中華民國第 57 屆中小學科學展覽會
作品說明書

高級中等學校組　地球與行星科學科

第三名

051903

類暖雲雲滴成長之探討

學校名稱：高雄市立高雄高級中學

作者：	指導老師：
高二 鄭丞佑 高二 謝函叡	吳嘉鴻

關鍵詞：水滴凝結、暖雲成長

摘要

高空中的雲總是型態各異，千變萬化的，但水氣在高空的成長、變化實在是難以直接觀測，而大氣觀測方法不外乎是探空氣球、氣象衛星、雷達等，但就我們學生來說，要使用這些設備並不是如此的可行。

所以我們嘗試在高中實驗室所允許的條件下進行實驗，也就是模擬出高空雲滴成長的變化，藉由閱讀文獻、實驗模擬、電腦分析等方式，來了解暖雲雲滴在高空中凝結成長的行為，把藏於高空中不易觀察的現象在實驗室中呈現出來，實驗結果顯示，凝結核的存在對水滴的形成是非常重要的；凝結水滴經由合併成長使粒徑增大，且粒徑頻譜分布隨時間會呈現 M 型化的特徵。

壹、 研究動機

在一次的地球科學課中，任課老師讓我們觀察天上的雲。「這是積雨雲，那是莢狀雲……」一邊看著，便一邊思索著……，從小到大每當要下雨之前，空氣總會異常的悶熱，天空漸漸的烏雲密布，最後傾盆大雨就這麼的落了下來。那雲究竟是如何形成的呢？於是我們先尋求課本，課本上只簡略的寫著「水氣到大氣中，遇冷凝結成水滴……」。我便有了疑問，如果條件這麼少，為何不是到處都能形成雲，又為何雲有如此歧異的型態呢？我們把這個疑問放在心裡。

後來我們到一個溫泉遊樂區玩耍泡溫泉時，瞧見了蒸氣室的玻璃上凝結了許多水珠顆粒，並且隨時間成長，顆粒漸漸變大，最後承受不住重力而滴落下來。對於一般人，這不過是一件稀鬆平常的事，但對於我們正是求之不得的實驗方法。這種在高水氣量的環境下凝結、成長，並到足夠大時落下，不正和暖雲雲滴的形成的過程，有異曲同工之妙嗎？

貳、 研究目的

一、 實驗模擬高空中暖雲雲滴成長過程。

二、 探討不同水溫對於水滴凝結的影響。

三、 藉碳粉扮演凝結核的角色並觀察水滴凝結的情形。

參、 研究設備與器材

一、 研究器材

1.個人電腦　　2.分析軟體：Image J、MicroViewer5MP、Microsoft Excel、小畫家

3. 250ml 燒杯　4.壓克力板　　5.直尺　　6.顯微照相機　　7. LED 燈　　8.碳粉

9.溫度計

顯微照相機

LED 燈

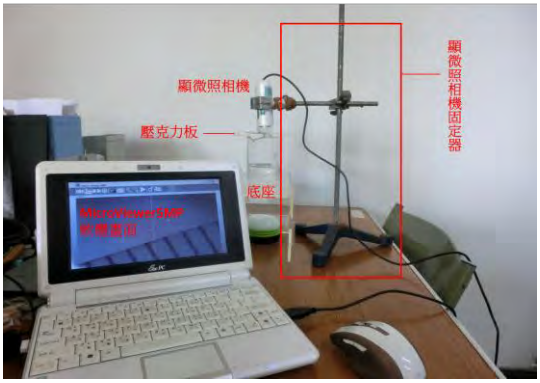
碳粉

壓克力板與直尺

二、研究裝置

裝置中之透明底座提供我們一個架高並底下可供放置 LED 燈的空位，其上可供放置 250ml 燒杯，並讓燈光能夠由燒杯下往上照射，達到拍攝水滴凝結之最好效果。而顯微照相機固定器能夠用夾子夾住照相機，且左方的螺絲可以控制夾子位子高低，搭配顯微照相機調整焦距的功能，便能拍攝出清晰之水滴凝結狀況。

接著我們把所有裝置放置在平坦桌面上，底座下放入 LED 燈，上面放上 250ml 燒杯並裝入熱水，再在燒杯上加蓋壓克力板供其凝結；然後將顯微照相機固定在夾子上，調整高度使其鏡頭前緣貼於壓克力板上，並搭配電腦對應之顯微照相機軟體 MicroViewer5MP，即能拍攝出一張張水滴凝結圖片 。



圖一　實驗裝置

肆、 研究過程與方法

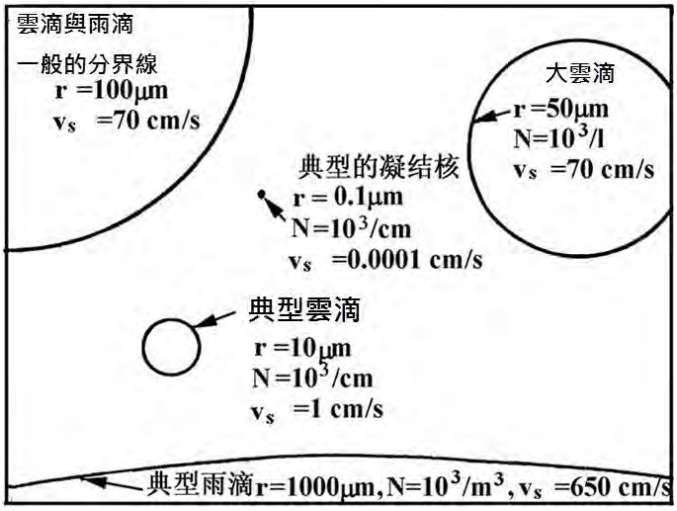
一、文獻探討

(一)水滴凝結過程

雲滴可以長期懸浮在空中，小水滴主要是由空氣中的水氣凝結而成，雲滴必須增長為雨滴，才能降到地面，成為降雨。當雲滴維持在一定的粒徑時，則雲滴表面的蒸發與凝結達到均衡，此時雲滴表面的飽和水氣壓稱為平衡水氣壓。

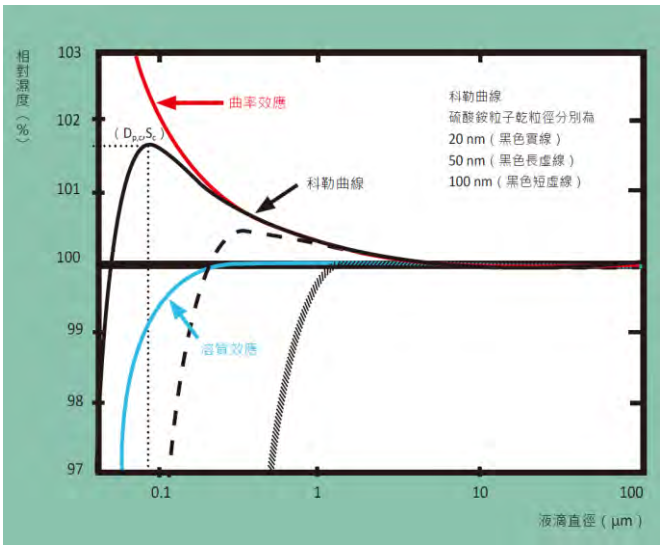
雲滴表面為曲面，具有曲面效應，其平衡水氣壓比平的水面的平衡水氣壓為高，因此僅只為維持雲滴的平衡態，雲內大氣環境就應為過飽和狀態，雲滴粒徑愈小，曲面效應愈大，雲滴表面大氣的過飽和程度就愈高。

對純水而言，維持 2μm 粒徑的雲滴的相對濕度＞100.1%，當粒徑＞10μm 時，可將雲滴表面視為平的水面。即使在雲內大氣的相對濕度很少超過 101%，微小的雲滴將難以發展為大的水滴。故極小的水滴具有很強的表面張力，要克服如此強的表面張力則需要具有很大的水氣壓梯度。所以在純水氣中的環境要發生凝結，相對溼度需達到數百個百分比，是件極不容易的事。若有微小的粒子存在，凝結的事情就變得簡單的多，這個微小的粒子，稱為凝結核。凝結核與雲滴大小示意圖如圖二。



圖二　雲內粒子相對大小之示意圖

若大氣中的凝結核為親水性的，會有溶質效應，致使混雜晶狀構造的水表面的平衡水氣壓降低，不須達到 100%即可凝結，其影響結果如圖三。一般而言，大陸的大氣中的凝結核較多，會使水氣較易凝結；海洋的大氣凝結核較少，水氣較不易凝結。



圖三　液滴凝結之溶質效應與曲率效應

(二)水氣擴散作用凝結成長過程

雲體上升絕熱冷卻，或不斷有水氣輸入雲中，使雲內的水氣壓維持大於雲滴的飽和水氣壓，雲滴才能因凝結而增長。

當小水滴約為臨界半徑的大小，它是經由擴散作用使水氣分子結合其表面而成長。以水汽擴散方程式來表示：

$\frac{\partial \rho}{\partial t} = D\nabla^2 \rho$　　ρ：環境水汽密度　　D：分子擴散係數

水滴質量成長變化：$\frac{dm}{dt} = 4\pi r D(\rho - \rho_r)$

當 $\frac{dm}{dt} > 0$，則為凝結　；　當 $\frac{dm}{dt} < 0$，則為蒸發

若考慮水滴的熱力傳導影響，Mason(1971)提出水滴擴散成長方程式為：

$r\frac{dr}{dt} = \frac{s-1}{F_k+F_d}$　　其中 F_k 為熱傳導係數；F_d 為水氣擴散作用

將$\frac{s-1}{F_k+F_d}$作為 ξ 參數化，上式可表示成　$rdr = \xi dt$

經積分後，水滴半徑隨時間變化可表示為　$r(t) = \sqrt{r_0 + 2\xi t}$

假設有兩個水滴，在 S 及 F_k、F_d 條件相同下，且 $r_2 > r_1$

則　$r_2(t) - r_1(t) = \frac{r_2(0)^2 - r_1(0)^2}{r_2(t)+r_1(t)}$

經由 Mason 實驗結果得到水滴成長初期會受到凝結核大小的影響，附著於大凝結核的水滴初期成長速率較快，相對地，小凝結核的水滴成長速率較慢，兩者約成長到半徑 10 μm 的大小之後，成長速率便大致相同。故隨著水滴擴散成長，初期大小不同的水滴，半徑會變得越來越接近，則粒徑差會越來越小，也表示水滴粒徑頻譜分析會隨著時間變窄。

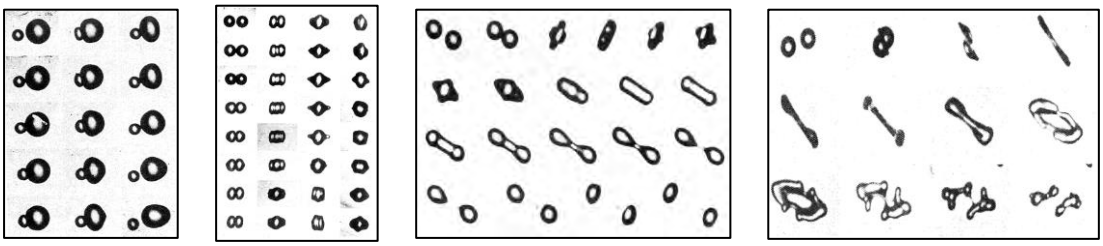
Mason(1971)的實驗結果呈現，初始半徑為 0.75μm 的極小水滴經由擴散作用凝結成長成 50μm 的小水滴，需要經過 11.5 至 12.3 小時，大約半天的時間。實際上，大氣中有大量的大水滴存在著，而擴散作用凝結成長的時間太漫長，因此還有其他的機制發生在小水滴的成長過程中。

(三)水滴碰撞與合併成長

雲滴透過凝結成長為雨滴的過程很緩慢，不會是造成降雨的直接因素。雲滴有大有小，較大雲滴多是大的凝結核所形成，或雲滴的隨機碰撞。大小雲滴碰撞黏附起來而成為較大雲滴。雲塊在上升氣流時，小雲滴也會追上大雲滴而合併為更大的雲滴。

暖性層雲一般厚度少於 500 公尺且上升氣流弱，大雲滴沒有足夠時間增長，形成的雨滴約在 200 μm 以下，如雲下空氣很潮濕，可形成毛毛雨，如雲底太高，雨滴蒸發，雨滴不易到達地面而無降水。

在大氣中，小的小水滴小到難有機會互相碰撞，不過當半徑成長達到約 20 μm 以上時，碰撞合併過程逐漸主導小水滴的成長，且越大的水滴成長的速率越快。在雲裡，重力作用為水滴碰撞合併的主導因素，因為越大的小水滴向下的速度比較快，在落下的路徑中會碰撞較小的小水滴。不過，碰撞並不代表合併一定會發生，兩個碰撞的水滴可能發生下列幾種情形：(1)碰撞後彈開，圖四(a)；(2)碰撞後合併，圖四(b)；(3)碰撞後短暫合併，又破裂成兩個水滴，圖四(c)；(4)碰撞後短暫合併，又分裂成數個小水滴，圖四(d)。發生何種碰撞情形，是根據小水滴的大小與碰撞軌跡來決定。大致上而言，當小水滴的半徑小於 100 μm 時，以(1)(2)種碰撞情形為主。



圖四 (a) (b) (c) (d)

科學家 East(1957)進行了一個水滴實驗，他觀察小水滴在每秒數公尺的上升氣流環境場中，凝結與合併的情形，結果發現，在短暫的時間內，小水滴便能發展成雨滴等級的大小。East 認為擴成凝結成長過程促使小水滴的粒徑頻譜變窄，而加速了合併的過程， 因為小的水滴半徑成長速率比大的水滴快。另外，科學家 Ryan(1974)則使用模式將相關的雲物理發展公式進行運算，驗證了 East 的實驗結果。

科學家 Berry 和 Reinhardt 在 1974 年時，利用積分方程式探討雲滴在隨機合併(stochastic coalescence)過程中，雲滴成長的變化。他們以 N 表示為雲滴濃度(drop concentration)，以 L 表示為液態水含量(liquid water content)

$$N = \int f(x)dx \text{；} \quad L = \int g(x)dx$$

其中f(x)dx為單位體積中雲滴數量，x為雲滴質量

又定義 質量密度函數(mass density function) $g(x) = xf(x)$

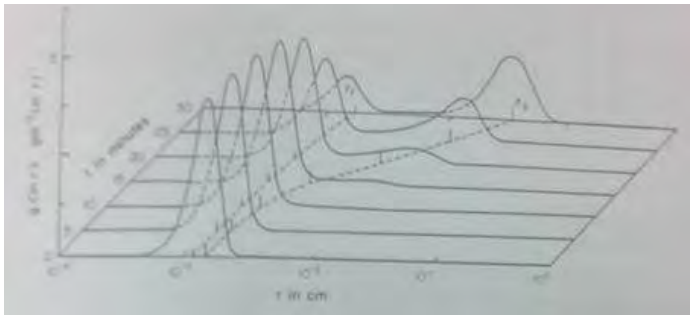
則平均雲滴質量方程式可表示為$x_f = \frac{\int xf(x)dx}{\int f(x)} = \frac{L}{N}$，其中雲滴的平均半徑為

$$r_f = (\frac{3}{4}\pi\rho_L)^{\frac{1}{3}} x_f^{\frac{1}{3}}$$

又質量密度函數的平均質量方程式表示為$x_g = \frac{\int xg(x)dx}{\int g(x)}$，其中對應之平均半徑為

$$r_g = (\frac{3}{4}\pi\rho_L)^{\frac{1}{3}} x_g^{\frac{1}{3}}$$

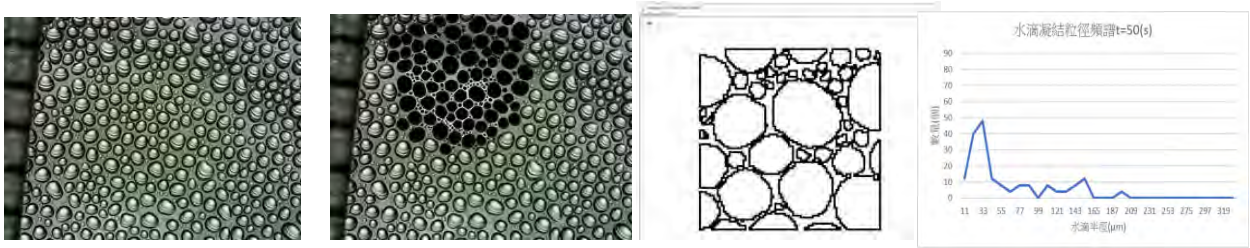
經由模式演算，設定f(x)為$r_f = 12\mu m$ 的伽瑪函數分布(gamma distribution)，且 L = 1 g/m^{3}以及 N = 166 個/cm^3，所得結果如圖五，經過 30 分鐘後，原本呈現伽瑪分布曲線，最終呈現 M 型化分布曲線。



圖五　Berry 和 Reinhardt(1974)探討雲滴在隨機合併結果

二、研究分析方法

研究方法流程為圖六(a) ~ (d)，我們利用顯微照相機所拍攝到的照片，在小畫家開啟後，自行選定我們需要之範圍內的水滴，並用手工繪製把範圍內每個小水滴都塗黑，接著再使用 ImageJ 進行有畫上黑色之特定區域的分析，進一步測量出選定範圍內水滴之數量及計算水滴半徑並作圖。



(a)　(b)　(c)　(d)

圖六　研究流程方法

伍、 研究結果

【實驗一】不同材質凝結板之探討

（一）、實驗步驟：

1.在自製實驗裝置上擺放一 250ml 燒杯。

2.將玻璃板(甲)蓋在 250ml 裝著 70℃熱水的燒杯上，讓小水滴凝結其上。

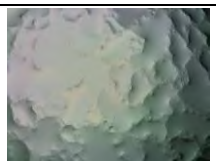
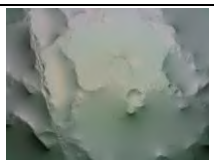
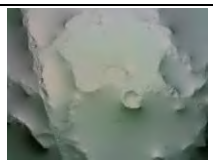
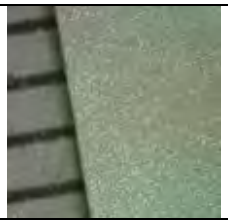
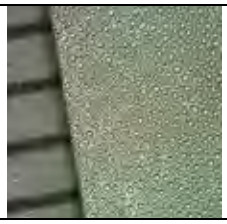
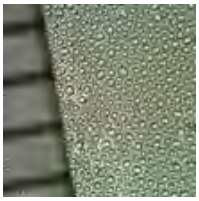
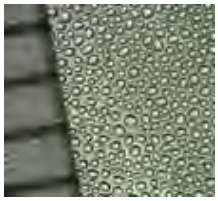
3.用 LED 燈在自行架設的裝置下方空位由下往上照射燒杯底部。

4.使實驗室環境黑暗，用顯微照相機間隔 3 秒拍攝 25 張水滴凝結之狀況。

5.改用透明壓克力板(乙)蓋在 250ml 裝著 70℃熱水的燒杯上。

6.重複 3. 4.之動作。

（二）、實驗結果與記錄：

	15 秒	30 秒	45 秒	60 秒
甲(玻璃板)				
乙(壓克力板)				

表一

（三）、討論：

如表一，使用玻璃板(甲)加蓋之效果並不佳，因為水滴與水滴之間界線並不明顯，且水滴增長幅度也不明顯，讓我們無法輕易分辨每一顆水滴之大小及其完整外觀形狀，難以做後續之各項分析。

相較之下我們發現，使用壓克力板提供讓水滴附著，水滴範圍及外圍形狀相對清楚許多，水滴成長幅度也顯而易見，這能夠方便我們得知水滴的數量，也讓我

們能夠輕易進行分析。

由以上結論，我們決定後續實驗皆以壓克力板作為加蓋板，以利我們清楚掌握每顆水滴的邊界，也讓我們容易做出粒徑分析等研究。

【實驗二】不同水溫情況下，水滴凝結之探討

我們進行四組不同水溫之水滴凝結現象實驗，實驗步驟如下：

組別	A 組	B 組	C 組	D 組
水溫	50℃	60℃	70℃	80℃

1.使用自行架設的實驗裝置搭載顯微照相機並固定。

2.使其鏡頭緊貼在壓克力板上，調整焦距使其對焦清楚。

3.將實驗室燈光關掉，保持黑暗，並在燒杯正下方打開 LED 燈。

4.在燒杯中裝了不同溫度的溫水燒杯上加蓋壓克力板。

5.再度對焦於水滴上，隨後立即拍攝第一張照片。

6.固定時間間隔拍攝一張水滴凝結的狀況，持續拍攝至水滴大小無明顯變化。

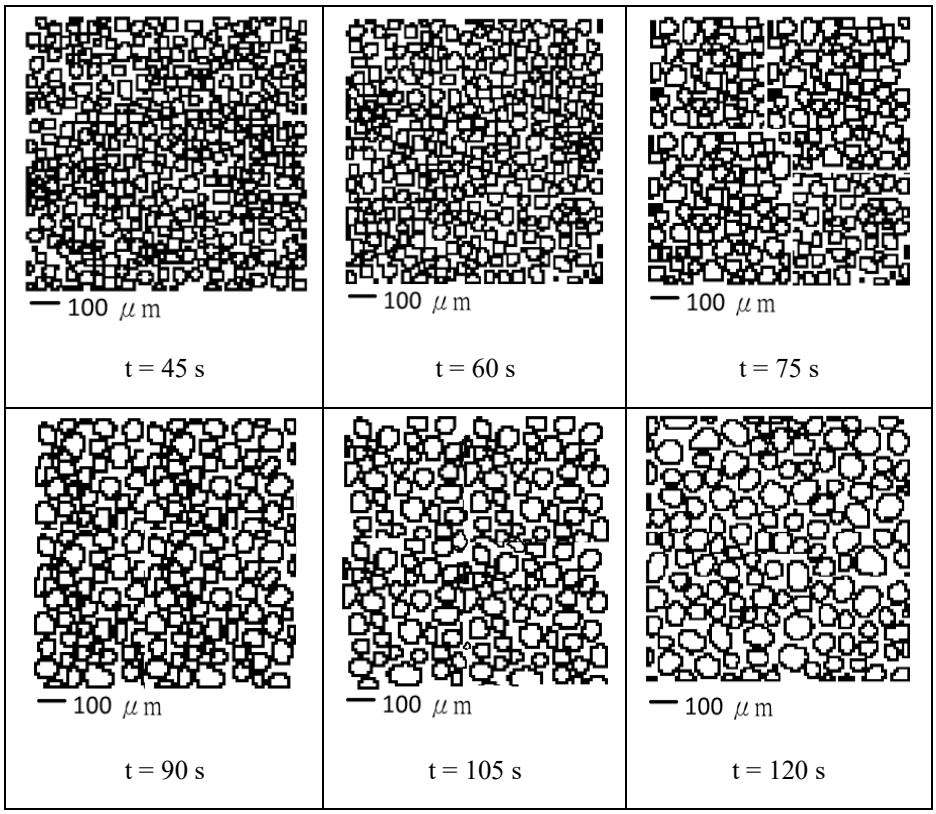
(一) A 組(50℃)實驗結果與記錄：

我們使用 ImageJ 軟體分析，可以得到水滴的數量及附著在壓克力板上的截面積大小，A ~ D 組皆訂定分析面積大小為 4 mm^2。我們假設凝結水滴接近似圓形，以截面積大小換算得到水滴的半徑，分析水滴粒徑分布的變化，另外，ImageJ 軟體也能提供水滴輪廓的圖形，讓我們清楚的看見水滴成長的情形。圖七為 50℃水溫之凝結水滴輪廓成長變化，記錄時間從 45 秒至 120 秒，時間間隔為 15 秒。

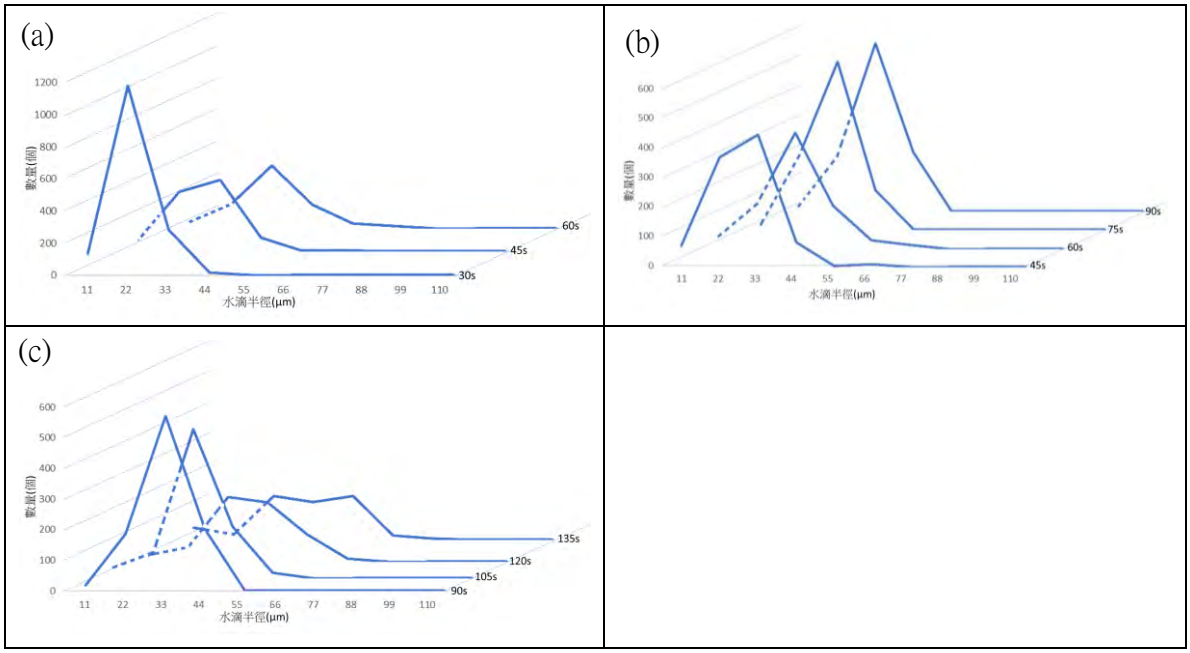
第 30 秒時，分析 4 mm^2 的面積中，計算得到的水滴總數量有 1746 個，凝結水滴半徑在 0 ~ 33 μm 之間，其中數量最多的水滴半徑在 11 μm~22 μm 範圍之間，計有 1278 個，最大水滴半徑不超過 33 μm，約有 300 個。從圖八(a)的凝結粒徑頻譜分布可知，曲線波峰對應的數量值隨時間下降，波峰對應之水滴半徑值隨時間增大，表示在凝結

時間 30 秒~ 60 秒之中，呈現水滴數量減少、水滴半徑增大的變化趨勢。

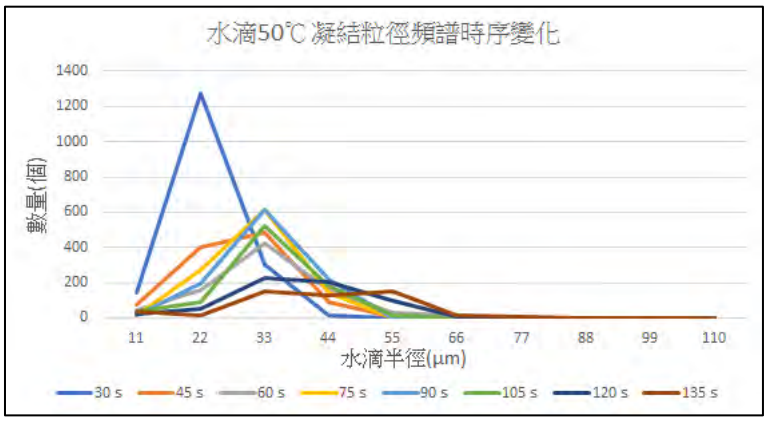
圖八(b)為 45 秒~90 秒的凝結粒徑頻譜變化，第 45 秒時，計算得到的水滴總數量有 1062 個，數量最多的水滴半徑分別在 11 μm~22 μm 之間有 401 個，22 μm~33 μm 之間有 481 個，為水滴半徑波峰區。從 60 秒~90 秒的凝結時間中，水滴半徑 22 μm~33 μm 的數量從約 450 個增加到約 600 個。從 90 秒~135 秒的凝結時間中，波峰對應的水滴數量隨時間發展為 612 個(90 秒)→522 個(105 秒)→225 個(120 秒)→153 個(135 秒)，雖然波峰區的數量逐漸下降，不過波峰區的範圍增寬。經觀察發現，這段時間中，有許多水滴合併成長，較大半徑的水滴數量增加，所以使得波峰區的範圍增寬。



圖七 水溫 50℃之凝結水滴輪廓時序圖



圖八　水溫 50℃之凝結粒徑頻譜



圖九　水溫 50℃凝結粒徑頻譜時序變化

討論：

1. 由以上結果我們發現，凝結初期水滴附著速率並不會太快，需經過約 1 分鐘才能由顯微照相機稍微清楚看出小水滴顆粒的成形，且水滴增長速度十分緩慢。
2. 幾乎沒有特別大顆之水滴，每顆水滴形狀大小皆十分相近，水滴與水滴之間也很少發現新凝結的小水滴。
3. 當我們連續拍攝至第 10 分鐘時，水滴大小已經幾乎沒有太大之改變，而且每顆水滴粒粒分明，形狀與大小也都非常相似，不過水滴的半徑卻是很小的，僅有 55 μm~66 μm 而已。

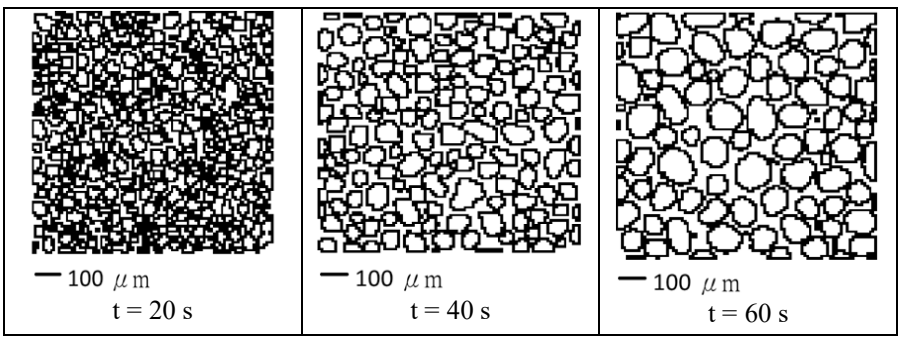
4. 隨著凝結時間增加，由圖九凝結粒徑頻譜時序變化可知，波峰區頻譜會增寬，數量會下降，這是水滴合併成長的現象。

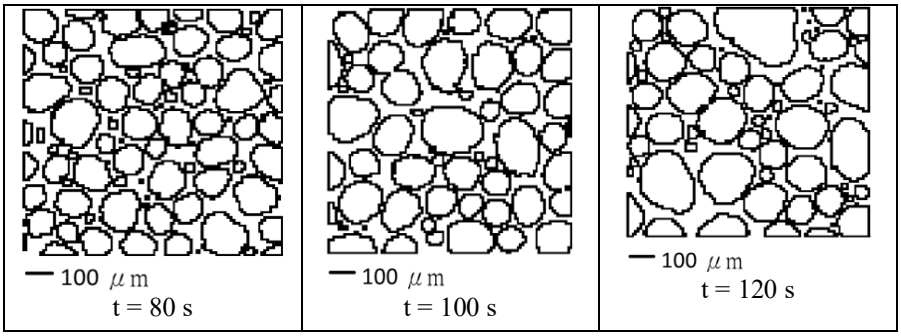
(二) B 組(60℃)實驗結果與記錄：

圖十為 60℃水溫之凝結水滴輪廓成長變化，記錄時間從 20 秒至 120 秒，時間間隔為 20 秒。第 20 秒時，分析 4 mm^2 的面積中，計算得到的水滴總數量有 808 個，凝結水滴半徑在 0 ~ 55 μm 之間，其中數量最多的水滴半徑在 22 μm~33 μm 範圍之間，計有 380 個，最大水滴半徑不超過 66 μm，約有 10 個。從圖十一(a)的凝結粒徑頻譜分布可知，20 秒~50 秒的曲線波峰對應的數量值隨時間下降，波峰對應之水滴半徑值隨時間增大，且波峰區頻譜增寬，表示有水滴合併成長的現象。

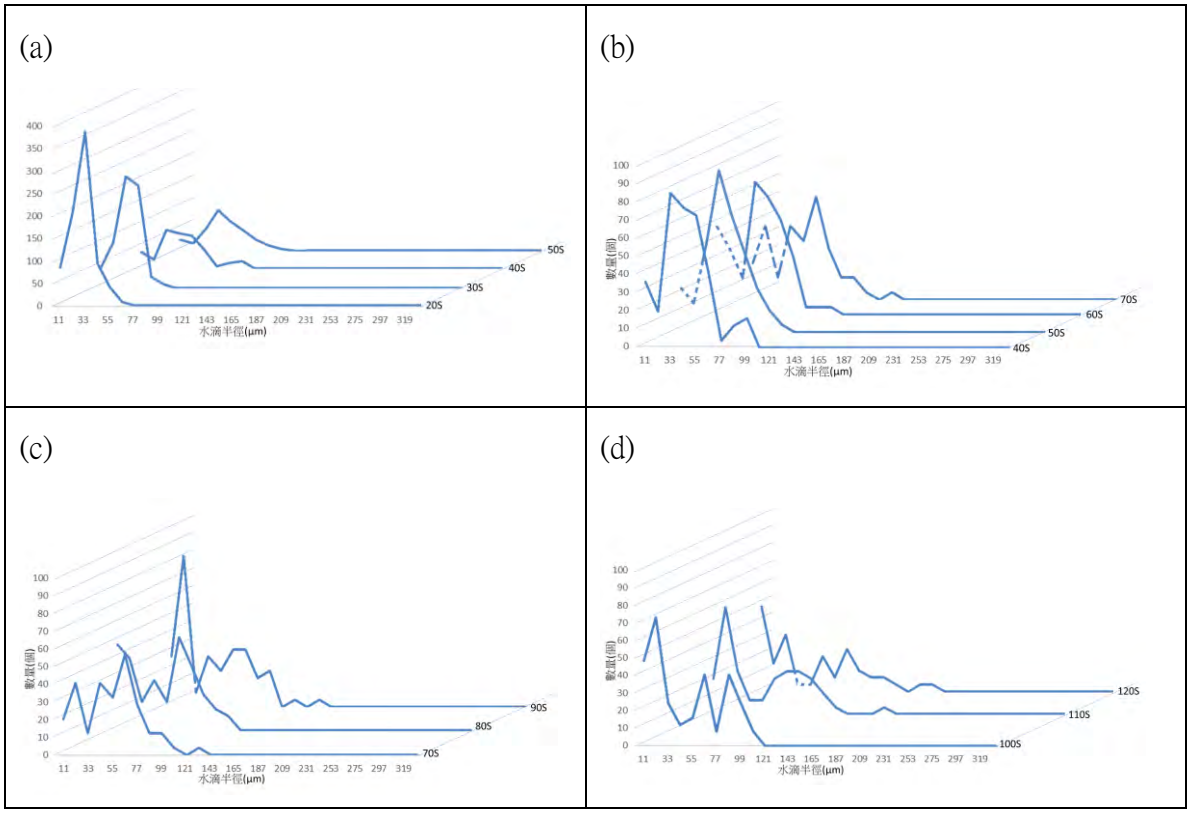
圖十一(b)為 40 秒~70 秒的凝結粒徑頻譜變化，第 40 秒時，計算得到的水滴總數量有 360 個，數量最多的水滴半徑分別在 22 μm~33 μm 之間有 84 個，33 μm~44 μm 之間有 76 個，我們稱它為水滴半徑「主波峰」區，有趣的是，這個時間上，水滴半徑 0~11 μm 的數量竟比 11 μm~22 μm 的數量還多，這在 A 組實驗中沒有見過的現象。

從 40 秒~90 秒的凝結時間中，原來位置 22 μm~44 μm 範圍的主波峰頻譜寬度逐漸增寬，而數量下降；第 80 秒時，水滴半徑 11 μm~22 μm 的數量已成長到與主波峰相當，我們稱它為「次波峰」區，這時可見凝結粒徑頻譜出現兩個波峰的發展現象，我們將此現象稱為凝結粒徑頻譜 M 型化。第 90 秒之後，次波峰的高度已經超過主波峰了。從 90 秒~120 秒的凝結時間中，經由水滴合併成長過程，最大水滴半徑已達到 165 μm。

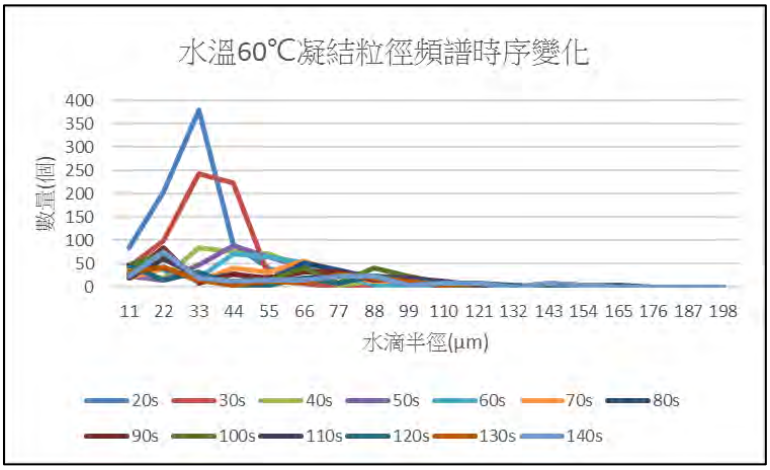




圖十　水溫 60℃之凝結水滴輪廓時序圖



圖十一　水溫 60℃之凝結粒徑頻譜



圖十二　水溫 60℃凝結粒徑頻譜時序變化

討論：

1. 我們從實驗觀察得知，使用 60℃熱水之水滴凝結速率明顯比 50℃快了許多，在大約 30 秒時水滴完整形狀已大致成形。
2. 對照圖十二，到 40 秒，這時水滴凝結的大小逐漸沒有同一規格，較大顆及很小顆的水滴紛紛出現，大顆的水滴旁也出現許多剛形成之小顆的水滴。
3. 在 60℃時我們發現到 50℃所沒有之情形，大顆的水滴會跟鄰近之較小水滴合併為更大顆的水滴，使得大顆水滴的面積越來越大。
4. 待水滴大小無明顯增長時，其半徑相對於 A 組實驗結果所凝結成之水滴半徑大上許多。

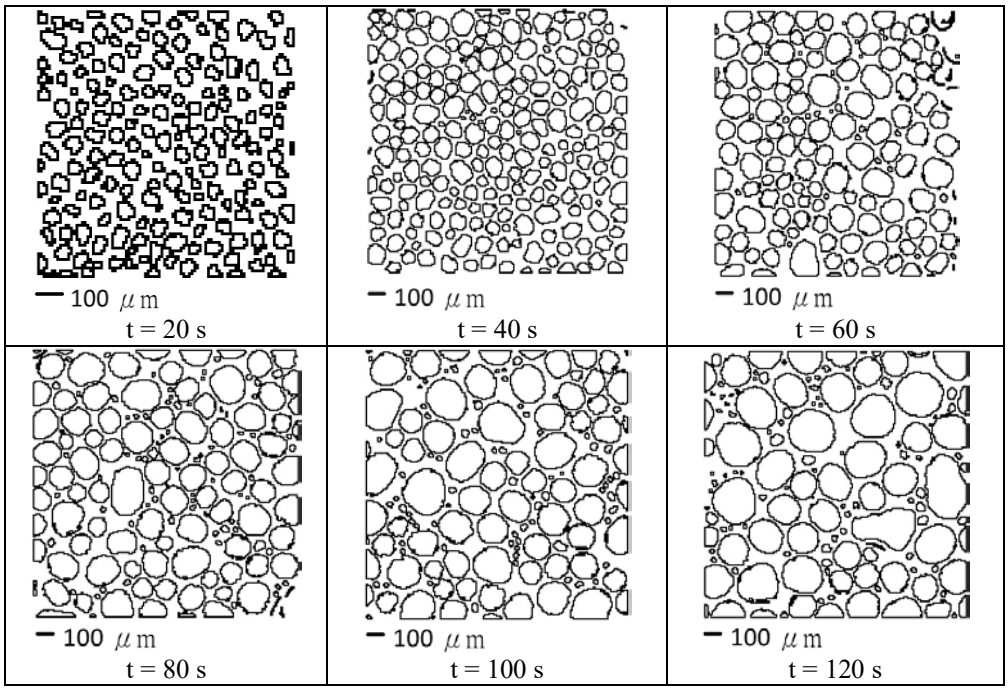
(三) C 組(70℃)實驗結果與記錄：

圖十三為 70℃水溫之凝結水滴輪廓成長變化，記錄時間從 20 秒至 120 秒，時間間隔為 20 秒。

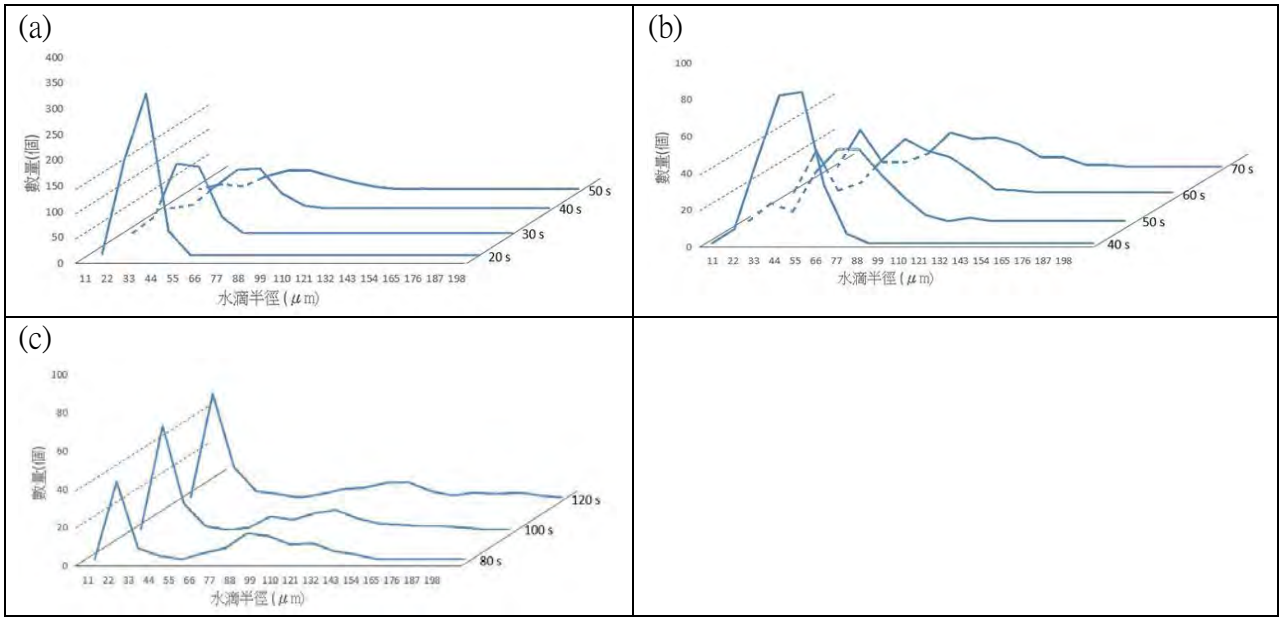
第 20 秒時，分析 4 mm^2的面積中，計算得到的水滴總數量有 652 個，凝結水滴半徑在 0 ~ 44 μm 之間，其中數量最多的水滴半徑在 22 μm~33 μm 範圍之間，計有 376 個。最大水滴半徑不超過 44 μm，約有 60 個。從圖十四(a)的凝結粒徑頻譜分布可知，曲線波峰的數量值隨時間下降，波峰對應之水滴半徑值隨時間增大，表示在凝結時間 20 秒~ 40 秒之中，呈現水滴數量減少、水滴半徑增大的變化趨勢，顯示有水滴合併成長的現象。

圖十四(b)為 40 秒~70 秒的凝結粒徑頻譜變化，第 40 秒時，計算得到的水滴總數量有 288 個，數量最多的水滴半徑分別在 22 μm~33 μm 之間有 92 個，33 μm~44 μm 之間有 94 個，為水滴半徑波峰區。從 50 秒~70 秒的凝結時間中，出現了兩個波峰的發展現象，有凝結粒徑頻譜 M 型化的特徵，主波峰對應的水滴半徑隨時間發展為 55 μm(50 秒)→66 μm(60 秒)→66 μm(70 秒)，雖然第 70 秒時，主波峰對應的水滴半徑

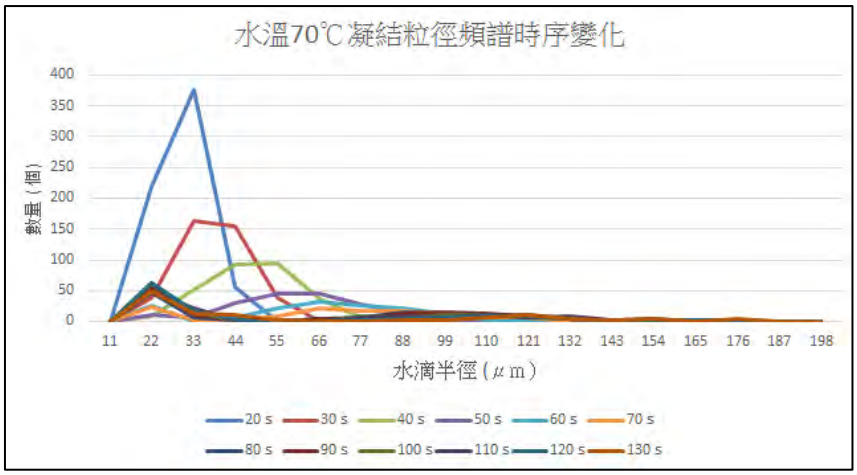
看似沒有增加，不過波峰區的範圍增寬，表示半徑大於 66 μm 的數量有增加。次波峰對應的水滴半徑維持在約 22 μm 左右，但水滴數量隨時間發展為 11 個(50 秒)→26 個(60 秒)→23 個(70 秒)→47 個(80 秒)→63 個(100 秒)，呈現數量增加的趨勢，表示小水滴的形成的量很多。



圖十三　水溫 70℃之凝結水滴輪廓時序圖



圖十四　水溫 70℃之凝結粒徑頻譜



圖十五　水溫 70℃凝結粒徑頻譜時序變化

討論：

1. 因前 20 秒水滴過於細小使得顯微照相機無法清楚拍攝，故我們從能夠準確判讀水滴範圍的第 20 秒開始進行分析。
2. 以上圖片顯示，70℃熱水所凝結之小水滴在大約 20 秒附近已經具有足夠大小以及完整外型可供我們分析。
3. 水滴在凝結時間 20 秒~40 秒間增長非常快，但每顆大小卻是差不多大的。
4. 第 50 秒之後慢慢出現合併現象，水滴大小開始出現差異化，凝結粒徑頻譜有 M 型化的特徵，大顆水滴數量漸漸變多，且在大水滴夾縫中也能看到剛形成之小水滴。
5. 待最後水滴不再合併增長時，其整體大小都比 A 組與 B 組的實驗結果要大上許多，最大水滴半徑達到 198 μm。

(四) D 組(80℃)實驗結果與記錄：

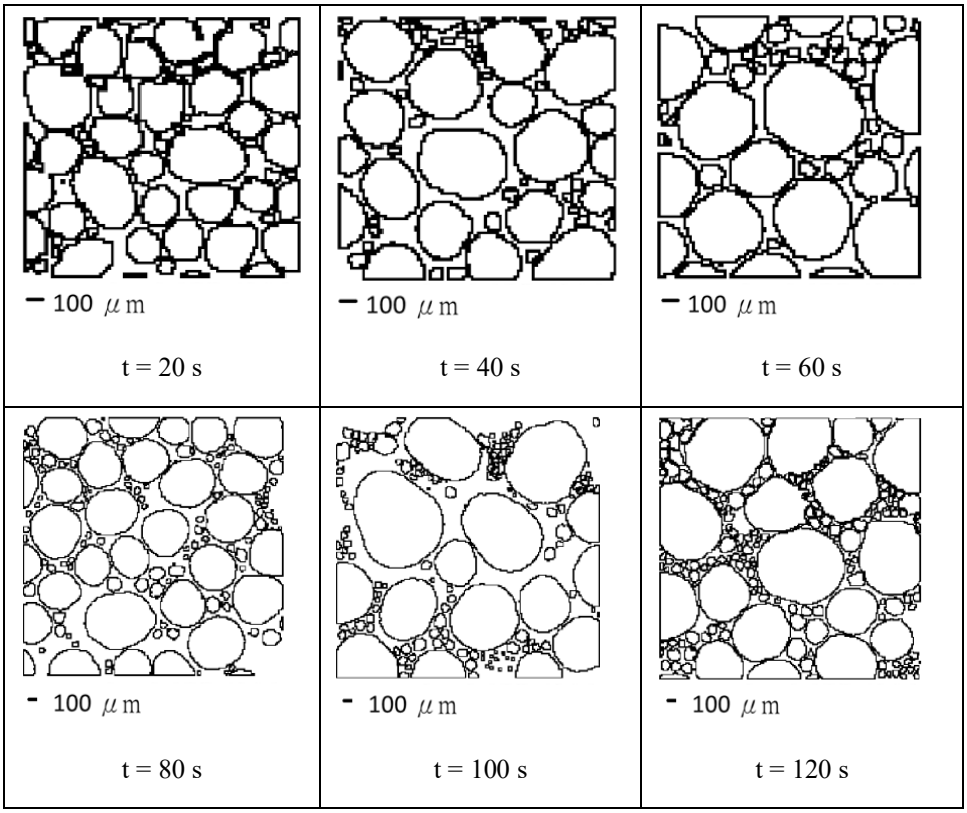
圖十六為 80℃水溫之凝結水滴輪廓成長變化，記錄時間從 20 秒至 120 秒，時間間隔為 20 秒。

第 20 秒時，分析 4 mm^2 的面積中，計算得到的水滴總數量有 216 個，凝結水滴最大半徑已發展到 143 μm，凝結粒徑頻譜已經具有 M 型化的特徵，主波峰對應的水滴半徑在 66 μm~77 μm 之間，計有 24 個；次波峰對應的水滴半徑在 11 μm~22 μm 之間，計有

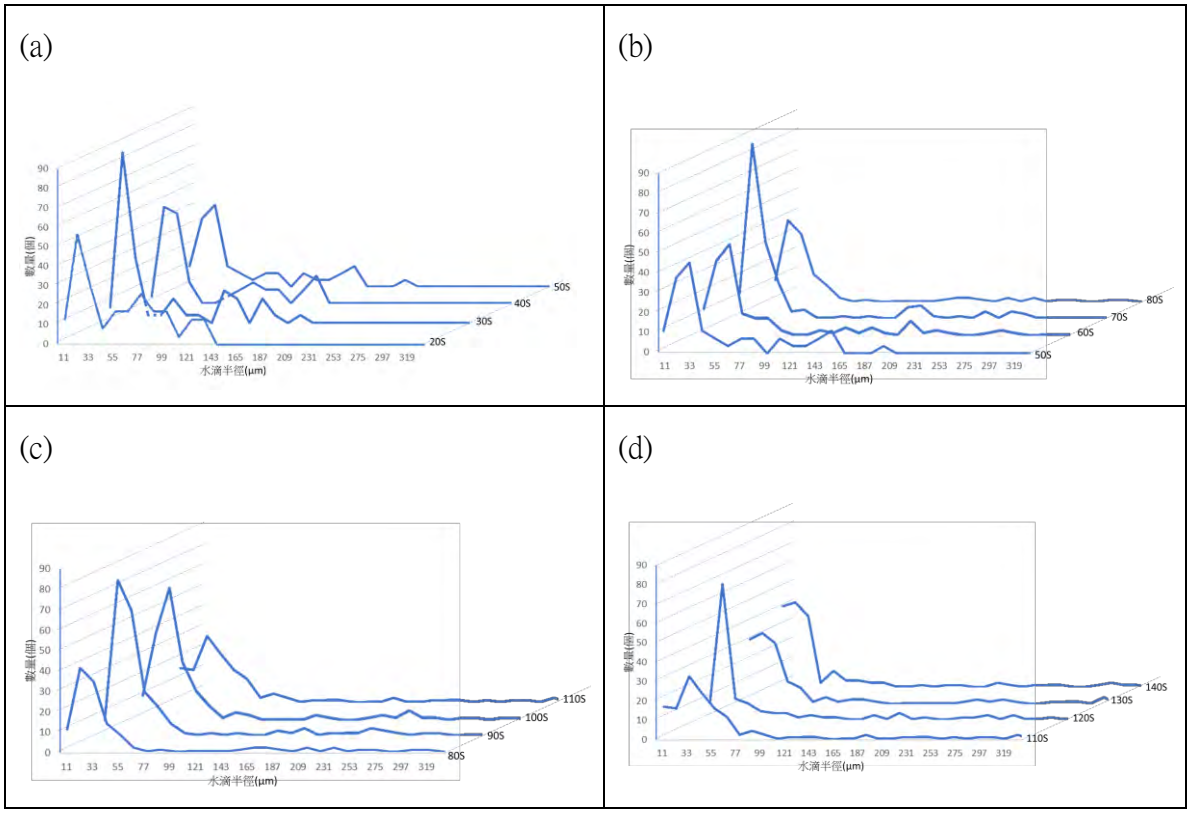
52 個，數量上已經超過主波峰。

從 20 秒~140 秒的觀察記錄其間，凝結粒徑頻譜重複地出現 M 型化發展的過程，共計有 5 次的循環。每一次的 M 型化循環，都呈現主波峰對應的水滴半徑隨時間增大，而數量下降，波峰區頻譜增寬，代表水滴進行合併成長，接著次波峰會出現在半徑 11 μm~22 μm 的位置，水滴數量會快速地增加。以第 70 秒時為例，半徑 11 μm~22 μm 的水滴數量增加到 83 個，這些水滴也會彼此發生合併成長，到第 80 秒時，半徑 11 μm~22 μm 的水滴數量減少為 46 個，而半徑 44 μm~55 μm 的水滴數量由 3 個增加至 9 個，成長 3 倍。到了第 90 秒時，半徑 11 μm~22 μm 的水滴數量又再次增加了，準備開始下一階段的粒徑頻譜 M 型化過程。

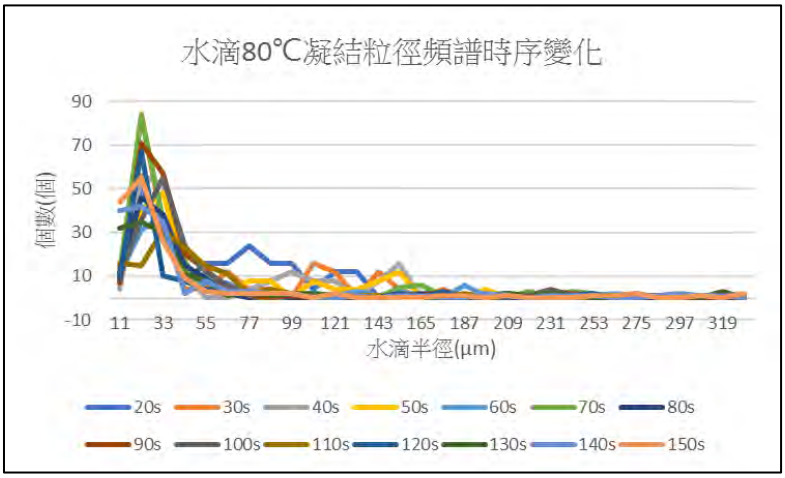
除此之外，已經成長的大水滴也仍然會合併周圍的中、小型水滴，不過半徑增加的速度變緩，在 D 組實驗中記錄到最大的水滴半徑為 330 μm。



圖十六　水溫 80℃之凝結水滴輪廓時序圖



圖十七　水溫 80℃之凝結粒徑頻譜



圖十八　水溫 80℃凝結粒徑頻譜時序變化

討論：

1. 本組實驗中，水滴凝結速度極快，當壓克力板一放上去時水蒸汽便已開始旺盛的凝結，在很短的時間內就能夠清楚看出水滴外圍形狀。
2. 初始水滴大小幾乎都相同，但是很快就進入了合併增長階段，水滴增長的幅度也比 A、B、C 組的實驗結果還要大。

3. 到了不再持續合併增長時，大顆水滴的直徑可以達到 1000 μm，相當於典型雨滴的大小。

4. 水溫溫度越高，所形成之水滴大小越大，形成速率越快。

【實驗三】探討凝結核於壓克力板上對水滴凝結的影響

我們進行三組不同表面性質之水滴凝結現象實驗，實驗步驟如下：

組別	E 組	F 組	G 組
物質	碳粉	整面 $C_{18}H_{29}NaO_3S$	半面 $C_{18}H_{29}NaO_3S$

（一）E 組(碳粉)實驗步驟

1.在自行設置之實驗裝置上擺放 250ml 燒杯，在內裝入 70℃之熱水。

2.在壓克力板上之欲讓水滴凝結面均勻撒上磨碎的碳粉。

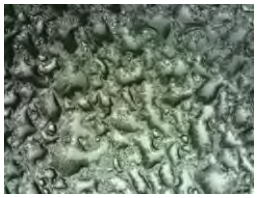
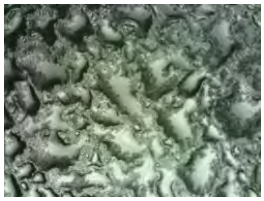
3.將壓克力板倒反過來加蓋在燒杯上，並使顯微照相機快速的對焦。

4.將實驗室保持黑暗，並開啟 LED 燈。

5.隨即拍攝第一張照片，往後間隔 3 秒拍攝一張水滴凝結照片。

6.持續拍攝至水滴型態無太大變化。

實驗結果與紀錄：

	15 秒	30 秒	45 秒	60 秒
灑碳粉				

圖十九　壓克力板附著碳粉之凝結水滴情形

討論：

1. 由圖十九發現，水滴凝結形狀非常不規則，且邊界不明顯。
2. 在相同時間內，水滴凝結速率和【實驗二】C 組比較起來明顯較快。
3. 另外，碳粉會聚集在水滴周圍，推測水滴形狀不規則的原因是碳粉破壞水的表面張力，導致小水滴無法內聚成完整的大水滴。
4. 加入碳粉確實能幫助水滴更快增長合併，但形狀卻支離破碎，故我們推測高空中之凝結核尺度可能比碳粉顆粒要小的許多。

（二）F 組(在壓克力板上整面塗抹 $C_{18}H_{29}NaO_3S$)實驗步驟

1.將十二烷基苯磺酸鈉溶於水中使其不產生泡沫。

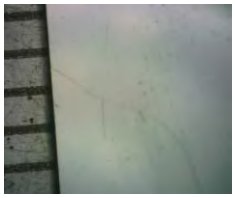
2.塗抹少量十二烷基苯磺酸鈉水溶液於整面壓克力板上之欲使水滴凝結面。

3.待水溶液蒸乾便加蓋於裝入 70℃熱水之燒杯上。

4.將顯微照相機迅速對焦於壓克力板上便開始拍攝第一張照片。

5.間隔 3 秒拍攝一張照片並持續拍攝。

實驗結果與紀錄：

	15 秒	30 秒	45 秒	60 秒
$C_{18}H_{29}NaO_3S$ 整面				

圖二十　壓克力板整面塗抹 $C_{18}H_{29}NaO_3S$ 之凝結水滴情形

討論：

1. 實驗結果發現，用十二烷基苯磺酸鈉塗抹過之壓克力板上，幾乎完全沒有可用肉眼觀察或使用顯微照相機可以分辨的水滴凝結。
2. 我們推測應是十二烷基苯磺酸鈉將原本附著於壓克力板上之凝結核微粒清洗掉了，使得水氣極難附著於其上。

（三）G 組(在壓克力板上半面塗抹 $C_{18}H_{29}NaO_3S$)實驗步驟

1.將十二烷基苯磺酸鈉溶於水中使其不產生泡沫。

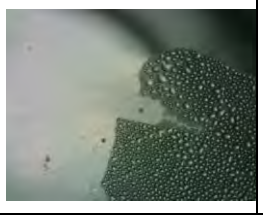
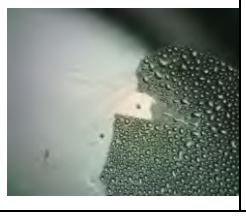
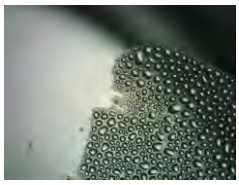
2.塗抹少量十二烷基苯磺酸鈉水溶液於半面壓克力板上之欲使水滴凝結面。

3.待水溶液蒸乾便加蓋於裝入 70℃熱水之燒杯上。

4.將顯微照相機之鏡頭視野一半放置於蒸乾位置，另一半放置於未做任何處理的壓克力板。

5. 對焦於壓克力板上的水滴，間隔 3 秒拍攝一張照片並持續拍攝。

實驗結果與紀錄：

	15 秒	30 秒	45 秒	60 秒
$C_{18}H_{29}NaO_3S$ 半面				

圖二十一　壓克力板半面塗抹 $C_{18}H_{29}NaO_3S$ 之凝結水滴情形

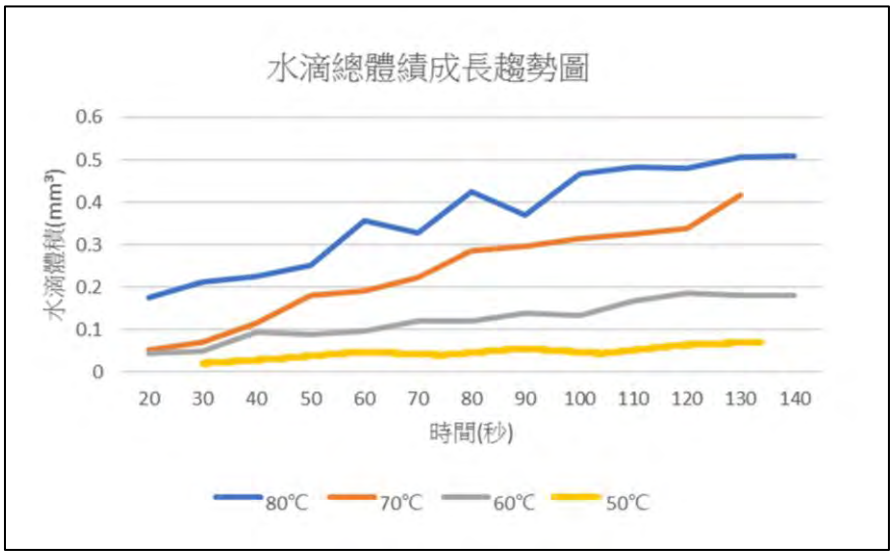
討論：

1. 由照片非常明顯可以看到水滴凝結之界線，塗抹過十二烷基苯磺酸鈉溶液的半邊幾無水滴凝結。
2. 用衛生紙擦拭乾淨之半邊水滴產生如【實驗二】C 組之凝結狀況。
3. 經實驗結果可更加證實塗抹過十二烷基苯磺酸鈉之後極難讓水滴產生凝結之現象。

陸、 討論

針對暖雲(溫度> 0℃)雲滴形成機制與本實驗的實驗結果進行探討。我們知道，雲的形成需要空氣塊達到飽和，若空氣塊中有凝結核，將更有助於水氣的附著，形成微小的雲滴。

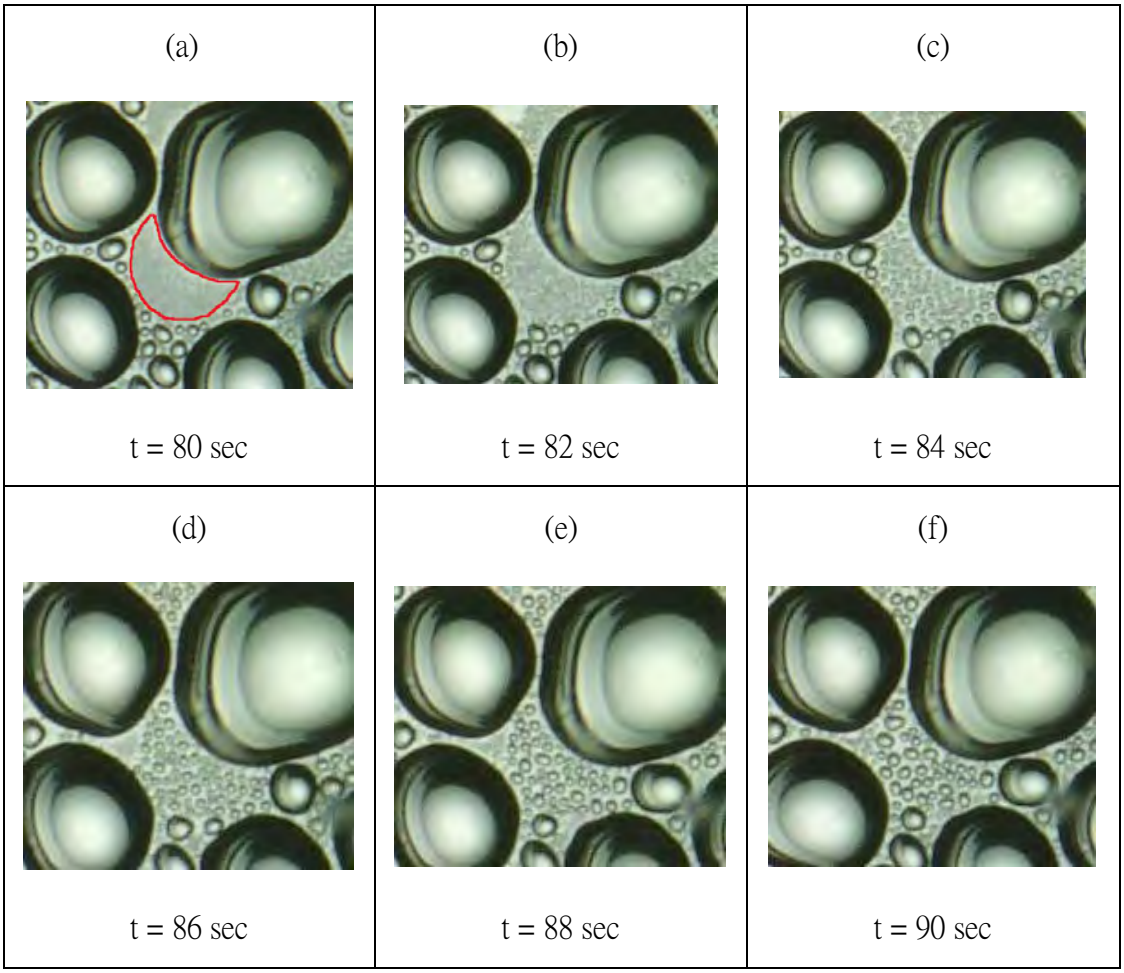
1. 對於凝結核大小，經由【實驗三】E 組的結果得到，撒上碳粉的壓克力板並沒有產生如預期般地完整的水滴，而是產生形狀不規則、邊界不清楚的水滴，而且當水滴夠大時，碳粉還會在水滴中出現流動的情形。相較於【實驗二】C 組，由衛生紙擦拭過的壓克力板上所凝結的水滴形狀完整，因此推測雲滴的凝結核尺度應和空氣中的懸浮微粒相近，看似細小的碳粉粉末，則比空氣中的凝結核大非常多。
2. 由【實驗三】F 組的結果，經塗抹過十二烷基苯磺酸鈉溶液的壓克力表面上的可作為凝結核的微粒被洗掉，即使有大量的水氣，仍無法形成雲滴。再對照【實驗三】G 組的結果，顯示雲滴的凝結的必要條件就是要有凝結核，並且凝結核的尺度是非常小的，即使使用顯微照相機也無法分辨。
3. 由【實驗二】A、B、C、D 四組的結果得知，水滴半徑均隨時間增加而增大，表示凝結水滴的體積也不斷在成長。我們計算 4 mm^2 的面積中水滴的總體積隨時間的變化，如圖二十二。各組水滴的總體積均隨時間而增加，且水溫越高，總體積增加速率越大，表示水溫溫度越高，水氣蒸發越旺盛，在同一時間內，水滴的凝結量相對較多，所以凝結水滴的總體積越大。



圖二十二　【實驗二】A~D 組水滴總體積隨時間變化圖

4. 比較【實驗二】A、B、C、D 四組的結果發現，水溫溫度越高，越有助於凝結水滴的增長。由上述，我們知道水溫溫度越高，水氣蒸發越旺盛，要有雲滴凝結首先一定要有足夠的水氣量，使凝結環境維持在高水氣壓的情況下，是有助於最初經由擴散作用使水氣分子結合至凝結核上而成長。

5. 在【實驗二】B、C、D 三組中都發生粒徑頻譜 M 型化的特徵，我們針對此現象進行更高時間解析度的分析。圖二十二取【實驗二】C 組(70℃)，第 80 秒起局部區域的微小水滴成長變化，時間間隔為 2 秒。圖二十二(a)紅色月形區域內為兩個大水滴合併後所留下的空隙，在圖二十二(b)立即可以看到極微小的水滴密集形成，但粒徑太小，難以分析，接著從圖二十二(c)至(f)，這些極微小的水滴迅速的成長，至第 90 秒時，已能明顯的分辨每個水滴大小。提高時間解析的結果，清楚地說明了為什麼凝結粒徑頻譜隨著時間先變寬之後，會朝著 M 型化發展，因為大水滴合併之後，水滴內聚的作用，所留下的空間，有利於微小水滴的形成，且數量非常多，而微小水滴的粒徑成長，透過合併過程，比大水滴快速。



圖二十三　【實驗二】C 組(70℃)80 秒至 90 秒局部區域之凝結水滴

柒、 結論與未來展望

一、結論

經過多次的實驗我們成功在高中實驗室允許的範圍下，模擬出類暖雲雲滴凝結的變化，並得出以下結論：

1. 由【實驗二】我們得知溫度高低是影響水滴凝結速率的一個重大變因，水溫溫度升高會伴隨著凝結速率顯卓的提升，且水滴大小也隨著溫度的升高而增加。
2. 由【實驗三】知，凝結核也是影響雲滴凝結的重要因素，在沒有凝結核的情況下，就算水氣再怎麼充足，也是難以凝結成水滴，這也呼應了文獻(一)中所提到：在純水氣的情況下，需要極大的相對濕度才能發生凝結。

3. 由【實驗三】發現，雲滴的凝結核並不是如我們預期的是肉眼可視的碳粉大小，而是平時就附著在各處的微小懸浮微粒及空氣中塵埃的尺度。
4. 凝結於壓克力板上水滴之總體積隨著時間的增加體積也跟著逐漸上升，另外熱水溫度越高，水氣蒸發量越多，所凝結之總體積也著越大。
5. 水滴在成長時會逐漸形成 M 型化的曲線，即一開始小顆水滴凝結速率極快、數量極多，但隨著增長漸漸出現合併的現象，於是水滴越來越大顆，但因為表面張力之關係，水滴合併後粒徑反而會略為縮減，縮減過後空出之空間恰好提供剛形成的小水滴成長之位置。故隨著時間經過，大顆之水滴因為合併作用及蒸發上來的水氣使體積持續變大數量也跟著變多，小水滴也持續的在空位處凝結形成，最後造成小水滴與大水滴同時變多的現象，即 M 型化。

二、未來展望

1. 首先，我們成功的把發生在高空中暖雲雲滴的成長過程，在實驗桌上實現了！且實驗結果與科學家經由積分方程式的數學模式演算的結果十分相似，真的讓我們感到非常振奮。不過，有一點我們覺得可惜的是，最初一段的時間所形成的水滴實在太微小了，若能夠取得解析度更高的顯微照相機，就能改善我們所做實驗中最前面有一段時間無法清楚拍攝出很細微之水滴，這樣才能進一步了\解最初細微水滴凝結的行為。
2. 目前我們只能做到在二維的平面上表現出類似暖雲雲低成長的過程，本實驗無法展現雲滴在垂直方向運動發展的情形，若能夠將二維的壓克力板上之水滴凝結拓展成三度空間，且能展示出垂直方向的運動，則更能趨近於真實世界高空中之雲滴凝結情形。

3. 改善分析數據之方法，期待能得到更精準的數量結果。本實驗使用小畫家透過手工繪製將水滴塗黑之後才能利用 ImageJ 分析，資料分析過程相當耗時，所以我們在完成本作品的時間壓力之下，只能採取折衷方法，取 4 mm^2的面積作代表，若能開發出電腦程式來分析，不但能分析更大的面積，相信精準度也絕對能提升！

捌、 參考資料

一、高中基礎地球科學課本(上) 龍騰版

二、雲滴凝結增長的過程 www1.geo.ntnu.edu.tw/webs/faculty/yauym/meteorology/chapter7.ppt

三、文化大學大氣科學系 游政谷老師 雲物理學(CLOUD PHYSICS) 課程講義

四、第七章 降水 PPT 222.195.136.24/lecture/ias/北大大气科学导论/Chap07.ppt

五、雲粒子的成長&暖雲降水過程 PPT

六、A Short Course in Cloud Physics 3rd 1989，R.R. Rogers & M.K. Yau

【評語】051903

對雲滴之形成進行蒸氣凝結之實驗，特別是不同水溫對凝結特性之影響，有深入之觀察與討論，進一步可以強化水氣凝結在不同條件，特別是水氣增加與溫度下降之影響。

作品海報

摘要

高空中的雲總是型態各異，千變萬化的，但水氣在高空的成長、變化實在是難以直接觀測，而大氣觀測方法不外乎是探空氣球、氣象衛星、雷達等，但就我們學生來說，要使用這些設備並不是如此的可行。

所以我們嘗試在高中實驗室所允許的條件下進行實驗，也就是模擬出高空雲滴成長的變化，藉由閱讀文獻、實驗模擬、電腦分析等方式，來了解暖雲雲滴在高空中凝結成長的行為，把藏於高空中不易觀察的現象在實驗室中呈現出來，實驗結果顯示，凝結核的存在對水滴的形成是非常重要的；凝結水滴經由合併成長使粒徑增大，且粒徑頻譜分布隨時間會呈現 M 型化的特徵。

一、研究動機

在一次的地球科學課中，任課老師讓我們觀察天上的雲。一邊看著，便一邊思索著……，從小到大每當要下雨之前，空氣總會異常的悶熱，天空漸漸的烏雲密布，最後傾盆大雨就這麼的落了下來。那雲究竟是如何形成的呢？為何不是到處都能形成雲，又為何雲有如此歧異的型態呢？

後來偶然看見玻璃上凝結了許多水珠顆粒，並且隨時間成長，顆粒漸漸變大，最後承受不住重力而滴落下來。於是我們便以此為靈感來做實驗。

二、研究目的

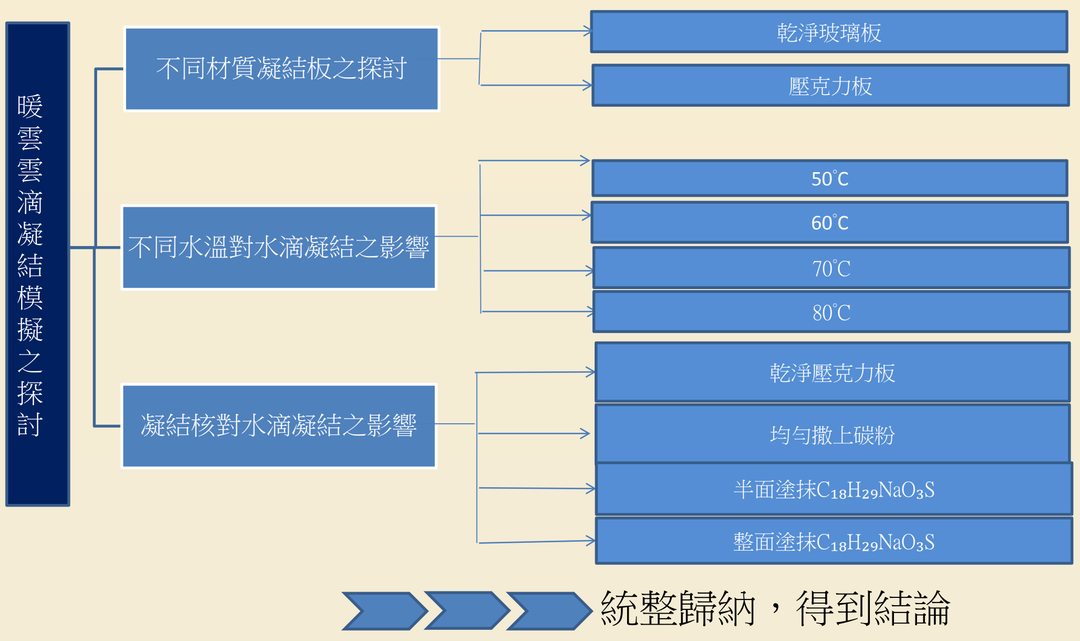
一、 實驗模擬高空中暖雲雲滴成長過程。
二、 探討不同水溫對於水滴凝結的影響。
三、 藉碳粉扮演凝結核的角色並觀察水滴凝結的情形。

三、實驗設備及器材

1.個人電腦　2. 250ml 燒杯　3.壓克力板　4.直尺　5.顯微照相機
6. LED 燈　7.碳粉　8.溫度計
9.分析軟體：Image J、MicroViewer5MP、Microsoft Excel、小畫家

四、研究過程與方法

一、我們利用顯微照相機所拍攝到的照片，在小畫家開啟後，自行選定我們需要之範圍內的水滴
二、用手工繪製把範圍內每個小水滴都塗黑，接著再使用 ImageJ 進行有畫上黑色之特定區域的分析
三、進一步測量出選定範圍內水滴之數量及計算水滴半徑即可作圖
四、討論玻璃板及壓克力板水滴凝結狀況
五、置換4種不同溫度之水溫
六、將壓克力板做不同處理並觀察其上水滴凝結狀況



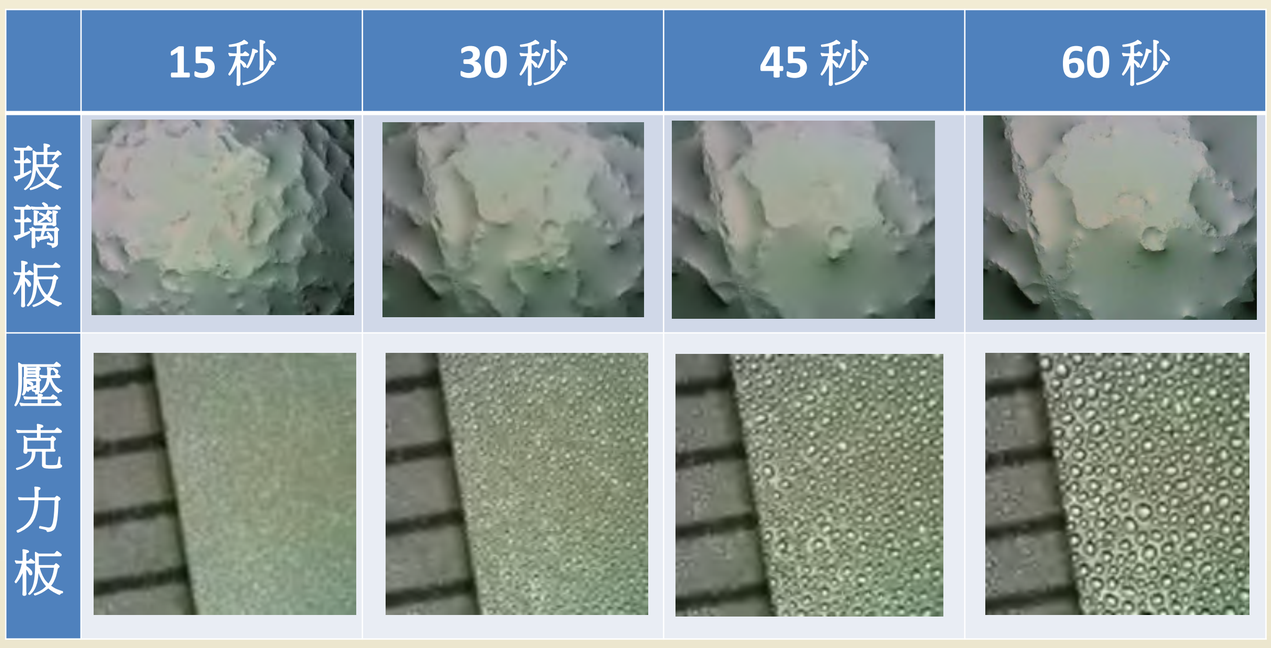
五、研究結果

【實驗一】不同材質凝結板之探討

（一）、實驗步驟：

1.在自製實驗裝置上擺放一 250ml 燒杯。
2.將玻璃板(甲)蓋在 250ml 裝著 70℃熱水的燒杯上，讓小水滴凝結其上。
3.用 LED 燈在自行架設的裝置下方空位由下往上照射燒杯底部。
4.使實驗室環境黑暗，用顯微照相機間隔 3 秒拍攝 25 張水滴凝結之狀況。
5.改用透明壓克力板(乙)蓋在 250ml 裝著 70℃熱水的燒杯上。
6.重複 3. 4.之動作。

（二）、實驗結果與記錄：



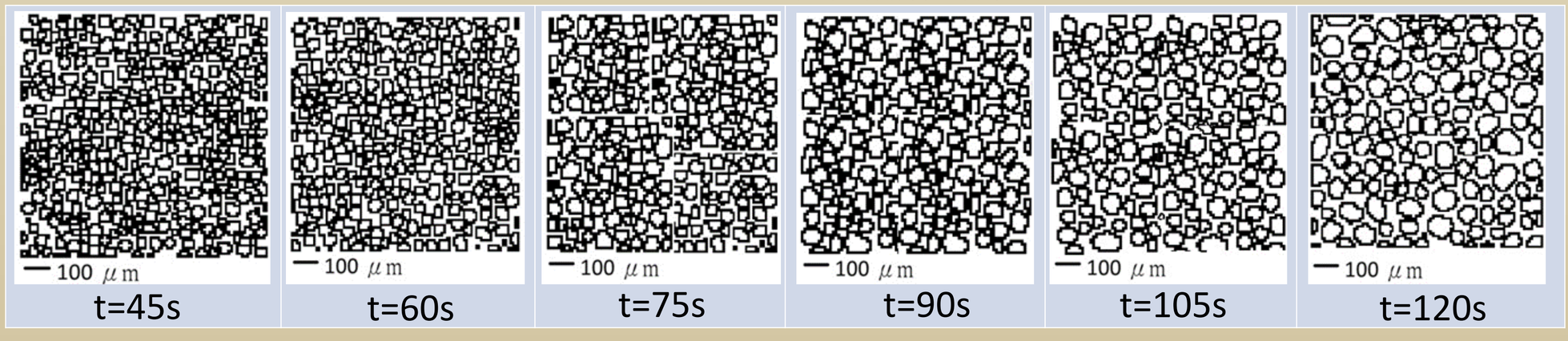
（三）、討論：

如圖，使用玻璃板加蓋之效果並不佳，因為水滴與水滴之間界線並不明顯，且水滴增長幅度也不明顯，無法輕易分辨每一顆水滴之完整外觀，難以做後續之各項分析。 相較之下，使用壓克力板提供讓水滴附著，水滴範圍及外圍形狀相對清楚許多，方便我們進行分析。
由以上結論，我們決定後續實驗皆以壓克力板作為加蓋板。

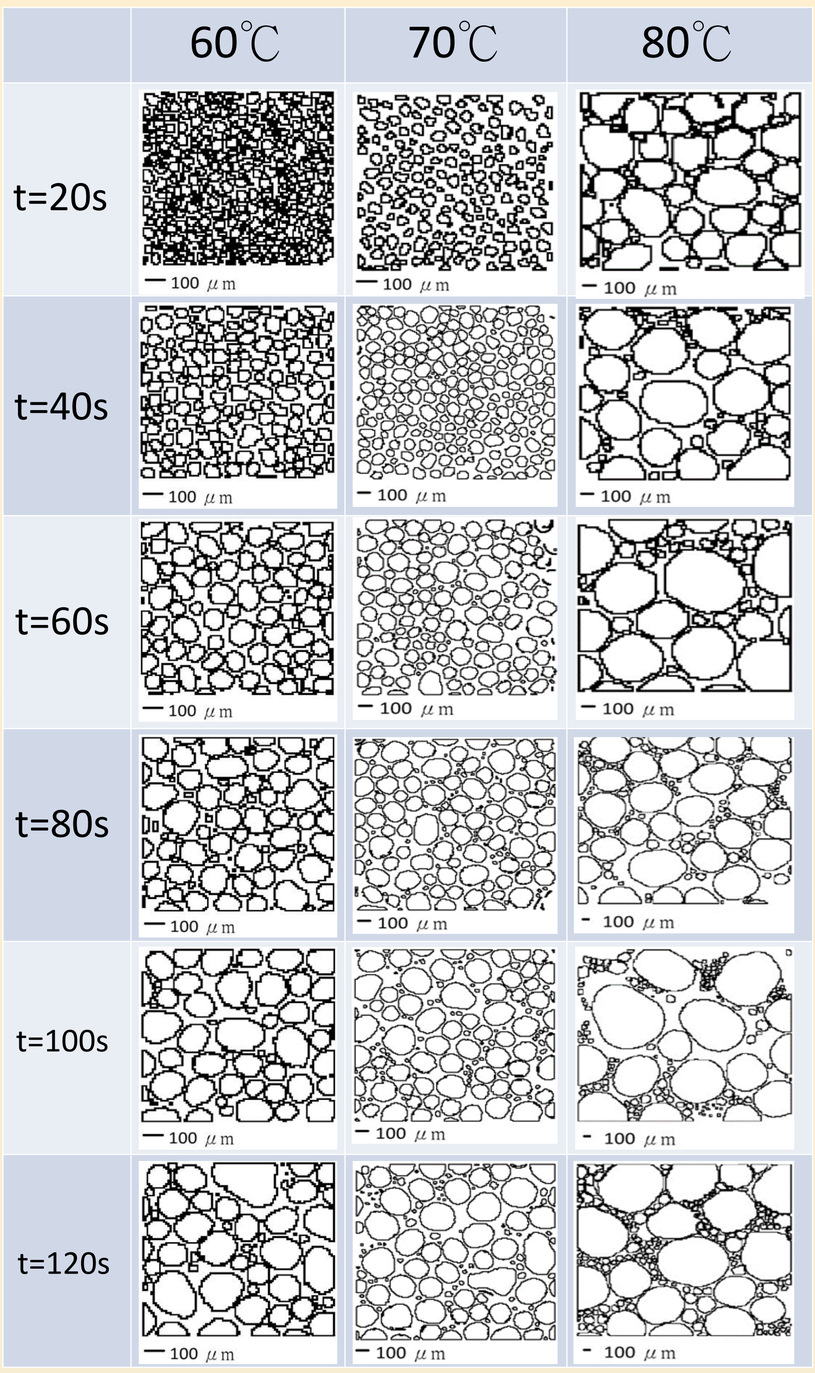
【實驗二】不同水溫情況下，水滴凝結之探討

我們進行四組不同水溫之水滴凝結現象實驗，分別為50℃、60 ℃、 70 ℃、 80 ℃ ，實驗步驟如下：
1.使用自行架設的實驗裝置搭載顯微照相機並固定。
2.使其鏡頭緊貼在壓克力板上，調整焦距使其對焦清楚。
3.將實驗室燈光關掉，保持黑暗，並在燒杯正下方打開 LED 燈。
4.在燒杯中裝了不同溫度的溫水燒杯上加蓋壓克力板。
5.再度對焦於水滴上，隨後立即拍攝第一張照片 。
6.固定時間間隔拍攝一張水滴凝結的狀況，持續拍攝至水滴大小無明顯變化。

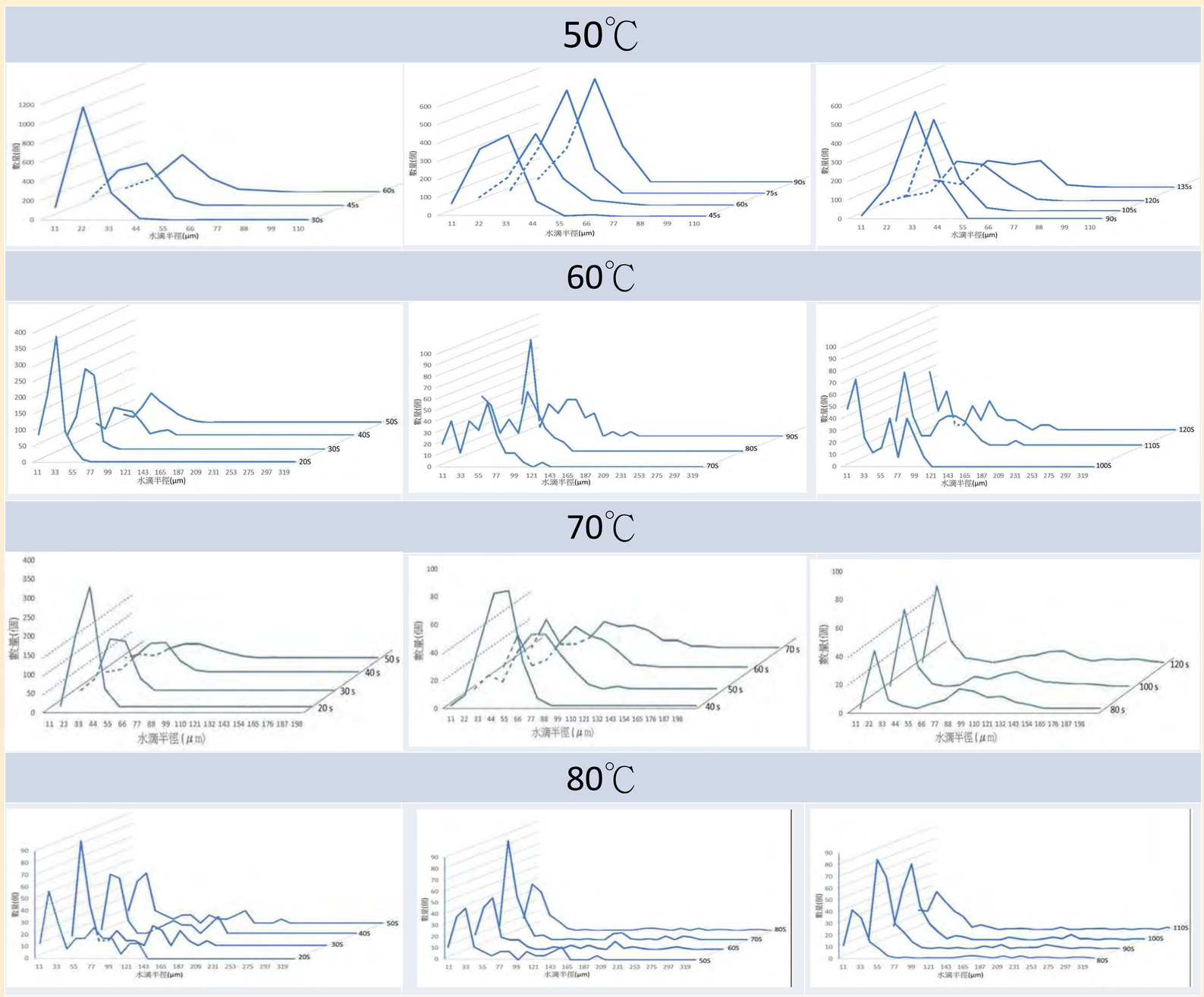
A組(50℃)實驗結果與記錄：　水溫 50℃之凝結水滴輪廓時序圖



B組(60℃)、C組(70℃)、D組(80℃)實驗結果與記錄：



水滴粒徑頻譜分析



討論：

A組(50 ℃)

1. 由以上結果我們發現，凝結初期水滴附著速率並不會太快，需經過約 1 分鐘才能由顯微照相機稍微清楚看出小水滴顆粒的成形，且水滴增長速度十分緩慢。
2. 幾乎沒有特別大顆之水滴，每顆水滴形狀大小皆十分相近，水滴與水滴之間也很少發現新凝結的小水滴。
3. 當我們連續拍攝至第 10 分鐘時，水滴大小已經幾乎沒有太大之改變，而且每顆水滴粒粒分明，形狀與大小也都非常相似，不過水滴的半徑卻是很小的，僅有 55μm~66μm 而已。
4. 隨著凝結時間增加，由凝結粒徑頻譜可知，波峰區頻譜會增寬， 數量會下降，這是水滴合併成長的現象。

B組(60 ℃)

1. 我們從實驗觀察得知，使用 60℃熱水之水滴凝結速率明顯比 50℃快了許多，在大約 30 秒時水滴完整形狀已大致成形。
2. 到40秒時，水滴凝結的大小逐漸沒有同一規格，較大顆及很小顆的水滴紛紛出現，大顆的水滴旁也出現許多剛形成之小顆的水滴。
3. 在60℃時我們發現到 50℃所沒有之情形，大顆的水滴會跟鄰近之較小水滴合併為更大顆的水滴，使得大顆水滴的面積越來越大。
4. 待水滴大小無明顯增長時，其半徑相對於 50℃實驗結果所凝結成之水滴半徑大上許多。

C組(70 ℃)

1. 水滴在凝結時間 20 秒~40 秒間增長非常快，但每顆大小卻是差不多大的。
2. 第 50 秒之後慢慢出現合併現象，水滴大小開始出現差異化，凝結粒徑頻譜有 M 型化的特徵，大顆水滴數量漸漸變多，且在大水滴夾縫中也能看到剛形成之小水滴。
3. 待最後水滴不再合併增長時，其整體大小都比 A 組與 B 組的實驗結果要大上許多，最大水滴半徑達到198μm。

D組(80 ℃)

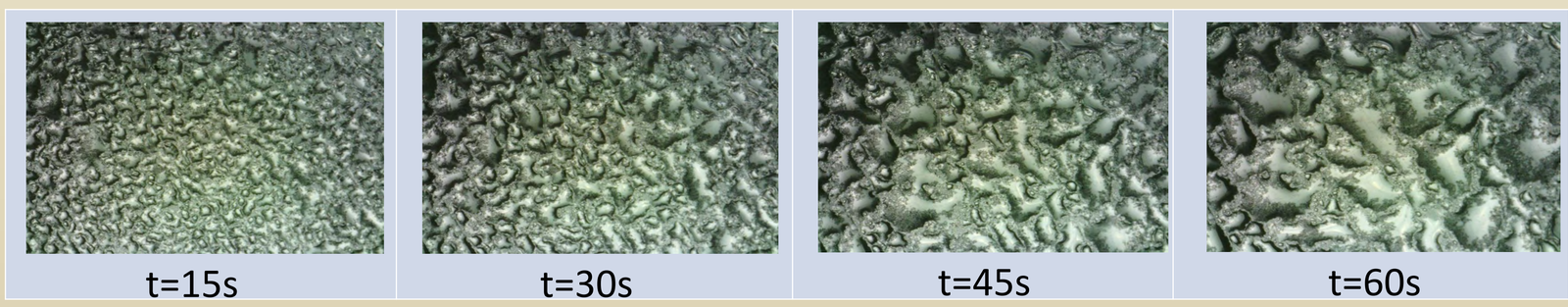
1. 本組實驗中，水滴凝結速度極快，當壓克力板一放上去時水蒸汽便已開始旺盛的凝結，在很短的時間內就能夠清楚看出水滴外圍形狀。
2. 初始水滴大小幾乎都相同，但是很快就進入了合併增長階段，水滴增長的幅度也比 A、B、C 組的實驗結果還要大。
3. 到了不再持續合併增長時，大顆水滴的直徑可以達到 1000μm，相當於典型雨滴的大小。

【實驗三】探討凝結核於壓克力板上對水滴凝結的影響

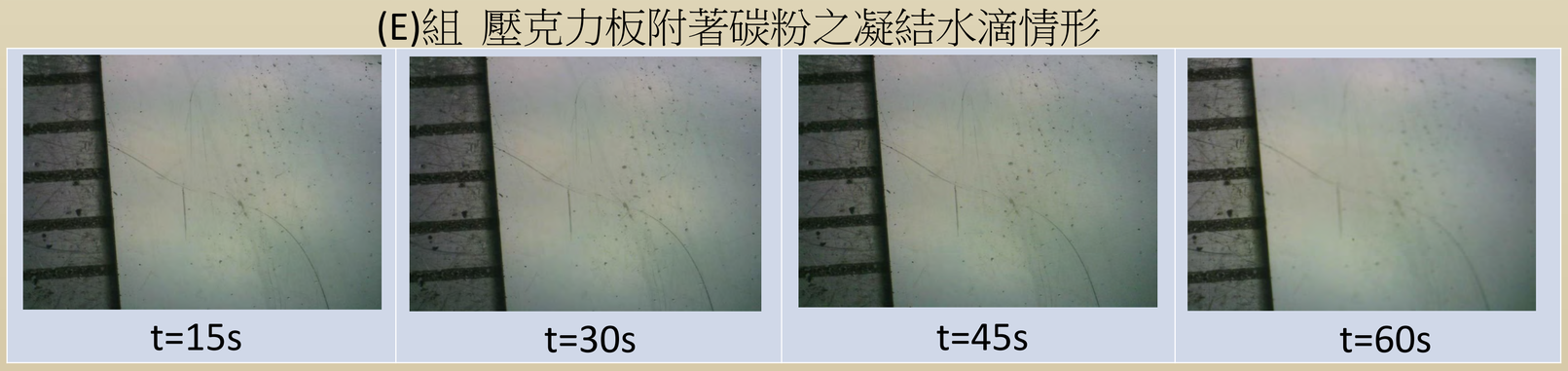
組別	E 組	F 組	G 組
物質	碳粉	整面 $C_{18}H_{29}NaO_3S$	半面 $C_{18}H_{29}NaO_3S$

我們進行三組不同表面性質之水滴凝結現象實驗，實驗步驟如下：

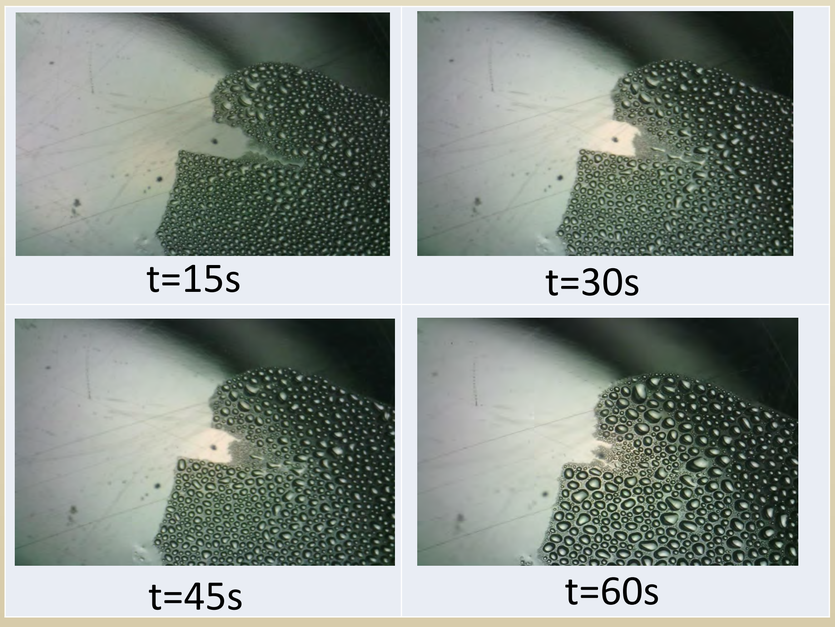
1.在自行設置之實驗裝置上擺放 250ml 燒杯，在內裝入 70℃之熱水。
2.在壓克力板上之欲讓水滴凝結面分別撒上磨碎的碳粉(E)、不同面積的$C_{18}H_{29}NaO_3S$ (F)、(G)。
3.將壓克力板倒反過來加蓋在燒杯上，並使顯微照相機快速的對焦。
4.將實驗室保持黑暗，並開啟 LED 燈，隨即拍攝第一張照片，往後間隔 3 秒拍攝一張水滴凝結照片。
5.持續拍攝至水滴型態無太大變化。



(E)組 壓克力板附著碳粉之凝結水滴情形



(F)組 壓克力板整面塗抹$C_{18}H_{29}NaO_3S$之凝結水滴情形



(G)組 壓克力板半面塗抹$C_{18}H_{29}NaO_3S$之凝結水滴情形

討論：

1. 由(E)組實驗發現，水滴凝結形狀非常不規則，且邊界不明顯。
2. 在相同時間內，水滴凝結速率和【實驗二】C 組比較起來明顯較快。
3. 另外，碳粉會聚集在水滴周圍，推測水滴形狀不規則的原因是碳粉破壞水的表面張力，導致小水滴無法內聚成完整的大水滴，故我們推測高空中之凝結核尺度可能比碳粉顆粒要小的許多。
4. 由(F)(G)組實驗發現，用十二烷基苯磺酸鈉塗抹過之壓克力板上，幾乎完全沒有可用肉眼觀察或使用顯微照相機可以分辨的水滴凝結，推測應是十二烷基苯磺酸鈉將原本附著於壓克力板上之凝結核微粒清洗掉了，使得水氣極難附著於其上。
5. 用衛生紙擦拭乾淨之半邊水滴產生如【實驗二】C 組之凝結狀況，經實驗結果可更加證實塗抹過十二烷基苯磺酸鈉之後極難讓水滴產生凝結之現象。

六、討論

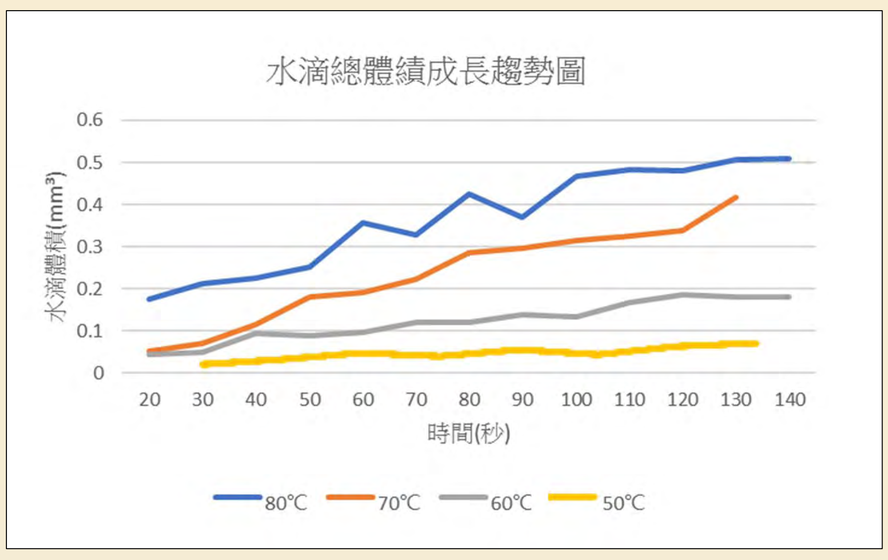
針對暖雲(溫度> 0℃)雲滴形成機制與本實驗的實驗結果進行探討。我們知道，雲的形成需要空氣塊達到飽和，若空氣塊中有凝結核，將更有助於水氣的附著，形成微小的雲滴。

1.對於凝結核大小，經由【實驗三】E 組的結果得到，撒上碳粉的壓克力板並沒有產生如預期般地完整的水滴，而是產生形狀不規則、邊界不清楚的水滴，而且當水滴夠大時，碳粉還會在水滴中出現流動的情形。相較於【實驗二】C 組，由衛生紙擦拭過的壓克力板上所凝結的水滴形狀完整，因此推測雲滴的凝結核尺度應和空氣中的懸浮微粒相近，看似細小的碳粉粉末，則比空氣中的凝結核大非常多。

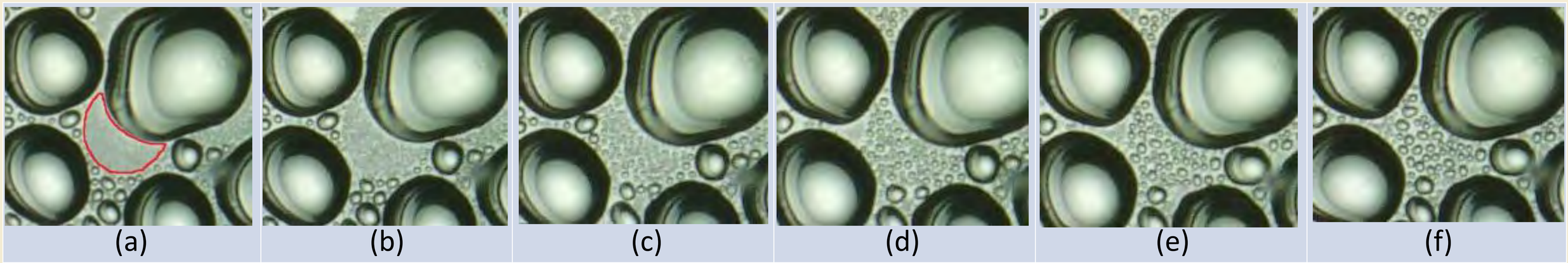
2. 由【實驗三】F 組的結果，經塗抹過十二烷基苯磺酸鈉溶液的壓克力表面上的可作為凝結核的微粒被洗掉，即使有大量的水氣，仍無法形成雲滴。再對照【實驗三】G 組的結果，顯示雲滴的凝結的必要條件就是要有凝結核，並且凝結核的尺度是非常小的，即使使用顯微照相機也無法分辨。

3. 由【實驗二】A、B、C、D 四組的結果得知，水滴半徑均隨時間增加而增大，表示凝結水滴的體積也不斷在成長。我們計算 4 mm^2 的面積中水滴的總體積隨時間的變化，如下折線圖。各組水滴的總體積均隨時間而增加，且水溫越高，總體積增加速率越大，表示水溫溫度越高，水氣蒸發越旺盛，在同一時間內，水滴的凝結量相對較多，所以凝結水滴的總體積越大。

4. 在【實驗二】B、C、D三組中都發生粒徑頻譜M型化的特徵，我們針對此現象進行更高時間解析度的分析。
下圖為取【實驗二】C組(70℃)，第80秒起局部區域的微小水滴成長變化，時間間隔為2秒。(a)紅色月形區域內為兩個大水滴合併後所留下的空隙，在(b)立即可以看到極微小的水滴密集形成，但粒徑太小，難以分析，接著從(c)至(f)，這些極微小的水滴迅速的成長，至第90秒時，已能明顯的分辨每個水滴大小。提高時間解析的結果，清楚地說明了為什麼凝結粒徑頻譜隨著時間先變寬之後，會朝著M型化發展，因為大水滴合併之後，水滴內聚的作用，所留下的空間，有利於微小水滴的形成，且數量非常多，而微小水滴的粒徑成長，透過合併過程，比大水滴快速。



【實驗二】A~D 組水滴總體積隨時間變化圖



(a) (b) (c) (d) (e) (f)

七、結論與應用

一、結論：

1.由【實驗二】我們得知溫度高低是影響水滴凝結速率的一個重大變因，水溫溫度升高會伴隨著凝結速率顯卓的提升，且水滴大小也隨著溫度的升高而增加。

2. 由【實驗三】知，凝結核也是影響雲滴凝結的重要因素，在沒有凝結核的情況下，就算水氣再怎麼充足，也是難以凝結成水滴。

3. 由【實驗三】發現，雲滴的凝結核並不是如我們預期的是肉眼可視的碳粉大 小，而是平時就附著在各處的微小懸浮微粒及空氣中塵埃的尺度。

4. 凝結於壓克力板上水滴之總體積隨著時間的增加體積也跟著逐漸上升，另外熱 水溫度越高，水氣蒸發量越多，所凝結之總體積也著越大。

5. 水滴在成長時會逐漸形成 M 型化的曲線，即一開始小顆水滴凝結速率極快、數 量極多，但隨著增長漸漸出現合併的現象，於是水滴越來越大顆，但因為表面 張力之關係，水滴合併後粒徑反而會略為縮減，縮減過後空出之空間恰好提供 剛形成的小水滴成長之位置。故隨著時間經過，大顆之水滴因為合併作用及蒸 發上來的水氣使體積持續變大數量也跟著變多，小水滴也持續的在空位處凝結 形成，最後造成小水滴與大水滴同時變多的現象，即 M 型化。

二、未來展望：

1.在上述實驗過程中，最初一段的時間所形成的水滴實在太微小了，希望能夠取得解析度更高的顯微照相機，以改善我們所做實驗精準度，這樣才能進一步了解最初細微水滴凝結的行為。

2. 目前我們只能做到在二維的平面上表現出類似暖雲雲低成長的過程，本實驗無法展現雲滴在垂直方向運動發展的情形，若能夠將二維的壓克力板上之水滴凝結拓展成三度空間，且能展示出垂直方向的運動，則更能趨近於真實世界高空中之雲滴凝結情形。

3. 改善分析數據之方法，期待能得到更精準的數量結果。本實驗使用小畫家透過手工繪製將水滴塗黑之後才能利用 ImageJ 分析，資料分析過程相當耗時，若能開發出電腦程式來分析，不但能分析更大的面積，相信精準度也絕對能提升！

八、參考資料

一、高中基礎地球科學課本(上) 龍騰版
二、雲滴凝結增長的過程 www1.geo.ntnu.edu.tw/webs/faculty/yauym/meteorology/chapter7.ppt
三、文化大學大氣科學系 游政谷老師 雲物理學(CLOUD PHYSICS) 課程講義
四、第七章 降水 PPT 222.195.136.24/lecture/ias/北大大气科学导论/Chap07.ppt
五、雲粒子的成長&暖雲降水過程 PPT
六、A Short Course in Cloud Physics 3rd 1989，R.R. Rogers & M.K. Yau