

# 中央氣象局全球模式系集颱風路徑預報系統（一）

曾建翰<sup>1</sup> 陳登舜<sup>1</sup> 陳建河<sup>2</sup> 楊舒芝<sup>3</sup> 賴永鑫<sup>1</sup>  
中央氣象局氣象科技研究中心<sup>1</sup>  
中央氣象局氣象資訊中心<sup>2</sup>  
中央大學大氣科學系<sup>3</sup>

## 摘要

建立於全球模式的系集系統以奇異向量為初始擾動，透過微小差異的初始場形成系集分歧顯著的預報。以此基礎，針對颱風環流區域和東亞地區颱風背景場環流區域的奇異向量用來合成初始擾動，進行颱風路徑系集預報。針對颱風所求算的奇異向量尺度較大尺度環流的奇異向量小，直接加回全球模式中作用不明顯，系集分歧不夠。鑑於奇異向量為指出未來擾動成找最快的梯度方向，適當的放大奇異向量尺度將會得到更佳的结果。放大倍率的方法採用學界和作業中心用以估算誤差或擾動量級的NMC法，將奇異向量尺度放大，以產生足夠的系集颱風路徑分佈。本文挑選2013年所發生的三個颱風進行個案分析，分別是Soulik颱風(2013070900-2013071300)，Kong-Rey颱風(2013082700-2013083000)，和Francisco颱風(2013101700-2013102300)。三個個案的系集路徑都有涵蓋到真實的颱風路徑，以對Soulik的路徑掌握較佳，對Francisco的預報較差。分析系集路徑時，我們嘗試利用碎形維度與統計分佈量度系集的分歧特性，以及群落(cluster)分佈。

關鍵字：奇異向量、碎形維度、群落

## 一、前言

以往多由區域型的模式對颱風路徑做預報，但隨著全球模式解析度的提高，各大作業中心的全球模式颱風路徑預報有非常顯著的進步，而全球模式的颱風路徑預報能提供 5-7 天較區域模式更長時間的預報供預報作業單位參考，以因應防災的行動佈屬。其預報的精確度可與區域模式比肩，這當中系集預報扮演重要角色 (Puri *et al.*, 2001; Peng and Reynolds, 2006, Liu *et al.*, 2006, Nakagawa, 2009; Yamaguchi and Komori, 2009; Hamil, 2011a, b)。氣象局全球模式近年來也致力於颱風路徑的預報，透過植入渦旋 (bogus) 和重置 (relocation)，或是相應物理參數化的改進，掌握颱風的路徑演化。發展過程中瞭解到單一預報的侷限，所以同時發展系集預報。另一方面，從一些先進的研究中得知，同化系統的改進也有助於颱風路徑預報 (Wu *et al.*, 2007, 2009)，而同化加上系集預報的混合 (hybrid) 方法，將大幅提昇模式預報準確率。系集預報的結果不僅提供機率或群落的結果，其誤差分佈對同化系統也有貢獻。

本文採用奇異向量(singular vectors, 簡稱 SVs)作為系集擾動成員，奇異向量為歐洲中心所採行的系集預報方法之一(Molteni *et al.*, 1996)，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。

奇異向量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。本文的奇異向量由中央氣象局 T42L40 簡化版的全球波譜模式計算而得，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。所得的奇異向量增加水平解析度後加回中央氣象局目前作業的 T319L40 全球模式中進行系集預報。針對颱風所求算的

奇異向量尺度較大尺度環流的奇異向量小，直接加回全球模式中作用不明顯，系集分歧不夠。鑑於奇異向量為指出未來擾動成找最快的梯度方向，適當的放大奇異向量尺度將會得到更佳的结果。放大倍率的方法採用學界和作業中心用以估算誤差或擾動量級的 NMC 法，將奇異向量尺度放大，以產生足夠的系集颱風路徑分佈。本文挑選 2013 年所發生的三個颱風進行個案分析，針對 Soulik 颱風(颱風期間：2013070900-2013071300)，Kong-Rey 颱風(颱風期間：2013082700-2013083000)，和 Francisco 颱風(颱風期間：2013101700-2013102300)進行路徑預報分析。

## 二、研究方法

假設  $\mathbf{x}' = (u', v', T', p')$  為模式擾動變數組成的行向量，定義一個終端時刻擾動  $\mathbf{x}'(t_f)$  的能量，內積形式寫成：

$$\|\mathbf{x}'(t_f)\|^2 = \langle \mathbf{x}'(t_f), \mathbf{E}\mathbf{x}'(t_f) \rangle \quad (2.1)$$

其中  $\mathbf{E}$  為權重算子，詳細的定義是：

$$\langle \mathbf{x}'(t_f), \mathbf{E}\mathbf{x}'(t_f) \rangle = \frac{1}{D} \int_D \int_0^1 \frac{1}{2} (u'^2 + v'^2) + \frac{1}{2} \frac{C_p}{T} T'^2 + \frac{1}{2} R_a \bar{T} \frac{p_s'^2}{\bar{p}_s} d\sigma dD$$

其中  $D$  是選取的水平範圍， $\mathbf{E}$  的定義是：

$$\mathbf{E} = \frac{1}{2} \text{diag}(\sigma, \dots, \Delta\sigma, \frac{C_p}{T} \Delta\sigma, \frac{R_a \bar{T}}{\bar{p}_s} \Delta\sigma, \dots)$$

假設  $\mathbf{L}$  為正切線性模式算子，(2.1)式可改為：

$$\langle \mathbf{x}'(t_f), \mathbf{E}\mathbf{x}'(t_f) \rangle = \langle \mathbf{L}\mathbf{x}'(t_0), \mathbf{E}\mathbf{L}\mathbf{x}'(t_0) \rangle \quad (2.2)$$

利用線性代數中的伴隨算子恆等式，再把(2.2)式改寫成：

$$\langle \mathbf{L}^* \mathbf{E} \mathbf{L} \mathbf{x}'(t_0), \mathbf{x}'(t_0) \rangle = \langle \mathbf{E}^{-1} \mathbf{L}^* \mathbf{E} \mathbf{L} \mathbf{x}'(t_0), \mathbf{E}\mathbf{x}'(t_0) \rangle \quad (2.3)$$

$\mathbf{L}^*$  即為伴隨模式算子，定義  $\mathbf{K} = \mathbf{E}^{-1} \mathbf{L}^* \mathbf{E} \mathbf{L}$ ，把(2.1)式與(2.3)式連接可得：

$$\begin{aligned} \|\mathbf{x}'(t_f)\|^2 &= \langle \mathbf{x}'(t_f), \mathbf{E}\mathbf{x}'(t_f) \rangle = \langle \mathbf{K}\mathbf{x}'(t_0), \mathbf{E}\mathbf{x}'(t_0) \rangle \\ &= \sigma^2 \langle \mathbf{x}'(t_0), \mathbf{E}\mathbf{x}'(t_0) \rangle \end{aligned} \quad (2.6)$$

求算  $\mathbf{K}$  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，奇異向量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，但是一開始奇異向量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，奇異向量的系集分歧會比 EnKF 稍大一些(Buizza *et al.*, 2005)，然而，有些動力量上長得很快快的擾動，有時的預報是非常不理想的，似乎可以剔除。當然，奇異向量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。

奇異向量的計算取自中央氣象局 T42L40 簡化版的全球波譜模式，利用(2.1)式，選取能量內積的目標區域範圍，約在颱風中心經度緯度  $15^\circ \times 10^\circ$  範圍，相仿於 Yamaguchi and Komori (2009)，Peng and Reynolds(2005)，Chen *et al.* (2009)，Chen *et al.* (2011)等文章所用的範圍。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  $15^\circ - 020^\circ$  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，這也說明為何日本氣象廳採用巢狀的兩層範圍計算 SVs，本文大尺度的範圍定義是  $20^\circ\text{N} - 60^\circ\text{N}, 100^\circ\text{E} - 180^\circ\text{E}$ ，捉住部分副高與主槽的位置(Yamaguchi and Komori, 2009)。在第三節中將討論針對颱風範圍的路徑系集預報和兩個巢狀範圍路徑預報的比較。奇異向量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計算結果的前 20 個，並未再線性組合過。

根據颱風範圍定義所求算的奇異向量的尺度約在原變數的 1-2% 或是更小(從所求的特徵值大小約為 4-6 可知擾動成長的速率)，直接帶入模式作用不大。我們由 NMC 法，亦即用全球模式的 24 小時預報減去 12 小時預報的誤差，取其向量大小作為奇異向量的量級，此時擾動會在原變數 0.5-0.6%，經測試調整再放大 10-15 倍，會是原變數的 10-12%。奇異向量的量級大小與系集發散的程度請見圖 1，可以發現當調整為 NMC 法的 10-15 倍後，取得颱風路徑分歧較夠的系集結果。

## 三、個案討論

圖 2 是上述三個個案的颱風路徑系集預報，採用：(1) 颱風中心環流附近  $15^\circ \times 10^\circ$  範圍計算的奇異向量經 NMC 法放大後，再放大 15 倍；(2) 東亞地區計算的奇異向量經 NMC 法放大後，再放大 5 倍。將二者的奇異向量直接線性相加組成初始擾動，加回 T319L40 的控制組模式中。圖中的黑線是颱風最佳路徑，紅線是系集成員的預報路徑，綠線是系集平均路徑，藍線是原模式控制組路徑，圖 2 由上而下分別是 Soulik、Kong-Rey、和 Francisco 的系集預報

結果，就系集颱風路徑預報的分佈來討論，可以發現此三個個案的系集颱風路徑皆圍繞著原模式控制組(沒有加入擾動)實驗路徑發散，這也表示由奇異向量所產製出的初始擾動具有一定的合理性，並且也具有合理的颱風路徑歧異度。

另外，這樣的結果也指出了原模式控制組的重要性。一般來說，具有良好預報能力的系集預報系統，必須倚賴一個具有一定預報能力的全球預報模式。就 Francisco(2013) 此個案原模式控制組的預報路徑就有較大的誤差，雖然有部分系集成員與最佳路徑極為相似，但系集平均的結果仍然有較大的預報路徑誤差。

大致上在此三個颱風個案中，系集成員的預報路徑皆涵蓋了最佳路徑，這個結果對於增加了此系集颱風路徑預報系統的可信賴度，也對未來上線作業的可能性大大加分。此外系集平均的預報路徑與原模式控制組的預報路徑大致相似，但相較於原模式控制組，系集平均預報誤差仍有些微減少。

主要影響系集預報系統的因子有：(1)原模式控制組初始場、(2)初始擾動方法和(3)預報模式。因此，針對 Soulik(2013)的個案，分別置換不同的預報模式與初始擾動方法，發現其系集颱風路徑變化甚大，若是未來能擁有加入不同初始擾動方法和預報模式的系集颱風路徑預報系統，則可減少採樣誤差。由碎形維度分佈圖(Tseng, *et al.*, 2010)大致可看出系集特性。分佈圖中的一點即代表一條颱風路徑，兩個愈接近的點表示颱風路徑愈相似。以 Soulik 颱風為例，圖 3a 中是奇異向量的碎形維度分佈圖，而圖 3b 則是再加入新物理過程 20 組和 EnKF 的 20 組，總計 60 組系集之碎形維度分佈。理想上，碎形維度分佈呈橢圓形而觀測值位居中心，20 組的系集偏少，但是將觀測包含於中心，這是一種在作業經濟考量下能善加利用的系集分佈。當然 60 組的系集會有更佳的橢圓分佈，可用來估算同化系統中的背景場誤差。

## 四、討論與結論

從目前選取的個案結果來看，對颱風路徑的系集分歧有一定的掌握，研究期間總共計算了 2013 年 8 個個案，分別是 Soulik、Jebi、Pewa、Kong-Rey、Trami、Fitow、Franciso、Lekma。在考量氣象局對 Soulik 和 Kong-Rey 發佈過陸上颱風警報，Franciso 的個案則是有兩個系集成員非常接近觀測路徑，現階段研究特別針對這 3 個個案。系集預報原本就是憑藉控制組預報有一定的掌握前提下，做轉效的分歧或是機率分佈的預報。就系集颱風路徑預報的分佈來討論，可以發現此三個個案的系集颱風路徑皆圍繞著原模式控制組(沒有加入擾動)實驗路徑發散，這也表示由 SV 所產製出的初始擾動具有一定的合理性，並且也具有合理的颱風路徑歧異度，這說明系集預報不是用來只看少數幾個成員預報特別接近觀測的結果，而是相信

自己模式的決定性預報下，最有可能的預報機率分佈。在測試這些個案時，氣象局的全球模式採用新的積雲參數化過程、新的邊界層過程和新的土壤模式，但是對 Soulik 和 Hagibis 兩個案而言，新的物理過程造成颱風路徑偏北，並且移速過快，整體的系集成員當然也是偏北、偏快。在下一階段會詳細測試瞭解新物理過程問題所在。

從 Soulik 的系集碎形維度的分佈來看，奇異向量所取的系集成員有代表性，雖然離理想分佈狀況有差距，但是在作業成本考量下，取用前 20 個奇異向量的系集成員所得的路徑預報並不差，大致能掌握機率分佈，而此處值得深入研究，將可提供背景場誤差的分析供本局 GSI-hybrid 同化系統使用。

目前正在進行分析初始擾動的結構以及演化過程，擾動演化與大尺度背景場息息相關，如果背景場能有效提供擾動能量，按 SV 的學理，擾動應該能持續成長數天，應該能對 5 天的路徑預報產生影響。所以，思考的重點會再次回到如何決定求算 SV 能量內積的範圍定義。是加入副高範圍重要，還是加入北方槽線作用重要，或是赤道的季風槽、季風波動也很重要。換言之，動力的分析與詮釋是下一階段的目標。相同初始時間的颱風路徑系集結果可以進一步分析，分析路徑分歧統計特性，或是路徑群組分類分析，製作成機率圖形，未來供預報單位使用。

## 五、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. Petroligis, 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.
- Tseng, J. C.-H., H.-K. Pao, and C. Faloutsos, 2012: The Typhoon Track Classification in El Niño/La Niña Events. *Conference on Weather Analysis and Forecasting*, Taipei, Taiwan, 307–312.
- 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.

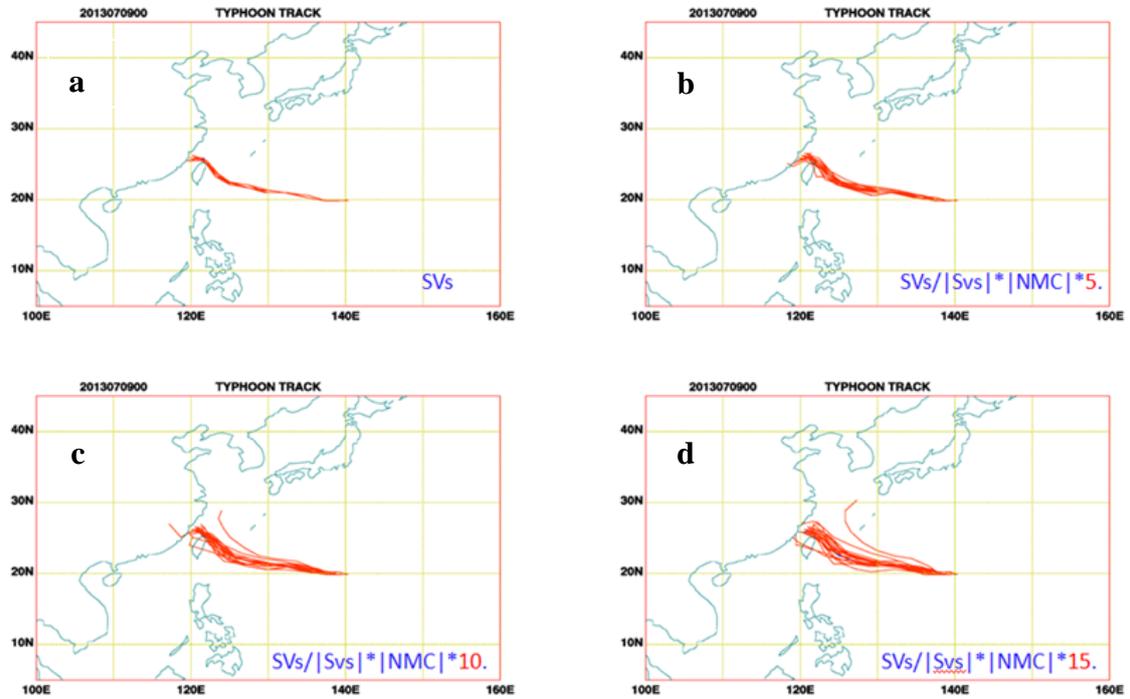


圖 1：不同 SV 尺度所形成的系集對颱風路徑的影響。(a)所求的 SV 未經任何處理直接加入全球模式中；(b)將 SV 經過 NMC 法調整後再放大 5 倍的系集；(c) 將 SV 經過 NMC 法調整後再放大 10 倍的系集；(d) 將 SV 經過 NMC 法調整後再放大 10 倍的系集。

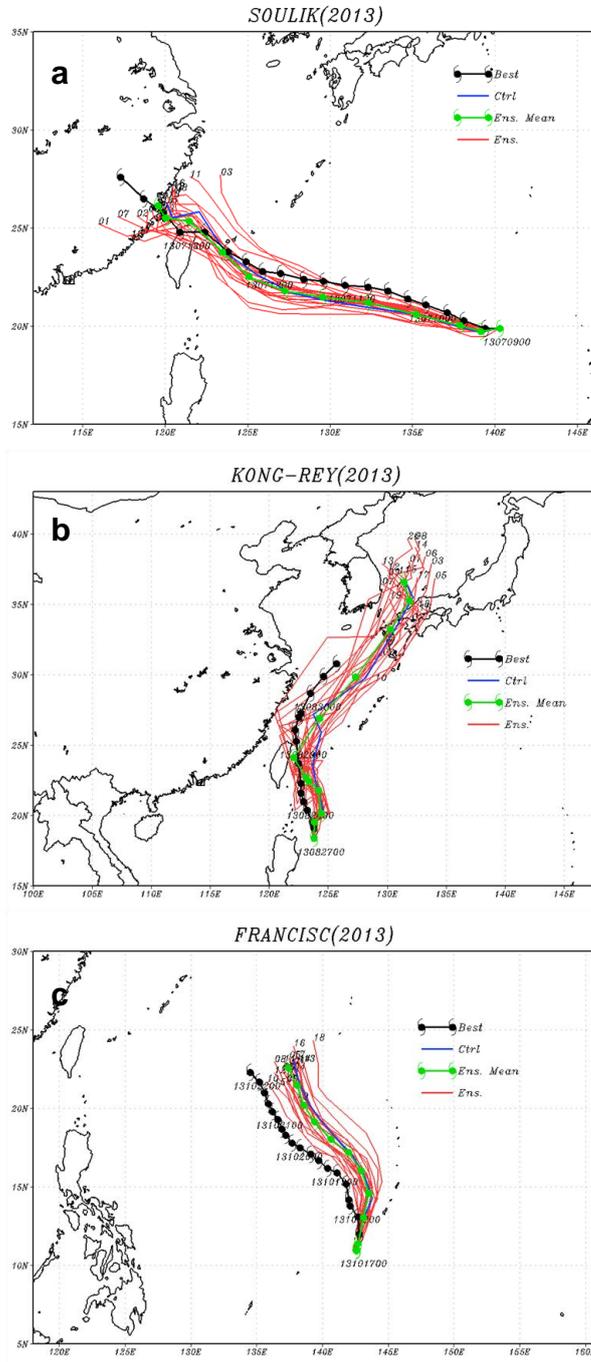


圖2：颱風個案的系集路徑。(a)Soulik(2013)颱風；(b)Kong-Rey(2013)颱風；(c)Francisco(2013)颱風。紅色線是系集成員的預報結果，綠色線是系集平均，藍色線是原模式控制組路徑，黑色線是颱風觀測路徑。

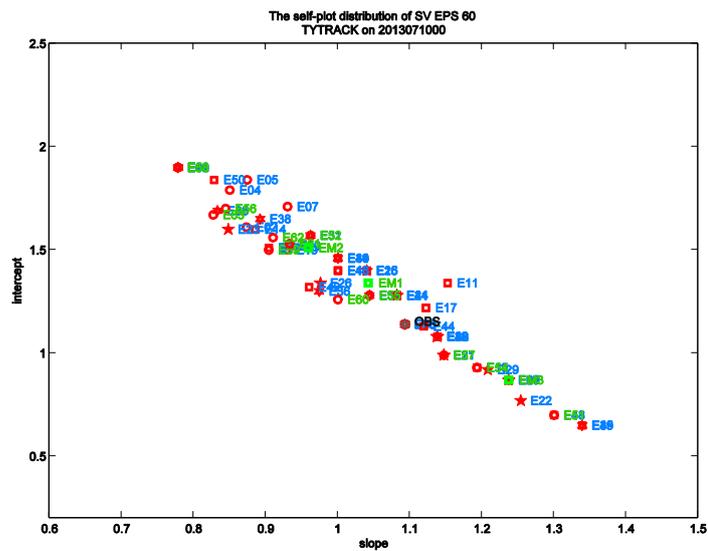
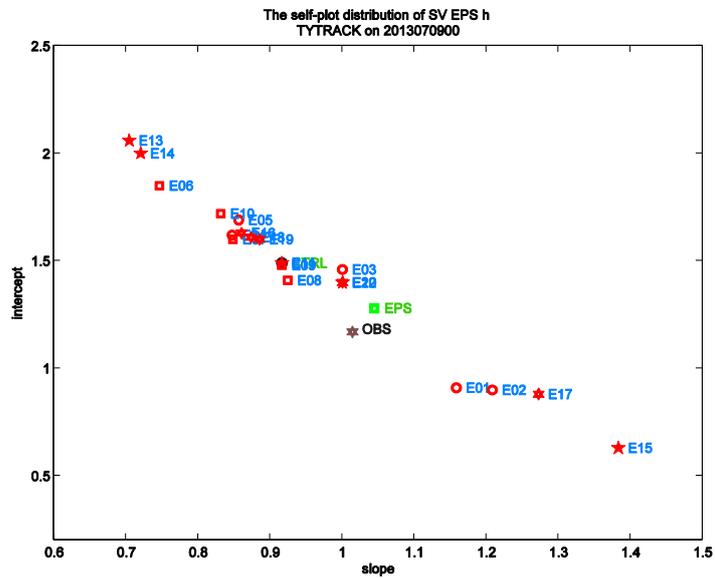


圖3：Soulik颱風路徑預報碎形維度分佈圖，每一個點代表一條颱風路徑，愈接近的點表示颱風路徑愈相似。(a)奇異向量的20組系集；(b)奇異向量、新物理過程和EnKF的60組系集。