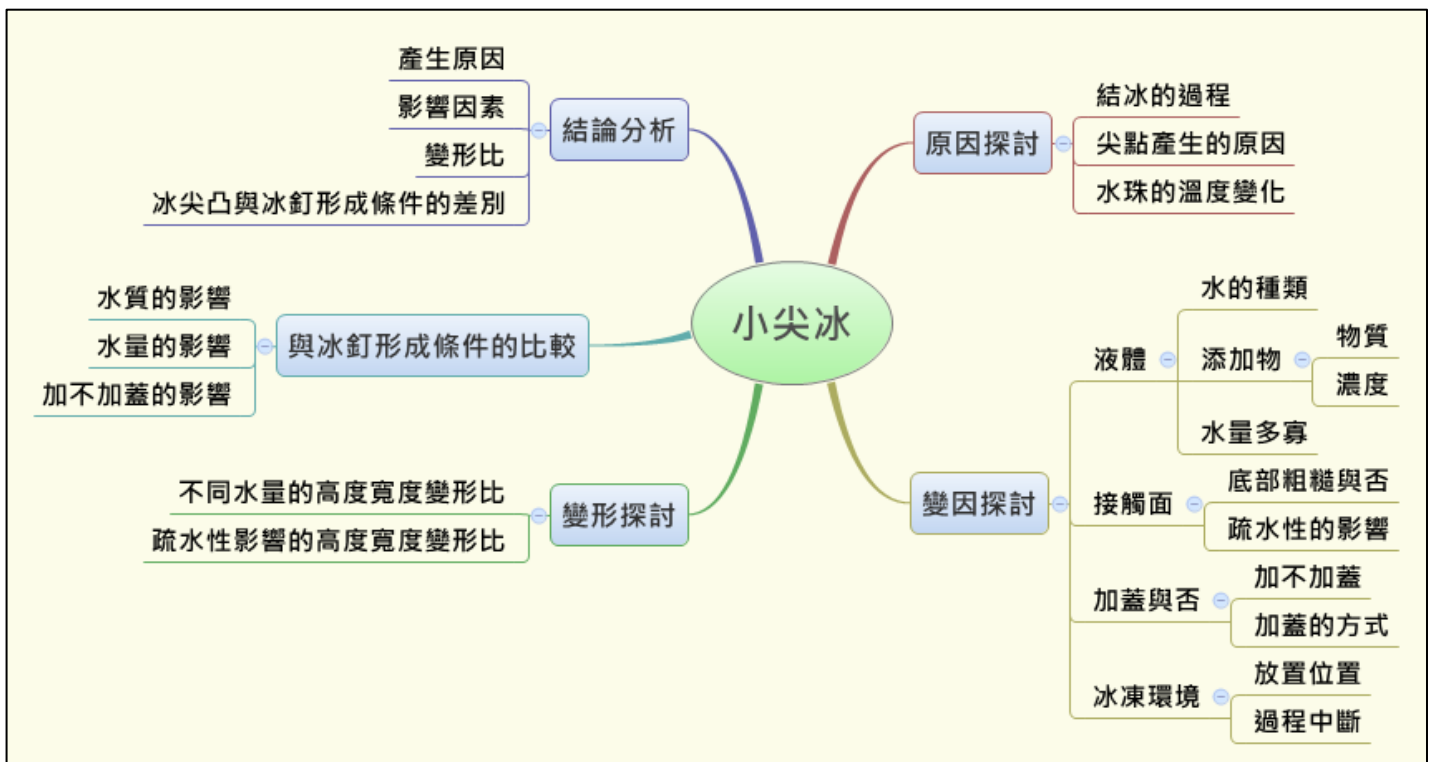
將熱電偶黏貼於壓克力片表面感測溫度



以數據紀錄器做出分析圖

## 肆、研究方法與結果

### 一、研究內容分析：



二、研究過程與方法：

**研究（一）：水珠結冰的過程到底如何發生？**

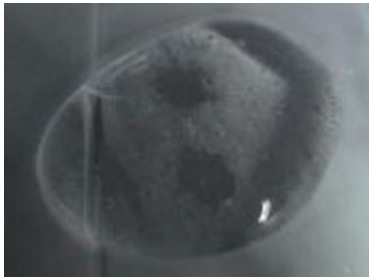
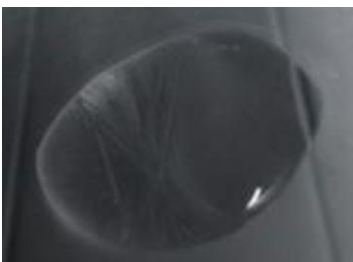
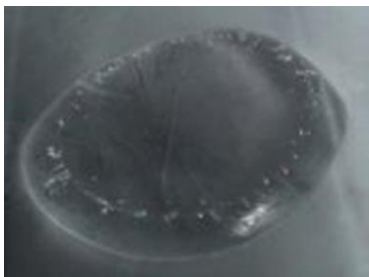
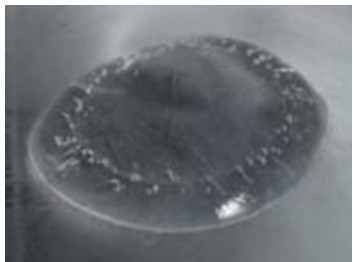
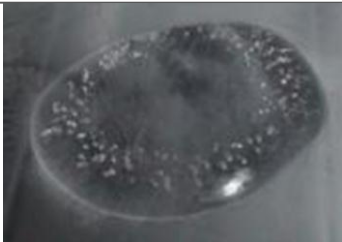
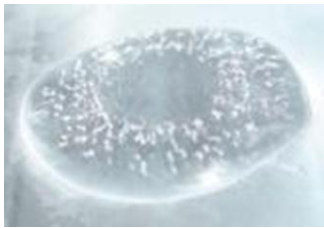
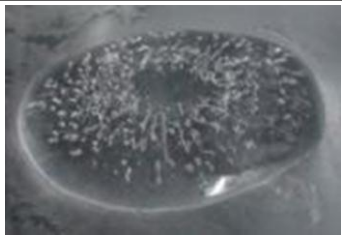

**實驗 1：觀察加蓋與不加蓋水珠結冰的過程。**

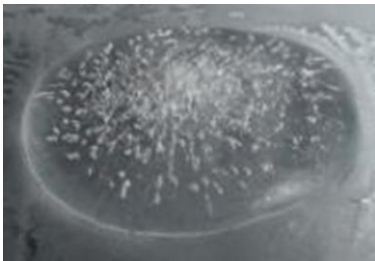

方法：(1)在塑膠培養皿中滴入 0.5c.c(量多比較好拍照)的小水珠，蓋上蓋子放入冷凍庫中。

(2) 每隔一段時間打開蓋子拍照一次，觀察記錄其結果，再迅速蓋上繼續結冰。

**說明：**在這個實驗中，一開始我們是每隔 10 分鐘打開冰箱拍照一次，但發現到要結冰時，變化太快反而觀察不到關鍵點；但如果一開始就太密集開冰箱，會造成無法結冰。所以在這個實驗中，觀察時間並沒有固定的間隔。

★ 加蓋的結冰過程：

照片		
記錄	①9:14 水珠剛放進冰箱中	②9:29 產生一些交叉的條紋。
照片		
記錄	③9:45 底部、側下方開始結冰，上方冰與水交界處有些微氣泡產生。	④9:55 底部冰層越來越厚，上面氣泡產生更多一些。
照片		
記錄	⑤10:02 冰層往內擴大，氣泡越來越多。	⑥10:10 冰層又往內擴大，上方沒有結冰的範圍越來越小；氣泡又更多了。
照片		
記錄	⑦10:17 上方沒有結冰的範圍只縮至一小孔，氣泡也越來越多。	⑧ 10:23 已完全結冰，氣泡越往中間上方集中且在氣泡最密集處，形成一個小尖凸。

照片		
照片	⑨10:30 與前面樣子差異不大。	⑩10:39 氣泡些微變少，冰尖凸樣子不變。

發現：蓋上蓋子的水珠結冰是由底部開始結的，不到半小時便有結冰層慢慢往上升，中間上方沒結冰的範圍越縮越小，結冰過程中會有氣泡往中間集中，在密集處會產生冰尖凸。

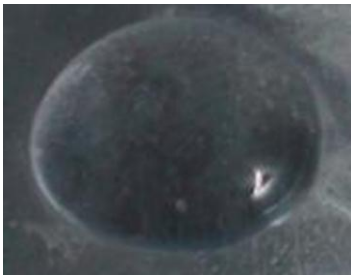
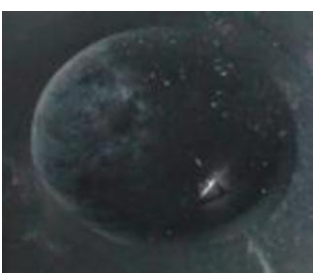




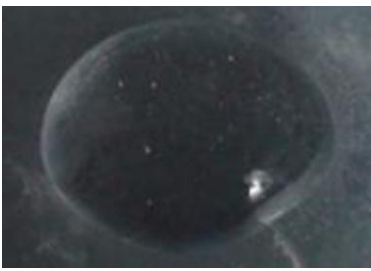

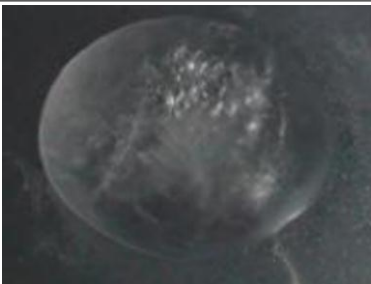



※為什麼會有這樣的現象產生？經過查詢相關資料與詢問專家的結果得知：

- 推論：(1) 物質的溫度是由分子凌亂震動的動能而決定（也就是震動次數），震動次數多，則溫度高；相反的，震動次數少，則溫度低。在本實驗中，水珠滴在培養皿內，水珠底部與固體接觸，冰箱底部的固體會搶走水的熱能，導致分子震動次數減少，因此溫度會降得比較快，才會從底部開始結冰。
- (2) 水分子在凍結過程中，會將空氣與雜質排除在冰的晶格之外，因此本實驗中，水珠從底部開始結冰時，水中所含的空氣變會被推擠上升，直到浮在水珠上層時，因為急速冷凍，來不及被排出，這些空氣也會被包在冰裡面，就是我們所看到的現象。
- (3) 因為水結冰體積會膨脹，因此水珠從底部開始往上及側邊結冰時，結冰部分體積膨脹，會將還沒結冰的水從上方氣泡最密集處，也就是最晚結冰的地方向上頂出，最後形成不可思議的小尖冰。

※思考：如果不加蓋子，結冰的過程也會一樣嗎？

★ 不加蓋的結冰過程：

照片		
記錄	①8:31 水珠剛放進冰箱中，不加蓋。	②8:35 底部開始有一些波紋，似乎要開始結冰了。

照片		
記錄	③ 8:39 底部、側下方開始結冰，上方也有薄冰層。	④ 8:43 底部冰層越來越厚，上方也是。
照片		
記錄	⑤ 8:47 中間氣泡稍微多了起來。	⑥ 8:55 幾乎快完全結冰了。
照片		
記錄	⑦ 9:05 已完全結冰，下方氣泡越來越少，氣泡集中在中上方。	⑧ 9:15 中間上方的氣泡更少了，完全結冰。
照片		
記錄	⑨ 10:19 完全結冰，上方中間氣泡只剩一點點。	⑩ 10:22 完全結冰，上方沒有尖凸。

發現：沒有蓋上蓋子的水珠結冰底部與上方結冰的時間幾乎分不太出來，但水珠內部仍然最慢結冰，結冰後看不到冰尖凸。



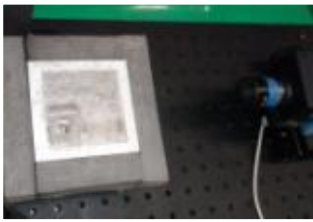

推論：因為不加蓋的水珠上方與下方結冰的速度都很快，因此，當內部的水結冰時，上方也已結成厚厚的冰，因此即使體積膨脹也看不到尖凸點。

### 實驗 2：觀察室溫下以液態氮造成水珠結冰的過程。









※思考：我們很想清楚看到水珠結冰的過程，但沒有可以使用的攝影機，因此決定在室溫下，以液態氮來進行結冰的實驗：

方法：(1) 大家討論出使用液態氮結冰的最佳裝置，並請爸爸協助製作。

(2) 滴一滴 0.2c.c(太大結冰會很慢)的水珠放在壓克力板上，並將液態氮倒入鋁製盒中，以攝影機記錄結冰過程，讓液態氮保持金屬板溫度約在-40°C左右。

			
討論繪出理想的裝置圖	一致決定的最佳方法	爸爸幫我們做出來的成品	倒入液態氮進行實驗





★下方設置液態氮結冰的過程：

			
0 秒	41 秒	56 秒	1 分 18 秒
			
1 分 44 秒	2 分 14 秒	2 分 21 秒	2 分 45 秒

發現：(1) 以液態氮讓下方金屬板保持-40°C左右(以熱電偶測量)，經過 2 分 45 秒的時間，我們清楚看到像桃子形狀的小尖冰。

(2) 這是純粹從下方降溫的實驗，從側面看更可以清楚見到從底部開始的結冰慢慢往上升，高度稍稍增加，隨後形成尖凸，尖凸又變成小尖冰。

★上方設置液態氮結冰的過程：

			
0 秒	20 秒	1 分 19 秒	3 分 20 秒

發現：從上方開始冷凍時，不久水珠上方就有小小的毛狀結晶，結冰是從上而下，一直到最後都沒有小尖冰的產生。

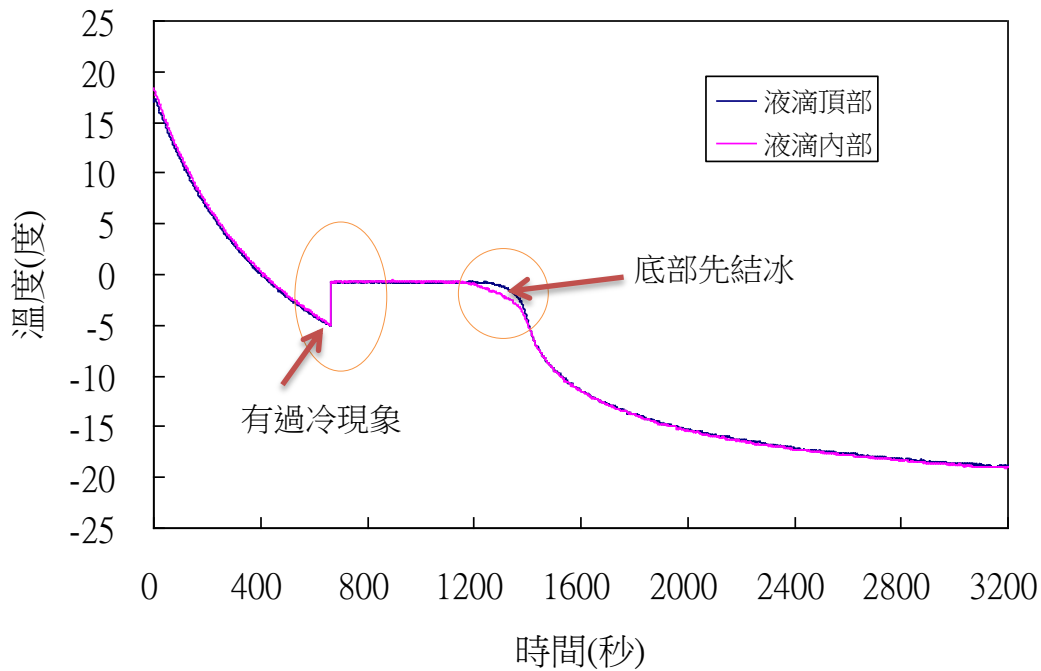
**實驗 3：形成冰尖凸與沒有形成冰尖凸的水珠，其溫度變化的過程是一樣的嗎？**

方法：

- (1) 將一條熱電偶黏貼於壓克力片底部，另一條也用膠帶固定使它稍微翹起，放在冷凍庫中。
- (2) 滴入一滴 1c.c.的清水，蓋上蓋子，關上冰箱以數據記錄器及 Excel 記錄分析其溫度變化。
- (3) 另外做一個沒有加蓋子的，重複前面步驟以進行分析記錄。

結果：

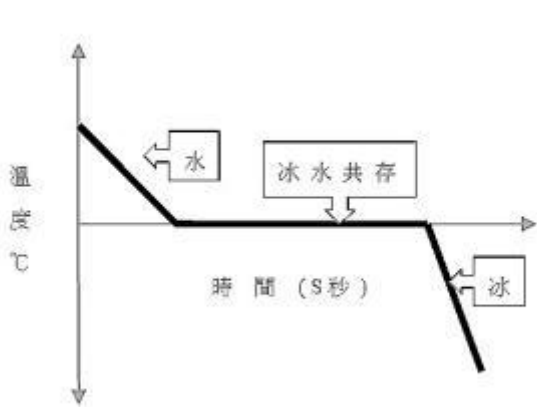
(1) 有形成尖凸點的水珠其液滴頂部與液滴內部的溫度變化如下：



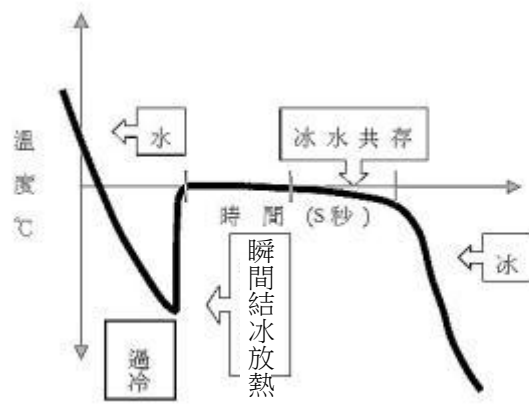
發現：一開始，液滴的頂部與內部溫度差異不大，兩者幾乎同時呈現過冷現象，然後瞬間升溫，液滴內部（底部）比頂部先行結冰，這與我們看到的加蓋結冰現象，互相吻合。

※名詞解釋：

所謂過冷就是當水不在 $0^{\circ}\text{C}$ ，而在更低的溫度才結冰的一種現象。過冷的發生，是因為「水在 $0^{\circ}\text{C}$ 時結冰」是關於水的最低能量狀態的陳述——在低於 $0^{\circ}\text{C}$ ，水分子「想」排列成冰晶體，意味著它們要停止像液態時那樣，隨機地嗡嗡亂飛，而代之以有秩序的固態晶格。然而，它們不知道怎樣去排列，需要少量不規則的物體或成核位置去告知它們。有時當水被降到 $0^{\circ}\text{C}$ 以下，它還看不到成核的位置，水就低於 $0^{\circ}\text{C}$ 而沒有結冰，此時的水是處於不穩定狀態，如果因為環境變動（例如攪拌、震動、摻入雜質）就會破壞不穩定狀態，而在短時間內轉為固體。



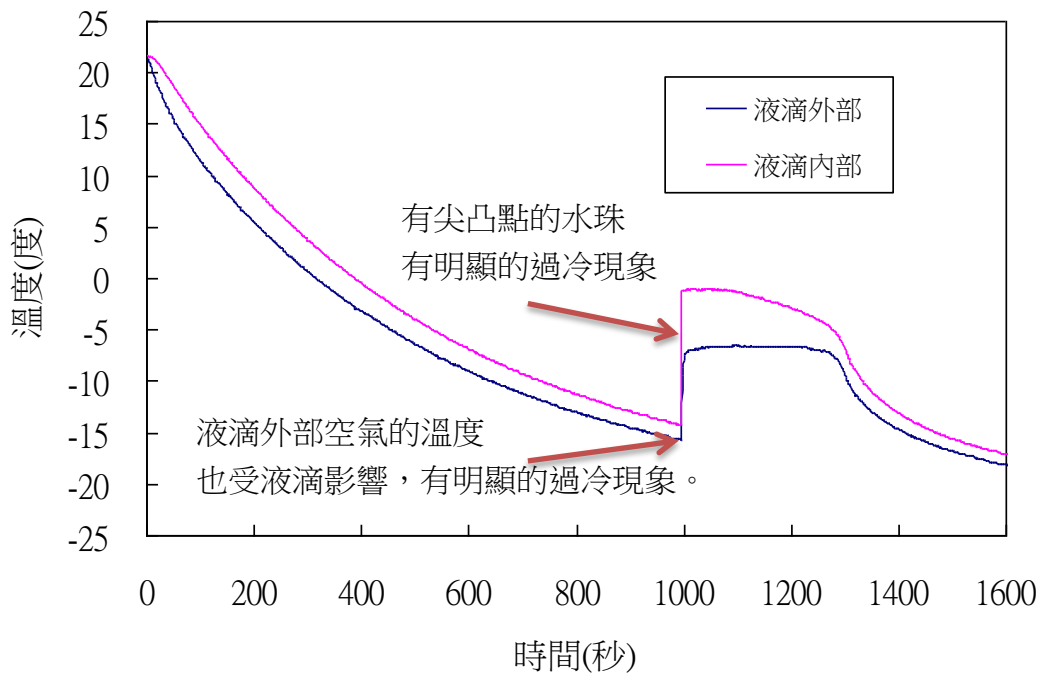
<水在放熱過程中理想的溫度變化>



<過冷效應想像圖>

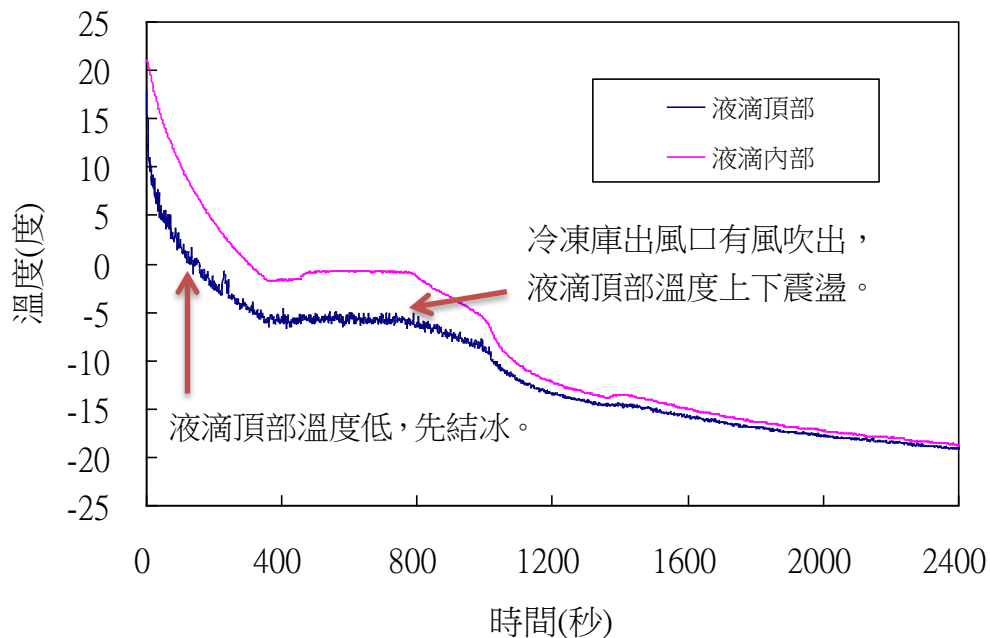


(2) 有形成尖凸點的水珠其液滴上方空氣的溫度與液滴內部的溫度變化如下：



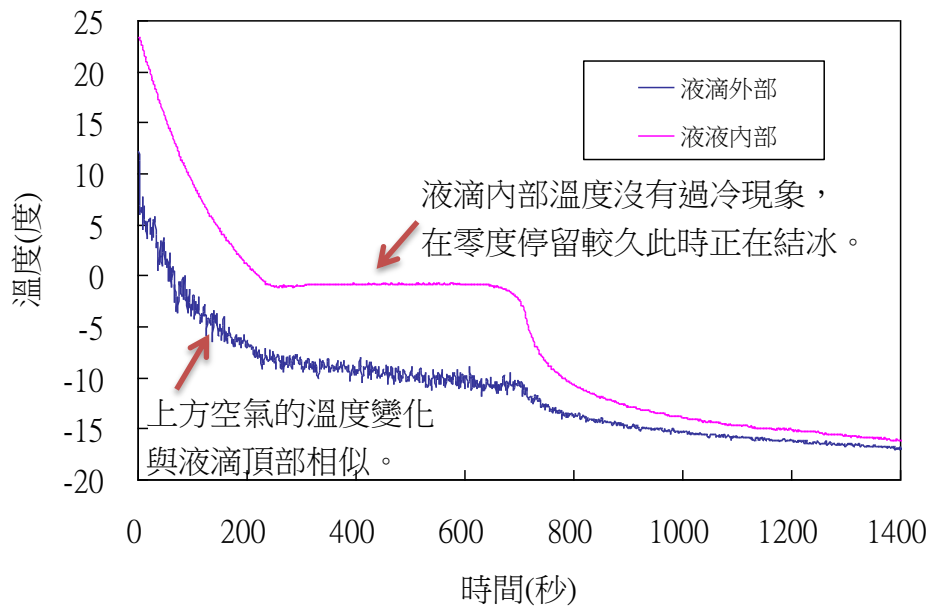
發現：在液滴上方的溫度，也會隨著液滴的溫度而受影響，當過冷現象開始結冰放熱時，液滴上方的溫度也會跟著提升。

(3) 沒有形成尖凸點的水珠其液滴頂部與液滴內部的溫度變化如下：



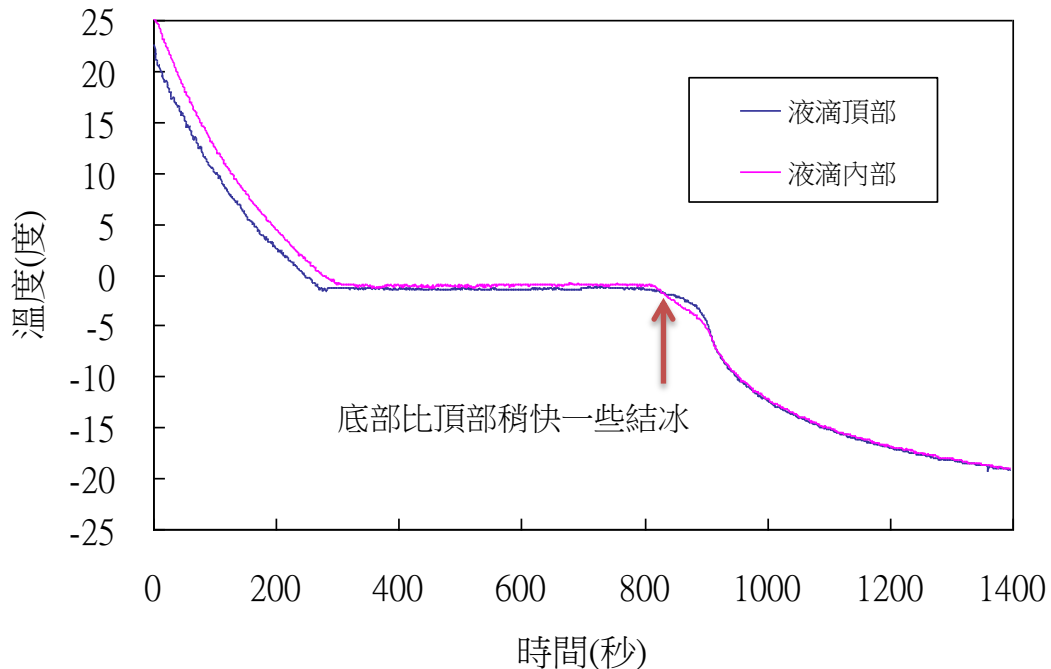
發現：沒有形成尖凸點的水珠結冰過程，沒有明顯的過冷現象；而且，頂部的溫度明顯比內部來得低，所以我們會看到頂部很快就結成厚厚的冰，當內部剩餘的水結冰體積膨脹時，無法從上方凸起，因此沒有冰尖凸。

(4) 沒有形成尖凸點的水珠其液滴上方空氣的溫度與液滴內部的溫度變化如下：



發現：由於上方沒有蓋子蓋住，冷風直接吹的結果，液滴上方的溫度明顯比液滴內部來得低。沒有尖凸點的水珠結冰，其過冷現象並不明顯，在零度 C 左右維持很久的時間，結冰後溫度會再迅速往下降。

(5) 不加蓋，但還是有形成尖凸點的水珠其液滴頂部的溫度與液滴內部的溫度變化如下：



發現：不加蓋的水珠，比較看不出來有過冷現象，且頂部的溫度都比內部低一點，兩者的溫度都在零度 C 維持很久，之後底部的溫度下降得比頂部快，因此還是底部先結冰，最後，兩者的溫度會一直下降到與環境相等。

結論：

- (1) 加蓋的水珠其結冰過程的溫度變化，會有明顯的過冷現象，而不加蓋的則只在零度 C 停留很久，溫度再慢慢往下降。
- (2) 不加蓋的水珠，頂部的溫度會比較低，因此上方會很快結冰，以致於內部的水結冰時，體積膨脹卻無法形成尖凸。



這台數據記錄器，可以自動幫我們記錄溫度。



我們以熱電偶測量水珠的底部、頂部或上方的溫度。

**研究(二)：探討哪些因素會影響「冰尖凸」的形成？**





**實驗 1：改變水質是否影響冰尖凸的產生？**

方法：(1) 將培養皿置於冷凍庫中，滴入一滴 0.5c.c 的水珠，蓋上蓋子，待 2 個小時後取出做觀察記錄。

(2) 改變不同的水質，依照前面的方法重複實驗進行觀察。

說明：進行此實驗時，我們還沒有適合的測量儀器，因此觀察重點著重在有無冰尖凸的產生。

結果：

尖 突 有 次	水 質 無 數	RO 水	礦泉水	水溝水	自來水
		1	○	○	○
2	○	○	○	○	
3	○	○	○	○	
照片					






發現：以上四種不同的水質，即便是略含雜質的水溝水，都會形成冰尖凸。

**實驗 2：加入固體添加物，是否影響冰尖凸的產生？**

方法：(1) 取 100cc 的自來水，加入 10g 的糖、鹽、味精、胡椒粉均勻攪拌。

(2) 將培養皿置於冷凍庫中，滴入一滴 0.5c.c 不同添加物的水珠，蓋上蓋子，待 2 個小時後取出做觀察記錄。

結果：

尖 突 有 次 無 數	添 加		無添加	鹽水	糖水	味精水	胡椒水
	有	無					
1	○	×	○	×	×	×	○
2	○	×	○	×	×	×	○
3	○	×	○	×	×	×	○
照片							

發現：無添加的和胡椒水都可以形成冰尖凸，但鹽水、糖水及味精水則不能。

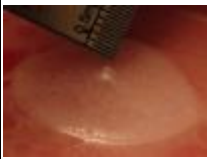




推論：鹽、糖、味精都可以溶於水，水溶了其他物質之後，會破壞水分子中的氫鍵(氫鍵是造成水結冰體積膨脹的主要原因)，導致體積無法膨脹，因此就沒有冰尖凸的產生。相反的，胡椒粉不能溶於水中，因此仍舊可以形成冰尖凸。



**實驗 3：其他不同的液體，是否會產生冰尖凸？**

方法：將培養皿置於冷凍庫中，各滴入一滴 0.5c.c 的自來水、10%的油+水、雪碧、沙士、米酒等，蓋上蓋子，待 2 個小時後取出做觀察記錄。

結果：

尖 突 有 次 無 數	液 體		自來水	油+水	雪碧	沙士	米酒
	有	無					
1	○	○	○	○	×	×	×
2	○	○	○	○	×	×	×
3	○	○	○	○	×	×	×
照片							

發現：除了自來水和油水外，其他液體都不能形成冰尖凸。






推論：跟前面的道理一樣，汽水與米酒等都溶有其他物質，導致氫鍵被破壞，因此沒辦法形成冰尖凸。而油與水是不相溶的，因此仍舊可以形成冰尖凸。

※思考：雖然油與水不相溶，會形成冰尖凸，但如果濃度增加，是否也會形成冰尖凸？

**實驗 4：不同的濃度的油水，是否會產生冰尖凸？**

方法：(1) 分別調製濃度 1%、5%、10%、20%、30% 的油水各一杯。

(2) 將培養皿置於冷凍庫中，滴入一滴 0.5c.c 不同濃度的油水珠，蓋上蓋子，待 2 個小時後取出做觀察記錄。

尖 突 次	濃 度 有 無 數	1%	5%	10%	30%	40%
		1	○	○	○	○
2	○	○	○	○	×	×
3	○	○	○	○	×	×
照片						



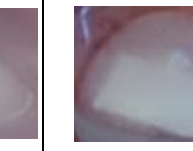

發現：濃度過高的油水溶液較不能形成冰尖凸。

推論：儘管油水不相溶，但如果濃度過高時，油會厚厚的浮在水的表面，導致看不到尖凸點。



**實驗 5：不同體積的水量，是否會影響冰尖凸的產生？**

方法：將培養皿置於冷凍庫中，分別滴入 0.1c.c、0.5cc、3c.c、7c.c 的自來水水珠，蓋上蓋子，待 2 個小時後取出做觀察記錄。

尖 突 次	水 量 有 無 數	0.1c.c	0.5cc	3c.c	7c.c 全滿 三分之二高
		1	○	○	○
2	○	○	○	○	○
3	○	○	○	○	○
照片					

發現：(1) 不同體積的水都可以形成冰尖凸，即便是碰到培養皿，都不影響冰尖凸的產生。

(2) 如果水珠是球形的，尖凸點通常在中間，如果是橢圓形的，尖凸點則不一定在中間，但全滿的則不太容易在中間。

(3) 水量較多時，尖凸隆起較厚，但尖凸點感覺較頓。







推論：培養皿加了蓋子後，不管水量的多寡，上方的水會較慢結冰，而當最後內部的水結冰時，膨脹的體積會向上形成冰尖凸。

**實驗 6：底部的接觸面粗糙與否，是否影響冰尖凸的產生？**

方法：(1) 將培養皿底部磨一圈寬度 1cm 的圓，使它略微凹凸不平。

(2) 滴入不同體積的水珠，蓋上蓋子，待 2 個小時後取出做觀察記錄。

結果：


尖 突 有 次 無 數	底 部 無 數			
		水珠在 粗糙面內	水珠與 粗糙面一樣大	水珠略大於粗糙面
1		○	○	○
2		○	○	○
3		○	○	○
照片				

發現：底部的粗糙與否，並不影響冰尖凸的產生。

**實驗 7：加蓋的方式，是否影響冰尖凸的產生？**

方法：培養皿置於冷凍庫中，各滴入一滴 0.5c.c 的自來水，將圓形厚紙板事先裁成不同大小，使培養皿蓋住 1/4、2/4、3/4 以及全蓋或沒蓋，待 2 個小時後取出做觀察記錄。

結果：

尖 突 有 次 無 數	方 式	不加蓋	蓋住四分之一	蓋住四分之二	蓋住四分之三	全蓋
1		×	稍微隆起	蓋住的地方有隆起	有尖點	○
2		×	稍微隆起	一點點隆起	×	○
3		×	稍微隆起	有頓頓的隆起	有尖點	○
4		×	×	有尖點	有尖點	○
5		×	有頓頓的隆起	有頓頓的隆起	一點點隆起	○
照片				 	 	 

發現：全蓋的一定會有尖點，不加蓋的沒有，其餘的似乎沒有一定的結果。

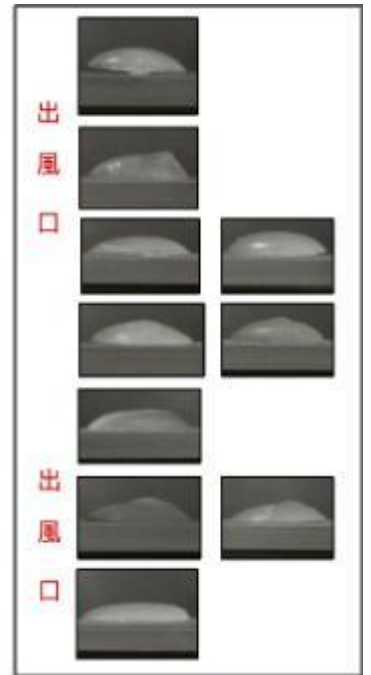
※思考：因為不加蓋或是蓋一點點的水珠不太能形成冰尖凸，所以冰尖凸的形成，應該與冰箱的冷空氣風向有關，為了進一步求證，我們又做了以下的實驗：

**實驗 8：不加蓋的水珠放在冷凍庫中的不同位置，是否會影響冰尖凸的形成？**

方法：在壓克力片上滴上一滴 0.1c.c 的水珠共十個，放在冷凍庫中的不同位置，一小時後觀察其結果。

結果：如右所示。











發現：在這台冰箱中，正對出風口前面的水珠，結冰的時候比較容易形成隆起現象，而在正中央沒有出風口的地方則形成一個尖凸點。



**實驗 9：換一台冰箱，不加蓋的水珠放在冷凍庫中會是甚麼情形呢？**

方法：換一台冰箱，在壓克力片上滴上一滴 0.1c.c 的水珠共十個，放在冷凍庫中的不同位置，但受風方向都一樣，一小時後觀察其結果。

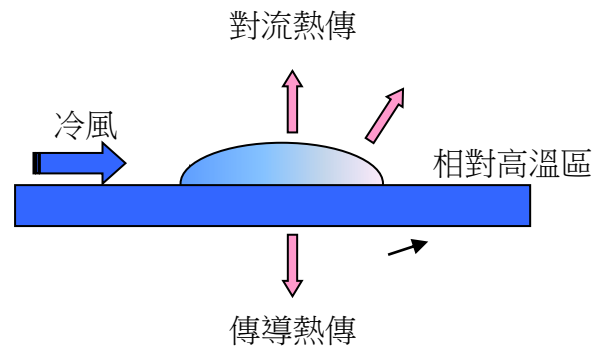
結果：

出風口	1	6
		
	2	7
		
	3	8
		
	4	9
		
	5	10
		

發現：竟然在這台冰箱內不加蓋結成的水珠，都往同一個方向隆起，且還有明顯的尖凸，真是太不可思議了！

推論：

- (1) 從以上的實驗我們更加證實，不加蓋的水珠，其實不見得一定不會形成尖凸點，端看冷凍環境而決定。因為我們使用的是傳統冰箱，冷凍庫有出風口送風，風向會影響水珠結冰，才會有偶而尖凸偶而不尖凸的情形。
- (2) 造成實驗 9 尖凸點往同一個方向的原因，是因為室溫的水珠放入冷凍庫中，冷凍庫的環境溫度低，水珠的熱量經由冷凍庫底部的熱傳導與上方熱對流，傳遞至冷凍庫，造成水珠底部與外表面先被結凍，再逐漸往水珠的中央結凍，最後形成冰珠。若水珠置於冷流吹拂處，迎風面因為強制對流，溫度降低最快，外表面形成的冰殼較厚，背風面溫度溫度降低慢，溫度相對高，所結凍的冰殼較薄。當液滴逐漸結凍，體積膨脹，內部壓力提昇，導致較薄的冰殼破裂，部分未結凍的水就會由此溢出並結凍，最後背風面形成尖凸。



研究 (三)：探討結冰前後的寬度、高度變形比為何？變形前後的接觸角變化又是如何？

說明：有了以上的觀察，我們大致瞭解影響冰尖凸形成的原因，但對於結冰前後的形狀變化卻還沒有深入探討，究竟這一顆小小的水珠結冰前後的形狀有了什麼變化？我們決定從寬度與高度的變形，及接觸角的改變來做探討。

實驗 1：不同體積的水珠結冰前後的高度與寬度變形比是多少？接觸角變化又是如何？

方法：

- (1) 將 3mm 厚的壓克力片放入培養皿中，置於冷凍庫。
- (2) 滴入不同體積的水珠於壓克力片上，並蓋上蓋子進行冷凍。
- (3) 兩小時後取出拍照，待其融化後再拍一次。
- (4) 以 Photoimpact 繪圖軟體畫線，依線段長短算出長度，並做比值分析。
- (5) 以 AutoCAD 軟體測量接觸角的角度。



1. ※說明：(1)高度變形比= 冰珠高度 / 水珠高度、寬度變形比= 冰珠寬度 / 水珠寬度  
(2)我們的實驗方式，是將培養皿放入冷凍庫中才滴水珠，以避免晃動影響水珠的形狀。而在顯微鏡下的冰凍水珠，融化後的形狀與結凍前一樣，因此，我們採取此時的液態水珠與固態冰珠做比值換算。



例如：上面的冰珠與水珠的高度變形比為  $1.36 \div 1.036 = 1.3127$



接觸角的測量方法：

在 AutoCAD 軟體上，取水珠表層的三點，自動畫一個圓，在圓上取其切線，切線與平面的夾角即為水珠或冰珠的接觸角。



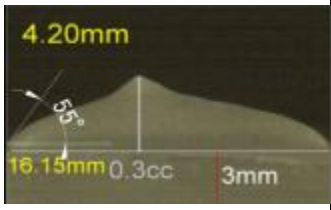
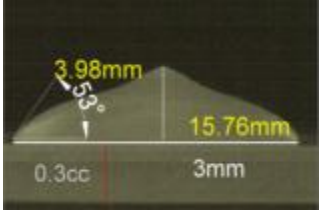
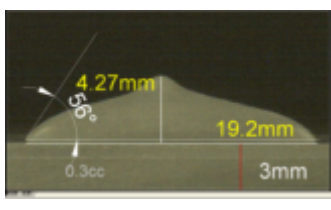
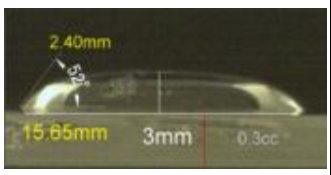
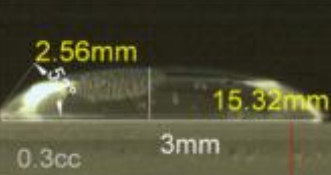

<p>1. 找出水珠與表面的介面，畫一水平線</p>	<p>2. 依水珠曲面，以三點畫一曲線</p>
<p>3. 以曲線的外切三角形，畫出曲線與水平線交點的切線。</p>	<p>4. 刪除曲線、外切三角形，標註水平線與切線的夾角(就是接觸角)。</p>

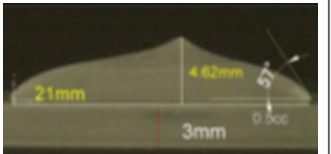
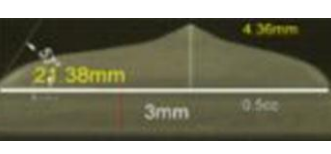
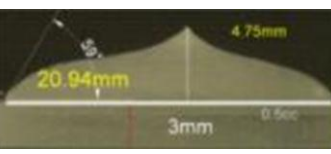


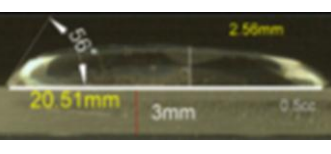
結果：




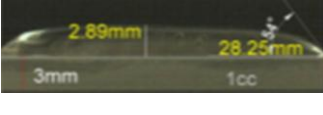
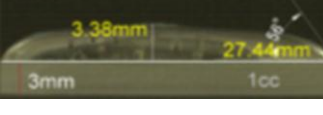
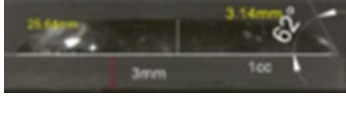
0.005c.c.	第一次	第二次	第三次
冰凍照片			
融化照片			
變形比 (高)	1.36/1.04=1.308	1.91/1.47=1.299	1.91/1.53=1.248
平均	1.2823		
變形比 (寬)	3.22/3.22=1.000	4.21/4.09=1.029	4.28/3.89=1.100
平均	1.0430		
接觸角變化	62° -61° =1°	65° -62° =3°	71° -70° =1°
平均	1.67°		

0.01c.c.	第一次	第二次	第三次
冰凍照片			
融化照片			
變形比 (高)	$1.89/1.42=1.331$	$1.69/1.35=1.252$	$1.96/1.25=1.568$
平均	1.3837		
變形比 (寬)	$4.64/4.7=0.987$	$4.7/4.67=1.006$	$5.55/5.37=1.034$
平均	1.009		
接觸角變化	$65^\circ - 63^\circ = 2^\circ$	$63^\circ - 62^\circ = 1^\circ$	$67^\circ - 65^\circ = 2^\circ$
平均	$1.67^\circ$		

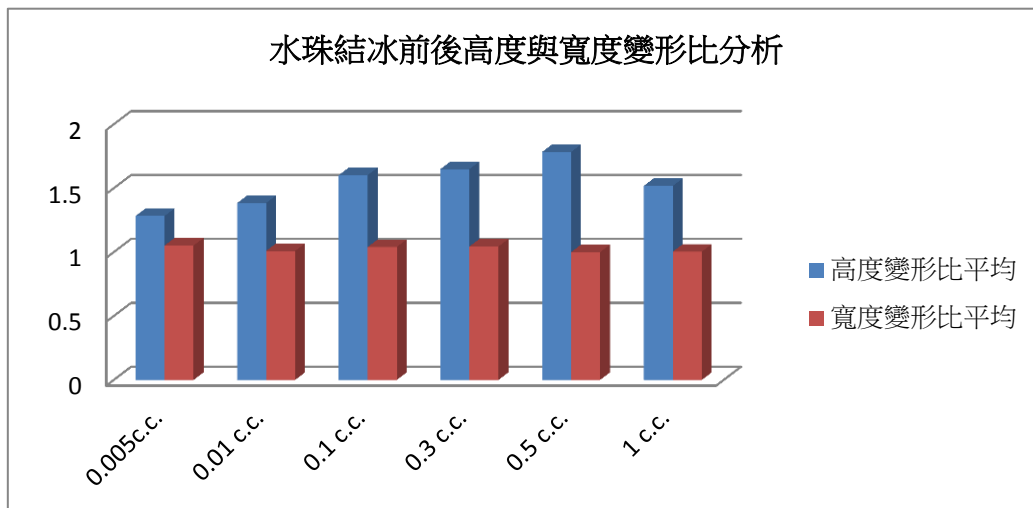
0.1c.c.	第一次	第二次	第三次
冰凍照片			
融化照片			
變形比 (高)	$3.76/2.37=1.586$	$3.23/1.88=1.718$	$3.38/2.25=1.502$
平均	1.6020		
變形比 (寬度)	$9.87/10.04=0.983$	$10.68/9.70=1.093$	$9.80/9.38=1.045$
平均	1.0403		
接觸角變化	$65^\circ - 63^\circ = 2^\circ$	$58^\circ - 57^\circ = 1^\circ$	$63^\circ - 59^\circ = 4^\circ$
平均	$2.33^\circ$		

0.3c.c.	第一次	第二次	第三次
冰凍照片			
融化照片			
變形比 (高)	$4.20/2.40=1.750$	$3.98/2.56=1.555$	$4.27/2.60=1.642$
平均	1.6490		
變形比 (寬度)	$16.15/15.65=1.032$	$15.76/15.32=1.029$	$19.20/17.94=1.070$
平均	1.0436		
接觸角變化	$55^\circ - 52^\circ = 3^\circ$	$53^\circ - 52^\circ = 1^\circ$	$56^\circ - 53^\circ = 3^\circ$
平均	$2.33^\circ$		

0.5c.c.	第一次	第二次	第三次
冰凍照片			
融化照片			
變形比 (高)	$4.62/2.65=1.743$	$4.36/2.49=1.751$	$4.75 / 2.56=1.855$
平均	1.7830		
變形比 (寬度)	$21/20.65=1.017$	$21.38/22.19=0.96$	$20.94/20.51=1.021$
平均	0.9993		
接觸角變化	$57^\circ - 57^\circ = 0^\circ$	$57^\circ - 56^\circ = 1^\circ$	$59^\circ - 56^\circ = 3^\circ$
平均	$1.33^\circ$		

1c.c.	第一次	第二次	第三次
冰凍照片			
融化照片			
變形比 (高)	$4.75/2.89=1.644$	$5.29/3.38=1.565$	$4.22/3.14=1.344$
平均	1.5177		
變形比 (寬度)	$28.15/28.25=0.996$	$27.38/27.44=0.9438$	$24.2/25.64=1.070$
平均	1.0032		
接觸角變化	$58^\circ - 54^\circ = 4^\circ$	$58^\circ - 56^\circ = 2^\circ$	$63^\circ - 62^\circ = 1^\circ$
平均	$2.33^\circ$		

體積	0.005c.c.	0.01 c.c.	0.1 c.c.	0.3 c.c.	0.5 c.c.	1 c.c.
高度變形比平均	1.2823	1.3837	1.602	1.6490	1.7830	1.5177
寬度變形比平均	1.0514	1.009	1.0403	1.0436	0.9993	1.0032
平均接觸角變化	$1.67^\circ$	$1.67^\circ$	$2.33^\circ$	$2.33^\circ$	$1.33^\circ$	$2.33^\circ$



發現：

- (1) 水珠結冰前後高度的變形比，大約都在 1.2~1.7 之間，其中，體積越小的水珠高度的變化越小，體積越大的水珠高度變化較大，但大於 1c.c 的水珠則沒有此現象。
- (2) 水珠結冰前後寬度的變形比，不管體積的多寡，幾乎都在 1 左右。
- (3) 水珠結冰前後接觸角的角度變化，幾乎都在  $3^\circ$  以內。

推論：

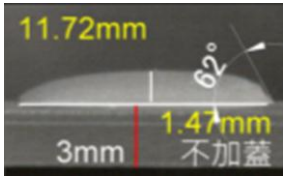
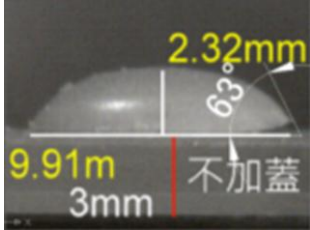
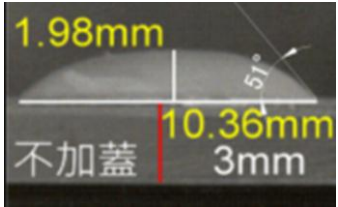
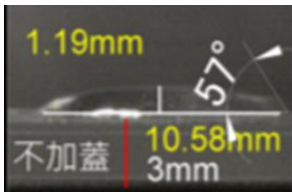
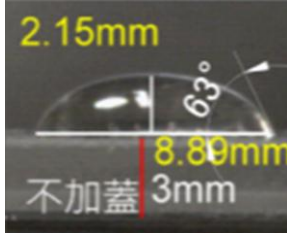

- (1) 由於水珠的結冰是從底部開始，當底部迅速結冰後，底面積其實沒什麼變化，因此寬度的變形比幾乎都是 1，代表寬度沒有改變。
- (2) 水結冰體積是會膨脹的（冰的密度比水小），當底部的冰往上結，側邊也開始結冰後，此時內部的水尚未結冰，卻因為冰的體積膨脹，所剩的空間變小，剩餘未結冰的水只好往上推擠結成冰，最後才形成尖凸點。因此，體積越大的水珠，被推擠上升的水就會越多，高度越高，變形比也越大；但當水珠大到 1c.c 以上時，可能是尖凸點比較厚，反而沒有 0.5c.c 的來得高。

※思考：以上是加蓋水珠結冰的探討，我們證實了水珠結冰前後，寬度沒什麼改變，高度會增為原來的一點多倍，那是因為形成了冰尖凸的關係。那如果沒有形成冰尖凸，寬度是否就會增加了？於是我們試著進行以下的分析：

**實驗 2：沒有尖凸點的水珠結冰前後的寬度與高度變形比是多少？**

方法：重複前面實驗以不加蓋的方式取三個沒有尖凸的數據進行分析。

結果：

0.2c.c.	第一次	第二次	第三次
冰凍照片			
融化照片			
變形比（高）	$1.47/1.19=1.235$	$2.32/2.15=1.079$	$1.98/1.75=1.131$
平均	1.1483		
變形比（寬）	$11.72/10.58=1.108$	$9.91/8.89=1.118$	$10.36/9.40=1.102$
平均	1.1093		
接觸角變化	$62^\circ - 57^\circ = 5^\circ$	$63^\circ - 63^\circ = 0^\circ$	$51^\circ - 50^\circ = 1^\circ$
平均	$2^\circ$		

發現：沒有形成尖凸的水珠結冰，其高度的變形比與寬度差不多，都在 1.1 倍左右，但高度比寬度稍稍增加一些，接觸角也略微加大。

推論：因為沒有形成尖凸的水珠，其上方結冰的速度比較快，因此內部的水結冰時，是均勻往外快展的，所以高度與寬度的變形比沒有差很多。

※思考：從之前的實驗中發現，其實影響水珠高度的主要原因，除了是水珠本身的體積大小外，接觸面的疏水性也是一種重要的因素。

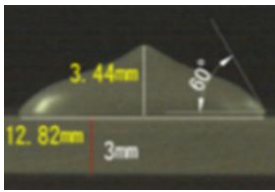
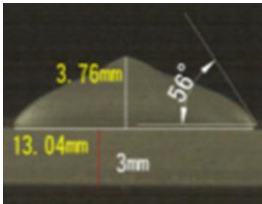
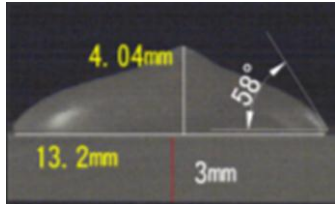
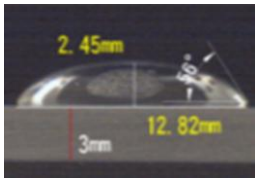
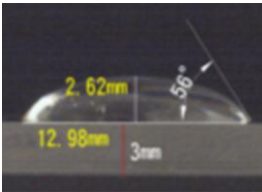

※名詞解釋：疏水性是指疏水物質的分子與水分子間互相排斥的物理性質。

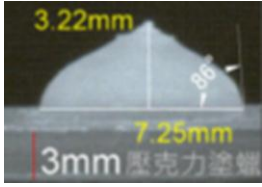
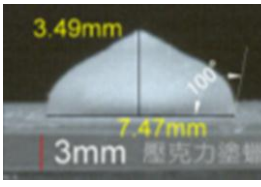
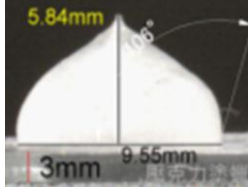
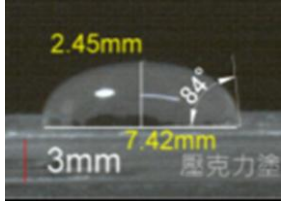
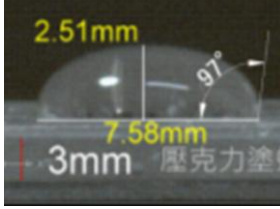
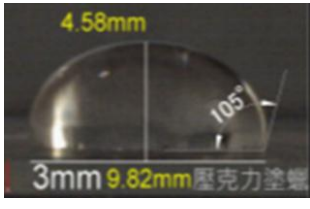
實驗 3：不同疏水性的接觸面，水珠結冰前後的寬度與高度變形比是多少？接觸角變化又是如何？

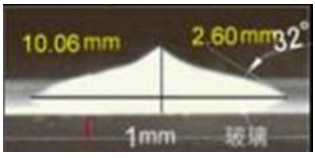
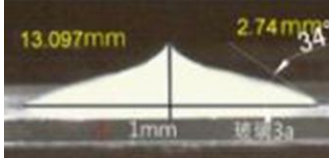
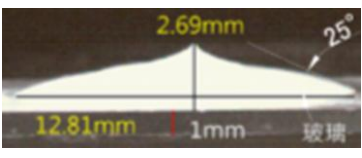



方法：

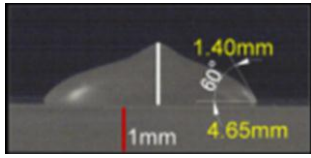
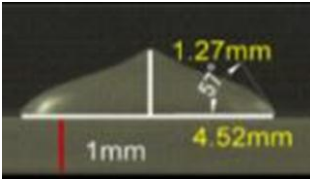
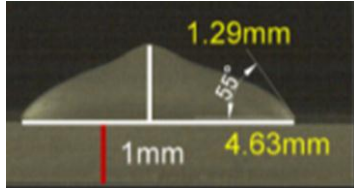

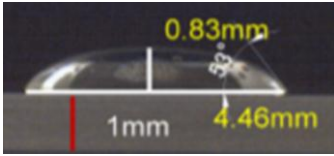
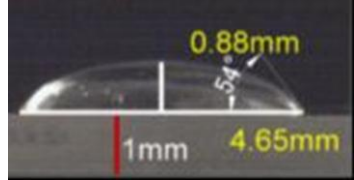
- (1) 將 3mm 厚的壓克力片放入培養皿中，置於冷凍庫。
- (2) 滴入 0.2c.c 的水珠於壓克力片上，並蓋上蓋子進行冷凍。
- (3) 兩小時後取出拍照，待其融化後再拍一次。
- (4) 以 Photoimpact 繪圖軟體畫線，依線段長短算出長度，並做比值分析。
- (5) 以 Autocad 軟體測量接觸角的角度。
- (6) 分別以壓克力、壓克力塗蠟、玻璃、玻璃塗蠟四種不同疏水性的材質為接觸面，重複上面實驗進行探討。

結果：

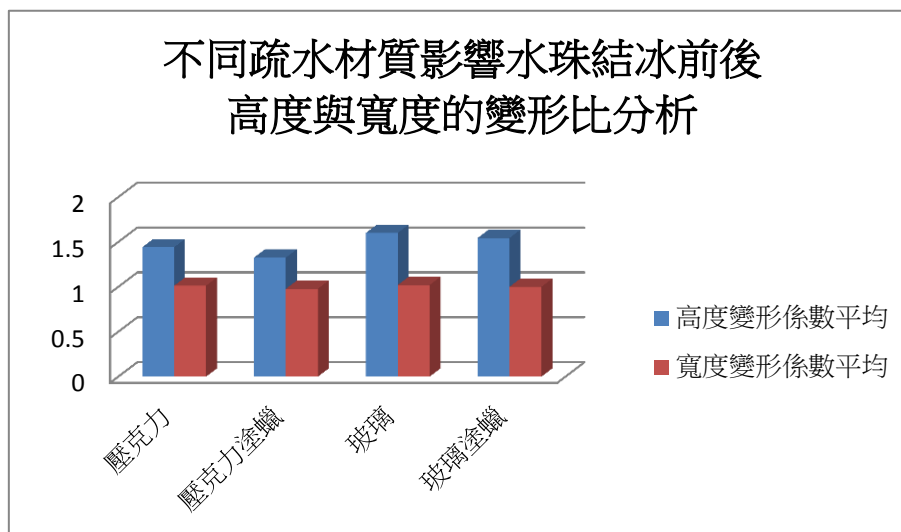
壓克力	第一次	第二次	第三次
冰凍照片			
融化照片			
變形比（高）	$3.44/2.45=1.404$	$3.76/2.62=1.435$	$4.04/2.72=1.485$
平均	1.4413		
變形比（寬度）	$12.82/12.82=1.000$	$13.04/12.98=1.005$	$13.2/12.76=1.034$
平均	1.0130		
接觸角變化	$60^\circ - 56^\circ = 4^\circ$	$56^\circ - 56^\circ = 0^\circ$	$58^\circ - 57^\circ = 1^\circ$
平均	1.67°		

壓克力塗蠟	第一次	第二次	第三次
冰凍照片			
融化照片			
變形比 (高)	$3.22/2.45=1.314$	$3.49/2.51=1.390$	$5.84/4.58=1.275$
平均	1.3263		
變形比 (寬度)	$7.25/7.42=0.977$	$7.47/7.58=0.985$	$9.55/9.82=0.972$
平均	0.9785		
接觸角變化	$86^\circ - 84^\circ = 2^\circ$	$100^\circ - 97^\circ = 3^\circ$	$106^\circ - 105^\circ = 1^\circ$
平均	$2^\circ$		

玻璃	第一次	第二次	第三次
冰凍照片			
融化照片			
變形比 (高)	$2.60/1.67=1.557$	$2.74/1.64=1.671$	$2.69/1.71=1.573$
平均	1.6003		
變形比 (寬度)	$10.06/10.77=0.934$	$11.16/11.41=1.029$	$12.81/12.24=1.047$
平均	1.003		
接觸角變化	$32^\circ - 29^\circ = 3^\circ$	$34^\circ - 31^\circ = 3^\circ$	$25^\circ - 23^\circ = 2^\circ$
平均	$2.67^\circ$		

玻璃塗蠟	第一次	第二次	第三次
冰凍照片			
融化照片			
變形比 (高)	$1.40/0.84=1.667$	$1.27/0.83=1.530$	$1.29/0.88=1.466$
平均	1.5443		
變形比 (寬度)	$4.65/4.65=1.000$	$4.52/4.46=1.013$	$4.63/4.65=0.996$
平均	1.003		
接觸角變化	$60^\circ - 57^\circ = 3^\circ$	$57^\circ - 53^\circ = 4^\circ$	$55^\circ - 54^\circ = 1^\circ$
平均	$2.67^\circ$		

疏水材質	壓克力	壓克力塗蠟	玻璃	玻璃塗蠟
高度變形比 平均	1.4413	1.3263	1.6003	1.5443
寬度變形比 平均	1.0130	0.9785	1.0203	1.0003
平均接觸角變化	$1.67^\circ$	$2^\circ$	$2.67^\circ$	$2.67^\circ$





發現：

- (1) 塗了蠟的壓克力與玻璃，疏水性變得比較好，但高度的變形比與沒有塗蠟的壓克力和玻璃比較起來，卻略微減少。
- (2) 玻璃的疏水性最差，高度變形比卻最大。
- (3) 在各種不同疏水材質的表面上，水珠結冰有形成尖凸點的，其寬度的變形比，依舊為 1 倍左右。
- (4) 水珠結冰前後接觸角的角度變化，也都在  $3^\circ$  以內。

推論：疏水性佳的材質，如壓克力塗蠟，其水珠的接觸角幾乎都接近 90 度或大於 90 度，呈現接近圓球形，當其結冰後高度的變化卻不會很大，可能是內聚力較大的原因。

#### 研究四、探討冰尖凸與冰釘產生條件的差別。

說明：老師最近拿了一份國際科展的報告給我們看，題目名稱是：【釘釘是個人才~急速冷卻水之冰釘特性研究】，這份報告主要是在探討另外一種水結冰的現象~冰釘形成的條件探究，根據他們實驗的結果，提出：水結冰時一開始水面會出現排列無序的層狀細冰，彼此間結合而留下孔洞，過冷水遭擠壓自此衝出形成冰釘。冰釘的形成以純水較容易產生，且常在風速小於  $1\text{m/s}$ ，溫度介於  $-16^\circ\text{C} \sim -20^\circ\text{C}$  時，於 22~77 分鐘內形成。看到這樣的一份報告，讓我們心生好奇，感覺上冰尖凸與冰釘形成的原理應該是類似的，但究竟冰尖凸與冰釘的形成條件有何不同？於是又花了一段時間來進行探究：

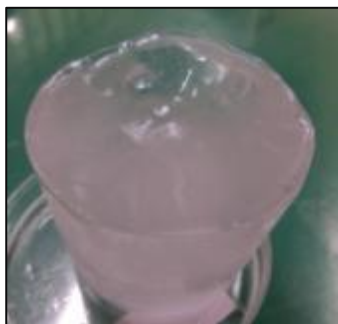
#### 實驗 1：改變水量嘗試尋找冰釘。

方法：以量筒分別裝 10、20、30、40、50、60、70、80、90、100C.C.的去離子水，一組加蓋一組不加蓋，放在冷凍庫中 3 小時後，取出觀察其結果。



結果：(1)以量杯裝去離子水，不管水量多少，加不加蓋都看不到冰釘的出現，頂多看到微微的隆起。

(2)水裝太滿時，並不會往上突起，反而從下面膨脹撐破量杯。



觀察：(1)將冰塊取出後發現，原來以整杯水來說，內部的下方是全部最晚結冰的，上方早已結成厚厚的冰，難怪冰尖凸不易出現，更不必說是冰釘了。

(2)當整杯水結成冰時，會呈現放射狀或是條紋狀的紋路，非常美麗。



這兩杯水內部偏下方還沒結冰，水邊緣有放射狀的氣泡。

完全結冰的水，裡面有放射或是條紋狀的紋路。

### 實驗 2：改變容器嘗試尋找冰釘。

方法：以不同容器裝八分滿的去離子水，放入冷凍庫中三小時觀察其結果。

結果：只有方形的製冰盒出現了長約 20mm 的冰釘，其餘頂多有些微隆起，都沒有發現冰釘。







### 實驗 3：改變水質嘗試尋找冰釘。

方法：以上寬下窄的方形製冰盒裝八分滿(約 10c.c)的蒸餾水、去離子水、RO 水、自來水，放入冷凍庫三小時觀察其結果。

結果：蒸餾水、去離子水、RO 水都出現了冰釘，但自來水沒有，因此冰釘的形成越沒有雜質越容易發生。



			
去離子水，冰釘長 25mm，裡面還有氣泡。	蒸餾水，冰釘長 20mm，較尖細。	RO 水，冰釘長 22mm，較圓潤，裡面有氣泡。	自來水，不容易形成冰釘。

觀察：冰釘出現的位置不一定，一盒 16 格往往只出現一根，去離子水最多曾有 3 根的記錄，研判與冷凍庫中的風向有關。

#### 實驗 4：改變風的影響嘗試尋找冰釘。

方法：以製冰盒用加蓋與不加蓋的方式加入八分滿的去離子水，放入冷凍庫三小時觀察其結果。

結果：沒加蓋的有出現冰釘，但加蓋的只出現隆起或厚厚的冰尖凸。



沒加蓋，有冰釘產生



有加蓋，只有不規則隆起。



推論：(1) 冰釘的產生的確需要風，當完全蓋上阻止風的干擾後，只能形成不規則的隆起。  
 (2) 我們發現冰釘的方向都往同一邊傾斜，應該是風向造成的。

#### 實驗 5：以製冰盒再次改變水量，嘗試尋找冰釘。

方法：在冰釘最容易出現的位置，分別加入 10c.c(八分滿)、8c.c(六分滿)、6c.c(四分滿)的去離子水，放入冷凍庫三小時觀察其結果。

結果：10c.c(八分滿)、8c.c(六分滿)有出現冰釘，但 6c.c(四分滿)則不曾出現，因此，要形成冰釘的水量要足夠，尤其深度不能太淺。



觀察發現：

- (1) 有形成尖凸或隆起的，冰塊取出後在隆起處會有白色的氣泡聚集，且以此為中心出現放射狀條紋(其實這個放射狀條紋應該是氣泡，是周圍的水先結冰時，將空氣推往中間還沒結冰的地方所造成。)；而沒有形成冰尖凸的，上面是清澈的冰塊(先結冰之處)，結冰時將空氣推往還沒結冰的內部，所以在底部才會出現白色氣泡。我們推測，氣泡聚集處是最慢結冰的地方，因此水結冰膨脹後，會由此突出；而上方若先結成厚厚的冰，則尖凸自然不易形成。



- (2) 有形成冰釘的冰塊，在冰釘下方的冰塊反而是清澈的，此處並不是氣泡聚集處，應該是只有微小的氣泡或孔洞，讓水有機會從這裡衝出來才能形成冰釘。



(本來是冰釘，已經稍微融化)

- (3) 氣泡聚集的白色部分，是最慢融化的。推測是因為水結冰是一種結晶的現象，結晶時會將雜質(空氣)往外排出，晶格十分整齊緊密，所以當溫度升高，這些緊靠在一起的水分子自然很快就一起融化了。



以白色氣泡聚集處為中心，氣泡由外向內集中。

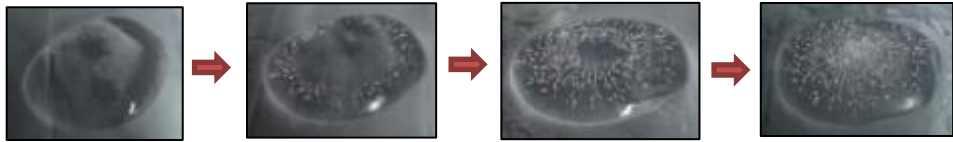


伍、結論：

1

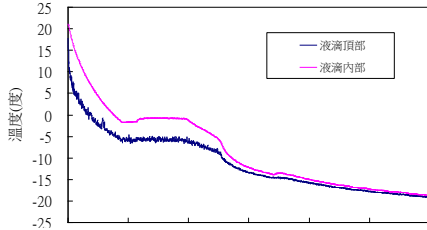
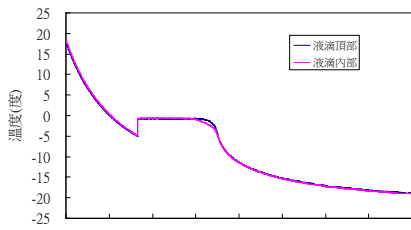


過程：蓋上蓋子的水珠底部與側邊會先結冰，此時底面積不會擴張，而是將內部還沒結冰的水往水珠的中央→上方推擠，才會形成冰尖



原因：水珠滴在培養皿內，水珠與底部接觸，冰箱底部的固體會搶走水的熱量，導致分子震動次數減少，溫度會降得比較快，因此才會從底部開始結冰。

現象：形成冰尖凸的水珠，其結冰過程的溫度變化會有明顯的過冷現象；沒有形成冰尖凸的水珠則只在零度 c 停留很久，溫度再慢慢往下降。

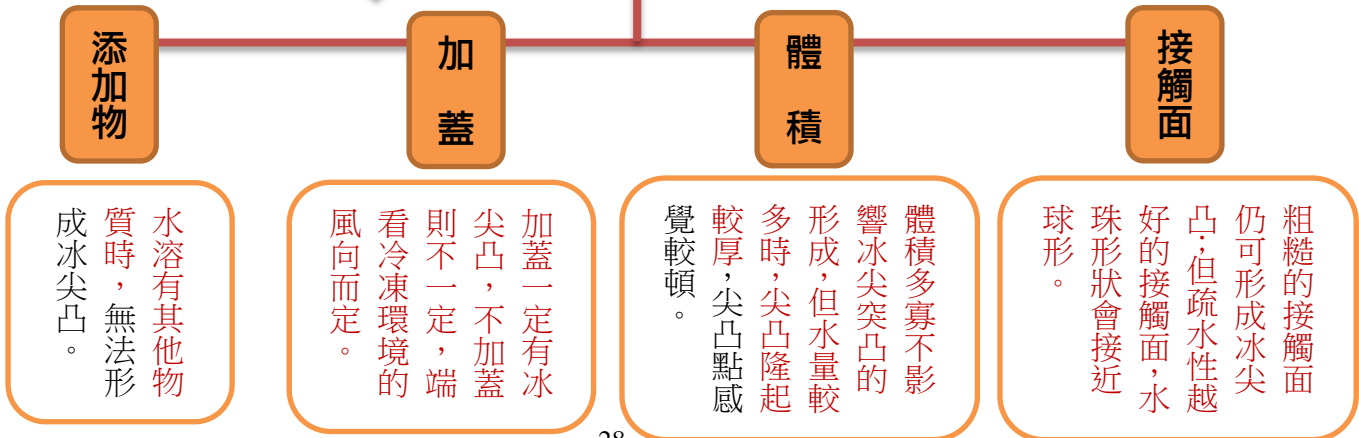


有尖凸的結冰過程中，水珠內部溫度有明顯的過冷現象（左圖）；反之，則在零度 C 停留很久溫度再往下降。（右圖）



2

影響冰尖凸形成的因素



## 3

## 水珠結冰前後的變形比

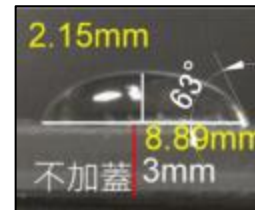
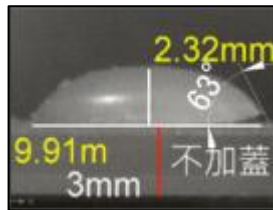
有尖凸

發現：由於水珠的結冰是從底部開始，當底部迅速結冰後，體積其實是沒有往外擴張，因此寬度的變形比幾乎都是 1，代表寬度沒有改變。而多餘的水被往上推擠，使高度變形比均在 1.2 ~ 1.7 之間。



無尖凸

發現：沒有形成尖凸的水珠結冰，其高度的變形比與寬度差不多，都在 1.1 倍左右，但高度比寬度稍稍增加一些。



體積的影響

發現：體積越大的水珠，被推擠上升的水就會越多，高度越高，變形比也越大。但超過 1c.c.則尖凸變厚，高度變形比反而下降。

發現：當接觸角變化越小，代表底部的底面積幾乎沒什麼改變，所以一直結冰到上方，內部的水會被推擠得越高，高度就越高。

疏水性的影響

發現：疏水性佳的材質，如壓克力塗蠟，其水珠的接觸角幾乎都接近 90 度或大於 90 度，接近球形，當其結冰後高度的變化卻不大，可能是內聚力較大的原因；寬度的變形比則維持在 1 倍左右。

4

## 冰尖凸與冰釘形成條件的比較

	冰尖凸	冰釘
		
	所需水量 很少， 0.005c.c 即可看到 明顯的尖 凸。	水量不能 太少，大約 需要製冰 盒六分滿 以上，較容 易出現
	容器材 質不拘 ，底部粗 糙也沒 關係。	以方形 製冰盒 較容易 出現。
	風 加蓋阻隔 風的影響 幾乎都能 形成冰尖 凸。	要有弱風 ，不能加 蓋，才容 易形成冰 釘。
	水質 只要不添加 能溶於水的 物質，幾乎都 可形成冰尖 凸。	去離子水 、蒸餾水 、RO 水皆 可，但去離子 水、蒸餾水出 現機率高。
	出現機率 幾乎百分之百，只 要加蓋、下方先結 冰，(放在冷凍庫即 可)就可形成。	發生機率低，要視 風向與表面冰層 是否有孔隙而決 定。

### 陸、討論

- 一、通常冰珠離開冷凍庫大約三秒鐘，就會開始融化，因此，我們必須以很快的速度取出並放在事先定位好的焦點上進行拍照，才不會拍到融化的冰珠，影響實驗結果。
- 二、由於熱電偶是金屬做的，因此，其導熱效果與底部的材質有所差異，這點在實驗中無法避免，但我們還是大致掌握到水珠結冰溫度變化。
- 三、我們沒有精密的儀器測量長度與接觸角，能想得到的最佳方法，就是拍照在繪圖軟體上換算高度或測量接觸角，這點讓我們學會應用兩種軟體，是意外的收穫呢！
- 四、為了增加實驗的精準度，我們都是每一項實驗重複做五次，再取最接近的三次進行分析測量，以減少實驗的誤差。
- 五、水珠結冰後取出再結冰，或是中斷結冰再進行，如此反覆多次，仍然會形成冰尖凸，這裡受限於字數與篇幅限制，不多贅述。
- 六、冰釘的形成機率不高，由於時間不足，還不宜明確計算出現機率，我們會繼續努力探究。

### 柒、心得感想：

「一沙一世界」，沒想到一顆小小的水珠結冰，竟然也有這麼多值得探討的地方！從這個研究中，我們深刻體悟到仔細觀察身邊事物的重要，即便是一顆不起眼的小水珠，也蘊含無限的學問。這是一個有趣又簡單的現象探討，很值得大家一起來探究！

### 捌、參考資料

- 一、過冷不結冰的水 中華民國第 43 屆科學展覽作品
- 二、彭巴效應的研究及探討 中華民國第 45 屆科學展覽作品
- 三、維基百科 <http://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E7%96%8F%E6%B0%B4%E4%BD%9C%E7%94%A8>
- 四、【釘釘是個人才~急速冷卻水之冰釘特性研究】 2009 台灣國際科展優勝作品

## 【評語】 080113

1. 對於過冷現象的理解和認識有相當的程度測量的儀器（溫度計）  
頗為先進，有助於數據的精準度。
2. 報告內容可以，但傳達速度可以降低些，則將會更佳。