

中華民國第 62 屆中小學科學展覽會
作品說明書

高級中等學校組 地球與行星科學科

第三名

051903

各種控制因子對雙漩渦互動的影響

學校名稱：臺中市私立弘文高級中學

作者： 高三 張浩昀 高三 朱苡蓓 高三 朱苡瑄	指導老師： 何欣勇
-----------------------------------	--------------

關鍵詞：雙颱風效應、颱風、水漩渦

摘要

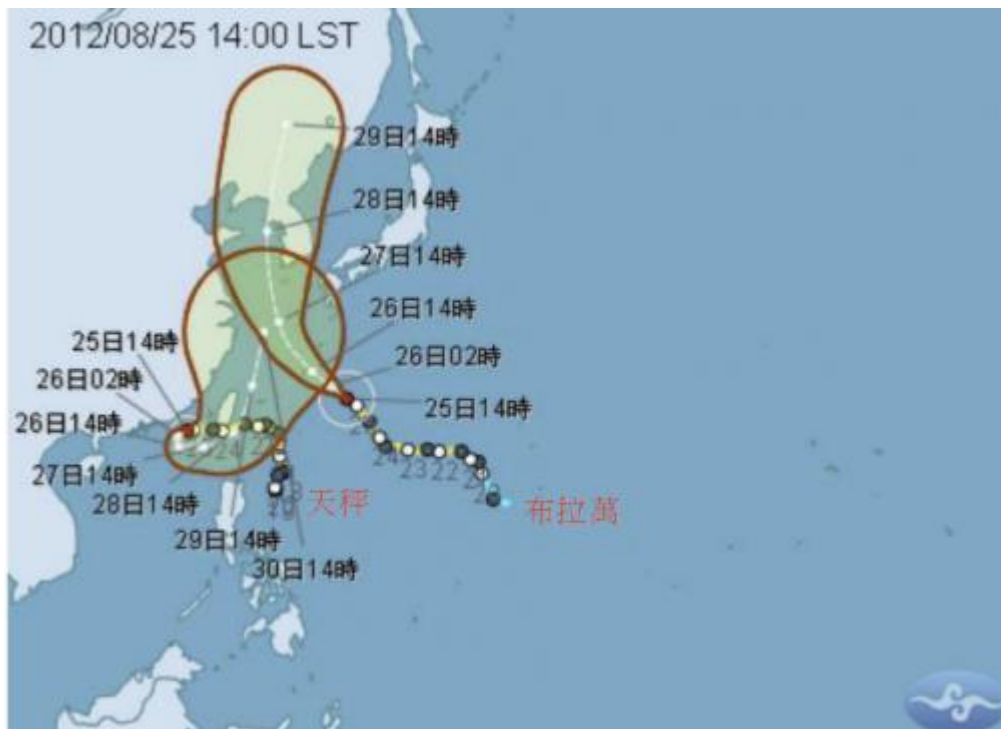
本研究透過水工實驗模擬實際雙颱風系統並繪製出軌跡圖，以探討颱風中心距離、相對強弱，以及太平洋高壓的環流等控制因子如何影響雙颱風系統，並對漩渦的結構進行了定量分析，以增加模擬結果的可信度。

研究結果顯示，上述三個因子皆對雙颱風系統的交互作用有著重大影響，其中，當兩颱風中心距離越近，其受彼此駛流影響發生互繞的情形也越明顯；當兩颱風間有強度差異時，較強颱風的繞行軌跡曲率半徑會較小，反之亦然；在模擬中加入太平洋高壓的作用時，雙颱風系統的運動軌跡則可視為上述結果與高壓造成之共同西向運動的疊加。

壹、前言

一、研究動機

我們第一次注意到雙颱風效應（Fujiwhara Effect，又稱藤原效應）現象是在 2012 年，當時中央氣象局分別在 8 月 22 日到 8 月 25 日以及 8 月 27 日到 8 月 28 日對中度颱風天秤發布了陸上颱風警報。根據新聞報導，造成天秤颱風兩次侵台（如圖一）的主要原因是其與北方海面上布拉萬颱風間的雙颱風效應。在課本上，雙颱風效應只有「兩個距離相近的颱風影響彼此的移動路徑，常見反鐘向互繞的情形」這樣短短一句定性的敘述，對此，我們有諸多問題無法獲得解答。例如：為何歷史上受雙颱風效應影響的颱風，僅有極少數呈現如課本所述：標準的反鐘向互繞？雙颱風系統的運動又會受到什麼氣象因素的影響？雙颱風效應的作用是否有較為定量的表達方式？經過進一步的了解後，我們明白雙颱風效應往往會使颱風路徑變的飄忽不定，甚至使天氣預報的準確度大幅降低。與此同時，雙颱風系統又會與其他控制因子互相影響而產生各式各樣偏離理論模型的變形。綜上所述，我們決定用《各種控制因子對雙漩渦互動的影響》為題進行實驗，希望以水工實驗模擬各種天氣因素對雙颱風系統行為模式的影響，進而了解各現象背後的原理及成因。



圖一、天秤颱風與布拉萬颱風之間的雙颱風效應（圖片來源：中央氣象局）

二、研究目的

颱風雖然為台灣帶來豐沛的降水量，但也是主要的天然災害之一，其路徑常受到太平洋高壓位置、強弱、海陸分佈等因素的影響，變化多端。當雙颱風效應發生的時候，更會使颱風路徑可預報度大幅降低，如 1986 年三度侵台，對中南部造成嚴重打擊的韋恩颱風。有鑑於此，我們希望透過歷史案例的分析與實驗模擬的方式，歸納出可能影響雙漩渦互動的控制因子，以及其影響方式的模型，做為日後遇到類似案例時參考之用。

貳、 研究設備及器材

- 一、透明水箱兩個（大小各一）
- 二、可變電阻兩個
- 三、小馬達兩個、減速馬達一個
- 四、電池盒數個
- 五、化學攪拌子兩個
- 六、筆記型電腦一台、智慧型手機一台
- 七、方格紙數張

參、 研究過程或方法

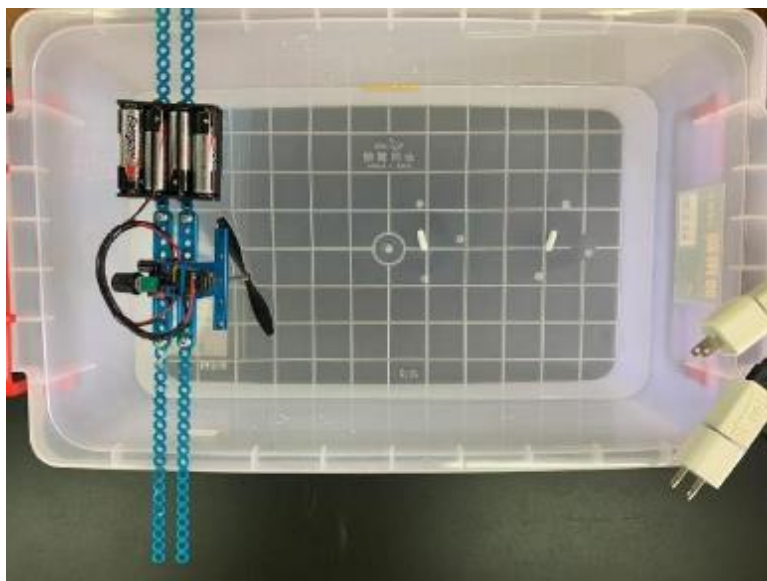
一、文件探討與前置作業

本研究主要採文獻分析法與實驗法。在研究之初，我們閱讀與雙颱風效應有關的各項論文，以利了解目前針對此現象的研究成果，並確立研究方向。在眾多參考資料中，Fujiwhara (1923) 利用水工實驗，首次提出了雙颱風(藤原)效應；Brand (1970) 透過統計資料和阮肯渦流(Rankine Vortex)的數學模型，討論兩颱風中心距離及其互繞角速度之間的關係並歸納出公式；何台華 (1990) 研究單一個雙颱風效應的特殊案例(橫跨赤道兩側的雙颱風系統)；Wu et al. (2003) 提出了在大尺度天氣系統作用下分析雙颱風互動情形的方法(及下文所謂「質心表示法」)；Yang et al. (2008) 以位渦反演技術(PV inversion) 定量描述個別案例中雙旋渦的互動情形；楊忠權 (2009) 計算出了各天氣系統對於颱風駛流的平均貢獻比例；Jang et al. (2015) 則以複合分析法(composite analysis) 將 1951 至 2012 年間產生於西北太平洋的雙颱風系統依路徑分為六類。

二、研究過程

在對雙颱風系統與外在(如太平洋高壓)或內在(組成颱風的相對強弱、距離等)天氣因素的互動情形有了初步的了解之後，我們便著手設計實驗。考慮了高中的硬體、軟體條件後，我們決定採取 Fujiwhara, S.以攪拌子製造旋渦的方法，以水箱模擬大氣進行實驗。

經過反覆的修正後，我們設計出了如圖二的實驗裝置，其中各元件與其功能的對應關係如表一所示。

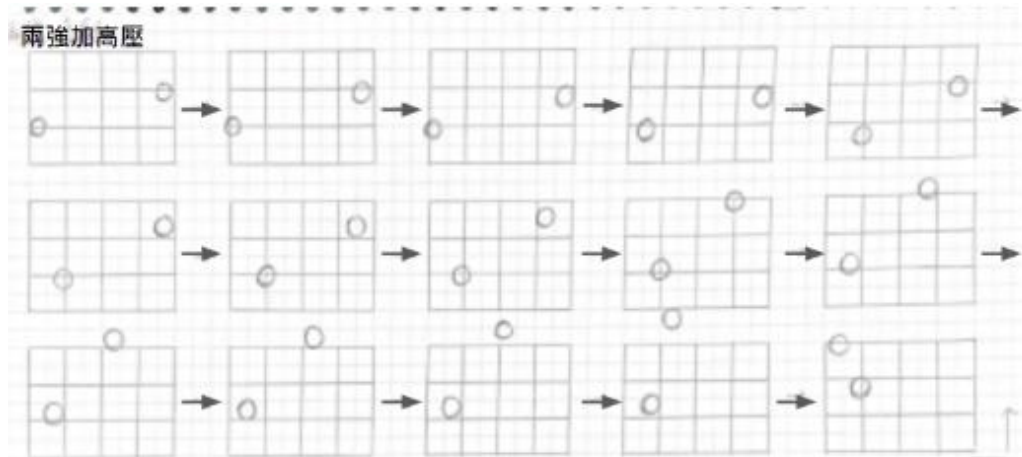


圖二、實驗裝置

表一、實驗裝置中各元件與模擬對象之對應關係

元件	功能
箱中水體	模擬大氣
小馬達	帶動磁攪拌子旋轉
磁攪拌子	產生漩渦模擬颱風
減速馬達	製造緩慢的順時針環流模擬太平洋高壓系統
箱底格線	作為紀錄時的座標基準
智慧型手機	錄製實驗影片以利分析
筆記型電腦	將影片作慢動作處理並逐時紀錄兩漩渦中心為至於方格紙上
可變電阻	調節小馬達、減速馬達的轉速以製造不同強度的颱風、高壓

進行模擬時，我們使用智慧型手機從實驗裝置的正上方錄影，並用筆記型電腦播放影片，逐時紀錄兩漩渦的動態（每秒記錄一次），先繪製如圖三的分鏡圖，再整理成如圖四到圖九的整體路徑圖。



圖三、根據實驗結果繪製的「分鏡圖」

另外，為確保水流拍擊箱壁所產生之駐波對本研究的實驗結果無重大的影響，我們設計了表二、表三的實驗來檢驗漩渦受影響的程度。我們選用一個尺寸明顯大於漩渦駛流影響範

圍的大水箱（78x56x43，單位：cm）以近似無箱壁影響的理想狀況，測量漩渦在其中的最大水平與垂直偏移量，再與我們實驗裝置測得的偏移量相較（每組實驗都以三重複方式進行）。同時，我們亦針對不同強度的漩渦結構進行了簡單的定量分析，以此為模擬結果提供物理上的理論基礎，詳見「伍、研究結果與討論」下的第二點。

肆、研究結果

一、箱壁對漩渦的影響

表二、大水箱中漩渦運動受箱壁影響情形（單位：cm）

	第一次	第二次	第三次	平均
水平最大偏移量	+0.8 -0.4	+1.0 -0.3	+0.7 -0.5	0.83
垂直最大偏移量	+0.8 -0.2	+0.6 -0.1	+0.5 -0.3	0.63

表三、小水箱中漩渦運動受箱壁影響情形（單位：cm）

	第一次	第二次	第三次	平均
水平最大偏移量	-0.2 -0.9	+0.6 -0.8	-0.2 -1.0	0.9
垂直最大偏移量	+0.2 -0.7	+0.3 -0.8	+0.4 -0.9	0.8

二、漩渦結構的定量分析

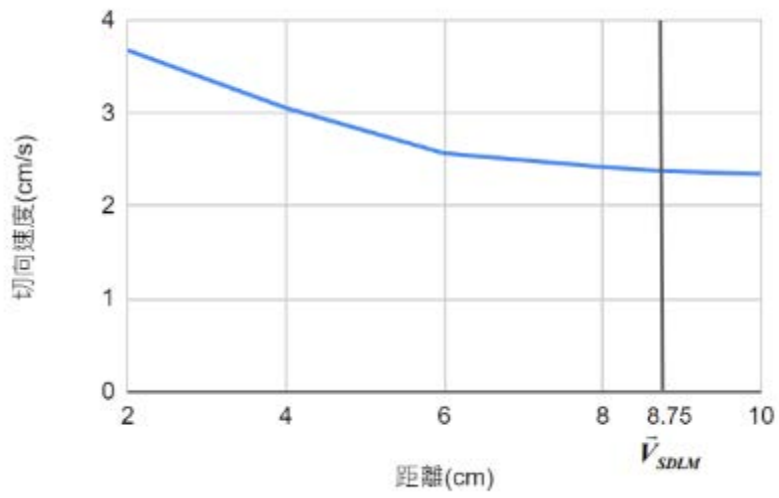
（一）漩渦駛流場範圍

表四、強弱漩渦駛流場範圍的比較

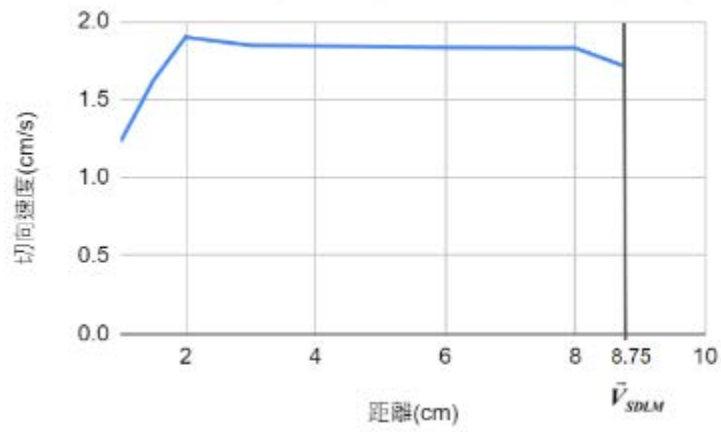
	環狀沉積帶半徑	有效駛流場半徑
強漩渦	18.5 公分	約 10.5 公分
弱漩渦	17 公分	約 6 公分

註：有關環狀沉積帶與有效駛流場的討論，請見後文伍、二、（二）

(二) 漩渦流速隨中心距的變化



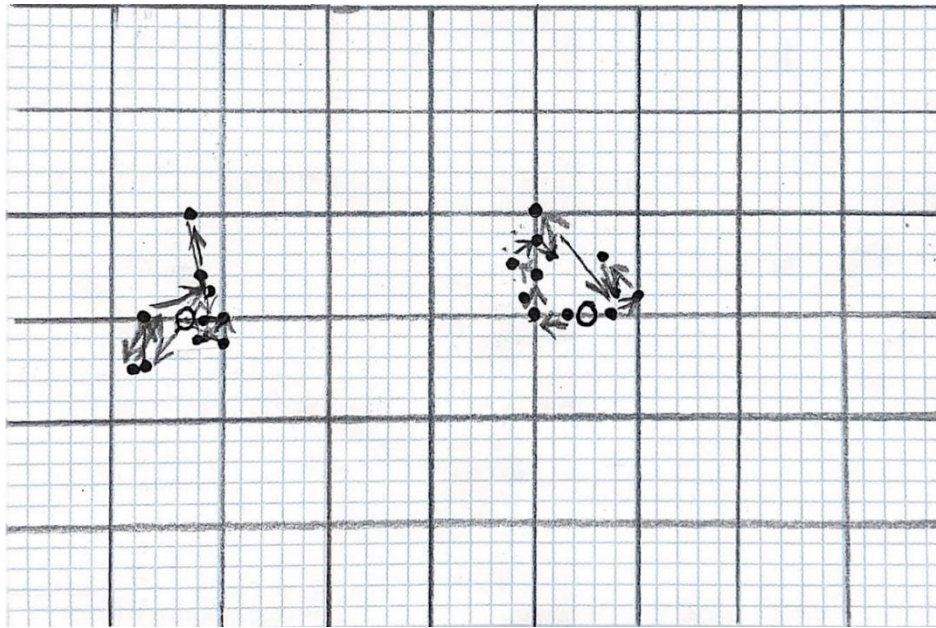
圖四、強漩渦中流速與中心距的關係



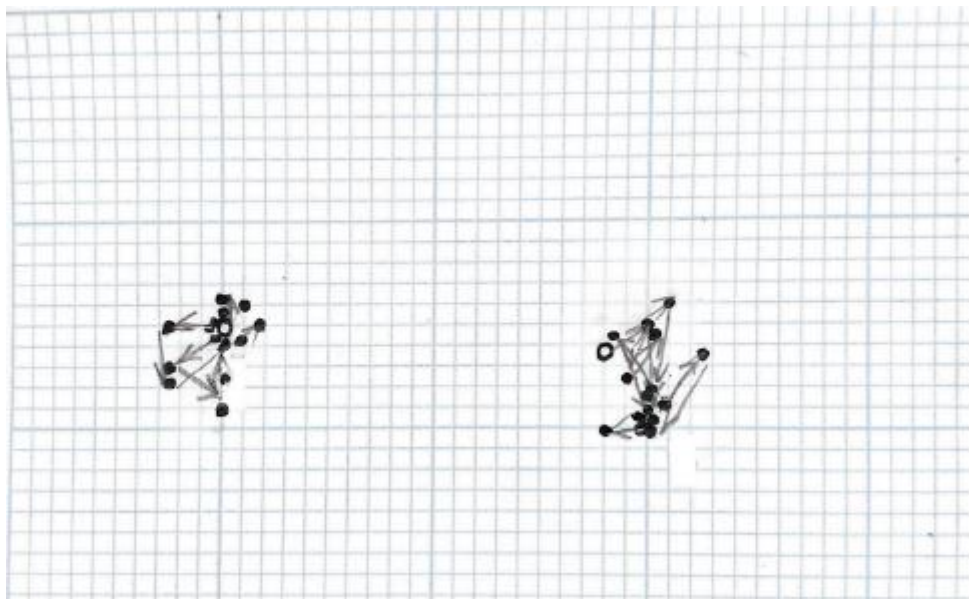
圖五、弱漩渦中流速與中心距的關係

三、各類控制因子對雙颱風系統路徑的影響

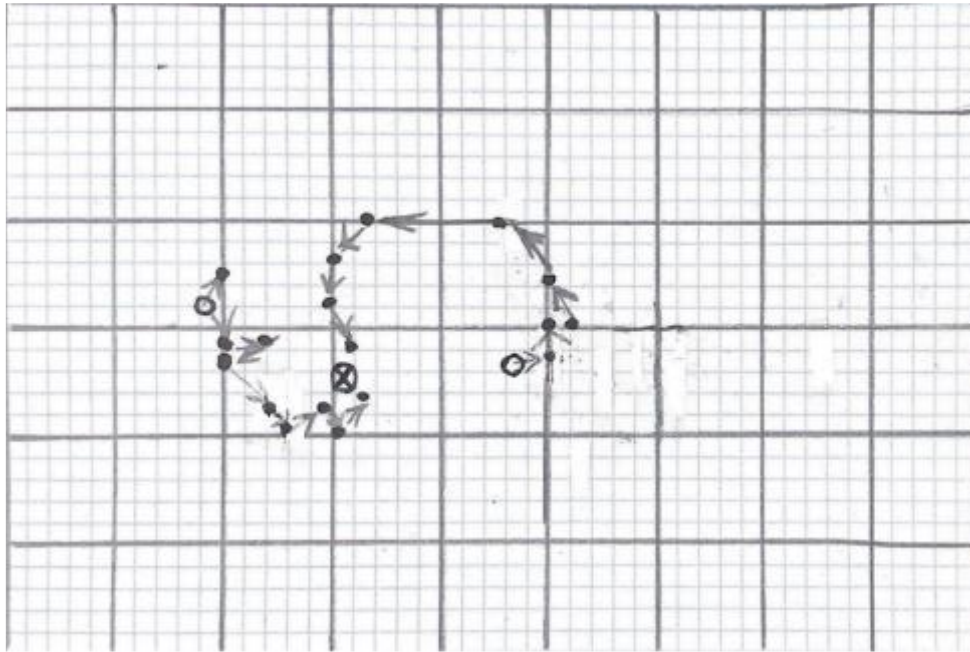
(一) 兩漩渦中心距離對雙颱風系統的影響



圖六、兩漩渦中心距離約 14 公分 (133 %有效駛流場範圍)

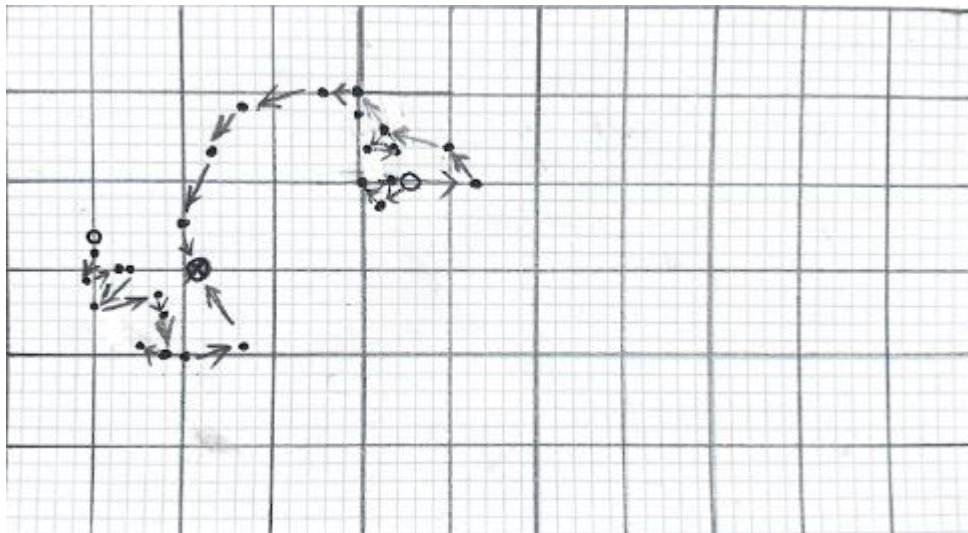


圖七、兩漩渦中心距離約 10.5 公分 (100 %有效駛流場範圍)

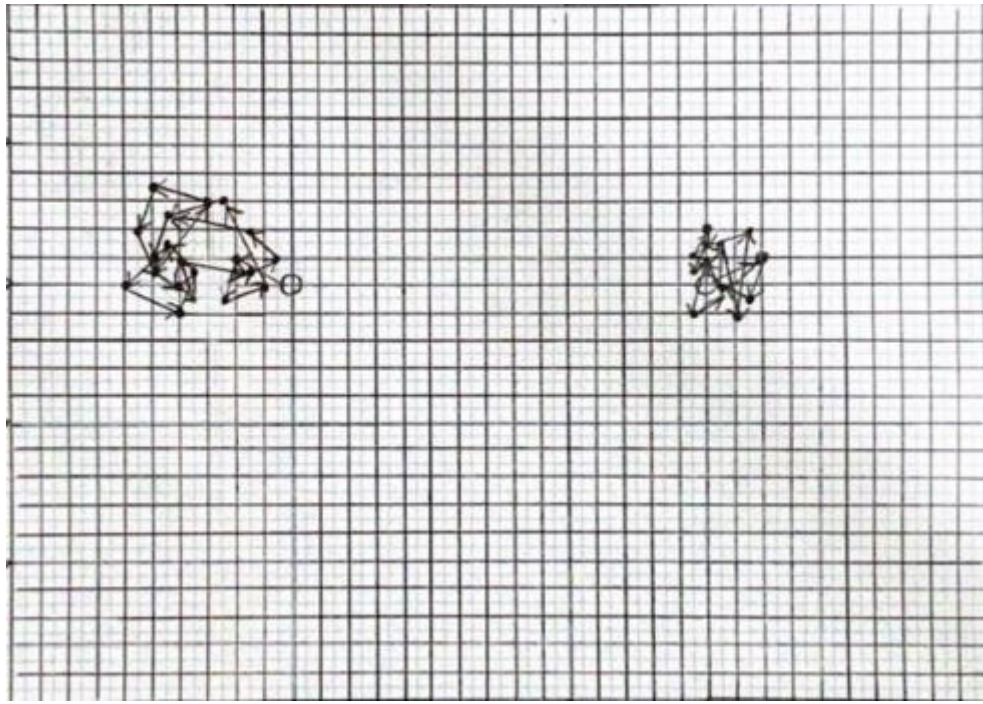


圖八、兩漩渦中心距離約 8.75 公分 (83 %有效駛流場範圍)

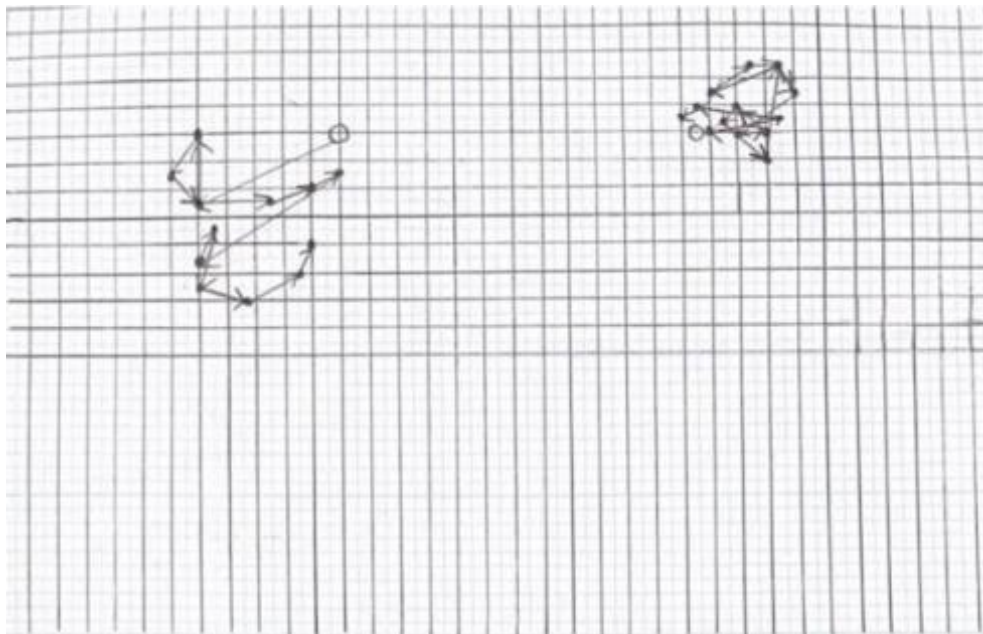
(二) 兩漩渦相對強弱對雙颱系統的影響



圖九、兩漩渦一強一弱 (右弱左強)

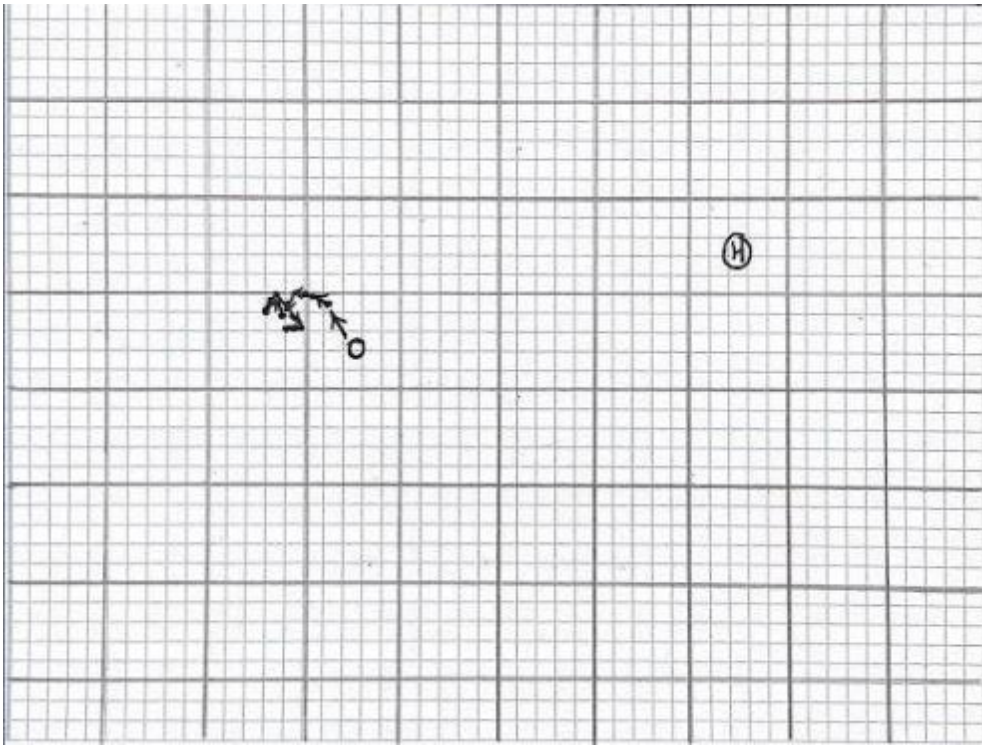


圖十、兩強漩渦的互動情形

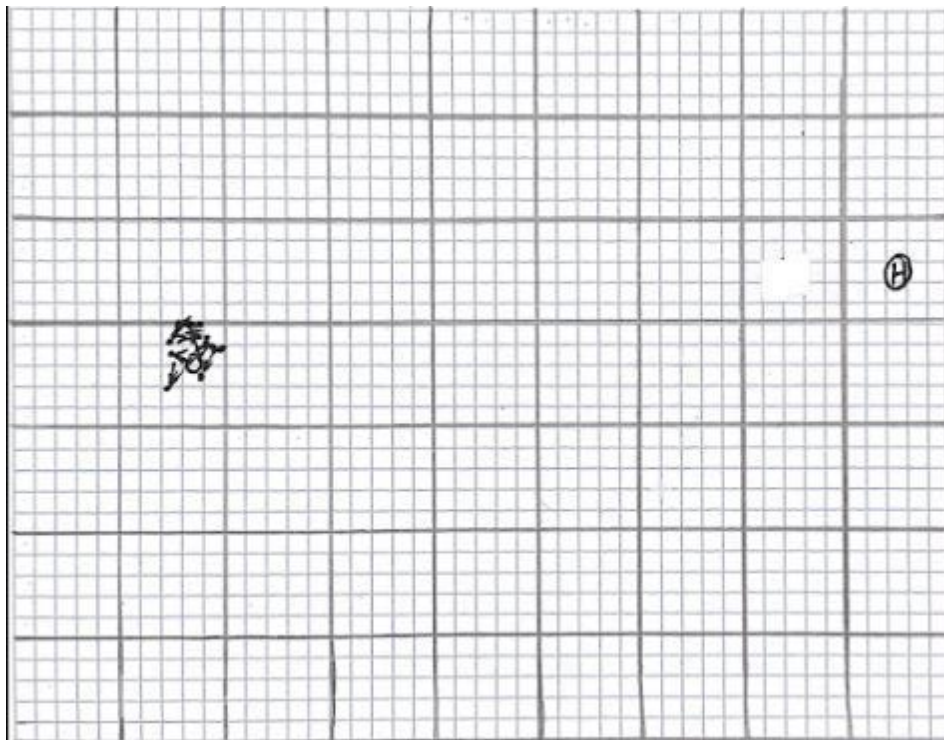


圖十一、兩弱漩渦的互動情形

(三) 太平洋高壓對雙颱風系統的影響



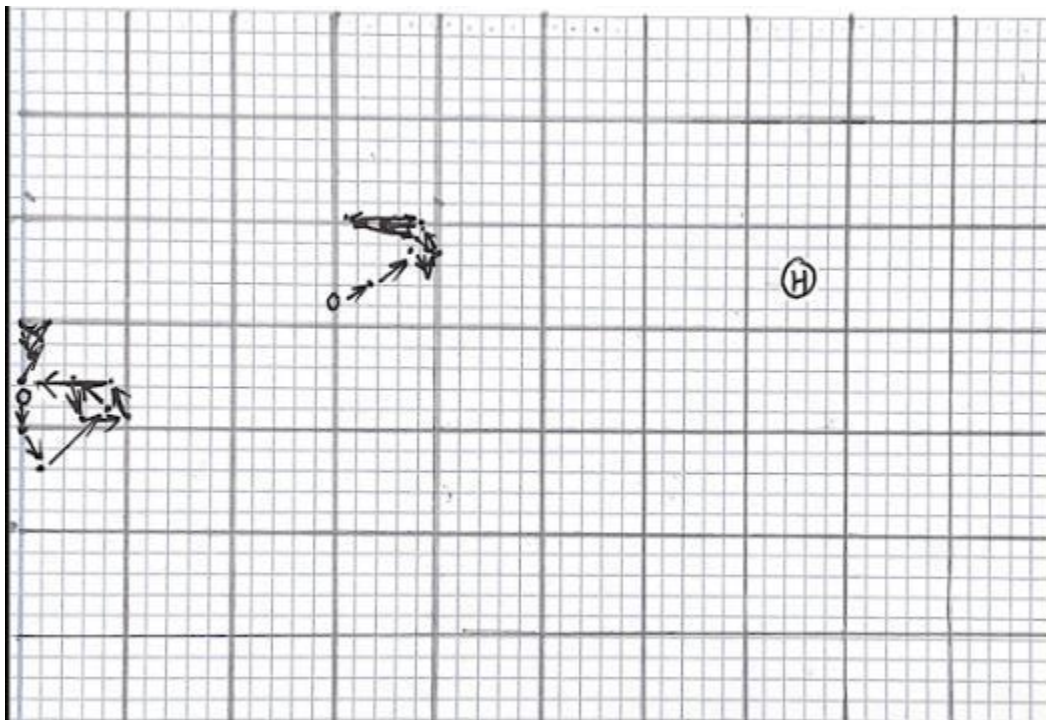
圖十二、太平洋高壓對單一颱風的影響（右漩渦）



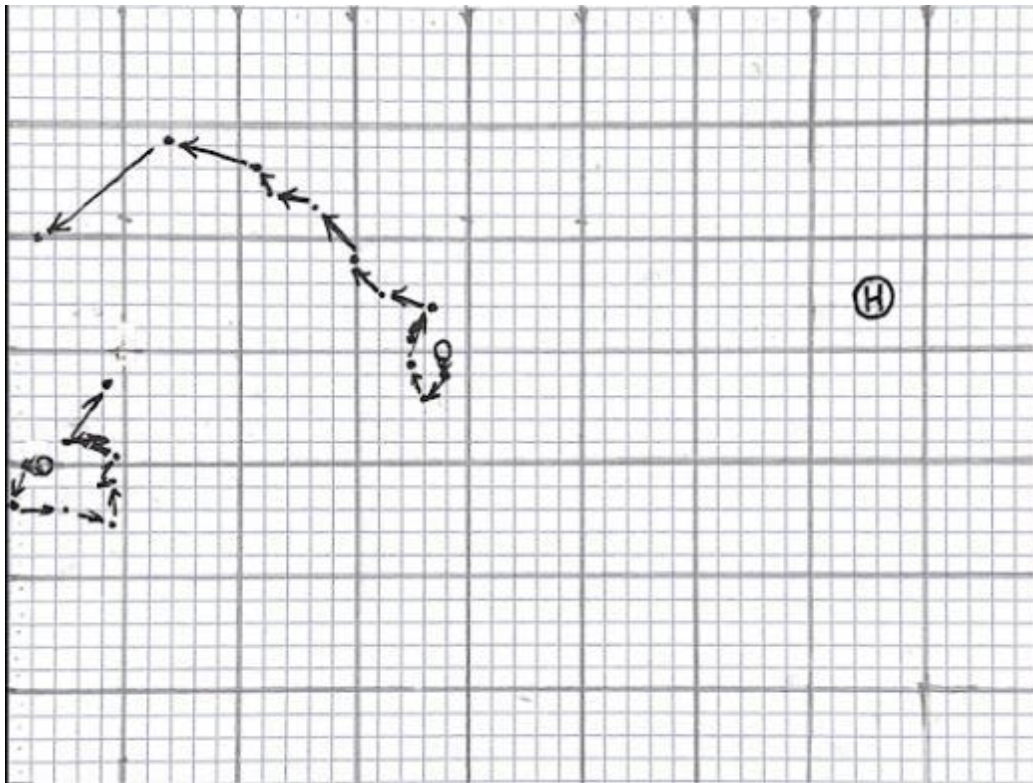
圖十三、太平洋高壓對單一颱風的影響（左漩渦）



圖十四、太平洋高壓對雙颱風系統的影響（高壓與弱颱風相鄰）



圖十五、太平洋高壓對雙颱風系統的影響（高壓與強颱風相鄰）



圖十六、太平洋高壓對雙颱風系統的影響（兩強颱風與高壓）

伍、 討論

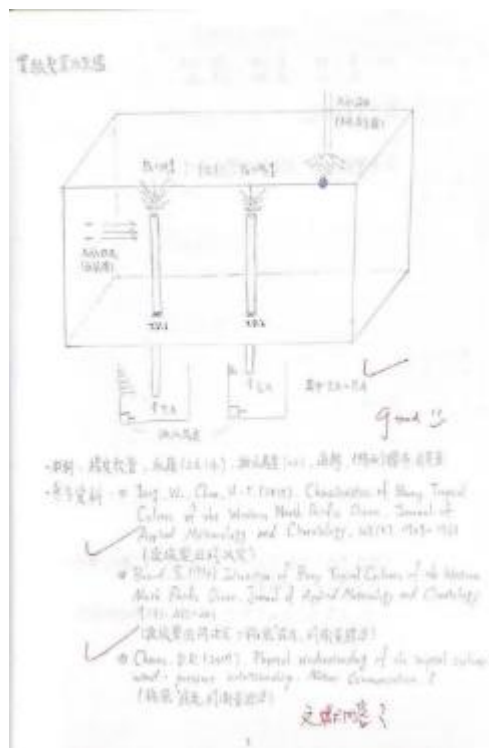
一、實驗方法論

(一) 實驗裝置的演變

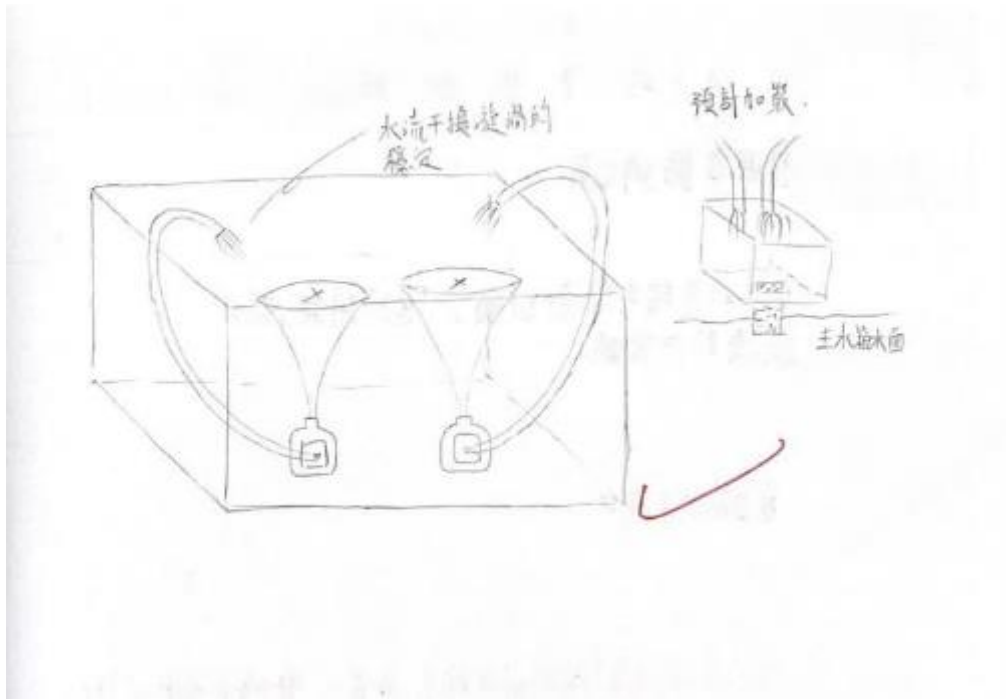
在我們的研究之初，擬定欲探究的問題「各種控制因子對雙漩渦互動的影響」後，我們針對「如何在實驗室模擬颱風」這個問題參考了不少資料。參考先前與我們主題相關的論文、專題，以及科展作品，我們發現目前（為科學家廣泛認可的）模擬颱風的方式主要有兩種：水工實驗以及電腦數值模擬。前者較為直觀，技術需求較低，但與實際大氣情形差異較大（將於討論的第二點中提及），在 Fujiwhara, S.(1923)中，雙颱風效應（藤原效應）即是透過這種方式被發現的；後者涉及程式設計的專業知識，與實際大氣中情況的一致性較高，但在高中校園內執行的難度較高。考量了校內的軟硬體設備條件後，我們決定採取水工實驗的方式進行我們的研究。設計實驗裝置時，除了材料方便取得、好操作、效果明顯等考量外，如何使模擬出來的颱風在流體中可以盡量自由的移動以符合大氣中的情況（於第二點中有更詳細的說明）

也是我們一貫的考量。

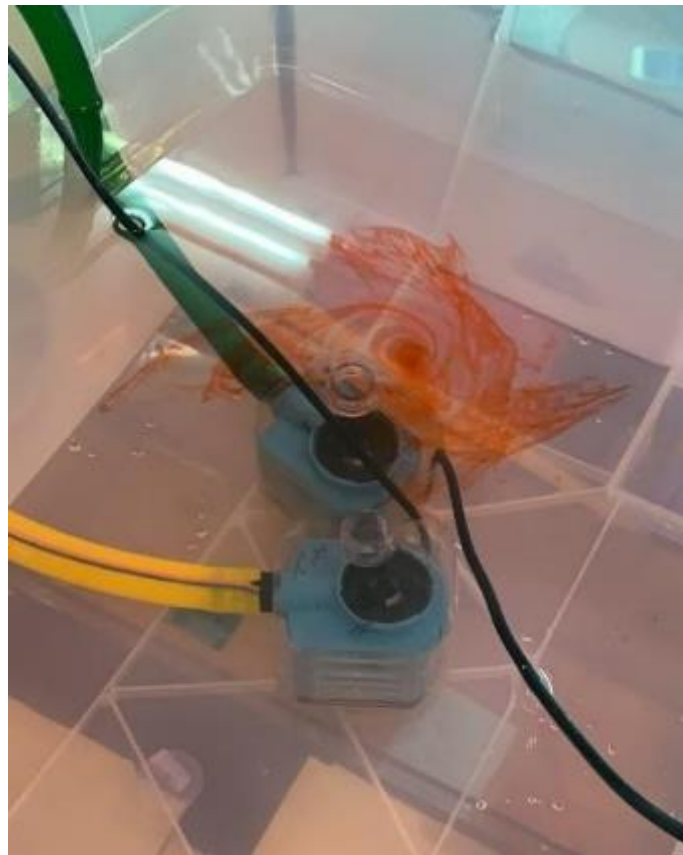
有鑑於此，我們設計出了第一版的實驗裝置（圖十七為其設計圖）。在此一版本的實驗裝置中，我們決定以大水箱模擬颱風所在的海域，用橡皮軟管排水製造可自由移動的漩渦，用抽水馬達使上下兩水箱的水位維持恆定，並調整兩橡皮管在下水箱中浸泡的深度改變橡皮管兩端壓力差，以製造不同強度的漩渦。然而，在實際執行實驗時，我們發現：橡皮軟管管口形成的漩渦強度太弱，無法產生肉眼可見的互動，於是我們改用抽水馬達直接作為低壓的中心。在第二代實驗裝置中，我們雖然成功觀察到兩漩渦的互動，但卻出現了另一個問題：駐波的擾動——由於水箱中的水位須維持恆定，我們必須將被抽水馬達抽走的水排回來，在實作的過程中，我們發現：重新排入水箱中的水會導致液面擾動，甚至在不斷撞擊箱壁的過程中形成駐波，嚴重破壞兩個漩渦的穩定性。



圖十七、第一版實驗裝置的設計圖



圖十八、第二版實驗裝置的設計圖



圖十九、以第二版實驗裝置製造出來的漩渦

至此我們了解到，若要在維持水位不變的情況下製造穩定的漩渦，那麼我們勢必得找到除馬達以外的漩渦製造方法（我們也想過要將實驗移至就算不斷抽水，水面也不會有多少下降的游泳池中進行，但沒有找到合適的場地）。參考 Fujiwhara(1923) 的作法後，我們決定改採「馬達+化學攪拌子」的組合，並用可變電阻調整馬達的轉速（模擬颱風的強弱）。經過多次測試後，我們完成了最終的實驗裝置（如圖二所示）。相較於先前的模型，此裝置的優勢有三：

1. 箱體無實際的水流出入，可避免駐波，維持漩渦穩定；
2. 利用可變電阻調節馬達轉速，可精準控制漩渦強度；
3. 實驗裝置輕巧，方便操作，故我們最終選定此裝置作為我們進行研究的正式版本。

（二）水工實驗與實際大氣的異同

之所以能利用水工實驗模擬颱風及其他發生於大氣之中的控制因子，其最大的關鍵就在於大氣與水皆為流體。然而，在這根本的共通處之上，水工實驗（此處特別聚焦在我們的實驗裝置上）的模擬仍與大氣中的實際情況有著一些關鍵的不同，為求能對實驗結果做出正確的解讀，在此我們將針對各差異進行詳細的討論。首先是關於漩渦形成機制的不同。在大氣中，颱風由熱帶性低氣壓發展而成，低空氣流在科氏力與氣壓梯度力的作用下以逆時針方向（北半球）輻合、舉升，形成螺旋狀的雲系；在進行水工實驗時，我們原本也想透過類似的方法產生漩渦狀水流，但在初步嘗試後發現此種作法在實務上存在諸多限制（如討論的第一點中所述），故我們轉而採取外力干擾的方式製造漩渦。此種作法雖與颱風實際上的形成原理有著根本上的不同，然而其模擬出來的結果與大氣中的颱風大致是相似的，故在進行相關研究時常被使用，其中最知名的例子莫過於 Fujiwhara, S.於 1923 年提出雙颱風（藤原）效應時進行的操作。第二個差異是關於環境的「背景」。我們作為實驗裝置的水箱是一個封閉的環境，除了我們外加的代表颱風的兩個水漩渦以及象徵太平洋高壓的慢速旋轉水流外再無其他的干擾；相反的，在真實大氣中，除了我們主要的觀察對象（即雙颱風系統與太平洋高壓）外，其他天氣系統（如歐亞大陸東南緣夏季盛行的西南季風、I.T.C.Z 的輻合氣流等）也時時刻刻在作用著，這些是在我們的實驗裝置中無法模擬出來的。另外值得注意的是，我們的實驗只探討雙颱風系統在開放海域上的行為模式，意即排除了所有來自陸地的干擾因素（如地形起伏、水分

補給的短缺等)。最後也最關鍵的，是關於漩渦運動自由度的問題。在大氣中，颱風的移動只受到海面摩擦力輕微的阻撓，自由度相當高（更精準的說，可較大程度的因應環境的駛流移動）；在水箱裡，由於漩渦的來源，即箱底轉動的攪拌子是無法移動的，故漩渦一邊受到駛流的引導，一邊還要被與攪拌子之間的束縛力「拉住」(我們姑且將此種束縛作用稱為「水繩」)，根據我們的觀察，「水繩」除了造成漩渦移動的自由度降低外，有時候也會在與駛流的兩相拉扯下使漩渦出現不穩定的路徑。為使模擬結果貼近實際情形，在執行實驗時我們嘗試了幾種方法以降低「水繩」的作用。一開始，我們試著在漩渦穩定之後即切斷馬達的電源，讓漩渦脫離「水繩」的干擾，此種方法雖然可大幅提升漩渦移動的自由度，然而存在漩渦易消散、觀察時間短、無法使其強度維持恆定的問題。後來，我們將漩渦的強度控制在已能穩定旋轉，但尚不足以形成與箱底連接之「水繩」的程度，此種作法可在漩渦的自由度以及穩定性中取得折衷的效果。



圖二十、理想強度的漩渦

二、實驗討論

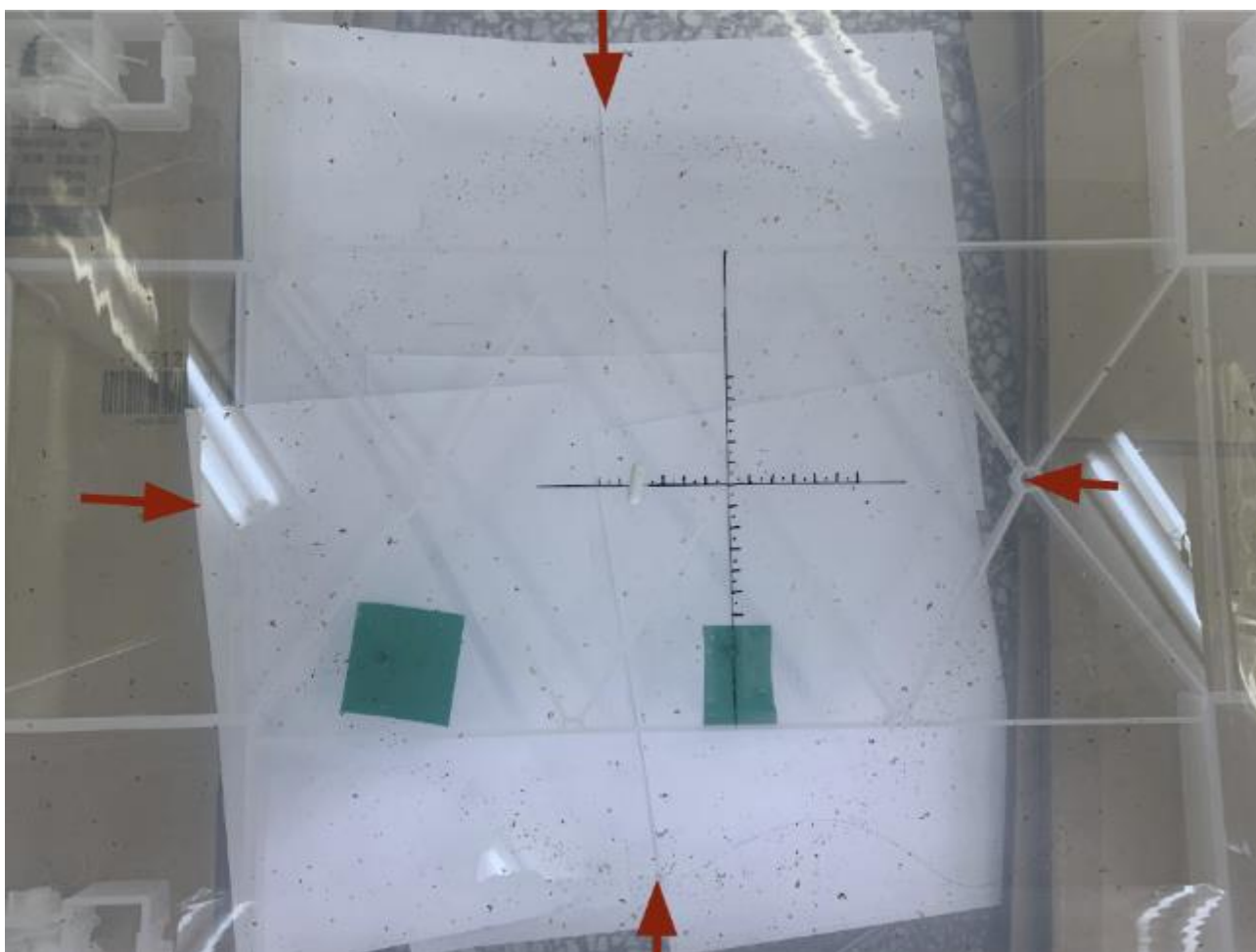
(一) 漩渦受箱壁的影響

從實驗數據可知，與理想狀態（大水箱）相較，漩渦的運動在我們的實驗裝置中的確有

受到箱壁的干擾，然其影響甚微，對本研究的模擬結果應不致造成重大偏差。具體而言，實驗裝置中漩渦最大水平偏移量僅較大水箱多百分之八，且在我們後續的模擬結果中，每個漩渦平均移動路徑常為 13.3798 公分，此數值亦遠大於箱壁對漩渦造成偏移效果，故在後續實驗中，我們都將忽略箱壁對模擬結果的影響。

(二) 漩渦駛流場的範圍

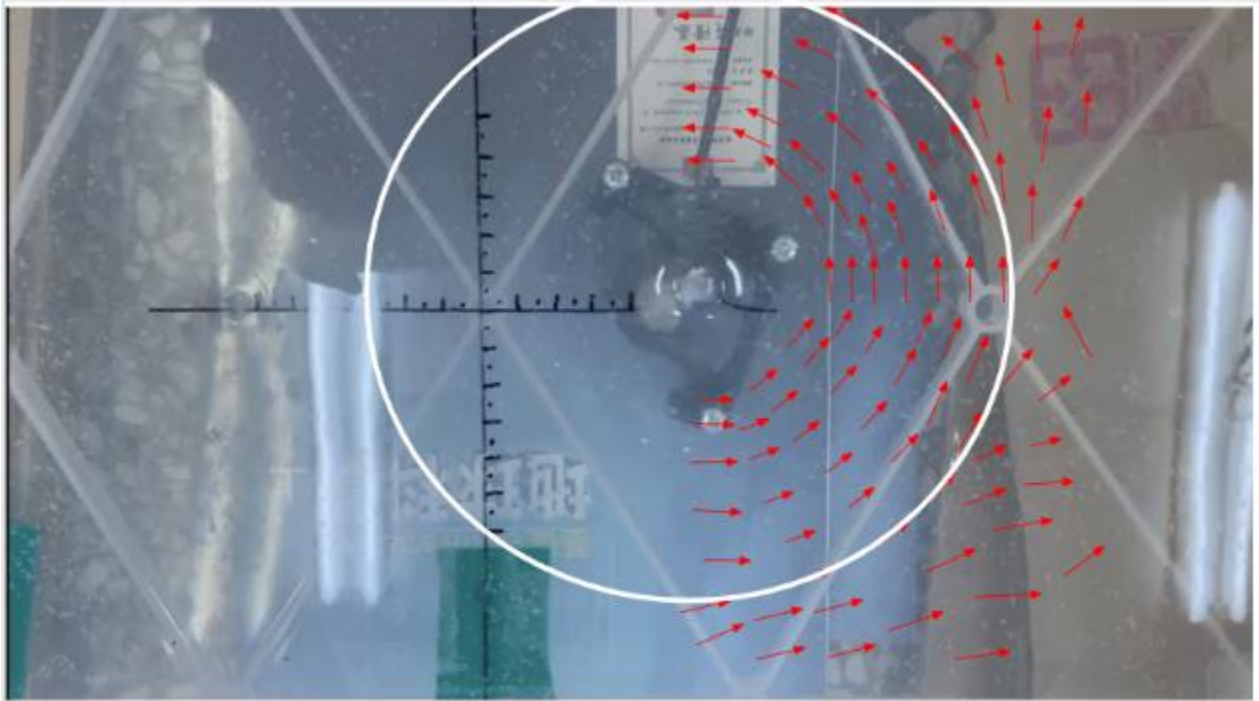
為視覺化漩渦的駛流場，我們在水箱中灑入大量胡椒粉，並觀察其於漩渦附近漂流的情形。我們發現，當胡椒粉隨漩渦漂流一段時間後，會於水箱底形成一圈環狀的沉積帶。我們推測這是因為胡椒粉脫離駛流場範圍後在靜止水域下沉的緣故（類似河川下游因搬運力降低而淤沙的情形）。



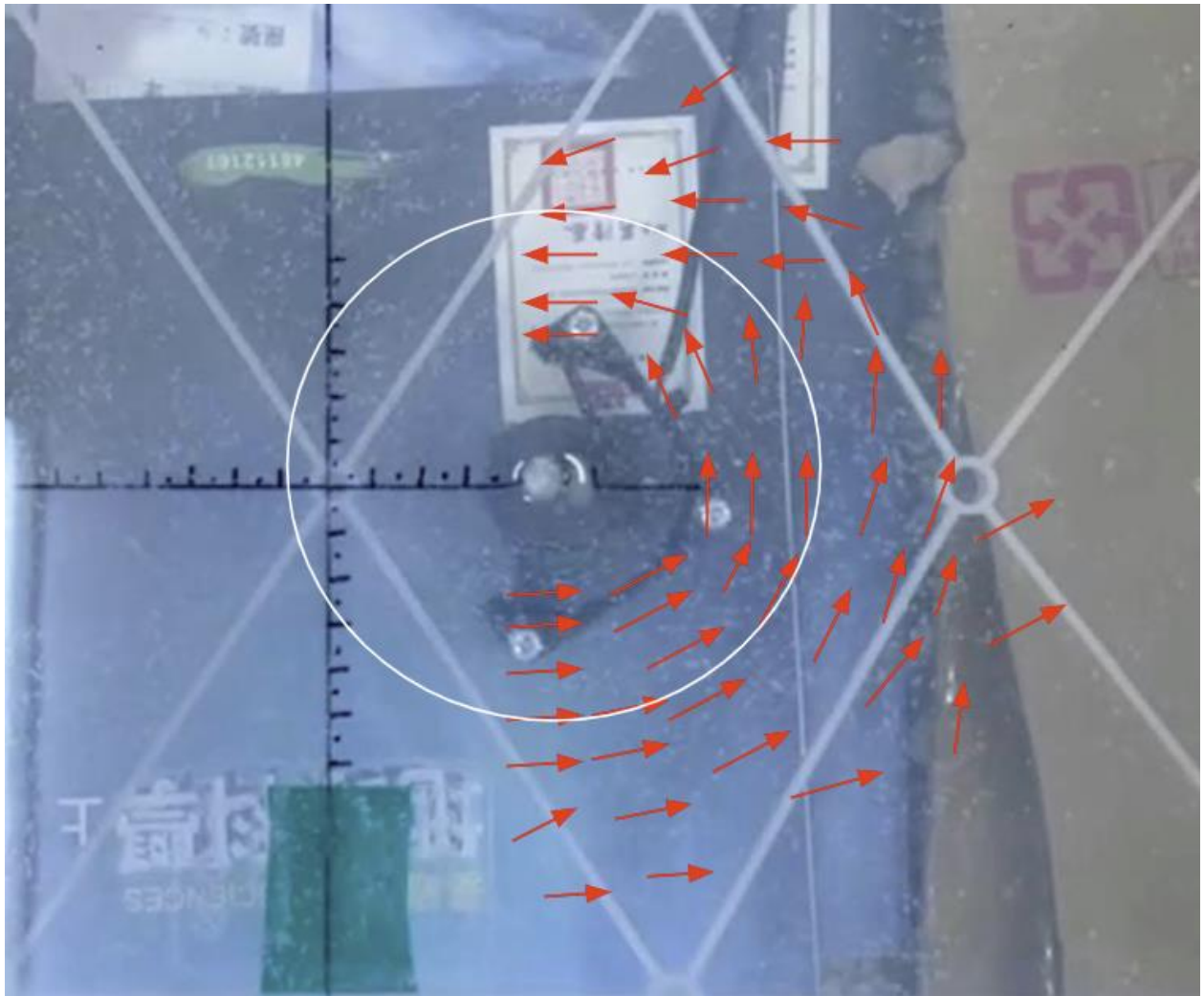
圖二十一、因搬運力降低形成的「環狀沉積帶」

然而，透過圖二十二、圖二十三對駛流場中個別質點移動方向的分析可以發現，從距離漩渦中心約 10.5 公分的同心圓至環狀沉積帶之間，水面雖然仍有駛流引起的擾動，然而胡椒

粉的運動已顯然失去同向性，我們據此推測在此範圍內的駛流應無法有效牽引另一漩渦運動，對本研究的討論內容而言較無重要性，故除了以環狀沉積帶為界的「駛流場範圍」外，我們另由下二圖畫出「有效駛流場範圍」的界線。值得一提的是，後者與模擬中雙漩渦開始互繞的臨界距離相符，再次印證雙颱風效應的產生乃由兩漩渦受彼此駛流牽引所致。



圖二十二、強漩渦的有效駛流範圍



圖二十三、弱漩渦的有效駛流範圍

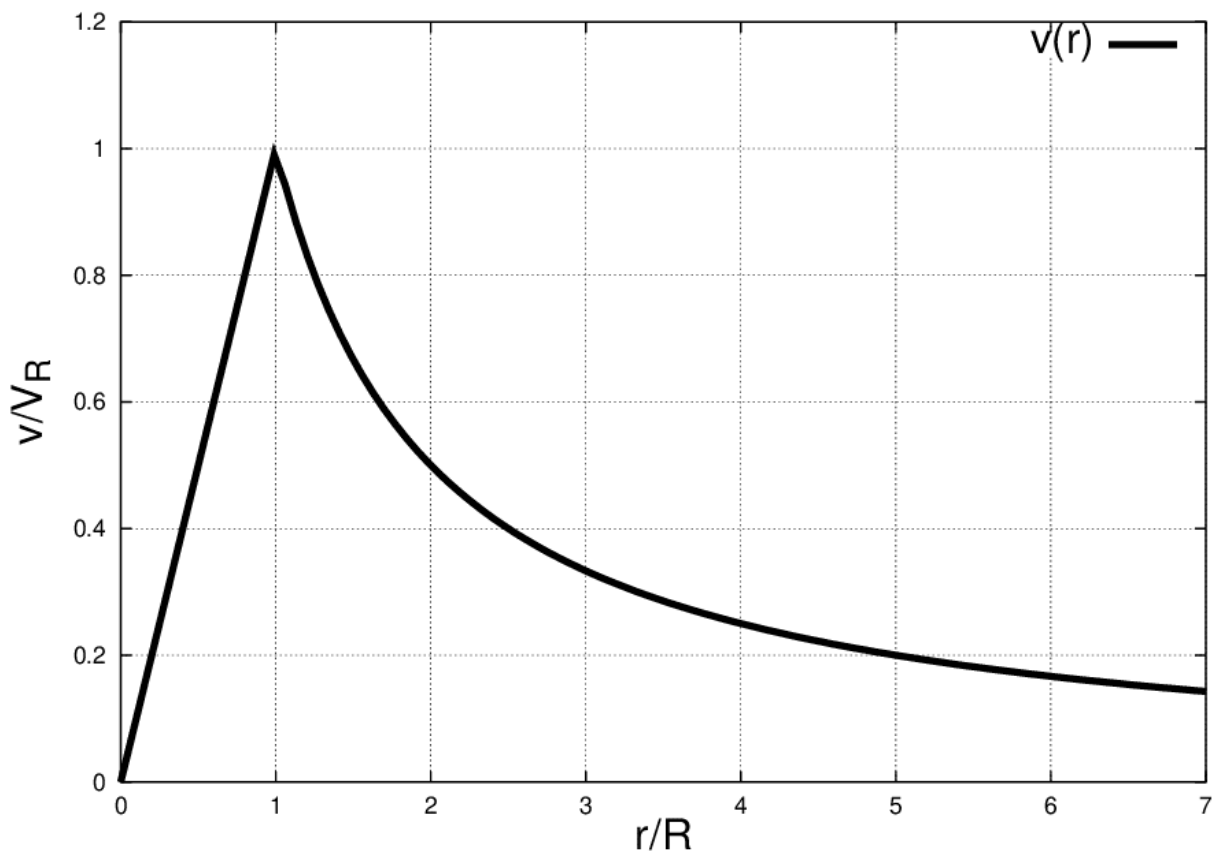
(三) 漩渦流速變化的分析

比較圖四與圖五可以發現，不管與中心的距離為何，強漩渦的水流流速永遠強於弱漩渦；其中，強漩渦的水流流速與中心間距大致為一反比關係，而弱漩渦的情形則比較複雜：隨著中心距增加，水流流速最初以線性上升，於中心距=2cm 附近達到頂峰後開始下降，繼而漸趨平緩。儘管強弱漩渦的曲線看似差異頗大，兩者卻都符合阮肯漩渦的模型。

根據 brand(1970)的定義，阮肯渦旋是指一種結構對稱，且流速隨中心距變化有一定規律的漩渦。在此種漩渦中，我們可以於距中心不遠處找到一個特定距離 r ，其中，渦流速度在此處達到頂峰，且當距離小於 r 時， $\frac{2v}{d} = \xi$ (相對渦度) = const.；當距離大於 r 時， $vd = \text{const.}$ 而 $\xi = 0$ ，如下圖二十四所示。

另外，使用阮肯漩渦模型來擬合本研究中實驗裝置產生的漩渦，除了為往後定量分析定

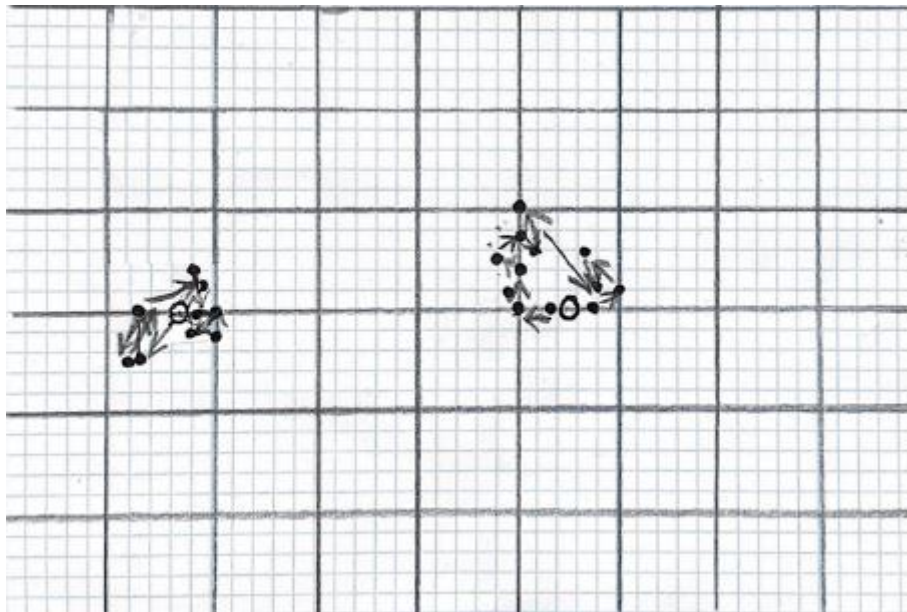
下理論基礎，我們亦在過程中發現，漩渦的強弱似與 r 出現的位置有關，我們認為這也是未來在進行水工實驗時值得注意的重點。



圖二十四、阮肯渦旋（Rankine Vortex）的模型

(四) 兩颱風中心距離與雙颱風互動模型的關係

雙颱風（藤原）效應是由於兩個颱風路徑受彼此產生的駛流場引導所造成的。是故當兩颱風中心距離越近，其所在位置受到彼此牽引的駛流場就越強，互繞的情形也越明顯，這點在我們的模擬中也可看出。如圖六，當兩漩渦中心距離 14 公分時，兩漩渦之間幾乎無互繞的情形發生；當距離稍微靠近至 10.5 公分時（圖七），雙颱風效應的雛型便大略可見了（尤其當我們把圖七中左漩渦最初短暫的向上運動當作無效的極端值予以排除後，互繞現象更為明顯，如下圖二十五。此極端值可能是由前述「水繩」作用所造成的震盪引起的。）



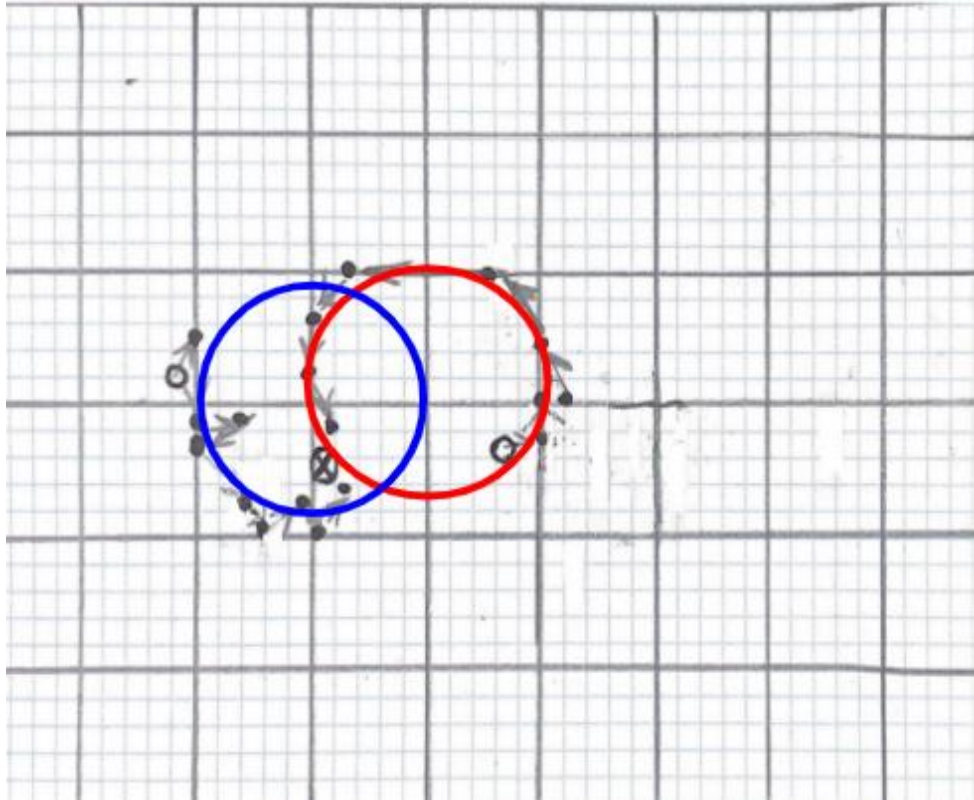
圖二十五、將圖五路徑中的極端值去除後的結果

根據 Brand, S. (1970), 在真實大氣中雙颱風效應開始具有顯著作用的距離可依歷史數據的平均值大略視為 750 海里 (約 1389 公里); 當兩漩渦的距離靠近至 8.75 公分時 (圖八), 我們已經能觀察到一個非常成熟而完整的圓形互繞軌跡, 兩漩渦甚至在模擬的後期出現了合併的現象。這組實驗結果說明, 當兩颱風中心距離越近, 其受彼此牽引的程度就越大, 雙颱風 (藤原) 效應的作用也越明顯。另外, 當兩颱風距離甚近時, 亦可能產生合併的現象 (如 1994 年 9 月的 Pat 與 Ruth)。

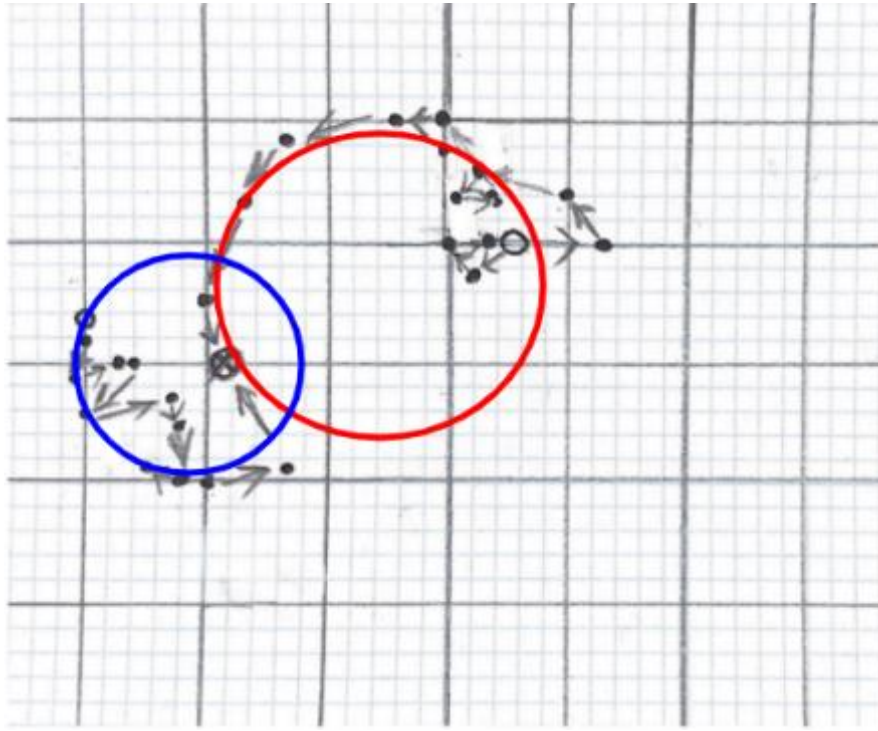
(五) 兩颱風相對強度與雙颱風互動模型的影響

除了距離以外, 兩颱風的相對強弱也是影響雙颱風系統行為模式的重要因素之一。我們對模擬出來的結果以圓形軌跡進行了擬合, 發現當兩颱風強度相近時, 兩者的互繞軌跡曲率半徑十分接近, 如下圖二十六 (圖十、圖十一中的實驗結果由於兩漩渦中心距離較遠, 互繞情形不如圖八, 故我們在此以後者代替作為擬合分析的對象) 中, 左邊漩渦軌跡的曲率半徑約為 3.68 公分, 右邊漩渦軌跡曲率半徑約為 3.55 公分, 兩者比值 (左/右) 約為 1.04。當兩漩渦強度出現差異時, 強漩渦軌跡的曲率半徑會較弱漩渦的曲率半徑小, 形成「強颱風拖曳弱颱風」的現象, 如下圖二十六中, 左邊漩渦 (強) 軌跡曲率半徑約為 3.77 公分, 右邊漩渦 (弱) 軌跡曲率半徑約為 5.29 公分, 兩者比值 (左/右) 約為 0.71。而在針對圖十、圖十一的觀察中, 我們也發現了一個反常的現象。一般而言, 在中心距離相同的前提下, 兩強颱風的互繞情形應

較兩弱颱風互繞情形明顯，然而我們的模擬結果卻呈現了相反的趨勢：圖十一中兩弱颱風的互繞情形可大致辨認，圖十中兩強颱風卻只呈現於起始位置附近的震盪，無互繞現象發生。我們認為，這是由於在進行圖八的實驗時，漩渦並未被控制在如圖二十般的「理想狀態」中，故「水繩」的束縛力很大程度限制了漩渦移動的自由度。



圖二十六、兩強度相近漩渦的互繞情形（以圓形軌跡擬合）



圖二十七、一強颱（左）一弱颱（右）的互繞情形（以圓形軌跡擬合）

(六) 太平洋高壓對雙颱互動模型的影響

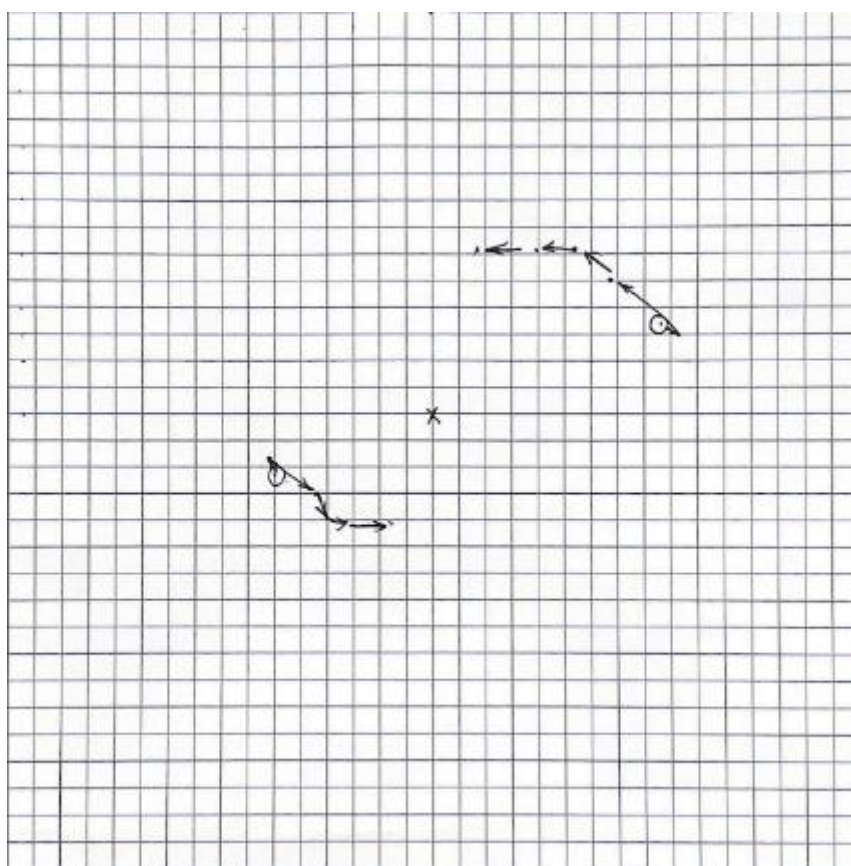
依照大氣中的實際情形以及楊忠權（2009）的研究成果看，除實驗一、實驗二中探討的內部因素外，太平洋高壓的大尺度駛流場似也對雙颱互動模型有著重大影響。故我們設計了實驗三來探討太平洋高壓對雙颱系統的影響。在本項實驗中，我們參考了西北太平洋區域夏季的實際狀況，把高壓中心放置在雙颱系統的右上（東北）方。我們首先模擬了太平洋高壓對單一一個漩渦的影響，圖十二中可看出，距離高壓中心較近的漩渦（右漩渦）受高壓的駛流場影響，出現了顯著而定向的西向運動；然而在圖十三中，距離高壓中心較遠的漩渦（左漩渦）之西向運動就變得比較微弱，可見在我們的模擬中，右漩渦受高壓駛流影響的程度遠較左漩渦來得大。在釐清了高壓對單一漩渦的影響後，我們終於可以進入正題，探討太平洋高壓如何影響雙颱互動模型。仔細觀察我們的模擬結果可以發現，在太平洋高壓作用下的雙颱系統，其軌跡可簡單描述為「系統本身的互繞」與「高壓駛流的西向吹送」兩者各自之獨立影響疊加的結果（見實驗二的結果與圖十四、圖十五、圖十六）。在圖十四與圖十六中，我們可以看到右漩渦逆時針繞行的軌跡在高壓的作用下被沿水平方向拉長成了類似橢圓的形狀（一邊繞行一邊向西移動），左漩渦原先向右（東）繞行的軌跡則受到高壓駛流的抑制，變得

較無高壓時不顯著，其中，圖十四裡的左漩渦甚至因為自身強度較強，本來就較不易受右漩渦牽制而移動（如實驗二中的結果所示），導致其幾乎不再有互繞的情形。

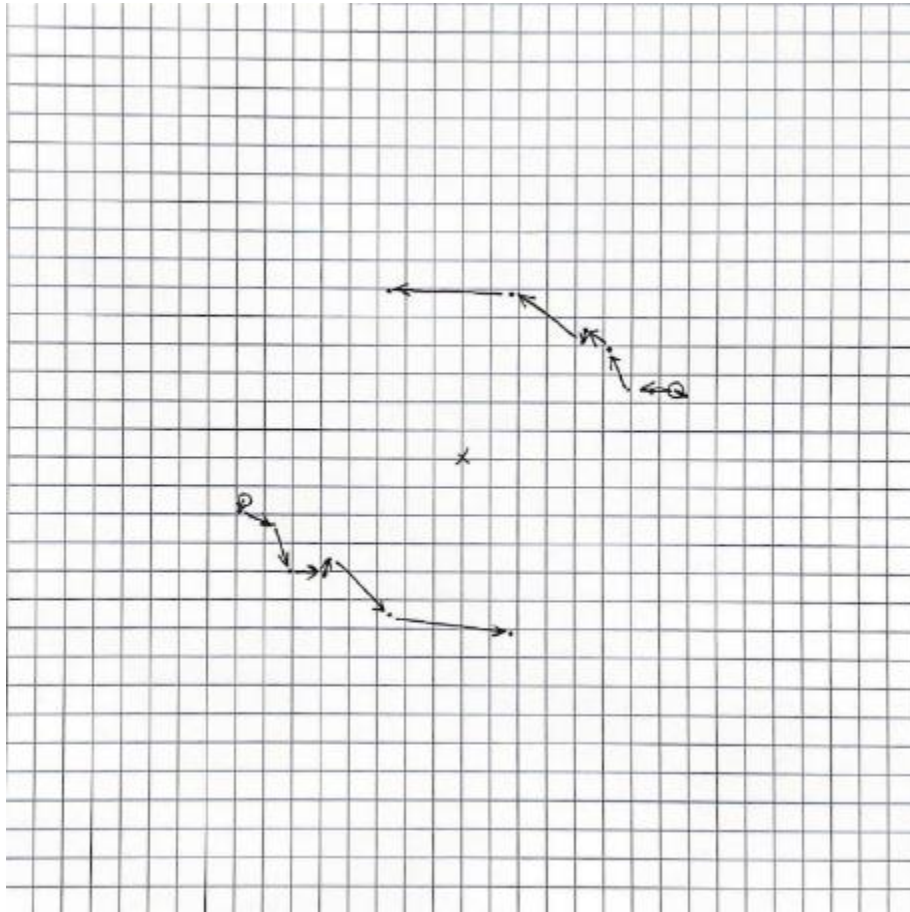
為進一步分析這種分析這種「影響的獨立性」，我們採用了 Wu et al. (2003) 建議的「質心表示法」，搭配分析漩渦流速隨中心距變化時求得的伴隨駛流大小數值（即圖四、圖五中距離為 8.75 公分時的漩渦環流流速），將「太平洋高壓對雙颱風系統的影響」實驗中的路徑圖重新繪製成下圖二十八、二十九。

$$\vec{r}_c = \frac{|\vec{V}_{SDLM}(q'_b)|}{|\vec{V}_{SDLM}(q'_s)| + |\vec{V}_{SDLM}(q'_b)|} \vec{r}_b + \frac{|\vec{V}_{SDLM}(q'_s)|}{|\vec{V}_{SDLM}(q'_s)| + |\vec{V}_{SDLM}(q'_b)|} \vec{r}_s$$

「質心表示法」是用以上式決定的系統質心作為路徑圖不動的幾何中心，描述雙漩渦相對運動的一種方式，其優勢在於排除整個系統共同運動的同時，又能保留前文所謂「強颱風拖曳弱颱風旋轉」的特性。



圖二十八、同圖十四，但以質心表示法繪製



圖二十九、同圖十六，但以質心表示法繪製

將上二圖與圖二十六、二十七相較便可發現，去除掉太平洋高壓西向吹送的效果後，雙漩渦運動的模式與「兩漩渦相對強弱對雙颱風系統的影響」並無二致，再次印證了前文所謂「影響的獨立性」。

陸、 結論

一、以水工實驗模擬大氣中氣旋的運動雖為簡單明瞭且行之有年的科學方法，但仍需注意水流渦與氣旋在本質上的不同，其中尤以漩渦上方圓盤面與底部攪拌子間的束縛力（即討論中所提到的「水繩」現象）與氣旋的實際狀況差異最大。

二、除一般為人所熟知的氣旋相對強度、中心距離等內部因素，太平洋高壓與雙颱風系統的相對關係亦是影響其互動模型的重要因素。

三、運用本研究之裝置模擬出來的漩渦，其流速與中心距間的關係大致可用阮肯渦漩（rankine vortex）的模型描述。

四、雙颱風系統的互繞始於兩漩渦中心間距離等於漩渦有效駛流最大範圍時，且當兩漩渦中心越接近，其互繞現象越明顯。

五、當雙颱風系統中兩氣旋強度相近時，其互繞軌跡呈兩曲率半徑相似的圓弧；當強度有明顯的強弱分別時，弱颱風移動的距離、軌跡的曲率半徑皆較強颱風為大，呈現彷彿為強颱風所拖曳的現象，最後甚至會併入強颱風之中。

六、加入太平洋高壓的存在時，雙颱風系統的兩氣旋在原先的互繞行為之上，又多了方向一致但方向不同但程度不同的西向移動。在我們的模擬中，氣旋向西偏移的距離跟自身強度、與高壓中心距離呈負相關。

七、Jang et al.(2015)中提供的統計資料顯示雙颱風系統出現的高峰為每年的七至九月，此時亦為太平洋高壓的強盛期，故雙颱風系統多變的行為模式可說是高壓系統對氣旋的影響（即上述第六點）施加於內部條件（上述四、五點）各有不同之雙颱風系統的結果。

柒、 參考文獻資料

中央氣象局颱風資料庫（Typhoon Database）。取自 <https://rdc28.cwb.gov.tw/>

何台華（1990）。雙熱帶氣旋的氣流場分析與路徑預報。《大氣科學》,18(4), 309-325.

戚啟勳（2014）。大氣科學。臺北市：弘揚。

楊明仁等（2021）。地球科學（全一冊）。台南市：翰林。

楊忠權（2009）。西北太平洋地區熱帶氣旋路徑特徵探討。臺灣大學大氣科學研究所學位論文，臺北市。

- Brand, S. (1970). Interaction of binary tropical cyclones of the western North Pacific Ocean. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 9(3), 433-441. 1 .
- Fujiwhara, S. (1923). On the growth and decay of vortical systems. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 49(206), 75-104.
- Giaiotti, D. B., & Stel, F. U. L. V. I. O. (2006). The Rankine vortex model. University of Trieste-International Centre for Theoretical Physics.
- Jang, W., & Chun, H. Y. (2015). Characteristics of binary tropical cyclones observed in the western North Pacific for 62 years (1951 – 2012). *Monthly Weather Review*, 143(5), 1749-1761.
- Lander, M. A. (1995). The merger of two tropical cyclones. *Monthly weather review*, 123(7), 2260-2265.
- Wu, C. C., Huang, T. S., Huang, W. P., & Chou, K. H. (2003). A new look at the binary interaction: Potential vorticity diagnosis of the unusual southward movement of Tropical Storm Bopha (2000) and its interaction with Supertyphoon Saomai (2000). *Monthly weather review*, 131(7), 1289-1300.
- Yang, C.-C., C.-C. Wu, K.-H. Chou, and C.-Y. Lee, 2008: Binary interaction between Typhoons Fengshen (2002) and Fungwong (2002) based on the potential vorticity diagnosis. *Mon. Wea. Rev.*, 136, 4593-4611.

【評語】 051903

本研究透過水工實驗模擬實際雙颱風系統並繪製出軌跡圖，以探討颱風中心距離、相對強弱，以及太平洋高壓的環流等控制因子如何影響雙颱風系統，並對漩渦的結構進行了定量分析，實驗設計，資料分析均詳實仔細，建議加強新觀點或新發現之論述或說明。報告撰寫非常的完整，利用簡單水箱加馬達的科學實驗，是個很好的點子，簡單但是切中要點。實驗數據的紀錄非常詳盡，很有科學精神。是個很不錯的科學專題研究。能夠自己設計簡單的儀器實驗，來模擬自然界現象，是非常難得的想法和探究精神，很有潛力，持續努力。

作品簡報

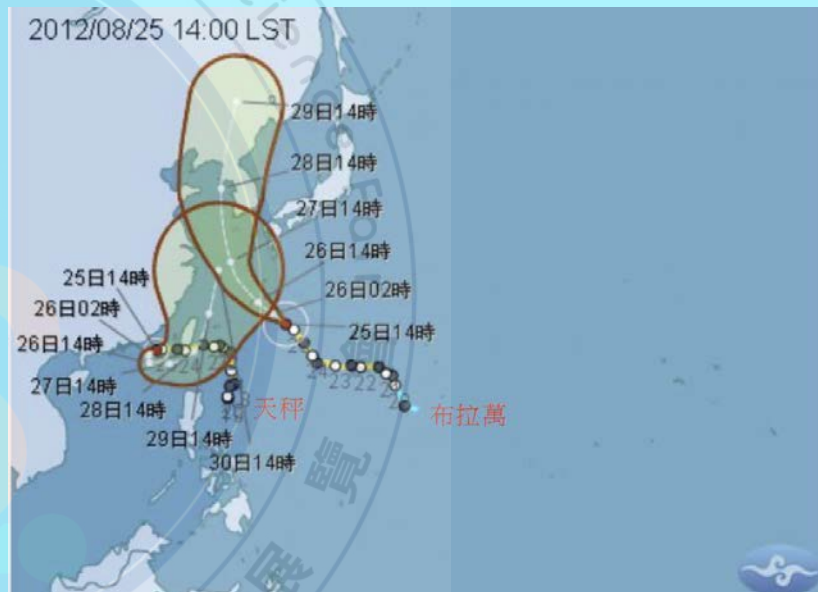
各種控制因子對雙漩渦互動的影響

科 別：地球與行星科學科

組 別：高級中等學校組

前言

- 在高中地科課本上，雙颱風效應被定義為「兩個距離相近的颱風影響彼此的移動路徑，常見反鐘向互繞的情形」
- 實際上雙颱風系統絕少出現典型反鐘向互繞，反而常見各種型態各異的變形
- Brand (1970) 亦指出，雙颱風效應的發生會大幅降低颱風路徑的可預報度
- 本研究設計水工實驗模擬系統，希望能找出各控制因子對雙颱風系統影響的模型、釐清各種變形的產生機制，以期降低未來預報上的誤差。



天秤與布拉萬颱風（2012）間的雙颱風效應

前言 (文獻探討)

文獻、歷史案例蒐集與整理

(接下頁)

在文獻分析的過程中，以下幾篇文章協助我們確立了水工實驗的方法以及欲模擬的各項控制因子：

- Fujiwhara (1923) 利用水工實驗，首次提出了雙颱風 (藤原) 效應
- Brand (1970) 透過統計資料和阮肯渦旋 (Rankine Vortex) 的數學模型，討論兩颱風中心距離及其互繞角速度之間的關係並歸納出公式
- Wu et al. (2003) 提出在大尺度天氣系統作用下分析雙颱風互動情形的方法 (質心表示法)
- Yang et al. (2008) 以位渦反演技術 (PV inversion) 定量描述個案中雙漩渦的互動情形
- 楊忠權 (2009) 計算出了各天氣系統對於颱風駛流的平均貢獻比例
- Jang et al. (2015) 則以合成分析法 (composite analysis) 將1951至2012年間產生於西北太平洋的雙颱風系統依路徑分為六類

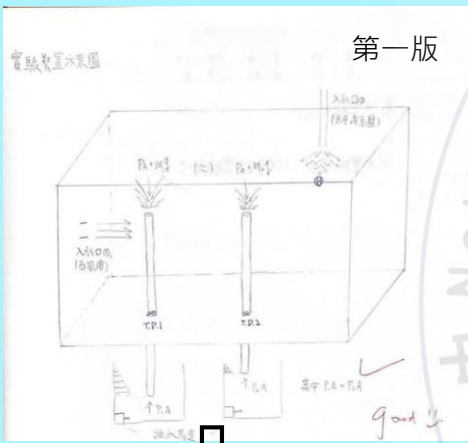
研究方法

(承上頁)

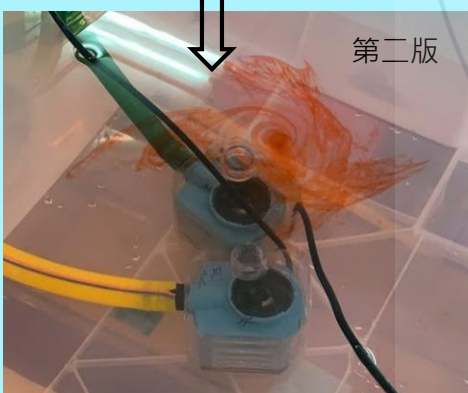
實驗裝置設計

(接下頁)

第一版



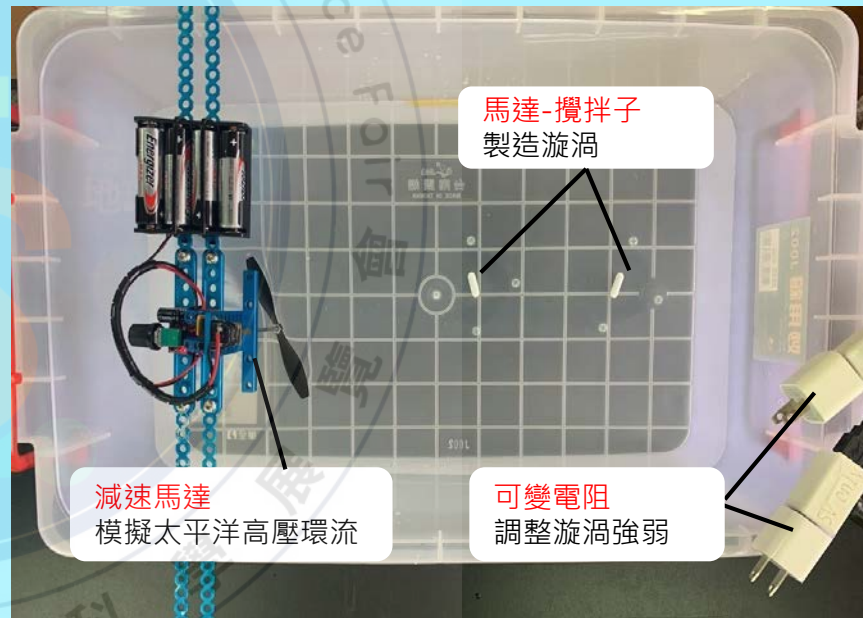
第二版



本研究參考Fujiwhara的方法，以**水工實驗**方式進行，最終裝置如右圖

裝置優點：

- **裝置輕巧**，易操作
- 無實際的水流出入，**避免駐波產生**
- 可變電阻調節轉速，**精準控制強度**

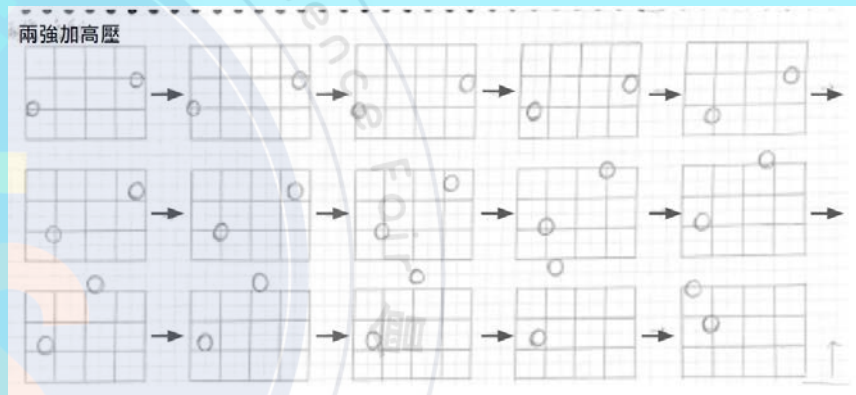


研究方法

(接上頁)

結果分析

- 我們將實驗影片逐時螢幕截取，繪製成分鏡圖，再疊加成雙漩渦的路徑圖
- 分析漩渦結構時，我們透過慢動作影片觀察胡椒粉漂流測定漩渦環流流速、角速度等量化數據
- 在部分實驗中我們也以Wu et al. (2003) 建議的質心表示法分析漩渦路徑。



根據實驗結果繪製的「分鏡圖」

$$\vec{r}_c = \frac{|\vec{V}_{SDLM}(q'_b)|}{|\vec{V}_{SDLM}(q'_s)| + |\vec{V}_{SDLM}(q'_b)|} \vec{r}_b + \frac{|\vec{V}_{SDLM}(q'_s)|}{|\vec{V}_{SDLM}(q'_s)| + |\vec{V}_{SDLM}(q'_b)|} \vec{r}_s$$

質心表示法中「質心」的計算方法

研究方法

	真實大氣	水箱模擬
環境背景	各種次要天氣系統也不斷作用	為 封閉的環境 ，僅有攪拌子與減速馬達的擾動
形成機制	由 熱帶性低氣壓的輻合氣流 引起	採取 外力干擾 的方式製造漩渦
運動自由度	颱風的移動只受到海面摩擦力 輕微阻撓	攪拌子無法移動，漩渦與 攪拌子之間有束縛力 （我們將之稱為「 水繩現象 」）



理想強度的漩渦

研究結果

箱壁對漩渦的影響

- 大水箱中的偏移量

水平最大偏移量平均值	0.83公分
垂直最大偏移量平均值	0.63公分

- 小水箱偏移量

水平最大偏移量平均值	0.9公分
垂直最大偏移量平均值	0.8公分

- 漩渦偏移量與平均移動路徑長對比

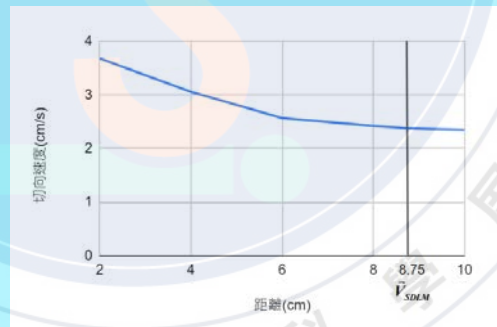
小水箱平均偏移量	每個漩渦平均移動路徑長
0.9公分	13.4公分

漩渦結構的定量分析

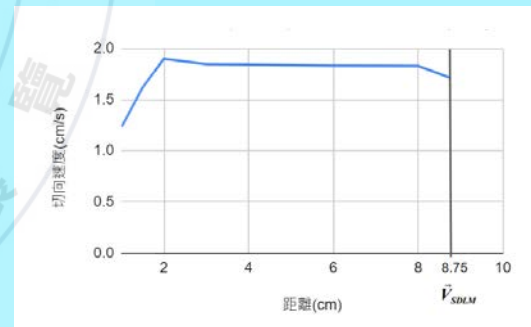
- 漩渦環流範圍

環流範圍	環狀沉積帶半徑	有效環流範圍半徑
強漩渦	18.5公分	約10.5公分
弱漩渦	17公分	約6公分

- 漩渦流速對中心距的變化



強漩渦流速與中心距的關係

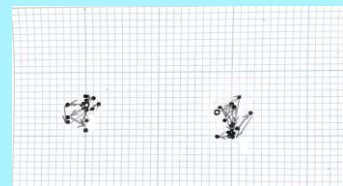


弱漩渦流速與中心距的關係

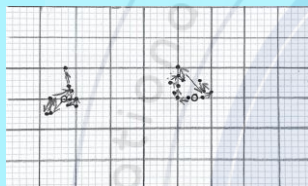
研究結果

各類控制因子對雙颱風系統路徑的影響

● 距離對雙颱風系統的影響



14公分 (133 %有效環流場範圍)

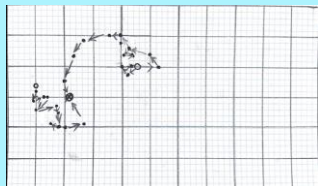


10.5公分 (100 %有效環流場範圍)

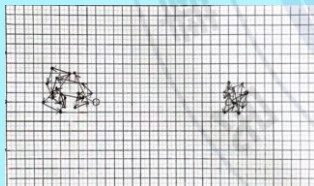


8.75公分 (83 %有效環流場範圍)

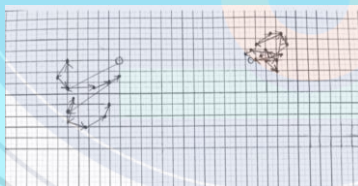
● 相對強弱對雙颱風系統的影響



一強一弱
(右弱左強)



兩強

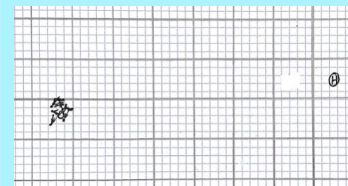


兩弱

● 太平洋高壓對雙颱風系統的影響



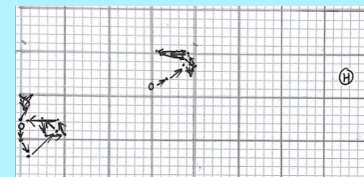
對單一颱風的影響 (右漩渦)



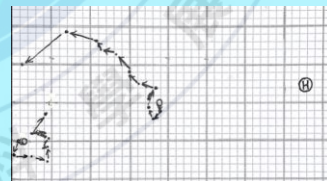
單一颱風的影響 (左漩渦)



雙颱風系統的影響 (高壓與弱颱風相鄰)



雙颱風系統的影響 (高壓與強颱風相鄰)



雙颱風系統的影響 (兩強颱風與高壓)

註：空心圈為颱風運動起始點

研究結果解釋

漩渦流速變化的分析

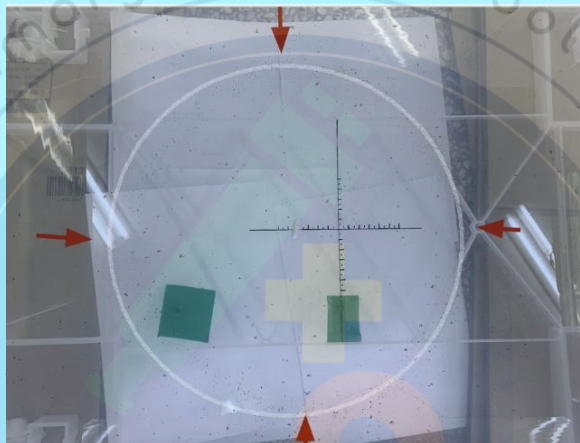
- 漩渦中速度與中心距的關係可用**阮肯漩渦**描述

漩渦受箱壁的影響

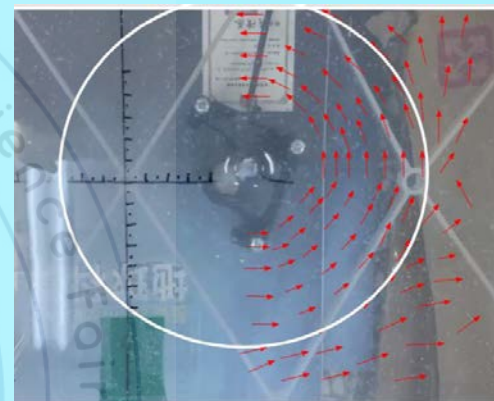
- 箱壁對漩渦路徑**影響甚微**
在後續實驗中忽略不計

漩渦駛流場的範圍

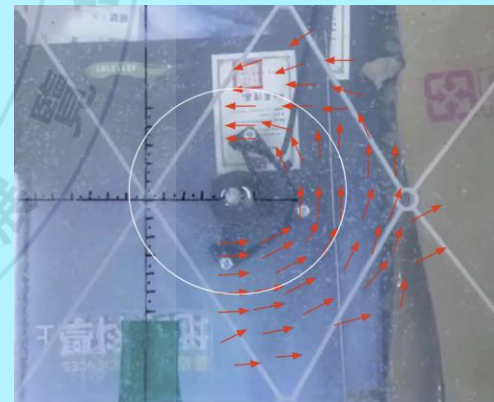
- 灑入大量胡椒粉，觀察其於漩渦附近漂流的情形，形成**環狀沉積帶**；另分析**各質點運動方向**畫定有效環流範圍
- 圖十九、二十範圍與模擬中**雙漩渦開始互繞的臨界距離**相符，印證雙颱風的產生乃由兩漩渦**受彼此環流牽引**所致



環狀沉積帶



強漩渦的有效環流範圍



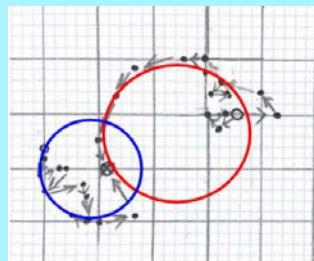
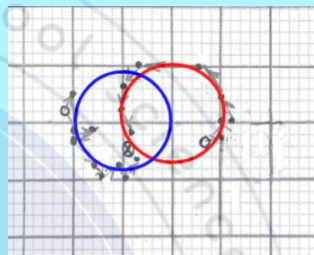
弱漩渦的有效環流範圍

研究結果解釋

中心距離與雙颱風互動模型的關係

- 14公分→無互繞
- 10.5公分→互繞雛型大略可見
- 8.75公分→完整的圓形互繞軌跡

距離越近，
互繞越明顯

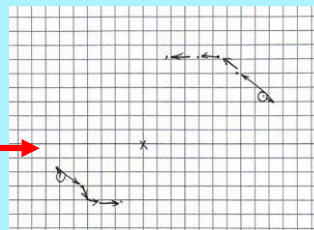
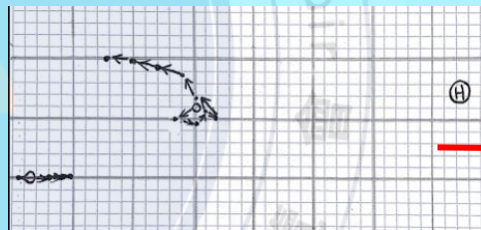


相對強度與雙颱風互動模型的影響

- 強度相近→互繞軌跡曲率半徑接近
- 強度不同→「強颱風拖曳弱颱風」

兩強度相近漩渦的互繞情形

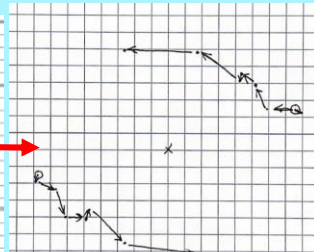
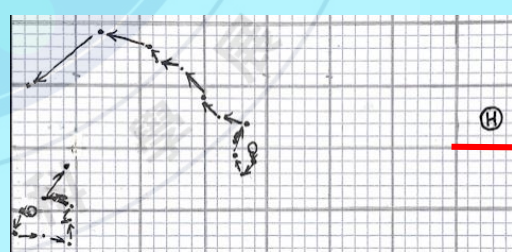
一強颱風（左）一弱颱風（右）的互繞情形



以質心表示法繪製高壓靠近弱颱風

太平洋高壓對雙颱風互動模型的影響

- 高壓對颱風有共同的西向吹送效果
- 太平洋高壓作用下的雙颱風系統=「系統本身的互繞」+「高壓環流的西向吹送」
- 以質心表示法繪成的路徑圖可看出此種「影響的獨立疊加」



以質心表示法繪製兩強颱風與高壓

結 論

- 造成雙颱風系統路徑變化的控制因子有很多，本研究確定了其中**距離**、**相對強弱**及**太平洋高壓環流**的影響模型。
- 雙颱風系統的互繞始於兩漩渦**中心間距離等於漩渦有效環流最大範圍**時，且當兩漩渦**中心越接近**，其**互繞現象越明顯**。高壓系統對氣旋的影響
- 當雙颱風系統中兩氣旋**強度相近**時，其互繞軌跡呈兩**曲率半徑相似**的圓弧；當強度有**明顯的強弱分別**時，弱颱風移動的距離、軌跡的曲率半徑皆**較強颱風為大**，呈現彷彿**為強颱風所拖曳**的現象，最後甚至會**併入強颱風**之中。
- 加入太平洋高壓時，雙颱風系統的兩氣旋在原先的互繞之上多了**方向一致但程度不同的西向移動**。在我們的模擬中，氣旋向西偏移的距離跟自身強度、與高壓中心距離呈負相關。
- 水工模擬和實際大氣最不同之處：**漩渦與攪拌子間的束縛力（水繩現象）**。

- 運用本研究之裝置模擬出來的漩渦，符合**阮肯渦旋** (rankine vortex) 模型的描述。
- Jang et al. (2015)中提供的統計資料顯示雙颱風系統出現的高峰為每年的七至九月，此時**亦為太平洋高壓的強盛期**，故雙颱風系統多變的行為模式可說是**太平洋高壓之西向吹送**（即上述第四點）施加於**內部條件各有不同**（上述二、三點）之**雙颱風系統**的結果。
- 未來可能的延伸方向：影響模型的**量化**、更多控制因子（如海陸差異、季風槽、地形）交互作用的探討。

參考資料

楊忠權(2009)。西北太平洋地區熱帶氣旋路徑特徵探討。臺大大氣科學研究所學位論文。

Brand, S. (1970). Interaction of binary tropical cyclones of the western North Pacific Ocean. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **9**(3), 433-441. 1.

Fujiwhara, S. (1923). On the growth and decay of vortical systems. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **49**(206), 75-104.

Jang, W., & Chun, H. Y. (2015). Characteristics of binary tropical cyclones observed in the western North Pacific for 62 years (1951–2012). *Monthly Weather Review*, **143**(5), 1749-1761.

Wu, C. C., Huang, T. S., Huang, W. P., & Chou, K. H. (2003). A new look at the binary interaction: Potential vorticity diagnosis of the unusual southward movement of Tropical Storm Bopha (2000) and its interaction with Supertyphoon Saomai (2000). *Monthly weather review*, **131**(7), 1289-1300. **11**