渦旋初始化方法對熱帶氣旋模擬之影響
— 蘇迪勒颱風（2015）個案

周柿均 [1]　林沛練 [1]　陳宇能 [2]　涂絹琪 [1]

國立中央大學大氣科學系 [1]

美國夏威夷大學大氣科學系 [2]

摘　　要

本研究採用 Nguyen and Chen (2011, 2014)提出的動力驅動渦旋初始化方法(後續稱作 NC)，假設環境場氣象變數與熱帶氣旋三維本體有高度相關，透過模式短時間週期反覆積分調整氣象變數分布情形，進而產生強度與觀測相當接近之渦旋結構。動機為測試在具有不同特性之熱帶氣旋使用 NC 初始化方法是否有一致的模式初始場改善能力，選取 2015 年蘇迪勒颱風進行個案分析。

結果顯示 NC 確實能有效增強數值模式初始場中熱帶氣旋的強度，且不論水平或是垂直結構亦有改善的情形。另外，欲瞭解地形在渦旋初始化過程中對熱帶氣旋強度發展的影響，探討初始化方法在模式中的限制與適用性。結果顯示當颱風靠近地形時，在執行初始化過程中須將可能影響颱風之地形因素移除，直到完成初始化後於預報過程中移回原始地形，數小時後透過模式動力過程能夠產生颱風環流與地形之交互作用。最後，我們透過不同雲微物理參數化討論不同雲微物理過程對熱帶氣旋的影響。結果顯示暖雲方案模擬出較寬廣的風場特徵與回波範圍，此結果驗證 Fovell et al. (2016)提出的熱帶氣旋雲物理過程，然而以有考慮冰態過程之微物理參數化模擬之颱風結構較接近真實情況。

關鍵字：渦旋初始化、颱風、雲微物理

一、前言

由於熱帶氣旋通常生成於觀測資料較缺乏的區域，導致模式初始猜測場較無代表性，再者中尺度模式初始場來自於全球分析場內差而來，且解析度不足以良好解析熱帶氣旋結構，尤其在內部變化較劇烈的區域，這對於後續進行颱風模擬探討可能會有負面的影響。為了改善數值颱風天氣預報之初始條件，通常採用建造虛擬渦旋取代原始渦旋的方式以增強颱風結構與強度，目前有許多不同的初始化方法來給定初始渦旋，主要可以分為三種：虛擬渦旋資料同化、虛擬渦旋植入方法與模式積分。

無論上述何種方法，熱帶氣旋初始化的最終目的為改善模式初始氣象場的結構與強度，但不同颱風個案有各自的特色，各種方法亦有其改善能力的限制，因此初始化方法的研究與發展直至現今仍是數值模式中非常重要且極具挑戰性的課題。

二、研究動機

探討將針對 NC 渦旋初始化方法對於蘇迪勒颱風在模式初始場的改善與預報結果進行分析。另外，一般渦旋初始化方法的使用時機為熱帶氣旋於廣闊海洋上生成或活動的期間。若將初始時間向後推移至靠近地形時，有地形存在之環境場可能使模式動力過程產生不穩定等問題，進而無法達到增強熱帶氣旋的成效。因此在初始化過程中我們移除台灣與澎湖地形，研究初始化方法之限制與適用性。

三、研究方法

透過綜觀環境場與模式動力過程進而調整初始場中熱帶氣旋的強度。除了模式模擬與預報的表現能力外，我們認為(1)在短時間內熱帶氣旋可能會移動位置，但不會明顯改變其結構；(2)熱帶氣旋結構與環境場有高度密切的相關性。透過前述假設，瞭解綜觀環境場在初始化過程中扮演相當重要的角色，因此我們能夠透過初始時間之綜觀環境與模式動力過程進而調整渦旋本體中氣象變數分布的情形，其中最低海平面氣壓與最大水平平均風速為我們判斷熱帶氣旋強度的指標。

使用 WRF 模式並採用 NCEP 全球模式分析場資料(FNL)作為熱帶氣旋初始化循環之初始條件，另外需要給定熱帶氣旋中心經度、緯度、熱帶氣旋最低海平面氣壓值與最大風速值等觀測資料，以及渦旋半徑的資訊。渦旋半徑的給定通常有兩種方式，分別為 15m/s 暴風半徑或直接給定固定數值，本篇採用固定半徑 400 公里。在固定環境場的情形下，進行短時間週期 1 小時的模式積分，模式產出的預報結果透過 Kurihara et al. (1993)提出的渦旋分離方法(式 2.1)，將模擬範圍區分為環境場(F_E)與三維渦旋本體(F_V)兩個部分。

$$F = F_E + F_V \tag{1}$$

環境場變數於二維座標其單位距離(q_n)給定對應之權重(K_m)而內插出該位置的變數值，其中單位距離採用 Kurihara et al. (1993)保留波長約大於 1000 公里的長波訊息方式，結果可視為綜觀環境場的變數分布，如式(2)所示：

$$\bar{F}^E_{i,j} = F_{i,j} + K_m\left(F_{i-q_n,j} + F_{i+q_n,j} - 2F_{i,j}\right)$$
$$F^E_{i,j} = \bar{F}^E_{i,j} + K_m\left(\bar{F}^E_{i,j-q_n} + \bar{F}^E_{i,j+q_n} - 2\bar{F}^E_{i,j}\right) \tag{2}$$

在渦旋本體變數的部分，先由式 3 得到此次循環的渦旋變數值，然後經由單位長度(dx、dy)與時間(dt)透過與此點距離得到權重係數($W(r)$)，進而得到此次循環(c)、此位置(x, y, z)之修正值($f^V_{c,t_0,x,y,z}$)，最後再加上原本此次循環的渦旋變數值即為下一次渦旋本體變數。

$$F^V_{c+1,t_0,x,y,z} = F^V_{c,t_0,x,y,z} + f^V_{c,t_0,x,y,z} \quad c = 1, \dots, N.$$
$$f^V_{c,t_0,x,y,z} = W_{x,y}F^V_{c,t_0,x,y,z} + \left(1 - W_{x,y}\right)F^V_{c,t+dt,x+dx,y+dy,z} \tag{3}$$

僅針對欲討論之特定氣象變數做渦旋分離的動作，如風場、氣壓場、高度場與各類水氣混合比等。透過渦旋分離的概念，可使初始化過程中僅改變颱風本體變數，而不會影響環境場的部分。另外，由於在短時間模式積分過程中，熱帶氣旋仍可能受到環境駛流場等因素而向其他地方移動，因此我們須將三維渦旋本體的變數移動至觀測資料颱風中心之經度、緯度。重複此過程直到熱帶氣旋強度與觀測資料接近，即完成渦旋初始化過程。不僅可以改善熱帶氣旋的強度，亦修正原始初始場颱風中心的位置。

此研究採用區域模式 WRF 版本 3.3.1，使用兩層巢狀網格，水平解析度分別為 18 公里與 6 公里。第一網域水平網格配置為 121×121，第二網域水平網格配置為 205×205；垂直分層為 38 層，最高可到 50 百帕；初始與側邊界條件皆使用美國國家環境預報中心(NCEP)之 FNL 水平解析度 1 度之全球分析場資料，表 1。物理參數化法選用 Ferrier 雲微物理參數化(Rogers et al. (2001))，Betts-Miller-Janjic 積雲參數化(Janjić (1994))，RRTM 長波輻射參數化(Mlawer et al. (1997))，Dudhia 短波輻射參數化(Dudhia (1989))，YSU 行星邊界層參數化(Hong et al. (2006))。

進行地形高度配置處理時，選取台灣與澎湖的範圍分別為東經 120.01 度至 122.5 度、北緯 21.7 至 25.51 度與東經 119.11 度至 119.81 度、北緯 23.11 度至 23.91 度。處理方式為在 WPS 裡的 Geogrid 相關變數進行更動，包含將目標區域其地形高度設為零、土地利用與土壤類型改為水體等。

四、結果討論

此節將分成三個部分進行討論，各組實驗簡稱與意義如表 2 所示。

4.1 渦旋初始化對颱風渦旋之影響

圖 1 為有無使用 NC 渦旋初始化的緯向海平面氣壓與水平平均風速分布，亦顯示熱帶氣旋中心氣壓與中心附近風速變化的特徵與強度。NC 結果顯示熱帶氣旋中心氣壓確實有顯著加深的情形，然而最大風速相較於 CTRL 並沒有太大的差異，不過我們可以透過圖 2(上)瞭解地表附近 10 米水平平均風速的分布。CTRL 結果顯示水平平均風速大小較呈現南北、東西

對稱的情形，可能因為初始資料源於全球模式，較低的解析度導致在熱帶氣旋眼牆附近氣象變數劇烈變化的區域容易有較差的掌握；而 NC 其水平平均風場有產生明顯的非對稱結構，較強的風速主要出現在熱帶氣旋北側。整體可以發現透過 NC 方法主要改善熱帶氣旋內核附近氣象變數的數值與分布，而較外圍區域則無明顯差異。除了水平平均風場，圖 2(下)顯示初始時間海平面氣壓分布情形。結果顯示 NC 在靠近颱風中心之氣壓梯度較顯著，較低的中心氣壓數值表示熱帶氣旋強度較強。接著我們將預報一小時之水平最大回波分布來進行分析與討論(圖 3)，並採用觀測資料地球同步氣象衛星 MTSAT-2 之紅外線亮溫分布衛星雲圖(圖 4)，能夠反映降雨強度的分布情形。結果顯示 NC 在熱帶氣旋東側有一條主要的非對稱環形特徵，與觀測衛星雲圖的分布較接近，且在熱帶氣旋南側之眼牆附近出現相對較明顯的最大回波分布，此現象亦符合觀測結果；然而 CTRL 整體在回波強度上明顯不足，無法掌握到準確的眼牆與環流特性。

因此，透過 NC 初始化方法中模式綜觀環境能夠有效調整海平面氣壓與水平平均風速的分布，並增強熱帶氣旋的強度，改善全球模式初始資料解析度不足導致熱帶氣旋強度較弱的問題。

4.2 地形對颱風模擬之影響

圖 5 顯示進行 NC 渦旋初始化的過程中保留(NC)與移除地形(NCNT)在每次循環其颱風渦旋最低海平面氣壓與最大風速數值的變化。結果發現 NC 隨著每次模式積分循環仍無法降低最低海平面氣壓數值，雖然最大水平平均風速有提升但亦不及觀測資料的強度；反觀 NCNT 結果有明顯改善熱帶氣旋強度的現象，且亦有出現前述提到強度趨於穩定的情況。我們選取最接近觀測資料強度的循環次數為第 20 次，將此結果視為後續 24 小時颱風預報的初始場。保留與移除地形實驗組兩者的差異源於此初始化方法是透過環境場去修正模式中熱帶氣旋的強度，然而在靠近地形的情形下，地形因素可能會破壞熱帶氣旋的結構，容易使熱帶氣旋強度在初始化過程中反而逐漸減弱，即 spin-down 的問題，無法達到渦旋初始化的目的。

4.3 雲微物理敏感度測試

為了瞭解不同雲微物理方案對原始初始場熱帶氣旋修正的差異，我們在初始化過程中除了原先採用的 Ferrier 雲微物理方案以外，我們另外考慮兩種雲微物理方案，分別為 Kessler 與 WSM6 方案。

圖 6 顯示不論是水平平均風速或海平面氣壓分布，NC_K 與 NC_WSM6 其強度與結構整體而言差異不明顯，且兩者與觀測數值相當接近。圖 7 顯示颱風最大回波水平結構，其中 NC_K 其颱風最大回波分布較 NC_WSM6 來得廣闊，而颱風溫度差異垂直結構(圖 8)顯示 NC_K 暖心發展高度較高，水汽混合比垂直分布(圖 9)亦顯示 NC_K 的水氣含量較豐沛，且緯向分布相當分布寬廣。我們認為 NC_K 與 NC_WSM6 在數值模式中模擬的差異主要在於雲微物理方案可慮不同種類的水相粒子預報所導致的差異，以 NC_K 結果說明，由於 Kessler 參數化方案考慮暖雲物理過程，因此在數值模式中颱風結構含有較豐沛的水氣，水相降水粒子表面積較大，所產生的雲對輻射強迫作用(CRF)越明顯。Fovell et al. (2016)表示較強的雲對輻射強迫作用其雲內長波輻射增暖效應將使颱風高層有較強的外流特徵，可從圖 8 或圖 9 高層水平風場推測，並將眼牆附近的降水粒子向外帶至外核區域，因此暖雲方案能夠模擬到較大的回波水平分布範圍(圖 7)。另外，較強的雲內長波輻射增暖現象可能增強外核的對流活動，底層水平風場議會有較強的現象，透過水平風速數值比較(圖 8 或圖 9)觀察到 NC_K 底層半徑較大的區域風速較大。較強的對流活動促使此區域附近垂直上升運動較顯著，促使降水粒子在相位轉換時釋放更多潛熱，使雲內長波輻射加熱的現象越明顯，即為一種正回饋機制。此測試結果可驗證 Fovell et al. (2016)提出的颱風雲物理過程(圖 10)。然而我們將兩組實驗組與衛星觀測影像(圖 4)進行比較，結果顯示暖雲微物理方案模擬的颱風結構太寬廣，則以有考慮冰態降水粒子之雲微物理過程能掌握較正確的颱風結構。

五、結論

為了瞭解在具有不同特性之颱風個案中使用 NC 方法改善模式初始場颱風強度、水平結構與垂直結構的程度與能力，此篇研究進行 2015 年蘇迪勒颱風個案分析。結果顯示初始化過程中確實有降低原始全球模式資料最低海平面氣壓與增強最大水平平均風速，

且與中央氣象局提供之觀測資料相當接近；NC 結果亦模擬出較強的颱風水平與垂直之動力與熱力結構發展，說明此方法確實能夠改善颱風強度，達到渦旋初始化最基本的目的。

由於渦旋初始化方法大部分使用時機為熱帶氣旋活動於開放海洋上的情況。當颱風接近複雜地形時，如台灣中央山脈，可能因地形因素導致在初始化過程中無法讓綜觀環環境有效地進行調整，甚至破壞颱風結構，出現 spin-down 的問題。因此我們增加將台灣與澎湖地形移除的測試，從初始化過程中氣壓與風速的變化顯示保留地形無法使颱風強度增強，而移除地形能夠正確地對颱風強度與結構做修正。完成 NC 初始化更新模式初始場後，將地形移回原先位置，透過模式動力過程能夠在數小時間模擬颱風與地形之間的交互作用，風場預報結果亦有減小與觀測之誤差。然而颱風風場預報表現仍有高估的問題需要解決，我們認為可以改善的部分為模式地形高度的配置，如果可以改善模式地形高度使其擬和真實複雜地形結構，在數值模式動力過程中進行颱風模擬與預報時，或許能夠改善模式水平風速較強的現象。若能在颱風靠近台灣期間透過初始化使數值模式中的強度與結構更趨於真實，預報結果可信度相對可能夠提高，國家政府對台灣各區域進行防範災害評估時或許能夠提供一定的貢獻。

在颱風研究中，降水預報是非常重要但困難的課題。雖然本篇研究並沒有針對降水預報結果進行討論，但我們有進行區域模式中雲微物理參數化敏感度測試。分別採用暖雲與冷雲物理過程之參數化法加入數值模式中模擬蘇迪迪勒颱風強度與結構，結果發現雖然初始使場颱風強度並沒有明顯差異，然而在颱風結構方面暖雲方案能夠模擬出較寬廣的風場特徵，低層風場較強，配合較高的熱力垂直發展高度與較大的高層水平風速，將眼牆附近降水粒子被向外帶至外圍區域，導致模擬出回波範圍較寬的現象。此結果驗證 Fovell et al. (2016)提出的熱帶氣旋雲物理過程，但仍以有考慮冰態降水粒子之雲微物理過程能掌握較正確的颱風結構。在數值模式中颱風降水機制與雲微物理參數化設定有不小的關係，未來能夠將各實驗組之間的差異透過合理的方式取得最佳的降水分布時，或是成為降水系集成員，颱風降水預報可能可以更接近真實發生的情況，為民眾提供更好更快速的資訊，以防範天然災害造成的傷害與損失，這也是我在大氣學識研究範疇中最終的理念。

六、參考資料

Cao, Y., R. G. Fovell, and K. L. Corbosiero, 2011: "Tropical cyclone track and structure sensitivity to initialization in idealized simulations: A preliminary study", *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, **22,** 559-579.

Chen, Y.-L., and J. Feng, 2001:" Numerical Simulations of Airflow and Cloud Distributions over the Windward Side of the Island of Hawaii. Part I: The Effects of Trade Wind Inversion", *Monthly Weather Review*, **129,** 1117-1134.

Chou, K.-H., and C.-C. Wu, 2008:" Typhoon Initialization in a Mesoscale Model—Combination of the Bogused Vortex and the Dropwindsonde Data in DOTSTAR", *Monthly Weather Review*, **136,** 865-879.

Dudhia, J., 1989: "Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model", *Journal of the Atmospheric Sciences*, **46,** 3077-3107.

Feng, J., and Y.-L. Chen, 2001: "Numerical Simulations of Airflow and Cloud Distributions over the Windward Side of the Island of Hawaii. Part II: Nocturnal Flow Regime", *Monthly Weather Review*, **129,** 1135-1147.

Fovell, R. G., and Coauthors, 2016: "Influence of Cloud Microphysics and Radiation on Tropical Cyclone Structure and Motion", *Meteorological Monographs*, **56,** 11.11-11.27.

Kurihara, Y., M. A. Bender, and R. J. Ross, 1993: "An Initialization Scheme of Hurricane Models by Vortex Specification", *Monthly Weather Review*, **121,** 2030-2045.

Nguyen, H. V., and Y.-L. Chen, 2011: "High-Resolution Initialization and Simulations of Typhoon Morakot (2009)", *Monthly Weather Review*, **139,** 1463-1491.

——, 2014: "Improvements to a Tropical Cyclone Initialization Scheme and Impacts on Forecasts", *Monthly Weather Review*, **142,** 4340-4356.

Smolarkiewicz, P. K., R. M. Rasmussen, and T. L. Clark, 1988:" On the Dynamics of Hawaiian Cloud Bands: Island Forcing", *Journal of the Atmospheric Sciences*, **45,** 1872-1905.

Yeh, H.-C., and Y.-L. Chen, 2003:" Numerical Simulations of the Barrier Jet over Northwestern Taiwan during the Mei-Yu Season", *Monthly Weather Review*, **131,** 1396-1407.

附表

表 1，模式設定

Model		WRF V3.3.1
Initial & Boundary Condition		NCEP FNL ds083.2
Horizontal Dimensions	Domain 1 (18 km)	121×121
	Domain 2 (6 km)	205×205
Vertical Levels		38 (sfc – 50 hPa)

表 2，各實驗組意義與使用雲微物理參數方案之種類

實驗簡稱	實驗意義
CTRL	沒有使用 NC 初始化方法
NC	使用 NC 初始化方法
NCNT	使用 NC 初始化方法且過程移除地形
NC_K	使用 NC 初始化方法 且 Kessler 雲微物理方案
NC_WSM6	使用 NC 初始化方法 且 WSM6 雲微物理方案

附圖

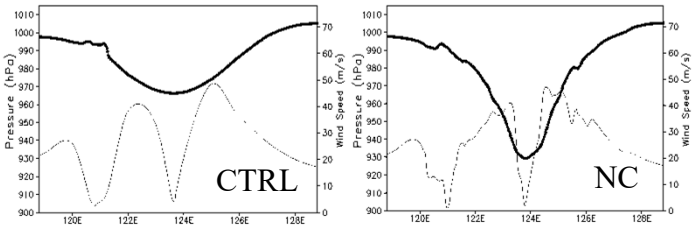

圖 1，08/07 12 UTC 緯向海平面氣壓與水平平均風速變化圖；橫軸為經度；縱軸(左)為為氣壓(單位 hPa)，(右)為風速(單位ms^{-1})；黑色實線表示海平面氣壓；灰色細線表示水平平均風速

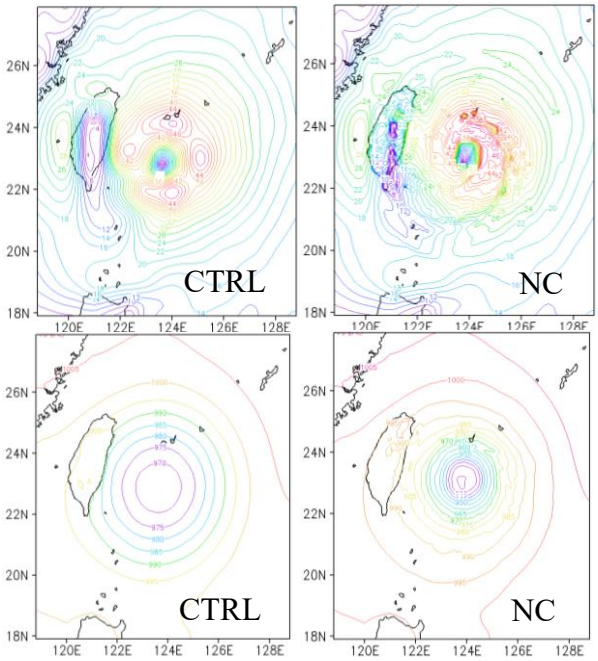

圖 2，08/07 12 UTC (上)水平平均風速分布圖等值線間隔 $2ms^{-1}$

(下)海平面氣壓分布圖。等值線間隔 $5hPa$

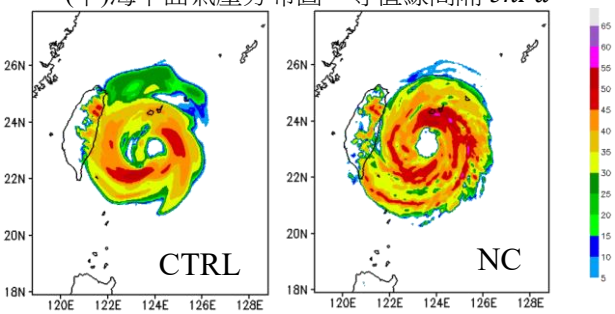

圖 3，08/07 12 UTC 最大回波水平分布圖，單位 dBz 橫軸：經度；縱軸：緯度

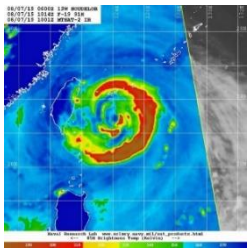

圖 4，08/07 10 UTC
MTSAT-2 亮溫合成
衛星影像

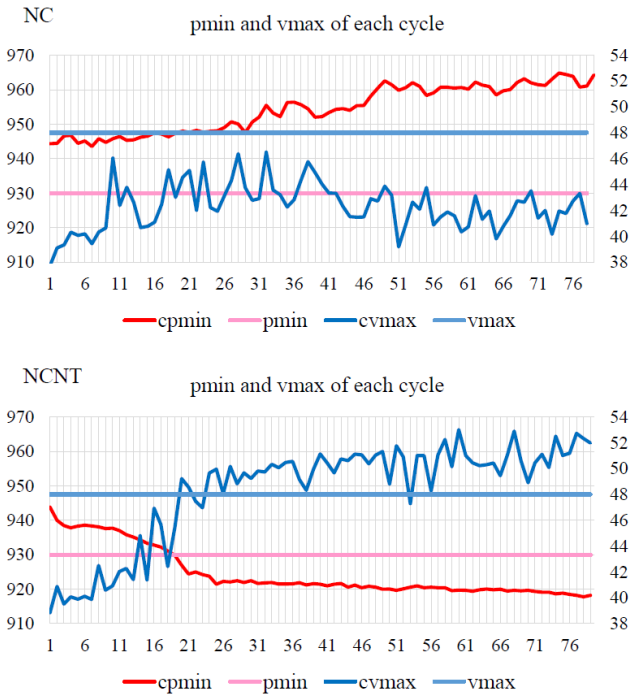

圖 5，08/07 18 UTC 初始化過程隨循環次數蘇迪勒颱風強度變化折線圖。橫軸為循環次數；縱軸(左)為氣壓值(單位hPa)，(右)風速(單位ms^{-1})
紅色為當次循環最低海平面氣壓；粉紅色為颱風中心氣壓觀測值；藍色為當次循環最大水平平均風速；淺藍色為颱風中心附近最大風速觀測值

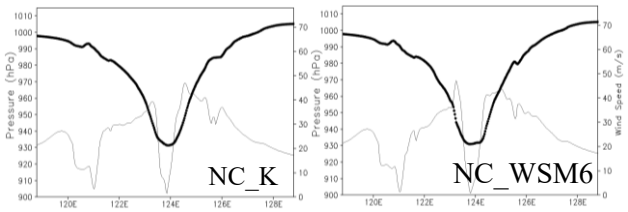

圖 6，08/07 12 UTC 緯向海平面氣壓與水平平均風速變化圖。橫軸為經度；縱軸(左)為為氣壓(單位hPa)，(右)為風速(單位ms^{-1})；黑色實線表示海平面氣壓；灰色細線表示水平平均風速

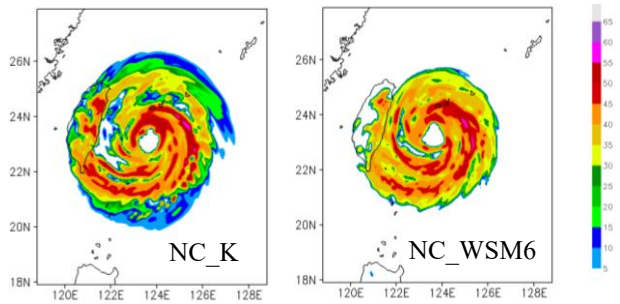

圖 7，08/07 12 UTC 最大回波水平分布圖，單位 dBz

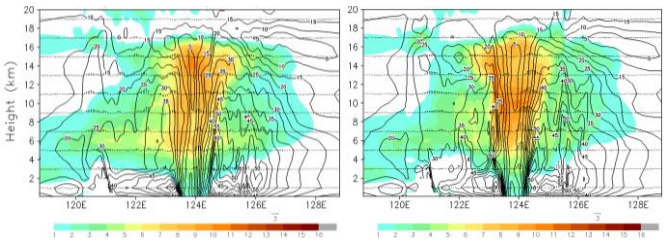

圖 8，08/07 12 UTC 溫度差異與水平、垂直風速垂直分布圖。等值線為水平平均風速，間隔 $5ms^{-1}$
底圖為溫度差異，單位 K；向量為垂直速度，單位ms^{-1}

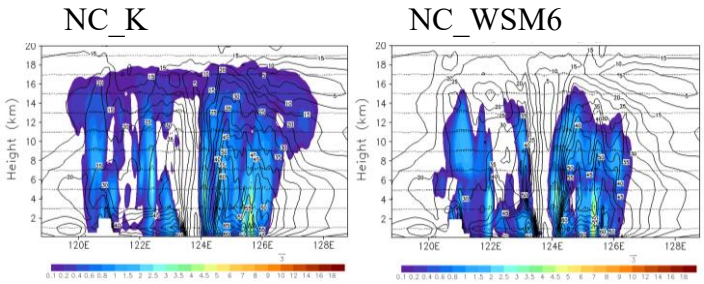

圖 9，08/07 12 UTC 水汽混合比與水平、垂直速度垂直分布圖。等值線為水平平均風速，間隔 $5ms^{-1}$
底圖為水汽混合比，單位%；向量為垂直速度，單位ms^{-1}

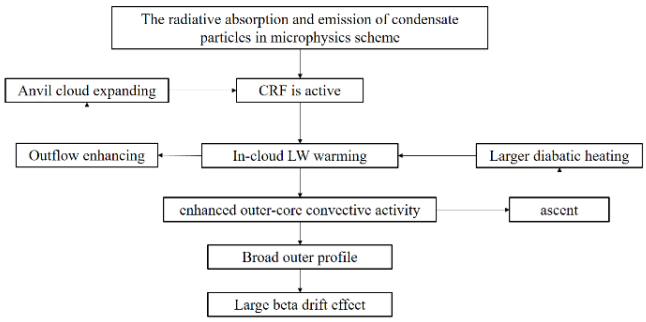

圖 10，(Fovell et al. 2016)颱風雲物理發展機制示意圖