

# 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stations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 $1.44 \times 10^{-6}$ 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。

<sup>s</sup>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 <sup>#</sup>	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。

<sup>\$</sup>：為日本地區地面密集觀測報(Automated Meteorological Data Acquisition System, AMeDAS)。

<sup>#</sup>：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 $\sigma$ 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

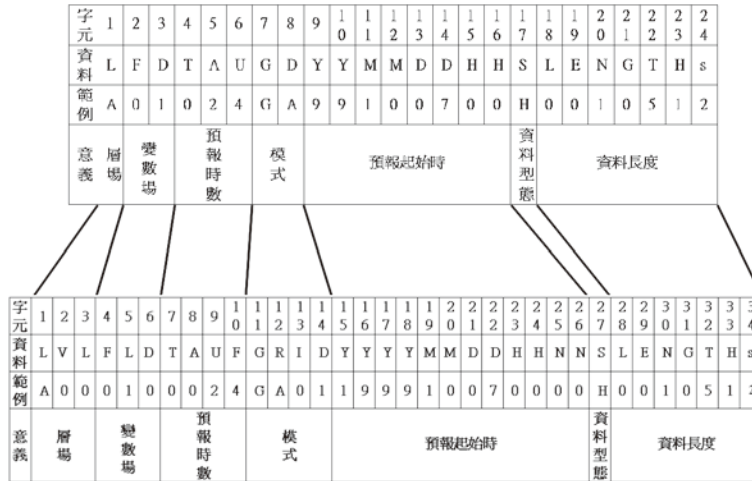


圖1：中央氣象局網格點資料管理系統24及34字元(碼)資料鍵值對照圖。

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