

納莉(2001)颱風數值模擬研究之初步分析

黃小玲¹ 楊明仁²

¹ 中國文化大學地學研究所大氣科學組

² 中央大學水文科學研究所

摘要

納莉颱風的路徑詭異，影響台灣時間甚長，於 2001 年 9 月 16 日 1300 UTC 在宜蘭登陸，繼續向南南西方移動，並於 2001 年 9 月 18 日 1500 UTC 於台南附近出海，移出台灣本島，為台灣帶來相當嚴重的水患及傷亡。

本研究藉由四層巢狀網域（網格間距分別為 60 公里、20 公里、6.67 公里以及 2.22 公里）之 PSU-NCAR MM5 模式（3.5 版）來模擬納莉(2001)颱風之路徑、強度及降水結構。控制組(CTL)實驗模擬颱風登陸地點與觀測登陸地點的誤差約為 20 公里。納莉颱風登陸後的降水分布及累積降水量，隨著水平解析度的提高有明顯的改善；以 9 月 17 日的 24 小時累積降水而言，60 公里、20 公里、6.67 公里及 2.22 公里網域可以模擬到觀測降水量的 19.63%、45.36%、81.98%及 90.98%。CTL 實驗亦顯示，納莉颱風登陸後由於受到台灣複雜地形的破壞，使得颱風呈現非軸對稱結構，其最大凝結加熱率分布在眼牆的低至中層大氣中。目前正在進行一系列的敏感度實驗，以進一步瞭解造成納莉颱風伴隨豪大雨的確切物理機制。

關鍵詞：納莉颱風，降水，MM5。

前言

由於納莉(2001)颱風的行經路徑詭譎，於 2001 年 9 月 6 日發展成颱風持續至 9 月 21 日颱風系統減弱，維持了約兩週的生命週期。納莉颱風於海上打轉時期(9 月 6 日至 9 月 16 日)以及侵襲台灣時期(9 月 16 日 1300 UTC 至 9 月 18 日 1500 UTC)的颱風結構與系統維持的物理機制，為目前台灣研究颱風之專家學者相當感興趣的科學議題。納莉颱風於海上打轉的路徑主要受綜觀環境駛流場所影響，而海氣交互作用影響著颱風強度及系統的維持 (Sui et al. 2002; 見圖 1)。納莉颱風於侵台時的結構主要受台灣複雜地形影響，旺盛水氣受到地形舉昇凝結而帶來豐沛的降水，於台灣全省都造成嚴重災情，尤其是北台灣的

淹水造成台北捷運系統癱瘓(9 月 16 日的北台灣 24 小時累積降水高達 540.5 公厘)及南投、花蓮及宜蘭的土石流災害最為嚴重(9 月 17 日的宜蘭地區 24 小時累積降水高達 940 公厘; 見圖 2)。因此，納莉颱風侵台期間的降水物理機制與台灣複雜地形密切相關，而納莉颱風與地形間交互作用的探討即為本研究的主要議題。

近十年來的颱風路徑預報模式已有相當大的進展(Kurihara et al. 1995, 1998)。發展至今日，高解析度的非靜力中尺度模式已可成功地模擬出颱風內詳細的中尺度結構模擬(Liu et al. 1997, 1999); 而雲微物理過程的分析對熱帶氣旋結構及強度的模擬與探討而言，亦是非常重要(Liu et al. 1997, 1999; Braun and Tao 2000; Wang 2001, 2002)。Wu et al. (2002)指出賀伯颱風

降水強度、降水水平分布及垂直速度和凝結加熱率的垂直剖面分布受模式之不同水平解析度所影響，而模式水平解析度愈高，則颱風模擬的強度愈強，所模擬出來的降水強度及降水水平分布將更接近於真實情形。Wang (2001)所研發之高解析度的熱帶氣旋模式(TCM3)成功地模擬出熱帶氣旋的中心結構、螺旋雨帶及眼牆中的羅士培波渦旋。Wang (2002)亦指出熱帶氣旋的結構、強度及降水皆受到不同的雲微物理過程所影響。

納莉颱風侵台時期為台灣帶來近 10 年來最嚴重的水患及損失，成為氣象學者十分關切的議題。而納莉颱風為什麼在台灣停留長達兩天的時間呢？納莉颱風的強降水機制是因其結構與台灣複雜地形交互作用所產生的呢？或是颱風結構中複雜的雲微物理過程造成的呢？因此，本研究藉由數值模擬模式之不同水平解析度實驗及敏感度實驗來探討納莉颱風侵台時期的路徑、強度、結構以及為台灣帶來豪大雨的形成機制。

實驗設計

本研究所使用的數值模式為 PSU-NCAR MM5 模式 3.5 版(Grell et al. 1995)。納莉颱風之侵台時期為 9 月 16 日 1300 UTC 至 9 月 18 日 1500 UTC，因此，CTL 模擬實驗時間間隔為 9 月 15 日 1800 UTC 至 9 月 20 日 0000 UTC (共 102 小時)。圖 3 顯示，水平巢狀網域共有 4 層，分別為 D1 (60 公里; 71×81)、D2 (20 公里; 91×91)、D3 (6.67 公里; 121×121) 以及 D4 (2.22 公里; 226×154)，垂直解析度皆為 31 層，為 σ 座標。由於模式所使用的初始場及邊界層資料取自歐洲中期天氣預報中心 (European Center for Medium-Range Weather Forecast; ECMWF) 之 $1.125^\circ \times$

1.125° 全球分析資料，積雲參數化方法使用 GR 積雲參數化方法(Grell 1993)，且僅使用於 D1 (60 公里)及 D2 (20 公里)；雲微物理參數化方法使用 Reisner Graupel 雲微物理參數法(Reisner et al., 1998)；輻射能量的處理使用 Dudhia (1989) 大氣輻射方法。

由於模式所使用的邊界層及初始場資料取自 ECMWF 之 $1.125^\circ \times 1.125^\circ$ 全球分析資料，其資料解析度較粗，使得模式模擬出來的颱風強度偏弱。所以，為了掌握納莉颱風的初始結構，本研究進行颱風植入步驟，使用 Davis and Low-Nam(2001)發展出來的 Rankine Vortex 之軸對稱渦旋植入方法。於颱風植入過程中之 850 hPa、700 hPa、500 hPa、300 hPa、200 hPa 及 100 hPa 的垂直權重係數 $[A(z)]$ 設定分別為 1、0.95、0.9、0.7、0.6 及 0.1，以確定各層風速相對於地面切線風速的百分比。

模擬結果討論

納莉颱風侵台時期(9 月 16 日 1300 UTC 至 9 月 18 日 1500 UTC)，於台灣停留的時間超過兩天，為台灣帶來相當充沛的雨量，而其路徑、強度及結構受到台灣複雜地形的影響甚巨。如圖 4 所示，控制組 (CTL) 實驗模擬的納莉颱風於 9 月 16 日 1400 UTC 在基隆鼻頭角地區登陸，與氣象局官方資料顯示納莉颱風於 9 月 16 日 1300 UTC 在宜蘭登陸之比較得知，模擬納莉颱風登陸地點誤差約為 20 公里左右，登陸時間誤差為 1 小時。但是由於颱風登陸地點及區域地形的少許差異，將影響颱風之伴隨降水分布及降水量的模擬結果。

圖 5 顯示 2001 年 9 月 17 日之 24 小時累積降水於不同水平解析度 [D1(60 公里)、D2(20 公里)、D3(6.67 公里)及 D4(2.22 公里)] 的模擬，可看出雪山山脈為主要降

水區，而中央氣象局發布資料之主要降水區則為宜蘭地區，其降水分布誤差主要是因為路徑模擬誤差（9月16日1300 UTC登陸台灣之路徑誤差約為20公里）所致。另外，在定量降水預報方面的探討，由模擬24小時累積降水量與觀測累積降水量940公厘（見圖2b）的比較，可看出最粗網域D1(60公里)的184.5公厘僅有觀測降水量的19.63%，D2網域(20公里)的426.4公厘達觀測降水量的45.36%；D3網域(6.67公里)的770.6公厘達觀測降水量的81.98%，直至最細網域D4(2.22公里)的855.2公厘則可達到觀測降水量的90.98%。由上所述，可知CTL實驗的累積降水量模擬隨著模式水平解析度的提高，有非常明顯的改進，此點結論與Wu et al. (2002)針對賀伯(1996)颱風的模擬研究結果相似。

圖6為納莉颱風中心氣壓於不同水平解析度之時間序列圖，D2網域(20公里)的水平解析度較粗，所以模擬出來的颱風強度較中央氣象局發布的官方資料偏弱，而D3網域(6.67公里)及D4網域(2.22公里)所模擬出來的颱風強度則較接近觀測值。尤其在登陸期間(9月16日1200至9月17日0600 UTC)，D3及D4網域對於颱風的強度掌握相當良好，其模擬中心氣壓與實際中心氣壓十分接近。

為進一步瞭解納莉颱風於侵台期間帶來豐沛降水的原因，本研究試從水平分布及垂直剖面來探討納莉颱風登陸前後的垂直結構、降水特性及降水物理機制。圖7為納莉颱風登陸前後之模擬雷達回波強度與氣象局實際觀測雷達回波的比較，可看出納莉颱風於登陸前(9月15日2100 UTC)的結構比較軸對稱；登陸後(9月16日1500 UTC)的颱風環流結構則明顯受到台灣複雜地形的破壞，呈現非軸對稱的颱風環流

結構。登陸前的颱風雷達回波模擬與氣象局雷達回波觀測類似，且掌握到颱風南側有較強的螺旋雨帶(圖7a及圖7c)；而登陸後的颱風雷達回波模擬亦與氣象局雷達回波觀測類似，且掌握到北部地區的強降水(圖7b及圖7d)。

接著，我們從垂直剖面來探討納莉颱風登陸前後的垂直結構變化。圖8a及圖8b為納莉颱風登陸前後之雷達回波強度與凝結加熱率的垂直剖面分布比較，顯示納莉颱風在海上時(15日2100 UTC；圖8a)的垂直結構是相當垂直且較為軸對稱；此垂直剖面顯示出明顯的颱風眼及眼牆結構，眼牆為對流旺盛的上升運動區域，水氣受上衝氣流抬升至中層大氣凝結成水滴而釋放潛熱，所以凝結加熱率主要分布在眼牆的中至高層大氣中。當納莉颱風登陸台灣後(16日1500 UTC；圖8b)，受到中央山脈複雜地形的影響，其垂直結構較為傾斜，且呈現非軸對稱現象；眼牆內的水氣受上衝氣流及雪山山脈地形舉升的動力條件幫助，於低層大氣迅速達到飽和凝結而釋放潛熱，所以凝結加熱率主要分布在眼牆的低至中層大氣中。圖8c及圖8d為納莉颱風登陸前後之雨水、雪花及暖電混合比的垂直分布比較，顯示納莉颱風登陸前後的雨水混合比分布皆在500 hPa高度以下，而且集中在眼牆強對流區域的中、低層。雪花混合比分布皆在550 hPa高度以上，暖電混合比的分布皆在650 hPa高度以上，主要分布在中至高層。另外，我們亦發現納莉颱風登陸前後之暖電混合比的垂直分布有較明顯的差異，登陸前(15日2100 UTC；圖8c)的颱風眼牆對流非常旺盛，可發展至200 hPa高度以上(見圖8a)，較有利於暖電的成長，暖電混合比最大值位於300 hPa高度，數量達到 7.67 g kg^{-1} ；而登陸後(16日1500 UTC；圖8d)的颱風

結構受台灣複雜地形破壞，其眼牆對流發展高度變低，僅達到 300 hPa 高度左右(見圖 8b)，使得暖電的成長空間較小，暖電混合比最大值位於 440 hPa 高度，數量僅有 1.1 g kg^{-1} 。因此，颱風登陸後的暖電混合比明顯地較登陸前的暖電混合比少許多。

結論及未來工作

為瞭解納莉颱風侵台時造成台灣豪大雨降水的成因，本研究使用數值模擬方法模擬納莉颱風侵台時期(9 月 16 日 1300 UTC 至 9 月 18 日 1500 UTC)的路徑、強度及結構。

控制組(CTL)實驗模擬的納莉颱風於 9 月 16 日 1400 UTC 在基隆地區的鼻頭角登陸，而觀測的納莉颱風於 9 月 16 日 1300 UTC 在宜蘭登陸，登陸地點誤差約為 20 公里左右。颱風伴隨降水分布受到路徑模擬誤差所影響；定量降水及颱風強度隨著模式水平解析度的提高，有非常明顯的改進。納莉颱風結構於登陸前後有明顯的差異，我們發現颱風登陸前(9 月 15 日 2100 UTC)的結構比較接近軸對稱，且凝結加熱率極大值在眼牆的中至高層大氣；登陸後(9 月 16 日 1500 UTC)的颱風結構則受到台灣複雜地形的破壞，呈現非軸對稱的結構，且凝結加熱率極大值在眼牆的低至中層大氣。

未來我們預定進行改變地形實驗與 CTL 實驗的比較來瞭解納莉颱風與台灣複雜地形交互作用於降水過程所扮演的角色及重要性；並藉由不同的雲微物理敏感度實驗來探討納莉颱風複雜的降水過程對颱風強度及結構的影響。

誌謝

感謝國科會計劃(NSC 93-2119-

M-008-010-API, 及 NSC 93-2625-Z-008-012)的贊助，以及文化大學大氣科學系和中央大學水文科學研究所的硬體及資源的支援。

參考文獻

- Braun, S. A., and W.-K. Tao, 2000: Sensitivity of high-resolution simulations of Hurricane Bob (1991) to planetary boundary layer parameterizations. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 3941-3961.
- Davis, C. and S. Low-Nam, 2001: The NCAR-AFWA tropical cyclone bogussing scheme. *A report prepared for the Air Force Weather Agency (AFWA)*. National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado.
- Dudhia, J. 1989: Numerical simulation of convection observed during the Winter Monsoon Experiment using a mesoscale two-dimensional model. *J. Atmos. Sci.*, **46**, 3077-3107.
- Grell, G. A., 1993: Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations. *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 764-787.
- Grell, G. A., J. Dudhia, and D. R. Stauffer, 1995: A description of the fifth-generation Penn State/NCAR Mesoscale Model. NCAR Technical Note, 122 pp.
- Kurihara, Y., M. A. Bender, R. E. Tuleya, and R. J. Ross, 1995: Improvements in the GFDL hurricane prediction system. *Mon. Wea. Rev.*, **123**, 2791-2801.

- , ——, ——, and ——, 1998: The GFDL hurricane prediction system and its performance in the 1995 hurricane season. *Mon. Wea. Rev.*, **126**, 1306-1322.
- Liu, Y., D.-L. Zhang, and M. K. Yau, 1997: A multiscale numerical study of Hurricane Andrew (1992). Part I: Explicit simulation and verification. *Mon. Wea. Rev.*, **125**, 3073-3093.
- , ——, and ——, 1999: A multiscale numerical study of Hurricane Andrew (1992). Part II: Kinematics and inner-core structures. *Mon. Wea. Rev.*, **127**, 2597-2616.
- Reisner, J., R. J. Rasmussen, and R. T. Bruijjes, 1998: Explicit forecasting of supercooled liquid water in winter storms using the MM5 mesoscaled model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **124**, 1071-1107.
- Sui, C.-H., and Coauthors, 2002: Meteorology-hydrology study targets Typhoon Nari and Taipei flood. *Eos, Transactions, AGU*, **83**, 265, 268-270.
- Wang, Y., 2001: An explicit simulation of tropical cyclones with a triply nested movable mesh primitive equation model: TCM3. Part I: Model description and control experiment. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 1370-1394.
- Wang, Y., 2002: An explicit simulation of tropical cyclones with a triply nested movable mesh primitive equation model: TCM3. Part II: Model refinements and sensitivity to cloud microphysics parameterization. *Mon. Wea. Rev.*, **130**, 3022-3036.
- Wu, C.-C., T.-H. Yen, Y.-H. Kuo, and W. Wang, 2002: Rainfall simulation associated with Typhoon Herb (1996) near Taiwan. Part I: The topographic effect. *Wea. Forecasting*, **17**, 1001-1015.

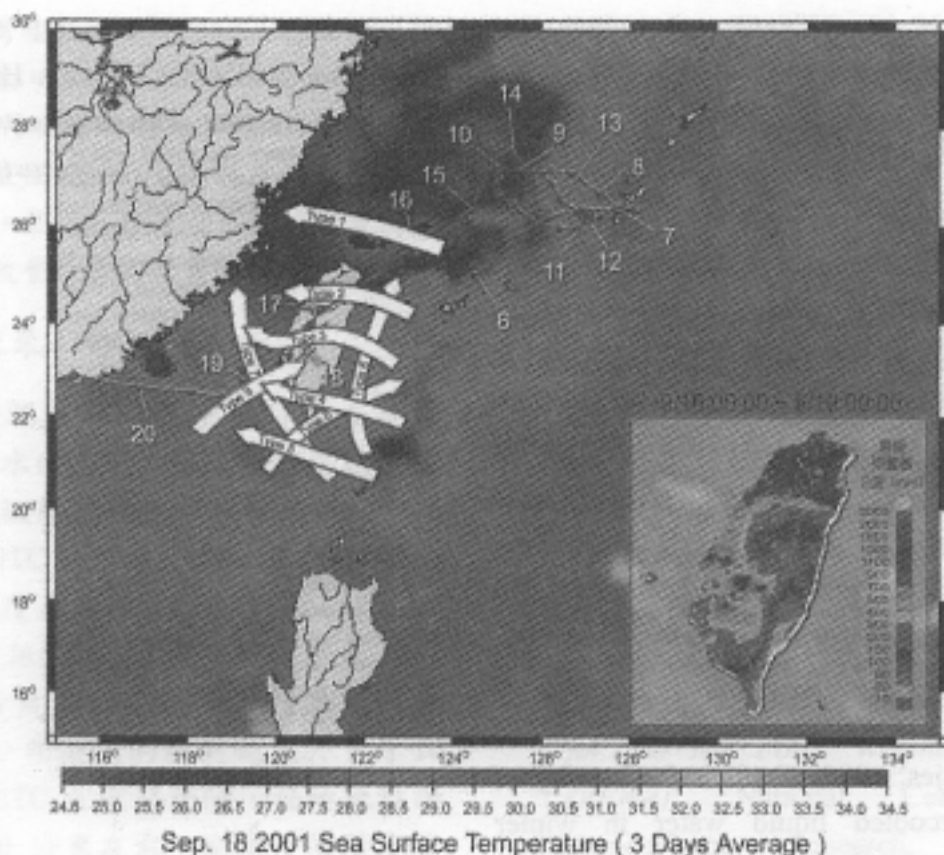


圖 1 2001 年納莉颱風路徑圖 (取自 Sui et al. 2002)。色階為海洋面溫度，色階間距為 0.5°C；箭頭為台灣地區百年歷史之平均颱風資料的各類型颱風路徑。

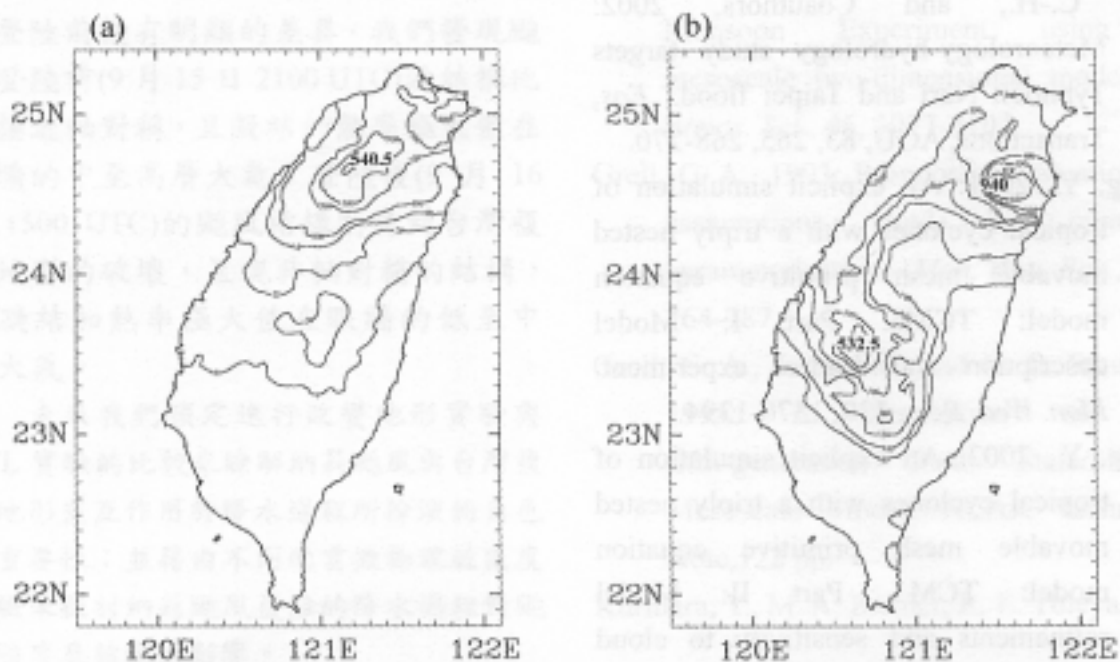


圖 2 參考氣象局發布之 2001 年 9 月 (a) 16 日及 (b) 17 日所繪製的 24 小時累積降水圖。

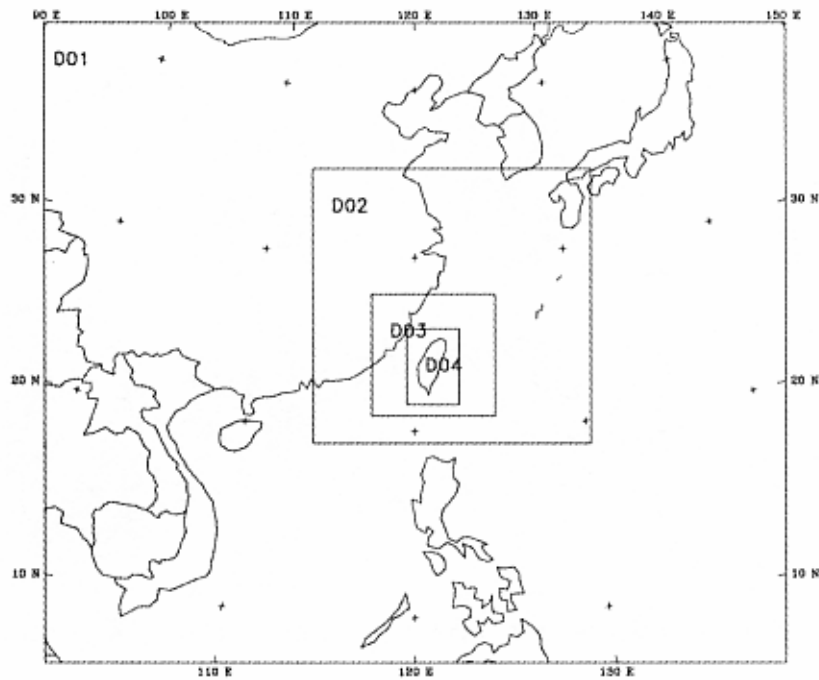


圖 3 納莉颱風 CTL 模擬實驗之水平巢狀網域設計圖。第一層網域(D1)水平間距為 60 公里,網格數為 71×81 ;第二層網域(D2)水平間距為 20 公里,網格數為 91×91 ;第三層網域(D3)水平間距為 6.67 公里,網格數為 121×121 ;第四層網域(D4)水平間距為 2.22 公里,網格數為 226×154 。

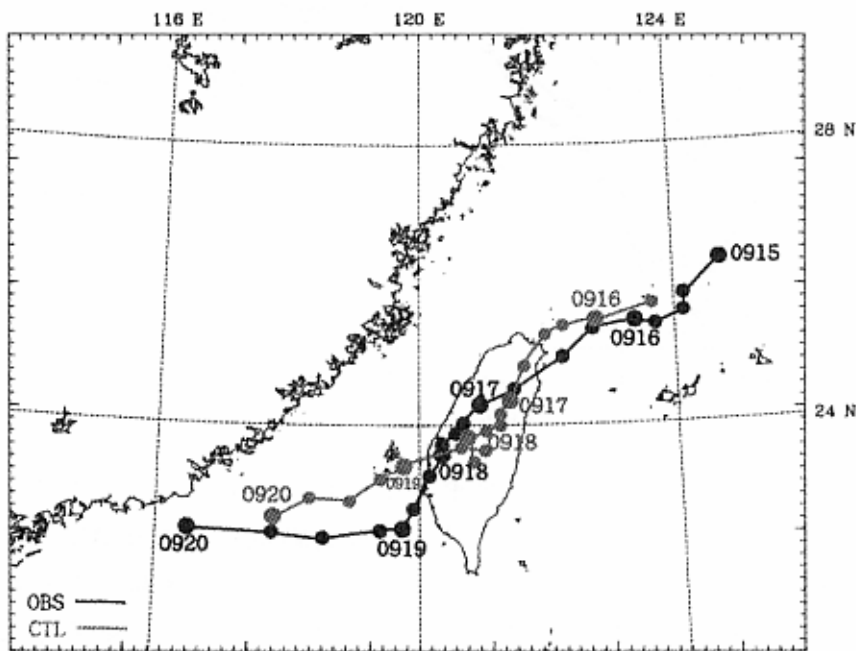


圖 4 CTL 模擬實驗路徑與中央氣象局觀測路徑比較圖。黑色線為中央氣象局發布之納莉颱風路徑,灰色線為各組模擬實驗路徑圖,每個點的時間間距為 6 小時,大點為颱風中心於 0000 UTC 時的所在位置。

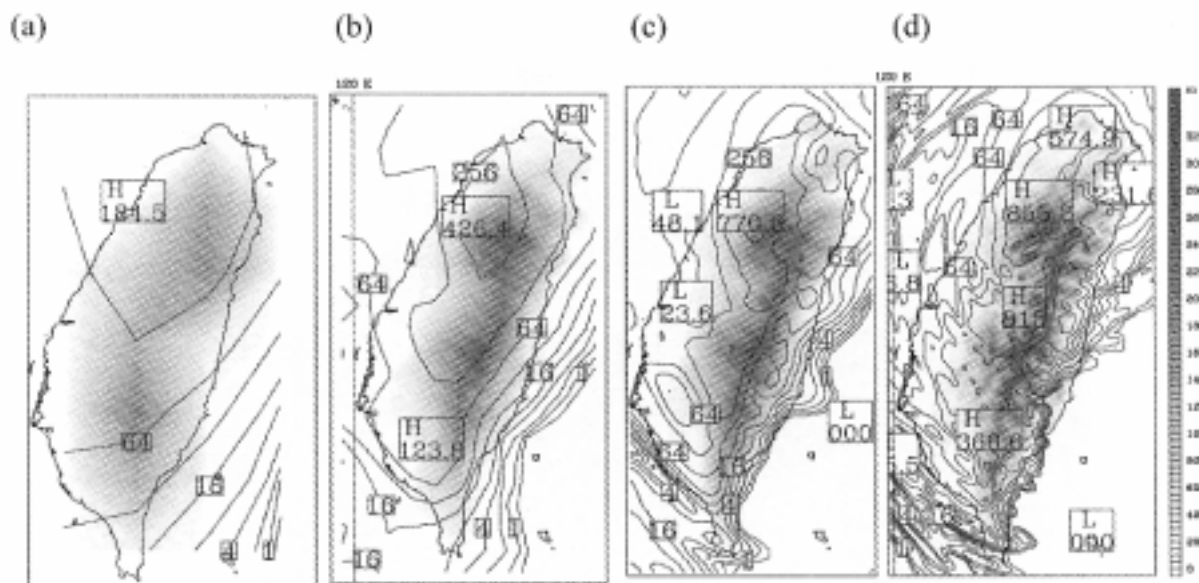


圖 5 2001 年 9 月 17 日 CTL 實驗之 (a) D1 網域(60 公里)、(b) D2 網域(20 公里)、(c) D3 網域(6.67 公里)、(d) D4 網域(2.22 公里)之 24 小時累積降水圖。灰色色階表示各網域所解析之台灣地形。

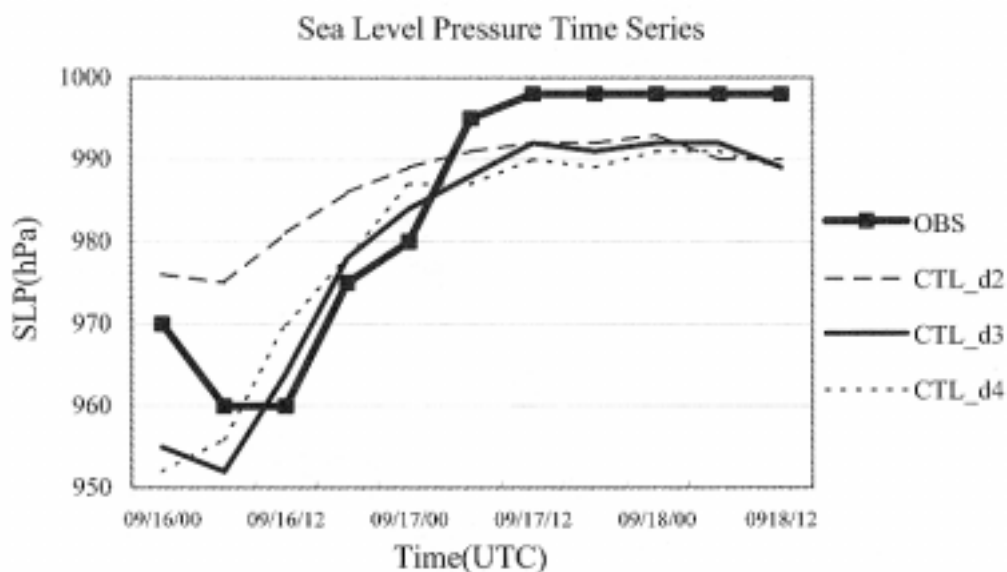
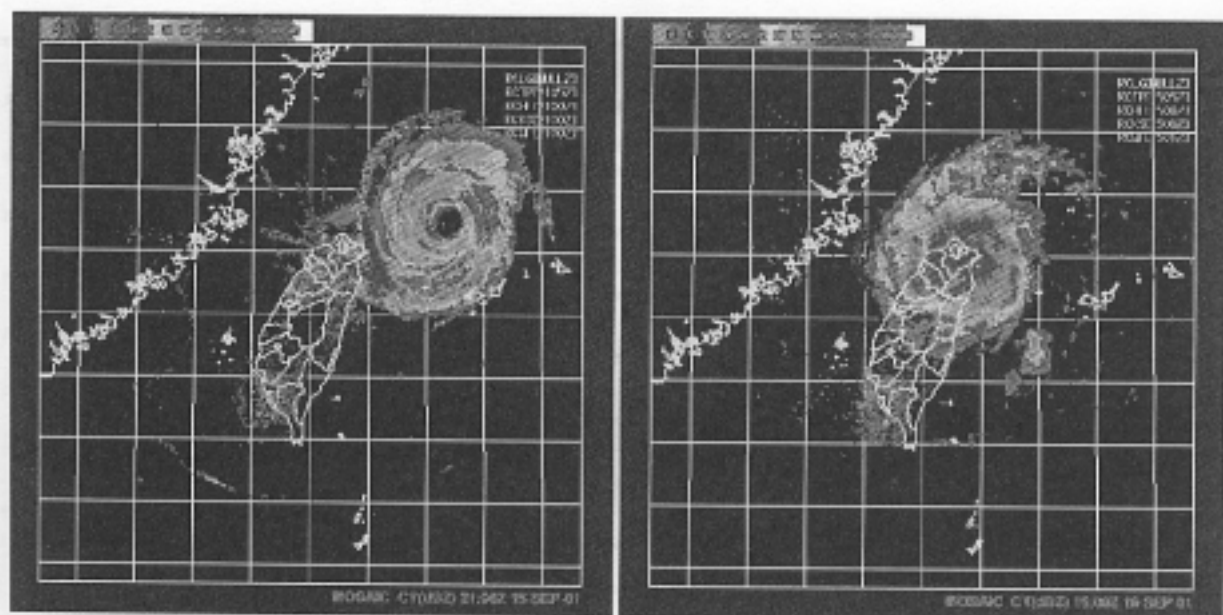


圖 6 納莉颱風於不同水平解析度的颱風中心氣壓時間序列圖。橫軸為時間(UTC)，縱軸為海平面氣壓(hPa)。粗實線為氣象局所發布的颱風中心氣壓資料，虛線為 CTL 實驗的 D2 網域(20 公里)之颱風中心氣壓，細實線為 CTL 實驗的 D3 網域(6.67 公里)之颱風中心氣壓，點線為 CTL 實驗的 D4 網域(2.22 公里)之颱風中心氣壓。

(a) A Preliminary Model (b) Typhoon Nari (2001) (c)



(c) (d)

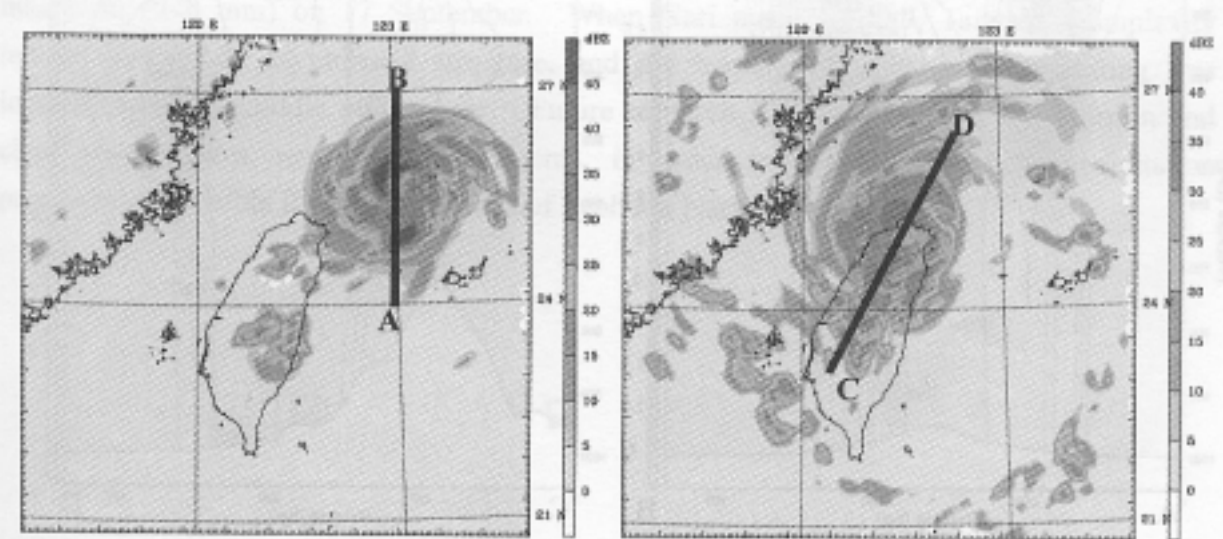


圖 7 氣象局於 2001 年 9 月(a) 15 日 2100 UTC、(b) 16 日 1500 UTC 之雷達回波 CV 圖，以及 CTL 實驗模擬之納莉颱風於 2001 年 9 月(c) 15 日 2100 UTC、(d) 16 日 1500 UTC 數值模式計算出之雷達回波強度。AB 及 CD 切線為圖 8 之垂直剖面設定。

雷達回波強度間距為 5 dBZ。 (a) 15 日 2100 UTC、(b) 16 日 1500 UTC 之雷達回波強度。 (c) 15 日 2100 UTC、(d) 16 日 1500 UTC 數值模式計算出之雷達回波強度。 AB 及 CD 切線為圖 8 之垂直剖面設定。 雷達回波強度間距為 5 dBZ。

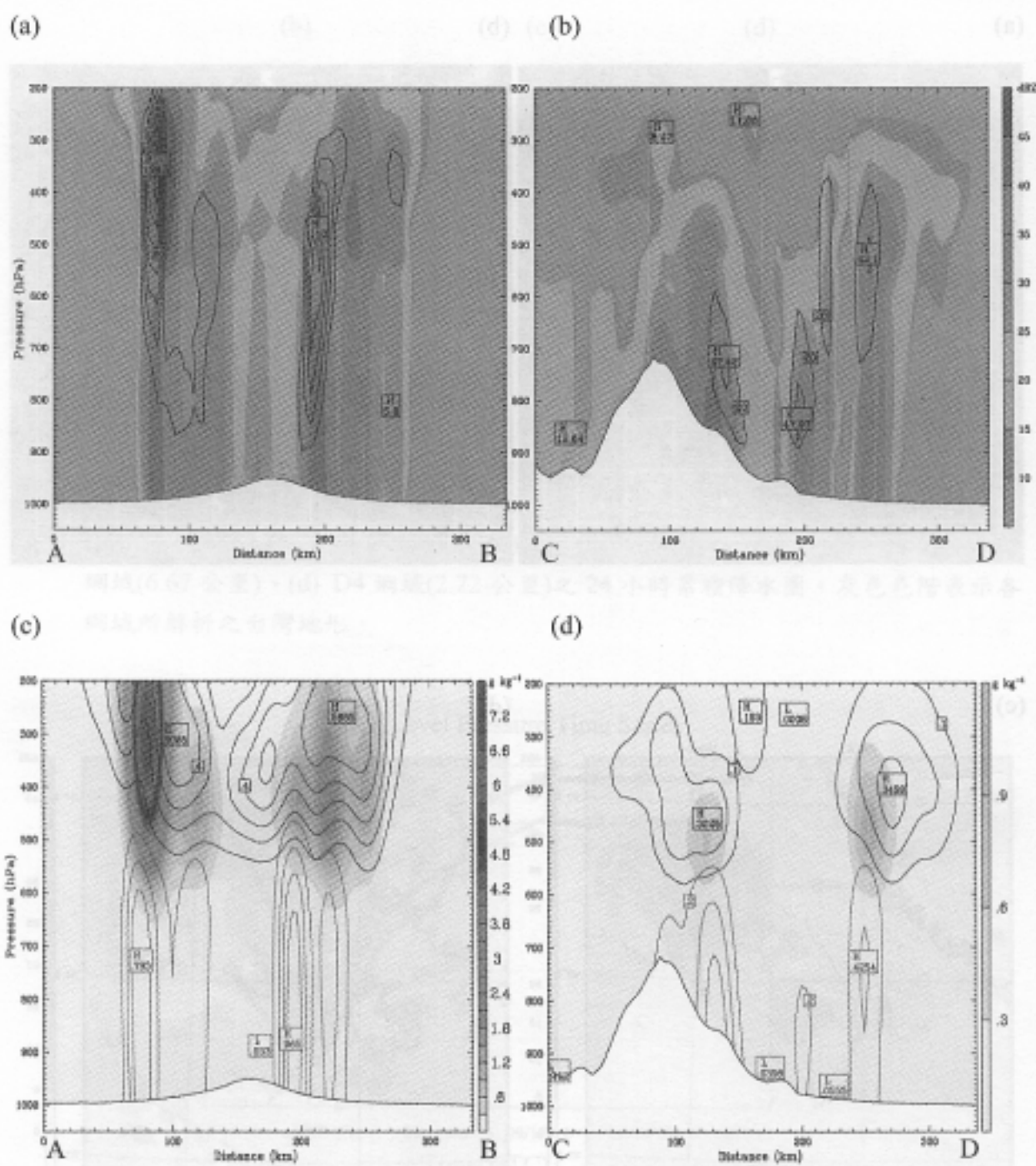


圖 8 CTL 實驗模擬之納莉颱風於 2001 年 9 月 (a) 15 日 2100 UTC、(b) 16 日 1500 UTC 模式計算出之雷達回波強度和凝結加熱率之 AB 及 CD 橫切面的垂直剖面分布，與 (c) 15 日 2100 UTC、(d) 16 日 1500 UTC 之雨水、雪花及軟雹三種降水粒子混合比之 AB 及 CD 橫切面的垂直剖面分布。回波強度的色階間距為 5 dBZ，凝結加熱率的等值線間距為 20 $K hr^{-1}$ ，雨水及雪的混合比等值線為 0.2 $g kg^{-1}$ 及 0.1 $g kg^{-1}$ ，軟雹的色階間距為 0.3 $g kg^{-1}$ 。

圖 8 CTL 實驗模擬之納莉颱風於 2001 年 9 月 (a) 15 日 2100 UTC、(b) 16 日 1500 UTC 模式計算出之雷達回波強度和凝結加熱率之 AB 及 CD 橫切面的垂直剖面分布，與 (c) 15 日 2100 UTC、(d) 16 日 1500 UTC 之雨水、雪花及軟雹三種降水粒子混合比之 AB 及 CD 橫切面的垂直剖面分布。回波強度的色階間距為 5 dBZ，凝結加熱率的等值線間距為 20 $K hr^{-1}$ ，雨水及雪的混合比等值線為 0.2 $g kg^{-1}$ 及 0.1 $g kg^{-1}$ ，軟雹的色階間距為 0.3 $g kg^{-1}$ 。

A Preliminary Modeling Study Typhoon Nari (2001)

Hsiao-Ling Huang¹ and Ming-Jen Yang²

¹ Department of Atmospheric Sciences, Chinese Culture University

² Institute of Hydrological Sciences, National Central University

Abstract

Typhoon Nari had an exceptional track, and struck Taiwan on 16 September 2001. Nari made landfall over I-Lan at 1300 UTC 16 September 2001, and moved out from Tainan at 1800 UTC 15 September 2001. It stayed over Taiwan more than 48 hours, and induced severe flash flood (48 hours accumulated rainfalls more than 2000 mm) especially at northern Taiwan.

This study used the PSU-NCAR MM5 model simulation to investigate the track, intensity, structure, and primary mechanism for heavy rainfalls of Typhoon Nari. The storm made landfall over Kee-Lung, only about 20 km off the actual landfalling position of I-Lan. The MM5 model with a 60-, 20-, 6.67-, and 2.2-km grid size can simulate the maximum 24-h rainfall near Snow Mountain with 19.63%, 45.36%, 81.98%, and 90.98% of observed rainfall maximum (940 mm) on 17 September. When Nari made landfall, Taiwan's complexity terrain induced an asymmetric structure, and the maximum condensational heating was located at low to middle atmosphere. Future research is on going to perform terrain and cloud-microphysics sensitivity experiments, in order to examine the key precipitation processes responsible for heavy rainfalls of Typhoon Nari.