

中華民國第 64 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國小組 物理科

第一名

080105

粼粼波光下的矽光子波導的傳輸奧秘

學校名稱： 國立臺南大學附設實驗國民小學

作者： 小六 曾栩彤 小六 黃品綸 小六 蘇上絢 小六 游騰榮 小六 陳諭喬	指導老師： 林貞吟
---	------------------

關鍵詞： 小振幅淺水波、波導

得獎感言

從新聞裡接觸「矽光子」是台灣未來重點產業，進而學習到「矽光子」是將電信號轉成光信號在波導上傳輸；因光可視是一種波動現象，便嘗試能否從水波來了解波導原理。

在實驗自製水槽中，針對小振幅淺水波的水波導現象與實驗變因進行探討；確認了參考文獻水波經過單通道傳播一段距離後，水波在約30cm後衰減，而水波導上的水波仍持續傳遞更遠距離的現象。進而以水深、頻率、壓克力條高度為變因實驗。結果顯示，須同時滿足波速比 ≤ 0.65 以及水波半波長接近波導寬度才能實現水波導現象。

接著嘗試模擬光波導的不同結構設計下，展開異型水波導實驗，結果發現水波導有缺陷時，水波依然可以維持波形在水波導上傳遞。

最後我們成功展示利用小振幅淺水波在水波導上的傳輸，可以學習到矽光波導的傳輸行為。

整個實驗從我們六上開始展開、蒐集資料，到設計實驗器材，訂製器材，利用寒假時反覆實驗，產生研究報告。

由於一開始水波導水域原本是由數個一公分高的壓克力條堆疊而產生，在切口處有需多細微雜波，讓我們懷疑是否因堆疊造成波的干擾，所以在臺南市賽後再訂製一體成型的壓克力條重新進行實驗。過程中士揚老師建議利用科學的方式來進行差異比較，所以在同學開心的迎接畢業時，我們深陷全是英文的ImageJ影像處理軟體噩夢中，幸好團隊五人分工合作-搜尋網路使用者教學、翻譯英文..，終於運用灰階化的Profile來比對，而成功驗證我們的假想。

期間特別感謝莊秋蘭老師，在市賽後對於我們執行實驗的態度與嚴謹性給予寶貴指導，明白科研學素養能力的重要性；了解這不只是實驗而已，更重要的是我們面對問題與困難，如何理解、分析、學習新知進而解決問題，也讓我們在畢業歡愉的浮躁中沉澱下來重新再出發。

最難忘的是，全國賽期間居然遇上颱風攪局，一夥人被關在飯店裡等待因颱風變動的賽制調整，也讓大家有時間在房間裡反覆修正。

窗外呼嘯的風雨，房內喋喋不休的爭論辯證，爸媽們頂著風雨源源不斷地投餵糧食；林士揚老師、林貞吟老師模擬演練；許志達老師的加油打氣，組員爸爸還特地從海外請假回台幫我們打氣..。

最後，謝謝爸爸媽媽們的支持，雖然有時也會厭倦你們的督促，但謝謝您們讓我們可以堅持沒放棄；謝謝南大附小與自然科老師們，包容我們的天馬行空與搗蛋；謝謝臺南市教育局長官及科展團隊老師的支援協助。

我們在這個過程中收穫很多，以後也會在研究科學的路途上不斷努力的，這次的經驗將是我們一生美好的回憶，這份榮耀也獻給在天上的謝宗憲老師！

（老師，我們是不是很棒！）



市賽的經驗後，我們把海報貼的沒有皺摺，看著平順的海報超有成就的



這是我們最好的畢業禮物



少一個?怎麼可能，還有一個在新加坡連線著。一個都不能少!

摘要

新聞報導「矽光子」是台灣未來重點產業，經老師解釋，我們學習到「矽光子」是將電信號轉成光信號在波導上傳輸。光可看是一種波動現象，我們嘗試能否從水波來了解波導原理？在實驗自製水槽中，針對小振幅淺水波的水波導現象與實驗變因進行探討。經多次測試：水波經過單通道傳播一段距離後，水波振幅在約 30cm 後衰減，而波導上傳播的水波可延波導傳遞更遠距離(>60cm)。

進一步以水深、頻率、壓克力條高度為變因實驗。結果顯示，須同時滿足波速比 ≤ 0.65 以及起振水波半波長接近波導寬度才能實現水波導現象。

在異型波導實驗中，證明水波導有缺陷時，水波依然可以維持波形在水波導上傳遞。故展示利用小振幅淺水波在水波導上的傳輸，可以學習到矽光波導的傳輸行為。

壹、 研究動機

自 2022 年底，由於 AI 產業的蓬勃發展，帶動了電腦伺服器與伺服器之間高速資料傳輸的需求，而很多新聞提及因為資料高速傳輸的需求，矽光子有機會成為未來台灣的重點產業。對於矽光子這酷炫的科技名詞我們感到非常好奇，因此請教了老師，學習到矽光子將傳統只有電信號傳輸的技術，擴展到使用光訊號在「光波導」上傳輸，以增加信號的傳輸速率與傳輸量。但平常看到傳統手電筒發出的光能照射的距離很短，更何況老師說光波導還能讓光轉彎、傳輸更遠，讓我們對所謂的「波導」產生了很大的好奇心。遺憾的是光波導結構要採用半導體製造的流程，我們沒辦法輕易複製與使用；但老師提示我們光可以視作一種波動，也許可以嘗試利用水波去模擬比較，這讓我們對進行水波導的實驗產生了很大的興趣。

資料索引過程中，我們發現有科學家利用小振幅淺水波來執行水波導的實驗，所以參考該文獻(Ref. *Fabián Sepúlveda-Soto, Observation of broad-band water waveguiding in shallow water: a revival*)^[1]的設計來驗證我們的假想，後續將此文獻簡稱之**實驗參考文獻**^[1]。

在討論後了解光能沿著光波導傳輸甚至改變方向的原因，在於光在光波導內的傳遞速度比在波導外的傳遞速度較慢，因此相對能維持波動能量的條件下，使用折射率大的波導材質，光將會沿著人們設計的光波導傳輸。在自然課與網路平台 TRY 科學^[2]中學習到光會發生折射，舉例來說，光從折射率小的介質（例如：空氣）入射到折射率大的介質（例如：玻璃）而產生折射；這是因為光在折射率大的介質裡傳播速度相對慢。那麼水波導的特性是否也是類似呢？

科學 Online 波浪^[3]中說明，當水波在不同深淺的水槽裡傳遞時，確實有不同的傳播速度；而在**實驗參考文獻**^[1]中，也驗證了小振幅淺水波在不同水深條件下，在透明玻璃條上展現出**波導現象**：也就是小振幅淺水波在水深較淺的水波傳遞速度會比較深區域的水波傳遞速度慢。因此我們推想，**利用水波導實驗應該也可以觀察並模擬到類似「矽光波導」的波**

傳遞現象。

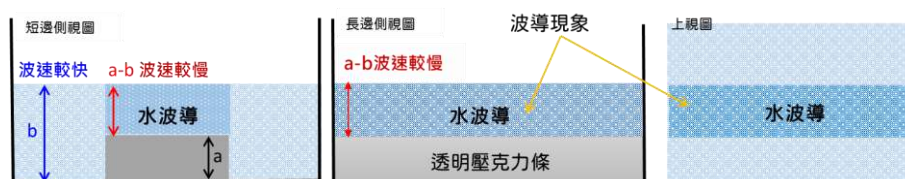


圖 1：水波導示意圖(學生自繪)

我們將探討水波導傳輸的影響因子，並找出本實驗小振幅淺水波波導現象的最佳條件；且將進一步延伸測試異型波導：斷裂、彎折下，觀察水波導的傳遞行為，以驗證是否與矽光子光波導結構具有一樣的波傳遞特性。

貳、 研究目的

一、 文獻探討

(一). 波的傳播

我們查詢 [均一教育平台](#)：[波的傳播、波動](#)^[4]，知道波是能量在空間逐點傳遞時形成的運動，同時水波的傳遞方式可以藉由水槽試驗來觀察。傳播性質區分兩種，一種不需要介質的電磁波(例如：光波)，另一種則需要介質的力學波(例如：水波、聲波)。而波傳播過程，只有單純的能量前進，介質則在原地振動，不會隨波前進。同時介質的運動方向與波的前進方向的不同，將會產生不同型態的波，由下圖可以簡易區別(見圖 2)與波的各部位名稱(見圖 3)。

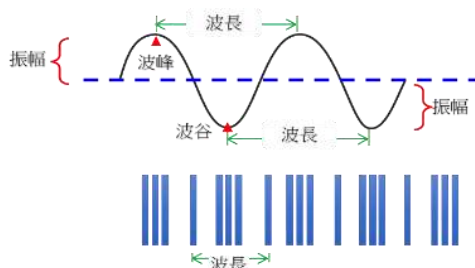


圖 2：介質振動方向的波(學生自繪)

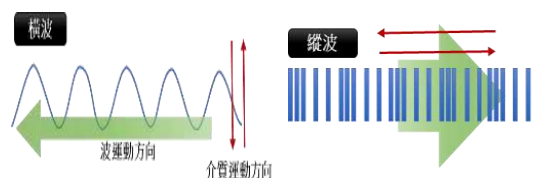


圖 3：波的各部名稱(學生自繪)

所以當給予介質不同的施力下，用力愈大，振動起伏愈大，也就是振幅越大。同樣的，在相同施力下，如果振動的快慢不同，會發現振動越快時，波的數目越多，波紋也會越密集，而彼此的關係為

- 波長(λ)：波峰到波峰或波谷到波谷的距離
- 振幅：平衡線到波峰(或波谷)的距離；就是振動一次將會產生一個波；而一個波在振動中，介質振動將有 2 個振幅，而振幅代表能量大小。
- 週期(T)：振動一次所需的時間(單位：秒)
- 頻率(f)：平均每一秒鐘內所振動的次數(單位：Hz)
- 波速(v)：波動每一秒鐘所移動的距離

關係式為：

$$\text{波速}(v) = \frac{\text{波長}(\lambda)}{\text{週期}(T)} = \text{頻率}(f) \times \text{波長}(\lambda)$$

所以當波速相同不變時

- 波長增加時，代表波數減少，於是波動減緩，週期增長，頻率減少。
- 波長加倍時，波數將減半，週期會加倍，頻率會減半。
- 振動愈快，能使頻率愈大，於是週期愈小，波變得愈密，波長減小。

(二).水波浪

水波浪也是波的運動，波形前進時，能量沿著運動方向傳遞過去，水分子僅在原地作運動，而非本身介質傳遞。在製波的過程中，我們了解波浪的分類主要有以下幾種方法，因為波長大小與水深、重力間的關係，將會影響到波浪的傳輸速度、運動方式，從**科學 Online 波浪介紹**^[3]中我們得知：

依照波長與水深的關係，如：

深水波— 水深大於波長二分之一 ($\lambda/2$) 深時

淺水波— 水深小於二十分之一波長 ($\lambda/20$) 淺時

由**實驗參考文獻**^[1]可知，如果依其設計類似尺寸的水槽、水深、小振幅淺水波浪振動頻率來進行水波實驗時，水波的波速可以沿用淺水波波速公式：

$$\text{水波波速}^2 = \text{水波波速} \times \text{水波波速} = \text{重力加速度} \times \text{水深}$$

其中的重力加速度代表物體 (在我們的實驗裡指的是水波) 承受地心引力導致每秒會增加往地面方向垂落的速度，在地面上重力加速度為一個固定數值，等於 9.8 (公尺/秒)/秒。因此只要我們知道水深，就可以估算小振幅淺水波浪的波速——使用計算機對重力加速度和水深的乘積開根號就可得。

(三).歷屆科展關於水波導之探討

關鍵字水波搜尋時，發現有近 42 件與水波相關研究，但更進一步以水波+

波導搜尋，便無所獲。以關鍵字**水波**中有七件科展科展作品與水波相關，其中有兩件與本實驗較相關：「水波全像法」^[5]為探討如何快速建立水波波紋，其他的探討為水波之介質、溫度、粘度、水深、槽底材質..等對於波速的影響，本實驗的固定變因下：自來水、常溫、槽底材質下，且水深<4cm，所以上述之研究未在本次實驗中有其延伸探討性。在「水波全像法」^[5]中，利用程式計算以模擬平面參考波通過水波全像片，並於各個點波源相互干涉結果，再將影像重建出來，但是使用>30Hz的頻率，與我們實驗需求不符，且運用的程式設計也超出我們目前的能力。

在「洞感水波-二維週期性水深結構對於水波傳遞的影響」^[6]中利用壓克力洞洞板模擬光子能隙，與我們相同的是利用水波來模擬光波，來探討是否可以模擬光子晶體，但可惜是，其結論對於利用壓克力洞洞板(水深差異)是否有光子能隙的現象仍有待驗證。故希望可以透過我們的實驗，來成功模擬水波導可以展示光波導的特性。

表 1：歷年科展水波導實驗索引(資料來源：國立臺灣科學教育館歷屆優勝作品索引系統)

年度	組別	學校	題目	關鍵字		相關性
				水波	波導	0~5
2017年	物理與天文學	高雄市立高雄女子高級中學	水波虛擬干涉全像法與光聲成像	同55屆 水波全像法		
第20屆	物理科	省立板橋高級中學	水波槽的改良及光波干涉實驗改進	√	×	1
第20屆	物理科	嘉義縣嘉義國民中學	波的研究	√	×	1
第28屆	物理科	台北縣立板橋國民中學	水波波速測量的改進與變因的探討	√	×	2
第32屆	物理科	桃園縣立山腳國民中學	液體波速的測量及探討	√	×	2
第53屆	地球科學科	國立臺南第一高級中學	風過水無痕，水過沙有痕	√	×	1
第55屆	物理科	高雄市立高雄高級中學	水波全像法	√	×	3
第56屆	物理與天文學科	國立武陵高級中學	「洞」感水波一二維週期性水深結構對於水波傳遞的影響	√	×	3

(四). 矽光波導

當波是能量的傳遞、行進，所以如何減少波的能量損失，波經介質由 A 點完整傳送到 B 點便是波導的目的，所以我們可將波導視作：**將波以相同行進方向，減少損失、快速的長距離傳遞。**

如果把光線當成是一直線來研究它(幾何光學)，在學校我們已經學過光的反射、光的折射等現象。因此，如果把光用在通訊上，除了速度快之外，還可以善用光寬廣的波長範圍來傳遞訊號。光纖通訊就是利用這樣的概念而發明的，正是因為光訊號的波長範圍(也就是商業上所稱的頻寬)比傳統電訊號高出許多而

且光訊號之間不會彼此干擾，光纖已逐步取代傳統銅軸電纜。

由光線來解釋光纖或光波導原理，是因為光纖或光波導內部材料的折射率大於其外部材料的折射率，使得光線在光纖或光波導裡面傳輸時都碰到全反射而不會將光能量浪費在外部。但是這樣以光線(幾何光學)的說明我們不容易理解。請教老師並搜尋網路資訊之後，了解

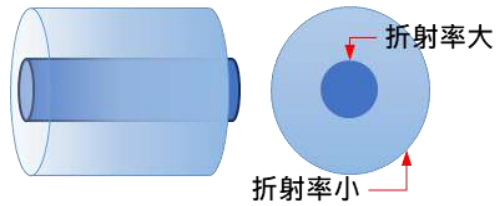


圖 4：光纖結構示意圖(學生自繪)

到如果用波來看待光(波動光學)，比較能清楚解釋，因為光纖或是光波導內部的折射率較大，所以光在內部波動的速度略小於外部，因為波動的特性會維持光能量在內部傳輸，形成所謂的「波導」效果。因此知道：如果光在光纖或是光波導內部與外部的波動速度差異越大(內部比外部波動速度越慢)，那麼就能實現更好的光導效果。正因如此，不論光纖或是其他處理光訊號的元件(光波導元件)，其材料有：「氧化矽」與「矽」兩種，兩者特性：

- 氧化矽— 折射率約為 1.5，為石英或玻璃為主要成分，外觀透明。
- 矽晶圓— 折射率約為 3.5，外觀不透明。

除了上面討論使用光訊號的頻寬很寬以及光傳播速度很快之外，矽光子可以縮小元件的尺寸，這是因為光波導材料的結構尺寸大約都在所使用光波長的一半大小^{[7][8]}，從「波動光學」的原理來說明，也就是一個光波的波長才能「感受到」這樣半波長的尺寸，使得利用其它波動光學原理製作的光波導器件，例如：光的干涉，才能達到它的效果。



圖 5：矽光子光元件立體結構折射率示意圖(學生自繪)

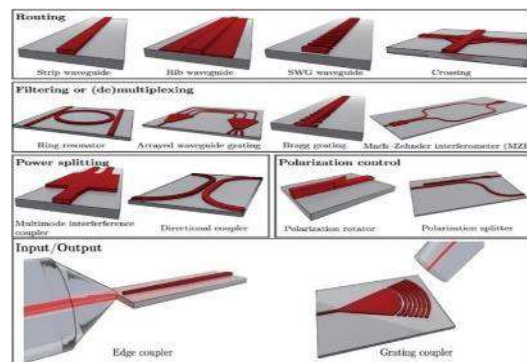

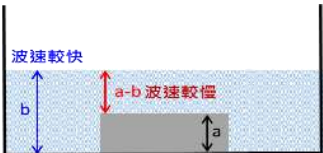


圖 6：各式矽光子光元件立體結構示意圖(Ref. Wei Shi^[9])

在科學月刊:光波操縱師—神奇的光子晶體^[10]中提到，經由光晶體的缺陷形成「共振腔 (resonant cavity)」，便可改善波導的轉彎角度過大，全反射條件被破壞的情況，這讓我們很驚訝，原來波導的缺陷不是缺陷，由圖 5 發現矽光子光波導結構的多樣性。在上面這些矽光子波導的示意圖中，暗紅色的結構通常被稱作光波導的「核」，是折射率較高的材料，因為兩種材料折射率的差異，使得光在「核」中傳播速度較慢，能維持光能量傳輸而不致衰減。

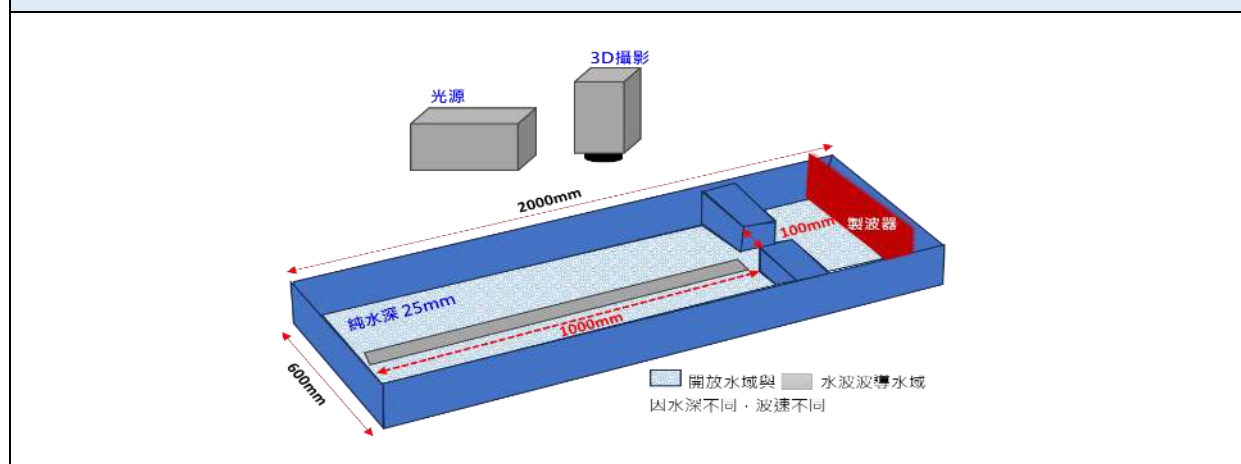
總結實驗參考文件與光波導設計原理，其差異如下：

表 2：差異比較

項目	光波導	水波導
傳輸方式	將光藉由不同折射率下，侷限在折射率大的地方進行全反射傳遞	藉由不同水深得不同波速，讓能量在波速較慢的水域持續傳遞
波導結構多樣性	缺陷形成共振腔，便可改善波導的轉彎角度過大，避免全反射條件被破壞，可任意、大幅改變光波傳輸路徑。	模擬缺陷，確認水波導是否可以傳遞
波導結構 (學生自繪)		

實驗參考文獻^[1]機構設計

Fabián Sepúlveda-Soto, Observation of broad-band water waveguiding in shallow water: a revival, Figure 1)



二、研究項目

(一).有無水波導下的水波傳遞差異

(二).探討小振幅淺水波波導影響因子並取得最佳水波導條件

(三).探討光波導結構設計是否可在水波導實現

參、 研究設備與器材

表 3：研究設備與器材

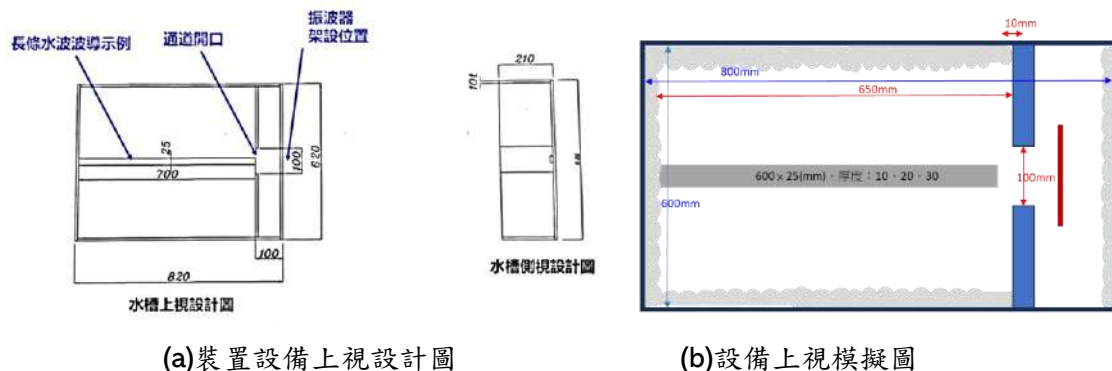
名稱	數量	規格	名稱	數量	規格
震波器	1 台	頻率：1Hz 到 10Hz	反射鏡子	1 面	長寬(mm)：845 × 600
壓克力水槽	1 個	外觀尺寸 820x620 x210(mm)	投影毛玻璃	1 片	長寬{mm}：700 × 600
		內壁尺寸 800x600x200(mm)	吸音棉	4 片	緊密置放在水槽四邊內壁 厚度(mm)：30、50
名稱	數量	規格			
壓克力條	數組	長條形標準尺寸{mm}：660 × 25，厚度：10、20、30 異型尺寸：厚度 20mm			
研究材料：	常溫自來水				
輔助器材：	角鋼支架、照相機、鹵素燈、尺、量水塑膠杯。				

肆、 過程或方法

一、 實驗裝置設計

(一) 壓克力水槽設計

由於實驗參考文獻^[1]水槽長達 200x60(cm)，為了減輕水槽的重量，並且在觀察水波投影能有清晰的影像，我們採用 10mm 厚的透明壓克力板製作小波浪水槽。因為壓克力厚度為 10mm，因此水槽外觀為：



(a)裝置設備上視設計圖

(b)設備上視模擬圖

圖 7：壓克力水槽設計圖(a.老師繪圖；b.學生自繪)

水槽外尺寸：820mm × 620mm × 210mm。如實驗參考文獻^[1]所展示，在距離架設振波器的位置 30mm 處，並使用壓克力擋板架設了一道長寬 100x10(mm)的通道。實驗中要進行測試的壓克力條，則置放在通道出口並緊靠(但沒有固定)在壓克力水槽底板，上圖(a)中以 600mm × 25mm 的壓克力與設備上視圖，圖(b)完整尺寸圖。因我們無法使用 3D 攝影機觀察水波，所以我們參考水槽實驗^[11]的設計，以鏡面反射至毛玻璃來觀察水波的傳遞。

表 4：水波槽裝置設計差異

比較項次	實驗參考文獻	水波槽試驗	本實驗裝置
尺寸(cm)	H200xW60xH20	H46xW46xH1~3.5(約略)	H80xW60xH20
水波觀察	3D輪廓攝影	反射	反射
燈源	未揭露	鹵素燈12V/75W	鹵素燈 12V/75W
頻率(Hz)	0~5	1~50	0~10
介質	純水	自來水	自來水

在**實驗參考文獻^[1]**中說明，水波在無水波導下 40cm 後，其能量便會散失，在考量角架荷重與降低晃動，將實驗水槽設計長度為 80cm；實驗區域長度為 65cm。

依**實驗參考文獻^[1]**分析，這樣規格的水波實驗可依淺水波理論來估算小振幅淺水波的波速。

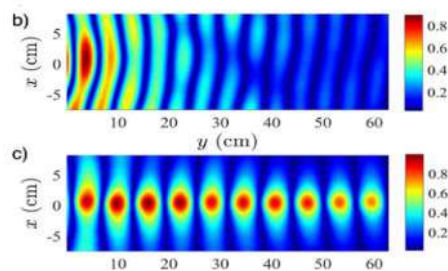
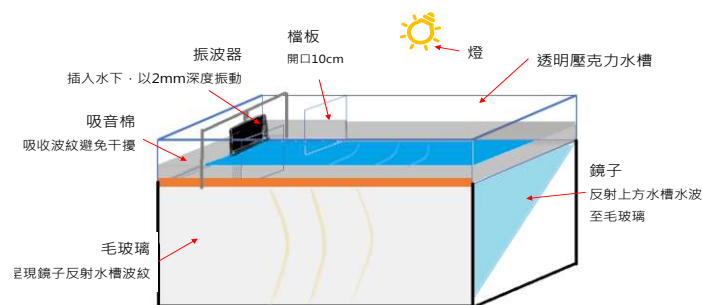


圖 8：實驗參考文件

(Ref. Observation of broad-band water waveguiding in shallow water: a revival^[1], Figure 1)

(二) 實驗設備架設



(a) 實驗裝置示意圖

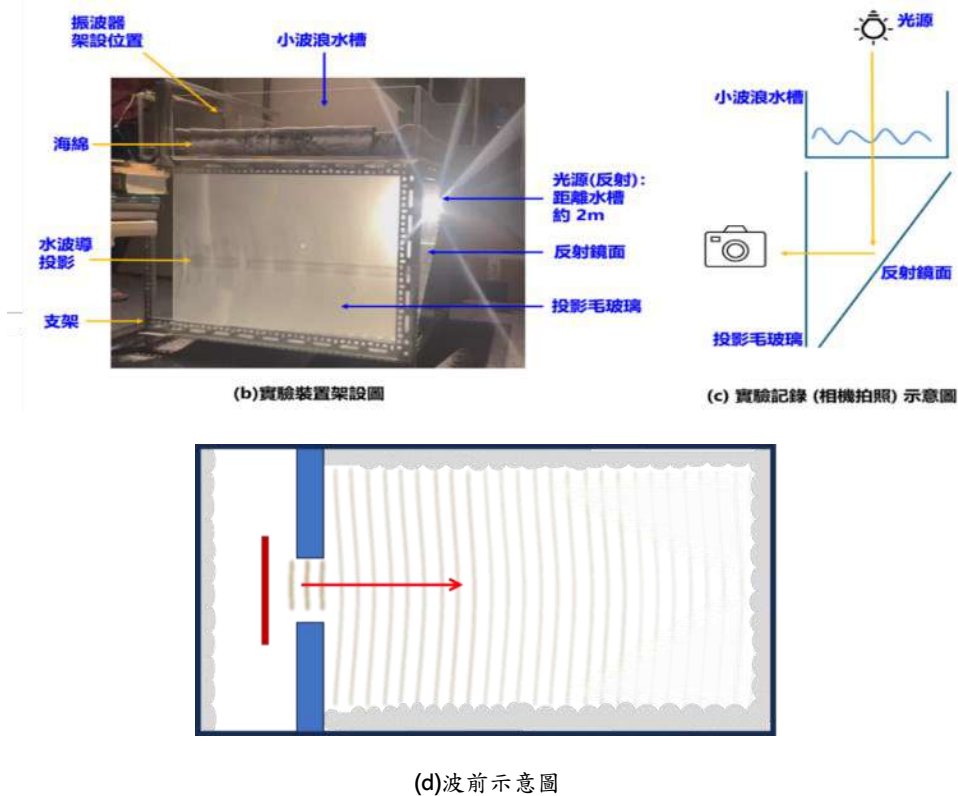
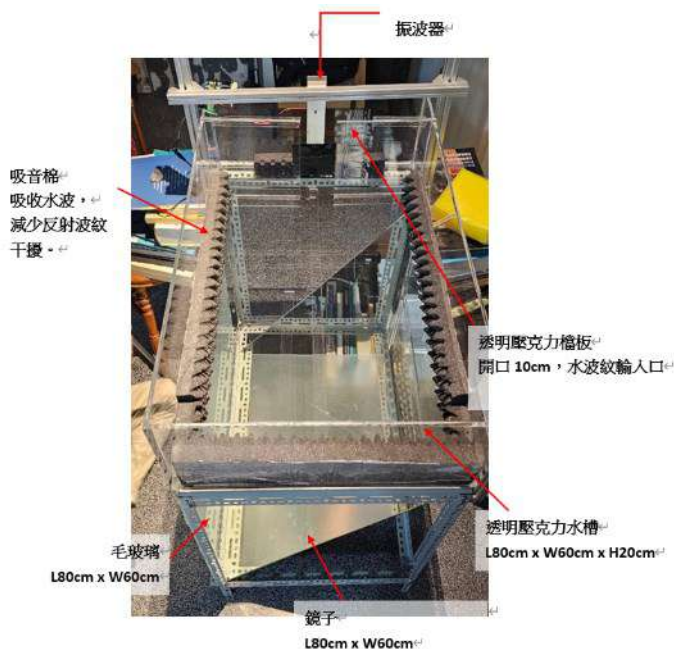


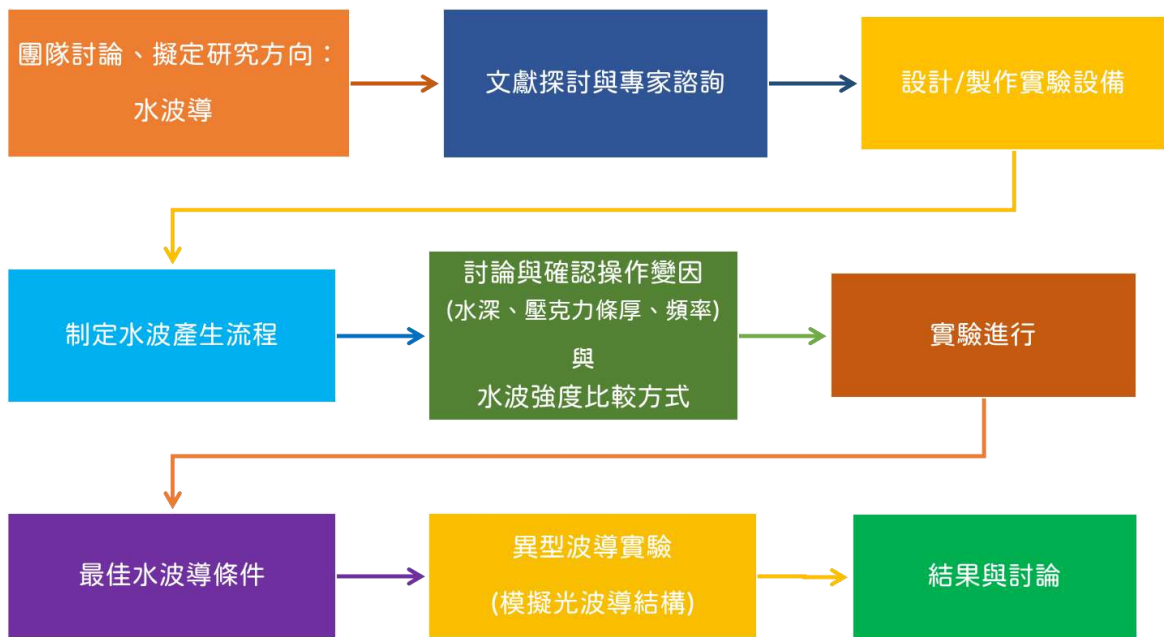
圖 9：(a)實驗裝置示意圖，(b)實驗裝置架設圖，(c)實驗記錄示意圖，和(d)波前示意圖(學生自拍/自繪)

(a) 實驗裝置示意圖、(b)架設圖以、(c)實驗記錄方式的示意圖與(d)波前示意圖如上圖所示。水槽的內壁都有置放海綿以減少水波反射造成干擾。以上圖方位說明：在壓克力水槽左壁，有一個由馬達驅動的振波器，可起振 2mm 小振幅波浪，頻率為 1Hz 到 10Hz。如裝置設計圖上的說明，距離振波器 30mm 處有一個寬 100mm 的通道。當在沒有置放壓克力條的條件下，水波離開通道並進入開放式水域時，在不同的起振器頻率與不同水深條件之下，小振幅波會發生不同衰減，而我們的實驗目標是想學習如果有壓克力條置放在通道出口，研究同時間下水槽中的水深差異對水波的傳遞行為是否有影響。



左圖- 圖 10：實驗設備上視實體圖(學生自拍)

二、 實驗流程



三、 實驗方法與內容

(一). 實驗方法

實驗方法	說明
<p>壓克力水槽黏貼吸音棉</p> <p>↓</p> <p>水槽加水，確認水深</p> <p>↓</p> <p>添加壓克力波導</p> <p>↓</p> <p>放置振波器</p> <p>↓</p> <p>打開上方燈</p> <p>↓</p> <p>開啟振波器，試驗不同頻率</p> <p>↓</p> <p>確認毛玻璃水波紋</p> <p>↓</p> <p>拍照</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 為避免水波於水槽四周反彈，在槽體四周黏貼吸音棉。 2. 安裝檔板，以製作水波中間通道開口 10cm。 3. 依據實驗計畫，添加室溫自來水至實驗所需水深(mm)：25、30、35 與 40 4. 依據實驗要求確認是否需要放置壓克力條，厚度為(mm)：10、20、30 5. 將製造水波振動片插入水面下 6. 開啟水槽上方燈源，確認水槽波紋有反射至毛玻璃上 7. 打開振波器，頻率 1.5、2.5、3、4、5、7、10(Hz)。 8. 確認毛玻璃上的水波紋，如有放置壓克力條，確認波導上的波紋是否有聚集量的較亮波紋。 9. 將毛玻璃上的波紋，拍照下來，供後續討論與比對。

(二). 實驗內容

1. 實驗一：有無水波導下的水波傳遞差異

由實驗參考文獻^[1]中我們知道在有波導與無波導下，其能量的傳遞是有差異的，為確認在本次實驗上是否也有這樣的現象，我們將使用實驗參考文獻^[1]的最佳條件作為實驗組；反之無波導為對照組進行實驗

表 5：有無水波導下的水波傳遞差異

項次	頻率(Hz)	水深(mm)	壓克力條高度(mm)
實驗組(有波導)	3	25	10
對照組(無波導)	3	25	-

2. 實驗二：探討小振幅淺水波之水波導影響因子並取得最佳水波導條件

依據討論結果我們決定以水深、壓克力條高度、起震的頻率作為我們的操作變因，並找出本實驗最佳的操作條件，也就是水波在壓克力條上能量聚集最顯著的條件。

(1). 確認小振幅淺水波的條件是否符合

在執行實驗前，須確認其條件是否符合小振幅淺水波，在水深 2.5cm 的實驗條件中，我們沒進行壓克力條厚 20mm 實驗，因當壓克力條厚為 20mm，壓克力條離水面為 5mm，且實驗採用起振器的水波振幅約為 2mm，太接近壓克力條離水面的水深 5mm，不能達到小振幅淺水波的條件，因此沒有進行水深 2.5cm/壓克力條厚為 20mm 的實驗。下表計算在水深 2.5cm 時，(水波振幅 / 壓克力條距水面) = 0.40 以紅色字體標註，不符合小振幅淺水波的條件。其它標註藍色字體的實驗條件都符合小振幅淺水波，因此我們可以估算小振幅淺水波的波速。

表 6：確認小振幅淺水波的條件是否符合

水深 (cm)	2.5			3			3.5			4			
壓克力條厚度 (cm)	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	3
壓克力條距離水面深度 (cm)	無波導	1.5	0.5	無波導	2	1	無波導	2.5	1.5	無波導	3	2	1
水波振幅 (cm)	0.2												
水波振幅 / 水槽水深	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05
水波振幅 / 壓克力條距水面	無波導	0.13	0.4	無波導	0.1	0.2	無波導	0.08	0.13	無波導	0.07	0.1	0.2

在水深 2.5cm/壓克力條厚度 2cm 的條件下(黃色標記)，其計算結果如下：

$$\text{水波振幅/水槽水深} = 0.2 \div 2.5 = 0.08$$

$$\text{水波振幅} \div \text{壓克力條距離水面} = 0.2 \div 0.5 = 0.4$$

(2). 尋找最佳條件，下表是我們將展開的試驗條件：

表 7：實驗因子:水深、壓克力條高與頻率暨實驗條件表

水深(mm)		25			30			35			40			
壓克力高(mm)		0	10	20	0	10	20	0	10	20	0	10	20	30
頻 率 Hz	1.5	v	v	-	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v
	2.5	v	v	-	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v
	3	v	v	-	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v
	4	v	v	-	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v
	5	v	v	-	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v
	7	v	v	-	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v
	10	v	v	-	v	v	v	v	v	v	v	v	v	

3. 實驗三：探討光波導結構設計是否可在水波導實現

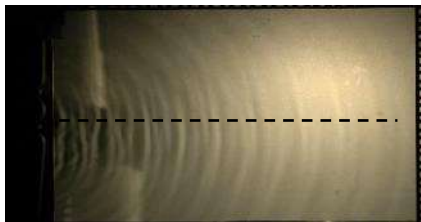
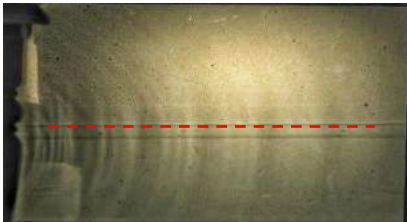
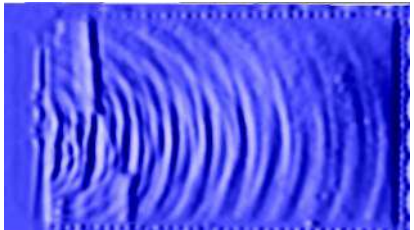
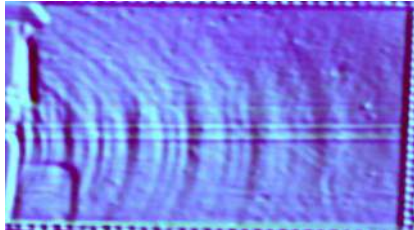
在找出我們實驗裝置條件下的最佳條件後，我們將進一步試驗矽光子光波導的傳遞模式，在水波的傳遞是否有相同的行為。

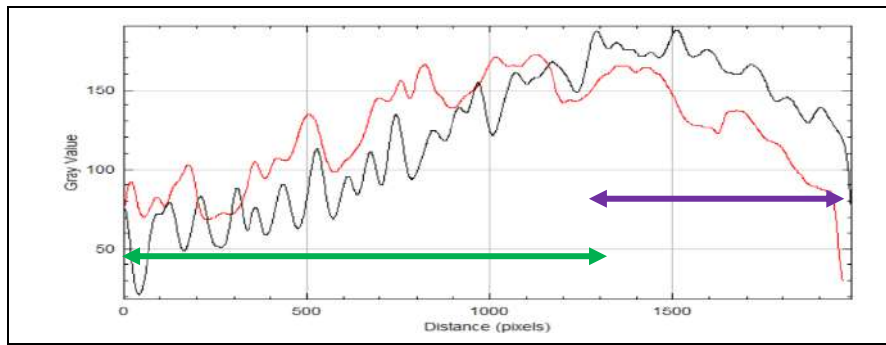
伍、 研究結果

一、 實驗一：有無水波導下的水波傳遞差異

表 8：實驗因子:水深、壓克力條高與頻率暨實驗條件表

項次	頻率(Hz)	水深(mm)	壓克力條高度(mm)
實驗組(有波導)	3	25	10
對照組(無波導)	3	25	-

對照組	實驗組
照片	
	
波前示意圖	
	



註: 紅色為有壓克力條上方水域; 黑色為無壓克力條下, 相同位置的水域

照片: 學生自拍; 波前示意圖: 軟體 ImageJ 繪製

由實驗所拍攝的照片利用 ImageJ-plot profile 來分析, 先將圖片執行以下作業: 灰階化 8bit > 高斯模糊 Gaussian Blur(10) > 對比度 brightness/contrast(自動)>輪廓 plot profile, 便可依不同的灰階值繪出其 Y 軸為水槽從匝道口到另一端的灰階推移狀態。後續本文中各 plot profile 圖, 均為使用軟體 ImageJ 繪製, 不再特別說明。

(一). 有無水波導下的水波傳遞差異實驗小結

從兩者的輪廓中可以觀察, 在波行進的前 2/3 處(綠色), 兩者無顯著的差異, 有壓克力條的水波導水域, 其波形比無壓克力條的較緩, 但到後段 1/3(紫色)時, 可以看到無壓克力條的波有明顯的消散, 但有壓克力條的水波導水域, 雖有少許能量消散, 但波形仍予維持。不過實驗參考文獻^[1]的最佳條件, 在本實驗過程中並未有良好波導的表現。

二、 實驗二: 探討小振幅淺水波波導影響因子並取得最佳水波導條件

(一). 實驗結果:

經過比對所有條件下的結果後(見表 9), 在以下條件, 水波的能量聚集較為顯著, 也就是有較佳的小振幅淺水波波導的效果, 經過 plot profile 比對後, 紅色標記的條件更佳。

- 水深 3cm / 頻率 5Hz / 壓克力條高 2cm
- 水深 3cm / 頻率 7Hz / 壓克力條高 2cm
- 水深 3.5cm / 頻率 5Hz / 壓克力條高 2cm
- 水深 3.5cm / 頻率 7Hz / 壓克力條高 2cm
- 水深 4cm / 頻率 5Hz / 壓克力條高 3cm

- 水深 4cm / 頻率 7 Hz / 壓克力條高 3cm

需要特別強調的是，雖然我們是依**實驗參考文獻^[1]**的尺寸規格設計實驗裝置，但是在**實驗參考文獻^[1]**波導傳播最佳條件是：

- 水深 2.5cm / 頻率 3Hz / 壓克力條高 1cm

這樣的差異我們會在本說明書「伍、討論」中作進一步的探究。

表 9：三因子實驗結果一覽(學生自拍)

水深	2.5cm			3cm			3.5cm			4cm				
	波導數	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	3
頻率 Hz	1.5			-										
	2.5			-										
	3			-										
	4			-										
	5			-										
	7			-										
	10			-										

要特別說明的是，因為我們照相記錄的方式是光源在水槽上方，而投影毛玻璃在下方，因此在照片中亮紋的區間其實是水波紋的波峰，而暗紋的區間為水波紋的波谷，將上表實驗結果中，六組較佳波導效果的照片再放大如下來檢視。

表 10：六組較佳的波導效果(學生自拍)

	水深3cm / 距水面1cm	水深3.5cm / 距水面1.5cm	水深4cm / 距水面1cm
頻率 5 Hz			
頻率 7 Hz			

這六組最佳波導效果的實驗結果有一共同特徵，就是在開放水域(非水波導處)的水波紋傳播到 30cm 遠(大約是照片長度的一半)起，水波振幅就開始衰減。而在開放水域傳播到大約 50cm 遠時，壓克力條外的水波紋幾乎都

已經衰減到不可見。相較之下，壓克力條上的水波紋可以穩定傳播到水槽右側的內壁。

使用頻率 5Hz 進行比對與分析。而沒有選擇採用振波器 7Hz 是因為在表 15 計算半波長比照片實際波長短，代表實際狀況中有我們尚未發現的變因，例如起振出多波長(「諧波」)的水波聚集在一起；除此之外，7Hz 的起振頻率也太靠近 10Hz 起振頻率引起的表面波 (非單純小振幅淺波)，且我們也分別計算水波導與開放水域的對比強度，其結果顯示 5Hz 對比強度大(見表 11)，因此，我們相對保守的採用了 5Hz 頻率進行缺陷波導的實驗，同時在表 12 中，我們以水深 3cm/頻率 5Hz /壓克力條高 2cm 為本實驗最佳條件。

表 11：水深 3cm/頻率 5Hz /壓克力條高 2cm，頻率 5Hz、7Hz 比較(軟體 ImageJ 繪製)

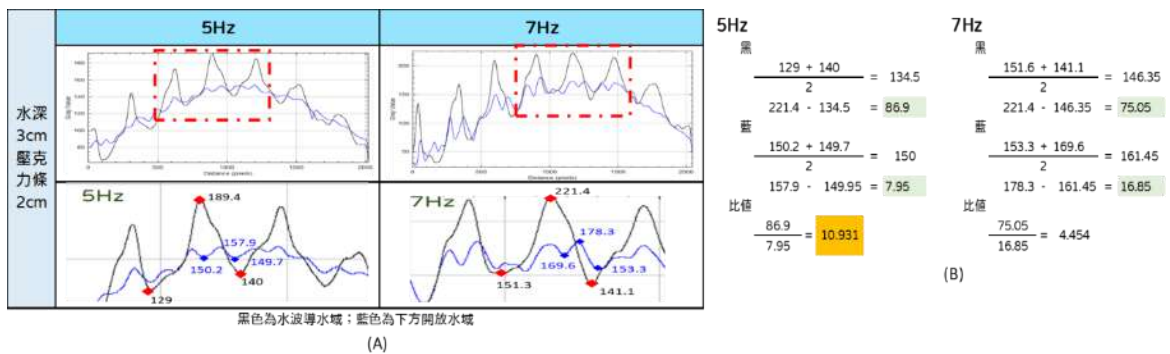
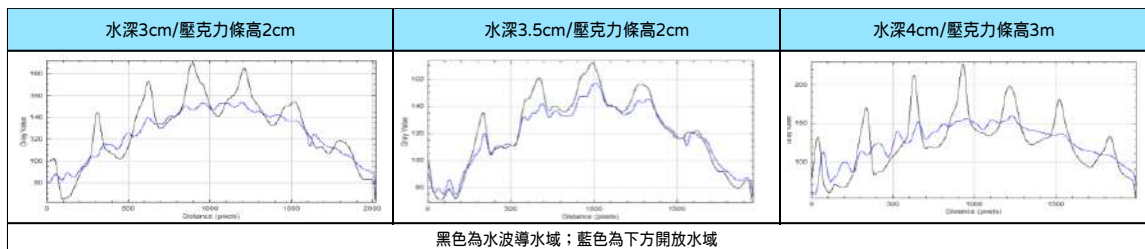


表 12：頻率 5Hz plot profile 比較(沒有壓克力條與有壓克力條的比較)(軟體 ImageJ 繪製)

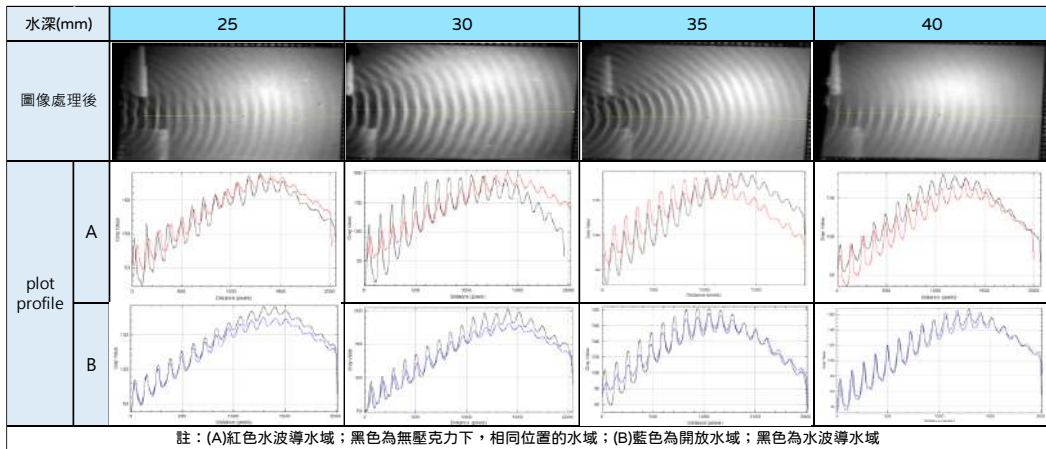


(二). 確認小振幅淺水波的條件是否符合

除了上述在水深 2.5cm 且壓克力條厚為 2cm 時，因為振幅與水深太接近而不符合小振幅淺水波條件之外，我們在實驗中特別注意到在「表 9：三因子實驗結果一覽」裡，振波器頻率 10Hz 的波紋特別密集，而且即使在開放水槽隨著傳播距離增加波紋都不會衰減，我們因此推論振波器頻率 10Hz 的波紋已經是有黏滯力(表面張力)的「表面波」，不是單純的小振幅淺水波。所

以在下面討論中，我們不把 10Hz 列入水波導現象的考慮，在相關表格中仍列為比較組但是以底色灰色來表示不符合小振幅淺水波。

表 13：頻率 10Hz 下各水深與有壓克力條下的狀態(照片：學生自拍；軟體 ImageJ 繪製)



(三). 計算水波在波導上傳播之波速與水波在開放水槽傳播之波速的比值

就如光在光纖或是光波導傳輸的原理一樣，如果要讓水波沿著壓克力條上方水域(後續簡稱水波導)傳播，在水波導傳播的波速相較於水波在開放水槽傳播的波速越慢越好。在本說明書「貳、研究目的」中，「文獻探討'(二)水波浪」一段已自參考文獻整理小振幅淺水波波速的計算方式，因此我們先計算這兩個波速的比值：

$$\text{開放水槽水波波速} \times \text{開放水槽水波波速} = \text{重力加速度} \times \text{水槽水深}$$

$$\text{壓克力條上水波波速} \times \text{壓克力條波導上水波波速} = \text{重力加速度} \times \text{壓克力條距離水面深度}$$

上式兩種波速可以用計算機對等號右邊乘積開根號求得，則波速比值為

$$\text{波速比值} = \text{壓克力條上水波波速(水波導波速)} / \text{開放水槽水波波速}$$

我們將各個條件下的波速比值整理如下表：

表 14：計算水波在壓克力條上傳播之波速與水波在開放水槽傳播之波速的比值

水深 (cm)		2.5			3			3.5			4			
壓克力條厚度(cm)		0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	3
頻率 (Hz)	1.5	開放水槽 (沒放壓克力條)	0.77	不符合小 振幅淺水 波條件	開放水槽 (沒放壓克力條)	0.82	0.58	開放水槽 (沒放壓克力條)	0.85	0.65	開放水槽 (沒放壓克力條)	0.87	0.71	0.5
	2.5		0.77			0.82	0.58		0.85	0.65		0.87	0.71	0.5
	3		0.77			0.82	0.58		0.85	0.65		0.87	0.71	0.5
	4		0.77			0.82	0.58		0.85	0.65		0.87	0.71	0.5
	5		0.77			0.82	0.58		0.85	0.65		0.87	0.71	0.5
	7		0.77			0.82	0.58		0.85	0.65		0.87	0.71	0.5
	10	0.77	0.82	0.58	0.85	0.65	0.87	0.71	0.5					

*振波器 10Hz 一系列數據以灰色底線標示為比較組，已推論為表面波，不列入討論

比較上表和實驗照片列表我們發現，當水波在波導上傳播之波速與水波在開放水槽傳播之波速的比值 ≤ 0.65 ，都有較好的實驗結果展示將小振幅淺水波紋侷限在波導上傳輸。但是從實驗照片得知，即使在波速比值 ≤ 0.65 的水深和波導數條件下，只有當振波器頻率 5Hz 和 7Hz 有看到明顯的波導傳輸（黃底藍色字體標記），振波器頻率 1.5Hz、2.5Hz、3Hz、4Hz，以及 10Hz 的波速比值即使也是 ≤ 0.65 ，卻無法看到明顯的水波導現象。因此除了波速的差異外，我們推論還有別的變因會影響到水波導現象，後續會再更進一步說明。

以水深 3.5cm/壓克力條厚 2cm/頻率分別為 5Hz 與 7Hz 條件下，其計算式為(紅色欄框)：

$$\text{開放水域波速} : \sqrt{9.8 \times (3.5 \div 100)} = 0.5857$$

$$\text{水波導波速} : \sqrt{9.8 \times ((3.5 - 2) \div 100)} = 0.3834$$

$$\text{波速比值} = 0.3834 \div 0.5857 = 0.65$$

所以當波速比越小，代表壓克力條上方的水波導波速與無壓克力條的開放水域波速，差異越大(水波導波速較慢)，其波導效應越顯著，這與矽光波導運用核與外被之折射率差異，將光子限制在折射率大的行進，有其異曲同工現象。

(四). 計算水波在波導上傳輸的半波長

在本說明書「貳、研究目的」中「文獻探討 (四)矽光波導」一段已探討過，光波導的尺寸會設計在大約光波長的一半的大小，以讓光波能「感受到結構的變化。因此我們推論：水波的波長是水波導傳播現象的重要因子，所以我們進一步計算理論上各個條件水波在波導上傳輸的半波長，我們推論因為波導的寬度只有 2.5cm，小振幅淺水波的半波長必須要與 2.5cm 相當一個量級，水波導的效果才會明顯。在本說明書「貳、研究目的」中「文獻探

討(一)波的傳播」已經討論過波長的計算方式，可以輕易整理出下表(表 15)

列出各個條件下，在水波導上傳輸的小振幅淺水波的半波長：

以水深 3.5cm/壓克力條厚度 2cm，頻率分別為 5Hz、7Hz 下

$$0.3834 = 5 \times \lambda \quad \lambda = 0.3834 \div 5 \quad \lambda = 0.0767(m) \quad \frac{\lambda}{2} = \frac{7.668}{2} = 3.83(cm)$$

$$0.3834 = 7 \times \lambda \quad \lambda = 0.3834 \div 7 \quad \lambda = 0.0548(m) \quad \frac{\lambda}{2} = \frac{5.477}{2} = 2.74(cm)$$

表 15：計算水波在波導上傳輸的半波長(cm)

水深 (cm)		2.5			3			3.5			4			
壓克力條厚(cm)		0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	3
頻率 (Hz)	1.5	開放水域 (沒放波 導)	12.78	不符合小 振幅淺水 波條件	開放水域 (沒放波 導)	14.76	10.43	開放水域 (沒放波 導)	16.5	12.78	開放水域 (沒放波 導)	18.07	14.76	10.43
	2.5		7.67			8.85	6.26		9.9	7.67		10.84	8.85	6.26
	3		6.39			7.38	5.22		8.25	6.39		9.04	7.38	5.22
	4		4.79			5.53	3.91		6.19	4.79		6.78	5.53	3.91
	5		3.83			4.43	3.13		4.95	3.83		5.42	4.43	3.13
	7		2.74			3.16	2.24		3.54	2.74		3.87	3.16	2.24
10	1.92	2.21	1.57	2.47	1.92	2.71	2.21	1.57						

*振波器 10Hz 一系列數據以灰色底線標示為比較組，已推論為表面波，不列入討論

由表 6、表 14、和表 15 可以發現，正如我們所推論，雖然振波器頻率 1.5Hz、2.5Hz、3Hz、4Hz，以及 10Hz 的波速比值(波導上水波波速 / 開放水域水波波速) 也是 ≤ 0.65 ，但也需理論推論出來波導上傳播的小振幅淺水波的半波長越接近波導寬度 2.5cm，顯示出來的波導效應才越明顯，也再次呼應水波導與砂光波導有著相似的特性。經查證實驗參考文獻^[1]也有類似討論：如果以該文獻的最佳化條件(水深 2.5cm / 頻率 3Hz / 波導高 1cm) 在寬度 5cm 和 10cm 的波導上重複實驗，都無法得到良好的水波導效應 (在實驗參考文獻^[1]中稱作水波能量的聚集以不是「單一模態」，成為能量聚集不良的「多模態」)，這就是因為這樣大尺寸寬度的波導，已經超過水波半波長的數量級大太多。

(五).小振幅淺水波在長條波導傳播最佳條件的結論摘要

1. 最佳條件：水深 3cm/頻率 5Hz/壓克力條高 2cm
2. 在我們設計的壓克力水槽開放水域尺寸(長 700mm × 寬 600mm × 深 200mm)，長條形壓克力波導 (長 660mm × 寬 25mm) 能實現小振幅淺水波波導現象的條件，必須同時滿足波

速比值(波導上水波波速 / 開放水槽水波波速) ≤ 0.65 ，以及起振的水波半波長接近波導寬 25mm。

3. 水深太淺 (接近振幅 2mm)、或是起振頻率太高($\geq 10\text{Hz}$)，都不符合小振幅淺水波條件。
4. 由較小的波速比(≤ 0.65)能實現水波導，如同矽光波導利用折射率差異，將光子侷限於折射率大的地方行進；同時較佳水波導條件，其半波長也趨近波導尺寸 25mm，又再一次呼應光波導的尺寸會設計在大約光波長的一半的大小。

三、 實驗三：探討光波導結構設計是否可在水波導實現

(一). 斷裂波導—波導的缺陷結構

目前我們對半導體雷射的原理只能窺其大概，但是讓我們很好奇的是，其實半導體雷射也是以砷化鎵或是氮化鎵的光波導結構來實現的。比較特別的是，這樣的光源的光波導需要有將光放大的「共振腔」；在光波導的「缺陷」讓光來回振盪而放大。因此，在完成實驗二找到能達成水波導現象的最佳化條件之後，我們想試試看利用我們的最佳條件，是否水波導有缺陷時也依然能實現波導的現象。

為了達到波導缺陷的效果，我們將壓克力條裁兩截，長的一截長度為 44cm 而短的一截長度為 22cm，進行兩項斷裂波導的實驗：

1. 振波器起振的小振幅淺水波先通過短的波導，經過斷裂間隙，再測試能否傳播到長的波導；
2. 振波器起振的小振幅淺水波先通過長的波導，經過斷裂間隙，再測試能否傳播到短的波導。

由實驗二我們已經得到結論，**如果要讓小振幅淺水波被侷限在水波導上傳播，波導的結構尺寸必須與水波的半波長相當，如此水波才能「感受」到波導結構而以較開放水域慢的波速傳遞。**基於這個實驗一的結論，我們讓斷

點的間隙長度設定為 3.0 cm 來進行缺陷波導的實驗。

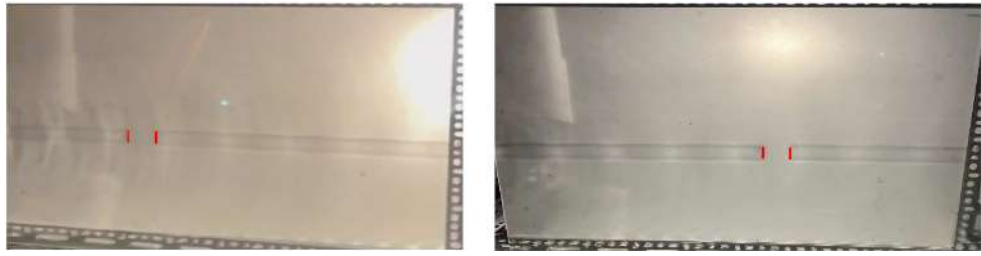


圖 11：小振幅淺水波缺陷波導的實驗，其中紅色短線標示出波導斷裂點(3.0cm)的間隙。(學生自拍)

圖 11 左圖是振波器起振的小振幅淺水波先通過短的波導(22cm)，然而水波紋在短波導處有些許發散掉的水波能量，我們推論是有輕微的反射波紋自波導斷裂面反射回起波處；雖然如此，在經過斷裂間隙傳播到長的波導(44cm)，我們依舊觀察到不錯的波導現象。相比較之下，圖 11 右圖是振波器起振的小振幅淺水波先通過長的波導，經過斷裂間隙，幾乎沒有損耗也沒有發散而完整傳播到短的波導，推論小振幅淺水波在先傳播長的波導(44cm)後，即使有輕微的反射波也已經對起波處不會造成干擾。

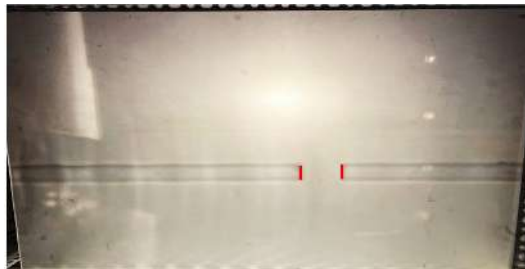
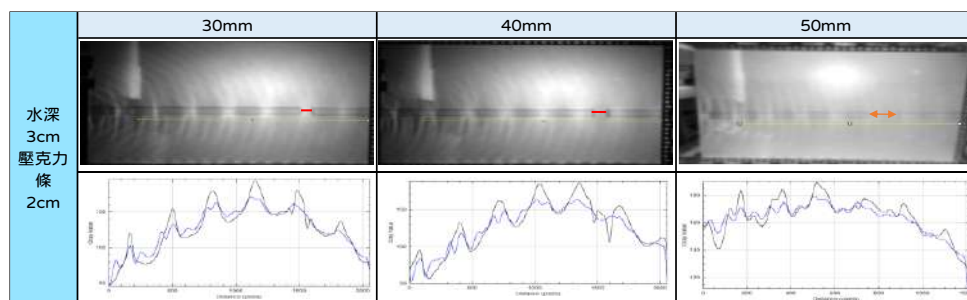


圖 12：失敗的小振幅淺水波缺陷波導的實驗，其中紅色短線標示出波導斷裂點(4.0cm)的間隙。(學生自拍)

表 16：不同缺陷長度之 Plot Profile 比較(照片：學生自拍；軟體 ImageJ 繪製)



藍色為開放水域；黑色為水波導水域

為了再次驗證如果要讓小振幅淺水波被侷限在水波導上傳播，波導的結構尺寸必須與水波的半波長相當，如此水波才能「感受」到波導結構而以較開放水域慢的波速傳遞，我們在相同條件下加大了斷點間隙到 4.0cm，這樣的缺陷已經比波導

寬度 2.5cm 和半波長 (由表 15 計算的半波長為 3.13cm) 大，因此從圖 12 可以明顯看出，除了較寬大的斷裂點會有回波反射到起波處形成雜波紋，另外水波紋也已經無法完整傳遞到短波導。我們再次驗證了任何波導結構的尺寸一定要跟波動傳播的半波長尺寸相當，波導才能發揮其功能。

(二). 彎折波導— 讓水波轉彎的結構

在這次決定實驗的題目時，我們已經提到，對於光波導可以讓光轉彎，感到非常的新奇甚至是不可思議，因此在還沒進行上述實驗二與實驗三之斷裂波導實驗，我們就先委外預先訂製了異型彎折波導。然而在完成實驗二與實驗三之斷裂波導實驗，我們已經可以推論這個異型彎折波導實驗會不成功，因為它的第一彎折處比前上實驗斷裂波導的短截波導還短，其設計如圖 13 左圖，小振幅淺水波波導實驗結果 (條件：水深 3cm / 頻率 5Hz / 波導高 2cm)則如圖 13 右圖。



圖 13：失敗的彎折小振幅淺水波波導設計，水波輸入端僅 200mm 即作 45 度角彎折(老師繪製；學生自拍)

如圖 13 右圖所示，水波傳遞第一段 200mm 波導遇到 45 度角彎折處就發生嚴重的反射水波干擾了起波處，因此完全破壞了振波器水深 3cm / 頻率 5Hz 波長的條件，產生多波長(「諧波」)的水波並發散、延著水槽長邊方向持續傳播。雖然如此，我們發現多波長的水波紋還是有部分沿著彎折處波導(285mm)傳遞，因此我們不氣餒討論如何進行彎折波導的實驗架設。要補充的是，在我們的說明中，彎折角度是指與水槽長邊的夾角。

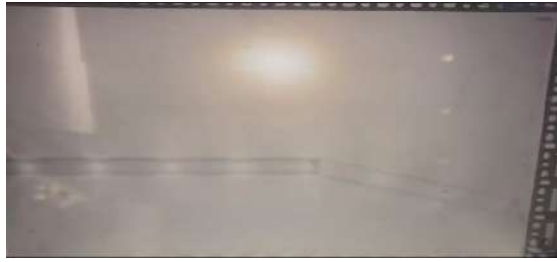


圖 14：以實驗二之 1 斷裂波導 44cm 的長波導與 22cm 的短波導，拼接成一個彎折角度(與水槽長邊夾角)小於 30 度的異型波導，成功觀察到小振幅淺水波沿著波導轉彎 (學生自拍)

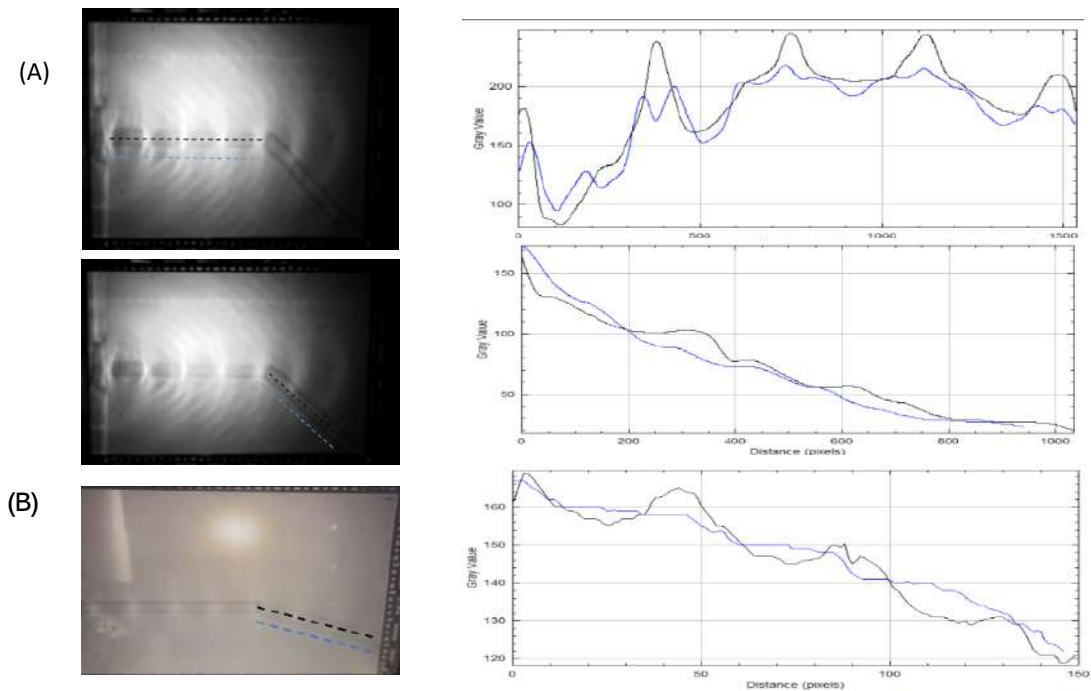


圖 15：彎折角度比較：當彎折角度為(A)45°下，彎折後波消散幅度相似；圖(B)為彎角小於 30 度的傳遞情況(藍色為開放水域,見圖藍色虛線；黑色為水波導水域, 見圖黑色虛線)
(照片：學生自拍；軟體 ImageJ 繪製)

在比較實驗三之(一)斷裂波導以及本實驗三之(二)失敗的彎折波導，我們推論在波導彎折前，筆直波導的長度還是要跟斷裂波導長截波導一樣長，才不會有回波雜紋自缺陷處(彎折處)反射干擾，而且彎折的角度過大就類比於斷裂點過大，不符合半波長的尺寸量級。因此，我們在相同最佳條件下，以實驗二之(一)斷裂波導 44cm 的長波導與 22cm 的短波導，拼接成一個彎折角度(與水槽長邊夾角)小於 30 度的異型波導。非常開心的是，在水深 3cm / 頻率 5Hz / 波導高 2cm 的最佳條件下，如圖 14 與圖 15(B)所示，我們成功看到小振幅淺水波沿著所拼接的波導傳播！

(三).小振幅淺水波在異型波導傳播成功的結論摘要

1. 依我們的水槽尺寸，在設計小振幅淺水波的異型波導時，缺陷或彎折處必須在水槽長邊大約三分之二處 (>40cm)，才不會有回波雜紋自缺陷或彎折處反射干擾到起波處。
2. 缺陷或彎折的尺度依然必須滿足和小振幅淺水波傳播的半波長相當的大小，再次滿足矽光波導設計中說明的：其平面平台建立於厚度小於目標光波長一半的光子薄膜。^[8]

陸、 討論

一、 與實驗參考文獻^[1]比較最佳小振幅淺水波的波導條件

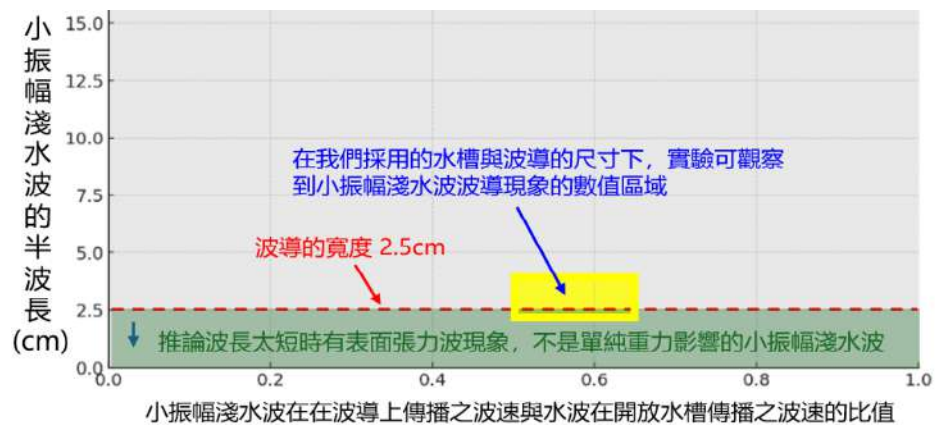


圖 16：在本實驗中能清楚觀察到小振幅淺水波波導現象的條件(學生自繪)

由實驗參考文獻^[1]我們知道該研究的最佳條件為「水深 2.5cm / 頻率 3Hz / 波導高 1cm」。我們的實驗得到六組較佳的波導條件，在圖 16 我們把條件限制整理如黃色區塊，在「水深 3cm / 頻率 5Hz / 波導高 2cm」作為最佳條件，進行了實驗參考文獻^[1]沒有提出的小振幅淺水波異型波導測試。有很多方面都可能造成與參考文獻的最佳條件不同，我們整理三個主要的原因：

(1) 實驗條件不一致

實驗參考文獻^[1]的振波器距離通道 10cm，並且沒有揭露所採用振波器的寬度以及通道的長度— 這三個參數有可能可以最佳化起振小振幅淺水波的波長單一性。而我們實驗裝置為了避免振波器在水槽後壁造成反射回波，塞進了吸音棉，

減少了安裝振波器的空間，使得振波器離通道大約 2-3cm，通道長度也只有壓克力擋板厚度 1cm。這導致振波器在水內起振，會有回波雜紋自通道角落反射回振波器，形成多波長的「諧波」，也就是每次進行測試，我們的裝置無法確定小振幅淺水波的波長單一性。雖然我們努力控制了水波的小振幅盡量避免回波的產生，多波長水波的傳播波速會與理論有所差異，導致了與參考文獻比較最佳小振幅淺水波的波導條件不同。

(2) 實驗設備不同

實驗參考文獻^[7]的實驗裝置是架設在抗震動的光學桌平台上測試，而我們的實驗裝置是以角架支架固定，同時，我們的起波器為單點支撐，所以在啟動時其波片會晃動，而環境雜訊也造成了無法最佳化小振幅淺水波波長單一性。

(3) 量測方式不同

實驗參考文獻^[7]是最先進的 3D 立體攝影技術去量測小振幅淺水波的振幅與波長，以調整裝置架設的最佳化；而我們是透過一般相機攝影，在實驗前期以初步數據反推裝置架設的參數時，沒有 3D 立體攝影技術量測的精準。雖然如此，我們的實驗證明了不需要使用昂貴的量測設備，依然能夠觀察到小振幅淺水波的波導現象。

二、半波長計算值與實驗照片觀察水波半波長不完全一致

我們推論這個差異還是來自於如上述一所述實驗裝置架設的設計問題，導致起振時多了波長的「諧波」；雖然我們努力控制了水波的振幅盡量避免回波的產生，多波長水波的傳播波速會與理論有所差異。除此之外，我們的振波器要精確控制每次實驗的振幅都精準在 2mm 以符合小振幅淺水波，仍有待後續設備改善。即使如此，由於在最佳條件下水波導的功能明顯，多波長的「諧波」的能量還是很成功被侷限在水波導上傳播。


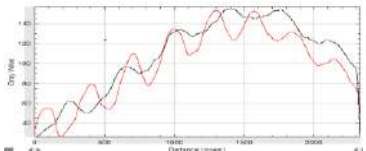
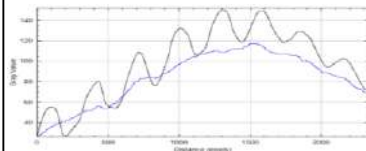
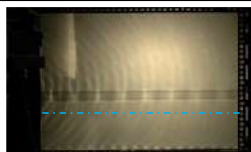
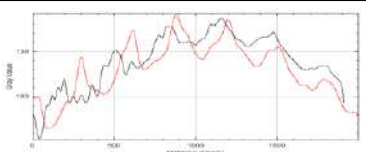
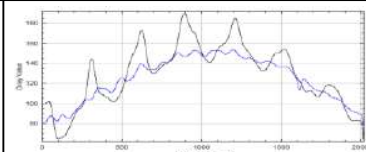
三、實驗延伸討論

- (一).從上述討論一和二可以知道，振波器本身與其架設位置的最佳化對實驗結果有決定性的影響。在我們一系列的實驗中，振波器是採用一片金屬組裝，然而在上下振動過程，左右兩端，會輕微搖擺，這也導致回波雜紋。

(二). 壓克力條厚度呈現方式，一開始使用厚度10mm來堆疊，發現有些雜波，便想如果是一體成型的壓克力條，會不會有所不同，使用表11之水深3cm/壓克力條高2cm/頻率5Hz下來比較，我們發現一體成型的波紋比較完整(左圖紅色線條)，且在有壓克力條的開放水域，波的能量更不完整(藍色線呈現微小波紋)；反之水波導水域的波能完整的傳遞(右圖黑色線條)。

雖然堆疊成型的壓克力條，一樣能在水波導水域將波傳遞，但其波的干擾較多且尖銳，這樣的差異，我們希望在日後的實驗中，優化以一體成型的壓克力條。

表 17：一體成形的壓克力條與堆疊壓克力條比較(照片：學生自拍；軟體 ImageJ 繪製)

模式	影像	(紅)水波水域與(黑)無放置壓克力條比較	(黑)水波導水域與(藍)開放水域比較
一體成型			
堆疊			

(三). 在表11中，我們發現在相同條件下：頻率5Hz/壓克力條高2cm，當水深不同時，其波形會越來越尖銳。我們便思考這樣與海嘯成因的原因是否有相似，海嘯是因浪不斷的堆疊覆蓋造成浪高加大，而另一因素便是由深水域進入到淺水域，其波速變慢能量不變下，浪變得更高，因為實驗中開放水域水深與水波導水域的差異變大，所以波的型態是否因此而改變呢？我們也希望在日後的實驗中，可以針對水域深度比值來探討波形的差異。

(四). 由表15得知其水深3cm/壓克力條2cm/頻率7Hz所計算而得的半波長(2.24cm)，最為接近水波導尺寸2.5cm，但在表11的對比強度低於5Hz的條件，故後續選擇5Hz作為異型水波導實驗的條件。也希望在日後的實驗中，可以針對5Hz與7Hz進行異型水波導，繼續比較其優劣，進而更精確的提供本實驗的最佳條件。

(五). 因為實驗裝置是用角架支架固定，導致水波容易受環境影響如：聲音、走路，容易產生微細波紋，以毛玻璃投影實驗結果並採用一般相機攝影，易形成雜訊。

(六).對於水波波前的觀測，目前僅能以目視判斷搭配圖片灰階模擬，未能完全定量化。

四、探討 ChatGPT 與驗證

(一) 在水波導上傳輸小振幅淺水波的投影光強度等高線圖

在**實驗參考文獻**^[1]有展示了當水波紋傳輸時，3D 立體攝影技術去量測小振幅淺水波的等高線圖，比較能清楚看出在波導上傳播的小振幅淺水波的波形輪廓，如圖 15 所示：

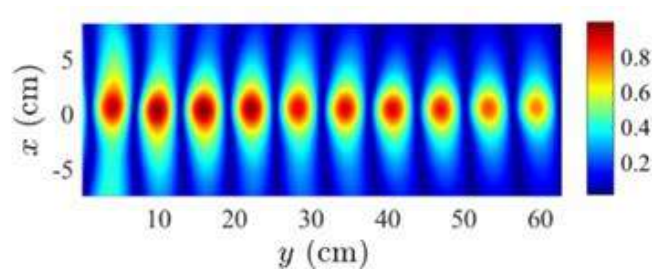


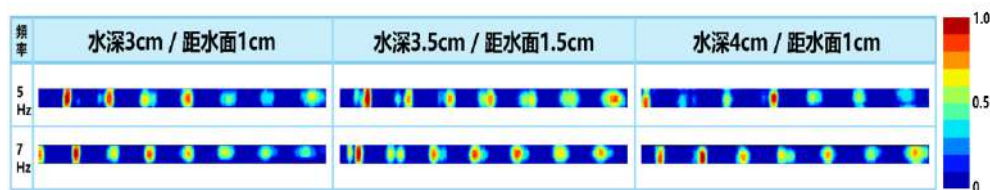
圖 17：實驗參考文獻^[1, Figure 1.(C)]當中展示出 3D 立體攝影技術去量測小振幅淺水波振幅的等高線圖

由於我們沒有 3D 立體攝影器材而使用直接投影方式，也不容易採用圖形軟體擷取並後製小振幅淺水波類似圖 17 的波傳播圖，我們想試試最近非常熱門的 ChatGPT，是否可以協助我們達到繪製如圖 17 的水波振幅等高線圖，操作步驟如下：(1) 上傳表 10 第一張照片(水深 3cm / 頻率 5Hz / 波導距離水面 1cm) 到 ChatGPT。(2) 給 ChatGPT 提示詞：上傳的兩張圖片，第一張是水波的等高線圖，第二章是實驗真實的水波照片。將第二張實驗的真實照片先去掉背景光，再轉成類似第一張的等高線圖。(必須先去掉背景光是因為雖然我們的光源距離水槽大約 2 公尺，但是不是均勻的平面光，所以毛玻璃投影還是有很強的鹵素燈背景光)。

非常訝異的是，ChatGPT 真的能幫我們將照片轉成如圖 17 的等高線圖，但因為整個水槽的等高線圖有太多雜散波紋，我們只擷取小振幅淺水波在波導傳輸的投影光強度等高線圖，整理如下：

表 18：對應到表 10 六組較佳的波導效果的小振幅淺水波投影光強度等高線圖

(使用 ChatGPT 產出、複製，再擷取與組合)



雖然這六組是我們照相得到最佳的波導效果，但是從投影光的光強度等高線圖可以看出，在本段「陸、討論」前面一到五項，所檢討實驗需改進的種種缺點，導致了我們小振幅淺水波在波導上傳播的波形還是不完美，這其中除了因為有雜紋波干擾，也有背景光太強導致等高線圖不容易展示出透射光光強度能量的集中。即使如此，透射光光強度的等高線圖還是展示了小振幅淺水波穩定的沿著波導傳輸。需要補充的是，為了清楚展示表 18，水波導的長與寬已經不是原始比例。下圖則是以同樣的提示詞，讓 ChatGPT 將彎折波導投影光的光強度等高線圖畫出(為了避免背景光或攝影機鏡頭反光等雜訊誤導，我們有除掉背景光與攝影機鏡頭反光雜訊)：

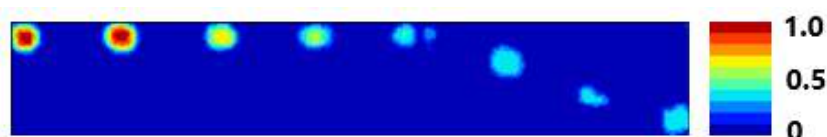


圖 18：小振幅淺水波在彎折波導傳播投影光的光強度等高線圖

(使用 ChatGPT 產出、複製，再擷取與組合)

由圖 18 可以看出，雖然由照片(圖 14) 我們可以清晰看到小振幅淺水波成功在彎折波導轉彎並繼續傳播，由投影光光強度的等高線圖發現，**彎折後的小振幅波形已經有所變化，能量的集中已經不像直線波導這麼完整，水波紋發散衰減的程度已經達到起波時能量的一半**。我們推論造成這種衰減最關鍵的原因是，彎折處是由 44cm 的長波導和 22cm 的短波導拼接而成的，在拼接處的缺陷損失了很多能量。因此，若要改善未來的實驗，穿透光的等高線圖提供了很好定量的參考標準。

(二) 藉由小振幅淺水波的投影光強度等高線圖來觀察反射波

有了小振幅淺水波的投影光強度等高線圖，可以提供我們對水波波導思考更多定量測試，在這邊我們嘗試進行在波導上反射實驗的討論。試驗架設還是

維持原本如圖 7 的裝置架設，只有對波導靠近右側的吸音棉剪出一個開口可以讓我們觀察小振幅淺水波在波導的反射現象。使用的條件還是水深 3cm //波導距離水面 1cm，並嘗試以手動起振一個波來觀察水波在水槽內側右壁的反​​射現象。由於是手動起振，在非水波導區的開放水域有更多雜紋，我們只取水波導區域的照片，**並且將水波抵達右側內壁前以及抵達右側內壁後的兩張照片一起作等高線繪製的處理**，結果如圖 19 所示：

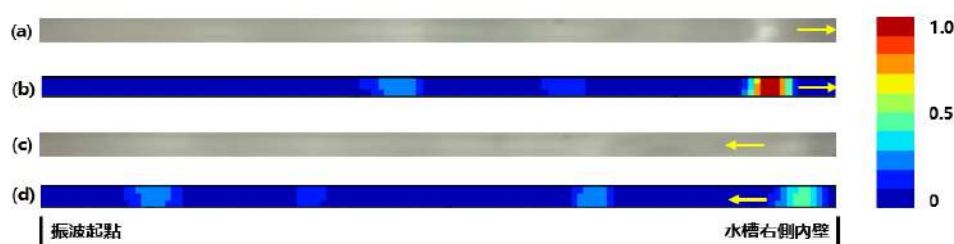


圖 19：淺水波抵達水槽右側內壁之前 (a) 投影光強度照片，與(b)投影光強度的等高線圖。淺水波自右側內壁**反射後**的 (c) 投影光強度照片，與(d)投影光強度的等高線圖。

(使用 ChatGPT 產出、複製，再擷取與組合)

由圖 17 可以看出，在我們起振的淺水波抵達水槽右側內壁並反射之後，**反射的投影光強度已經衰減到原本光強度的一半**。如果我們比較圖 18 的彎折波導實驗可以發現，小振幅淺水波經過彎折處的缺陷後，投影光強度也是衰減了一半，因此水槽右側內壁的反​​彈也可以視作是一種「缺陷」，而如果只從照片是無法定量估算缺陷造成能量的損失。在圖 19 中，不論實際照片或是等高線圖，都有因為本段「陸、討論」前面一到五項提到的種種缺點形成的雜波紋。

柒、 結論

因為對矽光波導的好奇心，我們展開了一系列小振幅淺水波的波導實驗：我們以壓克力板自製水槽、壓克力波導，針對可觀測的水波導現象與實驗變因進行探討。經多次測試：較一般水波經過單通道傳播一段距離後，水波振幅 (在大約 30cm 之後) 衰減，而水波導水域上傳播的水波可延波導傳遞更遠距離(>60cm)。進一步以水深、振波頻率、波導高度為變因，找尋較佳參數，並較參考文獻更進一步測試了異型波導：斷裂波導、彎折波導。實驗證明即使水波導有缺陷時，水波依然可以維持波形傳遞如無缺陷般的一段距離。**我們展示**

了利用水波在波導上的傳輸，可以學習到光波導的行為。

一、小振幅淺水波在長條波導傳遞的最佳條件

在以下條件，水波的能量聚集較為顯著，也就是有較佳的小振幅水波波導的效果，以水深 3cm/頻率 5Hz/波導高 2cm 最佳。

在我們設計的壓克力水槽開放水域尺寸(長 700mm × 寬 600mm × 深 200mm)，長條形壓克力波導 (長 660mm × 寬 25mm) 能實現小振幅淺水波波導現象的條件，必須同時滿足波速比值(波導上水波波速/開放水槽水波波速) ≤ 0.65 ，以及起振的水波半波長接近波導寬 25mm。除此之外，水深太淺(接近小振幅 2mm)、或是起振頻率太高($\geq 10\text{Hz}$)，都不符合小振幅淺水波條件。

也印證透過波速的差異，水波將會將波速較慢的的水波導區持續傳遞，可以模擬矽光波導透過折射率差異，將光子侷限在折射率高的介質中，將波持續傳遞的特性。

二、小振幅淺水波在異型波導傳遞成功的條件

(一).依我們的水槽尺寸，在設計小振幅淺水波的異型波導時，斷裂或彎折處必須在水槽長邊大約三分之二處 (>40cm)，才不會有回波雜紋自缺陷或彎折處反射干擾到起波處。

(二).斷裂或彎折的尺度必須滿足和小振幅淺水波的半波長相當的大小。

(三).缺陷(斷裂、彎折、反射)會造成小振幅淺水波能量衰減大約一半。

也再次驗證，較佳實驗結果的半波長，可以符合波導設計中，其尺寸或缺陷都需滿足半波長或其整倍數條件，故以水波導來模擬矽光波導是可被展示的。

捌、參考文獻與資料

1. Fabián Sepúlveda-Soto, Observation of broad-band water waveguiding in shallow water: a revival
2. 【TRY 科學】20211117 - 光的行徑無所遁形, 光的傳播, 光的折射, 光的反射

3. 科學 Online：波浪介紹, 2009/06/12
4. 均一教育平台:波的傳播、波動
5. 梁竣閔;曾少茵,水波全像法,第55屆高中物理組
6. 衛冠瑜;吳采耘,「洞」感水波—二維週期性水深結構對於水波傳遞的影響,第56屆高中物理與天文學科
7. 張宗文,認識光子晶體,長庚大學校訊 52, 1995
8. Peter Lodahl、Arne Ludwig 及 Richard Warburton 張鳳吟譯,決定性的單光子源,物理雙月刊, 2008/08
9. Wei Shi ,Scaling capacity of fiber-optic transmission systems via silicon photonics, Figure 4
10. 科學月刊(2015/12/21),光波操縱師—神奇的光子晶體
11. 高中物理_選修物理 III_4-1 波動水波槽實驗_水波槽實驗_林春煌
12. 點亮半導體的未來：矽光子(Silicon photonics)及共同封裝光學(CPO)的原理與發展趨勢

【評語】 080105

本作品是利用水波模擬光波的波導。

文獻部分介紹波的傳導，水波速度以及歷年來有關水波導的探討。

研究內容包括小振幅淺水波波導因子探討及模擬光波導現象。

研究具有創意，以及發展潛力，應可持續關注參考文獻的引用文獻！

作品簡報

粼粼波光下的矽光子波導的傳輸奧秘

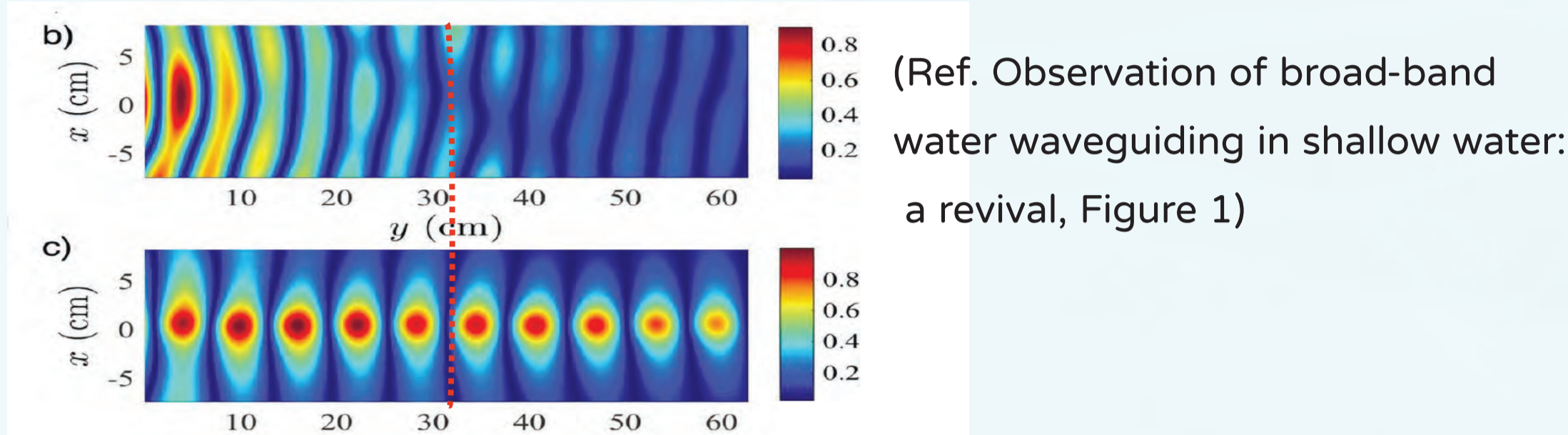
研究動機

「矽光子」是將傳統只有電信號傳輸的技術，擴展到使用光訊號在「光波導」上傳輸，以增加信號的傳輸速率與傳輸量，讓我們對所謂的「波導」產生了很大的好奇心，如果將光波視為一種「波」，是不是有機會可用水波模擬出光波的傳遞方式，進而利用小振幅淺水波來執行水波導的實驗，在有水波導下波的能量可以延伸得更遠，那水波導的傳遞是否可以模擬出光波導傳遞特性呢？我們將觀察小振幅淺水波的傳遞行為，是否與矽光波導有一樣的特性。

研究目的與設備

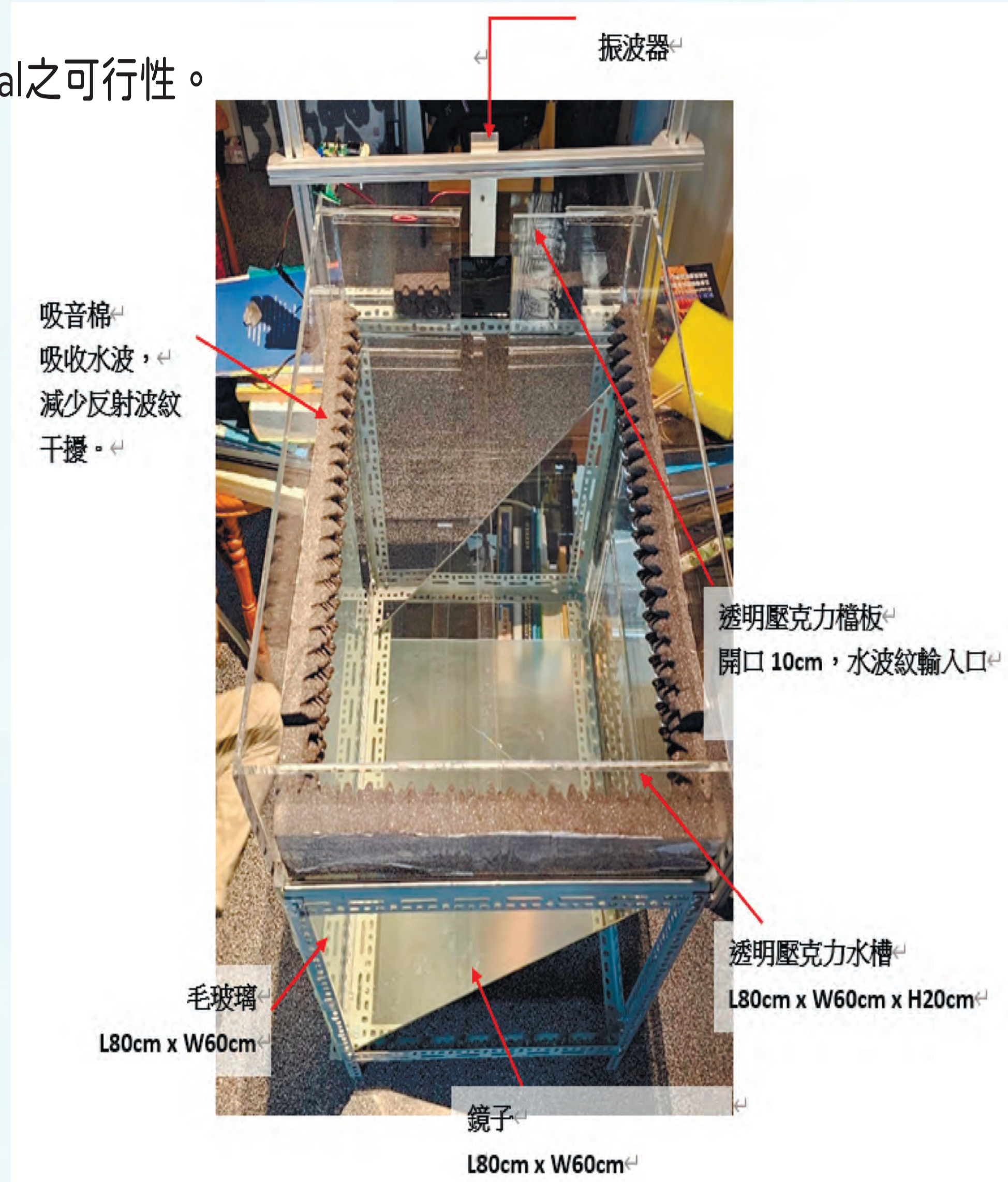
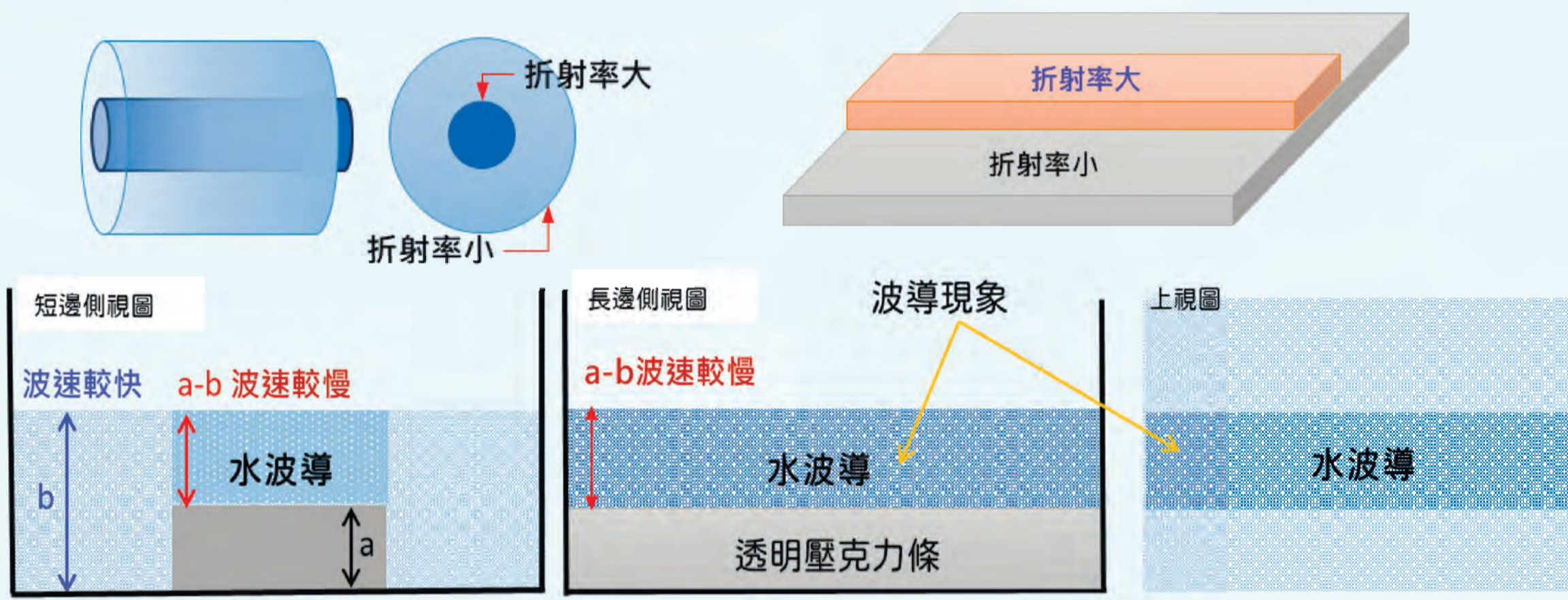
自製壓克力水槽和壓克力條，進行小振幅淺水波的波導現象與實驗變因探討，並進一步研究異型波導上小振幅淺水波的傳遞。探討水波導是否與光波導有相似效應，展開如下。

- (一) 文獻探討與資料索引
- (二) 探討參考文獻 Observation of broad-band water waveguiding in shallow water: a revival 之可行性。



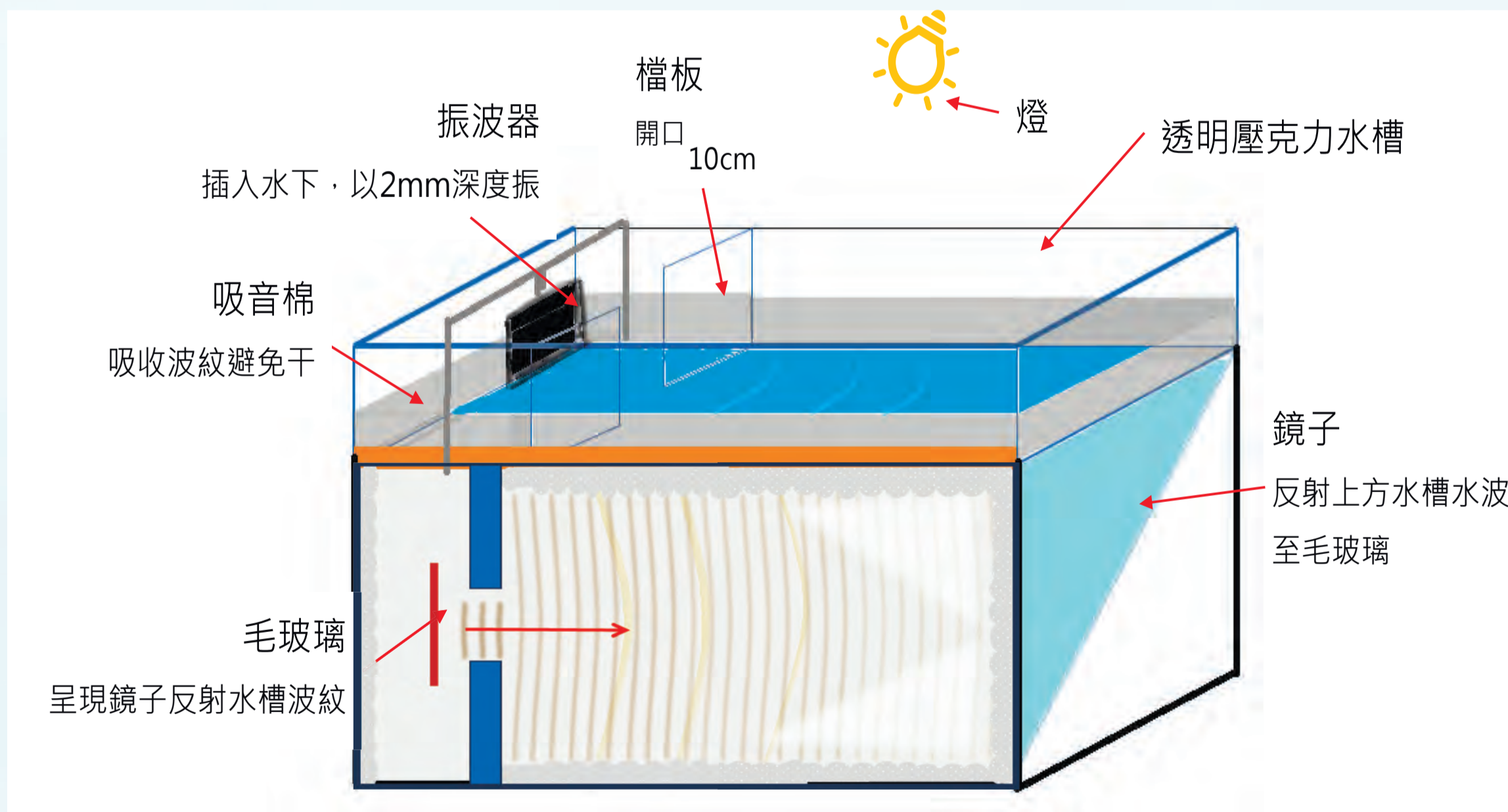
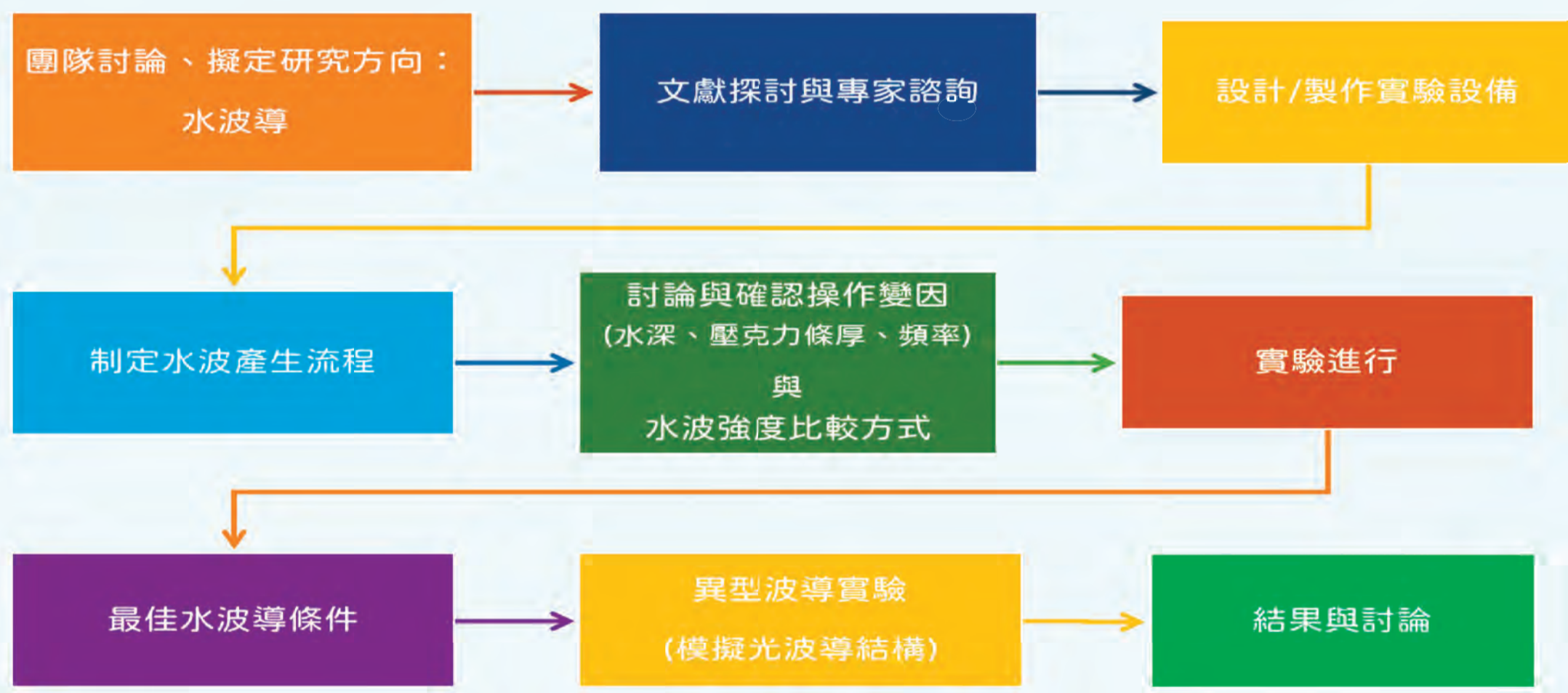
與其研究項目：

- (一) 有無水波導下的水波傳遞差異
- (二) 探討小振幅淺水波水波導影響因子並取得最佳水波導條件
- (三) 探討光波導結構設計是否可在水波導實現



(照片：學生自拍；示意圖學生EXCEL繪製)

實驗過程



1. 為避免水波於水槽四周反彈，在槽體四周黏貼吸音棉。
2. 安裝檔板，以製作水波中間通道開口10cm。
3. 依據實驗計畫，添加室溫自來水至實驗所需水深：2.5cm、3cm、3.5cm與4cm
4. 依據實驗要求確認是否需要放置壓克力條與數量
尺寸：H10mm x W25mm x L660mm
5. 將製造水波振動片插入水面下
6. 開啟水槽上方燈源，確認水槽波紋有反射至毛玻璃上打開振波器
頻率：1.5、2.5、3、4、5、7、10Hz。
7. 確認毛玻璃上的水波紋，如有放置壓克力條，確認波導上波紋是否有聚集的亮暗波紋。
8. 將毛玻璃上的波紋，拍照下來，供後續討論與比對。

(照片：學生自拍；示意圖學生EXCEL繪製)

實驗結果與討論

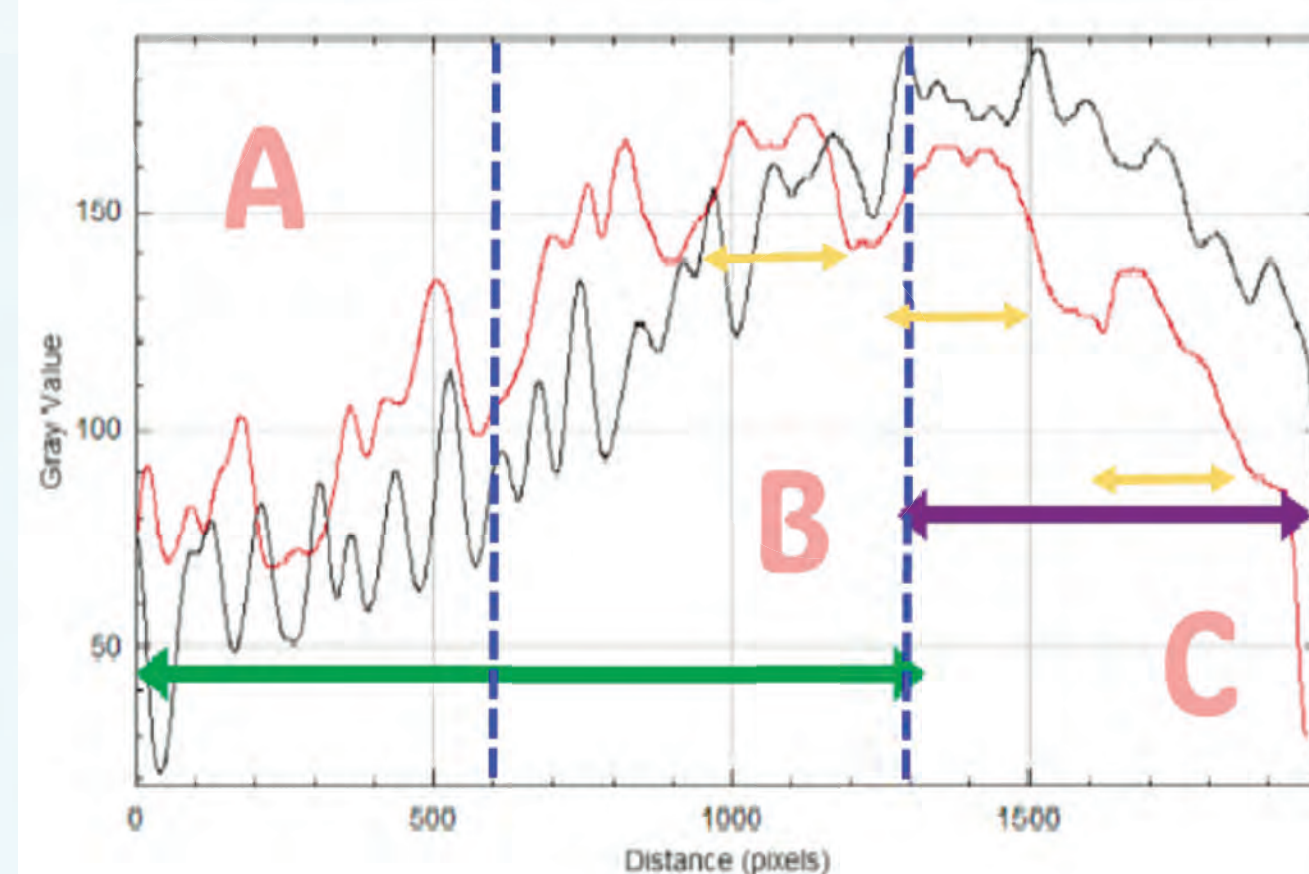
實驗一：有無水波導下的水波傳遞差異

使用實驗參考文獻的最佳條件作為實驗組與無波導為對照組進行實驗

兩者的輪廓從右圖可以觀察，在波行進的前2/3處(綠色)，兩者無顯著的差異，後段1/3(紫色)時，可以看到無壓克力條的波有明顯的消散，但有壓克力條的水波導水域，雖有少許能量消散，但波形仍予維持。

小結：

我們觀察到，實驗參考文獻的最佳條件，在本實驗過程中可以觀察到水波導



(照片：學生自拍；軟體ImageJ繪製)

項次	頻率(Hz)	水深(mm)	壓克力條高度(mm)
實驗組(有波導)	3	25	10
對照組(無波導)	3	25	-

對照組	實驗組
照片	

實驗二：探討小振幅淺水波之水波導影響因子並取得最佳水波導條件

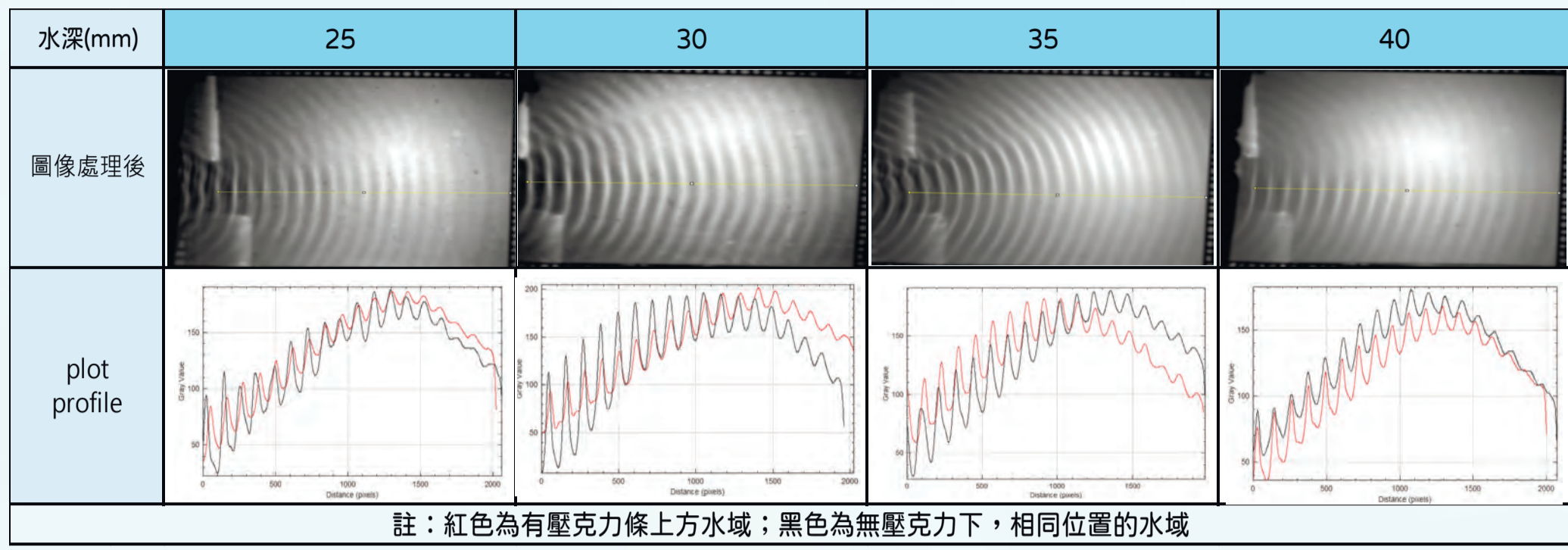
● 確認小振幅淺水波的條件是否符合 (照片：學生自拍；軟體ImageJ繪製)

水深 (cm)	2.5			3.0			3.5			4.0			
波導數	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	3
波導總厚度 (cm)	0.0	1.0	2.0	0.0	1.0	2.0	0.0	1.0	2.0	0.0	1.0	2.0	3.0
波導距離水面深度 (cm)	無波導	1.5	0.5	無波導	2.0	1.0	無波導	2.5	1.5	無波導	3.0	2.0	1.0
水波振幅 (cm)	0.2												
水波振幅 / 水槽水深	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05
水波振幅 / 波導距水面	無波導	0.13	0.40	無波導	0.10	0.20	無波導	0.08	0.13	無波導	0.07	0.10	0.20

計算在水深2.5cm時(左圖)，(水波振幅 / 波導距水面) = 0.40 以紅色字體標註，**不符合小振幅淺水波的條件**。其它標註藍色字體的實驗條件都符合小振幅淺水波，因此我們可以估算小振幅重力水波的波速。依此結果，展開本實驗因子：水深、壓克力條高與頻率暨實驗條件表

水深(mm)	25			30			35			40				
壓克力高(mm)	0	10	20	0	10	20	0	10	20	0	10	20	30	
頻率 Hz	1.5	√	√	-	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
	2.5	√	√	-	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
	3	√	√	-	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
	4	√	√	-	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
	5	√	√	-	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
	7	√	√	-	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
10	√	√	-	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	

水波振幅/水槽水深=0.2÷2.5=0.08
水波振幅÷壓克力條距離水面=0.2÷0.5=0.4



(左圖)振波器頻率10Hz的波紋特別密集，而且即使在開放水槽隨著傳播距離增加波紋都不會衰減，我們因此推論振波器頻率10Hz的波紋已經是有黏滯力(表面張力)的「表面波」，不是單純的小振幅淺水波。所以在下面討論中，我們不把10Hz列入水波波導現象的考慮，在相關表格中仍列為比較組但是以底色灰色來表示不符合小振幅淺水波。

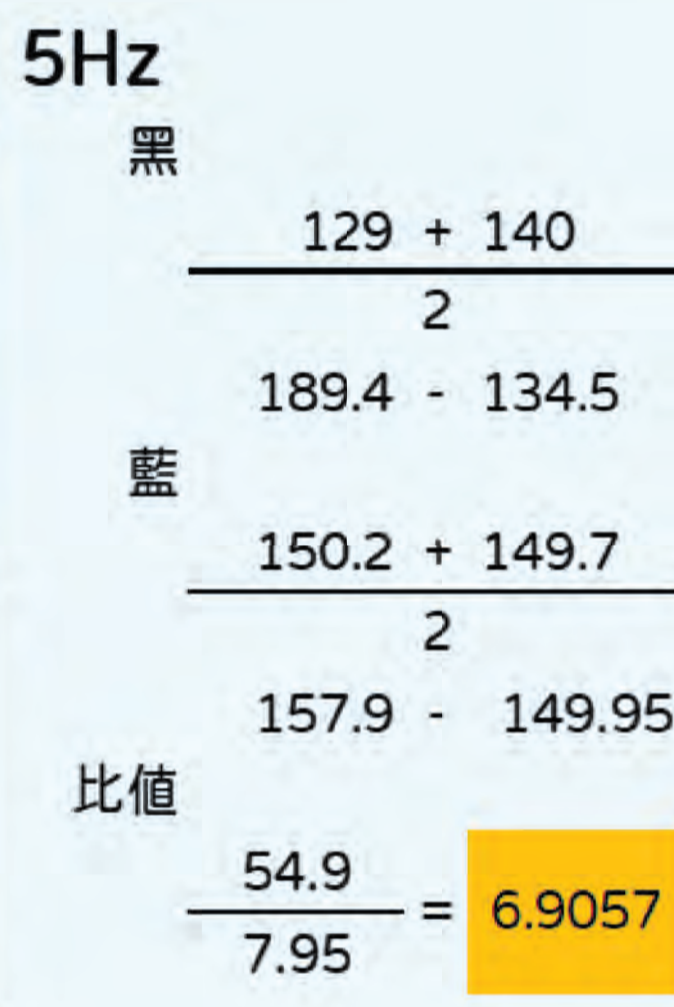
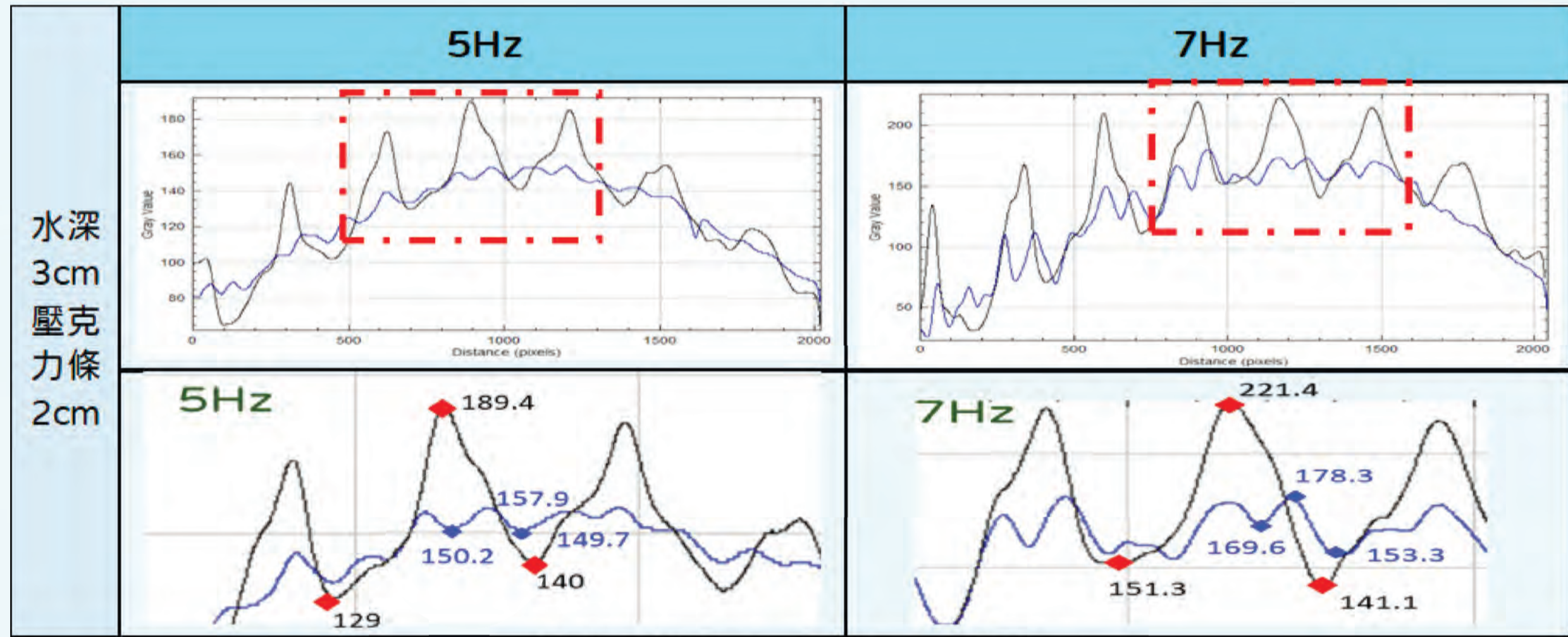
● 尋找最佳條件 (照片：學生自拍；軟體ImageJ繪製)

水深	2.5cm			3cm			3.5cm			4cm				
波導數	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	3	
振幅 Hz	1.5	√	√	-	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
	2.5	√	√	-	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
	3	√	√	-	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
	4	√	√	-	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
	5	√	√	-	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
	7	√	√	-	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
10	√	√	-	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	

水深3cm / 距水面1cm	水深3.5cm / 距水面1.5cm	水深4cm / 距水面1cm	
頻率 5 Hz	√	√	√
頻率 7 Hz	√	√	√

共同特徵：開放水域的水波紋傳播到水槽一半時(30cm左右)，水波振幅就開始衰減；相較之下，水波導的波紋可以穩定往槽體右側傳播。分別計算水波導與開放水域的對比強度，其結果顯示5Hz對比強度大(見下表)，因此本實驗最佳條件為：

水深3cm/頻率5Hz / 壓克力條高2cm



● 計算水波在波導上傳播之波速與水波在開放水槽傳播之波速的比值

水深 (cm)	2.5			3.0			3.5			4.0			
波導數	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	3
頻率 (Hz)	1.5	0.77	不符	0.82	0.58	0.85	0.65	0.87	0.71	0.50			
	2.5	0.77	不合	0.82	0.58	0.85	0.65	0.87	0.71	0.50			
	3.0	0.77	開放	0.82	0.58	0.85	0.65	0.87	0.71	0.50			
	4.0	0.77	水槽	0.82	0.58	0.85	0.65	0.87	0.71	0.50			
	5.0	0.77	沒放	0.82	0.58	0.85	0.65	0.87	0.71	0.50			
	7.0	0.77	波導	0.82	0.58	0.85	0.65	0.87	0.71	0.50			
10.0	0.77	重力	0.82	0.58	0.85	0.65	0.87	0.71	0.50				
		波導											
		條件											

*振波器10Hz一列數據以灰色底線標示為比較組，已推論為表面波，不列入討論

開放水槽水波波速 × 開放水槽水波波速 = 重力加速度 × 水槽水深
波導上水波波速 × 波導上水波波速 = 重力加速度 × 波導距離水面深度

$$\text{波速比值} = \text{波導上水波波速} / \text{開放水槽水波波速}$$

比較左表與上述六件實驗照片發現，當比值在<0.65下，都有水波導效果。只是在即時比值在≤0.65下，也只有振波器頻率在5Hz、7Hz時，有看到明顯的波導現象(黃底標示)，由此我們推論應還有其他變因影響水波導。

● 計算水波在波導上傳輸的半波長

水深 (cm)	2.5			3.0			3.5			4.0			
波導數	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	3
頻率 (Hz)	1.5	12.78	不符	14.76	10.43	16.50	12.78	18.07	14.76	10.43			
	2.5	7.67	不合	8.85	6.26	9.90	7.67	10.84	8.85	6.26			
	3.0	6.39	開放	7.38	5.22	8.25	6.39	9.04	7.38	5.22			
	4.0	4.79	水槽	5.53	3.91	6.19	4.79	6.78	5.53	3.91			
	5.0	3.83	沒放	4.43	3.13	4.95	3.83	5.42	4.43	3.13			
	7.0	2.74	波導	3.16	2.24	3.54	2.74	3.87	3.16	2.24			
10.0	1.92	重力	2.21	1.57	2.47	1.92	2.71	2.21	1.57				
		波導											
		條件											

光波導尺寸約略在光波長一半

實驗中波導寬度為2.5cm，小振幅淺水波半波長必須要與2.5cm相近，水波導效果才會明顯。由左表中可見，只是由波導波速比值，無法明顯看到波導傳輸，而搭配由理論數據推論出來的小振幅淺水波半波長，在接近2.5cm時(黃色標示)，才顯示較明顯的波導效應。

*振波器10Hz一列數據以灰色底線標示為比較組，已推論為表面波，不列入討論

由我們拍攝的水波紋(數位比對)之半波長與上表推論之半波長有差異，我們推論：

1. 在加疊壓克力條後，使得水深比原始加水深高，造成真實波速比理論波速有差異(快)；
2. 振波器與10cm的匝道通道不是最佳條件，使得起振的水波不是單一頻率。

小 結

1. 最佳條件：水深3cm/頻率5Hz/壓克力條高2cm
2. 在我們設計的壓克力水槽實驗設計的條件下，能實現小振幅淺水波波導現象，也必須滿足
 - 波速比≤0.65
 - 水波半波長接近波導寬度2.5cm(壓克力條寬)
3. 水深太淺(接近2mm振幅)、頻率太高(>7Hz)，都不符合

實驗三：探討光波導結構設計是否可在水波導實現

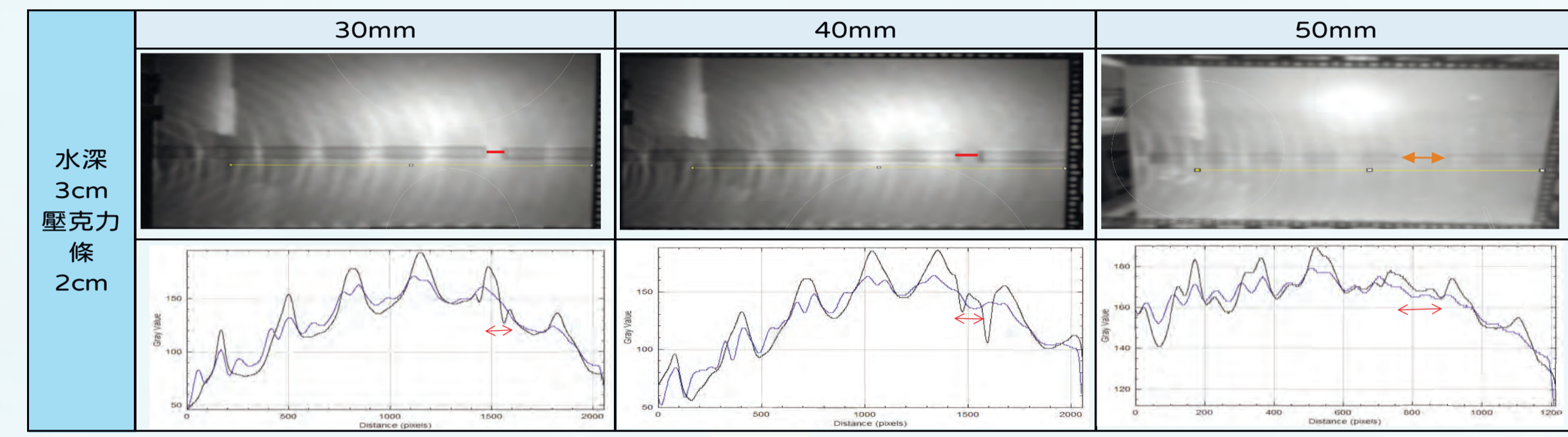
● 斷裂波導－波導的缺陷結構 (照片：學生自拍；軟體ImageJ繪製)



(a)小振幅淺水波缺陷波導的實驗，其中紅色短線標示出波導斷裂點(3.0cm)的間隙
b. 失敗的小振幅淺水波缺陷波導的實驗，其中紅色短線標示出波導斷裂點(4.0cm)的間隙。

條件：水深3cm / 頻率5Hz / 波導高2cm (距離水面 1cm)

由a圖斷裂3cm中，兩種斷裂波導排列(22cm、44cm)方式，均可經過斷裂傳點播到另一個波導
在b圖，將斷裂寬度拉長到4cm時，在斷裂點有較多的雜波(回波反射)，且也無法傳遞過去。



藍色為開放水域；黑色為水波導水域

左圖為不同缺陷長度之Plot Profile比較中，再次確認其斷裂長度須符合波導的結構尺寸，接近於水波的半波長

● 彎折波導－讓水波轉彎的結構

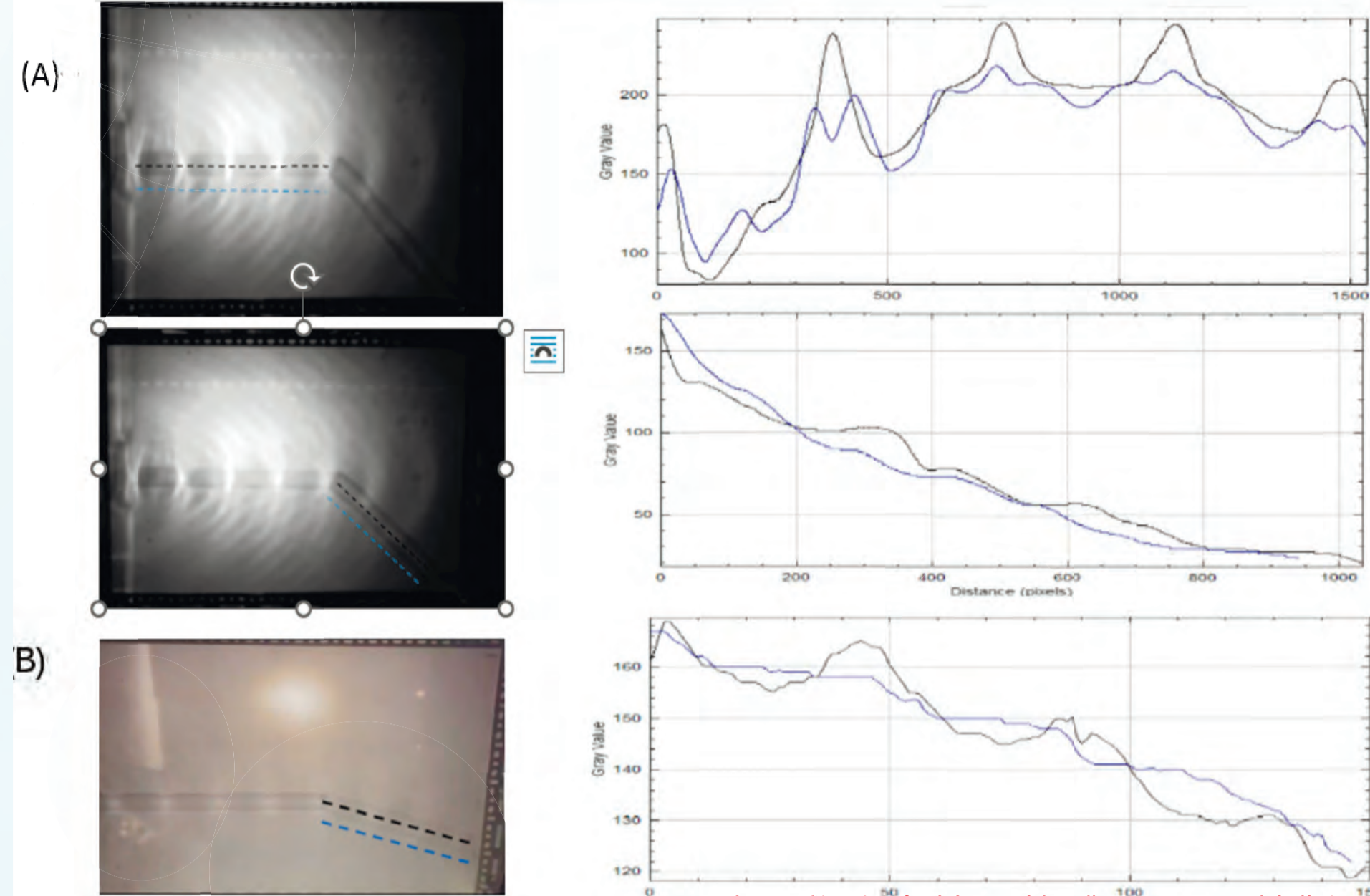
在矽光子光波導下，光波導可以讓光波轉彎，那水波導呢？



失敗的彎折小振幅淺水波波導設計，水波輸入端僅200mm 即作45度角彎折

改變轉折點

斷裂波導44cm的長波導與22cm 的短波導拼接成一個彎折角度(與水槽長邊夾角)小於30度的異型波導，成功觀察到小振幅淺水波沿著波導轉彎



(照片：學生自拍；軟體ImageJ繪製)

小結：

1. 缺陷或彎折，依然必須符合小振幅淺水波的半波長原則；
2. 在本實驗條件下，缺陷或折彎處，必須在水槽長邊2/3處，才不易受干擾

研究討論與總結

研究討論

一、本實驗與參考文獻之最佳小振幅淺水波的波導條件差異

1. 實驗條件不一致：文獻中未揭露振波器寬度與通道長度
2. 實驗設備不同：文獻中的實驗裝置架設在抗震平台上；本實驗為一般角架，且我們的起波器為單點支撐，所以在啟動時其波片會晃動。
3. 量測方式不同：文獻使用3D立體輪廓攝影技術來量測小振幅淺水波振幅與波長；本實驗為照相攝影再使用軟體灰階化，繪製其波紋。

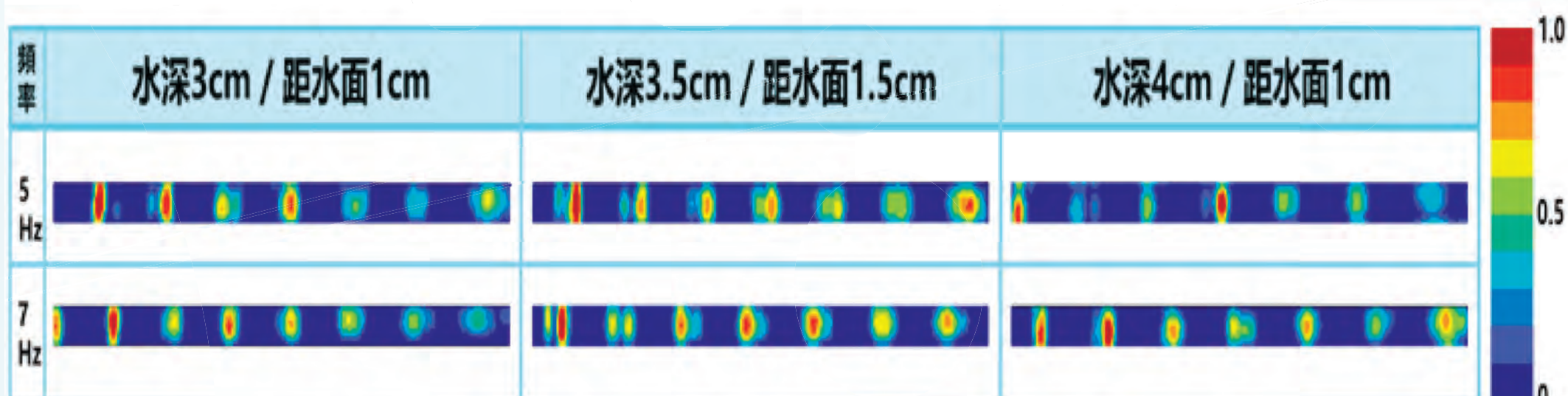
二、半波長計算值與實驗照片觀察水波半波長不完全一致

三、實驗延伸討論

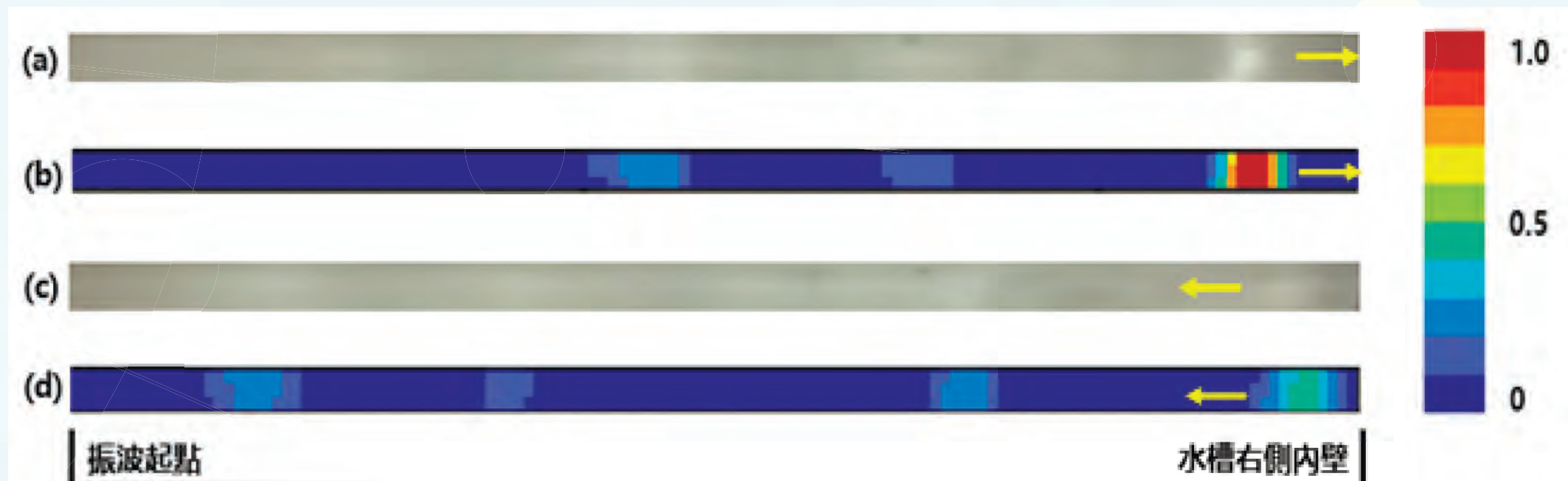
1. 振波器設計：採用一片金屬組裝，然而在上下振動過程，左右兩端，會輕微搖擺
2. 壓克力條厚度呈現方式：使用厚度10mm來堆疊，發現有些雜波
3. 實驗裝置易造成雜訊
4. 實驗水域深度比值來探討波形的差異
5. 增加7Hz(水深3cm/壓克力條2cm/)異形水波導實驗 (其求得之半波長最接近壓克力條寬，但比強度低於5Hz的條件)
6. 水波波前的觀測，未能完全定量化

總結

水波導上小振幅淺水波之投影光強度等高線圖模擬圖

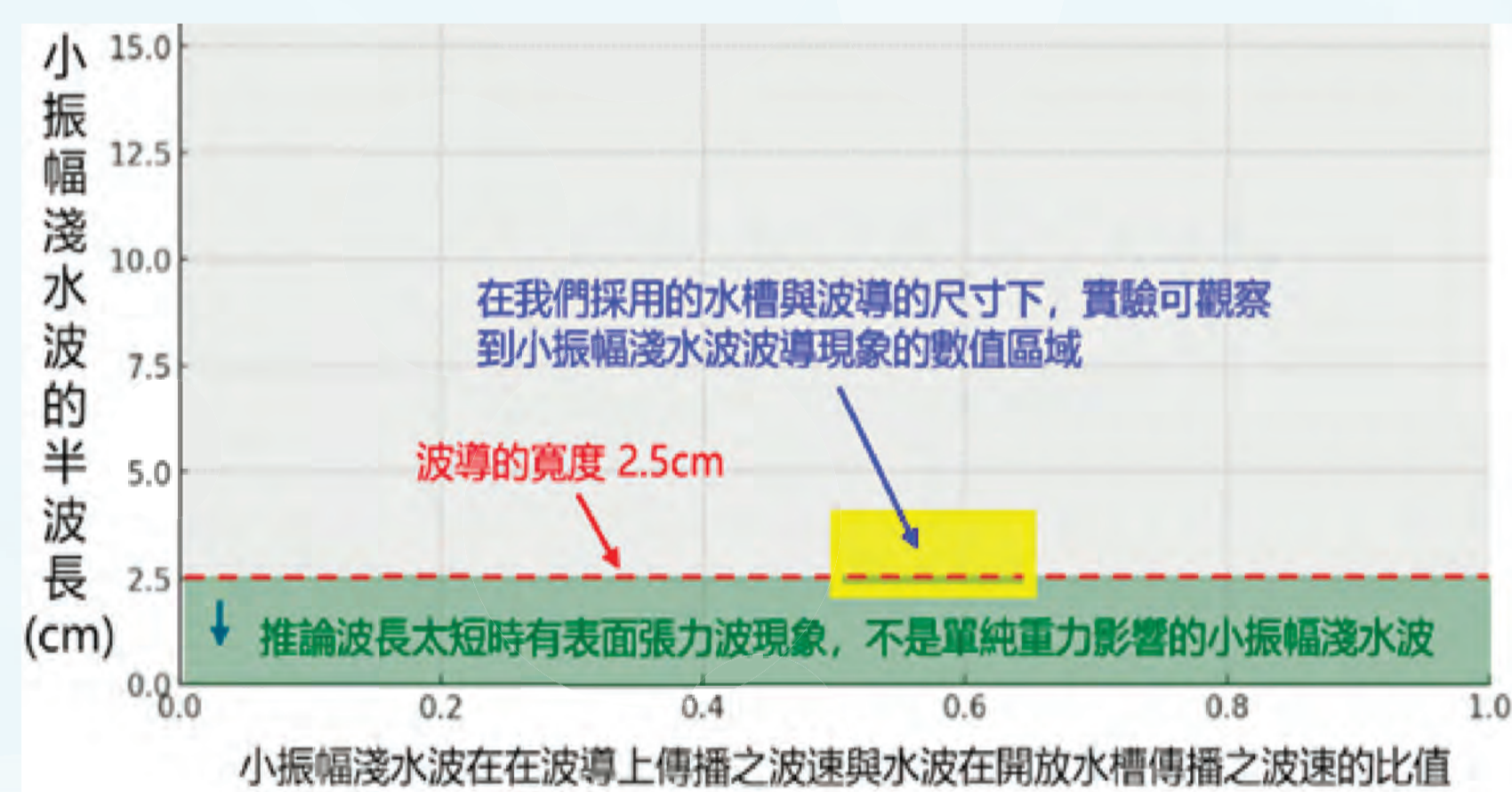


對應到六組較佳的波導效果的小振幅淺水波投影光強度等高線圖 學生使用ChatGPT繪製

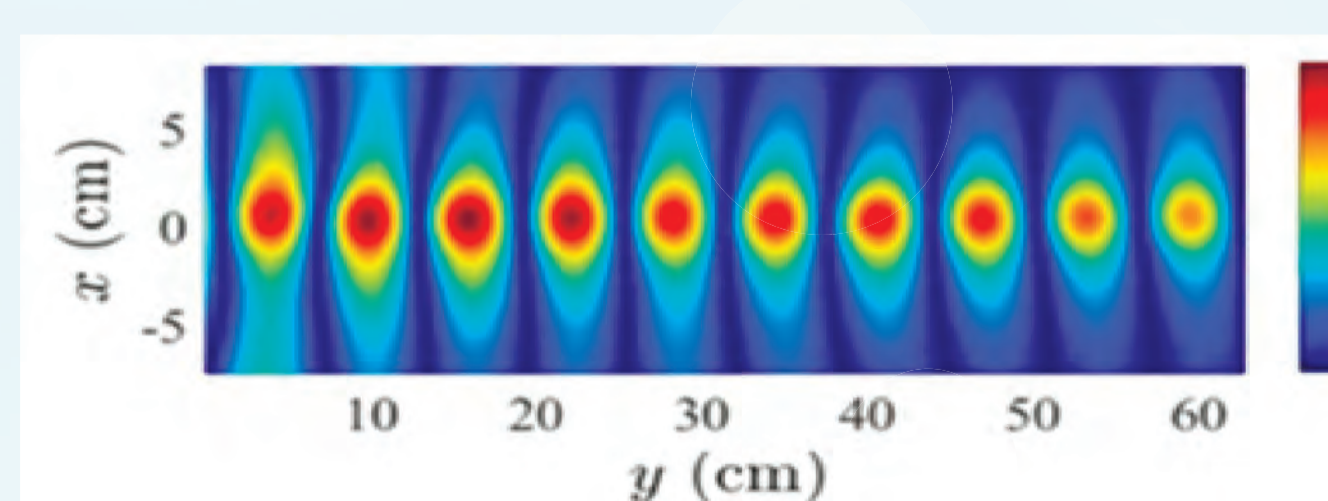


淺水波抵達水槽右側內壁之前 (a) 投影光強度照片，與(b)投影光強度的等高線圖。淺水波自右側內壁反射後的 (c) 投影光強度照片，與(d)投影光強度的等高線圖。 學生使用ChatGPT繪製

參考文獻：水深2.5cm / 頻率3Hz / 波導高1cm
本實驗：水深3cm / 頻率5Hz / 波導高2cm (距離水面 1cm)



模式	影像	(黑)水波導水域與(藍)開放水域比較
一種成型		
堆疊		



參考文獻展示出3D立體攝影技術去量測小振幅淺水波振幅的等高線圖 (Ref. Observation of broad-band water waveguiding in shallow water: a revival, Figure 1)