

# 西北太平洋熱帶氣旋形成模擬之研究

謝宜桓<sup>1</sup> 李清勝<sup>1,2</sup> 隋中興<sup>1</sup>

台灣大學大氣科學系<sup>1</sup>

財團法人國家實驗研究院 台灣颱風洪水研究中心<sup>2</sup>

## 摘要

為探討不同尺度環境因素對熱帶氣旋形成的量化影響程度，本研究利用 WRF 數值模式，在相同的模式設定下，模擬 2008-2009 年所有於西北太平洋形成之熱帶氣旋個案，每個個案均進行 8 個模擬，包含不同初始資料及初始時間。模擬結果顯示，在 WRF 數值模式中，對於大尺度環境較有利氣旋形成(處於大尺度波動活躍處或季風槽中)之個案，有較高之模擬形成比例，而透過不同積雲參數化之實驗，顯示此類熱帶氣旋形成過程和對流過程較無關係。角動量通量分析結果顯示，此類個案在形成前，有較強的向內軸對稱之角動量通量，顯示在大尺度系統影響下，有利低層之軸對稱環流結構建立，進一步形成熱帶氣旋，且此過程較易被模式所掌握。

關鍵字：熱帶氣旋、熱帶氣旋形成、WRF 模擬

## 一、前言：

過去數年間，關於西北太平洋地區熱帶氣旋形成之研究，已顯示影響西北太平洋熱帶氣旋形成的一些重要環境特徵和物理過程，如：顯著跨赤道流 (李與侯，2004)、信風暴發 (Chang et. al 2010)及梅雨鋒面風切 (Lee et. al 2006)等。但在不同機制對熱帶氣旋形成之定量影響上，仍有相當大的侷限性。針對個別熱帶氣旋形成個案，常可同時分析出多種因子之影響；此外，在西北太平洋地區，不但觀測資料 (TCS08 之觀測個案有限)不如大西洋豐富，季風系統更遠為複雜；分析時不但難以將此三個熱帶氣旋分類，在定量計算不同系統或作用的貢獻程度時，更難將其明顯分割。

因此本研究的重點，即為定量探討不同物理機制對於熱帶氣旋形成之影響。但受限於觀測資料不足，而且無法從觀測資料中完整分析不同之物理機制及其交互作用，透過數值模式重現及實驗不同過程之因果關係，是研究上不可或缺的一部分；但在模擬熱帶氣旋的形成過程時，有些熱帶氣旋形成個案在模式中較易被合理模擬，而有些個案則幾乎無法合理模擬其形成過程。導致此種模擬難度差異的原因，可能是模式

本身的問題，包括模式參數化設定的差異、不同個案間物理條件之不同或初始資料之問題，也可能是影響熱帶氣旋形成之重要機制之可模擬程度的問題。

而過去關於熱帶氣旋形成之模擬/預報的研究，大多以作業用模式做為研究平台，優點為在模擬表現上以及模式設定上已有一定的測試，因而可直接進入物理層面的探討；但缺點為在作業模式的設定上，常因應作業上之需求而有調整之現象，而無法針對特定物理過程更深入地進行實驗。因此，本研究將在一致的模式設定下，先行探討熱帶氣旋形成於模式之掌握程度；而後將進一步挑選特定類型個案，定量探討不同物理機制對於其形成之影響。

## 二、研究方法：

### (一)、 模式設定及實驗設計

研究針對 2008-2009 年於西北太平洋形成之熱帶氣旋，利用兩層槽狀網格 WRFV3.2 模式進行模擬。為使網格能涵蓋整個西北太平洋地區，網格設定為 569×340 (20484× 12240km)及 706×400 (8472× 4880km)，解析度分別為 36km 及 12km(圖 1)。透過在同樣網格大小、解析度及設定下，定量計算模式對不同個案之模擬程度。在模式的設定上，則參考過去

有關熱帶氣旋形成之個案模擬研究 (Kieu and Zhang, 2008; Chiao and Jenkins, 2010; Wang et al., 2010), 選用目前較常被使用(即可能較合理)之積雲參數化 (Kain and Fritsch scheme)、邊界層參數 (Yonsei University planetary boundary parameterization, YSU scheme)以及輻射參數化 (Rapid Radiative Transfer Model, RRTM scheme)...等設定。

在實驗中, 為了解不同熱帶氣旋個案在模式中表現程度之統計特性、及不同個案在模擬時間上之掌握程度, 每一個案, 以 JTWC 之 best-track 達到 25kts 之時間作為形成參考點 ( $t = 0$ ), 分別透過四組不同初始時間 (-48、-72、-96 及 -120 小時)及兩組不同初始資料, 共 8 種不同初始條件作為模式實驗成員; 初始資料分別選用 ECMWF-YOTC (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Year of Tropical Convection) 和 NCEP-GFS (National Centers for Environmental Prediction Global Forecast System)。

在 2008-2009 年中, 共有 55 個熱帶氣旋於西北太平洋地區形成, 除 3 個熱帶氣旋因初始資料因素而無法模擬外, 目前已完成 2008-2009 年共 52 個熱帶氣旋個案之模擬, 分析模擬結果時, 以 ECMWF-YOTC 資料作為觀測資料, 和模擬結果比對並計算各種誤差。至於模擬結果之熱帶氣旋判定, 透過主觀分析每 6 小時之模擬結果, 定出最接近觀測資料之低壓擾動中心, 並參考 Jourdain et al., (2011)之研究, 若滿足下列條件, 則將模式中該低壓環流定義為熱帶氣旋:

- A. 以 850hPa 環流中心為中心, 1.5 度半徑內之 850hPa 平均渦度需大於  $5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$
- B. 以 850hPa 環流中心為中心, 3 度半徑內之 850hPa 平均渦度需大於  $3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  或 5 度半徑內之 850hPa 平均渦度需大於  $1.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$
- C. 模擬之環流中心, 距 ECMWF-YOTC 之氣旋中心需小於 750 公里
- D. 在形成參考點前 12 小時至後 18 小時中, 同時滿足上述條件之時段需達 12 小時以上

在決定上述 850hPa 渦度門檻值前, 已先利用 ECMWF-YOTC 資料, 計算 2008-2009 年所有形成個案於形成期間的不同半徑內之 850hPa 最小平均渦度值。透過不同半徑之渦度值篩選, 可排除因對流而形

成之低層局部渦度中心, 而可更聚焦於模擬之熱帶氣旋上。

## (二)、 熱帶氣旋形成之綜觀環境分類

為進一步討論不同環境之下所形成之熱帶氣旋在模擬中是否有共通特性, 參考 Ritchie and Holland (1999, RH99)及 Lee et al. (2008)對於熱帶形成前低層綜觀環流特徵之研究, 以環流中心為中心, 依 ECMWF-YOTC 形成前 48 至前 24 小時之 850 百帕風速及風向, 將各熱帶氣旋形成之位置分為: 季風槽內(In-MT)、季風槽邊緣(On-MT)及季風槽之外(Out-MT)三類。其中, 季風槽內包含 RH99 之季風風切及季風環流圈; 季風槽邊緣則包含季風合流及羅士比能量頻散; 而季風槽外則包含東風波及其他明顯不在季風槽內之熱帶氣旋個案。圖 2 為此三類個案形成前 48 小時之低層環境之合成結果, 結果顯示, 此三類個案在綜觀環境上之差異, 主要為系統南側強西風帶之位置。在季風槽內形成之熱帶氣旋個案, 其擾動中心位於強西風帶之北側, 並伴隨低層水氣較多之環境; 而在季風槽外側形成之個案, 則無此強風帶之現象, 且處於低層水氣較為乾燥之環境, 而此結果也和過去研究相符。

## 三、 綜觀環境對模擬之影響:

透過目前之實驗設計, 針對 2008-2009 年於西北太平洋地區所形成之 52 個熱帶氣旋個案, 共 416 個模擬結果。若以不同初始資料來區分, 其中 143 個模擬以 ECMWF-YOTC 為初始資料、129 個以 NCEP-GFS 為初始資料; 而若以不同模擬初始時間來區分, 四組不同初始時間 (-48、-72、-96 及 -120 小時)則分別有 85、82、62 及 43 個符合熱帶氣旋形成模擬之模擬結果, 比例如表 1。上述結果顯示, 在目前實驗設計中, 模式整體模擬熱帶氣旋形成與否, 主要和模擬之初始時間有相當大之關係, 而和初始以及邊界資料較無關, 較高之模擬比例集中於氣旋形成 2 天及 3 天前之模擬; 而形成前 4 天及前 5 天之模擬, 模擬形成比例則有顯著下降, 而在三個不同環流特徵(季風槽內、邊緣及季風槽外)中, 模式模擬形成之比例分布也大致相同。

雖然在整體分布上, 模式模擬熱帶氣旋形成主要受到初始時間所影響, 但在形成比例在各個案彼

此間之差異十分顯著，顯示除初始時間外，應有其他因素控制其模擬形成比例。而過去研究指出，西北太平洋地區之氣旋形成，主要受到季風系統以及大尺度熱帶波動所影響，而近年關於熱帶氣旋形成之研究上，則常利用不同時間尺度來區分，探討不同系統之貢獻程度(Fu et al.,2012, Wu et al.,2013)。本研究為量化此二影響氣旋形成之因素，利用不同之時間濾子，以 10 天為分界點，計算各 TC 形成前(-24hr~0hr)，不同時間尺度下，以擾動為中心 3 度半徑內之 850 百帕平均渦度。其中以 10 天之低頻濾波表示為受到大尺度熱帶波動之影響程度，高頻濾波則代表綜觀尺度及對流尺度之影響程度。

圖 3 為各熱帶氣旋形成前，10 天之低頻濾波之渦度(橫軸)、高頻濾波之渦度(縱軸)，以及不同個案於 8 個模擬成員中，有模擬出 TC 形成過程之比例，圓點為模擬比例超過 50%之個案、方框為小於 50%之個案，而空心三角形則表示超過一半以上為模擬中心和觀測擾動中心相差較遠之個案(即大多模擬成員無法通過篩選條件 C)，而顏色則代表於不同綜觀環境下所形成個案。因此，圖中越遠離原點之個案，表示其初始擾動越強，而偏向右側顯示渦度主要來自於低頻場、偏向左側則顯示渦度主要來自於高頻場。結果顯示，在目前之實驗架構下，對於大尺度環境較有利氣旋形成(處於大尺度波動活躍處或是季風槽內)之個案，有較高之模擬形成比例；模式較無法掌握之個案，主要集中於左下側，顯示其初始渦度較弱，且低層渦度主要來自於高頻場。

進一步挑選圖中右上側及左下側，分別各 5 個個案，在相同實驗架構下，更改積雲參數化設定(Betts-Miller-Janjic scheme、Grell-Devenyi ensemble scheme 及 Grell 3D ensemble scheme)，再次進行模擬，探討積雲參數化對熱帶氣旋形成模擬之影響。實驗結果顯示，整體形成比例(4 組積雲參數化設定，共 32 個模擬成員)和原先之設定之形成比例相近，唯有在圖中的左下角個案，在特定積雲參數化下，有較高之形成比例。顯示在圖中左下側之個案，由於形成前之渦度較弱、且偏重於高頻場，因此對流過程在此類個案之形成模擬上扮演較重要之腳色；而在右上角之個案，對流對其氣旋形成過程較不敏感，主要則是受到大尺度系統之控制。

## 四、 角動量通量收支分析

Chan and Kwok (1999)透過分析熱帶氣旋形成前之角動量通量，探討在數值預報模式中挑選預報氣旋形成成功與否之個案之差異。本研究亦參考其方法，利用 EC-YOTC 資料計算個案形成前之角動量通量，將個案形成前之角動量分為軸對稱平均項及非軸對稱項，算式如下：

$$M(r) = \overline{ruv} + \overline{ru'v'} + \frac{f_0 r^2 \overline{u}}{2} + \frac{r^2 \overline{fu'}}{2}$$

結果顯示，在圖 3 右上角之個案(大尺度影響較顯著)，於形成兩天前，在低層皆有明顯之角動量項氣旋中心輸入，且以平均項為主。而在圖中靠近原點之個案(模擬形成比例較低)，則此對稱之角動量通量則較不明顯，此結果亦通過 95%之統計檢定。

## 五、 結論

由上述結果顯示，在目前之實驗架構下，對於大尺度環境較有利氣旋形成(處於大尺度波動活躍處或季風槽中)之個案，有較高之模擬形成比例。而透過更改積雲參數化實驗，顯示此類熱帶氣旋形成過程和對流過程較無關係，應與於大尺度顯著之有利環境下所形成有關，且皆伴隨較顯著之對稱角動量通量，顯示在形成前兩天，低層軸對稱之低壓環流已大致建構完成，因此在模式中有較高之掌握程度。

## 六、 參考文獻

- 李清勝與侯嘉榮，2004：伴隨強跨赤道流之熱帶氣旋形成個案的分析與模擬。大氣科學，32，161-182。
- Chan, Johnny C. L., Roger H. F. Kwok, 1999: Tropical Cyclone Genesis in a Global Numerical Weather Prediction Model. *Mon. Wea. Rev.*, 127, 611-624.
- Chang, L.-Y., Kevin K. W. Cheung, and C.-S. Lee, 2010: The role of trade wind surges for tropical cyclone formations in the western North Pacific. *Mon. Wea. Rev.*, 138, 4120-4134.
- Chiao, Sen, Gregory S. Jenkins, 2010: Numerical Investigations on the Formation of Tropical Storm Debby during NAMMA-06. *Wea. Forecasting*, 25,

866–884.

Fu Bing, Melinda S. Peng, Tim Li, and Duane E.

Stevens, 2012: Developing versus Nondeveloping Disturbances for Tropical Cyclone Formation. Part II: Western North Pacific. *Mon. Wea. Rev.*, 140, 1067–1080.

Jourdain, Nicolas C., Patrick Marchesiello, Christophe E.

Menkes, Jérôme Lefèvre, Emmanuel M. Vincent, Matthieu Lengaigne, Fabrice Chauvin, 2011: Mesoscale Simulation of Tropical Cyclones in the South Pacific: Climatology and Interannual Variability. *J. Climate*, 24, 3–25.

Kieu, C. Q., and D.-L. Zhang, 2008: Genesis of Tropical

Storm Eugene (2005) from merging vortices associated with the ITCZ breakdowns. Part I: Observational and modeling analyses. *J. Atmos. Sci.*, 65, 3419–3439

Lee, C. S., Y. -L. Lin, and K. K. -W. Cheung, 2006:

Tropical cyclone formations in the South China Sea associated with the mei-yu front. *Mon. Wea. Rev.*, 134, 2670–2687.

Lee, C. S., Kevin K. -W. Cheung, Jenny S. -N. Hui,

Russell L. Elsberry, 2008: Mesoscale Features Associated with Tropical Cyclone Formations in the Western North Pacific. *Mon. Wea. Rev.*, 136, 2006–2022.

Ritchie, E.A., and G. J. Holland, 1999 : Large-scale

patterns associated with tropical cyclogenesis in the western pacific. *Mon. Wea. Rev.*, 127, 2027–2043.

Wang, Z., M. T. Montgomery, and T. J. Dunkerton, 2010:

Genesis of pre-Hurricane Felix (2007). Part I: The role of the easterly wave critical layer. *J. Atmos. Sci.*, 67, 1711–1729.

Wu Liguang, Huijun Zong, and Jia Liang, 2013:

Observational Analysis of Tropical Cyclone Formation Associated with Monsoon Gyres. *J. Atmos. Sci.*, 70, 1023–1034.

表 1、2008-2009，52 個熱帶氣旋個案在不同初始條件、初始時間及不同綜觀環境下之模擬成功比例。

TC detect rate (%)	-48 hr	-72 hr	-96 hr	-120 hr	Avg.
EC-YOTC (n=52)	84.6	86.5	63.5	51.9	71.6
NCEP-GFS (n=52)	82.7	80.8	65.4	40.4	67.3
In-MT TCs (n=28)	92.9	85.7	60.7	53.6	73.2
On-MT TCs (n=34)	88.2	88.2	61.8	35.3	68.4
Out-MT TCs (n=42)	73.8	78.6	69.0	50.0	67.9

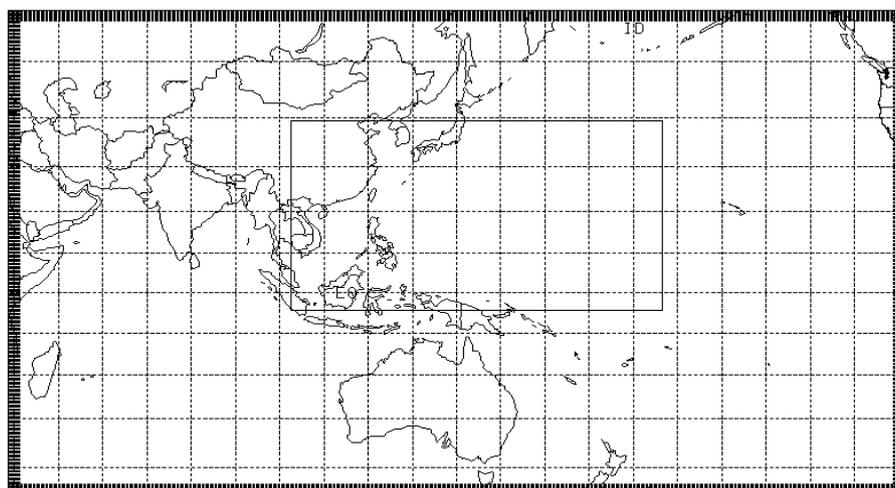


圖 1、WRF 數值模式模擬範圍。

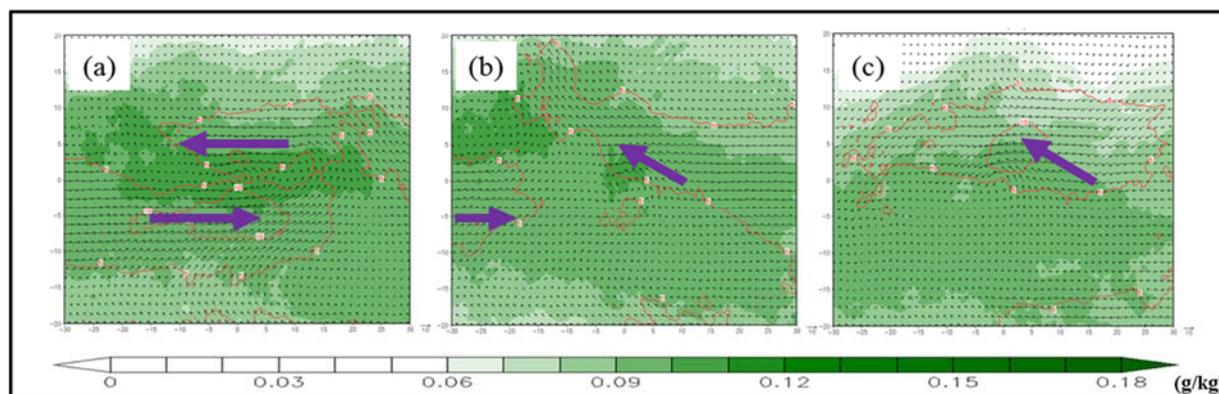


圖 2、以擾動中心合成之 1000-700 hPa 比濕(g/kg，色階)與 850 hPa 風場及 850 hPa 之強風區(等值線，間距 5 ms<sup>-1</sup>，標示合成大於 20 ms<sup>-1</sup>)。

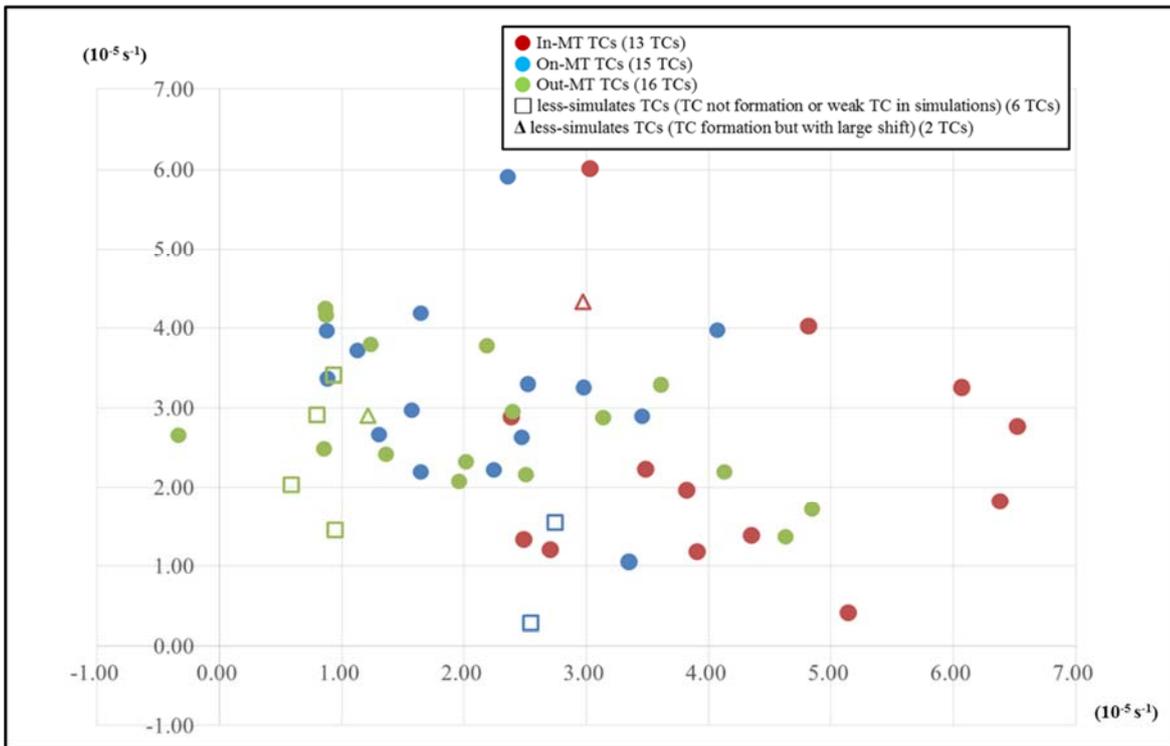


圖 3、2008-2009，52 個熱帶氣旋個案，擾動半徑 3 度，經 10 天低頻率波之 850 hPa 平均渦度場(橫軸， $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ )與經 10 天高頻率波之 850 hPa 平均渦度場(縱軸， $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ )之散佈圖；圓點為模擬成功比例超過 50% 之個案、方框為成功比例小於 50% 之個案，而空心三角形則表示超過一半以上為模擬中心和觀測擾動中心相差較遠之個案；紅色、藍色及綠色，分別表示於季風槽內、邊緣及外側形成之熱帶個案。