

衛星觀測西北太平洋雙眼牆颱風的結構及強度變化

楊憶婷¹

摘要

本研究發展一客觀方法判斷微波衛星雲圖的雙眼牆結構。我們判斷了三種主要的雙眼牆結構變化，分別是 20 小時內完成眼牆置換的 ERC (35 個個案，53%)、維持雙眼牆結構超過 20 小時的 CEM (16 個個案，23.5%)，及 20 小時內未發生眼牆置換，雙眼牆消失因為部分外眼牆消散，內沿牆存在的 NRC (16 個個案，23.5%)。從結構上來看，CEM 個案的強度都較強，moat 與外眼牆都較寬，符合正壓模式理論，因此較容易維持其雙眼牆結構、對流及強度。NRC 個案在形成雙眼牆後，強度及對流都快速減弱。可能原因是 NRC 個案地向北移動速度較快，也因此容易遭受到比較大的垂直風切、冷海水表面和低的相對濕度不利的環境條件，不利的環境條件。

一、簡介

Willoughby et al. (1982) 和 Black and Willoughby (1992) 透過飛機搭載雷達資料，發現強的颶風(例如：Hurricane Gilbert, 1988) 具有雙眼牆的結構，意即從颶風中心徑向外雷達觀測到兩個強對流區，中間包含一個弱對流區，稱為 moat。而在他們的研究當中也指出，雙眼牆形成之後，外眼牆漸漸增強，內眼牆漸漸減弱，隨後外眼牆取代內眼牆形成單一較大的眼，此一過程稱為眼牆置換過程(Eyewall replacement cycle，文章後簡稱為 ERC)。在此一過程當中，颶風強度減弱，伴隨著颶風的強度變化。如下圖一所示。

¹國立臺灣大學

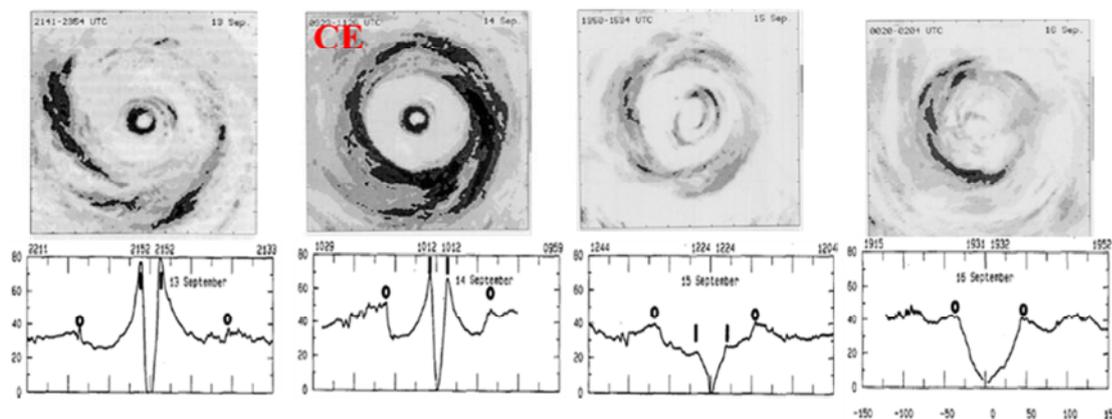


圖 1: Hurricane Gilbert 雷達回波圖及切向風速剖面(Black and Willoughby, 1992)。
CE 表示 Concentric eyewall 發生。

由於太平洋的飛機觀測資料較少，隨著衛星觀測的進步，透過微波衛星雲圖可以觀測到颱風雙眼牆的結構。Hawkins et al. (2004, 2006)利用微波衛星雲圖進行統計發現西北太平洋有 80%以上的強颱風（強度超過 120 kts，約 62 m s^{-1} ）具有雙眼牆結構。在 Kuo et al. (2009)利用衛星微波觀測資料研究西太平洋的雙眼牆颱風，和 Sitkowski et al. (2012)利用機載雷達觀測大西洋的雙眼牆颱風當中，都發現到雙眼牆形成後的強度變化有很大的變率 (variability)，因此瞭解雙眼牆形成後的結構變化和強度變化，有助於改善熱帶氣旋的強度預報。

在雙眼牆形成後結構變化方面，Hawkins and Helveston (2008)利用微波衛星雲圖發現，除了典型的 ERC 外，他們還發現多次 ERC、多眼牆形成、ERC 因為氣旋遭遇強垂直風切或是登陸而未完成、雙眼牆結構維持很久而未完成 ERC。但是在他們的研究當中，沒有明確的量化發生個數及比例。此外，ERC 過程已經在許多的數值模式當中模擬出(Wang 2008a, b; Terwey and Montgomery, 2008; Hill and Lackmann, 2009; Wang, 2009; Zhou and Wang 2009; Qiu et al., 2010; Martinez et al., 2011; Huang et al., 2011)，但是多為個案模擬，目前西北太平洋仍很少客觀的觀測分析。因此本研究

發展一客觀方法針對 1997-2010 的西北太平洋 SSM/I 和 TRMM/TMI 微波衛星雲圖判別雙眼牆結構，並針對其強度與結構變化進行統計分析。

二、資料及方法

本研究主要使用 1997-2010 之間 NRL Monterey tropical cyclone Web page 網頁 SSM/I 和 TRMM/TMI 85 GHz 微波衛星雲圖 (http://www.nrlmry.navy.mil/tc-bin/tc_home2.cgi)，圖檔是透過 Poe (1990) 演算法得到，並存成 800 像素×800 像素的 jpeg 檔，每一個像素約 1-2km。因此我們將每個像素換算成三原色：紅色(R)、綠色(G)及藍色(B)，再對照色標換算回雲頂亮度溫度(Blackbody Brightness temperature，文章後簡稱為 Tbb)。另外我們使用 Joint Typhoon Warning Center (JTWC) 的 Best track data 作為颱風強度資料，以及 Statistical Hurricane Intensity Prediction Scheme (SHIPS; DeMaria et al. 2005) 得到垂直風切、海表面溫度和 850mb-700mb 的相對濕度資料。

我們將每張衛星雲圖定出颱風中心，以中心徑向外 360 個方向計算每 5 個像素一個平均溫度，再以颱風中心徑向外分成 8 個方位(45 度)，每個方位的 45 個溫度剖面計算一個平均溫度剖面並得到其標準差，在此值得注意的是，雲頂的 Tbb 越小，表示對流越強。我們先判斷出颱風中心徑向外在 8 個方位下，有兩個 Tbbmin 中間被一個 Tbbmax 分開，意即在此方位有兩個強對流區中間被一個弱對流區分開，可能有雙眼牆發生，並且我們定義以下的標準選取雙眼牆個案：(1) $Tbb_{max} \geq \sigma_{outer_min}(inner_min) + Tbb_{outer_min}(inner_min)$; (2) $Tbb_{outer_min} \leq 230K$; (3) 超過五個方位滿足以上條件，以及 (4) 符合以上條件的各方位 Tbb_{outer_min} 差距不

超過50km，其中 σ 為標準差。定義以上條件的主要目的是想選取出有明顯的moat，而且外眼牆的強度夠強，並且外眼牆不是螺旋雨帶。

在本研究中，我們一共判別了23629微波衛星雲圖，判別出225張雙眼牆雲圖，共有91個個案。但是本研究的目的將針對強度及結構變化，因此我們將雙眼牆形成前後24小時，颱風中心接近陸地200km以內，認為可能受地形影響的個案扣除掉，因此主要針對67個個案進行研究。

三、結構及強度變化

我們針對雙眼牆颱風形成之後的強度變化分成3種不同的類型(圖2)，第一類型是典型的ERC，我們將雙眼牆颱風在20小時以內完成ERC的個案，一共35個個案(53%)歸於此類型。第二類型是CEM (Concentric eyewall maintained)，我們將雙眼牆颱風的時間序列圖中(12小時以內至少要一張可以使用的微波衛星雲圖)，內眼牆大小沒有明顯變化，雙眼牆結構存在超過20小時的個案，一共有16個個案(23.5%)歸於此類。第三類型則是NRC (no replacement cyclone)，我們將雙眼牆形成後的20小時內，部分的外眼牆消散，導致雙眼牆結構消失，但是內眼牆還部分或是完整存在的個案，一共有16個個案(23.5%)歸於此類。圖2中的雲頂亮度溫度平均剖面是選取最不對稱的兩個半邊作平均，而溫度剖面的縱軸值向上減小，和雷達觀測的切向風速結果相似。

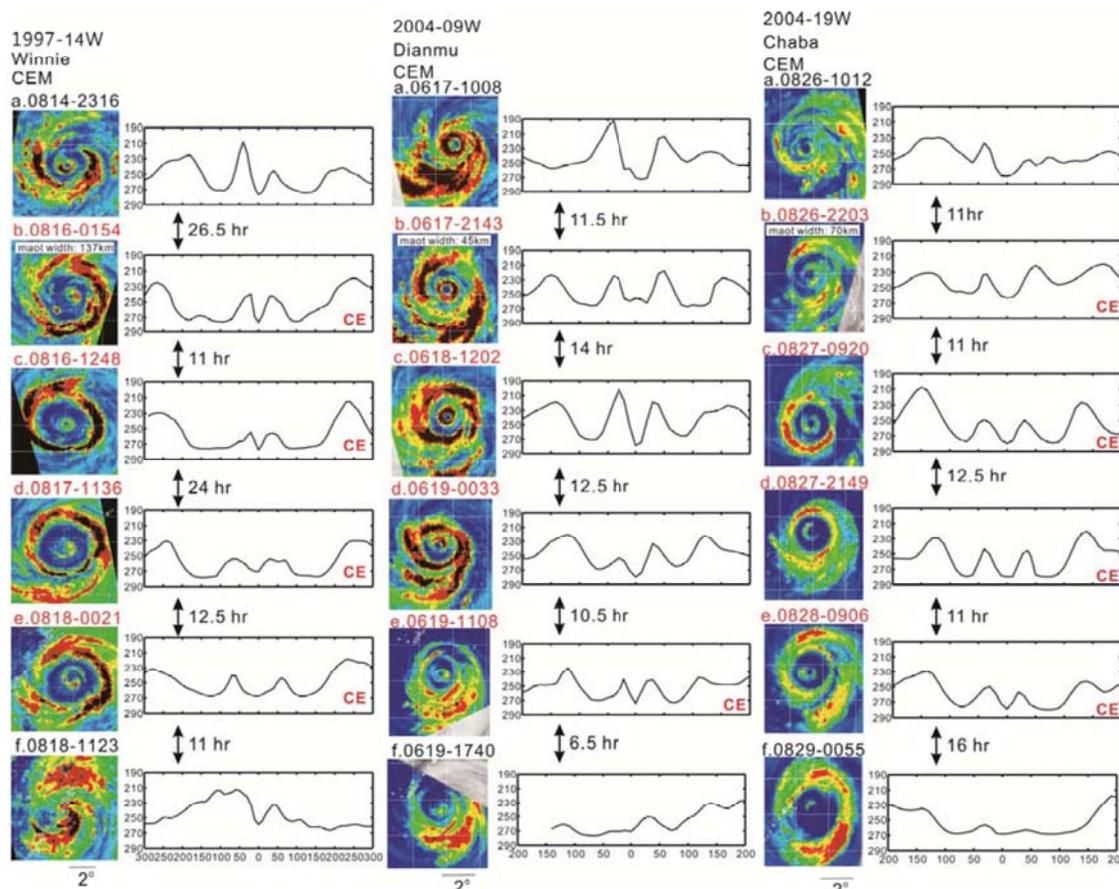


圖 2: Typhoon Saomai 2000 (ERC), Haitang 2005(NRC), Ewiniar 2006 (NRC), Winnie 1997(CEM), Dianmu 2004(CEM) and Chaba 2004(CEM)的衛星雲圖時間序列及對應的雲頂亮度溫度平均剖面。

由於雙眼牆颱風的強度及結構變化有很大的變率(Kuo et al., 2009; Sitkowski et al., 2012)。這樣的結構和強度變化，以及不同個案變率可以以K-Vmax圖來描述。主要是橫軸為颱風強度，縱軸為颱風動能，將颱風不同生命期的強度及動能透過飛機觀測切向風剖面計算得到後再繪製成，並且可以針對熱帶氣旋的強度系集預報將變率繪製在K-Vmax圖中，方便作業單位分析及預報(Maclay et al., 2008; Musgrave et al., 2012)。但是在西太平洋中，很少機會有機載雷達的資料計算得到K-Vmax圖。我們希望將本研究的技術應用在這方面，繪製成dT-Vmax圖。圖3為一般沒有雙眼牆形成的颱風dT-Vmax圖，其中dT是以400 km × 400 km範圍之內的Tbb平均

值，減去此範圍中前5%Tbb最大值作為平均的背景值，颱風Damrey (2000) 和颱風Rammasun (2008)分別強度都有超過Category 4，兩者的dT-Vmax圖曲線都很簡單也很相似，在颱風達到最大強度之前(後)，dT不斷增加(減弱)表示此範圍內的對流不斷增強(減弱)。但是在有雙眼牆形成的個案中，會有比較大的變率，我們將在圖4作進一步解釋。

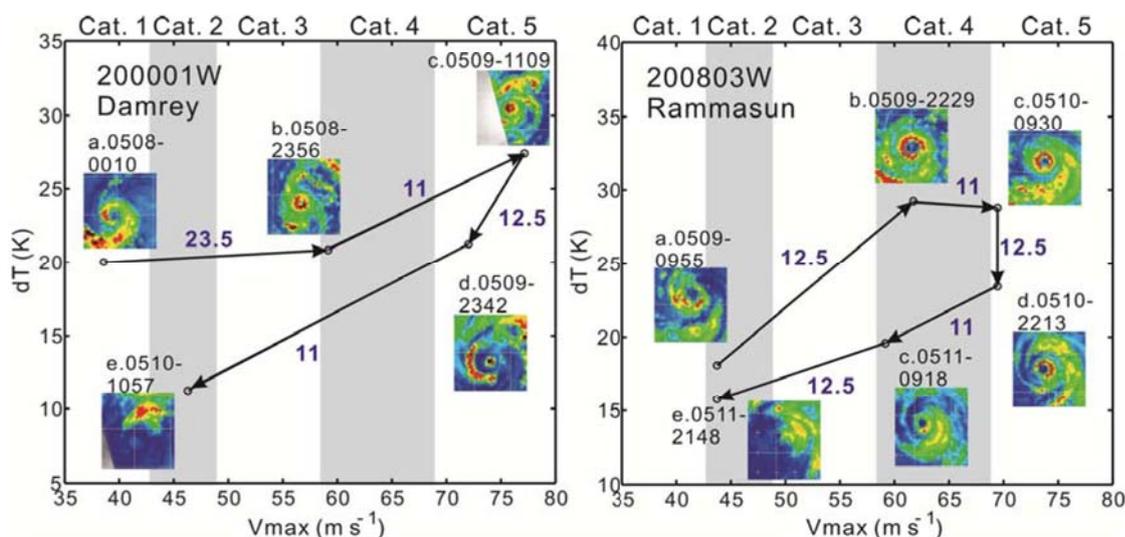


圖 3: 兩個非雙眼牆颱風的 dT-Vmax 圖，兩圖分別為 Typhoon Damrey (2000) and Rammasun (2008)。

從圖4(a)為颱風生命期不同階段形成雙眼牆前後的強度變化，雖然雙眼牆形成前後的強度變化有很大的變率，主要原因跟雙眼牆形成在哪一個颱風的生命期有關。我們將颱風的生命期分為三個階段，第一階段是雙眼牆形成時間比颱風最大強度時間早19個小時以上，第二階段是雙眼牆形成時間在颱風最大強度時間的前後18小時以內，第三階段是雙眼牆形成時間在颱風最大強度後19小時以上。圖4(b)則是對應不同時期不同雙眼牆結構變化的8個dT-Vmax圖，8張圖顯示雙眼牆的發生導致強度及對流變化有很大的變率，但是在雙眼牆形成之前，即使是在第三個階段，颱風強度本來就在減弱的情況下，其平均對流會先增強，除了NRC個案以外，ERC雙眼牆形

成後至結束，對流強度都在增加，CEM雙眼牆形成後到最後一張雙眼牆雲圖的20小時以上時間內，還維持的雲圖之間對流強度增強或是沒有明顯的變化，而NRC在形成雙眼牆後有很明顯的強度及對流強度減弱，可能的原因是遭遇到強垂直風切導致強度減弱，而部分的對流消失導致dT減小。

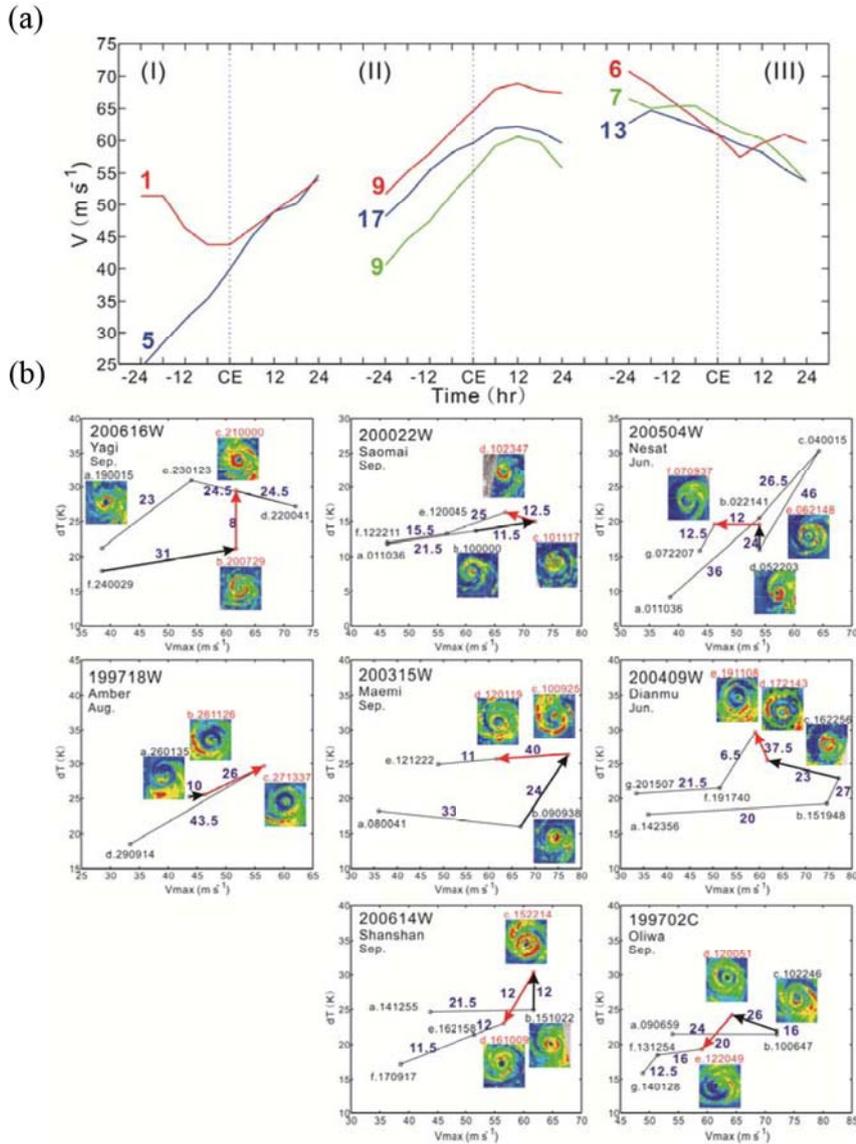


圖 4: (a) 三個颱風生命史的三種類型個案，在雙眼牆形成前後平均強度變化。第一階段 (I) 雙眼牆形成在颱風最大強度前 19 小時，第二階段 (II) 雙眼牆形成在颱風最大強度前後 18 小時，第三階段 (III) 雙眼牆形成在颱風最大強度後 19 小時；(b) 在 (I)、(II) 和 (III) 階段的三種類型個案 dT-Vmax 圖。第一、二和三行分別是 ERC、CEM 及 NRC 個案。

在圖5平均強度變化上，可以明顯觀察到，NRC個案的強度在雙眼牆形成之後快速減弱，但是CEM的個案在形成雙眼牆前後強度都較強。從無因次化的平均強度變化上來看，形成雙眼牆之後平均強度增強及維持約24小時候才開始減弱，而和Emanuel (2000) 針對西北太平洋和大西洋熱帶氣旋的強度，以及Knaff and Kossin (2003) 研究中提到的annular hurricane 強度變化相比，有雙眼牆形成的個案在雙眼牆形成之前，維持一段相對較強的強度，形成雙眼牆後CEM個案比annular hurricane 更能維持原來的強度，這個部分對於颱風的強度預報上，是很重要的資訊。

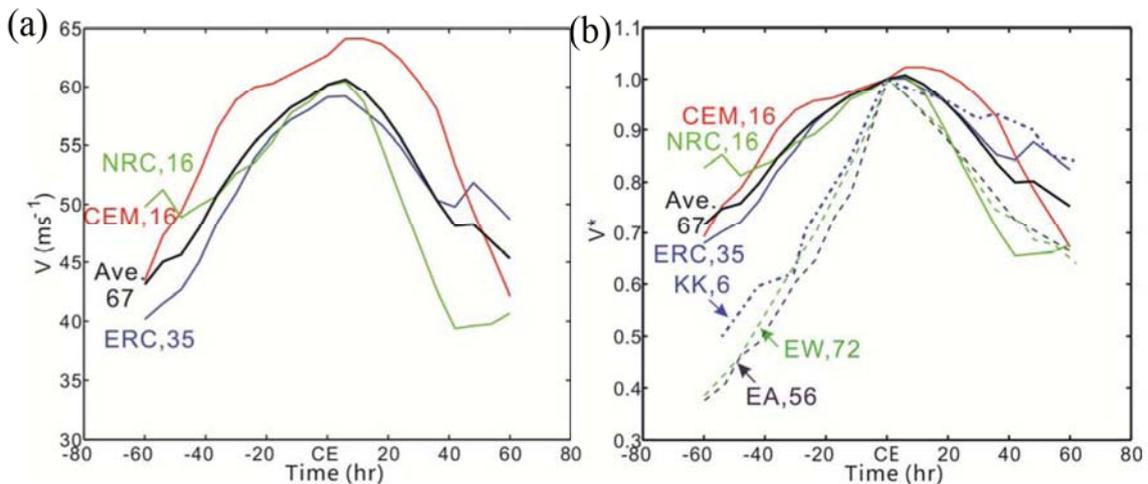


圖 5: (a)雙眼牆形成前後 60 小時平均強度變化；(b)無因次化的雙眼牆形成前後 60 小時平均強度變化，Emanuel (2000)針對大西洋(EA)和太平洋(EW)的熱帶氣旋平均強度變化及 Knaff and Kossin (2003)研究的 annular hurricane 個案平均強度變化也畫在圖中比較。

四、結構特徵及環境因子

圖6顯示外眼牆寬度、moat寬度以及颱風強度之間的關係，颱風的moat及外眼牆寬度有正相關($R^2=0.5$)。此外，CEM個案的颱風強度(約 63 m s^{-1})比ERC和NRC都強(分別約為 59 m s^{-1} 和 60 m s^{-1})強，moat及外眼牆寬度寬度(約 60 km 及 70 km)也都比ERC(約 40 km 及 49 km)和NRC寬(約 44 km 及 48 km)寬。從正壓模式的觀點來看，颱風的強度較強越能穩定外眼牆，以及維持

雙眼牆的結構較長的時間，而moat較寬雖不利於內眼牆穩定外眼牆，但有利於穩定Kossin et al. (2002)第二類正壓不穩定，另外，較寬的外眼牆也容易穩定，因此圖6中顯示4個CEM個案強度不達Category 4但是維持雙眼牆結構超過20小時，其moat與外眼牆都特別寬(約80 km)。從本研究的CEM個案統計結果，符合正壓理論模式(Kossin et al., 2002)。

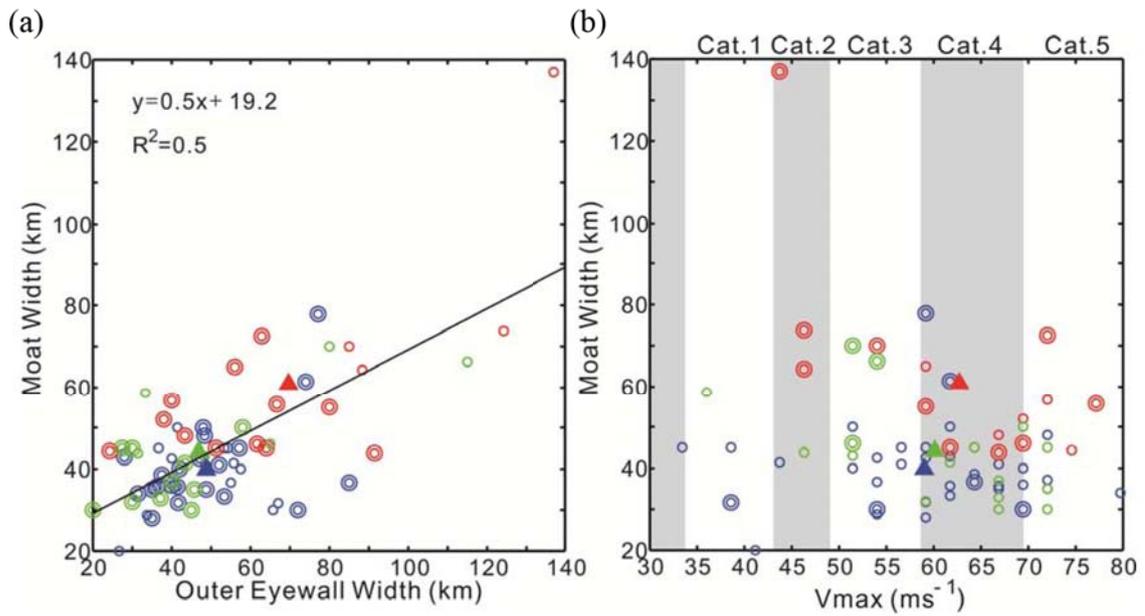


圖 6: (a) moat 寬度及外眼牆寬度關係圖；(b) moat 寬度及颱風強度關係圖。

從雙眼牆颱風形成的地理位置，以及形成前後24小時的路徑圖7中顯示，CEM個案多形成於太平洋的西側(140oE以西)，NRC個案則多形成於緯度較高區域(18oN以北)，我們推測CEM個案因為在太平洋上向西北移動較長的路徑才在西太平洋形成雙眼牆，因此平均形成強度都較強，而NRC個案除了多形成在高緯度區域以外，從路徑上來看，其向北移動速度(4.8 m s⁻¹)也比ERC和CEM大(3.4m s⁻¹和2.9 m s⁻¹)，因此，可能容易因為遭遇到較冷海水或是較大的垂直風切，不利於結構繼續維持。

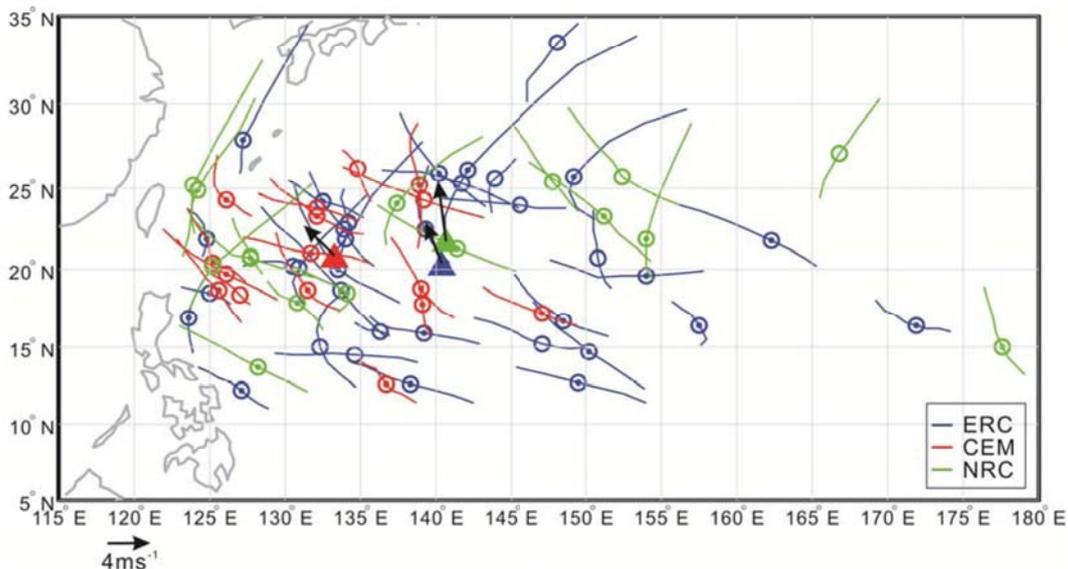


圖 7: 雙眼牆颱風形成地理位置，及形成前後 24 小時路徑圖。圈中有打點為強度大於 Category 4，三角形為形成的平均位置，箭頭為 24 小時後的平均位置。

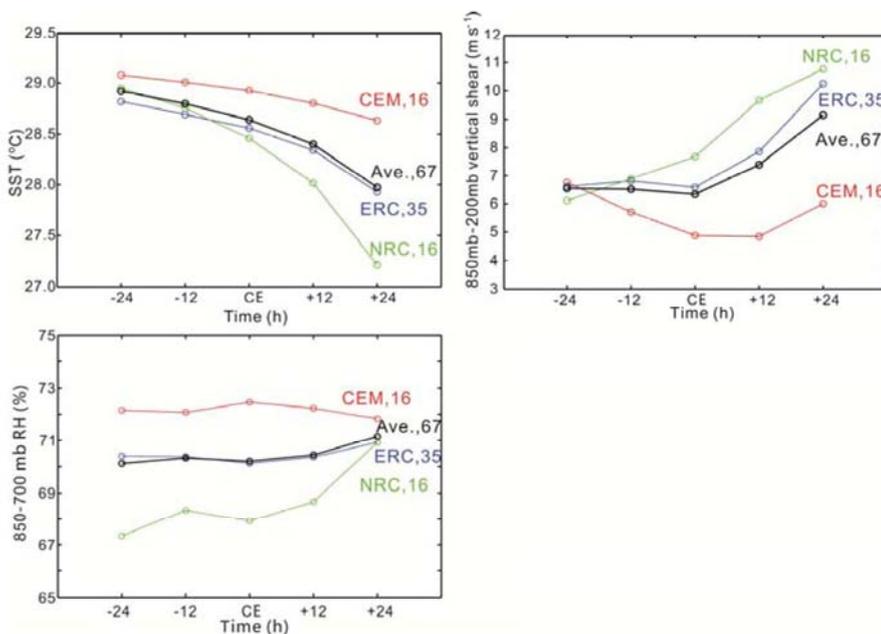


圖 8: 雙眼牆形成前後 24 小時的海表面溫度、垂直封切和低層相對濕度平均變化。

從平均SST、低層的RH和垂直風切隨時間變化上來看(圖8)，NRC個案因為向北移動速度較快，容易遭遇到冷海水、強垂直風切，以及較小的RH，

不過RH每種類型的平均差距值不大，SST和垂直風切則有明顯的變化，在我們的研究中也發現，NRC個案在雙眼牆消失時，只剩下半邊的雙眼牆結構，消失的半邊大多為在下風切處的右側，對流仍存在的半邊在左側，此結果和Corbosiero and Molinari (2002)認為下風切處的左側有利於對流發展，右側一致對流發展結果類似，垂直風切可能是NRC半邊的雙眼牆消失主要原因之一。

五、結論

- 1、本研究發展一客觀方法判斷微波衛星雲圖的雙眼牆結構。
- 2、我們判斷了三種主要的雙眼牆結構變化，分別是20小時內完成眼牆置換的ERC (35個個案，53%)、維持雙眼牆結構超過20小時的CEM (16個個案，23.5%)，及20小時內未發生眼牆置換，雙眼牆消失因為部分外眼牆消散，內沿牆存在的NRC (16個個案，23.5%)。
- 3、本研究發展dT-Vmax圖，並且發現即便已經在颱風生命史的後期，颱風強度在減弱期間雙眼牆形成之前，對流的平均強度不斷增強，在形成雙眼牆之後，除了NRC以外，對流強度都會增強或是維持強度，但是NRC個案因為部分外眼牆消失，對流強度會快速減弱。
- 4、從強度變化上來看，雙眼牆形成後的強度變化變率 ΔI ，取決於雙眼牆形成在颱風生命史的不同階段。NRC個案在形成雙眼牆後，強度快速減弱，CEM個案可以增強並維持強度約24小時，隨後才減弱，比annular hurricane更能維持強度。
- 5、從結構上來看，CEM個案的強度都較強，moat與外眼牆都較寬，符合正壓模式理論，因此較容易維持其雙眼牆結構。

6、CEM個案多在西太平洋西側(140°E以西)形成，可能因為在海上航行較遠才形成雙眼牆，其強度都較強。NRC個案多形成於緯度較高(18°N以西)的區域。此外，NRC個案的向北移動速度較快，也因此容易遭受到比較大的垂直風切、冷海水表面和低的相對濕度不利的環境條件，不利的環境條件可能是導致NRC個案的部分外眼牆對流消失的主要原因。

六、參考資料

- Black, M. L., and H. E. Willoughby, 1992: The concentric eyewall cycle of Hurricane Gilbert. *Mon. Wea. Rev.*, **120**, 947-957.
- Corbosiero and Molinari, 2002: The Effects of Vertical Wind Shear on the Distribution of Convection in Tropical Cyclones. *Mon. Wea. Rev.*, **130**, 2110-2123.
- DeMaria, M., M. Mainelli, L. K. Shay, J. A. Knaff, and J. Kaplan, 2005: Further improvement to the Statistical Hurricane Intensity Prediction Scheme (SHIPS). *Wea. Forecasting*, **20**, 531-543.
- Emanuel, K., 2000: A statistical analysis of tropical cyclone intensity. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 1139-1152.
- Knaff, J. A., and J. P. Kossin, 2003: Annular hurricanes. *Wea. Forecasting*, **18**, 204-223.
- Kossin J. P., W. H. Schubert, and M. T. Montgomery, 2000: Unstable interaction between a hurricane's primary eyewall and a secondary ring of enhanced vorticity. *J. Atmos. Sci.*, **57**, 3893-3917.
- 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.
- 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.
- , ——, T. F. Lee, F. J. Turk, K. Richardson, C. Sampson, J. Kent, and R. Wade, 2006: Tropical cyclone multiple eyewall characteristics. Preprints, 27th Conf. on Hurricane and Tropical Meteorology, Monterey, CA, Amer. Meteor. Soc., 6B.1. [Available online at http://ams.confex.com/ams/27Hurricanes/techprogram/paper_108864.htm.]
- , and ——, 2008: Tropical cyclone multiple eyewall characteristics. 28th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, Orlando, FL, Amer. Meteor. Soc., 6B.1. [Available online at

- [http://ams.confex.com/ams/28Hurricanes/techprogram/paper_138300.htm]
- Hill, K. A., and G. M. Lackmann, 2009: Influence of environmental humidity on tropical cyclone size. *Mon. Wea. Rev.*, 137, 3294—3315.
- Huang, Y.-H., M.-T. Montgomery, and C.-C. Wu, 2011: Concentric Eyewall Formation in Typhoon Sinlaku (2008) Part II: Axisymmetric Dynamical Processes. *J. Atmos. Sci.*, in press.
- Maclay, K. S., M. DeMaria, and T. H. Vonder Haar, 2008: Tropical cyclone inner-core kinetic energy evolution. *Mon. Wea. Rev.*, 136:4882–4898.
- Martinez, Y., G. Brunet, M. K. Yau, and X. Wang, 2011: On the dynamics of concentric eyewall genesis: Space-time empirical normal mode diagnosis. *J. Atmos. Sci.*, 68, 457–476.
- Musgrave, K. D., R. K. Taft, J. L. Vigh, B. D. McNoldy and W. H. Schubert, 2012: Time evolution of the intensity and size of tropical cyclones. *JAMES*. Submitted.
- Terwey, W. D., and M. T. Montgomery, 2008: Secondary eyewall formation in two idealized, full-physics modeled hurricanes. *J. Geophys. Res.*, 113, D12112, doi:10.1029/2007JD008897.
- Wang, Y., 2008a: Rapid filamentation zone in a numerically simulated tropical cyclone. *J. Atmos. Sci.*, 65, 1158–1181.
- Wang, Y., 2008b: Structure and formation of an annular hurricane simulated in a fully compressible, nonhydrostatic model-TCM4. *J. Atmos. Sci.*, 65, 1505—1527.
- Wang, Y., 2009: How do outer spiral rainbands affect tropical cyclone structure and intensity? *J. Atmos. Sci.*, 66, 1250—1273.
- Willoughby, H. E., and M. B. Chelmon, 1982: Objective determination of hurricane tracks from aircraft observations. *Mon. Wea. Rev.*, 110, 1298-1305.
- Zhou, X., and B. Wang, 2009: From concentric eyewall to annular hurricane: A numerical study with the cloud-resolved WRF model. *Geophys. Res. Letts.*, 36, L03802, doi:10.1029/2008GL036854.