

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

颱風軸對稱化動力、眼牆結構及環境熱效應之水工實驗 (II) 研究成果報告(精簡版)

計畫類別：個別型
計畫編號：NSC 95-2111-M-002-013-
執行期間：95年08月01日至96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
共同主持人：張建成
計畫參與人員：博士班研究生-兼任助理：黃世霖
碩士班研究生-兼任助理：林怡君、黃舒豐

處理方式：本計畫可公開查詢

中華民國 97年02月29日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

專題研究計畫：

颱風軸對稱化動力、眼牆結構及環境熱效應之水工實驗(II)

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 95-2111-M-002-013

執行期間：2006年8月1日至2007年10月31日

計畫主持人：朱錦洲

共同主持人：張建成

參與人員：黃世霖、林怡君、黃舒豐

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 98 年 1 月 31 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

專題研究計畫：

颱風軸對稱化動力、眼牆結構及環境熱效應之水工實驗(II)

**Laboratory simulations on the axisymmetrization dynamics
eyewall structure and thermal effect of typhoons**

計畫編號：NSC 95-2111-M-002-013

執行期限：2006年8月1日至2007年10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：黃世霖、林怡君、黃舒豐

一、中文摘要

本文以水工實驗模擬渦旋具背景渦度且存在溫度效應影響下的行為表現，利用旋轉水槽底部架設具有溫度效應的斜板模擬緯度效應及溫度來源，使渦旋通過此區域，分別以染料施放、雷射光切頁顯影，及液晶顯像技術(PIV/T)等方法，給予適當的定性觀察並定量量測其速度及溫度場。實驗結果顯示，溫度效應對於渦旋路徑影響為冷渦旋較常溫渦旋偏北，而熱渦旋較常溫渦旋偏南。再者，文中亦比較渦旋進入溫度效應區前、中、後三區域的速度溫度場，以觀察分析溫度效應對於渦旋垂直方向流場之影響。

關鍵詞：科氏效應、斜壓渦旋、液晶感溫粒子、粒子影像測速測溫法

Abstract

The objective of this thesis is to investigate the phenomenon of vortex under thermal effect and background vorticity, especially. The linearly slanting plane was used to simulate the change of latitude and to be the source of heat. In order to visualize the formation of vortices, a dye-injection, a laser light-sheet, and a PIV/T technique are necessary for qualitative observation and quantitative analysis properly. It is shown that a colder vortex moves to the north of the room-temperature vortex; however, a hotter one moves to the south under the temperature

effect. Furthermore, the three stage of vortex, before passing the hot/cold area; in the hot/cold area; and after passing the hot/cold area were compared so that the effect of the vertical flow field of the vortex can be well investigated.

Keywords: Coriolis effect, Baroclonic vortex, Thermochromic Liquid Crystal (TLC), Particle Image Velocimetry/Thermometry (PIV/T)

二、研究背景與目的

台灣地理位置位處西南太平洋島嶼，四週有大洋環繞，屬於亞熱帶型氣候，氣流活動相當旺盛的區域，每到夏秋之季，強勁颱風所夾帶的豐沛雨量及強勁風勢，常造成土石流的發生，嚴重威脅本地居民生命安全及財物的損失。因此，對於颱風與海洋之間關係，颱風強度如何遭受海洋之牽拌，進而預測其路徑及行為，以減少損傷的程度，實為近年來各界皆所關心的議題。文獻中，Lin等人以2000年侵襲台灣的凱達(Kai-Tak)及碧麗絲(Bilis)兩颱風為例，觀察大氣與海洋間之交互作用。研究顯示：颱風通過後，其海洋表面溫度(Sea Surface Temperature, SST)會下降，幅度較鄰近熱帶海洋之SST低約 6°C ，闡明由於颱風的驅動，使得深海冷水上湧，造成垂直的混合作用；另外，發現海洋表面溫度與風速間有一明顯正相關關係，如圖1所示。

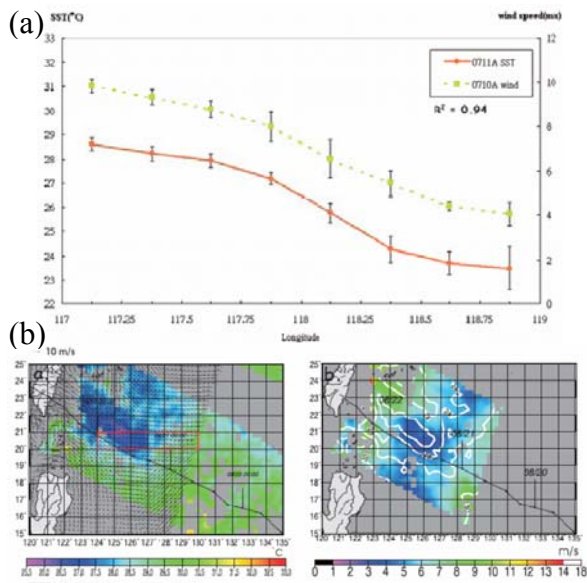


圖1 a)以凱達颱風提出海面溫度與海表面風速的相關性；b)由衛星資料觀察得海洋表面溫度與海表面風速之間的關聯(Lin, 2003)。

而碧麗絲颱風之相關係數為0.82，推測兩者間關聯是由於颱風引入的氣流通過較低溫海面所造成，使其邊界層穩定、垂直混和被抑制、垂直風剪應力增加，表面風速因而降低。Srifer & Huber 以實際颱風資料為基礎，計算模擬出熱帶氣旋在熱帶地區海洋表面之冷卻及垂直混合上扮演極重要的角色，假設熱量的混合是由極地的熱傳遞所平衡，那麼約15%的垂直混合是由熱帶氣旋所造成，另外，說明垂直混合的強度與海洋表面溫度相關度極高，提出熱帶氣旋與造成地球氣候及暖化之因素密切相關。此部分研究將專注於下列議題：

(1)單一渦旋通過溫度效應區相關現象之水工實驗—

以吸入法產生渦旋來進行水工實驗，該法優點為強度大小可控制、範圍大、容易產生及不易干擾流場等，而所產生的渦旋由 β 效應作用下通過一溫度效應區(冷卻或加熱)，以觀察渦旋結構的改變以及對於渦旋路徑的影響等。其中，吾人所施加之熱效應的強度及速率均需進一步考查真實大氣中相對應的條件，由適當動力、熱力相似條件，選取合適的實驗條件。

(2)熱效應於水工渦旋產生的應用—

此部分研究為進一步延伸前期相關的渦旋產生法的研究，藉由加熱或冷卻，旋轉流體不僅受科氏力的影響，更進一步需考慮熱對流與熱傳導的現象，而所產生的渦旋也由原先的正壓(barotropic)渦旋改變為斜壓(baroclinic)渦旋，進而掌握更多接近於真實颱風渦旋演變的特性。

三、研究方法

針對本實驗產生渦旋結構實驗之架構，使用粒子影像測溫法(Particle Image Thermometry, PIT)以量測二維剖面的溫度分布，且配合吾人現有的流場二維及三維速度量測(PIV及PTV)。

3.1 實驗水槽

本實驗的工作環境是(尺寸 $0.8\text{ m} \times 0.8\text{ m} \times 0.5\text{ m}$)之透明壓克力水槽中進行，其中，工作流體為水，工作溫度為室內常溫。由於實驗需求是要在具有背景渦度(Background vorticity)下的旋轉運動，須考慮科氏效應影響，故將水槽置於旋轉平臺上，藉由馬達帶動主軸旋轉使水槽跟著轉動，進而達到所需求的條件。為考慮 f 或 β 效應，將底部放置一線性平板，藉由將一端固定讓另一端可自由的調整高度來模擬出地球上緯度效應的影響。

3.2 渦旋產生法—吸入法(Suction method)

配合虹吸設備，可維持虹吸管的連續性，也利於計算汲水的量。整個裝置系利用吸取流體時，因為流體連續性，使得周圍的流體立即被吸入而帶動更外圍得流體，若背景旋轉為順時針，受到正的科氏效應下，連續汲取一段時間後，即形成一穩定的正渦旋；反之亦然。實驗時，可適當改變虹吸的量，以產生不同強度之渦旋。

3.3 流場顯影技術

(1)染料注入法：

適當施放染料，使染料融入渦旋的結構中，呈現出渦旋流場之徑線(Pathline)變化。此法除了可觀察流場的初步發展、渦旋中心及其附近的結構外，並可藉此觀察渦旋的三維性。再者，可使用螢光染料搭配上雷射切頁，以觀察渦旋的二維性。

(2) 雷射光頁顯影法：

雷射光頁之顯影方式是在工作流體中置入適量追蹤粒子(Seeding particle, PSP 50)，其密度與水接近故會懸浮於流場中，使粒子均勻的懸浮於整個流場，並將懸浮的粒子視為流體質點 (Fluid particles)，藉由影像擷取系統便可將觀察到的流場影像拍攝下來，再經由分析得出渦旋的速度場及渦度分佈值。

(3) 液晶顯像技術(PIV/T)：

液晶顯像技術 (Particle Image Velocimetry/Thermometry, PIV/T)是先將具有隨溫度變化而反射不同顏色波長之液晶感溫粒子(Thermochromic Liquid Crystal, TLC)做校準率定(Calibration)動作，亦即找出相對應之粒子反射波長顏色及其溫度值，以建立色調-溫度關係曲線(Hue-temperature curve)，如圖 2 所示。將液晶感溫粒子均勻灑於流場中，藉由其可懸浮於水中之特性作為流場追蹤粒子，以可見光連續全波段之白光為光源，3CCD 及影像擷取系統擷取瞬間流場影像，校準率定及實驗中皆固定白光光頁與 3CCD 之角度，PIT 架設如圖 3 所示。並結合影像處理技術，利用色調-溫度曲線將影像中顏色轉換為對應之溫度值，量測其二維溫度分布及相關熱力學參數。另外，也可對其影像做分析，以獲得相關速度及渦度場。

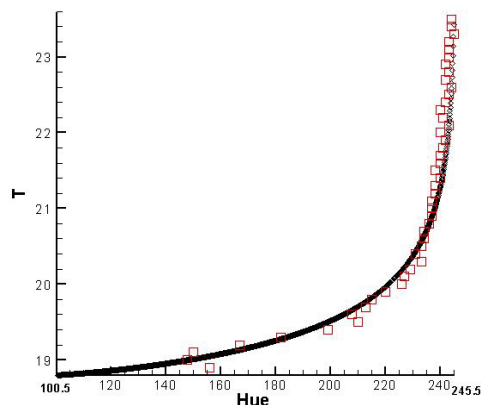


圖 2 實驗中所用之液晶感溫粒子，其色調與溫度關係之校準曲線

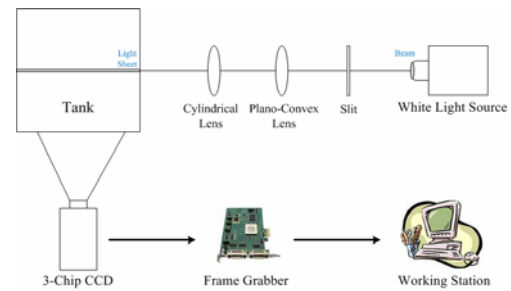


圖 3 PIT 實驗設備示意圖

四、結果與討論

本實驗以水工實驗模擬渦旋通過加熱或冷卻區域現象，觀察其在溫度影響下路徑與強度之變化，以下就染料施放法定性觀察渦旋路徑變化；雷射水平切頁顯影法觀察渦旋路徑及強度變化；以粒子影像追蹤法(PTV)分析其結果；及液晶顯像技術觀察垂直面的溫度速度場。在此定義溫度效應區溫度高於水溫者為熱渦旋，溫度效應區溫度等於水溫者為常溫渦旋，溫度效應區溫度低於水溫者為冷渦旋。

4.1 渦旋行進路徑

在不同初始溫度下，藉由渦旋在 β 平面上路徑的不同，比較溫度效應對渦旋運動路徑之影響。為使渦旋路徑變化明顯，將實驗條件之水深降低為 5 公分，使溫度效應的影響更為強烈。冷渦旋之實驗溫度條件水溫為 23.7°C ，斜板溫度冷卻至 18.5°C ；常溫渦旋水溫為 20.2°C ；冷渦旋水溫為 14.7°C ，斜板溫度加熱至 20.2°C ，利用雷射切頁顯影法做觀察；實驗結果如圖 4 所示，以間距 1 s 取渦心之連線，得冷渦旋通過溫度效應區後之路徑較常溫渦旋稍偏北，而常溫渦旋通過溫度效應區後之路徑又較熱渦旋明顯偏北。

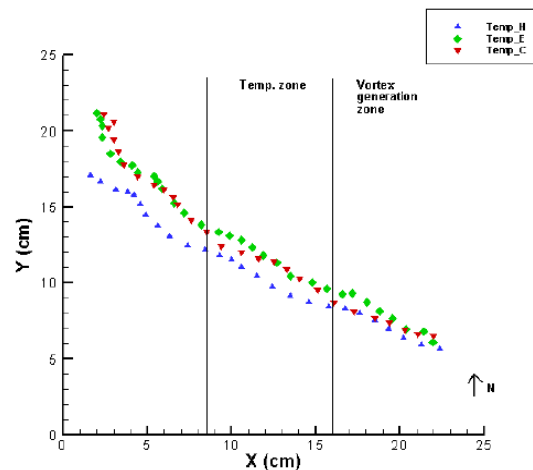


圖4 冷熱渦旋路徑之比較，其中藍線為熱渦旋；綠線為常溫渦旋；紅線為冷渦旋，而兩黑直線間為溫度效應區域

4.2 斜壓渦旋強度探討—水平速度場

以雷射水平切頁顯影法將斜壓渦旋在熱效應、常溫、冷效應下分別做觀察量測，其中，於熱效應中底板溫度控制為26°C，常溫效應即為實驗當時水溫，而冷效應之底板溫度為20°C。以CCD擷取每秒30張影像，利用粒子影像追跡法(Particle Tracking Velocimetry, PTV)，計算渦旋之渦度(Vorticity)及環流量(Circulation)。如圖5所示，環流量可解釋渦旋之強度，f平面上熱渦旋強度最強，次之為常溫渦旋，冷渦旋最弱，此與預想情況相同。

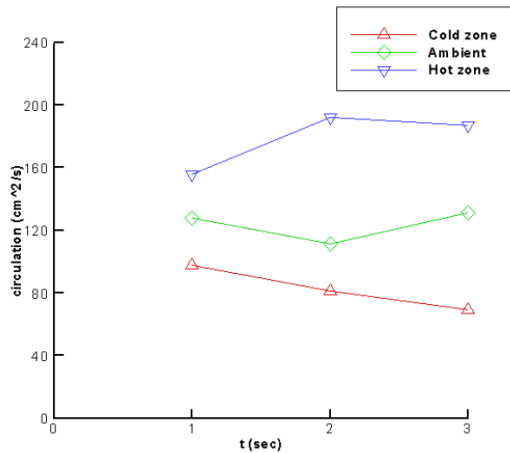


圖5 深水中f效應下渦旋之環流量

由圖6所示，β平面上渦旋之環流量皆隨時間增加而減少，熱渦旋強度最強，冷渦旋次之，常溫渦旋最弱；但對於溫度效應影響渦旋之增益則無法明顯觀察出，推測可能是由於溫度效應造成流體的對流而散失，使其表現不明顯。

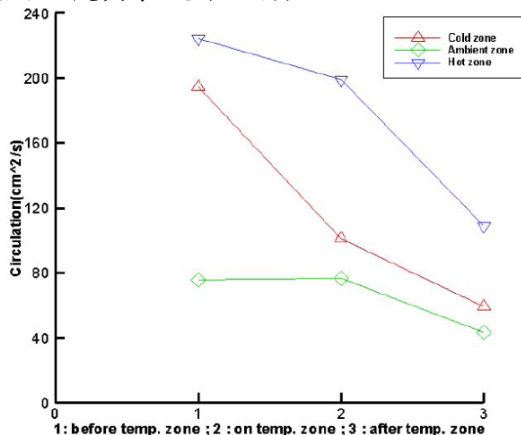


圖6 淺水中β效應下渦旋之環流量

4.3 應用液晶感溫粒子於斜壓渦旋流場—垂直速度及溫度場

本實驗以液晶顯像技術為基礎，量測全域流場的速度及溫度場。實驗分為f平面及β平面進行，f平面實驗即為渦旋產生時於溫度效應區上之現象，實驗溫度條件冷渦旋水溫為24.5°C，斜板溫度冷卻至20.0°C；常溫渦旋水溫為24.5°C；熱渦旋水溫為24.5°C，斜板溫度加熱至26°C；而β平面實驗由於在視角、光源、及渦旋運動軌跡的限制下，無法在同一平面量測其運動行為，因此分為三個區域進行觀察，以溫度效應區為分野，分為前、中、後三段，渦旋於前段產生，移動至溫度效應區上時為中段，再移動出溫度效應區後時為後段，實驗溫度條件冷渦旋水溫為24.5°C，斜板溫度冷卻至20.0°C；常溫渦旋水溫為24.5°C；熱渦旋水溫為24.5°C，斜板溫度加熱至26°C。渦旋於f平面表現如圖7—10所示，起初由於冷效應影響使得冷邊界層(紅色帶狀)存在於底部，渦旋開始產生後，速度明顯上升，渦度場以虹吸管為界，存在一正渦度(左)及一負渦度(右)，底部冷水即被強制抽取上來，形成一紅色高帽狀，由外而內為高溫到低溫，內部為冷結構，中央管狀亮點係為渦核，具有較強之上升速度，隨時間增加此一正渦度及一負渦度強度相對減少，渦旋強度漸弱，其內冷水範圍漸減，且渦度趨近於零，外流場隨即向渦旋方向移動，於圖10速度場中有一明顯向左速度。渦旋於β平面分為前、中、後三區域觀察，前段行為如圖11及12所示。

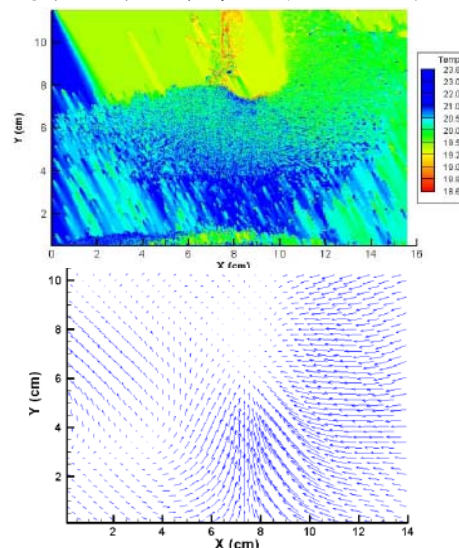


圖7 f效應下渦旋之溫度及速度場(t = 1)

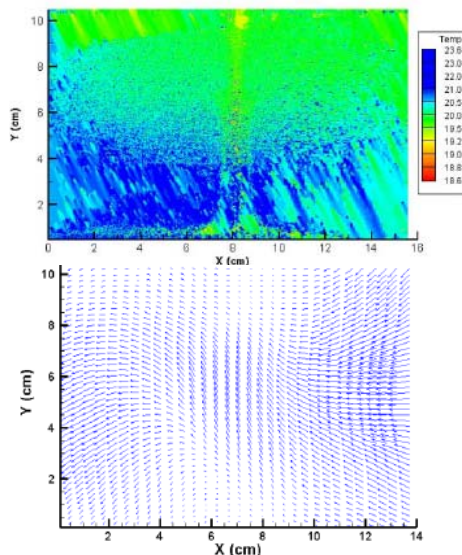


圖 8 f 效應下渦旋之溫度及速度場(t = 16)

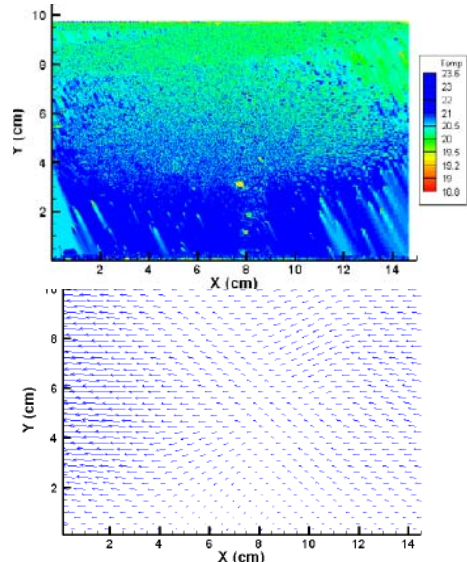


圖 11 f 效應下渦旋於溫度效應區前之溫度及速度場(t = 1)

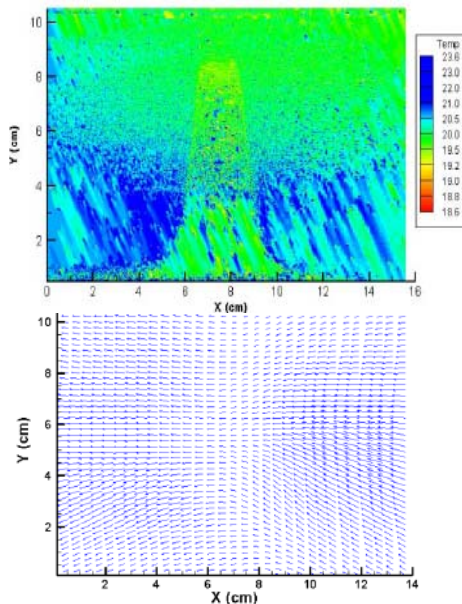


圖 9 f 效應下渦旋之溫度及速度場(t = 26)

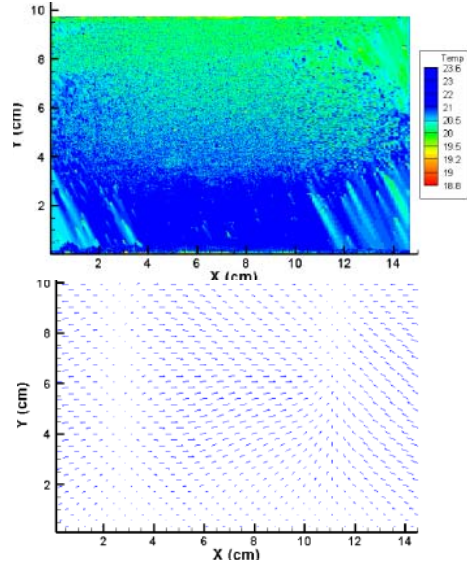


圖 12 f 效應渦旋於溫度效應區前之溫度及速度場(t = 4)

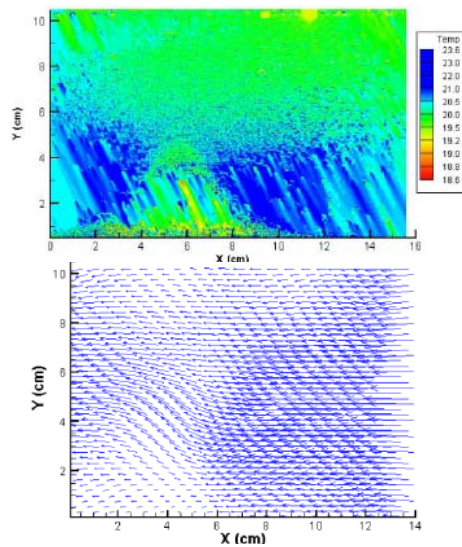
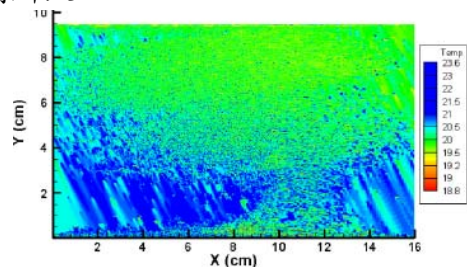


圖 10 f 效應下渦旋之溫度及速度場(t = 32)

中段行為如圖13—16所示，由f平面實驗得知，溫度效應區上應有一冷邊界層存在，但由圖中完全觀察不出，推測是渦旋產生時將其帶走，另外，此時自由液面溫度約為20°C，較前段低了0.5°C，這是由於渦旋將底層冷水往上帶至自由液面產生熱平衡所致。



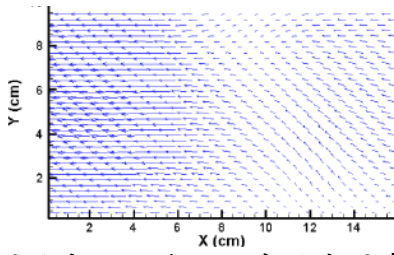


圖 13 f 效應下渦旋於溫度效應區中之溫度及速度場(t = 1)

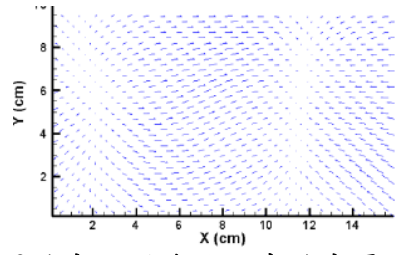


圖 16 f 效應下渦旋於溫度效應區中之溫度及速度場(t = 10)

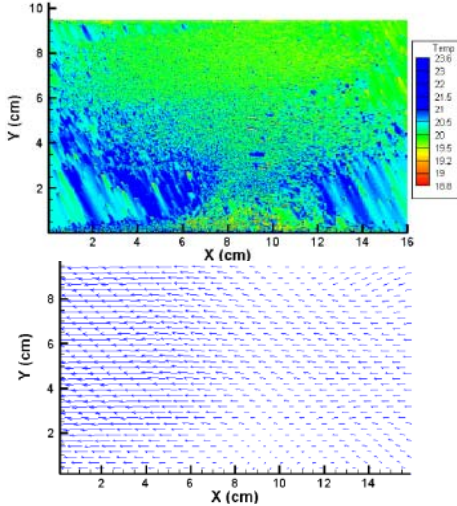


圖 14 f 效應下渦旋於溫度效應區中之溫度及速度場(t = 4)

渦旋通過溫度效應區後，如圖17—20所示，渦旋內部已漸升溫，且冷水區域漸小，由外部會擠回底層之冷邊界層；另外，圖中自由液面右側為靠近溫度效應區，其溫度低於左側，由此可知，渦旋的產生會使區域內自由液面溫度下降。

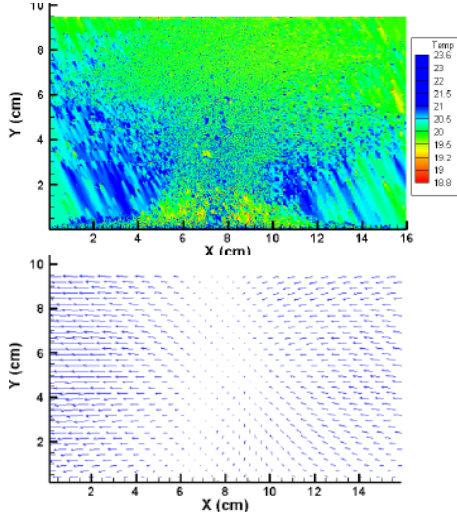


圖 15 f 效應下渦旋於溫度效應區中之溫度及速度場(t = 7)

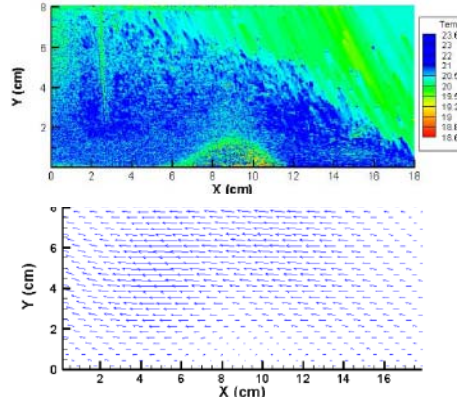


圖 17 f 效應下渦旋於溫度效應區後之溫度及速度場(t = 1)

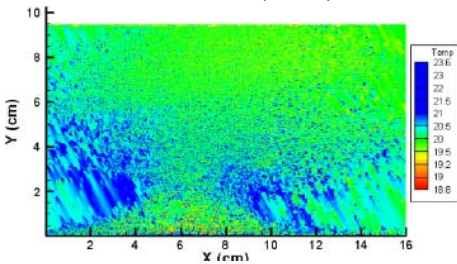
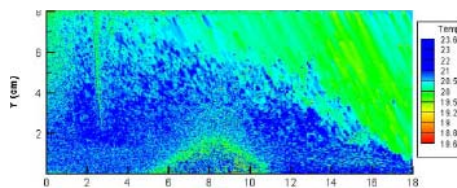
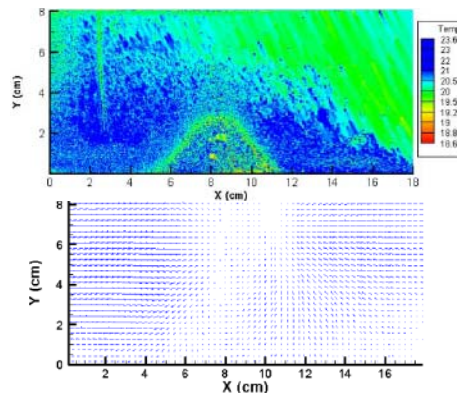


圖 18 f 效應下渦旋於溫度效應區後之溫度及速度場(t = 7)



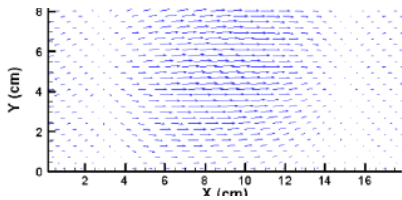


圖 19 f 效應下渦旋於溫度效應區後之溫度及速度場(t = 13)

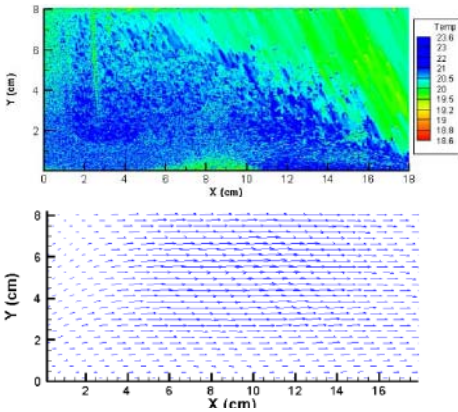


圖 20 f 效應下渦旋於溫度效應區後之溫度及速度場(t = 18)

五、結論與未來展望

5.1 結論

本實驗觀察渦旋具溫度效應下的路徑及強度變化，及其溫度速度場間相關性。就上述結果討論下列：

1. 渦旋路徑在溫度效應影響下歸納得冷渦旋較常溫渦旋之路徑偏北，常溫渦旋又較熱渦旋之路徑偏北。
2. 渦旋強度則是熱渦旋之渦度略大於冷渦旋及常溫渦旋，但不甚明顯。
3. 本實驗所使用之液晶感溫粒子，其工作範圍 $19.0^{\circ}\text{C}\sim 31.0^{\circ}\text{C}$ ，但就本實驗操作條件而言，其可辨識呈色範圍 $18.8^{\circ}\text{C}\sim 23.6^{\circ}\text{C}$ ，佔其工作範圍約 $1/2$ ，而其中顏色變化較明顯的區間落在起始的 $18.8^{\circ}\text{C}\sim 20.5^{\circ}\text{C}$ 間，約為工作範圍的 $1/6$ ，於此可以發現無法完全使用到所訂製的工作範圍區間，對於TLC的操作上其不確定性是需要被評估的，但就敏感性、重複性且不需侵入流場即可全域性量測速度即溫度場而言，TLC皆有良好的表現，
4. 液晶顯像技術所得之溫度場現象，觀察出底層冷水在渦旋產生時被吸取上至自由液面，使得熱平衡在此區域發生，自由液面溫度因而下降，Srifer和Huber提出約15%

的垂直混合是由熱帶氣旋所造成，本實驗雖未做定量的類比，但對於基本現象的結果是可以相互解釋的。

5.2 未來展望

本實驗未來展望從下列幾點著手：

- (1) 加強現有結果之物理現象解釋；
- (2) 液晶顯像技術之溫度場與速度場之間關聯，並定量說明兩者間關係；
- (3) 液晶顯像技術之誤差及不確定性分析。
- (4) 利用 Rhodamine B + Rhodamine 110 染料對於溫度改變的特性，開發溫度域更廣的全域非侵入式的溫度量測方式。

六、參考文獻

- [1] Al-Arabi, M. and El-Riedy, M. K., Natural Convection Heat Transfer from Isothermal Horizontal Plates of Different Shapes, *Journal of Heat Mass Transfer*, v19 (1976), pp. 1399—1404.
- [2] Anderson, M. R., Hysteresis in Liquid Crystal Thermography, *Journal of Heat Transfer*, v126 (2004), pp. 339—346.
- [3] Ciofalo, M., Signorino, M. and Simiano, M., Tomographic Particle-image Velocimetry and Thermography in Rayleigh-Benard Convection Using Suspended Thermochromic Liquid Crystals and Digital Image Processing, *Experiments in Fluids*, v34 (2003), pp.156—172.
- [4] Farina, D. J., Hacker, J. M., Moffat, R. J. and Eaton, J. K., Illuminant Invariant Calibration of Thermochromic Liquid Crystals, *Experimental Thermal and Fluid Science*, v9 (1994), pp. 1—12.
- [5] Fujisawa, N. and Funatani, S., Simultaneous Measurement of Temperature and Velocity in a Turbulent Thermal Convection by the Extended Range Scanning Liquid Crystal Visualization Technique, *Experiments in Fluids*, v29 (2000), pp. 158—165.
- [6] Funatani, S., Fujisawa, N. and Matsuura, T., Multipoint Calibration Technique of Liquid Crystal Thermometry and its Application to Three-dimensional Temperature Measurement of Thermal

- Convection, *Journal of Flow Visualization and Image Processing*, v7 (2000), pp. 353—366.
- [7] Kowalewski, T. A., Application of Liquid Crystal Tracers for Full Field Temperature and Velocity Measurements, *Proceedings of the 2001 International Symposium on Environmental Hydraulic*.
- [8] Lin, I. I., Liu, W. T., Wu, C. C., Chiang, J. C. H. and Sui, C. H., Satellite Observations of Modulation of Surface Winds by Typhoon-induced Upper Ocean Cooling, *Geophysical Research Letters*, v30 (2003), No.3, 1131, doi:10.1029/2002GL015674.
- [9] Matsuda, H. , Ikeda, K. , Nakata, Y. , Otomo, F. , Suga, T. and Fukuyama, Y., A New Thermochromic Liquid Crystal Temperature Identification Technique Using Color Space Interpolation and its Application to Film Cooling effectiveness measurements, *Journal of Flow Visualization and Image Processing*, v7 (2000), pp.103—121.
- [10] Moffat, R. J., Some Experimental Methods for Heat Transfer Studies, *Experimental Thermal and Fluid Science*, v3 (1990), pp. 14—32.
- [11] Nozaki, T., Mochizuki, T., Kaji, N. and Mori, Y. H., Application of Liquid-Crystal Thermometry to Drop Temperature Measurements, *Experiments in Fluids*, v18 (1995), pp. 137—144.
- [12] Park, H. G., Dabiri, D. and Gharib, M., Digital Particle Image Velocimetry/Thermometry and Application to the Wake of a Heated Cylinder, *Experiments in Fluids*, v30 (2001), pp. 327—338.
- [13] Sabatino, D. R., Praisner, T. J. and Smith, C. R., A High-accuracy Calibration Technique for Thermochromic Liquid Crystal Temperature Measurements, *Experiments in Fluids*, v28 (2000), pp. 497—505.
- [14] 松本正一，角田市良，液晶之基礎與應用，國立編譯館(1996)
- [15] 黃世霖，運用粒子追跡測速法探討旋轉水槽中單一渦旋演變之流場結構，國立臺灣大學碩士論文(2003)
- [16] 范振德，受科氏力影響下渦旋與熱邊界層之交互作用，國立臺灣大學碩士論文(2005)
- [17] 黃一仁，利用液晶顯像技術量測距溫度差渦環流場之溫度與速度，國立臺灣大學碩士論文(2006)
- [18] 林怡君，利用液晶顯像技術量測斜壓渦旋之速度及溫度場，國立臺灣大學碩士論文(2007)