

中華民國第 63 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國小組 物理科

佳作

080105

水中龍捲動起來！

學校名稱：新北市林口區麗林國民小學

作者： 小四 方若嫣 小四 薛稟妍 小四 孫孜晰 小四 李宸誼	指導老師： 吳志緯
---	------------------

關鍵詞：水中龍捲(漩渦)、移動多龍捲、磁石攪拌子

摘要

漩渦樣態像極了水中的龍捲，生活中有許多水中龍捲的發生與應用。我們想要製造出美麗完整的多龍捲，並且讓它們能自由自在的移動，那麼需要哪些條件呢？首先本研究先從電磁攪拌器產生的水中龍捲了解基礎特性，然後自製小體積的可移動水中龍捲產生器，接著有系統的實驗，依序由移動單龍捲、移動雙龍捲、再到移動三龍捲，逐步探索移動水中龍捲的生成條件與影響因素。實驗結果發現水中龍捲會受到移動速率與彼此距離的影響，移動越慢越有利於生成，而多龍捲之間過於靠近則會有相互消長的變化。值得一提的是，旋轉移動的方向如果與龍捲自轉同向，竟然會讓各種移動多龍捲的生成，全部都有顯著的提升。移動中的多龍捲具有豐富多樣的變化，十分有趣。

壹、前言(含研究動機、目的、文獻回顧)

一、研究動機

三年級的自然課，老師讓我們觀察漩渦，它的樣態像極了水中的龍捲。我們剛好有個磁石攪拌杯，裡面放入一顆磁石攪拌子，再加入水與咖啡粉，開關啟動後漩渦就產生了，幾秒鐘內快速完成攪拌。看著漩渦轉呀轉，好有趣呀！那麼，怎樣才能讓水中龍捲移動呢？

我們想要製造出美麗完整的多龍捲，而且讓它們能自由自在的移動，不受固定位置的限制，然而**完美移動多龍捲**卻不是隨處都可產生。儘管過去科展有許多作品探討漩渦，然而對於可移動水中龍捲的討論卻是相對少的，雖然有用於模擬雙龍捲，但較少研究其移動時的表現。目前並未搜尋到探討**移動多龍捲**的文獻作品。於是，我們決定自己動手做，先製作出產生器用來觀察可移動的水中龍捲，再透過一系列的實驗，有系統的從單龍捲移動、旋轉繞行、雙龍捲定距、公轉繞行、再到三龍捲公轉繞行，逐步探索移動多龍捲的生成與影響因素。

二、研究目的

(一)、自製可移動的水中龍捲產生器

(二)、研究移動單龍捲的特性

1. 單龍捲直線移動
2. 單龍捲自轉與公轉同向
3. 單龍捲自轉與公轉反向

(三)、研究各式容器中移動雙龍捲的特性

1. 定點雙龍捲距離遠近的相互作用
2. 容器壁面影響及寬廣容器定義
3. 雙龍捲自轉與公轉同向
4. 雙龍捲自轉與公轉反向

(四)、研究移動三龍捲的特性

1. 定點三龍捲距離遠近的相互作用
2. 三龍捲自轉與公轉同向
3. 三龍捲自轉與公轉反向
4. 提高公轉速率

三、背景與文獻回顧

在過去科展作品文獻中，有許多關於水中龍捲（漩渦）的探討。產生漩渦有許多種方式，可粗分為兩大類：第一大類是**自然排水法**產生（此法不需要旋轉攪拌），例如將容器底部開洞，透過孔洞排水來產生漩渦（陳依昕、郭維元、邱柏元與鄭日安，2003；蔡宗育、左伊心、平震傑與黃家偉，2007）；第二大類則是藉由**額外旋轉攪拌**的方式來產生漩渦，例如可將轉槳伸入水中進行旋轉的方式產生漩渦（李昱嫻、李欣玫、李有儀與江翊銘，2008），或是像姚杰邑、張詩篇、林敬旻與朱唯與等（2016）則是在容器底部建立立旋轉基座，更換不同的貝殼產生漩渦，近期有些作品則是利用**超距力磁力**吸引水中的磁石攪拌子旋轉來產生漩渦（黃筠茜與呂映儒，2014；吳宗祐、黃宥涵與曾亮鈞，2020）。

渦旋分為自由渦旋和強制渦旋。同時存在**自由渦旋**和**強制渦旋**的綜合性渦旋，稱為**蘭金渦旋**（維基百科，2023）。蘭金渦旋分為內外兩個區域，內部區域為剛體旋轉流，旋轉核心外的區域則為非旋轉流。電磁攪拌器所製造的渦旋，即是蘭金渦旋，內圈是屬於強制渦旋，但是越往外圍，則越接近自由渦旋。上方的水往中心流動，下方的水想往外圍排開，也因此造成渦旋有垂直方向的流線變化。

利用**磁石攪拌子**的方式產生漩渦，具有穩定可持續觀察的好處（吳宗祐、黃宥涵與曾亮鈞，2020）。因此就有作品使用兩組磁石，產生雙漩渦來模擬雙颱風，藉此觀察雙颱風彼此的交互作用。林煒宸與曾靖傑（2022）就使用了並排的兩台電磁攪拌器模擬雙颱風的藤原效應；黃筠茜與呂映儒（2014）則是改裝直流風扇來製作颱風的模擬器，在直徑 25 公分的圓桶中，模擬不同路徑的單颱風、雙颱風侵台的現象，同時也設計實驗探討兩個風扇於不同強弱時的交互情況。

表 1：文獻整理與比較

	作品文獻 (依屆排序)	研究重點	產生方式	可移動	龍捲數	容器
1	水龍捲—液體旋轉運動液面和漩渦變化的研究 (陳等人, 2003)	現象探究	容器底部打洞	X	2	圓
2	水中的殺手-漩渦 (蔡等人, 2007)	現象探究	容器底部打洞	X	1	圓
3	水中舞者—轉槳所成之漩渦的探討 (李等人, 2008)	現象探究	轉槳產生	X	1	圓
4	「颱風」客 - 追！追！追！ (黃與呂, 2014)	模擬颱風	磁石旋轉	O	2	圓
5	旋轉吧！貝殼！-貝殼製造漩渦原理與變因之研究 (魏等人, 2016)	用貝殼產生漩渦	貝殼旋轉	X	1	圓
6	神奇超距力攪拌器-探討各項影響電磁攪拌器穩定運轉的變因 (吳等人, 2020)	攪拌器自製方法	磁石旋轉	X	1	圓
7	神風水輪流轉-藤原效應之研究 (林與曾, 2022)	模擬雙颱風	磁石旋轉	X	2	方
♥	水中龍捲動起來! (本次科展研究)	移動多龍捲特性	磁石旋轉	O	3	圓+方

我們希望探究完美移動多龍捲的生成，需要注意哪些條件。從單一移動龍捲開始，接著是移動雙龍捲、然後推展到移動三龍捲。目前搜尋過往的文獻資料，並沒有相關作品探討過移動多（三）龍捲及其移動方式所造成的影響。因此，以探究「**產生完美移動多龍捲的條件**」來作為本次研究的主軸，不會有作品重複性的疑慮。

貳、研究設備及器材

表 2：實驗器材

					
電磁攪拌器	綠色格線背板 (格線間距 1 公分)	燒杯 500cc 直徑 9.2 x 高 11.5cm	燒杯 1000cc 直徑 11.6 x 高 14.5cm	平底小水箱 長 28 x 寬 19 x 高 14.5cm	水箱角柱 x4 高 13cm
					
平底長方水箱 長 41 x 寬 27 x 高 15.5cm	訂製壓克力中圓 桶 直徑 30 x 高 18cm	訂製壓克力正方 水箱 邊長 45 x 高 13.5cm	訂製壓克力大圓 桶 直徑 40 x 高 18cm	樂高機器人可控 制伺服馬達定速 前進	直線移動載具 (可拉線移動的 木製小汽車)
					
磁石 4cm 長條型	磁石 5x1.8cm 巨 型	磁石 3x3cm 十字型	磁石 2.5cm 長條型	長尺	定速旋轉轉盤 (直徑 20 公分)
					
風扇 5V 4cm 高 1cm	風扇 5V 6cm 高 1cm	風扇 12V 4cm 高 2.8cm	風扇 12V 6cm 高 2.6cm	強力釹磁鐵 (直徑 1cm x 高 1cm)	華司 - 阻隔磁性 用 (直徑 7/16")
					
小圓盒* (直徑 6cm x 高 8cm)	正方盒 (邊長 8cm x 高 5.4cm)	5V 升 12V 升壓 USB 線	行動電源 (5V)	USB 電壓電流 檢測儀	手機錄影腳架

參、研究過程與方法

在主實驗開始前，我們先利用電磁攪拌器進行基礎實驗，並依實驗結果和自製產生器的條件來決定控制變因，包括:水深控制在 5 公分，及使用 2.5 公分長條型磁石，讓後續的實驗維持一致性。此外，在本研究中，定義生成時間超過 90%的水中龍捲，叫做**完美移動龍捲**。



研究 完美移動多龍捲 生成的條件

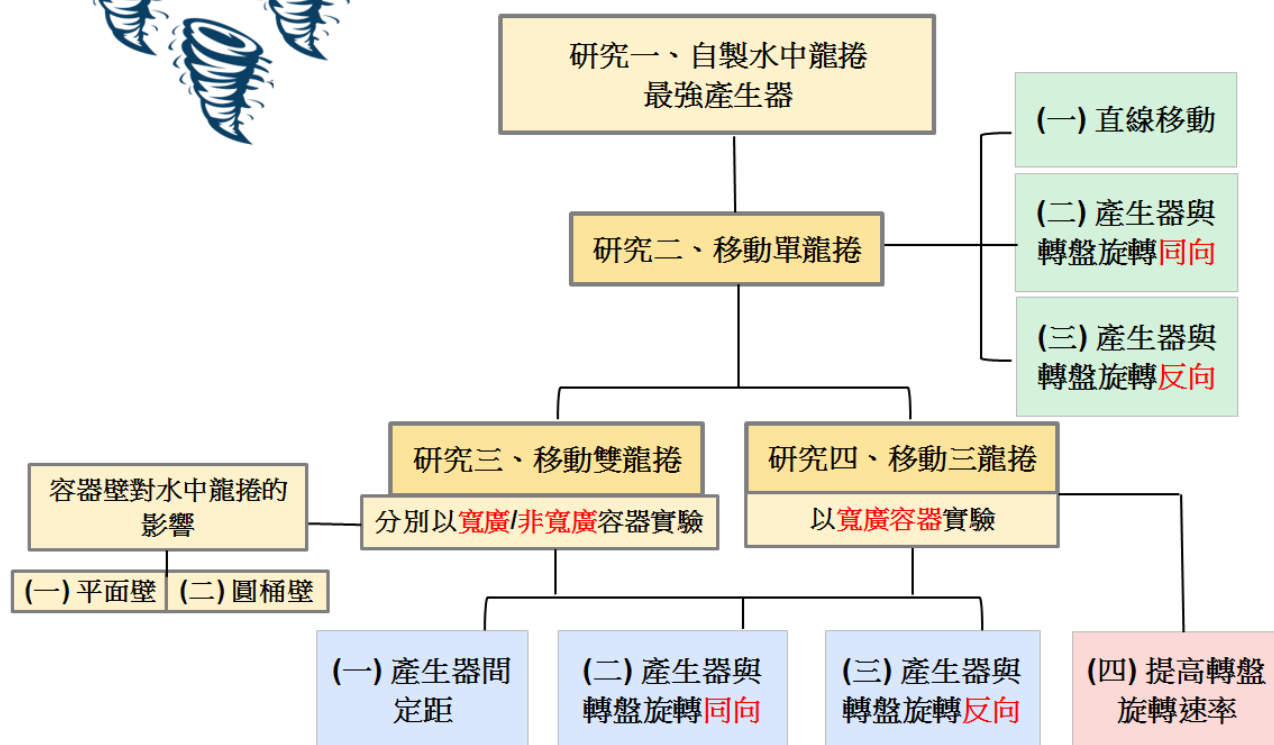


圖 1：研究架構圖

一、自製可移動的水中龍捲產生器

為了能製造出可自由移動的完美水中龍捲，我們訂定下面三個目標，選出最符合這些條件的產生器，再進行後續各項實驗。

1. 產生器轉速要最強，才能帶動磁石
2. 產生器體積要夠小，才有空間移動與數量擴充的優勢
3. 產生的水中龍捲要在各式容器中表現都很出色

操縱變因	不同的風扇 (四種)。5V,4cm；5V,6cm；12V,4cm；12V,6cm
控制變因	容器(燒杯、水箱)
應變變因	水中龍捲形狀有兩種 1. 到達底部：測量上寬與下寬 2. 沒到底部：測量上寬與深度
步驟	分次依操縱變因進行實驗，觀察並記錄

(一)、製作步驟：自製可移動水中龍捲產生器






1. 準備無刷直流風扇 (若為12V需額外接dc接頭)	2. 將華司黏在風扇中心(隔絕磁性用)	3. 於華司上黏上磁鐵	4. 風扇四周架上棉花棒，創造出磁鐵旋轉空間	5. 接USB線，將磁鐵朝底部，並把線收進圓盒中	6. 利用泡棉將風扇固定於圓盒內，完成！
					

圖 2：自製可移動水中龍捲產生器的步驟

(二)、兩個產生器自轉為同向或反向所造成的影響

我們先對兩個固定產生器的自轉方向進行前置實驗，分為兩種情況，(a)兩個自轉方向皆為同向，(b)兩個自轉方向分別為一逆時針一順時針自轉，如圖 3。

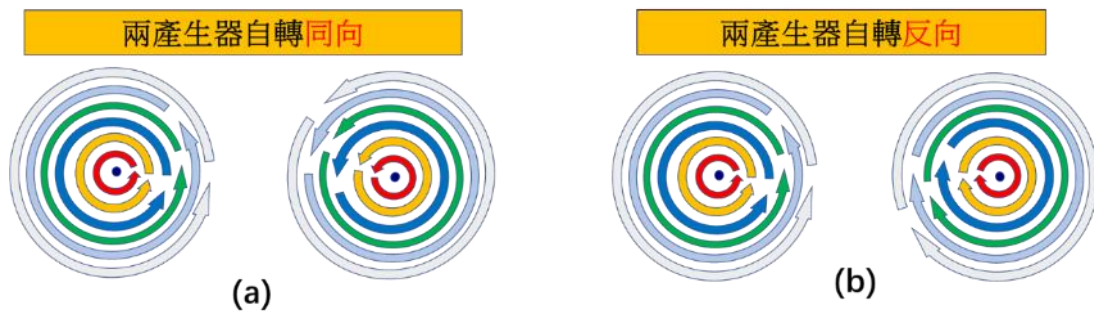


圖 3：兩個產生器自轉方向示意圖

兩個產生器相距 10 公分，實驗結果如圖 4，如果自轉同向，無論是順時針或是逆時針，皆可以產生水中龍捲；如果自轉是反向(一順一逆)，則無法產生水中龍捲。因此後續的各項實驗，一致採用同向產生器 (本研究用逆時針旋轉) 進行實驗。

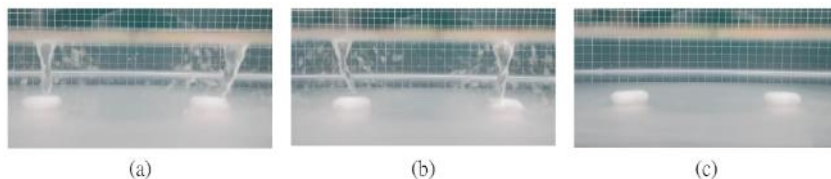


圖 4：兩個產生器自轉 (a)同順向有龍捲 (b)同逆向有龍捲 (c)一順一逆無法產生龍捲

二、研究移動單龍捲的特性

成功自製水中龍捲產生器後，我們開始對讓它可以自由移動有了許多想像，因此設計單龍捲直線移動實驗，觀察移動時的水中龍捲會不會消失，也進一步觀察在複雜的旋轉繞行過程中，能否找出容易產生移動水中龍捲的條件呢？

(一)【實驗 2-1】單龍捲直線移動

實驗步驟：

我們用電腦程式控制樂高機器人的伺服馬達，牽引木製小汽車在標示 1cmx1cm 的格板上直線前進，確保移動的速率是定速前進，距離設定為 20 公分，秒數共分為六種。

$$\text{移動速率 (公分/秒)} = \text{移動距離(20 公分)} \div \text{花費時間 (單位:秒)}$$

表 3：定速直線的移動速率表

移動秒數(秒)	5	7	10	15	20	40
移動速率(公分/秒)	4	2.9	2	1.3	1	0.5

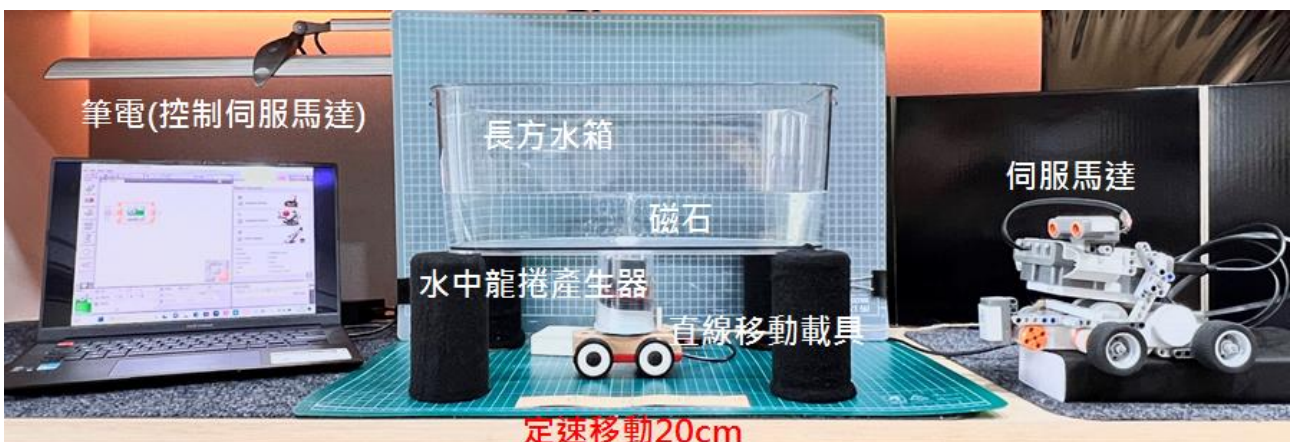


圖 5：單龍捲直線移動設置

操縱變因	定速直線移動共分為六種移動速率，如表 3
控制變因	長方水箱、水中龍捲產生器(12V,4cm)、直線移動載具、伺服馬達、綠格線板
應變變因	水中龍捲出現程度、樣態

(二)【實驗 2-2】單龍捲自轉與公轉同向

實驗步驟：

實驗使用的定速轉盤，以最低轉速(轉一圈需 25 秒)，在距離盤心十個不同位置擺放產生器，會有不同的移動速率。

$$\text{等速圓周運動，產生器在盤上移動速率} = \text{繞盤一圈距離 } 2\pi r \div \text{盤轉一圈時間}$$

表 4：定速轉盤不同位置的移動速率對照表 (盤轉一圈 25 秒)

離盤心距離(公分)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
移動速率(公分/秒)	0	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.26

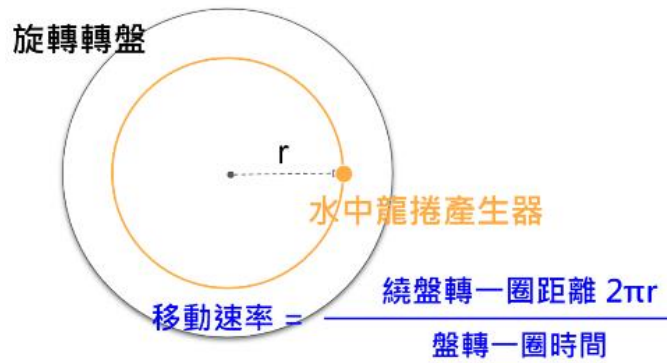


圖 6：產生器置於定速轉盤上的示意圖

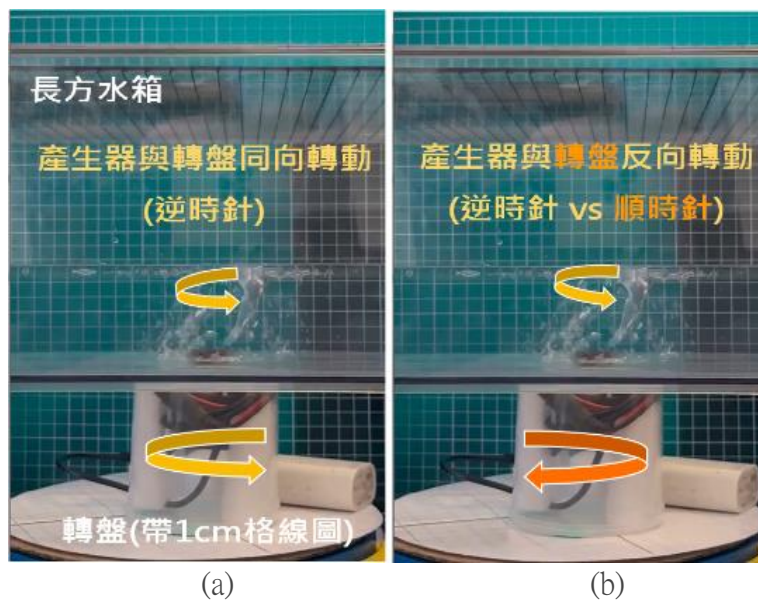


圖 7：(a)自轉與公轉同向 (b)自轉與公轉反向

操縱變因	離盤心距離 (共十種)，如表 4
控制變因	長方水箱、水中龍捲產生器(12V,4cm)
應變變因	水中龍捲出現程度、樣態

(三)【實驗 2-3】單龍捲自轉與公轉反向

實驗步驟：

除定速轉盤為順時針旋轉外（如圖 7(b)），所有實驗變因都與實驗 2-2 完全一致。

三、研究雙龍捲的移動

對於單一移動水中龍捲有了基本探索後，我們想要進一步了解移動雙龍捲間的交互作用，特性是否會和單龍捲相似呢？

(一)【實驗 3-1】定點雙龍捲距離遠近的相互作用



圖 8：定距雙龍捲實驗設置

操縱變因	雙龍捲間距離(七種)。6cm; 8 cm; 10cm; 12cm; 14cm; 16cm; 18cm
控制變因	長方水箱、水中龍捲產生器(12V,4cm)
應變變因	雙龍捲出現程度

(二)【實驗 3-2】容器壁面影響及寬廣容器定義

我們發現水中龍捲生成難易度，會受距離容器壁面遠近的影響(如圖 9)，所以用自製的水中龍捲產生器分別在方形與圓形容器進行實驗，並且最後為寬廣容器定義出條件。

實驗	研究壁面對於水中龍捲的影響
操縱變因	離壁面不同的距離。(由 4cm 到 12cm)
控制變因	容器(方形、圓形)、水中龍捲產生器(12V,4cm)
應變變因	完整水中龍捲出現與否
步驟	分次依操縱變因進行實驗，觀察並記錄。

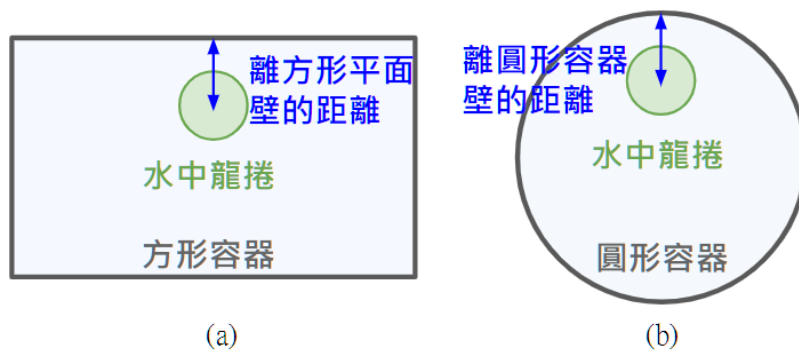


圖 9：水中龍捲離容器壁面的示意圖 (a)方形容器 (b)圓形容器

實驗發現須離方形容器壁 12 公分(含)以上，圓形容器須 8 公分(含)以上，才不受壁面影響。

定義寬廣容器的條件：

寬廣容器各邊寬度 $>$ (離壁面的距離 $\times 2$ + 龍捲彼此之間的距離)

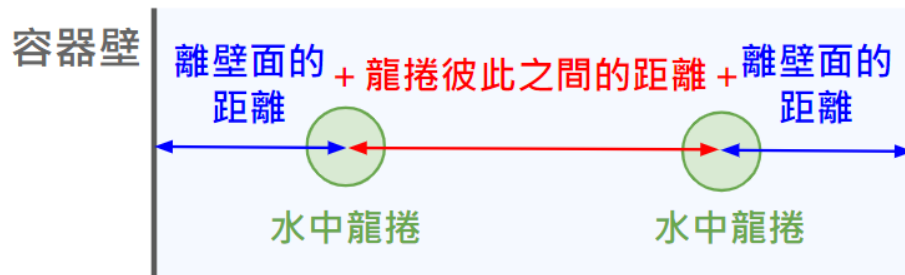






圖 10：定義寬廣容器尺寸的圖示說明

為了後續能順利觀察到多龍捲的特性，同時參考定距雙龍捲和定距三龍捲的實驗結果，我們定義寬廣容器的尺寸條件：方形容器長寬各需 42 公分以上；圓形容器直徑需 34 公分以上。

★【四種實驗容器】

在接下來的移動雙龍捲（實驗 3-3 與 3-4）中，我們將分別於四種容器中進行實驗。正方水箱與大圓桶為符合寬廣定義的容器；長方水箱與中圓桶為非寬廣容器，後續將對比兩類型容器的實驗結果。

表 5：四種用於移動多龍捲實驗的容器

寬廣容器		非寬廣容器	
正方水箱 (邊長 45cm)	大圓桶 (直徑 40cm)	長方水箱 (長 41cm x 寬 27cm)	中圓桶 (直徑 30cm)
			

(三)【實驗 3-3】雙龍捲自轉與公轉同向

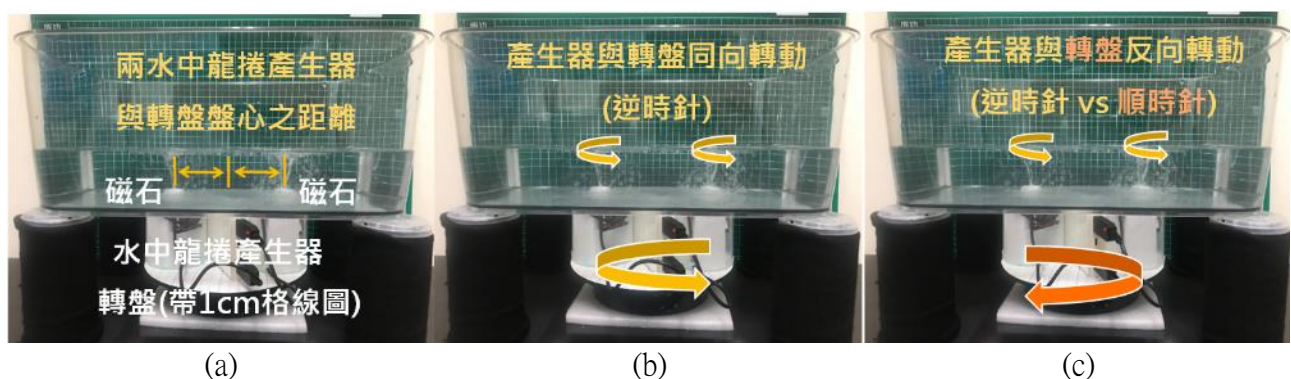


圖 11：(a)移動雙龍捲在長方水箱的設置 (b)自轉與公轉同向 (c)自轉與公轉反向

操縱變因	雙龍捲離盤心距離 (七種)。3+3cm; 4+4cm; 5+5cm; 6+6cm; 7+7cm; 8+8cm; 9+9cm
控制變因	四種容器(表 5)、水中龍捲產生器(12V,4cm)、轉盤和龍捲的旋轉同向(如圖 11(b))
應變變因	雙龍捲出現程度

(四)【實驗 3-4】雙龍捲自轉與公轉反向

實驗步驟：

除定速轉盤為順時針旋轉外(如圖 11(c))，所有實驗變因都與實驗 3-3 完全一致。

四、研究移動三龍捲的特性

對於移動雙龍捲有一定的了解後，我們繼續往移動三龍捲的實驗推進，期待會有更多的發現。我們在圓形轉盤上標示三條平分線與離盤心的刻度，用來放置產生器（如圖 12），由於三個龍捲彼此最靠近的整數距離是 4+4+4cm，因此三龍捲的實驗由此開始。

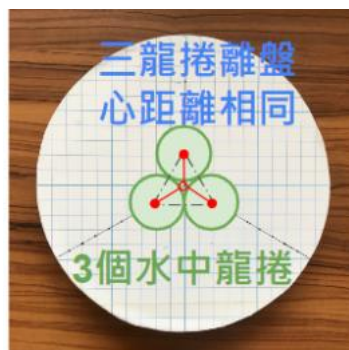


圖 12：定速轉盤上三龍捲以正三角形放置

(一)【實驗 4-1】定點三龍捲距離遠近的相互作用

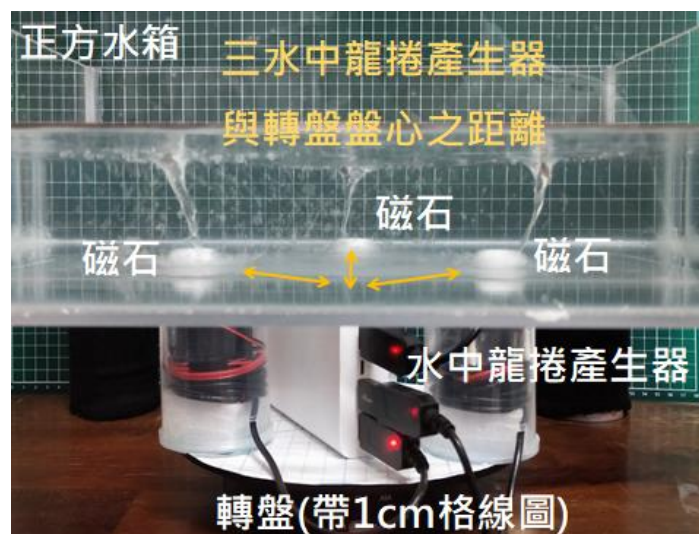


圖 13：定距三龍捲實驗設置

操縱變因	三龍捲離盤心距離 (六種)。 4+4+4 cm ; 5+5+5 cm ; 6+6+6 cm ; 7+7+7 cm ; 8+8+8 cm ; 9+9+9 cm
控制變因	正方水箱、水中龍捲產生器(12V,4cm)
應變變因	三龍捲出現程度

(二)【實驗 4-2】三龍捲自轉與公轉同向

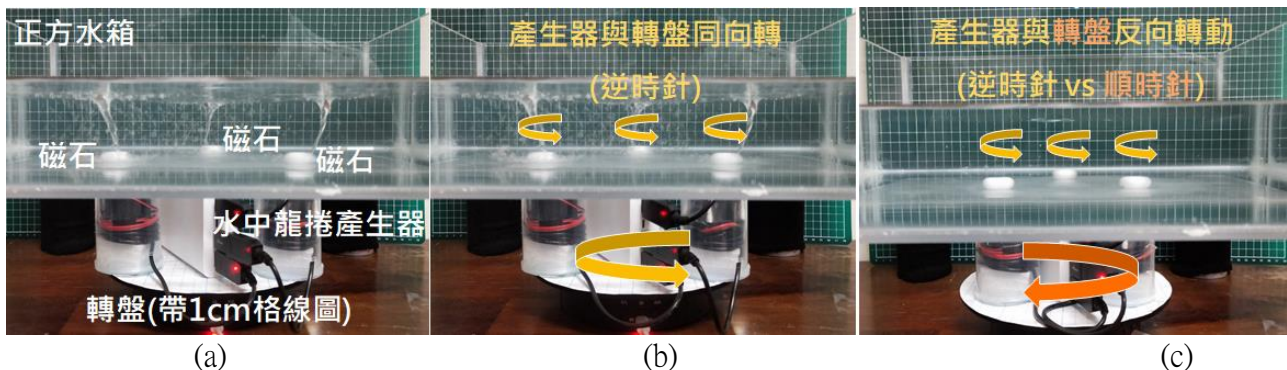


圖 14：(a)移動三龍捲在寬廣正方水箱的設置 (b)自轉與公轉同向 (c)自轉與公轉反向

操縱變因	三龍捲離盤心距離 (六種)。 4+4+4 cm ; 5+5+5 cm ; 6+6+6 cm ; 7+7+7 cm ; 8+8+8 cm ; 9+9+9 cm
控制變因	兩種寬廣容器(如表 5)、水中龍捲產生器(12V,4cm)、轉盤和龍捲的旋轉同向
應變變因	三龍捲出現程度

(三)【實驗 4-3】三龍捲自轉與公轉反向

實驗步驟：

除定速轉盤為順時針旋轉外(如圖 14(c))，所有實驗變因都與實驗 4-2 完全一致。

(四)【實驗 4-4】提高公轉速率

到目前為止，單、雙、三龍捲的同向實驗都可看到完美移動龍捲。我們想更進一步去觀察如果提高轉盤轉速，水中龍捲會有什麼樣的變化。在這個實驗中，我們將產生器放在離盤心最遠的 9 公分位置，定速轉盤一共有三段轉速。移動速率如表 6，計算方式如圖 6。

表 6：三段轉速下離盤心最遠(9cm)的移動速率

轉盤轉一圈所需 時間(秒)	25 低速	13 中速	7.2 高速
離盤心 9 公分的移 動速率(公分/秒)	2.26	4.35	7.85

操縱變因	轉盤的旋轉盤速 (三段)，如表 6
控制變因	兩種寬廣容器(如表 5)、水中龍捲產生器(12V,4cm)、轉盤和龍捲旋轉同向
應變變因	完美單龍捲、完美雙龍捲、完美三龍捲的出現程度

肆、研究結果

一、自製可移動水中龍捲產生器

以四種自製產生器在長方水箱中，進行水中龍捲的比較，實驗的結果整理於圖 15。同時，根據我們設定的篩選條件，確定了後面各項實驗使用的設備。

1. 產生器轉速要最強，才能帶動磁石
2. 產生器體積要夠小，才有空間移動與數量擴充的優勢
3. 產生的水中龍捲要在各式容器中表現都很出色

➤ 選用 12V,4cm 風扇
(轉速最強且體積最小)

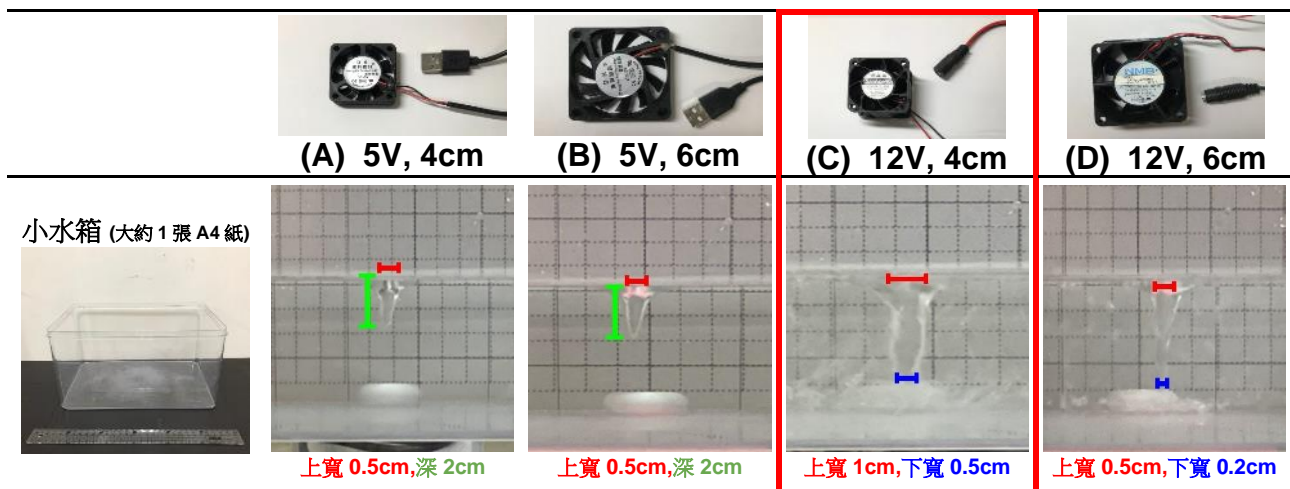


圖 15：四種不同風扇於不同容器所產生的水中龍捲大小與形狀。

二、研究移動單龍捲的特性

(一)【實驗 2-1】單龍捲直線移動

表 7：移動速率對於單龍捲直線移動的影響

單龍捲直線移動實驗							
(每項實驗結果為3次平均)							
操縱變因	移動速率	0.5 公分/秒	1 公分/秒	1.3 公分/秒	2 公分/秒	2.9 公分/秒	4 公分/秒
	20cm走完 秒數	40秒	20秒	15秒	10秒	7秒	5秒
應變變因	移動中有 水中龍捲?	有	有	有	有	有	無
	出現時間*	40秒	20秒	15秒	10秒	5秒	0秒
	形狀外觀	粗胖(寬1.5cm) ，直立，跟隨 磁石中心	粗胖(寬1.5cm) ，直立，跟 隨磁石後側	粗胖(寬1.5cm) ，直立，跟隨 磁石後側	粗胖(寬1.5cm) ，直立，跟隨 磁石後側	移動時由中等(寬1cm) 逐漸縮短，消失後又再 出現，微斜(偏移1cm) ，跟隨磁石後側。	N/A

*「出現時間」數據來自將錄影檔案重播，每秒紀錄並累計總共出現時間。

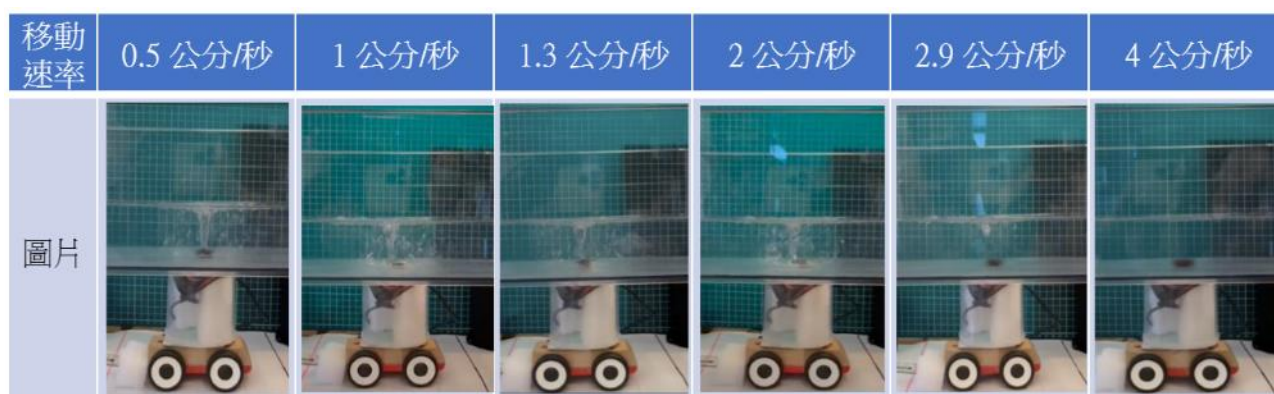


圖 16：移動速率對於單龍捲直線移動的影響

- 水中龍捲形狀會有縮短、歪斜甚至是消失的變化。
- 本實驗的結果發現，若要在直線移動中仍出現水中龍捲，移動速率需慢於 2.9 公分/秒。

(二)【實驗 2-2】【實驗 2-3】單龍捲自轉與公轉同向實驗及反向實驗

★【量化與統計龍捲占比方式】

為了量化龍捲出現時的各種占比，我們將水中龍捲的實驗過程錄影，每項實驗皆做三次，透過影片重播的方式，每秒記錄水中龍捲的出現個數，用試算表進行統計與比例分析。

同向反向對於移動單龍捲的影響

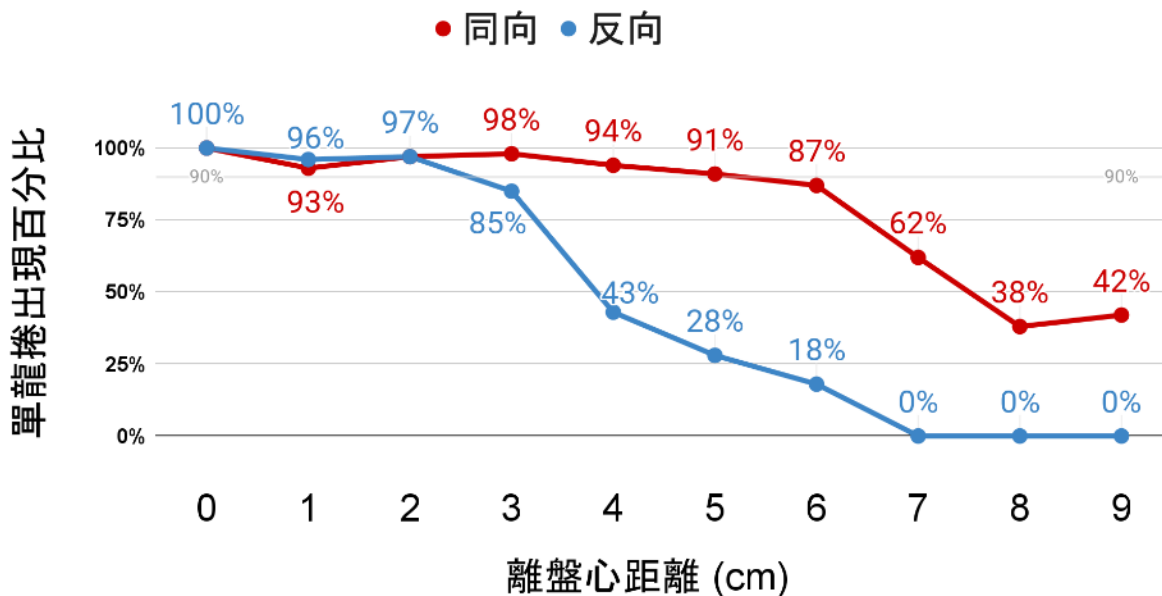


圖 17：單龍捲自轉與公轉同向與反向出現的單龍捲比例統計

- 單龍捲自轉與公轉同向時，離盤心 5cm 以內（移動速率 1.25 公分/秒以下），都還有 90% 以上產生單龍捲，距離盤心越遠，移動的速率越快，產生單龍捲的比例下降。
- 單龍捲自轉與公轉反向時，離盤心 3cm 以內（移動速率 0.75 公分/秒以下），才有較多的雙龍捲產生(85%)。而 7cm 以上則完全無法產生。對應的移動速率請參考表 4。

★【移動速率越快造成水中龍捲越歪斜】

移動的水中龍捲會出現歪斜的現象，為了了解歪斜程度，我們定義歪斜率的計算方式如圖 18，然後將產生器放在離盤心不同的距離（對應的移動速率請參考表 4）。實驗結果呈現於圖 19。可以發現移動速率越快，水中龍捲則越歪斜，呈現遞增的趨勢。

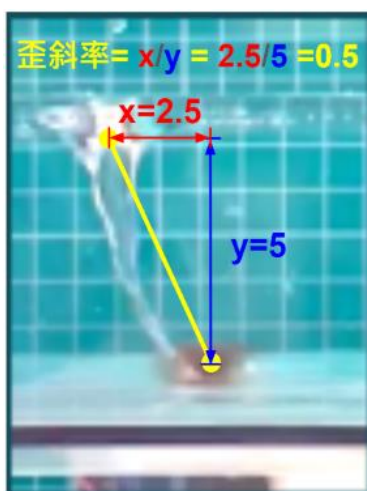


圖 18：移動龍捲歪斜率

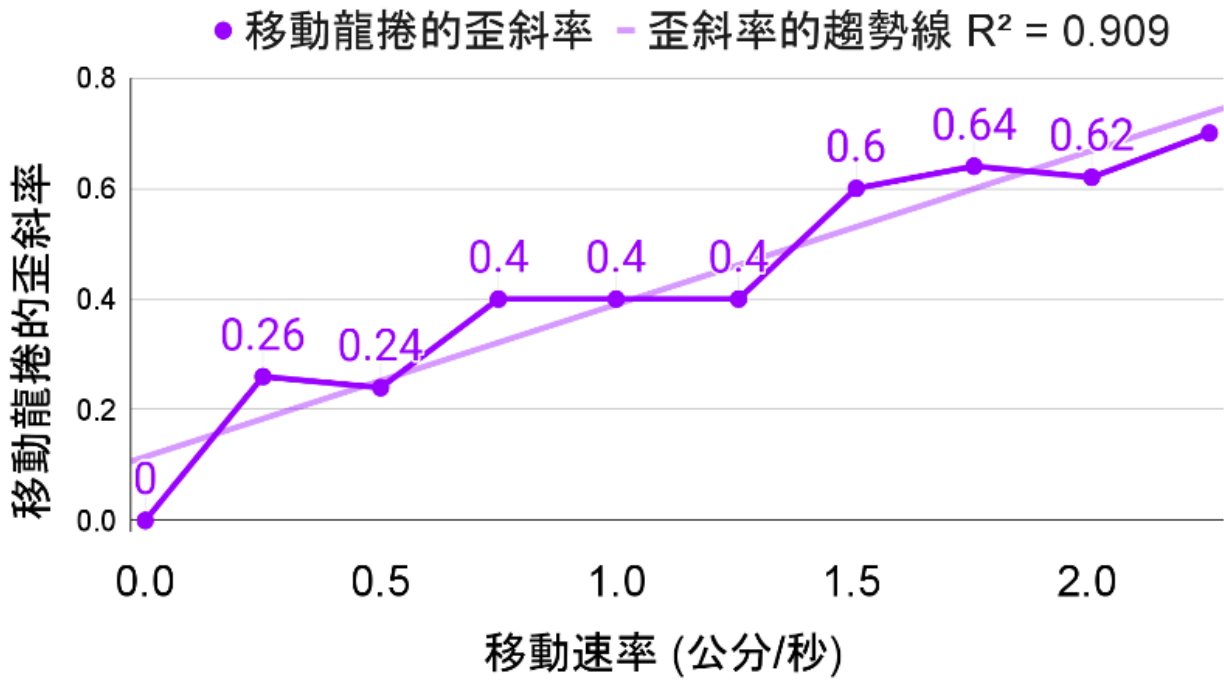


圖 19：移動速率對於移動龍捲歪斜率

三、研究各式容器中移動雙龍捲的特性

(一)【實驗 3-1】定點雙龍捲距離遠近的相互作用

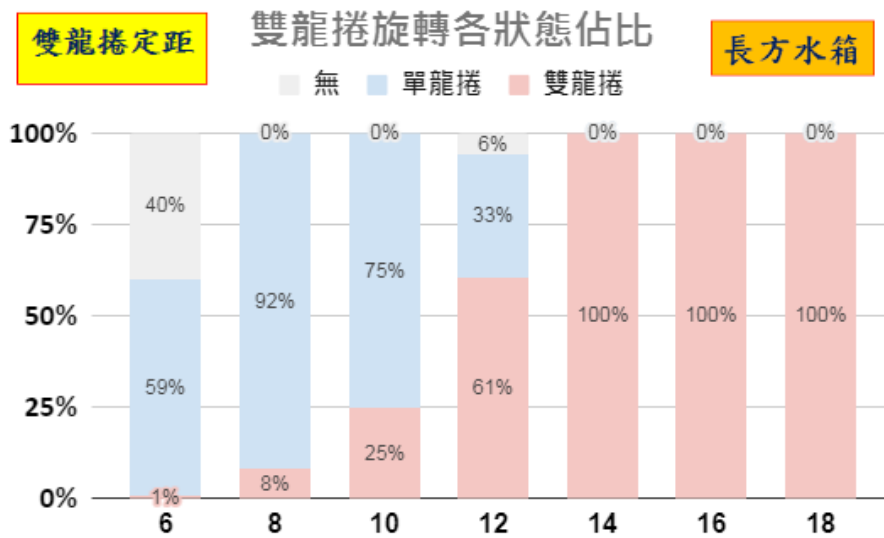


圖 20：定距雙龍捲實驗出現各龍捲的統計

- 彼此距離由近到遠時，雙龍捲產生的比例逐漸遞增，當距離為 14 ~ 18cm 時，可持續產生雙龍捲。
- 彼此距離 10cm 以內時，以產生單龍捲為主。彼此最近距離 6cm 時，出現 60%單龍捲，有 40%的機率沒有任何水中龍捲產生。

(二)【實驗 3-2】容器壁面影響與寬廣容器定義

1. 方形容器 (平面壁面)

表 8：離方形平面壁不同距離產生水中龍捲的效果

離方形平面壁 距離	4cm ~ 8cm	9cm	10cm	11cm	12cm
水中龍捲生成	X	○ 細	○ 細	○ 細	◎ 粗
龍捲上寬(公分)	X	0.5	0.5	1	2




- 靠近方形平面壁時(4cm ~ 8cm)水中龍捲不會產生；稍遠一些時(9cm ~ 11cm)雖有產生，但形狀呈細長狀。
- 離方形平面壁面 12cm 處，所產生的水中龍捲粗壯，其上方寬度大於 2 公分，而此距離也作為寬廣容器選擇的因素之一。

2. 圓形容器 (圓形壁面)

表 9：離圓形容器壁面不同距離產生水中龍捲的效果

離圓形容器壁 距離	4cm ~ 6cm	7cm	8cm	9cm	10cm
水中龍捲生成	X	○ 細	◎ 粗	◎ 粗	◎ 粗
龍捲上寬(公分)	X	0.5	2	2.5	2.5

- 靠近圓形容器壁時(4cm ~ 6cm)水中龍捲不會產生，離圓形容器壁面 8cm 處與更遠，所產生的水中龍捲粗壯，其上方寬度大於 2 公分。相較於方形容器壁面，在更近的距離下就可產生水中龍捲。

水中龍捲樣態	無生成	細狀	粗胖狀
圖示			

(三) 【實驗 3-3】雙龍捲自轉與公轉同向

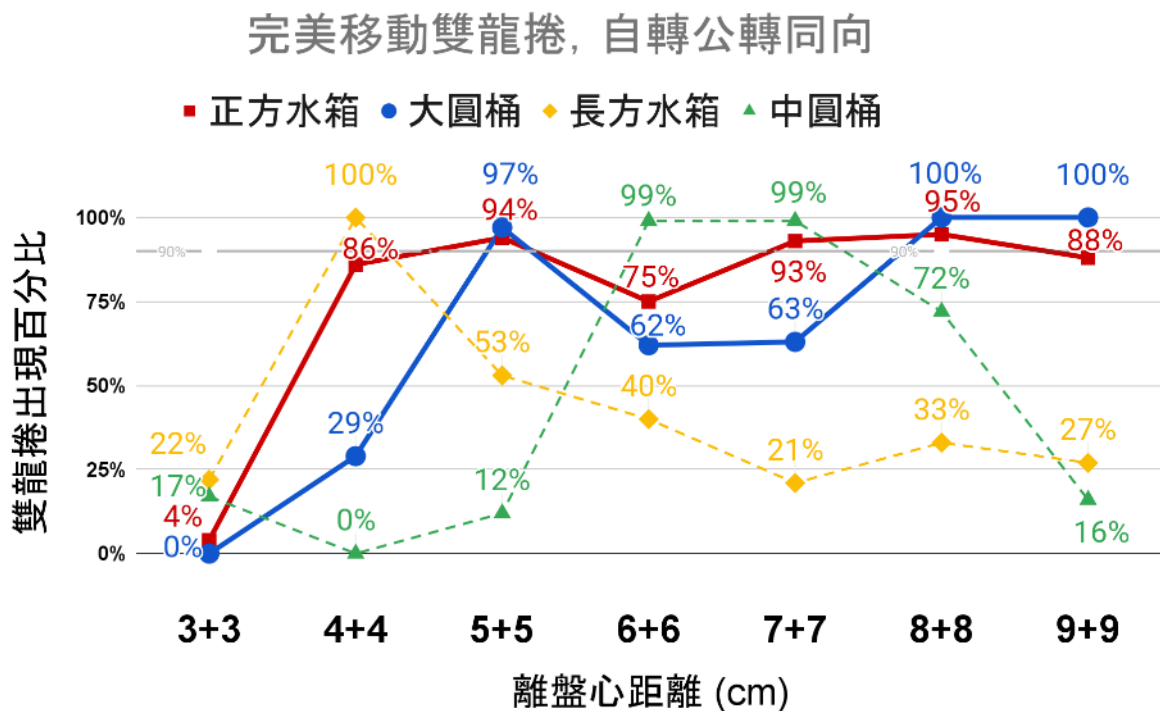


圖 21：雙龍捲自轉與公轉同向時，雙龍捲於各種容器出現的比例

- 在兩種寬廣容器(正方水箱與大圓桶)的雙龍捲自轉與公轉同向實驗中，兩者的雙龍捲出現比例的趨勢是非常相像的，也就是距離盤心越遠，產生雙龍捲的機率越高。
- 寬廣容器中，離盤心距離 6+6cm 時，雙龍捲出現的比例突然下降，針對此現象，在後文中，我們將以正方水箱為例，進行離盤心距離及水中龍捲深度變化的分析，以確認比例下降的原因（如圖 23）。
- 在非寬廣容器中，長方水箱與寬廣容器的趨勢完全相反，也就是距離盤心越遠，產生雙龍捲的機率越低。
- 另一種非寬廣容器中圓桶，在離盤心距離 5+5cm 以內，雙龍捲產生機率極低(<20%)，6+6cm 及 7+7cm 時雙龍捲的產生機率突然高至 99%後，再隨距離增加而遞減，這是完全不同於上述三種容器(兩種寬廣容器及長方水箱)的現象。

(四) 【實驗 3-4】雙龍捲自轉與公轉反向

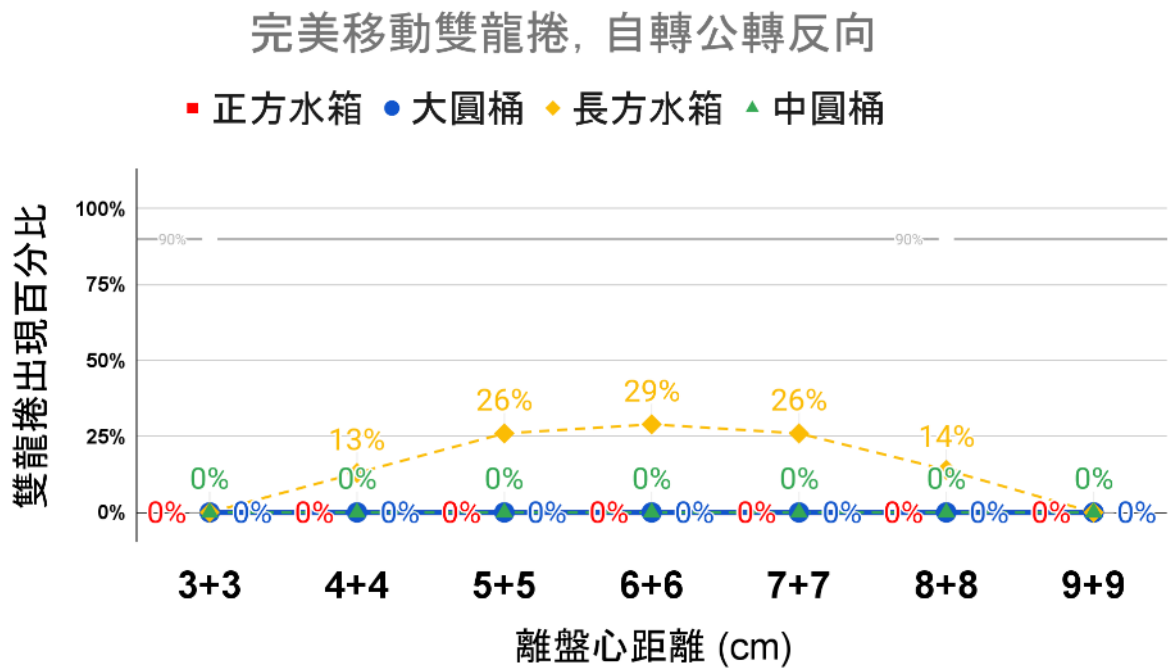


圖 22：雙龍捲自轉與公轉反向時，雙龍捲於各種容器出現的比例

- 在寬廣容器(正方水箱及大圓桶)以及非寬廣容器的中圓桶之中，雙龍捲自轉與公轉反向均無法看到雙龍捲。僅有長方水箱有雙龍捲的產生，但比例都小於 30%，且以 6+6cm 出現最多(29%)，離盤心距離更遠或更近時，都呈現了下降的趨勢，後面將針對此一現象，對雙龍捲的位置分布進行討論（圖 24）。

★【雙龍捲的深度變化分析，於正方水箱】

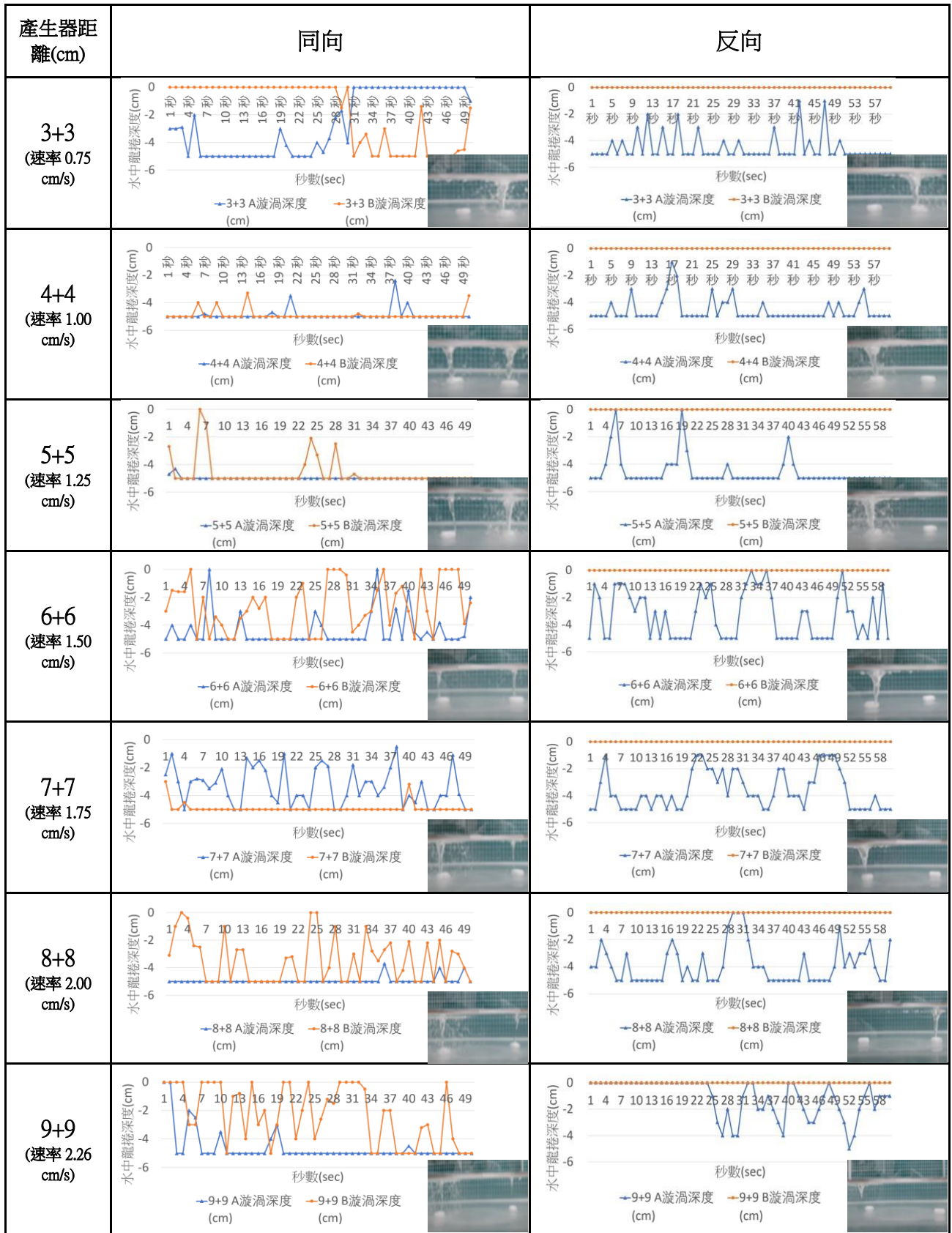


圖 23：雙龍捲離盤心距離 v.s 每秒紀錄深度變化與樣態照片圖（寬廣正方水箱）

- 在自轉與公轉同向的雙龍捲實驗中，離盤心距離不同，有以下有趣現象(如圖 23):
 - 3+3cm 時：兩個單龍捲交替產生
 - 4+4cm 及 5+5cm 時：兩個穩定的雙龍捲
 - 6+6cm：兩個劇烈彈跳的雙龍捲
 - 7+7cm、8+8cm、9+9cm：一穩定產生，一劇烈彈跳的水中龍捲

前文提及，寬廣容器出現離盤心距離 6+6cm 時，雙龍捲出現的比例突然下降，由深度分析和影片搭配來看，發現兩個龍捲皆劇烈跳動，無法穩定存在，是雙龍捲出現比例下降的原因。

- 在自轉與公轉反向的雙龍捲實驗中，無論距離盤心遠或近，皆只有單龍捲產生，且隨著距離增加，此單龍捲的深度及出現時間都呈遞減狀態。

★【俯視長方水箱中雙龍捲出現位置】

離盤心距離	第一次實驗	第二次實驗	第三次實驗
7cm+7cm (速率 1.75 cm/s)			
6cm+6cm (速率 1.50 cm/s)			
5cm+5cm (速率 1.25 cm/s)			
4cm+4cm (速率 1.00 cm/s)			

圖 24：俯視長方水箱中雙龍捲出現位置

- 在長方水箱中，雙龍捲自轉與公轉反向時，隨著離盤心距離增加，雙龍捲的比例卻逐步減少，由俯視圖中發現，水中龍捲出現的位置有以下分布情形:

- 離水箱壁較遠的一側(水箱短邊)，較容易產生水中龍捲。
- 離水箱壁較近的一側(水箱長邊)，不易產生水中龍捲，距離盤心越遠時(即越靠近水箱壁)，此現象會越明顯。

四、移動三龍捲的特性



圖 25：水中龍捲種類

(一) 【實驗 4-1】定點三龍捲距離遠近的相互作用

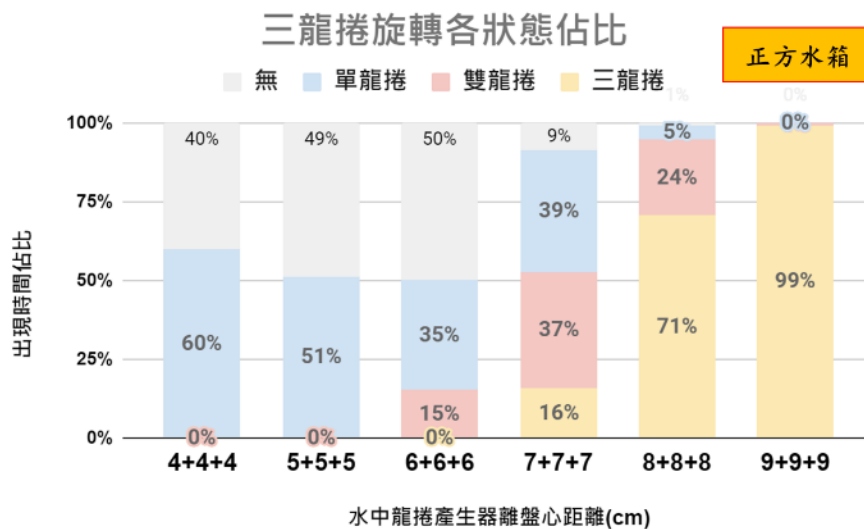


圖 26：定距三龍捲實驗出現各龍捲的統計

- 距離盤心 7+7+7cm 開始看到三龍捲的產生，且隨著距離增加，三龍捲產生的機率遞增，到 9+9+9cm 時有 99%的機率產生。
- 隨著離盤心距離越來越近，到 6+6+6cm 以內，以出現單龍捲為主。

(二) 【實驗 4-2】三龍捲自轉與公轉同向

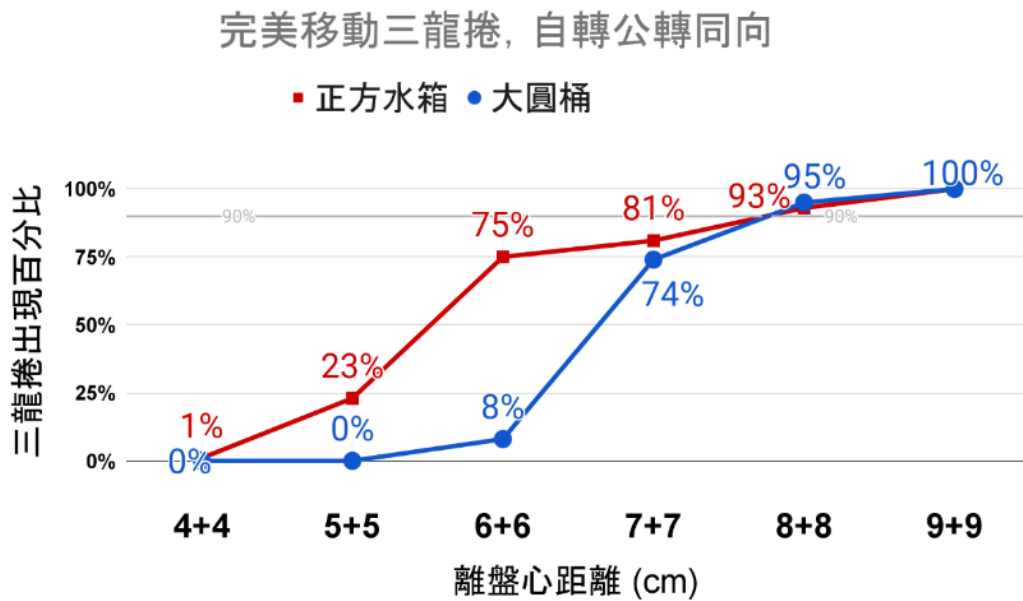


圖 27：三龍捲自轉與公轉同向

- 在兩種寬廣容器(正方水箱和大圓桶)的三龍捲自轉與公轉同向實驗中，三龍捲產生的機率有一樣的趨勢，也就是距離盤心越遠，產生三龍捲的機率越高，但大圓桶在離盤心 5+5+5cm 以內，沒有出現三龍捲。
- 離盤心距離 8+8+8cm 以上，有九成以上機率能出現三龍捲。

(三) 【實驗 4-3】三龍捲自轉與公轉反向

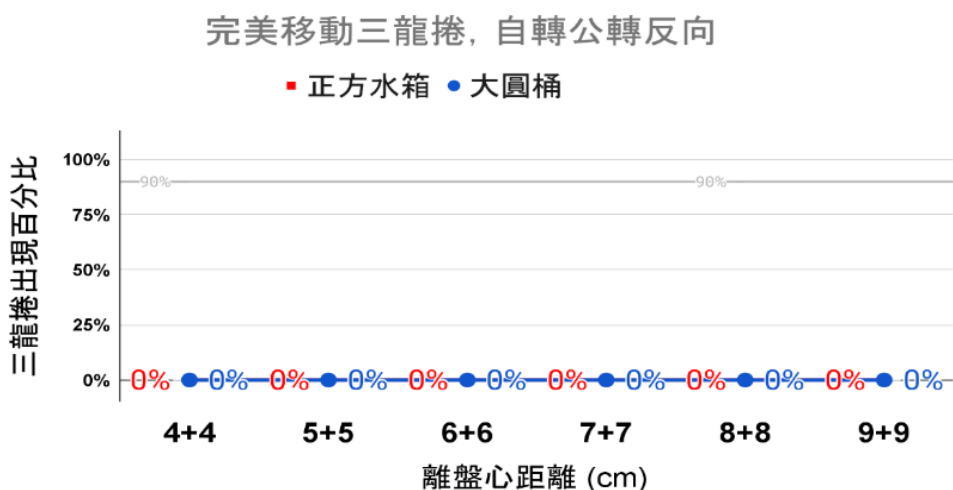


圖 28：三龍捲自轉與公轉反向

- 在兩種寬廣容器的自轉與公轉反向實驗中，皆沒有任何三龍捲的出現。

★【三龍捲的深度變化分析，於正方水箱】

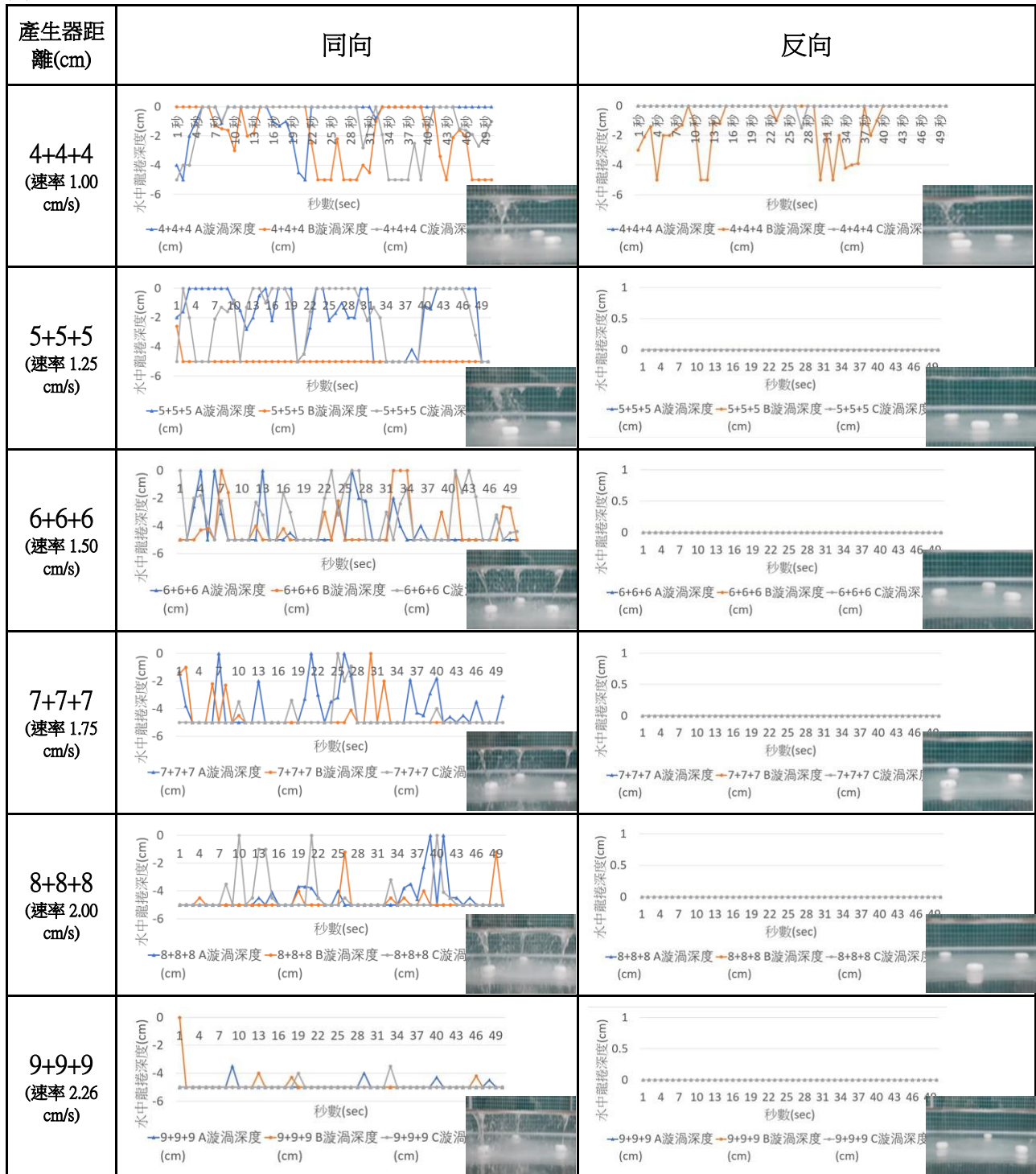


圖 29：三龍捲離盤心距離 v.s 每秒紀錄深度變化與樣態照片圖

- 以正方水箱進行分析，在自轉與公轉同向的三龍捲實驗中，離盤心距離不同，有以下現象：
 - 4+4+4cm: 三個龍捲接力形成，但同一時間始終只有一個龍捲出現。
 - 5+5+5cm~8+8+8cm: 各別龍捲不穩定的彈跳。
 - 9+9+9cm: 全時段穩定存在的三龍捲。
- 在反向的雙龍捲實驗中，4+4+4cm 可形成單龍捲(但無法生成雙龍捲)。除此之外，其餘

都沒有產生水中龍捲。

(四) 【實驗 4-4】提高公轉速率

1. 在大圓桶中

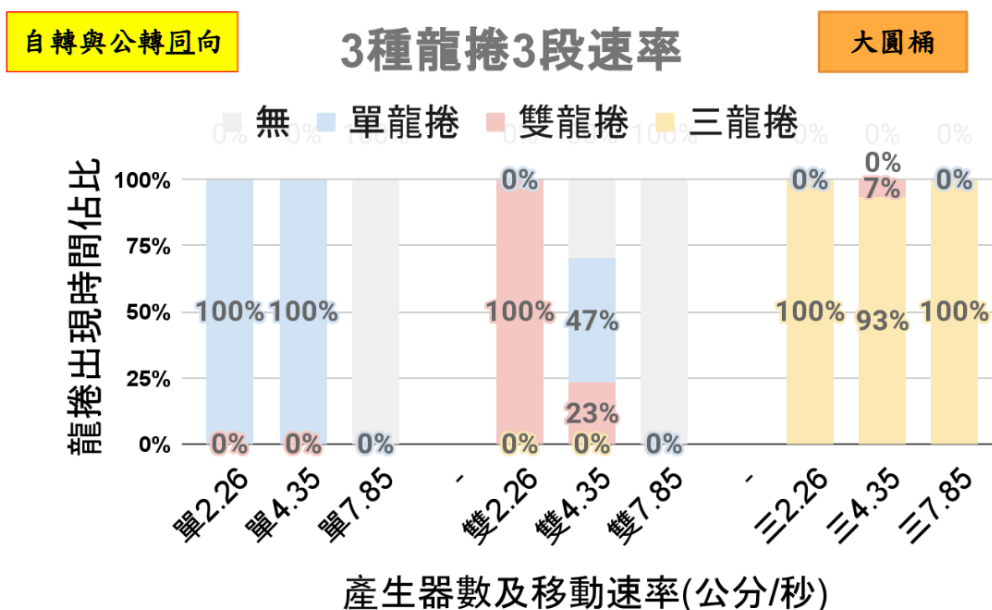


圖 30：大圓桶中提高公轉速率的水中龍捲生成情況

- 單龍捲: 低速與中速都可產生完美移動單龍捲，到最高速時則無法產生。
- 雙龍捲: 低速有完美移動雙龍捲，但中速與高速則迅速衰減。
- 三龍捲: 低、中、高速都有九成以上的三龍捲產生。

2. 在正方水箱中

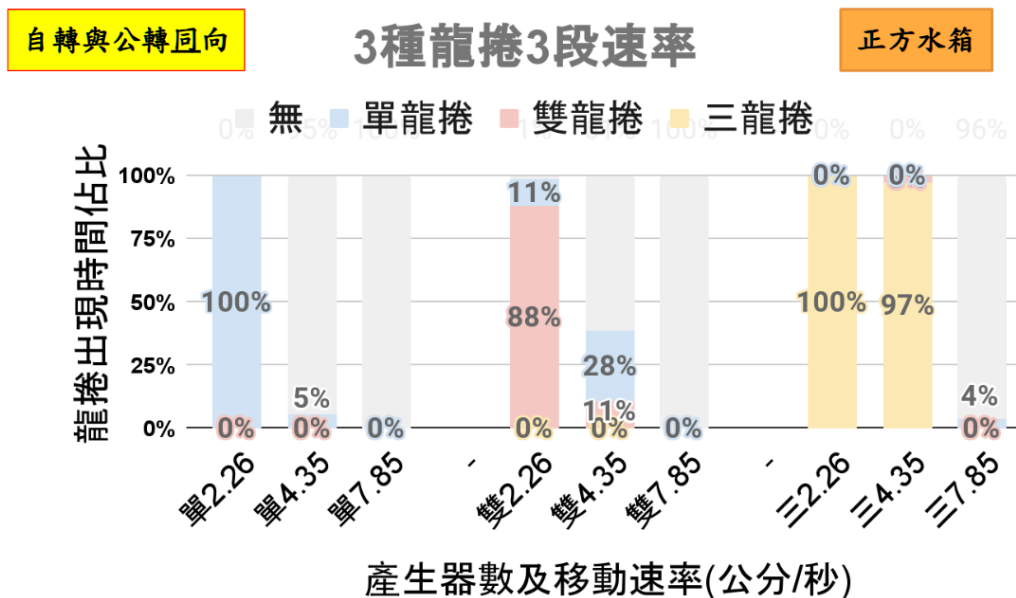


圖 31：正方水箱中提高公轉速率的水中龍捲生成情況

- 單龍捲: 低速可產生完美移動單龍捲，中高速時則無法產生。
- 雙龍捲: 低速約有 88% 的生成，到中速僅剩 11%，高速則無法產生。
- 三龍捲: 低速與中速都有九成以上會有三龍捲，高速則無法產生。

伍、討論

一、各項實驗發現與討論

- (一) 自製水中龍捲產生器必須要最強且夠小，才能在寬廣的容器中，產生最佳的觀察效果。結果顯示 12V,4cm 的小風扇最符合實驗需要。
- (二) 移動單龍捲實驗中，移動越慢才有機會產生水中龍捲。因為離盤心越遠速率越快，水中龍捲越不容易產生。在自轉公轉反向僅在 2 公分(速率 0.50 公分/秒)以內能生成完美移動單龍捲，而同向最遠到 5 公分(速率 1.25 公分/秒)仍然可以生成。
- (三) 移動雙龍捲實驗中，定點雙龍捲相距 14 公分以上，兩個水中龍捲能穩定共存。在寬廣容器的移動實驗中，自轉公轉同向時，僅需 10 公分(5+5)就開始會有完美移動雙龍捲；而在反向實驗，都沒有雙龍捲，且大多出現單龍捲。
- (四) 移動三龍捲實驗中，距離盤心最遠 9+9+9 公分的定點三龍捲，皆能穩定共存。在寬廣容器中的移動實驗中，自轉公轉同向時，在更近的 8+8+8 公分就開始有完美的移動三龍捲；而在反向實驗，都沒有三龍捲，甚至大多連一個龍捲都沒有。

二、綜合發現與討論

- (一) 要產生完美移動龍捲，需多項條件配合。會受到(1)產生器強度、(2)同向或反向的移動方式，(3)移動速率，(4)彼此距離影響。綜合觀察實驗二到實驗四的結果，整體總結歸納如下（如圖 32）。

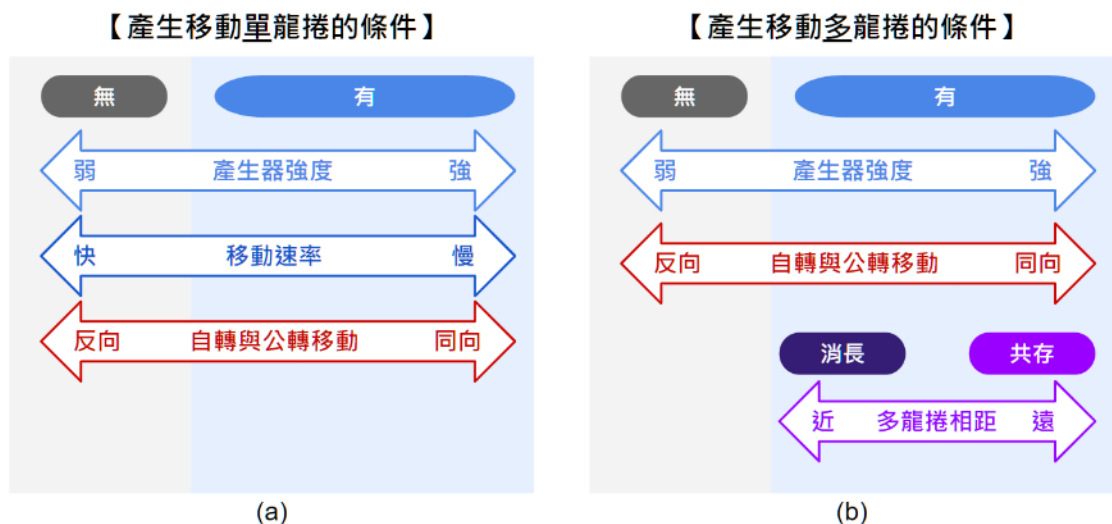


圖 32：水中龍捲生成會受到多種條件影響。(a)移動單龍捲 (b)移動多龍捲

- (二) 龍捲自轉方向與轉盤公轉同向是關鍵因素。綜合實驗結果如圖 33 所示，在寬廣正方水箱容器中，以定距不動為基礎，無論是雙龍捲或三龍捲，自轉與公轉同向會幫助多龍捲更容易生成；而自轉與公轉反向則會有抑制的效果。圖 34 為自轉公轉示意圖。

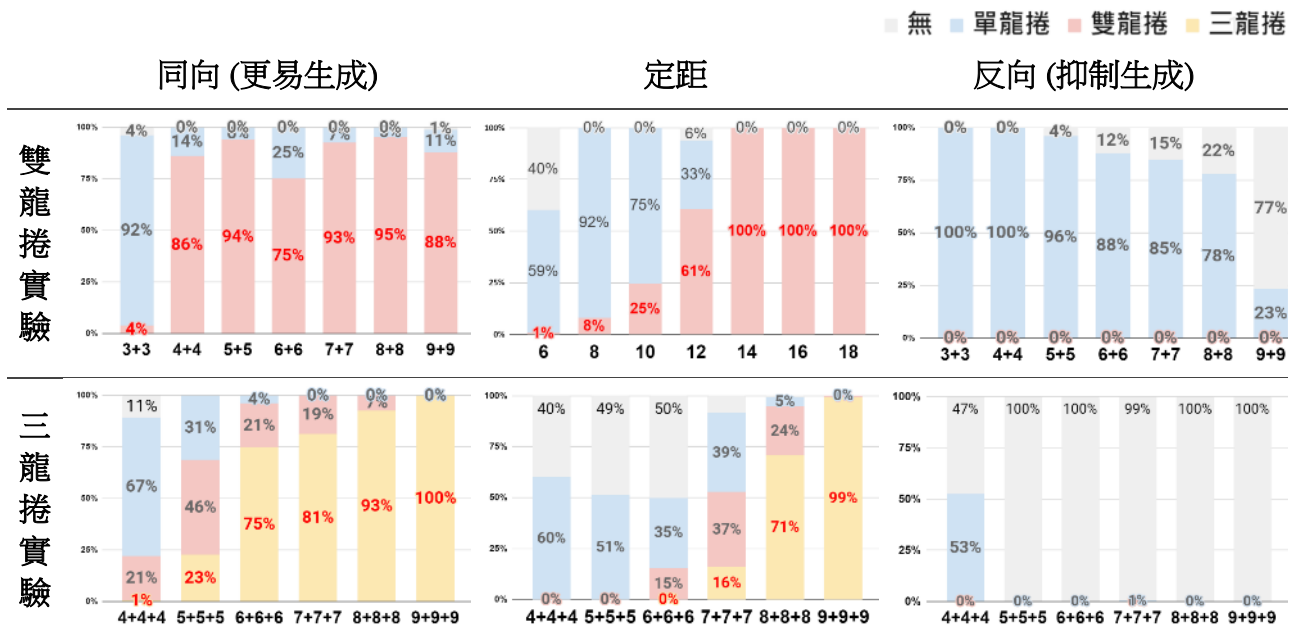


圖 33：同向會幫助多龍捲更容易生成而反向則有抑制效果

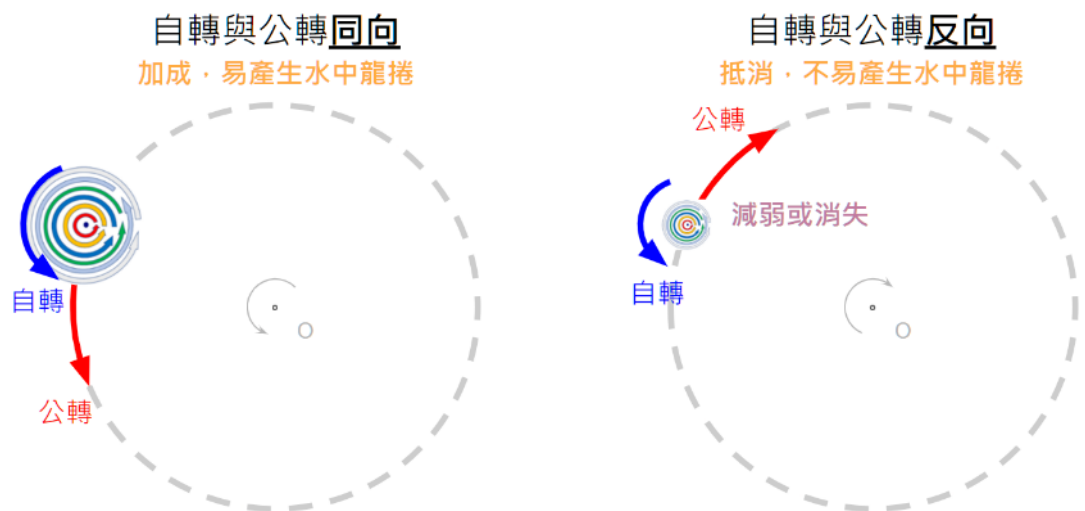


圖 34：水中龍捲自轉與公轉同向加成和反向抑制示意圖

(三) 水中龍捲生成會受到**容器**影響。

1. 圓形容器壁對比方形平面壁，在較靠近壁面的位置，仍能生成水中龍捲。
2. 在寬廣容器中，完美移動龍捲分布，相對單純而穩定。
3. 寬廣容器比非寬廣容器，在自轉與公轉同向實驗，對於產生移動雙龍捲皆有比較好的結果。

(四) 當自轉公轉同向，**三龍捲在大圓桶中**皆能產生完美移動龍捲。藉由轉盤三段速率(低中高速)的實驗 4-4 結果，整理如圖 35。

1. 在大圓桶中，我們發現隨著移動速率變快，出現雙龍捲的表現會衰退，但是增

加到三龍捲，卻能穩定生成且持續維持。

- 在正方水箱中，我們發現隨著公轉速率提高，越來越不容易產生完美移動雙龍捲。不過增加龍捲數量，例如在中段速，從雙到三，明顯提高龍捲生成至九成以上，但再加速則無法形成三龍捲。

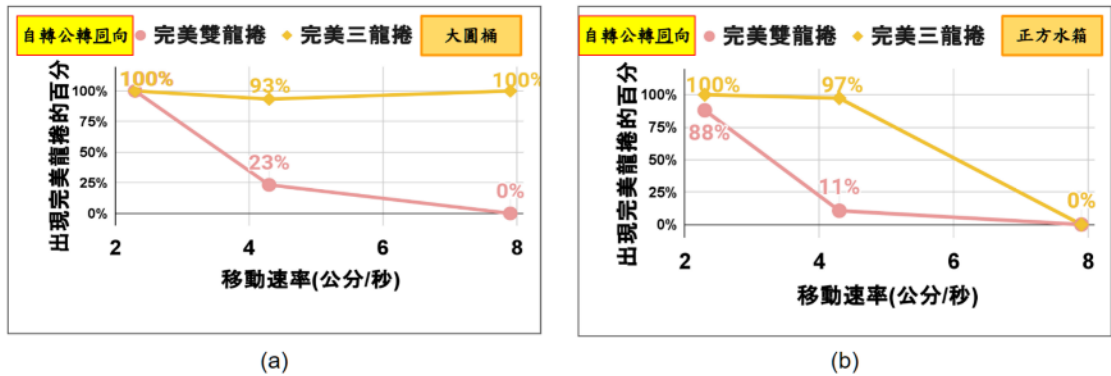


圖 35：提高轉盤速率在離盤心 9 公分處的完美多龍捲 (a)大圓桶(b)正方水箱

- 觀察水中龍捲移動時的樣態**。整理實驗結果，觀察到水中龍捲於移動時有多種樣態，列於表 10，包含消失、變短、歪斜、尾隨但直立、正中直立、增強等。

表 10：觀察各實驗移動水中龍捲的樣態

	消失	變短	歪斜	尾隨但直立	正中直立	增強
觀察移動水中龍捲樣態表現						
2-1 單龍捲直線移動	●	●		●	● (緩慢移動時)	
3-1, 4-1 定距多龍捲	●	●			● (相距很遠時)	●
2-2, 3-3, 4-2, 4-4 多龍捲自轉公轉同向	●	●	●			●
2-3, 3-4, 4-3 多龍捲自轉公轉反向	●	●	●			

水中龍捲在各項實驗過程中皆有消失的情況，像是移動過快、靠近容器壁面、受到另一個龍捲的影響、或是自轉公轉反向等都是造成消失的原因。水中龍捲像是一個很脆弱的結構體，很容易被破壞甚至消失。

三、可能的應用

- 粉糖即溶器**。本研究發展的自製器具，由於攜帶方便，可用於生活中需要將粉類或糖鹽類即溶時使用，如溶解咖啡/茶粉或嬰兒奶粉。
- 蔬果清洗**。蔬果表面的髒污與農藥殘留，可利用本研究發展的移動式多龍捲，進行移動式清洗；戶外露營，在只有少量水資源的情況下也可使用。
- 實驗教具**。本研究的自製產生器製作容易，可做為課堂教具，讓學生自己動手

做，還可延伸到多個，來觀察水中龍捲的交互作用；同時因具有可移動的特性，為各式實驗的發展增加許多彈性與想像。

- (四) **模擬氣旋**。大氣中的自然現象如颱風、龍捲風需要精密儀器或高運算能力的電腦才能進行模擬實驗。本研究發展的方法，可能可以做為中小學生模擬單、雙或多氣旋的簡單粗略方法。當然，模擬結果僅能作為一些思考的試驗，與自然界的大氣行為仍不可直接對應。
- (五) **有趣玩具**。大自然的漩渦通常具有危險性，而本研究發展的漩渦則是在安全可控的情況下，產生移動式的水中龍捲，未來可發展有趣的玩具、或是桌上型裝飾商品，產生新的商機。

陸、結論

(一) 要產生完美且可自由移動的多龍捲，需要許多不同條件的配合：(1)產生器要夠強才能帶動磁石產生水中龍捲、(2)水中龍捲移動的速率要夠慢、(3)水中龍捲彼此相隔的距離要夠遠，最有趣的是(4)水中龍捲的公轉方向要與自轉方向一致，有利於生成完美移動多龍捲。

(二) 本研究有系統性的探索移動的多龍捲：在先備實驗中，以電磁攪拌器了解固定式水中龍捲的基本特性，做為本研究實驗的基礎。接著，我們成功的自製了小體積且轉速強的移動式水中龍捲產生器。而且因為體積小，可以非常容易的擴展到多個移動龍捲的研究。

(三) 實驗結果發現：(1)移動水中龍捲會受到移動速率的影響，移動越慢越有利於移動單龍捲生成。(2)移動水中龍捲會受到彼此距離影響，靠近的龍捲並不是直接合併，而是會產生此消彼長的變化。(3)為了觀察移動水中多龍捲本質的特性，我們定義了寬廣容器的尺寸條件，同時也準備了形狀大小不同的非寬廣容器，做為移動多龍捲的實驗對照。我們發現移動多龍捲的生成會受到容器形狀與不夠寬廣而有較複雜的結果，而(4)移動雙龍捲與移動三龍捲在寬廣容器內的生成變化則較為單純穩定。

(四) 本研究還找到了一項有趣的關鍵因素：水中龍捲的移動方式，直接影響是否容易產生完美移動的多龍捲。我們興奮的發現，龍捲自轉與公轉若為同向，加成效果會讓完美移動多龍捲出現的機率大幅增加；而自轉與公轉若為反向，則會抑制移動多龍捲的出現，而這項關鍵因素對於移動單龍捲、移動雙龍捲、移動三龍捲皆得到一致性的結果。

(五) 自由自在移動的水中龍捲，具有多樣的形狀變化（如歪斜、尾隨、變短、消失或是增強）。移動多龍捲研究過程十分有趣，本作品成果可作為未來移動多龍捲更深入研究探討的基石！

柒、參考資料與其他

陳依昕、郭維元、邱柏元與鄭日安（2003）。水中龍捲—液體旋轉運動液面和漩渦變化的研究。第 43 屆全國中小學科展國小組物理科作品。

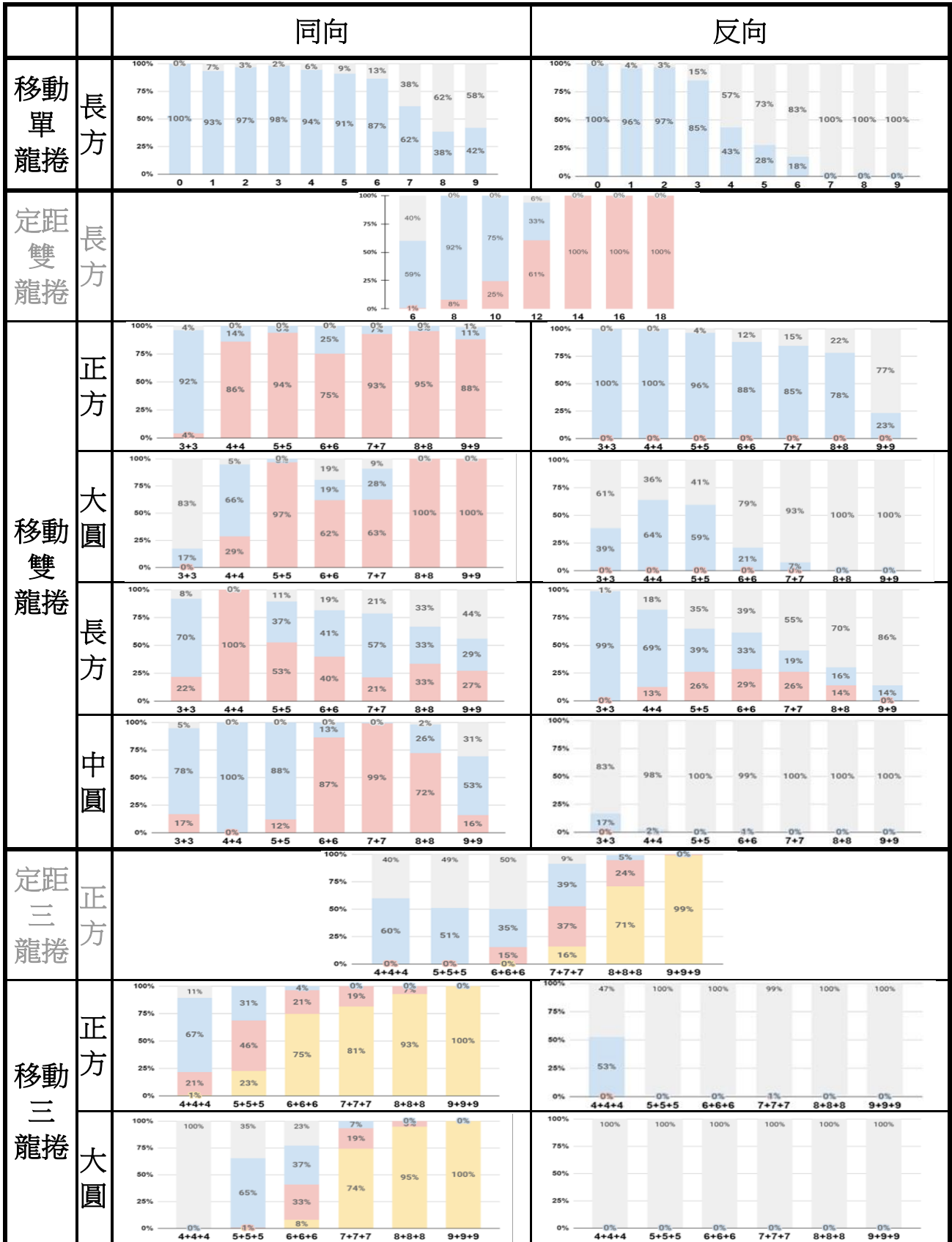
蔡宗育、左伊心、平震傑與黃家偉（2007）。水中的殺手-漩渦。第 47 屆全國中小學科展國小組自然科第三名作品。

- 李昱嫻、李欣玫、李有儀與江翊銘（2008）。水中舞者—轉槳所成之漩渦的探討。第48屆全國中小學科展國小組自然科佳作作品。
- 黃筠茜與呂映儒（2014）。「颶」客～追！追！追！第54屆全國中小學科展國小組地球科學科最佳(鄉土)教材獎作品。
- 姚杰邑、張詩篇、林敬旻與朱唯與（2016）。旋轉吧！貝殼！—貝殼製造漩渦原理與變因之研究。第56屆全國中小學科展國小組物理科第二名作品。
- 吳宗祐、黃宥涵與曾亮鈞（2020）。神奇超距力攪拌器-探討各項影響電磁攪拌器穩定運轉的變因。第60屆全國中小學科展國小組生活與應用科學(二)科第二名作品。
- 林煒宸與曾靖傑（2022）。風水輪流轉-藤原效應之研究。新竹市第四十屆國民中小學科學展覽會國中組地球科學科第三名作品。
- 維基百科（2023）。渦旋。維基百科。2023年5月5日。取自：<https://zh.m.wikipedia.org/zh-tw/%E6%B8%A6%E6%97%8B>
- 維基百科（2023）。Rankine vortex。維基百科。2023年5月5日。取自：https://en.wikipedia.org/wiki/Rankine_vortex
- 翰林出版（2023）。3-3 等速圓周運動。翰林出版。2023年5月5日。取自：<https://slidesplayer.com/slide/17710425/>

捌、附錄

表 11：單雙三龍捲自轉公轉同反向的綜合比較表

無 單龍捲 雙龍捲 三龍捲



【評語】 080105

渦流這個流體力學中的重要課題，也是科展中的熱門研究對象。因此，要從中發展出有趣且有新意的研究並不容易。而該團隊卻做到了這一點。移動中的渦流與多渦流的交互作用是該研究的主題。其中移動中渦流形變的研究令人印象深刻。他們也考慮了有限大容器介面對渦流的影響，這是過去較少被思考過的面向。他們的研究方向，變因的設計掌握是有物理思考的系統性，這是該項研究特別突出之處。

作品海報



以「♀」龍捲動起來！

摘要

漩渦模樣像極了水中的龍捲，生活中有許多水中龍捲的發生與應用。我們想要製造出美麗完整的多龍捲，並且讓它們能自由自在的移動，那麼需要哪些條件呢？首先本研究先從電磁攪拌器產生的水中龍捲了解基礎特性，然後自製小體積的可移動水中龍捲產生器，接著有系統的實驗，依序由移動單龍捲、移動雙龍捲、再到移動三龍捲，逐步探索移動水中龍捲的生成與影響因素。實驗結果發現水中龍捲會受到移動速率與彼此距離的影響，移動越慢越有利於生成，而多龍捲之間過於靠近則會有相互消長的變化。值得一提的是，如果移動方式是，繞盤公轉的方向與龍捲自轉同向，則移動多龍捲的完美生成，竟然全都顯著的提升！移動中的多龍捲具有豐富多樣的變化，十分有趣。

壹 研究動機

我們想要製造出美麗完整的多龍捲，而且讓它們能自由自在的移動，不受固定位置的限制，然而完美移動多龍捲卻不是隨處都可產生，過去可移動水中龍捲的討論很少，我們決定自己動手做，先製作出生產器來生成可移動的水中龍捲，再透過一系列的實驗，有系統的從移動單龍捲、移動雙龍捲、再到移動三龍捲，逐步探索完美移動多龍捲的生成條件。

參 研究設備與器材

買定式電磁攪拌器、自製水中龍捲產生器：各式萬用、強力鋸條、華司、12V升壓板、固定、行動電源、各式磁杯(燒杯、平底方形透明水箱、透明圓錐)、伺服馬達、直徑移動載具、定速自動旋轉盤(直徑20公分)、攝影機。

肆 研究過程方法與結果

研究一：自製可移動的水中龍捲產生器



由左至右實驗(電磁攪拌器)結果: 1. 轉速調整, 2. 水深與對齊(後兩者皆為5公分) > 12V, 4cm 版限 → 最佳產生器!

研究二：移動單龍捲的特性

[2-1] 單龍捲直線移動



> 移動慢，有助於生成
(本實驗： $< 2.9\text{cm/秒}$)

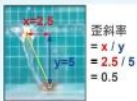
> 移動快，形狀會縮短，甚至消失



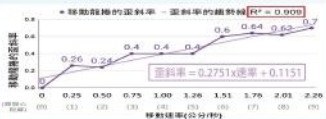
[2-2] 單龍捲自轉與公轉同向 & [2-3] 單龍捲自轉與公轉反向



同向效果佳



歪斜率與移動速率成正比



研究三：各式容器中移動雙龍捲的特性

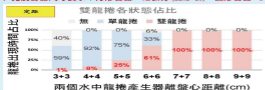
【3-1】定距雙龍捲 & 【3-3】雙龍捲自轉與公轉同向 & 【3-4】雙龍捲自轉與公轉反向

四種實驗容器

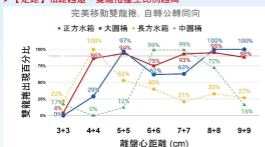


> 由實驗結果，定義寬廣條件：離壁夠遠+產生器相距夠遠

> 寬廣容器尺寸要求：方形容器>42公分 (1.2x2-1.8) · 圓形容器>34公分 (0.2-1.8)



> 【定距】相距越遠，雙龍捲產生比例越高



> 【同向】寬廣容器：相距越遠，雙龍捲產生比例越高。

(右圖：縱線深度變化，以正方水箱做深入分析)

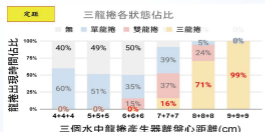
> 非寬廣容器：沒有固定規律



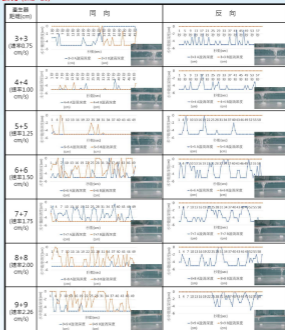
> 【反向】無法產生雙龍捲，或產生比例低(長方水箱)

研究四：移動三龍捲的特性

【4-1】定距三龍捲 & 【4-2】三龍捲自轉與公轉同向 & 【4-3】三龍捲自轉與公轉反向



> 【定距】三龍捲離壁心越遠，生成的機率越高

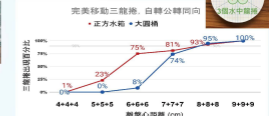


圖：雙龍捲離壁心距離 v.s 深度變化樣態與照片 (寬廣正方水箱)

> 【同向】雙龍捲相距由近至遠：交替單龍捲 →

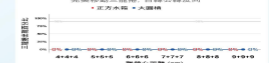
穩定雙龍捲 → 跳動雙龍捲 → 一穩定一跳動雙龍捲

> 【反向】無論遠近，僅有單一龍捲跳動



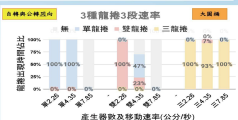
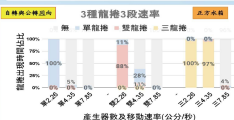
> 【同向】三龍捲離壁心越遠，生成的機率越高

完美移動三龍捲，自轉公轉反向



> 【反向】無法生成三龍捲



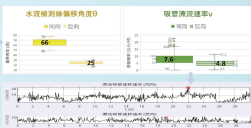
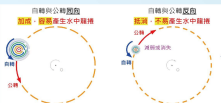


> 【正方水箱】三龍捲於低、中速可生成

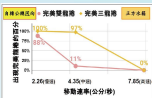
> 【大圓桶】三龍捲於低、中、高速都可完美生成

伍 討論 (跨實驗綜合發現)

- 完美移動多龍捲的趨勢，在寬廣容器中，比非寬廣容器，相對單純而穩定生成。
- 水中龍捲繞盤公轉與龍捲自轉同向是關鍵因素，無論是單、雙龍捲或三龍捲，同向會幫助多龍捲容易生成；而反向則有抑制的效果。



- 在大圓桶中，加快轉盤轉速(由低中速到高速)，雙龍捲不易出現，但是增加到三龍捲，明顯提升至九成以上，可以持續而穩定的存在。



- 水中龍捲移動時，有多樣的形狀變化。
 - 形狀容易變短，也會受到干擾而消失
 - 旋轉容易造成歪斜
 - 當彼此靠近時，會有此消彼長的變化

觀察移動水中龍捲樣態表現	消失	變短	歪斜	距離位置直立	正中直立	增強
2-1 單龍捲直線移動	●	●	●	●	●	●
3-1, 4-1 定距多龍捲	●	●	●	●	●	●
2-2, 3-3, 4-2, 4-4 多龍捲自轉公轉同向	●	●	●	●	●	●
2-3, 3-4, 4-3 多龍捲自轉公轉反向	●	●	●	●	●	●

陸 結論

本研究主要探討移動多龍捲的生成條件，從移動單龍捲、移動雙龍捲，再到移動三龍捲。

主要發現：**完美移動多龍捲***生成，除了產生器要強、移動速率要慢、以及龍捲彼此要離夠遠之外，一致性的**關鍵因素**是：水中龍捲公轉方向與自轉要同向！

*完美移動龍捲定義：生成時間超過90%的水中龍捲

【產生移動單龍捲的條件】



【產生移動多龍捲的條件】

