

中華民國第 51 屆中小學科學展覽會 作品說明書

高中組 物理科

佳作

040106

低頻振動對冰冷凝氣泡分佈之研究

學校名稱：臺北市立麗山高級中學

作者： 高二 黃士恂 高二 許恪禎 高二 王克維	指導老師： 徐志成 吳明德
-----------------------------------	---------------------

關鍵詞：冰、冷凝、表面波

摘要

本研究探討在水凝冰過程中，加入一低頻振動，探討其氣泡聚集在特定點成團的現象。首先改變水中溶氣量，以探討氣泡成因；並改變水量，推測其流動性質的影響性；利用照相觀測氣泡生成過程，推測氣泡聚集成團的原因。

實驗方法以喇叭作振動器，施加不同頻率振動冷凝時 50mm 鋁管中的水，待其固化後觀察不同頻率時的氣泡分佈狀況。結果顯示，在頻率 10-40Hz 中，頻率越高時，氣泡團間間距越小。

而在不同的水量進行實驗時，發現在水量過多或過少時，都不容易觀察出生成氣泡之現象，且水量佔管體積 35% 時氣泡聚集最明顯。推測可能是因為水裝太滿時液體無法流動所導致。

以照相觀測凝冰過程，發現節點會比較早結冰，故氣泡不平均現象是因駐波場導致結冰順序改變間接造成。

壹、研究動機

不論是在物理課本或是化學課本上，都可以看到許多關於水與冰的性質與介紹，在高一物理中上到波一課中，我們試想，波是否能改變水與冰的性質呢？於是我們便打算製作一個波對水冷凝後的冰的性質的影響，經過前前後後的摸索，我們發現當我們在水冷凝過程中加入一個振動(一個波)，那麼結冰後氣泡便會分佈在特定點上成團，於是我們便更進一步的進行了以下實驗。

實驗中，我們甚至進一步的利用到物理專題課中由物理課進行延伸時所上到的駐波。

貳、研究目的

1. 凝冰過程中，改變水中溶氣量以探討氣泡成因
2. 凝冰過程中，以照相觀測法分析與探討氣泡成團位置，並與常溫中流場進行比較。
3. 凝冰過程中，改變振動頻率，探討氣泡團與氣泡團間距與頻率關係。
4. 凝冰過程中，改變管中的水量，探討氣泡團與其他有氣泡處之寬度差與水量關係。
5. 試圖利用光彈法分析冰中的應力分佈。

參、研究設備及器材

一、實驗儀器

	名稱	規格/型號	功能/用途	購買/取得 地點
1	頻率產生器	Sweep function generator 8150	產生交流訊號	物理實驗室
2	喇叭	100 mm*100 mm*32 mm 功率：8Ω、5w	作振動源	光華電子商城
3	電冰箱	東元 RE4133V 110V 60Hz 130W -18 °C ± 5 °C	降低溫度至零下，作凝冰使用	電器行
4	電湯匙	80W 110V	加熱液體，以改變溶氣量	雜貨店
5	GLX	-30°C~85°C	測量液體及環境溫度	物理實驗室

二、實驗器材

	名稱	型號	功能/用途	購買/取得 地點
1	鋁管	內直徑： 16 mm 外直徑： 18 mm	作凝冰容器	台北後車站 太原路
2	壓克力管	內直徑： 16 mm 外直徑： 20 mm	常溫中觀察流場使用	台北後車站 長安西路
3	保鮮膜	材質：PE 耐熱溫度： 110 °C 耐冷溫度： -60 °C	封閉管口	超商
4	牙齒矯正用橡皮筋	H4 Elastics HEAVY 4mm	封閉管口	醫院
5	偏光片	圓形、半徑 150 mm	觀察其應力	物理實驗室
6	珍珠板	1m*1m	作拍照時之背景	文具用品書局

肆、研究過程與方法

一、實驗原理

(一) 駐波的振動

在共振管的實驗中，產生駐波。駐波即兩個波長、週期皆相等的波疊合而成的波。如果以兩端固定的線作來當作模型，則振動模式有能為一波腹兩個節點（ $n=1$ ）、兩個波腹三個節點（ $n=2$ ）、三個波腹四個節點（ $n=3$ ）

如果令 L 為全長，中可以歸納出 $L = \frac{n}{2} \lambda$ $n \in N$ 波長 $\lambda = \frac{2L}{n}$

由波速公式 $f = \frac{v}{\lambda}$ 所以 $f = \frac{nv}{2L}$ $n \in N$

其中因為管子中的水沒有裝滿，其中的波速又可以用 Surface Gravity Waves 的公式來表示。Surface Gravity Waves 的傳遞過程中混合了橫向和縱向的波動。Surface Gravity Waves 的傳播速率 v 和波長、 λ 水深 D 有關^[1]

$$v = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} \tanh\left[\frac{2\pi D}{\lambda}\right]}$$

公式中 g 即是重力加速度。其中速度和振幅無關。

把表面波速度公式帶入可得波長頻率關係式 $f = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} \tanh\left[\frac{2\pi D}{\lambda}\right]} / \lambda$ 。

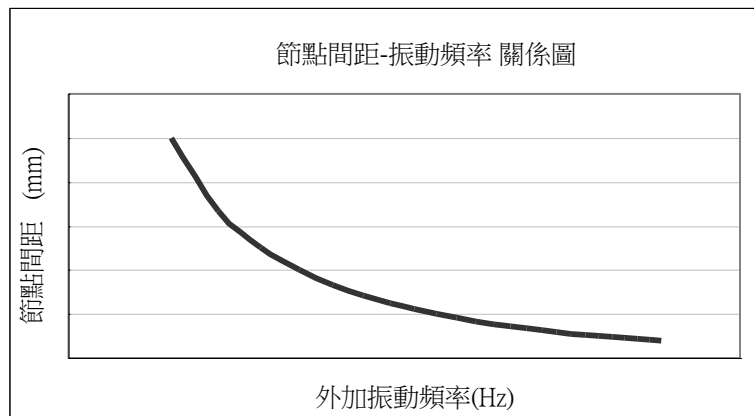


圖 4-1 節點間距-振動頻率 關係圖

1 Scott J. Sinick等(2009)。The physics teacher vol48。Surface Gravity Waves: Resonance in a Fish Tank。2011年1月5日，取自：http://tpt.aapt.org/resource/1/phteah/v48/i5/p330_s1?isAuthorized=no

(二) 冰的固化及成核

由文獻[2]得知，當溶解氣量不同時，水中所產生的氣泡大小也會有所不同，其中又以溶氣量少時所產生的氣泡較大顆。固化系統如圖 4-2 所示，在一管內裝入深 L 的溶液，溶液由下方開始凝固， s 為固體成長的高度。未固化前，氣體濃度為均勻分佈。固液界面視為平面。假設固液界面上液體的氣體濃度，與界面下固體的氣體濃度能維持定比例關係。

1. 非穩態，氣泡是軸對稱的，形狀為圓。
2. 氣泡是塊狀。
3. 固化速度為常數。

當介面的濃度大於標準溶解度時，會產生類似固體析出的現象，而導致在固液界面產生氣泡。

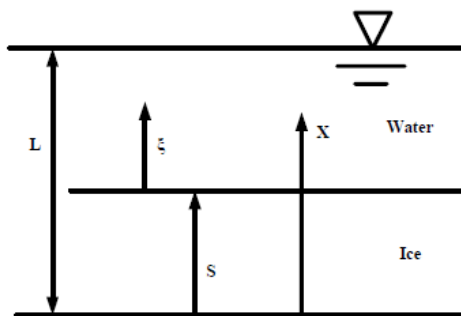


圖 4-2 固化示意圖，圖中由下方開始冷卻。

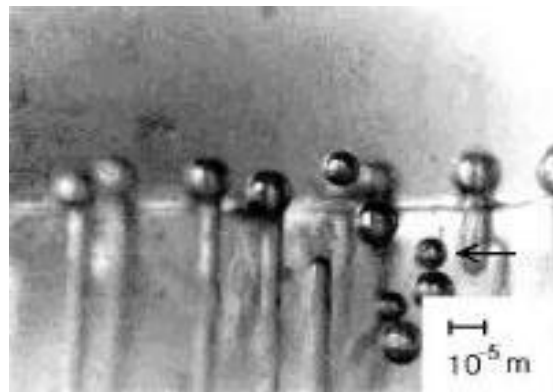


圖 4-3 用顯微技術所觀察到的冰中氣泡成核照片

(三) 應力分析

利用在外力作用下，會產生雙折射的透明材料製作光彈性模型，在偏振光場中，模型在模擬載荷作用下，能觀察到反映主應力差的干涉條紋，這些條紋和該模型的應力分佈有關，這就是光彈效應，這種技術可讓我們得到全場應力分佈情形、主應力方向、應力集中點及可計算出各點的應力大小，也可直接得到邊界應力。

對於三維結構，也可以用這種材料製作三維模型，將模型加熱到凍結溫度，加上模擬載荷，再對模型切片，切片在偏振光場中可以看到與應力分佈有關的雙折射條紋，這就是三維凍結光彈性。

其應用可不受形狀複雜性的限制，如發動機機身、汽缸蓋等都可以製作模型。對於不透明的物體，用光彈性貼片法可以直接在結構上測量應力。配合相機，可以紀錄瞬態變化，也可以用於量測如衝擊或爆炸波之下的沖擊載荷下的應力分佈。

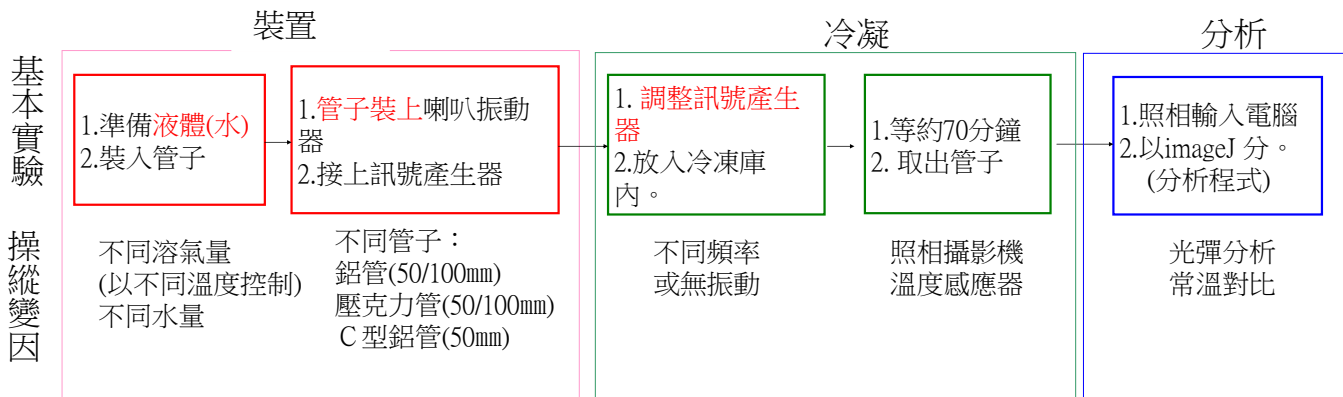
偏光片只允許某一個方向的光線才能透過，為 LCD 液晶顯示器之重要零件。製作液晶顯示面板 LCD Panel 過程中，必須在液晶上下各使用一片偏光片，且二片偏光片成 90 度交錯方向。在本研究中，也要求兩個偏光片呈垂直，測量冰晶凍結時的殘留應力。^[2]



圖 4-4 利用光彈儀器，可以看出尺中的彩色紋路

² 黃旭誠(2003)。水冰介面固化成核現象之研究。國立中山大學機電與機械工程學系碩士論文。未出版，高雄。

二、實驗方法



實驗中主要以基本實驗為主，但為釐清整個實驗，設計不同的變因。

(一) 溶氣量的控制

在水固化成冰的過程中，一開始因濃度尚未到達標準溶解度，所以剛結冰所產生的冰塊無氣泡，此時亦使殘存的水的氣體溶解度微微增加。只要利用此一原理，重複操作，即可使液體溶解氣體量達到標準溶解度（飽和）。操作結果如圖 4-5，液體一拿出冰箱後，氣體不停的析出。所以要使液體持續保持低溫。



圖 4-5 將低溫之水，移至常溫後，因溶解度改變，造成氣體析出現象。

已知一般的自來水中溶有大量的氣體，但手邊並沒有可以測量溶解量之工具，所以使用氣體飽和的方法進行。實驗中如圖 4-6 先取用自來水進行加熱，使其中的溫度上升，溫度上升過程中，因氣體溶解度減小，其中所溶解的氣體會析出，只要掌握不同溶解量與溫度的關係，即可控制氣體溶解量。

由氣體量實驗中可以得知冰塊中白色部份是否確實為氣體。



圖 4-6 利用電湯匙進行加熱，降低氣體溶解度。

(二) 改變冷凍溫度

實驗中除了氣體量會影響中氣泡生成狀況，結冰的速度也會導致結冰後冰中氣泡的分佈狀況改變，特別是氣泡聚集的密度。因此研究中試著設計實驗改變冰結冰時的溫度，觀察氣泡聚集上的密度。

冰箱在運作時，會有溫度震盪的現象，因此只要結冰時間拉的比較長，液體固化時的速度就會忽快忽慢，也會導致結冰速度的改變。因此要作結冰速度不同的實驗時，只需要準備一個比較大的容器（圖 4-7）來製冰即可，冰箱中溫度不穩定的因素反而是實驗的必要條件。



圖 4-7 用便當作冰塊

本實驗中最高溫度為 -12°C ，最低溫度為 -17°C ，其中間隔一次為 2 小時，並反覆四次，共歷時 8 小時。

(三) 調整管中水量比例以檢驗流動

為了證實是否為流場造成現象，本實驗中以不同水量固定頻率在進行實驗。因已知水裝全滿時無法流動，如果水量全滿時亦沒有現象出現，則可證實其中的不平均分佈現象是由流場所導致。

本實驗中，取用 50 mm 的鋁管、固定頻率為 40Hz，在水量為 20%、30%、40%、50%、90%、100% 進行實驗。其中不針對 20% 已下的水量進行實驗是因為其中所產生的冰塊厚度會過低（10% 的厚度大約僅有 2 mm），在實驗時會產生實際操作的困難。以百分數字來定水量則是因為管長為椎體，又全長為已知，如此僅要測量長即能測量水量百分率，會比較方便與容易。

(四) 凝冰容器(鋁管與壓克力管)

結冰實驗中使用鋁管主要原是因為金屬傳熱比較快，鋁管的樣子如圖 4-8、4-9、4-10，但鋁管不易觀察。因此在室溫實驗中，使用壓克力管來進行觀察。壓克力管雖然透明易觀察，但因導熱慢，不容易使水固化結冰，因此冰箱凝冰觀察實驗中，使用鋸開一邊的 C 型鋁管來進行實驗，以分析其中氣泡的生成過程。



圖 4-8 鋁管



圖 4-9 壓克力管



圖 4-10 C 型鋁管

(五) 振動頻率的控制

為了解振動的頻率對氣泡不平均分佈的現象的影響，因此設計改變振動頻率對氣泡團間距之影響的實驗。

本實驗採用 50 mm 的鋁管來裝水，為了使凝冰的時間縮短，因此水量只佔管體積 30%。振動時通過的振動頻率在 10-40Hz 間，每 5Hz 進行一次實驗。

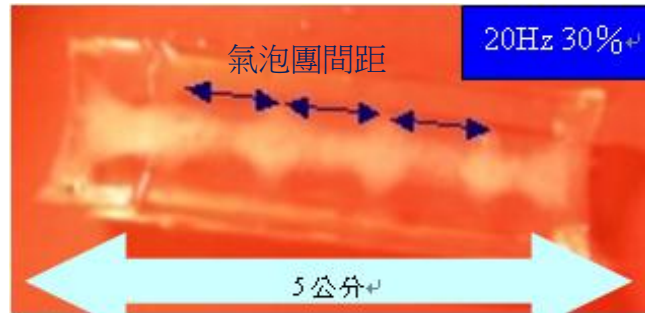


圖 4-11 取樣長度圖，藍色箭頭為半波長。(俯視圖)

(六) 結冰過程中照相攝影

在冰箱中進行測量始終不方便，如無法親眼觀測到振動時管中液體流動情況，因此以照相觀測振動時水結冰順序。相機在冰中運作時，需移除電池，並由外部接入電源，不然會導致電池無法運作，相機會斷電而無法拍照。

本實驗為方便觀測，使用 50 mm 壓克力管，但與冰塊進行比較時，為了使過程中比較適合相機觀察使用，所以把裝置裝入 100 mm 的振動機中，方便實驗的查。

另外為了能夠在結冰過程中隨時知道冰箱內情況，因而把相機的 AV 端子接出來（參照圖 4-13），接在冰箱外面的電視機上，如此即可如圖 18 看出大略的狀況。另外為了減少放入冰箱的電線，光源由相機閃光提供，採 30 秒拍攝一張照片。

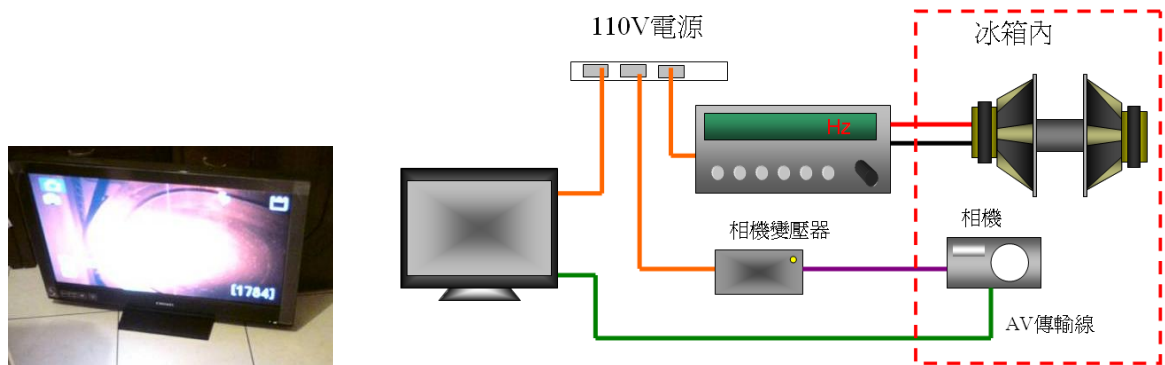


圖 4-12 以相機觀察冰箱內凝冰情形(左為實際照片，右為電路配置圖)

(七) 結冰過程中溫度感應

溫度是隨接冰時間一直在改變的一項變因，實驗中利用 PASCO GLX 的感應器來測量，輸入點腦後，PASCO 的程式會自動把其中隨時間改變的溫度畫成一張表，即可得知隨時間變動的溫度。

其中在放入感應器時，利用小橡皮筋固定，一個定在節點，另一個固定在腹點，分別同時測量兩點的數據，分析關係，

(八) 光彈分析

在攝影時，兩片偏振片調整到最暗（夾九十度）在來對其進行拍攝。拍出後即可用其結果來推知應力狀況。其中為防止房間其他光線的干擾，實驗時統一關燈實驗。為了使光線達到柔和，需先透過珍珠板，使其變得柔和。在實驗時特別架設光彈分析所使用的台子如圖 4-13。

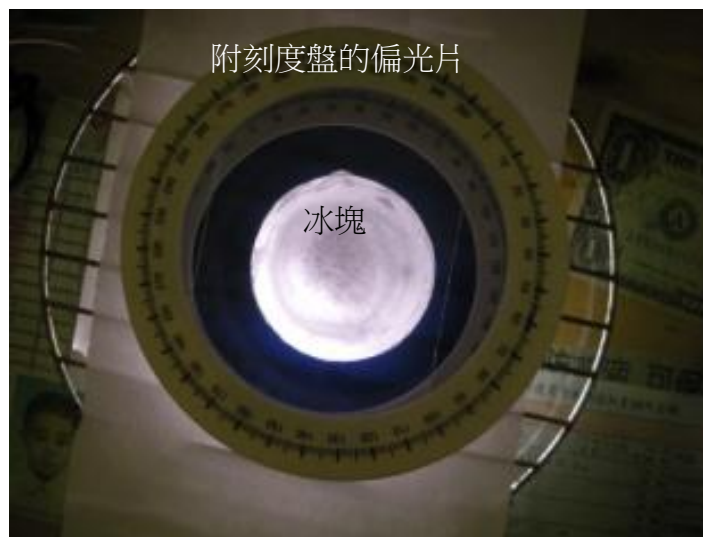


圖 4-13 光彈分析台

在冰冷凝過程中，會因為體積逐漸變大，對冰產生一推力，因而造成冰中的應力不平均。為了解氣泡究竟對冰中的應力有何影響，利用偏振片照射冰塊，對其中性質進行分析。

(九) 冰塊照片的影像分析

本研究中對於照片的定量主要有以下兩點：「長度定量」、「明暗定量」。長度定量難度低，僅僅需要開啟照片檔，在 imageJ 中設定比例尺，即可選長度作測量如圖 4-14、圖 4-15。

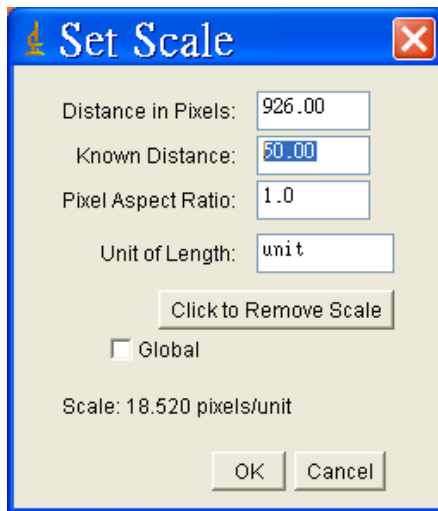


圖 4-14 設定長度

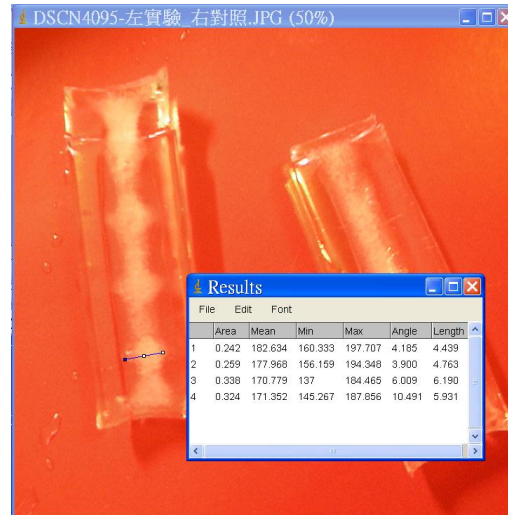


圖 4-15 測量長度

在面積的定量上，也是使用影像分析軟體「imageJ」。先利用電腦讀取照片，使用 imageJ 開啟影像，開啟後先設定完照片比例尺，並調整至 8bit 模式。在此模式下因為影像被化為灰階，所以只要手動調整氣泡團區域的顏色範圍後，即可輸入進行分析。圖 4-16 為利用 threshold 功能手動選取圖片中氣泡區域，圖中左上角為調整色彩區域的 threshold 視窗。圖中為程式操作畫面，顏色已經調整妥當，把非氣泡區轉換成了紅色，之後再選取範圍後即可進行面積定量。

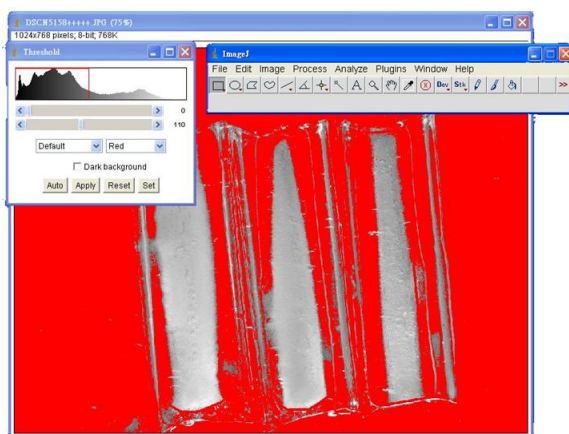


圖 4-16 調整顏色至接近氣泡顏色

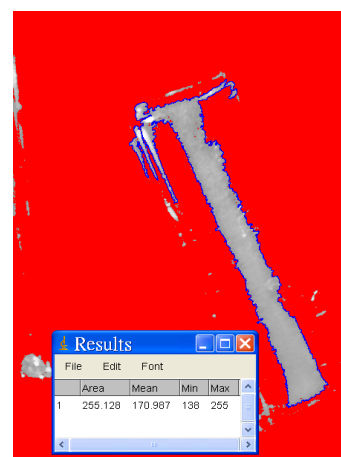


圖 4-17 測氣泡區域面積

三、實驗過程

實驗一 氣體溶解量與凝冰後氣泡量關係實驗

本研究中，冰塊中的白色氣泡推測可能成因有三，分別是氣體析出、空穴效應(Cavitation)或攪拌溶解，但查詢文獻後，發現空穴效應多發生在頻率 15000~100000Hz 的高頻振動波中，因此較可能是氣體析出或攪拌溶解。為了了解氣泡到底是因為冷卻時氣體溶解度下降導致氣泡析出，亦或是因為振動導致水與空氣不斷攪拌使空氣溶解於水中，因此設計了此實驗。此實驗改變氣體溶解量，不外加振動，探討不同的氣體溶解量下凝冰後冰塊氣泡的面積與寬度，以了解是否氣體析出為氣泡的主要成因。

已知一般的自來水中溶有大量的氣體，但手邊並沒有可以測量溶解量之工具，所以使用氣體飽和的方法進行。實驗中先取用自來水進行加熱，使其中的溫度上升，溫度上升過程中，因氣體溶解度減小，其中所溶解的氣體會析出，只要掌握不同溶解量與溫度的關係，即可控制氣體溶解量。比較特別的是，在操作時，因為要自來水中溶有的氣體多為氯氣，所以需保持通風，以避免吸入。

本實驗僅僅探討不同溶氣量所產生的冰塊中，氣泡區域的面積與寬度。實驗中利用 50 mm 的鋁管凝冰，所加熱的水溫分別為為 41、51、62°C。在數據的讀取上，先利用電腦讀取照片，使用 imageJ 的 **threshold** 功能手動選取圖片中氣泡區域，輸入程式後即可進行分析。

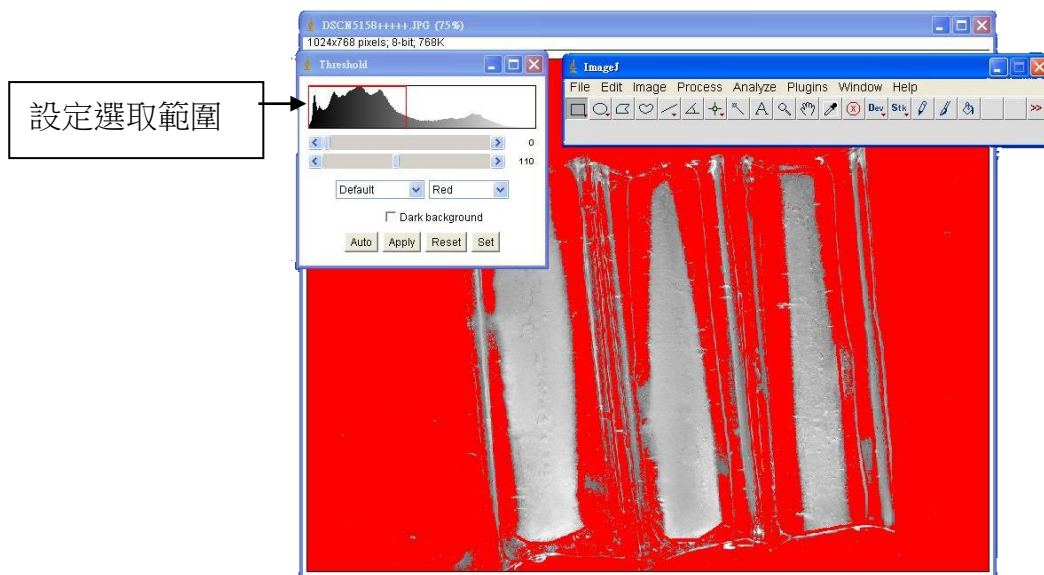


圖 4-18 利用 imageJ 軟體進行分析圖

實驗二 照相觀測振動時水結冰順序與觀察常溫流場並比較

而由於實驗一中，僅能了解到氣泡的成因，為了瞭解與分析氣泡生成的過程與位置，因此又設計了此實驗。在此實驗中，利用攝影法來進行全程的觀察。而壓克力管雖然透明、易觀察，但因導熱慢，不容易使水固化結冰，因此實驗中使用鋸開一邊的 C 型鋁管來進行實驗，以分析其中氣泡的生成過程。

本實驗中採用 50 mm 的鋁管，為了使氣泡團間距較大利於觀察，使用頻率較低的 10Hz 來進行振動。

然而，在冰箱中進行測量始終不方便，如無法親眼觀測到振動時管中液體流動情況，因此除了以照相觀測振動時水結冰順序，還將水置於管中，在常溫下振動觀測其流場與其節點、腹點位置及間距。

本實驗為方便觀測，主要使用 100 mm 壓克力管，但與冰塊進行比較時，為遷就冰塊則改用 50 mm 壓克力管進行測量。另振動時通過的振動頻率在 10-45Hz 間，每 5Hz 進行一次測試

實驗三 不同頻率的氣泡聚集分佈測量

由實驗一二，知道了氣泡成因、過程與位置，於是推論氣泡不平均分佈的原因為外加振動，因此我們設計了此實驗，以了解振動的頻率對氣泡不平均分佈的現象的影響。

本實驗採用 50 mm 的鋁管來裝水，為了使凝冰的時間縮短，因此水量只佔管體積 30%。振動時通過的振動頻率在 10-40Hz 間，每 5Hz 進行一次實驗。

實驗結果中，氣泡的分佈的確會因為頻率的不同產生不同的分佈狀況，而氣泡分佈會呈現週期性的分佈。

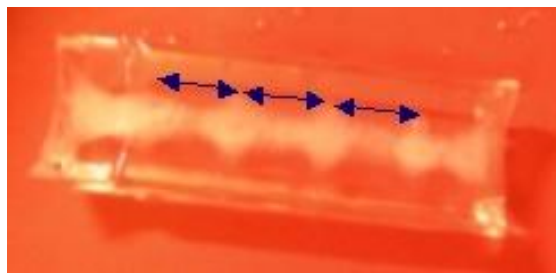


圖 4-19 取樣長度圖。

實驗四 以不同水量觀察冰中氣泡分佈現象

由實驗一二三中，推論出氣泡不平均分佈是因為振動而導致，而振動是如何造成氣泡不平均分佈的現象呢，我們猜測是因為振動造成了一個流場，而是這流場導致氣泡不平均分佈的現象的。

為了證實是否為流場造成現象，本實驗中以不同水量固定頻率在進行實驗。因已知水裝全滿時無法流動，如果水量全滿時亦沒有現象出現，則可證實其中的不平均分佈現象是由流場所導致。

經過實驗後發現在不同水量時的冰中氣泡分佈都不盡相同，其中以聚集狀況而言有的較明顯，有的則較不明顯。

本實驗中，取用 50 mm 的鋁管、固定頻率為 40Hz，在水量為 20%、30%、40%、50%、90%、100% 進行實驗。其中不針對 20% 已下的水量進行實驗是因為其中所產生的冰塊厚度會過低（10% 的厚度大約僅有兩毫米），在實驗時會產生實際操作的困難。以百分數字來定水量則是因為管長為椎體，又全長為已知，如此僅要測量長即能測量水量百分率，會比較方便與容易。

而將本實驗的結果與實驗一中的結果結合，我們推論出此現象是因振動製造出了一個流場，而這個流場導致節點與腹點結冰速率不同，間接導致了氣泡聚集的現象。

實驗五 以偏振片觀察冰中應力

而為了解釋冰中氣泡生成時，對冰中所施加的應力狀況，故設計本實驗。在之前的實驗中，偶爾會出現冰表面不成水平的狀況發生。此現象通常是在管子傾斜時發生，且發生時，會有某一點特別突出。

由文獻得知，在冰中氣泡產生時，會因為其中的體積變大，對冰產生一推力，因而造成冰中的應力不平均。為了了解氣泡就近對冰中的應力有何影響，利用偏振片照射冰塊，對其中性質進行分析。



圖 4-20 冰塊加入一片偏振片圖。

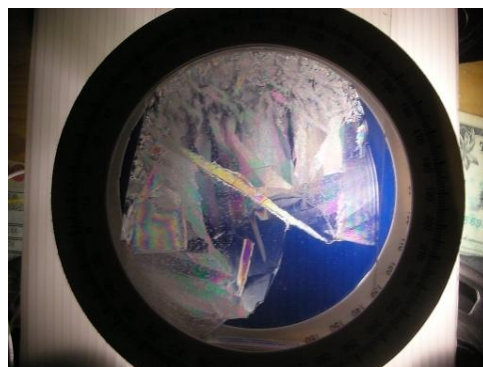


圖 4-21 偏塊加入兩片偏振片圖。

伍、研究結果

一、沒振動結冰

鋁管中的無振動的冰塊，拿出來樣子如圖 5-1，其中氣泡在冰塊中聚集在中間，直的是注意的是氣泡團的形狀不是長方形，而是圓錐形。



圖 5-1 無振動冰塊 30%(俯視)

我們假設其中的白色部份為氣泡，便利用加熱改變溶氣量來測試。圖 5-2 中可以明顯的看出，當加熱溫度越高，也就是溶氣量越小時，氣泡所佔的面積與寬度就越小。

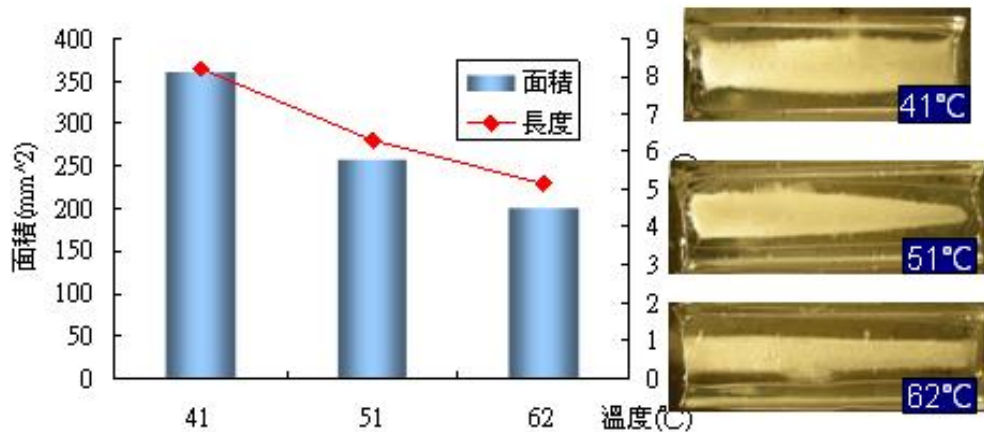


圖 5-2 氣體量無振冰塊面積寬度圖。

其中冰塊結冰時，冰中的氣泡分佈也會變的不平均，因而改變不同溫度作實驗。圖 5-3 為溫度持續震盪的結冰圖。

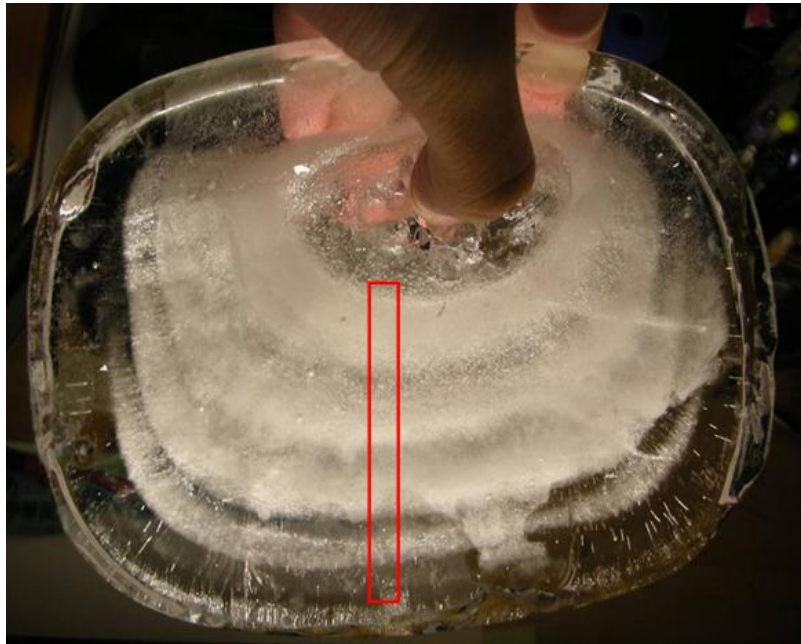


圖 5-3 結冰溫度震盪結冰結果

其中把每一點的溫度與利用溫度感應器作成的溫度曲線作對照，可以發現氣體密度較高時，所形成的溫度較高，如圖 5-4。圖中的曲線是在照片 5-3 中的紅框處取樣深淺作分析。

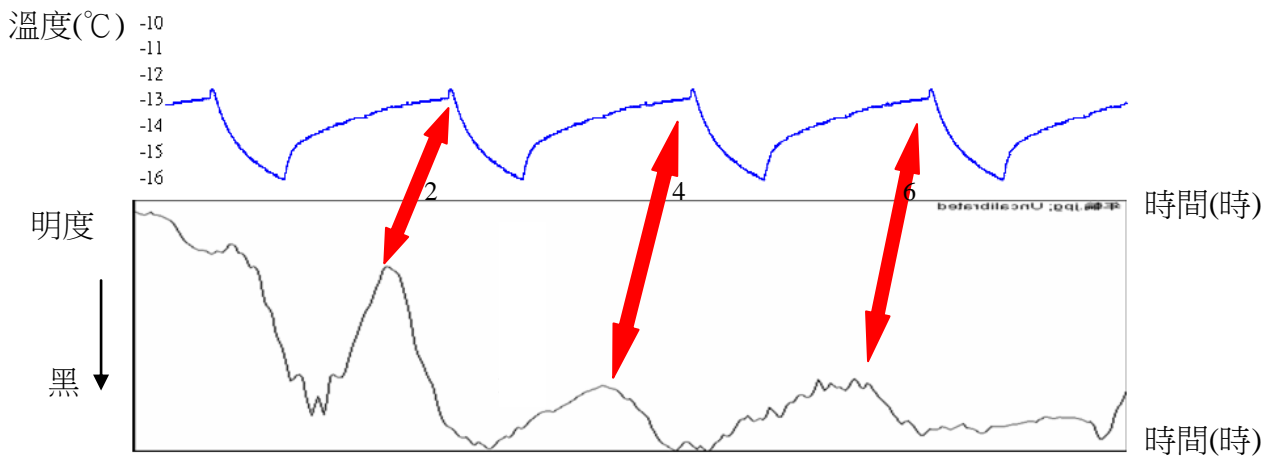


圖 5-4 結冰溫度標塊亮度圖

如果把有條紋的冰塊拿到放大鏡下觀測，則可以發現：氣泡密部的氣泡又大又密集；氣泡疏部氣泡顆粒又小又疏鬆，如圖 5-5。

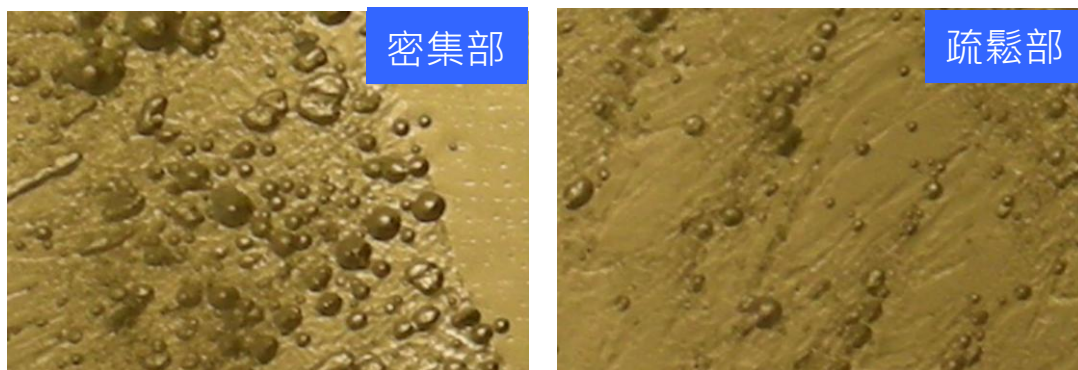


圖 5-5 疏密部氣泡大小圖（左密集、右疏鬆）

二、振動固化中冰塊

試著利用拍照法觀測不同時間的結冰狀況，由照片 5-5 中的固液介面判斷，節點先凝冰；再來是腹點。

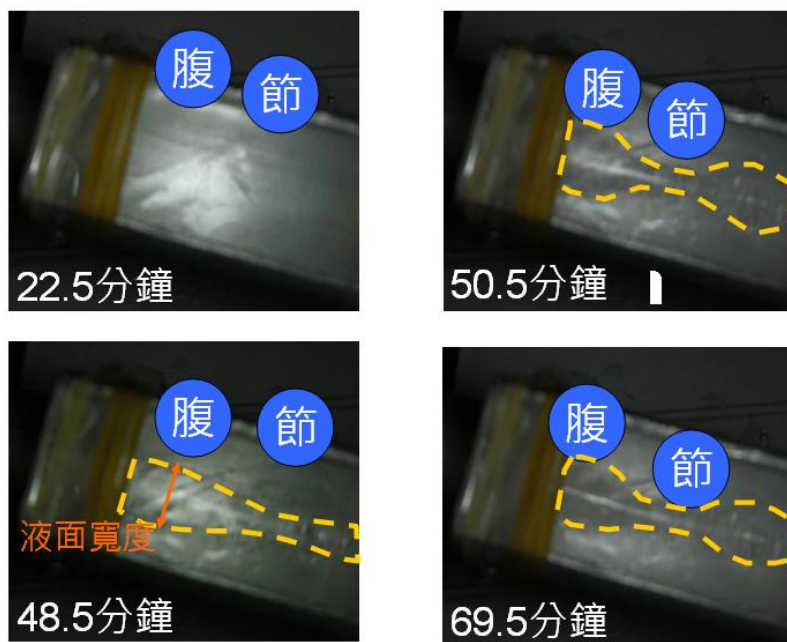


圖 5-6 不同時間的結冰狀況

把圖 5-5 中左下角定義的液面寬度與時間的變化繪成圖片 5-6，結果如圖 5-6 其中隨著時間的推移，節點液面寬度速度下降的較腹點快。而表中時間只取到 50 分鐘時，是因為隨著時間的推移，氣泡量越來越多，因此不易分辨已結冰部分與尚未結冰部分。

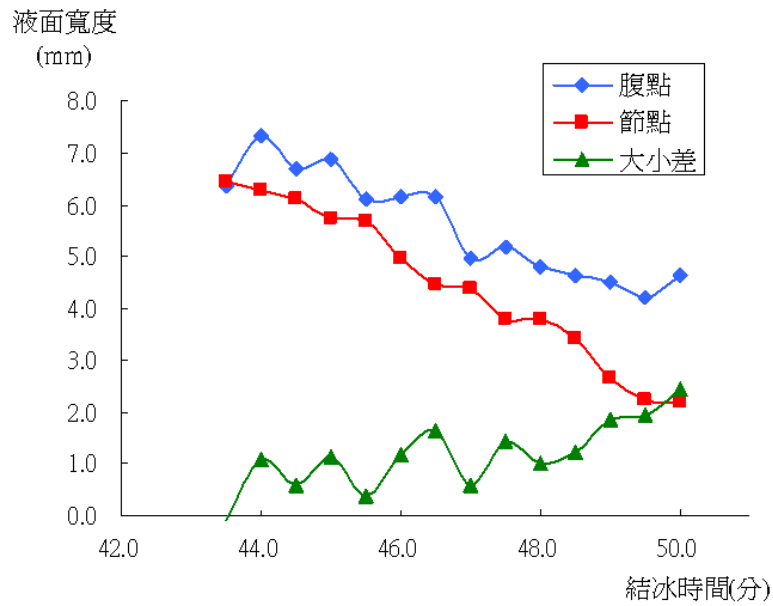


圖 5-7 即將結冰前節點、腹點寬度變化圖

在凝冰振動過程中使用溫度感應器感應溫度，還是有過冷的現象發生，溫度變化曲線如圖 5-7

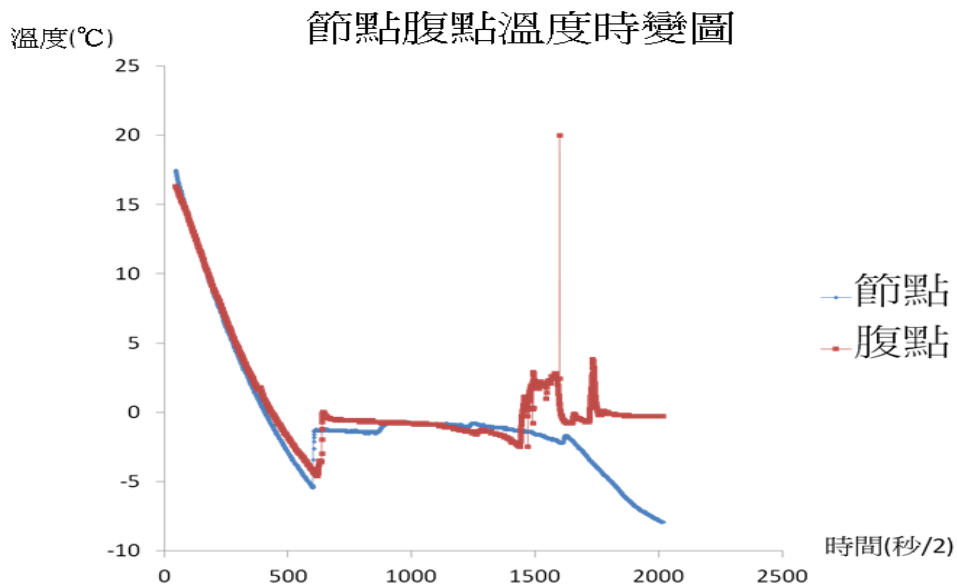


圖 5-8 振動結冰腹點溫度觀測圖 30% 10Hz

三、有振動結冰後

分析不同狀況的結冰結果可以發現氣泡成團的現象並非都會出現，在水量到達全滿時，現象消失，如折線圖 5-9。

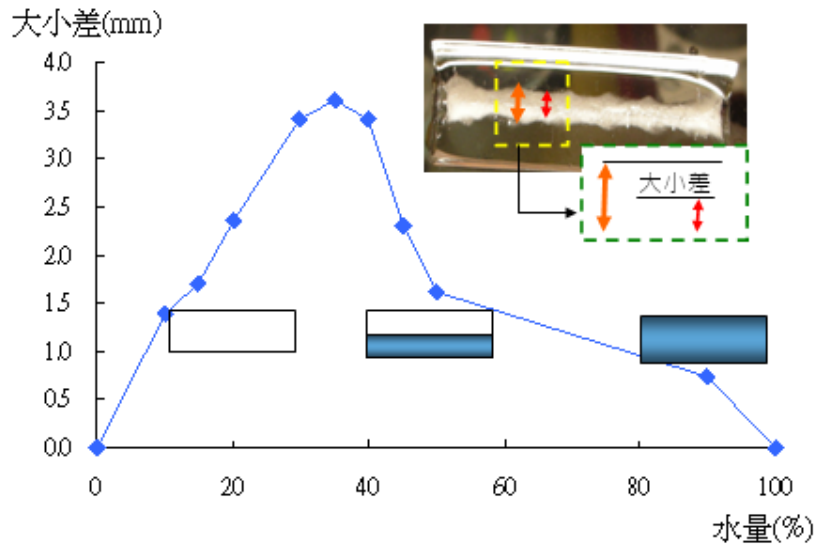


圖 5-9 水量-大小差圖

把常溫中觀察流場的數據拿來和冰的氣泡聚集度作比較結果如圖 5-10。A 部分為結成冰塊後成品，B 部分則為放置在壓克力管中攝影振動過程的片段。圖中可得知，氣泡團位置大約是在腹點上。

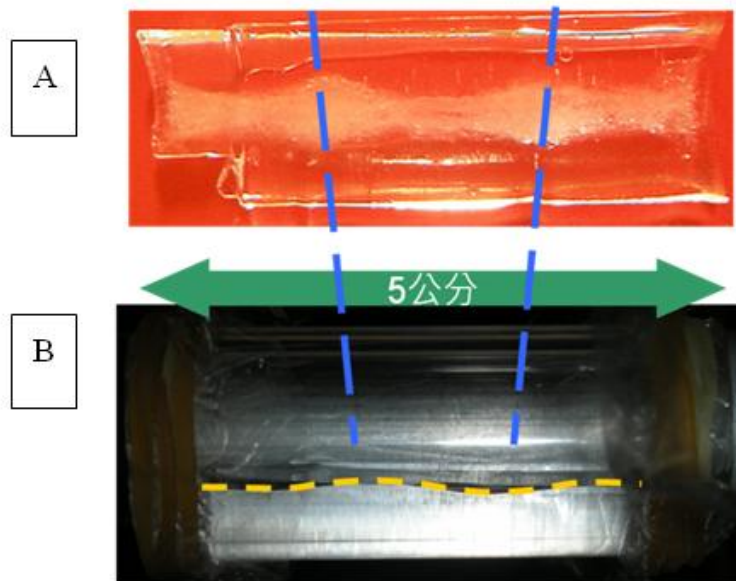


圖 5-10 水量 30% 振動頻率 10Hz 比較圖

把不同頻率的資料拿來做類，結果如圖 5-11。圖上紅線為在常溫中振動，以拍照法分析不同頻率下的波長；而藍線則是在不同頻率下冰置冷凍庫之冰塊成品的氣泡團間距；黃線及淺藍線則是以公式計算出的縱波與表面波的頻率與波長關係。由圖中可知，當頻率越大時，其波長倒數越大，且兩者大約成正比。

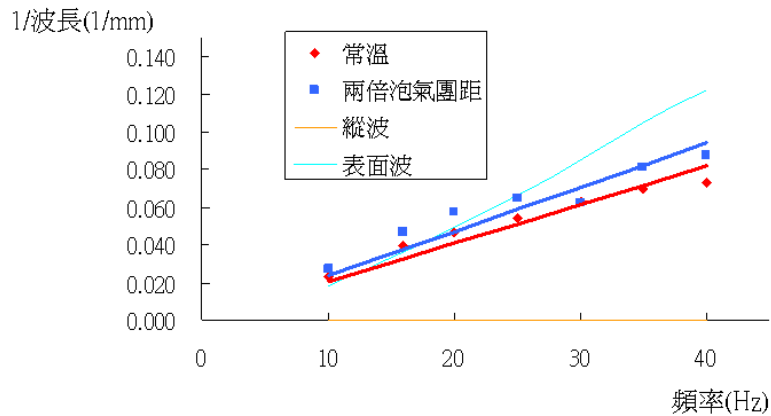


圖 5-11 不同頻率的氣泡聚集波長

另外由表面波所計算出來的波長，可以和實驗中的常溫以及實驗中的冰中波長進行類比。試著使用光彈分析其中的應力狀況，應力觀察在斷裂面尤其明顯如圖 5-12

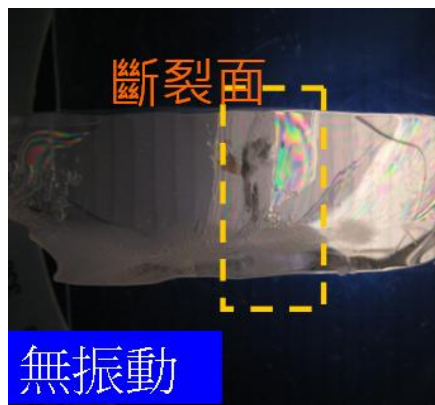


圖 5-12 光彈法觀察斷裂面

把有振動和無振動作類比，有振動反而會使應力變得較平均，如圖 5-13、5-13 且其中的條紋大致和 5-13 中的溫度梯度（以淺藍箭頭標示）垂直。其中氣泡團著成紅色方便比對

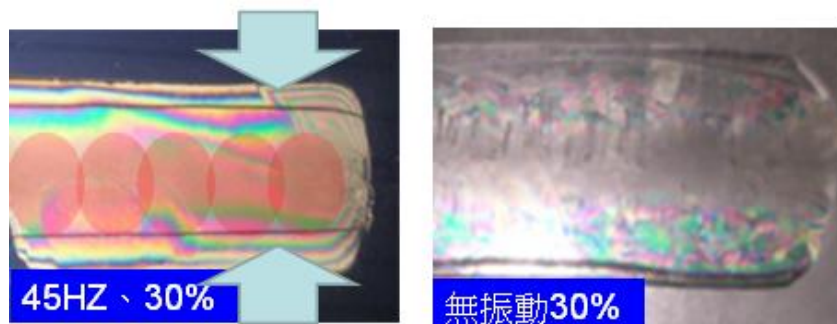


圖 5-13 偏光冰塊 30% 45Hz

陸、討論

一、沒振動結冰

沒振動的時候，液體中仍然會有白色的部份存在。我們視白色的部份為氣泡，觀察研究結果圖 5-2，其中的白色氣泡區域因為加熱溫度而改變大小，所以推斷氣泡是因為氣體析出所造成，而非因為把氣體攪入或空穴效應。

其中在控制容器量時，常在某一溫度下把電湯匙的插頭拔掉，但切斷電源後溫度仍然持續上升。為了紀錄上的精確，此時會記錄持續上升到最高溫的溫度為加熱溫度，而非切斷電源時的溫度。

在固化速度實驗中，冰塊太小，結冰時間太短則結冰溫度幾乎相同，無法進行實驗。但如果冰塊太厚，會導致結冰不均勻而裂開，反而不利於實驗的觀察。

實驗結果結果如圖 5-3。對照溫度圖 5-4 可知，溫度較低時時氣泡密度較低，溫度較高時氣泡密度較高，這推斷是因為氣體結冰速度較快時，會來不及聚集成大的氣泡團所導致。就像在火成岩中慢速結冰的花崗岩中的結冰顆粒較大，快速結冰的玄武岩則幾乎無法觀察結晶顆粒，也是因為固化時的溫度不同所導致。

二、有振動結冰過程

振動過程中的冰塊，由圖 5-6 可以發現冰塊由節點先行結冰，接下來才是腹點。其中節點的能量在整個駐波場中比較起來較低，有可能因此導致節點先行結冰。由圖 5-8 也可以發現節點在開始結冰的指標狀況—過冷現象結束也較腹點早，可以推知結冰順序的不同。

在圖片中發現節點先結冰，推測此點與流動有關，到是先結冰的時候，如節腹點位置太近，彼此互相影響的結果會導致其中的先結冰延後，後結冰提早。推測波長小到某一定值以下後，管中的氣泡將會平均分佈。

另外有振動的液體也有過冷的狀況發生，說明振動不是很激烈，不足以提早結束過冷。

三、有振動結冰後

管子的長度為 50 mm，所以波長要能在尺度範圍中測出，因此實驗沒辦法測出 5Hz 以下的頻率所對應的波長。

由圖 5-9 中水量到達全滿時，現象消失。推測試流動的因素，液體在全沒時即使要流動有沒有辦法，因而許多的相關效應變得不存在。倒是水量一半時，表層水面最寬廣，則內部較容易產生流動，但實際上在尚未到大最寬值時，就已經到達峰值。

假設過多的水會造成管子搖動困難。所以打小差和其中的水量反向變動、液面寬度正向變動。

假設 大小差 $\propto (a_{\text{搖動}})^m \times (area_{\text{液面}})^n$

$$\text{試解析 } \left(\frac{F_{\text{喇叭}}}{M_{\text{液體}}}\right)^m \times (area_{\text{液面}})^n = \left(\frac{F_{\text{喇叭}}}{D_{\text{液體}} \times V_{\text{液體}}}\right)^m \times (area_{\text{液面}})^n = \frac{F_{\text{喇叭}}^m}{D_{\text{液體}}^m} \times \frac{area_{\text{液面}}^n}{V_{\text{液體}}^m}$$

其中 $\frac{F_{\text{喇叭}}^m}{D_{\text{液體}}^m}$ 為常數。又大小差為長度一次方關係，雖以推知 $2n-3m=1$

如用 $(m,n)=(1,2)$ 帶入方程，結果如下，符合圖表 5-9。

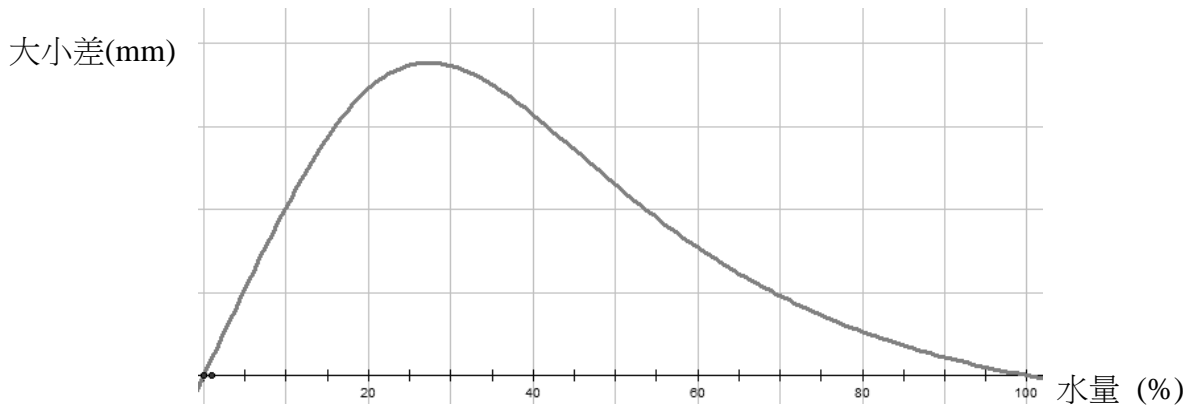


圖 6-1 水量-大小差理論圖

冰中波長和常溫波長由圖 5-11 知有差異。假設原因是在固化過程中，在冰產生少許後，才開始有氣泡產生。由所得的數據計算，冰中算出平均波速、計算深度分別為，193 mm/s；4.1 mm、水中波速、計算深度分別為 231 mm/s；5.8 mm。其中高度差為 2 mm 有可能符合實際狀況。

也有可是溫度改變波速有關。文獻冰中波速、水中波速分別為 197mm/s；201mm/s，也與本研究中狀況相差不遠。不過目前除利用計算外，仍缺乏足夠的證據，來確定是哪一項因素導致波速的不同，但其中應和兩者皆有關。

亦發現波聚集於腹點上，與假說中符合。

試著使用光彈分析其中的應力狀況，應力觀察在斷裂面尤其明顯如圖 5-12。其中有很多的部份，雖然沒有條紋，但是實驗物的光線偏亮，所以推知在光彈對冰的觀察中，有時會因為繞射而影響其中的實驗結果。

在可以觀察出條紋的狀況如圖 5-13，圖中的條紋有隨溫度梯度的變化垂直，當然也有些地方與溫度梯度不成垂直，有可能是因為流動的因素。所以歸納出其中的條紋主要受到溫度梯度而影響，流動雖然有影響，但影響較小。

另外有搖動之後的應力條紋會比較整齊，也可說成條紋在有振動時會比較整齊，所以歸納出輕微的流動反而會使應力變的比較整齊。

柒、結論

一、研究結論

(一) 沒振動結冰

1. 溶解氣量較多的冰固化時生成的氣泡較綿密，在分佈上集中於中間偏向液面的方向。其中因駐波振動所產生的不平均分佈狀況也較明顯。
2. 本研究中氣泡的主要來源應為冷凝時溫度下降，溶解度下降而導致的氣泡析出。
3. 結冰速度較快時，冰中氣泡少而小顆；結冰速度較慢時，冰中氣泡多而大顆。

(二) 有振動結冰過程

1. 冷凝時由節點先結冰，腹點後結冰；而氣泡聚集的地方(氣泡團)在腹點。
2. 由常溫中的波長和冰箱中凝冰的波長相比較，可以發現常溫中的波長會比較長，且兩者大致上成比例。其中的原因為凝冰時溫度降低以及凝冰時深度減低。
3. 如果在沒有外加影響下讓冰塊自由結冰時，冰塊的氣泡會結成完完整整的塊狀。如果在結冰時搖動它，氣泡就會分散。因此以觀察冰中白色的區塊來間接判斷何處有流動行為。

(三) 有振動結冰後

1. 聚集點分佈的密度會隨頻率改變，頻率越高時聚集點分佈上密度越大，且兩者大致上成正比關係。
2. 凝冰的過程中，因駐波振動所產生的氣泡不平均分佈現象，大致和 **Surface Gravity Waves** 的流動有關，在液體無法有流動的空間時，就沒以此現象。
3. 因為液體佔有質量，所以在考慮現象最明顯的水量時，除要考慮水的自由流動性外，也要考慮喇叭的推動量。
4. 水量大約在占管體積 35%時，氣泡團分佈不均的現象最明顯。
5. 有振動冰塊的紋路明顯比無振動的整齊些。

二、未來展望

現今有許多塑材如鋼鐵、塑膠、玻璃的製成中，都會有雜質與氣泡的生成，我們希望可以將我們的實驗應用到上面。另外在素材的製成中也容易會有塑材應力不均的問題發生，在我們的實驗中，也觀察到有振動的冰塊紋路較整齊，顯示應力較平均，故我們也希望這點可以應用在塑材的製成上。

捌、參考資料及其他

1. Scott J. Sinick等(2009)。The physics teacher vol48。Surface Gravity Waves: Resonance in a Fish Tank。2011年1月5日，取自：
http://tpt.aapt.org/resource/1/phteah/v48/i5/p330_s1?isAuthorized=no
2. 黃旭誠(2003)。水冰介面固化成核現象之研究。國立中山大學機電與機械工程學系碩士論文。未出版，高雄。
3. David Halliday等(2009)。物理（上）第八版。台北縣：全華。
4. 林俊明(2004)。邊界層附近減阻氣泡之特性。國立成功大學系統及船舶機電工程學系博士論文。未出版，台南。
5. 林士超等(2009)。「釘釘」是個人才—急速冷卻水之冰釘特性研究。2010年4月15日，取自：<http://science.ntsec.edu.tw/files/13-1004-19906.php?Lang=zh-tw>
6. 楊詠瑄等(2007)。透明冰。2010年4月15日，取自：
<http://science.ntsec.edu.tw/files/13-1004-9885.php?Lang=zh-tw>
7. 李哲安(2006)。超聲波在液體的探討。2010年8月13日，取自：
<http://science.ntsec.edu.tw/files/13-1004-10508.php?Lang=zh-tw>
8. 楊子君等(2005)。“稜”波微步。2010年8月13日，取自：
<http://science.ntsec.edu.tw/files/13-1004-8999.php?Lang=zh-tw>
9. 皇甫鈺妘等(2006)。被困住的水波。2010年8月16日，取自：
<http://science.ntsec.edu.tw/files/13-1004-9352.php?Lang=zh-tw>

【評語】 040106

1. 實驗設計細膩，可看出作者們的用心與努力值得肯定。
2. 以電腦模擬加以佐證實驗結果，難能可貴。
3. 作者能持續堅持研究工作，科學精神與態度十分難得。