

海棠颱風登陸台灣前內核結構演變之研究

簡國基

中央氣象局

(中華民國九十九年十一月二十五日收稿；中華民國一〇一年三月二十五日定稿)

摘 要

海棠颱風(2005)登陸台灣前，除了出現逆時針打轉的路徑外，颱風內核結構同時也有明顯的變化；都卜勒雷達觀測資料顯示，當颱風中心靠近台灣時，眼牆南側象限有線狀對流加強現象，該線狀對流逐漸旋繞併入眼牆，接著即出現颱風內核區之對流增強。本研究使用 WRF-ARW 中尺度模式進行高解析度(水平 4 公里)數值模擬的結果發現，台灣地形阻擋使繞山氣流與颱風內核環流產生低對流層之動力輻合，激發內核南側線狀強對流；隨後，該線狀強對流被併入眼牆區，促使眼牆東側位渦值及對流強度皆明顯增強，颱風眼結構也逐漸調整成橢圓狀。位渦擾動量收支分析結果顯示，非對稱加熱作用下之位渦通量項以及颱風平均風場作用下之位渦擾動通量項是導致眼牆東側位渦加強的主要貢獻項；線狀強對流併入眼牆時，颱風強度會短暫增強，此增強的過程在趨勢上是呈現振盪且強度漸漸加強之型態，同時內核不對稱強風速區將轉而出現在眼牆東側象限，本模擬結果亦顯示，線狀強對流完全併入眼牆東側(發生於積分時間 30~31 小時)約 2~3 小時後，颱風內核中心逐漸開始轉向北移行，此運動北轉為海棠颱風內核完成逆時針打轉路徑的關鍵過程，本實驗未來將進一步研究眼牆東側強位渦發展與該北轉運動是否有顯著關聯並探討其中的動力機制。

關鍵字：颱風內核、眼牆不對稱對流、WRF-ARW 模式

一、前言

近幾年來，國際上十分重視登陸颱風的相關研究；統計中央氣象局颱風資料顯示，1958-2009年共有177個颱風侵襲台灣，其中，颱風中心曾登陸台灣者有99個，每年因颱風災害所導致之經濟損失高達新台幣數百億元。實務上我們可發現，許多颱風在登陸台灣前數小時之路徑偏向相當複雜，如：2001年桃芝(Toraji)颱風即將登陸台灣前，運動路徑由西北突然轉向偏西，因而使颱風中心的登陸地點，較預期的地點偏向南邊約50公里。另一類個案如：海棠颱風(Haitang, 2005)、柯羅莎(Krosa, 2007)、辛樂克(Sinlaku, 2008)、雪莉颱風(Shirley, 1960)、瑪麗颱風(Mary, 1965)，這幾個颱風侵台時的強度皆為強烈颱風，中心登陸台灣前夕之數小時，運動速度明顯減慢，運動路徑則由原本偏向西行突然轉向偏南，隨後颱風中心在台灣東岸近海以逆時鐘方向繞行一圈後才登陸台灣本島，導致台灣遭受強烈颱風肆虐的時間足足增長8~12小時。Jian and Wu (2008)利用WRF模式進行海棠颱風高解析度數值實驗結果顯示，由於強烈颱風海棠的眼牆結構在靠近台灣之前近乎軸對稱，接近台灣山脈時，眼牆左側氣流受到地形擠壓形成峽管效應而產生低層北風噴流，促使颱風中心發生顯著向南偏向運動，接著眼牆強風區隨颱風環流進行逆時鐘平流，導致海棠颱風在登陸台灣前出現打轉一圈的路徑。然而，海棠颱風在靠近台灣時，眼牆深對流結構亦出現高度不對稱；就科學觀點而言，此對流不對稱演變所隱含之動力過程，在颱風侵台歷程上扮演著相當重要的角色。因此，本文接續Jian and Wu (2008)的研究，藉由中尺度動力數值模擬與分析，探討海棠登陸台灣前之眼牆深對流結構如何演變？不對稱結構如何發展？及其對颱風路徑有何影響？

二、實驗設計與結果分析

本研究採用新一代中尺度模式：WRF-ARW系統(Skamarock 2005)進行數值模擬實驗，其動力核心是一可壓縮、非靜力預報方程模組(flux-form Euler equations)，方程組中的垂直座標使用追隨地勢之 η 座標(terrain-following hydrostatic-pressure vertical coordinate)；模式網格使用two-way巢狀網格設定，水平網格之最高解析度(最內層，finest mesh)為4公里；垂直方向(地面至100百帕)共31層，並於近地表1公里內實施垂直高解析策略(1公里高度內有8層)；詳細之模式物理參數化設定及颱風結構初始化過程可參閱Jian and Wu (2008)。

本研究之實驗模擬初始時間設定在2005年7月17日0000 UTC，亦即約在海棠颱風侵台路徑發生大幅度偏向之前24小時，進行72小時積分(7月17日0000 UTC~20日0000 UTC)；由於本颱風個案眼牆南側象限之線狀強對流發展現象，極可能是颱風環流受台灣地形所產生的科學現象，所以本研究分別設計控制組與對照組實驗進行比對與研究。其中，控制組實驗(CTRL)：是以中央氣象局針對海棠颱風的中心定位與強度估計為依據，引用NCAR-AFWA渦旋植入模組(bogus scheme；Davis and Low-Nam 2001)，植入適當渦旋(選用之Rankine vortex參數為 $V_{max} = 53.0 \text{ ms}^{-1}$ ， $R_{max} = 50 \text{ km}$ ， $\alpha = 0.60$)來獲取更接近實際位置與強度的平衡颱風渦旋。對照組實驗(NT)：是將台灣地區的地形及地貌完全移除，改設定為海洋區，其餘設定皆與CTRL實驗相同，比較平衡渦旋結構可發現，NT與CTRL之主要差異僅出現在台灣地區，換言之，渦旋結構及環境場等重要特徵皆順利完整保存，以利後續模擬結果之相互比較。

模擬運動路徑顯示，CTRL 渦旋接近台灣地形時，WRF 模擬正確掌握海棠颱風逆鐘向打轉一圈的特徵，NT 實驗的渦旋則是直接向西北方運動而沒有打轉現象出現。Jian and Wu (2008)曾提及，由於台灣地形擠壓之峽管效應，會在海棠颱風眼牆西側出現北風低層噴流；本研究則進一步發現，該北風低層噴流會與颱風南側、西南側之氣流產生線狀局部輻合，且主要是發生在 850 hPa 以下的低對流層區，尤其 900 hPa 之氣流輻合帶最強可達 $-119.8 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ (圖 1)，此氣流動力輻合帶極可能與雷達所觀測之線狀強對流(圖未示)現象有密切相關性。透過低層大氣(900 百帕)的垂直運動場分析亦可看出同樣的結果，當海棠颱風逐漸進入台灣東部近海時，颱風南側因為動力輻合導致垂直上升運動逐漸加強，該強上升運動區由原先的線狀分布逐漸被併入颱風眼牆的東側及東南側象限，導致颱風眼牆區的位渦場分布由原來的接近圓形逐漸轉變成為橢圓形(圖 2)。水平風場分布顯示(圖未示)，隨著颱風靠近地形，眼牆與地形之間先出現低層北風噴流；隨後，當低層線狀強對流逐漸併入颱風眼牆之南側及東南側之際，水平風場等值線分布也逐漸拉長成橢圓形，同時該區的水平風速梯度亦快速增大，導致眼牆東南象限風速梯度明顯高於其他象限，表示存在有較大的氣旋式風切渦度，有利於颱風中心向東南象限移動；因此可推論，當海棠颱風中心受到低層北風噴流作用而大幅向南偏向後，隨即往較強氣旋式風切渦度區運動(眼牆區東南象限)，並以氣旋式方向打轉一圈後才登陸台灣東岸。可見，低層線狀強對流併入颱風眼牆南側及東南側的過程，是促使海棠颱風中心在台灣東部近海打轉的重要原因之一。

在颱風登陸台灣前的強度變化方面，Brand

and Blelloch (1974)所進行之統計分析結果指出，颱風強度在登陸台灣前約 12 小時就開始減弱，於登陸前後 12 小時期間，強颱風($> 50 \text{ m/s}$)強度減弱約 45%、弱颱風則減弱約 40%；與此統計分析有所不同的是，本研究中海棠颱風靠近台灣時之模擬強度呈現相當有趣的震盪變化，當線狀對流逐漸增強且颱風眼形狀轉變為橢圓形時，颱風強度並沒有因為地形破壞而迅速減弱，相反地，本階段 900 hPa 颱風近中心最大風速由 52.95 m/s 增強至 56.77 m/s；近地表中心最低氣壓也同時由 960 hPa 下降至 957 hPa 左右(見圖 3)，此颱風近中心強度增強現象在較大型颱風之敏感度實驗(見 Jian and Wu, 2008 研究中之 A35 及 A47 實驗)中並未出現，尤其在大型颱風敏感度實驗模擬結果中，也沒有線狀對流增強併入颱風眼牆的過程，因此，我們推論本研究中線狀對流增強伴隨眼牆區位渦加強，是促使海棠颱風接近台灣地形時，內核強度出現短暫增強的主因。為了進一步說明線狀對流併入颱風眼牆導致位渦增強及眼形狀轉變成橢圓形的過程，本研究進行位渦擾動量之收支計算如下(推導過程請參見 Wang, 2002)：

$$\frac{\partial P'}{\partial t} = -\nabla_3 \cdot (\bar{V}_3 P' + V_3' \bar{P} - g Q' \bar{\zeta}_a - g \bar{Q} \zeta_a' + g \nabla_3 \bar{\theta} \times F' + g \nabla_3 \theta \times \bar{F} + J_E) \quad (1)$$

$$J_E = (V_3' P' - \bar{V}_3' \bar{P}') - g (Q' \zeta_a' - \bar{Q}' \bar{\zeta}_a') + g (\nabla_3 \theta' \times F' - \bar{\nabla}_3 \theta' \times \bar{F}') \quad (2)$$

其中 P 是位渦、 V_3 是風向量、 Q 是非絕熱加熱率、 ζ_a 是絕對渦度、 θ 是位溫、 F 和 t 分別是摩擦及時間變數； \bar{A} 及 A' 則分別代表變數 A 之切向平均量及擾動量。

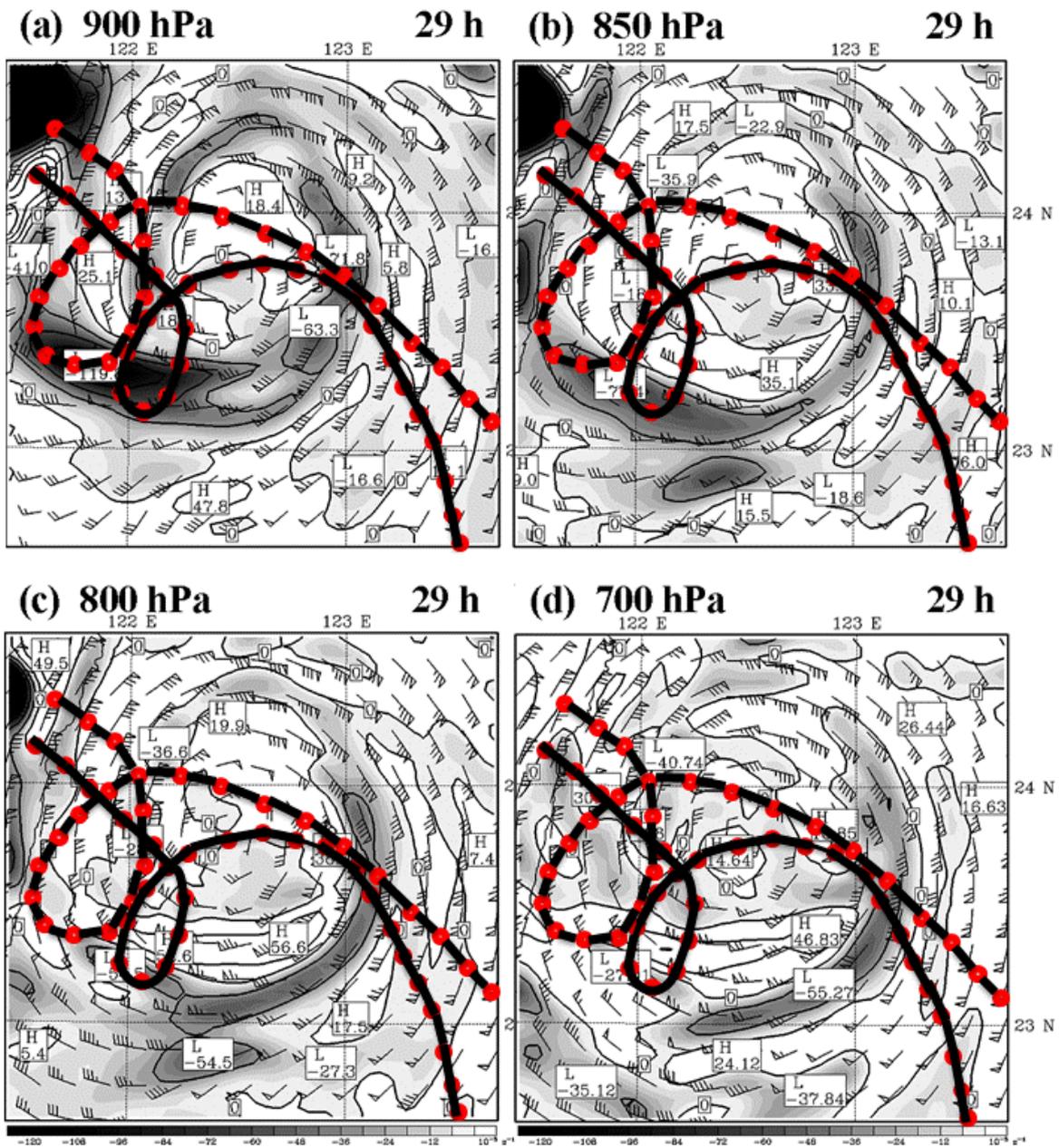


圖 1 控制組實驗積分 29 小時 (a) 900 hPa, (b) 850 hPa, (c) 800 hPa, 及(d) 700 hPa 之風場與水平輻合/輻散場分布, 等值線間距為 $3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。圖中空心圓線段為颱風最佳路徑、實心圓線段為模式模擬路徑。

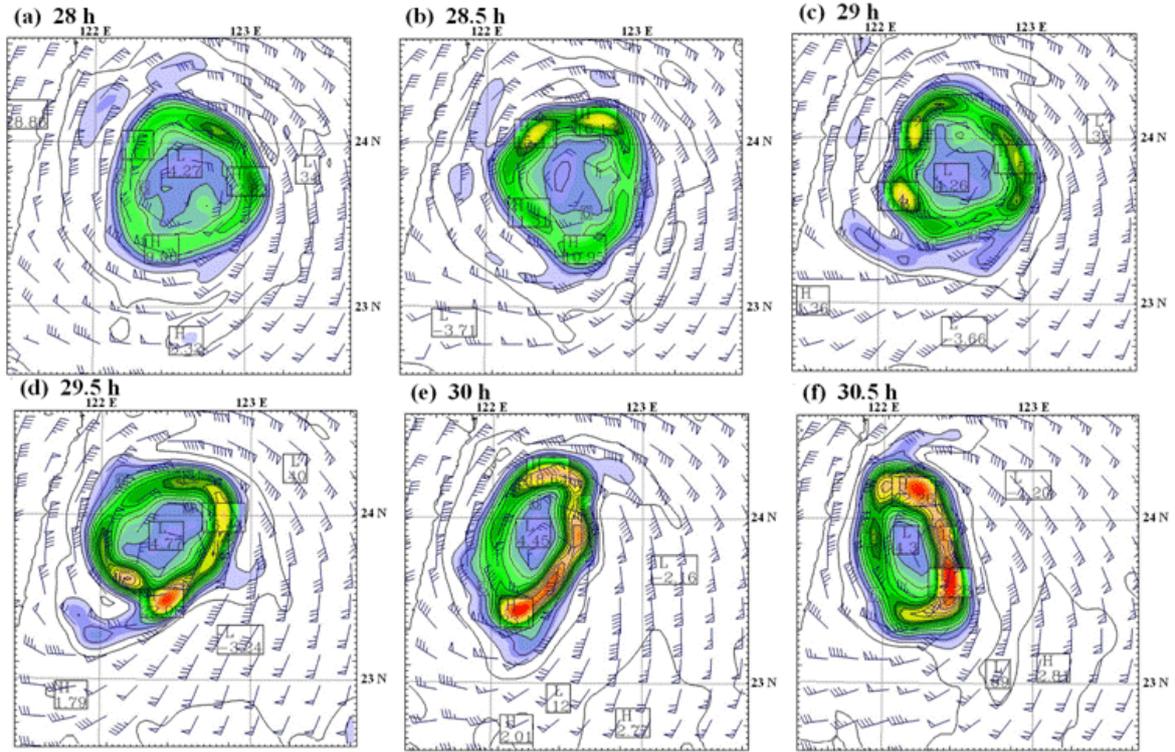


圖2 控制組實驗之模擬 900 hPa 水平風場與位渦場分布，積分時間分別在(a) 28 小時，(b) 28.5 小時，(c) 29 小時，(d) 29.5 小時，(e) 30 小時，及(f) 30.5 小時。

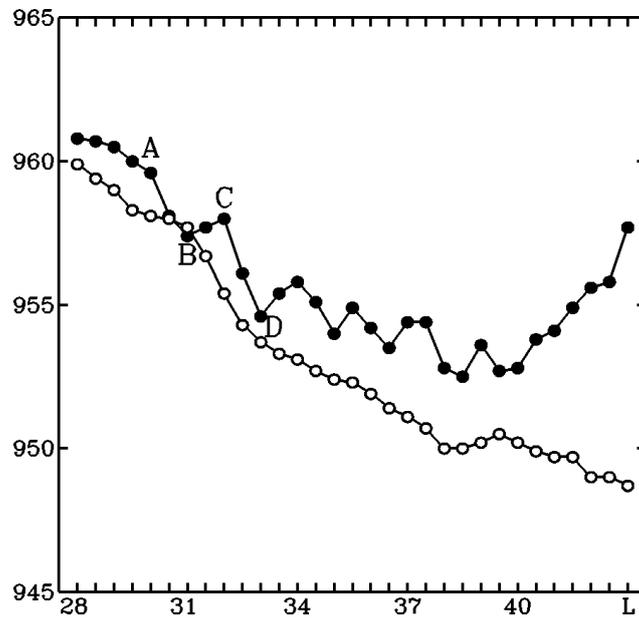


圖3 海棠颱風登陸台灣前，數值模擬之最低海平面氣壓時間序列圖，圖中實心圓及空心圓線段分別為控制組實驗(CTRL)與無台灣地形組實驗(NT)之模擬結果。

由(1)式顯示，位渦擾動量隨時間之變化可由等號右側之各項物理過程進行診斷，這些項依序分別是：颱風平均風場作用下之位渦擾動通量項 (flux of asymmetric PV due to the mean cyclone motion，含水平平流通量及垂直平流通量，以 LADV 項表示)、颱風非對稱風場作用下之平均位渦通量項 (flux of mean PV due to the asymmetric motion，以 BETA 項表示)、非對稱加熱作用下之位渦通量項 (PV fluxes due to asymmetric components of diabatic heating，以 DIABE 項表示)、對稱非絕熱作用下之位渦通量項 (PV fluxes due to symmetric components of diabatic heating，以 DIABM 項表示)，接下來的兩項為摩擦作用項，最後一項(J_E)代表非線性渦流過程，根據 Wang (2002)的研究結果顯示 J_E 項數值較主導項數值至少小一個數量級(order)以上，故本文將之忽略不計。此外，由圖 2 之位渦場分布可發現，颱風眼牆逐漸變形成為橢圓狀的關鍵時間點約落在模擬時間 29~30 小時之間，因此本研究分別進行 29.5 小時及 30 小時之位渦擾動量收支計算，結果如圖 4 及圖 5 所示；當颱風眼即將變形時，眼牆南側有局部位渦加強且最大值超過 22 PVU (圖 2d)，半小時後進一步加強達 23.1 PVU (圖 2e)，尤其，整個眼牆東半側都出現明顯的位渦增強。位渦擾動量收支的結果顯示，非對稱加熱作用下之位渦通量項 (DIABE 項) 是上述眼牆南側局部位渦增強的主導項之一，表示颱風靠近台灣時，眼牆南側經由線狀動力輻合過程產生線狀對流，進一步透過非絕熱效應作用加強眼牆南側之局部位渦值 (圖 4c)，此作用在積分 30 小時達最強盛，促使正位渦擾動貢獻量向颱風眼牆東側擴展 (圖 5c)，因而導致颱風強度短暫增強、中心氣壓下降 (見圖 3 之 A 至 B 時段)；另外，由圖 4a 及 5a

可見，颱風平均風場作用下之位渦擾動通量項 (LADV 項，主要是由切向風場之位渦擾動通量作用 LADVT 項所主導) 對橢圓颱風眼牆東側之強位渦發展也有顯著的正貢獻，而 BETA 項及 DIABM 項則皆只扮演次要的角色；再者，圖 2e 及 2f 則顯示，颱風中心北側有另一位渦極大值區，對應圖 5a 及 5e 可見，颱風平均風場對位渦擾動之通量作用 (即 LADV 項) 是該內核北側位渦極大值的主要正貢獻項。

三、結論與討論

海棠颱風登陸台灣前的過程複雜，本研究顯示，線狀強對流是導致颱風眼牆結構改變與路徑打轉的重要物理機制之一；Jian and Wu (2008)的研究結果發現，峽管效應所引發之北風低層噴流 (northerly low-level jet) 是造成海棠颱風登陸台灣前路徑發生大幅向南偏向的主因。然而，當颱風更靠近台灣時，由於地形摩擦作用，北風噴流的強度迅速減弱，眼牆不對稱強風速區轉而出現在颱風眼牆的東南象限與東側象限 (見 Jian and Wu, 2008 之圖 10a)。本研究分析結果進一步證實，低層水平輻合促進線狀強對流在眼牆南側發展，併入颱風眼牆東南象限與東側象限的過程中，伴隨有正位渦擾動量變率之相對極大值區，且此不對稱高位渦區亦伴隨局部強風速區，這些現象在 NT 組實驗並未出現；因此可見，由於海棠颱風靠近台灣時移動速度較慢 (約僅 3.5 ms^{-1})，路徑大幅南偏期間有足夠時間將線狀強對流合併入眼牆東半側，形成不對稱強風速區，此結果加強說明了 Jian and Wu (2008)之圖 10a 所示內核強風區轉而出現在颱風中心的東南側及東側，另外，線狀強對流完全併入眼牆東側約發生於積分時間 30~31 小時，再經過約 2~3 小時後，颱風內核中心逐漸

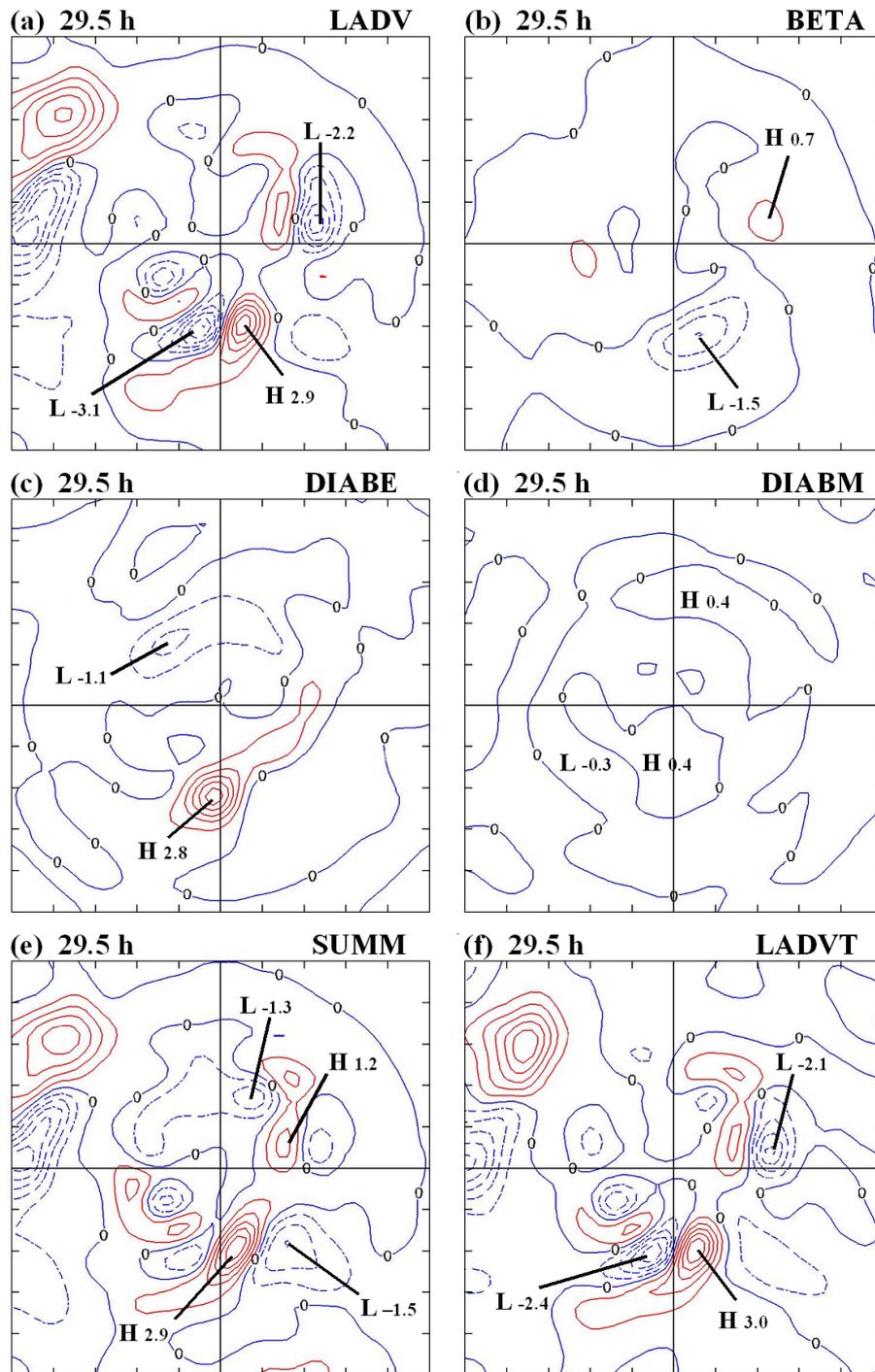


圖 4 控制組實驗位渦擾動量收支分析，(a)颱風平均風場作用下之擾動位渦通量項(LADV)，(b)颱風非對稱風場作用下之平均位渦通量項(BETA)，(c)非對稱加熱作用下之位渦通量項(DIABE)，(d)對稱非絕熱作用下之位渦通量項(DIABM)，(e)上述四項之總和項，(f)颱風切向風場作用下之擾動位渦通量項(LADVT)。圖的中心處為颱風中心，範圍為自中心向外延伸 50 公里（座標每一格為 10 公里）。

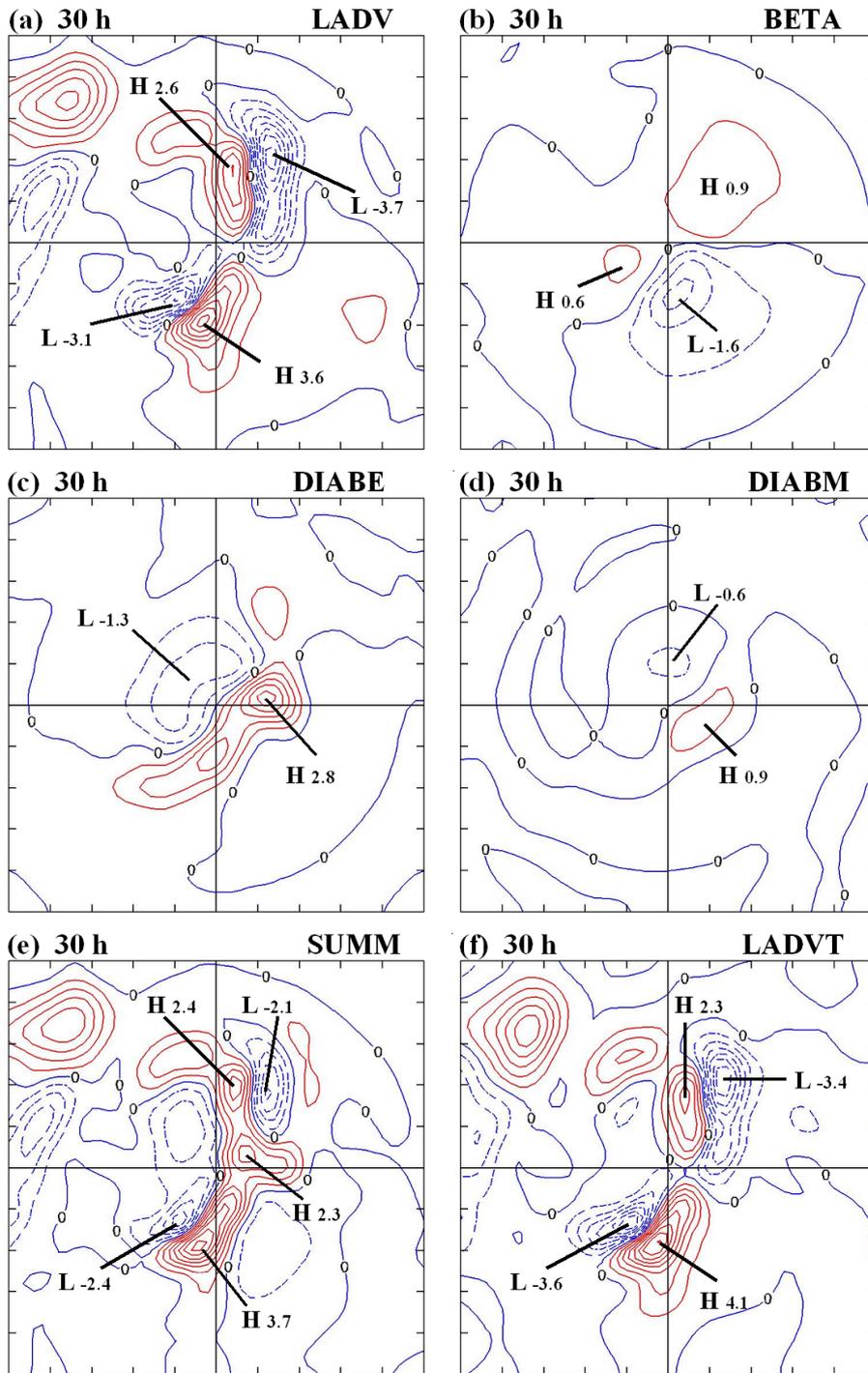


圖5 同圖4，但積分時間為30小時。

開始轉向北移行，此運動北轉為海棠颱風內核完成逆時針打轉路徑的關鍵過程，本實驗未來也將進一步研究眼牆東側之強位渦發展與海棠運動轉向北移行是否有顯著關聯，同時亦將探討其中的動力機制。

此外，雷達觀測與數值模擬結果均顯示，颱風眼牆合併線狀強對流僅需約 2~3 小時（該深對流的雷達觀測照片可參見 Jian and Wu, 2008 之圖 2b-2c），合併過程中眼牆對流與颱風強度均會短暫增強，此增強的過程在趨勢上是呈現振盪且強度漸漸加強之型態，此現象與 Montgomery and Enagonio (1998)所提渦旋羅士培波可促使颱風內核強度增強的研究結果頗有若干相似之處；較為可惜的是，相對應於圖 3 模式模擬的最低中心氣壓發生時間大多在洋面區域，故無實際觀測值可供比較；此外，有地形實驗組的颱風雖然在內核東南側有線狀強對流的作用，促使颱風中心氣壓有加深的現象，但由於此時颱風左半側環流已經受到台灣地形影響，因此其最低中心氣壓仍較無地形實驗組弱。由水平輻合/輻散場分析顯示，靠近眼牆南側之線狀動力輻合帶，主要發生在低對流層（850 hPa 以下）；透過位渦擾動量收支分析結果可知，非對稱加熱作用下之位渦通量項，是線狀強對流伴隨局部位渦增強的主要貢獻項。除了本文研究個案以外，統計歷史颱風資料發現，颱風登陸台灣東岸前，常可觀測到類似上述之低對流層線狀強對流，海棠颱風個案很可能是因為侵台時移動速度較慢，所以有較長的時間與眼牆進行交互作用，導致眼牆結構改變；然而，該線狀強對流對於移速較快或強度較弱颱風之影響如何？則無法使用本研究數值模擬資料來分析與探討，此外，慢速颱風靠近台灣時，路徑受台灣地形影響的因素複雜（如：颱風大小、強度、結構

對稱性等），本模擬研究的海棠颱風路徑開始向南偏向有過早的實驗誤差（雷達觀測颱風眼是在陸地邊緣附近南偏），後續研究我們亦曾將模式解析度提高至 1.33 公里，但此差異並未見明顯改善，這些科學問題將規劃於未來工作繼續探討。有關颱風內核位渦分析部分，未來我們亦將對模擬結果進行位渦移動分析（如：Chan et al., 2002 的分析方法），計算各物理項對於位渦運動的貢獻，如此更可清楚瞭解深對流（即非絕熱項）的效應。最後，需要補充強調的是，本文所討論的氣旋式打轉現象，是針對以颱風內核環流中心所定義的運動軌跡，若由較大範圍的颱風環流中心（如：七級風暴風範圍的幾何中心）來看，較大範圍的颱風環流接近於滯留並沒有明顯的打轉。而內核環流中心是否打轉，與颱風靠近台灣東岸時之移速有關，我們定性上推論移速過快的颱風不易出現內核打轉的現象，至於定量上的物理分析則有待使用理想化數值模擬實驗進一步探討。

致 謝

感謝兩位審查者提供寶貴建議，對本文之增進有很大助益；本研究是在國家科學委員會研究計畫 NSC 99-2625-M-052-005-MY3 資助下完成。

參考文獻

- Brand, S., and J. W. Blelloch, 1974: Changes in the characteristics of typhoons crossing the island of Taiwan. *Mon. Wea. Rev.*, **102**, 708-713.
- Chan, Johnny C. L., Francis M. F. Ko, Ying Man Lei, 2002: Relationship between Potential Vorticity Tendency and Tropical Cyclone Motion. *J. Atmos. Sci.*, **59**, 1317-1336.

- Davis, C. A., and S. Low-Nam, 2001: The NCAR-AFWA tropical cyclone bogussing scheme. *NCAR Technical Note*, 13pp. [Available online at <http://www.mmm.ucar.edu/mm5/mm5v3/tc-report.pdf>.]
- Jian, G. -J. and C. -C. Wu, 2008: A numerical study of the track deflection of Supertyphoon Haitang (2005) prior to its landfall in Taiwan. *Mon. Wea. Rev.* **136**, 598-615.
- Montgomery M. T., and J. Enagonio, 1998: Tropical cyclogenesis via convectively forced vortex Rossby waves in a three-dimensional quasigeostrophic model. *J. Atmos. Sci.*, **55**, 3176-3207.
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, W. Wang and J. G. Powers, 2005: A Description of the Advanced Research WRF Version 2. NCAR Technical Note, NCAR/TN-468+STR, 88pp.
- Wang Y, 2002: Vortex Rossby waves in a numerically simulated tropical cyclone. Part I: Overall structure, potential vorticity and kinetic energy budgets. *J Atmos Sci.*, **59**, 1213-1238.

A Numerical Study of The Inner Core Structure Change of Supertyphoon Haitang (2005) Prior To Its Landfall In Taiwan

Guo-Ji Jain

Central Weather Bureau

(manuscript received 25 November 2010 ; in final form 25 March 2011)

ABSTRACT

The inner structure of Supertyphoon Haitang (2005) took place temporal changes during the looping motion before its landfall in Taiwan. The Doppler observations show that an enhanced rainband is induced along the southern quadrant of the eyewall, which is then merged into the east sector of the eyewall. Two numerical simulations are conducted using the advanced WRF model with a 4-km fine mesh to examine the physical processes responsible for the above eyewall evolution. It is found that the initiation of the enhanced rainband is attributed to the low-level convergence between the around orographic flow and the inner-core circulation. The results of potential vorticity(pv) budget indicate that the pv fluxes due to asymmetric of diabatic heating play the major role on strengthening the eyewall pv and the winds over the eastern quadrant, which leads to a southerly asymmetric advection flow to complete the looping path.

Key Words: Inner core, Asymmetric eyewall convection, WRF-ARW

