

一、研究內容

(1)、侵台颱風之診斷分析與模擬研究：

針對侵台颱風，進行資料診斷分析，探討個別颱風的特性和其中伴隨的重要天氣現象。其次，利用 MM5/WRF 模式模擬颱風侵台過程，並利用模擬結果進行診斷分析，探討導致颱風結構和路徑變化的物理機制。最後則是綜合診斷分析和數值模擬結果，嘗試歸納不同類型侵台颱風所伴隨的重要特徵，並建構機制概念模式。希望透過有系統之研究，建立各類型侵台颱風結構和路徑變化之機制概念模式，並將結果轉化為預報指引。在此必須強調的是，由於台灣地區的颱風災害，大都因豪雨所導致，故研究時特別著重於強降水的颱風個案，尤其是氣候模式所無法掌握的特殊豪雨個案。

過去數年中完成的個案與分析重點有：

- (a) 1990 年 Yancy 颱風侵台前，導致路徑顯著變化並加速侵台之物理機制。(簡和李，2002，大氣科學)
- (b) 1990 年 Dot 颱風侵台時，中心過山與背風面副中心之發展機制。(Jian, Lee and Chen, 2004, TAO)
- (c) 1990 年 Ofelia 颱風侵台時之路徑變化特徵與背風系統之發展。(李和林，1999，大氣科學；Lee, 2006, TAO, 修改中)
- (d) 1998 年 Nichole 颱風於北行時，突然向東北-東轉向而侵襲台灣之物理機制(李和張，2003)。
- (e) 1987 年 lynn 颱風與東北季風共伴導致豪大雨之分析模擬和概念模式發展。
- (f) 2000 年 Xangsane 颱風於 ET 過程中之結構變化，及其和東北季風之交互作用而導致豪雨之機制。
- (g) 2001 年 Toraji 颱風登陸前之路徑偏向，以及登陸時紮實結構之維持機制，此結構特徵導致沿颱風路徑相當高之時雨量而造成嚴重災情。
- (h) 2004 年 Mindulle 颱風期間和颱風過後，導致持續性豪雨之綜觀條件和重要機制。
- (i) 2004 年之 Mindulle 颱風—模擬颱風登陸後之結構和環流變化特徵，並著重於副低壓/副環流之形成機制及其和颱風環

流場及環境流場之交互作用。

目前進行之個案有：

- (a) 2005 年之 Longwang, Haitang 和 Talim 颱風—目前已完成 LongWang 颱風之 Aerosonde 觀測資料分析，並針對此三個颱風之特性進行比較分析。

(2)、颱風形成之分析與模擬研究：

針對伴隨顯著環流特徵（如信風爆發、強跨赤道流和梅雨期之弱斜壓環流）之颱風形成個案，進行統計分析與數值模擬；除嘗試瞭解此類颱風形成之氣候特性、環流和對流特徵外，並提出導致颱風形成之物理機制。此項工作為自然處補助下，個人長期颱風基礎研究重點之一。

目前已完成的成果有：

- (a) 有關信風爆發對熱帶擾動發展成颱風的影響方面，我們已相當瞭解其中之重要機制，部分結果已發表於 Lee and Lee (2002) 中。目前正整理伴隨強信風形成熱帶氣旋部份之模擬結果（含控制和對照實驗）。
- (b) 對於強跨赤道流對颱風形成的影響，初步的模擬成果已發表於 Lee and Lee (2002)；而有關伴隨強跨赤道流之颱風形成過程的結構變化特徵研究結果，亦已發表於大氣科學（李和侯，2004）。
- (c) 有關梅雨期於南海弱斜壓環境之颱風形成過程的診斷分析結果，已投稿至 Monthly Weather Review(accepted with minor revision)。

目前的研究重點則為：

- (a) 伴隨顯著環流場強迫作用下，形成熱帶氣旋時，中尺度特徵之模擬與分析。
- (b) 利用衛星資料（QuikSCAT 和 IR1），分析颱風形成時，中尺度環流和對流（MCS）之重要特徵，及其變化情形。

二、WRF 數值模式介紹

綜觀網格資料分析能幫助瞭解熱帶氣旋形成期間之環境流場特徵，但對其中的重要物理過程則無法進一步分析。至於系統的中尺度結構演變，雖可由 TRMM/TMI 或 QuikSCAT 風場等衛星遙測資料分析中，得到一些重要資訊，但仍受限於衛星資料時空解析度的問題，無法瞭解完整的物理過程。因此，利用數值模式還原熱帶氣旋形成期間之流場分佈和中尺度結構特徵，是本實驗室研究不可獲缺的方法之一。合理的數值模擬結果將可提供較完整的中尺度結構演變過程，並可進一步診斷分析和進行敏感度實驗，以探討其中之重要物理機制。本實驗室將使用 WRF(Weather Research and Forecasting Model) 進行數值模擬。

WRF Model 是一個完整的可壓縮非靜力模式，採用通量形式的完整方程組，是專為研究以及作業單位所設計的模式；因此在任何方面的研究進展，均可迅速實際應用在作業單位上，而在作業時所發現模式上的問題，也可快速的反應到研究單位，進行改善。模式設計的目標主要是針對高解析度的中尺度系統 (>1~10km)，同時融合了 MM5、Eta 等現有流行的數值模式中，表現較好的各類參數化方法。此外，其模組化的程式設計，可容許使用者自行加入新的參數化方法。WRF 模式也可進行實際或是理想個案的模擬。此模式並已建立平行化模組，可適用於大多數的 PC Cluster 系統上。圖 2.1 為 WRF 模式的流程簡圖。

WRF 可選擇使用地形跟隨高度的垂直座標系統 (σ 座標)，或是地形追隨質量的垂直座標。網格設計採用 Arakawa C-grid，其控制方程組如下

$$\partial_t U + \nabla \cdot (vU) + \partial_x p' = F_u \dots\dots\dots 2.1$$

$$\partial_t V + \nabla \cdot (vV) + \partial_y p' = F_v \dots\dots\dots 2.2$$

$$\partial_t W + \nabla \cdot (vW) + \partial_z p' + g\rho' = F_w \dots\dots\dots 2.3$$

$$\partial_t \Theta + \nabla \cdot (v\Theta) = F_\Theta \dots\dots\dots 2.4$$

$$\partial_t \rho' + \nabla \cdot V = 0 \dots\dots\dots 2.5$$

$$\text{其中 } V = \rho v = (U, V, W) \quad \Theta = \rho \theta$$

2.1~2.3 式分別為 X,Y,Z 方向之動量方程，2.4 為熱力方程，2.5 為連續方程

$$\text{將 } p = \bar{P}(Z) + P', \rho = \bar{\rho}(Z) + \rho', \Theta = \bar{\rho}(Z)\bar{\theta}(Z) - \Theta'$$

$$p = p_0 \left(\frac{R\Theta}{P_0} \right)^\gamma$$

$\nabla p = \gamma R \pi \nabla \Theta, \pi = (p/p_0)^\kappa, \kappa = R/C_p$ 代入上列方程組，得到

$$\partial_t U + \nabla \cdot (vU) + \gamma R \pi \partial_x \Theta' = F_u \dots\dots\dots 2.6$$

$$\partial_t V + \nabla \cdot (vV) + \gamma R \pi \partial_y \Theta' = F_v \dots\dots\dots 2.7$$

$$\partial_t W + \nabla \cdot (vW) + \gamma R \pi \partial_z \Theta' - g \left(\bar{\rho} \frac{\pi'}{\pi} - \rho' \right) = F_w \dots\dots\dots 2.8$$

$$\partial_t \Theta + \nabla \cdot (v\Theta) = F_\Theta \dots\dots\dots 2.9$$

$$\partial_t \rho' + \nabla \cdot V = 0 \dots\dots\dots 2.10$$

$$\text{令 } V'' = V - V^t, \Theta'' = \Theta - \Theta^t, \rho'' = \rho - \rho^t$$

$$\partial_t U'' + \gamma R \pi^t \partial_x \Theta'' = F_u^t - \partial_x p^{tt} - \nabla \cdot (v^t U^t) \dots\dots\dots 2.11$$

$$\partial_t V'' + \gamma R \pi^t \partial_y \Theta'' = F_v^t - \partial_y p^{tt} - \nabla \cdot (v^t V^t) \dots\dots\dots 2.12$$

$$\begin{aligned} \partial_t W'' + \gamma R \pi^t \partial_z \Theta'' - g \bar{\rho} \frac{R \pi^t \Theta''}{C_v \pi \Theta} + g \rho'' = \\ F_w^t - \partial_x p^{tt} - g \rho^{tt} - \nabla \cdot (v^t W^t) \dots\dots\dots 2.13 \end{aligned}$$

$$\partial_t \Theta'' + \nabla \cdot (V'' \theta^t) = F_{\Theta}^t - \nabla \cdot (v^t \Theta^t) \dots\dots\dots 2.14$$

$$\partial_t \rho'' + \nabla \cdot V'' = -\nabla \cdot V^t \dots\dots\dots 2.15$$

2.11~2.15 為模式實際計算使用的方程組，其中等號左側為較高頻的波動(Acoustic mode)，例如 2.14 熱力方程，溫度平流以及質量的源匯項，以及 2.15 連續方程中的浮力項等；等號右側為低頻的波動(Gravity mode)，包含有計算較費時的上游差分以及高階的通量計算。因此在 WRF 模式中，另外使用 3 階的 Runge-Kutta 時間差分法 (Wicker and Skamarock,2002)。由於對於不同頻率的現象使用不同的時間步長積分，例如較高頻的聲波或是 Lamb wave 便使用較短的時步，而低頻的重力波或是羅士比波採用較大的時步，因此可容許較大的積分時間步長，計算教有效率同時也較穩定。Runge-kutta 每個時步的積分過程分成 3 個步驟 (圖 2.2)，說明如下：

$$\phi^* = \phi^t + \frac{\Delta t}{3} R(\phi^t) \dots\dots\dots 2.16$$

$$\phi^{**} = \phi^t + \frac{\Delta t}{2} R(\phi^*) \dots\dots\dots 2.17$$

$$\phi^{t+1} = \phi^t + \frac{\Delta t}{3} R(\phi^{**}) \dots\dots\dots 2.18$$

當模式需要計算 ϕ 從時間 t 積分到 $t + \Delta t$ 時，首先利用 ϕ^t 作為初始的變化趨勢，以計算 $t + \frac{\Delta t}{3}$ 時間點的值 ϕ^* (2.16)；第二步利用 ϕ^* 作為新的變化趨勢，計算 $t + \frac{\Delta t}{2}$ 時間點的值 ϕ^{**} (2.17)；接下來利用計算出來的中點值 ϕ^{**} 作為新的變化趨勢，計算 $t + \Delta t$ 時的值。雖然 3 階的 Runge-Kutta 計算步驟較多，但是卻可得到更正確、穩定的計

算結果，Runge-Kutta 時間差分法明顯比 Leapfrog 差分方法更為穩定，同時也容許較高階的空間差分；一般而言，WRF 模式中使用之 $\Delta t=6\Delta x$ ，相對於 MM5 模式中 $\Delta t=3\Delta x$ ，計算效率大大提升。此外，針對模式中各種參數化過程(雲微物理過程、擴散...等)，乃是個別進行預報計算後，於每個時步的最後再與 Θ 項合併。WRF 同時採用 5 階的平流前差分方法進行計算平流項；因此，就正確率以及計算效率上，WRF 均較 MM5 模式表現要好。同時，在 WRF 模式中，質量、動量、熵...等參數均為保守量，但在 MM5 中這些重要參數並不保守；因此，WRF 模式的模擬結果一般也較為合理。

WRF 模式同時已建立方便的 3 維資料同化方法，不論是傳統觀測資料或是越來越多的衛星觀測資料，甚至包括 2006 四月份升空的福衛三號衛星，透過 GPS 訊號反演大氣狀況的衛星資料，都能同化入模式初始場中，以期模式中初始狀況更接近真實大氣的分佈，在預報作業上能得到更好的表現。針對個案分析，也可利用此 3D VAR 模組將模擬期間所有的可用的觀測資料，同化入初始條件與邊界條件中，使得模擬期間的邊界條件更接近實際大氣的狀況，也將有助於模擬的正確性。

目前 WRF 模式中可以採用的參數化過程，廣納入 MM5、Eta 等模式中表現較好的各種參數方法，並且做了最新理論的調整，例如 MM5 模式中的 Kain-Fritsch 積雲參數化、Reisner 雲微物理參數化以及 Dudhia 短波輻射、RRTM 長波輻射參數化；Eta 模式中的 Betts-Miller-Janjic 積雲參數化、Ferrier 雲微物理參數化以及 GFDL 長波短波輻射參數化。同時透過模組化的設計，WRF 可容許使用者較易加入其他的參數化過程。在未來，WRF 也將加入雲摩擦(Cloud fraction)模組、重力波(Gravity wave drag)模組、植被模組、海洋與波浪模組以及大氣化學模組，讓模式在各方面都能更接近真正的大氣狀況。

最後必須強調的是，之前利用 MM5 模式模擬颱風形成過程之研究，大多侷限在解析度 20 公里的模擬結果(如 Lee and Lee, 2002、莊, 2004、Cheung, 2004)，原因在於若採用較細微網格，模擬結果對

於雲微物理參數化的選擇會十分敏感。在先前的 MM5 模擬結果中，大都使用 Simple Ice (Dudhia,1989)雲微物理參數化，但由於此種參數化過程較簡單，考慮的水體種類較少(圖 2.3)，雖然較節省計算機資源，但是對於較細微網格的模擬結果，有很大的影響，常使模式中的系統強度和結構不易維持。因此未來在採用 MM5 或 WRF 進行模擬時，將利用考慮較為詳細、包含水體種類較多的 Reisner mixed-phase (Reisner et al., 1998)，或是 Goddard microphysics (Tao et al., 1993)雲微物理參數化(圖 2.4)。

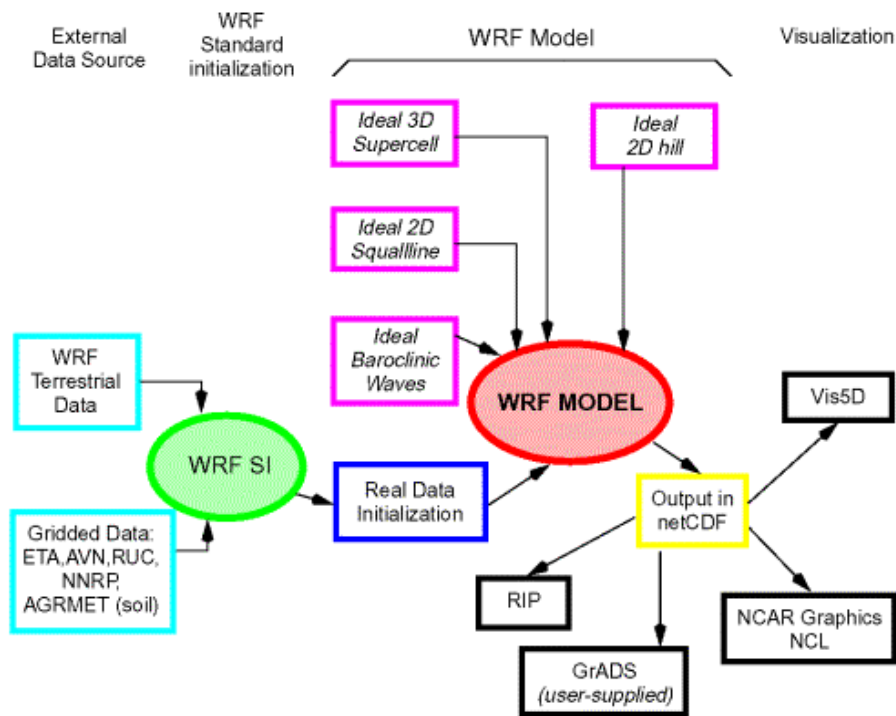


圖 2.1 WRF 模式簡要流程示意圖

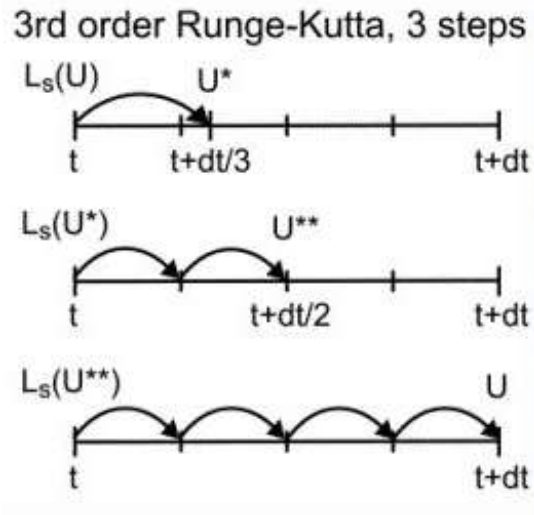


圖 2.2 3 階 Runge-Kutta 時間差分法示意圖

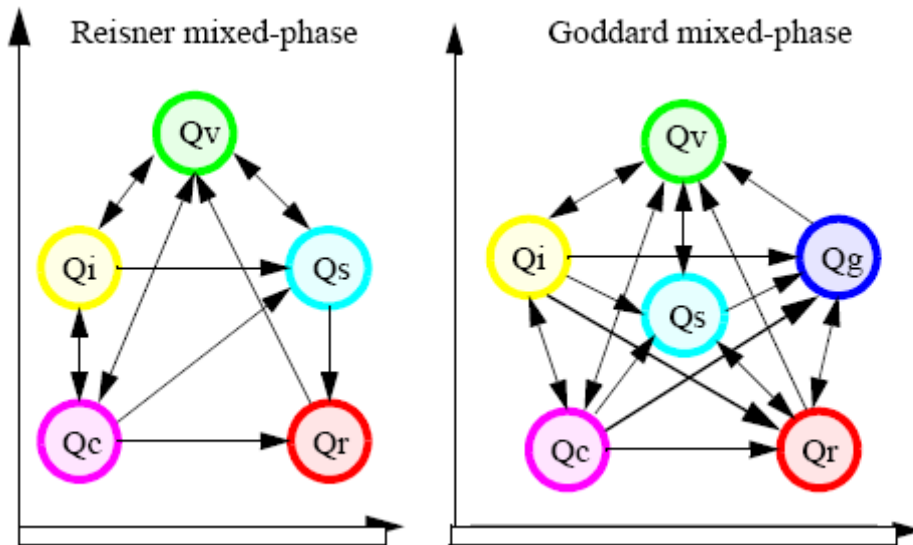


圖 2.3 Reisner mixed-phase 雲微物理參數化 (Chen and Sun 2002, 左) 和 Goddard microphysics 雲微物理參數化 (Tao et al. 1993, 右) 之示意圖。其中 Q_v 代表水氣、 Q_i 代表雲冰、 Q_c 代表雲水、 Q_s 代表雪花、 Q_r 代表雨水、 Q_g 代表雹。

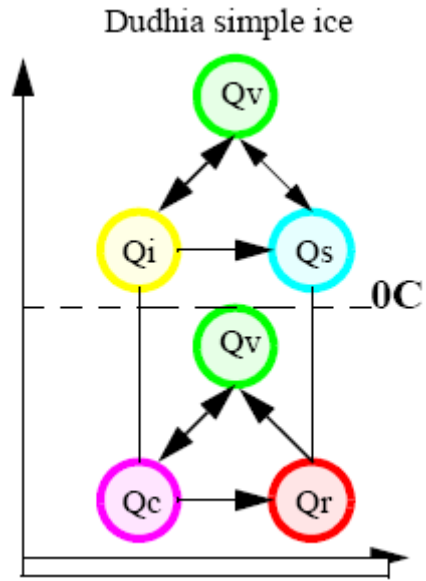


圖 2.4 Simple Ice 雲微物理參數化(Dudhia 1989)示意圖。其中 Q_v 代表水氣、 Q_i 代表雲冰、 Q_c 代表雲水、 Q_s 代表雪花、 Q_r 代表雨水、 Q_g 代表電。