

台灣二〇〇二年國際科學展覽會

科 別：物理科

作品名稱：液滴在我眼前蒸發

得獎獎項：物理科第一名

美國第五十三屆國際科技展覽會獲：

一、大會獎物理科三等獎

二、美國物理學會暨物理教師協會三等獎

三、聯合技術公司 UTC 獎

四、柯達公司一等獎

學 校：高雄市立左營高級中學

作 者：劉承華

作者簡介



我，出生在高雄，父親是位兩顆梅花的營長，母親是位職業婦女，下有一個妹妹，家庭和諧民主。但隨著父親退伍，之後，工作不順，家庭常四處遷移，獨立、自主便從小烙印在我的心裡。

我喜愛大自然，常好奇大自然的浩瀚現象，思考觀察其變化現象是如何發生的？能否以我所學的知識來詮釋？對我來說，無非是在求「真」，更期許自己能「善」用之，才能追求到它的「美」。正因此，我參加了許多的競賽和研習，領著這一股動力，追尋知識，把握每次的機會，嶄露頭角。

液滴在我眼前蒸發

Witnessing the Drops Evaporating Event

摘要

本研究的目的是在觀察液滴的蒸發過程，探討影響液滴蒸發方式改變的變因。我們利用數位攝影機外加近攝鏡頭，由側面逆光拍攝液滴蒸發過程，並轉錄成電子檔利用電腦協助分析。液滴影像分格放大投影在方格紙上，以便測量接觸角及高度的變化。

結果發現蒸發情形可分為三種：

- I. 當接觸角大於九十度時，液滴和界面的接觸線迅速外擴，直到接觸角遞減至90度後定住不動，蒸發終了時，接觸線迅速內縮，留下縮小的實心殘跡。
 - II. 當接觸角小於九十度時，接觸線先些微外擴，之後定住不變，直到蒸發終點，液體內縮，留下環狀殘跡。
 - III. 當接觸角等於九十度時，接觸線始終定住不變，液滴蒸發後留下原大小的實心斑跡。
- 液滴蒸發時接觸角和高度並不是連續變化，而是交互階梯式遞減。

本研究的結果可應用在探討噴漆及噴墨印表機的噴墨印刷上。

Abstract

The objective of this investigation is to observe the evaporation of liquid drop and find out the factors that could affect it. A digital camera with micro lens is used to film the process of the evaporation. And a close-up of the sample drop is taken with backlight. The results are analyzed with a personal computer. The magnified images of the drops are projected on grid papers for measuring the changes on contact angles, and heights of drops.

We classify the evaporation of a drop into three types:

- I. The contact angle is **greater than 90 degrees**. At first, the contact line will spread outwardly till the contact angle decrease to the 90 degrees and then be **pinned** until the evaporation reach its terminal. At last the contact line quickly contract inwardly, and a solid stain remain.
- II. The contact angle is **less than 90 degrees**. The contact line will spread slightly and then be **pinned**. At the terminal the liquid contract inward, and a ring-like stain is formed.
- III. The contact angle is **equal to 90 degrees**. The contact line will always be **pinned**, and no ring, but spot stain is left.

During the evaporation, we discover that the contact angle and the height of the drop do not change continuously but alternatively decrease by steps.

The results of our investigation can be applied to the aspects of paint-spraying and jet printers.

液滴在我眼前蒸發

一、前言

桌上，灑落幾滴水滴，靜候的我坐在桌前，起初目光並未刻意的放在水上，只是在作些冥想，數分鐘後，水滴它蒸發了，看似正常，但卻使我產生了疑問，水滴蒸發時，水與桌面的接觸緣是向內縮小？或是定住不動？水滴的蒸發過程如何？受哪些因素影響？不同種類的液滴蒸發情形相同嗎？液滴的蒸發有哪些模式？

當液體與固體表面接觸時，如果液體分子間的內聚力小於液體分子與固體分子間的附著力時，液體會「沾濕」固體，液體與固體的接觸線附近的液面會形成凹面。液面切線與固體表面的夾角就稱為「接觸角」，當液面會沾濕固體表面時，接觸角小於90度。如果液體不會「沾濕」固體時，接觸線附近的液面形成凸面，且接觸角大於90度。因此灑落在水平固體表面的液滴有兩種情形，一種是「吸附」在固體表面，另一種則是「內聚」成球形或扁球形。

對於吸附在固體表面的液滴，有研究(A. Amirfazli, 1998)發現，液滴的半徑越大，接觸角越小。當液滴蒸發時，體積變小，液滴的半徑可能有三種變化：第一種是液滴內縮半徑縮小，此時接觸角是否如上述研究結果一樣變大？第二種是液滴「定住」半徑不變(Robert D. Deegan, 1997)，則液滴的高度勢必降低，接觸角是否會隨之變小？第三種是液滴因毛細作用外擴(Rachid Chebbi, 1997)，接觸角將如何改變？

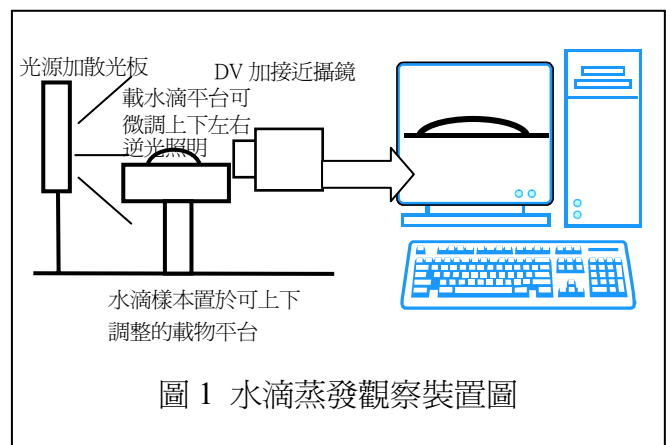
一項有關乾掉的咖啡液滴何以會留下環狀殘跡的研究(Robert D. Deegan, 1997)發現，環跡現象乃由於蒸發導致液滴的中心至邊緣產生溫差，這個溫差引起表面張力差而產生毛細流(capillary flow)，所以溶質(咖啡顆粒)被攜帶至液滴邊緣沈積在接觸線而形成環圈。這個研究支持液滴蒸發時接觸線定住不動的說法，這項說法是否可擴充至不同種類的液滴？如果蒸發時留下的殘跡不是環圈而是實心圓，則毛細流又是如何流動？而內聚成球狀或扁球狀的液滴，蒸發情形又如何？

二、研究方法

(一)液滴蒸發的觀察

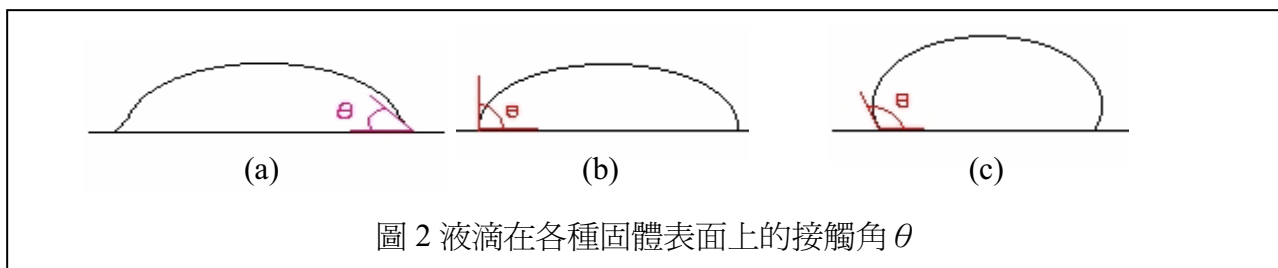
我們以數位攝影機(DV)拍攝水滴蒸發情形。水滴樣本置於可上下左右微調的平台(借用顯微鏡載物台)上。攝影機加接近攝鏡頭，以取得水滴放大影像，並採逆光照明，以獲得水滴剪影。實驗裝置如圖 1。

攝得液滴蒸發影片轉錄成電子檔存於光碟，以方便分析。並另以固定時距摘錄畫面，做成曠時攝影動畫，方便進行比較、觀察。



(二)接觸角的測量

影像經投影機放大投影於方格紙上，即可測得接觸角。圖二為接觸角 θ 的測量。會「沾濕」固體表面的液滴，其液面曲線在接觸線附近會有反轉點，接觸角即定義為該點的切線與固體平面所夾的銳角，如圖 2(a)。



三、研究過程與結果

(一)水滴蒸發的觀察

我們以分析天平將 20.00mg 的水滴滴於載玻片上，利用圖 1 的裝置詳細記錄水滴的蒸發。載玻片放置在顯微鏡載物台上以便上下微調，使其與數位攝影機鏡頭中心在同一水平面。全程拍攝所得水滴蒸發時側面的變化情形，製成動畫，方便探討。記錄的影像以單槍投影機，投影放大到垂直放置的方格紙，測量高度、接觸角。為了方便比較，我們將數據標準化(normalize)，即以原高度、原角度或總蒸發時間為 1，再將數據依比例換算。水滴蒸發時高度

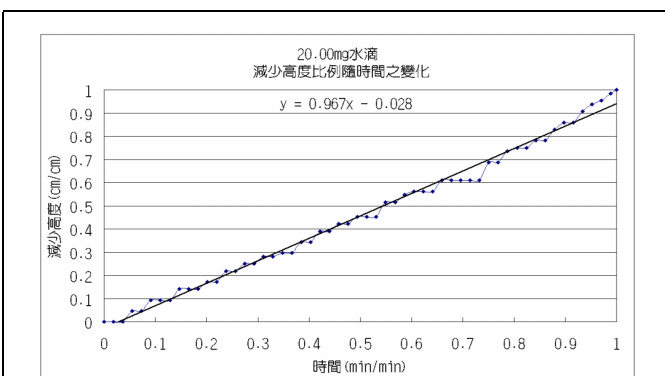


圖 4(a) 液滴蒸發時其高度隨時間做近似線性遞減

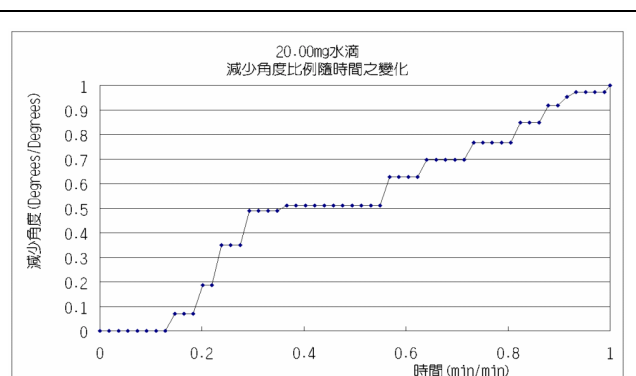


圖 4(b) 液滴蒸發時，角度有階梯式遞減現象

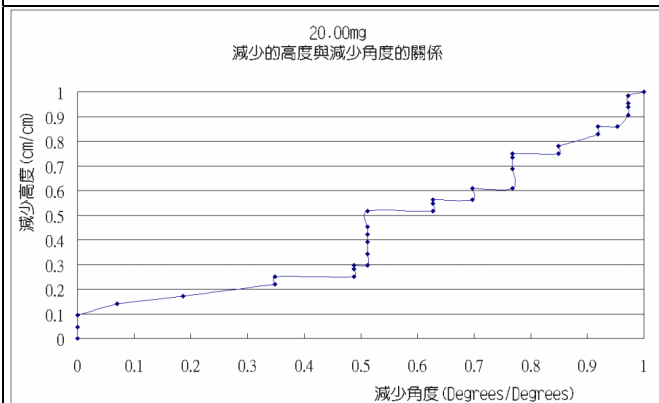


圖 4(c) 液滴蒸發時有高度減少接觸角不變的情形

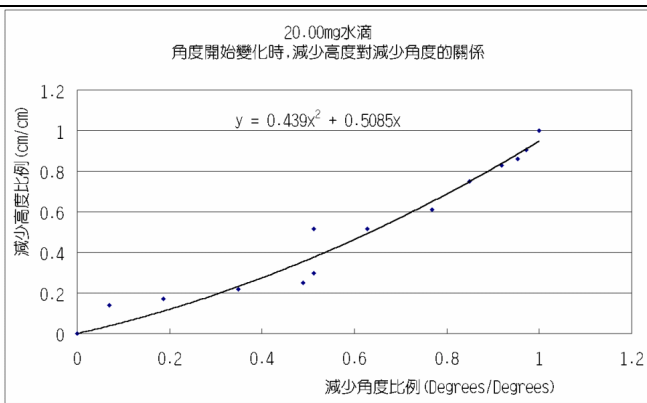


圖 4(d) 角度開始變化當時，液滴減少高度對減少角度的關係

隨時間以近似線性關係減少，如圖 4(a)；角度減少則呈階梯式遞減現象，如圖 4(b)；圖 4(c) 顯示在角度維持不變時，高度仍繼續遞減；若去除角度不變的數據，將角度開始變化時的數據留下，如圖 4(d)，則數據迴歸得如下經驗式，

$$\Delta h = 0.439\Delta\theta^2 + 0.509\Delta\theta$$

其中 Δh 為水滴蒸發時高度減少的比率， $\Delta\theta$ 表示接觸角減少的比率。

當水滴滴上載玻片時，接觸線立即些微外擴，此後在蒸發的過程中接觸線一直「定住 (pinned)」不動，直到最末，才突然內縮。

(二)水滴質量對蒸發的影響

以分析天平分別將不等質量的水滴滴於載玻片上，並固定水滴與載玻片的接觸面積。將載玻片放置在載物平台上(可上下微調高度)，以 DV 近拍水滴的蒸發情形，結果如圖 5，其減少高度對時間關係如表一。

水滴質量(mg)	趨勢線方程式	斜率(M)
2.50	$\Delta h = 0.970t + 0.032$	0.970
15.00	$\Delta h = 0.951t + 0.005$	0.951
20.00	$\Delta h = 0.967t - 0.028$	0.967
30.00	$\Delta h = 1.007t + 0.020$	1.007

液滴質量的改變，並不影響蒸發的方式，但是蒸發過程中，接觸角的變化及高度的變化，卻有很大的不同。分析發現：水量愈多時，減少的高度和時間的關係約趨近線性(正比， $M \approx 1$)。各水滴均有大幅度角度不變的時候，水量愈少的此時期發生會愈在蒸發的後期。角度和高度有互換減少的現象(如上圖的階梯式圖形)，但水量愈少的愈不明顯。以蒸發時期來分析：愈多水量的液滴，在蒸發的末期角度的變化量會越小，在蒸發的初期角度的變化量會越大，在蒸發的中期角度和高度的變換(一變一不變)頻率增加。

(三)水滴與固體接觸面間的附著力對蒸發的影響

分別將等量的水滴滴於載玻片、錫箔紙和雙面膠上，以改變固體接觸面(介面)的方式，改變水滴與界面的附著力，以觀察不同界面上的水滴蒸發情形。我們在密閉教室，氣溫維持 21.0°C，溼度維持 70.0%的環境下實驗，結果如圖 6，接觸角越大蒸發越慢。同時我們也發現水滴在錫箔紙上最初的接觸角為 90 度，蒸發過程至終了接觸線一直定住不動；而在雙面膠上的水滴起始接觸角大於 90 度，蒸發開始迅速快擴，當接觸角減至 90 度後接觸線定住不動，至末期則迅速內縮。

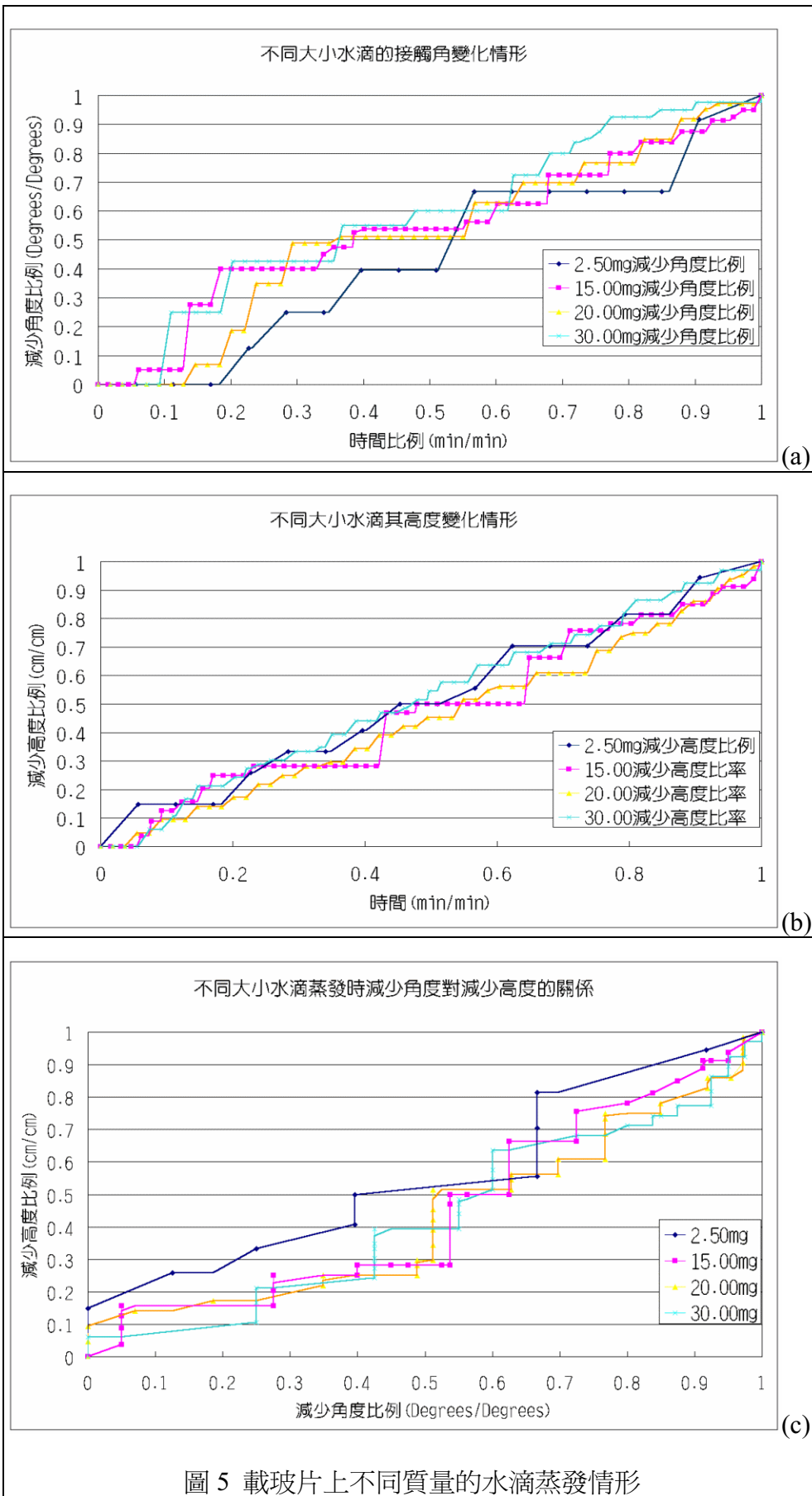


圖 5 載玻片上不同質量的水滴蒸發情形

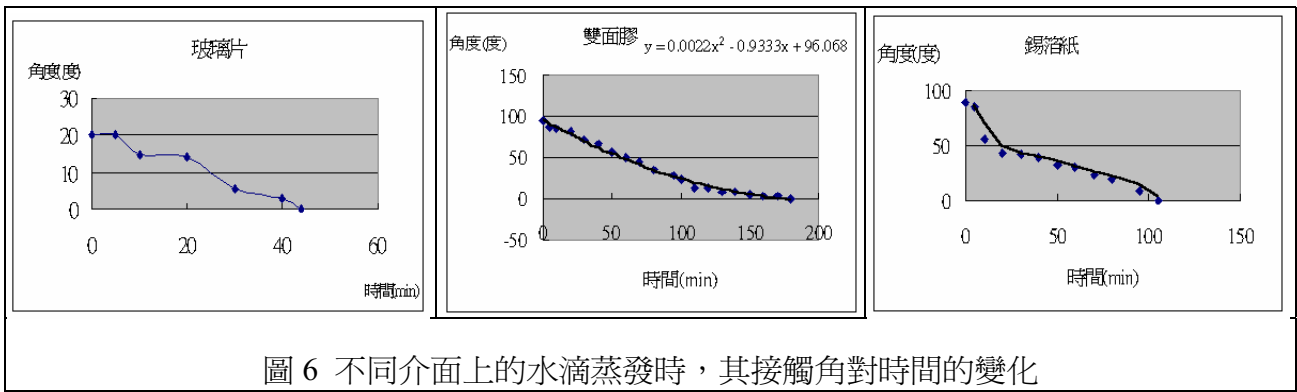


圖 6 不同介面上的水滴蒸發時，其接觸角對時間的變化

(四)液滴表面張力對蒸發的影響

將 95%的酒精稀釋為濃度 85%、75%、65%、55%的酒精，各滴一滴於玻璃片上。蒸發時接觸角變化如圖 7。結果顯示酒精濃度越高起始接觸角越小，向外擴展越大，蒸發時間越短，接觸角越趨近線性(等速)減少，而其斜率的絕對值越大，表示蒸發速率愈快。濃度愈小蒸發情形愈接近水。

濃度越高，之所以蒸發速率增快，且向外擴展越大，是因為表面張力越小。

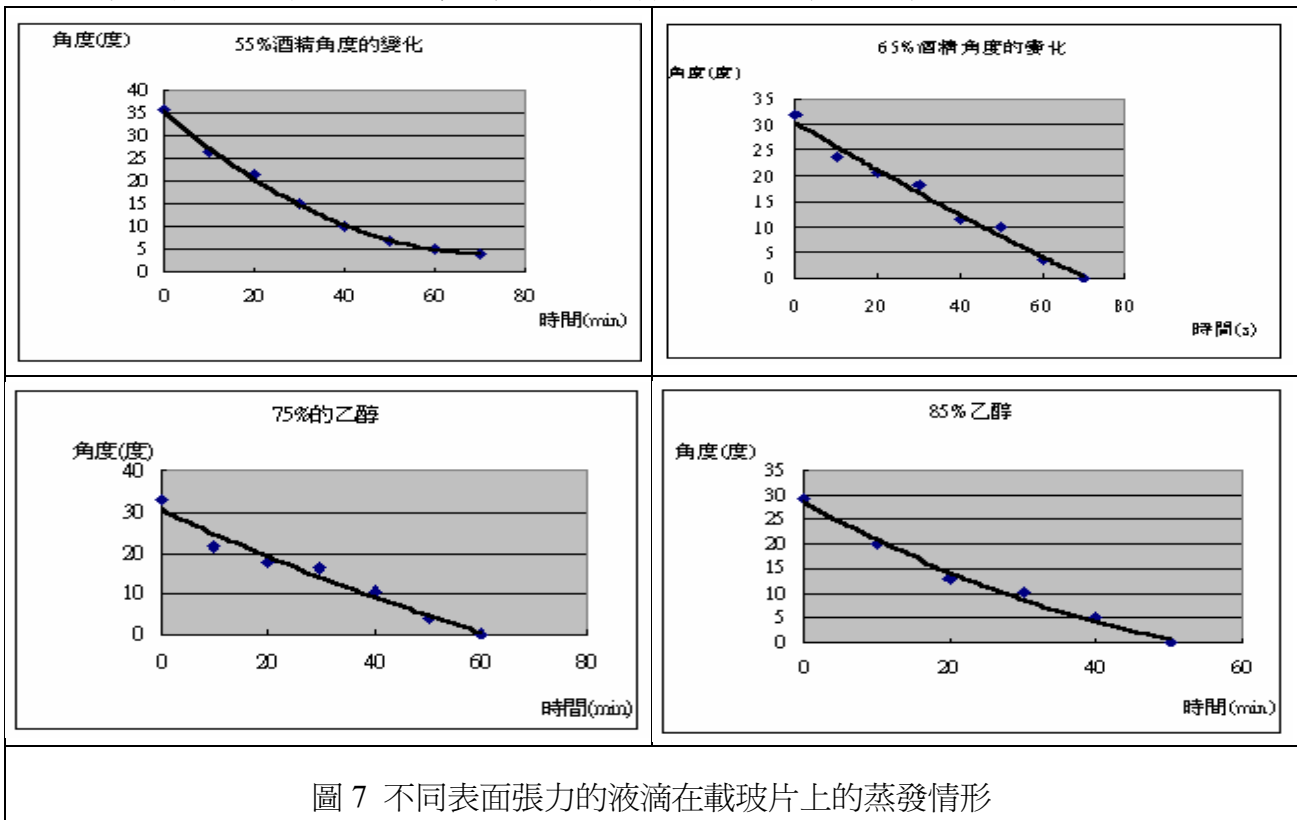


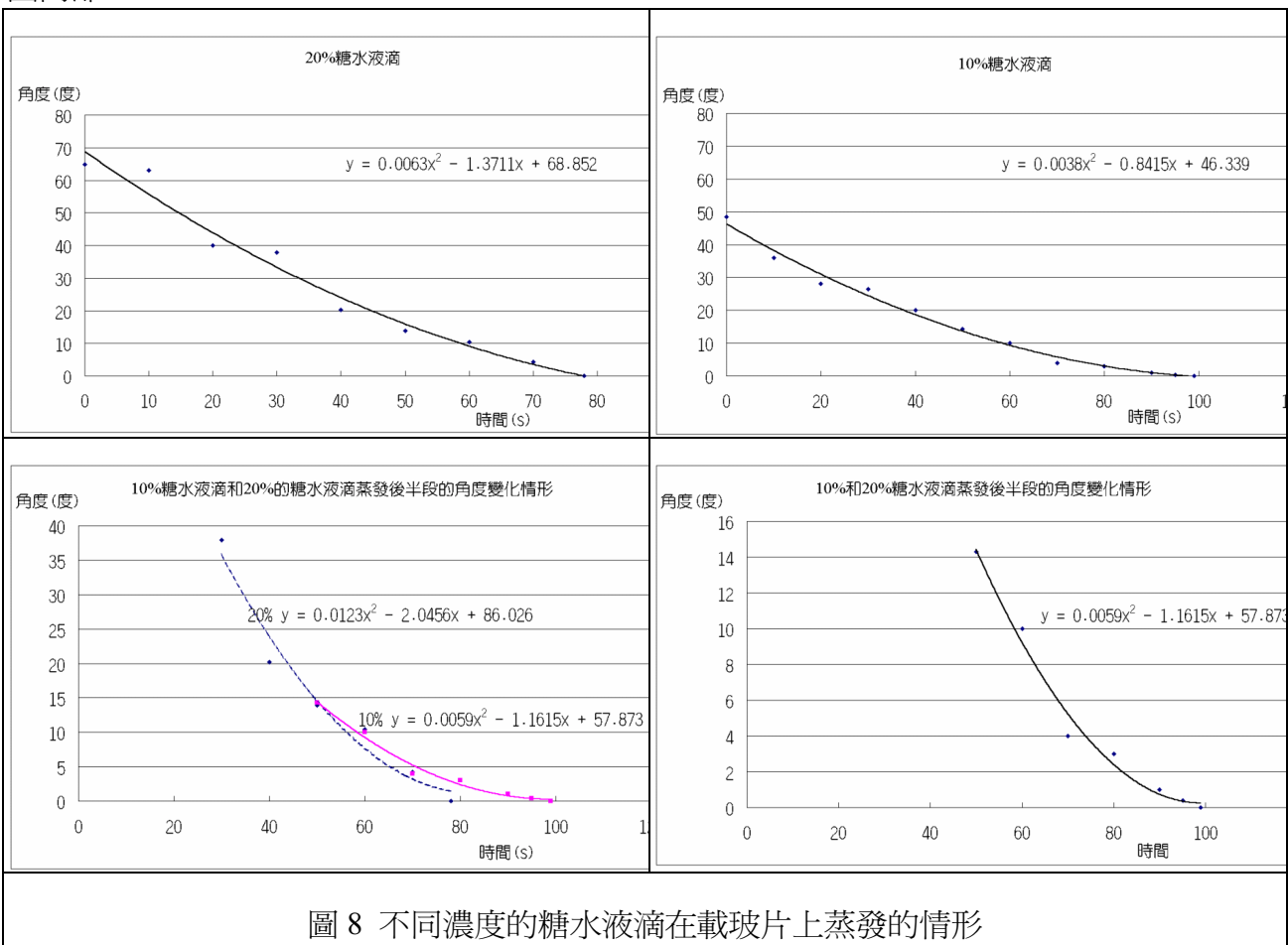
圖 7 不同表面張力的液滴在載玻片上的蒸發情形

(五)液滴的黏滯性質對蒸發的影響

配 10%、20%的糖水，利用不同濃度的糖來改變液滴的黏滯性質。載玻片上的糖水液滴蒸發情形如圖 8。

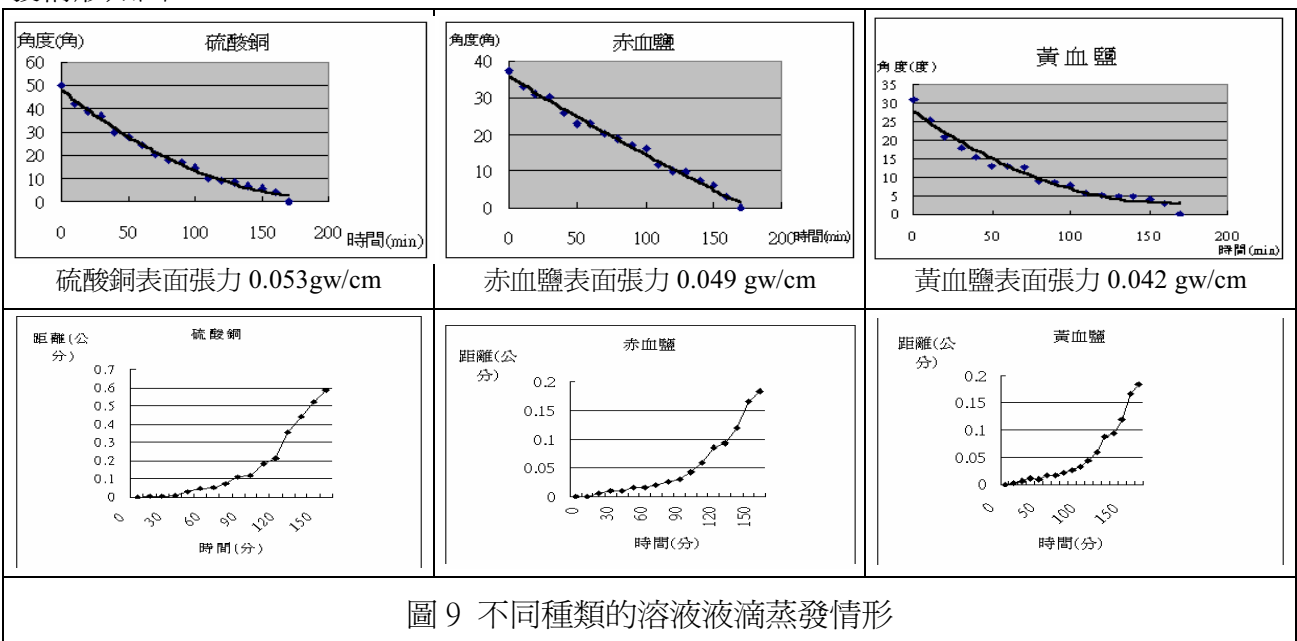
糖水液滴在蒸發過程中，並沒有水平方向的移動，只是在原地角度漸小的蒸發。起初蒸發時到全程大約一半的時間，角度幾乎等速在減少當中(如上左圖斜率一定)，但在一半過後

至結束有結晶析出時，角度變化速率有漸減的現象(如上右圖斜率漸減)。糖的結晶聚集在液圈內部。



(六)晶體溶質對蒸發的影響

取三片載玻片，分別在上面滴上一滴硫酸銅、赤血鹽、黃血鹽溶液，室溫 24.0°C 時的蒸發情形如圖 9。



結果發現硫酸銅產生結晶較大，並且有外擴情形。黃血鹽和赤血鹽結晶顆粒較硫酸銅小，向外擴較少。蒸發過程中，也和無結晶液滴一樣，角度會逐漸變小。

相對的糖也產生結晶，但是並非向外緣結晶，而是結合成糖塊。所以，是否和溶液的黏滯性質有關？

(七)溫度對液滴蒸發的影響

主要以改變溫度的方式，來造成同種液滴表面張力大小不同，以探討其蒸發時接觸角的變化、蒸發的方式及蒸散速率。燒杯內裝水 200mL，加熱至 50.0°C，滴一滴至貼有錫箔紙的載玻片上。置入已達 50.0°C 的恆溫箱中。並另做 21.5°C 的水置於密室室溫 21.5°C 下蒸發。結果如圖 10。

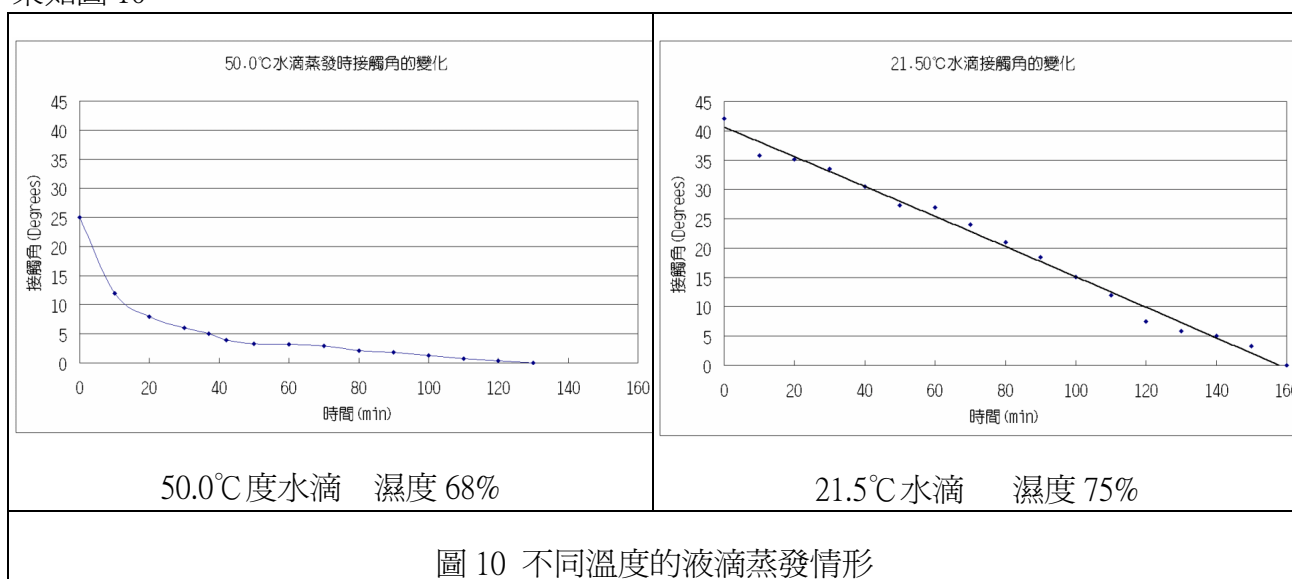


圖 10 不同溫度的液滴蒸發情形

結果顯示水滴存在溫度高的環境之上，會蒸發的比較快。但水在溫度比較高的溫度之下，很難滴出有角度的水滴出來，幾乎都是小於 45° 的接觸角。水在溫度較高的環境之下，並不會向外擴展而是原地蒸發。

四、結論：

1. 蒸發後無結晶的溶液，其蒸發情形如下：

(1) 接觸角對蒸發的影響如表二及圖 11，我們提出的說明如表三。

表二 蒸發後無結晶的溶液的蒸發情形									
起始接觸角	液滴和界面的接觸線			接觸角與液滴高度的變化情形					
	初期	中期	末期	初期		中期		末期	
				角度	高度	角度	高度	角度	高度
> 90	迅速外擴	不變	內縮	速減	約不變	減少	減少	減少	減少
= 90	不變	不變	不變	速減	減少	減少	減少	減少	減少
< 90	些微外擴	不變	快速內縮	減少	減少	互換減少		約不變	約不變

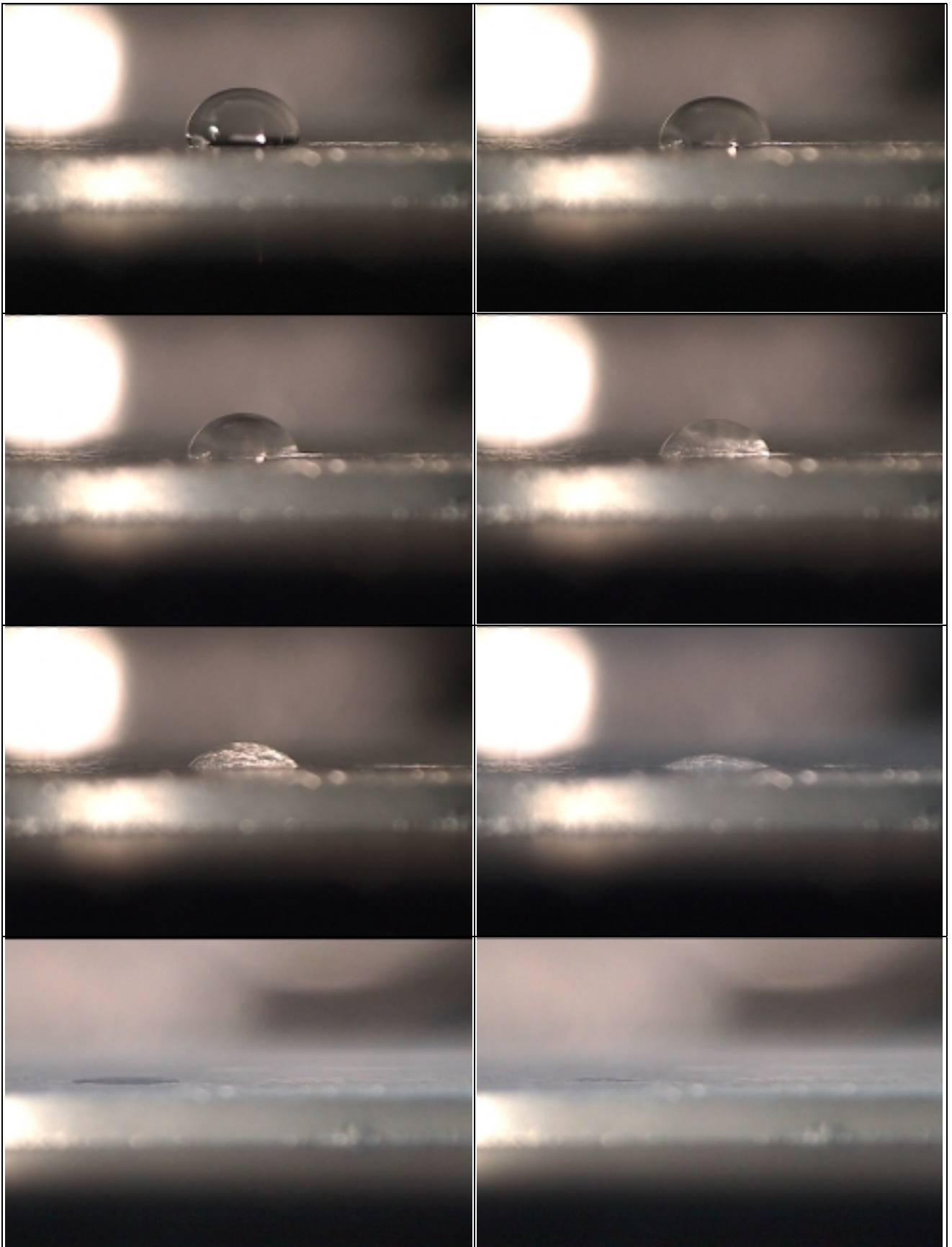


圖 11(a) 接觸角大於 90 度的液滴最初(上列)、中期(中列)及最後(下列)的變化情形

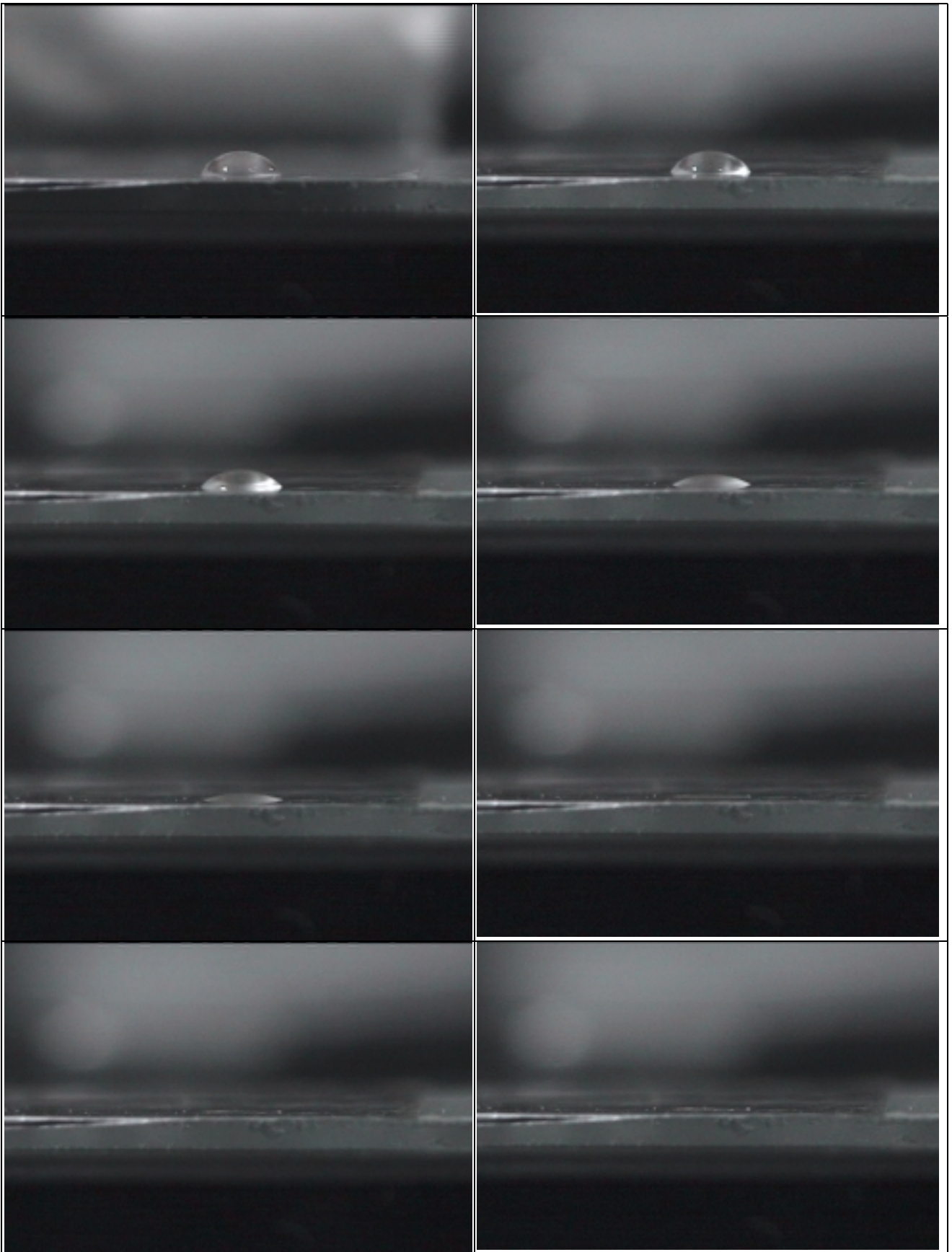


圖 11(b) 接觸角等於 90 度的液滴最初(上列) 、中期(中列)及最後(下列)的變化情形

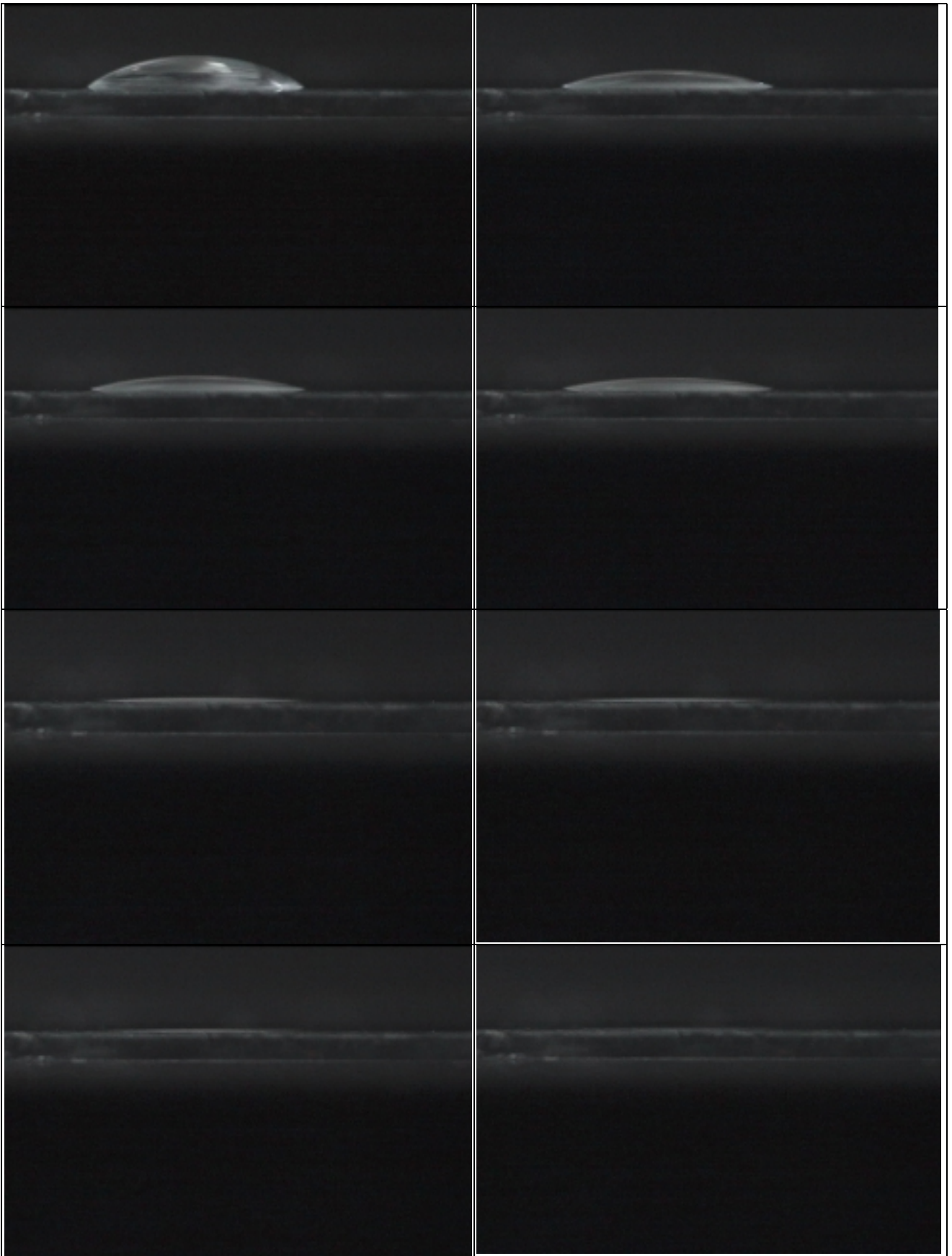


圖 11 接觸角小於 90 度的液滴最初(上列) 、中期(中列)及最後(下列)的變化情形

表三 蒸發後無結晶的溶液的蒸發情形說明		
接觸角	蒸發情形	說明
大於 90 度	起初迅速外擴，至原液滴兩旁凸出的點時即停止。然後接觸角、液滴高度逐漸減少。直至蒸發最後時，向內收縮蒸發。	水滴的兩旁和界面間形成銳角，蒸發時空氣分子會在液面和介面間作一次或二次碰撞，比上面液面的水分子只受一次碰撞更容易蒸發，表面張力變小，使得 接觸點的水分子受牽動向外移，直至接觸角約為 90 度 ，上述原因消失為止。起初接觸角大於 90 度的液滴，其內聚力大於附著力，因此接觸線附近無切線斜率反轉點存在，也無液體薄層，所以沒有向外的毛細流，最後因內聚力將液體內縮，所以溶質向內集中沈澱形成 內聚實心殘跡 。
小於 90 度	起初些微的外擴，然後接觸角、高度逐漸減少。直至蒸發最後時，快速向內收縮蒸發。	起初的些微外擴乃因毛細作用，因附著力大於內聚力，因此在接觸線附近液面形成切線斜率反轉點，反轉點外的液體極薄，內聚力的束縛較小，極易蒸發，液滴因而形成毛細流 ⁸ (capillary flow)， 由內向外流向接觸線 ，因為有液體的補充，所以 接觸線定住不動 。直至蒸發末期，反轉點外的薄層蒸發後無法再有液體補充，所以接觸線開始內縮，而被毛細流帶到邊緣的溶質遂沈澱於周圍而形成 環圈殘跡 。
約等於 90 度	至始至終接觸線並未改變。直至蒸發最後時，也無內縮現象。	內聚力大於附著力，雖然接觸線處無反轉點，所以無液體薄層存在，但也未大到足以內聚成凸面。蒸發末期內聚力也無法將液滴內縮，所以 接觸線始終未動 。溶質直接沈澱形成 實心的斑狀殘跡 。

(2) 液滴水量對蒸發影響說明如下：

水量愈多，減少的高度和時間的關係越趨近於線性。蒸發過程終各水滴均有大幅度角度不變的時候，水量愈少的此時期發生會愈在蒸發的後期。接觸角和高度的遞減有交互階梯式遞減現象，但水量愈少的愈不明顯。

2.蒸發後會結晶的溶液，蒸發後會留下溶質殘跡，說明如下。

(1)結晶向外延伸：

若液滴內聚力小於附著力，也就是起始接觸角小於 90 度，其接觸界面所顯示出來的是一

個凹面，加上溶質和液面也是一個凹面(溶質可溶解)，而凹面和凹面會使溶質受接觸面外緣吸引¹，使得溶質被帶到外圍產生結晶，然後晶體間的毛細作用²使液面向外擴張出去，於周圍形成環狀殘跡。

(2.)結晶向內聚集：

若內聚力大於附著力，也就是起始接觸角大於 90 度，此時液滴在接觸線附近液面是凸面，而溶質和液面是一個凹面，而凸面和凹面會使溶質受接觸線外緣排斥¹，使得溶質向內聚集，形成內聚實心殘跡。

五、討論：

在玻璃上的水滴蒸發時，由實驗得知水滴高度和時間有近於線性的關係，而與固體的接觸面積除最初及最末外，都固定不變，我們不禁懷疑水滴蒸發時蒸發速率是否一直不變？但是深入討論發現，水滴水量越大時，才越趨近上述的線性關係，水量較小時，其實並非線性，這是否意味著水滴的蒸發速率並非定值？

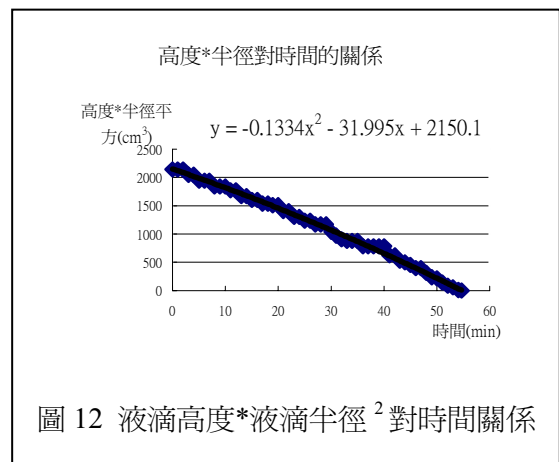


圖 12 為以液滴高度*液滴半徑平方對時間作圖，結果得到經驗式

$$V = -0.133t^2 - 32.0t + 2150$$

其中 t 為時間，V 為液滴高度與液滴半徑平方的乘積，可視為估計的液滴體積。因此蒸發速率為

$$-dV/dt = 0.266t + 32.0$$

也就是液滴的蒸發會越來越快。

但是蒸發與液滴表面與空氣的接觸面積有關，與空氣的接觸面積並未增加，這似乎與上述推論相互矛盾。因此我們重新修正液滴體積，首先利用液滴的弧度找出對應的半徑 R，液滴的高度 h，液滴的體積 V 計算如下

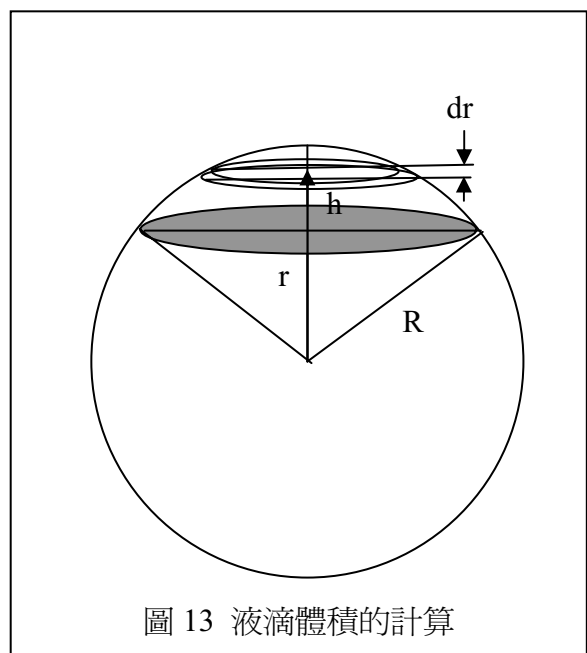


圖 13 液滴體積的計算

$$V = \int_{R-h}^R A(r) dr$$

$$= \int_{R-h}^R \pi(R^2 - r^2) dr$$

$$\begin{aligned}
&= \pi \left[\int_{R-h}^R R^2 dr - \int_{R-h}^R r^2 dr \right] \\
&= \pi \left[R^2 r \Big|_{R-h}^R - \frac{1}{3} r^3 \Big|_{R-h}^R \right] \\
&= \pi h^2 (R - h/3)
\end{aligned}$$

體積修正後，算得已蒸發體積 V' 對時間經驗式為

$$V' = -1291t^2 + 13243t$$

因此蒸發速率為

$$dv'/dt = 13243 - 2582t$$

亦即蒸發速率隨時間線性遞減。

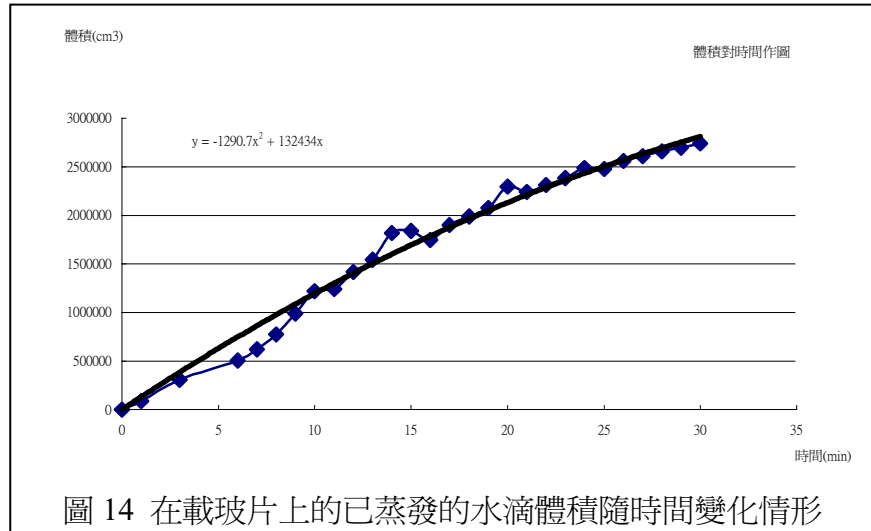


圖 14 在載玻片上的已蒸發的水滴體積隨時間變化情形

六、應用與展望：

當在推導蒸發速率時，發越接近蒸發末期速率越小，是否因為與空氣接觸的液滴面積變小的緣故？接觸面積與蒸發速率是有正比關係？是否還有其它因素存在？將再繼續做進一步探討。

此外，液滴蒸發時細微的液體流動的方向如何？可以用不溶於液滴的微粒(例如：壓克力粉)加入液滴中，藉由觀察微粒的移動來做探討。

本研究的結果可應用在探討噴漆及噴墨印表機的噴墨印刷上。

噴墨印表機若要清晰，其墨滴不宜外擴，且乾燥後殘跡應為實心，因此墨滴與紙張的接觸角應盡量設計在 90 度附近。

若是噴漆，我們希望漆面均勻，因此噴漆應稍微外擴，但乾燥後不應為環狀殘跡，而應是實心殘跡，所以噴漆的設計應使漆與被噴表面的接觸角小於 90 度，亦即附著力大於內聚力，但黏滯性需較高以形成實心殘跡。

七、參考文獻

1. 林省文等(2000):就是那個力-液面漂浮體的吸引與排斥現象。左中學報，第二期，pp.75-79。
2. 曾百宜等(2000):晶體攀緣現象。左中學報，第二期，pp.80-95。
3. 國立師範大學科學教育中心(1995):實驗十九 電流的磁效應，高中物理實驗手冊，第四冊，國立編譯館
4. Daniel Y. Kwok, Herman Ng, & A. Wilhelm Neumann(2000),Experimental Study on Contact

Angle Patterns: Liquid Surface Tensions Less Than Solid Surface Tensions, Journal of Colloid and Interface Science, Vol225,pp.323-328.

5. L.R. van den Doel, K.T. Hjelt, I.T. Young, L.J. van Vliet(1999), ASCI99, Proc. 5th Annual conference of the Advanced School for Computing and Imaging(Heijen, NL, June 15-17),ASCI, Delft, 1999, 58-64
6. Robert D. Deegan (1998), Deposition at pinned and depinned contact lines: Pattern formation and applications, <http://mrsec.uchicago.edu/~tten/Nagel.7.4.pdf>
7. A. Amirfazli(1998),Line Tension Measurements Through Drop Size Dependence of Contact Angle, Journal of Colloid and Interface Science, Vol205,pp.1-11.
8. Robert D. Deegan (1997),Capillary flow as the cause of ring stains from dried liquid drops, Nature, vol 389, pp.827-829.
9. Rachid Chebbi & M. Sami Selim(1997), Capillary Spreading of Liquid Drops on Solid Surfaces,Journal of Colloid and Interface Science, Vol195,pp.66-76.

附錄:實驗裝置



Witnessing the Drops Evaporating Event

Liu, Cheng-hua
Tsoying Senior High School, Kaohsiung , Taiwan

Introduction

Beads of dew cling to the leaves swinging in the breeze. They will soon be evaporated under the morning sunshine. Have you ever noticed what happened to those drops during their evaporation? Do the contact lines where drops meet the leaves shrink? Do the coffee drops spilled on the table evaporate in a similar way? How many models of liquid drops evaporation are there?



Experimental

A digital video camera (DV) was used to take close-ups of the sample drop (Fig. 1). The pictures taken by DV were transferred to a personal computer by an interface card of image capture. The images were retrieved at fixed period to convert them to a fast motion animation.

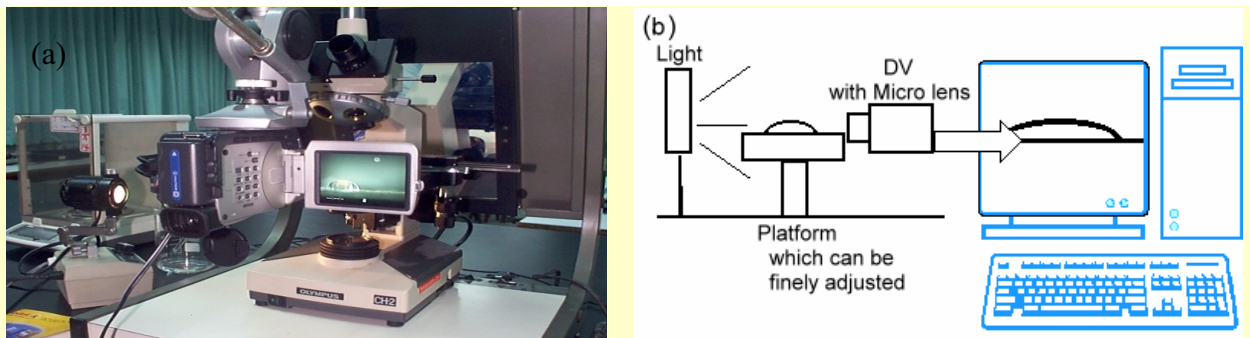


Fig.1 (a) Equipments used for drop observing (b) Schematic drawing of experimental setup

The magnified image of the drop (Fig. 2) was projected on the grid paper by a liquid crystal display projector, so that the changes on contact angles and heights of drops could be measured easily and precisely.

For the processing of large numbers of evaporating drops pictures, a computer program had been developed. The algorithm is stated as Fig. 3.

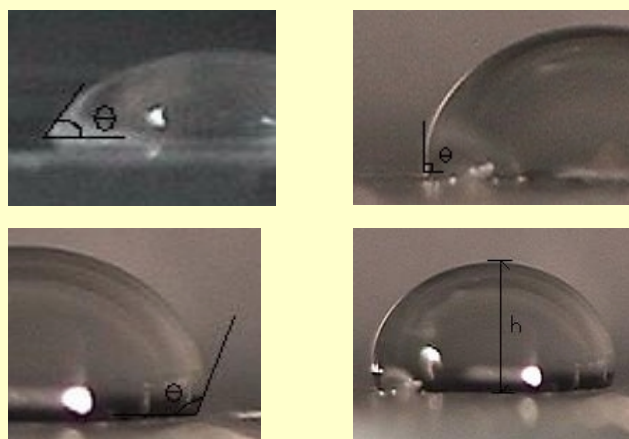


Fig. 2 Measuring contact angles and heights of drop

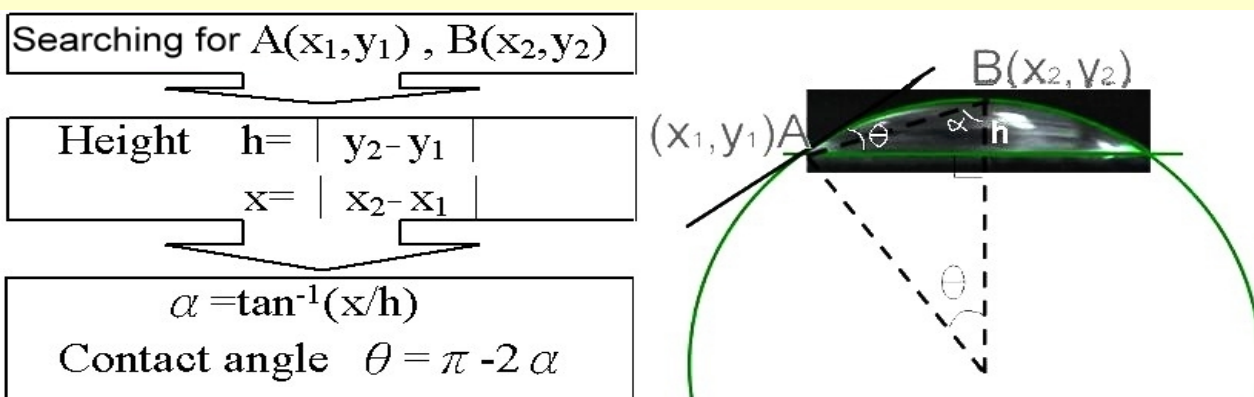
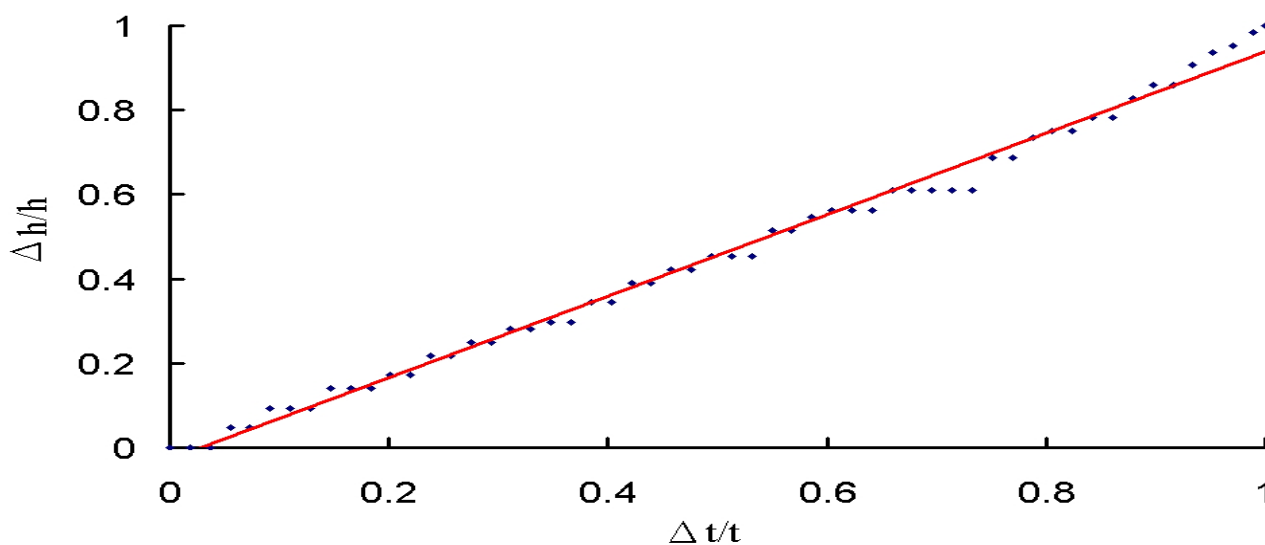


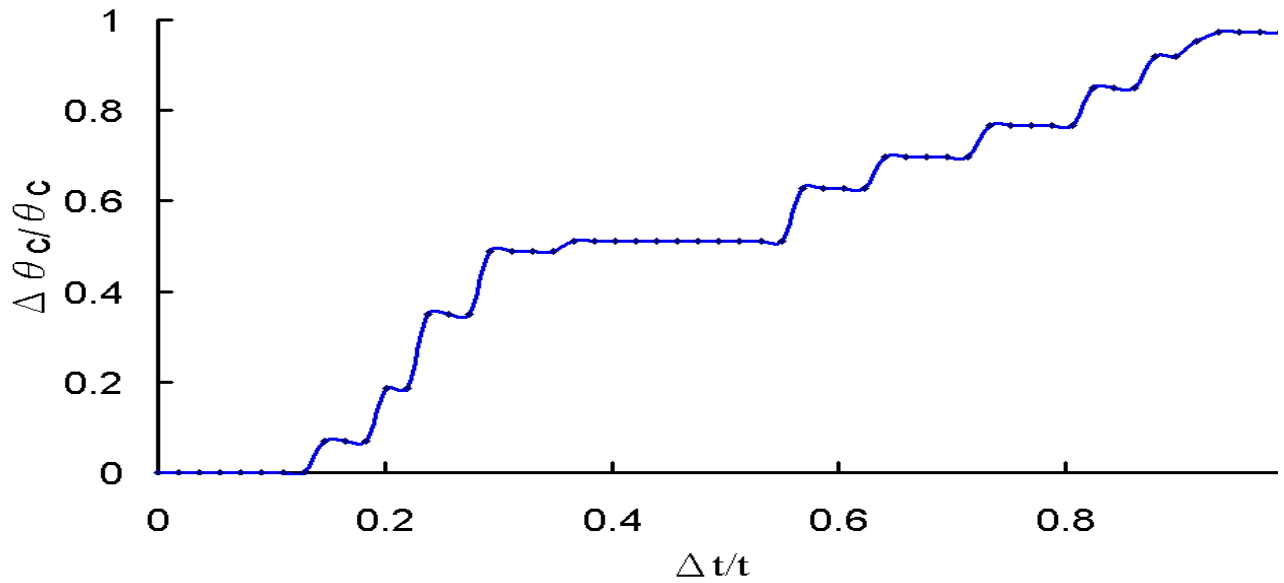
Fig. 3 Calculation of contact angles θ and heights h

Results

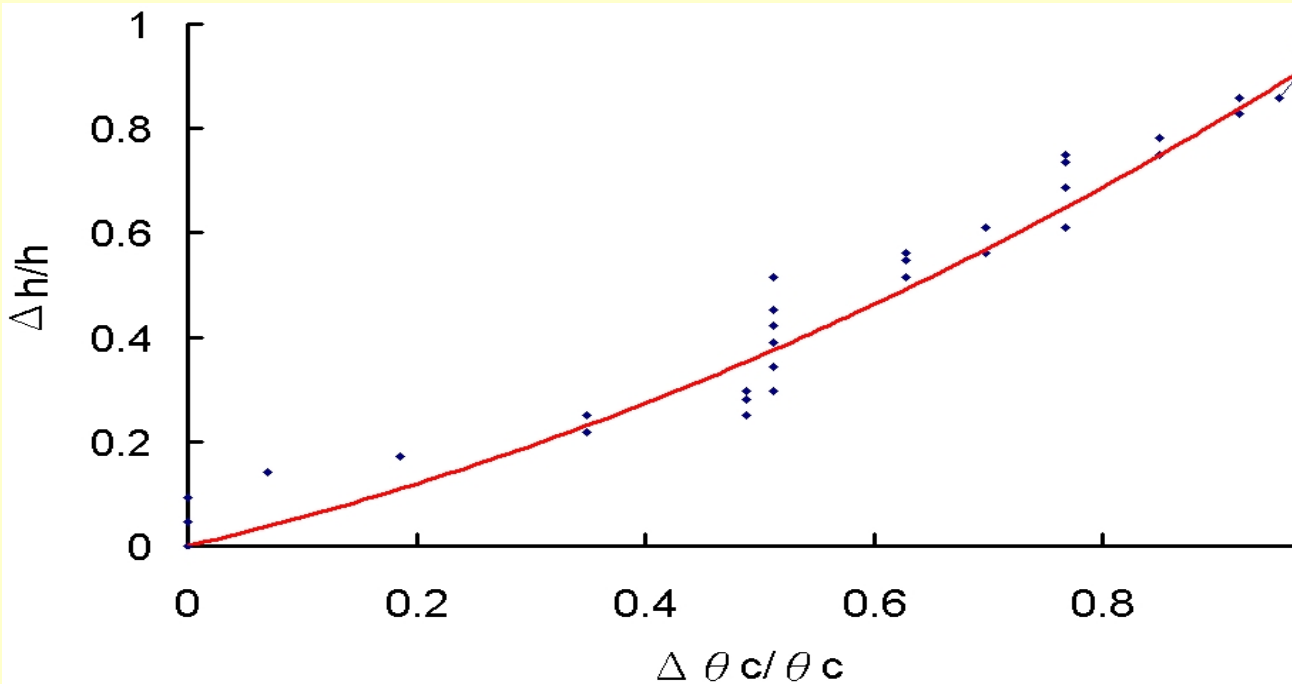
(1) Evaporation process of water drop



(a) Decrease of drop height during evaporation



(b) Decrease of drop contact angle during evaporation



(c) Decrease of drop height verses contact angle

Fig. 4 Measurement of contact angle and height of water drop (20mg) at 24°C and 78% humidity

The contact angle and the height of the evaporating drop do not change continuously but decrease in steps (Fig. 4).

During initial phase of evaporation, the decreasing ratio in contact angle, $\Delta\theta_c/\theta_c$, is larger than the decreasing ratio in height, $\Delta h/h$, where $\Delta\theta_c$ is the decrease from initial contact angle θ_c and Δh is the decrease from initial height h of the drop. When $\Delta\theta_c/\theta_c$ is higher than 0.5, it becomes smaller than that in height.

The contact line where the drop meets glass is **pinned** to the initial position throughout the evaporation.

(2) Evaporation on distinct solid surfaces

● *Liquid drop evaporating images of non-crystal solution*

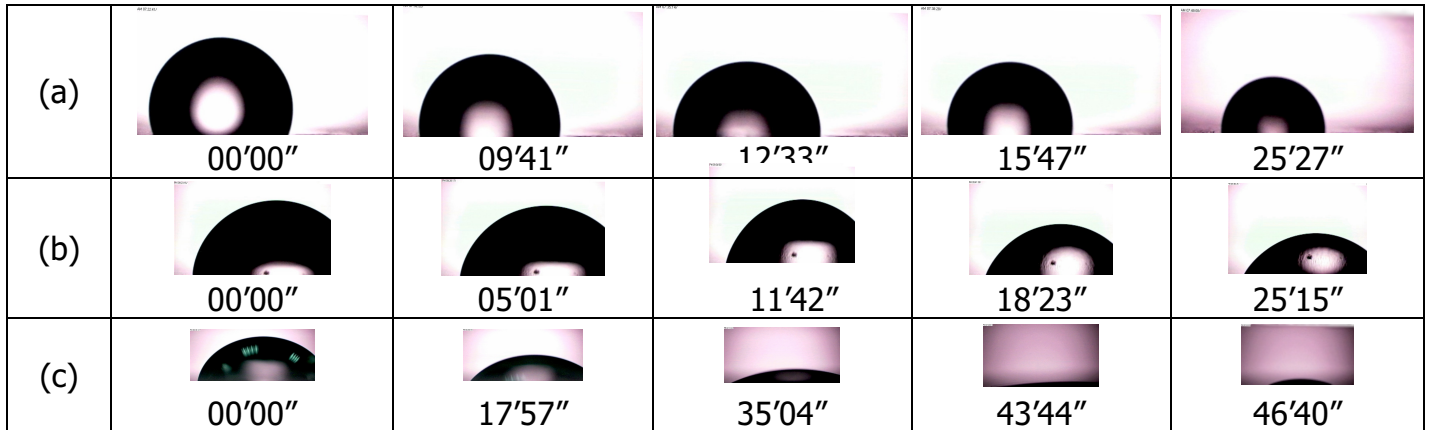
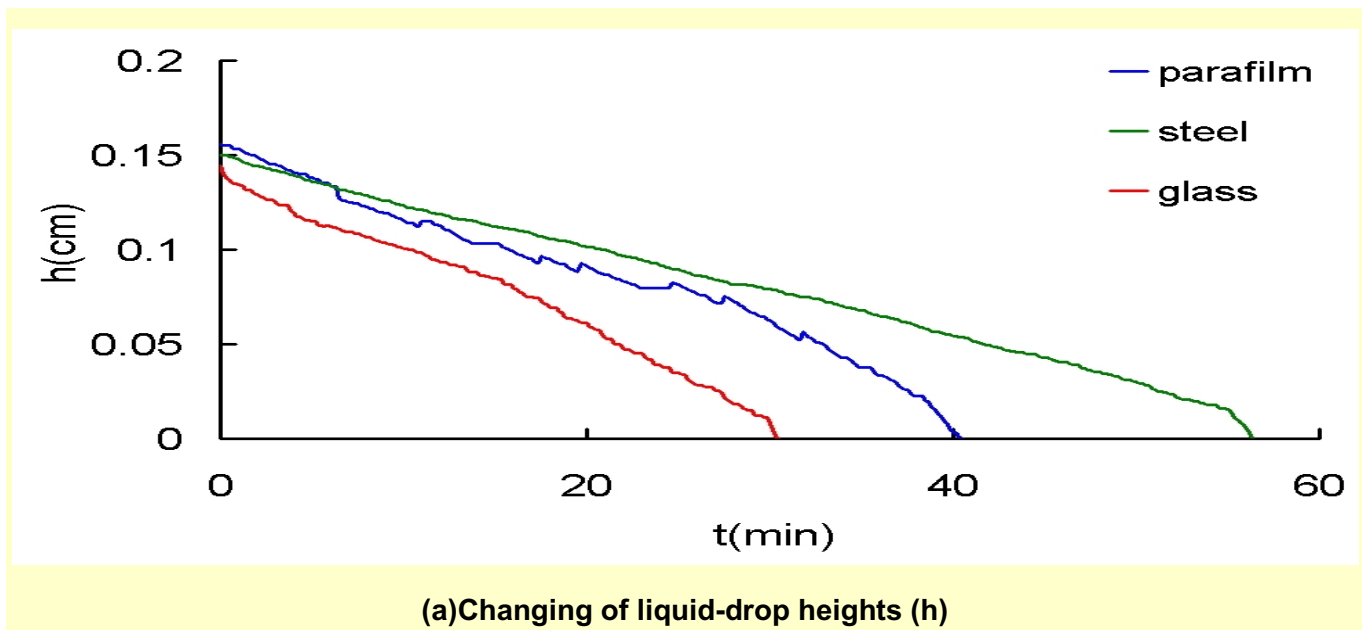
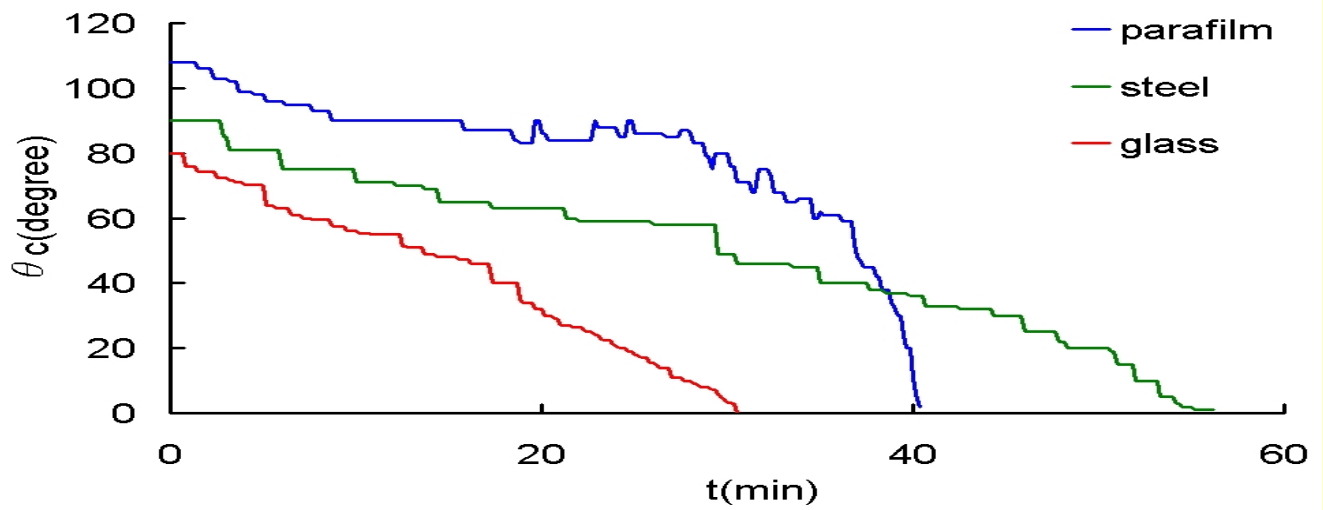
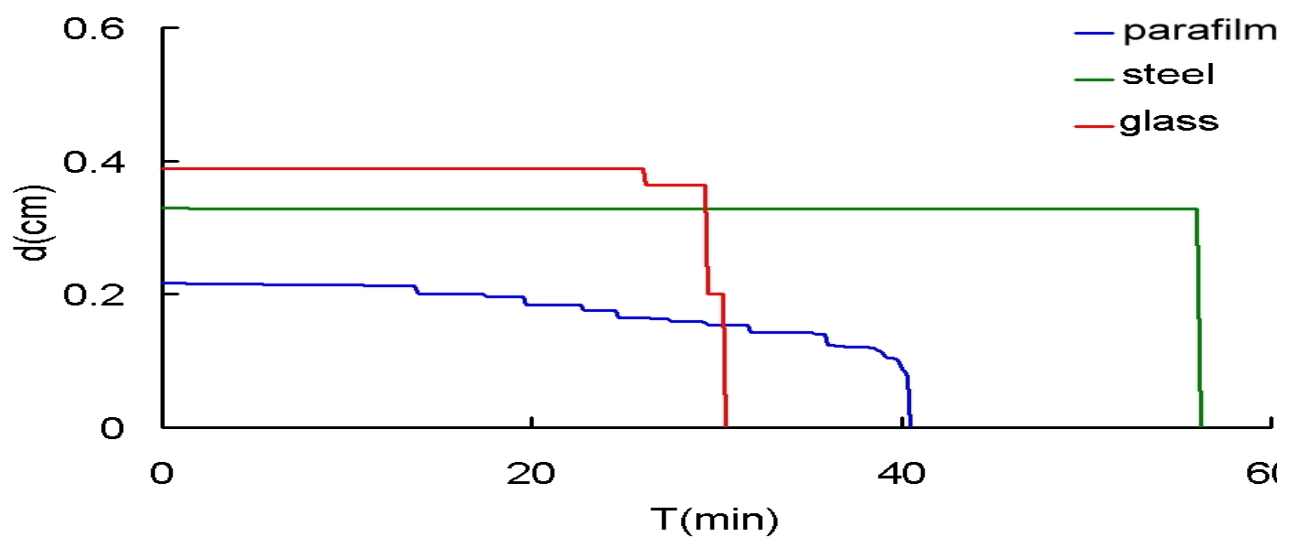


Fig. 5 Liquid drop images shot at varied exposure time indicating on figure(a) $\theta_c > 90^\circ$, Parafilm; (b) $\theta_c = 90^\circ$, Steel ;(c) $\theta_c < 90^\circ$, Glass; where θ_c is the contact angle between different solid surface and water drop.





(b) Changing of liquid-drop contact angles(θ_c)



(c) Changing of the diameter of contacting

Fig. 6 The physical parameter h , θ_c and d , against the evaporation time at 240C and humidity 76%

Table 1 Evaporating models of liquid drops of non-crystal solution

θ_c	Contact line		
	First	Medium	Last
$>90^\circ$	Pinned until 90°	Shrink in steps	Contracted spot-like stain
$\approx 90^\circ$	Pinned	Pinned	Spot-like stain
$<90^\circ$	Pinned	Shrink slightly	Ring-like stain



● **Liquid drop evaporating images of crystal solution**










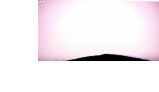




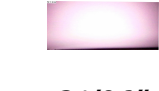
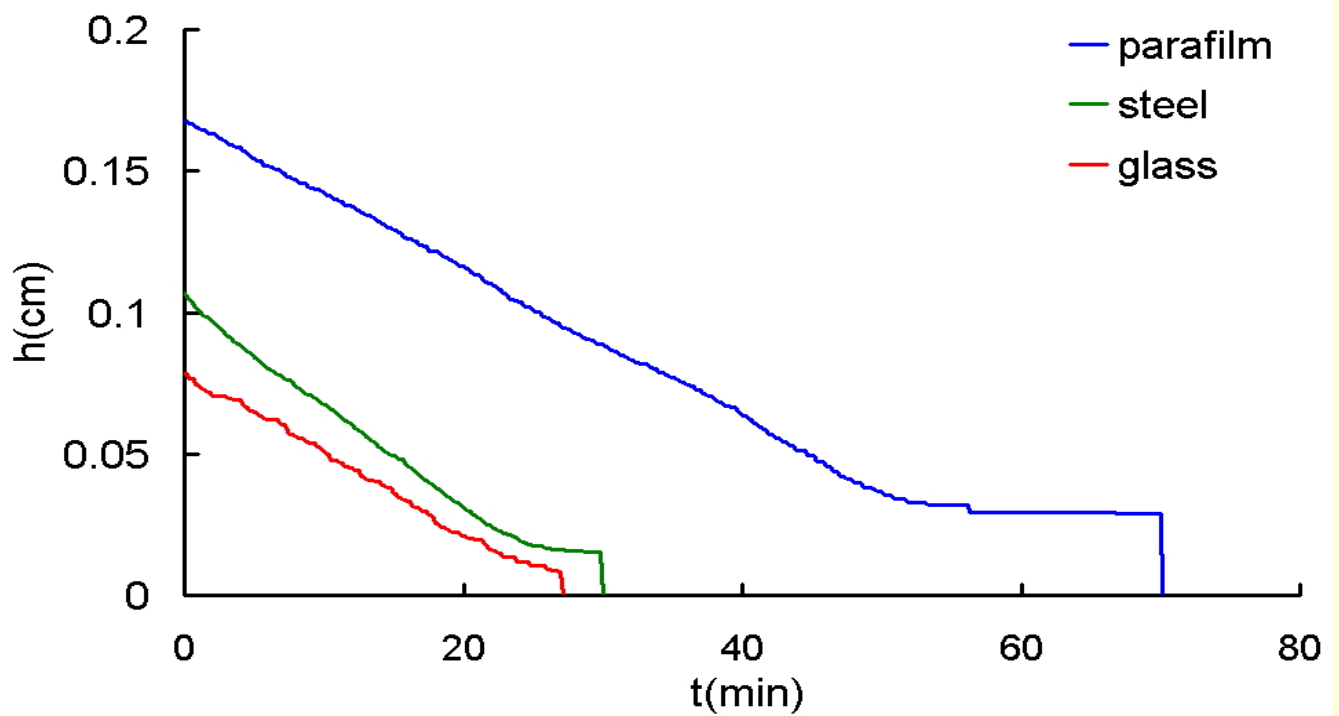
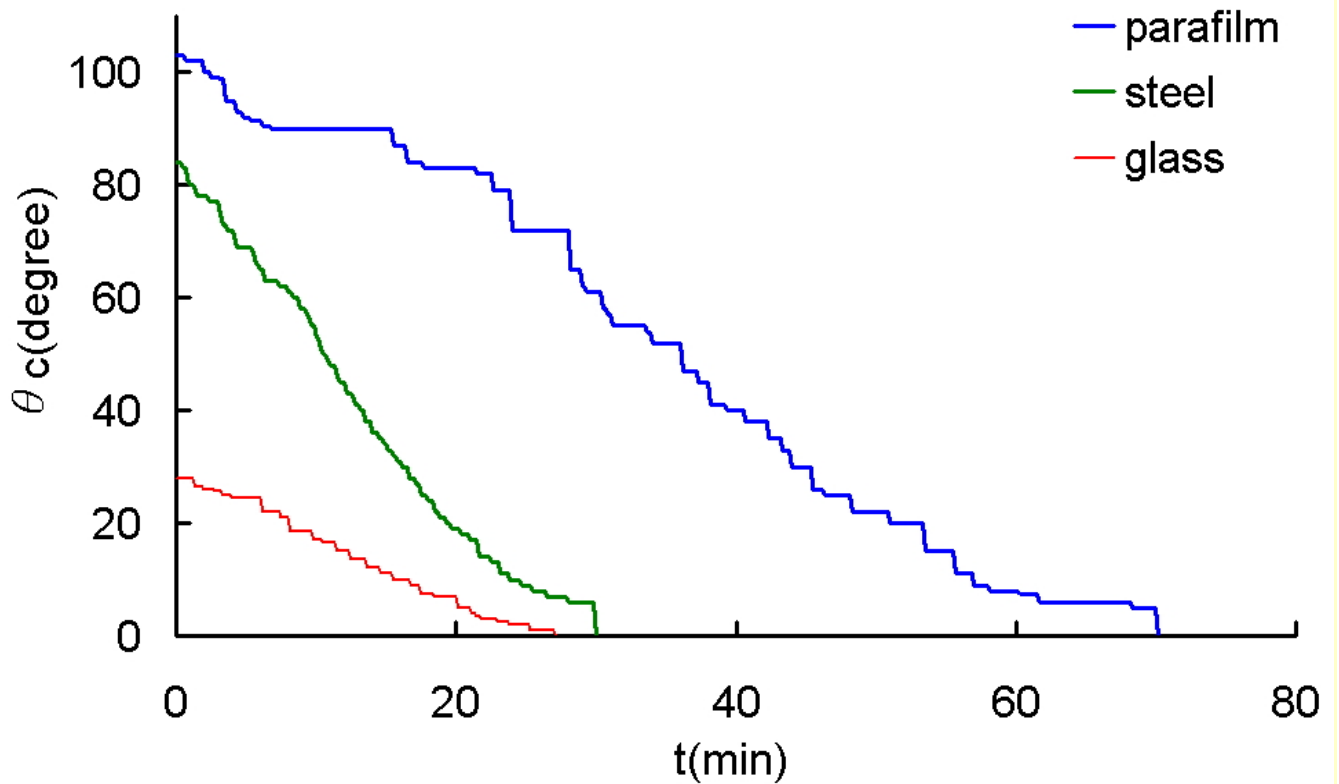
(a)					
(b)					
(c)					

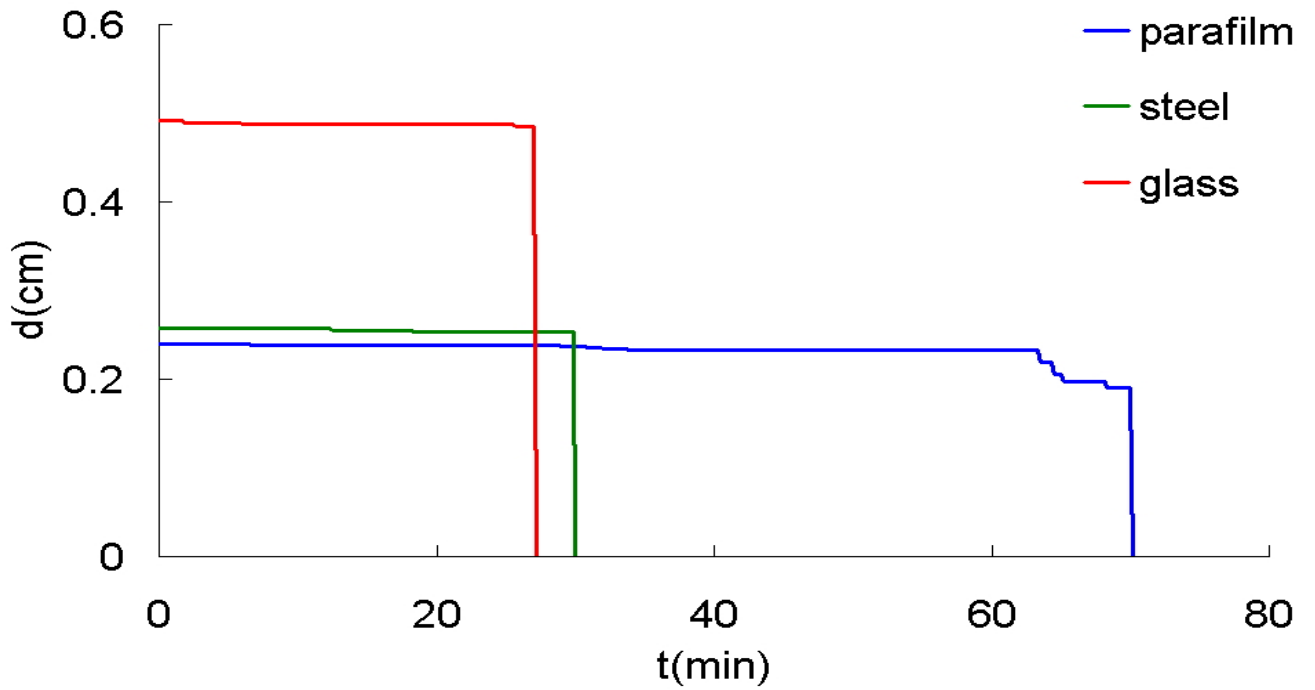
Fig. 7 Liquid drop images shot at varied exposure time indicating on figure(a) $\theta_c > 90^\circ$, Parafilm; (b) $\theta_c = 90^\circ$, Steel ;(c) $\theta_c < 90^\circ$, Glass; Where θ_c is the contact angle between different solid surface and water drop.



(a) Changing of liquid-drop heights (h)



(b) Changing of liquid-drop contact angles(θ_c)





(c) Changing of the diameter of contacting

Fig. 8 The physical parameter h, θ_c and d , against the evaporation time at 240C and humidity 76%

Table 2 Evaporating models of liquid drops of crystal solution

θ_c	Contact line		
	First	Medium	Last
$>90^\circ$	Pinned	Pinned	Spot-like crystal stain
$\approx 90^\circ$	Pinned	Pinned	Spot-like crystal stain
$<90^\circ$	Pinned	Shrink slightly	Expanded ring-like crystal stain





Discussion

A drop is considered a part of certain sphere with radius R as shown in fig. 9(a). The remaining volume V illustrated in Figure 9(b) is given by the integral of the cross-section area A from $r=R-h$ to R , where h is the remaining height of the drop. This is written as

$$V = \int_{R-h}^R A(r) dr \quad \text{or} \quad V = \pi h^2 (R - h/3)$$

The formula above is applied to the previous experiments to obtain the reducing volume of the evaporating drop. Fig. 10 shows the reducing volume V' as a function of time t . The best-fit line for

the data is stated as

$$V' = -1291 t^2 + 13243 t$$

The evaporation speed is the slope of the line,

$$dV'/dt = -2582 t + 13243 ,$$

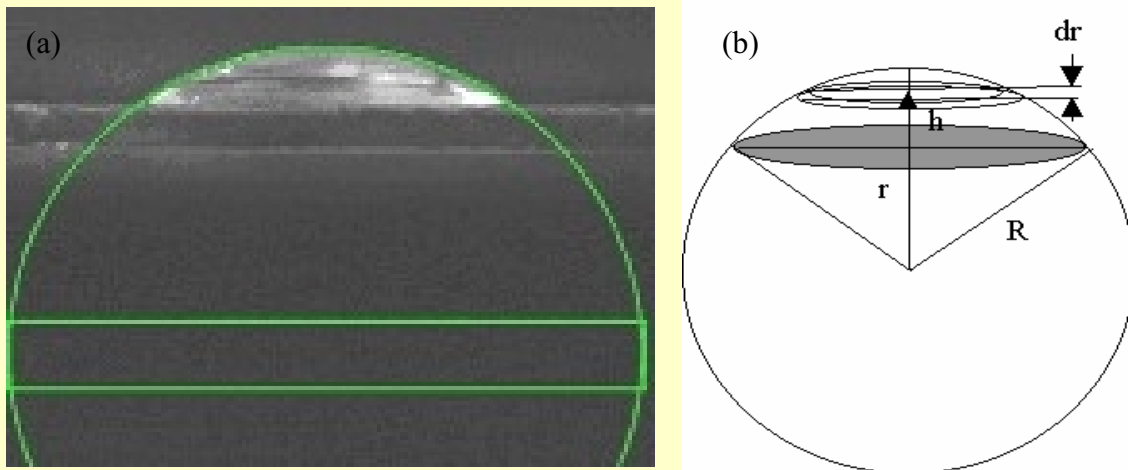
which is not constant, but decreases slowly during evaporation.

The liquid-air contact area S can be calculated by the formula that obtained by the similar way as previous, that is

$$S = 2\pi Rh$$

Apply this equation to the previous experiments, and then we have the result shown in fig.11. The evaporation speed is not directly proportional to the liquid-air contact area. The evaporation speed becomes much slower while the liquid-air contact area is getting small.

Why does the evaporation speed slow down when time is passing? The possible variables that affect the evaporation speed of a drop are temperature, humidity of the surrounding, contact area with air, and drop material that presented with cohesive and adhesive forces. The given drop was experimented at the constant temperature and humidity. According to the discussion above, there are more related variables, besides that of contact area. The adhesive force becomes more obvious than the cohesive force while the drop gets smaller and smaller. An assumption that the adhesive force slows down the evaporation speed was raised and supported with the evidences shown as Fig. 11.



**Fig.9 (a)fitting the shape of the drop wirh a certain circle
(b)Integating to obtain the volume of the drop**

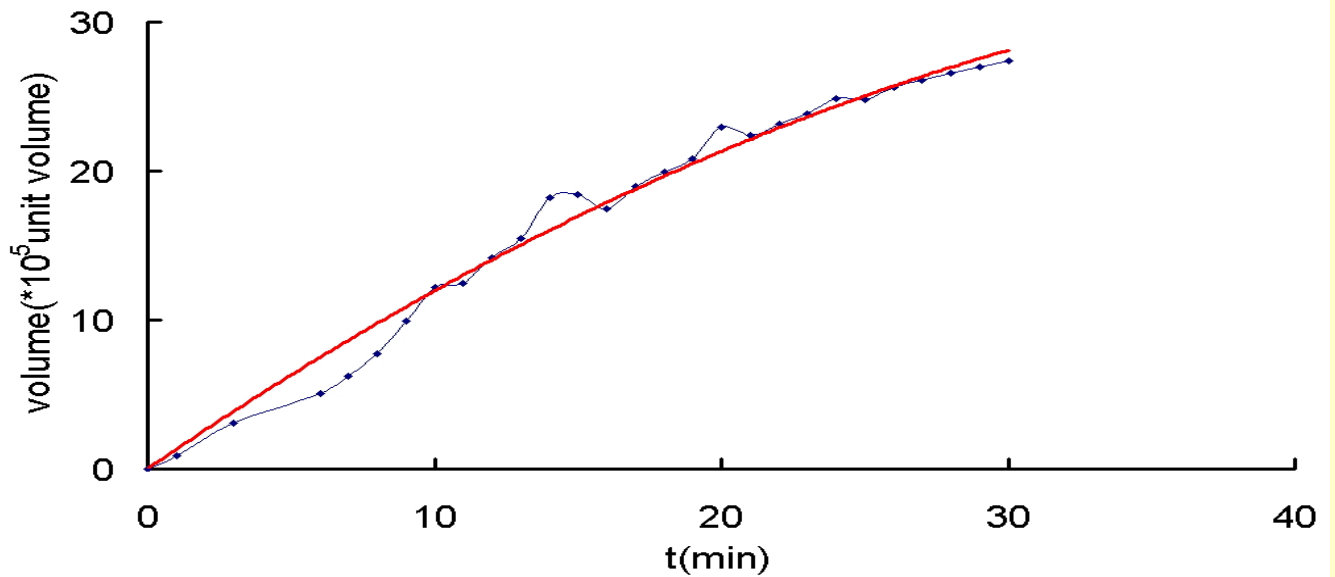


Fig. 10 The reducing volume of the evaporating

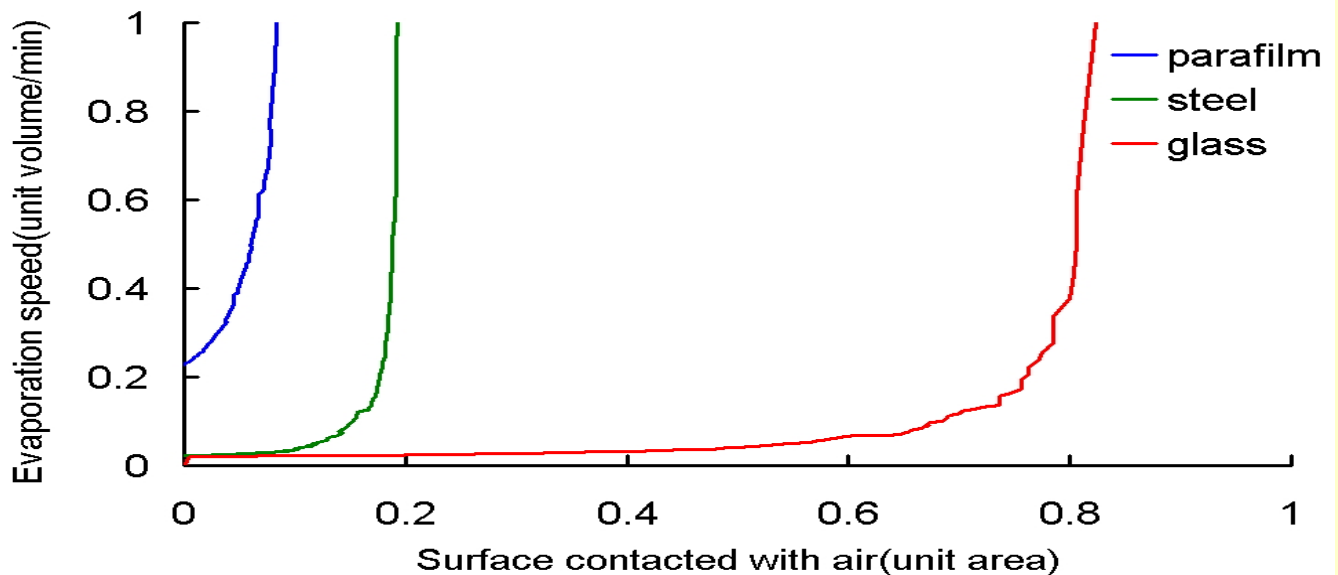


Fig. 11The evaporation speed vs. drop surface area contacted with air

Conclusion

It was found that the contact angle and the height do not change continuously but continually in steps during the process of the evaporation. The contact line is pinned at the initial stage, but the ending of the evaporation can be classified into three categories:

First, the adhesive forces that are larger than the cohesive forces cause outward capillary flows carrying the solutes to the edge of the drop. The ring-like stain is formed at the initial position of the contact line. Second, as explained above, if the capillary flows carry the crystal solutes to the edge of the drop and crystallize, there will be “capillaries” between crystals. Because of the capillarity, the contact line spread outwardly. Third, the cohesive forces that are larger the adhesive forces cause the contact line to be contracted and a spot-like stain remains.

Application & Prospective

The results of present investigation can be applied to the improvement of the technologies of DNA micro-array and the ink jet used in ink-jet printer.

The DNA micro-array base is usually made of glass-like material. The probes in array are fixed on the base, and then the target can be reacted on the micro-array. If we control the variables of drop evaporation and lower the evaporation speed of the target, we can increase the hybridization time to react more completely.

We expect ink-jet printers to have a higher resolution, so the ink drops should not expand and should form solid spots when they are air-dried. Therefore, the contact angle between the ink drop and the paper should be designed at about 90 degrees.

References

1. Amirfazli, A., Kwok, D. Y., Gaydos, J., and Neumann, A. W., J. Colloid Interface Sci. 205, 1(1998).
2. Deegan, R. D. , Nature 389,.827(1997).
3. Lin, Hsing-wen, J. Tsoying S.High School .2, 75 (2000).
4. Zen, Bai-yi, J. Tsoying S.High School .2, 75 (2000).
5. Kwok, D.Y., Ng, H. and Neumann, A. W., J. Colloid Interface Sci. 225, 323(2000).
6. van den Doel,L.R., Hjelt,K.T., Young,I.T.,and van Vliet L.J. ASCI99, Proc. 5th Annual conference of the Advanced School for Computing and Imaging, 58 (1999).
7. Chebbi, R., Selim, M. S., J. Colloid Interface Sci. 195, 66(1997).

評 語

- (1) 本作品利用數位攝影，配合電腦詳實的紀錄液滴的蒸發過程。依液滴與界面接觸角的不同分成銳角、90 度與鈍角三類蒸發方式，分別探討水滴質量、水滴與界面附著力、表面張力、黏滯性、溫度等因素對蒸發的影響。
- (2) 題目新穎實驗觀測完整充實而且有趣。理論說明大致合理，但有待加強。
- (3) 蒸發的最後階段，液滴與界面之作用變強，是研究較重要且更有趣的範圍，宜加重視。