

中華民國第四十七屆中小學科學展覽會
作品說明書

高中組 物理科

第一名

040102

見微知“駐”－水珠律動與圓駐波

學校名稱：國立新竹女子高級中學

作者：	指導老師：
高二 崔德昕	林智遠
高二 楊鎧蔚	李佳玲

關鍵詞：邊形數 平均圓半徑 停滯時間

見微知「駐」—水珠律動與圓駐波

壹、研究摘要

緣起：邂逅專題研究、水珠漫舞、剪輯影片，引起我們想更進一步揭開它的神秘面紗。

緣續：了解熱平台上水滴大小的變化及水珠基本的形狀及變化律動。

緣繫：進一步研究水珠多變的面貌，並探討水珠的大小、溫度、停滯時間及變化規律相關機制。

緣定：糾纏在水珠圓舞曲中有如大珠小珠落玉盤的曼妙，其中埋藏了平均圓與能量量子化的律動。

貳、研究動機

偶爾和家人去吃鐵板燒時，看到廚師們在鐵板上加水或油時，板上的小水珠並沒有立即蒸發，而是不停的在熱鐵板上跳動滾動。隨後才以ㄗㄗㄗ的聲音快速蒸發消逝。因而想設計一套實驗，來探討水珠在熾熱板上微妙的變化情形及原因。

參、研究目的

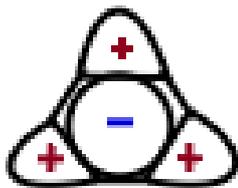
- 一、探討熱平台上水滴變化情形及水滴基本的變形形狀。
- 二、探討水滴在不同板溫下的不鏽鋼板上，水珠的大小、形狀、變化、溫度、停滯時間的相關性。
- 三、研究水珠形狀變化的規律及變形機制。
- 四、探討水珠在不同板溫下各種形狀出現的大小範圍及平均半徑關係。

肆、實驗原理

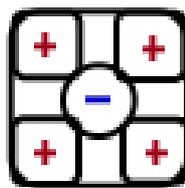
【觀念一】：振盪與水滴(water drop)變形

參考文獻【五】是一篇將水滴放置在 PTFE 或鐵氟龍板上，用喇叭(speaker)震盪水滴運動的實驗。從中得知，常溫下水珠的震盪和拉扯是由於本身是電偶極分子，當帶正電荷的水珠膨脹向上時，帶負電荷的水珠則向下陷落，反之亦然。

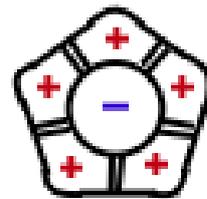
而由於多邊形水珠的巨大振幅，表面無法抵抗而破碎，導致水會從水珠中心噴射出去而造成變形。例如三角形：當三角形水珠變形時，正向和反向的三角形水珠交替著，表面激烈的波動一段時間就交換，水珠中心表面的垂直移動和三個角落表面的垂直移動是互補的。



(a) Triangle



(b) Quadrilateral

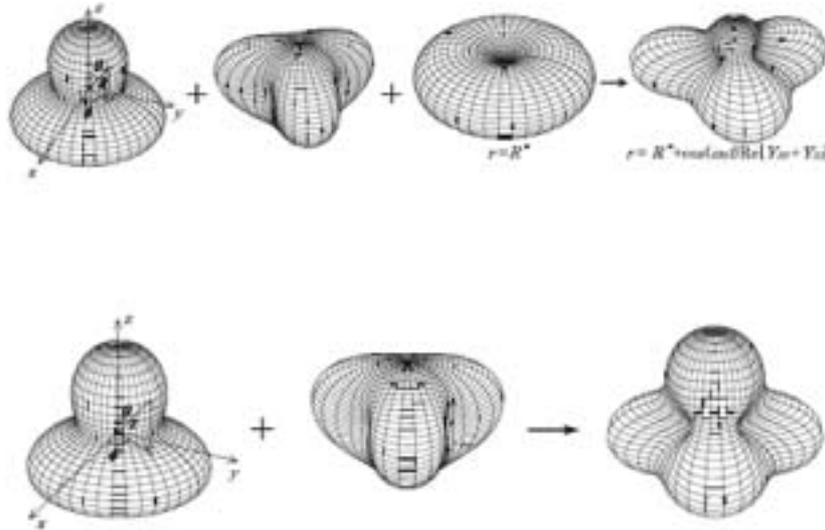


(c) Pentagon

【觀念二】：

參考文獻【五】拉普拉斯(Laplace)曾對液體表面張力現象，以球形極座標 (r, θ, ϕ) 表示，在振盪的條件下，解出球形簡諧運動組合方程式

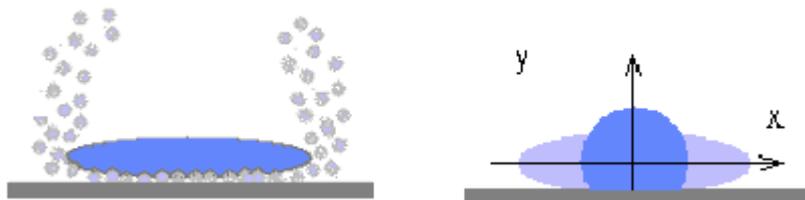
$$r(\theta, \phi) = R + \sum c_n \cos(\omega_n t) P_n(\cos \theta)$$



摘自：期刊 Exp Fluids(2006) 41:789-802
作者：Morihiro Okada · Minoru Okada 的研究報告

【觀念三】：蒸氣層與熱對流

高溫加熱板上的水滴於接觸瞬間，立即有水分子汽化成一層蒸氣膜，降低了 Hotplate 的熱傳導速率，水滴宛如一層蒸氣膜保護而形成穩定水珠，延長了停滯時間。如圖示：



水珠週遭空氣,在高溫加熱板上劇烈對流;加上高溫水珠內部分子的熱運動,形成水珠內外壓力差的作用,因此水珠不停的振動!轉動!變形!

【觀念四】：對稱變形與蒸散熱能

水珠處高溫狀態急待蒸散熱能，以降低溫度。高溫水分子的熱運動與空氣熱對流所造成的壓力差，致使水珠向外突出變形，以增大表面積加快蒸發速率，可以降低熱能。但是水珠變形的同時與 Hotplate 接觸表面積變大，單位時間熱傳導能量增加。表面張力內縮作用,水珠在突出變形與表面積縮小之下,劇烈變形後恢復球形,如此交替循環變化，如簡諧振盪一般。

伍、實驗設計

一、研究設備及器材

- (1) 加熱器 Stirrer Hotplate(Corning) 平台
- (2) K/J 型式熱電偶溫度計、兩支細針型
- (3) 不鏽鋼板兩片 (19.7cm×16.3cm×0.1 cm)
- (4) 錐形瓶 250ml、玻璃滴管
- (5) 高速攝錄影機一台。Fujinon corporation 1:1.4/16mm HF16HA-1B
- (6) 自行設計之鐵架（用以固定溫度計）。
- (7) 16K 方眼紙(1mm) 193×266mm

二、實驗裝置

由左起為 K/J 型式熱電偶溫度計、加熱器 Stirrer Hotplate(Corning) 平台、錐形瓶 250ml 及玻璃滴管，正後方為自行設計之鐵架。



(圖一)

三、名詞定義：

- (1) 單位體積：滴管每滴落一滴之平均體積。
- (2) 停滯時間 T_m ：水滴在加熱板上蒸發消逝的時間亦可稱為蒸發速率。
- (3) 圓形水珠：水滴在加熱板上形成扁球形之狀態稱為圓形水珠。
- (4) 邊形數：水珠變形時觀察者（含視覺暫留）所看到的邊形角數量。
- (5) 重影：水珠快速拉扯所造成視覺暫留之現象下所看到疊合的圖形。
- (6) 潛相熱：溫度升高提供熱源但邊形數沒變時，我們稱之為潛相熱。
- (7) 平均圓半徑：多邊形之內切圓與外接圓半徑的平均值。
- (8) 半徑限定：水珠平均圓半徑分布不連續現象。即某一邊形數在特定溫度，有特定的半徑範圍。

陸、實驗過程

實驗一：基本測量

〈表一〉 **【a】** 水滴平均體積：

滴數	50	100	150	200	平均體積(cc)	單位體積(cc)
體積(cc)	1.98	4.02	6.00	7.98	0.0399	0.0400
體積(cc)	2.00	4.05	6.02	8.02	0.0401	
體積(cc)	1.96	4.00	5.98	8.00	0.0400	

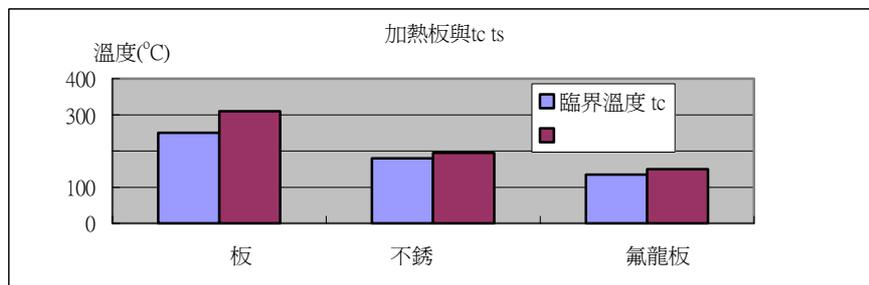
〈表二〉 **【b】** 水滴大小（截面直徑）：不銹鋼板上

滴數	一滴	二滴	三滴	四滴	五滴
平均直徑(mm)	6.6	8.3	9.8	10.7	11.2

〈表三〉

Hotplate 名稱	陶瓷板	平均溫度	不銹鋼板	平均溫度	鐵氟龍板	平均溫度
臨界溫度	248°C	250°C	180°C	180°C	138°C	135°C
	252°C		176°C		134°C	
	250°C		180°C		135°C	
	248°C		178°C		135°C	
	250°C		180°C		136°C	
穩定溫度	312°C	310°C	198°C	195°C	148°C	150°C
	305°C		196°C		150°C	
	310°C		195°C		150°C	
	308°C		192°C		148°C	
	310°C		195°C		152°C	

【數據分析】



(圖二) 加熱板與臨界溫度和穩定溫度

《引自參考文獻〈三〉水珠漫舞》

註：

臨界溫度：水滴在加熱板上開始形成水珠的最低溫度

穩定溫度：水滴在加熱板上形成與滴入水滴體積相同時的最低溫度

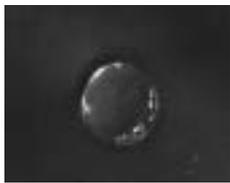
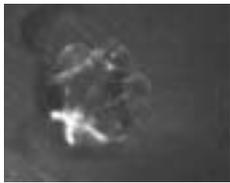
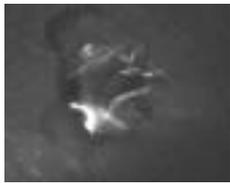
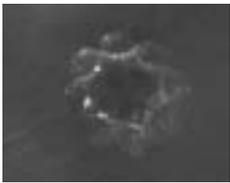
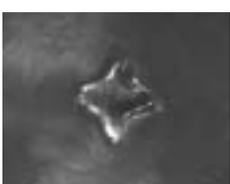
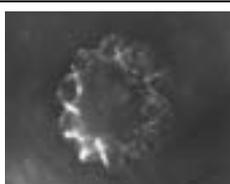
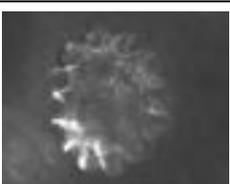
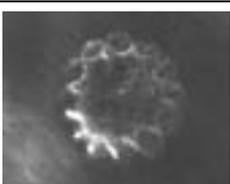
【觀察結果】：

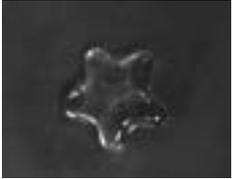
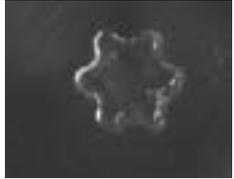
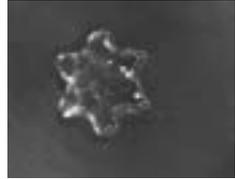
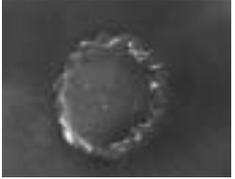
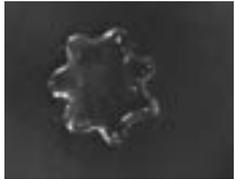
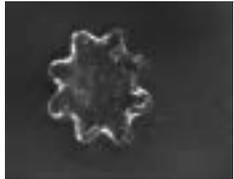
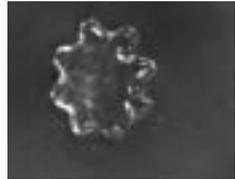
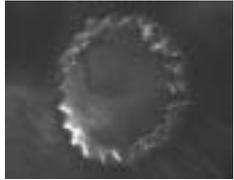
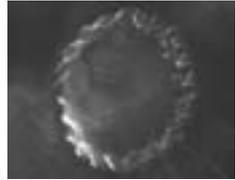
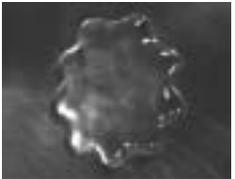
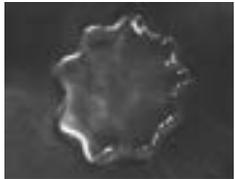
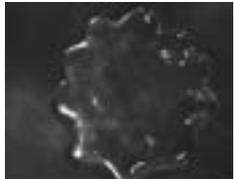
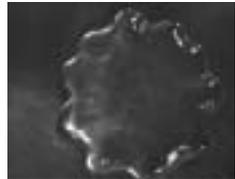
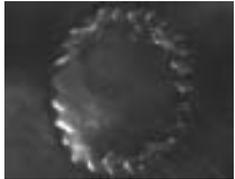
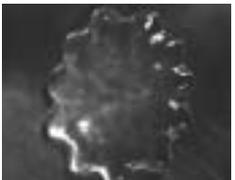
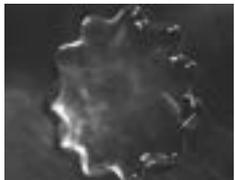
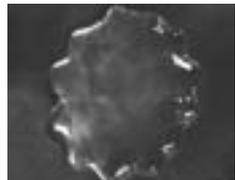
在（圖二）中我們發現，在不銹鋼板和鐵氟龍板上，臨界溫度較陶瓷板低，但由於鐵氟龍板的表面較粗糙，易對水珠的變形產生阻礙，因此我們決定選用不銹鋼板來進行以下實驗。

步驟一：紀錄及觀察各種形狀並給予定義

（表四）

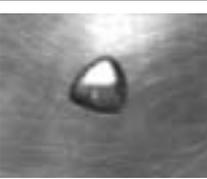
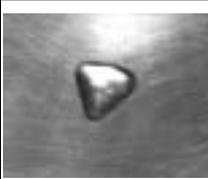
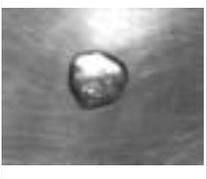
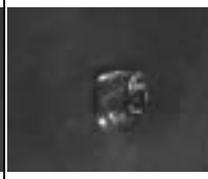
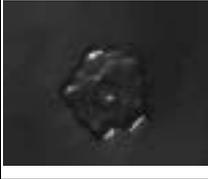
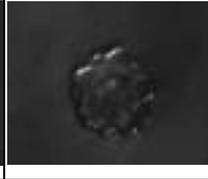
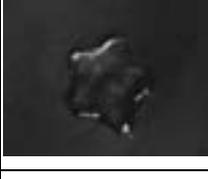
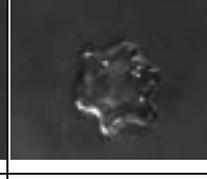
【】為數據表中表示此圖形之代號

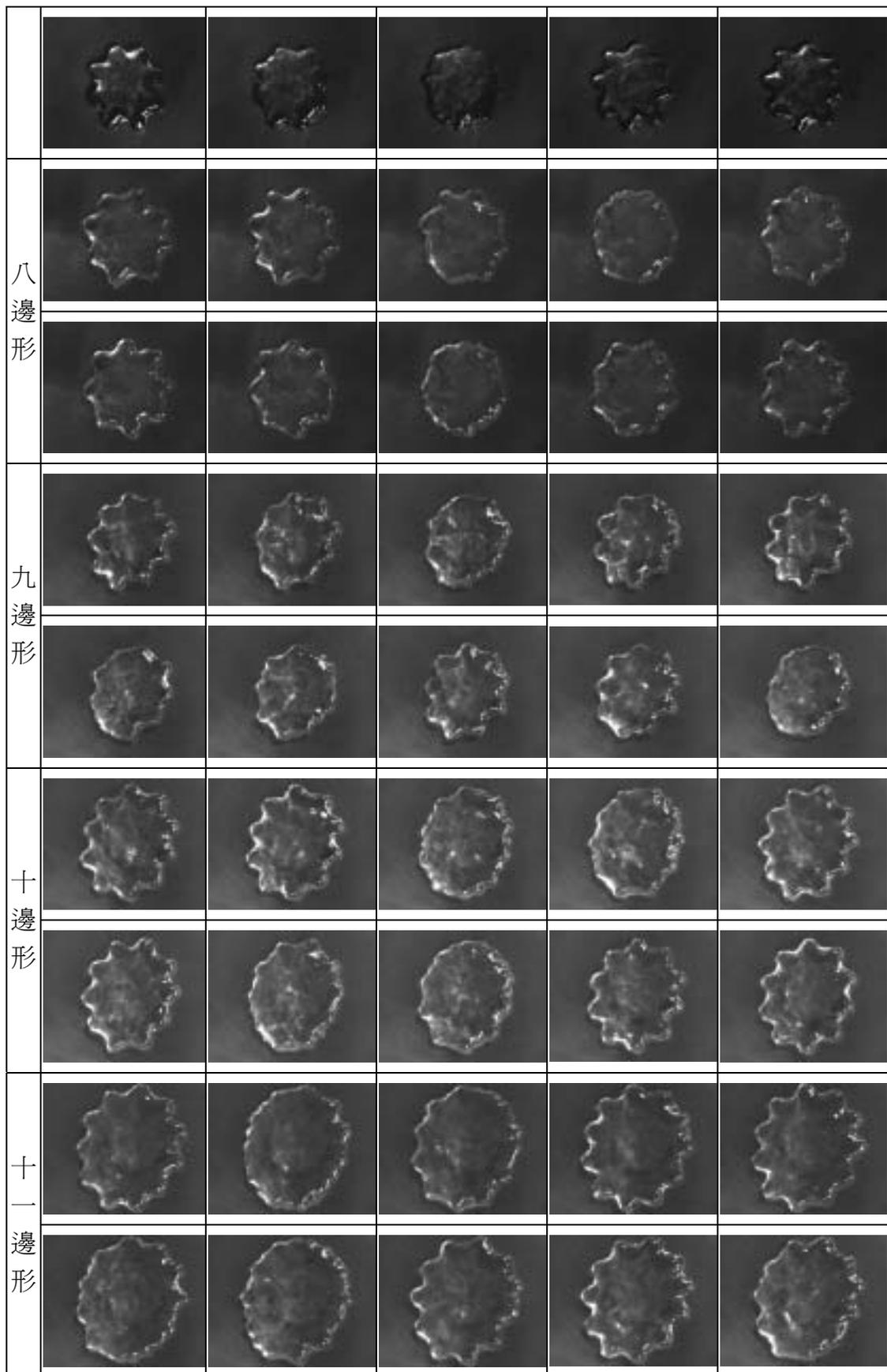
變形數	圓形【1】		十字形【4】	
肉眼所見				
高速攝影下				
變形數	三角形重影【6】		四邊形重影【8】	
肉眼所見				
高速攝影下				
變形數	五邊形重影【10】		六邊形重影【12】	
肉眼所見				

高速攝影下				
變形數	七邊形重影【14】		八邊形重影【16】	
肉眼所見				
高速攝影下				
變形數	九邊形重影【18】		十邊形重影【20】	
肉眼所見				
高速攝影下				
變形數	十一邊形重影【22】		十二邊形重影【24】	
肉眼所見			(Blank area with a diagonal line from top-left to bottom-right)	
高速攝影下				

步驟二：用高速攝影機拍攝下所有圖形之變化規律

(表五)

三邊形					
					
四邊形					
					
五邊形					
					
六邊形					
					
七邊形					



【實驗分析】：

於〈表五〉中觀察到水珠會在突出變形與表面積縮小之下，劇烈變形後恢復球形。如此交替循環變化且對稱變形，就如簡諧振盪一般。

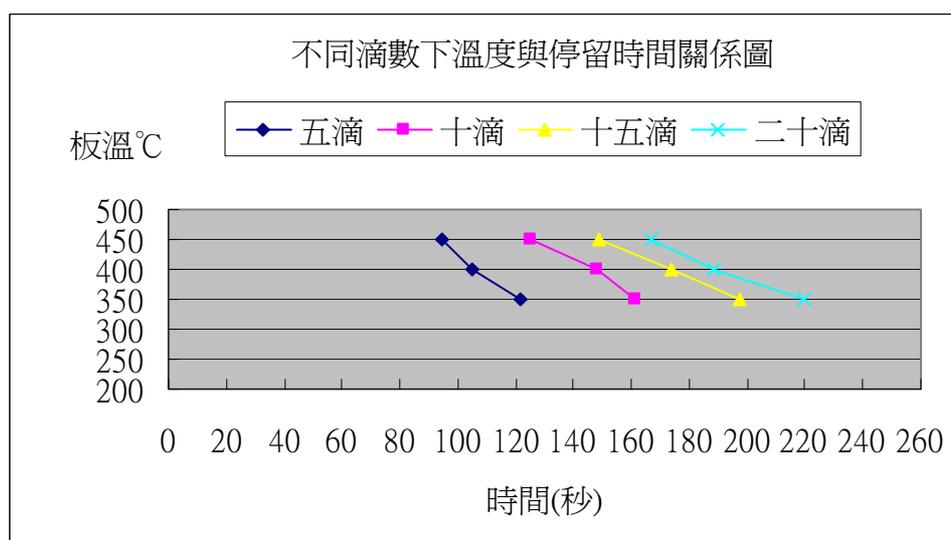
實驗二：水珠停滯時間在不同加熱板溫度下之探討

步驟一：將板溫分別依次穩定地控制在 350°C、400°C、450°C

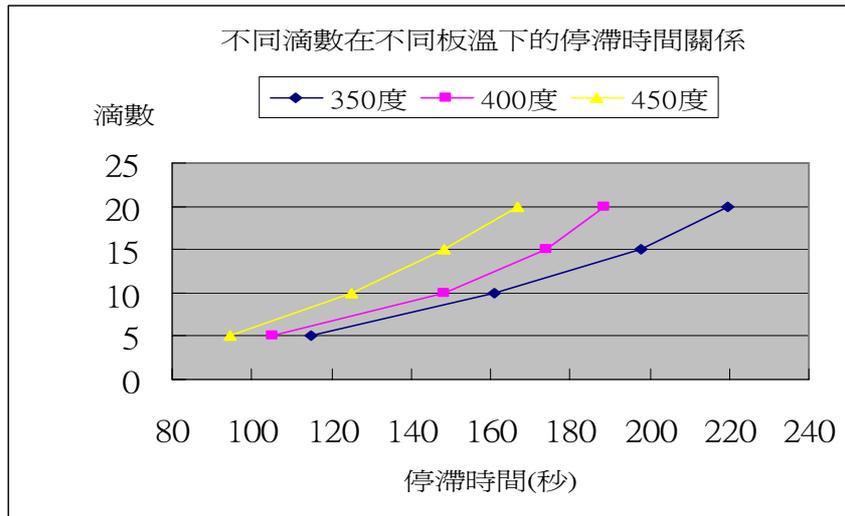
步驟二：於各個板溫下依序滴入五滴、十滴、十五滴、二十滴的水珠，並記錄下不同大小之水珠在不同板溫下的停滯時間，並畫函數圖以表現其關係。

(表六)

	350°C	400°C	450°C
5 滴	119.43	115.49	96.05
	119.28	98.74	95.59
	126.78	101.54	94.25
平均時間(秒)	121.83	105.26	95.30
10 滴	158.88	143.95	123.36
	163.70	149.10	121.78
	160.24	151.30	126.37
平均時間(秒)	160.94	148.12	123.84
15 滴	194.83	178.78	149.68
	193.91	169.29	148.26
	204.12	173.38	147.35
平均時間(秒)	197.62	173.82	148.43
20 滴	227.17	192.09	161.56
	213.32	186.12	162.47
	217.93	187.41	165.74
平均時間(秒)	219.47	188.54	163.26



〈圖三〉不同滴數下溫度與停留時間關係圖



〈圖四〉不同滴數在不同板溫下的停留時間關係圖

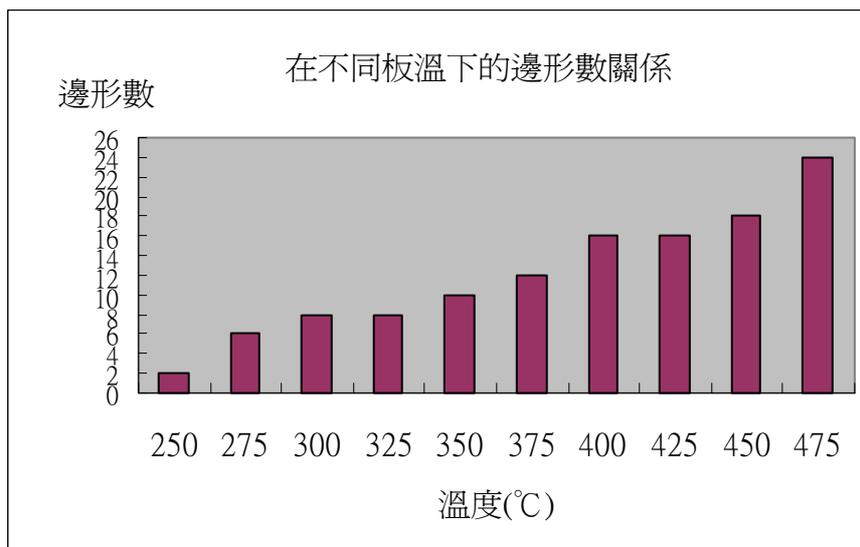
【實驗分析】：

於〈圖三〉中，我們觀察到水珠的停滯時間會隨著板溫的升高而變短。〈圖四〉中可發現水珠除了隨著水滴數之增加而停滯時間延長外，也會隨著水滴數之增加，在相同板溫下兩兩滴數之間(如五滴跟十滴)的停滯時間差值越小。從〈圖三〉中更可清楚的觀察出水滴數與板溫之停留時間之關係。

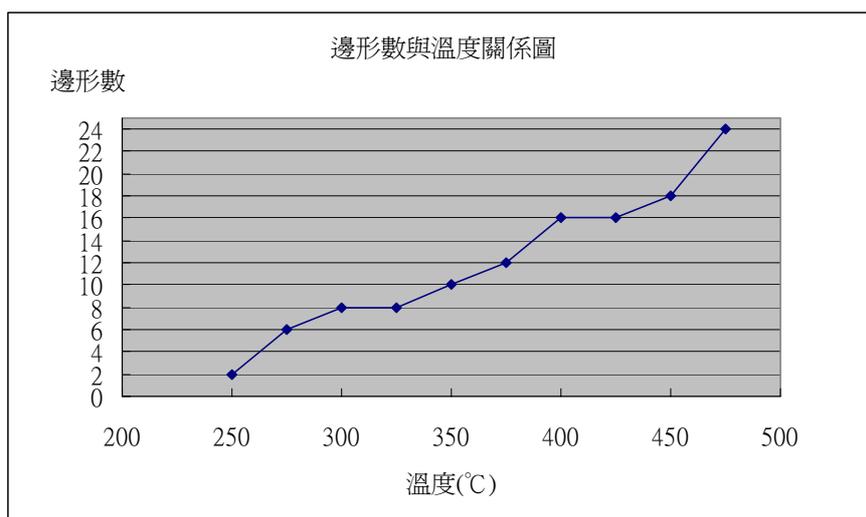
實驗三：水珠於不同加熱板溫度下之變形數關係

步驟一：將板溫分別穩定地控制在 250°C、275°C、300°C、325°C、350°C、375°C、400°C、425°C、450°C

步驟二：作數次的實驗並記錄所觀察到的圖形



（圖五）在不同板溫下的邊形數關係



〈圖六〉邊形數與溫度關係圖

【實驗分析】：

於〈圖五〉中明顯的顯示出：隨著溫度的升高，邊形數也隨之增大。〈圖六〉我們還觀察到 8 邊形(即四邊形重影)跟 16 邊形(即八邊形重影)為水平線，也就是說出現 8 邊跟 16 邊形時，會有一段溫度範圍下都不會再增加邊形數，但只要溫度再持續升高到超過某一溫度，則又會出現更多邊形。

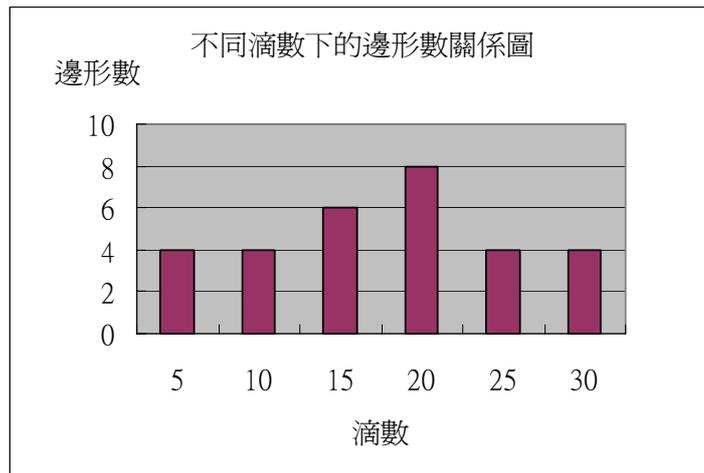
實驗四：水滴大小(滴數)與變形數之關係

步驟一：將板溫控制在 350°C，並依次滴入 5、10、15、20、25、30、35 滴水珠數次，並紀錄所出現的形狀。

〈表七〉 (*表示為有出現之形狀)

邊形數 滴數	圓形 (1)	橢圓形 (2)	十字形 (4)	三邊形 (6)	四邊形 (8)
5 滴	*		*		
10 滴	*		*		
15 滴	*		*	*	
20 滴	*		*	*	*
25 滴	*	*	*		
30 滴	*	*	*		

《各種形狀括號內的數字代表下圖中的邊形數》



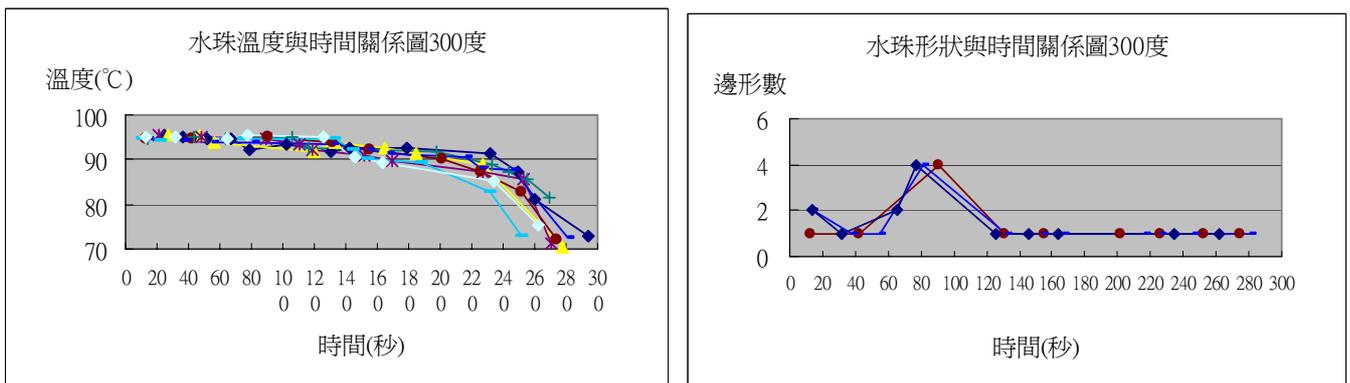
〈圖七〉不同滴數下的邊形數關係圖

【實驗分析】：

於〈表七〉的 5 滴~20 滴數據中，都沒有出現橢圓形，但變形數仍會隨著滴數之增加而增加。而大於 20 滴的數據，則是常出現橢圓形旋轉，等到水珠變小時會以十字快速拉扯。我們更可以從〈圖七〉清楚的觀察到在板溫 350°C 下是以 20 滴的變形數為最多。

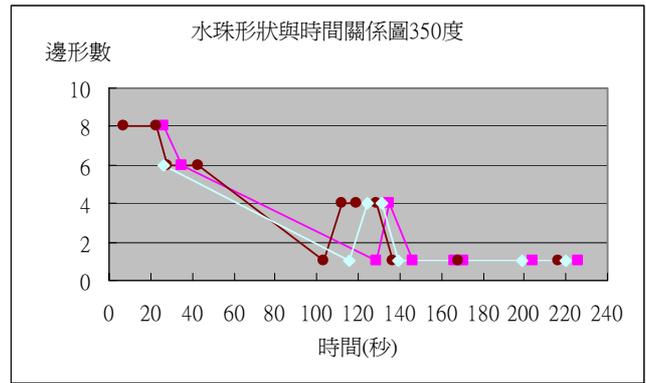
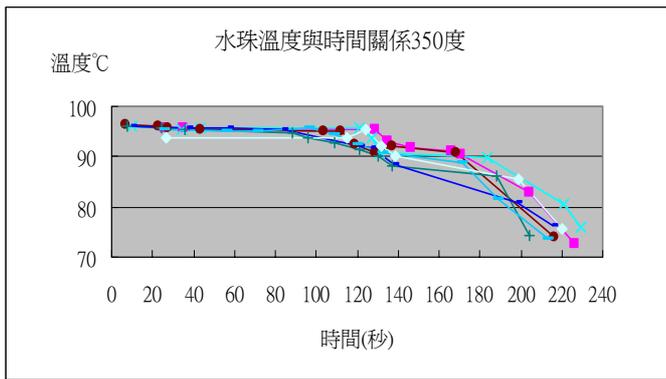
實驗五：水珠中心溫度及形狀變化與時間關係

步驟一：分別在 300°C、350°C、400°C 的溫度下滴入 20 滴水珠(由實驗四之結論，我們決定以變形數最多的 20 滴來觀察)，並紀錄水珠變形過程中的中心溫度及變形過程，且分別用碼錶紀錄下水珠溫度當時的時間跟變形時之時間。



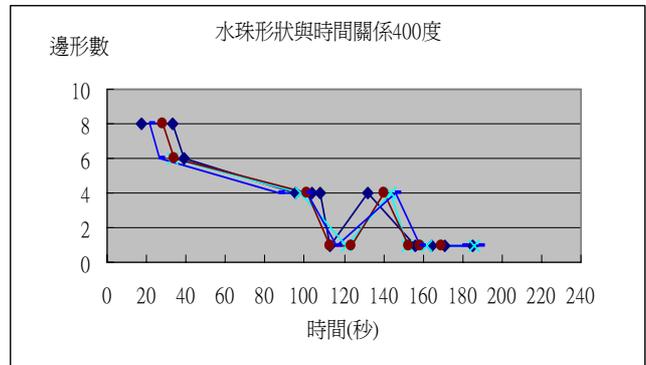
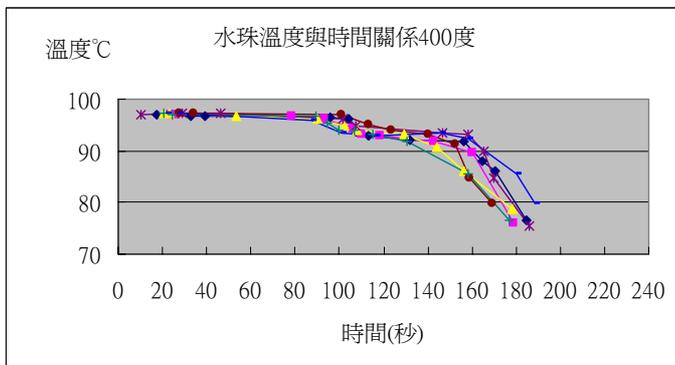
〈圖八〉水珠溫度與時間關係圖 300°C

- * 水珠溫度與時間關係圖：水珠中心溫度先以平緩曲線下滑，到約 230 秒時開始驟降。
- * 水珠形狀與時間關係圖：80~100 秒時水珠變成十字形（以 4 表示）劇烈拉扯，之後則趨於穩定不再變形。



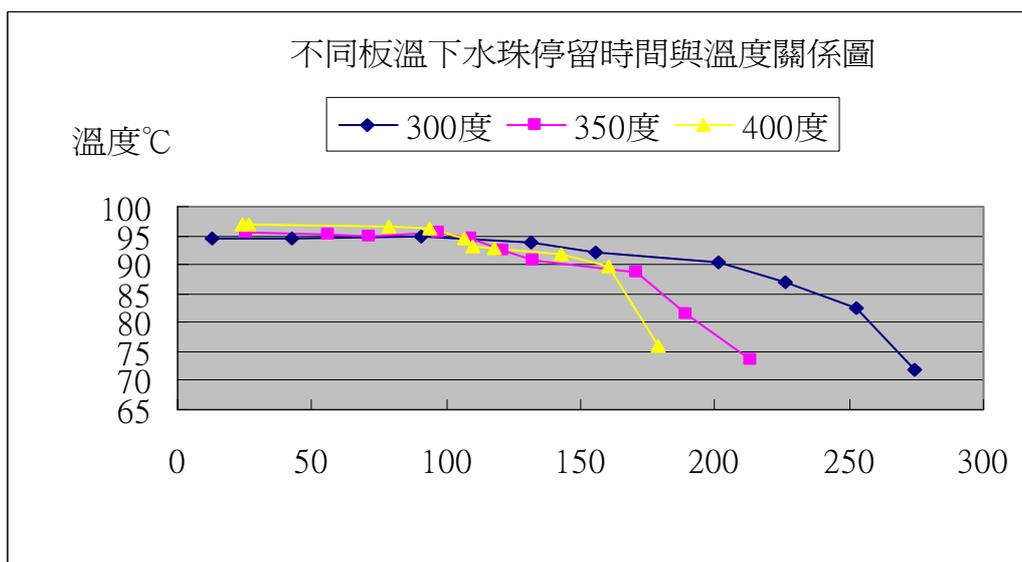
〈圖九〉水珠溫度與時間關係圖 350°C

- * 水珠中心溫度與時間關係圖：水珠中心溫度於120~140秒之間明顯下降(此時十字形變回圓形)，並於180秒左右時驟降(此時為圓形)，直至水珠消失。
- * 水珠變形規律：邊形數 8-6-1-4-1



〈圖十〉水珠溫度與時間關係圖 400°C

- * 水珠中心溫度與時間關係圖：水珠中心溫度於100~120秒間明顯下降(此時十字變回圓形)，於160秒左右時驟降直至水珠消失(此時為圓形)。
- * 水珠變形規律：邊形數 8-6-4-1-4-1



〈圖十一〉不同溫度下水珠停留時間關係圖

【實驗分析】：

於此實驗中可觀察到水珠中心溫度會隨著時間增加漸漸降低，此也說明了水珠中心溫度不會受到水珠變形的影響。除此之外，〈圖十一〉中水珠中心溫度一開始呈現穩定，到 100~200 秒之間會緩緩的降低，而後迅速降溫。也發現隨著板溫升高，水珠中心的初始溫度也較高，且停留時間較短，後階段的溫度驟降也較快。由對照的形狀與時間關係圖中可得知，隨著溫度的升高，變形也越趨複雜、多變，且變形規律皆由多邊形變至圓形。且當邊形數由多變少時，中心溫度會下降。

實驗六：水珠的平均半徑與邊形數關係

步驟一：將高速攝影機之高度利用腳架固定且垂直拍攝高溫不銹鋼板

步驟二：利用高速攝影機擷取水珠不同邊形數、不同大小之圖片

步驟三：將高速攝影機之高度及垂直拍攝固定，現拍攝一張 1x1cm 之方格紙當作比例換算的工具。

步驟四：將拍攝的圖片匯入 PhotoImpact 軟體，將圖片以 300% 的比例放大，放大後畫素不變，使用輪廓繪圖工具找出多邊形內切圓及外接圓之輪廓，固定 x 軸後利用測量工具找出 y 軸的畫素變化求出內切圓及外接圓半徑，將兩者平均求出平均圓之畫素。

步驟五：比較各種邊形數在不同加熱板溫下的平均圓半徑大小。

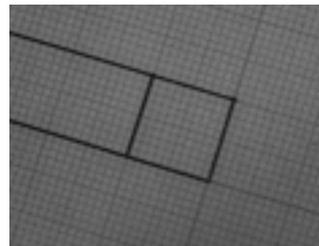
步驟六：以方格紙所拍攝之 1cm：62.64 畫素 為比例尺換算出水珠的平均圓半徑約為多少 cm 並探討各種邊形數在不同板溫下的平均圓半徑的範圍。



〈圖十二〉



〈圖十三〉



〈圖十四〉

〈圖十二〉 觀察水滴變形時的實驗裝置(攝影機高度固定)

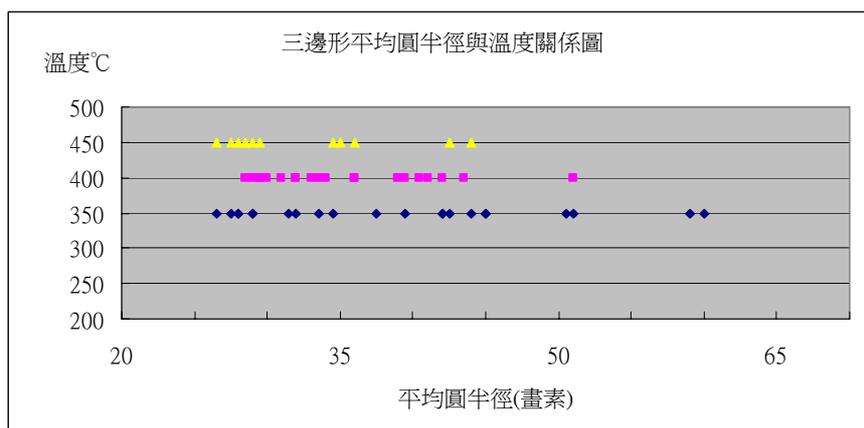
〈圖十三〉 攝影機高度固定下將不銹鋼板換成方格紙

〈圖十四〉 加粗的方格紙

〈表八〉三邊形

(單位：畫素)

板溫 邊形數	450°C			400°C			350°C		
	內切圓 半徑	外接圓 半徑	平均 半徑	內切圓 半徑	外接圓 半徑	平均 半徑	內切圓 半徑	外接圓 半徑	平均 半徑
	36	52	44	40	62	51	40	62	51
	23	34	28.5	29	39	34	27	36	31.5
	36	49	42.5	29	38	33.5	40	50	45
	20	33	26.5	36	51	43.5	36	48	42
	29	43	36	28	44	36	20	38	29
	27	42	34.5	26	40	33	31	44	37.5
	22	31	26.5	23	41	32	40	61	50.5
	21	34	27.5	25	34	29.5	19	36	27.5
	22	37	29.5	23	36	29.5	32	47	39.5
	21	29	25	24	34	29	22	31	26.5



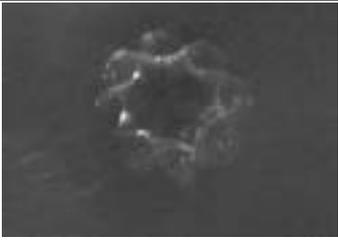
〈圖十五〉三邊形平均圓半徑與溫度關係圖

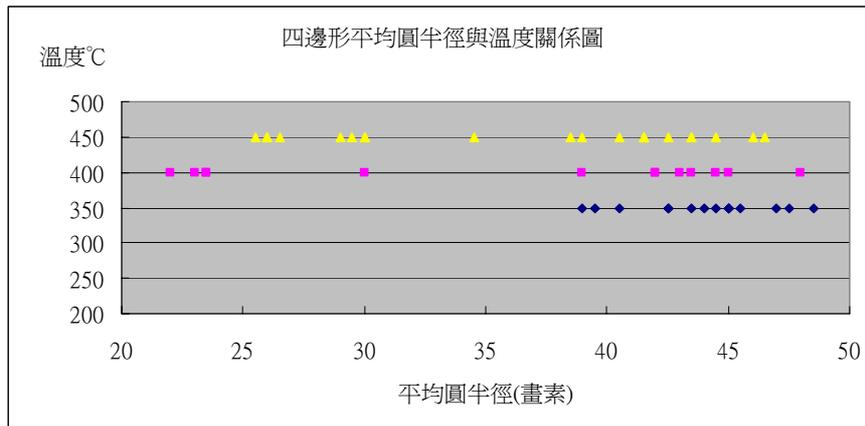
* 三邊形的平均圓半徑在溫度較低時範圍較大，溫度愈高時範圍較小。且其半徑限定區之最大間隔隨著溫度之升高而變短。

〈表九〉四邊形

(單位：畫素)

板溫 邊形數	450°C			400°C			350°C		
	內切圓 半徑	外接圓 半徑	平均 半徑	內切圓 半徑	外接圓 半徑	平均 半徑	內切圓 半徑	外接圓 半徑	平均 半徑
	36	59	47.5	36	60	48	42	55	48.5
	29	52	40.5	24	35	29.5	34	55	44.5
	33	60	46.5	26	34	30	30	51	40.5
	31	56	43.5	35	55	45	31	54	42.5

	25	53	39	33	56	44.5	34	45	39.5
	28	49	38.5	25	33	29	41	54	47.5
	31	58	44.5	30	54	42	33	54	43.5
	29	54	41.5	28	50	39	34	51	42.5
	23	30	26.5	20	27	23.5	32	56	44
	22	29	25.5	19	25	22	35	43	39

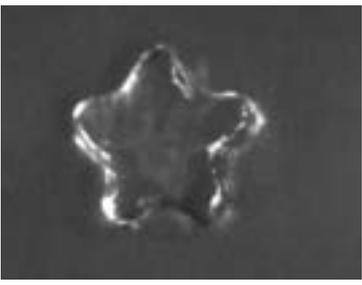
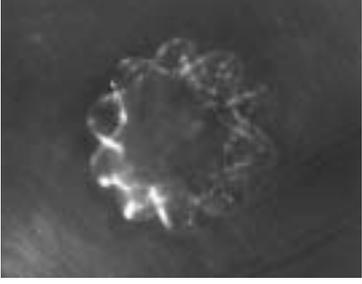


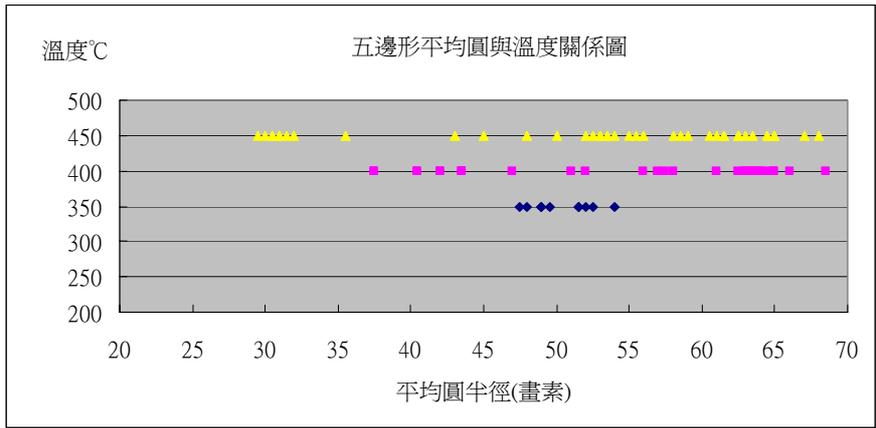
〈圖十六〉四邊形平均圓半徑與溫度關係圖

* 四邊形之出現範圍以 400°C 為最大，450°C 次之，300°C 最小。半徑限定區之最大間隔距離也依此順序減小。

〈表十〉五邊形

(單位：畫素)

板溫		450°C			400°C			350°C		
邊形數		內切圓半徑	外接圓半徑	平均半徑	內切圓半徑	外接圓半徑	平均半徑	內切圓半徑	外接圓半徑	平均半徑
		59	77	68	54	83	68.5	61	84	72.5
		37	49	43	39	51	45	61	82	71.5
		50	76	63	38	46	42	44	61	52.5
		47	76	61.5	51	75	63	44	60	52
		45	73	59	47	68	57.5	46	62	54
		38	58	48	35	46	40.5	43	56	49.5
		39	51	45	54	75	64.5	43	53	48
		45	62	53.5	49	74	61.5	41	57	49
		20	25	22.5	40	59	49.5	44	59	51.5
	21	24	22.5	34	41	37.5	41	54	47.5	



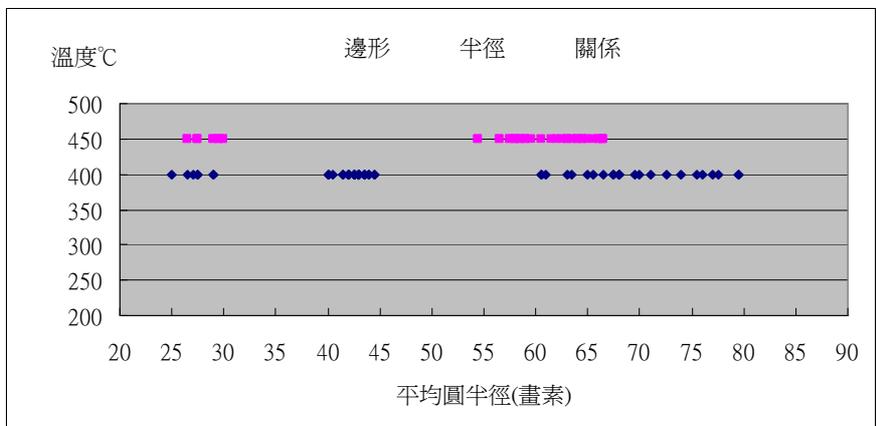
〈圖十七〉五邊形平均圓半徑與溫度關係圖

* 溫度越高，平均圓半徑範圍越大，水珠半徑限定區的最大間隔也越大。

〈表十一〉六邊形

(單位：畫素)

板溫		450°C			400°C			350°C		
邊形數		內切圓半徑	外接圓半徑	平均半徑	內切圓半徑	外接圓半徑	平均半徑	內切圓半徑	外接圓半徑	平均半徑
		54	79	66.5	70	89	79.5			
		54	75	64.5	56	80	73			
		52	74	63	54	81	67.5			
		53	70	61.5	49	72	64.5			
		48	69	58.5	37	52	44.5			
		50	59	54.5	37	49	43			
		25	35	30	35	45	40			
		24	34	29	36	49	42.5			
		24	31	27.5	23	32	27.5			
		23	30	26.5	22	28	25			

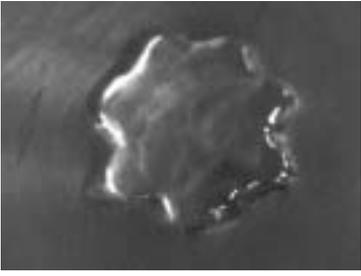
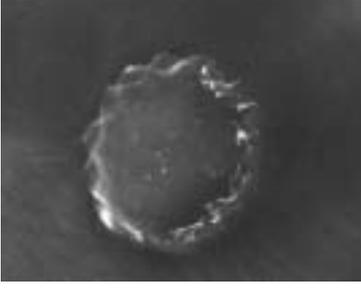


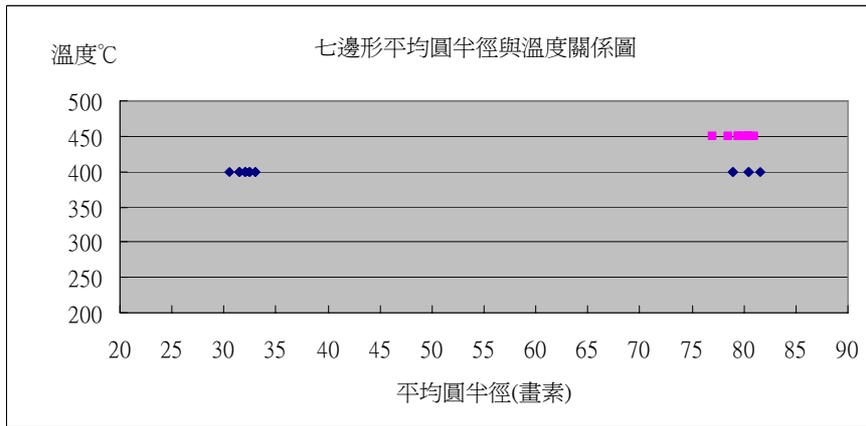
〈圖十八〉六邊形平均圓半徑與溫度關係圖

* 溫度越低，平均圓半徑範圍越大。但450°C時水珠半徑限定區の間隔較大。

〈表十二〉七邊形

(單位：畫素)

板溫		450°C			400°C			350°C			
邊形數		內切圓	外接圓	平均	內切圓	外接圓	平均	內切圓	外接圓	平均	
		半徑	半徑	半徑	半徑	半徑	半徑	半徑	半徑	半徑	
		72	91	81.5	71	92	81.5				
		65	92	78.5	72	89	80.5				
		69	92	80.5	71	87	79				
		64	90	77	70	91	80.5				
		69	93	81	71	87	79				
		70	90	80	30	35	32.5				
		71	90	79.5	31	35	33				
		69	89	79	30	34	32				
		68	88	78	30	33	31.5				
		64	89	76.5	29	32	30.5				

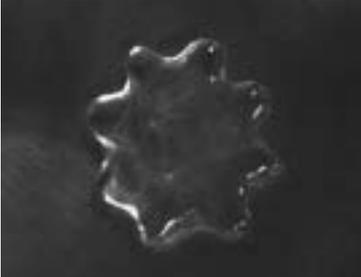


〈圖十九〉七邊形平均圓半徑與溫度關係圖

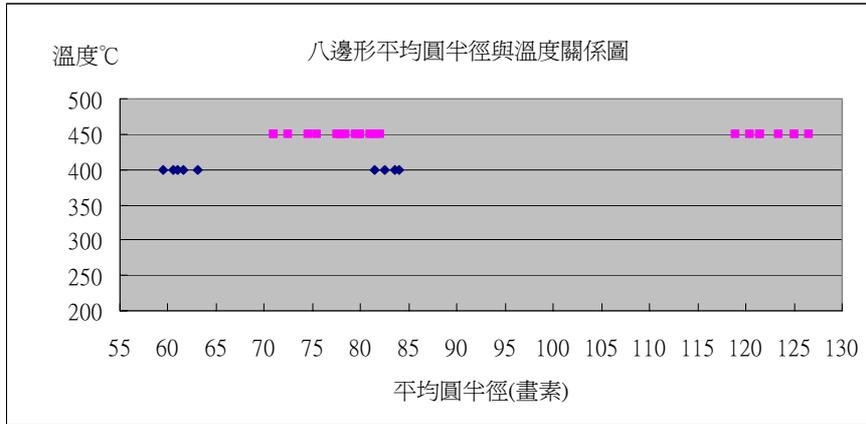
* 此圖 400°C 時的半徑限定區間隔很大，因此我們推測 450°C 的水珠在更大半徑時會出現其它的半徑限定區。

〈表十三〉八邊形

(單位：畫素)

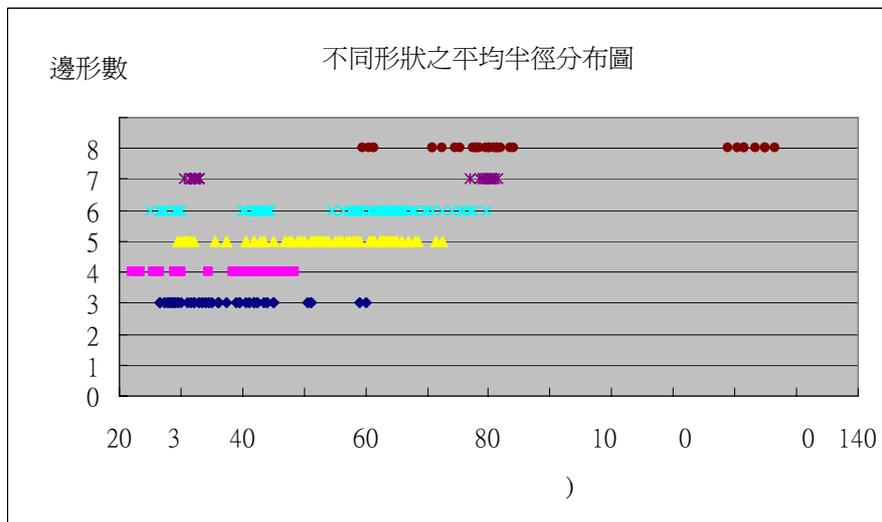
板溫		450°C			400°C			350°C			
邊形數		內切圓	外接圓	平均	內切圓	外接圓	平均	內切圓	外接圓	平均	
		半徑	半徑	半徑	半徑	半徑	半徑	半徑	半徑	半徑	
		63	190	126.5	75	93	84				
		72	91	81.5	56	67	61.5				
		66	184	125	57	64	60.5				
		68	88	78	54	65	59.5				

	71	88	79.5	74	93	83.5
	71	89	80	71	92	81.5
	64	183	123.5	72	93	82.5
	67	171	119	56	66	61
	73	91	82	58	68	63
	61	81	71	54	65	59.5

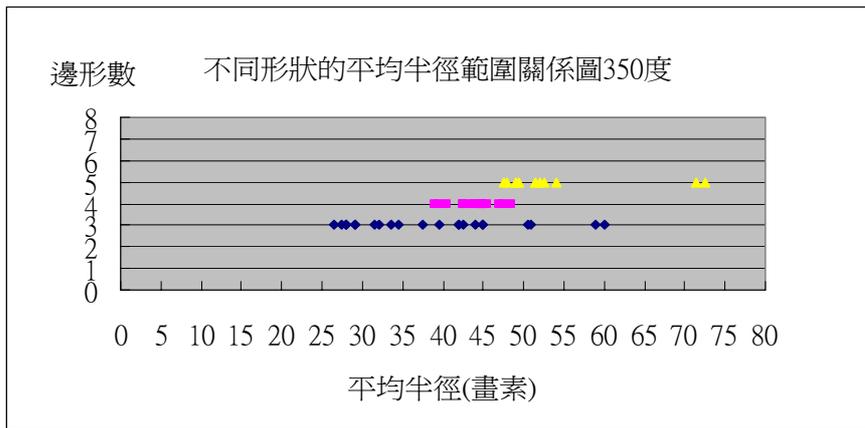


〈圖二十〉八邊形平均圓半徑與溫度關係圖

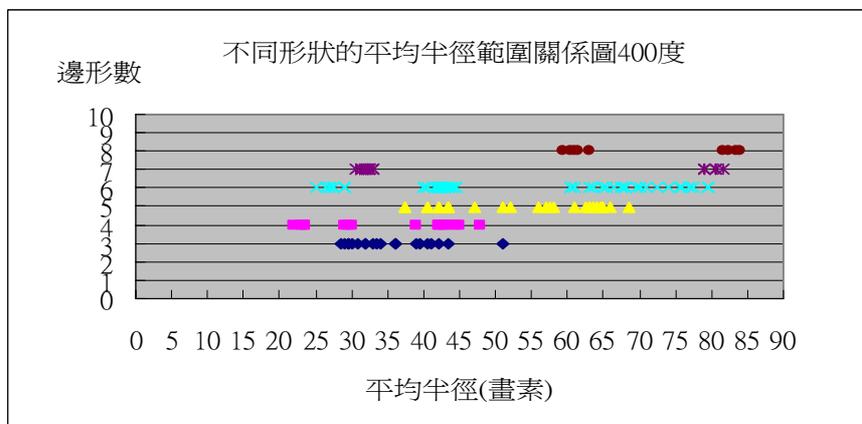
* 溫度越高，半徑範圍越大，且其半徑限定區の間隔也越大。



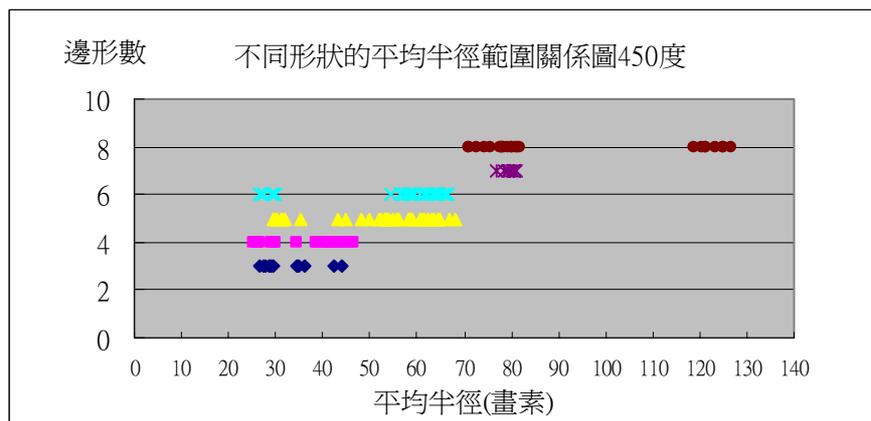
〈圖二十一〉不同形狀之平均半徑分布圖



〈圖二十二〉不同形狀的平均半徑範圍關係圖 350 度



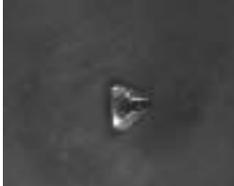
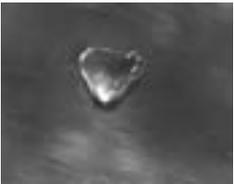
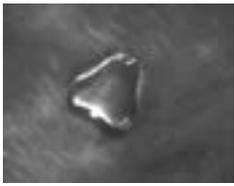
〈圖二十三〉不同形狀的平均半徑範圍關係圖 400 度



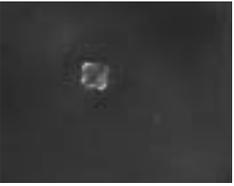
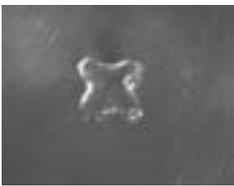
〈圖二十四〉不同形狀的平均半徑範圍關係圖 450 度

〈表十四〉各種形狀在不同板溫下出現之最大及最小平均半徑比較

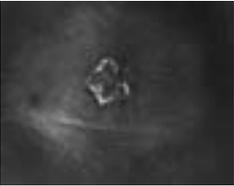
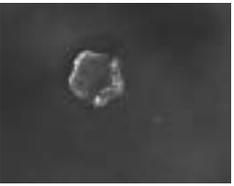
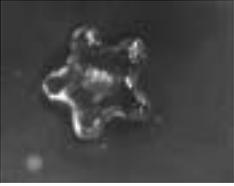
(單位：公分)

板溫	450°C		400°C		350°C	
最小平均半徑 (cm)		0.4		0.46		0.42
最大平均半徑 (cm)		0.7		0.81		0.81

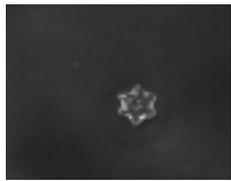
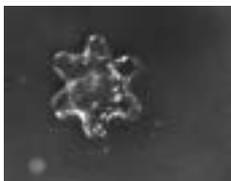
〈表十五〉

板溫	450°C		400°C		350°C	
最小平均半徑 (cm)		0.41		0.35		0.62
最大平均半徑 (cm)		0.76		0.77		0.77

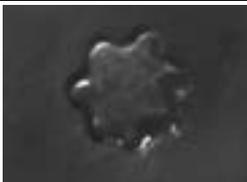
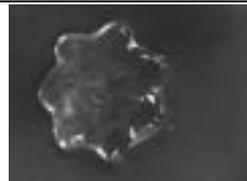
〈表十六〉

板溫	450°C		400°C		350°C	
最小平均半徑 (cm)		0.36		0.6		0.76
最大平均半徑 (cm)		1.09		1.09		1.16

〈表十七〉

板溫	450°C		400°C	
最小平均半徑 (cm)		0.42		0.4
最大平均半徑 (cm)		1.06		1.22

〈表十八〉

板溫	450°C		400°C	
最小平均半徑 (cm)		1.23		0.49
最大平均半徑 (cm)		1.30		1.25

〈表十九〉

板溫	450°C		400°C	
最小平均半徑 (cm)		1.13		0.95
最大平均半徑 (cm)		2.02		1.34

【實驗分析】：

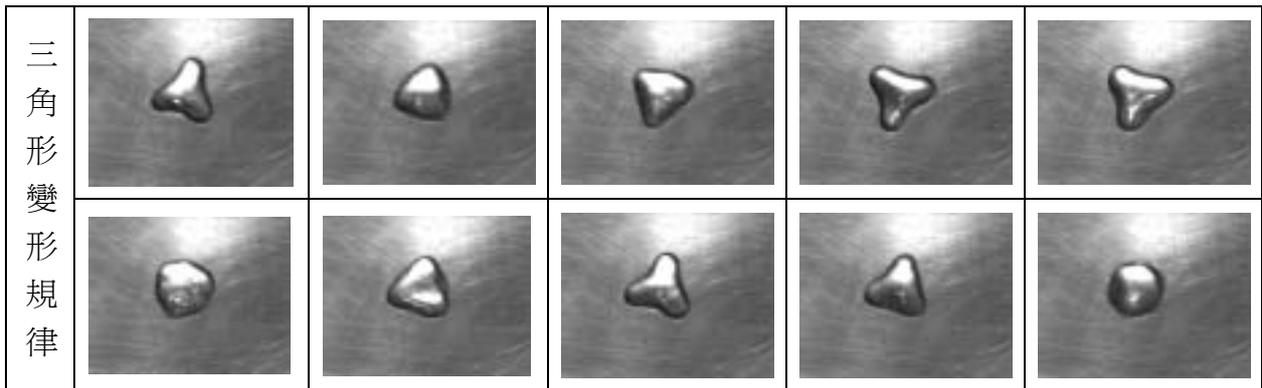
1. 由（圖二十一）中發現，除了四邊形以外，當邊形數較高時，平均圓半徑也較大，但不同邊形數之間的平均圓半徑範圍有部分的重疊。
2. 由（圖二十二、二十三、二十四）中發現，隨著板溫之升高，多邊形的平均半徑範圍增大，但低邊形的範圍則變小。反之，板溫較低時，低邊形的半徑範圍大，多邊形則小。

柒、實驗討論：

一、水珠的基本圖形及變化規律

實驗一〈表四〉中，水珠在突出變形與表面積縮小之下，劇烈變形後恢復球形。如此交替循環變化，如簡諧振盪一般。

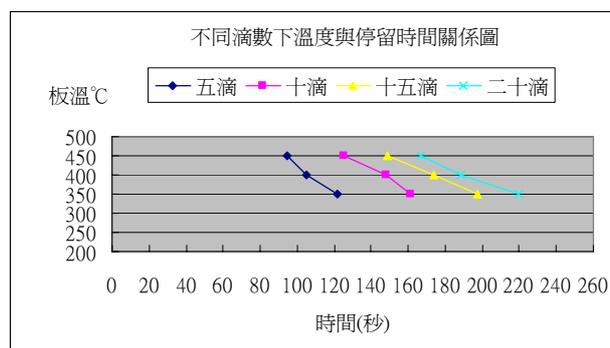
因此我們推測：水珠處高溫狀態急待蒸散熱能，所以水珠增大表面積加快蒸發速率，但水珠變形的同時與 Hotplate 接觸表面積變大，單位時間熱傳導能量增加，因此又變回球形，如此交替變化。



二、水珠停滯時間在不同加熱板溫度下之探討

實驗二〈圖三〉中，水珠的停滯時間會隨著板溫的降低而延長。且水珠除了隨著水滴數之增加而停滯時間延長外，也會隨著水滴數之增加，在相同板溫下兩兩滴數(如 5 滴和 10 滴之間)之間的停滯時間差值越小。

因此我們推測：隨著板溫之升高，水珠蒸發的速率也越快，且板溫對水珠停滯時間之影響大於水珠本身的大小(滴數)。

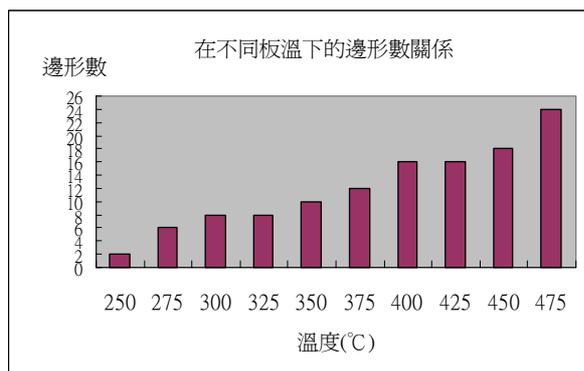


三、水珠於不同加熱板溫度下之變形數關係

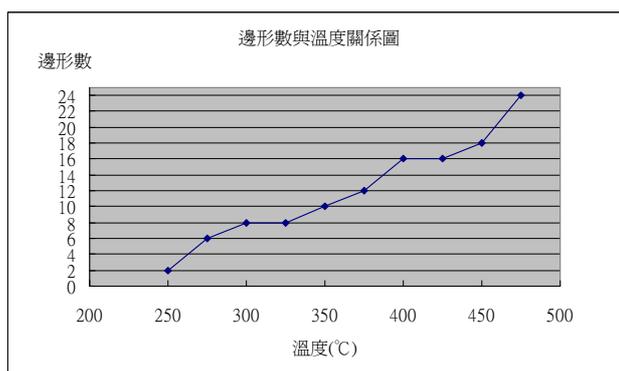
實驗三〈圖五〉中我們發現：隨著溫度的升高，變形數也隨之增大。此外，8 邊形跟 16 邊形在一段溫度下都不會再增加變形數。

因此我們推測：水珠隨著板溫之升高而變出更多邊形以增加表面積散熱，同時也以振盪減小吸熱面積，達到最佳的散熱機制。其中某些邊形的出現需要更多的熱能，所以會形成一

段熱能差，持續增多邊形數。如（圖六）中8→10、16→18即是如此。



(圖五)



(圖六)

四、不同滴數與變形數之關係

實驗四的〈表七〉5滴~20滴數據中，都沒有出現橢圓形，且變形數會隨著滴數之增加而增加。而大於20滴的數據，則會出現橢圓形旋轉，等水珠變小時改以十字快速拉扯。

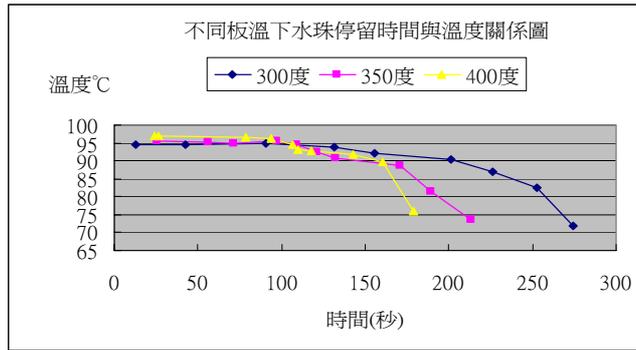
因此我們推斷：在滴數低於20滴時，由於水珠較小，所以會以快速的十字形振盪取代橢圓形旋轉。當水珠大於20滴時，由於水珠太大，而板溫又不夠高，所以沒有足夠的熱能形成十字型，故一開始只會以橢圓形旋轉以散熱，等水珠變小時，則會改以十字形振盪散熱。

滴數 \ 邊形數	圓形 (1)	橢圓形 (2)	十字形 (4)	三邊形 (6)	四邊形 (8)
5滴	*		*		
10滴	*		*		
15滴	*		*	*	
20滴	*		*	*	*
25滴	*	*	*		
30滴	*	*	*		

五、不同溫度下水珠停留時間關係

實驗五我們觀察到水珠中心溫度會隨著時間緩緩降低（由97°C~71°C），而且變形數並不會影響水珠之中心溫度。水珠中心溫度到100~200秒時會緩緩的降低，而後迅速降溫。隨著板溫升高，水珠中心的初始溫度也較高，且停留時間較短，溫度下降較快。同時也發現水珠變形由多邊形數降至低邊形數的規律變化（8→6→4→1→4→1）

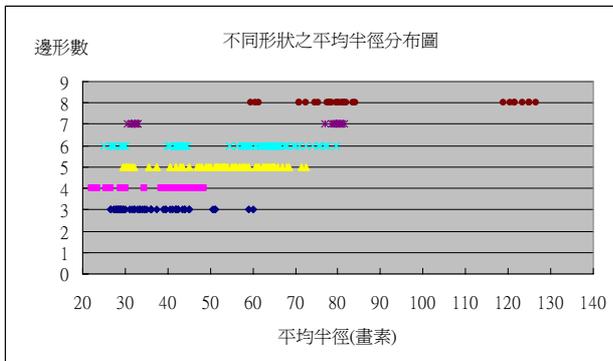
因此我們推測：水珠變形的目的在於降低溫度、散發熱能。所以板溫越高、擁有之熱能越多，變形數也隨之增加以達劇烈拉扯、轉動，好將過多的熱能散發出來以降低水珠中心溫度達到穩定、平衡。所以水珠的中心溫度並不會受到變形而影響。但板溫之高低確實會影響水珠初始跟最終的溫度。



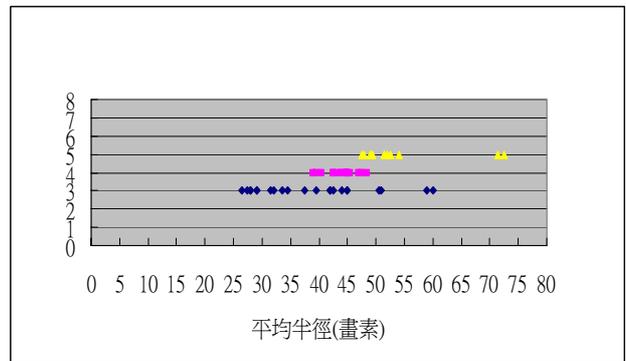
六、各種形狀的平均圓半徑與溫度關係

1. 由實驗六（圖二十一）中發現，除了四邊形重影外，當邊形數較高時，平均圓半徑也較大，但不同邊形數之間的平均圓半徑範圍有部分的重疊。

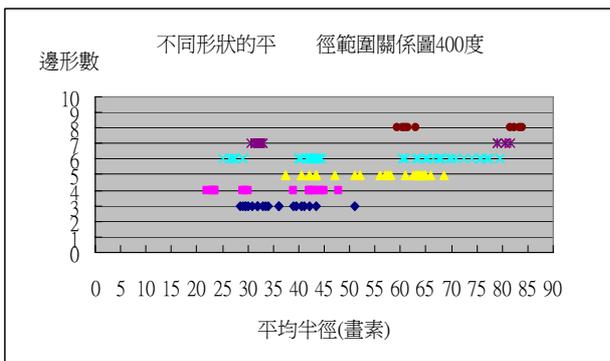
2. 由（圖二十二、二十三、二十四）中發現，隨著板溫之升高，多邊形的平均半徑範圍增大，但低邊形的範圍則變小。反之，板溫較低時，低邊形的半徑範圍大，多邊形則小。



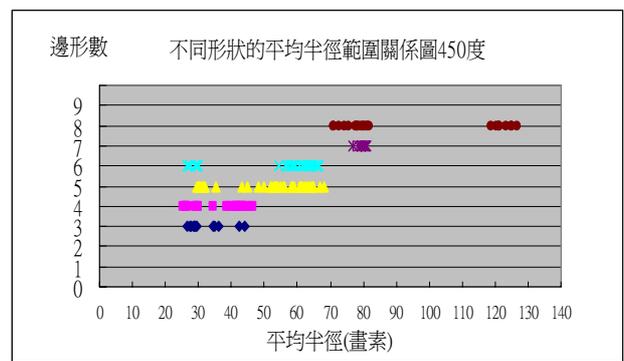
(圖二十一)



(圖二十二)



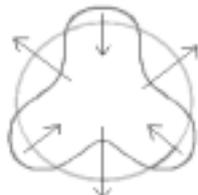
(圖二十三)



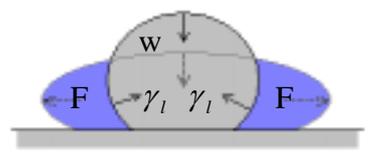
(圖二十四)

捌、結論

1. 一般液體之黏度、表面張力皆因溫度上升而降低。由於表面張力內縮作用，表面積變化要最小，水珠在突出變形與表面積縮小之下，劇烈變形後恢復球形，突出一角的相鄰為內凹並以參考圓為準，如此交替循環變化，如簡諧振盪一般，將熱能以位能和動能形式互換，對稱變形以達最小能量吸收，且以轉動方式在擾動之下，取得動態穩定平衡達到最快的蒸發。

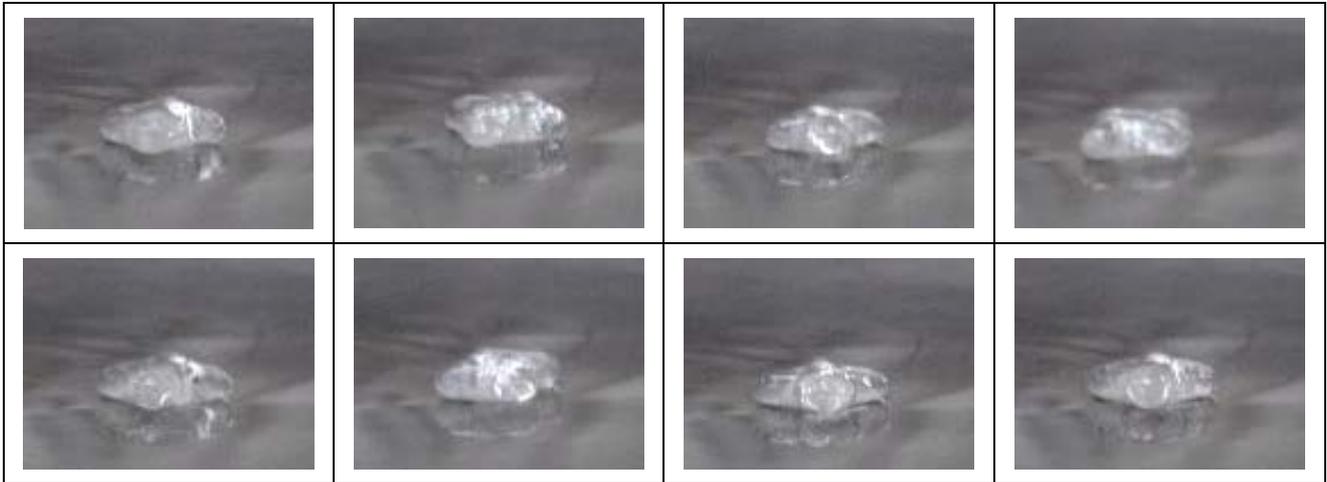


25

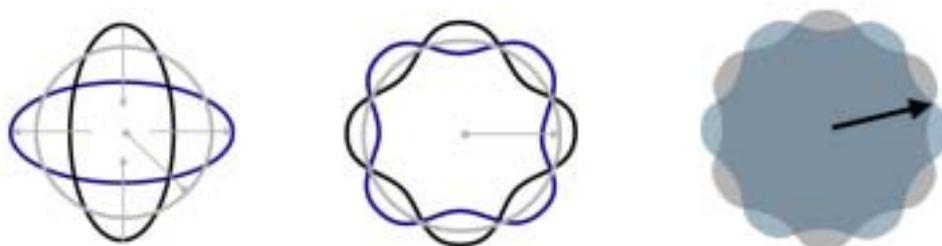


2. 由實驗原理觀念一得知：常溫水珠的水分子因為電偶極及高溫熱分子運動，水分子在蒸氣膜上產生劇烈的運動以增加表面積來散熱；同時也藉由降低表面積減少熱由 Hotplate 傳導至水珠，**以達最小吸收，最快蒸散的目的，水分子形狀因此就依 Laplace's equation 所得之結果不停的震盪與變形。** $r(\theta, \phi) = R + \sum c_n \cos(\omega_n t) P_n(\cos \theta)$

〈表二十〉 四邊形重影側面圖



3. 水珠的基本形狀有圓形、橢圓、三邊形、四邊形、五邊形、六邊形、七邊形、八邊形、九邊形、十邊形、十一邊形、十二邊形。同時加熱板上，溫度越高，形狀變化種類較多（變形數），最大變形數高，且自轉速度較快，停滯時間變短。水滴越大的形成水珠時，變形越豐富種類較多，自轉速率因重力而降低，但停滯時間越久。總之水滴大小會影響最大變形數，也就是**最大變形數由水滴大小及溫度高低決定，即邊形數隨溫度之升高及滴數之增加而變大。**
4. **水珠在特定邊形數**〈如：8 邊形(300°C~350°C)與 16 邊形(400°C~450°C)〉**須等到吸收或散出更多的熱量，才能完成下一個形狀的轉變**，因此水珠在一段較大的溫度範圍內均不再增加邊形數。此過程與水的『潛熱』有略同之處。
5. 由水珠平均圓半徑的實驗作深入的水珠大小分析統計，發現有數據顯現水珠某一邊形數與不同加熱板溫下，水珠平均圓的半徑範圍有一定限制。**隨著板溫之升高，多邊形的平均半徑範圍增大，但低邊形的範圍則變小。反之，板溫較低時，低邊形的半徑範圍大，多邊形則小。平均圓半徑並非連續性的，此現象表示特定的能量能形成特定的邊形數，且有特定的平均圓半徑限制，此現象與化學上所討論的電子組態結構的模型極為類似，亦即水珠變形的能量也遵守能量量子化。**



玖、感想與展望

感想：

在水珠溫度的測定中，依我們的觀測及思考判斷，認為水溫低時邊形數少，水溫高時邊形數多。可是經過數位溫度計的測量後，深深體會到實驗假設及思考判斷和實驗測量結果有時差距是很大的，因此我們確知科學實驗中必須有精密的測量，才是真正的科學研究。

重測再重測、修正再修正、驗證再驗證，花費了我們許多的心血，但當報告成形時，這一切的辛苦都是值得的，在科展研究過程中，我們學會了多方面的思考、追求完美的執著、虛心求教的態度，水珠完美的形狀變化就如我們精采豐富的結果。

展望：

從空中灑下黃金似的水滴，於炙熱板上卻是冰圓玉潤。於蒸氣膜上因表面張力及電偶極性作用的效應，水珠多種面貌、多樣狀態不停的變化演出世界生命的永恆。本作品是緣起水珠漫舞之源，卻是水珠律動機制之泉。小小一滴水，有永遠做不完的研究。

水珠多樣對稱變形，訴說著能量變形轉動互動機制。水珠的態總是在圓周長為律動波長整數倍的駐波形式下，達動態穩定平衡。時而震盪變形，時而轉動變形。是自然界中美妙的圓駐波能量量子化實例。

拾、參考文獻

- 一、 作者：林祐亘 水珠漫舞—表面張力與溫度變化共舞（第三屆旺宏科學獎）
- 二、 作者：黃定加 物理化學—高立圖書有限公司（第四章：熱力學第二、三定律第十章：界面化學）
- 三、 作者：林明瑞 高二物質科學物理篇下冊：第九章：流體力學、第十章：熱
- 四、 作者：楊宗翰 清大工科系碩士論文—微液膜蒸發的分子動力學模擬
- 五、 By Morihiro Okada · Minoru Okada Exp Fluids(2006) 4:789-802 Observation of the shape of a water drop on an oscillating Teflon plate.

【評語】 040102 見微知“駐” — 水珠律動與圓駐波

本作品探討水滴在熱板上的動態行爲，而能觀測到十多動水滴外形，並以溫度及水滴質量探討其對熱板上水滴動態外形的影響，內容豐富，討論合宜，雖並未能有充足數據，支持所提的熱蒸發機制，但不失爲，優良作品。