

衛星探空資料(SATEM)在有限區域預報模式中應用之研究

洪景山

中央氣象局資訊中心

摘要

本文主要是評估衛星探空資料(SATEM)應用在中央氣象局有限區域預報模式中的影響，並提出適當的使用策略，以增進SATEM的使用效率，俾提高分析及預報的準確度。

文中分為兩部份，第一部份說明SATEM資料的特性，第二部份則探討SATEM資料在最佳客觀分析(Optimal Interpolation)中的可能影響。研究指出，SATEM在低對流層有較差的垂直解析度，因此850 hPa以下加入SATEM後所導致高度場的變化均是客觀分析外延的結果，而850 / 700 hPa二層高度場間的低相關也說明SATEM在低對流層的不適用性。此外，分析中指出，SATEM的修正量佔總修正量的50%，這個比例稍嫌偏高，而SATEM在雲雨系統中會使高對流層的高度場有系統性增加的趨勢，這是在應用上應該要特別注意的地方。最後，本研究建議在有限區域預報模式中500hPa(含)以下及雲雨區的SATEM資料應避免使用，以減少因觀測資料的誤差而污染模式的分析結果及預報準確度。

一、前言

過去十多年來，對數值天氣預報而言，如何開發新的觀測資料及發展更進步的資料同化技術已經成爲一項研究的重點，同時也被認爲是提高數值預報產品準確度的一個重要的瓶頸。其中利用衛星資料反演計算得到的溫度及濕度剖面具有甚高的空間及時間解析度，因此，如果能妥善運用這些資料，那麼對於數值天氣預報而言可能具有正面積極的意義。

然而，對於衛星反演的溫度剖面(Satellite Temperature, SATEMs)而言，除了輻射強度的觀測先天就有遙測技術上的誤差之外，更重要的是透過複雜的反演計算所得到的溫度剖面卻包含了更多的不確定性。因此，在將SATEM應用到數值天氣預報模式之前，實有必要對SATEM的品質及其對模式的影響做進一步的研究。

歐洲天氣預報中心(European Center for Medium Range Weather Forecasts, ECMWF)曾對SATEM在模式中的影響做過一系列的分析，Uppala et al. (1984)利用ECMWF在1982 / 83年的作業模式及資料同化系統，針對1979年2月和1979年11月FGGE的觀測資料進行SATEM在全球模式240小時預報的異常相關(anomaly correlation)計算，其結論爲：

- 南半球在2個試驗中，SATEM對預報結果均有正的貢獻。Uppala et al. (1984)認爲由於南半球缺乏足夠的觀測資料，因此SATEM在分析的過程中很容易發揮它的影響力。
- 北半球在11月的測試中爲正的貢獻，2月的測試中則幾乎沒有影響。

Kelly and Pailleux (1988)接著針對Uppala et al. 所使用1979年11月的資料，但用ECMWF 1987年的資料同化系統再作一次測試，其預報結果在南半球同樣地仍有正貢獻，但北半球的正貢獻相對地減少。而在他們另一個測試中(1987年1月30日00UTC至2月14日12UTC)則顯示南半球依舊是正的貢獻，但北半球在北美-大西洋-歐洲一帶爲正貢獻，而亞洲-太平洋區域則爲負貢獻，綜合的結果是SATEM在北半球的影響趨近中性。此外Kelly and Pailleux (1988)和Kelly et al. (1991)也指出SATEM在某些地方的可靠性相當低，應該要有好的品管措施做嚴格篩檢，以避免污染到其他觀測資料。

有趣的是Andersson et al. (1991)再一次利用1987年的資料，但配合ECMWF在1988年底經過修改後的資料同化系統和作業模式(修改的項目可參考Andersson et al. 1991或Loönberg 1988)重新分析SATEM的影響，15個個案平均的結果顯示南半球仍爲正的貢獻，但北半球則爲負的貢獻。由以上一系列的研究可以知道同樣的資料在不同模式中(包含分析和預報)會有不同表現；Andersson et al. (1991)認爲這是因爲新的模式在北半球雖然對於有SATEM和沒有SATEM的個案均具有較高的預報準確度，但在沒有SATEM的測試中卻進步更多，因此使得SATEM的加入變成負的貢獻。這也意味著當我們對某特定觀測資料進行評估時，模式本身即是一個不容忽視的變數。

雖然ECMWF對SATEM做了一系列的研究，但是由於觀測資料提供的是模式的初始場，因此不論是討論初始分析場本身的正確度或者是探討初始場在數值模式預報過程中的影響，都因爲缺乏客觀上驗證的標準而使得資料本身扮演既是球員又是裁判的角色。舉例來說，進行異常相關計算時關係到

分析場和預報場之間的相異程度，一般我們希望分析場是不變的參考值，但是在考慮不同觀測資料的影響時，分析場和預報場卻同時都為變數，此時再依據異常相關的差異來說明資料的影響，在統計的立場上來說難免有不盡周全之處。此外，如果利用鄰近測站來討論不同觀測資料的差異，除了不容易得到全面性的結論外，也無法進一步獲得資料在分析模式或預報模式中的整體影響。職是之故，ECMWF的研究方法固然有再進一步商榷的必要，而如何設計一個較獨立的分析方法則是一項更重要的工作。

本文主要是探討 SATEM 應用在中央氣象局有限區域預報模式的評估，其重點在研究 SATEM 對模式分析及預報的影響，而不是在說明反演衛星資料的技術。由於大氣背景場，如溫度剖面、水氣分佈等會直接改變大氣的光學性質，從而進一步影響到大氣輻射的觀測及反演計算的結果；因此 SATEM 可能會因為天氣系統、氣團特性、海陸分佈和反演技術的差異而具有系統性誤差 (Andersson et al. 1991, Flobert et al. 1991)，但更重要的是資料對模式的影響除了來自於自身存在的誤差外，更和模式本身息息相關，它們往往是相對的，而不是絕對的；因此模式在不同的發展階段會使得觀測資料具有不同的意義，SATEM 如此，其他資料 (包括模式初始猜測值) 也是如此。

本文分為五個部份；第二部份概略介紹中央氣象局第二代有限區域預報模式的架構和客觀分析的方法，第三部份說明 SATEM 的特性及其在空間和時間上的分佈，第四部份則探討 SATEM 在客觀分析中的可能影響，最後則是結論。

二、模式簡介

中央氣象局第二代區域預報模式為包含粗細網格系統的巢狀模式，其網格間距分別為 60 及 20 公里，格點數目為 (161×121) 及 (91×91) ，水平範圍達 $9600 \text{ km} \times 7200 \text{ km}$ (如圖一)。垂直方向採用 σ 座標 ($\sigma = P/P_s$ ， P_s 為地表氣壓)，總共分為 20 層， $\sigma = 1$ 時為地表 $\sigma = 0$ 時則為模式的頂。變數在水平方向引用 Arakawa's C 交錯網格系統，溫度 (T)、重力位 (Φ)、比溼 (q) 和 σ 均在 (i, j) 上計算，水平風場 u, v 則分別放置在 $(i + 1/2)$ 及 $(j + 1/2)$ 格點上。時間積分格式為 Split-explicit 方法，羅士培模的時間間距為 90 秒，前三個重力模的時間間距則為 $\frac{1}{8}\Delta t$ ， $\frac{1}{4}\Delta t$ 及 $\frac{1}{2}\Delta t$ ，它的好處是可以針對不同的物理過程給予不同的積分間距，而得到較經濟的計算時間。在物理參數化方面則考慮到郭氏積雲參數化、TKE $-\epsilon$ 紊流閉合的多層邊界層參數化和 Harshvardhan 輻射參數化等。

第二代區域預報模式的客觀分析為最佳客觀內插法 (Optimal Interpolation)，其中包含水平速度場 (u, v) 和重力位 (Φ) 的多變數分析，相對濕度和海面溫度的單變數分析等，溫度場則由重力位高度透過靜力方程計算而得。由於 SATEM 是厚度資料，因此它被歸類在重力位和風場的多變數分析中。觀測資料經過檢定後在進入分析之前會再次和初始猜測值校驗一次 (gross error check)，同時在分析區域中建立一個水平尺度為 $0.2^\circ \times 0.2^\circ$ 的 "box" 系統，在每一個 box 中依不同的資料來源設定選用的優先順序如下：

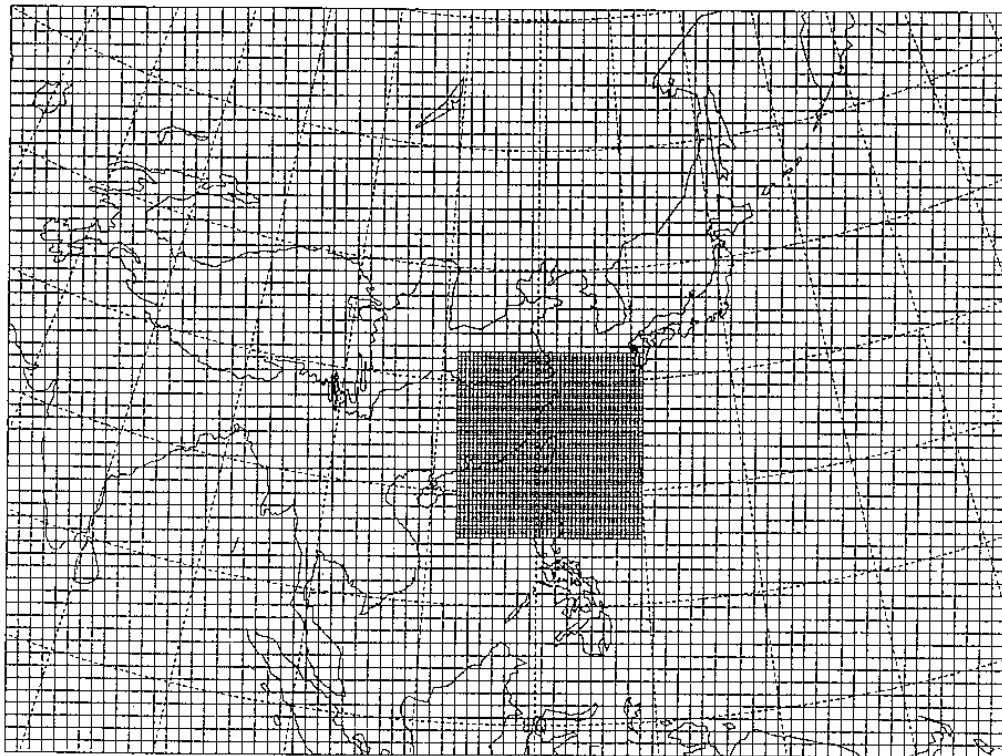


圖 1：中央氣象局區域預報模式的模式範圍及網格系統。其中大小網格間距分別為 60 及 20 公里，圖中每一個格點包含 2 個模式的網格間距。

- 探空資料 (TEMP)
- 高空風觀測 (PILOT)
- 地面觀測 (SYNOP)
- 船舶觀測 (SHIP)
- 衛星探空觀測 (SATEM)

這是爲了要減少太多重複的資料，以利於最佳內插法的計算。由於本文重點在探討 SATEM 的影響，因此飛機觀測和衛星風觀測並沒有進入客觀分析中。

三、SATEM 的資料特性

目前 GTS (Global Telecommunications System) 上的 SATEM 資料是由美國 NESDIS (National Environmental Satellite Data and Information Service) 所提供，主要是反演自 NOAA 11、12 號衛星的觀測資料，垂直方向包含自 1000 hPa 至 850 hPa、700 hPa、...、10 hPa 等計 14 個標準層的厚度資料 (如圖二)，水平解析度大約爲 500 公里左右。圖三是隨機選取 1994 年 6 月 22 日 12Z 之 500 hPa 至 400 hPa 厚度的 SATEM 水平分佈範例，其中有幾點是要特別提出的：

- GTS 上 SATEM 的時間解析度爲 3 小時 (00Z、03Z、...、21Z)，其中各包含前後 30 分鐘的衛星觀測，例如衛星在 0230Z 至 0329Z 的觀測均視爲 0300Z 的 SATEM 資料。而現階段中央氣象局同化系統的更新週期 (update cycle) 爲 12 小時，其中包含了前後各 6 小時的觀測資料；也就是 06Z 至 17Z 的觀測資料均納入 12Z 的分析，因此每個更新週期都包含了 4 個不同時間的 SATEM 資料。
- SATEM 經緯度的定位準確至個位數字，這對於 500 公里水平解析度而言是可以接受的。
- SATEM 厚度準確至 10 公尺，因此對於 700 hPa 以下的厚度而言，這個量級算是相當粗糙的，

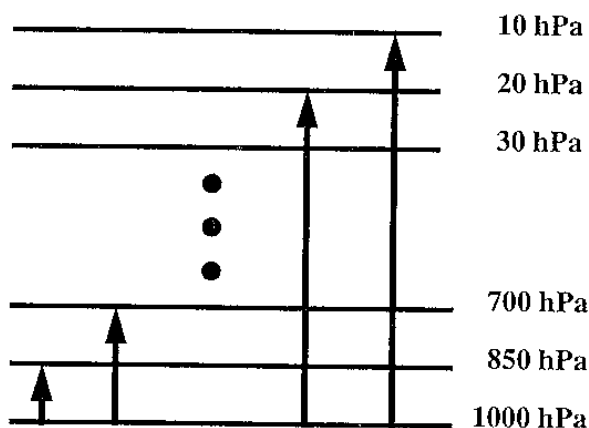


圖 2：SATEM 厚度示意圖，其中包含 1000 hPa 至 850 hPa、700、500、400、300、250、200、150、100、70、50、30、20 及 10 hPa 共 14 層的厚度。

所以我們可以預期 SATEM 在低對流層或穩定度變化劇烈的地方 (如逆溫層、對流層頂附近) 可能有較差的解析度。

- SATEM 最低層是 1000 / 850 hPa 的厚度，由於資料本身在低層缺乏精細的解析度，因此模式中並沒有將最低層的資料再內插至 1000 / 925 hPa 及 925 / 850 hPa 的厚度，而 850 hPa 以上的厚度 (850 / 700 hPa, 700 / 500 hPa ...) 才進入最佳化內插中進行客觀分析。
- 由於繞極軌道衛星在極區附近每一個視點均較低緯地區包含了更多經緯度，因此對於全球模式 (採用經緯網格系統) 來說，高緯的 SATEM 解析度相對是較差的，Pallieux (1985) 即指出南北緯 60° ~ 90° 的 SATEM 最好是不要採用。但在直角網格系統的區域模式中，這個問題就不至於那麼嚴重了。
- 因爲 NOAA 11、12 號衛星是繞極軌道衛星，因此在模式區域內的 SATEM 數目不見得每次分析都會一樣，而其空間分佈取決於衛星的運行軌跡。在 5 月 18 日至 6 月 26 日之間隨機選取 20 個個案的統計結果發現，平均進入客觀分析的 SATEM 數目爲 133.5 個，標準差爲 37.1 個，顯示資料來源相當穩定，因此在統計上來分析 SATEM 對有限區域預報模式分析及預報的影響是可行的。

四、SATEM 在客觀分析中的影響

(一)、實驗設計

這個部份主要是探討 SATEM 在客觀分析中的可能影響。在此選用 1994 年 6 月 20 日至 6 月 26 日共 10 個個案，就統計的觀點來分析 SATEM 是否具有系統性的偏差。實驗分爲兩組，第一組觀測資料包括 TEMP、PILOT、SYNOP 和 SHIP，以 NoSATEM 表示；第二組則加入 SATEM 資料，在此用 FULL 代表這組實驗；以高度場變數爲例，NoSATEM 組的高度場表示成 Φ_{no} ，FULL 組則寫成 Φ_{full} ，初始猜測場則以 Φ_{fst} 表示。

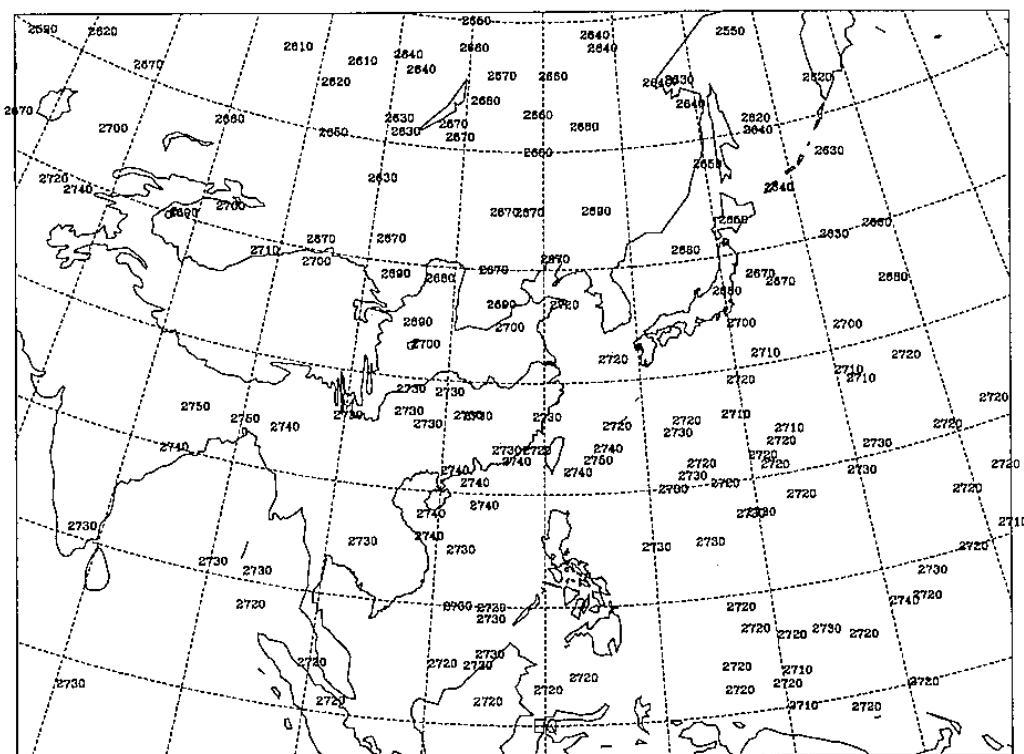
(二)、分析結果

定義 $\Delta\Phi_{full}$ ，

$$\Delta\Phi_{full}(p) = \sqrt{\sum_{i,j} (\Phi_{full}^{i,j} - \Phi_{fst}^{i,j})^2 / N}$$

其中 (i, j) 表示水平網格點上的值， N 是水平總網格數目。因此 $\Delta\Phi_{full}$ 相當於等壓面上 FULL 測試和初始猜測場差值的絕對值平均，它的數學型式有點類似標準差，計算結果比較有利於強調局部偏差，而較少包含整體平均的訊息。同時 $\Delta\Phi_{full}$ 也是高度和個案的函數，爲了去除個案間彼此的差異，因此將 10 個個案的 $\Delta\Phi_{full}$ 取平均，並計算標準差 (如圖 4a)。類似的手法也可定義 $\Delta\Phi_{no}$ ，

Thickness between 500 hPa and 400 hPa



94062212

154 elements

圖3：1994年6月12日12 Z SATEM資料的空間分佈，圖中的數字代表500 hPa至400 hPa的厚度。

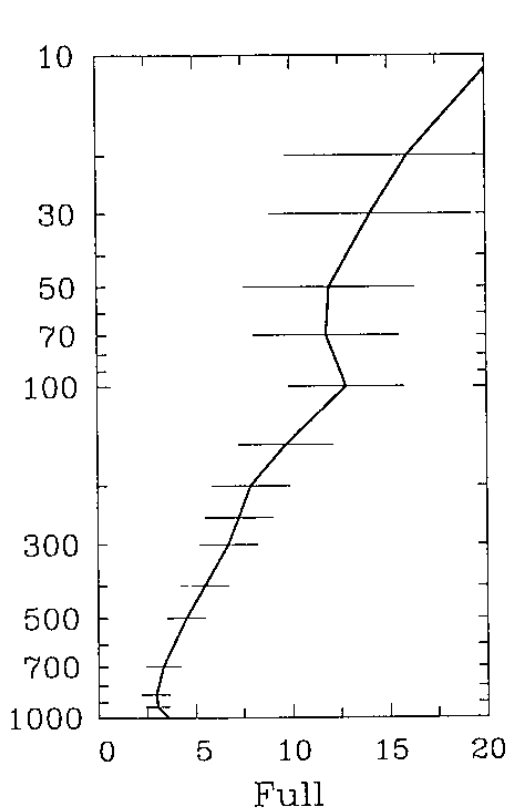


圖4a：10個個案平均的 $\Delta\Phi_{full}$ (定義請參考內文所述)隨高度的變化。

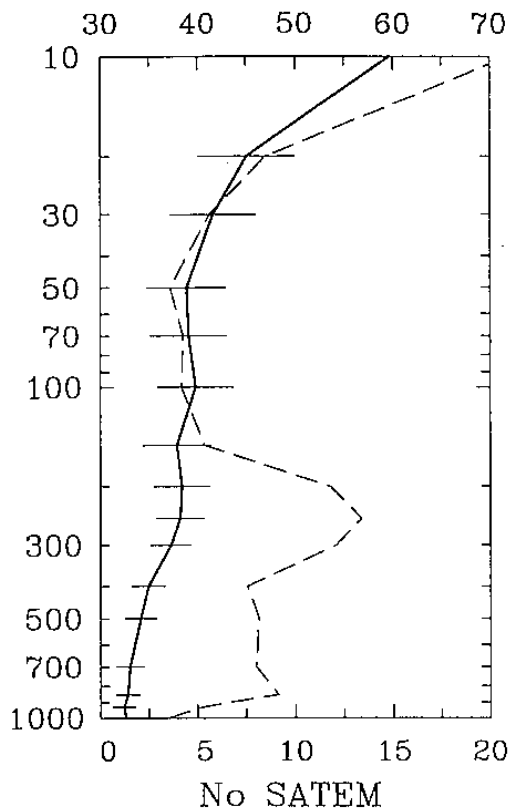


圖4b：同圖4a，但為 $\Delta\Phi_{no}$ ，虛線則是 $\Delta\Phi_{no}$ 和 $\Delta\Phi_{full}$ 的比值。

$$\Delta\Phi_{no}(p) = \sqrt{\sum_{i,j} (\Phi_{no}^{i,j} - \Phi_{full}^{i,j})^2 / N}$$

$\Delta\Phi_{no}(p)$ 即表示等壓面上FULL和NoSATEM的差值，也就是SATEM在分析中所扮演的角色，10個個案平均後即如圖4b所示。圖4a顯示10個個案平均的 $\Delta\Phi_{full}$ 基本上隨高度的增加而增加，在100hPa以下標準差變化不大，顯示個案間的差異性相當小，在這情形下850hPa以下及100hPa至50hPa之間負的斜率特別引人注目。為了進一步說明這個現象，在此先假設觀測誤差在垂直方向上的變化是固定的，那麼模式預報（也就是 $\Delta\Phi_{fst}$ ）的系統性誤差就有可能會影響到 $\Delta\Phi_{full}$ 的垂直分佈。由於100hPa以上為平流層區域，在這些地方大氣現象多半由流體動力主宰，物理過程（除了輻射之外）的成份較少（特別是水氣），因此和對流層比起來，經由參數化所導致的不確定性就少多了。這意味著模式在平流層可能有較好的初始猜測值，因此 Φ_{fst} 會更接近 Φ_{full} 而使得 $\Delta\Phi_{full}$ 呈現負的斜率。至於50hPa以上 $\Delta\Phi_{full}$ 又隨高度增加，這有可能是為了要滿足模式的上邊界條件而污染了初始猜測值，所以 $\Delta\Phi_{full}$ 在50hPa以上有正的斜率，而且顯然愈往上愈大。同樣地，複雜的地形、邊界層參數化及地表效應等使模式在近地層的預報（ Φ_{fst} ）可能出現更多的變因，也使得最低層的 $\Delta\Phi_{full}$ 有相對最大值的出現。由以上的分析可以知道，觀測資料對模式的意義不僅僅只來自觀測值的大小，模式透過初始猜測值（ Φ_{fst} ）也扮演一定的角色。

我們所感興趣的還是SATEM的影響，圖4b中 $\Delta\Phi_{no}$ 大致上仍隨高度的增加而增加，虛線表示 $\Delta\Phi_{no}$ 和 $\Delta\Phi_{full}$ 的比值，平均大約在50%左右，這個比例顯示SATEM在客觀分析中的影響是不可忽視的。當然，這個比例固然可以說明SATEM的影響程度，但是當我們改善了其他資料的使用情形或是加強了初始猜測場的準確度後也都會進一步改變這個比例，這也就是為什麼文中要一直強調在模式的不同發展階段都應該回來重新校驗不同資料在模式中的影響程度。此外， $\Delta\Phi_{no}$ 剖面也沒有如 $\Delta\Phi_{full}$ 般顯著的垂直變化，這可以很容易來說明，由於

$$\begin{aligned} \Delta\Phi_{no}(p) &= \sqrt{\sum_{i,j} (\Phi_{no}^{i,j} - \Phi_{full}^{i,j})^2 / N} \\ &= \sqrt{\sum_{i,j} [(\Phi_{no}^{i,j} - \Phi_{fst}^{i,j}) - (\Phi_{full}^{i,j} - \Phi_{fst}^{i,j})]^2 / N} \end{aligned}$$

因此 $\Delta\Phi_{no}$ 不包含模式預報的訊息在內，而僅僅只是觀測資料在客觀分析中的影響而已。由這個觀點來看， $\Delta\Phi_{no}$ 的剖面也支持先前在討論 $\Delta\Phi_{full}$ 剖面時，事先假設忽略觀測誤差在垂直方向的變化，而訴諸於模式系統性偏差的詮釋是合理的。

此外，在第三節中已提及，由於受限於SATEM在低層缺乏精細的解析度，因此850 hPa以上的SATEM厚度才進入客觀分析中。但是圖4b中卻可以看到850 hPa以下SATEM仍有顯著的影響，這是因為最佳化內插同時涵蓋三度空間的資訊，因此，

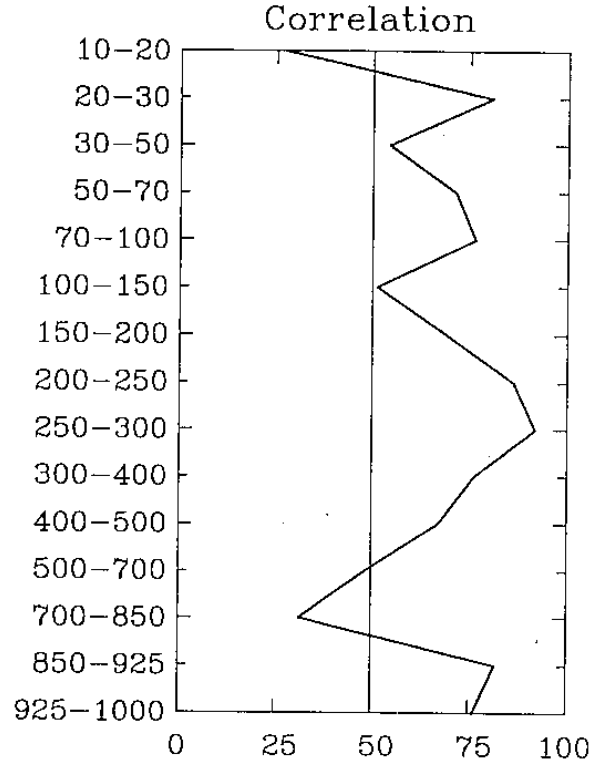


圖5：鄰近兩個等壓面上 $\Delta\Phi_{no}$ 的相關係數，此為10個個案的平均值。

850/700hPa厚度的資訊會滲透至850 hPa以下各層，如圖4b所示。由於這個過程類似外延，因此可預期在垂直方向上應該要有很好的相關。圖5是相鄰兩層等壓面上 $\Delta\Phi_{no}$ 的相關係數（10個個案的平均），如圖顯示925/850 hPa及1000/925 hPa即如預期具有高度相關。同時由於SATEM在低層的解析度不好，因此導致850/700 hPa的低相關。然而就實際運用來說，850 hPa以下SATEM的訊息是外延的，這當然是不正確的；而850/700 hPa的低相關也不是我們所樂意看到的現象（一般來說，大氣現象在相鄰兩層等壓面間而有顯著變化的情形並不多見），因此，由這個實驗中作者建議500 hPa以下的SATEM應盡量避免使用，至少在最佳化內插的分析中，這些資料的意義相對來說是比較貧乏的。

圖6是850 hPa和300 hPa等壓面上 $\Phi_{full} - \Phi_{no}$ 的場，正值表示 Φ_{full} 大於 Φ_{no} ，即意味加入SATEM後使分析的高度場增加，反之，負值表示SATEM使分析的高度場下降。圖6仍是10個個案的平均，因此已盡量減少由瞬變擾動引起的效果。圖7則是1994年6月20日至6月24日5天平均的紅外線衛星雲圖，這段時間涵蓋了本實驗中的8個個案。很有趣的一點是，圖6 300 hPa負值的區域（如圖中A、B、C、D所指）在圖7中均對應著顯著的雲團（如圖中的A、B、C及D），這應該不是巧合！眾所皆知，大氣中水氣的分布會強烈地改變輻射的行為，並進一步影響反演計算的正確性。由本實驗中可以了解，在對流區域中SATEM的加入會使分析的高度場系統性地降低，這種情形在較高層中尤為顯著，低層則較不受影響（

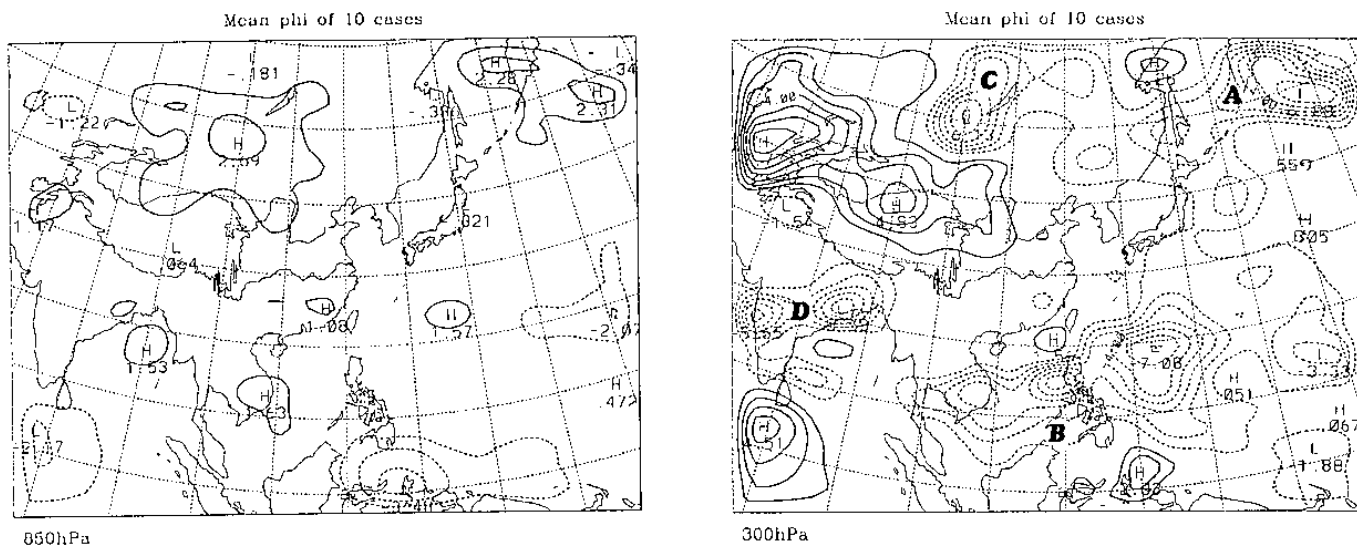


圖6： $\Phi_{full} - \Phi_{no}$ 在850 hPa和300 hPa的分佈，實線表示正值，虛線為負值，等值線間距為1 m，圖中仍為10個個案的平均，其中A、B、C、D分別對應於圖7中雲雨區的位置。

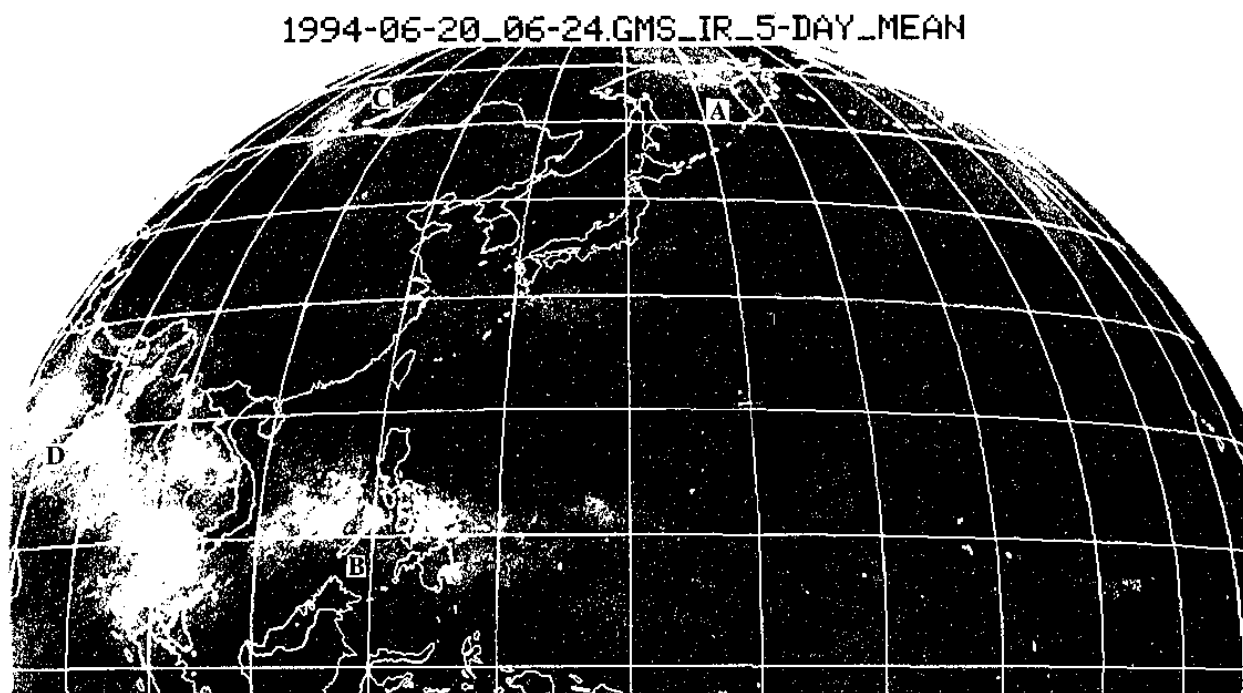


圖7：1994年6月20日至6月24日5天平均紅外線衛星雲圖，A、B、C、D為顯著的雲雨系統區。

如圖6的850 hPa)。雖然在此仍無法直接判斷這種效果對模式預報是正的或是負的貢獻，但是在許多研究報告中均指出，衛星反演的探空在有雲的區域往往會有較差的解析度和較低的準確度 (Kelly et al. 1991, Flobert et al. 1991)，因此這種系統性偏差很可能是觀測誤差，在分析前就應該把它過濾掉，以免進入模式中污染到其它觀測資料。

五、結論

由前面的討論中可以知道，由於SATEM在時空上的高解析度，因此特別吸引數值預報研究人員的關注；然而也因為遙測技術和反演理論在實作上的限制，而使得SATEM的應用存在更多的風險，這也就是本文所要探討的重點所在。

就現階段的衛星觀測技術而言，SATEM在低對流層的垂直解析度仍不敷數值天氣預報的需求，這個現象在本研究的分析中可以很清楚地看到。由於客觀分析中最低層只用到850 hPa和1000 hPa之間的厚度資料，因此850 hPa以下因為加入SATEM

所導致高度場的變化均是透過客觀分析的外延所致，這當然不是我們所樂見的。而850 / 700 hPa二層分析場之間的低相關也說明SATEM在低對流層的低解析度是不適用的。此外，在 $\Delta\Phi_{full}$ 的計算中也顯示觀測資料在客觀分析中的影響因為透過初始猜測場而和模式息息相關，SATEM在現階段分析模式中的影響可達50%左右，這個比例稍嫌偏高，但是模式在不同發展階段的預報能力和對觀測資料的使用策略都會明顯地影響到觀測資料在模式中所扮演的角色，這是要特別注意的。其次，SATEM受到雲雨系統的影響也相當顯著，10個個案平均結果顯示，分析場加入SATEM後在有雲的地方高對流層的高度場會系統性地降低，而低對流層的變化則較不顯著，這種系統性偏差很可能是觀測誤差，在分析應用上應該格外小心。

綜合以上分析，本文針就SATEM在中央氣象局有限區域預報模式的應用提出4點建議：

- (一)：由於SATEM垂直解析度的限制，低對流層，特別在500 hPa以下應避免使用。
- (二)：雲雨區，特別是對流旺盛的區域應盡量不要使用。
- (三)：在模式不同的發展階段中應隨時校驗不同資料來源在模式中的影響，以準確、有效地應用有限的觀測資料。
- (四)：避開衛星反演技術的限制，直接使用衛星輻射強度觀測資料(SATRAD)，這是未來可以繼續發展的一項技術。

未來衛星觀測資料無論在數值天氣預報或大氣科學研究上均將扮演舉足輕重的角色，而有關如何妥善應用觀測資料的研究，舉凡新資料的開發，校驗、更嚴謹的除錯系統、不同資料在客觀分析及預報流程中的影響以及資料同化的技術發展等，不僅在科學上具有研究的價值，同時也是影響數值天氣預報成果的重要關鍵，這是值得我們再進一步努力的一個方向。

參考文獻

- Andersson, E., A. Hollingsworth, G. Kelly, P. Lönnberg, J. Pailleux and Z. Zhang, 1991: Global observing system experiments on operational statistical retrievals of satellite sounding data. *Mon. Wea. Rev.*, **119**, 1851-1865.
- Flobert, J. -F., E. Andersson, A. Chédin, A. Hollingsworth, G. Kelly, J. Pailleux and N. A. Scott, 1991: Global data assimilation and forecast experiments using the improved initialization inversion method for satellite soundings. *Mon. Wea. Rev.*, **119**, 1881-1914.
- Kelly, G., E. Andersson, A. Hollingsworth, P. Lönnberg, J. Pailleux and Z. Zhang, 1991: Quality control of operational physical retrievals of satellite sounding data. *Mon. Wea. Rev.*, **119**, 1866-1880.
- Kelly, G., and J. Pailleux, 1988: Use of satellite vertical sounder data in ECMWF analysis system. ECMWF Tech. Memo. 143, 46 pp [Available from ECMWF, Shinfield Park, Reading, RG2 9AX, U. K.]
- Lönnberg, P., 1988: Developments in the ECMWF analysis system. *Proc. of the ECMWF Seminar on Data Assimilation and the Use of the Satellite Data*. Reading, ECMWF, 75 - 119. [Available from ECMWF, Shinfield Park, Reading, RG2 9AX, U. K.]
- Pailleux, J., 1985: Use of the satellite data in the ECMWF analysis system. *Proc. of the ECMWF Workshop on High Resolution Analysis*. Reading, ECMWF, 15 - 27. [Available from ECMWF, Shinfield Park, Reading, RG2 9AX, U. K.]
- Uppala, S., A. Hollingsworth, S. Tibaldi and P. Kållberg, 1984: Results from two recent observing system experiments at ECMWF. *Proc. of the ECMWF Seminar- Workshop on Data Assimilation Systems and Observing System Experiments with Particular Emphasis on FGGE*, Reading, ECMWF, 165 - 202 [Available from ECMWF, Shinfield Park, Reading, RG2 9AX, U. K.]

