

空間資訊處理在數值天氣預報作業之應用

葉天降 滕春慈 黃麗玫

中央氣象局氣象資訊中心

一、前言

天氣分析與預報作業主要仰賴完整之觀測資料，數值天氣預報系統主要是運用電腦有效處理資料之能力，以及準確之分析預報方法，來協助天氣分析與預報工作，而其所需處理之觀測資料則包含在各時間點上、三維大氣層空間內各種氣象因素之量測，因此數值天氣預報作業系統可以視為是一空間資訊處理應用之系統。本文之主要目的在以中央氣象局數值預報系統(NWP)為例，報告其在國內近二十年之應用情形，同時概要的報告其未來可能之進展。

中央氣象局數值預報系統之發展大致可分為四階段，民國 73 年以前系統係在迷你型電腦上執行，包括簡單之即時資料接收、解譯、填繪圖和東亞正壓模式 48 小時預測。民國 73 年以後中央氣象局全面業務電腦化計畫開始推動，在 73 年至 78 年間發展數值預報第一代系統，包括建置 CYBER 205 超級電腦，使電腦記憶體容量達 32MB、磁碟容量達 5.6GB、最佳計算速度達 200MFLOPS。民國 79 年至 83 年，中央氣象局發展數值預報第二代系統，包括建置第二代超級電腦系統 CRAY YMP8I，使電腦記憶體容量提高 512MB、磁碟容量達 30GB、最佳計算速度達 2.6GFLOPS。最近一期數值預報系統發展計畫是於 84 年至 90 年執行，包括更新超級電腦為含 15 個中央處理器之 FUJITU VPP5000 系統，使記憶體容量為 8GB X 15、磁碟容量為 2TB、最佳計算速度為 9.6GFLOPS X 15，詳見表一。這些超級電腦系

統皆是當年代運算能力最佳之系統，可見天氣分析與預報作業對運用電腦系統之需求較其他一般資訊系統更高，而這種特性我們可由觀測資料量以及分析與預報模式兩方面之演變來說明。

二、氣象資料量之演進

對天氣現況做觀測與紀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。中央氣象局在台灣地區設有多處地面測站，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、濕度、降水量、雲量、雲狀、雲高等，中央氣象局也另設有控空觀測站，應用氣球攜帶儀器觀測大氣層中各壓力層之溫度、風向風速、高度、濕度等。相同的，國內軍事以及民航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，因為天氣之尺度較大，僅有局部地區之資訊不足以了解全貌，因此也需要鄰近甚至全球各地之資訊。

為蒐集各地之氣象觀測資料，在早期中央氣象局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，當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函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 74 年 6 月建置了由日本氣象學會提供氣象資料之較高速線路，其速率為 2400 bPS，每日總資料傳送量約為 8 MB。隨後並於 75 年 3 月建置了由美國加州氣象公司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二，在民國 77 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，77 年以後這些資料已被逐步應用。

傳統之氣象觀測資料在此 20 年間並未有明顯成長，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，如目前中央氣象局每日接收觀測資料之總量約為 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。表三列示主要氣象觀測報別之站或筆數，其中也比較在民國 90 年 6 月時以新通信線路取代原有由美國加州氣象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，目前兩主要資料來源之資料傳送速度分別是 96K bPS 與 128K bPS，與最初期比較其速率提高千倍以上。事實上由局外所得資料除觀測之資料，增加更多的是各作業中心之分析或預報之格點資料，其每日之平均量約為 152 MB，這些資料大部分目前都已被應用。

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所使用的客觀分析法摘錄如表四，各方法之基本原理以及其演進情形如下。

Gressman 以及 Barnes 均是逐次訂正法，其基本原理皆是以一初始猜測值，計算其與觀測資料之差異，經訂正或多次訂正後得到分析結果。兩者差別在於每個觀測資料對其影響範圍內格點權重函數的定義。逐次訂正法權重函數的基本特色是：權重大小僅和格點間的距離有關，和方向無關、每個權重值均大於零且小於一，而且分析值小於最大觀測值。逐次訂正法，除了可以將在不均勻分佈點上的觀測資料內插到均勻的格點外，同時也俱有濾波的效用，經過這種權重方式處理的資料，透過影響範圍與權重方式的選取，格點上的分析值小於某個波長的振幅均為零。Barnes 所使用權重函數較 Gressman 方法容易得到分析場上各個波長的反應函數，所以較 Gressman 更被廣泛使用。中央氣象局最初客觀分析是使用 Gressman 的逐次訂正法，水平(2-D)的觀測資料影響到同平面上的格點分析，然後在 73 年至 78 年間發展數值預報第一代系統時修改為 Barnes 逐次訂正法，除了前所述將權重函數修改外，同時平面分析格點上的分析值，除了受同平面上的觀測資料影響外，也受到上、下臨近層間觀測資料的影響，換一個角度而言，觀測資料所影響的格點除該一層外，也包括了上、下平面上的格點，一般我們以 3-D 稱之。

逐次訂正法存在一個最大的缺點，就是權重僅是距離的函數，和觀測點與格點間的相對位置無關。也就是說，非常接近的二點觀測對格點的影響和距離成比率，但是相對位置相反的二點觀測是完全一樣的，這在許多情形下是不十分理想的作法。逐次訂正法不能考慮到觀測點之間相互位置的缺點，在較完整之統計分析法(OI)中得到改善。OI 是以分析值的變異量(variance)最小為基礎所計算的分析值，在這個做法下，每個觀測值對應的權重函數為 $W = B_i / [B + 0]$ 而 $B_i = \langle (B_k)(B_i) \rangle$ ， B_i 是觀測點 k 與格點 i 之間的預報誤差值， B 是格點與格點之間的預報誤差值， 0 是觀測點之間的預

報誤差值，這個量一般是假設僅存在儀器誤差，且空間上相關為零。格點間與觀測點與格點間的預報誤差值是使用模式的預報誤差空間相關大小經長時間累計，再經由統計上的運算得到，所以 OI 分析方法不僅在數學上是一個最小分析變異值的方法，又可以將模式的預報誤差大小與空間相關的特性放入分析的權重中，模式的誤差量在分析時真正的被使用，這是逐次客觀分析法中所欠缺的另一個重要改革。

除了上述二個重要的改革外，統計法另一個重要的變化在於多變數分析的使用。由逐次訂正法與統計法權重的變化可以明顯的看到，前者高度、風等觀測變數僅能影響到同樣變數的分析值，這種分析方法我們又稱之為單變數分析，但是後者只要在 B 的變量中將變數間的誤差量明示，那麼高度不僅可以修正高度的分析量也可以修正風的分析量，俱這種特色的分析方法又以多變數分析稱之。由單變數 2-D 的 Gressman 演變為 3-D 的 Barnes 方法，再演變為 3-D 多變數的 OI，先不談論分析方法的改進造成分析場的改進，同樣的觀測量，由於 3-D 與多變數分析方法的使用就相對的增加了相當多的觀測量，足以造成分析場的改進。OI 方法，真正結合了分析方法與模式誤差大小、空間相關，對中央氣象局而言 79 年至 83 年間發展數值預報第二代系統，建立 OI 方法是客觀分析方法向前跨了一大步的里程碑。

OI 是一個相當被肯定的分析方法，在分析方法上一直被廣為肯定，也被各數值預報作業系統使用了非常長的一段時間，然而它面臨最大的問題是，遙測資料增加後，和分析變數有關但又非分析變數的觀測資料量增加。如衛星觀測提供輻射值，為了增加這一類觀測資料的使用，分析方法又面臨了另一次革命性的變動。變分法是以 least square estimation 求分析量 f_A ，

使

$$I=0.5\{[f_A-f_0]^T O^{-1}[f_A-f_0]+[f_A-f_B]^T B^{-1}[f_A-f_B]\}$$

極小，

這個方法算得的權重和 OI 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 所俱有的分析值特點，變分法同時俱備。雖然，變分法和 OI 最終有相同的結果，但是由於基本理論出發的不同，變分法可以借由函數關係使用不同於分析變數的觀測量，這是 OI 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，尤其是南半球與大洋上觀測資料的嚴重不足，變分法就逐漸取代 OI 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變分分析法，目前已完成作業測試即將取代數值預報作業系統的 OI 分析，透由變分法，開始在數值預報作業系統中引用各式各類的觀測。

四、預報模式之演進

預報模式包含大氣運動之數值計算，本報告並不詳細說明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。數值預報第一代系統在模式上包含水平經緯 3 度解析之全球 9 層差分模式、90 公里解析之有限區域 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 1.5 度解析之 18 層波譜模式，提昇有限區域模式為雙層網格模式，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，目前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 1 度(T120)垂直 30 層，每日於 00UTC 與 12UTC 執行作業預測，其中 00UTC 執行 72 小時預測，而 12UTC 執行 8 天之預測，有限區域模式是包含三層網格格距之差分預測模式，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、台灣與沿海，內層網格格距 5 公里，包含台灣地區。有限區域預測模式每日於 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，不僅僅含二層網格，並涵蓋較大之範圍，東西向約 8400 公里，南北向約 7200 公里。目前每日 NWP 系統產生之格點資料量約為 2.65 GB。

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四倍，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，大致需要八倍之計算時間。若垂直方向之解析度也同樣提昇，則需十六倍之計算時間與八倍之資料量，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十六倍，而資料儲存與資料傳輸效率需增為八倍，這種需求特性清楚的反映在表一電腦系統之更新上。

五、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，系統還需包含以下幾項機制：

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。
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正常運作。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，即時讓人員能得知異常現象發生，儘速予以排除。

3. 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。在中央氣象局，大致在觀測三小時後才能將全球資料匯集完整，因此各種處理與模式預報大致要在三小時內完成才能適時提供給預人員參考。因此，需要有快速計算處理能力之電腦系統才足以勝任，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，因此增加複雜性。
4. 績效管理，由於體認一作業系統布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，使得以依這些記錄資料，研判系統之弱點予以改善或調整，使系統有較佳之績效。在這方面主要有三：一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；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。
5. 檔案管理，NWP 系統主要可以說是在處理資料，包括各原始觀測資料、最終之預報資料、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。
6. 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，而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方便介入，因此系統之設計也含人機互動之界面，以確保系統能正常有效的運作。

綜合而言，數值天氣預報作業系統，可以說是空間資訊處理技術在實用上一典型之範例，其間包含氣象基本資料處理、氣象高科技數值方法之應用、以及完整資訊管理科技之應用。

六、未來進展

從國內外現今數值預報作業之現況與科技之進展顯示，數值作業預報系統仍然是未來預報作業所最為依賴的資料來源，而其發展之方向，主要包含改善資料源與分析方法、提高預報模式之解析度、以及系集預報之應用與改進等三大方面。

在改善資料源與分析方法方面，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。在模式解析度方面，國內外之研究都顯示，唯有提高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佈以致影響模式之降水或風場預測結果。以日本氣象廳而言，其區域模式現今之解析度為 10 公里，全球預報模式為 T213L30，2005 年全球模式解析度規劃為 T319，而目前已在測試 2 公里解析度之區域模式。在美國也以每 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。

而外界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，由現今對台灣分北、中、南等區域提高到要提供對鄉鎮或市內各區之天氣預報。以都會地區之台北市為例，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如交通之負面影響。要對這種情形事先對可能之災區做準確的預警與採取防範措施時，若降水之觀測與預報無法提供台北分區之降水強度，則是非常困難達成。

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，中央氣象局經過去三期發展計劃之執行，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、以較高解析度之模式，來提供更即時與更準確之預報結果，以逐漸達到滿足外界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，針對此本局已於第三期計畫時開始嘗試進行模式 35 天之模擬計算，可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。

我們研定五年內全球與有限區域模式模式解析改進之指標為：全球模式由現今 T120L30 改進為 T213L40，有限區域模式由現今 D45/15/5L30 改進為 D30/10/3.3L40。在資料分析方面則要完成三維變分分析方法之作業，並將衛星觀測所得之 Radiance 和衛星導出風場納入分析。在分析方面不論變分法或OI 有最小的分析變異量，但是預報模式中所使用的變數比分析可以分析的變數多了許多，這些不能分析的變數，和分析變數往往造成模式在最初的預報時間內變化很大。初始化解決了許多這一類的問題，但是預報模式的複雜性，不是初始化這個過程可以完全解決。在變分法中，再加入了時間的變量，然後透過預報控制方程為限制條件，可以非常有效的解決這個問題，模式中所使用的非分析變數均配合最佳的分析值調整，解決了因彼此不協調所產生的不合理變化。四維變分法是目前所知道最佳化的客觀分析方法，分析的結果不僅有著最佳的分析值，同時模式中非分析的變數和這個最佳化分析場完全配合，這是中央氣象局在分析方面接著三維變分法應用後，發展的重點方向。

表一：中央氣象局數值天氣預報系統各階段之概況

	65-72 年	NWP-1 (73-78 年)	NWP-2 (79-83 年)	NWP-3 (84-90 年)
主系統 備援系統	GA SPC10/45GA SPC10/45	CDC CYBER205 CDC CYBER840	CRAY YMP8I CRAY YMP2E	FUJITU VPP5000
主系統 使用期間 速度 記憶體 磁碟容量	16KB 10MB	78-83 200MFlops 32MB(4MW) 5.6GB	84-88 333MFlops x 8 512MB(64MW) 30GB	89- 9.6GFlops x 15 8GB x 15 2TB
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
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

表二：中央氣象局數值天氣預報系統接收氣象觀測資料概況

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 (SATOB)	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
CS (CLIMAT)	1999-11	1999-11 長期課使用
CU (CLITMP)	1999-11	
Radiance	進行中	
ACARS (FSL)	進行中	
Japan cities forecasts	進行中	

表三：中央氣象局數值天氣預報系統接收氣象觀測資料 90 年 6 月 26 日主要報種之數量概況

報種	新舊美國線之比較		IRI 資料量 (筆數)	CWB 全部資料 量
	增減	差異說明		
TEMP	增	全球約增 38 站	709 站	718 站
ILOT	增	新增全球約 134 站	466 站	473 站
AIREP	增	新增全球約 12,500 站	15,750(全天)	25,390(全天)
SATOB		相似	19,534(全天)	24,086(全天)
SATEM		相似	12,645(全天)	16,012(全天)
SYNOP	增	新增全球約 780 站	5,464 站	5,861 站
SHIP	增	新增全球約 180 站	3,454(全天)	3,900(全天)
BUOY	減	減少全球約 55 站	6,786(全天)	
METAR	增	原無，新增 3,226 站	3,226 站	
BATHY	增	原無，新增 35 站	35 站	

表四：中央氣象局數值天氣預報系統各階段使用方法之概況

名稱	使用方法	權重	特點
Cressman	逐次訂正法	$W=(R^2-r^2)/(R^2+r^2)$	2-D、單變數
Barnes	逐次訂正法	$W=\exp(-r^2/2R^2)$	3-D、單變數
OI	統計法	$W= B_i/[B+O]$	3-D、多變數地轉平衡、使用預報模式的預報誤差
3DVAR	空間變分法	$W= B/[B+O]$	3-D、多變數地轉平衡、使用預報模式的預報誤差、非分析變數的觀測
4DVAR	(空間+時間)變分法		4-D、多變數完整預報模式限制、使用預報模式的預報誤差、非分析變數的觀測、透由預報模式配合分析量調整非分析變數量