

納莉 (2001) 颱風運用虛擬渦旋變分同化之模擬

王煥文^{1,2}、張忍成²

空軍氣象聯隊氣象中心¹

中國文化大學大氣科學系²

摘要

本研究使用 PSU/NCAR 的 MM5_V3 模式由 Zou and Xiao(2000)所發展之虛擬渦旋資料同化技術 (Bogus Data Assimilation(BDA) scheme) 來修正納莉 (Nari,2001) 颱風在 MM5 ECMWF 之初始場結構, 並模擬與探討其 72 小時颱風路徑與強度的變化, 其模擬之初始時間為 9 月 15 日 1200UTC。

其結果顯示, BDA 修正技術可以模擬出納莉颱風的暖心及非軸對稱和明顯的低層輻合與高層輻散的初始結構; 而在 72 小時颱風路徑模擬方面, 前 48 小時的模擬與 CWB, JMA, JTWC 平均誤差皆在 100 公里以內, 其中模擬路徑與 JMA 最為相似。在強度模擬方面, 海平面氣壓場經過 6~12 小時模式調整, 可達到與觀測相近的颱風中心氣壓趨勢。

此外, 在 CWB 所發布的路徑圖上可發現所模擬之海平面氣壓場亦有一低壓槽產生, 其與謝和王 (2001) 所繪製圖相類似; 比對當時之可見光衛星雲圖亦有不錯的模擬結果。

關鍵字: 虛擬渦旋資料同化、伴隨理論

一、前言

由於計算機的快速發展, 數值天氣預報成為了了解未來天氣最重要的工具之一, 它是通過一個預報模式從初始時刻開始積分到未來某一時刻來獲取該時刻的天氣狀況, 實際上也是數值地求解一組控制方程的初值問題。因此, 預報模式的性能與初始值(場)的優劣成為影響數值天氣預報準確性的兩個關鍵因素。可惜的是, 模式的初始狀態總是無法達到「完美」的狀態, 許多小於模式網格間距的現象無法被解析, 誤差會隨著電算機的運算過程快速成長。儘管如此, 我們可利用伴隨 (adjoint) 技巧的四維變分同化系統, 使之產生接近時間上之觀測又符合模式本身

動力演化的初始解, 對於改善颱風路徑預報上深具潛力, 如 Bennet *et al.*(1993)、Liu *et al.*(1997)及 Zou *et al.*(2001)等研究。

理論上, 四維資料同化通過一種最優的方式把觀測資料和背景場有效的結合起來形成最佳的模式初始場, 對於生長在海面上並缺乏觀測資料的颱風路徑預報有相當大的幫助。BDA 是採用四維變分同化的方法將人造渦旋作為觀測進行颱風初始化, 該方法的好處是僅用海平面氣壓場中的人造渦旋進行同化, 便可以改進整個初始場的三維結構, 並能恢復其暖濕結構 (Zou and Xiao, 2000)。基於我們有納莉颱風侵台期間還算詳盡的觀測資料, 而其極其緩慢的移動速度, 以及破紀錄的持續強降水, 幾乎造成全台 (尤其是北台灣地

區)相當嚴重的災情,遂成為我們首要探究的對象。

二、納莉颱風回顧

根據中央氣象局颱風警報單發布,納莉颱風在2001年9月6號上午11時在北緯25.3度,東經125.2度處生成,而後在北緯25~30度與東經125~130度之間打轉了8~9天後,於15號下午14時納莉颱風的中心來到北緯25.9度,東經123.9度,此時北台灣已經開始受到納莉颱風外圍環流影響(如圖1所示)。在15號晚間20時在北緯25.7度,東經123.8度處增強為中度颱風,風力達到每秒33公尺,威力持續增強;並在16日1340UTC左右於台北三貂角一帶登陸,登陸後受雪山山脈地形作用而一路往西南沿蘭陽溪谷移動,颱風結構迅速被破壞而減弱,最後從台南安平附近出海,滯留台灣陸地的時間長達49小時又20分鐘,其中在彰化雲林一帶滯留超過24小時,也使得颱風警報數目高達64報。帶來的雨量之多也是非常罕見,侵台的4天期間總累積雨量前50名測站均超過800毫米,超過1000毫米總雨量的測站高達18個,最多為宜蘭縣古魯的1443.5毫米,其次是宜蘭縣土場1430毫米,北部竹子湖亦達到1305.5毫米。

根據謝與王(2001)研究,納莉颱風在登陸台灣時(0916 13UTC),如圖3-1所示,在台灣東部之鄰近海面上有一副低壓產生,其強度較颱風主中心為弱,並沿著台灣東部海岸線緩慢往北移動。於0917 00UTC時(圖3-2),副中心仍然存在台灣東部海面上,颱風主中心強度減弱幾乎與副中心相當,副中心仍然緩慢向北移動。0917 21UTC時(圖3-3),除了原有存在於台灣本島陸地上的颱風主中心與在台灣東部海面上的副中心外,在台灣東南方海面上又生成一低壓中心,其中心氣壓強度與主、副中心相當。

三、研究方法與模式概述

本研究所使用的是PSU/NCAR的MM5_V3模式由Zou and Xiao(2000)所發展之虛擬渦旋資料同化技術來修正納莉(Nari,2001)颱風在MM5 ECMWF之初始場結構。其水平網格尺度為20公里(91*91),垂直間隔採 σ 垂直座標分31層,所使用網格中心點為(25.7°N, 123.9°E)。

MM5 4DVAR模式所使用的共軛(adjoint)技術,主要的作用為計算目標函數(cost function)對於控制變數的梯度值,此計算過程運用於變分學極小化過程來求取最佳的初始條件。其目標函數定義為:

$$J = \frac{1}{2} [x(t_0) - x_b]^T B^{-1} [x(t_0) - x_b] + \sum_{t_r=0, t_r} \frac{1}{2} \{h[x(t_r)] - y_0\}^T O^{-1} \{h[x(t_r)] - y_0\}$$

其中,

x_b 為背景變數

y_0 為觀測變數

B 為預報誤差協方差矩陣

O 為觀測誤差協方差矩陣

h 為非線性算子,將分析向量轉成觀測向量

t_R 為同化時窗(time window)

求其極值時, J 的導數必須為0,即

$$\nabla J = 0$$

颱風渦旋的同化採用Fujita(1952)經驗公式來估算其海平面氣壓場(SLP),其優點可在所有模式分析資料中獲得較接近實際颱風渦旋(Zou and Xiao, 2000)。其經驗公式如下,

$$P_{bogus}(r) = P_{\infty} - \frac{(P_{\infty} - P_c)}{\left(1 + \left(\frac{r}{2R_0}\right)^2\right)^{\frac{1}{2}}}, \quad r \leq R_{out}$$

其中, P_c 和 P_{∞} 為渦旋中心SLP與估計之渦旋無窮遠處之SLP; R_0 則為SLP最大梯度之半徑; R_{out} 為最外圍等壓封閉曲線。 P_c 與 R_{out} 直接由中央氣象局(CWB)所發布之颱風中心氣壓與最大暴風半徑給定之。 P_{∞} 則透過Park & Zou(2003)研究之經驗公式給定 P_{out} 和 R_{out} 與 R_0 後獲得。

四、模擬結果

4.1 目標函數

利用Fujita經驗公式所調整過的虛擬颱風渦旋之海平面氣壓場,再經過30次疊代(iteration)計算目標函數之最小誤差後,目標函數(J)與其梯度(∇J)的變化情形如圖2所示:目標函數在前5次的疊代快速下降了一階(order)以上,之後穩定且緩慢繼續減小,最後經過30次疊代下降了2~3階。 ∇J 亦於10次的疊代後快速下降至10的4次方以下,爾後緩慢遞減。此說明了伴隨模式對於此個案在前幾次的疊代可以快速使模式背景場逼近觀測資料,但對於其他如非系統性之誤差則無法完全排除。

4.2 初始場比較

圖4顯示了ECWFM之MM5初始場海平面氣壓、氣溫、風向風速等結構和使用Rankine vortex渦旋植入與經過虛擬渦旋資料同化後初始場之比較,我們可以明顯發現,經過BDA後之SLP初始場較其他兩者接近當時之實際觀測資料(根據氣象局發佈資料顯示0915 12UTC納莉颱風中心氣壓為975hPa),且其渦旋之氣壓梯度較大。在風場方面,亦可明顯發現Rankine vortex假造之渦旋風勢較大,但其風場幾乎沿著等壓線吹,輻合分量甚小(圖6.);而經過同化過後的渦旋周圍之風速則與ECWFM相當,但其渦旋之輻合分量較大(圖6.)。由圖6.亦可以明顯看出,由

BDA所模擬之底層有很強的輻合,高層有很強的輻散,與一般我們所認知的颱風動力較為接近;而未使用BDA法與使用Rankine vortex植入法之渦旋,其高低層之輻散度絕對值皆在0.0001以下。另外值得注意的是,Rankine vortex渦旋植入後會改變渦旋以外的綜觀環境場之風場,由台灣東南方海面上之小渦旋與颱風東方海面上氣流可以明顯看出;在海溫變化方面,則無太大變化。

另外由北緯25.7度(颱風中心)之颱風垂直剖面圖(圖5.)可以發現,經過同化過後的等濕位溫線(theta-e)與風場呈現非軸對稱狀態,且在渦旋底層($\sigma=0.9$ 附近)為明顯的暖濕結構;最大風速(35m/s)集中在颱風眼牆附近;而Rankine vortex植入之颱風渦旋暖心結構較不明顯,且等風速線幾乎為軸對稱狀態。而未使用BDA法之暖心結構只在低層明顯而中層則不顯著。

4.3 72小時路徑與強度之模擬

將未使用BDA法及使用BDA法後的資料與Rankine vortex植入法分別放入MM5伴隨模式系統模擬72小時,並與CWB、美軍聯合颱風警報中心(JTWC)與日本氣象廳氣象情報(JMA)等各個氣象作業單位所發布的颱風最佳路徑(best track)與強度做比較與討論。

在24小時(0916 1200 UTC,圖7.)的模擬裡,未使用BDA法之颱風渦旋與各個單位所發布之最佳路徑幾乎在同時、同地點登陸於台灣陸地上,而使用BDA和Rankine vortex植入法的颱風渦旋皆提早登陸於台灣陸地;在強度方面僅有使用BDA法之渦旋達到與觀測較接近之中心氣壓值(圖11)。在36小時(0917 0000 UTC,圖7.)之模擬,三者之模擬除了台灣本島之颱風渦旋外,皆在台灣東部海面上產生另一渦旋,此與當時之可見光衛星

雲圖和謝和王(2001)所繪製海平面氣壓圖(圖3.)皆有不錯之模擬。於0917 12Z(圖9.)CWB、JMA與JTWC對於此颱風中心定位完全不同:CWB(黃線)定位於中央山脈以西之台中、彰化一帶;JTWC(綠線)定位於中央山脈以東之花東附近;而JMA(紅線)則定位於台灣東部外海。模擬結果,使用BDA法之渦旋減弱為一低壓槽落於CWB路徑上,而有一渦旋恰好生成位於JMA所發布的最佳路徑附近,其他兩種模擬結果皆有類似情況;在60-72小時(0918 0000~1200 UTC,圖略)之模擬結果,使用BDA法之渦旋幾乎停留於台灣東部外海,與JMA所發布之最佳路徑幾乎相同。

計算三個颱風渦旋路徑模擬結果與各個氣象作業單位之誤差*(圖10、表一),未使用BDA法(ECWMF)之初始場因未經過調整所以初始之渦旋與各個作業單位已經存在一定的誤差,而使用BDA法經過模式動力調整後雖亦存在些許誤差,但誤差已經減少許多。使用BDA法的颱風渦旋路徑模擬之誤差,72小時之路徑模擬與JMA所發布最佳路徑之誤差最小,與CWB所發布之路徑誤差最大。Rankine vortex植入法不管在24、48、72小時之路徑模擬皆與三個氣象作業之最佳路徑誤差最大。

在渦旋強度模擬方面(圖11.),未使用BDA法之渦旋中心氣壓趨勢可模擬出0~18小時氣壓下降趨勢與18~36小時之上升趨勢,但其強度之掌握程度較差;而使用Rankine vortex植入法之颱風渦旋則無法有效掌握其氣壓變化趨勢與強度。使用BDA法之渦旋可達到與觀測較接近之颱風中心氣壓值,其氣壓變化趨勢也掌握較佳。

表一、三種不同模擬法與各氣象作業單位最佳路徑之24、48、72小時平均誤差

模擬法	作業單位	JMA	JTWC	CWB
		BDA	24h 45公里	50公里
Rankine vortex	24h	55公里	60公里	60公里
	48h	80公里	85公里	100公里
	72h	100公里	125公里	150公里
ECWMF	24h	50公里	60公里	60公里
	48h	50公里	60公里	75公里
	72h	60公里	80公里	115公里

* 所有虛擬渦旋前24小時選取原所模擬之颱風渦旋之主中心計算其路徑與其他氣象作業單位所發布最佳路徑之誤差;後48小時則選用後來生成之渦旋為其颱風渦旋主中心計算其路徑誤差與強度。

五、結論

為期能產生一更趨近於真實的模式初始颱風暨環流結構,本研究提案擬使用MM5伴隨模式系統(Zou et al., 1997),由Nari(2001)颱風個案著手,利用所謂的「四維變分」同化技術,以能植入合理颱風初始渦旋結構(含非軸對稱分量)且配合模式動力的BDA(Bogus Data Assimilation)方法(Zou and Xiao, 2000)為基礎,來進行資料同化實驗。

本研究是以納莉颱風(2001)侵台期間之9月15日1200 UTC為資料同化與模擬的初始時間,同化模擬的資料則使用ECWMF資料。在使用BDA法同化之前由ECWMF的資料得知在9月15日1200時(圖3.)在台灣東北外海上有一氣旋,其中心位置位於25.7°N、123.9°E。中心海平面氣壓為998hPa。再繪製25.7°N的垂直剖面可見在氣旋中心的氣壓於同一 σ 面有明顯下降,而其垂直風場則有明顯的低層輻

合,而高層輻散則較不明顯,暖心結構只在低層明顯而中層則不顯著。

將同一時間的ECWMF資料經過BDA法同化後氣旋中心位置在25.7°N、123.9°E,中心氣壓975hPa。但同化後的風速則明顯增加且垂直風場上也加強了低層輻合,此外高層輻散也相對明顯。同時也使暖心結構在中低層有明顯的呈現,同時也加強的低層的水氣結構。未使用BDA法(包含使用Rankine vortex植入法)所模擬的結果,可見在颱風中心海平面氣壓始終無法達到Nari颱風的水準,其颱風中心氣壓趨勢也較無法有效掌握。

六、致謝

本文為國科會研究計畫之部分成果,文化大學大氣科學系提供電算機研究設備,在此一並致謝。

參考文獻

- 謝信良,王時鼎,2001:台灣地形對侵台之中度以下颱風影響新例,兩岸颱風研討會,11-26。
- Liu, Y., D.-L. Zhang, and M. K. Yau, 1997: A multiscale numerical study of Hurricane Andrew (1992). Part I: Explicit simulation and verification. *Amer. Meteor. Soc.*, **125**, 3073-3093.
- Park, K., and X. Zou, 2003: Toward developing an objective 4D-Var BDA scheme for hurricane initialization based on TPC observed parameters. Submitted to *Mon. Wea. Rev.*
- Zou, X., and Q. Xiao, 2000: Studies on the initialization and simulation of a mature hurricane using a variational bogus data assimilation scheme. *J. Atmos. Sci.*, **57**, 836-860.
- , Q. Xiao, A. E. Lipton, and G. D. Modica, 2001: A numerical study of the

effect of GOES sounder cloud-cleared brightness temperatures on the prediction of Hurricane Felix. *J. Appl. Meteor.*, **40**, 34-55.

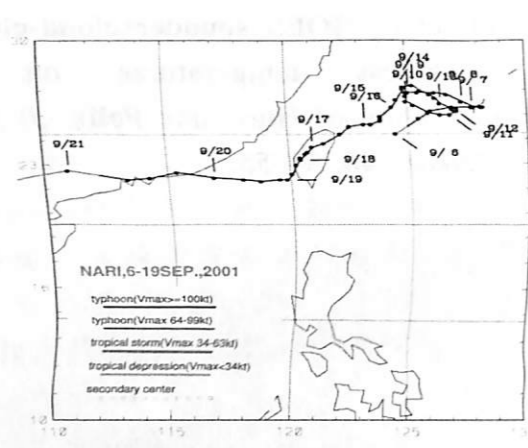


圖1. 納莉(2001)颱風最佳路徑圖(CWB)

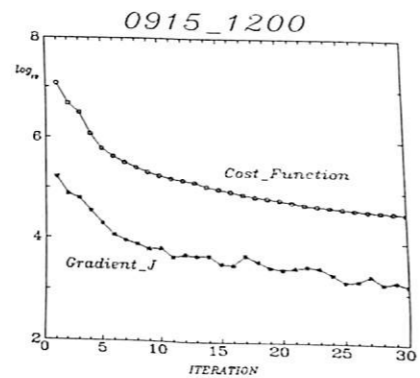
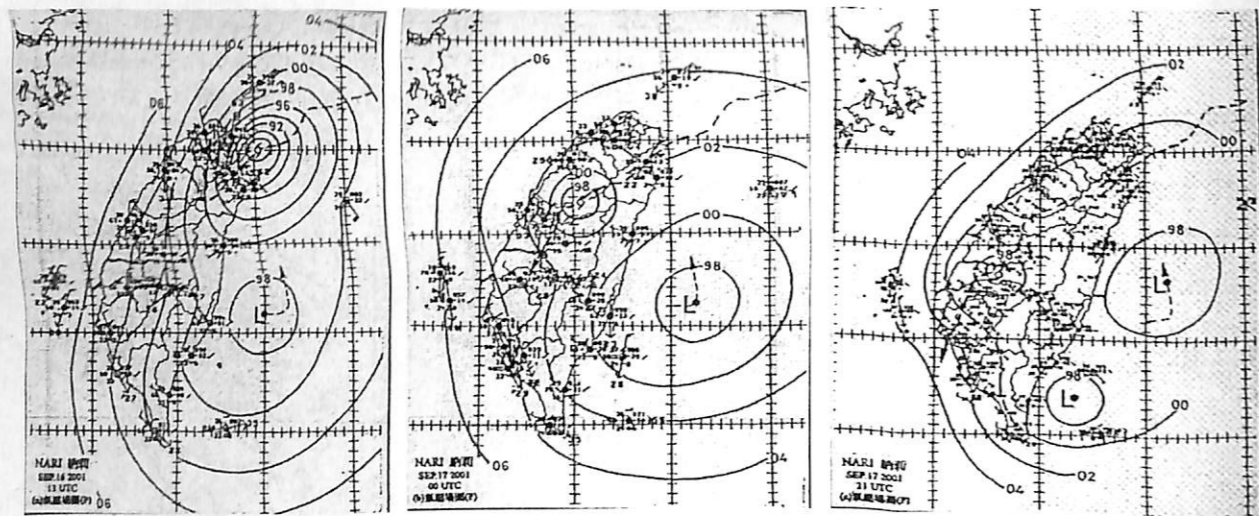


圖2. 目標函數(J)與其梯度(∇J)的變化情形, X軸為疊代次數, Y軸為取log值。



3-1. 0916 1300 UTC 3-2. 0917 0000 UTC 3-3. 0917 2100 UTC
圖3. 2001年9月年納莉颱風侵台各階段颱風詳圖(謝和王)。3-1為0916 1300 UTC, 3-2為0917 0000 UTC, 3-3為0917 2100 UTC

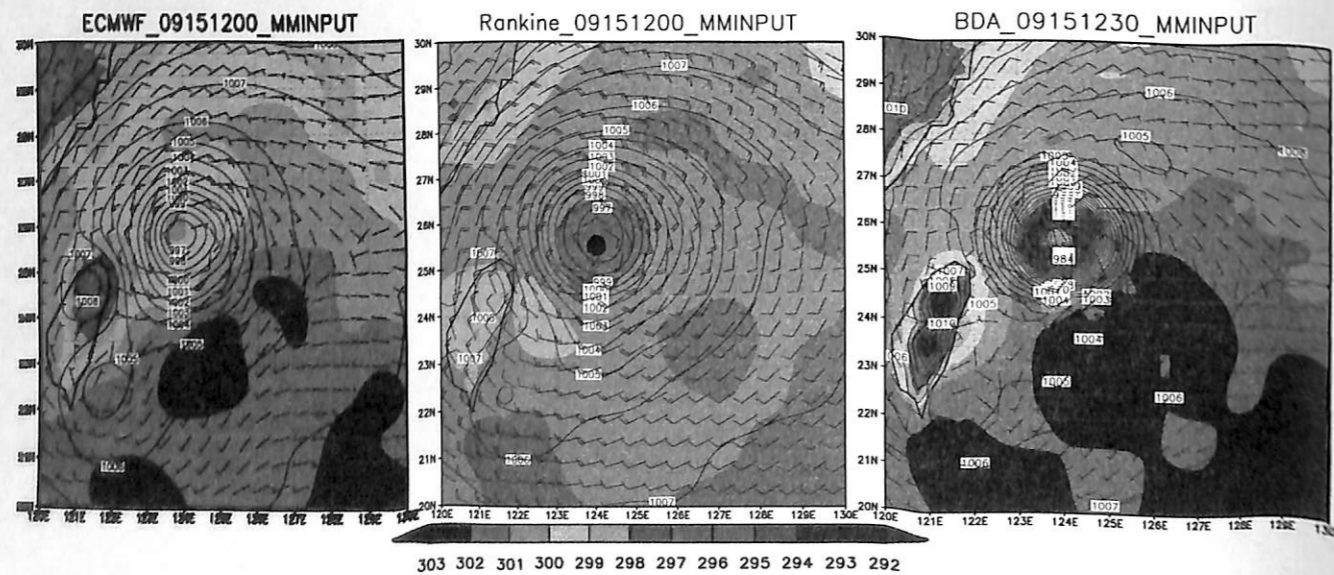


圖4. ECWMF和使用Rankine vortex渦旋植入與經過虛擬渦旋資料同化後(BDA)初始場海平面氣壓(黑色等值線)、氣溫(色彩部分)、風向風速(厂)等結構。

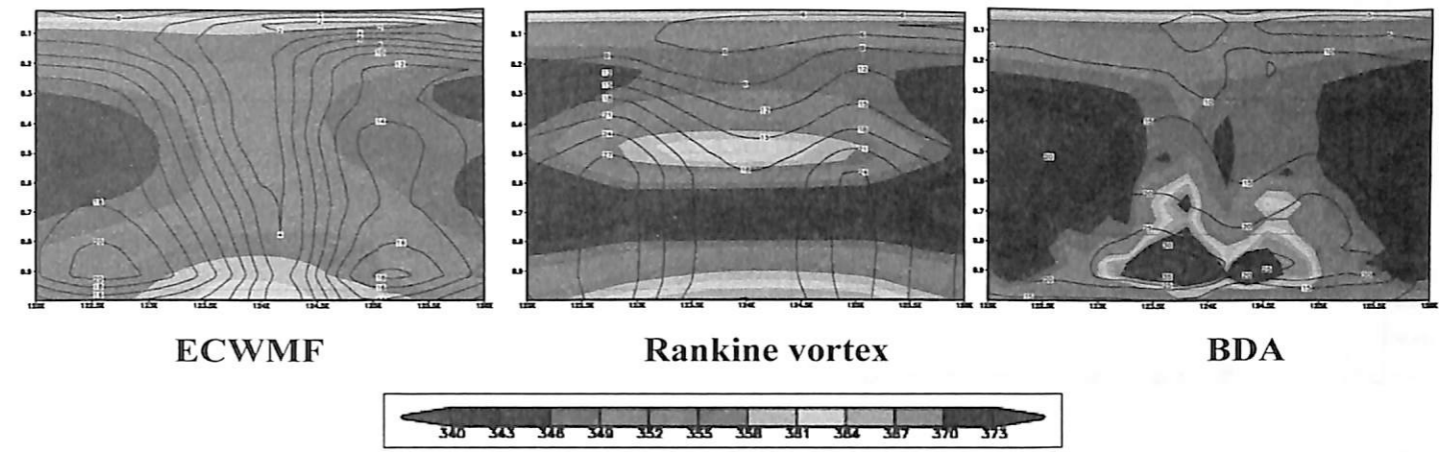


圖5. ECWMF和Rankine vortex與BDA颱風渦旋垂直剖面圖。黑色等直線為等風速線, Y軸為σ座標。

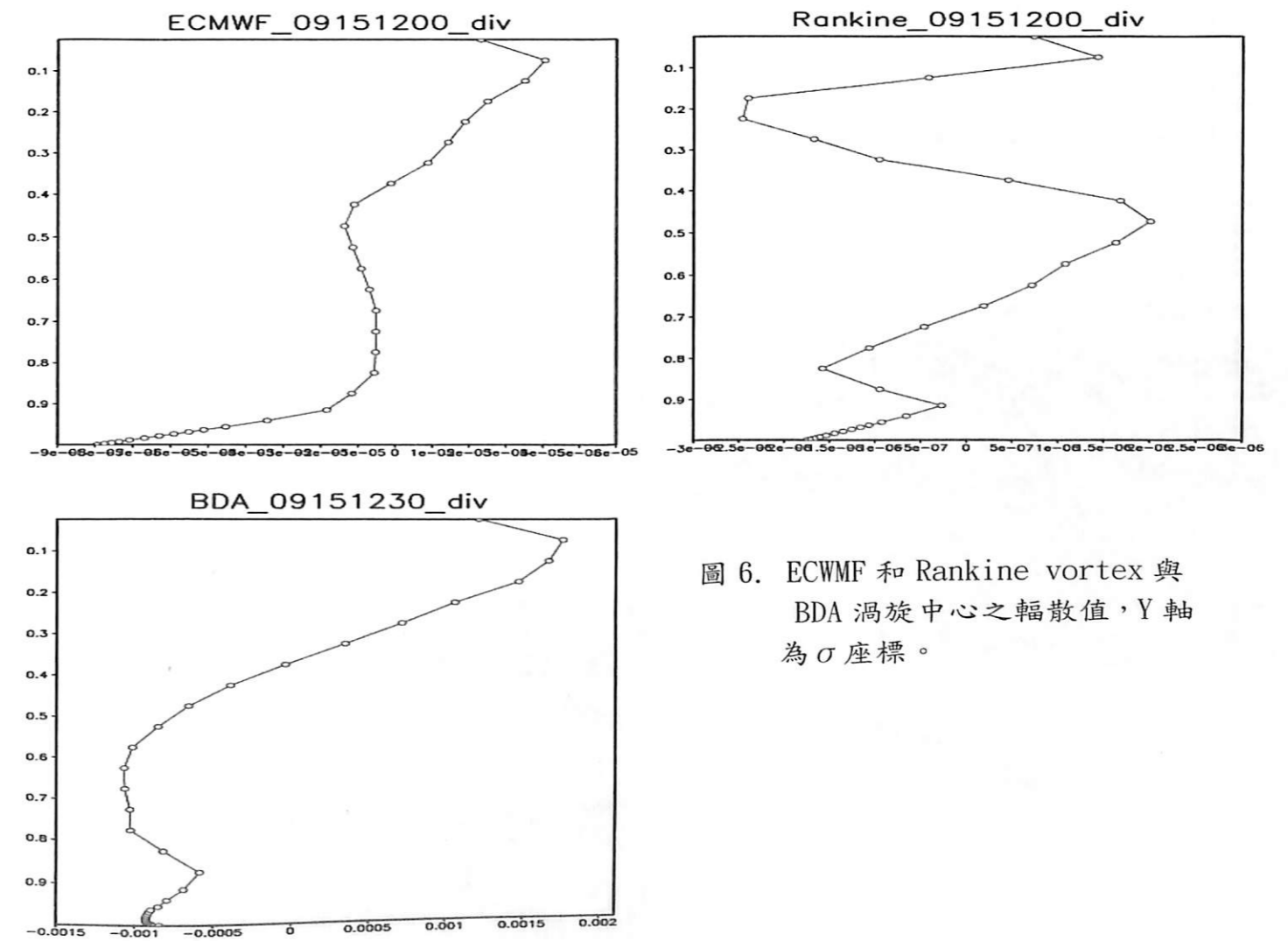


圖6. ECWMF和Rankine vortex與BDA渦旋中心之輻散值, Y軸為σ座標。

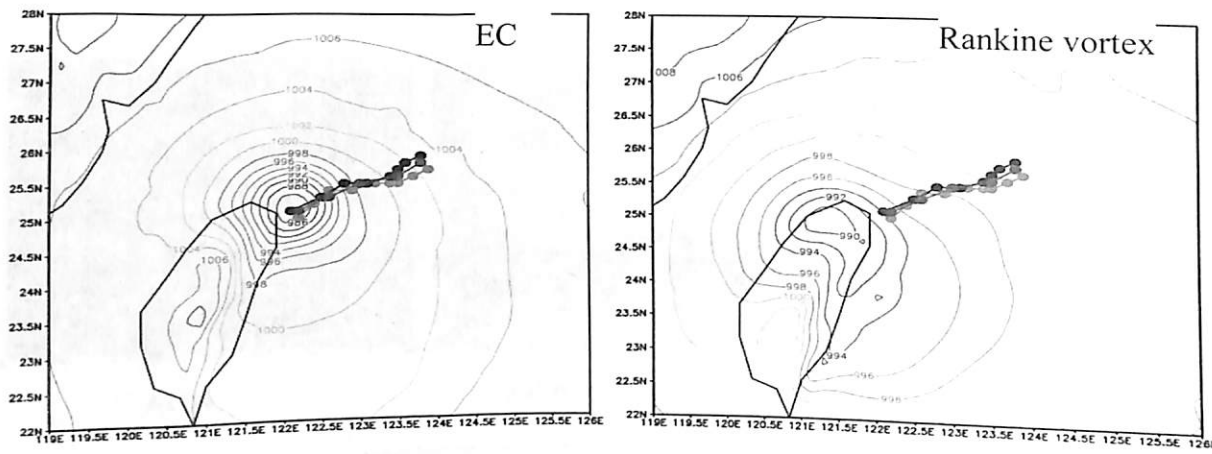


圖7. ECWMF 和 Rankine vortex 與 BDA 24小時(0916 1200UTC)之模擬結果,黃線為CWB所發布之最佳路徑,綠線為JTWC,紅線為JMA。

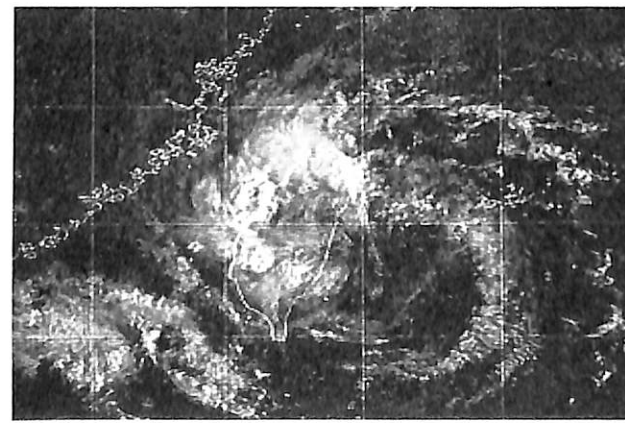
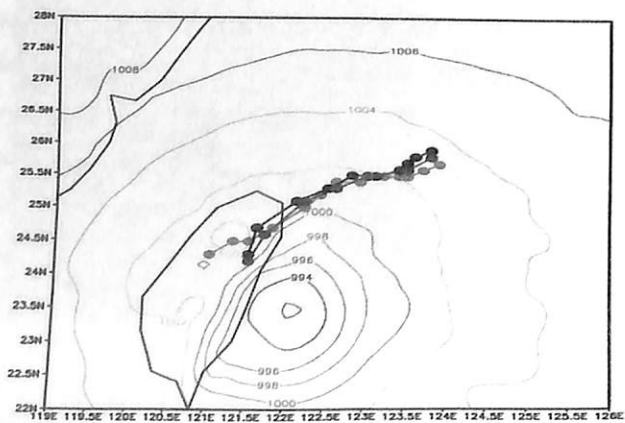
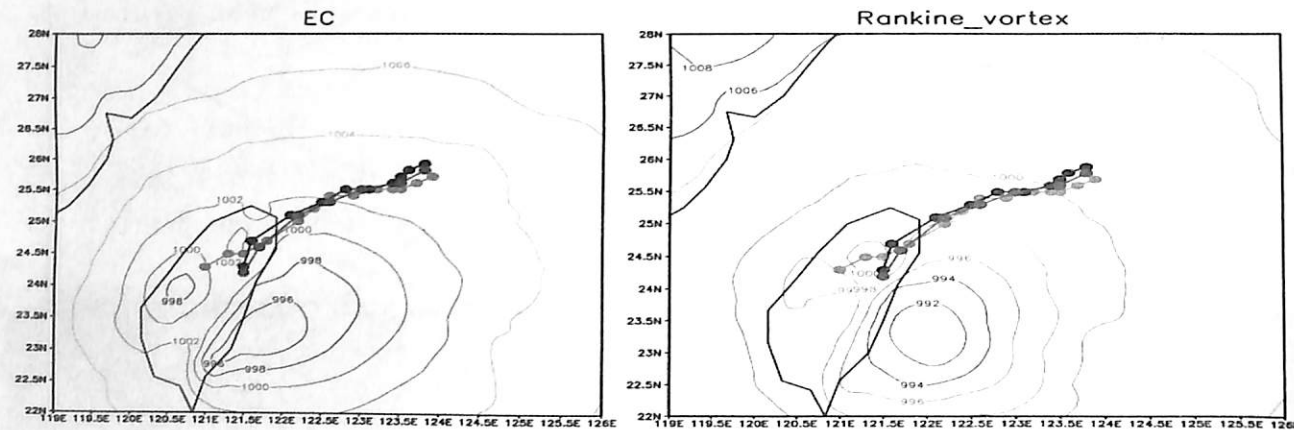
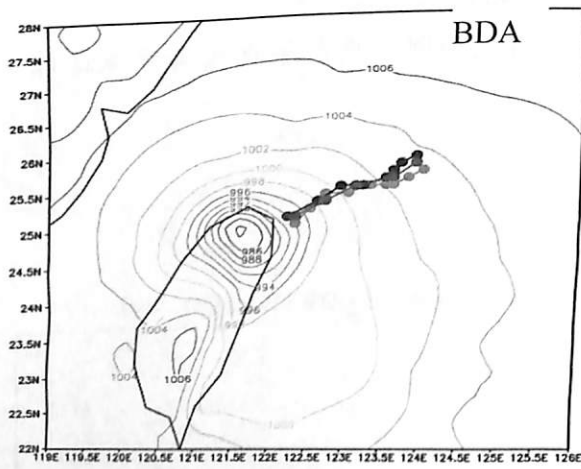


圖8. 與圖7同,但為48小時(0917 0000UTC)模擬。右下角為當時之可見光衛星雲圖。

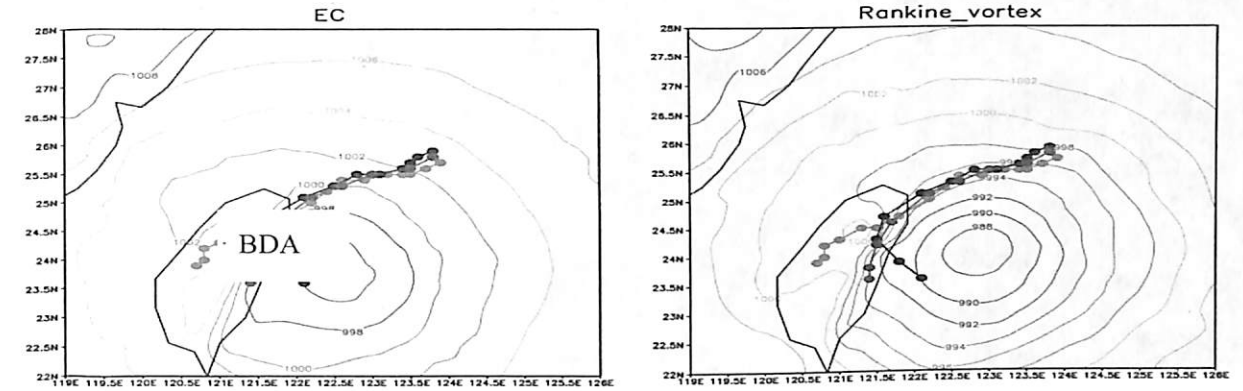


圖9. 與圖7.相同,但為60小時(0917 1200UTC)之模擬結果。

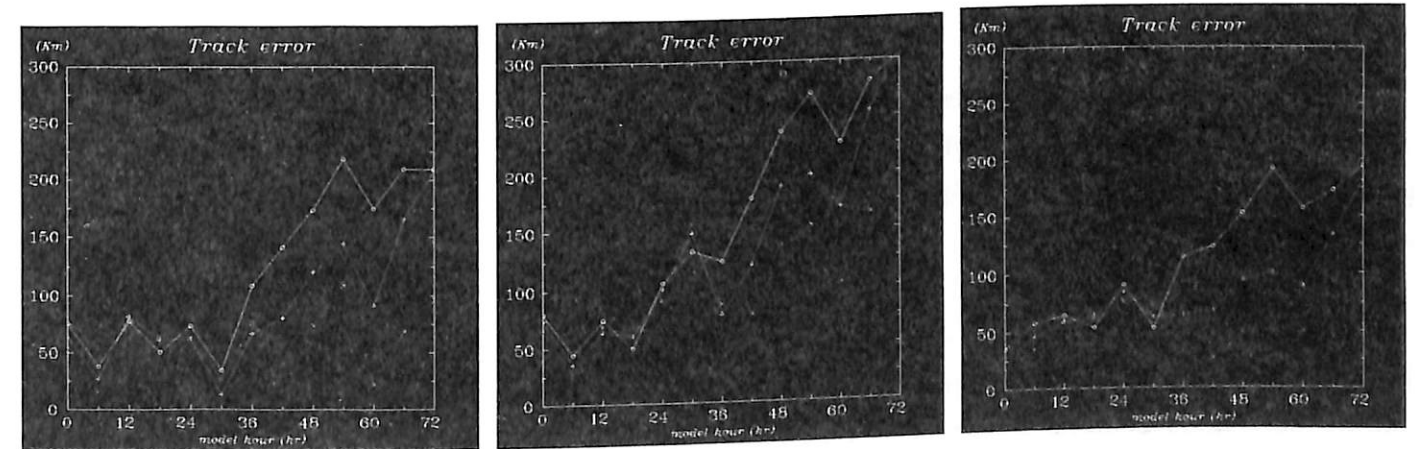
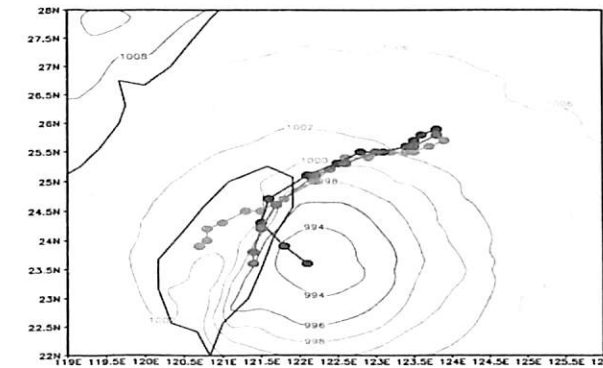
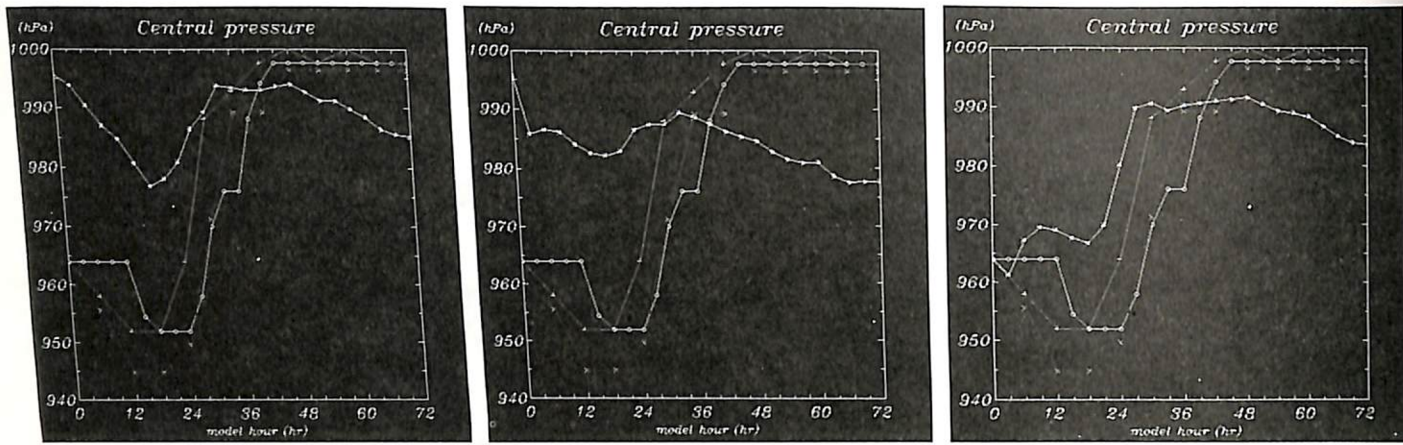


圖10. ECWMF、Rankine vortex、BDA三種不同颱風渦旋路徑之模擬與CWB(黃線)和JTWC(綠線)及JMA(紅線)所發布之最佳路徑之誤差。X軸為模擬之時間(小時),Y軸為距離(公里)。



ECWMF

Rankine vortex

BDA

圖 11. ECWMF、Rankine vortex、BDA 三種不同渦旋強度之模擬與 CWB (黃線) 和 JTWC (綠線) 及 JMA (紅線) 所發布之颱風中心氣壓之比較。X 軸為模擬之時間 (小時), Y 軸為氣壓值 (hPa)。

Simulation of Typhoon Nari(2001) Using the Variational Bogus Data Assimilation Scheme

by

Hwan-Win V. Wang^{1,2}, Jen-Cheng J. Chang²

Weather Center Weather Wing C.A.F. R.O.C.¹

Department of Atmospheric Sciences, Chinese Culture University²

Abstract

In this report, some preliminary results on simulation of Typhoon Nari(2001) will be presented. The Bogus Data Assimilation(BDA) scheme proposed by Zou and Xiao(2000) was applied to generate the ial structure of the Nari. The PSU/NCAR MM5 version 3 was used for both the data assimilation and simulation.

The 72-hour simulation for initial time on September 15, 2001, 1200UTC, revealed a multi-center breakdown as typhoon approaching Taiwan. The main center follows more like the JTWC's best track, rather than the CWB's, in the first 48 hours of simulation. On the other hand, one of the weaker centers, which shortly weakened to become a pressure trough, took the CWB's course closely during the whole simulation. Some snap-shots of simulated sea-level pressure filed qualitatively resembled the surface analyses shown by Hsieh and Wang(2001), and satellite visible imageries very well.

Keyword: Bogus Data Assimilation(BDA), Adjoint