

中華民國第 63 屆中小學科學展覽會
作品說明書

國中組 物理科

探究精神獎

030113

就問你「浮」不「浮」：浮球的穩定性討論

學校名稱：基隆市立中正國民中學

作者： 國一 李欣苡 國一 易庭安	指導老師： 許芳瑾 曹瑞芸
---------------------------------	-----------------------------

關鍵詞：扭蛋浮球、扶正力矩、浮球穩定度

就問你「浮」不「浮」：浮球的穩定性探討

摘要

我們利用扭蛋製做單軸、分離式及貫通式雙軸浮球模型，進行海水與淡水的載重與吃水深度、配重位置與傾斜角度、造波和回正觀察。發現載重與吃水深度呈線性關係。不同配重位置明顯影響分離式模型的傾斜角度，重心越低，角度越小。貫通式模型易保持正浮，但重心較高者，正浮不穩定，稍受擾動即傾斜。

在造波中發現浮球呈週期性運動，且浮力最大值在波峰，最小值在波谷，相差可達50%~85%。垂直方向運動速率最大值約在平衡位置，垂直位移最大值 <2 倍波高。

不同配重位置的貫穿式模型以 90° 傾斜入水，軸頂到重心的距離(L)決定浮球是否回正。本實驗發現全長16cm的模型， $L \geq 11.42\text{cm}$ 者，均可回正， $L \leq 11.17\text{cm}$ 者，均無法回正，顯示L越大浮球穩定性越高。

壹 研究動機

身為基隆的孩子，我們每天都可以看到許多船，或停在港口，或進出港灣，動靜之間，非常吸引人。但是偶爾還會看到有大船翻覆的新聞，我們十分好奇，究竟船要怎樣才是穩定的？是什麼原因讓船可以穩定或造成船翻覆呢？於是我們就想利用可隨手取得的扭蛋，來進行模擬實驗。

世界上每個水域、每個港口的水深，都不太一樣，我們查了資料，發現吃水深度會影響船隻航行與進出港口，所以我們先觀察不同配重位置的模型在靜水中的吃水深度。我們認為一艘船，應能在靜水中保持正浮的狀態，也應能在波浪中保持穩定，且遇到極端狀況造成船隻傾斜角度過大，也不至於翻覆。因此我們設計一系列在淡水與海水中的觀察與實驗，紀錄並分析浮球模型的狀態及運動情形，利用浮球表現的現象來簡單了解船隻的穩定性。

貳、研究目的

- 一、設計並測試扭蛋浮球模型以進行實驗觀察。
- 二、觀察並記錄在靜水中，不同配重對浮球的**吃水深度**影響。
 - (一) 在靜止的**淡水**中，**分離式雙軸**、**貫通式雙軸**及**單軸**三種浮球模型配重對與吃水深度的關係。
 - (二) 在靜止的**海水**中，**分離式雙軸**、**貫通式雙軸**及**單軸**三種浮球模型配重對與吃水深度的關係。
- 三、了解不同配重位置對浮球**傾斜度**的影響。
 - (一) 比較**淡水**與**海水**中，**分離式雙軸**配重位置對傾斜度的影響。
 - (二) 比較**淡水**與**海水**中，**貫通式雙軸**配重位置對傾斜度的影響。
- 四、探討**造波**對浮球運動的影響。
 - (一) 手動造波對不同浮球運動的影響。
 - (二) 造波機造波對**分離式雙軸**、**貫通式雙軸**、及**單軸**浮球運動的影響。
- 五、了解不同浮球模型在淡水中的**回正**情形。
 - (一) 了解**貫通式雙軸**浮球模型在淡水中 90°傾斜入水後的回正情形。
 - (二) 了解**單軸**浮球模型在淡水中 90°傾斜入水後的回正情形

參、研究設備及器材

扭蛋(直徑 10cm)、手鋸、全螺牙條(304 不銹鋼，密度 7.93)、螺母(與牙條同)、膠槍、膠條、魚缸與造波池，如圖 3-1~3-5 所示。攝影設備使用 iphone12 手機。

				
圖 3-1 浮球	圖 3-2 手工具	圖 3-3 電動工具	圖 3-4 魚缸	圖 3-5 造波池

肆、研究方法



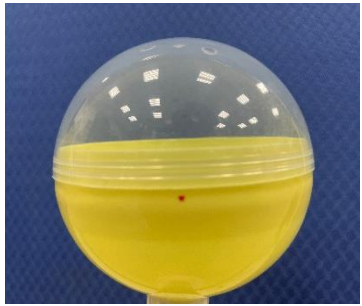
一、設計並測試扭蛋浮球模型以進行實驗觀察。

(一) 模型進階歷程

校內科展及市展使用的模型為分離式雙軸及單軸兩種，作為觀察運動行為標的，具有質心不確定、上下軸難以對稱、顏色單一不利觀察、密封性不佳等缺點。為了改善模型，我們統一模型的規格，找出扭蛋的質心，做好水密，同時採用分離式雙軸以及貫通式雙軸進行比對，並保留單軸模型，以便做完整的觀察與比較

(二) 找出扭蛋重心

1. 取扭蛋的上、下半球分別稱重，發現下半球較重。
2. 削減下殼，將削下的部分加入上殼，調整至兩半球質量近似。此時重心位置恰為兩半球交界處中心，其投影在扭蛋上的位置如圖 4-3 所示。

		
圖 4-1 削減後下殼質量 16.38 克	圖 4-2 上殼與削下的上殼質量共 16.06 克	圖 4-3 重心位置投影(紅點處)

(三) 製作扭蛋浮球模型

浮球模型分為**分離式雙軸**、**貫通式雙軸**及**單軸**三種。

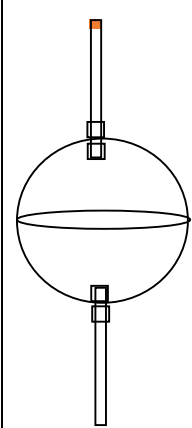
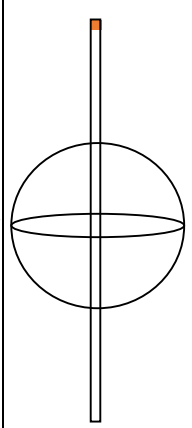
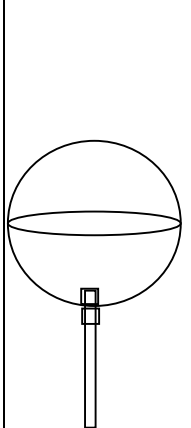
分離式雙軸：將扭蛋模型上下殼頂對稱位置鑽孔，以長螺絲穿入，內外均鎖上螺帽即成。軸長均為 6cm，上軸長度可調整。

貫通式雙軸：由一根長螺絲作為軸，上、下軸均為 6cm，在螺絲與浮球接觸點塗上防水膠即成。

單軸：做法與分離式類似，上半球不鑽孔。

三種浮球模型的資料及代號如表 4-1 所示。

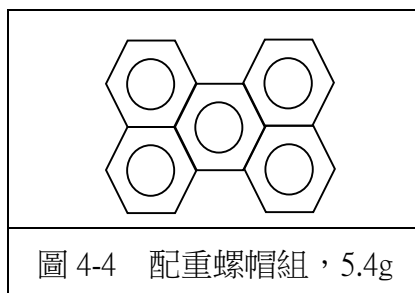
表 4-1 三種浮球模型資料表

代號	離 6	貫 6	單
質量	56.8g	54.0g	46.2g
上軸長度	6 (可調)	6 cm	--
下軸長度	6 cm	6 cm	6 cm
圖示			

二、觀察並記錄在靜水中，不同配重對浮球的吃水深度影響。

(一) 在靜止的淡水中，離 6、貫 6 及單三種浮球模型配重對與吃水深度的關係。

器材：魚缸、尺、三種模型、配重螺帽組(如圖 4-4)、手機、腳架。



操作方式如下：

步驟一 在魚缸中加入淡水，將無配重的離 6 模型放入水中。

步驟二 觀察並記錄吃水線的位置。

步驟三 離 6 模型配 5 組螺帽，重複步驟二。

步驟四 離 6 模型配 10 組螺帽，重複步驟二。

步驟五 離 6 模型配 15 組螺帽，重複步驟二。

以上為離 6 模型配重後，在淡水中吃水深度的觀察。

貫 6 及單模型以同樣的步驟操作，觀察並記錄吃水深度。

(二) 在靜止的海水中，分離式雙軸、貫通式雙軸及單軸三種浮球模型配重對與吃水深度的關係。

將魚缸中的水換成海水，重複一次上述步驟，即完成三種模型在海水中配重與吃水深度的觀察。

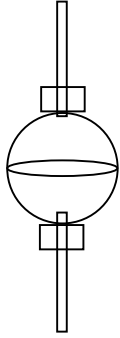
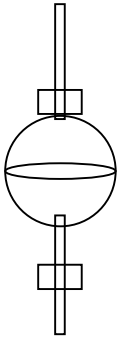
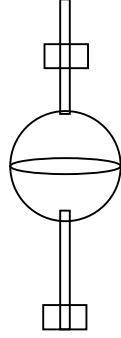
三、了解不同配重位置對浮球傾斜度的影響

為了操作方便，我們先將淡水的二種模型做完，改成海水再做一次。操作方式如下。

(一) 在靜止的淡水中，分離式雙軸和貫通式雙軸二種浮球模型配重位置對傾斜度的影響。

配重組如表 4-2，均只用一組。位置命名如表 4-2。

表 4-2 離 6 模型配重位置說明

		
離 6-00	離 6-03	離 6-36
上下軸配重均緊貼浮球	上軸配重緊貼浮球，下軸配重距浮球 3cm	上軸配重距浮球 3cm，下軸配重距浮球 6cm

貫 6 模型配重位置名稱與離 6 相同，單軸僅有單碼數字，分別為單-0、單-3、單-6。

操作步驟如下。

步驟一 在魚缸旁貼上尺規，加滿淡水。

步驟二 將離 6E 模型放入水中，記錄其影像。

步驟三 依序完成離 6-00、離 6-03、離 6-06、離 6-30、離 6-33、離 6-36、離 6-60、離 6-63、離 6-63 等配重位置。

以上為離 6 各配重位置的操作步驟。換成貫 6 及單軸模型，重複步驟二，即完成淡水傾斜度觀察。

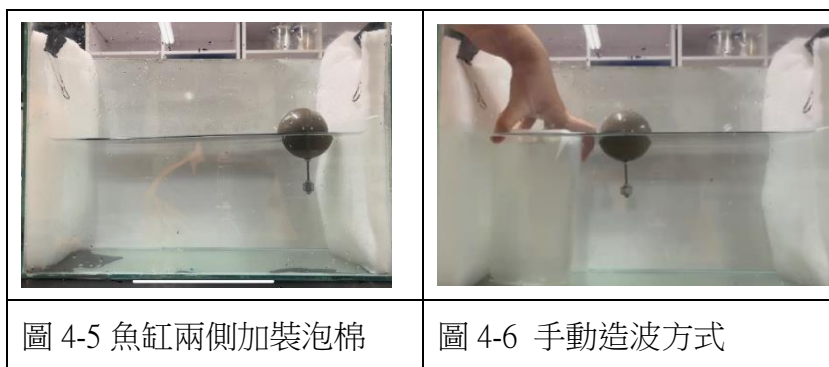
(二) 在靜止海水中，分離式雙軸、貫通式雙軸二種浮球模型配重位置對傾斜度的影響。

將淡水換成海水，重複上述操作，即完成海水傾斜度觀察。

四、探討造波對浮球運動的影響

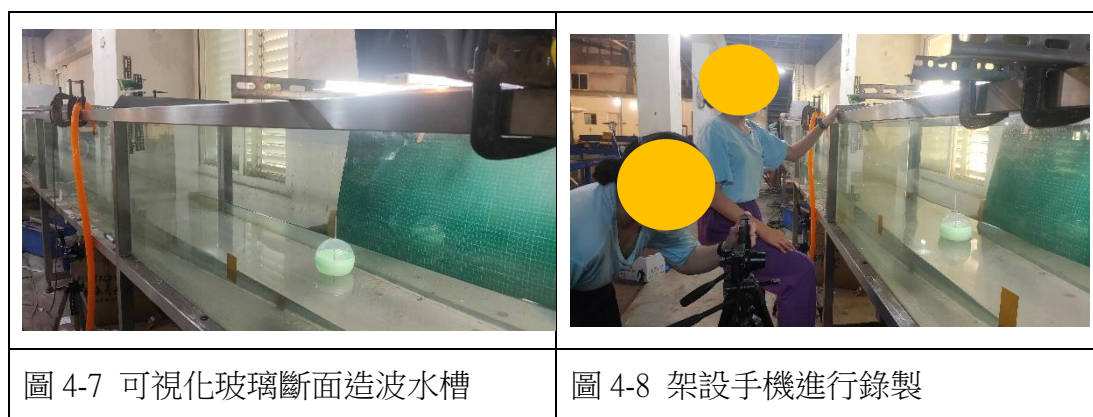
(一) 手動造波對不同浮球運動的影響

在校內科展和市展，我們採用手動造波的方式：為減少反射波對浮球的影響，我們在魚缸的兩端內側貼上泡棉吸收能量，如圖 4-5 所示。以一升的容器裝滿水，由魚缸底部往上提，造成單一波動(圖 4-6)，觀察對浮球的影響。



(二) 造波機造波對分離式雙軸、貫通式雙軸、及單軸浮球運動的影響

手動造波的缺點顯而易見，我們向海洋大學河工系商借可視化玻璃斷面造波水槽來造波，以觀察波動對不同浮球模型的影響。水槽長、寬、高為 15m x 0.4m x 0.6m，水深 20cm，週期 1s 及 1.5s，波高 4.5cm。過程中以手機進行拍攝。



器材：造波水槽、尺規、三種模型、配重螺帽組、手機、腳架。

步驟一 將水槽水深放到 20cm。

步驟二 架設手機。

步驟三 設定造波機的週期 $T=1s$ 與波高 $H=4.5cm$ 。

步驟四 以離 6 模型不配重，進行造波觀察並記錄影像。

步驟五 改變離 6 模型配重位置為 00、03、06、33、36、66，重複步驟四。

步驟六 以貫 6 模型重複上列步驟。

步驟七 以單軸模型重複上列步驟。

T=1s 的造波觀察完成，可得到離 6 模型 7 個檔案、貫 6 模型 7 個檔案、及單軸模型不配重、0、3、6 等 4 個檔案，共 18 個影像檔。

將造波機週期改成 T=1.5s，重複以上三種模型的操作並記錄。

五、了解不同浮球模型在淡水中的回正情形。

我們在校內科展和市展時，是用手將模型橫放入水，優點是容易操作，缺點是施力不易控制，於是我們自製模型下水器，希望做到兩軸同時下水，且兩端受力一致。經過多次討論及改進，最後產生的下水器如圖 4-9 所示。將兩根摩擦力較小的不銹鋼筷，固定在兩根竹筷做的把手上，使用時將模型的雙軸架在下水器的不銹鋼筷上，在接近水面時，將下水器前端傾斜，模擬新船下水，使浮球滑入水中，以觀察模型的回正情形



圖 4-9 自製模型下水器

(一) 了解貫通式雙軸浮球模型在淡水中 90°傾斜入水後的回正情形。

器材：魚缸、貫 6 模型，螺帽配重組，下水器，手機，腳架。

步驟一 將魚缸住滿淡水，架好手機。

步驟二 以下水器將貫 6-00 模型橫放入水，以手機紀錄其過程。

步驟三 將配重位置換成 03、06、30、33、36、60、63、66，重複以上步驟。

以上完成淡水的貫 6 模型回正觀察。

(二) 了解單軸浮球模型在淡水中 90°傾斜入水後的回正情形

換成單軸模型，以手托住下軸呈水平，再放開始下軸入水，以手機紀錄其過程。

伍、研究結果

一、設計並測試扭蛋浮球模型以進行實驗觀察。

我們在校內科展及市展用的浮球模型如圖 5-1 與圖 5-2。

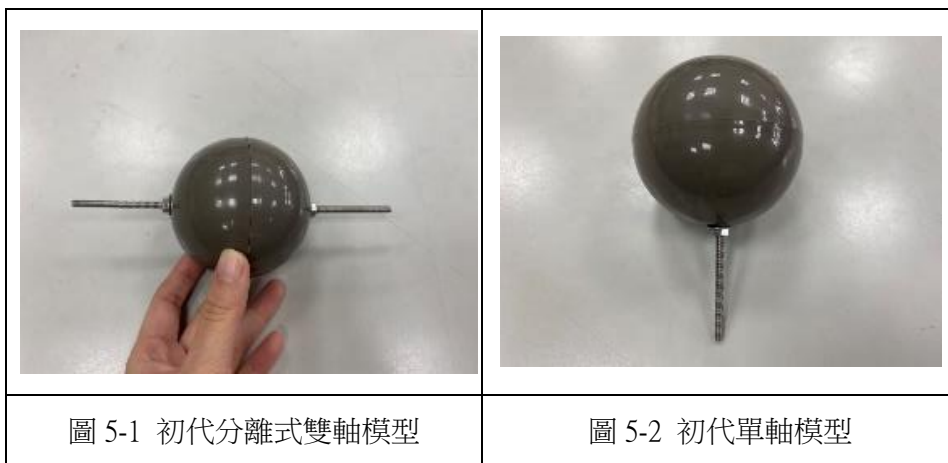


圖 5-1 初代分離式雙軸模型

圖 5-2 初代單軸模型

為了改進浮球模型的缺點，我們保留分離式雙軸及單軸模型，增加貫通式雙軸模型，最後成果如圖 5-3~圖 5-5。

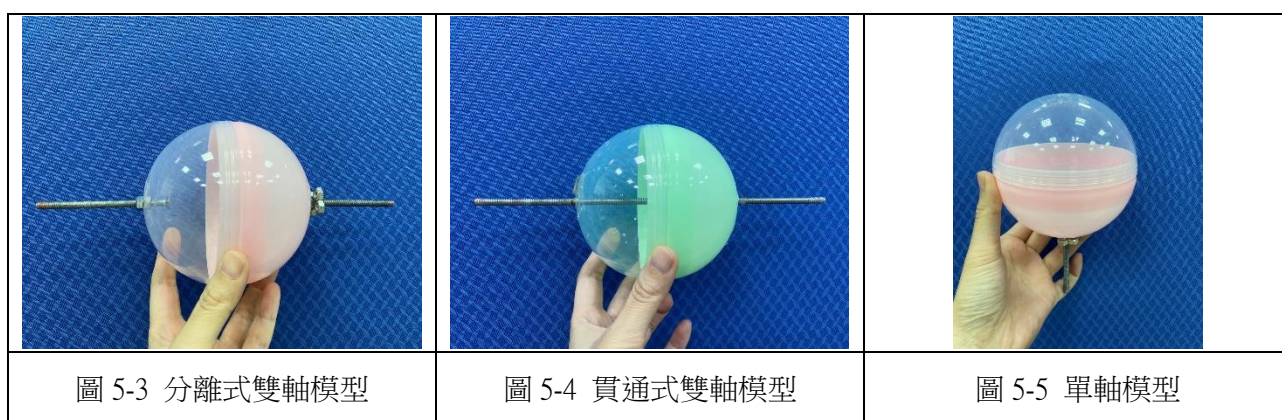


圖 5-3 分離式雙軸模型

圖 5-4 貫通式雙軸模型

圖 5-5 單軸模型

二、觀察並記錄在靜水中，不同配重對浮球的吃水深度影響。

(一) 在靜止的淡水中，分離式雙軸、貫通式雙軸及單軸三種浮球模型配重對與吃水深度的關係。

淡水的測試結果如表 5-1 所示。

表 5-1 靜止淡水中不同配重的模型吃水深度。

	模型	0 組	5 組	10 組	15 組
淡水	離 6	1.8cm	2.3cm	2.6 cm	3.2 cm
	貫 6	2.1 cm	2.4 cm	2.7 cm	3.0 cm
	單	1.7 cm	2.1 cm	2.5 cm	--

在淡水中，離 6 模型每增加 5 組配重，沒入水深分別增加 0.5、0.3、0.6cm，貫 6 沒入水深+0.3cm/5 組配重，單軸模型則是+0.4cm/5 組配重。

(二) 靜止海水中，分離式雙軸、貫通式雙軸及單軸三種浮球模型配重與吃水深度關係。

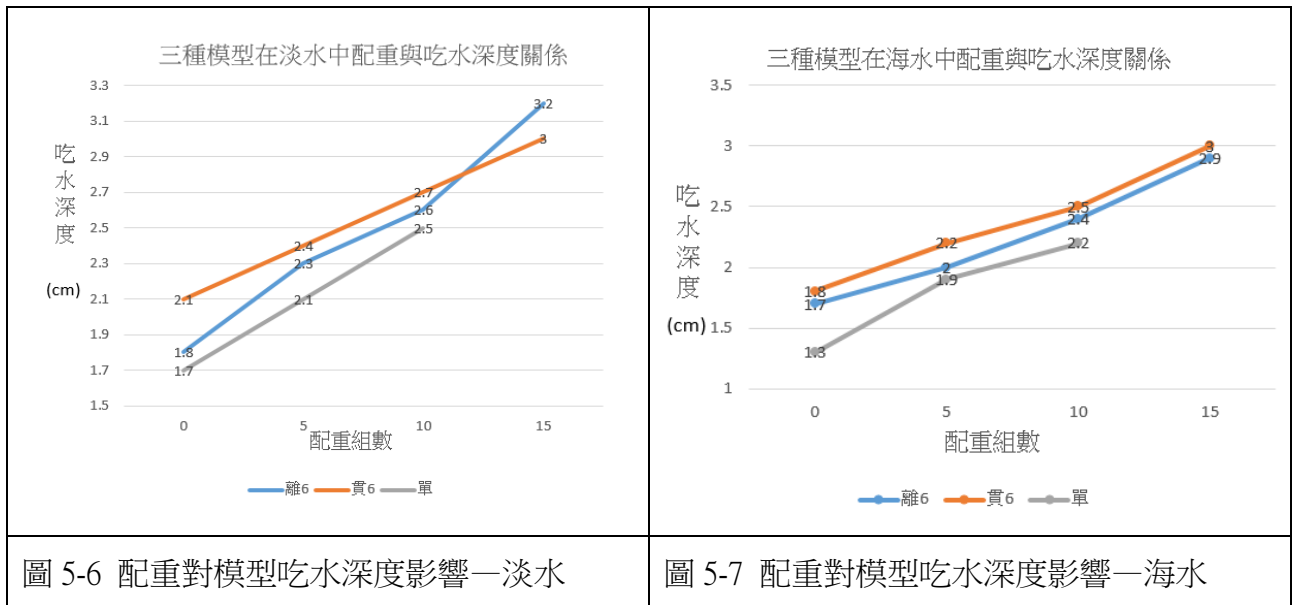
海水的測試結果如表 5-2 所示。

表 5-2 靜止海水中不同配重的模型吃水深度。

	模型	0 組	5 組	10 組	15 組
海水	離 6	1.7cm	2.0cm	2.4cm	2.9cm
	貫 6	1.8cm	2.2 cm	2.5 cm	3.0 cm
	單	1.3cm	1.9 cm	2.2 cm	--

在海水中，離 6 模型每增加 5 組配重，沒入水深為+0.3、+0.4、+0.5cm，貫 6 沒入水深+0.4、+0.3、+0.5cm，單軸模型則是+0.6、0.3cm。

各模型在淡水、海水的配重組數與吃水深度統計得比較如下圖 5-6~5-7 所示。



三、了解不同配重位置對浮球傾斜度的影響。

(一) 比較淡水與海水中，分離式雙軸配重位置對傾斜度的影響。

無配重離 6 傾斜度以 Tracker 測量，如圖 5-8~5-9 所示。

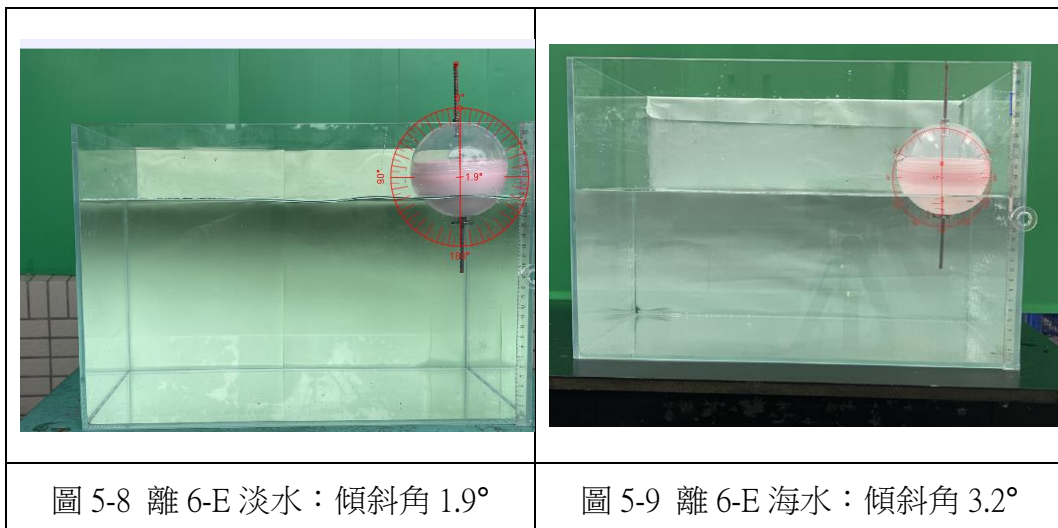
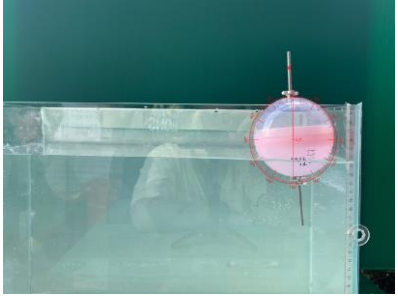
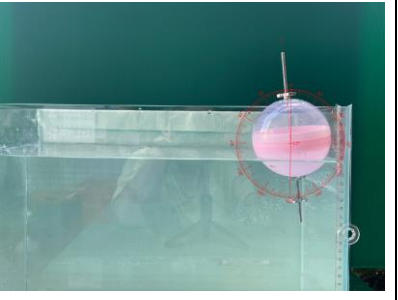
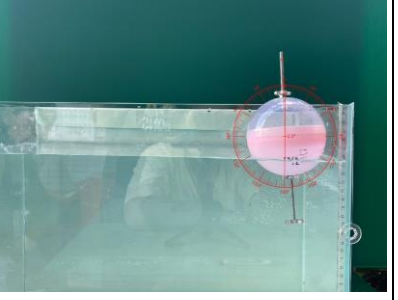
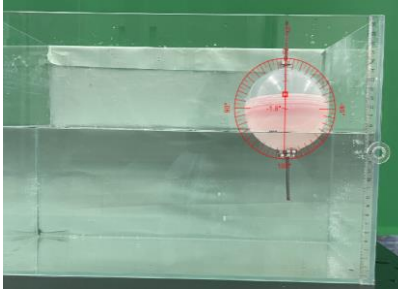
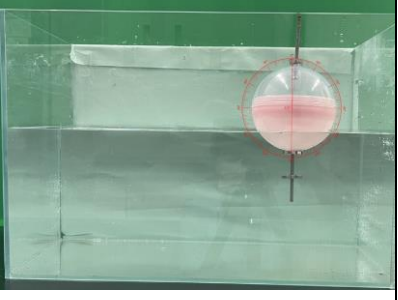
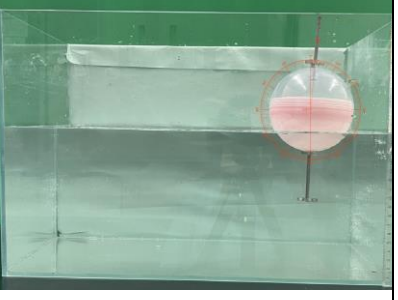


圖 5-8 離 6-E 淡水：傾斜角 1.9°

圖 5-9 離 6-E 海水：傾斜角 3.2°


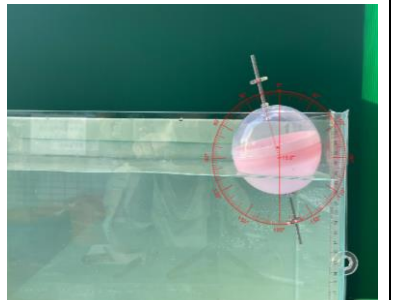
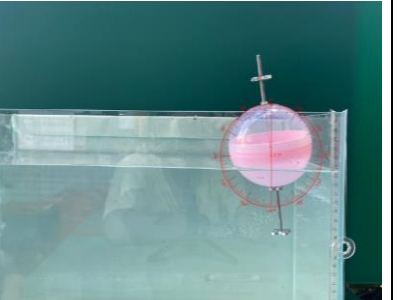
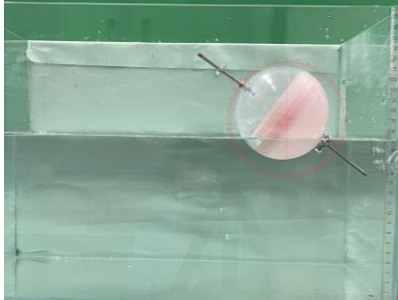
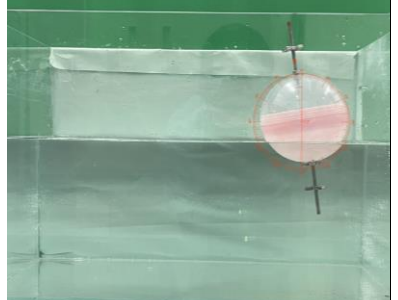
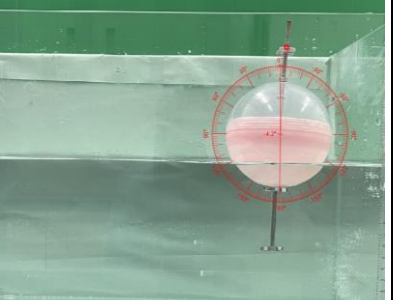
由於測量及環境誤差，傾斜角在 6°以內視為正浮。

表 5-3 「離 6」上軸配重位置 0cm 的三種組合浮球傾斜程度

	離 6-00	離 6-03	離 6-06
淡水			
	傾斜角 3.3°	傾斜角 5.5°	傾斜角 2.3°
海水			
	傾斜角 1.8°	傾斜角 5.3°	傾斜角 5.5°

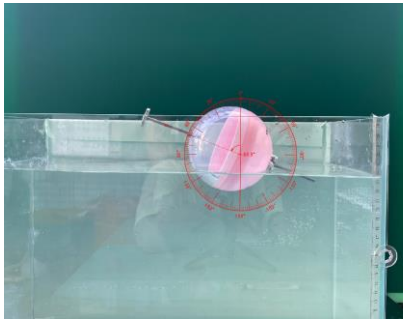
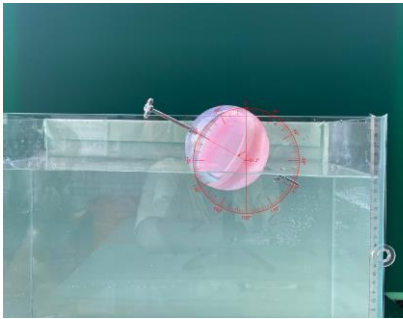
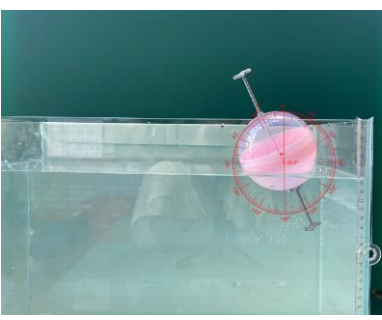
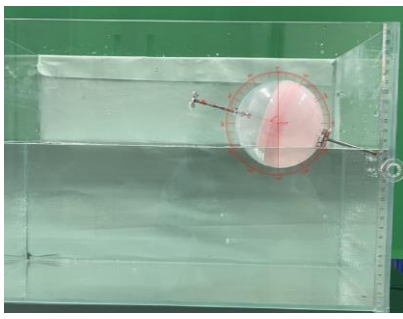
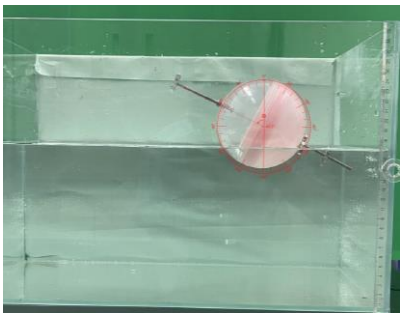
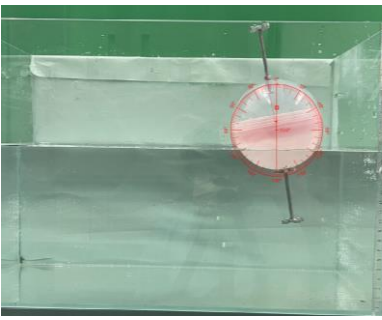
離 6 上軸配重位置 0cm，下軸 0、3、6cm，傾斜角均 $<6^\circ$ ，無明顯差異，均可視為正浮穩定。

表 5-4 「離 6」上軸配重位置 3cm 的三種組合浮球傾斜程度

	30	33	36
淡水			
	傾斜角 52.6	傾斜角 15.8	傾斜角 7.7
海水			
	傾斜角 53.2°	傾斜角 14.9°	傾斜角 4.0°

離 6-30，海水與淡水的測試都出現大角度傾斜，模型無法保持正浮。離 6-33 可明顯改善傾斜狀況，而離 6-36，在海水中傾斜角 $<6^{\circ}$ ，可視為正浮穩定。在淡水中傾斜角雖還有 7.7° ，但也已將模型回正至可接受範圍。

表 5-5 「離-6」上軸配重位置 6cm 的三種組合浮球傾斜程度

	60	63	66
淡水			
	傾斜角 68.9°	傾斜角 61.2°	傾斜角 25.0°
海水			
	傾斜角 73.5°	傾斜角 64.2°	傾斜角 10.6°

離 6-60、63、66，均有明顯傾斜，但下軸配重位置越遠，傾斜角度越小。

(二) 比較淡水與海水中，貫通式雙軸配重位置對傾斜度的影響。

由以上各圖可發現，分離式雙軸即便經過改良，仍難保證上下軸在同一直線，不易正浮，因此我們設計了貫通式雙軸模型，上軸 6cm，稱為「貫 6」。「貫-6」模型不配重的傾斜角如圖 5-10~圖 5-11 所示，貫 6-E 不配重作為對照組。

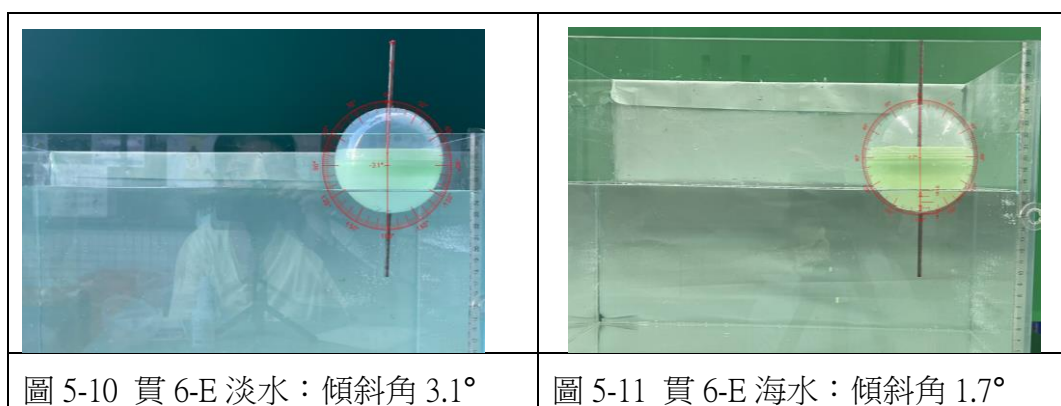
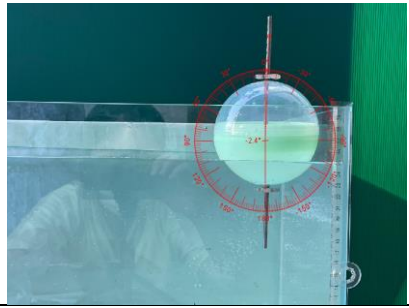
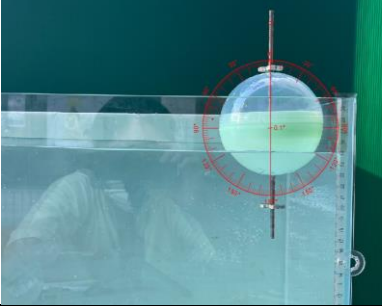
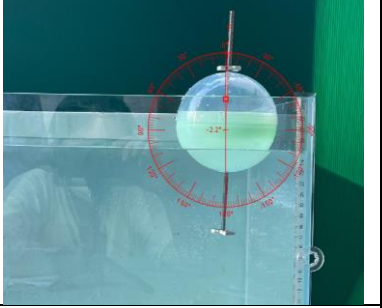
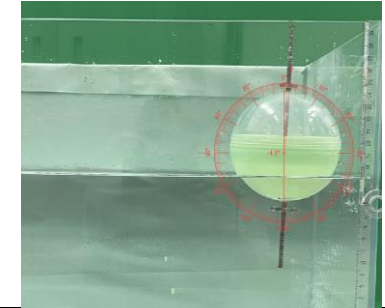
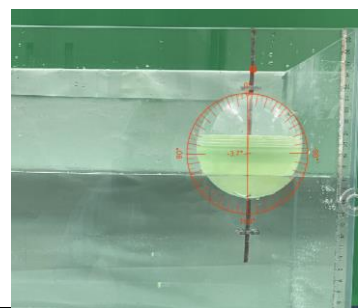
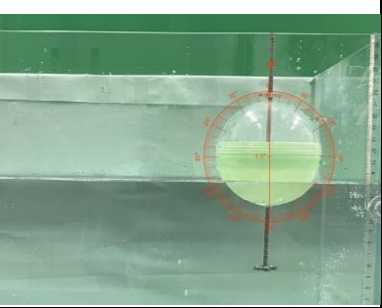
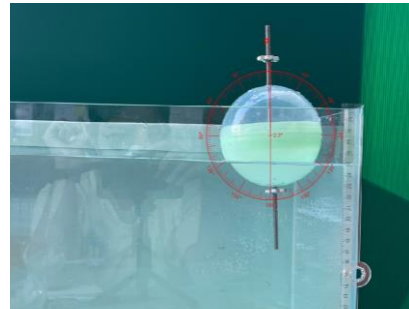
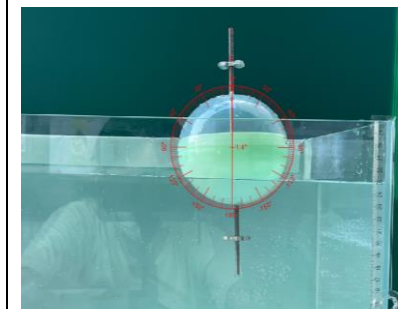
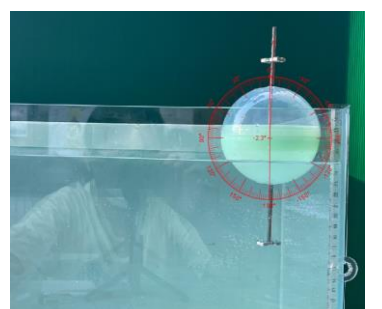
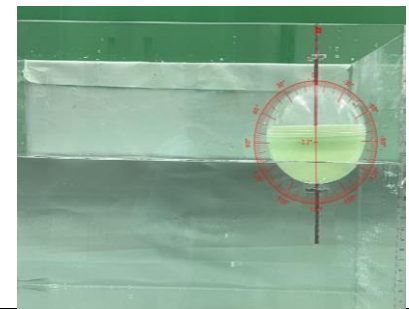
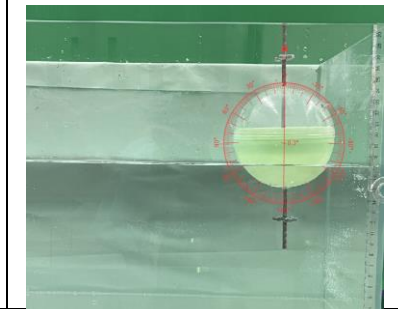
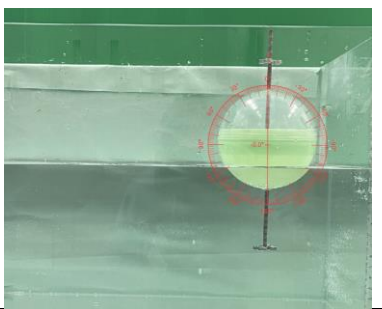


表 5-6 「貫-6」上軸配重位置 0cm 的三種組合浮球傾斜程度

	00	03	06
淡水			
	傾斜角 2.4°	傾斜角 0.1°	傾斜角 2.2°
海水			
	傾斜角 4.8°	傾斜角 3.7°	傾斜角 1.5°

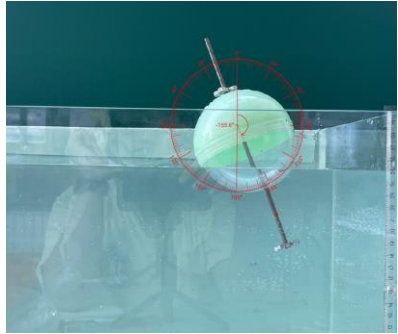
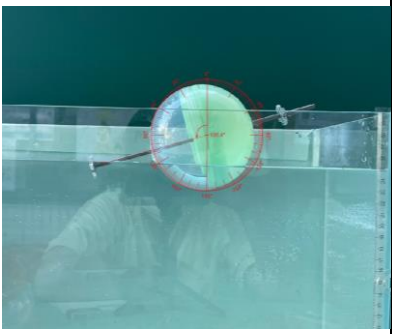
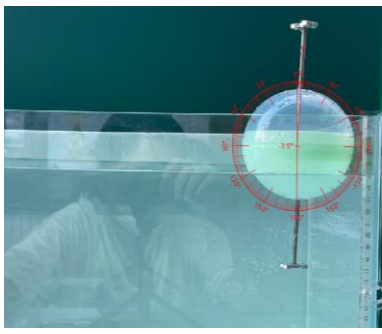
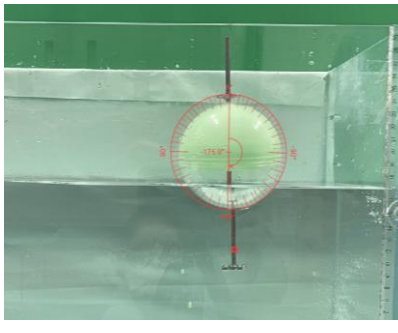
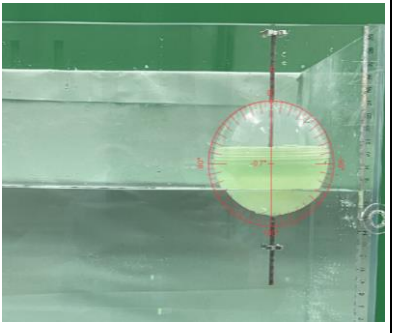
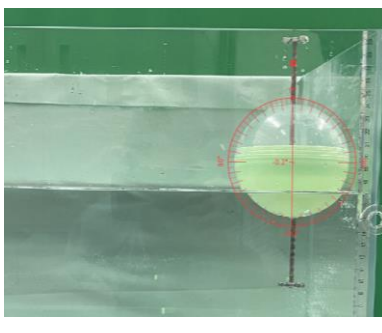
貫 6-00、03、06，傾斜角均 $<6^\circ$ ，能很好地表現出正浮穩定。

表 5-7 「貫-6」上軸配重位置 3cm 的三種組合浮球傾斜程度

	30	33	36
淡水			
	傾斜角 2.3°	傾斜角 1.4°	傾斜角 2.3°
海水			
	傾斜角 2.3°	傾斜角 0.3°	傾斜角 0°

貫 6-30、33、36，傾斜角均 $<3^\circ$ ，也都能保持正浮穩定。但貫 6-30 為不穩定正浮，稍有擾動便會橫倒。

表 5-8 「貫-6」上軸配重位置 6cm 的三種組合浮球傾斜程度

	60	63	66
淡水			
	傾斜角 156.9°，上軸入水	傾斜角 105.4°，上軸入水	傾斜角 3.5°
海水			
	傾斜角 175.9°，上軸入水	傾斜角 0.7°	傾斜角 0.2°

貫 6-60 上軸倒插入水，貫 6-63 淡水試驗時倒插入水，但在海水中能正浮但不穩定，稍有擾動即橫倒。

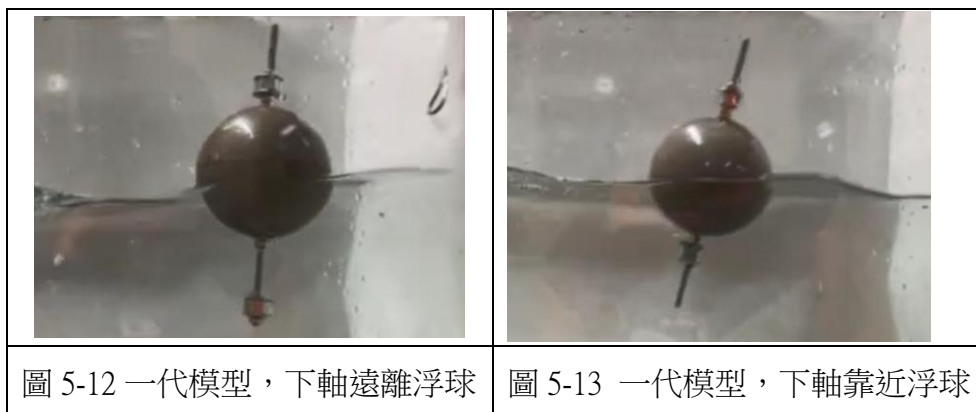
無法保持穩定正浮的配重位置，如 30、60、63，將不進行波動實驗。

由兩組模型的結果可知，「離-6」的各種配重位置組合的傾斜程度都更明顯，原因是上、下兩軸難以在同一條線上，這可由貫通式軸予以校正。

四、探討造波對不同浮球運動的影響

(一)手動造波對不同浮球運動的影響。

在市展我們發現，分離式雙軸浮球上軸配重高、下軸配重接近浮球的組合，無法使模型保持正浮。而能在靜水中穩定正浮的模型，在受到手動造波的影響時，會出現類似圓周運動、以及上下起伏的運動，如圖 5-12 與圖 5-13 所示。



(一) 造波機造波對分離式雙軸、貫通式雙軸及單軸浮球運動的影響。

為了量化運動模式，我們改進了造波方式，使用造波水槽來觀察造波對模型的運動影響；並且以 Tracker 進行影像分析。

造波週期 $T=1\text{sec}$ ，波高 $H=4.5\text{cm}$ ，水深 20cm ，第四個波起為穩定波動，所有影像都從第四個波開始記錄。

每個雙軸模型做 7 種配重位置組合：E、00、03、06、33、36、66，單軸模型做 E、0、3、6 四種位置組合，是為第一批資料。

將造波機周期改為 $T=1.5\text{s}$ ，其餘參數維持不變，進行同樣的模型組合觀察，為第二批資料。

$T=1\text{sec}$ ，離 6-00、03、06 的 Tracker 分析與 excel 運動軌跡如圖 5-14~圖 5-19 所示，每相鄰兩點的時間間隔均相同。

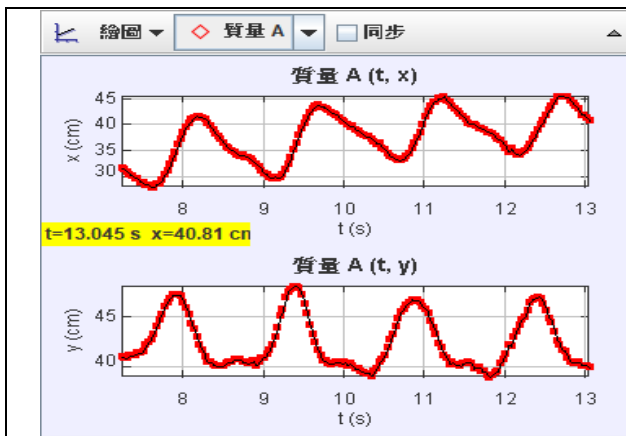


圖 5-14 離 6-00 x、y 質點運動軌跡

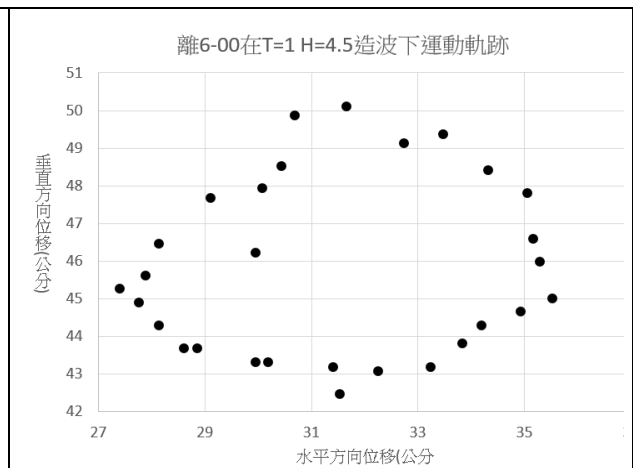


圖 5-15 離 6-00 x、y 關係圖

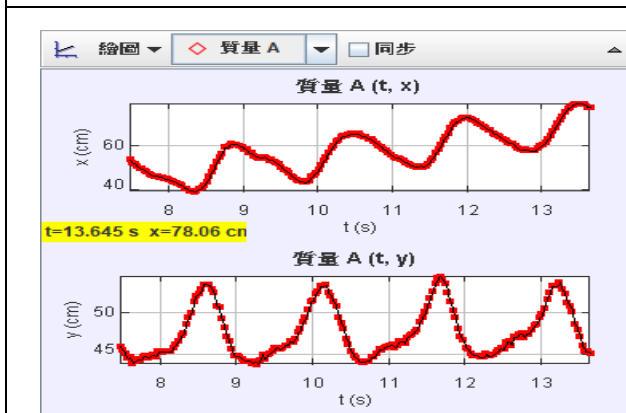


圖 5-16 離 6-03 x、y 質點運動軌跡

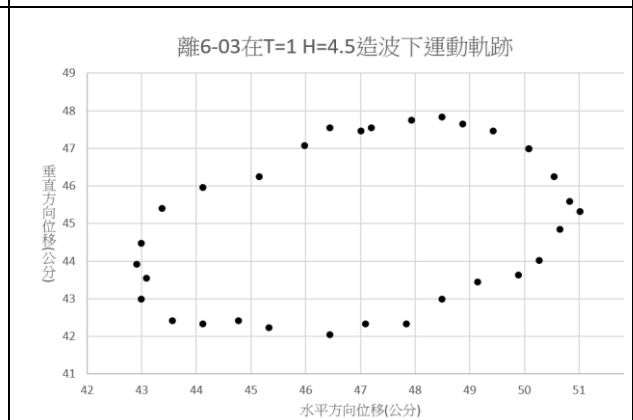


圖 5-17 離 6-03 x、y 關係圖

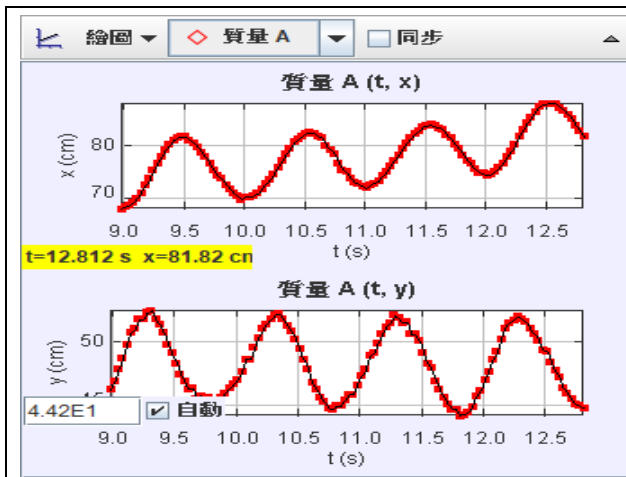


圖 18 離 6-06 x、y 質點運動軌跡

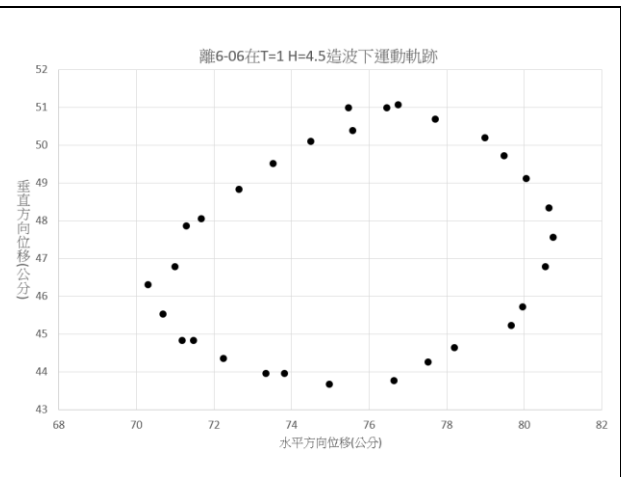


圖 5-19 離 6-06 x、y 關係圖

以上離 6 模型各配重位置的**最大垂直位移均<9cm，即 2 倍波高。**

貫 6 模型資料如圖 5-20~圖 5-25 所示。

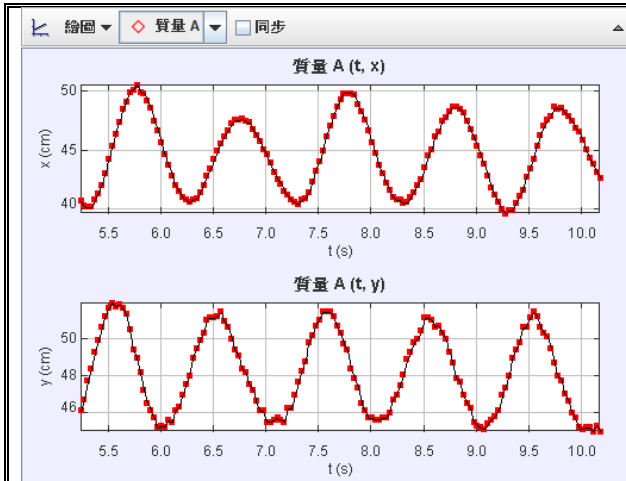


圖 5-20 貫 6-00 x、y 質點運動軌跡

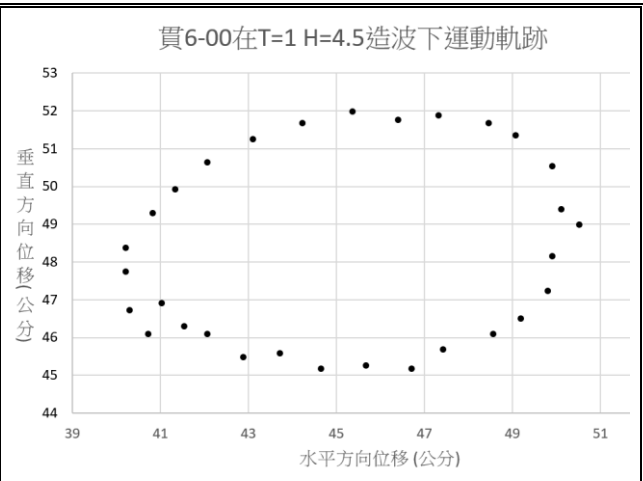


圖 5-21 貫 6-00 x、y 關係圖

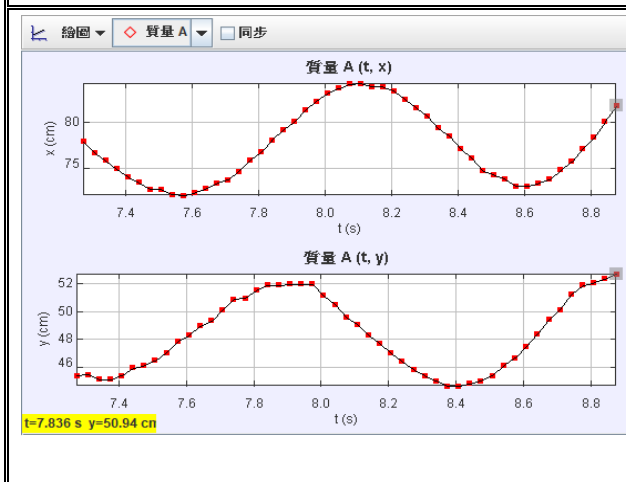


圖 5-22 貫 6-03 x、y 質點運動軌跡

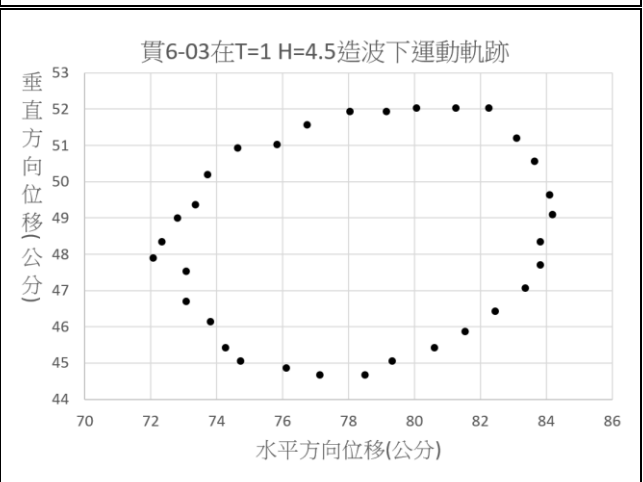


圖 5-23 貫 6-03 x、y 關係圖

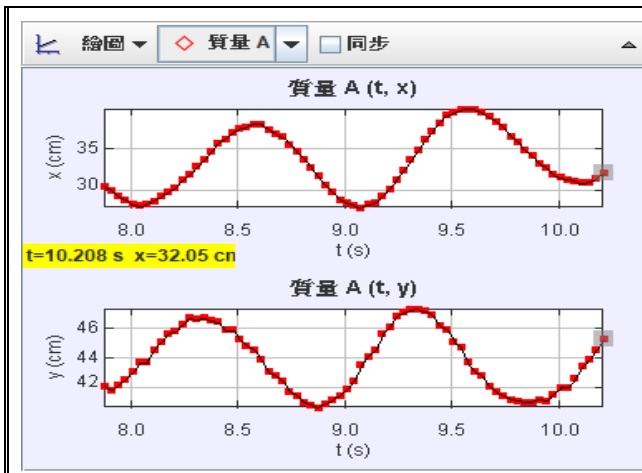


圖 5-24 貫 6-03 x、y 質點運動軌跡

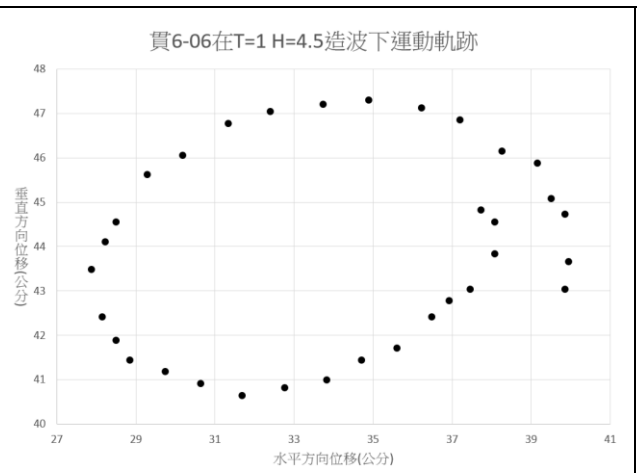


圖 5-25 貫 6-06 x、y 關係圖

由以上的資料可看出，在造波池的週期波使得浮球進行繞圈運動，其垂直方向最大位移均 $< 9\text{cm}$ 。

單軸模型運動模式如圖 5-26~圖 5-29 所示。

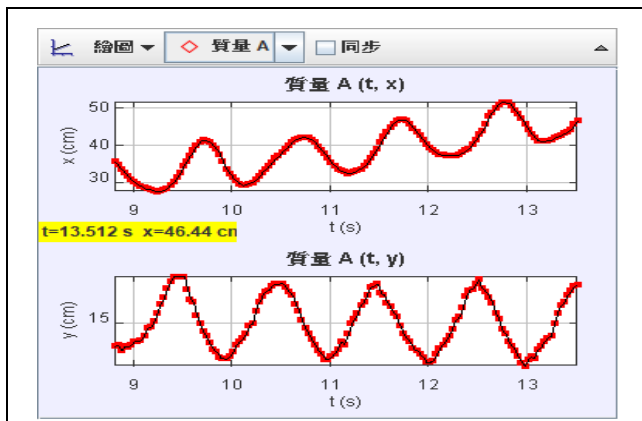


圖 5-26 單-3 x、y 質點運動軌跡

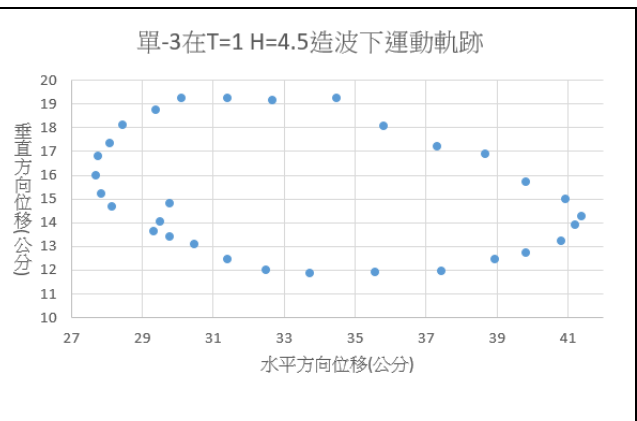


圖 5-27 單-3 x、y 關係圖

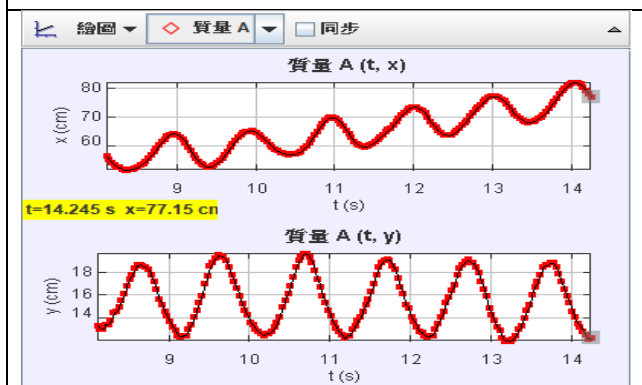


圖 5-28 單-6 x、y 質點運動軌跡

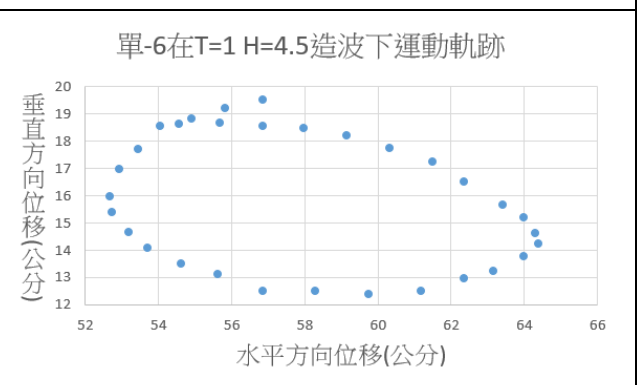


圖 5-29 單-6 x、y 關係圖

單軸模型各配重位置的垂直方向最大位移均 $< 9\text{cm}$ 。

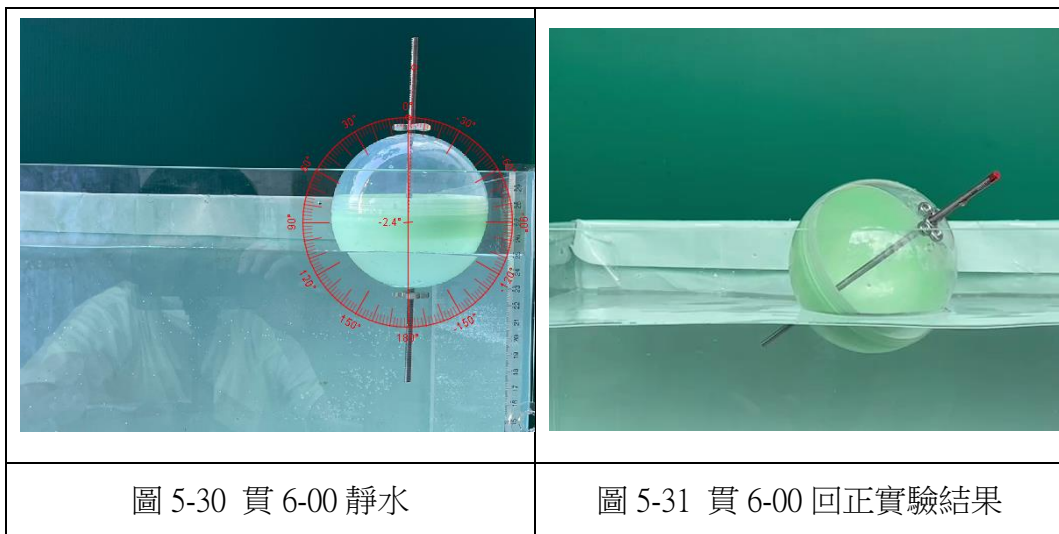
五、了解不同浮球模型在淡水中的回正情形。

在市展的報告中，關於浮球的回正實驗，我們發現配重位置較低，回到正浮靜止的時間較長，但由於模型易受水波干擾，較難明確測量回正時間。因此我們改用 Tracker 分析運動影像，以了解模型在 90° 入水的情況下，其回正的運動模式。

我們取較穩定的貫通式雙軸模型，以及單軸模型，進行本實驗。

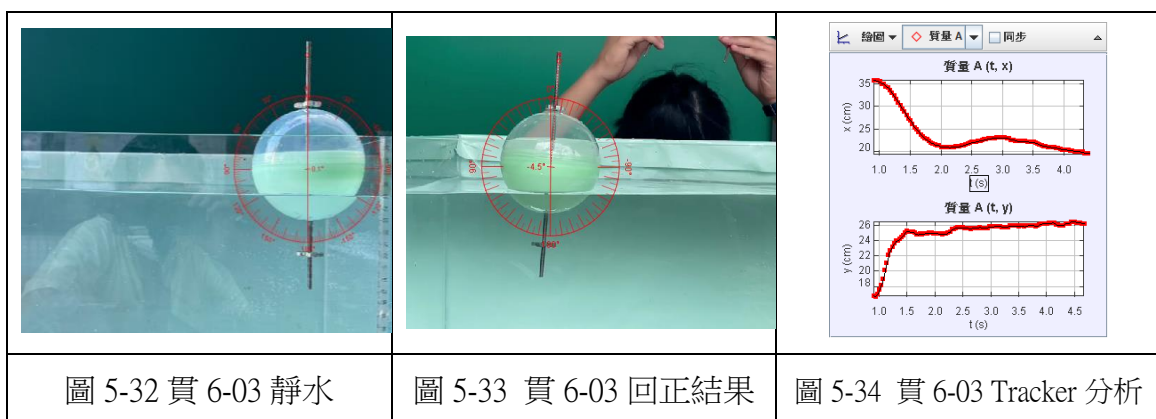
(一) 了解貫通式雙軸浮球模型在淡水中 90° 傾斜入水後的回正情形。

1. 貫 6-00



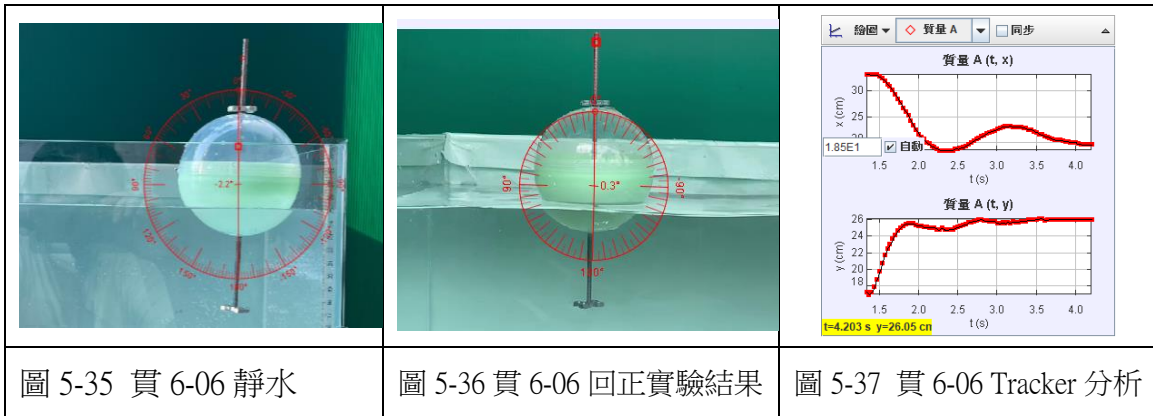
貫 6-00 配重位置集中在浮球上下殼， 90° 傾斜入水後，無法回到正浮位置。

2. 貫 6-03



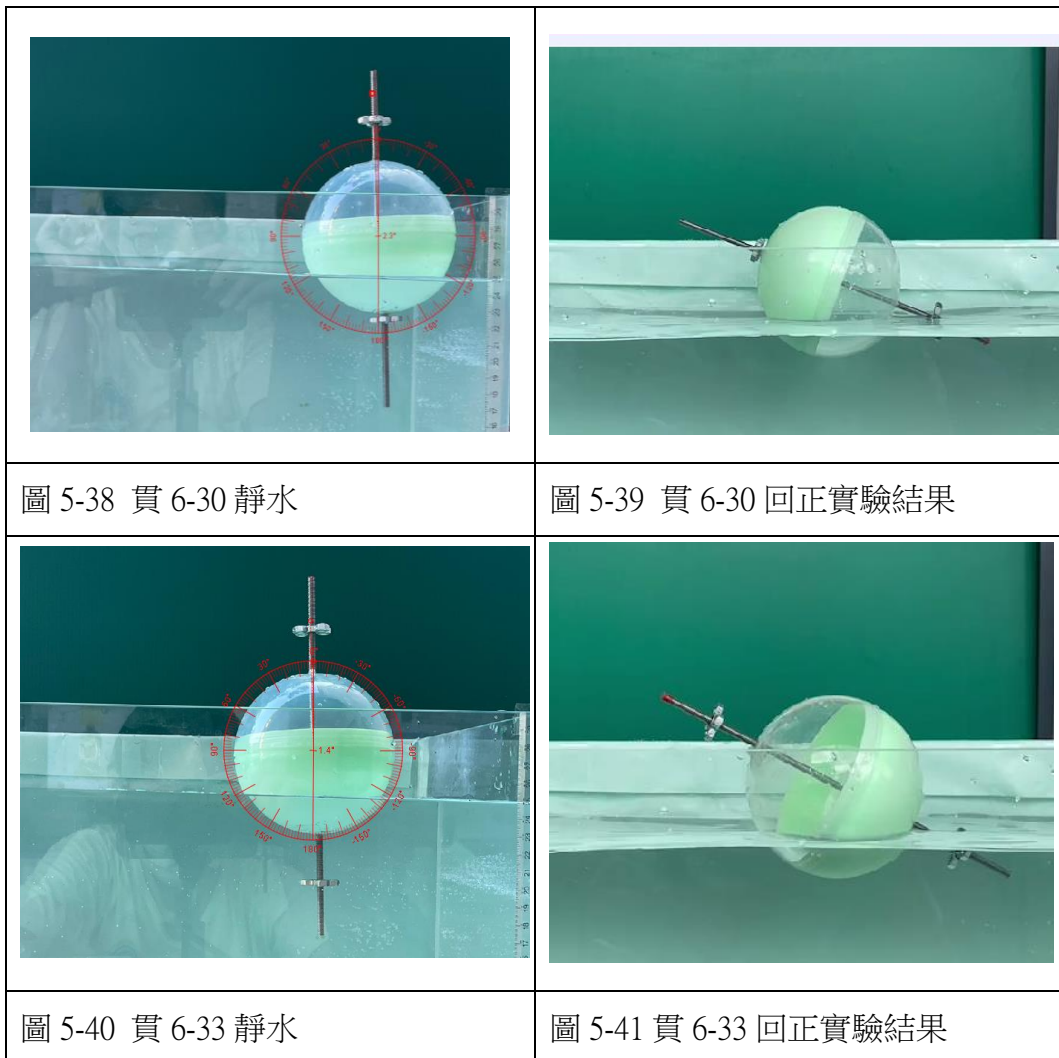
貫 6-03 以 90° 傾斜入水回正後，軸偏移角度 $< 5^\circ$ ，仍可視為正浮。

3. 貫 6-06



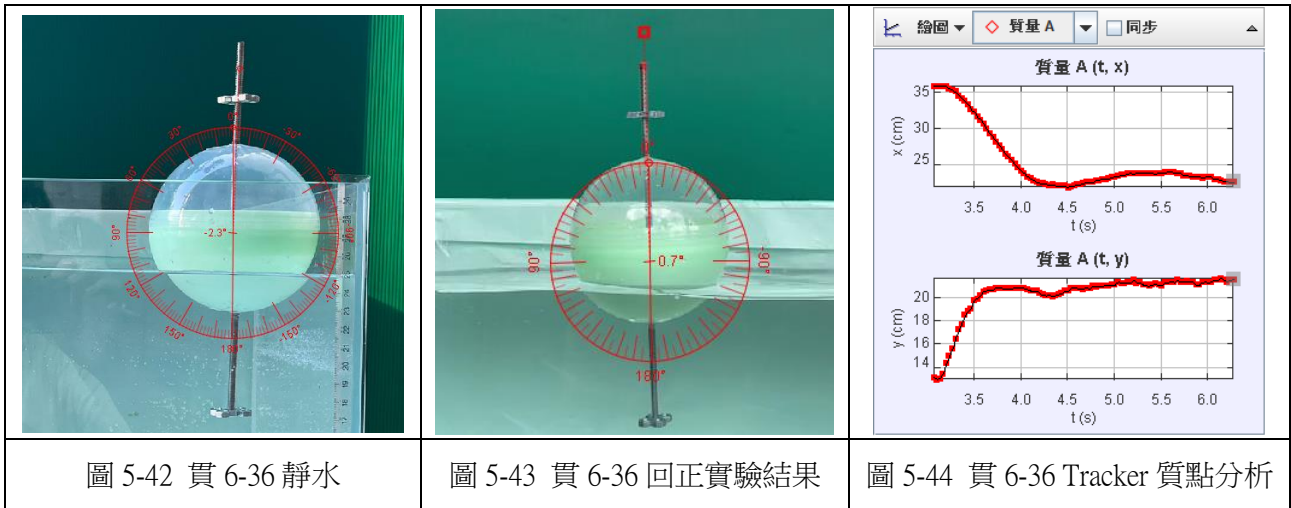
貫 6-06 模型以 90°傾斜入水後，能完美回到原先正浮位置。

4. 貫 6-30 與貫 6-33



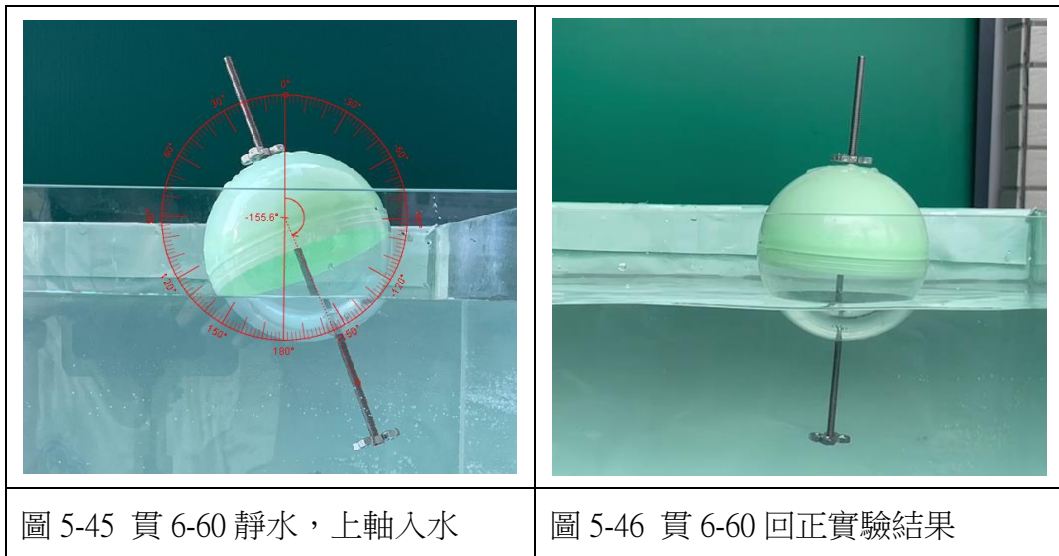
貫 6-30、33 兩種配重在靜水中可正浮，但以 90°傾斜入水後，無法回正，且 30 上軸倒插入水中。

5. 貫 6-36



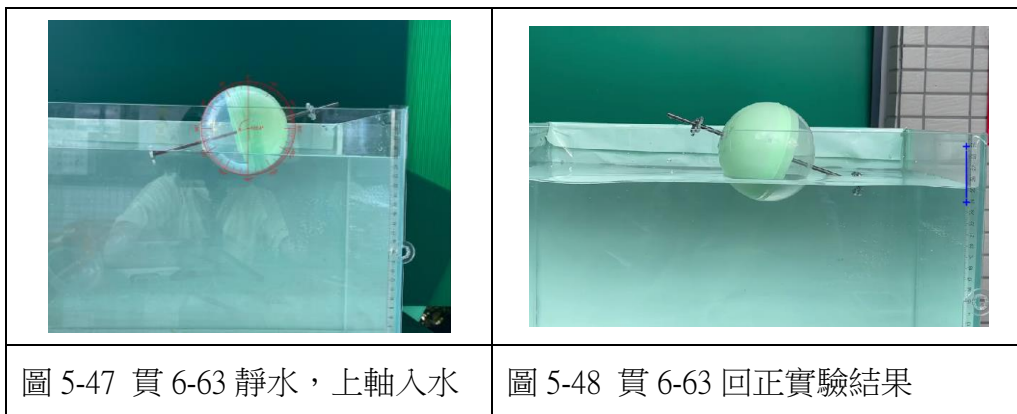
貫 6-36 模型以 90° 傾斜入水後，能完美回到原先正浮位置。

6. 貫 6-60



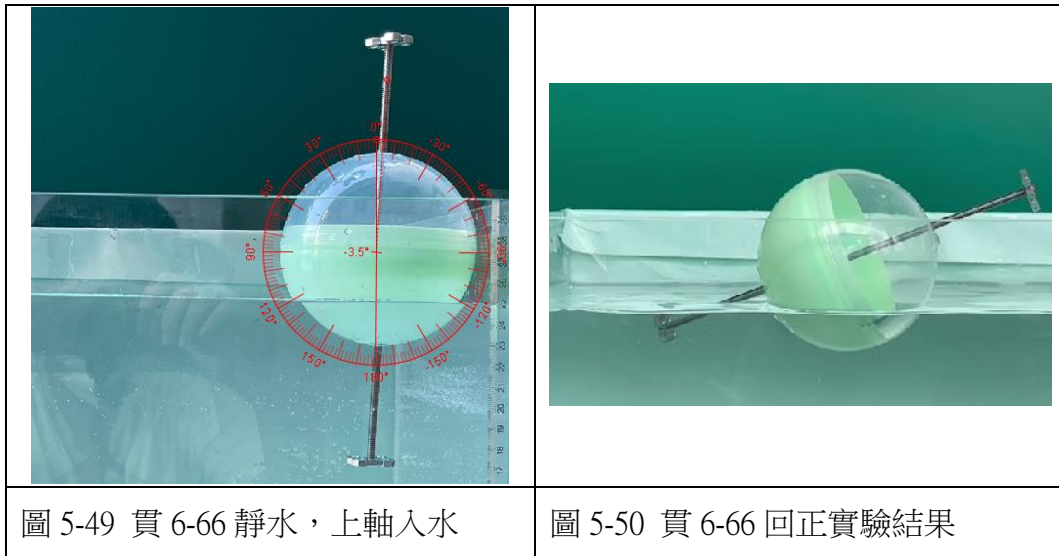
貫 6-60 模型不論在靜水中，還是回正實驗，上軸都會沒入水中，無法正浮。

7. 貫 6-63



貫 6-63 模型不論在靜水和回正實驗，也都上軸倒插入水，無法正浮。

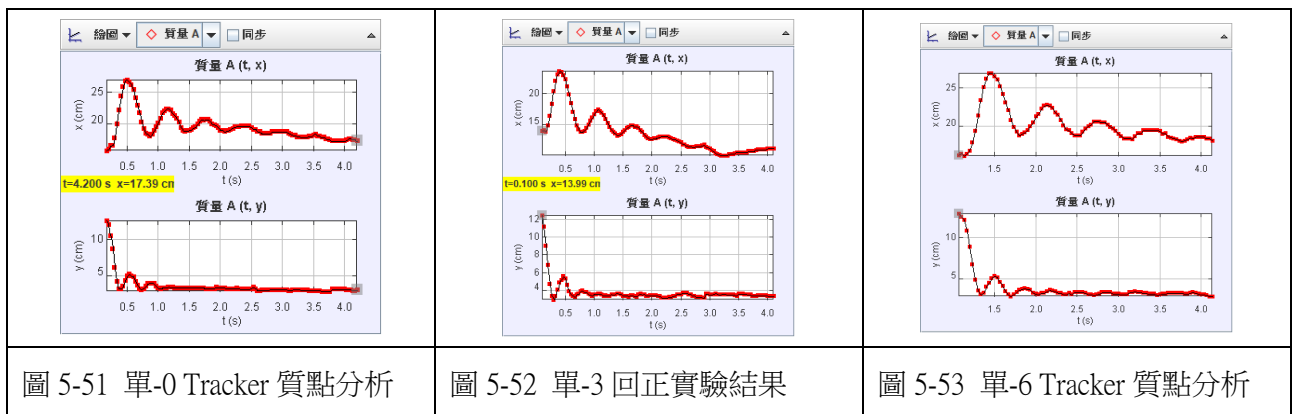
8. 貫 6-66



貫 6-66 模型在靜水中可保持正浮，但以 90° 傾斜入水後，無法回正。

(二) 了解單軸浮球模型在淡水中 90° 傾斜入水後的回正情形

單軸模型不論配重位置在哪裡，都可回到正浮，所以我們將單軸的三個配重位置放在一起觀察。由 Tracker 分析可發現單-0、單-3、單-6 的運動軌跡極其相似。



陸、討論

一、設計並測試扭蛋浮球模型以進行實驗觀察。

在校內科展與市展的初代扭蛋有單軸與分離式雙軸兩種，在實驗中發現若干缺點，我們在進一步的研究中一一加以改進，使模型規格化，以利實驗觀察。

(一) 顏色單一：上下殼的顏色相同，不易觀察。我們改用上球透明、下球有不同顏色的扭蛋作為模型。

(二) 質心不確定問題：新扭蛋下殼質量較大，我們削取下殼螺旋部分，削完後稱取下殼

質量為 A 克。將削下來的碎屑與上殼合計質量，稱取質量為 B。當 A=B 時，可視為上下殼等重，此時質心在浮球的上下殼交會處，如圖 4-3。

(三) 上下軸不在同一直線上：新扭蛋上下殼有明顯頂點，在頂點鑽孔後以螺絲和螺帽固定，可改善此缺點。

(四) 密封性不佳：製作新模型時，特別加強水密，使其不進水。

二、觀察並記錄在靜水中，不同配重對浮球的吃水深度影響。

在船舶進出港時，若吃水小於該港口水深，則船舶無法進港。故吃水深度是建造船隻的基本資訊。我們的三種扭蛋浮球在載重與吃水深度的實驗中，可看出每增加 5 組配重，淡水中吃水深度增加約 0.4cm，在海水中較不規律，但在海水沒入深度均小於淡水，這與海水密度較大相符。

三、了解不同配重位置對浮球傾斜度的影響。

(一) 比較淡水中與海水中，分離式雙軸配重位置對傾斜度的影響。

分離式各配重位置在海水與淡水傾斜度如表 6-1 所示。角度 $<6^\circ$ 可視為正浮。

表 6-1 離 6 模型各配重位置與傾斜角度。

		上軸		
		0	3	6
淡水	0	3.3°	52.6°	68.9°
	3	5.5°	15.8°	61.2°
	6	2.3°	7°	25°
海水	0	1.8°	53.2°	73.5°
	3	5.3°	14.9°	64.2°
	6	5.5°	4°	10.6°

由上表可看出，離 6 模型在淡水與海水的配重與傾斜度關係表現類似，上軸配重低，如 00、03、06 三組，不論淡水或海水，皆可正浮。上軸配重高者，如 30、33、36、60、63、66 等 6 組，皆無法正浮。而當下軸配重位置越低，傾斜角度越小。36、66 雖仍傾斜，但已接近正浮。

(二) 比較淡水與海水中，貫通式雙軸配重位置對傾斜度的影響如表 6-2。

表 6-2 貫通式雙軸配重位置與傾斜度一覽表

下軸 \ 上軸		0	3	6
		淡水	0	2.4°
	3	0.1°	1.4°	105.4°
	6	2.2°	2.3°	3.5°
海水	0	4.8°	2.3°	175.9°
	3	3.7°	0.3°	0.7°
	6	1.5°	0°	0.2°

在淡水與海水中，貫通式雙軸配重位置 00、03、06 均可穩定正浮。30、33、36 可正浮，但 30 稍受擾動即橫倒。60 上軸會倒插入水中。63(表格中紅色欄位)在海水中雖可成正浮(0.7°)，但極不穩定，稍有擾動，上軸即倒入水中，乃因上下軸在同一直線，只要無橫向受力，即可呈現正浮，又因上軸配重較高，力臂較大，只需微小橫向擾動，即產生淨力矩使浮球轉動傾斜甚至倒插入水。而在淡水中貫 6-63 無法正浮，與海水表現不同，推測是因為淡水實驗在室外進行，受風力影響所致。

四、探討造波對浮球運動的影響。

(一) 手動造波對不同浮球運動的影響。

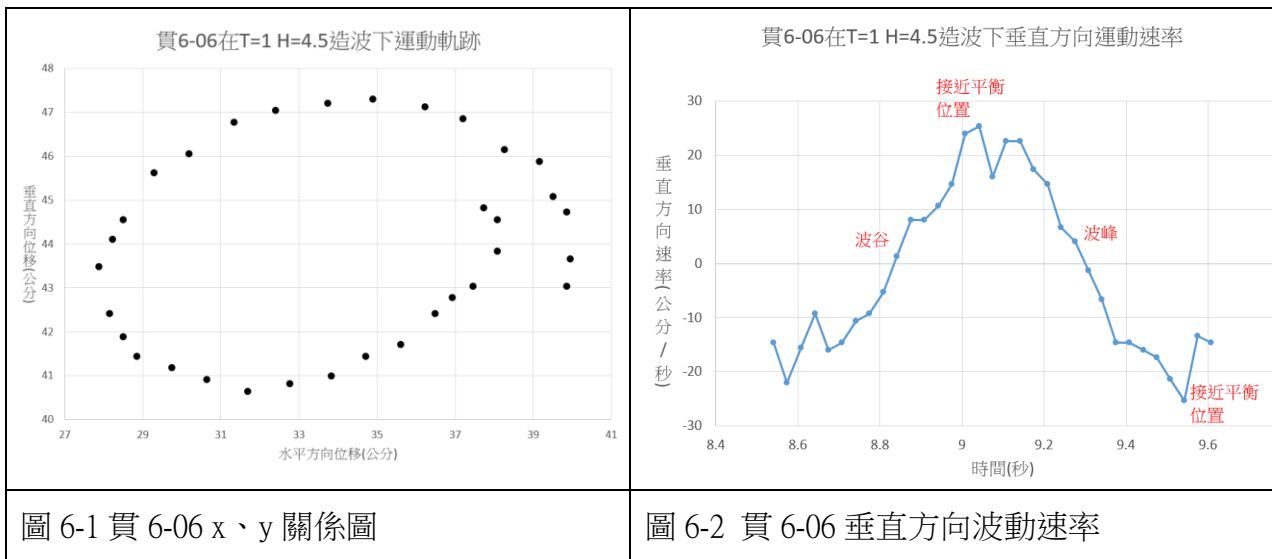
在市展中，我們發現浮球模型受手動造波影響，會同時發生同時發生位移、晃動、旋轉等運動，並觀察到浮球受波浪影響有短暫上下類似簡諧運動的表現。波浪行至魚缸兩側泡棉處，部分能量被吸收，部分被反射，反射回來的波對浮球造成擾動，應是浮球的運動型態複雜的主要原因。

(二) 造波池造波對浮球運動的影響。

1. 浮球運動形式探討

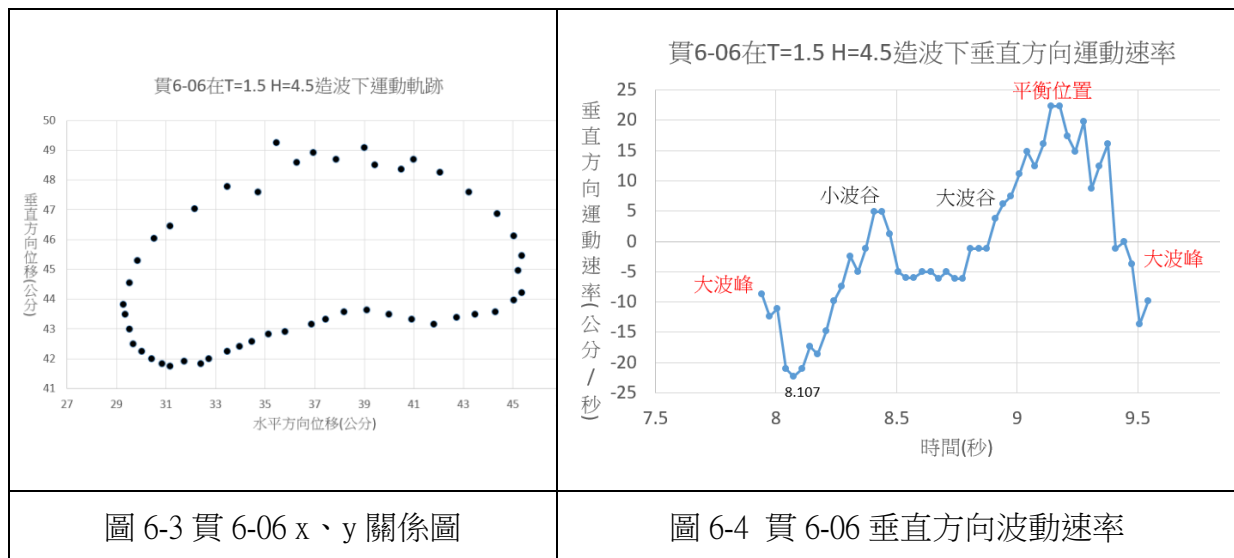
為減少反射波干擾且能穩定造波，我們借用海大河工系造波水槽進行造波實驗。我們選取上軸較低的貫 6-00、貫 6-03、貫 6-06 的配重進行探討。浮球在造波水槽中受波動影響，其運動軌跡接近橢圓，以貫 6-06 為例，由圖 6-1 和圖

6-2 可發現在垂直方向運動速率在平衡位置最大，之後速率逐漸下降，到波峰時速率為 0，開始改變方向。之後速率逐漸增加，平衡位置時為最大值，開始逐漸下降，到波谷再次轉向，如此往復。



其餘模型與配重在造波時運動形式皆與貫 6-06 相似。

我們同時也做了 T=1.5 的造波資料，同樣以貫 6-06 為例，其運動軌跡與垂直方向速率如圖 6-3 和圖 6-4 所示。



當 T=1.5s，追蹤軸頂的運動軌跡，如圖 6-3 所示，類似保衛細胞的形狀。雖然有大、小波峰和波谷，但基本表現與單純的波峰波谷相似，在平衡位置附近有最大垂直方向速率，小波峰、小波谷處速率降低，至大波峰、大波谷處，其速率為 0。

2. 浮球上軸擺動角度

以離 6 為例，上軸擺動角度如表 6-3 所示。

表 6-3 離 6 模型不同配重位置的上軸擺動角度

造波週期	離 6-00	離 6-03	離 6-06
T=1s	1.9	18.8	21.3
T=1.5s	4.8	8.5	15.8

由上表可清楚看出，下軸配重位置越遠，擺動角度越大。由力矩=力×力臂來看，力臂變大，力矩也變大，完全符合此公式。

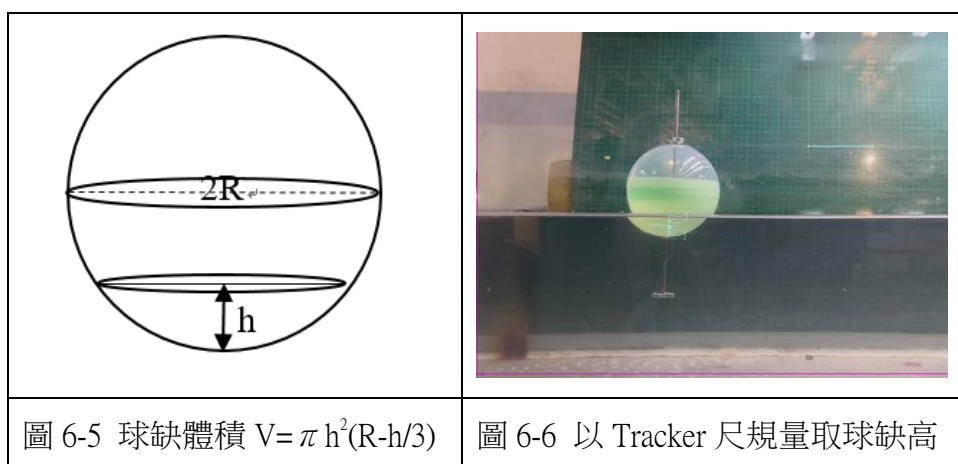
3. 浮球最大起伏 $\Delta h < 2H$

我們詳細比對所有的浮球模型配重位置，發現在不同週期的造波下，浮球最大垂直位移 Δh 都不會超過 2 倍波高。即，均小於 9cm。這是一個很有趣的發現，希望能有更多的印證和應用。

4. 浮球在波峰與波谷的浮力變化


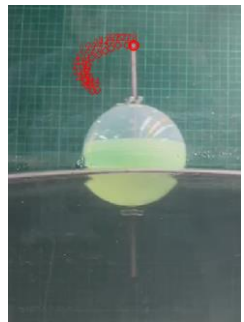

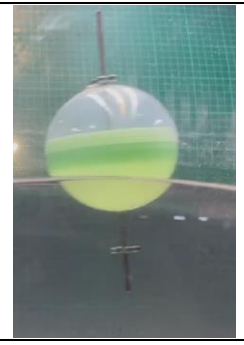
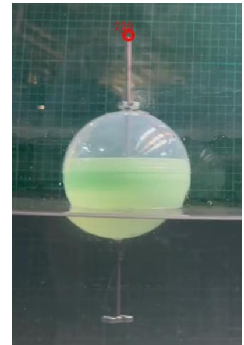

在觀察 Tracker 分析的時候，我們發現模型在波峰和波谷位置，沒入水面下的體積明顯不同，為了解其浮力變化，我們採用球缺公式 $V = \pi h^2(R-h/3)$ 來進行沒入液面下體積的計算。

球缺是指球體被平面截去的一部分，如圖 6-5 所示。只要知道垂直於截面的線段長度 h (球缺高)，和球體半徑 R ，就可以算出被截去的體積。



球缺體積為沒入液面下體積，以貫 6 模型為例，根據不同配重位置，其沒入液面下體積如表 6-4 所示。

表 6-4 貫 6 模型在 $T=1s$ ， $H=4.5cm$ 造波下，波谷與波峰的球缺對照

模型	波谷	波峰	增加%	波谷圖	波峰圖
貫 6-00	36.0π	54.0π	51.4%		
貫 6-03	38.2π	59.9π	57.9%		
貫 6-06	36.7π	62.4π	70.1%		

貫 6 模型的球體體積 $=4\pi r^3/3=166.7\pi$ ，加上下軸配重總質量約 65 克，在靜水中的浮力應等於本身重量，但在造波中，介質運動提供外力，對模型造成影響，使模型在不同位置的沒入體積有所變化，表示浮力有所變化。

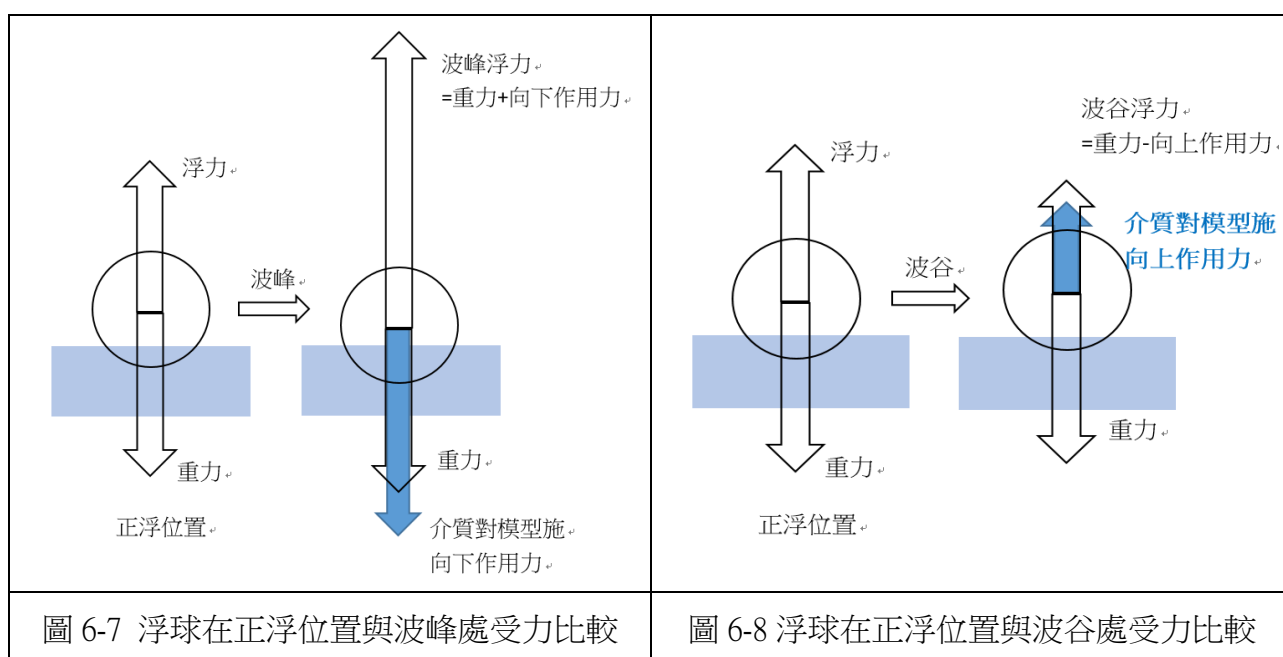
在我們的觀察中，在所有運動位置中，**波峰處的模型沒入體積最大**，此處模型開始受一向下的力以向下運動，彷彿有一力將模型往下拉，故沒入體積最大。同理，我們發現在**波谷處模型沒入體積最小**。原因是在波谷模型開始受一向上的力以向上運動，彷彿有一力將模型向上抬，故沒入體積最小。

同樣的模型在 $T=1.5s$ 時，沒入液面下體積變化如表 6-5。

表 6-5 貫 6 模型在 T=1.5s 造波下，波谷與波峰沒入液面下的體積比較。

模型	波谷	波峰	增加%
貫 6-00	38.1π	59.0π	54.9%
貫 6-03	36.2π	67.1π	85.4%
貫 6-06	36.3π	60.2π	65.8%

3 種不同配重位置的貫 6 模型，在不同週期的造波下，有相似的浮力變化：波峰浮力>>波谷浮力，如圖 6-7~6-8。



在波動中，浮球的浮力不完全遵守阿基米得原理，隨其受波浪的外力而有動態變化。本研究中由於浮球質量很小，易受波浪影響，若是質量很大的船隻、艦艇等，浮力與重力遠大於波浪造成的力，則不一定會表現出浮力的動態變化。

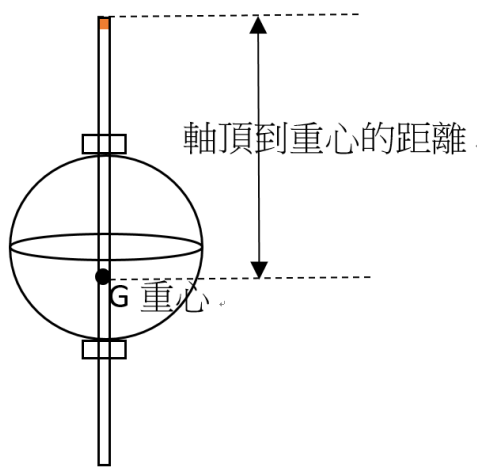
五、了解不同浮球模型在淡水中 90° 傾斜入水後的回正情形。

(一) 在靜止的淡水中，貫通式模型 90° 傾斜入水後的回正情形。

貫 6 模型不同配重位置入水後，回正情況不同，00、03、06 三種配重位置，以 90° 傾斜入水後，有一力矩使其往正浮方向轉回，可回正。其他配重位置以 90° 傾斜入水後，均無法回到正浮位置。

軸頂到重心的距離量取方式及統計如表 6-6。

表 6-6 軸頂到重心距離及回正情形對照

配重方式	軸頂到重心的距離	回正情形	量取方式
貫 6-06	11.67cm	可回正	
貫 6-03	11.42cm		
貫 6-36			
貫 6-00	11.17cm	不可回正	
貫 6-33			
貫 6-66			
貫 6-30	10.92cm		
貫 6-63			
貫 6-60			10.67cm

軸頂到重心的距離(L)量取如上表所示。L 越長，重心越低，越容易回正。

我們沿用在市展時的扶正力矩做說明。

圖 6-9 為扶正力矩示意圖，其中 G 為重心，B 為浮心，B' 為傾斜後新浮心，M 為定傾中心，GZ 為扶正力臂。

$$\text{扶正力矩} = \text{扶正力臂} \times \text{重力}$$

重心下移，扶正力臂 GZ 變大，扶正力矩變大，傾斜後較易回正。反之，若重心較高，則扶正力矩變小，浮球傾斜後無法回正。

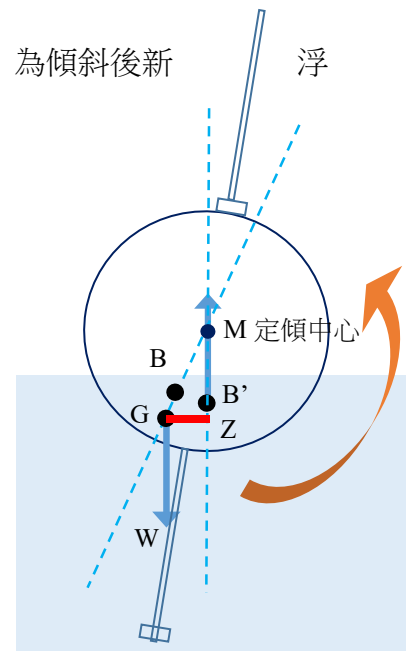
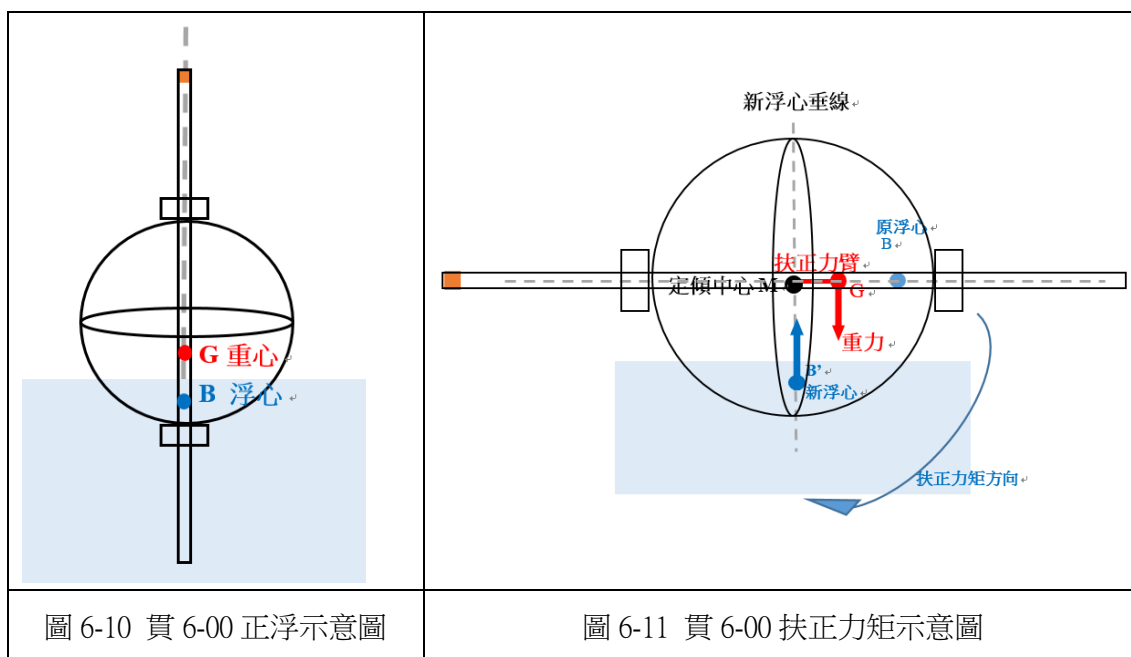


圖 6-9 扶正力矩示意圖

以貫 6-00 為例，其正浮及 90° 傾斜後回正的扶正力矩如下。



由圖 6-10 可發現，正浮時，貫 6-00 的重心及浮心在同一軸上，成一直線。由圖 6-11 可發現由於重心較高，扶正力臂 GM 極短，浮球重量輕，因而造成的扶正力矩不足以使貫 6-00 回正。

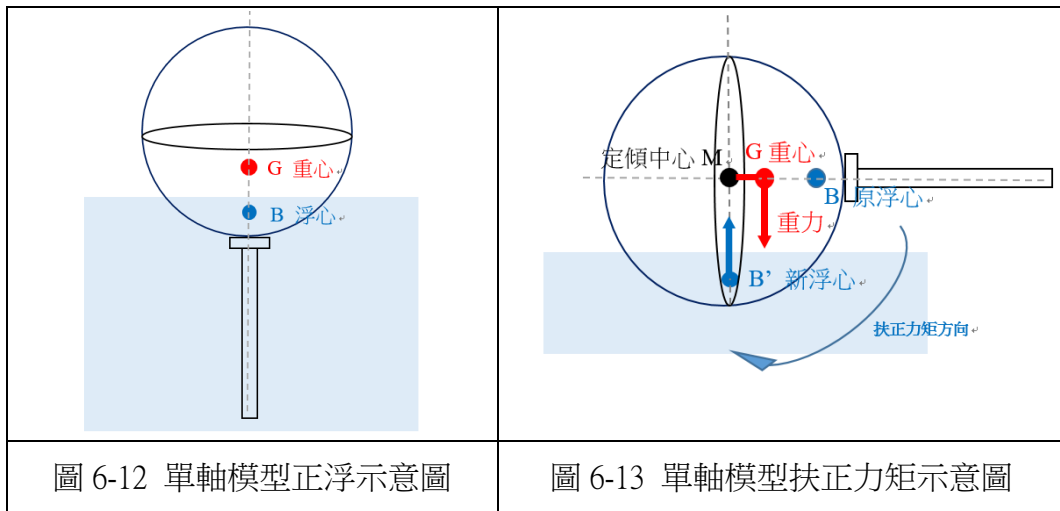
同樣的情形也發生在貫 6-33、貫 6-66，此三組模型重心在相同位置，軸頂到重心的距離均為 11.17cm，扶正力臂較短，因此在靜水中可正浮，90° 傾斜入水後，無法回到正浮位置。

此外，03、36 (L=11.42cm)、06 (L=11.67cm)，這三組的配重位置使重心下移，扶正力臂變大，90° 傾斜後仍可回正。

值得注意的是，L=11.17cm 時(00、33、66 三組)，重心過高，不可回正，但 L=11.42cm(03、36 二組)則重心位置已可造成足夠大的扶正力臂。兩者差距僅 0.25cm，足以有決定性的影響。

(二) 在靜止的淡水中，單軸模型 90° 傾斜入水後的回正情形

單軸模型不論配重在哪個位置，都能回到正浮狀態。圖 6-12 顯示正浮時重心與浮心位於同一直線。圖 6-13 為將單軸模型以 90° 傾斜時，扶正力矩示意圖。



單-0、單-3、單-6 的扶正力矩均足以使模型回到穩定正浮。

柒、結論

- 一、扭蛋殼是容易取得且方便進行實驗操作的材料，最好能製作呈貫通式軸模型進行實驗。
- 二、各模型在靜水中載重與吃水深度均呈線性關係，相同載重下，海水吃水深度較小。
- 三、比較同一浮球模型、不同配重位置的傾斜度發現：
 1. 分離式雙軸模型下軸配重位置越低，重心越低，傾斜角度越小。
 2. 貫通式雙軸由於上下軸在同一直線，除 60 倒插入水中，其餘各配重位置均可保持正浮，但重心較高者為不穩定平衡，稍受擾動即傾倒。
- 四、在造波中我們發現：
 1. 浮球呈週期性運動，軌跡近似橢圓形。造波週期越長，浮球運動越複雜。
 2. 在波峰有浮力最大值，波谷有浮力最小值，浮力呈動態變化。
 3. 垂直方向最大位置變化量小於兩倍波高。
- 五、在回正實驗中我們發現貫通式雙軸模型重心越低，扶正力矩越大，越容易回正。軸頂到重心的距離 L 臨界值在 11.17~11.42cm 之間， $L \geq 11.42\text{cm}$ 的配重位置，以 90° 傾斜入水後仍可回正，而 $L \leq 11.17\text{cm}$ 者，均無法回正。

捌、參考資料及其他

- 一、國民中學自然科學: Vol. 第四冊 (第六章). (111 C.E.). 翰林出版社
- 二、國民中學自然科學: Vol. 第五冊 (第三章). (111 C.E.). 康軒文教事業。
- 三、周鑑恆. (2012). 海浪發電之理論計算. 物理教育學刊, 13(1), 25–32.
- 四、小船穩度知識示範教材 <https://www.motcmpb.gov.tw/ServerFile/Get/08f86992-736c-479d-8bc2-876a4aa85af3?DLCount=1&attachTable=4>
- 五、船舶關鍵技術 <https://wordvice.com.tw/apa-citation-generator#:~:text=%E6%8A%80%E8%A1%93.%20>
- 六、新漁船翻覆 <https://www.youtube.com/watch?v=DWc22LQOXMM>

【評語】 030113

本作品研究浮球再加掛重物後，於水中的穩定性。研究動機發想自船舶在海上的穩定度與是否會翻覆問題。研究方向可以多一點探討在定傾中心與重心受到水波影響的相對位置變化，可以比較容易探討主題的多樣變數。

作品海報

摘要

我們利用扭蛋製做單軸、分離式及貫通式雙軸浮球模型，進行海水與淡水的載重與吃水深度、配重位置與傾斜角度、造波和回正觀察。發現載重與吃水深度呈線性關係。不同配重位置明顯影響分離式模型的傾斜角度，重心越低，角度越小。貫通式模型易保持正浮，但重心較高者，正浮不穩定，稍受擾動即傾斜。

在造波中發現浮球呈週期性運動，且浮力最大值在波峰，最小值在波谷，相差可達50%~85%。垂直方向運動速率最大值約在平衡位置，垂直位移最大值<2倍波高。不同配重位置的貫通式模型以90°傾斜入水，軸頂到重心的距離(L)決定浮球是否回正。本實驗發現全長16cm的模型，L≥11.42cm者，均可回正，L≤11.17cm者，均無法回正，顯示L越大浮球穩定性越高。

壹、研究動機

身為基隆的孩子，我們每天都可以看到許多船，或停在港口，或進出港灣，動靜之間，非常吸引人。但是偶爾還會看到有大船翻覆的新聞，我們十分好奇，究竟船要怎樣才是穩定的？是什麼原因讓船可以穩定或造成船翻覆呢？於是我們就想利用可隨手取得的扭蛋，來進行模擬實驗。

世界上每個水域、每個港口的水深，都不太一樣，我們查了資料，發現吃水深度會影響船隻航行與進出港口，所以我們先觀察不同配重位置的模型在靜水中的吃水深度。我們認為一艘船，應能在靜水中保持正浮的狀態，也應能在波浪中保持穩定，且遇到極端狀況造成船隻傾斜角度過大，也不至於翻覆。因此我們設計一系列在淡水與海水中的觀察與實驗，紀錄並分析浮球模型的狀態及運動情形，利用浮球表現的現象來簡單了解船隻的穩定性。

貳、研究目的

- 一、設計並測試扭蛋浮球模型以進行實驗觀察。
- 二、觀察並記錄在靜水中，不同配重對浮球的吃水深度影響。
 - (一)在靜止的淡水中，分離式雙軸、貫通式雙軸及單軸三種浮球模型配重對與吃水深度的關係。
 - (二)在靜止的海水中，分離式雙軸、貫通式雙軸及單軸三種浮球模型配重對與吃水深度的關係。
- 三、了解不同配重位置對浮球傾斜度的影響。
 - (一)比較淡水與海水中，分離式雙軸配重位置對傾斜度的影響。
 - (二)比較淡水與海水中，貫通式雙軸配重位置對傾斜度的影響。
- 四、探討造波對浮球運動的影響。
 - (一)手動造波對不同浮球運動的影響。
 - (二)造波機造波對分離式雙軸、貫通式雙軸、及單軸浮球運動的影響。
- 五、了解不同浮球模型在淡水中的回正情形。
 - (一)了解貫通式雙軸浮球模型在淡水中90°傾斜入水後的回正情形。
 - (二)了解單軸浮球模型在淡水中90°傾斜入水後的回正情形。

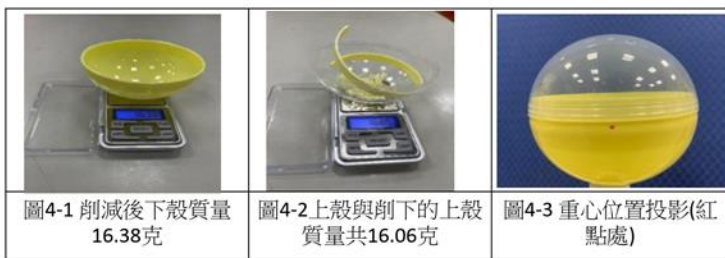
參、研究設備及器材

扭蛋(直徑10cm)、手鋸、全螺牙條(304不銹鋼，密度7.93)、螺母(與牙條同)、膠槍、膠條、魚缸與造波池，如圖3-1~3-5所示。攝影設備使用iphone12手機。



肆、研究方法

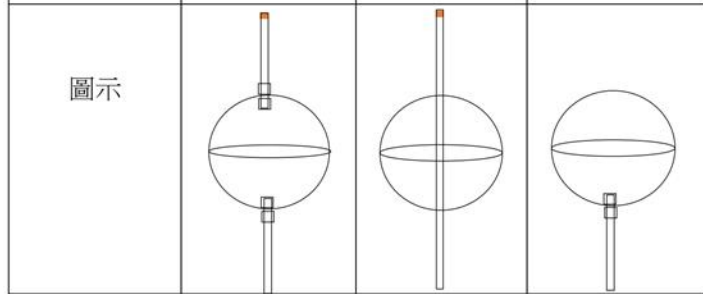
- 一、設計並測試扭蛋浮球模型以進行實驗觀察。
 - (一)模型進階歷程
校內科展及市展使用的模型為分離式雙軸及單軸兩種，由於質心不確定、上下軸難以對稱、顏色單一不利觀察、密封性不佳等缺點，我們重新設計新的扭蛋模型，並一一改善缺點。
 - (二)找出扭蛋重心



- (三)製作扭蛋浮球模型
浮球模型分為分離式雙軸、貫通式雙軸及單軸三種。三種浮球模型的資料及代號如表4-1所示。

表4-1 三種浮球模型資料表

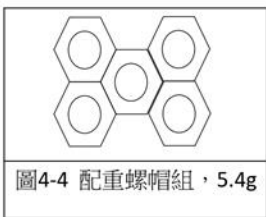
代號	離6	貫6	單
質量	56.8g	54.0g	46.2g
上軸長度	6 (可調)	6 cm	--
下軸長度	6 cm	6 cm	6 cm



二、觀察並記錄在靜水中，不同配重對浮球的吃水深度影響

- (一)在靜止的淡水中，離6、貫6及單三種浮球模型配重對與吃水深度的關係。

器材：魚缸、尺、三種模型、配重螺帽組(如圖4-4)、手機、腳架。



- (二)在靜止的海水中，分離式雙軸、貫通式雙軸及單軸三種浮球模型配重對與吃水深度的關係。

三、了解不同配重位置對浮球傾斜度的影響

- (一)在靜止的淡水中分離式雙軸和貫通式雙軸二種浮球模型配重位置對傾斜度的影響。配重組如表4-2，均只用一組。位置命名如表4-2。

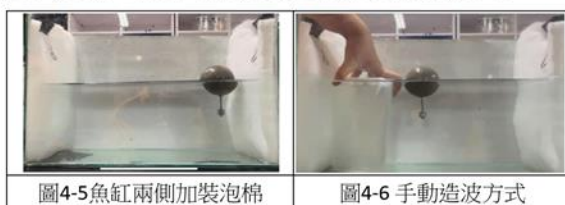
表4-2 離6模型配重位置說明

圖示	離6-00	離6-03	離6-36
	上下軸配重均緊貼浮球	上軸配重緊貼浮球，下軸配重距浮球3cm	上軸配重距浮球3cm，下軸配重距浮球6cm

- 貫6模型配重位置名稱與離6相同，單軸僅有單碼數字，分別為單-0、單-3、單-6。
 - (二)在靜止海水中，分離式雙軸、貫通式雙軸二種浮球模型配重位置對傾斜度的影響。

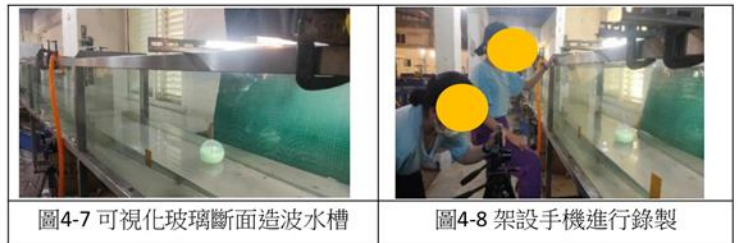
四、探討造波對浮球運動的影響

- (一)手動造波對不同浮球運動的影響



(二)造波機造波對分離式雙軸、貫通式雙軸、及單軸浮球運動的影響

我們向海洋大學河工系商借可視化玻璃斷面造波水槽 來造波，以觀察波動對不同浮球模型的影響。水槽長、寬、高為15m x 0.4m x 0.6m，水深20cm，週期1s及1.5s，波高4.5cm。過程中以手機進行拍攝。



五、了解不同浮球模型在淡水中的回正情形。

我們在校內科展和市展時，是用手將模型橫放入水，為改進缺點，我們自製模型下水器，希望做到兩軸同時下水，且兩端受力一致。

- (一)了解貫通式雙軸浮球模型在淡水中90°傾斜入水後的回正情形。
- (二)了解單軸浮球模型在淡水中90°傾斜入水後的回正情形。

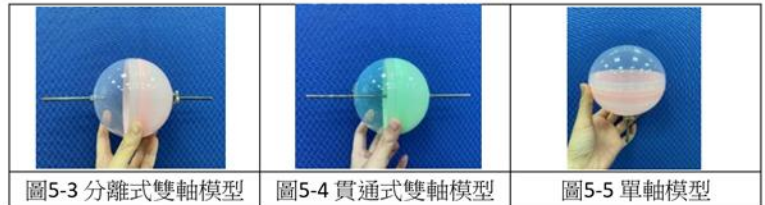


伍、研究結果

一、設計並測試扭蛋浮球模型以進行實驗觀察。

我們在校內科展及市展用的浮球模型如圖5-1與圖5-2。

為了改進浮球模型的缺點，我們保留分離式雙軸及單軸模型，增加貫通式雙軸模型，最後成果如圖5-3~圖5-5。



二、觀察並記錄在靜水中，不同配重對浮球的吃水深度影響。

- (一)在靜止的淡水中，分離式雙軸、貫通式雙軸及單軸三種浮球模型配重對與吃水深度的關係。淡水的測試結果如表5-1所示。

表5-1 靜止淡水中不同配重的模型吃水深度。

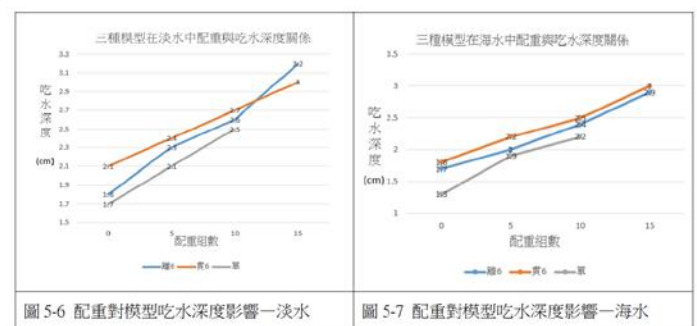
	模型	0組	5組	10組	15組
淡水	離6	1.8cm	2.3cm	2.6 cm	3.2 cm
	貫6	2.1 cm	2.4 cm	2.7 cm	3.0 cm
	單	1.7 cm	2.1 cm	2.5 cm	--

- (二)靜止海水中，分離式雙軸、貫通式雙軸及單軸三種浮球模型配重對與吃水深度關係。海水的測試結果如表5-2所示。

表5-2 靜止海水中不同配重的模型吃水深度。

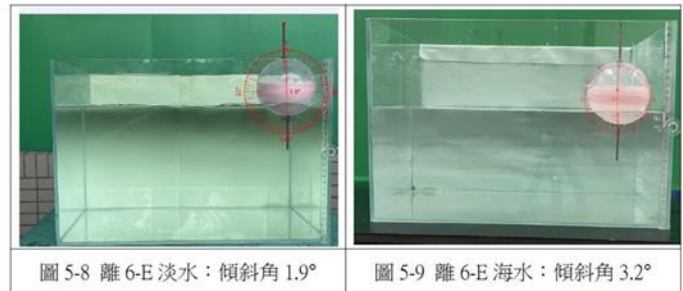
	模型	0組	5組	10組	15組
海水	離6	1.7cm	2.0cm	2.4cm	2.9cm
	貫6	1.8cm	2.2 cm	2.5 cm	3.0 cm
	單	1.3cm	1.9 cm	2.2 cm	--

各模型在淡水、海水的配重組數與吃水深度統計得比較如圖5-6~5-7所示。



三、了解不同配重位置對浮球傾斜度的影響。

- (一)比較淡水與海水中，分離式雙軸配重位置對傾斜度的影響。無配重離6傾斜度以Tracker測量，如圖5-8~5-9所示。由於測量及環境誤差，傾斜角≤6°視為正浮。



離6模型在淡水與海水中，各種配重的傾斜度如表5-3~表5-5所示。

表5-3 「離6」上軸配重位置0cm的三種組合浮球傾斜程度

	離6-00	離6-03	離6-06
淡水			
	傾斜角 3.3°	傾斜角 5.5°	傾斜角 2.3°
海水			
	傾斜角 1.8°	傾斜角 5.3°	傾斜角 5.5°

表5-4 「離6」上軸配重位置3cm的三種組合浮球傾斜程度

	30	33	36
淡水			
	傾斜角 52.6	傾斜角 15.8	傾斜角 7.7
海水			
	傾斜角 53.2°	傾斜角 14.9°	傾斜角 4.0°

表 5-5 「離-6」上軸配重位置 6cm 的三種組合浮球傾斜程度

	60	63	66
淡水			
	傾斜角 68.9°	傾斜角 61.2°	傾斜角 25.0°
海水			
	傾斜角 73.5°	傾斜角 64.2°	傾斜角 10.6°

由表 5-3~表 5-5 可看出，不論是海水還是淡水，離 6 模型重心越底，在靜水中越能保持正浮。

(二) 比較淡水與海水中，貫通式雙軸配重位置對傾斜度的影響。

貫 6 模型不配重的傾斜角如圖 5-10~圖 5-11 所示，貫 6-E 不配重作為對照組

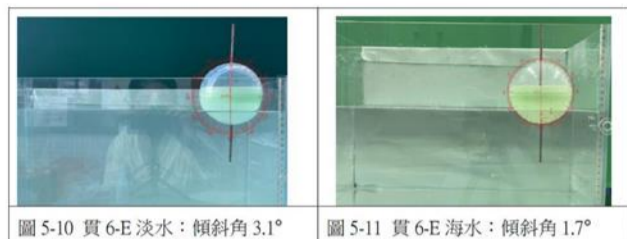


圖 5-10 貫 6-E 淡水：傾斜角 3.1° 圖 5-11 貫 6-E 海水：傾斜角 1.7°

貫 6 模型在淡水與海水中，各種配重的傾斜度如表 5-6~表 5-8 所示。

表 5-6 「貫-6」上軸配重位置 0cm 的三種組合浮球傾斜程度

	00	03	06
淡水			
	傾斜角 2.4°	傾斜角 0.1°	傾斜角 2.2°
海水			
	傾斜角 4.8°	傾斜角 3.7°	傾斜角 1.5°

表 5-7 「貫-6」上軸配重位置 3cm 的三種組合浮球傾斜程度

	30	33	36
淡水			
	傾斜角 2.3°	傾斜角 1.4°	傾斜角 2.3°
海水			
	傾斜角 2.3°	傾斜角 0.3°	傾斜角 0°

表 5-8 「貫-6」上軸配重位置 6cm 的三種組合浮球傾斜程度

	60	63	66
淡水			
	傾斜角 156.9°，上軸入水	傾斜角 105.4°，上軸入水	傾斜角 3.5°
海水			
	傾斜角 175.9°，上軸入水	傾斜角 0.7°	傾斜角 0.2°

貫 6 模型由於上下軸在同一直線，較易保持正浮。貫 6-30、貫 6-63 雖可保持正浮，但稍有擾動及橫倒。貫 6-60 上軸入水，貫 6-63 在淡水中上軸倒插入水，在海水中則能正浮。無法保持穩定正浮的配重位置，如 30、60、63，將不進行波動實驗。

四、探討造波對不同浮球運動的影響

(一) 手動造波對不同浮球運動的影響。

在市展我們發現，分離式雙軸浮球上軸配重高、下軸配重接近浮球的組合，無法使模型保持正浮。而能在靜水中穩定正浮的模型，在受到手動造波的影響時，會出現類似圓周運動以及上下起伏的運動，如圖 5-12 與圖 5-13 所示。

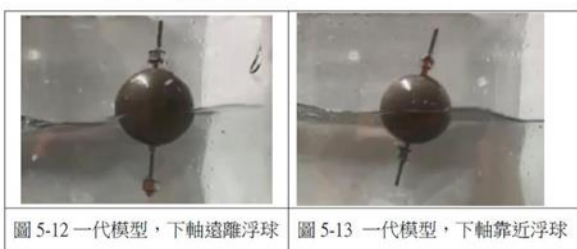


圖 5-12 一代模型，下軸遠離浮球 圖 5-13 一代模型，下軸靠近浮球

(二) 造波機造波對分離式雙軸、貫通式雙軸及單軸浮球運動的影響。

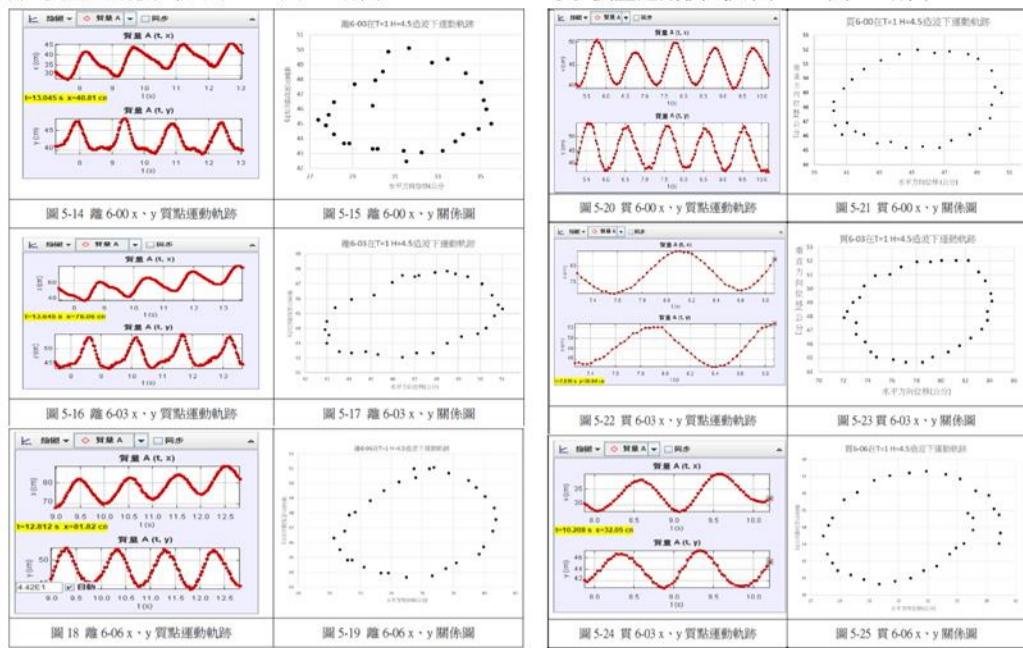
為了量化運動模式，我們改進了造波方式，使用造波水槽來觀察造波對模型的運動影響；並且以 Tracker 進行影像分析。

造波週期 $T=1\text{sec}$ ，波高 $H=4.5\text{cm}$ ，水深 20cm，第四個波起為穩定波動，所有影像都從第四個波開始記錄。

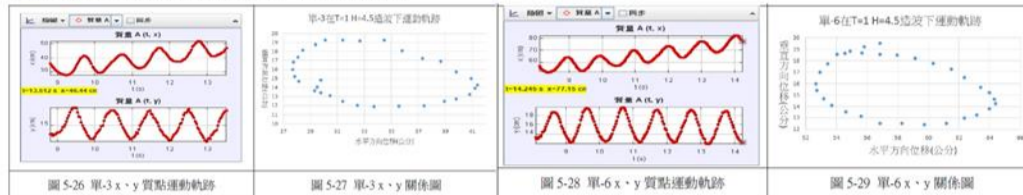
每個雙軸模型做 7 種配重位置組合：E、00、03、06、33、36、66，單軸模型做 E、0、3、6 四種位置組合，是為第一批資料。

將造波機週期改為 $T=1.5\text{s}$ ，其餘參數維持不變，進行同樣的模型組合觀察，為第二批資料。 $T=1\text{sec}$ ，離 6-00、03、06 的 Tracker 分析與 excel 運動軌跡如圖 5-14~圖 5-19 所示，每相鄰兩點的時間間隔約為 0.033 秒。

離 6 模型運動模式如圖 5-14~圖 5-19 所示。



單軸模型運動模式如圖 5-26~圖 5-29 所示。



由以上的資料可看出，在造波池的週期波使得浮球進行繞圈運動，其垂直方向最大位移均 $< 9\text{cm}$ 。

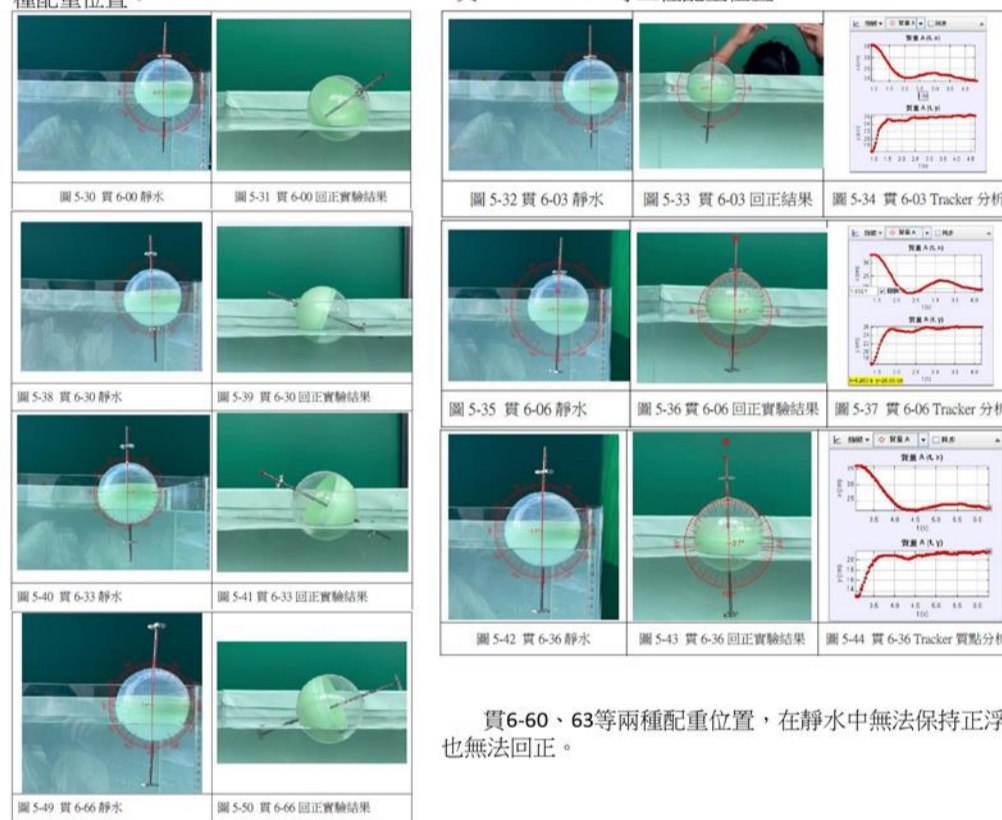
五、了解不同浮球模型在淡水中的回正情形。

在市展的報告中，關於浮球的回正實驗，我們發現配重位置較低，回到正浮靜止的時間較長，但由於模型易受水波干擾，較難明確測量回正時間。因此我們改用 Tracker 分析運動影像，以了解模型在 90° 入水的情況下，其回正的運動模式。我們取較穩定的貫通式雙軸模型，以及單軸模型，進行本實驗。

(一) 了解貫通式雙軸浮球模型在淡水中 90° 傾斜入水後的回正情形。

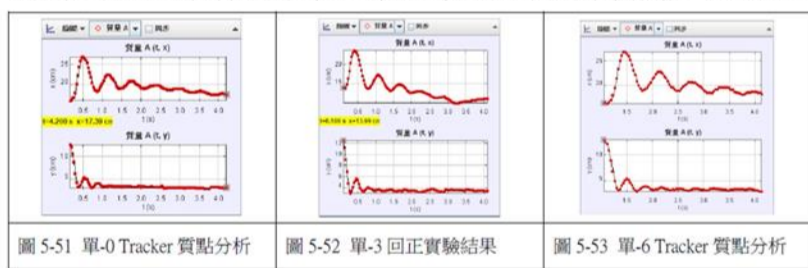
在靜水中可正浮，但傾倒後無法回正的模型為：貫 6-00、30、33、66 等四種配重位置。

在靜水中可正浮，且傾倒後可回正的模型為：貫 6-03、06、36 等三種配重位置。



(二) 了解單軸浮球模型在淡水中 90° 傾斜入水後的回正情形

單軸模型不論配重位置在哪裡，都可回到正浮，所以我們將單軸的三個配重位置放在一起觀察。由 Tracker 分析可發現單-0、單-3、單-6 的運動軌跡極其相似，如圖 5-51~5-53 所示。



陸、討論

一、設計並測試扭蛋浮球模型以進行實驗觀察。

在校內科展與市展的初代扭蛋有單軸與分離式雙軸兩種，在實驗中發現若干缺點，我們在進一步的研究中一一加以改進，使模型規格化，以利實驗觀察。

- (一) 顏色單一：上下殼的顏色相同，不易觀察。我們改用上球透明、下球有不同顏色的扭蛋作為模型。
- (二) 質心不確定問題：新扭蛋下殼質量較大，我們削取下殼螺旋部分，削完後稱取下殼質量為 A 克。將削下來的碎屑與上殼合計質量，稱取質量為 B。當 A=B 時，可視為上下殼等重，此時質心在浮球的上下殼交會處，如圖 4-3。
- (三) 上下軸不在同一直線上：新扭蛋上下殼有明顯頂點，在頂點鑽孔後以螺絲和螺帽固定，可改善此缺點。
- (四) 密封性不佳：製作新模型時，特別加強水密，使其不進水。

二、觀察並記錄在靜水中，不同配重對浮球的吃水深度影響。

在船舶進出港時，若吃水小於該港口水深，則船舶無法進港。故吃水深度是建造船隻的基本資訊。我們的三種扭蛋浮球在載重與吃水深度的實驗中，可看出每增加 5 組配重，淡水中吃水深度增加約 0.4cm，在海水中較不規律，但在海水沒入深度均小於淡水，這與海水密度較大相符。

三、了解不同配重位置對浮球傾斜度的影響。

(一) 比較淡水與海水中，分離式雙軸配重位置對傾斜度的影響

分離式各配重位置在海水中與淡水傾斜度如表 6-1 所示。角度 $< 6^\circ$ 可視為正浮。

表 6-1 離 6 模型各配重位置與傾斜角度。

		上軸		
		0	3	6
淡水	0	3.3°	52.6°	68.9°
	3	5.5°	15.8°	61.2°
	6	2.3°	7°	25°
海水	0	1.8°	53.2°	73.5°
	3	5.3°	14.9°	64.2°
	6	5.5°	4°	10.6°

由表 6-1 可看出，離 6 模型在淡水與海水的配重與傾斜度關係表現類似，上軸配重低，如 00、03、06 三組，不論淡水或海水，皆可正浮。上軸配重高者，如 30、33、36、60、63、66 等 6 組，皆無法正浮。而當下軸配重位置越低，傾斜角度越小。36、66 雖仍傾斜，但已接近正浮。

(二)比較淡水與海水中，貫通式雙軸配重位置對傾斜度的影響。

貫6模型傾斜度如表6-2所示。

表6-2 貫通式雙軸配重位置與傾斜度一覽表

下軸		上軸			
		0	3	6	
淡水	0	2.4°	2.3°	156.9°	
	3	0.1°	1.4°	105.4°	
	6	2.2°	2.3°	3.5°	
海水	0	4.8°	2.3°	175.9°	
	3	3.7°	0.3°	0.7°	
	6	1.5°	0°	0.2°	

在淡水與海水中，貫通式雙軸配重位置00、03、06均可穩定正浮。30、33、36可正浮，但30稍受擾動即傾倒。60上軸會倒插入水中。63(表格中紅色欄位)在海水中雖可成正浮(0.7°)，但極不穩定，稍有擾動，上軸即倒入水中，乃因上下軸在同一直線，只要無橫向受力，即可呈現正浮，又因上軸配重較高，力臂較大，只需微小橫向擾動，即產生淨力矩使浮球轉動傾斜甚至倒插入水。而在淡水中貫6-63無法正浮，與海水表現不同，推測是因為淡水實驗在室外進行，受風力影響所致。

四、探討造波對浮球運動的影響

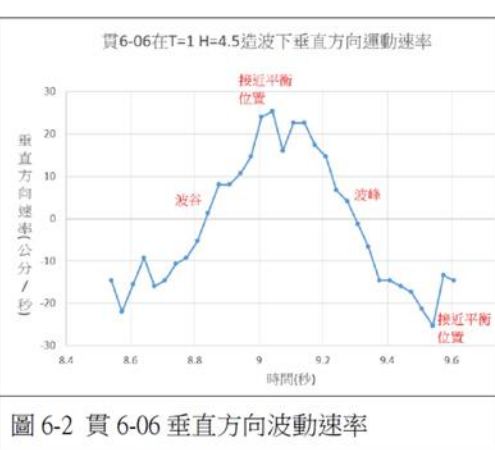
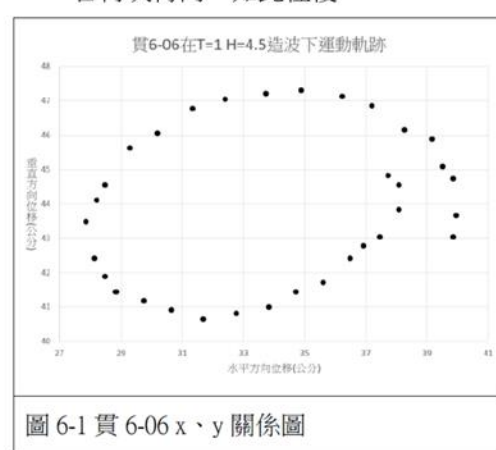
(一) 手動造波對不同浮球運動的影響。

在市展中，我們發現浮球模型受手動造波影響，會同時發生同時發生位移、晃動、旋轉等運動，並觀察到浮球受波浪影響有短暫上下類似簡諧運動的表現。波浪行至魚缸兩側泡棉處，部分能量被吸收，部分被反射，反射回來的波對浮球造成擾動，應是浮球的運動型態複雜的主要原因。

(二)、造波池造波對浮球運動的影響。

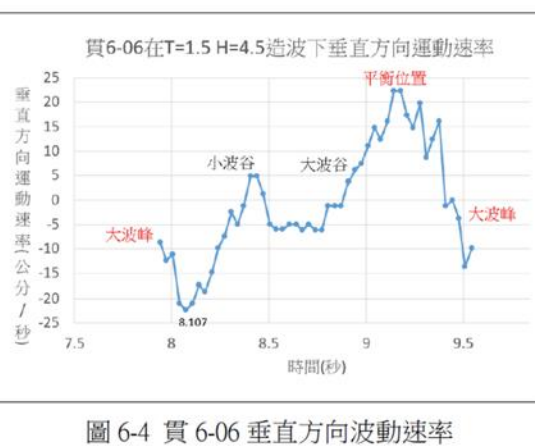
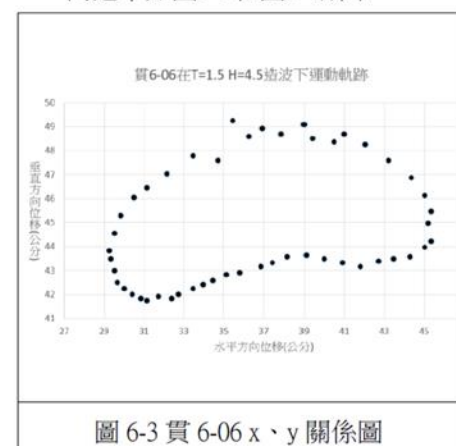
1. 浮球運動形式探討

為減少反射波干擾且能穩定造波，我們借用海大河工系造波水槽進行造波實驗。我們選取上軸較低的貫6-00、貫6-03、貫6-06的配重進行探討。浮球在造波水槽中受波動影響，其運動軌跡接近橢圓，以貫6-06為例，由圖6-1和圖6-2可發現在垂直方向運動速率在平衡位置最大，之後速率逐漸下降，到波峰時速率為0，開始改變方向。之後速率逐漸增加，平衡位置時為最大值，開始逐漸下降，到波谷再次轉向，如此往復。



其餘模型與配重在造波時運動形式皆與貫6-06相似。

我們同時也做了T=1.5的造波資料，同樣以貫6-06為例，其運動軌跡與垂直方向速率如圖6-3和圖6-4所示。



當T=1.5s，追蹤軸頂的運動軌跡，如圖6-3所示，類似保衛細胞的形狀。雖然有大、小波峰和波谷，但基本表現與單純的波峰波谷相似，在平衡位置附近有最大垂直方向速率，小波峰、小波谷處速率降低，至大波峰、大波谷處，其速率為0。

2. 浮球上軸擺動角度

以離6為例，上軸擺動角度如表6-3所示。

表6-3 離6模型不同配重位置的上軸擺動角度

造波週期	離 6-00	離 6-03	離 6-06
T=1s	1.9	18.8	21.3
T=1.5s	4.8	8.5	15.8

由表6-3可清楚看出，下軸配重位置越遠，擺動角度越大。由力矩=力×力臂來看力臂變大，力矩也變大，完全符合此公式。

3. 浮球最大起伏 $\Delta h < 2H$

我們詳細比對所有的浮球模型配重位置，發現在不同週期的造波下，浮球最大垂直位移 Δh 都不會超過2倍波高。即，均小於9cm。這是一個很有趣的發現，希望能有更多的印證和應用。

4. 浮球在波峰與波谷的浮力變化

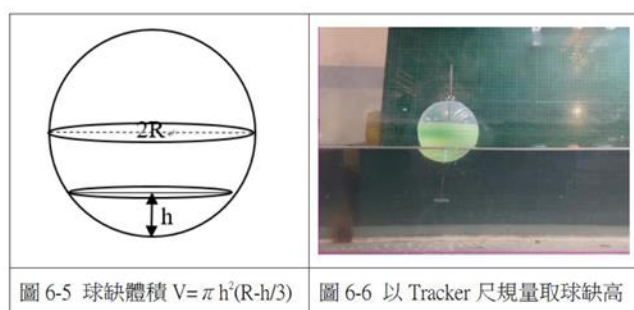


圖6-6 以Tracker尺規量取球缺高

在觀察Tracker分析的時候，我們發現模型在波峰和波谷位置，沒入水面下的體積明顯不同，為了解其浮力變化，我們採用球缺公式 $V=\pi h^2(R-h/3)$ 來計算沒入液面下體積的，如圖6-5所示。

以貫6模型為例，根據不同配重位置，其沒入液面下體積如表6-4所示。

表6-4 貫6模型在T=1s, H=4.5cm 造波下，波谷與波峰的球缺對照

模型	波谷	波峰	增加%	波谷圖	波峰圖
貫 6-00	36.0 π	54.0 π	51.4%		
貫 6-03	38.2 π	59.9 π	57.9%		
貫 6-06	36.7 π	62.4 π	70.1%		

貫6模型的球體體積 $=4\pi r^3/3=166.7\pi$ ，總質量約65克，在靜水中 $B=W$ ，但在造波中，介質運動提供外力，對模型造成影響，使模型在不同位置的沒入體積有所變化。我們觀察到在所有運動位置中，波峰處的模型沒入體積最大，此處模型開始受一向下的力以向下運動，彷彿有一力將模型往下拉，故沒入體積最大。同理，在波谷處模型開始受一向上的力以向上運動，故波谷處的模型沒入體積最小。同樣的模型在T=1.5s時，沒入液面下體積變化如表6-5。

表6-5 貫6模型在T=1.5s 造波下，波谷與波峰沒入液面下的體積比較。

模型	波谷	波峰	增加%
貫 6-00	38.1 π	59.0 π	54.9%
貫 6-03	36.2 π	67.1 π	85.4%
貫 6-06	36.3 π	60.2 π	65.8%

3種不同配重位置的貫6模型，在不同週期的造波下，有相似的浮力變化，波峰浮力>>波谷浮力，如圖6-7~6-8

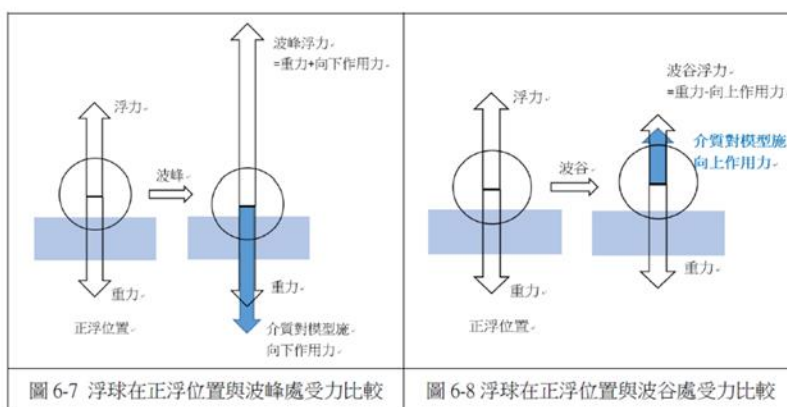


圖6-7 浮球在正浮位置與波峰處受力比較

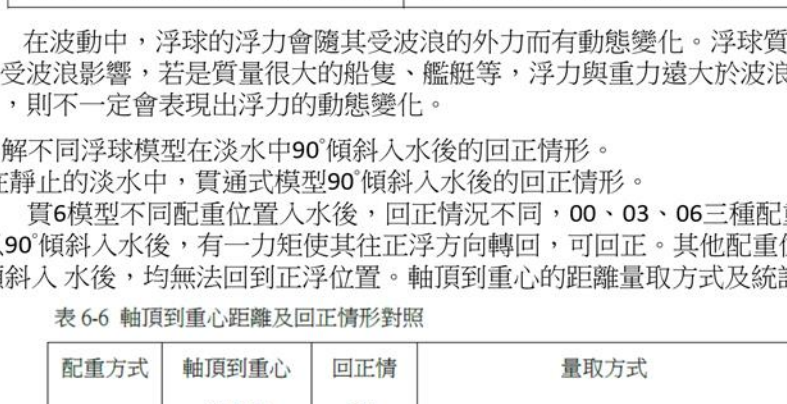


圖6-8 浮球在正浮位置與波谷處受力比較

在波動中，浮球的浮力會隨其受波浪的外力而有動態變化。浮球質量很小，易受波浪影響，若是質量很大的船隻、艦艇等，浮力與重力遠大於波浪造成的力，則不一定會表現出浮力的動態變化。

五、了解不同浮球模型在淡水中90°傾斜入水後的回正情形。

(一) 在靜止的淡水中，貫通式模型90°傾斜入水後的回正情形。

貫6模型不同配重位置入水後，回正情況不同，00、03、06三種配重位置，以90°傾斜入水後，有一力矩使其往正浮方向轉回，可回正。其他配重位置以90°傾斜入水後，均無法回到正浮位置。軸頂到重心的距離量取方式及統計如表6-6。

表6-6 軸頂到重心距離及回正情形對照

配重方式	軸頂到重心的距離	回正情形	量取方式
貫 6-06	11.67cm	可回正	
貫 6-03	11.42cm	可回正	
貫 6-36	11.42cm	可回正	
貫 6-00	11.17cm	不可回正	
貫 6-33	11.17cm	不可回正	
貫 6-66	11.17cm	不可回正	
貫 6-30	10.92cm		
貫 6-63	10.67cm		
貫 6-60	10.67cm		

軸頂到重心的距離(L)量取如上表所示。L越長，重心越低，越容易回正。

我們沿用在市展時的扶正力矩做說明。圖6-9為扶正力矩示意圖，其中G為重心，B為浮心，B'為傾斜後新浮心，M為定傾中心，GZ為扶正力臂。

扶正力矩=扶正力臂×重力

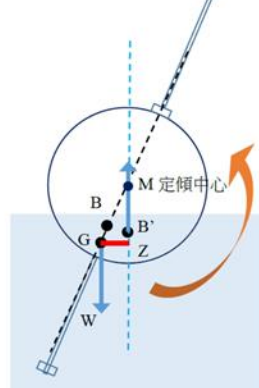


圖6-9 扶正力矩示意圖

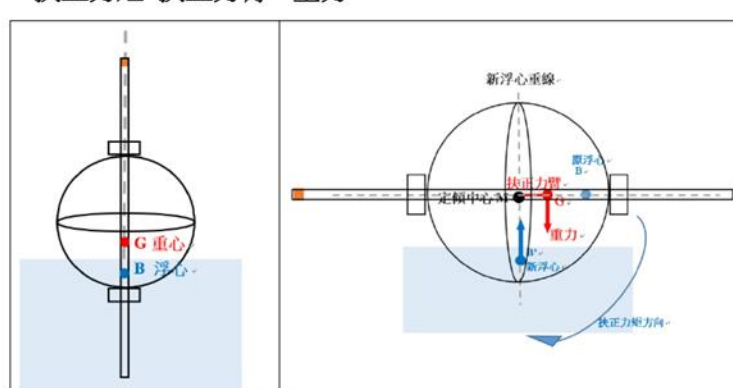


圖6-10 貫6-00正浮示意圖

圖6-11 貫6-00扶正力矩示意圖

貫6-00正浮時的重心及浮心成一直線(圖6-10)。水平橫放後，扶正力矩不足以使其回正。同樣的情形也發生在貫6-33、貫6-66，此三組模型重心在相同位置，軸頂到重心的距離均為11.17cm，扶正力臂較短，因此在靜水中可正浮，90°傾斜入水後，無法回到正浮位置。

此外，03、36(L=11.42cm)、06(L=11.67cm)，這三組的配重位置使重心下移，扶正力臂變大，90°傾斜後仍可回正。

值得注意的是，L=11.17cm時(00、33、66三組)，重心過高，不可回正，但L=11.42cm(03、36二組)則重心位置已可造成足夠大的扶正力臂。兩者差距僅0.25cm，足以有決定性的影響。

(二) 在靜止的淡水中，單軸模型90°傾斜入水後的回正情形。

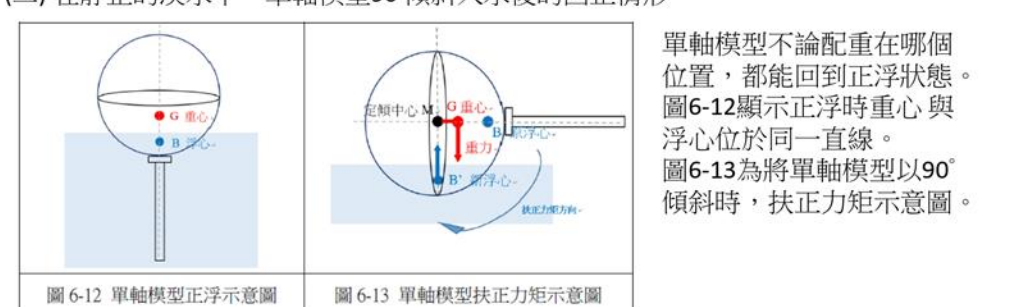


圖6-12 單軸模型正浮示意圖

圖6-13 單軸模型扶正力矩示意圖

單軸模型不論配重在哪個位置，都能回到正浮狀態。圖6-12顯示正浮時重心與浮心位於同一直線。圖6-13為將單軸模型以90°傾斜時，扶正力矩示意圖。

柒、結論

- 一、扭蛋殼是容易取得且方便實驗操作的材料，最好能製作呈貫通式軸模型進行實驗。
- 二、各模型在靜水中載重與吃水深度均呈線性關係，相同載重下，海水吃水深度較小。
- 三、比較同一浮球模型、不同配重位置的傾斜度發現：
 1. 分離式雙軸模型下軸配重位置越低，重心越低，傾斜角度越小。
 2. 貫通式雙軸由於上下軸在同一直線，除60倒插入水中，其餘各配重位置均可保持正浮，但重心較高者為不穩定平衡，稍受擾動即傾倒。

四、在造波中我們發現：

1. 浮球呈週期性運動，軌跡近似橢圓形。造波週期越長，浮球運動越複雜。
 2. 在波峰有浮力最大值，波谷有浮力最小值，浮力呈動態變化。
 3. 垂直方向最大位置變化量小於兩倍波高。
- 五、在回正實驗中我們發現貫通式雙軸模型重心越低，扶正力矩越大，越容易回正。軸頂到重心的距離L臨界值在11.17~11.42cm之間，L≥11.42cm的配重位置，以90°傾斜入水後仍可回正，而L≤11.17cm者，均無法回正。

捌、參考資料及其他

- 一、國民中學自然科學: Vol. 第五冊(第三章). (111 C.E.). 康軒文教事業。
- 二、國民中學自然科學: Vol. 第四冊(第六章). (111 C.E.). 翰林出版社
- 三、周鑑恆. (2012). 海浪發電之理論計算. 物理教育學刊, 13(1), 25–32.
- 四、小船穩度知識示範教材 <https://www.motcmpb.gov.tw/ServerFile/Get/08f86992-736c-479d-8bc2-876a4aa85af3?DLCount=1&attachTable=4>
- 五、船舶關鍵技術 <https://wordvice.com.tw/apa-citation-generator/?~:text=%E6%8A%80%E8%A1%93.%20>
- 六、新漁船翻覆 <https://www.youtube.com/watch?v=DWc22LQXMM>