

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

子計畫七：颱風軸對稱化動力及眼牆結構之自調適網格增密
計算

計畫類別：整合型計畫

計畫編號：NSC93-2119-M-002-008-AP1

執行期間：93年08月01日至94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：張建成

共同主持人：朱錦洲

計畫參與人員：陳弘正、黃世霖、楊適壕、宮春斐、施清華

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 94 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-子計畫七：

颱風軸對稱化動力及眼牆結構之自調適網格增密計算

An adaptive mesh refinement (AMR) calculation on the axisymmetrization dynamics and eyewall structure of typhoons

計畫編號：NSC 93-2119-M-002-008-AP1

執行期限：93年8月1日至94年7月31日

執行單位：國立台灣大學應用力學所

主持人：張建成

Email: changcc@iam.ntu.edu.tw

共同主持人：朱錦洲

Email: chucc@iam.ntu.edu.tw

計畫參與人員：陳弘正、黃世霖、楊適壕、宮春斐、施清華

一、中文摘要

本年度研究基於淺水模式架構，修正及發展出一套基於有限體積方法的數值計算模式，應用此模式，吾人初步的計算了似颱風渦旋經過理想橢山的流場現象；探討渦旋過山時流場演變的特徵，特別是渦旋遭遇地形時軸對稱化過程的演進，主要的現象包括了主渦變形、山後副渦流逸、渦旋合併等複雜流場現象；本研究並藉由改變橢山走向及幾何外形比例，觀察似颱風渦旋過山相關的地形效應及駛流效應等。另外，本研究亦提出一新的動力模式來計算渦旋過山的渦心軌跡，並與複雜的淺水模式計算結果互相比對。

關鍵詞：淺水模式、有限體積法、軸對稱動力、被動染劑施放法

Abstract

In the present study, we develop a finite volume code to numerically calculate the shallow water model. We perform a series of calculations on the related flow fields of a typhoon-like vortex encountering a bell-shape mountain. The axisymmetrization dynamics of the vortices encountering the mountain is revealed by the interaction between the primary vortex and the associated secondary vortices. Further investigations of the topographic effect and the steering flow effect are performed by changing the orienting of topography as well as the geometric shape and size of the

topography. Finally, a dynamic model for tracking the vortex over topography is also presented for comparing the results from the SWM calculations.

Keywords: shallow water model, finite volume method, axisymmetrization dynamics, passive tracer flow visualization

二、研究背景與目的

本研究旨在延續吾人過去共同主持人朱錦洲教授近年來所進行一系列有關侵台颱風水工流況的水工實驗與數值模擬；在該系列研究中，首先藉由推導出基於淺水位渦守恆的水工相似律，吾人得以決定出相應的水工流況條件，包括旋轉台週期、水深、渦旋強度及地形幾何等條件；進一步吾人由淺水數值模式可模擬相應的流況，相關結果顯示，無論是水工實驗抑或是數值模擬皆獲得一致的結果，特別是在地形效應的模擬上，渦旋經過一似台灣地形的橢山時所展現的效應，如渦旋繞山、直接過山、路徑偏折、分裂過山等諸多現象，均在吾人過去數年的研究中獲得證實。

另外一方面，吾人亦在相關研究結果中發現，對於所謂的分裂過山的現象而言，以往文獻中並無充分討論其相關的物理機制，而在吾人的研究中則發現，在淺水流場中，藉由較高解析度網格的計算，諸多細微的流場渦度結構則會被清楚的刻劃出來，針對此一現象的解釋目前已漸為人所關注。本研究中吾人嘗試引進一高解析度

的計算算則—Clawpack—並藉由此計算方法所具有對流場物理量高梯度區能良好刻劃的特性，藉以進一步分析渦漩過山時之分裂過山的流況中所伴隨的一系列渦漩軸對稱化的過程；並且，該計算方法亦相當適合以所謂的自調適網格增密技術(AMR)來改善數值模式對流場變化劇烈處的掌握，本年度計畫，初步以達成發展以CLAWPACK為核心算則的淺水數值模式，並先以均勻網格為計算標的。

另外，本研究亦推導一渦漩運動之動力理論，根據渦漩過山的物理條件，定義兩重要的參數—動力模式常數及地形比例常數，針對不同流況，吾人可推求合適的參數值以適切的描述渦漩運動並與淺水數值計算結果相互比對。

三、研究方法

3.1 淺水數值模式[1]

本研究所計算的淺水方程可以寫為：

$$\frac{\partial H_0}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{u}H_0) = 0,$$

$$\frac{D\vec{u}}{Dt} + g\nabla(h_B + H_0) = -(f_0 + \beta_0 y)\vec{k} \times \vec{u},$$

其中 \vec{u} 為水平速度， H_0 為水深， h_B 為地形起伏， g 為 reduced gravity，在本研究取 $1.96m/s^2$ 以適當的代表真實大氣的浮力效應。數值計算所採用的方法 CLAWPACK 為一高解析度的有限體積方法，此法適於計算雙曲線型偏微分方程式，在均勻離散的網格界面（或有限體積）上逐點計算相應的黎曼問題(Riemann problems)；由於離散的黎曼問題具有捕捉不連續流場現象的能力，對於渦漩過山問題中所遭遇的渦漩破裂、重整、軸對稱化等複雜現象有其適切性，較之過去所使用基於有限差分的數值模式可說有較佳的表現。

3.2 實驗條件

參考[2]，本研究取渦漩的初始條件為一蘭金渦(Rankine vortex)，相對應的風場及高度場表示如下：

$$v_\theta(r) = \begin{cases} \frac{1}{2}\zeta_c r & r \leq R_m; \\ \frac{1}{2}\zeta_c \frac{R_m^2}{r} & r \geq R_m, \end{cases}$$

$$H_0(r) = \begin{cases} D_0 - \frac{1}{4g}\zeta_c^2 R_m^2 + \frac{1}{8g}\zeta_c^2 r^2 & r \leq R_m; \\ D_0 - \frac{1}{8g}\zeta_c^2 \frac{R_m^4}{r^2} & r \geq R_m, \end{cases}$$

其中 V_θ 代表渦漩的切向速度， ζ_c 則代表渦心的平均相對渦度， D_0 為未擾動水深， R_m 為渦漩最大切線速度。本研究中取近似中度颱風強度的代表值分別為：

$D_0 = 5km$, $\zeta_c = 5.33 \times 10^{-4}s^{-1}$ and $R_m = 150km$. 並且吾人取網格距為 5 公里，網格大小為 $640*640$ ，計算步長約為 40 秒，每組實驗皆計算至 40 小時，並且考慮 Beta 效應的影響。另外，本研究中所使用的橢山外形為：

$$h_B = \frac{h_M}{\left(1 + \frac{(x-x_a)^2}{a_h^2} + \frac{(y-y_a)^2}{b_h^2}\right)^{3/2}},$$

為了配合類似台灣地形，取地形半山高為 40 及 120 公里；另外，山高則取 2500 公尺。

3.3 渦心路徑動力模式[3]

由淺水位渦守恆及適當的因次分析，吾人可推得無因次位渦表示式：

$$\Pi^* \equiv \beta_0^* y^* + \beta_B^* h_E^* - \beta_v^* \eta^* + \zeta^* (1 + Ro_v (\beta_B^* h_E^* - \beta_v^* \eta^*)) = const.$$

並且，吾人假設在渦漩過山過程中渦心平均窪陷及平均相對渦度維持定值，亦即：

$$\delta\eta^* \approx 0, \quad \text{and} \quad \delta\zeta^* \approx 0.$$

則吾人可進一步推得沿緯度方向的地形調整速度為：

$$\vec{V}_y^* = -\frac{\alpha\kappa \cos^2\gamma}{1 + \alpha\kappa \frac{\partial h_B^*}{\partial y^*}} \left(\vec{V}_0^* \cdot \nabla^* h_B^* \right) \vec{e}_y.$$

其中， α 為動力模式常數，可寫為：

$$\alpha \equiv \frac{(1 + \theta Ro_v \zeta_c^*) \beta_B^*}{\beta_0^*}.$$

而 γ 為局部地形法線方向與垂直方向的夾角， κ 為平均地形比例常數，約為 0.015 (本研究中)，代表渦心感受的平均地形起伏與真正地形之間成比例， θ 則為幾何修正常數，代表渦旋經過地形時伴隨的環流造成過山後平均渦度增減的修正係數，一般取 2。最後，渦心路徑的預報移速可寫成：

$$\vec{V}^* \equiv \vec{V}_0^* + \vec{V}_y^*,$$

其中， \vec{V}_0^* 為渦旋初始移速。

四、結果與討論

圖 1 為一自由過山渦旋 ($Ro \sim 5.34$) 之無因次相對渦度時間演變圖。地形置放東經 121 度，北緯 23.5 度的位置 (似台灣)；其中實線代表正渦度，虛線代表負渦度。

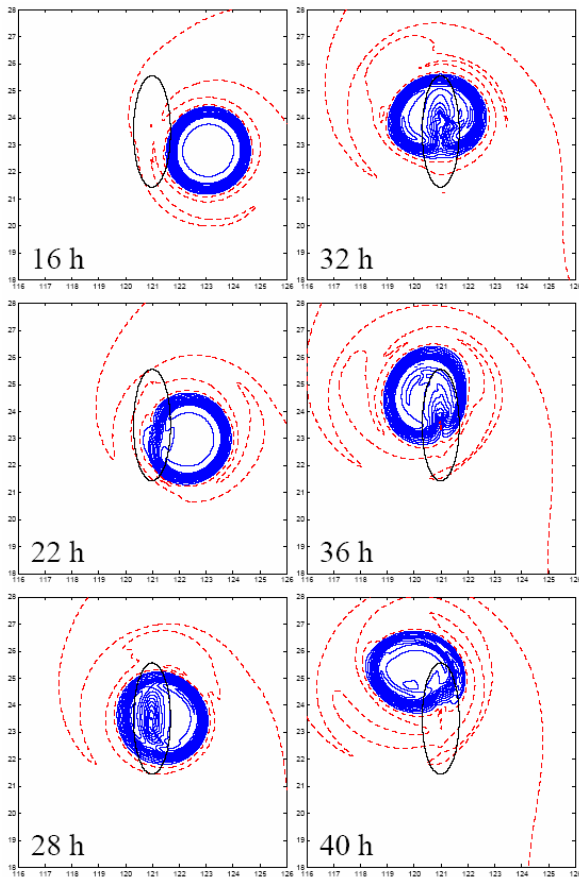


圖 1 自由過山之無因次相對渦度演變

由圖 1 看來，渦旋大體往西北方前進，而在過山時渦旋除了行進路徑稍有偏折外，最顯著的現象要屬渦旋的軸對稱化過程；在渦旋接觸地形始，渦旋開始受到擠壓而變型 (22h)，隨著 Beta 效應的趨使渦旋可持續過山；期間，吾人可觀察到渦旋漸變形為橢圓形 (非軸對稱，28h-40h)，後

續渦旋在離開地形後即逐漸恢復圓形，此即為渦旋過山之軸對稱化動力的最基本的過程。另外，由 Beta 效應影響所誘發的負渦度區，隨著渦旋過山，也有截然不同的發展，一是外圍的負渦區幾乎唯持不變，而有趣的是緊依著正渦周圍的負渦會受正渦去軸對稱化 (變成橢圓形) 的影響，漸漸成為伴隨著主渦的兩旋臂 (spiral arms)。

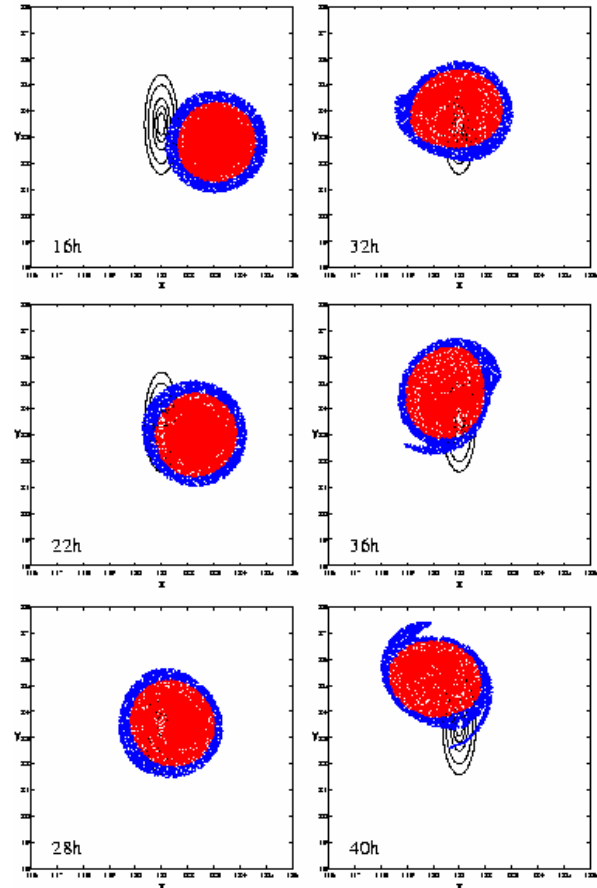
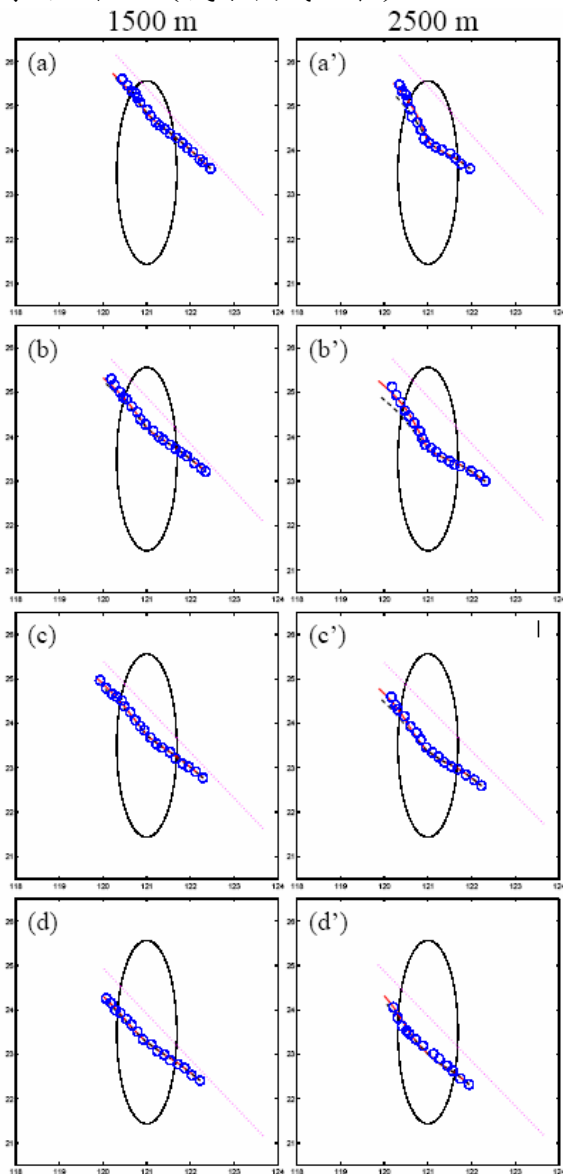


圖 2 自由過山之被動染劑演變

本年度研究中，吾人進一步引進數值流場中常用的被動染劑的技巧，來觀察渦旋演變中另一方面的資訊。圖 2 為相對於圖 1 之被動染劑 (passive tracer) 演變圖，此一染劑的數值上之施放，並不與流場發生作用，僅僅被動的跟隨流場的平流而動，可近似的看作是像衛星雲圖一樣的流場顯影。圖 2 中吾人以最大風速半徑內 (此為 150 公里) 施以紅色染劑，而最大風速半徑外圍則施以藍色染劑，此處取 50 公里。由演變結果，吾人可知最大風速半徑內的染劑幾何形狀在過山時先由圓形變為雞蛋形，再由雞蛋形轉變為橢圓形；而至於外圍的染劑則在渦旋過山的後半時期從橢圓長軸的兩端放出旋臂，並且此兩區域的染劑在演變過程中並無相混合的情況發生。

圖 3 為由不同起始位置渦漩過山(1500 公尺及 2500 公尺)的渦心路徑比較。其中圓圈代表淺水模式計算結果，實線代表渦心動力模式軌跡，而虛線則代表未放置地形時渦心軌跡（淺水模式結果）。



由圖 3 可知，地形高度愈高，渦心過山時向南偏折愈大；而對於同一地形高度、不同起始位置而言，靠近地形北部過山渦漩會有較大的路徑偏折，此可由動力模式解釋：因為由北部通過地形的渦漩，在迎風處向南偏折後，轉向移動位置恰為地形變化最劇烈的中部，故由此可知，通過地形北部之渦漩對應有最大的路徑偏折；此點結果亦可由其路徑與不具地形的路徑之差異值得到證實。

圖 4 為一分裂過山渦漩($Ro \sim 5.34$)過山之無因次相對渦度時間演變圖。與圖 1 相比，

此個案渦漩起始位置稍為偏南。

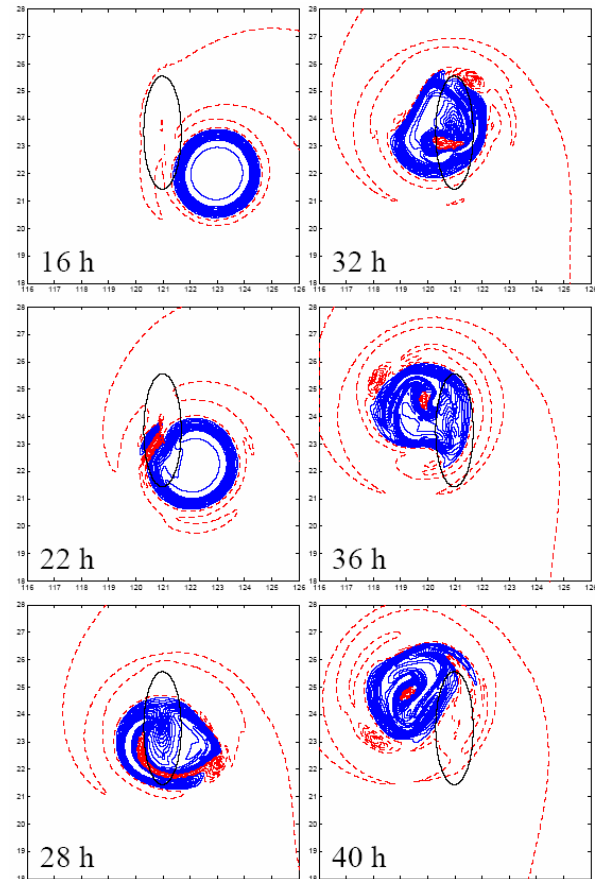


圖 4 分裂過山之無因次相對渦度演變

由圖 4 吾人觀察到與上述個案(圖 1)相當不同的流場現象。首先，由於撞擊的位置，渦漩最大風速區幾乎正向吹向地形中心(最高處)，故伴隨在地形中心背風處有二道正負相間的渦度區(22h)；此一流逸(shedding)的次渦漩(secondary vortices)隨著主渦(primary vortex)向西北方向移行的逼近，不斷地由地形背風面釋放出來(28h)；然而，隨著主渦穿越地形後，原先主流方向轉變為對流逸負渦的反向，因而不再有次渦被流逸出來，而原先的負渦帶因而被包裹在主渦內(32h)；更仔細的來看，原先次渦中的正渦區在主渦通過地形後，反而扮演起截斷次渦中負渦的角色，將於 28h 時延伸過地形前後的負渦帶一截為二，至 32h 時，原先負渦帶一半在正渦內，一半則遺留在外，被主渦環流方向逆時針向地帶動(32h-40h)。自此之後，一方面，主渦內部結構越形複雜，而另一方面，由於渦漩軸對稱化的力量，致使主渦逐漸恢復圓形，而在軸對稱動力過程中，亦不斷的有局部的旋臂被拋放出來。此一列有趣的現象不啻為軸對稱化動力中角動量

守恆的最佳說明。

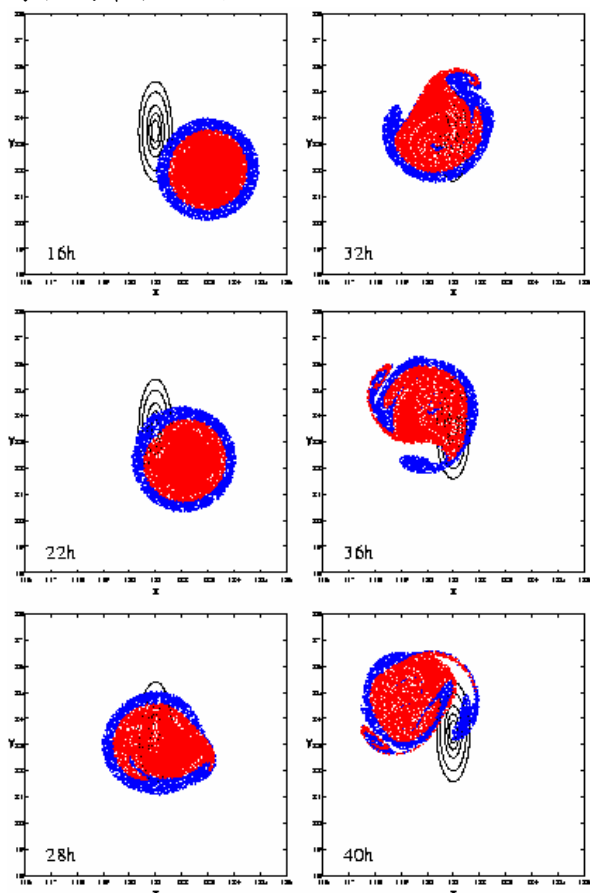


圖 5 分裂過山之被動染劑演變

圖 5 為分裂過山之染劑施放演變，由上一段的討論可知，由於渦旋撞擊位置的南偏，引發渦旋最大風速區與地形中心處的強烈作用，至終產生正負的渦條(vorticity banner)，隨著渦旋向地形的移近，此渦條並未發展流逸至山後，反倒是受到主渦環流的帶動，捲入主渦環流中；在 28 小時的圖中，吾人發現由於負渦條的捲入，代表著外圍的被動染劑被捲入主渦中，此一捲入的現象隨著主渦的過山皆陸續有捲入，至終，外圍藍色染劑一部份仍包圍主渦，另一部份則成為環繞主渦外圍的旋臂結構。

五、結語

本研究以一高解析度的有限體積計算模式，在淺水模式的架構下，詳細的考查似颱風渦旋過山的流場物理，特別是渦旋過山中所遭遇的各種流況的解釋，以渦旋軸對稱動力的觀點來看，清楚的解釋了相關的物理現象；並且相關的渦心路徑亦與吾人所推導渦心動力模式甚為吻合。

七、計畫成果自評

在本年度計畫中，吾人所進行一系列的

渦旋過山的計算中，充分的體現了在颱風過山的物理中，軸對稱動力化的過程所扮演核心的角色，並且藉由動力模式的比對，提供了颱風過台灣相關的現象之另一層面的思考。

八、參考文獻

- [1] LeVeque, R. J.: Balancing source terms and flux gradients in high-resolution Godunov methods: The quasi-steady wave-propagation algorithm. *J. Comput. Phys.*, Vol. 146, pp. 346-365. (1998)
- [2] Smith, R. B. and Smith, D. F.: Pseudoinviscid wake formation by mountains in shallow-water flow with a drifting vortex. *J. Atmos. Sci.*, Vol. 52, pp 436-454 (1995)
- [3] Chen, H.C., Chu, C.C., and Chang, C.C: Strong cyclonic vortices over topography on a beta-plane. XXI ICTAM, Warsaw, Poland, 15-21, Aug. 2004.
- [4] 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)