

颱風雨帶地面觀測特徵之統計分析研究

中國文化大學大氣科學系 游政谷 陳 滢

一、前言

颱風雨帶或熱帶氣旋雨帶為熱帶氣旋中最顯著的結構特徵之一[1-6]，也是颱風眼牆範圍以外最主要的強降水區域[7, 8]。在過去幾十年裡，颱風雨帶的起因及其對於熱帶氣旋強度的影響已獲得相當程度的重視，然而目前我們對於這其中所隱含動力過程的了解仍相當有限[9-15]。

由於熱帶氣旋對流能量的來源主要來自大氣邊界層[16, 17]，因此釐清前述科學議題的關鍵可能在於增進我們對於颱風雨帶近地面結構特性的基礎知識。近期的觀測研究顯示，颱風雨帶所造成的熱帶氣旋邊界層熱力特性的改變，對於隨後熱帶氣旋的發展亦具有舉足輕重的地位[18, 19]。隨著 1970 年代飛機觀測設備與技術的進步，我們對於颱風雨帶內部的降水、氣流及熱力等中尺度結構已有不少的認識[20-23]。然而，這些颱風飛機觀測研究常常受限於飛行高度無法貼近地表(基於安全理由)的緣故，無法真正捕捉到颱風雨帶的地面結構特徵。

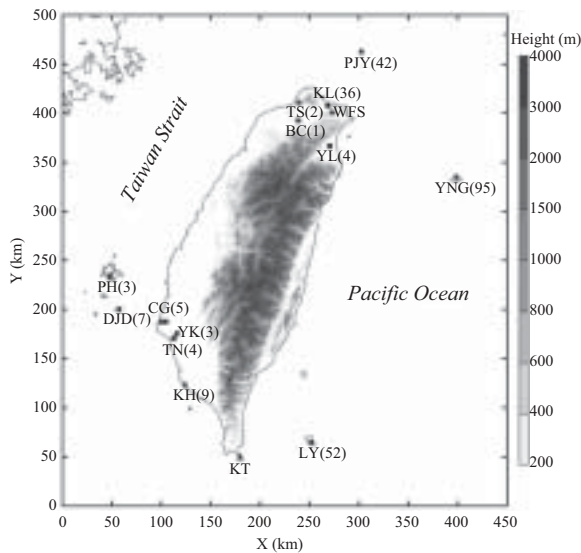
最早描述颱風雨帶地面特徵的文獻可回溯到 1950 到 1960 年代間，這些研究利用雷達圖像及地面觀測儀器檢視登陸颱風雨帶通過時各種氣象參數的變化情形[24-26]，由於這些早期研究所使用的地面觀測資訊之時空解析度相當粗糙，因此僅能提供颱風雨帶地面擾動之粗略概念。直至近期，Skwira *et al.* (2005) [27]利用 Wind Engineering Mobile Instrumented Tower Experiment (WEMITE)實驗期間內所收集的高時間解析度地面塔及雷達觀測資料，檢視數個登陸美國東岸熱帶氣旋雨帶的地面觀測特性。其分析指出，這些熱帶氣旋雨帶伴隨著明顯的相當位溫下降(~3-10 K)，而氣旋風暴的內流強度則呈現相當多變的特性。不過，Skwira *et al.* (2005)所研究的雨帶大多呈現層狀性降水結構[27]，對於較普遍發生的對流性颱風雨帶而言[11]，此研究所提供的雨帶地面觀測特徵就比較缺乏代表性。最近，

Yu and Tsai (2010) [28]利用高時間解析度的地面及雷達觀測資料分析兩個通過北台灣的颱風雨帶，針對其地面氣壓擾動進行詳細的量化診斷分析，與 Skwira *et al.* (2005)不同的是，這兩個雨帶具有對流降水結構特徵。研究顯示伴隨雨帶的地面氣壓具有波動的特性，而濕對流產生的氣壓擾動與伴隨颱風內部氣壓波動的結合可說明這些地面觀測的氣壓擾動變化。

從上面的回顧可知，現階段我們對於颱風雨帶地面特徵的認識仍只侷限在少數幾個個案研究上，非常缺乏全面性或普遍性的探討。台灣的地理位置位於西北太平洋颱風主要路徑上，大約每年會有 3-4 個颱風影響；加上中央氣象局在公元 2000 年建置完成台灣全島雷達觀測網，在這兩個條件優勢之下，使得台灣有獨特的機會去拓展我們對此一科學議題的了解。基於此，作者在國科會的研究經費補助下，利用近十年在台灣所收集的氣象雷達與地面觀測資料，統計分析大量接近台灣的颱風雨帶，希望能夠顯著增進我們對於颱風雨帶地面特徵的基礎認識。這些研究成果已發表在美國氣象學會 *Journal of the Atmospheric Sciences* 期刊(Yu and Chen 2011, Vol. 68, 1568-1585)，而本文的主要目的就是將此論文的研究內容與發現作一簡略概敘。

二、颱風雨帶地面合成特徵

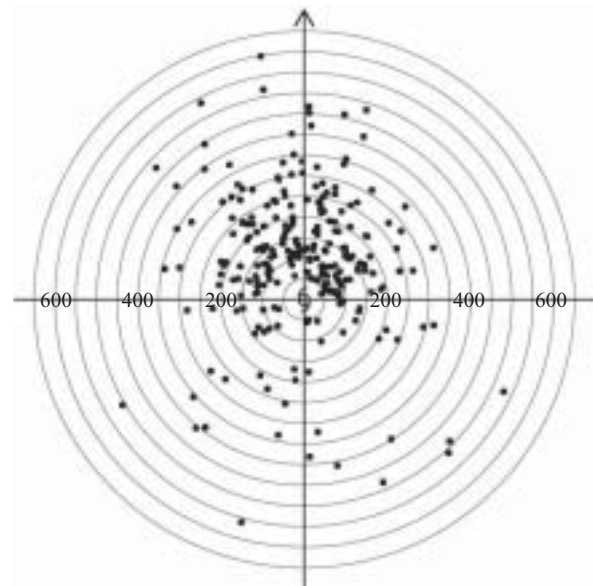
本研究利用中央氣象局都卜勒雷達資料、局屬氣象站逐分資料及日本氣象廳與那國島測候所逐分資料於 2000 至 2008 年間共定義出 263 個颱風雨帶(如圖一所示)，而這些雨帶相對於颱風行進方向之分佈位置如圖二所示。雨帶的定義必須符合以下條件：(1)雷達觀測的回波具備組織的特徵，即帶狀內(外)具有相對強(弱)的降水強度，(2)雨帶長度遠大於寬度，(3)雨帶邊界的回波值應大於 20 dBZ，(4)雨帶邊界可經由雷達回波水平結構明確看出。在本研究中，距離颱



圖一 2000~2008 年 263 個颱風雨帶通過之地面氣象站及數量。圖中 PJY、KL、TS、BC、YL、YNG、PH、DJD、CG、YK、TN、KH、LY（由北而南）分別代表彭佳嶼、基隆、淡水、板橋、宜蘭、與那國島、澎湖、東吉島、七股、永康、台南、高雄、蘭嶼地面氣象站（所在位置標示為正方形），WFS、CG、KT 分別代表中央氣象局五分山、七股、墾丁 S-band 氣象都卜勒雷達站（所在位置標示為三角形）。各個氣象站旁邊標示的數字為通過此氣象站的雨帶數量。灰階部份為地形高度（單位為公尺），間距如圖右方所示

風中心較遠之雨帶邊界我們稱為外邊界(outer edge)，較近者為內邊界(inner edge)。

首先，我們想知道這些觀測颱風雨帶的地面平均結構為何，因此使用雨帶的寬度作空間性的擾動場合成，在這裡的擾動值指的是觀測值與雨帶邊界內平均值的差值。圖三為本研究所定義出 263 個雨帶地面熱力及運動場的擾動變化空間合成圖。值得一題的是，雨帶合成擾動的振幅與個別雨帶的擾動值相較之下小上許多，主要是因為不同雨帶間擾動變化多樣性而相互抵消所致。不過，根據統計學 two-tailed Student's *t*-test 的評估，只要合成數值大於以下關鍵值就可認為是有意義的振幅擾動：氣壓(0.04 mb)、溫度(0.06°C)、露點溫度(0.06°C)、相當位溫(0.24 K)、相對濕度(0.25%)、風速(0.24 m s⁻¹)、風向(1.7°)、橫越雨



圖二 263 個颱風雨帶（黑色圓點）相對於颱風中心及行進方向的分佈圖。箭頭代表颱風之行進方向，颱風中心以 6 符號標示，同心圓圈的間距為 50 公里。

帶氣流(0.28 m s⁻¹)、平行雨帶氣流(0.24 m s⁻¹)，而圖三中各個氣象參數的合成數值基本上都是大過這些統計關鍵值。

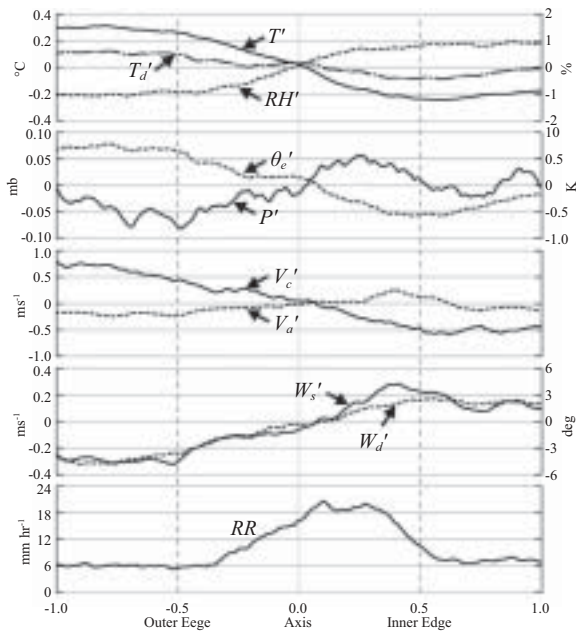
圖三顯示出溫度、露點溫度及相當位溫由雨帶外邊界至內邊界持續性的降低，不過，相對濕度卻在雨帶中心軸及內邊界內側變得較高，這意味著由於雨滴蒸發冷卻（即溫度下降）導致飽和水汽壓下降的效應大於水汽壓下降（即露點溫度降低）的影響。雨帶內水汽量的下降，可能與對流下衝流將較高處之乾空氣向下傳送的過程有關[11, 27]。氣壓的極小值位在外邊界，而極大值位於內邊界的內側，氣壓呈現明顯的波動變化，這個發現與 Yu and Tsai (2010)的研究結果一致[28]。橫越雨帶的風分量在外（內）邊界有明顯的正（負）值（即減速），平行雨帶的風分量在雨帶內些微增加，但其變化較不顯著。地面風速的極大值位在內邊界內側，風向在雨帶通過時呈現順時鐘轉變。最強降雨率也出現在內邊界內側，大致與氣壓極大值的位置相符。

三、地面擾動的量化分析

當颱風雨帶通過地面測站時，我們發現各個氣象參數的變化主要都發生在雨帶內（如圖三所

表一 颱風雨帶各個氣象參數地面擾動振幅的平均值、極大值及標準差

	$\Delta P'$	ΔT	ΔT_d	$\Delta \theta_e$	ΔRH	ΔW_s	ΔW_d	ΔV_c	ΔV_a	$max RR$
	(mb)	($^{\circ}C$)	($^{\circ}C$)	(K)	(%)	(ms^{-1})	(deg)	(ms^{-1})	(ms^{-1})	($mm hr^{-1}$)
mean value	0.9	0.8	0.9	4.0	3.9	3.7	17.8	4.1	3.7	41.9
maximum value	7.8	4.0	3.8	15.0	31.0	17.5	160.0	18.6	21.3	225.0
standard deviation	0.8	0.9	0.8	3.4	4.0	3.0	24.1	3.7	3.1	38.6



圖三 263 個颱風雨帶地面觀測擾動合成圖。由上至下分別為：擾動溫度(T')、擾動露點溫度(T_d')(點虛線)、擾動相對濕度(RH')、擾動氣壓(P')、擾動相當位溫(θ_e')、擾動橫越雨帶氣流(V_c')、擾動平行雨帶氣流(V_a')、擾動風速(W_s')、擾動風向(W_d')與降雨率(RR)。颱風雨帶的外邊界及內邊界(垂直灰色虛線)分別位於橫軸 $X = -0.5$ 及 $X = 0.5$ ，雨帶中心軸標示為 $X = 0$ (垂直灰色實線)

示)，因此我們將雨帶邊界內各氣象參數極大值與極小值的差值(即擾動量)定義為雨帶擾動的振幅(amplitude)，然後進行量化統計分析。值得注意，此振幅值的大小可視為一個因雨帶對流過程造成之邊界層變性的估計量度。

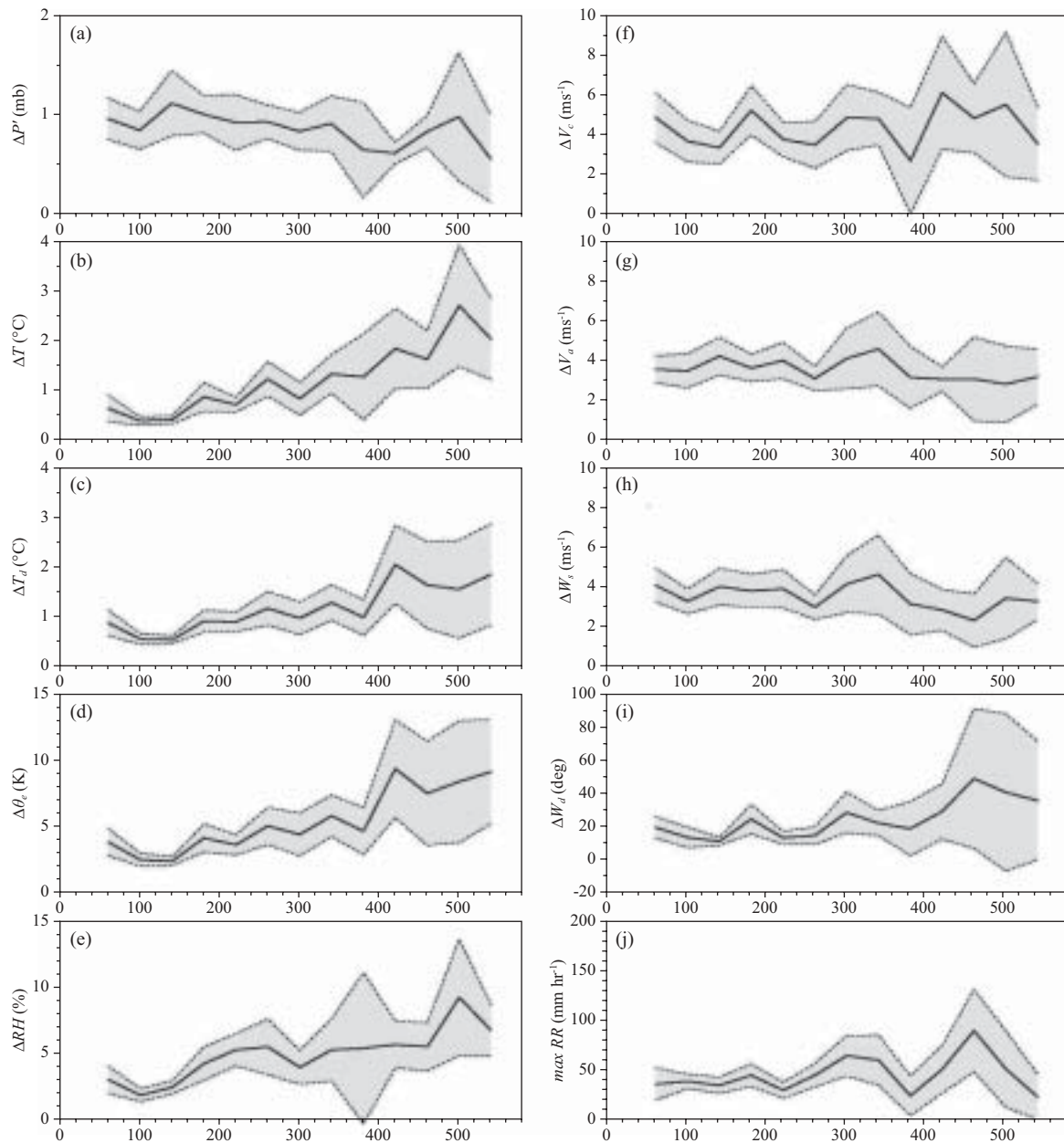
根據本研究所觀測到颱風雨帶的振幅值大小，我們計算其平均值、極大值及標準差，如表一所示。溫度、氣壓、風向及最大降雨率的平均

值皆與過去相關颱風研究所觀測到數值大小類似[7, 11, 19, 27, 28]，不過有趣的是，溫度與氣壓擾動振幅的最大值可分別達到 $4^{\circ}C$ 與 $7.8 mb$ ；不過，雨帶溫度及相當位溫的平均振幅比在中緯度觀測到之中尺度對流系統的冷池(cool pool)要小許多[29]。儘管各氣象參數振幅的極大值與平均值差距甚大，但經過累積頻率檢視，發現振幅超過平均值的雨帶比例僅佔 25%~40%。值得注意的是，由表一可發現各氣象參數的標準差值接近於其平均值，顯然雨帶地面擾動振幅的變異性不小。

依據過去熱帶氣旋的相關理論及模擬研究，我們知道颱風雨帶的基本特性相當程度取決於氣旋內核(inner-core)動力過程對它的影響程度[30-33]；此外，長久以來颱風雨帶濕對流對於熱帶氣旋強度的潛在影響已廣泛被認知[9, 15]，但是外圍及內圍颱風雨帶對於熱帶氣旋邊界層變性程度的相對貢獻仍未明確地被提出。為了對這些前述觀點提供一些觀測線索，我們將颱風雨帶的振幅值以雨帶與颱風中心徑向距離來加以分析(如圖四所示)。結果顯示，熱力場的擾動振幅(溫度、露點溫度、相當位溫及相對濕度)隨著徑向距離增加而明顯的增加(圖四(b), (c), (d), (e))；對比於熱力場顯著的徑向變化，擾動氣壓隨著徑向距離的增加而有些許的下降趨勢(圖四(a))，熱力場與氣壓場不一致的變化趨勢暗示著雨帶擾動氣壓並不是由對流非絕熱效應所主宰[28]。運動場擾動(最大降雨率)部份與氣壓場類似，並沒有明顯或一致性的徑向變化(圖四(f), (g), (h), (i), (j))。這部分分析結果所隱含的重要性將在下節進一步闡明。

四、外圍雨帶與內圍雨帶

為了提供颱風雨帶地面擾動振幅(尤其是熱力場部份)隨徑向距離改變的物理意涵，我們利



圖四 伴隨颱風雨帶各個氣象參數擾動振幅隨颱風徑向距離的變化圖（實線）。(a)擾動氣壓(ΔP)、(b)溫度(ΔT)、(c)露點溫度(ΔT_d)、(d)相當位溫($\Delta \theta_e$)、(e)相對濕度(ΔRH)、(f)橫越雨帶的風分量(ΔV_c)、(g)平行雨帶的風分量(ΔV_a)、(h)風速(ΔW_s)、(i)風向(ΔW_d)、(j)最大降雨率($max RR$)。灰色陰影區表示 90%的信賴區間

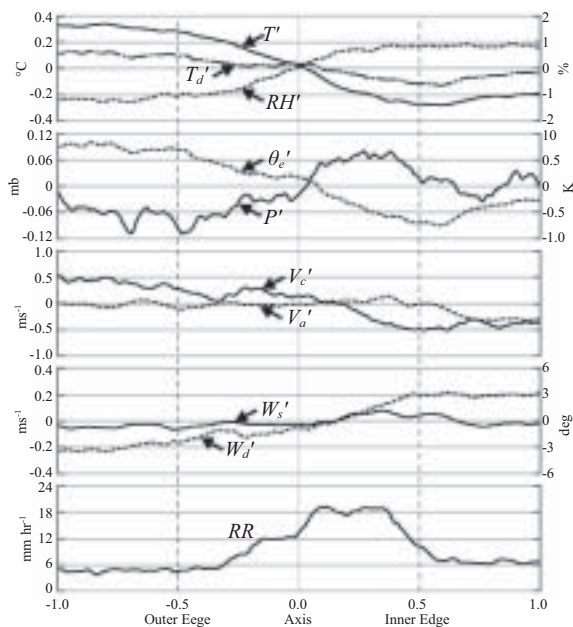
用美軍聯合颱風警報中心 (Joint Typhoon Warning Center) 所提供的最大風速半徑資訊 (radius of maximum wind, RMW)，進一步將本研究所觀測的颱風雨帶分成兩類，即為外圍雨帶 (outer rainbands) 與內圍雨帶 (inner rainbands)¹。

圖五及圖六分別為外圍及內圍雨帶的合成擾動分析圖。對外圍雨帶而言，溫度、露點溫度及相對濕度具有明顯的擾動變化（圖五），尤其是相當位溫，隨著雨帶的通過呈現十分顯著的下降。相反地，伴隨內圍雨帶的溫度及濕度變化相

¹雨帶與颱風中心徑向距離大於 3 倍 RMW 為外圍雨帶，相反則為內圍雨帶，根據 Wang (2009) 所提出的定義[15]。

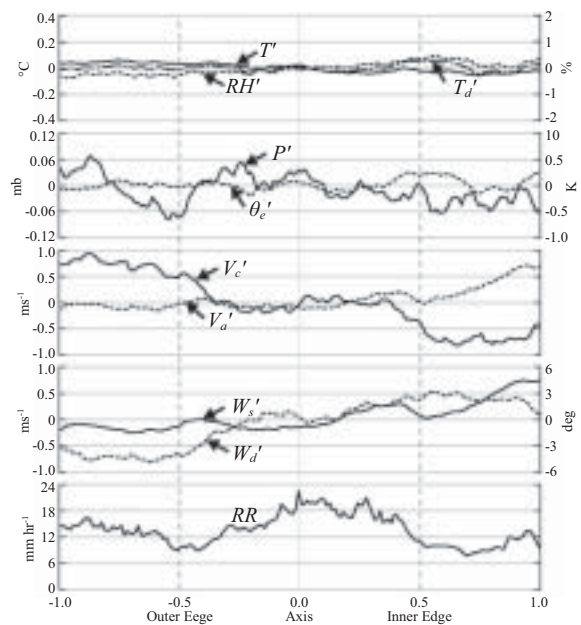
表二 兩種類型颱風雨帶（外圍雨帶及內圍雨帶）各個氣象參數地面擾動振幅的平均值及標準差。兩種類型雨帶平均值差異的統計顯著性檢定也標示於表內。第一虛無假設(the first null hypothesis, H_{01})代表兩種類型雨帶的平均值相等，第二虛無假設(the second null hypothesis, H_{02})代表外圍雨帶的平均值小於或等於內圍雨帶的平均值。字母 A(R)代表接受(拒絕)虛無假設， H_{01} (H_{02})的拒絕是在 0.05 (0.01)的顯著水準

	$\Delta P'$	ΔT	ΔT_d	$\Delta \theta_e$	ΔRH	ΔW_s	ΔW_d	ΔV_c	ΔV_a	$max RR$
	(mb)	($^{\circ}C$)	($^{\circ}C$)	(K)	(%)	($m s^{-1}$)	(deg)	(ms^{-1})	(ms^{-1})	($mm hr^{-1}$)
mean value (outer)	1.0	0.8	0.9	4.1	3.9	3.6	15.9	4.1	3.7	40.4
mean value (inner)	0.8	0.5	0.6	2.9	2.3	3.4	16.0	3.7	3.5	41.0
standard deviation (outer)	0.9	0.9	0.8	3.5	3.5	3.1	21.1	3.6	2.9	39.0
standard deviation (inner)	0.6	0.4	0.4	2.1	1.9	2.2	23.8	3.3	3.1	37.4
H_{01}	A	R	R	R	R	A	A	A	A	A
H_{02}	A	R	R	R	R	A	A	A	A	A



圖五 如圖三，但為外圍雨帶地面擾動的合成分析圖。需注意某些氣象參數的間距與圖三相異

當微弱（圖六）。外圍雨帶的氣壓擾動具有的清楚高-低雙峰(couplet)，此結構與前述所有雨帶合成圖相似（圖三），內圍雨帶則呈現多峰(multiple peaks)且波動振幅較小的特徵。對比於外圍雨帶與內圍雨帶在熱力場擾動有顯著的差異，它們在運動場擾動部分則沒有顯著性的差別。不過值得一提的是，不論是外圍或內圍雨帶風速的極大值皆位在內邊界的內側（圖五、圖六）；然而在內



圖六 如圖五，但為內圍雨帶地面擾動的合成分析圖

圍雨帶內邊界的外側，風速及平行雨帶的氣流仍有持續增加的趨勢，這與典型熱帶氣旋內核區域內的 Rankine-vortex 風剖線結構特徵是一致的。

為了確認上面合成分析所顯示出外圍及內圍雨帶的特性差異，我們進一步計算這兩種雨帶類型的地面擾動平均量，並利用 Student's t -test 檢定外圍雨帶及內圍雨帶平均值差異的統計顯著性（表二）。由表二可清楚發現外圍雨帶熱力場的擾動平均量較大，且通過統計檢定；相反

地，外圍雨帶及內圍雨帶的運動場擾動振幅及最大降雨率的平均值並無顯著差異。表二的檢定結果也為圖四的徑向趨勢提供額外的佐證。

上述分析結果隱含著幾個重要的物理觀點。例如，外圍雨帶顯然比內圍雨帶有更大的潛力去改變熱帶氣旋邊界層的熱力特性（如藉由降低近地面的相當位溫）。維持氣旋內流(inflow air)低層較高的相當位溫，長久以來已被視為增強熱帶氣旋強度的關鍵過程之一[16, 17, 34]。因此可預期的是，外圍雨帶（而不是內圍雨帶）在颱風中的範圍與分佈，以及大氣邊界層是否有效率回復雨帶濕對流所造成的熱力變異，將會顯著影響颱風強度的能量供給狀態。

除此之外，如同許多熱帶氣旋研究結果指出，外圍雨帶常有著大氣內重力波(inertia-gravity waves)特性[30-32]，而內圍雨帶則被認為可能跟渦旋羅士培波(vortex Rossby waves)有關[33]，然而目前這些推論仍只侷限在理論模式探討架構中，非常缺乏實際觀測資料的有力驗證。對於本研究觀測而言，外圍雨帶的地面氣壓擾動具有高-低雙峰特性，而最大降雨率也出現在近氣壓脊附近，這些觀測特徵與重力波的性質是一致的。相反地，內圍雨帶的地面擾動似乎不具有這些重力波的基本特質；當然，單單經由我們的地面觀測也很難去評估內圍雨帶是否與渦旋羅士培波類似。

最後我們要強調的是，因為外圍雨帶的位置離颱風中心較遠，可預期的是，它的對流行為應該較不受氣旋內核動力所控制，所以其結構應會比較類似一般所謂的中尺度對流系統或颱風線；相反地，內圍雨帶的濕對流的結構與特徵應該強烈受內核動力所控制。在上述的思考架構下，我們會期待看到外圍雨帶的地面擾動（不論是熱力場或是運動場）會比內圍雨帶要大許多。很顯然地，這些推測不完全符合我們的觀測事實。我們的觀測顯示，外圍雨帶的熱力擾動的確比內圍雨帶劇烈，這結果可詮釋外圍雨帶具有傾向颱風線對流的特性；然而觀測又顯示，外圍雨帶的運動場擾動實際又與內圍雨帶類似，不論是其擾動變化特徵或是振幅大小。或許我們可合理推測，實際發生在大氣的颱風外圍雨帶可能具有某種程度的混和性質—即結合了一般中尺度對流系統（如颱風線）與單純經由颱風動力所引發對流系統（如

眼牆）的雙重特質。

五、結語

本文檢視了為數相當可觀的颱風雨帶，分析它們所伴隨的地面擾動特性，也是截至目前為止，對颱風雨帶地面擾動進行最廣泛量化統計的研究工作。在未來，進一步收集更多的颱風雨帶觀測資料是相當重要的，尤其這些雨帶須廣泛分佈在不同的徑向距離位置（離颱風中心），才有機會去建構颱風雨帶的基本概念模式。另外，針對特定颱風雨帶個案進行詳細診斷分析或數值模擬，來釐清颱風雨帶對流結構與一般中尺度對流系統（或颱風線）的差異，也應有助於了解颱風雨帶對流的維持過程及其與颱風環流（強度）的相關。

致謝

論文中所使用的氣象都卜勒雷達及地面觀測資料由中央氣象局所提供，與那國島測候所資料由日本氣象廳所提供，RMW 資料由 Joint Typhoon Warning Center 所提供。本研究在行政院國家科學委員專題研究計畫支持下 (NSC99-2111-M-034-002-MY3 與 NSC100-2628-M-034-001-MY3) 才得以完成。

參考文獻

- [1] H. Wexler, *Ann. N.Y. Acad. Sci.*, **48**, 821 (1947).
- [2] H. V. Senn and H. W. Hiser, *J. Meteor.*, **16**, 419 (1959).
- [3] H. E. Willoughby, F. D. Marks Jr. and R. J. Feinberg, *J. Atmos. Sci.*, **41**, 3189 (1984).
- [4] R. Gall, J. Tuttle and P. Hildebrand, *Mon. Wea. Rev.*, **126**, 1749 (1998).
- [5] D. J. Cecil, E. J. Zipser and S. W. Nesbitt, *Mon. Wea. Rev.*, **130**, 769 (2002).
- [6] R. A. Houze Jr., *Mon. Wea. Rev.*, **138**, 293 (2010).
- [7] R. A. Anthes, *Tropical cyclones: Their Evolution, Structure, and Effects. Meteor. Monogr.*, No. 41, Amer. Meteor. Soc., 208pp (1982).
- [8] D. P. Jorgensen, *J. Atmos. Sci.*, **41**, 1268 (1984).
- [9] H. E. Willoughby, J. A. Clos, and M. G.

- Shoreibah, *J. Atmos. Sci.*, **39**, 395 (1982).
- [10] L. J. Shapiro and H. E. Willoughby, *J. Atmos. Sci.*, **39**, 378 (1982).
- [11] G. M. Barnes, E. J. Zipser, D. P. Jorgensen, and F. D. Marks, *J. Atmos. Sci.*, **40**, 2125 (1983).
- [12] H. E. Willoughby, *J. Atmos. Sci.*, **47**, 242 (1990).
- [13] P. T. May and G. J. Holland, *J. Atmos. Sci.*, **56**, 1224 (1999).
- [14] R. A. Houze Jr. and Coauthors, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **87**, 1503 (2006).
- [15] Y. Wang, *J. Atmos. Sci.*, **66**, 1250 (2009).
- [16] K. A. Emanuel, *J. Atmos. Sci.*, **43**, 585 (1986).
- [17] A. K. Betts and J. Simpson, *J. Atmos. Sci.*, **44**, 842 (1987).
- [18] M. D. Powell, *Mon. Wea. Rev.*, **118**, 891 (1990a).
- [19] M. D. Powell, *Mon. Wea. Rev.*, **118**, 918 (1990b).
- [20] G. M. Barnes and G. J. Stossmeister, *Mon. Wea. Rev.*, **114**, 2590 (1986).
- [21] B. F. Ryan, G. M. Barnes, and E. J. Zipser, *Mon. Wea. Rev.*, **120**, 431 (1992).
- [22] C. E. Samsury and E. J. Zipser, *Mon. Wea. Rev.*, **123**, 3502 (1995).
- [23] D. A. Hence and R. A. Houze Jr., *J. Geophys. Res.*, **113**, D15108, doi:10.1029/2007JD009429 (2008).
- [24] M. G. H. Ligda, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **36**, 340 (1955).
- [25] T. Ushijima, *J. Meteor. Soc. Japan*, **36**, 1 (1958).
- [26] M. Hamuro and Coauthors, *J. Meteor. Soc. Japan*, **47**, 298 (1969).
- [27] G. D. Skwira, J. L. Schroeder, and R. E. Peterson, *Mon. Wea. Rev.*, **133**, 454 (2005).
- [28] C.-K. Yu and C.-L. Tsai, *J. Atmos. Sci.*, **67**, 2893 (2010).
- [29] N. A. Engerer, D. J. Stensrud, and M. C. Coniglio, *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 4839 (2008).
- [30] J. W. Diercks, and R. A. Anthes, *J. Atmos. Sci.*, **33**, 959 (1976).
- [31] Y. Kurihara, *J. Atmos. Sci.*, **33**, 940 (1976).
- [32] H. E. Willoughby, *J. Atmos. Sci.*, **34**, 1028 (1977).
- [33] M. T. Montgomery and R. J. Kallenbach, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **123**, 435 (1997).
- [34] J. S. Malkus and H. Riehl, *Tellus*, **12**, 1 (1960).