

# 中華民國第 52 屆中小學科學展覽會

## 作品說明書

國中組 物理科

第三名

030106

水「升」火熱

—探討水珠在高溫下彈性與移動狀態

學校名稱：新竹縣立成功國民中學

作者：	指導老師：
國二 張峻豪	張君豪
國二 張承宗	柯淑惠
國二 羅子捷	

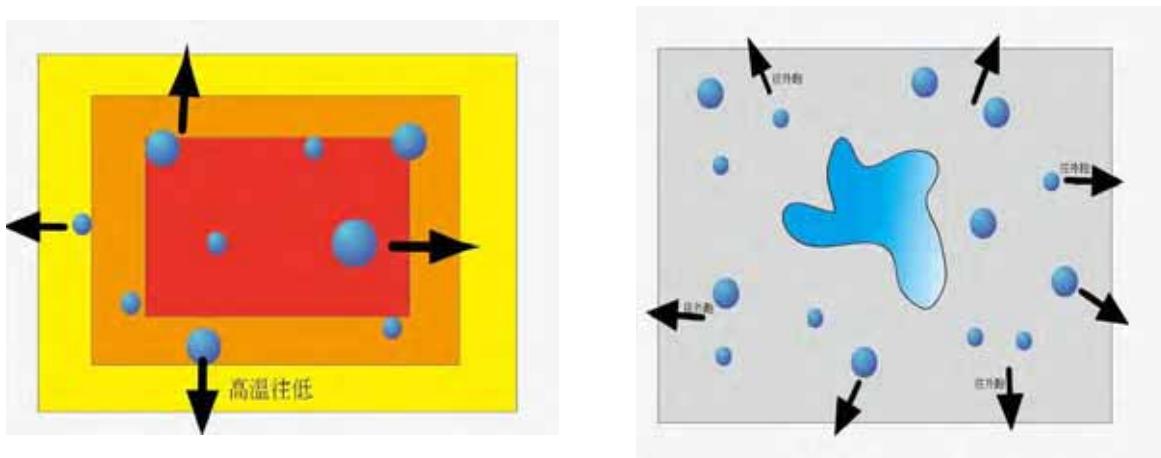
關鍵詞：溫度、表面張力

## 摘要

我們發現在加熱板上製造出溫差，並滴水在加熱板上，水珠會由高溫往低溫處移動的現象；我們判斷在較高溫處所產生的蒸氣氣膜厚度較低溫處厚，使水珠向低溫處傾斜，導致水珠往溫度低處移動，由本實驗得高溫板上水珠會向較低溫度方向進行散射現象(以上敘述貼合研究動機圖示)。水珠在溫差  $20^{\circ}\text{C}$  最高可以爬上  $0.3$  度的坡度，且溫差越大水珠能攀爬的坡度也愈大。在水珠碰撞的部分，根據我們實驗結果，在高熱板上滴水可以形成水珠並進行碰撞與移動。藉由控制溫度及水珠大小找出其對恢復係數的影響，證明在固定溫度下水珠大小的增加，會造成水珠的恢復係數  $e$  隨之遞減；而隨溫度的增加，則水珠的恢復係數  $e$  會隨之增加。

## 壹、研究動機

有一次和同學相約去吃鐵板烤肉，發現滴在高溫的板子上的水竟然不會立即蒸發，而是在熱鐵板上頭彈跳、碰撞與移動。因為熱源在加熱板正下方，使得板中央溫度為較高的部分，水珠會向四面八方溫度較低的部分跑，在隨後才會慢慢蒸發消逝，我們對此現象十分感興趣，於是設計這一連串的實驗並深入探討水珠的碰撞與移動。



## 貳、研究目的

- 一、水珠之基本測量
  - (一)單位水珠的體積
  - (二)加熱水珠板面材質之選定
  - (三)水珠在不同溫度下的停滯時間

- 二、水珠在加熱板運動情形之探討
  - (一)溫度對水珠的移動方向之探討
  - (二)水珠移動速率與加熱板傾斜角度的關係
  - (三)水珠移動速率與加熱板溫差的關係
  - (四)水珠移動速率與大小的關係

- 三、水珠在高溫下彈性與碰撞之探討
  - (一)水珠大小與彈性係數之探討
  - (二)不同溫度下水珠的彈性係數

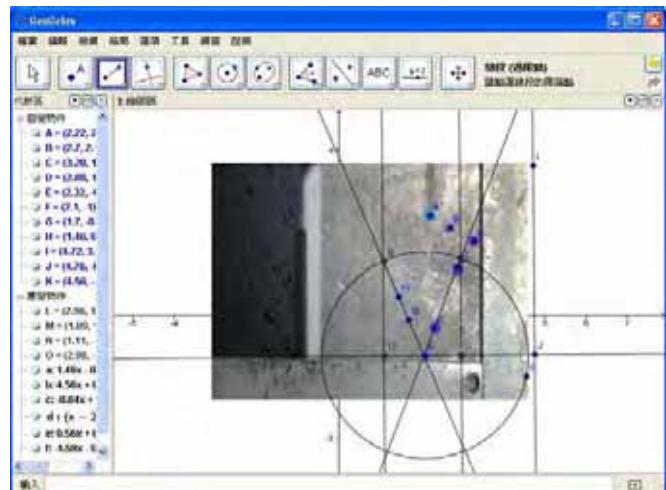
## 參、研究設備及器材

### 一、實驗器材

▼ (表 3-1-1) 實驗器材

加熱器	鋁條兩條 150mm*30mm*10mm	固體溫度計
鐵片 (厚度：0.02cm)	攝影機	鋁板 150mm*150mm*15mm
鋁板 200mm*150mm*15mm	鋁板 (含 3 條軌道) 200mm*150mm*15mm	

### 二、軟體 GeoGebra4 介紹

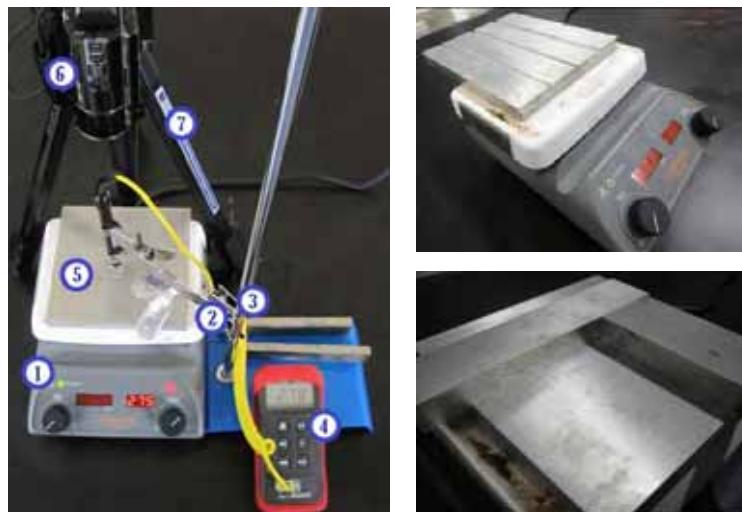


操作步驟：

- (一) 將水珠的位置設點。
- (二) 把入射前的兩點相連，反射後的兩點相連，交於碰撞點。
- (三) 以碰撞點為圓心，畫圓。
- (四) 圓弧交於入射線及反射線各兩點。
- (五) 利用實驗原理【觀念二】，進行計算。

### 三、實驗裝置(如圖 3-3-1)

- (1)加熱器
- (2)鐵夾
- (3)鐵架
- (4)溫度計
- (5)鋁板
- (6)攝影機
- (7)腳架



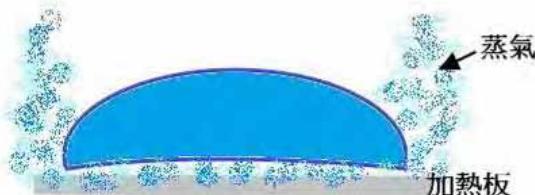
(圖 3-3-1)

## 肆、實驗原理

### 【觀念一】：蒸氣層與萊登弗斯特(Leidenfrost)現象

水滴在高溫加熱板上的接觸瞬間，水分子馬上會汽化成一層蒸氣氣膜，降低了加熱板的熱傳導速率，一層蒸氣膜保護水珠而形成穩定水珠，延長了在加熱板上的停滯時間。如(圖 4-1-1)。

1756年萊登弗斯特做出具體的科學化實驗，他把鐵湯匙在火爐上加熱成紅熱，然後把水滴滴在其上。第一滴水可以存活約30秒，但紅熱的湯匙也因散熱而變暗。第二滴水存活約10秒，第三滴水存活得更短，直至水滴只能潤濕湯匙而且快速消失。當時萊登弗斯特並沒有注意到當水滴落在紅熱的湯匙上時，二者之間產生一蒸汽的阻隔層，但後人為了感念他的實驗觀察，就把水滴在熱盤上存活最久的溫度，稱為萊登弗斯特溫度。



### 【觀念二】：碰撞與恢復係數

設計簡易方式測定水珠恢復係數。如圖(4-2-1)  
水珠撞擊障礙物時，假設碰撞前後水珠質量不變。

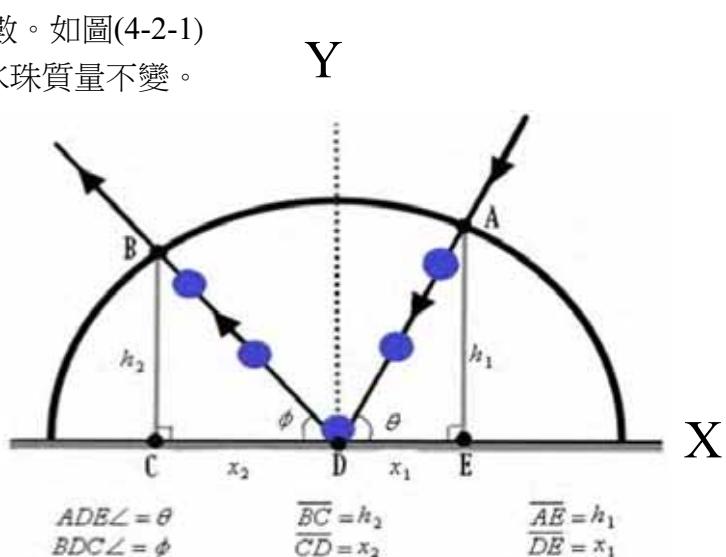
X:水平方向 障礙物視為不動

Y:垂直方向 動量守恆

$$mv \cos \theta = mv' \cos \phi$$

$$\frac{v'}{v} = \frac{\cos \theta}{\cos \phi} \quad \Delta \overrightarrow{P_X} = 0$$

$$e = f(\theta, \phi)$$



(圖 4-2-1)

$$\text{恢復係數 } e = \frac{\text{分離速度}}{\text{接近速度}} = -\frac{-v' \sin \phi}{v \sin \theta} = \frac{\cos \theta \sin \phi}{\cos \phi \sin \theta} = \frac{\tan \phi}{\tan \theta} = \frac{h_2 / x_2}{h_1 / x_1}$$

由此可知恢復係數是角度  $\theta$  與角度  $\phi$  的函數，與速度無關；寫為  $e=f(\theta, \phi | \text{質量；溫度；}\Delta T=0)$ ，故我們可以不用考慮吸管吹動的力量大小，僅測量水珠角度  $\theta$  與角度  $\phi$ ，即可求出水珠與鋁板碰撞的恢復係數  $e$ 。

## 伍、研究設計

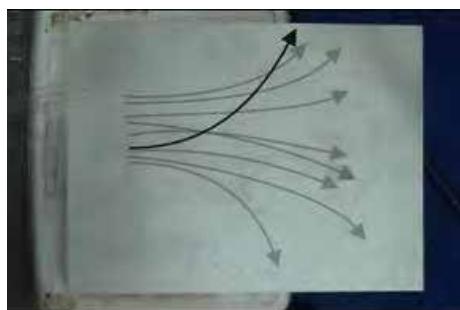
### 一、研究方法

#### (一)選用鋁板進行實驗：

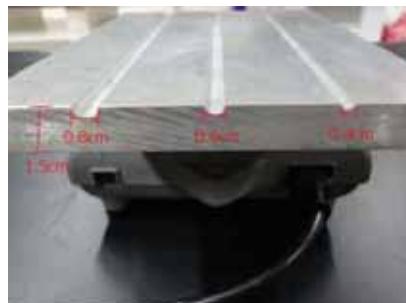
在觸手可及的金屬材料當中，鋁所產生的氧化物質地細密，不易有產生氧化物凸起的現象。則在後面的實驗二「加熱水滴板面材質之選定」可以看到銅與鋁板的臨界和穩定溫度低，所形成水珠較穩定，但銅卻有氧化物的影響，故使用鋁板。可以同時避免掉 2011 年台灣國際科展物理組作品「水滴在高溫鋸齒狀金屬表面上的爬坡現象」他們使用鐵片可能產生出氧化物的顧慮。

#### (二)加熱板上的軌道：

由(圖 5-1-2-1)可以看到水珠因為末端的溫度分布不均，所以向低溫處跑的路徑並不固定，但板子的前後的均溫差任在實驗的誤差值內( $+/-2^{\circ}\text{C}$ )。所以在鋁板上以水珠的大小分別製作剛好符合其直徑的軌道，以方便進行後續的實驗，以及確保實驗的精確。



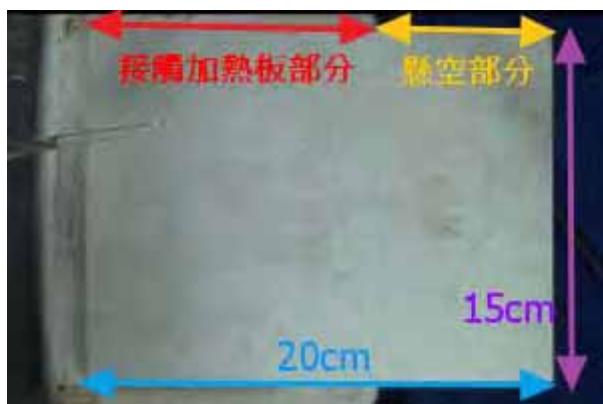
(圖 5-1-2-1)



(圖 5-1-2-2)

#### (三)加熱板部分懸空：

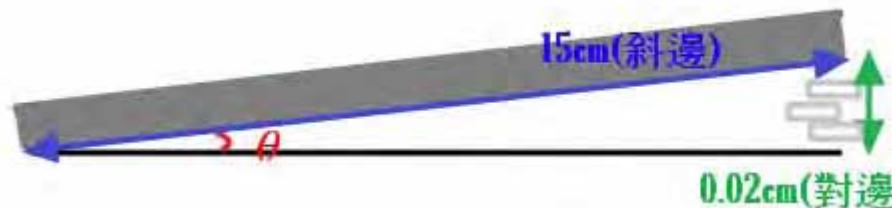
選定長  $x$  寬為  $20\text{cm} \times 15\text{cm}$  的鋁板，長的部分較加熱器所可以加熱的範圍長，以利於製造出最多 40 度溫差，如(圖 5-1-3-1)。



(圖 5-1-3-1)

#### (四)利用反三角函數計算其角度:

由(圖 5-1-4-1)我們假設角度是  $\theta$ ，所以  $\tan \theta$  就是  $0.02/15$  (對邊/斜邊)，所以你要求  $\theta = \arctan(0.02/15)$  (反三角函數)算出  $\theta \approx 0.07639^\circ$ 。利用反三角函數，我們只要得知其邊長在利用這樣的方式進行計算及渴求出精確的角度。



(圖 5-1-4-1)

## 二、實驗流程圖



## 三、名詞定義

(一)單位體積：滴管落下每一滴水珠之平均體積。

(二)停滯時間 T：水珠在加熱板上蒸發消逝的時間，亦稱為水珠的生命週期。

(三)臨界溫度( $t_c$ )：水珠開始可在加熱板上形成的最低溫度，但停滯時間無法持久，約為 1~3 秒，可推測蒸氣膜開始形成的溫度是臨界溫度( $t_c$ )



(四)穩定溫度( $t_s$ )：在加熱板上可成與滴管所滴出的水珠相近大小的最低溫度，水珠可在加熱板上停留一段較長的時間。



(五)加熱板面間溫度差( $\Delta T$ )：同一加熱板加熱板面間各處溫度所產生不同溫度的狀態。

# 陸、研究過程及結果

## 一、水珠單顆體積

<目的> 找出滴管所滴出一滴水珠的大小。

<方法> 分別滴入 50、100、150 及 200 滴的水珠滴入量筒中，求取平均值，計算式如下：

$$\text{量筒中水的總量}/\text{水滴的滴數} = \text{水珠的單位體積}$$

<結果> 如(表 6-1-1)可得到一滴水珠的體積大小約為 0.0562ml。0.05615 以四捨五入法，取進似值為 0.0562；體積誤差率為  $[(0.0562 - 0.05615)/0.0562] \times 100\% = 0.089\%$

▼(表 6-1-1) 水珠單顆體積

滴數	50 滴	100 滴	150 滴	200 滴	單位總平均
第一次	2.81	5.59	8.41	11.29	
第二次	2.79	5.60	8.38	11.30	
第三次	2.82	5.61	8.40	11.32	
平均	2.81	5.60	8.40	11.30	
單位平均	0.0561	0.0560	0.0560	0.0565	0.0562

註：單位(c.c)

## 二、加熱水滴板面材質之選定

<目的> 找出水珠在各加熱板上的臨界溫度<sup>(註一)</sup>與穩定溫度<sup>(註二)</sup>，以利尋求實驗之最佳狀態。

(註一) 臨界溫度：水珠開始可在加熱板上形成的最低溫度，但停滯時間無法持久，約為 1~3 秒。

(註二) 穩定溫度：在加熱板上可成與滴管所滴出的水珠相近大小的最低溫度，水珠可在加熱板上停留一段較長的時間。

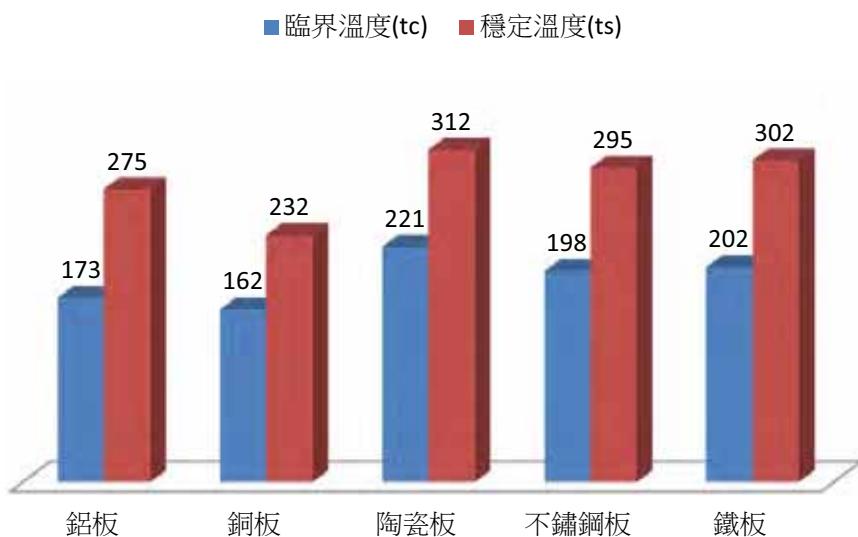
<方法> 利用滴管在不同介面材質之加熱板上，高度低於 2cm 處滴入一滴常溫(16°C)的蒸餾水，溫度由 150°C 提升，並觀察水珠在不同加熱板上的變化狀態，分別找出臨界溫度和穩定溫度。

<結果> 臨界溫度( $t_c$ )或穩定溫度( $t_s$ )越低溫產生氣膜的時間也越快，停滯時間越久，代表停滯時間越久。如(表 6-2-1)可看到銅板( $t_c$ )在 162°C 效果最佳，( $t_s$ )約是 232°C。鋁板的臨界溫度( $t_c$ )為 173°C，175°C 之後水珠的氣膜隨著溫度增厚，其停滯時間增加，當溫度達到 275°C 我們研判時水珠，氣膜已足夠，使水珠可在加熱板上可形成完整的水珠。

▼ (表 6-2-1) 水滴在不同加熱板的臨界溫度與穩定溫度

	加熱板	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均溫度
臨界溫度 ( $t_c$ )	鋁板	173	171	169	175	177	173
	銅板	163	164	159	160	163	162
	陶瓷板	221	219	223	225	218	221
	不鏽鋼板	198	200	199	196	199	198
	鐵板	201	205	198	203	201	202
穩定溫度 ( $t_s$ )	鋁板	275	273	271	277	278	275
	銅板	232	231	234	233	234	232
	陶瓷板	313	310	311	314	311	312
	不鏽鋼板	298	295	296	294	296	295
	鐵板	300	304	299	305	301	302

註：單位(°C)



(圖 6-2-1)加熱板與臨界溫度、穩定溫度

<實驗分析> 由於銅板在加熱的過程中，我們發現銅容易氧化，如(表 6-2-2)，而氧化物易造成表面凸起，如(圖 6-2-3)，將造成水滴入射行徑路線與反射行徑路線非直線型態；影響入射角及反射角，影響實驗結果，而鋁板表無凸起現象，因此我們決定用鋁板來進行實驗。

#### ▼ (表 6-2-2) 水滴在不同加熱板的臨界溫度與穩定溫度

銅板(未氧化)	銅板(已氧化)
表面呈紅褐色、平滑	表面呈黑色、粗糙
(圖 6-2-2)	(圖 6-2-3)

### 三、水珠在不同溫度下的停滯時間

<目的> 測量水珠在鋁板上不同溫度下水珠的停滯時間。

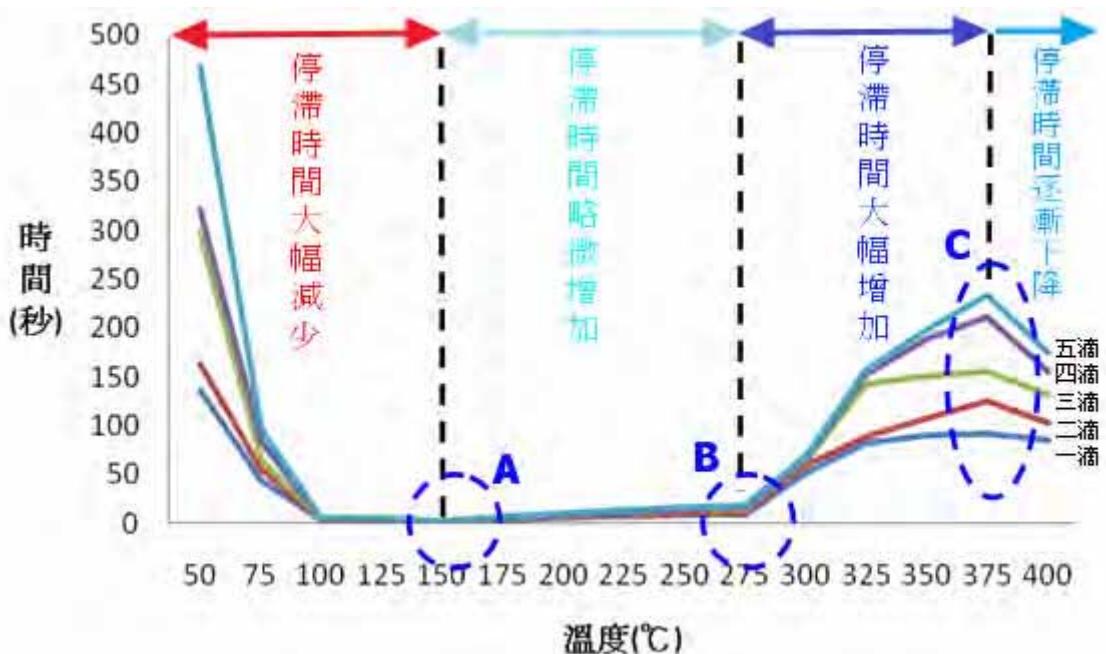
<方法> 將圓形鋁圈和鋁板一起加熱，從 50°C 開始，每次提高 25°C 一直到 400°C，在不同溫度下以滴管分別滴入一滴、二滴、三滴、四滴、五滴於鋁圈中。將不同大小水珠在不同溫度下的停滯時間以碼錶記錄下，每個溫標各取三次，將其平均填入表格中。

<結果> 由(表 6-3-1)顯示在溫度超過 175°C 後，水珠周圍會逐漸開始形成蒸氣氣膜，氣膜會降低水珠與加熱板的熱傳導速率，所以較 175°C 時的停滯時間微微增加(圖 6-3-1-A 部分)，與鋁板的臨界溫度相符。在超過溫度 275°C 時，由於停滯時間大幅增加，可研判氣膜厚度較 275°C 前大幅增加(圖 6-3-1-B 部分)，包覆水珠而以至於水珠停滯時間大幅增加這個現象的產生，符合鋁板的穩定溫度。而溫度到達 375°C 時，使其停滯時間達到水沸騰的溫度後的最長停滯時間(圖 6-3-1-C 部分)，故可證明此時氣膜達到最厚。停滯時間達最大值。

▼ (表 6-3-1) 水珠在不同溫度下的停滯時間

	一滴	二滴	三滴	四滴	五滴
50°C	136.3	163.4	298.0	321.7	468.7
75°C	43.7	55.7	64.4	84.3	95.4
100°C	18.8	37.8	65.7	72.2	80.5
125°C	1.4	2.3	2.4	3.0	4.1
150°C	0.3	0.7	1.1	1.4	1.7
175°C	2.7	4.4	5.7	5.1	6.5
200°C	5.4	6.5	8.4	8.7	9.3
225°C	6.6	6.9	8.2	9.0	12.6
250°C	7.7	9.7	14.9	15.2	16.3
275°C	8.1	9.5	14.1	15.9	17.3
300°C	51.0	60.0	65.0	67.5	69.1
325°C	81.9	87.7	142.6	152.6	157.0
350°C	89.4	108.3	150.4	189.5	198.7
375°C	92.0	125.9	156.3	212.4	233.8
400°C	84.6	102.1	132.4	156.1	174.5

註：單位(秒)



(圖 6-3-1)水珠在不同溫度下的停滯時間

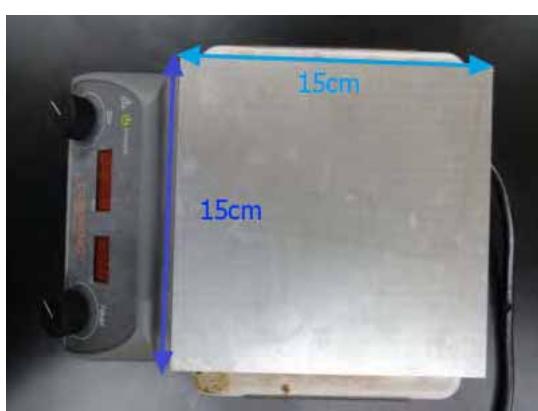
#### 四、溫度對水珠的移動方向之探討

<目的> 探討水珠移動的路徑和現象以及其原理

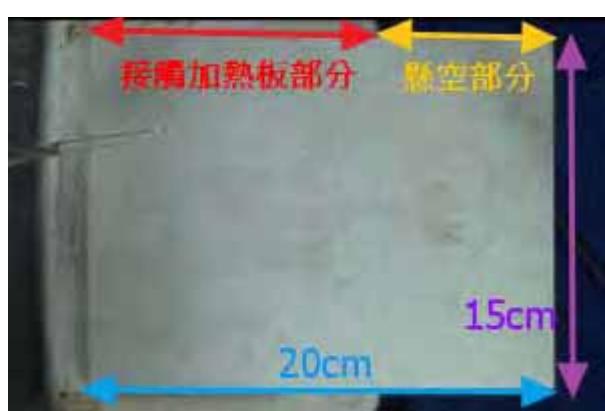
<推測> 我們由 2011 年台灣國際科展物理組作品「水滴在高溫鋸齒狀金屬表面上的爬坡現象」(詳細資料)看見水珠向上爬的現象。我們由此做了一個異於他們水珠上攀的原因的假設，水珠在高溫的鋸齒狀鐵片上，會向上攀爬；而此時熱源在下方，水珠會因鋸齒狀處高的地方較低溫，相對鋸齒較低的地方溫度卻較高，這樣的溫差使水珠所產生的氣膜不平穩，一邊厚，則一邊薄，造成水珠產生推力，使其出現上攀的現象。

詳細資料: <http://activity.ntsec.gov.tw/activity/race-2/2011/pdf/140003.pdf>

<方法> 根據我們的假設，我們在 15cmx15cm 的板子(圖 6-4-1)一端利用冷水使加熱板部分降溫，兩端產生溫差，再測試加熱的溫度高低分布情形，並記錄溫度分布的範圍。再以滴管滴下一滴大小的水珠，並用攝影機記錄水珠移動方向，在將其記錄下來。在記錄路徑部份(表 6-4-2)，我們使用 15cmx20cm 的鋁板一部份接觸加熱器，一部分懸空，如(圖 6-4-2)。製造出溫差，拍攝並且記錄其高溫向低溫跑的路徑。



(圖 6-4-1)

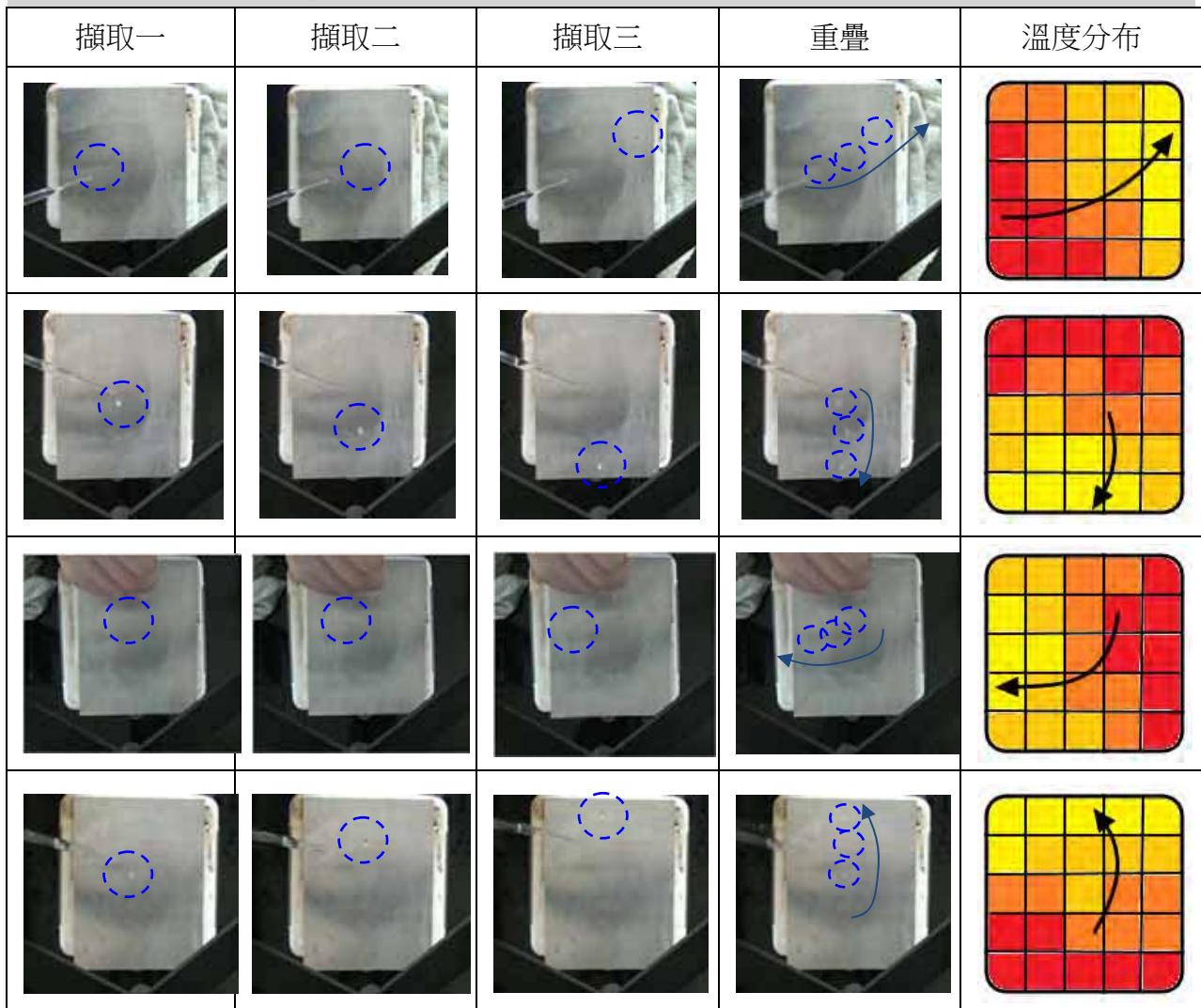


(圖 6-4-2)

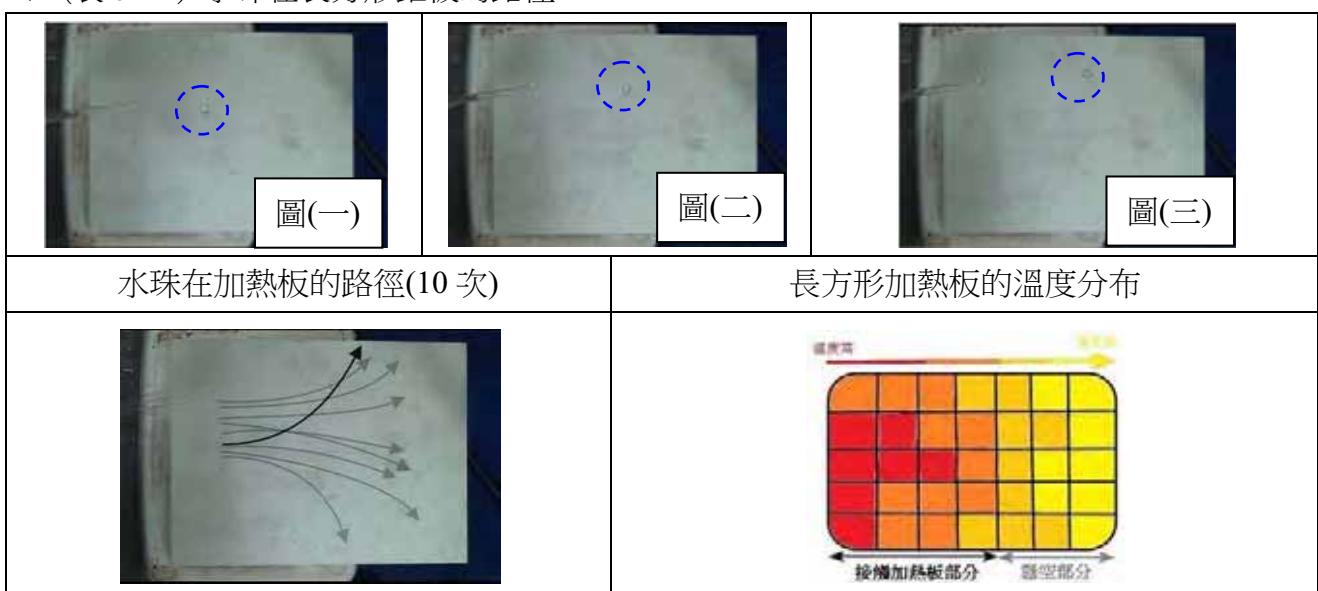
<結果> 水珠每一次的移動路徑都會依循高溫往低溫跑的特性,如(表 6-4-1)。在路徑部分,由我們的實驗結果(表 6-4-2)可以看到,水珠因尾端受熱不均,而由高處往低溫的路徑不一,故求後續實驗精準將平面改製成有軌道的鋁板,如實驗五(圖 6-5-1)。

▼ (表 6-4-1) 溫度對水珠的移動方向

紅色 : 375°C~372°C 橙色 : 371°C~364°C 橙黃色 : 363°C~359°C 黃色 358°C~354°C



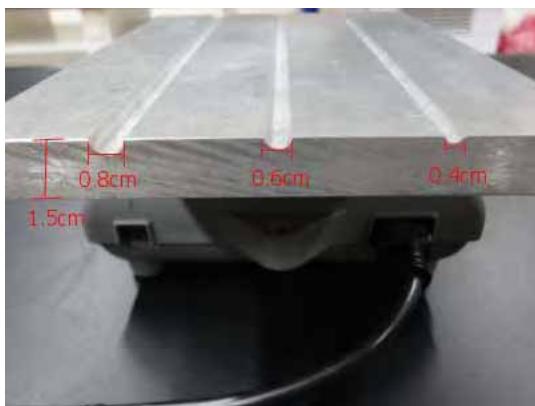
▼ (表 6-4-2) 水珠在長方形鋁板的路徑



## 五、水珠移動速率與板面傾斜角度的關係

<目的> 探討水珠從高溫往低溫移動及坡度的關係。

<方法> 由上一個實驗可以看到水珠向低溫處跑的路徑並不固定，經改良後，我們在 15cmx20cm 的板子上製作軌道，分別為 0.8cm、0.6cm、0.4cm，如(圖 6-5-1)，利用冷水潑在鋁板懸空部分，使軌道上產生出溫差(約為 20°C)，分別插入一片、二片、三片、四片、五片厚度為 0.02cm 的刀片使鋁板的請斜角度增加，將滴管至於高度 1cm 處固定滴入大小為一滴的水珠在為 0.6cm 的板子軌道上。觀察並分別記錄其現象。



(圖 6-5-1)長方形鋁板的軌道

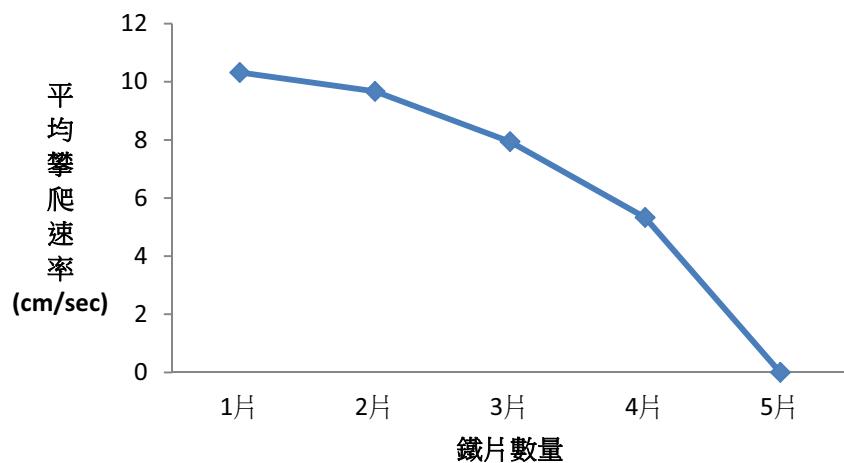


(圖 6-5-2)實驗裝置

<結果> 由(表 6-5-1)可知，水珠在板溫差 20°C 時往低溫處跑的力量，最大可以以 5.33 cm/sec 的速度爬上 0.2956° 坡度的鋁板，水珠會有明顯往低溫跑的現象，當鐵片超過 0.3695° 時，水珠往低溫跑的力量已經無法攀爬上斜坡，因此無往低溫跑的現象。由(圖 6-5-1)可以看出此趨勢。

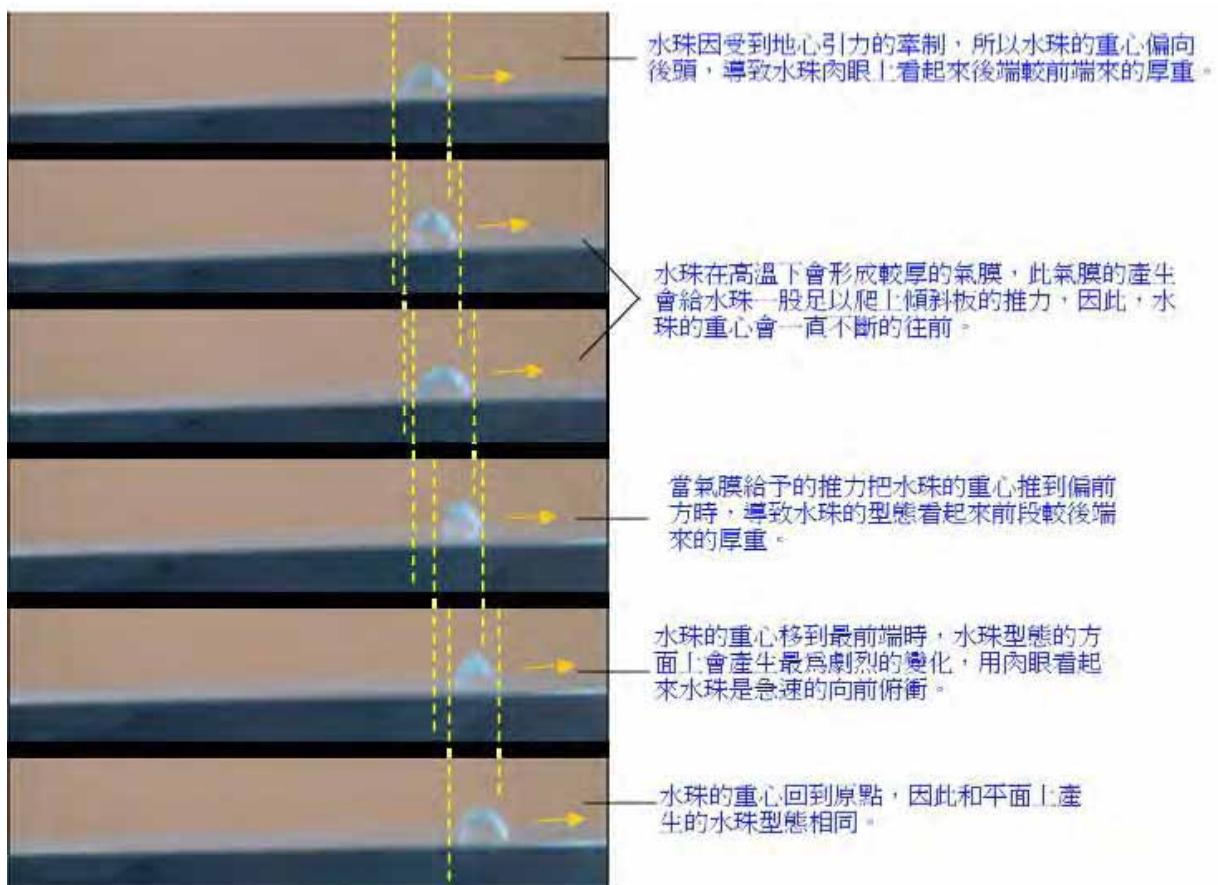
▼ (表 6-5-1) 水珠攀爬速率與板面傾斜角度的關係

	傾斜角度	前頭溫度	後尾溫度	頭尾溫差	成功機率	平均攀爬速率(cm/sec)
1 片	0.0739°	355°C	375°C	20°C	100%	10.32
2 片	0.1478°	353°C	374°C	21°C	100%	9.67
3 片	0.2217°	354°C	374°C	20°C	100%	7.94
4 片	0.2956°	358°C	377°C	19°C	70%	5.33
5 片	0.3695°	352°C	375°C	23°C	0%	xxx

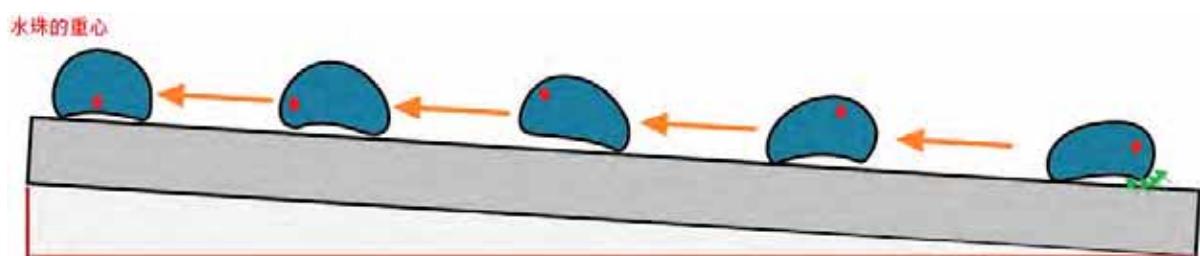


(圖 6-5-1) 水珠攀爬速率與板面傾斜角度的關係

### 水珠在平面加熱板上的觀察與原理



(圖 6-5-3) 水珠在平面加熱板上攀爬的觀察



(圖 6-5-4) 推測水珠在平面加熱板上攀爬的原理

## 六、溫度差異對水珠的移動之探討

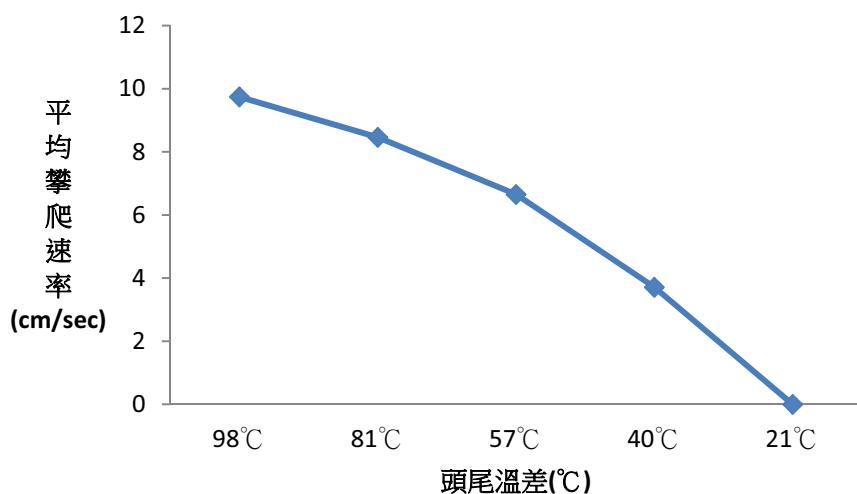
<目的> 探討溫度差異對水珠大小

<方法> 固定以片鐵板墊高 15cmx20cm 有軌道的鋁板傾斜角固定( $0.3695^\circ$ )，再用冷水使其加熱板懸空部分降溫，產生溫差，在測試加熱的溫度高低，控制溫度分布的範圍，使前頭溫度與頭尾溫產生差異。再以滴管滴下一滴大小的水珠在為 0.6cm 的板子軌道上，並記錄平均攀爬速率，。

<結果> 由(表 6-6-1)可以看到水珠在板子上時，如果把板子兩頭的溫度溫差變大時，可以看到當由原先加熱板溫差約為  $20^\circ\text{C}$  時，無攀爬現象；增加加熱板溫差至約為  $100^\circ\text{C}$ ，攀爬速率可高達  $9.74 \text{ cm/sec}$ ，由我們的研究結可以推論出，只要把溫差加的越大，水珠往低溫處跑的速度和力量都會隨之上升，可以在(圖 6-6-1)看到此趨勢。

▼ (表 6-6-1) 水滴的速率與板面溫度差異的關係

	傾斜角度	前頭溫度	後尾溫度	頭尾溫差	成功機率	平均攀爬速率(cm/sec)
5 片	$0.3695^\circ$	$276^\circ\text{C}$	$375^\circ\text{C}$	$98^\circ\text{C}$	100%	9.74
5 片	$0.3695^\circ$	$292^\circ\text{C}$	$373^\circ\text{C}$	$81^\circ\text{C}$	100%	8.46
5 片	$0.3695^\circ$	$318^\circ\text{C}$	$375^\circ\text{C}$	$57^\circ\text{C}$	90%	6.65
5 片	$0.3695^\circ$	$334^\circ\text{C}$	$374^\circ\text{C}$	$40^\circ\text{C}$	40%	3.71
5 片	$0.3695^\circ$	$355^\circ\text{C}$	$376^\circ\text{C}$	$21^\circ\text{C}$	0%	xxx



(圖 6-6-1) 水滴的速率與板面溫度差異的關係

## 七、水珠攀爬高度及速率與大小的關係

<目的> 水珠大小對於水珠攀爬速率

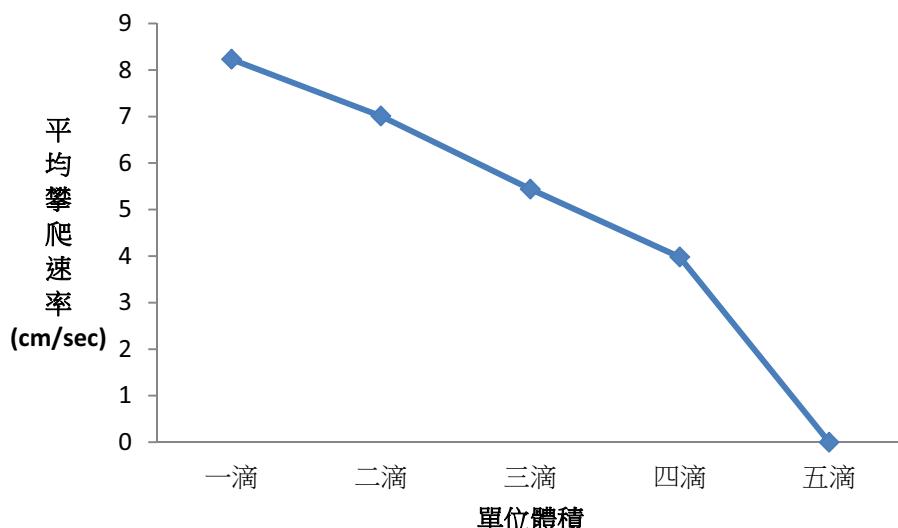
<方法> 固定以片鐵板墊高有軌道的鋁板傾斜角固定( $0.498^\circ$ )，測試加熱的溫度高低，控制溫度分布的範圍，使前頭溫度與頭尾溫產生的差異固定在溫度約為  $20^\circ\text{C}$ 。為了減少誤差，故使水滴與軌道契合，所以以滴管分別將一滴大小的水珠滴在 0.4cm 的軌道二滴、三滴大小的水珠滴在 0.6cm 的軌道四滴、五滴大小的水珠滴在 0.8cm 的軌道，並記錄平均攀爬速率。

<結果> 由(表 6-7-1)可以看到，我們在將角度和溫差(約  $20^\circ\text{C}$ )都控制在定值( $0.498^\circ$ )之下，

滴入一滴大小的水珠時，水珠攀爬上斜坡的速率最快，可達 8.23 cm/sec。當滴入的水珠大小為五滴時，水珠則無法出現向斜坡上攀爬得現象。我們發現滴入的水珠越大，會因為水珠的氣膜無法支撐本身的重量，而不斷壓縮氣膜，使其變薄，甚至壓垮氣膜，導致無法出現明顯氣膜一高一低的現象，故當水珠大小越大，攀爬速率就越小。

▼ (表 6-7-1) 水珠攀爬高度及大小與速率的關係

	傾斜角度	前頭溫度	後尾溫度	頭尾溫差	成功機率	平均攀爬速率(cm/sec)
一滴	0.498°	354°C	375°C	21°C	100%	8.23
二滴	0.498°	351°C	373°C	22°C	100%	7.01
三滴	0.498°	357°C	375°C	18°C	100%	5.44
四滴	0.498°	354°C	374°C	20°C	100%	3.98
五滴	0.498°	356°C	376°C	20°C	0%	XXX



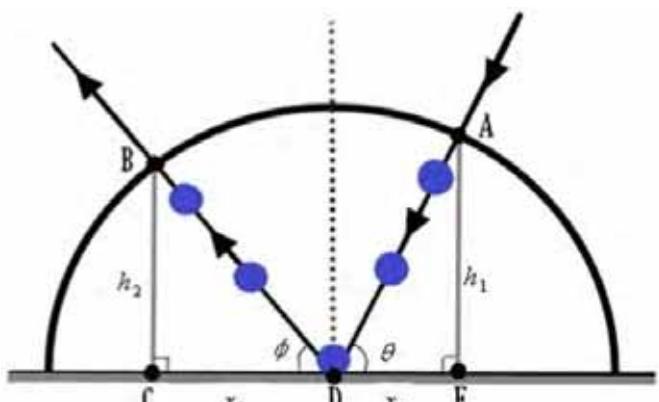
(圖 6-7-1) 水珠攀爬高度及速率與大小的關係

## 八、水珠大小與彈性的相關性

<目的> 探討水珠大小對於其彈性的影響。

<方法> 先把加熱板和鋁條加熱到 375°C，用滴管在高度低於 1cm 處依序滴入一滴、二滴、三滴、四滴、五滴大小的水珠滴在鋁板上，並且用吸管吹<sup>(註一)</sup>，及水珠使其反彈到鋁條上，水珠會對鋁條進行兩次反射。用攝影機將其反射的過程錄製下來，再利用軟體 GeoGebra 畫出它的入射和反射的路徑。以五張已透明化的圖分解找出兩次反射的  $\tan\phi$  與  $\tan\theta$ ，並計算它的恢復係數。將每個溫度製程表格，每個溫度各取十組，每組兩次碰撞，並求平均。我們拍攝各溫度下水珠反射的過程，於電腦中測量出水珠大小對恢復係數的影響。再把每個溫度的平均製成折線圖。

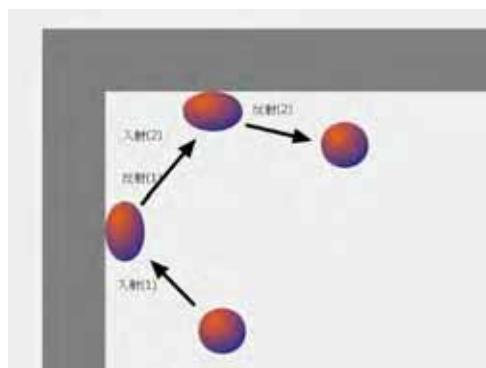
註(一)：彈性係數公式是非速度的函數而是角度的函數，所以我們可以不用考慮到吸管吹動的力量大小而是視水珠移動的角度。



$$\begin{aligned} \angle ADE &= \theta \\ \angle BDC &= \phi \end{aligned}$$

$$\frac{\overline{BC}}{\overline{CD}} = k_2$$

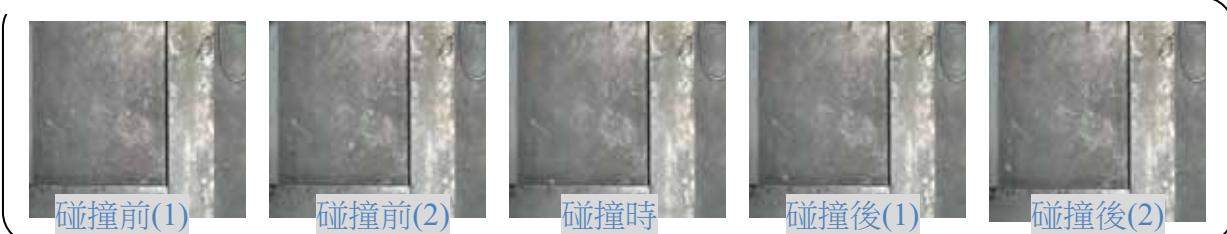
$$\frac{\overline{AE}}{\overline{DE}} = h_1$$



計算恢復係數的過程：

$$\text{恢復係數 } e = \frac{\text{分離速度}}{\text{接近速度}} = -\frac{-v' \sin \phi}{v \sin \theta} = \frac{\cos \theta \sin \phi}{\cos \phi \sin \theta} = \frac{\tan \phi}{\tan \theta} = \frac{h_2 / x_2}{h_1 / x_1}$$

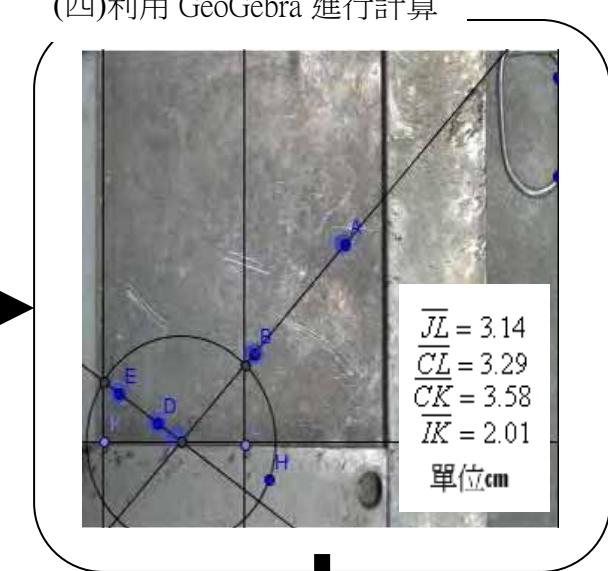
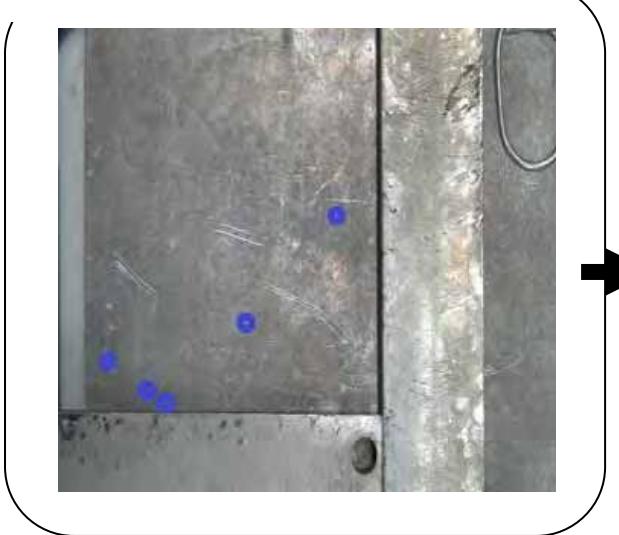
(一)從影像中擷取五張照片，分別是碰撞前 2 張，碰撞時 1 張，碰撞後 2 張



### (二)分別標出水珠位置



### (三)製作透明片，並重疊



(五)代入公式，求出其彈性係數

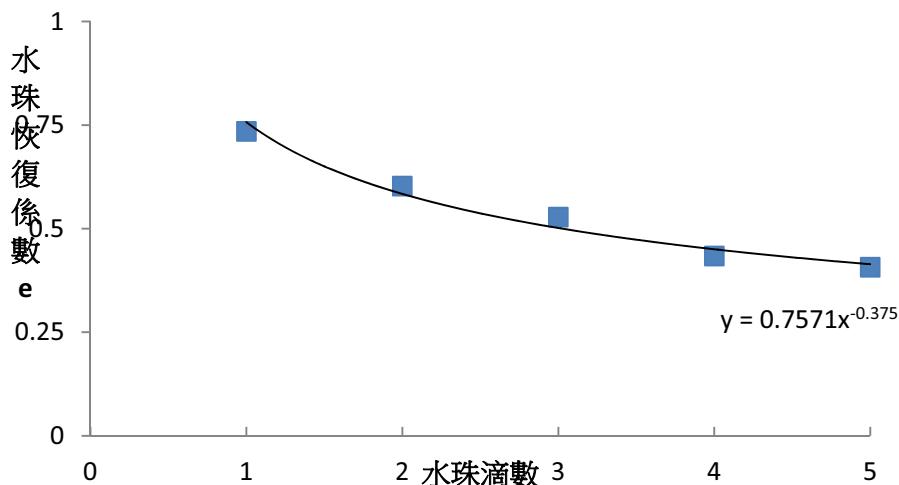
$$\text{彈性係數 } e = \frac{\tan \phi}{\tan \theta} = \frac{h_2/x_2}{h_1/x_1} = \frac{2.01/3.58}{3.14/3.29} = \frac{0.568}{1.036} = 0.548$$

<結果> 我們的實驗結果如(附件一)，整理後如(圖 6-8-1)，隨著我們所滴入的水珠越來越大時，恢復係數由 0.735 降至 0.407，可以發現它的恢復係數是一直不斷在變小的。如果減少水珠的大小，水珠的恢復係數也就會隨之一直增加，所以我們由此實驗可以推理出當水滴越小，其彈性就會變得越大。

#### ▼ (表 6-8-1) 水珠大小與彈性的相關性

	一滴	二滴	三滴	四滴	五滴
恢復係數 e	0.735	0.603	0.528	0.434	0.407

注: (表 6-8-1)的原始數據為(附件一)。



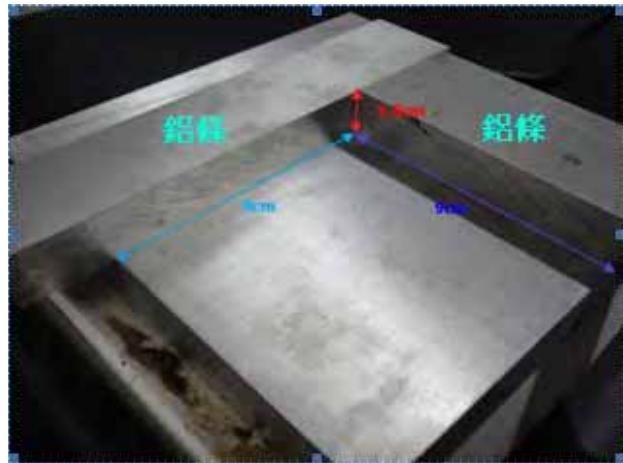
(圖 6-8-1)水珠彈性與大小的相關性

### 九、水珠的彈性與加熱板溫度的相關性

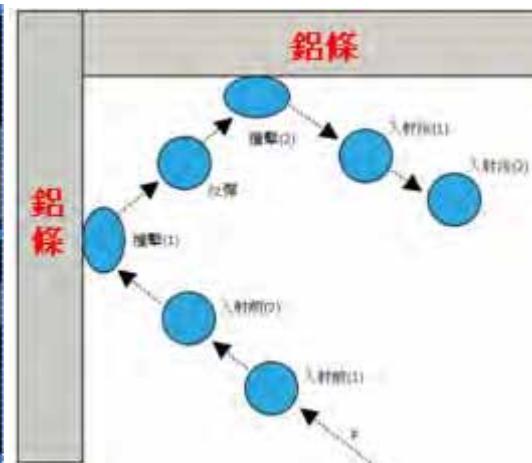
<目的> 找出水珠在不同溫度下的彈性係數。

<方法> 先把加熱板和鋁條加熱到 275°C、300°C、325°C、350°C、375°C、400°C，以玻璃滴管固定每一滴水滴的體積大小，並且用吸管吹<sup>(註一)</sup>及水珠使其反彈到鋁條上，水珠會對鋁條進行兩次反射(圖 6-9-1)。用攝影機將其反射的過程錄製下來(圖 6-9-2)，再利用軟體 GeoGebra 畫出它的入射和反射的路徑。以五張已透明化的圖分解找出兩次反射的  $\tan \phi$  與  $\tan \theta$ ，並計算它的恢復係數。將每個溫度製成表格，每個溫度各取十組，每組兩次碰撞，並求平均。我們拍攝各溫度下水珠反射的過程，於電腦中測量出溫度對恢復係數的影響。再把每個溫度的平均製成折線圖。

註(一)：彈性係數公式是非速度的函數而是角度的函數，所以我們可以不用考慮到吸管吹動的力量大小而是視水珠移動的角度所推出的。



(圖 6-9-1) 實驗裝置



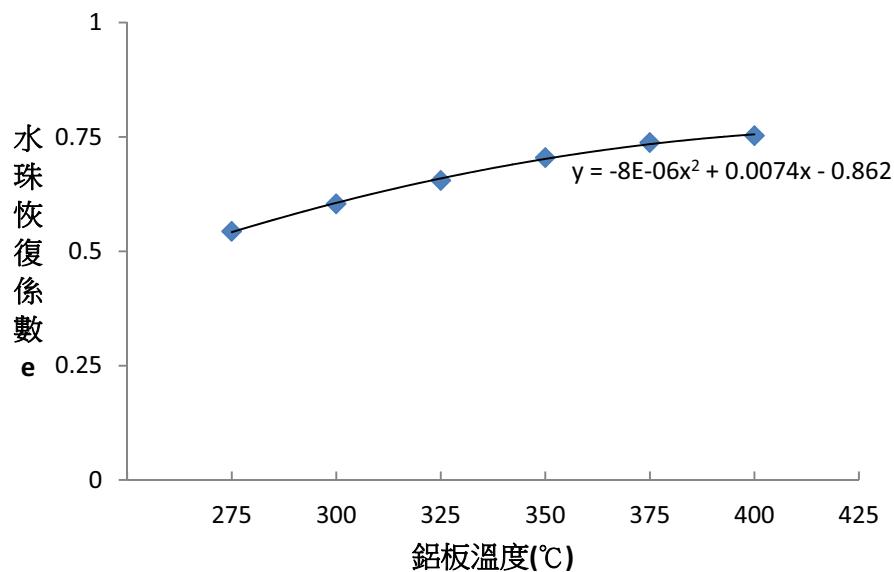
(圖 6-9-2) 水珠的碰撞路徑

<結果> 我們由實驗結果如(附件二)，整理成(表 6-9-1)，我們將溫度升高，在板子溫度越高時，水珠周圍會越容易形成蒸氣氣膜，擠壓水珠，使得板溫高時水珠的大小較板溫低時小，當水珠較小時恢復係數也就越大。我們由(圖 6-9-1)推論可以依據實驗結果推論出隨溫度越高時，恢復係數會由 0.544 增至 0.753，水珠的恢復係數是隨之變大的。

▼ (表 6-9-1) 水珠的彈性與加熱板溫度的相關性

	275°C	300°C	325°C	350°C	375°C	400°C
恢復係數 e	0.544	0.604	0.655	0.705	0.738	0.753

注: (表 6-9-1) 的原始數據為(附件二)。

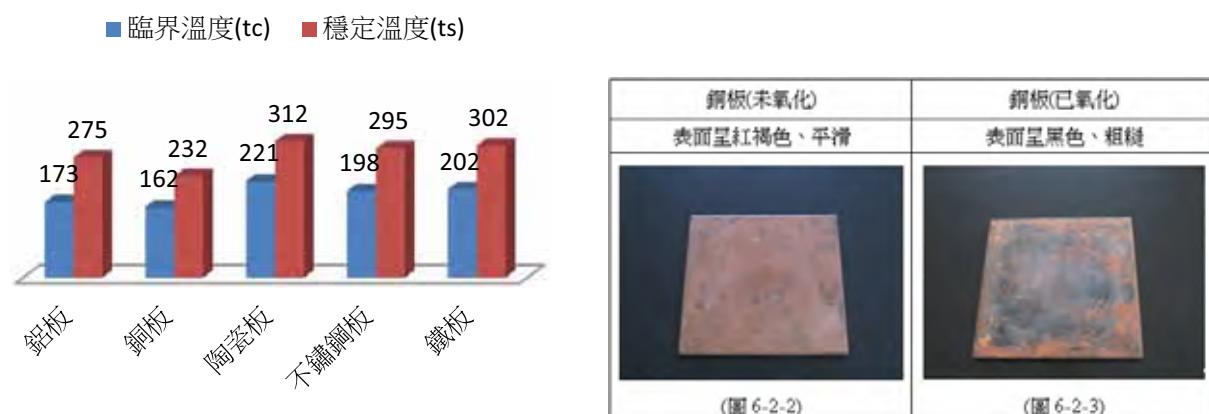


(圖 6-9-1) 水珠的彈性與加熱板溫度的相關性

## 柒、討論

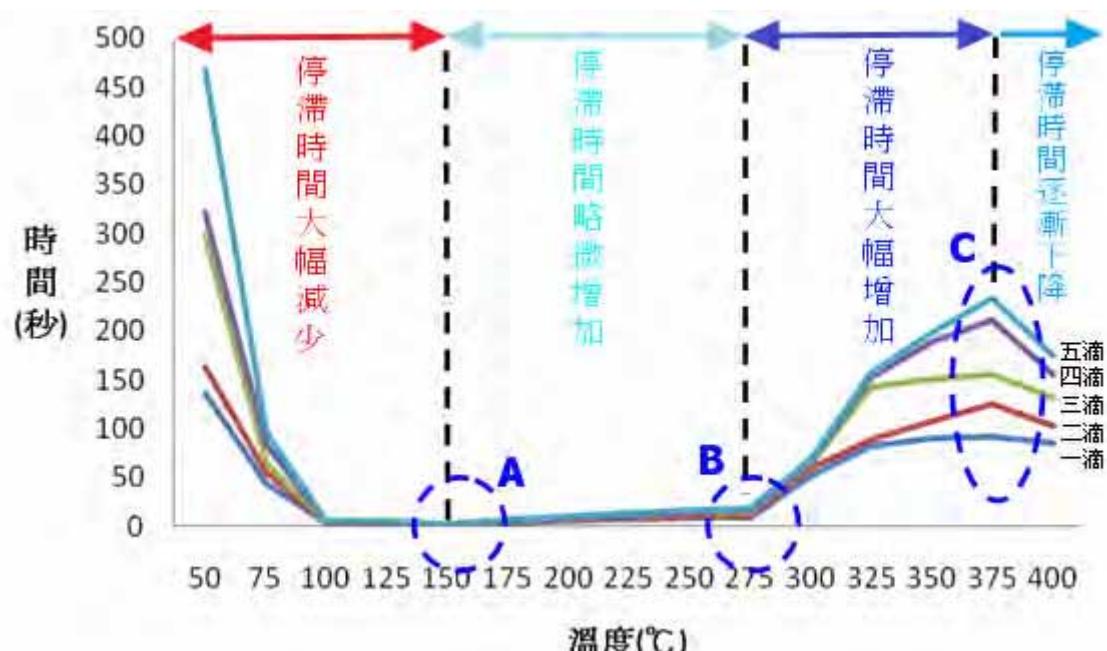
### 一、水珠之基本測量

1.在實驗一的(表 6-1-1)中，一滴水珠的體積大小約為 0.0562ml，以得到水滴定量分析。由實驗二(下圖 7-1-1)當中我們發現銅板進行實驗加熱的效果最佳，鋁板的效果其次。但由(下圖 6-2-3)可以看到銅板加熱後易形成氧化物造成表面凸起或凹陷。為了符合實驗六、七水滴直線碰撞運動及入射的路徑及反射的路徑之測量。在實驗過程中，應避免影響水珠的路徑，因此，在有限器材條件下，我們決定用鋁板來進行實驗，確保實驗數據的正確性。



(圖 7-1-1) 加熱板與臨界溫度、穩定溫度

2.在實驗三裡鋁板溫度超過 175°C 後，水珠周圍逐漸開始形成氣膜，水珠與鋁板間因氣膜存在，會降低其與板面的熱傳導速率，所以較 175°C 前的停滯時間微微增加，與鋁板的臨界溫度相符，且使摩擦力近於零，符合水平動量守恆基本假設。在超過溫度 275°C 時，氣膜包覆水珠而以至於水珠停滯時間與厚度較 275°C 前大幅增加，符合鋁板的穩定溫度。而溫度到達 375 °C 時，停滯時間達到水沸騰的溫度後的最長停滯時間，故可證明此時氣膜達到最厚。停滯時間達最大值。此為最佳溫度，故後續實驗以 375°C 下進行實驗。



(圖 7-1-2) 水珠在不同溫度下的停滯時間

## 二、水珠在加熱板運動情形之探討

1.在實驗四，我們發現水珠本身產生的氣膜因為受熱不均，促使氣膜厚度不一，產生較高溫處較厚，較低溫處較薄的現象。氣膜一高一低的情況之下(如圖 7-2-1)，是其產生出一股推力，造成水珠會向低溫處跑的現象。

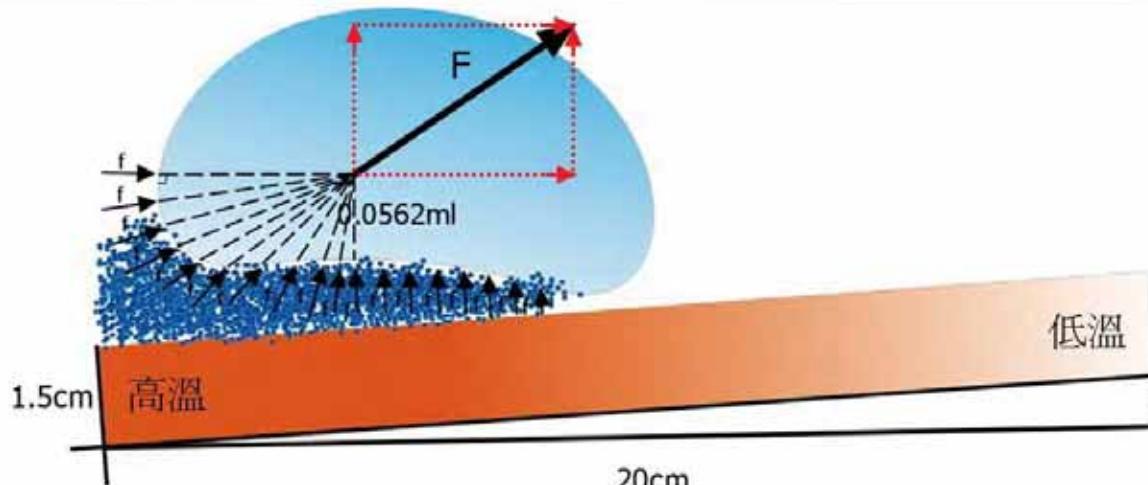
紅色：375°C~372°C 橙色：371°C~364°C 橙黃色：363°C~359°C 黃色 358°C~354°C



(圖 7-2-1)

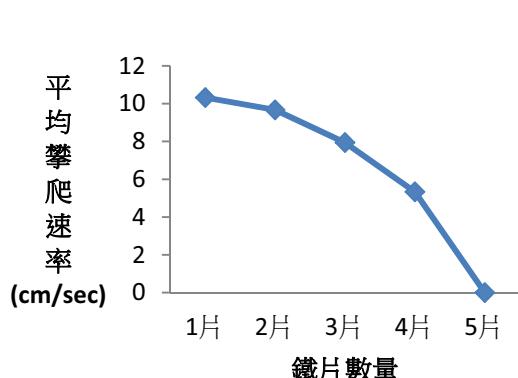
2.在實驗五，根據(圖 7-2-2)，水珠往低溫跑的力量可以爬上 0.3 度坡度的板子上(下圖 7-2-3)。

當鋁板的傾斜角產生變化時，水珠往低溫跑的速率也會跟著變動。由此實驗可證明水珠有向上爬的力量。水珠不管在平面還是在斜坡上，只要板子本身到達穩定溫度以上時，水珠就會產生往低溫處跑的這項特性。

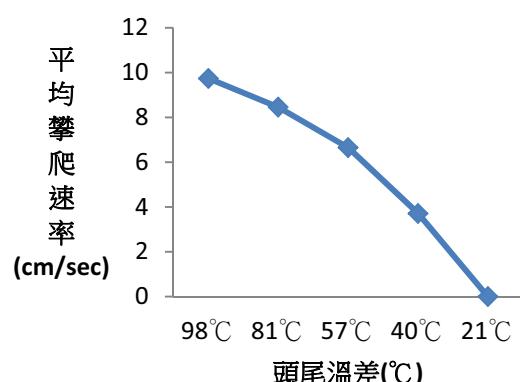


(圖 7-2-2)水珠攀爬原理

3.在實驗六，由(下圖 7-2-4)看出，加熱板溫差由原本約 20°C；無攀爬現象，增加溫差至約 100°C 攀爬速率可高達 9.74cm/sec，我們由此可以推論出當板子前後頭溫度差越大時，會導致水氣膜一邊高一邊低的差變大，故溫差越大時水珠往低溫的爬坡速率也就會隨之上升。



(圖 7-2-3)水珠攀爬速率與板面傾斜角度的關係

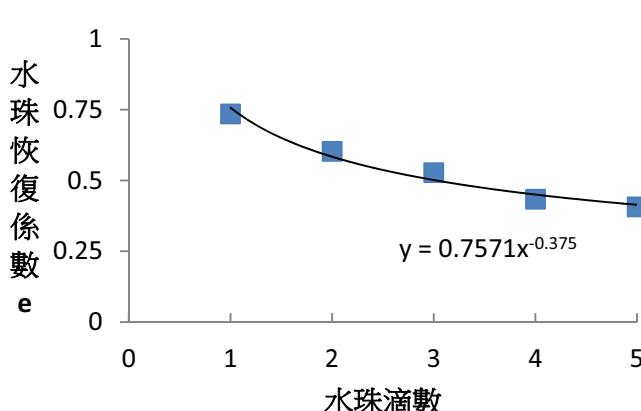


(圖 7-2-4)水滴的速率與板面溫度差異的關係

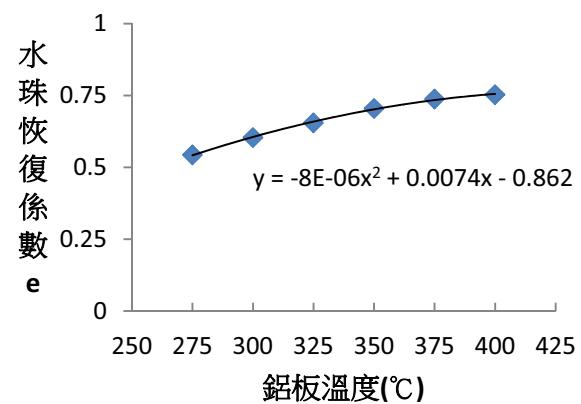
4.由實驗七之(表 6-7-1)中可以發現，我們在將角度和溫差都控制在定值之下。當水珠越大時，會因為水珠的氣膜無法支撐本身的重量，而不斷壓縮到氣膜，導致氣膜一高一低的差變小，甚至使氣膜消失，故會出現水珠大越大，攀爬速率越小的現象。

### 三、水珠在高溫下彈性與碰撞之探討

- 1.在實驗八裡我們發現水珠體積越小，彈性係數就會越來越大，也就會變的越接近 1。由(下圖 7-3-1)，可以看到水珠大小為一滴時，恢復係數為 0.735；當水珠大小增至五滴，恢復係數卻減少至 0.407。故相對的把水珠的體積越變越大，所得到的結果就會與滴入大小較小的水珠的結果相反。
- 2.在實驗九，我們把水珠的質量作為固定值時，把鋁板的溫度越調越高，水珠在鋁板上形成的氣膜就會變厚，在板子上水珠的靜摩擦就會減少，導致幾乎沒有其他外力干擾。在板子溫度越高下，水珠周圍會越容易形成蒸氣氣膜，擠壓水珠，使得板溫高時水珠的大小較板溫低時小，當水珠較小時彈性係數也就越大。依據(下圖 7-3-2)可以推論出溫度越高時，水珠的彈性就越大。



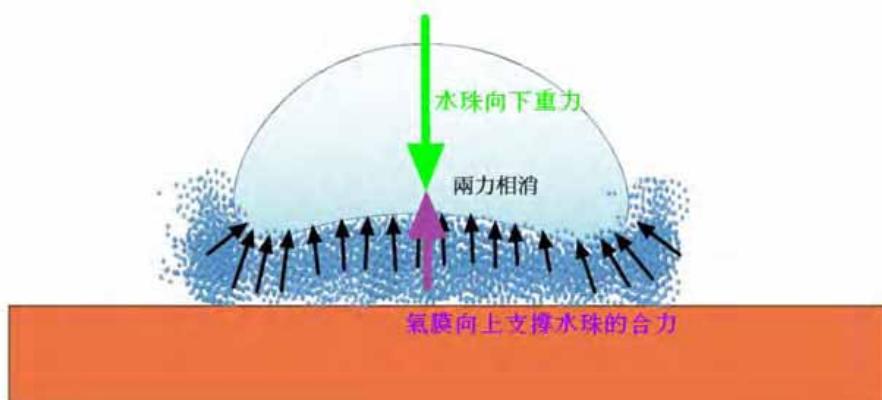
(圖 7-3-1)水珠彈性與大小的相關性



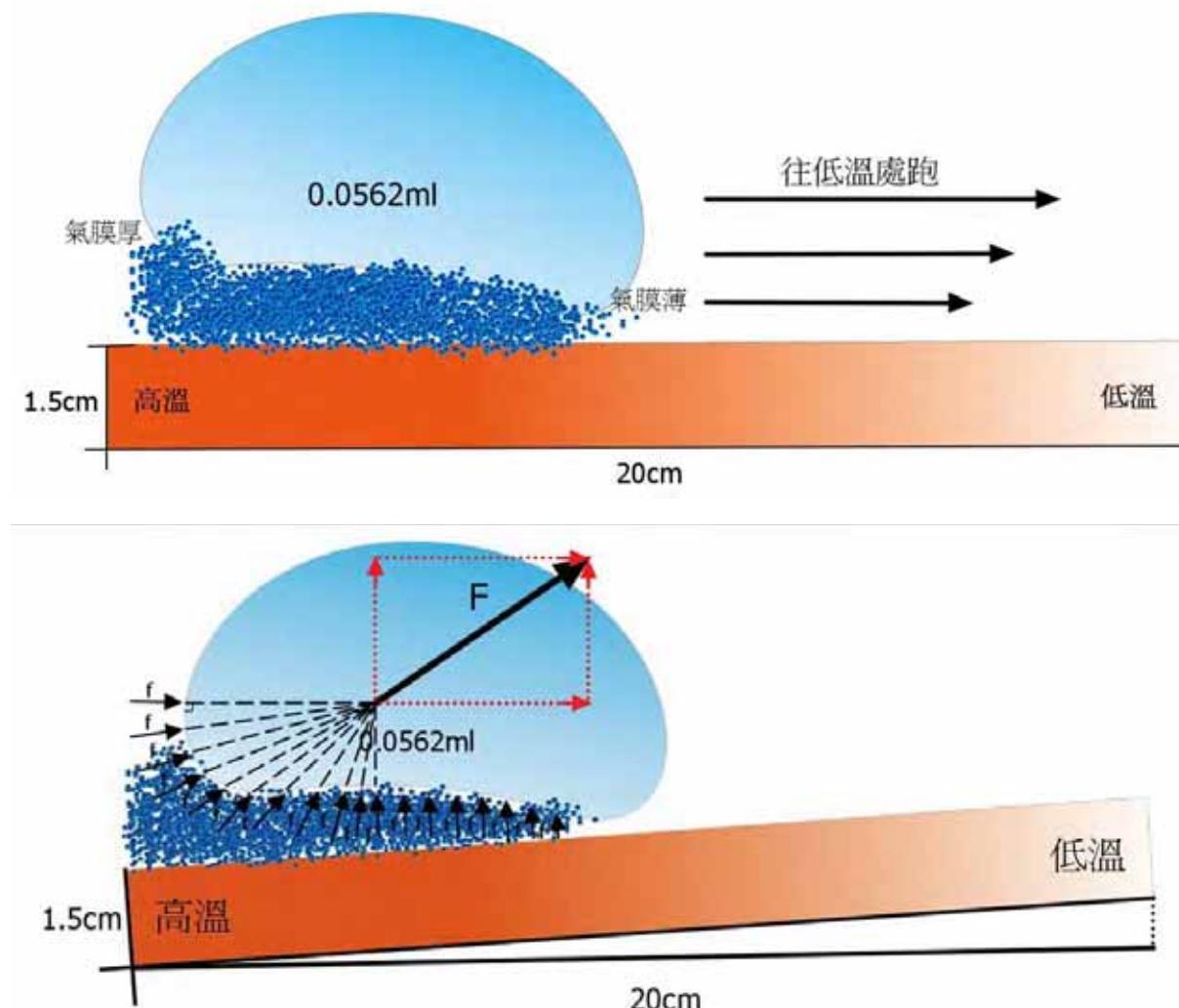
(圖 7-3-2)水珠的彈性與加熱板溫度的相關性

### 四、結論

- 1 水珠在到達穩定溫度，也就是可形成保護其整體的氣膜時，氣膜向上支撐水珠的合力為正向力，抵禦了水珠向下的重力，導致水珠整體不直接接觸至鋁板底部而減少摩擦力的產生，摩擦力近於零，故水珠在進行直線運動時，遵守其動量守恆。



2. 進行控制加熱板的溫差可以看到，加熱板板上水珠的氣膜一高一低。氣膜在水平 X 軸以及垂直 Y 軸都對於水珠各施於一股推力，垂直 Y 軸方面給予水珠支撐力，水平 X 軸則因氣膜的高度差易給予一股向低溫處跑的推力，兩軸的分力導致水珠在加熱板上產生出向低溫攀爬的現象。



3. 水珠在符合最佳狀態，也就是在  $375^{\circ}\text{C}$  的鋁板上，且透過恢復係數計算之下可不考慮吸管吹動水珠的力量大小進行直線碰撞運動。在經由恢復係數的公式的轉換後  $e=f(\theta, \phi | \text{質量; 溫度}; \Delta T=0)$ ，將實驗數據帶入求得結果。根據我們實驗結果可以發現水珠大小越小時，恢復係數也就越大。當溫度越高時，水珠的也會因為氣膜厚度增加而擠壓水珠，造成水珠較低溫時的水珠小，而相對的恢復係數也會因此而越大。

## 玖、參考資料及其他

水與水蒸氣。取自：<http://tw.knowledge.yahoo.com/question/question?qid=1508080211572>

Paul G. Hewitt (2009)。《觀念物理 III》。天下文化。

林祐宣 (2004)。水珠漫舞。第三屆旺宏科學獎

水珠碰碰樂。取自：<http://www.psjh.cy.edu.tw/~science/studauthor/99/phy02.pdf>

# 拾、附錄

## 附件一

一滴(375°C 鋁板)										
第一組		e	第四組		e	第七組		e		
$\tan \phi$	0.434	0.732	$\tan \phi$	0.638	0.733	$\tan \phi$	0.645	0.729		
$\tan \theta$	0.593		$\tan \theta$	0.870		$\tan \theta$	0.885			
$\tan \phi$	0.563	0.745	$\tan \phi$	0.782	0.744	$\tan \phi$	0.792	0.734		
$\tan \theta$	0.756		$\tan \theta$	1.051		$\tan \theta$	1.079			
第二組		e	第五組		e	第八組		e		
$\tan \phi$	0.751	0.739	$\tan \phi$	0.562	0.739	$\tan \phi$	0.579	0.735		
$\tan \theta$	1.016		$\tan \theta$	0.760		$\tan \theta$	0.788			
$\tan \phi$	0.398	0.741	$\tan \phi$	0.768	0.742	$\tan \phi$	0.756	0.732		
$\tan \theta$	0.537		$\tan \theta$	1.035		$\tan \theta$	1.033			
第三組		e	第六組		e	第九組		e		
$\tan \phi$	0.652	0.738	$\tan \phi$	0.752	0.728	$\tan \phi$	0.713	0.721		
$\tan \theta$	0.883		$\tan \theta$	1.033		$\tan \theta$	0.989			
$\tan \phi$	0.723	0.731	$\tan \phi$	0.674	0.736	$\tan \phi$	0.753	0.734		
$\tan \theta$	0.989		$\tan \theta$	0.916		$\tan \theta$	1.026			
平均							0.735			
二滴(375°C 鋁板)										
第一組		e	第四組		e	第七組		e		
$\tan \phi$	0.571	0.602	$\tan \phi$	0.551	0.599	$\tan \phi$	0.577	0.598		
$\tan \theta$	0.949		$\tan \theta$	0.920		$\tan \theta$	0.965			
$\tan \phi$	0.563	0.608	$\tan \phi$	0.583	0.609	$\tan \phi$	0.537	0.609		
$\tan \theta$	0.926		$\tan \theta$	0.957		$\tan \theta$	0.882			
第二組		e	第五組		e	第八組		e		
$\tan \phi$	0.612	0.624	$\tan \phi$	0.566	0.604	$\tan \phi$	0.524	0.598		
$\tan \theta$	0.981		$\tan \theta$	0.937		$\tan \theta$	0.876			
$\tan \phi$	0.589	0.597	$\tan \phi$	0.547	0.601	$\tan \phi$	0.574	0.591		
$\tan \theta$	0.987		$\tan \theta$	0.910		$\tan \theta$	0.971			
第三組		e	第六組		e	第九組		e		
$\tan \phi$	0.576	0.612	$\tan \phi$	0.572	0.596	$\tan \phi$	0.533	0.603		
$\tan \theta$	0.941		$\tan \theta$	0.960		$\tan \theta$	0.884			
$\tan \phi$	0.534	0.604	$\tan \phi$	0.569	0.608	$\tan \phi$	0.587	0.595		
$\tan \theta$	0.884		$\tan \theta$	0.936		$\tan \theta$	0.987			
平均							0.603			

三滴(375°C 鋁板)								
第一組		e	第四組		e	第七組		e
$\tan \phi$	0.426	0.523	$\tan \phi$	0.532	0.527	$\tan \phi$	0.681	0.537
$\tan \theta$	0.815		$\tan \theta$	1.009		$\tan \theta$	1.268	
$\tan \phi$	0.476	0.526	$\tan \phi$	0.649	0.515	$\tan \phi$	0.735	0.526
$\tan \theta$	0.905		$\tan \theta$	1.260		$\tan \theta$	1.397	
第二組		e	第五組		e	第八組		e
$\tan \phi$	0.592	0.534	$\tan \phi$	0.772	0.529	$\tan \phi$	0.234	0.522
$\tan \theta$	1.109		$\tan \theta$	1.459		$\tan \theta$	0.448	
$\tan \phi$	0.789	0.523	$\tan \phi$	0.481	0.536	$\tan \phi$	0.952	0.518
$\tan \theta$	1.509		$\tan \theta$	0.897		$\tan \theta$	1.838	
第三組		e	第六組		e	第九組		e
$\tan \phi$	0.825	0.522	$\tan \phi$	0.476	0.521	$\tan \phi$	0.875	0.537
$\tan \theta$	1.580		$\tan \theta$	0.914		$\tan \theta$	1.629	
$\tan \phi$	0.697	0.531	$\tan \phi$	0.523	0.541	$\tan \phi$	0.696	0.528
$\tan \theta$	1.313		$\tan \theta$	0.967		$\tan \theta$	1.318	
平均							0.528	

四滴(375°C 鋁板)								
第一組		e	第四組		e	第七組		e
$\tan \phi$	0.726	0.423	$\tan \phi$	0.532	0.446	$\tan \phi$	0.481	0.431
$\tan \theta$	1.716		$\tan \theta$	1.193		$\tan \theta$	1.116	
$\tan \phi$	0.576	0.435	$\tan \phi$	0.949	0.431	$\tan \phi$	0.435	0.432
$\tan \theta$	1.324		$\tan \theta$	2.202		$\tan \theta$	1.007	
第二組		e	第五組		e	第八組		e
$\tan \phi$	0.892	0.462	$\tan \phi$	0.372	0.429	$\tan \phi$	0.682	0.436
$\tan \theta$	1.931		$\tan \theta$	0.867		$\tan \theta$	1.564	
$\tan \phi$	0.389	0.443	$\tan \phi$	0.281	0.426	$\tan \phi$	0.531	0.425
$\tan \theta$	0.878		$\tan \theta$	0.660		$\tan \theta$	1.249	
第三組		e	第六組		e	第九組		e
$\tan \phi$	0.725	0.427	$\tan \phi$	0.476	0.436	$\tan \phi$	0.634	0.422
$\tan \theta$	1.698		$\tan \theta$	1.092		$\tan \theta$	1.502	
$\tan \phi$	0.597	0.433	$\tan \phi$	0.823	0.428	$\tan \phi$	0.752	0.438
$\tan \theta$	1.379		$\tan \theta$	1.923		$\tan \theta$	1.717	
平均							0.434	

五滴(375°C 鋁板)							
第一組		e	第四組		e	第七組	
$\tan \phi$	0.845	0.393	$\tan \phi$	0.825	0.386	$\tan \phi$	0.798
$\tan \theta$	2.150		$\tan \theta$	2.137		$\tan \theta$	1.852
$\tan \phi$	0.636	0.425	$\tan \phi$	0.259	0.421	$\tan \phi$	0.721
$\tan \theta$	1.496		$\tan \theta$	0.615		$\tan \theta$	1.669
第二組		e	第五組		e	第八組	
$\tan \phi$	0.532	0.412	$\tan \phi$	0.528	0.419	$\tan \phi$	0.686
$\tan \theta$	1.291		$\tan \theta$	1.260		$\tan \theta$	1.641
$\tan \phi$	0.797	0.423	$\tan \phi$	0.581	0.411	$\tan \phi$	0.252
$\tan \theta$	1.884		$\tan \theta$	1.414		$\tan \theta$	0.601
第三組		e	第六組		e	第九組	
$\tan \phi$	0.552	0.387	$\tan \phi$	0.476	0.379	$\tan \phi$	0.879
$\tan \theta$	1.426		$\tan \theta$	1.256		$\tan \theta$	2.415
$\tan \phi$	0.627	0.393	$\tan \phi$	0.723	0.385	$\tan \phi$	0.237
$\tan \theta$	1.595		$\tan \theta$	1.878		$\tan \theta$	0.558
平均							0.407

附件二

275°C(鋁板)							
第一組		e	第四組		e	第七組	
$\tan \phi$	0.417	0.533	$\tan \phi$	0.432	0.563	$\tan \phi$	0.437
$\tan \theta$	0.782		$\tan \theta$	0.767		$\tan \theta$	0.828
$\tan \phi$	0.568	0.548	$\tan \phi$	0.562	0.567	$\tan \phi$	0.534
$\tan \theta$	1.036		$\tan \theta$	0.991		$\tan \theta$	1.041
第二組		e	第五組		e	第八組	
$\tan \phi$	0.592	0.537	$\tan \phi$	0.392	0.510	$\tan \phi$	0.237
$\tan \theta$	1.102		$\tan \theta$	0.769		$\tan \theta$	0.408
$\tan \phi$	0.673	0.547	$\tan \phi$	0.499	0.523	$\tan \phi$	0.311
$\tan \theta$	1.230		$\tan \theta$	0.954		$\tan \theta$	0.544
第三組		e	第六組		e	第九組	
$\tan \phi$	0.431	0.553	$\tan \phi$	0.218	0.519	$\tan \phi$	0.426
$\tan \theta$	0.779		$\tan \theta$	0.420		$\tan \theta$	0.757
$\tan \phi$	0.571	0.547	$\tan \phi$	0.337	0.542	$\tan \phi$	0.567
$\tan \theta$	1.044		$\tan \theta$	0.622		$\tan \theta$	1.023
平均							0.544

300°C(鋁板)								
第一組		e	第四組		e	第七組		e
$\tan \phi$	0.476	0.592	$\tan \phi$	0.618	0.619	$\tan \phi$	0.638	0.598
$\tan \theta$	0.804		$\tan \theta$	0.998		$\tan \theta$	1.067	
$\tan \phi$	0.567	0.589	$\tan \phi$	0.702	0.613	$\tan \phi$	0.729	0.604
$\tan \theta$	0.963		$\tan \theta$	1.145		$\tan \theta$	1.207	
第二組		e	第五組		e	第八組		e
$\tan \phi$	0.741	0.597	$\tan \phi$	0.846	0.599	$\tan \phi$	0.341	0.618
$\tan \theta$	1.241		$\tan \theta$	1.412		$\tan \theta$	0.552	
$\tan \phi$	0.801	0.601	$\tan \phi$	0.879	0.603	$\tan \phi$	0.482	0.614
$\tan \theta$	1.333		$\tan \theta$	1.458		$\tan \theta$	0.785	
第三組		e	第六組		e	第九組		e
$\tan \phi$	0.354	0.591	$\tan \phi$	0.295	0.634	$\tan \phi$	0.783	0.589
$\tan \theta$	0.599		$\tan \theta$	0.465		$\tan \theta$	1.329	
$\tan \phi$	0.496	0.596	$\tan \phi$	0.349	0.628	$\tan \phi$	0.814	0.593
$\tan \theta$	0.832		$\tan \theta$	0.556		$\tan \theta$	1.373	
平均							0.604	

325°C(鋁板)								
第一組		e	第四組		e	第七組		e
$\tan \phi$	0.326	0.659	$\tan \phi$	0.792	0.657	$\tan \phi$	0.794	0.643
$\tan \theta$	0.495		$\tan \theta$	1.205		$\tan \theta$	1.235	
$\tan \phi$	0.477	0.647	$\tan \phi$	0.887	0.643	$\tan \phi$	0.836	0.654
$\tan \theta$	0.737		$\tan \theta$	1.379		$\tan \theta$	1.278	
第二組		e	第五組		e	第八組		e
$\tan \phi$	0.461	0.658	$\tan \phi$	0.496	0.652	$\tan \phi$	0.437	0.644
$\tan \theta$	0.701		$\tan \theta$	0.761		$\tan \theta$	0.679	
$\tan \phi$	0.572	0.661	$\tan \phi$	0.513	0.669	$\tan \phi$	0.561	0.651
$\tan \theta$	0.865		$\tan \theta$	0.767		$\tan \theta$	0.862	
第三組		e	第六組		e	第九組		e
$\tan \phi$	0.734	0.591	$\tan \phi$	0.475	0.673	$\tan \phi$	0.631	0.653
$\tan \theta$	1.131		$\tan \theta$	0.706		$\tan \theta$	0.966	
$\tan \phi$	0.864	0.596	$\tan \phi$	0.548	0.641	$\tan \phi$	0.776	0.671
$\tan \theta$	1.301		$\tan \theta$	0.855		$\tan \theta$	1.156	
平均							0.655	

350°C(鋁板)								
第一組		e	第四組		e	第七組		e
$\tan \phi$	0.713	0.695	$\tan \phi$	0.347	0.723	$\tan \phi$	0.427	0.692
$\tan \theta$	1.026		$\tan \theta$	0.480		$\tan \theta$	0.617	
$\tan \phi$	0.547	0.716	$\tan \phi$	0.491	0.714	$\tan \phi$	0.582	0.706
$\tan \theta$	0.764		$\tan \theta$	0.688		$\tan \theta$	0.824	
第二組		e	第五組		e	第八組		e
$\tan \phi$	0.568	0.703	$\tan \phi$	0.417	0.691	$\tan \phi$	0.614	0.721
$\tan \theta$	0.808		$\tan \theta$	0.603		$\tan \theta$	0.852	
$\tan \phi$	0.669	0.689	$\tan \phi$	0.498	0.692	$\tan \phi$	0.745	0.719
$\tan \theta$	0.971		$\tan \theta$	0.720		$\tan \theta$	1.036	
第三組		e	第六組		e	第九組		e
$\tan \phi$	0.713	0.711	$\tan \phi$	0.764	0.718	$\tan \phi$	0.325	0.687
$\tan \theta$	1.003		$\tan \theta$	1.064		$\tan \theta$	0.473	
$\tan \phi$	0.811	0.698	$\tan \phi$	0.825	0.724	$\tan \phi$	0.497	0.694
$\tan \theta$	1.162		$\tan \theta$	1.140		$\tan \theta$	0.716	
平均							0.705	

375°C(鋁板)								
第一組		e	第四組		e	第七組		e
$\tan \phi$	0.785	0.734	$\tan \phi$	0.417	0.749	$\tan \phi$	0.531	0.746
$\tan \theta$	1.069		$\tan \theta$	0.557		$\tan \theta$	0.712	
$\tan \phi$	0.816	0.741	$\tan \phi$	0.503	0.727	$\tan \phi$	0.587	0.726
$\tan \theta$	1.101		$\tan \theta$	0.692		$\tan \theta$	0.809	
第二組		e	第五組		e	第八組		e
$\tan \phi$	0.629	0.739	$\tan \phi$	0.847	0.745	$\tan \phi$	0.743	0.735
$\tan \theta$	0.851		$\tan \theta$	1.137		$\tan \theta$	1.011	
$\tan \phi$	0.743	0.754	$\tan \phi$	0.895	0.732	$\tan \phi$	0.812	0.742
$\tan \theta$	0.985		$\tan \theta$	1.223		$\tan \theta$	1.094	
第三組		e	第六組		e	第九組		e
$\tan \phi$	0.481	0.729	$\tan \phi$	0.742	0.733	$\tan \phi$	0.246	0.744
$\tan \theta$	0.660		$\tan \theta$	1.012		$\tan \theta$	0.331	
$\tan \phi$	0.574	0.738	$\tan \phi$	0.863	0.734	$\tan \phi$	0.397	0.736
$\tan \theta$	0.778		$\tan \theta$	1.176		$\tan \theta$	0.539	
平均							0.738	

## 400°C(鋁板)

第一組		e	第四組		e	第七組		e
$\tan \phi$	0.368	0.749	$\tan \phi$	0.532	0.764	$\tan \phi$	0.681	0.761
$\tan \theta$	0.491		$\tan \theta$	0.696		$\tan \theta$	0.895	
$\tan \phi$	0.476	0.756	$\tan \phi$	0.649	0.761	$\tan \phi$	0.739	0.759
$\tan \theta$	0.630		$\tan \theta$	0.853		$\tan \theta$	0.974	
第二組		e	第五組		e	第八組		e
$\tan \phi$	0.694	0.748	$\tan \phi$	0.472	0.749	$\tan \phi$	0.672	0.754
$\tan \theta$	0.928		$\tan \theta$	0.630		$\tan \theta$	0.891	
$\tan \phi$	0.664	0.742	$\tan \phi$	0.581	0.753	$\tan \phi$	0.701	0.766
$\tan \theta$	0.895		$\tan \theta$	0.772		$\tan \theta$	0.915	
第三組		e	第六組		e	第九組		e
$\tan \phi$	0.619	0.758	$\tan \phi$	0.776	0.742	$\tan \phi$	0.314	0.743
$\tan \theta$	0.817		$\tan \theta$	1.046		$\tan \theta$	0.423	
$\tan \phi$	0.793	0.753	$\tan \phi$	0.823	0.747	$\tan \phi$	0.452	0.750
$\tan \theta$	1.053		$\tan \theta$	1.102		$\tan \theta$	0.603	
平均								0.753

## 【評語】030106

1. 作者發現水珠在具有溫度梯度的高溫板上會朝低溫處運動，甚至可以爬坡。題材相當新穎有趣。
2. 作者亦對溫度範圍，梯度的影響做深入的探討。
3. 若作者能在模型及原理的探討多加一些定量的研究，會更形完整。