

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

子計畫三：侵台颱風流況之水工模擬與數值研究(I)

An Experimental and Numerical Study on the Terrain
Effect on the Flow Field of Typhoons (I)

計畫類別：個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC89-2111-M002-016-AP1

執行期間：88年8月1日至89年7月31日

計畫主持人：朱錦洲

共同主持人：

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

執行單位：台灣大學應用力學研究所

中華民國 91 年 2 月 26 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

子計畫三：侵台颱風流況之水工模擬與數值研究(I)

An Experimental and Numerical Study on the Terrain Effect on the Flow Field of Typhoons (I)

計畫編號：NSC89-2111-M002-016-AP1

執行期限：88年8月1日至89年7月31日

主持人：朱錦洲[✉] 執行機構：國立台灣大學應用力學研究所

研究助理：陳弘正、廖哲璋

一、中文摘要

本計畫主要為利用水工實驗與數值計算的方法來探討颱風侵台問題中相關的地形效應。首先吾人由位渦守恆關係推導出颱風侵台問題中相對應的水工相似律，並且由所推導的相似律，斟酌水工實驗的可行性，適當地給出旋轉水槽下相關的實驗條件，並據以為淺水模式計算之參考。研究結果顯示：颱風侵台過程中，其過山或繞山的形式主要與渦漩強度、撞擊位置有關，具體表現為行星 beta 效應、地形 beta 效應與渦漩本身渦漩 beta 效應三股力量拉扯的結果，其效應隨時、空演變而有所不同；相關結果得知強渦容易直接過山，而弱渦則有偏向過山的行為，而淺水數值模式與水工實驗的比對亦獲得令人滿意的結果。

關鍵詞：beta 效應，地形效應，颱風，淺水模式

Abstract

Terrain effects on typhoons encountering the Taiwan island are explored by a joint computational and experimental study. Essential dynamics concerning the motion of the typhoons is revealed by a similarity argument from the potential vorticity viewpoint. A numerical shallow water model (SWM), as well as a rotating tank experiment, is incorporated to enrich our understanding. Basing on the same

beta similarity laws, the laboratory experiments are first designed to reproduce the prototypical typhoons motion in the vicinity of Taiwan Island. And then the SWM is solved numerically by the multidimensional positive definite advection transport algorithm(MPDATA) on the same initial conditions.

Trajectories associated with different vortices impinging on various part of the topography are demonstrated both by numerical and experimental results. The cyclonic or anticyclonic rectifications of the vortex trajectory by the topography depend on the direction of impinging of the vortex and its strength. Weaker vortices are found that are heavily influenced by the existence of the topography. But the stronger vortices get across the topography only by slowing down their translating speed transitorily. Close agreements between the numerical calculations and experimental results are shown in this study.

Keywords: beta effect, terrain effect, typhoon, shallow water model

二、緣由與目的

對台灣影響最大的天氣就是颱風。颱風的侵襲，是台灣最具破壞力的天然災害之一；同時，因其充沛的雨量，亦為重要的水資源來源之一。故精確地掌握颱風生成、運動模式，增強對颱風的預報能力，

[✉] Email address : chucc@spring iam.ntu.edu.tw

確為氣象研究中，重要方向之一。中央氣象局顧問王時鼎先生於其1980年之研究報告中述及中研院物理所黃榮鑑教授所模擬數個侵台颱風水工實驗的結果，其中渦漩中心之軌跡和觀測資料相似。因此，激發了我們在水工模擬上作進一步的研究，特別是在受地形影響時流場的細部結構與其演變特徵。

計畫主持人自82年度以來即開始進行相關颱風侵台問題的水工實驗並累積的豐富的經驗，由早期不具科氏力的水槽實驗至近年來建構的旋轉水槽實驗，已逐步完成了在具背景渦度下單一渦漩的生成、單一渦漩與二維圓柱、橢柱並三維圓丘、橢丘等的交互作用，重要結果詳見相關文獻(朱錦洲等，1992；Chu et al, 1998；朱錦洲等，1999；Chu et al, 2000)。該系列研究中，主要的是以水工實驗的方法探討了渦漩與地形交互作用的流場物理，特別是背景渦度梯度與地形渦度梯度在交互作用過程中其消長的關係。

本年度計畫中，吾人將進一步運用相關的數值計算方法，以自行開發的淺水方程模式，針對水工實驗所給定的條件進行深入的計算及比對；另外，吾人也從位渦守恆的觀點進一步推導颱風侵台問題中重要的水工相似律，期使吾人在水工模擬實驗上所能涵蓋真實颱風問題的動力更為完整。

三、理論基礎與研究方法

理論基礎：

考慮在 β 平面上理想颱風渦漩與地形的交互作用，亦即科氏參數可以在局部區域內以線性近似來表示： $f = f_0 + \beta_0 y$ ，其中 $f_0 = 2\Omega_E \sin \phi_0$ 為有效科氏分量， ϕ_0 為參考緯度， $\beta_0 = 2\Omega_E \cos \phi_0 / r_E$ 為羅士培參數、 r_E 為地球半徑、 Ω_E 為地球旋轉角速率。 y 為非慣性座標指向北的方向。另外吾人定義渦漩的 Rossby 數為：

$Ro = V_m / f_0 R_m$ ，其中 V_m 與 R_m 分別代表渦漩的最大切線速度與對應半徑；在本問題中，颱風的 $Ro = O(1)$ 。

由淺水方程架構下之位渦守恆關係：

$$\frac{D}{Dt} \left(\frac{f + \zeta}{H} \right) = 0 \quad (1)$$

其中， ζ 為流體的相對渦度，而 H 為流體深度，則吾人可根據渦漩的特徵尺度將(1)式分別在真實颱風問題與水工實驗中加以無因次化為：

$$\frac{D}{Dt} \left((\beta_0)_p y^+ + \mu h_b^+ - \gamma \dot{\mu} + \zeta \cdot (1 + s_m h_b^+ - s_i \eta^+) \right)_p = 0 \quad (2a)$$

$$\frac{D}{Dt} \left((\beta_0)_p y^+ + \mu h_b^+ - \gamma \dot{\mu} + \zeta \cdot (1 + s_m h_b^+ + s_i - s_i \eta^+) \right)_p = 0 \quad (2b)$$

根據(2a)及(2b)式，吾人可合適地決定相關的實驗條件符合真實颱風問題中重要的動力參數，主要的有：一、背景 β 參數 $(\beta_0)_p = \frac{f_0 s_y R_m^2}{V_m D}$ ，二、地形 β 參數

$$\mu = \frac{f_0 s_m R_m a}{V_m D} \text{ 及三、渦漩 } \beta \text{ 參數 } \gamma = \frac{f_0 s_v R_m^2}{V_m D}$$

等。

實驗安排：

(1) 旋轉水槽及渦漩產生

實驗係在邊長135公分正方、高45公分的玻璃水槽中進行。水槽及其餘設備須架構於旋轉平台上，轉速範圍介於0.3~10 r.p.m。且令旋轉系統之角速度 $\Omega = 0.785 s^{-1}$ ，

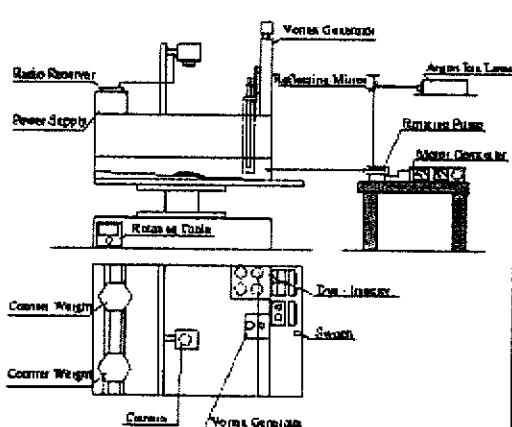


圖 1 旋轉水槽

對應科氏參數為 $f = 1.57 s^{-1}$ 。圖 1 為該旋轉水槽示意圖。渦漩產生方式係利用實心圓

柱，以逆時針、 20.82 s^{-1} 的等角速度旋轉圓柱，利用摩擦效應，藉以擾動流體生成渦漩。另於圓柱外加罩一 8 公分固定之中空圓管。將旋轉機構置於單軸滑軌上，當渦漩形成後，可將旋轉機構快速且穩定地抽出。

(2) 流場顯影

吾人在本實驗中為了定量分析渦漩結構，並據以為數值計算之初始條件，必須使用相關的雷射顯像法切頁以求得速度分佈、渦漩水深分佈等。分別以(1)4 瓦的氫離子雷射與(2)100 毫瓦的二極體雷射來產

Table 1: An example of the similarity experiment parameters

	Prototype Typhoon	Model Vortex
f_0	$4.99 \times 10^{-5}\text{s}^{-1}$	1.37s^{-1}
H_0	$3.15 \times 10^{-11}\text{m}^{-1}\text{s}^{-1}$	-
η_0	-	0.0538
D	10 km	10.47 cm
a	169 km	1.2 cm
h_M	2.5 km	0.624 cm
V_m	40 m/s	6 cm/s
R_m	150 km	3 cm
q_m	295.56 m	0.209 cm
B	1.5	0.477

表一 相似實驗條件

生水平切頁與垂直切頁，其中水平切頁為透過一旋轉八面鏡加以產生，並在工作流體中置入微小懸浮顆粒(約 $50\text{ }\mu\text{m}$)加以顯影；垂直切頁則由柱面鏡產生，與自由水面相交成一清楚的剖面；利用 Nikon F3 相機及 NAC 讀片機則可分別將流場速度分佈與自由水面起伏量化。

數值計算：

數值計算方面，吾人採用 Smolarkiewicz 等人(1998)所提的多維正定平流傳輸算則(MPDATA)針對淺水方程求解，並運用 Strang splitting 的概念將外力項平流，使得計算結果具有時、空間二階準確，其中，亦採行了 Davis(1983)所提之鬆弛邊界條件(relaxation boundary condition)。茲將吾人計算所依據之淺水方程寫成守恆式如下：

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \nabla \cdot (\hat{\mu} H) = V_H \cdot \nabla \cdot \nabla H \quad (3a)$$

$$\frac{\partial H\hat{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\hat{\mu} H\hat{u}) = -(\hat{f}_0 + \beta_{0,y})\hat{k} \times (H\hat{u}) \quad (3b)$$

$$-Fr_D^{-1}H\nabla(H + h_s) + V \cdot \nabla \hat{u}$$

其中，(3a)式右手邊為人工耗散項，(3b)式右手邊分別為科氏力項、重力項及動量耗散項。

四、結果與討論

(1) 初始條件

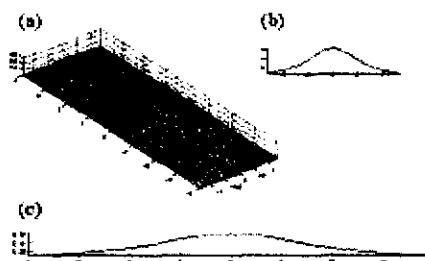


圖 2 三維構山

考慮一理想颱風渦漩與三維構山交互作用，其中構山由(4)式給定(見圖 2)

$$h_b = \frac{h_M}{\left(1 + \left(\frac{x - x_c}{a}\right)^2 + \left(\frac{y - y_c}{3a}\right)^2\right)} \quad (4)$$

另外，由相似律可得相關條件於表 1。並由上述流場顯影的方法分別將渦漩水平速度分佈與水深分佈求出，並據以求出數值計算之初值，如圖 3、圖 4。

(2) 實例

考慮一中度颱風渦漩由北緯 20 度生成，其最大切線速度與對應半徑分別為 40m/s 及 150km，則吾人根據相似律可得一水工渦漩其最大切線速度為 6cm/s，對應半徑為 3cm，並計算未擾動水深約為 10.5cm，且水槽底部須鋪設一斜率為 0.0538 的斜板以模擬行星 β 效應；值得注意的是，在吾人之水槽實驗中，所產生的渦漩其特徵尺度僅能接近所預期的相似尺度，分別以強渦、弱渦的實例來作說明。

在強渦的例子中(見圖 5)，渦漩自東南方接近地形，上半圖為實驗結果，下半圖為數值流線圖；吾人可以很清楚的看到渦漩直接過山的現象，而其整體運動的趨勢為向西北方向前進，並且吾人可見實驗與數值結果二者有相當良好的一致性；另外值得一提的是，渦漩在靠近及離開地形前後，在地形區域皆出現強風。

五、計畫成果自評

限於篇幅，吾人僅將弱渦的結果與強渦的結果一併以渦漩路徑加以展示於圖6；另外，吾人亦參考中央氣象局網站資料所載歷史颱風記錄，發現1997年安珀颱風與1994年道格颱風與吾人結果有相當的相似性；雖然颱風侵台問題整體上有相當的因素在於駛流及熱力因素等的影響，但吾人所進行基於 β 相似律的模擬仍具有一定程度對颱風路徑及風場的掌握與認知。

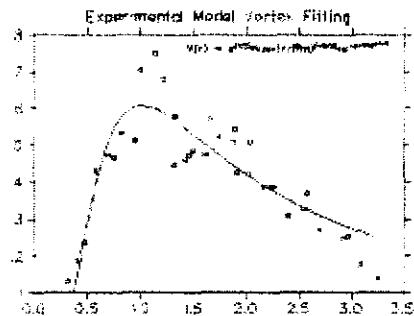


圖3 水工渦漩徑向速度分佈

六、參考文獻

- Chin-Chou Chu, Hong-Jeng Chen and Chien-Cheng Chang, 2000: The interaction of a cyclone with topography on a beta plane. *24th Conference on hurricane and tropical meteorology*, May 29-June 2.
- Chu, C-C, Liao, C-P, and Wang, Li-Hong, 1998: Experimental study of a monopolar vortex moving against obstacles on a beta-plane. *8th International Symposium on Flow Visualization*.
- Smolarkiewicz, P. K. and Margolin, L. G. 1998: MPDATA : A finite-difference solver for geophysical flows. *J. Comput. Phys.*, 140, 459-480.
- 王時鼎，(1992)“侵台颱風路徑、強度、結構及風雨整合研究”，行政院國家科學委員防災科技研究告 80-73 號，NSC 80-0414-P052-02B。
- 朱錦洲，王力弘，廖智鵬，(1999)“應用水工模擬探討地形對颱風渦漩之路徑與風場之影響”，第六屆大氣科學學術研討會論文集，577-582。
- 朱錦洲，王時鼎，郭光輝，(1992)“颱風過山之水工模擬”，論文彙編：天氣分析與預報研討會，463-474。

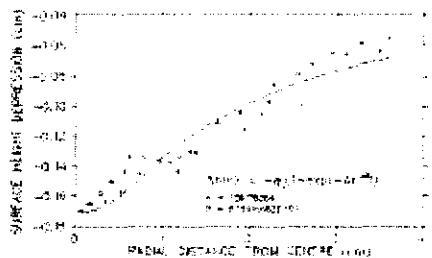


圖4a 水工渦漩水面窪陷分布



圖4b 垂直切面照明渦漩表面窪陷

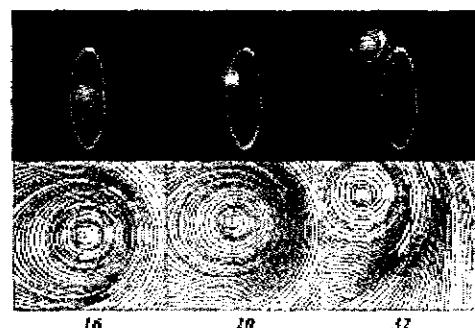
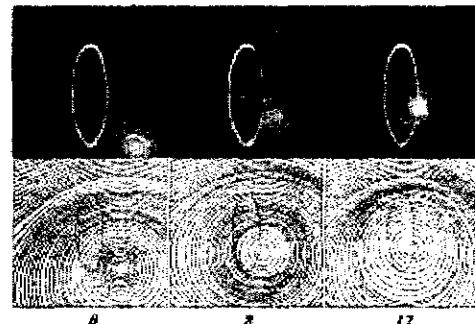


圖5 強渦自由渦山現象

Trajectories

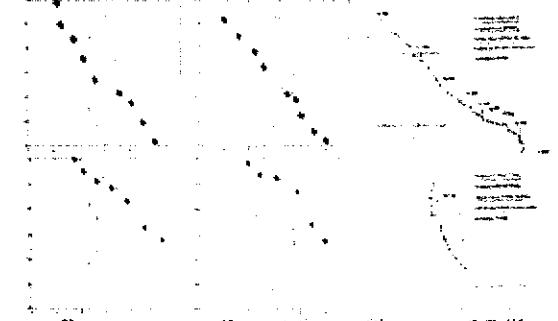


圖6 渦漩路徑比較圖(由左至右)：
分別為(1)實驗、(2)計算及(3)真實颱風問題