

# 中華民國第 57 屆中小學科學展覽會

## 作品說明書

---

國小組 物理科

佳作

080122

接觸一瞬間～蠟油模擬液體碰撞實驗

學校名稱：新竹縣私立康乃蘭國民中小學

作者：  小五 林紫彤  小五 張祐薰  小五 陳可芯  小五 董心媛  小五 陳宥仔	指導老師：  梁倚慈  韓順興
---	-----------------------------

關鍵詞：瑞利噴束、液滴碰撞、疏水性

## 摘要

水滴碰撞是一個很有趣的實驗，一般的水滴碰撞實驗，都是用快速攝影來捕捉水滴碰撞瞬間的情形。我們改以蠟油來代替實驗，因為蠟油在不同的碰撞條件下瞬間凝固，留下碰撞瞬間的圖形或動態變化，我們就有足夠的時間與證據來分析探討變因。將落下的蠟油滴落在液面或固體表面時碰撞所展開的圖形，用影像分析軟體『ImageJ』測量碰撞後蠟固體展開面積，也可以測量「水中展開蠟滴固體最大長度(直徑)」來分析液滴碰撞瞬間的動態情形。

我們設計實驗讓固定蠟油從不同高度滴在紙面、不同固體表面、水面、不同聲波頻率振動的水面，根據蠟油凝固後展開「蠟滴展開面積大小」與「蠟滴形狀」分析液滴碰撞的情形來進行研究與探討。

## 壹、研究動機

在網路 YouTube 看到影片「The walking water mystery(in space and slow motion)」，在影片中我們看到水珠在水面上連續彈跳的有趣畫面，這啟發我們的好奇心。如果將水滴滴在不同的物體表面，水滴也能彈跳嗎？

經過嘗試，發現水滴在較低的高度碰撞後就會附著物體表面，在較高的高度碰撞後就會在噴濺，我們想了解液滴和交界面兩者碰撞瞬間變化，我們想到生日蛋糕上蠟燭的蠟油可以用來模擬液滴碰撞瞬間情形，當蠟油碰觸交界面瞬間會快速凝固，在不同物理條件下，蠟油碰撞後就會有不同的凝固外型和展開面積。和老師討論後，老師提供一個影片分析軟體『ImageJ』，它可以用來分析實驗拍攝影片的蠟油圖案面積與圖形，對此實驗專題分析有很大幫助，於是我們就開始一系列的液滴碰撞實驗探討。

## 貳、研究目的

- 一、探討蠟燭棉芯的長度與蠟油液滴大小的關係。
- 二、蠟油從不同高度碰撞紙面，探討「高度」與「蠟滴展開面積大小」的關係。
- 三、蠟油碰撞不同固體表面，探討「固體表面種類」與「蠟滴展開面積大小」的關係。
- 四、蠟油在不同高度碰撞靜止水面，探討「高度」與「蠟滴在水中展開最大長度(直徑)」的關係。
- 五、蠟油在不同高度碰撞「不同振動頻率」的水面，由「蠟滴凝固形狀」分析液滴碰撞的情形。
- 六、探討以高速攝影機拍攝蠟油碰撞紙張時的凝固情形。

## 參、研究設備與器材

### 一、工具：

蠟燭、黏土、鐵尺、打火機、水平儀、玻璃片、培養皿、量筒、滴管、湯匙、鐵夾、濾網、滴管、水晶鍍膜、剪刀、相機、三腳架、捲尺、量杯、鑷子、喇叭、水彩紙、西卡紙、塗蠟免洗盤、投影片、玻璃、烘焙紙、烘焙紙、銅箔、鋁箔、砂紙  
高速攝影機( 型號：MIROEX4-1024MM )

### 二、程式軟體：

ImageJ、Frequency Sound Generator(APP 軟體)

## 肆、研究過程或方法

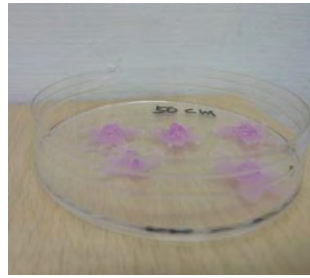
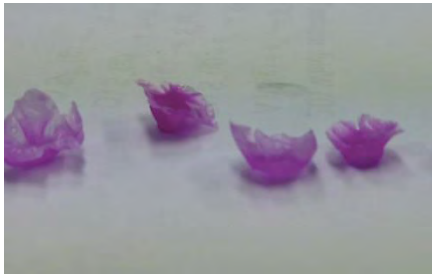
### 一、實驗研究架構：

高度越高，重力位能轉換成的動能越大，當不同速度的蠟油液滴碰撞固體、靜止水面、振動水面就會產生不同展開形狀與面積。

(一) 固體：由影像分析軟體『ImageJ』求其碰撞後蠟固體展開面積大小。

1. 不同高度：來進行速度對碰撞的影響。
2. 不同固體表面分別為水彩紙、西卡紙、塗蠟免洗盤、投影片、玻璃、塗奈米膜的玻璃、燻炭黑的玻璃、烘焙紙、烘焙紙、銅箔、鋁箔、砂紙，探討接觸面性質與碰撞液滴的碰撞影響。

(二) 靜止水面：高度低，速度小。蠟油液滴『碗形』的碰撞。逐漸加高會逐漸展開面積更大。高度高，速度大，蠟油液滴『瑞立噴束』會衝的較高。



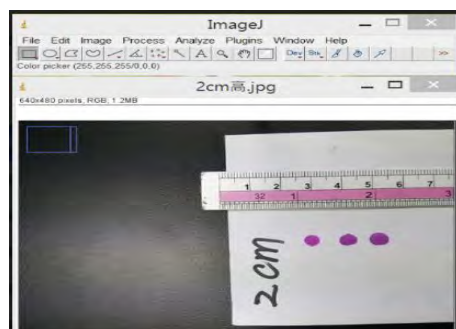
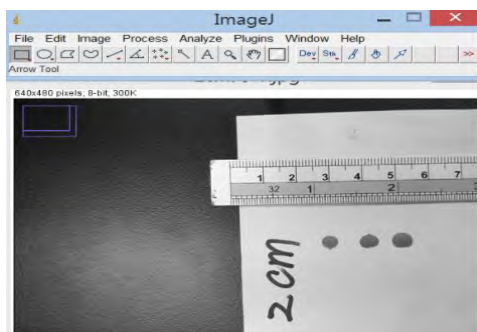
(三)振動水面：利用 APP 軟體「Frequency Sound Generator」播放頻率為 92、220 赫茲，此時可產生共振波，水面明顯有劇烈水波，水面震動波構成不同的幾何形狀，讓蠟油滴入凝固也會跟著變化，當高度低，衝擊力道小，形成空氣墊讓蠟油保持表面張力趨向於圓球形。

## 二、ImageJ 的使用：ImageJ 提供一個可以將圖像定量的軟體（算出蠟油固體面積）。

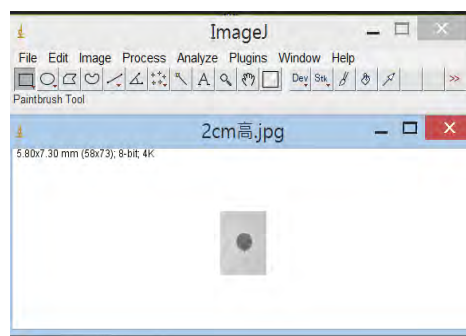
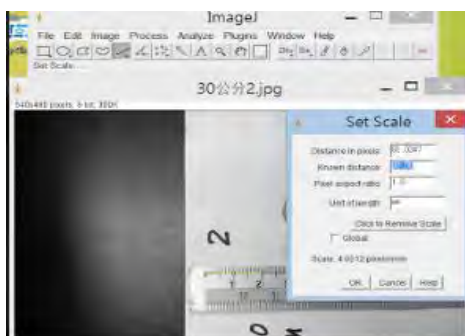
(一)開啟圖片檔(實驗拍攝影片)。

(二)將影片改成灰階圖案。

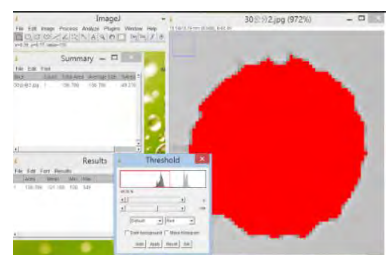
(三)選 Analyze，以圖案中的尺規參考物為刻度基準，可以換算圖案的大小比例。



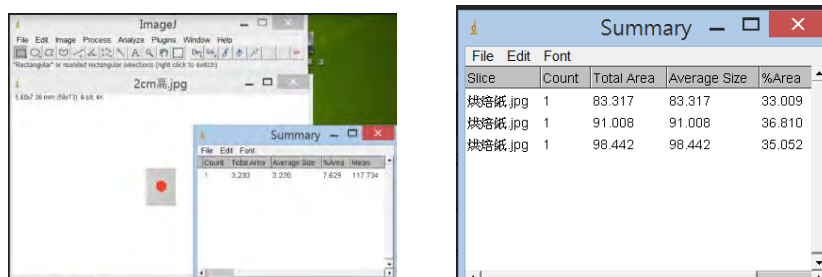
(四)擷取畫面所要的圖案。



(五)設定灰階閾值。選取影像中的蠟油圖案的 0-255 灰階值範圍，軟體會將選定灰階閾值的範圍轉換成『紅色』，我們可以藉此截取蠟固體展開的圖形。



(六) 計算蠟油總面積或在水中展開蠟固體最大長度。



### 三、實驗裝置：

- (一) 用捲尺測量固定高度。
- (二) 利用鐵夾將蠟燭固定在特定高度上。
- (三) 用水平儀確定平台是水平的。



(四) 將蠟燭的蕊心剪成『0.5cm』長。



(五) 用打火機點火，並用湯匙接住第一滴蠟油。

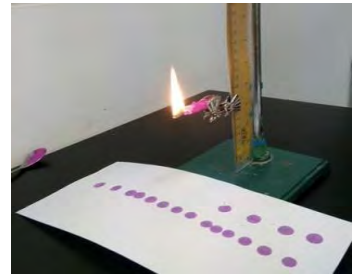
(六) 等第二滴蠟油滴下交界面後，連續做三滴，把湯匙放於蕊心下方，同時用鑷子將火熄。

### 四、實驗過程：

研究(一)：探討蠟燭棉芯的長度與蠟油液滴大小的關係。

【實驗方法】

1. 將蠟燭固定在 10 公分的高度上。
2. 分別將蠟燭棉芯剪到 0.2、0.5、1、2 cm，使用打火機點燃蠟燭，讓蠟油滴在白紙上。
3. 等蠟油凝固，慢慢移動紙面，雙手壓平紙面，避免產生過多氣流影響蠟滴流動。
4. 每移動一次，記錄間隔時間（連續 3 滴）。
5. 拍攝並記錄個別間隔時間。



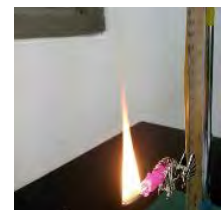
【實驗結果】：如表 1

表 1：棉芯長度與蠟滴大小的關係

棉芯長度	0.2cm	0.5cm	1cm	2cm
第 1-2 滴間隔時間 ( 秒 )	2 , 49	7 , 56	11 , 68	不滴蠟油，產生黑煙
第 2-3 滴間隔時間 ( 秒 )	2 , 98	10 , 54	12 , 12	
蠟滴在紙上的直徑長	1.1cm	1.3cm	1.3cm	
圖例				

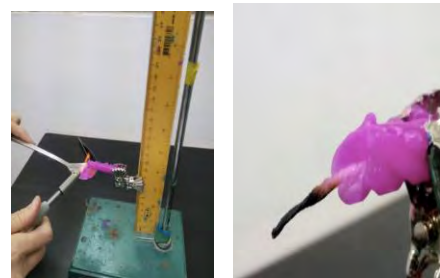
【分析】

1. 蠟燭棉芯 0.2cm 時要等候些時間才能被點燃，火開始形成時火焰很小。
2. 蠟燭棉芯 0.5cm 到 1cm 之間滴落的蠟燭直徑大小相近，適合作為後續實驗，所以後續實驗我們都選用 0.5cm 的燭芯。
3. 蠟燭棉芯 2cm，火焰非常大，不再滴蠟油，此時會看見一縷黑煙。





4. 連續滴蠟油，會發現滴落蠟油的間隔時間越來越久，表示此時火焰越來越大，燃燒用掉蠟燭碳氫化合物越快，要有足夠蠟油重量累積到可以克服表面張力的時間越長。最後棉芯很長，火焰很大，蠟油不再滴落。此時蠟燭棉芯底端形成一個碗狀的凹陷。



研究(二)：蠟油從不同高度碰撞紙面，探討「高度」與「蠟滴展開面積大小」的關係。

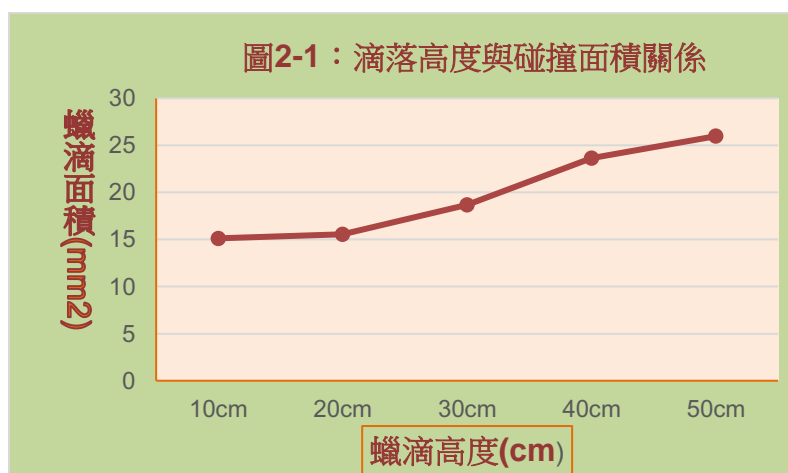
【實驗方法】

1. 將蠟燭固定在 10、20、30、40、50 公分的高度上。
2. 點燃蠟燭，讓蠟油滴在白紙上。
3. 等蠟油凝固，輕輕移動紙面，避免擾動氣流影響火焰大小。
4. 放上尺作為尺規參考物。
5. 用三角架固定相機高度並拍攝。
6. 使用 ImageJ 計算蠟油碰撞後的展開面積。

【實驗結果】：如表 2、圖 2-1、圖 2-2

表 2：滴落高度與碰撞面積大小的關係

高度(cm)	面積 1 (mm <sup>2</sup> )	面積 2 (mm <sup>2</sup> )	面積 3 (mm <sup>2</sup> )	面積 4 (mm <sup>2</sup> )	面積 5 (mm <sup>2</sup> )	平均 (mm <sup>2</sup> )
10cm	15.129	15.395	14.361	15.309	16.613	15.361
20cm	15.552	16.359	13.957	22.170	18.162	17.240
30cm	18.704	25.282	20.797	20.568	17.868	20.644
40cm	23.640	20.062	24.662	18.048	25.515	22.385
50cm	25.985	23.113	22.045	19.102	27.344	23.518



	原始照片	面積 1	面積 2	面積 3	面積 4	面積 5
10cm						
20cm						
30cm						
40cm						
50cm						

圖 2-2：不同高度滴下的蠟滴碰撞後展開的面積在 ImageJ 計算圖形

【分析】

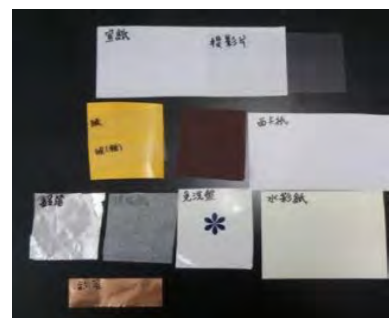
- 1.由折線圖看出蠟油展開面積逐漸變大，高度越高，碰撞一瞬間的速度越大，所以能量衝擊時讓液滴展開得越大。
- 2.高度 40 cm 時，蠟滴落下速度太快，從液滴展開形狀圖發現，液滴展開的外緣成鋸齒狀，液滴開始噴濺，從展開面積的數據發現，此時測到的面積開始不規律的遞增又再遞減。
- 3.高度 45cm 以後的展開面積，中央有一個凹陷白面積，表示其碰撞後再次彈起，做像皇冠噴濺。



研究(三)：蠟油碰撞不同固體表面，探討「固體表面種類」與「蠟滴展開面積大小」的關係。

【實驗方法】：

1. 將蠟燭固定在 10 公分的高度上。
2. 點燃蠟燭，讓蠟油滴在水彩紙、西卡紙、塗蠟免洗盤、投影片、玻璃、塗奈米膜的玻璃、燻炭黑的玻璃、烘焙紙、烘焙紙、銅箔、鋁箔、砂紙。
3. 同實驗二之 3~6 步驟。



【實驗結果】：如表 3、圖 3-1，圖 3-2。



表 3：不同固體表面種類與蠟滴展開面積大小的關係

表面種類	面積 1(mm <sup>2</sup> )	面積 2(mm <sup>2</sup> )	面積 3(mm <sup>2</sup> )	平均(mm <sup>2</sup> )
水彩	78.598	77.111	74.591	76.767
西卡紙	71.811	75.172	76.207	74.397
免洗盤(塗蠟)	84.221	82.670	83.575	83.489
投影片	86.936	82.606	88.164	85.902
玻璃	83.317	81.054	78.210	80.764
鍍膜玻璃	70.001	71.165	73.039	71.402
烘焙紙	83.317	91.008	98.442	蠟油展開不規則
宣紙	71.587	79.577	88.985	蠟油展開不規則
銅箔	71.747	*	*	金屬反光只取一點
鋁箔	83.963	*	*	金屬反光只取一點
砂紙	*	*	*	不規則噴濺
塗炭黑玻璃	*	*	*	不規則噴濺

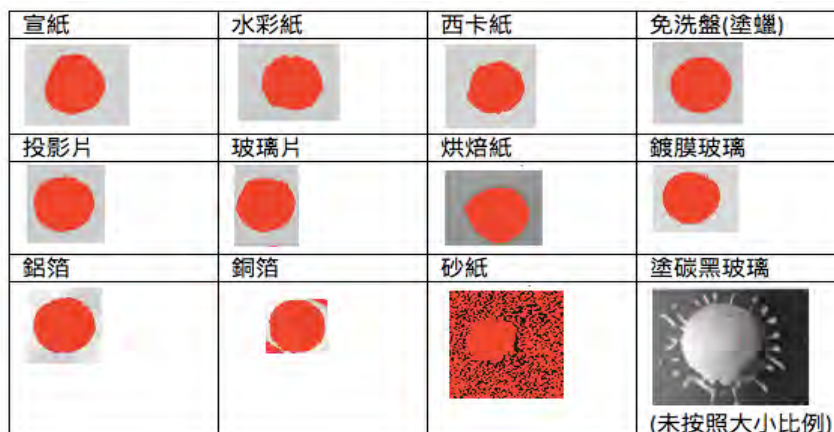
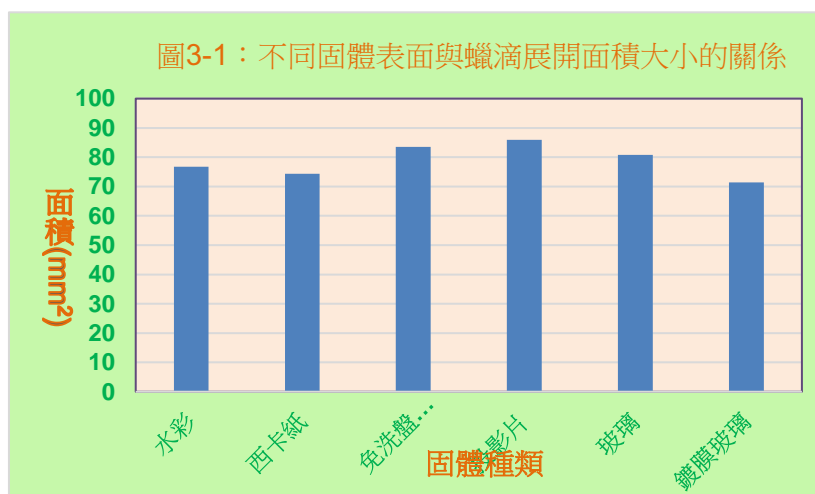
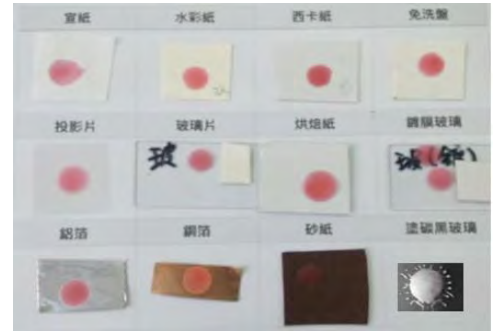


圖 3-2：不同固體表面種類與蠟滴展開面積在 ImageJ 計算

Slice	Count	Total Area	Average Size	%Area
免洗盤.jpg	1	84.221	84.221	29.506
免洗盤.jpg	2	82.670	41.335	27.877
免洗盤.jpg	4	83.575	20.894	24.259

Slice	Count	Total Area	Average Size	%Area
烘焙紙.jpg	1	83.317	83.317	33.009
烘焙紙.jpg	1	91.008	91.008	36.810
烘焙紙.jpg	1	98.442	98.442	35.052

Slice	Count	Total Area	Average Size	%Area
玻璃.jpg	1	83.317	83.317	38.295
玻璃-1.jpg	1	81.054	81.054	43.908
玻璃-1.jpg	2	78.210	39.105	46.899



### 【分析】：

#### 1. 展開面積大小探討：

鍍膜的玻璃本身就是防潑水的材質，水滴一旦碰到鍍膜玻璃會形成圓珠，而不容易附著在接觸面，所以用蠟油來模擬，可以發現它展開的面積最小，也就是接觸角最大（液滴凸起最高）。

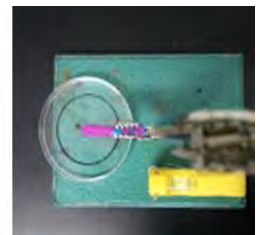
#### 2. 展開形狀探討：

越光滑的表面，蠟油滴落時呈現成圓形，如免洗盤、鍍膜玻璃、鋁箔、銅箔。面具有顆粒狀的粗糙面，碰撞瞬間會有空氣擠壓，會產生噴濺現象，如砂紙、塗炭黑的玻璃。

### 研究(四)：蠟油不同高度碰撞靜止水面，探討「高度」與「蠟滴在水中展開最大長度」的關係。

#### 【實驗方法】：

1. 將蠟燭固定在 5、10、15、20、25、30、35、40、45、50 公分的高度上。
2. 用量筒取 50mL 的水，倒入培養皿。
3. 點燃蠟燭，讓蠟油滴在培養皿水面上。
4. 同實驗二之 3~6 步驟，使用 ImageJ 計算蠟油碰撞後展開的最大長度。



【實驗結果】：如表 4、圖 4-1、圖 4-2、圖 4-3

表 4：測量水中展開花瓣的最大直徑：

低落高度(cm)	長度 1 (mm)	長度 2 (mm)	長度 3 (mm)	平均
5	6.07	5.53	6.23	5.94
10	11.82	10.39	12.62	11.61
15	12.51	13.67	13.66	13.28
20	14.49	14.23	14.56	14.43
25	13.61	14.77	13.94	14.11
30	15.97	16.06	15.41	15.81
35	17.84	18.32	18.93	18.36
40	18.92	18.92	19.49	19.11
45	23.95	23.39	22.06	23.13
50	23.12	24.42	23.92	23.82

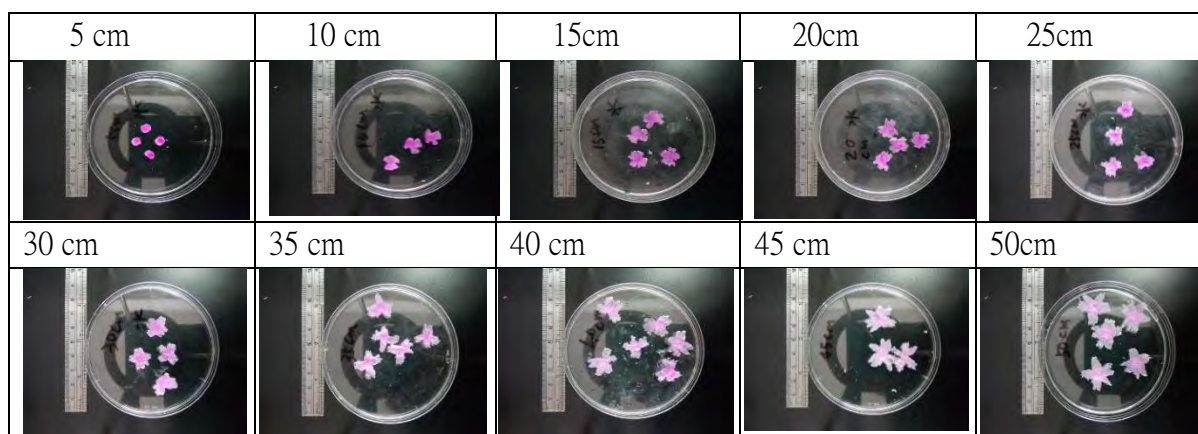
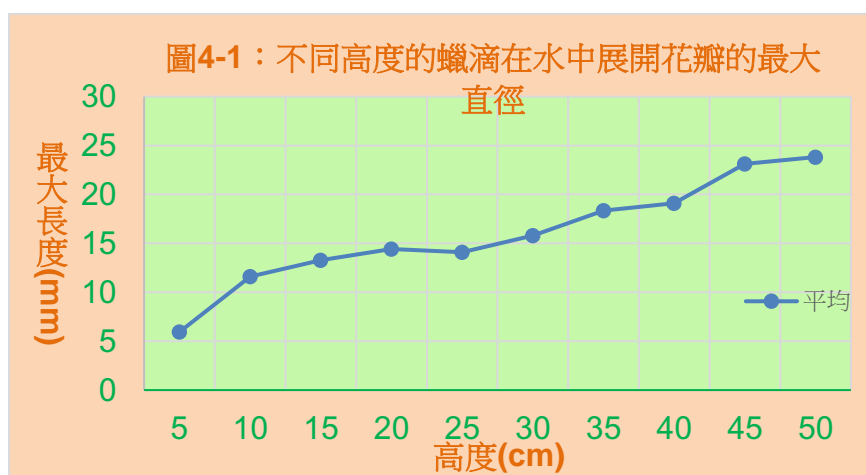


圖 4-2：不同高度的蠟滴在水中展開花瓣的情形

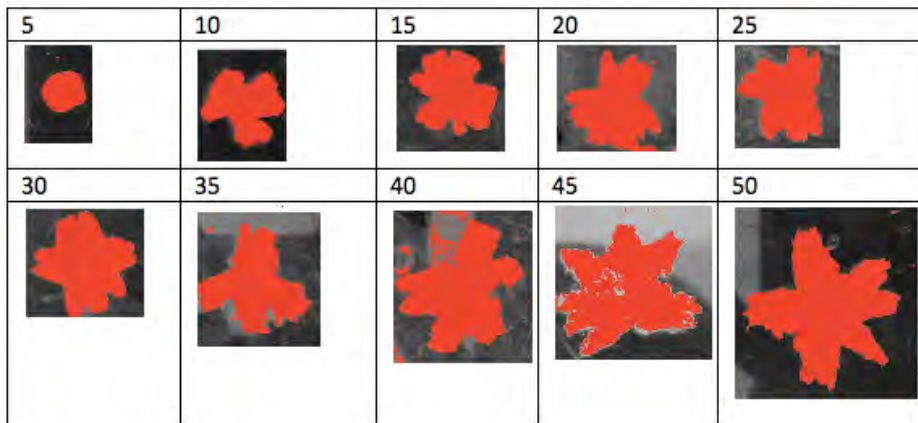


圖 4-3：不同高度的蠟滴在水中展開花瓣在 ImageJ 計算

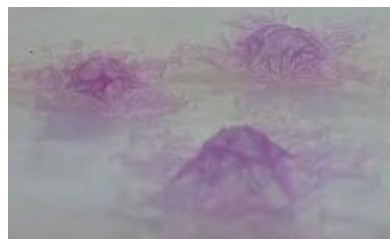
【分析】：

1. 展開面積大小探討：

高度越高，蠟油滴落碰撞水面時的速度越大，拍打水面的力道越大，引起水面的振動也越明顯，因此蠟油面積在振動水波上面往四周圍展開效果越大。

2. 展開形狀探討：

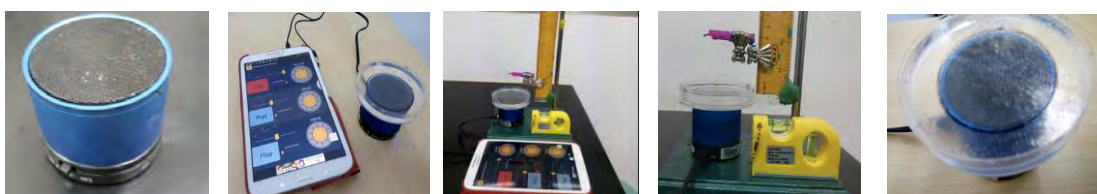
高度低，速度小，不足以振動水波，所以蠟油直接掉入水中，因為表面張力，形成小圓形。當高度逐漸加高，蠟油展開面增大，厚度越來越薄，到末端就會展開像花瓣一樣的固體。蠟固體花瓣逐漸展開裂片(中央凹陷)。到了高度 40cm，產生『瑞立噴束』(Rayleigh jet)，中央會有一股突起的噴束，45cm、50cm 的瑞立噴束高度逐漸增高。



研究(五)：蠟滴在不同高度滴落碰撞「固定振動頻率」的水面後，會產生什麼形狀？

【實驗方法】：

1. 將蠟燭固定在 0.5、1、3、5、10、20 公分的高度上。
2. 將培養皿放在低音喇叭上。
3. 喇叭接收平板電腦傳送的音源，播放 APP 軟體「Frequency Sound Generator」，分別調整播放頻率為 92、220 赫茲。(此時可以產生共振波，水面明顯有劇烈水波)
4. 點燃蠟燭，等蠟油凝固，放上尺作為尺規參考物。
5. 用三角架固定相機高度並拍攝蠟燭凝固後的形狀。



【實驗結果】：如圖 5-1、圖 5-2

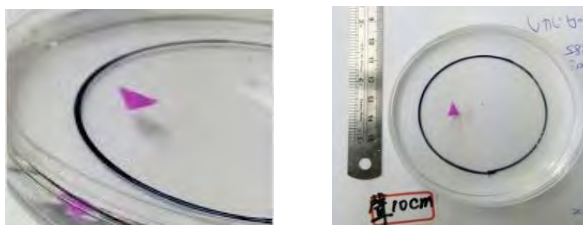


圖 5-1：蠟滴滴落在固定頻率水面的凝固情形

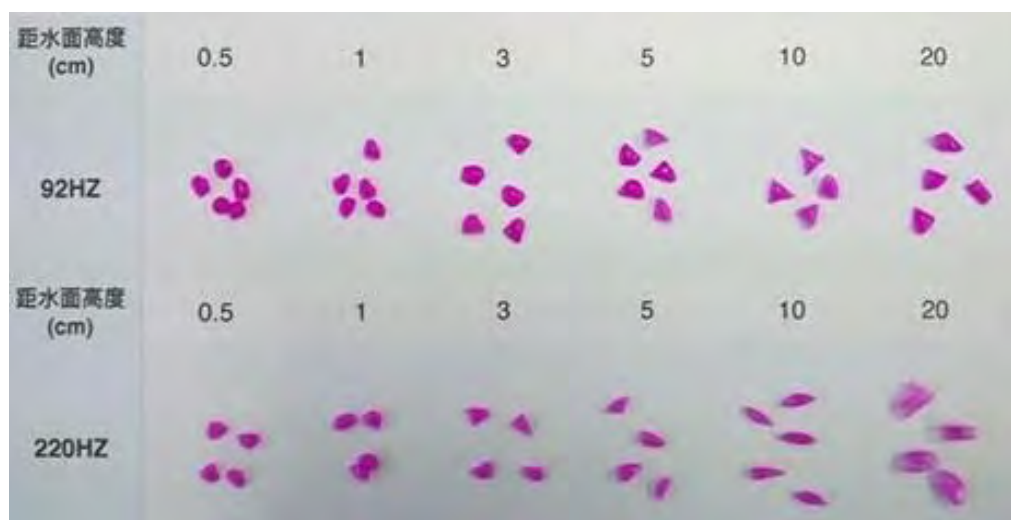


圖 5-2：不同高度的蠟滴滴落在兩種固定頻率水面的凝固情形



【分析】：

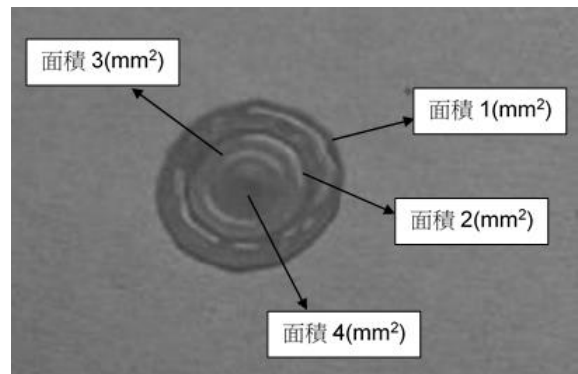
1. 淺水波槽產生的共振波（法拉第波），使得蠟油在水面產生各種圖形，包括三角形、四邊形、米粒狀，越低的高度蠟油展開的形狀越趨近圓球狀。
2. 振動頻率越大，凝固的顆粒越小。

研究(六)：探討以高速攝影機拍攝蠟油碰撞紙張時的凝固情形。

【前言】：在蠟滴快速變化的過程中，用肉眼完全不知道它是如何變化的。因此我們用了每秒可以拍攝 3000 張的高速攝影機來拍攝其過程，觀察是否有新的發現。

【實驗方法】：

1. 將蠟滴高度調整，從 10、20、30、40、50 公分處滴落，利用**高速攝影機**拍攝蠟油碰撞紙張時的凝固情形。錄影完後慢慢播放，觀察每張圖片的變化。
2. 將影片利用 ACDSce 軟體轉成圖片 JPG 檔。
3. 使用 ImageJ 計算蠟油碰撞後的展開面積。



【實驗結果】：表 6-1、圖 6-1、圖 6-2

表 6-1：高度在 10cm 的蠟滴滴落在紙張時的向內凝固速率

	第 11 張	第 27 張	第 39 張	第 50 張
原始照片				
ImageJ 的判讀圖片				
面積(mm <sup>2</sup> )	55.223	33.732	17.974	10.651
間隔時間(秒)	$\frac{16}{3000}$ 秒	$\frac{12}{3000}$ 秒	$\frac{11}{3000}$ 秒	
蠟油向內凝固速率	4029.56 (mm <sup>2</sup> /秒)	3939.50 (mm <sup>2</sup> /秒)	1997.18 (mm <sup>2</sup> /秒)	



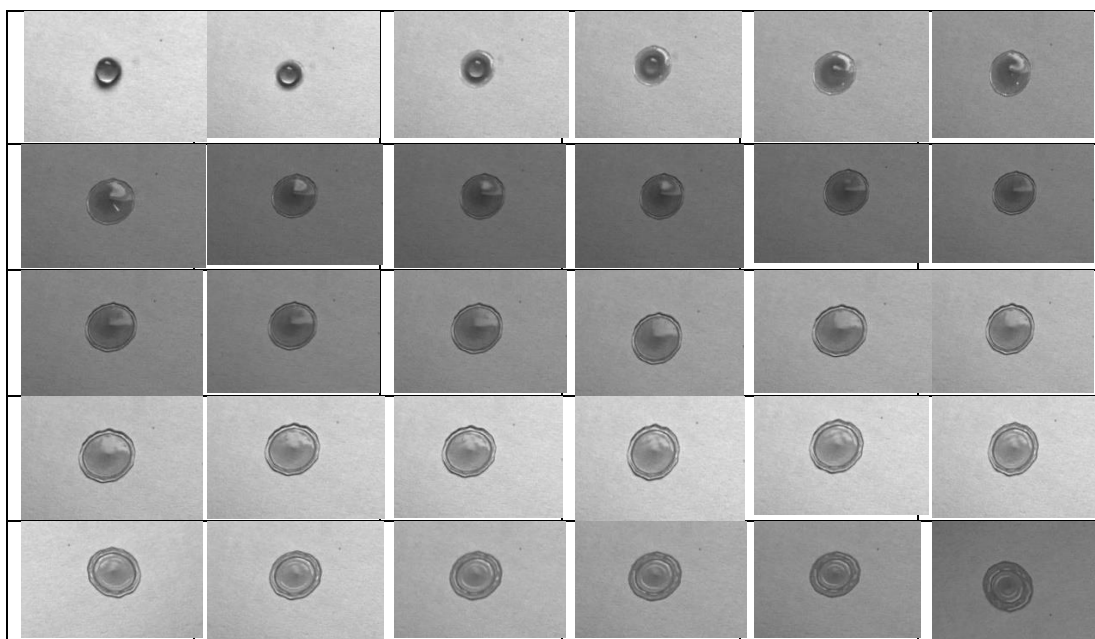


圖 6-1：高度 10 公分時，蠟油從碰撞到凝固的情形—可以發現蠟滴先展開再向內縮的變化

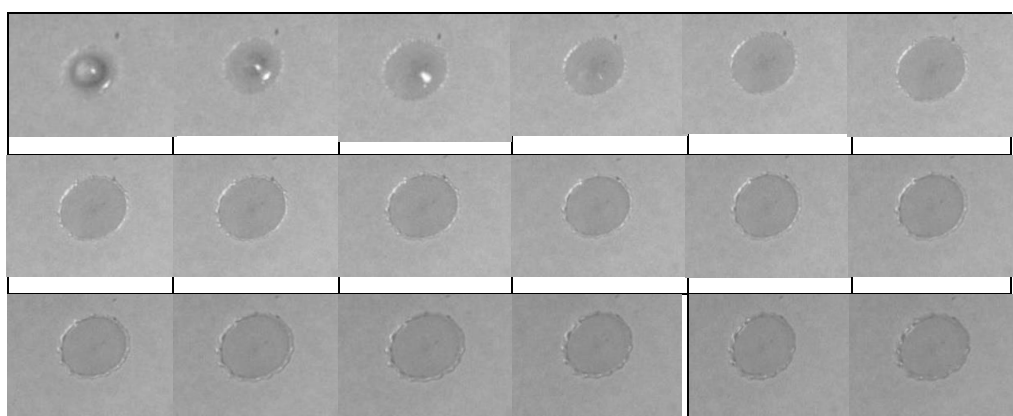


圖 6-2：高度大於 20 公分時，蠟油從碰撞到凝固的情形—可以發現蠟滴展開後隨即凝固，看不出蠟滴再向內縮的變化

**【分析】：**

1. 照片明暗的原因是外加光源為鹵素燈，有一些交流電的頻率。用普通的 LED 燈則更是明顯。
2. 從實驗結果中可以發現蠟滴於高度 10 公分時，可以發現蠟滴碰撞展開再向圓心凝縮，直至全部凝固為止。
3. 從實驗結果中可以發現蠟滴高於 10 公分時，蠟滴展開時很容易就凝固，看不到有向圓心凝縮的情形。
4. 開始凝縮時(前段)的速率，達每秒 40 平方公分，比後段每秒約 20 平方公分的速率相差很大，原因可能是蠟油還處於高溫狀態。

## 伍、研究討論

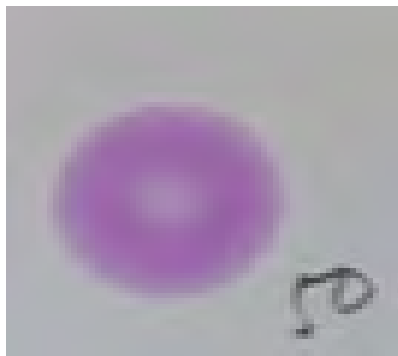
### 一、燭芯長短與滴落間隔時間關係：

- (一)當燭芯很短時，只見蠟油一直滴，未見有火焰，接著出現很小的火焰，此時蠟油滴落的間隔時間相當短，此時火焰很小，大部分的蠟燭碳氫化合物用掉量不多，卻足以融化很多蠟油，所以蠟油滴落間隔時間很短，約 3 秒。
- (二)燭芯燃燒越長，滴落間隔時間逐漸加長。蠟燭中的碳氫化合物被燃燒用掉越多，能克服表面張力而滴落的蠟油累積時間就越長，約 10 秒。
- (三)當燃燒一段時間，燭芯越來越長大約到 2cm，火越大，大部分的碳氫化合物都被用掉，幾乎沒有多餘的蠟油滴下來。只看到未燃燒完全的黑煙一直產生。
- (四)所以我們所設計的實驗，必須每做一次實驗連續取三滴蠟油，完畢都要用剪刀修剪燭芯到 0.5cm，讓蠟燭液滴大小成為控制變因，

### 二、ImageJ 尺規設定:

使用 ImageJ 影像分析軟體，在照片影像的尺標的物畫 0~10cm 一條直線，然後設定此長度為實際長度 100mm，ImageJ 軟體就能按照比例關係換算出我們所選定的蠟油展開面積大小，或水中蠟燭花瓣的最大長度。照片中選擇的尺度越長，誤差越小。

- ### 三、當蠟油從不同高度滴入固體上，達到一定了臨界值，50cm 時會向上濺起一個火山口的形狀，再往外散成皇冠狀，等到皇冠狀的蠟油落下後，皇冠的中心會有一股蠟油向外擴散，接著凝固後因中間缺少了蠟油而形成白色的凹狀。



#### 四、噴濺效果:

當快速運動的液滴撞擊到光滑的表面，會在表面展開出一層液體薄膜，在這個不斷向外擴展的液體薄膜的邊緣會飛濺出小液滴。但是人們對於這個普遍存在的現象一直缺少最基本的認識。我們借助高速成像的方法，揭示出濺射現象的發生，是由在不斷擴展的液滴前緣的底部被束縛的極薄的空氣層引起。（參考資料八：液滴飛濺的秘密：十倍強的風）

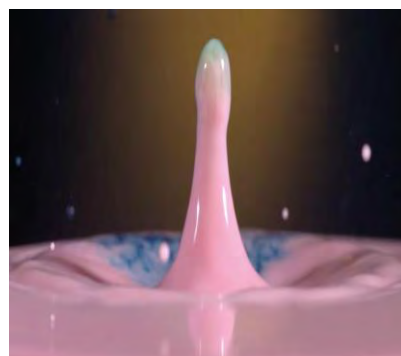
#### 五、蠟油在 10cm 高度落下，在不同性質固體表面展開情形：

- (一) 越光滑的固體表面，產生的蠟固體形狀越接近圓形。如塗膜免洗餐具、投影片、玻璃片、鍍膜玻璃、鋁箔、銅箔。
- (二) 越粗糙的固體表面，產生的蠟固體形狀越不規則。如宣紙、水彩紙、西卡紙、烘焙紙。
- (三) 越粗糙的固體顆粒表面，顆粒間的空氣使滴落的蠟燭形成空氣墊反彈而噴濺開來。如砂紙和塗炭黑的玻璃。
- (四) 疏水性越強的表面，因為接觸角大，所以展開的面積最小。如塗有疏水性塗料的水晶鍍膜玻璃。
- (五) 銅箔比鋁箔容易導熱，凝固快，展開面積鋁箔>銅箔。

#### 六、蠟油滴入液體中，滴落高度愈高撞擊力愈大，所以會影響蠟燭花的形狀。

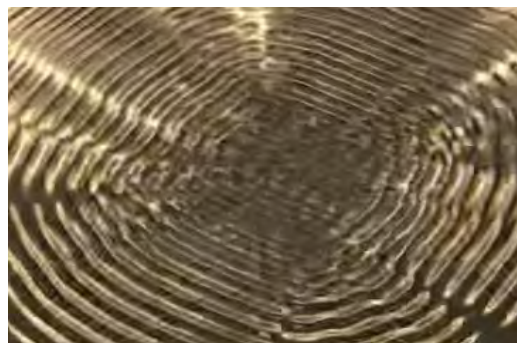
- (一) 蠟燭花瓣：高度愈高，濺起的皇冠狀會越高，蠟油振動能量越大，展開面積越大。
- (二) 中央凸起狀：蠟油累積能量越大，瑞立噴束會衝的較高。

從 5cm 到 35cm 高度尚未見到中央突起柱，只有碗型的形狀，未達臨界高度。40cm 開始到達臨界高度，形成 water jet 的突起柱。而且滴落高度愈高，突起柱也越高。因慣性定律下衝的牛奶滴的位能耗盡後，會因反彈力和不溶於水的特性而往上衝，所以皇冠的中心會有一股液體衝出(稱為瑞立噴束)，而這個中央噴束如果能量足夠會再往上擠，分離出幾滴小水珠。（資料參考九：物理馬戲團 I）



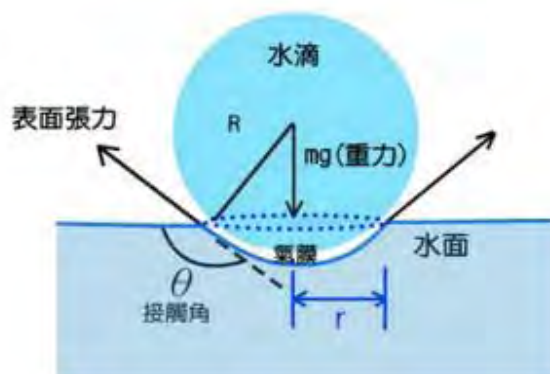
## 七、蠟油滴在共振水波槽：

每個物體都有固定的自然頻率，當培養皿裝了 50mL 的水，靜置在低音喇叭上方，用 APP 軟體「Frequency Sound Generator」，將音量調到最大聲，慢慢頻率旋轉盤來調整頻率大小，觀察培養皿上的水面情形，發現頻率在 92HZ、220HZ 時，水面會有明顯的共振水波紋，此時喇叭頻率和培養皿大小自然頻率相同而共振，我們利用這個共振水波槽來進行液滴碰撞實驗。固定聲波振動頻率造成共振水波，使得蠟油產生不同幾何形狀。當高度越滴，蠟油液滴碰撞時速度越慢，衝撞力道最小，讓蠟油液滴保留因表面張力而形成接近圓球狀蠟珠。



法拉第波，也稱為法拉第波紋，以邁克爾法拉第命名，是出現在由振動容器包圍的液體上的非線性共振波。當振動頻率超過臨界值時，平靜液表面變得不穩定。這被稱為法拉第不穩定性。

(參考資料十一)



(圖來源：參考資料十二)

## 八、以高速攝影機拍攝後觀察蠟滴碰撞紙面時：

- (一) 高速攝影機錄下的影片無法在一般的照片讀取軟體(windows 相片檢視器)讀取，後來嘗試了 ACDSsee，才能將一張一張的照片轉檔成 JPG 檔案格式。
- (二) 從實驗結果中可以發現蠟滴在還沒來得及凝固前，保持高溫液體狀態，當它擴散時，蠟油碰撞到紙張的外緣，形成鋸齒狀向外噴射且先凝固，但因蠟滴中間的溫度尚未降溫，所以動能讓它繼續向外擴散而補滿了鋸齒的空缺成為平滑的外緣，外緣的蠟油凝固後接著蠟油繼續向圓心凝固，所以我們可以發現好像蠟油向內縮的情形。

(三) 從實驗結果中可以發現蠟滴在開始凝縮時的速率比較大，到最後凝固前則凝縮速率變慢。原因可能是蠟油開始滴落時還處於高溫狀態，到最後蠟油急速展開而快速冷卻。

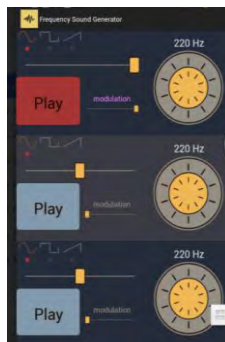
(四) 高度高於 10 公分時無法看到蠟滴擴散再凝縮的現象，可能是因為蠟滴在空氣中停留時間較長而冷卻，當碰撞到紙面時因擴散面積較大而較快冷卻凝固，無法再向內凝縮。

## 陸、結論

- 一、蠟燭燭芯長短會影響蠟油液滴體積大小，燭芯到達一定長度就不再會有蠟油滴落情形。控制燭芯長度，可以控制蠟油液滴體積大小。
- 二、蠟油從越高的高度滴落到固體紙面，蠟油展開面積越大。但是到達臨界高度，因為能量夠大，開始噴濺，蠟油液滴會在原地振動，造成展開面積忽大忽小不規則變化。
- 三、蠟油從相同的高度滴落到不同性質固體紙面，接觸面顆粒越粗糙，碰撞時造成空氣振動越劇烈，蠟油液滴碰撞後，會產生明顯噴濺，無法形成圓形的展開形狀。塗有奈米水晶膜的玻璃，因為疏水性明顯，接觸角大，所以展開面積最小。
- 四、蠟油從越高的高度滴落到靜止淺水面，蠟油展開面積越大。但是到達臨界高度，因為能量夠大，開始產生瑞立噴束，中間有突出狀。蠟油落水中對水產生振動波，使蠟油向四周展開面積逐漸增大，到末端裂開成花瓣狀。
- 五、固定聲波振動頻率造成共振水波（法拉第波），使得蠟油產生不同幾何形狀。當高度越低，蠟油液滴碰撞時速度越慢，衝撞力道最小，形成空氣墊讓蠟油液滴保留因表面張力而形成接近圓球狀蠟珠。
- 六、高速攝影下的蠟滴碰撞變化，可以呈現有趣的蠟滴縮放變化。開始低下時是球狀凝聚成一個圓球，接觸堅硬表面時直接往外擴散，不像影片中的水滴，先在表面彈跳幾次再擴散。

## 柒、參考資料

- 一、<http://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/jp106899k> : THE JOURNAL OF PHYSICAL CHEMISTRY , Persisting Water Droplets on Water Surfaces
- 二、<http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.langmuir.6b02750> , The Role of Liquid Properties on Lifetime of Levitated Droplets.
- 三、蔣儀宣、朱鳳華、徐悅聲，2012 年臺灣國際科學展覽會物理科，與波共舞的飄浮水滴。
- 四、陳焜蓉、謝文娟，臺灣國際科展 2007 年物理科，”液”滴活泉-探討液滴與液面的碰撞與振盪。
- 五、楊志文、徐英庭、蘇巧慈、倪柏揚，全國中小學科展第 47 屆國中物理科，當我們撞在一起～液滴碰撞。
- 六、黃靖淳、張雯菁、許毓茜，全國中小學科展第 49 屆國中物理科，會漂浮的水滴。
- 七、許喆媛、呂汶諺、侯宜伶，全國中小學科展第 54 屆國中物理科，水舞-水滴在薄層液上的噴濺性。
- 八、液滴飛濺的秘密：十倍強的風。<http://news.nwpu.edu.cn/info/1010/46986.htm>。
- 九、物理馬戲團 I ，沃克葉偉文，天下文化，2009。
- 十、<http://ame.nd.edu/research/research-images/particle-collision-in-a-complex-fluid-is-mainly-affected-by-shear-thinning-behavior-of-the-matrix-liquid-rather-than-its-viscoelasticity>
- 十一、法拉第波，[https://en.wikipedia.org/wiki/Faraday\\_wave](https://en.wikipedia.org/wiki/Faraday_wave)





## 【評語】 080122

本作品以蠟油低落表面，借蠟油凝固研究動態碰撞。探討的變因有低落高度、固體表面以及液面振動頻率等。題目有趣亦具科學研究性。主題在於蠟油滴落在水面後，其大小和幾何形狀的探討。最值得研究也是最有趣的應該是蠟油滴和水面接觸後的整個變化過程。這也是實驗目的提到的方向之一。雖能使用分析軟體進行定量面積分析，但僅著眼於凝固的”結果”，而非動態過程。可以考慮以攝影與軟體分析更進一步著重於整個動態性質的觀測。

作品海報



# 壹、研究動機

在網路YouTube看到影片「The walking water mystery(in space and slow motion)」，在影片中我們看到水珠在水面上連續彈跳的有趣畫面，這啟發我們的好奇心。如果將水滴滴在不同的物體表面，水滴也能彈跳嗎？

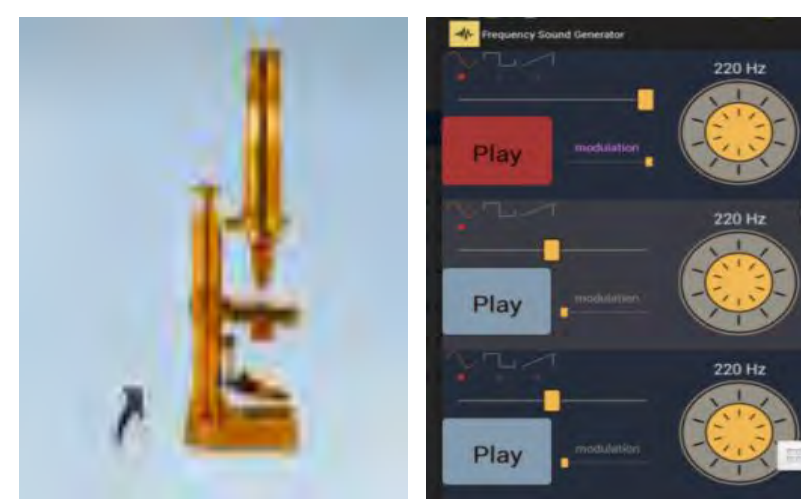
經過嘗試，發現水滴在較低的高度碰撞後就會附著物體表面，在較高的高度碰撞後就會噴濺，我們想了解液滴和交界面兩者碰撞瞬間變化，我們想到生日蛋糕上蠟燭的蠟油可以用來模擬液滴碰撞瞬間情形，當蠟油碰觸交界面瞬間會快速凝固，在不同物理條件下，蠟油碰撞後就會有不同的凝固外型和展開面積。和老師討論後，老師提供一個影片分析軟體『ImageJ』，它可以用來分析實驗拍攝影片的蠟油圖案面積與圖形，對此實驗專題分析有很大幫助，於是我們就開始一系列的液滴碰撞實驗探討。

# 貳、研究目的

- 一、探討蠟燭棉芯的長度與蠟油液滴大小的關係。
- 二、蠟油從不同高度碰撞紙面，探討「高度」與「蠟滴展開面積大小」的關係。
- 三、蠟油碰撞不同固體表面，探討「固體表面種類」與「蠟滴展開面積大小」的關係。
- 四、蠟油在不同高度碰撞靜止水面，探討「高度」與「蠟滴在水中展開最大長度(直徑)」的關係。
- 五、蠟油在不同高度碰撞「不同振動頻率」的水面，由「蠟滴凝固形狀」分析液滴碰撞的情形。
- 六、探討以高速攝影機拍攝蠟油碰撞紙張時的凝縮情形。

# 參、研究設備與器材

蠟燭、黏土、鐵尺、打火機、水平儀、玻璃片、培養皿、量筒、滴管、湯匙、鐵夾、濾網、滴管、水晶鍍膜、剪刀、相機、三腳架、捲尺、量杯、鑷子、喇叭、水彩紙、西卡紙、塗蠟免洗盤、投影片、玻璃、烘焙紙、銅箔、鋁箔、砂紙、高速攝影機(型號：MIROEX4-1024MM)、ImageJ、Frequency Sound Generator(APP軟體)。



# 肆、研究過程及方法：

## 一、實驗研究架構：

高度越高，重力位能轉換成的動能越大，當不同速度的蠟油液滴碰撞固體、靜止水面、振動水面就會產生不同展開形狀與面積。

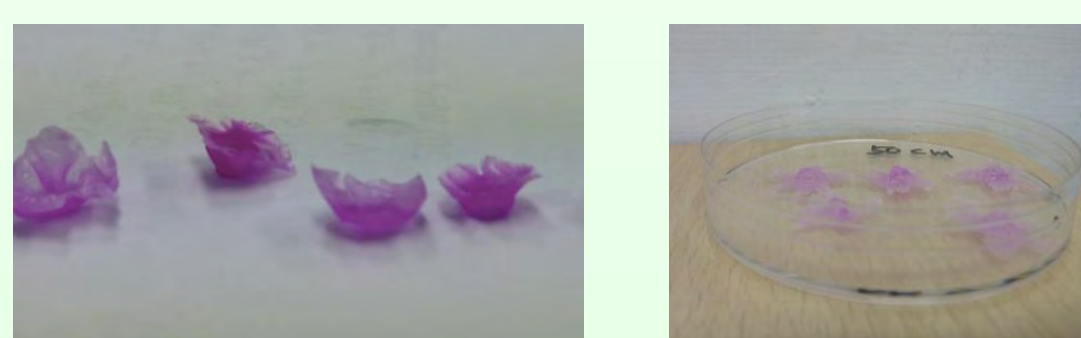
(一) 固體：由影像分析軟體『ImageJ』求其碰撞後蠟固體展開面積大小。

1. 不同高度：來進行速度對碰撞的影響。
2. 不同固體表面分別為水彩紙、西卡紙、塗蠟免洗盤、投影片、玻璃、塗奈米膜的玻璃、燻炭黑的玻璃、烘焙紙、銅箔、鋁箔、砂紙，探討接觸面性質與碰撞液滴的碰撞影響。

(二) 靜止水面：高度低，速度小。

蠟油液滴『碗形』的碰撞。逐漸加高會逐漸展開面積更大。

高度高，速度大，蠟油液滴『瑞立噴束』會衝的較高。



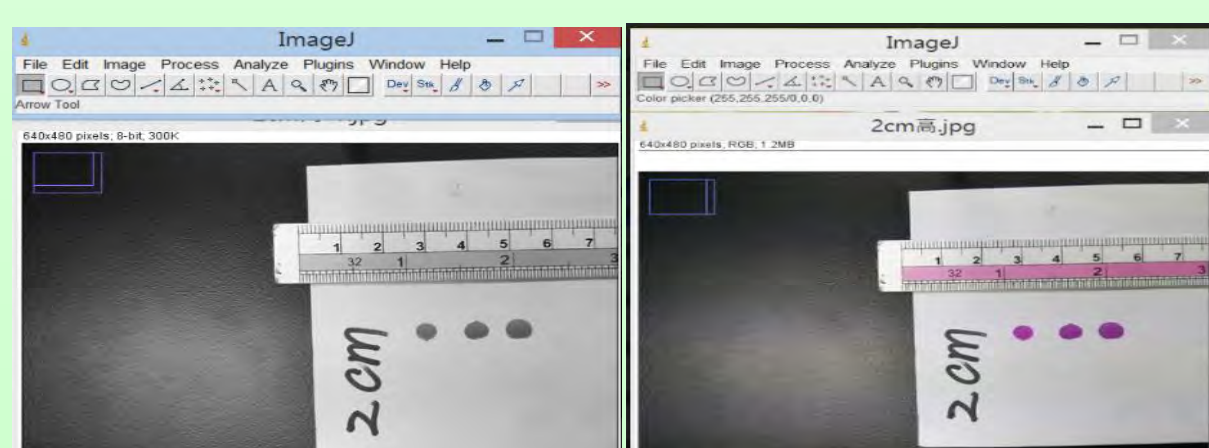
(三) 振動水面：利用APP軟體「Frequency Sound Generator」播放頻率為92、220赫茲，此時可產生共振波，水面明顯有劇烈水波，水面震動波構成不同的幾何形狀，讓蠟油滴入凝固也會跟著變化，當高度低，衝擊力道小，形成空氣墊讓蠟油保持表面張力趨向於圓球形。

## 二、ImageJ的使用：ImageJ提供一個可以將圖像面積定量的軟體(算出蠟油固體面積)。

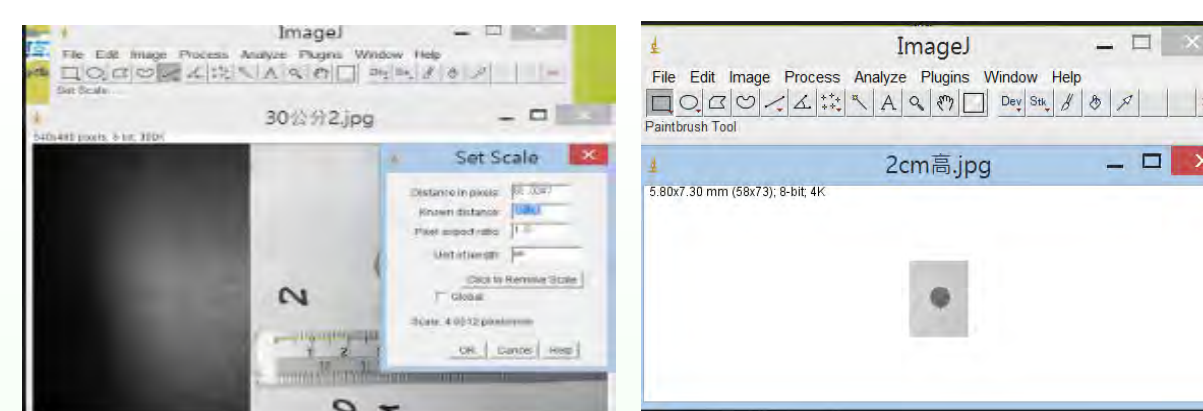
(一) 開啟圖片檔(實驗拍攝影片)。

(二) 將影片改成灰階圖案。

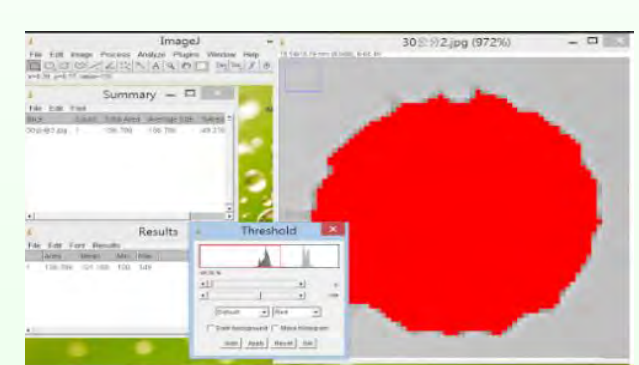
(三) 選Analyze，以圖案中的尺規參考物為刻度基準，可以換算圖案的大小比例。



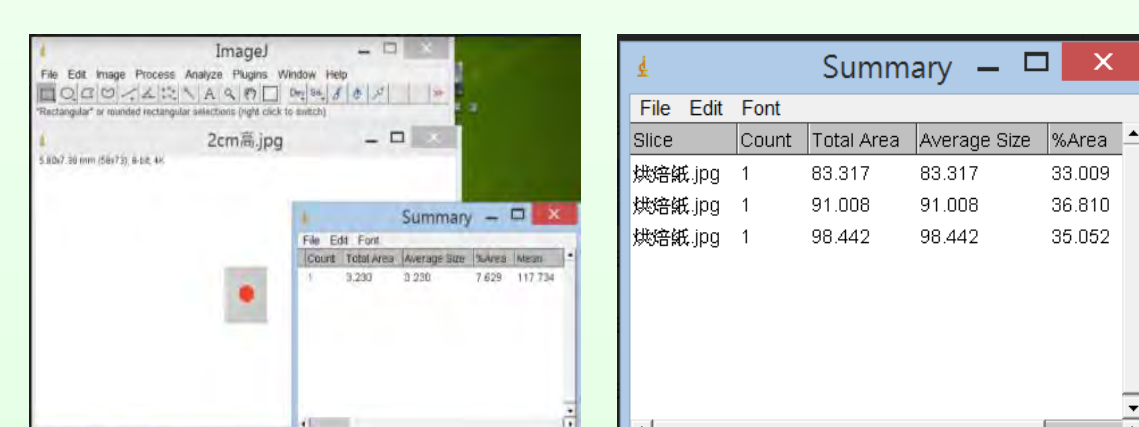
(四) 擷取畫面所要的圖案。



(五) 設定灰階閾值。選取影像中的蠟油圖案的0-255灰階值範圍，軟體會將選定灰階閾值的範圍轉換成『紅色』，我們可以藉此截取蠟固體展開的圖形。

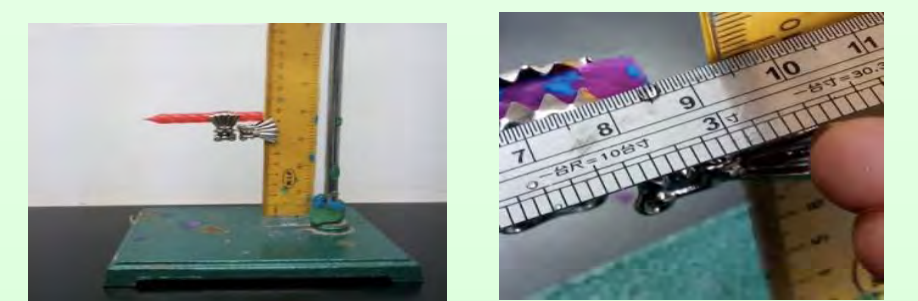


(六) 計算蠟油總面積或在水中展開蠟固體最大長度。



## 三、實驗裝置：

(一) 利用鐵夾將蠟燭固定在特定高度上。



(二) 用水平儀確定平台是水平的。

(三) 將蠟燭的蕊心剪成『0.5cm』長。

(四) 打火機點火，並用湯匙接住第一滴蠟油。等第二滴蠟油滴下交界面後，連續做三滴，把湯匙放於蕊心下方，同時用鑷子將火熄。



# 四、研究過程：

## 【研究一】探討蠟燭棉芯的長度與蠟油液滴大小的關係。

### 【實驗方法】

1. 將蠟燭固定在10公分的高度上。
2. 分別將蠟燭棉芯剪到0.2、0.5、1、2 cm，使用打火機點燃蠟燭，讓蠟油滴在白紙上。
3. 等蠟油凝固，慢慢移動紙面，雙手壓平紙面，避免產生過多氣流影響蠟滴流動。
4. 每移動一次，記錄間隔時間(連續3滴)。
5. 拍攝並記錄個別間隔時間。

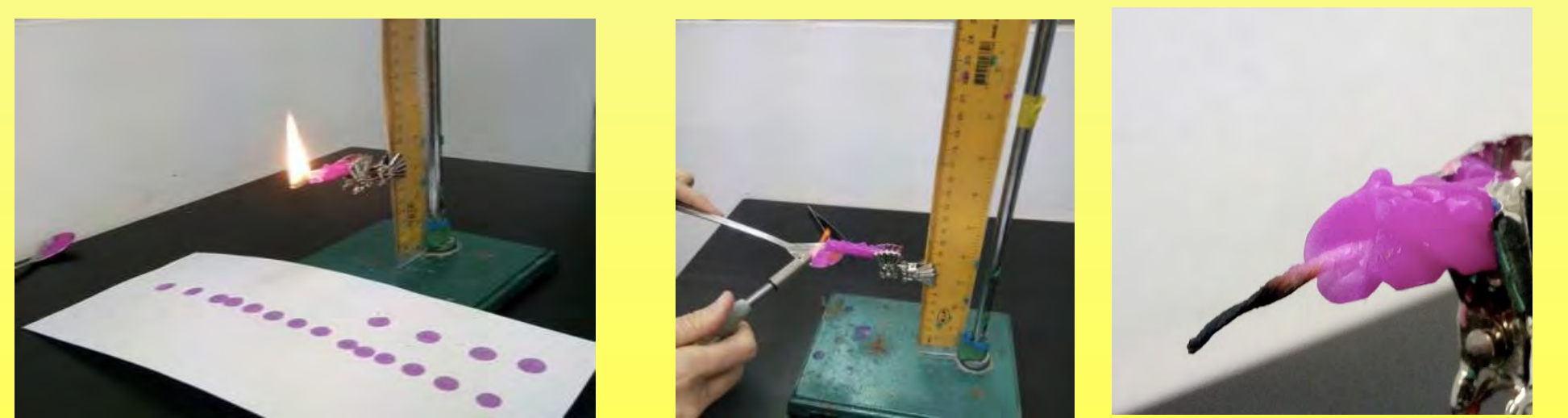
### 【實驗結果】如表1

表1：棉芯長度與蠟滴大小的關係

棉芯長度	0.2cm	0.5cm	1cm	2cm
第1-2滴間隔時間(秒)	2,49	7,56	11,68	
第2-3滴間隔時間(秒)	2,98	10,54	12,12	不滴蠟油,產生黑煙
蠟滴在紙上的直徑長	1.1cm	1.3cm	1.3cm	
圖例				

### 【分析】

1. 蠟燭棉芯0.2cm時要等候些時間才能被點燃，火開始形成時火焰很小。
2. 蠟燭棉芯0.5cm到1cm之間滴落的蠟燭直徑大小相近，適合作為後續實驗，所以後續實驗我們都選用0.5cm的燭芯。
3. 棉芯2cm，火焰非常大，不再滴蠟油，此時會看見一縷黑煙。
4. 連續滴蠟油，會發現滴落蠟油的間隔時間越來越久，表示此時火焰越來越大，燃燒用掉蠟燭碳氫化合物越快，要有足夠蠟油重量累積到可以克服表面張力的時間越長。最後棉芯很長，火焰很大，蠟油不再滴落。此時蠟燭棉芯底端形成一個碗狀的凹陷。



## 【研究二】蠟油從不同高度碰撞紙面，探討「高度」與「蠟滴展開面積大小」的關係。

### 【實驗方法】

1. 將蠟燭固定在5、10、15、20、25、30、35、40、45、50公分的不同高度上。點燃蠟燭，讓蠟油滴在白紙上。
2. 等蠟油凝固，輕輕移動紙面，避免擾動氣流影響火焰大小。
3. 用三角架固定相機高度並拍攝並使用ImageJ計算蠟油展開的面積。

### 【實驗結果】如表2、圖2-1、圖2-2

表2：滴落高度與碰撞面積大小的關係

高度(cm)	面積 1 (mm <sup>2</sup> )	面積 2 (mm <sup>2</sup> )	面積 3 (mm <sup>2</sup> )	面積 4 (mm <sup>2</sup> )	面積 5 (mm <sup>2</sup> )	平均 (mm <sup>2</sup> )
10cm	60.516	61.580	57.444	61.236	66.452	61.445
20cm	62.208	65.436	55.828	88.680	72.648	68.960
30cm	74.816	101.128	83.188	82.272	71.472	82.575
40cm	94.560	80.248	98.648	72.192	102.060	89.541
50cm	103.94	92.452	88.180	86.408	89.376	92.071

	原始照片	面積 1	面積 2	面積 3	面積 4	面積 5
10cm						
20cm						
30cm						
40cm						
50cm						

圖2-2：在不同高度低下的蠟滴碰撞後展開的面積在ImageJ計算圖形

### 【分析】

1. 由折線圖看出蠟油展開面積逐漸變大，高度越高，碰撞一瞬間的速度越大，所以能量衝擊時讓液滴展開得越大。
2. 高度40cm時，蠟滴落下速度太快，從液滴展開形狀圖發現，液滴展開的外緣成鋸齒狀，液滴開始噴濺，從展開面積的數據發現，此時測到的面積開始不規律的遞增又再遞減。
3. 高度45cm以後的展開面積，中央有一個凹陷白面積，表示其碰撞後再次彈起，做像皇冠噴濺。

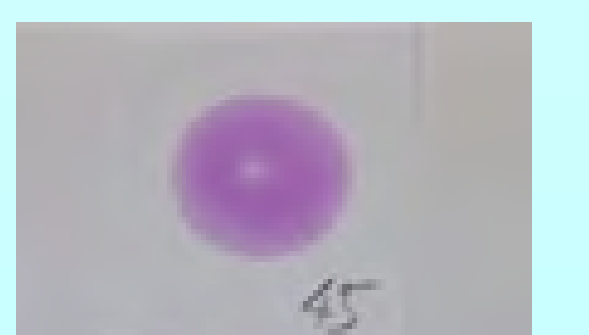
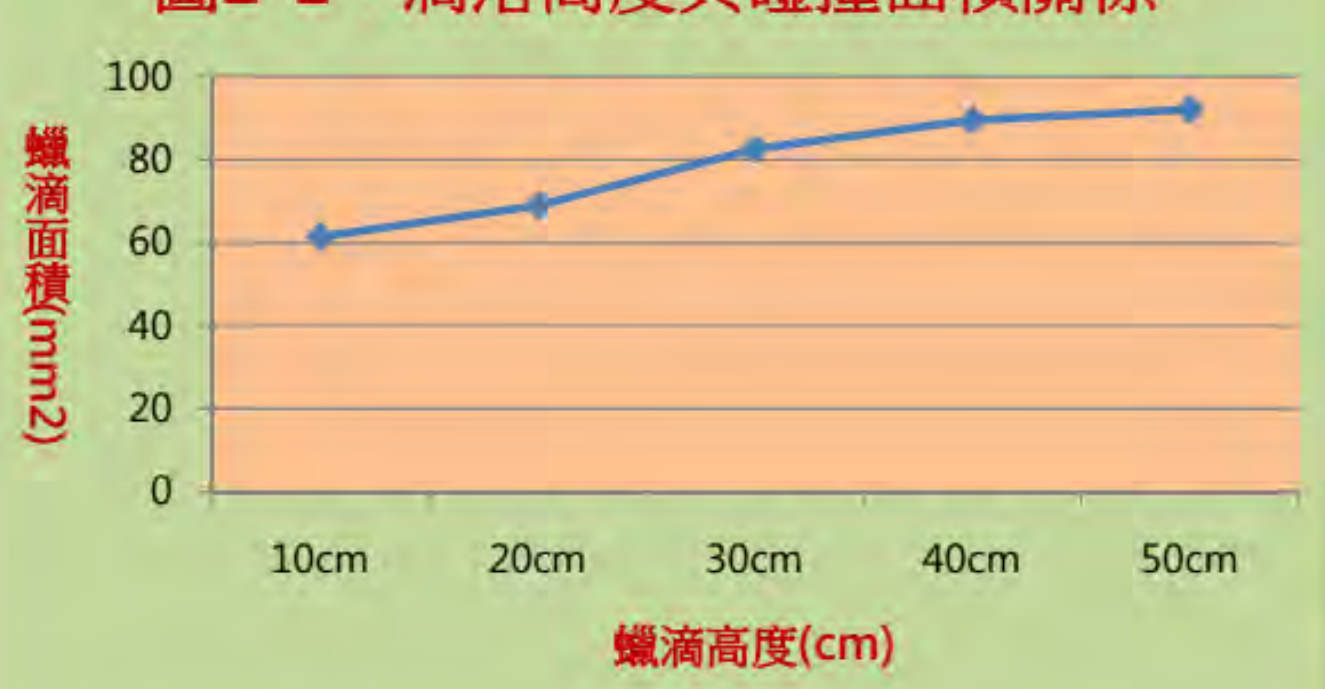


圖2-1：滴落高度與碰撞面積關係

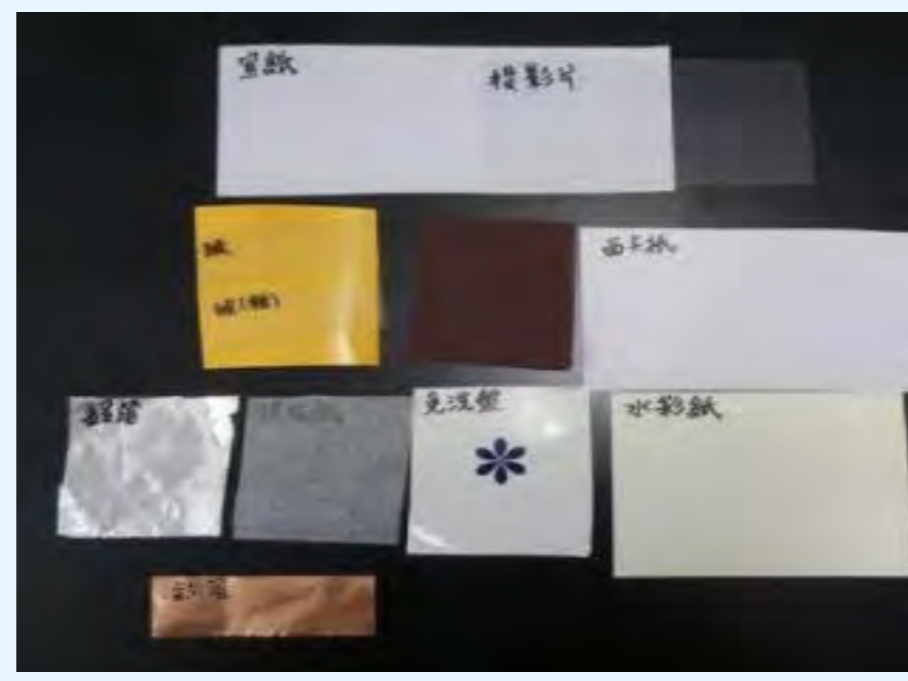




**【研究三】蠟油碰撞不同固體表面，探討「固體表面種類」與「蠟滴展開面積大小」的關係。**

**【實驗方法】**

1. 將蠟燭固定在10 公分的高度上。
2. 點燃蠟燭，讓蠟油滴在水彩紙、西卡紙、塗蠟免洗盤、投影片、玻璃、塗奈米膜的玻璃、燻炭黑的玻璃、烘焙紙、銅箔、鋁箔、砂紙。
3. 同實驗二之2~3步驟。



**【實驗結果】** 如表3、圖3-1、圖3-2。

表3：不同固體表面種類與蠟滴展開面積大小的關係

高度(cm)	面積1(mm <sup>2</sup> )	面積2(mm <sup>2</sup> )	面積3(mm <sup>2</sup> )	平均(mm <sup>2</sup> )
水彩	78.598	77.111	74.591	76.767
西卡紙	71.811	75.172	76.207	74.397
免洗盤(塗蠟)	84.221	82.670	83.575	83.489
投影片	86.936	82.606	88.164	85.902
玻璃	83.317	81.054	78.210	80.764
鍍膜玻璃	70.001	71.165	73.039	71.402
烘焙紙	83.317	91.008	98.442	蠟油展開不規則
宣紙	71.587	79.577	88.985	蠟油展開不規則
銅箔	71.747	*	*	金屬反光只取一點
鋁箔	83.963	*	*	金屬反光只取一點
砂紙	*	*	*	不規則噴濺
塗炭黑玻璃	*	*	*	不規則噴濺

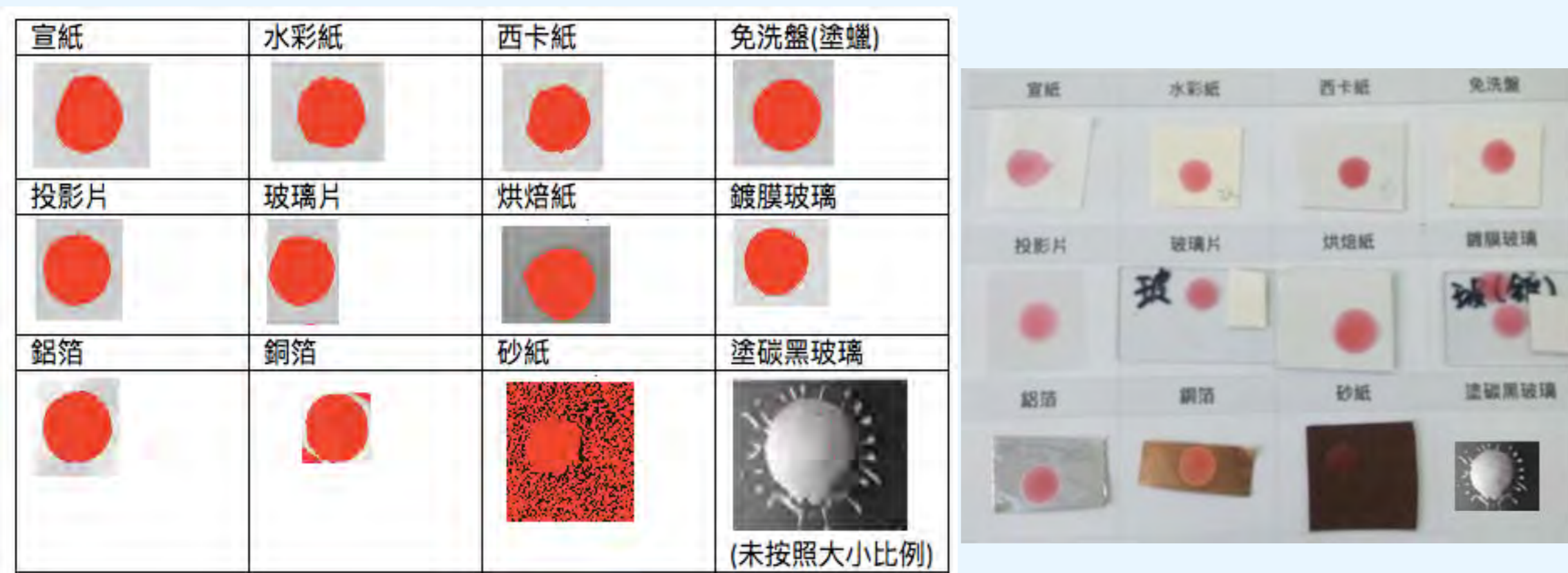
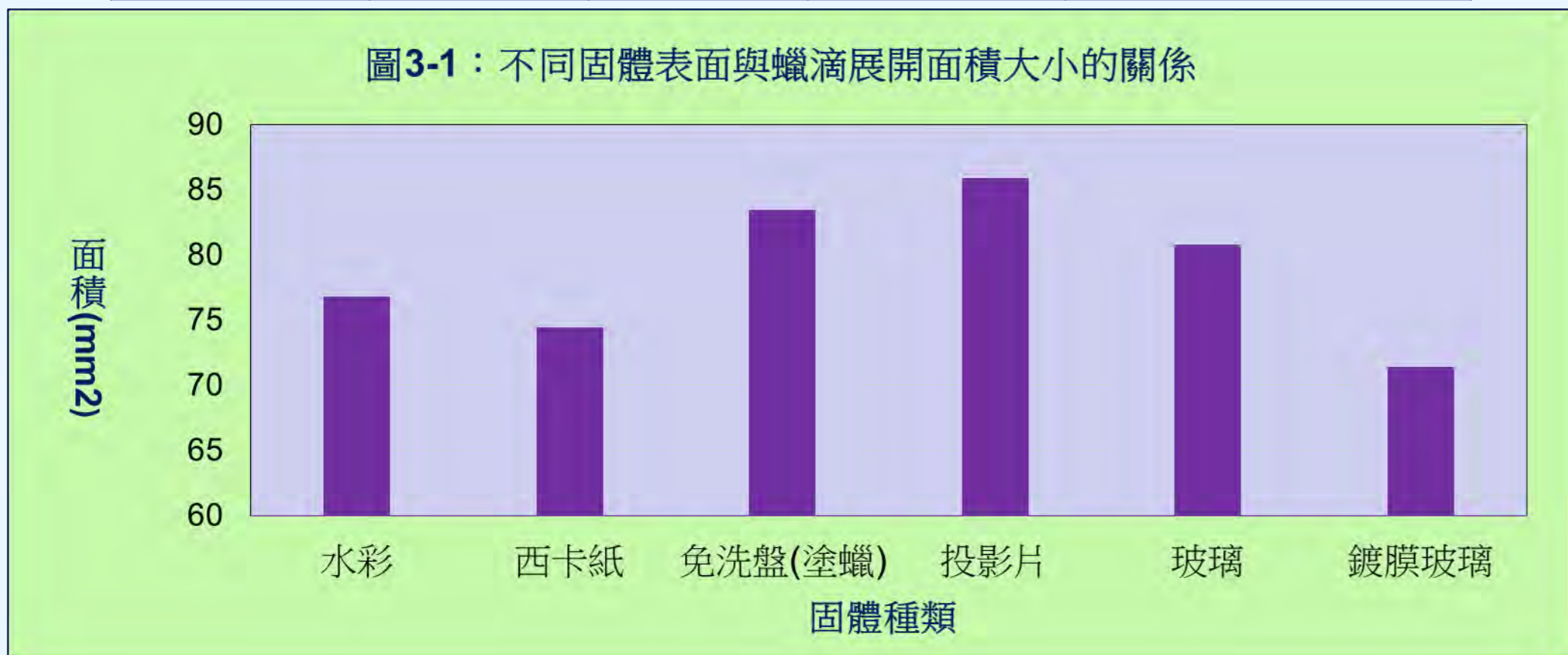


圖3-2：不同固體表面種類與蠟滴展開面積在ImageJ計算

**【分析】**

1. 展開面積大小探討：  
鍍膜的玻璃本身就是防潑水的材質，水滴一旦碰到鍍膜玻璃會形成圓珠，而不容易附著在接觸面，所以用蠟油來模擬，可以發現它展開的面積最小，也就是接觸角最大（液滴凸起最高）。
2. 展開形狀探討：  
越光滑的表面，蠟油滴落時呈現成圓形，如免洗盤、鍍膜玻璃、鋁箔、銅箔。面具有顆粒狀的粗糙面，碰撞瞬間會有空氣擠壓，會產生噴濺現象，如砂紙、塗炭黑的玻璃。

**【研究五】蠟滴在不同高度滴落碰撞「固定振動頻率」的水面後，會產生什麼形狀？**

**【實驗方法】**

1. 將蠟燭固定在0.5、1、3、5、10、20公分的高度上。
2. 將培養皿放在低音喇叭上。
3. 喇叭接收平板電腦傳送的音源，播放APP軟體「Frequency SoundGenerator」，分別調整播放頻率為92、220赫茲。(此時可以產生共振波，水面明顯有劇烈水波)
4. 點燃蠟燭，等蠟油凝固，放上尺作為尺規參考物。
5. 用三角架固定相機高度並拍攝蠟燭凝固後的形狀。

**【實驗結果】** 如圖5-1、圖5-2。



圖5-1：蠟滴滴落在固定頻率水面的凝固情形

圖5-2：不同高度的蠟滴滴落在兩種固定頻率水面的凝固情形

**【分析】**

1. 淺水波槽產生的共振波（法拉第波），使得蠟油在水面產生各種圖形，包括三角形、四邊形、米粒狀，越低的高度蠟油展開的形狀越趨近圓球狀。
2. 振動頻率越大，凝固的顆粒越小。

**【研究六】探討以高速攝影機拍攝蠟油碰撞紙張時的凝縮情形。**

**【前言】**

在蠟滴快速變化的過程中，用肉眼完全不知道它是如何變化的。因此我們用了每秒可以拍攝3000張的高速攝影機來拍攝其過程，觀察是否有新的發現。

**【實驗方法】**

1. 將蠟滴高度調整，從10、20、30、40、50公分處滴落，利用高速攝影機拍攝蠟油碰撞紙張時的凝固情形。錄影完後慢慢播放，觀察每張圖片的變化。
2. 將影片利用ACDSee軟體轉成圖片JPG檔。
3. 使用ImageJ判讀蠟油碰撞後的展開面積。

**【實驗結果】** 如表6-1、圖6-1、圖6-2。

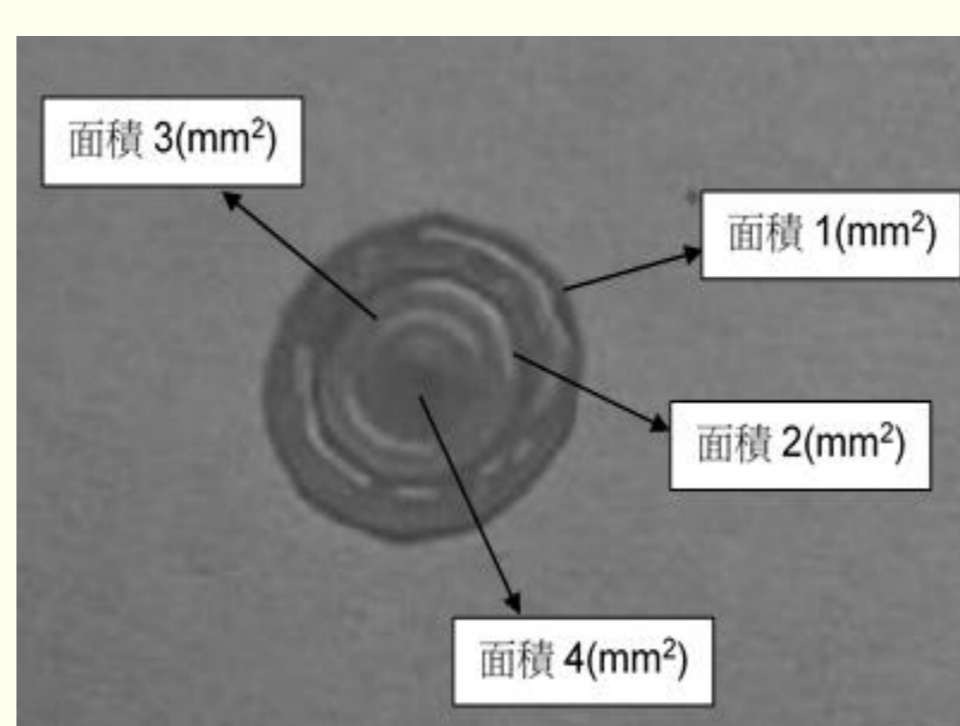


表6-1：蠟滴滴落在紙張時的向內凝縮情形

	第 11 張	第 27 張	第 39 張	第 50 張
原始照片				
ImageJ 的判讀圖片				

**【研究四】蠟油不同高度碰撞靜止水面，探討「高度」與「蠟滴在水中展開最大長度」的關係。**

**【實驗方法】**

1. 將蠟燭固定在5、10、15、20、25、30、35、40、45、50公分的高度上。
2. 用量筒取50mL的水，倒入培養皿。
3. 點燃蠟燭，讓蠟油滴在培養皿水面上。
4. 同實驗二之2~3步驟，使用ImageJ計算蠟油碰撞後展開的最大長度。



**【實驗結果】** 如表4、圖4-1、圖4-2、圖4-3。

表4：測量水中展開花瓣的最大直徑

低落高度(cm)	長度1 (mm)	長度2 (mm)	長度3 (mm)	平均
5	6.07	5.53	6.23	5.94
10	11.82	10.39	12.62	11.61
15	12.51	13.67	13.66	13.28
20	14.49	14.23	14.56	14.43
25	13.61	14.77	13.94	14.11
30	15.97	16.06	15.41	15.81
35	17.84	18.32	18.93	18.36
40	18.92	18.92	19.49	19.11
45	23.95	23.39	22.06	23.13
50	23.12	24.42	23.92	23.82

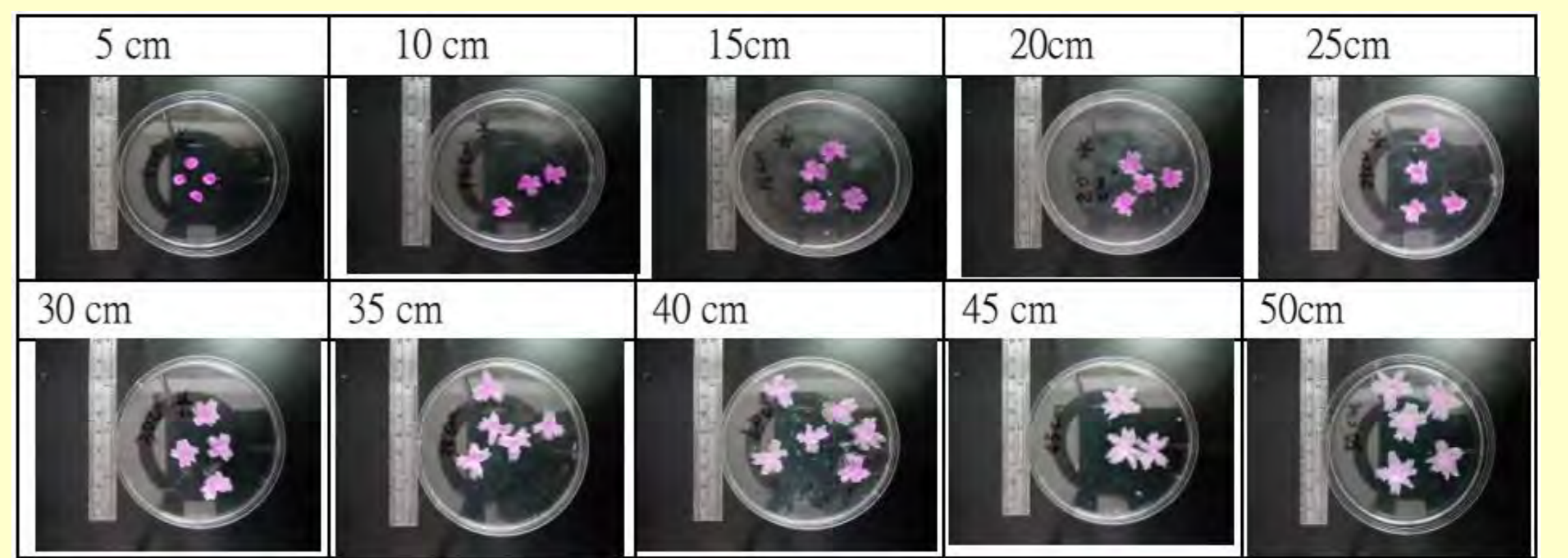
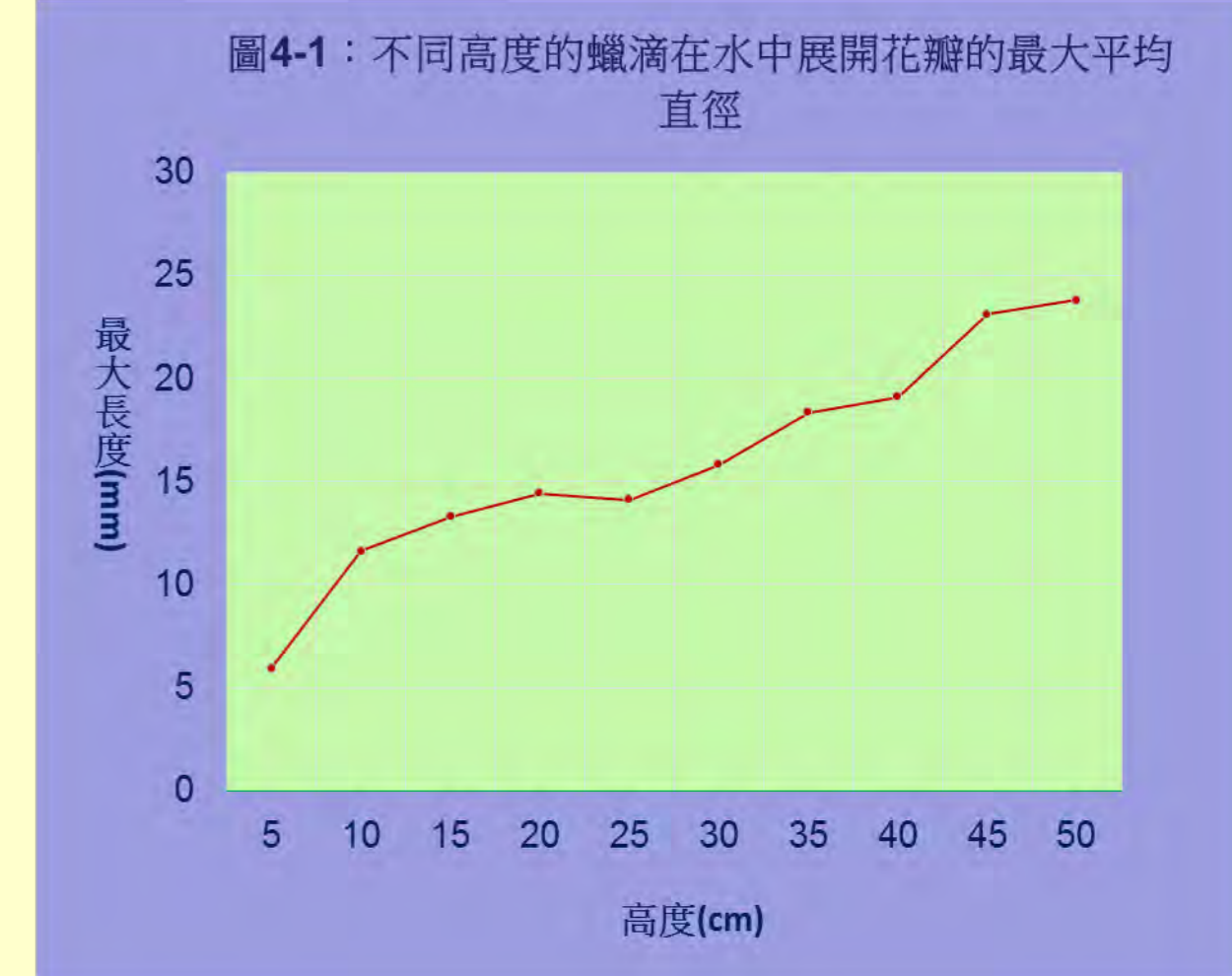


圖4-2：不同高度的蠟滴在水中展開花瓣的情形

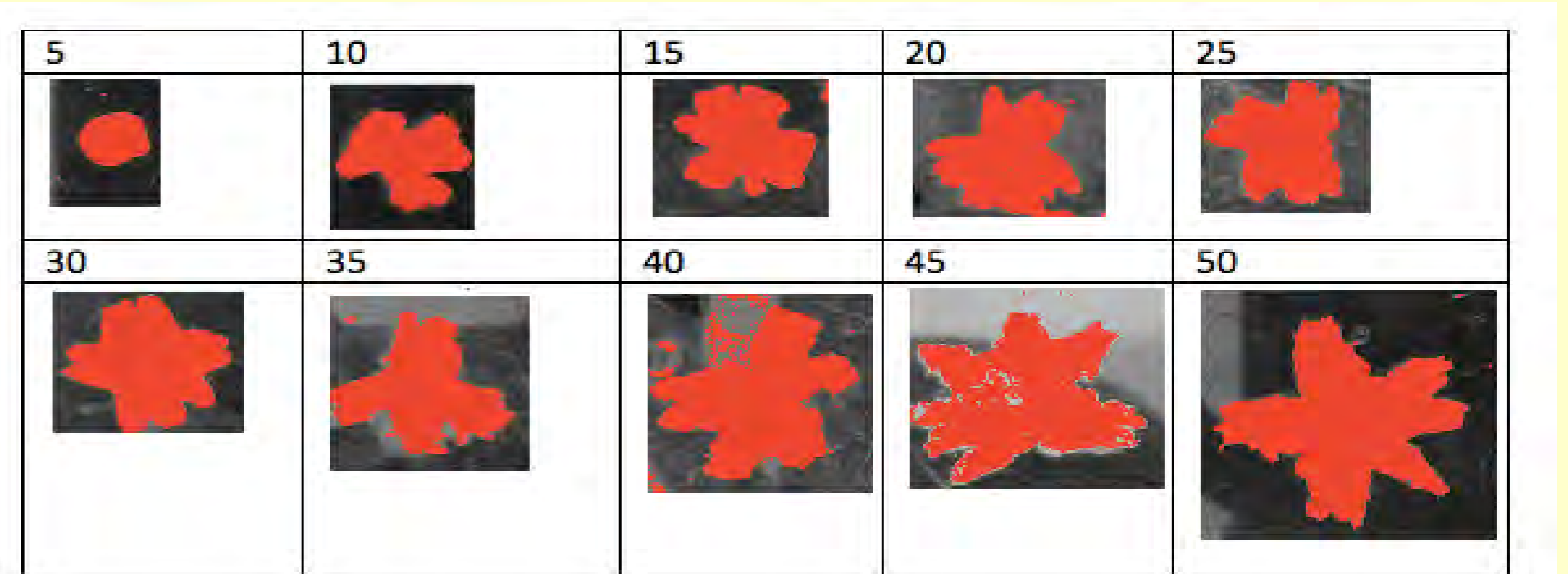
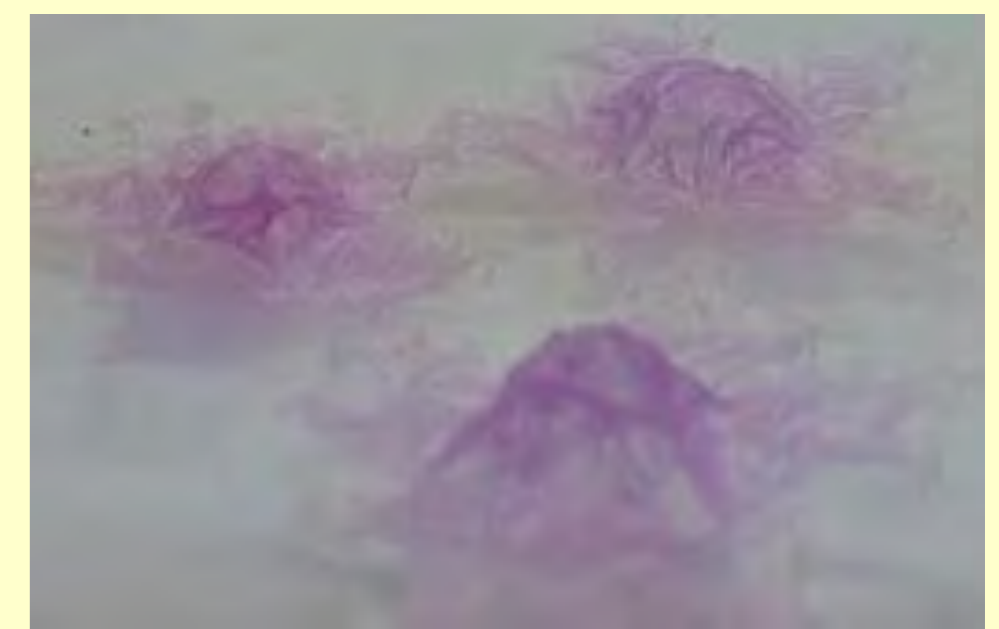


圖4-3：不同高度的蠟滴在水中展開花瓣在ImageJ計算

**【分析】**

1. 展開面積大小探討：  
高度越高，蠟油滴落碰撞水面時的速度越大，拍打水面的力道越大，引起水面的振動也越明顯，因此蠟油面積在振動水波上面往四周圍展開效果越大。
2. 展開形狀探討：  
高度低，速度小，不足以振動水波，所以蠟油直接掉入水中，因為表面張力，形成小圓形。當高度逐漸增高，蠟油展開面增大，厚度越來越薄，到末端就會展開像花瓣一樣的固體。蠟固體花瓣逐漸展開裂片(中央凹陷)。到了高度40cm，產生『瑞立噴束』(Rayleigh jet)，中央會有一股突起的噴束，45cm、50cm的瑞立噴束高度逐漸增高。





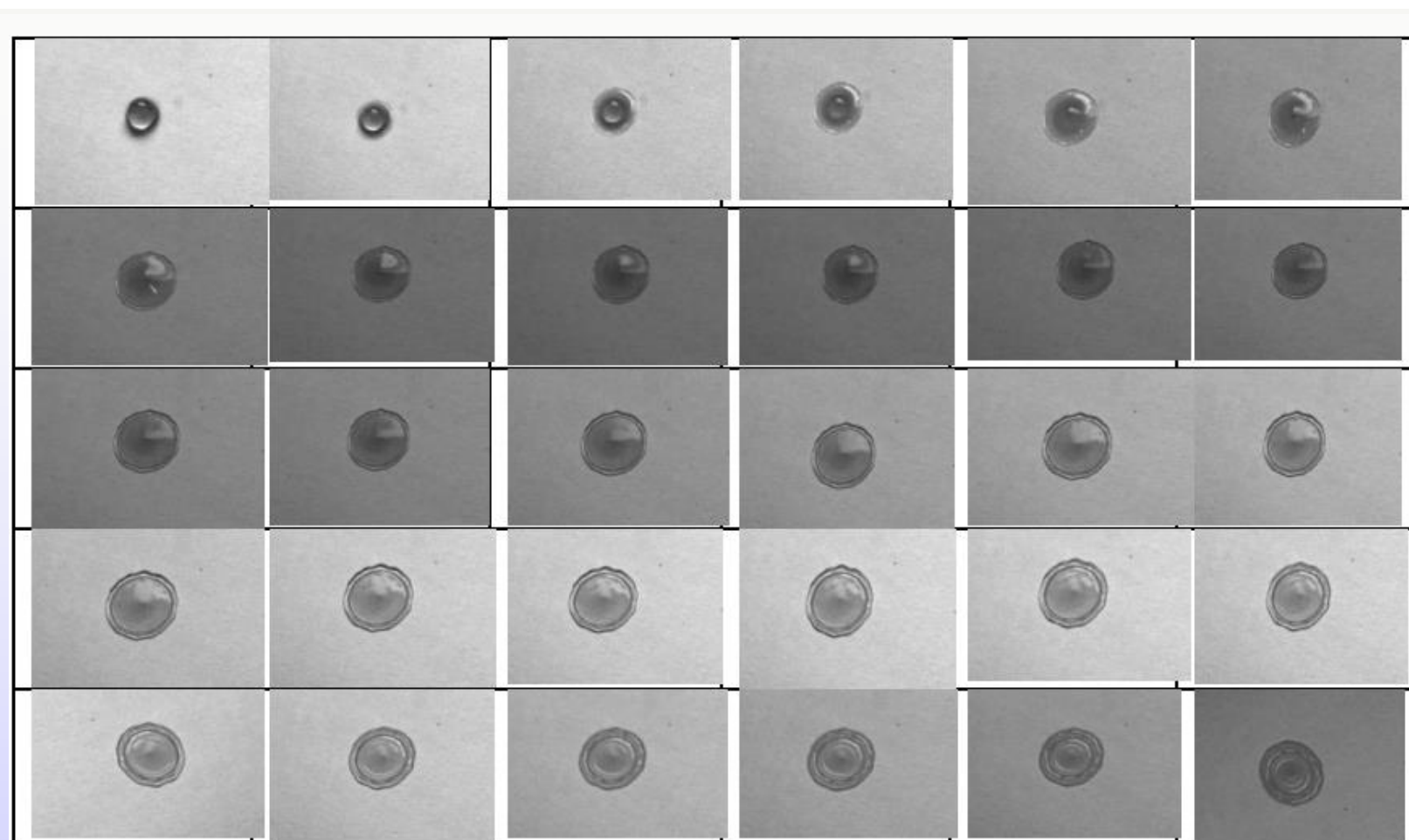


圖6-1：在高度較低時，蠟油從碰撞後的瞬間情形——可以發現蠟滴先展開再向內縮的變化。

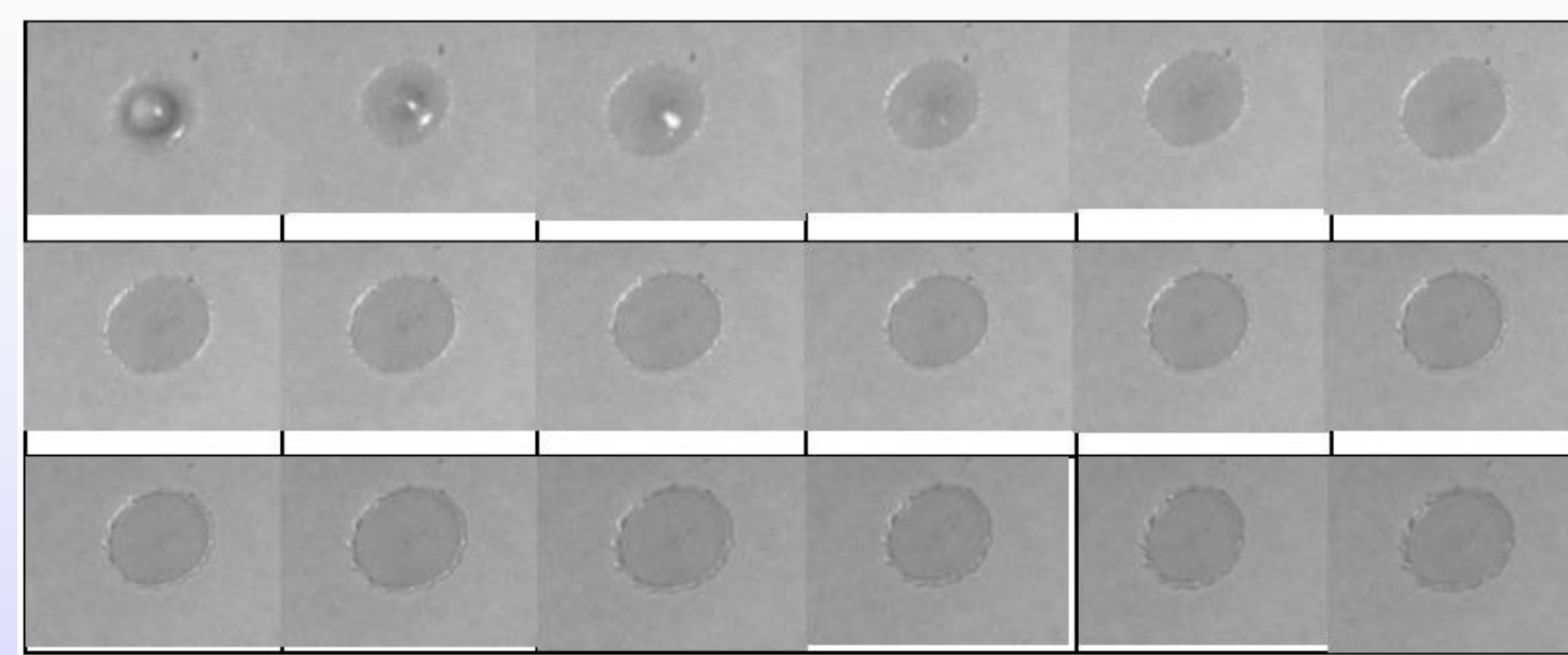


圖6-2：高度較高時，蠟油從碰撞後的瞬間情形——可以發現看不出蠟滴再向內縮的變化。

### 【分析】

1. 照片明暗的原因是外加光源為鹵素燈，有一些交流電的頻率。用普通的LED燈則更是明顯。
2. 從實驗結果中可以發現蠟滴於較低的高度滴落時，可以發現蠟滴碰撞展開再向圓心凝縮，直到全部凝固為止；在較高的高度滴落時，則看不到蠟滴向內凝縮的變化情形。

## 伍、研究討論

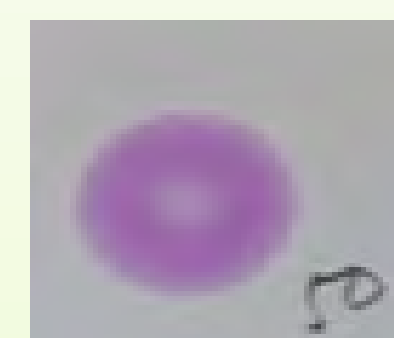
### 一、燭芯長短與滴落間隔時間關係：

- (一)當燭芯很短時，只見蠟油一直滴，未見有火焰，接著出現很小的火焰，此時蠟油滴落的間隔時間相當短，此時火焰很小，大部分的蠟燭碳氫化合物用掉量不多，卻足以融化很多蠟油，所以蠟油滴落間隔時間很短，約3秒。
- (二)燭芯燃燒越長，滴落間隔時間逐漸加長。蠟燭中的碳氫化合物被燃燒用掉越多，能克服表面張力而滴落的蠟油累積時間就越長，約10秒。
- (三)當燃燒一段時間，燭芯越來越長大約到2cm，火越大，大部分的碳氫化合物都被用掉，幾乎沒有多餘的蠟油滴下來。只看到未燃燒完全的黑煙一直產生。
- (四)所以我們所設計的實驗，必須每做一次實驗連續取三滴蠟油，完畢都要用剪刀修剪燭芯到0.5cm，讓蠟燭液滴大小成為控制變因。

### 二、ImageJ尺規設定：

使用ImageJ影像分析軟體，在照片影像的尺標的物畫0~10cm一條直線，然後設定此長度為實際長度100mm，ImageJ軟體就能按照比例關係換算出我們所選定的蠟油展開面積大小，或水中蠟燭花瓣的最大長度。照片中選擇的尺度越長，誤差越小。

三、當蠟油從不同高度滴入固體上，達到了一定臨界值，50cm時會向上濺起一個火山口的形狀，再往外散成皇冠狀，等到皇冠狀的蠟油落下後，皇冠的中心會有一股蠟油向外擴散，接著凝固後因中間缺少了蠟油而形成白色的凹狀。



### 四、噴濺效果：

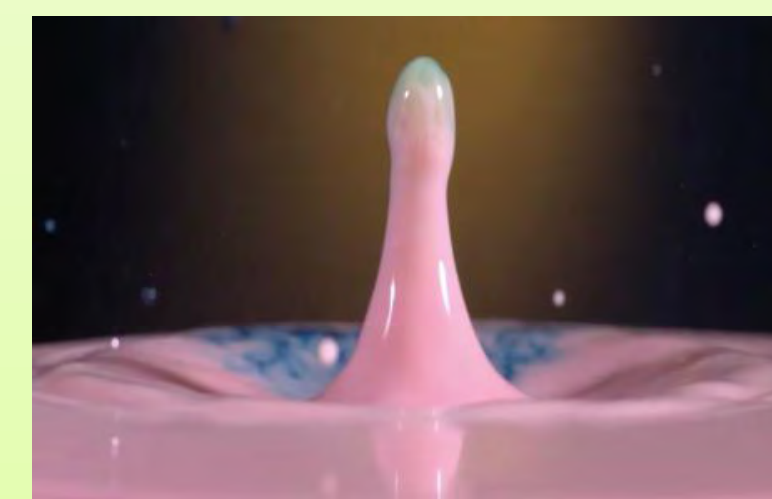
當快速運動的液滴撞擊到光滑的表面，會在表面展開出一層液體薄膜，在這個不斷向外擴展的液體薄膜的邊緣會飛濺出小液滴。但是人們對於這個普遍存在的現象一直缺少最基本的認識。我們借助高速成像的方法，揭示出濺射現象的發生，是由在不斷擴展的液滴前緣的底部被束縛的極薄的空氣層引起。（參考資料八：液滴飛濺的秘密：十倍強的風）

### 五、蠟油在10cm高度落下，在不同性質固體表面展開情形：

- (一)越光滑的固體表面，產生的蠟固體形狀越接近圓形。如塗膜免洗餐具、投影片、玻璃片、鍍膜玻璃、鋁箔、銅箔。
- (二)越粗糙的固體表面，產生的蠟固體形狀越不規則。如宣紙、水彩紙、西卡紙、烘焙紙。
- (三)越粗糙的固體顆粒表面，顆粒間的空氣使滴落的蠟燭形成空氣墊反彈而噴濺開來。如砂紙和塗炭黑的玻璃。
- (四)疏水性越強的表面，因為接觸角大，所以展開的面積最小。如塗有疏水性塗料的水晶鍍膜玻璃。
- (五)銅箔比鋁箔容易導熱，凝固快，展開面積鋁箔>銅箔。

### 六、蠟油滴入液體中，滴落高度愈高撞擊力愈大，所以會影響蠟燭花的形狀。

- (一)蠟燭花瓣：高度愈高，濺起的皇冠狀會越高，蠟油振動能量越大，展開面積越大。
- (二)中央凸起狀：蠟油累積能量越大，瑞立噴束會衝的較高。



從5cm到35cm高度尚未見到中央突起柱，只有碗型的形狀，未達臨界高度。40cm開始到達臨界高度，形成water jet的突起柱。而且滴落高度愈高，突起柱也越高。因慣性定律下衝的牛奶滴的位能消耗盡後，會因反彈力和不溶於水的特性而往上衝，所以皇冠的中心會有一股液體衝出（稱為瑞立噴束），而這個中央噴束如果能量足夠會再往上擠，分離出幾滴小水珠。（資料參考九：物理馬戲團I）

### 七、蠟油滴在共振水波槽：

每個物體都有固定的自然頻率，當培養皿裝了50mL的水，靜置在低音喇叭上方，用APP軟體「Frequency Sound Generator」，將音量調到最大聲，慢慢頻率旋轉盤來調整頻率大小，觀察培養皿上的水面情形，發現，頻率在92Hz、220Hz時，水面會有明顯的共振水波紋，此時喇叭頻率和培養皿大小自然頻率相同而共振，我們利用這個共振水波槽來進行液滴碰撞實驗。固定聲波振動頻率造成共振水波，使得蠟油產生不同幾何形狀。當高度越低，蠟油液滴碰撞時速度越慢，衝撞力道越小，讓蠟油液滴保留因表面張力而形成接近圓球狀蠟珠。

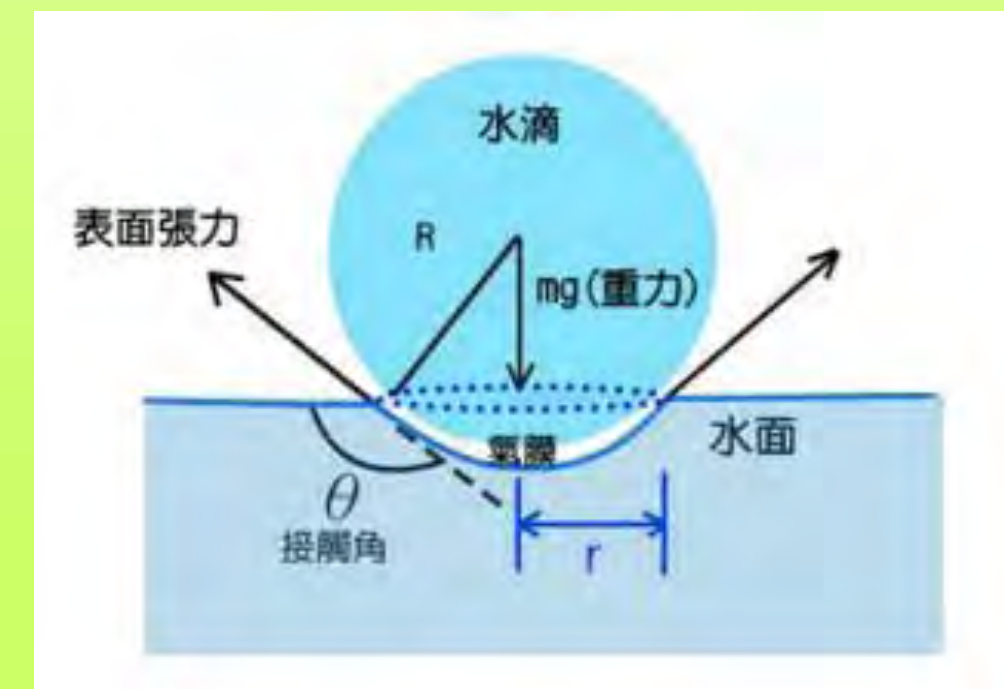


### 八、以高速攝影機拍攝後觀察蠟滴碰撞紙面時：

(一)高速攝影機錄下的影片無法在一般的照片讀取軟體(windows相片檢視器)讀取，後來嘗試了ACDSee，才能將一張一張的照片轉檔成JPG檔案格式。

(二)從實驗結果中可以發現蠟滴在還沒來得及凝固前，保持高溫液體狀態，當它擴散時，蠟油碰撞到紙張的外緣，形成鋸齒狀向外噴射且先凝固，但因蠟滴中間的溫度尚未降溫，所以動能讓它繼續向外擴散而補滿了鋸齒的空缺成為平滑的外緣，外緣的蠟油凝固後接著蠟油繼續向圓心凝固，所以我們可以發現好像蠟油向內縮的情形。

(三)在高度較高時無法看到蠟滴擴散再凝縮的現象，可能是因為蠟滴在空氣中停留時間較長而冷卻，當碰撞到紙面時因擴散面積較大而較快冷卻，無法再向內凝縮。



## 陸、研究結論

- 一、蠟燭燭芯長短會影響蠟油液滴體積大小，燭芯到達一定長度就不再會有蠟油滴落情形。控制燭芯長度，可以控制蠟油液滴體積大小。
- 二、蠟油從越高的高度滴落到固體紙面，蠟油展開面積越大。但是到達臨界高度，因為能量夠大，開始噴濺，蠟油液滴會在原地振動，造成展開面積忽大忽小不規則變化。
- 三、蠟油從相同的高度滴落到不同性質固體紙面，接觸面顆粒越粗糙，碰撞時造成空氣振動越劇烈，蠟油液滴碰撞後，會產生明顯噴濺，無法形成圓形的展開形狀。塗有奈米水晶膜的玻璃，因為疏水性明顯，接觸角大，所以展開面積最小。
- 四、蠟油從越高的高度滴落到靜止淺水面，蠟油展開面積越大。但是到達臨界高度，因為能量夠大，開始產生瑞立噴束，中間有突出狀。蠟油落水中對水產生振動波，使蠟油向四周展開面積逐漸增大，到末端裂開成花瓣狀。
- 五、固定聲波振動頻率造成共振水波（法拉第波），使得蠟油產生不同幾何形狀。當高度越低，蠟油液滴碰撞時速度越慢，衝撞力道最小，形成空氣墊讓蠟油液滴保留因表面張力而形成接近圓球狀蠟珠。
- 六、高速攝影下的蠟滴碰撞變化，可以呈現有趣的蠟滴縮放變化。開始滴下時是球狀凝聚成一個圓球，接觸堅硬表面時直接往外擴散，不像影片中的水滴，先在表面彈跳幾次再擴散。

## 柒、參考資料

- 一、<http://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/jp106899k>, THE JOURNAL OF PHYSICAL CHEMISTRY, Persisting Water Droplets on Water Surfaces。
- 二、<http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.langmuir.6b02750>, The Role of Liquid Properties on Lifetime of Levitated Droplets
- 三、蔣儀宣、朱鳳華、徐悅聲，2012年臺灣國際科學展覽會物理科，與波共舞的飄浮水滴。
- 四、陳姵蓉、謝文娟，臺灣國際科展2007年物理科，「液」滴活泉-探討液滴與液面的碰撞與振盪。
- 五、楊志文、徐英庭、蘇巧慈、倪柏揚，全國中小學科展第47屆高中物理科，當我們撞在一起~液滴碰撞。
- 六、黃靖淳、張雯菁、許毓茜，全國中小學科展第49屆國中物理科，會漂浮的水滴。
- 七、許喆媛、呂汶諺、侯宜伶，全國中小學科展第54屆國中物理科，水舞-水滴在薄層液上的噴濺性。
- 八、液滴飛濺的秘密：十倍強的風，<http://news.nwpu.edu.cn/info/1010/46986.htm>。
- 九、物理馬戲團I，沃克，葉偉文，天下文化。
- 十、<http://ame.nd.edu/research/research-images/particle-collision-in-a-complex-fluid-is-mainly-affected-by-shear-thinning-behavior-of-the-matrix-liquid-rather-than-its-viscoelasticity>。
- 十一、法拉第波，[https://en.wikipedia.org/wiki/Faraday\\_wave](https://en.wikipedia.org/wiki/Faraday_wave)。