

國立臺灣大學理學院大氣科學研究所
碩士論文



Department of Atmospheric Sciences
College of Science
National Taiwan University
Master Thesis

WISHE機制對於颱風雙眼牆形成的角色
The Role of the WISHE Mechanism in
Secondary Eyewall Formation

鄭傑仁
Chieh-Jen Cheng

指導教授：吳俊傑 博士
Advisor: Chun-Chieh Wu, Ph.D.

中華民國105年6月
June 2016

致謝



光陰荏苒，進入台大將屆滿六個年頭。感謝一開始的奇妙緣分，讓我能在大氣科學的領域中自由自在的打滾與成長，追尋自己的夢想。在過去的兩年內，有幸擁有人、師長，以及朋友的協助與支持，才能讓這個研究工作順利完成，在此我一一致上我滿滿的感謝。

首先，我要感謝我家人們的支持。謝謝爸爸及媽媽在我選擇大氣科學鑽研的這條路上，全心全意地支持我，也謝謝妹妹平常的分憂解勞以及陪伴，讓我無後顧之憂的能追尋自己的夢想。我很感謝能在這樣幸福的家庭中，邁入人生另一個階段，我們要一起度過很多很多的美好時刻。同時，我也要感謝一路陪伴我的思霈，生活的酸甜苦辣都一起分享，也一起經歷了大小事，讓我得以成長。

在碩士班的生涯中，我十分感謝指導教授吳俊傑老師的指導。從大三開始，修習獨立研究課程，並且到研究室參與 group meeting，接著，一路到進入碩士班就讀，老師提供了我許多機會精進自己，也在研究上用心的指導，使我們的研究可以成長茁壯，也有豐富的碩士班生活。另外，我也十分感謝口試委員老師們的建議以及指導。

這兩年中，在 TDRC 這個大家庭豐富了我的生活，也是教學相長的好所在。從大四開始，舜楠學長、欣平學姊、亭蓁學姊、偉聰學長、傳杰學長一個個都完成優秀且內容豐富的研究，豎立了很多的好榜樣讓我有動力追上學長姐們的腳步。同時，也感謝舜楠學長、亭蓁學姊、偉聰學長、傳杰學長、王慧學姊、怡瑄學姊，在程式語言以及研究上的教學與討論，以及忠權學長、自雄學長、元銘學長、宗翰學長、紹良學長的指教，讓我在研究的領域上得以得心應手。當然，也要感謝好夥伴冠捷，我們度過了這兩年的研究生活，彼此鼓勵與討論，也一起成長並完成了研究，你真的是我碩士生涯中的最佳拍檔。除此之外，也感謝依屏和 Sabrina 幫我們處理生活上大大小小的事情，讓我們可以更專心於自己的研究上。而和冠宇、志祺、里治、James 的互動中，讓我能擁有重新審視自己所學的機會與本實驗工作的好聽眾，我也感到感激。另外，我也要謝謝 B99 及 R03 的好同學、好朋友們，在碩士班生涯中，有你們一起成長，一起經歷著研究的酸甜苦辣，真好。

在完成了這份研究後，人生又將邁入下一個階段，也可能要在台大度過超過十個年頭。回頭審視這些點點滴滴，讓我對於這一切充滿感激，也感到滿滿的溫暖。如果沒有你們的協助以及陪伴，就不會有今天這個工作的完成，謝謝大家。

摘要



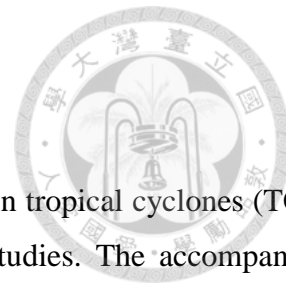
近年來，雙眼牆颱風以及颱風的眼牆置換過程已經廣泛的被觀測以及數值模擬文獻記載及討論。伴隨眼牆置換而造成颱風強度的變化，對於颱風強度預報十分重要，也是一個關鍵的科學議題。雖然許多文獻提出了可能形成雙眼牆的動力機制，仍無明確定論的提出。另外，在過去研究颱風的歷史當中，WISHE (Wind Induced Surface Heat Exchange, WISHE) 機制的提出相當關鍵，也被用以解釋颱風的增強過程。本研究主要在探討 WISHE 機制對於外眼牆的發展與增強的貢獻。

本研究採用高解析度的模式檢驗 WISHE 機制於雙眼牆形成的角色。在控制組實驗中，於雙眼牆出現的 12 小時前，我們分析出因為活躍對流而造成非絕熱加熱的增加，以及切向風的擴張的特徵。前者將造成外眼牆區域加熱效率的提升，而後者將引發邊界層中非平衡動力相關的一連串物理過程，兩者將有利於外眼牆的形成。這些模擬結果與文獻的特徵一致。

為了要檢驗雙眼牆颱風之內、外眼牆區域對於 WISHE 機制的敏感性，我們在計算表面熱量通量時，使用不同的特定上限值計算。這四個上限值分別為： 15 、 10 、 5 、 1 m s^{-1} ，而且限制 WISHE 機制區域共有四種設計：OSC(限制半徑大於 50 公里之區域)、OBC(限制半徑大於 80 公里之區域)、InC(限制半徑於 50 公里之區域)、RiR(限制介於半徑 55~90 公里之區域)。我們的分析指出，WISHE 機制會影響 SEF 的發生與否，以及其眼牆的發展型態。若限制了外眼牆以及其外區域的表面熱量通量，當限制程度較小時，則外眼牆可以發展，而且也具有與雙眼牆相關的物理特徵，但是發展的時間被延後，且強度較弱；當限制程度較大時，則沒有外眼牆發展。另外，透過 InC 實驗我們證明，在颱風內核區域附近的 WISHE 機制不會影響外眼牆的發展，但是將造成較早的眼牆置換過程。接著，透過 SE 模式(Sawyer-Eliassen model) 以及切向風收支的分析我們得知，颱風切向風的擴張以及次環流過程將受到限制 WISHE 機制的影響，也就是會影響颱風的質量場以及動量場的演變。此外，我們也發現，內、外眼牆的相對強度，也會影響颱風外眼牆的發展速度以及成熟的時間。這些過程指出，WISHE 機制對於眼牆置換以及外眼牆形成的過程十分重要。

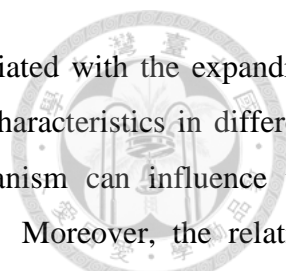
關鍵字：颱風、雙眼牆、WISHE 機制、眼牆置換、非平衡動力、平衡動力

Abstract



Concentric eyewalls (CEs) and the eyewall replacement cycle (ERC) in tropical cyclones (TCs) have been widely documented by both observational and numerical studies. The accompanied change of TC characteristics associated with CE and ERC is of scientific importance, and is an interesting issue for TC intensity prediction. While previous studies had provided a number of possible mechanisms for the secondary eyewall formation (SEF) from different dynamical aspects, consensus remains to be reached in literature. In addition, the idea of wind-induced surface heat exchange (WISHE) mechanism in TC was proposed explaining the intensification of the TC, and the importance of the mechanism is pointed out by several studies. In this study, the high-resolution numerical simulations (based on WRF model) are conducted to examine the role of the WISHE mechanism in SEF. Analyses of the control experiment (CTL) show that about 12 hours prior to SEF, a region of increasing diabatic heating due to active convections is established around and outside the SEF region, leading to an increase of inertial stability and an expansion of tangential winds, while the former enhances the heating efficiency, and the later induces a pathway to SEF in the boundary layer. The results from our high resolution experiments provide more detailed features related to SEF, and are consistent with the previous studies (Wu et al. 2012; Huang et al. 2012; Rozoff et al. 2012; Wu et al. 2015; Wang et al. 2015).

To examine the sensitivity of SEF to surface flux (i.e., the WISHE mechanism) in both storm core and outer rainband regions, in the sensitivity experiments the surface wind is capped at several designated values in the calculation of total surface heat flux. The values of the capped surface winds are set at 15, 10, 5, and 1 m s⁻¹. In addition, the selected regions of suppressed heat flux are OSC (R>50km), OBC (R>80km, InC (R<50km), and RiR (55km<R<90km), respectively. Analyses show that the WISHE mechanism can both quantitatively and qualitatively affect the evolution and characteristics of the vortex, especially the outer eyewall. When the heat fluxes are suppressed around or outside the SEF region, the onset timing of the outer eyewall is delayed and the intensity of the eyewall is weaker (OSC-10, OSC-15, OBC-10, OBC-15), and in some experiments (OSC-01, OSC-05, OBC-01, and OBC-05) no SEF occurs. Features of progressively strengthening supergradient forces and the accompanied strengthening convection in the SEF region are found in the cases with SEF. While for InC cases, the WISHE mechanism around the inner region is not crucial for the SEF, but the experiment design can result in a short-lived inner eyewall and affect the ERC. In addition, the results from Sawyer-Eliassen



diagnosis and tangential budget analysis show that the processes associated with the expanding tangential wind field and the secondary circulation will have distinct characteristics in different simulations. We can conclude that suppressing the WISHE mechanism can influence the evolution of the mass field and the momentum field of the storm. Moreover, the relative intensity between the inner and outer eyewalls can also affect the onset of the SEF and the intensifying rate of the outer eyewall. These results show that the WISHE mechanism plays a crucial role in both SEF and ERC.

Key words: Typhoon, secondary eyewall formation, wind induced surface heat exchange (WISHE) mechanism, eyewall replacement cycle, unbalanced dynamics, balanced dynamics

目錄



致謝	i
摘要	ii
英文摘要	iv
第一章 前言	1
1.1 颱風外眼牆形成文獻回顧	2
1.1.1 外在條件與模式設定影響	2
1.1.2 內在動力因素	4
1.1.3 平衡與非平衡動力在外眼牆形成中的角色	5
1.2 WISHE 機制回顧	9
1.2.1 WISHE 機制	9
1.3 研究動機與目的	11
第二章 研究工具與方法	13
2.1 資料來源	13
2.2 實驗設計	13
2.2.1 海表交換係數設定	13
2.2.2 控制組實驗(CTL)	14
2.2.3 敏感性實驗	14
第三章 研究結果一-控制組實驗	16
3.1 控制組實驗之結構演變	16
3.2 控制組實驗軸對稱結構及物理參數特徵	17
3.2.1 平衡及非平衡動力的角色	17
3.2.2 Sawyer-Eliassen 診斷	20
3.2.3 切向動量收支分析	21
3.3 小節	24
第四章 研究結果二-敏感性實驗	25
4.1 敏感性實驗之結構演變	25
4.2 敏感性實驗軸對稱結構及物理參數特徵	28
4.2.1 非平衡與平衡動力的角色	28



4.2.2 外眼牆區域相當位溫改變量之差異.....	29
4.2.3 內外眼牆的相對強度與 SEF 的關係.....	31
4.2.4 Sawyer-Eliassen 診斷.....	32
4.2.5 敏感性實驗之切向動量收支分析.....	33
4.2.6 敏感性實驗之表面熱通量分布與其他物理參數之關聯.....	34
4.3 綜合討論與小節.....	36
第五章 總結及未來展望.....	38
5.1 總結.....	38
5.2 未來展望.....	40
參考文獻.....	42
附圖.....	48
附表.....	97

圖目錄



- 圖 2.1 WRF 模式進行自由模擬實驗時，模式四層槽狀網格分別的範圍和大小。其中最外圍是定網格，其餘皆跟隨渦漩移動。此實驗同官(2012).....48
- 圖 2.2 (a)~(d)依序為 OSC、OBC、InC、RiR 之實驗設計，深藍色區間為限制 WISHE 機制的區間，數字代表限制的範圍邊界值。.....49
- 圖 3.1 CTL 實驗模式輸出之 2.8 公里高雷達反射率，由(a)~(i)依序為 15、20、25、30、33、36、39、42、45 小時。.....50
- 圖 3.2 CTL 實驗模式輸出之 2.8 公里高雷達反射率，由(a)~(i)依序為 15、20、25、30、33、36、39、42、45 小時。.....51
- 圖 3.3 CTL 實驗模式輸出之 2.8 公里高垂直速度(色階，單位 ms^{-1})，由(a)~(i)依序為 15、20、25、30、33、36、39、42、45 小時。.....52
- 圖 3.4 CTL 實驗渦漩強度以及最大風速半徑隨時間發展示意圖。(a)藍色線條為中心最低氣壓，紅色實線為半徑 40 公里以內最大 10 米風速值，紅色虛線為 50 公里以外最大 10 米風速值，當強於內眼牆區域時開始繪出。(b)最大風速半徑(單位 km)隨時間的發展。.....53
- 圖 3.5 CTL 實驗各項參數徑向剖面之平均，隨時間演變情形，圖中黑色實線皆為 1 公里高之切向風，單位 ms^{-1} 。(a)色階為 1 公里高垂直速度，單位 ms^{-1} 。(b)色階為 2.8 公里高之位渦，單位 $\log(\text{PVU})$ ， $\text{PVU}=10^{-6}\text{s}^{-1}$ 。(c)色階為大氣垂直平均之非絕熱加熱率，單位 Kh^{-1} 。(d)色階為由表面傳送向上之表面熱通量，單位 Wm^{-2} 。.....54
- 圖 3.6 CTL 實驗各項物理參數在不同時間的垂直結構。(a)、(c)分別為 20h 以及 30h 時的徑向流(黑色實線 >0 ，黑色虛線 <0 ，單位 ms^{-1})、超梯度風(紅色色階，單位 ms^{-1})、次梯度風(藍色色階 ms^{-1})、絕對角動量等值線(紫色實線)。(b)、(d)分別為 20h 以及 30h 時切向風(黑色實線)、垂直速度(色階，單位 s^{-1}).....55
- 圖 3.7 CTL 實驗各物理參數在不同時間的垂直結構。圖說同圖 3-6，時間為 33h 以及 36h。.....56
- 圖 3.8 CTL 實驗各物理參數在不同時間的垂直結構。圖說同圖 3-6，時間為 39h 以及 42h。.....57
- 圖 3.9 CTL 實驗於半徑 60~80 公里區間平均之輻散場，從 20h 至 40h 隨高度的變化。(單位 s^{-1}).....58
- 圖 3.10 CTL 實驗慣性穩定度在不同時間的特徵。(單位 10^{-3}s^{-1}).....59
- 圖 3.11 CTL 實驗各項物理參數在 20~30h 之間的變化量。(a)位渦變化量(單位 PVU) (b)慣



性穩定度變化量(色階, 單位 $10^{-3}s^{-1}$)以及 30h 切向風(等值線) (c)切向風變化量(單位 ms^{-1}) (d)相對渦度變化量(單位 $10^{-5}s^{-1}$).....60

圖 3.12 CTL 實驗各項物理參數在 30~35h 之間的變化量。圖說同圖 3-11。.....61

圖 3.13 CTL 實驗各項物理參數在 35~40h 之間的變化量。圖說同圖 3-11。.....62

圖 3.14 CTL 實驗輸出至 Sawyer-Eliassen 方程組 32~24h 平均之非絕熱加熱與動量外力 (forcing)場。(a)非絕熱加熱率(單位 Kh^{-1}) (b)動量外力(單位 $ms^{-1}h^{-1}$).....63

圖 3.15 CTL 實驗, 模式輸出(圖(a)、(c))以及 SE 模式診斷(圖(b)、(d))之次環流分布。其中, 圖(a)、(b)為徑向流場(單位 ms^{-1}); 圖(a)、(b)為垂直運動(單位 ms^{-1}).....64

圖 3.16 CTL 實驗, 切向風動量收支分析, 30~33 小時各項之變化。(a) 模式實際輸出變化量, (b) 診斷中五項(c、d、e、g、h)之和, (c) 摩擦項, (d) 平均徑向平流項, (e) 平均垂直平流項, (f) 平均項之總和(d、e、f), (g) 渦流徑向平流項, (h) 渦流垂直平流項, (i) 渦流項之總和(g、h)。(單位: $m^1s^{-1}h^{-1}$).....65

圖 3.17 CTL 實驗, 30~33 小時之切向風動量收支診斷, (a) 模式輸出之切向風變化量, (b) 診斷之切向風變化量, (c) 前兩項之差。(單位: $m^1s^{-1}h^{-1}$).....66

圖 3.18 CTL 實驗之切向風動量收支分析。不同物理過程在半徑 60~80 公里之平均隨時間的變化。(a)平均徑向平流項、(b)平均垂直平流項、(c)流徑向平流項、(d)渦流垂直平流項、(e)平均項總和、(f)渦流項之總和。橫軸單位: $m^1s^{-1}h^{-1}$ 、縱軸單位:垂直高度(km)。.....67

圖 4.1 OSC 實驗切向風(黑色等值線, 單位 ms^{-1})以及垂直速度(色階, 單位 ms^{-1})徑向剖面之平均, 隨時間演變情形。(a)OSC-01、(b)OSC-05、(c)OSC-10、(d)OSC-15。.....68

圖 4.2 圖說同圖 4.1。(a)OBC-01、(b)OBC-05、(c)OBC-10、(d)OBC-15。.....69

圖 4.3 圖說同圖 4.1。(a)InC-01、(b)InC-05、(c)InC-10、(d)InC-15。.....70

圖 4.4 InC-10 實驗, 最大風速半徑隨時間之變化。藍色虛線為此組實驗 SEF 之時間, 紅色則為 CTL 實驗 SEF 時間。.....71

圖 4.5 圖說同圖 4.1。(a)RiR-01、(b)RiR-05、(c)RiR-10、(d)RiR-15。.....72

圖 4.6 RiR-15 實驗, 最大風速半徑隨時間之變化。灰色虛線區域為內、外眼牆之間風速極值位置快速跳動的時間, 僅能在 32 小時開始找到外側固定極值。內側風速極值持續至 38 小時, 其後僅具單一極值於外側。.....73

圖 4.7 (a)~(c)依序為 CTL、RiR-10、RiR-15 切向風(黑色等值線, 單位 ms^{-1})以及垂直平均之非絕熱加熱率(色階, 單位 Kh^{-1})之徑向剖面平均, 隨時間演變情形。.....74

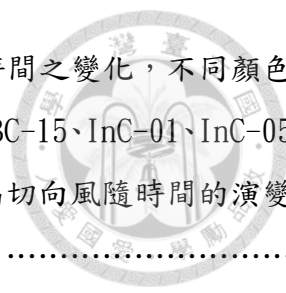


圖 4.8 (a)~(d)分別為 OSC、OBC、InC、RiR 實驗最大 10 米風速隨時間之變化，不同顏色表示不同組的實驗。(e)為具有雙眼牆之實驗(OSC-10、OSC-15、OBC-10、OBC-15、InC-01、InC-05、InC-10、InC-15、RiR-15)外眼牆區間(半徑 60~80 公里)平均 1 公里高切向風隨時間的演變，而(f)為內眼牆區間(10~40 公里)平均 1 公里高切向風隨時間的變化。.....75

圖 4.9 (a)~(d)分別為 InC-01、InC-05、InC-10、InC-15 半徑 60~80 公里區間平均之非梯度力，從 20h 至 40h 之變化。(單位 ms^{-2}).....76

圖 4.10 (a)~(d)分別為 OSC-01、OSC-05、OSC-10、OSC-15 慣性穩定度的變化量((a)、(b)、(d)為 30~35h 之變化量，(c)為 35~40h 之變化量，色階，單位 $10^{-3}s^{-1}$)以及切向風分布((a)、(b)、(d)為 35h 之切向風，(c)為 40h 之切向風，單位 ms^{-1})。.....77

圖 4.11 InC-10 於(a)30~35h 之間慣性穩定度的變化量(色階，單位 $10^{-3}s^{-1}$)以及 35h 之切向風(單位 ms^{-1}) (b)半徑 60~80 公里區間平均之非梯度力，從 20h 至 40h 之變化。(單位 ms^{-2})...78

圖 4.12 RiR-15 於(a)30~35h 之間慣性穩定度的變化量(色階，單位 $10^{-3}s^{-1}$)以及 35h 之切向風(單位 ms^{-1}) (b)半徑 60~80 公里區間平均之非梯度力，從 20h 至 40h 之變化。(單位 ms^{-2})...79

圖 4.13 (a)~(e)別為 CTL、OSC-01、OSC-05、OSC-10、OSC-15，30~35h 相當位溫之變化量(色階，單位 K)以及熵的變化量(實線)。.....80

圖 4.14 (a)、(b)別為 CTL、InC-10 於 25~30h 相當位溫之變化量(色階，單位 K)以及熵的變化量(實線)。.....81

圖 4.15 (a)、(b)別為 CTL、RiR-10 於 12~17h 相當位溫之變化量(色階，單位 K)以及熵的變化量(實線)。.....82

圖 4.16 CTL、OSC-10、OSC-15、InC-10、RiR-10 於外、內眼牆區間 1 公里高平均切向風之比值。.....83

圖 4.17 OSC-01 實驗輸出至 Sawyer-Eliassen 方程組 32~24h 平均之非絕熱加熱與動量外力(forcing)場。(a)非絕熱加熱率(單位 Kh^{-1}) (b)動量外力(單位 $ms^{-1}h^{-1}$)。而其餘四張圖為模式輸出(圖(d)、(f))以及 SE 模式診斷(圖(c)、(e))之次環流分布。其中，圖(c)、(d)為徑向流場(單位 ms^{-1})；圖(e)、(f)為垂直運動(單位 ms^{-1}).....84

圖 4.18 OSC-10 實驗輸出至 Sawyer-Eliassen 方程組 32~24h 平均之非絕熱加熱與動量外力(forcing)場。(a)非絕熱加熱率(單位 Kh^{-1}) (b)動量外力(單位 $ms^{-1}h^{-1}$)。而其餘四張圖為模式輸出(圖(d)、(f))以及 SE 模式診斷(圖(c)、(e))之次環流分布。其中，圖(c)、(d)為徑向流場(單位 ms^{-1})；圖(e)、(f)為垂直運動(單位 ms^{-1}).....85

圖 4.19 InC-10 實驗輸出至 Sawyer-Eliassen 方程組 32~24h 平均之非絕熱加熱與動量外力



(forcing)場。(a)非絕熱加熱率(單位 K h^{-1}) (b)動量外力(單位 $\text{ms}^{-1}\text{h}^{-1}$)。而其餘四張圖為模式輸出(圖(d)、(f))以及 SE 模式診斷(圖(c)、(e))之次環流分布。其中，圖(c)、(d)為徑向流場(單位 ms^{-1})；圖(e)、(f)為垂直運動(單位 ms^{-1}).....86

圖 4.20 RiR-10 實驗輸出至 Sawyer-Eliassen 方程組 32~24h 平均之非絕熱加熱與動量外力 (forcing)場。(a)非絕熱加熱率(單位 K h^{-1}) (b)動量外力(單位 $\text{ms}^{-1}\text{h}^{-1}$)。而其餘四張圖為模式輸出(圖(d)、(f))以及 SE 模式診斷(圖(c)、(e))之次環流分布。其中，圖(c)、(d)為徑向流場(單位 ms^{-1})；圖(e)、(f)為垂直運動(單位 ms^{-1}).....87

圖 4.21 圖說同圖 3.18, OSC-05。.....88

圖 4.22 圖說同圖 3.18, OSC-10。.....89

圖 4.23 圖說同圖 3.18, OSC-15。.....90

圖 4.24 圖說同圖 3.18, InC-10。.....91

圖 4.25 黑色線條為 21~30h 時間平均及垂直平均之非絕熱加熱率(單位: K h^{-1})，紅色實線為時間平均之表面熱量通量(單位: W m^{-2})。(a) CTL, (b) OSC-05, (c) OSC-15, (d) InC-10, (e) RiR-10, (f) RiR-15。.....92

圖 4.26 圖說同圖 4.25, 時間為 31h~40h 的時間平均。(a) CTL, (b) OSC-05, (c) OSC-15, (d) InC-10, (e) RiR-10, (f) RiR-15。.....93

圖 4.27 12h 至 30h 之切向風變化量(等值線, 單位: ms^{-1})及徑向風變化量(等值線, 單位: ms^{-1})。(a) CTL, (b) OSC-05, (c) OSC-15, (d) InC-10, (e) RiR-10, (f) RiR-15。.....94

圖 4.28 30h 至 40h 之切向風變化量(等值線, 單位: ms^{-1})及徑向風變化量(等值線, 單位: ms^{-1})。(a) CTL, (b) OSC-05, (c) OSC-15, (d) InC-10, (e) RiR-10, (f) RiR-15。.....95

圖 5.1 平衡動力、非平衡動力, 以及 WISHE 機制, 與 SEF 之間關連的示意圖。.....96

表目錄



表 2.1 敏感性實驗的實驗名稱及設計，共有四種，在不同處限制 WISHE 機制。風速上限值則代表 WISHE 機制計算時，被使用於計算熱通量的上限值。共有 16 組實驗。……………97

第一章 前言

對於盛行颱風區域的周邊國家而言，掌握颱風的強度發展以及移動路徑，向來是大氣科學界十分重要的議題之一；特別是，若能明確地掌握颱風結構的演變，將對於颱風強度預報有所貢獻。對於強度較為強烈的颱風，多眼牆結構的產生以及置換過程，是一個常見且關鍵的過程。這樣的現象，透過近年來觀測技術的進步，如雷達、衛星、飛機觀測，已經有許多對此現象詳加紀載的文獻(e.g., Hawkins and Helveston 2008; Kossin and Sitkowski 2009; Kuo et al. 2009)。Hawkins and Helveston (2008)分析了1997-2006年多種資料來源指出，80%西北太平洋、70%大西洋、50%印度洋及40%南半球強度強於120kts的颱風，在其生命期中，至少會經歷一次眼牆置換的過程。通常，颱風在外眼牆形成的這段時間內，颱風的強度會減弱，並伴隨內眼牆的減弱消散；當外眼牆逐漸發展成熟取代內眼牆後，眼牆置換完成，颱風的強度將有機會再度增強。而針對颱風眼牆置換過程之強度變化，許多相關研究(e.g., Hawkins and Helveston 2008; Kossin and Sitkowski 2009; Kuo et al. 2009)利用統計方法加以探討。近年來，許多的研究著手於模擬分析颱風眼牆置換，以及外眼牆形成的過程，若能詳加掌握眼牆置換發生的時間以及明確颱風的強度變化，對於颱風強度預報將更臻精準。

颱風的發展與增強，近數十年以來，大量的研究投入於此議題，並有許多假說被提出，但卻沒有一完備的物理解釋。其中，WISHE (Wind-Induced Surface Heat Exchange mechanism, WISHE) 機制的提出(e.g., Emanuel 1986, 1989)，為一重要的里程碑，並且被許多研究利用於解釋颱風的發展，並被廣泛應用於颱風的模式模擬中。WISHE 機制指出了海洋傳輸能量進入大氣中的關鍵角色，並提及了熱通量與颱風表面風速間的正回饋作用，此機制於文後會有詳細的回顧。WISHE 機制貢獻於颱風的增強及發展的重要性被廣為人知，然而，WISHE 機制是否影響颱風外眼牆的形成以及發展，近年來，雖有研究提及(e.g., Nong and Emanuel 2003; Terwey and Montgomery 2008)，但還沒有詳盡的分析與探討。因此，在本研究中，



將進行一個雙眼牆颱風之模擬，深入分析外眼牆發展的過程，並權衡相關熱力動力機制的角色；此外，將在敏感性實驗中限制 WISHE 機制的正回饋作用，進一步檢驗此正回饋機制與外眼牆發展的關係，以利於了解颱風外眼牆發展的過程。


1.1 颱風外眼牆形成文獻回顧

透過觀測與數值模擬同步的進行，再加上電腦運算系統之日新月異，以及模式解析度的提高與考慮全物理過程，針對眼牆置換，近年來已存在相當數量的研究成果；不管是由外在環境條件對於外眼牆形成的重要性出發，或是詳加探討颱風內部動力過程以及平衡、非平衡動力，對於外眼牆產生的所提出的理論雖已蓬勃發展，但是，截至目前為止，還沒有明確的理論完整解釋外眼牆發展與眼牆置換的過程。以下將由不同角度切入，回顧一系列與外眼牆生成及眼牆置換相關的過去文獻進行探討。

1.1.1 外在條件與模式設定影響

1.1.1.a 外在條件影響

颱風的外眼牆形成可能與外在環境條件相關。早期的研究當中，一系列的工作(Willoughby 1979; Willoughby et al. 1982, 1984)指出颱風移動造成摩擦的不對稱性、moat 區域之下沉運動所觸發的上升運動、冰的微物理過程，可能對於外眼牆之形成有所貢獻； Hawkins et al. (1983) 提出接近地形時颱風的眼牆結構受到影響而發生演變，可能影響到外眼牆的形成。 Nong and Emanuel (2003) 指出颱風環境(例如環境濕度)與颱風的交互作用，所產生持續的渦流角動量通量，可能導致外眼牆的發展，而其提到的環境相對濕度的影響，在後續的工作中也被檢驗。 Oort and Chen (2007)利用 MM5 模擬並使用 RAINEX 計畫的觀測資料，針對同樣是五級颶風，但原始大氣環境較乾的颱風芮塔(Rita)和較濕的卡崔娜(Katrina)進行比較。他們認為，較乾的環境也具有較大的穩定度，將使得外圍雨帶限制在較小的範圍內，有利於內外眼牆的發展；相對而言，相對溼度較高的不穩定環境，將使得颱風的雨帶發展的較不集中，因而不利於外眼牆的形成與發展。



相反的，Hill and Lackmann (2009)以及 Wang (2009)分別使用 WRF 和 TCM4 進行理想化的模擬，結果顯示，較高的環境相對濕度會提供颱風外圍較多的潛熱進入系統中，將有利於颱風水平尺度的擴展、雨帶的生成和增強，甚至是雙眼牆的形成。以上研究顯示，環境濕度為影響外眼牆的結構發展以及是否產生雙眼牆於颱風生命期中的重要因素之一。

1.1.1.b 模式設定之影響

物理模式設定也會影響到外眼牆的發展。Houze et al. (2007) 指出，模式的解析度需要達到一定的精細程度，才能有效模擬出演強制換的過程，研究中若將解析度從 1.67 公里調整至 5 公里，則無法使得外眼牆形成。近年來，Zhu and Zhu (2015)進行了一連串的敏感性實驗，測試了雙眼牆發展對於初始渦旋結構、背景風、模式物理的敏感性；他們指出，不同的垂直混合參數化方法(vertical turbulent mixing parameterization)會影響到內眼牆與外眼牆的互動、邊界層內的內流強度、表面層的物理過程以及 moat 區域中的淺對流發展，進而影響到外眼牆的結構發展，而不同的雪的終端速度(terminal velocity)會影響到非絕熱加熱分布，造成外眼牆發展位置的改變；另外，Zhu et al. (2015)利用 HWRF 系統(Hurricane Weather Research and Forecast model)進行了兩組採取不同參數化方法的理想化模擬，結果顯示，改變了模式的參數化方法，會影響外眼牆的生成與否。

Willoughby et al. (1984)指出冰的微物理過程可能貢獻外眼牆的生成，但 Terwey and Montgomery (2008)認為，無論是地形的影響、不對稱的摩擦、模式的冰微物理過程不會影響是否會有外眼牆的發展，但是會影響外眼牆的結構演變。相反的，Zhou and Wang (2011)提升了模式中冰相粒子的濃度，結果發現包含外眼牆發展的位置、外眼牆發展所需要的時間，以及颱風強度在置換過程中的演變，皆有明顯的改變，他們認為，模式中不同的雲微物過程參數化方法，對於眼牆置換過程有著顯著的影響。



1.1.2 內在動力因素

1.1.2.a 渦旋羅士比波

在地球上的中緯度地區，由於地球緯度效應所造成的南北行星渦度梯度，會引發繞極區運動的波動，稱為羅士比波；羅士比波時常與中緯度的天氣造成影響。在颱風中，颱風中心與周圍也存在渦度梯度，同樣也會產生圍繞著颱風中心的波動，稱為渦旋羅士比波(Vortex Rossby Wave, RMW)。過去，許多研究(e.g., Montgomery and Kallenbach 1997; Qui et al. 2010)提及了這樣的波動與外眼牆發展的關聯。核心概念為，擾動藉由渦度梯度之正壓不穩定的釋放，若存在於適當的距離和適當的尺度大小的條件之下，可能發展出個別集中的對流；而這些釋放不穩定度的波動，具有向三維方向傳遞的特徵，並同時向徑向及切向傳遞，與觀測到的颱風螺旋雨帶有其相似性。但這樣傳遞和累積能量的方式，與真實三維濕大氣中對流和眼牆發展的關連性，還沒有明確的定論與證明。

1.1.2.b 軸對稱化過程

接續渦旋交互作用及軸對稱化相關的工作，Kuo et al. (2004, 2008) 利用二維的非輻散正壓模式模擬並探討雙渦旋的交互作用。研究中植入兩個渦旋，一個範圍較小但強度較強，另一個則是強度較弱但範圍較大，並以前者代表颱風本身；並且改變兩個渦旋之間的距離、渦旋相對強度、渦旋大小以及結構。經由模式積分計算後，在一定條件之下，較強渦旋會將較弱的渦旋細絲化，使其環繞在較強渦旋的周圍，形成環狀的渦度帶；而這樣的結構特徵，與具有雙眼牆颱風的結構十分類似。然而，Moon et al. (2010)指出，實際觀測和全物理的模式皆顯示，颱風對流的上升運動在外圍能建立水平尺度較小的渦旋，並具有一正一負的渦度偶極(dipole)，這樣的渦度偶極的強度和颱風內核本身的渦度大小相當；Moon et al. (2010)進一步利用二維的模式模擬，置入一個較大的渦旋(代表颱風)以及數個較小的渦度偶極在周圍，並改變後者的分布，嘗試重現真實三維大氣的觀測結果。模擬結果顯示，無法出現軸對稱化類似外眼牆的環狀構造。從此研究得知，



若使用二維的乾對流假設，在模擬與解釋外眼牆形成時有其侷限性。

1.1.2.c beta skirt 軸對稱化假說

Terwey and Montgomery (2008) 利用一個三維、非靜力平衡的全物理理想模擬，提出一個外眼牆形成之前的動力、熱力配置情形，以及可能的物理過程解釋。首先，颱風具有由中心向外遞減的渦度分布，而具有此渦度梯度的區域被稱為 beta skirt，原本即存在零星的對流發展；而在 beta skirt 的區域，具有以下熱力與動力的條件，有利於外眼牆的發展：

- 1) 細絲化時間 τ_{fil} (filamentation time，此為不利於對流維持並將其拉伸成細絲花的時間尺度) 大於對流運動的時間尺度(30 分鐘)。
- 2) 環境存在夠大的對流不穩定度(convective available potential energy，CAPE，通常由內向外增加)
- 3) 較低的對流抑制 (convection inhibition，CIN)

原先，存在於這個區域中的零星對流之空間尺度(約為 10 公里尺度)較 beta skirt 的區域(尺度約為 50-100 公里)小，也具有較小的寬高比 (aspect ratio)，但以上之動力及熱力條件滿足時，從二維的 beta 平面的紊流理論(2D beta-plane turbulence)出發，這些小尺度擾動藉由向上能量串級(upscale energy cascade)的方式，非均向性的對大尺度軸對稱環流做出貢獻，進而形成低層噴流(low-level jet)。此低層噴流透過上述的機制和進一步的海氣正回饋作用(如 WISHE)，有效地使同一個區域的切向風，進而使得外眼牆有機會形成。

後續的研究如 Qui et al. (2010)以及 Huang et al. (2012) 皆對此 BSA 理論(Beta Skirt Axisymmetrization Hypothesis, BSA)進行進一步的檢驗。BSA 理論中所提及的某些特徵確實存在於模擬中，例如 beta skirt 以及低層噴流的出現，但是其二維紊流理論是否適用於三維濕大氣中，以及能量串級的過程，仍需要進一步的檢驗。

1.1.3 平衡與非平衡動力在外眼牆形成中的角色



針對颱風外眼牆的發展以及眼牆置換過程，早期研究多用較簡單的二維淺水方程模式，或使用軸對稱平衡的觀點探討。近年來，由於數值模擬的進步，以及加入了更多的觀測資料，都發現了非軸對稱的擾動所引發的物理過程，對於颱風外眼牆的發展有著顯著的影響力。另一方面，邊界層內的摩擦力，也會使得颱風呈現非梯度風平衡的狀態，進一步引發一連串的物理回饋作用。雖然，目前對於外眼牆的發展仍無定論，以下將回顧從不同觀點出發的文獻，包含邊界層中的非平衡動力(e. g., Wu et al. 2012; Huang et al. 2012; Wang et al. 2013; Qiu and Tan 2013; Abarca and Montgomery 2013, 2014, 2015)、渦旋的平衡動力 (e. g., Wang 2009; Hill and Lackman 2009; Judt and Chen 2010; Moon and Nolan (2010); Rozoff et al. 2012; Sun et al. 2013; Zhu and Zhu 2014)、邊界層的角色(e. g., Kepert 2013; Montgomery et al. 2014; Kepert and Nolan 2014)、實際例子的觀測模擬 (Bell et al. 2012; Didlake and Houze 2011; Sun et al. 2013)，整理近年來關於外眼牆發展的論文。

1.1.3.a 非平衡動力


Smith et al. (2009)將颱風渦旋增強的機制，分成兩個部分：

1) 邊界層之上：屬於不受邊界層內較大摩擦力影響的自由大氣，此區域的質量場和動量場呈現梯度風平衡，氣塊將保守絕對角動量(Absolute Angular Momentum, M)。颱風中因為對流潛熱釋放而來的非絕熱加熱，在眼牆最大並向外遞減，形成系統尺度的徑向浮力梯度。在軸對稱平衡的觀點之下，這樣的非絕熱加熱梯度將引發低層入流、高層外流之形式。這樣的機制將促使颱風範圍的增加以及切向風的增強，可以從平衡動力的觀點來著墨。

2) 邊界層內部的區域：對於颱風內核區域十分重要的機制。此區域受到摩擦力的影響，將有絕對角動量的耗損而破壞梯度風平衡，並伴隨超梯度風的出現。即使絕對角動量無法保守，足夠強度的內流仍可以使絕對角動量耗損最少並進入內核區，進一步使得切向環流增強。當在靠近邊界層頂附近出現科氏力和離心力的

總和大於氣壓梯度力時，即在此區域出現超梯度風，將存在一個向外的加速度，使得內流減弱，或是出現外流。

以上的理論主要針對單眼牆颱風作出解釋。但近年來，這些機制也被用來與外眼牆的發展做連結。Wu et al. (2012) 在 WRF-EnKF (Ensemble Kalman Filter) (Wu et al. (2010)) 的架構之下，以 EnKF 資料同化方法將 T-PARC (The Observing System Research and Predictability Experiment (THORPEX) Pacific Asian Regional Campaign) 實驗期間的觀測資料與 WRF 模式結合，重新在數值中模擬出 2008 年辛樂克颱風的生命史。模擬出的結果完整呈現了辛樂克颱風發展過程中風場以及質量場的變化，也詳細的模擬出颱風外眼牆發展以及眼牆置換的過程。使用 Wu et al. (2012) 的研究成果進一步分析，Huang et al. (2012) 指出，在外眼牆形成前的十幾個小時前率先出現切向環流的擴張，並且將絕對角動量面持續向颱風中心方向集中；接著，在外圍雨帶的某個區域，邊界層頂附近將可能出現一個集中的超梯度風區域並使該區域有向外之加速度，進而使該區域之下的內流減弱、邊界層內的輻合增強、並在邊界層頂及其上的區域出現外流及輻散、出現持續的上升運動；而這樣的物理過程可以支持較集中的對流於此區域集中並發展，進而導致外眼牆的發展與成熟。而這樣的機制在後續的研究中被持續進行檢驗。Abarca and Montgomery (2013, 2014, 2015) 一系列的工作當中，使用兩種不同的模式模擬出外眼牆發展的例子，並進行分析。首先，在考慮三維全物理的模式中，他們使用 Sawyer-Eliassen 模式進行診斷，結果發現平衡動力的診斷無法完整呈現外眼牆發展的過程以及颱風的環流，換言之，軸對稱的平衡動力不足以解釋外眼牆的發展，非平衡動力的過程的角色至關重要；另外，在 Abarca and Montgomery (2013) 中，他們使用一個軸對稱的非線性 slab 邊界層模式，結果發現單純只有非平衡動力的邊界層過程，即可觸發外眼牆的發展。此外，Wang et al. (2013) 使用理想化的模式模擬一個雙眼牆颱風的例子，並發現到切向風的擴張、次環流的出現以及邊界層中的總徑向作用力 (Net Radial Force, NRF) 主宰了外



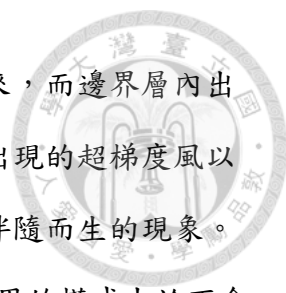
眼牆的發展，而非梯度力(gradient force) 和摩擦力對於 NRF 有最主要的貢獻，並出現第二對流極值(Second Maximum of Convection Zone, SMCZ)。另外，Qiu and Tan (2013) 發現外圍雨帶(Outer Rainbands, ORBs) 會藉由超梯度風的建立對於邊界層內的內流產生一定的影響，使得內流減速，並提前出現一個不對稱但規則的入流結構，進而支持外眼牆發展區域對流的發展。後續的這些研究，皆支持了 Huang et al. (2012) 所提出的物理過程，也強調了邊界層中非平衡動力的重要性。

1.1.3.b 平衡動力

從熱力風及梯度風平衡的觀點出發，Shapiro and Willoughby (1982) 指出，在颱風最大風速半徑附近的一個熱源，可以引發颱風的次環流的發展，並使得切向環流增強。Wang (2009) 以及相關工作 Hill and Lackmann (2009) 和 Judt and Chen (2010) 皆指出，外圍雨帶之潛熱釋放，可能有利於外眼牆的生成與發展；Moon and Nolan (2010) 提出假設，當外圍雨帶的潛熱加熱持續足夠的時間時，將能有效的產生環狀的切向環流增強，進而有利於外眼牆的生成。使用平衡動力的模式對於 WRF 模式輸出的渦旋進行診斷與計算，Rozoff et al. (2012) 指出徑向的非絕熱加熱梯度會引發橫向的環流以及低層的輻合；若在軸對稱平均之下最大風速半徑之外有持續之潛熱加熱，並伴隨著慣性穩定度的增加，則可能導致外眼牆的發展與成熟。Zhu and Zhu (2014) 指出，外圍雨帶的加熱主宰了外眼牆的生成與發展，而且外圍雨帶或外眼牆需要發展到一定的強度，才能導致外眼牆的生成及眼牆置換。

1.1.3.c 邊界層過程

Kepernt (2013) 和 Kepernt and Nolan (2014) 使用三個軸對稱的邊界層模式診斷一個穩定態具有兩個風速極值的模擬。他們指出，即使沒有切向環流的擴張，在最大風速半徑(Radius of Maximum Wind, RMW) 之外的某個地方，相對較弱的渦度梯度可以引發一個明顯的摩擦上升流(updraft)；而外眼牆的形成主要透過局



地渦度梯度的上升、摩擦上升流以及對流之間的正回饋作用而來，而邊界層內出現對流是此正回饋作用的第一步；同時，他們指出，邊界層中出現的超梯度風以及非平衡動力，並不是外眼牆發生的必要條件，而是原先就會伴隨而生的現象。然而，Montgomery et al. (2014) 指出，Kepert (2013) 所使用的模式由於不含時間微分項，因此無法預測隨時間流場的變化，而且邊界層中的艾克曼輻合也無法完全解釋和決定深對流的發生；若僅透過診斷一個穩定態的風場，不足以將邊界層內之超梯度風以及非平衡動力的重要性降低。

1.1.3.d 實例觀測與分析

使用 RAINEX 計畫及都卜勒雷達針對 2005 年的 Rita 颶風進行觀測的資料，Didlake and Houze (2011) 從資料中完整的分析出一個眼牆置換的過程，並且觀測到前文所提及的特徵，如超梯度風的出現。他們透過動能的收支分析結果指出，平均場及擾動場的運動均會使得外眼牆發展區域的環流增強，但兩者有不同的角色。針對同樣的一個颶風，Bell et al. (2012) 發現外眼牆發展區域的切向環流，同時在邊界層內以及其上發展，而且平衡動力及非平衡動力皆對於外眼牆的發展做出貢獻。此外，Sun et al. (2013) 針對 2008 年的辛樂克颶風進行模擬分析，他們發現外眼牆主要由向內移動並發展的外圍雨帶增強而來，平衡動力與非平衡動力過程之回饋作用皆對於外眼牆的發展做出貢獻。以上的實際例子中，除了有觀測計畫的資料外，也從不同的觀點進行深入之分析，並同時印證了非平衡動力及平衡動力的重要性。

1.2 WISHE 機制文獻回顧


1.2.1 WISHE 機制

颶風的形成與發展，與海洋提供的能量息息相關，唯有在海洋上，並與其他有利條件配合時，颶風才有機會形成與增強發展。在 1950 年代，即有研究提出，颶風發展所需的能量被從海面向上傳輸進大氣的焓通量主宰(e.g., Riehl 1950)，而這樣的海洋傳向大氣的焓通量，與海洋與大氣的交互作用以及不平衡有關。當

海表的溫度高於大氣，能量即從海表向大氣傳輸，且蒸發率與表面偏地的風速成正關係，被稱為蒸發率與風速的正回饋作用(evaporative-wind feedback)。這樣的觀念最初被運用到解釋熱帶 30-60 天熱帶波動的發展以及模式模擬(Emanuel 1987; Yano and Emanuel 1991)。

Emanuel (1986) 率先將這個概念運用到模擬颱風的模式當中，並在後續的研究工作(e.g., Emanuel 1989;) 被提及與修正。首先，需要存在一個具有一定強度的擾動，由於海表面向上的潛熱及可感熱通量與表面風速成正相關，當此渦漩之初使強度夠強時，即有足夠的熱通量可以進入颱風系統中，並克服大氣中不利於颱風增強的條件(e.g., 絕熱冷卻的效應)，使得颱風得以有效增強；當颱風增強時，表面風速隨之增強，進而使得海洋傳入大氣的熱通量更為增加，有利於颱風持續發展。這樣與海表風速及海氣不平衡有關的正回饋機制，被稱為 WISHE(Wind-Induced Surface Heat Exchange mechanism, WISHE) 機制。從這個概念被提及以來，許多的接續工作及模擬颱風的模式，皆採用這樣的觀念來解釋颱風的發展與增強，並被廣為利用。

然而，Montgomery et al. (2009, 2015) 指出，WISHE 機制雖然強調了海表的熱通量的重要性，並與颱風的增強有關，但卻不是颱風增強的過程中的必要機制。Montgomery et al. (2015) 在模式模擬當中置入一個最大風速僅為 13m/s 的初始渦漩，並限制了 WISHE 機制的正回饋作用。在他們的實驗中，模式中大氣表面的風速可以自由發展，但是，當用於計算海表向上之熱量通量時，使用給定的值作為上限值，即熱通量不會隨著颱風的增強而持續增加。在他們的實驗結果當中，即使限制了 WISHE 機制的回饋作用，將上限值定在 5m/s，渦漩仍能隨時間發展到颶風的強度，只是具有較慢的增強速率以及較弱的最終強度。Montgomery et al. (2015) 認為，WISHE 機制並不是颱風增強的必要條件。Zhang and Emanuel (2016) 同樣限制了計算熱通量之風速的上限值，並同時進行了理想實驗以及實際例子的實驗。他們發現，做了這樣的限制颱風雖然會發展，但是最終強度以及增



強速率將會因為沒有 WISHE 的正回饋作用而變得較弱、較慢。值得一提的是，在他們的實例例子的模擬當中，當限制的風速上限只有 5 m/s 時，颱風即不會發展；Zhang and Emanuel (2016) 指出，WISHE 機制雖然不是必要條件，但若在實際颱風個案的模擬，存在某些負面條件(e. g., 垂直風切) 於大氣中，則 WISHE 機制的正回饋作用將有利於颱風克服這樣的負面條件，使得颱風增強，否則颱風將無法發展。

以上的文獻回顧中，簡略的介紹了 WISHE 機制可能於颱風增強發展中的角色，而這樣的正回饋作用，與颱風外眼牆的發展之間的關係，將在本研究中深入模擬與分析。

1.3 研究動機與目的

在颱風的生命期中，時常能觀測或模擬出外眼牆的發展，以及眼牆置換過程，而這樣的過程與颱風強度的變化息息相關。近年來，即使有大量的研究成果，從不同的角度切入，模擬與分析外眼牆形成的過程，對於這個現象的物理解釋，仍沒有明確的定論。此外，WISHE 機制普遍被使用於解釋颱風強度的理論，這樣的正回饋機制也用於模式的模擬中；近年來，Nong and Emanuel (2003) 以及 Terwey and Montgomery (2008) 提及了外眼牆發展過程可能和 WISHE 機制的正回饋作用有關，但在這兩篇研究中，提出可能和外眼牆發展相關的機制後，僅字面上順帶提及 WISHE 機制的可能角色，並無針對此機制進行詳細的分析診斷。

因此，在本研究中，使用了 WRF 模式進行實際颱風初始場的模擬，首要目的是，詳細探討 WISHE 機制在外眼牆發展中扮演的角色，從模式的設定中關閉或調弱 WISHE 機制的正回饋作用，並測試不同區域以及不同大小回饋作用的敏感性；此外，分別從平衡動力以及非平衡動力的觀點出發，深入分析外眼牆發展過程中的物理過程以及能量的來源與收支，並與前人的研究成果互相印證比較。

後文的內容概述如下：第二章為本研究的資料來源以及模式簡介、實驗設計方法、以及敏感性實驗的設定。第三章為控制組實驗之成果，從多重觀點切入，

對控制組實驗中的眼牆置換過程加以分析。第四章為敏感性實驗的結果，這部分測試了外眼牆發展過程對於 WISHE 機制的敏感性，並且詳加探討每組實驗間的差異，以及造成差異的原因。第五章則為結論以及未來展望，包含了總結以及後續研究可進行之工作。



第二章 研究工具與方法



2.1 資料來源

本研究使用 2008 年的辛樂克颱風作為初始場，其來自官(2012)高解析度且經由資料同化方法而得的初始渦漩。資料同化的系統架構採用連(2009)與 Wu et al. (2010)在 WRF 模式的 Ensemble Kalman Filter 方法 (EnKF; Evensen 1994; Meng and Zheng 2007, 2008a)，藉此產生渦漩的初始場。

2.2 實驗設計

本研究使用 Advanced Research Weather Research and Forecasting Model (ARW/WRF) ver. 3.6.1，全部模擬中使用了四層槽狀網格，分別為 45(91×82, d1)、15(85×85, d2)、5(115×115, d3)、1.67(190×190, d4)公里的水平空間解析度。其中，最外圍網格為定網格，其餘跟隨渦漩中心移動；而最高解析度的第四層網格涵蓋 316.7 公里的範圍，涵蓋了渦漩半徑 150 公里以內的結構。垂直方向上，共有非等間距的 35 層，即較大比例的層數在邊界層內，而網格配置如圖 2-1。

模式的物理過程中，使用 WSM 6-class 雲微物理參數化於 d2、d3、d4；積雲參數化部分則使用 Kain-Fritsch scheme 於 d1、d2；Yonsei University planetary boundary layer scheme 作為邊界層參數化方法；長波輻射使用 RRTM scheme (Radiative Transfer Model)，搭配 the simple short wave Dudhia scheme 作為短波輻射方法；並運用 Revised MM5 Monin-Obukhov scheme 作為 surface-layer scheme。另外，由於海表和模式最低層大氣的溫度差影響了海面向上傳遞的熱通量，而海表溫度會因為颱風移動而可能改變，為了要減少實驗間的變數，在所有實驗中將海溫設定為定值 29.0 度 C，與主要相關文獻的設定一致(如 Rozoff et al. 2012; Wang et al. 2015)。

2.2.1 海表交換係數設定

海表面的熱量通量是颱風發展很重要的能量來源，而在 WRF 模式中，海表面

向上傳至大氣的熱通量與拖曳係數 C_D (drag coefficient)、可感熱交換係數 C_H 、潛熱交換係數 C_Q 相關；本實驗模式設定中選定 $isftcflx=1$ ，此設定的詳細內容於 Green and Zhang 2013 有詳盡的介紹。首先，在 C_D 的部分，考慮了過去有實地觀測的研究成果(e.g., Powell et al. 2003; Donelan et al. 2004)，當風速小於 hurricane force wind 時，係數會隨風速增加，但是當風速達到此風速值時，拖曳係數就接近維持定值，不隨著風速增加而增強。由(2-1)-(2-3):

$$C_{D,N} = \frac{k^2}{[\ln(z_{ref}/z_0)]^2} \quad (2-1),$$

$$C_{H,N} = C_{D,N}^{0.5} \frac{k}{\ln(z_{ref}/z_T)} \quad (2-2),$$

$$C_{Q,N} = C_{D,N}^{0.5} \frac{k}{\ln(z_{ref}/z_Q)} \quad (2-3),$$

由於觀測(如, Powell et al. 2003)指出，在颱風的眼牆之下，地面層中性且穩定，因此，這邊的 N 代表這些方程式考慮了中性且穩定的狀態；而 z_{ref} 是參考高度(約為 10 公尺)，k 是 von Karman 常數， z_0 、 z_T 、 z_Q 為動量、可感熱、潛熱的摩擦長度(roughness length)。本實驗的設定中， z_T 、 z_Q 設定為定值 $10^{-4}m$ ， z_0 與風速(地面層的摩擦速度 u^*)相關，直接影響到各個交換係數的數值。

2.2.2 控制組實驗(CTL)

實驗中的 WRF 模擬預報由 10 日 18UTC 開始到 13 日 00UTC 結束，在四層網格中進行共 54 小時的預報；為了表示方便，本研究於此將 10 日 1800UTC 訂為 $T=0h$ 。本實驗中，颱風移動路徑與辛樂克颱風的實際例子十分不同，在積分時間內緩慢向北移動，從頭至尾皆距離陸地數百公里，因此，颱風的主要核心區域皆落在海面上，陸地對於颱風結構和強度沒有顯著可見的影響。

2.2.3 敏感性實驗

本實驗使用敏感性實驗來檢驗 WISHE 機制在外眼牆形成過程中的角色。首先，模式中的熱通量形式在敏感性實驗中如下：

$$SH = \rho C_p C_h |UST|(\Delta\theta) \quad (2-4),$$

$$LH = \rho L_v C_q |UST| A_m (\Delta q) \quad (2-5),$$

$$U_{\min} = (UST/\kappa) \ln(Z/Z_0) \quad (2-6),$$

其中，SH 和 LH 分別為表面向上的可感熱通量以及潛熱通量， ρ 為密度， C_p 是熱容量 (specific heat capacity)， C_h 和 C_q 分別為可感熱以及潛熱的交換係數， L_v 為 enthalpy of vaporization，UST 為表面摩擦風速， A_m 為 moisture availability， $\Delta\theta$ 、 Δq 分別為模式最低層與海表面之間位溫及比濕的差異。其中，UST 經由 2-6 式計算而得，其中的 U_{\min} 選用模式最低層風速或是給定的上限值兩者中，較小的一个。而本實驗中上限值分別為 1、5、10、15 ms^{-1} (風速上限值若大於 15 ms^{-1} ，實驗結果並無顯著差異)。另外，在敏感性實驗中，模式的風速可以自由發展，但是在計算熱通量時，使用修正過後的熱通量形式計算，即風速最高只能用給定的 U_{\min} 來計算摩擦風速以及熱量通量，以此方式濾除 WISHE 機制的回饋作用，換句話說，熱通量不會隨著風速不斷增加而持續增強。

本實驗中，共有四個給定的上限值，並且改變不同的限制區域，圖 2-2(a)~2-2(d) 的藍色區域為限制 WISHE 回饋機制的區域，分別為限制 50km 之外 (OSC)、限制 80km 以外 (OBC)、限制 50km 之內 (InC)，以及限制距離颱風中心 55-90km 之間的環狀區域 (RiR)；因此，共有 16 組敏感性實驗 (如表 2-1)。積分時間共 42 小時，並會在第四章中詳細分析各個實驗，進行歸納比較。

第三章 研究結果一 – 控制組實驗



3.1 控制組實驗之結構演變

以下將針對控制組實驗(CTL)外眼牆形成過程進行分析。首先，圖 3.1、圖 3.2、圖 3.3 依序為不同時間點的 2.8 公里高反射率(reflectivity)、切向風、1 公里高垂直速度隨時間的演變。在 30h 以前，颱風具有對稱的內眼牆，並伴隨外圍的螺旋雨帶結構，沒有在某固定半徑上具有組織性的發展；切向風則是從 T=15h~30h 這段時間內增強，並且在 25h 之後維持強度；最大風速半徑大致落在 30-40 公里之處，邊界層中接近 1 公里的高度之處。而從 30h 開始，在半徑 50 公里之外數十公里的範圍，出現環狀結構的對流並持續發展，垂直速度增強，外眼牆逐漸發展成熟；從切向風來看，在 50 公里到 100 公里的區間明顯向外擴張，並且出現了內眼牆之外的第二個極值，內眼牆區域風速在 33h 之後逐漸減弱。39h 之後，內眼牆的對流減弱並逐漸消散，外眼牆的區域具有風速的極值，完成眼牆置換。

圖 3.4a 為此組實驗中心最低氣壓、模式十米的最大風速隨時間之演變，而圖 3.4(b)為最大風速半徑隨時間的演變。於此後的分析，我們將 10-40 公里的區域定為內眼牆區域，60-80 公里定為外眼牆區域。從圖 3.4a 中可見，於 30h 前，最大風速隨著時間發展增強，並且伴隨著中心氣壓的降低，颱風強度於這段時間內增強。在 30h 之後，隨著外眼牆的發展，中心氣壓逐漸上升並且伴隨著風速的減弱。在外眼牆發展成熟後(約 39h)，最大風速再度增強，但是，中心氣壓沒有再度下降，反而微幅上升。以上特徵中，最大風速的變化與過去文獻大致符合：颱風於進行眼牆置換時風速減弱，當完成眼牆置換後，強度將再度增強；但中心最低氣壓卻沒有再度下降，可能是由於颱風眼擴張，再加上最大風速半徑向外移到外眼牆區域，使得颱風中心附近之氣壓梯度減弱，不需要更低的中心氣壓即可維持颱風的結構，這部分有待日後詳加分析。另外，在圖 3.4b 中，分別畫出內、外眼牆區域的最大風速半徑隨時間的演變，當外眼牆區域的風速，出現第二個極值時，

將此區域的最大風速半徑畫出，在本模擬中，定義 32h 為外眼牆出現的時間。分析結果顯示，最大風速半徑原位於 30-40 公里之間，在 30h 之後，些微向外移動；而外眼牆的極值出現在 32h 時，外眼牆的最大風速半徑，大致位於 60-70 公里的區間，並且逐漸內縮；而內眼牆的風速極值於 40h 之後消失，完成眼牆置換。

以下，將針對不同物理參數隨時間的演進，以 Hovmöller diagram 表示。於圖 3.5a 與圖 3.5b，分別畫出了 1 公里高度的垂直速度與切向風、2.8 公里高度的位渦，以及非絕熱加熱率隨時間的變化。於 24h 之前，較大的垂直速度與切向風，集中於 60 公里以內的內核區域，並伴隨著切向風向外些微擴張，而在內眼牆區域，垂直速度較活躍的地區，與非絕熱加熱之區域大致重合；24h 後，在半徑 60-110 公里間，開始出現較活躍的對流以及非絕熱加熱，接著，此區域伴隨出現切向風的擴張與增強。於 32h 開始，外眼牆開始明顯發展，切向風繼續擴張且出現第二個極值，代表此時具有雙眼牆構造，同時，在外眼牆區域，也有較大的 PV 及非絕熱加熱出現，貢獻於外眼牆的增強。最後，在 36h 後，颱風半徑 40 公里以內的對流與切向風減弱，在此同時，外眼牆的結構已發展成熟，具有對流以及切向風的極值，完成眼牆置換。

以上這些特徵，包含了切向風之擴張並伴隨著較有組織性的對流、PV 在此區域累積，以及置換完成後颱風風場的擴張，皆和過去文獻所提及之特徵相近。

3.2 控制組實驗軸對稱結構及物理參數之特徵

以下將針對控制組實驗，從軸對稱的觀點進行分析，並探討平衡動力及非平衡動力的角色。另外，為了要診斷造成切向風風場擴張的機制，也在此節中進行動量收支分析；此外，將模式輸出的 forcing 資料輸入 Sawyer-Eliassen 方程組診斷，了解平橫動力能掌握雙眼牆生成的程度。

3.2.1 平衡及非平衡動力之角色

3.2.1.a 非平衡動力的角色

此處的分析，將 Smith et al. (2009) 的兩種渦旋增強機制延伸到雙眼牆形



成的探討。在平衡的情況之下，邊界層以上的自由大氣為梯度風平衡：

$$\frac{\overline{v_g^2}}{r} + f \overline{v_g} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{P}}{\partial r} \quad (3-1),$$

等號由左至右，分別為離心力、科氏力、氣壓梯度力，此三力建立了梯度風平衡。然而，渦旋發展過程中的增強或減弱時，三力可能會不平衡，具有 AF (AF, Agradient Force):

$$AF = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{P}}{\partial r} + \frac{\overline{v_g^2}}{r} + f \overline{v_g} \quad (3-2),$$

$$v_{ag} = v - v_g \quad (3-3),$$

若 AF 大於零，代表實際風速大於梯度風速， v_{ag} 亦大於零，為超梯度風；反之，當 AF 小於零，此時實際風小於梯度風，為次梯度風。若一地出現超梯度風，代表此處具有向外的加速度，可能使該處的徑向內流減弱，亦或是出現外流。

圖 3.6~3.8 為邊界層及低對流層各項物理參數隨時間的變化。在 20h 時，此時僅具有單眼牆的構造，在邊界層最低層皆為次梯度風的區域，並於 10-30 公里區域的 1 公里高度以下有超梯度風，於其上有外流。30h 時，切向風略為向外擴張，外圍也出現了零散的對流，並於 50-110 公里、0.5-1.5 公里之區域出現超梯度風，於其上具有些微外流，60 公里以外的內流也增厚增強；在此同時，內眼牆區域的內流也減弱垂直上也變淺。從 33 至 36h，外圍區域的超梯度風增強且集中發展於 50-80 公里，而 60 公里以外之內流持續增強，並向颱風中心方向遞減，使得此區域出現輻合，並於邊界層頂(約為 1.1 公里高處)之上有外流及輻散出現，輻合及輻散的特徵可由圖 3.9 中輻散場隨時間的變化分析而得。最後，從 39 至 42h，眼牆置換完成，此時，內眼牆區域的超梯度風消失，外圍區域的超梯度風有增強且向颱風中心內縮，內流也集中於外眼牆區域之外。

總結來說，切向風的擴張可能引發外眼牆區域邊界層附近超梯度風的產生，而產生向外的加速度，並於此區域以及其外的低層，具有內流隨著半徑減少而遞減的特徵，產生一個集中的輻合區域，而且在邊界層頂有外流與輻散。以上的機

制將有效使外眼牆發展增強，與過去文獻所提及非平衡動力所引發之特徵一致。

3.2.1.b 平衡動力的角色

過去研究(e.g., Schubert and Hack 1982; Shapiro and Willoughby 1982)指出，渦漩一處之慣性穩定度(I^2 , *inertial stability*)增加時，將會限制偏地的徑向流，使得該處有利於發展垂直上的對流，並提升潛熱加熱的效率，進而使得該地的切向風增強。在 Rozoff et al. (2012) 中提及了這樣的機制可能有利於外眼牆的出現及發展。慣性穩定度可用下列式子表示：

$$I^2 = \left(\bar{f} + \frac{2\bar{v}}{r}\right)(\bar{f} + \bar{\zeta}) \quad (3-4),$$

其中， f 為科氏參數、 r 為離颱風中心之距離、 v 為切向風、 ζ 為相對渦度，而 $\bar{}$ 代表軸對稱的平均量。圖 3.10 為慣性穩定度徑向上之垂直分布隨時間的發展，於 14~15h 時，最大的慣性穩定度位於內核區，而外圍區域的 I^2 隨半徑增加而遞減。十小時後，50~80 公里區間的慣性穩定度，略為向外延伸增強；到了 34~35h，50 公里以外之慣性穩定度明顯增加，尤其是在 3 公里以下的地方，並且垂直向上、向外發展；於 39~40h，外眼牆發展成熟時，外圍慣性穩定度較大的區域與外眼牆發展的位置重合。圖 3.11、3.12、3.13 為位渦、慣性穩定度、切向風以及渦度，隨時間的變化，分別計算了從 20h~30h、30~35h、35~40h 這三段時間，這些物理參數隨時間的變化量，以下分別以這三段時間進行討論。從 20~30h，這幾項參數明顯增加的區域，皆落在內眼牆區域，但是在半徑 60 公里以外之區域，位渦以及慣性穩定度也增加，顯示此處之自由大氣具有之活躍對流，有效率地提供潛熱加熱，造成切向風的擴張與渦度的增強，並進一步提升慣性穩定度。接著，從 30~35h，無論是位渦或是 I^2 增加的區域，已經移動到 40~110 公里的區間，顯示外眼牆的對流更為活躍提供更多加熱，而內眼牆的對流正在減弱，慣性穩定度增加較多的區域已經和外眼牆將產生的區域重合，而且同時由切向風的擴張與渦度的增加貢獻；最後，從 35~40h，此時外眼牆的位渦和 I^2 增加的更為明顯且其中於外眼牆區域，而內眼牆區域的位渦和慣性穩定度持續減少，顯示已經完成了眼牆置換。

由以上的分析得知，在雙眼牆形成之前，外眼牆區域有活躍對流的出現(圖 3-5a、c)，並提供非絕熱加熱；由平衡動力觀點得知，將造成切向風的增加與外眼牆區域慣性穩定度 I^2 的增加，進一步提升外眼牆區域的加熱效率，並伴隨外眼牆發展成熟；與 Rozoff et al. (2012)所提及的物理特徵符合。

3.2.2 Sawyer-Eliassen 診斷

Sawyer-Eliassen 方程式(Eliassen 1951, 以下簡稱 SE 模式)為一用來檢驗診斷渦旋次環流之工具。當給定一外力(forcing, 如摩擦力或是潛熱加熱)時，使用此方程組能分析出渦旋對應的次環流。過去有許多文獻使用此方程式，從不同的觀點檢驗颱風的性質；而也有數篇文獻(e.g., Sun et al. 2013; Abarca and Montgomery 2014; Zhu and Zhu 2014; Wang et al. 2015)用以檢驗外眼牆的增強機制。以下參考 Bui et al. (2009)，使用這個方程組檢驗，當給定從模式所輸出的非絕熱加熱以及摩擦力項時，平衡動力能掌握到渦旋結構次環流的變化趨勢，並探討與外眼牆發展增強之間的關係。

在本實驗中，輸入 SE 模式組的資料由 WRF 模式輸出，解析度與模式第四層網格相同為 1.67 公里，垂直上則從地面延伸至 18 公里的高度，以 0.2 公里為間隔，檢驗渦旋在半徑 130 公里以內次環流以及垂直速度場。分析的時間為 30~32h，也就是外眼牆發生前兩個小時的平均狀態。由於在兩個條件之下，無法滿足解 SE 模式的條件：一個是垂直風切過大的地方，主要發生在低邊界層；另一個則是慣性穩定度小於零的地方，大部分位於高層的外流層。因此，在實驗中，將慣性穩定度小於零的地方訂為 $10^{-6}s^{-1}$ ，同時，也適當的減少邊界層中的風切，使得計算範圍內能滿足解 SE 模式的條件。

模式所輸出的外力項(forcing terms, 非絕熱加熱項及動量項)如圖 3.14。在圖 3.14a 中，非絕熱加熱率正且較大的地方主要位於內眼牆以及外眼牆的區域，與眼牆的對流區大致上一致，而負的區域則位於邊界層最低層，以及眼牆區和內外眼牆間的 moat 區域；圖 3.14b 中，主要在邊界層的低層有負的值，可能由摩擦



力貢獻，在自由大氣中，則是較小的正負數值交替出現。

將輸出的外力項輸入 SE 模式後，能診斷出次環流即颱風的徑向流，以及垂直速度場。圖 3.15b、d 為 SE 模式診斷所得的次環流以及垂直速度場，而圖 3-15a、c 為 WRF 模式輸出資料之分析結果。以下分別比較兩者間的垂直速度以及徑向流：在次環流的部分，SE 模式能掌握到邊界層內低層兩個內流的極值區域，並且在內、外眼牆上方皆有外流場，但是 SE 模式低估了內流場的量值，也低估了內、外眼牆區域外流的量值(SE 模式沒有掌握到半徑 60 公里以外且高度 14~16 公里，以及半徑 90 公里以外，5~12 公里之間的外流)；另外，SE 模式中在 50~100 公里區間的 6 公里以上，有一內流的區域，但是在 WRF 模式輸出中，這個區域僅是徑向流場較小的區域，並無明顯的內流區。在垂直速度部分，SE 模式能掌握到垂直速度的分布，內眼牆區域大致位在 10~40 公里，並從地面延伸到 18 公里高度向外傾斜，而外眼牆則是分布於 65~110 公里，從地面發展至 16 公里的高度，同樣也向外傾斜，但是 SE 模式輸出的垂直速度量值，平均比 WRF 模式輸出小約 0.3~0.5m/s，顯示了給定的非絕熱加熱無法確切掌握到對流的強度，和 SE 模式低估了內流強度有關；而在負的垂直速度部分，SE 模式則診斷出過強的下沉速度於內、外眼牆之間。

以上的研究結果顯示，SE 模式雖然能大致掌握對流以及徑向流場的分布以及形式，但是對於量值皆有所低估，顯示若從 SE 模式組的觀點出發，平衡動力無法完全解釋外眼牆區域次環流的發展及眼牆的增強，需要考慮非平衡動力的作用(如前文所提及的超梯度風在邊界層中所引發的過程)。而這樣的結果與 Abarca and Montgomery (2014)較為接近；但與 Wang et al. (2015)所提及平衡動力已能反應次環流的結果不同。

3.2.3 切向動量收支分析


由於在外眼牆要發展時，具有切向風明顯沿徑向擴張特徵，因此，在本節將計算切向動量的收支，進一步了解使切向風增強的過程為何。切向風變化的方程式展開如下：



$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} = -\bar{u}\overline{\zeta_{abs}} - \bar{w}\frac{\partial \bar{v}}{\partial z} + \overline{F_{ric}} - \overline{u'\zeta_{abs}'} - \overline{w'\frac{\partial v'}{\partial z}} \quad (3-5),$$

於此方程組中，(u, v, w)分別為徑向、切向、垂直速度， ζ_{abs} 為絕對渦度，overbar代表軸對稱平均量，prime 為非軸對稱平均的量。等號左邊為模式輸出切向風的變化量，等號右邊依序為平均徑向平流項、平均垂直平流項、摩擦項、渦流徑向平流項、渦流垂直平流項。圖 3.16 為不同項在 30~33h，也就是外側眼牆之切向風極值正要產生的前後，各項物理過程對於切向風變化的貢獻，我們主要針對 50 公里以外外眼牆以及其外的區間進行分析。首先，圖 3.16a 以及圖 3.17a 中，模式輸出的切向風在 50-120 公里的區間，大部分區域是增強，尤其是在 70 至 120 公里的區域，增加的最為明顯，並且增加的區域向外、向上傾斜；而圖 3.16b 以及圖 3.17b 為等號右邊五項的總和，大致上能掌握外眼牆區域風速增加區域的分布，但是量值上的掌握度不佳，另外，相位正負號掌握較差之處為整個區域 0.5 公里以下，以及靠近內眼牆區域 3 公里高以上的地方。若將兩者進行比較並檢驗剩餘項 (residual term, 圖 3.17c)，我們發現，診斷的結果明顯高估了 50 公里附近、3 公里高度以上區域的切向風，並且也高估了 50~120 公里區間，1 公里高度上下的風速，但對於其他區域則低估，尤其是在整個區間 0.5 公里高以下的地方。從以上的分析結果中，我們發現這樣的收支分析診斷可以掌握切向風變化的型態分布，雖然量值上仍有一定差異，但此收支分析仍可提供定性的了解。以下，將針對等號右邊中五個不同的物理過程項詳盡討論。

首先，先從軸對稱平均項進行分析，發現到平均徑向平流項(圖 3.16d)在邊界層低處之內流區域為正，代表內流將外側較大的動量向颱風中心傳送，尤其在 50~90 公里外眼牆的區間量值最大；而此項在半徑 50~90 公里區間邊界層頂以及其外側區域的高層小於零，與具有外流特徵的區域重合。接著，在平均垂直平流項(圖 3.16e)中，於內流區為負，於其上則大於零，代表垂直速度將低層經由內流而得的動量相上傳送，使得自由大氣的切向風得以增強，並且向外傾斜。圖 3.16c 則為摩擦項的作用，大致上在邊界層低層呈現負的貢獻。以上三項的總和為軸對稱



平均項的貢獻，結果如圖 3.16f，我們發現對於邊界層 0.5 公里高以上之邊界層內風速的增強有正的貢獻，對於 90~120 公里區間邊界層以上的大氣同樣有正貢獻，但對於 50~90 公里區間邊界層以上，以及最低層 0.5 公里高以下的區域則有負貢獻；物理上，邊界層中的內流將外側較大的切向動量傳輸進入外眼牆的區間(半徑 60~80 公里處)，並且經由垂直速度向上傳輸動量至自由大氣中。然而，於雙眼牆區域的邊界層上的外流，將外眼牆區域邊界層頂至 3.5 公里高的動量外傳到此區域外側的自由大氣，進而使得此區間的動量減少，並造成外圍區域風速的增加。此結果顯示。軸對稱平均項是導致切向風擴張十分重要的過程。

接著為針對渦流項進行的分析。圖 3.16g 為渦流徑向平流項，我們發現對於整個區間大多數區間的貢獻為負，只有在半徑 90 公里以外的邊界層內有正的貢獻；相對的，渦流垂直平流項的貢獻較小，而且在 2.5 公里高以下的分布特徵與平均垂直平流項相近，但於此高度以上又有量值相對較小的負貢獻。將以上兩項進行加總，圖 3.16i 顯示了渦流項的貢獻。我們發現，渦流項總和為 50~90 公里之邊界層上方，以及 90 公里以外的邊界層內帶來正的貢獻，但是相對軸對稱平均項而言較小，另外，渦流項也造成了半徑 50 公里附近收支計算不準確的來源。

圖 3.18 為 60~80 公里區間，不同項隨著時間的演變。我們發現，從 25 小時到 40 小時，隨著切向風的擴張以及外眼牆的發展，平均徑向平流(圖 3.18a)以及平均垂直平流項(圖 3.18b) 的量值有逐漸增強的趨勢，可能與此區間內流以及垂直速度的增強有關。而渦流項的部分，渦流徑向平流項(圖 3.18c)的貢獻一開始量值很小，隨後則是具有負貢獻；渦流垂直平流項(圖 3.18d)在 1km 高以下的區域沒有明顯的貢獻，但是在此高度以上，正的貢獻隨時間增加，與平均垂直平流項相似。同時。若將平均項(圖 3.18e)以及渦流項(圖 3.18f)進行比較，我們發現在邊界層內，平均項帶來主要的正貢獻，而渦流項主要帶來負貢獻；在邊界層頂以及其上延伸至 3.5 公里高的地方，平均項有負貢獻，而渦流項則有正貢獻，這些物理過程的量值均隨時間逐漸增加。



總和來說，我們可以得知，以上這些特徵與內流、外流，以及垂直速度的分布和發展關係密切。雖然此分析在定量上無法完美診斷切向風的變化，但是定性上足夠用以討論切向風擴張的過程。

3.3 小結

此組控制組實驗，所分析的特徵，與過去觀測或是數值模擬的文獻十分類似：包含了外眼牆形成前，活躍對流伴隨切向風的擴張，對流逐漸構成環形，最後取代內眼牆而完成眼牆置換。透過非平衡動力的觀點分析，切向風的擴張造成了邊界層附近超梯度風的出現，進而引發一連串的回饋機制，與過去文獻所提及的過程相符；同時，透過平衡動力的觀點分析，我們發現到外眼牆發生前，在外圍區域活躍對流的出現，有效提供非絕熱加熱並產生切向風的增強，提升該處的慣性穩定度與加熱效率。最後，Sawyer Eliassen 方程的診斷分析顯示，雖然給定外力項能診斷出與 WRF 模式輸出類似型態的內、外眼牆分布，但是無論是內流，或是垂直速度，SE 模式皆低估，顯示了平衡動力無法完整解釋外眼牆的發展增強，仍需要其他如非平衡動力的作用，才可能完整解釋外眼牆產生的過程。

在颱風雙眼牆結構發展之前，外眼牆區域低層切向風擴張為重要的特徵，除了能引發非平衡動力的物理機制外，也與此區域的表面熱通量關係密切。而透過切向風診斷我們得知，在外眼牆區域，軸對稱平均項或是渦流項在不同的區域分別對於切向風的增強帶來正的貢獻。另外，在外眼牆區域，一旦表面的風速增強，向上傳輸進入大氣的表面潛熱及可感熱之通量增加，使得對流發展，進一步使得風速繼續增加，這樣的正回饋機制，將有利於此區域眼牆的發展，此即為 WISHE 機制之貢獻，也與外眼牆的發展密不可分。因此，在第四章將從定性上及定量上進行探討 WISHE 機制與外眼牆發展的角色，並且針對不同的區域，包含內眼牆及外眼牆區域限制回饋作用，進行深入的探討。

第四章 研究結果二 - 敏感性實驗



4.1 敏感性實驗之結構演變

在本研究中，限制 WISHE 回饋機制區域共有四種設計(圖 2.2，實驗代號依序為:OSC, OBC, InC, RiR)，並有四種回饋上限的風速值(1, 5, 10, 15ms⁻¹)，合計共有 16 組敏感性實驗。圖 4.1 為 OSC-01, OSC-05, OSC-10, OSC-15 一公里高度之垂直速度及切向風的哈莫圖(Hovmöller diagram)。OSC-01 以及 OSC-05 僅具有單一眼牆，且外圍也沒有活躍顯著的對流發生；於 OSC-05 中雖然切向風場向外擴張，但並無外眼牆的發生。相對的，在 OSC-10 中，於 33 小時開始活躍對流活動的出現並伴隨切向風的擴張，較 CTL 實驗延遲(CTL 中發生於 24 小時左右)，而 OSC-15 有外眼牆的發生，但外側對流出現的時間為 30 小時左右，也比 CTL 實驗延遲。另外，OSC-10、OSC-15 之 moat 區域比控制組實驗來的不明顯，且外眼牆的對流較為鬆散，切向風的極值也比控制組實驗來的弱。

接著，我們分析 OBC 組的實驗，圖 4.2 為這四組實驗的結果。同樣的，OBC-01 及 OBC-05 實驗，沒有外眼牆的發展，而於 OBC-10、OBC-15 的實驗有外眼牆發展，但是發展的時間以及強度也比 CTL 實驗來的弱，實驗結果與 OSC 組的實驗有相似的特徵。以上的實驗結果顯示，若限制 WISHE 機制的區域為 SEF 以及其外的區域，當限制 WISHE 機程度較高時，可能沒有外眼牆的發展；當較小幅限制 WISHE 機制時，則可以支持外眼牆的發展，但是對流與切向風的擴張，以及外眼牆出現的時間延後，而且眼牆的型態也同樣比控制組實驗鬆散。

從以上 OSC 以及 OBC 的實驗結果，我們能初步得知，如果限制了外眼牆以及其外區域的 WISHE 機制的正回饋作用，則會影響到外眼牆的發展。若限制程度大(如實驗 OSC-01、OSC-05、OBC-01、OBC-05)，外眼牆將無法發展，若限制程度較小(如實驗 OSC-10、OSC-15、OBC-10、OBC-15)，則外眼牆可以發展，但是將延後發展的時間，而且外眼牆的強度也較弱。





圖 4.3 為 InC 實驗之結果，在這四組實驗中，皆有外眼牆的發展，而且外側活躍對流出現的時間與控制組實驗之時間相近。由於四組實驗的型態相近，因此以 InC-10 實驗加以討論。圖 4.4 最大風速半徑的圖中，InC-10 外圍之風速極值出現於 29 小時，比 CTL 實驗的 32 小時約提早三個小時；而 InC 這四組實驗之間外眼牆發展的時間並無顯著差異。從 InC 的實驗中，我們發現，若限制內眼牆區域的 WISHE 機制，並不會對於外眼牆的發展有明顯的影響，無論內眼牆區域限制 WISHE 機制的程度如何，外眼牆均能發展，而且強度以及型態與控制組實驗十分類似。

圖 4.5 為 RiR 實驗之結果，四組實驗之風速以及對流的極值皆隨時間逐漸向外擴張。雖然於 32 小時後，風速及對流極值位於 40~80 公里，與控制組實驗之外眼牆區域類似，但是在積分的過程中，由於 RiR-01、RiR-05、RiR-10 此三組實驗無法同時存在內外兩個風速以及對流的極值，我們因而將此三組實驗歸納視為沒有雙眼牆發展的例子。而在 RiR-15 實驗中，如圖 4.6，我們能於 32 小時分析出外眼牆有持續穩定之第二個風速極值，雖然內、外眼牆之間從 30~38 小時之間有無法明確定義出風速極值的區域，但我們仍能從垂直速度以及切向風的型態推斷具有雙眼牆；另外，內、外眼牆間的弱對流區(moat)較控制組實驗不清楚，可能與此實驗限制 WISHE 機制的區域有關。接著，從圖 4.7 可以得知，RiR-10 與 RiR-15 實驗在 30h 之後，風速發展較強的區域，與控制組實驗(圖 4.7a)十分相近，因此，我們針對 30h 之前進行探討。從垂直平均的非絕熱加熱的分布，我們得知，在 30h 之前，由於半徑 55~90 公里區間限制了 WISHE 機制，導致 RiR 實驗之非絕熱加熱率較大的區域較 CTL 實驗外側，進而使切向風較大的區域向外移動擴張；而原始內眼牆部分，RiR-10 實驗由於內側的加熱率明顯較小，進而使得原始內眼牆無法維持，也無法同時存在兩個眼牆，RiR-15 雖然同樣限制了環狀區域的 WISHE 機制，但因為限制的程度較小，使得原始內眼牆區間的風速極值能維持較久的時間，因而被歸納為具有雙眼牆的例子。我們發現，外眼牆區域附近的 WISHE 機制將影響到颱風內、外眼牆的發展，並且影響到是否能在某段時間具有雙眼牆的結構，而



產生與控制組實驗相比十分不同的實驗結果；於積分時間的後期，我們發現 RiR 實驗仍能在外側發展出新的風速極值區域，並且和控制組實驗的區域類似，但是由於限制的環狀區間的 WISHE 機制，導致於 30h 之前內眼牆即減弱，造成 RiR-01、RiR-05、RiR-10 實驗沒有雙眼牆的結構，但是若限制程度較小(RiR-15)，仍能具有雙眼牆的構造。這樣的例子(RiR-01、RiR-05、RiR-10)，可視為介於單眼強颱風以及雙眼牆颱風中間的特殊結構，即雖然沒有同時存在兩個眼牆，但是內眼牆卻有重整並外移的現象，代表雙眼牆產生區域的 WISHE 機制，對於外眼牆的發展十分重要。

圖 4.8a 為這 16 組實驗最大地面(10m)風速隨時間的變化。首先，在 OSC 以及 OBC 實驗當中，OSC-10、OSC-15、OBC-10、OBC-15 四組實驗具有雙眼牆的例子，強度的變化與控制組實驗類似，都是先增強，於雙眼牆形成時風速減弱，並於置換完成後再度增強；而在 OSC-01、OSC-05、OBC-01、OBC-05 沒有雙眼牆的實驗當中，颱風的強度隨時間有減弱的趨勢，但以上八組實驗的強度皆弱於控制組實驗。而 InC 的四組實驗中，在 35 小時之前較控制組實驗弱，而且限制 WISHE 的程度越大，風速越弱；而在眼牆置換完成後，颱風的強度與控制組實驗相近。最後，RiR 實驗的部分，颱風的強度同樣在 35 小時之前比控制組實驗弱，但是四組實驗之間的強度並無明顯不同；而在 35 小時後，強度與控制組實驗相當。

接著，圖 4.8b 針對具有雙眼牆的例子(OSC-10、OSC-15、OBC-10、OBC-15、InC-01、InC-05、InC-10、InC-15、RiR-15)，分析 10~40km 以及 60~80km 之間，平均 1km 切向風隨時間的變化。外眼牆區域(60~80km)部分，InC 的四組實驗的風速強度以及增強速度，與控制組實驗相近；而 RiR-15 實驗之外眼牆強度，發展的速度以及最終強度均稍弱於控制組實驗；另外，於 OSC-10、OSC-15、OBC-10、OBC-15 中，風速增強的速度較慢而且最終強度也較弱，顯示限制了外圍的 WISHE 機制，會影響到外眼牆風速的發展，但是若限制內部區域，則影響輕微。再來，於內眼牆的風速發展的分析結果中，OSC-10、OSC-15、OBC-10、OBC-15 內眼牆減弱的速

度在外眼牆發展前比控制組實驗稍弱，但是於 InC 實驗以及 RiR-15 當中，減弱更為明顯。針對模擬最終達到穩定態的颱風強度(以下簡稱最終強度)部份，OSC-10、OSC-15、OBC-10、OBC-15 與控制組實驗相當，但是 InC 實驗以及 RiR-15，最終強度則明顯較弱。此分析結果顯示，無論是限制內眼牆區間附近或是其外區域的 WISHE 機制，將改變內眼牆的減弱速度，尤其是，若限制內眼牆區間以及其外環狀區域，會明顯地加速內眼牆的減弱；同時，最終強度也將受到影響，同樣的，限制內眼牆區間以及環狀區域的例子中，最終強度較 CTL 實驗明顯偏弱。


以下，將針對以上這四組實驗設計共 16 組實驗，分析相關的物理過程，包含相當位溫的變化、平衡以及非平衡動力的觀點、切向風收支分析，並使用 Sawyer-Eliassen 模式診斷，比較不同實驗之間的差異；另外，針對內眼牆維持的時間進行實驗組之間的比較，分析可能造成的原因。並比較不同實驗之間的差異。

4.2 敏感性實驗軸對稱結構及物理參數之特徵

從上一小節中，我們發現若限制不同區域的 WISHE 之回饋機制，將影響到內、外眼牆的發展，而且不同的實驗設計造成了不同的實驗結果。因此，以下我們將從多重觀點出發，如熱力與動力、平衡與非平衡動力之觀點，深入分析不同組實驗間的差異，並提出可能的解釋。

4.2.1 非平衡與平衡動力的角色


以下將針對 OSC 以及 InC 實驗組間進行比較，深入了解在不同的 WISHE 限制區域以及程度之下的不同；而在 OSC 以及 OBC 實驗中，兩種實驗設計之實驗結果相近，因此，選用 OSC 組實驗進行分析。圖 4.9 依序為 OSC-01、OSC-05、OSC-10、OSC-15 實驗 60~80 公里區間，平均的非梯度力(gradient force, AF)隨時間的變化；而圖 4.10 則為這四組實驗在五小時內，慣性穩定度的變化量。在沒有雙眼牆發展的實驗(OSC-01、OSC-10)，在邊界層低層內流區 $AF < 0$ ，代表具有向內的加速度，而於其上的邊界層高層至邊界層頂，AF 略大於零，但是並沒有隨著時間而顯著增強；同樣的於圖 4.10a、b 中，這兩組實驗於外圍區間也沒有慣性穩定度增加



的連續區間。與控制組實驗相比，我們發現，在無雙眼牆的例子當中，即沒有相關的特徵出現。相對的，在實驗 OSC-10 以及 OSC-15 的實驗當中，具有 $AF > 0$ 且隨時間較明顯增強(圖 4.9c、d)，以及慣性穩定度於連區區間增加(圖 4.10c、d)的特徵，而且在實驗 OSC-10 中，此特徵約比控制組實驗延後約 5 小時出現。從這組實驗中我們得知，一旦限制 SEF 區域以及其外的 WISHE 回饋機制，對於外眼牆的發展以及伴隨的物理特徵有影響，而且限制的程度越大，越不利於外眼牆的發展。由於 InC 四組實驗之結果相近，以下即選擇 InC-10 實驗進行分析，圖 4.11 為此組實驗慣性穩定度以及 AF 在半徑 60~80 公里區間的變化。分析後發現，無論是邊界層附近超梯度風的增強，或是渦漩外圍慣性穩定度的增加分布及量值，都與控制組實驗相當。實驗結果顯示，若僅針對內部區域(半徑 50 公里以內)進行限制，則對於外眼牆的發展以及伴隨於 SEF 區域的物理特徵，並無顯著影響。另外，圖 4.12 為 RiR-15 慣性穩定度以及 AF 在半徑 60~80 公里區間的變化。我們發現，與控制組實驗相比，雖然也有慣性穩定度增加的連續區間，AF 也有隨時間增強的過程，但是增強的幅度比控制組實驗來的小，極值也較小，顯示若限制外眼牆環狀區域的 WISHE 機制，將影響外眼牆發展的相關物理特徵，進而使得外眼牆發展的速度較慢且有較弱的最終強度。

4.2.2 外眼牆區域相當位溫改變量之差異

在颱風中，海洋表面所提供的熱通量，經由垂直上的傳送過程，將使颱風的大氣被加熱，而可以使用相當位溫的變化，來判斷加熱的程度。另外，大氣中的熵(entropy, s)，為相當位溫(θ_e)的函數($s = C_p \ln \theta_e$)。而我們在實驗中於不同區域，限制了海表面的熱通量，對於大氣中相當位溫的變化將有影響。圖 4.13~4.15 顯示針對不同實驗分析在不同的時間內，大氣中相當位溫以及熵的變化情形。首先，圖 4.13 分別為 CTL、OSC-01、OSC-05、OSC-10、OSC-15 在 25h~35h 間，相當位溫的變化量。將這四組實驗與 CTL 相互比較，發現幾個特徵：第一個，當限制了 50 公里以外表面的熱通量，則最低層區域的相當位溫的增加將受到限制而略減；



第二，四組實驗的自由大氣中，相當位溫的變化也受到了影響：OSC-01 相當位溫於垂直方向上皆減少，OSC-05 微幅增加，而 OSC-10 以及 OSC-15 具有外眼牆的例子中，後者增暖程度較大，且相當位溫增加的範圍與外眼牆區域相近，但是兩者皆比控制組實驗的增加程度小；第三，相當位溫增加與熵增加的區域，兩者是重合的。從這組實驗設計的分析中，我們得知限制了外圍以及 SEF 區域的 WISHE 機制，將影響相當位溫的增減，以及增加的幅度。

圖 4.14 分別為 CTL 以及 InC-10 實驗，在 15~25h 之間相當位溫以及熵的變化。InC-10 實驗限制 WISHE 機制的區域是在 50 公里以內的區域，而從圖中也可以發現，於限制區域以外的區間，相當位溫的增加量和 CTL 實驗相近，不因內側區域的熱通量的限制而改變；而位於內部區域，我們發現在颱風中心周圍的相當位溫減少，可能和限制內眼牆周圍的熱通量有關。從這組實驗中我們得知，限制了 SEF 區域以內的 WISHE 機制，不會對於外眼牆相當位溫的增加有明顯的影響，但是會使得內眼牆的增暖受到限制，甚至產生一個生命期較短的內眼牆以及較早的眼牆置換。

最後，圖 4.15 分別為 CTL 以及 RiR-10 實驗，在 12~17h 之間相當位溫以及熵的變化。由於在此組實驗中，對流不斷向外擴張，且較靠內側的對流減弱，以至於內眼牆無法維持而沒有雙眼牆的產生，因此，將針對積分的前五小時分析。圖中顯示，當限制了 55~90 公里區間的熱通量，對於外側區域相當位溫的增加並無顯著影響，甚至相當位溫增加比 CTL 多；然而，於半徑 50 公里以內的區域，相當位溫的減少相當明顯，由低層至 4.5 公里的區間皆有此特徵，也可能造成了減弱較外的內部區間對流。

從以上一系列的分析，我們發現，限制 WISHE 機制的回饋作用(即限制的海表向上的熱通量)將影響大氣中相當位溫的變化以及加熱的程度，進而影響到整個颱風的發展，以及內外眼牆的演變。



4.2.3 內外眼牆的相對強度與 SEF 的關係

從敏感性實驗前述的結果中，我們發現不同組具有雙眼牆的實驗之間，內眼牆的維持時間不相同，而且對於不同的 WISHE 機制的限制區間較為敏感。於物理上，我們從過去研究得知，當外眼牆發展時，會阻斷進入內部區域的內流以及能量傳送，進而限制了內眼牆的發展，甚至加速其減弱，而內外眼牆的相對強度，可能影響了這個過程。

於 OSC-10、OSC-15 以及 OBC-10、OBC-15 實驗中，OSC-10 以及 OBC-10 可達 48 小時；於 OSC-15、OBC-15 實驗當中，內眼牆對流的特徵則可維持至約 42 小時，我們發現，後者外眼牆發展的時間較早且強度較強，從中可以推斷，當外眼牆的相對強度較強或發展較快時，內眼牆的生命期較短。同樣的現象可於實驗 InC 實驗中所見，在這組實驗中，經由前文得知，由於限制了內部區域的 WISHE 機制回饋作用，內眼牆減弱的較快，再加上這組實驗中，外眼牆的出現較控制組實驗早，強度也與控制組實驗相當，在兩者的影響之下，內眼牆的生命期較短。

圖 4.16 為 CTL、OSC-10、OSC-15、InC-10、RiR-10 實驗，內、外眼牆 1 公里高度之平均切向風速的比值(外眼牆區域/內眼牆區域)，當量值大於 1 時，代表外眼牆區間的平均風速較大。我們發現，於 CTL 實驗中，於 30h 之前，量值略小於 1，並呈現上下震盪，而在 32h(第二個風速極值出現的時間)後，比值穩定的大於 1，顯示外眼牆正在明顯的發展而內眼牆正在減弱。相較之下，OSC-10 以及 OSC-15 的比值於 30h 後小於 CTL 實驗，且前者小於後者，恰好這兩組實驗的外眼牆較弱且出現時間較晚，相對於內眼牆來說強度較弱，對於阻擋進入內眼牆區域內流的限制較小，因此，內眼牆才能維持較久的時間。於 InC-10 以及 RiR-10 中，我們發現外眼牆區間的平均風速一開始就相對較大，且增強較快的時間也比控制組實驗提前，而且最終比值也較高，顯示了外(內)眼牆相對較強(弱)，具有生命期較短的內眼牆。從以上的比值分析中，我們發現到內外眼牆的相對強度將影響內眼牆的生命期，以及 ERC 的過程。於物理上，外眼牆發展確實會限制內眼牆的發展，



這個結果與過去文獻的發現一致。

4.2.4 Sawyer-Eliassen 診斷

圖 4.17~4.20 為不同組敏感性實驗使用 Sawyer-Eliassen 方程組診斷之次環流結果、輸入之給定動量和熱量外力，以及 WRF 模式輸出變數的次環流，與控制組實驗選取相同的時間(32-34h)平均計算。圖 4.17 及 4.18 分別為 OSC-01 以及 OSC-10 的結果，前者沒有外眼牆的發展，而後者則有外眼牆發展的特徵。從診斷中得知，限制了外圍的熱通量後，明顯影響到外圍潛熱加热的量值，並也限制了內眼牆區域的潛熱加热。對比 WRF 輸出的徑向流場，我們發現外流有明顯的低估，尤其在 50 公里以內的區域，內流的量值也被低估；垂直速度的部分，雖然能掌握到內眼牆垂直速度的分布，但是明顯低估了外圍區域的垂直速度，從這組實驗的結果我們得知，限制了外圍區域的熱通量後，將影響整體的垂直次環流。接著，在圖 4.18 (OSC-10)中，我們發現外圍非絕熱加热的量值也受到限制表面熱通量的影響而減少，但是仍然能區隔出內部以及外部區域的非絕熱加热。對比徑向流後，我們發現到 SE 模式能掌握到內、外眼牆區域，邊界層以上自由大氣低層的外流，但是低估了內眼牆的外流值；同時，也低估了中、高層大氣的外流，以及整個邊界層的內流。診斷垂直速度，我們發現 SE 模式對於外圍區域的垂直速度分布以及量值皆無法有效掌握，可能與同時低估內流以及外流有關；而內眼牆部分，內眼牆的垂直速度雖被低估，但是大致能掌握內眼牆的分布位置。從這組實驗中我們得知，當限制 WISHE 機制的程度較小(e.g., OSC-10)時，雖然外圍區域的非絕熱加热受到影響，但是 SE 模式仍然能掌握到內外眼牆之次環流，量值部分則被低估。

圖 4.19 為 InC-10 實驗的診斷結果。我們發現，限制內部區域的表面熱通量，對比控制組實驗，僅對於內眼牆非絕熱加热的量值有影響，且分布較窄；對於外眼牆區域附近的非絕熱加热無顯著影響。我們發現 SE 模式能診斷出這組實驗內、外眼牆的特徵，包含了兩個區域兩個內流的極值、邊界層頂以上的兩個外流、以及兩個垂直速度的分布。但是同樣低估了垂直速度的量值、內流的量值，以及中

高層大氣的外流場。這組實驗的結果顯示，當限制內部區域表面熱通量時，SE 模式大致能掌握到兩個眼牆的發展。

圖 4.20 顯示 RiR-10 的診斷結果，此組實驗具有較深厚的單一眼牆。我們發現，限制了 55~90 公里區間的表面熱通量，將使得這個區間以及其內垂直上的非絕熱加熱受到抑制，進而使得 SE 模式低估了此區間的垂直速度和徑向流量值；而且，非絕熱加熱的區域也分布的較為外側(與 CTL 相比)，造成一個連續的加熱區間(無 moat 區域)，可能造成了單一眼牆的結果。雖然 SE 模式以及 WRF 輸出的結果皆能分析出兩個邊界層之上的外流，但是無法發展出兩個清楚的眼牆。

從 SE 模式的診斷中，我們得知，限制 WISHE 機制，將影響到非絕熱加熱，進而影響到颱風次環流的發展；特別是針對 SEF 區域以及其外的限制，影響較為顯著。於前面的篇幅中，我們得知平衡動力以及非平衡動力皆對於外眼牆的發展有貢獻，而使用 SE 模式的結果，我們得以證明從平衡動力觀點出發而得的次環流，將會因為 WISHE 機制而與 CTL 有所不同。

4.2.5 敏感性實驗之切向動量收支分析

圖 4.21~4.24 為其中幾組代表性的敏感性實驗，切向風收支分析隨時間的演變。在圖 4.21(OSC-05，無雙眼牆)中，無論是正貢獻或是負貢獻，隨時間並沒有顯著的變化，尤其平均徑向平流以及垂直平流項的正貢獻，隨時間並沒有顯著的增加，與外側沒有外眼牆發展的結果一致；圖 4.22 以及圖 4.23 為有外眼牆發展的實驗，但是此兩組實驗外眼牆的強度較弱，且較 CTL 實驗延遲發生。從分析結果我們發現，OSC-10 實驗的平均項以及擾動項在 36h 以前量值並沒有明顯的增強，但是於其後有較為顯著的增強，與此組實驗外眼牆延遲出現的特徵相符；OSC-15 實驗各項的量值增加的比 OSC-05、OSC-10 明顯，而且從 25 小時開始就開始增強，但是量值仍比 CTL 實驗來的弱，也造成了此組實驗具有較弱的外眼牆。最後，圖 4.24 為 InC-10 的結果。從前文的分析中，此組實驗的外眼牆發展時間以及強度均和 CTL 實驗相似，從動量收支分析的結果中，我們發現不同物理過程量值的大小



以及增強幅度，均和 CTL 實驗(圖 3.18)相近。

由此小節的分析我們得知，限制 WISHE 機制將會影響到颱風外眼牆動量的增加以及切向風的增強，進而影響到眼牆發展和置換的過程，特別是若限制了外眼牆區間以及其外的 WISHE 機制，將影響到切項風增強的量值以及最終強度，進而限制外眼牆的發展；若僅限制內眼牆區間的 WISHE 機制，則對於外側動量的增加無明顯的影響。

4.2.6 敏感性實驗之表面熱通量分布與其他物理參數之關聯

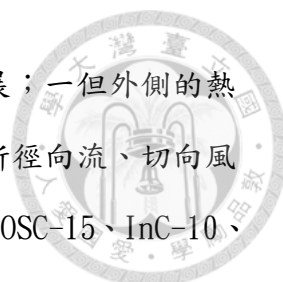
此部分將分成兩個階段討論，第一段時間為外眼牆對流發展之前(30h 以前)，另一段時間則為雙眼牆正在發展的時間(30~40h)。我們同時選取不同組實驗，具有雙眼牆(CTL、OSC-15、InC-10、RiR-15)及沒有雙眼牆發展(OSC-05、RiR-10)的個案，進行比較分析。在第一個階段，我們主要探討內眼牆的維持。從圖 4.25 中，我們發現非絕熱加熱率與表面的熱量通量的分布有關，而且熱通量的分布會影響內、外眼牆區域的非絕熱加熱。將 CTL 與 OSC-05、OSC-15 相比，我們發現若限制了外側(半徑 50 公里以外)的表面熱通量，將影響整個區域包含內、外眼牆區域的非絕熱加熱，而且限制程度越大，非絕熱加熱率越小。接著，我們比較 InC、RiR-05、RiR-10，我們發現內眼牆區域以及其外 20~30 公里的地方，是影響內眼牆發展的重要區域。InC-10 實驗(限制區域大約延伸至內眼牆之外 10 公里)以及 RiR-15 實驗中，前者限制範圍較小，後者限制程度較小，因此內眼牆區域的大氣仍能維持一定的非絕熱加熱率，但在 RiR-10 實驗中，由於限制程度較大，造成內眼牆附近(約半徑 40 公里)非絕熱加熱率明顯減弱，將使內眼牆減弱較快，進而無法維持較長時間且無法發展雙眼牆。除了限制 WISHE 機制的程度和大小之外，表面熱通量加熱隨半徑的分布也會影響內眼牆的維持，以及是否具有雙眼牆的結構。我們選取 OSC-15、RiR-10、RiR-15 相互比較，我們發現雖然限制 WISHE 機制的區域在半徑 50~90 公里上重疊，但在這段時間內，OSC-15 以及 RiR-15(兩組能發展雙眼牆結構之實驗)的非絕熱率隨半徑分布仍然與 CTL 實驗類似，皆為集中在內側並往外



遞減；相比之下，由於 RiR-10 實驗限制表面熱通量的區域以及程度影響了非絕熱加熱率的分布，造成非絕熱加熱率較大的區域集中於半徑 60 公里以外，有利於外側對流的發展以及切向風的增強，也使得內眼牆減弱較快。

接著，由於非絕熱加熱將影響次環流的發展，進而影響颱風的環流結構，因此我們分析了切向風以及徑向風的變化量。圖 4.27 中，CTL 實驗與 OSC-05、OSC-15 實驗相比，我們發現 CTL 以及 OSC-15 這兩個具有雙眼牆的個案，在內、外眼牆區域，皆有低層內流增加以及其上外流增加的特徵，但 OSC-15 增加的幅度較小，尤其是在外眼牆區域，內流增強的區域較小且較淺，進而減弱由外側往內之絕對角動量使切向風增強的過程，也使得風速增加的幅度較小；在 OSC-05 實驗中，我們發現邊界層中皆呈現內流減弱、上層外流也減弱的特徵，顯示若限制內眼牆以外所有區域 WISHE 機制的程度較大，將使整個渦旋減弱，因為無論是內、外眼牆的能量來源皆受到限制。在圖 4.27d~f 中，我們發現外眼牆區域皆有內流增強其上外流增強的特徵，顯示外側的次環流正在增強，並促使更多的絕熱角動量被帶入使切向風同樣也在發展；但比較三者內眼牆區域之變化，我們發現 RiR-10 切向風減弱的最為明顯，且內流減弱程度也較大，與前文所提及內眼牆外側 20~30 公里區域的熱通量被劇烈限制有關，而且此實驗大氣垂直平均之非絕熱加熱率集中於內眼牆之外側，將更不利內眼牆的維持；相對的，在 InC-10 以及 RiR-15 中，切向風以及徑向風的減弱程度較小，進而使內眼牆能維持較久的時間。從本節第一部分(30h 以前)討論中，我們發現內眼牆的維持對於其外 20~30 公里區域的 WISHE 機制以及表面熱通量最為敏感，而且表面熱通量隨半徑的分布也會影響到非絕熱加熱率的分布，將影響內眼牆的維持以及是否具有雙眼牆的結構。

第二部分，我們將針對外眼牆的發展進行討論。從圖 4.26 中，我們發現外眼牆及外側對流的發展，與雙眼牆以及其外區域表面熱通量的大小有關。對比具有外眼牆(CTL、OSC-15、InC-10、RiR-15)、外側對流發展(RiR-10)以及沒有外眼牆(OSC-05)的例子，我們發現只要半徑 60 公里以外具有一定量值的熱通量，即能



提供有效的非絕熱加熱率於外側區域，使得外側眼牆或對流發展；一但外側的熱通量隨半徑的分布太小，將使外側無顯著的對流發展。我們分析徑向流、切向風的變化量，我們發現具有雙眼牆以及外側對流發展的例子(CTL、OSC-15、InC-10、RiR-15 及 RiR-10)，外側皆為低層內流增強、其上層外流增強，並伴隨切向風的增加；相對而言，OSC-05 實驗外側內流增強有限且較不集中，切向風也只有微幅增強，使得外眼牆無法發展。

從本節中我們得知，內眼牆的維持對於其外側的表面熱通量的量值以及隨半徑分布皆敏感，一但非絕熱加熱率過小，或是極值區域改變移動之外側，則內眼牆將無法維持且減弱較快；而外眼牆的發展與外眼牆以及其外區域的熱通量量值最有關係。這些結果顯示，熱通量的分布與 WISHE 機制將影響自由大氣中的非絕熱加熱率，進而影響次環流的發展、分布，還有切向風的變化，使颱風眼牆發展以及其置換過程產生改變。

4.3 綜合討論與小結

在敏感性實驗中，四組實驗設計改變了限制 WISHE 機制的區間，並且改變了計算熱通量的風速上限值。實驗結果顯示，若限制了內部區間的 WISHE 機制回饋，對於外眼牆的發展以及增強並無顯著影響，但是將造成內眼牆減弱較快，眼牆置換的時間也略為提早，而不同限制量值的實驗(InC-01、05、10、15)皆顯示一致的結果。對比之下，若限制了 SEF 區間以及其外的 WISHE 機制，則對於外眼牆形成以及 ERC 的結果有顯著影響。若限制的程度較大(實驗 OSC-01、05、OBC-01、05)，則外眼牆將不發展，整體颱風的垂直對流活動也受到限制；若限制的程度較小(實驗 OSC-10、15、OBC-10、15)，則外圍眼牆可以發展，但是外眼牆的發展時間延後，而且限制程度越大，外眼牆發展的越慢。從 RiR 實驗中，我們得知，雙眼牆區間的 WISHE 機制(環狀區域)，會影響到眼牆的演變以及置換的過程，而且此區間的 WISHE 回饋機制將影響內眼牆的維持。四組實驗雖然在 30h 之後於外眼牆區間有風速極值發展，但若環狀區間限制 WISHE 機制的程度大(RiR-01、RiR-05、RiR-10)，

將使得內眼牆無法維持，因此被歸類為沒有產生雙眼牆的例子；若限制程度較小 ($RiR=15$)，則內眼牆能維持較久，進而能產生雙眼牆的構造。 RiR 實驗顯示介於單眼牆以及雙眼牆颱風之間的情形。

另外，診斷各項物理參數後，發現限制 WISHE 機制會影響到與外眼牆發展的相關特徵，包含了邊界層頂的超梯度力、自由大氣中的慣性穩定度的增加，以及非絕熱加熱的量值。如此使得外眼牆區域平衡與非平衡動力的正回饋機制無法發生，並且限制了外眼牆的次環流發展，進而不利於外眼牆的發展。經由 SE 模式以及切向風動量的收支分析，我們從前者得知，限制 WISHE 機制將影響非絕熱加熱及次環流；而從後者得知，動量增加的物理過程也會因為 WISHE 回饋機制的限制而受到影響，特別在限制 SEF 以及其外區間的實驗中。無論是動量或是質量場的演變，和表面的 WISHE 機制皆息息相關。

從以上控制組實驗的分析中，我們發現限制 WISHE 機制除了會影響到是否有外眼牆的發生以外，也會影響到外眼牆的最終強度、發展速度，以及形成的時間；另外，不同限制區間的設計，也會影響到眼牆置換的過程。總而言之，WISHE 機制在定量以及定量上影響到 SEF 以及 ERC 的過程，此表面熱通量的正回饋機制對於颱風內外眼牆的發展扮演相當重要的角色。


第五章總結及未來展望



5.1 總結

本研究使用2008年的辛樂克颱風作為初始場，其來自高解析度且經由資料同化方法而得的初始渦漩(官(2012))，並進行數值模擬實驗。在控制組實驗當中所分析的特徵，與過去觀測或是數值模擬的文獻十分一致：包含了外眼牆形成前，活躍對流伴隨切向風的擴張，對流逐漸構成環形，最後取代內眼牆而完成眼牆置換。透過非平衡動力的觀點分析，切向風的擴張造成了外眼牆區域附近超梯度風的出現，進而引發該處邊界層中輻合的增加以及集中的對流出現，並發展出外眼牆，這一連串的回饋機制，與過去文獻所提及的過程相符；同時，透過平衡動力的觀點分析，我們發現到外眼牆發生前，在外圍區域活躍對流的出現，有效提供非絕熱加熱並產生切向風的增強，提升該處的慣性穩定度與加熱效率。本研究的主軸為分析WISHE機制在外眼牆發展中的角色。當颱風的切向風向外擴張時，將使得外圍區域的表面風速跟著增加，進一步使得表面的熱量通量增加，將有利於外側眼牆的發展，並提升表面風速。這樣的正回饋機制，可能對於外眼牆的形成有很大的影響。於是，在第二部份進行將對此進行深入檢驗，以進一步了解WISHE機制對於SEF的影響。

在敏感性實驗中，四組實驗設計改變了限制 WISHE 機制的區間，並且改變了計算熱通量的風速上限值。實驗結果顯示，若限制了內部區間的 WISHE 機制回饋，對於外眼牆的發展以及增強並無顯著影響(實驗 InC)，但是將造成內眼牆減弱較快以及較早的眼牆置換。對比之下，若限制了 SEF 區間以及其外的 WISHE 機制，則對於外眼牆形成以及 ERC 的結果有顯著影響。若限制的程度較大則外眼牆將不發展，整體颱風的垂直對流活動也受到限制(實驗 OSC-01、OSC-05、OBC-01、OBC-05)；若限制的程度較小(實驗 OSC-10、OSC-15、OBC-10、OBC-15)，則外圍眼牆可以發展，但是外眼牆的發展時間被延後，而且發展較慢。RiR 的實驗結果中，我們發現 RiR 實驗仍能在外側發展出新的風速極值區域，並且和控制組實驗的區域類似，但



是由於限制的環狀區間的WISHE機制，導致於30h之前內眼牆即減弱，造成RiR-01、RiR-05、RiR-10實驗沒有雙眼牆的結構，但是若限制程度較小(RiR-15)，仍能具有雙眼牆的構造。這樣的例子(RiR-01、RiR-05、RiR-10)，可視為介於單眼強颱風以及雙眼牆颱風中間的特殊結構，即雖然沒有同時存在兩個眼牆，但是內眼牆卻有重整並外移的現象，這樣的結果也顯示，雙眼牆區域的WISHE機制，對於外眼牆的發展十分重要。

另外，診斷各項物理參數後，發現限制WISHE機制會影響到與外眼牆發展的相關特徵。此限制將影響到外眼牆區域非平衡動力相關物理參數的變化，也會影響到外眼牆區域自由大氣中慣性穩定度的增加。透過切向風收支診斷，我們發現限制WISHE機制將影響到切向風擴張的速度，即動量場將受到影響；透過SE模式的診斷，我們發現颱風的次環流的發展，包含內流以及垂直速度，皆會因為此限制而減弱或改變其形態；換言之，質量場也將改變。同時，我們也發現SE模式雖然能掌握到次環流的型態，但是量值上有所低估，此結果顯示平衡動力對於雙眼牆颱風的次環流掌握有限，仍需要考慮其他影響次環流發展的因素。

敏感性實驗的分析中，我們發現限制WISHE機制除了會影響到是否有外眼牆的發生以外，也會影響到外眼牆的發展速度、形成時間，以及颱風的最終強度，並且在熱力以及動力上改變外眼牆的發展及型態；而且尤其以外眼牆以及其外區域的WISHE機制影響程度較大。

總結控制組實驗以及敏感性實驗，我們使用示意圖(圖 5.1)以詮釋了不同物理過程與機制之間的關聯性。首先，外圍區域活躍對流的出現十分重要，由平衡動力的觀點，這些對流將有效加熱大氣並產生次環流，使外圍區域之低層切向風增強並向外擴張，透過非平衡動力的機制而產生集中的低層輻合區域，支持對流的發展；同時，WISHE機制部分，表面風速的增強也將提升表面向上進入大氣的熱量通量並加熱自由大氣，由於熱力風平衡的作用，將產生垂直上升運動，促使對流活動的發生；另外，自由大氣中的慣性穩定度將提高，進一步有利於外圍區域局



地的垂直對流發展，與加熱效率的提升。經由以上這些機制的的作用，將使外眼牆區域附近的對流持續發展增強，並逐漸發展成熟為外眼牆。因此可以推論出非平衡動力、平衡動力以及 WISHE 機制三者的重要性。

5.2 未來展望

外眼牆的形成，以及眼牆置換的過程，與動量以及熱量場的分布以及能量的傳送關係密切。對於動量場，將分析時間上高解析度的資料，進行徑向流以及絕對角動量收支分析，讓我們能更加了解使切向風擴張並增強的物理過程，進一步探討其機制。在熱量場方面，將詳盡分析表面熱通量以及自由大氣中非絕熱加熱之間的關係，並探討對於大氣中熱力條件的影響。另外，由於外圍對流及雨帶將影響到外眼牆的位置以及發展過程，並與環境條件(如環境的相對濕度、垂直風切…等)相關，同時，也會受到外圍風速分布的影響。因此，將在不同的區域，給予初始場水氣以及風場擾動之後，進行多組實驗的系集模擬，並比較外眼牆對於擾動不同初始場的敏感性；同時，也將改變限制WISHE機制的起始時間，以了解此對於時間的敏感性。另外，前人指出(e. g., Zhou and Wang 2011; Zhu and Zhu 2015; Zhu et al. 2015) 大氣中不同的物理參數化方法將影響外眼牆的發展以及型態，因此，將對於不同的物理參數化方法進行敏感性實驗，了解其與WISHE機制對外眼牆形成的共同影響。另外，從圖3.3的垂直速度分布中，我們發現外圍雨帶中存在不對稱的較強對流，並且存在非軸對稱且較大的上升以及下沉運動，而這些外圍不對稱的深對流，將提供外圍某些區域自由大氣較明顯的加熱，透過平衡動力的觀點我們得知，加熱後將產生低層的內流，並且帶入外圍較大的絕對角動量，進而產生切向風的擴張，也影響到外眼牆的發展。而與此不對稱的深對流以及伴隨的強烈下沉運動相關的詳細物理機制，將在後續的分析中詳加探討深對流對於局地動力場及熱力場的影響。

本實驗為實際個案之模擬，而在理想化的架構之下，颱風的發展環境可能相當不同，WISHE 機制的角色也可能有所改變。因此，將選定一個理想化模擬實驗，

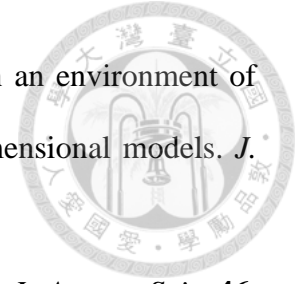
進行 WISHE 機制的敏感性實驗給予不同的背景風切場，模擬大氣中的其他影響條件，以更詳細了解 WISHE 機制與 SEF 的關係。

颱風外眼牆的發展以及眼牆置換過程對於颱風強度的掌握十分關鍵，也是近年來大氣科學領域大量投入研究的議題之一，但詳細的機制為何仍是一個懸而未解的議題。文獻中模擬的雙眼牆颱風，皆有切向風擴張的特徵，也和該處熱通量成正比，本研究結果顯示，WISHE 機制扮演著一定的角色。期許能在未來的研究工作中，進一步將此回饋機制與雙眼牆發展之間的關係釐清，以對於雙眼牆動力有更清晰的了解。

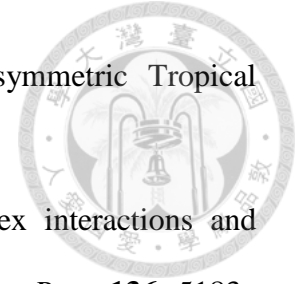
參考文獻



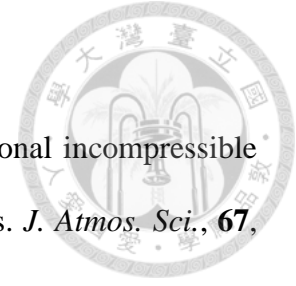
- 官欣平，2013：颱風雙眼牆形成動力研究——非平衡動力的延伸探討。國立台灣大學大氣科學系，碩士論文，72 頁。
- 連國淵，2009：颱風路徑與結構同化研究——系集卡爾曼濾波器。國立台灣大學大氣科學系，碩士論文，87 頁。
- Abarca, S. F., and M. T. Montgomery, 2013: Essential dynamics of secondary eyewall formation. *J. Atmos. Sci.*, **70**, 3216–3230.
- , and ——, 2014: Departures from axisymmetric balance dynamics during secondary eyewall formation. *J. Atmos. Sci.*, **71**, 3723–3738.
- , and ——, 2015: Are eyewall replacement cycles governed largely by axisymmetric balance dynamics? *J. Atmos. Sci.*, **72**, 82–87.
- Bell, M. M., M. T. Montgomery, and W.-C. Lee, 2012: An axisymmetric view of concentric eyewall evolution in Hurricane Rita (2005). *J. Atmos. Sci.*, **69**, 2414–2432.
- Bui, H. H., R. K. Smith, M. T. Montgomery, and J. Peng, 2009: Balanced and unbalanced aspects of tropical cyclone intensification. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **135**, 1715–1731.
- Didlake, A. C., and R. A. Houze, 2011: Kinematics of the secondary eyewall observed in Hurricane Rita (2005). *J. Atmos. Sci.*, **68**, 1620–1636.
- Donelan, M. A., B. K. Haus, N. Reul, W. J. Plant, M. Stiassnie, H. C. Graber, O. B. Brown, and E. S. Saltzman, 2004: On the limiting aerodynamic roughness of the ocean in very strong winds. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L18306.
- Emanuel KA. 1986. An air-sea interaction theory for tropical cyclones. Part I: Steady state maintenance. *J. Atmos. Sci.* **43**: 585–604.



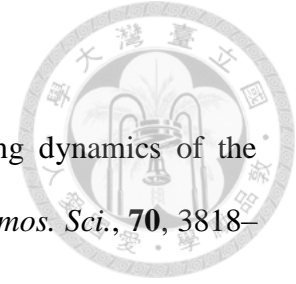
- , M. Fantini, and A. J. Thorpe, 1987: Baroclinic instability in an environment of small stability to slantwise moist convection. Part I: Two-dimensional models. *J. Atmos. Sci.*, **44**, 1559–1573.
- , 1989: The finite-amplitude nature of tropical cyclogenesis. *J. Atmos. Sci.*, **46**, 3431-3456.
- Green, B. W., and F. Zhang, 2013: Impacts of air–sea flux parameterizations on the intensity and structure of tropical cyclones. *Mon. Wea. Rev.*, **141**, 2308–2324.
- Hawkins, H. F., 1983: Hurricane Allen and island obstacles. *J. Atmos. Sci.*, **40**, 1360–1361.
- Hawkins, J. D., and M. Helveston, 2008: Tropical cyclone multiple eyewall characteristics. 28th Conf. on *Hurricanes and Tropical Meteorology*, Orlando, FL, *Amer. Meteor. Soc.*, 14B.1.
- Hill, K. A., and G. M. Lackmann, 2009: Influence of environmental humidity on tropical cyclone size. *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 3294–3315.
- Houze, R. A., and Coauthors, S. S. Chen, B. F. Smull, W.-C. Lee, and M. M. Bell, 2007: Hurricane intensity and eyewall replacement. *Science*, **315**, 1235–1239.
- Huang, Y.-H., M. T. Montgomery, and C.-C. Wu, 2012: Concentric eyewall formation in Typhoon Sinlaku (2008). Part II: Axisymmetric dynamical processes. *J. Atmos. Soc.*, **69**, 716 662–674.
- Judt, F., and S. S. Chen, 2010: Convectively generated potential vorticity in rainbands and formation of the secondary eyewall in Hurricane Rita of 2005. *J. Atmos. Sci.*, **67**, 3581-3599.
- Kepert, J. D., 2013: How does the boundary layer contribute to eyewall replacement cycles in axisymmetric tropical cyclones? *J. Atmos. Sci.*, **70**, 2808–2830.
- Kepert, J. D. and D. S. Nolan, 2014: Reply to “Comments on ‘How Does the Boundary



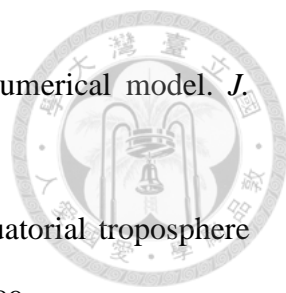
- Layer Contribute to Eyewall Replacement Cycles in Axisymmetric Tropical Cyclones?”. *J. Atmos. Sci.*, **71**, 4692–4704.
- , W. H. Schubert, C.-L. Tsai, and Y.-F. Kuo, 2008: Vortex interactions and barotropic aspects of concentric eyewall formation. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 5183–5198.
- Kossin, J. P., and M. Sitkowski, 2009: An objective model for identifying secondary eyewall formation in hurricanes. *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 876–892.
- 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, 2008: Vortex interactions and barotropic aspects of concentric eyewall formation. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 5183–5198.
- , C.-P. Chang, Y.-T. Yang, and H.-J. Jiang, 2009: Western North Pacific typhoons with concentric eyewalls. *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 3758–3770.
- Montgomery, M. T., and R. J. Kallenbach, 1997: A theory for vortex Rossby waves and its application to spiral bands and intensity changes in hurricanes. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **123**, 435–465.
- , N. V. Sang, R. K. Smith, and J. Persing, 2009: Do tropical cyclones intensify by WISHE? *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **135**, 1697–1714.
- , S. F. Abarca, R.K. Smith, C.-C. Wu, and Y.-H. Huang, 2014: Comments on “How does the boundary layer contribute to eyewall replacement cycles in axisymmetric tropical cyclones?” *J. Atmos. Sci.*, **71**, 4682–4691.
- , J. Persing, and R. K. Smith, 2015: Putting to rest WISHE-ful misconceptions for tropical cyclone intensification, *J. Adv. Model. Earth Syst.*, **7**, 92–109.
- Moon, Y., and D. S. Nolan, 2010: The dynamic response of the hurricane wind field to



- spiral rainband heating. *J. Atmos. Sci.*, **67**, 1779–1805.
- , ——, and M. Iskandarani, 2010: On the use of two-dimensional incompressible flow to study secondary eyewall formation in tropical cyclones. *J. Atmos. Sci.*, **67**, 3765–3773.
- Nong, S., and K. Emanuel, 2003: A numerical study of the genesis of concentric eyewalls in hurricanes. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **129**, 3323–3338.
- Ortt, D., and S. S. Chen, 2006: Rainbands and secondary eye wall formation as observed in RAINEX. 27th Conf. on *Hurricanes and Tropical Meteorology*, Monterey, CA, *Amer. Meteor. Soc.*, 12A.5.
- Powell, M. D., Vickery, P. J., and Reinhold, T. A., 2003: Reduced drag coefficients for high wind speeds in tropical cyclones. *Nature*, **422**, 279-283.
- Qiu, X., Z.-M. Tan, and Q. Xiao, 2010: The roles of vortex Rossby waves in hurricane secondary eyewall formation. *Mon. Wea. Rev.*, **138**, 2092–2109.
- , and ——, 2013: The roles of asymmetric inflow forcing induced by outer rainbands in tropical cyclone secondary eyewall formation, *J. Atmos. Sci.*, **70**, 953–974.
- Riehl, H., 1950: A model for hurricane formation. *J. Appl. Phys.*, **21**, 917-925.
- Rotunno, R., and K. A. Emanuel, 1987: An air-sea interaction theory for tropical cyclones. Part II. *J. Atmos. Sci.*, **44**, 542-561.
- Rozoff, C. M., D. S. Nolan, J. P. Kossin, F. Zhang, and J. Fang, 2012: The roles of an expanding wind field and inertial stability in tropical cyclone secondary eyewall formation. *J. Atmos. Sci.*, **69**, 2621–2643.
- Shapiro, L. J., and H. E. Willoughby, 1982: The response of balanced hurricanes to local sources of heat and momentum. *J. Atmos. Sci.*, **39**, 378–394.
- Smith, R. K., M. T. Montgomery, and N. Van Sang, 2009: Tropical cyclone spin-up



- revisited. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **135**, 1321–1335.
- Sun, Y. Q., Y. Jiang, B. Tan, and F. Zhang 2013, The governing dynamics of the secondary eyewall formation of Typhoon Sinlaku (2008), *J. Atmos. Sci.*, **70**, 3818–3837.
- Terwey, W. D., and M. T. Montgomery, 2008: Secondary eyewall formation in two idealized, full-physics modeled hurricanes. *J. Geophys. Res.*, **113**, D12112.
- Wang, H., C.-C. Wu, and Y. Wang, 2015: Second eyewall formation in an idealized tropical cyclone simulation – Balanced and unbalanced dynamics. *J. Atmos. Sci.* (minor revision)
- Wang, X., Y. Ma, and N. E. Davidson 2013, Secondary eyewall formation and eyewall replacement cycles in a simulated hurricane: Effect of the net radial force in the hurricane boundary layer, *J. Atmos. Sci.*, **70**, 1317–1341.
- Wang, Y., 2009: How do outer spiral rainbands affect tropical cyclone structure and intensity? *J. Atmos. Sci.*, **66**, 1250–1273.
- Wu, C.-C., Y.-H. Huang, and G.-Y. Lien, 2012: Concentric eyewall formation in Typhoon Sinlaku (2008). Part I: Assimilation of T-PARC data based on the ensemble Kalman filter (EnKF). *Mon. Wea. Rev.*, **140**, 506–527.
- , and ——, 2015: “Tropical Cyclones: Secondary Eyewall Formation”, *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*. 2nd Edition; Edited by Gerald R. North; Elsevier. 85-90, 6 pp.
- Willoughby, H. E., 1979: Forced secondary circulations in hurricanes. *J. Geophys. Res.*, **84**, 3173–3183.
- , J. A. Clos, and M. G. Shreilah, 1982: Concentric eyewalls, secondary eyewall maxima, and the evolution of the hurricane vortex, *J. Atmos. Sci.*, **39**, 395-411.
- , H.-L. Jin, S. J. Lord, and J.M. Piotrowicz, 1984: Hurricane structure and

- 
- evolution as simulated by an axisymmetric, nonhydrostatic numerical model. *J. Atmos. Sci.*, **41**, 1169–1186.
- Yano, J.-I., and K. Emanuel, 1991: An improved model of the equatorial troposphere and its coupling with the stratosphere. *J. Atmos. Sci.*, **48**, 377–389.
- Zhang, F., and K. A. Emanuel, 2016: On the role of surface fluxes and WISHE in tropical cyclone intensification. *J. Atmos. Sci.*, **73**, 2011–2019.
- Zhou, X., and B. Wang, 2011: Mechanism of concentric eyewall replacement cycles and associated intensity change. *J. Atmos. Sci.*, **68**, 972–988.
- Zhu, Z., and P. Zhu 2014: The role of outer rainband convection in governing the eyewall replacement cycle in numerical simulations of tropical cyclones, *J. Geophys. Res. Atmos.*, **119**, 8049–8072.
- , ——, 2015: Sensitivities of eyewall replacement cycle to model physics, vortex structure, and background winds in numerical simulations of tropical cyclones, *J. Geophys. Res. Atmos.*, **120**, 590–622.
- Zhu, P., Z. Zhu, S. Gopalakrishnan, R. Black, F. D. Marks, V. Tallapragada, J. A. Zhang, X. Zhang, and C. Gao, 2015: Impact of subgrid-scale processes on eyewall replacement cycle of tropical cyclones in HWRF system, *Geophys. Res. Lett.*, **42**, 10,027–10,036.

附圖

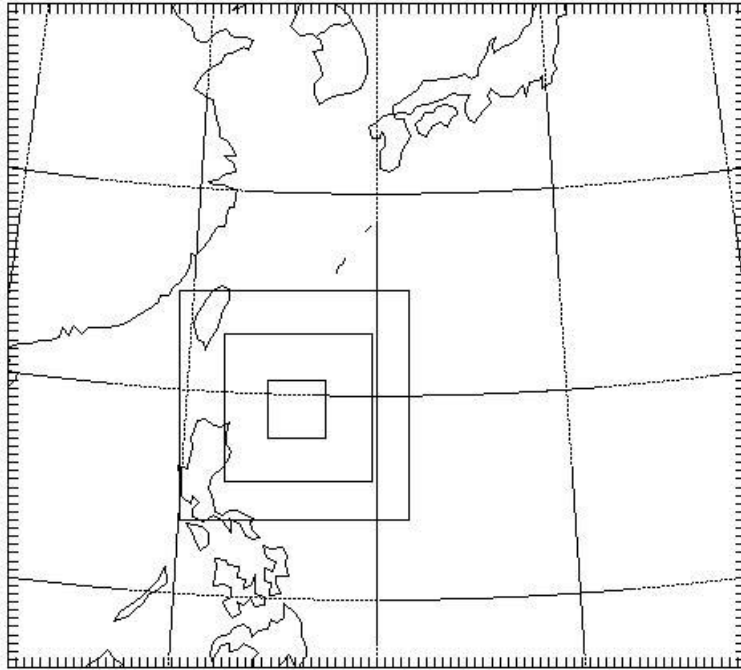


圖 2.1 WRF 模式進行自由模擬實驗時，模式四層槽狀網格分別的範圍和大小。其中最外圍是定網格，其餘皆跟隨渦漩移動。此實驗同官(2012)

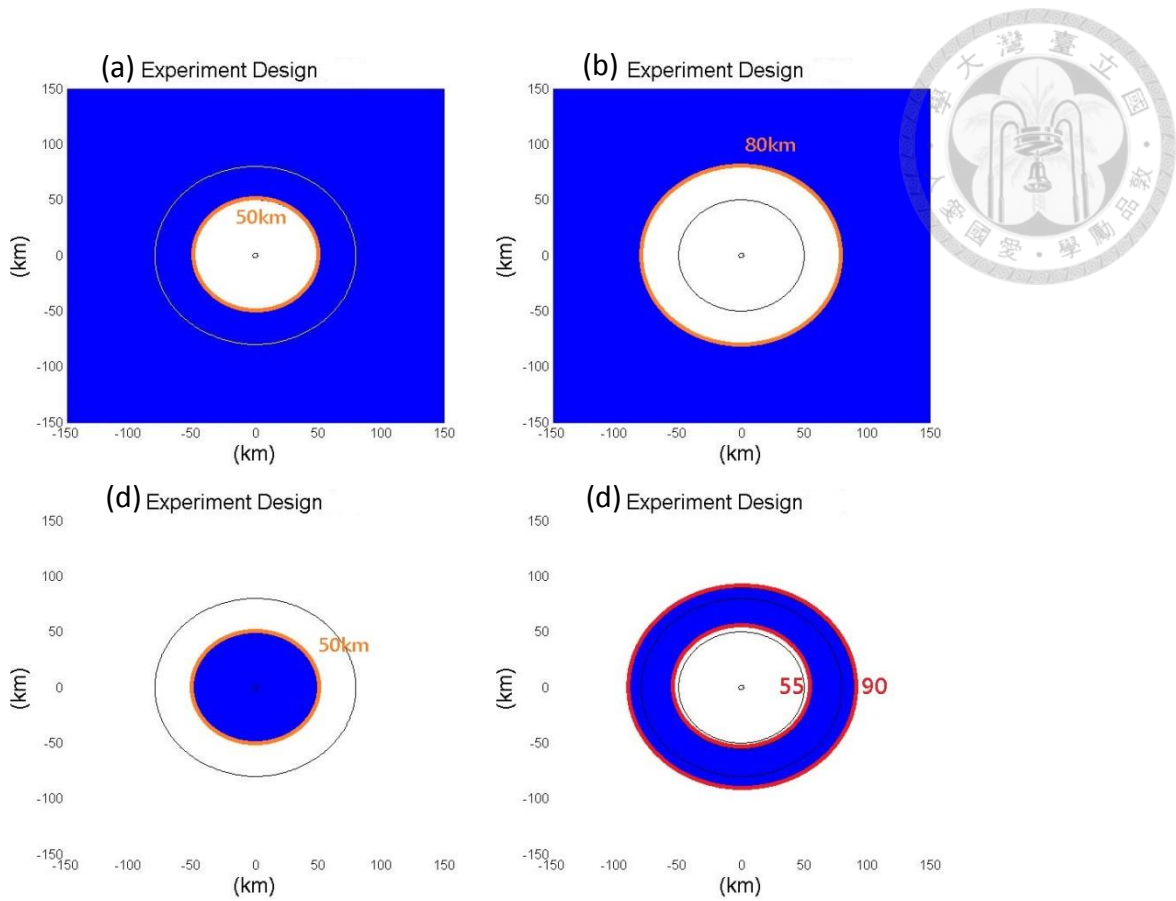


圖 2.2 (a)~(d)依序為 OSC、OBC、InC、RiR 之實驗設計，深藍色區間為限制 WISHE 機制的區間，數字代表限制的範圍邊界值。

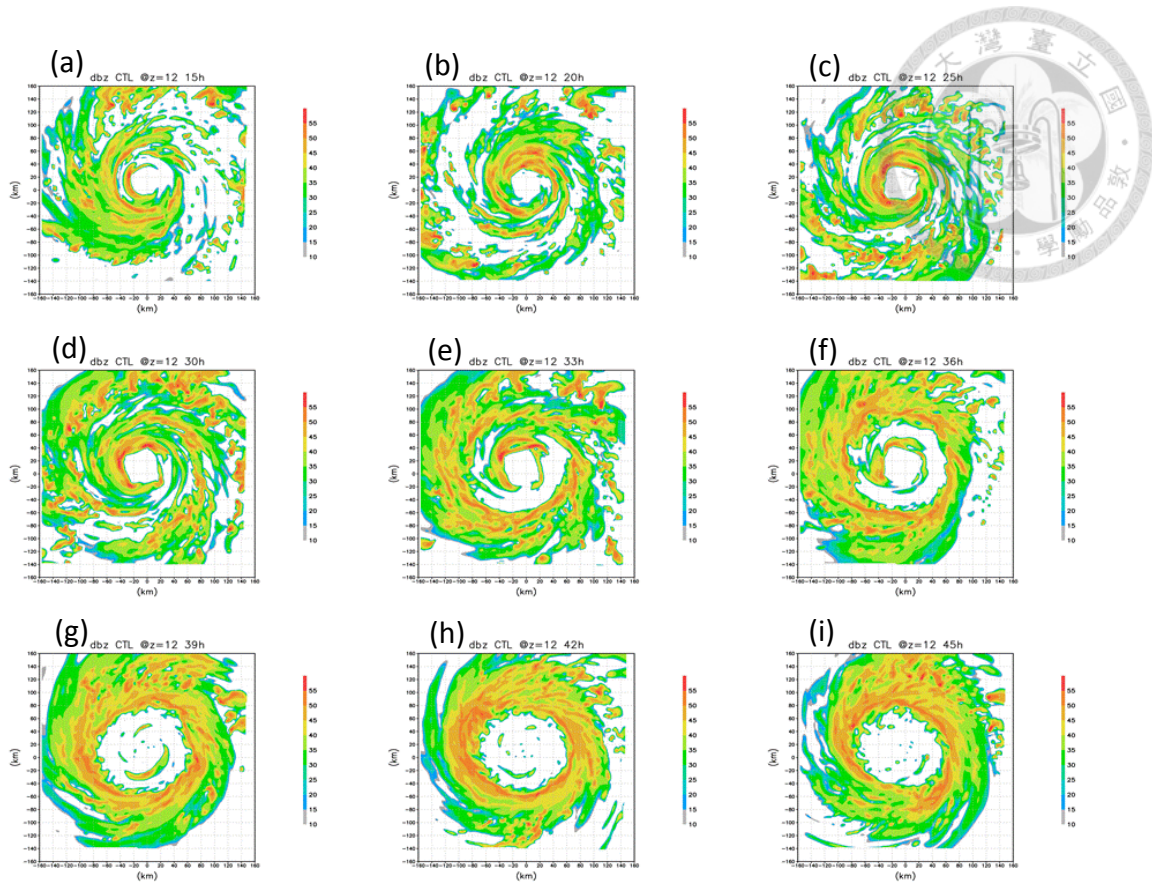


圖 3.1 CTL 實驗模式輸出之 2.8 公里高雷達反射率，由(a)~(i)依序為 15、20、25、30、33、36、39、42、45 小時。

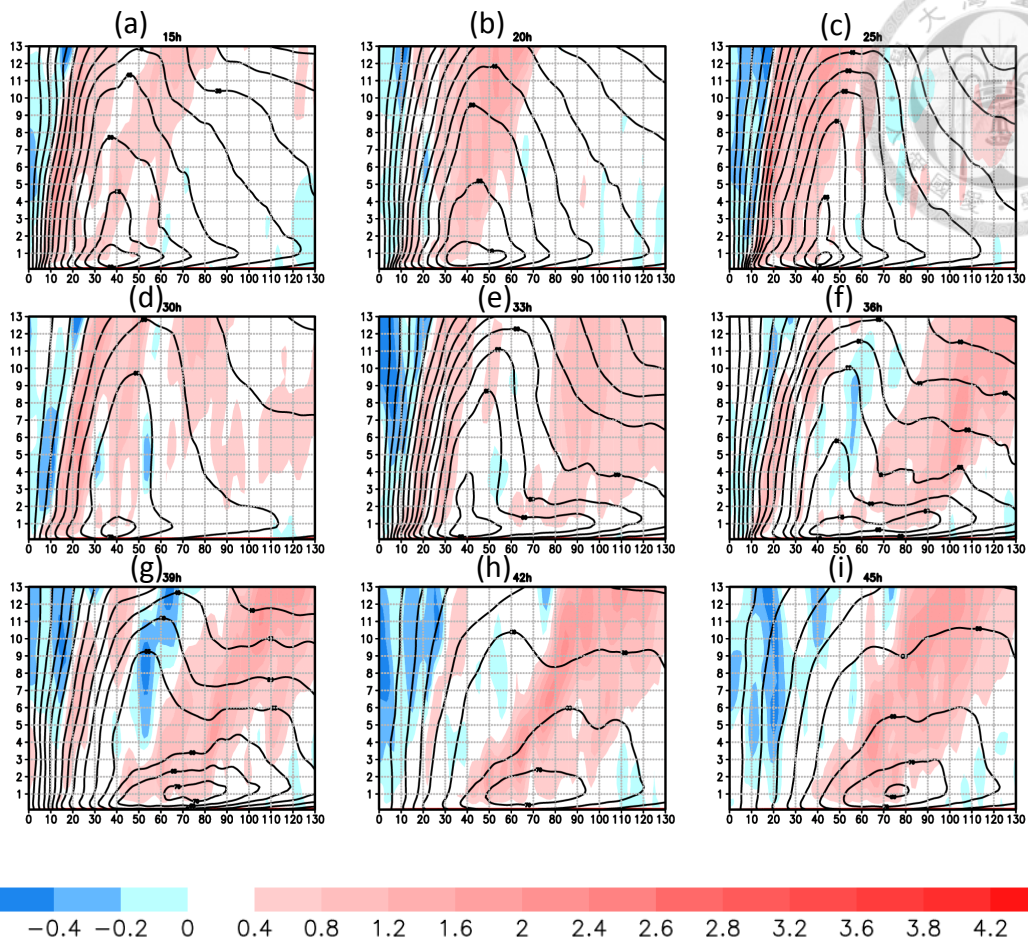


圖 3.2 CTL 實驗切向風(線條)以及垂直速度(色階, 單位 ms^{-1})之發展情形, 橫軸方向為徑向(單位 km), 縱軸方向為高度(單位 km)。由(a)~(d)依序為 15、20、25、30、33、36、39、42、45 小時。

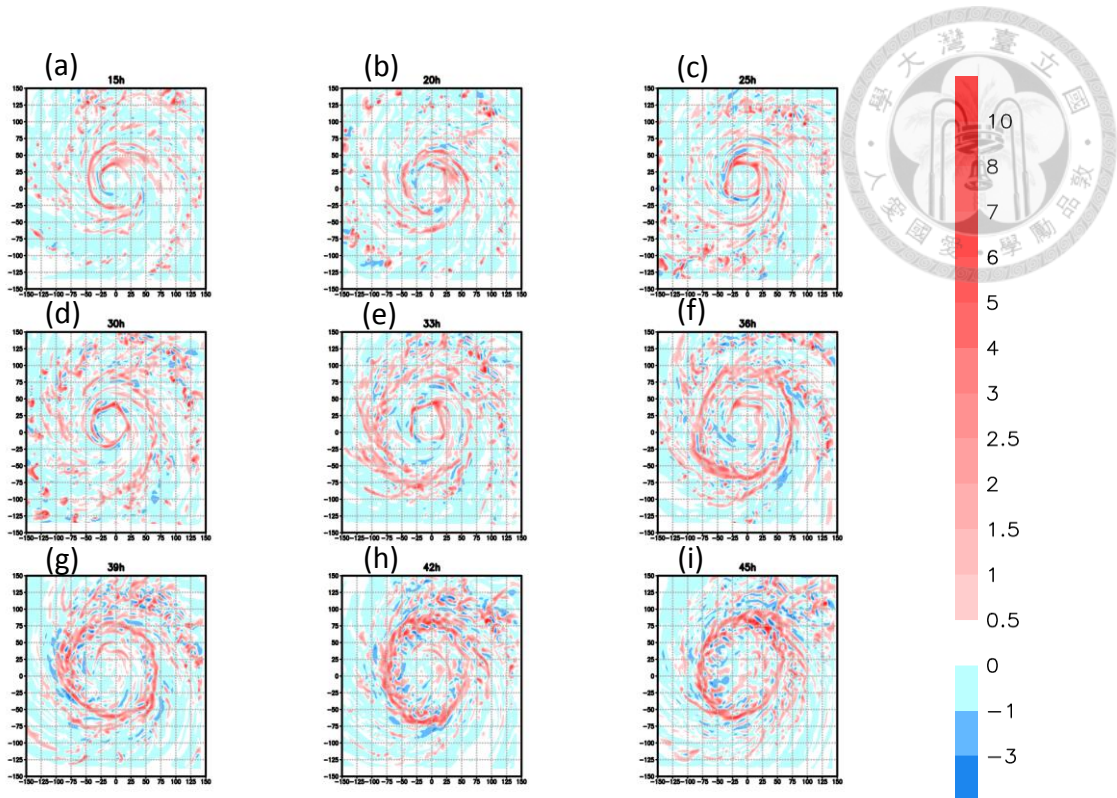


圖 3.3 CTL 實驗模式輸出之 3 公里高垂直速度(色階, 單位 ms^{-1}), 由(a)~(i)依序為 15、20、25、30、33、36、39、42、45 小時。

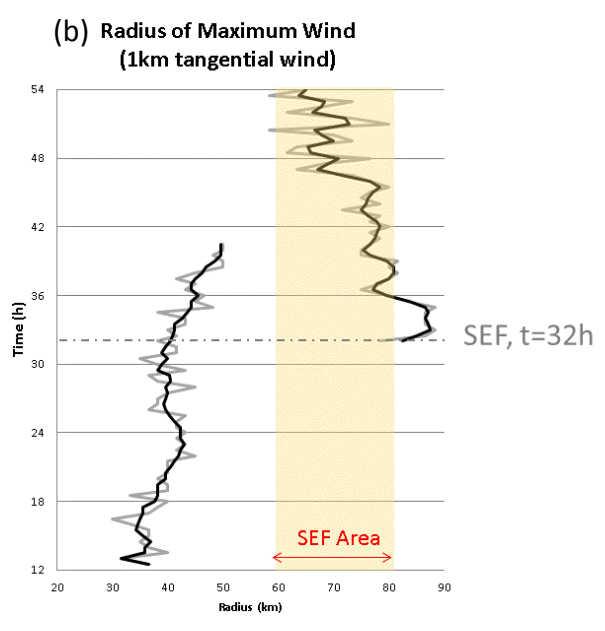
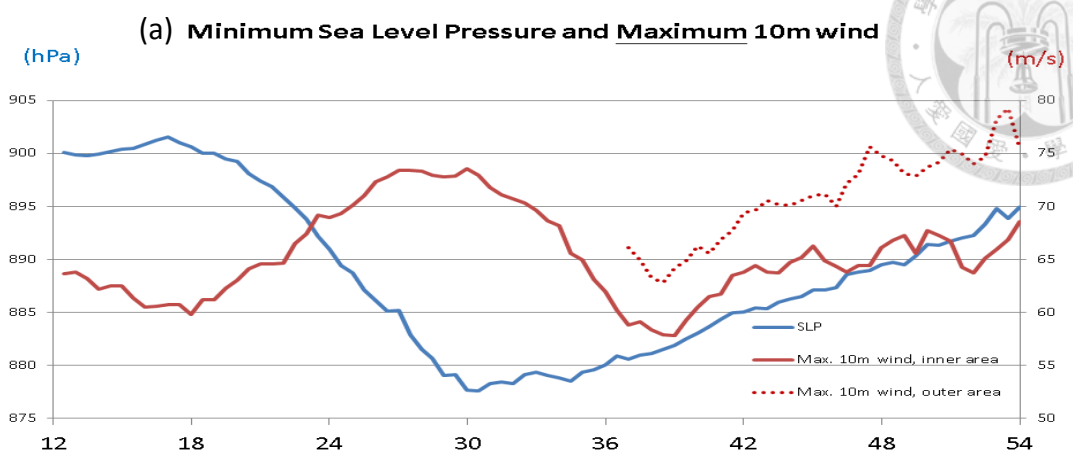
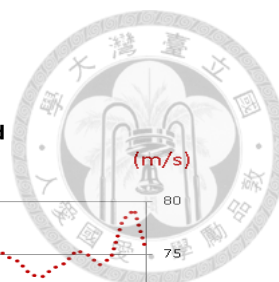


圖 3.4 CTL 實驗渦旋強度以及最大風速半徑隨時間發展示意圖。(a)藍色線條為中心最低氣壓，紅色實線為半徑 40 公里以內最大 10 米風速值，紅色虛線為 50 公里以外最大 10 米風速值，當強於內眼牆區域時開始繪出。(b)最大風速半徑(單位 km)隨時間的發展。

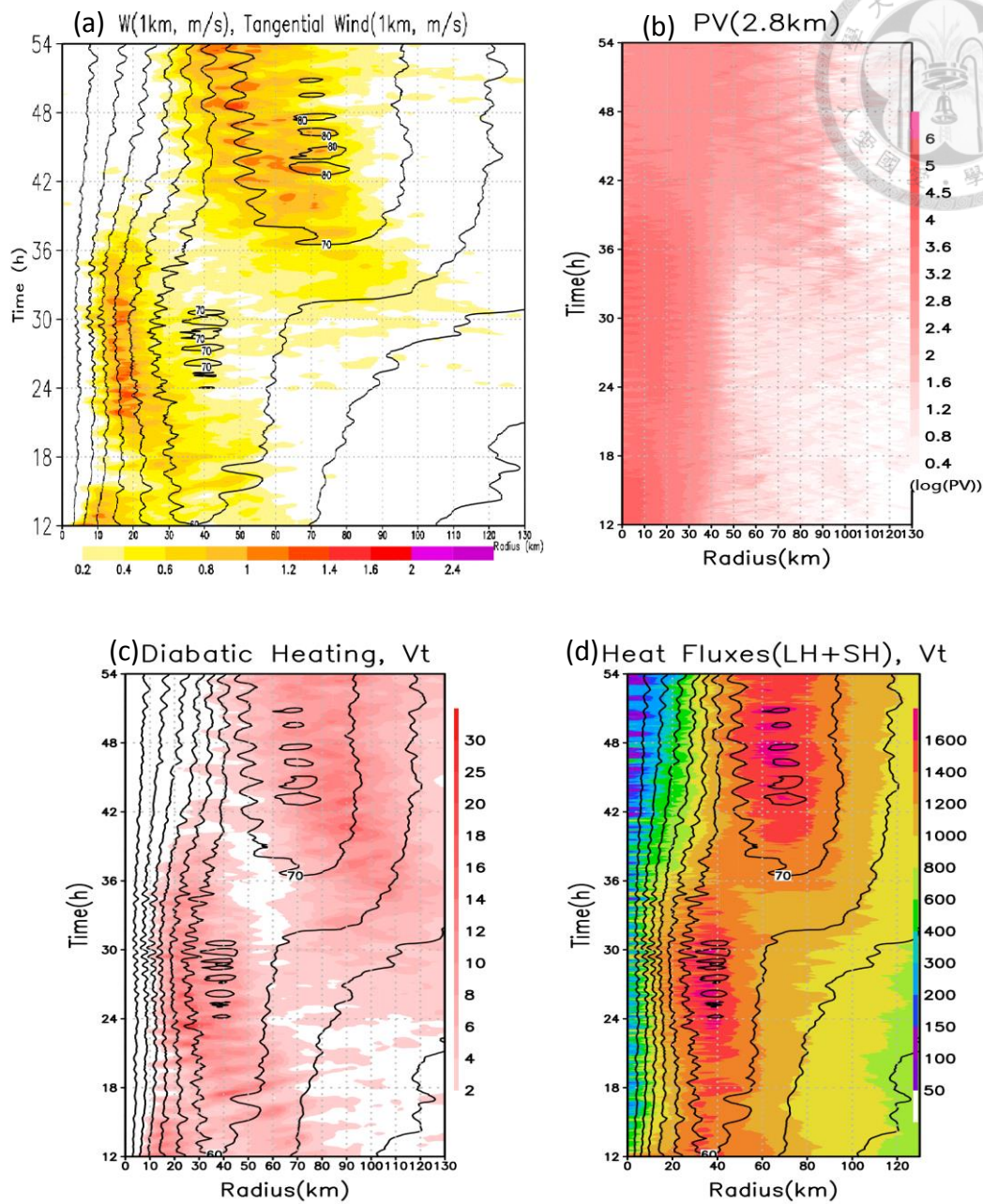


圖 3.5 CTL 實驗各項參數徑向剖面之平均，隨時間演變情形，圖中黑色實線皆為 1 公里高之切向風，單位 ms^{-1} 。(a)色階為 1 公里高垂直速度，單位 ms^{-1} 。(b)色階為 2.8 公里高之位渦，單位 $\log(\text{PVU})$ ， $\text{PVU}=10^{-6}\text{s}^{-1}$ 。(c)色階為大氣垂直平均之非絕熱加熱率，單位 Kh^{-1} 。(d)色階為由表面傳送向上之表面熱通量，單位 Wm^{-2} 。

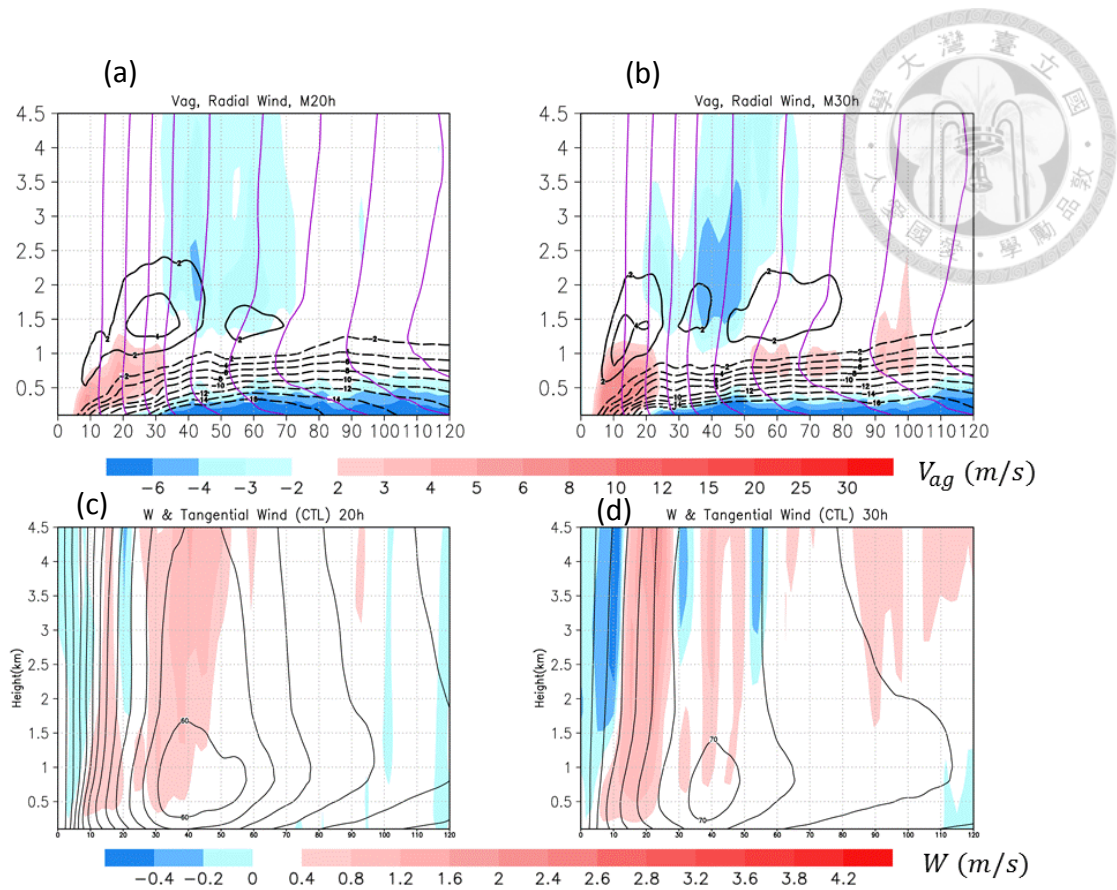


圖 3.6 CTL 實驗各項物理參數在不同時間的垂直結構。(a)、(c)分別為 20h 以及 30h 時的徑向流(黑色實線 >0 ，黑色虛線 <0 ，單位 ms^{-1})、超梯度風(紅色色階，單位 ms^{-1})、次梯度風(藍色色階 ms^{-1})、絕對角動量等值線(紫色實線)。(b)、(d)分別為 20h 以及 30h 時切向風(黑色實線)、垂直速度(色階，單位 ms^{-1})

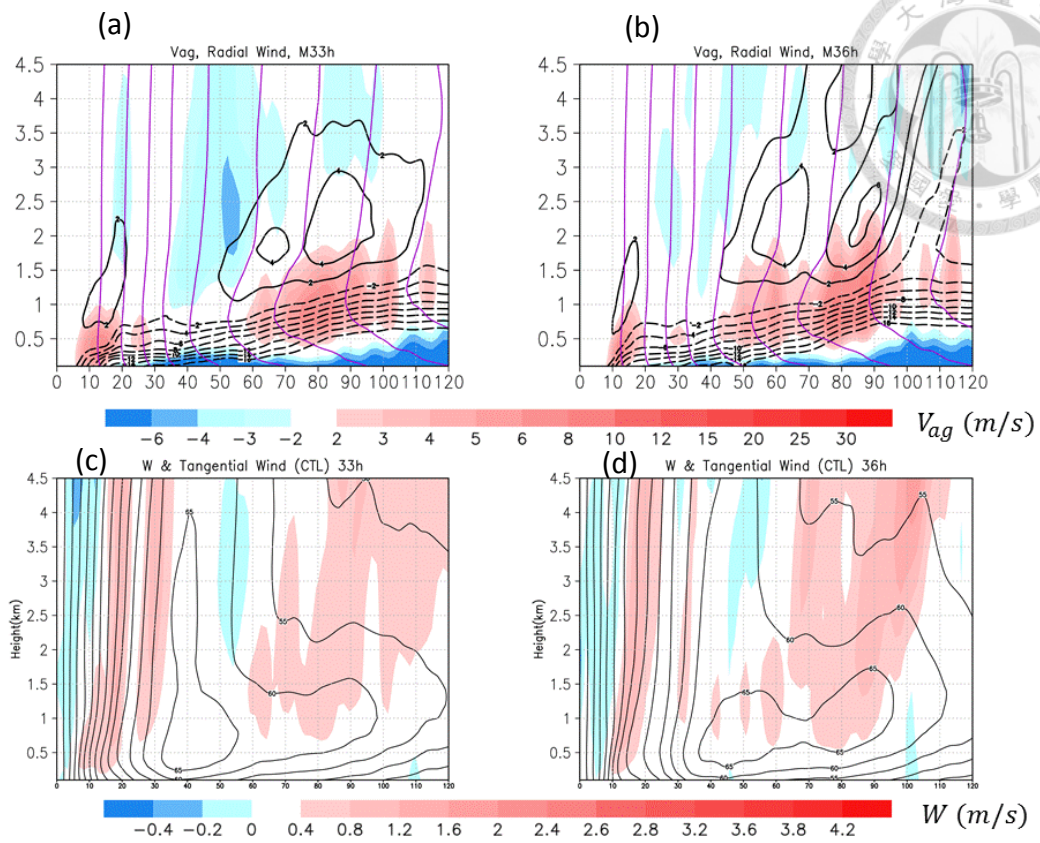


圖 3.7 CTL 實驗各物理參數在不同時間的垂直結構。圖說同圖 3-6，時間為 33h 以及 36h。

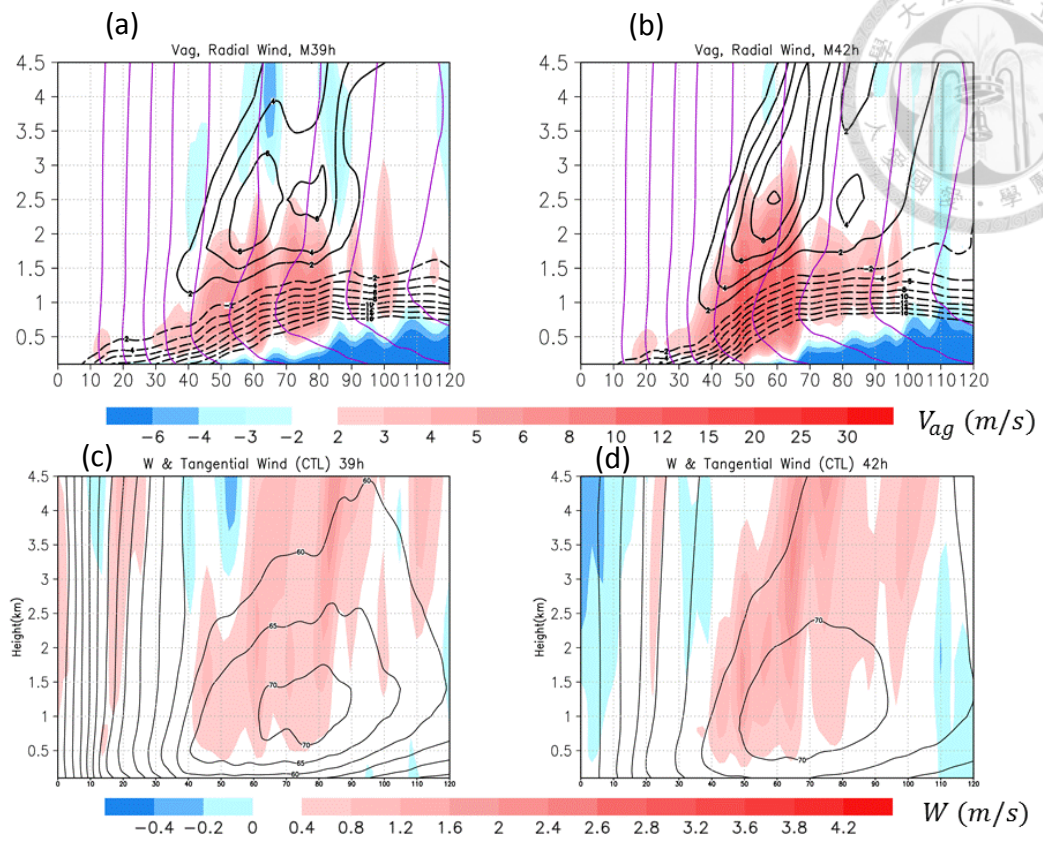


圖 3.8 CTL 實驗各物理參數在不同時間的垂直結構。圖說同圖 3-6，時間為 39h 以及 42h。

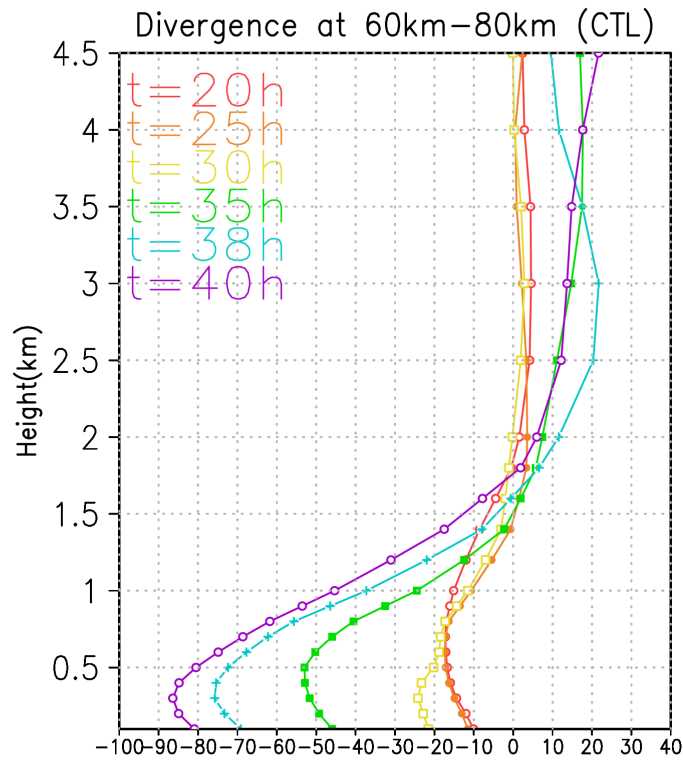


圖 3.9 CTL 實驗於半徑 60~80 公里區間平均之輻散場，從 20h 至 40h 隨高度的變化。(單位 s^{-1})

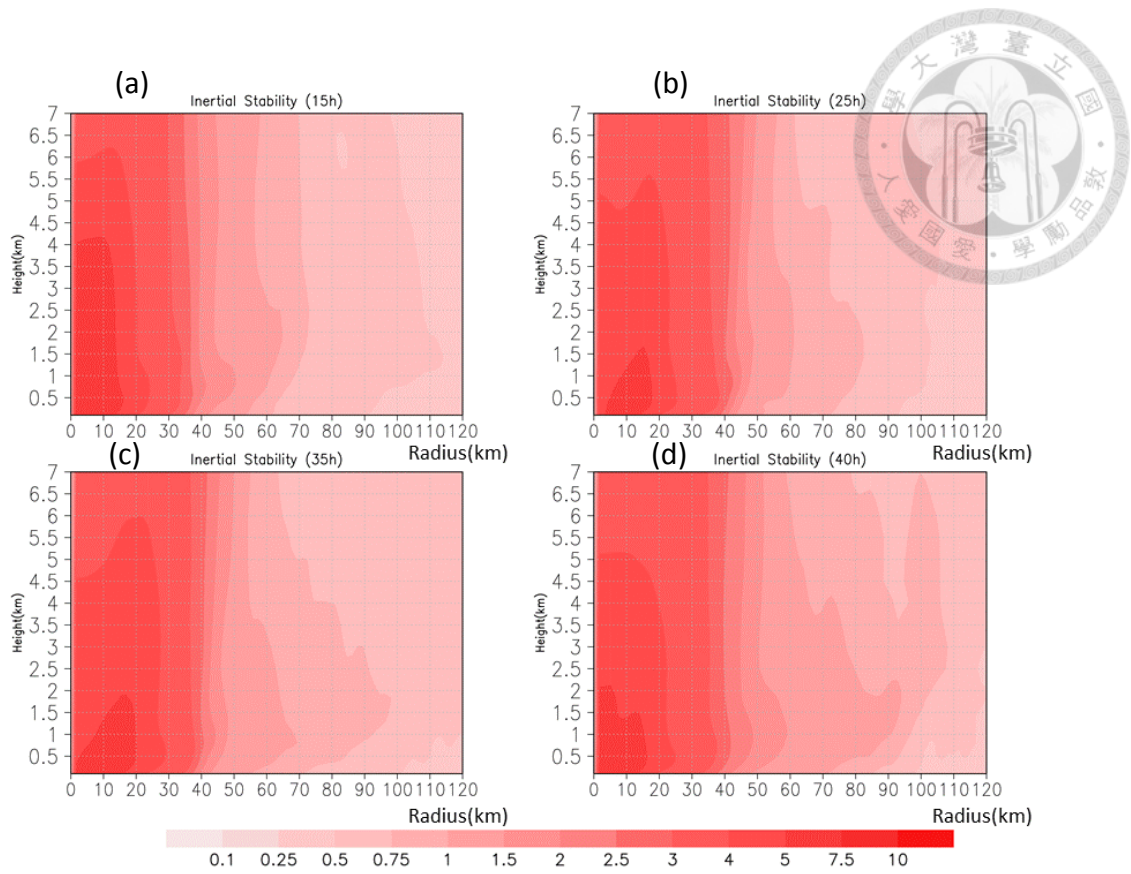


圖 3.10 CTL 實驗慣性穩定度在不同時間的特徵。(單位 10^{-3}s^{-1})

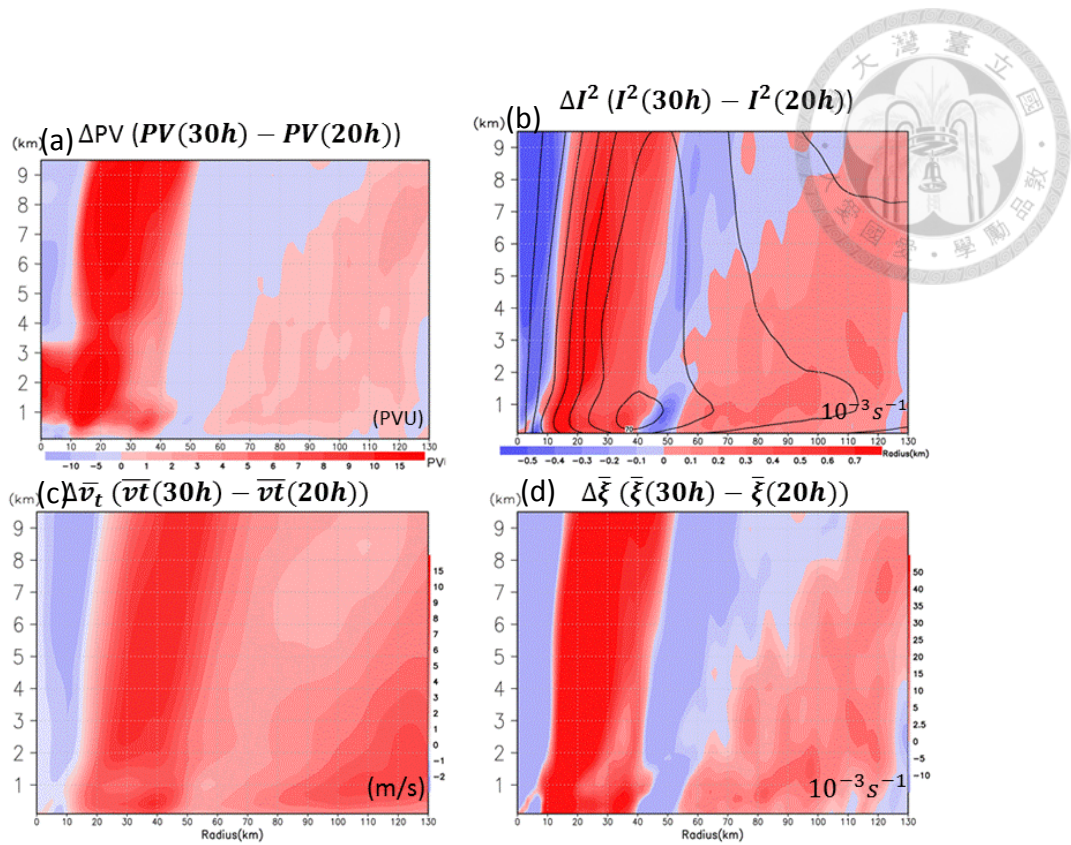


圖 3.11 CTL 實驗各項物理參數在 20~30h 之間的變化量。(a)位渦變化量(單位 PVU) (b)慣性穩定度變化量(色階, 單位 $10^{-3} s^{-1}$)以及 30h 切向風(等值線) (c)切向風變化量(單位 ms^{-1}) (d)相對渦度變化量(單位 $10^{-5} s^{-1}$)

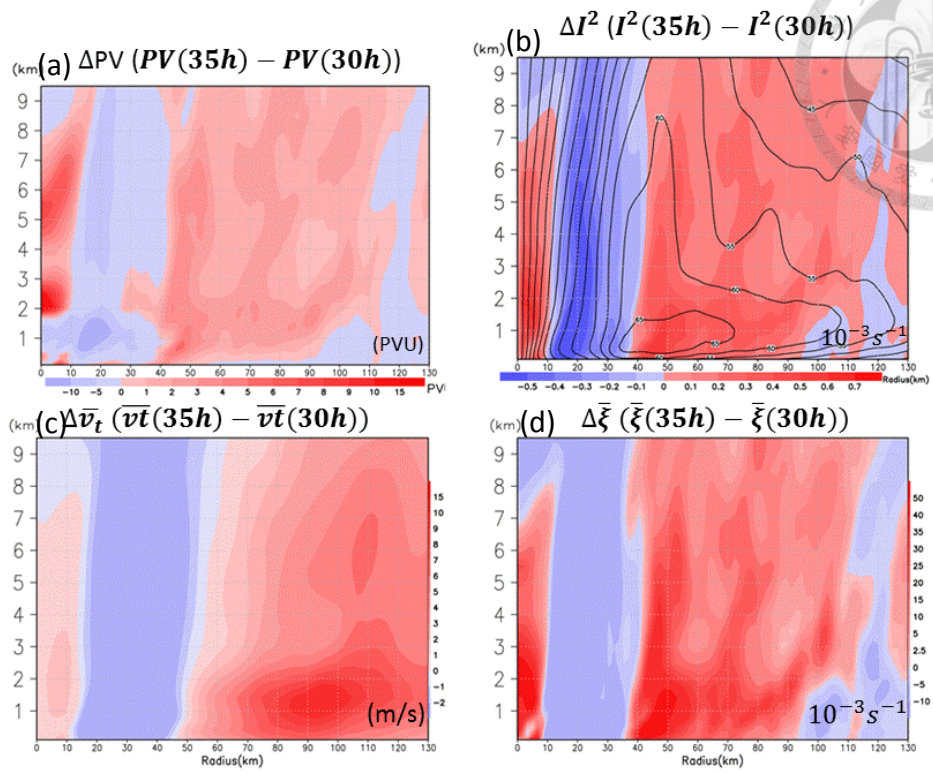


圖 3.12 CTL 實驗各項物理參數在 30~35h 之間的變化量。圖說同圖 3-11。

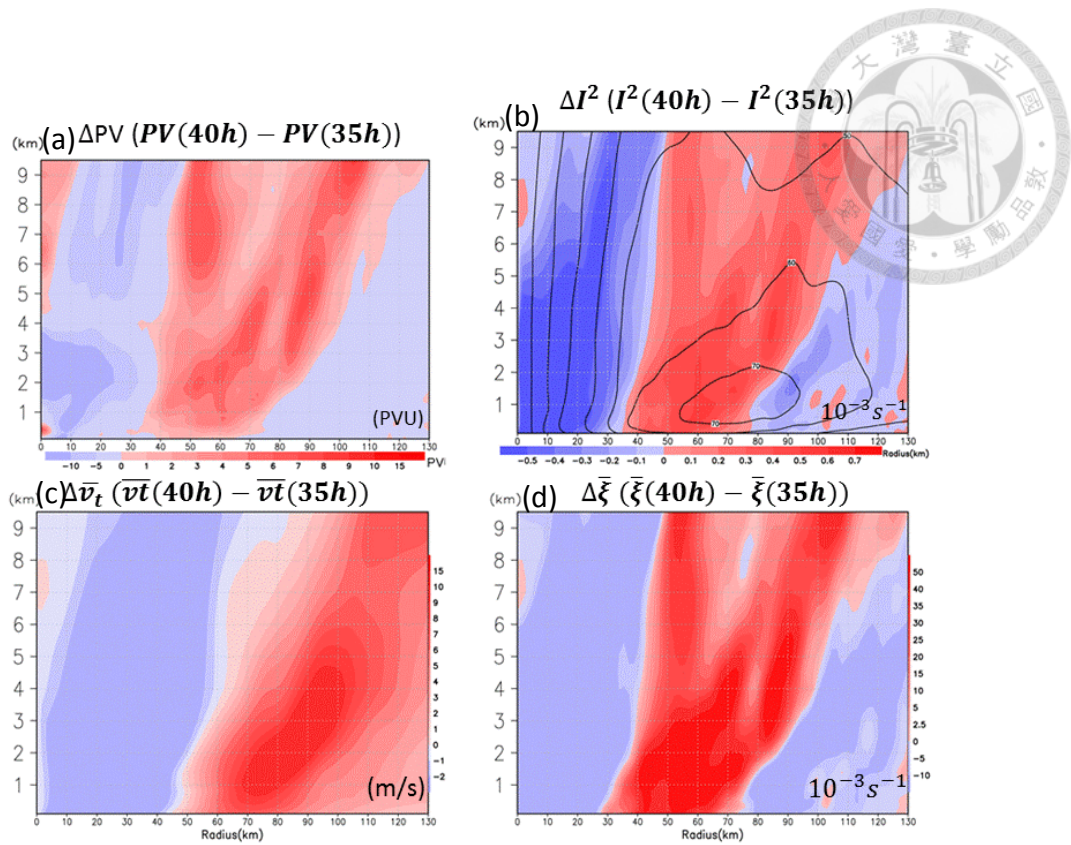


圖 3.13 CTL 實驗各項物理參數在 35~40h 之間的變化量。圖說同圖 3-11。

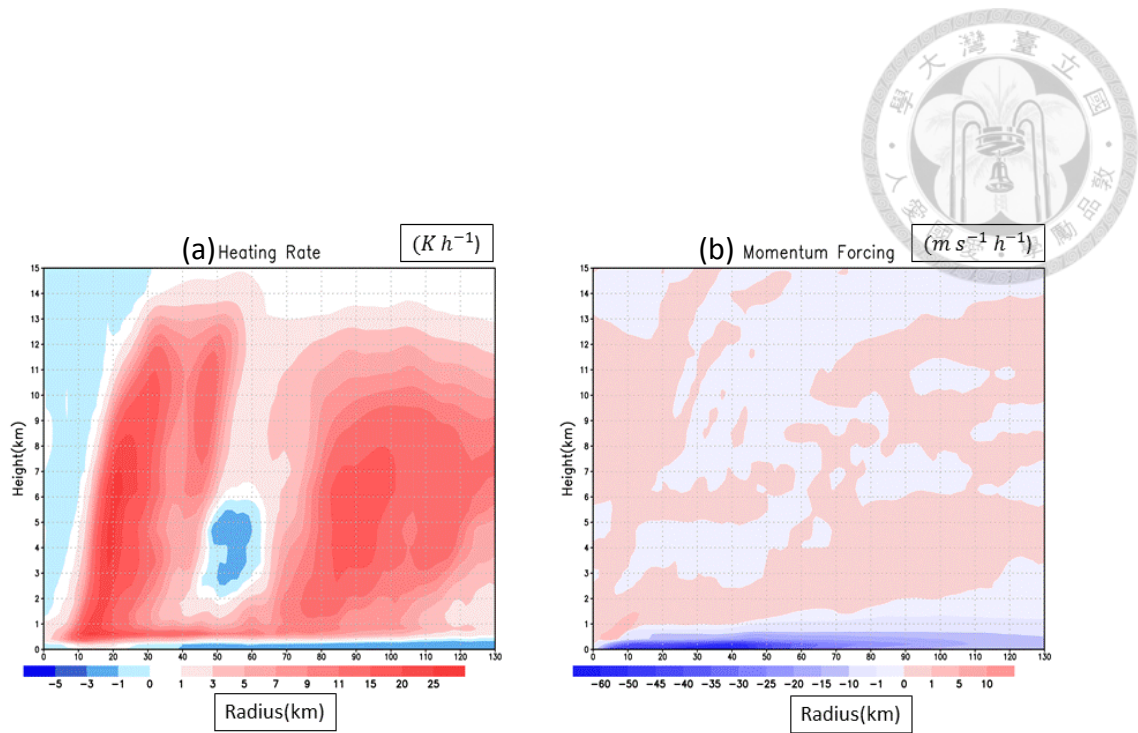


圖 3.14 CTL 實驗輸出至 Sawyer-Eliassen 方程組 32~24h 平均之非絕熱加熱與動量外力(forcing)場。(a)非絕熱加熱率(單位 $K h^{-1}$) (b)動量外力(單位 $m s^{-1} h^{-1}$)

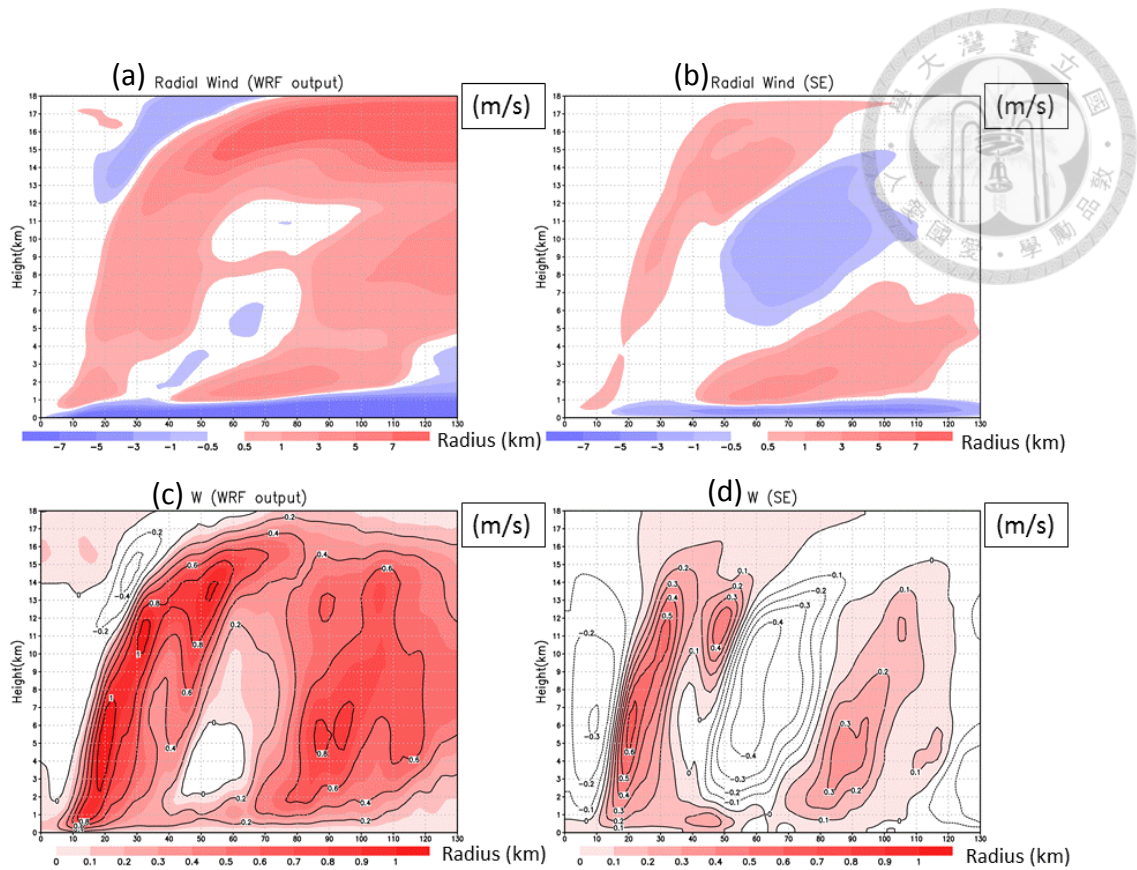


圖 3.15 CTL 實驗，模式輸出(圖(a)、(c))以及 SE 模式診斷(圖(b)、(d))之次環流分布。其中，圖(a)、(b)為徑向流場(單位 ms^{-1})；圖(c)、(d)為垂直運動(單位 ms^{-1})

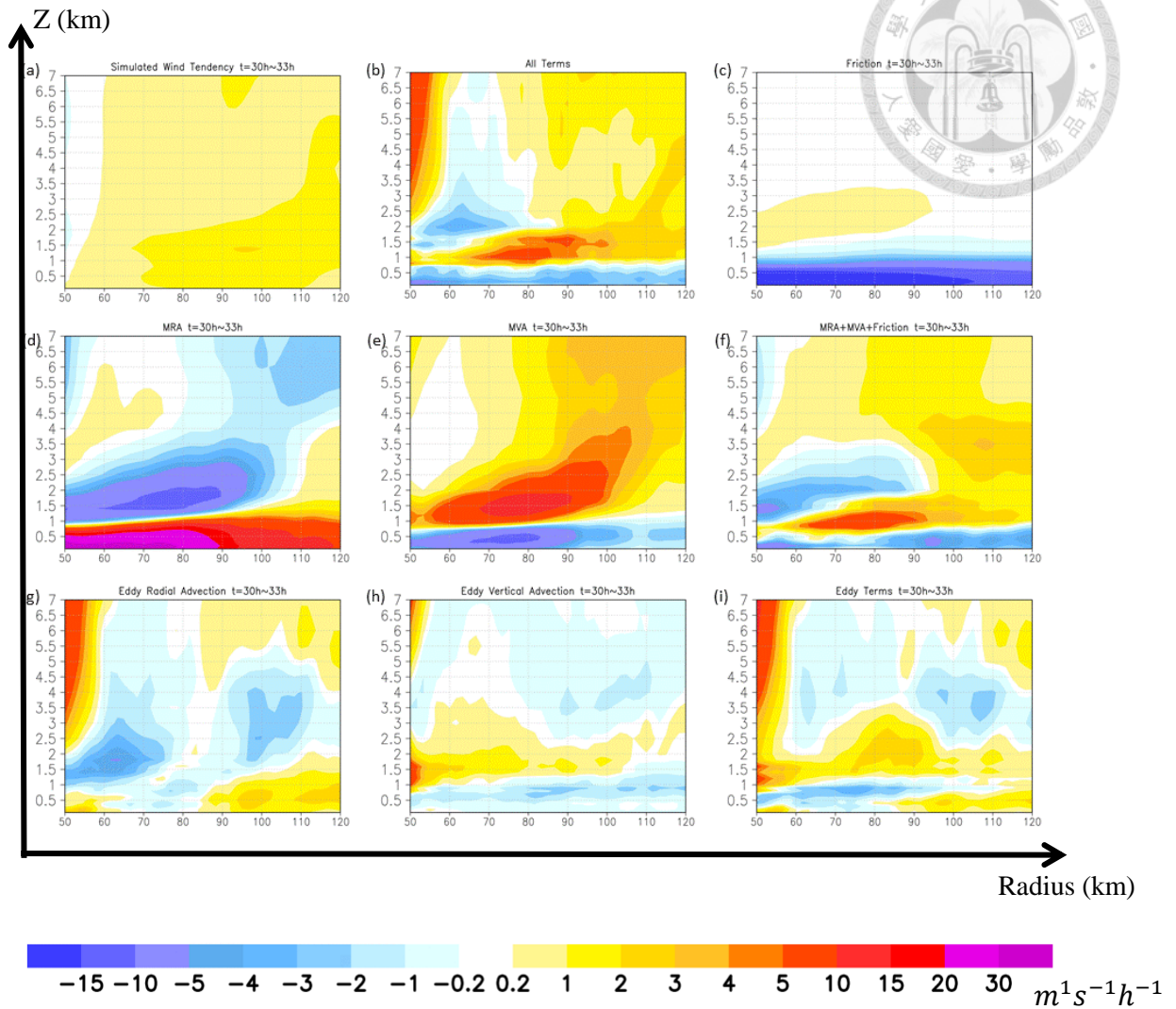


圖 3.16 CTL 實驗，切向風動量收支分析，30~33 小時各項之變化。(a) 模式實際輸出變化量，(b) 診斷中五項(c、d、e、g、h)之和，(c) 摩擦項，(d) 平均徑向平流項，(e) 平均垂直平流項，(f) 平均項之總和，(g) 渦流徑向平流項，(h) 渦流垂直平流項，(i) 渦流項之總和(g、h)。(單位： $m^1s^{-1}h^{-1}$)

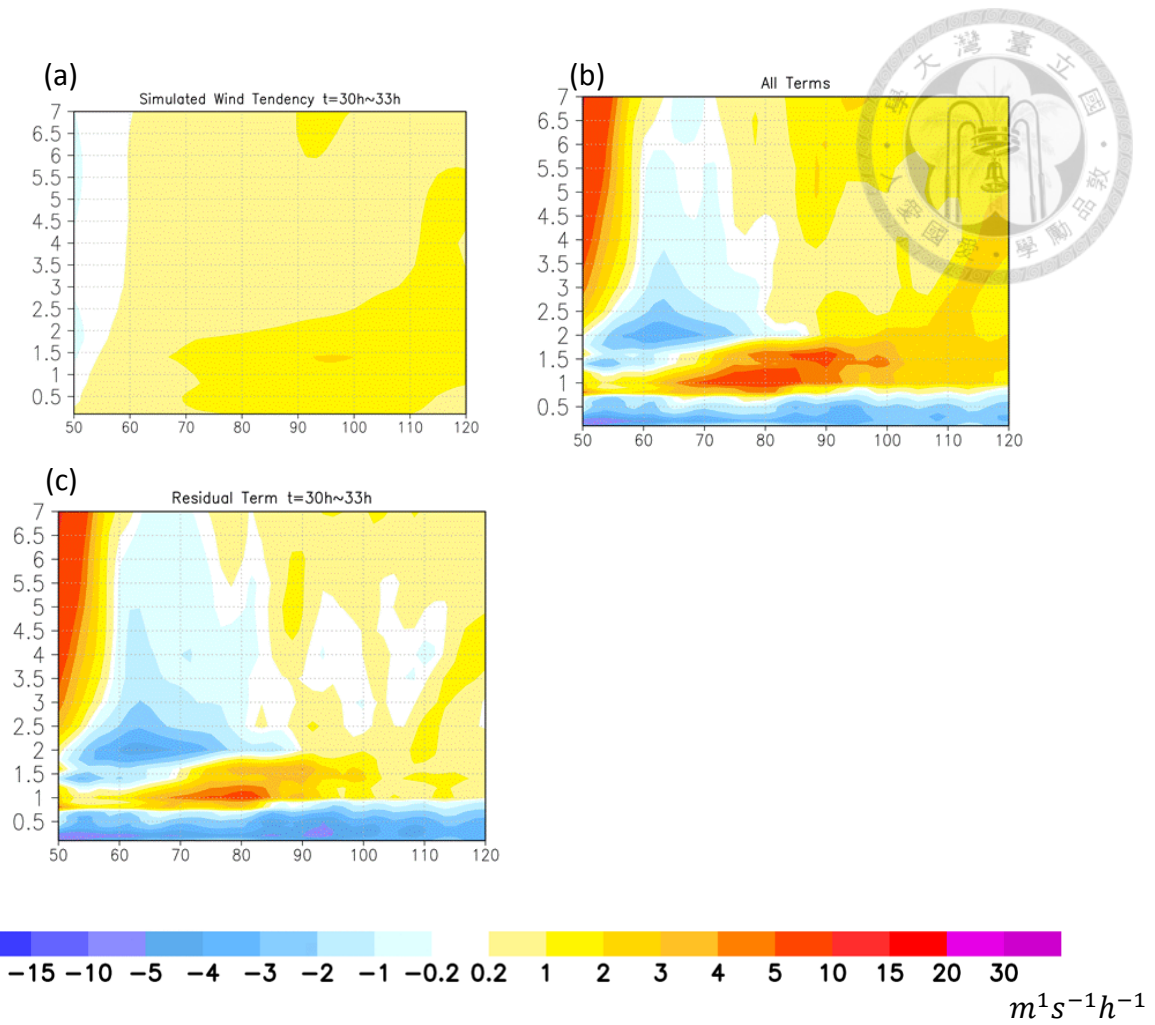


圖 3.17 CTL 實驗，30~33 小時之切向風動量收支診斷，(a) 模式輸出之切向風變化量，(b) 診斷之切向風變化量，(c) 前兩項之差。(單位： $m^1s^{-1}h^{-1}$)

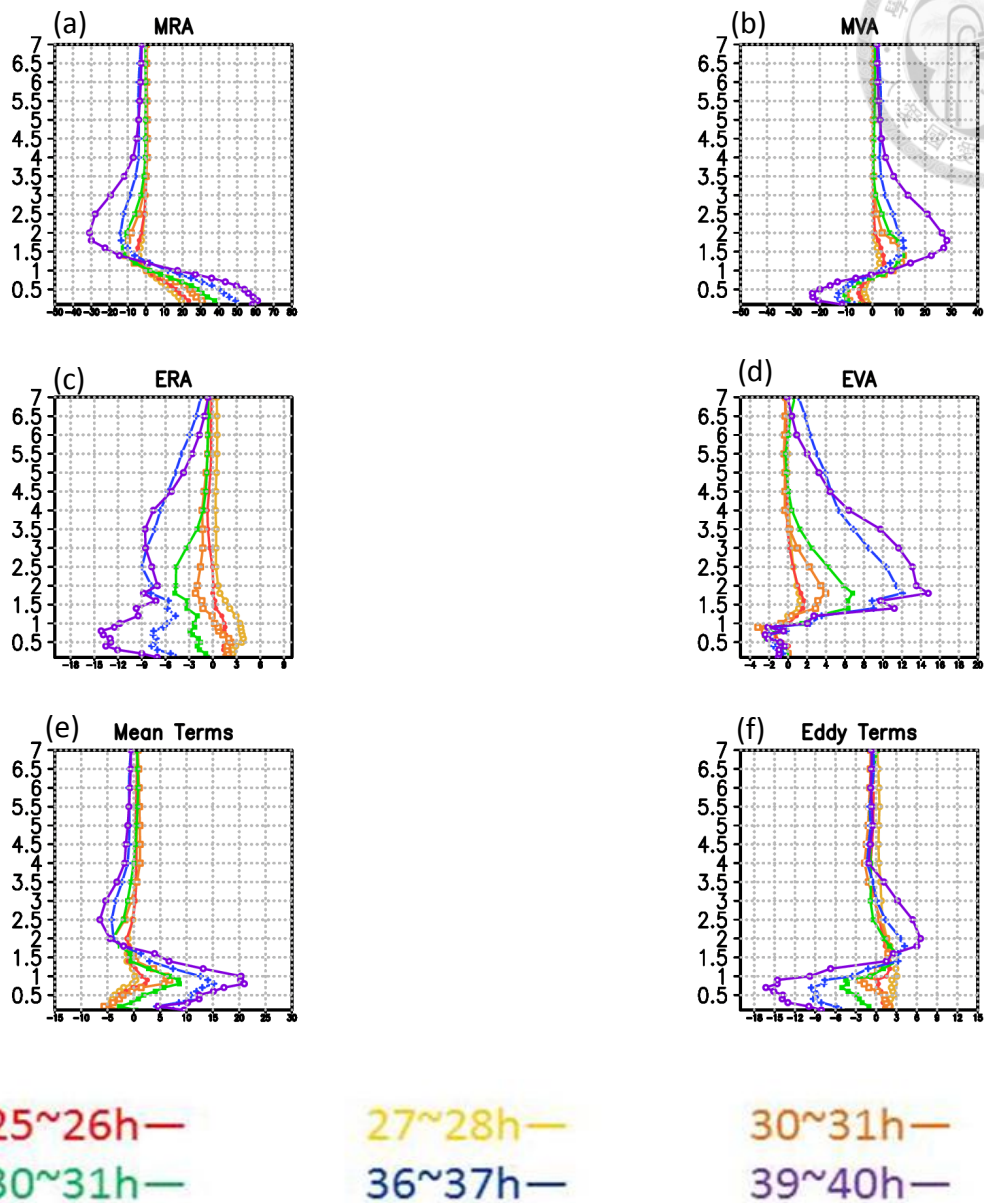
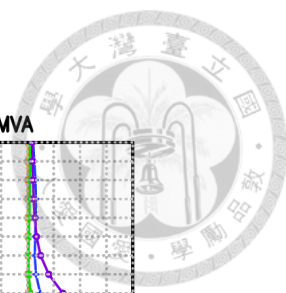


圖 3.18 CTL 實驗之切向風動量收支分析。不同物理過程在半徑 60~80 公里之平均隨時間的變化。(a) 平均徑向平流項、(b) 平均垂直平流項、(c) 渦流徑向平流項、(d) 渦流垂直平流項、(e) 平均項總和、(f) 渦流項之總和。橫軸單位： $m^1s^{-1}h^{-1}$ 、縱軸單位：垂直高度(km)。

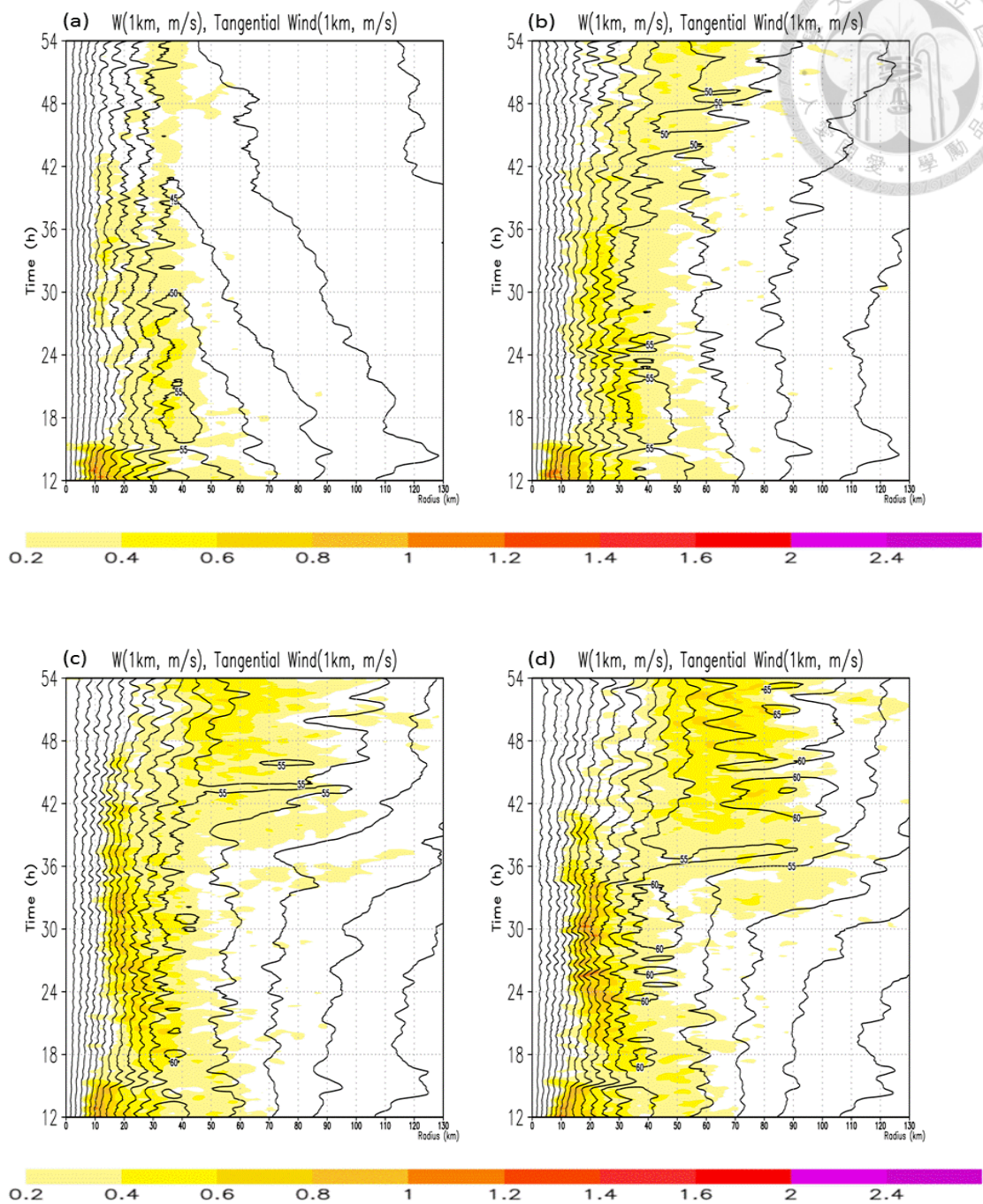


圖 4.1 OSC 實驗切向風(黑色等值線, 單位 ms^{-1})以及垂直速度(色階, 單位 ms^{-1})徑向剖面之平均, 隨時間演變情形。(a)OSC-01、(b)OSC-05、(c)OSC-10、(d)OSC-15。

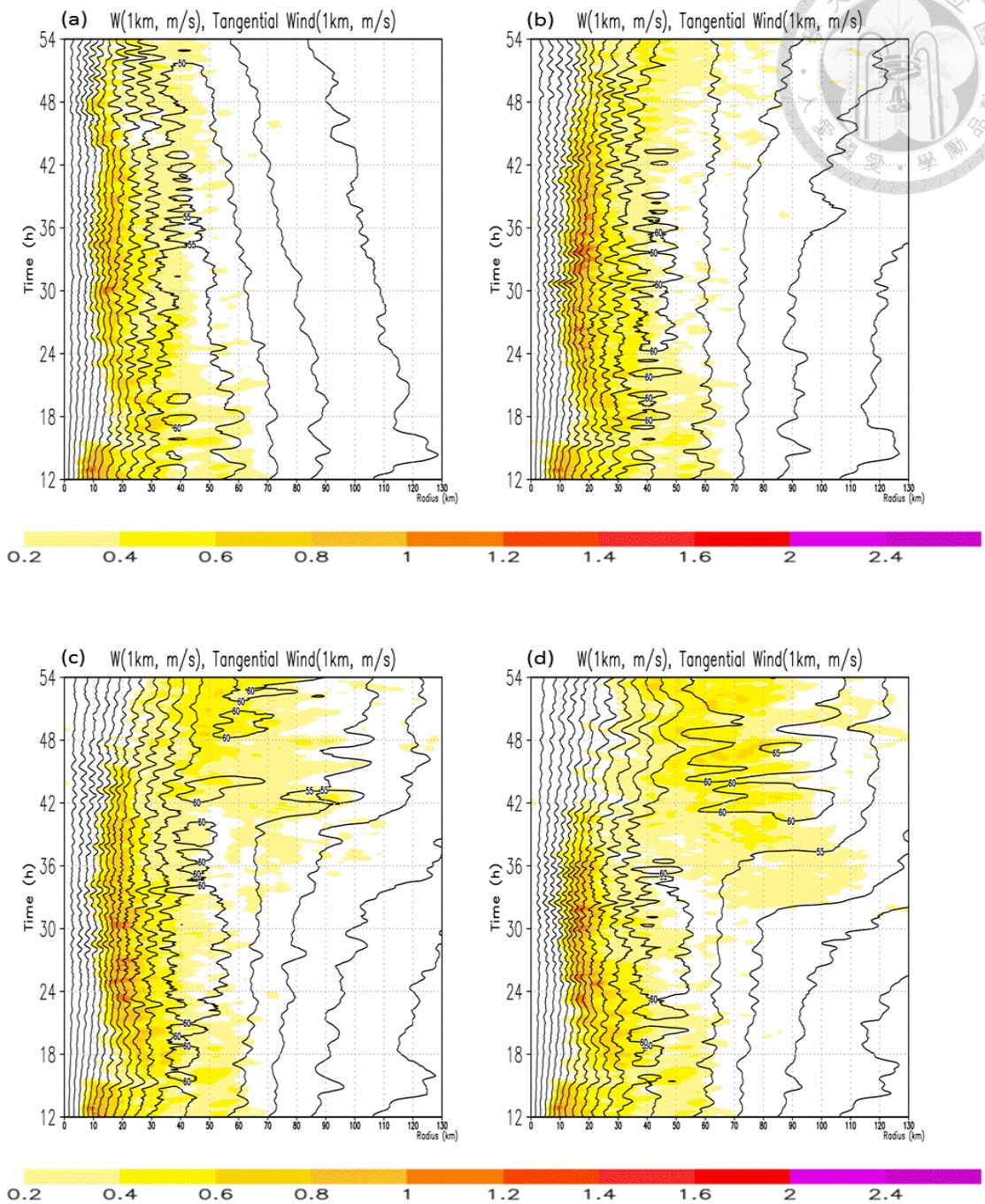
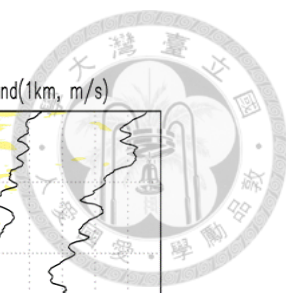


圖 4.2 圖說同圖 4.1。 (a)OBC-01、(b)OBC-05、(c)OBC-10、(d)OBC-15。

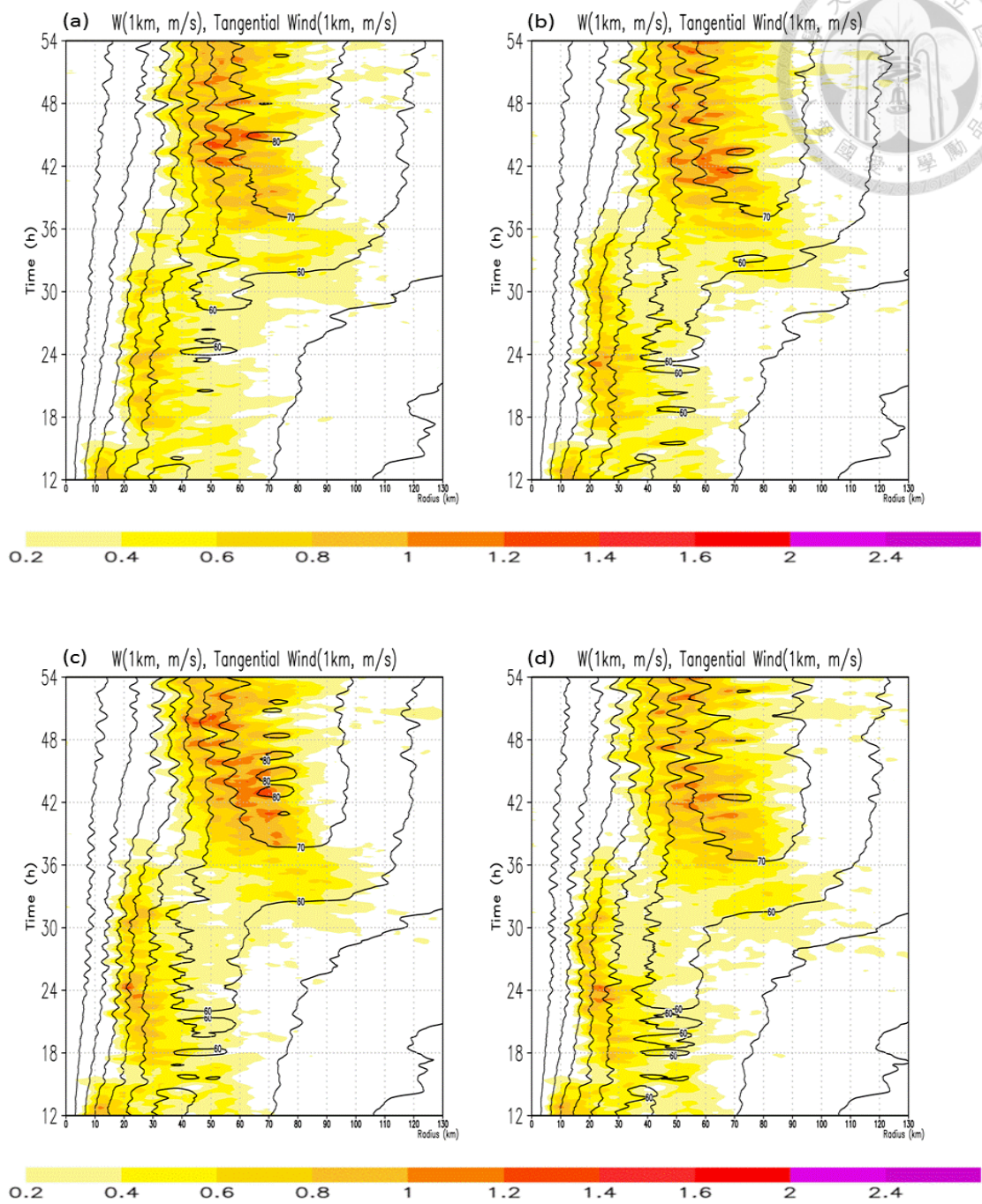


圖 4.3 圖說同圖 4.1。 (a)InC-01、(b)InC-05、(c)InC-10、(d)InC-15。

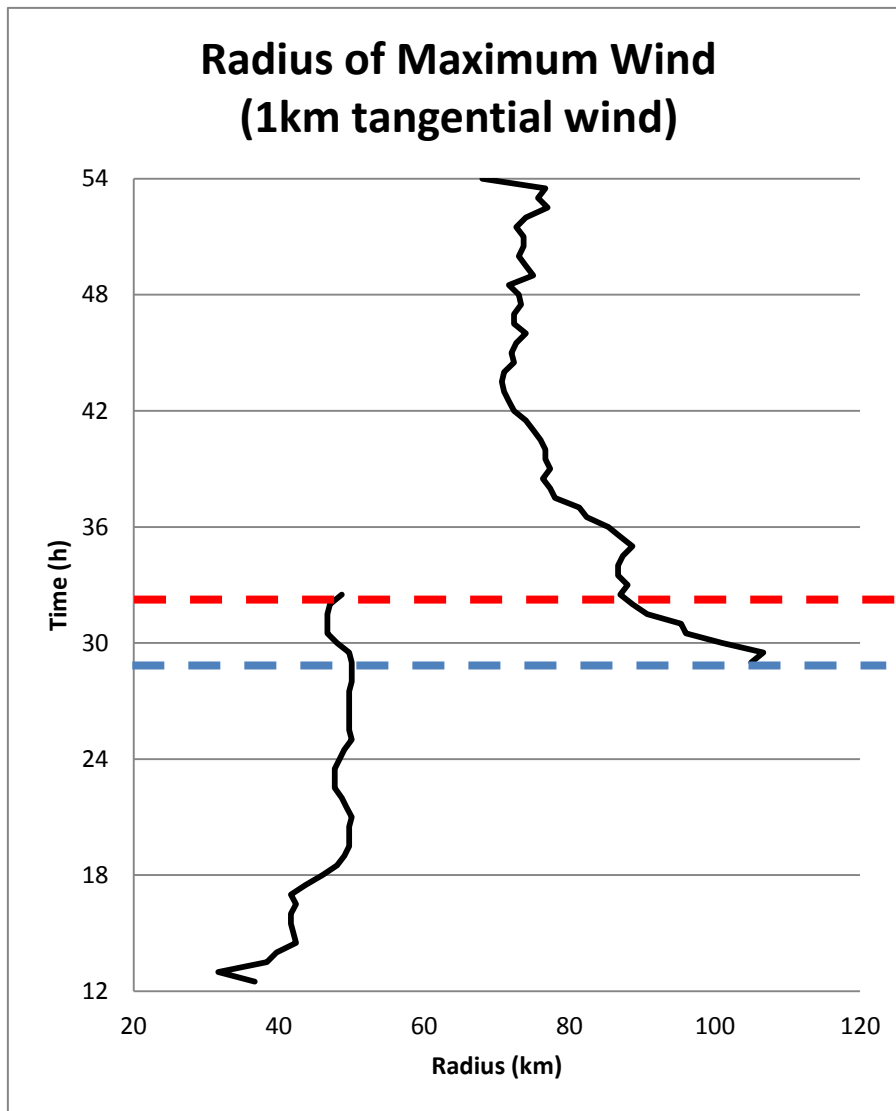


圖 4.4 InC-10 實驗，最大風速半徑隨時間之變化。藍色虛線為此組實驗 SEF 之時間，紅色則為 CTL 實驗 SEF 時間。

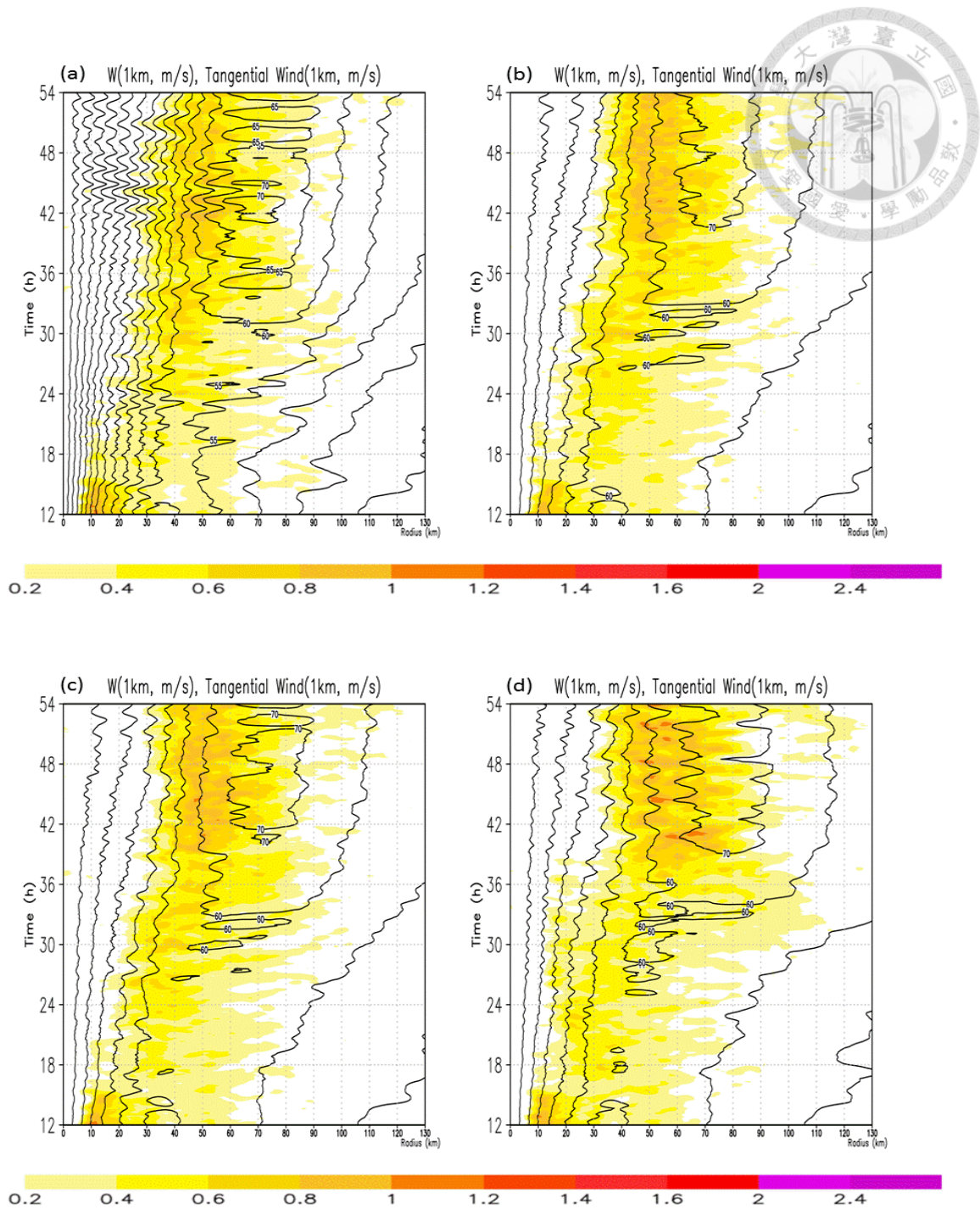


圖 4.5 圖說同圖 4.1。 (a) RiR-01、(b) RiR-05、(c) RiR-10、(d) RiR-15。

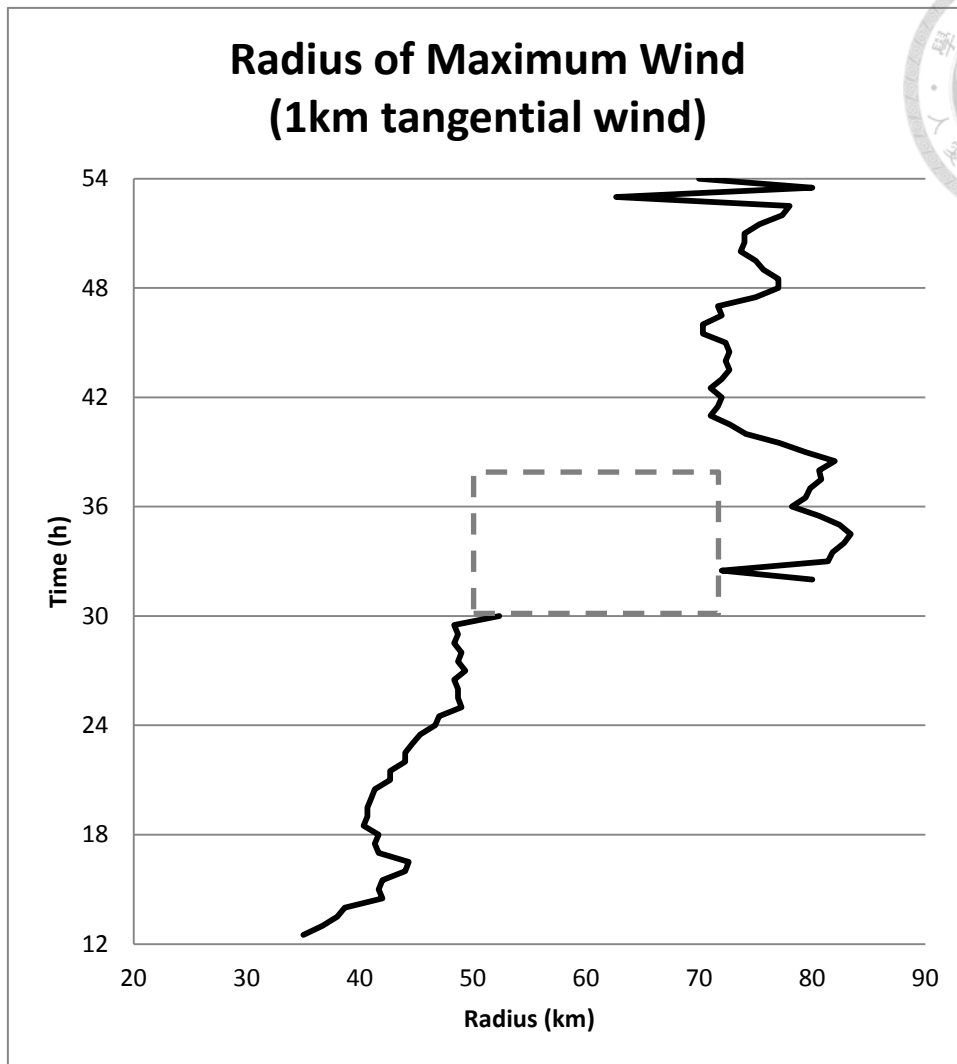
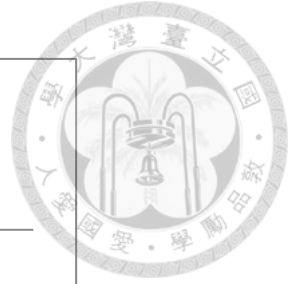


圖 4.6 RiR-15 實驗，最大風速半徑隨時間之變化。灰色虛線區域為內、外眼牆之間風速極值位置快速跳動的時間，僅能在 32 小時開始找到外側固定極值。內側風速極值持續至 38 小時，其後僅具單一極值於外側。

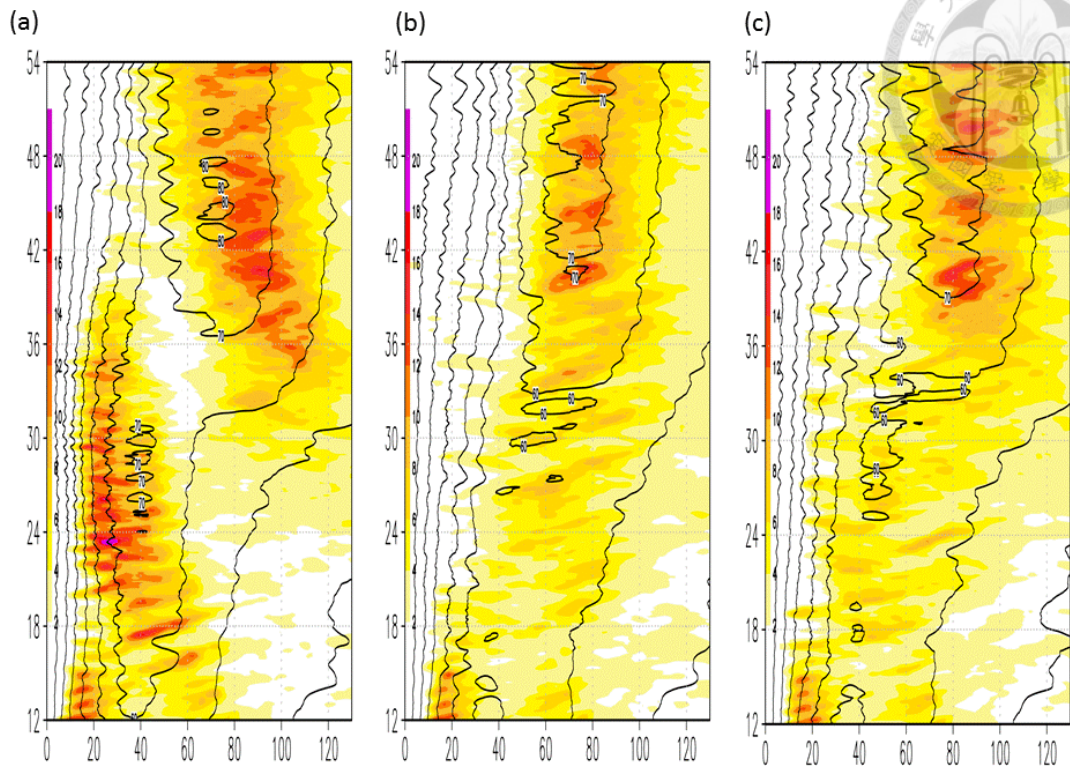


圖 4.7 (a)~(c)依序為 CTL、RiR-10、RiR-15 切向風(黑色等值線, 單位 m s^{-1})以及垂直平均之非絕熱加熱率(色階, 單位 K h^{-1})之徑向剖面平均, 隨時間演變情形。

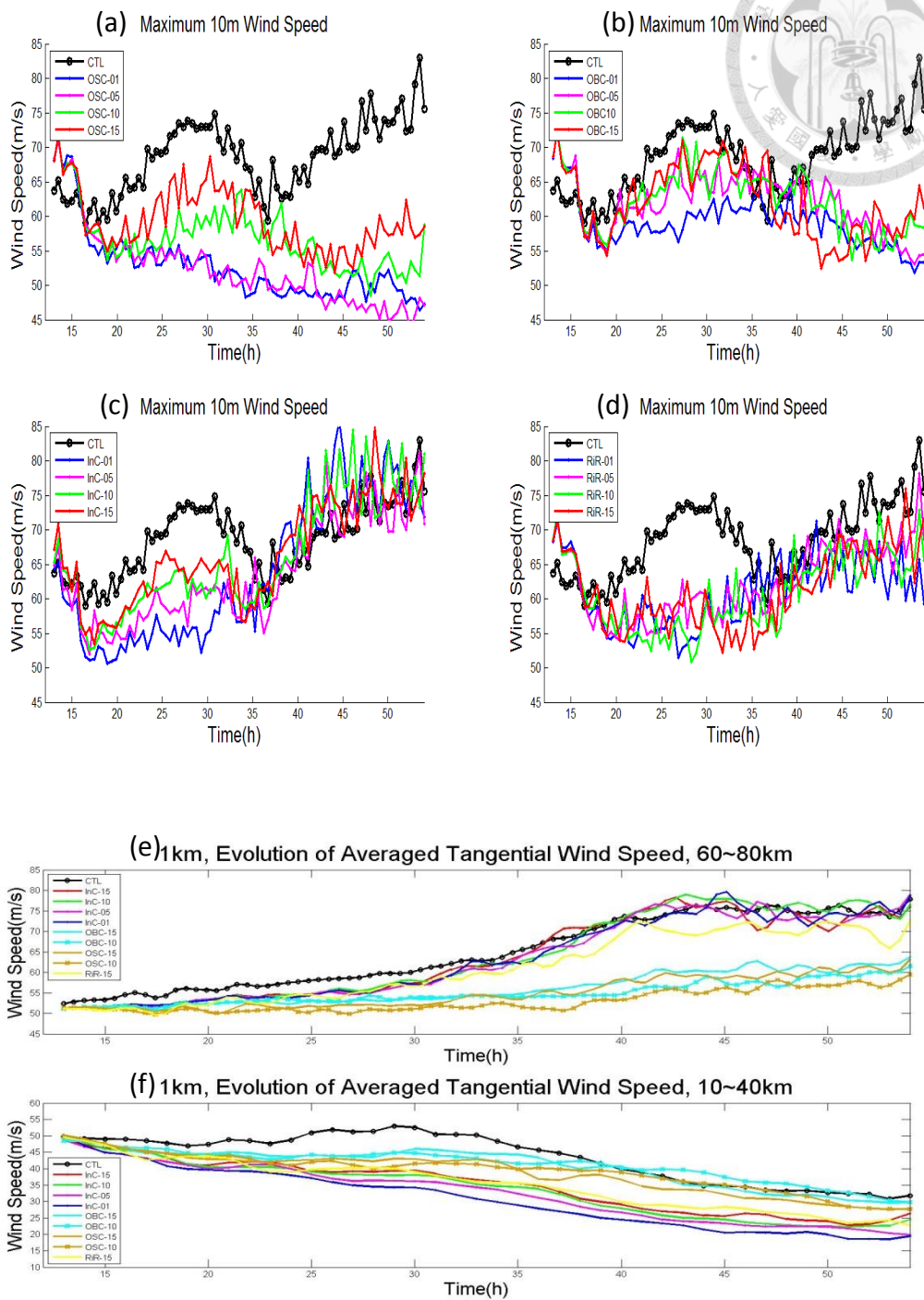


圖 4.8 (a)~(d)分別為 OSC、OBC、InC、RiR 實驗最大 10 米風速隨時間之變化，不同顏色表示不同組的實驗。(e)為具有雙眼牆之實驗(OSC-10、OSC-15、OBC-10、OBC-15、InC-01、InC-05、InC-10、InC-15、RiR-15)外眼牆區間(半徑 60~80 公里)平均 1 公里高切向風隨時間的演變，而(f)為內眼牆區間(10~40 公里)平均 1 公里高切向風隨時間的變化。

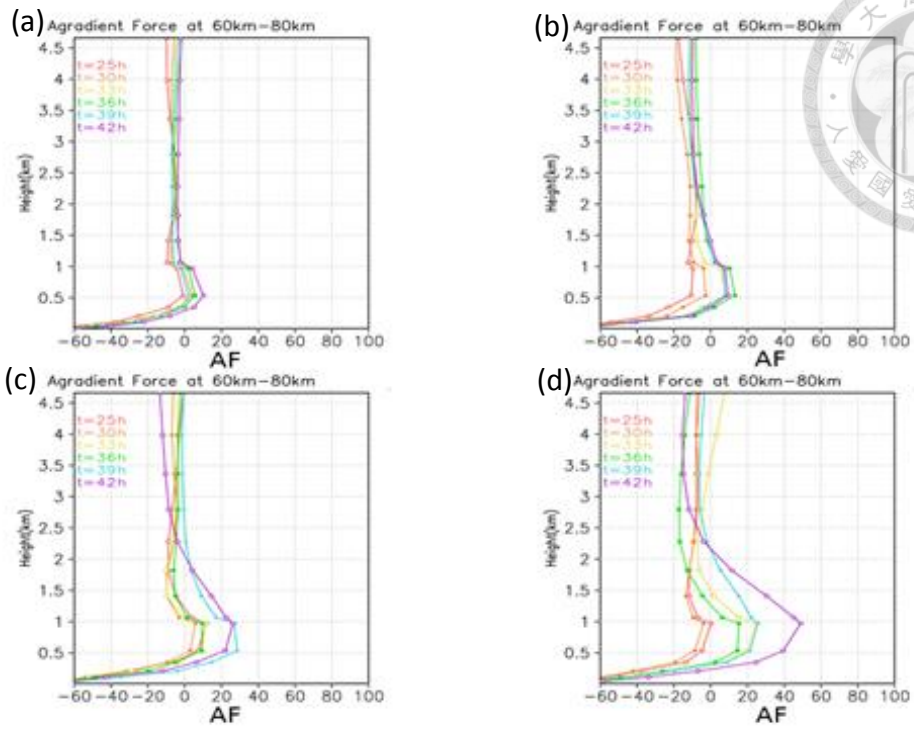


圖 4.9 (a)~(d)分別為 InC-01、InC-05、InC-10、InC-15 半徑 60~80 公里區間平均之非梯度力，從 20h 至 40h 之變化。(單位 ms^{-2})

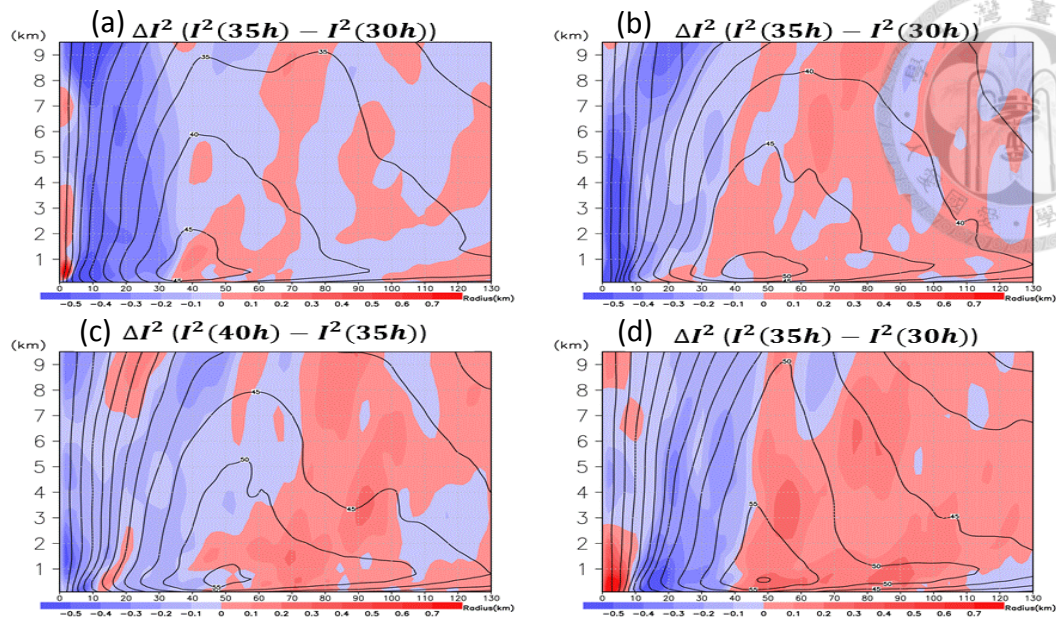


圖 4.10 (a)~(d)分別為 OSC-01、OSC-05、OSC-10、OSC-15 慣性穩定度的變化量 ((a)、(b)、(d)為 30~35h 之變化量，(c)為 35~40h 之變化量，色階，單位 $10^{-3}s^{-1}$) 以及切向風分布((a)、(b)、(d)為 35h 之切向風，(c)為 40h 之切向風，單位 ms^{-1})。

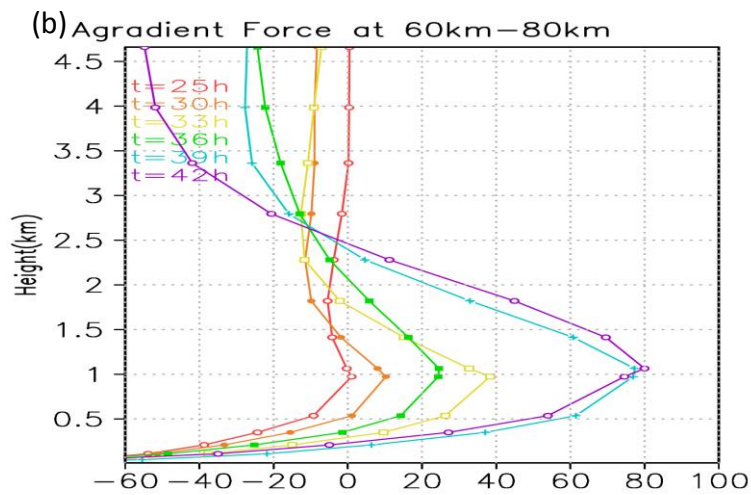
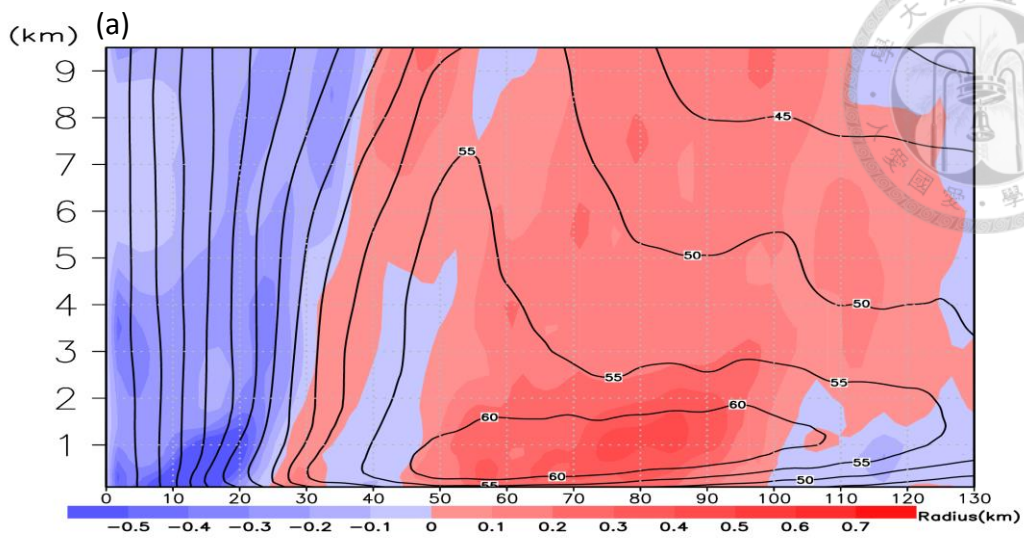


圖 4.11 InC-10 於 (a)30~35h 之間慣性穩定度的變化量(色階, 單位 $10^{-3}s^{-1}$)以及 35h 之切向風(單位 ms^{-1}) (b) 半徑 60~80 公里區間平均之非梯度力, 從 20h 至 40h 之變化。(單位 ms^{-2})

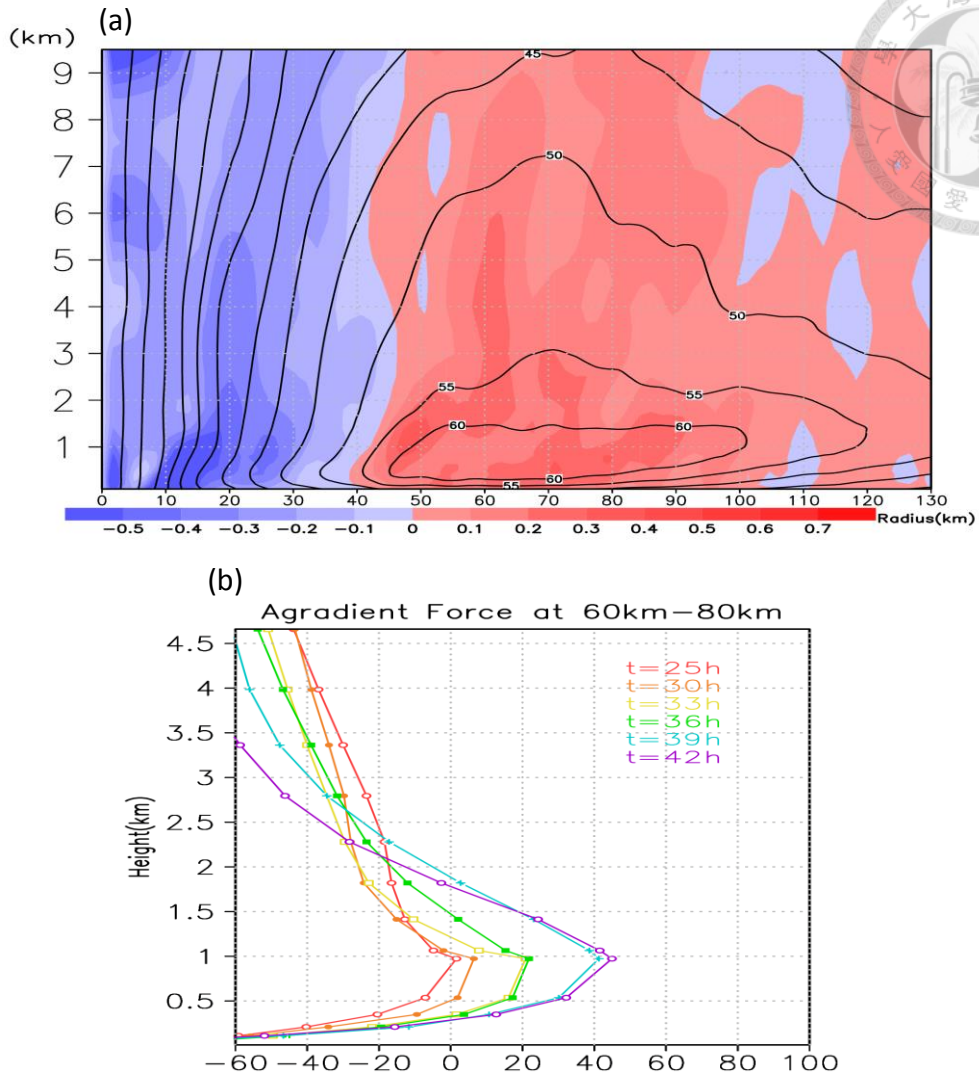
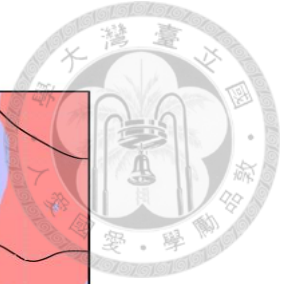


圖 4.12 RiR-15 於 (a)30~35h 之間慣性穩定度的變化量(色階,單位 $10^{-3} s^{-1}$)以及 35h 之切向風(單位 ms^{-1}) (b) 半徑 60~80 公里區間平均之非梯度力,從 20h 至 40h 之變化。(單位 ms^{-2})

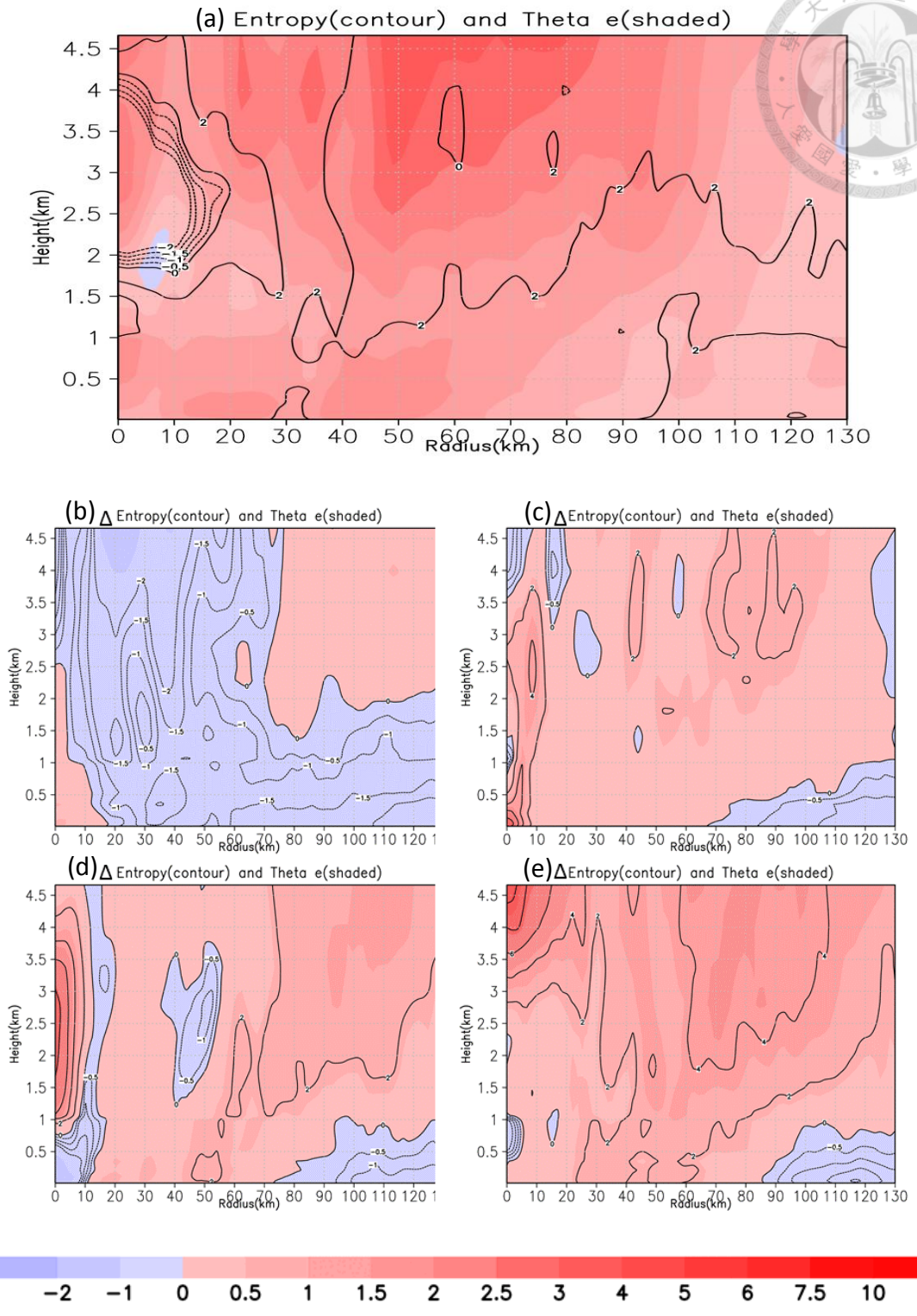
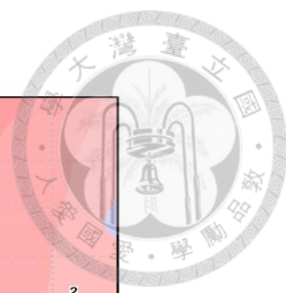


圖 4.13 (a)~(e)別為 CTL、OSC-01、OSC-05、OSC-10、OSC-15，30~35h 相當位溫之變化量(色階，單位 K)以及熵的變化量(實線)。

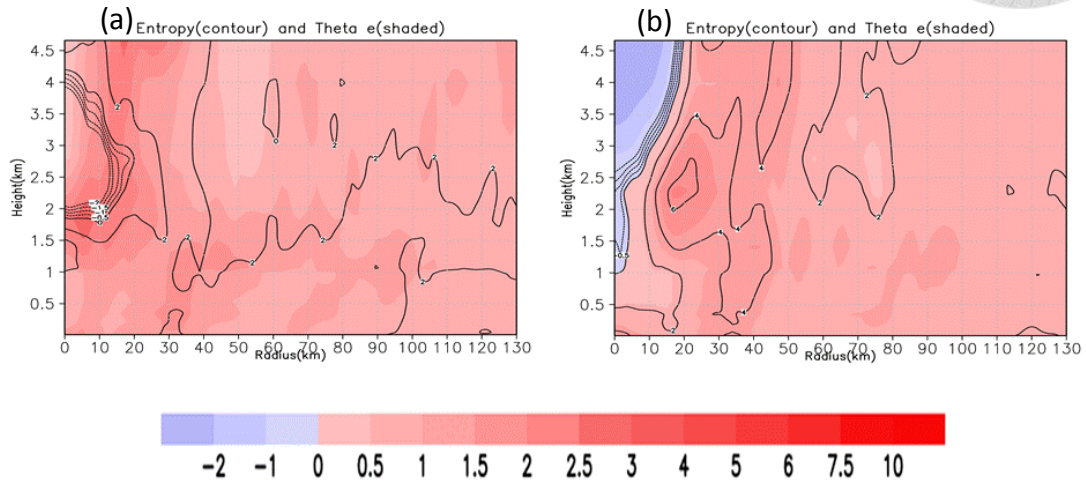


圖 4.14 (a)、(b)別為 CTL、InC-10 於 25~30h 相當位溫之變化量(色階，單位 K) 以及熵的變化量(實線)。

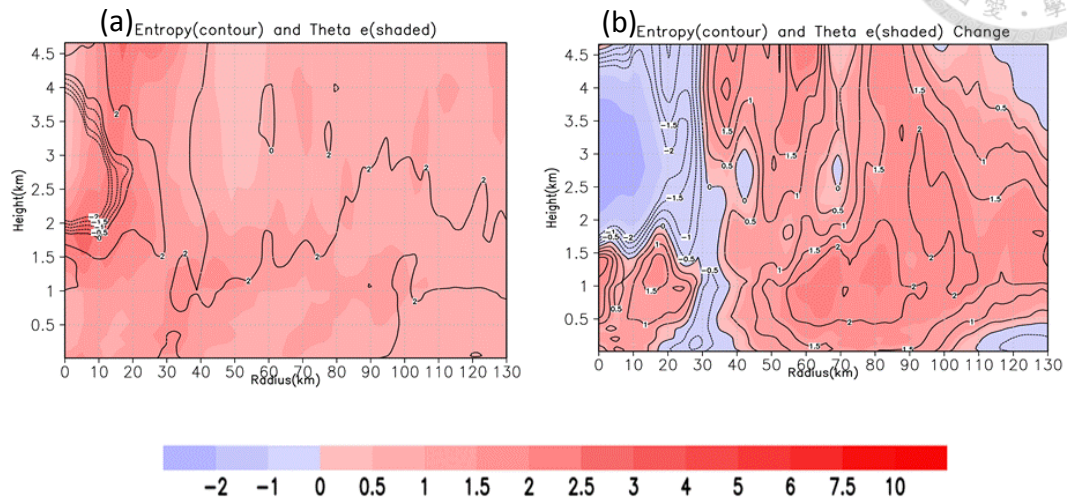


圖 4.15 (a)、(b)別為 CTL、RiR-10 於 12~17h 相當位溫之變化量(色階, 單位 K) 以及熵的變化量(實線)。

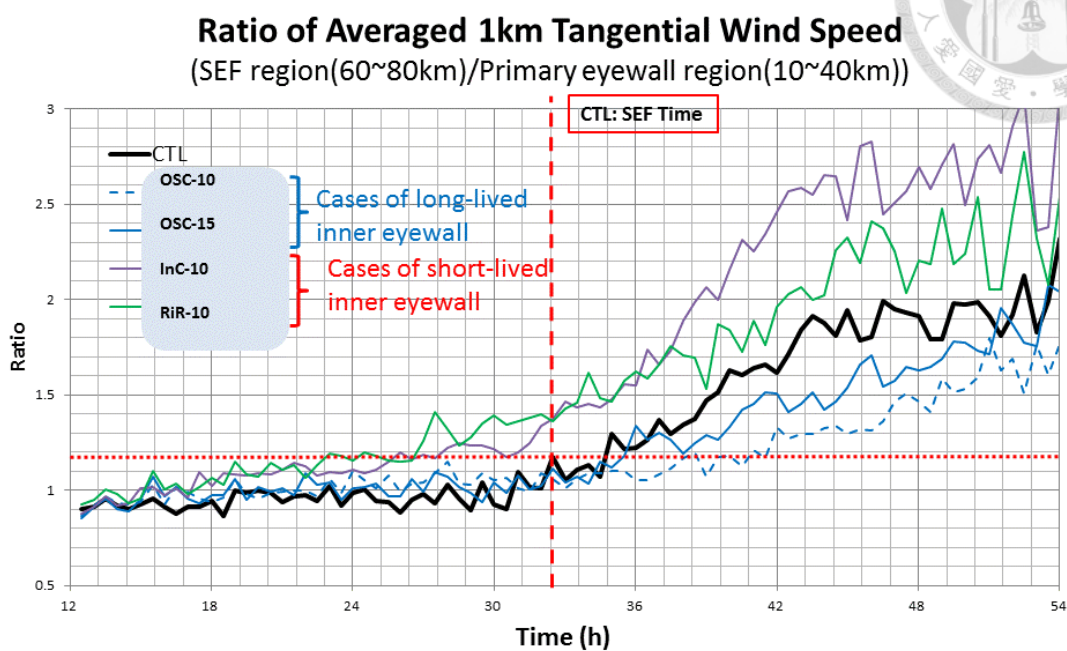


圖 4.16 CTL、OSC-10、OSC-15、InC-10、RiR-10 於外、內眼牆區間 1 公里高平均切向風之比值。

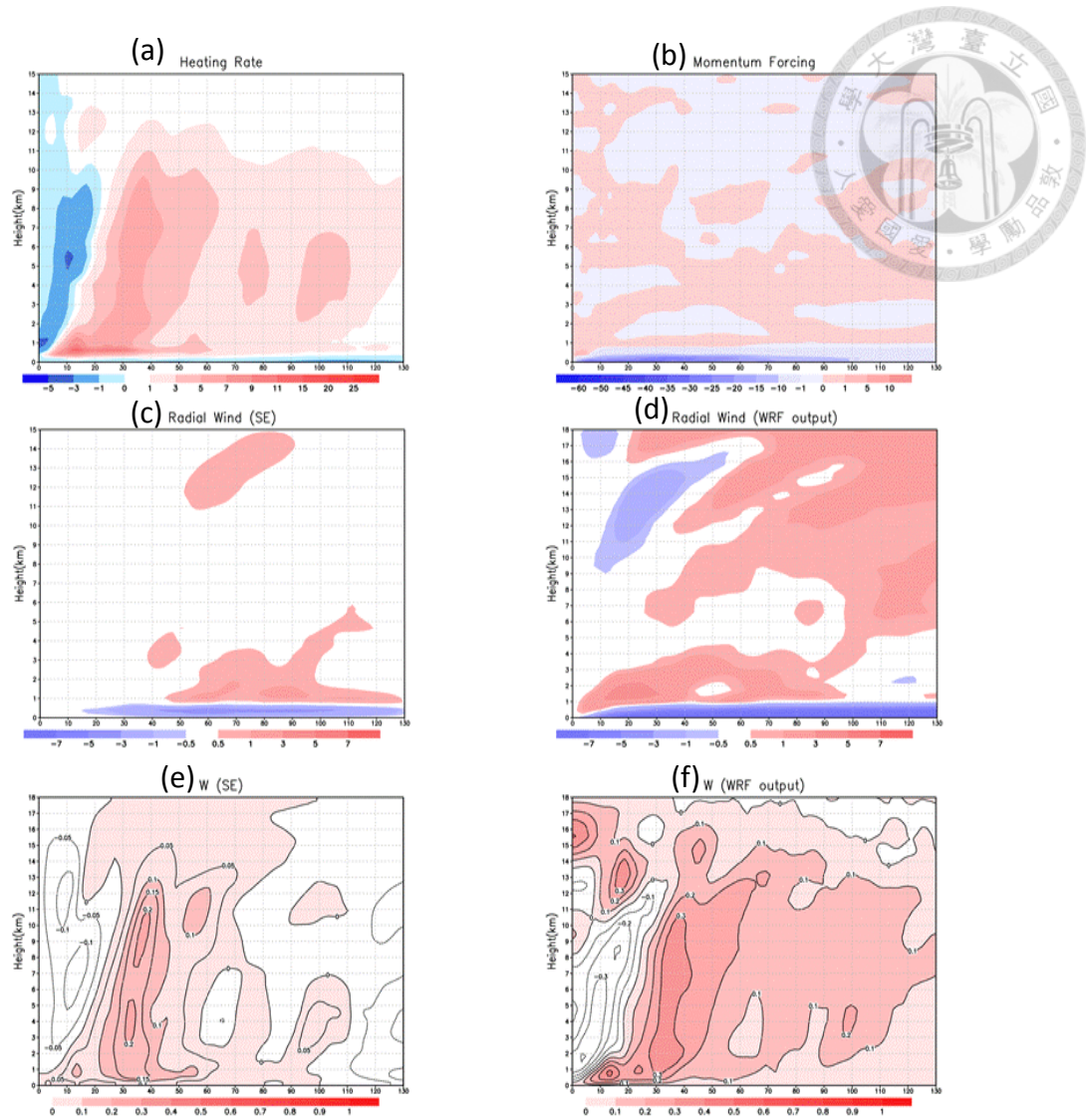


圖 4.17 OSC-01 實驗輸出至 Sawyer-Eliassen 方程組 32~24h 平均之非絕熱加熱與動量外力(forcing)場。(a)非絕熱加熱率(單位 Kh^{-1}) (b)動量外力(單位 $\text{ms}^{-1}\text{h}^{-1}$)。而其餘四張圖為模式輸出(圖(d)、(f))以及 SE 模式診斷(圖(c)、(e))之次環流分布。其中，圖(c)、(d)為徑向流場(單位 ms^{-1})；圖(e)、(f)為垂直運動(單位 ms^{-1})

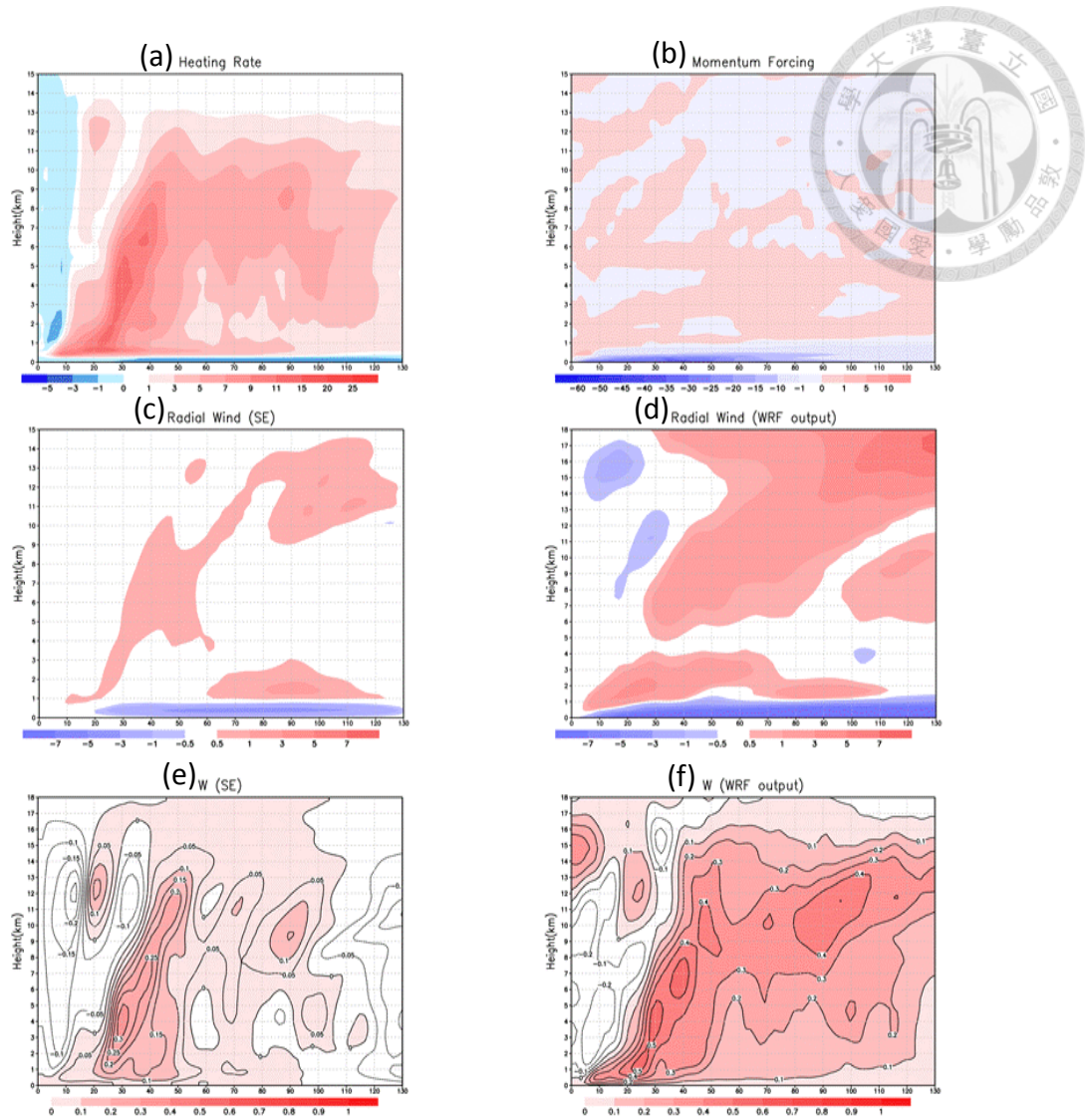


圖 4.18 OSC-10 實驗輸出至 Sawyer-Eliassen 方程組 32~24h 平均之非絕熱加熱與動量外力(forcing)場。(a)非絕熱加熱率(單位 Kh^{-1}) (b)動量外力(單位 $\text{ms}^{-1}\text{h}^{-1}$)。而其餘四張圖為模式輸出(圖(d)、(f))以及 SE 模式診斷(圖(c)、(e))之次環流分布。其中，圖(c)、(d)為徑向流場(單位 ms^{-1})；圖(e)、(f)為垂直運動(單位 ms^{-1})

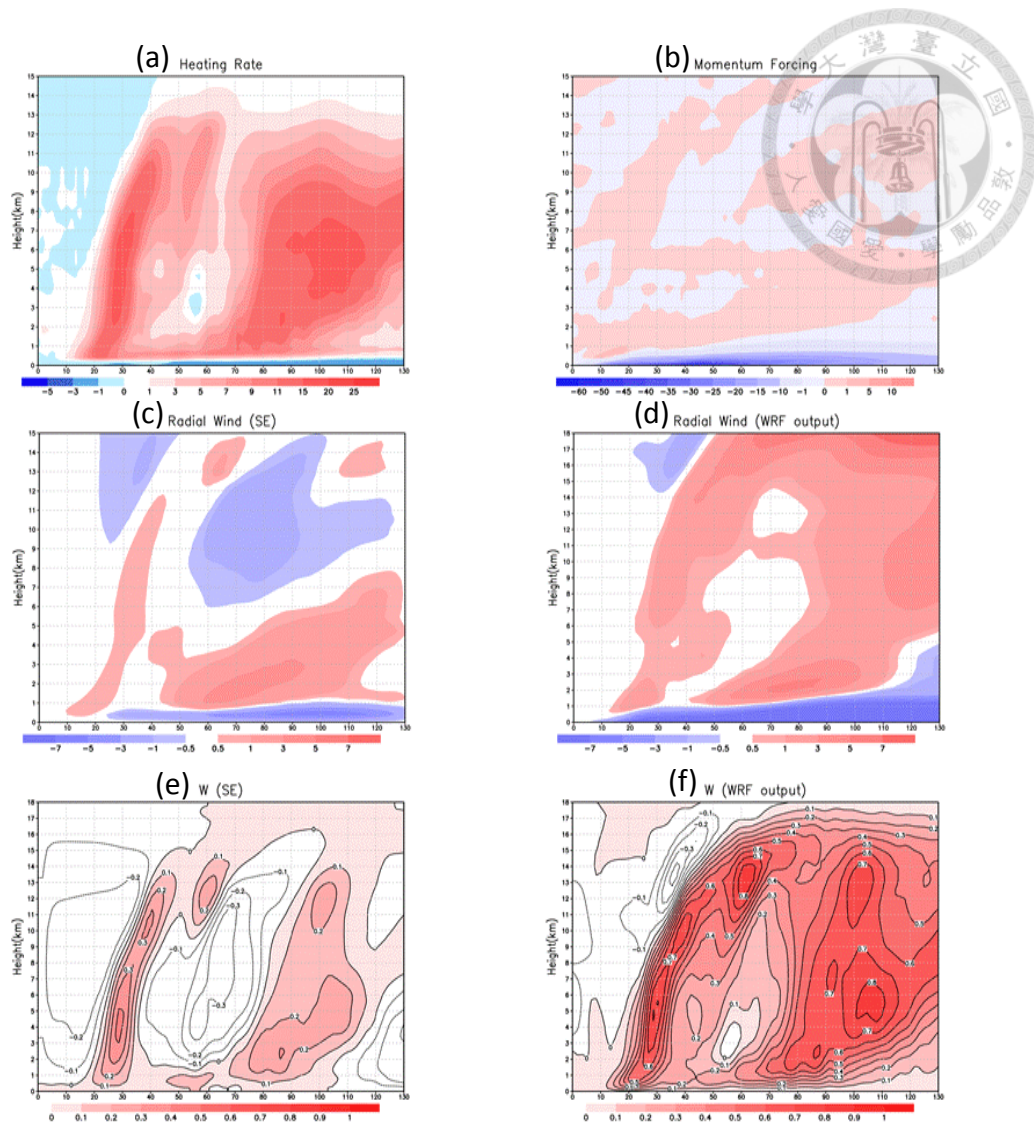


圖 4.19 InC-10 實驗輸出至 Sawyer-Eliassen 方程組 32~24h 平均之非絕熱加熱與動量外力(forcing)場。(a)非絕熱加熱率(單位 K h^{-1}) (b)動量外力(單位 $\text{ms}^{-1}\text{h}^{-1}$)。而其餘四張圖為模式輸出(圖(d)、(f))以及 SE 模式診斷(圖(c)、(e))之次環流分布。其中，圖(c)、(d)為徑向流場(單位 ms^{-1})；圖(e)、(f)為垂直運動(單位 ms^{-1})

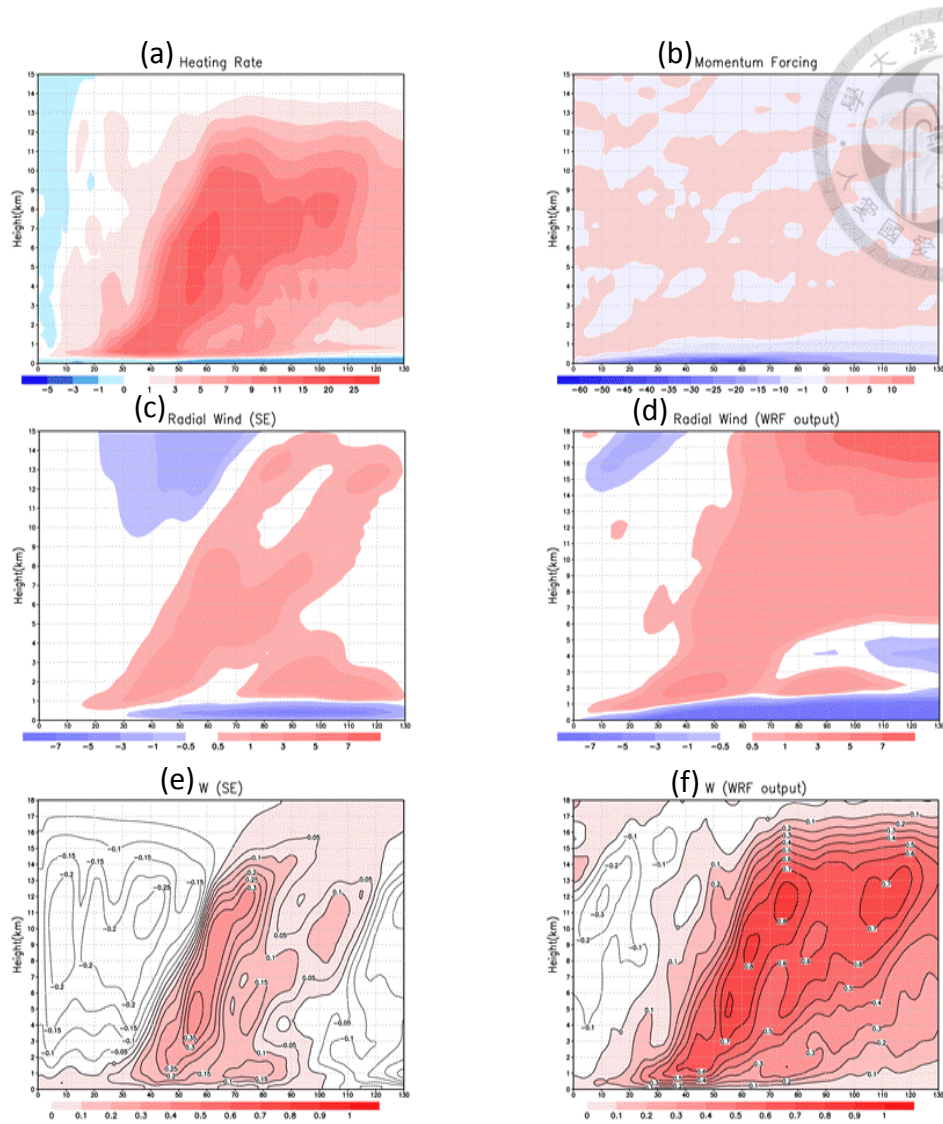


圖 4.20 RiR-10 實驗輸出至 Sawyer-Eliassen 方程組 32~24h 平均之非絕熱加熱與動量外力(forcing)場。(a)非絕熱加熱率(單位 Kh^{-1}) (b)動量外力(單位 $\text{ms}^{-1}\text{h}^{-1}$)。而其餘四張圖為模式輸出(圖(d)、(f))以及 SE 模式診斷(圖(c)、(e))之次環流分布。其中，圖(c)、(d)為徑向流場(單位 ms^{-1})；圖(e)、(f)為垂直運動(單位 ms^{-1})

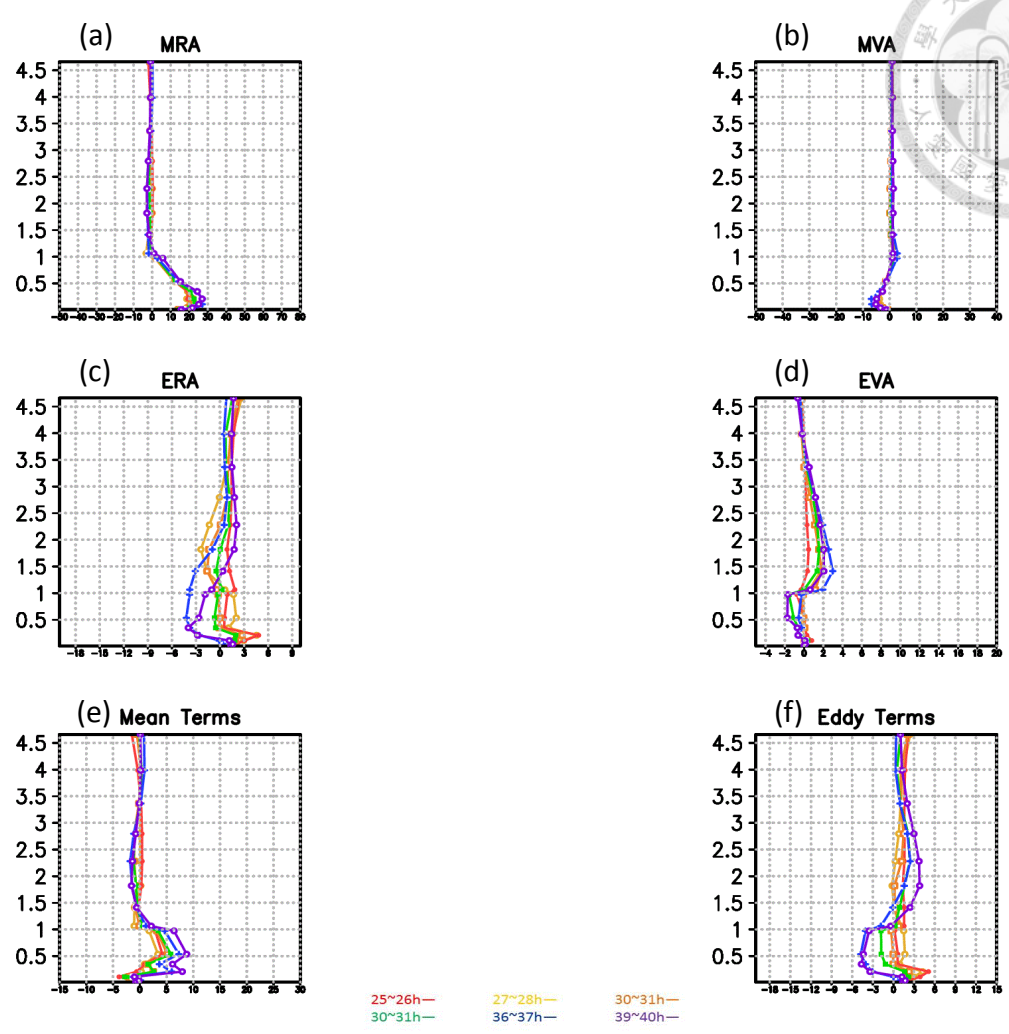
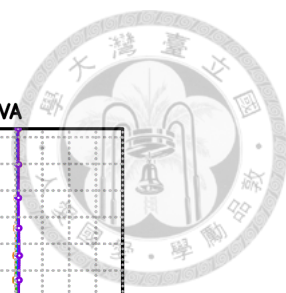


圖 4.21 圖說同圖 3.18，OSC-05。

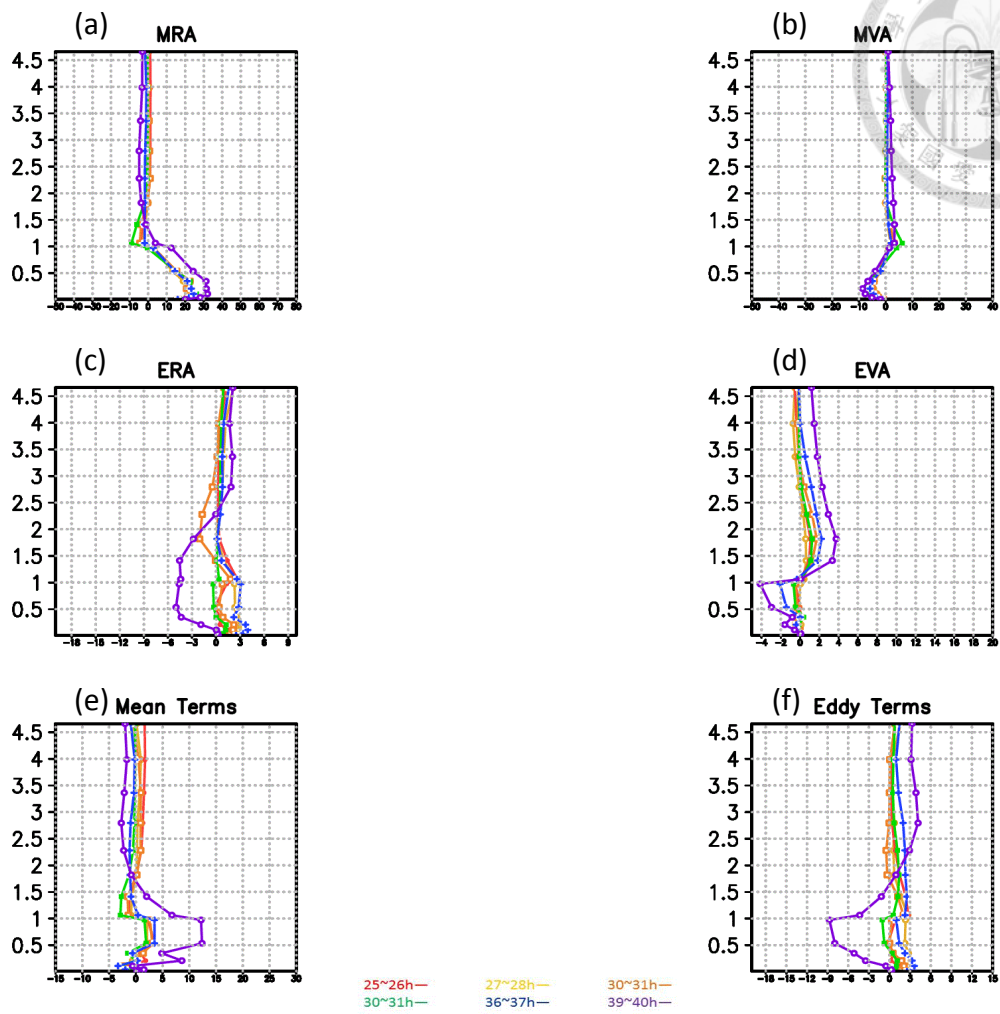


圖 4.22 圖說同圖 3.18，OSC-10。

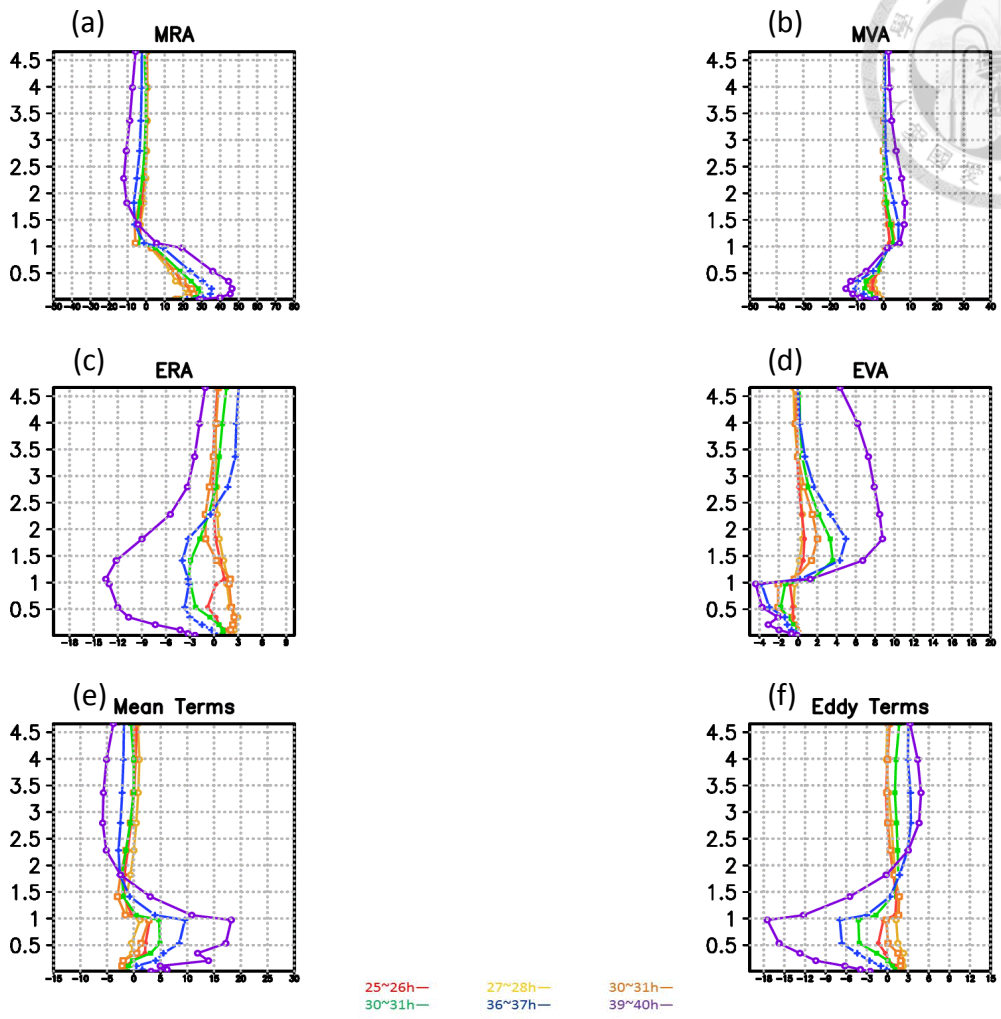


圖 4.23 圖說同圖 3.18，OSC-15。

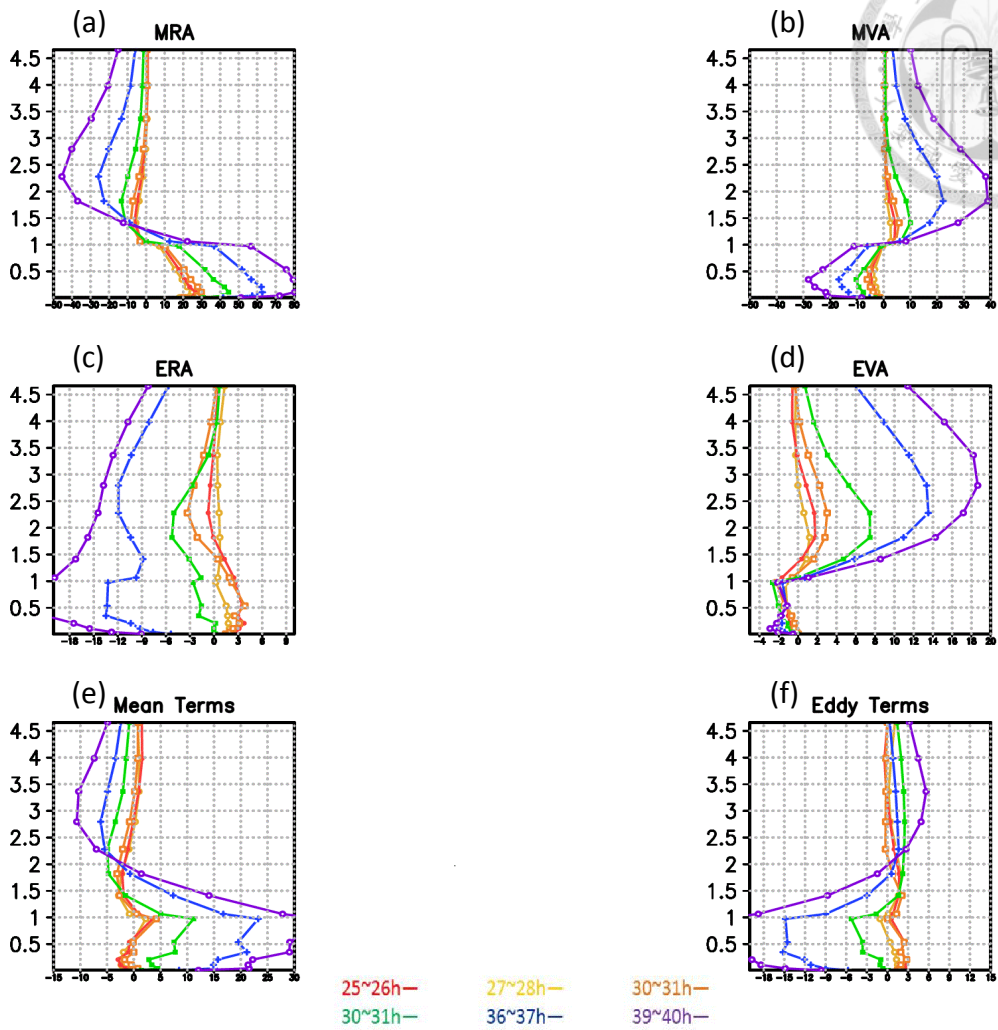


圖 4.24 圖說同圖 3.18，InC-10。

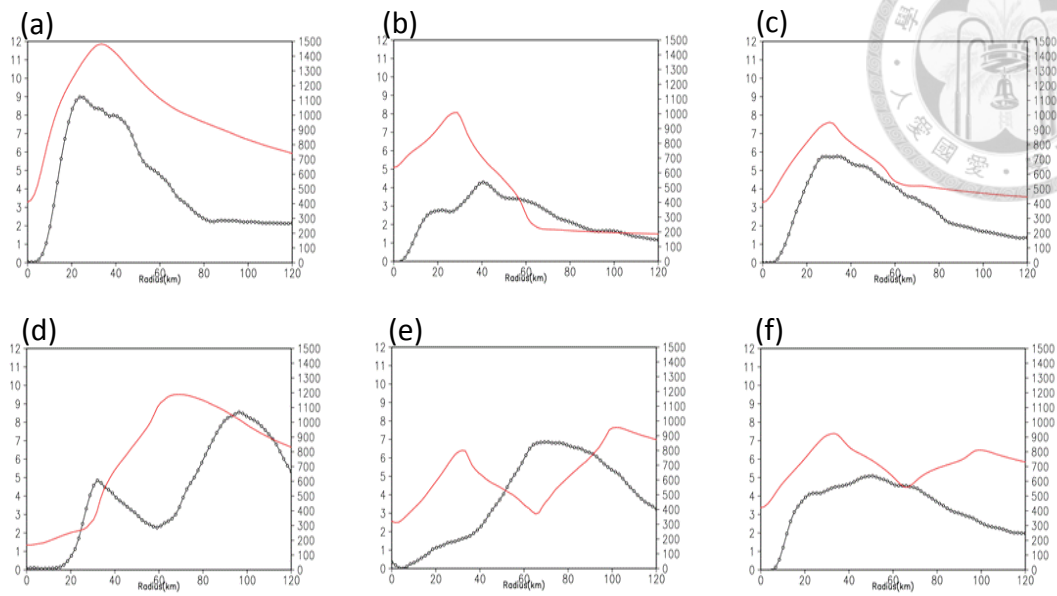


圖 4.25 黑色線條為 21~30h 時間平均及垂直平均之非絕熱加熱率(單位: $K h^{-1}$)，紅色實線為時間平均之表面熱量通量(單位: $W m^{-2}$)。(a) CTL，(b) OSC-05，(c) OSC-15，(d) InC-10，(e) RiR-10，(f) RiR-15。

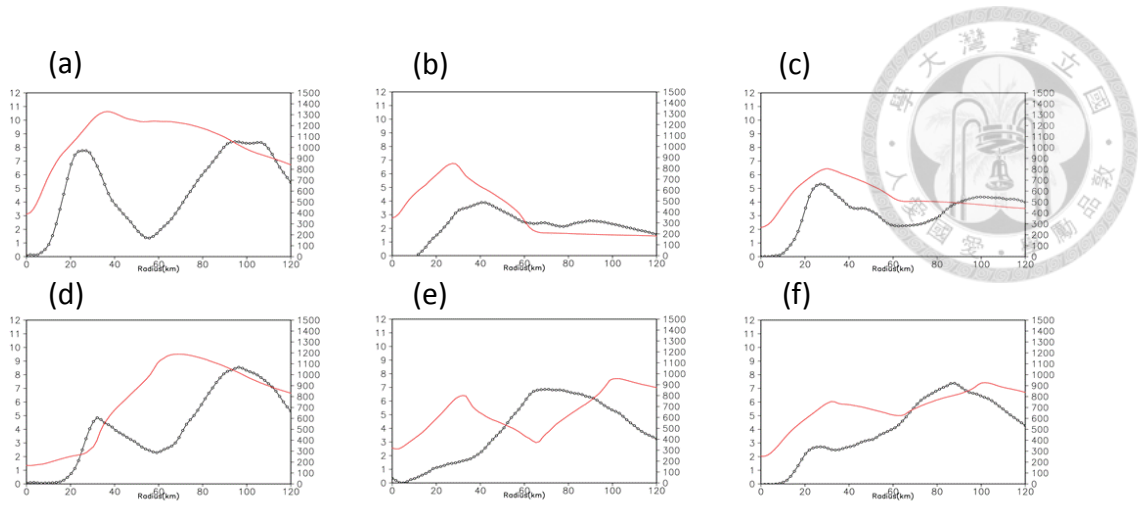


圖 4.26 圖說同圖 4.25，時間為 31h~40h 的時間平均。(a) CTL，(b) OSC-05，
(c) OSC-15，(d) InC-10，(e) RiR-10，(f) RiR-15。

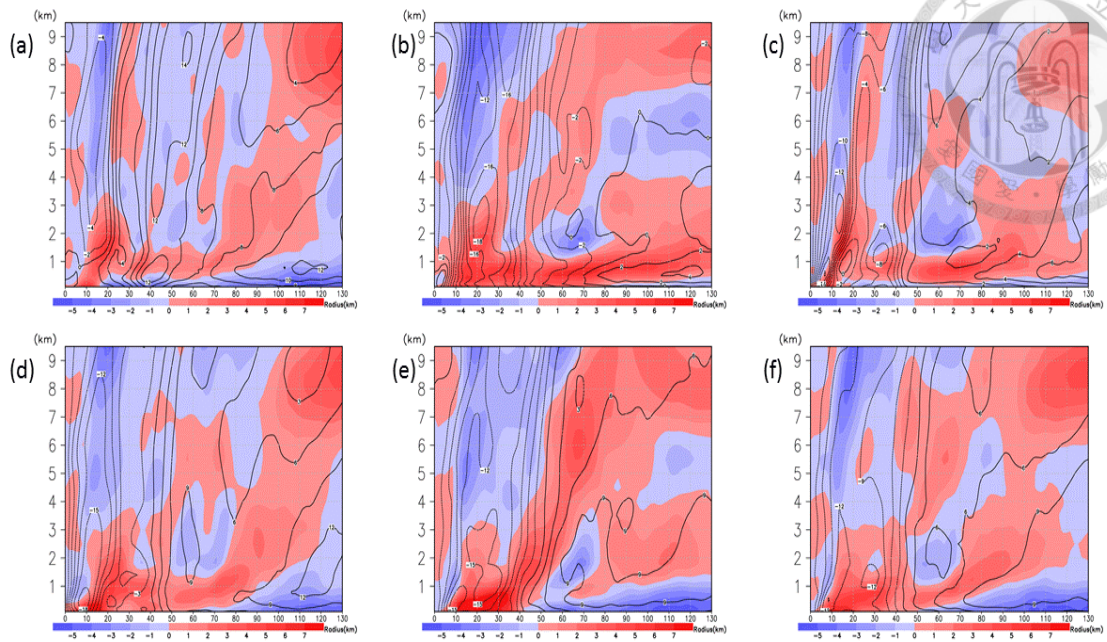


圖 4.27 12h 至 30h 之切向風變化量(等值線, 單位: ms^{-1})及徑向風變化量(等值線, 單位: ms^{-1})。 (a) CTL, (b) OSC-05, (c) OSC-15, (d) InC-10, (e) RiR-10, (f) RiR-15。

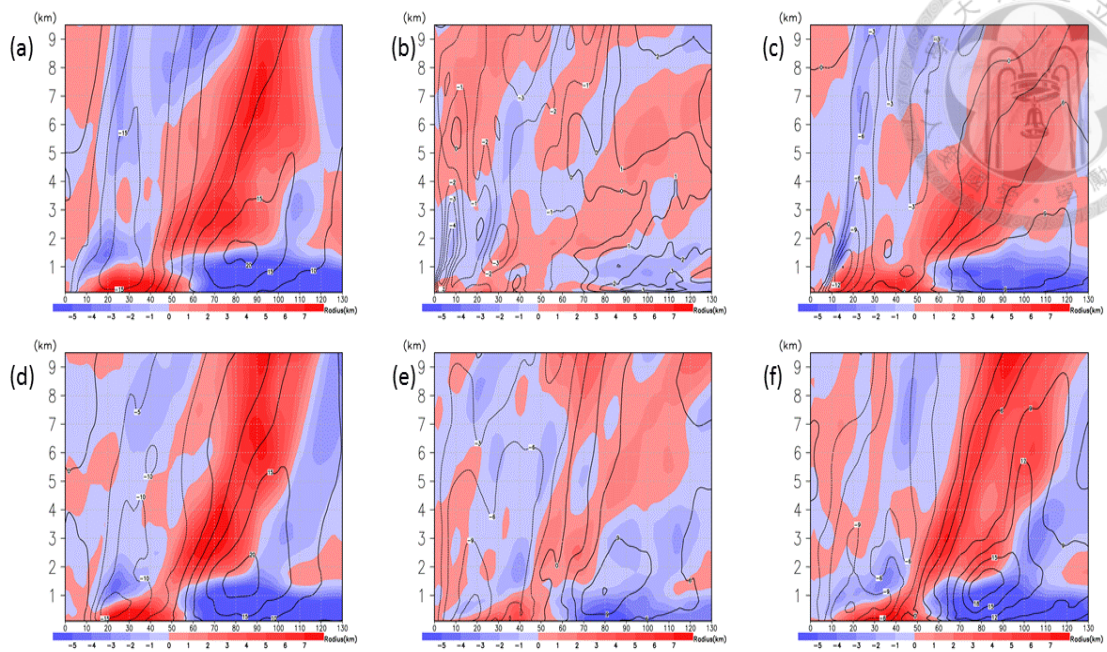


圖 4.28 30h 至 40h 之切向風變化量(等值線, 單位: ms^{-1})及徑向風變化量(等值線, 單位: ms^{-1})。 (a) CTL, (b) OSC-05, (c) OSC-15, (d) InC-10, (e) RiR-10, (f) RiR-15。

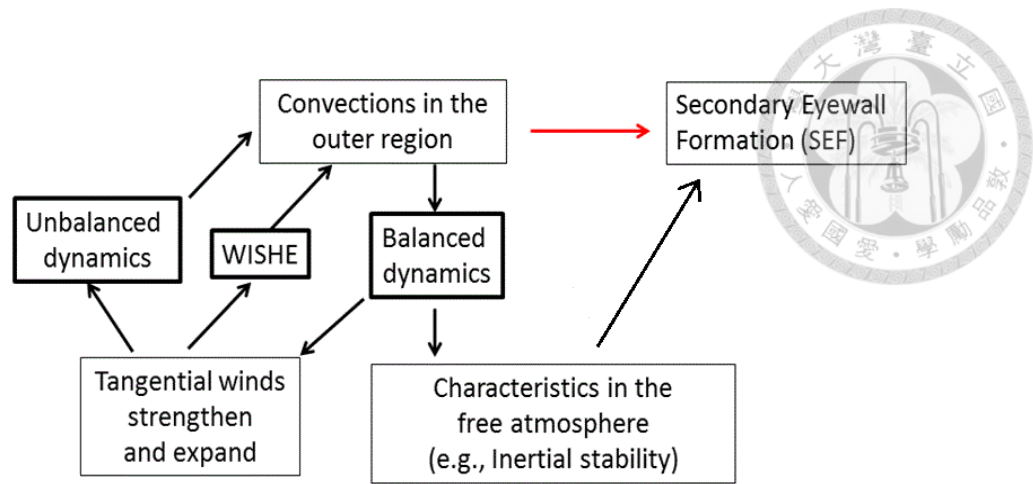
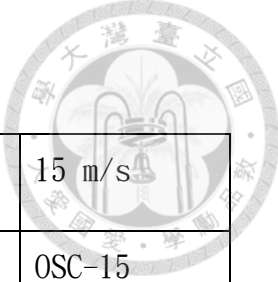


圖 5.1 平衡動力、非平衡動力，以及 WISHE 機制，與 SEF 之間關連的示意圖。

附表



	1 m/s	5 m/s	10 m/s	15 m/s
限制 50km 之外	OSC-01	OSC-05	OSC-10	OSC-15
限制 80km 之外	OBC-01	OBC-05	OBC-10	OBC-15
限制 50km 之內	InC-01	InC-05	InC-10	InC-15
限制 55-90km	RiR-01	RiR-05	RiR-10	RiR-15

表 2.1 敏感性實驗的實驗名稱及設計，共有四種，在不同處限制 WISHE 機制。風速上限值則代表 WISHE 機制計算時，被使用於計算熱通量的上限值。共有 16 組實驗。