

# 奇異向量在全球波譜淺水模式颱風路徑系集預報的應用

賴永鑫<sup>1</sup> 曾建翰<sup>1</sup> 陳建河<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中央氣象局氣象科技研究中心

<sup>2</sup>中央氣象局氣象資訊中心

(中華民國一〇三年二月十七日收稿；中華民國一〇三年六月十一日定稿)

## 摘 要

淺水模式應用於颱風路徑的系集預報仍有其價值，理由為計算花費成本簡單，可作為參照的最低標準。本研究採用的淺水模式為配合氣象局全球波譜模式的淺水模式，沒有邊界條件問題，方程組承繼全球模式，除可做動力學研究外，同時作為測試平台供以後全球模式使用。奇異向量(singular vectors, 簡稱 SVs)的應用為歐洲中心所採行的系集預報方法之一，精神為求算大氣基本場的最不穩定初始擾度場作為系集成員，在改動初始場儘可能少的情形下(通常僅改動 2~3%)於一定時間內求得最大合理分歧的一組預報。中央氣象局的奇異向量系統架構於 T42L40 簡化版的全球波譜模式上，內含簡單的邊界層及簡單物理過程。從 T42L40 所計算的奇異向量，可於垂直上擷取不同層的平均值給予淺水模式使用。

本研究使用全球範圍的單層淺水模式，把 SVs 視為模式初始場的最佳擾動分布來進行莫拉克颱風及凡那比颱風的系集路徑預報，而且在模擬過程中把 SVs 當作一種強制項的作用，每 6 小時加入 SVs 至淺水模式中直到 24 小時為止。二個個案的預報結果顯示，加入 SVs 成功將原始的單一路徑散開，而且凡那比颱風的系集預報範圍有包含到最佳路徑(best track)的方向。同時，為驗證 SVs 的空間分佈有重要意義，實驗測試將 SVs 平移出原先的區域，所得到的系集預報發散度皆不如原本的模擬結果，表示本研究所計算的 SVs 的空間分布作為影響颱風路徑預報的敏感區域有一定的可信度。

本研究的實驗測試過程可為未來全球模式的颱風路徑系集預報所用，同時 SVs 計算的敏感區可作為資料同化工作中的適應性觀測(adapting observation)如投落送(dropwindsound)等工作利用，加強區域局部觀測。

關鍵字：奇異向量、最佳路徑、適應性觀測、投落送

## 一、前言

數值模式的計算可視為非線性的過程，初始場的差異或使用物理參數化的不同都有可能導致預報結果有明顯的落差，這是單一預報結果所無法掌握且容易產生偏見之處。系集預報的方法則是利用不同的系集成員來進行預報，讓成員彼此間存在初始場的差異或使用不同的物理參數化，期望從系集成員預報結果的分歧來掌握模式本身在預報時的不確定性，用以提升對未來天氣預報成功的機率。

奇異向量 (singular vectors, 簡稱 SVs) 的應用為歐洲中心所採行的系集預報方法之一 (Molteni et al., 1996), 精神為求算大氣基本場的最不穩定初始擾度場作為系集成員，在改動初始場儘可能少的情形下於一定時間內求得最大合理分歧的一組預報 (Buizza et al., 1993; Buizza and Palmer, 1995; Molteni and Palmer, 1993)。藉由能量內積範圍的定義，可求算因應不同特定尺度背景場的初始擾動。針對熱帶氣旋與颱風的預報，文獻上對於能量內積的範圍選擇亦有所不同。從歐洲中心的 30°S-30°N (Barkmeijer et al., 2001; Puri et al., 2001) 到侷限在颱風環流附近 20°S-20°N 範圍的計算都有 (Peng and Reynolds, 2005, 2006; Reynolds et al., 2007)，端視在聚焦於熱帶大尺度環流場熱帶氣旋的生成問題或是颱風的路徑預報。

從一些文獻的探討 (Barkmeijer et al., 2001; Chen et al., 2009; Kim and Jung, 2009, 2010; Peng and Reynolds, 2005, 2006 等)，SVs 作為颱風系集預報的優點是能針對颱風附近的範圍做計算探討。選取的範圍可彈性選擇，除大小可依颱風環流大小定義外，另可加入多個範圍，如針對副高

或是大尺度槽脊線環境場的變化 (ECMWF, 2012; Komori et al., 2010)。本質上是透過數學內積所定義的函數與模式求算初始的擾動分佈，而相較其他時間延遲 (time lag) 法、或是誤差生成法 (breeding method) 對颱風附近環流有較佳掌握。本文僅就單一模式初始場的微小差異，計算 SVs 系集的效果。

本研究使用計算花費成本簡單的單層淺水模式，採用淺水模式的目的是將問題先聚焦在旋轉效應下的流體動力反應，先不考慮層化的作用。另一方面，我們先將颱風的運動考慮成正壓、單層的流體運動，測試 SVs 作為初始擾動對颱風路徑預報的影響。本研究選擇莫拉克颱風及凡那比颱風兩個侵台颱風的個案來進行颱風路徑的系集預報實驗，並對路徑預報的分歧結果進行評估，探討 SVs 作為初始場擾動在颱風路徑系集預報的應用可行性。

## 二、研究方法

### (一) 淺水模式介紹

本研究使用模式網格涵蓋全球範圍的單層淺水模式，水平解析度為 T320 (網格間距約為 42 公里)，無邊界條件問題。本模式採用的變數場為風場及高度場，淺水模式的控制方程如下：

首先定義一個運算子  $\alpha$ ：

$$\alpha(A, B) = \frac{1}{\cos^2 \varphi} \frac{\partial A}{\partial \lambda} + \frac{\partial B}{\partial \mu},$$

$$\mu = \sin \varphi, \lambda \text{ 為經度, } \varphi \text{ 為緯度}$$

$$\zeta = \alpha(V, -U), D = \alpha(U, V)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -\alpha(U(\zeta + f), V(\zeta + f)) \quad (2.1a)$$

$$\frac{\partial D}{\partial t} = \alpha(V(\zeta + f), -U(\zeta + f)) - \nabla^2(I + g\eta) \quad (2.1b)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = -\alpha(U(\eta - h_s), V(\eta - h_s)) - H\alpha(U, V) \quad (2.1c)$$

其中  $\zeta$  為渦度場， $D$  為輻合散場， $\eta = h - H$ ， $h$  為流體厚度， $H = 5000\text{m}$ ， $h_s$  為地形， $U = u \cos\phi/a$ ， $V = v \cos\phi/a$ ， $u$  為東西向風場， $v$  為南北向風場， $a$  為地球半徑， $f$  為柯氏參數。

模式中的颱風採用人為植入的方式來進行模擬，颱風環流是參考 Chen and William(1987)的颱風公式，風場公式如下：

$$v(r) = v_m \left( \frac{r}{r_m} \right) \exp \left\{ \frac{1}{b} \left[ 1 - \left( \frac{r}{r_m} \right)^b \right] \right\} \quad (2.2)$$

其中  $r$  代表離颱風中心的半徑距離， $v_m$  為近中心最大風速， $r_m$  為近中心最大風速半徑， $b$  為風速變化曲率值。

## (二) 奇異向量(SVs)的計算

SVs 的計算先是定義一個終端時刻擾動  $x'(t_f)$  的能量，內積形式寫成：

$$\|x'(t_f)\|^2 = \langle x'(t_f), Ex'(t_f) \rangle \quad (2.3)$$

其中  $E$  為權重算子。假設  $x'$  為正切線性模式的變數， $L$  為正切線性模式算子，(2.3)式可改為：

$$\langle x'(t_f), Ex'(t_f) \rangle = \langle Lx'(t_0), ELx'(t_0) \rangle \quad (2.4)$$

利用線性代數中的伴隨算子恆等式，再把(2.4)式改寫成：

$$\langle L^*ELx'(t_0), x'(t_0) \rangle = \langle E^{-1}L^*ELx'(t_0), Ex'(t_0) \rangle \quad (2.5)$$

$L^*$ 即為伴隨模式算子，定義  $K = E^{-1}L^*EL$ ，把(2.3)式與(2.5)式連接可得：

$$\|x'(t_f)\|^2 = \langle x'(t_f), Ex'(t_f) \rangle = \langle Kx'(t_0), Ex'(t_0) \rangle = \sigma^2 \langle x'(t_0), Ex'(t_0) \rangle \quad (2.6)$$

求算  $K$  的特徵值  $\sigma^2$  與相應特徵向量，按由大至小排列，則最大  $\sigma^2$  所對應的特徵向量  $x'$  是一個最不穩定的模。數值運算中，通常前面幾組的特徵向量較具代表性，可按需要選擇特定組數，或是線性組合數組。而(2.6)式中，因為是對能量二次式求算特徵向量，數學上又稱為奇異向量。

綜合來說，SVs 是利用正切與伴隨模式配合算出，是數學上求出的最佳解，滿足模式的動力特性。成員彼此互相正交，系集成員會以單一決定模式為中心（平均值）散開，但是一開始 SVs 的擾動彼此是等同量級的（向量的 Norm 一樣），隨時間演化，均向性的結構會破壞，並且拉長成非均向性的結構。大致上說，SVs 的系集分歧會比 EnKF 稍大一些 (Buizza *et al.*, 2005)，然而，有些動力上長得很快的擾動，有時的預報是非常不理想的，似乎可以剔除。當然，SVs 的系集取樣也是盡力做到最佳，但凡是取樣，難免都會有偏頗。

本研究計算 SVs 的原始資料是取自中央氣象局 T42L40 簡化版的全球波譜模式，動力部分與高解析度模式相同，加上簡化的邊界層（含 vertical diffusion）、地面拖曳(surface drag)、水平擴散平滑(horizontal diffusion)等作用。利用(2.3)式，可選取能量內積的目標區域範圍如圖 1 紅色框所示，經緯度範圍約介於 126°E-154°E 與 8°N-36°N 之間，相仿於 Peng and Reynolds (2005)，Chen *et al.* (2009)，Chen *et al.* (2011)等文

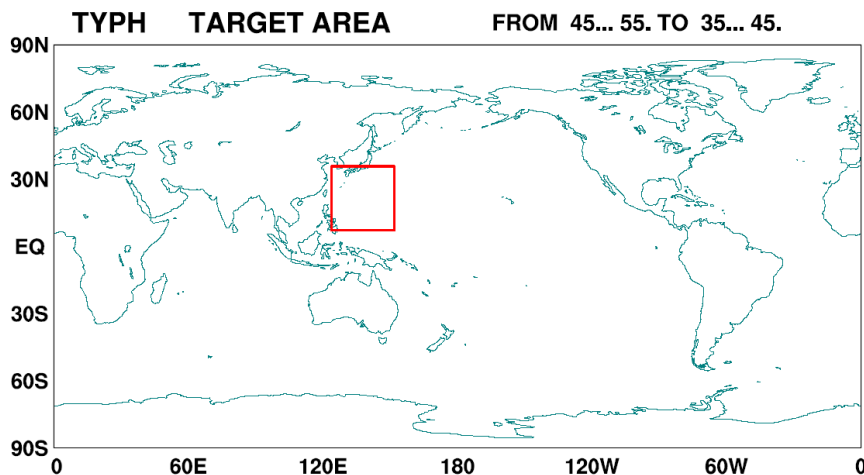


圖 1 計算 SVs 所選定的目標區域範圍，約介於 126°E–154°E 與 8°N–36°N 之間。

章所用的範圍。而日本氣象廳用的範圍要小些，約在颱風中心經度  $\pm 10^\circ$ ，緯度  $\pm 5^\circ$  範圍(Yamaguchi and Komori, 2009)。目前學界對此範圍的定義並無最佳化的方法，我們測試了許多大小的邊界和不同的颱風個案，發現圍繞颱風中心 20°範圍內的能量計算，對颱風系集路徑有顯著影響，當然有些颱風個案考慮大尺度的能量計算，會有稍好的結果，這也呼應為何日本氣象廳採用巢狀的兩層範圍計算 SVs，大尺度的範圍定義是 20°N–60°N, 100°E–180°E，捉住部分副高與主槽的位置(Yamaguchi and Komori, 2009)，而關於計算 SVs 的巢狀範圍會是我們下一階段的工作。本文 SVs 成長最佳化的時間定為 48 小時(Buizza et al., 1993)，所選擇的擾動系集成員是 SVs 計算結果的前 12 個，並未再線性組合過。

為了配合淺水模式的需要，各層變數場的 SVs 計算只擷取風場(m/s)跟重力位高度場(m)的結果加入淺水模式。實驗設計共有 12 組的 SVs 成員，以其中一組成員為例來說明 SVs 的分布情形。圖 2 為凡那比颱風個案期間在 2010 年 9 月

17 日 00z 所計算而得的其中一組成員的 SVs 分布，分別是在 850mb、500mb 的結果。

可看出 SVs 的風場(圖 2a,b)有類似於氣旋或反氣旋式的環流分布，相對於植入颱風的中心位置，SVs 作為風場的擾動將局部減弱或增強初始颱風的環流，對理想颱風的強度進行些微的調整。SVs 的高度場(圖 2c,d)類似於風場擾動的效果，有局部加深或減弱理想颱風的效應，對理想颱風的強度進行些微的調整。其中在 850mb 的 SVs 高度場(圖 2c)顯示颱風中心東西兩側的高度場擾動呈現正負兩極化的分布，此分布類似於颱風環流本身所產生的  $\beta$  效應。

SVs 的計算結果指出能量內積成長最快的方向，得出的向量為單位向量，可以乘以適當的倍率，模擬成原控制方程的擾動場。本研究利用 NMC 方法(Parrish and Derber, 1992)，估算模式 12 小時與 24 小時的誤差量級作為 SVs 最初的量級倍率，估算出的量級約為平均場的 0.5%。之後依照實驗需要會對 SVs 的量級倍率進行調整，調整方式參照實驗設計的說明。

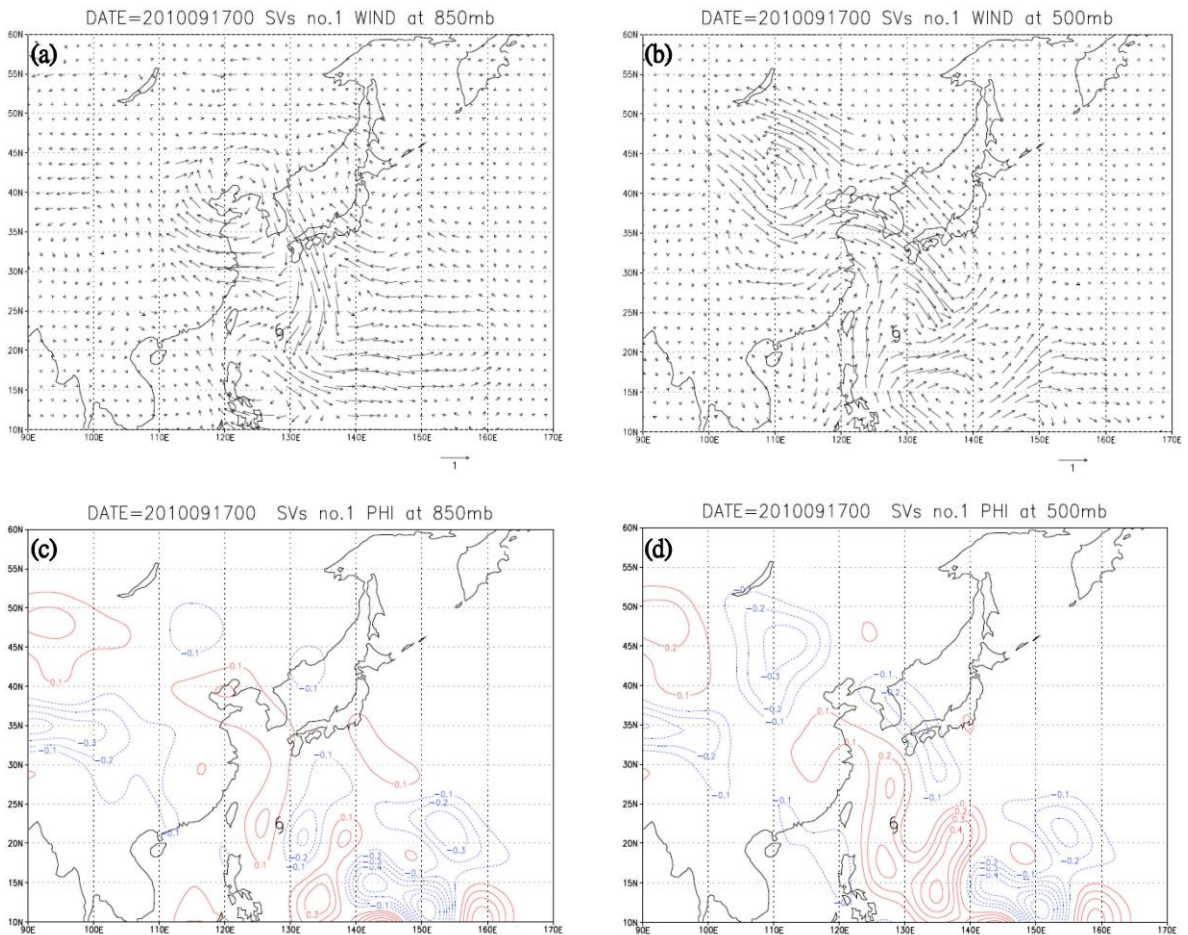


圖 2 凡那比颱風個案期間於 2010 年 9 月 17 日 00z 所計算 SVs 之其中一組成員在 (a) 850mb、(b) 500mb 的風場 (m/s) 擾動分布以及 (c) 850mb、(d) 500mb 的重力位高度場 (m) 擾動分布。

### (三) 預報實驗設計

淺水模式所使用的原始資料是從中央氣象局 T42L40 簡化版的全球波譜模式內插至 T320 的網格上而得，其中選取 850mb、700mb、500mb、400mb 分析場的平均作為模式的初始場。

系集預報的實驗設計是在模式的初始場分別加入 12 組 SVs，之後把 SVs 當作淺水方程控制模式的強迫項，每 6 小時加入 SVs 至淺水模式，一直至 24 小時為止。這是因為淺水模式沒有物理過程，也沒有垂直上的斜壓不穩定供擾動發展。

按照 SVs 的理論，其擾動會經過斜壓、正壓不穩定，並與模式的非線性與物理作用增強，所以將 SVs 視作額外的強迫作用加入模式中，期望取得較佳的分歧結果。模擬時間為 48 小時，最後可得到 12 組系集成員的路徑預報。

考慮 NMC 法估算的量級倍率過小，故定義一個量級係數  $S_f$ ，為 SVs 的量級調整倍率。本實驗的最佳控制組(control run, CTR)是設定  $S_f = 20$ ，亦即 SVs 的量級調整為原來的 20 倍。實驗也分別設定  $S_f = 1、5、10$ ，與控制組對照，進行

SVs 對路徑發散的敏感度測試。關於 SVs 的量級調整設定，在實驗結果裡會有更進一步的說明及討論。

#### (四) 颱風個案介紹

本研究分別選取莫拉克颱風(2009)和凡那比颱風(2010)個案進行系集預報實驗。莫拉克颱風於 2009 年 8 月 7 日侵襲台灣，伴隨的豪大雨量在台灣南部造成重大災害，史稱八八水災。凡那比颱風於 2010 年 9 月 19 日侵襲台灣，帶來的豪雨亦造成台灣南部部分地區淹水，農損逾 45 億元。

莫拉克颱風系集預報的個案選取時間為 2009 年 8 月 5 日 00z 至 8 月 5 日 18z，每隔 6 小時共四個個案的 48 小時路徑模擬，而凡那比颱風

系集預報的個案選取時間為 2010 年 9 月 17 日 00z 至 9 月 17 日 18z，同樣為四個個案的路徑模擬。

莫拉克個案所植入的理想颱風環流公式(2.2 式)的參數設定為  $r_m = 83\text{km}$ ， $v_m = 28\text{m/s}$ ， $b = 0.55$ ；凡那比的颱風環流公式的參數設定為  $r_m = 95\text{km}$ ， $v_m = 35\text{m/s}$ ， $b = 0.85$ 。

### 三、實驗結果

#### (一) 系集預報的路徑分析

圖 3 為莫拉克颱風的系集路徑預報圖，個案選取時間為 2009 年 8 月 5 日 00z 至 8 月 5 日 18z，共四個個案時間的模擬，而且為最佳控制組( $S_f = 20$ )的 48 小時模擬結果。圖上有四種路徑，紅色

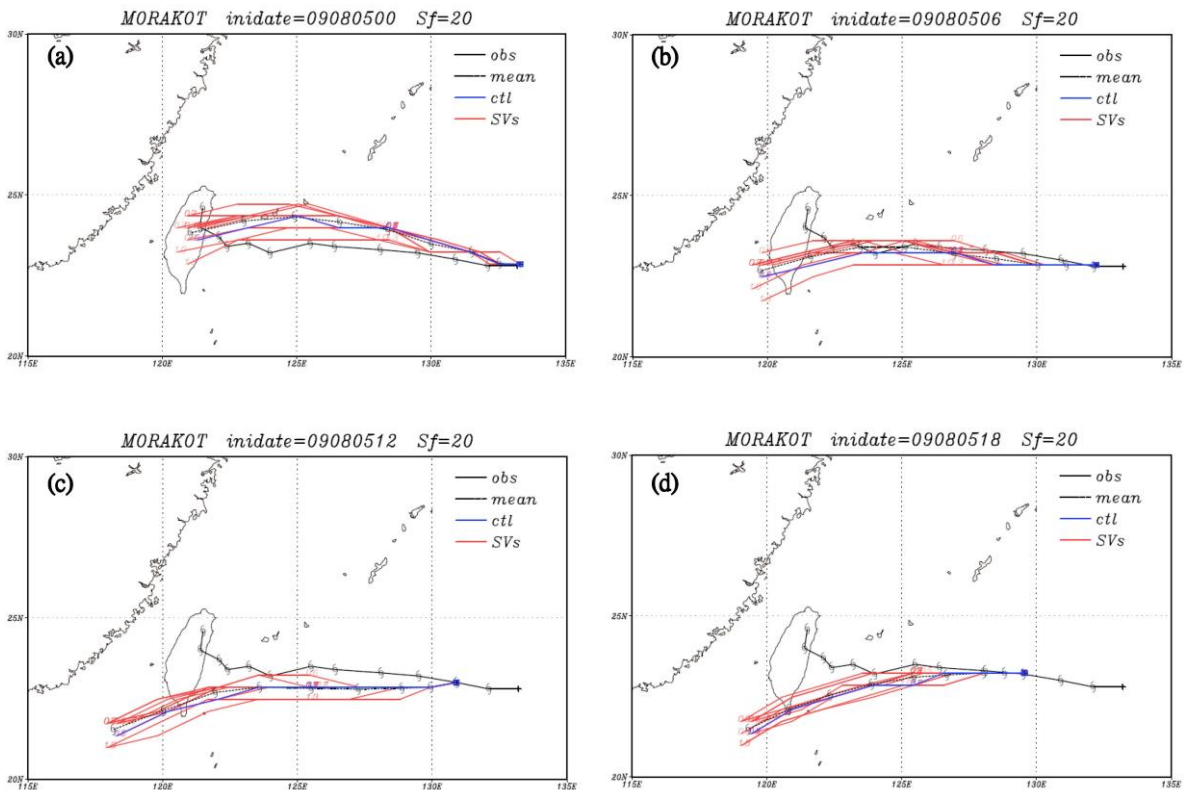


圖 3 莫拉克颱風的系集路徑預報圖，紅色線為系集成員，黑色虛線為系集成員的路徑平均，藍色線為原始路徑，黑色線為最佳路徑。個案時間為(a) 2009080500z, (b) 2009080506z, (c) 2009080512z, (d) 2009080518z。

線為系集成員，藍色線為未加入 SVs 的原始路徑，黑色虛線為系集成員的平均路徑（幾乎與原始路徑重疊），黑色線為颱風實際走的最佳路徑 (best track)。

由於淺水模式對颱風路徑的預報能力有限，其結果絕對不如完整動力物理過程的區域模式，因此圖中所顯示的最佳路徑，主要是提供系集預報和真實颱風路徑在移動方向上的偏差比較之用，而非針對路徑絕對誤差的比較。

莫拉克颱風的系集預報結果顯示加入 SVs 後，系集成員的路徑預報相對於原始預報路徑有發散分歧的現象，不同個案時間的系集成員路徑與最佳路徑相比有北偏(圖 3a)或南偏(圖 3b,c,d)的誤差，使得其平均路徑的預報結果會有北偏或

南偏的情況。

在模擬後期颱風路徑發生向北或向南偏轉，其偏轉原因主要與路徑靠近台灣地形時的位置有關。就淺水模式的模擬能力而言，由於台灣地形呈東北至西南走向，模擬像莫拉克這般強度及大小的西向颱風若靠近台灣東部比較偏北的宜蘭時，其路徑會北偏，反之颱風若靠近台灣東部的台東，其模擬的路徑則大多傾向南偏。

此外，不管是哪個個案時間的模擬，每個系集成員的颱風移動速度皆過於快速，48 小時的路徑長度都超過實際颱風的移動距離，使得路徑的誤差在模擬後期大幅提升。

圖 4 為凡那比颱風的系集路徑預報圖，個案

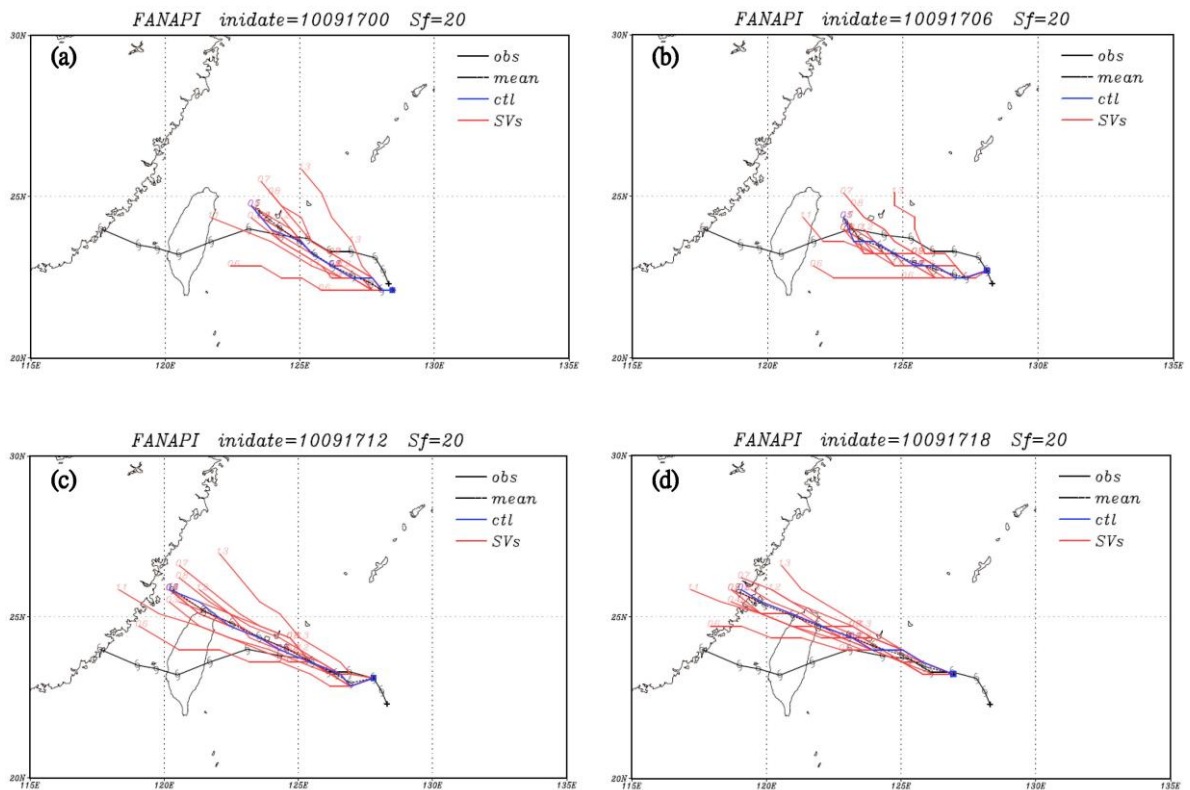


圖 4 凡那比颱風的系集路徑預報圖，紅色線為系集成員，黑色虛線為系集成員的路徑平均，藍色線為原始路徑，黑色線為最佳路徑。個案時間為(a) 20101700z, (b) 20101706z, (c) 20101712z, (d) 20101718z。

選取時間為 2010 年 9 月 17 日 00z 至 9 月 17 日 18z，共四個個案時間的模擬。預報結果顯示，四個時間個案的系集成員預報路徑的發散效果相當明顯，其中二個時間個案（圖 4a,b）其路徑分布的扇形範圍在預報 24 小時後，勉強有涵蓋到最佳路徑的方向，另二個時間個案（圖 4c,d）的系集成員跟最佳路徑相比有明顯偏北的路徑誤差。

此模擬結果表示凡那比颱風的初始基本場對加入的 SVs 擾動有較大的反應，系集成員分歧的情形相較於莫拉克的情形為大，這也間接指出凡那比颱風的路徑預報要比莫拉克來的不確定，困難度較高。同時，平均路徑（幾乎與原始路徑重疊）與最佳路徑相比仍有相當大的差距。

兩個颱風的模擬結果皆顯示，加入 SVs 的確可使原始的單一預報路徑發散，不同時間個案的發散效果各有差異，顯示不同的初始基本場對於 SVs 擾動的反應不一樣，SVs 的擾動在凡那比的個案中有較佳的發展狀況，而另一方面可想成莫拉克的基本場較為穩定，對大多數的數值模式路徑預報而言，應該有較多的一致預報。

## (二) SVs 對路徑發散的敏感度測試

SVs 對預報路徑發散的敏感度測試分成兩個部分來探討：(1)探討 SVs 的量級大小對路徑發散的影響；(2)探討 SVs 的空間分布是否可視為影響路徑發散的敏感區域。

標準差可以反映出群體內的離散程度，這裡利用平均預報路徑與 12 組系集成員預報路徑的差異來進行標準差的計算，作為系集預報路徑發散程度的定量分析參考，計算公式如下：

$$S = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \quad (3.1)$$

其中  $N$  為成員數量，共有 12 組成員， $\bar{X}$  為平均路徑預報值， $X_i$  為系集成員預報值。

### (1) 探討 SVs 的量級大小對路徑發散的影響：

由於兩個颱風的模擬皆顯示第一個個案時間的系集路徑發散效果最好（圖 3a 與圖 4a），因此選擇第一個個案時間的系集預報作為控制組 ( $S_f = 20$ )，對應的實驗組設計將針對 SVs 的量級大小來進行調整，分別調整 SVs 的量級倍數  $S_f = 1、5、10$  來進行系集預報以測試 SVs 的量級大小對徑發散的影響。

SVs 的量級倍數  $S_f = 1、5、10$  來進行系集預報以測試 SVs 的量級大小對徑發散的影響。

圖 5a,b 分別為莫拉克與凡那比颱風在不同 SVs 量級大小下的系集路徑發散程度分析圖，實線為控制組 ( $S_f = 20$ )，虛線分別為調整  $S_f = 1、5、10$  的實驗組，縱軸上顯示的標準差數值愈大，即代表路徑發散的程度愈大。

結果顯示不論是莫拉克還是凡那比的個案，放大 SVs 的量級，皆有助於增加系集成員預報路徑的發散度，其中凡那比颱風的路徑發散度變化最為顯著（圖 5b），實線跟虛線之間的差異相當明顯。這也代表調整 SVs 的量級大小可以技術性追求一組最大且合理分散的系集颱風路徑預報。

不過相對地 SVs 的量級調整也要考慮到對初始場改動不可過大。對本研究所使用的淺水模式而言，設定  $S_f = 20$  已是接近可以容忍的最大倍率，若放大倍率到 30 倍以上，會導致對原本初始場的影響過大，模擬的過程中反而會產生不正常的場。

一般而言，SVs 的尺度約在原變數的 1~2% 或是更小，經過 NMC 法放大後，會在原變數 0.5



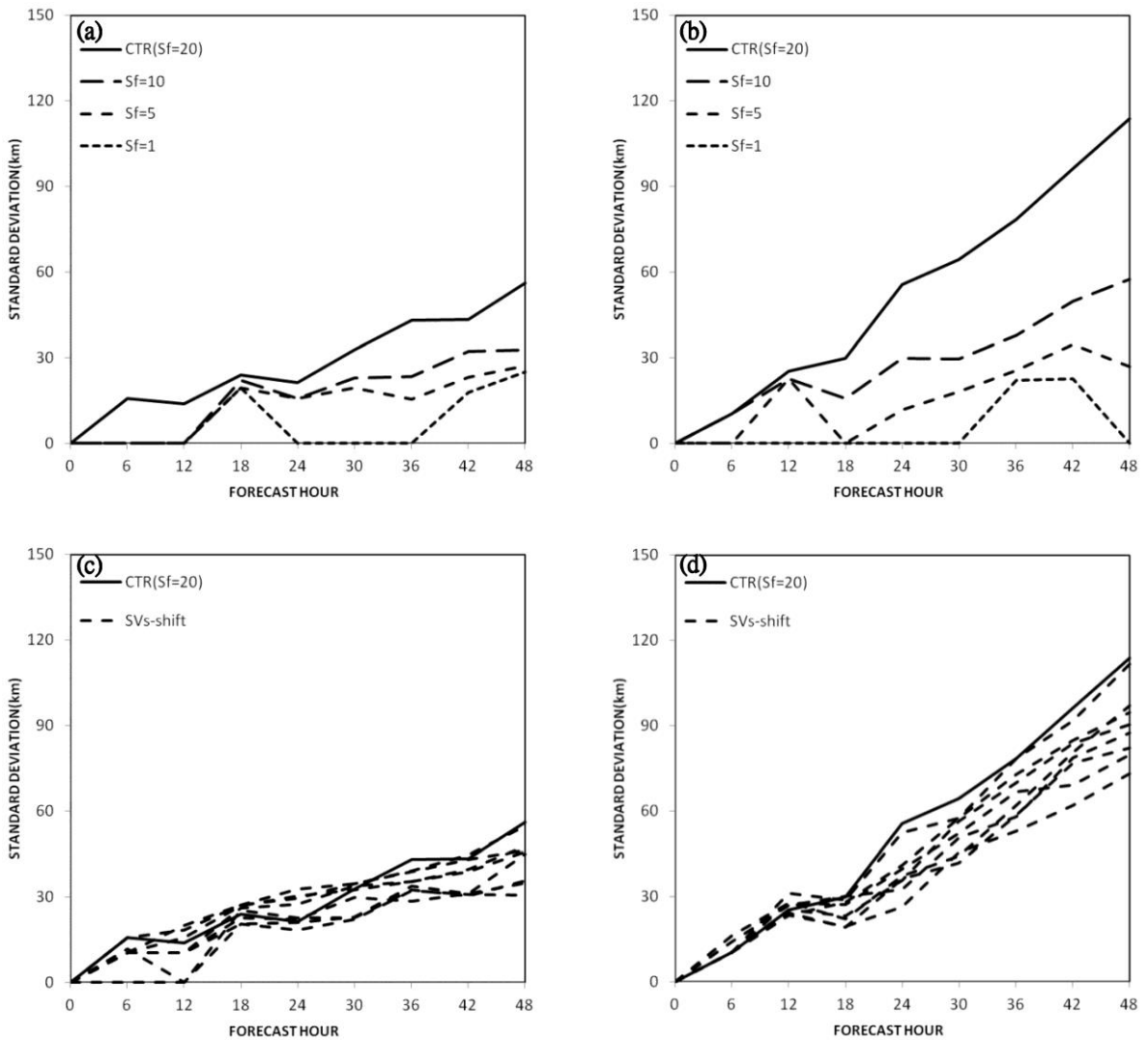


圖 5 不同 SVs 量級大小 (調整  $S_f = 1、5、10、20$ ) 的(a)莫拉克颱風, (b)凡那比颱風之系集預報路徑發散分析圖; SVs 經平移後實驗組 (虛線) 和未平移控制組 (實線) 的(c)莫拉克颱風, (d)凡那比颱風之系集路徑發散分析圖。

~0.6%，再放大 20 倍，會是原變數的 10~12%。可以容忍這樣的倍率，是因為從特徵值的大小可估算擾動成長的倍率，而對颱風範圍所求得的 SVs 特徵值要比全球範圍所計算的特徵值小一個數量級。本研究的原始 SVs 只有原變數的 0.5%，所以測試後，決定經過 NMC 法調整後再放大 20 倍進行運算。

未來最佳化的  $S_f$  值應該針對颱風環流的模式背景場誤差分析取得，傳統的 NMC 方法運用統計估計出全球大尺度的模式誤差量級，但是針對颱風的環流，模式解析度常常無法解析完全，生硬的使用 NMC 法不能使結果更好，所以應加上資料同化的分析校正，或是借鏡颱風渦旋植入的研究，進行擾動量級的估計。

## (2) 探討 SVs 分布是否為影響路徑發散的敏感區域：

原則上 SVs 是根據能量內積所求出的成長最佳擾動，其空間幾何分布有特定意義，能說明為何此種擾動能從基本環流取得能量成長，簡單說就是影響颱風路徑預報的敏感區域。

為驗證 SVs 的空間分布是否為影響路徑發散的敏感區域，實驗組設計以控制組(此控制組同前一小節的控制組)為基準，測試把 SVs 平移出原來的位址後，再加入初始場進行系集預報，與原本控制組的路徑發散度來進行比較。

實驗組設計平移 SVs 方式為：向東、向西、向南、向北移動 20 個網格點；以及向東北、東南、西北、西南移動 20 個網格點，總共是八個方位的平移測試。

圖 5c,d 分別為莫拉克與凡那比颱風系集預報的控制組(實線)和 SVs 經過平移後的實驗組(虛線)之路徑發散程度分析圖。莫拉克的 SVs 平移測試顯示(圖 5c)在預報的 30 小時之前，有部分作 SVs 平移的實驗組的路徑發散度大於控制組。到預報的 30 小時之後，控制組的發散度就顯然大於其它實驗組。

凡那比的 SVs 平移測試(圖 5d)顯示其控制組與實驗組之間路徑發散度的差異又更加明顯。在預報的 18 小時之前，控制組與實驗組的路徑發散度相當接近，部分實驗組的發散度還略為大於控制組。到預報的 18 小時之後，有作 SVs 平移的實驗組的路徑發散度皆明顯不如控制組。

以上結果說明了本研究所計算出 SVs 的空間分布是有意義的，與作 SVs 平移的實驗組相比，控制組在預報後期的路徑發散度最大，表示 SVs 作為影響颱風路徑預報的初始場敏感區域有一定

的可信度。

## (三) 平均路徑的預報校驗

同樣利用標準差的公式(3.1 式)去計算圖 5 所提全部系集預報實驗組的平均路徑與實際路徑的差異(改成  $X_i$  為平均路徑預報值， $\bar{X}$  為實際路徑， $N=1$ )，作為平均路徑誤差的校驗結果。鑒於淺水模式對颱風路徑的模擬能力有限，本小節所計算各實驗組的平均路徑誤差值僅為參考，只是單純想探討路徑發散度的大小是否對平均路徑的誤差有修正作用。

圖 6 為圖 5 所提全部系集預報實驗的平均路徑誤差分析圖，圖 6 的實驗組可與圖 5 作對照，實線為控制組，虛線為測試 SVs 的實驗組。誤差結果皆顯示即使不同實驗組之間的路徑發散度有差異(圖 5)，但平均路徑的誤差值都相當接近，第 48 小時的路徑誤差至少超過 200 公里以上。

這說明了系集路徑發散程度較好，甚至有包覆到實際路徑(圖 4a)，並不代表就有助於改進平均路徑的預報誤差。原因在於系集成員的路徑發散並非都傾向於實際路徑，莫拉克(圖 3a)或凡那比(圖 4a)的控制組都是很明顯的例子。此外，路徑誤差在模擬後期大幅上升的原因多半是模擬的颱風移速過快所造成。

要改進系集預報的平均誤差，未來可嘗試在人工植入颱風的過程中，針對颱風環流公式的參數進行調整，也就是對初始渦旋的結構進行擾動，考慮模式中颱風渦旋強度和大小的不確定性，期望能改善路徑預報的誤差。

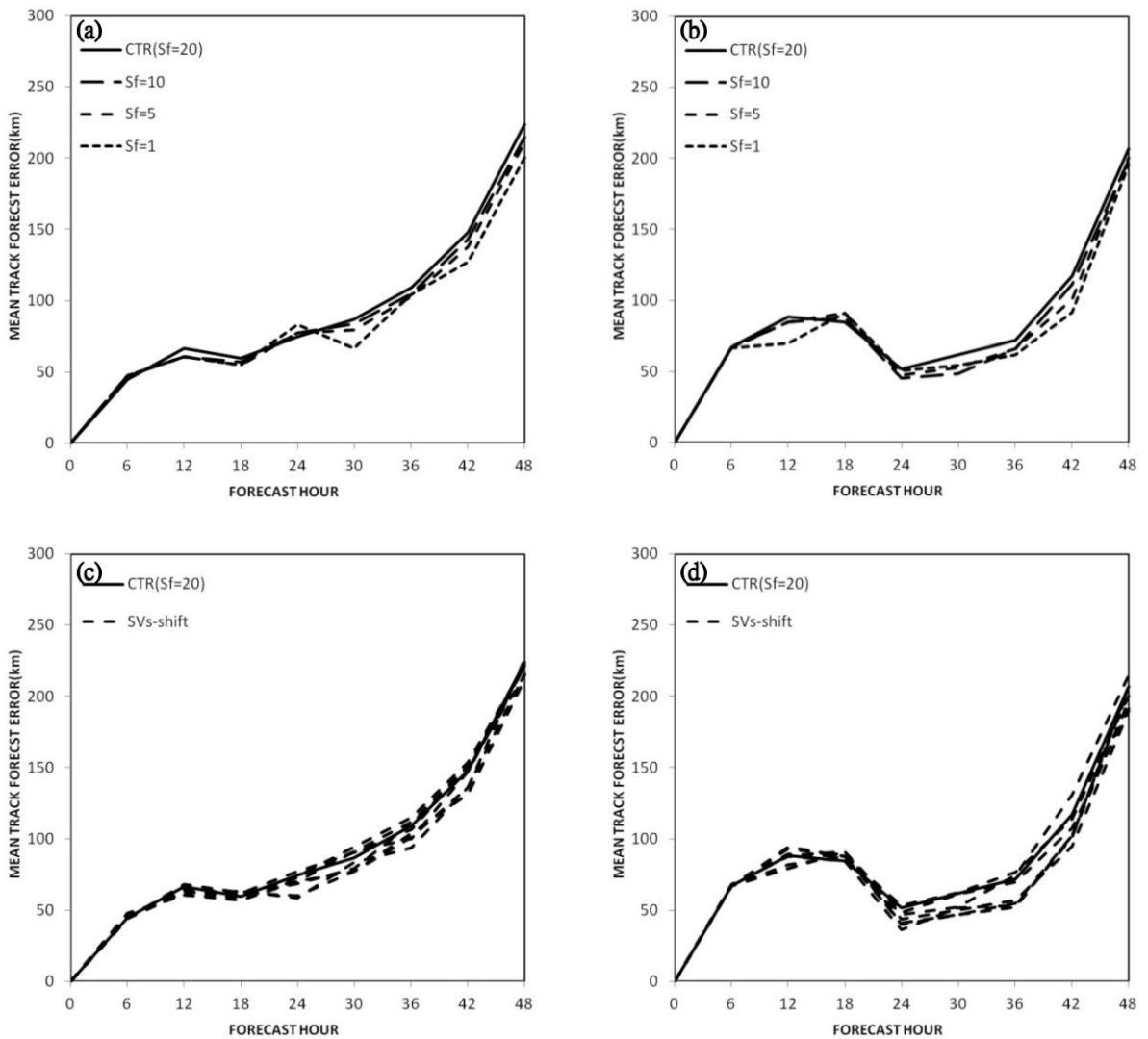


圖 6 (a)同圖 5a 的實驗組別，但為平均路徑的誤差分析圖，(b)同圖 5b 的實驗組別，但為平均路徑的誤差分析圖，(c)同圖 5c 的實驗組別，但為平均路徑的誤差分析圖，(d)同圖 5d 的實驗組別，但為平均路徑的誤差分析圖。

### 四、結論

本研究利用網格涵蓋全球範圍的單層淺水模式來模擬測試 SVs 對颱風路徑系集預報上的應用。原則上把 SVs 視為模式初始場的最佳擾動分布來進行系集颱風路徑預報的模擬，而且在模擬過程中把 SVs 當作淺水方程控制模式的強迫項作用，每 6 小時加入 SVs 至模式中，直到 24 小時

為止，期望能得到合理分散的路徑分布預報。

實驗選擇的颱風例子有莫拉克颱風(2009)，選取的個案時間為 2009 年 8 月 5 日 00z 至 8 月 5 日 18z，每隔 6 小時共四個個案的 48 小時路徑模擬，以及凡那比颱風(2010)，選取的個案時間為 2010 年 9 月 17 日 00z 至 9 月 17 日 18z，同樣為四個個案的路徑模擬。

系集預報實驗的分析顯示，加入 SVs 可使原始的單一預報路徑發散，其中凡那比的個案路徑甚至有呈現出明顯扇形發散的效果。然而不同個案的發散效果各有差異，亦即兩個不同颱風的初始基本場對於 SVs 擾動的反應不一樣。

莫拉克颱風的路徑發散度不夠，四個時間個案路徑的發散方向大多未包含到最佳路徑，平均路徑的預報有北偏或偏南的誤差。凡那比颱風的初始基本場對加入的 SVs 擾動有較大的反應，路徑發散的效果較好，其中有二個時間個案路徑分布的扇形範圍有包含到最佳路徑的方向。

SVs 對路徑發散的敏感度測試結果顯示，放大 SVs 的量級，皆有助於增加系集成員預報路徑的發散度，表示調整 SVs 的量級大小可以技術性追求一組合理分散的系集路徑預報。把 SVs 平移出原來的位址後，所得到的系集預報發散度，在預報的後期皆不如原來未平移 SVs 的控制實驗組，表示本研究所計算的 SVs 的空間分布是有意義的，作為影響颱風路徑預報的敏感區域有一定的可信度。

本研究的實驗測試過程可為未來全球模式的颱風路徑系集預報所用，同時 SVs 計算的敏感區可作為資料同化工作中的適應性觀測(adapting observation)如投落送(dropwind sound)等工作利用(Chou et al., 2011; Harnisch and Weissmann, 2010)，加強區域局部觀測。SVs 工具建置過程中的伴隨模式，亦可用於敏感度的測試工作(Wu et al., 2007; 2009)，診斷本局的全球模式對颱風的路徑預報。

## 致謝

非常感謝兩位審查者的意見，指出文章中許

多說明不清楚與錯誤之處，並提供許多值得參考的文獻。本文在國科會計畫 NSC99-2625-M-052-003-MY3 的部分經費下補助下完成，特致謝意。

## 參考文獻

- Barkmeijer, J., R. Buizza, T. N. Palmer, K. Puri, and J. F. Mahfouf, 2001: Tropical singular vectors computed with linearized diabatic physics. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **127**, 685-708.
- Buizza R., J. Tribbia, F. Molteni and T. Palmer, 1993: Computational of optimal unstable structures for a numerical weather prediction model. *Tellus*, **45A**, 388-407.
- and T. Palmer, 1995: The singular-vector structure of the atmospheric global circulation. *J. Atmos. Sci.*, **52**, 1434-1456.
- , P. L. Houtekamer, Z. Toth, G. Pellerin, M. Wei, and Y. Zhu, 2005: A comparison of the ECMWF, MSC, and NCEP global ensemble prediction system. *Mon. Wea. Rev.*, **133**, 1076-1097.
- Chan, C. L., and R. T. Williams, 1987: Analytical and Numerical Studies of the Beta-Effect in Tropical Cyclone Motion. Part I: Zero Mean Flow. *J. Atmos. Sci.*, **44**, 1257-1265.
- Chen, J.-H., M. S. Peng, C. A. Reynolds, and C.-C. Wu, 2009: Interpretation of tropical cyclone forecast sensitivity from the singular vector perspective. *J. Atmos. Sci.*, **66**, 3383-3400.
- Chen, S.-G., C.-C. Wu, J.-H. Chen, and K.-H. Chou, 2011: Validation and interpretation of

- adjoint-derived sensitivity steering vector as targeted observation guidance. *Mon. Wea. Rev.*, **139**, 1608–1625.
- Chou, K.-H., C.-C. Wu, P.-H. Lin, S. D. Aberson, M. Weissmann, F. Harnisch, and T. Nakazawa, 2011: The impact of dropwindsonde observations on typhoon track forecasts in DOTSTAR and T-PARC. *Mon. Wea. Rev.* **139**, 1728–1743.
- ECMWF, 2012: *IFS DOCUMENTATION – Cy37r2 Operational implementation 18 May 2011 Part 5: ensemble prediction system*. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, Shinfield Park, 25pp.
- Harnisch, F., and M. Weissmann, 2010: Sensitivity of typhoon forecasts to different subsets of targeted dropsonde observations. *Mon. Wea. Rev.*, **138**, 2664–2680.
- Hartmann, D. L., R. Buizza, T. N. Palmer, 1995: Singular Vectors: The effect of spatial scale on linear growth. *J. Atmos. Sci.*, **52**, 3885–3894.
- Kim, H. M., and B.-J. Jung, 2009: Singular vector structure and evolution of a recurving tropical cyclone. *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 505–524.
- Kim, H. M., S.-M. Kim, and B.-J. Jung, 2010: Real-Time Adaptive Observation Guidance Using Singular Vectors for Typhoon Jangmi (200815) in T-PARC 2008. *Weather and Forecasting.*, **26**, 634–649.
- Komori, T., R. Sakai, H. Yonehara, T. Kadowaki, K. Sato, T. Miyoshi, and M. Yamaguchi, 2010: Total energy singular vector guidance developed at JMA for T-PARC. *RSMC Tokyo-Typhoon Center Technical Review*, **12**, 13–27.
- Molteni, F., and T. N. Palmer, 1993: Predictability and finite-time instability of the northern winter circulation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **119**, 269–298.
- , R. Buizza, T. N. Palmer and T. Petroliagis, 1996: The ECMWF ensemble prediction system: methodology and validation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **122**, 73–119
- Parrish, David F., John C. Derber, 1992: The National Meteorological Center's Spectral Statistical- Interpolation Analysis System. *Mon. Wea. Rev.*, **120**, 1747–1763.
- Peng, M. S., and C. A. Reynolds, 2005: Double trouble for typhoon forecasters. *Geophys. Res. Lett.*, **32**.L02810, doi:10.1029/2004GL021680.
- , and C. A. Reynolds, 2006: Sensitivity of Tropical Cyclone Forecasts as Revealed by Singular Vectors. *J. Atmos. Sci.*, **63**, 2508–2528.
- Puri, K., J. Barkmeijer, T. N. Palmer, 2001: Ensemble prediction of tropical cyclones using targeted diabatic singular vectors. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **127**, 709–731.
- Reynolds, Carolyn A., Melinda S. Peng, Jan-Huey Chen, 2009: Recurring Tropical Cyclones:

Singular Vector Sensitivity and Downstream Impacts. *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 1320–1337.

Wu, C.-C., J.-H. Chen, P.-H. Lin, and K.-H. Chou, 2007: Targeted observations of tropical cyclone movement based on the adjoint-derived sensitivity steering vector. *J. Atmos. Sci.*, **64**, 2611–2626.

-----, S.-G. Chen, J.-H. Chen, K.-H. Chou, and P.-H. Lin, 2009: Interaction of Typhoon Shanshan (2006) with the

mid-latitude trough from both adjoint-derived sensitivity steering vector and potential vorticity perspectives. *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 852–862.

Yamaguchi, M. and T. Komori, 2009: Outline of the Typhoon Ensemble Prediction System at the Japan Meteorological Agency. *RSMC Tokyo-Typhoon Center Technical Review*, **11**, 14-24.

# **The Application of Singular Vectors in the Typhoon Track Ensemble Prediction of the Global Shallow Water Spectral Model**

**Yong-Sin Lai<sup>1</sup>, John Chien-Han Tseng<sup>1</sup>, Jen-Her Chen<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>**Research and Development Center, Central Weather Bureau**

<sup>2</sup>**Meteorological Information Center, Central Weather Bureau**

(manuscript received 17 February 2014 ; in final form 11 June 2014)

## **ABSTRACT**

The typhoon track ensemble prediction of the shallow water model is still beneficial in operation because the cost is economic and the result could be the minimal criterion of forecast accuracy. In this study, we adopt the global shallow water spectral model which is simplified from the global spectral model of Central Weather Bureau, Taiwan, that is, this shallow water model does not need to deal with horizontal boundary and the equations are consistent with the global spectral model. This global shallow water spectral model can be not only used in basic dynamic researches but the testing platform of the global forecast system. The singular vector method is one of the procedures of ensemble prediction system in European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. The spirit of the singular vectors is to get the basic flow initial most unstable perturbations which modify the basic flow least (around %2-%3) and get the most divergent evolution in the specific period of time after. The singular vectors of Central Weather Bureau are calculated from T42L40 simplified global spectral model with simple boundary layer process and simple physical scheme. The singular vectors through vertical interpolation can be taken several specific vertical layers average as the perturbations in the shallow water model.

The typhoon Morakot and Fanapi was chosen for this study. The singular vectors are regarded as the initial perturbations and the forcings in every 6 hours within the beginning 24 hours time integration. In these two cases, the singular vector ensemble predictions successfully spread the typhoon tracks, and the ensemble set of Fanapi can cover the typhoon best track. Moreover, the different space positions of singular vectors are tested. The singular vector space areas are the most sensitive perturbation positions, so when we move the

singular vectors out of their original areas, the track divergences are fewer than the original areas track spreads. That means somehow the singular vectors pointing the sensitive areas that we should pay more attention for typhoon track ensemble prediction.

The results of this study can be extended to global ensemble prediction system. At the same time, the singular vectors sensitive area information points out which local area observations should be enhanced or be worth improved. It can be auxiliary help for the adaptive observations like the typhoon dropsound experiment in data assimilation work.

**Key Words: Singular vectors, The best track, Adapting observation, Dropwindsound**