

# GFDL颱風預報系統對於1995年及1996年 西北太平洋地區颱風測試結果評估

吳俊傑 卓瑜甄

國立台灣大學大氣科學系

(中華民國八十六年四月十六日收稿；中華民國八十六年十一月七日定稿)

## 摘 要

本研究測試GFDL (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory) 颱風預報系統對於西太平洋地區颱風的預報情形，以瞭解此系統在現階段對於西太平洋颱風之預報能力及被參考價值。

在1995年颱風季節中，我們對西北太平洋16個颱風做125個案的真時GFDL颱風模式預報。在路徑預報方面GFDL颱風模式的預報結果相較於CLIPER、中央氣象局的TFS和EBM、及美國的AVN與NOGAPS等颱風模式的平均路徑誤差約減少35%。另外GFDL颱風路徑預報誤差亦低於關島和台灣之官方預報，其改進超過30%。1996年之颱風季節中，我們復對西北太平洋23個颱風做171個案的真時GFDL颱風模式預報。在路徑預報方面，GFDL颱風預報系統對1996年西北太平洋颱風之路徑預報在所有預報個案中，對12，24，36，48，60及72小時的各預報時間，其平均預報路徑誤差分別為108，174，220，274，352及436公里。

路徑預報偏差及強度預報偏差之結果則顯示雖然GFDL颱風預報系統對於西北太平洋颱風預報之系統偏差會因年份不同而有所變化，但基本上仍略具一定的系統偏差：即在路徑預報方面GFDL系統具有偏北與相對於行進方向偏右的趨勢（特別是在1995年），且會低估高緯度颱風之移速，在強度預報偏差上，GFDL系統明顯具有高報強度較弱之颱風而低報強度較強之颱風的趨勢，這顯示模式本身及初始化過程尚有許多需要改進之空間。

由賴恩颱風（1995）個案結果凸顯GFDL颱風預報對於初始資料之敏感度問題，及台灣地區對於颱風預報誤差之較嚴格需求。此外，賀伯颱風（1996）個案分析結果則顯示GFDL預報系統對於風雨及中小尺度現象已稍具預報能力。目前我們正在規劃更多之測試以探討GFDL預報系統表現與其他現有模式差異之主因，以及瞭解颱風預報模式對初始資料場之敏感度。我們期望藉由這些測試以釐清現階段颱風預報所面臨之關鍵問題，並協助改善國內之颱風預報。

關鍵詞：颱風、GFDL颱風預報系統

## 一、前言

颱風是自然界最具破壞力的天氣系統，也是台灣最重要的災變天氣，其所帶來的雨量亦是台灣地區最重要的水資源之一。根據中央氣象局的分析（民國84年年終記者會）顯示近15年台灣地區因氣象因素導致的直接財物損失，平均每年達新台幣160億元（賀伯颱風災害未含在內），而其中有76.6%的損失係由颱風災害所造成。以民國84年為例，許多颱風過門而不入，未對南部帶來足夠降水，因此造成南部地區缺水及限水的問題。另一方面，賴恩（Ryan）颱風於民國84年9月22日掠過恆春半島外海，台灣大部份地區民眾度過一個少風、少雨的颱風假日，同樣也造成社會經濟的耗損。

而強烈颱風賀伯(Herb)於民國85年7月31日至8月1日期間侵襲台灣北部地區，其所挾帶之破記錄豪雨造成整個台灣地區超過數百億之民生經濟損失。尤其是南投山區及阿里山地區，災情最慘重（特別是其嚴重之山崩及土石流等災害）。根據農委會統計，賀伯颱風共造成死亡及失蹤人數分別達51人及22人，受傷人數463人，房屋全倒503間，半倒880間，農田流失559公頃、埋沒1266公頃，海水倒灌2157公頃，復建費用約19億元，農業災害損失達199億元（李三畏，1996）；而其他道路、橋樑之重建費用更是難以估計。儘管因各年代幣值不同而無法準確比較歷年來災害損失大小，但賀伯風災可能是自民國四十八年八七水災以來最大的災害。

從學術觀點而言，颱風是流體力學在大自然所展現的絕妙特例。颱風系統包括旋轉渦旋、位流、層化流體、熱力對流、大氣與海洋之交互作用等物理過程，一直是國際大氣科學界深感興趣的研究題材。以台灣為例，由於位處於西北太平洋地區颱風路徑之要衝，每年常受颱風侵襲，但也因此成為觀測和研究颱風之絕佳地理位置。颱風接近台灣時，中央山脈高聳、複雜的地形，對颱風伴隨之對流和環流結構有相當顯著的影響；此地形作用，不但可以改變颱風之路徑，也使得其所伴隨之強風和豪雨之預報更加困難。而此地形作用導致颱風特性之複雜變化亦為學術上深具挑戰之研究課題。

除上述學術難題外，加上颱風本身及其周圍大氣環境的觀測資料之不足、颱風預報模式之缺陷、人為颱風預報的主觀性、以及上述各原因的交錯影響，準確的颱風預報是相當困難，而颱風預報的能力更是有限。依統計平均而言，目前世界各先進國家的二十四小時颱風中心位置預報誤差約為一百八十公里。然而台灣地區地狹人稠，對於颱風是否侵襲非常敏感且脆弱。無論是颱風入侵或者是“狼來了”假警報都會造成社會成本之損失。因此，颱風預報的改進是台灣地區目前氣象科技發展最實際也最大的挑戰之一。

中央氣象局所發展的第二代颱風路徑預報系統（TFS）已於1994年建置完成，並針對1994年之颱風做作業性測試。Chen et al. (1994) 顯示24、48小時颱風路徑預報統計誤差各為201、380公里，較其前一代系統已有所改善。此TFS颱風預報系統仍在持續研究改進之中，如何吸取其他颱風模式及其資料初始化方法之優點，以改善TFS颱風預報系統，應是值得進一步研究的方向。另外，深入瞭解颱風預報系統本身之系統誤差及偏差特性，除了對於模式本身之改進有所助益外，亦可提供使用其系統做預報者之重要參考依據。儘管氣象局已有這套自己所發展的模式，然而在做正式颱風預報時，客觀地參考其它模式之預報結果及加上有經驗的預報人員之主觀人為研判，亦是做好颱風預報不可忽視的環節。

Wu (1994) 使用GFDL (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory) 颱風預報系統對西北太平洋的颱風進行初步測試，其結果顯示此模式對18個侵台之西北太平洋之颱風具有相當之預報能力。本研究則持續Wu (1994) 之研究—測試GFDL颱風預報系統在1995年及1996年對於西太平洋地區颱風的預報情形，以瞭解此預報系統在現階段對於西太平洋颱風之預報能力，進而評估其將來做為本地颱風預報參考之價值。

吳 (1996) 與Bender et al.(1997)之研究主要是針對GFDL在1995年所做之預報結果進行路徑預報及強度預報之評估。本文則針對1995年及1996年的結果加以探討，以瞭解模式本身是否具有一特定之預報偏差，以及在不同年份預報結果之差異。由於我們在1996年已將GFDL颱風預報系統對於西北太平洋地區颱風之預報作業自動化，因此在1996年時之預報個案較1995年多出約40%。而為配合美國海軍NOGAPS (Navy Operational Global Atmospheric Prediction System) 進行GFDL颱風預報系統之平行測試【即皆使用GFDL颱風預報模式，但初始場則分別使用NCEP (National Centers for Environmental Prediction) 之AVN (AViationN) 及NOGAPS (Navy Operational Global Atmospheric Prediction System) 之全球分析場】，預報時間因此由1995年使用之00UTC及12UTC改為06UTC及18UTC。此外，本文亦特別強調與TFS的比較（TFS颱風預報系統在1995年及1996年時預報時間皆為00UTC及12UTC，故在1996年中GFDL和TFS預報結果比較為非均勻個案之比較），以更明確分析TFS在95及96年之預報結果，並探討其未來改進方向。

基於上述精神，本研究之主要目的即在延續Wu (1994)，吳 (1996) 及Bender et al.(1997)之工作—測試GFDL颱風預報系統對於1996年西太平洋地區颱風的預報結果，以瞭解此模式在現階段對於西太平洋颱風之預報能力，進而評估其將來做為本地颱風預報參考

之價值。並且從不同模式預報與實際觀測之比較中學習經驗，以改進GFDL及TFS模式及其資料初始化與渦旋植入(bogusing)處理方法，期盼能對未來之颱風預報有所幫助。

本文之第二節說明所使用的GFDL颱風預報系統及所進行的預報方式與流程；第三節為1995年對西北太平洋颱風測試之結果回顧；第四節為1996年西北太平洋颱風預報結果分析及探討；第五節為個案分析與討論；最後為結語與未來工作。

## 二、GFDL颱風預報系統

本節介紹GFDL颱風預報系統之基本架構（詳細架構見附錄或Kurihara et al.,1997），我們所使用的最新版本的GFDL的多重巢狀可移動網格(Multiply Nested Movable Mesh)颱風模式（以下簡稱爲GFDL颱風預報系統），是由Kurihara和Bender（1980）所研究發展，再經由Tuleya et al.（1984），Bender et al.（1987）和Bender et al.（1993）對模式的細部加以修改，並加入資料初始化過程及颱風渦旋植入方法【Kurihara et al. 1993;1995（KBTR）】及輻射參數化（Tuleya 1994）。

此模式爲一原始方程模式，在水平爲經緯度座標，垂直爲 $\sigma$ （ $\sigma = P/P_s$ ）座標。垂直高度分爲18層，積分範圍爲緯度 $75^\circ \times$ 經度 $75^\circ$ 。而所使用的三重巢狀網格，其解析度由粗至細分別爲 $1^\circ$ ， $1/3^\circ$ 和 $1/6^\circ$ 。最外層網格的範圍緯度是由 $10^\circ S$ 到 $65^\circ N$ ，而經度座標則隨著預報的颱風位置不同而有所改變。模式中參數化過程主要包括積雲參數化，大氣—地面交互作用，垂直和水平擴散，及輻射參數化。此模式使用NCEP的T126全球分析場，並將其內差至GFDL颱風模式之網格上做爲模式積分的初始條件，並以NCEP全球模式每12小時的預報結果做爲側邊界條件（Kurihara et al.1989）。

GFDL的颱風預報系統主要特徵包括 1、爲一個高解析度的多重可移動網格模式，2、以NCEP的全球分析場資料做爲初始場，3、採用GFDL模式之颱風初始化過程和颱風植入方法。因此這三部份中任何一項的改進，都可能影響模式預報的準確度。在Bender et al.（1993）的模擬中，透過颱風初始化過程對Gloria（1985）和Gilbert（1988）颶風做模擬，結果顯示在預報的前48小時其路徑相較於沒有初始化之預報有顯著的改善。而颱風的強度在預報上雖有較大之誤差，但對其強度的變化已有較佳之掌握。1995年KBTR提出新的初始化方法，針對過濾擾動場中屬於颱風擾動和不包含颱風擾動的部份加以改善；使用新的初始化方法結果顯示，在Florence（1988）颶風的模擬中，可將颶風東北方的氣旋和颶風本身的環流做較好的過濾，得到更正確的初始環境流場，進而改進颱風的路徑預報。

此GFDL預報系統在經過多年之測試及近年的實際颱風預報模擬，統計上顯示出所有大西洋及東太平洋颱風模式中之最佳路徑預報，並且稍微展示颱風強度之預報能力（Kurihara et al.1993）。GFDL颱風預報系統於1994年的颱風季節，在NCEP的Cray C-90電

腦上測試，並在1995年時正式成為NCEP颱風預報的作業模式。GFDL颱風預報系統亦分別在1996年及1997年成為美國海軍數值預報中心（FNMOC）及南韓氣象局的颱風預報作業模式。我們認為GFDL颱風預報是現有颱風預報的最佳模式之一。

本研究乃延續Wu（1994），吳（1996）及Bender et al.（1997）之研究，利用NCEP之Cray C-90電腦，在1995年及1996年颱風季節針對西北太平洋地區颱風進行真時預報。由於1995年時GFDL颱風預報系統對於西北太平洋地區之颱風預報仍需依賴人工啟動以輸入初始颱風渦旋資料，因此1995年僅預報16個颱風，125個案；而1996年時因自動化預報作業已完全建置，因而預報個案較1995年約增加40%：為23個颱風，171個案。此外，本研究中的一項特色在於當美國海軍使用NOGAPS之資料場以GFDL預報系統對1996年西北太平洋地區之颱風從事預報時，我們亦同時採用GFDL系統以AVN為初始資料場於NCEP進行平行之預報。因此比較兩者之結果將可幫助瞭解GFDL預報系統對於初始條件之敏感問題；而這可視為系集預報（ensemble forecast）的初步探討（Bender et al., 1997）。為配合美國海軍對於西北太平洋颱風進行預報之預報時間以進行此二個平行預報，在本研究中所進行颱風預報之初始時間為06UTC和18UTC（1995年為00UTC及12UTC）；故此研究無法以GFDL預報系統之預報結果與其他模式（00UTC及12UTC）之結果進行均勻個案之比較。以每日0600UTC之預報為例，GFDL之預報約在1200UTC—1400UTC時完成（即在NCEP AVN完成後1—3小時）。

### 三、1995年預報測試結果分析

#### （一）路徑預報誤差

1995年颱風季節，我們自7月中旬至11月初對西北太平洋16個颱風做125個案的真時預報（預報個案如表一）。預報結果除和CLIPER（CLImatology and PERsistence）、中央氣象局之TFS和EBM（Equivalent Barotropic Model）等模式，及與Guam（即JTWC，Joint Typhoon Warning Center）和中央氣象局的官方預報做比較外（註：官方預報時間約比模式預報時間早3~4小時），也與NCEP的AVN和美國海軍NOGAPS的全球預報模式結果作均勻個案（homogeneous）的比較。其中，所有的路徑預報誤差均是以關島所分析之颱風中心為校驗位置。（分析顯示各不同預報中心所分析之颱風中心位置有所不同，而我們亦使用不同預報中心之颱風位置校驗預報路徑誤差，但發現此對研究之主要結果並無影響。）附帶要提的是，雖然GFDL颱風模式執行的是72小時的預報，但因中央氣象局之模式僅預報48小時，因此在與中央氣象局模式做比較時，我們僅比較到48小時。另外必須強調的是，由於不同預報模式使用不同的初始分析場做預報，因此我們的比較並非完整的模式比較。此研究主要在顯示各作業之颱風預報系統在現階段的颱風路徑預報能力。

表一 1995年GFDL颱風預報系統在西北太平洋所做颱風預報個案表。

STORM NAME	NUMBER OF CASES	DATES OF FORECASTS
FAYE (WP05)	11	JULY 18 - JULY 23
GRAY (WP07)	3	JULY 29 - JULY 30
HELEN (WP08)	6	AUGUST 8 - AUGUST 11
IRVING (WP09)	3	AUGUST 17 - AUGUST 18
JANIS (WP10)	9	AUGUST 22 - AUGUST 26
KENT (WP12)	8	AUGUST 27 - AUGUST 30
LOIS (WP13)	4	AUGUST 27 - AUGUST 29
OSCAR (WP17)	9	SEPT. 12 - SEPT. 16
POLLY (WP18)	5	SEPT. 16 - SEPT. 20
RYAN (WP19)	12	SEPT. 17 - SEPT. 23
SIBLY (WP20)	7	SEPT. 28 - OCTOBER 2
VAL (WP25)	1	OCTOBER 10
WARD (WP26)	9	OCT. 18 - OCT. 22
YVETTE (WP27)	5	OCT. 23 - OCT. 25
ZACK (WP28)	13	OCT. 25 - NOV. 1
ANGELA (WP29)	20	OCT. 26 - NOV. 4
<b>TOTAL</b>	<b>125</b>	<b>JULY 18 - NOVEMBER 4</b>

在路徑預報方面，GFDL颱風模式在所有125個個案中，對12、24、36、48及72小時的各個預報時間之平均路徑預報誤差分別為95、146、193、250及468公里。若將GFDL與TFS、EBM、CLIPER等颱風模式及中央氣象局的官方預報（簡稱CWB）做所有個案（但非均勻個案）的比較結果（圖未示）顯示，在前12小時各模式及官方預報的路徑誤差都很接近，但在24小時以後，GFDL的路徑誤差便明顯地小於其它預報結果，此差異並隨時間增加而變大。若將GFDL、TFS、EBM此三個颱風預報系統及CWB官方預報之誤差相對於CLIPER之預報誤差做正規化後之比較（即 $\frac{\epsilon_{\text{model}} - \epsilon_{\text{CLIPER}}}{\epsilon_{\text{CLIPER}}}$ ；其中負值表示模式較CLIPER之預報為佳，即顯示有預報技術），結果（圖未示）顯示只有GFDL預報及中央氣象局的官方預報表現出預報技術（優於CLIPER），而GFDL預報相較於CLIPER之預報技術比中央氣象局的官方預報超過30%。

如果對上例做均勻個案的比較（如表二、及圖1和2），我們仍發現類似的結果。其中圖1顯示TFS、EBM的路徑誤差劣於CLIPER，而GFDL的路徑預報則優於CLIPER及中央氣象局官方的路徑預報。GFDL在12、24、36及48小時的各個預報時間之平均路徑預報誤差分別



表二 1995年颱風季節，GFDL和CLIPER、TFS和EBM等颱風模式及CWB的官方預報對西北太平洋颱風做均勻個案的12、24、36和48小時預報路徑平均誤差及標準差（括號內數字）比較。

單位：公里

	12Hr	24Hr	36Hr	48Hr
TFS	105 (62)	207 (122)	314 (183)	423 (231)
EBM	124 (77)	258 (138)	393 (202)	522 (253)
GFDL	90 (57)	144 (84)	183 (117)	241 (160)
CLIPER		187		367
CWB		193		350
Case numbers	102	101	93	82

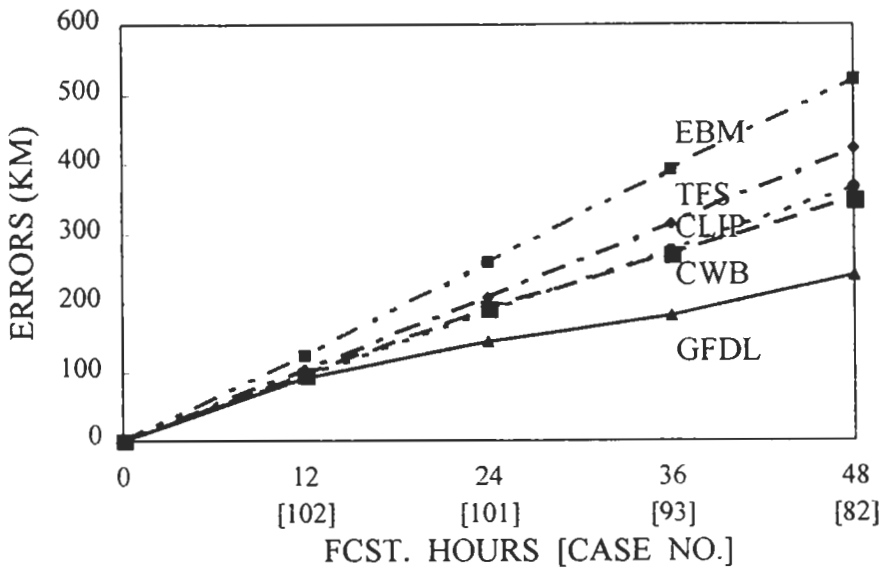


圖1 1995年颱風季節GFDL、TFS、EBM颱風模式及CWB的官方預報對西北太平洋颱風做均勻個案的預報路徑誤差比較。

為90、144、183及241公里，相較於TFS，其誤差改進達14%、30%、42%及43%；若相較於CWB（CLIPER）的24及48小時的預報，GFDL預報的誤差改進則分別為25（23）%和31（34）%。而GFDL路徑預報誤差之標準差亦遠較其它預報低，此結果亦顯示GFDL預報系統之較具穩定性。另外由GFDL、TFS、EBM和中央氣象局官方的路徑預報相對於CLIPER做預報技術的比較（如圖2）結果顯示，TFS和EBM颱風預報系統相對於CLIPER並沒有預報技術，中央氣象局的官方預報則略優於CLIPER，而GFDL颱風模式則較CLIPER誤差減少約30%。

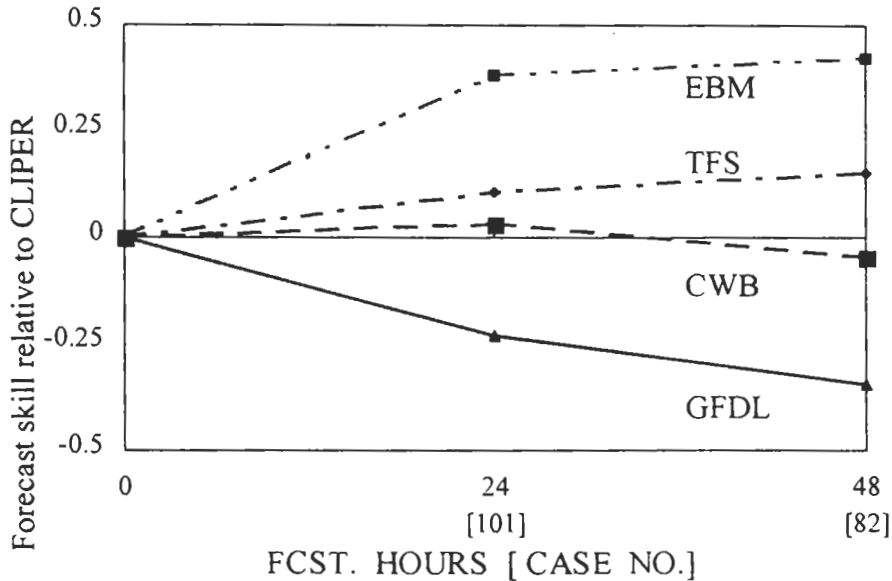


圖2 1995年颱風季節，GFDL、TFS、EBM颱風模式及CWB的官方預報對西北太平洋颱風做均勻個案的預報路徑誤差相對於CLIPER之預報能力比較。

我們亦針對TFS、EBM及GFDL之所有個案的路徑誤差及標準差做比較。結果顯示，隨時間增加，GFDL預報在路徑誤差除遠小於TFS及EBM兩個颱風模式的路徑誤差外，GFDL預報的路徑誤差之標準差亦較TFS及EBM兩個颱風模式小。如果對TFS、EBM及GFDL的所有個案做均勻個案的路徑誤差和標準差比較（表二），結果亦和所有個案比較之結果相似。這再次顯示GFDL預報的路徑預報優於TFS及EBM。此結果亦說明，相對於TFS及EBM兩個颱風模式，GFDL預報系統除較具準確性外，亦較具穩定性。

若僅針對Gary，Helen，Janis，Kent和Ryan5個對台灣影響較大，有發佈警報的颱風，將GFDL與TFS颱風模式和CLIPER做均勻個案的比較（圖未示），其比較結果可看出TFS的路徑誤差與CLIPER相當，而GFDL的路徑預報則遠優於CLIPER及TFS的路徑預報。另外，我們亦將GFDL、TFS的路徑預報相對於CLIPER做預報技術的比較（圖未示）。結果顯示在這5個個案的比較中，TFS颱風模式相對於CLIPER並未顯示預報技術，而GFDL颱風模式則在24及48小時之預報分別優於CLIPER達32%及54%。

綜而言之，1995年所預報的颱風路徑結果中，GFDL的預報誤差相較於CLIPER、中央氣象局TFS等模式的路徑誤差約減少35%，且GFDL的颱風路徑預報誤差也遠低於關島和台灣的官方預報，其改進超過30%。若針對GFDL和中央氣象局TFS模式之比較（圖3a及3b），可看出在24和48小時的預報中，GFDL路徑預報優於TFS之比例分別佔總個案之69%及81%。這些結果顯示GFDL的預報結果之優於TFS並非只是由於某些特定較好的個案預報所造成。統計檢定（t-test）亦顯示，在95%的信心下，GFDL在24、36及48小時的各個預報時間，其路徑預報均較TFS為優。



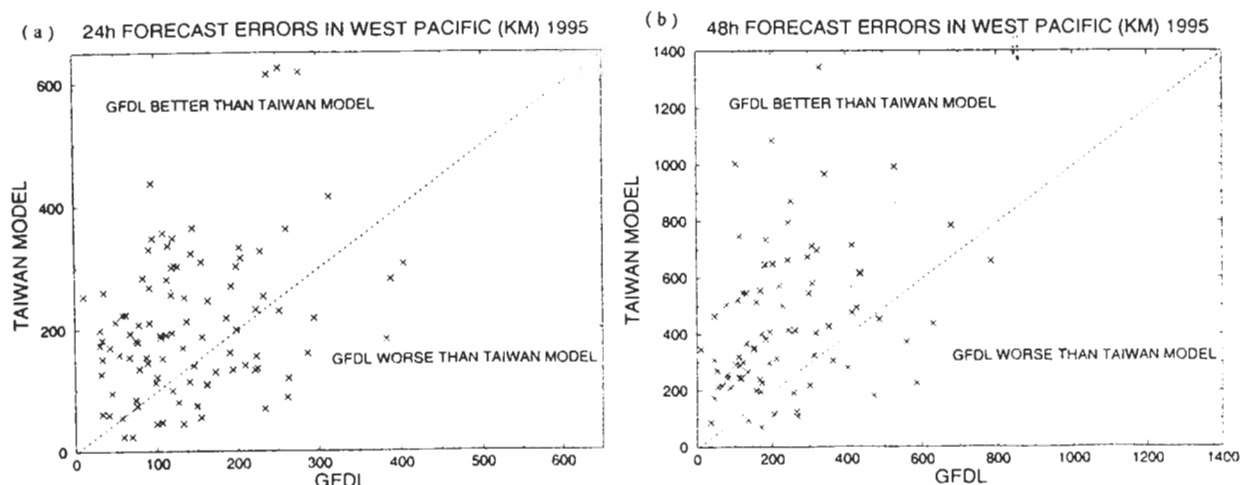


圖3 1995年颱風季節，GFDL和TFS颱風模式對西北太平洋颱風個案做(a)24小時(b)48小時之所有路徑預報誤差比較。虛線上方代表GFDL預報優於TFS，下方代表TFS優於GFDL。

表三及圖4為GFDL與美國海軍NOGAPS、AVN及GUAM的官方預報做均勻個案的路徑誤差比較。這個比較結果顯示GFDL的路徑誤差在各預報時間均小於其它颱風模式及官方預報，而其差別尤其在預報末期更顯著。由GFDL、NOGAPS、AVN及GUAM官方預報之路徑預報相對於CLIPER做預報技術比較（如圖5），顯示AVN颱風預報系統相對於CLIPER並沒有預報技術；NOGAPS颱風預報系統僅有在24、36小時之預報結果優於CLIPER；GUAM之官方預報在前48小時之預報優於CLIPER，但在72小時之預報相對於CLIPER則並無預報技術；而GFDL颱風預報系統則亦較CLIPER誤差減少達30%。另外，針對GFDL的預報結果和NOGAPS（AVN）的預報做均勻個案統計分析，結果顯示GFDL在24、36、48和72小時的各

表三 1995年颱風季節，GFDL和CLIPER、NOGAPS、AVN颱風模式及JTWC的官方預報對西北太平洋颱風預報做均勻個案的12、24、36、48和72小時預報路徑誤差及平均標準差（括號內數字）比較。

單位：公里

	12Hr	24Hr	36Hr	48Hr	72Hr
CLIPER	116 (78)	209 (128)	312 (193)	400 (279)	619 (431)
JTWC	99 (65)	177 (89)	263 (127)	369 (196)	629 (317)
GFDL	94 (61)	150 (87)	197 (131)	275 (174)	527 (372)
NOGAPS	122 (77)	201 (118)	286 (169)	400 (260)	702 (447)
AVN	134 (81)	226 (130)	331 (225)	468 (360)	829 (527)
Case number	72	71	64	54	38

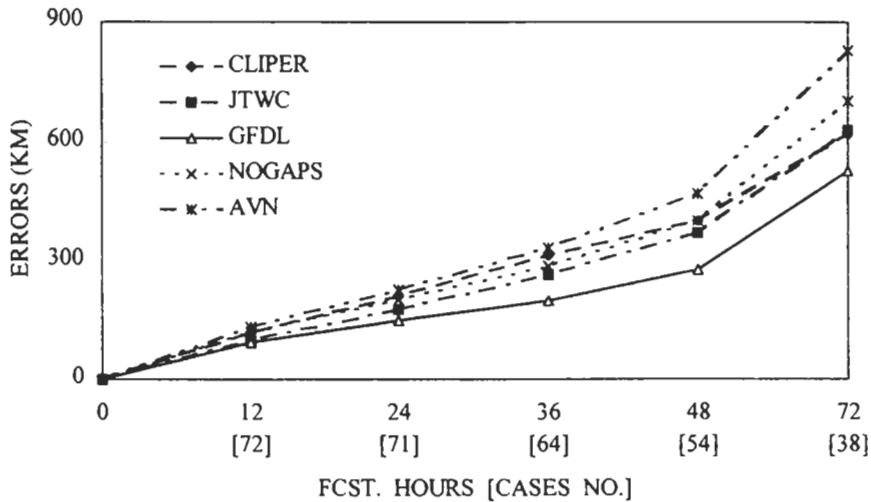


圖4 1995年颱風季節，GFDL、NOGAPS、AVN、CLIPER等颱風模式及JTWC的官方預報對西北太平洋颱風預報做均勻個案的預報路徑誤差比較（個案數目顯示在橫軸預報時間下方之括號內）。

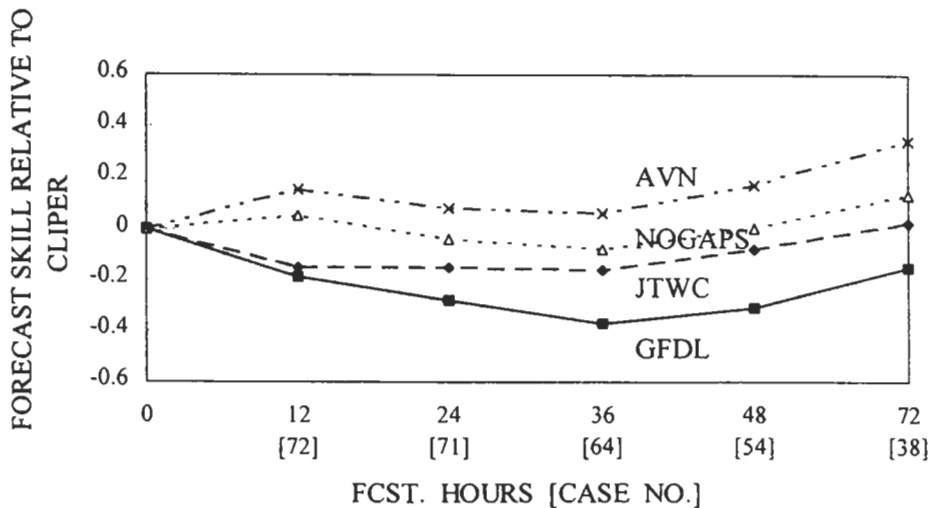


圖5 1995年颱風季節，GFDL、NOGAPS、AVN等颱風模式及JTWC的官方預報對西北太平洋颱風預報做均勻個案的路徑預報誤差相對於CLIPER的預報能力比較（個案數目顯示在橫軸預報時間下方之括號內）。

個預報時間，其路徑預報優於NOGAPS（AVN）之比例佔總個案之63%（68%），66%（63%），68%（65%）及63%（67%）。在95%的信心下，統計檢定（t-test）亦顯示GFDL在24、36、48和72小時的各個預報時間，其路徑預報均較NOGAPS與AVN為優。雖然目前已有研究指出使用全球模式來預報颱風的可行性（如Krishnamurti,1989；Fiorino et al.,1993；Chan et al.,1993）。雖然颱風預報本身亦具有年際變化，但以上資料（至少對於1995年之統計而言）顯示目前作業之全球模式尚未具有明顯預報颱風路徑之技術。

## (二) 路徑預報偏差

除對各颱風模式及官方預報之路徑預報結果加以比較之外，我們亦針對GFDL預報及TFS預報做路徑預報系統偏差之分析。在此分析中我們將路徑誤差分為沿著颱風路徑（Along Track；AT）及垂直颱風路徑（Cross Track，以AT方向右側為正；CT）兩個分量，以探討此二個模式對颱風移速及行徑方向預報的掌握。圖6a與b為針對GFDL及TFS二個颱風預報系統作均勻個案的比較，針對AT和CT兩個分量來瞭解其相對於CLIPER的預報技術。其結果顯示GFDL颱風預報系統不論在CT方向或AT方向之預報皆優於TFS颱風預報系統。在GFDL颱風預報系統之路徑預報偏差結果中，雖然GFDL之預報在CT及AT方向相對於CLIPER都具有預報技術，但在AT方向之表現優於CT方向，顯示出GFDL系統對颱風移速之掌握優於對颱風行徑方向之表現。在TFS颱風預報系統方面，則顯示出在AT方向，TFS預報系統之表現和CLIPER預報相近，但在CT方向則劣於CLIPER預報，此點亦顯示出TFS系統對於颱風行徑方向之掌握較不理想。

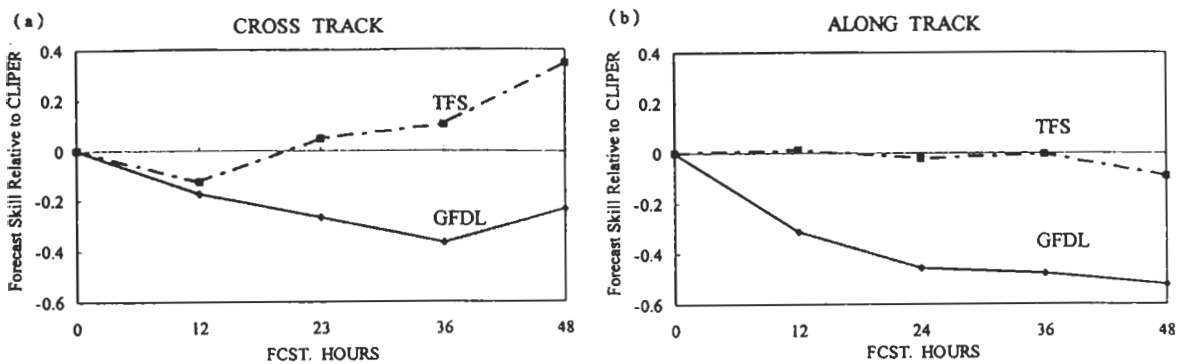


圖6 1995年颱風季節，GFDL及TFS颱風預報系統路徑預報誤差在(a)Cross-Track和(b)Along-Track二個方向相對於CLIPER正規化後之比較。

圖7、8分別為GFDL颱風預報系統及TFS颱風預報系統在1995年對西北太平洋颱風所有預報個案誤差在CT及AT分量上之分佈圖。（由於TFS颱風預報系統只預報至48小時，故圖8僅顯示24及48小時之誤差分佈。）圖7顯示GFDL路徑誤差在AT方向有稍快的現象，在CT方向上則具有較明顯的系統性偏右特性。TFS路徑誤差（圖8）顯得較GFDL為大，雖然在AT方向上並無明顯偏差的趨勢，且在CT方向上路徑誤差也較凌亂，但大致上仍具有偏右的情形。由於大多數之颱風皆是往西或西北方向行進，因而由此結果顯示出不論是GFDL或TFS之路徑預報皆有偏北或提早轉向的系統偏差。

圖9、10分別為GFDL颱風預報系統及TFS颱風預報系統於24小時及48小時路徑預報的位置偏差（將所有24或48小時的預報誤差值經由簡單客觀分析所計算出每 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 網格點上

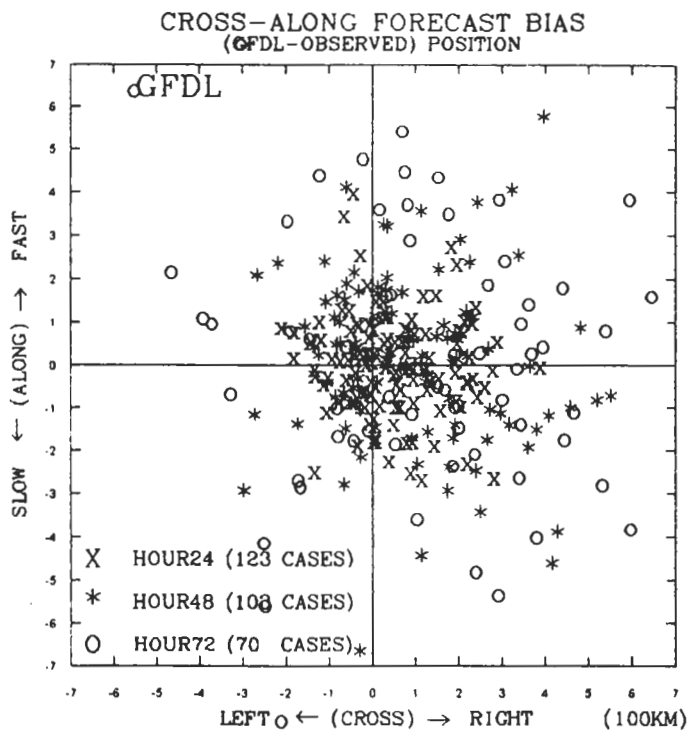


圖7 GFDL颱風預報系統對1995年西北太平洋颱風預報誤差在Cross-Track (橫座標) 及Along-Track (縱座標) 方向上之分佈圖。

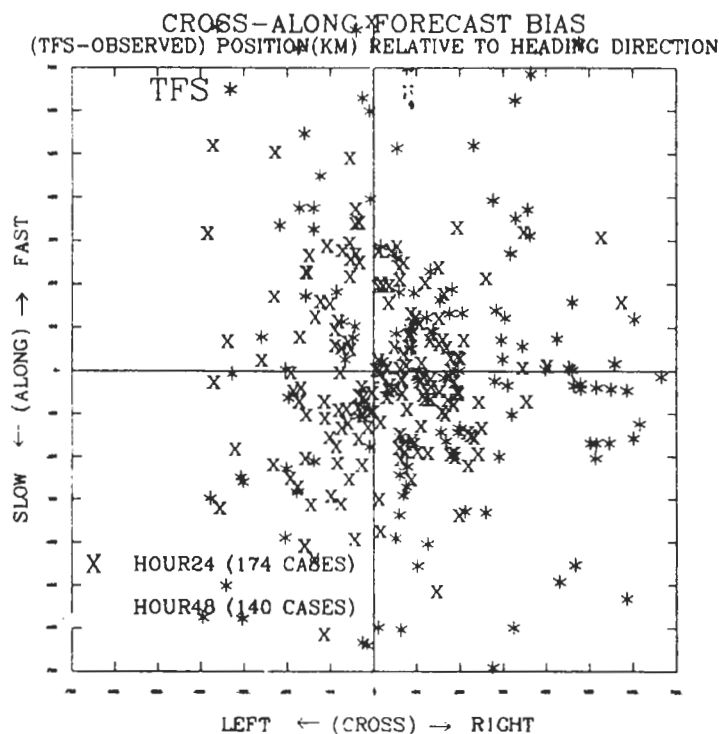


圖8 TFS颱風預報系統對1995年西北太平洋颱風預報誤差在Cross-Track (橫座標) 及Along-Track (縱座標) 方向上之分佈圖。

之代表誤差向量；圖中箭頭長度代表實際之經緯度誤差）。圖9a為GFDL颱風預報系統在24小時之預報位置偏差，結果顯示GFDL颱風預報系統對於 $15^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 區域的颱風之路徑有較好之表現，但具有系統性的偏北誤差，在較高緯度則有向西之預報偏差。我們的分析顯示，此向西之偏差可能是由於GFDL預報低估高緯度地區轉往東北（或東）方向行進之颱風移速所造成。在48小時之位置偏差圖中（圖9b），由於預報個案減少及路徑誤差擴大之影

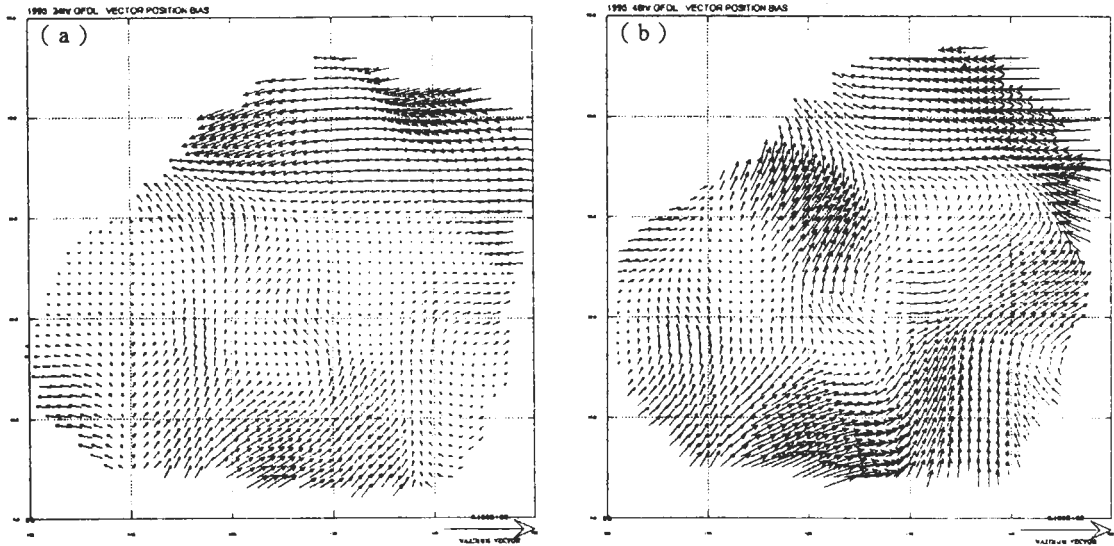


圖9 GFDL颱風預報系統對1995年西北太平洋颱風(a)24小時(b)48小時預報之實際位置預報偏差（圖中箭頭代表實際經緯度誤差）。

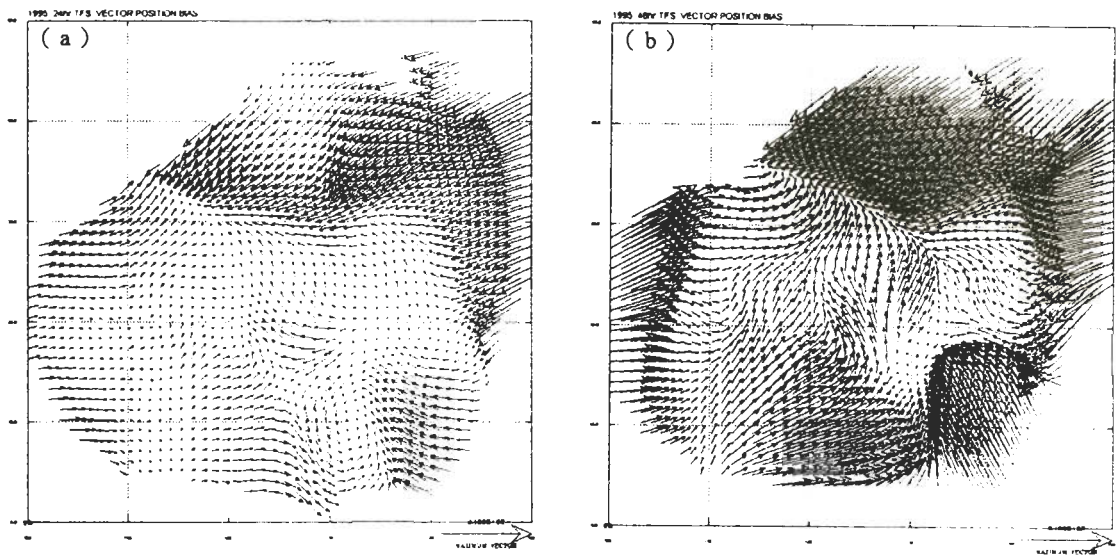


圖10 TFS颱風預報系統對1995年西北太平洋颱風(a)24小時(b)48小時預報之實際位置預報偏差（圖中箭頭代表實際經緯度誤差）。

響，對於較高緯度及較低緯度之區域之位置誤差會因個案不足而受少部份預報結果之影響而較不具代表性（特別位在圖中邊界區域之箭頭），但大致上仍可看出和24小時之位置偏差有相似之結果。由於圖9中間區域之颱風行徑多為西向，因此其偏北預報誤差與圖7之偏右誤差結果一致。

由TFS颱風預報系統之位置偏差（圖10）顯示不論是24小時或48小時之位置預報偏差皆遠大於GFDL之位置預報偏差。圖10b顯示TFS之位置偏差在48小時之表現上並不十分理想，此結果除可能是由於預報個案減少而受少部份預報結果影響外，也顯示TFS颱風預報系統之預報結果並不一致；且對於颱風位置之改變十分敏感，以及預報時間較長其預報誤差增加快速。若由圖10a中之結果則顯示出TFS颱風預報系統在中緯度有向北之位置偏差，高緯度為向西之位置偏差，而低緯度則有向南的位置偏差。由於大部分所預報之颱風皆位於中緯度之區域，因而此結果和圖8頗為類似，即顯示TFS颱風預報系統對於大部分之預報結果有北偏的趨勢。

### （三）強度預報

雖然現有的其它颱風數值模式並無強度預報之能力，而強度預報也是以模式預報颱風中較困難的部份，不過Kurihara et al. (1993) 已顯示GFDL颱風模式具有某種程度的颱風強度預報能力。因此我們亦將GFDL和GUAM的官方強度預報結果做比較（圖11）。結果顯示GFDL在強度上的誤差在預報初期（12小時）即已存在，平均約為20Knots。但至預報結束

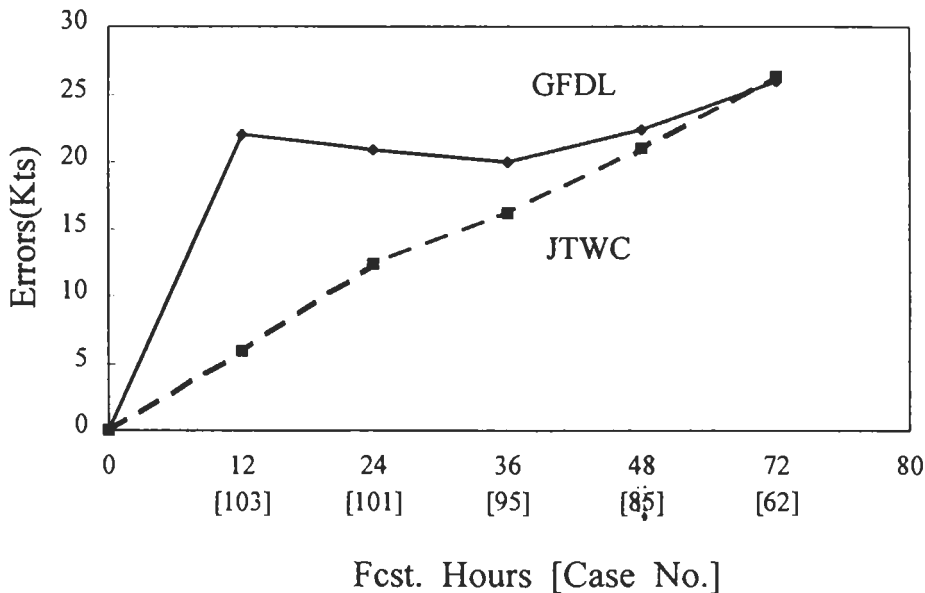


圖11 1995年颱風季節，GFDL和JTWC官方預報對西北太平洋颱風做均勻個案的強度預報誤差比較。（個案數顯示在橫軸預報時間下方之括號內）。

前，其預報的強度誤差並沒有隨時間明顯增加；而GUAM的強度誤差卻隨時間做一近似線性的成長，以致到預報結束時，其誤差已和GFDL的誤差相當。此結果顯示GFDL對颱風強度預報的能力仍屬有限。圖12a,b為GFDL及JTWC強度預報之系統偏差，圖中直線表示由線性迴歸所求得之迴歸直線。圖中顯示GFDL預報會低報強度較強之颱風，而高報強度較弱之颱風。模式低報較強颱風部份至少應與模式解析度無法完全解析眼牆有關。而高報較弱颱風之趨勢，可能部份是導源於GFDL初始化及渦旋植入過程對於弱系統之處理較不佳使然。但JTWC則與GFDL之預報偏差相反，具有高報強度較強颱風與低報強度較弱颱風的情形。

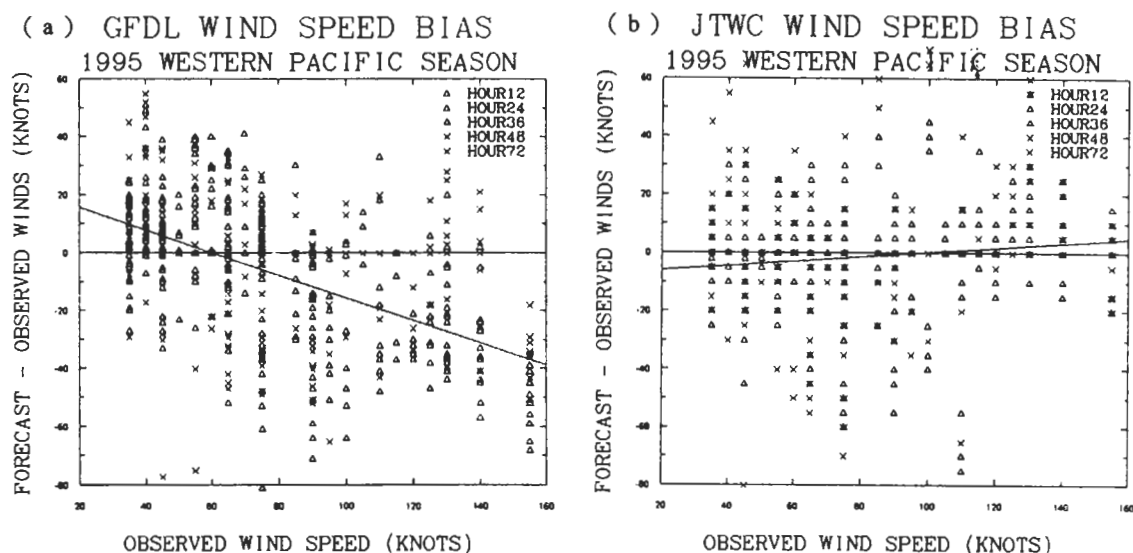


圖 12 (a)GFDL 颱風預報系統(b)JTWC 官方預報對 1996 年西北太平洋颱風強度預報之系統偏差，橫座標代表觀測 (JTWC) 之颱風強度，縱座標代表強度預報誤差。

#### 四、1996 年預報測試結果分析

1996 年颱風季節，我們自 7 月中旬至 12 月底對西北太平洋 23 個颱風做 171 個案的真時預報 (預報個案如表四)，因此較 1995 年增加 40% 之個案數。我們將預報結果加以分析，並和 1995 年 GFDL 及 1996 年 TFS 之預報結果做比對 (吳和卓, 1997)，以探討 GFDL 颱風預報系統之路徑和強度預報，預報結果之系統偏差，及在不同年度之變化。

##### (一) 路徑預報誤差

在路徑預報方面，GFDL 颱風預報系統在所有個案預報中，對 12 (171 個案), 24 (159



表四 1996年GFDL颱風預報系統在西北太平洋所做颱風預報個案總表。

STORM NAME	NUMBER OF CASES	DATES OF FORECASTS
DAN (WP06)	3	JULY 06 - JULY 08
EVE (WP07)	11	JULY 13 - JULY 19
GLORIA (WP09)	5	JULY 22 - JULY 25
HERB (WP10)	9	JULY 24 - JULY 31
IAN (WP11)	2	JULY 29 - JULY 29
JOY (WP12)	3	AUGUST 02 - AUGUST 03
KIRK (WP13)	15	AUGUST 05 - AUGUST 15
NIKI (WP18)	5	AUGUST 18 - AUGUST 20
ORSON (WP19)	17	AUGUST 22 - SEP. 03
SALLY (WP23)	6	SEP. 05 - SEP. 08
TOM (WP25)	8	SEP. 11 - SEP. 17
VIOLET (WP26)	11	SEP. 12 - SEP. 22
WILLIE (WP27)	6	SEP. 18 - SEP. 22
YATES (WP28)	7	SEP. 23 - OCT. 01
ZANE (WP29)	10	SEP. 24 - OCT. 02
ABEL (WP30)	2	OCT. 13 - OCT. 16
WP31	2	OCT. 13 - OCT. 15
BETH (WP32)	9	OCT. 14 - OCT. 21
CARLO (WP33)	7	OCT. 21 - OCT. 25
WP35	1	NOVEMBER 02
DALE (WP36)	11	NOV. 04 - NOV. 12
ERNIE (WP37)	13	NOV. 04 - NOV. 16
FERN (WP42)	8	DEC. 22 - DEC. 26
<b>TOTAL</b>	<b>171</b>	<b>JULY 06 - DECEMBER 22</b>

個案), 36 (146個案), 48 (136個案), 60 (118個案) 及 72 (108個案) 小時的各個預報時間, 其平均路徑預報誤差分別為 108, 174, 220, 274, 352 及 436 公里。若將 1996 年 GFDL 之結果和 1995 年 GFDL 之預報加以比對 (如圖 13), 結果顯示 1996 年 GFDL 颱風預報系統之路徑預報誤差, 在前 48 小時較 1995 年約增加 10%, 但在 60 及 72 小時的預報, 則優於 1995 年。不過值得注意的是, 由於 1996 年 GFDL 之初始預報時間為非傳統觀測時 (即非 0000UTC 與 1200UTC; 而為 0600UTC 與 1800UTC), 故可以利用之傳統觀測資料應較為有限, 因此所分析初始資料場之好壞可能較容易受全球模式做四維資料同化表現之影響。

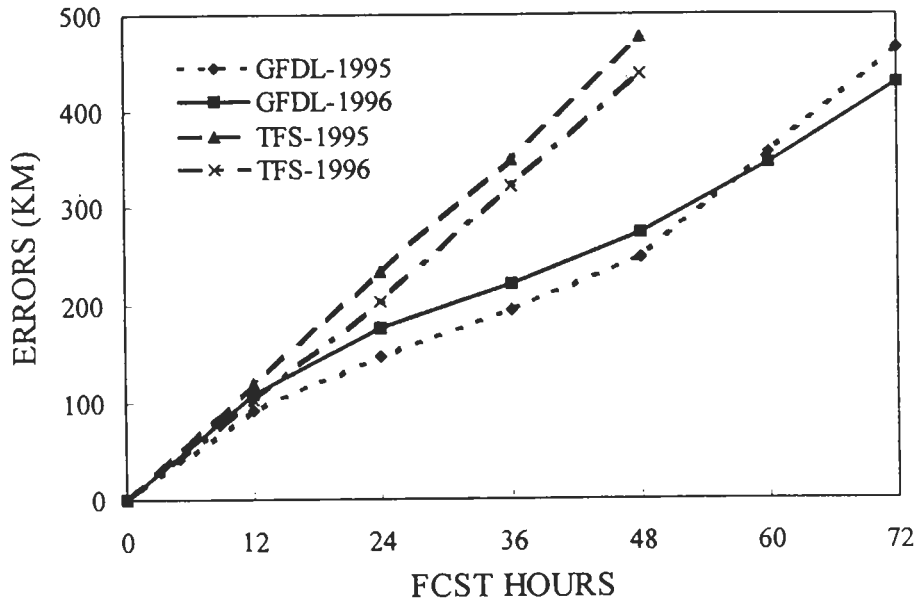


圖 13 1996年颱風季節中，GFDL與TFS之颱風路徑預報誤差及1995年GFDL與TFS之颱風路徑誤差比較。

雖然初始預報時間不同（即GFDL系統為0600UTC及1800UTC），我們亦嘗試以1996年GFDL之預報結果和所有TFS預報做非均勻個案之比較（圖13）。結果顯示在12小時之路徑預報誤差兩者相當（TFS略優）。而在24,36及48小時，則GFDL優於TFS，其誤差改進約為15%,31%及38%：即GFDL與TFS路徑預報誤差之差別隨預報時間而增加。若我們將TFS對1996年颱風路徑預報之結果與TFS在1995年之預報結果加以比較，則可發TFS在1996年之路徑預報誤差較1995年改進約10%。

以上結果雖然顯示1996年GFDL路徑預報誤差較1995年增加，而1996年TFS之預報誤差較1995年減少，但經由1996年GFDL及TFS預報系統獨立對CLIPER做均勻個案比較（即GFDL與CLIPER做0600UTC及1800UTC之均勻個案比較；而TFS與CLIPER做0000UTC及1200UTC之均勻個案比較）卻顯示（如圖14），實際上1996年GFDL相對於CLIPER之預報技術較1995年增加，而1996年TFS之預報技術較1995年卻略為降低。這是由於CLIPER在0600UTC及1800UTC之平均預報誤差在24及48小時預報時間分別較0000UTC及1200UTC增加30%及20%。至於為何CLIPER之預報會顯示如此隨不同時間之差異，我們仍無法做合理的解釋，因此有待未來作進一步的探討。

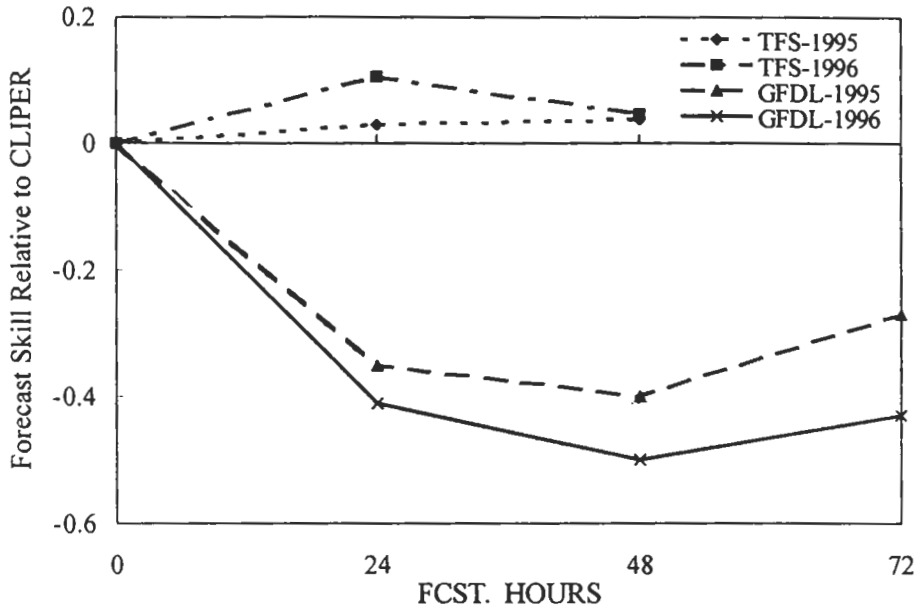


圖14 1996及1995年颱風季節中，GFDL與TFS之颱風路徑預報分別相對於同期CLIPER預報的預報能力比較。

## (二) 路徑預報偏差

除對各路徑預報結果加以比較之外，我們亦針對GFDL及TFS預報做路徑預報系統偏差分析。在此分析中我們亦將路徑誤差分為沿著颱風路徑（Along-Track；AT）及垂直颱風路徑（Cross-Track，以AT方向右側為正；CT）兩個分量，以探討此兩個模式對颱風移速及行徑方向預報的掌握。圖15（16）為針對GFDL（TFS）颱風預報系統在1996年對西北太平洋颱風之所有預報個案之誤差在CT及AT分量上之分佈圖（由於TFS颱風預報系統僅預報至48小時，因此圖16僅顯示24及48小時之誤差分佈。）。圖15顯示GFDL路徑誤差在AT方向有稍慢的現象，在CT方向上並無明顯的系統性偏差。TFS路徑誤差（圖16）在AT方向上也具有偏慢的現象，但在CT方向上路徑誤差則較為凌亂。若將1996年之颱風路徑預報偏差結果和1995年比較，我們發現不論是GFDL或TFS颱風預報系統，其路徑預報偏差皆與1995年之路徑預報偏差有頗大的差距（即1995年之路徑偏差分析中，在CT方向為偏右，AT方向為偏快；而1996年之路徑預報偏差在CT方向無明顯之系統偏差，AT方向則偏慢）。

圖17（18）為GFDL（TFS）颱風預報系統之24小時及48小時路徑預報的位置偏差（將所有24或48小時的預報誤差值經由簡單客觀分析所計算出每 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 網格點上之代表誤差向量；圖中箭頭長度代表實際之經緯度誤差）。圖17a為GFDL在24小時之預報位置偏差，結果顯示GFDL對於 $30^{\circ}\text{N}$ 以北區域的颱風之路徑有向西之預報偏差；而對於 $20^{\circ}\text{N}$ 以南區域的

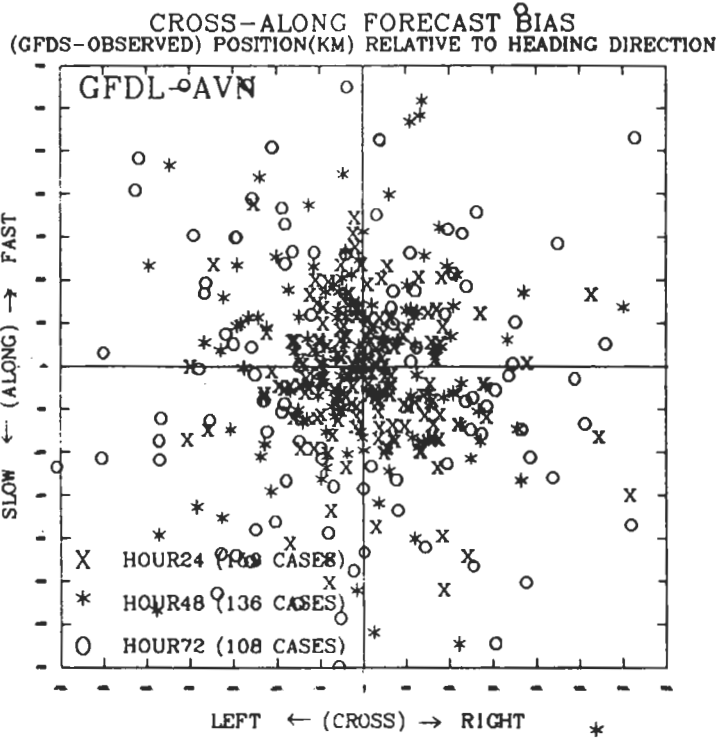


圖15 GFDL颱風預報系統對1996年西北太平洋颱風預報誤差在Cross-Track (橫座標) 及Along-Track (縱座標) 方向上之分佈圖。

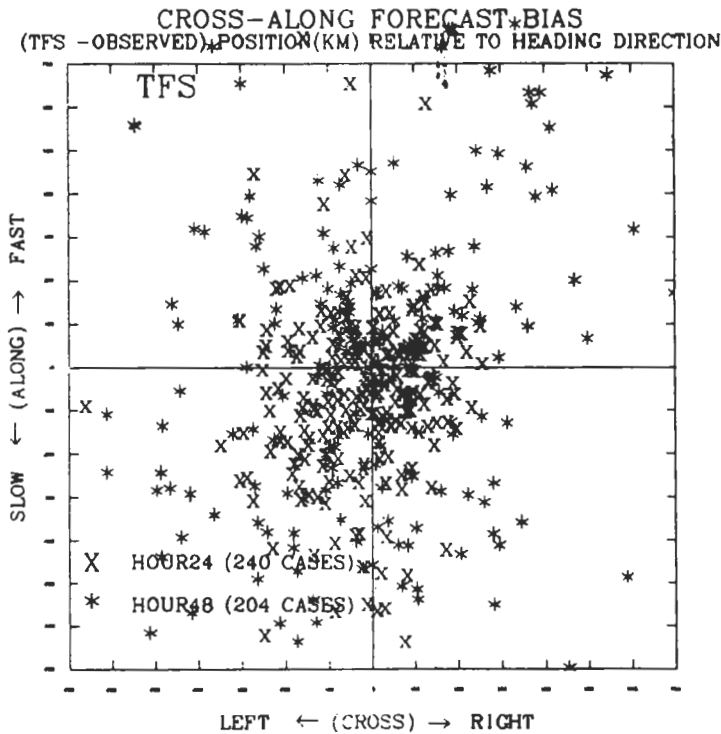


圖16 TFS颱風預報系統對1996年西北太平洋颱風預報誤差在Cross-Track (橫座標) 及Along-Track (縱座標) 方向上之分佈圖。

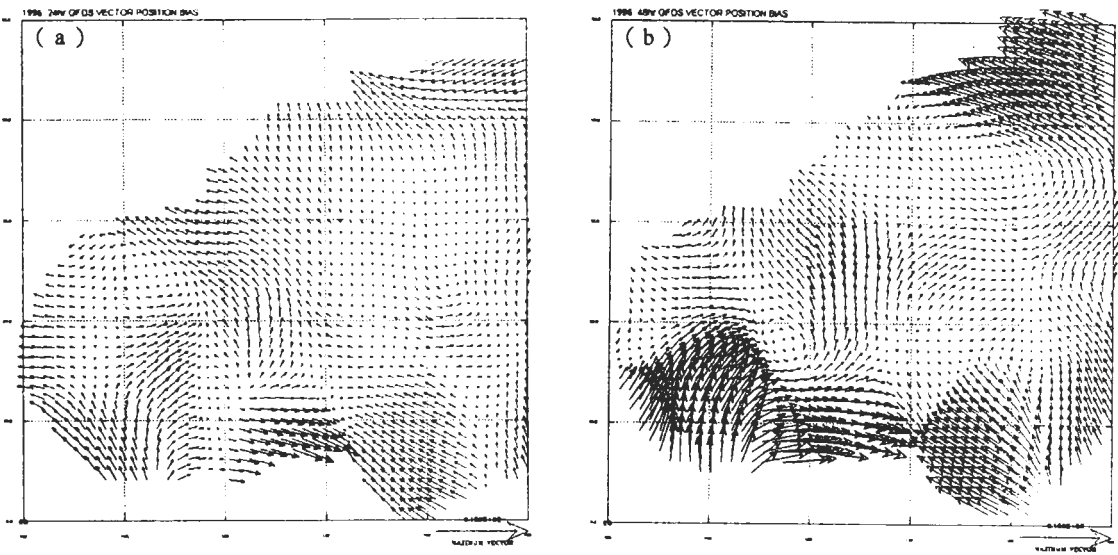


圖17 GFDL颱風預報系統對1996年西北太平洋颱風(a)24小時(b)48小時預報之實際位置預報偏差(圖中箭頭代表實際經緯度誤差)。

颱風路徑有向東之預報偏差；在介於 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 區域之颱風路徑預報雖較 $30^{\circ}\text{N}$ 以北及 $20^{\circ}$ 以南區域之路徑預報為準確(即圖中之箭頭較短)，但由於在 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 恰為西北太平洋地區颱風轉向之區域，因此GFDL颱風預報系統之預報偏差結果較為凌亂，但大致上略具有北偏的趨勢。由我們的分析顯示，此高緯度向西及低緯度向東之偏差可能是由於GFDL預報低估颱風移速所造成；在 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 區域之路徑誤差較小而系統偏差不明顯則顯示出GFDL颱風預報系統對於 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 區域之颱風預報較為準確，不過對於颱風轉向與否之預報能力則較差，但略顯現出提早轉向之趨勢。在48小時之位置偏差圖中(圖17b)，由於預報個案減少及路徑誤差擴大之影響，對於較高緯度及較低緯度之區域之位置誤差會因個案不足而受少部份預報結果之影響而較不具代表性(特別位在圖中邊界區域之箭頭)，但大致上仍可看出和24小時之位置偏差有相似之結果。綜合圖15及圖17之結果，並與1995年之路徑偏差(圖7及圖9)加以比較，顯示出不同年份之系統偏差有所不同。但基本上我們發現對於西北太平洋颱風預報而言GFDL颱風預報系統會低估高緯度之颱風移速，且對颱風轉向的預報能力較為有限。

由TFS颱風預報系統之位置偏差(圖18a,b)顯示不論是24小時或48小時之位置預報偏差皆大於GFDL之位置預報偏差。由圖18中亦顯示TFS颱風預報系統之位置偏差與GFDL之位置偏差頗為相似，即在 $30^{\circ}\text{N}$ 以北區域的颱風路徑有向西之偏差，在 $20^{\circ}\text{N}$ 以南區域的颱風路徑為向東之偏差；但在 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 區域的颱風路徑則十分凌亂。綜合圖18及圖16之結果，我們可看出TFS之颱風路徑預報在預報偏差方面，1996年之預報表現較1995年為佳，但同樣顯示TFS颱風預報系統對於颱風轉向與否之預報問題。

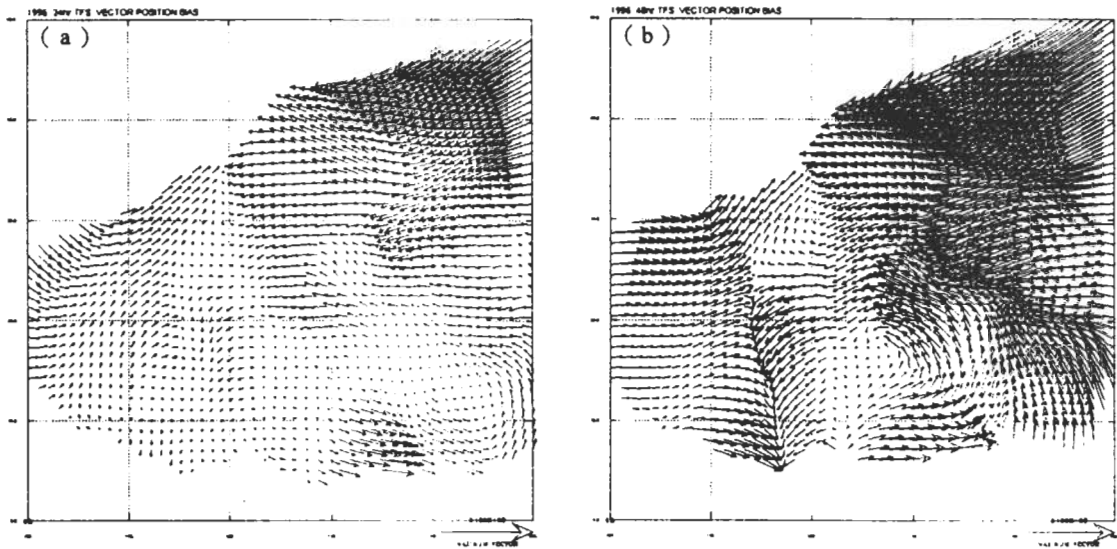


圖 18 TFS 颱風預報系統對 1996 年西北太平洋颱風 (a) 24 小時 (b) 48 小時預報之實際位置預報偏差 (圖中箭頭代表實際經緯度誤差)。

### (三) 強度預報

在此我們亦針對 1996 年西北太平洋之颱風進行強度預報測試並與 1995 年之結果加以比較 (如圖 19)，結果顯示雖然 GFDL 颱風預報系統對於現階段颱風強度之預報仍屬有限，但 1996 年強度預報之結果已較 1995 年之強度預報有所改善 (平均誤差減少 5 knots)；不過其誤差隨預報時間之改變趨勢仍與 1995 年之預報十分類似，即其強度預報誤差在預報初期 (12 小時) 便已存在，且至預報末期時，GFDL 颱風預報之強度誤差並沒有隨時間增加【未若 1995 年關島官方 (JTWC) 預報隨時間呈線性成長】。

有關強度預報之系統偏差，1995 年 GFDL 強度預報顯示 GFDL 預報會低報強度較強之颱風，而高報強度較弱之颱風；而在 1996 年 (圖 20a)，此一關係亦約略存在，但較不明顯。圖 20b 亦顯示 1996 年 JTWC 高報 (低報) 較強 (弱) 颱風之偏差現象。另外，且 1996 年之平均強度預報具有較 1995 年強度預報偏低之現象，這是由於 1996 年 GFDL 颱風預報系統中  $\sigma$  座標所預報之最大風速為地面 10 公尺高之風速而非 1995 年時為 GFDL 模式中最低層之預報結果 (約為地面上 40 公尺之風速)。因此在 1996 年時之地面最大風速須透過外差計算求得，故預報之最大風速會較 1995 年的預報低。如同針對 1995 年預報強度偏差之探討，我們認為現階段 GFDL 颱風預報強度之系統偏差與模式之解析度，初始化及物理過程息息相關。因此如何從資料本身，初始化過程，及模式的物理過程做改進，以增加颱風強度預報之能力，乃是未來亟待深入探討的子題。

Intensity forecasts for western North Pacific storms

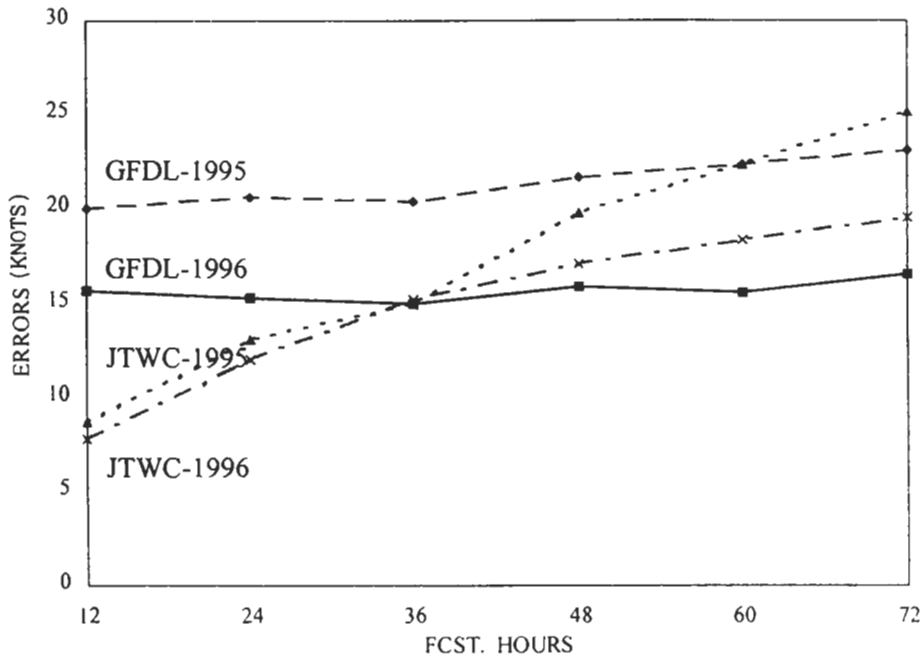
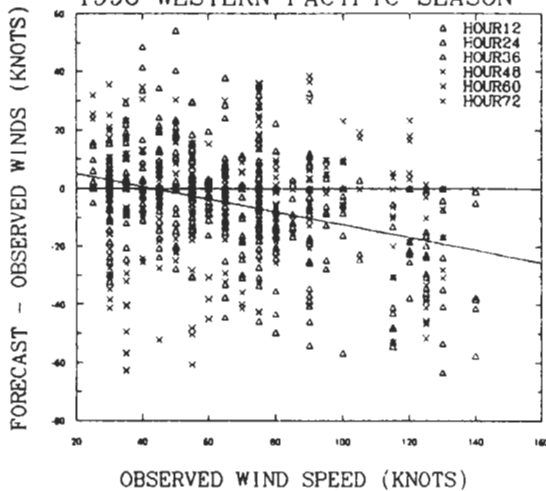


圖19 GFDL颱風預報系統及JTWC官方預報對1996年西北太平洋颱風之強度預報誤差與1995年GFDL及JTWC官方預報強度誤差比較。

(a) GFDL WIND SPEED BIAS 1996 WESTERN PACIFIC SEASON



(b) JTWC WIND SPEED BIAS 1996 WESTERN PACIFIC SEASON

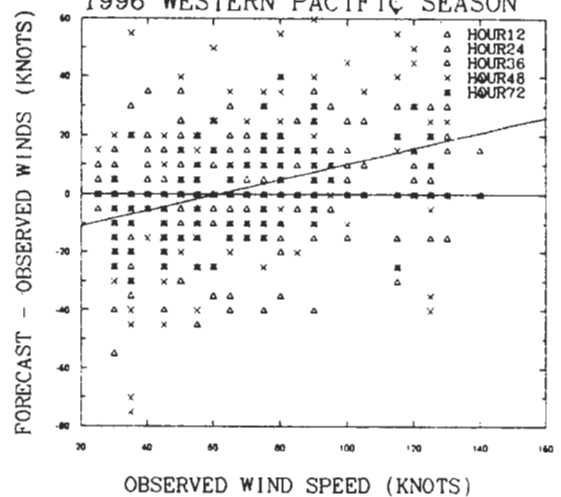


圖20 (a)GFDL颱風預報系統(b)JTWC官方預報對1996年西北太平洋颱風強度預報之系統偏差，橫座標代表觀測(JTWC)之颱風強度，縱座標代表強度預報誤差。



## 五、個案分析

在1995年16個颱風預報個案中，我們針對接近台灣南部的賴恩（Ryan）颱風做細部的分析。1996年我們則選取侵台且造成重大災害的賀伯（Herb）颱風進行個案探討。

### （一）賴恩颱風（Ryan, 1995）

GFDL颱風預報系統對於賴恩颱風的路徑預報和觀測的最佳路徑比較（圖21）顯示，GFDL颱風模式對於賴恩颱風之預報結果並不理想（自9月17日00UTC至9月22日12UTC共10個預報個案，其平均路徑誤差在12，24，36及48小時分別為104，371，247及341公里。）尤其是在最初前兩個預報時，GFDL颱風預報系統對賴恩颱風之路徑轉向情形掌握不佳，造成很大之24小時預報誤差。由於賴恩颱風生成初期位於觀測資料較缺乏的南海上，這可能是造成初期路徑預報誤差較大的主因。在進行賴恩颱風之預報時，正值NCEP在測試新的客觀分析方法（Steven Lord 1995，個人聯繫；例如包括改變邊界層處理方法及利用衛星資料反衍溫度場方法），因而賴恩颱風之預報期間有兩組（新/舊）初始場。比較此二個不同初始資料所獲得之預報結果（圖未示），可看出使用新的分析方法的初始場所得之颱風預報路徑對於賴恩初期的預報有顯著的不同；其可能原因是由於當時賴恩颱風位於南海區域，傳統的觀測資料較為稀少，因此使用不同的衛星資料方法做資料同化，可能對初始環境分析場有很大之影響，因而導致GFDL預報賴恩的路徑有相當之差異。這個結果正凸顯GFDL颱風預報模式對於初始場之敏感性。有關颱風預報系統對於初始場之敏感度問題，亟待將來做更深入的探討。

由賴恩颱風在第4，5，6，7及8的預報（圖21）可看出，路徑預報結果逐漸向觀測的最佳路徑修改，這些路徑誤差雖在每12小時100公里的誤差範圍內，但由於台灣面積狹小，無論颱風登不登陸，這些誤差已影響到台灣地區的民生經濟。因此賴恩颱風個案亦凸顯現階段GFDL颱風預報系統之極限及台灣地區對於颱風預報誤差之較嚴格需求。

綜合而言，由圖1及4中可發現較短時間的預報，各模式的預報結果相差不多，但隨時間的增加，GFDL模式在路徑誤差上的改善則越顯著。這是由於颱風運動主要受環境流場的影響，在短時間的預報中，各模式對整個大環境的綜觀天氣都具有一定的掌握能力，而隨時間的增長，模式對環境場的預報及本身的穩定性，都會影響預報的結果。GFDL對較長時間的預報其路徑誤差遠小於其它預報，除顯示出此模式對整個環境場有不錯的掌握外，更顯示出此模式在預報上的持續性和穩定性。另外，研究（Wu and Kurihara 1996）指出，颱風渦旋本身與環境環流之間亦有非線性之交互作用，並足以影響颱風之移動。由此觀點顯示，GFDL颱風模式較佳之初始化及颱風渦旋植入方法亦有助於其路徑預報。唯到底是何種原因（資料本身、模式之細節、或是兩者）造成GFDL颱風模式之預報結果顯然優於其他模式，乃是一項亟待研究的重要課題。如何做一個有代表性的颱風模式比較實驗（typhoon model intercomparisons），也是一個值得深思的問題。

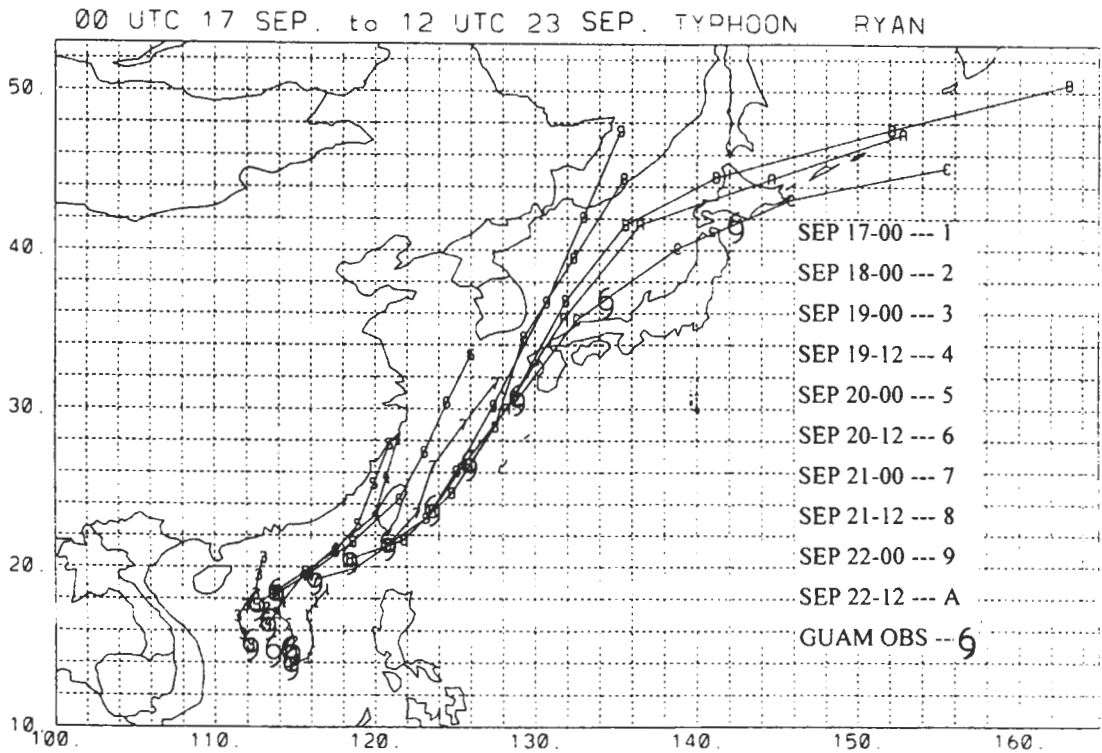


圖21 1995年賴恩颱風從9月17日00 UTC至9月20日12 UTC的所有GFDL預報系統72小時路徑預報圖及最佳觀測路徑圖（以颱風符號代表，每12小時顯示一次）。1, 2, 3...代表GFDL模式時間順序。

又在此研究中，我們比較所有GFDL模式的預報結果發現，GFDL的颱風預報之個案表現良否和此模式對大尺度環境流場模擬好壞有很大的關係：即GFDL模式對颱風預報較準確時，其對大尺度的環境流場也有較好的表現。換句話說，GFDL模式對於較初期的預報或對於颱風形成位置較缺乏觀測資料之預報亦較無法掌握。由此顯示出若要提高颱風預報的能力，除對模式本身的改良外，更多的觀測資料以及更好的分析方法是必要的。由於颱風模式預報結果對於其初始場好壞相當敏感，我們認為中央氣象局的TFS在現階段預報能力較為有限之問題，部份原因可能與其初始場有關。我們正在做進一步之檢驗，期待能較明確找出造成TFS預報能力有限的癥結。

## （二）賀伯颱風（Herb, 1996）

1996年23個颱風預報中，我們特別針對賀伯颱風作細部之探討。賀伯颱風在1996年7月31日1244UTC於宜蘭附近登陸；而後以緩慢速度通過台灣北部，並於7月31日2000UTC時自新竹附近出海。賀伯颱風侵台期間帶來豐沛之降水對台灣造成重大之災害，賀伯颱風7月30日至8月2日之累積雨量顯示（圖22），其最大降水區分別集中在兩處：一位於於北部石門水庫集水山區，另一則為中南部曾文水庫上游集水山區。而當賀伯颱風接近及通過台灣

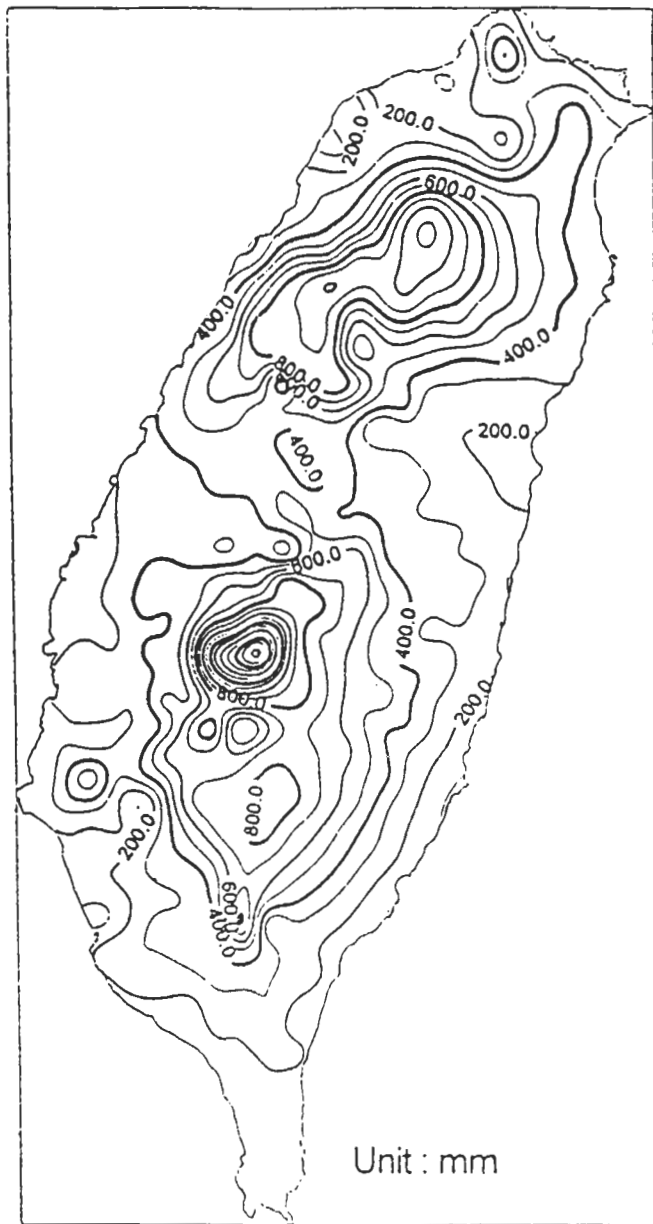


圖22 賀伯颱風七月31日至八月2日之累積雨量。單位：公釐。等值線間距：100公釐。

時，台灣附近之風場顯示（圖未示）在7月31日06-12UTC時，賀伯颱風此時正位在台灣東側外海，其暴風半徑籠罩住整個台灣，因此在台灣附近都為西北風；在12-24UTC時，此時賀伯颱風正緩慢地通過台灣，因此在台灣西側為西北風，而台灣東側為南風及西南風；在8月1日00-06UTC時，賀伯颱風此時已經離開台灣，因而在台灣附近主要為西風及西南風。

圖23為GFDL颱風預報系統對賀伯颱風的路徑預報和關島之觀測路徑。圖中顯示，GFDL颱風預報系統對賀伯颱風之路徑預報只有在初期之預報中（預報1，2，3）較不一致，之後對賀伯颱風的路徑預報皆具有相當的持續性（在接近台灣之前的7個預報中其平均路徑誤差於12，24，36及48小時分別為107，164，160及191公里）。但GFDL之預報結果在初始預報時間為7月29日06UTC至7月30日18UTC這段期間之第4，5，6和7等四個預報，則表現出賀伯颱風在接近台灣時，預報路徑有較觀測路徑偏南的現象，也因此導致GFDL預報之賀伯颱風登陸位置較接近花蓮而非宜蘭。而當賀伯颱風離開台灣後，GFDL預報則回復到與實際觀測路徑較吻合，因此造成其中四個預報之24小時平均預報誤差（172公里）較48小

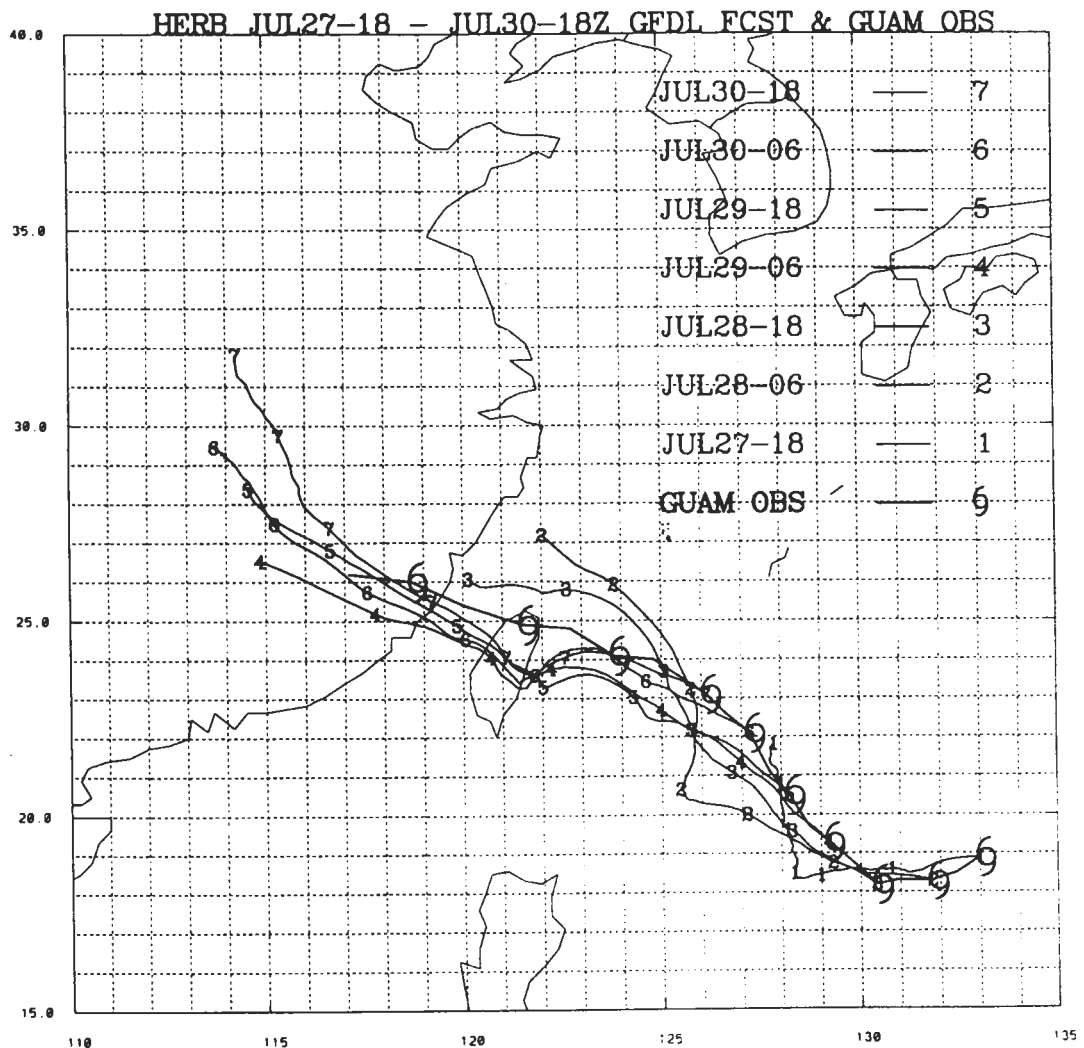


圖23 1996年賀伯颱風從7月27日18 UTC至7月30日18 UTC的所有GFDL預報系統72小時路徑預報圖及最佳湍測路徑圖（以颱風符號代表，每12小時顯示一次）。1, 2, 3...代表GFDL模式預報時間順序。

時誤差（167公里）為小。但在其後之兩個預報（即初始預報時間為7月31日06及18UTC），則預報路徑無上述南偏之趨勢。綜合而言，賴恩及賀伯颱風在接近台灣前之預報結果皆顯示，GFDL系統之24小時平均路徑預報誤差在颱風接近台灣前增加的情形。此結果可能是GFDL系統無法正確反應台灣地形影響所造成，唯實際情形如何，仍有待更深入之研究。

由於過去觀測（Wang,1980）及理想模式（Bender et al.,1987）研究中提出台灣地形對類似侵台行徑颱風之影響為導致颱風向北偏移而產生氣旋式之路徑，此和GFDL第4,5,6和7等四個預報之南偏情形並不一致；因此我們認為GFDL系統對於賀伯颱風接近及登陸台灣時預報路徑較實際觀測路徑偏南，可能是由於模式預報結果表現出賀伯颱風環流因氣流過山絕熱增溫而在花蓮地區而產生一局部低壓，導致GFDL系統以最低地面氣壓定位颱風中心產生誤判的中心位置（我們初步的風場分析亦符合此推測）。但這部份仍須經由更進一步之探討才能確定。

由於賀伯颱風的伴隨風雨造成台灣地區重大之災害，因此本文亦針對其風雨預報作簡單探討。在風雨預報方面，GFDL颱風預報系統對於賀伯颱風所做瞬時風雨預報（圖未示）顯示，在預報時間為7月31日09UTC時（初始預報時間為7月31日06UTC，即預報積分3小時），其瞬時最大降雨區域及台灣附近之環流風場顯示（圖未示）最大降雨區為石門水庫上游及曾文水庫上游附近，而在台灣附近之環流風場在西側為西北風，但在東側卻顯示出在花蓮附近有渦旋環流，此和實際觀測結果有所出入。預報時間為7月31日15UTC時（即預報積分9小時，圖未示），GFDL預報結果中在最大降雨區域雖和觀測一致，但在台灣東側卻顯示有降雨現象，而實際觀測結果中在台灣東側並無降雨；若由風場分析中，GFDL預報系統顯示在颱風東側有下沉氣流及颱風環流所造成的輻合，此輻合可能是造成預報結果中在台灣東側有降水之主因，但在實際觀測中台灣東側卻無此輻合之現象。

若由預報72小時期間（7月31日06UTC至8月3日06UTC）累積雨量之預報顯示（圖24），GFDL之預報結果同樣可表現出有二個降水較大之區域：一處約為石門水庫之集水區，另一處在阿里山附近，此和觀測實際最大降雨區十分相近（圖22）。但若比較預報累積雨量和實際之降雨量，GFDL預報之累積雨量為509.8公釐，此和同期間實際觀測雨量之1450公釐有頗大之差距。此顯示GFDL颱風預報系統雖可模擬出最大降雨之位置，但對於雨量之預報則有低估的現象。另外，北部中心雨量大於南部中心雨量之結果雖和實際觀測不同，但此與GFDL模式解析的台灣地形分佈應有相當關係（見Figure1, Bender et al.,1987；GFDL模式所解析之台灣地形。）。

由賀伯颱風之風雨預報中顯示GFDL颱風預報系統對於中小尺度現象已有一定程度之掌握。Kuo and Wang（1997）使用MM5模式以高解析度模擬（6.7Km）模擬賀伯颱風，結果顯示賀伯颱風在台灣所造成之強風及豪雨和台灣地形及颱風路徑息息相關。而GFDL預報系統中1/6°的解析度僅略可表現出主要的台灣地形，雖然能提供準確的颱風路徑預報，及

## ACCUMULATED PRECIP (CM) DURING STORM PASSAGE

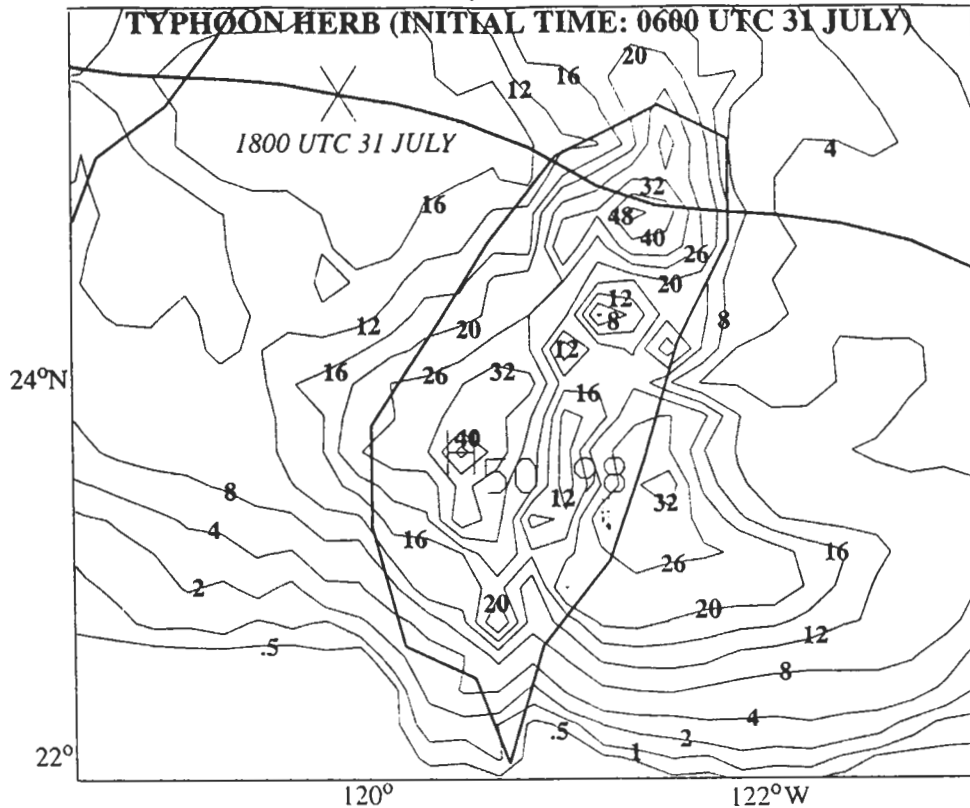


圖24 GFDL颱風預報系統對賀伯颱風之累積雨量（單位：公分）及路徑預報（粗實線）。初始積分時間為7月31日06UTC。

能掌握最大降雨區的位置，但仍不足以定量解析出雨量之大小。有關颱風經過台灣地形之數值模擬則需要更高之解析度，而累積雨量之估計則又與模式之物理架構及參數化過程有關，因此在現階段除增進模式之解析度外仍須藉由參數化過程及物理架構之改進以增進風雨預報之準確性。

## 六、結 語

本研究測試GFDL颱風預報系統對於西太平洋地區颱風的預報情形，以瞭解此系統在現階段對於西太平洋颱風之預報能力。

在1995年颱風季節中，我們對西北太平洋16個颱風做125個個案的真時GFDL颱風模式預報。在1996年之颱風季節中，我們對西北太平洋23個颱風作171個個案的真時預報，並將預報和1995年GFDL系統對西北太平洋颱風之預報及1996年TFS之預報做非均勻個案的比較。



在路徑預報方面，GFDL颱風預報系統對1996年西北太平洋颱風之路徑預報在所有預報個案中，對12（171個案），24（159個案），36（146個案），48（136個案），60（118個案）及72（108個案）小時的各預報時間，其平均路徑預報誤差分別為108,174,220,274,352及436公里。與1996年TFS預報系統之預報結果比較顯示，對於12小時之預報GFDL和TFS之預報誤差相當（TFS略優）。但在24,36,48小時之預報，則GFDL預報優於TFS，其改進分別為15%,31%及38%；即隨預報時間增長，其路徑誤差之差別越顯著。在對於1995年GFDL對西北太平洋颱風路徑預報之比較中，則顯示在前48小時之預報，1996年之路徑預報劣於1995年，而在60及72小時之預報則優於1995年；若針對TFS路徑預報結果，則1996年誤差較1995年約減少10%。但經由GFDL及TFS對CLIPER做均勻個案比較則顯示，實際上1996年GFDL相對於CLIPER之預報技術較1995年增加，而1996年TFS之預報技術較1995年卻略為降低。

由1996年對西北太平洋颱風之路徑偏差研究，顯示GFDL颱風預報系統對於20°~30°N區域之颱風預報較為準確，但對於颱風轉向之預報能力則較差，但略顯現出提早轉向之趨勢。對於20°N以南區域及30°N以北區域之颱風，則有向東及向西之預報偏差，此部份是由於GFDL預報系統低估颱風移速所造成。將1996年所分析之路徑偏差與1995年之分析結果加以比較，顯示出不同年份之系統偏差有所不同。但基本上我們發現對西北太平洋颱風而言，GFDL預報系統會低估高緯度之颱風移速且對颱風轉向之預報能力較為有限。

在強度預報方面，由1996年對西北太平洋颱風之強度預報結果顯示，GFDL颱風預報系統對颱風強度之預報已較1995年改進（誤差約減少5knots），但對颱風強度之預報能力仍屬有限。由強度預報偏差分析則顯示GFDL系統在1996年之西北太平洋颱風強度預報中略具有某種強度預報系統偏差：即GFDL會低報強度較強之颱風而高報強度較弱之颱風，但此一關係不如1995年之預報明顯。

賴恩颱風之個案探討一方面指出台灣地區對於颱風預報高準確度之需求，另一方面也凸顯GFDL颱風預報系統初始場資料之敏感度。而由賀伯颱風個案分析之結果則顯示GFDL颱風預報系統對於颱風路徑已具有相當之預報能力，但由於大尺度環境場之些微變化卻會造成中小尺度中巨大的誤差，因此在現階段中GFDL颱風預報系統對於風雨預報之能力仍有一些不確定性。

透過這些測試研究，我們已較能肯定GFDL預報系統預報西北太平洋颱風之能力。我們亦認為此模式預報結果對於台灣地區颱風預報應具有參考價值，且此模式的一些長處（例如其初始資料及渦旋植入方法），亦可提供台灣現有颱風模式學習。我們也發現，GFDL預報之所以能優於其他模式，主要原因是在其資料初始化過程能成功地將環境駛流場過濾出來，並利用渦旋植入方法，適當地將較準確的颱風渦旋植入初始場中。而最新TFS預報測試（陳1997；Chen et al.1997）也顯示TFS預報結果對於資料初始過程相當敏感。Chen et al.（1997）簡單地將GFDL颱風預報系統中過濾環境場及擾動場之步驟植入TFS模式，並對



1996年之51個西北太平洋颱風個案進行預報測試，其結果已顯示颱風路徑預報平均誤差約可改進30%。

此外，由於颱風模式預報結果對於初始場好壞相當敏感，我們認為中央氣象局的TFS颱風預報系統在現階段預報能力有限之問題，部份原因可能與初始場有關。我們正在做進一步之檢驗（例如以AVN分析場作為TFS颱風預報系統之初始資料場，針對1996年Violet颱風進行預報測試），期待能明確找出TFS預報系統能力受限之癥結。在未來我們亦將思考如何改進渦旋植入之過程及測試颱風模式對初始環境場之敏感度。我們希望藉由此方面深入之研究以更加瞭解影響颱風預報之各項可能因素，並釐清現階段颱風預報所面臨之問題。

## 致 謝

本文作者感謝中央氣象局謝信良局長，鄭明典主任及葉天降副主任的支持，GFDL的Dr. Yoshio Kurihara和Mr. Morris Bender及NCEP的Dr. Stephen Lord的協助，使得此真時的GFDL颱風模式預報實驗得以順利完成。作者亦感謝中央氣象局的陳得松先生及黃康寧小姐提供氣象局颱風預報位置資料，及兩位審查者之寶貴建議，使本文更趨完整。本研究是在中央氣象局計畫CWB85-2M-07及CWB86-2M-04支助下完成。

## 參考文獻

- 李三畏，1996：賀伯颱風山坡地崩坍類別探討。賀伯颱風與工程環境研討會論文集，11-13。
- 吳俊傑，1996：用GFDL颱風模式預報1995年西北太平洋地區颱風。天氣分析與預報暨海象測報研討會，中央氣象局，台灣，台北，13-25。
- 吳俊傑，卓瑜甄，1997：GFDL颱風預報系統對於1996年西北太平洋地區颱風預報測試結果評估。天氣分析與預報暨海象測報研討會，中央氣象局，台灣，台北，391-400。
- 陳得松，黃康寧，葉天降，彭順台，1997：中央氣象局颱風路徑預報模式初始場之改進。天氣分析與預報研討會，中央氣象局，台灣，台北，411-415。
- Bender, M. A., R. E. Tuleya, and Y. Kurihara, 1987: A numerical study of the effect of island terrain on tropical cyclones. *Mon. Wea. Rev.*, **115**, 130-155.
- , R. J. Ross, R. E. Tuleya, and Y. Kurihara, 1993: Improvements in tropical cyclone track and intensity forecasts using the GFDL initialization system. *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 2046-2061.

- , C.-C. Wu, M. A. Rennick and Y. Kurihara, 1997: Comparison of the GFDL Hurricane Model Prediction in the Western Pacific Using the NOGAPS and AVN Global Analysis. Preprint, 22nd Conf. on Hurricanes and Tropical Meteorology, American Meteorological Society, Boston MA, 615-616.
- Chan, J. C.-L., and Kay, W.-K., 1993: Performance of the United Kingdom meteorological office global model in predicting the movement of tropical cyclones. *Wea. And Forecast*, **8**, 326-336.
- Chen, D.-S., T.-C. Yeh, K.-N. Huang, M. S. Peng, and S. W. Chang, 1994: A new operational typhoon track prediction system at the central weather bureau in Taiwan. Proc., 21 Conf. on Hurricanes and Tropical Meteorology. American Meteorological Society, Boston MA. 51-52.
- Chen, D.-S., M. S. Peng, T.-C. Yeh, S. W. Chang, and K.-N. Huang, 1997: Performance of the Typhoon-Track Forecast System in the Central Weather Bureau in Taiwan. Preprint, 22nd Conf. on Hurricanes and Tropical Meteorology, American Meteorological Society, Boston MA, 248-249.
- Fiorino, M., J. S. Gross, J. J. Jensen, and E. J. Harrison, Jr., 1993: An evaluation of the real-time tropical cyclone forecast skill of the Navy Operational Global Atmospheric Prediction System in the western North Pacific. *Wea. And Forecasting*, **8**, 3-24.
- Krishnamurti, T. N., D. Oosterhof, and N. Dignon, 1989: Hurricane prediction with a high resolution global model. *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 631-669.
- Kuo, Y.-H., and W. Wang, 1997: Rainfall Prediction of Typhoon Herb with a Mesoscale Model. Workshop on Typhoon Research in the Taiwan Area. National Science Council, Taipei, Taiwan. 35-45.
- Kurihara, Y., and M. A. Bender, 1980: Use of a movable nested-mesh model for tracking a small vortex. *Mon. Wea. Rev.*, **108**, 1792-1809.
- , C. L. Kerr, and M. A. Bender, 1989: An Improved numerical scheme to treat the open lateral boundary of a regional model. *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 2714-2722.
- , M. A. Bender, and R. J. Ross, 1993: An initialization scheme of hurricane model by vortex specification. *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 2030-2045.
- , -----, R. E. Tuleya, and R. J. Ross, 1995: Improvements in the GFDL hurricane prediction system. *Mon. Wea. Rev.*, **123**, 2791-2801.
- , R. E. Tuleya, and M. A. Bender, 1997: The GFDL hurricane prediction system and its performance in the 1995 hurricane season. Submitted to *Mon. Wea. Rev.*.
- Tuleya, R. E., M. A. Bender, and Y. Kurihara, 1984: A simulation study of the landfall of tropical cyclones using a movable nested-mesh model. *Mon. Wea. Rev.*, **112**, 124-136.
- , 1994 : Tropical storm development and decay: Sensitivity to surface boundary conditions. *Mon. Wea. Rev.*, **122**, 291-304.
- Wang, S.-T., 1980: Prediction of the movement and strength of typhoons in Taiwan and its vicinity. Res. Rep. 018. National Science Council. Taipei, Taiwan ( in Chinese ).
- Wu, C.-C., 1994: Typhoon prediction using GFDL hurricane model. Proc., Conference on Weather Analysis and forecasting. Central Weather Bureau, Taipei, Taiwan. 67.
- Wu, C.-C., and Y. Kurihara, 1996: A numerical study of the feedback mechanisms of hurricane-environment interaction on hurricane movement from the potential vorticity perspective. *J. Atmos. Sci.*, **53**, 2264-2282.

## **Evaluation of the GFDL Hurricane Prediction System in the Western North Pacific in 1995 and 1996**

**Chun-Chieh Wu      Yu-Tseng Cho**

**Department of Atmospheric Sciences, National Taiwan University**

### **ABSTRACT**

The Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL) hurricane prediction system was tested at the National Centers for Environmental Prediction in experimental mode and in near real time for western North Pacific storms during 1995 and 1996.

Altogether, 125 (171) forecasts were run for 16 (23) storms in 1995 (1996). The forecast tracks in 1995 were compared with the official JTWC (Joint Typhoon Warning Center) and CWB (Central Weather Bureau) forecast available just after the initial synoptic time, as well as forecasts from other operational models, such as CLIPER (CLImatology and PERSistence), TFS (Typhoon Forecasting System) of CWB, NOGAPS (Navy Operational Global Prediction System) and AVN (AViation model). Results in 1995 indicate that the GFDL system exhibited considerable skill in the forecast of the storm track for the cases run. The average improvement of the GFDL track forecasts over other models is roughly 35%. In addition, the improvement of the GFDL forecasts over the official forecasts from JTWC and CWB is about 30%. The forecasts from 1996 also show comparable performance, with mean track errors of 108, 174, 220, 274, 352 and 436 km for 12, 24, 36, 48, 60 and 72h, individually.

Despite the demonstrated skill of the GFDL forecast system, some biases were revealed in the storm track and intensity. In general, a northward and a rightward (relative to the storm's heading direction) bias is found (especially in 1995). As to the intensity forecasts, an over-prediction of the intensity of weak storms and an under-prediction of the intensity of strong storms by the GFDL system is found, thus suggesting a need for some improvement both in the prediction model and its initialization.

The case studies of Typhoon Ryan (1995) and Typhoon Herb (1996) are also discussed. The sensibility of the GFDL system to its initial condition is identified. Certain capability, in forecasting the distribution of precipitation and wind is also demonstrated. Overall, results from this study clearly indicate that the GFDL hurricane prediction system can serve as a useful dynamical model guidance for tropical cyclone forecasters in the western North Pacific region. More tests and analyses are still needed to improve the current GFDL system and to identify the key factors that affect the typhoon forecasting system. It is also hoped that results from these studies can help improving typhoon forecasts in Taiwan.

**Key words: Typhoon, GFDL hurricane prediction system.**