

出國報告（出國類別：實習）

臺美氣象先進資料同化與預報模式
系統發展技術合作協議－系集調整
卡爾曼濾波(**Ensemble Adjustment
Kalman Filter**)

服務機關：交通部中央氣象局

姓名職稱：林昀瑱 國防訓儲人員

派赴國家：美國

出國期間：97年7月3日至97年8月29日

報告日期：97年11月12日

摘要

天氣研究與預報模式(Weather Research and Forecast Model ; WRF)與系集調整卡爾曼濾波 (Ensemble Adjustment Kalman Filter ; EAKF)為美國國家大氣研究中心(National Center for Atmospheric Research ; NCAR)資料同化研究平台(Data Assimilation Research Testbed ; DART)最新資料同化系統。藉由 EAKF 資料同化系統配合本局新一代高速電腦系統，期望能有效提升預報準確率。

卡爾曼濾波係利用分析場與觀測值所決定出來的最佳解。簡單來說，在預報過程中若有新的觀測資料進來時，由預報值與觀測值決定最佳分析數值解，再由此分析值往下預報。假設使用卡爾曼濾波分析一段時間後，預報結果將會接近實際觀測大氣，預報誤差也不會顯著成長。EAKF 利用系集樣本的預報場與新的觀測資料來求取最佳分析場，同時也更新背景場誤差(Background Error)。

本次實習將 EAKF 資料同化系統移植至中央氣象局超級電腦系統中，並以實際颱風個案進行分析與預報。觀測資料除了一般傳統觀測資料外，本次實驗也加入福衛 3 號(FORMOSAT-3 / COSMIC) GPS radio occultation (RO)衛星資料進行資料同化。希望利用衛星資料空間分布的優點，彌補海上觀測資料不足之區域。

關鍵詞：天氣研究與預報模式(WRF)、系集調整卡爾曼濾波(EAKF)

目次

一、目的	• • • • • 4
二、過程	• • • • • 5
三、心得	• • • • • 6
四、建議	• • • • • 11
附圖	• • • • • 12

一、 目的

天氣研究和預報模式(Weather Research and Forecasting model ; WRF) 是近年來美國相關研究單位研發的中尺度數值模式預報系統，其快速平行化運算處理和先進的物理與動力數值運算方法，大幅改進預報作業的時間與預報準確率。資料同化系統利用客觀的分析方法估計出在分析點上的大氣狀態，再使用天氣數值預報模式系統模擬未來的天氣狀態。

系集調整卡爾曼濾波(Ensemble Adjustment Kalman Filter system ; EAKF)是近年美國國家大氣研究中心(National Center for Atmospheric Research)資料同化研究平台(Data Assimilation Research Testbed ; DART)最新資料同化系統，此方法將氣象資訊在時間上往前分析，再依次估計出整個大氣狀態的估計值。簡單來說，在預報過程中有新的觀測資料進來時，用此觀測資料與預報值來決定出最佳的分析值。利用最新觀測資料來更新預報值，有利於預報結果不會偏離實際大氣太遠，使得預報誤差降低，進而改善數值模式預報結果。

本次實習主要引用 EAKF 針對福爾摩沙衛星 3 號(FORMOSAT-3/COSMIC) 的 GPS 觀測資料進行資料同化，並且探討此觀測資料對預報結果的影響，希望逐步提升 GPS 觀測資料於數值模式預報系統上的應用。

二、 過程

本次實習時間為 2008 年 7 月 3 日至 2008 年 8 月 31 日，與 NCAR 劉輝博士研究 EAKF 資料同化系統。此次行程與研究內容如下：

日期	地點與相關工作內容
97/7/3	台北至丹佛
97/7/7	與郭英華博士和劉輝博士討論主要工作事項。
97/7/8~97/7/11	<ol style="list-style-type: none">1. 架設 Ensemble Adjustment Kalman Filter 資料同化系統於中央氣象局超級電腦上。2. 修改 Ensemble Adjustment Kalman Filter 資料同化系統運行流程。
97/7/14~97/7/24	參加 WRF Tutorial 研討會，研討會網頁： http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/supports/tutorial.html
97/7/14~97/7/31	<ol style="list-style-type: none">1. 修改 GPS RO 資料處理方式，將資料處理垂直高度調整至 22 公里，降低高層資料誤差。2. 測試運行 Ensemble Adjustment Kalman Filter 資料同化系統。
97/8/1~97/8/28	<ol style="list-style-type: none">1. 進行 2007 年 10 月颱風 Krosa 實際個案測試，分別為 CTL、LOCAL_GPS 和 NONLOCAL_GPS 3 組實驗。
97/8/28~97/8/30	丹佛回台北

三、心得

台灣地區在夏季經常遭受颱風的侵襲，時常造成民眾生命財產嚴重損失。提升天氣預報效率與颱風路徑預報的準確度為本局首要工作。近年美國國家大氣研究中心(NCAR)投入相當多的人力研發先進資料同化系統，而 Ensemble Adjustment Kalman Filter (EAKF)為其中一種的資料同化系統。

卡爾曼濾波(Kalman Filter)利用觀測資料來調整模式狀態變數，由新的觀測資料與模式預報數值求取最佳數值解，使得模擬大氣狀態趨近於實際大氣情況。而 EAKF 利用系集預報的相關性來調整模擬大氣狀態的變數。以下為本次赴美實習的心得：

(一) 測試軟體版本

WRF-ARW model	(V 2.2.1 10/31/2007)
WPS	(V 2.2.1 10/31/2007)
WRFVAR	(V 2.1.2 08/23/2006)
WRF/DART	(V 2.2 DART WEBSITE 07/31/2008)
RIP4	
NCAR Graphics	

(二) Ensemble Adjustment Kalman Filter 概述

資料同化係將特定時間內所有的觀測資料加上模式背景場估計出大氣狀態。氣象局近年來不斷發展大氣資料同化系統以取代傳統的客觀分析方法，DART 為美國國家大氣研究中心最新研發的資料同化系統，利用系集預報與資料同化的特

性，使得分析場更接近於實際大氣狀態，特別是在中尺度天氣系統上。DART 使用 Ensemble Adjustment Kalman Filter 資料同化方法來估計出大氣狀態。以下為 EAKF 資料同化系統的流程：

首先，定義一個連續觀測狀態變數為 $Z = [X, H(X)] = [X, Y]$ ，其中 x 為模式狀態變數； $Y = H(X)$ 為由模式估計的觀測資料的初始猜測值， H 為觀測算子，將模式狀態變數轉換成觀測變數。

利用 Bayesian 估計法由觀測值來更新模式狀態，只要有觀測資料進來，就進行更新的步驟。假設模式更新前(預報/初始猜測)的狀態分布為 $Z^p = [X^p, Y^p]$ ，更新後的狀態分布為 $Z^u = [X^u, Y^u]$ ，利用 Bayesian 估計法可求得：

$$P(Z^u) = P(Y^o | Z^p) P(Z^p) / \text{normalization} \quad (2.1)$$

設 Y^o 為單一觀測值，當有觀測資料時，可得到預報系集模式狀態變數向量 X_i^p ，($i = 1, \dots, K$)，其中 i 為系集樣本的編號， K 為系集預報的大小。利用觀測算子 H 可以得到 $Y_i^p = H(X_i^p)$ ，($i = 1, \dots, K$)，利用 2.1 式可以得到更新後觀測資料分布：

$$P_y(Y^u) = P(Y^o | Y^p) P(Y^p) / \text{normalization} \quad (2.2)$$

EAKF 同化觀測資料主要有兩個步驟：第一步驟，利用系集調整方法與計算更新前後觀測資料系集估計值的增量，可以得到更新後的觀測估計值 Y_i^u ($i = 1, \dots, K$)。第二步驟，利用觀測空間增量求得模式更新後狀態變數估計值 X_i^u ($i = 1, \dots, K$)。以下為 DART/EAKF 資料同化流程：

- (1) 產生一組系集模式狀態變數估計值(預報) \mathbf{X}_i^p ($i = 1, \dots, K$)。
- (2) 利用觀測算子得到一組系集觀測估計值

$$\mathbf{Y}_i^p = \mathbf{H}(\mathbf{X}_i^p), \quad i = 1, \dots, K \quad (2.4)$$

- (3) 計算系集平均 $\overline{\mathbf{Y}^p}$ 與斜方差 Σ^p :

$$\overline{\mathbf{Y}^p} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \mathbf{Y}_i^p \quad (2.5)$$

$$\Sigma^p = \frac{1}{K-1} \sum_{i=1}^K (\mathbf{Y}_i^p - \overline{\mathbf{Y}^p})(\mathbf{Y}_i^p - \overline{\mathbf{Y}^p})^T \quad (2.6)$$

- (4) 計算更新的標準差平方與觀測點上系集平均 :

$$\Sigma^u = \left[(\Sigma^p)^{-1} + (\Sigma^0)^{-1} \right]^{-1} \quad (2.7)$$

$$\overline{\mathbf{Y}^u} = \Sigma^u \left(\overline{\mathbf{Y}^p} / \Sigma^p + \mathbf{Y}^0 / \Sigma^0 \right) \quad (2.8)$$

Σ^0 為觀測誤差變數，其包括量測誤差與模式預報誤差。

- (5) 將估計的觀測變數與更新的系集平均計算出更新的觀測變數 :

$$\mathbf{Y}_i^u = (\mathbf{Y}_i^p - \overline{\mathbf{Y}^p}) \sqrt{\Sigma^u / \Sigma^p} + \overline{\mathbf{Y}^u}, \quad i = 1, \dots, K$$

更新前後觀測變數的增量可表示為： $\Delta \mathbf{Y}_i = \mathbf{Y}_i^u - \mathbf{Y}_i^p$

- (6) 計算在觀測點上系集預報標準差的平方 $(\sigma_{\mathbf{Y},\mathbf{Y}}^p)$ 與每一個預報樣本協方差 $(\sigma_{\mathbf{X}_j,\mathbf{Y}}^p)$ ， j 為模式狀態變數的因子 :

$$(\sigma_{\mathbf{Y},\mathbf{Y}}^p) = \frac{1}{K-1} \sum_{i=1}^K (\mathbf{Y}_i^p - \overline{\mathbf{Y}^p})(\mathbf{Y}_i^p - \overline{\mathbf{Y}^p})^T \quad (2.9)$$

$$(\sigma_{\mathbf{X}_j,\mathbf{Y}}^p) = \frac{1}{K-1} \sum_{i=1}^K (\mathbf{X}_{i,j}^p - \overline{\mathbf{X}_j^p})(\mathbf{Y}_i^p - \overline{\mathbf{Y}^p})^T \quad (2.10)$$

$$\text{在此, } \overline{\mathbf{X}_j^p} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \mathbf{X}_{i,j}^p \quad (2.11)$$

- (7) 假設模式預報的誤差分布為高斯分布，由系集預報標準差的平方、預報樣本斜方差和更新前後觀測資料的增量，可以得到(分析後)的預報狀態分布的增量 :

$$\Delta X_{j,i} = \frac{\sigma_{X_j,Y}}{\sigma_{Y,Y}} \Delta Y_i, \quad i = 1, \dots, K; j = 1, \dots, M$$

其中 K 為系集預報樣本總數， M 為模式狀態變數總數。

(8) 得到一組更新的系集模式變數(analysis)：

$$X_{j,i}^u = X_{j,i}^p + \Delta X_{j,i}, \quad i = 1, \dots, K; j = 1, \dots, M$$

(三) 實際颱風個案測試

中央氣象局近年來使用天氣研究與預報模式與資料同化系統作為天氣預報的工具，並且搭配高速運算的超級電腦，大幅縮短預報分析的時間且有效提升預報準確率。目前 WRF3DVAR 資料同化所使用的背景場誤差統計值為 NCEP 全球模式所計算出的統計值(CV3)，在資料同化過程中此統計值都是固定不變。台灣地處副熱帶地區，四季天氣系統有顯著差異。EAKF 資料同化系統可以隨時間同化當時可獲得的觀測資料並且也更新背景場誤差統計值，經由 EAKF 分析後的分析場趨近於真實大氣狀態。

本次到美國研習主要將 EAKF 資料同化系統移植回局內超級電腦上，並且以實際颱風個案作測試。本次測試個案選取 2007 年 10 月侵襲台灣的強烈颱風 KROSA，模式使用一層巢狀網格，預報區域大小為(d01 : 222 x 128，圖 1)，模式解析度為 45 km，垂直使用的 σ 座標共為 41 層，模式層頂為 30hPa。以 NCEP AVN 全球模式資料作為模式初始場，使用 WRF/EAKF 做每 1 小時 cycling run，先經由 WRF/EAKF 分析後(圖 2)，分別從 00Z 與 12 Z 做 72 小時預報。

本次實驗加入福衛 3 號衛星資料(GPS_RO)進行同化，藉由衛星觀測資料彌補海上觀測資料的不足。實驗分成 CTL、LOCAL_GPS 和 NONLOCAL_GPS 3

組。CTL：只同化傳統觀測資料；LOCAL_GPS：同化傳統觀測資料與 LOCAL_GPS RO 資料；NONLOCAL_GPS：同化傳統觀測資料與 NONLOCAL_GPS RO 資料。LOCAL_GPS RO 資料是由單點折射率直接內插到垂直座標上，得到 1 組垂直高度的折射率；而 NONLOCAL_GPS 則是將 GPS 觀測所經過大氣層的路徑進行積分，得到整層大氣的折射率。

初步研究顯示，經由 EAKF 分析後再做 72 小時預報有效減低颱風預報路徑誤差，CTL 與 NONLOCAL_GPS 明顯較 LOCAL_GPS 好。以下針對不同時間預報結果進行說明：

A. 2007100400UTC：在初始時間颱風位置(圖 3)，CTL 最接近實際颱風觀測位置，LOCAL_GPS 顯著偏離實際颱風位置，NONLOCAL_GPS 的颱風位置與 CTL 較為相近。隨著預報 24 小時後 LOCAL_GPS 路徑誤差有降低的趨勢(圖 4)，而 NONLOCAL_GPS 則呈現增加的趨勢，這可能與 NONLOCAL_GPS 預報颱風移動速度較緩慢有關。72 小時平均颱風路徑預報誤差分別為 CTL：99.20 km；LOCAL_GPS：149.39 km；NONLOCAL_GPS：122.68 km。在颱風強度預報方面(圖 5)，LOCAL_GPS 中心氣壓明顯較 CTL 與 NONLOCAL_GPS 低，NONLOCAL_GPS 中心氣壓值隨預報時間有下降的趨勢。

B. 2007100412UTC：在初始時間颱風位置(圖 6)，CTL 與 NONLOCAL_GPS 較接近實際颱風觀測位置，LOCAL_GPS 初始颱風位置誤差有稍微改善，從 200 km 降低至 100 km。CTL 與 NONLOCAL_GPS 在預報 36 小時內颱風路徑預報誤差低於 80 km(圖 7)，LOCAL_GPS 在預報 12 小時後路徑預報誤差也有減少的趨勢，但是在預報 48 小時以後 3 組路徑預報誤差均有顯著增加。72 小時平均颱風路徑預報誤差分別為 CTL：84.39 km；LOCAL_GPS：107.67 km；NONLOCAL_GPS：119.83 km。在颱風強度預報方面(圖 8)，LOCAL_GPS 中

心氣壓比 CTL 與 NONLOCAL_GPS 低，顯示強度預報上 LOCAL_GPS 較 CTL 與 NONLOCAL_GPS 好。

- C. 2007100500UTC：在初始時間颱風位置(圖 9)，CTL 與 NONLOCAL_GPS 較接近實際颱風觀測位置，LOCAL_GPS 偏離實際颱風位置約 100 km 左右。在預報 36 小時以後 3 組實驗路徑預報誤差均有顯著增加(圖 10)。72 小時平均颱風路徑預報誤差分別為 CTL：87.59 km；LOCAL_GPS：209.83 km；NONLOCAL_GPS：135.19 km。在颱風強度預報方面(圖 11)，LOCAL_GPS 與 CTL 的中心氣壓較 NONLOCAL_GPS 低，隨著預報時間 3 組颱風中心氣壓預報均有減弱的趨勢。
- D. 2007100512UTC：在初始時間颱風位置(圖 12)，3 組實驗預報的颱風位置差不多，LOCAL_GPS 與 NONLOCAL_GPS 在預報 12 小時以後，颱風路徑預報誤差呈現增加的趨勢，CTL 在預報 42 小時以內均小於 100 km(圖 13)。72 小時平均颱風路徑預報誤差分別為 CTL：78.43 km；LOCAL_GPS：154.83 km；NONLOCAL_GPS：172.45 km。在颱風強度預報方面(圖 14)，3 組實驗的中心氣壓值都差不多，NONLOCAL_GPS 在預報 18 小時中心氣壓迅速下降，並且接近實際觀測值。

小結：

1. 在颱風路徑預報方面，CTL 與 NONLOCAL_GPS 明顯較 LOCAL_GPS 好，在預報 24 小時以內 CTL 與 NONLOCAL_GPS 颱風路徑預報誤差均低於 100 km。LOCAL_GPS 仍需進一步分析颱風預報初始位置的偏差，NONLOCAL_GPS RO 資料對於颱風路徑預報誤差有改善的現象。
2. 在颱風強度(中心氣壓)預報方面，LOCAL_GPS 預報颱風中心氣壓值明顯較 CTL 與 NONLOCAL_GPS 低，顯示加入 LOCAL_GPS RO 資料對於颱風強度(中心氣壓)預報有改善。

四、 建議

近年來中央氣象局與美國國家大氣研究中心(NCAR)共同合作天氣預報模式與資料同化系統，目前中央氣象局已經建置 WRF 模式與 WRF3DVAR 資料同化系統，並且進行平行化作業預報。本次赴美移植 EAKF 資料同化系統為 NCAR 最新研發的資料同化系統，結合系集預報與資料同化的方式，針對分析場進行調整。隨著預報時間同化觀測資料，將使分析場更接近實際大氣狀態。由於 EAKF 採用多組初始場進行分析與預報，在分析過程系統的穩定度為一重要指標。目前所測試的 EAKF 分析已經可以穩定完成，其內部仍有許多地方需要進行調整，如何提升觀測資料同化後預報的準確率和減少 EAKF 資料同化系統運行所需時間。對於未來之工作方向，職提出以下幾點建議：

1. EAKF 資料同化系統：EAKF 已經可以同化傳統測站觀測資料，也已經成功同化 GPS RO 資料，衛星觀測資料可以改善海上觀測資料不足的區域，提供颱風在太平洋海面上的大氣狀態。由本次測試實際颱風個案的結果，對於颱風初始預報位置仍需要進一步研究，接下來將會加入全球颱風 BOGUS，希望能有效改善 LOCAL_GPS 實驗的颱風路徑預報誤差。
2. 增加觀測資料：目前使用的衛星資料只有 GPS RO 與衛星雲導風，仍有其他衛星觀測資料可以進行同化，例如：Radiance 與 QuikSCAT 風場資料。另外，中央氣象局在全島設置 4 座氣象觀測雷達儀，提供台灣本島與附近洋面即時觀測資料。雷達觀測資料擁有高時空解析度的優勢，希望可以將此觀測資料同化到 EAKF 系統中，有效提升颱風侵台前的預報準確率。

附圖：

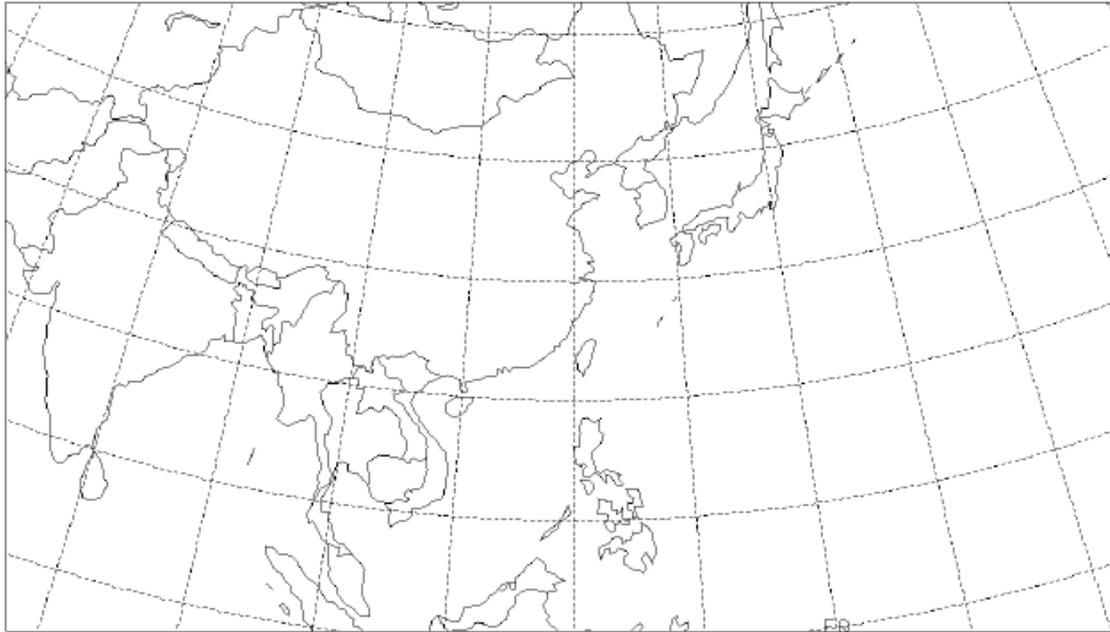


圖 1：中央氣象局 WRF 模式預報網格點範圍，domain 1：222 x 128，格點解析度為 45 km。

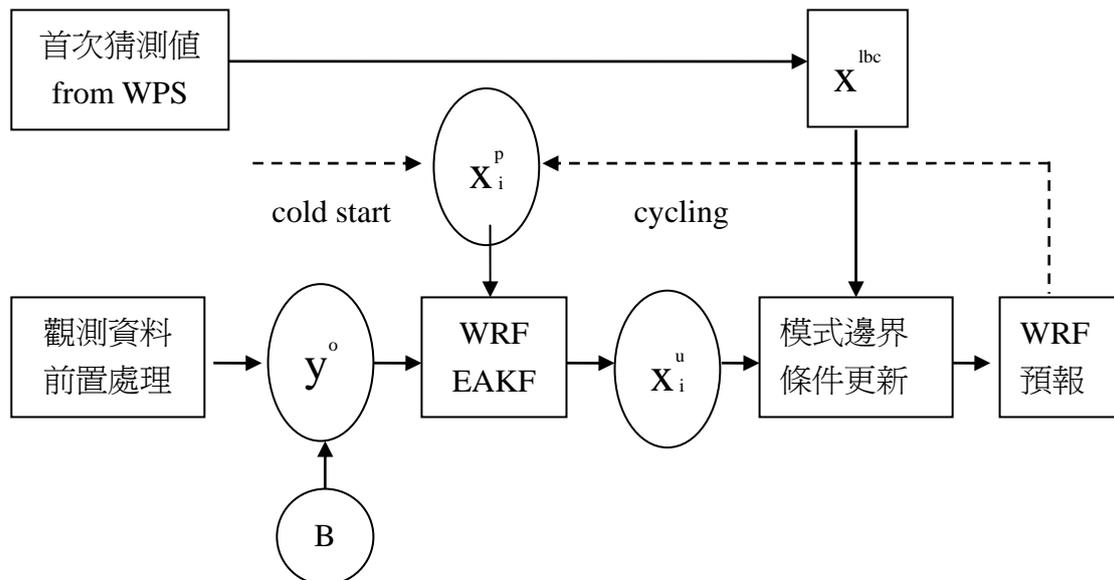


圖 2：WRF/EAKF cycling run 示意圖， i 為系集樣本編號。

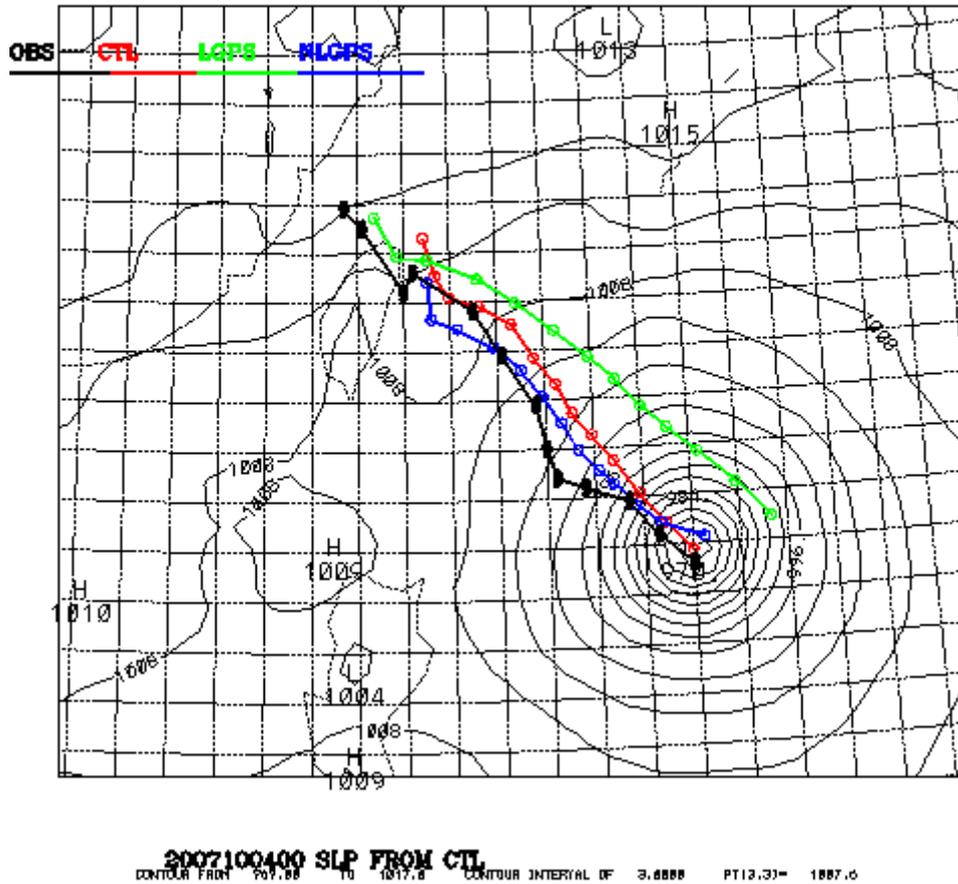


圖 3：Krosa 颱風(2007100400)，domain_1 3 組實驗 72 小時颱風預報路徑圖，紅色為 CTL(不含 GPS 資料)，綠色為 LGPS(含 local_GPS 資料)，藍色 NLGPS(含 nonlocal_GPS 資料)。

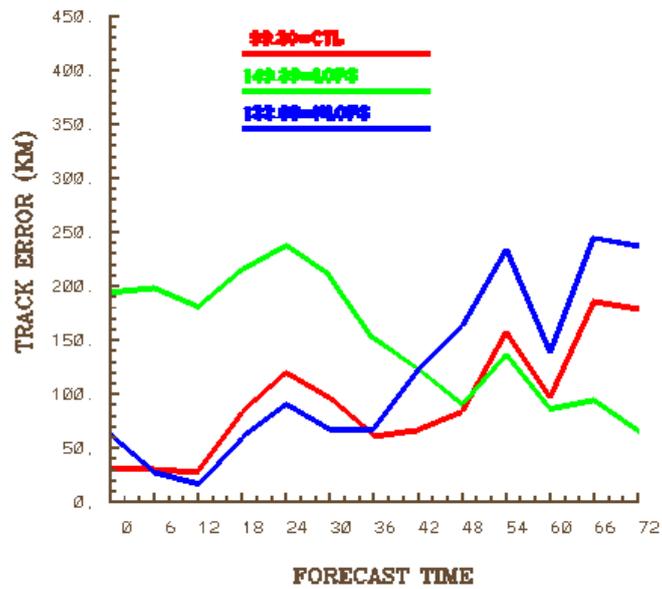


圖 4：Krosa 颱風(2007100400)，domain_1 3 組實驗 72 小時路徑預報誤差圖。72 小時平均颱風路徑預報誤差分別為 CTL：99.20 km、LGPS：149.39 km 和 NLGPS：122.68 km。

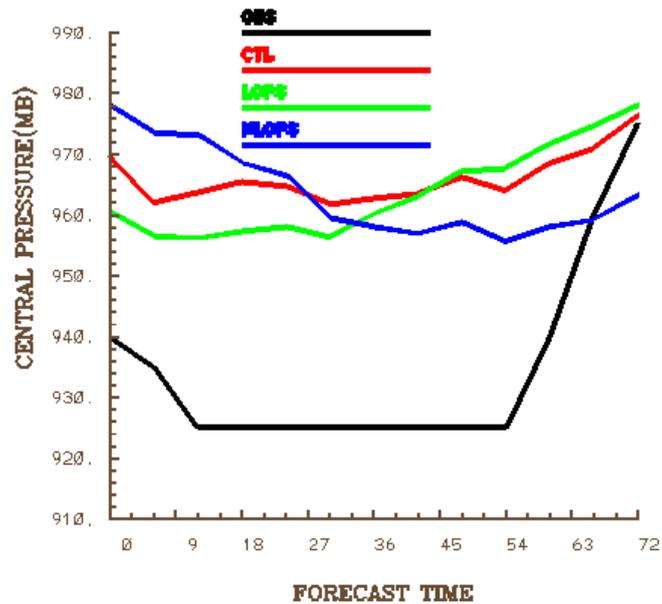


圖 5：Krosa 颱風(2007100400)，domain_1 3 組實驗 72 小時颱風中心氣壓圖。

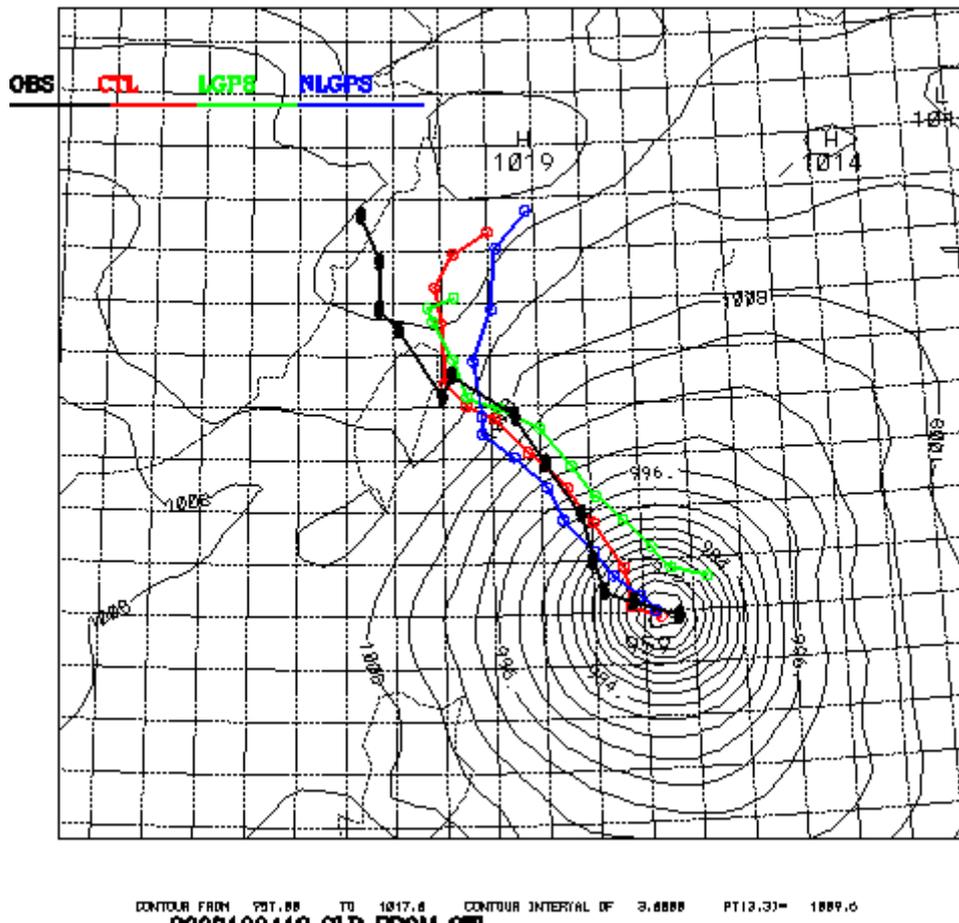


圖 6：Krosa 颱風(2007100412)，domain_1 3 組實驗 72 小時颱風預報路徑圖，紅色為 CTL(不含 GPS 資料)，綠色為 LGPS(含 local_GPS 資料)，藍色 NLGPS(含 nonlocal_GPS 資料)。

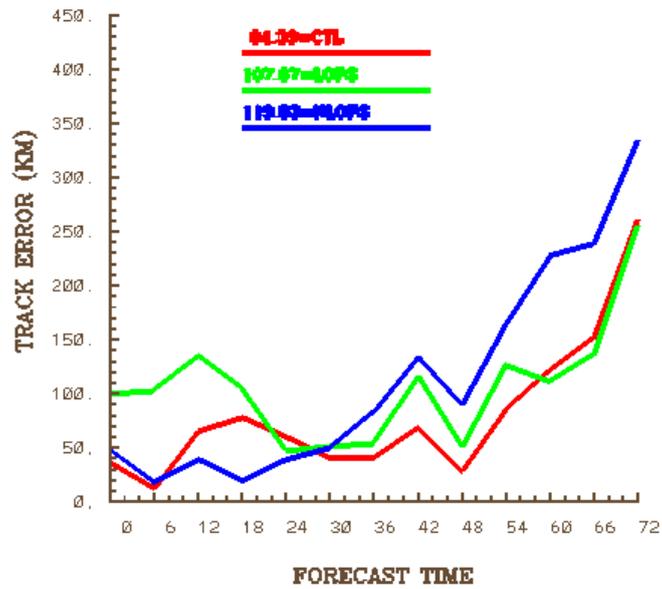


圖 7：Krosa 颱風(2007100412)，domain_1 3 組實驗 72 小時路徑預報誤差圖。72 小時平均颱風路徑預報誤差分別為 CTL：84.39 km、LGPS：107.67 km 和 NLGPS：119.83 km。

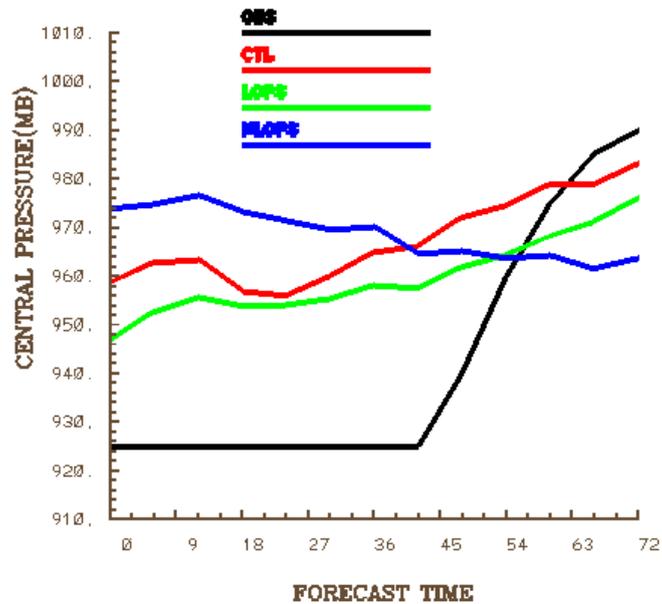
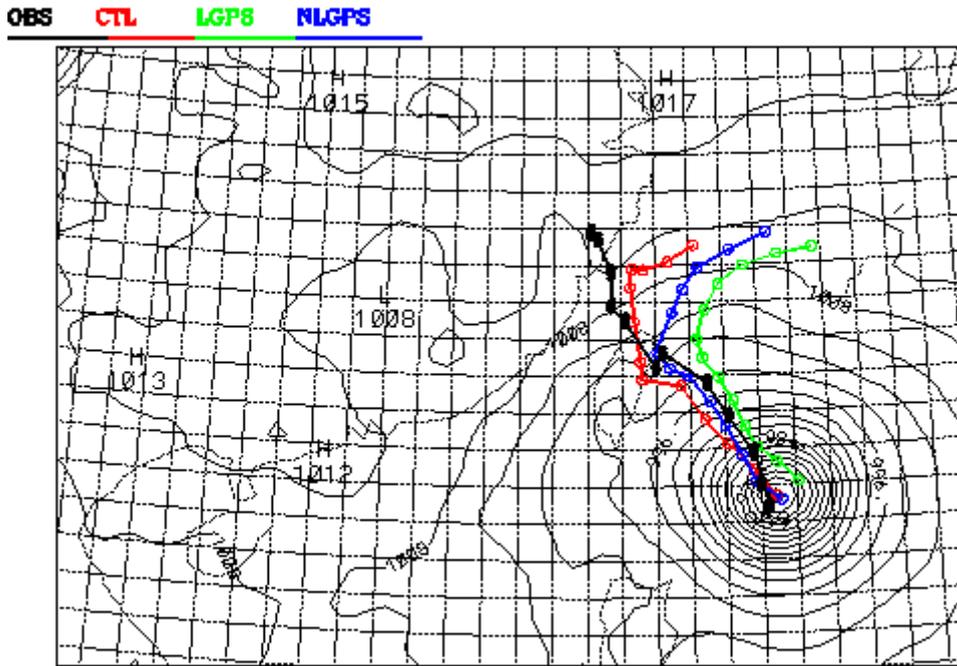


圖 8：Krosa 颱風(2007100412)，domain_1 3 組實驗 72 小時颱風中心氣壓圖。



2007100500 SLP FROM CTL

CONTOUR FROM 1011.00 TO 1014.0 CONTOUR INTERVAL OF 3.0000 PT(3.31)= 1886.6

圖 9：Krosa 颱風(2007100500)，domain_1 3 組實驗 72 小時颱風預報路徑圖，紅色為 CTL(不含 GPS 資料)，綠色為 LGPS(含 local_GPS 資料)，藍色 NLGPS(含 nonlocal_GPS 資料)。

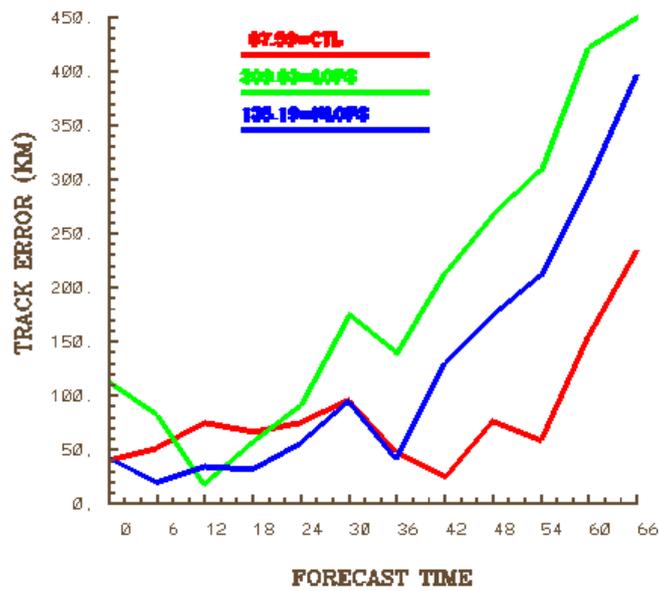


圖 10：Krosa 颱風(2007100500)，domain_1 3 組實驗 72 小時路徑預報誤差圖。
72 小時平均颱風路徑預報誤差分別為 CTL：87.59 km、LGPS：209.83 km 和 NLGPS：135.19 km。

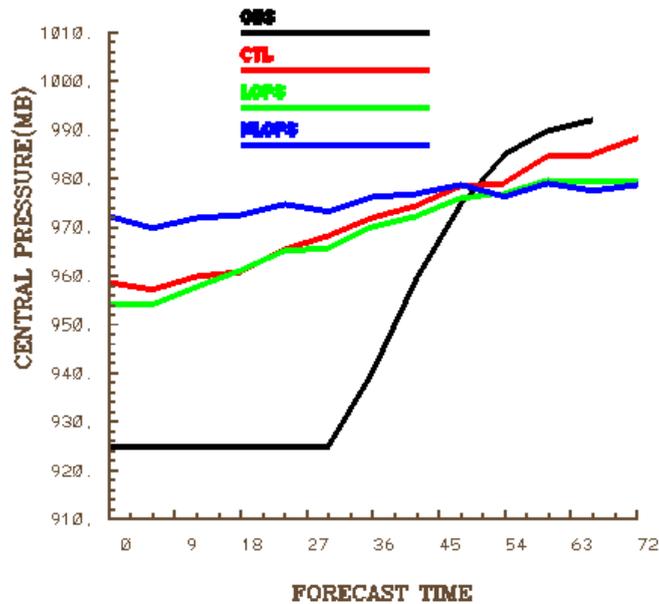
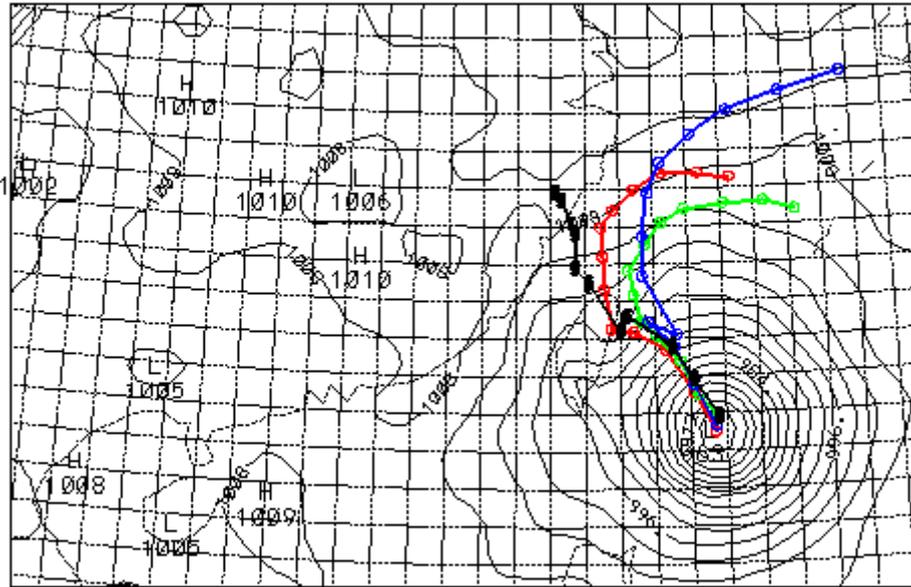


圖 11：Krosa 颱風(2007100500)，domain_1 3 組實驗 72 小時颱風中心氣壓圖。

OBS CTL LGPS NLGPS



2007100512 SLP FROM CTL

CONTOUR FROM 993.88 TO 1014.8 CONTOUR INTERVAL OF 3.8888 PT(3.31) = 1885.8

圖 12：Krosa 颱風(2007100512)，domain_1 3 組實驗 72 小時颱風預報路徑圖，紅色為 CTL(不含 GPS 資料)，綠色為 LGPS(含 local_GPS 資料)，藍色 NLGPS(含 nonlocal_GPS 資料)。

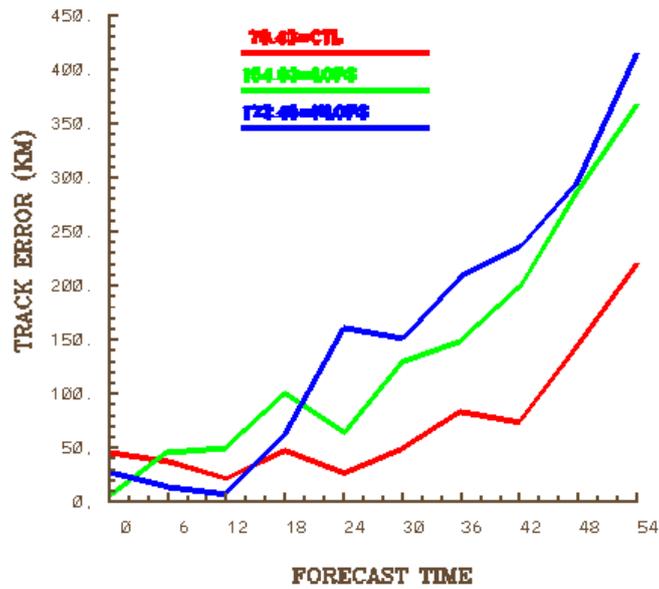


圖 13：Krosa 颱風(2007100512)，domain_1 3 組實驗 72 小時路徑預報誤差圖。
72 小時平均颱風路徑預報誤差分別為 CTL：78.43 km、LGPS：154.83 km 和 NLGPS：172.45 km。

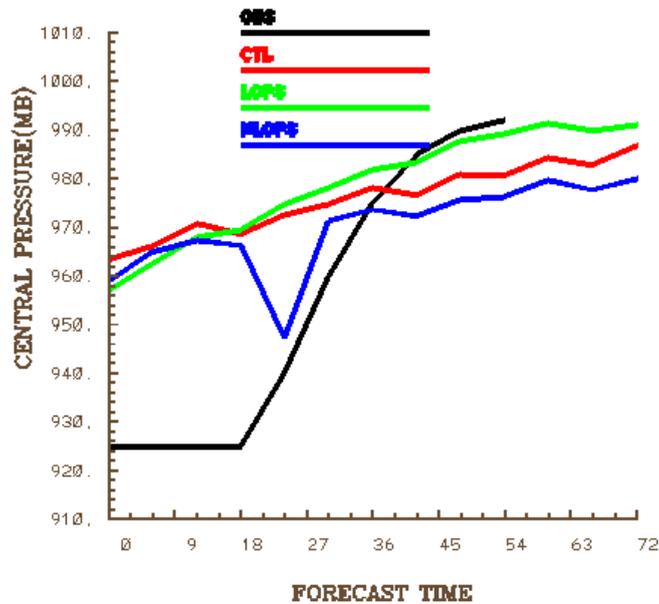


圖 14：Krosa 颱風(2007100512)，domain_1 3 組實驗 72 小時颱風中心氣壓圖。