

ISSN 0255-5778

氣象學報

Meteorological Bulletin



交通部中央氣象局

CENTRAL WEATHER BUREAU

季刊
第48卷第4期
民國101年3月
Vol. 48 NO. 4 March 2012

氣象學報

季刊

第48卷 第4期

目次

研究論文

- 高雄小林地區強地動分析 ----- 劉坤松 (1)
- 從氣候觀點探討影響臺灣颱風的定義問題 ----- 李清滕 盧孟明 (25)
- 臺灣梅雨期開始及乾溼之指標研究 ----- 陳孟詩 (39)
- 中央氣象局數值天氣預報作業系統(一)歷史演進 ----- 葉天降 滕春慈 (53)
黃麗玫 馮欽賜
張庭槐
- 中央氣象局數值天氣預報作業系統(二)預報模式概況 ----- 葉天降 馮欽賜 (69)
柳再明 陳得松
黃康寧 陳雯美
汪鳳如 洪景山

出版機關：交通部中央氣象局

10048臺北市中正區公園路64號

發行人：辛在勤

聯絡電話：(02)2349-1091

編審小組：

主 編 程 家 平

委 員 呂 國 臣 李 育 棋

林 雨 我 林 煒 閔

洪 景 山 郭 鎧 紋

陳 嘉 榮 馮 欽 賜

黃 維 智 滕 春 慈

鄭 明 典 盧 孟 明

幹 事 黃 玉 絲 韓 素 蘭

(按姓氏筆劃排列)

高雄小林地區強地動分析

劉坤松

高苑科技大學通識教育中心暨防災研究中心

摘 要

本研究使用中央氣象局所設置強震站之強震紀錄，進行傅氏振幅譜及單站頻譜比值的計算，分析高雄小林地區的強地動特性，包括最大地表加速度、頻譜特性以及場址特性。結果顯示：最大振幅譜比值與芮氏規模及震源距離呈現非線性效應，會隨著芮氏規模及震源距離的增加而減少，此說明強震與弱震的放大函數會有所差異。南北對垂直方向的顯著頻率平均值約為8 Hz，其最大振幅譜比的平均值為11.4倍。東西對垂直方向則分別為7 Hz及13.6倍。水平方向對垂直方向的最大振幅譜比約為4-20倍，但因為其場址效應產生了強烈的共振效應，最大振幅譜比值可達50-60倍。本研究成果可作為了解造成災害區域之環境特性及重建之建築等結構物規劃設計的參考。

關鍵詞：小林、強地動、場址效應、共振效應

一、前言

臺灣位於地震活動非常頻繁的環太平洋地震帶上，歐亞板塊與菲律賓海板塊日以繼夜的碰撞、擠壓，常有強烈的地震發生。此外，臺灣地處西太平洋颱風路徑上，平均每年有4個颱風侵襲；雪上加霜，颱風加上地震的威脅，大大提高了山區發生土石流、山崩的潛勢，致使臺灣地區，近20年來因天然災害所造成的直接財物損失，平均1年高達新臺幣174億元，近年來並有升高的趨勢，不僅直接關係到人民生命財產的安全，更影響到社會經濟建設的發展。

2009年8月莫拉克颱風引致臺灣山區大規模崩塌、落石及土石流災害，造成619人死亡、76人失蹤及相當多的房舍掩埋沖毀，是臺灣史上傷亡最慘重的颱風

災害(國家災害防救科技中心,2009;潘國樑,2010)。尤其是高雄縣甲仙鄉小林村500人失蹤的村落掩埋，更讓人怵目驚心。是什麼原因造成如此慘重的災情，是單純的天災或亦有人為的疏失所造成，也是社會關注的重點，因此學術研究領域投入了相當多的人力來了解事件發生的緣由及進行救災工作。

李錫堤等人認為是莫拉克颱風帶來超級的雨量，先在小林村後方山坡誘發大型山崩，造成村落掩埋。山崩發生1小時後，堰塞湖潰決，大水沖刷被土石掩埋的村落，留下慘不忍睹的景象；而造成巨災的癥結是因地質構造、地表水的滲入及滑動區坡度太高所致(李錫堤等,2009)。游峻一等人則利用地電阻及電磁波測勘方法，來進行地質調查及尋找掩埋於土石區之房舍，進而搜尋大體。由其調查結果，建議

未來調查土石流災區，應先進行地質調查與地球物理探查，以供將來研究土石流的基礎(游峻一等,2009)。此外，陳建志等人綜合水文、地質、地形、地球物理探勘和地震等資料，精準訂出小林山崩發生時間，兩階段災變過程土石覆蓋小林全村(Chen et al., 2010)。

除了上述的地質及地球物理方法外，地動資料的分析也是可用來瞭解災害區域之環境特性。例如葉永田在921地震後，分析嘉南與高屏地區的地動特性，得到各區域的地盤基本週期(葉永田,2000)。溫國樑分析921地震中，地表加速度大於1G的名間單一測站(TCU129)(Wen et al., 2001)。溫國樑分析大屯山兩相鄰強震站，竹子湖測站(TAP056)與鞍部測站(TAP066)兩者強地動特性的差異，顯示出竹子湖測站的場址效應(Wen et al, 2008)。劉與蔡則分析921地震建築物與鄰近自由場強震資料，顯示大樓會因基本週期的共振效應，會有高達7倍的加速度放大效應(劉與蔡,2007)。

綜上所述，本研究使用中央氣象局位於高雄小林國小所設置強震站之強震紀錄，進行傅氏振幅譜及單站頻譜比值的計算，分析其強地動特性，包括最大地表加速度、頻譜特性，以了解小林的環境區域特性如地層基本週期、場址效應，提供資訊供後續解析事件發生的緣由，以及在未來重建時，建築物如房舍及教室能妥善規劃設計，避免共振效應的發生，有助於日後地震發生時降低生命財產的損失。

二、研究區域與強震資料

(一)研究區域

本研究區域小林村位於在高雄縣甲仙鄉，村民聚落主要分布於旗山溪左岸之高

灘地及低位河階上，與河床之高差約在5至10公尺之間。小林村附近出露之地層為上新世鹽水坑頁岩及糖恩山砂岩，主要岩性分別為頁岩與砂岩或泥質砂岩。周邊之高位階地、低位階地及分布於河道上之現代沖積層，均以砂礫為主。小林向斜是本區最主要的地質構造，向斜軸東側約800~900公尺處有甲仙斷層通過，係高角度向東南傾斜的逆斷層，再往東約2公里處另有旗山斷層通過(李錫堤等,2009)。

(二)強震資料

本研究使用中央氣象局在高雄小林國小所設置強震站的強震紀錄，中央氣象局自1990年7月起執行第1期為期6年之「強地動觀測計畫」(TSMIP)，此計畫目的在於蒐集高品質的強震紀錄，除可作為耐震設計規範修訂之依據外，並可用來研究地震震源、波傳路徑與場址效應等重要課題(劉坤松等，1994)；至第1期計畫結束時已先後設置了超過630個自由場強地動觀測站；除中央山脈外，各站站距約為5公里，是目前世界最密集的強震觀測網。

小林國小強震站，測站編號kau001，位於北緯23.1625度、東經120.6352度，海拔高度365公尺，設置於1993年2月17日，至2009年8月8日因莫拉克颱風引致山區大規模崩塌而遭掩埋，期間共蒐錄了數十筆寶貴的強震記錄。本測站之強震儀的觀測先後有IDS、IDSA及SMTA 3種型態，其硬體部分由5個單元所組成，分別是加速度感應器、信號紀錄處理裝置、記憶單元、時間裝置與電源裝置；並具有下列功能及特色(Liu et al., 1999；Liu and Tsai, 2005)：

1. 數位式紀錄方式，解析度高，至少為16位元，對滿格(full scale)為2g的加速度感應器，其解析度為0.0598gal/count

以上。

2. 動態紀錄範圍大，可至少為96dB，強震、微震均可記錄，目前觸發位準設定於滿格的0.2% (約3.92gal)。
3. 頻率反應範圍廣，由DC至50Hz，且儀器反應並經振動台測試確認。
4. 滿格為2g之力平衡式加速度感應器，可避免強震時遭到信號裁剪。
5. 可設定地震事件前後時間長度，以保紀錄完整，目前各站一般設定為事件前20秒，事件後15秒的記憶時間。
6. 可配備GPS時間校正系統，使時間誤差維持在每日5msec以內。

本研究所選取52個強震紀錄的編號、日期、時間、經緯度、地震深度、震央距離、震源距離及地震芮氏規模整理如表1。而小林測站及52個地震的震央位置分布圖如圖1所示。同時，52個地震的地震芮氏規模範圍介於2.8至7.1。震源距離範圍介於4.6 KM至169.4 KM。地震此兩參數的關係分布如圖2所示。

三、分析方法

對於高雄小林地區強地動的分析方法，我們先檢視所有地震的強震紀錄，先繪出各地震垂直、南北、東西三方向之加速度波形，並標出各方向之最大加速度值。其次，本研究對加速度紀錄作了進一步的分析處理，包含傅氏振幅譜及單站頻譜比法二部分。有關單站頻譜比法之計算原理簡述如下：

以往研究場址效應大都使用地震頻譜來作分析，即在頻率域處理，而常用的分析方法，主要可分為傅氏頻譜與反應譜。傅氏頻譜是將地震紀錄的時間序列做傅立葉轉換至頻率域，包括傳統的雙站頻譜比法和單站頻譜比法(葉永田,2000)。由於傳

統的雙站頻譜比法常常會遇到參考站選定的困擾，甚至某些場址區域附近，根本找不到適合的參考點測站。因此，降低了雙站頻譜比法的實用性。

單站頻譜比法(H/V Ratio)是由Nakamura(1989)利用微地動資料估算場址效應所得的經驗式。由於單站頻譜比法沒有參考站選擇的問題，所以此方法的實用性增加了不少。Nakamura指出場址的顯著振動週期及其對應之振幅放大效應應直接與場址水平向及垂直向微動訊號之比值有關。單站頻譜比法的基本假設有3個：

- (1)微動訊號是由表面波以及在表面土層(未壓密土層)內反射與折射之剪力波2個成份波所組成。
- (2)表面波不會影響未壓密土層底部(即基盤)處之所蒐集的微動訊號。
- (3)未壓密土層不會放大垂直向上傳遞之微動訊號。

量測到的振動反應紀錄主要受到：震源效應、路徑效應、與場址效應之影響。如果要探討場址效應，應該要去除其他兩個效應才行。若 V_S 為沖積層測站所量得之垂直向傅氏頻譜、 H_S 為沖積層測站所量得之水平向傅氏頻譜、 V_B 為岩盤測站所量得之垂直向傅氏頻譜、 H_B 為岩盤測站所量得之水平向傅氏頻譜。則來自震源的效應可以近似為 A_S ：

$$A_S = V_S / V_B \quad (3)$$

而場址效應 S_E 為

$$S_E = H_S / H_B \quad (4)$$

為了除去來自震源的效應，Nakamura將 S_E 除以 A_S ，並將路徑效應視為一致，可得：

$$S_M = S_E / A_S = (H_S / H_B) / (V_S / V_B) \quad (5)$$

Nakamura於1989利用井下微地動觀測資料來證實在岩盤上水平向與垂直向傅氏頻譜的比值為1。因此式(5)可表示成：

表1. 本研究所使用地震之參數

Table 1. Earthquakes whose records are used in this study.

No.	Date yy/mm/dd	Time	Lat. (N)	Lon. (E)	Depth (km)	Epi. Dist (km)	Hypo. Dist (km)	ML
1	1993/4/25	15:31.3	23.119	120.676	3.8	6.32	7.37	3.33
2	1993/4/25	31:38.7	23.121	120.677	4.15	6.31	7.55	3.74
3	1993/4/25	54:07.2	23.119	120.681	4.24	6.73	7.95	3.49
4	1993/12/15	49:43.1	23.213	120.524	12.5	12.73	17.84	5.7
5	1993/12/22	22:20.0	23.211	120.510	11.71	13.84	18.13	4.63
6	1994/1/20	50:15.6	24.065	121.852	49.45	159.41	166.9	5.58
7	1994/7/4	07:58.2	23.180	120.750	7.08	11.91	13.86	4.09
8	1994/10/5	13:24.5	23.156	121.720	31.28	111.11	115.43	5.83
9	1995/1/24	17:15.2	23.319	120.759	14.12	21.5	25.72	4.51
10	1996/1/27	39:31.3	23.170	120.772	1.37	14.03	14.1	4.13
11	1996/2/10	02:36.8	23.178	120.769	5.61	13.85	14.94	3.98
12	1996/9/5	42:07.9	22.001	121.367	14.76	148.98	149.71	7.07
13	1998/2/14	22:17.3	23.084	120.735	3	13.37	13.7	3.92
14	1998/3/12	03:21.7	22.981	120.664	14.05	20.34	24.72	4.39
15	1998/7/17	51:15.0	23.503	120.663	2.8	37.78	37.88	6.2
16	1998/8/16	13:03.8	23.203	120.532	8	11.49	14	4.8
17	1998/11/17	27:32.5	22.832	120.790	16.49	39.89	43.16	5.51
18	1998/12/20	34:04.5	23.220	120.539	2.84	11.71	12.05	3.88
19	1999/4/18	32:11.1	23.165	120.656	4.08	2.17	4.62	3.19
20	1999/4/30	45:05.7	23.172	120.672	5	3.87	6.32	3.82
21	1999/6/17	18:14.9	23.176	120.601	8.3	3.79	9.12	3.28
22	1999/7/7	53:13.4	23.319	120.735	13.78	20.1	24.37	5.1
23	1999/7/7	06:29.2	23.313	120.745	11.34	20.08	23.06	4.55
24	1999/7/9	36:51.7	23.322	120.748	9.7	21.05	23.18	4.53
25	2001/2/12	57:01.7	23.149	120.684	6.05	5.24	8	2.95
26	2001/9/12	38:35.4	23.112	120.692	7.17	8.01	10.75	3.65
27	2002/9/30	35:13.5	23.328	120.614	8.12	18.45	20.16	5.04
28	2003/11/6	58:44.4	23.124	120.451	17.63	19.35	26.18	4.96
29	2003/12/10	38:13.5	23.067	121.398	17.73	78.86	80.83	6.42
30	2003/12/17	27:25.3	22.606	121.311	32.2	92.78	98.21	5.43
31	2004/2/8	39:44.6	23.179	120.629	7.99	1.93	8.22	3.35
32	2004/7/25	04:19.0	23.088	120.712	4.15	11.39	12.12	3.86

33	2004/9/2	07:50.9	23.201	120.499	7.51	14.54	16.36	4.26
34	2005/4/11	01:55.7	23.268	120.532	5.2	15.8	16.63	4.63
35	2006/4/15	40:55.4	22.856	121.304	17.9	76.47	78.54	6.04
36	2006/12/26	26:21.0	21.687	120.555	44.11	163.56	169.4	6.96
37	2006/12/26	34:15.1	21.970	120.420	50.22	133.92	143.03	6.99
38	2007/7/9	03:51.4	23.150	120.601	4.72	3.8	6.06	3.51
39	2007/12/23	50:22.3	23.103	120.672	7.62	7.61	10.77	4.2
40	2007/12/23	31:10.8	23.099	120.664	7.76	7.65	10.9	3.28
41	2008/3/4	13:36.9	23.208	120.698	11.58	7.68	13.9	4
42	2008/3/4	31:47.5	23.207	120.696	11.32	7.39	13.52	5.22
43	2008/3/4	42:32.6	23.213	120.707	11.95	8.68	14.77	4.58
44	2008/3/5	51:40.3	23.201	120.690	11.4	6.52	13.13	3.59
45	2008/7/3	05:37.4	23.190	120.670	15.13	4.24	15.71	4.28
46	2008/7/26	15:10.4	23.203	120.549	14.96	10.78	18.44	4.13
47	2008/7/26	51:21.8	23.209	120.548	15.04	11.09	18.69	4.31
48	2008/12/6	55:28.4	23.179	120.593	9.29	5.57	10.83	3.75
49	2008/12/6	34:46.2	23.177	120.597	9.01	5.02	10.31	3.53
50	2008/12/23	04:43.8	22.946	120.551	17.09	25.62	30.8	5.32
51	2008/12/26	08:30.2	23.182	120.610	7.11	4.16	8.24	2.81
52	2009/2/13	51:43.3	23.167	120.620	6.09	2.48	6.58	2.78

$$S_M = H_S // V_S \quad (6)$$

此經驗式即為Nakamura所提出的單站頻譜比法。雖然對於Nakamura所提出的假設與理論仍有些爭議，但相對於其他方法而言，此法的有效性與可行性已被廣泛的接受與利用(Wen et al., 2006)。

四、強地動特性

(一)最大地表加速度

為瞭解高雄小林地區的強地動特性，我們先檢視小林國小強震站所記錄到地震的強震紀錄，先繪出各地震垂直、南北、東西三方向之加速度波形，並標出各方向之最大加速度值，總共選用了52筆強震

紀錄，其編號、地震震度、震源距離、芮氏規模、垂直(V)、南北(NS)、東西(EW)三方向之最大地表加速度及紀錄長度整理如表2。同時，也繪出垂直、南北、東西三方向之最大地表加速度與芮氏規模及震源距離的關係如圖3所示。垂直向之最大地表加速度範圍介於1.84至45.02(gal)，南北向之最大地表加速度範圍介於1.84至92.92(gal)，東西向之最大地表加速度範圍介於4.54至72.58(gal)。水平向的最大地表加速度大於垂直向的最大地表加速度，這些地震的最大震度可達5級(80gal)。

(二)頻譜特性

接下來，我們將對加速度紀錄作進一

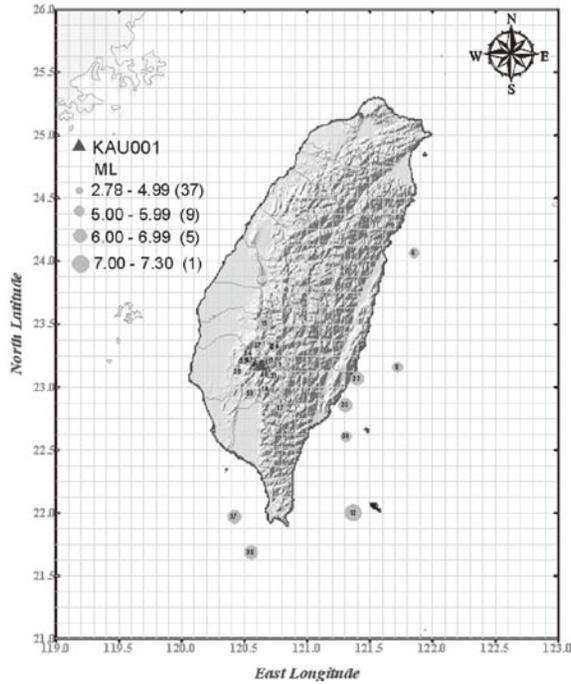


圖1. 本研究所使用之強震測站(KAU001)及地震震央分布圖。

Figure 1. Distribution of the TSMIP free-field station KAU001 and the epicenter locations of earthquakes used in this study.

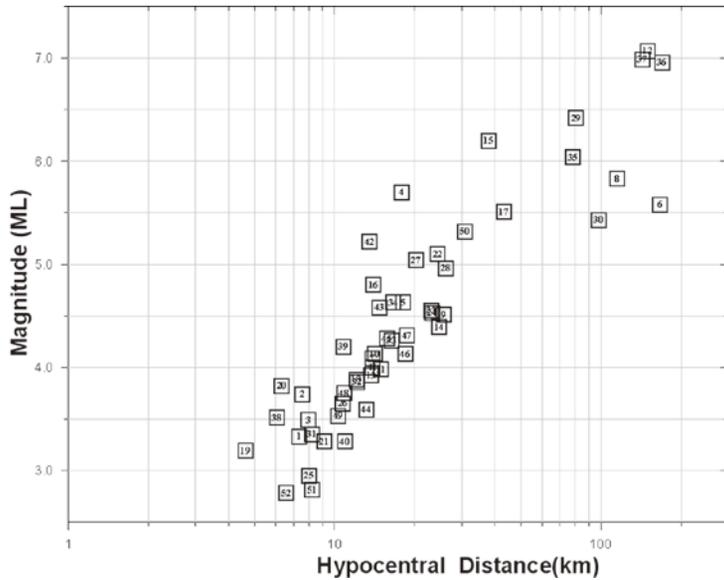


圖2. 本研究所選取強震紀錄的芮氏規模與震源距離關係，方形內數字為地震編號。

Figure 2. Distribution of strong motion data used in this study. The event numbers are also shown in the open square.

步的分析處理，包含傅氏振幅譜及單站頻譜比法二部分。本節將探討傅氏振幅譜的結果，結果顯示：同一個地震3個方向分量中，垂直向比水平向的傅氏振幅譜可延伸至較高頻的頻率範圍，另外，垂直向的最大傅氏振幅譜的頻率也比水平向的高。總共計算了52筆強震紀錄，其編號、垂直向最大振幅譜值(FAP V)及其顯著頻率(Pre. F V)、南北向最大振幅譜值(FAP NS)及其顯著頻率(Pre. F NS)、東西向最大振幅譜值(FAP EW)及其顯著頻率(Pre. F EW)分別整理如表3之第1至第7行。同時，也繪出垂直、南北、東西三方向之最大振幅譜值的顯著頻率與芮氏規模及震源距離的關係分別如圖4及圖5所示。上、中、下方

分別為垂直(V)、南北(NS)、東西(EW)三方向，各方向之回歸曲線、加減一個標準偏差(以虛線表示)及 R^2 (相關係數的平方)亦標示在圖上。回歸曲線的相關係數R是用來評估兩參數彼此的相關程度，相關係數R的值介於-1至1，R值為正，則表示兩參數有正相關性，亦即一參數會隨另一參數增加而增加。如R值為負，則表示兩參數有負相關性，亦即一參數會隨另一參數增加而減少。如R值接近零，則表示兩參數相關性很低，是屬隨機關係。

由圖4及圖5皆顯示顯著頻率與芮氏規模及震源距離皆有負相關的關係，亦即顯著頻率皆隨著芮氏規模及震源距離的增加而減少，同時，在顯著頻率與芮氏規模

表2. 本研究所使用地震之三分量最大地表加速度

Table 2. The Peak Ground Acceleration of records in three components are used in this study.

No.	Inten.	Hypo. Dist (km)	ML	PGA(gal)			Rec. Length (sec)
				V.	NS	EW	
1	3	7.37	3.33	8.5	10.28	11.24	31
2	3	7.55	3.74	7.9	11.48	7.3	31
3	3	7.95	3.49	13.46	18.3	20.82	31
4	4	17.84	5.7	32.78	61.54	54.2	43
5	3	18.13	4.63	5.62	13.04	7.9	31
6	2	166.9	5.58	2.34	5.98	7.3	32
7	3	13.86	4.09	3.7	7.36	10.7	36
8	2	115.43	5.83	3.46	6.46	6.58	36
9	3	25.72	4.51	5.8	8.02	9.98	37
10	3	14.1	4.13	5.86	16.68	8.2	36
11	2	14.94	3.98	3.12	7.36	6.52	35
12	2	149.71	7.07	3.28	5.68	4.72	54
13	3	13.7	3.92	2.76	10.04	7.42	36
14	3	24.72	4.39	3.34	8.26	6.04	36
15	4	37.88	6.2	15.14	24.58	35.58	59
16	3	14	4.8	9.16	12.26	7.84	46

17	3	43.16	5.51	3.22	8.02	11.6	38
18	2	12.05	3.88	5.02	2.94	6.7	35
19	3	4.62	3.19	4	8.38	10.94	35
20	3	6.32	3.82	9.98	18.72	17.88	37
21	3	9.12	3.28	2.7	6.04	8.92	35
22	3	24.37	5.1	6.64	10.58	15.08	37
23	3	23.06	4.55	8.38	15.74	16.92	37
24	3	23.18	4.53	3.88	8.98	7.96	37
25	3	8	2.95	10.58	10.28	10.22	35
26	3	10.75	3.65	7.18	10.64	14.84	35
27	4	20.16	5.04	18.48	29.6	36.06	41
28	3	26.18	4.96	12.62	4.6	5.02	35
29	3	80.83	6.42	10.34	14.48	14	60
30	2	98.21	5.43	3.06	3.22	5.62	35
31	3	8.22	3.35	7	6.22	9.46	35
32	2	12.12	3.86	3.94	6.52	5.02	35
33	3	16.36	4.26	4.42	5.08	9.1	36
34	2	16.63	4.63	4.12	3.58	6.64	35
35	2	78.54	6.04	3.88	4.18	4.78	35
36	3	169.4	6.96	5.34	8.7	7.9	120
37	3	143.03	6.99	9.42	17.68	15.32	120
38	3	6.06	3.51	5.68	11.78	13.44	120
39	4	10.77	4.2	8.22	20.56	27.84	60
40	2	10.9	3.28	1.84	1.84	5.58	120
41	3	13.9	4	5.6	9.6	9.12	60
42	5	13.52	5.22	45.02	92.92	72.58	120
43	4	14.77	4.58	8.86	37.76	17.62	60
44	2	13.13	3.59	4.66	5.06	4.74	60
45	3	15.71	4.28	8.2	10.08	10.02	60
46	2	18.44	4.13	2.08	1.86	5.28	120
47	2	18.69	4.31	1.86	1.9	4.54	60
48	4	10.83	3.75	15.54	46.36	46.42	60
49	3	10.31	3.53	4.7	11.26	12.54	120
50	2	30.8	5.32	4.7	7.86	7.88	120
51	2	8.24	2.81	2.58	7.42	7.22	60
52	3	6.58	2.78	4.28	9.46	14.16	60

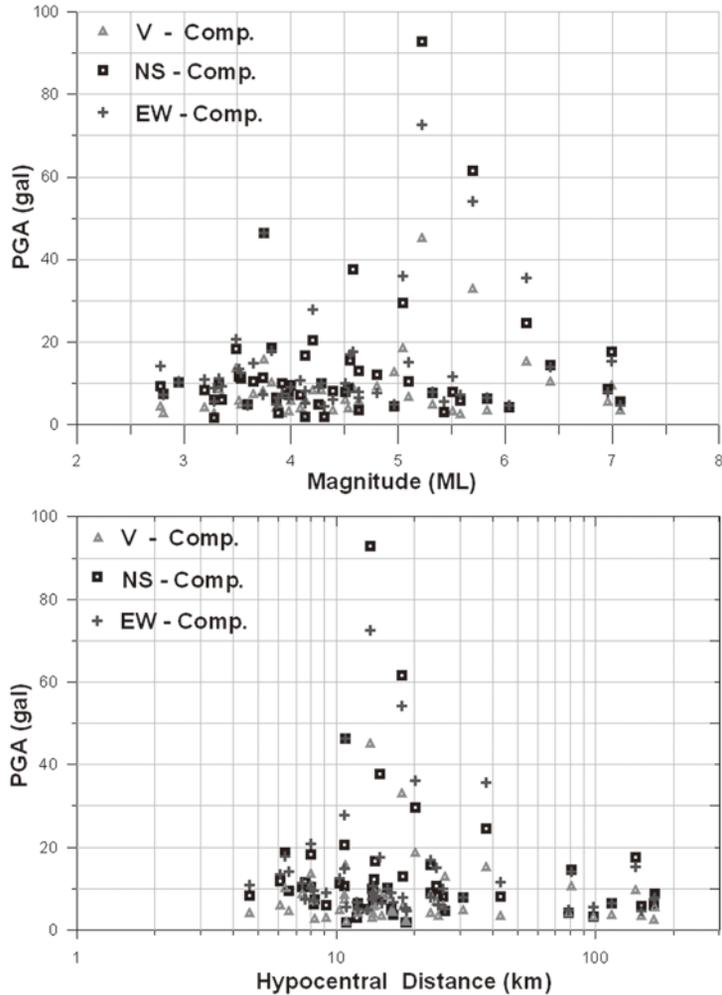


圖3. 垂直(V)、南北(NS)、東西(EW)三方向之最大地表加速度與芮氏規模(圖上方)及震源距離(圖下方)的關係。水平向的最大地表加速度大於垂直向的最大地表加速度。

Figure 3. The relations of PGA and magnitude (upper panel) as well as hypocentral distance (lower panel) are analyzed in three components.

或顯著頻率與震源距離的相關性，水平向比垂直向有較高的相關係數。此結果也說明隨著距離增加，因高頻波較快衰減的特性，地震波的能量會集中在低頻波。經計算垂直、南北、東西三方向顯著頻率的平均值分別為7.57Hz、7.30Hz及6.57Hz。此外，我們也繪出三方向之最大振幅譜值與芮氏規模的關係如圖6。上、中、下方

分別為垂直(V)、南北(NS)、東西(EW)三方向，各方向之回歸曲線、加減1個標準偏差(以虛線表示)及 R^2 (相關係數的平方)亦標示在圖上。由圖3顯示三方向之最大振幅譜值與芮氏規模有正相關的關係，亦即最大振幅譜值隨著芮氏規模的增加而增加，但並不是規模最大的最大振幅譜值最高，還與震源距離有關，通常地震能量會

表3. 本研究所得三方向最大振幅譜值(FAP)及其顯著頻率(Pre. F)以及最大振幅譜比值及其顯著頻率

Table 3. The Fourier Amplitude Peak (FAP) and relative Predominant Frequency (Pre. F) as well as Fourier Amplitude Ratio (FAR) and relative Pre. F. of records in three components are analyzed.

No.	FAP V	Pre. F V	FAP NS	Pre. F NS	FAP EW	Pre. F EW	FAR NS/V	Pre. F NS/V	FAR EW/V	Pre. F EW/V
1	1.41	16.08	1.75	11.15	3.69	7.77	17.03	5.72	16.13	7.89
2	1.86	16.17	2.37	12.11	2.11	12.47	12.15	5.3	10.41	5.3
3	2.44	16.07	4.1	11.78	3.49	6.82	11.47	11.6	14.02	5.2
4	17.24	3.31	31.45	8.47	36.38	1.77	13.49	7.05	8.23	7.03
5	1.63	16.83	4.89	9.84	3.19	8.79	8.17	7.31	5.92	4.17
6	2.69	3.53	5.8	2.7	6.78	2.17	10.15	7.16	11.35	5.52
7	1.75	2.85	2.7	9.9	2.87	6.91	7.59	13.35	9.86	11.43
8	4.4	4.18	6.7	3.49	5.98	4.17	6.26	4.38	5.41	5.2
9	1.86	3.98	3.07	8.82	4.86	6.91	11.09	11.69	6.77	5.48
10	1.95	2.52	3.76	4.11	2.92	2.91	17.51	9.89	14.01	7.9
11	1.23	4.87	2.52	12.42	4.57	6.88	15.94	10.73	13.98	9.69
12	7.75	1.08	12.36	3.43	14.86	1.05	4.3	10.1	5.94	6.88
13	1.72	3.1	3.25	4.23	2.28	3.17	15.72	9.52	8.5	9.69
14	1.85	8.48	3.48	7.02	4.3	8.48	9.46	8.91	11.29	5.83
15	19.63	1.68	30.24	1.63	23.37	2.18	8.8	6.85	14.53	6.85
16	4.24	1.85	6.29	9.06	6.58	5.6	8.06	6.85	6.02	7.28
17	6.29	1.95	7.45	1.98	7.03	2.08	5.17	6.82	11.52	6.8
18	1.11	10.5	1.71	7.36	2.23	9.54	6.86	4.64	7.43	8.7
19	0.87	10.53	1.79	12.63	2.76	9.29	9.61	7	12.84	6.55
20	1.75	30.01	4.39	12.44	4.44	8.35	12.77	12.18	14.06	9.13
21	0.63	11.2	1.31	7.17	2.31	6.93	34.42	7.19	59.95	7.19
22	3.18	3.49	4.63	3.59	7.01	8.51	5.91	6.67	11.88	6.88
23	3.76	4.03	7.74	7.78	10.56	8.62	9.74	10.74	13.35	6.8
24	1.94	6.26	3.7	6.09	5.28	8.56	9.84	10.38	9.96	10.38
25	1.13	12.73	1.96	11.02	1.52	6.76	9.68	8.88	8.3	9.75
26	1.53	7.02	2.21	7.98	4.03	8.27	7.76	15.61	6.71	3.11
27	8.56	4.73	14.04	3.08	18.5	4.73	7.48	7.19	10.05	7.19
28	2.84	9.89	3.22	7.87	3.35	6.12	6.64	6.49	4.38	5.19
29	23.51	2.49	33.79	0.95	28.76	2.3	4.65	9.8	4.21	9.8
30	3.05	3.04	3.23	2.67	3.62	3.01	3.77	9.03	4.5	9.4
31	0.96	13.49	1.78	8.64	2.09	6.52	9.37	8.64	8.67	9.93

32	1.12	8.36	2.19	8.53	1.8	8.3	6.43	11.03	6.64	9.96
33	1.65	8.77	3.05	9.09	3.8	8.79	6.83	9.38	9.17	4.3
34	1.76	5.68	1.82	8.12	3.27	4.72	5.54	0.24	3.87	4.17
35	4.95	1.04	6.36	1.56	11.41	1.65	5.24	3.27	4.87	3.28
36	11.37	1.66	12.98	1.39	16.08	1.45	7.13	8.3	7.69	5.84
37	10.35	2.03	16.19	3.2	18.34	6.69	9.07	9.7	6.45	7.29
38	1.98	11.33	3.24	8.84	2.42	10	17.96	9.07	15.81	10.68
39	1.97	13.31	4.97	5.52	8.32	7.68	12.57	8.44	20.14	8.42
40	0.04	3.17	0.05	9.64	0.09	9	10.03	6.59	19.72	6.6
41	1.82	13.39	3.41	8.97	3.87	12.26	9.18	6.99	11.19	5.27
42	12.67	8.41	32.69	6.74	22.49	7.98	17.46	6.49	9.54	1.54
43	4.44	4.26	12.1	6.81	8.94	6.82	22.95	11.8	15.93	7.03
44	1.29	9.55	2.16	9.01	2.24	9	15.14	9.88	13.11	17.11
45	3.94	13.17	4.01	13.15	5.14	8.94	8.23	8.62	16.78	8.24
46	0.17	2.76	0.2	8.86	0.35	6.46	7.5	14.86	8.96	6.54
47	0.72	2.73	1.24	9.58	2.4	6.76	8	1.76	17.04	6.58
48	3.65	10.51	10.96	8.64	10.78	8.88	29.95	6.9	50.55	6.9
49	1.65	11.54	2.75	8.68	2.81	9.03	8.65	5.21	18.57	6.53
50	3.86	1	5.3	1.6	4.95	3.19	16.45	9.7	10.53	4.92
51	1	11.62	1.85	8.86	1.37	7.39	25.29	7.32	54.69	7.32
52	1.59	11.51	2.09	11.6	3.69	8.97	21.81	5.36	36.16	5.36

Remark: FAP=Fourier Amplitude Peak (unit=cm/sec). FAR=Fourier Amplitude Ratio.
Pre. F= Predominant Frequency (unit=Hz).

隨震源距離增加而衰減，致使振幅譜值會減低，在52個地震中以編號4號的最大振幅譜值最高，其芮氏規模為5.7及震源距離為17.8公里。

五、場址特性

在本節中，我們將使用單站頻譜比法去分析高雄小林地區的場址特性。延續上一節的結果，分別計算52筆強震紀錄南北向與垂直向振幅譜比值(FAR NS/V)及其顯著頻率(Pre. F NS/V)、東西向與垂直向振幅譜比值(FAR EW/V)及其顯著頻率(Pre.

F EW/V)分別整理如表3之第8至第11行。為了讓頻譜比有較穩定的結果，不致於有很高或很低的比值出現。各方向的振幅譜先進行3點平滑化處理，可將頻譜中散亂之尖峰頻率平滑出容易判讀之顯著頻率值(葉永田,2000)，在本研究中取平滑10次。

(一)顯著頻率

圖7及圖8分別為南北、東西與垂直方向之振幅譜比的顯著頻率與芮氏規模及震源距離的關係。圖上、下方分別為南北(NS)對垂直方向(V)以及東西(EW)對垂直(V)方向的結果，回歸曲線、加減

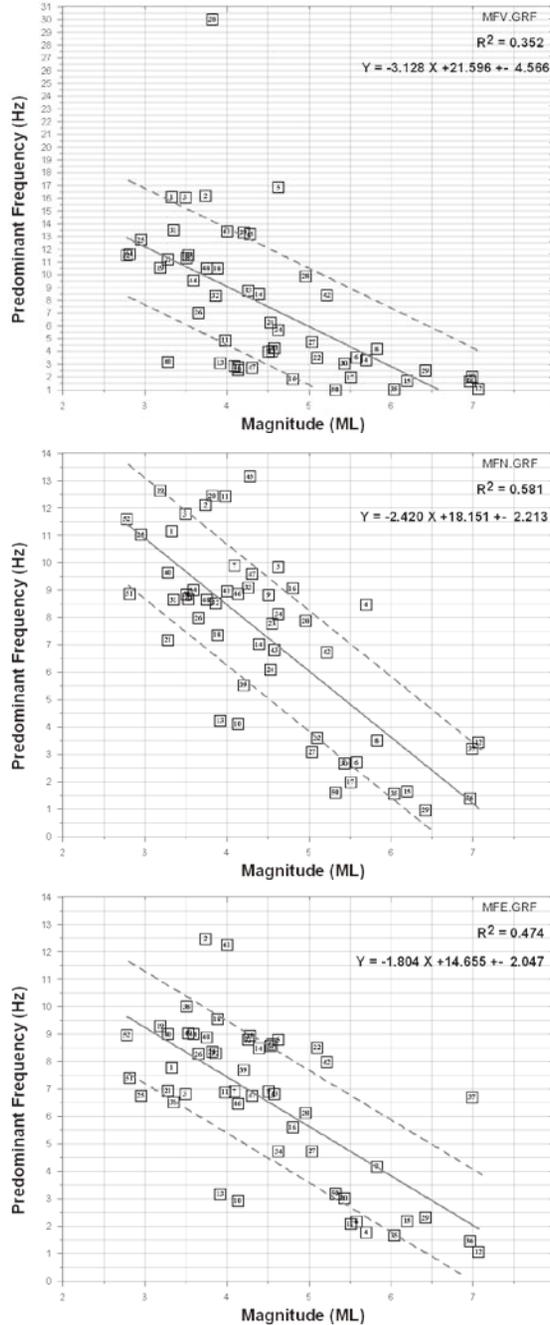


圖4. 三方向之最大振幅譜值的顯著頻率與芮氏規模的關係。圖上、中、下方分別為垂直(V)、南北(NS)、東西(EW)三方向，各方向之回歸曲線、加減一個標準偏差(以虛線表示)及 R^2 (相關係數的平方)亦標示在圖上。

Figure 4. The relations of predominant frequency and magnitude are analyzed in three components. The regression line, plus and minus one standard deviation as well as the Coefficient of Determination R Squared are also shown in the figure.

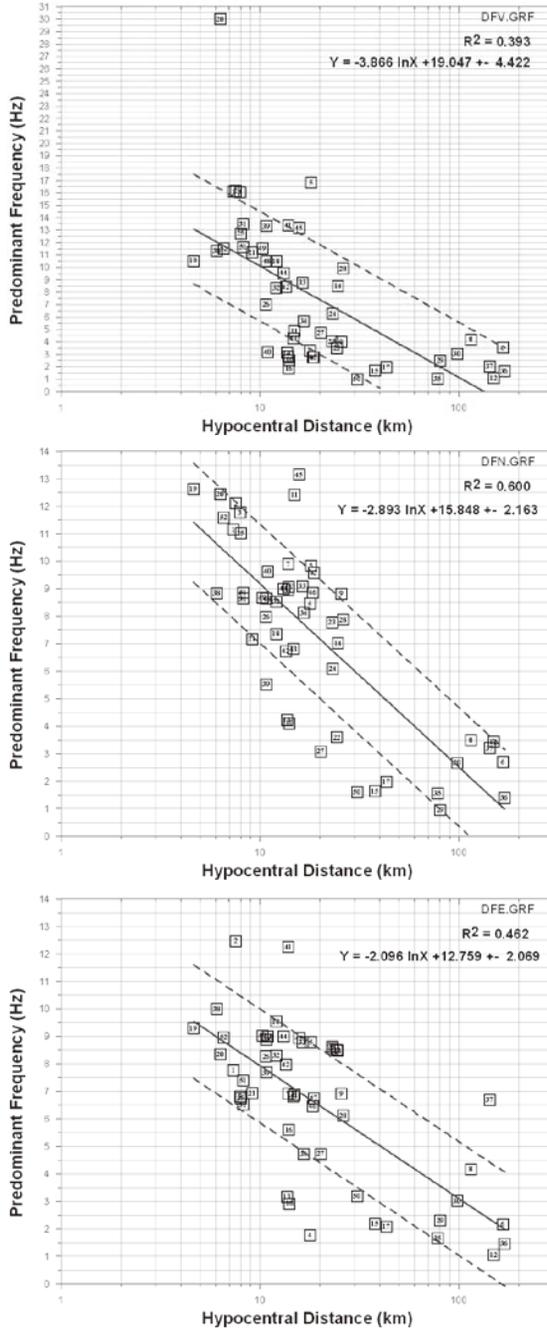


圖5. 三方向之最大振幅譜值的顯著頻率與震源距離的關係。圖上、中、下方分別為垂直(V)、南北(NS)、東西(EW)三方向，各方向之回歸曲線、加減一個標準偏差(以虛線表示)及 R^2 (相關係數的平方)亦標示在圖上。

Figure 5. The relations of predominant frequency and hypocentral distance in three components. The regression line, plus and minus one standard deviation as well as the Coefficient of Determination R Squared are also shown in the figure.

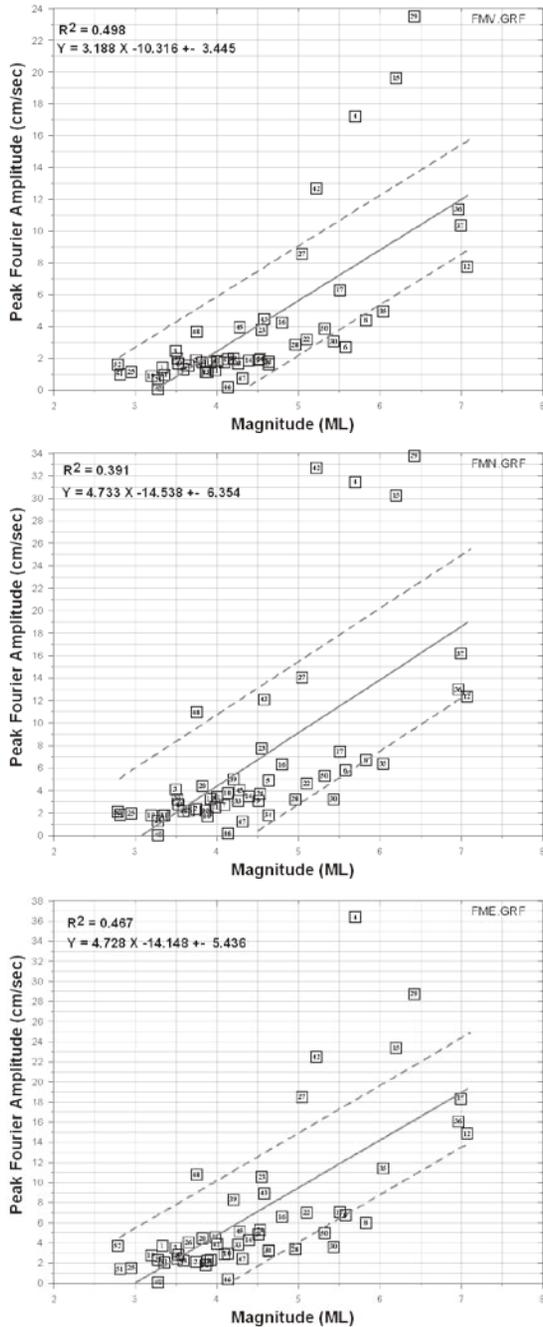


圖6. 三方向之最大振幅譜值與芮氏規模的關係。圖上、中、下方分別為垂直(V)、南北(NS)、東西(EW)三方向，各方向之回歸曲線、加減一個標準偏差(以虛線表示)及 R^2 (相關係數的平方)亦標示在圖上。

Figure 6. The relations of peak Fourier Amplitude and magnitude are analyzed in three components. The regression line, plus and minus one standard deviation as well as the Coefficient of Determination R Squared are also shown in the figure.

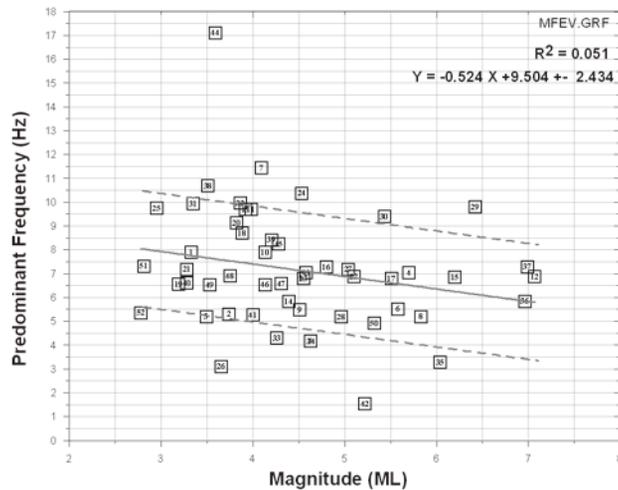
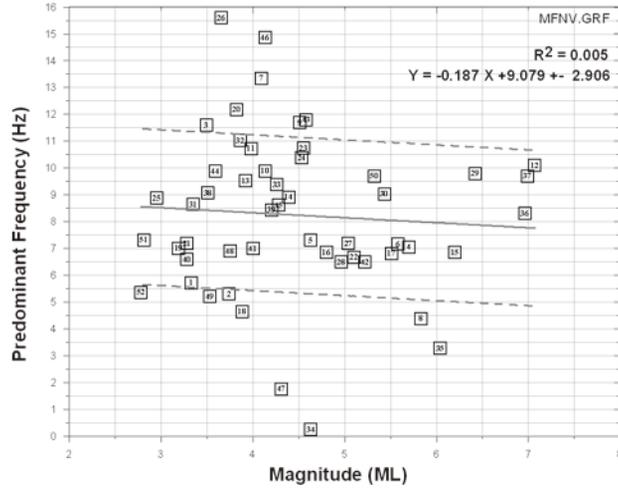


圖7. 南北、東西與垂直方向之振幅譜比的顯著頻率與芮氏規模的關係。圖上、下方分別為南北對垂直方向(NS/V)以及東西對垂直(EW/V)方向的結果，回歸曲線、加減一個標準偏差(以虛線表示)及 R^2 (相關係數的平方)亦標示在圖上。

Figure7. The relations of predominant frequency and magnitude are analyzed in three components. The regression line, plus and minus one standard deviation as well as the Coefficient of Determination R^2 are also shown in the figure.

1個標準偏差(以虛線表示)及 R^2 (相關係數的平方)亦標示在圖上。由圖7及圖8皆顯示顯著頻率與芮氏規模及震源距離皆為相關性低的結果， R^2 (相關係數的平方)遠小於1.0。此結果也說明經此單站頻譜比法去計算之顯著頻率與芮氏規模(震源因素)及

震源距離(波傳播路徑因素)相關性低，能顯示出該測點的場址特性。經計算南北/垂直與東西/垂直顯著頻率的平均值分別為 8.24 ± 2.91 Hz及 7.15 ± 2.43 Hz。上述顯著頻率與古美玲(2001)使用反應譜比方法所得小林國小測站的顯著頻率7Hz相當接近。

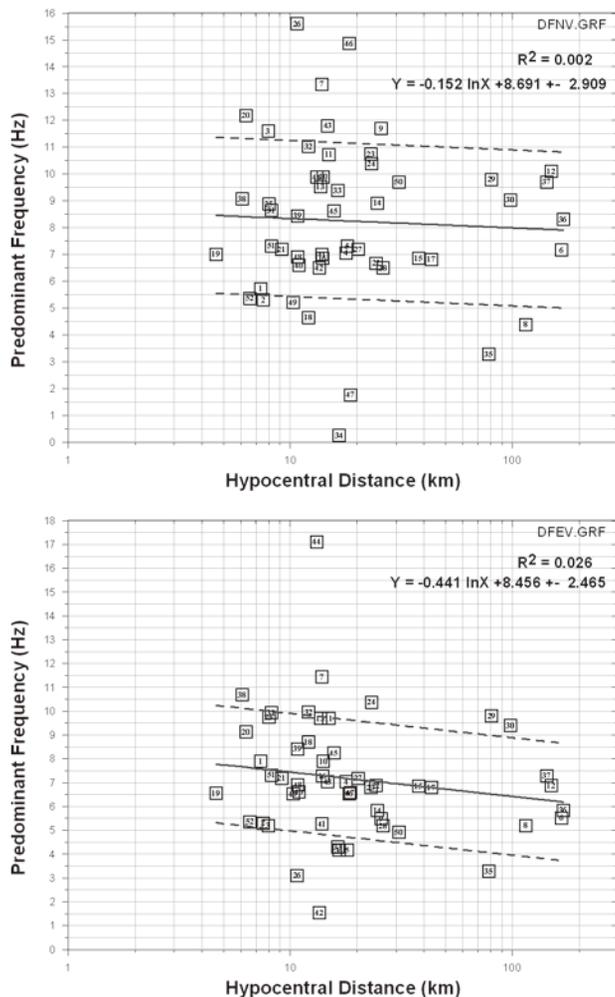


圖8. 南北、東西與垂直方向之振幅譜比的顯著頻率與震源距離的關係。圖上、下方分別為南北對垂直方向(NS/V)以及東西對垂直(EW/V)方向的结果，回歸曲線、加減一個標準偏差(以虛線表示)及 R^2 (相關係數的平方)亦標示在圖上。

Figure 8. The relations of predominant frequency and hypocentral distance in three components. The regression line, plus and minus one standard deviation as well as the Coefficient of Determination R^2 are also shown in the figure.

(二) 頻譜比值

接下來，我們繪出南北、東西與垂直方向之最大振幅譜比值與芮氏規模及震源距離的關係分別如圖9及圖10所示。圖上、下方分別為南北(NS)對垂直方向(V)以及東西(EW)對垂直(V)方向的结果，回

歸曲線、加減一個標準偏差(以虛線表示)及 R^2 (相關係數的平方)亦標示在圖上。由圖9及圖10皆顯示最大振幅譜比值與芮氏規模及震源距離皆有負相關的關係，亦即最大振幅譜比值會隨著芮氏規模及震源距離的增加而減少，呈現非線性效應。此結

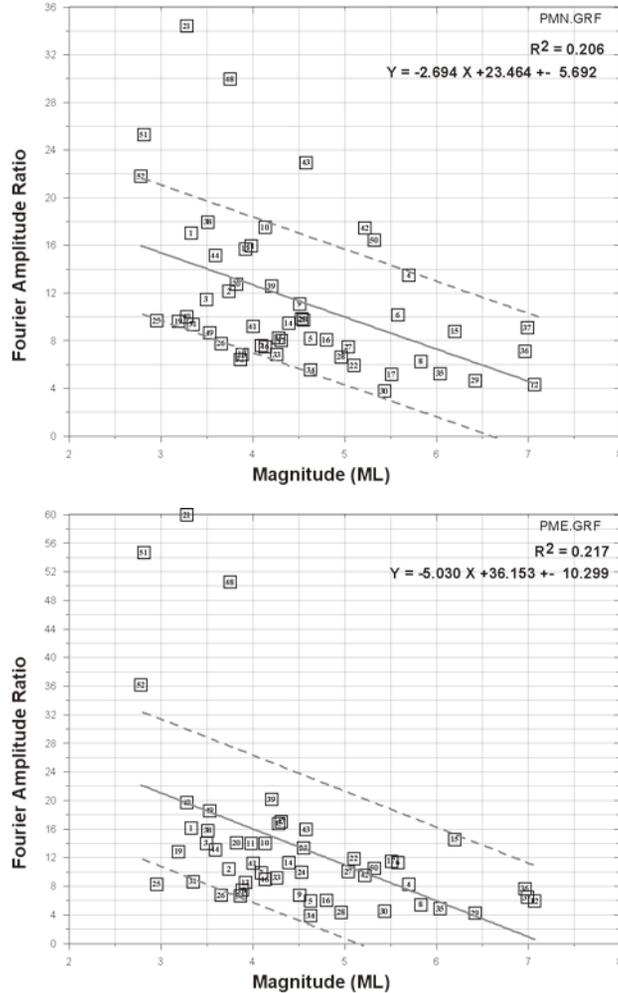


圖9. 南北、東西與垂直方向之最大振幅譜比值與芮氏規模的關係。圖上、下方分別為南北對垂直方向(NS/V)以及東西對垂直(EW/V)方向的结果，回歸曲線、加減一個標準偏差(以虛線表示)及 R^2 (相關係數的平方)亦標示在圖上。

Figure 9. The relations of Fourier Amplitude Ratio and magnitude are analyzed in the NS to V component and EW to V component, respectively. The regression line, plus and minus one standard deviation as well as the Coefficient of Determination R Squared are also shown in the figure.

果說明強震與弱震的放大函數會有所差異，在小林國小測站，如發生較小地震或地振動但在較近距離也會有較高的放大場址效應。例如地震編號21，規模3.28，震源距離9.12公里，甚至在東西方向紀錄的

振幅譜比值可達到60倍，此原因下一段會繼續探討。

最後，我們繪出南北、東西與垂直方向之最大振幅譜比值與顯著頻率的關係如圖11所示。圖上、下方分別為南北

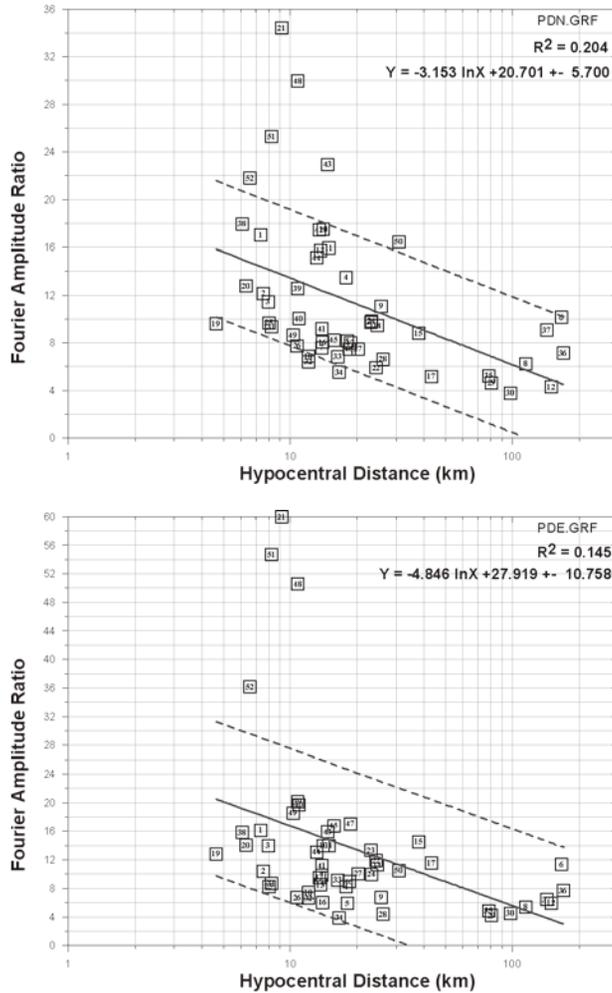


圖10. 南北、東西與垂直方向之最大振幅譜比值與震源距離的關係。圖上、下方分別為南北對垂直方向(NS/V)以及東西對垂直(EW/V)方向的結果，回歸曲線、加減一個標準偏差(以虛線表示)及 R^2 (相關係數的平方)亦標示在圖上。

Figure 10. The relations of Fourier Amplitude Ratio and hypocentral distance are analyzed in the NS to V component and EW to V component, respectively. The regression line, plus and minus one standard deviation as well as the Coefficient of Determination R Squared are also shown in the figure.

(NS)對垂直方向(V)以及東西(EW)對垂直(V)方向的結果，最大振幅譜比值的平均值分別為11.4與13.6及加減1個標準偏差(以虛線表示)亦標示在圖上。由圖顯示東西(EW)對垂直(V)方向的最大振幅譜比值

約為4-20倍，但地震編號21、48與51的比值可達50-60倍，探究原因此3個地震的規模雖小(ML:2.81-3.75)，但距離近(震源距離:8.24-10.83公里)，而最主要的原因是因為其場址效應的顯著頻率約在7Hz與地震

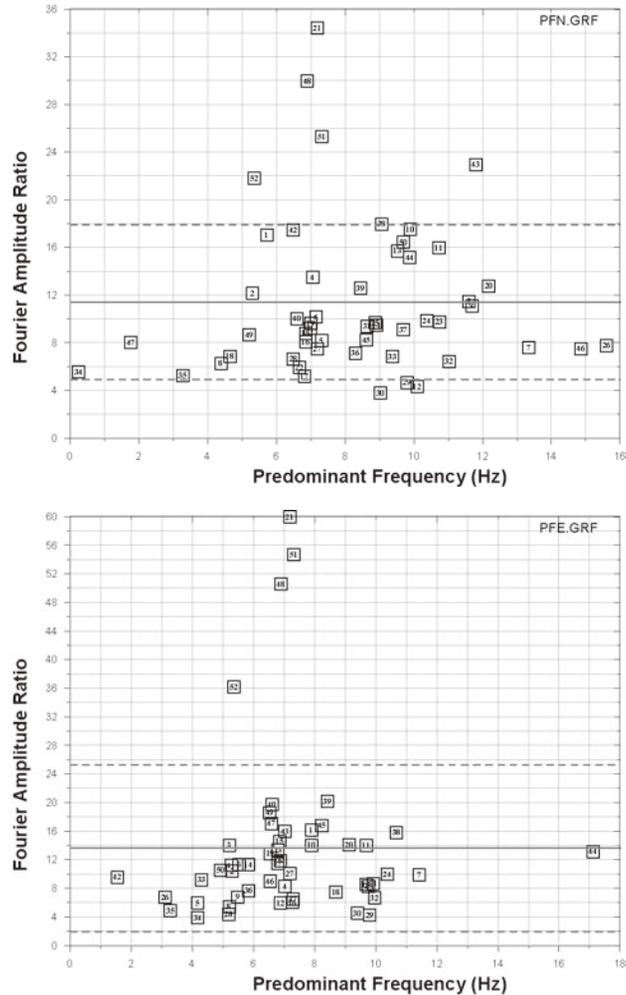


圖11. 南北、東西與垂直方向之最大振幅譜比值與顯著頻率的關係。圖上、下方分別為南北對垂直方向(NS/V)以及東西對垂直(EW/V)方向的結果，最大振幅譜比值的平均值分別為11.4與13.6、加減一個標準偏差(以虛線表示)亦標示在圖上。

Figure 11. The relations of Fourier Amplitude Ratio and predominant frequency are analyzed in the NS to V component and EW to V component, respectively. The average of Fourier Amplitude Ratio, plus and minus one standard deviation are also marked in the figure.

能量集中在6.9~7.3Hz產生了強烈的共振效應所致(參見表3)。另在南北(NS)對垂直方向(V)的最大振幅譜比值則約為4-18倍，但地震編號21、48與51的比值可達25-34倍，也是因為共振效應的結果。

(三)地質及地體構造相關性分析

綜合了上述顯著頻率及頻譜比值的結果，本節進一步分析高雄小林地區的場址特性與地質及地體構造的相關性。在Lee等(2001)綜合了地質、工程鑽探資料及

標準貫入試驗之N值和頻譜分析等方法將全臺灣強震站的場址分為B、C、D、E4類。其中B類可視為岩盤的場址，而小林國小測站因處於河階地被歸為D類，與本研究結果有所差異，可能在分類時因測站地質狀況不夠清晰，僅能從小比例尺地質圖去比對分類，無法充分代表該測站場址之工程特性。此外，林孝維(2004)將強震站場址依顯著放大頻率區分為4類。第1類為振幅譜比曲線在小於1Hz的頻帶中呈現放大現象的測站；第2類為振幅譜比曲線在1Hz~10Hz的頻帶中呈現放大現象的測站；第3類為振幅譜比曲線在大於10Hz的頻帶中呈現放大現象的測站；第4類為振幅譜比曲線比值在整個頻帶趨近於1的測站。小林國小測站屬於第3類與本研究的結果在較高頻有大的放大現象相符合。同時本研究結果，小林地區的顯著頻率位於高頻(約7Hz)，與古美玲(2001)論文圖4.12中場址分類型態屬B類亦相符合。因此我們將小林國小測站的場址分類歸於B類。

另一個令人爭議、也是社會關注的重點是此次小林村500人失蹤的村落掩埋，是單純的天災或與曾文水庫越域引水工程有關呢？學術研究領域投入了相當多的人力來了解事件發生的緣由。李錫堤等人認為是莫拉克颱風帶來超級的雨量，先在小林村後方山坡誘發大型山崩，造成村落掩埋。山崩發生1小時後，堰塞湖潰決，大水沖刷被土石掩埋的村落；而造成巨災的癥結是因地質構造、地表水的滲入及滑動區坡度太高所致(李錫堤等, 2009)。另由日本NHK電台所製作的專輯，提及此次的山崩是屬於較少見的「深層崩塌」。究竟曾文水庫越域引水工程會不會引致山崩，學者調查結果聲稱可能性非常小。以一般的隧道鑽炸似乎不會引起如此大規模

的山崩。而由本研究場址分析顯示：小林地區最大振幅放大值約為4-20倍，但地震編號21、48與51的值可達50-60倍，探究原因，此3個地震的規模雖小(ML:2.81-3.75)，但距離近(震源距離:8.24-10.83公里)，但最主要的因素是因為其場址效應的顯著頻率約在7Hz與此3個地震能量集中在6.9~7.3Hz，產生了強烈的共振效應所致(參見表1、表3及圖9至圖11)。因此是否有人為外力因素會產生顯著頻率約在7Hz相近的能量，致使裂縫生成，而進一步的誘發深層崩塌，則有待進一步的探究！

六、結論

本研究使用中央氣象局於高雄小林國小所設置強震站之強震紀錄，進行傅氏振幅譜及單站頻譜比值的計算。分析高雄小林地區的強地動特性，包括最大地表加速度、頻譜特性，以了解小林的環境區域特性如地層基本週期、場址效應，得到下列結論：

1. 顯著頻率與芮氏規模及震源距離皆有負相關的關係，亦即顯著頻率皆隨著芮氏規模及震源距離的增加而減少，同時，在顯著頻率與芮氏規模或顯著頻率與震源距離的相關性，水平向比垂直向有較高的相關係數。經計算垂直、南北、東西三方向顯著頻率的平均值分別為7.57Hz、7.30Hz及6.57Hz。
2. 最大振幅譜值與芮氏規模有正相關的關係，亦即最大振幅譜值隨著芮氏規模的增加而增加，但並不是規模最大的最大振幅譜值最高，還與震源距離有關。
3. 使用單站頻譜比法去分析高雄小林地

區的場址特性，南北/垂直與東西/垂直顯著頻率的平均值分別為 8.24 ± 2.91 Hz及 7.15 ± 2.43 Hz。

4. 最大振幅譜比值與芮氏規模及震源距離呈現非線性效應，會隨著芮氏規模及震源距離的增加而減少。此結果說明強震與弱震的放大函數會有所差異。
5. 南北(NS)對垂直方向(V)以及東西(EW)對垂直(V)方向最大振幅譜比值的平均值分別為11.4與13.6。東西(EW)對垂直(V)方向的最大振幅譜比值約為4-20倍，但因為其場址效應產生了強烈的共振效應，最大振幅譜比值可達50-60倍，在南北(NS)對垂直方向(V)的最大振幅譜比值亦有類似的結果。

七、誌謝

本研究所使用之強震資料來自中央氣象局，在此謹表謝忱。感謝兩位審查委員的寶貴意見，讓本文內容更加充實。本研究經費由國科會贊助，計畫編號NSC99-2116-M-244-001，特表謝忱。

八、參考文獻：

- Chen C. C., J. J. Dong, C. Y. Kuo, R. D. Hwang, M. H. Li, C. T. Lee, R. Han, the Morakot Team, 2010, Kinematics of the tragic Shialin debris avalanche in Taiwan reconstructed by geophysical, geological and simulated evidence. (submitted to *Nature*).
- Lee, C. T., C. T. Cheng, C. W. Liao, and Y. B. Tsai., 2001, Site classification of Taiwan free-field strong-motion stations, *Bull. Seis. Soc. Am.*, 91, 1283-1297.
- Liu, K. S., T. C. Shin and Y. B. Tsai, 1999. A free field strong motion network in Taiwan: TSMIP, *Terr. Atmos. Ocean*, Vol. 10, No 2, 377-396.
- Liu, K. S. and Y. B. Tsai, 2005, Attenuation Relationships of Peak Ground Acceleration and Velocity for Crustal Earthquakes in Taiwan., *Bull. Seis. Soc. Am.* Vol. 95, No3,1045-1058.
- Nakamura, Y., 1989. A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface using Microtremor on the Ground Surface, *Rep. Railway Tech. Res. Inst. Japan*, Vol. 30, No. 1, pp. 25-33.
- Wen, K. L., H. Y. Peng, Y. B. Tsai, and K. C. Chen, 2001, Why 1G Was Recorded at TCU129 Site During the 1999 1Chi-Chi, Taiwan, Earthquake, *Bull. Seis. Soc. Am.*, 91, 1255-1266.
- Wen, K. L., T. M. Chang, C. M. Lin, and H. J. Chiang, 2006, Identification of nonlinear site response using the H/V spectral ratio method, *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 17, 3, 533-546.
- Wen, K. L., C. M. Lin, H. J. Chiang, C. H. Kuo, Y. C. Huang, and H. C. Pu, 2008, Effect of surface geology on ground motions: The case of station TAP056 - Chutzuhu Site, *Terr. Atmos. Ocean*, Vol. 19, No.5, 451-462.
- 古美鈴,2001,高屏地區場址效應之探討,國立中央大學地球物理研究所碩士論文,共117頁。
- 李錫堤、董家鈞、林銘郎,2009,小林村災變之地質背景探討。地工技術,第122期,第87-94頁。

- 林孝維,2004,利用傅氏振幅譜比法分析全臺灣強震站的場址,國立中央大學地球物理研究所碩士論文,共217頁。
- 游峻一、蕭開平、胡志昕、李正兆、劉興昌,2009,莫拉克風災後(新開部落、小林村)地質調查及大體搜尋初步成果,災害防救電子報第050期。
- 葉永田,2000,九二一集集大地震後續短期研究告—嘉南與高屏地區微地動研究,共331頁。
- 國家災害防救科技中心,2009,莫拉克颱風概述。地工技術,第121期,第75-82頁。
- 楊偉甫、葉純松、連上堯、侯秉承、黃崇仁、李民政、李怡德,2010,曾文水庫越域引水工程於莫拉克颱風後所面臨之課題。地工技術,第126期,第29-38頁。
- 潘國樑,2010,地工小百科—小林地區的走勢滑動與洋蔥狀剝離理論。地工技術,第125期,第105-108頁。
- 劉坤松、辛在勤、李泮鑑、蔡義本,1994,中央氣象局強地動觀測計畫—基本自由場強震儀比較分析,氣象學報第三十九卷第三期,第132-150頁。
- 劉坤松和蔡義本,2007,以921集集地震之建築物強震資料探討大樓高層震度的放大效應,建築學報第61期,第151-173頁。

Analysis of Seismic Strong Ground Motion in Xiaolin Area, Kaohsiung

Kun-Sung Liu

General Education Center & Hazard Mitigation Research Center, Kao Yuan University

ABSTRACT

To investigate the strong ground motion characteristics, including the source, path, and site effect, in Xiaolin area, Kaohsiung is the purpose of this paper. Fifty-two strong motion records with magnitude ranging from 2.8-7.1 were collected from the Taiwan Strong-Motion Instrumentation Program conducted by the Central Weather Bureau of Taiwan, R.O.C. In strong motion records, the ratio of Fourier amplitude spectrum (FAS) component in the horizontal to that in the vertical is first found to decay with magnitude on Richter scale and hypocentral distance and interact nonlinearly with them. The average values of FAS ratio in north-south (NS) and east-west (EW) to the vertical component are 11.4 and 13.6, respectively, and the predominant frequencies in NS and EW components are about 8 Hz and 7 Hz, respectively. In addition, FAS ratio appears significantly high values of 50-60 in response to the resonance of seismic excitation.

Key words: Xiaolin, strong ground motion, site effect, the resonance of seismic excitation

從氣候觀點探討影響臺灣颱風的定義問題

李清滕、盧孟明

中央氣象局

摘 要

本報告提出一個適於氣候研究之影響臺灣颱風判斷方法，重新畫定邊界作為辨識標準，認定進入此範圍的颱風為影響臺灣颱風。降雨是颱風對臺灣最重要的影響。分析1970-2009年6-10月間所有颱風中心位置與臺灣測站的距離以及當時測站所觀測的颱風降水量，發現降雨量會隨颱風中心離測站距離愈遠而下降，當距離超過300公里之外，降水量則無明顯變化。因此，以臺灣海岸邊界形狀為基準，往外擴展300公里，可作為界定影響臺灣颱風的範圍。當颱風中心進到此範圍內，且中心最大風速有達33 knots以上，則稱之為影響臺灣颱風。比較此新定義300公里範圍的颱風個數與Chu et al.(2007)及Lu et al.(2010)的颱風個數判斷方法，發現根據新定義統計的颱風降雨量比較有代表性，颱風個數也較符合中央氣象局官方發佈之侵臺颱風數據，並且無論在颱風的移動路徑方面，或是因颱風而造成的降水量或災情損失方面，均比以往的定義更能反應出實際的影響。本文的定義若用在颱風氣候研究與預測模式發展，應可獲得對臺灣較有應用價值的結果。

關鍵詞：颱風、颱風個數、侵臺颱風個數

一、前言

臺灣地區平均每年會受到3-5個颱風的侵襲，且颱風所帶來的降雨量是年總雨量的主要貢獻之一，然而其巨大降雨量往往會造成臺灣地區有重大災情發生(Chen and Chen 2003; Chen et al. 2007; Chen et al., 2007; Wu and Kuo 1999; Wu et al., 2002)。謝等人(1998)發現過去中央氣象局對於侵臺颱風定義有著不同的標準，為了讓侵臺颱風個數符合量化、具有預報上意義、不同年代之侵臺個數要有一致性以及考慮颱風帶來的災害，所以重新定義了侵臺颱風個數。此新定義認為侵臺颱風

的辨識需要滿足以下三個條件，(1)各平地測站所受到颱風風力達到放假條件為主要標準，即一地平均風達到七級風(13.9 m/s)以上或陣風達到11級風(28.5 m/s)以上；(2)以臺灣本島為中心，設立一個正方形範圍(118~124°E、20~27°N)，在此範圍內達到放假條件之颱風；(3)颱風對臺灣地區有產生災害。謝等(1998)利用此條件建置了百年歷史颱風資料庫(<http://photino.cwb.gov.tw/tyweb/mainpage.htm>)。此侵臺颱風的定義是以臺灣氣象測站的風速為基準並參考是否有災害發生，不是以國際上慣用的颱風資料庫為基礎，而且由於颱風災害的認定有相當的隨機性，也就是同樣的

氣象條件在沒有人活動的地方就不會有災害，因此會影響到長期變化的分析結果。近年來氣候問題受到廣泛重視，氣候變化對颱風的影響更是社會大眾的關心重點，為此有必要重新思考合適於氣候分析研究與預報模式發展及校驗等方面應用的影響臺灣颱風定義方法。

Chu et al. (2007)與Lu et al. (2010)發展侵臺颱風個數統計預報方法所使用的侵臺颱風定義都是以颱風中心位置進入 119°E - 120°E ; 21°N - 26°N 範圍內，且中心風速有達到33 knots以上為標準，風速資料則是根據美國海軍負責的聯合颱風警報中心(JTWC)或是日本氣象廳負責的世界氣象組織區域特定氣象中心(RSMC)的資料。在區域範圍的選取上，這兩篇論文均參考氣象局預報中心長期預報課的做法(朱寶信, 2006)，沒有針對範圍本身多作探討。然而2010年10月的梅姬颱風雖然中心未進入定義的範圍(如圖1所示)，卻在臺灣東部造成重大災情，氣象局也曾對此颱風發布陸上颱風警報單。另一方面，2009年9月的盧碧颱風雖然中心進入了此定義範圍內，但中央氣象局歷年颱風警報單紀錄並未顯示曾對此颱風發佈任何警報訊息。如何界定一個合適的區域範圍應用於侵臺颱風的定義顯然有商榷的必要。

本文將提出一個畫定邊界的方法，最大的優點為考慮了臺灣海岸線形狀與颱風為臺灣帶來的強降雨，同時避免把邊界定在易有颱風短暫經過的地點，以改善前述定義的缺點。論文安排如下，第二節介紹本研究使用的資料，第三節討論區域範圍的決定，第四節討論依本文方法判定之颱風個數和以往結果相比的優點，第五節為本文的結論與綜合討論。

二、使用資料

本研究使用1970-2009年每6小時的颱風最佳路徑資料，資料來源是Joint Typhoon Warning Center (JTWC, https://metocph.nmci.navy.mil/jtwc/best_tracks)，資料格式為颱風中心位置之經緯度以及颱風中心風速大小。另外也參考中央氣象局官方所發佈歷年來所有颱風警報單(<http://www.cwb.gov.tw>)，此警報單分為海上及陸上颱風警報單，警報單的發佈原則有三點，(1)預測颱風之7級風暴風範圍可能侵襲臺灣或金門、馬祖100公里以內海域時之前24小時，應即發布各該海域海上颱風警報。(2)預測颱風之7級風暴風範圍可能侵襲臺灣或金門、馬祖陸上之前18小時，應即發布各該地區陸上颱風警報。(3)颱風發生於臺灣及金門、馬祖近海，或颱風之暴風範圍、移動速度、方向發生特殊變化時，得即發布海上或陸上颱風警報，必要時並得同時發布海上及陸上颱風警報。

測站資料方面，使用臺灣局屬測站之每小時降雨量，時間長度為1970-2009年，單位為mm/hr，使用的局屬測站有八個，分別為臺北、臺中、高雄、恆春、花蓮、臺東、阿里山以及日月潭測站。另外也使用中央氣象局第一組提供之1985-2009年臺灣地區歷年災害統計與災害分類統計資料，此資料為統計每年臺灣地區受颱風影響而有災情發生所換算成金額上的損失。

三、影響臺灣颱風之界定

如何畫定颱風影響臺灣地區的範圍是本研究的核心問題。由於在臺灣附近活動的颱風才能直接造成對臺灣的影響，所以不能不考慮臺灣南北狹長之海岸線形狀。

Megi (2010 Oct) & Lupit (2009 Sep) Typhoon Track

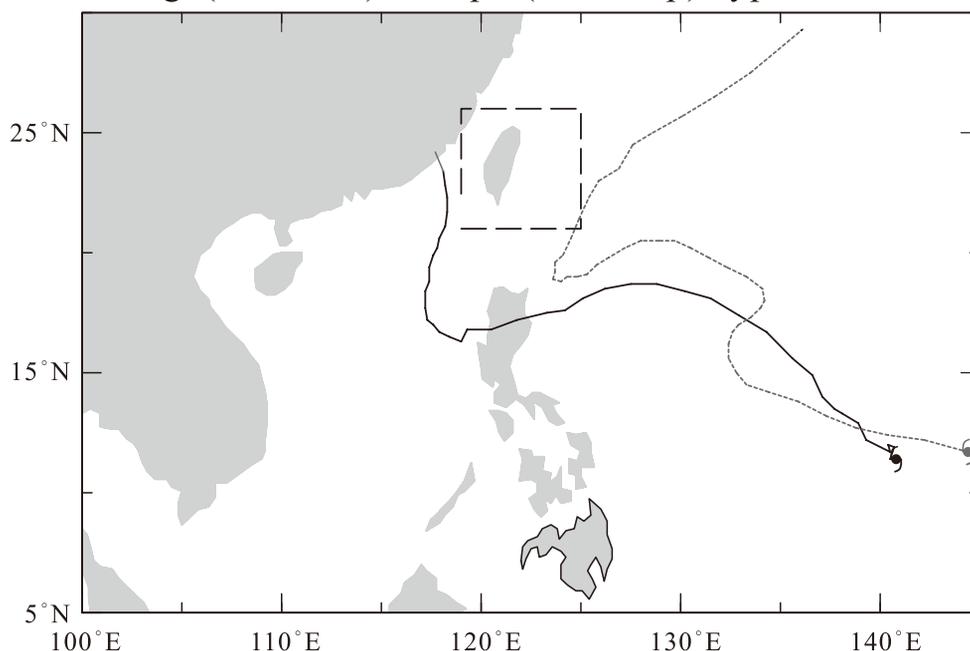


圖1. 2010年10月梅姬颱風(實線)及2009年9月盧碧颱風(點線)之颱風路徑圖。圖中X-Y軸代表經緯度。

Fig 1. Typhoon track of typhoon Megi on October 2010 (solid line) and typhoon Lupit on September 2009.

以往使用長方形設定的範圍(朱寶信,2006)不太符合臺灣海岸線形狀,而且容易把一些短暫經過設定範圍的颱風判斷為侵臺而造成個數上的誤差。故首先以臺灣海岸線形狀為基準來設定範圍大小(圖2),探討此範圍大小與颱風個數之間的關係,進一步確定範圍的大小對颱風個數的變化是否穩定。圖3顯示從臺灣邊界擴展100公里到550公里之每增加50公里範圍內的颱風增加個數,藉此了解颱風個數隨範圍大小的變化特性,圖中可看到增加的颱風個數有兩個最大值,分別是在350公里以及500公里的範圍,顯示出從300增至350公里與從450增至500公里範圍時颱風增加個數達最大,表示300-350公里與450-500公里的

邊界很可能經過颱風活動頻繁區域,因此邊界的畫定以這兩個區間最不合適。由於颱風暴風半徑平均在二、三百公里左右,若以450公里的範圍為界線可能會把過多對臺灣沒有影響的颱風囊括進來,因此以300公里為界線是一個比較合理的選擇。

除了颱風個數分析之外,颱風對於臺灣地區所帶來極端的降雨量也是必需考量條件之一,特別是有時雖然颱風中心沒有登陸臺灣本島,但是帶來的極大降雨量也會在臺灣地區造成嚴重的災損,因此有必要分析颱風降雨量與範圍大小之間的關係。颱風降雨量是指颱風中心與測站距離 r 時在該測站測量到的降雨量(Kubota and Wang, 2009)。本研究範圍設定以臺

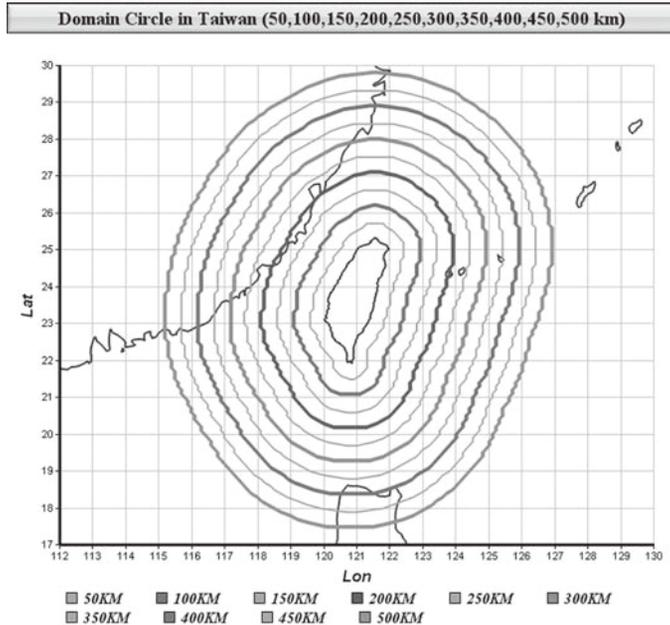


圖2. 根據臺灣地形邊界所定義之50至500公里的範圍，圖中每個間距為50公里，X-Y軸代表經緯度。

Fig 2. The proposed 50-500 km domains based on the shape of Taiwan coastline. The distance interval is 50 km.

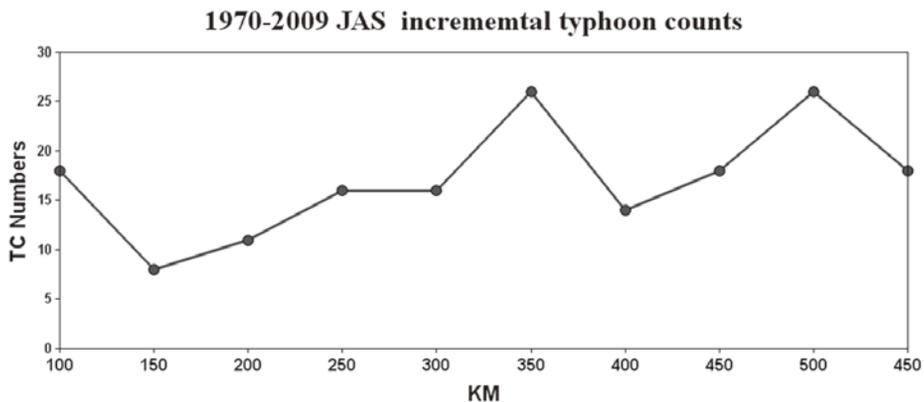


圖3. 1970-2009年6-10月期間，所有颱風通過各個範圍內之颱風增加個數，增加個數代表此範圍內的所有颱風個數減去上個範圍內的颱風個數。圖中X軸各個範圍，單位為公里，Y軸則是個數，單位為number。

Fig 3. The incremental typhoon counts with the distance away from Taiwan coastline based on the typhoon data during June-October from 1970-2009. The domains used for counting the typhoons are presented in Fig. 2.

灣海岸線形狀為基準，並參考Kubota and Wang (2009)之颱風雨的判斷方式，分析臺灣測站雨量與 r 的關係以決定影響臺灣颱風區域範圍界定的判斷標準。

本研究分析了8個臺灣測站的 r 與颱風降雨量的關係。由於使用的JTWC之颱風路徑資料為每6小時一筆，因此對應的颱風降雨量是以6小時累積雨量計算，例如颱風中心距離臺北測站100公里時，此時颱風觀測的小時為12時，則07至12小時內的測站降雨總和即為颱風降雨量。圖4顯示1970至2009年6-10月所有颱風中心位置和臺北、臺中、高雄、阿里山、花蓮、臺東、恆春及日月潭測站之距離(r)以及當時測站觀測颱風降雨量之盒鬚圖，此盒鬚圖中柱狀圖表示所有歷史資料中25%以及75%的值，而中間則是代表50%即中位數，上(下)邊界則是75%(25%)的值加上(減去)75%與25%差值之1.5倍。從臺北測站距離與雨量分佈圖中，可明顯看到降雨量隨著颱風中心離測站距離愈遠而愈小，當距離超過300公里範圍之外，雨量明顯變小。臺中測站可看在200公里內，颱風降雨量都維持在一定的高值，一旦超過200公里外才迅速減少，也是超過300公里外降雨量迅速減弱。高雄、恆春及花蓮測站的主要颱風降水量都集中在150公里範圍之內，而超過大約250公里範圍外，雨量變化則不顯著。在臺東測站方面，同樣是在250-300公里範圍內降水量最少，另外在高山測站中的阿里山與日月潭測站顯示出，颱風主要降水量集中在150公里之內，超過150公里外，降水迅速減少。總和各測站的分析結果中，可以得到不同測站由於所處地理環境不同，其颱風距離及降水量的變化特性也會略有不同，但大致可以歸納出臺灣地區因颱風所造成的降

水量大約都集中在300-350公里之內的範圍，超過此範圍之外，颱風降雨則不顯著。

圖5顯示1970至2009年6-10月間，所有颱風中心在橫軸顯示的距離範圍內時臺灣八個測站觀測之全部測站總降水量，圖中可以看到隨著範圍的擴大，降水量也逐漸增加，到了300公里時颱風降水量達到最大值，之後隨著距離的增加，颱風降水量略為減少，由此可知從颱風降雨量看來，以300至350公里的距離界定影響臺灣颱風區域範圍相當合理。

接下來要進一步分析300與350公里兩者之間那一個選擇比較好。1970-2009年間若以350公里為邊界要比300公里多出34個影響臺灣的颱風，佔全部個數之14.2%(350公里全部颱風個數為240個)，颱風路徑圖顯示在圖6。從路徑中可看到這些颱風大都從臺灣的南邊及東北方地區通過，颱風中心在350公里範圍內所停留的時間並不長，另外從300公里颱風降水量之盒鬚圖中(圖6右上角)可看到，此34個颱風之颱風降水量，只有一個颱風(1988年9月克蒂颱風，降水量為718.6mm)降水量在歷史百分位的50%-75%範圍，而有7個颱風降水量屬於25%-50%，剩下的26個都在25%以下，由此可知相對於300公里若把範圍擴大至350公里所增加的颱風在雨量方面多數對臺灣並無顯著影響。

由以上分析可得到以臺灣海岸線形狀往外擴展300公里作為影響臺灣颱風的界定標準，不但符合臺灣邊界的形狀，也顧及颱風降雨量判斷是否合理，因此不失為一個理想的選擇。

四、300公里定義的優點

本研究建議以臺灣邊界往外擴展300

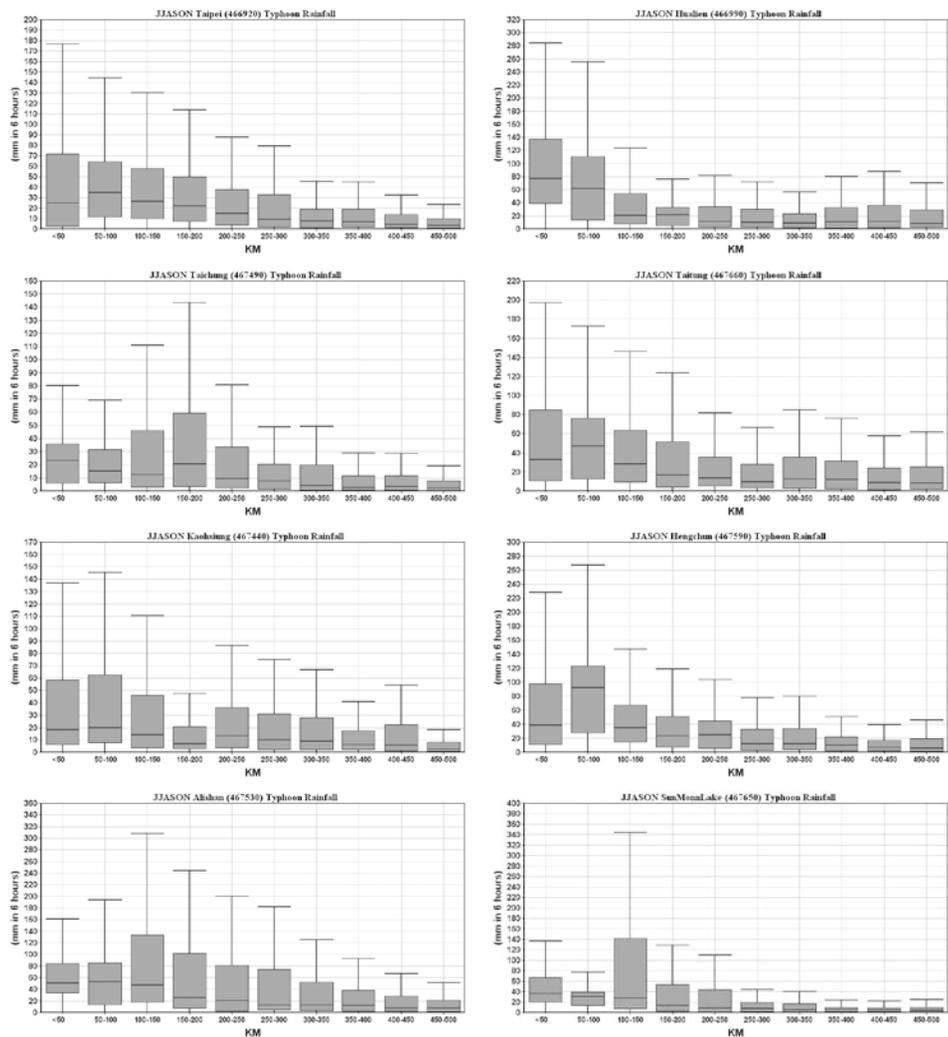


圖4. 臺北、臺中、高雄、阿里山、花蓮、臺東、恆春、日月潭測站(由上至下、由左至右)之颱風中心位置與測站距離(r)以及當時測站觀測的颱風降雨量之盒鬚圖。圖中X軸代表距離(KM)，Y軸代表雨量(mm/6hr)，柱狀圖之上下邊界代表75%與25%值，中間則是50%值，上(下)邊界則是75%值(25%值)加上(減去)75%與25%之差值的1.5倍。

Fig 4. The relationship between the distance domain (Fig. 2) and the mean rainfall amount during the typhoon influence period defined as the typhoon center is located within the distance domain. The rain is measured at 8 meteorological stations: Taipei, Taichung, Kaohsiung, Alishan, Hualien, Taitung, Hengchun, and Jihyuehtan (from top to bottom and from left to right) The mean rainfall per typhoon (total rainfall amount divided by the total influence hours, with the interval of 6 hours, of each typhoon) is represented in the conventional box-and-whisker plot which shows the median, upper quartile, lower quartile, sample maximum and sample minimum of the samples. The x coordinate shows the distance (km) of the distance domain and y coordinate shows mean rainfall per typhoon (mm/six-hours).

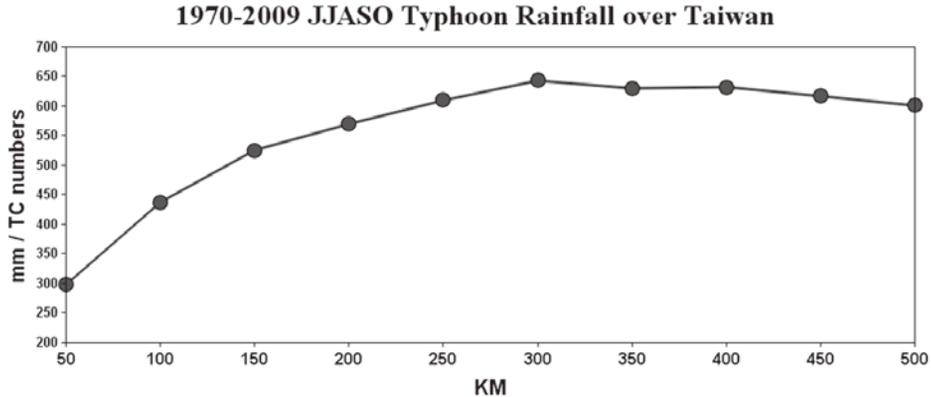


圖5. 1970-2009年6-10月間，所有颱風中心在橫軸顯示的距離範圍內臺灣8個測站(同圖4)的總降水量，圖中X軸為各個範圍(KM)，Y軸則是降水量 (mm/ TC numbers)。

Fig 5. The mean eight-station (Fig. 4) total rainfall amount per typhoon with respect to the distance of the distance domain (Fig. 2). The analysis period is from June to October during the period of 1970-2009.

公里為界定影響臺灣颱風的範圍，判定中心進入此範圍且中心最大風速在颱風生命週期間有達33Knots的記錄之颱風為「影響臺灣颱風」。比較本文(300公里)與以往長方形範圍定義(朱寶信 2006; Chu et al. 2007; Lu et al. 2010)的差別，可發現在些微變動邊界本定義判定的颱風個數比較不受影響。西北太平洋所有颱風路徑分佈頻率圖(圖7) 顯示颱風移動主要有三大路徑，一條是由西太平洋颱風往西移動經過海洋大陸而進入到南海，另一條則是從菲律賓海往西北方向移到而從臺灣北邊通過，第三條則是直接往北而進入到日本區域。臺灣地區的東南方海域上有三個主要颱風經過的區域，分別為121°E、21°N; 123°E、21.5°N以及124-125°E、21°N區域。以往的長方形範圍切過其中兩個主要颱風移動路徑，也就是說邊界正位於颱風經常活動的區域，從大尺度條件觀點來看在邊界內與邊界外的颱風不會有明

顯的差異，若依此分析多颱與少颱年的環流場則比較困難。反觀300公里範圍的定義，因避開124-125°E、21°N區域且涵蓋121°E、21°N附近區域，沒有這種混淆的問題。

圖8a顯示長方形範圍比300公里增加的颱風個數路徑圖，圖8b顯示300公里範圍比長方形範圍增加的颱風個數路徑圖，圖8c則呈現了兩種範圍內之颱風降水量的統計結果。長方形範圍比300公里範圍增加11個颱風，佔全部長方形的個數約6.3%，而300公里範圍多增加44個颱風個數，佔全部300公里範圍內的個數約21.3%，顯示僅有很少數的颱風是包含在長方形範圍但沒有在300公里範圍內的。路徑圖顯示長方形範圍多增加的颱風其路徑略掃過長方形右邊，停留時間並不長，這些颱風的降水量佔整體降水量極少部份(圖8c)。反觀300公里範圍比長方形範圍多增加的颱風個數中，其移動路徑分布廣

1970-2009 JJASO Typhoon Track (350km-300km)

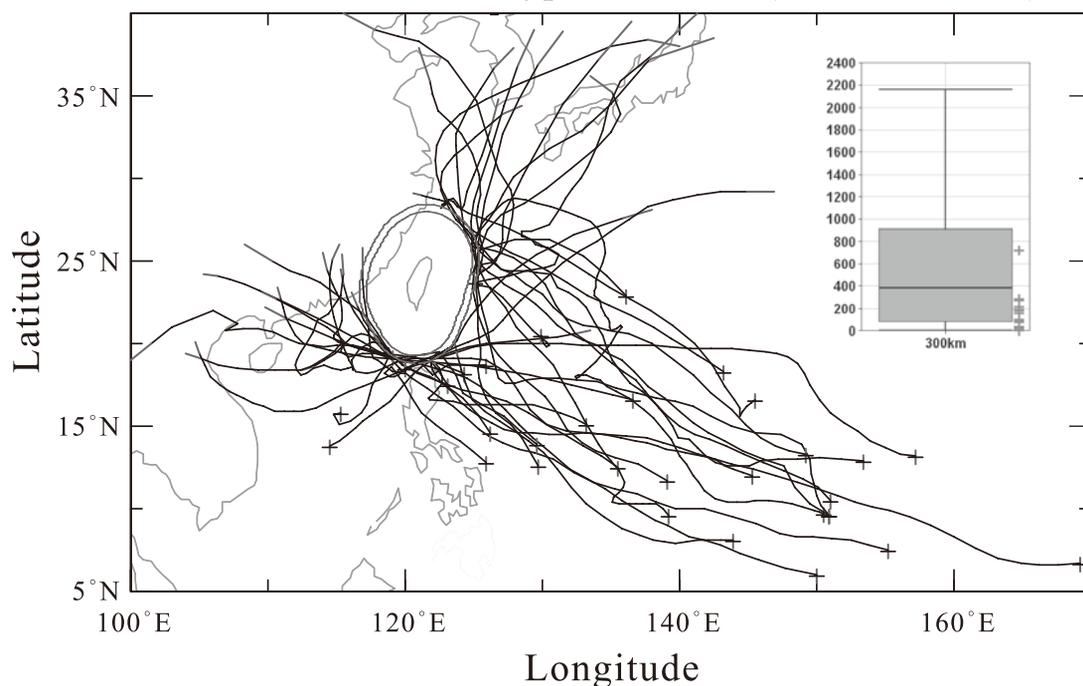


圖6. 1970-2009年期間，350公里範圍內的颱風比300公里範圍內多出來的颱風個數之路徑圖，圖中+號代表颱風初始位置。圖中右上角代表300公里範圍內之所有颱風降水量的盒鬚圖，盒鬚圖中的+號代表此多出來颱風個數之颱風降水量。

Fig 6. The difference between the distance domains of 350 km and 300 km. The first record of the typhoons are marked by '+' in the typhoon tracks. The accumulated rainfall amount per typhoon of the extra typhoons counted by the 350 km domain is presented in the box-and-whisker plot of the typhoons within the 300 km domain.

留的時間也較長，颱風降水量分布於百分位0-75之間，甚至有一個颱風降水量超過75%(2009年10月芭瑪颱風)，顯示長方形定義在颱風降雨方面略有不足。

另外分析1970至2009年6-10月間長方形範圍內之颱風個數、300公里範圍內之颱風個數、中央氣象局發佈陸上颱風警報個數，以及每年因颱風所造成災情損失金額之時間序列圖(圖9)。從圖中可以明顯看到300公里範圍的颱風個數比長方形的個數要多，長方形範圍的全部颱風個數

有145個，而300公里範圍則是增加至173個颱風(增加28個)。從中央氣象局發佈陸上警報的颱風個數中也明顯比長方形範圍的個數要多，全部為164個颱風個數，比長方形範圍多19個，但卻比300公里範圍少9個，顯示300公里範圍的個數誤差較少。表1顯示四個時間序列之相關係數表格，從表中可看到長方形範圍、300公里範圍以及氣象局發佈陸上警報之颱風個數，此三者的相關係數均有達0.7以上，代表三者的颱風個數年際變化均相同，但

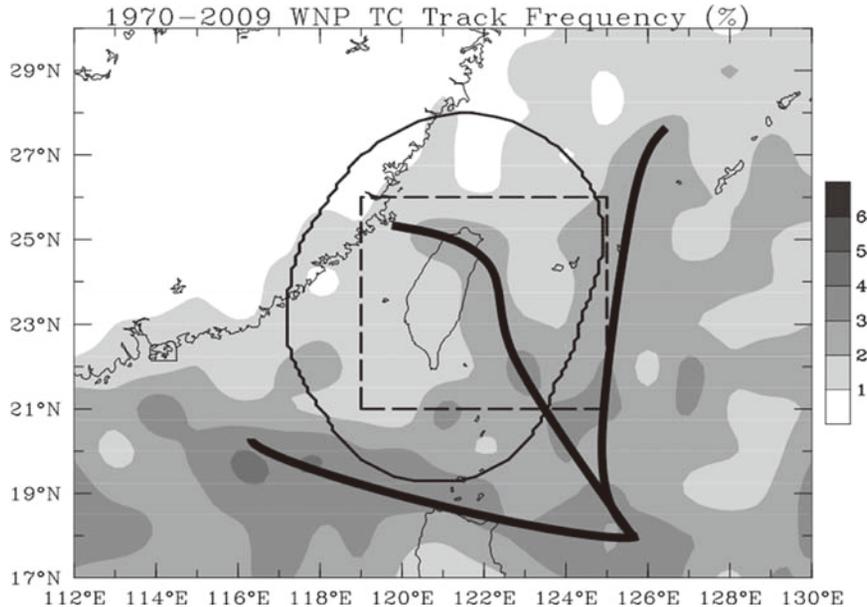


圖7. 1970-2009年西北太平洋颱風路徑分佈之頻率圖，圖中長方形範圍為190°E-120°E; 21°N-26°N，而圓圈代表300公里範圍，圖中黑色粗實線代表颱風主要三大路徑。

Fig 7. The rectangular and 300 km domains defined in the text and the typhoon frequency (shaded) distribution. The three typhoon major paths over the northwestern Pacific are marked by the thick lines.

從颱風災損金額中看到，此三個颱風個數分別與災損金額的相關係數為-0.06、0.23與0.25，此相關係數明顯偏低且沒有通過統計檢定，從時間序列圖中可看到在1996年及2009年均有發生災損金額的極大值，此兩年臺灣地區分別受到賀伯颱風及莫拉克颱風所帶來的巨大降水量，造成了臺灣地區有嚴重的災情損失(Wu et al., 2002; Zhang et al., 2010)。假如去除掉此兩年災損金額的極端值資料後，其相關係數可高達0.4、0.6與0.69，且此相關係數均有通過統計檢定，顯示出除了這兩年的極端個案外，其颱風個數和災損金額都有很高的相關性，而300公里範圍所定義之颱風個數比長方形範圍更符合中央氣象局所發佈陸上颱風警報之個數，也更為客觀化。

五、結論與討論

本研究嘗試從影響臺灣的颱風個數、颱風降雨量以及以臺灣海岸形狀為依據提出300公里範圍的界定標準，可應用在颱風氣候研究與氣候預測模式發展等方面工作，並可使用如JTWC一類的國際慣用的颱風進行分析和預報發展。

分析1970-2009年期間所有颱風中心位置與測站距離以及當時颱風降水量的關係中，得到颱風主要影響臺灣地區的降雨大都集中在距離測站300公里的範圍之內，超過此距離外，降雨量則無明顯變化，另外分析此300公里範圍內的颱風個數大都符合中央氣象局所發佈陸上颱風警報單的颱風個數，所以本研究以臺灣海岸

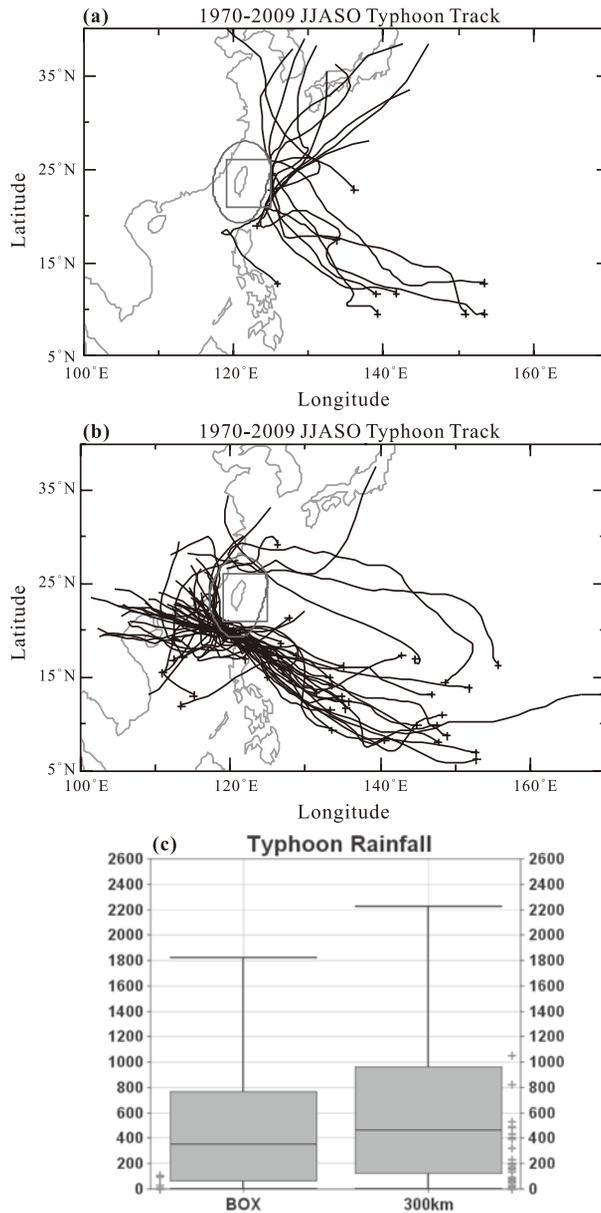


圖8. 1970-2009年間，長方形範圍內比300公里範圍內多出來的颱風個數之路徑圖(a)，長方形範圍內比300公里範圍內多出來的颱風個數之路徑圖(b)以及兩者範圍內之颱風降水量盒鬚圖(c)。路徑圖中圓圈代表300公里範圍，矩形代表長方形範圍，+號代表颱風初始位置，盒鬚圖中的+號代表多出來颱風個數之颱風降水量。

Fig 8. The difference between the rectangular and 300 km domains, (a) the typhoons counted in the rectangular but not counted in the 300 km, (b) the typhoons counted in the 300 km but not in the rectangular and (c) the box-and-whisker plots of the typhoons of the rectangular (left) and 300 km (right) domains, the “+” marks the typhoons not counted in the reference domain but counted in the other.

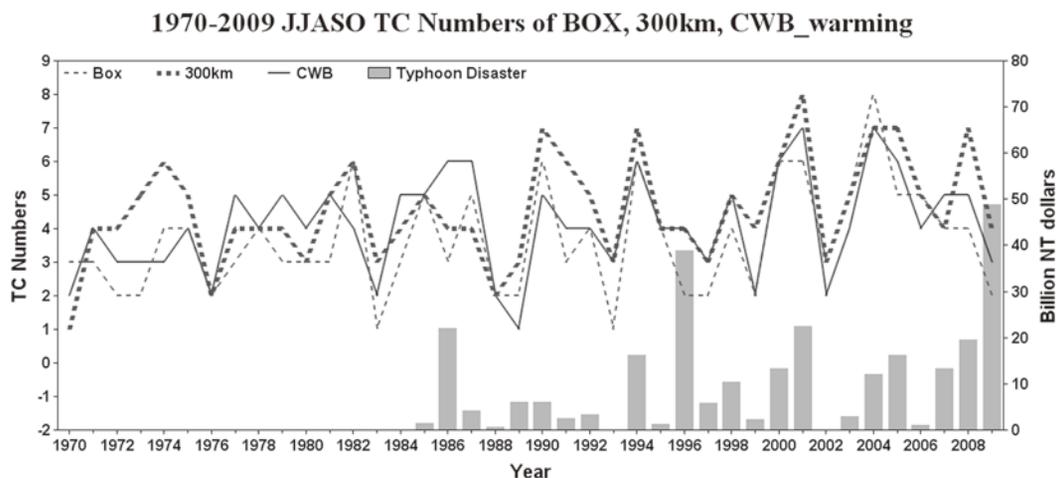


圖9. 1970-2009年6至10月之長方形範圍內颱風個數(Box，細點線)、300公里範圍內颱風個數(300km，粗點線)、中央氣象局發佈陸上警報單之颱風個數(CWB，實線)以及因颱風所造成災情損失金額(Typhoon disaster，柱狀圖)之時間序列圖。圖中X軸代表年份，Y軸代表颱風個數(左邊Y軸)與災損金額(右邊Y軸)。

Fig 9. The time series of the annual typhoon counts within the rectangular (thin dot line) and 300 km (thick dot line) domains and the number of typhoons that CWB issued typhoon land warning or sea alert (solid line). The typhoon caused annual economic loss (unit: Billion NT Dollars) is presented in bars.

表1. 長方形範圍(BOX)、300公里範圍內(300km)之颱風個數、中央氣象局發佈陸上警報之颱風個數(CWB)與颱風造成的金額損失(Disaster)之相關係數表格。時間長度為1970-2009年6至10月資料。

Table 1. The correlation of the typhoon counts in the rectangular box domain (BOX) shown in Fig. 1, the 300km domain (300km) shown in Fig. 1, the number of typhoons that CWB issued typhoon land warning or sea alert (CWB) and the typhoon caused annual economic loss (Disaster). The typhoon data used for the calculation is during the months of Jun-Oct from 1970-2009.

Corr	BOX	300km	CWB	Disaster
BOX	1			
300km	0.74	1		
CWB	0.73	0.70	1	
Disaster	-0.06	0.21	0.25	1

邊界形狀為基準，向外擴展至300公里來當作颱風活動主要影響臺灣地區之客觀範圍，此新定義範圍比舊定義之長方形範圍(119°E-120°E; 21°N-26°N; Chu et al. 2007 & Lu et al. 2010) 更合理並更具應用價值，不但符合臺灣南北狹長走向的地理分佈特徵而且颱風擦過邊界的機率明顯偏少，另外也符合颱風降雨量對臺灣地區造成的影響。分析1970-2009年期間每年通過此新定義範圍之颱風個數，得到此300公里範圍颱風個數比舊定義方法和中央氣象局發佈陸上警報颱風個數的誤差較少，且相關係數較高。此外比較歷年來因颱風造成的災情損失金額中，同樣也得到此300公里的颱風個數比舊定義方法有較高的相關性。

未來將以本文提出的定義範圍研究影響臺灣的颱風氣候長期變化，發展颱風氣候預測模式，以及推估氣候變遷對影響臺灣颱風的影響。

六、參考文獻

- 朱寶信，2006：西北太平洋颱風路徑機率月與季預報。交通部中央氣象局委託研究計畫成果報告CWB95-3M-06, 196-219。
- 謝信良、王時鼎、鄭明典、葉天降，1998：百年(1897-1996)侵臺颱風之統計分析及應用，中央氣象局之百年颱風資料庫。
- Chen, C.-S., and Y.-L. Chen: 2003: The rainfall characteristics of Taiwan. *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 1323-1341.
- , ——, C.-L. Liu, P.-L. Lin, and W.-C. Chen, 2007: Statistics of heavy rainfall occurrences in Taiwan. *Wea. Forecasting*, **22**, 981-1002.
- Chen, S.-H., P.-H. Lee, M.-H. Yao, and Y. Shen, 2007: The agro-meteorological environment and disasters occurring potential in the central region of Taiwan. *Crop Environ. Bioinformatics*, **4**, 345-352.
- Chu, P.-S., X. Zhao, C.-T. Lee, and M.-M. Lu, 2007: Climate Prediction of Tropical Cyclone Activity in the Vicinity of Taiwan Using the Multivariate Least Absolute Deviation Regression Method. *TAO*, **18**, 805-825.
- Kubota, H, B. Wang, 2009: How Much Do Tropical Cyclones Affect Seasonal and Interannual Rainfall Variability over the Western North Pacific. *J. Climate*, **22**, 5495-5510.
- Lu, M.-M. P.-S. Chu and Y.-C. Lin, 2010: Seasonal Prediction of Tropical Cyclone Activity Near Taiwan Using the Bayesian Multivariate Regression Method. *Wea. Forecasting*, **25**, 1780-1795.
- Wu, C.-C. and Y.-H. Kuo, 1999: Typhoon Affecting Taiwan: Current Understanding and Future Challenges. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **80**, 67-80.
- , T.-H. Yen, Y.-H. Kuo and W. Wang, 2002: Rainfall Simulation Associated Typhoon Herb(1996) near Taiwan. Part I : The Topographic Effect. *Wea. Forecasting*, **17**, 1001-1015.
- Zhang, F., Y. Weng, Y.-H. Kuo, J. S. Whitaker, and B. Xie: Predicting Typhoon Morakot's Catastrophic Rainfall with a Convection-Permitting Mesoscale Ensemble System. *Wea. Forecasting*, **25**, 1816-1825.

Defining the Tropical Storms/Typhoons Invading Taiwan by Influence Domain— a Climate Perspective

Ching-Teng Lee, Mong-Ming Lu
Central Weather Bureau, Taiwan, R.O.C.

ABSTRACT

A new method for defining the tropical storms/typhoons (TSs/TYs) invading Taiwan by determining the influence domain is proposed based on the geographic shape of Taiwan's coastline and the precipitation brought by TSs/TYs. The June-October data analysis of the stations over Taiwan area during 1970 and 2009 obviously indicates a downward trend of the accumulated rainfall amount with the distance between the stations and the TS/TY center. If the distance is greater than 300 km, such trend is not evident. Therefore, the boundary of the influence domain can be determined by extending 300 km outward of Taiwan's coastline. The proposed domain is more reasonable than the rectangular area of 21°N-26°N and 119°E-125°E that has been previously utilized (Chu et al. 2007; Lu et al. 2010) in terms of the better estimation of TS/TY-induced accumulated rainfall and the number of the TSs/TYs invading Taiwan officially released by the Central Weather Bureau. The new definition proposed here also appears better than the old ones in reflecting the real impact caused by the TS/TY track or the economic loss, and more practical for the climatological research of TSs/TYs and the development of forecast models.

Key words: typhoon, rainfall brought by typhoon, typhoons invading Taiwan

臺灣梅雨期開始及乾溼之指標研究

陳孟詩

中央氣象局氣象預報中心

摘 要

本研究先了解 Wang et al. (2004) 所建議之南海夏季季風肇始指標是否適用於臺灣梅雨期開始，同時考慮 Wang et al. (2008) 所建議之東亞夏季季風強度指標是否亦可量度臺灣梅雨期之乾溼，之後嘗試尋找一組可適用於臺灣梅雨期開始及量度梅雨期乾溼之指標，並與 Wang et al. (2004) 及 Hung and Hsu (2008) 所建議的南海夏季季風或東亞夏季季風肇始日期比較。

研究結果發現，隨著東亞夏季季風的推進，各地季節轉換的時間並不盡相同，季風行進路徑不同並不代表季風並未肇始，南海夏季季風肇始指標也許可以代表南海地區的季風爆發，但無法顯現臺灣附近由冬季季風轉變為夏季季風的大尺度特徵，相對地，垂直風切指標可能較適合描述此大尺度環流系統的重大變化。當垂直風切轉變時，若臺灣附近同時存在著低層水平風切的轉變，也就是由反氣旋轉變為氣旋，如此會增加風切渦度，使得環境變得不穩定，而造成臺灣容易有豪大雨發生。換句話說，當大尺度環流系統已經準備好轉變，而局地環境亦同時配合著提供不穩定的條件，則臺灣開始進入季節轉變（即梅雨期開始），進一步意味著之後發生豪大雨的機會將提高。

關鍵字：臺灣梅雨、肇始、乾溼

一、前言

臺灣地處歐亞大陸和太平洋的交界處，冬季盛行東北季風，夏季盛行西南季風，東亞季風與臺灣地形複雜的交互作用，使得區域氣候呈現多樣性的風貌。以臺灣西南部為例，因地處北迴歸線以南，全年季節並非區分為中緯度氣候的四季，而是接近熱帶氣候的乾季（10月至隔年4月）和溼季（5月至9月），其中溼季雨量又呈現雙峰分布，也就是梅雨季（5月至6月）及颱風季（7月至9月）。由於乾溼季雨量比例約為1:7，對於水資源的分配

造成嚴峻的挑戰，同時也影響防災相關因應措施，因此能準確掌握到季節的轉換時間，就顯得特別格外重要。

過去多位學者曾對東亞夏季季風的肇始進行過相當多的研究（整理於表1），包括分析低層流場（胡等，1998；Chang, 1999；郭與林，2001；Hsu et al., 1999；Hung and Hsu, 2008）或風場（Yan, 1997；Wang et al., 2004）演變、分析對流活動（Tanaka, 1992；陳等，1996；Lau and Yang, 1997；林與林，1997）、結合流場與對流場（麥，1997；林等，2000）或風場與對流場（Chang and Chen,

表1、東亞夏季季風肇始定義。資料來源：郭與林（2001）、Wang et al. (2004)

Table 1. Definitions of East Asian summer monsoon onset (Kueh and Lin 2001, Wang et al. 2004).

作者	定義
Tanaka (1992)	GMS高雲雲量
Chang and Chen (1995)	主觀分析風和對流
陳等(1996)	對流雲帶由赤道北跳至10° -15° N、副高自南海撤離、西南氣流盛行於南海至華南沿海一帶
林與林 (1997)	南海的對流性雲型數量明顯驟增的時段為東亞夏季季風發展的瞬變期
麥 (1997) 林等(2000)	(1) 以南海緯向風場最大均方根值的位置為參考點，找出此點之850hPa緯向風場由負值突然轉變成較大正值的时间 (2) 夏季期間第一次出現850hPa緯向風場30-60天及12-24天低頻振盪同時呈現正相位發展之際，為季風肇始之可能日期 (3) 南海850hPa流線場由反氣旋式環流轉變為氣旋式環流，並有顯著增加的對流活動，擇定肇始日期
Lau and Yang (1997)	GPI EOF分析
Wang and Wu (1997)	(1) 南海中北部區域平均OLR<235W/m ² 持續6候 (2) 南海中南部區域平均緯向風>0.5m/s持續6候 (3) 兩者差1候以OLR為準。差距較大則取中間1候
Yan (1997)	(1) 南海北部850hPa或925hPa西南風持續至少5天，最大風速達到10m/s（香港附近）或是8m/s（中南半島）以上 (2) 南沙測站地面西南風至少持續5天 (3) 南海南部850hPa或925hPa西南風持續至少5天
胡等 (1998)	5-6月南海850hPa候平均流線場盛行源自印度洋的西南風或出現西風槽，且此後太平洋副高不再移入南海
盧 (1998)	5月1日後連續5天OLR<250W/m ² 、垂直風切及850hPa渦度場由負轉正，分別定其第1天為季風肇始日
Xie et al. (1998)	南海區域候平均OLR<235W/m ² ，且850hPa緯向風由東風轉為西風，需持續至少3候
Chang (1999)	4-6月850hPa流線場：副高第一次完全退出南海，被氣旋式的西南風（主要來自孟加拉灣）所取代，過渡期前後流場形勢至少需持續5天維持穩定不變
Hsu et al. (1999) Hung and Hsu (2008)	(1) 對4-6月850hPa 5日滑動平均流函數做EOF分析，EOF1空間分布顯示第一次過渡期時印度洋、南海及西北太平洋的低層大氣均由氣旋式環流所主控，陸地區域則以反氣旋式流場為主 (2) 逐年EOF1的PC由正值轉負值的2天之後為季風肇始過渡日期，且由正值轉負值當日為臺灣梅雨期肇始日期
郭與林 (2001)	(1) 逐日分析850hPa流場，定副高開始東退到季風槽完整建立時間為季風肇始日期，同時有對流活動發展 (2) 確認中緯度槽脊系統所伴隨之鋒面系統，並以JTWC最佳路徑追蹤熱帶擾動 (3) 以區域平均OLR和850hPa緯向風場及相對渦度的時序分析，佐證副高環流東退、西南風/季風槽的氣旋式環流發展過程。此外季風肇始後氣旋式環流需維持至少5天
Wang et al. (2004)	南海850hPa緯向風場（Uscs）： (1) 肇始當候Uscs>0 (2) 之後4候（包含肇始當候）Uscs至少需有3個為正值，且此4候Uscs總和需>1m/s

1995 ; Wang and Wu, 1997 ; Xie et al., 1998 ; Lu et al., 2000) ……等，上述研究的基礎在於亞洲夏季季風可區分為印度季風及東亞季風，而東亞季風的肇始最早始於南海 (Tao and Chen, 1987)。

然而過去關於東亞夏季季風肇始對臺灣梅雨期影響之研究，可供參考的資訊並不算多。Hung and Hsu (2008) 認為過去約半數的年份亞洲夏季季風是明顯轉變的，而此第一次明顯轉變與熱帶季內振盪有關，監測熱帶季內振盪活動應有助於預測臺灣梅雨期開始。盧 (1998) 指出當南海夏季季風肇始偏早時，東部5月偏乾機會小，但中部6月偏乾機會大；而南海夏季季風肇始偏晚時，東部5月偏乾機會大，但北部6月偏乾機會小。

由於亞洲夏季季風本身為一大尺度環流系統，在冬季季風轉變為夏季季風的過程中，隨著季風的進展，各地季節轉換 (孟加拉灣 / 中南半島雨季、華南前汛期 / 臺灣梅雨期、長江梅雨期 / 日本Baiu / 印度季風、韓國Changma) 的時間也不盡相同。根據監測東亞夏季季風的經驗，南海夏季季風肇始的早晚或東亞夏季季風的強弱，並不一定完全能代表臺灣梅雨期的乾溼。本研究嘗試由臺灣的角度出發，尋找能代表臺灣梅雨期開始的指標，期許能對臺灣梅雨期的監測預報作業有所幫助，進而提供防災單位較為豐富的資訊，以利其決策之形成。本文中梅雨期指的是臺灣由入梅至出梅的期間，與氣象局官方所稱梅雨季為5月至6月有些許差異。第二章將說明研究所使用的資料與方法，第三章討論研究初步成果，第四章則提出結論與建議。

二、資料及分析方法

研究所使用的資料為臺灣25個局屬氣象站日雨量及美國環境預報中心重分析日平均場 (NCEP/NCAR Reanalysis, Kalnay et al., 1996)，選取變數為850hPa及200hPa緯向風場，資料均先經過5日滑動平均 (running mean)。Wang et al. (2004) 提到選擇低層風場做為南海夏季季風肇始指標有幾個原因：1、風場相較於雨量場有較長期的氣候資料。2、風場之可信度及準確度較雨量資料高。3、風場比雨量資料更能反應大尺度環流的變化，降雨則容易受小尺度環流系統及局部作用因子影響。因此本研究以此為出發點，先了解Wang et al. (2004) 所建議之南海夏季季風肇始指標是否適用於臺灣梅雨期開始，同時考慮Wang et al. (2008) 所建議之東亞夏季季風強度指標是否亦可量度臺灣梅雨期之乾溼，之後嘗試尋找一組可適用於臺灣梅雨期開始及量度梅雨期乾溼之指標，同時與Wang et al. (2004) 及 Hung and Hsu (2008) 所建議的南海夏季季風或東亞夏季季風肇始日期比較。為描述兩變數 x 、 y 之間的關係，研究使用了相關係數

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 (y_i - \bar{y})^2}}$$

其中 n 為資料長度， $\bar{\quad}$ 表示平均。

Wang et al. (2004) 所建議的南海夏季季風肇始指標 $U_{scs} = U_{850} (5^\circ - 15^\circ N, 110^\circ - 120^\circ E)$ ，Hung and Hsu (2008) 所建議的東亞夏季季風肇始指標 (H2008) 為 $30^\circ S - 50^\circ N, 30^\circ E - 180^\circ$ 之850hPa 5日滑動平均流函數經由經驗正交函數 (EOF) 分析後的第一個主成分 (PC) 由正轉負之日期，Wang et al. (2008) 所建議的東亞夏季季風

強度指標則為 $EASM = U_{850} (5^\circ - 15^\circ N, 90^\circ - 130^\circ E) - U_{850} (22.5^\circ - 32.5^\circ N, 110^\circ - 140^\circ E)$ 。

三、研究結果與討論

根據監測東亞夏季季風的經驗顯示，低層風場因容易受到瞬變天氣系統的影響，其轉變不如高層風場轉變來得持續（圖略），因此有時並無法完全代表整層環流的變化，換句話說，垂直風切的轉變比低層風場的轉變更容易確認為季風肇始。為了找出垂直風切影響臺灣雨量的關鍵區域，1948-2002年5月垂直風切 ($U_{850} - U_{200}$) 和臺灣西部12個氣象站累積雨量之相關係數如圖1所示。由圖中可發現相關最高的區域（實線方塊）與 Wang et al. (2004) 所建議的南海夏季季風肇始指標 (U_{scs}) 區域（虛線方塊）並不一致，這也說明了為何在監測東亞夏季季風實務作業上，有時南海夏季季風肇始並不一定表示臺灣會有豪大雨發生，或是宣告臺灣梅雨期開始。為了方便說明垂直風切、 U_{scs} 與臺灣雨量的關係，定義圖1中相關區域最高的垂直風切為 $V_{shear} = U_{850} (12.5^\circ - 20^\circ N, 110^\circ - 130^\circ E) - U_{200} (12.5^\circ - 20^\circ N, 110^\circ - 130^\circ E)$ 。進一步比較2001-2010年各年臺灣西部12個氣象站累積雨量、 V_{shear} 及 U_{scs} （圖3），由圖中可看出 V_{shear} 相較於 U_{scs} 更能顯示出明顯由負轉正的轉變，舉例而言，2006、2007及2010年由 U_{scs} 就不易辨認出當年南海夏季季風肇始日期。換句話說，東亞夏季季風是一個大尺度的環流系統，垂直風切的轉變隱含著副熱帶地區的低層風場由東風轉為西風，同時高層風場亦跟著由西風轉為東風，再加上每年季風行進的路徑並不一定相同，有時西南氣流自南海北部通過（如

2010年，圖略），但有時西南氣流會從南海南部通過（如2008年，圖略），若季風不是於南海全面爆發，則單由低層風場所設計之 U_{scs} 較無法辨認出當年南海夏季季風肇始日期。綜合來說，隨著東亞夏季季風的推進，各地季節轉換的時間並不盡相同，季風行進路徑不同並不代表季風並未肇始， U_{scs} 也許可以代表南海地區的季風爆發，但無法顯現出臺灣附近由冬季季風轉變為夏季季風的大尺度特徵，相對地， V_{shear} 可能較適合描述此大尺度環流系統的重大變化。

除了臺灣梅雨期何時開始之外，梅雨期的乾溼也是眾所關心的課題之一，尤其是中南部由乾季枯水期進入到溼季汛期，能夠事先掌握降雨的多寡，對防災工作有極大的助益。圖2為1948-2002年5月至6月850hPa緯向風場 (U) 和臺灣西部12個氣象站累積雨量之相關係數，由圖中可發現相關最高的區域（實線方塊）與 Wang et al. (2008) 所建議的東亞夏季季風強度指標 ($EASM$) 區域（虛線方塊）並不一致，這是由於 $EASM$ 描述的是整體季風的強弱，但對臺灣而言，與臺灣降雨相關性較高的區域還是以鄰近臺灣地區為主。定義圖2中相關最高區域的低層水平風切為 $H_{shear} = U_{850} (17.5^\circ - 22.5^\circ N, 115^\circ - 125^\circ E) - U_{850} (25^\circ - 30^\circ N, 110^\circ - 120^\circ E)$ ，為了表示臺灣西部12個氣象站累積雨量與 H_{shear} 之關係大於其與 $EASM$ ，進一步分析了三者於2001-2010年之時間序列（圖4），由圖中可看出臺灣西部雨量隨著 H_{shear} 起伏，當 H_{shear} 大時，臺灣西部雨量就多，反之若 H_{shear} 小，臺灣西部則幾乎無降雨。其可能的物理機制解釋如下：絕對渦度（absolute vorticity）可由地球渦度（earth vorticity）、風切渦度

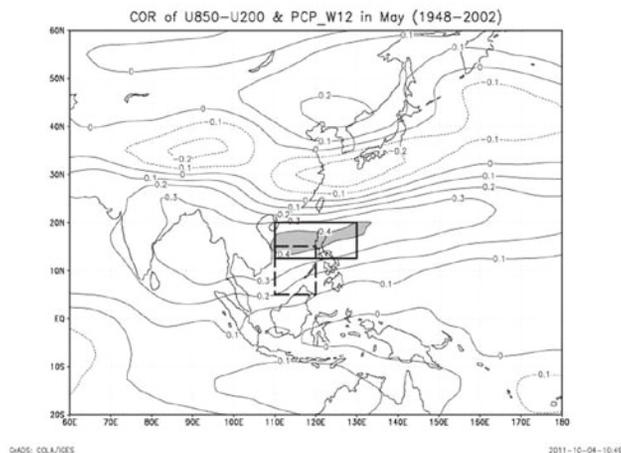


圖1、1948-2002年5月高低層垂直風切和臺灣西部12個氣象站累積雨量之相關係數。圖中實線方塊為本研究所選取的垂直風切區域，虛線方塊為Wang et al. (2004) 所建議的南海夏季風肇始指標區域。

Figure 1. The correlation coefficient between area-average vertical wind shear and accumulated precipitation from 12 stations of western Taiwan in May from 1948 to 2002. Solid-line box is the area of vertical wind shear used in this study, while dash-line box is the area of U_{scs} from Wang et al. (2004).

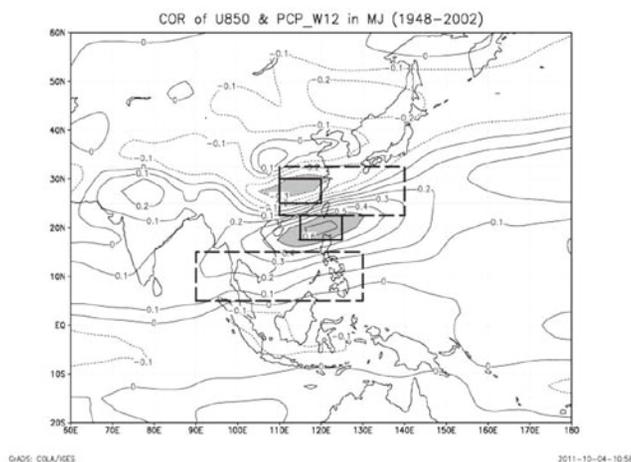


圖2、1948-2002年5月至6月850hPa緯向風場和臺灣西部12個氣象站累積雨量之相關係數。圖中實線方塊為本研究所選取的低層水平風切區域，虛線方塊為Wang et al. (2008) 所建議的東亞夏季季風強度指標區域。

Figure 2. The correlation coefficient between area-average 850hPa zonal wind and accumulated precipitation from 12 stations of western Taiwan in May and June from 1948 to 2002. Solid-line box is the area of low-level horizontal wind shear used in this study, while dash-line box is the area of $EASM$ from Wang et al. (2008).

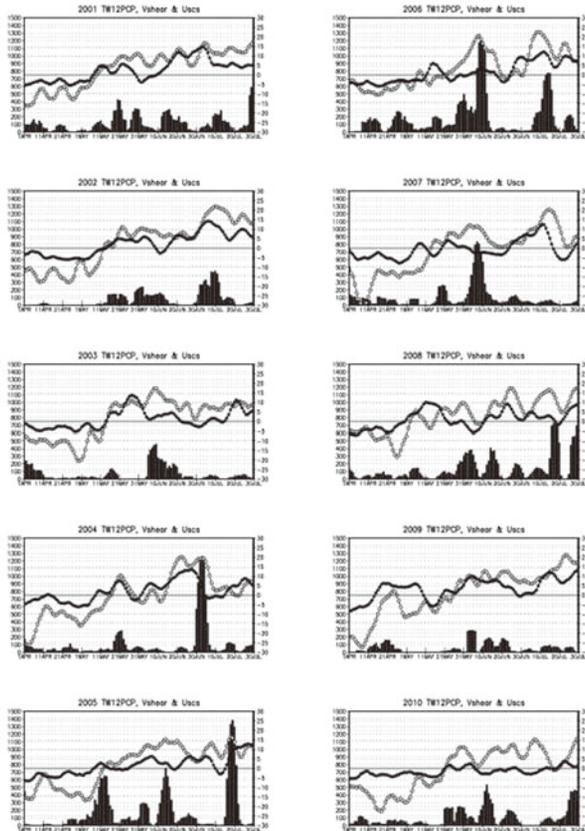


圖3、2001-2010年臺灣西部12個氣象站累積雨量（長條）、 V_{shear} （空心圓）及 U_{scs} （實心圓）。左邊縱軸為雨量（單位：mm），右邊縱軸為風速（單位：m/s），橫軸為時間（5日滑動平均，如5月3日表示5月1日至5月5日平均）。

Figure 3. The accumulated precipitation from 12 stations of western Taiwan (bar), V_{shear} (open circle), and U_{scs} (solid circle) from 2001 to 2010. The value of precipitation is shown in left vertical axis (Unit: mm), while in right vertical axis is the wind speed (Unit: m/s). The abscissa is time (five-day running mean, eg. May 3 means the average from May 1 to May 5).

（shear vorticity）及曲率渦度（curvature vorticity）三項來決定，臺灣附近低層水平風切的轉變表示由反氣旋轉變為氣旋，如此會增加風切渦度，使得環境變得不穩定，而造成臺灣容易有豪大雨發生。因此臺灣西部雨量與 H_{shear} 有一致性變化，相較之下其與 $EASM$ 關係則較不明顯。

由上述討論可得知， V_{shear} 比 U_{scs} 更能顯現臺灣附近由冬季季風轉變為夏季季風

的大尺度特徵，同時臺灣西部雨量與 H_{shear} 的相關性遠高於其與 $EASM$ 。換個角度思考，是否可綜合此兩指標，由 V_{shear} 來宣告臺灣附近大尺度環流系統由冬季季風轉變為夏季季風，而 H_{shear} 的轉變表示局地環境存在著不穩定，進而提高了臺灣發生豪大雨的機會？也就是說，當大尺度環流系統已經準備好轉變，而局地環境亦同時配合著提供不穩定的條件，則臺灣開始進入季

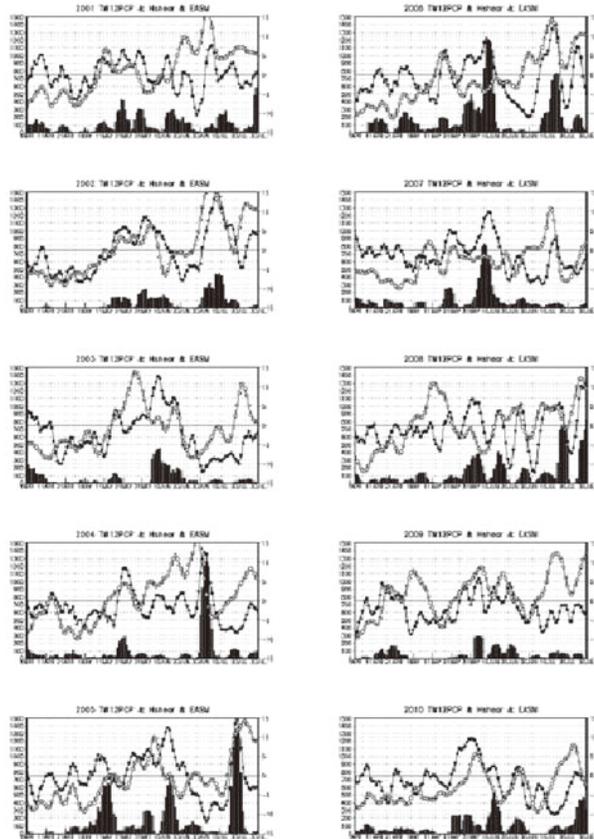


圖4、2001-2010年臺灣西部12個氣象站累積雨量（長條）、 H_{shear} （實心圓）及 $EASM$ （空心圓）。左邊縱軸為雨量（單位：mm），右邊縱軸為風速（單位：m/s），橫軸為時間（5日滑動平均，如5月3日表示5月1日至5月5日平均）。

Figure 4. The accumulated precipitation from 12 stations of western Taiwan (bar), H_{shear} (solid circle), and $EASM$ (open circle) from 2001 to 2010. The value of precipitation is shown in left vertical axis (Unit: mm), while in right vertical axis is the wind speed (Unit: m/s). The abscissa is time (five-day running mean, eg. May 3 means the average from May 1 to May 5).

節轉變（即梅雨期開始），進一步意味著之後發生豪大雨的機會將提高。

圖5顯示2001-2010年各年臺灣25個氣象站累積雨量、 V_{shear} 及 H_{shear} 之時間序列，由圖中可看出大部分年份當 V_{shear} 和 H_{shear} 同時由負轉正時，臺灣降雨亦同時增加，而且兩指標值越一致性地大，臺灣降雨量就越多；換句話說，結合 V_{shear} 與 H_{shear} 兩指標，可以良好地反應臺灣梅雨期雨量。

分別檢視2001-2010年每年 V_{shear} 與 H_{shear} 兩指標同時轉變日期之前後15天雨量達到豪大雨（日雨量達到50毫米以上）等級的測站數目，發現除了2008年外，其他9年轉變日期後15天發生豪大雨的測站數均多於轉變日期前15天發生豪大雨的測站數，表示 V_{shear} 與 H_{shear} 兩指標同時轉變後，臺灣發生豪大雨的機會亦增加。隨著動力系集預報模式不斷地提升預報技術，增加了預報可信

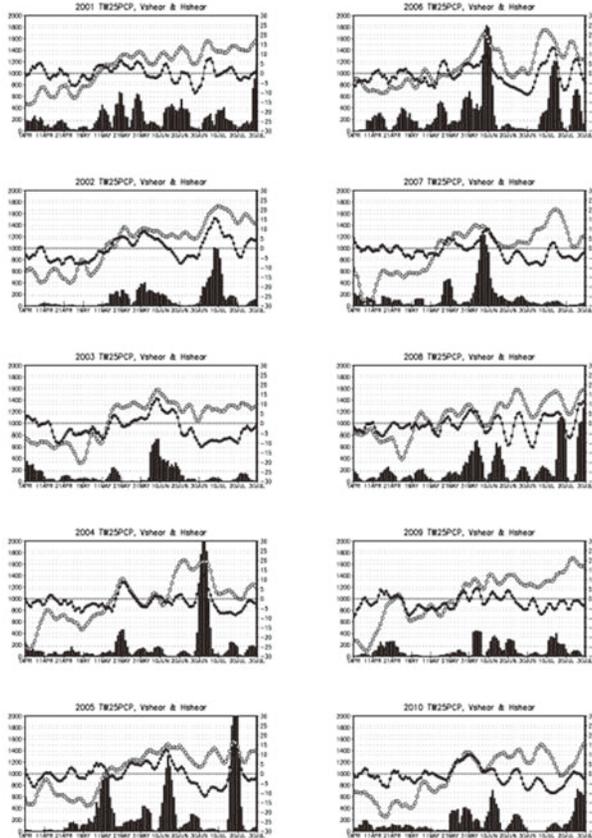


圖5、2001-2010年臺灣25個氣象站累積雨量（長條）、 V_{shear} （空心圓）及 H_{shear} （實心圓）。左邊縱軸為雨量（單位：mm），右邊縱軸為風速（單位：m/s），橫軸為時間（5日滑動平均，如5月3日表示5月1日至5月5日平均）。

Figure 5. The accumulated precipitation from 25 stations around Taiwan (bar), V_{shear} (open circle), and H_{shear} (solid circle) from 2001 to 2010. The value of precipitation is shown in left vertical axis (Unit: mm), while in right vertical axis is the wind speed (Unit: m/s). The abscissa is time (five-day running mean, eg. May 3 means the average from May 1 to May 5).

度的天數，若將此發現應用於梅雨期監測預報作業上，也許可於一星期甚至更早之前，由可靠度較高的模式預報資料計算出 V_{shear} 及 H_{shear} ，即可預知臺灣梅雨期何時開始，並事先為即將來臨的豪大雨做好準備。

表2整理了1948-2010年本研究中臺灣雨量（TWPCP）、 V_{shear} 、 H_{shear} 、 U_{scs} 及H2008轉變日期，表中“?”表示由該指標無法決定當年轉變或肇始日期。扣除

無法決定日期的年份，53年中只有7年TWPCP和 V_{shear} 、 H_{shear} 轉變日期三者完全不一致，其中1987、1992、2003及2008年TWPCP轉變日期與 V_{shear} 或 H_{shear} 轉變日期相差甚至超過2候（候即為5日）。綜合來看，5個指標中除了 U_{scs} 的中位數為29候外，其他均為28候； U_{scs} 的標準差2.29候最大， V_{shear} 轉變日期的標準差1.71候最小；5個指標的第25百分位數（percentile）均為

表2、南海夏季季風（*Uscs*）或東亞夏季季風（*H2008*）肇始日期之比較，表中亦附上臺灣雨量（*TWPCP*）明顯增加及垂直風切（*Vshear*）、低層水平風切（*Hshear*）由負轉正之日期，”?”表示由該指標無法決定轉變或肇始日期。（單位：候，即為5日）

Table 2. The onset dates defined by *Uscs*, *H2008*, *TWPCP*, *Vshear*, and *Hshear* from 1948 to 2010. “?” indicates that the onset date can not be identified by that index. (Unit: Pentad)

年份	<i>Uscs</i>	<i>H2008</i>	<i>TWPCP</i>	<i>Vshear</i>	<i>Hshear</i>
1948	26				
1949	30				
1950	26				
1951	25		26	26	26
1952	27		29	29	33
1953	26		27	27	?
1954	31		31	30	?
1955	29		31	29	?
1956	31		?	27	?
1957	32		27	29	27
1958	29	26	29	28	29
1959	30	29	30	29	30
1960	30	28	28	30	32
1961	27	28	28	28	28
1962	28	28	32	29	32
1963	30	30	31	30	31
1964	28	27	30	30	30
1965	29	29	26	27	30
1966	25	?	30	26	31
1967	29	28	29	28	29
1968	34	?	28	29	29
1969	29	28	28	28	29
1970	32	31	26	27	27
1971	25	29	31	31	?
1972	26	26	26	27	27
1973	33	32	?	26	31
1974	29	29	30	30	30
1975	31	30	28	26	28
1976	26	?	25	25	25
1977	28	27	27	27	27
1978	29	28	28	28	28

1979	27	?	27	27	27
1980	27	?	?	29	?
1981	31	28	27	30	27
1982	31	31	30	31	31
1983	31	29	27	30	27
1984	29	30	28	29	28
1985	30	?	30	30	30
1986	27	26	27	27	27
1987	32	33	27	32	32
1988	29	28	29	29	29
1989	28	28	30	30	30
1990	28	27	28	29	31
1991	32	33	34	33	34
1992	28	34	32	28	28
1993	32	30	29	31	29
1994	25	30	25	25	25
1995	27	27	27	28	28
1996	26	33	25	26	25
1997	28	27	28	28	28
1998	29	28	31	29	29
1999	30	29	30	29	25
2000	26	27	33	28	32
2001	26	26	26	27	26
2002		26	28	27	28
2003			32	28	28
2004			28	28	28
2005			26	27	26
2006			28	29	28
2007			28	28	28
2008			30	25	28
2009			31	30	30
2010			29	29	29
中位數	29	28	28	28	28
標準差	2.29	2.13	2.09	1.71	2.11
Q1-Q3	27-30	27-30	27-30	27-29.25	27-30

27候，第75百分位數則為30候（除了 V_{shear} 轉變日期的第75百分位數為29.25候外）；除了 V_{shear} 轉變日期外，其他指標均有無法決定當年轉變或肇始日期的年份（由圖3可看出 U_{scs} 於2010年無法決定南海夏季季風肇始日期）。計算 U_{scs} 、H2008、 V_{shear} 、 H_{shear} 與TWPCP轉變日期的相關係數分別為0.15、0.16、0.58及0.69，顯示 V_{shear} 、 H_{shear} 比 U_{scs} 、H2008更能描述TWPCP的變化。由於 V_{shear} 每年轉變明顯、年際間的變異也較小，再次佐證了 V_{shear} 可能比 U_{scs} 及H2008更適合來描述臺灣附近夏季季風肇始。

進一步探究東亞夏季季風肇始日期的早晚，若根據表1中第25百分位數及第75百分位數，也就是將27候至30候視為正常肇始日期，則東亞夏季季風肇始較早的年份為1951、1976、1994、1996年，而肇始較晚的年份則為1982、1987、1991年。至於是何種因素影響東亞夏季季風肇始的早晚，以及 V_{shear} 是否亦適用於東亞夏季季風肇始，則需要更進一步地分析研究。

四、結論

本研究嘗試由臺灣的角度出發，尋找能代表臺灣梅雨期開始的指標，期許能對臺灣梅雨期的監測預報作業有所幫助，進而提供防災單位較為豐富的資訊，以利其決策之形成。

研究結果發現，隨著東亞夏季季風的推進，各地季節轉換的時間並不盡相同，季風行進路徑不同並不代表季風並未肇始， U_{scs} 也許可以代表南海地區的季風爆發，但無法顯現出臺灣附近由冬季季風轉變為夏季季風的大尺度特徵，相對地， V_{shear} 可能較適合描述此大尺度環流系統的重大變化。當垂直風切轉變時，若臺灣附近同時存在著低層水平風切的轉變，也就

是由反氣旋轉變為氣旋，如此會增加風切過度，使得環境變得不穩定，而造成臺灣容易有豪大雨發生。換句話說，當大尺度環流系統已經準備好轉變，而局地環境亦同時配合著提供不穩定的條件，則臺灣開始進入季節轉變（即梅雨期開始），進一步意味著之後發生豪大雨的機會將提高。

結合 V_{shear} 與 H_{shear} 兩指標，可以良好地反應臺灣梅雨期雨量。隨著動力系集預報模式不斷地提升預報技術，增加了預報可信度的天數，若將此發現應用於梅雨期監測預報作業上，也許可於一星期甚至更早之前，由可靠度較高的模式預報資料計算出 V_{shear} 及 H_{shear} ，即可預知臺灣梅雨期何時開始，並事先為即將來臨的豪大雨做好準備。

五、參考文獻

- 胡志文，陳孟詩與王作臺，1998：中緯度及熱帶系統對東亞夏季季風肇始影響之初步分析。第十五屆天氣分析與預報研討會論文彙編，臺北，389-393。
- 林松錦，麥如俊與嚴明鈺，2000：南海夏季季風肇始期間大氣環流特徵與水汽輸送之合成分析。大氣科學，28，281-292。
- 林博雄與林和，1997：東亞夏季季風與梅雨鋒(一)：雲型季風指標。大氣科學，25，267-287。
- 麥如俊，1997：南海夏季季風之合成探討。國立中央大學大氣物理研究所碩士論文，98頁。
- 郭勉之與林松錦，2001：東亞夏季季風-肇始定義與季風肇始時期的環流特徵。大氣科學，29，141-170。
- 陳隆勛，宋毅與村上勝人，1996：夏季風

- 爆發時期對流雲團的變化特徵。亞洲季風研究的新進展，何金海主編，氣象出版社，北京，54-65。
- 盧孟明，1998：南海夏季季風肇始早晚與臺灣梅雨期(五、六月)乾濕關係之探討。大氣科學，**26**，205-225。
- Chang, C. P. and G. T. J. Chen, 1995: Tropical circulation associated with southwest monsoon onset and westerly surges over the South China Sea. *Mon. Wea. Rev.*, **123**, 3254-3267.
- Chang, J. C., 1999: On triggering mechanism of SCS summer monsoon onset. 第六屆全國大氣科學學術研討會論文彙編，臺北，435-440。
- Hsu, H. H., C. T. Terng, and C. T. Chen, 1999: Evolution of large-scale circulation and heating during the first transition of Asian summer monsoon. *J. Climate*, **12**, 793-810.
- Hung, C. W. and H. H. Hsu, 2008: The First Transition of the Asian Summer Monsoon, Intraseasonal Oscillation, and Taiwan Mei-yu. *J. Climate*, **21**, 1552-1568.
- Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, A. Leetmaa, B. Reynolds, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K. C. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, Roy Jenne, and Dennis Joseph, 1996: The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77**, 437-472.
- Lau, K. M. and S. Yang, 1997: Climatology and interannual variability of the Southeast Asian summer monsoon. *Adv. Atmos. Sci.*, **14**, 141-161.
- Tanaka, M., 1992: Intraseasonal oscillation and the onset and retreat dates of the summer monsoon over East, Southeast Asia and the western Pacific region using GMS high cloud amount data. *J. Meteor. Soc. Japan*, **70**, 613-629.
- Tao, S. Y. and L. X. Chen, 1987: A review of recent research on the East Asian monsoon in China. *Monsoon Meteorology*, C. P. Chang and T. N. Krishnamurti Eds., Oxford Univ. Press, 60-92.
- Wang, B., LinHo, Y. S. Zhang, and M. M. Lu, 2004: Definition of South China Sea Monsoon Onset and Commencement of the East Asia Summer Monsoon. *J. Climate*, **17**, 699-710.
- Wang, B. and R. Wu, 1997: Peculiar temporal structure of the South China Sea summer monsoon. *Adv. Atmos. Sci.*, **14**, 176-194.
- Wang, B., Z. W. Wu, J. P. Li, J. Liu, C. P. Chang, Y. H. Ding and G. X. Wu, 2008: How to Measure the Strength of the East Asian Summer Monsoon. *J. Climate*, **21**, 4449-4463.
- Xie, A., Y. S. Chung, X. Liu, and Q. Ye, 1998: The interannual variations of summer monsoon onset over the South China Sea. *Theor. Appl. Climatol.*, **59**, 201-213.
- Yan, J. Y., 1997: Observational study on the onset of the South China Sea southwest monsoon. *Adv. Atmos. Sci.*, **14**, 276-287.

A Study of Heavy Rainfall Index during Taiwan Mei-Yu Season

Meng-Shih Chen

Weather Forecast Center, Central Weather Bureau

ABSTRACT

Whether the onset index of South China Sea summer monsoon (SCSSM) suggested by Wang et al. (2004) is applicable to identify the commencement of Taiwan Mei-Yu season has been surveyed. The index of East Asian summer monsoon (EASM) proposed by Wang et al. (2008) has also been considered to see if it is appropriate to determine whether wet or dry in Taiwan's Mei-Yu. This study attempts to design new practical indices for both the above purposes, and then compare the onset days with those referred by the SCSSM/EASM indices suggested by Wang et al. (2004) and Hung and Hsu (2008).

The onset of seasonal transition varies with each region as EASM advances northward, as indicated by the results. Different propagating routes may not necessarily represent that the monsoon has not commenced yet. The onset index of SCSSM can probably represent the monsoon onset in that area, but it fails to reveal the large-scale transition feature from winter to summer surrounding Taiwan. Instead, the vertical wind shear index may be more suitable for describing this significant conversion of large-scale monsoon systems. More specifically, if the low-level horizontal wind shear near Taiwan changes from anticyclonic to cyclonic following the transition of the vertical wind shear, heavy rainfall tends to occur. In other words, while the large-scale system conversion along with an unstable local environment gets ready, the onset of Taiwan Mei-Yu is identified, with the implication of higher probability for heavy rainfall occurrence afterwards.

Key words: Taiwan Mei-Yu, East Asian summer monsoon, onset, heavy rainfall

中央氣象局數值天氣預報作業系統(一) 歷史演進

葉天降 滕春慈 黃麗玫 馮欽賜 張庭槐

中央氣象局

摘 要

中央氣象局於1976年開始引進電腦設備，發展氣象作業自動化系統，至今已近35年。期間歷經4期數值天氣預報系統之發展，目前數值天氣預報作業模式之最細水平解析度已達5公里，此和1989年底第一期數值天氣預報系統完成時，模式最細水平解析度70公里相較，有很大差異。在系統所產生成品之應用上，目前是透由網路傳遞，資料直接傳送至預報作業輔助系統工作站上，可依預報或其他人員當時應用之需求，即時繪製並顯示在其工作之螢幕上，此和數值天氣預報系統建置前以人工進行填繪圖，以及與第一期數值天氣預報系統剛完成時，系統所產生之成品主要以批次方式繪製在紙面上，皆有很大差異。本文概要的整理近35年間，中央氣象局數值天氣預報作業系統之電腦系統、氣象資料、及數值分析與預報模式等資料，以期對其歷史演進有進一步認識。

關鍵詞：數值天氣預報、模式、觀測資料、電腦系統。

一、前言

天氣分析與預報作業主要仰賴完整之觀測資料，數值天氣預報系統是運用電腦有效處理資料之能力，以及準確之分析與預測方法，來協助天氣分析與預報工作，而其所需處理之資料則包含在各時間點、三維大氣層空間內各種氣象因素之量測。中央氣象局負責國內氣象之監測與預報，在未建立數值天氣預報作業系統(NWP)以前，觀測資料之蒐集與整理，是相當繁重又耗時之工作。以1980年代初期繪製北半球地面天氣圖為例，在接收到觀測電碼資料後，需要由有經驗作業人員將電碼轉換成氣象各項目值或符號，填繪在天氣圖

上，而後再做天氣分析、繪等值線、及標示鋒面區、雨區、雷擊區等，完整之分析圖往往需要花費有經驗作業人員接近4小時才能完成。隨著氣象與資訊科技之進步，如今氣象觀測、分析、及預報作業都和以往有很大之不同。於後謹以參與中央氣象局數值天氣預報作業系統之發展經驗，就其歷史演進情形做概要的整理。

中央氣象局數值天氣預報作業系統發展至今大致可分為5階段，1984年以前系統係在迷你型電腦上執行，1976年7月時首先以租購方式建立一套GA-SPC16/45迷你型電腦(郭與胡1975)，並在其上發展資料接收與處理系統，於1977年3月正式作業。而後再於民國1978年7月建置同型

迷你型電腦一套，組成完整之作業備份，並在其上建立自動化資料蒐集與處理系統(胡1979)、填繪圖(徐與胡1976)、分析與正壓大氣預報模式(胡1975)、以及颱風統計預報模式(胡與陳1976)等，至此包括即時資料接收、解譯、氣象觀測資料查詢、填繪圖、東亞正壓模式48小時預測、及氣象觀測資料錄存等都逐步在中央氣象局作業應用。

1984年中央氣象局業務電腦化計畫開始全面推動，在1984年至1989年間發展數值天氣預報第一代系統，包括於1987年6月建置CYBER 205，電腦記憶體容量32MB、磁碟容量5.6GB、最佳計算速度200MFLOPS。此電腦系統之容量、計算速度雖不及現今之個人電腦，惟其是當年之超級電腦，其和GA-SPC16/45迷你型電腦時期之記憶體容量96KB(當時1W=16bits)、磁碟容量10MB、計算速度每指令需要 1.44×10^{-6} 秒相較，能量改進為幾百至千倍之提升。1990年至1994年，中央氣象局發展數值天氣預報第二代系統，包括1992年6月建置第二代超級電腦系統CRAY YMP8I，使電腦記憶體容量提高為512MB、磁碟容量30GB、最佳計算速度2.6GFLOPS。第三代數值天氣預報系統發展計畫是於1995年至2001年執行，包括於1999年12月更新超級電腦為含15個中央處理器之FUJITU VPP5000系統，每個中央處理器之記憶體容量為8GB，磁碟總容量為2TB、最佳計算速度為9.6GFLOPS X 15。第四代數值天氣預報系統發展計畫是於2002年至2009年執行，包括於2006年10月更新超級電腦為含2496個中央處理器之IBM Cluster 1600系統，每個中央處理器之記憶體容量為2 GB，特殊節點為4GB，磁碟總容量為52 TB、最佳計算速度為

13.2 TFLOPS，詳見表1，第四代建置之數值天氣預報系統目前仍為中央氣象局作業所用。

二、氣象資料量之演進

對天氣現況做觀測與記錄是進行天氣分析與預報的先決條件，透過對這些觀測資料的彙整和研判，才能知道目前各地天氣現況和進一步利用預報方法進行天氣預報。中央氣象局在臺灣設有多處地面測站，以從事氣象之觀測，這些測站之觀測項目包含地面之溫度、風向風速、氣壓、溼球溫度、降水量、雲量、雲狀、雲高等，中央氣象局也另設有探空觀測站，量測大氣層中各層之溫度、風向風速、高度、溼度等。相同的，國內軍事以及民用航空局也有進行天氣觀測，這些資料是研判本地區天氣現況的基本資料。然而僅有這些資料仍不足以從事完整之天氣分析，更難以進行有效的天氣預報，因為天氣之水平尺度較大，僅有局部地區之資訊不足以了解全貌，而需要鄰近甚至全球各地之氣象資訊。

為蒐集各地之氣象觀測資料，中央氣象局早期主要是透過有線電線路接收由東京日本氣象廳、日本府中美空軍氣象中心所傳送之印字(TTY)氣象電碼，以及應用無線電接收由日本、蘇俄、泰國、北平、漢口、成都等地所廣播之印字氣象電碼。這些慢速的通信設施，有線電線路通訊速率為75 bPS，無線電接收為50 bPS，相當於慢速的打字，在1980年時各種觀測報每日之資料總數約為2.5 MB。

上述之氣象資料主要涵蓋之地區僅是東亞地區，這些資料並不足以進行較長期之天氣預報。有鑑於此，中央氣象局在發展數值預報第一代系統時，在1985年6

表1：中央氣象局數值天氣預報系統各階段電腦設備之概況。

Table 1: Main properties of the CWB NWP computer systems in different phases.

	NWP前期 1976-1983年	NWP-1 (1984-1989年) 氣象業務全面 電腦化計畫	NWP-2 (1990-1994年) 氣象業務全面 電腦化第二期 計畫	NWP-3 (1995-2001年) 氣象業務全面 電腦化第三期 計畫	NWP-4 (2002-2009年) 氣候變異與劇烈 天氣監測預報系 統發展計畫
主系統 備援系統	GA SPC10/45 GA SPC10/45	CDC CYBER205 CDC CYBER840	CRAY YMP8I CRAY YMP2E	FUJITU VPP5000 FUJITU VPP300	IBM Cluster1600 IBM Cluster1600
主系統 使用期間 速度 記憶體 磁碟容量	1976-1986* 1440ns 96KB(48KW) 10MB	1987-1994 200MFlops 32MB(4MW) 5.6GB	1995-1999 333MFlops x 8 512MB(64MW) 30GB	2000-2006 9.6GFlops x 15 8GB x 15 2TB	2006起 6GFlops x 2496 6144GB 52TB
I/O	讀卡機 繪圖機 列表機 磁帶機	終端機 繪圖機 列表機 磁帶機	工作站 繪圖機 WINS\$ 磁帶館	工作站 繪圖機 WINS2\$ 磁帶館 個人電腦	工作站 WINS2 磁帶館 個人電腦
網路	無	連結 CYBER205與 CYBER840	HiPPI, FDDI, Ethernet, ATM 連結主要作業 系統	FDDI, Ethernet, ATM, Fast Ethernet 完整局屬網路連 結各系統	HPS, Giga-Ethernet, ATM, Frame Relay 完整局屬網路連 結各系統

註 * 1984年後建置Vax750電腦系統為數值天氣預報主要作業系統。

^s說明見文。

月建置了由日本氣象學會(JWA)提供氣象資料之較高速線路，其資料傳輸速率為2400 bPS，每日總資料傳送量約為8MB。隨後並於1986年3月建置了由美國加州GWDI氣象公司(Global Weather Dynamic Incorporated)提供氣象資料之相似線路，使得氣象觀資料之獲取得到保障。這些資料之內容如表2，在民國1988年以前，新的電腦系統和數值預報分析與預報模式尚

未完成，新的氣象資料僅在舊有系統上應用以及做為各系統發展之測試，1988年以後這些資料已被模式分析與預測逐步應用。

傳統之氣象觀測資料近年並未有明顯成長，甚至有小幅減少之趨勢，如探空觀測報數即有些微之減少。代之而起的是非傳統之觀測資料明顯增加，如2000年代初期中央氣象局每日接收觀測資料之總量約

表2：中央氣象局數值天氣預報系統接收氣象觀測資料概況。

Table 2: A summary of the time of different observation datum be received, applied, and achieved in CWB NWP system.

種類與代碼	開始處理並完整錄存時間	資料開始完整應用之時間
US (TEMP)	1988-01-01	1988-07 NWP作業
UP (PILOT)	1988-01-01	
SM (SYNOP)	1988-01-01	
UA(AIREP)	1988-01-01	
SH (SHIP)	1988-01-01	
TS (SATO)	1988-01-01	
TT (SATMP)	1988-01-01	1994-07 NWP作業
SS (BUOY)	1988-01-01	1995-01 SST OI 作業
SA (METAR)	1988-01-01	2000-11 LAPS 作業
SP (SPECI)	1988-01-01	
UK (TEMP SHIP)	1988-01-01	
SO (BATHY)	1993-04-20	海象中心使用
WF (world city forecast)	1997-08-25	1997-08 預報中心作業參考
TW (hight density satellite wind)	1999-10-01	1999-11 NWP 作業 (至2010-12-31)
CS (CLIMAT)	1999-11	1999-11 長期課使用
CU (CLITMP)	1999-11	
NCPE pre_buf data*	2001-05-07	
NCEP Ozone data	2002-12-29	
UX (Dropsonde)	2003-05-21	
SB\$	2003-09-01	
Radiance	2004-01	
TD (QuikSCAT 海面風)	2004-12-27	2009-11-23停止
福衛三號資料 [#]	2006-04-30	
衛星降水分析資料及QPESUMS之雷達估計降水產品資料	2010-04-15	

註 *：NCPE pre_buf data含Rawinsonde, Dropsonde, PILOT, AIREP, PROFILER, VAD, SATOB, SYNOP, METAR, MARINE, WINDSAT。

^{\$}：為日本地區地面密集觀測報(Automated Meteorological Data Acquisition System, AMeDAS)。

[#]：福衛三號資料含WetPrf (溫度、水氣量、壓力、反射率)及AtmPrf (溫度、壓力、反射率、反射率標準偏差、bending angle、bending angle standard deviation、衛星傾角)。

為110 MB，其中由衛星、飛機等非傳統觀測之資料成為觀測資料中之最大部分。表3列示主要氣象觀測報別之站或筆數，其中也比較在2001年6月時以新通信線路連接在美國之國際研究院(International Research Institute, IRI)以取代原有由美國GWDI公司線路時資料數量之大致差異情形。

隨著資料量之增加，通信速率也相對的提高，2000年代初期兩主要資料來源之資料傳送速度分別是96K bPS與128K bPS，與最初時期之情況比較其速率提高千倍以上。2003年原由美國之國際研究院提供之資料，改由美國海洋大氣總署轄下海洋大氣研究院全球系統組(GSD/ESRL/OAR/NOAA)提供，目前中央氣象局與GSD與JWA兩主要資料來源之資料傳送速度分別是256 kbPS與128 kbPS。事實上由局外所得資料，觀測之資料並無明顯增加(見表3)，增加更多的是各作業中心之分析或預報之格點資料，2000年代初期每日之平均量約為152 MB(含觀測資料與模式資料)，至2011年每日接收之觀測資料平均量為163MB，模式格點資料為15GB，約為10年前之100倍。

由於網際網路的日益普遍，除專線外，中央氣象局也由1999年起先後透由網際網路FTP的方式分別從國外取得資料(1995與1996年曾藉由網路取得NCEP MRF模式結果，該些資料後來由GWDI專線提供)，如於1999年由美國Wisconsin大學取得高密度衛星風資料(至2011年止)，2001與2002年由美國NCEP取得臭氧量資料(Ozone data)、傳統觀測資料(pre_bufdata)與AVN模式資料，並由日本JWA取得JMA之GSM、RSM、MSM三模式預報結果。2003年增加由CDC得到OLR data，

2004至2007年增加取得quikSCAT衛星海面風與NOGAPS模式資料。2010年再增加NCEP衛星降水分析資料(cmorph & qmorph)、NCEP與JMA兩中心之wave模式預報結果，及從ECMWF得到全球預報模式結果。2011則從NCEP得到GFS系集預報結果(Ensemble model data)。

除了資料類別與量之改變外，資料之應用方式也有很大進步，在自動化資料蒐集與處理系統未完成以前，氣象觀測資料是以TTY氣象電碼紙面輸出的方式供作業人員應用，並由於儲存空間之顧慮，一般原始資料紙張僅保留3個月。有了自動化資料蒐集與處理系統後，氣象觀測資料除了在電腦上提供進一步之分析預測應用外，觀測資料也以磁帶錄存，可供事後再分析或進行研究。對因應資料應用量之增加，於第二期發展計畫時開始建置磁帶館，使大量資料能近乎線上的被讀取、應用。

在填繪圖系統、客觀分析與預測模式逐漸建立之後，部分原依靠人工之作業逐步被自動化作業所取代。而更由於第二期發展計畫時建立氣象主要作業系統間之網路連結、與美國預報系統實驗室(Forecast System Laboratory, FSL)合作發展完成WINS (Weather Information and Nowcasting System)系統，加上高效能之電腦工作站較普及，因此原本主要透過紙面作業之方式，也逐漸的改由電腦銀幕上直接顯示。於第三期發展計畫時全局電腦網路已完成，同時WINS系統之功能也做了擴充，WINS2 (第二代WINS)不只顯示數值天氣預報作業系統之產品，也整合所有地面、高空、衛星及雷達等資料，成為預報作業中非常重要之輔助系統。

值得一提的是，中央氣象局於第四

表3：中央氣象局數值天氣預報系統接收氣象觀測資料於2001年與2010年主要報種全日之數量概況。

Table 3: Data numbers of different data types that be received in CWB NWP system in 2001 and 2010.

報種	2001年新舊美國線之比較 (IRI-GWDI)		2001年(6月26日)		2010年(12月29日)	
		增減差異說明	IRI	CWB全部	GSD	CWB全部
TEMP	增	全球約增38站	709站	718站	723站	735站
PILOT	增	新增全球約134站	466站	473站	374站	387站
AIREP	增	新增全球約12,500站	15,750	25,390	9,295	19,112
SATOB		相似	19,534	24,086	9,709	9,709
SATEM		相似	12,645	16,012	7,039	7,039
SYNOP	增	新增全球約780站	5,464站	5,861站	6,047站	6,428站
SHIP	增	新增全球約180站	3,454	3,900	2,146	2,161
BUOY	減	減少全球約55站	6,786	-	11,500	19,510
METAR	增	原無，新增3,226站	3,226站	-	3,963站	4,052站
BATHY	增	原無，新增35站	35站	-	7站	8站

期發展計畫時，與經濟部水利署、農委會水土保持局及美國海洋暨大氣總署(NOAA)所屬國家劇烈風暴實驗室(NSSL)自2002年起共同合作發展QPESUMS系統(Quantitative Precipitation Estimation and Segregation Using Multiple Sensor)，其可整合雷達、衛星、雨量與閃電觀測資料，並結合地理資訊發展劇烈天氣監測系統，以加強對於颱風、梅雨、雷暴等災害性天氣的監測與極短期預報能力。系統提供每10分鐘更新一次之即時性劇烈天氣監測資訊、過去72小時內高解析度之定量降水估計、閃電分析及未來0~1小時定量降雨預報等產品，另外此系統亦提供雙都普勒雷達風場分析。惟目前QPESUMS系統與NWP模式系統分屬獨立，尚未結合。

三、分析模式之演進

客觀分析方法是NWP系統中相當重要的一環，其將空間、時間與內容不一的資料，整理為一完整而有組織之三度空間分布。中央氣象局在各階段使用的方法以及其演進情形簡述如下。

Cressman(1959)以及Barnes(1964)均是逐次訂正客觀分析法，其基本原理是計算觀測資料與網格點初始背景值(多為模式預報)之差異，經由這差異值與權重函數訂正(或多次訂正)網格點的背景值後得到分析結果。逐次訂正法的權重大小僅與距離有關和方向無關、每個權重值均大於零且小於1，而且分析值小於最大觀測值為其基本特色。逐次訂正法，除了可以

將分佈不均勻的觀測資料內插到均勻的網格點外，同時透過觀測資料影響範圍與權重函數的選取，如小於某個波長的分析值振幅均為零，則也具有濾波的效用。Cressman與Barnes兩方法差別僅在於觀測資料對其影響範圍內權重函數的定義，由於Barnes客觀分析方法使用的權重函數較容易計算各個波長的反應函數，所以較Cressman客觀分析方法更被廣泛使用。中央氣象局最初客觀分析方法是使用Cressman逐次訂正法，觀測資料影響到同平面上網格點的分析值，1984年至1989年間發展數值預報第一代系統時引進Barnes逐次訂正法，除了前所述將權重函數修改外，網格點上的分析值，受同平面的觀測資料影響外，還增加了上、下臨近層間觀測資料的影響。

逐次訂正法存有一最大的缺點，就是權重僅是距離的函數，和觀測誤差、背景誤差值以及其它種類的觀測值均無關，這在許多情況下並不是十分理想的做法。這些缺點，在最佳內插統計分析法(Optimal Interpolation, OI)中得到改善。OI客觀分析方法是以前最小分析值變異量(variance)為基礎的數值分析方法(Gandin 1963; Lorenc 1981)，每個觀測值影響範圍內的權重函數為 $W_{ki} = B_{ki} / [B + O]$ ，而 $B_{ki} = (B_k)(B_i) >$ 是觀測點k與其影響範圍內網格點i的背景誤差值，B是背景誤差值，O是觀測誤差值，而且假設不同的觀測值間不存在相關，相關值為零。所以OI客觀分析方法之權重函數直接使用模式預報誤差以及預報誤差的空間分布，此是OI客觀分析方法的一個非常重要特性。

上述OI分析方法權重函數 W_{ki} 式中預報誤差B不僅訂定高度對高度、風對風間的預報誤差值，也訂定高度對風間的預報

誤差值，如此高度觀測不僅可以修正高度的分析量，也可以修正風的分析量，反之亦然，這種分析方法又稱之為多變數分析法，是OI客觀分析方法的另一個重要特色。另外，預報誤差B不僅含有不同變數間的預報誤差值，也含有不同氣壓層變數間的預報誤差，任一氣壓層的觀測量可以訂正其它氣壓層的分析值，這個分析方法稱之為3維分析法，是OI客觀分析方法的第3個重要特色。

由單變數2維的Cressman客觀分析方法演變為3維多變數的OI客觀分析方法，不論是分析方法結合了模式預報誤差大小以及預報誤差空間關係，或是3維與多變數分析的過程，相對的增加觀測資料的運用，都造成分析結果的顯著改進。對中央氣象局而言1990年至1994年間建立OI分析方法是客觀分析方法向前跨了一大步，也是其發展數值天氣預報系統過程中，很重要的里程碑。

OI分析方法是一被廣為肯定的客觀分析方法，也被各個數值預報作業中心採用了非常長的一段時間，然而其所依據之預報誤差B不容易加入遙測觀測資料的影響，是它最大的缺點，也是它面臨最大的問題，為了增進遙測觀測資料的使用，客觀分析方法又面臨了另一次革命性的變動。變分法(Variational Method)是以前最小差異(least square estimation)求分析量 f_A (Parrish and Derber 1992; Devenyi et al. 2001)，若觀測資料為 f_o ，初始猜測值為 f_B ，L為將分析變數轉換至觀測變數及其位置之觀測運算子，變分法即是求取使 $I = 0.5 \{ [L(f_A) - f_o] T O^{-1} [L(f_A) - f_o] + [f_A - f_B] T B^{-1} [f_A - f_B] \}$ 為極小的分析量 f_A 。

這個方法算得的權重和OI分析方法其實是一致的，所以在相同的觀測資料時，

這二個方法可以有相同的分析結果，OI分析方法所具有的分析值特點，變分法同時俱備。雖然，變分法和OI分析方法最終有相同的結果，但是由於基本理論出發的不同，使變分法較OI分析方法更具彈性。在分析變數的選擇上變分法可以與預報模式一致，且可以直接在預報模式定義之水平及垂直 σ 層座標上分析，取代OI分析方法在等壓面上分析的方式，減少分析完成後再做內差或變數轉換可能造成的分析場不平衡；同時變分法可以不必如OI分析方法因受限於計算機資源而必須區分區塊並做資料篩選的方式，避免不同區塊間的不連續的現象，也由於可以同時做全球的資料分析，溫度的變化配合地表氣壓分析可以直接轉換成高度的變化，藉由多變數關係而改進風的分析，因此分析變數可以直接是溫度取代OI分析方法以高度為分析變數的分析，其優點為溫度為直接觀測值而高度資料為一觀測導出值，使用直接觀測值可能減少誤差引進的機會。此外，變分法可以藉由觀測運算子使用有別於分析變數的觀測量，這是OI分析方法求解過程中不能達到的。所以，當數值預報系統需藉著遙測觀測改進，尤其是南半球與廣大洋面上觀測資料的嚴重不足，此優勢就更形重要。目前變分法已取代OI分析方法成為各個重要作業中心的客觀分析方法。中央氣象局也於數值預報第三期計畫開始發展三維變分分析法，目前中央氣象局全球預報模式、區域預報模式皆是採用變分分析法取代原OI分析方法，透由變分法，開始引用如輻射量(radiance)等各類的觀測資料。

四、數值天氣預報模式之演進

數值天氣預報模式包含大氣中風速、溫度與水氣變化等之數值計算，本文不詳

細說明中央氣象局各階段各模式在數值方法與模式物理等之改變，只就預報模式主要架構之演進做摘要報告(數值天氣預報模式之概況見葉等2011)。在應用GA-SPC16/45迷你型電腦時代，主要之數值天氣預報模式為單層相當正壓模式，由於模式僅涵蓋東亞區域，且當時也尚未從局外取得全球模式預報資料因此側邊界沒有辦法做正確更新。數值預報第一代系統在模式上包含水平經緯2.5度解析之全球9層差分模式、90公里解析之有限區域(RFS)11層差分模式、以及70公里解析之颱風路徑預測11層差分模式。數值預報第二代系統提昇全球模式為經緯約1.5度解析(T79)之18層波譜模式；提升有限區域模式(LFS)為雙層網格模式，外層粗網格距60公里，內層細網格距為20公里，垂直共20層；颱風路徑預報模式則提昇解析度為水平60公里垂直20層。而在此同時，較低價位之工作站電腦開始普及，局內電腦網路開始建立，因此也使氣象預報作業之形態逐漸由透過紙面之輸出改為由終端機做電腦圖形之顯示。

數值預報第三代系統包括進一步改善與發展數值預報模式，完成時數值預報系統之作業概況為：全球預報模式為波譜模式，解析度水平約為經緯1度(T119)垂直30層，每日於00UTC與12UTC執行作業預測，其中00UTC執行5天預測，而12UTC執行8天之預測；有限區域模式(NFS)是包含三層網格點之差分非靜力平衡預測模式，垂直30層，外層網格格距為45公里，涵蓋整個東亞與西太平洋，中層網格格距15公里，主要包含華南、臺灣與沿海，內層網格格距5公里，包含臺灣地區，每日於00UTC與12UTC分別執行72小時之預測；颱風路徑預報模式和有限區域預報模

式相似，不過僅含二層網格，並涵蓋較大之範圍，東西向約8,400公里，南北向約7,200公里。

數值預報第四代系統是在第三代全球預報模式上做改進，並引進與建置區域模式WRF，完成時數值預報系統之作業概況為：全球預報模式為波譜模式，解析度水平約為經緯0.5度(T239)垂直30層，2011年底將更新模式至解析度水平約為經緯0.375度(T319)垂直40層，每日於00/06/12/18執行4次作業預測，其中00/12 UTC執行8天預測，而06/18UTC執行84小時之預測；有限區域模式(NFS)是包含三層網格點之有限差分預測模式，垂直30層，外層網格格距為45公里，涵蓋整個東亞與西太平洋，中層網格格距15公里，主要包含華南、臺灣與沿海，內層網格格距5公里，包含臺灣地區，每日於00/06/12/18 UTC均執行84小時之預測；WRF區域模式亦為包含三層網格點之有限差分預測模式，垂直45層，第一、二層網格格距為45/15公里，涵蓋範圍與NFS模式相同，最內層網格格距為5公里，涵蓋較大之華南地區範圍，每日亦於00/06/12/18 UTC執行84小時預測，另外WRF區域模式水平解析度20/4公里之版本也已於2009年12月上線，成為一個WRF模式系列之系集成員模式，於每日00/06/12/18 UTC執行84小時預測。

預測模式所需之電腦運算資源雖和其細部之數值方法以及物理之複雜性有關，但基本上最有關的是解析度與涵蓋範圍，解析度(如格距)之大小直接影響計算之準確度，但在相同涵蓋範圍內增加水平解析度一倍，水平格點數與資料量即增加為4倍，另為滿足計算之穩定，時距約需縮小為二分之一，因此單純水平解析度提高一

倍，大致需要8倍之計算時間。若垂直方向之解析度也同樣提昇，則需16倍之計算時間與8倍之資料量，換言之，若要在相同時限內完成運算處理，電腦之運算效率需增為16倍，而資料儲存與資料傳輸效率需增為8倍，這種需求特性清楚的反映在表1電腦系統之更新上。

五、格點資料管理系統

數值天氣預報系統除模式外，含有大量的資料，有不同變數、不同層、不同預報時間、不同模式預報、不同區域、不同預報起始時間、同一模式可用不同之物理參數化處理等等結果，如何有效管理這些資料，達到資料能被所有參與數值天氣預報模式發展或使用者方便存取、確保一資料能被多人同時使用、同一筆資料內容有所異動時確保執行異動時讀取資料之使用者能正確取得資料、資料之存取方式不會因為電腦系統硬體或軟體異動時而須進行大幅異動，因此中央氣象局在數值天氣預報系統發展之初，即對如何提供數值天氣預報作業良好的資料存取機制，亦即對所謂網格點資料管理系統(Grid Data Management System，簡稱DMS系統)進行完整之規劃與建置，而此DMS的發展與演進也和氣象局所推動的數值預報系統發展息息相關。

第一期數值天氣預報系統發展時期，所採用的高速運算電腦(CDC Cyber 205)與前置電腦(CDC Cyber 180)尚屬封閉性的作業系統，當時在作業系統的限制下，發展出第一代可供多人同時存取網格點資料的單機版DMS。資料之存取係透過此DMS嫁接電腦系統所提供之資料管理指令，資料鍵值(Key)的設計為24字元(碼)：L-FD-TAU-GD-YYMMDDHH-S-

LENGTHs

- 第1碼與2、3碼組成層與變數場，如A01，A表地表，01表氣壓；
- 第4至6碼表預報時數(TAU)，如024表24小時之預報；
- 第7至8碼為模式代碼，如GA表全球模式、RA表區域模式；
- 第9至16碼表預報起始時，如yymmddhh，表19yy年mm月dd日hhUTC；
- 第17碼為資料格式，可以是整數(I)型，文字型(A)，或半數元(H)等；
- 第18至24碼為資料長度，如0010512為當時全球模式一層場為144乘73共10,512個格點資料。

第二期數值預報系統發展時期，電腦由CDC Cyber改為Cray，同時開放性的作業系統(UNIX)已逐漸普遍、網路開始興盛，初期的DMS資料在不同主機間跨網路的流通性上明顯不足，因此進而發展出了建構於UNIX檔案系統(UNIX file system)上的網路版DMS，此時DMS資料已可流通在各工作站(Workstation)間；又為了讓DMS的儲存平台更廣，進一步發展出建構於關聯式資料庫(relational data base)上的版本，成功的讓這個網格資料存取系統順利運作於當時採用的對稱式多處理機(Symmetric Multiple Processors; SMP)高速運算電腦(Cray YMP)上；此時建構於檔案系統或建構於資料庫上的DMS已可跨異質(heterogeneous)平台使用，也達到了跨主機系統的存取功能。而從使用者之眼光，由於有DMS的嫁接，資料讀取方式與前期幾乎完全相同。所錄存之歷史資料，也可透過DMS系統進行資料之轉換，在新電腦系統上正確讀取。

第三期數值預報系統發展時期，採用了分散式記憶平行處理器(Distributed Memory Parallel; DMP)架構的高速運算電腦(Fujitsu Vpp)，也開始採用訊息傳輸介面(Message Passing Interface; MPI)標準，來結合各分散式處理單元進行高速運算，以有效利用系統資源。此時，DMS在一般可供循序程式存取氣象資料的版本外，再發展一套適合於大量平行處理系統環境下使用的平行化檔案系統版本。DMS至此，以主從式架構(Client/Server Architecture)管理及分散式資料處理(Distribution Data Processing)為基礎的異質性資料管理系統，已發展得相當成熟，就前者而言，任何一台主機可單純的成為伺服器或客戶端，也可同時兼顧兩種角色，在不同或相同的資料儲存平台間互相讀取及寫入資料；就後者而言，資料儲存時可以根據指定的不同平台而有不同的儲存方式，亦可透過不同的平台讀取相同的資料。同樣的，由於有DMS的嫁接，使用者所錄存之歷史資料能簡單、迅速的轉換到新電腦系統上，同時寫入、讀取等方式與先前之使用方式幾乎完全相同，減少電腦系統異動所造成之影響。

隨著數值天氣預報模式的逐步發展，不僅解析度提高、預報的層場變數增加，預報時間亦加長，DMS為滿足氣象局在數值天氣預報系統及氣候預報系統等相關模式的網格資料存取需求，在第四期數值天氣預報系統發展期間，將資料鍵值(Key)之定義由原先的24個字元擴增至34個字元。之後，系統沿用至今。34字元Key(簡稱Key34，24字元Key簡稱Key24)主要改變內容為將Key24之L自1個字元增為3個，FD自2個字元增為3個，TAU由3個字元增為4個，GD由2個字元增為4

個，YYMMDDHH由8個字元增為12個，S及LENGTHs則維持不變，形式如LVL-FLD-TAUF-GRID-YYYYMMDDHHNN-S-LENGTHs。Key24及Key34的對應如圖1。其中Key34資料層(LVL)較Key24增加2字元，使可用層數增加數百倍，以應模式垂直層數之增加，同時容許代碼更易為使用者了解；變數場(FLD)大致上沿用原來的定義，僅在前面增加1字元，使可用範圍增加數十倍。Key34預報時數(TAUF)較Key24預報時數(TAU)亦增加1字元，使預報時間的長度可為原來之10倍。模式代碼方面Key34(GRID)較Key24(GD)增加2字元，使得全球模式(GA)可依不同的水平解析度或不同的垂直座標分別以GA0A、GA0B、GA0G、GAMG等表示，區域模式(RA)亦可視不同的解析度分別以RA01、RA02、RA03等表示。預報起始時Key24設定為年月日時各2字元(YYMMDDHH)，其中年(YY)假設為20世紀，如98表1998年。千禧年時這種簡化之代碼即產生不便與困擾，因此將年碼由2字元增加為4字元(YYYY)，另未來預報起始時間可能更頻繁，並不限定為整點時進行，因此加分鐘(NN)2字元以細分。

現行DMS歷經長期的改良與演進，已成為一套功能十分強大、運作極穩定的網格點氣象資料存取系統。氣象局現行的多種氣象應用作業系統，不僅是數值天氣預報的運作，甚至其週邊前後端資料處理以及作業控管的相關系統，包括上游的資料接收、轉發系統及下游的填繪圖、即時預報系統等，均透過此特定的方式來存取網格點資料，充分達成了資料共享、容易存取、穩定傳輸的目標，並提高了資料的使用率。透過DMS的資料存取平台，不僅讓模式的氣象網格點資料得以集中存放，增

加使用性及流通性，節省儲存空間降低營運成本；更可以透過此資料分享平台，快速達到各作業系統在垂直與水平方向運作的整合，便利新作業系統加入原有的作業架構。當有新的人員加入發展與維運工作時，亦可降低在系統間進行資料串接的學習時間，於最短時間內上手，提升整體的工作效率。

六、其他特性

為達到自動作業的目的，NWP系統除了資料接收處理、分析與模式預測之外，還顧及其它方面之需求，而這些需求隨著系統之演進逐漸增建與改進。目前之作業系統逐漸成熟，包含以下幾項機制：

1. 自動控制，由於系統需每天重複的進行相同之作業，自動排程與自動控制機制是系統不可或缺的項目，此機制使得系統能依既定的時間啟動各種作業程式，使各資料能在即時接收後，依時完成各種處理，而被應用(參見譚與蔡1994；黃等2003；黃等2010)。
2. 異常管理，由於數值預報作業系統包含大量資料之處理，也包含大量資料之蒐集。異常現象之發生，可包含在各階段，如資料觀測上之錯誤、資料編碼上之錯誤、資料傳輸上之錯誤、資料運算時之異常以及電腦軟硬體之異常等，這些異常現象都需要有相對應之處理程式或作法才能讓系統順利運作。舉例而言，對觀測之資料，我們需要有資料檢定系統，檢視以對被認定為異常之資料值做修正、或將之剔除、或標示、或讓人員研判後修正。在自動控制機制以及各程式裏也都加入對異常發生時之處理，必要時做異常現象之警示功能，即時讓作業



圖1：中央氣象局網格點資料管理系統24及34字元(碼)資料鍵值對照圖。

Figure 1: Diagram shows the meaning of each code in DMS key and the relationship of the DMS key in 36 characters and that of in 24 characters.

人員得知異常現象發生，儘速予以排除。

- 即時作業，NWP系統的一個主要特性是各種處理需在一定期限內完成，否則即趕不上時效。因此，需要有快速計算處理能力之電腦系統，並重視模式之運算效率(如葉與簡1994、馮與李2000討論模式之平行運算)才足以勝任，另外由於資料之接收與處理也不容間斷，因此主要系統皆有備援之需要，當主系統有異常發生時能迅速的啟動備援系統，執行必要之工作。這些備援不只是硬體備份，在應用系統也需要考慮，因此增加整個作業系統之複雜性。在中央氣象局，大致在觀測3小時後才能將全球資料匯集完整，因此各種處理與模式預測大致在觀測資料匯集後1小時，就能適時提供給預報人員應用。
- 績效管理，由於體認一作業系統不只要能執行當時所設計之功能，更需要

兼顧系統能逐步進步，因此對NWP系統之設計也包含績效之記錄功能，使能以依這些紀錄資料，研判系統之弱點予以改善或調整。在這方面主要有3部分需要顧及：一為模式預測結果之校驗，自動計算各模式預測之誤差、系統偏差、得分指標等(參見方與陳1989；陳等1989)；一為記錄各項資料量、各項處理完成時間、程式異常結束等；另一為記錄電腦系統各資源之使用情形、系統之異常狀況。

- 檔案管理，NWP系統主要可以說是處理資料，包括各原始觀測資料、最終之預測資料、以及其中之中間產品，這些資料各有不同之應用，其留存在線上系統之時間也長短不一，其是否需要長久之錄存也不一，因此需要對檔案有完整之規劃，使資料之產生、讀取、傳送、錄存、備份都能有效的進行。
- 狀態記錄與人機互動，為使NWP系統

能一方面在系統內部有效的作業，另一方面也能清楚的界定其和上下游系統間之劃分，因此系統內各項工作之執行狀況都需清楚的記錄，包括主要工作執行之起迄時間、資料對外傳送之情況等。而為便於監視系統之狀況與在異常時作業人員能適時介入，因此系統之設計也含人機互動之界面，以確保系統能順利的運作。

七、目前工作與未來進展

從國內外現今數值天氣預報作業之現況與科技之進展顯示，數值天氣預報作業系統仍然是未來預報作業所最為依賴的資料來源。為延續第四期數值天氣預報發展計畫之成果與達成氣象預報進一步之提升，中央氣象局於2010年開始執行災害性天氣監測與預報作業建置計畫，其中亦規劃數值天氣預報作業系統將進一步提升，目前工作與未來發展方向，主要包含改善資料源與分析方法、提高預報模式之解析度與物理處理、以及系集預報之發展應用與改進等3大方面。

在改善資料源與分析方法方面，除繼續改善3DVAR分析系統外(全球預報系統採用NCEP GSI分析系統)，目前正測試四維變分法(4DVAR)與系集卡爾曼濾波器(EnKF)，另由於衛星雷達等遙測資料逐漸取代傳統觀測，而成為觀測之主流，因此如何將這些觀測結果納入模式應用，成為未來重要之發展課題。

在預報模式方面，針對模式預報誤差或偏差，分析其可能成因，透過物理處理方法之改善等，以提升模式預報能力，是NWP改進之一重要途徑。另外國內外之研究都顯示，唯有足夠之模式解析度才有可能解析到更小尺度之天氣系統，尤其在複

雜之地形下，解析度不足就無法表現地形之確實分布以致影響模式之降水或風場預測結果。以美國為例，其以每1.5年提高計算能力一倍為基礎規劃作業改進目標，預期在2020年時之區域模式之解析度可達幾百公尺。因此提高預報模式之解析度是NWP改進之另一重要途徑。中央氣象局將自2012年起引進新一代高速運算電腦，預估其運算能量將較目前成長15倍以上。配合此條件，中央氣象局數值模式計劃進一步提高解析度，全球模式將提高至經緯0.25度以內(T512)，垂直60層，區域模式WRF則將至少提高至15公里內含3公里之2層巢狀網格。在資料同化將發展三維變分法結合系集卡爾曼濾波器(EnKF)之混合技術，利用系集預報系統改善三維變分法所用的背景誤差統計，以獲得更佳的資料同化效果。目前NCEP及ECMWF均積極發展這項新技術。

國內對天氣預報之需求已逐漸擴增至兩大方面，一為要求更區域性之預報，由現今對臺灣分北、中、南等區域提高到要提供對鄉鎮或市內各區之天氣預報。以都會地區之各城市為例，除了颱風梅雨等劇烈天氣所造成較廣泛範圍之災害外，最常見的是因豪雨引致局部地區排水不良之淹水，而造成財物之損失與對生活之負面影響。要對這種情形有預警能力前，必須有小區域之降水觀測與預報能力。依中央氣象局目前之資料分析、預報與模式解析度等狀況而言，此需求遠超過目前作業能力。而以數值天氣預報之發展能力與成熟度而言，中央氣象局經過去4期發展計畫之執行，各模式之內涵已相當完整，也具有非靜力處理之能力，因此需要在電腦計算處理能力進一步擴充後，整合更多之觀測資料、發展更完整之資料分析與同化技

術、並以較高解析度之模式，來提供更即時與更準確之預報結果，配合統計預報之再強化與應用(中央氣象局早期發展系統見陳等1999)，以逐漸達到滿足外界對小尺度區域性定量天氣預報之需求。

外界對天氣預報另一方面之需求則是逐漸擴增至更長期天氣之預報，針對此中央氣象局已於第三期計畫中開始嘗試以全球預報模式進行模式35天之預報計算，將以此為基礎進一步改進與擴充以達到一個月內逐週天氣趨勢預報之需求(見張等2000)，而更長期之預報則需依賴氣候模式。

誌謝

感謝中央氣象局氣象科技研究中心程家平先生對網格資料管理系統、陳雯美女士對變分法提供更完整說明資料，氣象資訊中心劉國隆先生、林弘倉先生提供中央氣象局IBM超級電腦系統效能相關資料，以及秦照萍女士、何傳忠先生提供中央氣象局數值天氣預報系統接收觀測資料之明確資訊。

參考文獻

方力脩、陳慧貞，1989：數值天氣預報之校驗方法綜評。氣象學報，35-01，48-64。

胡仲英，1979：ADAPS之研究與設計。氣象學報，25-01，9-24。

胡仲英、陳熙揚，1976：利用客觀比擬法預報颱風路徑之研究。氣象學報，22-01，8-16。

徐月娟、胡仲英，1976：用電腦繪製天氣圖之研究。氣象學報，22-04，32-38。

郭文鑠、胡仲英，1975：預報電腦化之研究與設計。氣象學報，21-02，18-24。

陳雯美、林松錦、蔡清彥，1989：中央氣象局全球數值天氣預報系統1988-1989預報校驗評估。氣象學報，35-04，263-280。

陳重功、羅存文、王惠文、賀介圭，1999：中央氣象局統計預報系統的發展。氣象學報，43-02，18-33。

張庭槐、曾建翰、張忍成，2000：中央氣象局系集預報系統。氣象學報，43-04，1-11。

馮欽賜、李長華，2000：中央氣象局全球模式之平行計算處理及在新超級電腦上之測試。天氣分析與預報研討會，2000年7月10-12日，臺北，294-297。

黃麗玫、劉政、林介峰、李香蘭、秦照萍、柯宏明、何傳忠、陳蕙茹，2003：中央氣象局數值天氣預報系統整體作業控制近況介紹。天氣分析與預報研討會，2003年9月15-17日，臺北，342-346。

黃麗玫、張庭槐、柯宏明、吳蕙如、李香蘭、秦照萍、何傳忠、陳蕙茹、周昆逸、張宏逸，2010：臺灣數值天氣預報作業介紹。2010年海峽兩岸氣象科學技術研討會，2010，147-151。

葉天降、簡宏偉，1994：在CRAY-YMP 8i上增進有限區域預報模式向量化及平行處理之研究。氣象學報，40-04，301-312。

譚允中、蔡翠碧，1994：中央氣象局第二代數值天氣預報整體控制系統發展近況。氣象學報，40-03，246-257。

- Barnes, S., 1964 : A technique for maximizing details in numerical map analysis. *J. Appl. Meteor.*, 3, 395-409.
- Cressman, G. P., 1959 : An operational objective analysis system. *Mon. Wea. Rev.*, 87, 367-374.
- Devenyi, D., S. G. Benjamin, and S. S. Weygandt, 2001 : 3DVAR analysis in the Rapid Update Cycle. Preprints, 14th Conference on Numerical Weather Prediction, Amer. Meteor. Soc., J103-J107.
- Gandin, L., 1963 : Objective analysis of meteorological fields (Leningrad: Gridromet). English translation (Jerusalem: Israel Program for Scientific Translation), 1965.
- Lorenc, A., 1981 : A global three-dimensional multivariate statistical interpolation scheme. *Mon. Wea. Rev.*, 109, 701-721.
- Parrish, D., and J. Derber, 1992 : The National Meteorological Center' s spectral statistical interpolation analysis system. *Mon. Wea. Rev.*, 120, 1747-1763.

The Numerical Weather Prediction System of the Central Weather Bureau (I): Overview of the Development of the System

Tien-Chiang Yeh, Chuen-Teyr Terng, Li-Mei Huang,
Chin-Tzu Fong, Ting-Huai Chang
Central Weather Bureau

ABSTRACT

In 1976, the Central Weather Bureau (CWB) commenced the application of its computerized meteorological operational system, which has been significantly improved through four-phase evolution of the Numerical Weather Prediction (NWP) systems. For example, the horizontal model resolution has markedly been increased from 70 Km in 1989 to 5 km in 2010. Nowadays, the NWP results can be transmitted across varied computer systems in real time and displayed on the screens in front of the forecasters according to their decisions. This current situation considerably differs from that of the past when the computerized system has not been introduced and the meteorological codes had to be decoded and manually plotted by meteorologists. This report documents the transition of the CWB NWP systems, which include the computer systems, meteorological data, numerical analysis, and forecast models through the past 35 years so as to better understand the development of the CWB NWP operations.

Key words: Numerical Weather Prediction, model, observational data, computer system

中央氣象局數值天氣預報作業系統(二) 預報模式概況

葉天降 馮欽賜 柳再明 陳得松 黃康寧 陳雯美 汪鳳如 洪景山
中央氣象局

摘 要

中央氣象局於1976年開始引進電腦設備，發展氣象作業自動化系統，至今已35年，葉等(2012)曾就其發展過程做說明。本文概要的整理近年間，中央氣象局數值天氣預報作業全球、區域、與颱風路徑預報模式之改進情形與現況，以期對其有進一步認識。由中央氣象局之發展經驗顯示，近年數值預報準確度之提升主要是由於模式解析度之提高、模式動力及物理之改善、引進三維變分分析方法並於分析中加入如衛星觀測輻射場等非傳統觀測資料之應用，另外在颱風渦旋處理及簡單系集預報之應用也都改進了颱風路徑預報與降水量預報。

關鍵詞：數值天氣預報、颱風路徑預報、模式、客觀分析、三維變分

一、前言

中央氣象局(CWB)數值天氣預報(NWP)作業系統發展至今已近35年，葉等(2011)曾說明其發展過程大致可分為5階段，1984年以前系統係在迷你型電腦上執行，由1976年起包括即時資料接收、解譯、氣象觀測資料查詢、填繪圖、東亞相當正壓模式48小時預測、及氣象觀測資料錄存等都逐步在中央氣象局作業應用。

1984年中央氣象局業務電腦化計畫開始全面推動，在1984年至1989年間發展數值天氣預報第一代系統，包括於1987年6月建置CYBER 205超級電腦，並逐步發展客觀分析、全球預報、區域預報、颱風路徑預報等系統，完成之第一代數值天氣預報系統於1990年正式作業。民國1990年至1994年，中央氣象局發展數值天氣預報

第二代系統，包括1992年6月建置第二代超級電腦系統CRAY YMP8I，並發展最佳內差客觀分析取代逐次修正分析、發展全球波譜預報模式取代全球定差格點預報模式、發展新的多層巢狀(nest)網格組區域預報模式與颱風路徑預報等系統，完成之第二代數值天氣預報系統於1995年正式作業。第三代數值天氣預報系統發展計畫是於1995年至2001年執行，包括於1999年12月更新超級電腦為含15個中央處理器之FUJITU VPP5000系統，發展三維變分分析取代最佳內差分析、改進全球波譜預報模式、發展新的多層網格非靜力平衡區域預報模式等系統，完成之第三代數值天氣預報系統於2002年正式作業。

2002年後中央氣象局推動氣候變異與劇烈天氣監測預報系統發展計畫，於2002年至2009年發展第四代數值天氣預報系

統，其於2006年10月更新超級電腦為含2,496個中央處理器之IBM P5-575 Cluster 1600系統，並以第三代數值天氣預報系統為基礎，持續進行系統之改進，並引進WRF (Weather Research and Forecast) 區域數值預報模式，目前中央氣象局正推動「災害性天氣監測與預報作業建置計畫」，發展第五代數值天氣預報系統，而在第五代數值天氣預報系統未完成前，第四代建置之系統仍為日常作業所用。本文謹就中央氣象局全球預報系統、區域預報系統、及颱風路徑預報系統相關之進展與現況做進一步之說明。

二、全球預報系統

配合數值天氣系統的發展歷程與電腦運算效率的提升，中央氣象局全球預報系統(Global Forecast System, GFS)自1988年完成並逐步正式上線作業至今，無論在分析方法、模式架構、物理參數化及解析度的提升都歷經許多變動而逐步進展，表1與表2簡列系統發展過程的主要遞變。在CWB第一代全球預報系統時期，全球預報模式乃植基於當時美國加州大學洛杉磯分校(UCLA)所發展之定差網格型態大氣環流模式，水平解析度為經、緯各2.5度，垂直分布有9層，在客觀分析上採用Barnes (1964)方法，詳見Liou et al. (1989)。1994年更替為第二代全球預報系統上線作業，系統各個部分已作重新的設計，全球預報模式之動力架構除改為世界主要氣象作業中心所採用的典型三角截斷式波譜型態，並引進不同的物理參數化方案(Liou et al. 1997)，主要特徵如表1所示，不過近年來又陸續更新了當初的物理參數化方案。

近十幾年間，大體而言中央氣象局全

球預報模式都是在此版本上作為發展的延續，不過模式之水平解析度隨著電腦運算能量的更迭，已從剛建置時的T79(約相當於1.5度)提升為2011年的T319(約相當於0.375度)，垂直分布則由18層增加至40層。另外，在電腦發展的新趨勢下，自1998年起中央氣象局引進的第三、四代新超級電腦均屬分散式平行化架構，為此全球預報模式的程式均被大幅調整以加入分散式平行運算的功能，與電腦運算的新趨勢接軌，這項改變使全球預報模式在此類電腦上具備極佳的平行化執行效率(馮與李 2000)。其次，第二代全球預報系統在客觀分析方法較第一代全球預報系統時有重大的變革，它採用最佳統計內插法，這方法具有建立統計上最小誤差分析場的特性，此外資料同化循環區間也在稍後由12小時改為6小時，以進一步改善分析場的品質。

國外氣象預報作業，近二十年來得益於衛星資料的大量運用，取得相當大幅度的提升，但中央氣象局卻在客觀環境的阻滯，長期難以即時取得這些大量、非傳統觀測資料的條件下，導致全球預報系統的發展一直存在不易突破的瓶頸。長期以來GTS (Global Telecommunication System) 是中央氣象局獲得全球即時觀測資料的最主要源頭，比較其他國外作業中心能運用的資料量與種類，CWB GTS的資料內容除在傳統資料的提供上與國外作業中心差距不大之外，但在飛機風場報之數量則是相當不足，而在衛星輻射通量資料上則更是付諸闕如。表3為以2002年11月20日12Z及2011年8月12Z為例，列示CWB GTS資料量與NCEP (National Center for Environmental Prediction, 美國國家環境預測中心)、ECMWF (European Center

表1、中央氣象局全球預報系統(GFS)發展過程紀要。

Table 1: Milestones of the Development of the Central Weather Bureau Global Forecast System.

全球預報系統(GFS)的發展	
1988年	第一代系統正式作業 ●定差格點模式，水平格距為2.5度垂直9層 ●Barnes客觀分析
1994年	第二代系統正式作業 ●波譜模式T79，水平格距約1.5度垂直18層 ●最佳內差客觀分析
1997年	分析週期由12小時提高為6小時
1998年	水平解析度提高為T119 格距約1度
1999年	建置第三代平行處理式超級電腦 ●模式具平行運算功能
2002年	垂直解析度提高為30層
2003年	引進NCEP SSI三維變分分析方法，並加入颱風中心relocation方案
2004年	水平解析度提高為T179 格距約0.66度
2005年	更新土壤模式
2006年	建置第四代平行處理式超級電腦
2007年	水平解析度提高為T239 格距約0.5度 ●增加雲水預報變數 ●採用雲微物理降水參數化
2008年	更新輻射參數化
2009年	更新積雲對流參數化與邊界層參數化
2010年	引進NCEP新一代三維變分分析方法GSI
2011年	水平解析度提高為T319 格距約0.375度，垂直解析度提高為40層

for Medium Range Weather Forecasting，
 歐盟中期天氣預報中心)兩個主要作業中心可用資料量的情形，由此表可發現在傳統觀測上最重要的探空(TEMP)及一般地面綜觀觀測(SYNOP)、海洋船報(SHIP)、PILOT風場等資料上，CWB GTS數量雖稍少但接近，且隨時間之變化較不明顯。不過那些在空間及時間密度較高、非傳統的飛機報、衛星雲導風(SATOB)及衛星原始輻射量資料則嚴重偏少或缺乏，這種差異並隨時間增長。所幸，在2002年NCEP

將其全球預報系統所使用的完整觀測資料放置於網路上，中央氣象局得以由網路從NCEP每日定時取得過去欠缺之各類、豐富的衛星資料，不過這些資料有6小時的延遲，CWB僅是將其運用於作業上的後執行階段，詳見馮等(2003)。在此同時，為使資料同化過程能更有效率及妥善地運用衛星輻射觀測資料，CWB亦開始投入三維變分分析之發展，並經過測試後於2003年5月引進NCEP的SSI三維變分分析法(Deber et al. 1991)，取代最佳統計內插法

表2、中央氣象局全球預報系統(GFS)模式架構。

Table 2: The model configuration of the Central Weather Bureau Global Forecast System in 2004 and the major differences between the configurations in 2004 and in 2010.

2004年系統的架構	
<p>動力</p> <ul style="list-style-type: none"> ●三角截斷179波，垂直30層 ●非線性正模初始化 ●預報變數： <ul style="list-style-type: none"> - 垂直速度 - 水平輻散場 - 地表氣壓 - 虛位溫與溼度 ●時間積分採Semi-implicit法 	<p>物理</p> <ul style="list-style-type: none"> ●單層土壤模式包含地表通量參數化處理 ●垂直紊流為 TKE-ϵ 方案 ●積雲參數化為 Relaxed Arakawa-Schubert方案 ●簡單大尺度降水處理 ●淺積雲效應為Li and Wang (2000) ●重力波效應為類似Palmer et al. (1986) 方案 ●輻射處理為Harshvardhan et al. (1987) 方案
2011年與2004年系統架構之差異	
<p>動力</p> <ul style="list-style-type: none"> ●三角截斷319波，垂直40層 ●預報變數增加雲水項 	<p>物理</p> <ul style="list-style-type: none"> ●類似Mahrt and Pan (1984) 之兩層土壤模式方案 ●垂直紊流採用含非局部 (nonlocal) 紊流通量之一階閉合邊界層參數法(Troen and Mahrt 1986) ●積雲參數化為Pan and Wu (1995) 之簡化A-S 積雲對流參數法 (Simplified Arakawa- Schubert scheme) ●大尺度降水參數化採用Zhao and Carr (1997) (1997) 提出之預報方案，預報雲水 (雲冰)，並透過雲物理過程決定降水 ●輻射參數化使用二向式(two-stream)之計算結構，但長波方面使用Fu et al. (1997) 的二向\四向混合法以提高其精確性。關於大氣氣體吸收係數與雲光學特性的參數化乃參考Fu and Liou (1992; 1993)。

客觀分析模式；為擴充對陸續新增之衛星輻射觀測資料的同化能力，於2010年7月再度引進NCEP最新三維變分分析作業系統GSI (Gridpoint Statistical Interpolation) 更新分析模式(陳等，2010)，同時對臺灣所發射的福衛三號(Formosat-3/COSMIC) 氣象衛星的GPSRO資料亦於評估測試後

(沈等，2010)納入同化分析作業中。另一方面，為提升颱風路徑預報的成效，全球預報系統在實施客觀分析之前，先對猜測場的颱風環流依當時氣象局之颱風中心的定位報告進行重置(relocation)，此項技術與NCEP所使用的方法雷同(Liu et al. 2000)。

表3、CWB、NCEP、ECMWF三作業中心之各類觀測資料量的比較。2001年為2001年11月20日12Z之資料量，2011年CWB及NCEP的資料量為2011年8月份12Z時段的平均量，ECMWF為9月13日12Z之單日資料量。資料類型之括號內說明為觀測報告類別簡稱。

Table 3: Numbers of data used in the operation of the numerical model forecasts at CWB, NCEP and ECMWF, respectively. The values were counted at 12UTC November 20 for 2001, and were the mean of 12UTC August for CWB and NCEP and at 12UTC September 13 for ECMWF, respectively, in 2011.

資料類型		2001年			2011年		
		CWB	NCEP	ECMWF	CWB	NCEP	ECMWF
地面觀測(SYNOP)		8277	10400	13706	12408	17591	18834
機場地面觀測(METAR)					29854	43271	13081
船泊報告(SHIP)		1509	1885	1510	2819	1361	2938
海洋浮標觀測(BUOY)		-----	16	2524	8517	13287	9096
探空雷送(TEMP)		530	566	561	634	670	628
探空風標(PILOT)		129	135	318	321	78	307
剖風儀(PROFILER)		----	165	477	----	161	1687
飛航報告(AIREP)			748	3387		3329	2949
ASDAR/AMDAR- aircraft		1185	4069	7119	13772	14672	24777
ACAR-aircraft			25296	27014		36607	38574
衛星觀測與反演資料	VAD	----	----	----	----	1683	----
	SCAT	----	----	----	----	0	285810
	SATOB-satellite wind	19751	20247	12433	78425	425658	574176
	RADIANCE-AMSUA					608405	615364
	RADIANCE-AMSUB/MHS					152991	346114
	RADIANCE-HIRS	----	~150000	235760	----	164266	470363
	RADIANCE-IASI					1167119	70228
	RADIANCE-AIRS					614034	71116
	OZONE	----	----	----	----	18200	72057
GPSRO	----	----	----	131358	131358	62048	

圖1是CWB GFS 從1995至2010年間對北半球20至80度範圍內500hPa高度場第5日預報值相較分析值之距平相關(anomaly correlation)，如前所述CWB GFS在過去數年投入各種改進努力下，已從1999年平均距平相關得分大約為0.65，至2002年漸提升至0.7左右。2003年經過非傳統觀測資料及三維變分法之應用等變動，使平均距平相關得分往上推升至0.73

左右，相較之前漫長的歷程，短期獲致如此幅度的改進確是效益顯著；而2010年的更新也有顯著的效益，使年平均距平相關自2009年的0.78提昇至2010年的0.82左右。於後再簡要說明模式改進情形。

改善模式的系統性誤差是發展數值預報模式另一項重要的工作，由於預報誤差的來源錯綜複雜，從數值模式初始場的誤差到模式內部數值方法及物理參數化的不

day 5 forecast, 500hPa H AC - N.Hemis.

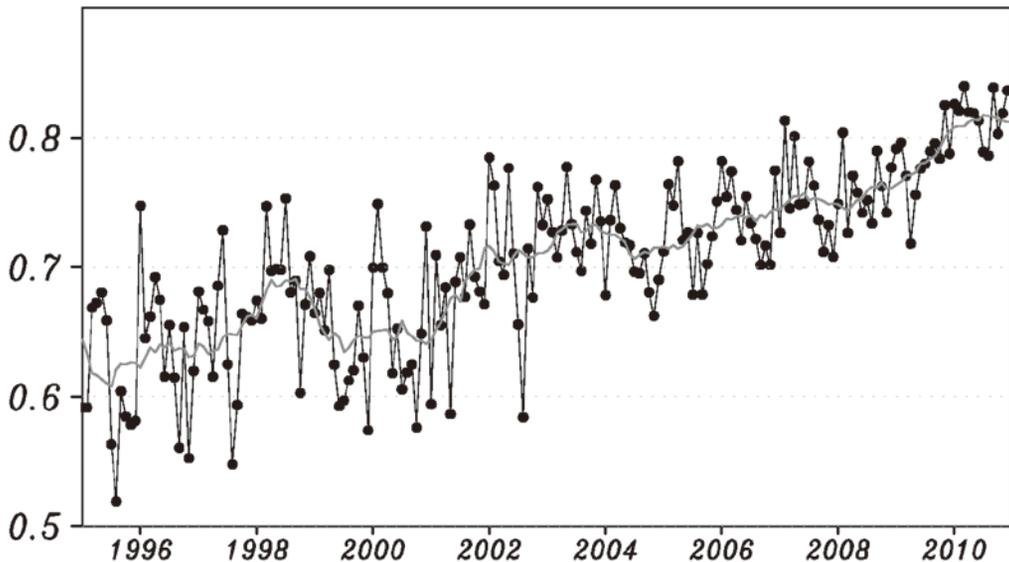


圖1、1995至2010年期間(橫軸)中央氣象局全球預報系統對北半球20至80度範圍內，第5日500hPa高度場預報結果之距平相關(AC,縱軸)月平均變化。圖中較平滑線為為12個月移動平均(running mean)。(感謝中央氣象局氣象資訊中心柯宏明協助繪製)

Figure 1: Monthly mean anomaly correlations of the CWB GFS model day-5 geo-potential height forecast over northern hemisphere between 20 to 80 degree latitudes on 500 hPa, from 1995 to 2010. The 12-month running mean is shown in the smoothed curve. (Figure provided with help from Mr. H.-M. Kuo, Central Weather Bureau)

完善，都是引起預報誤差的可能來源，這也使得釐清誤差的來源並不容易，不過就系統性誤差而言，往往與物理參數化過程的不完善有相當關連。圖2為CWB GFS從1998年7月至2001年9年期間，第五天預報在850hPa至500hPa大氣溫度的系統性誤差隨緯度之分布，顯示GFS預報結果主要特徵是GFS對北半球20度以北，夏季時節屬於預報偏暖而冬季時節屬於預報偏冷，低緯度帶GFS預報偏差則無季節變化特性，溫度預報處於穩定不變的過暖偏差。馮(2001)以收支計算法，利用模式一日預報中加熱或冷卻收支不平衡的現象作為診斷的基礎，追蹤系統性誤差與物理參數化

過程之間的關連，發現夏季溫度預報過暖的問題與模式過強的長波雲輻射作用力有關，原因出自模式對雲垂直疊合的假設一律視為隨機疊合，因此有高估雲量的作用，使得對中低層大氣產生過多的長波溫室效應。針對此問題的修正，新作法改為對於伴隨積雲降水的雲層假設最大垂直疊合，如此使得夏季溫度預報過暖的問題已獲得許多改善，詳見馮(2001)。

Li and Wang (2000)的研究也指出CWB GFS淺積雲參數化在垂直紊流混合上之反應較實際大氣過度，使東太平洋ITCZ上源信風帶之邊界層水氣不能有效積聚，導致低層水氣通量輻合偏弱、ITCZ降

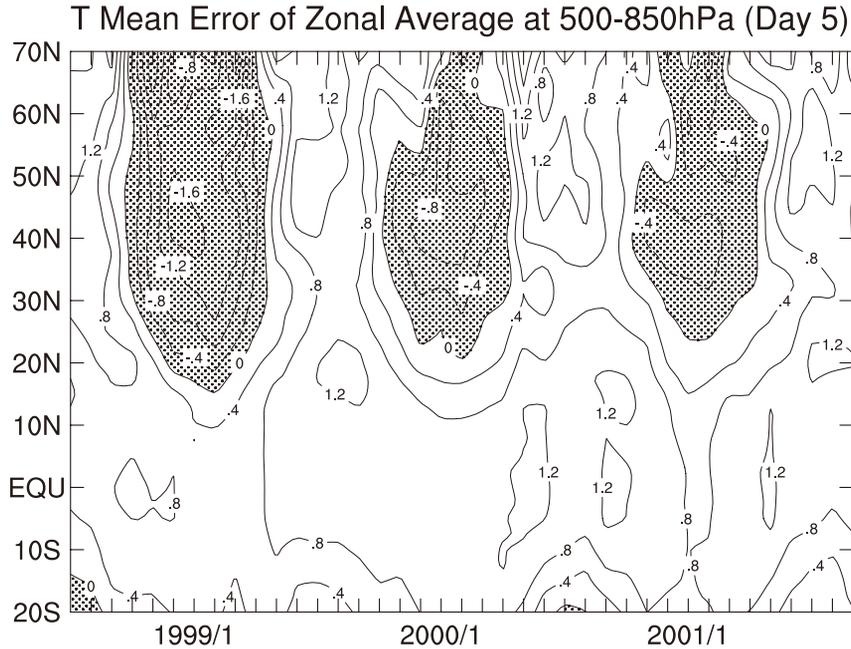


圖2、1998年7月至2001年9月期間(橫軸)，中央氣象局全球模式對第五天在850 hPa至500 hPa間大氣平均溫度預報系統性誤差隨緯度(縱軸)之分布。單位為 $^{\circ}\text{C}$ 。

Figure 2: Trends, from July 1998 to September 2001, of the day-5 CWB GFS model forecast error of the zonal averaged mean temperature ($^{\circ}\text{C}$) between 850 hPa and 500 hPa.

水過弱的現象。CWB GFS在納入他們的修正方案之後，新版淺積雲對流相較於舊版，對信風區邊界層頂會產生遠較舊版明顯的水氣與相當位溫梯度結構，同時邊界層表現較淺且水氣增多，有利下游ITCZ產生較多的水氣輻合與產生對流。

此外，鑒於CWB GFS原先使用的地表過程參數化為單層土壤模式，其過於簡化，無法涵蓋地表覆蓋物的影響及土壤層之間的交互作用，而可能引進地表溫度與濕度的預報誤差，所以在顧全物理的詳實及實際作業在運算資源的限制上，於2005年進行以Mahrt and Pan (1984)發展的OSU多層土壤模式作為更新的版本。OSU多層土壤模式的預報變數涵蓋了各土壤層的土壤溫度及單位體積土壤含水比例，植物

表面承接水量、地表溫度及雪的厚度均在此模組內預報。它除了涵蓋較詳實的物理過程，對土壤溫度及含水量做預報，另外還考慮了植物覆蓋(canopy)的影響，因此地表至大氣的蒸散量是由3個部分共同決定：土壤表面的直接蒸散、植物表面水分的再蒸散、透過植物根部上傳水分的蒸散(evapotranspiration)作用，其中並考慮了4種植物阻泥因子。從預報實驗結果顯示，此土壤模式因為考慮了較切實的植物覆蓋率及合理的飽和蒸發量計算方式，大幅降低了作業單層土壤模式在夏季對青康藏高原區及各沙漠區蒸發量的高估傾向(圖3)，這有助於GFS對北半球中低層大氣預報偏暖系統性誤差的再次改善。

隨著地表過程對大氣影響之議題日漸

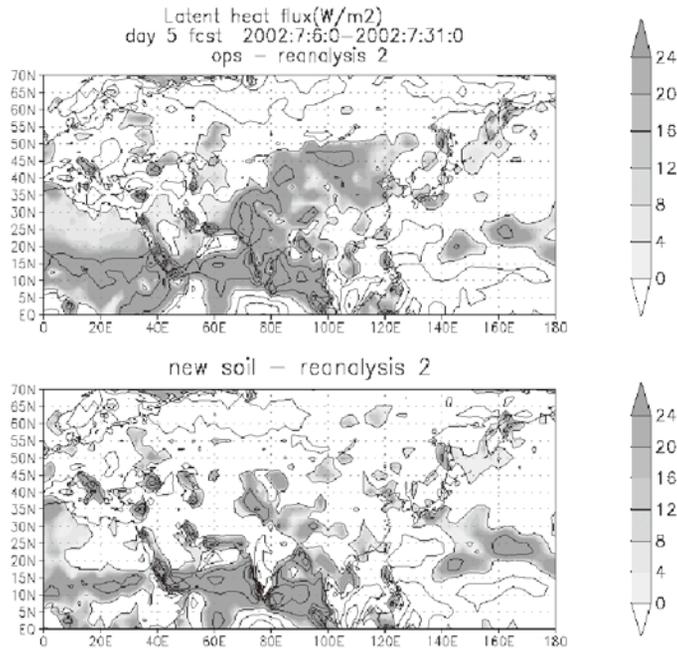


圖3、以2002年7月進行中央氣象局全球預報模式預報實驗，模式第五天平均地面潛熱通量分別以作業的單層土壤模式(上圖)及多層土壤模式(下圖)之預報結果。差值之正區(有色階)代表模式對地面潛熱通量預報有高估傾向，等值線間距為50 W/m²。

Figure 3: CWB GFS model, with single-layer soil model in upper panel and multi-layer soil model in lower panel, monthly mean day-5 latent heat flux forecasts during the operational test on July 2002. Areas of over forecast are shaded. Contour intervals are 50 W/ m².

受到重視，地表模式的研究近十年亦有蓬勃的進展，Noah地表模式(Ek et al. 2003)即為其中一代表，建構於OSU地表模式之上的Noah地表模式，針對冰及雪的部分作了加強，除了預報土壤水含量，另外增加了土壤含冰量的計算。有關雪的預報，也引進了較完整的積雪(snowpack)概念，將溫度對積雪密度的影響加入。對於降雪情況，增加了因降雪溫度與地面溫度差異而產生的熱量交換，另外增加了凍雨的考慮，即當大氣條件判斷為降雨，但地面溫度低於零度，於此情況則視為凍雨，將額外考慮水結冰的相位變化所釋放之熱量，因此對於雪面溫度之計算更接近真實。基

於Noah地表模式較完整的冰雪處理，全球模式也正嘗試引進，目前處於測試評估階段，測試結果顯示此版地表模式對模式冬季預報偏冷之誤差有顯著的改進(圖4)。

模式對於降水過程的掌握，是影響大氣模式預報之關鍵環節，為提升模式對於網格尺度降水的模擬，全球模式於2007年將原本的診斷方案更新為預報方案(Zhao and Carr 1997)，於預報方案中考慮了雲水(或雲冰)的生成消散機制以預報雲水(或雲冰)，最後再透過雲物理過程決定雲水轉換為網格尺度降水的量。此雲水預報方案同時提供預報之雲水作為計算雲輻射效應的參考變數。配合雲水預報過程的納

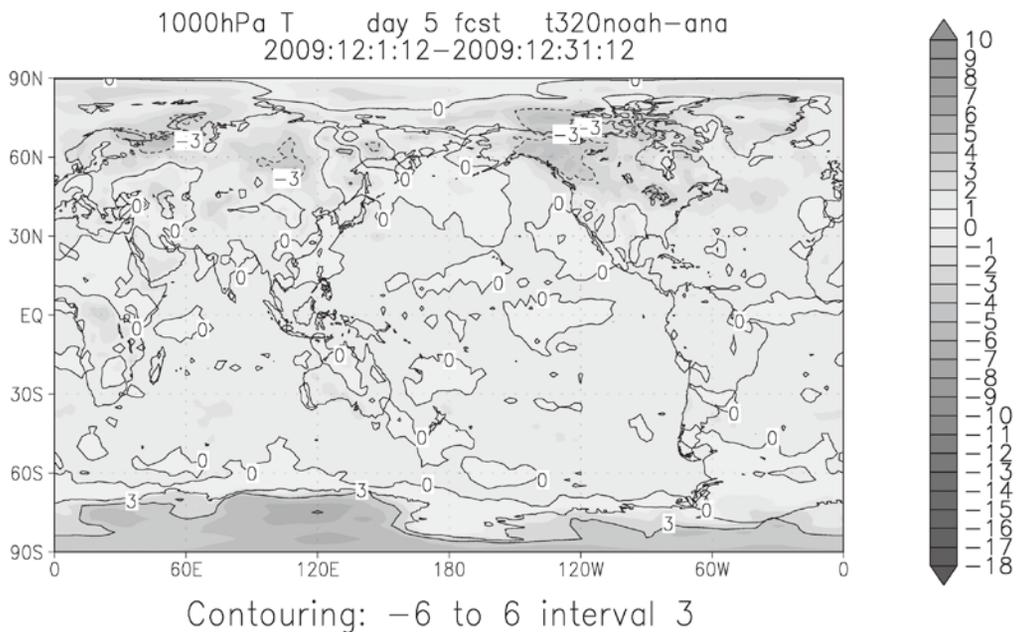
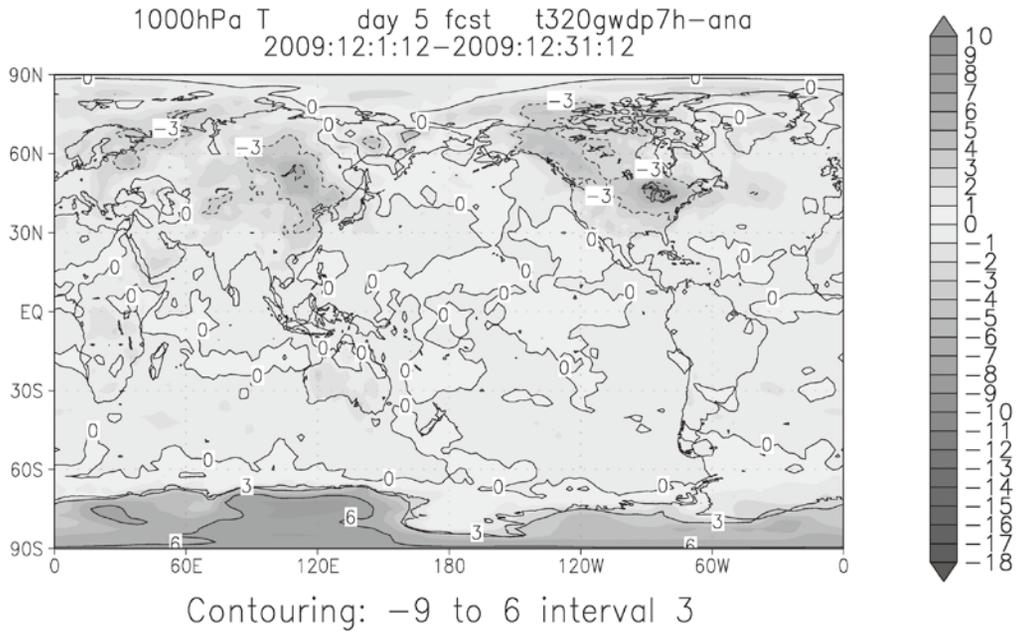


圖4、中央氣象局全球模式使用OSU兩層土壤模式(上圖)與Noah土壤模式(下圖)之12月份預報實驗比較。圖為相對分析場，一個月平均下1000hPa溫度場之5日預報偏差(°C)，前者在北半球冬季之陸地區域有明顯偏冷系統性誤差。

Figure 4: CWB GFS model, with OSU two-layer soil model in upper panel and Noah soil model in lower panel, monthly mean day-5 1,000 hPa temperature forecast errors during the operational test on December 2009. Scales (°C) are shown in right panel.

入，於2008年也更新輻射模式，新版將短波及長波輻射的計算統一在兩向式(two-stream)之計算結構(馮 2001)，並採用較合理的雲垂直疊合處理以及雲光學特性參數化，能改善雲輻射作用的模擬。

另外有關對流降水過程，亦於2009年引進NCEP全球模式使用之SAS (Simplified Arakawa Schubert)積雲參數法(Pan and Wu 1995)，此方案將雲水在雲頂的逸出計算含蓋於內，同時增加了下沖流(down draft)過程及對流過程的動量傳遞，對於降水過程的處理更為完整。整體而言，降水過程的更新使得降水的配置比例產生變化，網格尺度降水比例提高後接近總量的33%，更接近實際大氣。另外對於熱帶系統的模擬亦有正面影響，原來於500hPa等壓面太平洋高壓隨預報過強的現象獲得改善(見圖5)，也進一步改善颱風路徑預報的品質(馮等 2009)。配合SAS積雲參數法的更新，邊界層過程的參數化方案同時也作了更新，引進NCEP全球模式使用的非局部(nonlocal)方案(Troen and Mahrt 1986)，此方案考慮了大渦流(large eddy)產生的非局部傳送，使得低層水氣能有效率的向上傳送，改善模式原本近地層的過濕現象。整體而言，得益於積雲及邊界層參數化的更新，全球預報系統預報品質獲得相當明顯的進展(汪與馮 2010)。

三、有限區域預報系統

中央氣象局第一代有限區域預報模式包含一區域模式(RFS)、一中尺度模式(MFS)與一颱風路徑預報模式(TFS)。三者相似，差別在水平格點解析度與含蓋區域。區域模式解析度為90公里含9層111 X 81格點於1989年7月1日起作業，中尺度模式解析度為45公里亦含9層但為101 X 81

格點於1990年1月1日起作業，颱風路徑預報模式亦於1990年1月1日起作業，先採60公里解析度後因電腦計算能力不足採70公里解析度垂直7層121 X 88格點。有關第一代有限區域預報系統詳細資料見Jeng et al. (1991)、Peng et al. (1993)、與Peng et al. (1995)。

中央氣象局第二代有限區域預報模式(LAFS; Local Area Forecast System)於1994年發展完成，與第一代有限區域預報模式相較，其在動力模組與時間積分處理方式上相類似，唯第二代有限區域預報模式已將區域與中尺度模式提高解析度為垂直20層，並整合為一含粗與細網格距組之2層巢狀模式(nest model)，粗網格組格距60公里，含蓋161 X 121格點，細網格組格距20公里，含蓋91 X 91格點。在物理處理上第二代有限區域預報模式與第一代有限區域預報模式有較大差異，包括地表邊界層採用較完整、多層之TKE $E-\epsilon$ 參數化處理，輻射效應採用Harshvardhan et al. (1987)參數化處理，積雲效應除有Kuo (1974)參數化處理外，增加Betts and Miller (1986)之參數化處理，相關之說明見葉等(1994)、張與葉(1994)、吳等(1994)、童與彭(1994)。另外，第二代有限區域預報模式之資料分析係採用最佳內插法(OI)，並經非線性正模初始化處理後才進行積分預報，相關之說明見黃等(1994)、柳與張(1994)。

中央氣象局於第三代數值預報系統發展計畫時，自行發展四階定差、三層巢狀網格、垂直30層之非靜力平衡預報系統(Non-hydrostatical Forecast System)，簡稱NFS，三層巢狀網格之格距分別為45、15、與5公里，格點數分別為191x127、145x139、與61x91，因此模式最高解析

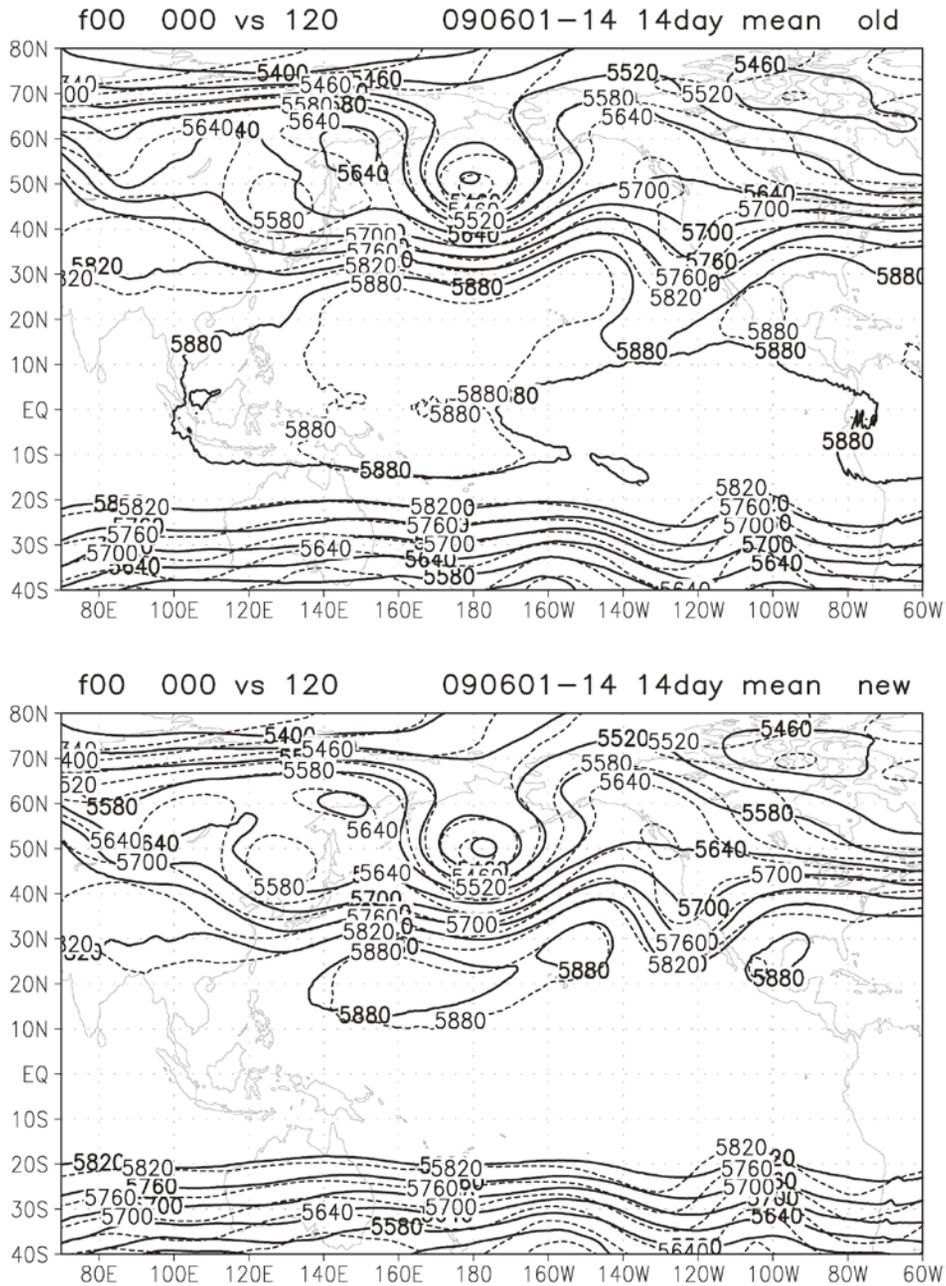


圖5、中央氣象局全球模式使用舊版積雲與邊界層參數化(上圖)與新版(下圖)之預報實驗比較。圖為2週平均之下，500hPa高度場5日預報場(虛線)與分析場(實線)之對照，前者在北半球副高有明顯偏強之系統性誤差。

Figure 5: 14-day mean observed (solid lines) and the CWB GFS model day-5 forecast (dash lines) 500 hPa geopotential heights. On upper (lower) panel, the original (revised) version of the cumulus and planetary boundary layer parameterizations was applied in the CWB GFS. Contour intervals in 60 meters.

5公里涵蓋之範圍為以臺灣為中心，東西300公里、南北450公里。預報模式對水汽的動力平流方面，為顧及水汽量為正值，因此除了一般的四階定差法，尚有Hsu與Arakawa正定法(Hsu and Arakawa 1990)可供選擇，此法當網格解析度到達對流尺度時，更能凸顯正定水汽平流法的重要性，尤其是在垂直平流方面。當然較之四階定差法，正定法會花費較多的電腦計算時間。預報模式時間積分採用split-explicit法處理前三組速度較快的重力波，也使用四階頻散讓模式積分穩定。模式的物理部份，輻射參數化方面採Harshvardhan et al. (1987)法；邊界層參數化方面採TKE E- ϵ 法處理；而降水模擬部份，對流性降水參數化方面有Kuo (1974) 以及Arakawa and Schubert (1974)兩種方法供選擇；大尺度降水參數化方面有層狀降水參數法以及Zhao et al. (1997)雲冰與雲水的降水參數法，現行NFS作業採用Kuo (1974)對流性降水參數化法與雲冰雲水法大尺度降水參數化法。

CWB NFS於2001年取代第二期電腦化計畫時發展之區域預報系統LAFS成為CWB之區域預報作業模式，圖6與圖7分別是NFS與LAFS新舊兩預報系統在2001年9月至11月平行測試期間時高度場預報標準差以及溫度場預報平均誤差的比較。圖6顯示LAFS在850hPa、500hPa及300hPa各層高度場預報標準差值皆較NFS者大，尤其在中上層更明顯。圖7顯示NFS在850hPa溫度場預報平均誤差為負值，亦即NFS在下層大氣有預報偏冷趨勢，但LAFS在850hPa溫度場預報平均誤差為正值，亦即LAFS在下層有預報偏暖趨勢，惟兩者偏離量約略相等。LAFS在500hPa及300hPa兩層溫度場預報平均誤

差仍為正值、並較850hPa偏離更多，反之NFS在500hPa及300hPa兩層溫度場預報平均誤差則在零值附近，顯示與LAFS相較，NFS有相當程度的改進，中高層之預報尤其明顯。

圖8顯示NFS中層網格組與LAFS 第二層網格組對SCSMEX在1998年5月11日至6月10日一個月期間降水預測結果之比較，為使模式有一致之水平解析度，此部份之比較時NFS中層網格組格距設定為20公里。圖8降水預測結果之比較其格式是參考Mesinger (1996)將24小時降水依水量大小分成大於0.01、0.1、0.25、0.5、0.75、1.0、1.5及2.0英吋共八等級（相當於大於0.25、2.54、6.35、12.7、19.05、25.4、38.1、50.8毫米）來計算公正降水得分(Equitable Treat Score, ETS)。校驗所用觀測值是取自中央氣象局在全省自動雨量站觀測資料，圖中橫軸標示的數值最下一行是各雨量區隔的採樣點。圖8顯示，NFS對日雨量小於2.0英吋(50.8毫米)降水之ETS大都在0.1以上，明顯較LAFS者為高。大致來說，NFS對小雨的ETS數值也較大雨的ETS數值高，這和其它國外作業預報模式之結果相似。兩模式對同期間降水預報之偏差值則顯示NFS對於較大雨量有過度預報的情形，LAFS雨量的預報則是明顯低估。

為進一步提高NFS對臺灣地區之天氣預報能力，中央氣象局於2003年6月將NFS模式5公里格組之涵蓋範圍由61x91格點擴充至91x121格點，使模式最高解析範圍為以臺灣為中心，東西450公里、南北600公里。在提升降水預報能力方面，中央氣象局針對CWB NFS 15公里與45公里解析度的降水預報做系集(ensemble)方式的定量降水預報測試，主要有兩類系

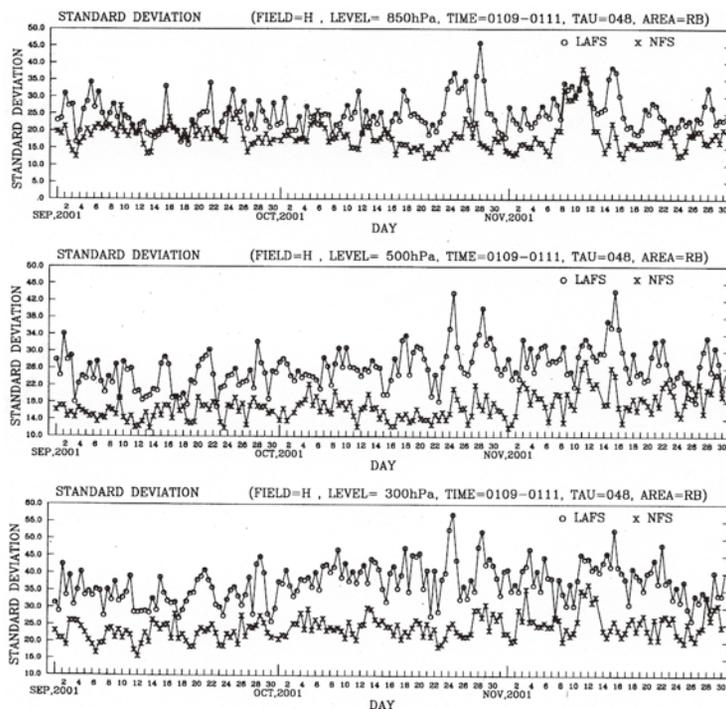


圖6、NFS(X線)與LAFS(O線)新舊兩區域預報系統在2001年9月至11月(橫軸)平行測試期間時在850hPa(上)、500 hPa (中)及300 hPa (下)三層之高度場標準差值(單位為公尺)。

Figure 6: The error standard deviations (in meters) of the geopotential height forecast of models NFS (curves with Xs) and LAFS (with Os) on 850 hPa (upper), 500 hPa (middle), and 300 hPa (lower) during the operational test period from September to November 2001 .

集方式：一是混合使用郭氏積雲參數法與Arakawa and Schubert積雲參數法的結果、一是混合使用NFS前後時段的預報。圖9顯示在此測試期間NFS採用郭氏積雲參數法，比採用Arakawa and Schubert積雲參數法有較佳的ETS得分，而以兩參數法預報結果做算數平均其ETS得分不論在雨量大或小都較原先兩者為優。另外不論是採用郭氏積雲參數法或是採用Arakawa and Schubert積雲參數法，混合使用前後時段預報結果的ETS得分都優於原來單一時段者，因此以兩積雲參數法預報結果做算數平均，加上混合使用前後時段預報結

果平均的ETS得分，是最佳的預報。另由降水預報偏差值來分析也得到相同之結論，因此此種系集預報方法在2004年間曾納入CWB NFS日常作業裡，以供定量降水預報參考。NFS並一直作業應用至今，有關NFS詳細資料見Liou et al. (2009)。

WRF (Weather Research and Forecasting model, Michalakes et al. 2001)是美國近年來集合美國學術界和作業單位人力所發展之中尺度數值模式，中央氣象局最先於2002年開始試用此模式(葉與戴2003)，經進一步測試(戴2005)後決定投入此模式之發展，以供下一代

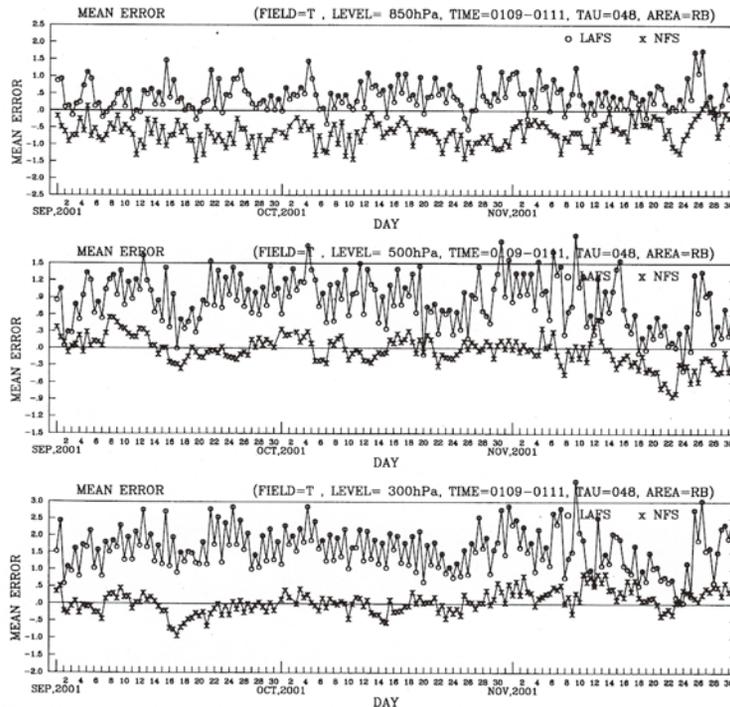


圖7、如圖6，惟是NFS(X)與LAFS(O)新舊兩預報系統在2001年九月至十一月平行測試期間時在850hPa(上)、500hPa(中)及300hPa(下)三層之溫度場平均誤差值(單位為 $^{\circ}\text{C}$)。

Figure 7: As in figure 6, the standard deviations of temperature forecast error (in $^{\circ}\text{C}$) from model NFS (Xs) and LAFS (Os) on 850 hPa (upper), 500 hPa (middle), and 300 hPa (lower) during the operational test period from September to November 2001.

預報作業應用。於2005年正式引進WRF 3DVAR客觀分析和WRF模式，歷經2年之測試、改進(洪等2006以及簡等2006)，並使其融合於中央氣象局數值天氣預報模式作業環境，建構一完整之中尺度數值天氣資料同化系統。WRF資料同化系統於2007年5月1日進行6個月之平行作業測試，於11月15日正式上線作業，稱為CWB WRF。

CWB WRF資料同化系統主要是由WRF 3DVAR和WRF模式組成(如表4)，其中包括前置處理、客觀分析、預報模式和後處理模組等。CWB WRF為三層巢狀網格，解析度分別為45/15/5公里，其中

45和15公里兩層網格之模式涵蓋範圍與NFS相同，但5公里網格之範圍則由NFS之91x121擴充至148x178。CWB WRF垂直分層則由NFS之30層增加至45層，期由增加垂直解析度與擴增高解析度積分範圍以改進模式在臺灣地區的預報能力。模式物理參數法包括NOAH土壤模式、Goddard微物理參數法、YSU邊界層參數法、Kain-Fritsch積雲、RRTM長波輻射和Goddard短波輻射參數法等，各參數法之介紹詳見WRF使用手冊(Skamarock et al. 2008)。

CWB WRF模式目前每日進行4次預報，每次預報時間達84小時。CWB WRF

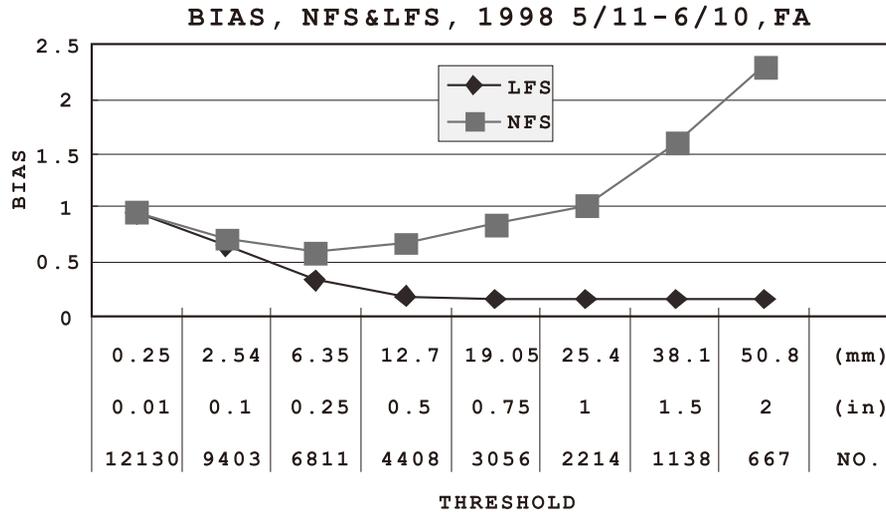
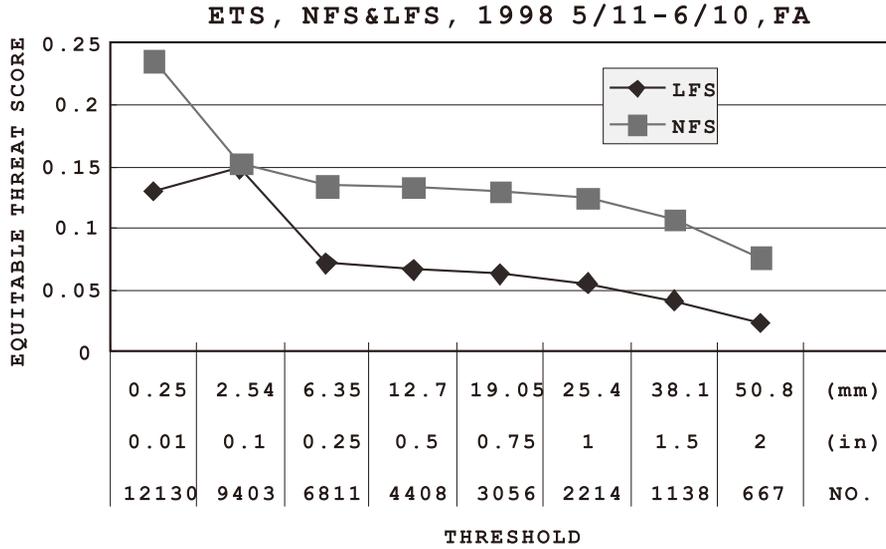


圖8、NFS中層網格(■線)與LAFS (◆線)第二層網格對SCSMEX在1998年5月11日至6月10日一個月期間降水預測結果在各降水區間(橫軸)之ETS值(上圖)與偏差值(下圖)。

Figure 8: The ETS (upper) and bias (lower) of the NFS middle meshes (■s) and LAFS inner meshes (◆s) model precipitation forecasts during 11 May to 10 July 1998 during SCSMEX.

資料同化系統採用所謂的部份循環更新 (partial cycle) 資料同化策略，也就是每一個模式的初始場均自12小時前由NCEP GFS的分析場冷啟動(cold start)，然後每6小時進行一次WRF 3DVAR客觀分析，其中模式的初始猜測場來自WRF的6小時

預報，也就是循環更新(full cycle)模式。這樣做的目的是經由間斷式的資料同化策略以避免中尺度模式累積系統性預報偏差；而12小時的循環更新可以在資料同化過程中掌握模式背景場與觀測所提供的中尺度資訊，此將有利於模式對中尺度天氣

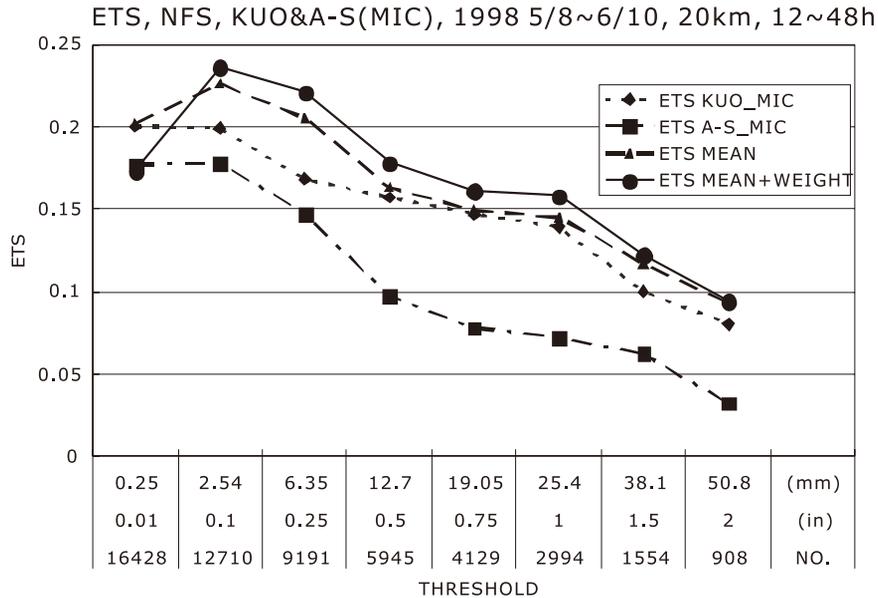


圖9、NFS以不同處理對SCSMEX在1998年5月8日至6月10日一個月期間降水預測結果在各降水區間(橫軸)之ETS值。不同處理包括NFS採用郭氏積雲參數法(◆)、採用Arakawa and Schubert積雲參數法(■線)、或以兩參數法算數平均(▲線)、以兩積雲參數法算數平均加上混合使用前後時段預報(●線)。

Figure 9: The ETS of the precipitation forecasts in different model configurations (line patterns indicated on right upper corner) of NFS cumulus parameterization. The period of the model forecast examined was 8 May to 10 July 1998 during SCSMEX, and model horizontal resolutions are 20 km.

表4、CWB WRF資料同化系統的組成模組。

Table 4: Modules of the Central Weather Bureau WRF forecast system.

功能	組件名稱	功能說明
前置處理	WRF WPS	將全球模式資料水平內插至WRF模式格點，以產製模式的邊界條件
客觀分析	WRF 3DVAR	三維變分客觀分析
預報模式	WRF	WRF預報模式
後處理	N2d64	σ 內插至P座標，並輸出各式導出量場

系統的預報能力。其中採用WRF 3DVAR內建之背景誤差斜方差矩陣(CV3選項)，此亦為NCEP網格統計內插分析(Gridpoint Statistical Interpolation, GSI)使用之背景

誤差斜方差矩陣，主要是用NCEP全球模式24和48小時預報誤差，使用Parish and Derber (1992)方法推估所得。

CWB WRF自2007年底上線作業後，

中央氣象局相關人員致力於改善整個資料同化系統，包括觀測資料的使用、三維變分法的調校和模式預報效能的改進等，模式預報能力逐年有顯著的改善。圖10為2008年至2010年，針對850 hPa溫度場和500 hPa高度場之72小時預報場的均方根誤差，圖中顯示CWB WRF的預報能力每年均有10%以上的改善程度，3年來，850 hPa溫度場改進了25%，500 hPa高度場則改進達35%。

為提高模式解析度與改進模式預報，WRF區域模式水平解析度20/4公里之版本已於2009年12月上線為一個WRF模式系列之系集成員模式，於每日00/06/12/18 UTC亦執行84小時預測。目前CWB WRF的研發重點主要在持續改善三維變分分析的效能、局地觀測資料的應用(如地基GPS觀測資料)，建立土壤資料同化系統以改善地表參數的預報，持續改進模式的定量

降水預報能力，以及發展系集預報系統等。

四、颱風路徑預報

颱風所造成之災害損失佔臺灣地區天氣災害損失中最大部分，因此颱風路徑預報是中央氣象局天氣預報作業中最重要的項目之一，也是數值天氣預報作業最重要的項目之一。歷年來中央氣象局颱風路徑預報模式與有限區域預報模式在整體架構上兩者相似，但因為預報作業之需求不同而有不同之解析度、模式涵蓋範圍，以及資料初始處理。

Peng et al. (1993)曾對中央氣象局第一代颱風路徑數值預報系統(Typhoon Forecast System, TFS)做詳細說明，葉等(1999)、黃等(2000)、及葉等(2002)則分別對中央氣象局第二代颱風路徑數值預報系統與第一代間之主要差異、第二代颱風

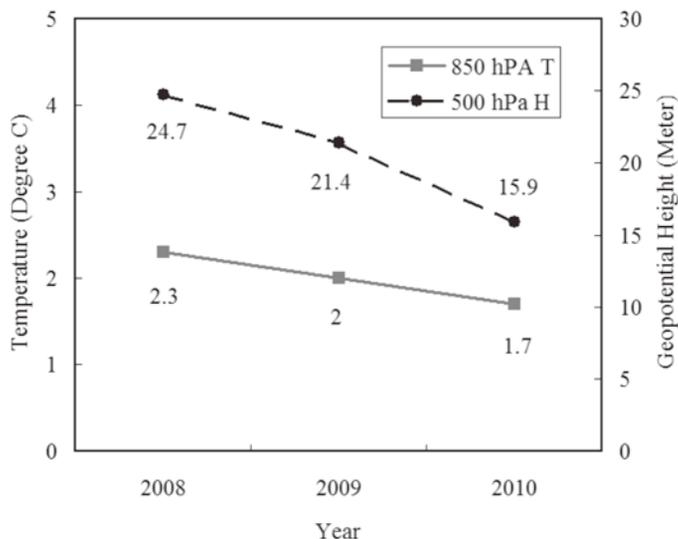


圖10、CWB WRF在2008年至2010年，針對850 hPa溫度場和500 hPa高度場之72小時預報場的均方根誤差。

Figure 10: Root mean square errors of CWB WRF 72-hour 850 hPa temperature (°C) and 500 hPa geo-potential height (meter) forecasts in 2008 to 2010.

風路徑數值預報系統資料初始處理方法及TFS預報誤差與作業概況做詳細說明。表5為1994年至2003年TFS作業預報逐年誤差平均值，由表可見經數年之改善，TFS 24小時颱風路徑預報誤差由早期接近200公里減少到130至170公里之間，48小時颱風路徑預報誤差也由早期接近400公里減少到270至330公里之間。

配合第三代數值預報系統之發展，NFS也加入颱風路徑預報之能力，颱風路徑預報與一般天氣預報最主要的差異是初始處理方法之不同。由於颱風大部份皆形成於廣闊熱帶海洋面上，在颱風附近常欠缺傳統觀測資料，因而在模式初始分析場中，常無法正確解析颱風位置及其環流結構，增加了預報模式對颱風預測之困難度。針對此情形，當颱風生成或移入模式預報範圍時，TFS是加入整個虛擬渦旋(葉等1999)，CWB NFS則是採用只在颱風中心附近60內植入虛擬觀測資料共41點之作法，以得到較佳之初始場。詳細虛擬觀測資料產生程序與做法為：首先針對風場之初始猜測場(first guess fields)做濾波，以去除不完整之颱風渦旋、保留颱風附近之大尺度駛流，而後在1000hPa至400hPa各層給定41點風場，其值是由7級風、10級風暴風半徑及中心最大風速所定之Rankine渦旋並加上颱風過去6小時移動速度。而此41點之分布為中心1點，離中心0.50之東、西、南、北方個1點，離中心1.0之東北、東南、西南、西北方各1點，離中心2.0、3.0、4.0、6.0再分別等間、交錯各置8點。在質量場結構方面，是由上述虛擬渦旋風場，由梯度風平衡反演出1000hPa至700hPa各層之高度場及質量場。此41點虛擬觀測資料和其它傳統及遙測觀測資料一起提供客觀分析法進行分

析，以取得含有完整颱風環流之模式初始場。

為進一步展示NFS對颱風路徑之預測能力，圖11為NFS、TFS及中央氣象局官方預測(CWB)對2002及2003年共17個颱風101個案之平均預報誤差比較。17個颱風為2002年Rammasun、Nakri、Sinlaku及2003年Kujira、Nangka、Soudelor、Imbudo、Morakot、Krovanh、Dujuan、Melor等11個中央氣象局曾發布警報的颱風，再加上離臺灣較遠之Halong、Koni、Etau、Maemi、Ketsana、Nepartak等6個颱風。圖11顯示NFS/TFS/CWB對這些颱風24、48、72小時路徑預報平均誤差分別為134/141/109、251/281/207、369/417/350公里，NFS與TFS兩個客觀數值動力模式在24、48、72小時之預測能力皆低於中央氣象局官方主觀預測。而NFS為一新建置之區域模式，相對TFS而言動力及物理處理方法皆有改進，使對此17個颱風101個案，在3天內路徑預測平均誤差表現皆優於TFS。

2003年在臺灣地區曾在9月1日06UTC對颱風杜鵑(Dujuan)及在11月2日06UTC對颱風米勒(Melor)進行投落送(dropsonde)觀測實驗，NFS亦針對上述資料進行模擬測試。圖12可見NFS對9月1日06UTC杜鵑颱風路徑模擬，不論是否有加入投落送觀測資料皆在12時後之路徑有偏北誤差，未加入及加入投落送資料之24/48小時路徑預測誤差分別為175/168公里及169/177公里，對此個案，加入投落送資料後，對NFS之颱風路徑預測影響不大。NFS對11月2日06UTC米勒颱風路徑模擬結果則顯示NFS在未加入投落送資料時模擬之路徑有偏慢偏左誤差，加入投落送資料後，NFS對颱風移速之預測稍好，

表5、TFS由1994至2003年對颱風12、24、48小時路徑預報年平均誤差。當年模式之格距、各年西北太平洋之颱風個數、與TFS進行路徑預報之颱風個數列於第一列，模式預報之個案數則列於括號內。

Table 5: Forecast errors of 12 hours, 24 hours and 48 hours typhoon track forecast from CWB Typhoon Forecast System in 1994 to 2003. The model grid resolutions, numbers of typhoon, and numbers of forecast cases are also indicated.

	12hr	24hr	48hr
1994 – 60 km 17 of 34 typhoons	97 km (130 cases)	210 km (129)	452 km (121)
1994 – 45 km (rerun) 17 of 34 typhoons	104 km (130)	185 km (129)	369 km (121)
1995 – 45 km 18 of 25 typhoons	111 km (168)	203 km (159)	421 km (128)
1996 – 45 km 24 of 29 typhoons	94 km (231)	172 km (209)	338 km (164)
1997 – 45 km 20 of 31 typhoons	97 km (180)	162 km (162)	264 km (129)
1998 – 45 km 14 of 17 typhoons	108 km (106)	183 km (92)	369 km (68)
1999 – 45 km 15 of 23 typhoons	93 km (96)	161 km (83)	270 km (55)
2000 – 45 km 21 of 23 typhoons	86 km (187)	149 km (168)	299 km (128)
2001 – 45 km 23 of 26 typhoons	88 km (229)	162 km (211)	314 km (163)
2002 – 45 km 19 of 26 typhoons	83 km (175)	147 km (158)	293 km (126)
2002 – 45 km /15km nest 19 of 26 typhoons	88 km (175)	137 km (158)	268 km (126)
2003 – 45 km/15km nest 21 of 21 typhoons	99 km (218)	163 km (200)	326 km (161)

未加入及加入投落送資料之12/24/36小時路徑預測誤差分別為61/211/383公里及43/115/300公里。其它關於模式預報之改進測試可參見Hsiao et al. (2009)。

配合WRF模式之建置，中央氣象局也將颱風虛擬資料處理、颱風中心定位等功能建置於WRF模式中，使其具有颱風路徑預報能力，於2007年測試於2008年

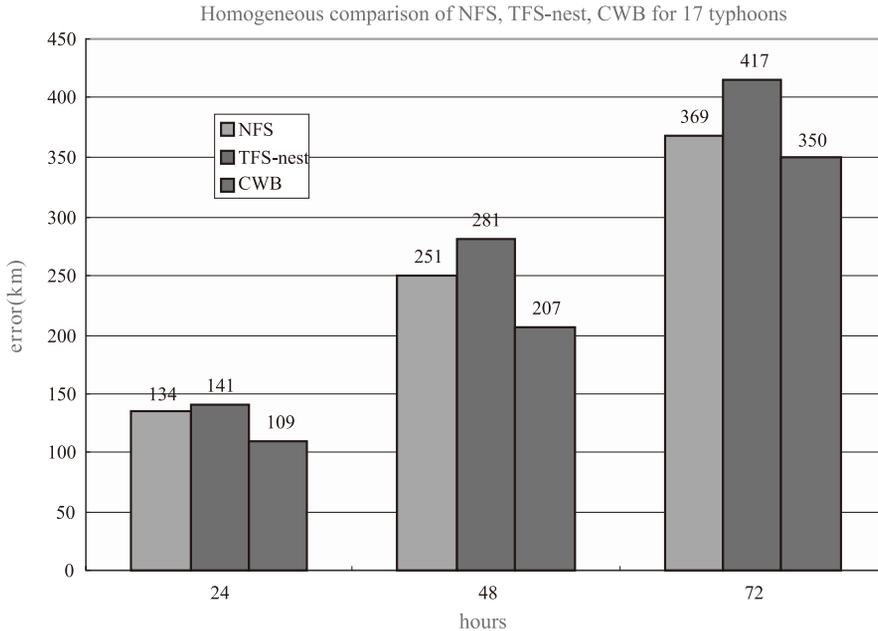


圖 11、NFS(左)、TFS(中)、CWB(右)對2002與2003年17個颱風之24、48及72小時颱風預測路徑平均距離誤差。

Figure 11: The mean forecast errors of 24-h, 48-h, and 72-h typhoon track forecasts of NFS (in left of each group), TFS (middle) and CWB (right). The cases were selected from 17 typhoons in 2002 and 2003.

颱風季正式作業，而後顧及颱風預報仍須與一般天氣預報在處理上有所不同，中央氣象局嘗試改進此模式之颱風預報能力。主要改進項目包含引進含質量場之颱風渦旋植入(bogus scheme)及渦旋移置(relocation scheme)技術之颱風渦旋初始化流程(參見Hsiao et al. 2010)、partial cycling作業流程、三維變分資料同化系統中之背景誤差(background error)與outer loop、Kain-Fritsch積雲參數化(參見Hsiao et al. 2011)。結果顯示採用這些改進技術之WRF模式對2008, 2009年11個颱風24/48/72小時颱風路徑預測誤差為8/93/148/248公里，呈現了不錯之颱風路徑預報能力，中央氣象局據此於2010年建置TWRF模式並於同年6月正式上線作

業。圖13為1994年至2010年中央氣象局颱風路徑主要作業模式對西北太平洋颱風路徑預報之誤差平均值，其中主要作業模式在1994至2003年為TFS，2004至2007年為NFS，2008年為WRF，2009為WRF與NFS系集預報，2010年為TWRF。由圖可見20年間24與48小時颱風路徑模式預報之誤差值，約由200與400公里縮小至100與200公里，約為原來的二分之一。72小時颱風路徑模式預報之誤差值，約由500公里縮小至300餘公里，約為原來的五分之三。其中，在2005年前有比較明顯之改進，而後維持在一定程度。近年颱風路徑預報模式除提供路徑預報供作業參考外，也提供降雨量預報供作業參考。

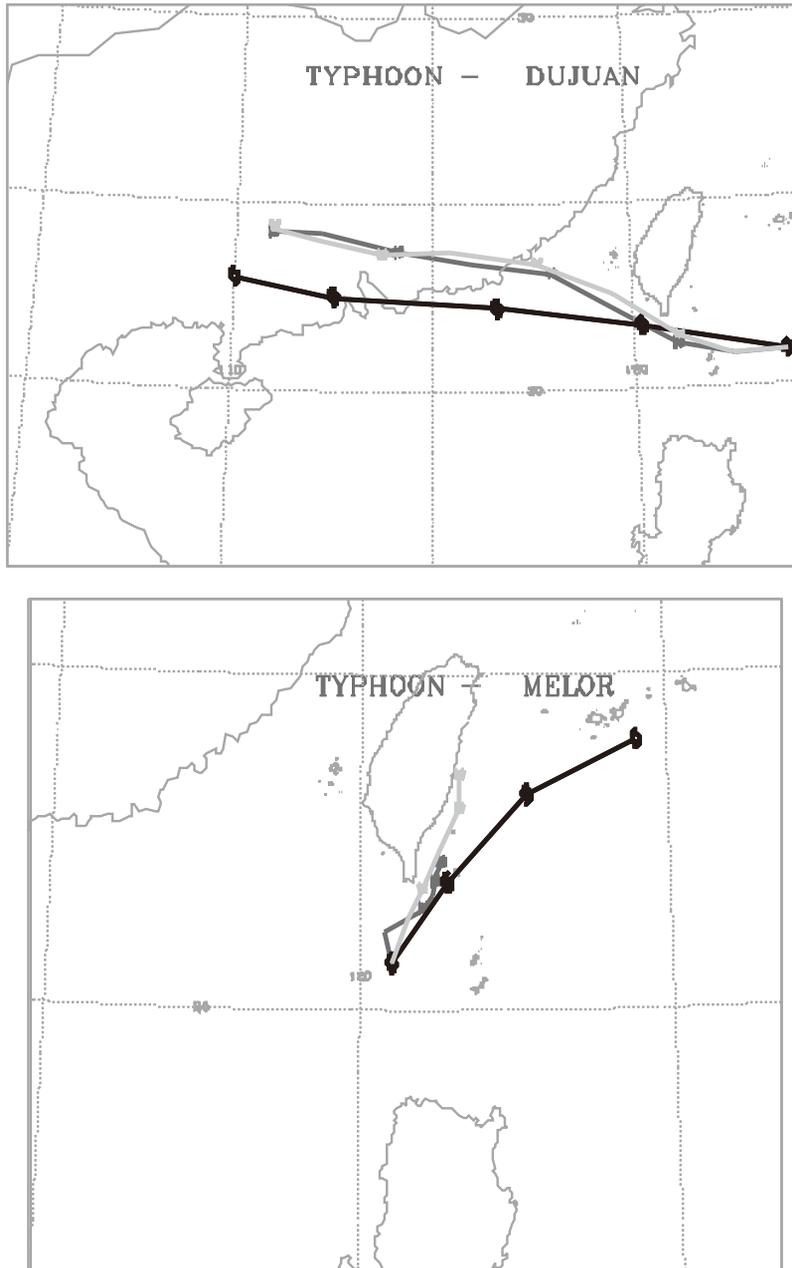


圖 12、NFS 對 2003 年(上圖) 9 月 1 日 06 UTC 杜鵑颱風與(下圖) 11 月 2 日 06 UTC 米勒颱風之路徑模擬結果，標線 N、W 分別為未加入及加入投落送資料之 48 小時預測路徑，粗黑線為杜鵑颱風實際路徑。

Figure 12: Observed (with typhoon symbols) and NFS model forecast tracks of (upper panel) Typhoon Durjun (2003) at 06 UTC September 1 and (lower panel) Tropical storm Milor (2003) at 06 UTC November 2. Two forecast tracks are with (curves with Ws) and without (with Ns) including dropsonde observations in model initial fields.

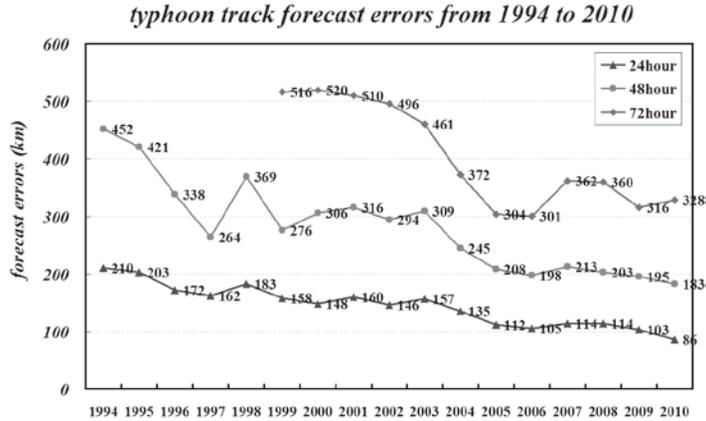


圖 13、1994年至2010年中央氣象局颱風路徑主要作業模式對西北太平洋颱風路徑之24、48與72小時預報之平均誤差值。

Figure 13: Trends of the CWB typhoon track model forecast errors, in 24, 48, and 72 hours forecasts, from 1994 to 2010.

五、未來展望

中央氣象局全球模式的水平解析度雖已接近40公里，但相較歐美日先進氣象作業單位已進展至20公里，仍有段差距。中央氣象局預計於2012年起採購新一代超級電腦，屆時全球模式的水平解析度將可提升至25公里，並且計劃引進半拉格朗日 (semi-Lagrangian) 平流法一併改善數值方法的效率與精確性。模式物理過程往往與解析度有關，也需持續尋求更佳方案，尤其全球模式的解析度已能掌握類似颱風的渦旋結構，加上全球模式不像區域模式般受邊界條件的影響，可以合理地掌握大尺度駛流場與颱風間之交互作用，強化全球模式在颱風路徑預報的應用已是國外氣象作業中心的一種趨勢，而物理參數化也與颱風路徑預報的成效息息相關。在區域預報模式方面則逐漸重視在結合系集預報，將結果應用在定量降雨以及機率預報上，以提供各地之雨量、溫度和風速之精緻化鄉鎮預報服務。

資料同化是目前提升數值天氣預報的關鍵，由於網路的便利已使中央氣象局目前可取得即時的衛星觀測資料，此外臺灣正規劃福衛3號衛星的後續計畫，預計2014年將有更多的掩星觀測資料可供利用，尤其在熱帶地區增加最多，因此加強衛星觀測資料的應用必將是未來中央氣象局資料同化工作的重點。由颱風之路徑預報顯示近年裡颱風路徑之預報誤差並未明顯改進，此可能也與模式初始場仍不夠理想有關，因此加強3Dvar之應用、研究發展與引用4Dvar或EnKF (Ensemble Kalman Filter) 四維資料同化技術也是後續進一步提升區域模式預報能力之關鍵。

提升對短期氣候預報能力與增進對定量降水預報能力是中央氣象局未來施政之重點項目，對短期氣候預報方面，除了統計預報方法之發展，中央氣象局目前也以全球波譜模式為基礎，發展氣候模式，以期此氣候模式預報結果能提供月、季、或6個月長期天氣預報作業參考。

誌謝

近10年來全球預報系統在資料同化及物理參數化方面的更新與改善，得力於吳婉淑博士、潘華陸博士、莊漢明博士及李瑞麟博士等人甚多協助，區域與颱風路徑預報系統方面則得力於劉其聖博士、彭順台博士及張偉正博士之協助或建議，特致上由衷的謝意。另數值預報除模式外，其他之支援如自動控制、資料接收處理、繪圖、資料傳輸等等也都是非常關鍵要素，這些工作歷年來係由中央氣象局氣象資訊中心負責，部分發展工作並委託資訊工業策進會等財團法人或其他民間機構進行。此外，藉由與美國UCAR的合作協議，由郭英華博士帶領的科學團隊對WRF數值預報系統的發展亦貢獻良多。

參考文獻

- 吳石吉、葉天降、張偉正，1994：大氣輻射效應：兩種輻射參數化方法在有現區域預報模式之比較，天氣分析與預報研討會論文彙編，1994年11月24-26日，臺北，133-140。
- 沈彥志、馮欽賜、陳雯美、曹伶伶、陳御群、楊明仁，2010：以GSI同化GPSRO資料對中央氣象局全球預報系統之影響。天氣分析與預報研討會。2010年6月28-30日，臺北，247-252。
- 汪鳳如、馮欽賜，2010：中央氣象局全球模式物理參數化之更新：邊界層及積雲參數化。大氣科學，38，213-236。
- 柳再明、張偉正，1994：中央氣象局有限區域巢狀模式之初始化過程，天氣分析與預報研討會論文彙編，1994年11月24-26日，臺北，69-78。
- 洪景山、林得恩、劉素屏、簡芳菁、周仲島、林沛練、張文錦、繆璿如、陳致穎、雷銘中，2006：WRF模式之敏感度測試，第一部分：探空測站上的校驗，大氣科學，34，241 - 260。
- 陳雯美、沈彥志、曹伶伶、馮欽賜、吳婉淑，2010：中央氣象局全球資料同化系統之更新評估。天氣分析與預報研討會。2010年6月28-30日，臺北，4-8。
- 葉天降、戴俐卉，2003：臺灣地區颱風侵臺綜觀天氣分析與侵臺颱風之數值模擬研究。吳俊傑彙整國家科學委員會颱風重點研究報告，NSC91-2119-M-002-032，子計畫三，12-15。
- 葉天降、陳得松、黃康寧、彭順台、謝信良，1999：颱風數值預報模式初始處理：兩種方法對模式預測誤差之比較。大氣科學，27，171-190。
- 葉天降、陳得松、黃康寧、謝信良，2002：中央氣象局颱風路徑預報模式之預報檢討及改進。氣象學報，44，31-75。
- 葉天降、滕春慈、黃麗玫、馮欽賜、張庭槐，2012：中央氣象局數值天氣預報作業系統(一)歷史演進。氣象學報，48，53-68。
- 葉天降、林淑卿、李尚武、陳雯美、張偉正、彭順台，1994：中央氣象局第二代有限區域預報系統之建置與現況，天氣分析與預報研討會論文彙編，1994年11月24-26日，臺北，11-20。

- 張美玉、葉天降，1994：中央氣象局有限區域預報模式邊界層參數化處理之個案測試，天氣分析與預報研討會論文彙編，1994年11月24-26日，臺北，311-315。
- 馮欽賜，2001：中央氣象局全球模式系統性誤差之分析與改進。中央氣象局研究發展專題第CWB90-1A-18號報告，21頁。
- 馮欽賜，2001：部份雲量條件下輻射加熱率之參數化。大氣科學，29，125-140。
- 馮欽賜、李長華，2000：中央氣象局全球模式之平行計算處理及在新超級電腦上之測試。天氣分析與預報研討會論文彙編，2000年7月10-12日，臺北，294-297。
- 馮欽賜、陳雯美、黃曉薇、鄭明典，2003：中央氣象局全球預報系統之近況與發展—2003年之報告。天氣分析與預報研討會論文彙編，2003年9月15-17日，臺北，321-325。
- 馮欽賜、陳雯美、陳建河、汪鳳如，2009：物理參數化變動對颱風路徑預報之影響與分析。天氣分析與預報研討會論文彙編，2009年9月8-10日，臺北，33-37。
- 童雅卿、彭順臺，1994：兩種積雲參數化法在颱風模式之診斷分析，天氣分析與預報研討會論文彙編，1994年11月24-26日，臺北，329-336。
- 黃麗玫、滕春慈、劉其聖，1994：最佳客觀分析法於中央氣象局第二代有限區域模式之使用現況，天氣分析與預報研討會論文彙編，1994年11月24-26日，臺北，95-106。
- 黃康寧、陳得松、葉天降、謝信良，2000：1999年中央氣象局颱風路徑數值預報模式作業概況。氣象學報，43，46-60。
- 簡芳菁、洪景山、張文錦、周仲島、林沛練、林得恩、劉素屏、繆璿如、陳致穎，2006：WRF模式之敏感度測試，第二部分：定量降水預報校驗。大氣科學，34，261 - 276。
- 戴俐卉，2005：中美氣象資訊自動監測技術發展合作—LAPS-WRF Hot Start建置。中央氣象局出國報告，33pp。
- Arakawa, A., and M. Suarez, 1983: Vertical differencing of the primitive equations in sigma coordinates. *Mon. Wea. Rev.*, 111, 34-45.
- Barnes, S., 1964: A technique for maximizing details in numerical map analysis. *J. Appl. Meteor.*, 3, 395-409.
- Betts, A. K., and M. J. Miller, 1986: A new convection adjustment scheme. Part II: Observational and theoretical basis. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 112, 677-691.
- Derber, J. C., D. F. Parrish and S. J. Lord, 1991: The new global operational analysis system at the National Meteorological Center. *Wea. and Forecasting*, 6, 538-547.
- Ek, M., K. E. Mitchell, Y. Lin, E. Rogers, P. Grunmann, V. Koren, G. Gayno, and J. D. Tarpley, 2003: Implementation of Noah land surface model advances in the National Centers for Environmental Prediction operational mesoscale Eta Model. *J. Geophys. Res.*, 108, 8851, doi:10.1029/2002JD003296.
- Fu, Q., and K. N. Liou, 1992: On the correlated k-distribution method for radiative

- transfer in nonhomogeneous atmospheres. *J. Atmos. Sci.*, 49, 2139-2156.
- Fu, Q., and K. N. Liou, 1993: Parameterization of the radiative properties of cirrus clouds. *J. Atmos. Sci.*, 50, 2008-2025.
- Fu, Q., K. N. Liou, M. C. Cribb, T. P. Charlock, and A. Grossman, 1997: Multiple scattering parameterization in thermal infrared radiative transfer. *J. Atmos. Sci.*, 54, 2799-2812.
- Harshvardhan, R. Davies, D. Randall, and T. G. Corsetti, 1987: A fast radiation parameterization for atmospheric circulation models. *J. Geophys. Res.*, 92, 1009-1016.
- Hsiao, L.-F., Melinda S. Peng, Chen, D.-S., K.-N. Huang, T.-C. Yeh., 2009: Sensitivity of typhoon track predictions in a regional prediction system to initial and boundary conditions. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 48, 1913-1928.
- Hsiao, L.-F., C.-S. Liou, T.-C. Yeh, Y. R. Guo, D.-S. Chen, K.-N. Huang, C.-T. Terng, J.-H. Chen, 2010: A vortex relocation scheme for tropical cyclone initialization in advanced research WRF. *Mon. Wea. Rev.*, 138, 3298-3315.
- Hsiao, L.-F., D.-S. Chen, Y.-H. Kuo, Y.-R. Guo, T.-C. Yeh, J.-S. Hong, C.-T. Fong, and C.-S. Lee, 2011: Testing of WRF 3DVAR for model initialization and its application on operational typhoon prediction in Taiwan. Paper submitted to *Mon. Wea. Rev.*
- Hsu, Y.-J., and A. Arakawa, 1990: Numerical modeling of the atmosphere with an isentropic vertical coordinate. *Mon. Wea. Rev.*, 118, 1933-1959.
- Jeng, B.-F., H.-J. Chen, S.-C. Lin, T.-M. Leou, M. S. Peng, S. W. Chang, W.-R. Hsu, and C.-P. Chang, 1991: The Limited-Area Forecast System at the Central Weather Bureau in Taiwan. *Wea. Forecasting*, 6, 155-178.
- Kuo, H. L., 1974: Further studies of the parameterization of the influence of cumulus convection in large scale flow. *J. Atmos. Sci.*, 31, 1232-1240.
- Li, J.-L. F. and F.-J. Wang, 2000 : Improved shallow cumulus process in the Central Weather Bureau global forecast system 。天氣分析與預報研討會（大氣部份），2000年7月10-12日，臺北，288-293。
- Liou, C.-S., T. Terng, W.S. Kao, T. Rosmand, C. Chen, J. H. Chen, and C. Y. Tsay, 1989: Global Forecast System at Center Weather Bureau. *Papers in Meteorology Research*, 12, No.2, 205-228.
- Liou, C.-S., J.-H. Chen, C.-T. Terng, F.-J. Wang, C.-T. Fong, T.E. Rosmond, H.-C. Kuo, C.-H. Shiao, and M.-D. Cheng, 1997: The second-generation global forecast system at the central Weather Bureau in Taiwan. *Wea. Forecasting*, 12, 653-663.
- Liou, C.-S., Y.-F. Sheng, T.-M. Leou, S.C. Lin, T.-C. Yeh, C.-T. Terng, D.-S. Chen, K.-N. Huang, and M.-Y. Chang, 2009: A Method of Upgrading a Hydrostatic Model to a Nonhydrostatic Model, *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, Vol. 20, No. 5, 727-739.
- Liu, Q., T. Marchok, H. L. Pan, M. Bender and S. Lord, 2000: Improvements in hurricane

- initialization and forecasting at NCEP with global and regional (GFDL) models. *Technical Procedures Bulletin No. 472*. Available at: <http://www.nws.noaa.gov/om/tpb>.
- Mahrt, L., and H. -L. Pan, 1984: A two-layer model of soil hydrology. *Boundary Layer Meteorol.*, 29, 1-20.
- Mesinger, F., 1996: Improvement in quantitative precipitation forecasts with the Eta regional model at the National Centers for Environmental Prediction: The 48-km upgrade. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 2637-2649.
- Michalakes, J., S. Chen, J. Dudhia, L. Hart, J. Klemp, J. Middlecoff, and W. Skamarock (2001): "Development of a Next Generation Regional Weather Research and Forecast Model" in *Developments in Teracomputing: Proceedings of the Ninth ECMWF Workshop on the Use of High Performance Computing in Meteorology*. Eds. Walter Zwiefelhofer and Norbert Kreitz. World Scientific, Singapore. pp. 269-276.
- Palmer, T. N., G. Shutts, and R. Swinbank, 1986: Alleviation of a systematic westerly bias in general circulation and numerical weather prediction models through an orographic gravity wave drag parameterization. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 112, 1001-1039.
- Pan, H.-L. and W.-S. Wu, 1995: Implementing a mass flux convective parameterization package for the NMC Medium-Range Forecast model. NMC Office Note 409, 40pp.
- Parrish, D. F., and J. C. Derber, 1992 : The National Meteorological Center' s spectral statistical interpolation analysis system. *Mon. Wea. Rev.*, 120, 1747-1763.
- Peng, M. S., B.-F., Jeng, and C.-P. Chang, 1993: Forecast of typhoon motion in the vicinity of Taiwan during 1989-90 using a dynamical model. *Wea. Forecasting*, 8, 309-325.
- Peng, M. S., D.-S. Chen, S. W. Chang, C.-P. Chang, and B.-F. Jeng, 1995: Improvement of numerical prediction of typhoon tracks in the western North Pacific basin near Taiwan. *Wea. Forecasting*, 10, 411-424.
- Skamarock, W. C., Coauthors 2008: A description of the Advanced Research WRF version 3. NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR, 113 pp.
- Troen, I., and L. Mahrt, 1986: A simple model of the atmospheric boundary layer: Sensivity to surface evaporation. *Bound. Layer Meteor.*, 37, 129-148.
- Zhao, Q., and F. H. Carr, 1997: A Prognostic Cloud Scheme for Operational NWP Models. *Mon. Wea. Rev.*, 125, 1931-1953.
- Zhao, Q., T. L. Black, and M. E. Bladwin, 1997: Implementation of the cloud prediction scheme in the Eta model at NCEP. *Wea. Forecasting*, 12, 697-712.

The Numerical Weather Prediction System of the Central Weather Bureau(II): Overview of Forecast Models

Tien-Chiang Yeh, Chin-Tzu Fong, Tzay-Ming Liou, Der-Song Chen,
Kang-Ning Huang, Wen-Mei Chen, Feng-Ju Wang, and Jing-Shan Hong
Central Weather Bureau

ABSTRACT

35 years have passed since the first introduction of the computer system at the Central Weather Bureau (CWB) in 1976 to build up the automatic facilities for weather service. An overview of the system development has been documented in Yeh et al. (2012). In this report, the evolution and current condition of Numerical Weather Prediction (NWP) models of the CWB were reviewed. The improvements of the numerical forecast system in CWB were found to be mainly associated with the increase of the model resolutions, progress of the model dynamics and physics, employment of 3-dimensional variation analysis scheme in objective data analysis, and the incorporation of the near real-time non-traditional observations, such as the radiance data detected by satellites, in the analysis. The refinement in typhoon vortex bogussing and relocation methods and application of ensemble forecast techniques in the regional forecast were also contributed to the improvement of the typhoon track forecast and rainfall forecast at the service of the CWB.

Key words: Numerical Weather Prediction, typhoon track forecast, model, objective analysis, 3-dimensional variation

氣象學報季刊

第48卷第4期

出版機關：交通部中央氣象局

地址：10048臺北市中正區公園路64號

聯絡電話：(02)2349-1091

網址：<http://photino.cwb.gov.tw/rdcweb/lib/cd/cd07mb/index.htm>

發行人：辛在勤

出版年月：中華民國101年3月

創刊年月：中華民國44年3月

刊期頻率：季刊

版次冊數：初版400冊

定價：新臺幣200元

印刷者：財團法人伊甸社會福利基金會附設數位資料處理庇護工場

電話：(02)2230-8002

展售地點：五南文化廣場臺中總店，400臺中市中山路6號

電話：(04)2226-0330

國家書店松江門市，10485臺北市中山區松江路209號1樓

電話：(02)2518-0207

GPN：2004400001

ISSN：0255-5778

著作財產權屬交通部中央氣象局，著作人格權屬著作人。

本書保留所有權利。

欲利用本書全部或部分內容者，須徵求著作財產權人交通部中央氣象局同意或書面授權。

© All rights reserved. Any forms of using or quotation, part or all should be authorized by copyright holder Central Weather Bureau. Please contact with Central Weather Bureau.[Tel:(02)2349-1091]

Meteorological Bulletin

(Quarterly)



CONTENTS

Articles

Analysis of Seismic Strong Ground Motion..... in Xiaolin Area, Kaohsiung	Kun-Sung Liu	(1)
Defining the Tropical Storms/Typhoons Invading Taiwan by Influence Domain – a Climate Perspective	Ching-Teng Lee Mong-Ming Lu	(25)
A Study of Heavy Rainfall Index..... during Taiwan Mei-Yu Season	Meng-Shih Chen	(39)
The Numerical Weather Prediction System of..... the Central Weather Bureau (I): Overview of the Development of the System	Tien-Chiang Yeh Chuen-Teyr Terng Li-Mei Huang Chin-Tzu Fong Ting-Huai Chang	(53)
The Numerical Weather Prediction System of..... the Central Weather Bureau (II): Overview of Forecast Models	Tien-Chiang Yeh Chin-Tzu Fong Tzay-Ming Liou Der-Song Chen Kang-Ning Huang Wen-Mei Chen Feng-Ju Wang Jing-Shan Hong	(69)

行政院新聞局出版事業登記證局版台誌字 第一類新聞紙類
中華郵政臺字第一八九三號登記為第一類新聞紙類

二〇〇四〇〇〇一
統編號

ISSN 0255-5778



9 770255 577008



CENTRAL WEATHER BUREAU
64 Gongyuan Road, Taipei 10048
Taiwan, ROC

GPN : 2004400001
定價：新臺幣200元