

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

子計畫五：颱風軸對稱化動力及眼牆結構之水工模擬

計畫類別：整合型計畫

計畫編號：NSC92-2119-M-002-010-AP1

執行期間：92年08月01日至93年07月31日

執行單位：國立臺灣大學應用力學研究所

計畫主持人：朱錦洲

共同主持人：張建成

計畫參與人員：陳弘正，黃世霖，謝政達

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 93 年 11 月 1 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

颱風重點研究-子計畫五： 颱風軸對稱化動力及眼牆結構之水工模擬

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 92-2119-M-002-010-API

執行期間：92年8月1日至93年7月31日

計畫主持人：朱錦洲

共同主持人：張建成

參與人員：陳弘正、黃世霖、謝政達

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告 完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- 赴國外出差或研習心得報告一份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權， 一年 二年後可公開查詢

執行單位：國立台灣大學應用力學所

中華民國 93 年 10 月 28 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

颱風重點研究-子計畫五：

颱風軸對稱化動力及眼牆結構之水工模擬

Laboratory simulations on the axisymmetrization dynamics and eyewall structure of typhoons

計畫編號：NSC 92-2119-M-002-010-API

執行期限：92年8月1日至93年7月31日

執行單位：國立台灣大學應用力學所

主持人：朱錦洲

Email: chucc@iam.ntu.edu.tw

共同主持人：張建成

Email: changcc@iam.ntu.edu.tw

計畫參與人員：陳弘正、黃世霖、謝政達

一、中文摘要

本年度計畫吾人成功的以水工模擬及應用二維 PIV 技術探討不具背景渦度下雙渦旋交互作用的流場物理。渦旋產生方法係利用兩對稱之二維機翼平板之同步拖動及定角度之轉動，帶動機翼尖端之渦旋；本研究控制兩對稱位置產生之渦旋其相對位置、強度為一定值時，可有系統的探討兩等強度渦旋及不等強度渦旋交互作用的流場演變。在定量量測方面係利用 PIV 量測技術可得到整體渦旋流場之速度與渦度分佈時序變化。同時利用所獲得之流場資訊計算出環流量、渦焓等物理量之逐時變化。無論在等強度與不等強度渦旋合併的流場中，渦旋整體的環流量皆呈現緩慢的衰退。而總渦焓量的變化則顯示更進一步渦旋交互作用特性，其結果可劃分成三個階段：一、在雙渦旋互繞(*orbiting*)時其渦焓量急速衰減；二、在合併(*during-merging*)階段則衰減趨於平緩；三、當合併成單一渦旋後(*after-merging*)，渦焓量之衰減又逐漸加劇。相關的流場現象可作為進一步了解颱風軸對稱化及眼牆動力機制的理論及物理模型。

關鍵詞：渦旋合併、總渦焓量、粒子影像測速儀

Abstract

In the present study, we experimentally investigate related flow physics of the

interaction between two co-rotating columnar vortices in a rectangular water tank without background rotation. Using a 2-D PIV technique, we can quantitatively obtain the time evolutions of the velocity and the vorticity distributions as well as the circulation and the total enstrophy of the co-rotating vortices system. The results show a slowly decaying tendency of the total circulation of the vortices system both in the cases of the equal-strength vortices and the unequal-strength vortices interactions. We conclude three stages of the interacting process of these cases. They are (1) the *orbiting process* which has a rapid decrease of their total enstrophy, (2) the *during-merging process* which has a gentle decreasing rate of the total enstrophy and finally (3) the *after-merging process* which the decreasing rate of total enstrophy becomes strong again. Such flow analysis can be used as an indicator of the vortex dynamics of the co-rotating vortices system, such as the process of the axisymmetrization of typhoons and the mechanism of eyewall dynamics.

Keywords: vortex merger, total enstrophy, particle image velocimetry (PIV)

二、研究背景與目的

雙颱風問題的研究，最早可追溯自 1921 年 Fujiwhara 所提出雙渦旋的合併現象，即今日吾人所熟知的藤原效應；近年來，由

於觀測技術的進步，相關的颱風合併的證據及現象亦陸續被發現或報導(Lander and Holland 1993; Lander 1995; Kuo et al. 2000)；在這些論文中發現，在雙颱風合併的過程中存在許多複雜的流場結構的演變，如氣旋式互繞(orbiting)、颱風雲帶拉伸(straining-out)、颱風捲入、合併渦漩增強等。除了衛星雲圖觀測之外，關於雙颱風的研究，泰半藉由數值模擬來進行相關學理的探討；並且，有趣的是，在雙颱風研究的背後，更涉及許多理論上相當重要且影響深遠的議題，諸如：一、多渦漩交互作用，二、颱風眼對稱化動力及眼牆結構演變等。

關於多渦漩交互作用，主要是考慮在具背景渦度或不具背景渦度條件下，渦漩間彼此的交互作用。這方面的研究，主要是藉由所謂的圍線動力學(contour dynamics, CD)或更進一步的圍線手術(contour surgery, CS)的計算得以探討各種渦漩間交互作用的流場物理。針對雙渦漩而言，不論是相同結構渦漩或不同結構渦漩之間的交互作用，皆呈現令人驚訝的流場型態(Melander et al. 1988; Waugh 1992; Dritschel and Waugh 1992)。其中，以 Dritschel and Waugh (1992)所進行不同結構渦漩交互作用結果最具代表性；他們根據 126 個數值實驗的結果歸納出五大類雙渦漩交互作用的型態：一、彈性互繞(elastic interactions, EI)，二、部份拉伸(partial straining-out, PSO)，三、完全拉伸(complete straining-out, CSO)，四、部份合併(partial merger, PM)以及五、完全合併(complete merger, CM)等。

另外，關於雙渦漩的水工實驗方面，無論是具背景渦度或不具背景渦度，雙渦漩的產生一直都是學術上高度的挑戰；就不具背景渦度的雙渦漩產生而言，泰半由二維機翼擺動產生一柱狀渦漩，但由於缺乏背景渦度的支持下，渦漩很容易被流體的黏滯力所耗散而解構；近年來，吾人曾嘗試以一具適當相對位置的平板，配合同步地擺動以產生穩定之雙渦漩，在雙渦漩渦心距及實驗條件均能配合的情形下，吾人可以在水槽中產生一穩定且持久之水工渦漩。此外，對於旋轉水槽環境下所產生的

雙渦漩實驗，相關文獻亦極其有限，可見者僅 1987 年 Griffiths and Hopfinger 所進行的渦漩合併實驗，以及 2001 年 Fuentes 所作關於兩個有限區域渦漩的混沌平流(chaotic advection)現象。

本研究基於上述吾人產生單一渦漩的經驗，進一步在矩形水槽中產生兩個柱狀渦漩；並藉由調整二維機翼的相對位置，擺動角速度等，以進一步產生不同強度的渦漩。在流場定性觀察上，吾人採用染料平鋪法進行渦漩結構的了解；而在流場定量資訊方面，則採用雷射光頁，配合以二維 PIV 量測，獲得流場逐時演變的資訊；另外，在雙渦漩交互作用過程中，吾人亦進一步定量的獲得了雙渦漩系統的總環流量及總渦焔的演變資訊，不啻提供了一個清楚了解雙渦漩系統流場物理解釋的途徑。相關研究結果可進一步作為具背景渦度下，雙渦漩交互作用物理的基礎，以及研究雙颱風交互作用、颱風眼牆動力等之參考。

三、研究方法

以下針對本實驗產生雙渦漩結構實驗之架構與量測技術說明如下：

3.1 雙渦漩產生法

本實驗係在一長 160 公分、寬 130 公分與高為 45 公分之工作水槽上安裝兩座拖曳式平台，以及架設滑軌與渦漩產生器，渦漩產生機構長、寬、厚分別為 30cm*15cm*1cm 且具有 45 度之平板翼，實驗液體為水。首先，安置在拖曳平台上的兩平板翼起始攻角設為 60 度，當伺服馬達驅動水平拖曳平台後，兩平板翼以大小相同、方向相反的速度移動，即瞬間在前緣與後緣處分別產生一對逆時針旋轉與順時針旋轉之尾翼渦漩，在平板翼維持 60 度攻角移動一段距離，開始由攻角 60 度轉至 0 度，此目的乃是將兩順時針渦漩帶走，隨著平板前進至工作水槽兩端後停止，最後在中間剩下兩逆時針渦漩將互繞進而合併。

3.2 粒子影像測速儀

粒子影像測速儀 PIV (Particle Image Velocimetry) 工作單元如下：

(1) 雷射光源：

由美國 New Wave Research 公司所製造瞬間功率在波長 266nm 時為 25mJ, 532nm 時為 120mJ, 脈衝雷射寬度為 10.0ns, 亮滅頻率為 30*2 Hz, 最大脈衝數目為 2, 脈衝雷射時間距離從 1 μs 到 100000 μs, 此系統可以藉由電腦同步驅動控制其亮滅的功率與脈衝時間頻率。

(2) 導光臂：

由許多光學鏡組所組成, 是將雷射脈衝光束以切頁方式呈現出。

(3) 電子耦合數位相機：

為 Kodak Megaplug ES1.0 Camera (影像擷取頻率為 30fps), 影像長 1008pixels, 寬為 1016pixels。

3.3 流場顯影技術

本實驗中, 為了能完整觀測雙渦旋交互作用的過程, 分別採用三種方式觀測整體流場：

3.3.1 染料平鋪法：

係利用兩種不同顏色食用染料, 利用細針頭將之注入至靠近平行板翼旁底部, 藉由渦旋底部黏性邊界層引致垂直二次流帶動, 可觀察雙渦旋垂直結構。

3.3.2 雷射光頁顯影法：

將密度為 1.02g/cm³, 直徑為 50 μm 之追蹤粒子 (Ployamid Seeding) 加入於水中, 使得粒子均勻分佈在水中, 將雷射切頁調整至欲觀測流場高度, 在光頁內的質點顆粒因照明而散射光, CCD 架設於雷射切頁垂直正上方, 當散射光進入 CCD 中時記錄其影像。另外可藉由調整雷射切頁高度, 可獲得不同高度水平的流場資訊, 此為 PIV 雷射光頁產生與顯影的方式。

3.3.3 染料液面釋放法：

於雙渦旋產生之平板旁架設針筒, 在平板未啟動時, 將不同顏色染料分別注入其水面上, 以觀察其合併現象, 此方法可清楚觀察雙渦旋水平結構之演變。

四、重要物理參數

以下對雙渦旋流場中各物理參數進行定義, 並針對此流場系統之重要物理量進行探討, 希冀對其流場演變機制有更進一步的認識。

4.1 環流量 (Circulation)

在流場空間中, 對任一封閉曲線 C 所進行的環積分, 即

$$\Gamma = \oint_C \vec{u} \cdot d\vec{l} \quad (1)$$

其中 \vec{u} 為在封閉曲線 C 上的流速, $d\vec{l}$ 為在封閉曲線 C 上的切線方向之線段, 由於在封閉曲線 C 內 (包括曲線上) 流速 \vec{u} 為連續且可為分的函數, 由 Stoke 定理得

$$\Gamma = \iint_{\Omega} \vec{\omega} \cdot \vec{n} dA \quad (2)$$

以 PIV 計算而言, 定義

$$\Gamma = \iint_{\Omega} \omega \cdot dA = \sum \omega \times \Delta A \quad (3)$$

將渦度方程式代入並對時間微分得

$$\begin{aligned} \frac{d\Gamma}{dt} &= \iint_{\Omega} \frac{1}{Re} \nabla^2 \omega dA \\ &= \iint_{\Omega} \frac{1}{Re} \nabla \cdot (\nabla \omega) dA \end{aligned} \quad (4)$$

4.2 雷諾數 (Reynolds Number)

藉由雷諾數的值大小來代表渦旋強度大小。估計單一渦旋環流量為

$$\Gamma = \iint_{\Omega} \omega \cdot dA = \sum \omega \times \Delta A$$

並由下列定義得到雷諾數

$$Re = \frac{\Gamma}{\nu} \quad (5)$$

其中， Γ 定義為渦旋之初始環流量，而 ν 為動黏滯係數(kinematic viscosity)。

4.3 渦焓(Enstrophy)

在流場空間中，對任一區域 V ，進行渦度平方之體積分的二分之一即為渦焓

$$E \equiv \iiint_V \frac{1}{2} \omega^2 dV \quad (6)$$

其中 dV 為區域 V 中的微小體積量，若取渦焓的時間變化率，並合併渦度方程式與高斯散度定理，可得渦焓隨時間的演變表示式：

$$\frac{dE}{dt} = \frac{1}{\text{Re}} \iint_{\Omega} \frac{\omega^2}{2} \cdot \bar{n} dA - \frac{1}{\text{Re}} \iiint_V |\nabla \omega|^2 dV \quad (7)$$

其中 Ω 為包含體積 V 之曲面，顯然在特定的雷諾數下渦焓的演變由兩項因素所控制，等號的右邊第一項是在 Ω 曲面上，系統內與系統外渦焓的進出即因周圍邊界所引起的效應；而等號右邊的第二項是在系統內 V 區域中，渦度梯度對渦焓的影響，因此可以看出渦焓是渦旋活動力的重要定量指標。

五、結果與討論

5.1 等強度渦旋合併

為了可以觀測出雙渦生成、合併以及合併過後的發展，先以染料平鋪法觀測單一柱狀渦旋生成。將兩種不同顏色之染料分別注入在渦旋產生器之平板下(圖 1)；

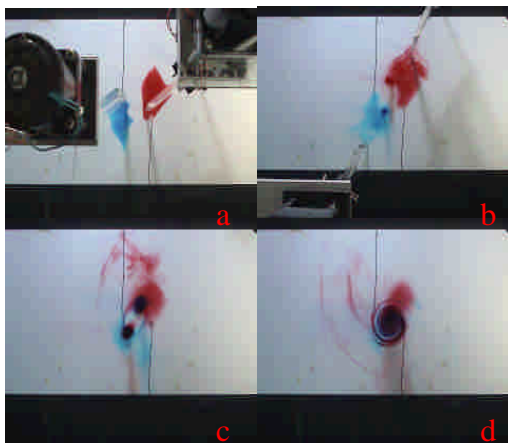


圖 1 等強度渦旋之染料平鋪法俯視圖

當兩平板以等速度、相反方向一啟動，

即有一股上升氣流將染料往上帶，此上升流乃因底部黏性邊界層所造成之二次流動(secondary flow)。進一步觀測渦旋的發展情況：當兩等強度渦旋形成時，即以相同的距離做逆時針方向的互繞，由於同向旋轉關係，兩渦旋彼此間將受到對方微弱之吸引力，隨著時間的增加，兩個渦旋半徑由於黏滯擴散而逐時增大，兩者之相互影響更加顯著，從染料顯影可以看出因為受到另一個渦旋影響，兩渦旋逐漸變形，由原本之近似圓形變為橢圓形，而渦旋間的距離也逐漸靠近，最終兩個渦旋合併為一，形成一穩定單一柱狀渦旋，而由於流體黏滯力的影響，渦旋半徑逐漸擴大，觀測出染料一層藍一層紅的漸層擴散，最後消散開來(圖 2)。

上述交互作用過程中，當兩柱狀渦旋產生時，伴隨著渦旋底部會有一股強烈的上升流產生，即渦旋主流(primary flow)所引發底板黏性邊界層(bottom boundary layer)內之徑向壓差(radial pressure gradient)所造成之底層流動向渦心聚集之二次流，此二次流動於底板表面呈現螺旋狀向渦心聚集，俟至渦心時，所聚集之流動由質量守恆可知會向上竄升，由於兩渦旋產生的機制相同，此一上升流動會將底部染料往上帶至相近的高度(約四分之一水深處)，緊接著彼此水平流動影響漸增；並且伴隨兩渦旋逐漸靠近；由側面拍攝出的影像看來，兩股上升流動間存在軸向的不穩定現象(axial instability or elliptic instability)，此現象所伴隨的渦管扭動現象亦常見於 2-D turbulence 的渦旋交互作用的探討中。接著，在兩渦旋合併瞬間，又有一股上升氣流產生，合併後單一渦旋高度明顯較未合併單一柱狀渦旋高度還要高，亦可以由此影像時序圖觀測出，染料範圍逐漸消散擴大，單一渦旋會因為黏滯力關係開始擴散開來，而所有的染料最後會聚集在接近水面上，形成一類似杯子的形狀。

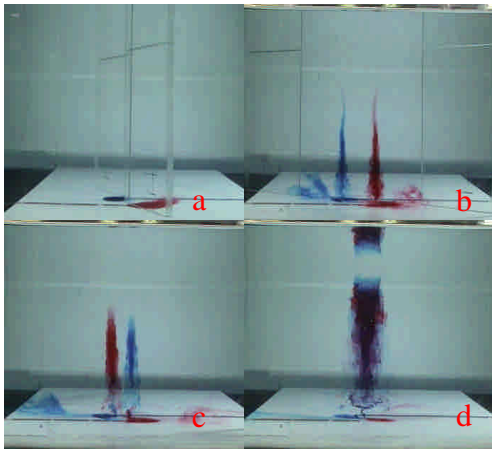


圖 2 等強度渦漩之染料平鋪法側視圖

藉由液面染料釋放法觀測整體流場，發現渦漩產生時其初始形狀近似圓形，兩渦漩彼此間作互繞運動時將會有質量轉換，大部分的流體都是從外圍漸漸捲入至另一個單一渦漩柱，隨著時間增加，兩個渦漩流線越接近橢圓狀。合併時，從上方觀測染料的變化：兩渦漩彼此逐時被對方捲入，形成一層層的絲狀流線，明顯地可以看出類似中國的太極卦圖形（圖 3）。

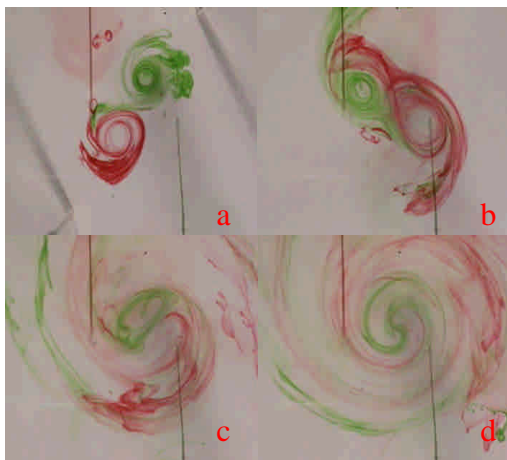


圖 3 等強度渦漩合併之液面釋放法

5.2 不等強度渦漩合併

以同樣架設方式觀測兩不等強度渦漩合併情況。由染料釋放法可以觀察到，初始兩個不等強度之渦漩產生時，雷諾數較小的渦漩會圍繞著較大的渦漩做逆時針方向的旋轉，較強的渦漩本身移動方式亦為逆時針方式，當兩渦漩合併時，此單一渦漩具有一平移速度而會有移動的情況產生。

從側視圖觀察發現（圖 4），兩平板開始以不等速度移動時，所產生的上升氣流高

度明顯亦會不同。

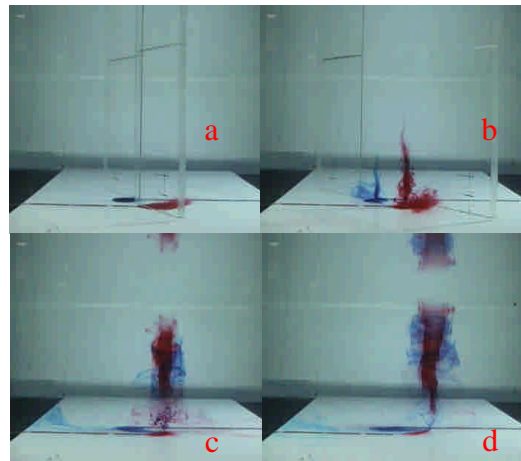


圖 4 不等強度渦漩之染料平鋪法側視圖

另外，合併後雷諾數較弱的渦漩被捲入於強度較大的渦漩，並不會像等強度渦漩一樣有互繞的情況產生。

由液面染料釋放法得知（圖 5），兩不等強度渦漩最後會合併在一起，強度較弱的渦漩逐漸被捲入另一渦漩中，合併過程兩者逐時變成橢圓，但形成一單一渦漩後，又以近似圓形形狀移動，可發現雷諾數較小之渦漩的紅色染料包圍著雷諾數較大之渦漩的綠色染料。

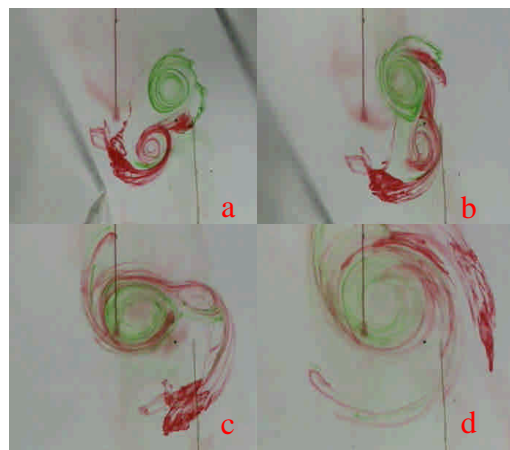


圖 5 不等強度渦漩合併之液面釋放法

5.3 渦漩合併之物理量探討

本實驗係成功地利用兩塊平板產生單一柱狀渦漩，來探討產討雙渦漩合併之機制；初步探討影響兩渦漩合併主要因素有二：一為雙渦漩產生位置，即平板初始位置，第二為雙渦漩系統之環流量，即平板速度，本研究擬探討改變渦漩環流量其合併

情形之不同。

文中所使用的平板速度主要為 1.8cm/s 及 2.4cm/s，圖 6 中當平板速度越快，則初始雷諾數將越大，兩者有個正比趨勢存在；

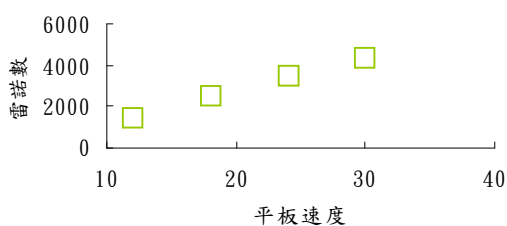


圖 6 平板速度與單一渦旋雷諾數之對應圖

另外，由 PIV 運算結果中，運用式(3)可得到兩渦旋從產生到合併後整體渦旋環流量之變化，當兩單一渦旋初始生成時，整個流場渦環量為個別兩單一渦旋之渦環量總和，且整體的環流量接近一定值。在合併過程中，無論是兩等強度渦旋之合併或不等強度渦旋之合併，整體環流量同樣沒太大的改變，等到渦旋合併後，其環流總量才逐漸減少；另外由式(4)得知，在邊界無窮遠處渦度梯度為零，將使得環流量不會改變，但由於實驗邊界並非無窮域，因此渦度梯度亦會逐漸變小，造成環流量逐漸變小。

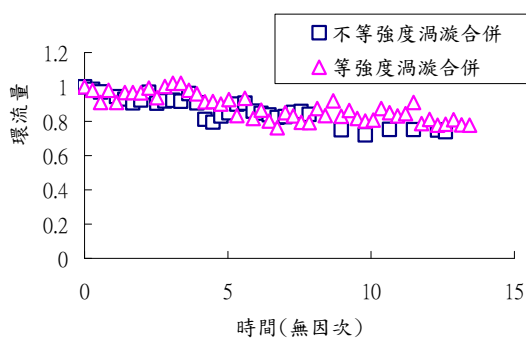


圖 7 等強度與不等強渦旋合併之環流量隨時間演變

同樣利用 PIV 運算結果，假設單位厚度為 1，由式(6)吾人可以計算出單一渦旋合併過程之渦旋變化(圖 8)，吾人發現當兩個逆時針旋轉之柱狀渦旋從產生到互繞運動之階段時，整體系統之渦旋值衰退極快，這表示兩個同向渦旋互繞之同時，將互相減弱其活動力，初步窺探其原因，乃由於兩個等向渦旋旋轉時，渦旋中心區域

流場為相反方向，亦即對應高渦度梯度區，因而導致渦旋急速衰減；等到兩個渦旋即將合併時，渦旋的變化即趨於緩和，此時渦旋改變量非常小；最終，等到雙渦旋完全合併後，總渦旋的變化呈現逐漸衰減的態勢。總的來說，無論是等強度渦旋或是不等強度渦旋而言，其渦旋的產生、互繞到合併之整個過程，渦旋的變化可以清楚的分成三個階段；另外，由式(7)吾人可以看出，當兩個渦旋互繞情形下，邊界雖為有限域，但同樣影響將非常小；反觀體積分項之渦度梯度改變不可忽略，原因乃是兩同向渦旋互繞時，其渦心間速度為相反方向，渦度梯度差對渦旋的影響遠大於邊界效應，致使整體渦旋值急速下降。同樣的，當兩個不等強度渦旋產生時，亦發現整體渦旋之渦旋量改變趨勢和等強度渦旋合併過程中的渦旋的改變趨勢相同，即表示渦心間流場趨於穩定狀態，唯一差別在於兩渦旋強度同時增強時，衰減情況將會越快速；兩強度較弱下，衰減情況較為緩慢。

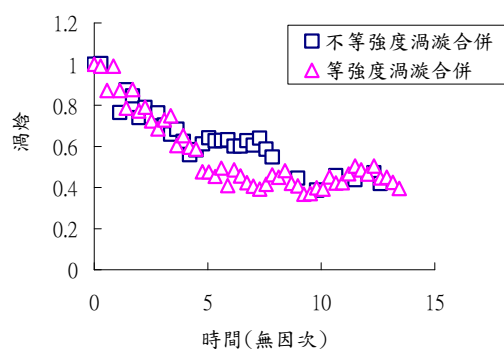


圖 8 等強度與不等強渦旋合併之渦旋隨時間演變

5.4 具科氏力影響之渦旋之垂直結構^[12]

關於本研究另一主題—眼牆結構—之研究，吾人則著重在旋轉水槽上正壓渦旋三維結構的了解；在過去的研究文獻中，針對旋轉水槽中渦旋的運動雖已有相當豐碩的研究成果，但多數學者皆忽略渦旋的三維結構之討論與釐清；此渦旋三維結構的了解，可以在學理上幫助吾人更清楚的刻劃颱風眼牆內垂直接動對颱風整體環流及

強度的影響。

關於在旋轉水槽上實驗設備的架設、渦漩的產生及量測等等均於吾人近年的國科會報告中已有詳細說明，在此因篇幅所限不擬多述，僅就本年度吾人所更進一步針對流場的三維結構所作探究之主要結果予以說明。

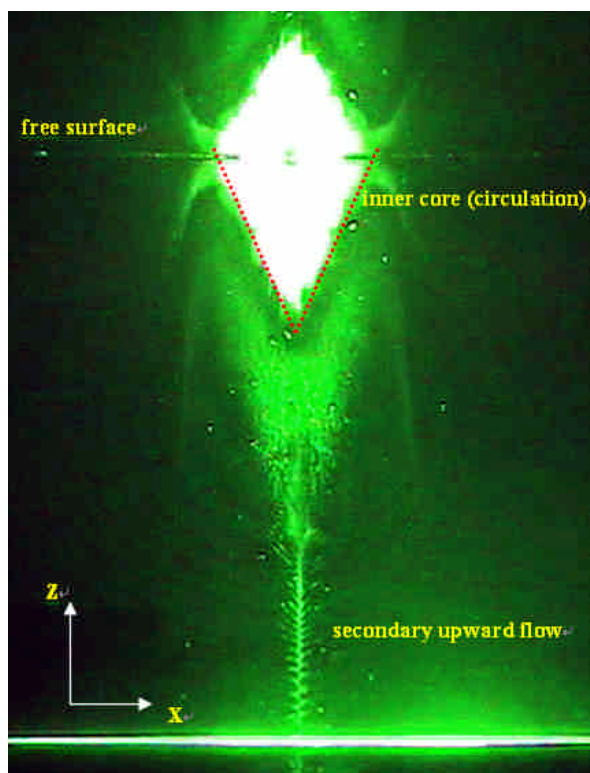


圖 9 旋轉水槽上正壓渦漩的垂直結構之顯影

圖 9 為旋轉水槽上吾人所產生正壓渦漩的垂直結構切頁流場顯影圖(螢光染料)。由於垂直切頁僅有 2mm 厚，故該圖中流場的主要環流方向幾近垂直穿過頁面，因此在此圖中所顯示的是該渦漩在垂直 z 方向的流動情形。由該圖顯示，除了主要流動的方向外(primary flow)，尚存在兩部分的運動：第一、位於渦心，由下而上螺旋狀攀升的二次流(secondary upward flow)；該部分的流動起因於渦漩主流其強力的帶動(方向為逆時針)底板邊界層的流動所致，並由於該邊界層流動的影響，進一步造成渦漩底部徑向壓力梯度的產生，更促使底部流動有螺旋狀向渦心聚集；且由於質量守恆之故，該流動被迫得以向上流動；二、位於渦漩中心水面底下之渦漩內核(vortex inner core)流動，該流動的形成亦

頗為複雜，主要是由於渦漩中心於水表面因梯度力平衡至終於渦心必有一向水面下的垂直接流動，此一流動在渦漩形成初期，原為伴隨渦漩產生可延伸至接近水槽底部，然而因上述渦心底部二次上升流的抵制，整個由上而下的流動必然因而返回水面，進而形成一錐狀的封閉的環流區。

上述渦漩三維結構的闡釋與之前於不具科氏力影響的渦漩結構皆屬於相當複雜的現象；對於後者而言，科氏力在整個結構中所扮演的角色為何仍需進一步的學理分析；或者說，對於一主要流動方向為水平的渦漩而言，位於渦心之垂直的流動對於整體流動而言雖說只佔很小的一部分，但在吾人所觀察的流場中，此部分的流動(二次上升流)顯然藉著與渦心下沉流動的交互作用達到影響渦漩強度的事實。可以預期的是：對於同樣有著垂直接流動的颱風眼牆內流動而言，相似的流動是否亦伴隨著類似的強度影響的機制呢？在此雖不宜過度臆測，卻不啻指出未來可以進一步努力的方向。

六、結語與討論

由以上實驗與 PIV 量測結果，結果整理成以下幾點：

1. 當兩逆時針方向旋轉之等強度渦漩柱合併成單一渦漩過程時，發現其合併情形是以逆時針方向彼此互繞，同樣由底部染料釋法與 PIV 皆可看出；相對的，當兩不等強度渦漩合併，則發現相對於雷諾數較小的渦漩將圍繞著雷諾數較大渦漩做逆時針方向運動，較強的渦漩幾乎會於原處做小幅度之逆時針旋轉。而當兩渦為順時針旋轉時，結果會相反。
2. 從液面上方釋放染料，發現等強度雙渦漩合併過程時，會有類似中國的八卦圖案形成，兩者彼此互繞最後達到穩定情況後，染料如抽絲般逐一散開。而不等強度渦漩合併時，初始情形為不等對稱之橢圓形，緊接著渦漩將逐時變成穩定之圓形。
3. 兩柱狀渦漩從產生到合併成單一渦漩之

過程，藉由 PIV 量測及渦漩動力學之分析發現，兩個渦漩整體的初始總環流量維持一穩定值，等到雙渦漩合併後，整體的環流量才逐漸減少。

4. 無論是等強度渦漩之合併與不等強度之渦漩合併，皆可看出整體渦焓下降趨勢可分為三個階段：一、首先兩個渦漩彼此削減其活動力，整體渦焓量快速衰減；二、當兩者即將合併時，渦焓量維持一穩定值；三、合併成單一渦漩後，渦焓量逐漸遞減。

七、計畫成果自評

本計畫為吾人系列探討研究之第一年計畫，本計畫針對雙渦漩之水工模擬（可應用至颱風軸對稱化動力及眼牆動力之基礎學理），主要達成目標有三：一、首先應用二維 PIV 流場量測技術於雙渦漩交互作用流場中；二、應用渦漩動力學分析方法，包括定義雙渦漩系統總環流量及總渦焓，並量測其逐時演變，求得雙渦漩（等強度及不等強度）之流場演變的物理特性；三、定義雙渦漩交互作用的三階段，包括互繞、合併中及合併後，並且具體求得其對應的流場特徵等。至於吾人所作關於旋轉水槽下單一渦漩的流場三維結構，藉由垂直切頁顯影的輔助，亦成功的描繪出相關的流動特徵，其基本的流場物理現象可進一步與颱風眼牆結構進行比較。

進一步研究，吾人將擴展上述雙渦漩水工實驗於旋轉環境（水槽）中，更深入的研究具背景渦度的渦漩交互作用的流場物理。

八、參考文獻

- [1] Kuo, H. C., Chen, G. T. J. & Lin, C. H., "A possible Mechanism for the Eye Rotation of typhoon Herb," *J. Atm. Sci.*, Vol.56, pp 1659-1673 (1999)
- [2] Lander, M.: The Merger of Two Tropical Cyclones. *Mon. Wea. Rev.*, 123, 2260-2265.(1995)
- [3] Dritschel, D. G. and Waugh, D. W.: Quantification of the inelastic

interaction of two asymmetric vortices in two-dimensional vortex dynamics. *Phys. Fluids. A*, 4, 1737-1744.(1992)

- [4] Lander, M. and Holland, G. J.,: On the interaction of tropical-cyclone-scale vortices. I: Observations. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 119, 1347-1361.(1993)
- [5] Waugh, D. W.,: The efficiency of symmetric vortex merger. *Phys. Fluids A*, 4, 1745-1758.(1992)
- [6] Fuentes, V. O. U.,: Chaotic advection by two interacting finite-area vortices. *Phys. Fluids*, 13, 901-912.(2001)
- [7] Melander, M. V., Zabusky, N. J. and McWilliams, J. C.,: Symmetric vortex merger in two dimensions: Causes and conditions. *J. Fluid Mech.*, 195, 303-340.(1988)
- [8] Winant, C. D. & Browand, F. K. "Vortex paring: the mechanism of turbulent mixing layer growth at moderate Reynolds number," *J Fluid Mech*, Vol.63, pp 237-255 (1974)
- [9] Griffiths, R. W. & Hopfinger, E. J. "Coalescing of geostrophic vortices," *J Fluid Mech*. Vol.178, pp 73-97 (1987)
- [10] Meunier, P. & Leweke, T. "Three dimensional instability during vortex merge," *Phys. Fluids*, Vol.13, pp 2747-2750 (2001)
- [11] 謝政達，"運用 PIV 與 PTV 量測技術於單一渦漩生成之研究"，國立台灣大學應用力學所碩士論文，2004 年。
- [12] 黃世霖，"運用粒子追跡法探討旋轉水槽中單一渦漩演變之流場結構"，國立臺灣大學應用力學所碩士論文，2003 年。