

# 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

佳作

030113

液滴受震波驅使而產生向上爬坡行為之物理機制探討

學校名稱：臺中市立大雅國民中學

作者：	指導老師：
國二 李羿寰	鐘文生
國二 呂佳縈	
國二 楊晨	

關鍵詞：液滴、震動、向上爬坡

# 液滴受震波驅使而產生向上爬坡行為之物理機制探討

## 摘要

我們研究的主要內容是研究液滴處在激烈震動的傾斜板子上時，為何會產生向上爬坡的現象？我們發現水滴大小、頻率、振幅、液滴成份、板子與液滴之間的附著力、爬坡角度與水滴形變等，對液滴爬坡速率皆有影響。我們試著改變板子的傾斜角度，水滴最大的爬坡角度可達 43 度角。液滴之所以會爬坡，主要是因為震動使其形狀產生變化，受到板子附著力及水滴表面張力兩者的拉扯，加上重力與慣性的影響，水滴會先形成突起的柱狀體，之後柱狀體會往高處移動，因此帶動了水滴的爬坡效果，以上是利用高速攝影技術所觀測的結果。我們亦利用木板、壓克力板與橡皮筋來製作一個模擬水滴可爬坡的裝置，結果顯示，壓克力板會因為橡皮筋的拉扯而產生向高處移動的效果。

## 壹、研究動機

話說電影<<神鬼奇航：幽靈海>>中，當船長傑克接近不老泉時，赫然發現一顆水滴在葉子表面正不斷的向上爬坡。在現實中，自然界真有水滴會如電影情節一樣的向上爬坡嗎？這樣的疑問一直烙印在自己的腦海中。

後來有機會參與校內科展研究，期間常上網觀摩一些歷屆的優秀作品，赫然發現有件作品真有如電影情節一樣---力爭向上的水滴<<作者：鄧奉芸等著>><1>，仔細研讀該篇文章，我們發現該篇作品有些缺點，例如：

- 1、架設器材方式會造成板子振幅與頻率的衰減，頻率產生器與板子的震動頻率是會不一樣的，該篇作品並沒有說明。
- 2、水滴的震動瞬間的形變照片極為不清楚。
- 3、水滴的質量並沒有仔細控制。
- 4、該篇作品認為水滴的爬升速率最大值會隨板子的重量增加而一直在降低，我們認為這是振幅的問題，但該作品並無探討。

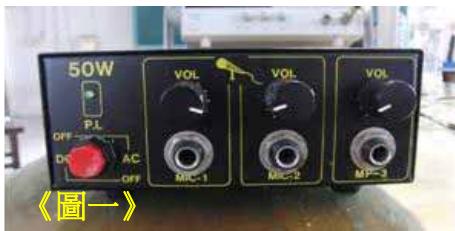
我們認為，如果可以改進實驗裝置，一定可以做得更好。但是，”想” 是很容易，”做”起來很難，為了製造出一個可以使水滴爬坡的實驗裝置，我們努力了半年，但我們不氣餒，我們的實驗裝置變得更簡單，解決了「板子震動頻率」與「頻率產生器輸出頻率」兩者差異的問題，而且水滴爬坡效果一樣好，雖然我們的實驗成果並不多，但我們對自己的表現仍深受感動。

## 貳、研究目的

- 1、架設與改良可使水滴向上爬坡的實驗裝置。
- 2、找出可使水滴快速向上爬坡的條件。
- 3、針對各種液體與固體進行實驗，探討哪些狀況可向上爬坡？
- 4、找出水滴向上爬坡的物理機制。
- 5、針對爬坡液滴進行拍攝，了解液滴形變與爬坡的關聯。

## 參、研究設備與器材

- 一、訊號擴大器。〈如圖一〉
- 二、微量滴管,(單位： $\mu\text{l}$ )。〈如圖二〉
- 三、喇叭。〈如圖三〉
- 四、訊號產生器。〈如圖四〉
- 五、塑膠中空板，板子長度為24.7 cm、寬度為9.5 cm，重量為25.8公克重。
- 六、Casio EX-FH20 攝影機，可高速拍照，拍照模式最快每秒40張照片。亦可高速攝影，最快達每秒拍攝1000張照片。〈如圖五〉
- 七、實驗裝置全圖。〈如圖六、七、八〉



《圖一》



《圖二》



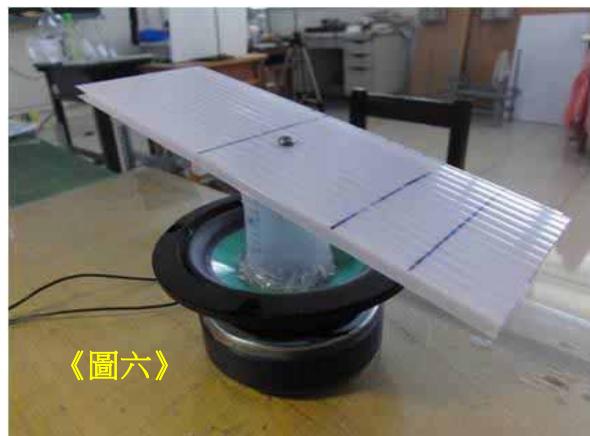
《圖三》



《圖四》



《圖五》



《圖六》



《圖七》



《圖八》

## 肆、實驗步驟與方法

### 一、文獻探討：

#### (一)第48屆全國科展作品-力爭向上的水滴，作者：鄧奉芸等著。

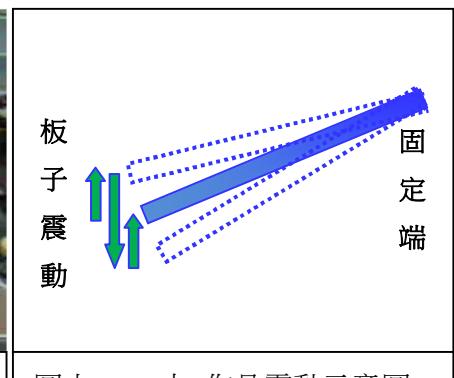
該篇作品是利用板子一端震動的方式，使得板子上的水滴產生爬坡的現象，該篇作者認為板子的震動頻率、板子的重量、板子的表面性質、水滴大小與水滴成份等都會影響水滴向上爬坡的效果。該研究亦有針對水滴向上爬坡時的形變進行攝影，但並不清晰。

#### (二)我們的研究與<力爭向上的水滴>作品的差異：

##### 1、實驗裝置不同：

如圖九~十一，<力爭向上的水滴>的作品是採用一端固定一端震動的方式，其振幅明顯是左邊大、右邊小，振幅不固定，該篇作品並沒有加以討論及校正。我們有根據該篇作品的裝置進行製作與實驗，發現板子會產生波浪狀之形變，這是板子在震動過程中受到一定擠壓所造成的。

而我們的裝置如圖十二~十三，震動方式是垂直向上及向下，則板子左邊與右邊的振幅就會相同。



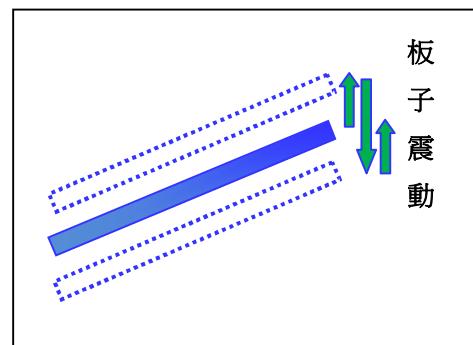
圖九、摘自<力爭向上的水滴>

圖十、摘自<力爭向上的水滴>

圖十一、<力>作品震動示意圖。



圖十二、我們的作品實際裝置圖。



圖十三、我們的作品震動示意圖。

## **2、板子震動頻率的問題：**

<力爭向上的水滴>的作品是採用一端固定一端震動的方式，會壓制到喇叭的震動力道，而使板子的震動頻率與振幅不穩定，甚至造成頻率產生器所輸出的頻率與板子震動的頻率不同，會產生巨大差異。該篇作品並沒有加以討論與校正。

而我們的實驗裝置，經過我們高速攝影觀察之後，仔細計算板子的震動頻率，發現與頻率產生器所輸出的頻率仍不相同，但是我們利用實驗一來探討這個問題並找出了實際的震動頻率。請參考實驗一。

## **3、板子振幅的問題：**

實驗過程中，我們發現<力爭向上的水滴>的作品中，並沒有探討振幅的問題，而且我們也發現，當喇叭的震動頻率越大，其振幅會縮小，所以當我們增加震動頻率時，其實振幅是跟著在變小，這樣同時會有兩種變因在影響水滴的爬坡，但這方面的問題，在<力爭向上的水滴>的作品中並沒有說明與探討。因而我們利用高速攝影的方式，進行討論：板子震動頻率與板子振幅的關係，因此我們的實驗方式可以改進這個缺失，如實驗一。

## **4、我們的實驗裝置更方便簡單，爬坡效果一樣好：**

我們的實驗裝置可以輕易變換不同的傾斜角，也可以容易變換板子表面材質作為水滴的爬坡面。在<力爭向上的水滴>的作品中有說，板子的重量將影響水滴的爬坡速率，而我們的想法是，這是因為喇叭輸出能量的關係，當你的板子越重，則板子受到壓迫的關係而越震不起來，影響水滴的爬坡效果，而該篇文章都沒有注意探討這方面的問題。而我們的研究將採用不同的方式來改變板子表面的材質，卻不會增加板子的重量，這樣的實驗控制才是正確的。

## **5、使用高速攝影機：**

我們通篇作品，都隨時進行攝影，來得到實際的板子頻率與振幅大小值，這在實驗誤差上的控制將非常重要。

## **6、使用微量滴管來滴出水滴：**

在<力爭向上的水滴>的作品中，只使用一般的滴管來滴出水滴，水滴的體積在誤差上將會比較大。我們看出這個問題，購買一支微量滴管，水滴體積方面的控制將更為精準。

## 7、我們探討水滴的震動頻率是否與板子震動頻率同步：

在<力爭向上的水滴>的作品中，並沒有這方面的探討與說明，這在實驗原理方面的說明將會不夠充分。我們使用高速攝影，來觀察水滴的震動與板子的震動，可以仔細了解這方面的問題。

## 8、我們的水滴爬坡角度更大：

在<力爭向上的水滴>的作品中，並沒有探討爬坡角度這方面的問題，我們希望能夠針對水滴的爬坡角度進行討論。根據我們的實驗，傾斜角度越大，下滑力愈大，可爬坡的水滴愈小，我們認為找出最大爬坡角度十分重要，因為這代表著水滴爬坡的傾斜極限。而相對於<力爭向上的水滴>的實驗裝置，我們的更容易改變角度，也能調整出更大的傾斜角度。

## 9、拍出更清楚詳細的水滴爬坡圖形：

我們利用拍照模式(1秒40張)，可以清楚的看到水滴的形變變化，也利用高速攝影(1秒1000張)的技巧，來拍出更精準更漂亮的水滴爬坡圖形。這非常重要，因為這可以讓我們深入了解水滴的爬坡機制原理。但在<力爭向上的水滴>的作品中所拍到的照片，不夠清楚且水滴畫面較小。我們期望能改進這個缺點。

## 10、探討更多種液體或固體物質處在傾斜板子上時，是否有產生向上爬坡的效果？

我們探討不同比例的非牛頓液體、灑一群亮粉以及單顆固體橡皮擦等物質處在震動傾斜的板子上時，是否會產生爬坡的效果，這將在實驗八進行探討。

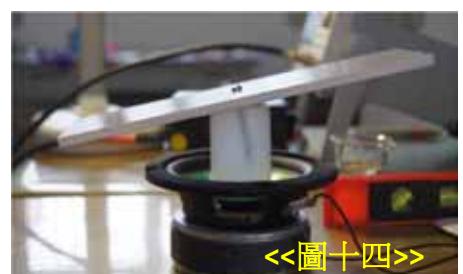
## 11、水滴內部加入螢光物質，拍出水滴爬坡過程中，內部是否產生流動：

在<力爭向上的水滴>的作品中，並沒有這方面的探討與說明，但我們認為這十分重要，可以讓我們更了解水滴的爬坡機制原理。將在實驗九進行探討。

## 二、實驗方法：

### (一)實驗一、架設與改良實驗器材：

- 1、至電子材料行購買擴大器、頻率產生器、喇叭等器材。
- 2、至五金行、大賣場購買水平儀、碼表與塑膠中空板。
- 3、透過學校採買 Casio Ex-Fh20 照相機與微量滴管。
- 4、經過多種方式的架設，決定採用如右<圖十四>的方式，此方式的優點有：
  - (1)、板子輕。
  - (2)、架設更簡單，可以隨時改變板子的傾斜角度。
  - (3)、整塊板子的振幅相同，經過高速攝影，我們可以測得板子的振幅大小。
  - (4)、我們的板子震動方式為整塊垂直向上，其上方的水滴仍會向上爬坡。



<<圖十四>>

- 5、測定板子的振動頻率與振幅大小。
- 6、分析頻率產生器的輸出頻率大小與板子實際震動頻率的關係。因為我們假設：「頻率產生器的輸出頻率」與「板子實際震動頻率」兩者並不會相同。
- 7、分析板子的震動頻率與板子振幅的關係。因為我們假設：板子震動越快，喇吧輸出至板子的振幅會縮小。

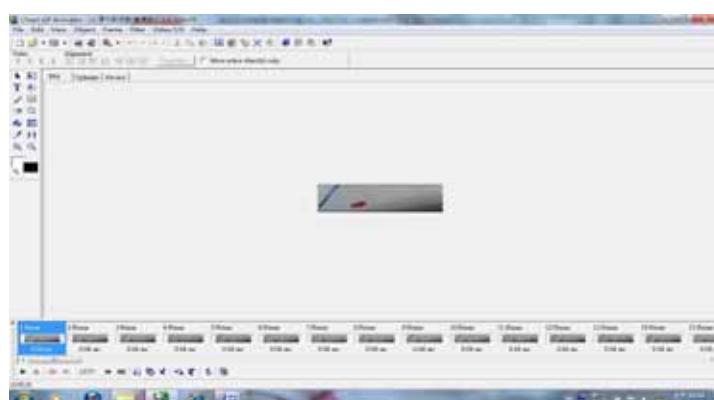
## (二) 實驗二～六的實驗方法如下

- 1、架設如圖十四的實驗器材，板子傾斜角為 12 度。
  - 2、在板子上設立一條線，定為 0cm，即水滴的起始線。
  - 3、設定控制變因，將水滴滴在起始線。
  - 4、啟動喇吧震動，測量水滴的爬升距離與時間，並紀錄下來。
  - 5、爬升距離為：向上爬坡的水滴與 0cm 的垂直距離。
  - 6、改變操縱變因，並重複步驟 3~5。
- (1) 實驗二：設定相同頻率與相同的振幅，改變水滴大小，測量水滴爬坡速率。
- (2) 實驗三：設定相同的振幅，採用相同質量的水滴(體積為  $2.5 \mu l$ )，改變輸出頻率，測量水滴爬坡速率。
- (3) 實驗四：設定板子的實際爬坡頻率，使用高速攝影機拍攝水滴爬坡的形變畫面。測量板子的震動頻率與水滴的形變頻率。
- (4) 實驗五：設定相同頻率與相同的振幅，改變板子傾斜角為 0 度、12 度、37 度、43 度、44 度，測量水滴爬坡速率。
- (5) 實驗六：設定相同的振幅、頻率(58Hz)，採用相同質量的水滴(體積為  $2.5 \mu l$ )，改變液滴成份：蒸餾水、飽和食鹽水、稀釋酒精(16.7%)，測量水滴爬坡速率。

7、統整數據與分析數據。

## (三) 實驗七～九的實驗方法如下：

- 1、架設如圖十四的實驗器材，板子傾斜角為 12 度。
  - 2、設定控制變因和操縱變因。
  - 3、啟動喇吧震動，利用照相機 1/40 秒拍照模式和 1/1000 秒高速攝影拍攝。
  - 4、利用 Ulead GIF Animator 軟體，將影片進行切割，如下圖十五，接著整理照片。
  - 5、觀察形變過程，統整資料。
- (1) 實驗七：設定相同頻率與相同的振幅，將染色過的  $4.0 \mu l$  水滴滴在板子上。
- (2) 實驗八：設定可爬坡的頻率及振幅，放上橡皮擦、亮粉和麵粉團來模擬水滴。
- (3) 實驗九：集中放上亮粉、將水滴滴在亮粉上。觀察亮粉在水滴內部流動的情形。



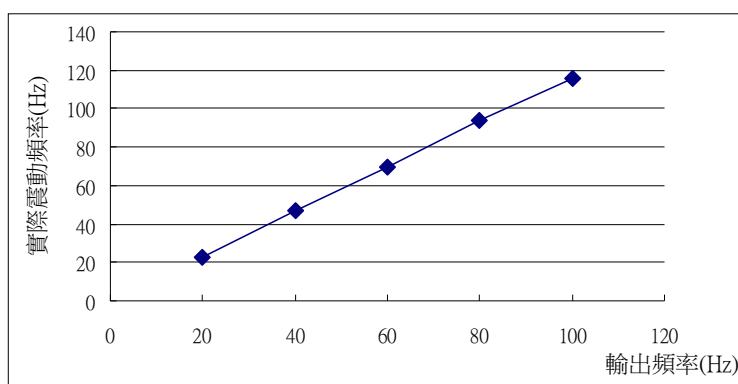
圖十五、Ulead GIF Animator 軟體

## 伍、研究結果

### 一、實驗一：架設與改良實驗器材：

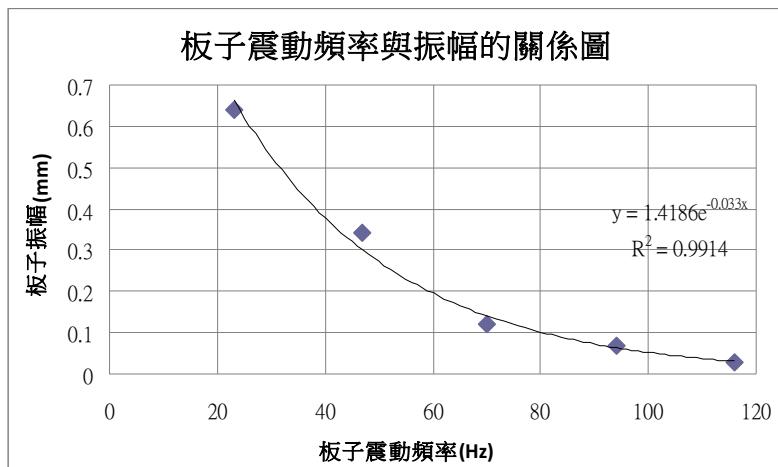
(一)分析「頻率產生器的輸出頻率」與「板子實際震動頻率」的關係

輸出頻率(Hz)	實際震動頻率(Hz)
20	23
40	47
60	70
80	94
100	116



(二)分析板子的震動頻率與板子振幅的關係

實際震動頻率(Hz)	振幅(mm)
23	6.4
47	3.2
70	1.3
94	0.7
116	0.3



## 二、實驗二、水滴大小對爬坡速率的影響

控制變因：頻率約 58Hz、板子斜度 12°、振幅 0.30 cm、波形 □。

操縱變因：改變水滴大小，分別為  $2.0\mu l$ 、 $2.5\mu l$ 、 $3.0\mu l$ 、 $4.0\mu l$ 、 $5.5\mu l$ 。

### 1、水滴體積為 $2.0\mu l$

水滴大小	$2.0\mu l$				
項目	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次
距離(cm)	2.91	2.83	2.75	2.73	2.87
時間(sec)	5.40	5.25	5.19	5.12	5.22
速率(cm/sec)	0.54	0.54	0.53	0.53	0.55

### 2、水滴體積為 $2.5\mu l$

水滴大小	$2.5\mu l$				
項目	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次
距離(cm)	4.09	4.09	4.25	4.16	4.29
時間(sec)	5.25	5.25	5.19	5.31	5.03
速率(cm/sec)	0.78	0.78	0.82	0.78	0.85

### 3、水滴體積為 $3.0\mu l$

水滴大小	$3.0\mu l$				
項目	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次
距離(cm)	3.83	3.78	3.67	3.78	3.79
時間(sec)	5.25	5.25	5.06	5.25	5.19
速率(cm/sec)	0.73	0.72	0.73	0.72	0.73

### 4、水滴體積為 $4.0\mu l$

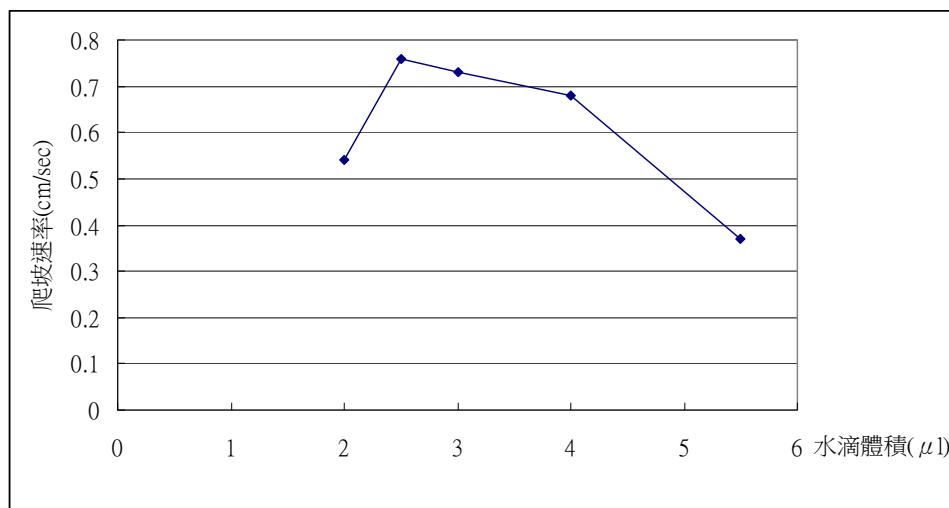
水滴大小	$4.0\mu l$				
項目	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次
距離(cm)	3.51	3.62	3.55	3.69	3.54
時間(sec)	5.13	5.41	5.41	5.37	5.06
速率(cm/sec)	0.68	0.67	0.66	0.69	0.70

### 5、水滴體積為 $5.5\mu l$

水滴大小	$5.5\mu l$				
項目	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次
距離(cm)	2.04	1.96	1.91	1.97	1.93
時間(sec)	5.63	5.28	5.28	4.94	5.29
速率(cm/sec)	0.36	0.37	0.36	0.40	0.36

實驗數據統整：

水滴大小( $\mu l$ )	2.0	2.5	3.0	4.0	5.5
平均速率(cm/sec)	0.54	0.80	0.73	0.68	0.37



### 三、實驗三、板子震動頻率對爬坡速率的影響

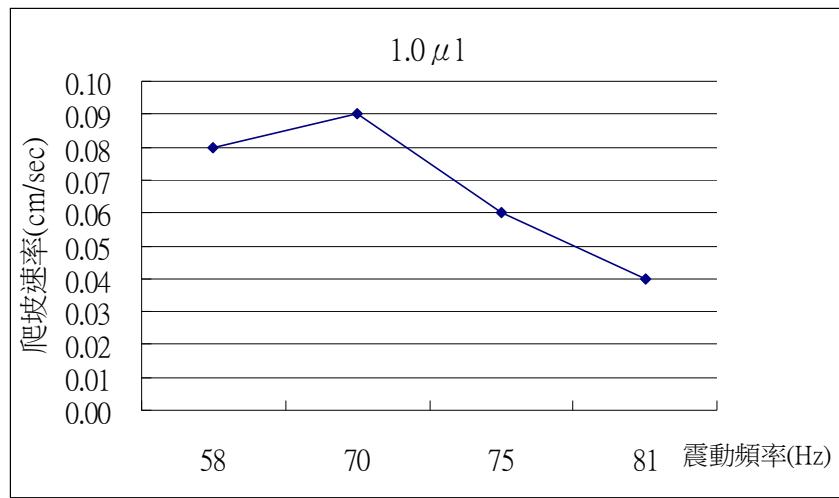
#### 一、水滴體積為 $1.0 \mu l$ ：

控制變因：水滴大小  $2.5 \mu l$ 、板子斜度  $12^\circ$ 、波形  $\sim$ 。

頻率	水滴	1.0 $\mu l$				
		項目	1	2	3	4
58Hz	距離	0.32	0.36	0.48	0.49	0.43
	時間	5.24	5.13	5.24	5.06	5.24
	速率	0.06	0.07	0.09	0.10	0.08
70Hz	距離	0.48	0.43	0.52	0.44	0.48
	時間	5.13	5.03	5.12	5.12	5.03
	速率	0.09	0.09	0.10	0.09	0.10
75Hz	距離	0.32	0.38	0.29	0.31	0.29
	時間	5.10	5.12	5.12	5.00	5.29
	速率	0.06	0.07	0.06	0.06	0.05
81Hz	距離	0.24	0.21	0.22	0.23	0.18
	時間	5.13	5.14	5.06	5.06	5.13
	速率	0.05	0.04	0.04	0.05	0.04

實驗數據統整：

震動頻率 Hz	58	70	75	81
平均速率(cm/sec)	0.08	0.09	0.06	0.04



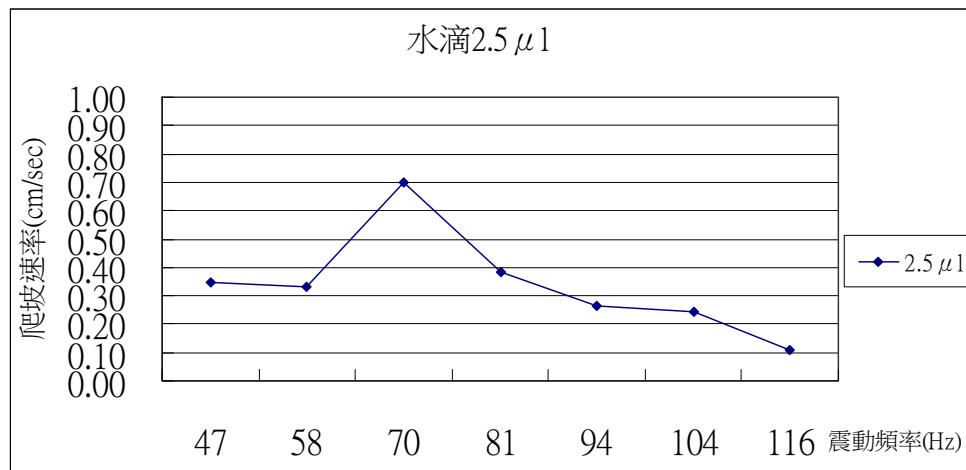
## 二、水滴體積為 $2.5 \mu\text{l}$ :

控制變因：水滴大小  $2.5 \mu\text{l}$ 、板子斜度  $12^\circ$ 、波形  $\sim$ 。

頻率	水滴體積	$2.5 \mu\text{l}$				
		項目	第1次	第2次	第3次	第4次
47Hz	距離(cm)	2.02	1.98	1.62	1.89	1.62
	時間(sec)	5.25	5.25	5.25	5.25	5.22
	速率(cm/sec)	0.38	0.38	0.31	0.36	0.31
58Hz	距離(cm)	1.55	1.56	1.79	1.91	1.84
	時間(sec)	5.06	5.13	5.41	5.16	5.44
	速率(cm/sec)	0.31	0.30	0.33	0.37	0.34
70Hz	距離(cm)	3.71	3.51	3.56	3.68	3.69
	時間(sec)	5.37	5.07	5.06	5.34	5.13
	速率(cm/sec)	0.69	0.69	0.70	0.69	0.72
81Hz	距離(cm)	1.97	2.25	1.82	1.82	2.23
	時間(sec)	5.22	5.35	5.25	5.28	5.31
	速率(cm/sec)	0.38	0.42	0.35	0.34	0.42
94Hz	距離(cm)	1.22	1.25	1.42	1.57	1.5
	時間(sec)	5.28	5.44	5.25	5.25	5.28
	速率(cm/sec)	0.23	0.23	0.27	0.30	0.28
104Hz	距離(cm)	1.24	1.32	1.23	1.39	1.32
	時間(sec)	5.28	5.28	5.28	5.32	5.31
	速率(cm/sec)	0.23	0.25	0.23	0.26	0.25
116Hz	距離(cm)	0.62	0.81	0.78	0.29	0.35
	時間(sec)	5.28	5.28	5.50	5.38	5.29
	速率(cm/sec)	0.12	0.15	0.14	0.05	0.07

### 實驗數據統整：

震動頻率(Hz)	47	58	70	81	94	104	116
平均速率(cm/sec)	0.35	0.33	0.70	0.38	0.26	0.25	0.11



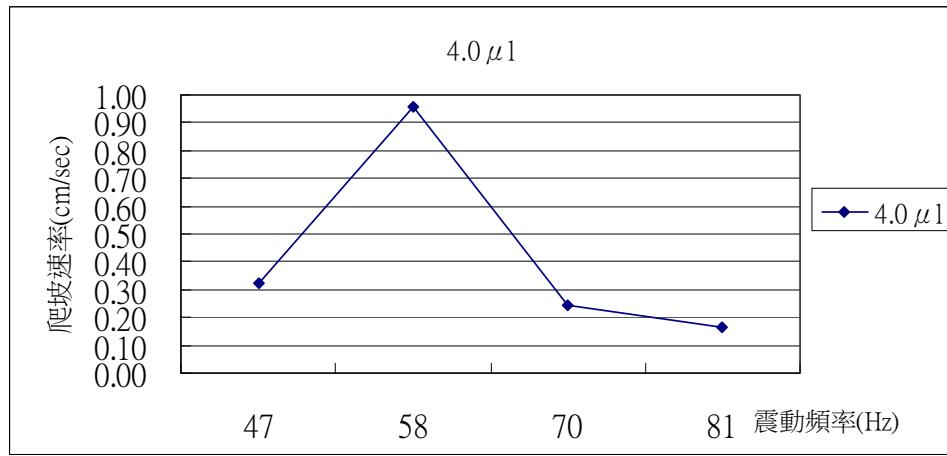
### 三、水滴體積為 $4.0\mu l$ ：

控制變因：水滴大小  $4.0\mu l$ 、板子斜度  $12^\circ$ 、波形  $\sim$ 。

頻率	水滴	$4.0\mu l$				
	項目	第1次	第2次	第3次	第4次	第5次
47Hz	距離(cm)	1.75	1.61	1.69	1.64	1.52
	時間(sec)	5.15	5.15	5.00	5.16	5.16
	速率(cm/sec)	0.34	0.31	0.34	0.32	0.29
58Hz	距離(cm)	4.89	4.81	5.05	5.21	4.55
	時間(sec)	5.28	5.28	4.93	4.93	5.25
	速率(cm/sec)	0.93	0.91	1.02	1.06	0.87
70Hz	距離(cm)	1.29	1.19	1.39	1.21	1.33
	時間(sec)	5.28	5.25	5.34	5.16	5.16
	速率(cm/sec)	0.24	0.23	0.26	0.23	0.26
81Hz	距離(cm)	0.85	0.92	0.88	0.91	0.78
	時間(sec)	5.10	5.17	5.06	5.32	5.75
	速率(cm/sec)	0.17	0.18	0.17	0.17	0.14

### 實驗數據統整：

震動頻率(Hz)	47	58	70	81
平均速率(cm/sec)	0.32	0.96	0.24	0.17



#### 四、實驗四、探討板子的震動頻率與水滴形變頻率的關係(會爬坡的水滴)

控制變因：頻率 58Hz、81Hz、板子斜度 12 度、水滴大小  $4.0 \mu l$ 、波形 ~。

	板子震動頻率(Hz)	水滴形變的頻率(Hz)
次數(一)	58	58
次數(二)	58	58
次數(三)	58	58

	板子震動頻率(Hz)	水滴形變的頻率(Hz)
次數(一)	81	81
次數(二)	81	81
次數(三)	81	81

#### 五、實驗五、探討水滴最大的爬坡角度為何

控制變因：頻率 81Hz、水滴體積  $1.5 \mu l$ 、波形 ~。

操縱變因：改變板子斜度，分別為 0 度、12 度、37 度、43 度。

次數 爬坡角度	第 1 次 (cm/sec)	第 2 次 (cm/sec)	第 3 次 (cm/sec)	平均速率 (cm/sec)
0 度	0	0	0	0
12 度	0.47	0.50	0.48	0.48
37 度	0.34	0.33	0.34	0.34
43 度	0.12	0.13	0.14	0.13

現象觀察：

- (1) **板子呈水平(0度)**：不管水滴的體積大小，都不會有爬坡效果。
- (2) **板子傾斜12度**：水滴體積 $1.0 \mu l$ 到 $5.5 \mu l$ 為可以爬坡的範圍，以 $2.5 \mu l$ 水滴的爬坡最快。
- (3) **板子傾斜37度**：水滴體積 $1.0 \mu l$ 到 $4.0 \mu l$ 為可以爬坡的範圍，以 $3.0 \mu l$ 水滴的爬坡最快。
- (4) **板子傾斜43度**：水滴體積 $1.0 \mu l$ 與 $1.5 \mu l$ 為可以爬坡的範圍，以 $1.5 \mu l$ 水滴的爬坡最快。

## 六、實驗六、探討不同的液滴成份(表面張力)對爬坡速率的影響

控制變因：水滴大小  $2.5\mu l$ 、 $3.5\mu l$ 、頻率約  $58Hz$ 、板子斜度  $12^\circ$ 、波形 ~。

操縱變因：改變液滴成份，分別為蒸餾水、飽和食鹽水和稀釋酒精。

(一)水滴的體積為  $2.5\mu l$ ：

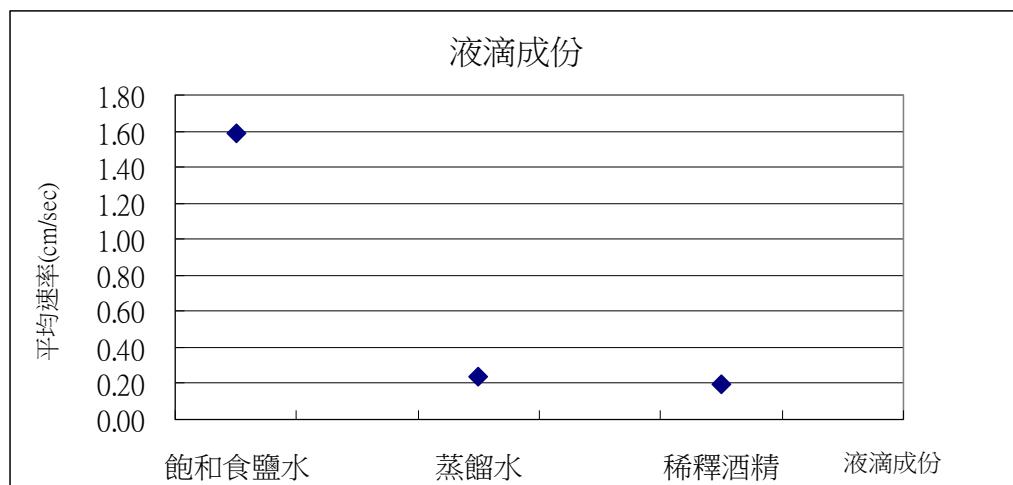
液滴成份	飽和食鹽水				
項目	1	2	3	4	5
距離 (cm)	6.71	6.48	6.79	6.58	6.38
時間 (sec)	4.34	4.06	4.00	4.06	4.34
速率 (cm/sec)	1.55	1.60	1.70	1.62	1.47

液滴成份	蒸餾水				
項目	1	2	3	4	5
距離 (cm)	1.13	1.18	1.18	1.27	1.21
時間 (sec)	5.03	5.03	5.00	5.00	5.10
速率 (cm/sec)	0.22	0.23	0.24	0.25	0.24

液滴成份	稀釋酒精(16.7%)				
項目	1	2	3	4	5
距離 (cm)	1.01	0.98	0.93	1.01	1.06
時間 (sec)	5.32	5.24	5.22	5.13	5.12
速率 (cm/sec)	0.19	0.19	0.18	0.20	0.21

統整：

液滴成份	飽和食鹽水	蒸餾水	稀釋酒精(16.7%)	95%酒精
平均速率 (cm/sec)	1.59	0.24	0.19	散開



(二)水滴的體積為  $3.5\mu l$  :

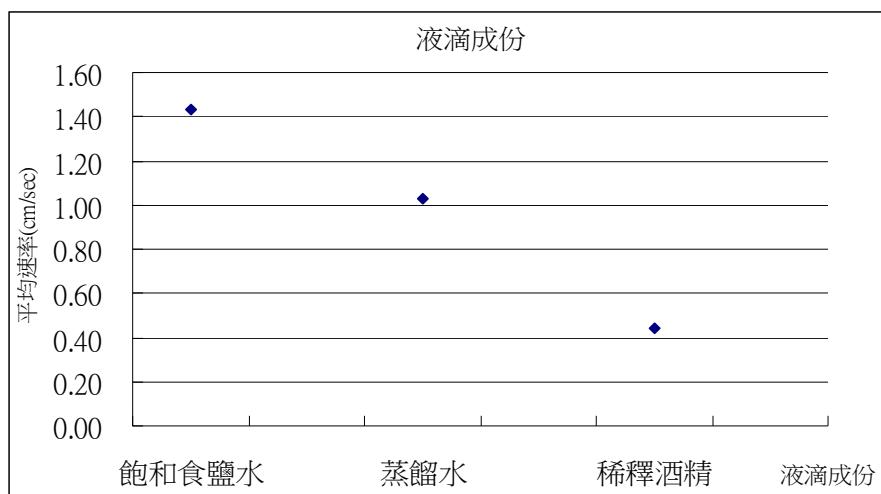
液滴成份	飽和食鹽水		
項目	1	2	3
距離 (cm)	7.21	7.16	7.08
時間 (sec)	5.00	5.00	5.00
速率 (cm/sec)	1.44	1.43	1.42

液滴成份	蒸餾水		
項目	1	2	3
距離 (cm)	5.23	5.41	5.21
時間 (sec)	5.03	5.31	5.03
速率 (cm/sec)	1.04	1.02	1.04

液滴成份	稀釋酒精(16.7%)		
項目	1	2	3
距離 (cm)	2.21	2.28	2.36
時間 (sec)	5.23	5.23	5.09
速率 (cm/sec)	0.42	0.44	0.46

統整：

液滴成份	飽和食鹽水	蒸餾水	稀釋酒精(16.7%)	95%酒精
平均速率 (cm/sec)	1.43	1.03	0.44	散開

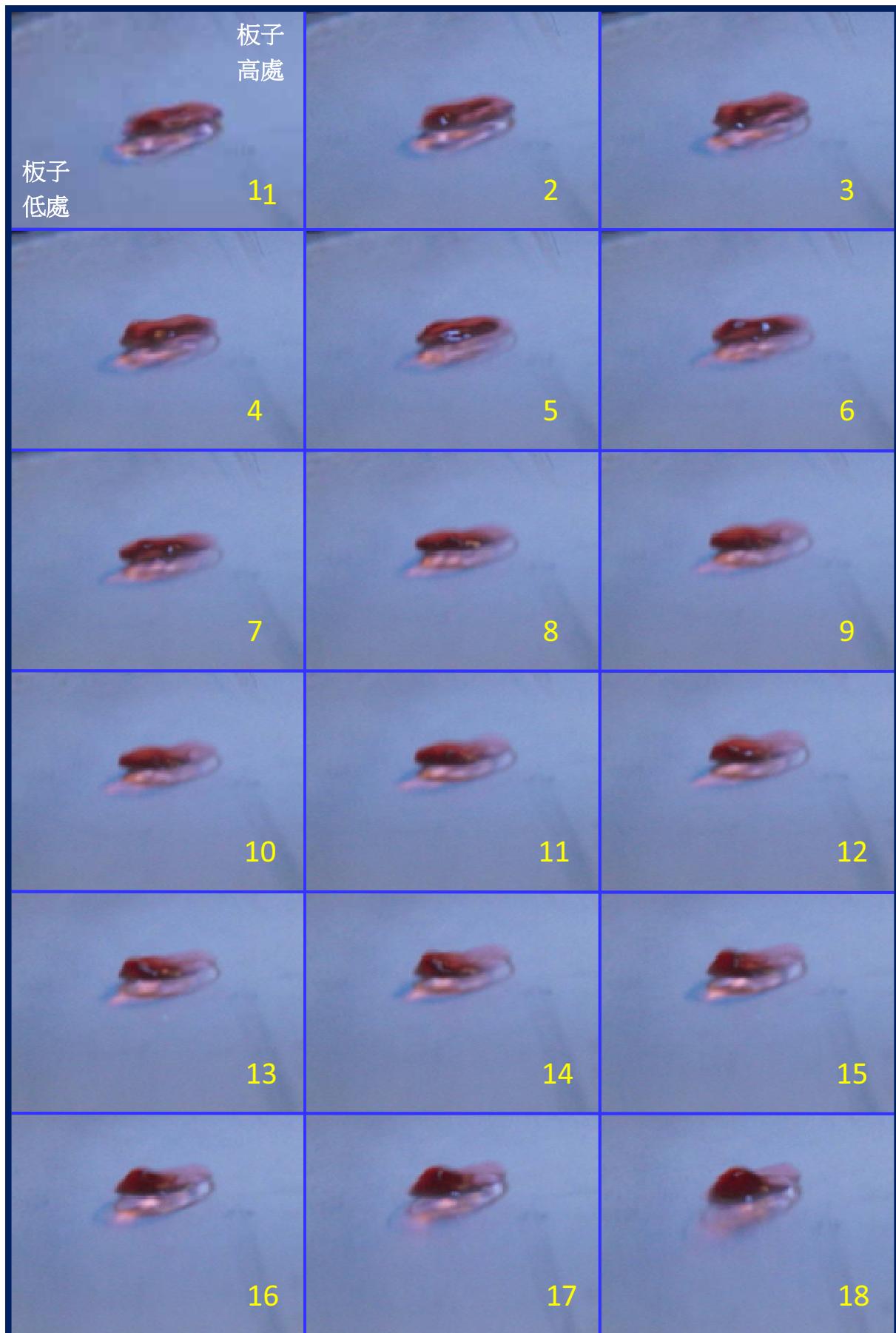


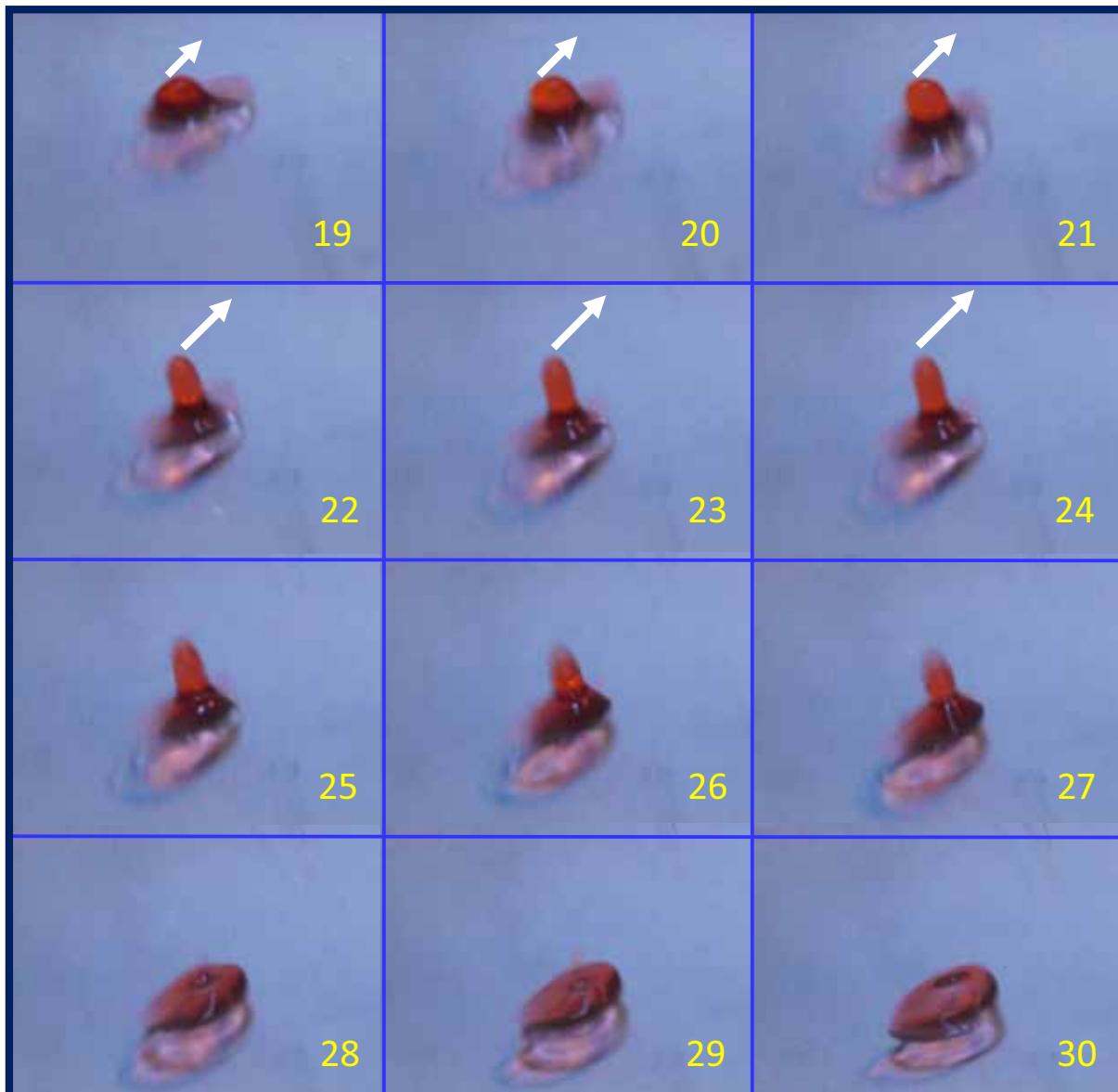
(三)額外觀察：將板子抹油，觀察 95% 酒精在震動的傾斜板子上是否會有爬坡的效果？

我們發現 95% 酒精之所以會散開，是因為 95% 酒精黏附在板子上之附著力過大，加上 95% 酒精本身的表面張力過小之緣故。因此我們藉由降低 95% 酒精黏附在板子上之附著力，來達到讓 95% 酒精能夠成形而不會散開。實驗結果發現，95% 酒精並不會有爬坡的效果。因此，我們假設板子與水滴之間的附著力對水滴的爬坡亦扮演重要的角色。此假設在實驗八獲得證實。

## 七、實驗七、拍攝會爬坡的水滴，觀察其形變

(一)、拍照模式：每張照片的時間間隔為  $1/40$  秒，照片排列為：由左而右，在由上而下。





### 圖片觀察：

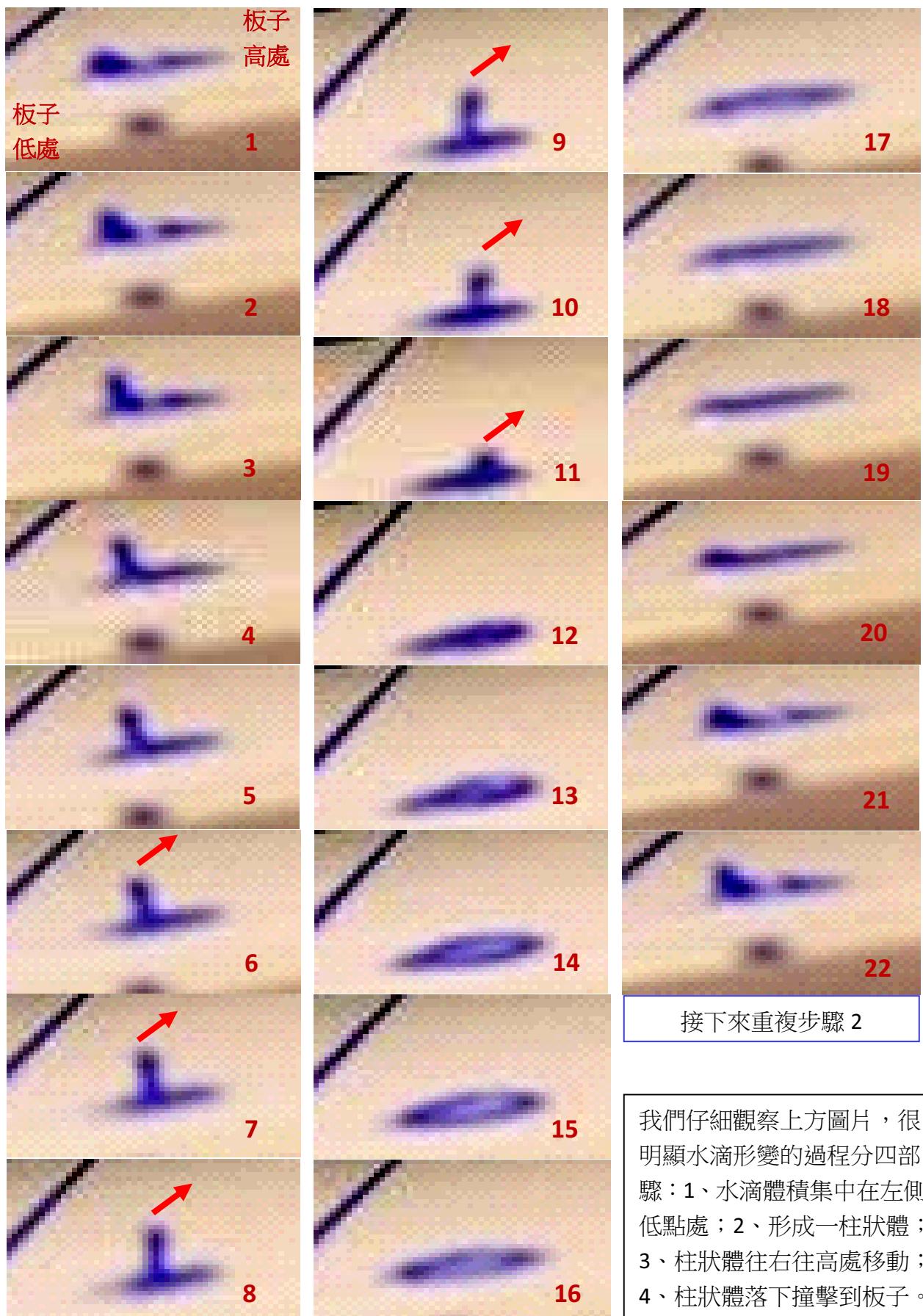
我們假設水滴的形變在水滴的爬坡過程中扮演重要的角色，可能是水滴能夠爬坡的原因之一。因此我們使用高速照相機來紀錄水滴的爬坡狀況。

從照片中我們可以發現，水滴在震動的過程中，當板子向上移動時，水滴體積集中在左側，即傾斜板子較低處。這是合理的，因為左側是低點，受到重力的影響，水滴會往低點移動的趨勢，如上頁圖 7~15。但是，為何沒有一直往低處滑下去呢？而反而是體積集中在左側呢？這主要是附著力的關係，水滴與板子之間會存在著附著力。因此與實驗六一樣，我們仍存在著一個疑問：在水滴爬坡的過程中，附著力是否扮演重要的角色？這個部分，我們在實驗八有詳細的探討。

緊接著，我們檢視圖片。水滴會開始形成隆起的柱狀，如上圖 16~27，仔細觀察照片，這時的板子正處於向下移動的狀態，所以水滴一定是由慣性原理而產生柱狀的形狀。我們亦觀察不同體積的水滴或者板子震動力道較大時，發現有些時候柱狀上會彈出一球狀的小水滴，之後會在落下，不過有趣的是，落下的位置會是落在板子上水滴的前端。

接著我們檢視上圖 25~30，柱狀會落下而撞擊板子，整個水滴呈扁平狀。接下來水滴的形變，會再一次重複上圖 1~30。

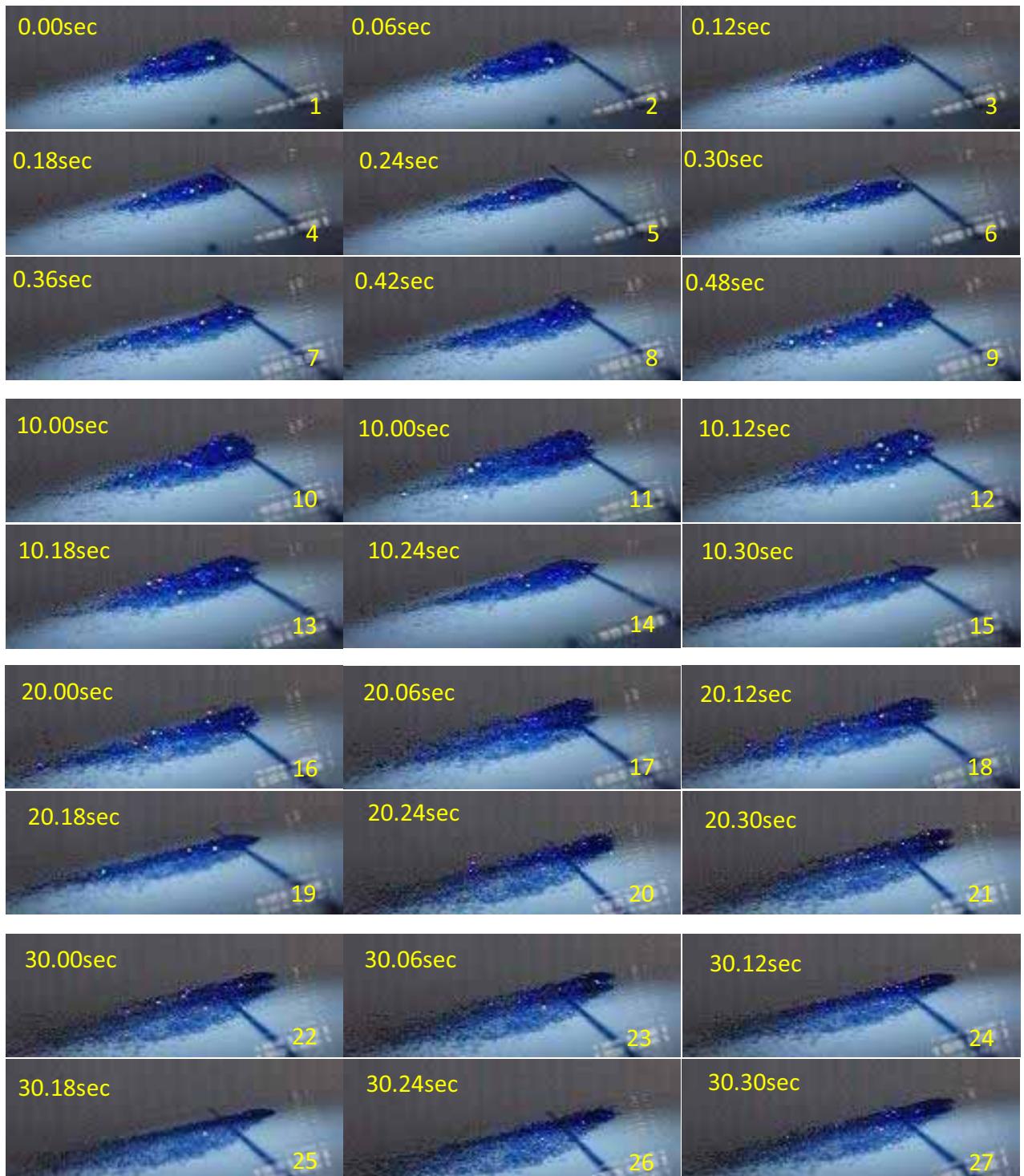
(二)、攝影模式：每張照片的時間間隔為 1 毫秒，照片排列為：由左而右，在由上而下。



## 實驗八、探討「水滴形變」與「水滴與板子之間的附著力」對水滴爬坡的影響？

### (一) 觀察「群體亮粉」處在震動的傾斜坡面上是否會產生爬坡現象？

控制變因：頻率 6 Hz、板子斜度 12 度、波形 ~。



### (二) 實驗照片觀察：

我們觀察亮粉的爬升變化，發現當粉末震起時分成兩個部分：第一、下層亮粉在震後會沿板面朝下四處滑落；第二、上層未和板子接觸的亮粉，因受震動驅使持續向上爬坡，整體散布範圍會像四周圍持續擴大。

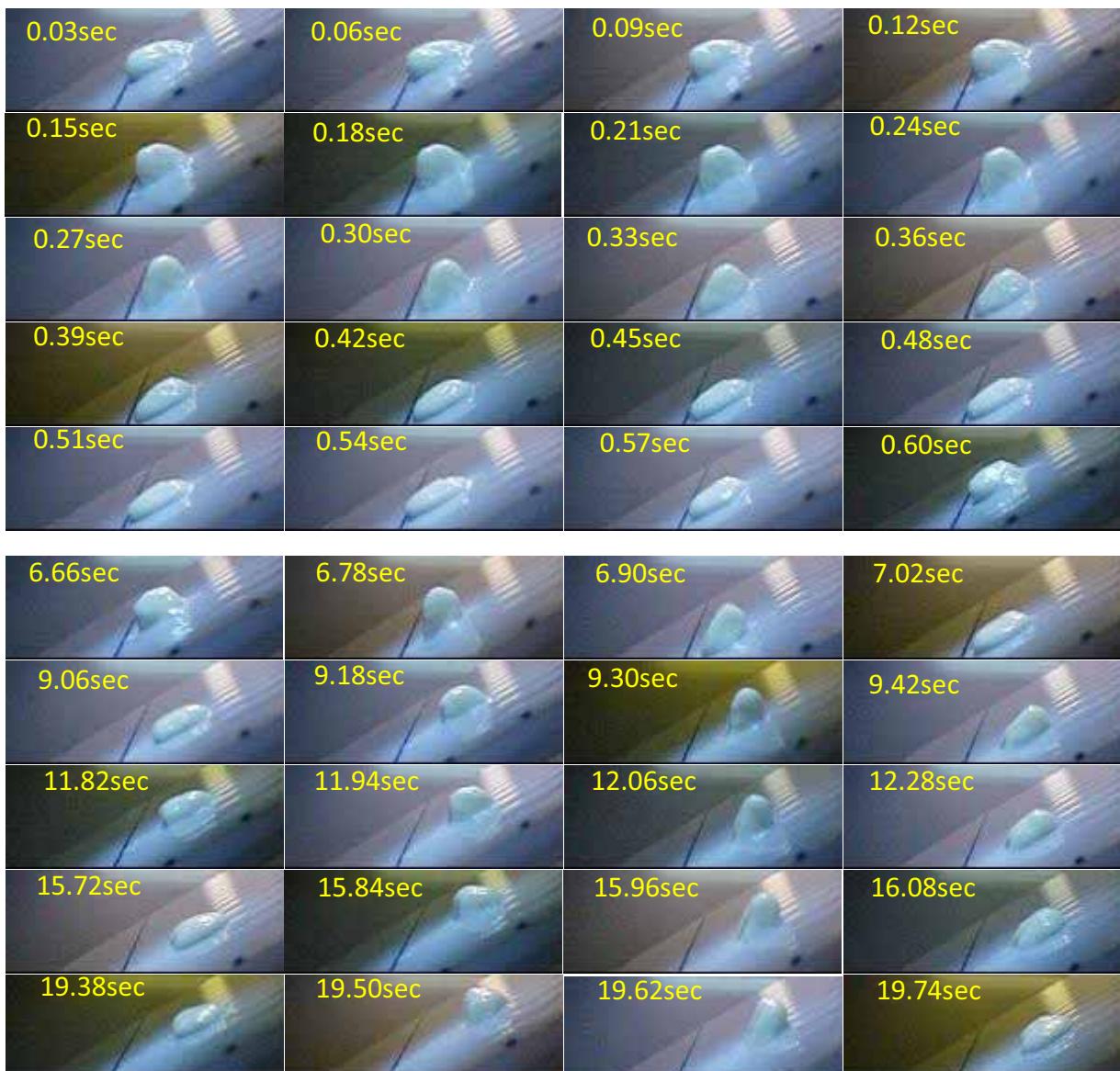
## (二)非牛頓液體處在震動的傾斜坡面上是否會產生爬坡現象？

控制變因：頻率 47Hz、板子斜度 37 度、波形 ~。

### 1、實驗數據：

爬坡速率 麵粉與水的比例	次數 1	次數 2	次數 3	平均 (cm/sec)
2 : 3	0.170	0.192	0.186	0.183
1 : 1	0.134	0.141	0.148	0.141
3 : 2	0.0	0.0	0.0	0.0

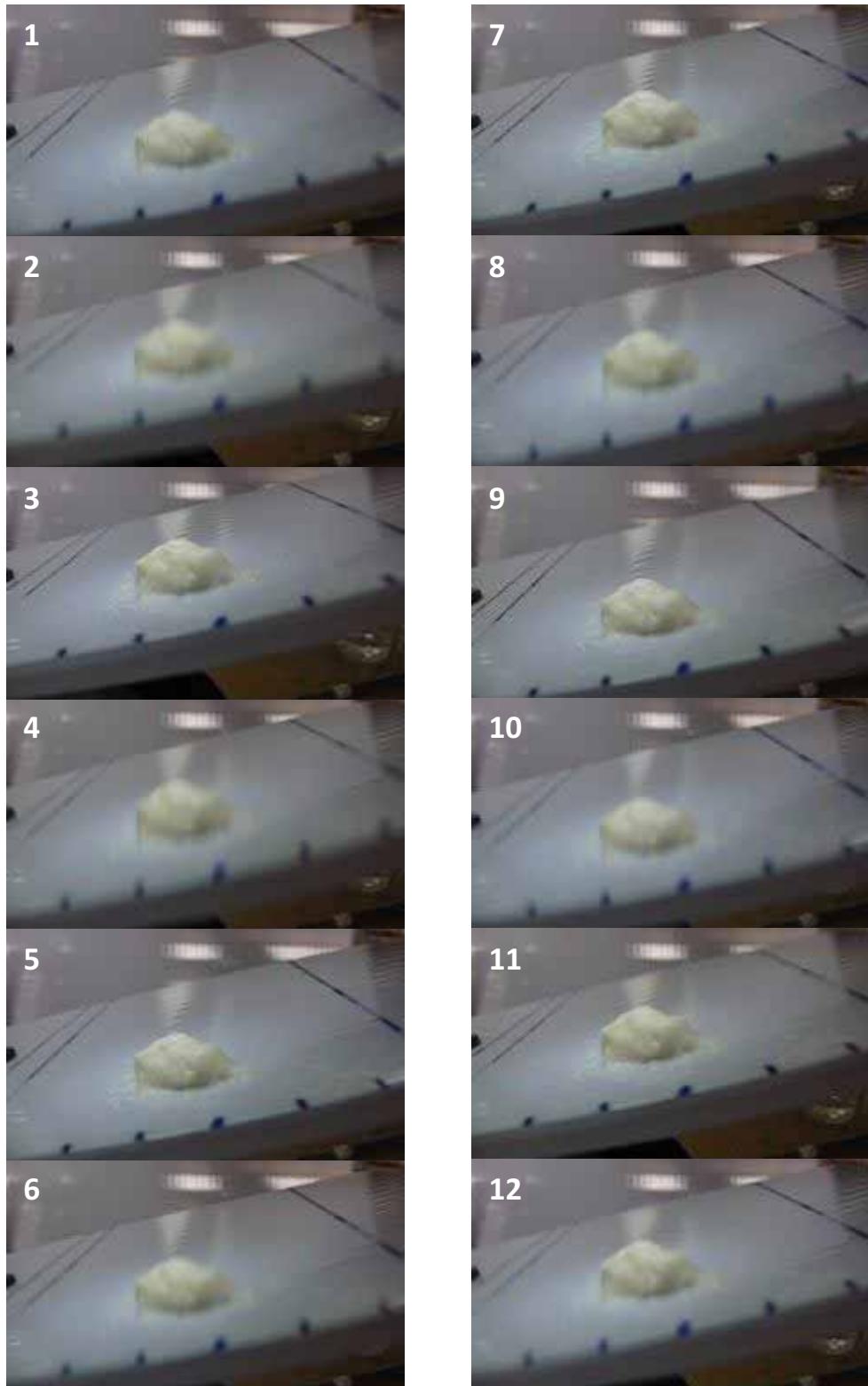
2、麵粉與水的比例為 2 : 3，其爬坡情形如下：



### 3、實驗結果：

此非牛頓液體會有向上爬坡的現象，但是，如果越黏稠，其爬坡速率較慢，當麵粉與水的比例大過於 1 時，皆不會有向上爬坡的效果，但亦不會下滑。我們從高速攝影的照片中可以清楚的知道，較黏稠的非牛頓液體(麵粉與水的比例大於 1 時)並不會產生形變的狀況，此液珠會黏附在板子上而一直不動。如下頁圖形所示。

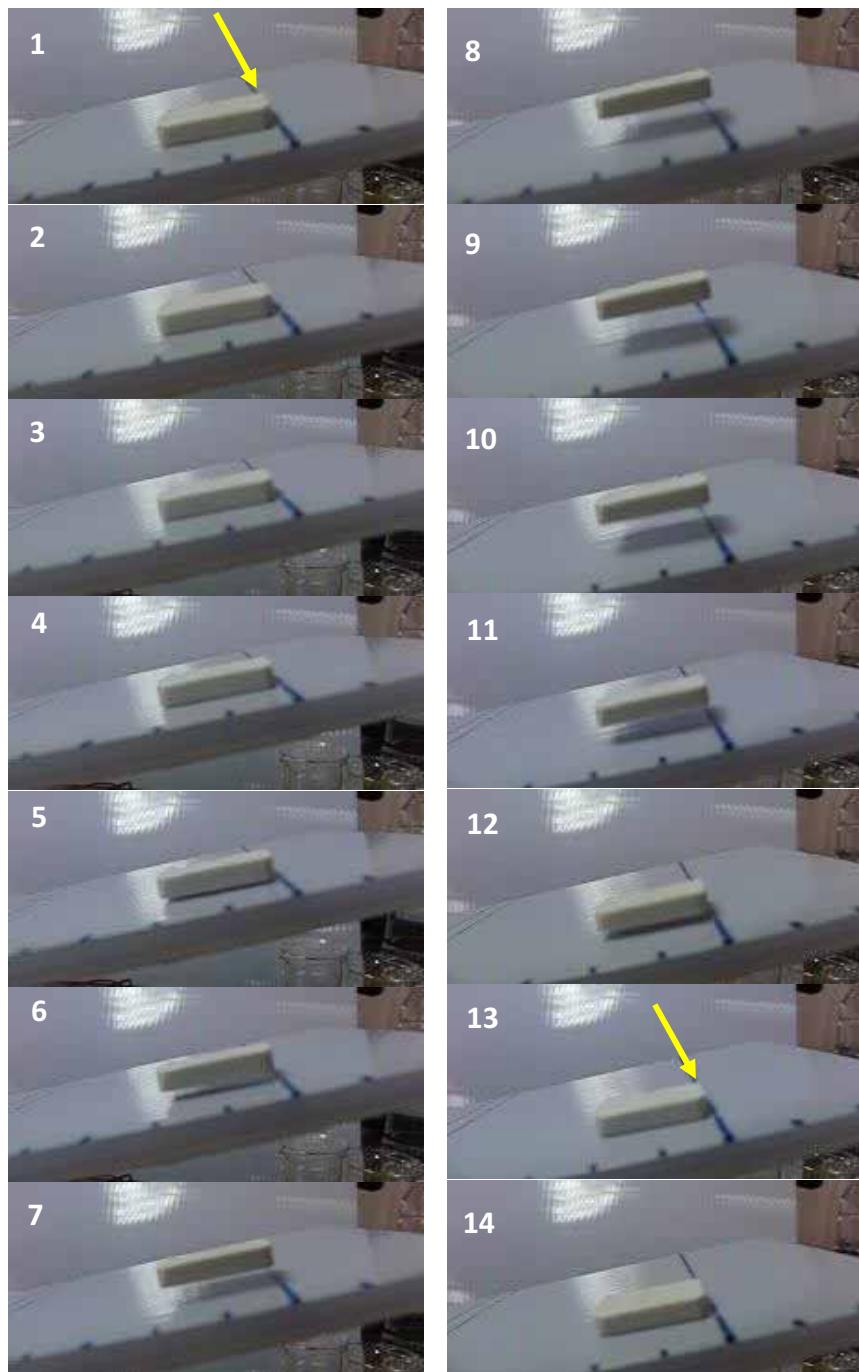
從此實驗可知，即使液滴與板子之間有附著力，但液滴本身黏稠性太高而造成不會形變，因此液滴不會有向上爬坡的效果，因此液滴形變會影響對其本身的爬坡情形，如下圖。



根據此圖，此麵粉與水的比例為 3：2，此液體根本無法產生形變，此液滴一無法產生爬坡的效果。

(三)觀察單一固體(橡皮擦)處在震動的傾斜坡面上是否會產生爬坡現象？

1、實驗照片：



2、實驗結果：

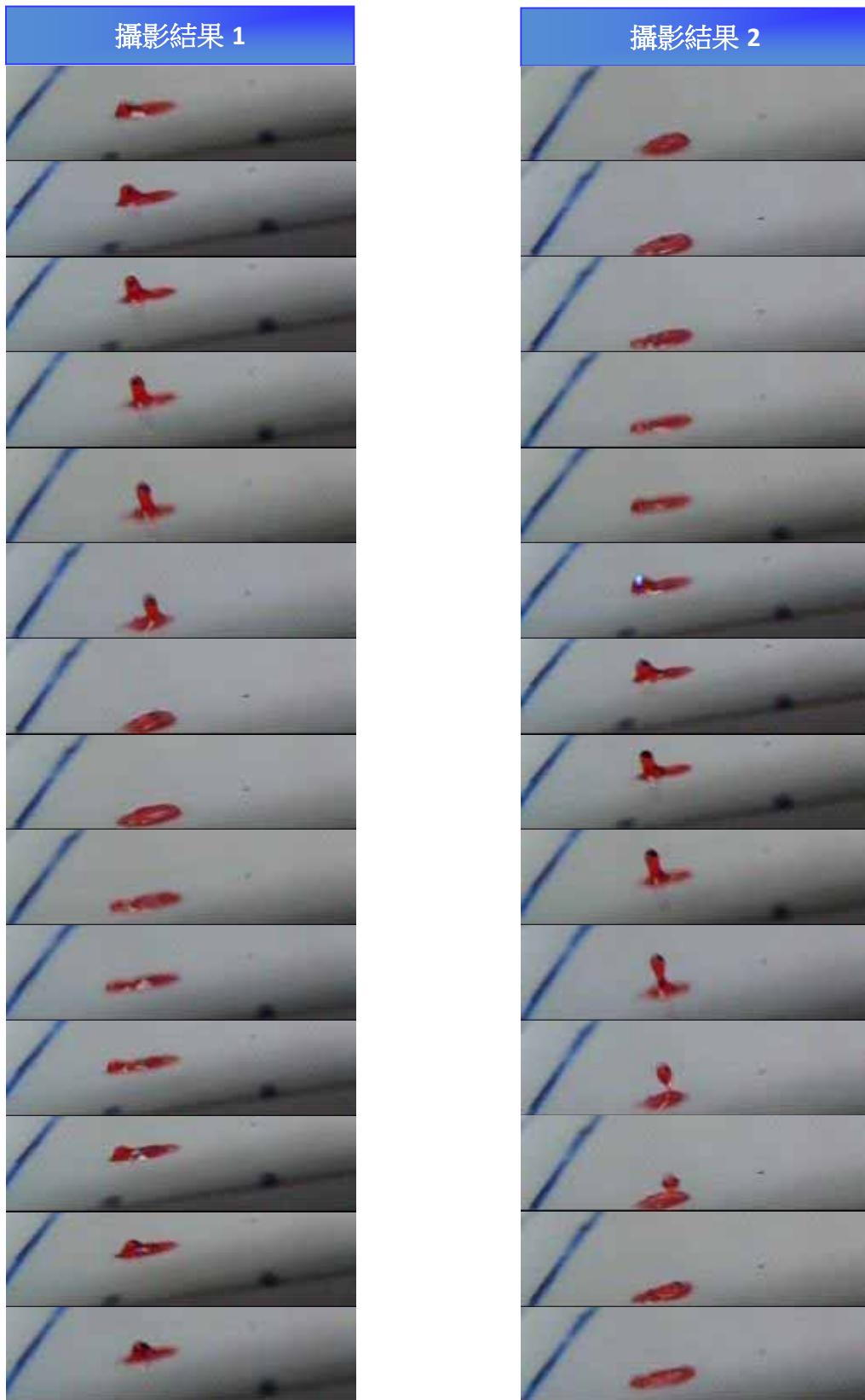
在板子上放一個橡皮擦，發現並不會有向上爬坡的效果，橡皮擦只是被垂直往上推，然後在垂直的往下墜，落回到板子原來的位置。

(四)將板子抹油，觀察飽和食鹽水、蒸餾水、稀釋酒精等是否會有爬坡的效果？

實驗結果發現，這些水滴都無法產生爬坡的效果，更多因為震動的關係而破碎，我們發現是因為附著力不夠，液滴會彈離板子，掉落時被板子撞碎。

## 實驗九、水滴內部加入顆粒，拍攝水滴內部的流動現象。

控制變因：頻率 58 Hz、水滴大小  $4.0 \mu\text{l}$ 、板子斜度 12 度、波形 ~、亮粉 5 粒。

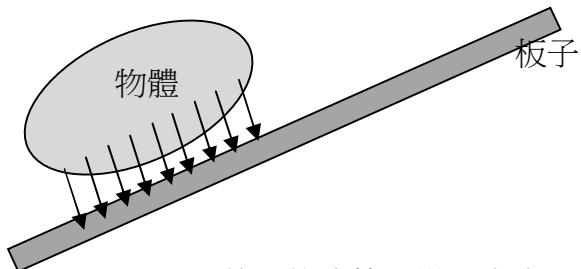


水滴內部的亮粉顆粒流動並不是很清楚，但我們依稀可見亮粉被柱狀體往上帶，然後隨著柱狀體往右高處點移動，之後再落入板子上，水滴呈扁平狀。

## 實驗十、模擬水滴向上爬坡的機制：

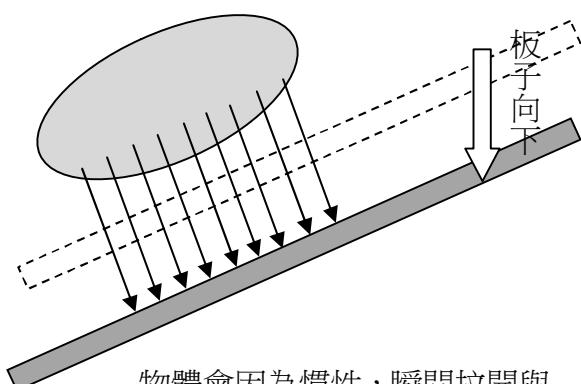
### (一)構想：

步驟一



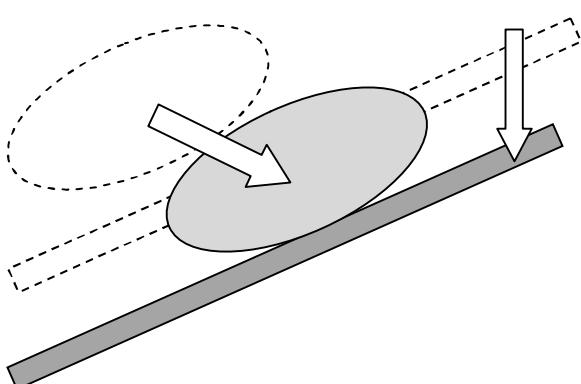
→：使用橡皮筋，模擬水滴與板子之間的附著力。

步驟二



物體會因為慣性，瞬間拉開與板子之間的距離。

步驟三



預期物體會往右下移動，而產生向前、向高處移動的效果。

### (二)實際操作情形：



物體向前移動

## 陸、討論與分析

### 一、實驗一：

#### (一)、頻率產生器的輸出頻率高低與板子的實際震動頻率之關係？

我們發現輸出頻率越高，與板子的實際震動頻率就相差越多，從數據來看，輸出20Hz、40Hz、60Hz、80Hz、100Hz，實際震動分別為23Hz、47Hz、70Hz、94Hz、116Hz。此時，可發現輸出和實際震動相差數字為3、7、10、14、16，十分接近3、6、9、12、15的等差數列，實際震動頻率以等比數增加，大約是：輸出頻率每增加20Hz，與實際板子震動頻率間的相差數就多了3下，由此實驗我們知道了輸出頻率與實際震動頻率之間的關係：實際振動頻率約為輸出頻率的1.2倍，並藉由這個關係，推論出實際的震動頻率。

我們以為下列兩個原因造成的：1、板子的重量；2、喇叭自身的問題。所以，我們將板子拆卸下來以及更換不同的喇叭來進行觀測喇叭本身頻率和頻率產生器輸出頻率的關係，結果仍與之前的實驗結果相同。

#### (二)、板子震動頻率與板子振幅之間的關係？

我們發現輸出頻率越高，與板子的實際震動頻率就相差越多而振幅也就越小，我們認為是因為板子的震動頻率加快，使得板子的振幅還未達最高點時，便需轉換方向而急遽向下，緊接著在短時間內又須急遽向上，因此造成高頻率時，振幅反而越小。

### 二、實驗二：水滴大小對爬坡速率的影響？

從實驗二的實驗結果可知，在固定頻率58Hz的條件下，不同大小水滴的爬坡速度皆有差異，經過統計和比較後，發現水滴的爬坡規律分高峰期和低峰期：爬坡速率最快的是 $2.5\mu l$ ，接著是 $3.0\mu l$ 、 $4.0\mu l$ ，然後又跳回 $2.0\mu l$ ；爬坡速率最慢的是 $5.5\mu l$ 。如果水滴再大一些，將會因為震動而破碎。如果水滴太小，將無法產生爬坡的效果。

我們假設：不同大小的水滴都有一段可以爬坡的頻率範圍，在這個範圍裡，水滴的爬坡規律有最高峰和最低峰，也就是說各種大小的水滴都有一個適合爬坡的頻率，使爬坡的速率達到最高峰。這個假設在實驗三的實驗結果中得到驗證。

### 三、實驗三：板子震動頻率對爬坡速率的影響？

由 $2.5\mu l$ 和 $4.0\mu l$ 的數據得知，不同大小的水滴，並沒有相同的高峰頻率，如： $2.5\mu l$ 的高峰頻率是70Hz， $4.0\mu l$ 的高峰頻率則是58Hz，因此，實驗二所假設的情況在此被證實：各種體積的水滴，確實有各自適合爬坡的頻率，同樣的，也有各自最低峰的頻率。反向推論，不同的頻率就有了各自搭配成組的大小水滴。

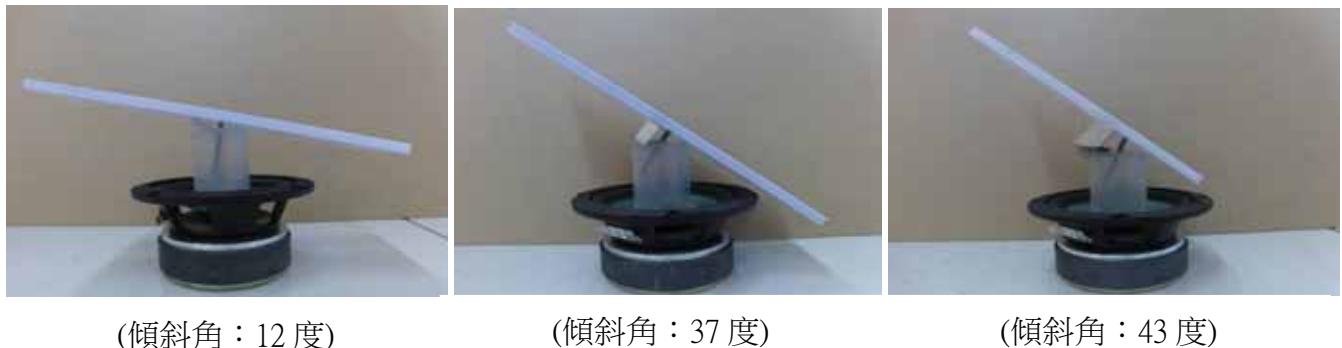
### 四、實驗四：板子震動頻率與水滴形變的關係？

經過我們利用高速攝影技術發現，水滴形狀會有週期性的變化，簡稱形變。我們原本假設板子震動頻率與水滴形變的頻率是不一樣的，但是經過高速攝影(每秒1000張照片)的仔細觀察後發現：板子的實際震動頻率和水滴形變的頻率是相同的，也就是水滴的形變是受到板子震動的驅使，而且水滴震動的情形與板子的震動同步。

## 五、實驗五、水滴最大的爬坡角度為何？

一開始，我們設定的板子斜度為 12 度，然後又另架設了對照組 0 度，發現板子呈水平時，並不會有移動的效果。在不斷的拆解和組裝下，我們發現板子傾斜 44 度以上的角度並不會爬坡，只要啟動板子震動，水滴都會一直往低處移動，這是因為水滴處在較傾斜的板子上，由於重量的關係，其水滴下滑力的值會比較大，因此不僅不易爬坡且會有下滑的狀況。但只要板子平緩一些，使其傾斜約 43 度角，水滴體積為  $1.0 \mu\text{l}$  及  $1.5 \mu\text{l}$ ，板子震動頻率為 81Hz 時，水滴約有 0.53cm/sec 的爬坡速率。

這個角度是令人震撼的，在〈力爭向上的水滴〉該作品中，就無法產生這樣的效果。同時，我們固定水滴大小  $1.5 \mu\text{l}$ ，觀察同頻率下，水滴在各角度的爬坡速率，發現角度愈傾斜，下滑力愈大，水滴爬坡速率也就愈慢。



(傾斜角：12 度)

(傾斜角：37 度)

(傾斜角：43 度)

## 六、實驗六、不同液滴成份(表面張力)對爬坡速率的影響？

我們認為造成不同液滴成份爬坡速率不一樣的主因，可能是因為其表面張力的不同，飽和食鹽水的表面張力較大，所以爬坡速率較快，而稀釋酒精則因為表面張力較小，所以爬坡速率也就相對較慢。越純的酒精，其表面張力越小，當我們使用 95% 濃度的酒精時，由於酒精的表面張力太小，而造成酒精散開無法形成一個小水珠，更不用說會有爬坡的效果。

但是，我們在傾斜的板子上塗抹沙拉油，降低酒精黏在板子上的附著力，讓酒精可以成一半球體積的形狀，接著打開機器使板子震動，結果酒精向下滑動而不會有向上爬坡的效果。因此，必須加水稀釋才能使酒精以一顆水滴的形狀附著在板子上，而我們調配出來的稀釋酒精，其蒸餾水的比例占比較多，所以其爬坡速率與蒸餾水較為接近。目前，我們要進一步針對更多不同表面張力大小的液滴進行實驗，並使用儀器測出表面張力的值，真正去了解表面張力扮演的角色。

## 七、實驗七、拍攝爬坡的水滴，觀察形變的過程？

為了觀察方便，我們使用墨水把水滴染成紅色和藍色，分別利用每秒 40 張的高速拍照模式以及利用每秒 1000 張的高速攝影等兩種模式來拍下水滴形變的過程。

從照片中我們可以發現，水滴在震動的過程中，當板子向上移動時，水滴體積會集中於左側，即傾斜板子較低處。這是合理的，因為左側是低點，受到重力的影響，水滴會往低點移動的趨勢。但是，為何沒有一直往低處滑下去呢？而反而是體積集中在左側呢？這主要是附著力的關係，水滴與板子之間會存在著附著力，把水滴拉住了。

緊接著，水滴會開始形成隆起的柱狀，此時的板子正處於向下移動的狀態，所以

水滴一定是由慣性原理而產生柱狀的形狀。我們亦觀察不同體積的水滴或者板子震動力道較大時，發現有些時候柱狀上會彈出一球狀的小水滴，之後會在落下，不過有趣的是，落下的位置會是落在板子上水滴的前端。

水滴的柱狀形狀緊接著會落下而撞擊板子，由於強大的撞擊力道，使整個水滴呈現扁平狀。

根據以上觀察，我們因此提出假設：水滴必須在震動的過程中產生形變，才能產生爬坡的效果；如果無法產生形變，則不會有爬坡的效果。這個假設將在實驗八與討論分析八中來進行探討。

## 八、實驗八、探討「液滴形變」與「液滴與板子之間的附著力」對水滴爬坡的影響？

### (一) 觀察「群體亮粉」處在震動斜坡面上是否會產生爬坡現象？

水滴是一個很多水分子的集體行為，本身水分子與水分子之間受到表面張力的束縛，而形成一個圓球狀體積的水珠，水珠在受到板子震動的驅使之後而產生形變。在實驗七的實驗結果中，我們假設水滴必須在震動的過程中產生形變，才能造成爬坡的效果。

因此，我們將細小的固體亮粉集體灑在板子上，觀察這些細小的固體亮粉是否產生爬坡的效果。根據我們的高速攝影所觀察結果發現，亮粉上層會有往前往上爬坡的現象，但亮粉下層卻往下方低處來滾落，持續震動時，亮粉持續往四面八方散開之後，就不會有爬坡的效果。這樣的結果，並不能直接斷定亮粉會有爬坡的現象。但為何亮粉上層會有向上往前爬坡的現象？是我們未來持續要觀察的重點。

### (二) 非牛頓液體處在震動斜面坡面上是否會產生爬坡現象？

我們設想水滴的形變會造成水滴產生爬坡的效果。因此我們想說：黏稠性較高的非牛頓液體是否會有爬坡的效果呢？實驗結果發現，麵粉和水的比例不同，爬坡效果也不同。水的比例愈高爬坡速率愈快，當麵粉比例大於水時，就不會有爬坡情形了，但若是比例為小於等於 1 時，其液體仍會有爬坡的效果。

我們仔細檢視高速攝影的圖片，發現麵粉與水的比例為 2：3 時，其非牛頓液體仍會產生形變，只是形變量並不大。但若麵粉與水的比例改為 3：2 時，就沒有發現形變的情形，實驗結果也顯示其不會有爬坡的效果。

### (三) 觀察單一固體(橡皮擦)處在震動斜面坡面上是否會產生爬坡現象？

在板子上放一個橡皮擦，發現並不會有向上爬坡的效果，橡皮擦只是被垂直往上推，然後在垂直的往下墜，落回到板子原來的位置。

由高速攝影，我們發現橡皮擦僅在原位置垂直上下震動，不會有爬坡效果。因此可得知，單一固體黏滯力低，附著力也低，又不會產生形變，確實不會受震波驅使向上爬坡。所以我們的結論是，要能產生爬坡現象，必須要附著力和形變具備。

### (四) 將板子抹油，觀察飽和食鹽水、蒸餾水、稀釋酒精等是否會有爬坡的效果？

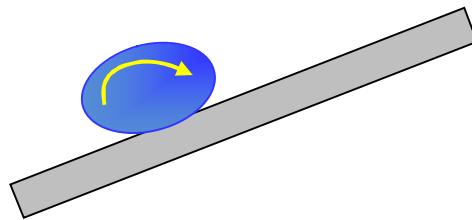
實驗結果發現，這些液滴都一直往低處滑動，無法產生爬坡的效果。表示即使液滴具有較大的表面張力，即使水滴在震動過程中產生形變，只要液滴處在一個附著

力較小的板子上時，就不會有向上爬坡的效果。因此可以證明，附著力在液滴爬坡的過程中扮演關鍵角色。

### 九、水滴內部加入顆粒，拍攝水滴內部的流動現象：

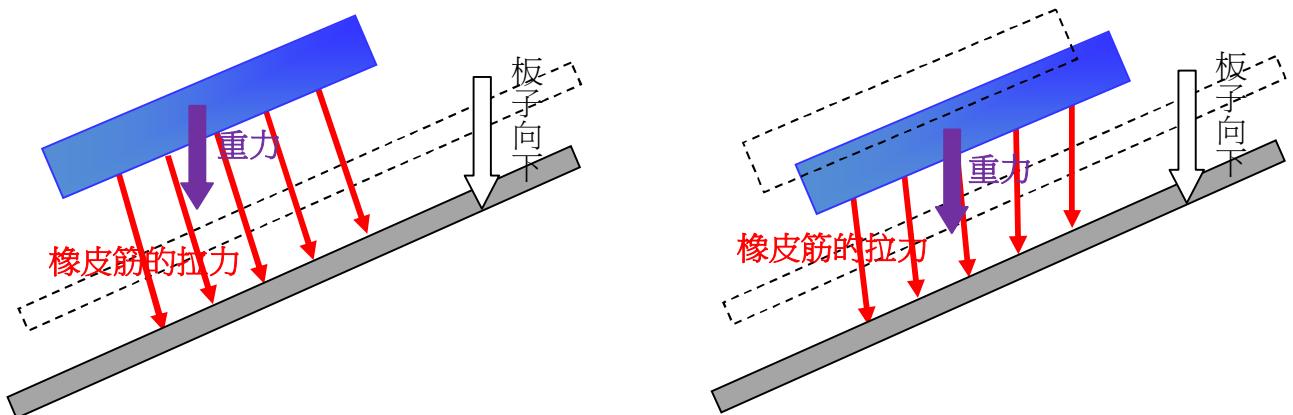
在震動過程中，水滴內部產生激烈的震盪，要明顯觀察出水滴內部的流動情形，將會非常困難。

根據我們拍攝的結果，亮粉顆粒會隨著水滴而移動。很明顯的，亮粉被柱狀體往上帶，然後隨著柱狀體往右高處點移動，之後再落入板子上，水滴呈扁平狀。根據這樣的現象，可以合理猜測水滴內部會先往上(柱狀體)然後再往前流動，整顆水滴因此被帶往前即往高處方向移動。內部流動情形如下圖所示。



### 十、模擬水滴向上爬坡的機制：

根據實驗一至九的觀察，我們認為水滴之所以會產生向上爬坡，關鍵是附著力與慣性。我們使用橡皮筋來代表水滴與板子之間的附著力，當板子上升又瞬間下降，此時物體會因為慣性，瞬間拉開與板子之間的距離，橡皮筋因此被拉長，緊接著橡皮筋轉為垂直方向，如下圖。在這樣的轉換之間，使得物體朝右下方移動，因此達到向前向上爬坡的結果。根據我們人力實際操作，也真的可以產生讓物體向高處移動的結果，如實驗十。



物體會因為慣性，瞬間拉開與板子之間的距離。

橡皮筋由於拉扯的關係，最後方向轉為垂直方向。

我們思考的是，水滴處在震動板子上時的爬坡狀況，也可以這樣適用嗎？我們從實驗七中可知，水滴因為慣性的關係而產生柱狀結構，此柱狀結構在落下時，會往板子高處的一方移動，可見此時水滴一定受到向右向高處的力量，才會產生這樣的運動情形。我們認為這樣的模擬，其實非常貼切的。

## 十一、處在垂直上下震動板子上的水滴，為何會產生爬坡的效果？

我們發現水滴大小、板子震動頻率、震動振幅、液滴成份、板子與液滴之間的附著力、爬坡角度與水滴形變等，對液滴爬坡速率皆有影響。這些因素都有連帶的關係，比如水滴較大，震動起來其形變歷程會花比較多的時間，其形變頻率較小，我們發現水滴之所以會爬坡，是因為垂直上下震動使水滴形狀產生變化，受到板子附著力及水滴表面張力之間的拉扯，以及重力和慣性的影響，當板子震動往上時水滴會先向上凸起，再來板子震動向下時，突起的水滴會在由上而下的過程中，向前移動，然後扁成一灘，在第二次的震動向上時再度突起，重複循環爬坡。

## 柒、結論

- 1、當液滴受到震波驅使會產生向上爬坡的現象。
- 2、我們發現水滴大小、震動頻率、板子振幅、液滴成份、板子與液滴之間的附著力、爬坡角度與水滴形變等，對液滴爬坡速率皆有影響。
- 3、不同大小液滴的爬坡高峰期，會因液滴體積不同而頻率也會有所改變。實驗中，我們可得知，若固定頻率 47Hz 及波形～，則體積為  $2.5 \mu\text{l}$  的水滴會比其他體積的水滴來得快，若固定頻率 58Hz 及波形～，則體積為  $4.0 \mu\text{l}$  的水滴會比其他體積的水滴來得快。
- 4、水滴並非所有體積皆會爬坡，若液滴太小，震動時不會產生任何現象，若液滴太大，震動時則會出現破裂的現象。
- 5、我們最大的爬坡角度為 43 度角。
- 6、板子的角度會影響液滴的爬坡情形，當板子為 0 度時液滴並不會移動。若板子傾斜超過 43 度時亦不會出現爬坡現象。這可能原因是因為重力造成的下滑力較大的緣故。
- 7、若固定震動頻率為 81Hz、波形～、水滴體積為  $1.5 \mu\text{l}$ ，會得到水滴的爬坡速率由快至慢分別為：12 度 > 37 度 > 43 度。
- 8、液滴的成份會影響爬坡的速率。飽和食鹽水的表面張力較大，所以爬坡速率較快，而稀釋酒精(16.7%)則因為表面張力較小，所以爬坡速率也就相對較慢。若我們採用 95% 酒精作為爬坡的液珠，完全不會有爬坡的效果。
- 9、水滴要能爬坡，板子與液滴之間必須要有附著力。若將板子抹油，結果水滴不會有爬坡的效果。
- 10、若我們將橡皮擦放在震動的傾斜板子上時，橡皮擦只會垂直向上移動，之後再垂直向下掉落，回到起始的位置，並不會產生向高處移動的效果，這就是因為缺乏附著力的關係，而造成橡皮擦不能向上爬坡的效果。
- 11、液珠形變在水滴的爬坡過程中扮演關鍵性的角色。我們發現不會形變的非牛頓液滴(其麵粉的比例大於水)，並不會有向上爬坡的效果。
- 12、體積過小的水滴，亦不能向上爬坡，這是因為水滴體積過小，不易產生形變之原故。
- 13、液滴向上爬坡的情形，從實驗照片中可以看到，水滴形變的過程分四步驟：1、板子向上移動時，水滴體積集中在低點處；2、當板子轉為向下移動時，水滴外形會變成柱狀體；3、此柱狀體會往右往高處移動；4、接下來，柱狀體落下而撞擊到板子，水滴因為撞擊而變成扁平狀，這些步驟會一直重複循環。
- 14、我們認為水滴之所以可以在震動的傾斜板子上爬坡，關鍵是因為慣性而產生形變，以及

水滴與板子之間的附著力所影響。

- 15、藉由高速攝影，我們觀測水滴內部的流動情形。水滴內部的亮粉被水滴柱狀體往上方帶動，然後又隨著柱狀體往高處點移動，之後再落入板子上，水滴呈扁平狀。

## 捌、參考資料與其他

- 1、中華民國第 48 屆中小學科學展覽會，國中組理化科，力爭向上的水滴，鄧奉芸等著。
- 2、第 44 屆全國科展，國中組物理科，被忽略的神秘力量-表面張力，吳尹傑等著。
- 3、高中物質科學物理篇(下)，流體力學，南一書局。
- 4、Surface Tension Module，Department of Mathematics，MIT，John W.M.Bush 著。
- 5、Manoj K. Chaudhury、George M. Whitesides，1992.6.12，How to Make Water Run Uphill，科學雜誌第 256 卷第 5063 頁。
- 6、<http://www.bristol.ac.uk/news/2007/5630.html>

## 【評語】030113

本作品系統化討論液滴受震動在坡面上運動行為

1. 本實驗現象觀察以錄影後製分析觀察液滴形變行為。
2. 本探討以液滴形變解釋，在坡面爬行，略以表面張力等解釋。
3. 建議可將定性詮釋，進一步查閱相關物理理論模型，從事定量分析。