

中華民國第 64 屆中小學科學展覽會
作品說明書

國中組 物理科

第三名

探究精神獎

030114

凌波微步-漂、浮體於振動液面之運動狀態探討

學校名稱： 宜蘭縣立國華國民中學

作者： 國二 楊馥聿 國二 林曉熙 國三 謝羿潤	指導老師： 劉權緯 邱旻昇
---	-----------------------------

關鍵詞： 表面張力、漂浮體、移動轉動

摘要

本報告旨在探討不同形狀的物體在振動液面上的運動現象，通過改變物體形狀、漂與浮的狀態，及實驗時的振動條件，觀察物體的行為，並以液體表面張力、漂體與液面夾角的變化、振動模式與流場狀態解釋。研究發現：疏水性漂體因表面張力漂在振動液面上時，其重力會造成液面凹陷，由於漂體形狀對稱性質與質量分布差異，造成各端點與液面夾角不同，液面為漂體提供不同方向與大小的作用力，並產生不同的流場，使其移動與轉動，其(角)速度受液體種類、振幅、頻率、漂體質量影響。此外，在振動液面上移動的漂體與其他漂、浮體間會因為液面狀態互相影響產生交互作用力，進而出現吸引、排斥、繞圈的現象。

壹、研究動機

有次將玩具黃色小鴨放在水上玩水造波。發現黃色小鴨竟然移動了！回想之前在課本上教的內容是說「波上的介質只能傳遞能量不能移動。」，為何小鴨卻能夠移動？我們也好奇：是否其他形狀的物體受到水波擾動也能產生移動現象？如果能，原理又是什麼？我們上網查閱相關文獻並利用自製振動裝置產生波動，探討漂、浮體與液體表面波動的奧秘。

貳、研究目的

【第一部份：探討漂、浮體於振動液面的運動狀態】

實驗 1：厚度均勻的幾何多邊形漂、浮體運動狀態探討

實驗 2：厚度均勻的曲線與複雜圖形漂體運動狀態探討

實驗 3：星芒差異對星形漂體運動狀態的影響

實驗 4：厚度不均勻的長方形漂體運動狀態探討

【第二部份：探討親水浮體、疏水漂體與液面交互作用的基本狀態】

實驗 5：發展漂、浮體與液面夾角的拍攝方式與計算方法

實驗 6：漂、浮體與液面的夾角分析

【第三部份：探討影響漂體移動與轉動的因素】

實驗 7：頻率與振幅對漂體運動狀態的影響

實驗 8：振動載體種類對漂體運動狀態的影響

實驗 9：漂體大小與質量差異對漂體運動狀態的影響

【第四部份：漂體、浮體與液面間的交互運動狀態】

實驗 10：漂體於振動液面的流場狀態

實驗 11：漂、浮體間於振動液面的交互運動狀態

參、研究設備及器材

一、實驗設備、器材

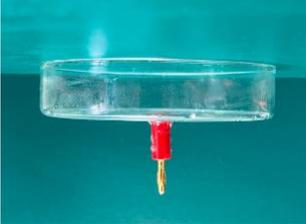
			
振動器	培養皿 (振動用)	功率放大器	手機(訊號源)
			
甘油	疏水劑	酒精	色素
			
振動物體	3D 列印機	鑷子	微量電子秤
			
電子游標卡尺	手機(拍攝用)	水平儀	防風罩

圖 3-1-1 各種實驗設備與器材(一作攝)

二、分析軟體

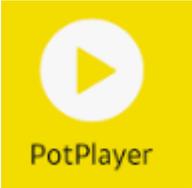
			
Tracker	GeoGebra	Excel	PotPlayer

圖 3-1-2 分析軟體(引自網路圖片)

肆、研究過程與方法

一、研究流程與架構

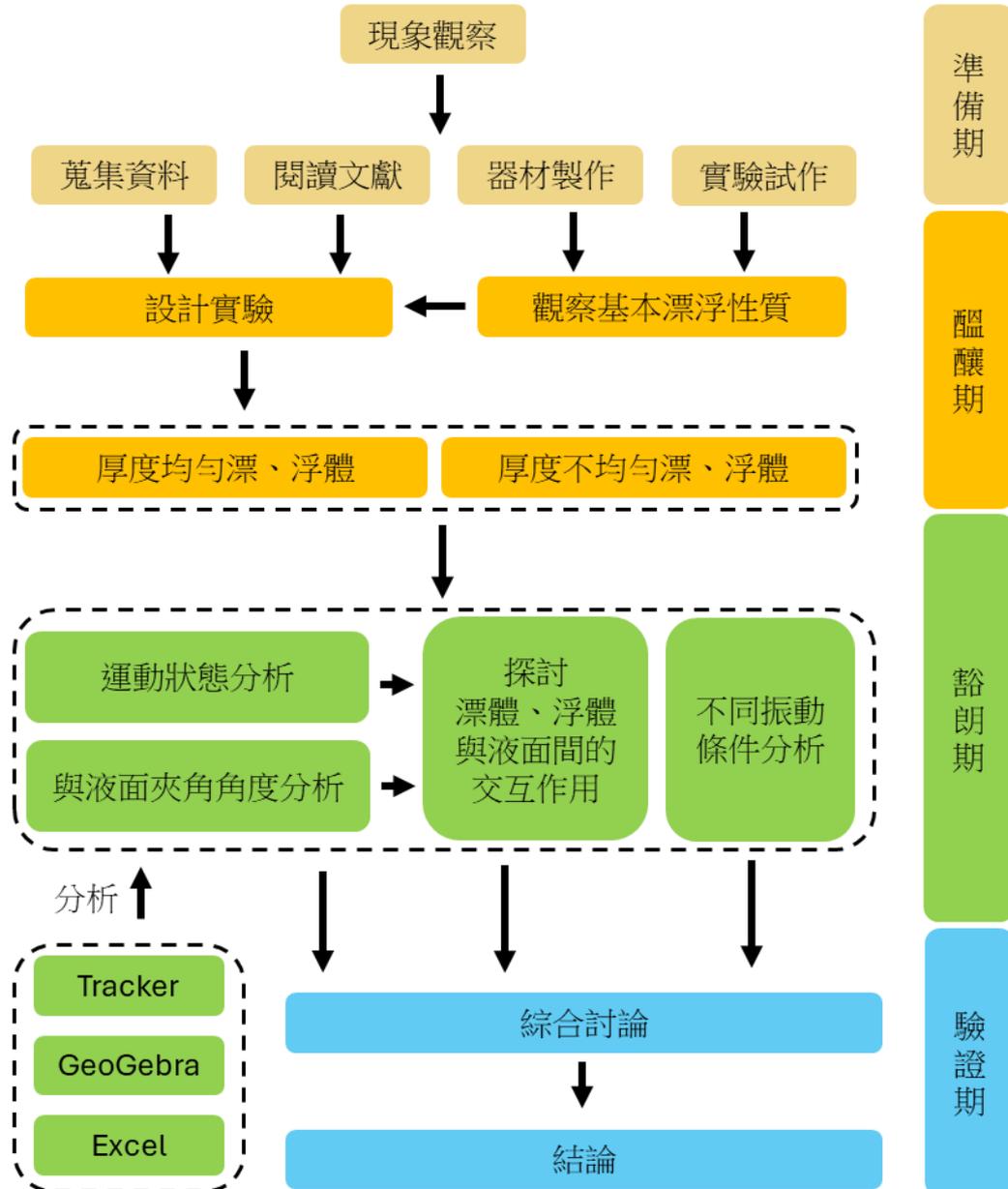


圖 4-1-1 研究架構(二作繪)

二、研究原理

(一)表面張力

表面張力是液體表面上對每單位長度所作用的張力，在液體表面，液體分子受到下方液體分子向內的吸引力，使液體表面的形狀儘可能縮小，以達到最小表面位能。**向內的拉力會使液體的表面就像拉長的彈性膜**，如果在液面上方放置物體，且物體的重量維持在限度以內，液體會產生凹陷，使物體維持在液面上方。

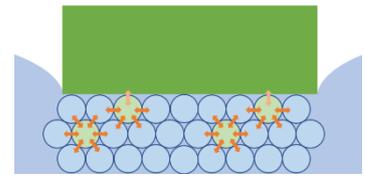


圖 4-2-1 表面張力與液體凹陷示意圖(三作繪)

(二)接觸角

接觸角是指當液體與固體接觸時，液體與固體表面所形成的夾角。當不同液體與固體表面接觸時，液體分子間的吸引力越大，即**表面張力越大**，則傾向形成較大的接觸角。一般來說，若液體為水，當與固體表面接觸角小於 90 度時，則稱此物體表面為親水性；接觸角大於 90 度時，則稱為疏水性。

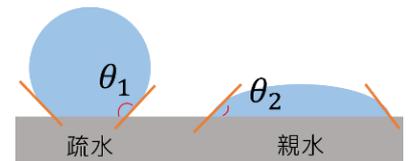


圖 4-2-2 親、疏水性接觸角示意圖(三作繪)

(三)彈力與虎克定律

彈力是指物體受到外部作用力發生形變時，物體內部作用力會產生一股恢復原狀的趨勢而生成的力，試圖恢復成原本的形狀，這種恢復的趨勢產生了彈力。形變量越大，彈力越大。

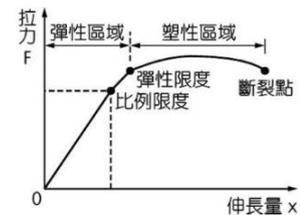


圖 4-2-3 虎克定律示意圖(引自網路圖片)

(四)表面張力波

當液體表面受到輕微的擾動時，液體表面平衡狀態被破壞，液體的重力和表面張力會發揮恢復力的作用，促其返回平衡位置，從而產生液體質點的振動，也就是水面上常見的波紋和漣漪。在培養皿中，此種表面張力波可呈現同心圓波形。

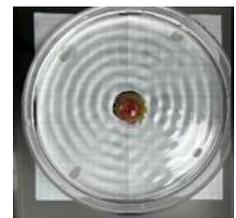


圖 4-2-4 表面張力波(一作攝)

(五)附壁效應

流體遇到障礙物時，會有沿著障礙物表面流動的傾向，且接近障礙物表面的流體速率會減緩。當流體被障礙物表面吸引，障礙物也受流體反作用力影響，產生向流體方向的作用力。

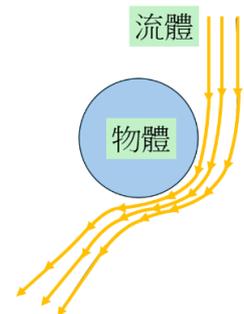


圖 4-2-5 附壁效應(二作繪)

三、實驗裝置製作流程與研究方法

(一)實驗前置：蒐集資料、文獻閱讀、實驗試做、現象觀察

經過多次嘗試失敗，如振動裝置的製作、液體的選用、物體的漂浮狀態以及親、疏水性難以控制，且缺乏可系統性分類的條件等問題，不斷的與組員討論與試做並修正，最終才完成了現在本實驗所使用的裝置：於自組的振動裝置上方放置加大的圓形培養皿，並加入不同種類的液體。使用 3D 列印，製造具有特定幾何形狀的漂、浮體，在表層噴上疏水噴霧。

(二)3D 列印製作過程

1.使用 Onshape 繪製各種漂、浮體	2. 使用 Up Studio 切片與設定列印參數
3. 輸出並使用 3D 印表機印製	4. 篩選出列印品質較好的漂、浮體

圖 4-3-1 3D 列印過程說明(一作攝)

(三)親水浮體、疏水漂體製作

親水性	疏水性	
1. 3D 列印出的物體即為親水性浮體(成分：聚乳酸)。	1. 在物體表面噴上疏水噴霧 (成分：氟素樹脂)。	2. 乾燥後的物體即為疏水性漂體。

圖 4-3-2 漂、浮體制作過程說明(一作攝)

(四)振動裝置

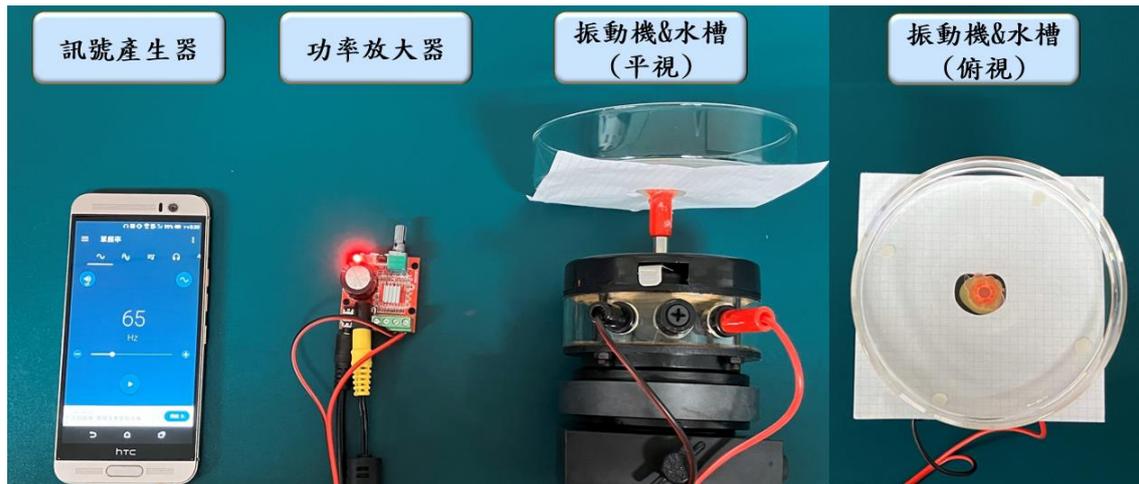


圖 4-3-3 振動裝置示意圖(一作攝)

(五)攝影方法

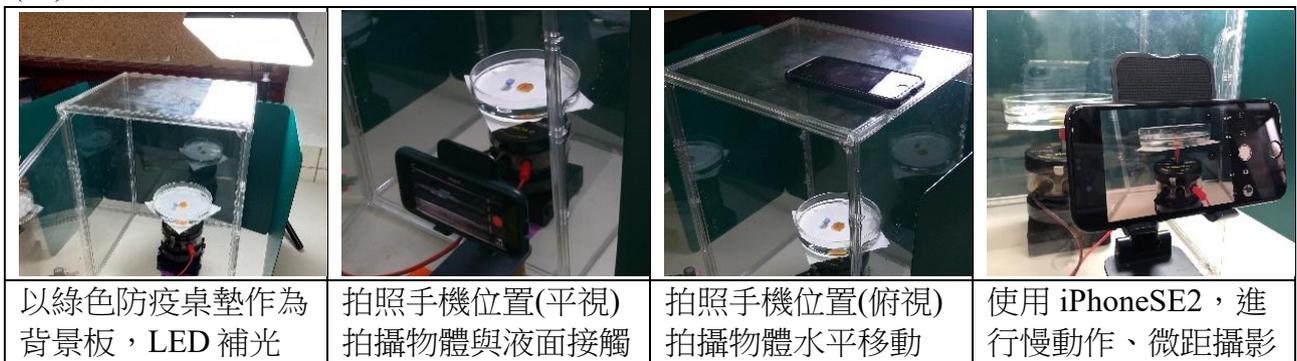


圖 4-3-4 不同角度攝影方法說明(一作攝)

(六)數據分析

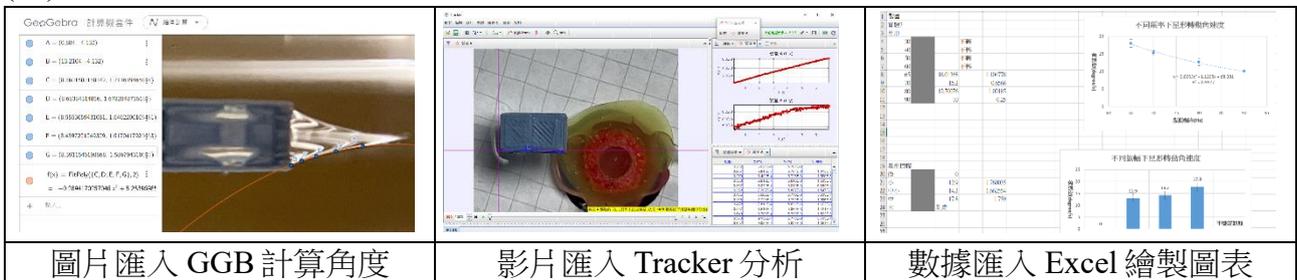


圖 4-3-5 數據分析方法示意圖(一作攝)

四、名詞定義

(一) 微、小、中、大振幅

振幅定義	微	小	中	大
波動種類	表面張力波	表面張力波	表面張力波	法拉第駐波
液面波紋圖				
Z 軸加速度(m/s^2)	1.18	2.32	3.28	3.36

圖 4-4-1 表面張力波示意圖(一作攝)

(二)浮體、漂體、長股、短股與斜邊

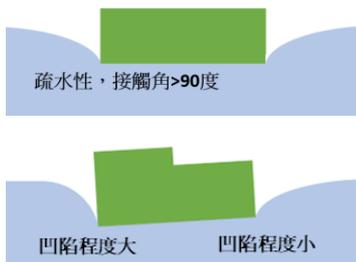
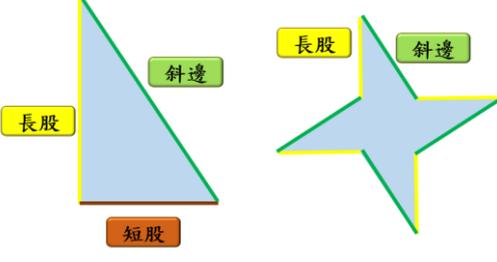
<p>浮體(平視圖) 浮力與物體重力共同作用，表面為親水性</p>	<p>漂體(平視圖) 表面張力與物體重力共同作用，表面為疏水性</p>	<p>厚度均勻的三角形、星形(俯視圖) 長股、短股與斜邊</p>
		

圖 4-4-2 名詞說明(二作繪)

(三) 接觸角、與液面夾角

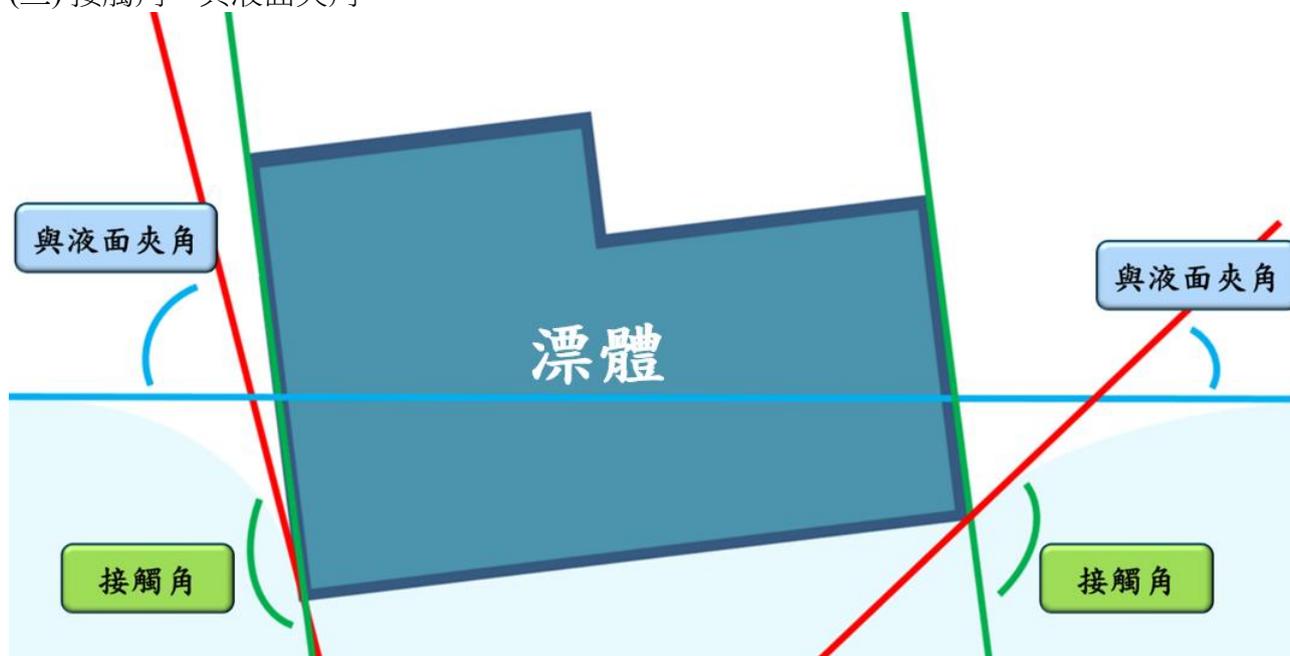


圖 4-4-3 接觸角與液面夾角差異圖(三作繪)

本實驗討論的角度為液面凹陷處切線(紅線)與水平面(藍線)的夾角：因為疏水性漂體受液體的表面張力漂在液面上時，本身重量會將液面下壓出凹陷，凹陷的液面與漂體表面可計算出接觸角。厚度不均勻的物體因為兩側重量差異，導致液面重量大的部分凹陷程度大，造成兩邊接觸角不同的差異。若厚度不均勻時物體側邊表面(綠線)並非鉛直線，傾斜程度隨質量差異改變，不容易計算接觸角。而接觸角與液面夾角成正向關係，且後續探討漂體運動狀態時的受力方向時，討論物體與液面夾角產生的影響較為直觀。

伍、研究結果與討論

【第一部份：探討漂、浮體於振動液面的運動狀態】

實驗 1：厚度均勻的幾何多邊形漂、浮體運動狀態探討

一、操作步驟

1. 架設振動裝置，並在培養皿內倒入 65% 甘油。
2. 將幾何多邊形漂、浮體放入培養皿中，並使其漂、浮在甘油上。
3. 將振幅與頻率調整至適當的大小，觀察漂、浮體的運動狀態。

二、實驗結果

(一) 各種形狀的親水性浮體在各種振幅與頻率的條件下，都無法產生移動或轉動的現象。

(二) 下表為漂體的實驗結果：

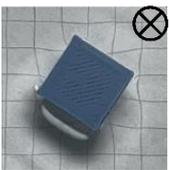
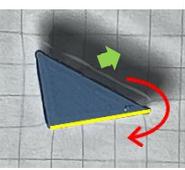
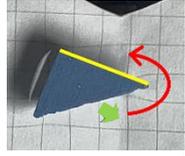
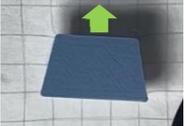
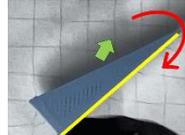
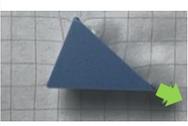
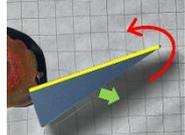
實驗編號	運動狀態簡圖	速度 (mm/s)	運動狀態說明(俯視)	實驗編號	運動狀態簡圖	速度 (mm/s)	運動狀態說明(俯視)
		角速度 (°/s)				角速度 (°/s)	
1-1 正方形		0	不產生移動或轉動	1-5 (正面) 3-4-5 三角形		0.2	向長股轉動，同時往質量較小端移動
		0				4.8	
1-2 長方形		0	不產生移動或轉動	1-5 (反面) 3-4-5 三角形		0.2	向長股轉動，同時往質量較小端移動
		0				3.2	
1-3 等腰梯形		1.2	沿對稱軸往質量較小端移動	1-6 (正面) 5-12-13 三角形		3.0	向長股轉動，同時往質量較小端移動
		0				7.5	
1-4 等腰三角形		0.2	沿對稱軸往質量較小端移動	1-6 (反面) 5-12-13 三角形		3.0	向長股轉動，同時往質量較小端移動
		0				6.9	

圖 5-1-1(一作攝) 註：質量：0.160~0.240g，振幅=中，振動頻率= 64 Hz

三、分析討論

(一) 疏水性漂體的運動狀態：

1. 靜止：由實驗 1-1、1-2 可發現形狀具有線對稱及旋轉對稱的長方形、正方形，在各種頻率和振幅的條件均不動。

2. **移動**：由實驗 1-3、1-4 可發現具有一條對稱軸的梯形、銳角等腰三角形會產生移動的現象，**移動方向與對稱軸平行，並往質量較小端前進**。完全不對稱的直角三角形亦可觀察到移動的現象。

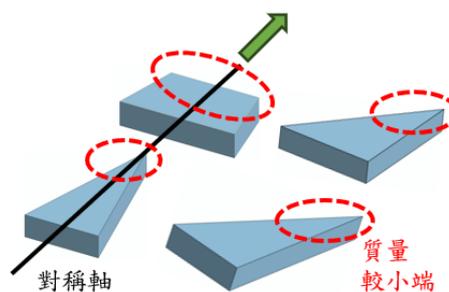


圖 5-1-2 (一作繪)

3. **轉動**：由實驗 1-5(正)(反)、1-6(正)(反) 可發現**完全不對稱**的直角三角形同時出現移動與轉動。轉動的方向不論正、反面，都會**向著直角三角形的長股轉動**。

(二)所有的**親水性浮體都靜止**：不同形狀的浮體在各種頻率和振幅的條件下均無法產生**移動或轉動的現象**。我們嘗試使用鑷子對浮體施力。發現浮體在施力終止後劇烈減速。與此相對比，漂體卻能夠維持長時間的運動。**故後續實驗我們僅探討漂體的移動與轉動。**

實驗 2：厚度均勻的曲線與複雜圖形漂體運動狀態探討

由實驗 1 可以發現幾何多邊形的漂體會產生移動或轉動的現象。為了深入了解漂體的運動狀態，我們使用 3D 列印進一步製造出曲線與複雜圖形的漂體。

一、操作步驟

1. 架設振動裝置，並在培養皿內倒入 65% 甘油。
2. 將疏水曲線與複雜圖形漂體放入培養皿中，並使其漂在甘油上。
3. 將振幅調整為中，頻率調整為 64~65Hz，觀察漂體的移動、轉動。

二、實驗結果

實驗編號	運動狀態簡圖	速度 (mm/s)	運動狀態說明 (俯視狀態下)	實驗編號	運動狀態簡圖	速度 (mm/s)	運動狀態說明 (俯視狀態下)
		角速度 (°/s)				角速度 (°/s)	
2-1 正圓形		0	不產生移動或轉動	2-5 (正面) 四芒星		0	不移動 向長股轉動
		0				7.6	
2-2 半圓形		0.4	沿對稱軸往質量較小端移動	2-5 (反面) 四芒星		0	不移動 向長股轉動
		0				6.9	

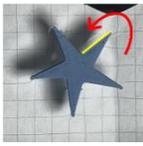
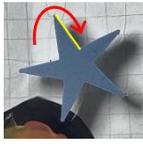
2-3 十字形		0	原地上下振動 <u>不產生移動或轉動</u>	2-6 (正面) 五芒星		0	不移動 向長股 <u>轉動</u>
						3.4	
		0		2-6 (反面) 五芒星		0	不移動 向長股 <u>轉動</u>
						2.8	

圖 5-2-1(一作攝)

質量：0.190~0.270g

三、分析討論

(一)靜止的漂體：根據實驗 2-1 和 2-3，我們觀察到旋轉對稱的正圓形和十字形，在各種頻率和振幅的條件下皆未有運動現象。

(二)移動的漂體：實驗 2-2 可發現有一條對稱軸的半圓形移動，移動方向與對稱軸平行。

(三)轉動的漂體：將直角三角形結合成四芒星和五芒星僅產生轉動，如實驗 2-4(正)(反)和 2-5(正)(反)，轉動的方向與直角三角形(實驗 1-5)相同，不論是正面還是反面，都呈現向著長股轉動。

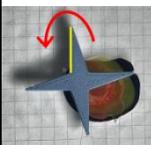
實驗 3：星芒差異對星形漂體運動狀態的影響

在實驗 1 和實驗 2 中，我們觀察到不具有對稱軸的直角三角形同時出現移動和轉動。然而，當數個三角形結合成星形的形狀時，卻僅出現轉動。我們進一步調整星芒的數量和種類，以觀察其對物體運動狀態的影響。

一、操作步驟

- 1.架設振動裝置，並在培養皿內倒入 65%甘油。
- 2.將直角三角形與星形漂體放入培養皿中，並使其漂在甘油上。
- 3.將振幅調整為中，頻率調整為 65Hz，觀察漂體的移動、轉動。

二、實驗結果

實驗編號	運動狀態簡圖	速度 (mm/s)	運動狀態說明 (俯視狀態下)	實驗編號	運動狀態簡圖	速度 (mm/s)	運動狀態說明 (俯視狀態下)
		角速度 (°/s)				角速度 (°/s)	
3-1 直角三角形		0.2	向長股 <u>轉動</u> ，同時 <u>往質量較小端</u> 移動	3-4 四芒星 (直角)		0	不移動 向長股 <u>轉動</u>
		3.6				6.5	

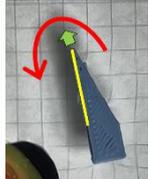
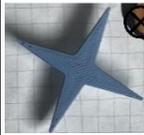
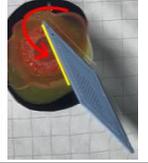
3-2 四芒星 (一芒)		0.2	向長股 旋轉 同時 往質量較 小端 移動	3-5 四芒星 (等腰)		0	原地上下振動 不產生移動或 轉動
		4.8				0	
3-3 四芒星 (二芒)		0	不移動 向長股 轉動	3-6 四星芒 (兩等分)		0	不移動 向長股 轉動
		5.1				14.8	

圖 5-3-1 (一作攝)

三、分析討論

漂體的形狀和對稱性種類影響其運動狀態：

1. 由實驗 3-3、3-4 可發現具有**旋轉對稱**且沒有**線對稱**的圖形**僅有轉動**，而**不移動**。此外，隨著星芒數增加，轉動的角速度也越大。

2. 在實驗 3-5 中，四芒星星芒為**等腰三角形**，**未觀察到移動或轉動**。

3. 在實驗 3-6 中透過**菲涅耳透鏡 (Fresnel lens)** 概念簡化的直角三角形星芒，質量變小，轉動速度變快。

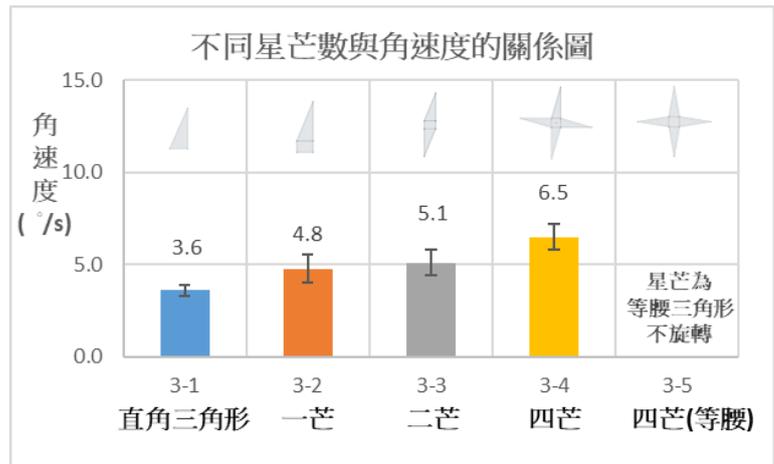


圖 5-3-2 星芒數量、種類與角速度的關係圖(二作繪)

實驗 4：厚度不均勻的長方形漂體運動狀態探討

由於實驗 1、實驗 2、實驗 3，可發現不具旋轉對稱的圖形會產生移動的現象，且移動的方向往質量較小端前進。若圖形具有一條對稱軸，則移動方向會與對稱軸平行。

基於這些發現，我們進一步改造了厚度均勻的長方形漂體，藉由**調整前後兩側的厚度差異**，**製造了重心偏移的漂體**，觀察其在振動液面上的移動狀態。

一、操作步驟

1. 架設振動裝置，並在培養皿內倒入 65% 甘油。
2. 將長方形漂體放入培養皿中，並使其漂、浮在甘油上。
3. 將振幅調整為中，頻率為 64Hz，俯視拍攝觀察漂體移動。
4. 將漂體較厚端定為**(後端)B 點**，較薄端定為**(前端)F 點**，並平視拍攝其振動狀態。

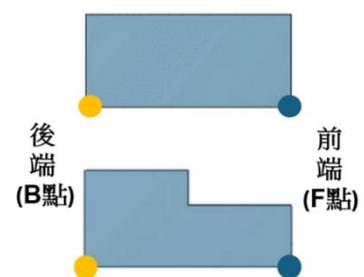


圖 5-4-1 厚度不均勻的長方形平視圖(三作繪)

二、實驗結果

實驗編號	立體圖	速度 (mm/s)	實驗編號	立體圖	速度 (mm/s)
4-1 長方形		0	4-6 長方形 (2倍寬)		0.9
4-2 長方形 (較厚處占 3/4)		0.9	4-7 長方形 (3倍寬)		0.8
4-3 長方形 (重心在 2/8)		1.7	4-8 長方形 (1.2倍長)		1.3
4-4 長方形 (重心在 3/8)		1.5	4-9 長方形 (1.4倍長)		0.7
4-5 長方形 (重心在 4/8)		0	4-10 T字 長方形		0.2

圖 5-4-2(三作繪)

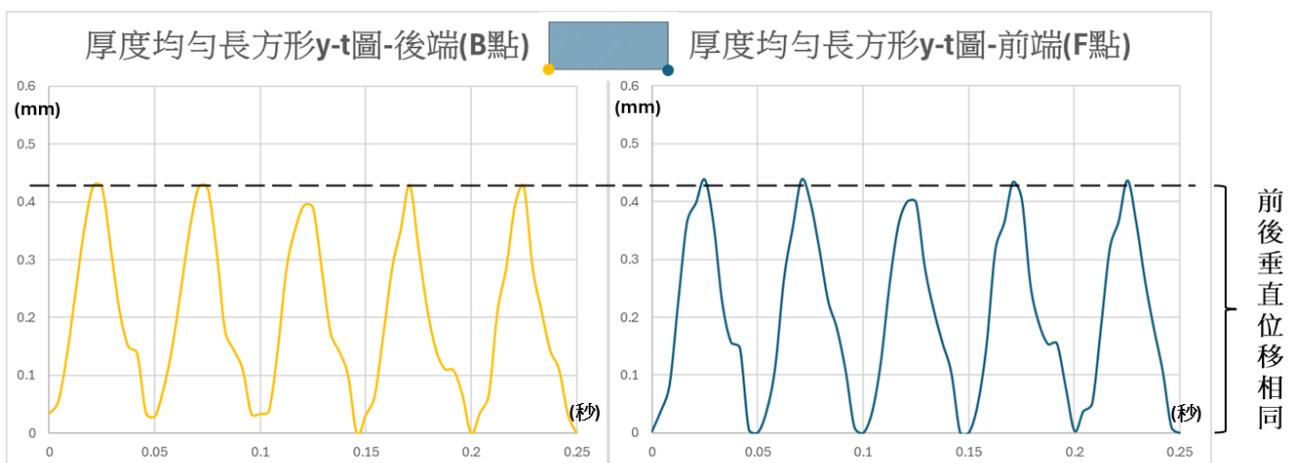


圖 5-4-3 (實驗 4-1)厚度均勻的長方形漂體前、後端垂直位移比較圖(三作繪)

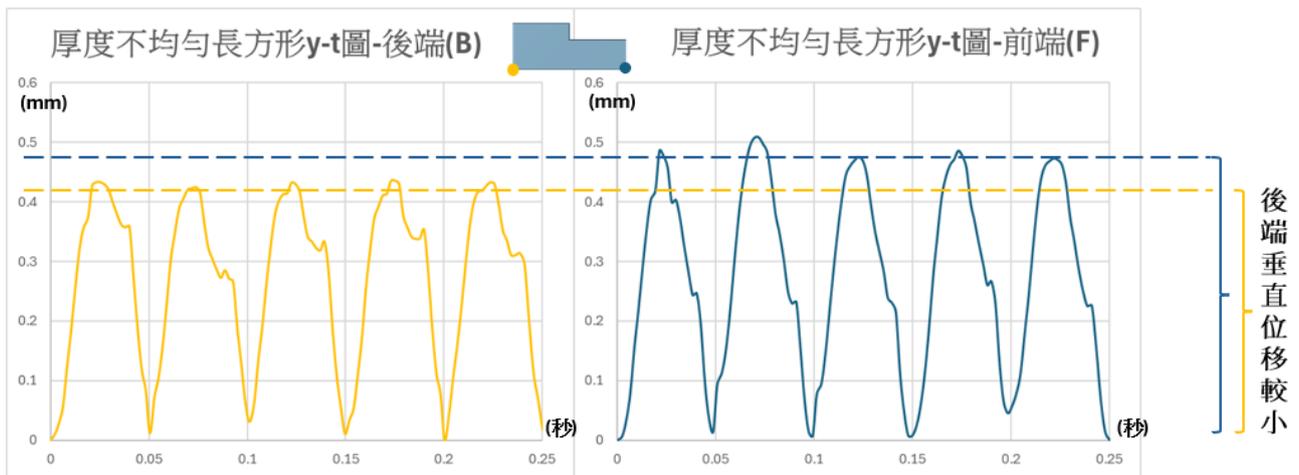


圖 5-4-4 (實驗 4-3)厚度不均勻的長方形漂體前、後端垂直位移比較圖(三作繪)

三、分析討論

(一)連續振動時，厚度不均勻漂體往較薄端前進：移動方向與對稱軸平行，[實驗 4-1 ~ 4-5](#)的結果發現重心偏移中心較多的長方形移動速度較快。

(二)長方形漂體寬度越大，速度越慢；長度越大，速度越慢 ([實驗 4-6 ~ 4-9](#))。

(三)厚度不均勻漂體，較厚端垂直振幅小，較薄端垂直振幅大：平視拍攝[實驗 4-1](#)並分析兩端點的垂直振幅：因兩端厚度相同，振幅差異不明顯，也沒有產生移動。[實驗 4-3](#)較厚端質量大，振動幅度小，較小端質量小，振動幅度大，像是海上移動的船一樣，由於比較重的引擎在船尾，因此船尾的上下振動較小。

除此之外，此類漂體也產生明顯的移動。後續將以此點作為開展討論振動機制。

【第二部份：探討親水浮體、疏水漂體與液面交互作用的基本狀態】

實驗 5：發展漂、浮體與液面夾角的拍攝方式與計算方法

物體在液體表面受到振動影響產生移動或轉動的現象，我們認為可能與物體在液面上的漂浮狀態、以及與水平液面的夾角有關，為了觀察漂、浮體靜止狀態浮在液體中與漂在液面上的差異，我們利用手機中的 app 調整攝影焦距進行微距攝影，並利用數學方法發展兩種方法計算漂、浮體與液體表面的夾角，分別為(一)圓形法與(二)二次函數法。

一、分析方式

(一)、圓形法

1. 開啟 GeoGebra，將欲計算角度的微距攝影圖片放入。
2. 並拉出一個原點(0,0)半徑為 1 的圓。
3. 調整大小讓液面符合圓形，並畫出多條輔助線段。
4. 結果如右圖所示，求出 $j \div g$ 即為 $\cos\theta$ 。
5. 利用函數 $\cos^{-1}(j \div g)$ 計算出與液體表面的水平夾角 θ 。

[Excel 函數”=ACOS(j÷g)*180/PI()”]

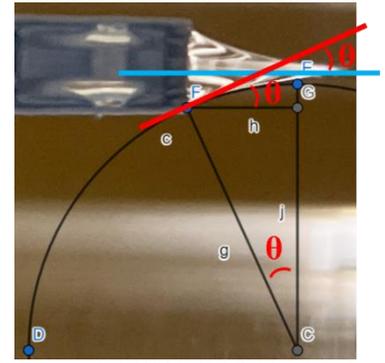


圖 5-5-1 圓形法測量與液面夾角 (一作繪)

(二)、二次函數法

1. 開啟 GeoGebra，將欲計算角度的微距攝影圖片放入 x-y 座標平面中，並確認圖中的液面與 x 軸平行。
2. 在圖片上增加 5 個點，其中 G 點為液面與物體接觸點。
3. 利用二次函數擬合步驟 2 的點 (fitpoly({C,D,E,F,G},2))，得到二次函數 $f(x)=ax^2+bx+c$ 。
4. 將步驟 3 的二次函數進行微分處理後得到一次函數：

$f'(x)=2ax+b$ ，此時 a 值與 b 值為已知。

5. 將物體與液面接觸點 G 的 x 值代入此一次函數中，即可得該點的切線斜率
6. 利用函數 \tan^{-1} (斜率) 並取絕對值即可計算出與液體表面的水平夾角 θ 。

[Excel 函數”=ABS(ATAN(斜率)*180/PI()”]

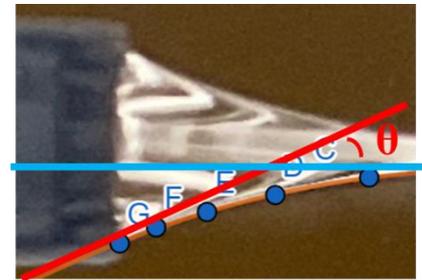


圖 5-5-2 二次函數法測量與液面夾角 (一作繪)

二、分析結果

綜合比較	親水表面(正方體浮於 65%甘油水溶液)		疏水表面(正方體漂於 65%甘油水溶液)	
	(一)圓形法	(二)二次函數法	(一)圓形法	(二)二次函數法
分析圖				
角度	20.6°	19.8°	24.3°	22.0°

圖 5-5-3(一作攝)

三、分析討論

(一) 使用圓形法與二次函數法測量物體與液面夾角能夠提高量測的精確度：相較於使用量角器進行測量，同時降低因環境變異或測量者主觀認定而引起的角度誤差。

(二) 兩種分析方法在操作和計算角度上都有相似之處：均使用 GeoGebra 進行操作，並透過數學計算得到數值，最後再利用反三角函數求得角度。夾角較小時，兩者的差異不大，且模擬曲線在圖上能夠與液面近乎完全重疊。

(三) 二次函數法擬合在大角度能夠更好地貼合液面：當疏水性漂體下壓液面的程度增加時，圓形模擬曲線難以完全貼合被下壓的液面，而二次函數法擬合能夠更好地貼合液面。因此為確保一致性，後續所有與液面夾角的分析都將採用二次函數法。

實驗 6：漂、浮體與液面的夾角分析

我們利用二次函數法，計算漂、浮體靜止在液面時以及連續振動時與液面的夾角。

一、操作步驟

1. 在培養皿內倒入選用的液體(純水、35%、65%甘油溶液、酒精)。
2. 將處理過的漂、浮體輕輕放入培養皿中，並使其漂、浮在液體上。
3. 利用 FotorGear app 進行微距攝影，並使用二次函數法計算出與液面的夾角。

二、實驗結果

(一) 靜止狀態

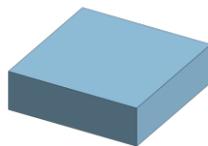
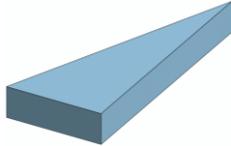
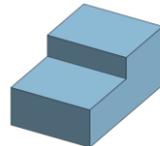
漂、浮體 形狀 質量	正方形	星形	直角三角形	不均勻長方形				
								
液體種類	0.273g	0.241g	0.194g	0.247g				
浮體狀態								
純水	6.9°	/		7.8°				
65%甘油	19.8°	/		11.1°				
漂體狀態								
		長	斜	短	長	斜	薄	厚
純水	20.1°	9.8°	8.6°	27.7°	21.8°	20.8°	20.4°	23.4°
35%甘油	21.1°	20.9°	16.1°	29.3°	22.6°	21.0°	21.3°	24.4°
65%甘油	22.0°	23.2°	18.3°	32.1°	24.0°	21.9°	25.2°	29.3°
酒精	漂不起來	27.5°	26.7°	漂不起來		漂不起來		

圖 5-6-1 靜止狀態漂、浮體與液面夾角(一作繪) 註：物體的密度大於酒精，小於水與甘油及其混合溶液。

(二)連續振動狀態

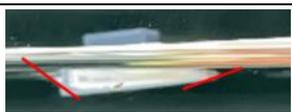
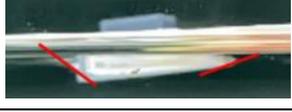
時間(秒)	位置	不均勻長方形漂體	後	前	均勻長方形漂體	後	前
0.00000	最高點		33°	21°		13°	13°
0.02500	最低點		48°	42°		47°	47°
0.05000	最高點		33°	21°		13°	13°

圖 5-6-2(一作攝)

註：振幅=中，振動頻率=20 Hz

三、分析討論

(一)靜止狀態下的漂、浮體與液面夾角：根據實驗 6，不論液體的密度比漂體大或小，液體與親水表面的浮體接觸面呈上凸狀，疏水漂體的接觸面則呈下凹狀。

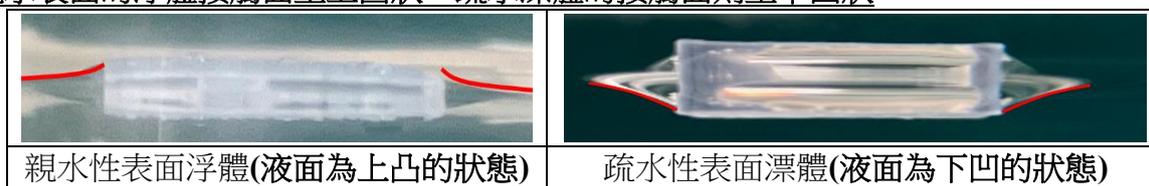


圖 5-6-3(一作攝)

(二)疏水性漂體靜止時，各邊與液面夾角比較：

漂體形狀	正方形	星形	直角三角形	厚度不均勻長方形
與液面夾角	各邊皆相同	長股>斜邊	短股>長股>斜邊	厚端>薄端

表 5-6-1

(三)連續振動下的長方形漂體在低點與液面夾角大，高點則較小：如圖 5-6-2，厚度均勻的漂體左右角度變化相同。厚度不均勻長方形，較厚端角度變化小，較薄端角度變化大。

(四)表面張力越小，漂體與液面夾角越大(圖 5-6-1)：查表顯示表面張力大小(純水 > 35%甘油 > 65%甘油 > 酒精)，酒精的表面張力最小，小到無法讓物體漂在液面上。

【第三部份：探討影響漂體移動與轉動的因素】

我們想了解振動環境(外部)與漂體本身(內部)的條件因素差異會如何影響運動狀態。

實驗 7：頻率與振幅對漂體運動狀態的影響

一、操作步驟

1. 架設振動裝置，並在培養皿內倒入 65% 甘油。
2. 將厚度不均勻的長方形漂體與厚度均勻的星形漂體放入培養皿，並使其漂在甘油上。
3. 啟動振動機，將振幅固定為中振幅並改變頻率，觀察漂體的移動、轉動。
4. 將頻率固定為 65Hz，並改變振幅，觀察漂體的移動、轉動。

二、實驗結果

(一) 振幅對漂體移動與轉動的影響

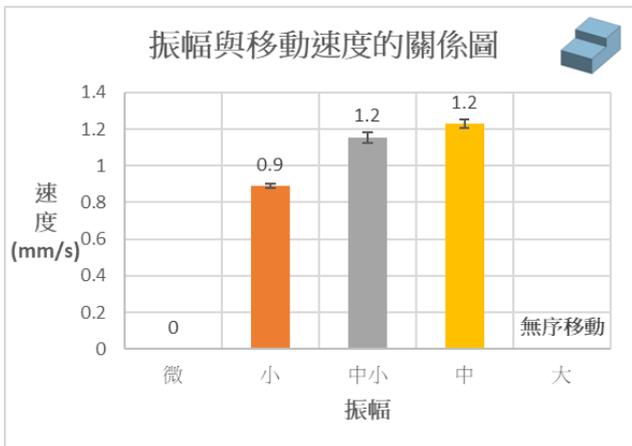


圖 5-7-1 厚度不均勻長方形漂體振幅與速度關係圖
(二作繪)

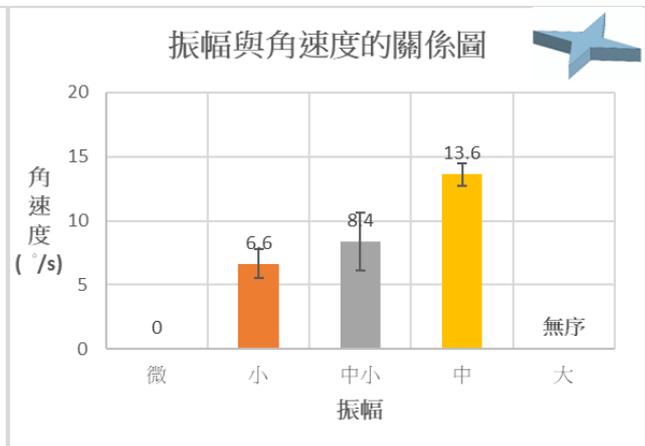


圖 5-7-2 厚度均勻星形漂體振幅與角速度關係圖
(二作繪)

(二) 頻率對漂體移動與轉動的影響

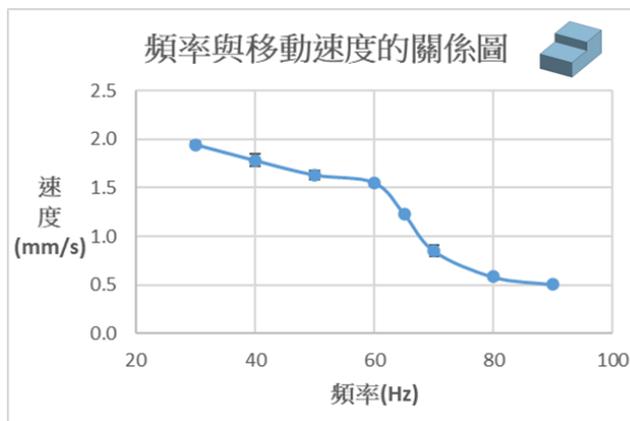


圖 5-7-3 厚度不均勻長方形漂體頻率與速度關係圖
(二作繪)

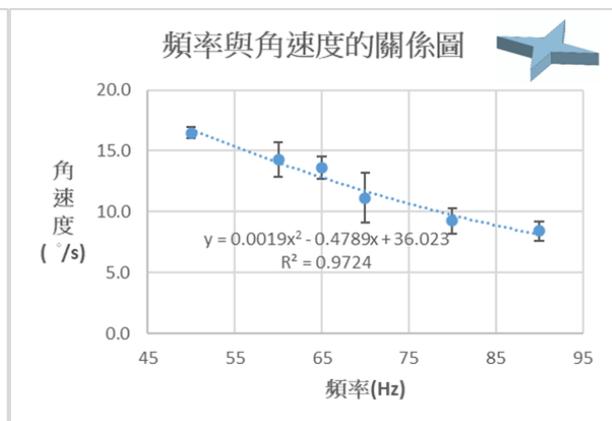


圖 5-7-4 厚度均勻星形漂體頻率與角速度關係圖
(二作繪)

三、分析討論

(一)頻率固定時，振幅越大，漂體移動速度與角速度越大：

因為振幅越大時，液面擺動幅度越大，較大垂直位移能提供給長方形、星形漂體較多能量，使其移動或轉動更快。

(二)振幅固定時，頻率越大，漂體移動速度與角速度越小：

因為頻率越大，漂體上下擺動的頻率跟不上液面擺動的頻率，既無法從液面有效獲得能量，能量也會被抵銷。

實驗 8：振動載體種類對漂體運動狀態的影響

一、操作步驟

- 1.架設振動裝置載體：氣球皮、壓克力平板、培養皿內不同液體。
- 2.將厚度不均勻的長方形漂體與厚度均勻的星形漂體放在載體上方。
- 3.啟動振動機，將振幅固定為中振幅，頻率固定為 65Hz，觀察漂體的移動、轉動。

二、實驗結果

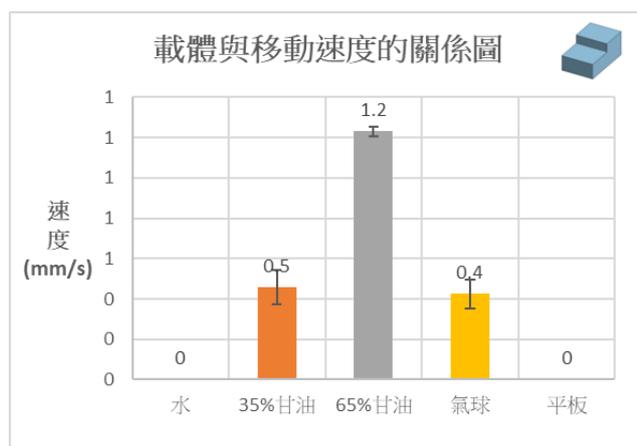


圖 5-8-1 厚度不均勻長方形載體差異與速度關係圖
(二作繪)

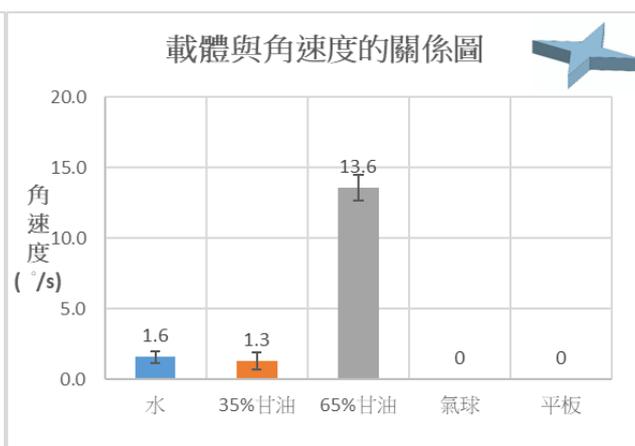


圖 5-8-2 厚度均勻星形漂體載體差異與角速度關係圖
(二作繪)

三、分析討論

(一)65%甘油水溶液表面張力最適中，漂體移動速度與角速度越大。

(二)35%甘油水溶液與氣球皮的移動速度相仿。我們認為兩者的表面性質相似。

(三)物體無法在堅硬的壓克力板上產生運動現象。

實驗 9：漂體大小與質量差異對漂體運動狀態的影響

一、操作步驟

1. 架設振動裝置，並在培養皿內倒入 65% 甘油。
2. 將質量不同的厚度不均勻漂體、密度不同的厚度不均勻漂體與厚度均勻的星形漂體放入培養皿中，並使其漂在甘油上。
3. 啟動振動機，將振幅固定為中振幅，頻率固定為 65Hz，觀察漂體的移動、轉動。

二、實驗結果

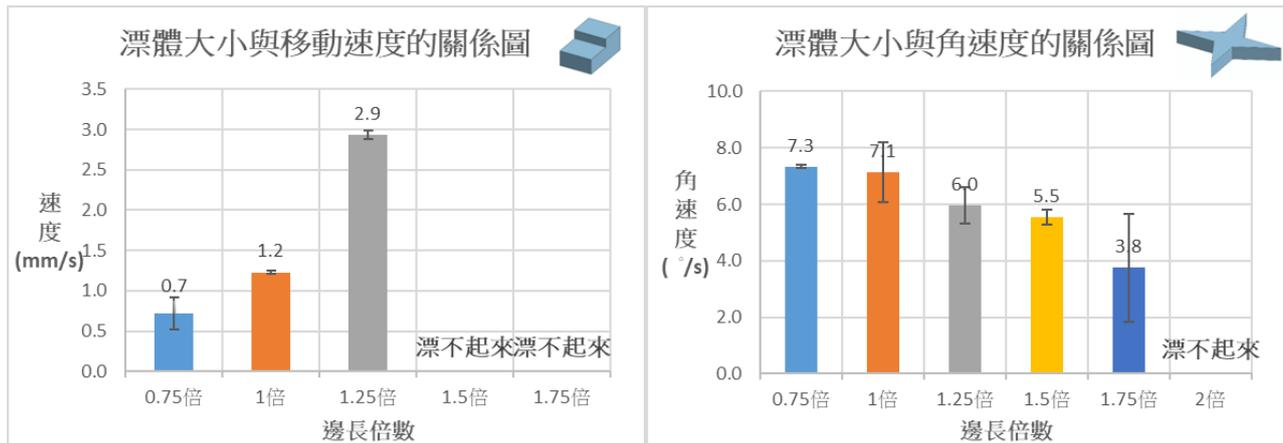


圖 5-9-1 厚度不均勻長方形大小與漂體速度關係圖(二作繪) 圖 5-9-2 厚度均勻星形漂體大小與角速度關係圖(二作繪)

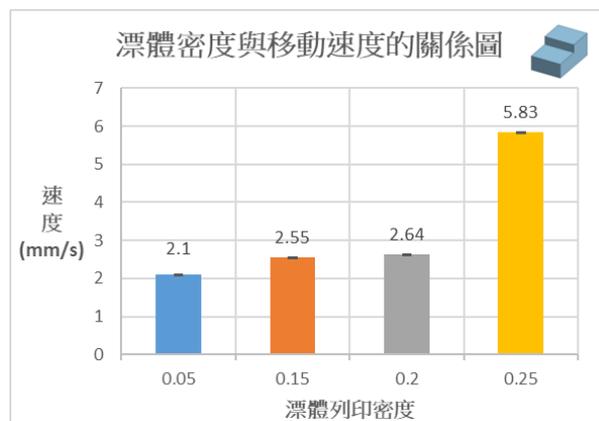


圖 5-9-3 厚度不均勻長方形密度差異與漂體速度關係圖(二作繪)

三、分析討論

(一)長方形漂體質量越大，移動的速度越快：不論改變體積(固定密度)或改變密度(固定體積)，當漂體質量越大，造成液面下凹程度大，與液面夾角越大，水平分力越大，讓其克服自身質量因素移動效果越佳。

(二)星形漂體越大，轉動的角速度越慢：因為星形漂體質量與體積變大，轉動慣量增加量大於液面作用力增加量，轉動的速度反而變慢。

(三)液體表面張力不足以支撐質量過大的漂體：漂體質量越大，液面下凹程度越大，當超過表面張力能支撐的程度，即失去漂體狀態。

【第四部份：漂體、浮體與液面間的交互運動狀態】

實驗 10：漂體於振動液面的流場狀態

一、操作步驟

- 1.架設振動裝置，在培養皿內倒入 65%甘油，並放入不同形狀的漂體。
- 2.分別將亮粉、色素加入甘油中作為標誌物，啟動振動機，將振幅固定為中振幅，頻率固定為 65Hz，觀察並分析漂體運動時的流場狀態。

二、實驗結果

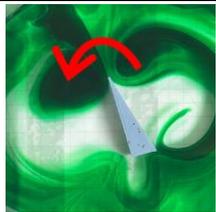
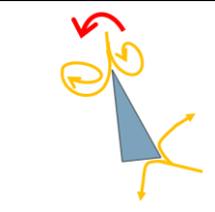
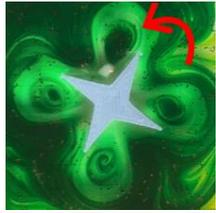
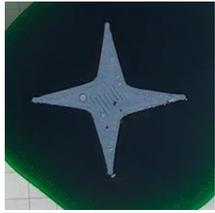
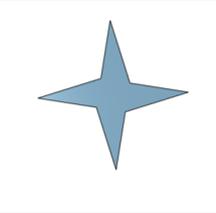
實驗編號	流場狀態	流場狀態簡圖	實驗編號	流場狀態	流場狀態簡圖
10-1 漂體 三角形 (直角)			10-3 漂體 四芒星 (等腰)		
10-2 漂體 四芒星 (直角)			10-4 浮體 四芒星 (直角)		

圖 5-10-1 漂體、浮體流場圖(二作繪)(紅線為漂體轉動方向，橘線為液體流動方向)

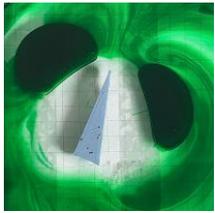
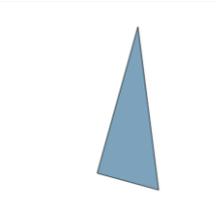
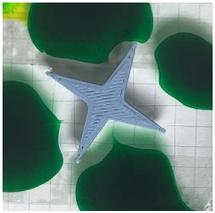
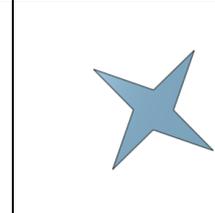
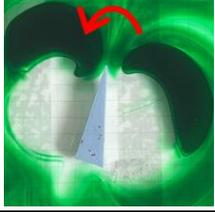
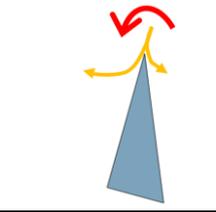
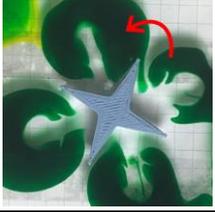
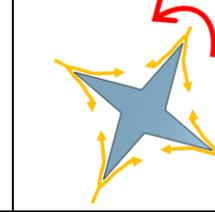
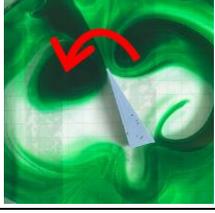
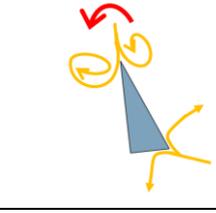
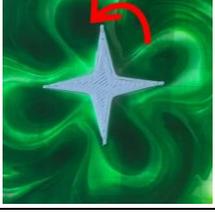
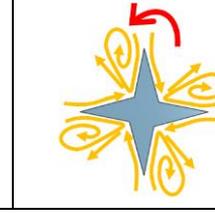
流場隨時間變化圖	10-1 三角形 (直角)	流場狀態簡圖	10-2 四芒星 (直角)	流場狀態簡圖
1.未振動 靜止				
2.啟動瞬間 液體由星芒 兩側分離				
3.穩定轉動 產生 渦旋與射流				

圖 5-10-2 三角形與星形，流場隨時間變化圖(二作繪)(紅線為漂體轉動方向，橘線為液體流動方向)

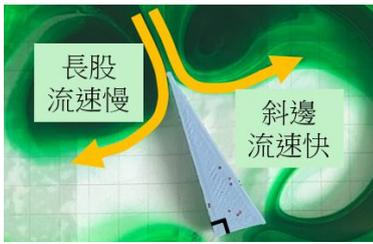


圖 5-10-3 三角形兩側流場速度
(三作繪)

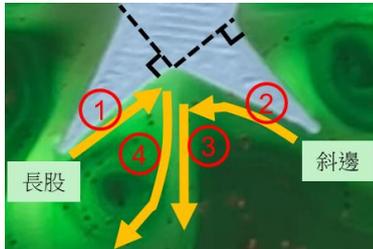


圖 5-10-4 星形兩側流場速度
(三作繪)

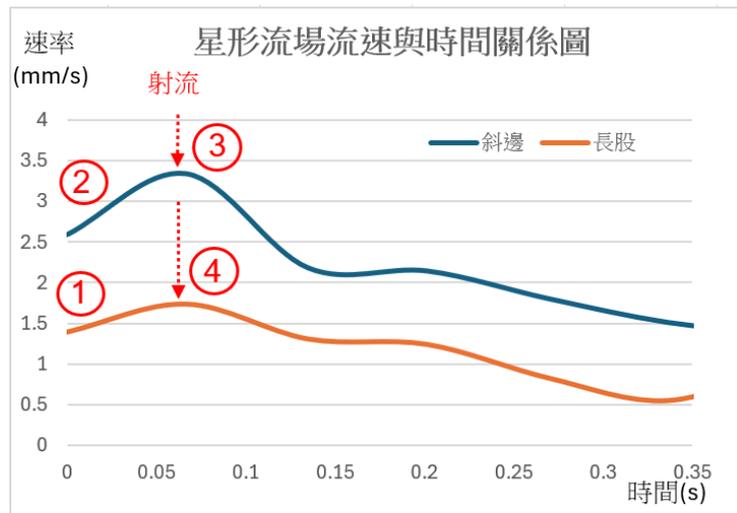


圖 5-10-5 星形兩側流場速率與時間關係圖
(紅色數字標記位置參考圖 5-10-4) (三作繪)

三、分析討論

- (一)色素與亮粉不流動的狀況：1. 振動機未啟動 2. 浮體星形 3. 非振動液面星形旋轉(手動)。
- (二)當色素與亮粉開始流動(圖 5-10-2)：當振動機啟動時，液面垂直振動，色素與亮粉沿漂體下凹液面處流動，此流動現象發生在液體表層。
- (三)流動速率：色素與亮粉在漂體長股側流速慢，斜邊側流速較快(圖 5-10-3、圖 5-10-4)
- (四)渦旋與射流的產生：振動時在漂體周圍產生渦旋，實驗 10-3 觀察到不轉動的星形周圍有 8 個渦旋，而實驗 10-2 僅有 4 個渦旋(圖 5-10-1)。實驗 10-2 中在長股與斜邊交界處產生流速極快的射流(圖 5-10-4)，射流延長線通過漂體旋轉中心。

實驗 11：漂、浮體間於振動液面的交互運動狀態

物體獨立在振動液面上時，厚度均勻圓形漂、浮體不移動，只有厚度不均勻長方形漂體能移動。此部分實驗將不同狀態的物體同時置於振動液面上，觀察兩物體的交互運動。

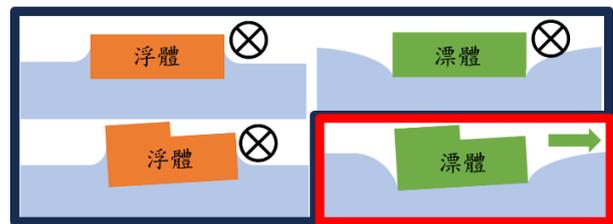


圖 5-11-1 漂、浮體獨立於振動液面上之運動狀態圖
(三作繪)

一、操作步驟

- 將(1)厚度不均勻長方形漂、浮體與厚度均勻圓形漂、浮體放入培養皿中，並使其漂、浮在 65% 甘油上。(2)長方形漂體放入培養皿中，並將圓柱體固定，使其表面為親水或疏水性。
- 啟動振動機，將振幅固定為中振幅，頻率範圍為 50~80Hz，觀察兩個物體的交互作用。

二、實驗結果

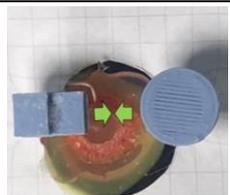
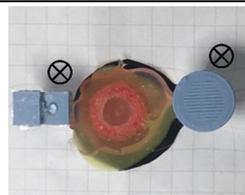
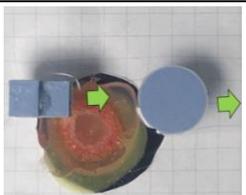
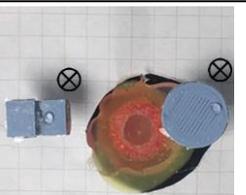
漂、浮體狀態	長：漂；圓：漂	長：浮；圓：漂	長：漂；圓：浮	長：浮；圓：浮
圓形位於長方形較薄端				
作用力	互相吸引	靜止不動	互相排斥	靜止不動

圖 5-11-2(一作攝)

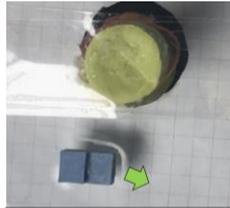
物體狀態	長：漂；固定圓柱：親水	長：漂；固定圓柱：疏水	
圓柱位於長方形漂體側邊			漂體繞圈非常特別我們進一步實驗 在 不同速度下 漂體繞圈現象
作用力	互相排斥	互相吸引	

圖 5-11-3(一作攝)



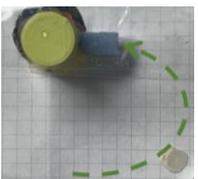
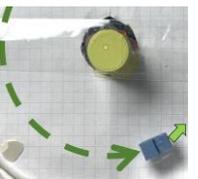
物體狀態	長方形：漂體，固定圓柱：疏水		
實驗結果			
軌跡說明	漂體受圓柱吸引以 拋物線 方式接近圓柱	漂體受圓柱吸引以繞圈方式做 圓周運動	漂體速度足夠快克服圓柱吸引力而 遠離

圖 5-11-4 不同速度下漂體繞圈現象(一作攝)

三、分析討論

- (一)互相吸引(兩者距離縮短)：長方形漂體前進與圓形漂體、固定疏水性圓柱互相吸引。
- (二)互相排斥(兩者距離固定)：長方形漂體前進與圓形浮體、固定親水性圓柱互相排斥。
- (三)靜止不動：長方形若為浮體，則不論圓形物體為漂或浮，兩者皆不動。
- (四)長方形漂體受圓柱吸引力影響有接近、圓周運動、遠離三種運動狀態(圖 5-11-4)。

陸、研究綜合討論

為了解釋不同形狀的漂體在液面移動或轉動的現象，我們設計了一系列實驗研究漂體在液面上的運動狀態與液面夾角、流場狀態的相關性，並透過多角度的觀察，詳細分析漂體在液面上的振動模式。為了能更全面性的探討漂體的運動狀態，我們也改變了多項變因如：振動條件、振動載體、漂體性質等，同時為振動模式提供更具說服力的解釋。

一、探討漂體形狀與運動狀態相關性

統整實驗 1 與實驗 2 的漂體運動狀態，可以發現漂體的形狀和對稱性種類對其在液面上的移動與轉動產生了重要的影響。

(一)靜止漂體的共同特徵：同時具有旋轉對稱以及線對稱的圖形。

(二)純移動漂體的共同特徵：具有線對稱且不具旋轉對稱的圖形。若圖形具有一條對稱軸，則移動方向會與對稱軸平行。並由實驗 4 可知，移動方向往質量較小端前進。

(三)純轉動漂體的共同特徵：具有旋轉對稱而缺乏線對稱的圖形，且以本報告星形(星芒為直角三角形)為例，轉動方向向著直角三角形的長股轉動。

可依照旋轉對稱與線對稱的有無，將漂體歸納出四大類的運動狀態：

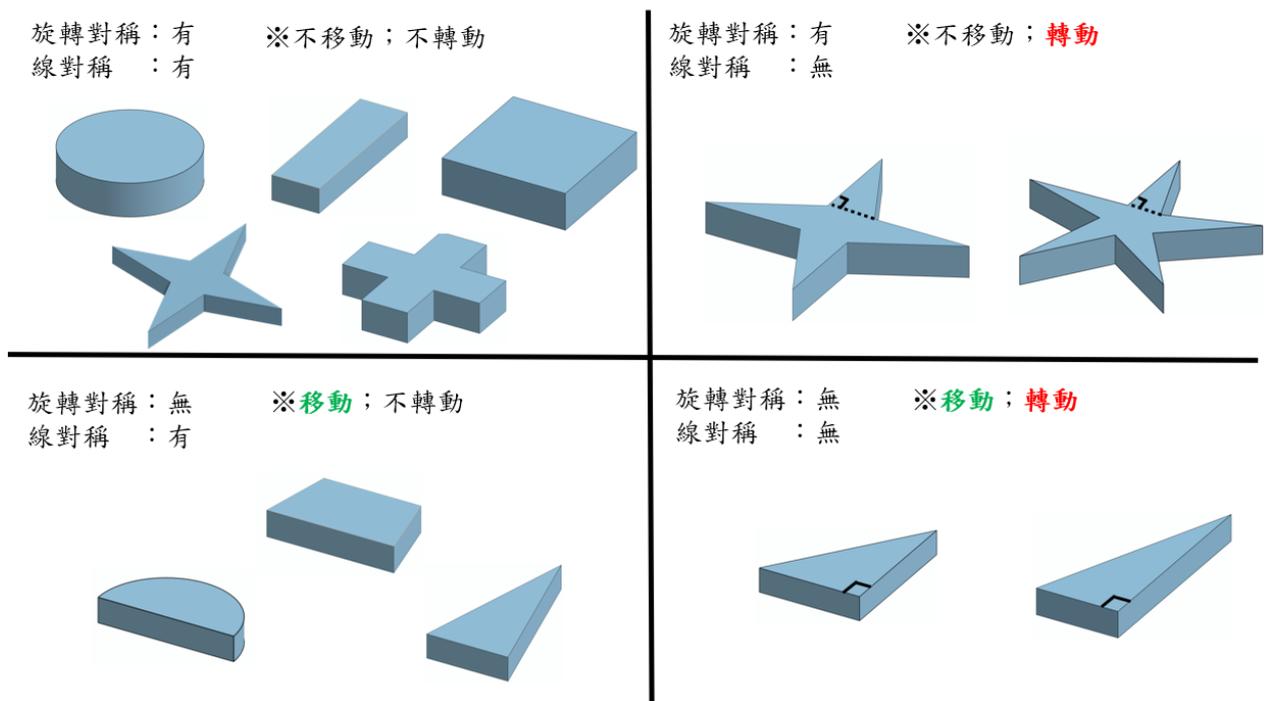


圖 6-1-1 漂體運動狀態與對稱關係分類圖(三作繪)

二、液體間表面張力形成彈性液體表面解釋漂體受力

結合圖 5-6-1 與綜合討論一，當漂體靜止時，液體表面呈凹陷狀，我們拍攝物體下壓彈性氣球皮的照片與

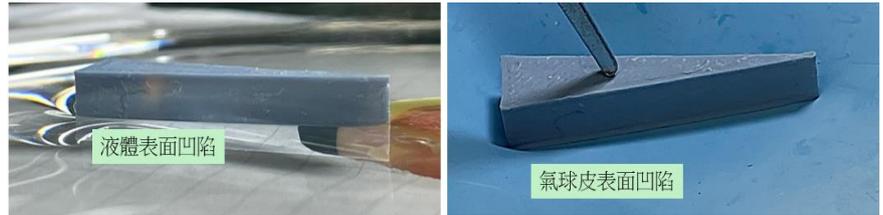


圖 6-2-1 漂體於液面與氣球皮表面比較圖(一作攝)

其進行對照(圖 6-2-1)。當液面連續振動時，與液面夾角改變使漂體開始運動。我們認為液體間表面張力讓液面像彈簧一樣提供漂體彈力，並藉此解釋其轉動與移動的現象。

(一)表面張力越小，液面凹陷程度大：

表面張力小的液體容易產生形變，這也解釋了實驗 6 中，表面張力最小的酒精不易使物體漂在液面上。

	表面張力	液面形變量	與液面夾角
純水	大	小	20.1°
酒精	小	大	漂不起來

表 6-2-1 正方形漂體於純水與酒精溶液液面狀態比較圖

(二)漂體質量越大，液面凹陷程度大：

實驗 6 中可觀察到此結果，可以透過圖 6-2-2 中的球與連桿來解釋。

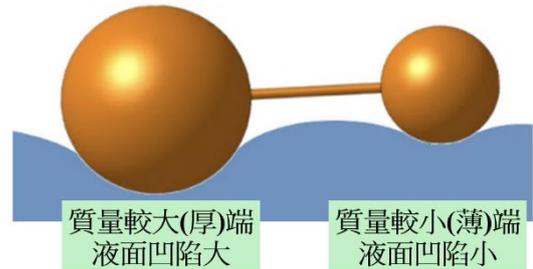


圖 6-2-2 質量差異造成液面凹陷差異示意圖 (三作繪)

(三)液面作用力的大小和液面被壓縮程度成正向關係，方向和與液面夾角有關：厚度不均勻長方形兩側受不同大小與角度的液面作用力(圖 6-2-3)。而具有旋轉對稱與線對稱圖形的漂體，各邊受到的彈力相等(圖 6-2-4)。

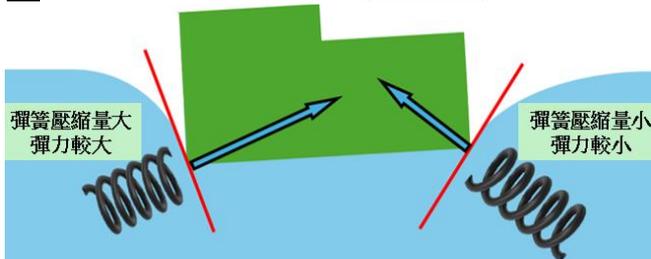


圖 6-2-3 厚度不均勻漂體於彈性液面模擬圖(三作繪)

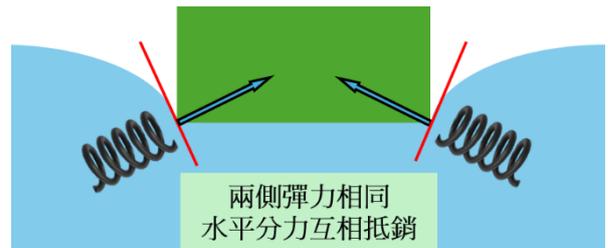
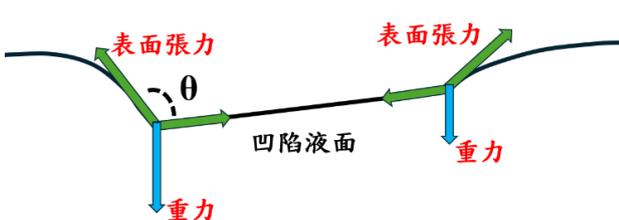


圖 6-2-4 厚度均勻漂體於彈性液面模擬圖(三作繪)

(四)液體表面受力分析(圖 6-2-5)：向下振動時， θ 變小，液面合力變大，方向向右上方。



65%甘油表面張力	接觸周長	總力
68.5 (mN/m)	$\times 0.032(m)$	$= 2.192(mN)$
$2.192(mN) \div 9.8(mN/gw)$		$= 0.223(gw)$
$0.223gw > \text{漂體重量}$ ，表面張力可支撐漂體		

圖 6-2-5 液體受重力與表面張力示意與計算(三作繪)

三、影響漂體移動與轉動的因素

我們改變振動環境(載體、頻率、振幅)與漂體本身(大小與質量)等條件觀察不同因素差異如何影響運動狀態，並為我們提出的彈性液面假設與振動型態提供更具說服力的解釋。

(一)表面張力大小較適中的 65%甘油水溶液效果最好：

由實驗 8 可發現當液體表面張力越大時(例如：水)，轉動與移動的現象不明顯，因液面不容易產生形變，垂直振動幅度小。而壓克力平板表面完全沒有彈性，實驗結果與水相同。表面張力最小的酒精，因為張力過小，振

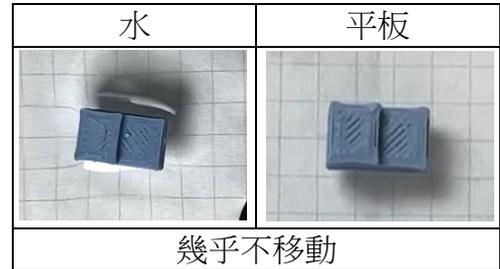


圖 6-3-1(一作攝)

動無法有效傳遞振動能量。**65%甘油水溶液表面張力大小較適中，使漂體運動的效果最好。**

(二)振幅越大，漂體運動效果好；頻率越大，運動效果差：由實驗 7 發現**振幅越大，漂體移動與轉動都更快**。因彈性液面能提供漂體更多能量。頻率越大則漂體上下擺動的頻率跟不上液面擺動的頻率，運動過程中的動能也被抵銷，不利於漂體的運動。

(三)**漂體質量越大**，厚度不均勻長方形**移動越快**、厚度均勻星形**轉動越慢**：由實驗 9 發現不論改變體積(固定密度)或改變密度(固定體積)，當漂體質量也越大，造成液面下凹程度大，與液面夾角越大，水平分力越大，讓其克服自身質量，而移動效果越佳，產生更快的移動。對於星形轉動來說，質量與體積變大，轉動慣量增加量大於液面作用力增加量，且星芒過長不利於流場作用力產生，轉動的速度反而變慢。

四、漂體於液面上的運動及振動模式分析

(一)漂體的移動分析：與液面夾角差有關。

1.厚度不均勻長方形漂體

B、F 兩點的垂直移動距離不同，水平合力皆向前：將實驗 4-3 的漂體平視拍攝，並標記後端下方 B 點，前端下方 F 點。圖 6-4-1 發現 B、F 兩點的水平移動距離相同，垂直移動距離不同。比較圖 5-6-2 相較於前端 F 點，後端 B 點受液面作用力大，且夾角較大，能產生較大的水平分力。

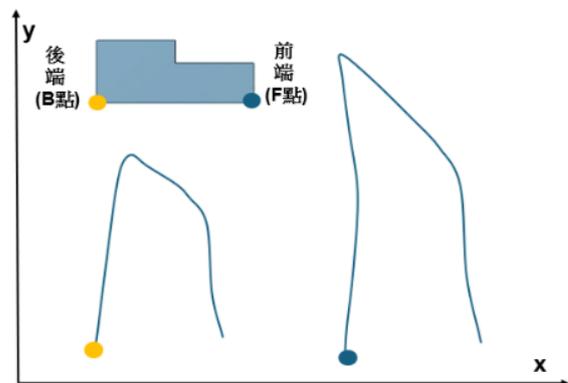


圖 6-4-1 B、F 兩點的水平與垂直位移圖(前、後端距離未依實際比例繪製)(三作繪)

2.厚度均勻三角形、梯形、半圓形漂體

由綜合討論二可知質量較大端與液面夾角較大，三角形、梯形、半圓形漂體與液面接觸狀態和厚度不均勻長方形漂體相同，夾角有差異，故振動模式也相同。而浮體則無夾角差異，不論有無振動皆不移動。

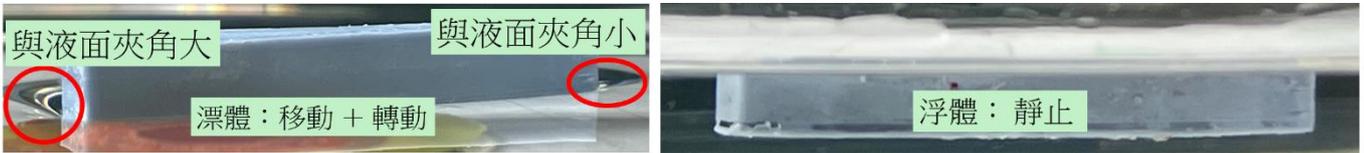


圖 6-4-2 三角形漂、浮體與液面夾角比較圖(一作攝)

(二)厚度均勻三角形與星形漂體的轉動分析：與液面夾角差、附壁效應、渦旋有關。

若漂體持續轉動，無法利用固定水平視角的方式進行拍攝以及與分析各端點在水平和垂直方向上的移動。但可透過間接方式觀察流場解釋漂體的轉動。

1.與液面夾角差異(圖 5-6-1)：實驗 6 中三角形與星形可觀察到，短股與液面夾角大於長股。

2.模擬三角形的轉動：實驗 4 中觀察到較長的漂體移動較慢，以一長一短相互垂直的漂體(圖 6-4-3)來模擬轉動，實驗結果與三角形相同。

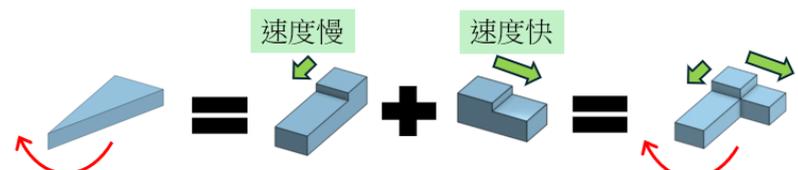


圖 6-4-3 兩長方形漂體結合模擬三角形示意圖(三作繪)
(紅線為漂體轉動方向，綠箭頭為漂體移動方向)

3.液體沿漂體下凹處流動產生附壁效應：實驗 10 中觀察到三角形與星形轉動時。沿著長股流動的距離大於斜邊(圖 6-4-4)，產生較大的吸引力。

4.渦旋提供轉動助力：實驗 10 中液體遠離星形漂體射出後產生渦旋(圖 6-4-5)。在長股側的渦旋形成的低壓區能為星形的轉動提供助力。

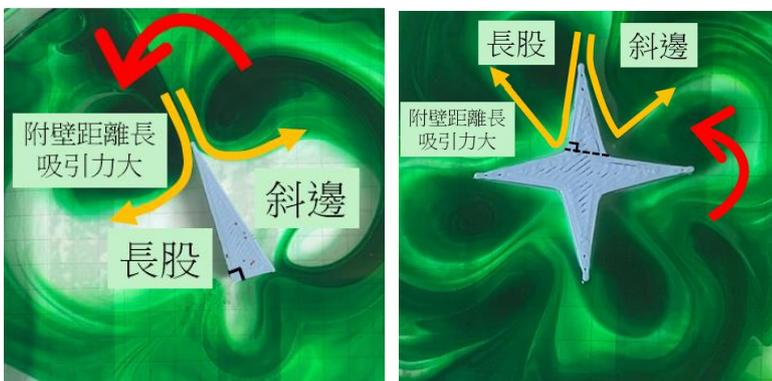


圖 6-4-4 三角形與星形流場示意圖(二作繪)

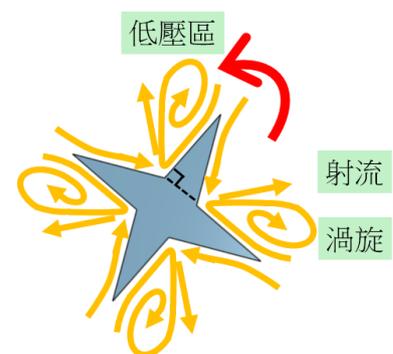


圖 6-4-5 射流與渦流示意圖(二作繪)

(紅線為漂體轉動方向，橘線為液體流動方向)

五、振動液面上漂體與流場的交互作用

在振動液面上，漂體與液面的夾角差異為影響漂體運動狀態的主要原因，同時也造成漂體周圍的流場變化，進而產生射流和渦旋。這些流場變化也能為漂體運動提供部分的助力。

(一)漂體於振動液面產生渦旋與射流：如實驗 10 所示。(下列星芒皆為直角三角形)

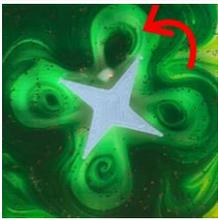
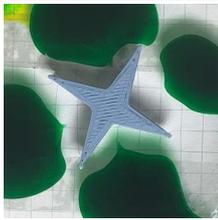
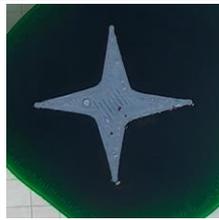
有射流與渦旋	沒有射流與渦旋		
			
漂體於液面上振動	振動機未啟動 液面保持靜止	浮體星形於振動液面 不轉動，流場靜止	強迫轉動星形 周圍流場無明顯變化

圖 6-5-1 是否產生渦旋與射流之比較圖(一作攝)

(二)流場中的附壁效應(以三角形為例)：流體靠近漂體長股側時，附壁距離長，越晚從長股分離(前頁-圖 6-4-4)，能與漂體長股產生較多的吸引力。

	與液面夾角	液體流速	附壁距離	渦旋	轉向
長股	大	慢	長	有	向長股
斜邊	小	快	短	有*註	

*註：
若為星形轉動時，
星芒斜邊處無渦旋。

表 6-5-1 三角形流場狀態比較表

(三)射流不產生力矩，渦旋為轉動提供助力(圖 6-5-2)：

射流延長線通過轉動中心，不產生力矩，不影響轉動。向內旋轉的渦旋形成低壓區產生吸引力。若兩側皆產生渦旋，則作用力互相抵銷。



圖 6-5-2 星形射流與渦旋示意圖(二作繪)(紅線為漂體轉動方向，橘線為液體流動方向)

(四)星形轉動時的外圍環流(圖 6-5-3)與極地渦旋(圖 6-5-4)相似，將流體限制於環流內：

漂體外圍環流與南極大陸上的極地渦旋(Polar Vortex)(圖 6-5-4)流場相似。差異在於漂體與外圍環流流向相反，南極大陸與極地渦旋流向相同，且極地渦旋風向亦受柯氏力與行星風系影響。

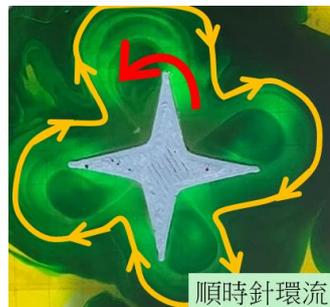


圖 6-5-3 星形轉動之外圍環流

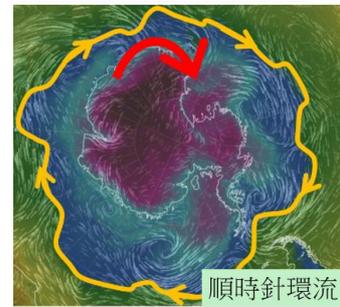


圖 6-5-4 摘自 earth.nullschool
2017-08-01 南極大陸上空

(三作繪)(紅線為漂體與南極大陸轉動方向，橘線為液體流動方向)

六、振動液面上漂、浮體間的交互運動

(一)振動液面上，本來不移動的圓形漂、浮體開始移動：由實驗 1與實驗 4的結果可歸納出在漂、浮與厚度均勻圓形、厚度不均勻長方形排列組合中，物體獨立在振動液面上時，唯一能移動的只有長方形漂體(圖 5-10-1)。但兩種物體以不同漂、浮狀態使其在振動液面上時，本來不移動的圓形漂、浮體與移動漂體因交互作用開始移動。若討論液面上移動漂體與圓形漂、浮體，可歸納出「漂、漂吸，漂、浮斥」的結論。與參考文獻中喜瑞爾效應結果相似，惟文獻僅討論靜止物體間作用力，本實驗討論的是液面上物體有自主動力的狀況。

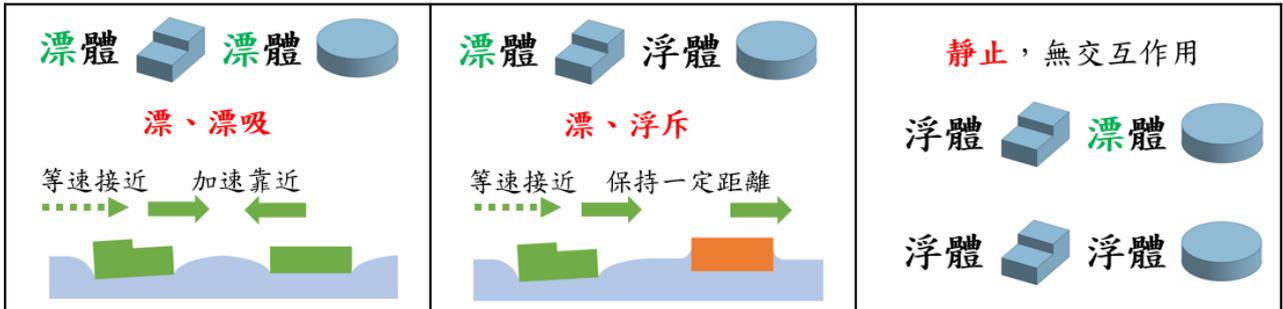
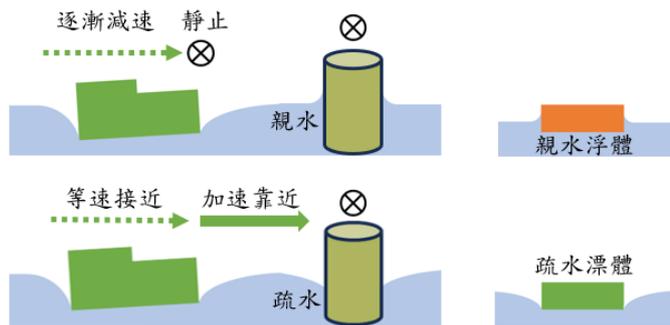


圖 6-6-1 漂、浮體交互作用分類圖(三作繪)

(二)振動液面上，移動漂體與圓柱體「漂、漂吸，漂、浮斥」：固定圓柱表面親水時液面狀態與浮體相同，疏水時與漂體相同(圖 6-6-2)。移動漂體受其他物體吸引、排斥與兩者的液面狀態有關。



6-6-2 漂體與固定圓柱體交互作用示意圖(三作繪)

(三)「衛星繞地球：墜毀、繞圈、脫離」：移動漂體繞固定圓柱運動與衛星受地球引力繞地球做圓周運動非常相似。

墜毀	繞圈	脫離
漂體 低速 無法克服向心力，繞圈半徑逐漸減少。	漂體 中速 以等速率繞圓柱做圓周運動。	漂體 高速 克服向心力而遠離圓柱，漂體因較厚端(B點)與較薄端(F點)受圓柱引力差異明顯，產生轉動力矩，導致轉向。

6-6-3 不同速度漂體與固定圓柱體交互作用示意圖(三作繪)

柒、研究結論與建議

一、結論

(一)探討漂、浮體與液面的交互作用

- 1.浮體不會因為液體波動產生水平運動現象。
- 2.漂體靠表面張力漂在液面上，阻力小，容易受擾動而產生運動現象。
- 3.液體表面張力越小、漂體質量越大，液面容易產生形變。
- 4.測量漂、浮體與液面夾角時，利用二次函數法擬合在大角度能得到更準確的數值。
- 5.漂體在連續振動最低點與液面夾角大，高點則較小。厚度均勻的漂體兩側角度變化相同。厚度不均勻長方形，較厚端角度變化小，較薄端角度變化大。
- 6.漂體各邊與液面夾角有明顯差異時，在連續振動時產生移動或轉動現象。
- 7.漂體移動或轉動時，其振動載體表面需有彈性。
- 8.漂體受液面作用力的大小與液面被壓縮程度成正向關係，方向和與液面夾角有關。
- 9.漂體於振動液面時周圍流場產生射流與渦旋。

(二)探討漂、浮體於振動液面時的運動狀態

- 1.同時具有旋轉對稱以及線對稱的漂體靜止。
- 2.具有一條對稱軸且不具旋轉對稱的漂體純移動，移動方向與對稱軸平行，且移動的方向往質量較小端前進。
- 3.具有旋轉對稱而缺乏線對稱的漂體純轉動，星形轉動向著(星芒：直角三角形)長股旋轉。
- 4.厚度不均勻長方形漂體往厚度較薄端移動，移動方向與該對稱軸平行。
- 5.振動液面上，移動漂體與其他物體「漂、漂吸，漂、浮斥」。

(三)探討漂體於振動液面時，不同實驗條件下的振動模式

- 1.厚度均勻長方形漂體，兩端厚度相同，振幅差異不明顯，漂體不水平移動。
- 2.厚度不均勻的漂體，較厚端垂直振幅小，較薄端垂直振幅大。
- 3.頻率固定時，振幅越大，漂體移動速度與角速度越大。
- 4.振幅固定時，頻率越大，漂體移動速度與角速度越小。
- 5.長方形漂體質量越大，移動的速度越快；星形漂體質量越大，轉動的角速度越慢。
- 6.液體沿漂體下凹處流動產生附壁效應，與液面夾角越大，附壁效果越明顯。
- 7.漂體周圍的流場產生渦旋，為漂體的轉動提供部分的助力。

二、實驗改進建議與未來研究方向

- (一)製作更大的振動平台與水槽，增加實驗的尺度，更方便於觀察與拍攝。
- (二)利用更高速的攝影機，觀察到更細微的振動過程，提出更完善的振動機制。
- (三)改變振動的方式，產生不同類型的波源。
- (四)改變不同液體種類，進一步了解不同液體性質對漂體運動的影響。
- (五)使漂體漂、浮於兩種液體之間，而非侷限於氣、液介面。
- (六)以漂體外圍環流模擬大氣環流，並討論與北(南)極震盪之關聯，將研究拓展至地球科學領域。

捌、參考資料

1. 蔡依靜等人(2013)：「深」在「浮」中不知「浮」～探討表面張力對『沉體』浮於水面行為之影響。中華民國第 53 屆中小學科學展覽會國中組物理科
2. 洪碩成等人(2011)：「液表」人才一同性相吸，異性相斥。中華民國第 51 屆中小學科學展覽會高中組物理科
3. Ian Ho et al.(2021)：“**Capillary surfers: wave-driven particles at a fluid interface.**” New Jersey Institute of Technology, Newark, New Jersey 07102
4. Jack-William Barotta et al.(2023)：“**Bidirectional wave-propelled capillary spinners**” Communications Physics volume 6, Article number: 87

【評語】 030114

本作品探討不同形狀的物體在振動液面上的運動現象，找出其移動和轉動以及兩物相吸或相斥的變因，其中也有探討物理，雖然此作品的主題、探究方式、結論等與其所引用之論文及其它文獻上已有探討，但內容尚有新意變化，若能對於實驗結果之物理內涵、量化分析及重要應用進行更進一步的探索，將會更好。

作品簡報

凌波微步

漂、浮體於振動液面之運動狀態探討

摘要

本報告旨在探討不同形狀的物體在振動液面上的運動現象，通過改變物體形狀、漂與浮的狀態，及實驗時的振動條件，觀察物體的行為，並以液體表面張力、漂體與液面夾角的變化、振動模式與流場狀態解釋。研究發現：疏水性漂體因表面張力漂在振動液面上時，其重力會造成液面凹陷，由於漂體形狀對稱性質與質量分布差異，造成各端點與液面夾角不同，液面為漂體提供不同方向與大小的力，並產生不同的流場，使其移動與轉動，其(角)速度受液體種類、振幅、頻率、漂體質量影響。此外，在振動液面上移動的漂體與其他漂浮體間會因為液面狀態互相影響產生交互作用力，進而出現吸引、排斥、繞圈的現象。

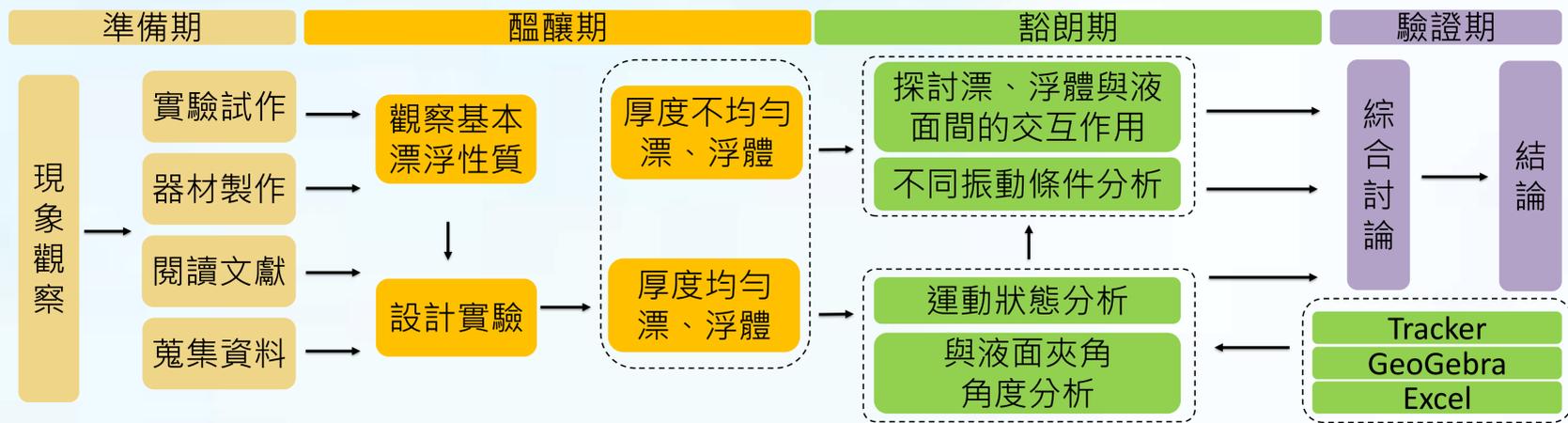
研究目的

實驗影片

- 【第一部份：探討漂、浮體於振動液面的運動狀態。】
- 【第二部份：探討親水浮體、疏水漂體與液面交互作用的基本狀態。】
- 【第三部份：探討影響漂體移動與轉動的因素。】
- 【第四部份：漂體、浮體與液面間的交互運動狀態。】



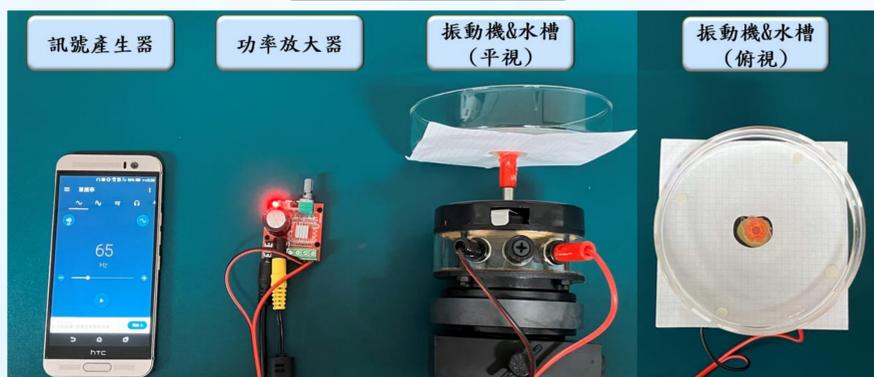
實驗架構



名詞解釋

浮體(平視圖) 浮力與物體重力共同作用，表面為親水性	漂體(平視圖) 表面張力與物體重力共同作用，表面為疏水性	厚度均勻三角形、星形(俯視圖) 長股、短股與斜邊	厚度不均勻長方體(平視圖) 接觸角、與液面夾角
親水性，接觸角<90度 兩側接觸角不同	疏水性，接觸角>90度 凹陷程度大 凹陷程度小	長股 短股 斜邊	與液面夾角 接觸角

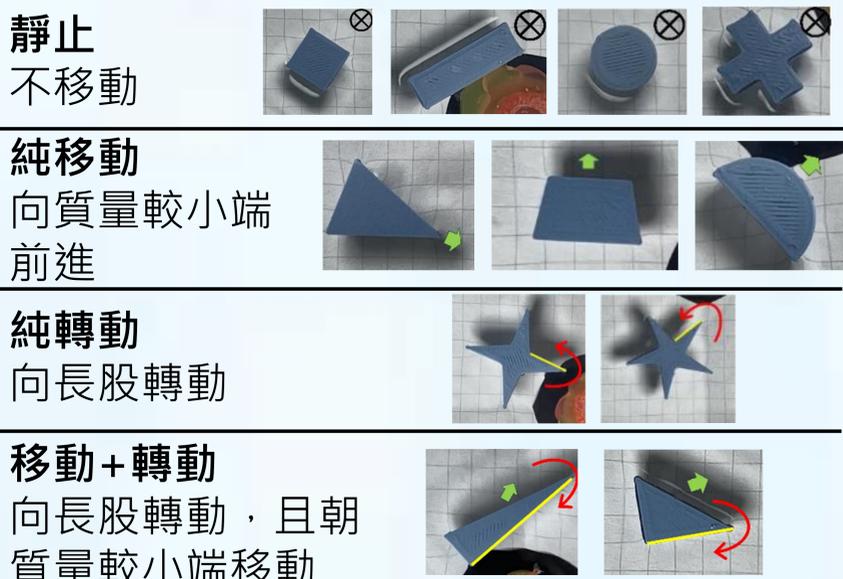
實驗裝置



實驗結果

【第一部份：探討漂、浮體於振動液面的運動狀態。】

實驗1、2：厚度均勻的圖形漂、浮體運動狀態探討

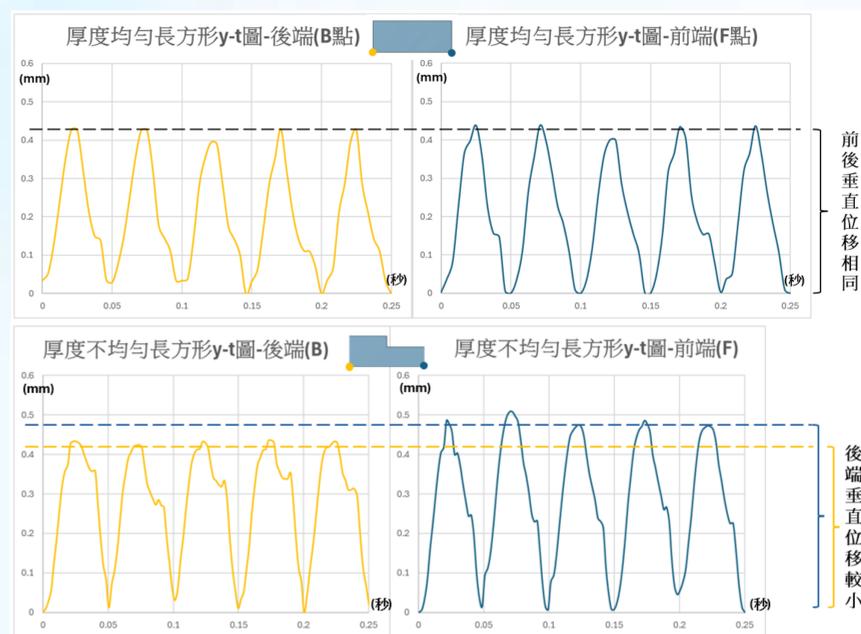


實驗3：星芒差異對星形漂體運動狀態的影響

1. 只有旋轉對稱的圖形純轉動不移動。
2. 星芒為等腰三角形時未觀察到移動或轉動。
3. 使用菲涅耳透鏡概念減少物體質量，旋轉角速度增加。



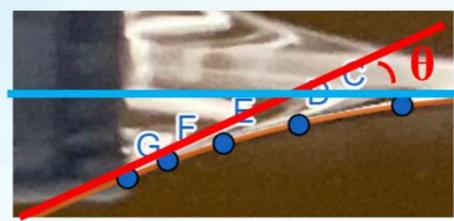
實驗4：厚度不均勻的長方形漂、浮體運動狀態探討



1. 連續振動時，厚度不均勻漂體往較薄端前進。
2. 厚度不均勻漂體，後端垂直振幅小，前端振幅大此種漂體產生明顯的移動。
3. 後續將以此作為開展討論振動機制。

【第二部份：探討親水浮體、疏水漂體與液面交互作用的基本狀態】

實驗5、6：發展計算、觀察物體與液面夾角



利用二次函數法，避免夾角大時圓形法產生的誤差並利用此方法計算出漂體的與液面夾角。

振動狀態下長方形漂體各邊夾角

位置	後	不均勻長方形	前	後	均勻長方形	前
最高點	33°		21°	13°		13°
最低點	48°		42°	47°		47°
最高點	33°		21°	13°		13°

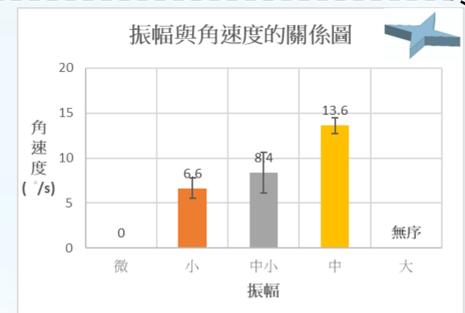
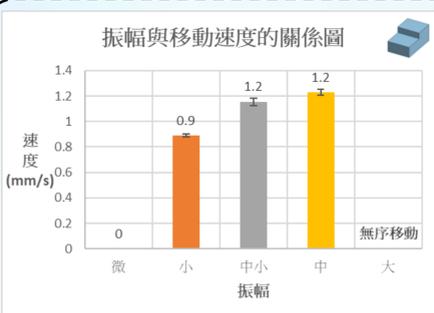
靜止時漂體各邊夾角大小

漂體形狀	星形	直角三角形	不均勻長方形
各邊角度	長股 > 斜邊	短股 > 長股 > 斜邊	厚端 > 薄端

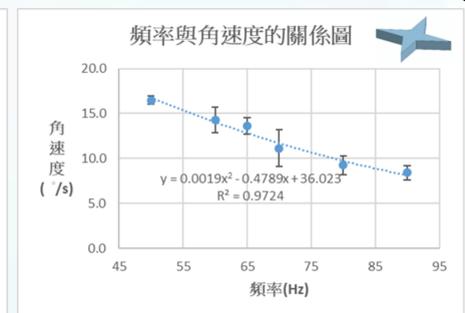
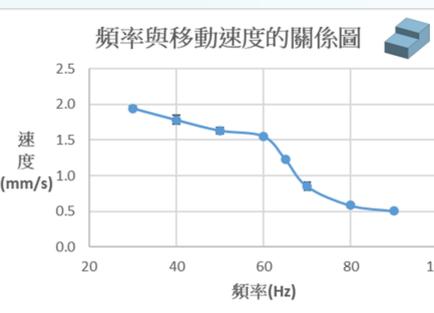
1. 親水表面液面呈上凸，疏水則下凹。
2. 連續振動的長方形在最低點時夾角大，最高點時夾角小。
3. 表面張力愈小，漂體與液面夾角愈大。

【第三部份：探討影響漂體移動與轉動的因素】

實驗7：頻率與振幅對漂體運動狀態的影響

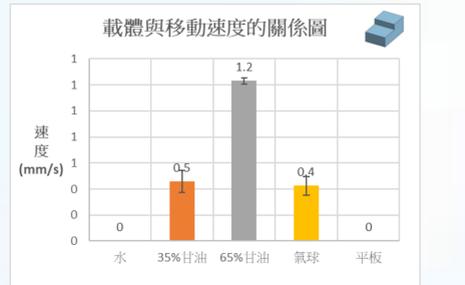
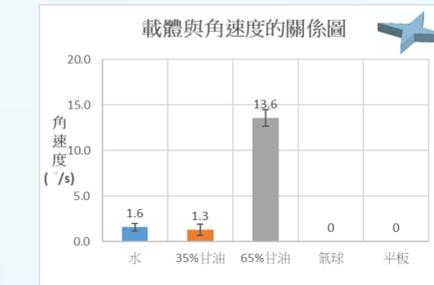


頻率固定時，振幅越大，漂體移動速度與角速度越大



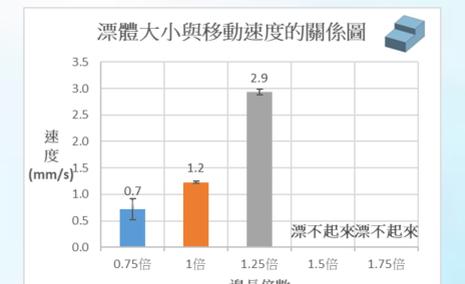
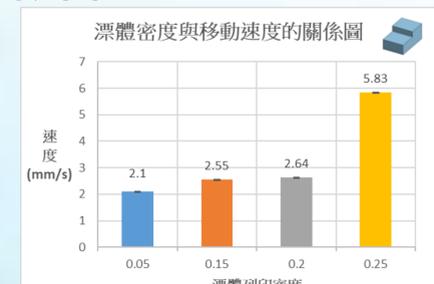
振幅固定時，頻率越大，漂體移動速度與角速度越小

實驗8：振動載體種類對漂體運動狀態的影響

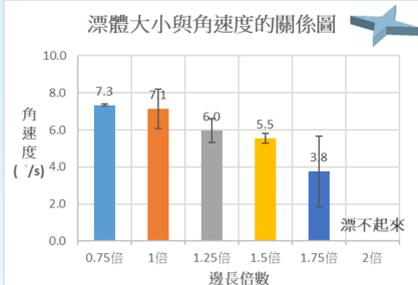


1. 65%甘油水溶液表面張力適中，漂體移動速度與角速度最大。
2. 35%甘油水溶液與氣球皮的移動狀態相仿。我們認為兩者的表面性質相似。
3. 物體無法在堅硬的壓克力平板上產生運動現象。

實驗9：漂體質量差異對漂體運動狀態的影響



1. 長方形漂體前進與圓形漂體、固定疏水性圓柱互相吸引。
2. 長方形漂體前進與圓形浮體、固定親水性圓柱互相排斥。
3. 長方形若為浮體，則不論圓形物體為漂或浮，兩者皆不動。
4. 長方形漂體受圓柱吸引力影響有接近、圓周運動、遠離三種運動狀態。



1. 長方形漂體越大速度越快
星形漂體越大轉速越慢。

2. 表面張力不足以支撐質量過大的物體。

【第四部份：漂體、浮體與液面間的交互運動狀態】

實驗10：漂體於振動液面的流場狀態

不同物體於振動液面上之流場狀態

漂體三角形		漂體四芒星(等腰)	
漂體四芒星(直角)		浮體四芒星(直角)	

漂體兩側流場速度

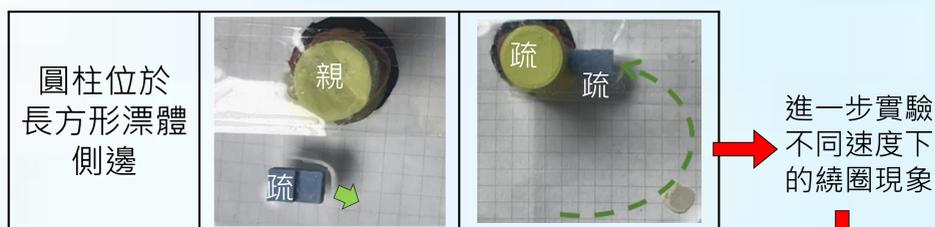


1. 振動時液體表層開始流動。
2. 流體在長股側流速慢，斜邊側流速快。
3. 漂體三角形與星形出現射流與渦旋。

實驗11：漂、浮體間於振動液面的交互運動狀態

漂、浮體間交互運動狀態

漂、浮體狀態	長方形：漂	長方形：浮	長方形：漂	長方形：浮
起始相對位置	圓形：漂	圓形：漂	圓形：浮	圓形：浮
圓形位於長方形正前方				
作用力	互相吸引	靜止不動	互相排斥	靜止不動



進一步實驗不同速度下的繞圈現象

實驗結果			
軌跡說明	漂體受圓柱吸引以拋物線方式接近圓柱	漂體受圓柱吸引，以繞圈方式做圓周運動	漂體速度足夠快，克服圓柱吸引力而遠離

1. 長方形漂體前進與圓形漂體、固定疏水性圓柱互相吸引。
2. 長方形漂體前進與圓形浮體、固定親水性圓柱互相排斥。
3. 長方形若為浮體，則不論圓形物體為漂或浮，兩者皆不動。
4. 長方形漂體受圓柱吸引力影響有接近、圓周運動、遠離三種運動狀態。

研究綜合討論

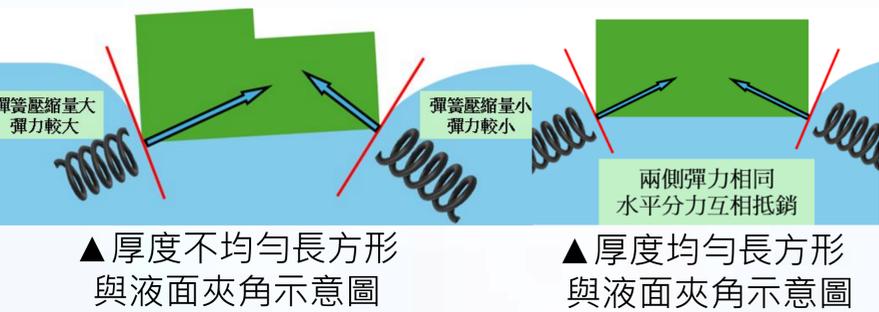
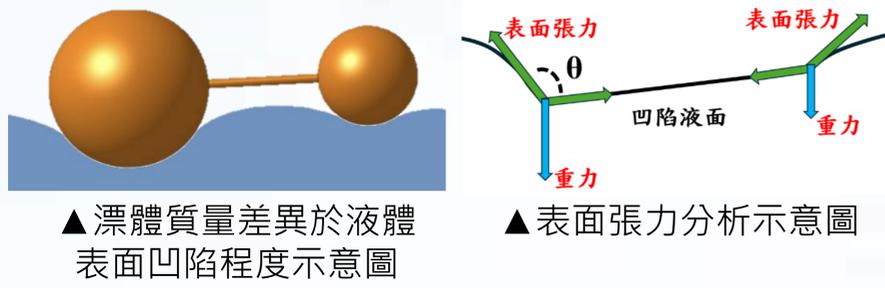
一、探討漂體形狀與運動狀態相關性

旋轉對稱：有 線對稱：有 	※不移動；不轉動	旋轉對稱：有 線對稱：無 	※不移動；轉動
旋轉對稱：無 線對稱：有 	※移動；不轉動	旋轉對稱：無 線對稱：無 	※移動；轉動

1. 靜止漂體：同時具有**旋轉對稱**與**線對稱**的圖形。
2. 純移動漂體：僅具有**線對稱**的圖形，向質量較小端前進。
3. 純轉動漂體：僅具有**旋轉對稱**的圖形，向長股轉動。

二、漂體受液面(彈性表面)作用力探討

1. 表面張力越小，液面凹陷程度越大。
2. 漂體質量越大，液面凹陷程度越大。
3. 漂體各邊與液面夾角不同，在連續振動時產生移動或轉動現象。
4. 液面作用力大小和液面壓縮程度呈正相關。



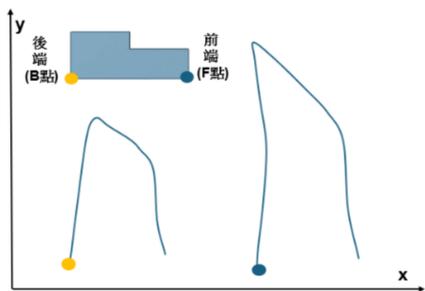
三、影響漂體移動與轉動的因素

1. 表面張力大小適中的65%甘油效果最好。
2. 振幅越大、頻率越小的運動效果越好。
3. 漂體質量越大時，厚度不均勻長方形運動越快，厚度均勻的星形轉動愈慢。

四、漂體於液面上的運動及振動模式分析

(一)厚度不均勻漂體的移動

1. 漂體上升、下降時水平合力皆向前。
2. 前、後兩點的垂直振幅不同，前側較大。

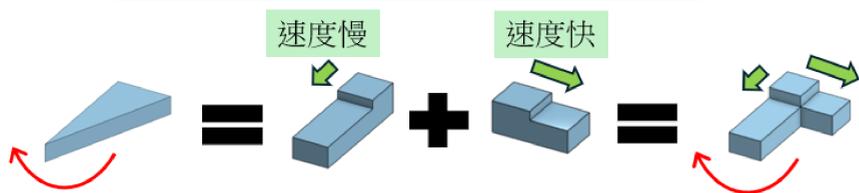


(二)厚度均勻漂體的移動與轉動

漂體因其形狀之對稱的性質，從漂體各邊可觀察到兩端點與液面夾角差異。

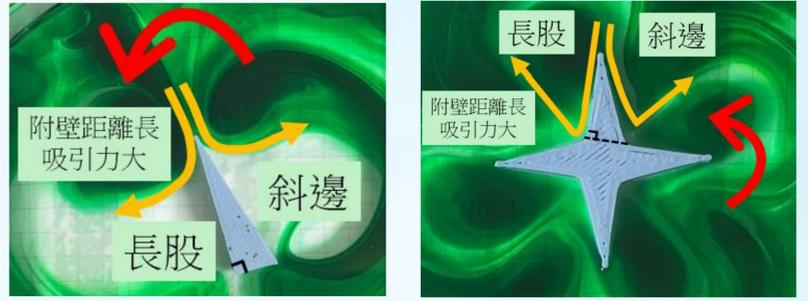


(三)兩長方形漂體模擬厚度均勻三角形移動與轉動



(四)厚度均勻三角形、星形的轉動

三角形與星形轉動時，沿著長股流動的距離大於斜邊，此附壁效應，產生較大的吸引力。



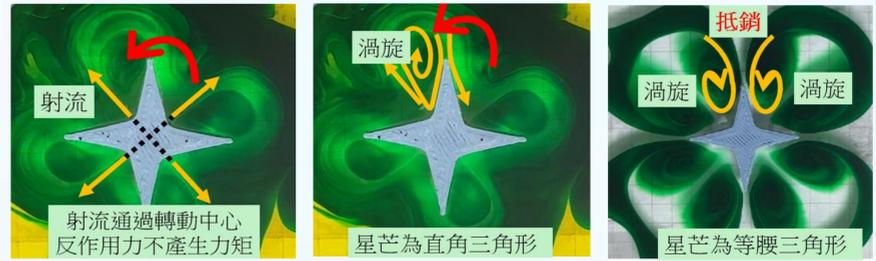
五、振動液面上漂體與流場的交互作用

(一)附壁效應

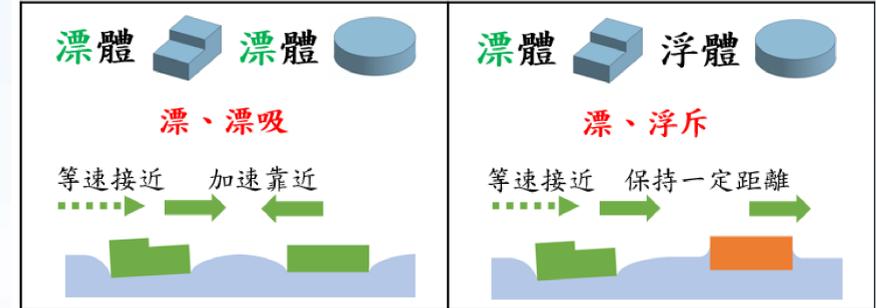
	與液面夾角	液體流速	附壁距離	渦旋	轉向
長股	大	慢	長	有	向長股
斜邊	小	快	短	有	

(二)射流與渦旋

1. 射流延長線通過轉動中心，不產生力矩。
2. 漂向內旋轉的渦旋，吸引物體。
3. 若兩邊等長，則互相抵銷。



六、振動液面上漂、浮體間的交互運動



兩物體於振動液面上「漂、漂吸，漂、浮斥」

低速	中速	高速
無法克服向心力墜毀	等速率繞圓柱圓周運動	半徑小，較厚端受吸引產生轉動

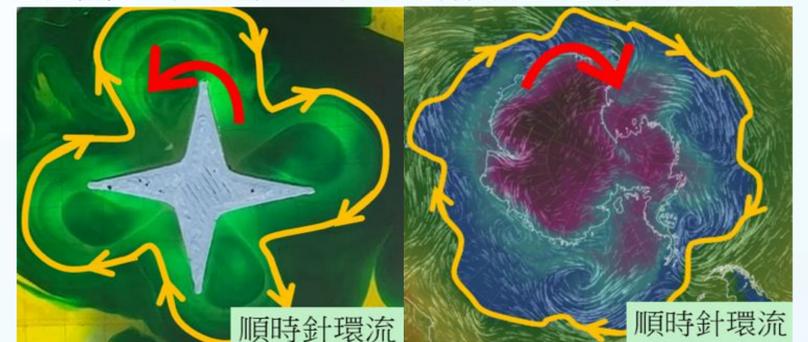
移動漂體繞固定疏水性圓柱運動與「**衛星受地球引力繞地球做圓周運動**」非常相似。

研究結論

1. 親水浮體在振動液面中無法移動，疏水漂體受表面張力漂在液面，各邊與液面夾角有差異時產生移動或轉動，運動狀態受對稱性影響。
2. 移動物體沿對稱軸向質量較小、較薄端移動，轉動物體向長股轉動。
3. 漂體受液面作用力的大小與液面被壓縮程度成正相關，方向和與液面夾角有關。
4. 振動載體為65%甘油、液面振幅越大、頻率越小時，漂體的(角)速度越大。
5. 長方形漂體質量越大，速度越快；星形漂體質量越大，角速度越慢。
6. 連續振動時，漂、浮體間交互作用均為「漂、漂吸，漂、浮斥」。
7. 漂體於振動液面時周圍流場產生射流與渦旋。

未來展望

星形外圍環流與南極極地渦旋均把流體限制於一定範圍，未來希望將研究拓展至地球科學領域。



本作品說明板海報中除氣象圖截自earth.nullschool2017-08-01南極大陸上空外，所有照片、圖片皆為自攝自繪。