

中央氣象局全球模式系集颱風路徑預報系統（二）

陳登舜^{1,3} 曾建翰¹ 陳建河² 汪鳳如¹ 楊舒芝³ 楊明仁⁴ 陳得松¹ 黃康寧¹ 鄭浚騰¹

中央氣象局氣象科技研究中心¹

中央氣象局氣象資訊中心²

國立中央大學大氣科學系³

國立臺灣大學大氣科學系⁴

摘要

颱風路徑系集預報是目前全球氣象作業中心積極投入的工作，一方面藉由系集成員推估颱風可能進行的路徑(系集平均路徑)，盡可能減少決定性預報(determining forecasts)的誤差; 另一方面提供機率預報(probability forecasts)，提供預報員與民眾瞭解預報的不確定性。本研究的整體目標將著重在於，建置中央氣象局全球模式系集颱風路徑預報系統(Central Weather Bureau Global ensemble predict system for Typhoon-track, CWB GET)之系統原型，此系集預報系統是利用中央氣象局現有的奇異向量(SVs)作為系集初始擾動的方法，利用中央氣象局全球預報模式(T320L40)將此系集初始場透過作時間積分，將可得出一組(20 個系集成員)系集預報。由於本研究著重於颱風路徑的系集預報表現，所以颱風中心定位方法便扮演了其中一個很關鍵的角色，本研究與中央氣象局颱風小組合作，汲取相關颱風中心定位的經驗，將其改進並測試，同時測試數個個案，分析、統計評估此系集颱風路徑預報系統的預報表現。本研究分析評估颱風路徑系集預報能力，著重在於路徑誤差與分歧度。

關鍵詞：奇異向量、颱風路徑、系集預報

一、前言

西北太平洋地區平均每年大約有 17 個颱風生成，而臺灣所在的位置又在颱風經常行徑路徑的熱區中，平均每年會有三到四個颱風侵襲臺灣，造成風災、水災與海水倒灌等災害，造成生命與財產的極大損失，所以颱風路徑的預報是一個迫切與重要的工作。

颱風路徑系集預報是目前全球氣象作業中心積極投入的工作，一方面藉由系集成員推估颱風可能進行的路徑(系集平均路徑)，盡可能減少決定性預報(determining forecasts) 的誤差; 另一方面提供機率預報(probability forecasts)，提供預報員與一般民眾瞭解預報的不確定性。

目前系集擾動方法主要分為兩種，1)物理參數化擾動; 2)初始場擾動。物理參數化法是使用一致的初

始場，而其主要是使用模式中不同的物理參數化法，以提供模式系集物理擾動量，進而影響其他模式動力變數(李與洪，100); 初始場擾動法為擾動初始場以產生一組系集成員，而目前各國作業單位主要使用的初始擾動的方法，大致上有系集卡爾曼濾波器(Ensemble Kalman Filter, 文後稱 EnKF)和奇異向量(singular vectors, 文後稱 SV)。

本研究主要是在於建立以中央氣象局全球預報模式為主體的系集預報系統，並針對颱風路徑做預報表現的探討，此系統是使用不同初始擾動的系集預報系統，而所用的初始擾動為奇異向量方法，未來則可能考慮使用中央氣象局系集資料同化系統(CWB Ensemble Data Assimilation system)所產製的系集分析場。因考量颱風為中尺度(<綜觀尺度)天氣系統，為對颱風路徑有更加的掌握，所採用的系集預報模式解析度與氣象局目前作業的 T319L40 一致。SV 的計算主要是產生初始擾動，再加回模式後期待能有最大的

分歧，而此種擾動的尺度一般而言低解析度即可達成（ECMWF, 2012; Peng and Renolds, 2009; Yonehara, 2010）。另一方面，SV 的計算相當耗時，所以採行的解析度是 T42L40。以歐洲中心為例(ECMWF, 2010)，所用的 SV 模式解析度也只有 T42L62，而日本 JMA 為 T63L40（Yonehara, 2010）。

本研究主要針對 2013 年 6 個侵襲台灣的颱風個案：蘇力(soulik)、西馬隆(Cimaron)、潭美(Trami)、康芮(Kong-rey)、天兔(Usagi)、菲特(Fitow)；同時也對今年 2014 生成的颱風也做了相關測試。奇異向量的計算仿照 JMA 的設計 (Nakagawa, 2009; Yamaguchi and Komori, 2009)，除針對颱風中心環流附近 $15^{\circ} \times 10^{\circ}$ 的範圍外，亦考慮整個東亞範圍(詳細作法請見第二節)。建置系統的同時，氣象局全球模式正在更新新一代物理參數化的演算，於計畫前半執行期間，挑選系集預測最佳的 Soulik 個案做不同物理參數化演算的測試。

二、 研究工具

中央氣象局目前已有 T42L40 的奇異向量求解工具，並應用於淺水模式的颱風路徑預報 (賴等，2014)。本研究延續其方法，將 SV 所算的初始擾動加入作業的全球模式，建置全球模式為主的颱風路徑系集預報系統。SV 的計算根據 48 小時後的乾空氣全能量(total energy)做計算，這是因為氣象局水氣運算的伴隨模式並不完整，而且水氣的伴隨模式計算耗時，於現階段暫不考慮。全能量的訂義是：

$$\langle \mathbf{x}'(t_f), \mathbf{E}\mathbf{x}'(t_f) \rangle = \frac{1}{D} \int_D \int_1^0 \frac{1}{2} (u'^2 + v'^2) + \frac{1}{2} \frac{C_p}{T} T'^2 + \frac{1}{2} R_a \bar{T} \frac{P_s'^2}{\bar{P}_s^2} d\sigma dD$$

為了計算颱風路徑系集，SV 的選取範圍必須涵蓋颱風環流。所取範圍參照 JMA 的 Yonehara (2010)、Peng and Renolds (2005, 2006)和 Puri et al. (2001)等所定義，大約在以颱風中心 $15^{\circ} \times 10^{\circ}$ 的範圍。太大或太小的範圍對有些颱風個案，系集路徑發散不明顯。當然，有些個案(如 Kong-Rey)對較大的範圍的 SV 計算，會對路徑會有較佳的分歧影響，但是為考量作業一致性，不採用特意選取的範圍。本研究

另外採用較大範圍的 SV，根據日本 JMA 學者的研究 (Yamaguchi and Komori, 2009; Yonehara, 2010)，計算範圍大小為 $20^{\circ}\text{N} \sim 60^{\circ}\text{N}$ ； $100^{\circ}\text{E} \sim 180^{\circ}\text{E}$ ，調整東亞主槽附近的大尺度環流場。簡言之，將 SV 對不同颱風區域與東亞大尺度範圍計算二次，並將二者 SV 線性相加組合，加入全球模式中。

根據颱風範圍定義所求算的 SV 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，放大 SV 後，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%。SV 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。

誠如一些研究指出 (Chan and Gray, 1982)，颱風的路徑也受到大尺度駛流場影響。JMA 的颱風系集預報定義一個東亞地區的範圍，用來計算東亞主槽，或是部分太平洋副高的區域 (Yamaguchi and Komori, 2009; Yonehara, 2010)。經過東亞地區範圍定義而求算的 SV，我們用 NMC 法調整後再放大 5 倍取用，最終所得的 SV 組成的初始擾動會是這兩種範圍所算的 SV 線性組合。以數學形式表示如：

$$TY_perturb = SV_{TY} / |SV_{TY}| \times |NMC| \times TY_factor$$

$$EA_perturb = SV_{EA} / |SV_{EA}| \times |NMC| \times EA_factor$$

$$perturb = TY_perturb + EA_perturb$$

此處，TY 表颱風範圍定義所算的 SV，EA 表東亞地區範圍所算的 SV，而 TY_factor=10 或 15，EA_factor=5。

三、 個案探討

目前已經收集完成 2013 年所有的颱風個案。圖 2 為蘇力(Soulik,2013)與麥特姆(Matmo,2014)颱風路徑系集預報，採用 TY_factor=15，EA_factor=5 的參數計算(目標區域請參考圖 1)。圖 2 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 由上為 Soulik(2013)；下為 Matmo(2014)的預報結果，就系集颱風路徑預報的分佈來討論，可以發現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。

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。大致上在此四個颱風個案中，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(圖 3)，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(圖 3d)，則可減少採樣誤差。

未來下半年度會針對 2013 年颱風侵台颱風(表 2)做個案測試，以便對於此系統做更多方面的了解。另外會建置分析診斷工具作為分析、評估此系統未來上線作業的可能性。

四、 結論

本研究我們確立了 SV 經 NMC 法放大 10-15 倍，並加入東亞範圍的 SV 以線性組合方式加入全球模式的系集預報颱風路徑原型。因為 SV 為彼此正交的模組，颱風路徑系集會以控制組預報為中心向兩側散開，當然，其系集平均不會等於控制組路徑，只是多數系集成員集中於控制組路徑一側的偏頗情形。建置系集模式時，考量同時可能有雙颱或是三颱的發生，於建立模組時，可同時最多計算 4 個颱風環流範

圍的 SV，供未來作業需要。東亞大尺度範圍的計算參照 JMA 的方式進行，未來會考量加入一部份副高的範圍，或是整個低緯度 $\pm 5^\circ$ 的範圍的計算 (ECMWF, 2012)。

計算 SV 時，因為需要 tangent 模式與 adjoint 模式遞回運算非常耗時，原本的計算約需 40 分鐘至 1 小時完成。本計畫執行初期，在研究人員與氣象局人員和日本 Fujitsu 電腦公司工程師的合作下，將計算時間縮短至 20 分鐘，使得後續颱風環流範圍與東亞範圍的 SV 計算更有效率執行。

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，總計計算了 2013 年 8 個個案，分別是 Soulik、Jebi、Pewa、Kong-Rey、Trami、Fitow、Franciso、Lekima。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，我們於現階段研究特別針對這 3 個個案。所做的個案中以 Trami 和 Fitow 的系集路徑預報最差(未示)，推估原因是因為這兩個颱風環流不強，導引氣流較複雜，氣象局全球模式的控制組預報原本就已經相當不好，系集預報原本就是憑藉控制組預報有一定的掌握前提下，做較好的分歧或是機率分佈的預報。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(未示)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。在下一階段會與氣象局模式參數化人員研究、並進行測試瞭解問題所在。

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。中央氣象局作業的 GSI-hybrid 系統中有 EnKF 的系集，對颱風路徑系集亦有正面貢獻，其擾動演化過程

也可與 SV 過程相印證。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

賴永鑫、曾建翰、陳建河，2014: 奇異向量在全球波譜淺水模式颱風路徑系集預報的應用。大氣科學，已接受。

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, J. C. L. and W. M. Gray, 1982: Tropical cyclone movement and surrounding flow relationships. *Monthly Weather Review*, 100, 1354-1374 .

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.

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.

單位使用。

五、 參考資料

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.

Houtekamer, P. L., and H. L. Mitchell, 1998: Data assimilation using an ensemble Kalman filter technique. *Mon. Wea. Rev.*, 126, 796 – 811.

Kim, H. M., and B.-J. Jung, 2009: Singular vector structure and evolution of a recurving tropical cyclone. *Mon. Wea. Rev.*, 137, 505 – 524.

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.

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.

Yonehara, H., 2010: Current JMA ensemble-based tools for tropical cyclone forecasters. HFIP-THORPEX Ensemble Product Development Workshop. NCAR, Boulder, CO, US.

表一 中央氣象局全球模式系集颱風路徑預報系統

CWB GFS EPS for Typhoon track (GET)			
resolution	deterministic model		T319L40
	ensemble		T319L40
initial perturbation, singular vector	global		T42L40
	nested typhoon domain	east Asia	20°N-60°N, 100°E-180°E
		typhoon	15° × 10°
optimization time	48 hrs		
ensemble size	20		
forecast length	5 days		

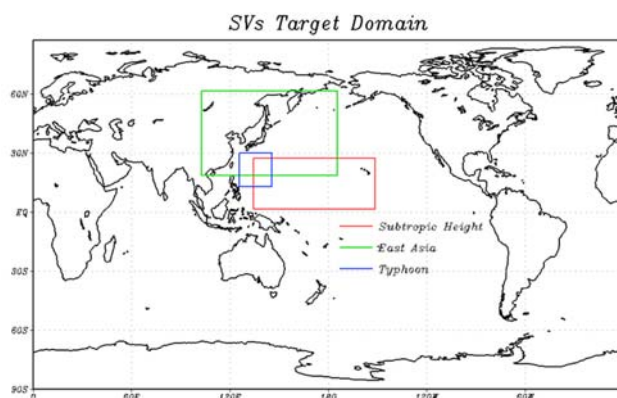


圖 1：SV 目標區域範圍示意圖。(a)藍色為颱風區域 (TY)；(b)綠色為東亞地區(EA)；(c)紅色為副熱帶高壓地區(ST)。

表二 2013 年侵襲台灣颱風列表

編號	中文名稱	英文名稱	警報期間	近臺強度	最低氣壓 (hPa)	最大風速 (m/s)	半徑 (km)	七級風暴風半徑 (km)	十級風暴風半徑 (km)
201323	菲特	<u>FITOW</u>	2013/10/4 2013/10/7	中度	960	38	250	80	
201319	天兔	<u>USAGI</u>	2013/9/19 2013/9/22	強烈	910	55	280	120	
201315	康芮	<u>KONG-REY</u>	2013/8/27 2013/8/29	輕度	985	25	120	---	
201312	潭美	<u>TRAMI</u>	2013/8/20 2013/8/22	輕度	970	30	180	50	
201308	西馬隆	<u>CIMARON</u>	2013/7/17 2013/7/18	輕度	998	18	100	---	
201307	蘇力	<u>SOULIK</u>	2013/7/11 2013/7/13	強烈	925	51	280	100	

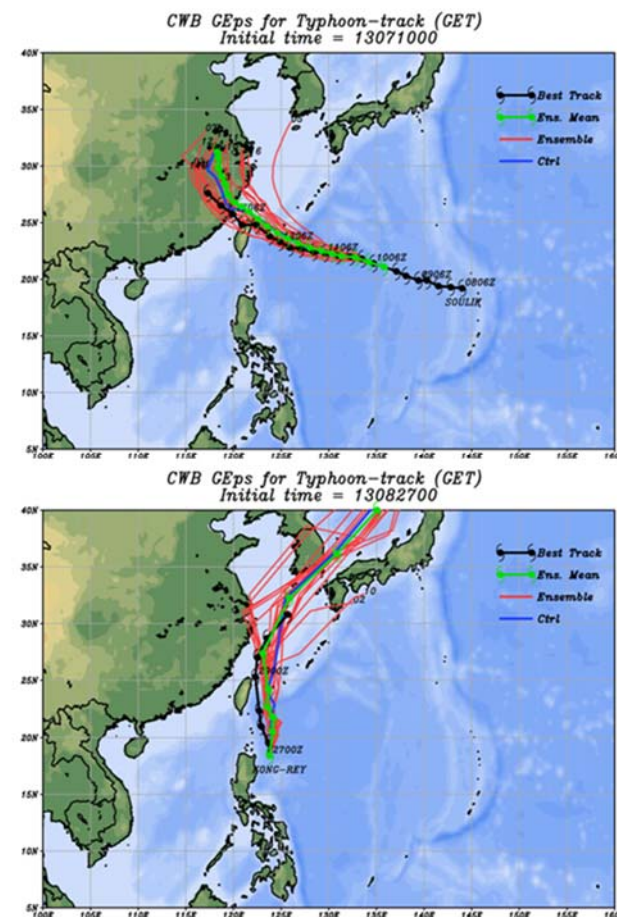


圖 2：Soulik (2013)與 Kong-rey(2013)颱風系集路徑圖。紅色線是系集成員的預報結果，綠色線是系集平均，藍色線是原模式控制組路徑，黑色線是颱風觀測路徑。

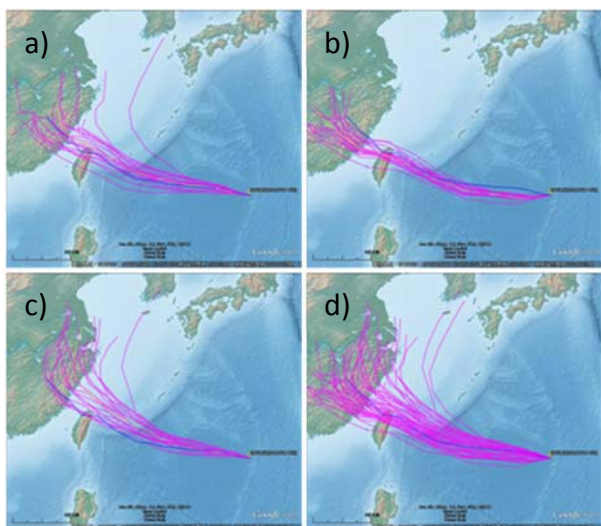


圖 3：颱風 Soulik(2013)，不同模式與系集初始擾動方法比較圖。20 個系集成員。(a)和(c)使用 SV 為系集初始擾動方法；(b)使用 EnKF 為系集初始擾動方法；(a)和(b)使用之全球模式為 2013 年 8 月 15 日以前的作業版本(兩層 OSU 土壤模式)；(c) 使用之全球模式為 2013 年 8 月 15 日更新後的作業版本(四層 Noah 地表模式，更新積雲、淺積雲與邊界層參數化方案。)；(d)為包含(a)、(b)和(c)之結果。

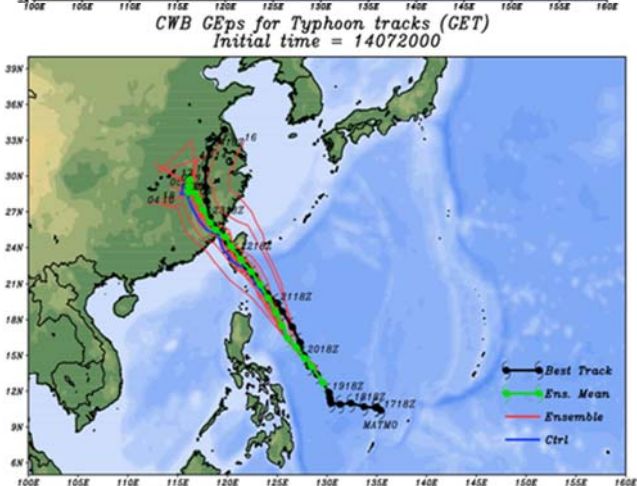
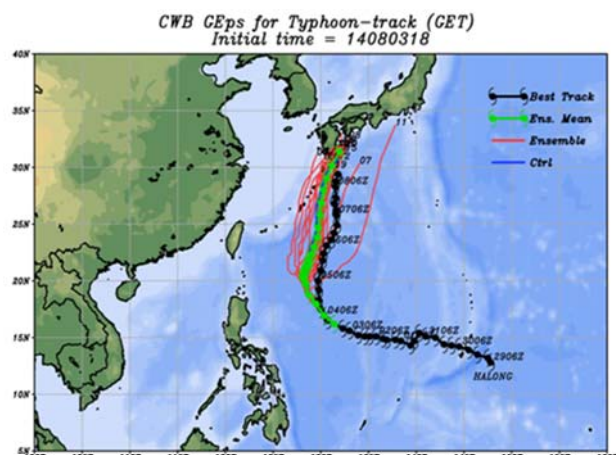


圖 2：Halong (2014)與 Matmo(2014)颱風系集路徑圖。紅色線是系集成員的預報結果，綠色線是系集平均，藍色線是原模式控制組路徑，黑色線是颱風觀測路徑。