

不同洋面長生命期雙眼牆颱風特徵分析

楊憶婷¹

一、前言

住在臺灣一定都會認識颱風這個天氣系統，颱風對臺灣的經濟、生活、水資源、災害防救都有很大的影響，也大大影響飛航安全。在教科書上，完整且成熟颱風的結構具有颱風眼、眼牆及外圍環流。不過，隨著觀測方式越來越多元，觀測儀器越來越精細，我們已經發現颱風的結構其實相當多樣貌。例如，有的颱風具有多邊形或雙眼牆的結構。對於颱風結構及動力越能掌握，將有助於颱風預報，因此有許多科學家研究雙眼牆結構的特徵、機制及變化。後續本篇文章會比較不同洋面的研究結果，改以熱帶氣旋統稱。

二、雙眼牆結構介紹

從熱帶氣旋從氣旋中心徑向外的方向，出現兩個強對流區，就是內眼牆和外眼牆，分隔著兩個眼牆的弱對流區，稱為 moat，這樣的結構就稱為雙眼牆結構。1990 年後期，隨著衛星微波觀測技術的進步，我們漸漸可以透過觀測觀察到雙眼牆熱帶氣旋結構。許多統計研究指出，強度較強的熱帶氣旋伴隨雙眼牆結構出現的比例很高，這也是雙眼牆結構被科學家重視的原因之一(Hawkins and Helveston, 2004; Kuo et al., 2009)。

三、不同洋面的雙眼牆熱帶氣旋

將 1997 年至 2014 年間衛星觀測到 83 個西北太平洋、34 個大

¹ 國立科學工藝博物館副研究員

西洋及 26 個東太平洋具雙眼牆結構的熱帶氣旋(分析方法參考 Yang et al., 2013)，將其大小、熱帶氣旋強度、數量，依雙眼牆生命期長度¹進行分類後，分析結果如圖 1。雙眼牆生命期維持 30 小時以上的個案中，西北太平洋共有 10 個、大西洋共有 2 個，東太平洋 0 個個案。從圖 1(a)也可以觀察到，這些長生命期的雙眼牆個案有一個值得注意的特徵，就是其 moat 及外眼牆平均值，較短生命期的雙眼牆個案大，不論是西北太平洋或大西洋，生命期越長的個案其平均大小隨著生命期而變大。另外，西北太平洋的雙眼牆個案平均尺寸比大西洋雙眼牆個案大。但在雙眼牆熱帶氣旋的強度及生命期之間，除了東太平洋個案雖然生命期越長，氣旋強度越強外，西北太平洋與大西洋個案都沒有明顯的關係，且東太平洋個案也偏少。圖 1(c)顯示在所有不同的雙眼牆生命期，西北太平洋的個案都是最多的，其次是大西洋，東太平洋則是數量最少的。

¹ 雙眼牆生命期長度以微波衛星觀測到雙眼牆的結構時間長度來計算。

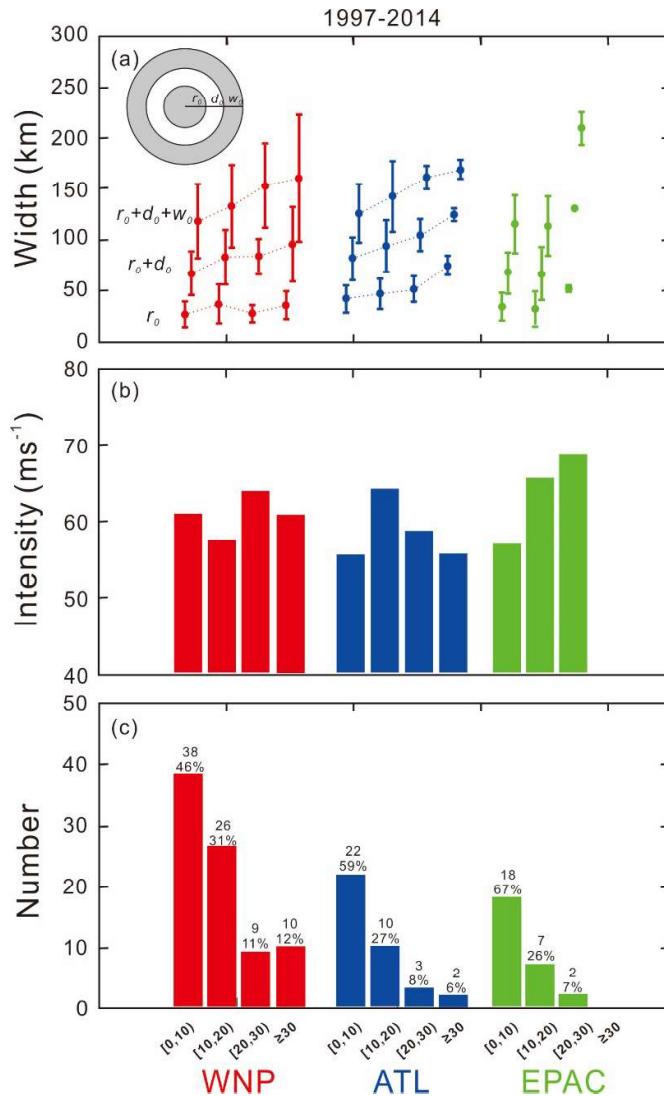


圖 1：(a) 表示 1997 年到 2014 年間，衛星觀測西北太平洋(WNP，紅色)、大西洋(ATL，藍色)及東太平洋(EPAC，綠色)的熱帶氣旋形成生成時的內眼牆半徑(r_0)、內眼牆半徑+moat 寬度(d_0)，及內眼牆半徑+moat 寬度+外眼牆寬度(w_0)大小平均值，及加減一個標準差，虛線表示平均值的連線，東太平洋沒有畫線是因為個案太少。(b)和(c)分別為三個洋面雙眼牆結構生成時，熱帶氣旋的強度及生成雙眼牆的熱帶氣旋數量。其中，三個洋面的雙眼牆熱帶氣旋依雙眼牆生命期分別分為 0-10 小時(不含 10 小時)、10-20 小時(不含 20 小時)、20-30 小時(不含 30 小時)及 30 小時以上。圖(c)中雙眼牆形成的數量及該生命期間形成雙眼牆結構的百分比均顯示於長條圖上方。

本文定義長生命期的雙眼牆結構是雙眼牆可維持超過 20 小時。比較西北太平洋及大西洋的個案在雙眼牆生成時的 moat 寬度與

外眼牆寬度，可以發現到雙眼牆結構長生命期的個案 moat 都較大，在西北太平洋及大西洋分別大於 35 公里及大於 32 公里。圖 2 發現這兩個洋面雙眼牆個案的 moat 寬度越寬，其外眼牆寬度也越寬，在西北太平洋兩者關係 $R^2=0.66$ ，在大西洋的關係 $R^2=0.55$ 。

Kossin et al. (2000)利用正壓無輻散的渦度方程式探討眼牆的穩定度，並提及雙眼牆結構有兩種型態不穩定，進而影響雙眼牆結構維持，第一種是指外眼牆的不穩定，第二種是指 moat 的不穩定，長生命期的雙眼牆個案 moat 較寬可能隱含兩種作用，第一種作用是 moat 寬度較寬有助於降低不穩定成長率，有利於雙眼牆結構維持，第二種作用是因 moat 寬，中心渦旋對於外眼牆的穩定度減弱，不利於雙眼牆結構維持。但較厚的外眼牆較能降低不穩定成長率，進而維持雙眼牆結構。觀測結果長生命期的雙眼牆個案具有較厚的外眼牆，可能對於結構維持扮演重要的角色，而長生命期的個案氣旋中心平均強度較強，可能有利於穩定外眼牆。透過正壓動力，觀測中的長生命期的雙眼牆個案具有較強的強度、大的 moat 和寬的外眼牆，均可能有利於雙眼牆結構維持。

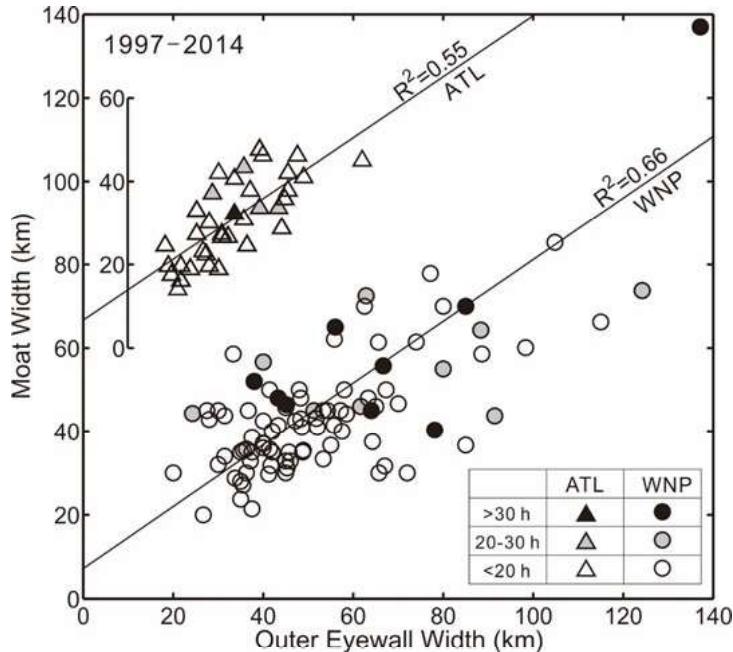


圖 2: 1997-2014 年間大西洋(三角形)及西北太平洋(圓形)雙眼牆個案的 moat 寬度及外眼牆寬度關係。黑色代表雙眼牆生命期超過 30 小時，灰色表示 20-30 小時，白色表示未滿 20 小時。大西洋個案縱軸向上移以利閱讀。 R^2 代表兩者間的相關性。

我們利用雲中液態水含量(Cloud liquid water, CLW)代表氣旋的對流，分析氣旋的對流與外眼牆面積，及雙眼牆氣旋的半徑關係(計算方式參考 Yang et al. 2021)。圖 3 顯示 CLW 和外眼牆面積 R^2 在西北太平洋為 0.89，在大西洋為 0.7。CLW 和雙眼牆氣旋的半徑的 R^2 在西北太平洋為 0.72，在大西洋為 0.92。雲中液態水含量與外眼牆面積，及雙眼牆氣旋的半徑關係在兩個洋面相關性都很高。外眼牆寬度一般都比 moat 寬，內眼牆半徑一般都小於 moat 及外眼牆寬度，因此，當 moat 和外眼牆比較寬時，整個雙眼牆氣旋的半徑也都會比較大，圖 1 曾提及到西北太平洋的雙眼牆氣旋 moat 及外眼牆寬度都較寬，因此西北太平洋的雙眼牆個案其結構特徵較有利於降低正壓不穩定，使得雙眼牆結構更能維持，因此有較多的長生命期雙眼牆個案。

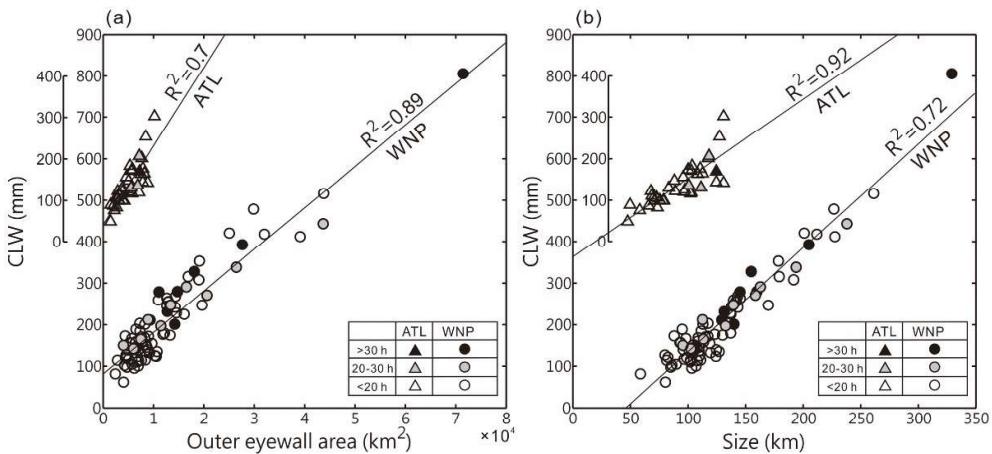


圖 3:1997-2014 年間大西洋(三角形)及西北太平洋(圓形)雙眼牆個案的(a)雲中液態水含量(CLW)及外眼牆面積關係及(b)雲液態水含量及雙眼牆個案的半徑(內眼牆半徑+moat 寬度+外眼牆寬度)關係。黑色代表雙眼牆生命期超過 30 小時，灰色表示 20-30 小時，白色表示未滿 20 小時。大西洋個案縱軸向上移動 60 公里方便將兩洋面的個案分開以利閱讀。 R^2 代表兩者間的相關性。

四、境對雙眼牆生命期的影響

從雙眼牆結構形成前後 24 小時來看，海表面溫度、垂直風切、相對溼度、海洋熱含量的變化，其結果顯示雙眼牆個案在形成前強度增加，到了雙眼牆形成後，強度開始減弱，僅有西北太平洋的長生命期個案稍微增強後才減弱。但三個洋面雙眼牆個案形成前後 24 小時的海表面溫度都在減弱，長生命期個案海表面溫度減弱趨勢較短生命期個案平緩，而大西洋個案海表面溫度減弱的趨勢比西北太平洋個案平緩。在垂直風切的變化上，短生命期的雙眼牆個案隨著時間遇到比較強的環境垂直風切，不利於雙眼牆結構維持。在相對溼度上，三個洋面的相對濕度平均值不太相同，東太平洋平均最大、太平洋其次、大西洋最小。但三個洋面的相對濕度在長短生命期個案間的差異不大，僅有 5% 以內，因此相對濕度對於雙眼牆生命期影

響不明顯。雖然海表面溫度對於熱帶氣旋的生成相當重要，但海表面溫度對於熱帶氣旋的快速增強或減弱並非重要的因子，暖海水的量及深度有助於提供熱帶氣旋能量，因此海洋熱含量可能比海表面溫度更有助於雙眼牆結構維持。比較圖 4(a)和(e)海表面溫度的變化非常小，大西洋的變化只有在 1°C 以內、西北太平洋變化約 1.5°C ，東太平洋的變化約 2°C 。不過，從圖 4(e)海洋熱含量變化來看，西北太平洋雙眼牆個案的海洋熱含量是最高的，其次是大西洋及東太平洋。此外，海洋熱含量在雙眼牆長短生命期的比較中並沒有明顯的差異，所以海表面溫度及海洋熱含量都不是影響雙眼牆長短生命期的主要因子。

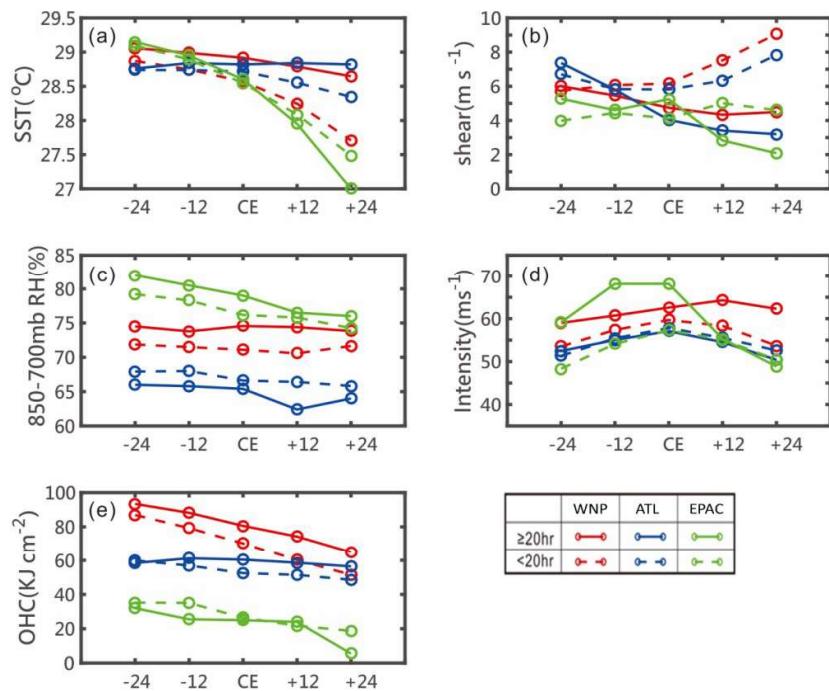


圖 4：1997-2014 年間西北太平洋、大西洋、東太平洋雙眼牆個案在雙眼牆形成前 24 小時到形成後 24 小時間，(a)海表面溫度(SST)、(b)風切(shear)、(c)850-700mb 相對溼度(RH)、(d)強度變化及(e)海洋熱含量變化。其中，實線為 20 小時以上個案，虛線為未滿 20 小時個案。

進一步觀察三個洋面個案在雙眼牆結構形成前後 24 小時的路

徑發現(如圖 5)，在西北太平洋及大西洋長生命期的雙眼牆個案大多生成於北緯 25 度以南及靠洋面的西側，因熱帶氣旋在洋面上航行比較長的時間，有助於其增強其強度。觀察長生命期的雙眼牆個案路徑，可以注意到其向北移動速度分量較小，向西移動速度的分量較大，這使得長生命期的雙眼牆個案較遇到中緯度西風帶及較大垂直風切的環境機會比較小，其雙眼牆形成後，遇到比較低的海表面溫度機會也會比較小，這樣的移動方向有助於雙眼牆結構及氣旋強度維持，這結果也與圖 4(a)、(b)及(d)相一致。

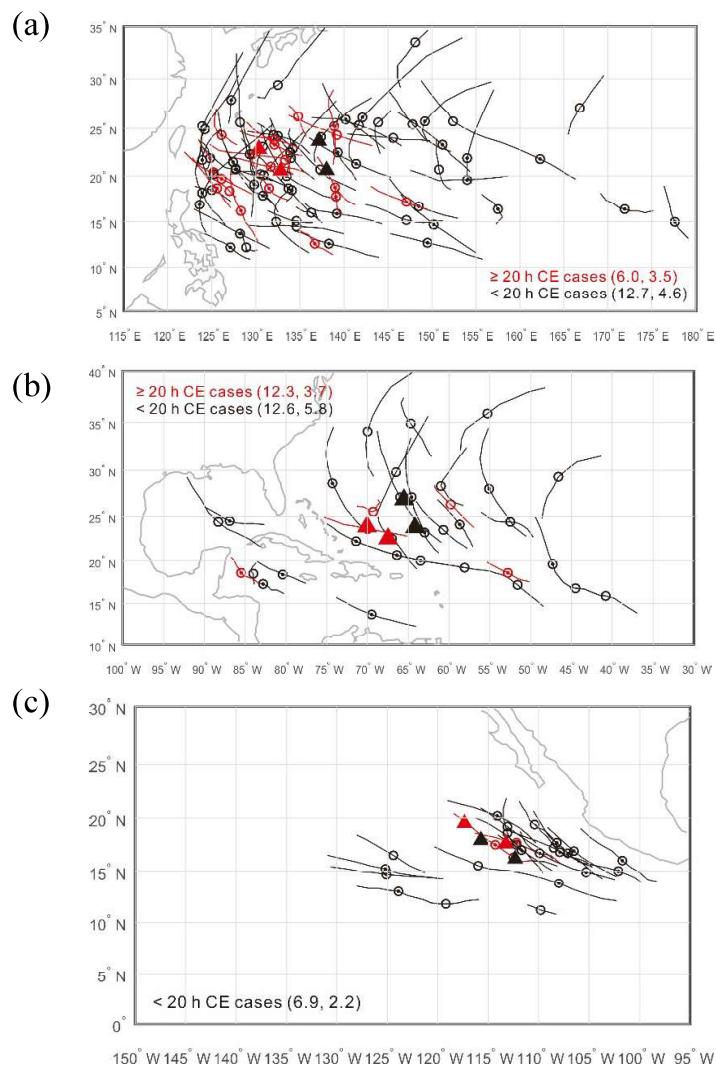


圖 5：1997-2014 年間(a)西北太平洋、(b)大西洋及(c)東太平洋雙眼牆生

成前後 24 小時路徑圖。紅色及黑色線分別代表雙眼牆個案生命期達 20 小時以上及未滿 20 小時。紅色及黑色三角形分別代表長及短生命期雙眼牆個案平均生成位置及 24 小時後的位置。括號內為經向及緯向的標準差(單位：度)，東太平洋因只有兩個長生命期個案，故未呈現標準差。

Reference

- Hawkins, J. D., and M. Helveston, 2004: Tropical cyclone multiple eyewall characteristics. Preprints, 26th Conf. on Hurricane and Tropical Meteorology, Miami, FL, Amer. Meteor. Soc., 276-277.
- Kuo, H.-C., C.-P. Chang, Y.-T. Yang, and H.-J. Jiang, 2009: Western North Pacific typhoons with concentric eyewalls. *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 3758-3770.
- Willoughby, H. E., J. A. Clos, and M. G. Shoreibah, 1982: Concentric eye walls, secondary wind maxima, and the evolution of the hurricane vortex. *J. Atmos. Sci.*, **39**, 395-411.
- Yang, Y.-T., H.-C. Kuo, E. Hendricks, and M. S. Peng, 2013: Structural and Intensity Changes of Concentric Eyewall Typhoons in the Western North Pacific Basin, *Mon. Wea. Rev.*, **141**, 8, 2632-2648.
- Yang, Y.-T., E. A. Hendricks, H-C. Kuo, and M. S. Peng, 2014: Long-lived concentric eyewalls in Typhoon Soulik (2013), *Mon. Wea. Rev.* **142**, 3365–3371.
- Yang, Y.-T, H.-C., Kuo, S. Tsujino, B.-F. Chen, M. S. Peng, 2021: Characteristics of the Long-Lived Concentric Eyewalls in Tropical Cyclones, *JGR*. (accepted)