

侵台颱風之水力模擬

朱錦洲* 王時鼎+ 郭光輝*

* 台灣大學應用力學研究所

+ 中央氣象局顧問

摘要

本研究係以水力實驗方式，模擬颱風通過台灣時的細部流場結構，同時將探討颱風中心橫越台灣的機制及因山脈地形的因素所引發的各種現象，如上游阻擋效應及下游遮蔽效應所造成的弱風尾流區、山角效應所引致的局部噴流、及副中心的生成等等；吾人利用在工作水槽所產生一速度分佈已知的起始渦漩作為颱風渦漩的代表，以台灣模型靠近渦漩的方式，模擬多種颱風侵台的路徑，並以流場顯像方式觀察在模型水平對稱面上及模型以上之高層平面上的流場變化。水力模擬的結果經和實際的颱風資料比較，二者有許多相似之處；無論是路徑、瞬時風場分佈、或地形阻擋所引發的各種現象上，均有相當程度的吻合。此外，吾人並於文中討論現階段水力模擬需改進之處及其限制。吾人以為以理論模式結合水力模擬將是往後進一步研究的方向。

一、引言

據氣象局的統計資料，因著颱風的侵襲，農、漁、工、商、交通、電訊及人民財物的損失平均每年高達新台幣一佰億元，加上平均每年數十人生命的喪失。颱風無疑地是台灣最大的天然災害。除了採取適當的防範措施之外，如何準確地掌握颱風的動向並提高預報之準確率以減少災害的損失實為一值得重視及研究的課題。

台灣約3/5的地區為山地，山脈大致沿北北東至南南西之走向縱貫全島，山勢高聳，地形的因素甚為複雜，境內中央山脈平均高度約有3000公尺之譜。故當颱風接近山脈時，山脈之高度足以影響中尺度颱風的結構及行徑。同時，由於來襲颱風路徑的不同使得颱風之於各地的影響差別甚大。王時鼎先生根據其數十年對颱風的研究（王1980，1989）歸納出颱風受台灣山脈地形之影響所造成的各種現象。例如：上游

阻擋效應及下游遮蔽效應所造成的弱風區，山角效應所引致的局佈噴流，副中心的生成，以及海峽上的明渠流效應等現象。以上所述的現象相似於渦漩流通過障礙物所產生的流場型態，故此引發了以水工實驗方式模擬侵台颱風受台灣山脈的影響，所產生的各種流場變化。中研院鮑、黃等學者（1976，1977）首開水工模擬颱風過山的實驗。王時鼎先生於其1980年國科會研究報告中詳細敘述黃榮鑑教授所模擬數種侵台颱風水工實驗的結果，並與實際颱風路徑相比較，二者相當接近。因此吾人有興趣以水工實驗方式進一步了解由於台灣山脈地形之阻擋所造成風場的細部結構，例如由於阻擋效應所造成的弱風尾流區（wake zone）、山角效應所引致的局部強風區（local jet）、副中心的生成等現象，使得台灣中央山脈對颱風風場的影響，獲得系統性之了解，俾能對各地風力變化能有所掌握，並期望以水工模擬資料彌補觀測資料之不足，並可補台灣四圍海域無觀測資料的缺點，及進一步作為數值模擬與數值預報之初期與驗證之需要。

吾等（見朱等1992a）曾在一水槽中產生一速度分佈已知的近似二維渦漩作為颱風渦漩的代表，再使其接近二維圓柱、橢圓柱、三維球體及橢球體等模型，並以流場顯像方式觀察流場的變化。初步的水工模擬結果顯示，柱狀渦漩受三維模型阻擋，（尤其是三維橢球），其結果和實際颱風資料比較後，二者有許多相似之處。吾人以為水工模擬有進一步研究的需要，以確認其在颱風風場及路徑預報上的實用價值。根據上述研究的結果，吾人作了以下的改進：(1)加大實驗水槽的尺寸為 $1\text{m} \times 1\text{m}$ 以消除邊界的限制，(2)改進渦漩產生的方式，以減少渦漩產生器所引致的導引速度，(3)改進模型的外觀使其接近實際台灣地形的地貌，(4)加入大陸東南沿海的地形因素，以便模擬台灣海峽區域的流場變化，然後再依所設定 Rossby 數、颱風移向、接近位置

、俾以模擬多種颱風來襲的路徑，再以流場顯像方式觀察高層及水平對稱面上（相當於地表面）的流場的變化，吾人將舉兩個不同路徑的例子加以說明，並與實際颱風資料比較。此外，吾人將此一階段的水工模擬作一總結，並展望未來。

二、水工實驗的設備及方法

(一) 實驗設備及模型

實驗設備係依朱等(1992a)之結果加以改進。實驗係在長、寬各為 1m 、高為 35cm 的水槽進行，工作流體為水。渦漩的產生藉助於一塊長 30cm 、寬 15cm 、厚為 4mm 平板的非定常運動而產生。平板起始的攻角設定為 60° ，且前後緣均為尖銳的 45° 切角，如圖1所示。當平板由伺服馬達驅動的水平移動平台驅動時，平板的後緣即產生一逆時針的起始渦漩，當平板保持 60° 攻角被移動約 20 公分後，平板即由另一組直流馬達，以 0.1rad/sec 的角速度轉動以降低攻角為零度，此時平板繼續前進至水槽的邊緣再行停止。此種渦漩生成機構的目的，將使得在平板產生起始渦漩的同時，由前緣所產生的另一順時針旋轉的渦漩被平板帶至水槽的一隅；而平板後緣所生成的起始渦漩幾乎停留在原處，而受到順時針旋轉渦漩的影響將為之降低，如此該起始渦漩將是較為

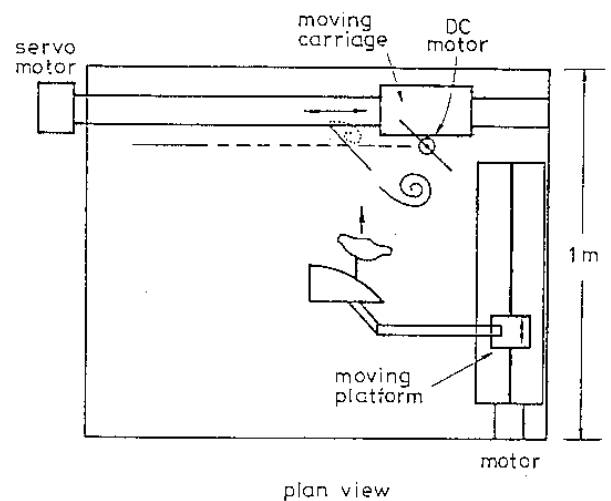


圖1. 實驗設備示意圖

“純淨”的柱狀單一渦漩，吾人以此作為颱風渦漩的代表。由於起始渦漩產生幾乎停留在原處，吾人採取移動模型逐漸靠近渦漩的相對運動方式。移動模型的機構係由另一直流馬達以0.5cm/sec的線速度所驅動，模型放置的角度可依所設定渦漩接近模型的路徑及位置而調整。同時必須以渦漩產生的位置配合模型的位置及角度而達到渦漩接近模型的路徑，俾能模擬來襲的颱風。移動模型的機構亦表示於圖1中。台灣模型的尺寸如圖2所示。地形外貌依國軍聯勤測量署製作之立體地圖為藍本，但尺寸依朱等(1992a)之經驗作適當的縮放，台灣地形高度與長度之比約為1:100，模型之高與長之比放大為1:6，以配合實驗上模擬颱風渦漩的困難，同時也將強調地形因素的影響。模型為水平上下對稱的方式，使得流場中的水平對稱面為無應力存在的邊界條件(stress-free boundary condition)。如此之安排不同於實際颱風渦流漩，實際颱風在海上運動時，近海面部份所產生的邊界層、磨擦損耗、及熱力問題在本研究的模擬中均未加以考慮。模型放置於水槽的位置，依模型的半厚度h和模型水平對稱面至水槽自由液面的深度H的比例。本研究將h/H之值依颱風垂直高度及台灣山脈的高度而定，其值約在0.3~0.4之間。

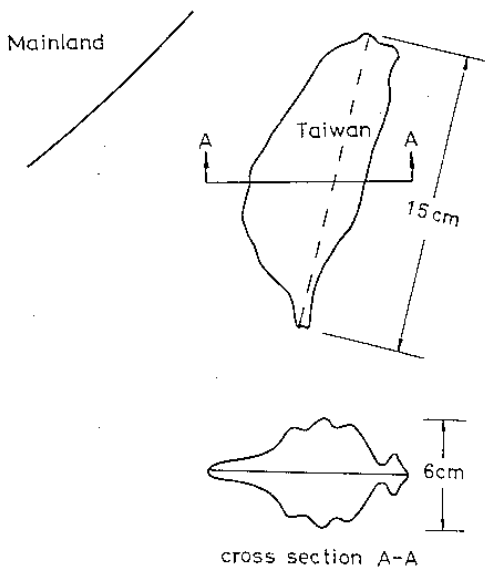


圖2. 台灣模型的二視圖

(二) 實驗方法

1. 定性流場觀察

吾人利用懸於流體中之鋁粉顆粒(直徑約10-30 μm)，再經由雷射光頁的照明，配合相機的曝光時間，被照明的微小顆粒將於底片上留下軌跡，如此將使吾人獲得在照明面上近似於流線分佈的流場訊息。藉此將可判斷當渦漩接近障礙物時，渦漩核心的軌跡以及各種現象發生的時機及區域。本研究中流體所含鋁粉顆粒的濃度約為2.4ppm(以重量計算)，雷射光源係由4瓦氬離子雷射(Argon Ion Laser)所發射之藍綠光組成，其波長為488-514nm。雷射光由反射鏡導引至水槽附近，再經由柱面鏡將之分散成爲一厚度約為0.5mm的雷射光頁。在光頁內的質點顆粒，由於被照明的緣故而形成發亮的質點，圖3爲產生雷射光頁的示意圖。若調整水平雷射光頁的垂直高度，吾人將可獲得不同高度水平面上之訊息。

2. 流場定量量測

吾人將藉助於雷射激發光化學量測技術(Laser Induced Photochemical Anemometry, 簡稱LIPA)。量測經由渦漩產生器所產生之渦漩的

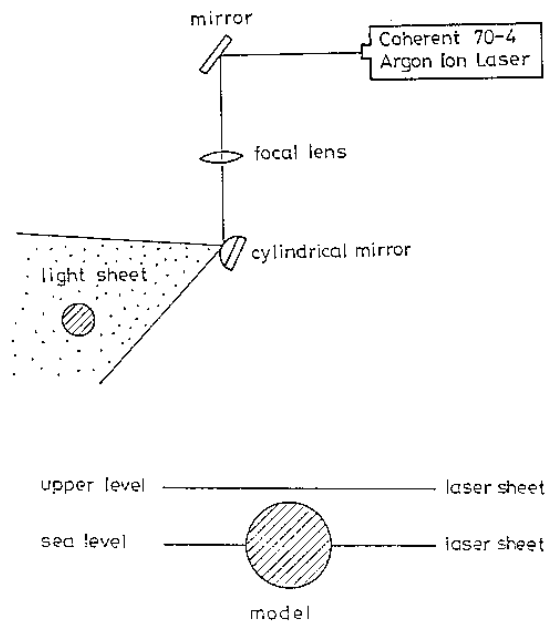


圖3. 流場顯像之光學安排

速度分佈及其環流量值。LIPA方法為一不介入流場的光學量測方法，該方法之基本原理是遇光反應變色（Photochromism），使用準分子雷射（Excimer Laser, 波長為351nm）為光源，所發射之雷射光脈衝（pulse, 脈衝持續為20ns）通過加有Kodak 52590之光化學顯示劑的無色煤油，雷射光通過之處瞬間將變為深藍色，被染色的流體隨著流場運動而變形，此變色存留的時間約有數秒，化學還原作用使得被染色的流體歸回無色。利用此原理，吾人使雷射光以一設定之頻率通過渦漩預定經過之位置，當渦漩通過時，變色之流體被捲入渦漩中而標示出渦漩的位置；而當渦漩核心通過雷射光時，方才變色的時線（timeline）恰可作為估算渦漩速度分佈的根據。如此吾人可估算出通過渦漩中心的一軸上切線速度的分佈，且可計算最大速度處的環流量值。實驗方法請參閱Chu與Liao(1992)。

(三) 水工實驗的程序

實驗進行的程序如下：為配合渦漩接近（相對而言）台灣模型時的路徑，渦漩產生器起動的位置將隨之改變。當柱狀渦漩經由渦漩產生器產生後，渦漩大致停留在水槽的某處，待其穩定後再將裝載台灣模型的移動平台以定速度緩慢的接近渦漩。流場顯影取像的相機（Nikon F3）與台灣模型固定在同一機構上，當模型移動時，相機與模型同步運動。相機的曝光時間設定為1秒，並由遙控觸發裝置控制取像。以相對運動的觀點，由相機攝取的影像為模型不動，渦漩逐漸接近台灣模型而模擬颱風的來襲。由於模型為一鈍體，故當移動模型前進時，其下游處將有一尾流（wake）出現，但吾人以緩慢的速度推動模型，以模型之速度及厚度尺度而定出的雷諾數約在200左右，對渦漩本身的雷諾數 $\Gamma/\nu \sim 4000$ 而言相去甚遠，故其影響不大。

三、結果與討論

此處首先將就柱狀渦漩的本身作定性及定量上的描述。接著將舉出渦漩以二種不同的路徑接近台灣模型時流場的時間變化，藉此模擬二種典型颱風侵台的路徑及風場變化，並確定因山脈地形因素所造成颱風移速移向的改變，弱風尾流區、局部噴流、副中心之生成等現象出現的時機和地區，並和實際颱風風場作比較。

(一) 自由柱狀渦漩初始條件的測定及 Rossby 數的決定

1. 由本組設備所產生的渦漩，大致與朱等1992a所述的渦漩相似。由於產生起始渦漩後，平板的攻角逐漸降低至零攻角，在過程中平板後緣因著平板的前進與旋轉，將有輕微的剪切層不穩定的現象。但因距離起始渦漩較遠，對起始渦漩的影響較小。此種起始渦漩的速度分佈大致維持 $vr^{0.6 \sim 0.8} = \text{常數}$ ，其中 v 為渦漩切線速度， r 為渦漩徑向座標。由流場顯像的觀察，柱狀渦漩的中心亦有上升之二次流存在，這亦是由於水槽上下邊界層不同的緣故。吾人在水槽底部施放一層染料，當渦漩形成時，底部邊界層中造成的壓力梯度，將具有染料的流體推向中心，再經由流體的不可壓縮性，使得渦漩中心有上升的運動。當然，此種渦漩中心的結構不同於颱風中心眼牆及雲牆複雜的結構。
2. 由於所產生的起始柱狀渦漩受到渦漩產生平板的導引速度不若吾等(1992a)所產生的渦漩，當其被產生後，大致停留在流場中某處，或是以緩慢的速度移向某一特定的方向（視起始渦漩的強弱而定）；故此，吾人必須移動台灣模型，以相對運動的觀念模擬颱風的來襲。但因模型為一鈍體，在流體中移動時，尾流的存在勢所難免，故吾人儘量減低此項非必要的因素，而以較緩的速度移動

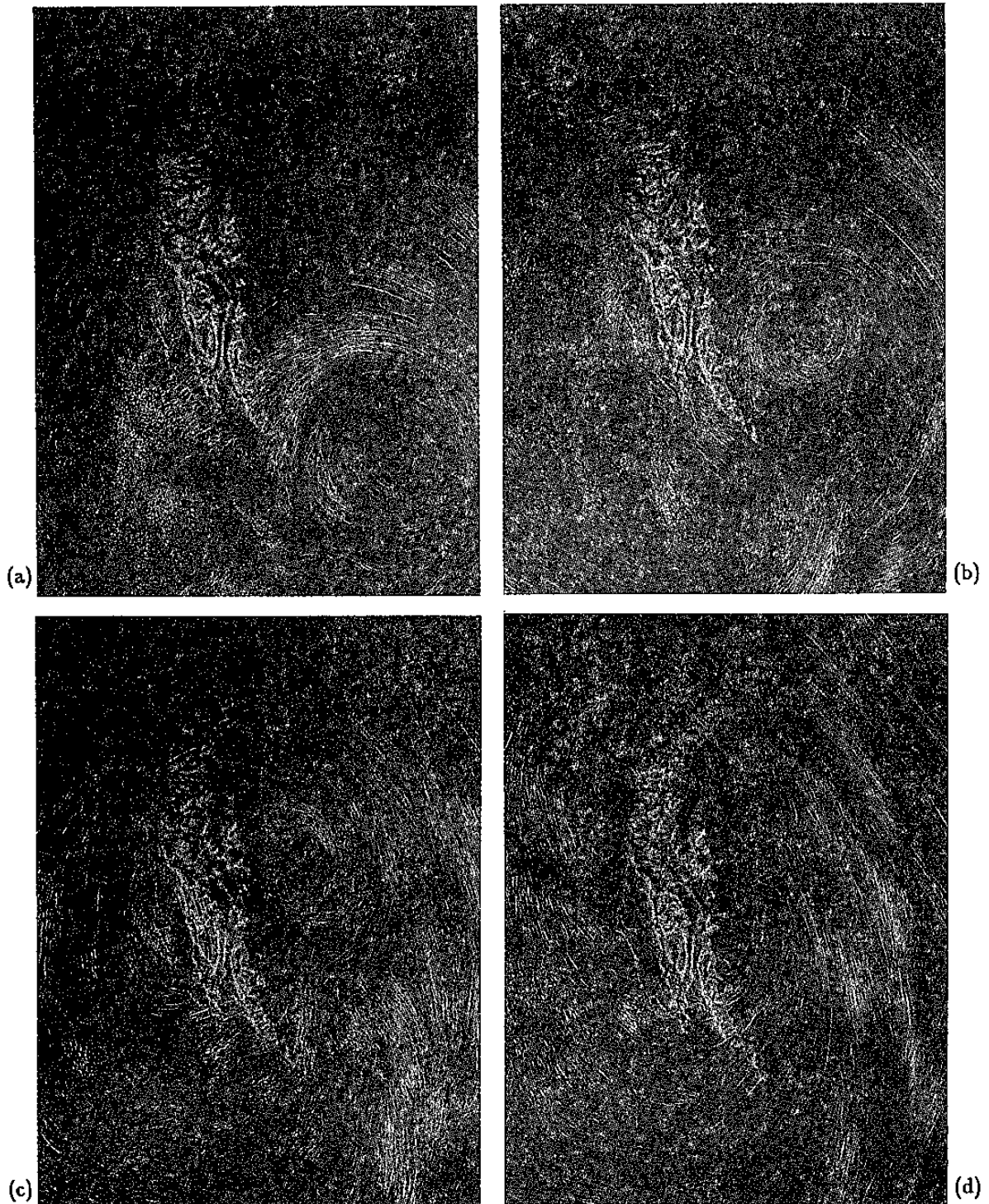


圖4. 渦漩沿模型東側北上，並由其中段斜向橫越台灣
模型之現象—高層平面上之流場變化

模型。吾人依前述 Rossby 數的定義，估算的結果顯示， Ro 約在 $0.2 \sim 0.5$ 之間。

(二) 渦漩受台灣模型阻擋之中心運動及流場變化

吾人依照前述渦漩產生的方法產生渦漩，並進行渦漩依不同的位置及方向接近台灣模型時的流場變化。本文中將舉二種渦

漩接近台灣的方式，模擬二種常見的颱風侵台路徑，吾人並將流場的變化與實際的颱風資料相比較，以檢視水工模擬的實用性。

1. 渦漩沿台灣模型東側北上，並由其中段斜向橫越：

圖4(a-d)為渦漩斜向橫越模型時在高層平面之流場變化。當渦漩中心接近模型東

南側時，由於地形之遮蔽，模型之西側中
南區域有弱風區的出現。當渦漩中心將接
觸模型東側中段時，上述位於模型西側的
遮蔽效應更為明顯，同時西側所生成的分
離泡（S）亦清晰可見（圖4(b)）。當渦
漩中心仍在模型東側時，渦漩中心南部的
風切線在圖4(b)中清晰可見，同時形成
因上游阻擋效應而產生的尾流區。當渦
漩上層中心位於模型上方時，模型西北
部因阻擋所生成的分離泡將因渦漩中心
通過模型上方時的再聯結作用，完成橫
越模型的動作。請參閱朱等(1992b)有
關再聯結效應的示意圖。基本上此類型
的橫越現象之機制均甚相似。當渦漩中
心接觸模型時，風場分佈明顯的因地形
的阻礙而由原來近乎圓形的形狀而拉
長為橢圓形南北之分佈，即便是高層
流場其曲率甚為明顯。當渦漩中心通
過模型之後，渦漩中心被破壞，且前進
速度減緩，而且風場分佈呈橢圓狀，
長軸由南北向轉為西北至東南向。圖
5(a,b)顯示水工模擬之渦漩中心的軌
跡圖以及與此模擬相似之Ofelia颱風
(1990)侵台時的中心路徑。圖6(a-d)
顯示Ofelia颱風風場的時間變化（參閱

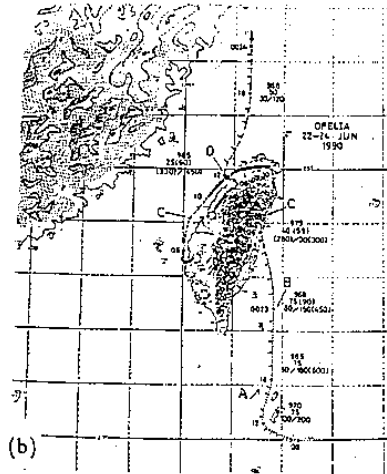
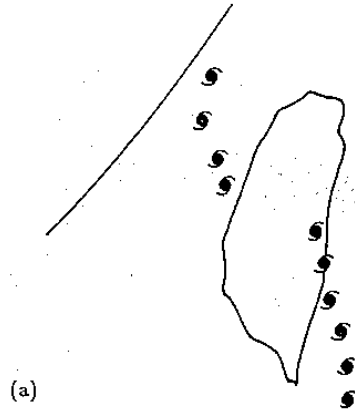


圖5. 渦漩沿模型東側北上，並由其中段斜
向橫越台灣模型之現象—(a)渦漩中心路
徑；(b)Ofelia(1990)颱風的路徑

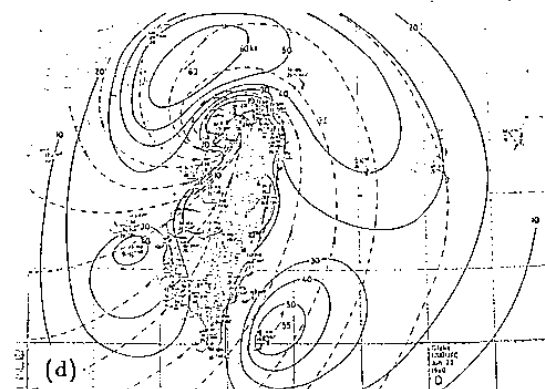
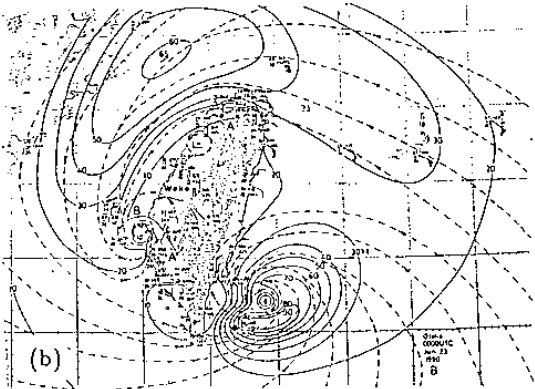
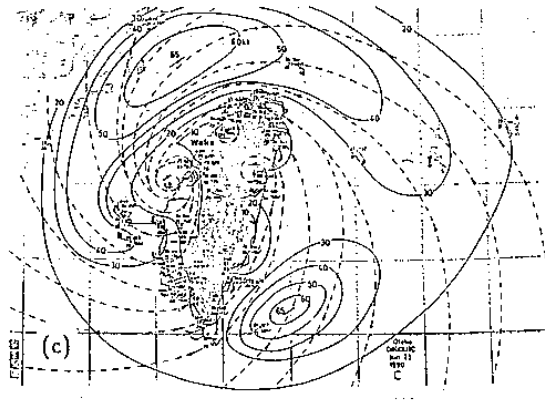
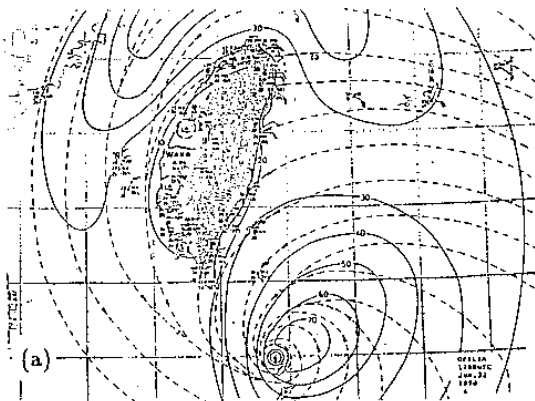


圖6. Ofelia(1990)颱風風場的時間變化，其對應的水工模擬為圖4(a-d)

蔡、王 1991)；各圖將分別與水工模擬的結果圖 4(a-d) 互相對應。雖然圖 4 為高層流場變化，但根據朱等 (1992b) 水平面及高層面的比對之經驗，此例中水工模擬的結果和實際颱風資料非常相似。

2. 渦漩沿模型東側北上，並由其中南段斜向橫越：

圖 7 為此例水工模擬的高層影像的逐時變化。基本上此例中顯示渦漩高層斜向橫越模型的機制和上例中所述的相似所不同者，在於模型西側副中心的發展較為迅速，不若前例中分離泡那樣微弱（比較圖 7(c) 及圖 4(c)）。圖 7(c) 顯示中心迅速經由再聯結通過，而本例似乎原渦漩和分離泡同時併存一段時間。所以機制上或許有別於上

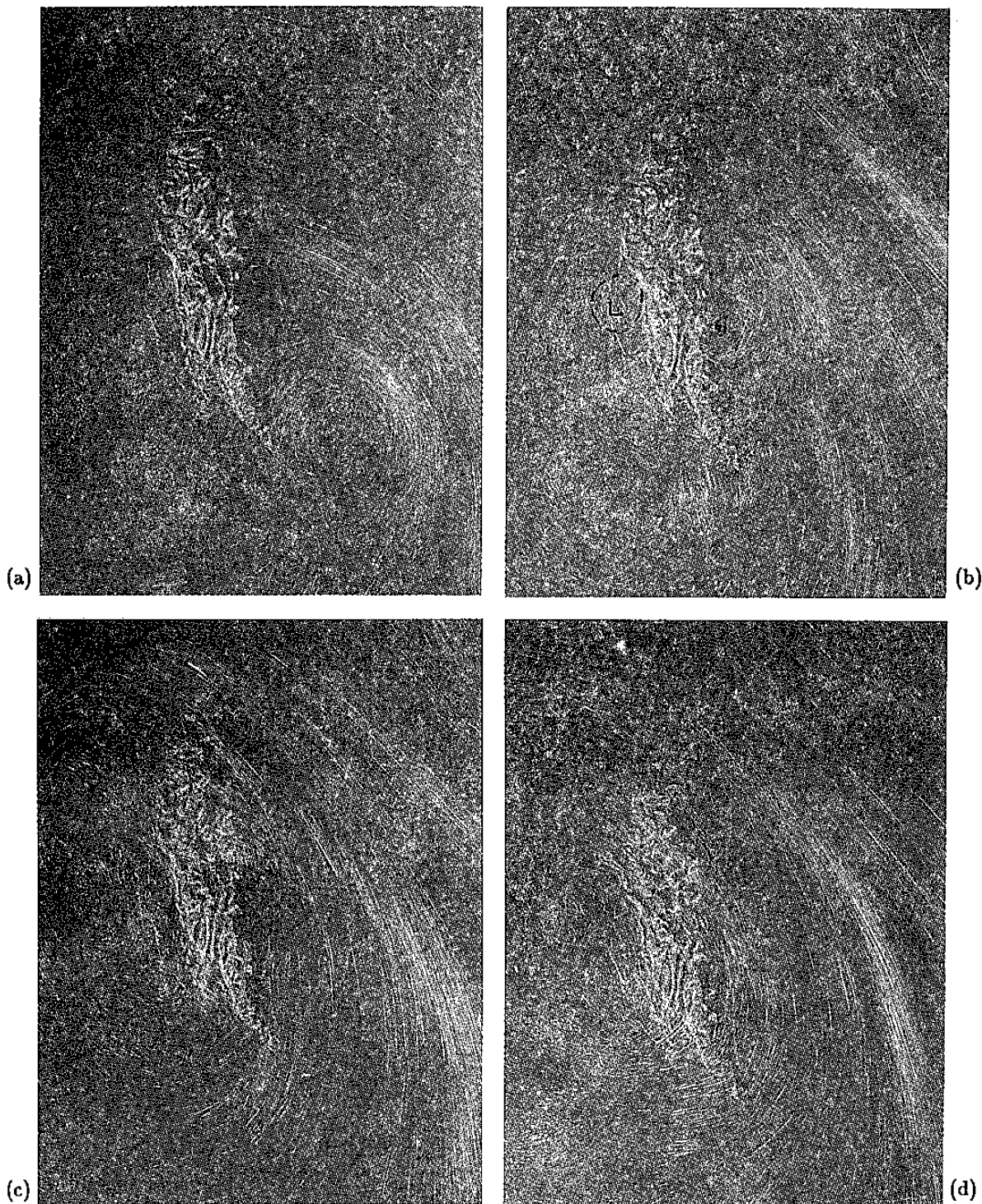


圖 7. 渦漩沿模型東側北上，再行由模型中南段橫越之現象—高層平面之流場變化

例，而與王(1980)敘述中心分裂為二，再由副中心取代者相近，此點有待後續的研究加以証實。在其斜向橫越的過程中，地形的阻擋所產生位於模型東南的尾流區(見圖7(b))、位於模型上端的局部噴流(見圖7(b))，等各種現象均清晰可見。當渦漩中心越過台灣模型後，中心部份的流場被破壞，至圖7(d)時中心仍未恢復，但此時台灣模型西南方或隨後之西南氣流則清晰可見。圖8為渦漩橫越模型時渦漩中心的軌跡。該圖中亦將和此例相似的Betty(1961)颱風路徑一併陳列，二者相比較，有許多相似之處。圖9(a-c)顯示Betty(1961)颱風風場的時間變化(參閱蔡、王1991)，其結果將分別與圖7(a-c)水工模擬的結果相對應，二者非常相似。

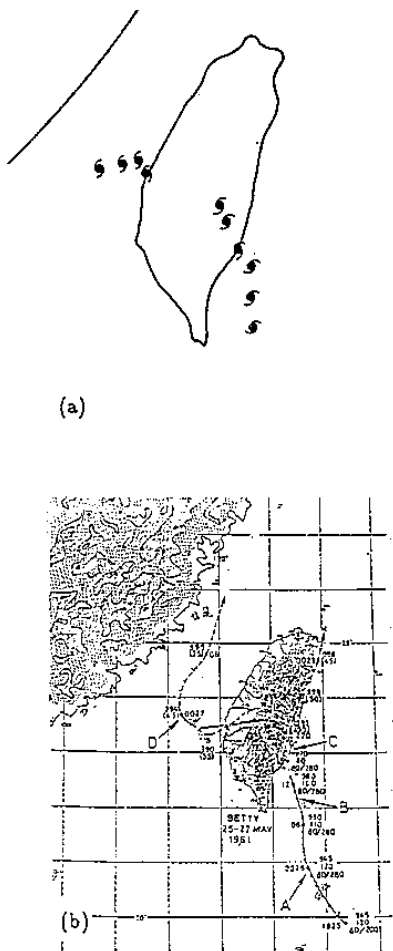


圖8. (a)圖7之中心軌跡；(b)和此模擬相似的颱風路徑 - Betty(1961)颱風

3. 水工模擬的歸納：由以上的二例中，吾人將渦漩受台灣模型的阻礙所產生的各種現象，及其和颱風資料比較的相擬關係，討論如下：

- (1) 渦漩由模型中段橫越模型或是由其中段偏南橫越台灣模型，其橫越模型的現象基本上和朱等(1992b)成果報告中渦漩橫越橢球體的機制相類似，除了模型上複雜的程度不同。當渦漩接近模型時，因

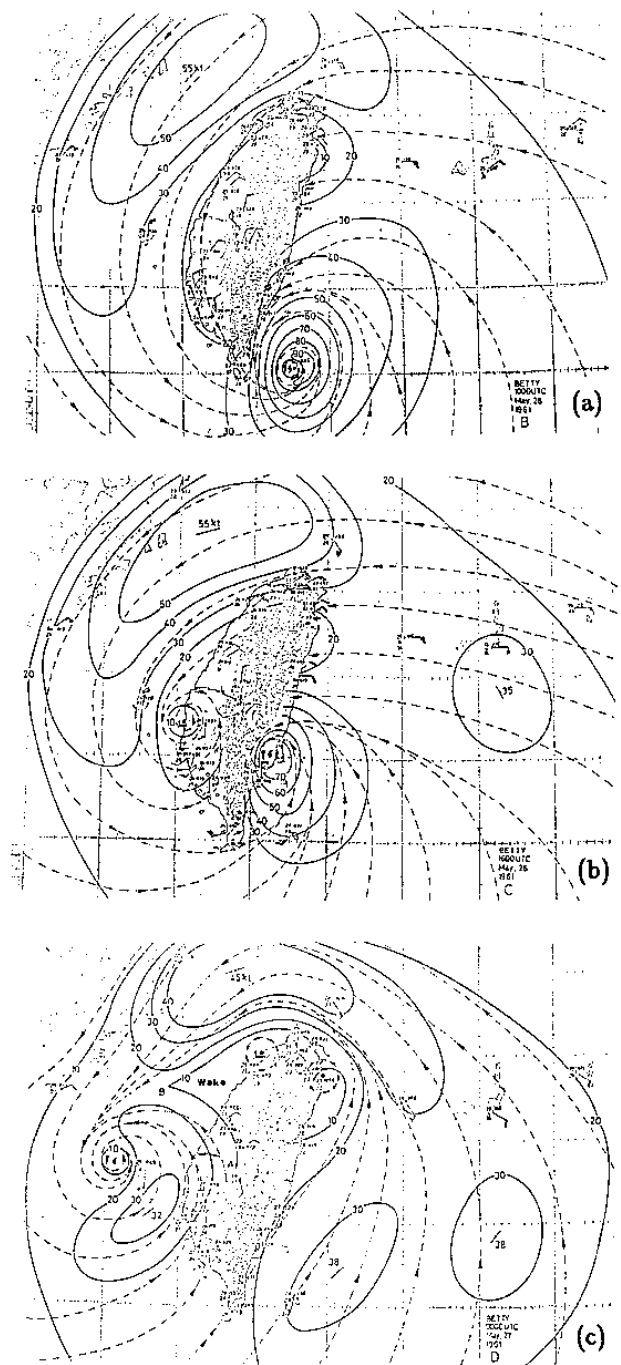


圖9. Betty(1961)颱風風場的時間變化，其對應的水工模擬為圖7(a-c)

地形的阻擋而於模型背風區產生的誘生渦流將在渦流上部通過模型後，與之進行再聯結作用而完成渦流橫越模型的動作。其間的過程和颱風資料的比對，有許多吻合之處。

(2) 上述渦流通過台灣模型的第二例中，渦流由模型之中段以南橫越模型，其路徑與 Betty (1961) 颱風相似。但據王 (1980) 之觀察，副中心的生成基本上係由於中心沿台灣東側北上，繞行西側的氣流在模型西側產生流離而發展成一副中心而取代原有的颱風，(參閱蔡、王 1991, P.56)。圖 9(b) 中顯示模型的西側中段有明顯的迴流出現，和東側的原渦流同時存在，如何和在機制上區別分裂過山與自由過山有待後續的研究。據吾人在先驅研究中渦流受二維圓柱或橢圓柱的實驗中有更明顯類似王 (1980) 之觀察。吾人根據水工實驗之經驗推斷，當渦流的環流較強，尺度較大，且 h/H 的比值較大時，上述的現象將更明顯。本研究中 h/H 約在 0.3 左右。據氣象局之資料顯示颱風低層的风力較強，若實驗中 h/H 提高至 0.6 左右則較能反應低層較強的事實。在後續的研究中將就此項疑點加以研究澄清，以多方檢驗水工模擬的適用性。

(3) 此外，本研究的結果亦顯示 (參閱朱等 1992b)，當渦流接近模型北端則渦流於近水平對稱面的部份將由其北端繞行通過模型，而渦流上層部份，則由模型上方越過，而形成上下層中心不一致的現象，此現象和渦流繞行橢圓球的現象一致 (見朱等 1992a)，而且和實際颱風的資料相似。

四、結語及展望

由以上水工模擬的結果，吾人作成以下數點結論，並就水工模擬之未來作一展望：

1. 經由渦流產生器所產生的柱狀起始渦流，其速度分佈大致為 $vr^{0.6\sim 0.8} = \text{常數}$ 。在其被產生後，因流體的黏滯性而有的擴散效應使得渦流的速度分佈有所改變。柱狀渦流大體而言為二維結構，但因其上下邊界條件的不同，其中心有上升氣流的存在。
2. 由雷射光頁的定性流場觀察，本研究進行了渦流由多種不同方式，受縮尺的台灣模型的阻擋時流場的變化。實驗結果顯示，颱風侵台時所發生的一些現象，例如：局部噴流、弱風尾流區以及副中心生成、中心越山後遭破壞，以及西南氣流的引進等等，均可由渦流受台灣模型阻擋的水工模擬實驗中獲得。實驗結果亦顯示渦流中心的軌跡和流場分佈與實際的氣象資料相似。
3. 由以往渦流受三維橢圓球體阻擋的實驗中 (參閱朱等 1992b)，提供渦流橫越模型的機制。當模型的幾何形狀改變為近似台灣的地形時，吾人可推測渦流橫越台灣模型的機制，基本上和渦流橫越橢圓球時相似。此項觀察將有助於了解颱風橫越台灣及副中心生成的機制。
4. 實驗的條件如 Reynolds 數或是 Rossby 數，無法完全模擬實際的颱風，但由實驗觀察及比較，吾人認為雖然尺度有差異，但基本上可將颱風視為一不可壓的渦流。水工模擬即是在此觀念下進行，而模擬出類似颱風的多種現象。吾人認為配合水工實驗，利用此種渦流模式再行作進一步的分析，以及受簡化幾何形狀的物體阻礙時的數值計算，可作為研究的下一個目標。至於熱力問題、磨耗問題，將是後續的研究逐步考慮的對象。
5. 水工模擬中移動模型將會於其下游產生尾流，雖然雷諾數很低，但干擾流場勢所難免，仍有改進的必要。至於模型尺度的縮放及比例對流場中尾流的生成

，次渦漩的發展等現象，均會造成程度上的差異。此方面尺度參數的影響有待進一步的研究。

五、參考資料

- [1] H. P. Pao (鮑咸平) , Robert R. Hwang (黃榮鑑) and Jin Jso " The effect of Mountains on A Typhoon Vortex As Identified by Laboratory Experiments, part II . Three-Dimensional Barriers " Annual Report of the Institute of Physics, Academia Sinica, Vol.6, P.109, 1976.
- [2] H. P. Pao and R. R. Hwang, " Effects of Mountains on a Typhoon Vortex : A Laboratory Study " , Annual Report of the Institute of Physics, Academia Sinica, Vol.7, 1977.
- [3] C. C. Chu (朱錦洲) , Y. Y. Liao (廖育元) , " A Quantitative Study of the Flow Around an Impulsively Started Circular Cylinder " , Experiments in Fluids, Vol.13, P.137-146, 1992.
- [4] 王時鼎, " 台灣近海颱風運動及強度預報法 " , 國科會研究報告, NSC-67M-0202-05(01), 1980年4月。
- [5] 王時鼎, " 侵台颱風風場特性及各地陣風預報研究 " , 國科會防災科技研究報告, 77-58號, 1989年6月。
- [6] 朱錦洲、王時鼎、郭光輝, " 颱風過山之水工模擬 " , 天氣分析與預報研討會論文彙編(81), P.463-474, 1992a年。
- [7] 蔡清彥、王時鼎, " 台灣地形對颱風運動、結構及強度影響診斷研究-I, 侵台重要颱風電腦資料檔建立及分裂過山研究 " , 國科會研究計劃成果報告, NSC80-0202-M052-06, 1991年。
- [8] 王時鼎, " 侵台颱風路徑、強度、結構及風雨整合研究 " , 國科會防災研究報告, 80-73, 1992年。
- [9] 朱錦洲、王時鼎, " 侵台颱風風場變化之水工模擬 " , 交通部中央氣象局委託研究計劃成果報告, CWB81-2M-16, 1992b年。

誌 謝

本研究承蒙中央氣象局補助及蔡局長與林民生主任的支持，在此致謝。此外，海洋大學理工學院院長黃榮鑑教授於水工實驗上提供寶貴的經驗，及王文祿先生在實驗上的協助，在此一併致謝。

A Laboratory Simulation of Typhoon Vortex Across Taiwan Island

*C.C.Chu**, *S.T.Wang⁺*, *K.H.Kuo**

* Institute of Applied Mechanics
National Taiwan University
+ Central Weather Bureau

An experimental study has been performed to simulate the associated phenomena as typhoon vortices encountering the Taiwan island, which include the wake zone due to the upsteram blocking effect as well as the downstream shielding effect, the local jet flow due to the corner effect, and the formation of secondary vortices. An essentially two-dimensional column vortex was created in a water tank as the representative of a typhoon vortex. A series of experiments of column vortices interacting with 3-D Taiwan model were carried out by a flow visualization technique. Comparisons are made between the experimental results and field data, which indicate that the general phenomena are quite similar. Future work of the laboratory simulation is also discussed in the present study.