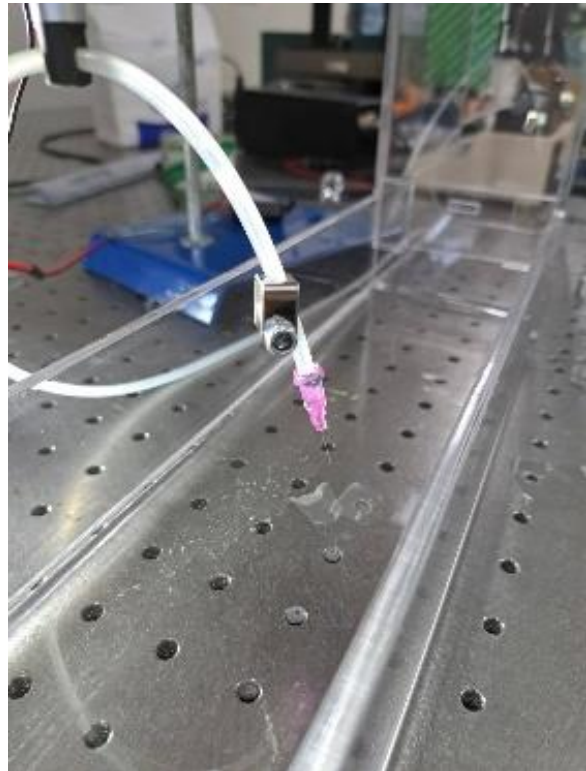
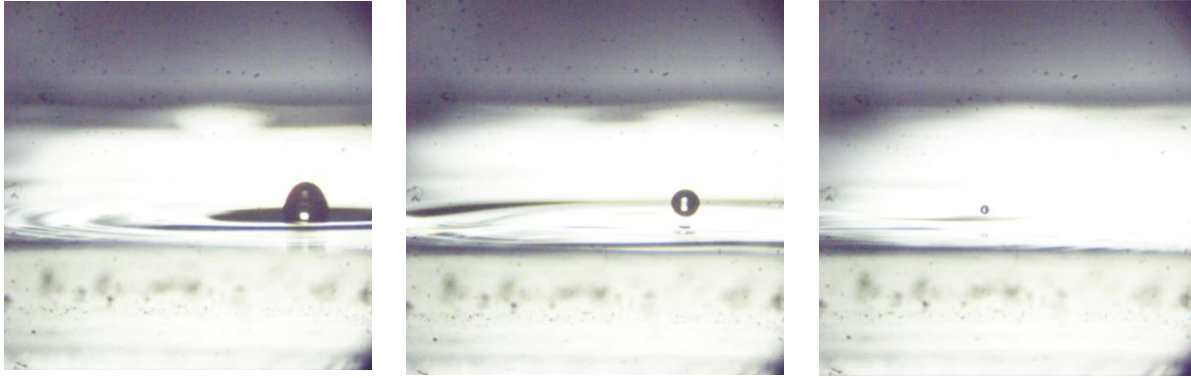


第二十二屆旺宏科學獎 創意說明書



參賽編號: SA22-587

作品名稱: 滴肆縱橫—水平移動的液面對液滴碰撞水面情形的影響

姓名: 黃煒捷

關鍵字: 韋伯數、液滴碰撞

摘要

液滴碰撞的實驗不勝枚數，然而，如果下方被撞擊的為移動中的液體表面，對液滴碰撞會造成甚麼影響呢？此研究不同於其他液滴碰撞實驗，下方撞擊處為移動中的水面。我們在參考許多文獻資料後，設計實驗並且自行製作一套實驗裝置，以高速攝影機搭配電腦進行拍攝，結果我們發現：液滴反彈的傾向、反彈至最高點所需的時間皆受到水平速度的影響。然而當水平速度過大時，液滴反而容易沒入液面。除此之外，我們也發現碰撞移動中的液體與固體表面皆具有類似的行為模式：液滴的在掉落至接近液體表面時，受到空氣擠壓而產生的抬升力方向也並不垂直於水平面，促使液滴沿著水平移動方向彈跳。

壹、研究動機

用小石頭能打水飄，但令人想不到的是水滴也可以！我們在看到一部IYPT的題目影片後驚訝不已，在畫面中沿著水平移動的表面跳躍的小水滴緊緊吸引住我們的目光。開始接觸液滴碰撞理論後，流體力學就像新世界的一座大門，也讓我們決心探索這片領域。



圖1-1、Dynamic Hydrophobicity(IYPT 2021)

貳、研究目的

- 一、分析不同韋伯數之液滴碰撞不同移動速度水面反彈與融合之邊界
- 二、探討不同水面流速與液滴碰撞後體積改變的影響
- 三、探討液滴碰撞流動水面期間的形狀變化

參、研究過程

一、研究設備及器材

表3-1-1.重要器材表（研究者自行拍攝）

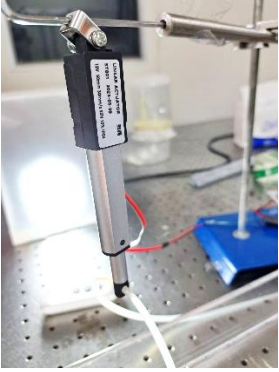
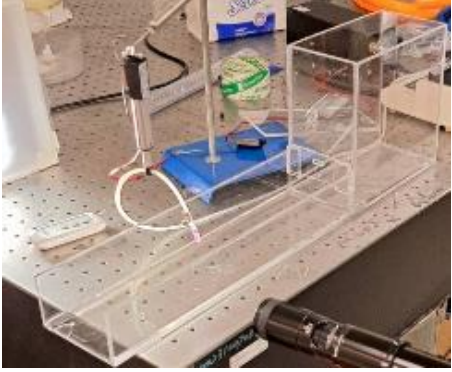



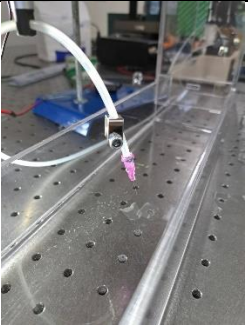
步進馬達×1組	自製實驗水道與水槽×1	高速攝影機×1台
		
液滴產生器×1台	輔助燈光×1個	針頭×1個
		
筆記型電腦×2台	抽水幫浦×1台	直尺×1支
光學尺×1個	塑膠軟管×1條	銼刀×1支

表3-1-2. 所用程式及計算平台



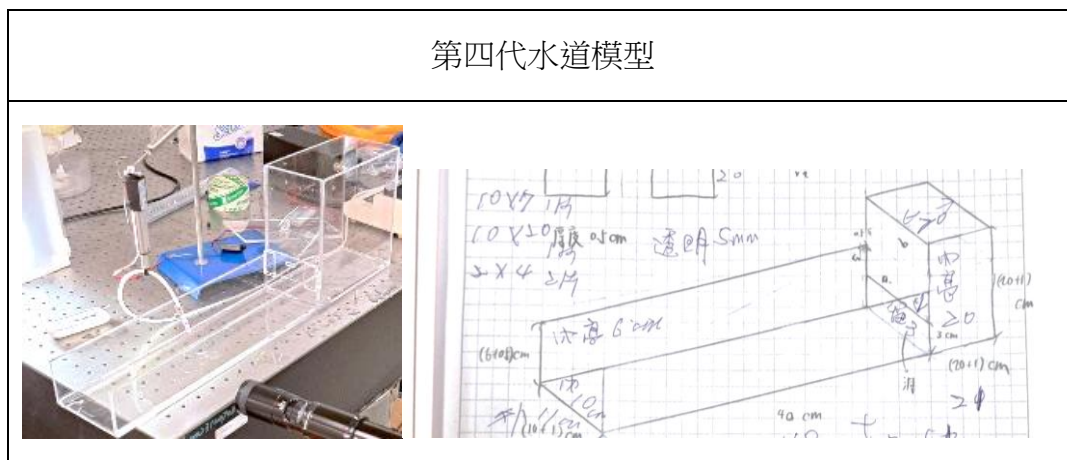
Phantom Camera Control	Matrox MIL X(Contour Edge Finder)
	

表 3-1-3. 自製實驗水槽（研究者自行拍攝）

第一代實驗水槽	第二代實驗水槽	第三代實驗水槽
		



第一代水槽是起初我們自行利用手邊材料製作的實驗裝置，然而由於容器非透明材質，不便拍攝液滴碰撞的過程。

第二代水槽是為了解決第一代無法從側邊拍攝的問題而製作，我們使用膠帶與膠水，將透明墊板來黏合在第一代水槽之上，然而，我們在觀察時發現有部分膠水殘留於容器壁上，影響我們觀察，除此之外，由於接合處有部分無法完全密封，水會持續從該處流出，於是此裝置也無法實際運用於實驗中。

第三代水槽是我們過去使用的實驗裝置，我們改以透明的塑膠盒製作，中間裝有塑膠片推動水流，不僅可以讓我們從側邊清晰地觀察到水滴在水面上的變化，也可以讓水在水槽以固定、穩定的速度流動，不會跑出裝置外，但還是有缺點，當轉速過大時，水面不再保持水平，可能會影響實驗結果，高起的水面也造成拍攝時解析度下降，所以我們之後還會製作第四代實驗裝置－壓克力水道－將能進一步的提升我們實驗拍攝的品質，也能克服當前所遇到的問題。

第四代水道模型是我們目前使用裝置，我們以透明壓克力製作，水道也有設計小閘門，透過閘門的調控，不僅可讓水流有一定的流速還可以使水流更趨於平緩，讓我們在照片分析上能更容易，然而此裝置還是有缺點，當水速過快時，液滴反彈的畫面就會超出高速攝影機能捕捉到最大面，不過我們還是會盡可能地去克服此問題。

二、實驗架設

在架設裝置的部分，我們使用第四代水道模型，作為液滴碰撞的環境。我們透過閘門來使水流保持穩定的流速，並且使用液滴產生裝置以每小時8.0毫升的速度將水從針頭擠壓出，水滴隨著重量逐漸增加而落下，再以液滴落下的位置計算水平的移動速度。我們利用高速攝影機以每秒8000張照片的速度進行拍攝，將影片傳輸至筆記型電腦中，再透過程式平台PCC捕捉液滴碰撞的畫面，最後以Matrox Inspector 10.0分析液滴的大小與速度並討論液滴反彈的情形。

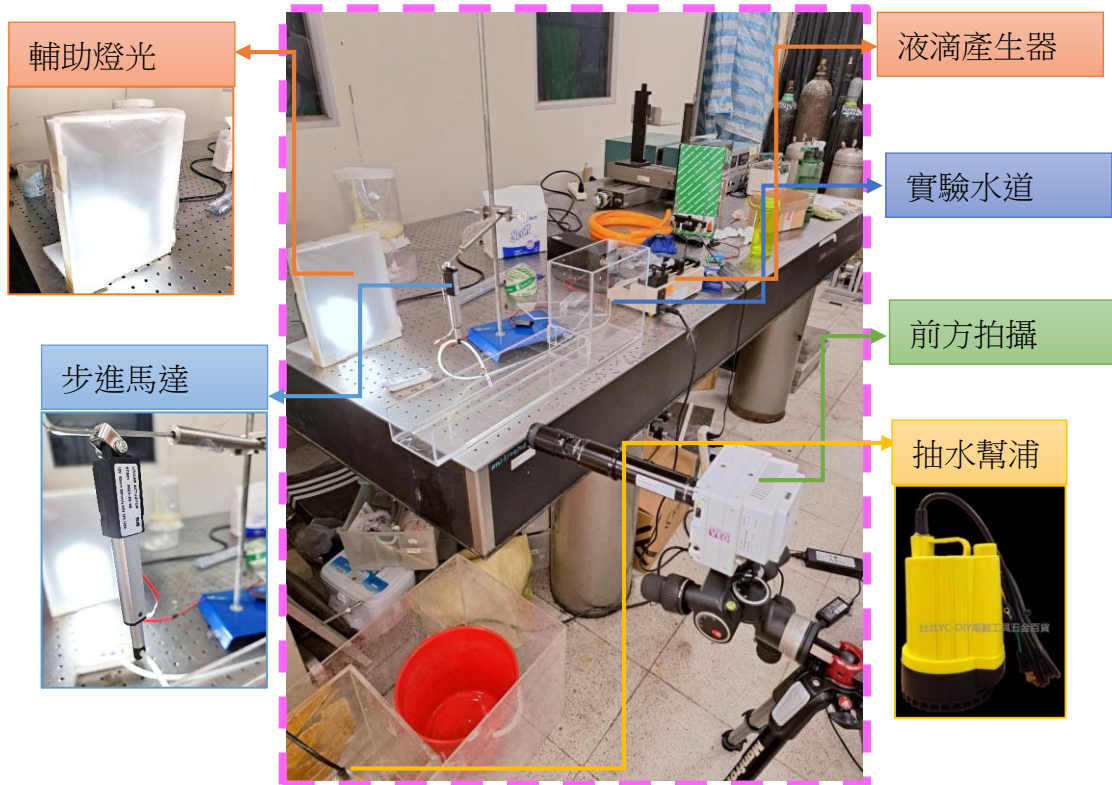


圖 3-2-1. 實驗裝置示意圖（研究者自行拍攝）

三、實驗裝置操作步驟

（一） 拍攝準備

1. 啟動高速攝影機，調整適當倍率
2. 待攝影機連線至電腦程式後，以光學尺進行對焦
3. 啟動液滴產生器，調整液滴落下位置至鏡頭前方
4. 將水倒入水箱至適當高度，並且調整針頭與水面之間的距離
5. 控制水閘門

（二） 拍攝過程

1. 開啟燈光，操作電腦程式開始拍攝
2. 結束拍攝，擷取影片中的重要片段，將影片存檔歸類

四、理論與名詞解釋

(一) 表面張力

$$\sigma = \frac{\Delta E}{\Delta A}$$

表示當單位表面積增大 ΔA 時，所增加的表面自由能 (ΔE)

(二) 韋伯數 (Weber number)

$$We = \frac{\rho v^2 l}{\sigma}$$

其中， ρ 為液體密度， v 為特徵流速， l 為特徵長度， σ 為流體的表面張力係數（對水而言， $\rho = 1000kg/m^3$ ， $\sigma = 0.0728N/m$ ）

(三) 水平速度計算

在我們實驗中，以圓柱形容器當作碰撞環境，水平切向速度為

$$v = R\omega$$

此實驗中， $R=0.07$ （公尺）， ω =轉速* 2π （弧度/秒）

(四) 毛細數 (Capillary number)

$$Ca = \frac{\mu v}{\sigma} = \frac{We}{Re}$$

其中， μ 為流體黏度（對水而言， $\mu = 1mPa \cdot s$ ）

(五) 沃辛頓射流

沃辛頓射流，指的是水面在受到撞擊且出現空腔後，因表面張力的作用與周遭水的回覆能量，在中心出現噴射的現象。

(六) Journal of Engineering Physics(1976)。Interaction of drops with boundary layer on rotating surface(頁1453-1456)，Povarov, O.A., Nazarov, O.I., Ignat'evskaya, L.A.et al.

當碰撞表面有水平移動時，由於水平表面給的側向力使液滴傾斜，造成液滴的在掉落至接近液體表面時，擠壓空氣而受到的抬升力不垂直於水平面，兩者促使液滴沿著水平移動方向彈跳。（見圖3-4-1）

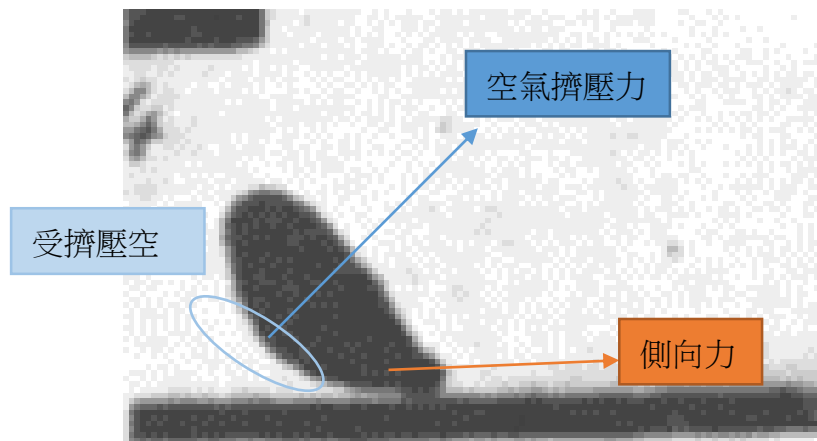


圖3-4-1彈跳機制示意圖

資料來源：Journal of Engineering Physics(1976)。Interaction of drops with boundary layer on

rotating surface(頁1454), Povarov, O.A., Nazarov, O.I., Ignat'evskaya, L.A.et al.

與我們的研究不同的地方是，我們下碰撞的表面為水池，並非固體表面，因此我們也想探討兩者是否會產生類似的現象。

(七) Physics of Fluids (2012)。Droplets bouncing on a wet, inclined surface。Gilet, Tristan & Bush, John.

這是一個針對在一層高黏度液體（矽油）、傾斜固體表面環境的液滴碰撞研究，在液滴的韋伯數不同時，他們發現當韋伯數低於4時，主要液滴反彈後的大小接近原來的100%，在大於4時，則會分裂出數個液滴；另外，當韋伯數小於8的時候，會有因沃辛頓射流產生的液滴（見圖3-4-2）其他液滴的參數為：奧內佐格數（ $Oh = \frac{\mu}{\sqrt{\rho\sigma}}$ ）=0.007、邦德數（ $Bo = \frac{\rho gl^2}{\sigma}$ ）=0.4，而表面與水平間的夾角為14度。

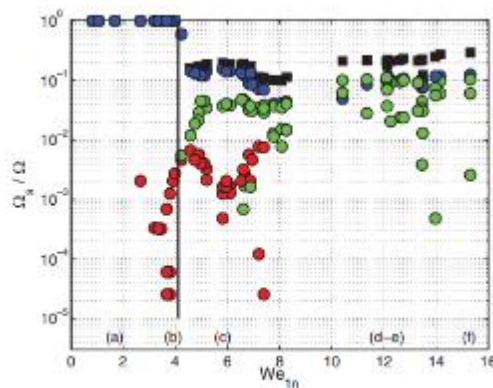


圖3-4-2 不同液滴韋伯數-反彈後體積圖

資料來源：Physics of Fluids (2012)。Droplets bouncing on a wet, inclined surface(頁6)。Gilet, Tristan & Bush, John.

在圖3-4-2中，橫軸為液滴的韋伯數，縱軸則是體積與原液滴總體積的比值。其中，藍色圓圈表示反彈後主液滴大小、綠色圓圈為主液滴分裂出的液滴總體積、而紅色圓圈代表沃辛頓射流產生的液滴，黑色方形則是代表反彈後的總體積。

在我們的實驗中，我們也想試著以類似的圖呈現在不同水平速度（反映於水平液面韋伯數）之下相同液滴碰撞後反彈的體積變化情形。

另外，研究中也提及液滴與液體表面的接觸時間 $t_c = \sqrt{\frac{M}{\sigma}}$ ，其中M為液滴的質量。中層空氣受擠壓而排放的時間則為 t_d ，受到液體性質、環境溫度、蒸氣密度、飽和蒸汽壓、溶液對空氣的溶解度、靜電分布以及界面活性劑等多重因素影響。若 $t_c < t_d$ ，則液滴會彈起，反之則會墜入液面。而水平移動的表面，可以藉由注入空氣而延遲液滴與水面的合併速度。

(八) Soft Matter (2017)。Understanding the drop impact on moving hydrophilic and hydrophobic surfaces。Almohammadi, H., & Amirfazli, A.

在這個研究當中，分別探討液滴撞擊移動中的親水性與疏水性固體表面。研究中指出，液滴撞擊移動平面後會不均勻的擴散，而液滴撞擊後的漸散或擴散行為會受到水平移動影響：以撞擊後垂直移動方向之最大直徑為分界，分為向下水流與向上水流（見圖3-4-3），對於親水性表面，向下水流容易受拉伸而擴散，對於疏水性

表面，過程中卻會反衝而造成飛濺行為。

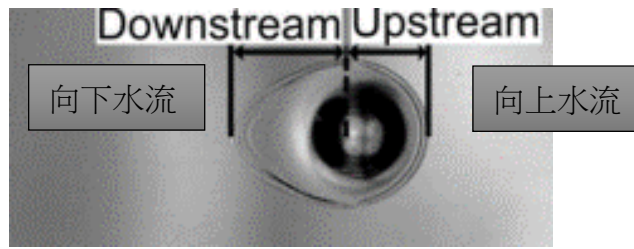


圖3-4-3 向上水流與向下水流

資料來源：Soft Matter (2017)。Understanding the drop impact on moving hydrophilic and hydrophobic surfaces(頁12)。Almohammadi, H., & Amirfazli, A.

另外，研究中也針對液滴碰撞後壓縮至接觸面積最大的時刻 t_{Max} 討論（見圖3-4-4），對於親水性表面，當液滴的韋伯數愈大， t_{Max} 愈小；然而，對於疏水性表面卻無明顯影響。另一個影響因素是表面的移動速度：表面移動速度愈快，對於親水性與疏水性表面皆使 t_{Max} 下降（幾乎成線性關係），其中，對親水性表面的影響更大。

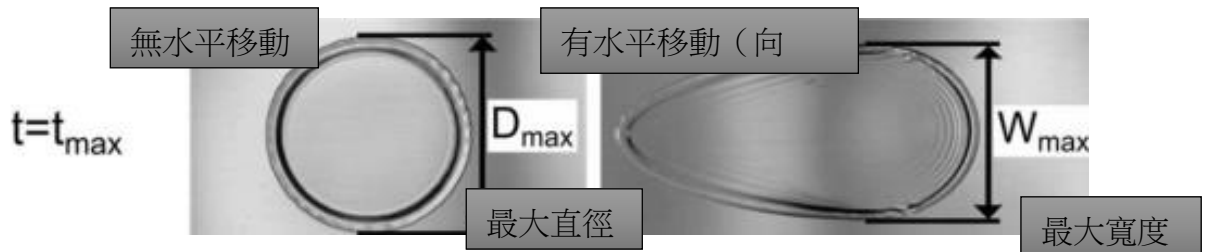


圖3-4-4 t_{Max} 定義示意圖

資料來源：Soft Matter (2017)。Understanding the drop impact on moving hydrophilic and hydrophobic surfaces(頁12)。Almohammadi, H., & Amirfazli, A.

針對向上水流處的飛濺行為，他們發現飛濺範圍與速度方向之間的夾角 φ 與液滴的韋伯數以及毛細數有關，他們也建立了理論模型：

$$Ca \left(1 + k_2 \frac{v_s}{v_n} We^{-\frac{1}{3}} \cos \varphi \right) = k_1$$

其中Ca與We分別為液滴的毛細數與韋伯數， $\frac{v_s}{v_n}$ 表示水平表面速度與液滴速度的比值， k_1 與 k_2 是無因次的常數， $k_1=0.14$ ， k_2 對親水性表面為4.53，對於疏水性表面則是6.59。角度 φ 的定義如圖3-4-5所示。

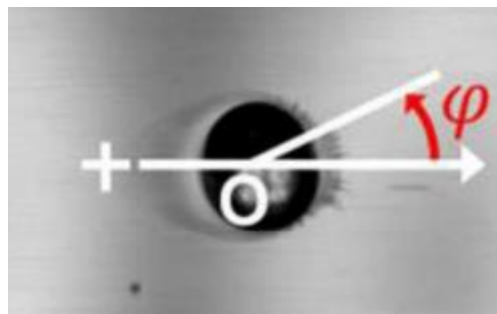


圖3-4-5 飛濺範圍與速度方向之間的夾角 φ 式意圖

資料來源：Soft Matter (2017)。Understanding the drop impact on moving hydrophilic and

hydrophobic surfaces(頁19)。Almohammadi, H., & Amirfazli, A.

雖然此研究並未討論使用液體表面，但由於我們也想以類似的方式觀察液滴碰撞後的形體變化模式，因此我們也可以分析實驗數據與此理論模型的符合程度，並且討論兩者之間的差異。

(九) Cameron Tropea & Marco Marengo(1999)。The Impact of Drops on Walls and Films。

這個研究主要在討論液滴撞擊液膜或固體表面時，液滴在不同區域劃分下所會發生的情形，分別是(1)薄膜(2)液膜(3)淺池及(4)深池，並歸納液滴撞擊液膜之物理型態及韋伯數(We)、無因次液膜深度(H)及無因次表面粗糙度(R_{nd})，三者皆為液滴撞擊液膜影響重大之參數。

Regime	Defining range	Characteristics
Thin film	$L_{nd} < Hf < 3(R_{nd})^{0.16}$	Impact depends on surface feature
Liquid film	$3(R_{nd})^{0.16} < Hf < 1.5$	Dependence becomes weak
Shallow pool	$1.5 < Hf < 4$	Impact is independence of surface characteristics but still on film thickness
Deep pool	$Hf \gg 4$	Impact does not depend on film thickness

其中， Hf =液膜厚度 h /液滴半徑 R ， R_{nd} :無因次表面粗糙度($R_{nd} = \frac{Ra}{D}$ ， Ra 為平均粗糙度)

在我們的實驗之中， $H \gg 4$ ，因此我們的實驗結果不需考慮水面厚度對撞擊結果造成的影響。

(十) K.L.Pan & C.K.Law(2007)。dynamics-of-droplet-film-collision。

在這個研究之中，探討了液滴撞擊於不同厚度之靜止液膜之反彈與融合的邊界。結果發現：在介於 $10 < We < 14$ 時，隨著液膜厚度的增加，液滴撞擊液膜的模式會由融合變成反彈，再變成融合，再變成反彈（見圖3-4-6）。其中的過渡區域發生在 $0.8 < Hf < 1.2$ ，也就是液滴半徑與液膜厚度相近時。其後又以能量守恆的觀點，討論液滴碰撞期間因液膜厚度不同而造成動能、表面能以及黏性力之間的轉換差異，進而影響液滴反彈/融合的結果。

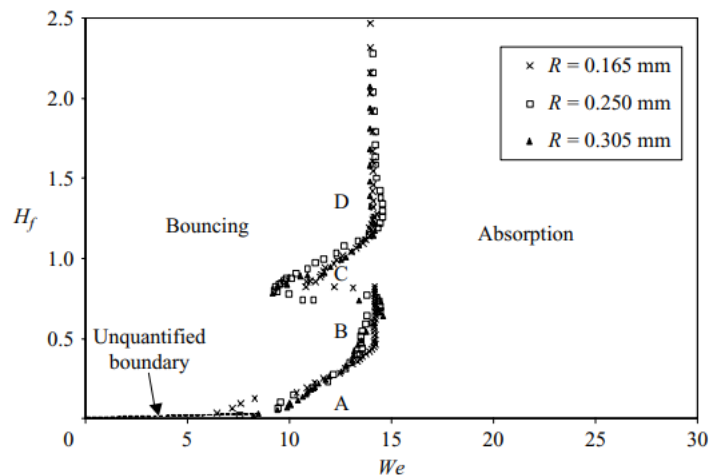


圖3-4-6液膜厚度、韋伯數與反彈/融合邊界關係圖

資料來源：J.Fluid.Mech (2007)。dynamics-of-droplet-film-collision (頁8)。K.L.Pan & C.K.Law
從圖3-4-6中我們可以得知：在靜止的極厚液膜 ($H > 2$) 中反彈與融合的邊界大約發生

在 $We=14$ ，其邊界因液滴半徑大小不同而會有些微差異。因此，在我們的實驗之中，我們以 $We=14$ 作為對照組，可探討水平移動的水面對於液滴反彈的情形是有利或是抑制。

五、實驗結果

(一) 以實驗水槽進行水平方向拍攝

在我們的第一個實驗中，我們想觀察液滴在碰撞到水平移動的水面後，反彈液滴的體積

變化。在實驗中，我們使用水作為液體，液滴的韋伯數 $We_n = \frac{1000 \times 1.713^2 \times 1.85 \times 10^{-3}}{0.0728} =$

74.57，水平速度 $v = 0.07 \times \omega$ ，而 $\omega = \text{轉速} \times 2\pi$ 。我們猜想，由於水平移動的表面會帶進空氣，使液滴於水面之間的空氣停留時間增加，因此，隨著水平速度的增加，反彈後液滴的總體積也會隨之增加。於是，我們以靜止水面為對照組，分別測試轉速10、20以及30（轉／秒），並擷取部分畫面，製成下表：



















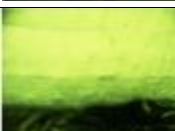













水平速度 時間(ms) (m/s)	0	4.40	8.80	13.19
t=0				
t=0.5(ms)				
t=2.5(ms)				
t=10(ms)				
t=22.5(ms)				
t=35(ms)				
t=47.5(ms)				
t=52.5(ms)				

表3-5-1 水平拍攝不同水平速度對液滴碰撞的影響（研究者自行拍攝）

經過實驗，我們發現：當轉速小於30時，隨著轉速的增加，反彈的傾向也會遞增（見表5-2）除此之外，我們也發現隨著轉速的增加，液滴反彈至最高點所需的時間也隨之下降。然而，當轉動速度大於30時，我們發現有時候液滴在碰撞液面後，會受到移動液面推擠與拉扯，而反彈的方向受到改變容易使液滴沒入液面（見表3-5-1）。

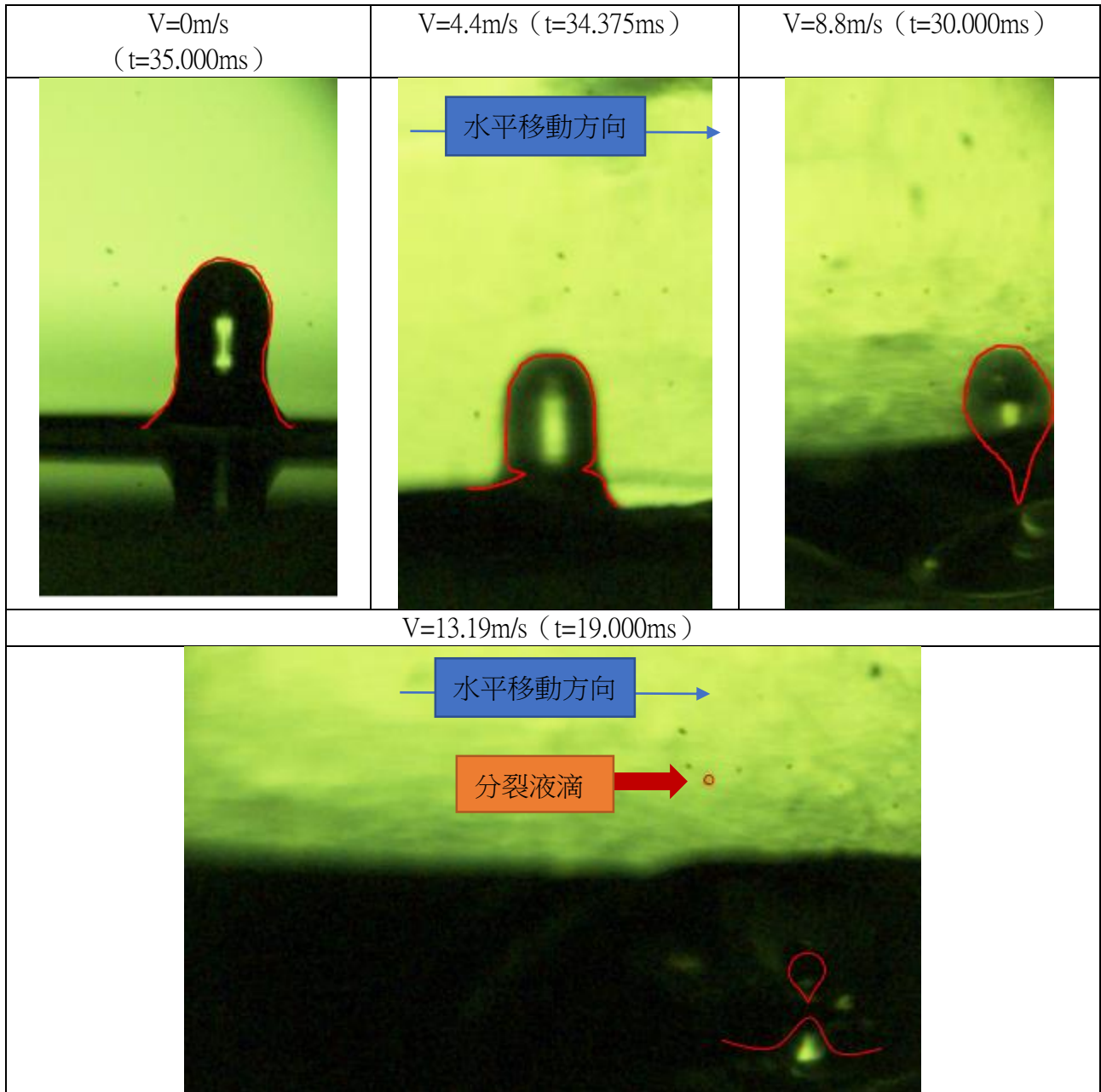


表3-5-2 液滴反彈至最高點（研究者自行拍攝）

經過實驗後，我們也察覺到液滴在撞及水面後，也會有偏離垂直軌道（見圖4-1）的現象：在背離水平移動方向端容易出現斜向的漸散現象。（表3-5-3）

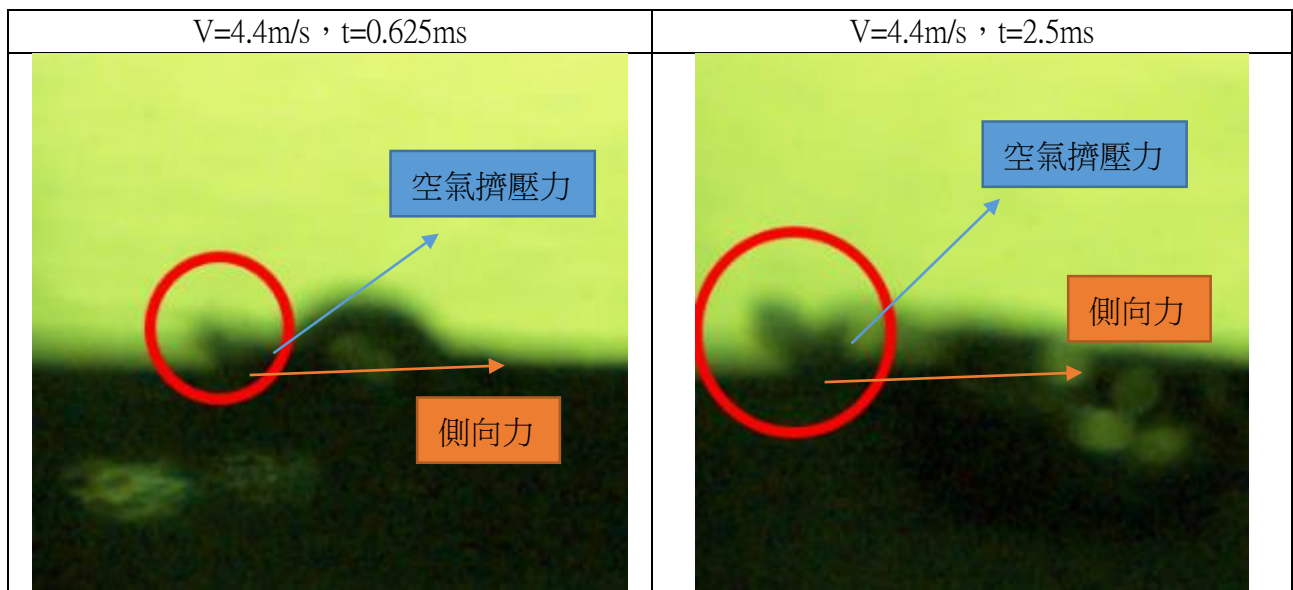


表3-5-3 空氣抬升力示意圖（研究者自行拍攝）

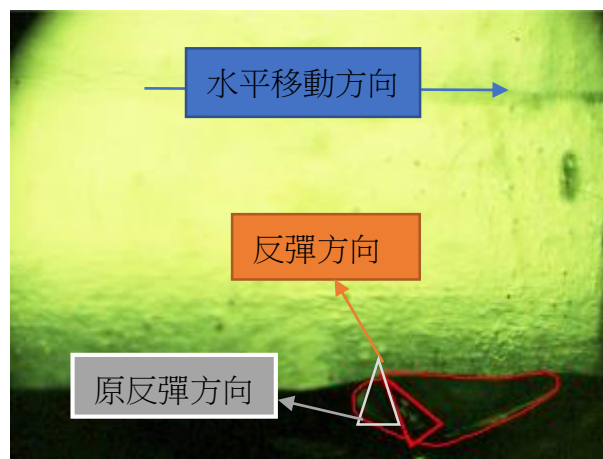


圖3-5-1液滴反彈方向受水平面推擠（研究者自行拍攝）

我們在實驗的時候發現，液滴反彈的高度與程度都不如預期，可能是因為韋伯數（垂直速度）過大所造成，所以我們需要找出最合適的液滴韋伯數，重新進行實驗。另外，我們發現，目前使用的實驗裝置在轉動速度太快的時候，水表面會因為離心力而形成圓弧形，不只增加許多實驗時的誤差，也增加拍攝時的難度。因此，我們需要重新設計我們的實驗器材，以增加實驗的精確度。

（二） 以實驗水槽進行垂直方向拍攝

在我們第二個實驗中，我們將攝影機架於水面上方，觀察液滴在碰撞到水平移動的水面後，液滴外形的變化，在實驗中，我們同樣使用水作為液體，液滴的韋伯數 $We_n =$

$$\frac{1000 \times 0.727^2 \times 1.85 \times 10^{-3}}{0.0728} = 13.43, \text{ 水平速度 } v = 0.042 \times \omega, \text{ 而 } \omega = \text{轉速} \times 2\pi, \text{ 我們以靜止水面}$$

為對照組，分別測試轉速 10、20 以及 30（轉／秒），並擷取部分畫面，製成下表：。

	轉速 0	轉速 10	轉速 20	轉速 30
T=0				
T=0.5				
T=2.5(ms)				
T=10(ms)				
T=22.5(ms)				
T=35(ms)				

表 3-5-4 垂直拍攝不同水平速度對液滴碰撞的影響（研究者自行拍攝）

（三） 以實驗水道進行水平方向拍攝

在我們的第三個實驗中，我們想探討液滴在碰撞到水平移動的水面後，反彈與融合現象產生之邊界，以及反彈後體積的變化。在實驗中，我們同樣使用水作為液體，使用韋伯數 We_n 介於2.5~21之間的液滴，水平速度介於0.2~1(m/s)。我們猜想，由於水平移動的表面會帶進空氣，使液滴於水面之間的空氣停留時間增加，因此，隨著水平速度的增加，反彈的趨勢與反彈後液滴的總體積皆會隨之增加。首先，我們將液滴碰撞於移動水面的情形，以特稱時間尺度 $t=$ 真實時間 $\div T$ ($T = 2\pi \left(\frac{\rho R^3}{8\sigma}\right)^{\frac{1}{2}}$)表示時間間隔，擷取高速攝影之碰撞畫面（水面移動速度 $U=0.64$ m/s，液滴半徑 $R=1.2$ mm，韋伯數 $We=6.92$ ， $t=0.12$ ），製成下表：

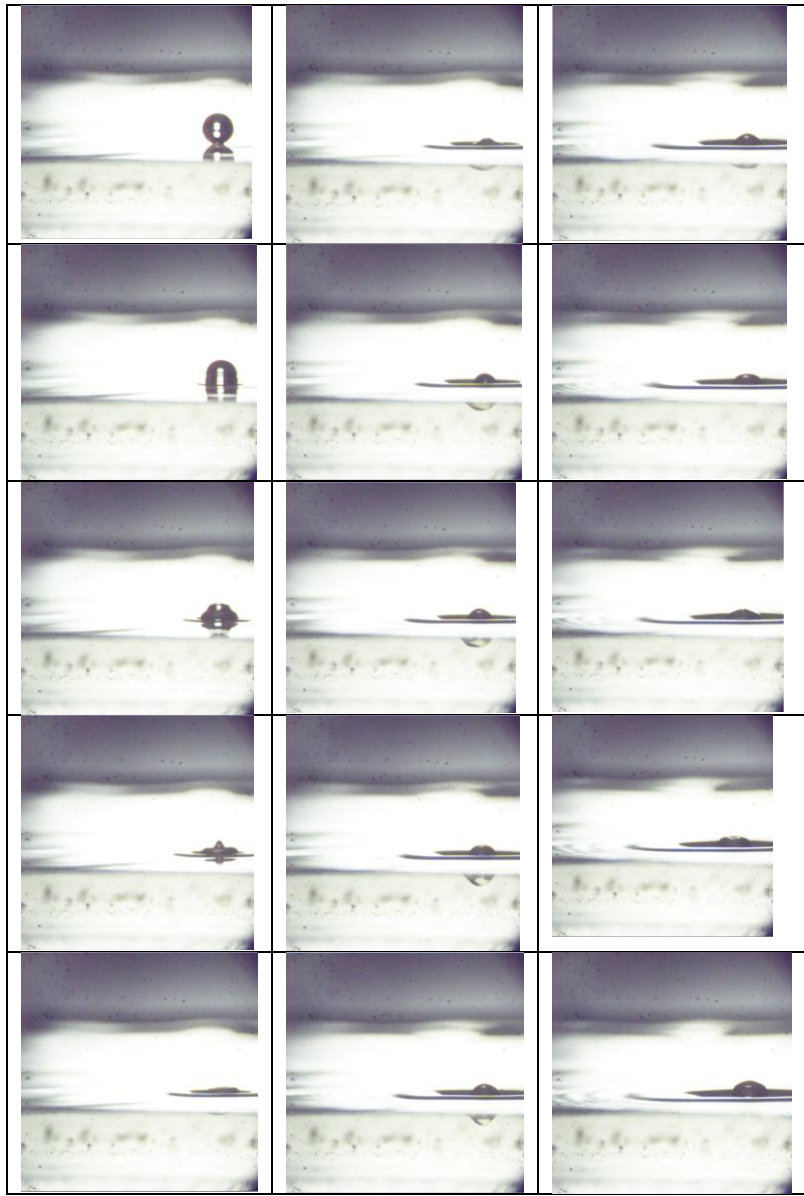


表3-5-5 水平拍攝液滴碰撞水平移動水面的情形（研究者自行拍攝）

除了以表 3-5-5 呈現之外，我們先前使用轉動水槽進行實驗時也發現：水面下方因撞擊而產生的空腔，在移動水面的推擠之下，容易使液滴沒入水中。

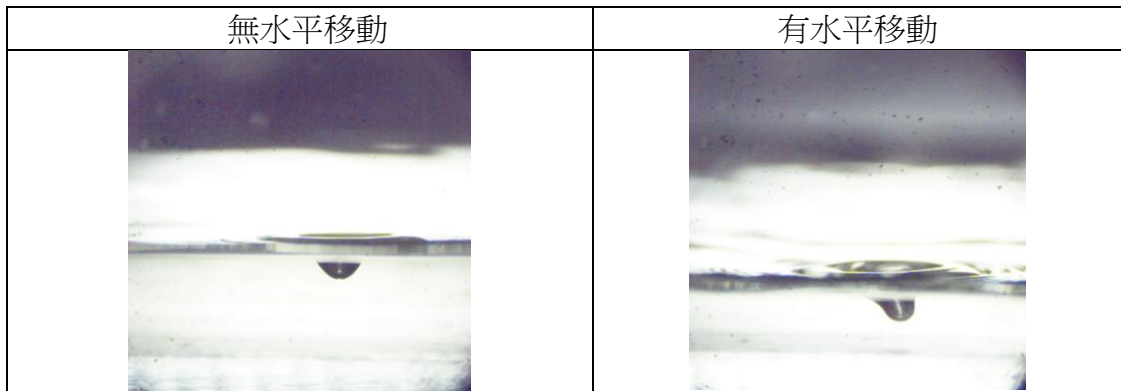


表 3-5-6 水平拍攝液滴碰撞水平移動水面的情形（研究者自行拍攝）

經由多次實驗，我們將拍攝到的畫面以 Matrox MIL X(Contour Edge Finder)分析液滴

的韋伯數 We 以及水平表面移動的速度 U ，以 excel 紀錄並且繪製成圖表：

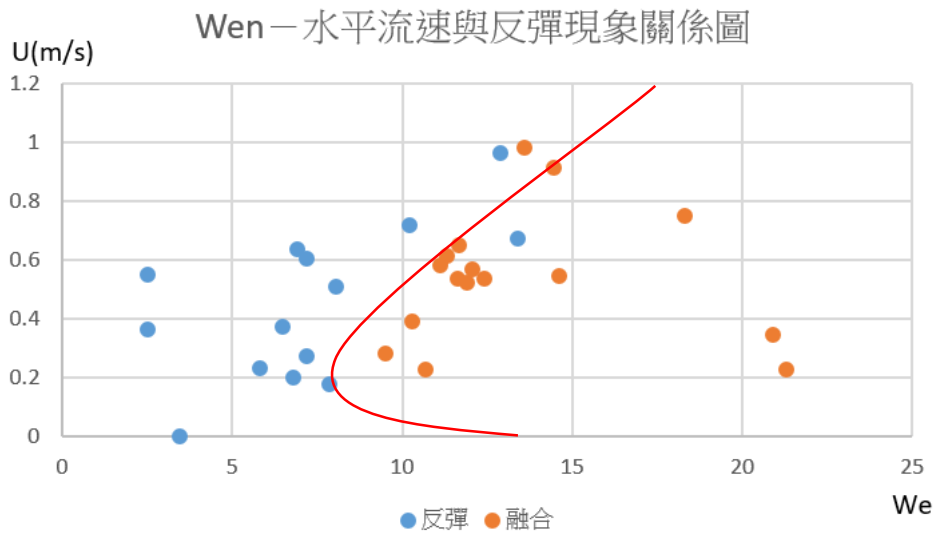


表 3-5-7 水平流速與反彈現象關係圖（研究者自行繪製）

從圖表中我們可以看出：在有水平流速的情形之下進行液滴碰撞，反彈／融合的邊界因水面流速的不同而可能有所差異，並非固定數值之韋伯數決定液滴碰撞的行為模式—當水面流速大於 0.2m/s 時，液滴反彈的情形隨著水面流速的增加有增加的趨勢。雖然我們在 $U < 0.2\text{m/s}$ 時並沒有進行實驗，但根據前人的實驗，當水平流速為 0 時，邊界應落在 $We=14$ ，因此在表 3-5-7 中，我們以紅色線表示可能之反彈／融合的邊界。此外，由於液滴大小也會影響邊界的位置，因此部分誤差可能因液滴大小有些微差異而產生。

除此之外，我們也對於反彈液滴的體積比例跟水面流速之間的關係進行討論。結果我們發現：在相同韋伯數的情況下，隨著流速的增加，反彈液滴的體積能有下降的趨勢。

$\frac{\omega'}{\omega} \times 100\% = 5.2\%$ $U=0.63\text{m/s}$	$\frac{\omega'}{\omega} \times 100\% = 8.9\%$ $U=0.27\text{m/s}$	$\frac{\omega'}{\omega} \times 100\% = 16.1\%$ $U=0.19\text{m/s}$

表 3-5-8 水平流速與反彈體積比例關係圖（研究者自行拍攝）

其中， ω 表示原液滴的體積， ω' 表示反彈液滴的體積。除此之外，我們也發現隨著

液滴韋伯數的增加，反彈液滴的體積比例也同樣有下降的趨勢。然而，相較於水面移動速度對反彈體積比例的影響，我們觀察數據之間的相符程度後，認為液滴的韋伯數才是影響反彈液滴體積比例的主要因素。因此，我們以 We 為橫軸， $\frac{\omega'}{\omega} \times 100\%$ 為縱軸，製成以下圖表：

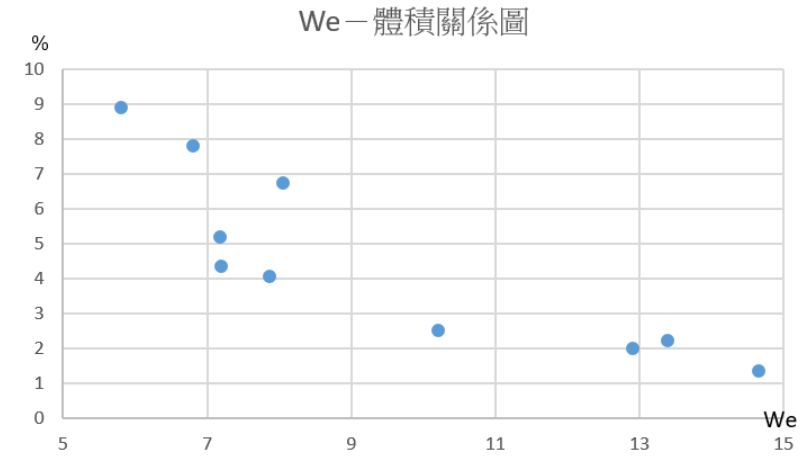


表 3-5-8 水平流速與反彈體積比例關係圖（研究者自行繪製）

肆、討論與應用

我們由前人的實驗可以得知：液滴碰撞水面時，因液滴與水面間的氣膜壓力上升，抵銷液滴的撞擊慣量，因此發生反彈。然而，當液滴動能過大時，氣膜會被排出，液滴與液面融合。此外，當液滴撞擊液面時，一大部分的動能會轉換成液面的表面能，若此時的動量不足以排除氣膜，則反彈會發生。

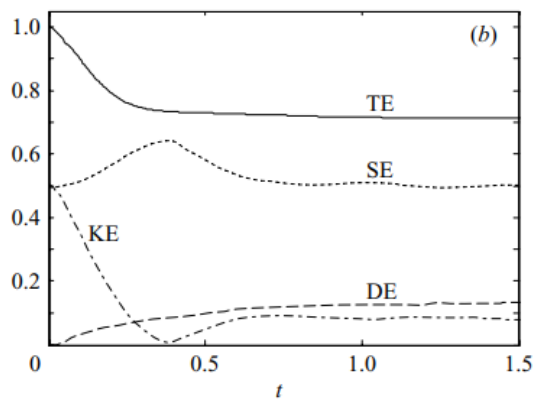


圖 4-1 液滴碰撞液面之能量轉換圖

資料來源：J.Fluid.Mech (2007)。dynamics-of-droplet-film-collision (頁 18)。K.L.Pan & C.K.Law

(TE 表示液滴總能量，SE 代表液滴表面能，KE 為液滴動能，而 DE 表累積黏性耗散能)

在我們的實驗中，我們知道：當水平移動速度大於 0.2m/s 時，液滴的反彈傾向隨水面速度增加而遞增，我們認為其原因可能是由於碰撞後移動水面的黏性力部分耗散，轉換為液滴的水平動量，提供液滴反彈所需的部分動能。

液滴碰撞在應用上涉及汽車內燃機的噴霧燃燒、印表機的噴霧技術、甚至是降雨的準確預測，它在我們生活中扮演著相當重要的角色，因此，研究液滴碰撞機制，有助於我們了解其中的物理現象，並且作進一步的運用。我們的研究原本只是想透過實驗對有興趣的現象有更進一步的了解，然而，可能在日後也可以對相關的技術與產業有所幫助。

伍、結論

經由這次的實驗，我們發現液滴在碰撞移動中的液體表面時，液滴反彈的傾向受到水平速度的影響。在碰撞移動水面時，液滴除了與碰撞固體表面具有類似的行為模式之外，在液面下形成之空腔可能受推擠變形，使液滴容易沒入水中。

除此之外，我們經過多次實驗，將所得數據繪製成圖表，並且得出液滴碰撞移動中的水面時，其反彈／融合的可能邊界，然而，由於邊界位置受液滴大小影響，因此可能使結論與實際情形產生些微誤差，因此，增加數據量、控制液滴大小以及延伸反彈／融合之邊界長度，將成為我們未來持續努力的方向。

最後，我們探討液滴反彈體積比例時，發現水平速度可能不是改變反彈液滴大小的主要原因，反彈液滴的體積可能受液滴韋伯數影響較大，而兩者呈負相關。

陸、參考資料及其他

- Gilet, Tristan & Bush, John. (2012). Droplets bouncing on a wet, inclined surface. *Physics of Fluids*.
- Almohammadi, H., & Amirfazli, A. (2017). Understanding the drop impact on moving hydrophilic and hydrophobic surfaces. *Soft Matter*
- Povarov, O.A., Nazarov, O.I., Ignat'evskaya, L.A. et al. Interaction of drops with boundary layer on rotating surface. *Journal of Engineering Physics* 31, 1453 - 1456 (1976).
- K.L.Pan & C.K.Law(2007). dynamics-of-droplet-film-collision.

附錄：研究組員分工表

陳伯恩	黃煒捷
<p>分工內容：</p> <p>設計、採購實驗器材 實驗操作（控制液滴與水道） 數據影像分析 文獻閱讀 作品說明書製作 撰寫言札記</p>	<p>分工內容：</p> <p>實驗操作（高速攝影機操作與對焦） 採購實驗器材 作品說明書製作 文獻閱讀 撰寫研究札記 拍攝簡介影片</p>
<p>貢獻度：50%</p>	<p>貢獻度：50%</p>