

中央氣象局四維變分資料同化(4DVAR) 之初步應用與評估

江晉孝¹、張昕²、馮欽賜¹、黃向宇²

¹中央氣象局

²美國國家大氣科學研究中心

摘要

中央氣象局WRF模式目前使用之資料分析方法為三維變分資料同化(Three-Dimensional Variational Data Assimilation, 3DVAR)，此技術是假定觀測資料與模式控制變數皆屬同一時間，優點為所需之計算機資源較低，但其背景誤差協方差矩陣不隨時間變化與無法同化不同時間的觀測資料則為極大之劣勢。配合中央氣象局新一代超級電腦之建置，大幅提升的計算機資源，讓我們能嘗試運用四維變分資料同化(Four-Dimensional Variational Data Assimilation, 4DVAR)技術評估與分析其對WRF模式預報的效益。

研究結果發現，(1)由單觀測點實驗證明4DVAR確實擁有與流場相關(flow dependent)的背景場誤差統計特性，由實驗中亦了解觀測點位置與選取個案為影響與流場相關特性顯著程度之重要因素。(2)在2008年(THORPEX Pacific Asian Regional Campaign, T-PARC)實驗期間，格點校驗結果顯示4DVAR相較於3DVAR得到略差的表現，但在颱風路徑預報上，則呈現優劣互現的結果。(3)在評估同化如雷達等時空密集觀測資料能力方面，4DVAR比3DVAR更能掌握較佳的降水分布型態與極值，而由公正預兆得分(ETS)及偏離指數(Bias)校驗結果，4DVAR亦得到較高的得分值與較佳的偏離值，顯示4DVAR較有潛力與優勢在未來同化時空密集度較高的降水資料。(4)在效能評估方面，由實驗顯示，多重增量(Multi-incremental)4DVAR能在30分鐘內完成45公里解析度(東亞區域)之同化過程，而在5公里的高解析度網格(臺灣區域)之設定下則耗時約50分鐘即可完成同化流程，與Full resolution 4DVAR相比較能符合作業上之需求與效益。

關鍵字：變分資料同化、與流場相關的背景場誤差統計特性、颱風路徑預報、多重增量、格點校驗、公正預兆得分、偏離指數

一、前言

臺灣常受到颱風、梅雨以及中尺度對流系統等複雜的劇烈天氣所侵襲，而氣象觀測資料與模式網格解析度不足以及臺灣複雜的地形地貌則為預報這些極端天氣所面臨的難題。數值天氣預報範疇中，除了持續改進預報模式解析度、物理參數化與動力架構外，如何得到一個準確的初始分析場來描述實際天氣狀態是氣象學家持續努力的目標，而要獲取一個較佳的初始分析場則著重在改進資料分析與初始化技術。

四維變分資料同化(Four-Dimensional Variational Data Assimilation, 4DVAR)概念最早由 (Lewis and Derber 1985 ; Le dimet and Talagrand 1986)提出，首先將 4DVAR 系統成功應用於日常作業預報的氣象單位為歐洲中期天氣預報中心 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) (Courtier et al. 1994; Rabier et al. 1997)。Rabier et al. (2000)研究證明 4DVAR 在作業預報上確實能得到比 3DVAR 更佳的表現。在 ECMWF 之後，全世界各個氣象單位皆致力於在其預報模式中發展 4DVAR 系統，包含法國氣象局(Météo-France; Gauthier and Thépaut 2001)，英國氣象局(Met Office; Lorenc and Rawlins 2005; Rawlins et al. 2007)，日本氣象廳(Japan Meteorological Agency; Honda et al. 2005)，加拿大環境部(Environment Canada; Gauthier et al. 2007)

以及瑞典氣象與水文研究所(Swedish Meteorological and Hydrological institute; Huang et al. 2002 and Gustafsson et al. 2012)。

WRF4DVAR 系統雛形建立於 2005 年，至今仍持續改進與透過切線性(tangent linear)、伴隨(adjoint)等方法驗證其程式架構之正確性(Huang et al. 2006)，但其程式內部資源分配與資料交換方式仍待改善。Zhang et al. (2013)重新發展新一代 WRF4DVAR，此版本將各程式套件間的資料交換改由記憶體存取並重新分配中央處理器運算資源，大幅提升計算效能與資料交換之效率。

4DVAR 相較於 3DVAR 有以下幾項優點: 1)能同化不同時間的觀測資料，2)隱含與流場相關 (flow dependent)的背景場誤差統計特性，3)能利用預報模式的約束來增加初始分析場的動力平衡效益。

本研究主要目的希望藉由 4DVAR 可同化不同時間觀測資料的特性，透過模式非線性原始方程與伴隨(adjoint)方程之反覆來回疊代運算，再依據誤差協方差矩陣調整模式中的變數，使得同化後的初始場充分包含觀測資料的訊息，同時也能符合模式動力的一致性。

本文使用由 Zhang et al. (2013)發展的新版 WRF4DVAR 系統做相關研究，文章架構為：第二節詳述 4DVAR 概念與架構，第三節描述個案介紹、WRF4DVAR 在中央氣象局新一代超級電腦 (Fujitsu FX10) 建置狀況與其執行效能，第四節描

述 1)以單觀測點實驗了解 WRF4DVAR 基本特性與架構，2)評估 WRF4DVAR 對綜觀尺度天氣之掌握能力，3)了解 WRF4DVAR 對於颱風路徑預報之表現，4)研究 WRF4DVAR 在高解析度網格下對降水之效益，5)初步測試模式平衡控制項之效益，第五節為結論，第六節為未來應用與建議。

二、WRF4DVAR 概念與架構

(一) 4DVAR 概念

大氣科學包含正反問題的領域，客觀分析中將分布不規則的測站上觀測到的氣象變數值內插到分布規則的格點上為反問題，其相應的正問題是將格點上的分析值內插到測站上；4DVAR 中透過氣象變數觀測值的時間序列藉由動力模式決定出最佳的初始值為反問題，而給定初始值、邊界條件下依循動力模式進行向前積分(亦即數值預報)則屬正問題之範疇。

WRF4DVAR 中定義一價值函數 J ，經由反覆疊代使其極小化藉以獲得模式最佳初始場 (Huang et al. 2009)：

$$J = J_b + J_o + J_c \quad (1)$$

(1)式中包含了背景場項(J_b)、觀測場項(J_o)、平衡控制項(J_c)。

背景場項(J_b)定義如下：

$$\begin{aligned} J_b &= \frac{1}{2} (x^n - x^b)^T B^{-1} (x^n - x^b) \\ &= \frac{1}{2} [(x^n - x^{n-1}) + (x^{n-1} - x^b)]^T B^{-1} [(x^n - x^{n-1}) + (x^{n-1} - x^b)] \\ &= \frac{1}{2} \left[(x^n - x^{n-1}) + \sum_{i=1}^{n-1} (x^i - x^{i-1}) \right]^T B^{-1} \left[(x^n - x^{n-1}) + \sum_{i=1}^{n-1} (x^i - x^{i-1}) \right] \end{aligned} \quad (2)$$

x^b ：背景場。

x^n ：經過 n 次外迴圈所得之分析值。

n 為外迴圈之總數， i 表示第 i 次外迴圈， $i=1 \sim n$ 。

B 為背景場誤差協方差矩陣。

-1 表示反矩陣， T 表示伴隨矩陣。

x^b 與 x^0 僅在第一次外迴圈時才會相等。

觀測場項(J_o)定義如下：

$$\begin{aligned} J_o &= \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K \{ H_k [M_k(x^n)] - \mathbf{y}_k \}^T \mathbf{R}^{-1} \{ H_k [M_k(x^n)] - \mathbf{y}_k \} \\ &\approx \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K \{ H_k [M_k(x^{n-1})] + \mathbf{H}_k \mathbf{M}_k (x^n - x^{n-1}) - \mathbf{y}_k \}^T \\ &\quad \times \mathbf{R}^{-1} \{ H_k [M_k(x^{n-1})] + \mathbf{H}_k \mathbf{M}_k (x^n - x^{n-1}) - \mathbf{y}_k \} \\ &= \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K [\mathbf{H}_k \mathbf{M}_k (x^n - x^{n-1}) - \mathbf{d}_k]^T \mathbf{R}^{-1} \\ &\quad \times [\mathbf{H}_k \mathbf{M}_k (x^n - x^{n-1}) - \mathbf{d}_k]. \end{aligned} \quad (3)$$

$$\mathbf{d}_k = \mathbf{y}_k - H_k [M_k(x^{n-1})] \quad (4)$$

y_k ：同化窗區 k 時的觀測值。

k ($k = 1 \sim K$)：同化時間窗區 (k 個觀測窗區)。

H_k 及 \mathbf{H}_k ：非線性與切線性觀測算符，在觀測窗區中利用其轉換模式大氣變數至觀測的變數及空間上，才能與觀測變數相比較。

M_k 及 \mathbf{M}_k ：非線性與切線性模式，將猜測向量(guess vector, \mathbf{x}^{n-1})及分析增量($\mathbf{x}^n - \mathbf{x}^{n-1}$)自同化窗區初始傳遞至第 k 個觀測時間窗區。

\mathbf{d}_k ：位於同化窗區 k 時的創新向量(innovation vector)。

\mathbf{R} ：觀測誤差協方差矩陣。

由(3)式，我們可以了解 4DVAR 在觀測算符(H_k, \mathbf{H}_k)中加入了預報模式(M_k, \mathbf{M}_k)的資訊，使得不同時間的觀測資料可以同時影

響初始時間的模式控制變量。

平衡控制項(J_c)定義如下：

$$\begin{aligned}
 J_c &= \frac{1}{2} \gamma_{df} [\mathbf{M}_{N/2}(\mathbf{x}^n - \mathbf{x}^{n-1}) \\
 &\quad - \sum_{i=0}^N f_i \mathbf{M}_i(\mathbf{x}^n - \mathbf{x}^{n-1})]^T \mathbf{C}^{-1} [\mathbf{M}_{N/2}(\mathbf{x}^n - \mathbf{x}^{n-1}) \\
 &\quad - \sum_{i=0}^N f_i \mathbf{M}_i(\mathbf{x}^n - \mathbf{x}^{n-1})] \\
 &= \frac{1}{2} \gamma_{df} \left[\sum_{i=0}^N g_i \mathbf{M}_i(\mathbf{x}^n - \mathbf{x}^{n-1}) \right]^T \mathbf{C}^{-1} \\
 &\quad \times \left[\sum_{i=0}^N g_i \mathbf{M}_i(\mathbf{x}^n - \mathbf{x}^{n-1}) \right], \tag{5}
 \end{aligned}$$

r_{df} 為 J_c 項之權重。

N 為同化窗區之總積分步長。

g_i 為修正係數。

\mathbf{C} 為對角矩陣，包含風場、溫度場、地面乾氣壓。

上述(1)~(5)公式中，我們可以得知 4DVAR 之觀測算符會跟隨時間變化，同時也假設觀測誤差與背景誤差不相關，且不同時刻之觀測誤差也不相關，因為 4DVAR 在分析時刻與整個同化窗區內都有觀測值，使得其控制變數的數量相當龐大，必須採用伴隨模式才能計算價值函數之梯度。

(二) Full resolution 4DVAR 與多重增量 (Multi-incremental) 4DVAR

WRF4DVAR 演算法主要使用增量 (incremental) 形式的 4DVAR (Courtier et al. 1994; Veersé and Thépaut 1998; Lorenc 2003)，此方法廣泛的被世界上作業單位所使用。增量趨近之概念是極小化以分析增量 (analysis increment; δx) 為函數的價

值函數 [cost function; $J(\delta x)$]。新版 WRF4DVAR 沿用之前版本的某些要素：1) 觀測算符(observation operators)，2)品質控管(quality control)，3)背景場誤差協方差 (background error covariance)，4) 切線性與伴隨模式主要由簡化過的非線性預報模式衍生而來，此兩種模式主要使用於內迴圈(inner loop)極小化計算過程，5)外迴圈(outer loop)疊代使用非線性 WRF 模式來更新基本軌跡狀態，用以描述同化過程中的非線性效應。

Full resolution 4DVAR 主要是內外迴圈皆使用相同解析度進行運算，其優點為內外迴圈使用之地形完全一致且沒有高網格解析度的初始場差分至較低網格解析度產生的誤差，缺點則為需要相當龐大的記憶體資源進行儲存與交換，在實際作業上較不具時效性。而為了使 4DVAR 能符合氣象單位作業時效上之需求，進而發展出多重增量形式的 4DVAR，其主要技巧是以較低網格解析度執行內迴圈極小化價值函數之流程，而外迴圈仍維持較高網格解析度的方式，因此不影響創新向量之計算與非線性結果之更新。目前 ECMWF 與 JMA 等氣象單位皆運用此技術在日常數值天氣預報，而其使用之內外迴圈網格解析度之比例為 3:1。

因內迴圈極小化價值函數在較低網格解析度下執行，必須先擁有低網格解析度的初始場，其來源有 1) 將高網格解析度的初始場差分至較低網格解析度；2) 由另

一個較低網格解析度的非線性模式產製，目前 WRF4DVAR 是以方法(2)為內迴圈極小化的初始場來源。經由內迴圈極小化計算後，我們可以得到低網格解析度的分析增量(analysis increment)，將其差分回高網格解析度並加在高網格解析度的初始場上，即得到這次外迴圈的分析場，若未達到收斂門檻值，此分析場亦為下一次外迴圈極小化的初始場，如此循環直到收斂為止。

上述兩種形式的 WRF4DVAR 在理論與實務上皆有其優缺點，前者內外迴圈使用之解析度與地形完全相同，但以現階段的資源較無法達到作業的目標，後者雖能在實際作業上運行但其因內迴圈使用較低解析度進行運算，進而提高了產生誤差的變因，本研究使用此兩種 4DVAR 對個案進行分析，評估兩者之間的差異與效益。

(三)背景誤差

正確地使用背景誤差在資料同化中對分析結果有舉足輕重的影響，間接決定如何調整同化的觀測資料之權重。目前 WRF 模式提供 cv_options =3,5,6 三種選擇，在本研究中採用 cv_option=3(簡稱 cv3)進行同化模擬實驗，cv3 由 Wu et al. (2002) 利用 Parrish and Derber (1992) 方法，使用美國國家環境預報中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP) 全球模式資料進行預報，資料時間一年，取 48 小時預報與 24 小時預報之相差以 NMC 方法估計。因此 cv3 屬於全球模式的誤差分

析。

三、模式系統設定與實驗設計

(一) 模式系統設定

本研究實驗模式的版本是 WRF 3.3.1 版、WRFDA 3.3.1 版與 WRFDA 3.5 版(即 2013 年最新版的 4DVAR)。網格設定部份(圖 1)，使用單層網格，網格解析度為 45 公里，水平點數為 223×130 ，垂直分層為 45 層，選擇 223×130 ，主要是為了符合多重增量 4DVAR 必須搭配網格點數除 3 餘 1 之特性，WRF 模式使用相關參數化資訊請參照(表 1，與 CWBWRF OP24 設定相同)。所有實驗均使用 NCEP 分析場($0.5^\circ \times 0.5^\circ$)為初始猜測場、NCEP 預報場為 CWBWRF 模式的邊界，採用 12 小時局部循環(12 hour partial cycle)，並分別在 0000/0012 UTC 進行 72 小時預報。

3DVAR 與 4DVAR 實驗中同化的觀測資料有地面綜觀報(SYNOP)、飛機報(AIREP)、機場天氣報(METAR)、船舶報(SHIP)、漂浮站觀測報(BUOY)、衛星雲導風報(SATOB、GeoAMV)、衛星海面風觀測報(QSCAT)、衛星探空報(SATEM)、高空風報(PILOT)、探空報(SOUND)、投落送(DROPSonde)、GPS 掩星(GPSRO)等傳統與遙測資料。

(二) 個案介紹與預期效果

為了瞭解不同形式的 4DVAR 在綜觀尺度、颱風路徑預報、降水分布以及與 3DVAR 之差異，同時亦評估在作業上之可行性；期望能藉由 4DVAR 可同化不同

時間觀測資料的優勢，透過模式非線性原始方程與伴隨(adjoint)方程之反覆來回疊代運算，使得同化後的初始場充分包含觀測資料的訊息，進而得到較佳的初始場來改進模式預報。本文選取 T-PARC 實驗期間三個颱風(Sinlaku、Hagupit、Jangmi)，作為實驗研究的分析個案。

Sinlaku 颱風為 2008 年第 13 號颱風，本實驗模擬時間自 2008 年 9 月 9 日 0000 UTC 至 9 月 13 日 0000 UTC。Hagupit 颱風為 2008 年第 14 號颱風，本實驗模擬時間自 2008 年 9 月 19 日 0012 UTC 至 9 月 24 日 0000 UTC。Jangmi 颱風為 2008 年第 15 號颱風，本實驗模擬時間自 2008 年 9 月 24 日 0012 UTC 至 9 月 28 日 0000 UTC。

本研究中，Sinlaku 颱風以及 Jangmi 颱風主要模擬時間為登陸之前，登陸後因地形效應影響甚鉅，颱風中心定位不易，因此不列入實驗選取之期間。

(三) WRF4DVAR 執行效能

2012 年底中央氣象局開始建置新一代超級電腦 (Fujitsu FX10)，此電腦分三階段進行佈署，預計 2014 年完成建置。本實驗研究期間使用第一階段(2013 年 9 月前)建置之電腦資源，相較於氣象局其他日常作業與研究工作，4DVAR 實驗需耗費較高計算與記憶體資源，因此在有限的電腦資源情況下，完成 4DVAR 實驗實屬不易。

為了瞭解 4DVAR 之執行效能，我們將 WRFDA 3.5 版(即 2013 年最新版的 4DVAR)在 Fujitsu FX10 上進行編譯與測

試，依(圖 1)的網格設定範圍，在使用 2 次外迴圈以及上限為 100 次內迴圈收斂條件下，以 192 核心(Cores)進行 0~3 小時觀測窗區的資料同化。(表 2)結果顯示，內與外迴圈都使用相同解析度(45 公里, Full resolution)的 4DVAR 需耗時 3 小時才能完成一次資料同化過程；而內迴圈使用較低解析度(135 公里)，外迴圈仍使用較高解析度(45 公里)的多重增量 4DVAR 則只需耗時約 30 分鐘，初步結果顯示多重增量 4DVAR 在作業上較有其可行性與時效性。未來第二階段(2013 年 9 月後)超級電腦建置完成，可使用更多計算與記憶體資源來提升執行效率，並將同時評估 4DVAR 在多少電腦資源下即達到計算速率飽和臨界值之狀態。

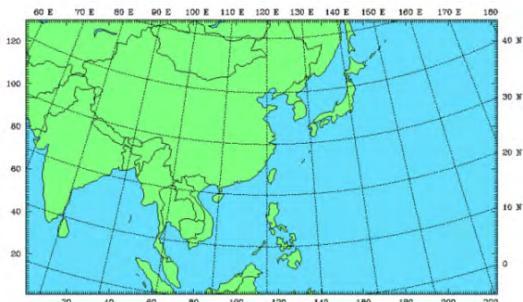


圖 1. 本研究 WRF 模式選取範圍。

Fig. 1. The single domain for WRF model.

表 1. 本研究 WRF 模式使用相關參數化設定。

Table 1. The parametric settings of WRF model.

Model Physics	
Microphysics	Goddard GCE
Cumulus	Kain-Fritsch scheme with new trigger function
PBL	YSU
Surface layer	Monin-Obukhov
Land process	NOAH land-surface model
Long wave radiance	RRTM
Short wave radiance	Goddard short wave

表2. 不同形式的4DVAR在低網格解析度之執行效能。

Table 2. The execution performance of different 4DVAR at low-resolution grid.

CWB Fujitsu FX10 (outer loop : 2 Inner loop : 100) Domain : 223x130x45 Resolution : 45 KM	Full resolution 4DVAR	Multi-incremental 4DVAR
Wall clock time (192 cores) (12 nodes)	3 hours	About 30 minutes

四、分析結果

(一) 單觀測點實驗

Huang et al. (2009)針對 2000 年 1 月 25 日在美國東岸的劇烈冬季渦漩系統利用單觀測點實驗瞭解 4DVAR 的基礎架構，本研究同樣應用此方法來探討 4DVAR 系統之特性，而 3DVAR 與 4DVAR 之增量其物理意義與公式如下：

$$\mathbf{x}^a - \mathbf{x}^b = \mathbf{B}_i(\sigma_b^2 + \sigma_o^2)^{-1}(y_i - x_i) \quad (6)$$

→ 3DVAR

y_i : 第 i 個網格點的單觀測點

x_i : 其相對應的背景場值

σ_o : 觀測誤差

σ_b : 背景誤差

\mathbf{B}_i : 第 i 行的背景誤差協方差

$$\mathbf{M}(\mathbf{x}^a - \mathbf{x}^b) = (\mathbf{MBM}^T)(\sigma_b^2 + \sigma_o^2)^{-1}(y_i - x_i) \quad (7)$$

→ 4DVAR

\mathbf{M} : 切線性模式

\mathbf{M}^T : 切線性模式之伴隨

由(6)、(7)式中，我們可以了解 4DVAR 在分析過程中比 3DVAR 多了預報模式的資訊，亦即單觀測點的資訊不僅依賴著背

景誤差協方差矩陣，同時也透過切線性模式與伴隨模式的積分來進行傳播，因此雖然表面上 4DVAR 公式中的背景誤差協方差是三維的，但由於觀測算符中引入了數值預報模式，因此 4DVAR 實際上是一種四維隱式協方差模式，所以其背景誤差協方差矩陣是隨時間變化的。

本實驗選取 2008 年 9 月 12 日 0000 UTC (Sinlaku 颱風實驗期間)為個案，針對槽線做單觀測點測試，選取槽線之目的是想重現 Huang et al. (2009)的實驗結果(圖 2)，同化窗區為 0~6 小時，同化流程是在第 6 小時放一個位於 500 百帕的探空溫度資料，此資料內容包含時間、經緯度 ($45.6613^0\text{N}, 128.963^0\text{E}$)、溫度創新向量 (innovation vector, 0.25^0K)以及觀測誤差 (0.25^0K)等相關訊息，而 4DVAR 之分析增量是由兩個預報場相減得到，一個是由初始場直接做的預報，另一個則為做完 4DVAR 後之分析場的預報，透過此方式來了解 4DVAR 隱含與流場相關的背景場誤差統計特性。

圖 3 與圖 4 分別為 Full resolution 與多重增量 4DVAR 之單觀測點測試之結果，可明顯發現其與流場相關的背景誤差統計特性不如圖 2 明顯。若單獨比較圖 3 與圖 4 可發現，多重增量 4DVAR 之增量極值較大且分布範圍也較廣，其與流場相關的背景誤差統計特性也較強。

從上述實驗，我們發現無法得到與 Huang et al. (2009)實驗一樣好的結果，有數個方向可加以思考與測試，例如單觀測

點之位置、網格解析度、是否選取到合適的個案等因素，因此我們針對單觀測點位置做進一步調整與測試，將單觀測點位置往東北方向調整(流場下游處)，調整後之位置為(47.2536°N , 134.837°E)，其餘設定皆不更動，並以多重增量 4DVAR 做測試，結果顯示(圖 5)，與流場相關的背景

場誤差統計特性確實較佳，而且增量的偶極分布也相當明顯，雖仍未如圖 2 來的顯著，但已確認單觀測點的位置為關鍵因素之一，未來仍將針對網格解析度、選取的個案、背景誤差協方差尺度長度之調整做進一步分析與探討。

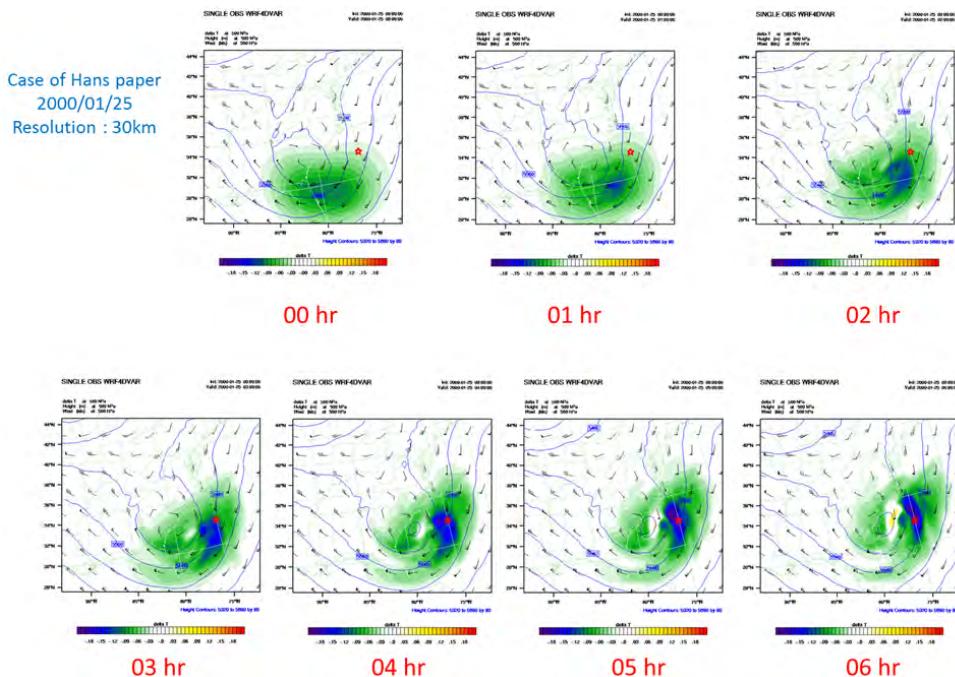


圖 2. Huang et al. (2009)針對 2000 年在美東的冬季劇烈渦旋之 4DVAR 單觀測點實驗，陰影是位於 500hPa 從 0~6 小時，由兩個預報場(一個是由背景場直接做的預報，另一個則為做完 4DVAR 後之分析場的預報)相減得到之位溫分析增量，細等值線為從背景場開始預報所得到的重力位高度，星號代表觀測資料之位置。

Fig. 2. 4DVAR Single observation experiment was done by Huang et al. (2009) : a severe winter storm case that occurred at 0000 UTC 25 January 2000, differences of the potential temperature (shading) at 500 hPa at 0, 1, 2, 3, 4, 5, and 6 h between two forecasts: one initialized from the background and the other from the 4D-Var analysis. The thin black contours are geopotential height (m) in the forecast from the background. The star sign indicates the observation location.

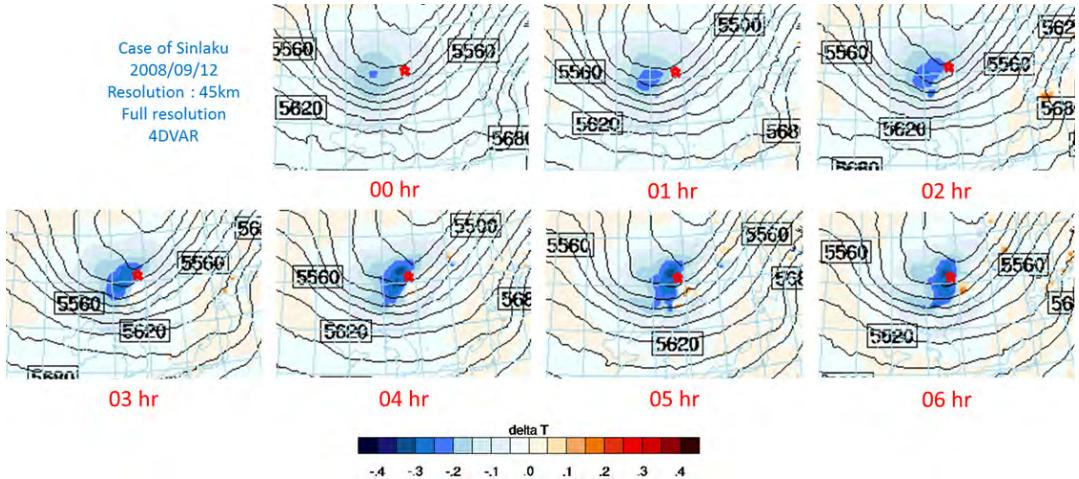


圖 3. 2008 年 9 月 12 日 0000 UTC(Sinlaku 颱風期間)之 Full resolution 4DVAR 單觀測點實驗，星號代表觀測資料之位置，陰影為位溫分析增量。

Fig. 3. Full resolution 4DVAR Single observation experiment, as in Fig. 2, but use different case that occurred at 0000 UTC 12 September 2008 (Typhoon Sinlaku).

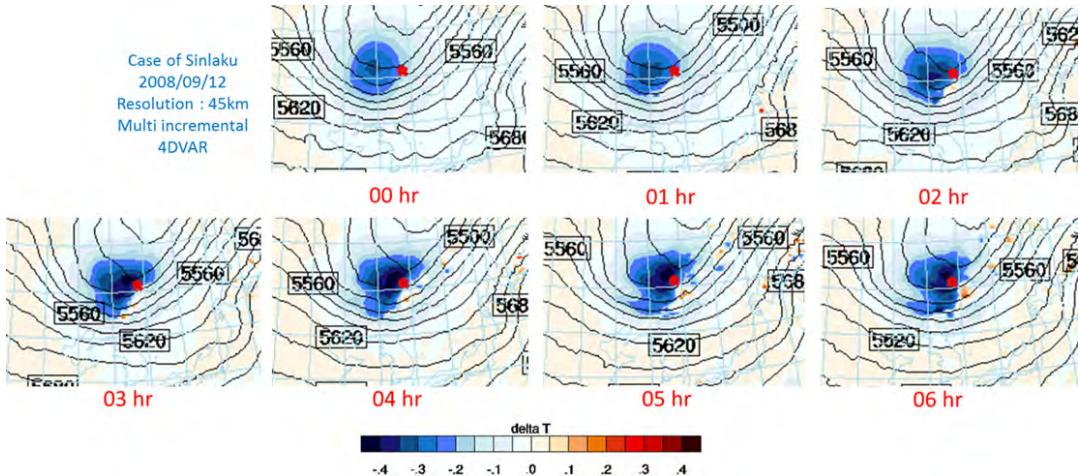


圖 4. 2008 年 9 月 12 日 0000 UTC(Sinlaku 颱風期間)之多重增量 4DVAR 單觀測點實驗，星號代表觀測資料之位置，陰影為位溫分析增量。

Fig. 4. Multi-incremental 4DVAR Single observation experiment, symbol represents as in Fig. 3.

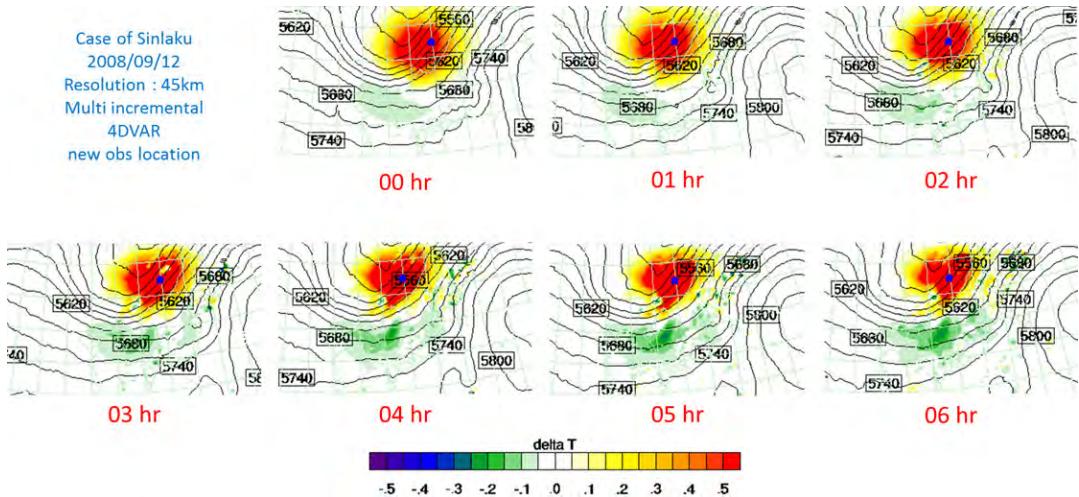


圖 5. 2008 年 9 月 12 日 0000 UTC(Sinlaku 颱風期間)之多重增量 4DVAR 單觀測點實驗，星號代表觀測資料之位置(將觀測點由圖 4 之位置往東北做調整)，陰影為位溫分析增量。

Fig. 5. Multi-incremental 4DVAR Single observation experiment, as in Fig. 4, but move observation location to the northeast.

(二) 綜觀尺度校驗

為了解 4DVAR 在綜觀尺度上預報之能力，本研究針對 T-PARC 實驗期間三個颱風(Sinlaku、Hagupit、Jangmi)做長期積分實驗，三組實驗分別是 1)3DVAR，實驗代號為 3dvar，2)Full resolution 4DVAR，實驗代號為 f-4dvar，3)多重增量 4DVAR，實驗代號為 m-4dvar。三組實驗均使用 NCEP 分析場($0.5^\circ \times 0.5^\circ$)為初始猜測場、NCEP 預報場為 CWBWRF 模式的邊界，採用 12 小時局部循環(12 hour partial cycle)，分別在 0000/0012 UTC 進行 72 小時預報，並且以 NCEP 分析場為校驗之依據。

為充分顯示 4DVAR 與 3DVAR 在 T-PARC 三個颱風期間對於綜觀尺度預報

之效益，本研究將三個颱風個案在垂直層上之均方根誤差(Root Mean Square Error)取平均並繪出橫槓表示個案中的最大值與最小值，圖中以虛線表示為 3dvar 之三個颱風的均方根誤差之平均；實線為 Full resolution 4DVAR；點線則為多重增量 4DVAR。

(圖 6)為高度場之校驗結果，，結果顯示 3DVAR 在分析時刻皆優於 4DVAR，尤其以 850 百帕以上最為明顯，但隨著預報時間增加至 24 小時差異逐漸縮小，72 小時預報三組實驗在 850 百帕以上之差異又開始稍微加大。兩種 4DVAR 在分析與預報時刻則呈現互有優劣之情況。(圖 7)溫度場之校驗結果，分析時刻 3DVAR 在 850 百帕至 500 百帕呈現稍佳的結果，其

次是多重增量 4DVAR 以及 Full resolution 4DVAR，隨著預報時間增加，三組實驗之間的差異逐漸縮小。風場(圖 8)，3DVAR 在分析時刻皆優於 4DVAR，隨預報時間增長仍看得出 3DVAR 在 850 百帕至 300 百帕仍比 4DVAR 稍佳，而兩種 4DVAR 之間的差異則較不明顯。

由綜觀尺度校驗結果顯示，3DVAR 在分析時刻三個颱風實驗期間表現較佳，預報之後則呈現三組實驗優劣互現的結果。而高度場雖與溫度場之關係密不可分，但由結果顯示，在分析時刻 Full resolution 4DVAR 之高度場誤差較多重增量 4DVAR 小(850 百帕至 500 百帕)，但是其溫度誤差卻較大，而從風場卻看不出兩者之間之差異，值得更深入探討與研究。

(三) 4DVAR 對颱風路徑預報之效益

提升颱風路徑預報之準確性，一直是氣象學家持續努力改進的目標，本節探討不同形式的 4DVAR(Full resolution & 多重增量)對於 T-PARC 實驗期間三個颱風(Sinlaku、Hagupit、Jangmi)的路徑預報之表現。

在 Sinlaku 颱風實驗模擬期間，3DVAR、Full resolution 與多重增量 4DVAR 之每天 0000/0012 UTC 的 72 小時路徑預報結果(圖 9)，3DVAR 呈現較收斂的路徑預報分布，且其移動速度有偏快的趨勢，由圖上顯示 3DVAR 對於 9 月 15 日颱風轉彎時的預報較 4DVAR 差；4DVAR 雖然有掌握到颱風轉彎的趨勢，但其路徑分布卻較為離散。(圖 10-a)為三組實驗預

報路徑誤差之統計結果，在 42 小時預報之前，Full resolution 4DVAR 呈現較低的預報誤差，42 小時到 60 小時預報呈現三組實驗相近的結果，60 小時預報之後仍以 Full resolution 4DVAR 較佳。

(圖 10-b) 為 Hagupit 颱風實驗模擬期間，三組實驗預報路徑誤差之統計結果，在 18 小時預報之前，多重增量 4DVAR 有較佳的表現，但預報 18 小時之後就以 3DVAR 表現較好。儘管 Hagupit 颱風路徑走向較為單純，但由路徑誤差統計結果我們發現三組實驗對於 Hagupit 颱風之預報表現並不佳。

T-PARC 期間最後一個颱風為 Jangmi 颱風，(圖 10-c)之路徑誤差統計結果顯示，30 小時預報後以 3DVAR 表現最為突出，72 小時預報誤差低於 150 公里。

由上述颱風路徑預報實驗結果發現，4DVAR 在 Sinlaku 颱風之路徑預報上表現較佳，而 3DVAR 則是對於 Hagupit 與 Jangmi 颱風的預報有較好的表現。多重增量 4DVAR 在颱風路徑預報上之趨勢及效益與 Full resolution 4DVAR 呈現相似的表現，由此顯示儘管多重增量 4DVAR 在內迴圈使用較低網格解析度做價值函數極小化運算，仍不影響其颱風路徑預報之趨勢，且其節省時間與計算資源之特性，對於將 4DVAR 應用在日常作業上有極大之助益。

(四) 4DVAR 在高解析度網格下對降水之效益

為了瞭解 4DVAR 在高解析度網格使

用之效益，我們使用單層高解析度網格，其解析度為 5 公里，水平點數為 151×181 ，垂直分層為 45 層，點數配置符合多重增量 4DVAR 必須搭配網格點數除 3 餘 1 之特性，WRF 非線性模式使用相關參數化設定與表 1 相同，但不使用積雲參數化(CU_PHYSICS=0)，而切線性與伴隨模式也不使用微物理參數化與積雲參數化，相關實驗均使用 NCEP 分析場($0.5^\circ \times 0.5^\circ$)為初始猜測場、NCEP 預報場為 CWBWRF 模式的邊界，同樣採用 12 小時局部循環，分別在 0000/0012 UTC 進行 72 小時預報，圖 11(a)為網格設定範圍。本研究原欲依上述實驗方式測試在高解析度網格下 3DVAR、Full resolution 4DVAR、多重增量 4DVAR 之效能，但 Full resolution 4DVAR 在此高解析網格設定下，因為必須存取每個時步(time step)的相關資訊需要極高記憶體資源，由測試結果顯示，若使用 64 核心需要搭配 960GB 記憶體才能跑完一次資料同化，且耗時約 20 小時；若提高至 192 核心，以目前建置之超級電腦，並無如此高的記憶體資源能夠支援，因此在考量運算資源與效能之下，本節不將 Full resolution 4DVAR 納入考慮。而多重增量 4DVAR 因執行一次資料同化約耗時 1 小時(192 核心)，且使用記憶體資源相對較低，因此仍可研究其效能。

本研究使用的台灣自動雨量觀測站共有 425 個，其分布比 5 公里解析的細網格格點分布密集，在計算校驗降水預報得

分之前，必須先做出一個模式網格點與自動雨量站相對應之測站列表，因為是在模式網格點上做校驗，所以必須計算出格點上的觀測降水，此方法為在格點上以一半網格間距(2.5 公里)為半徑內觀測雨量之平均，例如該選取範圍內有兩個雨量站資料，則該網格點上之觀測降水即為此兩個雨量站資料之平均。圖 11(b)為選取的模式網格點與雨量站位置之相對應示意圖，其中選取的模式網格點(藍圈)共 322 點，自動雨量站(紅點)共 425 站。

定性的累積降水分布結果，由 Sinlaku 颱風(圖 12)結果顯示，在 12~24 小時與 36~48 小時，多重增量 4DVAR 能掌握到較好的降水分布，且其極大值之掌握也較佳，尤其是在北部山區、宜蘭地區、中南部山區，但相較於觀測仍呈現低估降雨的現象。由 Hagupit 颱風之結果(圖 13)，3DVAR 在 12~24 小時之降水分布與極大值掌握稍佳，但 60~72 小時兩組實驗之降水分布則比較集中在中央山脈且屬於零星的雨量分布，與觀測之降水分布集中在東部沿岸不盡相同。圖 14 為 Jangmi 颱風之結果，多重增量 4DVAR 在 12~24 小時之表現較 3DVAR 好，尤其掌握到嘉義以及高雄山區的雨量分布以及極大值的位置；36~48 小時雖然兩組實驗都掌握到宜蘭地區的降水分布，但是卻未能預報到中南部地區之降水，48 小時之後兩組實驗預報降水都在臺灣東部沿岸以及西部平原與觀測降水有極大之出入。

校驗降水預報之得分與指數方面，我

們利用廣被氣象作業及研究單位所採用的公正預兆得分 ETS (Equitable Threat Score, Schaefer 1990) 及偏離指數 Bias 進行降水預報校驗。ETS 是在計算除了模式與觀測皆無降水且不是隨機猜中的情況下，模式正確預測降水的機率，ETS 分數愈高代表模式降雨預報愈準確，其定義如下：

$$ETS = \frac{H - R}{F + O - H - R}$$

上式的 F 為預測降雨的次數， O 為觀測降雨的次數， H 代表預報與觀測皆有降雨的次數， $R = FO/N$ 為隨機可正確預測降水的次數， N 為預報次數與觀測次數之和。而偏離係數 $Bias = F/O$ ，即模式預測降水次數與觀測降水次數之比，當 $Bias$ 值大於 1 代表模式高估降水次數，小於 1 則代表模式低估降水次數，綜合 ETS 與 $Bias$ 得分的結果，可判斷降水預報的正確性。

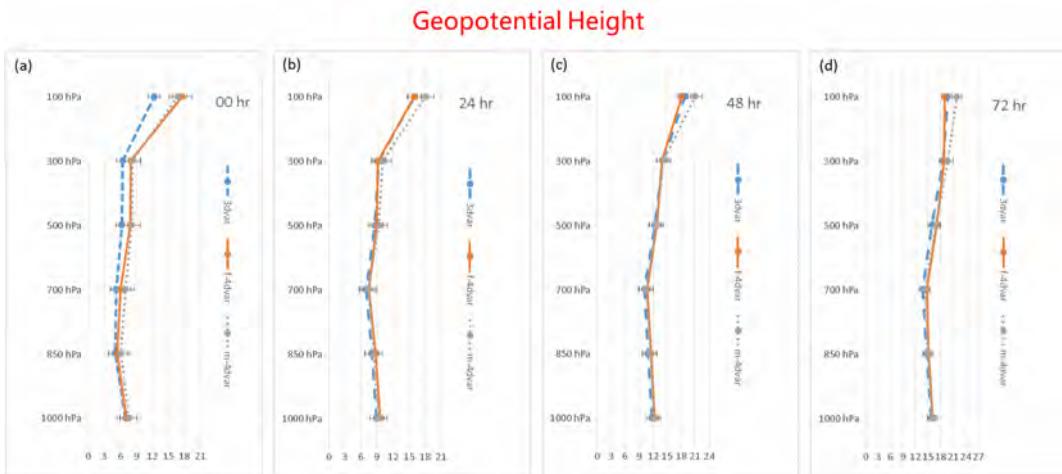


圖 6. 三組實驗的高度場(H)在垂直層上之個案平均均方根誤差，(a)分析場，(b)24 小時預報，(c)48 小時預報，(d)72 小時預報。虛線為 3DVAR；實線為 Full resolution 4DVAR；點線為多重增量 4DVAR，橫槓表示個案中的最大值與最小值。

Fig. 6. Three experimental geopotential height (H) in the vertical layer of the average Root Mean Square Error, (a) analysis, (b) 24, (c) 48, (d) 72 hour forecast. Dash line:3DVAR, solid line:Full resolution 4DVAR, dotted line:Multi-incremental 4DVAR, bars:the maximum and minimum.

Temperature

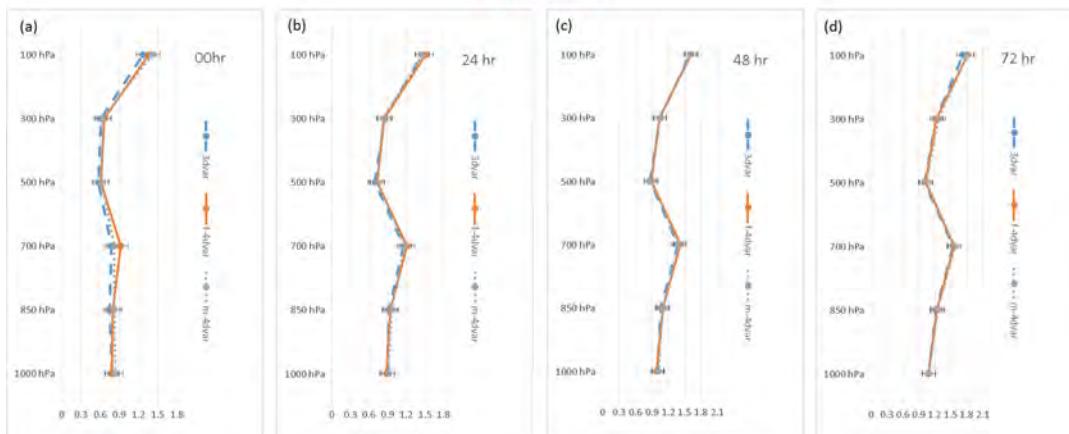


圖 7. 三組實驗的溫度場(T)在垂直層上之個案平均均方根誤差，(a)分析場，(b)24 小時預報，(c)48 小時預報，(d)72 小時預報。圖形表示同圖 6。

Fig.7. Three experimental temperature (T) in the vertical layer of the average Root Mean Square Error, (a) analysis, (b) 24, (c) 48, (d) 72 hour forecast. Symbol represents as in Fig. 6.

Wind

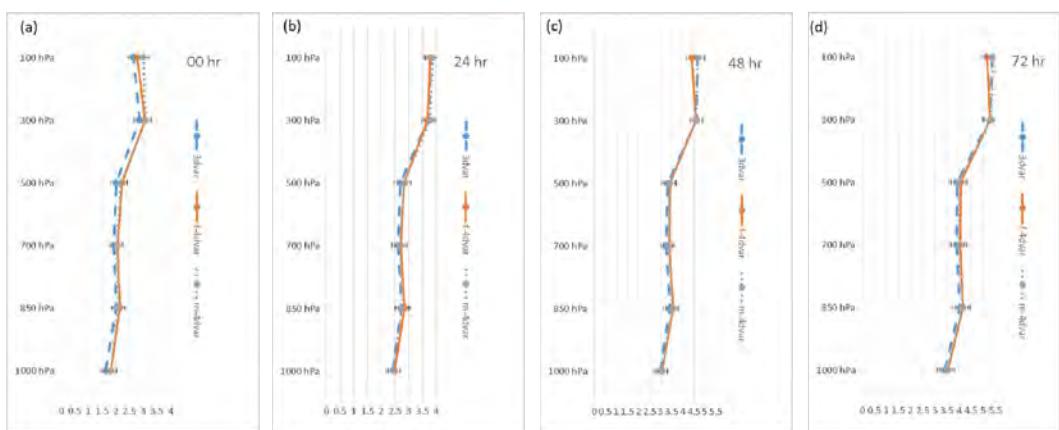


圖 8. 三組實驗的風場(U)在垂直層上之個案平均均方根誤差，(a)分析場，(b)24 小時預報，(c)48 小時預報，(d)72 小時預報。圖形表示同圖 6。

Fig. 8. Three experimental wind (U) in the vertical layer of the average Root Mean Square Error, (a) analysis, (b) 24, (c) 48, (d) 72 hour forecast. Symbol represents as in Fig. 6.

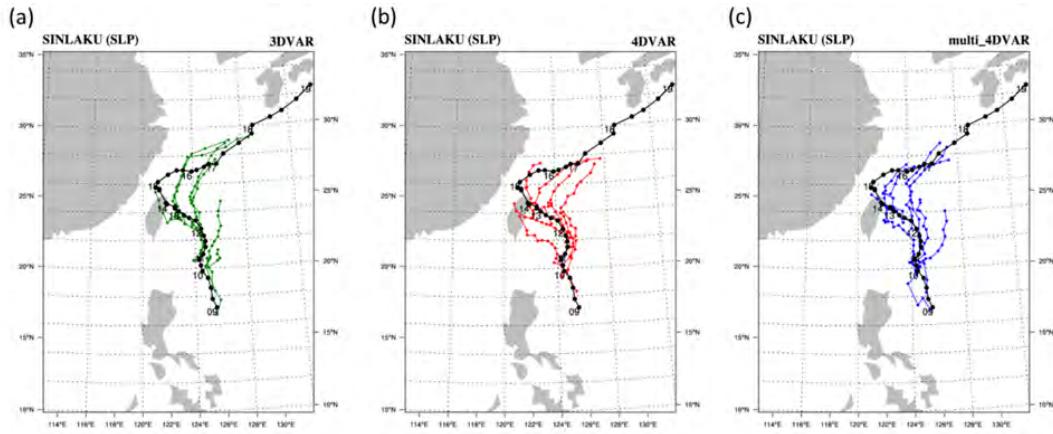


圖 9 : Sinlaku 颱風實驗模擬期間，(a)3DVAR、(b)Full resolution 4DVAR、(c)多重增量 4DVAR 三組實驗之預報路徑。

Fig. 9. Forecast track comparing three experiments for Typhoon Sinlaku, (a) 3DVAR, (b) Full resolution 4DVAR, (c) Multi-incremental 4DVAR.

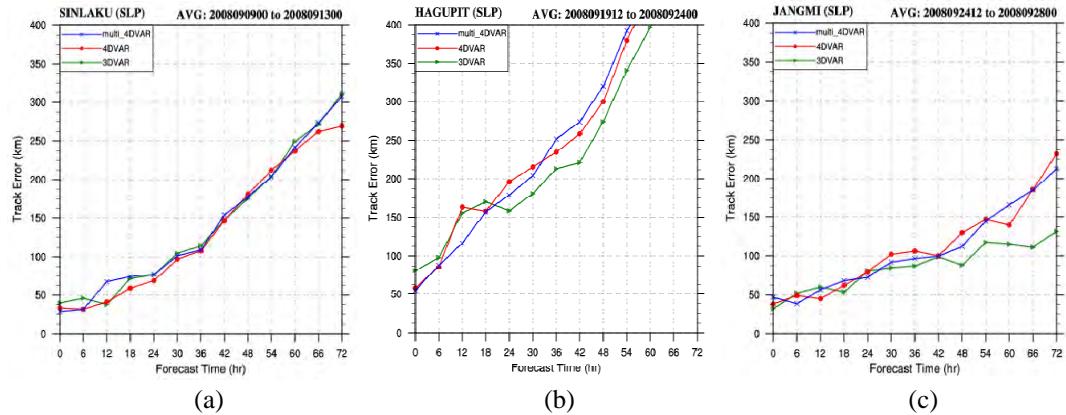


圖 10 .Sinlaku、Hagupit、Jangmi 颱風實驗模擬期間，3DVAR 與 4DVAR (Full resolution & 多重增量)之路徑誤差統計圖。▲為 3DVAR，●為 Full resolution 4DVAR，x 為多重增量 4DVAR 。

Fig. 10. Track error (km) comparing three experiments for Typhoon (a) Sinlaku, (b) Hagupit, (c) Jangmi. ▲:3DVAR, ●:Full resolution 4DVAR, x:Multi-incremental 4DVAR.

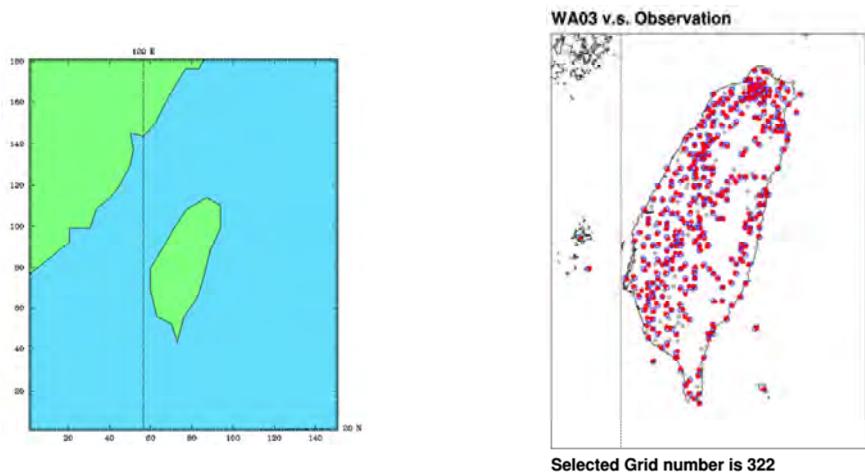


圖 11. (a)本研究高解析度網格選取範圍，解析度為 5 公里，(b)選取之模式網格點(藍圈，共 322 點)與自動雨量站(紅點，共 425 點)相對應示意圖。

Fig. 11. (a) The high-resolution domain, resolution : 5km, (b) The distribution of model grid point(blue circle) and auto rain station (red point).

由於模式預報長度為 72 小時，而我們的校驗對象是 12 小時累積降水，因此將預報長度分為 0~12、12~24、24~36、36~48、48~60、60~72 小時等六個時段，分別稱為 A、B、C、D、E、F 時段，其中模式開始預報的 A 時段為 spin-up 階段，其降水預報較不可靠，因此本研究不加以著墨 A 時段的降雨預報。另外，為了校驗不同降雨強度的預報準確度，我們使用 13 種降水門檻值分別是 0.5、1、2、5、10、20、30、40、50、75、100、125、150mm，根據各個門檻值判斷是否有降雨，以檢驗模式對該門檻值降水強度的預報能力。

圖 15 為 Sinlaku 颱風之降水校驗結果，由 B、F 時段之降水 ETS 得分可見，在 10mm 以下的小雨預報 3DVAR 比多重增量 4DVAR 稍佳，但 20mm 以上大雨的 ETS 得分則以多重增量 4DVAR 勝出，C、

D、E 時段皆呈現多重增量 4DVAR 從小雨至大雨預報之 ETS 得分皆優於 3DVAR。而由 Bias 之結果顯示，兩組實驗之模式降水皆呈現低估(小於 1)之狀態，但多重增量 4DVAR 之值較接近於 1，由此可知多重增量 4DVAR 在 Sinlaku 颱風實驗期間降雨預報表現較佳。Hagupit 颱風之降水校驗(圖 16)，在 B、C、D、E、F 時段兩組實驗在 10mm 以下小雨預報之 ETS 得分非常相近，而在 20mm 以上大雨預報則以 3DVAR 略佳。Bias 結果亦與 ETS 得分結果相似，但兩組實驗的 E 與 F 時段在 75mm 以上大雨預報皆呈現高估的情況。Jangmi 颱風之降水校驗(圖 17)，在 B、C、E、F 時段多重增量 4DVAR 從小雨至大雨預報之 ETS 得分皆較 3DVAR 高，僅在 D 時段在 20mm 大雨以上預報稍差，由 Bias 結果亦能得到相似的結果，而且此兩組實驗降

水皆呈現低估狀態。

整體而言，多重增量 4DVAR 對於颱風降水預報呈現較佳的表現，特別是在雨區分布與極大值掌握能力皆優於 3DVAR。

(五)、模式平衡控制項之探討

本節我們藉由增加 4DVAR 的價值函數公式(1)中平衡控制項(J_c)的權重比例，初步探討預報模式的約束對初始分析場的動力平衡之影響，同時評估對 T-PARC 實驗期間三個颱風路徑誤差的改進效益，因電腦計算資源有限，本實驗僅針對多重增量 4DVAR 做測試。

圖 18 中符號◇為增加平衡控制項權重之結果，在 Sinlaku 颱風實驗期間(圖 18-a)，增加(J_c)權重後的多重增量 4DVAR 在預報 30 小時後路徑誤差之改進非常顯著；而在 Hagupit 颱風實驗期間(圖 18-b)，增加(J_c)權重的多重增量 4DVAR 預報 12 小時之後的路徑誤差表現最好；最後在 Jangmi 颱風實驗期間(圖 18-c)，增加(J_c)權重的多重增量 4DVAR 其結果雖未能與 3DVAR 相比擬，但仍是三組 4DVAR 中表現最佳的。值得注意的是在三個颱風實驗期間，增加(J_c)權重的多重增量 4DVAR 之颱風初始位置比其他實驗來的準確。

由上述初步的實驗結果，我們發現增加平衡控制項之權重能得到較佳的颱風路徑預報與初始位置，但增加此項權重在價值函數中代表減少資料同化對模式預報的影響，亦即降低觀測資料在同化過程中的貢獻程度，因此要如何拿捏觀測資料、背景場以及平衡控制項之間的比例關

係，是未來可深入探討與加以測試的目標。

五、結論

本研究首次在中央氣象局新一代超級電腦(Fujitsu FX10)上建置 4DVAR 系統，期望能評估與了解 4DVAR 在氣象局作業上之可行性與效能，因此本文針對 4DVAR 執行所需電腦資源需求做完整之評估，另外對於 4DVAR 之理論基礎與 WRF4DVAR 主要架構亦有深入的探討。

為了瞭解 WRF4DVAR 對於中央氣象局 WRF 模式預報的影響，首先我們藉由單觀測點實驗了解與證實 WRF4DVAR 系統與流場相關的背景場誤差統計特性是否存在。而藉由長時間積分實驗的結果，我們能了解 WRF4DVAR 在作業上的穩定性與效能，進一步運用此系統分析 T-PARC 實驗期間(2008 年 9 月)內三個颱風之綜觀尺度天氣之校驗結果、颱風路徑之預報以及在高解析度網格下降水的表現。

本研究主要結論為：1)效能評估之結果，多重增量 4DVAR 使用之記憶體資源與運算效率較能符合實際作業上之需求，且其結果與 Full resolution 4DVAR 相似，不因內迴圈使用較低網格解析度而受影響，2) 經由單觀測點實驗確認了 WRF4DVAR 擁有隱性的與流場相關的背景場誤差統計特性，但此特性之顯著程度與觀測點位置以及個案選取之技巧息息相關，3)由綜觀尺度天氣之校驗以及颱風

路徑預報之結果，4DVAR 與 3DVAR 系統呈現優劣互現的狀態，顯示 4DVAR 未來仍有調整之空間，4)在高解析度網格(5 公里)下，4DVAR 在降水分布型態與極值之掌握皆優於 3DVAR，顯示其未來同化高時空分布的觀測資料(如：雷達回波、徑向風)有其優勢與潛力。

六、未來應用與建議事項

本文對於 4DVAR 之研究尚屬初步階段，研究過程中我們瞭解其基本的概念與相關經驗之累積，未來中央氣象局新一代超級電腦建置完成，將有更足夠的資源提供測試與應用。

在本研究中，我們藉由單觀測點實驗了解 4DVAR 的特性與發現一些問題尚待進行更多實驗加以釐清，例如與流場相關的背景場誤差統計特性要如何更顯著的表現出來，可由兩個方向進行更深入探討，1)由背景場直接做預報與做完 4DVAR 後的分析場之預報皆使用乾(完全不使用積雲與微物理參數化)的非線性模式進行積分，此兩種預報的相減應更能顯示 4DVAR 與流場相關的背景場誤差統計特性，2)選擇水氣較少的天氣現象進行實驗，以上兩點皆為了降低模式水氣過程對 4DVAR 的影響。

而由綜觀尺度校驗結果，我們了解 4DVAR 仍須改進，在實驗設計上可嘗試調整背景場誤差之設定值(如：尺度長度 length scale)，讓觀測資料的效益更加突

顯。而在 4DVAR 程式架構上，未來仍有下列項目需進行修正與補強，1)在切線性模式與伴隨模式加入微物理與積雲參數化，使 4DVAR 在積分與伴隨過程都有與非線性模式一致的物理過程，2) 調整多重增量 4DVAR 內迴圈使用初始場之求取方式，目前內迴圈採用較低網格解析度的模式預報產品作為內迴圈極小化之初始場，未來將直接以外迴圈較高解析度的非線性模式預報產品直接內插至較低解析度作為內迴圈之初始場，使內外迴圈之物理過程與地形效應儘量達到一致，3) 讓多重增量 4DVAR 內外迴圈擁有不同解析度之彈性，目前多重增量 4DVAR 若使用 2 次以上的外迴圈計算設定，每次內外迴圈解析度比例無法更動，未來可將此計算過程改成較為彈性之作法，例如第 1 次外迴圈與內迴圈之比例為 1:6，第 2 次可變成 1:3 之程式架構，4) 4DVAR 因為必須存取每個時步的相關模式資訊需要極高記憶體資源，若能在存取每個時步時只存取必要的資訊，進而降低所需記憶體的需求，應可再增加其效能且不影響其正確性，5) 本研究中尚未深入瞭解與測試價值函數公式中，模式平衡控制項(Jc)對 4DVAR 的貢獻與效益，亦為未來深入探討與研究之課題。

由高解析度網格下的降水校驗結果，4DVAR 在降水分布與極值掌握皆優於 3DVAR，未來將針對梅雨與其他颱風個案進行研究，了解其穩定性與在不同天

氣現象上之表現，進一步規劃則希望能同化與雷達資料相似的高時空解析度觀測

資料，期望能改善與提升台灣地區降水預報之準確率。

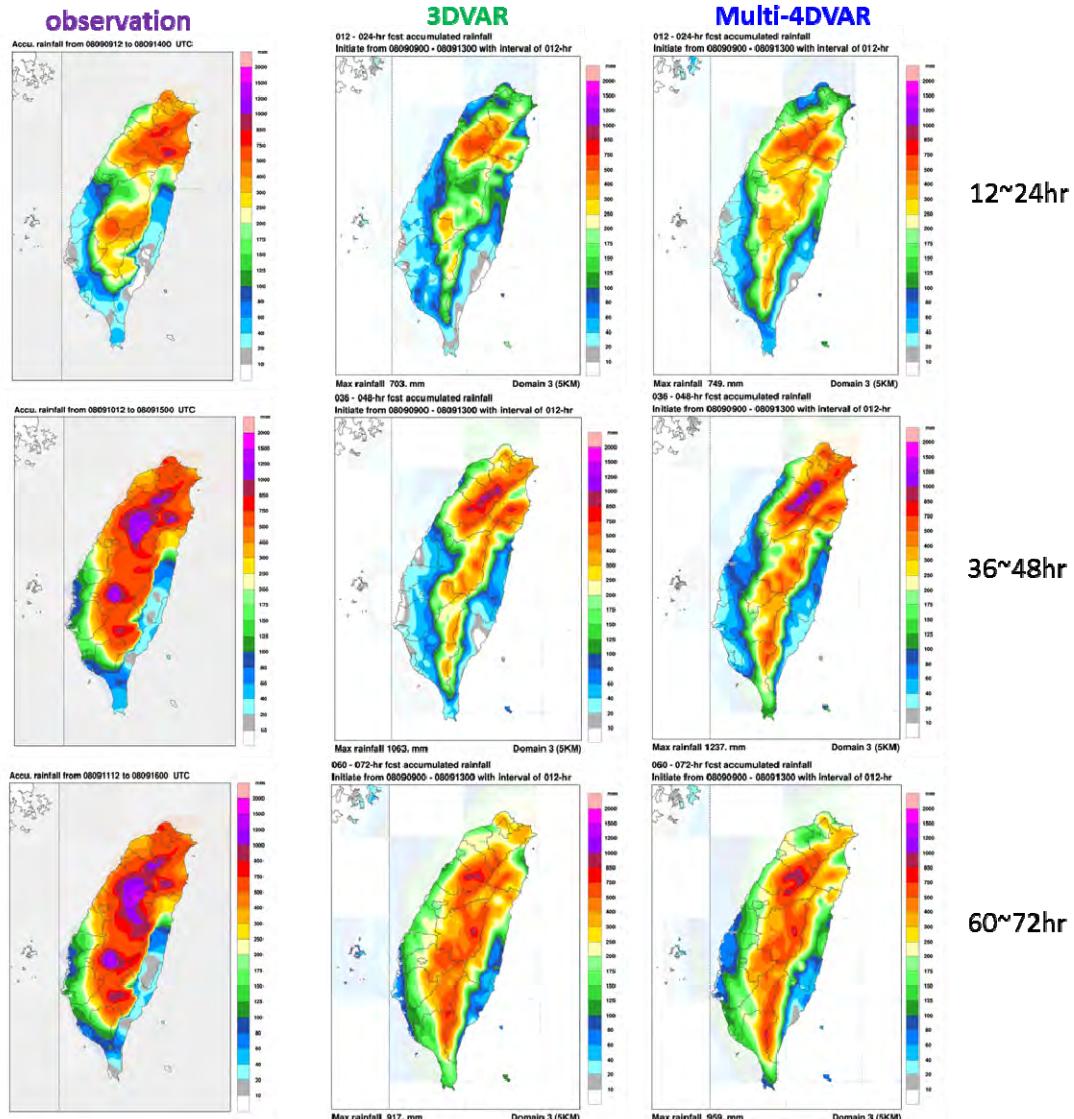
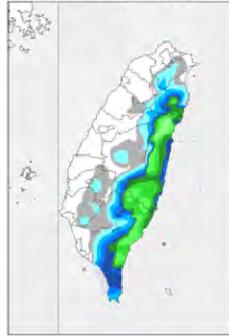


圖 12. Sinlaku 颱風實驗期間觀測與模式降水分布。

Fig. 12. The rainfall distribution of Observation and model forecast for Typhoon Sinlaku.

observation

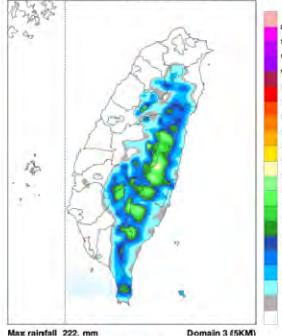
Accu. rainfall from 08092200 to 08092500 UTC



3DVAR

012 - 024-hr fcst accumulated rainfall

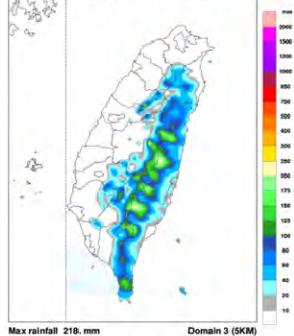
Initiate from 08091912 - 08092400 with interval of 012-hr



Multi-4DVAR

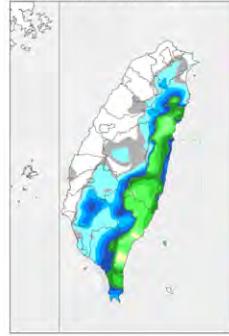
012 - 024-hr fcst accumulated rainfall

Initiate from 08091912 - 08092400 with interval of 012-hr



12~24hr

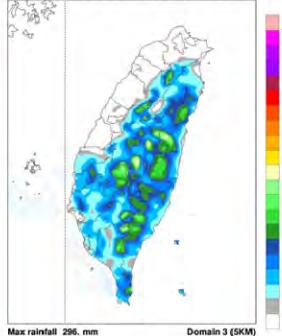
Accu. rainfall from 08092100 to 08092600 UTC



Max rainfall 223 mm Domain 3 (5KM)

036 - 048-hr fcst accumulated rainfall

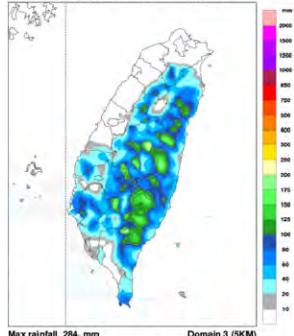
Initiate from 08091912 - 08092400 with interval of 012-hr



Max rainfall 218 mm Domain 3 (5KM)

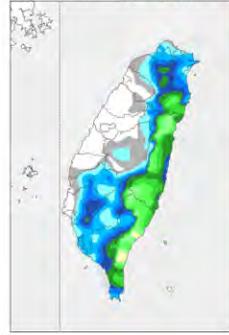
036 - 048-hr fcst accumulated rainfall

Initiate from 08091912 - 08092400 with interval of 012-hr



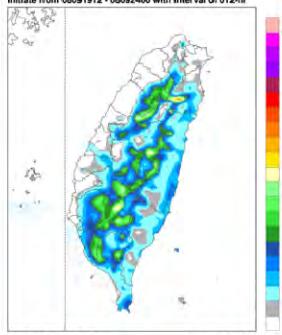
36~48hr

Accu. rainfall from 08092200 to 08092700 UTC



060 - 072-hr fcst accumulated rainfall

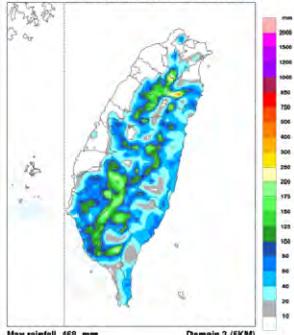
Initiate from 08091912 - 08092400 with interval of 012-hr



Max rainfall 294 mm Domain 3 (5KM)

060 - 072-hr fcst accumulated rainfall

Initiate from 08091912 - 08092400 with interval of 012-hr



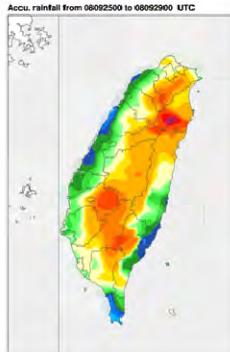
60~72hr

圖 13 . Hagupit 颱風實驗期間觀測與模式降水分布。

Fig. 13. The rainfall distribution of Observation and model forecast for Typhoon Hagupit.

observation

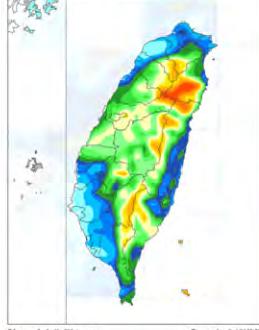
Accu. rainfall from 08092500 to 08092900 UTC



3DVAR

012 - 024-hr fcst accumulated rainfall

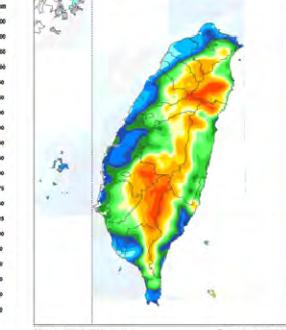
Initiate from 08092412 - 08092800 with interval of 012-hr



Multi-4DVAR

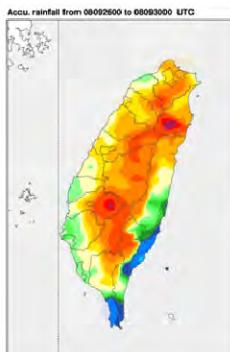
012 - 024-hr fcst accumulated rainfall

Initiate from 08092412 - 08092800 with interval of 012-hr



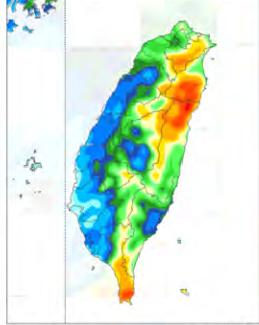
12~24hr

Accu. rainfall from 08092600 to 08093000 UTC



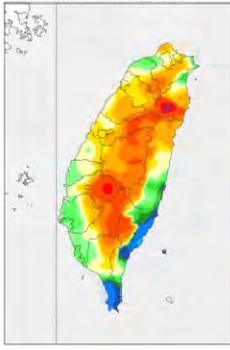
036 - 048-hr fcst accumulated rainfall

Initiate from 08092412 - 08092800 with interval of 012-hr



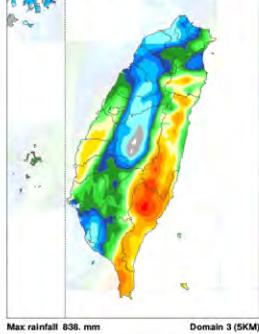
36~48hr

Accu. rainfall from 08092700 to 08100100 UTC



060 - 072-hr fcst accumulated rainfall

Initiate from 08092412 - 08092800 with interval of 012-hr



60~72hr

Max rainfall 904 mm

060 - 072-hr fcst accumulated rainfall

Initiate from 08092412 - 08092800 with interval of 012-hr

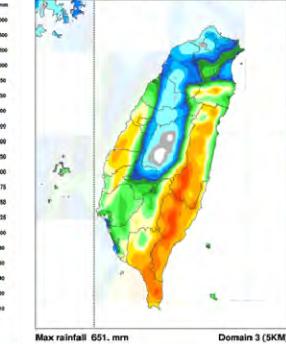


圖 14. Jangmi 颱風實驗期間觀測與模式降水分布。

Fig. 14. The rainfall distribution of Observation and model forecast for Typhoon Jangmi.

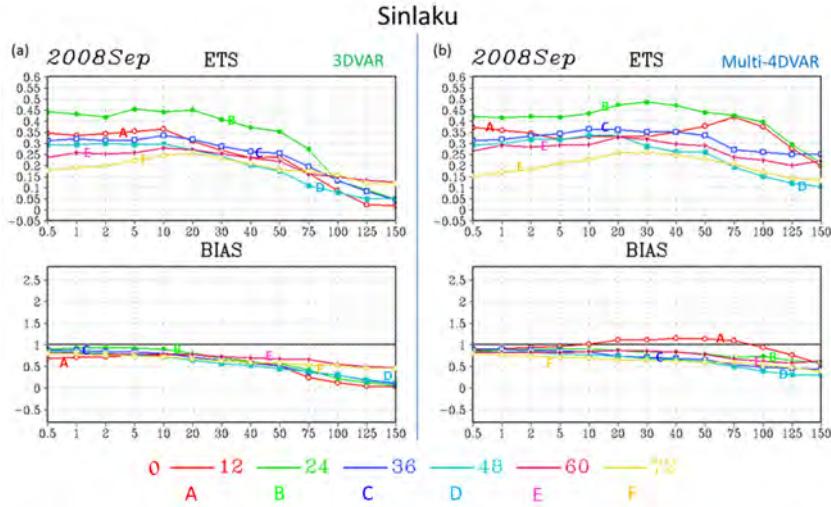


圖 15. Snlaku 颱風降水校驗結果，(a)3DVAR，(b)多重增量 4DVAR，橫軸為降水門檻值 (mm)，縱軸為 ETS 得分值與偏離值。A、B、C、D、E、F 分別為 0~12 小時、12~24 小時、24~36 小時、36~48 小時、48~60 小時、60~72 小時之累積降水。

Fig. 15. The verification of precipitation for Typhoon Snlaku, (a) 3DVAR, (b) Multi-incremental 4DVAR, the horizontal axis represents the threshold value of precipitation (mm), the vertical axis represents ETS score values and outliers. A, B, C, D, E, F, respectively, from 0 to 12 hours, 12 to 24 hours, 24 to 36 hours, 36 to 48 hours, 48 to 60 hours, 60 to 72 hours of accumulated precipitation.

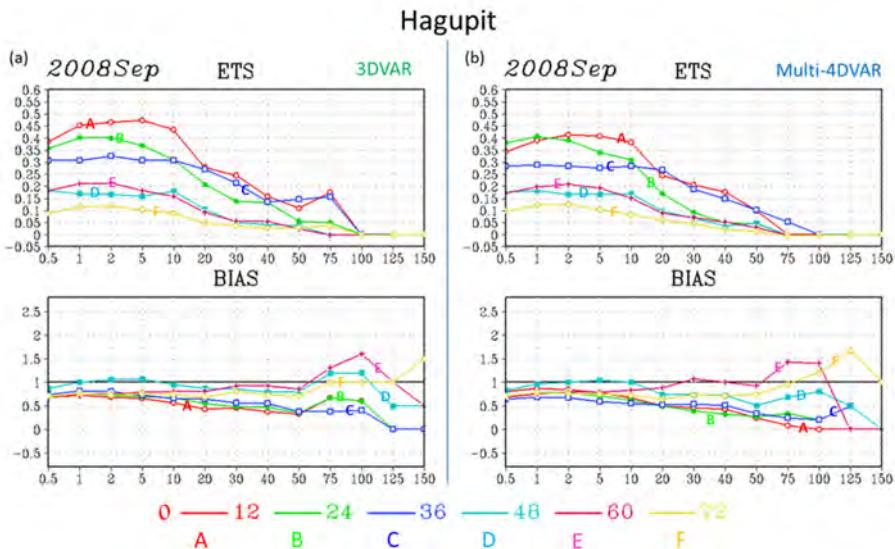


圖 16. Hagupit 颱風降水校驗結果，(a)3DVAR，(b)多重增量 4DVAR，橫軸為降水門檻值 (mm)，縱軸為 ETS 得分值與偏離值

Fig. 16. The verification of precipitation for Typhoon Hagupit. Symbol represents as in Fig. 15.

Jangmi

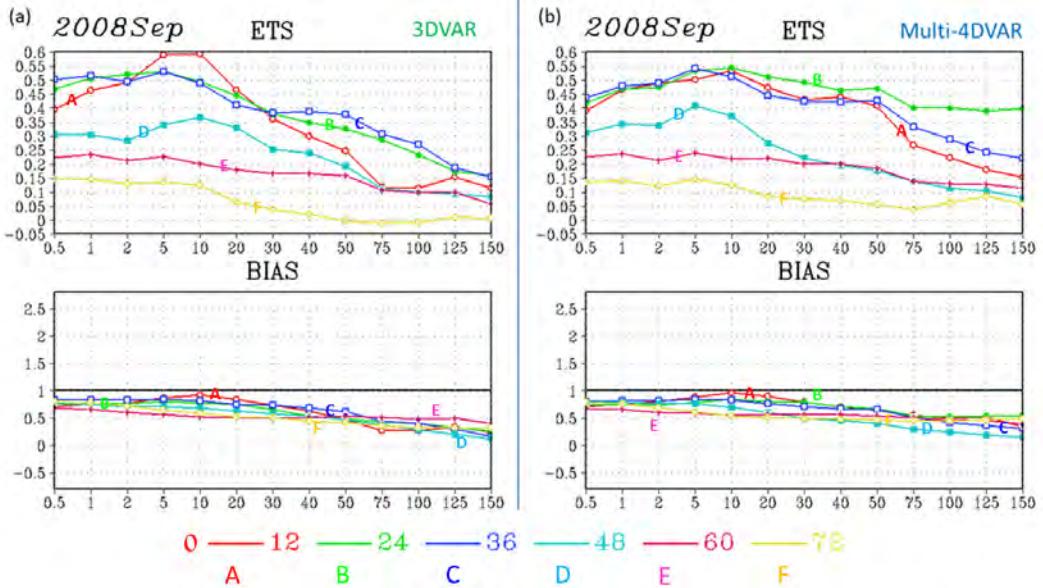


圖 17. Jangmi 颱風降水校驗結果，(a)3DVAR，(b)多重增量 4DVAR，橫軸為降水門檻值 (mm)，縱軸為 ETS 得分值與偏離值。

Fig. 17. The verification of precipitation for Typhoon Jangmi. Symbol represents as in Fig. 15.

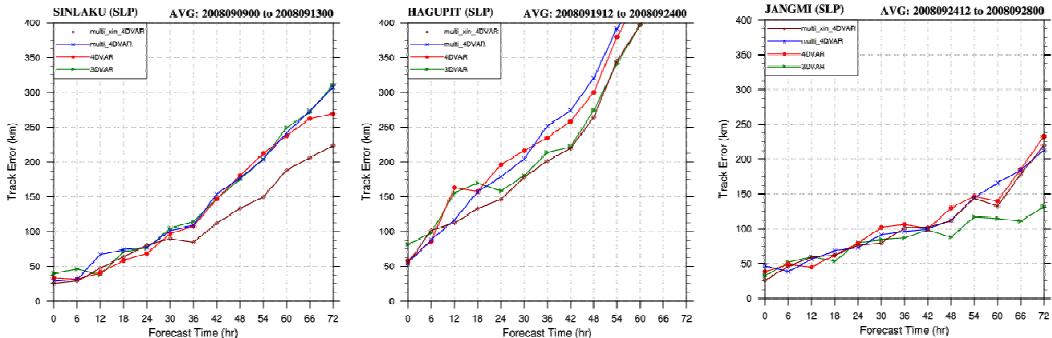


圖 18. Sinlaku、Hagupit、Jangmi 颱風實驗模擬期間，3DVAR、4DVAR (Full resolution & 多重增量 & 多重增量增加平衡控制項權重)之路徑誤差統計圖。▲為 3DVAR，●為 Full resolution 4DVAR，x 為多重增量 4DVAR，◇為多重增量增加平衡控制項權重。

Fig. 18. Track error (km) comparing four experiments for Typhoon (a) Sinlaku, (b) Hagupit, (c) Jangmi. ▲:3DVAR, ●:Full resolution 4DVAR, x:Multi-incremental 4DVAR, ◇:increase Jc weighting of Multi-incremental 4DVAR.

七、參考文獻

- 簡芳菁、洪景山、張文錦、周仲島、林沛練、林得恩、劉素屏，繆睿如、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，第 34 期，第 3 卷，261-276。
- Barker, D., W. Huang, Y.-R. Guo, A. J. Bourgeois, and Q. N. Xiao, 2004:A three-dimensional variational data assimilation system for MM5:Implementation and initial results. Mon. Wea. Rev., 132, 897–914.
- , M. S. Lee, Y.-R. Guo, W. Huang, Q.-N. Xiao, and R. Rizvi, 2004b:WRF variational data assimilation development at NCAR. Fifth WRF/14th MM5 Users' Workshop, Boulder, CO, NCAR, 5 pp.
- Courtier, P., J.-N. Thépaut, and A. Hollingsworth, 1994 : A strategy for operational implementation of 4D-Var, using an incremental approach. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 120, 1367–1387.
- Fujita, T., 1952: Pressure distribution within a typhoon. Geophys. Mag., 23, 437-451.
- Gauthier, P., and J.-N. Thépaut, 2001: Impact of the digital filter as a weak constraint in the preoperational 4DVAR assimilation system of Météo France. Mon. Wea. Rev., 129, 2089–2102.
- , M. Tanguay, S. Laroche, and S. Pellerin, 2007: Extension of 3DVAR to 4DVAR: Implementation of 4DVAR at the Meteorological Service of Canada. Mon. Wea. Rev., 135, 2339–2364.
- Guo, Y.-R., Y.-H. Kuo, J. Dudhia, D. Parsons, and C., Rocken, 2000:Four-dimensional variational data assimilation of heterogeneous mesoscale observations for a strong convective case. Mon. Wea. Rev., 128, 619-643.
- Honda, Y., M. Nishijima, K. Koizumi, Y. Ohta, K. Tamiya, T. Kawabata, and T. Tsuyuki, 2005: A pre-operational variational data assimilation system for a non-hydrostatic model at the Japan Meteorological Agency: Formulation and preliminary results. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 131, 3465–3475.
- Huang, X.-Y., X. Yang, N. Gustafsson, K. Mogensen, and M. Lindskog, 2002: Four-dimensional variational data assimilation for a limited area model. HIRLAM Tech Rep 57, 41 pp.
- Huang, X.-Y., Q. Xiao, W. Huang, D. M Barker, J. Michalakes, J. Bray, Z. Ma, Y.-R., Guo, H.-C. Lin, and Y.-H. Kuo, 2006. Preliminary results of WRF 4D-Var. WRF users' workshop, Boulder, Colorado, 19-22 June 2006.
- Huang, X.Y., Q. Xiao, D.M. Barker, X. Zhang, J. Michalakes, W. Huang, T. Henderson, J. Bray, Y. Chen, Z. Ma, J. Dudhia, Y. Guo, X. Zhang, D.J. Won, H.C. Lin, and Y.H. Kuo, 2009: Four-Dimensional Variational Data Assimilation for WRF: Formulation and Preliminary Results. Mon. Wea. Rev., 137, 299–314.

- Le Dimet, F., and O. Talagrand, 1986: Variational algorithms for analysis and assimilation of meteorological observations: Theoretic aspects. *Tellus*, 38A, 97–110.
- Lewis, J., and J. Derber, 1985: The use of adjoint equations to solve a variational adjustment problem with advective constraints. *Tellus*, 37A, 309–327.
- Lorenc, A. C., 2003: Modelling of error covariances by 4D-Var data assimilation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 129, 3167–3182.
- , and F. Rawlins, 2005: Why does 4D-Var beat 3D-Var? *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 131, 3247–3257.
- Navon, I. M., X. Zou, J. Derber, and J. Sela, 1992: Variational data assimilation with an adiabatic version of the NMC spectral model. *Mon. Wea. Rev.*, 120, 1433–1446.
- Parrish, D. F., and J. C. Derber, 1992: The National Meteorological Center's spectral statistical-interpolation analysis system. *Mon. Wea. Rev.*, 120, 1747–1763.
- Rabier, F., and Coauthors, 1997: Recent experimentation on 4Dvar and first results from a simplified Kalman filter. ECMWF Tech. Memo. 240, Reading, United Kingdom, 42 pp.
- , H. Järvinen, E. Klinker, J.-F. Mahfouf, and A. Simmons, 2000: The ECMWF operational implementation of four dimensional variational assimilation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 126, 1143–1170.
- Rauno Niemenen, 1983: Operational verification of ECMWF forecast fields and results for 1980-1981. ECMWF Technical Report No.6.Rawlins,F.,S.P.
- Ballard, K. J. Bovis, A. M. Clayton, D. Li, G. W. Inverarity, A. C. Lorenc, and T. J. Payne, 2007: The Met Office global 4-Dimensional data assimilation system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 133, 347–362.
- Thépaut, J.-N., and P. Courtier, 1991: Four dimensional variational data assimilation using the adjoint of a multilevel primitive-equation model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 117, 1225–1254.
- Wu, C.-C., and Y.-H. Kuo, 1999: Typhoons Affecting Taiwan: Current Understanding and Future Challenges. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 80, 67-80.
- Wu, C.-C., K.-H. Chou, Y. Wang and Y.-H. Kuo, 2006: Tropical cyclone initialization and prediction based on four-dimensional variational data assimilation. *J. Atmos. Sci.*, 63, 2383–2395.
- Zhang, X., X.-Y. Huang, and N. Pan, 2013: Development of an efficient regional four-dimensional variational data assimilation system for WRF. *JTECH-S-13-00098(3)*.

The Preliminary Assessment of Four-dimensional Variational Data Assimilation (4DVAR) Performance at Central Weather Bureau

Chin-Hsiao Chiang¹, Xin Zhang², Chin-Tzu Fong¹, Xiang-Yu Huang²

¹Central Weather Bureau

²National Center for Atmospheric Research

ABSTRACT

The current data assimilation technique used by the Central Weather Bureau (CWB) in Taiwan is the three-dimensional variational data assimilation (3DVAR). Although 3DVAR is computationally economical in operational NWP, its background error covariance (BE) defined as static matrix and which can not evolve with the time is the major weakness. Therefore, all to-be-assimilated observations have to be presumed as the snapshot of the current atmospheric state. Recently, the CWB has upgraded its computational resources significantly; and the opportunities arise to test the advanced data assimilation methods, such as four-dimensional variational data assimilation (4DVAR), which has the capability to take into account the observation data within a certain timeframe. In this paper, the impact of 4DVAR on the Weather Research and Forecasting (WRF) model in the context of the CWB operational configuration has been evaluated systematically.

The comparisons between the 3DVAR and 4DVAR experiments are summarized as follows: (1) The single-observation experiment confirms that the 4DVAR is able to evolve the BE implicitly and demonstrates the flow-dependent characteristics on the analysis; (2) With the data observed during 2008 THORPEX Pacific Asian Regional Campaign (T-PARC), the 4DVAR experiment preliminary results can not compete with which by the 3DVAR on grid-point verifications, but 4DVAR experiment demonstrates comparable typhoon-track forecasts with those of 3DVAR; (3) The 4DVAR experiment with high horizontal resolution usually produces better precipitation forecasts in terms of the pattern and peak value. This implies that the high temporal-and-spacial-resolution related observations, such as radar data, may be better assimilated in 4DVAR; (4) The multi-incremental 4DVAR is able to complete the analysis on the 45km horizontal-resolution CWB operational domain (East-Asia) in 30 minutes (2 outer loops), and complete the 5km Taiwan domain in 50 minutes. The computational costs of 4DVAR are affordable for operational purpose given the CWB computational resources.

Key words: variational data assimilation, flow-dependent, typhoon-track forecast, multi-incremental, grid-point verification