

渦旋交互作用與結構改變

沈彥志¹ 郭鴻基²

¹ 中央氣象局

² 台灣大學大氣科學系

摘要

颱風渦旋的結構可以受到許多不同機制的影響而改變，例如：颱風與中渦旋 (mesovortex) 的交互作用、非絕熱效應、暖海渦 (warm ocean eddy) 造成的海氣交互作用、中層水氣濕化 (mid-level moistening) 及垂直風切等等。本研究著重在颱風問題的渦旋交互作用所導致的結構改變與起轉效應 (spinup)，利用區域淺水模式模擬，包括：(1) 延續 Kuo et al. (2004) 的正壓實驗架構，討論地轉調節在雙眼牆形成過程的角色，接著模擬強颱風與中渦旋交互作用所造成的增強 (intensification)；(2) 弱颱風或是熱帶低壓與中渦旋交互作用所造成的旋生 (cyclogenesis)。

結果顯示 (1) 在淺水模式的雙渦旋交互實驗與之前在正壓模式下的結果幾乎相同，亦即渦度動力 (vorticity dynamics) 和位渦動力 (potential vorticity dynamics) 在強颱風形成雙眼牆的狀況之下沒有不同，此即為慢速流形 (slow manifold) 的情況，重力波造成的影響很有限；(2) 至於起轉效應，若中渦旋發生在中心渦旋的最大風速半徑內，則起轉效應顯著；反之則必須視中心渦旋的強度來決定是否起轉；(3) 產生起轉效應其中一個重要因素即為中心渦旋的強度，若中心渦旋強度愈強、渦度梯度愈大，則外圍的快速帶狀化區域 (rapid filamentation zone) 亦愈強且大，因此較能維持自身，不易起轉；(4) 在起轉效應的情況之下，合併動力 (merger dynamics) 主宰全部的過程，使中心渦旋外擴，成為一個更大且更強的渦旋。

關鍵字：雙渦旋交互作用、雙眼牆、起轉效應 (spinup)、中渦旋 (mesovortex)

一、前言

颱風的結構變化包括了颱風最大風速的變強、中心氣壓的降低、颱風暴風圈變大，或是三者皆有，此效應可以受到許多不同的機制的影響，例如：颱風與中渦旋 (mesovortex) 的交互作用、非絕熱效應、暖海渦 (warm ocean eddy) 造成的海氣交互作用、中層水氣濕化 (mid-level moistening) 及垂直風切等等。其中渦旋交互作用的觀測及研究理論，應是起轉效應中的一大重要課題。Gentry et al. (1970) 觀測 1969 年的 Debbie 颱風，發現在中心附近有深對流的現象並對颱風強度造成影響，於是 Enagonio and Montgomery (2001) 利用淺水模式模擬渦旋旋生 (cyclogenesis) 的現象，其結果發現外圍對流區對中心渦旋有明顯的旋生，使中心渦旋的最大切向風增強。除此之外，RAINEX (2005) 實驗中觀測到在颱風眼牆附近有明顯的中渦旋和 turbo-boosting，這些系統對颱風的發展亦有重大影響。

在颱風與外圍渦度交互作用的觀測與理論研究中，尚包括了雙眼牆的形成研究。過去 Dritschel and Waugh (1992)、Kuo et al. (2004) 與 Kuo et al. (2007) 皆利用正壓模式模擬雙渦旋交互作用的情形。其結果分別有互繞、合併、拉伸、雙眼牆等，這些結果在熱帶大氣颱風相關觀測得到驗證。其中雙眼牆結構有一大特徵，為內眼牆與外眼牆間有一弱回波區，稱為 moat Rozoff et al. (2006) 以 Weiss (1981) 之渦度梯度成長率理論為動

力機制解釋雙眼牆中 moat 的形成，定義拉伸主宰區渦度梯度成長率的指數遞減時間為帶狀化時間 (filamentation time, τ_{fil})，帶狀化時間小於對流成長至翻轉時間 (~30 min.) 之區域稱為快速帶狀化區域 (rapid filamentation zone)，此區之對流將被抑制，即為 moat。

本研究著重在颱風與渦度形成的中渦旋交互作用所導致的起轉效應，利用區域淺水模式，首先延續 Kuo et al. (2004) 的正壓實驗架構，討論地轉調節在雙眼牆形成過程的角色，接著模擬不同情況的中渦旋與颱風起轉的結果。在模式中，中渦旋以強迫作用 (forcing) 的方式給定。討論的起轉效應包括了 (1) 強颱風與中渦旋交互作用所造成的增強 (intensification)；(2) 弱颱風或是熱帶低壓與中渦旋交互作用所造成的旋生 (cyclogenesis)。本研究雖然沒有探討有關熱力作用對颱風造成的起轉效應，但不可否認的，在颱風起轉的問題下，動力作用造成的影響亦佔有相當程度的重要性。

二、研究工具

本研究所使用的模式是區域淺水模式 (regional shallow water model)。選用區域淺水模式的原因，是因為我們欲模擬的問題其空間尺度約為數百公里見方，且為了了解地轉平衡在雙渦旋實驗中扮演的角色，是以使用區域淺水模式。

所有的模擬都在 f 面之雙週期邊界條件 (doubly periodic f -plane) 上進行 使用的空

間網格點數為 512×512 ，故有 170×170 個傅立葉模 (Fourier mode)。除了幾個較為特別的實驗之外，水平區域範圍 (domain size) 均為 $600 \text{ km} \times 600 \text{ km}$ 。因此解析之波長最短為 2.5 公里。另外，考慮近乎無黏滯性 (viscosity)，其黏滯項很小，為 $60 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ，對模式中最小解析波長的 e^{-1} damping time 為 90 分鐘。時間積分格式使用跳蛙法 (leapfrog method)，時間積分步長為 4 秒。以這樣的時空解析度而言，應該可以清楚地看到中尺度系統的細微變化。

三、強渦旋起轉效應實驗

在進行起轉效應實驗之前，我們首先延續 Kuo et al. (2004) 之雙渦旋實驗，以測試模式並瞭解重力波是否對雙眼牆結構的形成有所影響，亦即地轉調節在雙渦旋實驗中扮演的角色。設定一實驗為兩渦旋，一小而強渦旋代表颱風中心渦旋，一大而弱渦旋代表颱風外圍大範圍不對稱對流區。並且改變中心渦旋的結構，其控制方程式如下：

$$\zeta(x, y) = \zeta_1 \begin{cases} 1, & \text{if } 0 \leq r_1 \leq 0.65 \\ c_0 + c_1 r_1 + c_2 r_1^2 + c_3 r_1^3, & \text{if } 0.65 \leq r_1 \leq 0.81 \\ \frac{1}{2}(1-\alpha)r_1^{-\alpha}, & \text{if } 0.81 \leq r_1 < \infty \end{cases} \quad (3.1)$$

當 a 為 1 時，即為阮肯渦旋 (Rankin vortex)，當 a 為 0.7 或 0.5 時，為修正阮肯渦旋，此種渦旋在最大切向風速半徑外側存在渦度裙帶。因此本組實驗共有 4 個重要參

Δ/R_1 ，兩渦旋無因次距離、(3) $\gamma = \zeta_1/\zeta_2$ ，兩渦旋無因次強度比、(4) α ，中心渦旋結構。

選取其中兩個形成雙眼牆結果的實驗，觀察其渦度場與位渦場，如圖 1，實驗參數分別如圖上所示。上為渦度場，下為位渦場。兩實驗均積分至 84 小時。由圖中可以看到渦度場與位渦場的分布幾乎相同，僅有些細微的部份不同，整體的結果可說是一樣。將原始方程式經由垂直轉換 (vertical transform)、傅立葉轉換 (Fourier transform) 及正模分析 (normal mode analysis) 可得證，位渦場均由旋轉模 (rotational mode) 所貢獻，並沒有慣性重力波。由實驗中位渦場與渦度場相同，因此可知，重力波對雙眼牆的形成幾乎沒有影響。

比較 Kuo et al. (2007) 的實驗結果 (圖 2) 與本組實驗的實驗結果相位圖 (圖 3)。可以發現形成雙眼牆結構主要的參數分布大致上均相同，僅在雙眼牆結構與其他結構的交界處有些許不同，此原因可能是因為兩者實驗組的絕對參數值不同而導致，但這並不影響我們欲了解的目的。因此，本組實驗所得到的結論為重力波在雙眼牆形成的過程中造成的影響有限；在雙渦旋實驗中，渦度動力 (vorticity dynamics) 和位渦動力 (potential vorticity dynamics) 近乎相同，結果屬於慢速流形。

接著我們根據 RAINEX (2005) 觀測 Hurricane Rita (2005) 的渦度場觀測，如圖 4。

設計了一實驗：中心渦旋最大切向風為 51.8 ms^{-1} ，最大風速半徑為 37.5 公里，此中心渦旋的強度相當於中央氣象局颱風分級中的強烈颱風。在距離中心 15 公里與 75 公里處分別以強迫作用給予一個半徑為 10 公里，強度為 $2.4 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 的中渦旋。其實驗結果如圖 5，上圖為平均切向風速剖面圖，下圖為切向風速變化隨距離之剖面圖。點虛線為初始場，紅色線為中渦旋距中心 15 公里之實驗，藍色線為中渦旋距中心 75 公里之實驗。因此，由下圖可以清楚看到，當中渦旋發生在最大風速半徑內的時候，中心渦旋各處均明顯起轉，平均最大風速由原本的 51.8 ms^{-1} 增為 54.1 ms^{-1} ，增加了 2.3 ms^{-1} ，中心渦旋並有稍微變大的情況。相對於離中心近的實驗，距中心 75 公里的實驗平均最大風速卻沒有增強，反而減弱至 49.3 ms^{-1} ，降低了 2.5 ms^{-1} 。

在這邊，我們先定義起轉效應為平均最大風速有增強的情況。因此，當中心渦旋很強的時候，若中渦旋發生在最大風速半徑之內，則起轉效應顯著；若中渦旋發生在最大風速半徑之外，則因為中心渦旋外的快速帶狀化區域大，中渦旋會被快速地帶狀化而消散，因此沒有起轉效應。

四、弱渦旋起轉效應實驗

根據上述強渦旋起轉效應實驗，考慮相同的狀況，但將中心渦旋的強度與結構改變為高斯 (gauss) 渦旋，最大風速為 16.7 ms^{-1} ，最

大風速半徑為 37.5 公里此中心渦旋的強度相當於中央氣象局颱風分級中的輕度颱風。同樣地，在距離中心 15 公里與 75 公里處分別以強迫作用給予一個半徑為 10 公里，強度為 $2.4 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 的中渦旋。其實驗結果如圖 6，上圖為平均切向風速剖面圖，下圖為切向風速變化隨距離之剖面圖。點虛線為初始場，紅色線為中渦旋距中心 15 公里之實驗，藍色線為中渦旋距中心 75 公里之實驗。由距中心 15 公里的實驗中可以看到，較弱的中心渦旋結構，同樣的中渦旋強度，平均最大風速竟增強至 23.3 ms^{-1} ，增強了 6.5 ms^{-1} 。而至於距中心 75 公里的實驗，其平均最大風速僅僅只增強了 0.1 ms^{-1} ，但整個渦旋有外擴變大的傾向。

這樣的實驗結果與強渦旋的實驗結果不盡相同。當中心渦旋為弱渦旋時，兩實驗平均最大風速均有增強的情況，中心渦旋同時也外擴。當中渦旋發生在最大風速半徑之內時，起轉效應明顯比起強渦旋的實驗中要顯著。而在中渦旋發生在最大風速半徑之外時，卻也有起轉效應，這是因為當中心渦旋為弱渦旋時，其快速帶狀化區域帶狀化的能力不足，無法帶狀化外圍的中渦旋，因此中渦旋可以混入弱的中心渦旋，導致起轉效應的發生。

五、奇比颱風 (Typhoon Chebi) 實驗

另外我們對 Typhoon Chebi (2001) 做了一類似的模擬。圖 7 為 Typhoon Chebi (2001) 之紅外線衛星雲圖及模式模擬初始渦度場。

初始場按照觀測給定，中心渦旋風速為 75 節 (knot)，約為 37 ms^{-1} 。經過 12 小時的積分後，平均切向風速剖面圖及切向風速變化隨距離之剖面圖如圖 8，平均渦度剖面圖如圖 9。最大切向風增強至 40.9 ms^{-1} ，和觀測的 100 節大致相同。但值得注意的是，中渦旋所給定的位置在中心渦旋的最大切向風速之外，但最後仍然產生了起轉效應。由圖 9 可知，中心渦旋的強度造成的快速帶狀化區域不足以帶狀化外圍的渦度，因此中心渦旋無法維持自身，進而與中渦旋發生交互作用，產生起轉效應。

六、結論

颱風渦旋的結構可以受到許多不同的機制的影響，例如：颱風與中渦旋的交互作用、非絕熱效應、暖海渦造成的海氣交互作用、中層水氣濕化及垂直風切等等。在本研究中，我們根據過去的理論研究 (如：Enagonio and Montgomery, 2001) 以及最新的颱風觀測 (RAINEX, 2005)，嘗試以颱風與中渦旋交互作用的角度切入，以純粹動力作用的情況，探討中心渦旋與外圍中渦旋渦度交互作用而產生的起轉現象。

結果顯示：(1) 在淺水模式的雙渦旋交互實驗與之前在正壓模式下的結果幾乎相同，亦即渦度動力和位渦動力在強颱風形成雙眼牆的狀況之下沒有不同，此即為慢速流形的情況，重力波造成的影響很有限；(2) 至於起轉效應，若中渦旋發生在中心渦旋的最大風速半

徑內，則起轉效應顯著；反之則必須視中心渦旋的強度來決定是否起轉。這與 Schubert and Hack (1982) 的結論類似，當中渦旋發生在最大風速半徑之內時，也就是慣性不穩度 (inertial stability) 最大的地方，颱風容易發展，雖然他們是以熱力的強迫作用和軸對稱的模式來討論這個問題，與本研究中是以渦度強迫作用和非軸對稱的情況不同，但是質量匯 (mass sink) 和渦度源 (vorticity source) 所產生的效應基本上類似，且非軸對稱是更接近實際的情形；(3) 產生起轉效應其中一個重要因素即為中心渦旋的強度，若中心渦旋強度愈強、渦度梯度愈大，則外圍的快速帶狀化區域亦愈強且大，當外圍的渦度進入到此區時，將會被快速地帶狀化而消散，無法混入中心渦旋，因此在這樣的情況下，中心渦旋較能維持自身，不易起轉。反之，當中心渦旋強度較弱時，則容易受到外圍渦度的影響，而有起轉的現象；(4) 在起轉效應的情況之下，合併動力 (merger dynamics) 主宰全部的過程，使中心渦旋外擴，成為一個更大且更強的渦旋。在有起轉的實驗中，可以看到除了平均最大風速增強以外，整個渦旋亦有變大且外擴的現象，最後亦形成了單一的大渦旋，因此屬於合併動力，此動力機制在主宰了起轉效應的過程。

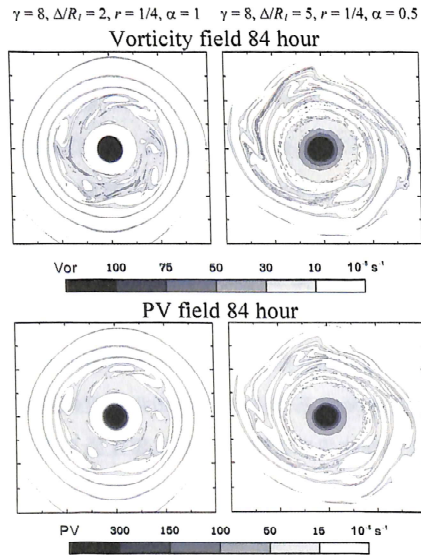


圖 1 其中兩形成雙眼牆結構之實驗結果，實驗參數分別如圖上。上面兩圖為兩實驗之渦度場，下面兩圖為位渦場。兩實驗均積分至 84 小時。渦度場和位渦場的分布幾乎相同，僅有小區域不同。

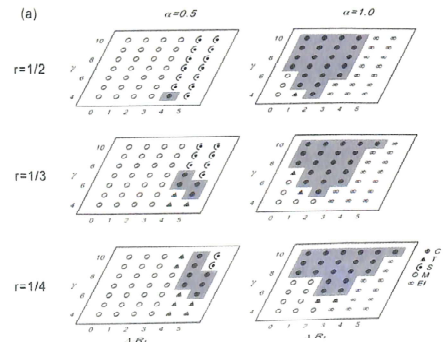


圖 2 Kuo et al. (2007) 之實驗相位圖。由上而下分別為 $r = 1/2$ 、 $r = 1/3$ 、 $r = 1/4$ ，縱軸為強度 (γ)，橫軸為無因次距離 (Δ/R_1)，左側為 $\alpha = 0.5$ 的情況，右側為 $\alpha = 1$ ，即為阮肯渦旋的情況。(摘自 Kuo et al., 2007)

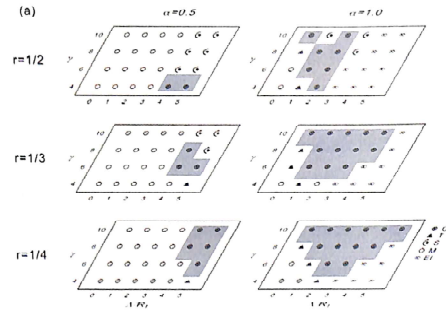


圖 3 本實驗組相位圖。由上而下分別為 $r = 1/2$ 、 $r = 1/3$ 、 $r = 1/4$ ，縱軸為強度 (γ)，橫軸為無因次距離 (Δ/R_1)，左側為 $\alpha = 0.5$ 的情況，右側為 $\alpha = 1$ ，即為阮肯渦旋的情況。

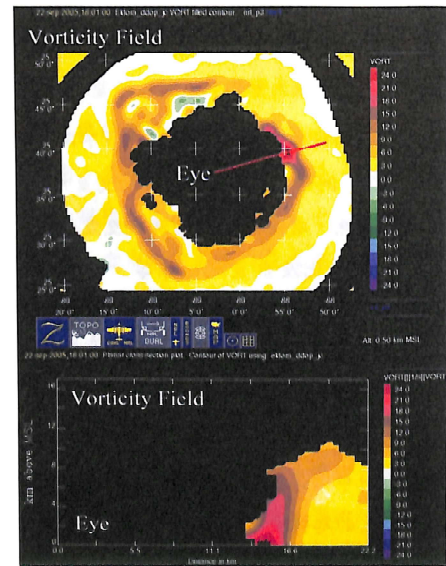


圖 4 上圖為 RAINEX (2005) 觀測 Hurricane Rita (2005) 高度 0.5 公里近中心渦度場，單位為 $10^{-4} s^{-1}$ 。下圖為上圖紅色部分之渦度剖面圖。清楚可見近颱風中心偏東北 15 公里處有一中渦旋，其他方位亦有渦度較強區 (深黃色區域) (摘自 RAINEX, 2005)

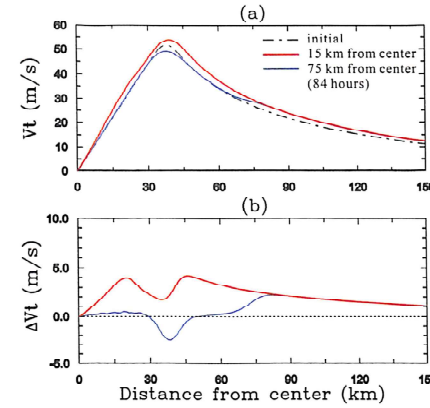


圖 5 強中心渦旋與強迫作用之中渦旋交互作用之平均切向風速剖面與切向風速變化隨距離之剖面圖。上圖點虛線為初始場，紅線為中渦旋距中心 15 公里處之實驗，藍線為中渦旋距中心 75 公里處之實驗。下圖點線為零度線，其餘與上圖相同。

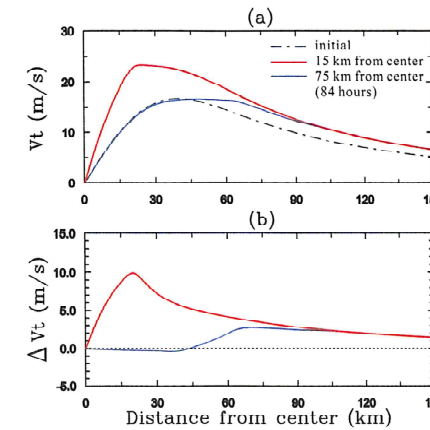


圖 6 弱中心渦旋與強迫作用之中渦旋交互作用之平均切向風速剖面與切向風速變化隨距離之剖面圖。上圖點虛線為初始場，紅線為中渦旋距中心 15 公里處之實驗，藍線為中渦旋距中心 75 公里處之實驗。下圖點線為零度線，其餘與上圖相同。

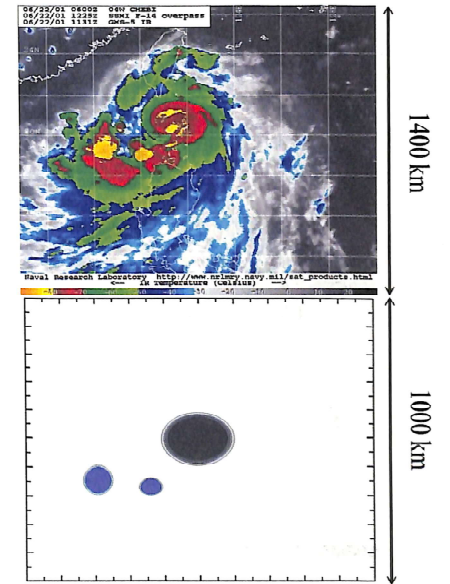


圖 7 上圖為 Typhoon Chebi (2001) 之紅外線雲圖，下圖為模式模擬 Typhoon Chebi (2001) 起轉效應初始渦度場，藍色部份為即將由強迫作用所給的中渦旋位置。

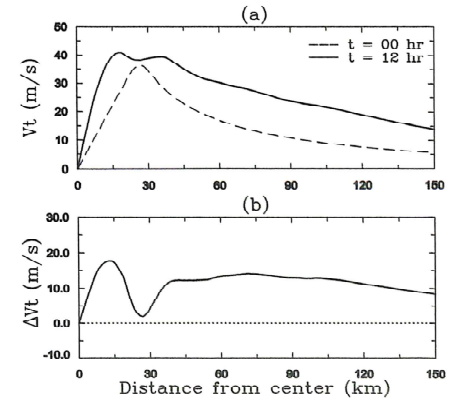


圖 8 Typhoon Chebi (2001) 起轉效應實驗之平均切向風速剖面與切向風速變化隨距離之剖面圖。上圖虛線為初始場，黑線為積分至 12 小時後的結果。下圖點線為零度線。

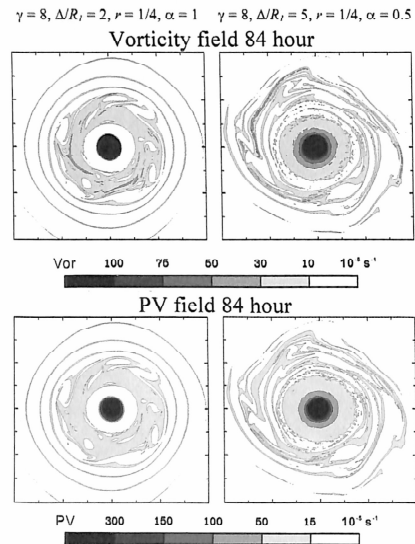


圖 9 Typhoon Chebi (2001) 起轉效應實驗之平均渦度剖面圖。上圖虛線為初始場，黑線為積分至 12 小時後的結果。

參考文獻

- Dritschel, D. G., and D. W. Waugh, 1992: Quantification of the inelastic interaction of unequal vortices in two-dimensional vortex dynamics. *Phys. Fluids*, **4A**, 1737-1744.
- Enagonio, J., and M. T. Montgomery, 2001: Tropical cyclogenesis via convectively forced vortex Rossby waves in a shallow water primitive equation model. *J. Atmos. Sci.*, **58**, 685-705.
- Gentry, R. C., T. T. Fujita, and R. C. Sheets,

1970: Aircraft, spacecraft, satellite and radar observations of Hurricane Gladys, 1968. *J. Appl. Meteor.*, **9**, 837-850.

Hendricks, E. A., M. T. Montgomery, and C. A. Davis, 2004: The Role of "Vortical" Hot Towers in the Formation of Tropical Cyclone Diana (1984). *J. Atmos. Sci.*, **61**, 1209-1232.

Kuo, H.-C., L.-Y. Lin, C.-P. Chang, and R. T. Williams, 2004: The formation of concentric vorticity structures in typhoons. *J. Atmos. Sci.*, **61**, 2722-2734.

—, W. H. Schubert, C.-L. Tsai, and Y.-F. Kuo, 2007: Vortex interactions and the barotropic aspects of concentric eyewall formation. *J. Atmos. Sci.*, submitted.

RAINEX (The NSF sponsored Hurricane Rainband and Intensity Experiment), 2005

Rozoff, C. M., W. H. Schubert, B. D. McNoldy, and J. P. Kossin, 2006: Rapid filamentation zones in intense tropical cyclones. *J. Atmos. Sci.*, **63**, 325-340.

Schubert, W., J. J. Hack, 1982: Inertial Stability and Tropical Cyclone Development. *J. Atmos. Sci.*, **8**, 1687-1697.

Vortex Interaction and Structural Change

Yen-Chih Shen¹ Hung-Chi Kuo²

¹ Research and development center, Central weather bureau

² Department of Atmospheric Sciences National Taiwan University

Abstract

This study utilizes a shallow water model to understand the vortex interaction, structural change and spinup effect of typhoons. Despite the Rossby Radius of Deformation around strong vortexes is much smaller than of the background, the results of experiments in the nondivergent barotropic model and in the shallow water model are similar. This indicates that there is little differences between vorticity dynamics and potential vorticity dynamics in the formation of the concentric eyewall structure of typhoons. The dynamics of this formation belongs to a slow manifold dynamics and the effect of the gravity waves is limited.

We attempt to study the structural change of typhoons in vorticity interactions, including both (1) The intensification of maximum tangential wind and radius of maximum wind of typhoons and (2) The cyclogenesis of weak vortexes. We designed ideal experiments according to observations of RAINEX in order to study the spinup effect of the vortex contributed by mesovortex. The results of these experiments are classified according to its structural characteristic. Type I includes the cases which the maximum tangential wind of the core vortex increases and Type II includes the cases which the maximum tangential wind does not increase, but the radius of maximum wind increase.

The Result shows that: (1) If the mesovortex arise within the radius of maximum wind, the structural change of core vortex belongs to Type I. Otherwise, it belongs to Type II, (2) The raise of the maximum tangential wind is proportion to the strength of the mesovortex, (3) If the vorticity structure of the core vortex is looser, the mesovortex will more profound impact on the core vortex. These results can be explained by the rapid filamentation zone dynamic theory of the vortex. Finally, we have also perform simulations with turbulent vorticity background. In general, the result of the turbulent background experiments supports the ideal experiments.

Key words: concentric eyewall, filamentation time, mesovortex, spinup