

2009 年臺灣國際科學展覽會

優勝作品專輯

編號： 140008

作品名稱

「釘釘」是個人才——急速冷卻水之冰釘特性研究

得獎獎項

物理與太空科學科大會獎第三名

學校名稱： 國立大里高級中學

作者姓名： 邱律婷

指導老師： 林士超

關鍵字： 水結冰、冰釘、過冷水

Study on the Formation of Ice Spikes from Super Cooled Water

Abstract

The ice cubes in the refrigerator vary to some extent. Some appear white, some have bubbles inside, and some even have ice spikes on the surfaces. This study is conducted by utilizing a variety of container and water types to find the condition required for ice spikes' growth, so as to verify the development of ice spikes growing.

The result indicates that ice spikes usually formed from fast frozen distilled water within 27~77 minutes in a condition that wind speed lower than 1 m/s and temperature is between -16°C and -20°C. First of all, there will be layered tiny ice crystals arranged randomly on the water surface. There are some holes left in the combination of these tiny crystals, which allows super cooled water to be pushed to extrude out from them. The super cooled water solidify and form spikes at a speed of 25~60 um per second.

In 1921, Bally and Dorsey proposed a model of ice spike formation. They presumed that ice spikes formed only when water started to solidify from the edge. On the contrast, the finding in this study indicates that ice spikes form as long as "water surface" was solidified.

The conditions for the formation of ice spikes vary widely, just as no two snow flakes are of the same shape. They both belong to field of nonlinear physics. Moreover, the conditions for the formation of ice spikes are more complicated and variable in natural circumstances.

摘 要

冰箱裡的冰塊每顆都不全然相同，或呈乳白，或有氣泡，甚至長出冰釘！本研究以各種容器、各種的水找出冰釘生長條件，進而驗證其生長過程。

結果顯示：冰釘常在風速小於 1m/s，溫度介 $16^{\circ}\text{C} \sim -20^{\circ}\text{C}$ 時，由純水快速冷卻，於 27~77 分鐘內形成。起初，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，固化速度約 $25 \sim 60 \text{ um/s}$ 。

Bally-Dorsey 認為冰釘生長需過冷水四周先固化，才能長出冰釘。但本研究發現，只要『水表面』封住，就能長成冰釘。

冰釘形成的條件相當多變，如同任二片雪花皆無一樣的外形，是非線性物理的一環。此外，在自然界的冰釘生長，條件更複雜多樣。有待分子動力學模擬來估算冰釘的水分子結構！

「釘釘」是個人才 ~~急速冷卻水之冰釘特性研究

一、前言

水凝結成冰相信大家最熟悉不過的物理現象之一，偶然中發現，放在冰箱中的冰塊不是完全長得同一模樣，有的晶瑩剔透，有的呈現乳白色，有的含有小氣泡。

日本名古屋大學的 Ohmine 教授花了六年的時間利用超級電腦才首次觀察到水結成冰的過程。才知道科學家要模擬水分子是如何由液體變成固體的過程是多麼麻煩。

在科學人雜誌 2007 年 8 月號，有篇短文提到為什麼冷凍庫裡的冰會結成像石筍一樣尖？似乎也在說明水結冰的條件也許一樣，但結果可能不同。

於是我想知道：水到了冰點是不是立即結冰？晶瑩剔透的冰要怎麼樣才會形成？到底有多少因素會影響水的結冰及冰釘的生長...等。本研究亦期許在水凝結成冰塊與分子動力學問題上有進一步的瞭解。

二、研究目的

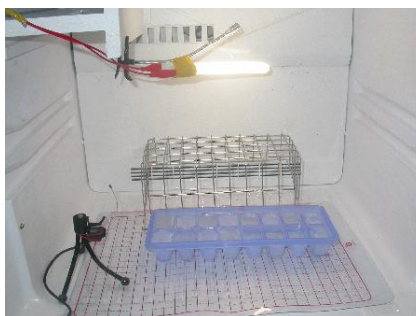
- (一)明瞭水結成冰及冰釘生長的過程。
- (二)確定可以在冰箱中培養出冰釘的物理條件。
- (三)檢視急速冷卻條件下，水結冰的過程及結果。
- (四)探討製冰盒表面粗糙度對水結冰的影響。
- (五)利用不同雜質來改變水結成冰的生成速率。
- (六)分析冰釘長出的機率及生長速率。

三、研究設備及器材

蒸餾水、冰箱、冷凍櫃、各樣式的容器（鋼杯、塑膠杯、瓶蓋、玻璃瓶）、製冰盒三個（PP 材質-3 排 x6 格及 2 排 x8 格，HDPE 材質-2 排 x7 格）、數位相機、攝影機、DVD 錄影機、量筒、燒杯、滴管、液態氮、迷你風速計、探針式溫度計、底片盒、過錳酸鉀、量尺一把、鋼杯、小鐵鍋、PL 燈管、電腦冷卻用風扇。

四、研究過程及方法

- 一、將飲料杯注入八分滿的自來水，一部份的實驗中放入吸管在水面附近，放入冰箱及冷凍櫃，分別在冰凍 20、40、60 分鐘、隔夜之後取出飲料杯觀察水結冰的結果，並記錄冰箱及冷凍櫃的溫度及風速。
- 二、將各樣式的容器（有大有小、有高有低、有圓有多邊形、有塑膠有玻璃）與製冰盒（PP-3x6，HDPE-2x7，PP-2x8）注入自來水，放入冰箱及冷凍櫃，觀察結冰的結果，記錄是否有冰釘長出來。
- 三、將各樣式製冰盒改以加注入蒸餾水並在部份製冰盒中加入過錳酸鉀（0.5% wt），放入冰箱及冷凍櫃，觀察結冰的結果，特別留意顏色變化及結冰順序，記錄是否有冰釘長出來。
- 四、將 PP 材質-2 排 x8 格的製冰盒注入不同比例的自來水與蒸餾水混合（0、10、20、30%自來水），放入冰箱及冷凍櫃，觀察結冰的結果，是否有冰釘長出來，重覆數次。
- 五、在部份的實驗中，於冷凍室中安置攝影機，再以錄影機記錄水結成冰的過程及冰釘生長之起迄時間及歷程。
- 六、在小鐵鍋中放入鋼杯、小藥杯(15ml)及製冰盒(PP-2x2)，小心倒入液態氮，一邊記錄溫度變化情形，一邊觀察結冰的結果，並留意水表面的變化與冰釘是否長出來。



五、研究結果

(一)將飲料杯注入八分滿的自來水，發現結冰的結果大為驚人。

1. 開始冷凍之初，杯中水是由外往內逐漸結冰，一開始幾全部都是透明的冰，未結冰的部份是屬過冷水，水溫約為 -3°C 。
2. 若是完全結冰(至少 40 分鐘以上)則會發現冰塊呈現白白霧霧的，四周會有許多氣泡，最外側才是透明冰塊，大多數的氣泡排列呈輻射狀往外排列，相當明顯。
3. 當時的冰箱溫度在 $-16\sim 18^{\circ}\text{C}$ 之間，而風速約略不大於每秒一公尺($<1\text{m/s}$)。
4. 放入冰箱及冷凍櫃的結果是類似的。只是冷凍櫃的溫度更低，可到 -28°C 上下，而風速的部分因為沒有風扇所以風速為 0。
5. 原本以為在部份的實驗中放入吸管在水面附近，可以有水會在吸管中結冰，但結果並無長出冰釘之類的情形。

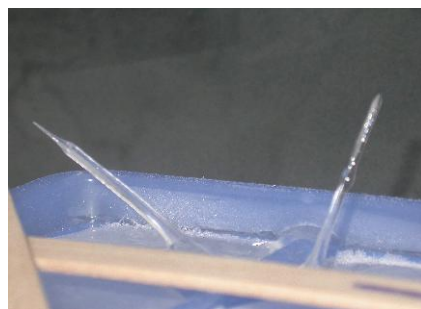


(二)什麼都有什麼都不奇怪：

1. 雖然試了各樣式的容器與製冰盒，但是自來水的結冰似乎不為所動，結冰的結果並無任何冰釘長出來，令人遺憾、挫折。
2. 冷凍櫃的條件如上，沒有風扇，溫度可以在 -30°C 上下，但並無任何冰釘長出來，不過發現冰塊的白霧情形有更明顯，表面有凸出，且有一些的裂縫。
3. 鋼杯中的自來水可能是因冷卻速率快，白霧狀冰塊的體積有比較大一些。
4. 大部份的容器表面，冰的表面不是相當的平整，我開始希望『冰釘』出現吧！
上帝啊！不要再跟我開玩笑了！

(三)千呼萬喚始出來，真正的「什麼都有什麼都不奇怪」：

1. 經過了將近一百天的嘗試與摸索，終於在網站上查到了 Morris(U of Toronto, Canada)及 Libbrecht(CalTech, CA/USA)是採用蒸餾水進行冰釘的實驗，於是決定從自來水改為蒸餾水來進行實驗。
2. 實驗出現了一支又一支的冰釘，但它們可以在各種塑膠的容器，或大或小，圓形容器或五、六邊形，也可以在某些製冰盒（PP-3x6 或 PP-2x8）中出現，但奇怪的是鋼杯、玻璃及 HDPE 材質的製冰盒全都不曾出現冰釘。
3. 冰釘的外形大致上皆為：幾個 mm 的直徑，長短不一，可長可短，在幾 mm 到幾十 mm 的範圍，冰塊表面長出冰釘的位置並不固定，冰釘的角度也不固定（雖然與水平面夾 60 度頗為常見），方向有向外、向內、向左、向右、也有垂直向上的。
4. 本實驗中所見的冰釘有一奇特現象，短胖型冰釘好似頂端常見到有氣泡封存其中，若是細長型的冰釘，前述現象則相當少見。
5. 在冰釘出現後，也開始定性定量的實驗，此時也已經到了今年的二月份。接下來的實驗，為統計之便，都是以 PP 製冰盒（冰盒體積約 25ml、有 AB 二排，每排有 8 個位置，編號 A1~A8、B1~B8），放在冰箱中固定的位置（放一有格子標記的塑膠墊板於冰箱內，並以油性筆註記位置），溫度在 $-16^{\circ}\text{C} \sim -20^{\circ}\text{C}$ ，冰箱門關閉時會有風扇啟動，風速不大於 1m/s 的環境進行。



(四)有雜質的水結冰結果

1. 全國第 43 屆科展的過冷水實驗指出，水質對過冷水結冰的影響是存在的：水中有沉積物(如熱水瓶的鍋垢)或懸浮顆粒，過冷效果不穩定。
2. 於是我將 PP 製冰盒部份除了加蒸餾水外，並在部份製冰盒中加入過錳酸鉀水溶液一或二滴，並攪拌均勻，放入冰箱中，觀察結冰的結果，是否有冰釘長出來。
3. 過錳酸鉀為粉紅色，調配成 0.5%wt。在結冰之初，原本是假定它能成為結冰過程的標籤，但發現過錳酸鉀常常是在結冰的最後階段才進入冰的結晶格子當中。這樣的行為與海水結冰的初期是淡水冰是一樣的。
4. 因過錳酸鉀分子在水結冰過的初期及中期並沒有參與結晶格子排列的過程（詳見如圖 1 所示，剛開始的冰是透明，在表面、在四周圍出現，最後過錳酸鉀分子才進入冰塊之中），所以我看到了 86 個冰塊中有 14 支冰釘長出，7 支較長(有 15、20、26、28mm 等)，7 支較短（小於 2 mm）。顯示過錳酸鉀分子對於冰釘生長並無關鍵性的影響，或是冰釘的生長另有一番的故事可言。
5. 以現有的參考資料，我無法判斷過錳酸鉀分子在水結冰或冰釘生長的過程是幫忙的角色（冰核：有利於影響水分子排列）或幫倒忙的角色（影響水分子排列）。

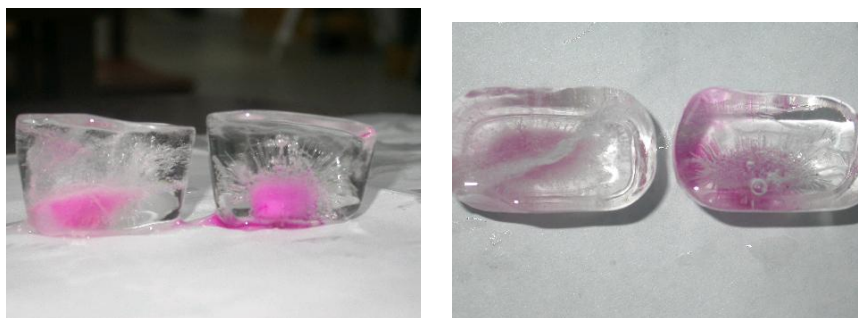


圖 1

(五)不同純度的水質：

1. 在 PP 製冰盒注入不同比例的自來水（0、10、20、30%自來水），可以觀察到仍可長出冰釘的現象，雖然不是很多支冰釘，但有二支長到 35mm 的長度（分別是 20、30%自來水與蒸餾水混合，35mm 已是本研究的最長記錄），自來水對冰釘生成的影響變動性並不是相關性很高。
2. 自來水常因管路老舊而含有一些雜質，所以台灣的自來水目前尚未到達生飲的標準，若是某一時期的水質較好，是否就比較有機率長出冰釘來呢？
3. 美國 Ames 高中有進行類似的實驗，表示自來水與蒸餾水比例愈低，冰釘的長出機率高。這是否顯示美國的自來水的品質比較穩定呢？還是有其他原因？

(六)很幸運地，有三次實驗成功以錄影機記錄水結成冰的過程及冰釘

生長之歷程：

1. 由影片可看到水結為冰的過程為：
 - (1)先有細長冰晶漂浮在過冷水表面
 - (2)之後，水表面固化為冰。
2. 翻拍自 DVD 的影片(如圖 2 所示)，有三支冰釘分別在 B8、A5、A7 位置長出，記錄如表 1 所示：

表 1

位置	起	迄	歷時	長度	速率
B8	27m28s	39m33s	705s	26mm	37um/s
A5	43m30s	56m01s	750s	28mm	37um/s
A7	51m56s	59m06s	430s	26mm	60um/s

條件：強冷（ -20°C ），風速 $<1\text{m/s}$ ，

B8、A5、A7 皆以蒸餾水進行實驗



圖 2

3. 但冰的生長，明顯受到風的影響，我發現結冰的方向會有順風與逆風的情形。

以下圖（另有加電腦冷卻用風扇如圖 3 所示）為例說明，單一冰塊的白色區域代表的是已固化為冰，粉紅色區域代表的是之後才陸續結為冰的部份，此二區域在單一冰塊中並無對稱。



圖 3

4. 另將冰箱冰凍條件改為弱冷（ -16°C ），其他不變如表 2 所示：

表 2

位置	起	迄	歷時	長度	速率
B5	1h17m0s	1h30m0s	780s	20mm	26um/s
重算	1h17m0s	1h27m0s	600s	18mm	30um/s

5. 冰釘的生長大致在 27~77 分鐘內開始；同一次的結冰過程中，冰釘的出現可先後差將近 25 分鐘，這應是風的影響。但不論風的大小或急速冷卻的快慢，對於冰釘的生長速率影響不大，約是維持在 $26\mu\text{m/s}\sim 60\mu\text{m/s}$ 的範圍，也可說成 $26\text{nm/ms}\sim 60\text{nm/ms}$ (每毫秒有 26~60 奈米的冰分子依序排列，或說每毫秒有 50~100 顆冰分子依序排列)。

6. 冰釘的出現過程大致可分為三個階段：

- (1) 基座出現，亦即冰封的表面出現了一個小破洞，過冷水開始溢出，約耗時 25 分鐘（強冷）或 60 分鐘（弱冷），會不會有冰釘就看這個關鍵階段。
- (2) 向外凸出，這是主要的冰釘發展期，會有多長冰釘長出來，由此階段主控。
- (3) 封口期，若過冷水不再往上擠出，冰釘的最頂端立即冰封，長度不再增加，但冰釘的結構可能還會調整，例如：冰釘內的氣泡或冰釘的透明度。

(七)以液態氮進行急凍奇「兵」：

1. 液態氮倒入鐵鍋時由於溫度太低，鐵鍋附近出現大量水滴（煙霧迷漫）觀測不易，但仍然前後進行七次超急速冷凍的結冰實驗，分別三次 PP 製冰盒與小藥盒、三次鋼杯（30ml、60ml 蒸餾水），以及一次在 120ml 蒸餾水的內外皆加入液態氮。以液態氮進行的實驗，控制的溫度如圖 4 所示，大致都在 -60°C 或更低溫度下進行。
2. 實驗的過程都可在 6~8 分鐘內完成，但不同次的實驗都可看到兩個現象發生：
 - (1)如圖 4 所示的紅及粉紅色箭頭所指，是冰層的表面出現有液態水溢出。
 - (2) 如圖 4 所示的藍及淺藍色箭頭所指，是溢出的液態水表面已經固化，但類似火山一樣出樣了冒煙現象，應該是有如冰釘要生長的過冷水冒出，但因溫度太低、亦缺乏一定的風速，所以過冷水一直冒出，但長不出冰釘。

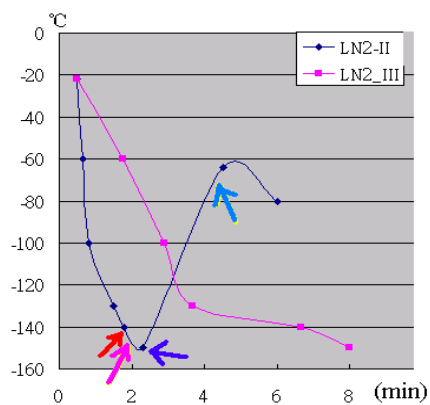


圖 4

3. 全部液態氮急速冷卻的實驗，皆可觀察到：純水結冰比較快，整個冰塊為純白色；而含粉紅色過錳酸鉀的結冰較慢了一些，整個冰塊為均勻的粉紅色(如圖 5 所示)。這很有趣，先前發現過錳酸鉀常常是在結冰的最後階段才進入冰的成份之中，但因為冷卻太過於急速，一旦水開始結冰，過錳酸鉀隨即進入冰的成份之中。



圖 5

六、討 論

(一)製冰盒的材質

1. 一般不難發現小冰塊極為容易與玻璃或鋼杯表面粘住，這是因水分子在固態時，分子大小及排列方式恰巧能“卡”在其表面。也就是某物質表面與固態水分子容易有大小相似的凸出與凹陷，能互相卡住(如圖 6 所示)。

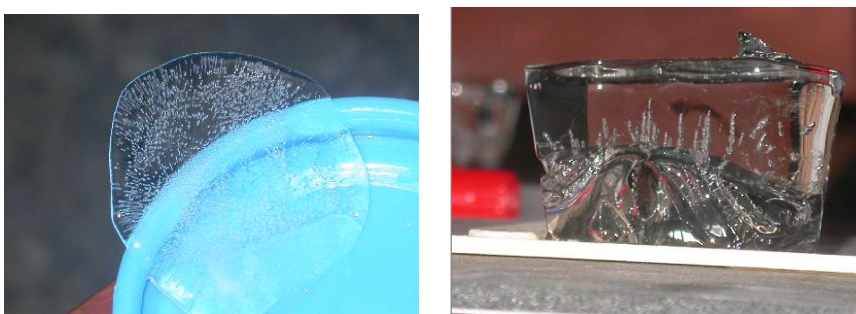


圖 6

2. 於是製冰盒的接觸面性質，也能決定是否有利於冰釘的生長，在過去的實驗統計中，發現冰釘在製冰盒的出現機率是 HDPE < PP，而 HDPE 的製冰盒幾乎沒有長過冰釘。這也是為什麼在附件的冰釘統計，本研究只有針對 PP 製冰盒所生長的冰釘來分析。

(二)從工業製冰來討論透明冰塊與氣泡：

中文維基百科指出：大量銷售的冰塊一般來說都相當清澈，不像家裡做的冰塊中央會有霧狀。較不透明的霧狀冰塊之所以會產生，是由於快速冷凍的結果。當水是慢慢的結凍時（也就是非常接近冰點），在水中微小的氣泡和溶解的氣體有機會離開水面，最後的冰塊就會很清澈。如果水是快速結凍，這些氣體就會被凍結在水中，造成了霧狀冰塊。

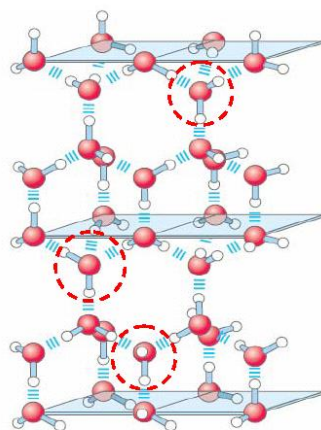
(三)冰釘描述：

綜合全部的實驗，冰釘的生長條件為：

1. 位置、長短不一定，但是平整光滑的塑膠製品(PP 製冰盒)、裝以蒸餾水的條件是必需的。
2. 在風速小於每秒 1 公尺、 $-16^{\circ}\text{C} \sim -20^{\circ}\text{C}$ 的溫度下急速冷卻。
3. 雜質(自來水及過錳酸鉀)有著一程度的影響。
4. 但如附件的統計表所列：在 30 次、每次 16 顆冰塊的試驗中，有 96 支的冰釘長出，機率為 18%。若將總長度加總，除以冰塊數，平均每支冰釘的長度為 1.4mm。
5. 若製冰盒分為四區，以中間偏右最易長出冰釘。此一推測應與風扇的位置有關。

(四)氫鍵的影響：

1. 每一個水分子，其氫原子與另外兩個水分子的氧原子之間，會有如鍵結的吸引，稱為氫鍵，氫鍵是水比起其他氫化物具有更高熔點、高沸點、高熔解熱、高氣化熱的原因。
2. 水結冰，形成氫鍵而成四面體之中空網狀結構，故體積膨脹，密度變小，硬度變大水的特性跟『氫鍵』有關，而且在結冰過程晶格排列中好像變成六角蜂窩的形狀，而水的原子是『角形』鍵結（ 108° ），在整個由水變成冰的過程中，由於鍵結形狀的不同造成體積變大，而質量不變、密度變小，所以會浮起來。
3. 水結冰後是六角晶型(類似蜂窩狀，如圖 7 所示)，固態的水分子則彼此強烈地結合，形成一個井然有序的陣列結構。當水結冰時，一個水分子會將鄰近的四個分子吸引在自己的周圍，形成六角環疊層式的晶格陣列。



冰結晶中水分子的排列

圖 7

4. 日本名古屋大學的 Ohmine 教授在 2002 年利用超級電腦成功觀察到水結成冰的過程。他們進行 512 個水分子相互間作用的觀察，發現凝結成冰的第一步是水分子會形成維持長時間的氫鍵，然後原子逐漸改變形狀及大小，逐漸形成穩定的鍵結，也就是形成冰塊。另有許多文獻指出國內外已有許多利用分子動力學的方法進行預測奈米冰晶分子之氫鍵結構，相信再假以時日，或許冰釘的生長時間及生長速度會因冰晶分子之氫鍵結構的進一步瞭解，而有突破。

(五)Bally-Dorsey Model 修正

1. 在 1921 年 Dorsey 即已提出冰釘生長的模式（Bally-Dorsey Model，如圖 8 所示），它認為四周皆需冰封，才会有冰釘發展，但本研究顯示冰釘生長的過程有需要修正的地方。

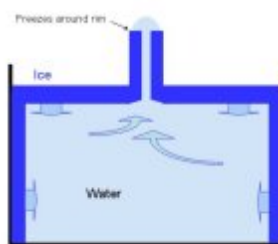


圖 8

2. 因氫鍵之故，水結冰是體積膨脹，凝結成冰的第一步是水分子會形成維持長時間的氫鍵，然後原子核逐漸改變形狀及大小，逐漸形成穩定的鍵結，也就是形成冰塊。本研究認為：在結冰的一開始，若溫度可以在 -10°C 以下，蒸餾水會先有過冷現象，再因冰核條件的配合，過冷水表面會由四周往中央結冰，將「表面」幾乎完全封住（詳見如圖 9 所示，表層的冰厚度只有 2~3mm）；若「表面」冰封時存在有一小洞，即有機會發展出冰釘。



圖 9

3. 一旦「表面」有一小洞之後，後來的過冷水會遭擠壓而自冰封表面的小洞衝出，當此等過冷水會從空心管子頂端溢出，立即固化、排列在空心管的上方，逐漸形成一又細又長的冰釘。

(六)自然界的冰釘：

1. 本實驗是屬於實驗室的冰釘培養，條件如前所述，容易控制。然而，自然界的水結冰，如湖面或河面，常因風不大或止息無風的條件下，即便是低溫的自然條件可以時常發生，但並非很容易發生冰釘的生長情形。如圖 10 所示是小鳥的飲水盆，在清晨低溫下所長出的冰釘，相當少見。



圖 10

2. 本研究認為：自然界的冰釘生長條件極為嚴苛，必需是有融雪或露/霜融化之後的潔淨水，不能有任何的雜質，接下來再等待下一次結冰時機，方有機會可以長出冰釘。

(七)非線性物理學：

1. 雪花的形成也是水結晶作用的表現，但世上没有兩朵相同的雪花，當水分子自我排列成固態的雪或冰時，雪花即反映了水分子的內在秩序是亂中有序，以及其不規則的特性(如圖 11 所示)。



圖 11

2. 水分子們彼此依最低能量狀態排列，這使得它們之間的吸引力最大而斥力最小。地球上的水冰中，每個分子都以氫鍵與另外四個分子相連，形成晶格結構，最基本的形狀是六方柱，頂端與底端都是六角形，六個側邊則是三角形。有如貼地磚一般：只要樣式選定、並放好了第一片地磚，其他所有的地磚都一定得放到已被決定的位置，才能維持樣式。
3. 水分子依照低能量的位置自我安頓，便會填入空位並維持對稱；雪花有很多種樣子，產生的原因在於雪花在大氣中生成，而大氣狀況複雜多變。
4. 一片雪的結晶可能先以某種方式生成，然後因溫度與濕度的改變而有相對的調整。基本的六角形對稱會保留下來，不過冰晶會往新的方向來發展它的分枝。
5. 自然界中的許多現象都可以在一定程度上近似為線性關係。物理學和自然科學就是為各種現象找尋線性相依的關係，但隨著人類對自然界中各種複雜現象的深入研究，越來越多的非線性現象開始進入了人類的視野。
6. 據英文維基百科資料，冰在不同的溫度壓力條件下，可以有至少 17 種的相。由此看來，這個冰釘的研究才剛剛要開始，而不是完成。

七、結論

- (一) 冰釘通常是純水在快速冷卻時形成，當過冷水中出現冰核，才開始結冰。冰核在過冷水中長大，先在容器表面出現層狀冰晶，過冷水遭擠壓自冰封表面小洞衝出。若冰晶排列整齊，過冷水自空心管子頂端溢出，立即固化長出 5~35mm 不等的冰釘。
- (二) 由實驗得知水面的封凍，需三大要素，低溫、風、時間，缺一不可。在 $-16^{\circ}\text{C} \sim -20^{\circ}\text{C}$ 的溫度，及小於每秒 1 公尺的風速下，容器生長出冰釘的可能性高達 18%，平均長度為 1.4mm。
- (三) 有 18 支冰釘長度超過 20mm，其中 5 支達 30mm 以上。冰釘大約是在冷凍後的 27~77 分鐘內長出，生長速度每秒約 $25 \sim 60 \mu\text{m} (10^{-6}\text{m})$ 。
- (四) 文獻指出冰釘生成溫度為 -6°C ，但實驗發現在 $-16^{\circ}\text{C} \sim -20^{\circ}\text{C}$ 也可長出冰釘；製冰盒所產出的冰釘會受雜質影響，但受過錳酸鉀的影響不甚明顯。
- (五) 自然界的冰釘生長條件更為嚴苛，必需是有融雪或露/霜融化之後的潔淨水，待再一次結冰方能長出。
- (六) 在 1921 年 Bally-Dorsey 即提出冰釘生長模式，本研究認為有修正需要。只要水結成冰將容器『表面』幾乎完全封住，接下來若冰封表面存在一小洞，容器內過冷水會有機會自小洞四週長成空心管子，自頂端溢出、固化、排列在冰柱的最上方，冰晶重覆堆疊，形成冰釘。
- (七) 冰釘生長並非有固定的條件，它是非線性物理研究的一環。將來將以分子動力學模擬來估算冰釘的水分結構是否會與普通冰塊相同？此一部份有待後續研究。

八、參考資料及其他

(一)書面

1. 李通藝等人，高中基礎地球科學(全)，第一版，台中，康熹圖書，p.208，2006
2. Morris, 2007, 為什麼冷凍庫裡的冰會結成像石筍一樣尖？科學人雜誌, 2007 年 8 月號, p.194
3. K. G. Libbrecht and K. Lui, 2004, An Investigation of Laboratory-grown Ice Spikes, J. Glaciology 50, p. 371
4. K. G. Libbrecht, 2003, Growth Rates of the Principal Facet of Ice Between -10C and -40C, J. Cryst. Growth 247, p. 530
5. Matsumoto, M., Saito, S. & Ohmine, I., 2002, Molecular dynamics simulation of the ice nucleation and growth process leading to water freezing. Nature, 416, 409～413
6. Stalagmite ice, 2006, Vol. 2547 New Scientist magazine, p. 81, 15 April
7. C. A. Knight, 1998, What conditions determine crystal growth? The triangular ice spike. American Journal of Physics, Vol. 66, p. 1041
8. H. F. Perry, 2001, What conditions determine crystal growth? American Journal of Physics, Vol. 69, p. 106

(二)網路

1. <http://www.its.caltech.edu/~atomic/snowcrystals/ice/ice.htm>
2. <http://www.physics.utoronto.ca/~smorris/edl/icespikes/icespikes.html>
3. <http://activity.ntsec.gov.tw/activity/race-1/43/pdf/d/030103.pdf> (43th 全國科展)
4. http://www.sciscape.org/news_detail.php?news_id=665 (Nature 結冰了)
5. <http://zh.wikipedia.org/wiki/非線性物理學>
6. <http://zh.wikipedia.org/wiki/冰塊>
7. http://www.bme.ncku.edu.tw/bme_homepage/edu/course/BioEC96/BioEC1023.pdf
8. <http://earth.fg.tp.edu.tw/learn/water/water3.htm>
9. http://news.xinhuanet.com/st/2006-01/16/content_4058318.htm (雪花)
10. <http://www.halbertcicles.com/>
11. <http://www.lsbu.ac.uk/water/ice1h.html> (冰結構)
12. <http://cmp.ameslab.gov/personnel/canfield/misc/ice.ppt>
(An investigation of the effects of water purity on ice spike formation)

附件：PVC製冰盒中冰釘位置及長度(mm)統計表																								
B1			B2			B3			B4			B5			B6			B7			B8			
T1			T1			T1			T1			T1		20	T1		5	T1			T1		6	
T2			T2			T2		5	T2			T2		6	T2		1&7	T2			T2		2	
T3			T3		✓	T3		✓	T3		3	T3			T3			T3		✓	T3			
T4			T4		✓	T4			T4		10&4	T4			T4		✓	T4	x		2	T4	x	
T5		18	T5	✓		T5		2	T5		✓	T5		4	✓	T5		5	T5			T5		
T6			T6			T6			T6			T6		10	T6		20	T6		✓	T6			
T7			T7		30	T7			T7			T7		6	3	T7		25	T7		2	T7		
T8			T8			T8			T8		10	T8			T8			T8		✓	T8		10	35
T9			T9			T9		✓	T9			T9			T9			T9			T9		✓	
T10			T10			T10			T10		4	T10			T10			T10			T10		26	
A1			A2			A3			A4			A5			A6			A7			A8			
T1	✓		3	T1	30		T1			T1			T1			T1			T1		10	T1		
T2		15		T2		4	T2		4	T2		7	T2		6	5	T2		22	5	T2		20	
T3				T3			T3		1	T3			T3				T3				T3		3	
T4			28	T4			T4		✓	T4			T4		✓		T4		✓	✓	T4	25	x	2
T5		2		T5			T5		✓	T5		12	T5				T5		10		T5	✓	22	
T6	20		✓	T6			T6			T6			T6		8		T6		8		T6			
T7				T7			T7			T7			T7				T7		20		T7		✓	
T8				T8			T8			T8			T8				T8		✓		T8		2&1	
T9				T9		✓	T9			T9			T9		✓		T9				T9		✓	
T10			✓	T10			T10		✓	T10			T10		28		✓	T10	✓	11	T10	26	3	
紅色表示 有加過錳酸鉀 藍色表示 只有蒸餾水 綠色表示 有自來水																								

紅色表示 有加過錳酸鉀

藍色表示 只有蒸餾水

綠色表示 有自來水

註一：PP 製冰盒有二排，每排有 8 格，本研究以靠近冰箱內側為編號 B，靠近冰箱門的一側為編號 A，自左而右，依序編 1~8。

註二：詳細實驗記錄請參閱實驗手札。

註三：本研究使用的冰箱，在 B3、B4 的方向，高度約 20cm，有一冰箱本身所配置的風扇，待關閉冰箱門後，風扇就會啟動，使冷凍室的空氣能規則流動。

評語

本作品探討水在溫度降低時結冰形成「冰釘」的過程，研究過程尚稱嚴謹，內容及現象十分有趣，亦得到良好結果，同時在實驗初期經過多次嘗試，學習許多知識，很值得鼓勵。