

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

子計畫四：侵台颱風流況之水工實驗與數值模擬(3/3)

計畫類別：整合型計畫

計畫編號：NSC91-2111-M-002-022-

執行期間：91 年 08 月 01 日至 92 年 10 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

報告類型：完整報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 93 年 4 月 14 日

「臺灣地區災變天氣整合研究群」
子計畫四：侵台颱風流況之水力實驗與數值模擬(3/3)

計畫編號：NSC 91-2111-M-002-022-

執行期限：91 年 8 月 1 日至 92 年 10 月 31 日

子計畫主持人：朱錦洲 國立台灣大學應用力學研究所

摘要

本年度計劃中，延續前期有關漩渦結構的研究，於本期計畫中進一步探討正壓渦旋的三維流場結構，特別是底部受 Ekman 層影響所引致的螺旋狀上升運動。實驗方法上，吾人以雷射光頁顯像法觀察流場定性演變之特徵，並以染料注入法來呈現流場三維立體的結構。在流場定量量測上，吾人則分別以高解析度之二維粒子追跡測速法(2D PTV)及二維流場粒子影像測速法(2D PIV)，完整的提供可靠之流場量測數據，其分析之結果可作為進一步了解流場中渦旋速度場及渦度場之演變。另一方面，吾人亦於本期研究中開始了旋轉及非旋轉環境下雙渦旋交互作用之研究，初步結果已觀察到非旋轉水槽中雙渦旋流場的互繞、黏性擴散、非線性合併等諸多複雜現象。駛流過地形之流場現象亦於旋轉水槽中獲得初步的成果。

1. 簡介

本文主要分成三個部分。第一部份係藉由吸入方式(sink method)產生單一渦旋，並比較先期研究中所採用之攪動法之渦旋流場，藉著應用 PTV 之定量量測技術，來分析單一渦旋的水平與垂直結構，並著重於探討渦心埃克曼抽升(Ekman pumping)的現象及成因，其對渦旋結構及軸對稱化動力的影響亦有不同。提供吾人對渦旋細部結構之深入了解，並可助於吾人在進一步探討渦旋軸對稱化動力時之實驗佐證。並利用對吸入法的瞭解，進一步產生雙渦或多渦等流場交互作用現象。第二部分為研究雙渦旋的合併，係在拖曳式水槽中以一具有適當位置的平板，配合同步的擺動以產生穩定之雙渦旋，並以 PIV 系統分析渦旋合併過程中存在許多複雜的流場結構的演變，包括互繞、拉伸與合併等流場型態。第三部分為單一渦旋、地形與駛流間交互作用。自然界中的颱風渦旋動向 80~90%是由駛流所決定，實驗上以

單純駛流過山所發生的現象做探討，期能找出影響流場的主要變因。

本實驗之流場顯影方法共包含兩種(1)染料注入法及(2)雷射光頁顯像法。藉由照相機及數位攝影機(DV)及電子耦合式數位攝影機(CCD)等攝影設備擷取連續之影像，以利於捕捉渦旋的運動行為及以 PTV 及 PIV 系統分析渦旋速度場及渦度場之變化。

文獻上對於單一渦旋的研究頗多，但對於探討渦心處的 Ekman pumping 現象雖略有觸及但多半為理論研究，對於該現象的實驗觀察則甚少著墨。在 Andersan 等人的研究中(Andersan et al. 2003)中詳述了利用一類似 Von Karman 和 Pohlhausen 的平均方法，解決渦旋在受 Laminar Ekman Layer 影響下，根據統御方程式，計算上升湧流對渦心的影響的解析解，但文中缺少直接的實驗佐證。藉由 PIV 及 PTV 等技術我們得以探討渦心處複雜的流體現象。而在渦旋的垂直結構上，發現有著明顯的上升運動，並以 PTV 方法定量的量測到渦旋水平及垂直速度分布，並進一步探討單一渦旋的演變及渦心處的 Ekman pumping，此現象對於單一渦旋的 spin down 效應及軸對稱化動力皆扮演舉足輕重的腳色，值得吾人更進一步的深入探討。

對於雙渦旋的水工實驗，無論是具背景或不具背景渦度下，雙渦旋的產生一直是學術上高度的挑戰。針對(Dritshel and Waugh 1992)所進行不同結構渦旋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的渦旋交互作用的型態：一、彈性互繞(elastic interactions, EI)，二、部分拉伸(partial straining-out, PSO)，三、完全拉伸(complete straining-out, CSO)，四、部分合併(partial merger, PM)，五、完全合併(complete merger, CM)等。實驗上吾人以拖曳式水槽成功的創造出穩定的雙渦旋合併，並利用 PIV 量測得到一系列成功的數據作為上述數值實驗的驗證。

2. PTV 與 PIV

PTV 方法係根據 Capart 等人(2000, 2002)所發展,並應用影像處理加以修改而得。該方法原以粒子軌跡速度量測(particle tracking velocimetry, PTV)之觀點針對顆粒流(granular flow)加以量測,並以 Voronoi 影像方法辨識出每一個顆粒的位置(圖 1b)及前後影像中顆粒彼此的相關性,判斷出顆粒正確的位移向量,進一步以顆粒的流動來代表整個流場的運動狀況(圖 1c),且以全域的量測計算出流場內任一位置點的速度。(圖 1a)為單一渦漩局部之原始影像

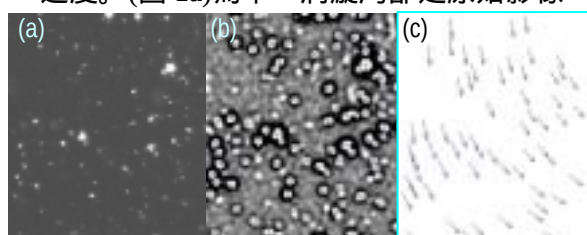


圖 1 PTV 方法

在雙渦漩的實驗上係利用三維立體粒子影像測速儀(3-D Stereoscopic Particle Image Velocimetry, PIV),以全域的量測計算出流場內任一位置點的速度。所謂 PIV 系統主要包括四個小部分,分別為照明設備(YAG Lasers)、影像擷取設備(CCD camera)、運算控制處理器(FlowMap processor),及分析軟體(FlowManager)。配合雷射及 CCD,成功的擷取出短暫曝光時間內的兩張連續影像,並以 FlowMap 處理器以即時運算顯示向量結果及 FlowManager 軟體做後續分析處理。圖 2 為 PIV 系統基礎架構原理。

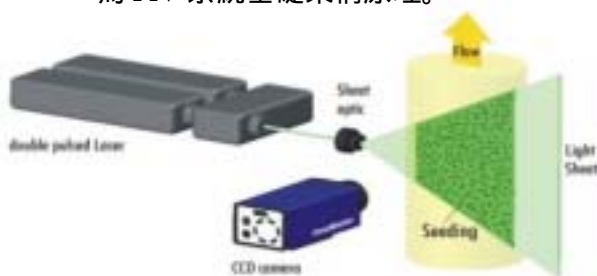


圖 2 Basic system of PIV

3. 結果與討論

3.1 單一渦漩的演變

在 f -plane 下以吸入方式產生渦漩會往水槽中心移動,而在 β -plane 下,渦漩會往西北方向移動。對於單一渦漩產生後,不僅有著旋轉(rotation)的運動,且伴隨著渦心移動(translation)的運動,此現象

造成在速度分布上產生不對稱的結果,但若將渦心移動的效應減去,則可以看出單一渦漩有著軸對稱化的速度分布。

由於渦漩產生方法的不同(攪拌、吸入),使得在產生單一渦漩時的結構也不一樣,圖 3 為比較吸入法與攪拌法所造成的渦漩性質的不同。

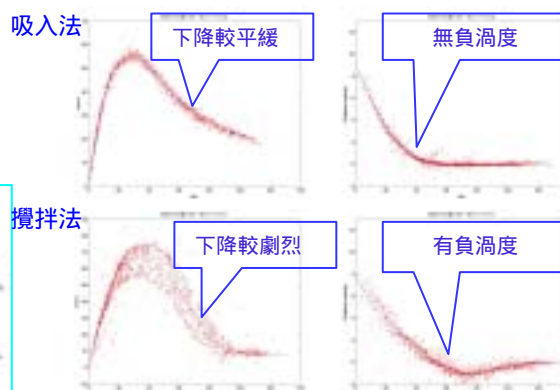


圖 3 渦漩產生方法之比較

圖 4 表示單一渦漩隨時間的發展下,渦漩的無因次徑向速度分布演變情形,其中在不同產生條件,相對應渦漩的發展下,無因次速度分布及無因次渦度演變的情形,渦漩初時距離渦心 2 至 3 公分 R_{max} 處皆出現最大 V_{max} 值,等待一段時間後, R_{max} 會些許增大,而 V_{max} 值卻有明顯的遞減 $a) > b) > c) > d) > e) > f)$ 。在近渦心處 $\tilde{R} < 0.2$ 以內,速度變化太大,導致相對應的渦度也呈現些鋸齒狀不穩定現象,而 $\tilde{R} \geq 0.2$ 後則渦度接近於零。而受到底部 Ekman layer 的影響下,整個渦的速度逐漸的被消滅(spin down),而以渦心附近消滅效果最明顯。

實驗上在 f -plane 下產生之渦漩,經過長時間發展後仍然維持良好的圓形正旋結構(圖 5)。

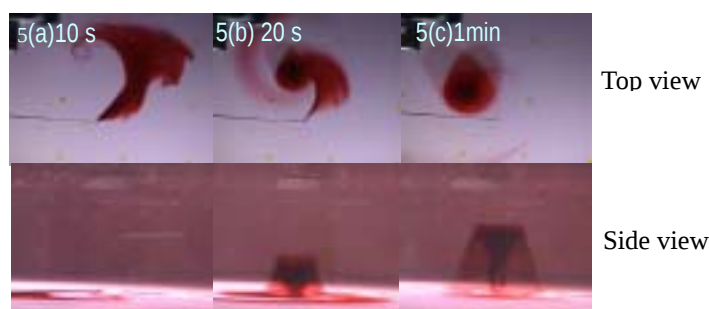


圖 5 單一渦漩的發展

然而在近渦心處所施放之染料,染料

一施放即被底層上升運動牽帶而升起可觀察出(圖 6), 近水面處會形成漏斗狀之流場交界現象, 且在渦心中段處之染料會呈現忽上忽下之不穩定現象, 此外渦心處並有著扭曲現象。染料受渦旋底層力量上升, 至渦旋中上段後逐漸感受到近水面處下沉的力量, 使得染料在此處呈現不穩定, 此現象於文獻中並未被提及, 對於渦心處內流現象與底部 Ekman pumping 效應勢必對整體渦旋運動行為造成不可或缺的影響, 而對於渦旋動力學這方面領域也值得做更深入之探究。

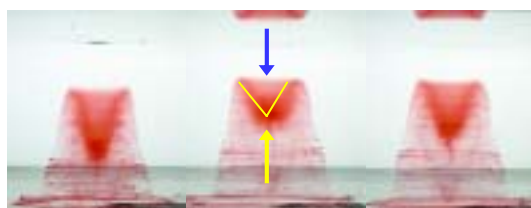


圖6

進一步觀察渦旋的垂直結構上, 利用雷射光垂直切頁時, 當顆粒有垂直穿越雷射切頁的運動時, 會呈現如星星般一閃一閃的現象, 而當顆粒有沿著切頁的運動時, 則會拖著明亮的軌跡。

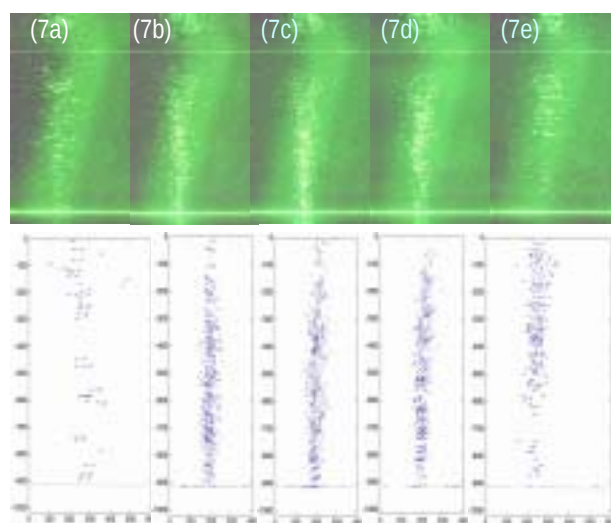


圖 7 渦旋的垂直結構

(圖 7c)為進入渦心範圍時, 渦心恰在切頁上, 此時的渦心上層呈現漏斗狀中空現象, 於渦心兩側則有較多的顆粒聚集, 渦心中空較暗地帶顯示此處的顆粒運動不顯著或是靜止不動, 且水平流動幾乎為零, 取而代之的則是明顯的上升運動。經由 PTV 定量分析則得到上升速度約為 1cm/s, 而速度則成拋物狀分布。

上升運動的現象並不如預期容易量

測, 藉由染料施放的觀察來, 我們可以大概看出渦旋三維立體的結構。流體在底部底板附近受艾克曼層(Ekman layer)的影響不是地轉運動, 而是穿越等壓線的 Ekman 流動(旋轉水槽實驗條件下的 Ekman layer 厚度約為 1.9 公分)。柱狀渦旋在速度場與壓力場保持平衡下, 在自由液面會產生軸對稱的凹陷現象, 此凹陷之液面為等壓面, 此結果造成在平坦的底部有著呈同心圓狀的壓力分佈, 中心壓力較低(渦心處), 而周圍壓力較高(渦心外環流), 因為受 Ekman 流的影響, 底層流體往渦心處幅合, 在近渦心的位置產生明顯的上升流動將染料帶起, 使得流體呈現螺旋狀上升, 形成螺紋般的染料線, 而由螺距大小可大略推估上升流動的速度大小約為 1cm/s。因受重力影響使得上升運動變慢或停止, 或因黏滯力的影響下, 使得渦旋逐漸漩慢 (spin down), 同時 η_v 縮小, Ekman 流所造成的上升運動因而變小, 最終染料並無法上升至水面。在整個過程中, 染料因擴散作用而逐漸擴大。

3.2 雙渦旋的合併

圖 7 為不具旋轉效應之雙渦旋合併現象。圖中為 PIV 的實驗結果, 時序為由左上至右下。明顯可看出雙渦互繞、吸引及合併等現象。

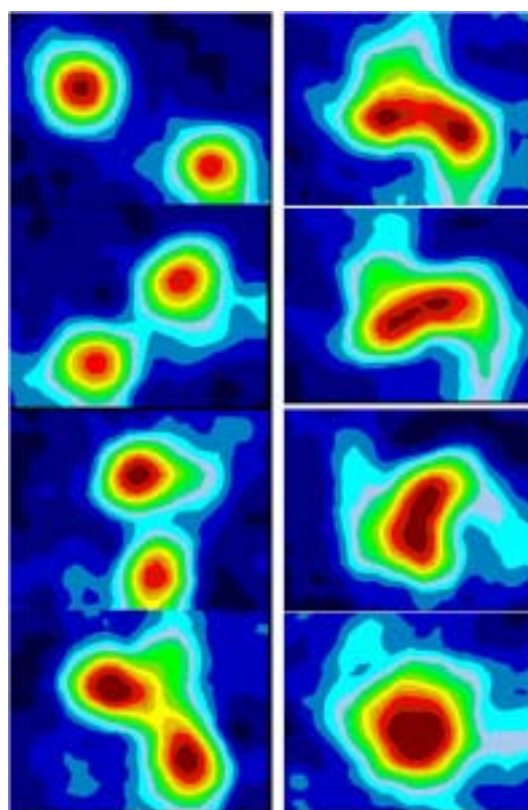


圖 8 雙渦旋合併

3.3 駛流過地形之流場現象

吾人於二種不同的水槽旋轉速度，分別在 β 平面和 f 平面進行實驗，並藉由改變拖拉模型的速度，來獲得不同流速下，駛流過地形所發生的現象，並與文獻作一對照，以驗證吾人所採行的拖拉模型也可獲得同樣的流場效果。利用染料注入法來觀察實驗中不同的流場現象，以二種不同水槽旋轉速度參數，其轉速為 0.785 ($1/\text{秒}$, $f = 1.57$) 和 0.3925 ($1/\text{秒}$, $f = 0.785$)，故埃克曼層厚度分別為 4.5mm 和 6.3mm (室溫 25°C)。此實驗項目的模型是由左拖向右 (模型往東行)，所以模型所感受的駛流為向左的駛流 (向西駛流)。

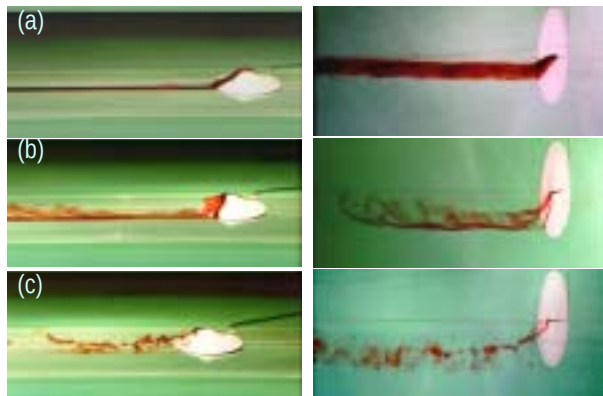


圖9 在 f -平面之下，駛流速度分別為 1cm/s (a)、 3cm/s (b)、 6cm/s (c)。

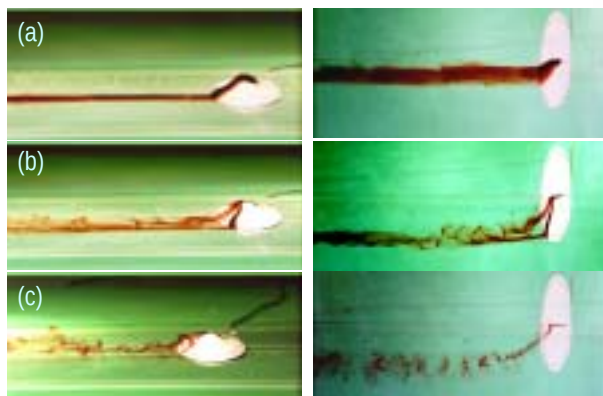


圖10 在 β -平面之下，駛流速度分別為 1cm/s (a)、 3cm/s (b)、 6cm/s (c)。

當有旋轉效應時，無論是轉快 (一圈 8 秒)、轉慢 (一圈 16 秒)，駛流速度快或慢，吾人皆可由俯視圖中清楚的看到染料在埃克曼層中往左 (往下游看) 偏斜的現象。駛流速度愈大，其染料偏斜距離模型中段愈遠；且其偏斜的角度 (與山脊所夾之角) 愈小。

駛流速度為 6 及 3 (cm/s) 時，由側視圖觀之，流場有流離 (separation) 現象發生，而駛流速度為 1 (cm/s) 時，並無流離發生。而有流離發生時，由側視圖觀之，在旋轉平面下，其流離的高度約為模型山高的一半；而在非旋轉平面下，其流離的高度約等同山高。此符合 Richards 等人 (1992) 之論述，即旋轉效應會抑制流離的發生。

3.4 單一渦漩、駛流與地形交互作用

在 β -平面下，吾人採用相同強度的單一渦漩，但不同的駛流速度，及不同的渦漩撞地形位置來進行實驗，期能找出在加入駛流此項條件之後，對單一渦漩所走路徑的影響。圖 11 為渦漩過山軌跡，圖上每一虛線方格實際為 5 公分，圖的上方為北方，渦漩在旋轉平臺右下角 (東南方) 產生，因 β -效應而會自行往左上角 (西北方) 移動。實驗模型由旋轉平臺靠左側向右拉動 (由西向東)，因而產生相對模型向西流動的駛流。

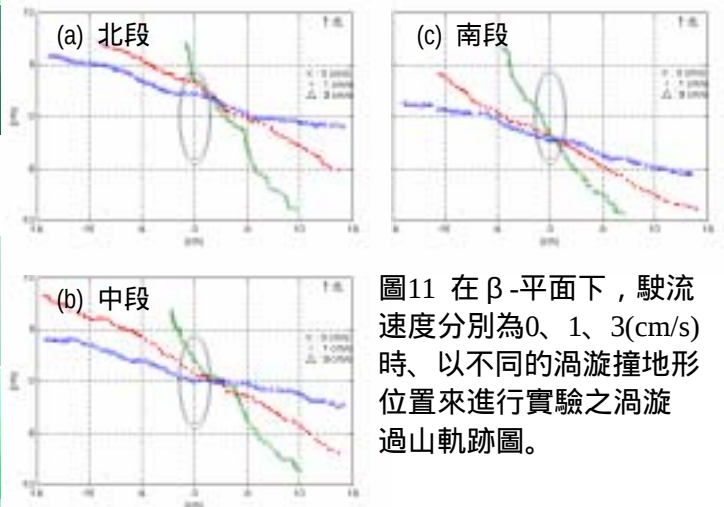


圖11 在 β -平面下，駛流速度分別為 0 、 1 、 3 (cm/s) 時、以不同的渦漩撞地形位置來進行實驗之渦漩過山軌跡圖。

所有的渦漩皆是由東南往西北方移動，故此水工實驗符合不對稱位渦分布 (β -Gyres) 理論。渦漩分別與模型交會在南側與中段。在迎風面時，渦漩路徑會稍稍往南偏移；而後到達背風面時，渦漩路徑會稍微往北偏移，此路徑南北偏移的現象，為地形局部 β -效應所引起。當無駛流時，渦漩的軌跡最偏北 (最陡峭)；而駛流流速愈快，渦漩的行進軌跡會愈趨於平緩。因此，駛流對於渦漩所走路徑有一定程度的影響，當駛流愈強，渦漩路徑也就更容易被駛流往偏西的方向牽引帶動。

4. 結論

(一) 渦漩性質方面比較：

因為受 Ekman 流的影響，底層流體往渦心處幅合，在近渦心的位置產生明顯的上升流動將染料旋轉帶起，使得流體呈現螺旋狀上升 Ekman Pumping。此現象於近渦心最明顯，在渦心以外皆無任何上升運動現象(圖 5)。

近渦心處施放之染料，受渦漩底層力量上升，至渦漩中上段後逐漸感受到近水面處下沉的力量，使得染料在此處呈現忽上忽下，且在此兩力量作用下形成似漏斗狀情形(圖 6)。

以 sink 方式產生渦漩，於渦心處有中空漏斗形狀，此現象在以攪拌方式所產生的渦漩上並未發現，未來將針對渦漩於渦心處的行為作深入探討，並期望找出 Ekman pumping 與渦漩演變的關係。因為渦漩流場本身就具有三維性，將來若是能由現有 2D-PTV 發展成 3D-PTV 的話，就可更清楚的看出整個渦心 Ekman pumping 扭曲旋轉現象。

(二) 駛流之影響：

本水工實驗產生流離現象之臨界羅士培數約為 0.5 左右。當流離發生時，側面觀之，在旋轉平面下，其流離的高度約為模型山高的一半；而在非旋轉平面下，其流離的高度約等同山高。旋轉效應會抑制流離的發生。且模型的斜率愈大，發生流離的機會愈高。

駛流(西向流)愈強，渦漩行進路徑愈受駛流牽引帶動而愈偏西(平緩)。渦漩脫離模型後，其行進方向仍主受背景渦度及駛流所影響，故其行進方向相當雷同。目前無人繼續發展含駛流效應之修正淺水模式之計算，並將與實驗比較。

對於以吸入法產生穩定單一渦漩，及成功的在無旋轉環境下產生雙渦的技巧後，將以吸入法更廣泛的應用於雙渦或多渦的產生與合併過程，並利用 PIV 系統對此現象做深入的透視分析結果，以期解決現今雙颱風議題上的種種疑問。

5. 致謝

本研究承蒙國科會之經費補助(編號 NSC 91-2119-M-002-022)，特此致謝。

參考文獻

Andersen, A., Lautrup, B., and Bohr, T.,

“An average method for nonlinear laminar Ekman layers”, *J. Fluid Mech.* 487, 81-90. 2003.

Carnevale, G. F., Kloosterziel, R. C., and van Heijst, G. J. F., “Propagation of barotropic vortices over topography in a rotating tank”, *J. Fluid Mech.* 233, 119-139. 1991.

Capart, H., Young, D. L., Zech, Y., “Voronoi imaging methods for the measurement of granular flows”, *Experiments in Fluids* 32(1), 121-135. 2002.

Chen, H. C., Chu, C. C. and Chang, C. C., “Transient Wake Formation by Mountains of a Barotropic Cyclone on a Beta-plane”, *10th Conference on Mountain Meteorology and MAP Meeting*. Park City, UT, USA, June 17-21, 2002.

Chen, H. C., Chu, C. C. and Chang, C. C., “A Laboratory Experiment and Numerical Simulation of Barotropic Vortices over Topography: A Topographic β -Drift Law”, submitted to the *Journal of Atmospheric Sciences*, 2002.

Chu, C. C., Chen, H. C. and Chang, C. C., “A Validation Study of a Modified Shallow Water Model for the Cyclonic Motions and Their Structures in a Rotating Tank: Laboratory Experiment and Numerical Simulation”, accept for publication, *Phys. Fluids*. 2002.

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.

Pedlosky, J., *Geophysical Fluid Dynamics*, 2nd ed. (Springer-Verlag, New York, 1987).

張瑞閔 “單一渦漩、地形與駛流間交互作用之實驗研究”，國立臺灣大學應用力學所碩士論文 2002。

黃世霖 “運用粒子追跡法探討旋轉水槽中單一渦漩演變支流場結構”，國立臺灣大學應用力學所碩士論文 2003。