

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

030117

輕功水上漂之驚濤駭浪

學校名稱：臺中市立大雅國民中學

作者： 國一 游湘庭 國一 杜庭芸 國一 張詠瑞	指導老師： 陳盈昌
---	------------------

關鍵詞：表面張力、力圖、波

摘要

水黽在水面上自在地的滑行，就想探索動態水面的表面張力。先設計用懸掛式的方式來測量表面張力，發現寬度愈大，可承載的重量越大，若加計沉陷的壓力差，

則表面張力趨於一致。再測量兩根線接近時的承載力，發現距離小於 5mm，承載的重量隨距離的減少而減少，超過後則沒影響。當波前與壓克力板的方向平行時，在波谷時的向上加速度最大，此時水的表面張力不足以拉上壓克力，就會沉沒。波前與長邊垂直，當波浪來時，表面張力將前方向上抬升，後方要往下降，卻受到的表面張力的阻止，所以容易沉沒。推動鋁線快速前進時，鋁線前後方向上分力減少而沉沒。所以鋁線與前進方向垂直的比例愈多，最大前進速率愈小。依此做出表面張力移動底盤。

壹、前言

一、研究動機

去秋紅谷參觀的時候，發現許多之水黽在水面上悠遊自在地的滑行，不會沉下去。這種現象是表面張力造成的，但是如果這靜態的水池換成有水波經過的環境，還是要快速的滑行，這表面張力還撐得住嗎?為了探索這個謎團，自行設計了一連串的實驗，展開了研究。

二、研究目的

- (一)探討表面張力與線寬的關係
- (二)測量兩條線的間距與表面張力的關係
- (三)測量波的振幅、上下移動的加速度、波速
- (四)測量波浪經過時，銅線與波前平行時，振幅變化與最大承載量的關係
- (五)測量波浪經過時，銅線與波前垂直時，振幅變化與最大承載量的關係
- (六)推動鋁線移動，找出移動速率與鋁線長寬的關係
- (七)製作表面張力船底結構

三、文獻回顧

(1)你「浮」不「浮」～紙船載重能力之探討

屏東縣第 61 屆中小學科學展覽會
探討水溫、溶液，對紙船載重能力的影響

(2)表面功夫-用自製儀器測量液體的表面張力

中華民國第 56 屆中小學科學展覽會

自製儀器、利用各種清潔劑來探討表面張力被破壞的情形，清潔劑會跟液體表面的薄膜作用進而破壞了表面張力，不同清潔劑溶液有不同的表面張力，有些更會隨著濃度改變而變化。

(3)是誰讓我心“帆”-魔法船

中華民國第四十七屆中小學科學展覽會

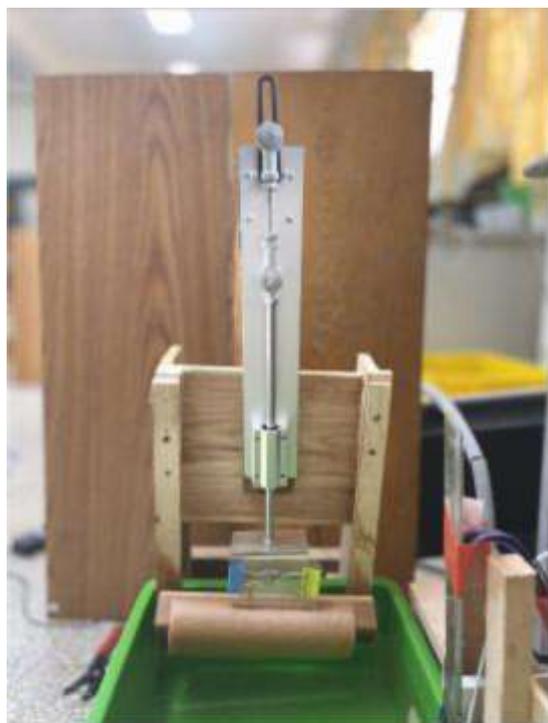
設計不同船型、不同添加劑及不同水深、溫度來探討瞭解船隻航行的行為，利用表面張力的差異性來驅動船隻航行。

貳、研究器材與原理

一、造波裝置

1.將往復電機固定於木架上，將運動的連桿一端連上圓柱形木棍，如圖一所示。

圖一:造波裝置(第 1 作者拍攝)

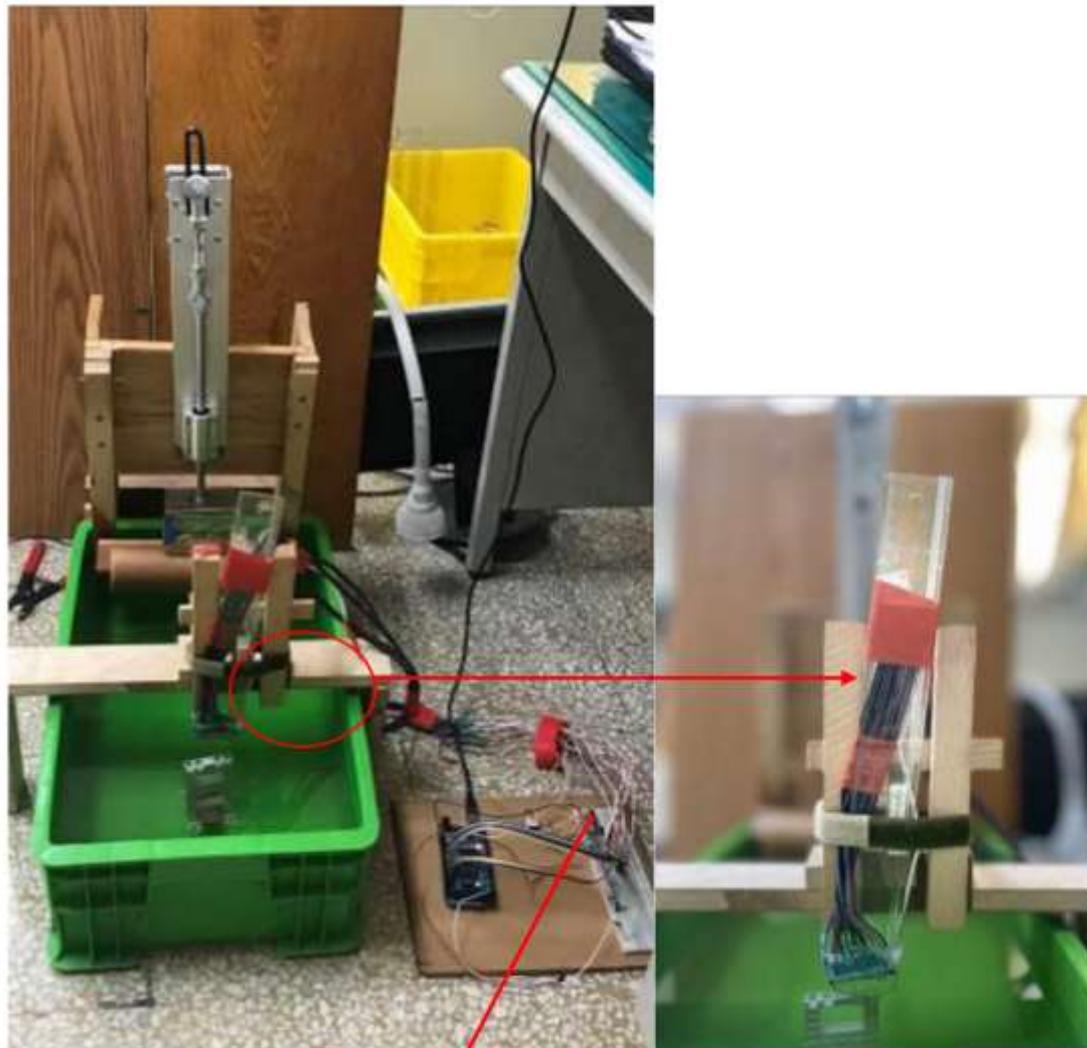


- 2.將固定作的前兩隻腳放入水槽，加入水後，啟動往復電機，即可造波。
- 3.要加大波浪的振幅，可以用一壓克力板，折彎成斜坡狀，放入水槽中，如此波浪經過斜坡時，會因為波速減緩而使得振幅加大，如同海嘯一樣。

二、振幅與時間測量裝置

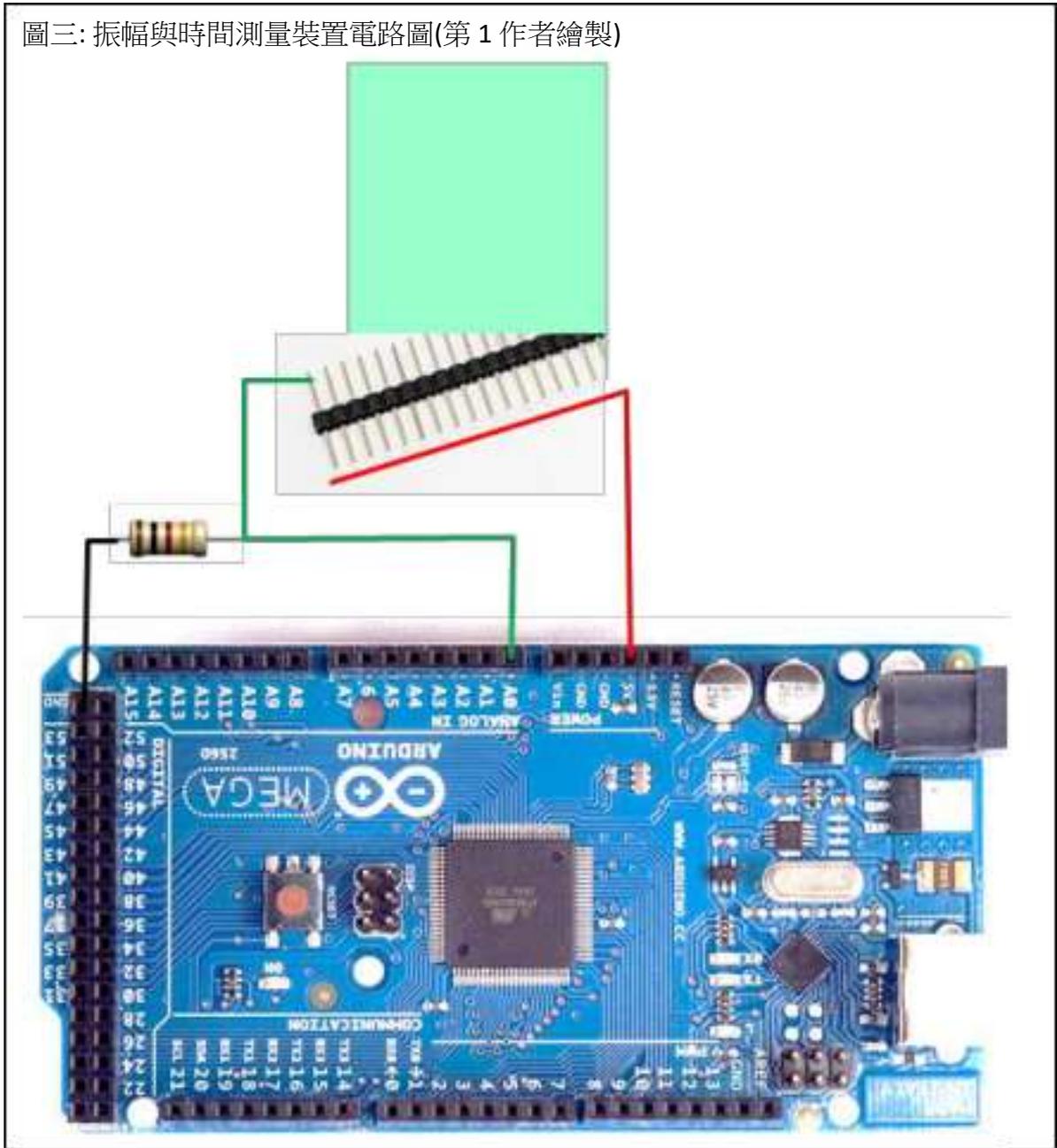
- 1.實驗裝置如圖二。

圖二:測量振幅與時間裝置(第三作者拍攝)



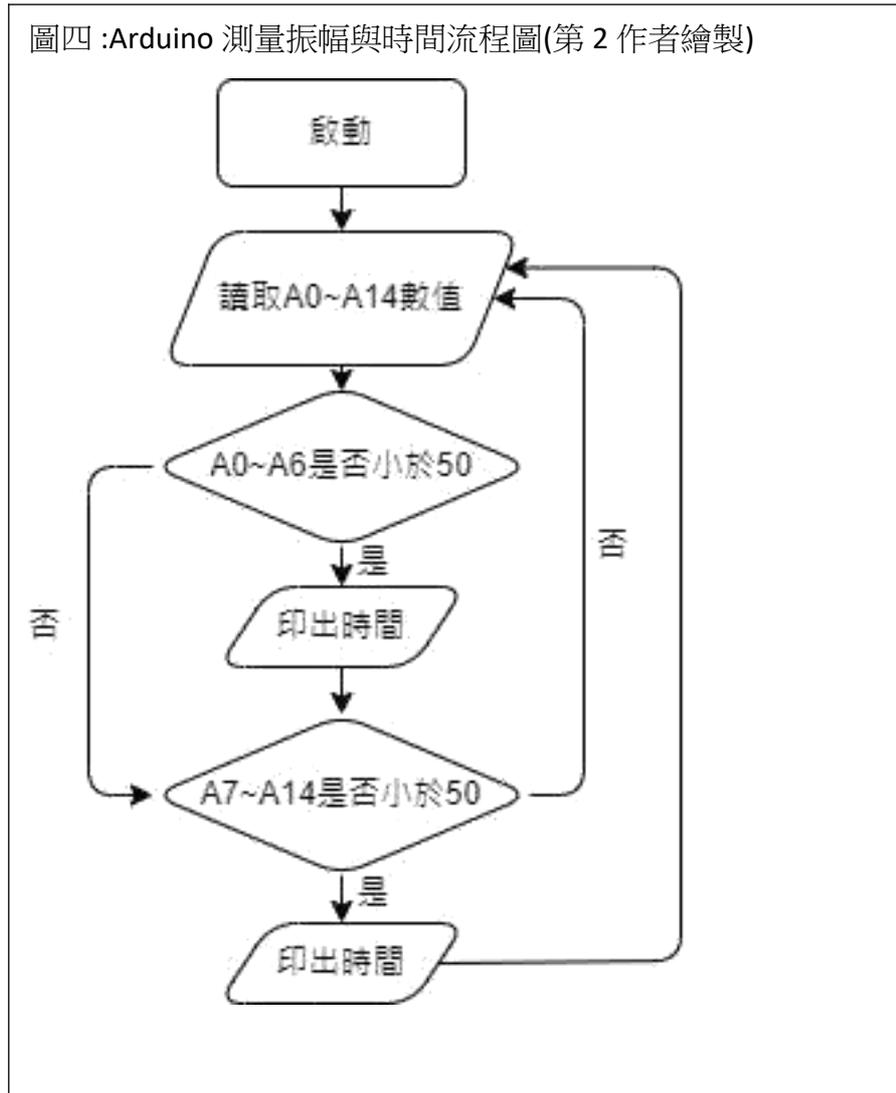
2. 電路圖如圖三。

圖三: 振幅與時間測量裝置電路圖(第 1 作者繪製)



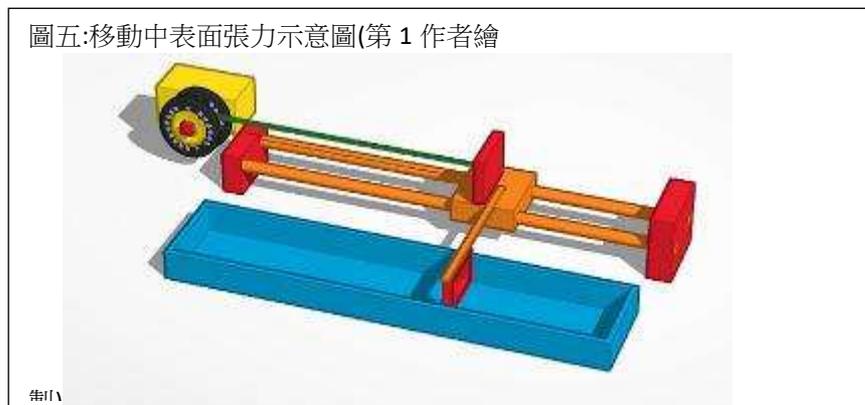
3.程式設計流程

- (1)將連接到 A0~A6 的排針放入水中，A7~A14 在空氣中。每根排針的垂直間距為 1mm。
- (2)當波浪經過後，水面下的排針如果在水面上，就記錄每根排針露出水面的時間；水面上的排針，如果未入水中，就記錄沒入水中的時間。
- (3)程式設計的流程圖如四。

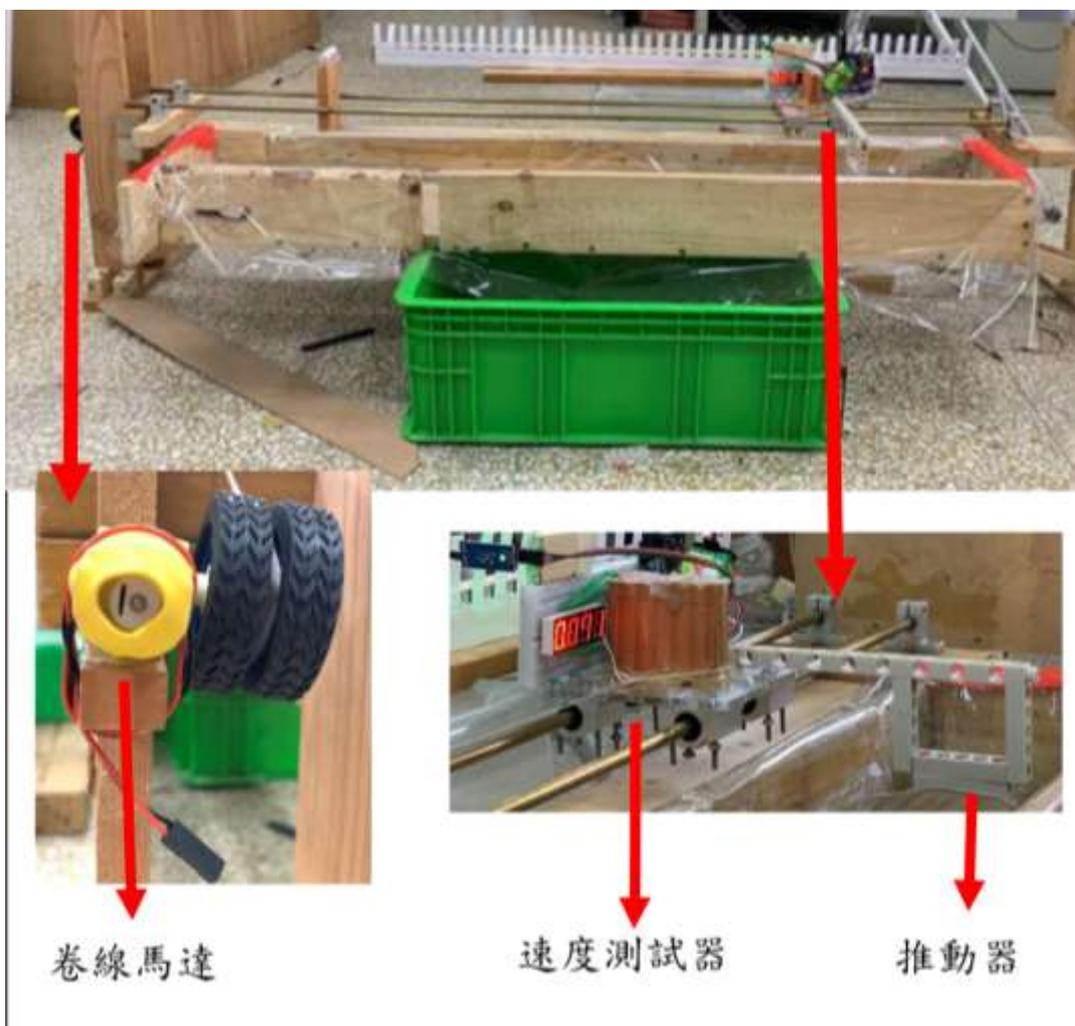


三、移動中的表面張力可承受最大速率測量裝置

1.裝置如圖五與圖六。

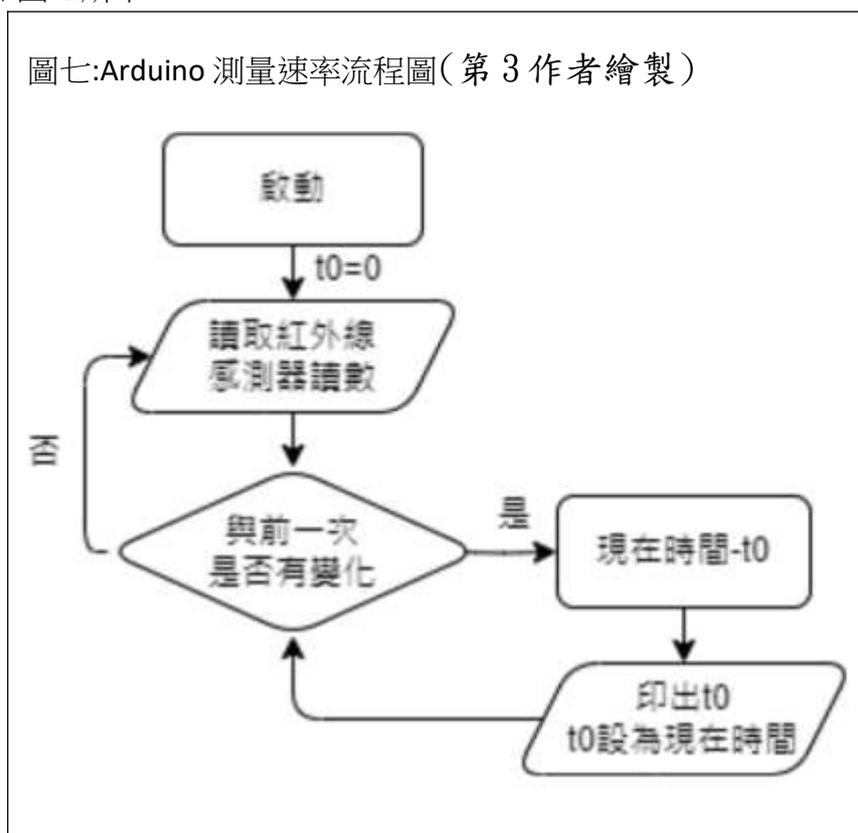


圖六:測量鋁條前進裝置(第 2 作者拍攝)



2.程式設計流程:將一長條的紙剪成柵欄狀，間隔 1cm。用紅外線發射接收裝置面對柵欄，當紅外線發射出去，碰到白紙反射回來的時候，設為狀態 1，而後拉動馬達使機器前進，當偵測到無紙地方時，把此時的訊號設為 0，當訊號由 1 轉變為 0 的時候，開始計時，等到訊號由 0 變成 1 時，結束計時，顯示速率。並重新開始計時，當訊號由 1 轉變為 0 的時候，結束計時，顯示速率。

3.流程圖如圖七所示。



圖八:不同壓克力板實體圖(第 1 作者拍攝)



叁、研究過程

一、探討表面張力與線寬的關係

(一)測量不同寬度的壓克力板最大承重量。

1.取透明壓克力，裁成正方形，外側邊長 6cm，內側邊長 5.8cm，如圖所示。在其上方繞上細銅線作為掛勾，如圖八所示。

- 將壓克力連同掛勾放在水面上，逐次加入一小段鋁線在掛鉤上，至其沉沒為止，如圖九所示。記錄鋁線總長度，換算成重量。

圖九:測量不同寬度壓克力板表面張力實驗圖

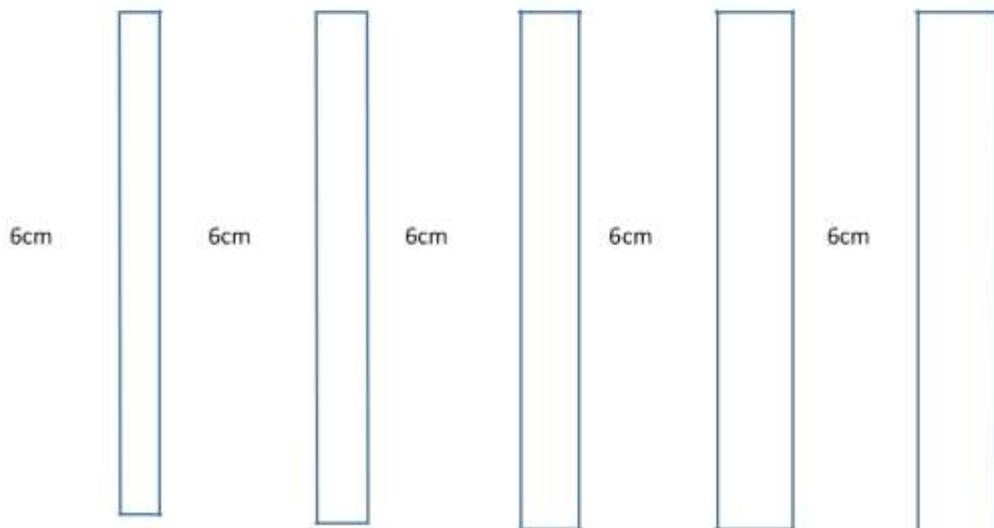


- 取透明壓克力，分別裁成正方形，外邊長 6cm，內邊長分別為 5.6cm，5.4cm，5.2cm，5.0cm，再重複步驟 1~2。

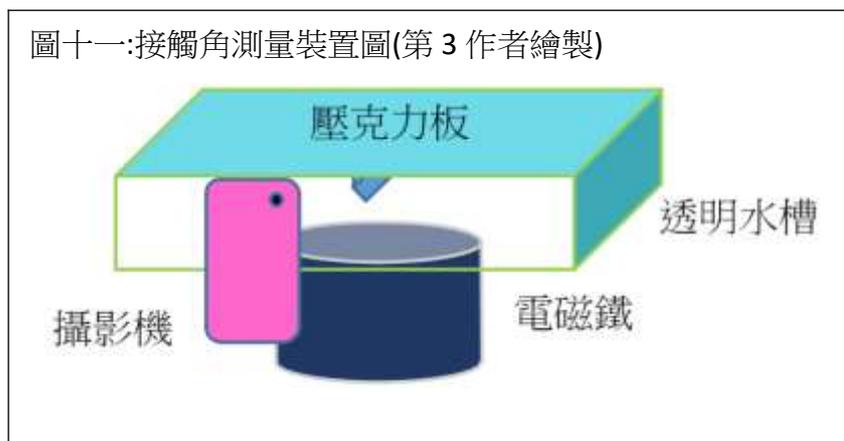
(二)測量不同寬度的壓克力板最大接觸角

- 分別裁出長均為 6cm，寬度分別為 1mm、2mm、3mm、4mm、5mm 的壓克力板，並在下方黏 1cm 的鐵絲，如圖十所示。

圖十:不同尺寸的壓克力板，寬度由右至左分別為 1mm、2mm、3mm、4mm、5mm(筆者繪製)

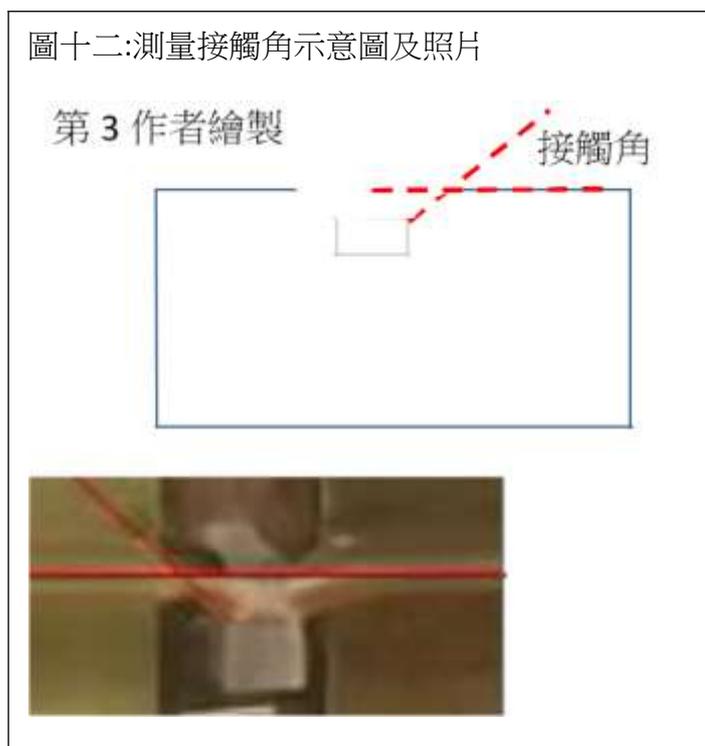


2.將壓克力板放在透明水槽中，水槽下方置一電磁鐵，如圖十一所示。



3.啟動攝影機錄影，逐漸升高電磁鐵的電壓，直至壓克力板沉沒。

4.回播錄影畫面，擷取沉沒前一畫面，計算接觸角，如圖十二所示。



(三)分析受力情形及計算表面張力

1.畫出壓克力板在水中的受力圖。

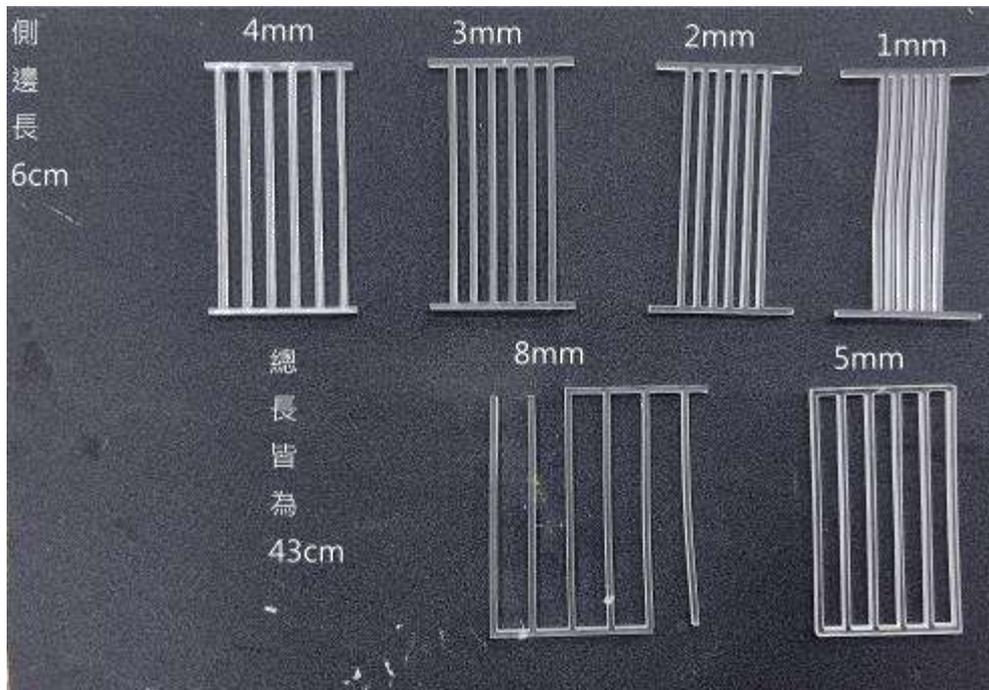
2.由力的平衡計算表面張力。

二.測量兩條線の間距與表面張力的關係

(一)測量不同間距的壓克力板承重量

1.在雷切機的軟體上，劃出寬 2mm，長 6cm 的矩形共 6 條，間距 2mm，頭尾兩端以長 5cm，寬 2mm 連接。如圖十所示。

圖十:不同間距的壓克力板(第三作者拍攝)

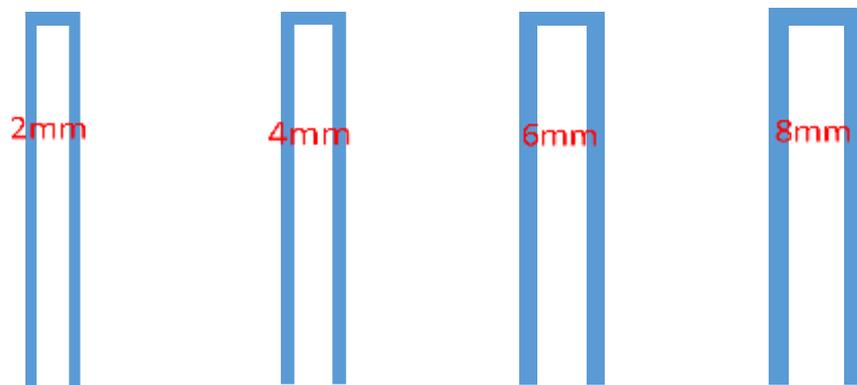


- 2.將裁切好的壓克力板，放在水面上，並在上方依序放上鋁條，直至沉沒。
- 3.計算鋁條的長度，再換算成重量。
- 4.將步驟 1 的間距 2mm，依序改成 4mm，6mm，8mm，10mm，裁切後，重複步驟 2~3。
- 5.找出間距與最大承重量的關係。

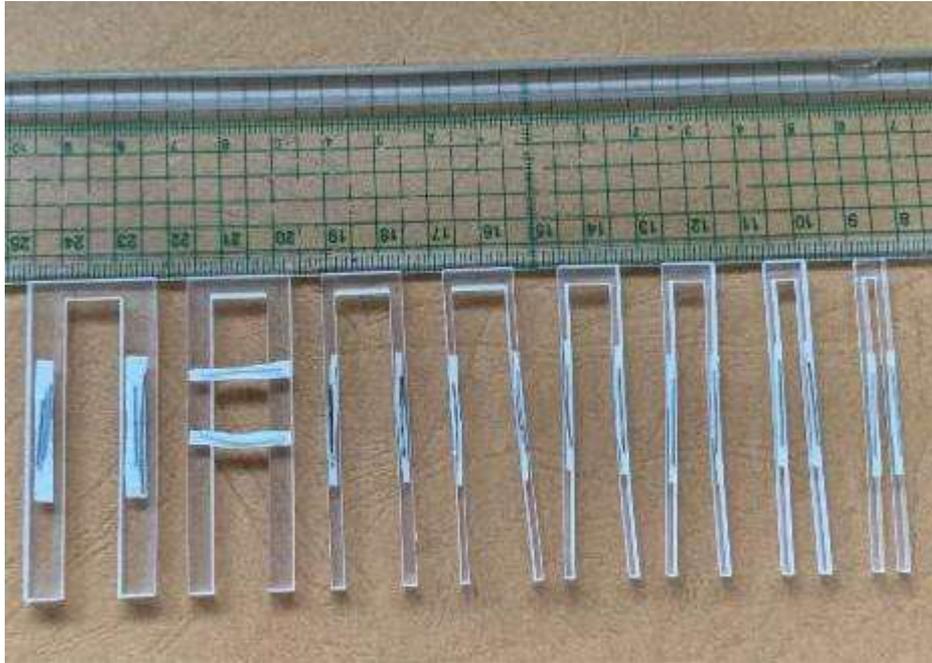
(二)測量不同間距的壓克力接觸角

- 1.將裁出間距分別為 2mm，4mm，6mm，8mm，10mm 的 U 形壓克力板，下方黏上鐵絲，至於透明水槽中，如圖十一，十二。

圖十一: 不同間距的壓克力板示意圖(第二作者繪製)



圖十二:不同間距壓克力板實體圖(第 2 作者拍攝)



2.實驗裝置同圖十一。

3.由拍攝的影片量出接觸角。

(三)比較接觸角與最大承重量的關係

1.由拍攝出的影片，量出壓克力板內側的接觸角。

2.用內側接觸角與承重量作圖，找出兩者的關係。

三、測量波的振幅、上下移動的加速度、波速

1.將振幅時間測量裝置組裝妥當。

2.啟動起波器，由 arduino 讀取振幅對應的時間。

3.畫出時間、位移、速度、加速度的表格，並將時間與位移填入。

4.計算出速度與加速度，做出速度-時間關係圖與加速度-時間關係圖。

四、測量波浪經過時，銅線與波前平行時，振幅變化與最大承載量的關係

1.將起波器與水槽、arduino 等裝置設置妥當。

2.水槽內裝水，放入壓克力斜坡，使最小的水深為 5 公分。

3.取 6cm 長的漆包線，下方掛可以浮起的最多訂書針，放置於水槽中央，漆

包線的方向與起波桿的方向平行，如圖十三所示。

圖十三：銅線掛訂書針圖(第一作者拍攝)



4. 啟動起波器，檢視第一個水波過去時，是否下沉。若是，則減少一個訂書針，以此類推，至不下沉為止。取第一次下沉與前一次的重量之平均值，計算最大承載量。

五、測量波浪經過時，銅線與波前垂直時，振幅變化與最大承載量的關係

1. 將起波器與水槽、arduino 等裝置設置妥當。
2. 水槽內裝水，放入壓克力斜坡，使最小的水深為 5 公分。
3. 取 6cm 長的漆包線，下方掛可以浮起的最多訂書針，放置於水槽中央，漆包線的方向與起波桿的方向垂直。
4. 啟動起波器，檢視第一個水波過去時，是否下沉。若是，則減少一個訂書針，以此類推，至不下沉為止。取第一次下沉與前一次的重量之平均值，計算最大承載量。

六、推動鋁線移動，找出移動速率與鋁線長寬的關係

1. 裁剪 43 公分的鋁線，其中 30 公分折成矩形，剩下的 13 公分折成把手，如圖所示。將鋁線摺成正方形，上方折成把手狀，方便推行。如圖十三所示。

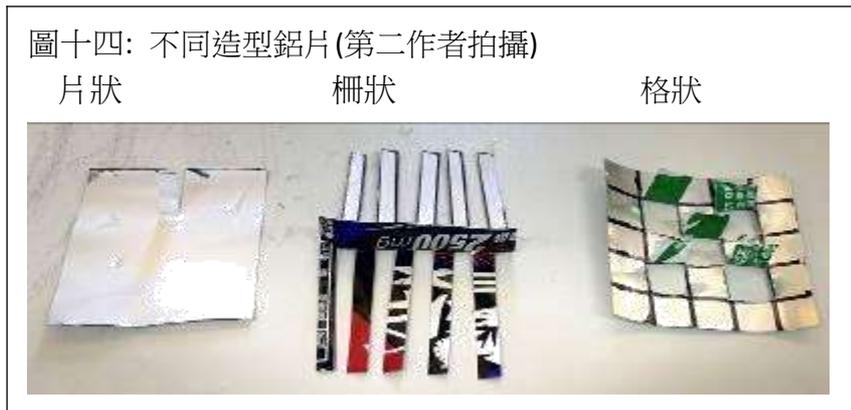
圖十三:不同矩形的鋁線(第二作者拍攝)



2. 選取一組鋁線，將摺好的鋁線把手，放置於牽動裝置的前方。
3. 啟動馬達拉著牽引裝置把金屬線往前推。
4. 逐漸增加電壓，直到鋁線落水為止。
5. 落水瞬間斷電，紀錄最後速率。
6. 改用其他尺寸的鋁線，重複步驟 2~5。
7. 分析鋁線形狀與移動速率的關係。

七、製作表面張力船底結構

- 1.取鋁罐飲料，裁剪出中央的部分，攤平。
- 2.裁剪邊長 5 公分的正方形三個，作為實驗組與對照組。
- 3.將實驗組一裁成長條狀，寬 5mm，折成間距 5mm 的柵狀，實驗組二則在中間畫出棋盤格，並在不接觸的邊緣的格子挖出正方形的洞，如圖十四所示。



- 4.將實驗組與對照組分別放入速率測量器，測出最大的速率。
- 5.將實驗組與對照組同時放入造波裝置的水槽中，比較沉入的先後。

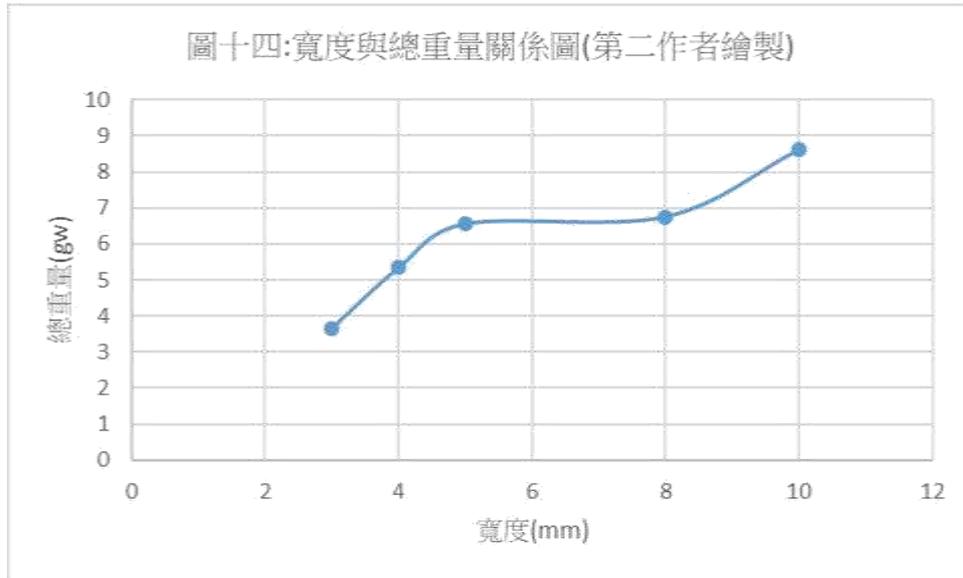
肆、數據與結果

一、探討表面張力與線寬的關係

(一)測量不同寬度的壓克力板最大承重量。

- 1.數據如表一，圖形如圖十四。

表一:不同寬度壓克力板與總重量(第二作者製表)					
寬度(單位 mm)	3	4	5	8	10
總重(單位 gw)	3.67	5.34	6.56	6.76	8.61



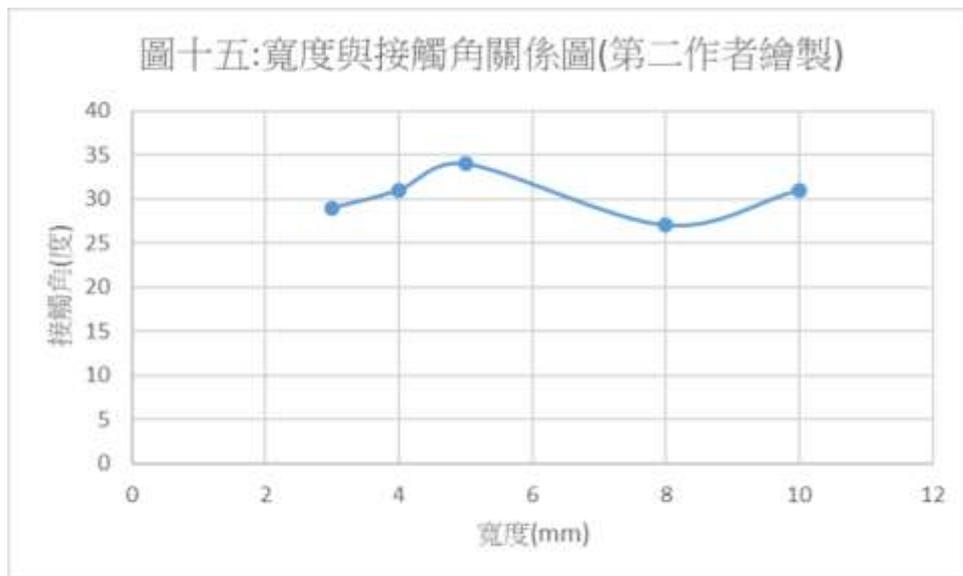
結果：總重隨寬度增而增加。

(二)測量不同寬度的壓克力板最大接觸角

1.數據如表二，圖形如圖十五。

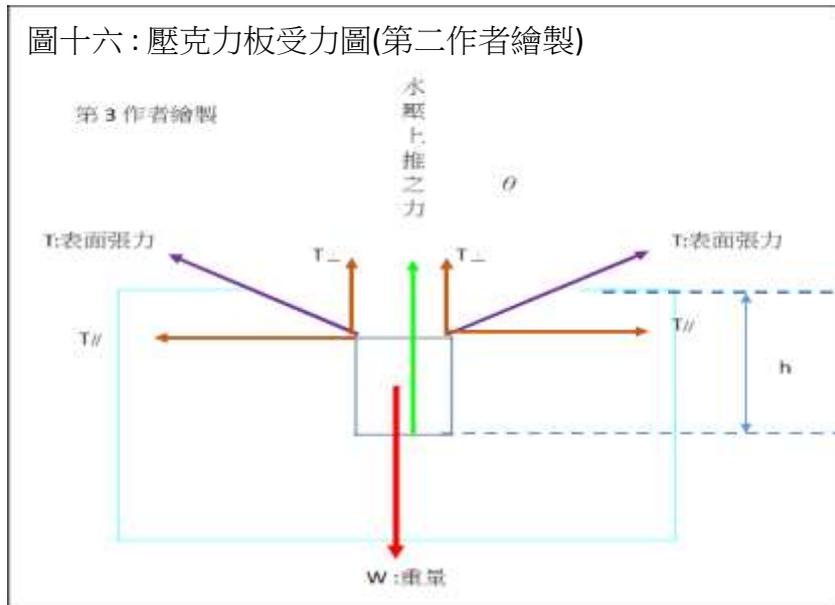
表二:寬度與接觸角(第二作者製表)

寬度(mm)	3	4	6	8	10
接觸角(度)	27	30	30	32	24



(三) 分析受力情形及計算表面張力

1. 力圖如圖十六



2. 力圖分析

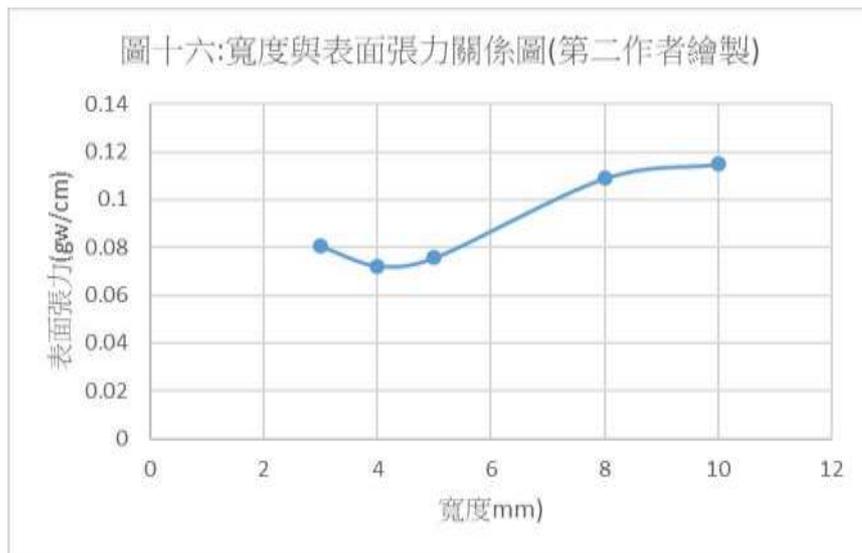
$$\text{水壓上推之力} + 2 T_{\perp} = \text{重量}$$

$$h \cdot d \cdot A + 2 \cdot T \cdot \sin\theta = w$$

$$T = (w - h \cdot d \cdot A) / 2 \sin\theta$$

3 數據如表三，圖形如圖十六。

寬度(單位 mm)	3	4	5	8	10
塑膠片面積(單位 cm ²)	6.84	8.96	11.65	12.04	16.00
塑膠片重(gw)	2.22	2.91	3.57	3.91	5.20
周長(cm)	45.6	44.8	44	34.4	32.0
鋁條總重(gw)	1.44	2.43	2.99	2.84	3.412969
總重(gw)	3.66	5.34	6.56	6.75	8.612969
表張的垂直分力(gw)	1.78	1.67	1.86	1.70	1.892969
接觸角度	29.0	31.5	34.0	27.5	31
接觸角弧度	0.51	0.54	0.59	0.47	0.541053
底部深度(cm)	0.42	0.41	0.42	0.42	0.42
水壓上推之力(gw)	0.82	0.99	1.39	1.44	1.92
表面張力*總長(gw)	3.67	3.24	3.32	3.74	3.675389
表面張力(gw/cm)	0.081	0.072	0.075	0.11	0.114



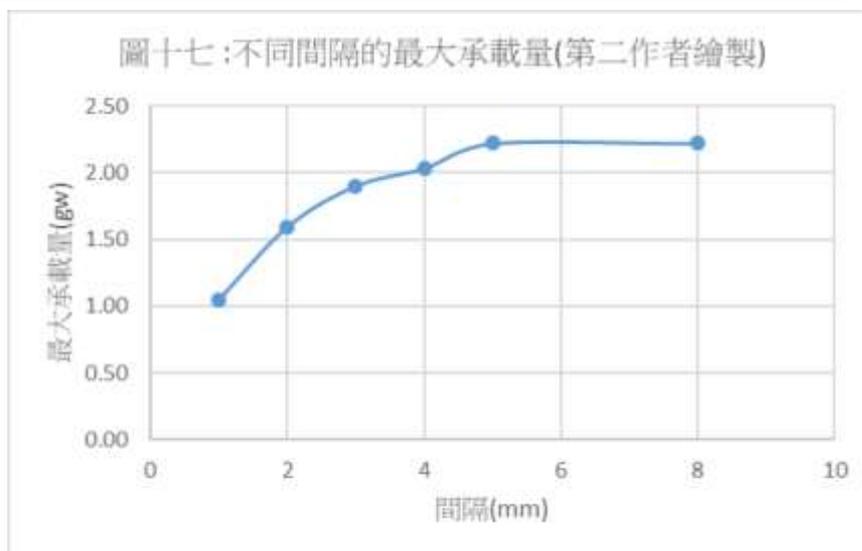
結果 :表面張力隨寬度增加而上升的趨勢，但愈寬則增加的愈不明顯。以理論上來說，表面張力應該是一定值，推敲其原因，應該是太細的寬度，再放鋁條的時候，稍一不平衡，就容易傾斜而沉沒。

二、測量兩條線の間距與表面張力的關係

(一) 不同間距與最大承載量的數據如表四，圖形如圖十七。

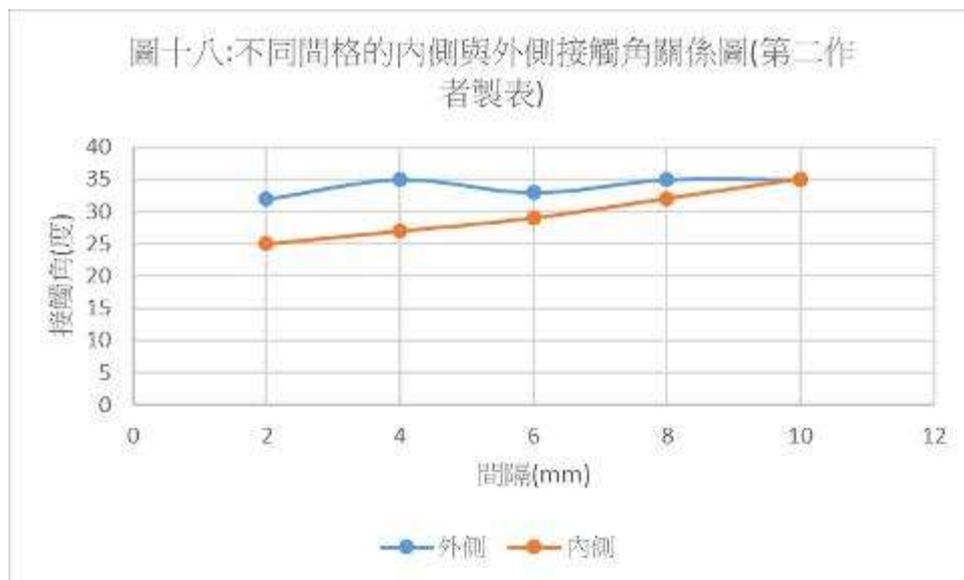
表四:不同間距與最大承載量(第二作者製表)

寬度(單位 mm)	1	2	3	4	5
(單位 g)	1.05	1.596	1.902	2.034	2.22



結果 :在 5mm 以下，最大承載量隨間距增加而增加，超過 5mm，則無變化。

(二)不同間距的接觸角，數據如表五，圖形如圖十八。



結果：內側的接觸角隨間距增加而增加，到了 1 公分時，內外側的接觸角都相等。比較 2mm 與 1cm 間隔的內外側水平面，如圖十九與圖二十，可以發現間隔

表五:不同間隔的內側與外側接觸角(第二作者製表)

間隔(mm)	2	4	6	8	10
外側接觸角	32	35	33	35	35
內側接觸角	25	27	29	32	35

窄的，內側水平面愈低，也就是表面張力的垂直分力愈小，但超過 1cm，內外側水平面就趨於一致了。

圖十九:間隔 1cm 內外側水平面實體圖(第 1 作者拍攝及繪製)

原圖



圖二十:間隔 2mm 內外側水平面實體圖(第 3 作者拍攝及繪製)

原圖



結果：有間隙的承載量，當間隙小於 5mm 時，間隙愈小，承載量愈小，超過 5mm，沒有太大變化。從其接觸角來觀察，外側的接觸角較大，可以提供較大的

垂直分力，內側的接觸角較平，提供的垂直分力較少。而間距愈小，內側的接觸角愈小，所以提供的垂直分力愈小，因此承載量愈小，如圖所示。觀察單一壓克

力板周邊的水面扭曲範圍，大約在 2.5mm 左右，所以超過 5mm 的間隙就不會彼此互相影響。

三、測量波的振幅、上下移動的速度、加速度

(一)數據如表五，圖形如圖二十、二十一。

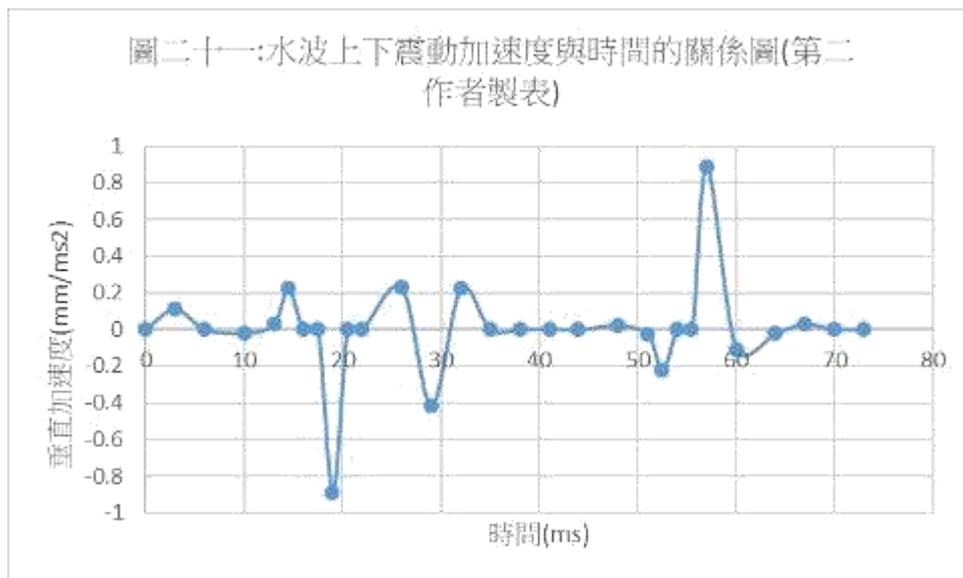
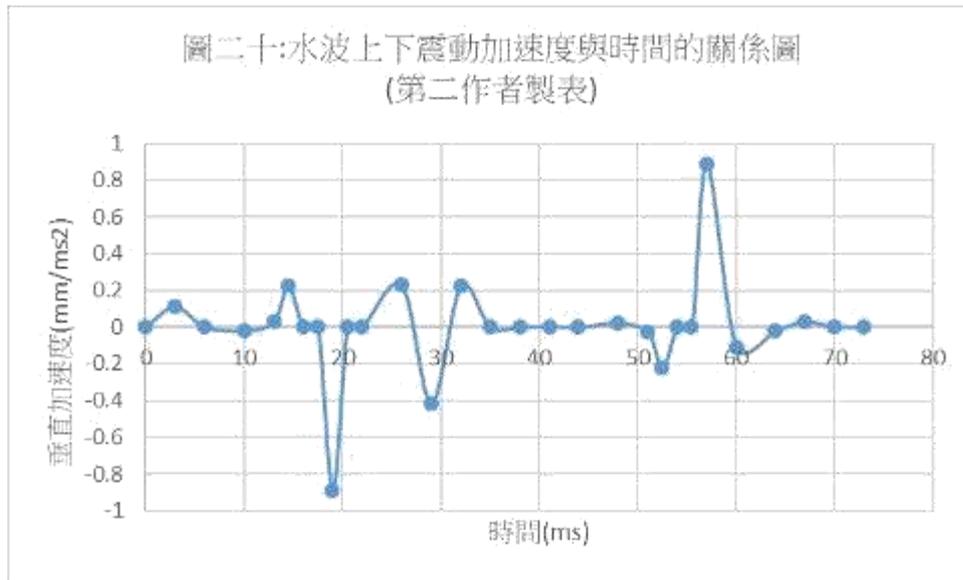
表五：波的振幅、上下移動的速度、加速度(第二作者製表)

t(ms)	0	3	6	10	13	14.5	16	17.5	19
x(mm)	0	1	2	3	4	5	6	7	6
v(cm/ms)	0.033	0.333	0.25	0.033	0.666	0.666	0.666	-0.666	
a(cm/ms ²)	0.111	0	-0.020	0.027	0.222	0	0	-0.888	

t(ms)	20.5	22	26	29	32	35	38	41	44
x(mm)	5	4	3	2	1	0	-1	-2	-3
v(cm/ms)	-0.666	-0.66			-0.333	-0.333	-0.333	-0.333	-0.333
a(cm/ms ²)	0	0	0.022	-0.416	0.222	0	0	0	

t(ms)	48	51	52.5	54	55.5	57	60	64
x(mm)	-4	-5	-6	-7	-6	-5	-4	-3
v(cm/ms)	-0.25	-0.333	-0.666	-0.666	-0.666	0.666	0.333	0.25
a(cm/ms ²)	0.020	-0.027	-0.022	0	0	0.888	-0.111	-0.020

t(ms)	67	70	73
x(mm)	-2	-1	0
v(cm/ms)	0.333	0.333	
a(cm/ms ²)	0		

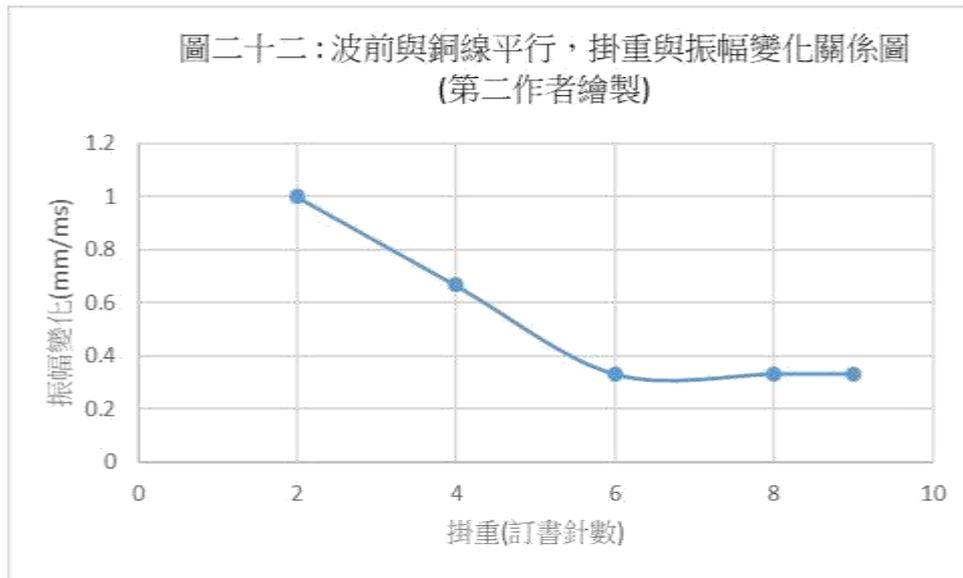


結果:在接近波峰的地方,有最大的向下加速度,在波谷的地方,有最大上加速度。

四、測量波浪經過時,銅線與波前平行時,振幅變化與最大承載量的關係

(一)數據如表六,圖形如圖二十二。

掛重(訂書針數)	2	4	6	8	9
振幅變化速率 (mm/ms)	1.0	0.67	0.33	0.33	0.33



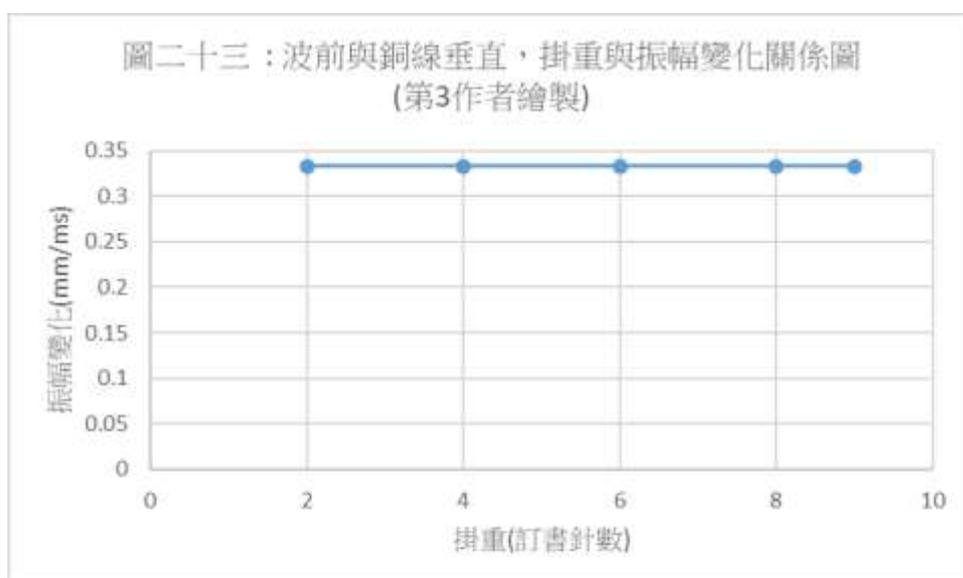
結果：振幅變化小於 0.4mm/ms 時，掛的訂書針數超過 6 個以上，都是波一過就沉下去。只有減少掛針數，才能在波較大時仍能隨之起伏。

五、測量波浪經過時，銅線與波前垂直時，振幅變化與最大承載量的關係

(一)數據如下表七，圖形如圖二十三所示。

表七：波浪經過時，銅線與波前垂直時，掛重與振幅變化關係

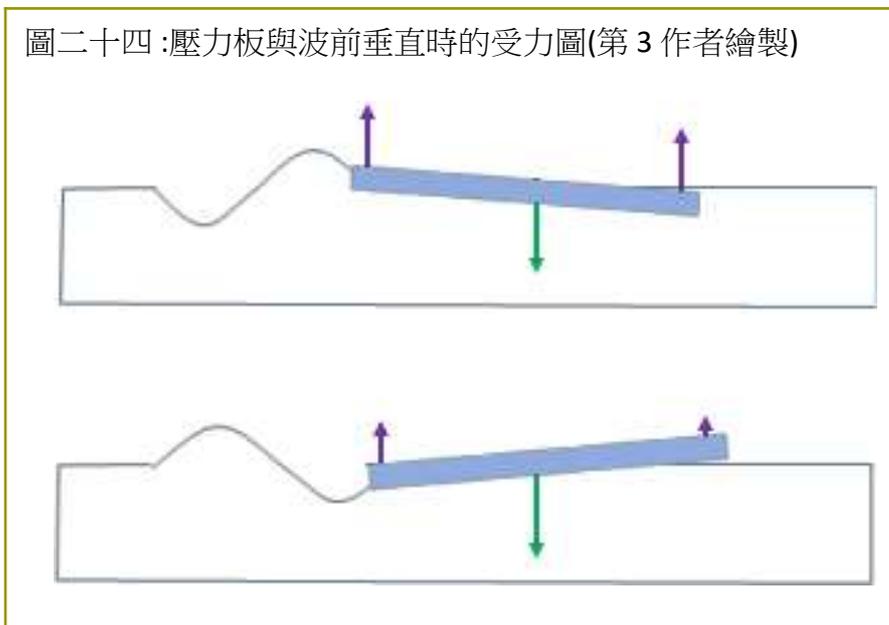
掛重(訂書針數)	2	4	6	8	9
振幅變化速率 (mm/ms)	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33



結果: 1.當壓克力板擺放方向與波前方向垂直時，波峯的前端抬升壓克力板時，壓克力板後方會下陷，此時前方的表面張力要將壓克力板往上抬升，水面需凹陷的更深才有足夠的向上推力，後方的壓克力板要撐住壓克力板不讓它過度下陷，所以當振幅稍大時，所需的力量就超過表面張力，而讓壓克力板沉沒了。

2.當壓克力板擺放方向與波前方向垂直時，當波谷的前端到達時，壓克力板下降，所需的表面張力就減少，而壓克力板後方會上升，所需的表面張力就減少，所以波谷通過時就不易沉沒，如圖二十四所示。

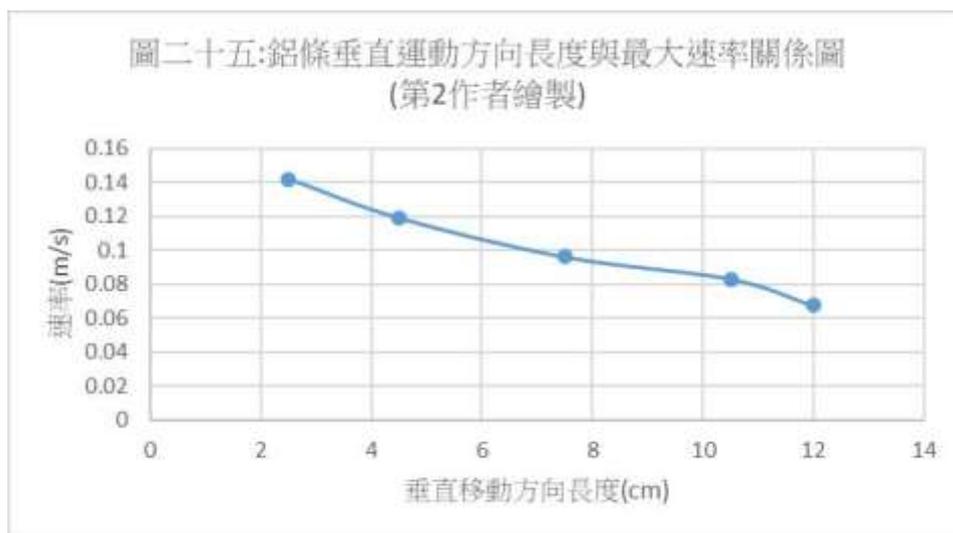
圖二十四:壓力板與波前垂直時的受力圖(第3作者繪製)



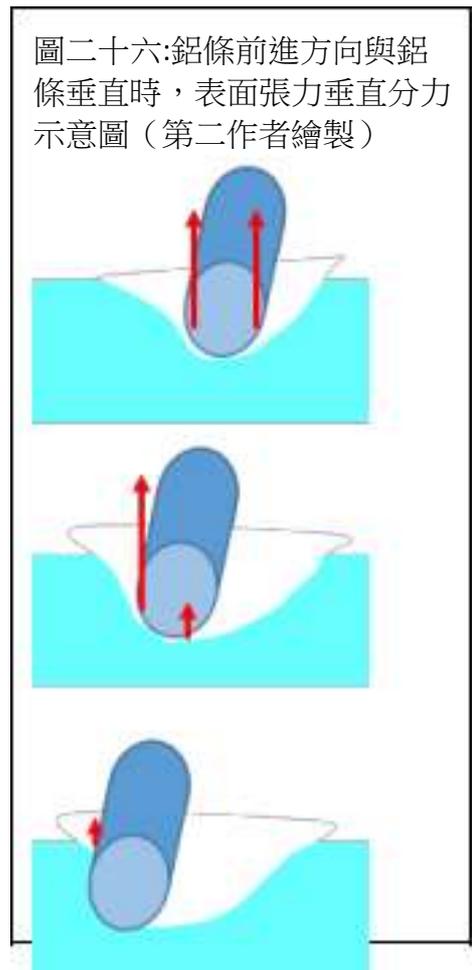
六、推動鋁線移動，找出移動速率與鋁線長寬的的關係

(一)數據如表八，圖形如圖二十五。

垂直長度(cm)	2.5	4.5	7.5	10.5	12
速率(m/s)	0.142	0.119	0.096	0.083	0.0674



結果：如圖二十六，鋁條前進方向與鋁條垂直時，當速率慢的時候，鋁條兩側水面扭曲的速率跟得上鋁條的移動速率，所以表面張力垂直分力維持一定，如圖的紅色箭頭所示。當速率漸增鋁條前方的水被擠壓得更扭曲表面張力的垂直分力也增加，但鋁條後方的水，扭曲的速率跟不上，所以角度漸平，其垂直分力也變小，但還能撐住。等到速率更快，鋁條前方的水來不及扭曲就被鋁條碰上了，這時前方的表面張力垂直分力就變得很小，而後方的水來不及扭曲鋁條就過去了，讓鋁條後方的水瞬間成水平，表面張力的垂直分力也不見了，失去支撐的鋁條也因此沉沒。

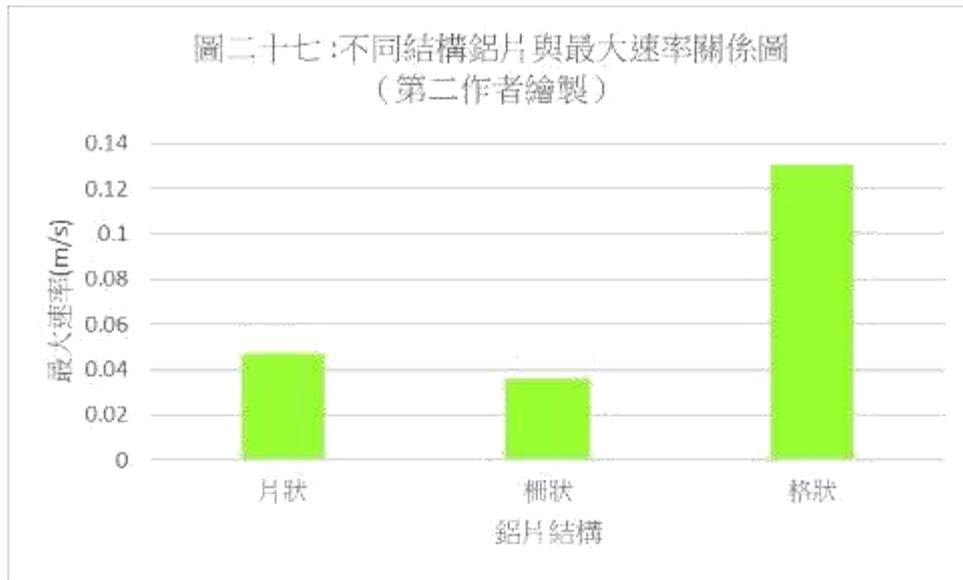


圖二十六：鋁條前進方向與鋁條垂直時，表面張力垂直分力示意圖（第二作者繪製）

七、製作表面張力船底結構

(一)不同結構前進最大速率如表九，圖形如圖二十七。

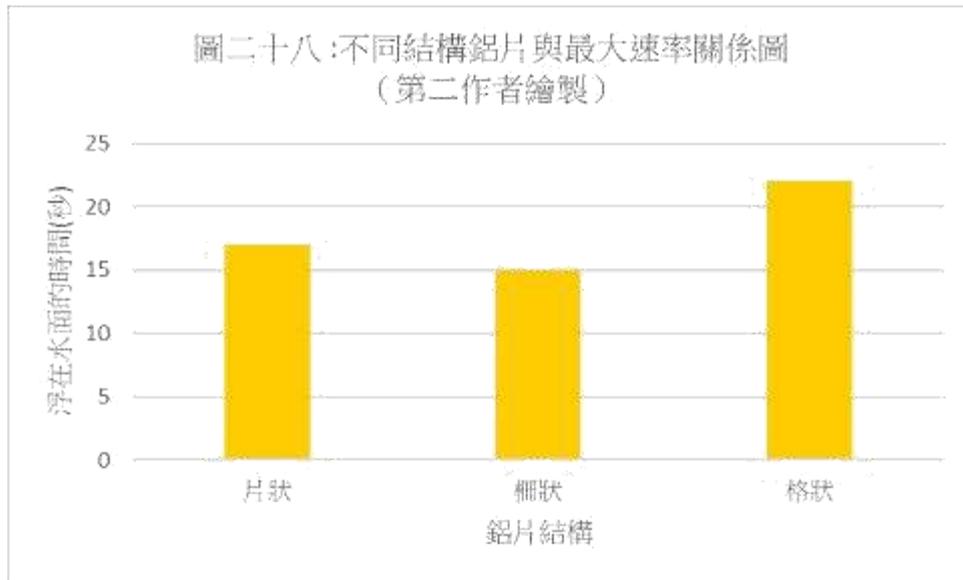
表九：不同結構前進的最大速率（第二作者製表）			
結構（均加 0.834g 的鋁線）	柵狀	格狀	鋁片狀
			
速率快慢 (m/s)	0.036	0.13	0.047



結果：原本以為柵狀接觸到水的周長較鋁片大，其所受的表面張力的向上分力和也較大，但實驗結果卻相反。仔細觀察其運動過程，發現柵狀的鋁條容易上下起伏，一旦高速運動，稍微出現不平衡的情況，就會插入水中而沉沒。而中間挖洞的格狀鋁片，就沒有柵狀的問題，可以有著接觸水面的大周長，有有高速運動的穩定度，所以最大速率是三者之冠。

(二)不同結構浮在波浪中的時間如表十及圖二十八。

結構 (均加 0.834g 的鋁線)	柵狀	格狀	鋁片狀
			
波經過時沉沒時間	15	17	22



結果：柵狀與片狀的沉沒時間差不多，並沒有因為柵狀的周長較長，而支撐較久的時間。這也是因為波通過時，鋁片都會有一個方向與波前垂直，造成上方要升高，後方卻不讓下降的情況而沉沒。而格狀的鋁片周長較長，又有較柵狀好的平衡度，所以支撐的時間最久。

伍、討論

- 一、用下壓式的方式來測量表面張力，必須要考慮物體底部與水面間的壓力差，因為上壓力對物體底部有作用力，若不考慮，則會高估了表面張力。這是與上拉式方式測量表面張力不同的地方。
- 二、一開始原本想用金屬線來做實驗，但每條金屬線都是捲曲的，必須要壓直才不會有誤差，一開始用老虎鉗來壓，發現不好，最後用木板把金屬線壓在桌面來回摩擦，發現效果不錯。但是把金屬線彎成矩形時，就會有一邊翹起的不平衡情況，所以用壓克力板，配合雷射切割，可以得到精確的結果。
- 三、起波器一開始打的水波振幅偏小，於是用壓克力斜坡來增加振幅，但還是不夠，於是讓起波器不停打出波浪，讓水波在邊界來回反射，如此可以得到最大的振幅，只要在金屬線落水的那一刻，在 `arduino` 的序列埠視窗，按一下暫停，就可以記錄到當時的時間變化，如此可以省下很多的時間。
- 四、測量水波的加速度，原本想要利用慢動作攝影再回播來測量，發現到振幅極小，難以辨識。於是利用排針，將其傾斜擺放，使第一根到第十一根的垂直距離為 1 公分，就可以得知兩根排針的垂直距離為 1 mm。但是金屬裝置不能在水中放太久，用完就要晾乾，以免受潮而影響。
- 五、測量鋁條沉沒前的最大速率，原本是用手機拍攝，回放後去找影片的時間即距離，發現影像不夠清晰，於是用 `ARDUINO` 和紅外線發射接收模組來測量時

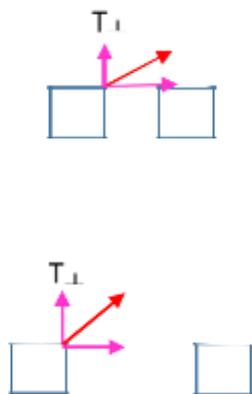
間，並用 LED 直接顯示瞬時速率，既快又方便。

六、由於水溫會影響到表面張力，所以同一組的實驗，必須在同一個時間內做完，才不會影響實驗的準確度。

陸、結論

- 一、用不同寬度測量表面張力，理論上來說，表面張力應該一定。但實測卻是隨著寬度增加而增加，但寬度愈大，增加的幅度就愈小。分析其原因，應該是較細的情況，稍微不平衡，就會沉沒，所以測出的表面張力較小。在寬度較寬的情況，稍微的震動就容易恢復平衡，所以測出的表面張力較準。
- 二、兩根線の間距在水面上時，間距增加時，承載量也愈大，當超過 5mm 的時候，就不受影響，這距離恰好是水面形成凹線的距離。由圖二十九可以知道，間距較小時，內側的接觸角較小，表面張力的垂直分力也較小，所以承載量也較小。間距超過 1 公分，內外側的接觸角相同，承載量也達到最大。

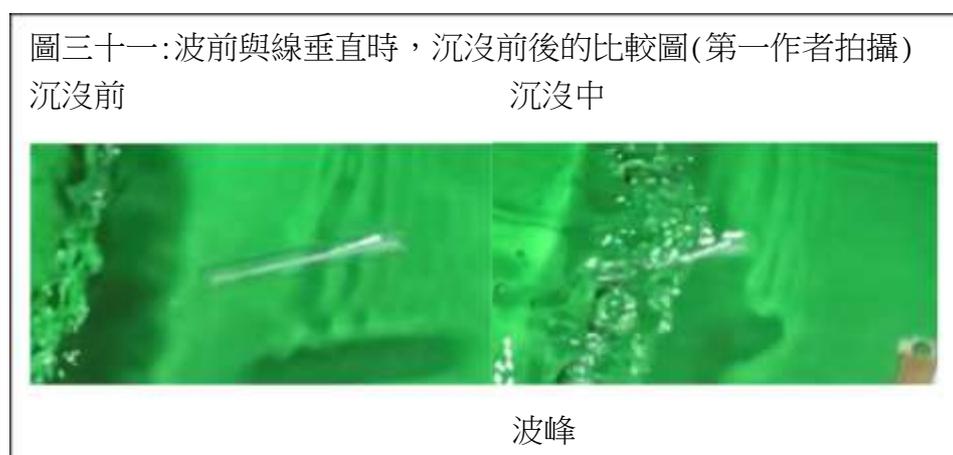
圖二十九:不同間隙內側表面張力垂直分力示意圖(第二作者繪製)



三、當波前與線的方向平行時，銅線的每一段受到的表面張力都相同，沒有落差，所以隨著波浪起伏，不易落下。當波浪愈大時，加速度愈大，所需的力量也愈大，當表面張力不足以提供銅線產生與水波相同的加速度時，銅線就會落下。由圖三十可知，在波谷的時候，有最大的向上加速度，若是表面張力不夠，就容易在波谷的時候沉沒，如圖三十所示。。



四、當波前與線的方向垂直時，銅線的前端遇到波浪的波峯來時，其受到的表面張力垂直分力必須增加，但後端下陷使水面凹陷，表面張力的垂直分力也會增加，如果增加的比例不夠時，就容易下沉。若是波谷襲來時，讓前端下沉，所需的表面張力減小，後短上翹，表面張力也減小，所以不容易沉沒。由圖三十一可以看出，垂直方向從波峯開始沉沒。



- 五、推動銅線移動時，銅線與前進方向垂直的部分，要讓前方的水凹陷後，才能漂在水上，繼續前進。但是太快時，前端的部分與水撞擊黏在一起，表面張力垂直分力幾乎消失，而後端因為移動太快，水來不及扭曲，呈現瞬間水平狀態，無法提供垂直分力，所以當銅線移動比水移動速率還快時，就會沉沒。但與移動方線平行的部分，只有前後兩端的表面張力有影響，兩側的部分不受影響，所以鋁條折成的矩形，與前進方向垂直的部分愈少，最大速率愈快。
- 六、利用易開罐鋁片來做表面張力船的底部構造，根據實驗結果是間隔 1 公分時，表面張力的垂直分力最大，所在 5 公分見方的鋁片，割出間隔 1 公分的柵狀構造，可以增加表面張力作用的長度，但因為鋁片不平整，反而無法發揮作用。改用棋盤格的方式，在內部切出不相連的 1 公分正方形，計可以維持平衡，又有最大的周長，所以有最好的效果。

柒、參考資料

- 一· 柯博文，Raspberry Pi 超炫專案與完全實戰(第二版) 碁峰資訊股份有限公司 2017 年 2 月二版三刷

【評語】 030117

本作品探討表面張力以及水波對漂體產生的影響。實驗報告中，呈現許多精密的量測數據，但報告書中並未提及如何量測出這些精確的數據，例如壓克力板底部深度，接觸角等，也未說明如何控制（確認）壓克力板保持水平等。建議學生要熟悉整個實驗的內容及過程，例如實驗中使用的壓克力片的厚度，水壓上推之力的計算等。

作品簡報

浪駭濤驚之漂上水功輕

摘要

水黽在水面上悠遊自在的滑行，就想探索動態水面的表面張力。首先設計用懸掛式的方式來測量表面張力，發現寬度愈大，可以承載的重量越大，若加計沉陷的壓力差，則表面張力趨於一致。再測量兩根線接近時的承載力，發現距離小於5mm，承載的重量隨距離的減少而減少，超過後則沒影響。當波前與壓力板的方向平行時，在波谷時的向上加速度最大，此時水的表面張力不足以拉上壓力板，就會沉沒。當波前與長邊垂直時，當波浪來時，表面張力將前方向上抬升，後方要往下降，卻受到的表面張力的阻止，所以容易沉沒。推動鋁線快速前進時，鋁線前後方向上分力減少而沉沒。所以鋁線與前進方向垂直的比例愈多，最大前進速率愈小。依此做出表面張力移動底盤。

壹、前言

一、研究動機

去秋紅谷參觀的時候，發現許多之水黽在水面上悠遊自在的滑行，不會沉下去。這種現象是表面張力造成的，但是如果這靜態的水池換成有水波經過的環境，還是要快速的滑行，這表面張力還撐得住嗎？為了探索這個謎團，自行設計了一連串的實驗，展開了研究。

二、研究目的

- (一) 探討表面張力與線寬的關係
- (二) 測量兩條線的間距與表面張力的關係
- (三) 測量波的振幅、上下移動的加速度、波速
- (四) 測量波浪經過時，銅線與波前平行時，振幅變化與最大承載量的關係
- (五) 測量波浪經過時，銅線與波前垂直時，振幅變化與最大承載量的關係
- (六) 推動鋁線移動，找出移動速率與鋁線長寬的關係
- (七) 製作表面張力船底結構

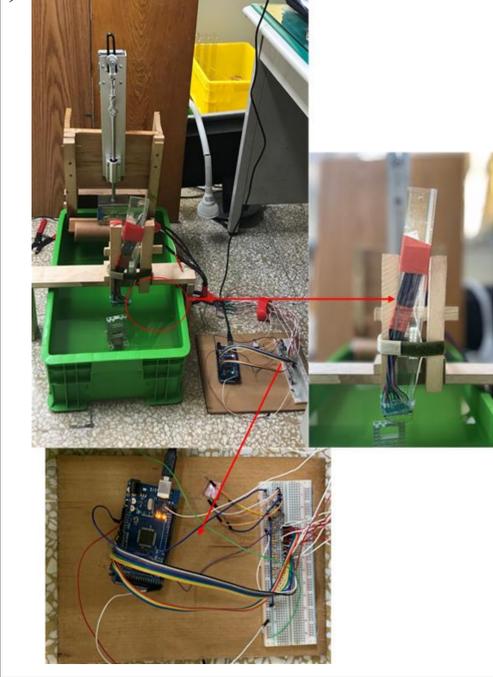
三、文獻回顧

- (1) 你「浮」不「浮」～紙船載重能力之探討
屏東縣第61屆中小學科學展覽會
探討水溫、溶液，對紙船載重能力的影響
- (2) 表面功夫-用自製儀器測量液體的表面張力
中華民國第56屆中小學科學展覽會
自製儀器、利用各種清潔劑來探討表面張力被破壞的情形，清潔劑會跟液體表面的薄膜作用進而破壞了表面張力，不同清潔劑溶液有不同的表面張力，有些更會隨著濃度改變而變化。
- (3) 是誰讓我心“帆”—魔法船
中華民國第四十七屆中小學科學展覽會
設計不同船型、不同添加劑及不同水深、溫度來探討瞭解船隻航行的行為，利用表面張力的差異性來驅動船隻航行。

二、振幅與時間測量裝置

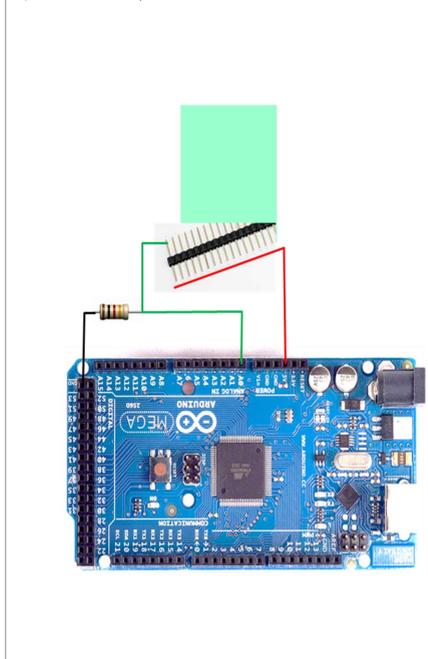
1. 實驗裝置如圖二。

圖二：測量振幅與時間裝置(第三作者拍攝)



2. 電路圖如圖三。

圖三：振幅與時間測量裝置電路圖(第1作者繪製)



圖一：造波裝置(第1作者拍攝)



貳、研究器材與原理

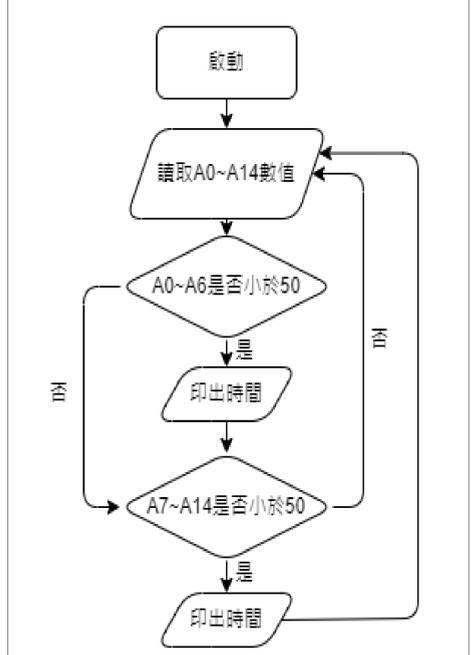
一、造波裝置

1. 將往復電機固定於木架上，將運動的連桿一端連上圓柱形木棍，如圖一所示。
2. 將固定作的前兩隻腳放入水槽，加入水後，啟動往復電機，即可造波。
3. 要加大波浪的振幅，可以用一壓克力板，折彎成斜坡狀，放入水槽中，如此波浪經過斜坡時，會因為波速減緩而使得振幅加大，如同海嘯一樣。

3. 程式設計流程

- (1) 將連接到A0~A6的排針放入水中，A7~A14在空氣中。每根排針的垂直間距為1mm。
- (2) 當波浪經過後，水面下的排針如果在水面上，就記錄每根排針露出水面的時間；水面上的排針，如果未入水中，就記錄沒入水中的時間。
- (3) 程式設計的流程圖如四。

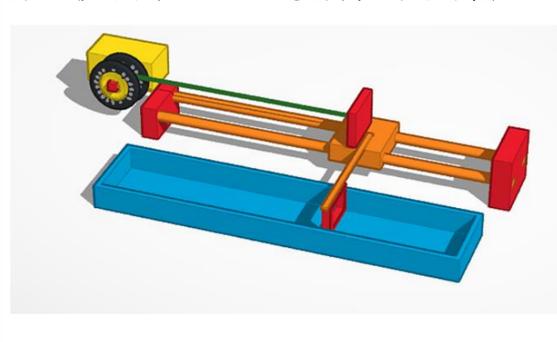
圖四：Arduino測量振幅與時間流程圖(第2作者繪製)



三、移動中的表面張力可承受最大速率測量裝置

1. 裝置如圖五與圖六。

圖五：移動中表面張力示意圖(第1作者繪製)

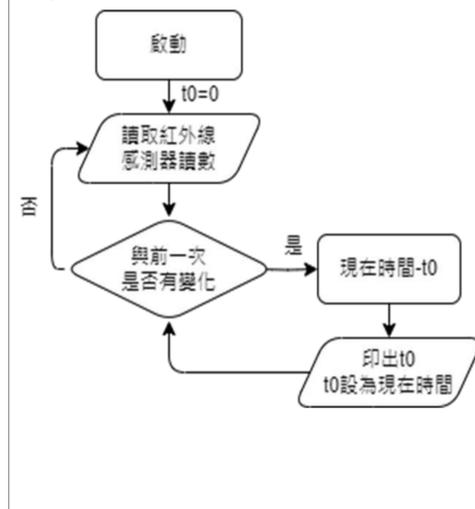


圖六：測量鋁條前進裝置(第2作者拍攝)



2. 程式設計流程：將一長條的紙剪成柵欄狀，間隔1cm。用紅外線發射接收裝置面對柵欄，當紅外線發射出去，碰到白紙反射回來的時候，設為狀態1，而後拉動馬達使機器前進，當偵測到無紙地方時，把此時的訊號設為0，當訊號由1轉變為0的時候，開始計時，等到訊號由0變成1時，結束計時，顯示速率。並重新開始計時，當訊號由1轉變為0的時候，結束計時，顯示速率。
3. 流程圖如圖七所示。

圖七：Arduino測量速率流程圖(第3作者繪製)



參、研究過程

一、探討表面張力與線寬的關係

- (一) 測量不同寬度的壓克力板最大承重量。
 1. 取透明壓克力，裁成正方形，外側邊長6cm，內側邊長5.8cm，如圖所示。在其上方繞上細銅線作為掛勾，如圖八所示。

圖八：不同壓克力板實體圖(第1作者拍攝)



2. 將壓克力連同掛勾放在水面上，逐次加入一小段鋁線在掛鉤上，至其沉沒為止，如圖九所示。記錄鋁線總長度，換算成重量。

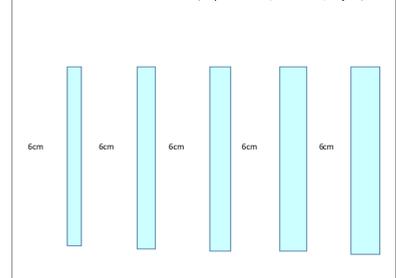
圖九：測量不同寬度壓克力板表面張力實驗圖



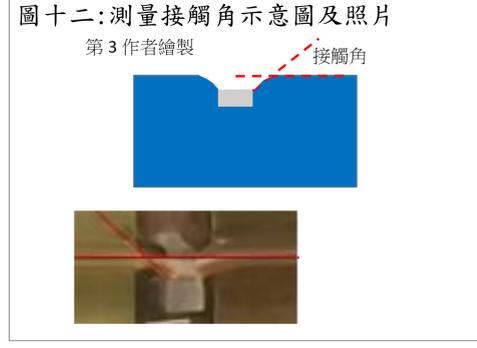
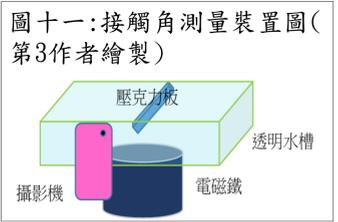
3. 取透明壓克力，分別裁成正方形，外邊長6cm，內邊長分別為5.6cm，5.4cm，5.2cm，5.0cm，再重複步驟1~2。

- (二) 測量不同寬度的壓克力板最大接觸角
 1. 分別裁出長均為6cm，寬度分別為1mm、2mm、3mm、4mm、5mm的壓克力板，並在下方黏1cm的鐵絲，如圖十所示。

圖十：不同尺寸的壓克力板，寬度由右至左分別為1mm、2mm、3mm、4mm、5mm(第二作者繪製)



- 將壓克力板放在透明水槽中，水槽下方置一電磁鐵，如圖十一所示。
- 啟動攝影機錄影，逐漸升高電磁鐵的電壓，直至壓克力板沉沒。
- 回播錄影畫面，擷取沉沒前一畫面，計算接觸角，如圖十二所示。



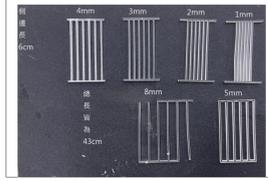
- 分析受力情形及計算表面張力
- 畫出壓克力板在水中的受力圖。
- 由力的平衡計算表面張力。

二. 測量兩條線的間距與表面張力的關係

(一) 測量不同間距的壓克力板承重量

- 在雷切機的軟體上，劃出寬2mm，長6cm的矩形共6條，間距2mm，頭尾兩端以長5cm，寬2mm連接。如圖十所示。

圖十：不同間距的壓克力板(第三作者拍攝)

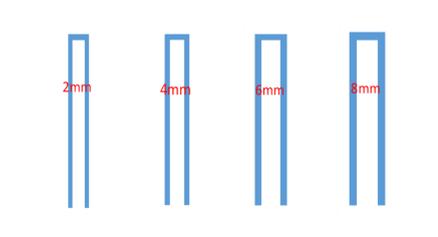


- 將裁切好的壓克力板，放在水面上，並在上方依序放上鋁條，直至沉沒。
- 計算鋁條的長度，再換算成重量。
- 將步驟1的間距2mm，依序改成4mm，6mm，8mm，10mm，裁切後，重複步驟2~3。
- 找出間距與最大承重量的關係。

(二) 測量不同間距的壓克力接觸角

- 將裁出間距分別為2mm，4mm，6mm，8mm，10mm的門形壓克力板，下方黏上鐵絲，至於透明水槽中，如圖十一，十二。

圖十一：不同間距的壓克力板示意圖(第二作者繪製)



- 實驗裝置同圖十一。
- 由拍攝的影片量出接觸角。

圖十二：不同間距壓克力板實體圖(第2作者拍攝)



(三) 比較接觸角與最大承重量的關係

- 由拍攝出的影片，量出壓克力板內側的接觸角。
- 用內側接觸角與承重量作圖，找出兩者的關係。

三、測量波的振幅、上下移動的加速度、波速

- 將振幅時間測量裝置組裝妥當。
- 啟動起波器，由arduino讀取振幅對應的時間。
- 畫出時間、位移、速度、加速度的表格，並將時間與位移填入。
- 計算出速度與加速度，做出速度-時間關係圖與加速度-時間關係圖。

四、測量波浪經過時，銅線與波前平行時，振幅變化與最大承載量的關係

- 將起波器與水槽、arduino等裝置設置妥當。
- 水槽內裝水，放入壓克力斜坡，使最小的水深為5公分。
- 取6cm長的漆包線，下方掛可以浮起的最多訂書針，放置於水槽中央，漆包線的方向與起波桿的方向平行，如圖十三所示。
- 啟動起波器，檢視第一個水波過去時，是否下沉。若是，則減少一個訂書針，以此類推，至不下沉為止。取第一次下沉與前一次的重量的平均值，計算最大承載量。

圖十三：銅線掛訂書針圖(第一作者拍攝)



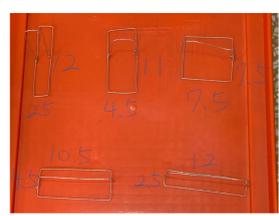
五、測量波浪經過時，銅線與波前垂直時，振幅變化與最大承載量的關係

- 將起波器與水槽、arduino等裝置設置妥當。
- 水槽內裝水，放入壓克力斜坡，使最小的水深為5公分。
- 取6cm長的漆包線，下方掛可以浮起的最多訂書針，放置於水槽中央，漆包線的方向與起波桿的方向垂直。
- 啟動起波器，檢視第一個水波過去時，是否下沉。若是，則減少一個訂書針，以此類推，至不下沉為止。取第一次下沉與前一次的重量的平均值，計算最大承載量。

六、推動鋁線移動，找出移動速率與鋁線長寬的關係

- 裁剪43公分的鋁線，其中30公分折成矩形，剩下的13公分折成把手，如圖所示。將鋁線摺成正方形，上方折成把手狀，方便推行。如圖十三所示。

圖十三：不同矩形的鋁線(第二作者拍攝)



- 選取一組鋁線，將摺好的鋁線把手，放置於牽動裝置的前方。
- 啟動馬達拉著牽引裝置把金屬線往前推。
- 逐漸增加電壓，直到鋁線落水為止。
- 落水瞬間斷電，紀錄最後速率。
- 改用其他尺寸的鋁線，重複步驟 2~5。
- 分析鋁線形狀與移動速率的關係。

七、製作表面張力船底結構

- 取鋁罐飲料，裁剪出中央的部分，攤平。
- 裁剪邊長5公分的正方形三個，作為實驗組與對照組。
- 將實驗組一裁成長條狀，寬5mm，折成間距5mm的柵狀，實驗組二則在中間畫出棋盤格，並在不接觸的邊緣的格子挖出正方形的洞，如圖十四所示。

圖十四：不同造型鋁片(第二作者拍攝) 片狀 柵狀 格狀



- 將實驗組與對照組分別放入速率測量器，測出最大的速率。
- 將實驗組與對照組同時放入造波裝置的水槽中，比較沉入的先後。

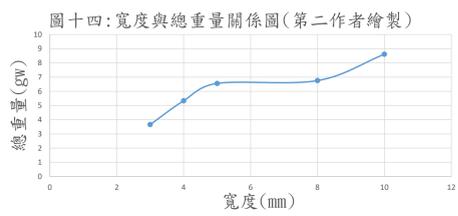
肆、數據與結果

一、探討表面張力與線寬的關係

- 測量不同寬度的壓克力板最大承重量。

- 數據如表一，圖形如圖十四。

寬度(mm)	3	4	5	8	10
總重(gw)	3.67	5.34	6.56	6.76	8.61

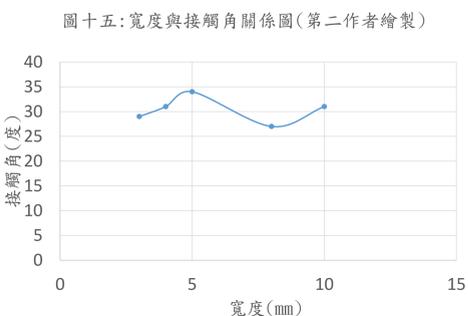


結果：總重隨寬度增而增加。

(二) 測量不同寬度的壓克力板最大接觸角

- 數據如表二，圖形如圖十五。

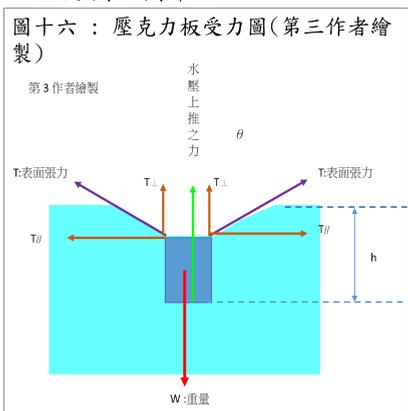
寬度(mm)	3	4	6	8	10
接觸角(度)	27	30	30	32	24



結果：接觸角在一定範圍內變化。

(三) 分析受力情形及計算表面張力

1. 力圖如圖十六



- 力圖分析

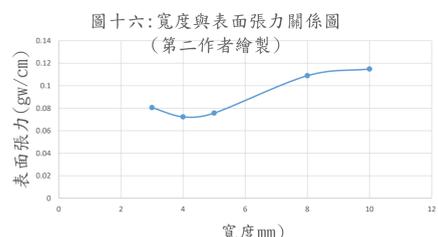
$$w = 2T \sin \theta$$

$$h \cdot d \cdot A + 2T \sin \theta = w$$

$$T = (w - h \cdot d \cdot A) / 2 \sin \theta$$

3. 數據如表三，圖形如圖十六。

寬度(單位mm)	3	4	5	8	10
塑膠片面積(單位cm ²)	6.84	8.96	11.65	12.04	16.00
塑膠片重(gw)	2.22	2.91	3.57	3.91	5.20
周長(cm)	45.6	44.8	44	34.4	32.0
鋁條總重(gw)	1.44	2.43	2.99	2.84	3.41
總重(gw)	3.66	5.34	6.56	6.75	8.61
表張的垂直分力(gw)	1.78	1.67	1.86	1.70	1.89
接觸角度	29.0	31.5	34.0	27.5	31
接觸角強度	0.51	0.54	0.59	0.47	0.54
底部深度(cm)	0.42	0.41	0.42	0.42	0.42
水壓上推之力(gw)	0.82	0.99	1.39	1.44	1.92
表面張力*總長(gw)	3.67	3.24	3.32	3.74	3.67
表面張力(gw/cm)	0.081	0.072	0.075	0.11	0.11

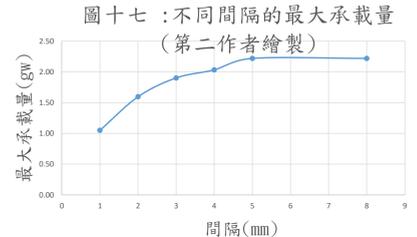


結果：表面張力隨寬度增加而上升的趨勢，但愈寬則增加的愈不明顯。以理論上來說，表面張力應該是一定值，推敲其原因，應該是太細的寬度，再放鋁條的時候，稍一不平衡，就容易傾斜而沉沒。

二、測量兩條線的間距與表面張力的關係

(一) 不同間距與最大承載量的數據如表四，圖形如圖十七。

寬度(單位mm)	1	2	3	4	5	8
(單位g)	1.05	1.59	1.90	2.03	2.22	2.22

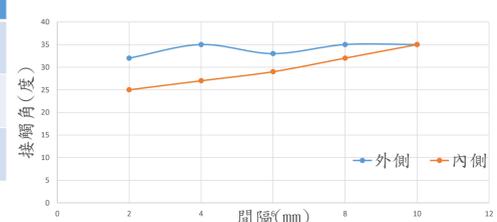


結果：在5mm以下，最大承載量隨間距增加而增加，超過5mm，則無變化。

(二) 不同間距的接觸角，數據如表五，圖形如圖十八。

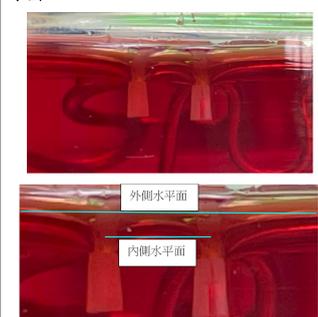
間隔(mm)	2	4	6	8	10
外側接觸角	32	35	33	35	35
內側接觸角	25	27	29	32	35

圖十八：不同間隔的內側與外側接觸角關係圖(第二作者製表)

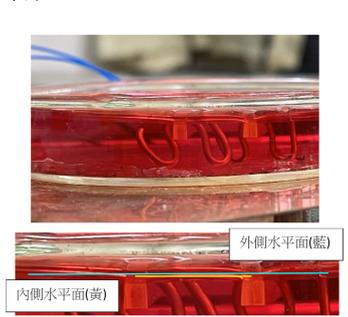


結果：內側的接觸角隨間距增加而增加，到了1公分時，內外側的接觸角都相等。比較2mm與1cm間隔的內外側水平面，如圖十九與圖二十，可以發現間隔窄的，內側水平面愈低，也就是表面張力的垂直分力愈小，但超過1cm，內外側水平面就趨於一致了。

圖十九：間隔2mm內外側水平面實體圖(第1作者拍攝及繪製) 原圖



圖二十：間隔1cm內外側水平面實體圖(第3作者拍攝及繪製) 原圖



三、測量波的振幅、上下移動的速度、加速度

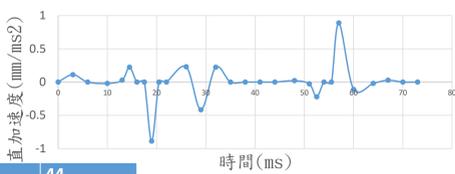
(一)數據如表五，圖形如圖二十。

t(ms)	0	3	6	10	13	14.5	16	17.5	19
x(mm)	0	1	2	3	4	5	6	7	6
v(cm/ms)	0.033	0.333	0.25	0.033	0.666	0.666	0.666	0.666	-0.666
a(cm/ms ²)	0.111	0	-0.020	0.027	0.222	0	0	0	-0.888

t(ms)	20.5	22	26	29	32	35	38	41	44
x(mm)	5	4	3	2	1	0	-1	-2	-3
v(cm/ms)	-0.666	-0.666	0.25	-0.033	-0.333	-0.333	-0.333	-0.333	-0.333
a(cm/ms ²)	0	0	0.022	-0.416	0.222	0	0	0	0

t(ms)	48	51	52.5	54	55.5	57	60	64
x(mm)	-4	-5	-6	-7	-6	-5	-4	-3
v(cm/ms)	-0.25	-0.333	-0.666	-0.666	-0.666	0.666	0.333	0.25
a(cm/ms ²)	0.020	-0.027	-0.022	0	0	0.888	-0.111	-0.020

圖二十：水波上下振動加速度與時間的關係圖(第二作者製表)



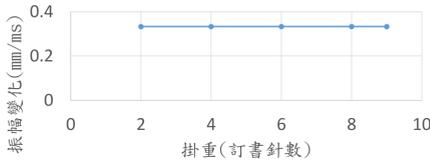
結果：在接近波峰的地方，有最大的向下加速度，在波谷的地方，有最大上加速度。

五、測量波浪經過時，銅線與波前垂直時，振幅變化與最大承載量的關係

(一)數據如下表七，圖形如圖二十三所示。

掛重(訂書針數)	2	4	6	8	9
振幅變化速率(mm/ms)	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33

圖二十三：波前與銅線垂直，掛重與振幅變化關係圖(第3作者繪製)



結果：

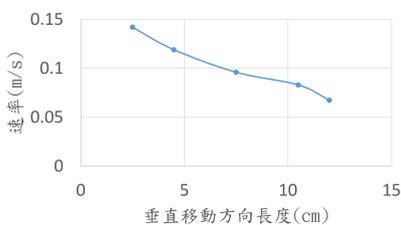
- 當銅線擺放方向與波前方向垂直時，波峰的前端抬升銅線時，銅線後方會下陷，此時前方的表面張力要將銅線往上抬升，水面需凹陷的更深才有足夠的向上推力，後方的銅線要撐住銅線不讓它過度下陷，所以當振幅稍大時，所需的力就超過表面張力，而讓銅線沉沒了。
- 當銅線擺放方向與波前方向垂直時，當波谷的前端到達時，銅線下降，所需的表面張力就減少，而銅線後方會上升，所需的表面張力就減少，所以波谷通過時就不易沉沒，如圖二十四所示。

六、推動鋁線移動，找出移動速率與鋁線長寬的關係

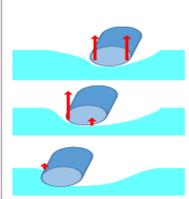
(一)數據如表八，圖形如圖二十五。

垂直長度(cm)	2.5	4.5	7.5	10.5	12
速率(m/s)	0.142	0.119	0.096	0.083	0.0674

圖二十五：鋁條垂直運動方向長度與最大速率關係圖(第2作者繪製)



圖二十六：鋁條前進方向與鋁條垂直時，表面張力垂直分力示意圖(第二作者繪製)



結果：如圖二十六，鋁條前進方向與鋁條垂直時，當速率慢的時候，鋁條兩側水面扭曲的速率跟得上鋁條的移動速率，所以表面張力垂直分力維持一定，如圖的紅色箭頭所示。當速率漸增鋁條前方的水被擠壓得更扭曲表面張力的垂直分力也增加，但鋁條後方的水，扭曲的速率跟不上，所以角度漸平，其垂直分力也變小，但還能撐住。等到速率更快，鋁條前方的水來不及扭曲就被鋁條碰上了，這時前方的表面張力垂直分力就變得很小，而後方的水來不及扭曲鋁條就過去了，讓鋁條後方的水瞬間成水平，表面張力的垂直分力也不見了，失去支撐的鋁條也因此沉沒。

伍、討論

- 用下壓式的方式來測量表面張力，必須要考慮物體底部與水面間的壓力差，因為上壓力對物體底部有作用力，若不考慮，則會高估了表面張力。這是與上拉式方式測量表面張力不同的地方。
- 一開始原本想用金屬線來做實驗，但每條金屬線都是捲曲的，必須要壓直才不會有誤差，一開始用老虎鉗來壓，發現不好，最後用木板把金屬線壓在桌面來回摩擦，發現效果不錯。但是把金屬線彎成矩形時，就會有一邊翹起的不平衡情況，所以用壓克力板，配合雷射切割，可以得到精確的結果。
- 起波器一開始打的水波振幅偏小，於是用壓克力斜坡來增加振幅，但還是不夠，於是讓起波器不停打出波浪，讓水波在邊界來回反射，如此可以得到最大的振幅，只要在金屬線落水的那一刻，在arduino的序列埠視窗，按一下暫停，就可以記錄到當時的時間變化，如此可以省下很多的時間。
- 測量水波的加速度，原本想要利用慢動作攝影再回播來測量，發現到振幅極小，難以辨識。於是利用排針，將其傾斜擺放，使第一根到第十一根的垂直距離為1公分，就可以得知兩根排針的垂直距離為1mm。但是金屬裝置不能在水中放太久，用完就要晾乾，以免受潮而影響。
- 測量鋁條沉沒前的最大速率，原本是用手機拍攝，回放後去找影片的時間即距離，發現影像不夠清晰，於是用ARDUINO和紅外線發射接收模組來測量時間，並用LED直接顯示瞬時速率，既快又方便。
- 由於水溫會影響到表面張力，所以同一組的實驗，必須在同一個時間內做完，才不會影響實驗的準確度。

陸、結論

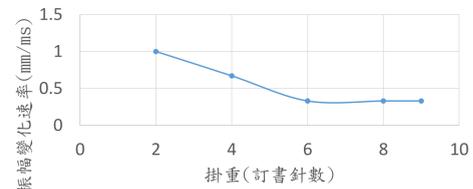
- 用不同寬度測量表面張力，理論上來說，表面張力應該一定。但實測卻是隨著寬度增加而增加，但寬度愈大，增加的幅度就愈小。分析其原因，應該是較細的情況，稍微不平衡，就會沉沒，所以測出的表面張力較小。在寬度較寬的情況，稍微的震動就容易恢復平衡，所以測出的表面張力較準。
- 兩根線的間距在水面上時，間距增加時，承載量也愈大，當超過5mm的時候，就不受影響，這距離恰好是水面形成凹線的距離。由圖二十九可以知道，間距較小時，內側的接觸角較小，表面張力的垂直分力也較小，所以以承載量也較小。間距超過1公分，內外側的接觸角相同，承載量也達到最大。
- 當波前與線的方向平行時，銅線的每一段受到的表面張力都相同，沒有落差，所以隨著波浪起伏，不易落下。當波浪愈大時，加速度愈大，所需的力也愈大，當表面張力不足以提供銅線產生與水波相同的加速度時，銅線就會落下。由圖三十可知，在波谷的時候，有最大的向上加速度，若是表面張力不夠，就容易在波谷的時候沉沒，如圖三十所示。
- 當波前與線的方向垂直時，銅線的前端遇到波浪的波峰來時，其受到的表面張力垂直分力必須增加，但後端下陷使水面凹陷，表面張力的垂直分力也會增加，如果增加的比例不夠時，就容易下沉。若是波谷襲來時，讓前端下沉，所需的表面張力減小，後短上翹，表面張力也減小，所以不容易沉沒。由圖三十一可以看出，垂直方向從波峰開始沉沒。
- 推動銅線移動時，銅線與前進方向垂直的部分，要讓前方的水凹陷後，才能漂在水上，繼續前進。但是太快時，前端的部分與水撞擊黏在一起，表面張力垂直分力幾乎消失，而後端因為移動太快，水來不及扭曲，呈現瞬間水平狀態，無法提供垂直分力，所以當銅線移動比水移動速率還快時，就會沉沒。但與移動方向平行的部分，只有前後兩端的表面張力有影響，兩側的部分不受影響，所以鋁條折成的矩形，與前進方向垂直的部分愈少，最大速率愈快。
- 利用易開罐鋁片來做表面張力船的底部構造，根據實驗結果是間隔1公分時，表面張力的垂直分力最大，所在5公分見方的鋁片，割出間隔1公分的柵狀構造，可以增加表面張力作用的長度，但因為鋁片不平整，反而無法發揮作用。改用棋盤格的方式，在內部切出不相連的1公分正方形，計可以維持平衡，又有最大的周長，所以有最好的效果。

四、測量波浪經過時，銅線與波前平行時，振幅變化與最大承載量的關係

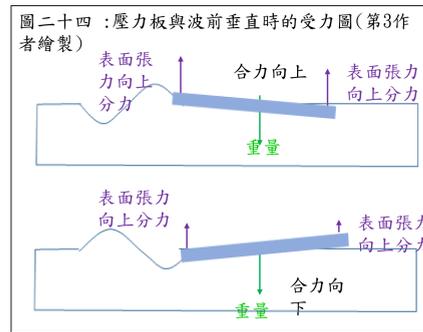
(一)數據如表六，圖形如圖二十二。

掛重(訂書針數)	2	4	6	8	9
振幅變化速率(mm/ms)	1.0	0.67	0.33	0.33	0.33

圖二十二：波浪經過時，銅線與波前平行時，掛重與振幅變化關係(第二作者製表)



結果：振幅變化小於0.4mm/ms時，掛的訂書針數超過6個以上，都是波一過就沉下去。只有減少掛針數，才能在波較大時仍能隨之起伏。



七、製作表面張力船底結構

(一)不同結構前進最大速率如表九，圖形如圖二十七。

結構	柵狀	格狀	鋁片狀
速率(m/s)	0.036	0.13	0.047

圖二十七：不同結構鋁片與最大速率關係圖(第二作者繪製)



結果：原本以為柵狀接觸到水的周長較鋁片大，其所受的表面張力的向上分力和也較大，但實驗結果卻相反。仔細觀察其運動過程，發現柵狀的鋁條容易上下起伏，一旦高速運動，稍微出現不平衡的情況，就會插入水中而沉沒。而中間挖洞的格狀鋁片，就沒有柵狀的問題，可以有著接觸水面的大周長，有有高速運動的穩定度，所以最大速率是三者之冠。

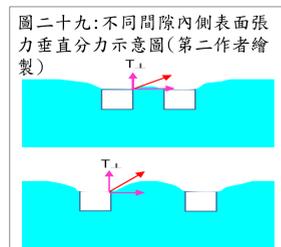
(二)不同結構浮在波浪中的時間如表十及圖二十八。

結構	柵狀	格狀	鋁片狀
沉沒時間(秒)	15	17	22

圖二十八：不同結構鋁片與最大速率關係圖(第二作者繪製)



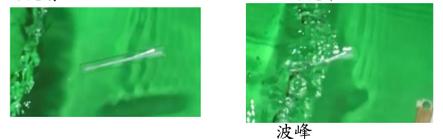
結果：柵狀與片狀的沉沒時間差不多，並沒有因為柵狀的周長較長，而支撐較久的時間。這也是因為波通過時，鋁片都會有一個方向與波前垂直，造成上方要升高，後方卻不讓下降的情況而沉沒。而格狀的鋁片周長較長，又有較柵狀好的平衡度，所以支撐的時間最久。



圖三十：波前與線平行時，沉沒前後的比較圖(第一作者拍攝)



圖三十一：波前與線垂直時，沉沒前後的比較圖(第一作者拍攝)



柒、參考資料

- 楊明豐，Arduino最佳入門與應用-打造互動設計輕鬆學，基峰資訊股份有限公司2014年5月初版二刷