

宜蘭高中 98 學年度學生數理自然科學專題研究

題目：

彭巴效應-探討液體的降溫機制

指導老師：

吳旭峰

學生：

江冠勳

林家漢

林浩誌

目錄

摘要-----	2
研究動機-----	2
實驗目的-----	2
實驗器材-----	3
第一部份：彭巴效應-----	4
第二部份：冷卻機制-----	11
第三部份：過冷效應-----	18
結論-----	25
未來展望-----	25
參考資料-----	26
附錄-----	26

摘要

實驗最初在研究彭巴現象，發現當實驗組的初始溫度愈高，熱水與冷水的溫度交叉處愈高，大略呈線性趨勢。在我們將燒杯內置入 6 個感測點，作出對流、傳導、蒸發的實驗後，認為冷卻時的熱密度無論為何，只要平均溫度相同，傳導冷卻率均相同。我們將其歸納為蒸發及對流所造成的現象。

在做蒸發實驗時，意外的發現水有過冷現象。更深入實驗後，發現溫度曲線在 4°C 左右有明顯變化，上下層溫差變大，但會逐漸趨向一致。而在上層加入油脂時，皆會發生過冷現象，其溫差較不明顯，但差距會一直保留至過冷效應結束。

過冷效應可在冷卻時間極長、表面添加油脂的情況下發生，大都至負 8°C。過冷結束後，上層外圍的水會最先結冰，帶動其他部分的水同時瞬間結冰。

壹、研究動機

在一次偶然機會下，再網路上看到在相同冷卻環境下，熱水比冷水還要快結冰的影片，對此，我們感到很驚訝，與老師討論後，老師也無法確切說明他的成因以及冷卻過程發生了什麼變化，因此，便開始我們長期的研究路程。

貳、研究目的

第一部份：彭巴效應

- 〈一〉 探討「彭巴效應」在不同初始溫度下的發生情形。
- 〈二〉 探討蒸發、傳導、對流對液體冷卻時的影響。
 1. 蒸發：探討在水的表面添加油脂後，冷卻過程及結果的變化。
 2. 傳導：模擬冰箱結霜，水溫下降的情形。
 3. 對流：探討對流是否受到不同容器的影響。

第二部份：冷卻機制

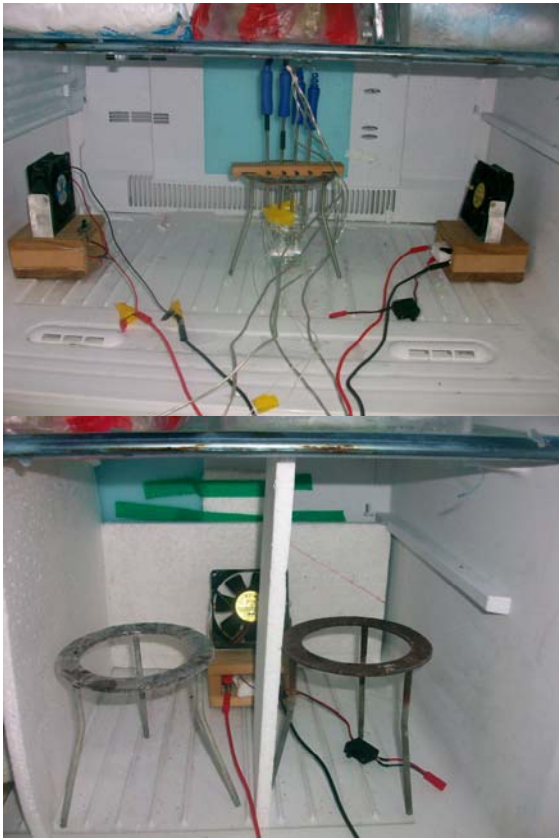
- 〈三〉 探討純水在冷卻時，內部溫度的分布情形。
- 〈四〉 探討表層添加油脂的水，在冷卻時內部溫度的分布情形。

第三部份：過冷效應

- 〈五〉 加油脂的過冷效應。
- 〈六〉 探討添加油脂的糖水，過冷效應的發生情形。

參、研究設備及器材

實驗裝置：



研究器材

GLX 多功能測定儀	電源供應器
100ml 燒杯	陶瓷加熱板
冰箱冷凍庫	大臉盆
三腳架	保麗龍板
糖	電子溫度計
小型風扇	試管
試管塞	碼錶
量筒	塑膠滴管
製冰塊機	沙拉油
鹽	電腦

肆、研究過程或方法

第一部份：彭巴效應

實驗（一）探討「彭巴效應」在不同初始溫度下的發生情形。

關於彭巴效應：

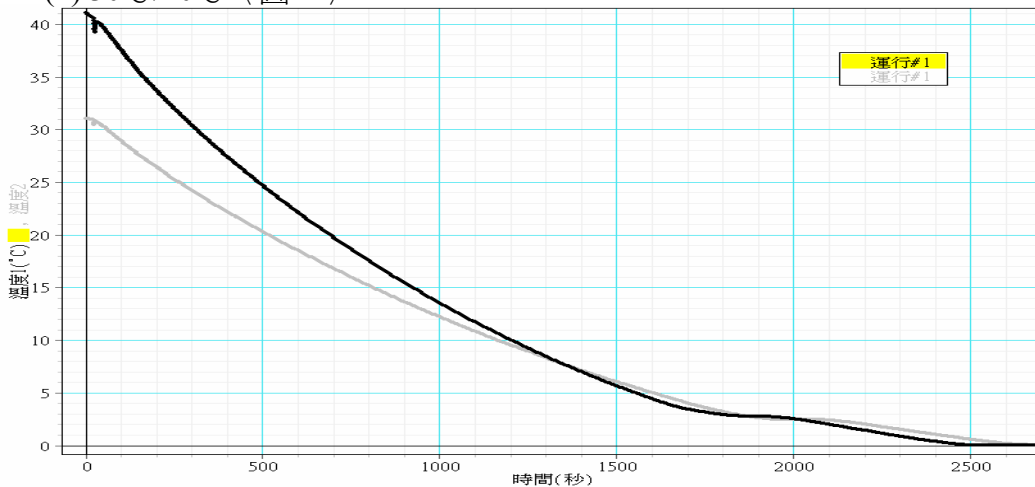
1963 年，非洲坦桑尼亞一位名叫彭巴 (Erasto B. Mpemba) 的中學生，有一天他與同學在學校學習製做冰淇淋。但是學校的冰箱空間不大，彭巴又比較晚開始做，於是他等不及他的混合液冷卻，就直接放進冰箱。其他的同學則都按部就班，一直等到牛奶冷卻到室溫，才放入冰箱中。一段時間後打開冰箱，發現彭巴的冰淇淋已經完成了。彭巴心裡在想自己只比別人早不到幾分鐘放進去，而溫度又比大家高出那麼多，怎麼竟比其他同學快出許多。

1. 實驗步驟：

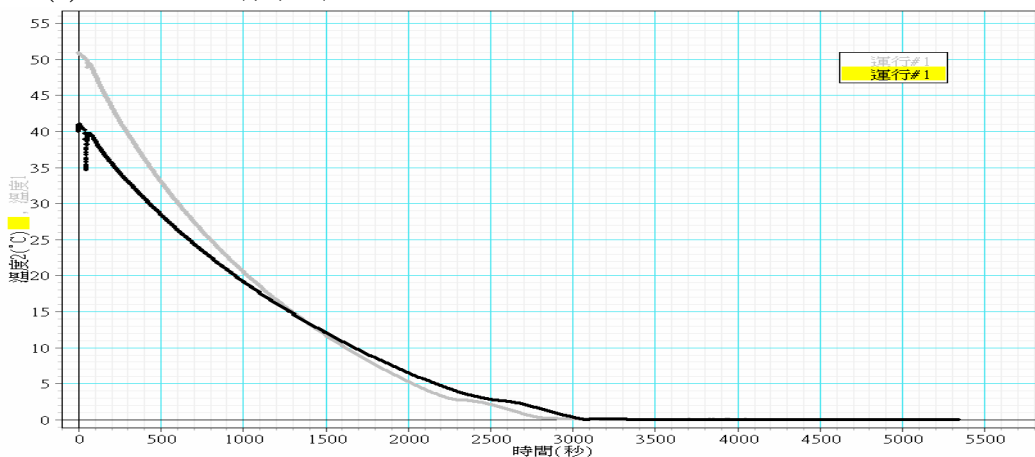
- 〈1〉. 在容量為 100 毫升的燒杯中，裝入 75 毫升的自來水。
- 〈2〉. 用加熱器分別隔水加熱至不同溫度。
- 〈3〉. 在燒杯下層放置溫度感應器，並置入冰箱冷凍庫。
- 〈4〉. 以儀器 (GLX) 每 0.5 秒紀錄一次數據，匯入電腦。
- 〈5〉. 觀察及分析數據。

2. 實驗結果：

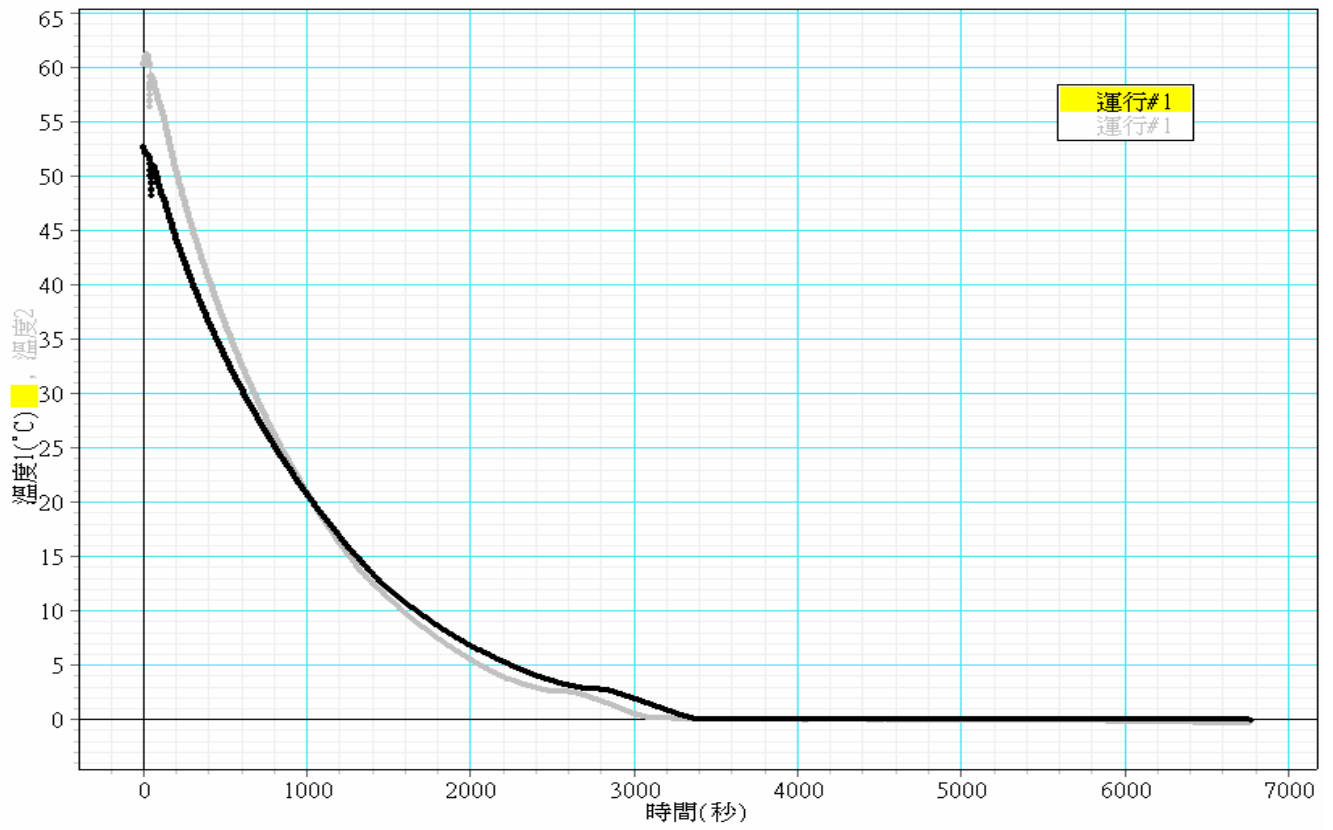
(1) 30°C/40°C 〈圖一〉



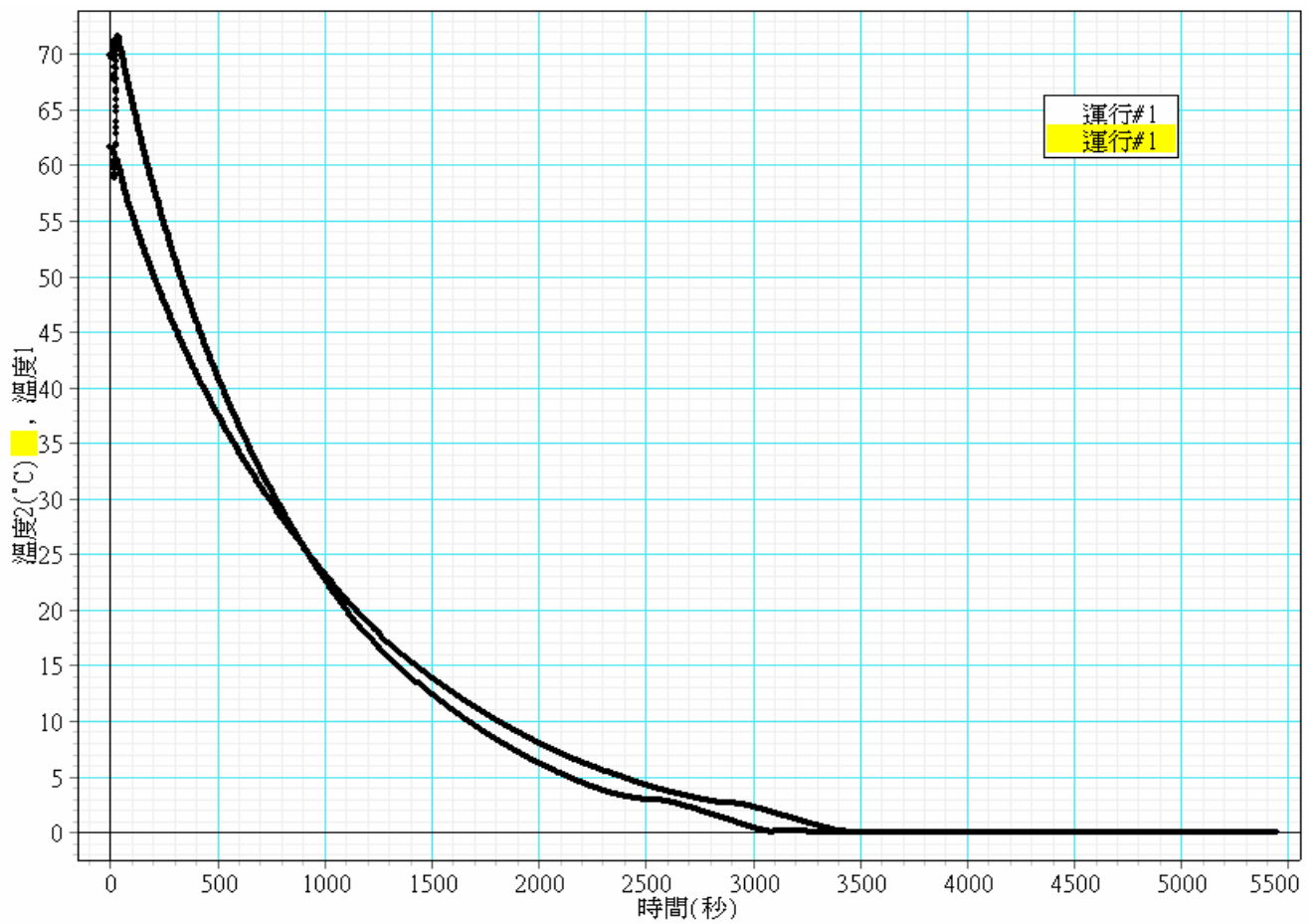
(2) 40°C/50°C 〈圖二〉



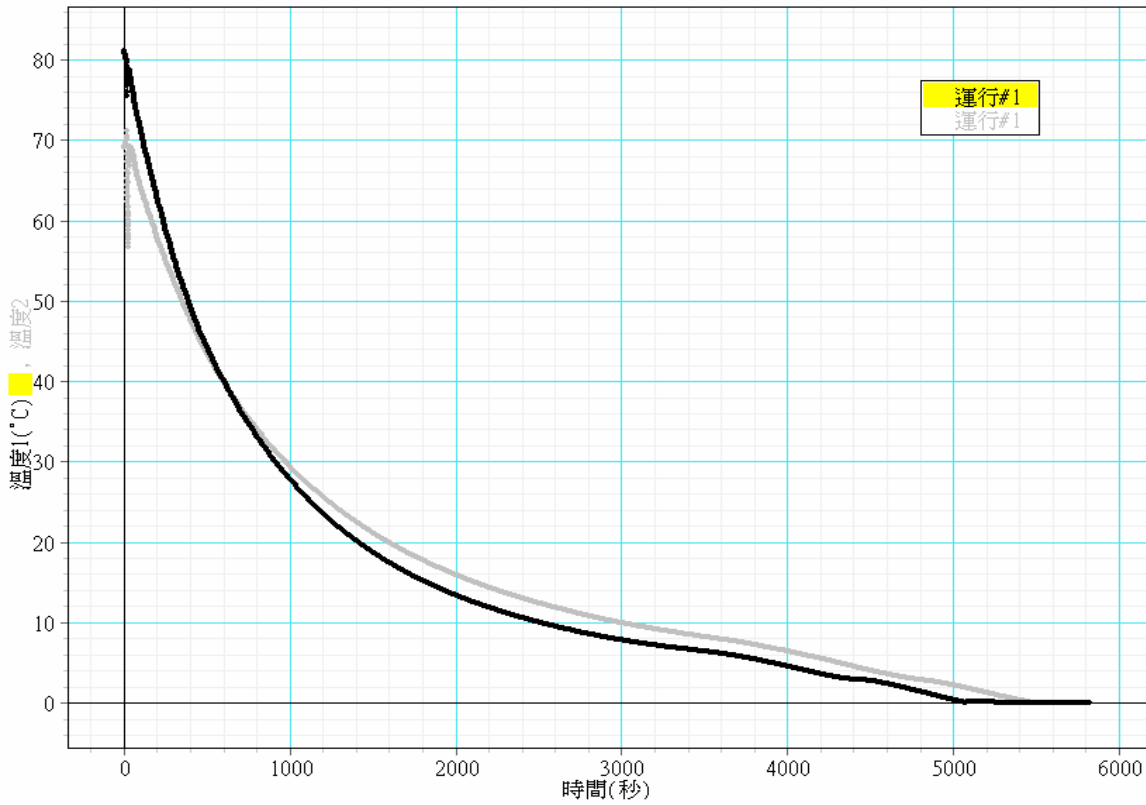
(3) 50°C/60°C <圖三>



(4) 60°C/70°C <圖四>

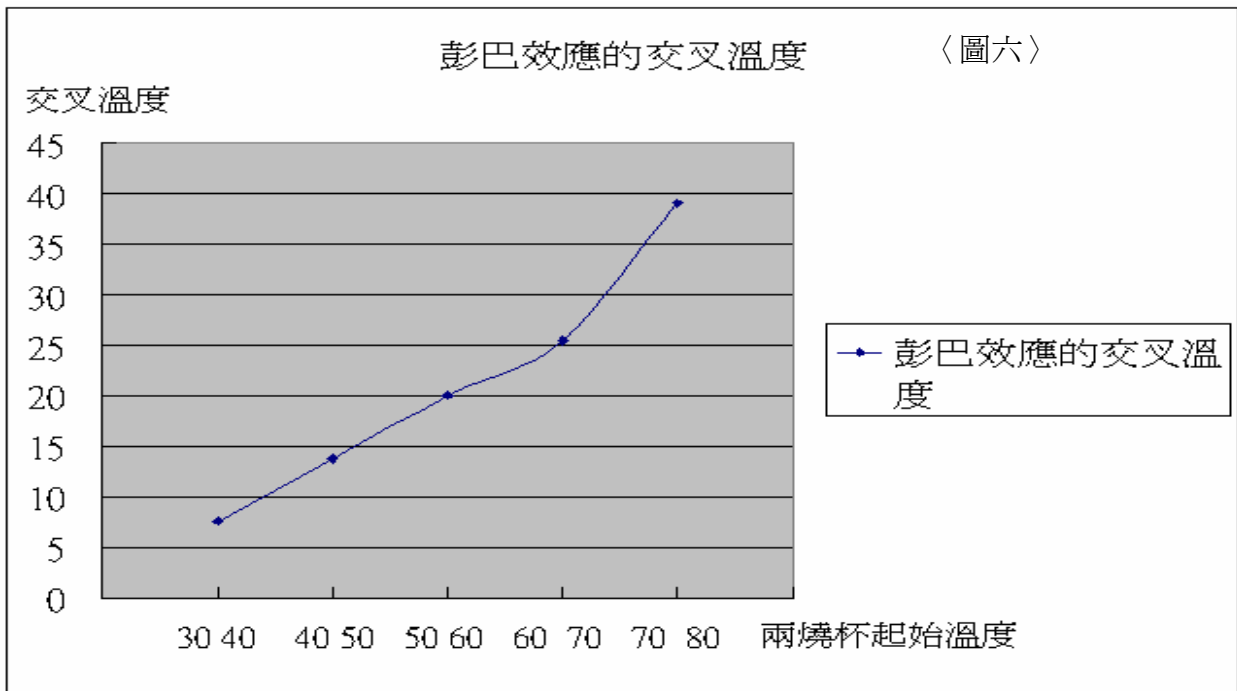


(5) 70°C/80°C 〈圖五〉



3.討論：

- (1) 此實驗顯示，熱水的結冰時間較冷水短
- (2) 作圖分析「不同溫度的組別，發生彭巴效應的交叉溫度」，如〈圖六〉。觀察到燒杯溫差為 10°C 時，溫度愈高的組別愈早發生彭巴效應，且交叉溫度愈高，約呈線性關係。



實驗（二）探討蒸發、傳導、對流對液體冷卻時的影響。

對於彭巴效應發生之原因，我們推論可能的成因如下：

- 1 蒸發：爲了驗證是否蒸發爲主要原因，因此我們於水面上方添加油脂，以阻隔水的蒸發。
 - 2 傳導：有研究指出，彭巴效應的可能成因，是覆蓋在冷凍庫內層表面的霜，因爲碰觸到溫度較高的燒杯，造成霜溶解後再度凝固，使得霜與燒杯底部的密合度提升，促使導熱係數變高，而發生彭巴效應。
 - 3 對流：我們考慮到試管截面積大小是否對於對流有影響。
- 基於以上三點推測，我們設計了以下實驗，驗證此些說法是否正確。

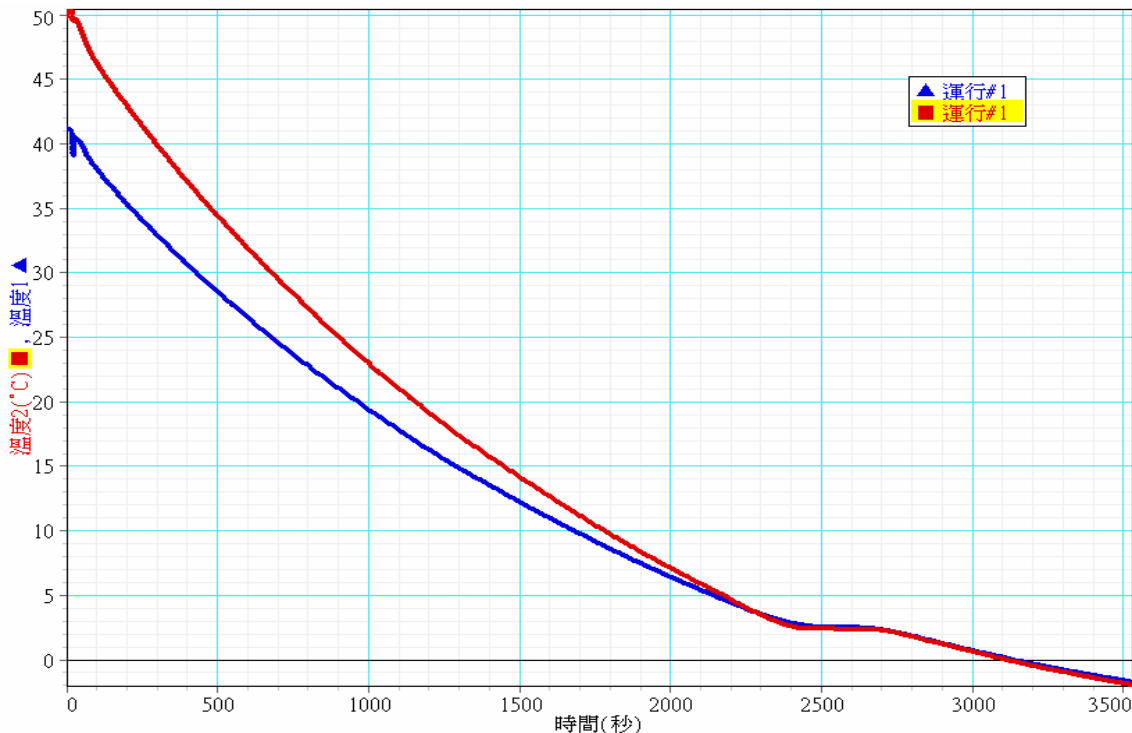
蒸發：探討在水的表面添加油脂後，冷卻過程及結果的變化。

1. 實驗步驟：

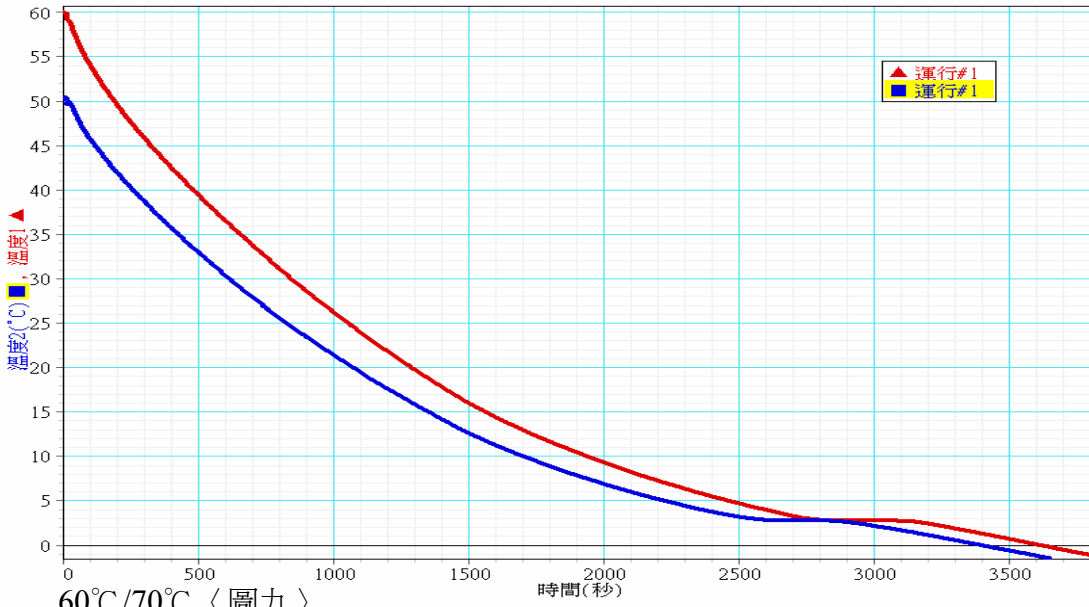
- 〈1〉在容量爲 100 毫升的燒杯中，裝入 75 毫升的自來水。
- 〈2〉用加熱器分別隔水加熱至不同溫度。
- 〈3〉在燒杯下層放置溫度感應器，並添加 5 cc 的油脂。
- 〈4〉置入冰箱冷凍庫，以儀器（GLX）每 0.5 秒紀錄一次數據，匯入電腦。
- 〈5〉觀察及分析數據。

2. 實驗結果：「彭巴效應」不再發生，且冷卻時間加長。

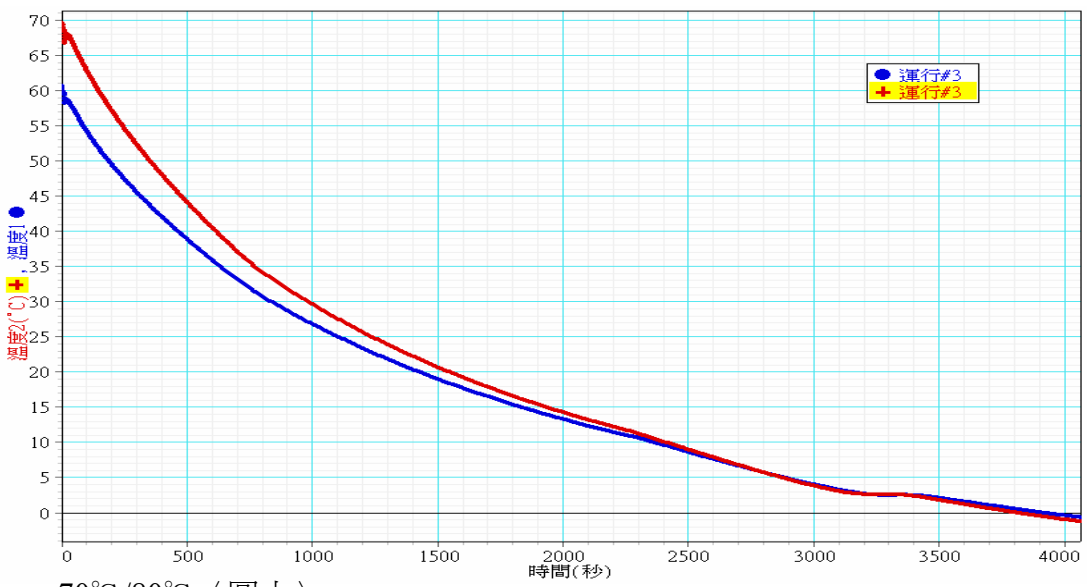
40°C/50°C 〈圖七〉



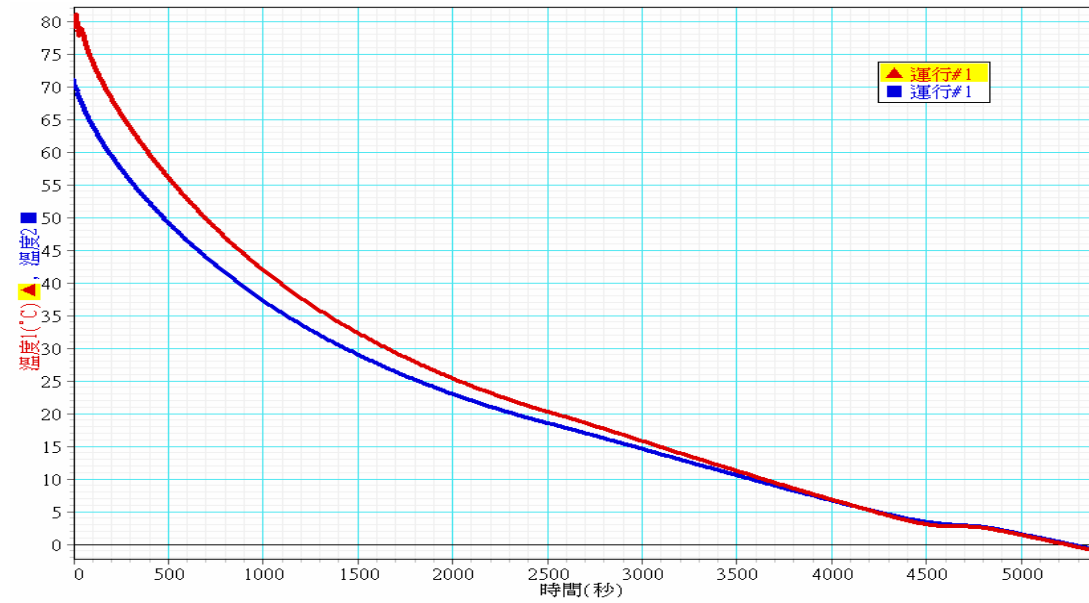
50°C/60°C 〈圖八〉



60°C/70°C 〈圖九〉



70°C/80°C 〈圖十〉



3.討論：

- (1)此實驗可明顯觀察出，添加油脂後，由於阻止了蒸發，切斷了水冷卻的主要途徑之一，所需的冷卻時間因此而均延長了約 2000 秒。
- (2)去除蒸發的影響後，彭巴效應明顯地不再發生，可見蒸發對於彭巴效應有顯著的影響。

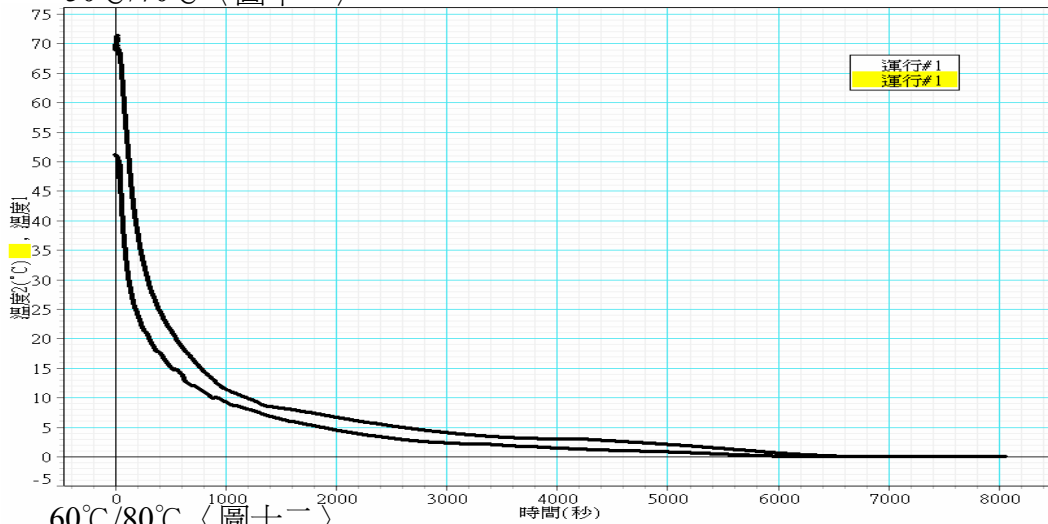
傳導：模擬冰箱結霜，水溫下降的情形。

1· 實驗步驟：

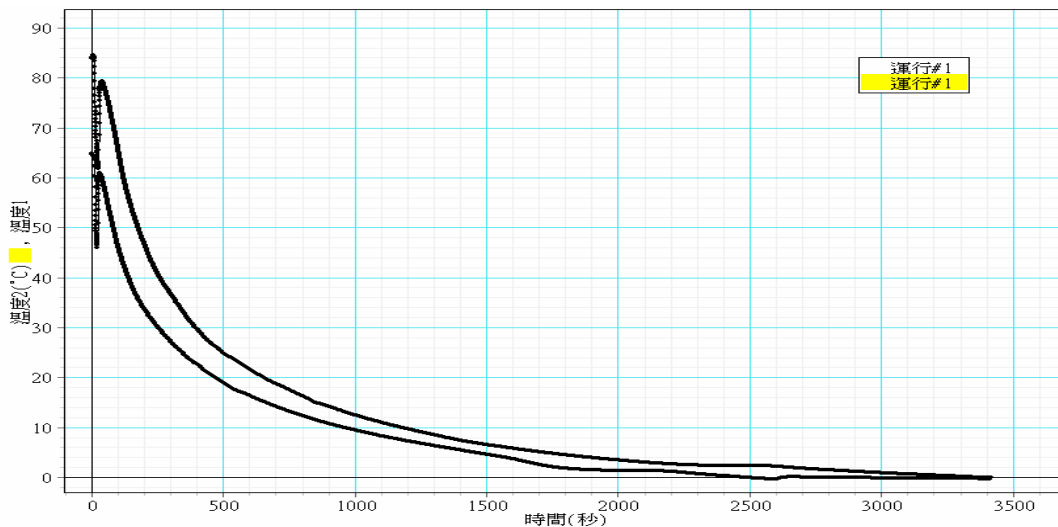
- 〈1〉在容量為 100 毫升的燒杯中，裝入 75 毫升的自來水。
- 〈2〉用加熱器分別隔水加熱至不同溫度。
- 〈3〉在冷凍庫鋪一層約 2 cm 的冰塊，模擬冰箱結霜的情形。
- 〈4〉在燒杯下層放置溫度感應器，並置入冰箱冷凍庫（置於冰塊上）。
- 〈5〉以儀器（GLX）每 0.5 秒紀錄一次數據，匯入電腦。
- 〈6〉觀察及分析數據。

2· 實驗結果：

50°C/70°C 〈圖十一〉



60°C/80°C 〈圖十二〉



3.討論：

- (1) 實驗數據顯示，將燒杯放在冰塊上（模擬結霜）並不會促進彭巴效應的發生，甚至會有反效果。
- (2) 推測如下：據觀察〈曾有次在燒杯內水溶液尚未結冰時，打開冰箱觀察，發現其杯底冰塊並未如預期般再結冰〉，裝有熱水的燒杯，融化了較多周圍的冰塊，燒杯下陷較多。使周圍的冰塊產生隔絕的效果，阻止其熱量散失，造成熱水冷卻變慢。因此不造成彭巴效應。

對流：探討對流是否受到不同容器的影響。

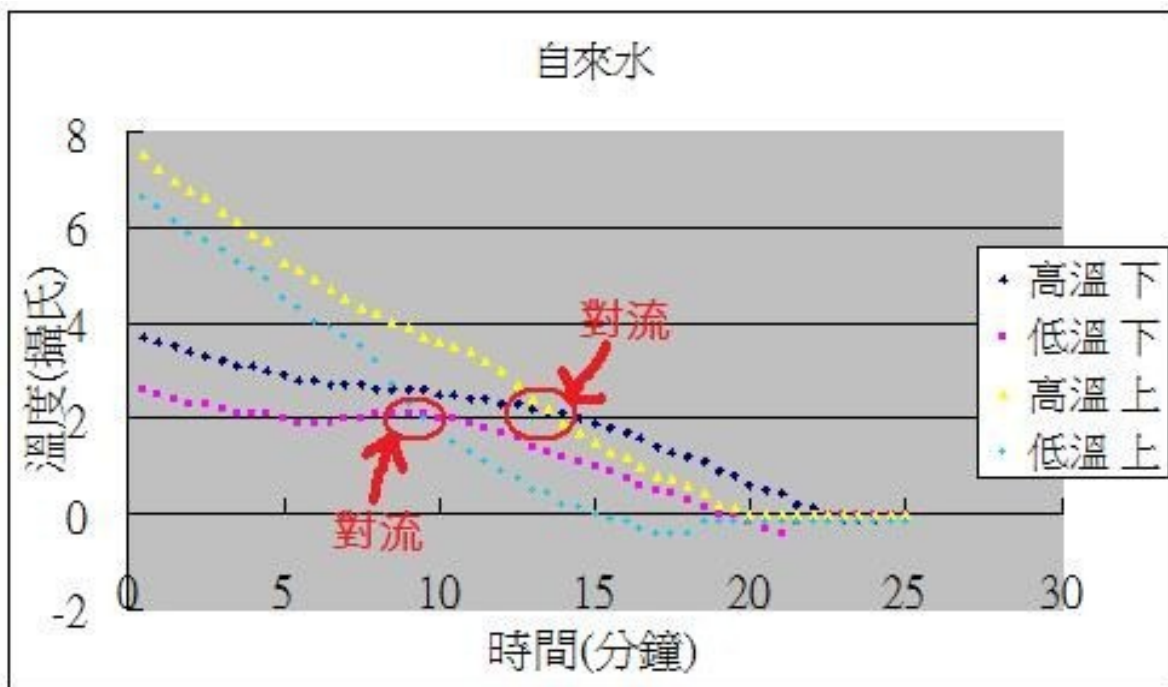
1. 實驗步驟：

- (1) 在容量為 70 毫升試管即 100 毫升燒杯中，裝入 75 毫升的自來水及蒸餾水。
- (2) 用加熱器分別隔水加熱至 60°C 及 80°C。
- (3) 在燒杯上層及下層分別放置溫度感應器，並置入冰箱冷凍庫。
- (4) 以儀器（GLX）每 0.5 秒紀錄一次數據，匯入電腦。
- (5) 觀察及分析數據。

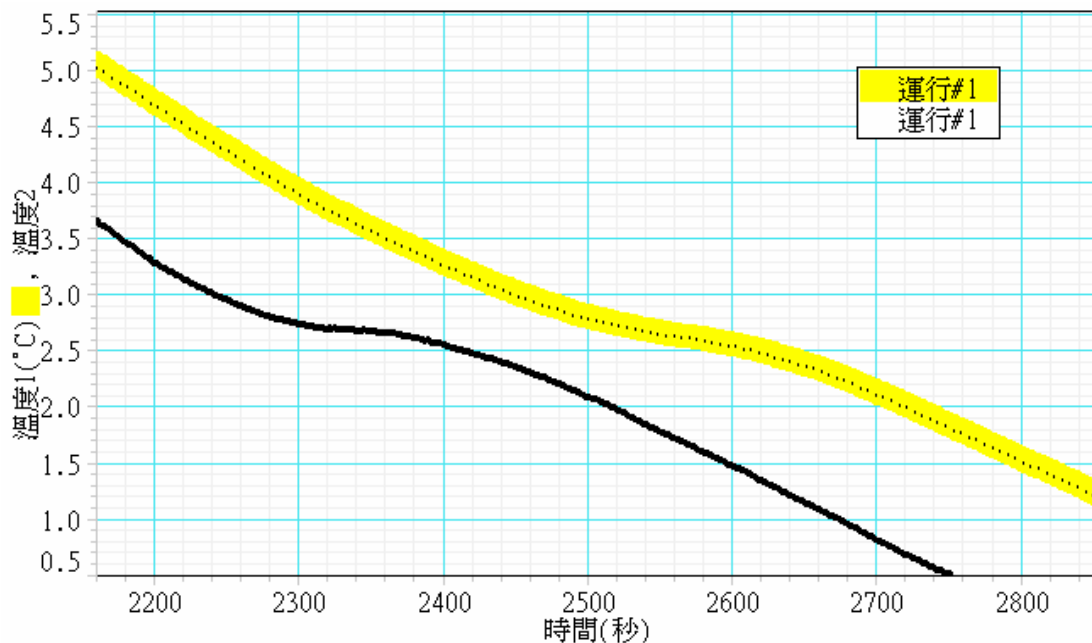
2.實驗結果：

將圖表在低溫時放大，如〈圖十三〉〈圖十四〉

試管組：〈圖十三〉



燒杯組：〈圖十四〉



3.討論：

- 〈1〉由於是測量下方的溫度，所以當斜率趨緩時代表此時（4°C以下）上方較熱的水，因為密度較大而對流至下層。
- 〈2〉由〈圖十三〉〈圖十四〉可知，在容器口徑變寬後，減少了對流時水分子間的阻礙，造成對流溫度較偏向理論值 4°C 的情形。

※ 第一部分總結：

- 一、由傳導實驗(2)可觀察出，冰箱是否結霜並非彭巴效應的主因。
- 二、實驗(1)、(3)的結論是：對流及蒸發對於水的冷卻均有影響。我們對於蒸發及對流的機制尚未了解，決定朝此方向做進一步的研究。

第二部份：冷卻機制

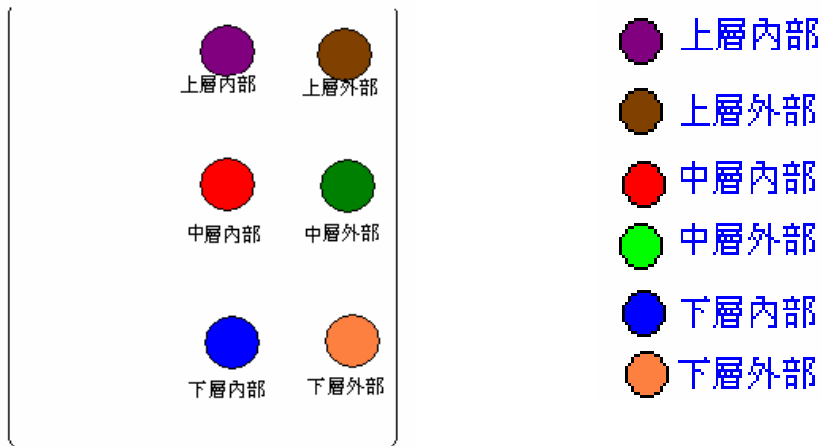
實驗〈三〉探討純水在冷卻時，內部溫度的分布情形。

1.實驗步驟：

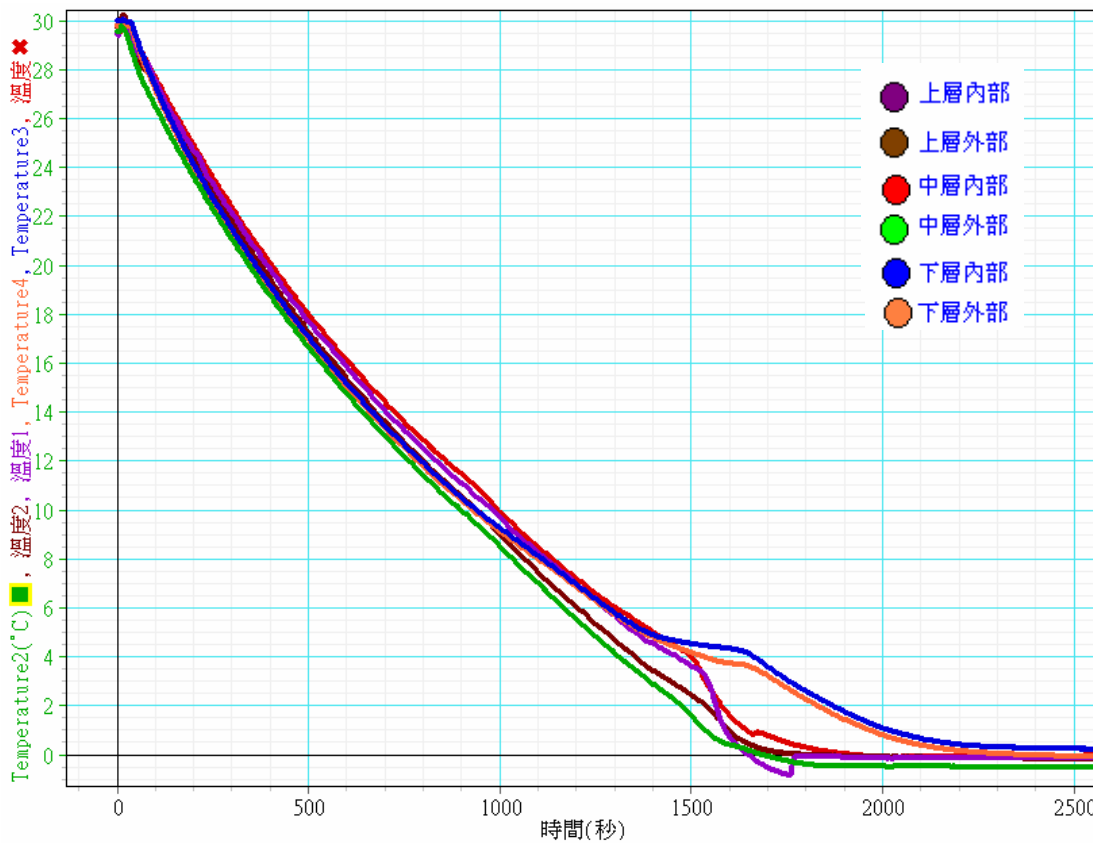
- (1) 在容量為 100 毫升的燒杯中，裝入 75 毫升的自來水。
- (2) 用加熱器隔水加熱至所需溫度。
- (3) 在燒杯放置六點溫度感應器，並置入冰箱冷凍庫。
- (4) 以儀器 (GLX) 每 0.5 秒紀錄一次數據，匯入電腦。
- (5) 觀察及分析數據。

2. 實驗結果：

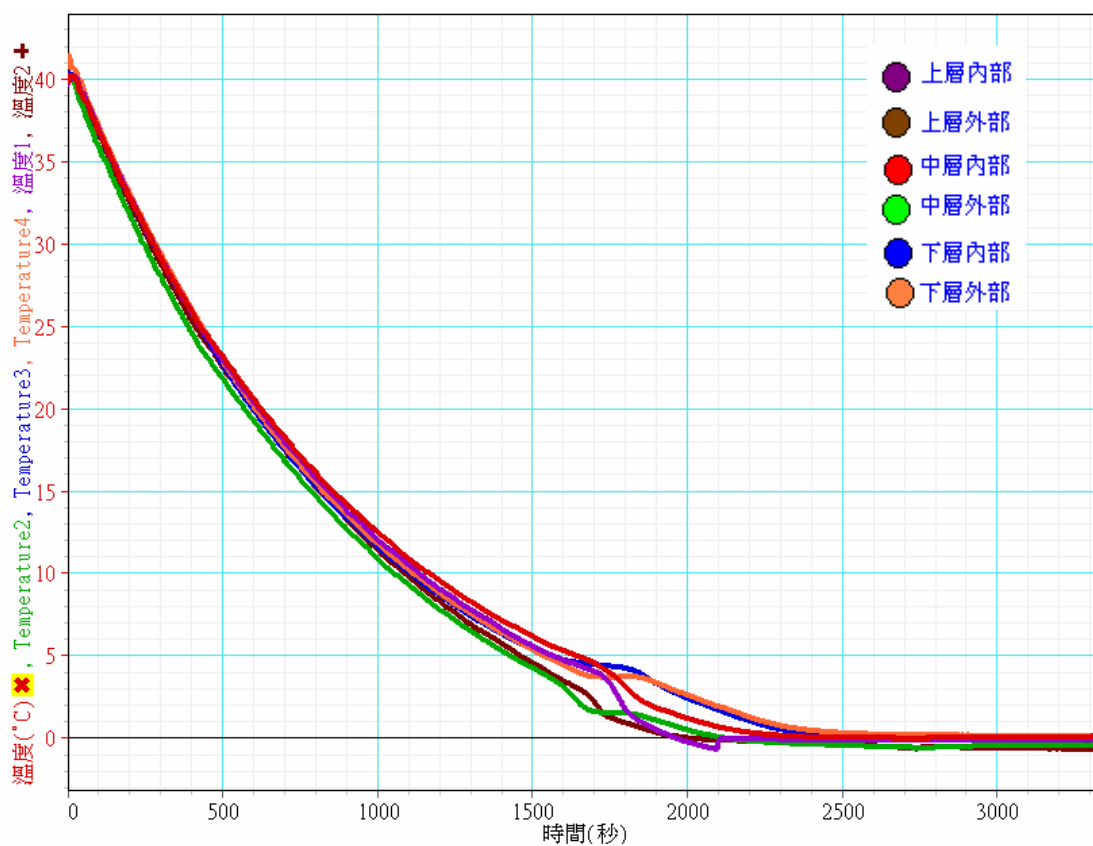
1. 圖例：下列圖片中線條顏色，代表溫度計在燒杯中擺放位置



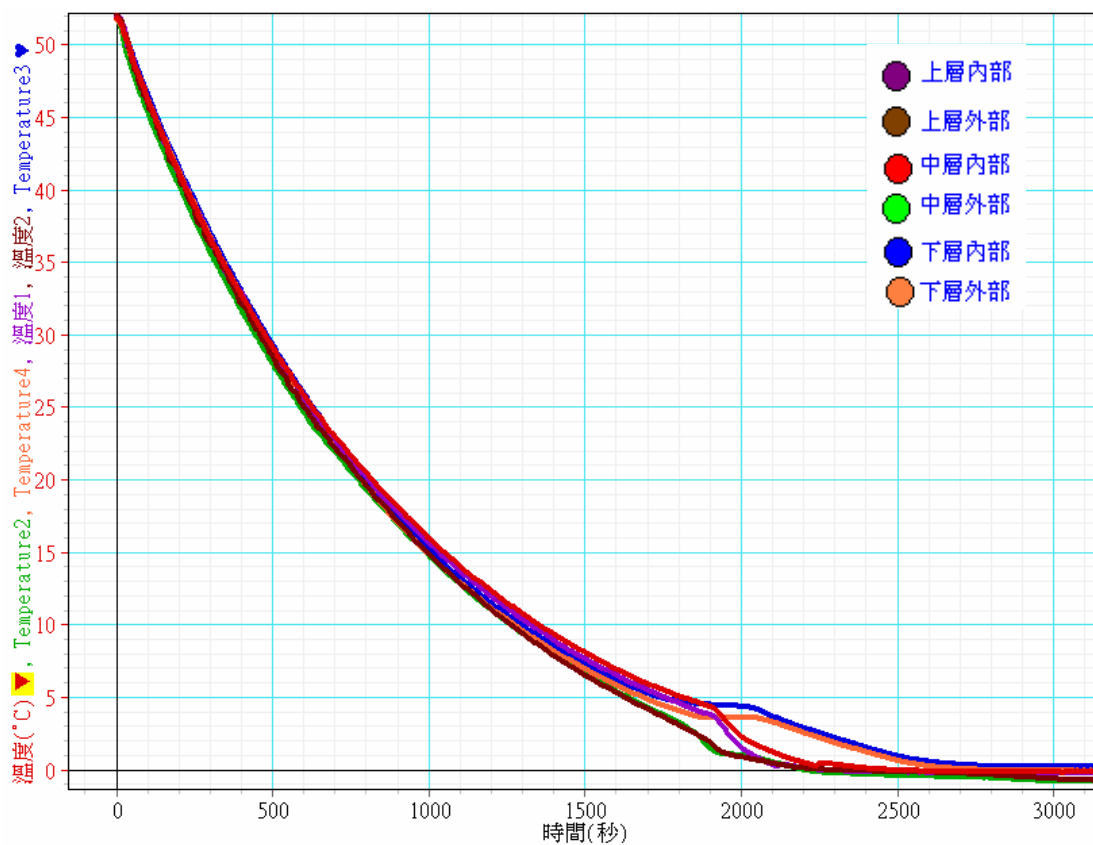
30°C 〈圖十五〉



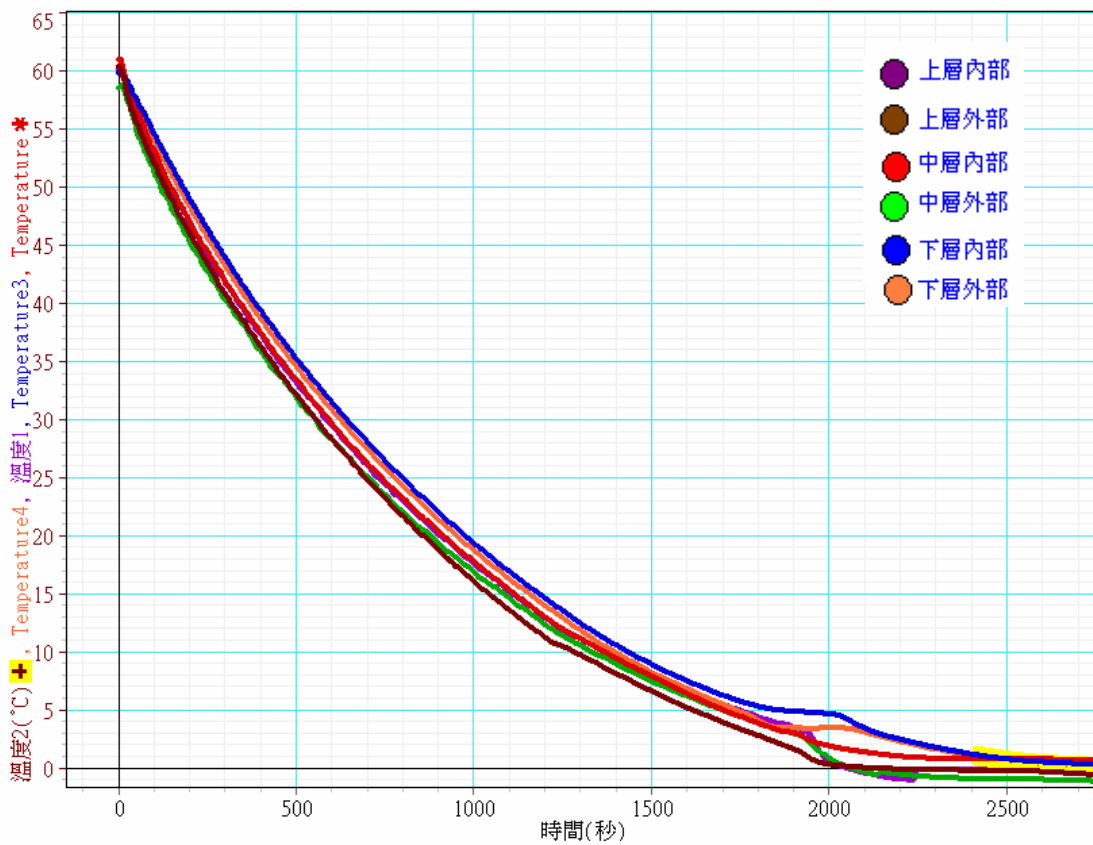
40°C 〈圖十六〉



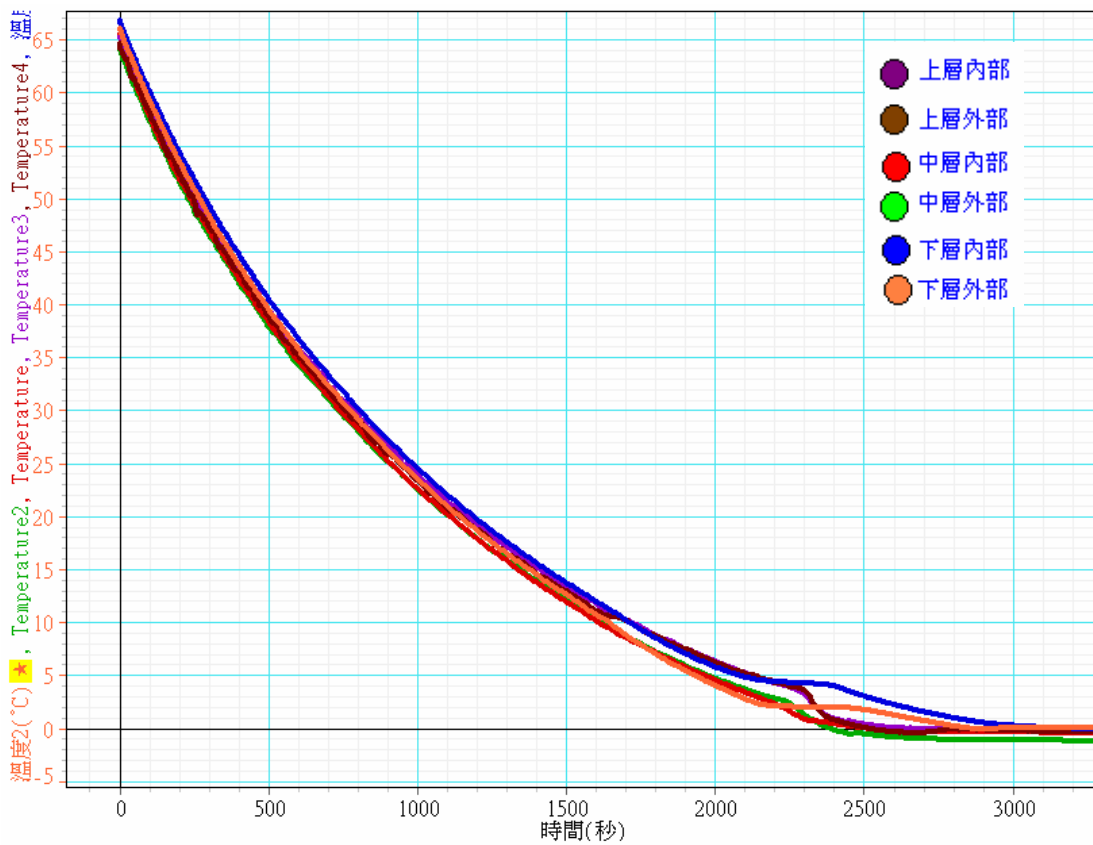
50°C 〈圖十七〉



60°C 〈圖十八〉



65°C 〈圖十九〉



3.討論：

- (1) 由〈圖十五〉至〈圖十九〉可知，無論初始溫度為何，均可以觀察到，水在冷卻時，會因為冷卻不均勻，造成溫度較高的水因為密度小而對流至上層，形成些微的「熱頂效應」。但溶液冷卻至 4°C 左右，則因為水的密度曲線改變，上層較溫暖的水因密度較大而沉降至底層，而有上冷下熱的情形。
- (2) 細部分析後可見水在冷卻時各層的水仍不斷在做溫度的交換，並在 4°C 到 0°C 作劇烈的溫度交換，直到 0°C。
- (3) 由〈圖十五〉至〈圖十九〉可見，4°C 以下的對流在下層內部、下層外部、中層內部及上層內部的發生較明顯。

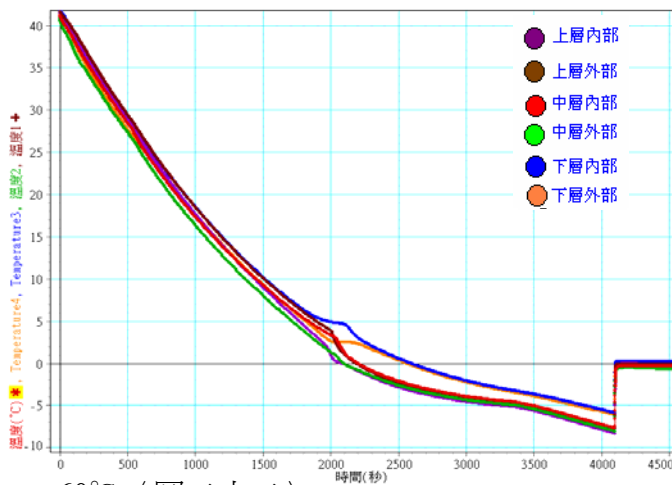
實驗〈四〉探討表層添加油脂的水，在冷卻時內部溫度的分布情形。

1. 實驗步驟：

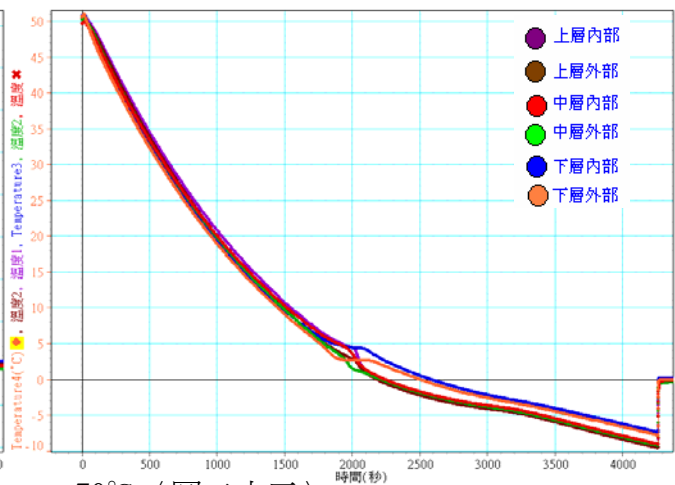
- 〈1〉在容量為 100 毫升的燒杯中，裝入 75 毫升的自來水。
- 〈2〉用加熱器隔水加熱至所需溫度。
- 〈3〉在燒杯放置六點溫度感應器，表層添加 5ml 的油。
- 〈4〉置入冰箱冷凍庫，以儀器（GLX）每 0.5 秒紀錄一次數據，匯入電腦。
- 〈5〉觀察及分析數據。

2. 實驗結果：

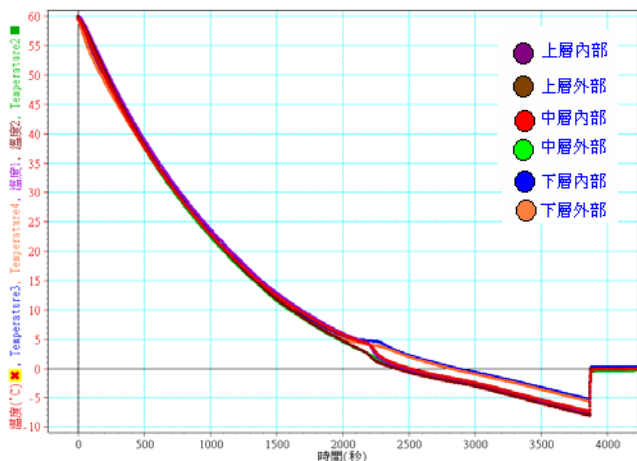
40°C 〈圖二十〉



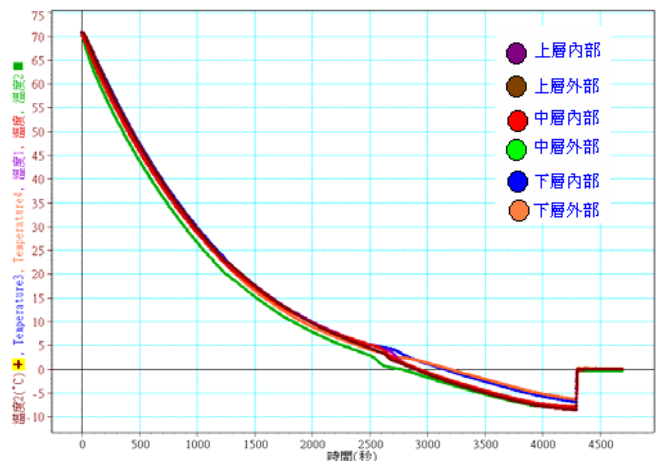
50°C 〈圖二十一〉



60°C 〈圖二十二〉

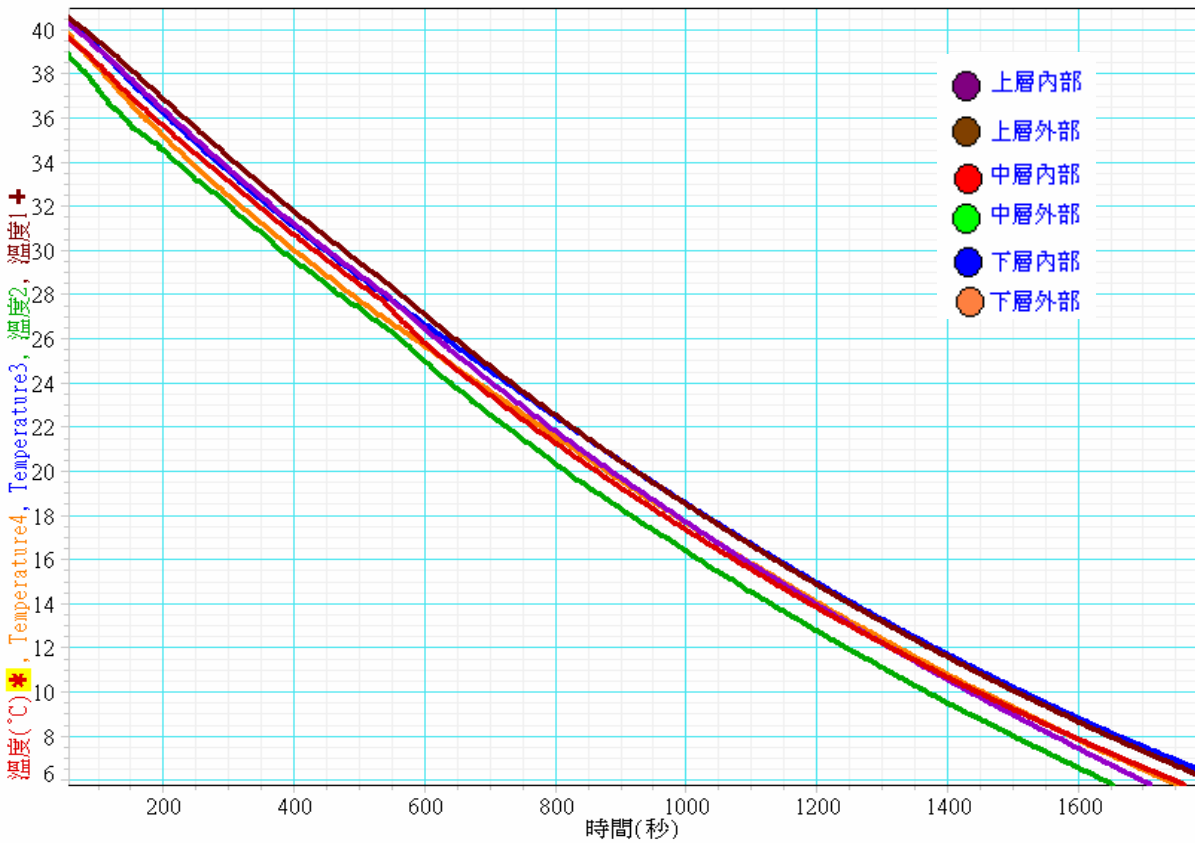
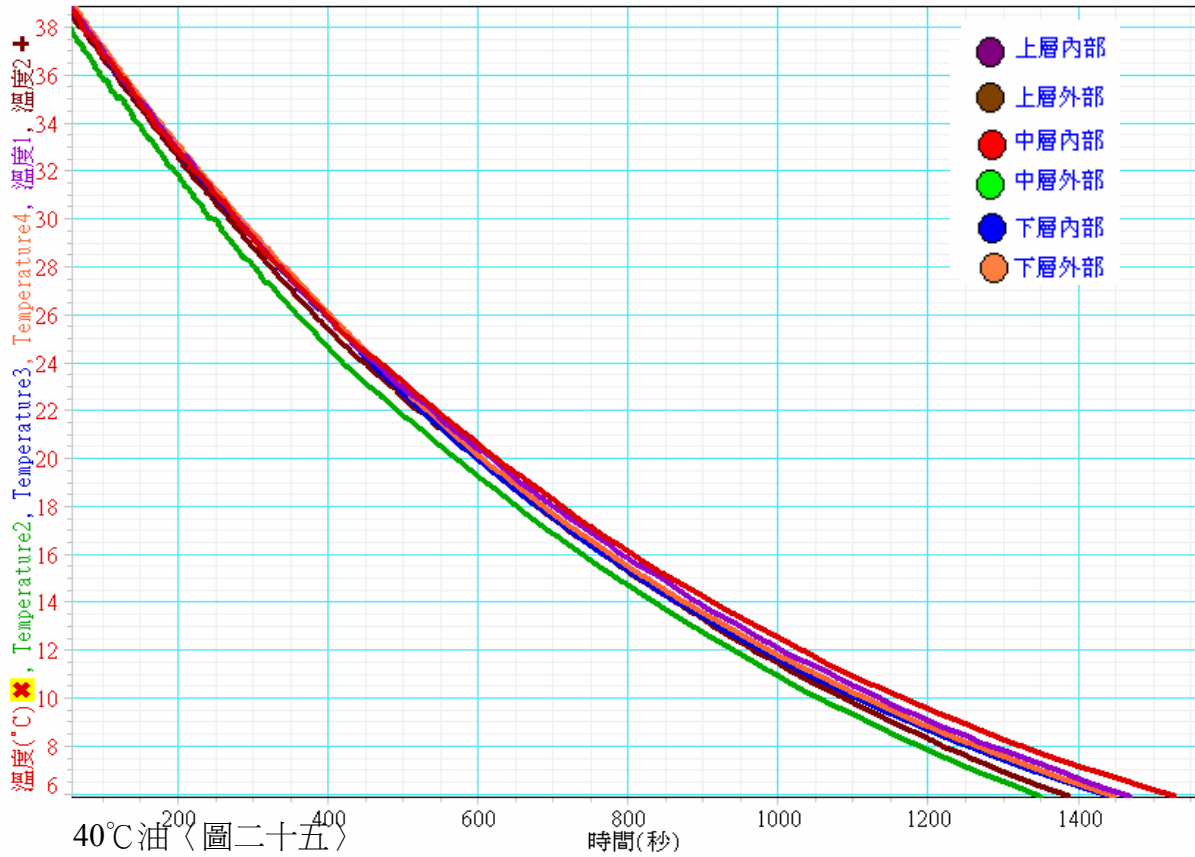


70°C 〈圖二十三〉

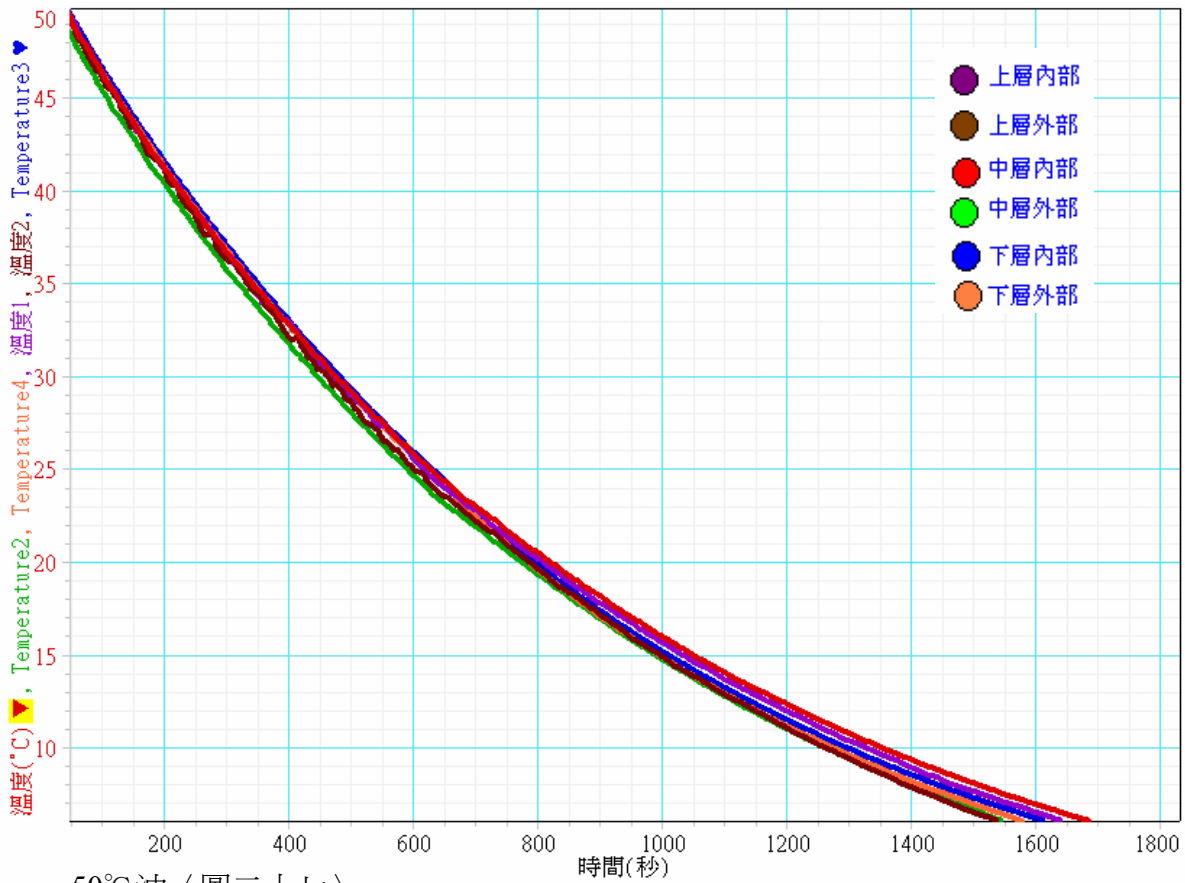


(1) 此實驗發現，實驗組(油脂)中蒸發帶動的對流減緩，造成實驗組冷卻時，容器內各部份的熱交換較不明顯，列舉兩組(40°C 50°C)實驗，將其下降中的溫度放大，如〈圖二十四〉至〈圖二十七〉。

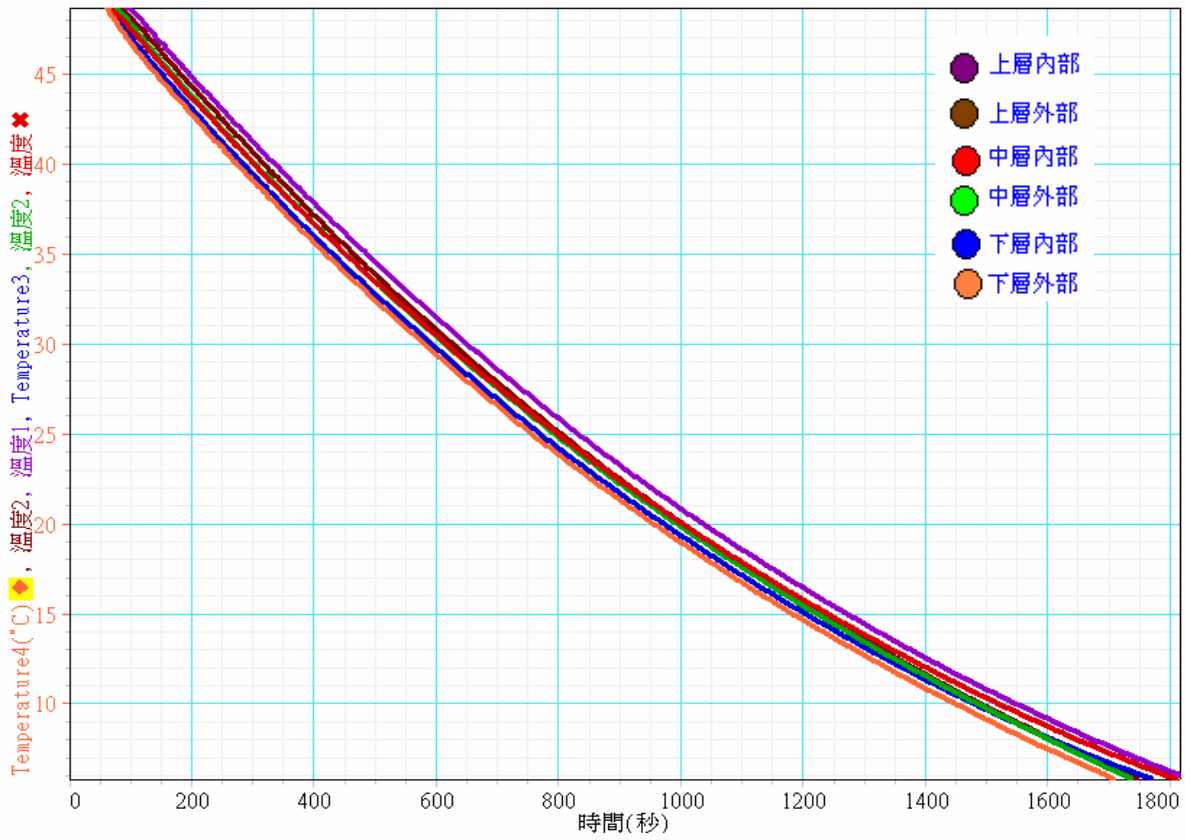
40°C水〈圖二十四〉



50°C水〈圖二十六〉



50°C油〈圖二十七〉



3.討論：

我們從上述實驗意外觀察到此一現象：水在冷卻時，有時會有些微的「過冷效應」如下圖；但添加油脂後的過冷效應極為顯著，且與一般關於過冷效應的描述並不符合。於是決定再做進一步的探討(第三部分)。

第三部份：過冷效應

實驗（五）加油脂的過冷效應

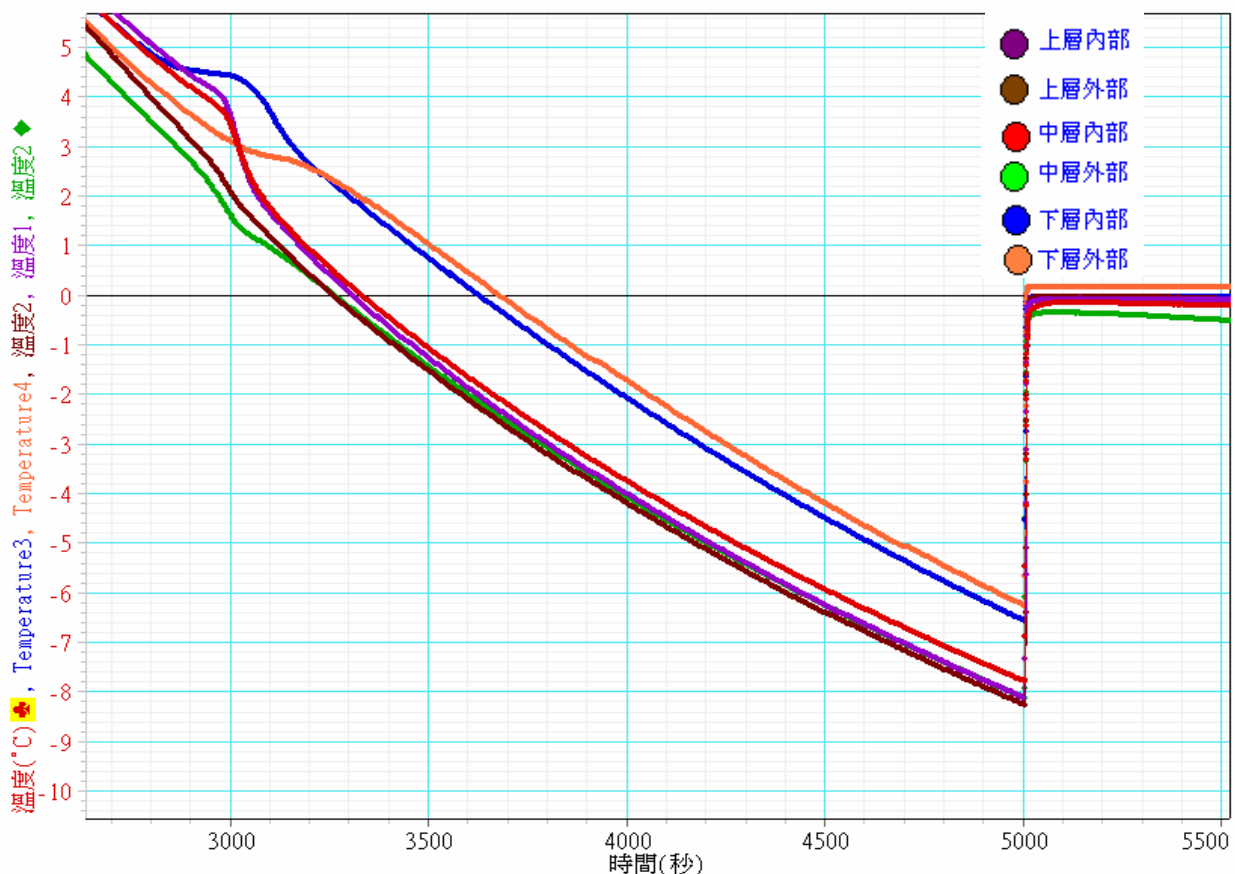
1.一般對過冷現象的描述為：

急速冷卻下，由於冷卻時間短，到達冰點以下的水分子尚未找到適合的成核點作有效碰撞，故造成其低於冰點卻未結冰。當其達到有效碰撞時便開始結冰，此時結冰所放出的勢能造成溫度驟增至冰點。

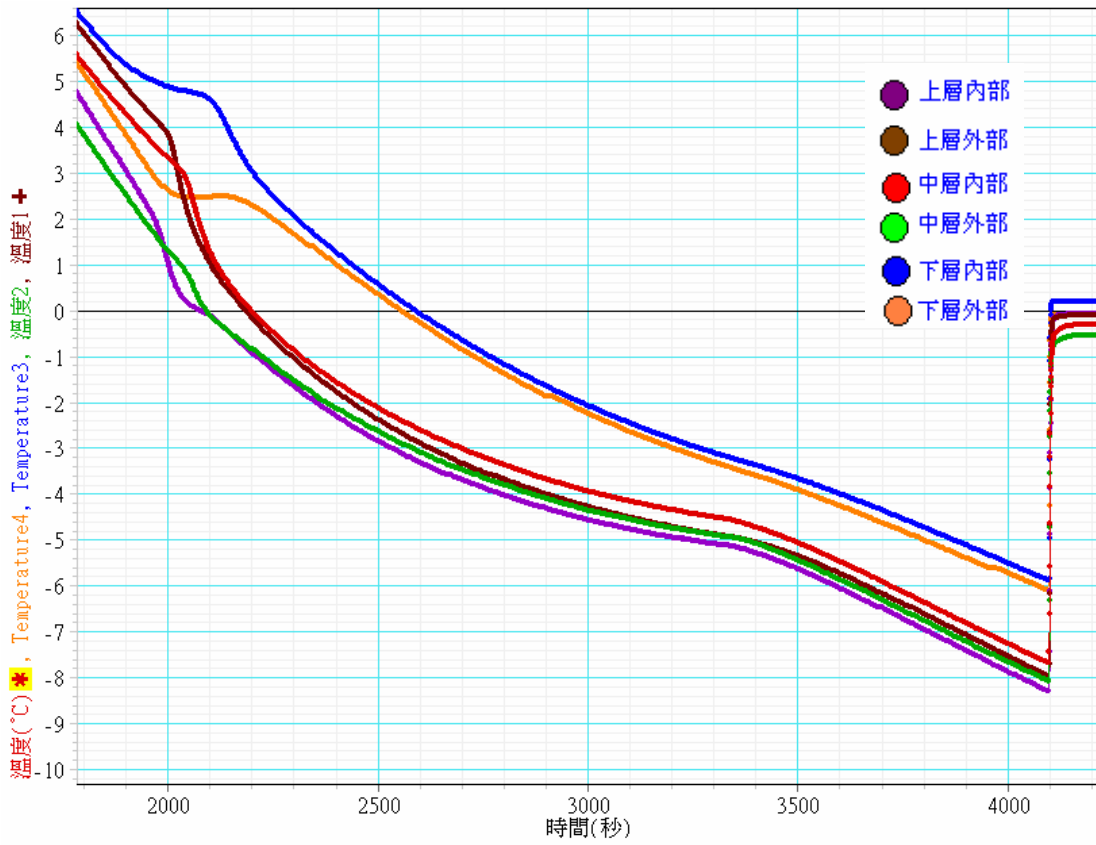
2.實驗結果：

將〈圖二十〉至〈圖二十三〉取低溫部分放大並分析，如〈圖二十八〉至〈圖三十二〉。

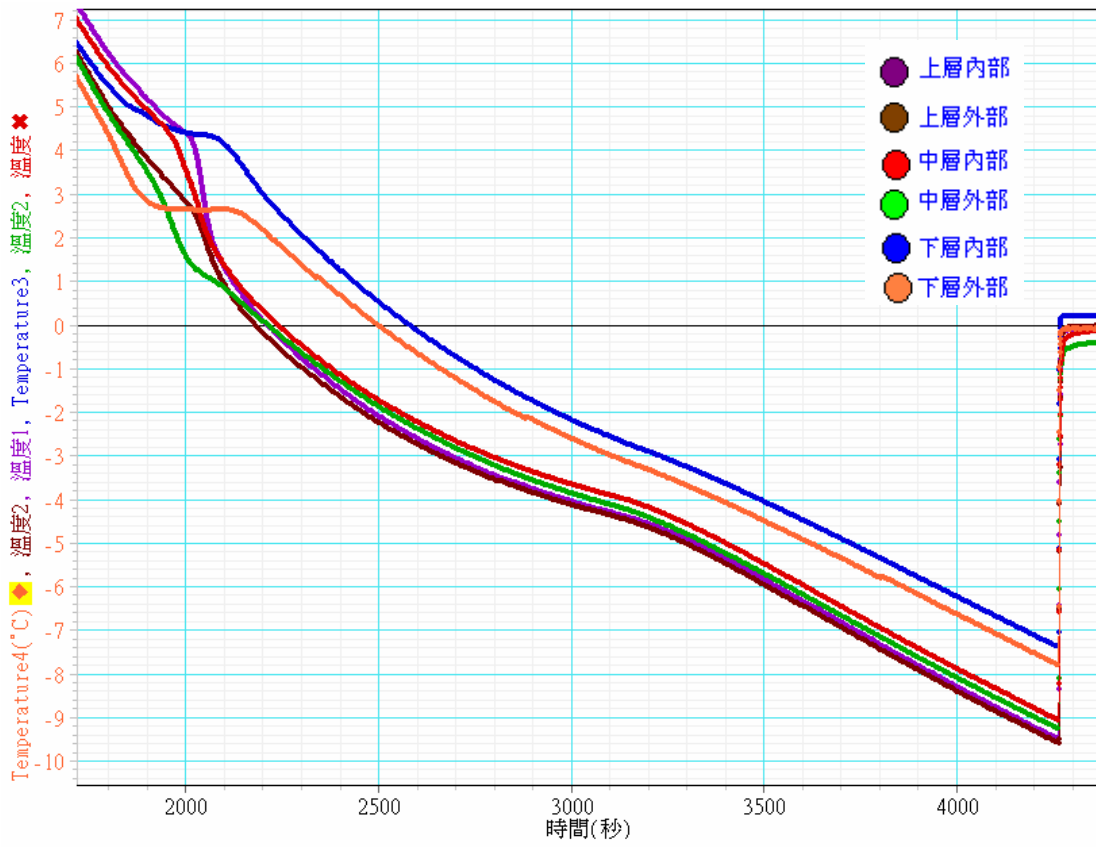
30°C 〈圖二十八〉



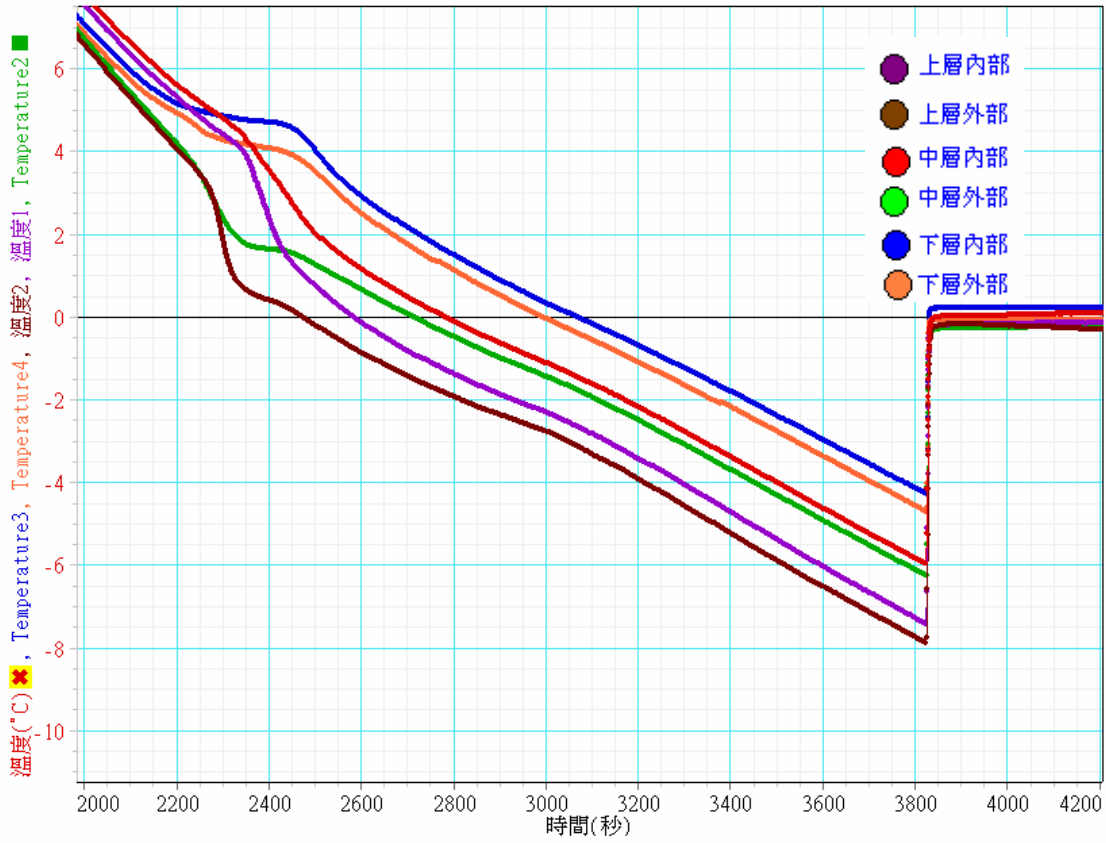
40°C 〈圖二十九〉



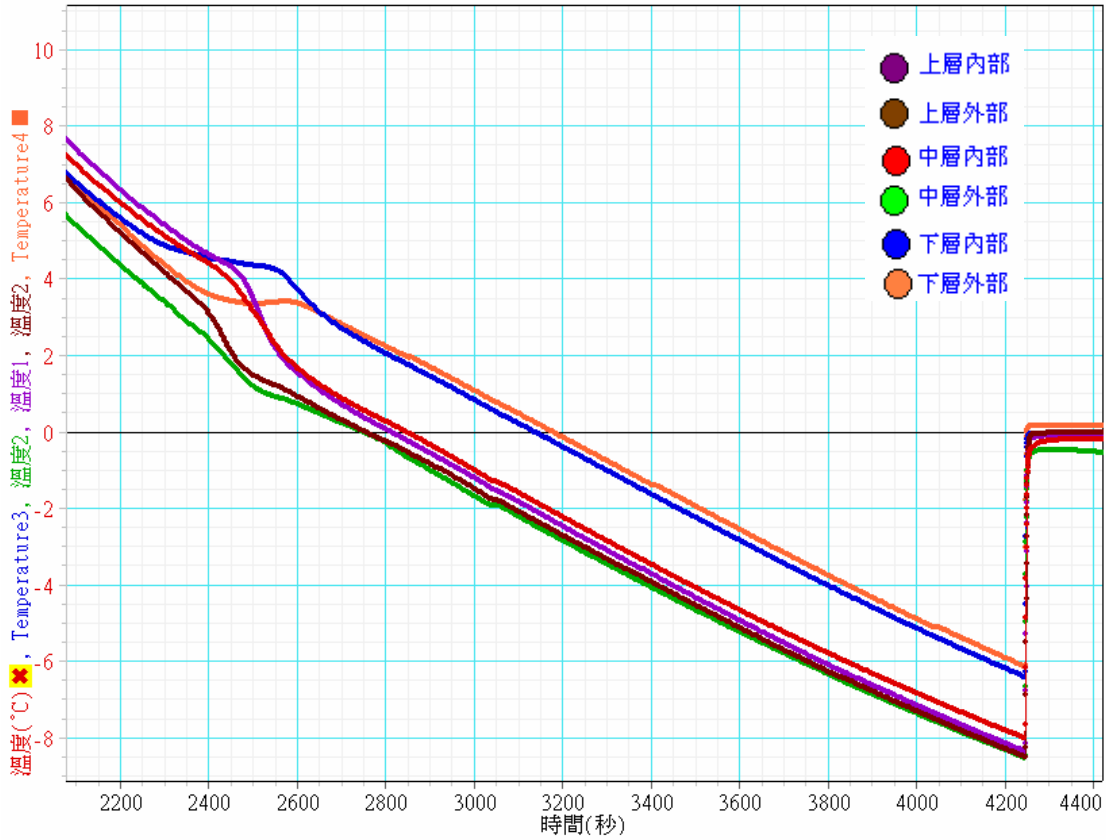
50°C 〈圖三十〉



60°C 〈圖三十一〉



70°C 〈圖三十二〉

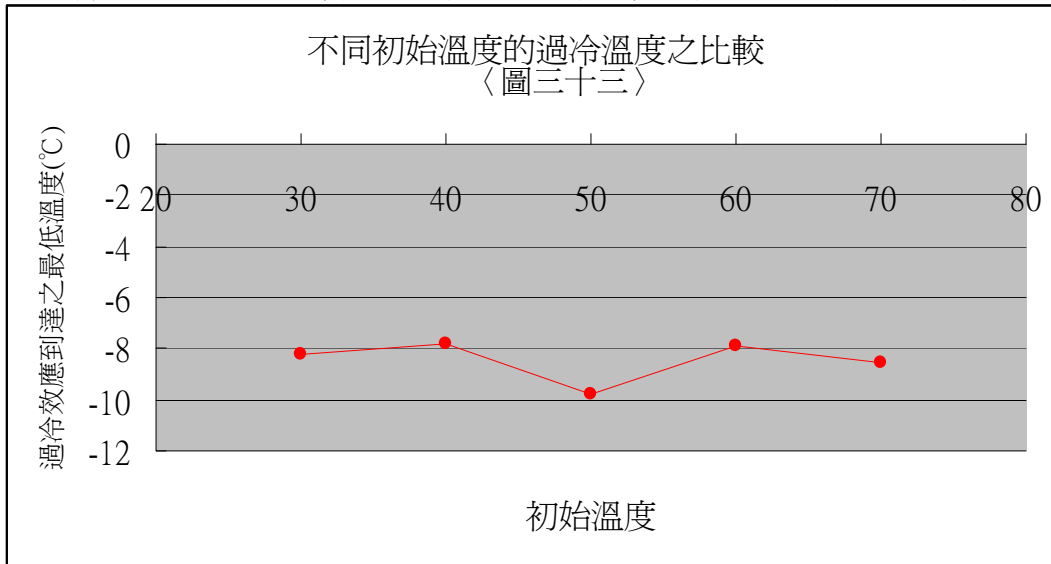


3.討論：

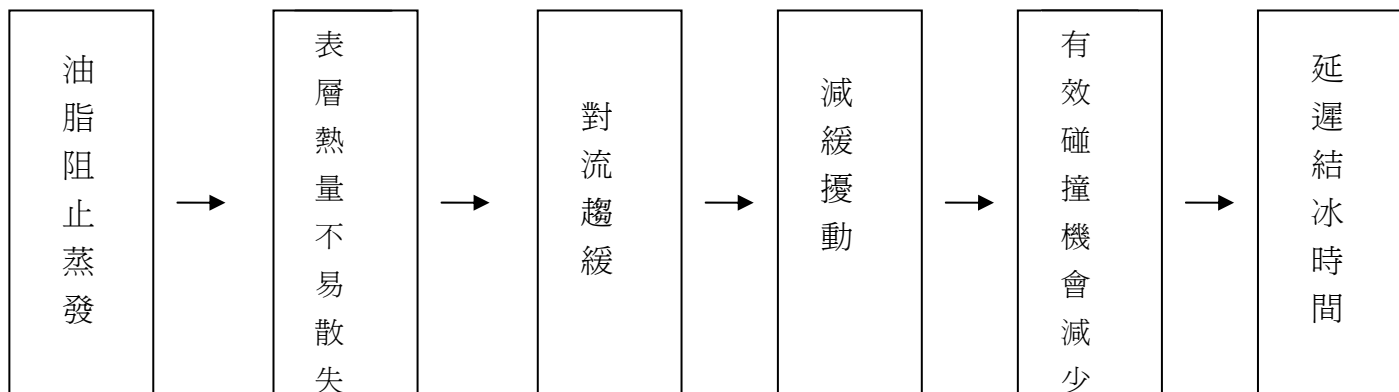
(1) 添加油脂後，所造成的影響為：排除蒸發的影響，減低因蒸發造成的對流（蒸發帶走熱量，會使最表層溫度降低，促進對流）。

(2) 由〈圖二十八〉至〈圖三十二〉觀察到，由於降低了對流，水本身又是不良導體，冷卻時各層的熱交換因此非常微小。此情形在 4°C 以上及 0°C 以下均可觀察到。

(3) 我們在上述放大圖中，發現第一個過冷點幾乎發生於上層外部(咖啡色)。將所有添加油脂的過冷實驗，取其數據平均後，做〈圖三十三〉如下。

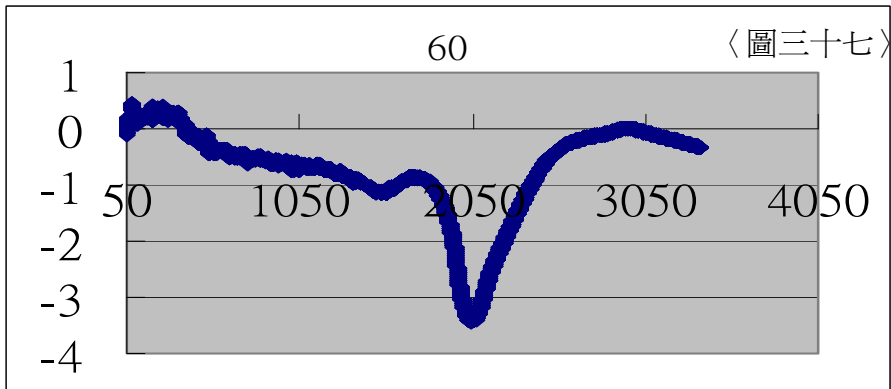
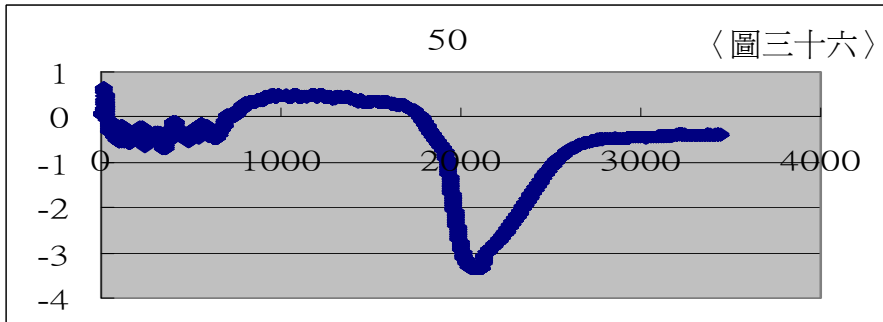
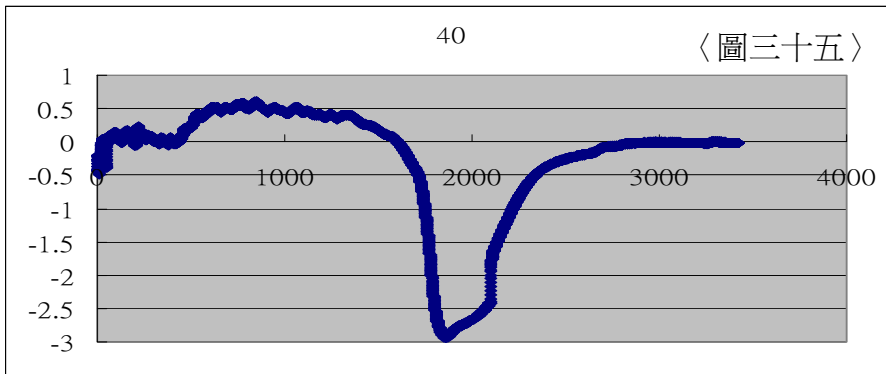
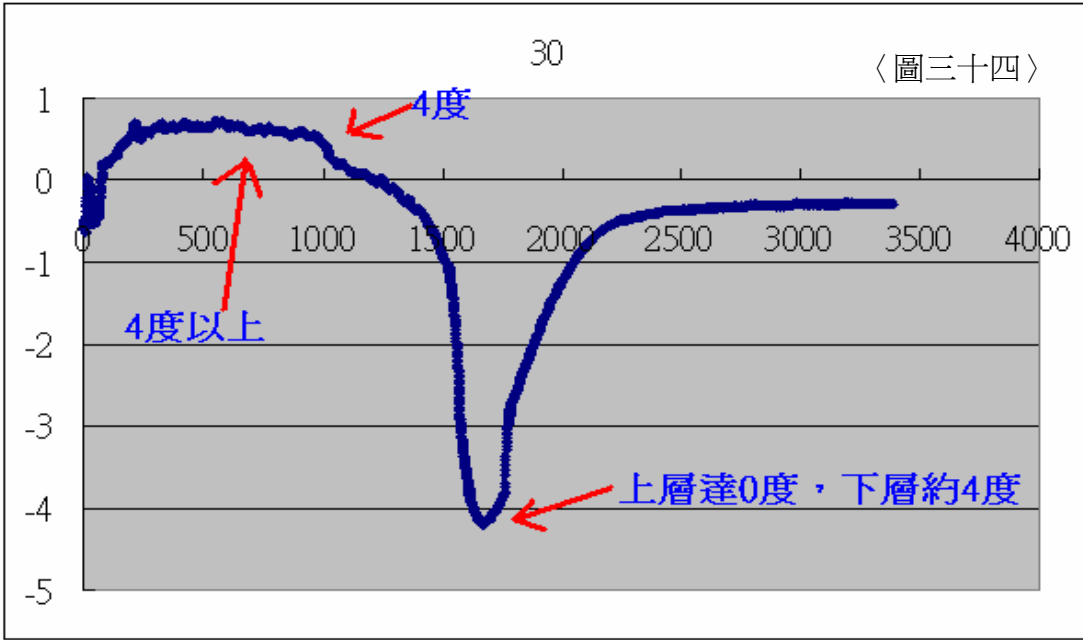


- 由〈圖三十三〉觀察出，不同初始溫度的過冷現象大都發生在負 8°C，唯獨初始溫度為 50°C 的實驗裡，過冷效應平均可達到負 10°C。
- 關於添加油脂後，過冷效應變得極為顯著，我們的推測如下：

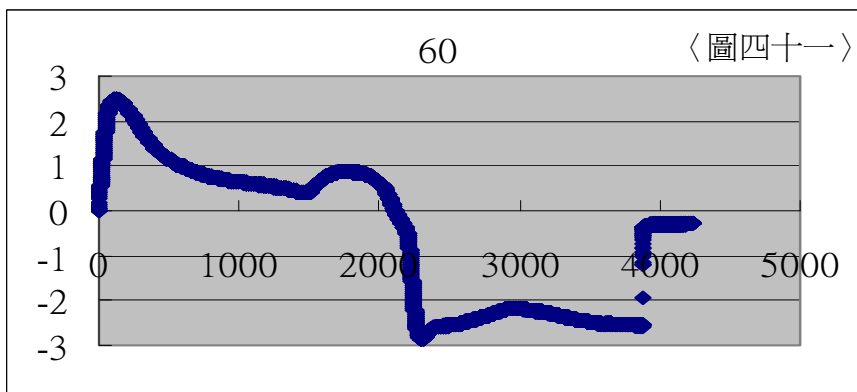
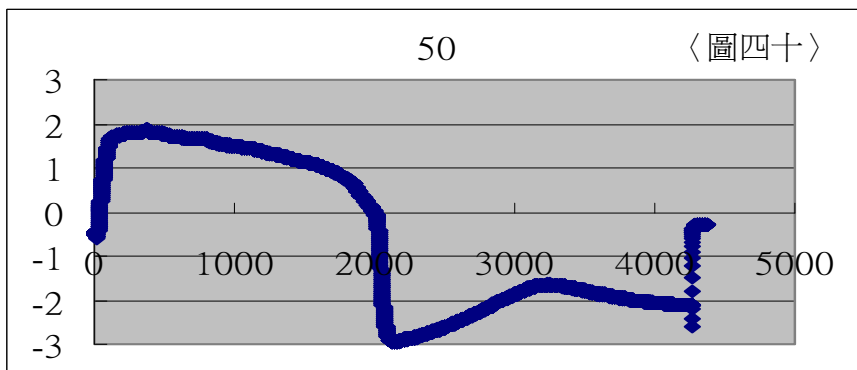
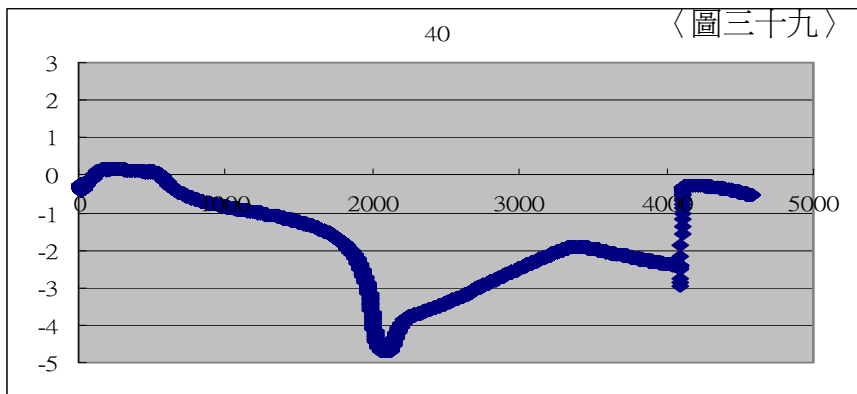
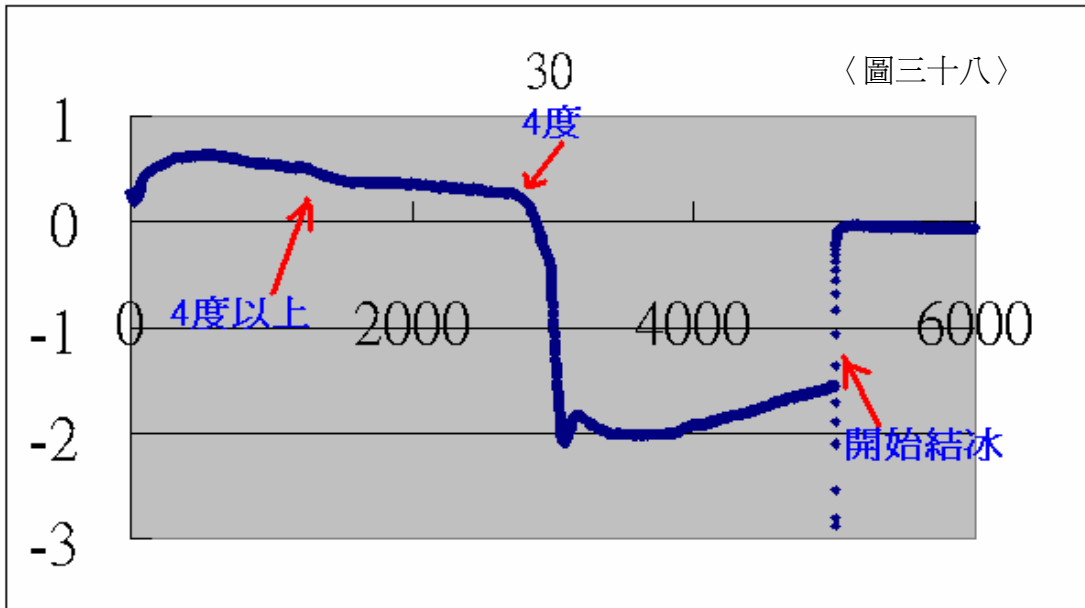


- 由〈圖二十八〉至〈圖三十二〉可觀察到，儘管冷卻時間約為 4000 秒，算是很長的時間，但過冷效應卻明顯地發生。與一般對過冷效應的描述（急速冷卻會發生過冷效應）並不相符。
- 將圖表〈圖二十八〉至〈圖三十二〉中上層內部〈紫色〉與下層內部〈藍色〉數據相減，作溫差分析〈圖三十四〉至〈圖四十一〉。

自來水組：



添加油脂組：



4. 討論：

- (1) 經此分析後，可以明顯的觀察到：添加油脂後，過冷現象十分明顯。經圖表知，沒有添加油脂時，4°C以下對流發生時，會造成上下溫差，但會逐漸再回到沒有溫差的狀態；添加油脂後，對流期間產生的上下溫差在過冷期間會被保留，直至過冷結束，結冰後溫差再回到零。

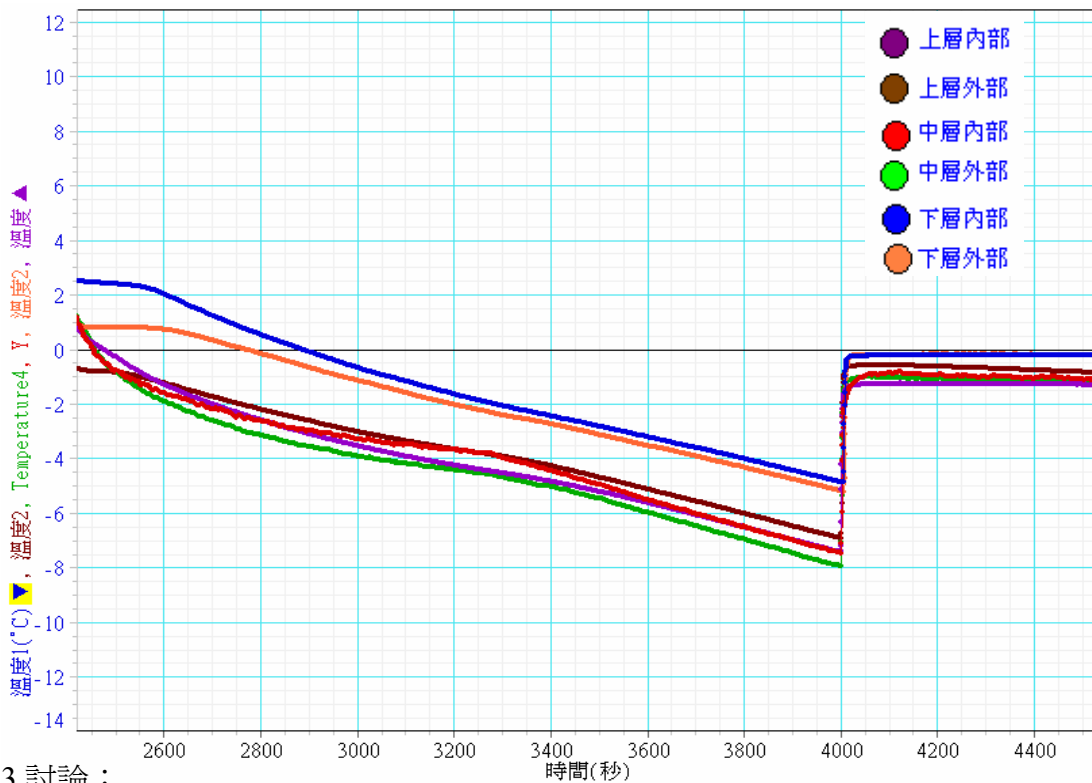
實驗（六）：探討添加油脂的糖水，過冷效應的發生情形。

1. 實驗步驟：

- (1) 在容量為 100 毫升的燒杯中，裝入 75 毫升的自來水。
- (2) 加入 0.025 克的糖，並用加熱器隔水加熱至所需溫度。
- (3) 在燒杯放置六點溫度感應器，表層添加 5ml 的油。
- (4) 置入冰箱冷凍庫，以儀器（GLX）每 0.5 秒紀錄一次數據，匯入電腦。
- (5) 觀察及分析數據。

2. 實驗結果：

50°C 〈圖四十二〉



3. 討論：

- (1) 在實驗樣本中加入糖後，原來過冷溫度可達負 10°C 的實驗，過冷溫度稍稍提升至負 8°C，可見添加溶質後，水分子結冰的有效碰撞機率增加。
- (2) 在水中加入糖後，仍有明顯的過冷現象，故判斷水中的溶質並不對過冷效應有大幅的改變。

肆、結論：

第一部分：

- 壹、彭巴效應組別的交叉溫度，有「初始溫度愈高，交叉溫度愈高」的趨勢，且略呈線性關係。
- 貳、彭巴效應與蒸發所散失的熱量有密切關係，此結論可由第一部分實驗（二）觀察出。
- 參、由加油脂實驗中，可明顯看出去除蒸發的影響後，彭巴效應明顯地不再發生，可見蒸發對於彭巴效應有顯著的影響。
- 肆、由模擬冷凍庫結霜的實驗中，將燒杯放在冰塊上（模擬結霜）並不會促進彭巴效應的發生，甚至會有反效果。
- 伍、由對流的實驗中，觀察到在容器口徑變寬後，減少了對流時水分子間的阻礙，造成對流溫度較偏向理論值 4°C 的情形。
- 陸、由以上三點(參、肆、伍)，得知彭巴效應的主要因素為：蒸發及對流，而傳導的因素被我們排除在外。

第二部分：

- 柒、 4°C 以下的對流在下層內部、下層外部、中層內部及上層內部的發生較明顯。
- 捌、於添加油脂的冷卻機制之實驗中，發現實驗組(油脂)中蒸發帶動的對流減緩，造成實驗組冷卻時，容器內各部份的熱交換較不明顯。
- 玖、添加油脂後，過冷現象十分明顯。經圖表知，沒有添加油脂時， 4°C 以下對流發生時，會造成上下溫差，但會逐漸再回到沒有溫差的狀態；添加油脂後，對流期間產生的上下溫差在過冷期間會被保留，直至過冷結束，結冰後溫差再回到零。

第三部分：

- 拾、在過冷效應實驗中我們發現第一個過冷點幾乎發生於上層外部。
- 拾壹、添加油脂後，過冷效應變得極為顯著，由此實驗中推測，油脂使水面不易蒸發，蒸發趨緩了對流，進而減少了水中的擾動，造成了過冷現象，此為這部分實驗最大的收穫
- 拾貳、在水中加入糖後，仍有明顯的過冷現象，故判斷水中的溶質並不對過冷效應有大幅的改變。

伍、未來展望：

1. 在實驗組中加入水的結晶核碘化銀，觀察是否仍會發生過冷效應。
2. 精算不同初始溫度下水的蒸發量，並計算其對水冷卻的影響。
3. 找出過冷效應為何會在長時間冷卻下發生的原因。
4. 試找出不同初始溫度下，過冷效應的程度為何有差別之細部原因。

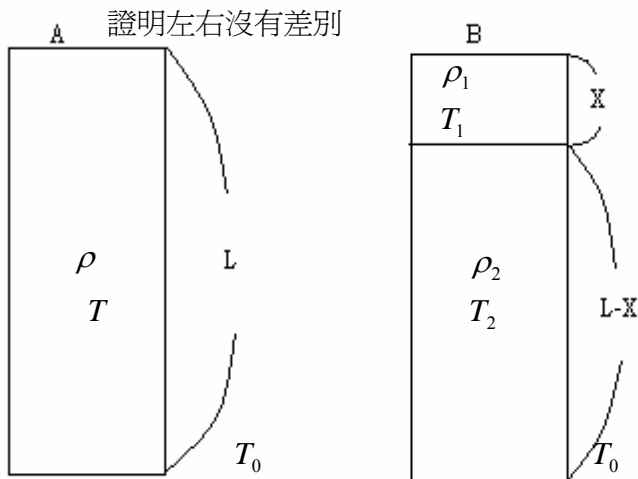
陸、參考資料：

- 一、許博硯(2008)。彭巴效應及水凝固之探討 A Study of the Mpemba Effect and Water Solidification。國立台灣科技大學機械工程系：碩士論文。
- 二、蔡坤憲（譯）（2001）。觀念物理3。臺北市：天下遠見出版股份有限公司。
- 三、姚珩(2009)。普通高級中學物理(下)12章。台南市：翰林出版事業股份有限公司。

柒、附錄：

熱傳導證明：

證明「總熱量相同時，熱密度分佈的均勻程度與傳導冷卻速率無關」



設 ρ 為熱密度，也就是單位體積的熱量。

$$\rho = \frac{Q}{V} \quad \text{而溫度 } T \propto \rho$$

設全長 L 的液體，溫度均勻時，熱密度為 ρ ，溫度為 T ，外界溫度為 T_0 。此時期熱傳導

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} \propto \frac{A \cdot \Delta T}{d} \propto L \cdot (T - T_0) \quad \text{接觸面積 } A \propto L$$

$$\text{當分為上下層的 B 狀態時 } T_1 = \frac{\rho_1}{\rho} T \quad T_2 = \frac{\rho_2}{\rho} T$$

$$\text{且總熱量相同故 } \rho L = \rho_1 x + \rho_2 (L - x) \rightarrow \rho_2 = \frac{\rho L - \rho_1 x}{L - x}$$

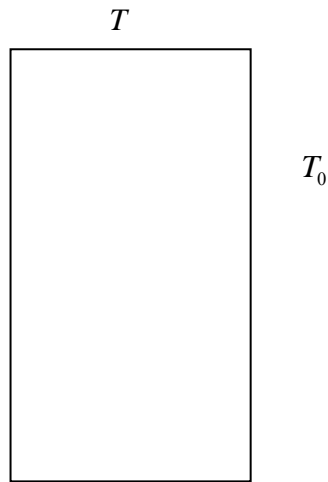
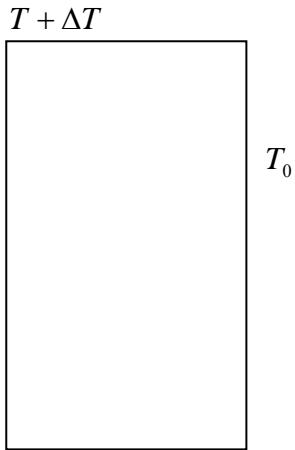
$$\text{則 } \frac{\Delta Q}{\Delta t} = x(T_1 - T_0) + (L - x)(T_2 - T_0) = x\left(\frac{\rho_1}{\rho} T - T_0\right) + (L - x)\left(\frac{\rho_2}{\rho} T - T_0\right)$$

$$= x \frac{\rho_1}{\rho} T - x T_0 + (L - x) \left(\frac{\rho L - \rho_1 x}{\rho(L - x)} T - T_0 \right)$$

$$= x \frac{\rho_1}{\rho} T - x T_0 + L T - \frac{\rho_1}{\rho} x T - (L - x) T_0 = L(T - T_0) \quad \text{故熱密度分佈的均勻程度與左右傳導冷}$$

卻速率無關。

證明其上下傳導冷卻無差別：



$T - \Delta T$

T

設截面積 A

左圖為上下有溫差，但平均溫度為 T 。右圖為上下無溫差，溫度為 T 。

冷卻環境溫度 T_0

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} \propto A \cdot \Delta T$$

左圖傳導冷卻速率：

右圖傳導冷卻速率：

$$A(T + \Delta T - T_0) + A(T - \Delta T - T_0) \quad --(1)$$

$$2A(T - T_0) \quad --(2)$$

(1)式與(2)式相等 故上下無差別