

中華民國第 63 屆中小學科學展覽會
作品說明書

國中組 物理科

第一名

030106

親疏有別—水滴在親疏交錯界面之運動現象探討

學校名稱：宜蘭縣立國華國民中學

作者： 國二 穆亭昕 國一 邱量 國二 洪子晴	指導老師： 邱旻昇 覺一容
--	-----------------------------

關鍵詞：懸吊水滴爬坡下坡、親疏界面、不對稱鋪展
收縮

得獎感言

原來，結束只是剛開始！

踏上頒獎台的那一刻，所有感動與喜悅的熱血流動全身，在猶如夢境的恍惚之中，也憶起了科展的點點滴滴：從提出水滴移動猜想，到現今的懸吊水滴，數不盡難忘的感慨，都是一步步親手實踐積累而來的。

從去年暑假開始，懵懂無知的我們，基於對物理與科學研究的興趣，一腳踏入了名為科展的無底深淵，從觀察現象、實驗操作、數據分析、報告撰寫開始一步一步學習，甚至提出從未被發現的現象猜想並且成功驗證。過程中充滿了許多辛酸悲苦與艱難，好在身邊總有隊友的陪伴，共同面對所有困難。

科展的旅途中，最要感謝的是一路陪伴我們的指導老師，當我們認為研究遇到瓶頸已到盡頭時，老師總會適時提供許多創意發想，讓我們能夠開啟再下一階段不可思議的研究，就因為如此：「原來，結束只是剛開始」，就成為了我們整年研究的主旋律，在心中迴盪不已，久不散去！伙伴們也常拿著這句話，時而調侃、時而激勵，只為成就更好的自己。此外，在老師嚴格指導的同時，也給了我們許多鼓勵，在他物理之手的呵護眷顧下，也才讓我們享有豐碩甜美的果實。

一路上，感謝所有曾經給予我們協助的人，也感謝最後的結果是如此美好，肯定了我們每個差點放棄嘗試，卻又堅持下來的瞬間。踏上頒獎台時，是全國科展的結束，卻只是接觸科學的剛開始。當下，伙伴相視著發出會心的一笑，「原來，結束只是剛開始」的主旋律又再次響起，我們將會無畏地繼續在科學大海中勇往直前！



縣科展賽前練習



63屆全國科展在基隆



國展加油

親疏有別-水滴在親疏交錯界面之運動現象探討

摘要

當水滴碰撞親疏交錯界面，直線、弧線及螺線親疏線條決定了水滴鋪展收縮的對稱形態與受力，研究發現水滴有分割、彈跳、移動、旋轉等多樣化運動現象，接著以此基礎提出「水滴移動猜想」並且驗證成功：水滴置於繪有親水弧線道的疏水振動平板上，會因為持續的不對稱鋪展收縮產生了振動-移動現象，且和水滴大小、振幅頻率、親疏線型、平板材質、張力黏度、角度…有關。本研究亦嘗試控制水滴使其產生繞圓周、直角過彎、爬坡下坡等現象，更測試出「懸吊」水滴的振動-移動。最後，針對其形態、受力加以分析，提出模型予以解釋。

壹、研究動機

偶然機會下，在網路上看到了一個有趣的影片！將水滴滴在有刻痕的碳黑化玻片上，水滴竟然會旋轉跳躍。這樣的神奇現象，不禁讓我們感到好奇：不同的表面及不同形狀的刻痕是否會讓水滴產生不一樣的運動？現象又該如何重現？於是我們便開始著手進行相關研究。



圖 1-1 旋轉水滴
(取自網路圖片)

貳、研究目的

研究目的一：水滴在親水或疏水界面基本現象探討

實驗 1：靜態水滴、動態水滴的基本測量

研究目的二：水滴碰撞親疏交錯界面之彈跳現象探討

實驗 2：發展可大量製作親疏交錯界面(紋路板)的方法

實驗 3：水滴碰撞「直線型」親疏線條之彈跳現象探討

實驗 4：水滴碰撞「弧線型」親疏線條之彈跳現象探討

實驗 5：水滴碰撞「螺線型」親疏線條之彈跳現象探討

研究目的三：水滴在親疏交錯界面之振動-移動現象探討

實驗 6：觀察分析水滴在不同板材上的振動差異：提出並驗證水滴移動猜想

實驗 7：頻率振幅對振動-移動現象之影響探討

實驗 8：親疏線型對振動-移動現象之影響探討

實驗 9：底板性質對振動-移動現象之影響探討

實驗 10：黏度張力對振動-移動現象之影響探討

研究目的四：水滴在親疏交錯界面複雜運動現象探討

實驗 11：水滴直行、繞圓周、直角過彎

實驗 12：挑戰地球引力 I -水滴爬坡

實驗 13：挑戰地球引力 II -水滴下坡

實驗 14：挑戰地球引力 III -「懸吊」水滴的下坡與爬坡

參、研究設備與器材

一、設備器材

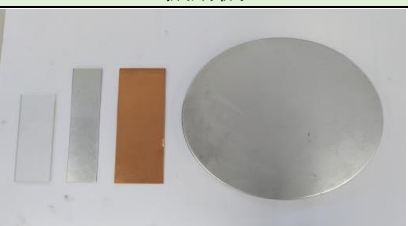
		
高速攝影相機、手機	振動機	雷射切割機
		
耐熱模板(砂紙)、印刻凸版(木頭)	底板(玻板、鋁板、銅板、鋁盤)	紋路板
		
注射筒、微量滴管	自組滴定架	自組雷射定位裝置
		
補光燈、水平參考量筒	2000 號砂紙、蠟燭	酒精、甘油、水銀

圖 3-1 各式實驗器材

二、分析軟體

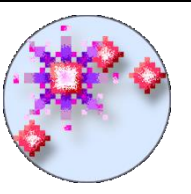

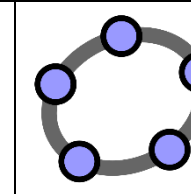
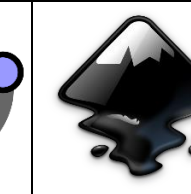


					
Tracker	Beamstudio	Geogebra	Inkscape	威力導演	Excel

圖 3-2 各式應用軟體

肆、研究過程與方法

一、研究架構

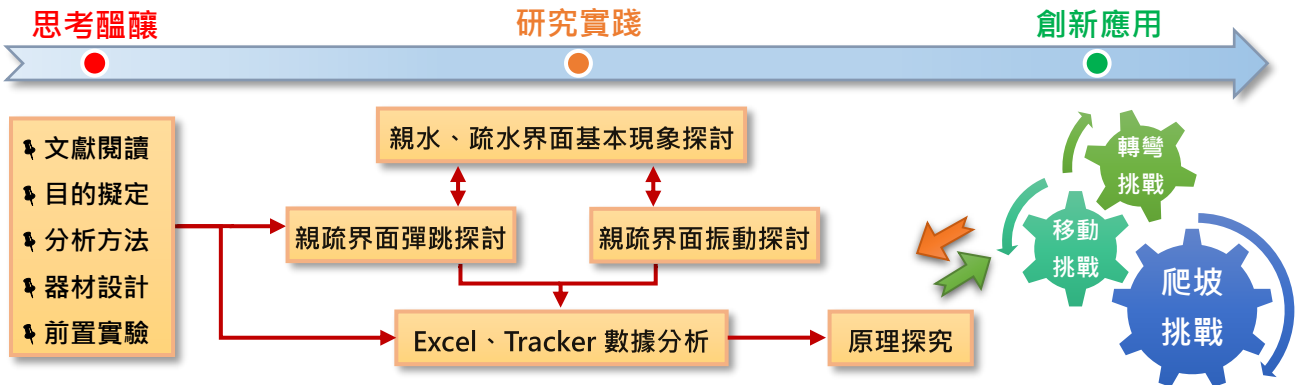


圖 4-1：研究過程架構說明

二、研究原理

(一) 表面張力、接觸角、滾動角、親水性、疏水性、濕潤程度、黏附程度

表面張力是使液體表面積縮小的力量。如右圖 4-2 所示，一液體其內部的分子均受到旁邊分子的引力影響，然而在表面的分子，所受的吸引力僅受涵蓋液體的這一方向，致使分子被往內拉而更緊密的擠在一起。

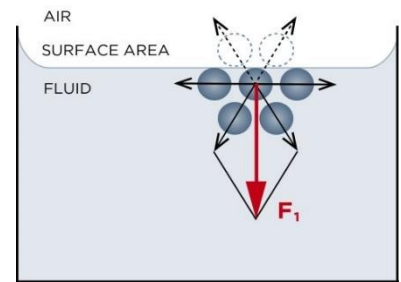


圖 4-2 表面張力示意圖
(取自網路圖片)

接觸角是指液體接觸固體表面形成的夾角，其大小為液體與液體間的內聚力(同分子間的吸引力)及液體與固體間的附著力(異類分子間的吸引力)相互作用的結果。利用接觸角的大小可判斷液體在固體表面的**濕潤程度**(即親水性或疏水性)。

滾動角是指液滴在傾斜的表面上，因重力作用而有下滑的趨勢。當傾斜角增大到某一臨界角度時，液滴會從固體表面滑下來，這時的臨界角就是液滴在此種固體表面的滾動角。滾動角的大小可用來判斷固體表面與液體之間的**黏附程度**。

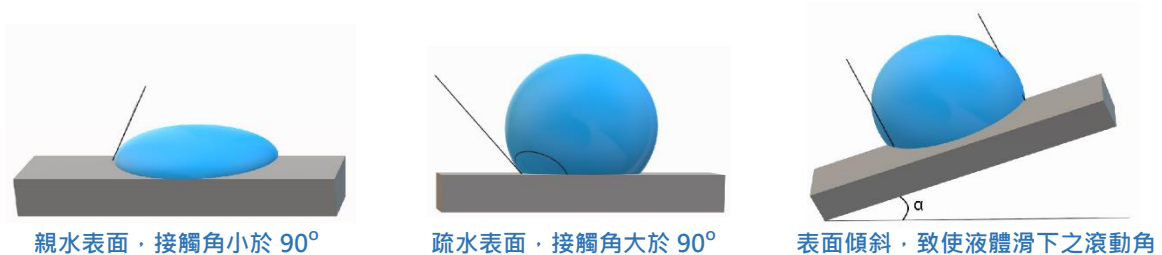


圖 4-3 親疏水表面與接觸角、滾動角示意圖(取自網路圖片)

(二)鏡面對稱、旋轉對稱

鏡面對稱是指一個平面圖形沿一條直線摺疊，直線兩旁的部分能夠互相重合。旋轉對稱則是把一個平面圖形繞著平面上一個定點旋轉 α° 後，會與初始圖形重合，這個定點叫做旋轉對稱中心，旋轉的角度叫做旋轉角（ $0^\circ < \alpha < 360^\circ$ ），依旋轉角度的大小，可決定旋轉的階次 n （ n 為大於1的正整數）。

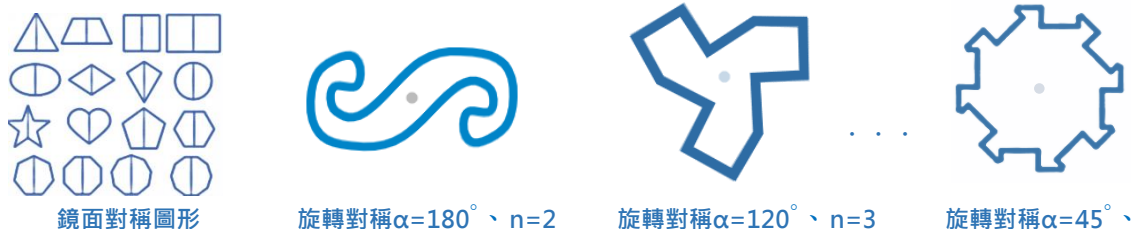


圖 4-4 對稱圖形示意圖（取自網路圖片）

三、名詞定義

(一)不對稱鋪展收縮

水滴碰撞親疏交錯界面，鋪展與收縮時因受力不均產生多樣化不對稱的形變。

(二)底板、碳黑板、紋路板

底板是以鋁板為主，尚有銅板、玻板。**碳黑板**是將底板置於燭焰上，覆蓋出一層奈米碳黑的板材。**紋路板**是指底板經模板套疊法或凸版印刻法後，所得各種親疏紋路的板材。

(三)模板及模板套疊法、凸版及凸版印刻法

模板是指經雷雕後具多樣化紋路的鏤空砂紙。**模板套疊法**是指將模板套疊在底板上並以夾子固定放置在燭焰上。砂紙模板能耐燭焰高溫，而鏤空的部份則會使不完全燃燒的燭焰在底板上形成碳黑層。之後，移除砂紙模板後，就可獲得研究所需的紋路板。

凸版是指在木頭上雷雕出所需的紋路，達成類似印章的效果。**凸版印刻法**是指使用凸版在碳黑板上進行按壓沾除碳黑，印刻出研究所需的紋路板，必要時會以竹籤加強沾除。

(四)弧線、螺線、弧線道

弧線、**螺線**、**弧線道**皆為紋路板上親水紋路的表現形式，可利用**模板套疊法**或**凸版印刻法**繪製而成。本研究使用粗細約為0.03cm、半徑為0.22cm(水滴半徑)，圓心角為120度的**弧線**。**螺線**為黃金螺線，數條螺線起點中心圓為水滴原尺寸，且 n 條螺線把中心圓周均分成 n 等分。**弧線道**則是由多條弧線並排組合而成的線道。

(五)水滴、懸吊水滴

在板動平板上方的稱之為水滴；在振動平板下方的稱之為懸吊水滴。

四、實驗方法

(一)以「模板套疊法」及「凸版印刻法」製作「紋路板」

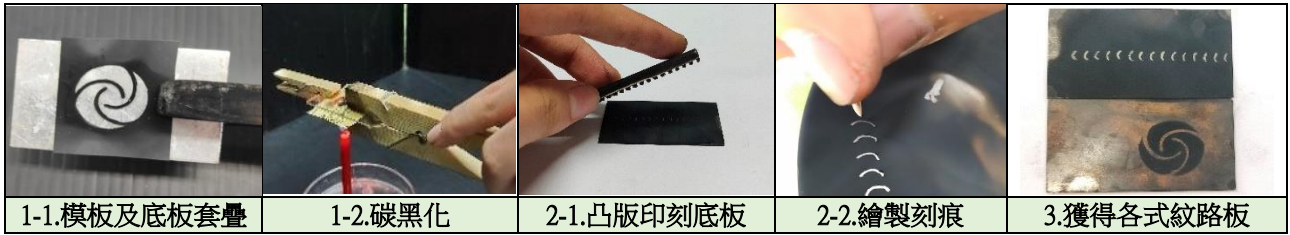


圖 4-5 以模板、凸版製作紋路板

(二)自製滴定架進行「研究目的一」及「研究目的二」的滴定實驗



圖 4-6 自製滴定架

(三)組裝振動板進行「研究目的三」、「研究目的四」的振動實驗

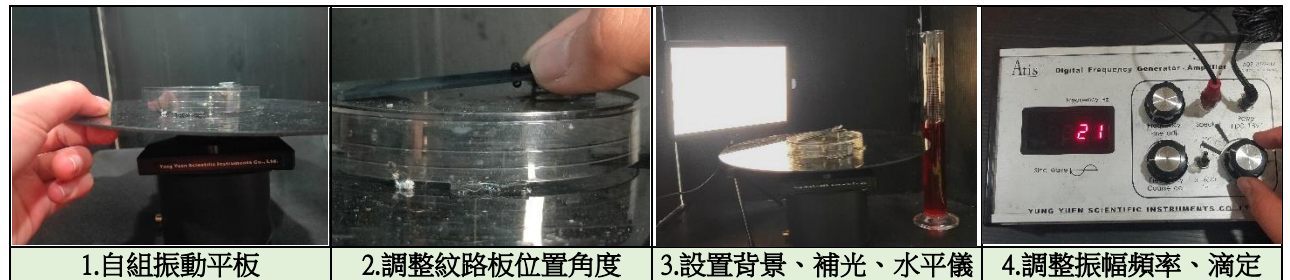


圖 4-7 組裝振動板

(四)高速攝影後，匯入電腦軟體，蒐集數據進行分析



圖 4-8 實驗影像分析

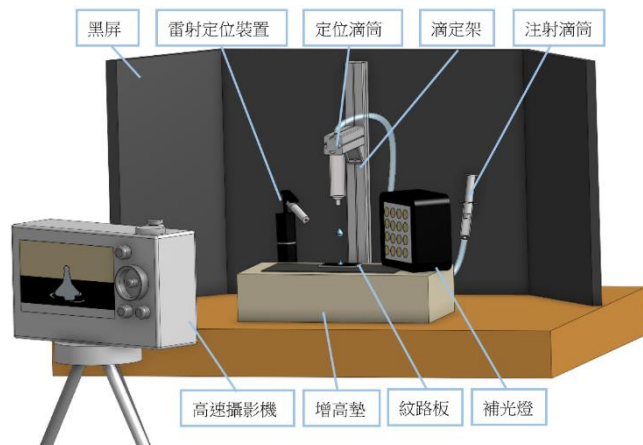


圖 4-9：滴定實驗裝置(研究目的一、二使用)

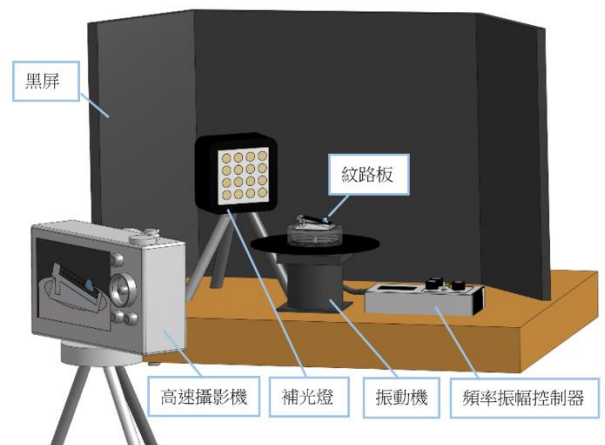


圖 4-10：振動實驗裝置(研究目的三、四使用)

伍、研究結果與討論

【研究目的一：水滴在親水或疏水界面基本現象探討】

實驗 1：靜態水滴、動態水滴的基本測量

一、實驗步驟

- (一)以針筒注出水滴至板材上，以定滑輪方式漸漸抬高板材至水滴瞬間滑落並進行動態攝影，以電腦軟體測量接觸角(θ)、滾動角(α)，並以正切函數($\tan \alpha$)轉換為摩擦係數 μ 。
- (二)以自組滴定架在固定高度(5cm)注出水滴使其滴落至板材上並進行動態攝影，再將影片匯入 tracker 進行相關測量。

二、實驗結果

表 5-1-1 靜態、動態水滴的基本測量

		玻璃板	銅板	鋁板	碳黑板
靜態水滴	接觸角 θ	21.37	70.9	74.2	140.11
	滾動角 α	15.9	45.3	53.2	3.07
	摩擦係數 μ	0.29	1.01	1.33	0.05
動態水滴	恢復係數 e	0	0	0	0.37
	最大鋪展直徑 D (cm)				0.9
	直徑比 D/d				1.92
	鋪展速率 V (cm/s)				65.4
	收縮速率 v (cm/s)				21.7

註：水滴體積=43 μ L，水滴直徑 d=0.44cm

三、分析討論

- (一)有關靜態水滴：接觸角大小依序：碳黑板>鋁板>銅板>玻璃板，表示碳黑板疏水性強，使水滴濕潤程度小，較能維持水滴形狀。滾動角大小依序：鋁板>銅板>玻璃板>碳黑板，表示水滴與鋁板之間的黏附程度較大，會限制水滴的運動，對後續研究有重大啟發意義。
- (二)有關動態水滴：只有碳黑板能使水滴回彈，恢復係數僅 0.37，顯示能量損耗很大。最大鋪展直徑大約是原來水滴的兩倍，而鋪展速率遠大於收縮速率。相關圖示如下：

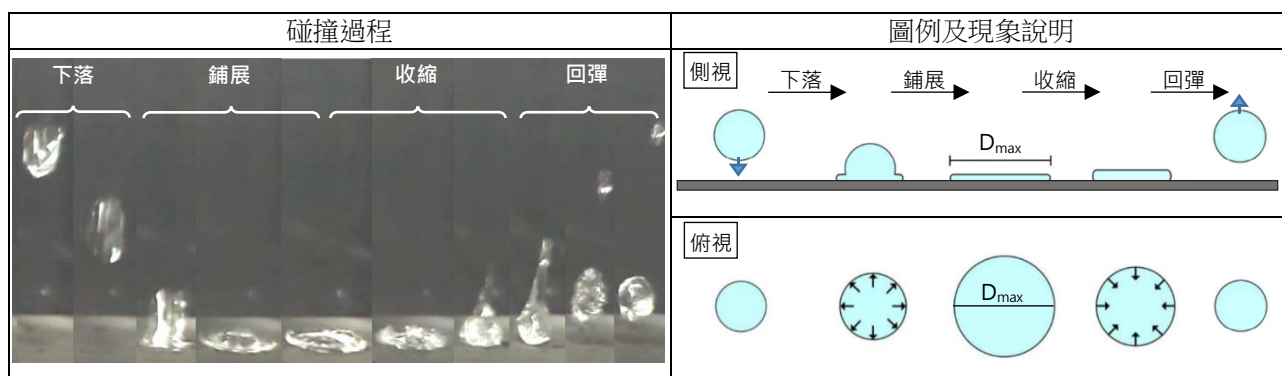


圖 5-1-1 動態水滴示意圖

【研究目的二：水滴碰撞親疏交錯界面之彈跳現象探討】

實驗 2：發展可大量製作親疏交錯界面(紋路板)的方法

研究動機中的影片以竹籤直接在碳黑板上刮出相對親水線條的作法較難控制變因，由於我們沒有研究室等級的先進設備，於是花了許久的時間測試，才發展出兩種經濟可行相對有效的方法：模板套疊及凸版印刻法(見 p.5)。兩種方法皆需先以(1)Geogebra 繪製親水線型，再以(2)雷射切割出耐熱模板(砂紙)及印刻凸版(木板)，最後(3)製作所需的各式紋路板。

一、親水線型繪製的發展歷程


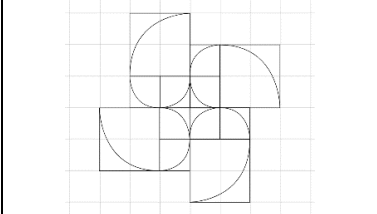
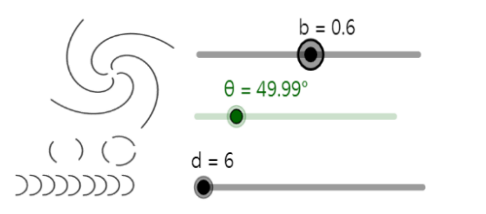
先觀察影片中的曲線形狀	嘗試以 Beamstudio 繪圖	最後以 Geogebra 繪圖
		
影片中刻痕形狀讓我們聯想到等角螺線，經討論後決定了本研究所繪製的線條，除直線、圓弧線之外，漩渦形狀的線條均為等角螺線。	以 Beamstudio 繪製等角螺線的方法是拉出幾個正方形後，用貝茲曲線拉出螺線，誤差較大，且能繪製螺線的旋轉角度有限。	除直線弧線外，能精確繪製以費氏數列排列出的等角螺線，線條的粗細與螺線旋轉角度很好調整。匯入雷射軟體後反白就可與耐熱模板進行分割。

圖 5-2-1 親水刻痕繪製歷程說明

二、耐熱模板製作的发展歷程

手繪親水刻痕效果不佳	以 PVC 材質卡為模板測試效果普通	以砂紙為模板測試效果良好
		
在底板燒一層奈米碳粉後，用竹籤刮出刻痕。誤差大且十分耗費時間。	卡片的厚度與硬度適合雷射，不會有刻痕太細而斷裂的問題。但在火烤碳黑層時，會受熱變形。	較一般紙張堅硬，且耐高溫。雷射後不會斷裂，蠟燭燃燒後也不會變形，最後使用砂紙做模板，應用於研究目的二。

圖 5-2-2 耐熱模板製作歷程說明

三、印刻凸版製作的发展歷程



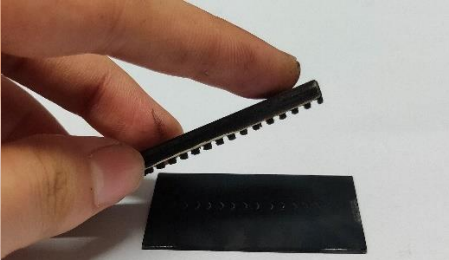
扁梳繪製效果不佳	圓規刻痕效果普通	雷射木頭印刻效果良好
		
在底板燒一層奈米碳粉後，利用扁梳的髮針一次畫出整排弧線道。無法調整弧線間距。	利用圓規畫弧線，要改變間距很容易，但圓規在鋁板上並不好使用，也只能畫弧線。	在木頭上雷射出凸起弧線，之後印刻在底板上，再用竹籤刮除，快速且可製作多種線型，應用於研究目的三、四。

圖 5-2-3 印刻凸版製作歷程說明

實驗 3：水滴碰撞「直線型」親疏線條之彈跳現象探討

一、實驗步驟

- (一)先以雷射輔助定位滴落點，再以滴定裝置滴定水滴至各式紋路之紋路板上。
- (二)高速攝影，並將影片匯入電腦加以分析解釋。

二、實驗結果

編號	線型	紋路板	碰撞結果截圖	碰撞結果圖例	碰撞結果說明
A	1 條親水直線				水滴回縮時呈果核狀，不回彈
B	1 條疏水直線				水滴被分割成二部份，附著於鋁板上，不回彈
C	2 條相交親水直線				水滴先呈四邊形後呈四芒回縮，不回彈
D	2 條相交疏水直線				水滴被分割成四部份，附著於鋁板上，不回彈
E	3 條中空親水直線				水滴呈三邊形後呈三芒回縮，有回彈
F	3 條中空疏水直線				水滴不完整分割，最後呈三葉扇狀，不回彈
G	4 條中空親水直線				水滴呈四邊形後呈四芒回縮，有回彈
H	4 條中空疏水直線				水滴不完整分割，最後呈四葉扇狀，不回彈

圖 5-3-1

三、分析討論

(一)疏水線條的作用：分割水滴

由上圖的 B、D、F、H 可知，疏水線條有分割水滴的作用。線型可分成為完整相交(B、D)與不完整相交(F、H)。完整相交疏水線紋路板可以完全分割水滴，而不完整相交疏水線紋路板在使水滴僅外圍有分割作用，最後水滴呈現風扇狀。

(二)親水線條的作用：延緩水滴收縮

由上圖的 A、C、E、G 可知，親水線條會延緩水滴收縮，受力不均導致產生果核狀(A)、三芒星(E)或四芒星(C、G)的對稱形變。其中 A、C 因水滴收縮後還有接觸到親水紋路，導致能量損耗過大無法垂直回彈，而 E、G 因水滴收縮後只與碳黑接觸，所剩能量尚可垂直回彈。

實驗 4：水滴碰撞「弧線型」親疏線條之彈跳現象探討

一、實驗步驟

(一)先以雷射輔助定位滴落點，再以滴定裝置滴定水滴至各式紋路之紋路板上。

(二)高速攝影，並將影片匯入電腦加以分析解釋。

二、實驗結果

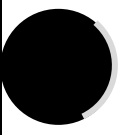
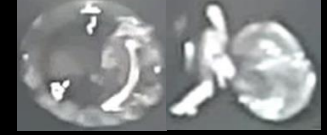
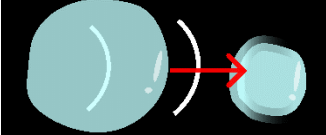
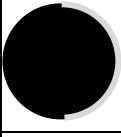


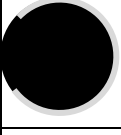
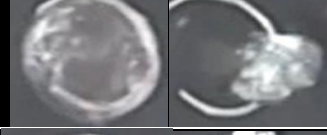

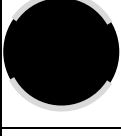


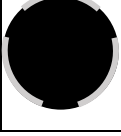
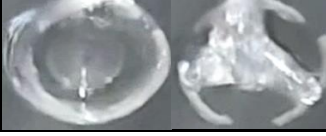

編號	線型	紋路板	碰撞結果截圖	碰撞結果圖例	碰撞結果說明
I	1 條 1/4 親水弧線				水滴收縮時向右彈跳移動
J	1 條 1/2 親水弧線				水滴收縮時向右彈跳移動
K	1 條 3/4 親水弧線				水滴收縮時向右彈跳移動
L	2 條 1/4 親水弧線				水滴收縮時呈果核狀並且垂直回彈
M	3 條 1/4 親水弧線				水滴收縮時呈三芒星狀並且垂直回彈

圖 5-4-1

三、分析討論

(一)有橫向位移的水滴

由上圖的 I、J、K 可知，只具有「鏡面對稱」但不具「旋轉對稱」的一條親水弧線，會延緩水滴部分面積收縮，使水滴合力不均而產生橫向位移。

(二)無橫向位移的水滴

由上圖的 L、M 可知，具有「鏡面對稱」及「旋轉對稱」的兩條或三條親水弧線會延緩水滴收縮、無橫向移動現象，延緩收縮的終點落在弧線中心，使其呈果核狀及三芒星狀。

實驗 5：水滴碰撞「螺線型」親疏線條之彈跳現象探討

一、實驗步驟

- (一)先以雷射輔助定位滴落點，再以滴定裝置滴定水滴至各式紋路之紋路板上。
- (二)高速攝影，並將影片匯入電腦加以分析解釋。

二、實驗結果













編號	線型	紋路板	碰撞結果截圖	碰撞結果圖例	碰撞結果說明
N	1 條親水螺線				水滴收縮時呈逆時針旋轉並向右方彈跳移動、轉動
O	2 條親水螺線				水滴收縮時呈逆時針兩臂旋轉，垂直回彈、轉動
P	3 條親水螺線				水滴收縮時呈逆時針三臂旋轉，垂直回彈、轉動
Q	4 條親水螺線				水滴收縮時呈逆時針四臂旋轉，垂直回彈、轉動

圖 5-5-1

表 5-5-1 水滴收縮最大角速率

	1 條旋臂	2 條旋臂	3 條旋臂	4 條旋臂
$\bar{\omega}_{\max}(\text{rev/s})$	79.2	58.4	34.4	28.7

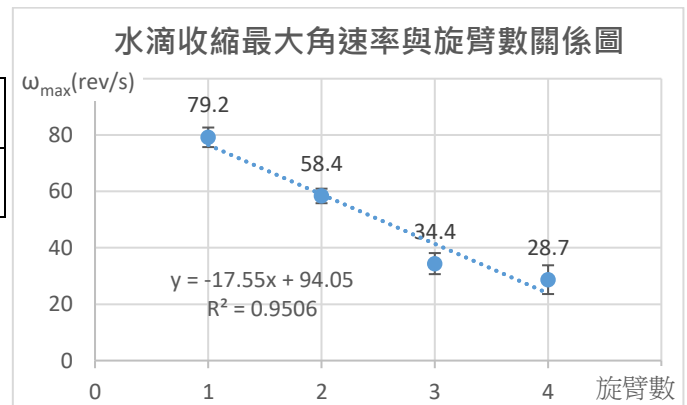


圖 5-5-2 水滴收縮最大角速率與旋臂數關係圖

三、分析討論

(一)有橫向位移的旋轉水滴

由上圖的 N 可知，不具有「鏡面對稱」及「旋轉對稱」一條親水螺線會延緩水滴部分面積的收縮，因為不對稱的關係，除了產生逆時針旋轉之外，並伴有橫向的移動、轉動。

(二)無橫向位移的旋轉水滴

由上圖的 O、P、Q 可知，不具「鏡面對稱」但具有「旋轉對稱」的親水螺線會延緩水滴收縮，親水螺線的數目不同會產生不同的旋臂數量，水滴除垂直碰撞回彈之外，還產生了逆時針轉動。

(三)水滴的轉速

我們發現，若有 N 條螺線，水滴收縮時因受力不均會產生 N 條旋臂，並伴隨轉動。由圖 5-5-2 可得知，旋臂數與水滴轉速呈線性負相關，水滴順著螺線轉動的最大角速率可達 79 rev/s，當水滴完全收縮回彈後，也會因慣性持續旋轉。

【研究目的三：水滴在親疏交錯界面之振動-移動現象探討】

研究目的二發現當水滴碰撞 1 條弧線型親水線條時(p.9 編號 I、J、K)，會因為鋪展收縮的不對稱產生受力不均發生橫向移動！異想天開的我們大膽假設臆測，提出「**水滴移動猜想**」：

如果以連續振動取代一次碰撞，鋁板為底板製作成碳黑板，再印刻出多條弧線組成的親水弧線道，是否可讓水滴在親疏交錯界面產生持續的鋪展收縮並且移動？

於是便開始了研究目的三的各项實驗！

實驗 6：觀察分析水滴在不同板材上的振動差異：提出並驗證水滴移動猜想

一、實驗步驟

調整振動機振幅、頻率並以微量滴管置水滴於下列板材，高速攝影匯入電腦分析解釋。

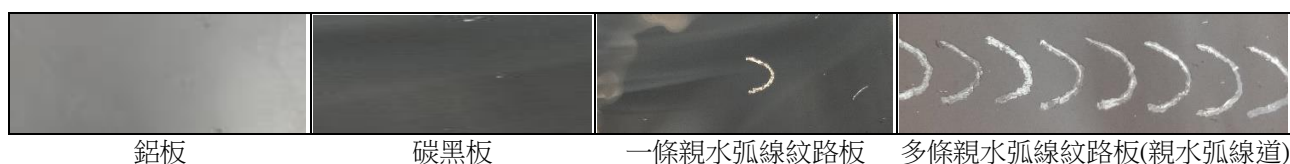


圖 5-6-1 各式板材

二、實驗結果與分析討論

(一)水滴在鋁板上的鋪展收縮：對稱，兩側端點滑動量非常小，幾近固著

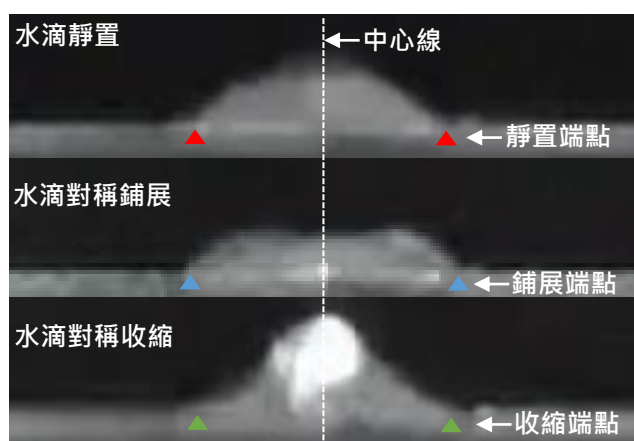


圖 5-6-2 水滴在鋁板上的振動

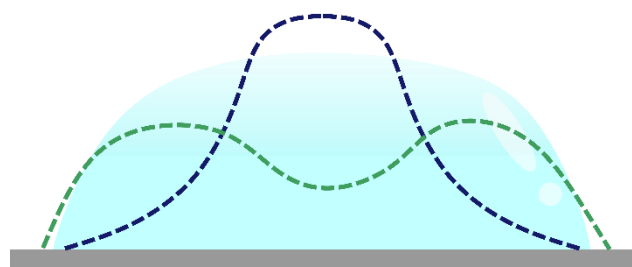


圖 5-6-3 將圖 5-6-2 去背的輪廓示意圖

(二)水滴在碳黑板上的鋪展收縮：對稱，兩側端點滑動非常明顯

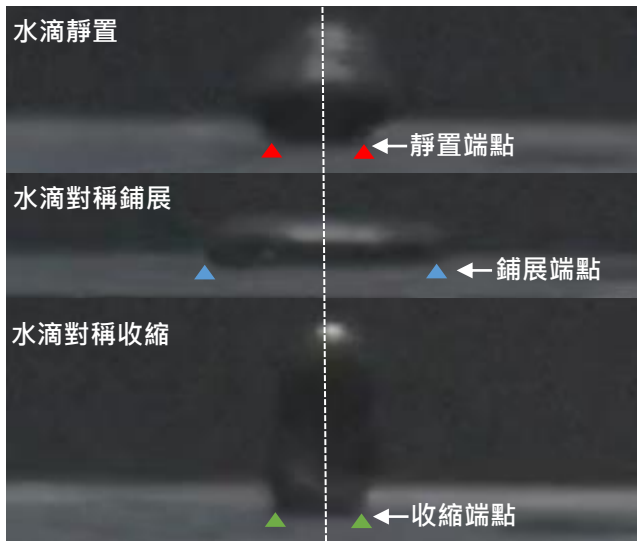


圖 5-6-4 水滴在碳黑板上的振動

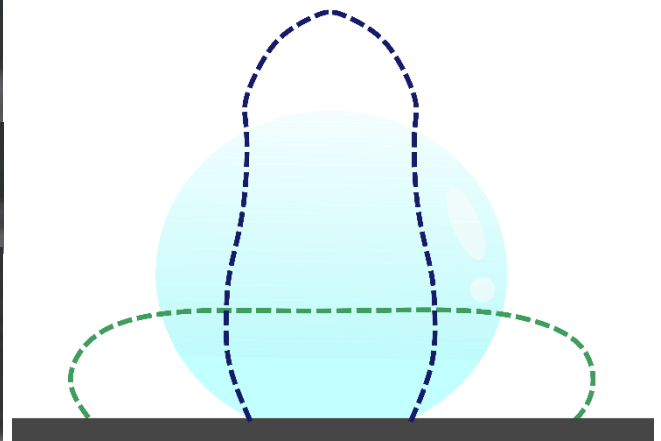


圖 5-6-5 將圖 5-6-4 去背的輪廓示意圖

(三)水滴在右側有一條親水弧線紋路板上的鋪展收縮：不對稱，向右滑動

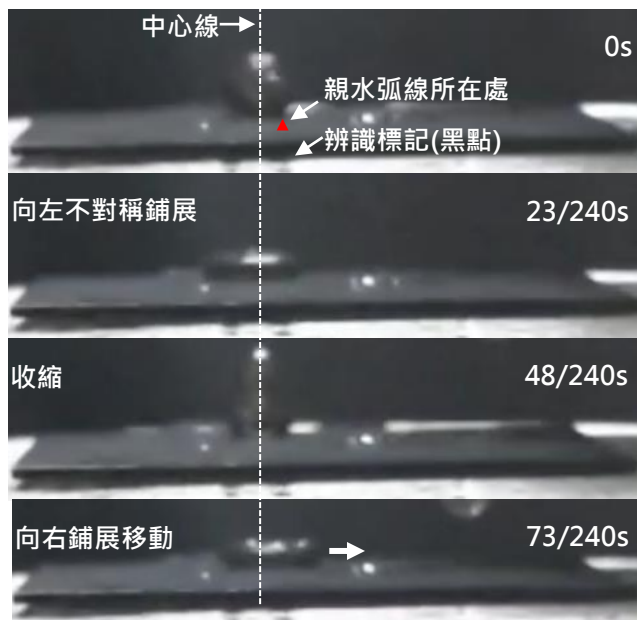


圖 5-6-6 水滴在右側有一條親水弧線紋路板上鋪展收縮

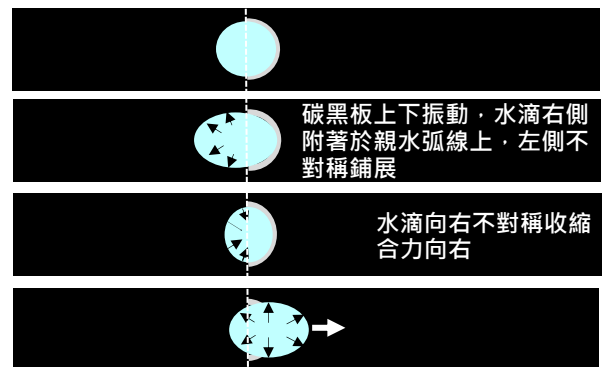


圖 5-6-7 圖 5-6-5 俯瞰示意圖

水滴右側的親水弧線(紅色三角形)限制了水滴在右側的鋪展及收縮，因振動關係，所以向左侧產生了差異明顯的不對稱鋪展，成為綠色虛線水滴樣，之後產生收縮。

水滴從綠色虛線水滴樣收縮回藍色虛線水滴樣的過程時，因為受力不均產生了向右的合力且因慣性關係，所以水滴向右移動，並因振動關係，繼續鋪展成紅色虛線水滴樣

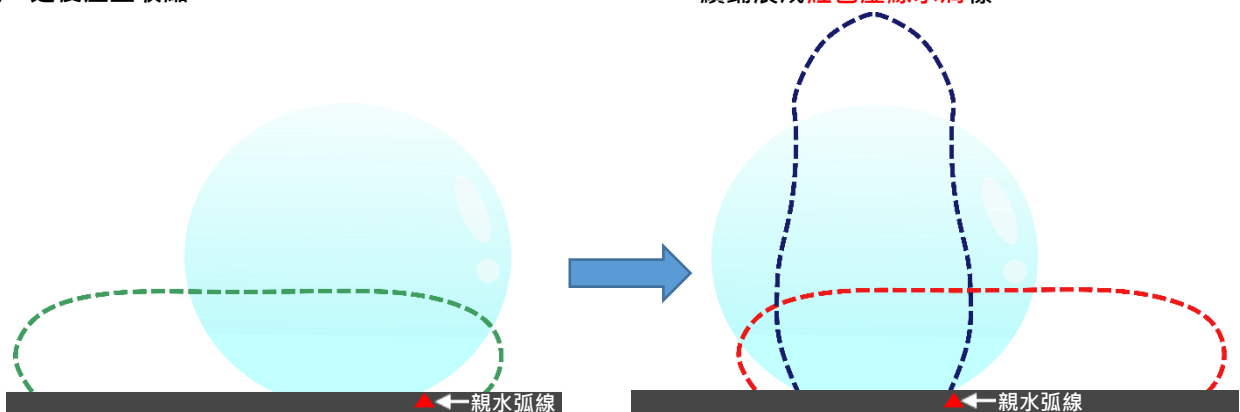


圖 5-6-8 將圖 5-6-6 去背的輪廓示意圖

(四)右側多條親水弧線紋路板(弧距 0.5d 之親水弧線道)：連續不對稱的鋪展收縮，持續向右移動

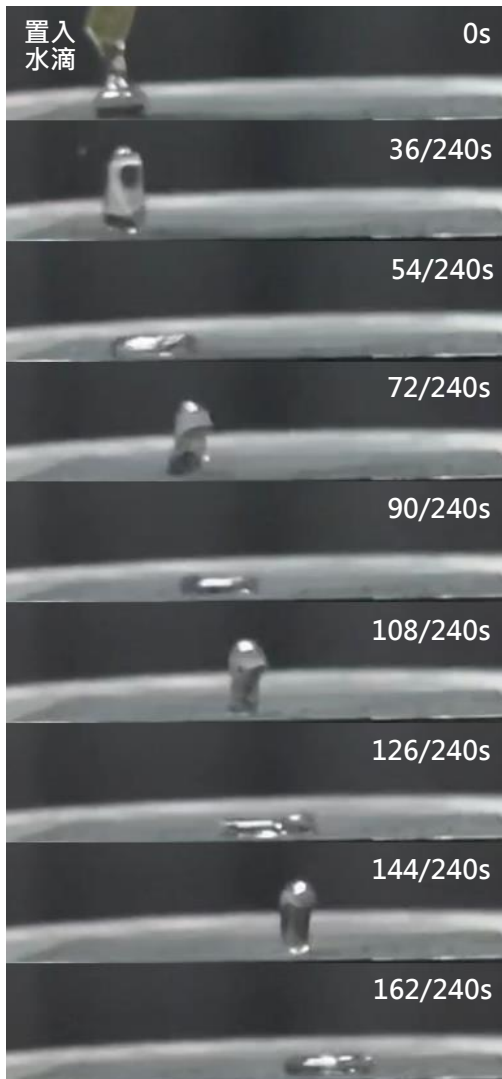


圖 5-6-9 水滴在親水弧線道持續振動-移動

由(一)~(三)可知，界面的性質決定了水滴的鋪展收縮與形態。從實驗一：水滴的基本測量(p.6)及本實驗可以相互印證出以下結果：

1.親水界面：

鋁板對水滴的黏附程度較大，振動時可使水滴相對固著，鋪展收縮的程度非常小。

2.疏水界面：

碳黑板對水滴的黏附程度非常小，振動時水滴非常容易滑動，鋪展收縮的程度非常大。

3.在碳黑板上印刻出一條親水弧線：

水滴兩側因為黏附程度的差異，產生不對稱的鋪展收縮，進而向右滑動。

根據上述發現，我們才敢大膽提出「水滴移動猜想」：在碳黑板上印刻出多條親水弧線形成親水弧線道，應該可以讓水滴持續向右移動。這個猜想，看似理所當然，卻讓我們吃足苦頭，經過了非常多次的嘗試、失敗、再嘗試，終於使水滴產生連續的不對稱鋪展收縮，達成持續向右的運動，如左圖 5-6-9！這個現象是：

本研究的重要發現及後續實驗的重要基礎

實驗 7：頻率振幅對振動-移動現象之影響探討

一、實驗步驟

調整振動機振幅、頻率並以微量滴管置水滴於親水弧線道(見 p.11 圖 5-6-1)的紋路板上(弧距為 0.5d、底板為鋁板)，測試出水滴可順利移動的最低振幅(0.1cm)及頻率(20Hz)後，逐漸提高振幅頻率，高速攝影後匯入電腦分析解釋。(註：d 為水滴直徑，0.44cm)

二、實驗結果

(一)固定振幅(0.1cm)，不同頻率

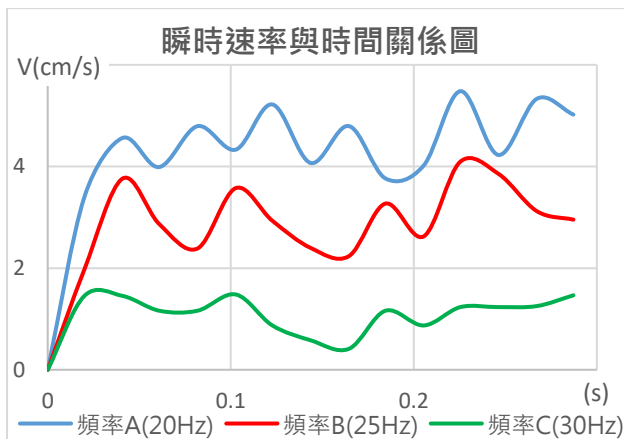


圖 5-7-1 水滴在不同頻率時，瞬時速率與時間關係圖

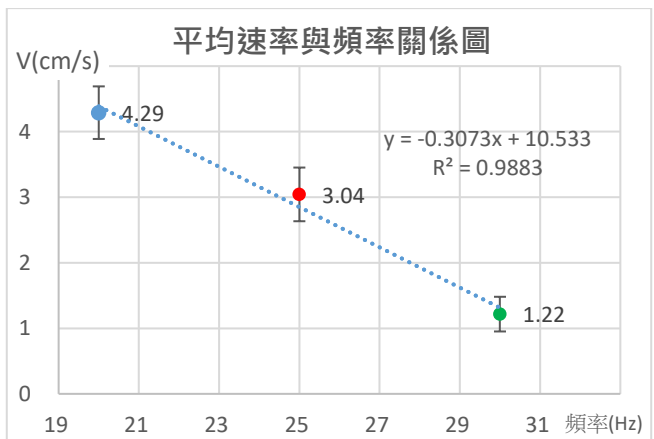


圖 5-7-2 水滴的平均速率與頻率關係圖

(二)固定頻率(20Hz)，不同振幅

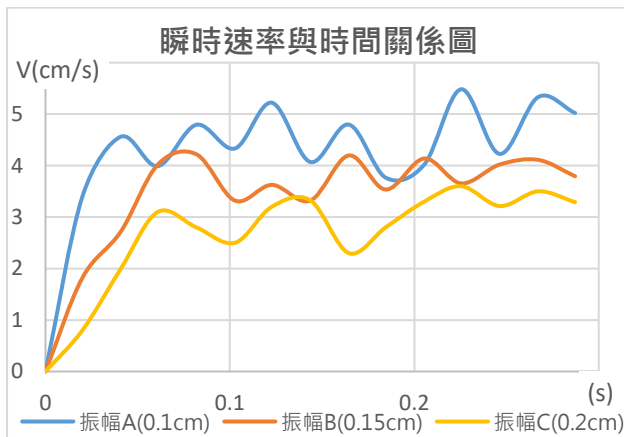


圖 5-7-3 水滴在不同振幅時，瞬時速率與時間關係圖

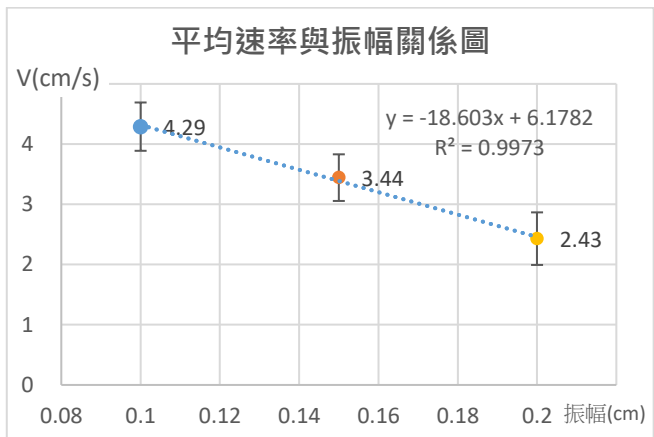


圖 5-7-4 水滴的平均速率與振幅關係圖

三、分析討論

(一)固定振幅時，頻率較小，水滴移動速率較快。因為水滴在頻率小時形變量較大，導致合力較大，移動速率大；水滴在頻率大時形變量較小，導致合力較小，移動速率小。

(二)固定頻率時，振幅較小，水滴移動速率較快。因為水滴在振幅小時形變規律，導致合力較大，移動速率大；水滴在振幅大時形變劇烈散亂，導致各方向的收縮力會互相抵銷，移動速率小。

(三)因為水滴不斷地快速鋪展收縮，受力時大時小，故移動速率會有波動、時快時慢。我們測試出水滴可順利向右移動的頻率範圍：20Hz~30Hz；振幅範圍：0.1cm~0.2cm。在此前提下，振幅、頻率與水滴移動速率呈線性負相關。

實驗 8：親疏線型對振動-移動現象之影響探討

一、實驗步驟

固定振動機振幅(0.1cm)、頻率(20Hz)並以微量滴管置水滴於不同樣式的親水線道的紋路板上(粗細約為 0.03cm、弧距為 0.5d、底板為鋁板)，高速攝影後匯入電腦分析解釋。

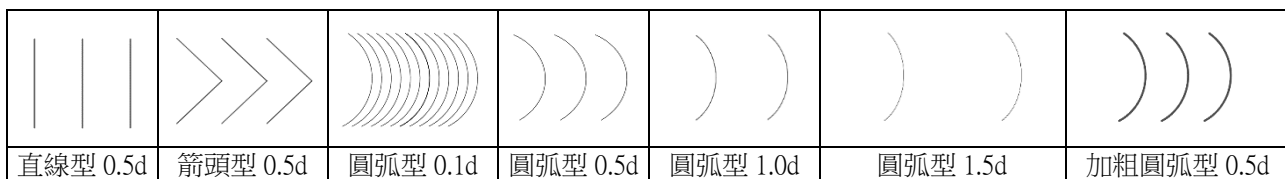


圖 5-8-1 各式線型示意圖

註：d 為水滴直徑 0.44cm

二、實驗結果

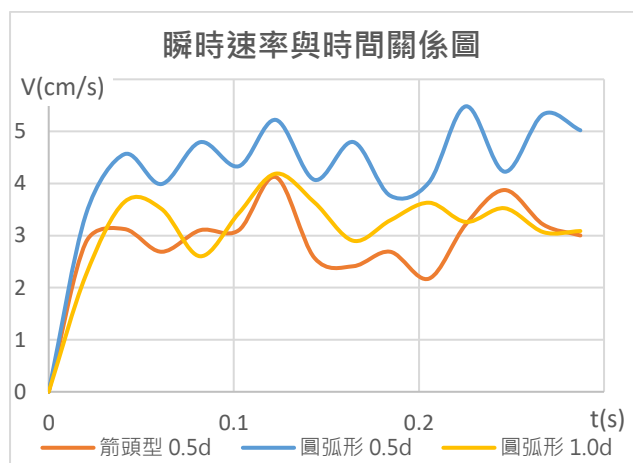


圖 5-8-2 水滴在不同線型上，瞬時速率與時間關係圖

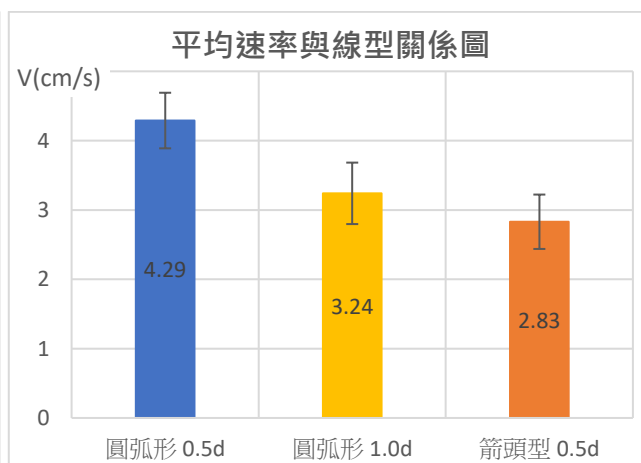


圖 5-8-3 水滴在不同線型上，平均速率與時間關係圖

※註：直線型 0.5d、圓弧型 0.1d、圓弧型 1.5d、加粗圓弧型 0.5d，水滴皆無法產生移動

三、分析討論

(一)直線型親水線條無法使水滴移動，箭型及圓弧型親水線條可使水滴移動。因為水滴是圓形收縮，所以圓弧型的線條會比箭頭型的線條產生較大的合力，因此移動速率最大。

(二)親水線條太粗、間距太小或間距太大，水滴皆不移動。線條太粗或間距太小，水滴接觸到的親水線條面積過大會導致附著力太大；間距太大，水滴無法接觸到下一條親水線條，沒有足夠的附著力作為反作用力，因此不易移動。

(三)當親水線條的間距為 0.5d 時 (如右圖)，水滴鋪展的最大長度約為 1.3d~1.4d，下方持續有 1~3 條的親水線條，會使水滴振動-移動效果最好，在綜合討論三有深入探討。

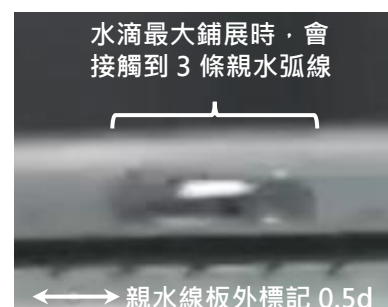


圖 5-8-3 水滴最大鋪展

實驗 9：底板性質對振動-移動現象之影響探討

一、實驗步驟

固定振動機振幅(0.1cm)、頻率(20Hz)並以微量滴管置水滴於不同材質且具親水弧線道的紋路板上(弧距為 0.5d；底板為鋁板、銅板、玻璃板)，高速攝影後匯入電腦分析解釋。

二、實驗結果

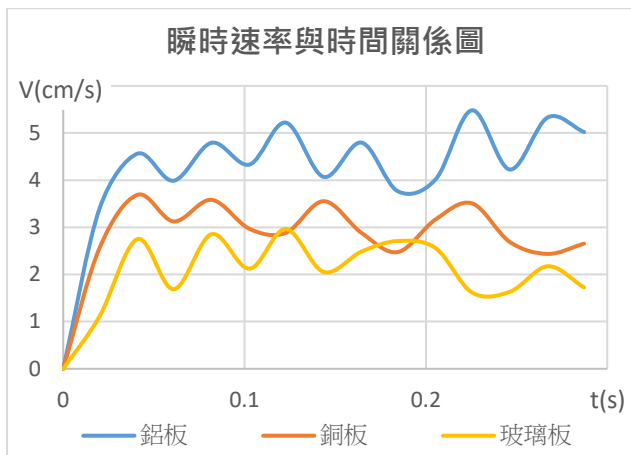


圖 5-9-1 水滴在不同底板上，瞬時速率與時間關係圖

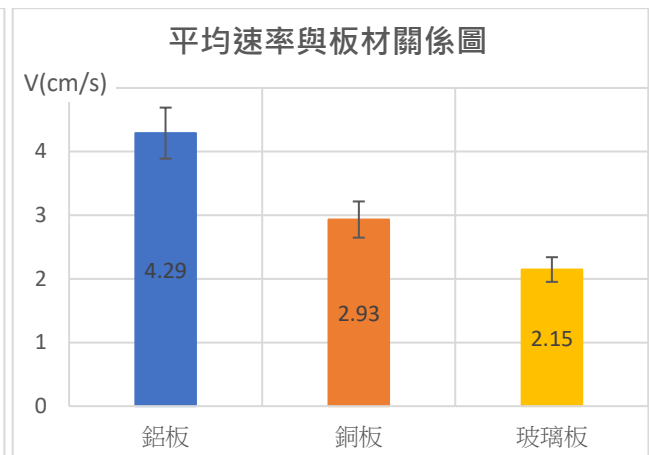


圖 5-9-2 水滴在不同底板上，平均速率與時間關係圖

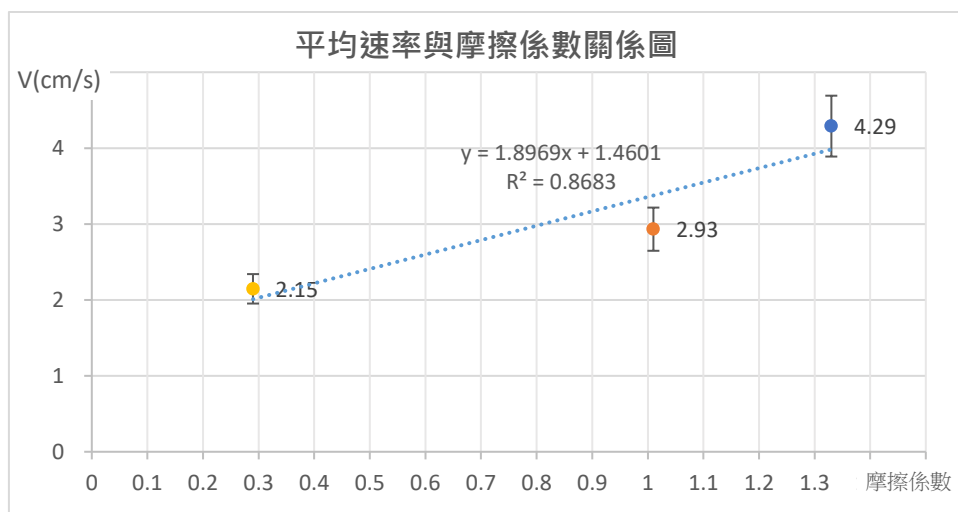


圖 5-9-3 水滴在不同底板上，平均速率與摩擦係數關係圖

三、分析討論

- (一)底板的附著力較大，水滴移動速率較快。由圖 5-9-3 可發現，在成功實驗中，底板板材的摩擦係數愈大(實驗 1)，水滴的移動速率愈大，兩者呈線性正相關。
- (二)鋁板的附著力較大，能使水滴在振動時不會太散亂也不會跳離板面，能有效率的達到合力較大的移動效果。而玻璃板與銅板附著力比鋁板較小，會導致水滴振動時有時會有跳離板面的狀況且不對稱鋪展收縮效應較差，移動效果自然較差。

實驗 10：黏度張力對振動-移動現象之影響探討

一、實驗步驟

- (一)查詢或測量各類水溶液接觸角、滾動角、張力、黏度、密度…等。
- (二)固定振動機振幅(0.1cm)、頻率(20Hz)並以微量滴管置不同種類的液滴於親水弧線道紋路板(弧距為 0.5d、底板為鋁板)上，高速攝影後匯入電腦分析解釋。

二、實驗結果

表 5-10-1 各類液滴的基本測量及平均速率

	酒精 (95%vol.)	肥皂水 (0.1%wt.)	水銀	水	甘油 (20%wt.)	甘油 (40%wt.)	甘油 (60%wt.)	甘油 (80%wt.)
接觸角 θ	12.8	34.6	142	74.2	75.3	75.4	75.9	75.2
滾動角 α	7.3	8.6	/	53.2	54.6	55.2	57.9	63.2
摩擦係數 μ	0.13	0.15	/	1.34	1.41	1.44	1.59	1.98
張力(N/m)	0.0225	0.0336	0.49	0.0732	0.0717	0.0700	0.0685	0.0674
黏度 mpa.s	1.2	1	1.55	1	1.76	3.72	10.8	60.1
密度 g/cm ³	0.81	1	13.6	1	1.05	1.10	1.16	1.21
平均速率(cm/s)	立即邊陷 無法移動	左右振動 漸漸邊陷不移動	四處滑動	4.2	5.32	6.04	4.01	左右振動 無法移動

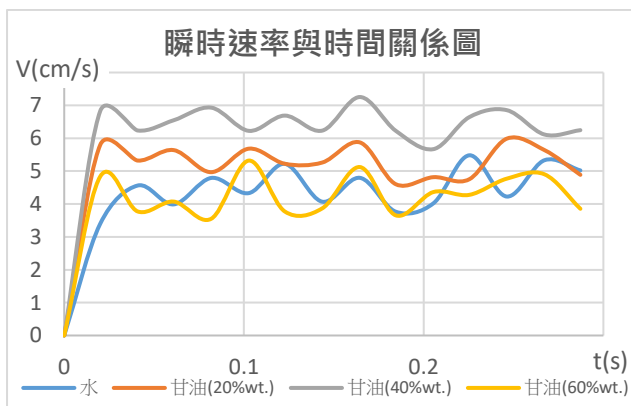


圖 5-10-1 各類液滴，瞬時速率與時間關係圖

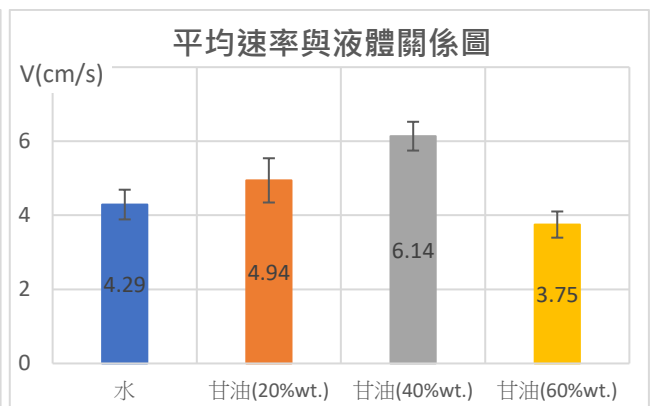


圖 5-10-2 各類液滴，平均速率與時間關係圖

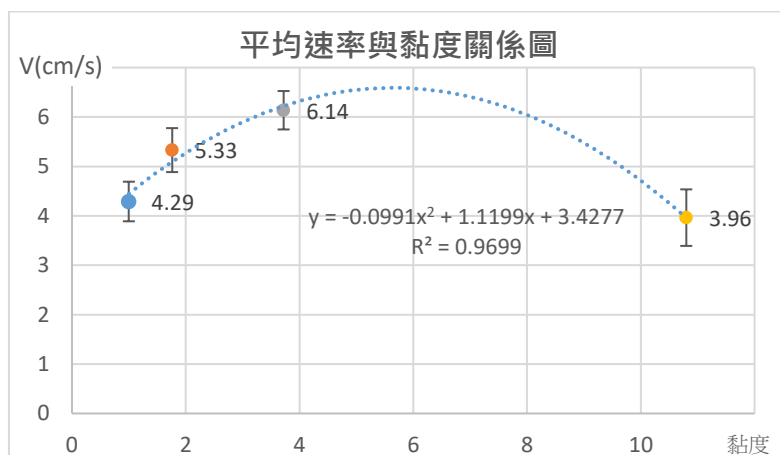


圖 5-10-3 各類液滴，平均速率與黏度關係圖

三、分析討論

研究過程中，我們尋找並測試許多種類液體，表 5-10-1 紅框中的液體黏度差異性大，藍框中的液體表面張力差異性大。為何使用甘油？因為甘油的張力與密度都與水相近，能使操縱變因單一，容易比較。選用水銀、酒精與肥皂水的理由也與此相同。實驗結果如下：

(一)黏度適中的 40%甘油液滴，移動速率最快

紅框中由水依序至 40%甘油液滴，黏度漸增，移動速率越快。因 40%甘油水溶液的不對稱鋪展收縮，形態比水更為完整不散亂。而當黏度繼續增加時(甘油 60%、甘油 80%)，移動速率開始下降，這是因為黏度過大，液體不易流動、不易鋪展收縮，最後甚至不移動。

(二)張力適中的水滴，移動速率最快，是產生不對稱鋪展收縮與前進動力的重要因素

藍框中的液滴，只有水的實驗是成功的。我們已經盡可能的取得黏度與水相近但張力差異性大的液體，無奈，不斷嘗試皆無法產生振動-移動現象。張力比水小的酒精、肥皂水，接觸角過小，根本無法維持較為完整的球體形態，**無法收縮**；張力比水大的水銀剛好完全相反，四處滑動，無法附著在親水弧線上，**無法鋪展**。

由上可知：黏度決定了液滴的流動難易、表面張力決定了液滴的形態維持，兩者與液滴的鋪展收縮息息相關，對振動-移動成功與否有重大影響。

【研究目的四：水滴在親疏交錯界面複雜運動現象探討】

實驗 11：水滴直行、繞圓周、直角過彎

一、實驗步驟

固定振動機振幅(0.1cm)、頻率(20Hz)並以微量滴管置水滴於各式親水線道的紋路板上(弧距為 0.5d、底板為鋁板)，高速攝影後匯入電腦分析解釋。

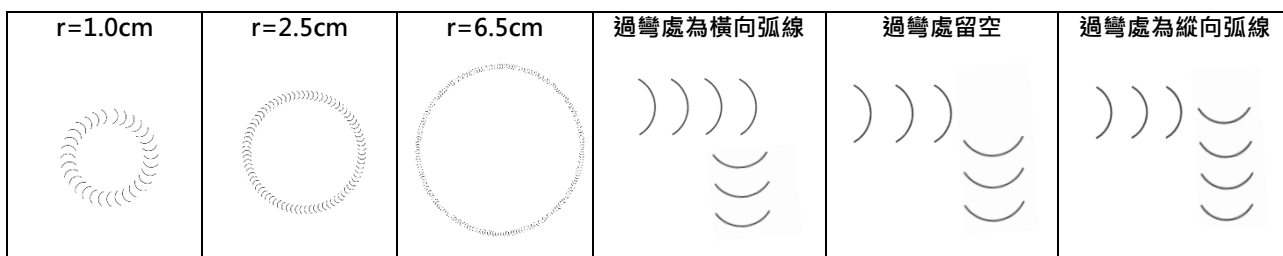


圖 5-11-1 各式線型示意圖

二、實驗結果

(一)直行

表 5-11-1 水滴直行最大距離與平均速率

	1	2	3	平均
最大移動距離(cm)	9.26	10.23	9.75	9.75
平均速率(cm/s)	5.74	6.32	6.02	6.03

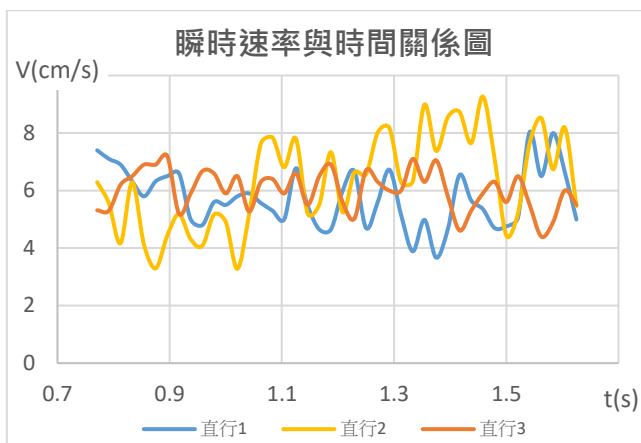


圖 5-11-2 水滴瞬時速率與時間關係圖



圖 5-11-3 水滴直行分身圖

(二)繞圓周

表 5-11-2 水滴繞圓周平均速率與平均角速率

	1	2	3	平均速率 (cm/s)	平均角速率 ω ($^{\circ}$ /s)
大圓周	2.99	2.68	2.87	2.84	25.07
中圓周	2.53	2.38	2.59	2.50	57.27
小圓周	2.39	2.35	2.58	2.44	140.06

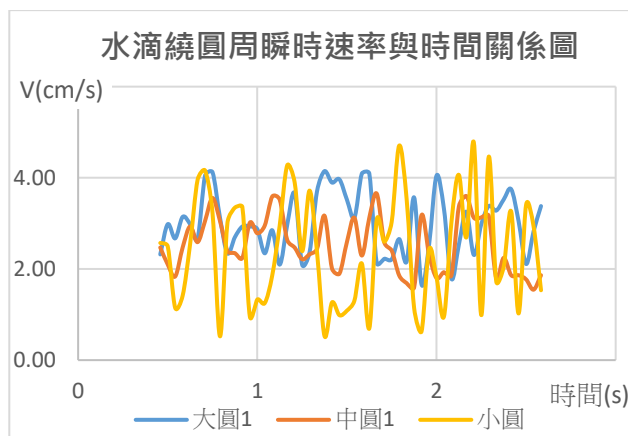


圖 5-11-4 水滴繞圓周瞬時速率與時間關係圖

(三)直角過彎

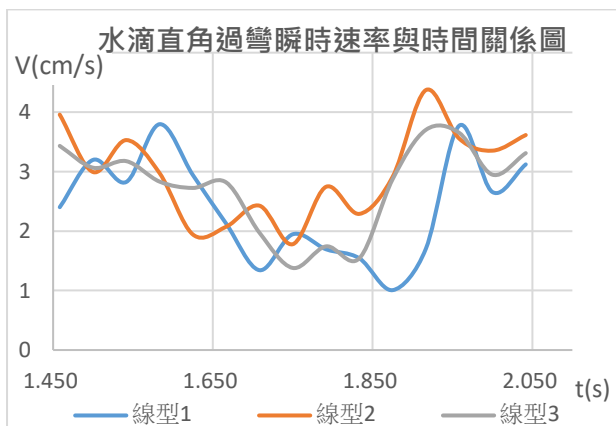


圖 5-11-5 水滴直角過彎瞬時速率與時間關係圖

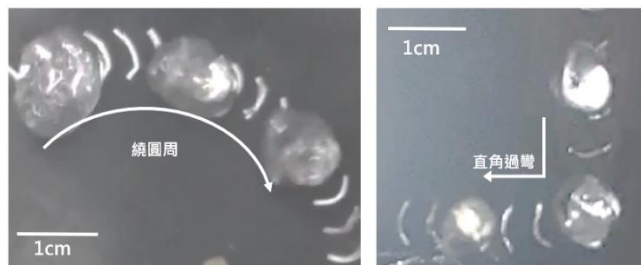


圖 5-11-6 水滴繞圓周及直角過彎分身圖

三、分析討論

(一)水滴直行

水滴在直行中的平均速率將近有 6 cm/s，而每次實驗，水滴可以移動的最大距離都將近有 10cm，之後會因鋪展收縮程度縮小而停止移動。從右圖 5-11-7，我們發現：水滴在移動時，會沾黏碳粉，會降低水滴與親水弧線之間的黏附作用，而這也是水滴最後會停止移動的原因。



圖 5-11-7 水滴沾黏碳粉

(二)繞圓周

圓周越小，水滴移動平均速率略減，角速率越快。我們查詢圓周運動相關理論，知道所需的向心力與半徑成反比，由於大圓親水弧線道較趨近於直線，故所需向心力較小；反觀中小圓由於向心力不足，導致反覆出現衝出-拉回的狀況，從上頁圖 5-11-4 很清楚的可以看到，代表小圓的黃色線段速率變化很大。

(三)直角過彎

無論那一種過彎線型，水滴皆能順利過彎，而且在過彎時速率皆會衰減。這是因為在轉彎時需要向心力，這時若維持原速率則容易會飛出或滑出。由上頁圖 5-11-5 可得知，線型 2(橘色)的過彎效果最好，速率衰減最少。這是因為轉彎處中空，單位面積上的親水線條密度最低，較不干涉水滴的移動，使水滴能順利接觸到下一條橫向的親水線。

實驗 12：挑戰地球引力 I - 水滴爬坡

一、實驗步驟

固定振動機頻率(20Hz)，調整振幅、爬坡角，並以微量滴管置不同大小水滴以及甘油水溶液 40%wt.於紋路板(弧距為 0.25d、底板為鋁板)，裝置示意如右圖 5-12-1，高速攝影後匯入電腦分析解釋。

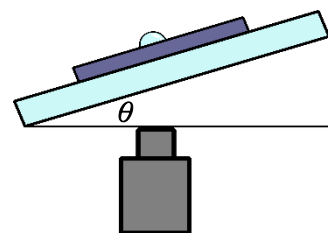


圖 5-12-1 爬坡裝置示意圖

二、實驗結果

(一)不同參數下，水滴爬坡狀況

表 5-12-1 水滴在不同參數下，爬坡狀況

參數	水滴狀態	振幅 A(0.1cm)	振幅 B(0.15cm)	狀況說明
A	無針頭大水滴 (平均 0.043g)	爬坡效果差	爬坡效果差	大顆水滴鋪展收縮效果好、但重量大 爬坡角度小，約 3°以下，成功率低
B	橘色針頭中水滴 (平均 0.008g)	爬坡效果好	爬坡效果最好	鋪展收縮效果與水滴重量達較佳平衡 爬坡角度大。振幅 A 可達 12°、振幅 B 可達 14° (註：40%wt.甘油水溶液可達 28°)
C	咖啡針頭小水滴 (平均 0.004g)	爬坡效果普通	爬坡效果普通	小顆水滴重量輕，但鋪展收縮效果差 爬坡角度小，約 5°以下，水滴容易跳動

(二)水滴在不同爬坡角下的移動分析 (註：以表 5-12-1 參數 B 進行數據分析)

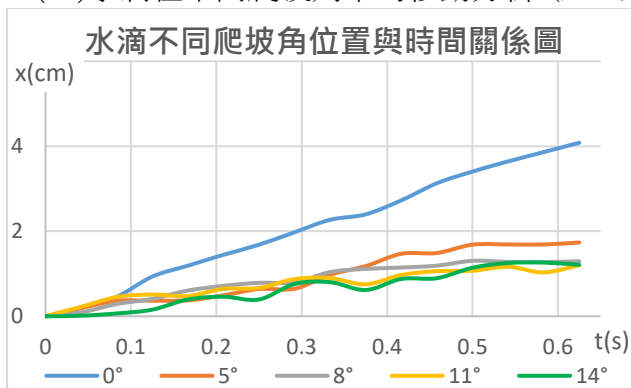


圖 5-12-2 水滴在不同爬坡角，位置與時間關係圖

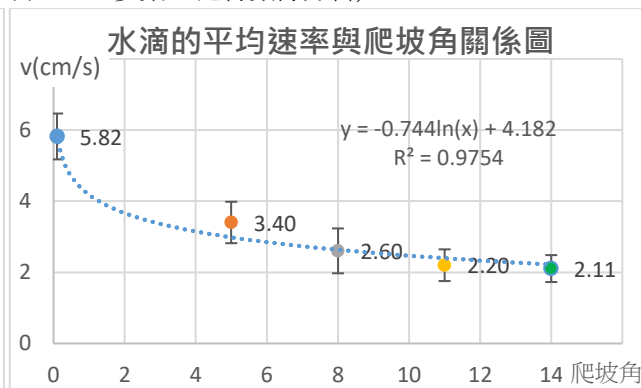


圖 5-12-3 水滴平均速率與爬坡角關係圖

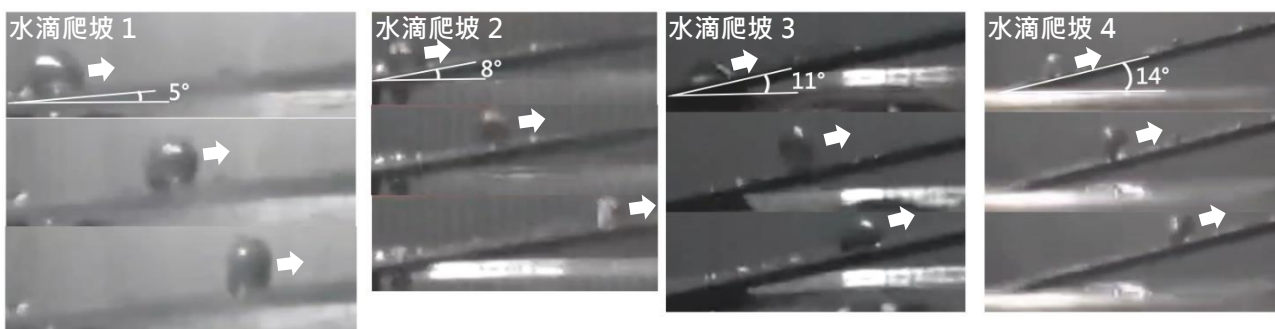


圖 5-12-4 水滴在不同角度下的爬坡過程



圖 5-12-5 水滴爬坡分身圖 (5°爬坡)

(三)甘油水溶液(40%wt.)挑戰最大爬坡角 (註：以表 5-12-1 參數 B、振幅 A 及 B 進行實驗)

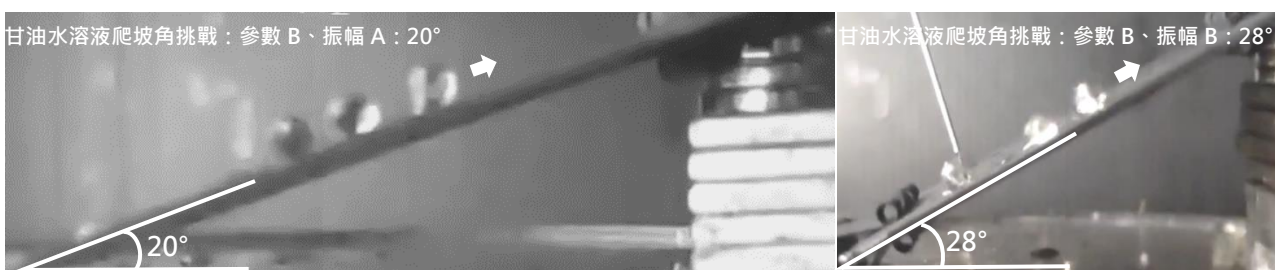


圖 5-12-6 甘油水溶液爬坡分身圖

三、分析討論

(一)本部份的實驗一開始的成功率不高。如右圖 5-12-7 所示， F 為水滴鋪展收縮時與斜面交互作用後之向上合力，必須克服水滴重量在斜面上的分力($F > mg\sin\theta$)才有可能實現水滴爬坡。因為我們有了實驗 6~11 的經驗，經不斷調整相關參數，最後發現參數 B 效果最好。

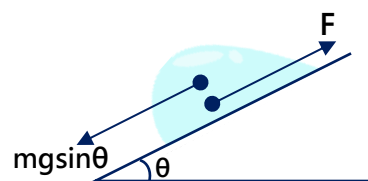


圖 5-12-7 水滴爬坡受力示意圖

(二)實驗中觀察到水滴成功爬坡的形式和先前振動-移動有很大的不同，主要有(1)直線前進、(2)前進→停止→再前進、(3)前進→後退→再前進，平均速率隨著爬坡角變大而變小。從上頁圖 5-12-2 可知：水滴在水平振動-移動，也就是爬坡角為 0 度時(藍色斜長直線)，幾乎一路向前，沒有停頓，但在 5°~14°的爬坡中，鮮見一氣呵成的登頂。所以，我們再將 x-t 圖中，不同角度的爬坡水滴一一拉出獨立檢視如下：

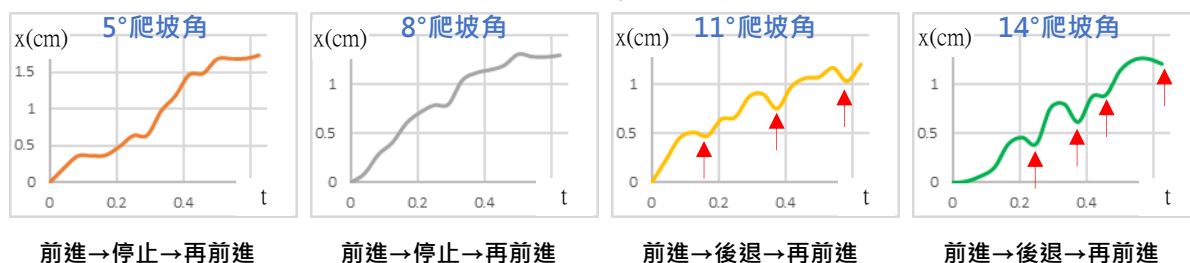


圖 5-12-8 水滴在不同爬坡角的位置與時間關係圖

從上圖可觀察出，在 5°、8°爬坡角上的水滴並無明顯後退但有停下再前進的現象；11°、14°爬坡角較大，水滴前進、後退再前進的狀況頻繁(紅色箭頭)。水滴在爬坡時會後退是因為水滴在奈米碳黑板上的摩擦力非常小，若鋪展收縮的狀態不夠完美，導致合力無法克服下滑力，自然就會後退，但下滑的路徑上仍有親水線條，水滴不會一次滑落到底。

(三)在進行完水滴爬坡實驗後，我們企圖超越水滴 14°的極限，參照實驗 10 的結果：40%wt. 甘油水溶液的移動速率最快且不對稱鋪展收縮較水滴完整，所以改用甘油水溶液挑戰最大爬坡角，發現爬坡效果果真遠比水滴更好，爬坡角也遠大於水滴，但因為角度過大，後退再前進的狀況更為頻繁，**振幅 A 爬坡角可達 20°、振幅 B 更是高達 28°，這等同於克服了自身約 1/2 的重量呢！**

實驗 13：挑戰地球引力II-水滴下坡

一、實驗步驟

固定振動機振幅(0.1cm)頻率(20Hz)，分別以不振動、直線振動、弧線振動及不同下坡角等操作變因，測定水滴及甘油水溶液(40%wt.)進行實驗，高速攝影後匯入電腦分析解釋。

二、實驗結果

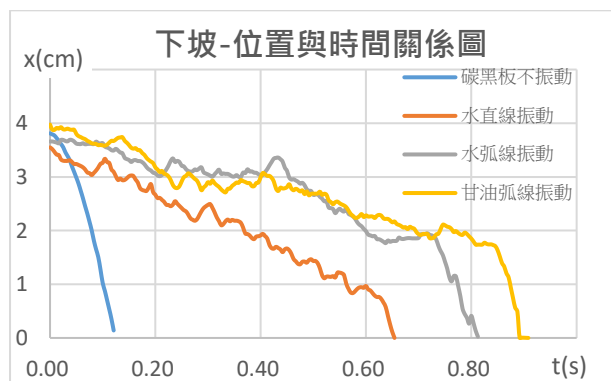


圖 5-13-1 不同類型下坡，位置與時間關係圖

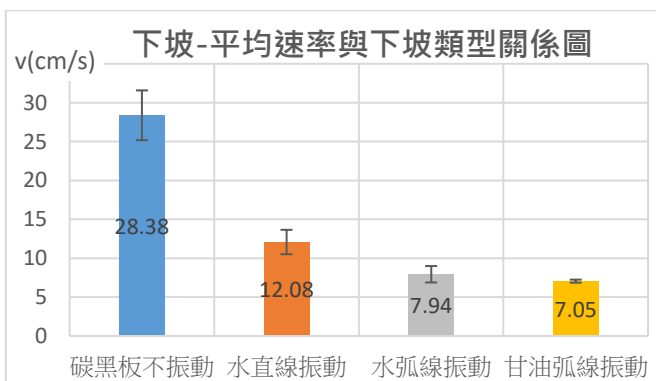


圖 5-13-2 平均速率與不同類型下坡關係圖

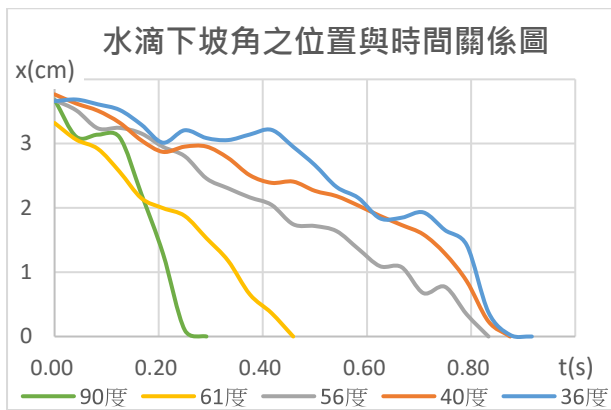


圖 5-13-3 水滴在不同下坡角，位置與時間關係圖

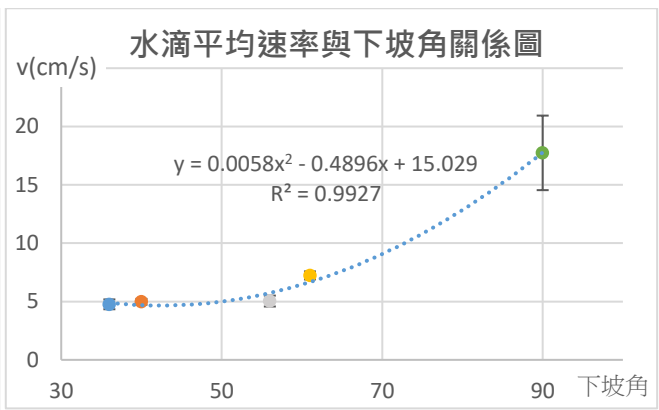


圖 5-13-4 水滴平均速率與下坡角關係圖

三、分析討論

實驗 12 顯示水滴爬坡的極限為 28° 。後來發現若將水滴置於更大角度的振動平板上時，發生下坡現象，但有意想不到的緩衝減速效果。

(一) 不同類型下坡

圖 5-13-1、5-13-2 顯示：緩衝效果仍以弧線、甘油最佳，與不振動的碳黑板相比，速度可減低至約 $1/4 \sim 1/3$ 。

(二) 不同角度的水滴下坡

圖 5-13-3、5-13-4 顯示：下坡角 $30^\circ \sim 60^\circ$ 水滴減速效果接近，不因角度變大而有明顯遞減。令人驚訝的是，水滴在垂直平板上(90 度的下坡角)，仍有明顯減速作用。

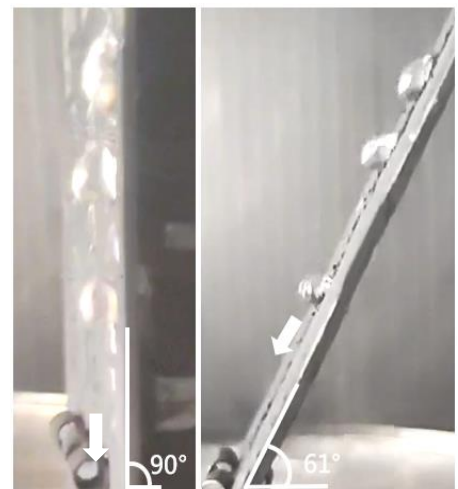


圖 5-13-5 水滴下坡分身圖

實驗 14：挑戰地球引力Ⅲ-「懸吊」水滴的下坡與爬坡

一、實驗步驟

固定振動機振幅(0.1cm)頻率(20Hz)，以弧線振動及不同下坡角、爬坡角操作變因，以「懸吊」水滴及甘油水溶液(40%wt.)進行實驗，高速攝影後匯入電腦分析解釋。

二、實驗結果

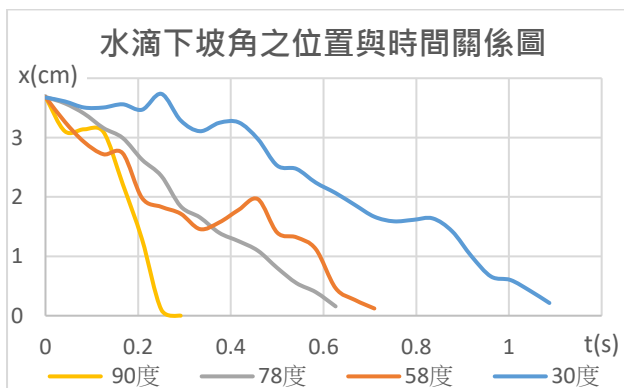


圖 5-14-1 水滴在不同下坡角，位置與時間關係圖

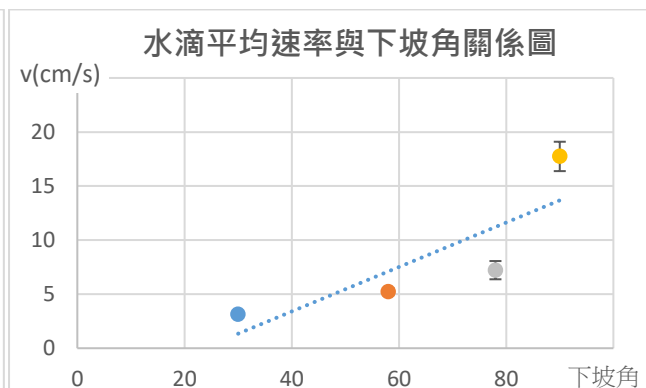


圖 5-14-2 水滴平均速率與下坡角關係圖(橫軸-類別)

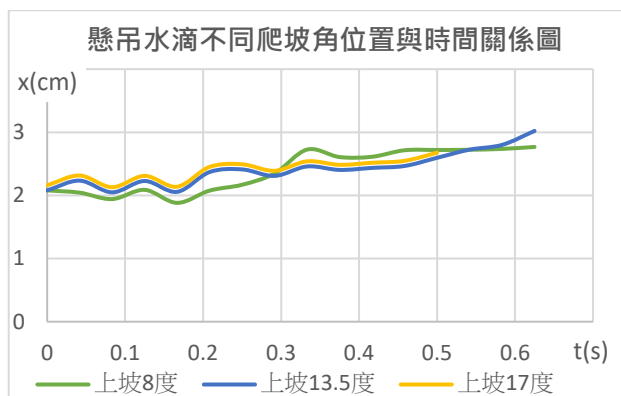


圖 5-14-3 水滴在不同爬坡角，位置與時間關係圖

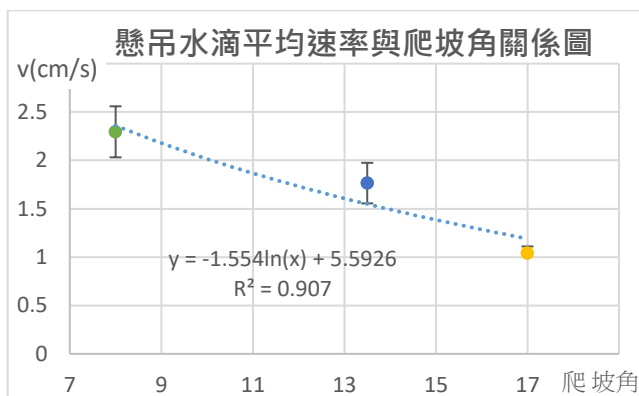


圖 5-14-4 水滴平均速率與爬坡角關係圖(橫軸-類別)

三、分析討論

在實驗 13 中，發現垂直平板上的水滴(90 度的下坡角)仍可減速下坡。本實驗一開始嘗試將角度逆時針擴大至 102 度、150 度，發現水滴竟也可以吸附於紋路板上且發生下坡(如右圖 5-14-5)，當角度大到約 163° 時，竟然開始產生了爬坡現象(如下圖 5-14-6)。因為此時水滴是在振動平板之下，為了區辨，我們將其命名為「懸吊水滴」，角度則改以補角方式呈現。

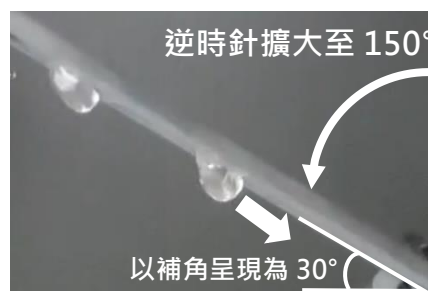


圖 5-14-5 懸吊水滴下坡分身圖

(一) 懸吊水滴的下坡

由於親水線條(鋁板)的附著力使靜止的懸吊水滴不會因重力吸引而下落，而振動的水滴因所受的靜摩擦力變為較小的動摩擦力，故開始往下坡方向移動。因為親水弧線道的設計，使不對稱鋪展收縮的合力往爬坡方向，雖然無法完全克服重力，但仍能使水滴產生減速下坡。由圖 5-14-1、5-14-2 可得知，懸吊水滴的下坡角越接近 90 度，下滑速率越快，反之則愈慢。

(二) 懸吊水滴的爬坡(水滴可達 17 度、甘油可達 31 度)

當角度減小到 17 度時，水滴運動方向反轉，**竟然發生了令我們驚奇的爬坡現象**，這真的是在研究起初無法想像到結果。因為不對稱鋪展收縮的合力，克服了水滴的重力分力，由圖 5-14-3、5-14-4 可得知，懸吊水滴的爬坡角越接近 0 度，爬坡速率越快。我們也嘗試以甘油代替水滴，發現爬坡角與實驗 12 相近，遠大於水滴的 17 度，可達 31 度。



圖 5-14-6 懸吊水滴爬坡分身圖 (8°爬坡)

陸、研究綜合討論

討論一：親疏線條的作用

一、親水板上的疏水線條作用：分割水滴

從**實驗 3** 可以推知：在鋁板上(親水板)若有 n 條相交疏水線條，定位準確使水滴滴落到線條的交點上，則可以將水滴分割成 $2n$ 等份。

二、疏水板上的親水線條作用：水滴收縮時多樣形變，進而改變運動狀態

實驗 1 的結果顯示，水滴鋪展之後，因表面張力的關係，會以環狀收縮。但若遇親水線條會使水滴收縮變慢，產生多樣化的形變。經由**實驗 3~5** 的結果，我們發現：親水線條的對稱樣式決定水滴在 X-Y 平面上所受到的力與力矩，進而影響後續收縮運動，原則如下：

旋轉對稱決定移動：有旋轉對稱～不移動；無旋轉對稱～移動

鏡面對稱決定轉動：有鏡面對稱～不轉動；無鏡面對稱～轉動

依上述原則，不考慮水滴在 Z 軸上的回彈，可歸納出四類在 X-Y 平面上的收縮運動狀態：





<p>第一類</p> <p>對稱狀態：旋轉對稱、鏡面對稱</p> <p>受力狀態：$F=0$、$L=0$</p> <p>運動狀態：不移動、不轉動</p> <p>親水線型：E、G、L、M</p> 	<p>第二類</p> <p>對稱狀態：旋轉對稱、鏡面對稱</p> <p>受力狀態：$F=0$、$L \neq 0$</p> <p>運動狀態：不移動、轉動</p> <p>親水線型：O、P、Q</p> 
<p>第三類</p> <p>對稱狀態：旋轉對稱、鏡面對稱</p> <p>受力狀態：$F \neq 0$、$L=0$</p> <p>運動狀態：移動、不轉動</p> <p>親水線型：I、J、K</p> 	<p>第四類</p> <p>對稱狀態：旋轉對稱、鏡面對稱</p> <p>受力狀態：$F \neq 0$、$L \neq 0$</p> <p>運動狀態：移動、轉動</p> <p>親水線型：N</p> 

圖 6-1-1 水滴收縮運動分類圖

討論二：建構水滴振動-移動的物理模型(一)：形態分析

利用 tracker 分析振動機的振動，匯入 EXCEL 後得到 $y-t$ 及 v_y-t 圖如下：

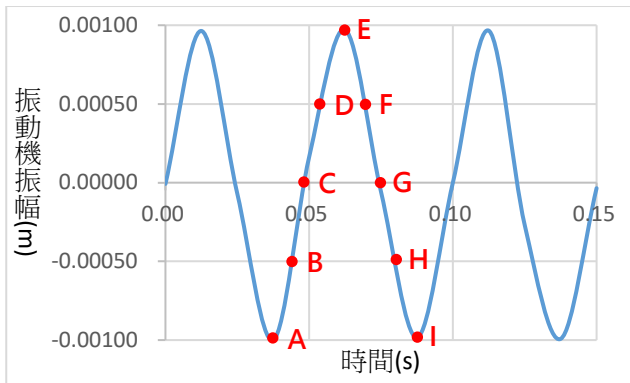


圖 6-2-1 振動機振幅與時間關係圖

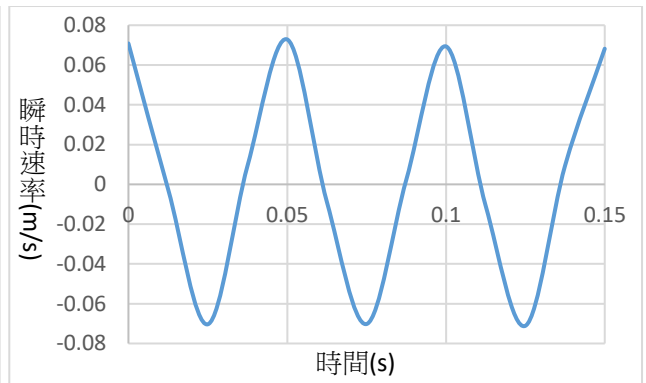


圖 6-2-2 振動機瞬時速率與時間關係圖

上圖幾乎與正、餘弦函數圖形一致，可驗證本研究的振動機進行的是簡諧振動。從上圖中可知振幅約 0.1cm、頻率接近 20Hz，這個分析結果與控制器上呈現出的數值相差無幾。為了了解水滴在不同位置、不同時間的形態，我們在上圖標示出關鍵位置，從最低點 A 經最高點 E 再回到最低點 I=A，再從**實驗 6**和**實驗 12**的影片中截取圖片並繪製模擬圖片如下：

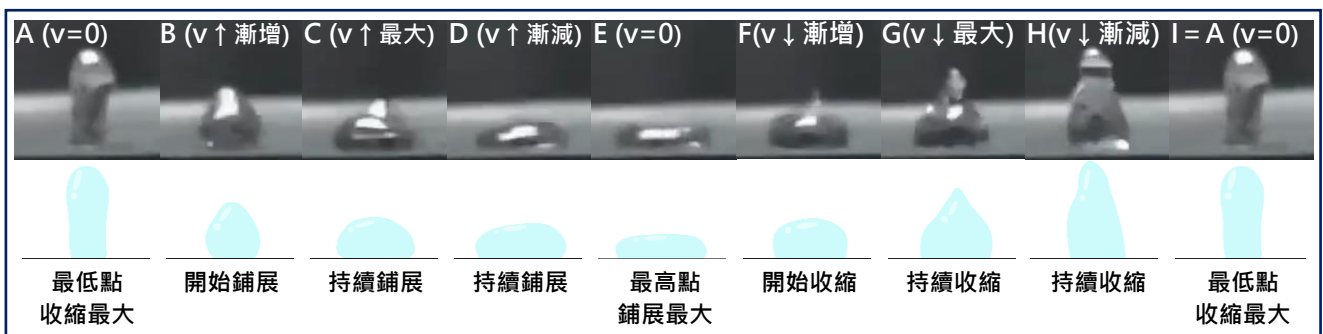


圖 6-2-3 水滴 振動-移動 形態

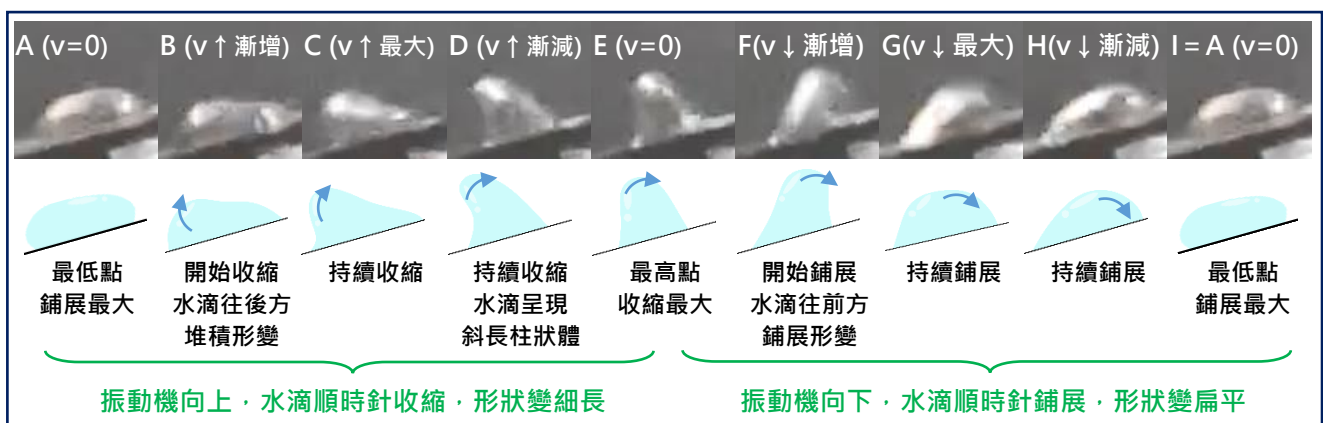


圖 6-2-4 水滴 振動-爬坡 形態

從上面兩圖中發現，在低頻時振動機振動一次，水滴也振動一次，兩者**振動週期**一致。以圖 6-2-4 為例，我們觀察水滴在**爬坡**過程中的形態，**規律重覆著「順時針方向的收縮-鋪展」**且**爬坡角愈大現象愈明顯**，只是形變程度都不及**水平振動-移動**的水滴。因為若收縮太過明顯呈斜長柱狀體，會導致重心太高反而會有一個**逆時針的力矩**，可能使水滴後退，影響爬坡。

討論三：建構水滴振動-移動的物理模型(二)：受力分析

一、水滴在親水直線上的受力分析

在實驗 3 中，水滴滴落在 1 條親水直線的中心上，會使水滴產生對稱收縮沒有移動，如下圖 A1。我們加做了偏心滴落的實驗如下圖 A2 和 A3，水滴會因為不對稱的收縮，產生橫向移動。接著，我們將 A1、A2、A3 相加，並再加做實驗如下圖 A，結果：水滴沒有移動。這樣的推論與實驗結果，跟實驗 8：水滴在親水直線道上的振動-不移動，結果完全相符。

A1：水滴落在直線中心	A2：水滴右偏心	A3：水滴左偏心	A1+A2+A3=A
$F_{A1右}$ 為水滴向右收縮的力 $F_{A1左}$ 為水滴向左收縮的力 $F_{A1右} = F_{A1左}$ ，故 $F_{A1合} = 0$	$\therefore F_{A2左} > F_{A2右}$ \therefore 水滴受向左力 $F_{A2合}$	$\therefore F_{A3右} > F_{A3左}$ \therefore 水滴受向右力 $F_{A3合}$ (若 A2、A3 線型對稱，偏心距離相等，則 $F_{A2合} = F_{A3合}$)	\therefore 水滴受力為 A1+A2+A3 $\therefore F_{A合} = F_{A1合} + F_{A2合} + F_{A3合} = 0$

圖 6-3-1 水滴在親水直線上的受力說明

二、水滴在親水弧線上的受力分析

若將親水直線替換成親水弧線，引用實驗 4 結果如下圖 B1，並加做偏心滴落的實驗 B2 和 B3，以及 B1+B2+B3 的實驗如下圖 B，結果水滴向右移動。若將圖 6-3-1 及 6-3-2 上下對照，可知這樣的推論與實驗結果，跟實驗 6、實驗 8：水滴在親水弧線道上的振動-移動完全相符。

B1：水滴落在弦線中心	B2：水滴右偏心	B3：水滴左偏心	B1+B2+B3=B
\therefore 線型不對稱， $F_{B1右} > F_{B1左}$ \therefore 水滴受向右力 $F_{B1合}$ 再與圖 6-3-1 的 A1 對照 $\therefore F_{B1右} > F_{A1右}$ 且 $F_{B1左} < F_{A1左}$ $\therefore F_{B1合} > F_{A1合} \dots\dots ①$	$\therefore F_{B2左} > F_{B2右}$ \therefore 水滴受向左力 $F_{B2合}$ 再與圖 6-3-1 的 A2 對照 $\therefore F_{B2右} > F_{A2右}$ 且 $F_{B2左} < F_{A2左}$ $\therefore F_{B2合} < F_{A2合} \dots\dots ②$	$\therefore F_{B3右} > F_{B3左}$ \therefore 水滴受向右力 $F_{B3合}$ 再與圖 6-3-1 的 A3 對照 $\therefore F_{B3右} > F_{A3右}$ 且 $F_{B3左} < F_{A3左}$ $\therefore F_{B3合} > F_{A3合} \dots\dots ③$	\therefore 水滴受力為 B1+B2+B3 $\therefore F_{B合} = F_{B1合} + F_{B2合} + F_{B3合}$ 再從①、②、③可得 $F_{B合} > F_{A合} = 0$ ；故 $F_{B合} > 0$

圖 6-3-2 水滴在親水弧線上的受力說明

上述討論可知：水滴在碰撞或振動時都有鋪展收縮，其接觸親水線條的位置與幾何，在影響了水滴的受力：(1)水滴「水平」振動時，若 $F_{B合}$ 能克服接觸面上的摩擦力(主要為親水線的附著力)，則產生移動；(2)水滴「有角度」振動時，若要是能爬坡如實驗 12、14， $F_{B合}$ 還需克服水滴的重量在斜面上的分力才行，若無法克服，則會產生緩慢下坡情形如實驗 13、14。

討論四：綜整影響水滴振動-移動的因素

影響水滴振動-移動、爬坡、下坡的因素非常多，經過實驗 6~14 的研究後，歸納以下四大類因素如圖 6-4-1 並分述如后：

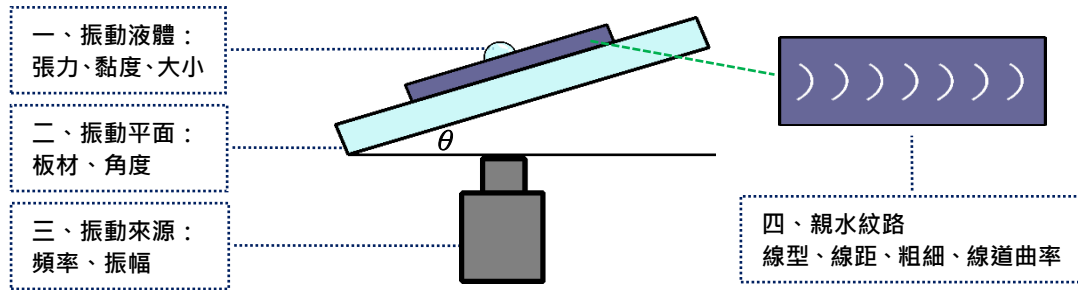


圖 6-4-1 影響水滴振動-移動因素示意圖

一、振動液體：張力、黏度、顆粒大小

在**實驗 10**中，使用了不同液體來改變張力、黏度。得出結論：「黏度及張力適中的水滴，振動-移動速率最快」且發現：「黏度決定了液滴的流動難易、表面張力決定了液滴的形態維持」等重要結論。在**實驗 12**中發現：「水滴尺寸大，因鋪展收縮容易，爬升力較大，但重量太大反而不利爬坡；水滴尺寸小，雖然重量較小有利爬坡，但在表面張力影響下，水滴不易鋪展收縮，也會導致爬升力道不足」。

二、振動平面：板材、角度

在**實驗 1**和**實驗 9**中發現：「水滴的滾動角與板材之間的黏附程度有高度相關且附著力較大，可使水滴移動速率較快，兩者呈線性正相關」。在**實驗 12**、**實驗 14**中發現：「爬坡角度越大，水滴發生反覆前進後退，越難爬坡成功」。

三、振動來源：頻率、振幅

在**實驗 7**中，分別改變頻率、振幅，且得出結論：「在頻率 20Hz~30Hz；振幅 0.1cm~0.2cm 範圍中，水滴振動-移動效果較好，振幅頻率與水滴移動速率呈線性負相關」。

四、親水紋路：線型、線距、粗細、線道曲率

在**實驗 8**中發現：「親水線條太粗、間距太小或間距太大，水滴皆不移動且水滴最大鋪展時，下方最多有 3 條親水線條」。在**實驗 11**中，嘗試了直行、繞圓周、直角過彎，可得：「當線道彎曲度越大，水滴在過彎時減速幅度越大」。

水滴振動-移動實驗，各變因的因果關係十分複雜，本研究嘗試一一釐清之後，再綜整討論於此！常常，改變了一項變因，其餘變因也都要跟著改變，才能使水滴振動-移動達到最順利的狀態。

討論五：「水滴」、「懸吊水滴」的爬坡與下坡綜整分析

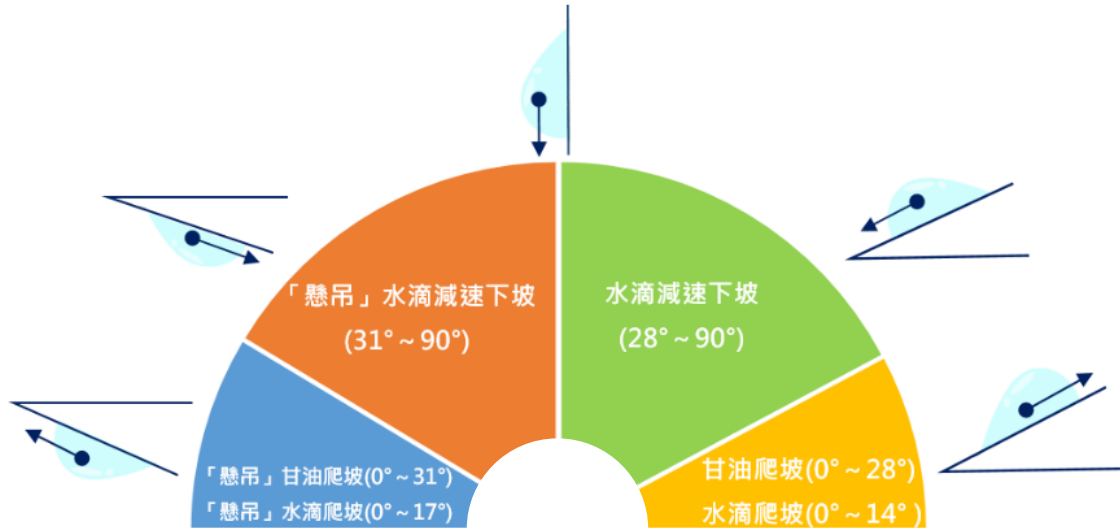


圖 6-5-1 水滴與懸吊水滴爬坡下坡角度分析圖

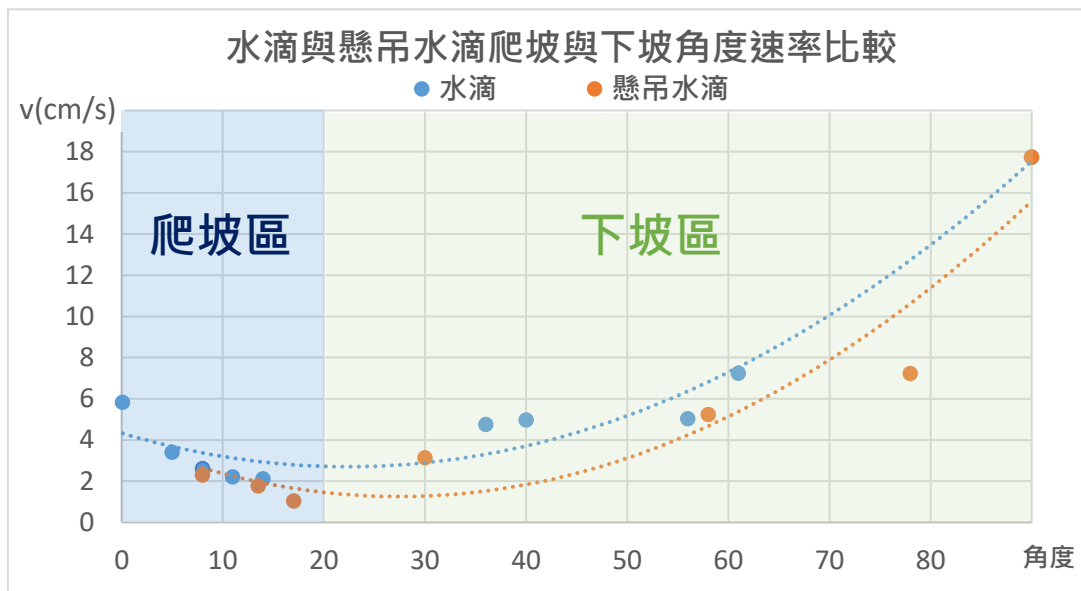


圖 6-5-2 水滴與懸吊水滴爬坡下坡速率角度關係圖

在實驗 12~14 中，我們彙整水滴與懸吊水滴爬坡與下坡的數據，整理出上圖 6-5-1 及 6-5-2 後發現：爬坡、下坡的**臨界角度**非常接近，曲線也非常一致，茲分述如下：

一、水滴的爬坡與下坡

實驗 12 結果發現：水滴在 0~14 度時(甘油為 0~28 度)，因為不對稱鋪展收縮產生的合力能克服重力分力使水滴爬坡。而在**實驗 13** 中：水滴在 28~90 度時，由於重力分力逐漸變大且大於鋪展收縮產生的合力，水滴發生下坡，但會有減緩水滴下坡速率的效果。

二、懸吊水滴的爬坡與下坡

在**實驗 14** 中，持續加大底板角度，在超過 90 度時，由於親水線的附著力，導致水滴成懸吊狀，且會發生減速下坡。最後，懸吊水滴在與實驗 12 結果相近的 0~17 度(甘油為 0~31 度)時，不對稱鋪展收縮產生向前的合力已大於重力分力，因而達到往前爬坡的效果。

柒、研究結論與建議

一、結論

一顆水滴的運動，幾乎囊括了國中二下到三上關於「力、運動、功與能」的學習內容：

- (一)振動機對水滴**做功**使其具有**動能**，之後產生**形變**儲存成**彈力位能**
- (二)形變的水滴因**恢復力**收縮，彈力位能又轉換回動能，與**力學能守恆**、**簡諧運動**相關
- (三)收縮中的水滴因親水線條給予的**反作用力**，產生不對稱鋪展收縮而具有**速度**、**加速度**
- (四)收縮後的水滴因**慣性**持續移動，由於**兩力平衡**仍需克服親水線條的**摩擦力**才可持續向前
- (五)水滴若遇轉彎或**圓周運動**，親水線條的摩擦力可作為**向心力**
- (六)水滴會爬坡或者下坡，與水滴所受**合力**及水滴重量在**斜面上**的**水平分力**有關

從剛開始研究水滴的彈跳現象，一直到實驗 6 發現水滴的連續不對稱鋪展收縮，這個嘗試長達了將近半年，之後才能有後續實驗 7~實驗 14 的成果，這過程我們經歷了：

觀察再觀察 → 發現水滴碰撞時的不對稱鋪展收縮 → 假設水滴能因振動達成連續的不對稱鋪展收縮 → 提出水滴移動猜想 → 實驗(多次失敗) ↔ 多次修正變因、技巧再實驗(成功) → 分析討論 → 歸納結論：本研究的關鍵現象~不對稱鋪展收縮

這些都是因為堅信與堅持，一步一步探究才能獲得的成果！

二、實驗改進建議與未來展望

- (一)更精良的親疏表面處理技術、優化實驗器材，並使親水線外凸，可增加水滴移動距離和爬坡角度，也可精準控制水滴運動，實現水滴運輸。
- (二)尋找取代振動使水滴形變的方法，能使其交互作用更精確、直接。
- (三)使用幀數較高的高速攝影，能看到水滴運動更細微的現象。

捌、參考資料

1. Brunet, P, J Eggers, and R D Deegan. "Vibration-Induced Climbing of Drops." Physical review letters 99.14 (2007): 144501 - 144501. Web.
2. Li, Huizeng et al. "Spontaneous Droplets Gyration via Asymmetric Self-Splitting on Heterogeneous Surfaces." Nature communications 10.1 (2019): 950 - 950. Web.
3. Linke, H et al. "Self-Propelled Leidenfrost Droplets." Physical review letters 96.15 (2006): 154502 - 154502. Web.
4. 李明芳等人(2022)：自然與生活科技第四冊、第五冊。臺南市：翰林。

【評語】 030106

水滴透過親疏水材料與振動的實驗可以成為許多應用上的基礎。本研究釐清許多水滴在親疏水介面的移動方式並發現逆行爬坡的現象，相當有趣且具創意。

作品海報

摘要

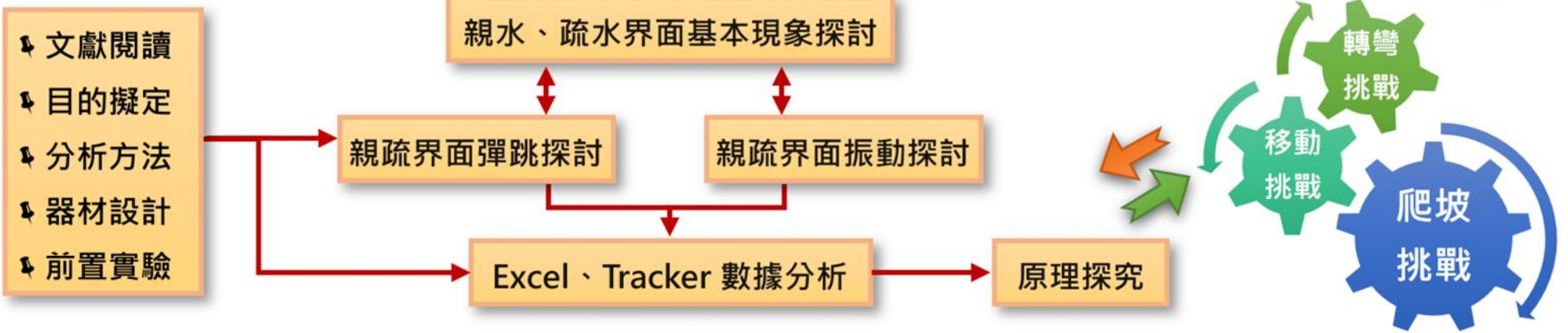
當水滴碰撞親疏交錯界面，直線、弧線及螺線親疏線條決定了水滴鋪展收縮的對稱形態與受力情形，使水滴有分割、彈跳、移動、旋轉等多樣化的運動現象。本研究嘗試控制水滴，使水滴可以產生移動、迴轉、轉圈、爬坡。

研究目的與流程

思考醞釀

研究實踐

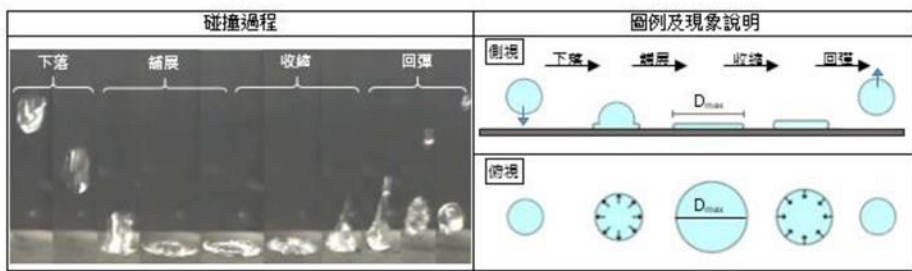
創新應用



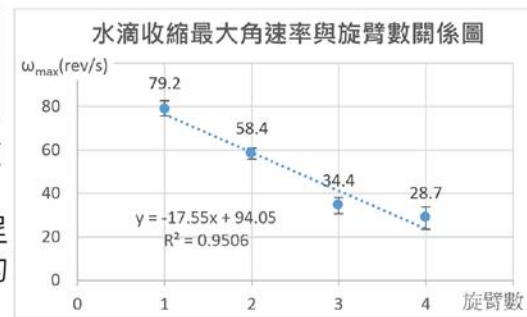
研究結果與討論

水滴在親水或疏水界面基本現象

實驗一：靜態水滴、動態水滴的基本測量



	1 條旋臂	2 條旋臂	3 條旋臂	4 條旋臂
$\bar{\omega}_{max}(rev/s)$	79.2	58.4	34.4	28.7



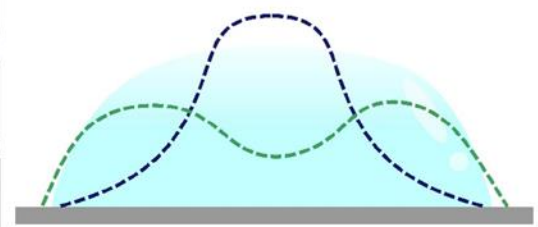
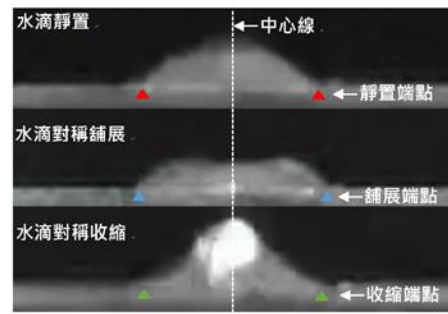
我們發現，若有N條螺線，水滴收縮時因受力不均會產生N條旋臂，並伴隨轉動。旋臂數與水滴轉速呈線性負相關，水滴順著螺線轉動的最大角速率可達79 rev/s

水滴在親疏交錯界面之振動-移動現象

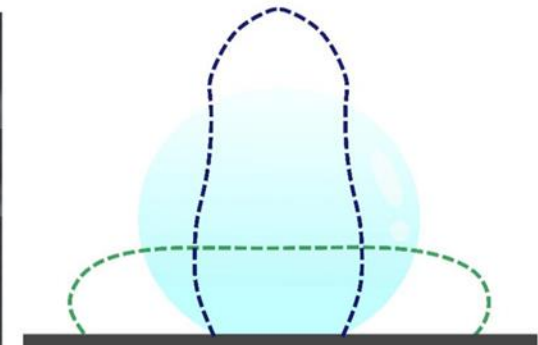
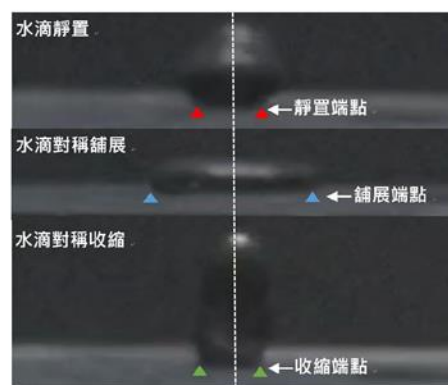
實驗六：觀察分析水滴在不同板材上的振動差異

提出並驗證「水滴移動猜想」

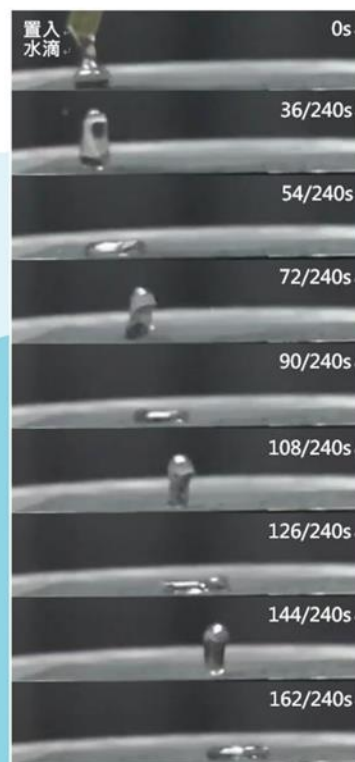
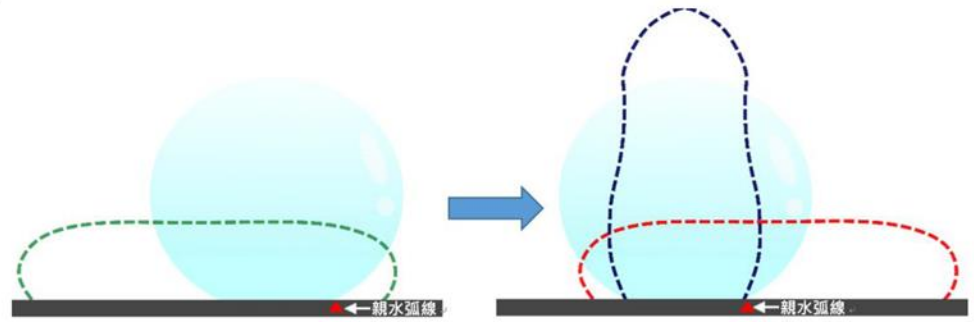
(一)水滴在鋁板上的鋪展收縮：對稱，兩側端點滑動量非常小，幾近固著



(二)水滴在破黑板上的鋪展收縮：對稱，兩側端點滑動非常明顯



(三)水滴在右側有一條親水弧線紋路板上的鋪展收縮：不對稱，向右滑動



根據上述發現，我們大膽提出「水滴移動猜想」：在破黑板上印刻出多條親水弧線形成親水弧線道，應該可以讓水滴持續向右移動。經過了非常多次的嘗試再嘗試，終於使水滴產生連續的不對稱鋪展收縮，達成左圖持續向右的運動！這個現象是：本研究的重要發現及後續實驗的重要基礎

水滴碰撞親疏交錯界面之彈跳現象

實驗三：水滴碰撞「直線型」親疏線條之彈跳現象探討

線型	紋路板	碰撞結果截圖	碰撞結果圖例
1 條親水直線			
1 條疏水直線			
2 條相交親水直線			
2 條相交疏水直線			
3 條中空親水直線			
3 條中空疏水直線			
4 條中空親水直線			
4 條中空疏水直線			

實驗四：水滴碰撞「弧線型」親疏線條之彈跳現象探討

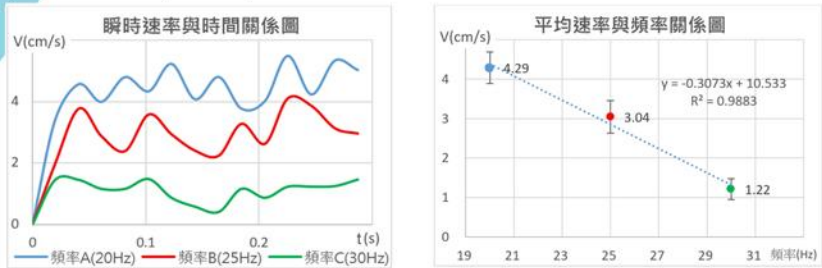
線型	紋路板	碰撞結果截圖	碰撞結果圖例
1 條 1/4 親水弧線			
1 條 1/2 親水弧線			
1 條 3/4 親水弧線			
2 條 1/4 親水弧線			
3 條 1/4 親水弧線			

實驗五：水滴碰撞「螺線型」親疏線條之彈跳現象探討

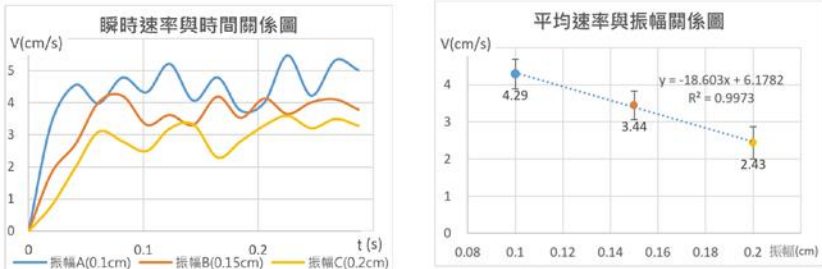
線型	紋路板	碰撞結果截圖	碰撞結果圖例
1 條親水螺線			
2 條親水螺線			
3 條親水螺線			
4 條親水螺線			

實驗七：頻率振幅對振動-移動現象之影響探討

(一)固定振幅(0.1cm)·不同頻率

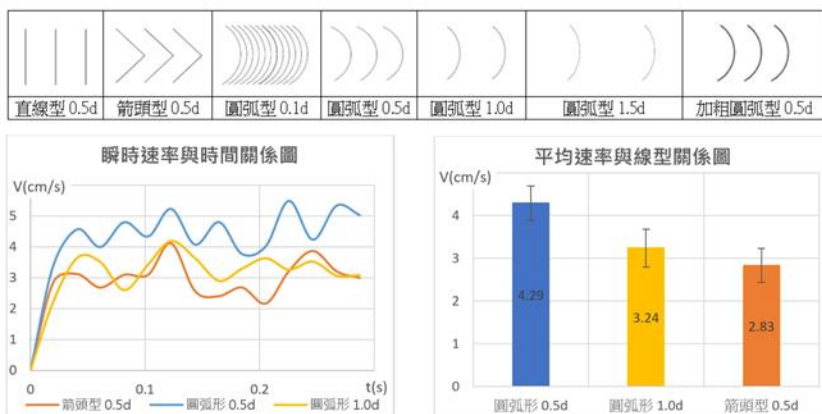


(一)固定頻率(20Hz)·不同振幅

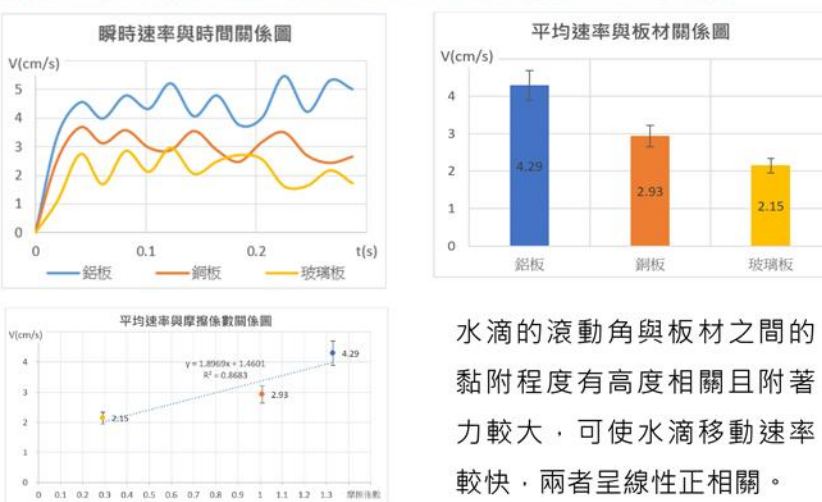


在頻率20Hz~30Hz；振幅0.1cm~0.2cm範圍中，水滴振動-移動效果較好，振幅頻率與水滴移動速度呈線性負相關。

實驗八：親疏線型對振動-移動現象之影響探討

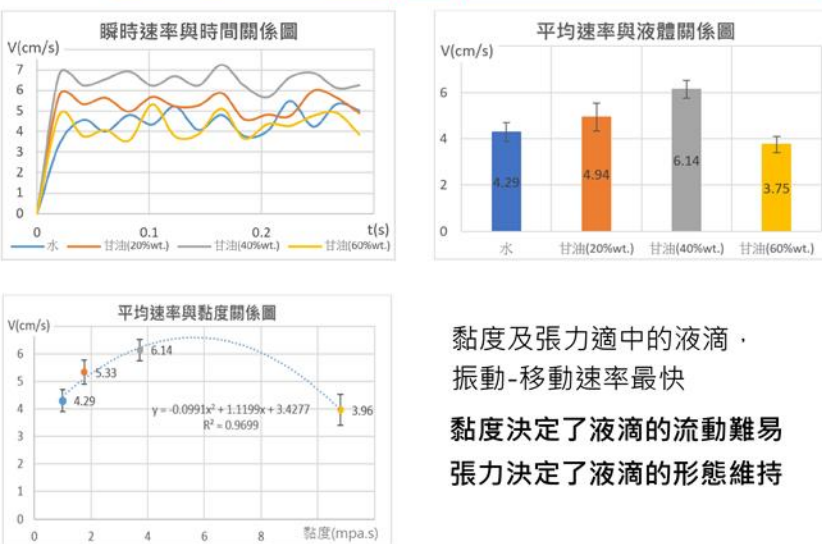


實驗九：底板性質對振動-移動現象之影響探討



實驗十：黏度張力對振動-移動現象之影響探討

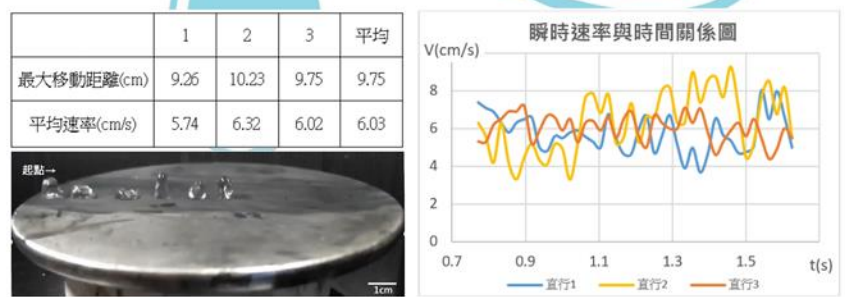
	酒精(95%vol.)	肥皂水(0.1%wt.)	水銀	水	甘油(20%wt.)	甘油(40%wt.)	甘油(60%wt.)	甘油(80%wt.)
接觸角 θ	12.8	34.6	142	74.2	75.3	75.4	75.9	75.2
滾動角 α	7.3	8.6		53.2	54.6	55.2	57.9	63.2
摩擦係數 μ	0.13	0.15		1.34	1.41	1.44	1.59	1.98
張力(N/m)	0.0225	0.0336	0.49	0.0732	0.0717	0.0700	0.0685	0.0674
黏度 mpa.s	1.2	1	1.55	1	1.76	3.72	10.8	60.1
密度 g/cm ³	0.81	1	13.6	1	1.05	1.10	1.16	1.21
平均速率(cm/s)	立即開始無法移動	左右振動漸漸開始不移動	四處滑動	4.2	5.32	6.04	4.01	左右振動無法移動



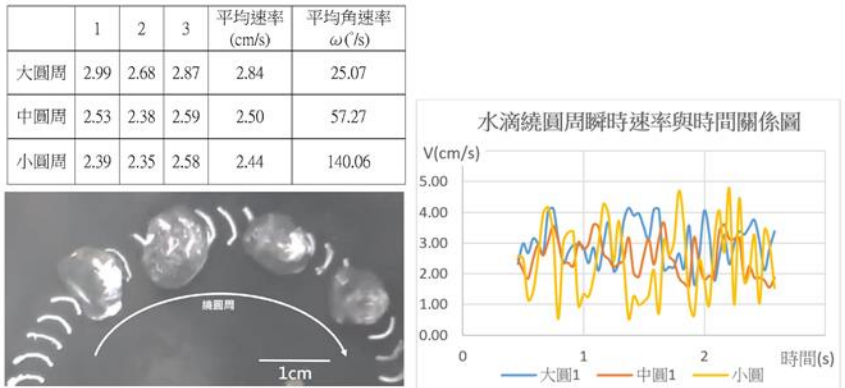
水滴在親疏交錯界面複雜運動現象

實驗十一：水滴直行、繞圓周、直角過彎

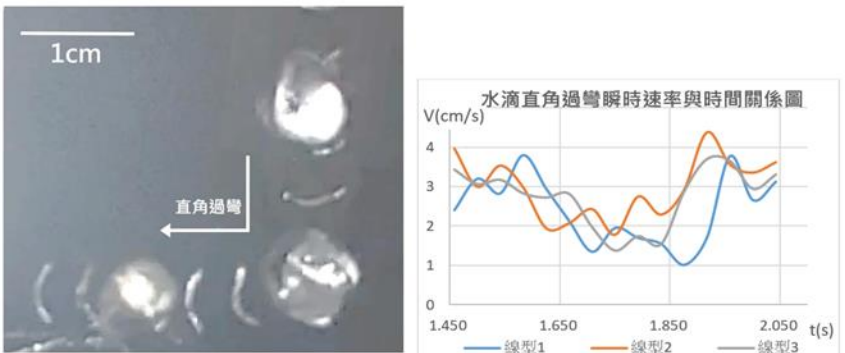
(一)直行



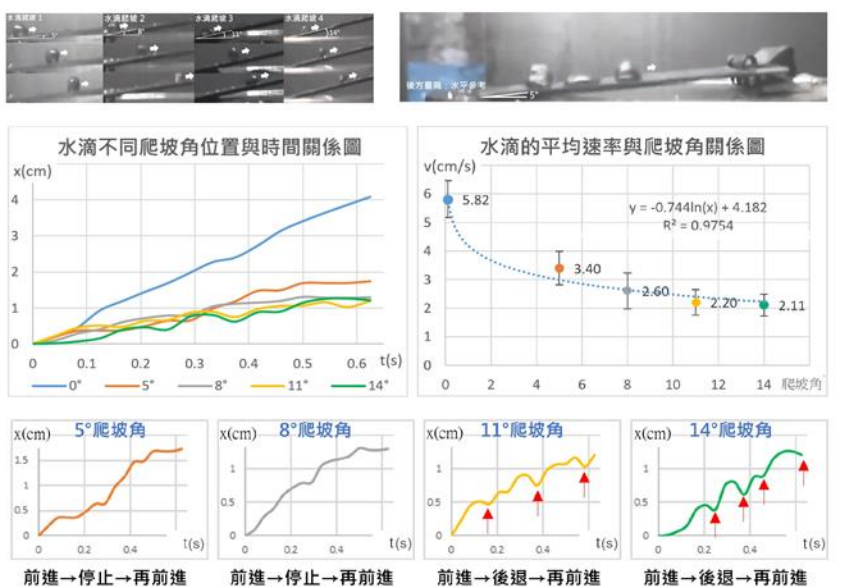
(二)繞圓周



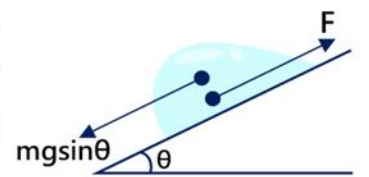
(三)直角過彎



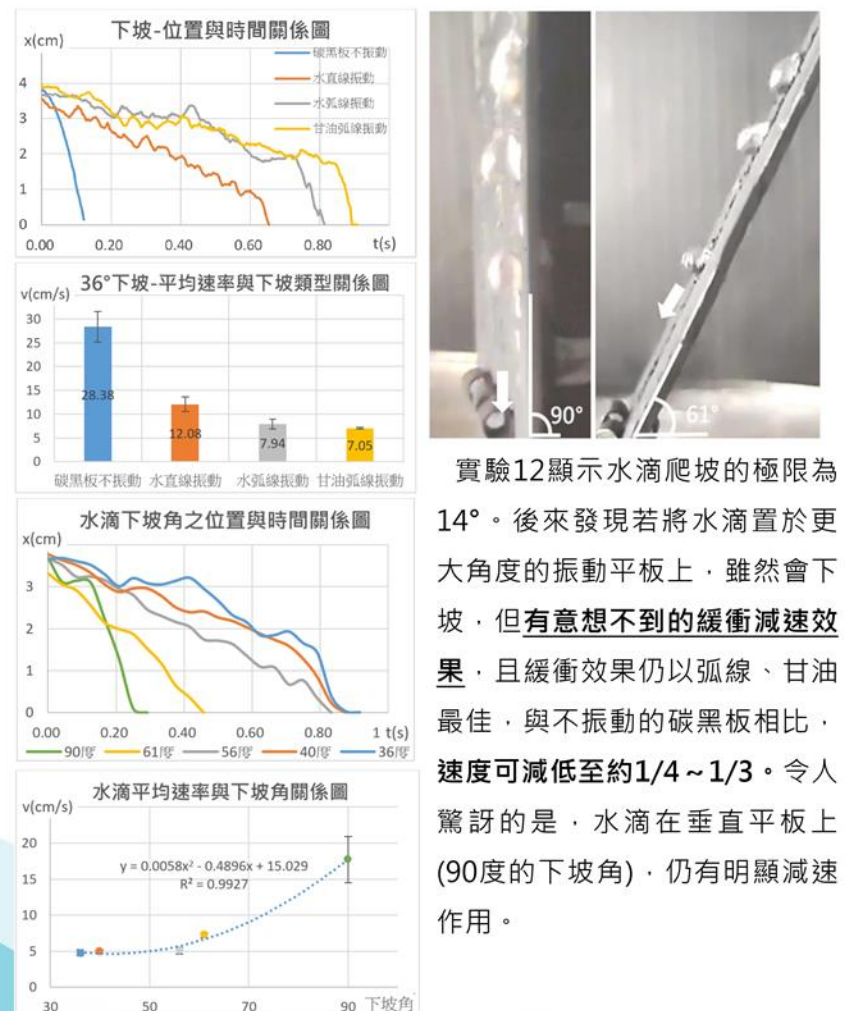
實驗十二：挑戰地球引力 I-水滴爬坡



水滴爬坡時有後退再前進現象，F為水滴鋪展收縮時與斜面交互作用後之向上合力，必須克服水滴重量在斜面上的分力 ($F > mg\sin\theta$)

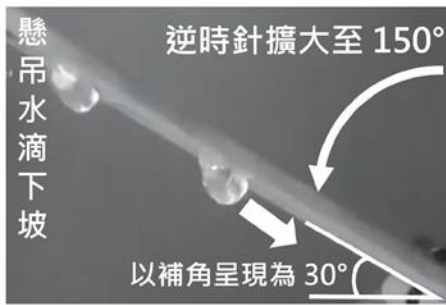
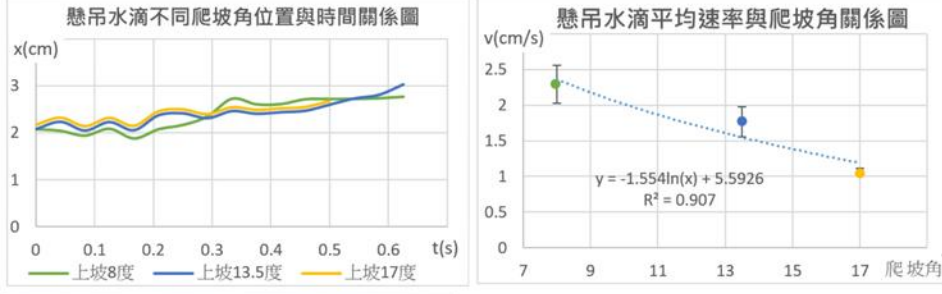
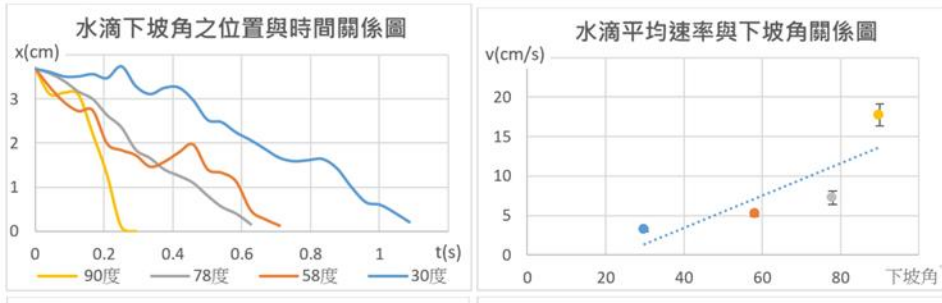


實驗十三：挑戰地球引力 II-水滴下坡



實驗12顯示水滴爬坡的極限為14°。後來發現若將水滴置於更大角度的振動平板上，雖然會下坡，但有意想不到的緩衝減速效果，且緩衝效果仍以弧線、甘油最佳，與不振動的碳黑板相比，速度可減低至約1/4~1/3。令人驚訝的是，水滴在垂直平板上(90度的下坡角)，仍有明顯減速作用。

實驗十四：挑戰地球引力Ⅲ-懸吊水滴的爬坡與下坡



本實驗一開始嘗試將角度逆時針再擴大，發現水滴竟也可以下坡，而當角度大到約163°時，水滴竟然開始產生了爬坡現象。將其改命名為「懸吊水滴」



研究綜合討論

討論一：親疏線條的作用

一、親水板上的疏水線條作用：分割水滴

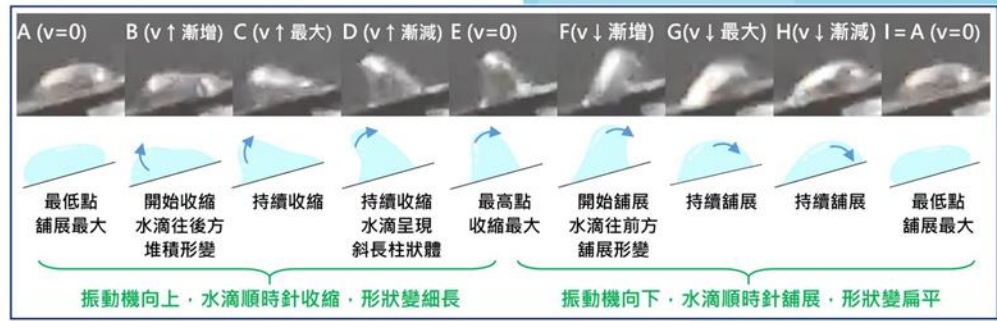
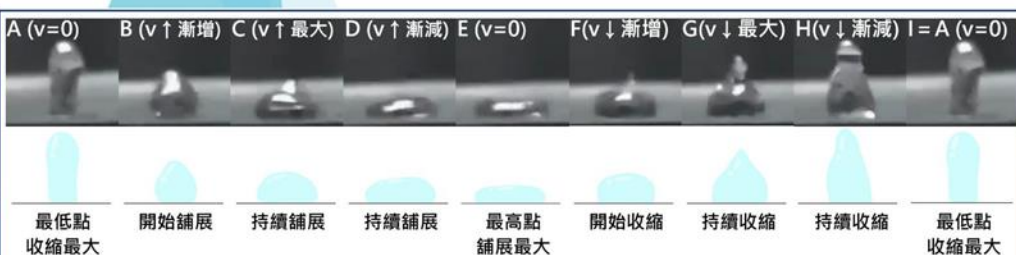
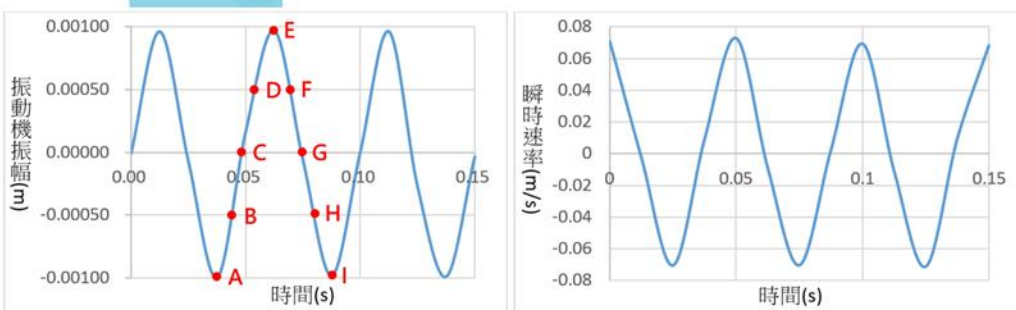
從實驗3可以推知：在鋁板上若有n條相交疏水線條，則可以將水滴分割成2n等份。

二、疏水板上的親水線條作用：水滴收縮時多樣形變，進而改變運動狀態

旋轉對稱決定移動：有旋轉對稱～不移動；無旋轉對稱～移動
鏡面對稱決定轉動：有鏡面對稱～不轉動；無鏡面對稱～轉動

<p>第一類</p> <p>對稱狀態：旋轉對稱、鏡面對稱</p> <p>受力狀態：$F=0$、$L=0$</p> <p>運動狀態：不移動、不轉動</p> <p>親水線型：E、G、L、M</p>	<p>第二類</p> <p>對稱狀態：旋轉對稱、鏡面對稱</p> <p>受力狀態：$F=0$、$L \neq 0$</p> <p>運動狀態：不移動、轉動</p> <p>親水線型：O、P、Q</p>
<p>第三類</p> <p>對稱狀態：旋轉對稱、鏡面對稱</p> <p>受力狀態：$F \neq 0$、$L=0$</p> <p>運動狀態：移動、不轉動</p> <p>親水線型：I、J、K</p>	<p>第四類</p> <p>對稱狀態：旋轉對稱、鏡面對稱</p> <p>受力狀態：$F \neq 0$、$L \neq 0$</p> <p>運動狀態：移動、轉動</p> <p>親水線型：N</p>

討論二：建構水滴振動-移動、爬坡的物理模型(一)：形態分析



水滴的振動週期與振動機相同。且水滴在爬坡過程中的形態，規律重覆著「順時針方向的收縮-鋪展」且爬坡角愈大現象愈明顯

討論三：建構水滴振動-移動、爬坡的物理模型(二)：受力分析

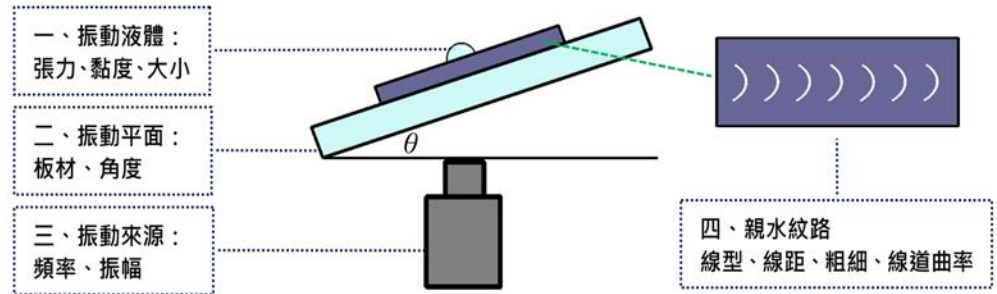
A1：水滴落在直線中心	A2：水滴右偏心	A3：水滴左偏心	A1+A2+A3=A
$F_{A1右}$ $F_{A1左}$ $F_{A1合}=0$	$F_{A2右}$ $F_{A2左}$ $F_{A2合}$	$F_{A3右}$ $F_{A3左}$ $F_{A3合}$	$F_{A合}=0$
$F_{A1右}$ 為水滴向右收縮的力 $F_{A1左}$ 為水滴向左收縮的力 $F_{A1右}=F_{A1左}$ ，故 $F_{A1合}=0$	$F_{A2右} > F_{A2左}$ ∴水滴受向左力 $F_{A2合}$	$F_{A3右} > F_{A3左}$ ∴水滴受向右力 $F_{A3合}$ (若 A2、A3 線型對稱，偏心距離相等，則 $F_{A2合}=F_{A3合}$)	∴水滴受力為 $A1+A2+A3$ ∴ $F_{A合}=F_{A1合}+F_{A2合}+F_{A3合}=0$

水滴在親水直線上的受力說明

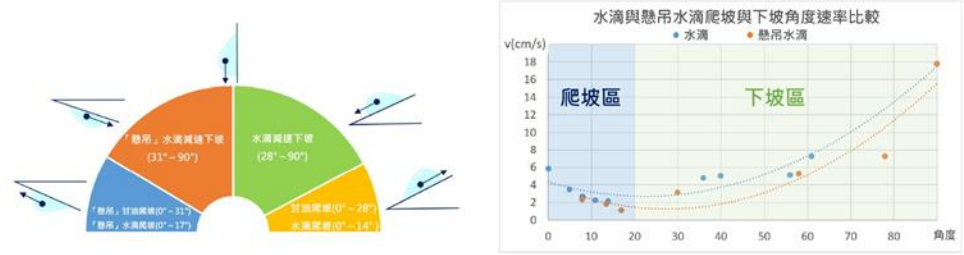
B1：水滴落在弦線中心	B2：水滴右偏心	B3：水滴左偏心	B1+B2+B3=B
$F_{B1右}$ $F_{B1左}$ $F_{B1合}$	$F_{B2右}$ $F_{B2左}$ $F_{B2合}$	$F_{B3右}$ $F_{B3左}$ $F_{B3合}$	$F_{B合}$
∴線型不對稱， $F_{B1右} > F_{B1左}$ ∴水滴受向右力 $F_{B1合}$	$F_{B2右} > F_{B2左}$ ∴水滴受向左力 $F_{B2合}$	$F_{B3右} > F_{B3左}$ ∴水滴受向右力 $F_{B3合}$	∴水滴受力為 $B1+B2+B3$ ∴ $F_{B合}=F_{B1合}+F_{B2合}+F_{B3合}$
再與上圖的 A1 對照 ∴ $F_{B1右} > F_{A1右}$ 且 $F_{B1左} < F_{A1左}$ ∴ $F_{B1合} > F_{A1合}$①	再與上圖的 A2 對照 ∴ $F_{B2右} > F_{A2右}$ 且 $F_{B2左} < F_{A2左}$ ∴ $F_{B2合} < F_{A2合}$②	再與上圖的 A3 對照 ∴ $F_{B3右} > F_{A3右}$ 且 $F_{B3左} < F_{A3左}$ ∴ $F_{B3合} > F_{A3合}$③	再從①、②、③可得 ∴ $F_{B合} > F_{A合}=0$ ；故 $F_{B合} > 0$

水滴在親水弧線上的受力說明

討論四：統整影響水滴振動-移動、爬坡的因素



討論五：「水滴」、「懸吊水滴」的爬坡與下坡綜整分析



實驗12：0~14度，因為不對稱鋪展收縮產生的合力能克服重力分力使水滴爬坡。

實驗13：28~90度時，由於重力分力逐漸變大且大於鋪展收縮產生的合力，水滴發生下坡，但會有減緩水滴下坡速率的效果。

實驗14：在超過90度時，水滴成懸吊狀，且會發生減速下坡。0~17度時，不對稱鋪展收縮產生向前的合力已大於重力分力，因而達到往前爬坡的效果。

研究結論與建議

一顆水滴的運動，幾乎囊括了國中二下到三上關於「力、運動、功與能」的學習內容，本研究歷經了：

觀察 → 發現水滴碰撞時的不對稱鋪展收縮 → 假設水滴能達成連續不對稱鋪展收縮 → 提出水滴移動猜想 → 實驗 ↔ 修正變因、技巧 → 分析討論 → 歸納結論：本研究的關鍵現象～不對稱鋪展收縮

本研究綜合影片連結

