

# 凡那比颱風(2010)與米塔颱風(2019)之次環流結構：理想化軸對稱颱風模式結果與 WRF 模式模擬結果之比較與探討

李尚恩 楊明仁

國立臺灣大學大氣科學系

## 摘要

本研究使用理想化軸對稱颱風模式以診斷凡那比颱風 (2010) 與米塔颱風 (2019) 的溫度變化趨勢及含徑向風與垂直風速之次環流結構，並與高解析 (網格間距 3 公里) 之 WRF 真實個案模擬結果做分析比較。理想化颱風模式將靜力穩定度、斜壓性、慣性穩定度、非絕熱加熱徑向變化等參數代入 Sawyer-Eliassen 方程式，以診斷軸對稱次環流結構。我們已針對凡那比颱風 (2010) 檢視環境斜壓性與非絕熱加熱徑向分佈對於颱風次環流結構之影響，結果顯示由於理想化颱風模式未能考慮雲頂輻射冷卻造成之亂流與近地表摩擦，高層與低層次環流與 WRF 模式結果有較大差異。相較於正壓環境條件而言，斜壓性使得低層入流、高層出流、颱風眼內下沉運動增強，颱風主雨帶的存在也能使眼牆附近之次環流增強。米塔颱風 (2019) 行經台灣東部海域時，經歷眼牆置換過程。目前正進行米塔颱風次環流診斷，於軸對稱架構下，預期雙眼牆內存在上升運動，眼牆間 (moat) 存在下沉運動與下沉增溫造成的正溫度趨勢。

關鍵字：颱風、次環流、暖心、軸對稱模式、WRF、雙眼牆

## 一、前言

颱風的次環流對於其強度貢獻極其重要。颱風低層之入流輻合至眼牆或雨帶，於此處產生上升氣流，該氣流小部分向內至颱風眼處形成受迫的下沉氣流外，大部分向外離開颱風，為高層出流，並於颱風周圍處形成廣而微弱之下沉使天氣較為晴朗，此為颱風主要的次環流結構。而低層入流夾帶海洋上豐沛的水氣，除了因角動量守恆而增強主環流外，其於輻合處產生的上升運動可將水氣凝結釋放潛熱而產生劇烈天氣現象。

颱風所夾帶的強風與劇烈降水為台灣帶來嚴重的天氣災害，因此，合理的颱風路徑與強度預報可使民眾與災防中心提前做災防準備以減少生命財產損失。現行數值天氣預報模式預報數日後將侵台之颱風，數十年來已將路徑之誤差逐漸縮小，於海上穩定發展的颱風也可描述強度之變化，對於快速增強與快速減弱的颱風模式較無法合理預期。

造成颱風強度快速變化，主要與其系統內之潛熱加熱造成結構的改變有關。Schubert et al. (2007) 利用 Sawyer-Eliassen 方程式診斷軸對稱颱風次環流結構。其將颱風簡化為颱風眼、眼牆、眼牆外三區

域，於眼牆區域給定徑向均質、垂直方向可解析的潛熱加熱，將以上簡化假設代入 Sawyer-Eliassen 方程式解次環流之解析解。其結果顯示眼牆區有上升運動並於外側達到最強，颱風眼區有下沉運動並於外側較強。颱風眼與眼牆之溫度趨勢為正，顯示颱風為一暖心系統，升溫最強之位置則於眼牆內側，表示高溫極大值為環狀。

以上為高度理想之情形，實際颱風之相關參數，如溫度、風速、潛熱加熱等，皆為徑、切、垂直三方向變化之參數。本研究複雜化以上情境，假設颱風軸對稱，保留徑、垂直兩方向之變化，依 Schubert et al. (2007) 所列之 Sawyer-Eliassen 方程式數值解其次環流結構。

WRF 模式常見於現行大氣科學研究，其真實個案模擬考慮眾多且複雜的物理過程，加上大氣為高度非線性系統，修改其中參數所造成的結果改變較難歸咎於單一物理原因。理想化模式由於先經由一定程度之假設使系統較為單純，利用其做敏感度實驗較能凸顯該變數對於結果之影響，且較能釐清其中之因果關係。本研究利用 Sawyer-Eliassen 方程式建立一理想化模式診斷颱風次環流結構，並針對凡那比颱風(2010)個案進行斜壓性與潛熱分佈實驗討論兩者對於次環流結構之影響。

## 二、研究方法

### (一) 理想化軸對稱颱風模式

本研究依照 Schubart et al. (2007)之方法建立理想化軸對稱颱風模式(以下簡稱理想化模式)診斷颱風軸對稱之次環流結構。理想化模式假設大氣無黏滯力、靜力平衡、梯度風平衡、颱風軸對稱、科氏參數為定值。依以上假設可以圓柱座標表示為下列控制方程：

$$\left(f + \frac{v}{r}\right)v = \frac{\partial \phi}{\partial r} \quad (1a)$$

$$\frac{Dv}{Dt} + \left(f + \frac{v}{r}\right)u = 0 \quad (1b)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{g}{T_0}T \quad (1c)$$

$$\frac{\partial(rv)}{r\partial r} + \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{w}{H} = 0 \quad (1d)$$

$$c_p \frac{DT}{Dt} + \frac{RT}{H}w = Q \quad (1e)$$

其中， $u$ 、 $v$ 、 $w$  分別為徑向風、切向風與垂直速度， $\phi$  為重力位， $R$  為乾空氣之氣體常數， $c_p$  為乾空氣之定壓比熱、 $f$  為科氏參數， $Q$  為非絕熱加熱。圓柱座標之垂直座標為  $z = H \log(p_0/p)$ ， $H = RT_a/g$ ， $p_0 = 1000 \text{ hPa}$ ， $T_0 = 250 \text{ K}$ 。實質導數(material derivative)為：

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial r} + w \frac{\partial}{\partial z}$$

此控制方程隱含熱力風平衡假設，將徑向動量方程(1a)之垂直微分與靜力平衡方程(1c)合併整理，可得熱力風平衡關係式：

$$\left(f + \frac{2v}{r}\right)\frac{\partial v}{\partial z} = \frac{g}{T_0}\frac{\partial T}{\partial r} \quad (2)$$

徑向風與垂直速度可以流函數表示為以下形式，該形式滿足連續方程(1d)：

$$e^{-\frac{z}{H}}u = -\frac{\partial \psi}{\partial z} \quad (3a)$$

$$e^{-\frac{z}{H}}w = \frac{\partial(rv\psi)}{r\partial r} \quad (3b)$$

將切向動量方程(1b)乘以  $-(f + 2v/r)$ 、熱力方程(1e)乘以  $-(g/T_0)$ ，並將兩式之  $u$ 、 $w$  以(3a)、(3b)之流函數表示可得動力關係式(4)與熱力關係式(5)：

$$-\left(f + \frac{2v}{r}\right)\frac{\partial v}{\partial t} + B\frac{\partial(rv\psi)}{r\partial r} + C\frac{\partial \psi}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{g}{T_0}\frac{\partial T}{\partial t} + A\frac{\partial(rv\psi)}{r\partial r} + B\frac{\partial \psi}{\partial z} = \frac{g}{C_p T_0}Q \quad (5)$$

其中， $A$ 、 $B$ 、 $C$  分別為靜力穩定度、斜壓性、慣性

穩定度，其形式分別表示如下。熱力風平衡關係式使斜壓性存在二種形式。

$$A = e^{\frac{z}{H}}\frac{g}{T_0}\left(\frac{\partial T}{\partial z} + \frac{\kappa T}{H}\right) = e^{\frac{z}{H}}N^2 \quad (6)$$

$$B = -e^{\frac{z}{H}}\left(f + \frac{2v}{r}\right)\frac{\partial v}{\partial z} = -e^{\frac{z}{H}}\frac{g}{T_0}\frac{\partial T}{\partial r} \quad (7)$$

$$C = e^{\frac{z}{H}}\left(f + \frac{2v}{r}\right)\left(f + \frac{\partial(rv)}{r\partial r}\right) \quad (8)$$

將動力關係式(4)之垂直微分與熱力關係式(5)之徑向微分相加，並以熱力風平衡關係式(2)消除時間微分項，即可得 Saywer-Eliassen 方程式(9)：

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial r}\left(A\frac{\partial(rv\psi)}{r\partial r} + B\frac{\partial \psi}{\partial z}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(B\frac{\partial(rv\psi)}{r\partial r} + C\frac{\partial \psi}{\partial z}\right) \\ = \frac{g}{c_p T_0}\frac{\partial Q}{\partial r} \quad (9) \end{aligned}$$

此方程式說明，只要取得非絕熱加熱分佈並計算為徑向變化，切向風與溫度計算為靜力穩定度、斜壓性、慣性穩定度，即可診斷颱風軸對稱部分之次環流結構 $\psi$ ，再帶入(3a)、(3b)、(5)即可解出徑向風 $u$ 、垂直速度 $w$ 與溫度趨勢 $\partial T/\partial t$ 。

此理想化模式使用二階中差分法離散(6)至(9)所有微分項。網格配置使用 Arakawa C grid 交錯網格 (Mesinger and Arakawa, 1976)，如圖一所示。邊界條件設定為模式頂層、底層、颱風中心處( $r = 0$ )之  $\psi = 0$ ，外邊界( $r \rightarrow \infty$ )之  $r\psi \rightarrow 0$ 。由於模式徑向範圍有限，因此模式之外邊界須遠離颱風主結構以避免邊界條件之效果影響。

模式設定部分，垂直方向底層 960 百帕，頂層 40 百帕，間距 20 百帕；徑方向由 1 公里向外延伸至 650 公里，間距 1 公里。研究結果繪圖之徑方向皆顯示 250 公里內範圍，以避免邊界條件影響。

### (二) WRF 模式設定

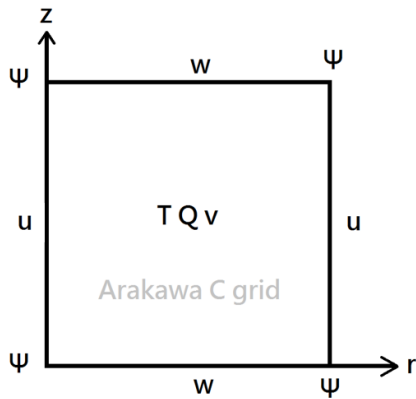
本研究使用 WRF 模式 (第 3.9 版; Skamarock et al., 2008) 之真實個案模擬凡那比颱風(2010)。模式設定取自 Yang et al. (2018)。積分時間自 2010 年 9 月 18 日 00 UTC 至 2010 年 9 月 19 日 00 UTC，共 24 小時。網格採用三層巢狀網格，如圖二所示，水平網格大小分別為 9 公里、3 公里、1 公里。垂直層數 55 層，模式頂層為 30 百帕。

模式之物理參數方案使用 Grell-Devenyi 系集積雲參數法(Grell and Devenyi, 2002)、Morrison 雙矩量雲微物理參數法(Morrison et al., 2009)、RRTM 長波輻射參數法(Mlawer et al., 1997)、Dudhia 短波輻射參數法(Dudhia, 1989)、Yonsei University (YSU)邊界層參數法(Hong et al., 2006)。積雲參數法僅用於 9 公里網格，並假設 3 公里與 1 公里網格大小可解析積雲。

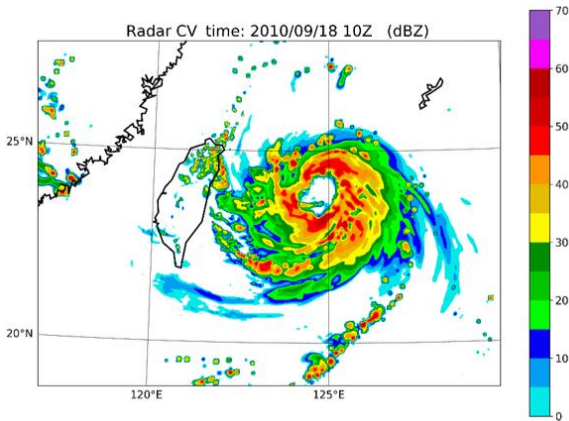
### (三) 實驗設計

本研究先以 WRF 模式模擬凡那比颱風，其切向風、溫度、非絕熱加熱結果換算為靜力穩定度、斜壓性、慣性穩定度與非絕熱加熱之徑向變化後代入理想化模式。非絕熱加熱僅考慮最主要的潛熱釋放。診斷之時間為 2010 年 9 月 18 日 10 UTC，並以 3 公里之網格做為資料代入理想化模式。該時間凡那比颱風仍位於海上，其主結構尚未受台灣地形影響，且較接近軸對稱。如圖三，其雷達回波東側與南側範圍稍廣，於眼牆處，不同方位皆存在寬度約 50 公里之 45 至 50 dBZ 回波。

實驗分為斜壓性與潛熱兩部分。斜壓性實驗分為正壓與斜壓，正壓係將所計算之斜壓性歸零，使其為正壓之環境，斜壓則保留完整斜壓性，比較斜壓性存在造成之次環流影響。潛熱實驗先以軸對稱潛熱加熱依強度分為眼牆與主雨帶兩部分(如圖四)，以完整之潛熱分佈與移除主雨帶潛熱兩情況，比較主雨帶的存在對於颱風次環流之影響。



圖一 Arakawa C grid 之交錯網格配置。該配置將如溫度之熱力變數配置於網格中央，徑向風配置於網格左右兩側，垂直速度配置於上下兩側，切向風配置於網格前後，由於軸對稱平均，與熱力變數之位置重疊。

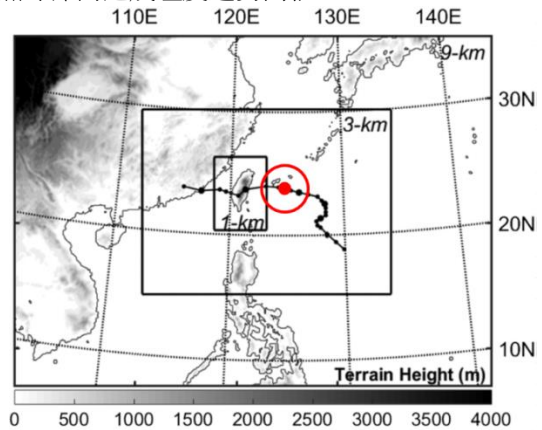


圖三 WRF 模擬之 2010 年 9 月 18 日 10 UTC 雷達回波。

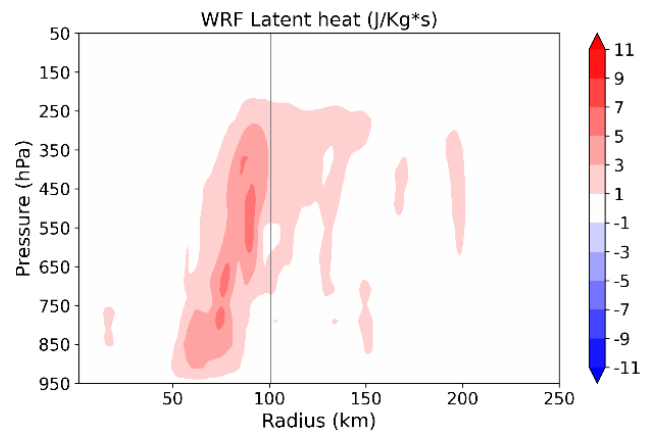
## 三、結果與討論

### (一) 理想化模式與 WRF 模式結果比較

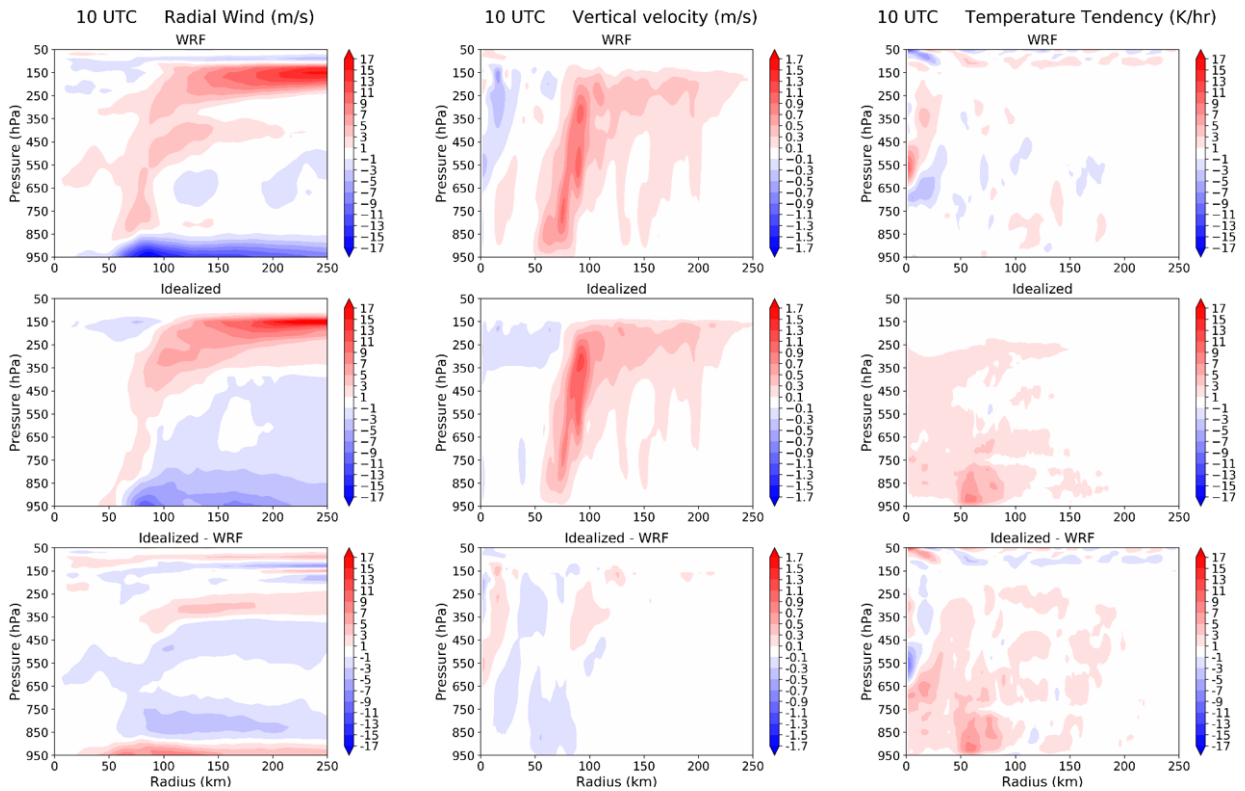
由於 WRF 模式考慮眾多物理過程而複雜，理想化模式透過颱風軸對稱、未考慮地形等假設而較為簡單，兩模式必存在差異，兩者之結果與差異如圖五。兩模式之徑向風皆呈現低層流入與高層出流之基本次環流特徵，而理想化模式於低層因未考慮地表摩擦而低估流入強度，高層因未考慮雲頂輻射冷卻，使此二處徑向風差異較大。理想化模式與 WRF 模式之垂直速度差異較小，半徑 100 公里內有較顯著之差異。由於該區域為主要對流區，較不滿足熱力風平衡，此外該區之潛熱與斜壓性梯度較大，數值差分將產生誤差而造成差異。理想化模式之溫度趨勢普遍高於 WRF 模式結果，以半徑 100 公里之高估較顯著。該區垂直速度大多低估，提供不足的絕熱冷卻而造成溫度趨勢高估。



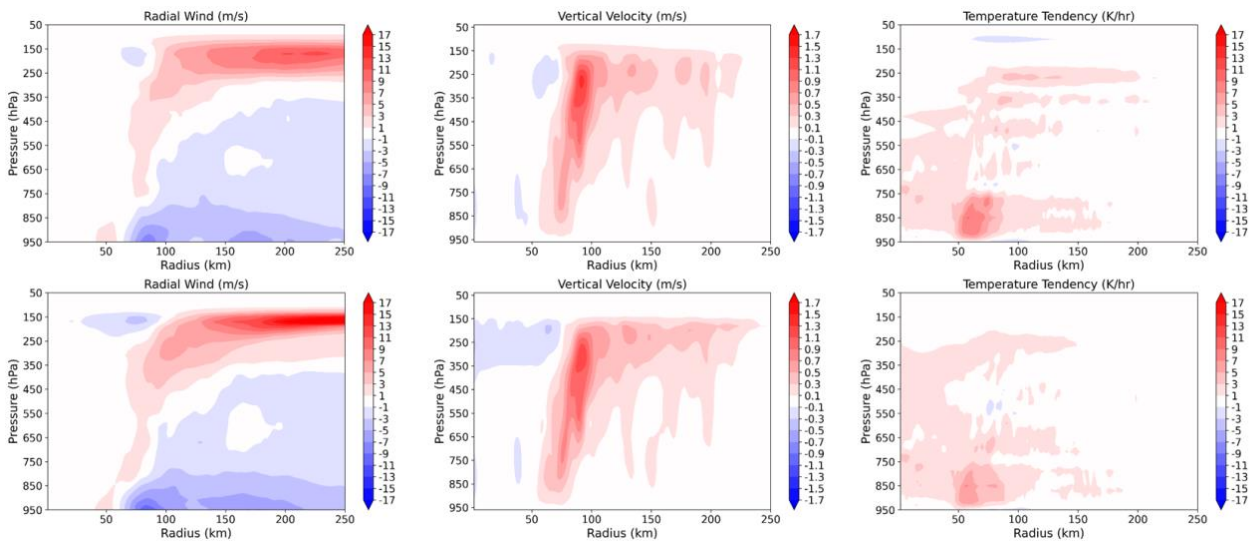
圖二 修改自 Yang et al. (2018)圖一。WRF 模式之巢狀網格配置。紅點與紅圈為模擬之 2010 年 9 月 18 日 10 UTC 颱風中心位置與 850 百帕風速大於 35 m/s 之範圍。



圖四 WRF 模擬之軸對稱潛熱分佈。圖中之垂直灰線位於半徑 100 公里處，以內為眼牆區，以外為主雨帶區。



圖五 兩模式之凡那比颱風次環流結果。左、中、右欄分別為徑向風、垂直速度、溫度趨勢。上、中、下列分別為理想化模式、WRF 模式、理想化模式減去 WRF 模式之差異。因繪圖關係，徑、垂直方向比例有所調整。

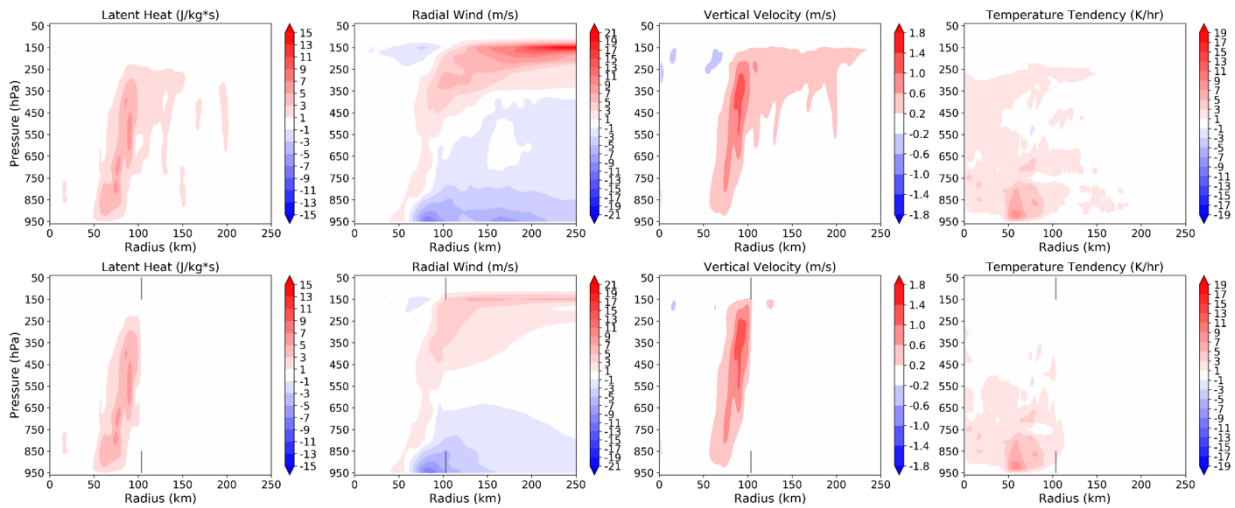


圖六 理想化模式斜壓性實驗結果。左、中、右欄分別為徑向風、垂直速度、溫度趨勢。上下列為正壓與斜壓。因繪圖關係，徑、垂直方向比例有所調整。

## (二) 斜壓性實驗

實驗結果如圖五所示。正壓與斜壓兩者的次環流結構相似，差異顯現於細節。存在斜壓性之低層入流與高層出流較正壓者強。由於斜壓性存在表示颱風為暖心，對於正壓環境，於高層產生相對高壓，向外之氣壓梯度力增強高層出流，較強之高層出流須較強與較廣闊的低層入流補償。斜壓性存在者 200

公里內垂直速度較強。斜壓性存在增強高層出流，由連續方程可知亦須較強較廣的上升運動，該較強的上升運動於颱風眼處亦造成較強的下沉運動。溫度趨勢部分，於低層 50 至 100 公里處正壓之升溫較斜壓大。斜壓性存在表示颱風外圍較中心低溫，配合低層入流而形成冷平流，抵銷部分升溫效果，該處溫度趨勢較正壓者大。由於入流與出流增強、主



圖七、理想化模式潛熱實驗結果。左至右欄分別為潛熱、徑向風、垂直速度、溫度趨勢。上下列分別為保留完整主雨帶潛熱與移除主雨帶潛熱。圖中之灰線表示眼牆與主雨帶分別位置。因繪圖關係，徑、垂直方向比例有所調整。

雨帶之垂直速度較強、眼內下沉較明顯，斜壓性可增強颱風之次環流。

### (三) 潛熱實驗

結果如圖七所示。完整潛熱與主雨帶移除兩者之次環流差異明顯。主雨帶潛熱移除者之次環流較完整潛熱者單純，低層入流僅於眼牆處較為明顯，低層入流與高層出流之強度皆較完整潛熱者弱，且缺少中層之入流。主雨帶移除之垂直速度僅存在於眼牆，颱風眼之下沉較弱，且缺少主雨帶高層廣闊的上升運動。溫度趨勢之升溫僅存在於 100 公里內之中低層。主雨帶使中層入流得以存在，增強低層入流、高層出流、上升運動與颱風眼內下沉。較強之眼內下沉所夾之增溫使該處溫度趨勢較高。較強的高層出流搭配暖心結構而有較大暖平流，使高層溫度趨勢升高。主雨帶的潛熱加熱使次環流強度增強並可延伸到外圍區域、使次環流更加完整、建立較廣的暖心結構。

## 四、結論與未來工作

本研究以理想化軸對稱颱風模式數值解 Saywer-Eliassen 方程式以診斷颱風軸對稱之次環流結構。本次以凡那比颱風之 WRF 模擬個案代入此理想化模式診斷其次環流結構，並藉由改變斜壓性與潛熱分佈以探討此二變數對於次環流結構與強度之影響。

由於理想化模式與 WRF 模式之複雜性不同，兩者之次環流結果存在差異。因理想化模式未考慮低層地表摩擦及高層雲頂輻射冷卻與風切亂流，徑向風於高層與低層有較顯著之差異；眼牆處劇烈對

流較不滿足熱力風平衡或因數值誤差，此處垂直速度差異較大，其所造成的絕熱冷卻偏弱而使溫度趨勢高估。於斜壓性實驗中，斜壓性可略為增強次環流強度。斜壓性表示颱風為暖心系統，相對於正壓，於高層產生向外的氣壓梯度力，使出流及入流增強、主雨帶之上升運動與颱風眼下沉增強、低層升溫減弱。於潛熱實驗中，主雨帶的潛熱加熱對於次環流強度與結構完整性相當重要。主雨帶潛熱加熱存在時，出現中層入流，低層入流與高層出流增強且可延伸至較外圍區域，也於主雨帶處高層出現上升運動，溫度趨勢分佈較廣。

Houze et al. (2007)的 Rita 雙眼牆颶風飛機觀測指出，其兩眼牆間 (moat) 存在微弱的下沉氣流。未來將嘗試利用理想化模式診斷含有雙眼牆次環流結構之颱風個案，如米塔颱風(2019)。於軸對稱架構下，預期兩眼牆有上升運動，眼牆間有微弱下沉及微弱下沉增溫。也將針對此個案進行斜壓性與潛熱實驗。此外，米塔颱風於 2019 年 9 月 30 日北上通過台灣東部近海，並被花蓮雷達與五分山雷達觀測到，未來將嘗試使用經驗公式轉換雷達回波至潛熱加熱，代入理想化模式診斷次環流結構。

## 五、參考文獻

- Dudhia, J., 1989: Numerical study of convection observed during the Winter Monsoon Experiment using a mesoscale two-dimensional model. *J. Atmos. Sci.*, **46**, 3077–3107.
- Grell, G. A., and D. Devenyi, 2002: A generalized approach to parameterizing convection

- combining ensemble and data assimilation techniques. *Geophys. Res. Lett.*, **29**(14).
- Hong, Song-You, Yign Noh, Jimmy Dudhia, 2006: A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 2318–2341.
- Houze, R. A., Jr., S. S. Chen, B. F. Smull, W.-C. Lee, and M. M. Bell, 2007: Hurricane intensity and eyewall replacement. *Science*, **315**, 1235-1239.
- Mesinger, F., and A. Arakawa, 1976: NUMERICAL METHODS USED IN ATMOSPHERIC MODELS, volume 1, Chapter 4-3, *GRAP Public Ser.*, 46-50
- Mlawer, Eli. J., Steven. J. Taubman, Patrick. D. Brown, M. J. Iacono, and S. A. Clough, 1997: Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *J. Geophys. Res.*, **102**, 16663–16682.
- Morrison, H., G. Thompson, V. Tatarskii, 2009: Impact of Cloud Microphysics on the Development of Trailing Stratiform Precipitation in a Simulated Squall Line: Comparison of One- and Two-Moment Schemes. *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 991–1007.
- Schubert, W. H., C. M. Rozoff, J. L. Vigh, B. D. McNoldy, and J. P. Kossin, 2007: On the distribution of subsidence in the hurricane eye. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **133**, 595-605.
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G. Duda, X.-Y. Huang, W. Wang, and J. G. Powers, 2008: A Description of the Advanced Research WRF Version 3. *NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR*, 113 pp.
- Yang, M.-J., Y.-C. Wu, and Y.-C. Liou, 2018: The Study of Inland Eyewall Reformation of Typhoon Fanapi (2010) Using Numerical Experiments and Vorticity Budget Analysis. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **123**, 9604–9623.