

國立中央大學

大氣科學學系大氣物理碩士班  
碩士論文

臺灣環島雷達網多雷達風場合成方法測試  
——凡那比颱風(2010)個案分析

研究生：郭思辰

指導教授：陳台琦 博士

廖宇慶 博士

中華民國一〇二年六月



# 國立中央大學圖書館 碩博士論文電子檔授權書

(101 年 9 月最新修正版)

本授權書授權本人撰寫之碩/博士學位論文全文電子檔(不包含紙本、詳備註 1 說明), 在「國立中央大學圖書館博碩士論文系統」。(以下請擇一勾選)

同意 (立即開放)

同意 (請於西元 \_\_\_\_\_年\_\_\_\_月\_\_\_\_日開放)

不同意, 原因是: \_\_\_\_\_

在國家圖書館「臺灣博碩士論文知識加值系統」

同意 (立即開放)

同意 (請於西元 \_\_\_\_\_年\_\_\_\_月\_\_\_\_日開放)

不同意, 原因是: \_\_\_\_\_

以非專屬、無償授權國立中央大學、台灣聯合大學系統圖書館與國家圖書館, 基於推動「資源共享、互惠合作」之理念, 於回饋社會與學術研究之目的, 得不限地域、時間與次數, 以紙本、微縮、光碟及其它各種方法將上列論文收錄、重製、與利用, 並得將數位化之上列論文與論文電子檔以上載網路方式, 提供讀者基於個人非營利性質之線上檢索、閱覽、下載或列印。

研究生簽名: 郭思辰 學號: 100621023

論文名稱: 臺灣環島雷達網多雷達風場合成方法測試

——凡那比颱風(2010)個案分析

指導教授姓名: 陳台琦、廖宇慶

系所: 大氣科學系大氣物理  博士班  碩士班

備註:

1. 本授權書之授權範圍僅限電子檔, 紙本論文部分依著作權法第 15 條第 3 款之規定, 採推定原則即預設同意圖書館得公開上架閱覽, 如您有申請專利或投稿等考量, 不同意紙本上架陳列, 須另行加填聲明書, 詳細說明與紙本聲明書請至 <http://thesis.lib.ncu.edu.tw/> 下載。
2. 本授權書請填寫並親筆簽名後, 裝訂於各紙本論文封面後之次頁(全文電子檔內之授權書簽名, 可用電腦打字代替)。
3. 請加印一份單張之授權書, 填寫並親筆簽名後, 於辦理離校時交圖書館(以統一代轉寄給國家圖書館)。
4. 讀者基於個人非營利性質之線上檢索、閱覽、下載或列印上列論文, 應遵守著作權法規定。

國立中央大學碩士班研究生

論文指導教授推薦書

大氣科學系大氣物理碩士班 郭思辰 研究生

所提之論文

臺灣環島雷達網多雷達風場合成方法測試

——凡那比颱風(2010)個案分析

係由本人指導撰述，同意提付審查。

指導教授

陳子奇 廖宇慶 (簽章)

102 年 6 月 27 日

國立中央大學碩士班研究生  
論文口試委員審定書

大氣科學系大氣物理碩士班 郭思辰 研究生

所提之論文

臺灣環島雷達網多雷達風場合成方法測試

——凡那比颱風(2010)個案分析

經本委員會審議，認定符合碩士資格標準。

學位考試委員會召集人

委

員

魏志遠

陳台琦

廖宇慶

中華民國 102 年 7 月 16 日

## 摘要

颱風是臺灣重要水資源的來源之一，然而卻常常造成農業、經濟上的損失。雷達資料具有高時空解析度的優點，適合研究中小尺度的天氣系統。目前臺灣擁有十座都卜勒雷達，本研究使用臺灣環島雷達網，配合上Liou and Chang(2009)提出的多雷達風場合成方法來反演凡那比颱風(2010)風場結構，此方法具有許多的優點，最重要的是解決雷達基線上風場無法反演的問題，傳統風場合成需要給定的上下邊界垂直風場，此方法也可以視情況選擇，因此可以減少許多誤差。另外本研究可以彈性加入任意數目雷達同時做合成，在反演風場過程中可以得到渦度收支，且反演三維風場後可以直接做熱力場反演。到了Liou et al.(2012)加入Immersed Boundary Method (IBM)方法，使該風場合成程式又具備在複雜地形上合成能力以及不須轉換成地勢追隨座標的優點，減少座標轉換上的誤差。

Liou and Chang(2009)所發展出來的風場合成方法除了用到雷達資料，還加入了背景場來補足沒有雷達覆蓋地區的風場結構。本研究比較不同背景場對風場合成結果的影響，背景場的製作分為兩種，第一種是直接使用NCEP資料作為背景場，第二種為放入WRF(Weather Research and Forecast)模式執行十二小時後，以模式不同預報時間輸出風場投影到各雷達上，再與雷達觀測徑向風比較差異最小的模式預報時間風場做為背景場。此外針對有無雷達資料交界處的異常運動場作探討，分別討論改變damping層數、改變合成層數以及增加水平風場平滑係數，改善異常運動場的產生。

Liou and Chang (2009)提出的風場合成方法並不希望對背景場太敏感，因此只要大環流結構正確，不管使用上述任一種背景場，有雷達資料覆蓋地區結果都不會有太大差異，儘管原始背景場渦旋中心各不相同，加入雷達資料後，都會將渦旋中心重置搬移到相似的位置。因此雷達資料越密集，減少背景場主導會對風場合成有較好的結果表現。

# **Using Taiwan Radar Network to Test Multiple-Radar Wind Synthesis Method by Studying the Fanapi(2010)**

## **Abstract**

Typhoon is one of the most important water resources of Taiwan. Doppler radar is a good observation instrument for mesoscale weather system with its high spatial and temporal resolution. Presently Taiwan radar network have ten Doppler radars. In this research, the radar data sets from seven radars of Taiwan radar network during the Typhoon Fanapi (2010) land fall period were selected. The multiple-radar synthesis method which demonstrated by Liou and Chang (2009) was applied to retrieve the three dimension wind field of Taiwan and its vicinity area. The first advantage of this multiple-radar synthesis method is that the wind field can still be recovered well on the radar base line, second is that there is no need to prescribe the top or bottom boundary condition of vertical velocity. This variation method can also acquire the vorticity budget with no residual term, finally it has the flexibility to add any numbers of radar to synthesize the wind field. Liou et al. (2012) add IBM(Immersed Boundary Method) into the multiple-radar synthesis method, thus it has the ability to deal with complex terrain, another feature is that it has no need to change Cartesian grid into terrain-following coordinate system and reduce the error from interpolation.

There are two methods for making background field. First is using the NCEP FNL data directly. Second way is running the WRF model and selecting the forecast time period wind data which has the least difference between the projected radial wind field from model output and the observed radial wind. Both types background provided wrong locations of typhoon vortex, the Multiple-Radar Wind Synthesis method proved that with proper coverage of radar data, the more realistic vortex center can be relocated to more correct position.

## 致謝

兩年的碩士班生涯就要告一段落，這一路走來有太多人要感謝了。首先要謝謝我的指導老師，陳台琦老師及廖宇慶老師，謝謝老師們耐心的指導常粗心大意的我，總是給我許多的關心和鼓勵。謝謝陳老師從大專生專題研究計畫開始就一直帶著我做研究，從老師身上真的學到很多，而老師看圖說故事的能力，則是我想繼續努力學習的部分。謝謝廖老師陪我一起看程式，修程式，讓我對風場合成程式更為熟悉，也謝謝老師給予許多研究方法上的建議。另外謝謝魏志憲老師擔任我的口委，給了許多寶貴的建議，讓我可以做的更好。此外也要謝謝林沛練老師，在大學時期帶領我接觸雷達、認識雷達並喜歡上雷達，才能有現在的我。也謝謝所有系上的老師們：林松錦老師、黃清勇老師、楊明仁老師、曾仁佑老師、楊舒芝老師、王作台老師等等的指導，讓我獲得許多寶貴知識和經驗。充滿熱情的柯老師總帶給我滿滿的動力。

謝謝實驗室的各位，謝謝沛瑜帶著我學習新方法，讓我的研究能夠順利進行，謝謝豪大、老蔡、olan、少凡學長和鯨魚在雷達資料處理問題上給予許多的幫忙和建議，讓研究能更為順利，謝謝威廷幫我解決許多工作站方面的問題。也要謝謝玉霜學姐在大學時期幫我打好雷達資料處理的基礎，謝謝薇鈞學姐一直以來的鼓勵。另外謝謝邱俠、浩彥、伯謙的幫忙，最後謝謝總是一起討論程式、討論研究、談天說地的大柯，謝謝你們各位。

謝謝爸爸、媽媽和老弟，你們總是支持我、鼓勵我，並體諒我不能常回家，而每次回家都能有美味的佳餚享用，一切疲憊都消除了。謝謝定安的陪伴和鼓勵，給我許多動力讓我能夠堅持到最後，並且帶我出去走走散散心，加上許多的幫忙，減輕不少壓力，謝謝你體諒我的忙碌。謝謝家人們的鼓勵和支持。謝謝朱老師一直以來的關心和勉勵。

謝謝兔子、vindy、稚婷、珮瑜、好棒、塗翎的陪伴，讓我的中央生活充滿許多美好回憶，其中謝謝兔子總是和我分享許多好東西，vindy總是能點醒死腦筋的我。謝謝 rubber 當我的顧問，也謝謝三瓶、大夢、嫵儒、怡鈴、阿呆、湯包、澳客、盈文、前烜、阿月等其他同學，我們一起學習、一起吃喝玩樂。謝謝好室友馬馳的陪伴，還有一起享用美食無所不聊。

兩年說長不長，說短不短卻一晃眼就過去了，其中卻有太多的關卡要破解、太多情緒起伏要平滑，還好有各位的幫忙、支持和鼓勵，才有現在更為成長的我。研究所學習到的超乎我的想像，也讓我真正了解到並不是所有的事物都有標準答案，正是因為沒人知道答案，因此我們更要尋找方法去求解。相信研究所的磨練對未來的人生旅程會有所助益。

# 目錄

中文摘要 .....	i
英文摘要 .....	ii
致謝 .....	iii
目錄 .....	iv
圖目錄 .....	vi
表目錄 .....	xiii
第一章 緒論 .....	1
1-1 研究目的 .....	1
1-2 個案介紹 .....	2
1-3 前人研究 .....	3
1-4 論文架構 .....	6
第二章 資料來源與品管 .....	7
2-1 資料來源 .....	7
2-2 雷達資料品管 .....	8
2-2-1 都卜勒雷達資料品管 .....	8
2-2-2 雙偏極化都卜勒雷達資料品管 .....	9
第三章 研究方法 .....	11
3-1 風場合成方法介紹 .....	11
3-2 背景場製作 .....	14
3-2-1 NCEP 背景場 .....	15
3-2-2 模式輸出背景場 .....	15
3-3 多雷達風場合成處理程序 .....	16
第四章 NCEP 背景場合成結果 .....	17
4-1 0600UTC 背景場合成結果 .....	17
4-2 1200UTC 背景場合成結果 .....	18
4-3 0900UTC 背景場合成結果 .....	20
4-4 風場合成在地形上的表現 .....	20
4-5 不同個數雷達合成結果比較 .....	21
第五章 模式輸出背景場合成結果 .....	23
5-1 模式輸出背景場合成結果 .....	23
5-2 與 NCEP 背景場合成結果比較 .....	24



第六章	合成結果驗證與資料交接異常值測試.....	25
6-1	合成結果驗證.....	25
6-2	資料交接異常值測試.....	26
6-2-1	改變 damping 層數與省略背景場結果.....	26
6-2-2	不同垂直層數合成結果.....	26
6-2-3	改變水平風平滑係數測試.....	27
第七章	結論與未來展望.....	29
參考文獻	.....	31
附圖	.....	33
附表	.....	78

## 圖目錄

- 圖 1-1、氣象局風場合成方法，淺灰色圓形邊線是雷達觀測最大範圍，粗黑線則為合成風場範圍。圖片由氣象局張保亮博士提供。
- 圖 1-2、臺灣雷達網分布情形。圓形為氣象局所屬雷達，方形則為軍方所屬雷達。整個範圍為本研究風場合成的大小。
- 圖 1-3、凡那比颱風(2010)路徑圖，藍色為輕度颱風，綠色為中度颱風。
- 圖 1-4、氣象局合成回波時序圖。取自氣象局。色標如各圖中左上角所示，為回波強度。時間由左到右，由上到下分別為 9/18 0500UTC、1500UTC、2000UTC、2300UTC、9/19 0000UTC、0400UTC、0900UTC、2100UTC、9/20 1200UTC。
- 圖 2-1、五分山雷達 9 月 19 日 0850UTC 在  $0.5^\circ$  仰角的觀測結果。分別為回波(a)、風速(b)以及波譜寬(c)，各數值如右側色標所示。
- 圖 2-2、五分山雷達 9 月 19 日 0850UTC 在  $0.5^\circ$  仰角濾除海洋雜波後的結果。分別為回波(a)、風速(b)以及波譜寬(c)，各數值如右側色標所示。
- 圖 3-1、判定 ghost cell。黑曲線為地形，斜線黑點的網格是地形，X 代表流體區域，三角形即為 ghost cell。
- 圖 3-2、求取 ghost cell 值的方法。G 為 ghost cell，I 為鏡像點，O 為 G、I 連線中點位在地形上，X1、X2 為流體區域鄰近地形的數據，用來內插到 I。
- 圖 3-3、(a)為地勢追隨座標，(b)為卡式座標。
- 圖 3-4、(a)中綠色(氣象局雷達)、藍色(軍方雷達)、紅色(TEAM-R)圓圈代表本研究中七座雷達在凡那比(2010)中最大掃瞄範圍。陰影則代表 9/19 0846UTC 實際雷達覆蓋情形，紅色為一座雷達、黑色為兩座、綠色為三座、黃色為四座、藍色為五座覆蓋。(b)為 9/19 0900UTC 氣象局合成回波圖。
- 圖 3-5、模式三層巢狀網格設計。由外到內水平解析度分別為 45km、15km、5km。

圖 4-1、0600UTC 背景風場分布。分別為兩公里(a)、四公里(b)、八公里(c)的結果。風標長槓代表 10m/s，短槓代表 5m/s，陰影為風速，數值如圖右色標所示。

圖 4-2、0600UTC 背景場在 0846UTC 下的風場合成結果，分別為兩公里(a)、四公里(b)、八公里(c)的結果。陰影為風速，數值如圖右色標所示。(d)是 0846UTC 以 0600UTC 為背景場四公里高度所合成之風場與回波結果。陰影為回波，數值如圖右色標所示。各圖風標長槓代表 10m/s，短槓代表 5m/s。

圖 4-3、0600UTC 背景場在 0846UTC 的風場合成結果以流線表示，分別為兩公里(a)、四公里(b)、八公里(c)的結果。(d)是放大(a)紅框中區域的結果。黑線代表流線。陰影代表回波強度，數值如右側色標。紫色點為各雷達位置。

圖 4-4、0846UTC 雷達資料覆蓋情形，分別為兩公里(a)、四公里(b)、八公里(c)的結果。其中紅色為一座雷達覆蓋，黑色為兩座、綠色是三座，黃色四座，藍色則有五座雷達覆蓋。紫色點為各雷達位置。

圖 4-5、花蓮雷達在 0849UTC 所觀測風場內插到兩公里(a)及四公里(b)CAPPI 結果。陰影代表風速，數值對照右側色標。其中暖色系是吹離雷達，冷色系則吹向雷達。

圖 4-6、0846UTC，以 0600UTC 背景場合成的渦度場。分別為兩公里(a)、四公里(b)、八公里(c)的結果。風標長槓代表 10m/s，短槓代表 5m/s。陰影代表渦度，數值如右側色標，紅色為正渦度，綠色為負渦度。紫色點為各雷達位置。

圖 4-7、0846UTC，以 0600UTC 背景場合成的輻散場。分別為兩公里(a)、四公里(b)的結果。風標長槓代表 10m/s，短槓代表 5m/s。陰影代表輻合輻散，數值如右側色標，紅色為輻散，藍色為輻合。紫色點為各雷達位置。

圖 4-8、0846UTC，以 0600UTC 背景場合成的三公里高度垂直運動場。風標長槓代表 10m/s，短槓代表 5m/s。陰影代表垂直速度，數值如右側色標，紅

色為上升運動，藍色為下降運動。紫色點為各雷達位置。

圖 4-9、1200UTC 背景風場分布。分別為兩公里(a)、四公里(b)、八公里(c)的結果。風標長槓代表 10m/s，短槓代表 5m/s。陰影為風速，各數值如右側色標所示。

圖 4-10、1200UTC 背景場在 0846UTC 下的風場合成結果，分別為兩公里(a)、四公里(b)、八公里(c)的結果。其中風速以風標表示，長槓代表 10m/s，短槓代表 5m/s。陰影代表回波強度，數值如右側色標。紫色點為各雷達位置。

圖 4-11、1200UTC 背景場在 0846UTC 下的風場合成結果以流線表示，分別為兩公里(a)、四公里(b)、八公里(c)的結果。(d)是放大(a)紅框中區域的結果。黑線代表流線。陰影代表回波強度，數值如右側色標。紫色點為各雷達位置。

圖 4-12、0846UTC 以 1200UTC 背景場合成結果減去 0600UTC 背景場合成結果，分別為兩公里(a)、四公里(b)、八公里(c)的結果。箭頭代表風速，大小如圖下標示，以 30m/s 為單位。綠色陰影代表沒有雷達資料覆蓋區域。紫色點為各雷達位置。

圖 4-13、0846UTC，1200UTC 背景場合成的渦度場。分別為兩公里(a)、四公里(b)的結果。其中風速以風標表示，長槓代表 10m/s，短槓代表 5m/s。陰影代表渦度，數值如右側色標，紅色為正渦度，綠色為負渦度。紫色點為各雷達位置。

圖 4-14、0846UTC 以 1200UTC 背景場合成渦度減去 0600UTC 背景場合成渦度，分別為兩公里(a)、四公里(b)的結果。陰影代表渦度增減，數值如右側色標，紅色為增加，綠色為減少。紫色點為各雷達位置。

圖 4-15、0900UTC 背景風場分布。分別為兩公里(a)、四公里(b)、八公里(c)的結果。風標長槓代表 10m/s，短槓代表 5m/s。陰影為風速，各數值如右側色標所示。

圖 4-16、0900UTC 背景場在 0846UTC 下的風場合成結果，分別為兩公里(a)、四公里(b)、八公里(c)的結果。陰影為風速，數值如圖右色標所示。風標長槓代表 10m/s，短槓代表 5m/s。

圖 4-17、0846UTC 以 0900UTC 背景場合成結果減去 0600UTC 背景場合成結果，兩公里(a)、四公里(b)。以 0900UTC 背景場合成結果減去 1200UTC 背景場合成結果，兩公里(c)、四公里(d)。箭頭代表風速，大小如圖下標示，(a、b)為 30m/s 一單位，(c、d)為 10m/s 一單位。綠色陰影代表沒有雷達資料覆蓋區域。紫色點為各雷達位置。

圖 4-18、切東經 120.68°的垂直剖面，圖 4-10(A)線，北緯取 22.48°到 24.5°的回波(a)和輻合輻散(b)，圖左為南右為北。灰色陰影為地形，箭頭為垂直速度乘上五倍與南北向的風合成之風速，比例尺如圖右下所示，30m/s 為一單位。彩色陰影為回波(a)和輻散值(b)，數值如圖下色標所示。

圖 4-19、切東經 120.97°的垂直剖面，圖 4-10(B)線，北緯取 22.48°到 24.5°的回波(a)和輻合輻散(b)，圖左為南右為北。灰色陰影為地形，箭頭為垂直速度乘上五倍與南北向的風合成之風速，比例尺如圖右下所示，30m/s 為一單位。彩色陰影為回波(a)和輻散值(b)，數值如圖下色標所示。

圖 4-20、切北緯 22.79°的垂直剖面，圖 4-10(C)線，東經取 119.5°到 121.5°的回波(a)和輻合輻散(b)，圖左為西右為東。灰色陰影為地形，箭頭為垂直速度乘上五倍與東西向的風合成之風速，比例尺如圖右下所示，30m/s 為一單位。彩色陰影為回波(a)和輻散值(b)，數值如圖下色標所示。

圖 4-21、一公里高度不同個數雷達合成之風場結果與回波。分別為四座(a)、五座(b)及七座(c)。黑線為流線，陰影則為回波，數值大小如右圖色標所示。

圖 4-22、一公里高度上 0846UTC 以 1200UTC 背景場合成多了馬公資料(a)及多了清泉崗和 TEAM-R(b)的差異。箭頭代表風速，大小如圖下標示，(a)為 30m/s 一單位，(b)為 10m/s 一單位。綠色陰影代表沒有雷達資料覆蓋區域。紫色點為各雷達位置。

圖 4-23、四公里高度不同個數雷達合成之風場結果與回波。分別為四座(a)、五座(b)及七座(c)。黑線為流線，陰影則為回波，數值大小如右圖色標所示。

圖 4-24、四公里高度上 0846UTC 以 1200UTC 背景場合成多了馬公資料(a)及多了清泉崗和 TEAM-R(b)的差異。箭頭代表風速，大小如圖下標示，(a)為 30m/s 一單位，(b)為 10m/s 一單位。綠色陰影代表沒有雷達資料覆蓋區域。紫色點為各雷達位置。

圖 4-25、兩公里高度切 4-23 紅框範圍不同個數雷達合成之風場結果與回波。分別為四座(a)、五座(b)及七座(c)。黑線為流線，陰影則為回波，數值大小如右圖色標所示。

圖 4-26、四公里高度切 4-23 紅框範圍不同個數雷達合成之風場結果與回波。分別為四座(a)、五座(b)及七座(c)。黑線為流線，陰影則為回波，數值大小如右圖色標所示。

圖 5-1、各模式輸出結果投影到各雷達與徑向風比較的方均根差異。各長條代表不同模式輸出時間結果。數字代表時間，b 是第一種模式微物理設定，v 為第二種模式微物理設定。橫軸由左到右代表分別投影到七股、花蓮、墾丁、五分山、馬公、清泉崗、TEAM-R 以及整個合成範圍的風場方均根差異。縱軸則為方均根數值。

圖 5-2、模式 0800UTC 輸出結果所做出之背景場。分別為兩公里(a)、四公里(b)、八公里(c)的結果。其中風速以風標表示，長槓代表 10m/s，短槓代表 5m/s，陰影為風速，數值如右側所示。

圖 5-3、0800UTC 模式輸出背景場在 0846UTC 下的風場合成結果，分別為兩公里(a)、四公里(b)、八公里(c)的結果。其中風速以風標表示，長槓代表 10m/s，短槓代表 5m/s。陰影代表回波強度，數值如右側色標。紫色點為各雷達位置。

圖 5-4、0846UTC 以 1200UTC 背景場合成結果減去 0800UTC 模式輸出背景場合成結果，分別為兩公里(a)、四公里(b)、八公里(c)的結果。箭頭代表風速，

大小如圖下標示，以 30m/s 為單位。綠色陰影代表沒有雷達資料覆蓋區域。紫色點為各雷達位置。

圖 5-5、0846UTC，0800UTC 模式輸出背景場合成的渦度場。分別為兩公里(a)、四公里(b)的結果。其中風速以風標表示，長槓代表 10m/s，短槓代表 5m/s。陰影代表渦度，數值如右側色標，紅色為正渦度，綠色為負渦度。紫色點為各雷達位置。

圖 5-6、0846UTC 渦度場以 1200UTC 背景場合成減去 0800UTC 模式輸出背景場合成結果差異，分別為兩公里(a)、四公里(b)的結果。陰影代表渦度，數值如右側色標，紅色為增加，綠色為減少。紫色點為各雷達位置。

圖 5-7、四公里高度不同背景場合成之風場結果與回波。分別為 1200UTC 背景場(a)以及 0800UTC 模式輸出背景場(b)。黑線為流線，陰影則為回波，數值大小如右圖色標所示。

圖 5-8、四公里高度不同背景場合成之風場結果與回波，取圖 5-7 紅框範圍。分別為 1200UTC 背景場(a)以及 0800UTC 模式輸出背景場(b)。黑線為流線，陰影則為回波，數值大小如右圖色標所示。

圖 6-1、地面測站觀測的風(紅色風標)與各背景場合成結果(黑色風標)比較，背景場分別為 0600UTC(a)，1200UTC(b)、0900UTC(c)以及 0800UTC 模式輸出背景場(d)。其中風速以風標表示，長槓代表 10m/s，短槓代表 5m/s。綠色陰影為沒有雷達覆蓋地區。

圖 6-2、改變 damping 層數的十公里高度合成結果，(a、c)為水平速度與垂直速度均 damping 十層，(b、d)為水平速度五層，垂直速度三層。陰影的部分(a、b)為回波，(c、d)為垂直速度，數值對照右側色標。其中風速以風標表示，長槓代表 10m/s，短槓代表 5m/s。

圖 6-3、以 1200UTC 為背景場 0901UTC 垂直層到 15km 與垂直層到 10km 合成結果差異，分別為四公里(a)、八公里(b)的結果。箭頭代表風速，大小如圖下標示，以 30m/s 為單位。綠色陰影代表沒有雷達資料覆蓋區域。紫色

點為各雷達位置。

圖 6-4、以 1200UTC 為背景場 0901UTC 垂直層到 15km 與垂直層到 10km 合成結果渦度差異，分別為四公里(a)、八公里(b)的結果。陰影代表渦度，數值如右側色標，紅色為增加，藍色為減少。紫色點為各雷達位置。

圖 6-5、以 1200UTC 為背景場，拉普拉斯平滑項被調高 100 與原本設定之間風場差異，分別為兩公里(a)、四公里(b)的結果。箭頭代表風速，大小如圖下標示，一單位是 10m/s。綠色陰影代表沒有雷達資料覆蓋區域。紫色點為各雷達位置。

圖 6-6、以 1200UTC 為背景場，拉普拉斯平滑項被調高 100 與原本設定之間渦度差異，分別為兩公里(a)、四公里(b)的結果。陰影代表渦度場差異，各數值如圖右側色標，紅色為增加，綠色為減少。紫色點為各雷達位置。

圖 6-7、0846UTC，1200UTC 模式輸出背景場，平滑項水平風係數調高 100 倍合成的渦度場。分別為兩公里(a)、四公里(b)的結果。其中風速以風標表示，長槓代表 10m/s，短槓代表 5m/s。陰影代表渦度，數值如右側色標，紅色為正渦度，綠色為負渦度。紫色點為各雷達位置。

圖 6-8、0846UTC 以 1200UTC 為背景場，拉普拉斯平滑項被調高 100 與增加 damping 層數風場差異，分別為兩公里(a)、四公里(b)以及十公里(c)的結果。箭頭代表風速，大小如圖下標示，一單位是 10m/s。綠色陰影代表沒有雷達資料覆蓋區域。紫色點為各雷達位置。

圖 6-9、0846UTC 以 1200UTC 為背景場，拉普拉斯平滑項被調高 100 與增加 damping 層數垂直速度差異，分別為兩公里(a)、四公里(b)以及十公里(c)的結果。陰影代表垂直速度差異，紅色為增加，藍色為減少。紫色點為各雷達位置。



## 表目錄

表 2-1 七座雷達資料品質管控設定。

表 3-1 第一種模式微物理設定

表 3-2 第二種模式微物理設定

# 第一章 緒論

## 1-1 研究目的

對臺灣來說，颱風是個提供水資源相當重要的天氣現象，然而颱風侵臺時期卻也帶來許多重大災害，因此我們如果能對颱風有更進一步的了解，相信對於預報及防災都能有所助益。雷達是一個對於中尺度天氣系統有很好資料提供之觀測儀器，具有高時間、空間解析度，大約每七分半鐘能提供雷達周邊一百到三百多公里範圍的回波及風場資訊，至於雙偏極化雷達還可以提供偏極化參數，藉由這些資訊可以了解風場結構並推估降雨量，以及系統內部水象粒子分布情形。

風場合成的方法，氣象局採用雙雷達合成，也就是把臺灣六座雷達兩兩合成，合出的結果再彼此拼接起來得到整個臺灣的風場合成結果。圖 1-1 是氣象局的風場合成範圍，由氣象局張保亮博士提供。Liou and Chang(2009)提出多雷達風場合成方法，此方法具有許多傳統雷達風場合成所沒有的能力，其中最重要的是克服傳統雷達在雷達基線(radar base line)上無法合成準確風場的問題，另外垂直速度的上下邊界可以視情況給定，減少誤差，方法中以渦度收支平衡為價值函數之一項，在反演風場同時可得到渦度收支各項的場。此外可以較彈性的加入任意數目雷達同時做合成，反演出來的風場還可以直接做熱力反演。Liou et al.(2012)加入 Immersed Boundary Method(IBM)方法，使該風場合成程式又具備在複雜地形上合成能力以及不須轉換成地勢追隨座標的優點。

目前臺灣環島已有多座雷達，包括了四座氣象局雷達、三座軍方雷達、一座民航局的機場雷達、一座中央大學 C-POL 雷達，以及 2008 國科會計畫建造的 TEAM-R(Taiwan Experimental Atmospheric Mobil Radar)移動式雷達，一共有十座雷達。位置分布見圖 1-2。

本研究利用臺灣環島雷達網，配合上 Liou et al.(2012)的風場合成方法，研究颱風登陸期間的風場結構，在這裡選用了 2010 年侵臺的凡那比颱風，希望藉由

這些充裕的雷達資料以及最新的風場合成方法，可以得到較為完整、準確的颱風時期風場結構，也期待藉由這樣完整的合成風場結構能使我們對颱風與陸地交互作用下的風場有更深入的了解。

## 1-2 個案介紹

凡那比颱風於 2010 年 9 月 15 日於菲律賓東北方海面生成，往東北些微緩慢移動後轉北北西前進，並在 9 月 16 日 1200UTC 左右發展成為中度颱風，JTWC(Joint Typhoon Warning Center)則定義為 3 級颶風，在 9 月 17 日 1200UTC 附近轉為向西前進，接觸到臺灣地形後，大約是 9 月 18 日 1800UTC 左右轉往西南方移動，一直到 9 月 19 日 0040UTC 也就是臺灣的早上八點四十分在花蓮豐濱登陸，近中心最大風速一度達到 45m/s，最後在 9 月 19 日 1000UTC 左右從臺南附近進入臺灣海峽，9 月 20 日 0000UTC 左右登陸福建進入大陸，向西深入廣東省。見圖 1-3。

中央氣象局在 9 月 17 日晚上十一點半(1530UTC)發布海上警報，並於 9 月 18 日清晨五點三十分(9 月 17 日 2130UTC)發布陸上颱風警報，9 月 20 日下午兩點半(0630UTC)解除海上、陸上颱風警報。凡那比侵臺期間，為臺灣南部及東部地區帶來豪雨，臺南、高雄、屏東等地區發生淹水的情形。鐵、公路受阻，農損逾 45 億元。

觀察氣象局雷達合成回波圖在凡那比颱風侵臺期間的結果，在 9 月 18 日 0500UTC 可以看到部分的眼牆結構，東部的雷達像是花蓮雷達、綠島雷達有些觀測資料，但西半部雷達只有細碎的雜波。到了 1500UTC 時，外圍雨帶的回波增強，推測雨帶上對流有增加的情形。在 2000UTC 時，外圍雨帶開始掃到臺灣，西北邊的雷達像是五分山雷達、清泉崗雷達等也有些觀測資料，直到 2300UTC，全臺的雷達都能觀測到凡那比颱風的回波。颱風在 9 月 19 日 0000UTC 左右登陸臺灣，原本明顯的颱風眼結構消失，隨後回波強度也跟著減弱。在 0400UTC 時，北方的結構逐漸變的鬆散。一直到 0900UTC 有明顯的兩條結構完整強回波雨帶，

一條跨過高屏地區往臺灣海峽延伸，而另一條大致沿著臺東外海往南延伸。最後 1000UTC 附近凡那比從臺南離開臺灣，類似眼的結構再度出現，但較登陸前範圍來的大。到了 2100UTC 後，凡那比登陸福建。直到 9 月 20 日 1200UTC 全臺雷達幾乎得不到凡那比颱風的回波資訊。合成回波時序圖詳見圖 1-4。

本研究風場合成選用 9 月 19 日 0900UTC 左右的資料。主要是因為觀察凡那比颱風侵臺期間氣象局的雷達合成回波圖，發現在該時間點，環島七座雷達都能有觀測資料，並且在臺灣西南邊有強而明顯的兩帶結構，加上黃(2012)研究凡那比颱風(2010)在這個時期，大概 0600UTC~1200UTC，發現颱風眼過山後有重建的情形，因此希望藉由這個時間的風場合成了解多雷達風場合成的成果以及眼牆重建的風場結構。

### 1-3 前人研究

氣象雷達是個具有高度時間、空間解析度的觀測儀器，此外氣象雷達為了觀測雨滴，電磁波波長多在 3~10 公分左右，因此掃描範圍最遠可到三、四百公里，與中小尺度天氣系統的尺度相當，對於中小尺度天氣系統能有很好的資料提供。目前各國都在積極建造雷達網，Park and Lee(2009)利用韓國雷達網，一共有 18 座雷達，合成 Ewiniar 颱風(2006)以及勾狀回波兩個案的風場結構。所使用的合成程式為 NCAR(National Center for Atmospheric Research)所發展的 CEDRIC(Custom Editing and display of Reduced Information in Cartesian Space)。該研究所合成出來的風場多能與探空資料相近，證實透過韓國雷達網，能提供整個韓國高解析度的中小尺度降水系統三維風場結構。其他國家的雷達網以美國來說有 136 座，日本則有 20 座 C 波段雷達。歐洲國家一起組成歐洲氣象雷達網：OPERA(European Weather Radar Network)，擁有 160 座雷達，其中 110 座為都卜勒雷達，中國大陸則有 110 多座雷達，至於臺灣有十座雷達。以國土面積換算密度，臺灣雷達網的密度是最高的。因此我們更應該好好利用這樣高密度的雷達網資訊，得到更多天氣系統下的三維風場結構。

大氣中的三維風場結構是大家非常關心的資訊，因為颱風環流結構對颱風路徑以及強度預報有很大的關聯性，並對風雨預報有所助益。風場資訊我們除了可以取自地面測站的觀測以及探空釋放，資料最為豐富的還是雷達。早在 1969 年 Armijo 就提出使用多雷達觀測配合上連續方程求得三維風場結構。Ray et al.(1975) 應用 Armijo 所提出的方法，利用兩座都卜勒雷達資料，首先展示出龍捲風風暴中三維風場結構。Doviak and Ray(1976)和 Ray et al.(1978)隨後分析出雷達網的運動場誤差分布。之後大家嘗試減少因為垂直速度在上下邊界所造成的誤差累積。Brandes(1977)，Ray et al.(1980)，Ziegler et al.(1983)使用疊代方法求取風場，後面兩位使用到了變分的方法來疊代，其約束條件分別有垂直積分水平輻合輻散以及連續方程。Ray et al.(1980)發現向下積分連續方程的誤差會比向上積分來的小。

然而傳統的多雷達風場反演都需要上、下邊界條件，這裡假設上、下邊界的垂直風速為零，依據是上邊界為系統頂端，下邊界為地表。然而實際上在進行風場反演的過程時，我們沒辦法真正取到系統頂端與地表，而且雷達資料在這些地方資料也過少，因此使用這種假設下的反演結果其實存在不少誤差。因此 Gao et al.(1999,2004)提出雙雷達變分反演方法，他的方法對邊界條件不會太敏感。Mewes and Shapiro(2002)則利用渦度方程來修正邊界條件問題。Protat and Zawadzki(2000)發現風場反演時使用渦度方程可以得到更為準確的溫度以及壓力反演結果，使風場反演結果增加更多的產品。Liou and Chang(2009)也利用變分方法來進行多雷達風場合成，其所使用的約束條件集結了許多前人所使用的方程，包括了雷達徑向風場與反演風場間差異、連續方程、垂直渦度方程以及改進後的垂直速度上下邊界問題。其中最為重要的是在雷達基線上仍可以順利反演出風場結構。雖然 Chong and Bousquet(2001)的方法中也可以解析出基線上的風場，但是那時候的做法是使用低通濾波的二次微分來平滑基線附近風場。而 Liou and Chang(2009)則透過最小化一系列約束條件來求取雷達基線風場。

然而早期這些風場合成研究多是在沒有考慮地形的情況下執行。因此對於臺灣這種有著複雜地形的區域，合成結果必會有所差異。Georgis et al.(2000)利用機

載雷達及地基式雷達觀測通過複雜地形的降水系統。Chong and Cosma(2000)改進了 Bousquet and Chong(1998)所提出的 Multiple-Doppler Synthesis and Continuity Adjustment Technique(MUSCAT)的公式，使其不只反演出平面的風場結構，還可以做出地形上的風場反演。Liou et al.(2012)則加入了 Immersed Boundary Method(IBM)來處理複雜地形上的風場合成。IBM 最早在 1972 年由 Peskin 所提出，運用在計算流體動力的水流特性。Tseng and Ferziger(2003)使用了 ghost cell 區分各網格特性，計算流體通過圓柱障礙物後的流場特徵。Lundquist and Chow(2010)把 IBM 的方法與 WRF(Weather Research and Forecasting)做結合，使 WRF 模式可以在複雜地形下順利反演風場，另外，因為使用 IBM 方法來判斷網格特性，因此甚至是都市天際線這樣十分陡峭的地形 WRF 也可以順利模擬出當時的風場結構。

在颱風的部分，近年來有許多人研究颱風風場在複雜地形下的影響結果和效應，畢竟以西北太平洋這個颱風侵襲最嚴重的區域，其地形結構多屬複雜。Shun et al.(2003)利用都卜勒雷達研究香港國際機場周圍的風場結構，香港的地形在香港國際機場南邊成 U 型分布，許多天氣系統都會經過南面這個複雜地形後才會到國際機場，而飛機起降與氣流息息相關，如果無法準確掌握飛機起降時的氣流，很有可能釀成大災，因此氣流過山的運動情形非常重要。研究中發現氣流過山後因為地形會產生高速以及低速的風帶，而相鄰的高、低風速帶則會產生渦旋，對飛機起降有很大的影響。Yu and Cheng(2008)研究象神颱風(2000)通過時，北臺灣地形對其影響。北臺灣地形分別為三維立體狀大屯山以及二維狹長型南港山區的影響，研究中考慮了颱風外圍環流降雨以及真正地形影響的部分。發現山前有強烈上升運動會伴隨較強烈的地形降雨。黃(2012)同樣利用 Liou et al.(2012)所提出的風場合成方法來探討凡那比颱風(2010)通過臺灣時，七股雷達站附近的強回波帶風場結構，發現從 9 月 19 日 0600UTC 到 1200UTC 風向由北風、西北風逐漸轉往西風，最後則轉成南風，雨帶上回波逐漸彎曲，最後形成新的渦旋結構，將其歸為眼牆重建過程。

黃(2012)所使用的範圍是以七股雷達為中心，向西 40km、向東 61km、向南 60km、向北 41km，各邊長為 101km 之正方形區域，水平解析度為 1km，垂直解析度 0.5km，垂直由 0.5km 開始 30 層到 15km。使用七股、TEAM-R 兩座在合成範圍內的雷達以及墾丁、馬公兩座在合成範圍外的雷達資料進行風場合成。主要探討凡那比颱風眼牆重建時期動力結構。本研究繼續黃(2012)的研究進展到全臺灣的範圍，以臺灣為中心向四面各取 254km 進行風場合成，水平解析度為 2km，垂直解析度及垂直層數與黃(2012)設定相同。並且加入臺灣雷達網七座雷達資訊進行合成，分析擴大合成範圍以及增加合成雷達個數的風場結構，並測試此方法對於背景場的反應有何不同。

#### **1-4 論文架構**

第二章先介紹研究中所使用到的雷達資料，接著說明各雷達資料的品管處理方式，這裡分都卜勒雷達及雙偏極化都卜勒雷達來個別介紹。第三章介紹研究中所使用的多雷達風場合成方法及其優點，並說明 IBM 原理及使用方法。接著提出因為需要補足沒有雷達覆蓋地區的風場資訊，因此要製作背景場，並介紹製作方法。最後則是合成時資料處理程序及設定。第四章探討 NCEP 背景風場合成結果，討論不同 NCEP 時間資料當背景場的合成結果差異，並嘗試加入不同個數雷達進行合成結果比較，並展示 IBM 方法對地形上風場合成結果的貢獻。第五章討論模式背景場的合成結果，並與 NCEP 背景場結果比較。第六章與地面測站資料做比較，驗證合成風場的準確性，並針對雷達資料交接處的異常運動值做討論。最後第七章作總結並提出目前這個風場合成在大範圍時所存在的合成問題。

## 第二章 資料來源與品管

### 2-1 資料來源

目前臺灣擁有十座雷達，四座隸屬於氣象局的十公分 S 波段都卜勒雷達，分別為位在臺南七股海邊的七股雷達、屏東墾丁國家公園內的墾丁雷達、位在花蓮北濱的花蓮雷達以及臺北的五分山雷達。這四座雷達觀測的變數包括了雷達回波(DZ)、徑向風(VR)以及波譜寬(SW)，掃描仰角皆為九層，七股雷達、花蓮雷達、墾丁雷達分別為  $0.5^\circ$ 、 $1.4^\circ$ 、 $2.4^\circ$ 、 $3.4^\circ$ 、 $4.3^\circ$ 、 $6.0^\circ$ 、 $9.9^\circ$ 、 $14.6^\circ$ 、 $19.5^\circ$ ，五分山雷達中間五層仰角則換為  $1.5^\circ$ 、 $2.5^\circ$ 、 $3.4^\circ$ 、 $4.4^\circ$ 、 $6.1^\circ$ ，這四座雷達完成一個體積掃描所要花費的時間都是七分半鐘。折錯速度(Nyquist Velocity)七股雷達和墾丁雷達同為 21.2m/s，五分山雷達前七個仰角為 26.6m/s 最高兩層則改為 31m/s，花蓮雷達則高達 49.5m/s。

三座隸屬於軍方的五公分 C 波段雷達，一個是位於臺灣東部的綠島雷達，另外有兩座分別位於臺中的清泉崗雷達，以及澎湖的馬公雷達。這些軍方氣象雷達所觀測的變數除了與氣象局所屬雷達相同有回波、風速及波譜寬外，因為馬公雷達與清泉崗雷達有雙偏極化功能，因此他們還可以得到差異反射率(Zdr)、差異相位差( $\phi_{dp}$ )、比差異相位差( $k_{dp}$ )、相關係數( $\rho_{HV}$ )。這幾個偏極化參數分別可以探討雨滴大小、形狀、降水估計，甚至判斷雷達掃描的粒子類型，可以當作判斷是否為氣象回波的依據。綠島雷達每半小時一筆資料輸出，然而在 0846UTC 的合成時間附近沒有資料。馬公雷達與清泉崗雷達的折錯速度分別為 37.2m/s 以及 37.5m/s。掃描仰角皆為十層，馬公仰角包括： $0.0^\circ$ 、 $0.9^\circ$ 、 $1.9^\circ$ 、 $2.9^\circ$ 、 $3.8^\circ$ 、 $5.5^\circ$ 、 $9.4^\circ$ 、 $14.1^\circ$ 、 $19.0^\circ$ 、 $24.5^\circ$ ，清泉崗則為  $0.5^\circ$ 、 $1.4^\circ$ 、 $2.4^\circ$ 、 $3.4^\circ$ 、 $4.3^\circ$ 、 $6.0^\circ$ 、 $9.9^\circ$ 、 $14.6^\circ$ 、 $19.5^\circ$ 、 $25.0^\circ$ ，完成一個體積掃描皆約七分半鐘。

另外三座雷達分別為民航局的桃園機場雷達，是個五公分 C 波段雷達，也是全臺灣第一座都卜勒雷達，但是在凡那比颱風(2010)個案中，我們並未拿到機場雷達資料。另外一座也沒有資料的是中央大學科二頂樓雷達，是 C 波段的五公分



雷達，然而在凡那比颱風(2010)期間，因為發射機送修，也沒有觀測資料。最後一座雷達，也是臺灣第一座移動式雷達 TEAM-R 在 2008 年由國科會補助中央大學建造而成，是一座三公分 X 波段雷達，因為是移動式所以具有高機動性，可以補足地基式雷達所觀測不到的區域，在凡那比颱風侵臺期間，2010 年 9 月 18 日到 2010 年 9 月 21 日，TEAM-R 到高雄縣集來農場進行觀測。因為 TEAM-R 波長短盤面小，因此多了另一種掃描策略——RHI(Range-Height Indicator)，也就是雷達可以固定某一方位角由最低仰角一直向上掃到 90 度不斷重複，更重點式的掃描系統發生區域，並且直接得到垂直結構，然而因為發射的電磁波波長較短，接收範圍比較小，因此遇到系統的時候，相較於五公分、十公分的雷達，回波衰減情形較為嚴重，使用資料前需要做衰減修正及系統偏移修正。以普遍使用也就是前面八座雷達掃描方式的 PPI(Plan Position Indicator)掃描策略，仰角共有 11 層，分別為  $1.5^\circ$ 、 $2.5^\circ$ 、 $4.0^\circ$ 、 $6.0^\circ$ 、 $8.0^\circ$ 、 $10.0^\circ$ 、 $12.0^\circ$ 、 $15.0^\circ$ 、 $18.0^\circ$ 、 $21.0^\circ$ 、 $24.0^\circ$ ，做完一個體積掃描約需花費八分十二秒，所觀測的雷達參數與雙偏極化雷達相同，折錯速度則為 31.1m/s。各雷達分布位置如圖 1-2 所示。

## 2-2 雷達資料品質管

### 2-2-1 都卜勒雷達資料品質管

都卜勒雷達資料品質管控，最重要的一點是濾除非氣象資訊，雷達觀測原理是遇到障礙物時會把電磁波反射回去，這反射回來的能量再被雷達所接收，然而有時候電磁波所打到的不一定是降水粒子，也有可能是地形或者昆蟲，因此濾除這些雜波是非常重要的，以免造成我們做出錯誤的分析判斷。以都卜勒雷達來說，大部分使用的方法有兩種。第一，根據該座雷達附近的地形資料，直接把已知是地形區域所出現的回波濾除；第二則是利用地形上強回波弱風速原理濾除。一般來說，回波越強表示該區域的系統越強，因此內部的對流應該會越旺盛，然而雷達資料所顯示的風速卻很弱，因此可以推測是個較為固定像是地形之類的物體所產生的回波，本研究使用的門檻值是：風速小於 2m/s 回波卻達到 40dBZ。

其中五分山雷達在濾除非氣象資訊的時候還要再多一個步驟——濾除海洋雜波(Sea Clutter)。電磁波傳遞時包含了主波瓣(main lobe)和副波瓣(side lobe)，因為五分山雷達海拔位置較高，因此副波瓣累積的能量也相對其他雷達來的高，海浪的資訊也一併被接收了，所以我們看五分山的雷達資料時，常會發現在海岸線周圍有一圈很弱的回波，如圖 2-1(a)藍色區塊。通常該區域的風速也很低，也就是圖 2-1(b)黃綠色區塊，圖 2-1(c)則是波譜寬，波譜寬是個用來判斷擾動情形的數值，該地區擾動越大波譜寬的值也會越大，在圖 2-1 中低回波弱風速位置，波譜寬數值約 3 以下，是個很弱的區域，因此判斷此為海浪所造成的回波，屬於非氣象回波，篩選門檻設定以凡那比颱風 9 月 19 日 0846UTC 這個時間點，發現使用風速小於 15m/s，回波小於 20dBZ，而波譜寬小於 6 會濾除的比較乾淨。雖然理論上是低風速、弱回波，波譜寬小的區域，然而在實際情形門檻值設太嚴仍會有許多雜訊存在。濾除後結果見圖 2-2。

去除非氣象資訊後就是去風場折疊，都卜勒風場由相位資料反演，然而每座雷達因為脈衝發射頻率的差異，最大可觀測風速(折錯速度)不盡相同。當風速大於雷達最大可觀測風速時，回波相位值就會超出原來區間，發生風場折疊情況，因此直接使用這種資料會有誤判的情形出現。風場去折疊就是要把這些未過零值線而變號的數值修正回來。研究中使用本雷達實驗室所提出空間連續觀念進行去折疊。首先以零值線為基準，再把每層 PPI 劃分成許多小區域，從參考點開始，一格一格小區域做去折疊的判斷，當該區域有風場折疊的情形出現，則依鄰近參考點判斷該加上或減去兩倍的折錯速度，以此方式一塊一塊逐步向外修正到完成整個區域。然而仍會有些區域程式仍無法準確判斷或達成正確的去折疊，這時候會放入 SOLOII 進行人工手動去折疊。氣象局四座雷達的資料品管就依據這兩大過程進行處理。

### 2-2-2 雙偏極化都卜勒雷達資料品管

雙偏極化雷達因為有同極化相關係數( $\rho_{HV}$ )，而這個相關係數可以判斷目標物

種類，通常來說水象粒子的相關係數( $\rho_{HV}$ )大約是 0.9，然而在實際個案中並不一定是這麼嚴格的數據，經過多方測試，本研究使用門檻值有 0.7 和 0.8 兩種，當 $\rho_{HV}$ 小於門檻值時即視為非氣象資訊，在這裡擁有 $\rho_{HV}$ 之雙偏極化雷達像是清泉崗雷達、馬公雷達以及 TEAM-R 都使用這種處理方式。非氣象資訊濾除後一樣要進行雷達資料品質管最重要的一步——風場去折疊，這裡同都卜勒雷達使用空間連續方法來處理，處理流程與都卜勒雷達相同。

其中因為 TEAM-R 是個三公分段波段的雷達，波長較短，遇到系統的時候較容易衰減，因此在這裡我們需要進行回波衰減修正以及系統偏移修正，以得到較為真實的回波。通常影響雷達資料因素有兩個，第一為雷達硬體本身的系統偏移，第二則是電磁波傳遞過程中能量衰減情形，本研究參考黃(2012)的計算結果，衰減係數 $\alpha_H=0.3329$ ， $\alpha_{HV}=0.04499$ 。系統偏移修結果為： $Z_H^{bias}=-6.5$ ， $Z_{DR}^{bias}=-0.45$ 。

各雷達資料品質管處理方式詳見表 2-1。

## 第三章 研究方法

### 3-1 風場合成方法介紹

雷達風場的觀測利用都卜勒效應，因此只看得到與雷達所發射電磁波同向的頻率變化也就是風速。因此只靠單一座雷達我們較難準確反演出三維風場，因為與雷達徑向垂直的風是觀測不到的。然而現在如果使用兩座雷達，在兩座雷達的連線上，也就是所謂的基線，那裡的風也是不容易反演，因為在雷達基線上，兩雷達看到只是共同徑向的風，垂直雷達基線的風，完全沒有投影向量，因此無法求解。

蔡(2012)的研究中測試了 CEDRIC 所合成出來的風場與利用 Liou and Chang(2009)所提出之風場合成程式做出之結果比較，發現在兩座雷達基線上 CEDRIC 會無法計算或者出現錯誤，而利用變分的新風場合成程式則可以順利合成出該區域的風場結構。Liou and Chang(2009)所提出的風場合成方法優點包括了：(1)克服傳統雷達無法合成雷達基線上風場結構問題；(2)風場上下邊界可以自由視情況給定；(3)因為使用兩筆相近的雷達資料做合成，滿足渦度方程，並且可以計算渦度收支，不會有剩餘項；(4)合成出來的風場可以做熱力反演；(5)可以彈性加入任意數目雷達同時做合成。此方法使用的是變分修正來滿足一系列約束條件，做法是極小化價值函數  $J = \sum_{M=1}^7 J_M$ ，此函數包含了七個項目，以下逐一介紹。

第一項是各觀測位置所反演的風場，公式如(3-1)式，其中  $t$  代表時間， $i$  代表第幾座雷達， $(V_r)_{i,t}$  是第  $i$  座雷達在第  $t$  時間所觀測到的徑向風， $(u_t, v_t, w_t)$  代表在  $(x, y, z)$  位置下的三維風場， $W_{T,t}$  為終端落速， $(P_x^i, P_y^i, P_z^i)$  為第  $i$  座雷達所在位置， $r_i$  是所要合成風場的位置與第  $i$  座雷達的距離。 $\alpha_1$  為權重，值為 0 或 1，有雷達覆蓋權重為 1，沒雷達覆蓋則權重為 0。

$$J_1 = \sum_{t=1}^2 \sum_{x,y,z} \sum_{i=1}^N \alpha_1 (T_{1,i,t})^2. \quad (3-1a)$$

$$T_{1,i,t} = (V_r)_{i,t} - \frac{(x-P_x^i)}{r_i} u_t - \frac{(y-P_y^i)}{r_i} v_t - \frac{(z-P_z^i)}{r_i} (w_t - W_{T,t}). \quad (3-1b)$$

$$r_i = \sqrt{(x - P_x^i)^2 + (y - P_y^i)^2 + (z - P_z^i)^2}. \quad (3-1c)$$

第二項是反演出來的風場( $V_t = u_t \vec{i} + v_t \vec{j} + w_t \vec{k}$ )與背景風場( $V_{B,t}$ )的差異，背景風場的來源可以是探空資料或者是其他模式的預報結果，而背景風場對那些沒有雷達覆蓋的地區提供額外資訊，公式如(3-2)式，

$$J_2 = \sum_{t=1}^2 \sum_{x,y,z} \alpha_2 (V_t - V_{B,t})^2. \quad (3-2)$$

第三項為非彈性連續方程，如(3-3)式， $\rho_0$ 是空氣密度，只隨高度變化，

$$J_3 = \sum_{t=1}^2 \sum_{x,y,z} \alpha_3 \left[ \frac{\partial(\rho_0 u_t)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_0 v_t)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_0 w_t)}{\partial z} \right]^2. \quad (3-3)$$

第四項為垂直渦度方程，在此省略混和項及斜壓項， $f$ 是科氏參數，上標橫線代表兩時間平均，如(3-4)式所示，

$$J_4 = \sum_{x,y,z} \alpha_4 \left\{ \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \left[ u \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v \frac{\partial \zeta}{\partial y} + w \frac{\partial \zeta}{\partial z} + (\zeta + f) \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \left( \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] \right\}^2. \quad (3-4a)$$

其中

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = - \left[ u \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v \frac{\partial \zeta}{\partial y} + w \frac{\partial \zeta}{\partial z} + (\zeta + f) \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \left( \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right]. \quad (3-4b)$$

$$\zeta = \left( \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right). \quad (3-4c)$$

第五項為拉普拉斯平滑項，主要用以濾除過多的雜訊，如(3-5)式。

$$J_5 = \sum_{t=1}^2 \sum_{x,y,z} \alpha_5 [\nabla^2 (u_t + v_t + w_t)]^2. \quad (3-5a)$$

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}. \quad (3-5b)$$

第六、第七項是上下邊界的垂直速度，這兩項視情況選擇，也可以不使用這兩項約束條件。傳統上設定上下邊界垂直速度為0，該為假設下邊界為地表，上邊界是系統頂端，然而實際上並不一定如此，因此這裡有這樣的約束條件供選擇，主要以符合水平合成範圍平均最小為原則。

$$J_6 = \sum_{t=1}^2 \alpha_6 \left[ \frac{1}{N_x N_y} \sum_{x,y} (w_t)_{top} \right]^2. \quad (3-6a)$$

$$J_7 = \sum_{t=1}^2 \alpha_7 \left[ \frac{1}{N_x N_y} \sum_{x,y} (w_t)_{bottom} \right]^2. \quad (3-6b)$$

Liou et al. (2012)考慮地形，利用 IBM(Immersed Boundary Method)的方法，把網格分為流體區域、地形區域以及 ghost cell，ghost cell 即為被地形穿過的網格，如圖 3-1 所示。此方法是尋找最靠近地形但屬於流體區域的網格，將網格上的值內插到鏡像位置上，鏡像位置是與 ghost cell 連線且與地形垂直的直線上以相交處為中心與 ghost cell 到中心位置等距的位置，見圖 3-2，使用鏡像位置是為了避免權重為負值。在此假設風速在空間中的變化是線性，水平風速所使用的是 Nemann 邊界條件， $\frac{\partial u}{\partial n} = \frac{\partial v}{\partial n} = 0$ ，即法線上變化為 0，如公式(3-7)式，

$$\begin{cases} \varphi_0 = \varphi_I + \varphi_x X_0 + \varphi_y Y_0 + \varphi_z Z_0 \\ \varphi_1 = \varphi_I + \varphi_x X_1 + \varphi_y Y_1 + \varphi_z Z_1 \\ \varphi_2 = \varphi_I + \varphi_x X_2 + \varphi_y Y_2 + \varphi_z Z_2 \\ \vdots \\ \varphi_N = \varphi_I + \varphi_x X_N + \varphi_y Y_N + \varphi_z Z_N \end{cases} \quad (3-7a)$$

$\varphi$  為網格上的數值，下標 I 為鏡像位置，下標 0 則為邊界值，也就是圖 3-2 中的 I 點和 O 點，1~N 則為流體區域網格數值，即為圖 3-2 中 X 的數值， $(\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z)$  則是空間中 x、y、z 方向上的微分值。 $(X_0, Y_0, Z_0)$  是鏡像點到邊界 O 的距離， $(X_i, Y_i, Z_i, i=1 \sim N)$  則為鏡像點到各流體區域用來內差的點 X 的距離。用來計算的陣列表示則為：

$$A = \begin{bmatrix} (N+1) & \sum_{i=1}^N X_i & \sum_{i=1}^N Y_i & \sum_{i=1}^N Z_i \\ \sum_{i=1}^N X_i & \sum_{i=1}^N X_i X_i & \sum_{i=1}^N X_i Y_i & \sum_{i=1}^N X_i Z_i \\ \sum_{i=1}^N Y_i & \sum_{i=1}^N Y_i X_i & \sum_{i=1}^N Y_i Y_i & \sum_{i=1}^N Y_i Z_i \\ \sum_{i=1}^N Z_i & \sum_{i=1}^N Z_i X_i & \sum_{i=1}^N Z_i Y_i & \sum_{i=1}^N Z_i Z_i \end{bmatrix} X = \begin{bmatrix} \varphi_I \\ \varphi_x \\ \varphi_y \\ \varphi_z \end{bmatrix} B = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N \varphi_i \\ \sum_{i=1}^N \varphi_i X_i \\ \sum_{i=1}^N \varphi_i Y_i \\ \sum_{i=1}^N \varphi_i Z_i \end{bmatrix} \quad (3-7b)$$

未知數為  $\varphi_I$ ，因此要解  $X=A^{-1}B$ ，最後利用  $\varphi_G = 2\varphi_0 - \varphi_I$  即可得 ghost cell 上的數值，因為 Liou et al.(2012) 水平風速(u,v)所使用的是 Nemann 邊界條件， $\frac{\partial u}{\partial n} = \frac{\partial v}{\partial n} = 0$ ，因此  $\varphi_G = -\varphi_I$

垂直風速則使用 Dirichlet 邊界條件，如公式(3-8)式。

$$\begin{cases} \frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0 \cdot \varphi_I + \varphi_x \hat{n}_x + \varphi_y \hat{n}_y + \varphi_z \hat{n}_z \\ \varphi_1 = \varphi_I + \varphi_x X_1 + \varphi_y Y_1 + \varphi_z Z_1 \\ \varphi_2 = \varphi_I + \varphi_x X_2 + \varphi_y Y_2 + \varphi_z Z_2 \\ \vdots \\ \varphi_N = \varphi_I + \varphi_x X_N + \varphi_y Y_N + \varphi_z Z_N \end{cases} \quad (3-8a)$$

各變數所代表的同公式(3-7)，其中 $(\hat{n}_x, \hat{n}_y, \hat{n}_z)$ 為垂直邊界的單位向量， $\frac{\partial \varphi}{\partial n}$ 為 $\varphi$ 在邊界上的法向微分，用陣列表示則為：

$$A = \begin{bmatrix} N & \sum_{i=1}^N X_i & \sum_{i=1}^N Y_i & \sum_{i=1}^N Z_i \\ \sum_{i=1}^N X_i \hat{n}_x \hat{n}_x & \sum_{i=1}^N X_i X_i \hat{n}_x \hat{n}_y & \sum_{i=1}^N X_i Y_i \hat{n}_x \hat{n}_z & \sum_{i=1}^N X_i Z_i \\ \sum_{i=1}^N Y_i \hat{n}_y \hat{n}_x & \sum_{i=1}^N Y_i X_i \hat{n}_y \hat{n}_y & \sum_{i=1}^N Y_i Y_i \hat{n}_y \hat{n}_z & \sum_{i=1}^N Y_i Z_i \\ \sum_{i=1}^N Z_i \hat{n}_z \hat{n}_x & \sum_{i=1}^N Z_i X_i \hat{n}_z \hat{n}_y & \sum_{i=1}^N Z_i Y_i \hat{n}_z \hat{n}_z & \sum_{i=1}^N Z_i Z_i \end{bmatrix}$$

$$X = \begin{bmatrix} \varphi_I \\ \varphi_x \\ \varphi_y \\ \varphi_z \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N \varphi_i \\ \sum_{i=1}^N \varphi_i X_i \\ \sum_{i=1}^N \varphi_i Y_i \\ \sum_{i=1}^N \varphi_i Z_i \end{bmatrix} \quad (3-8b)$$

最後利用 $\varphi_G = 2\varphi_0 - \varphi_I$ 即可得 ghost cell 上的數值，這裡使用 Dirichlet 邊界條件，

研究中以水平風場隨地表起伏造成的垂直速度為下邊界條件，即為 $w = \frac{\partial h}{\partial x} u +$

$\frac{\partial h}{\partial y} v$ 。

使用 IBM 的方法不用轉換到地勢追隨座標，圖 3-3，因此可以處理較大斜率的複雜地形，對臺灣這種複雜地形會是一個很好的方法。

## 3-2 背景場製作

進行風場合成時，首先有了雷達觀測資料，另外還需要背景場來補足雷達資料缺少的地區。圖 3-4(a)的圓圈代表在凡那比颱風(2010)個案中，七座雷達所使用的掃描策略可以達到最大範圍，然而圖中陰影代表四公里高度上，9月19日

0846UTC 實際雷達資料覆蓋情形，這是該時間下雷達資料覆蓋率最高的高度。對照圖 3-4(b)的 9 月 19 日 0900UTC 之氣象局合成回波圖，除了沒有系統因此沒有回波的區域外，在地形區域有的地方也沒有資料。儘管雷達可以掃描的範圍很大，實際雷達有資料的區域相對較少。在 Liou and Chang(2009)的風場合成方法中，就需要背景場來補足這些缺乏雷達資料的區域，以合成出一完整範圍的風場。本研究使用兩種方法製作背景場，以下逐一介紹。

### 3-2-1 NCEP 背景場

這裡使用的資料是 NCEP FNL 再分析資料，資料水平解析度是  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ ，垂直有 27 層。首先讓模式跑十分鐘，做出該時間點的資料，然而再分析資料每六小時一筆，這裡使用了 0600UTC 以及 1200UTC 的資料製作背景場。另外嘗試把 0600UTC 以及 1200UTC 的背景場作時間差比例內插到 0900UTC，因為 0900UTC 與 0600UTC 及 1200UTC 時間差距相等，因此兩者權重各為 1/2。有了模式的輸出結果後，內插到每三十公里一個格點上，當做各個等距之虛擬探空，加入地面測站的觀測結果，最後經過客觀分析把資料計算成為背景場。另外再用 WRF 模式的輸出製作地形檔，這樣合成前的資料準備就算完成。

### 3-2-2 模式輸出背景場

第二種背景場製作一樣使用 NCEP 再分析資料，然而製作過程中把資料放入 WRF 模式中進行預報，本模式設定使用三層巢狀網格。為了解雷達資料能對模式做多少修正，因此這裡模式的解析度配合氣象局作業上的解析度設定為五公里，只給一個尺度較大較平滑的資料，細節交給之後合成方法中雷達資料補足，因此網格解析度由外而內分別為 45 公里、15 公里以及 5 公里如圖 3-5，模式設定及各參數化設定見表 3-1、表 3-2。模式初始資料使用 9 月 19 日 0000UTC 的資料讓模式預報 12 小時，對颱風這種中尺度天氣系統，前六小時的資料還不能使用，這時候模式仍在進行調整，因此把 0700UTC 到 1200UTC 的模式輸出風場投影到各



座雷達上，再把投影風場與該座雷達實際觀測到的風場做空間相關係數以及方均根誤差比較，選擇方均根誤差差異最小的那個模式時間當作新的背景場放入。

因為模式的解析度為五公里，然而風場合成的解析度為兩公里，因此模式輸出結果還需要先內插回兩公里解析度才可以當作新的背景場。在這個背景場下的地形檔製作與 NCEP 背景場相同。

### 3-3 多雷達風場合成處理程序

本研究為了研究環島雷達，因此針對臺灣中心：東經 121.025°，北緯 23.6°，向外四面各延伸 254 公里，這樣的範圍選擇是為了把所有雷達及其大致掃描結果包入，其中雷達資料都由本雷達實驗室所發展的 RAKIT(Radar Kit)做雷達資料品管及內插處理。合成的水平解析度與雷達資料內插解析度相同為 2 公里，垂直解析度為 0.5 公里，由 0.5 公里開始一直到 15 公里，共 30 層，合成範圍見圖 1-2。

首先取所要合成時間相近的兩筆雷達資料，也就是相鄰兩組體積掃描資料，其中因為各雷達開始掃描時間及策略不同，因此這裡只取最為相近的時間來處理，本研究使用 0846UTC 以及 0854UTC 左右的兩筆資料進行合成，接著把雷達資料經過品管處理(參考 2-2 節)及內插到各水平面上。有了雷達資料、背景場資料及地形檔後，就可以放入多雷達風場合成程式中，其中第二項背景風場權重為 0.1，第三項非彈性連續方程權重為  $10^8$ ，而拉普拉斯平滑項水平方向權重為  $10^{11}$ ，垂直方向權重則為  $10^{12}$ ，以及垂直渦度方程權重設為  $10^{13}$ 。

合成出來的風場，會投影到各座雷達上與其徑向風做方均根誤差(rmse)以及空間相關係數(SCC)計算，公式表示如(3-9)、(3-10)式，

$$\text{rmse} = \sqrt{\frac{\sum(A_r - A_t)^2}{N}} \quad (3-9)$$

$$\text{SCC} = \frac{\sum(A_r - \bar{A}_r)(A_t - \bar{A}_t)}{\sqrt{(\sum(A_r - \bar{A}_r)^2)(\sum(A_t - \bar{A}_t)^2)}} \quad (3-10)$$

其中下標 r 代表反演數值，下標 t 則為實際數值，A 為任意變數，N 則為計算時所用到的網格數。

## 第四章 NCEP 背景場合成結果

### 4-1 0600UTC 背景場合成結果

圖 4-1 為 0600UTC 兩公里、四公里、八公里的背景場，不管那個高度渦旋中心都在花東外海。兩公里和四公里高度上渦旋中心在東經  $122^\circ$ ，北緯  $22.5^\circ$  到  $23.5^\circ$  附近，渦旋中心隨著高度增加有往南偏移的情形，並且結構由橢圓逐漸變圓，圖 4-1(a、b)，八公里高度上的渦旋中心在北緯  $22.75^\circ$  附近，圖 4-1(c)。各層渦旋中心風速偏弱，大約 5 到 10m/s，風速向外逐漸加大，外圍環流風速可達到 20 到 25m/s。

圖 4-2 是加入 0846UTC 雷達資料後的風場合成結果，渦旋中心由原本的花東外海移到大約是雲林、嘉義地區的位置，大約是東經  $120.6^\circ$ ，北緯隨高度由  $23.25^\circ$  移到  $23^\circ$  附近，東西方向上位移了 120 公里左右。隨著高度增加，渦旋中心往東南傾斜到山區。風速一樣隨著半徑增加而加強，然而除了東北邊保留原本背景風場外，有雷達資料的部分，風向風速都有修正。看到四公里高度合成結果，達到 30m/s 的強風主要出現在台南高雄外海以及台東外海兩主要回波帶上，在五分山區域也有強風出現的情形，對照圖 4-2(d)。

從兩公里的流線場，如圖 4-3(a)，可以發現到，渦旋中心在東經  $120.4^\circ$ ，北緯  $23.25^\circ$  附近，然而在相近經度下北緯  $22.75^\circ$  還有另一個渦旋系統，圖 4-3(d)，由於圖中東北角處並無雷達資料，這樣的風場資訊是由背景風場與雷達資料共同合成出來，目前無法確定是否正確。在海岸線附近，即東經  $120.2^\circ$ ，北緯  $23.1^\circ$  到  $23.5^\circ$  的位置，可以看到風場輻合的情形，與回波 35dBZ 以上的對流區域吻合，發生原因有待探討。由以上發現儘管背景場的渦旋中心與颱風實際位置不符，加入雷達資料後即能修正回到與颱風路徑較為接近的位置上，有渦旋結構重置現象。看到八公里高度的結果，圖 4-3(c)，儘管在這個高度上最多的雷達覆蓋數是五座雷達，圖 4-4(c)，但是高層雷達資料分布過於零碎，容易有比較不連續的風場出現。

另外注意到兩公里高度的合成結果，圖 4-2(a)，可以看到在花蓮雷達覆蓋地區，合成出來的風場不太連續，在花蓮雷達北邊，風場輻射狀由花蓮雷達站吹出，南側則為輻射狀吹入，由流線場來看，圖 4-3(a)會發現流線在花蓮雷達站附近內凹。這樣不連續的狀況是背景場所造成，因為花蓮雷達站的位置大概是背景場渦旋中心的北側，因此背景場提供的是東北風的分量。然而花蓮雷達實際觀測到的卻是南風分量，圖 4-5，這兩個近乎對立的風向在合成疊代過程中，就出現不連續風場，由圖 4-2(a)風速也可以明顯看出背景場資訊在雷達資料空洞區被保留的現象。

圖 4-6 是渦度場分布，在主要雨帶上，大概高屏外海——東經  $119^{\circ}$ 到  $120.25^{\circ}$ 附近，北緯  $22.5^{\circ}$ 到  $23^{\circ}$ 之間，由底層到高層都是正渦度主導。然而在兩公里，也就是圖 4-6(a)，看到正渦度出現的地方除了主要雨帶上，花蓮沿海以及五分山和馬公北方，這三處各自雷達資料交接處也有正渦度出現，到了四公里高度花蓮沿海的渦度值有降下來的現象，見圖 4-6(b)，到八公里則幾乎沒有這樣正渦度出現，圖 4-6(c)，因為這時候花蓮地區的雷達資料覆蓋率增加，風場結構也較為連續，如圖 4-4(b)。判斷這些出現在馬公雷達、花蓮雷達資料交接處的渦度為異常，是對照圖 3-4(b)氣象局合成回波圖，在這些渦度偏大的區域，並沒有特別強的回波，因此不該有這樣大的渦度出現，因此認定其為異常渦度。然而五分山雷達觀測到的系統是兩狹長西北向東南的強回波，因此較難判定是系統本身強渦度抑或是有無雷達資料交接所產生。

輻合輻散場在主要雨帶，高屏外海東經  $118.5^{\circ}$ ~ $120.5^{\circ}$ ，北緯  $22.5^{\circ}$ ~ $23^{\circ}$ 之間，一到兩公里以輻合為主，而三公里半到六公里則以輻散為主，見圖 4-7。對應到垂直速度，圖 4-8，可以看到在一公里到六公里之間有上升運動出現，其中最大值出現在三公里高度上，速度達到  $6\text{m/s}$ 。在運動場結構上是很一致的。

## 4-2 1200UTC 背景場合成結果

圖 4-9 是 1200UTC 背景場，這時候渦旋中心出現在澎湖東南外海，大約東經

119.75°附近，緯度隨著高度由 23.5°南傾到 23°。渦旋中心隨著高度同樣有南偏且結構變圓的現象，到了八公里卻變成東西向的扁橢圓。與 0600UTC 背景場相同，各高度上中心風速偏低，大約只有 5m/s，風速一直向外為增加到 20m/s 左右。

看到兩公里高度合成結果，圖 4-10(a)及圖 4-11(a)，渦旋中心由原本背景場的澎湖東南外海，移到大約東經 120.6°北緯 22.75°附近，與 0600UTC 背景合成風場第二個渦旋位置相近，而且沒有 0600UTC 為背景之合成結果北邊的那個渦旋存在，海岸邊的輻合所造成的對流同樣可以看見，圖 4-11(d)，對照圖 4-4(a)的雷達覆蓋分布，位在 23.25°附近的渦旋是在雷達資料交接帶，因此 0600UTC 中多出來的渦旋是背景風場主導所引起，因而造成這兩個背景場所合成出來的風場結構有所差異。另外比較花東外海的兩公里風場結構在 1200UTC 比 0600UTC 來的連續流暢，由圖 4-12(a)可以看到在東部有雷達資料覆蓋的地區看到風場差異。至於西部主要雨帶區域，合成風場結果並沒有太大差異，因為這個地區幾乎是兩到三座以上雷達覆蓋的區域，圖 4-4，因此背景場對主雨帶的結果沒有明顯影響。如果看到四公里的合成差異，在 1200UTC 的結果是把沒有雷達覆蓋地區，原本在 0600UTC 中向東偏的結構拉回來。由此可以發現背景場對沒有雷達覆蓋地區影響很大。

接著看到合成出來的風場投影回各座雷達上，與各雷達所觀測到的徑向風做比較。以相對誤差來討論，風速差異在 0.8m/s 到 2.3m/s 之間，差異最小的為花蓮雷達，差異最大的是 TEAM-R。至於空間相關係數(SCC)則介在 0.91 到 0.99 之間，相關性最好的是墾丁雷達，相關性相對較低的為 TEAM-R。這樣的分布情形可以發現：外圍環流的風場反演後差異比較小，而 TEAM-R 比較接近渦旋中心，提供比較細微封場資訊，因此容易有比較大的差異出現。

比較渦度場的部分，圖 4-13，主要雨帶上同樣以正渦度為主，馬公北邊一樣有資料交接帶上的不正確渦度出現，但只有在一到四公里高度上有這樣的現象，相較 0600UTC 的合成結果有所改善，見圖 4-14。五分山地區的渦度較 0600UTC 背景場下的數值來的小，比較圖 4-14(b)，兩者有零碎的正負差異，推測這地區仍

是有雷達資料交接問題，才使的兩個不同背景場所做出來的結果有明顯差值。

### 4-3 0900UTC 背景場合成結果

前面兩節討論 0600UTC 以及 1200UTC 的背景場以及合成結果，然而 0600UTC 背景場的渦旋與最佳路徑定義出的渦旋中心偏移太大，使得許多不連續的風場出現。使用 1200UTC 渦旋中心稍微偏西，因此這裡嘗試把 0600UTC 以及 1200UTC 兩背景場資料進行時間差的比例內差到 0900UTC，一個比較接近合成時間的背景場。

圖 4-15 是 0900UTC 的背景風場。結構與 1200UTC 背景風場較為接近，以四公里高度討論，渦旋中心位置在東經  $120.4^{\circ}$ ，北緯  $23.25^{\circ}$ ，結構偏扁橢圓，風速隨半徑增加一樣有增強的情形。看到整層的渦旋中心，同樣會有南偏的情形出現。

圖 4-16 是以 0900UTC 為背景場的合成結果，在有雷達資料覆蓋的地區，風向風速都有被修改的情形。比照圖 4-10，兩公里及四公里高度的強風速出現位置與強回波位置吻合。比較 0600UTC 和 1200UTC 各別和 0900UTC 背景場所做出來的合成結果差異，見圖 4-17，可以看到 0600UTC 與 0900UTC 為背景場的合成結果差異較大，最大風速差可達  $25\text{m/s}$ ，且差異最大的位置出現在東部，同樣為渦旋中心不同所造成的差異。比較 0900UTC 和 1200UTC 為背景場的合成結果，不管兩公里或四公里，風場差異位置與 0600UTC 與 0900UTC 的差異位置相似，都是在東部地區，但是數值小了三倍。其中西半部地區，不管那種背景場之間都沒有明顯差異。

### 4-4 風場合成在地形上的表現

本研究考慮了地形，並且運用了 IBM 的方法來處理地形的部分，本節將討論地形附近的運動情形。這裡切東經  $120.68^{\circ}$  也就是圖 4-10 的(A)線，圖左到右是南到北，選這個剖面主要希望看渦旋外圍通過地形時風場特徵。由圖 4-18 可以看到，

風場順著地形向北吹。對照陰影看到山前北緯  $22.9^{\circ}$  附近有強回波出現，而且底層輻合高層輻散，而有山前爬坡的結果，風速大約有 20 到 30m/s 左右，然而到了山後，也就是北邊的山區，回波只有 25dBZ 左右，輻合輻散情形較弱，風速降到大約 10m/s 左右。

再來看到更為陡峭的地形，這裡切北緯  $120.97^{\circ}$ ，即圖 4-10(B)線，圖 4-19(a) 中北緯  $23.4^{\circ}$  是個很高聳陡峭的地形，高度約 3.8 公里，附近的回波值約為 25dBZ 左右，由風場可以看到氣流順著地形在山前爬坡山後下降，與圖 4-19(b) 的輻合輻散一致。此結果證實 IBM 在此風場合成方法中，可以順利合成出地形上的風場且符合運動場特性。

前面討論的都是南北向的剖面，現在看到東西向剖面，切圖 4-10(C)線，北緯  $22.79^{\circ}$  的位置，並探討主要雨帶上的垂直結構。由圖 4-20(a)，在山前東經  $119.8^{\circ}$  到  $120^{\circ}$  之間有一個強對流胞，回波值高達 45dBZ，在強回波的東側，此處為雨帶北緣，在兩公里高度，北風與西北風輻合處，有上升運動。強回波到地形之間，大概在東經  $120.4^{\circ}$ ，是個低層輻散高層輻合的運動結構，對應到下降運動。最後在地形頂端，也就是東經  $120.9^{\circ}$  的位置，又是個爬坡的風場結構，地形附近的風場也可以合理合成出來，展現出 IBM 方法的特性。

## 4-5 不同個數雷達合成結果比較

接著探討不同個數雷達合成結果，想了解雷達資料的多寡對合成結果會有什麼影響。比較 0600UTC 和 1200UTC 背景場的結果，1200UTC 的合成風場較連續，而且運動場上不合理的值也比較少，因此這裡以 1200UTC 為背景場討論不同雷達個數合成結果。先看到一公里高度雷達資料還很少時的結果，如圖 4-21。四座雷達與五座雷達的差異在有無馬公雷達資料，觀察主雨帶的部分，可以看到在四座雷達時，出了雷達資料覆蓋的地方，也就是圖中沒有回波的區域，風向風速馬上轉為背景場，因為 1200UTC 的背景場渦旋中心已經在臺灣西側，因此背景風場在主雨帶的位置也是以西北風為主，沒有太不連續的風出現，不過四座雷達的

環流範圍比較大，尚保留背景場的特性。由圖 4-22(a)可以清楚看出，多了馬公雷達，也就是五座雷達合成與四座雷達合成差異，主要出現在馬公資料覆蓋地區，而五座雷達與七座雷達的差異，也就是多了清泉崗以及 TEAM-R 的資料，仍會有細微的不同，但差異比較不明顯，圖 4-22(b)。

看到四公里的合成結果，圖 4-23，也是雷達覆蓋率最高的一層，不管是幾座雷達合成結果，渦旋中心都有重置的情形，也就是合成後的渦旋中心並不會被背景場或加入雷達個數影響，都會回到與颱風路徑相近的區域。看到圖 4-24(a)，五座雷達與四座雷達差異一樣在馬公資料覆蓋地區，差異比一公里來的小，而圖 4-24(b)則會發現加入清泉崗和 TEAM-R 會有些微風場差異，大整體來說有雷達資料的地區幾乎沒差異。

再來把分析的範圍縮小比較，這裡取東經  $119.79^{\circ}\sim 120.63^{\circ}$ ，北緯  $22.6^{\circ}\sim 23.52^{\circ}$ ，為了方便看結構用流線場表示，在主渦旋的部分，兩公里的時候，隨著加入的雷達個數增加，渦旋中心有向東向南移動的情形，如圖 4-25，到了四公里高度則稍微偏北，一樣有向東移動的現象，圖 4-26。由以上可以發現，多加入雷達資料可以多補足一些細微的結構，但有兩座以上雷達覆蓋的地區，風場結構大致確定。

## 第五章 模式輸出背景場合成結果

### 5-1 模式輸出背景場合成結果

第四章使用 NCEP 再分析資料直接製作背景場，NCEP 資料每六小時一筆，因此我們無法取得與實際合成時間相似之風場結構，除非進行背景風場內差，由上一章的討論，加入雷達資料合成後，不管是什麼背景場，實際渦旋中心都能夠透過合成雷達資料回到與最佳路徑相近位置，問題還是出在有無雷達資料交界處的風場容易不連續，進而造成異常大的運動場數值出現。因此這個章節藉由模式預報，期待找出與合成時刻最為相近的風場結構，分析是否能有更好的合成結果。

如 3-2-2 節介紹背景場的製作方法，要把模式不同時間預報結果投影到各雷達上與雷達徑向風比較，因為颱風是個中尺度天氣系統，模式需要大約六小時的時間做調整，因此取七點到十二點的模式輸出風場做比較，圖 5-1 即為模式結果投影到各雷達以及整個合成範圍的方均根差異比較。由圖中可以看到 0800UTC 模式預報時間方均根差異最小出現的次數最多，花蓮、墾丁及清泉崗雷達的方均跟差異都在 10m/s 以下，主要是因為這幾座雷達位在颱風的外圍環流上，而模式在 0800UTC 的環流中心與第四章 NCEP 背景場合成結果的渦旋中心相比稍微偏北，但外圍結構都很類似，因此有比較小的差異值，如圖 5-2 及圖 4-10。七股雷達以及 TEAM-R 差異最大，因為這兩座雷達位在環流中心周圍，提供比較細節的風場資訊，因此模式如果沒抓到正確渦旋中心，這兩座雷達的方均根差異會很大。最後選定 9/19 0800UTC 模式結果當作新的背景場，風場結構如圖 5-2 我們可以看到，渦旋中心出現在陸地上，而且不像單純的 NCEP 背景場結構那麼圓滑，而是有些較亂的風出現在渦旋周圍。比較圖 4-1 或圖 4-9 看到地形效應被考慮在模式的結果中，而且外圍的強風比 NCEP 背景場來的偏強，風速隨半徑增加的梯度很大，出現 30m/s 的區域很多。

再來看到模式的合成結果，圖 5-3 中可以發現渦旋中心有偏移的情形，合成



結果與 0600UTC、1200UTC 結構很類似，圖 5-4 可以看到有雷達資料覆蓋的地方，模式為背景場合成結果和 1200UTC 背景場合成結果差異很小，但環流中心風場結構模式背景場結果較為混亂，因為環流中心附近是沒有雷達資料覆蓋，由圖 5-4(b)看到模式背景場結果與 1200UTC 背景場合成結果在四公里高度最大差異將近 15m/s。

渦度場的部分，在主雨帶上以正渦度主導，圖 5-5，不正確的渦度值出現在桃竹苗外海，應該是模式考慮地形後所造成的結果，因為看到圖 4-4 的雷達資料覆蓋情形，那個地區是沒有雷達資料的，因此不會有第四章所討論到資料交接處不連續所引發的現象。

## 5-2 與 NCEP 背景場合成結果比較

模式合成結果在運動場上的表現，在馬公雷達資料交接處的異常值比 NCEP 不管那個時間資料所做出來的異常值來的大很多。看到圖 5-6，是 NCEP1200UTC 背景場合成結果渦度場與 0800UTC 模式輸出背景場所合成出渦度場差值，圖中可以看到，馬公資料交接處都有許多正負相間的差值出現，最大差異在  $2s^{-1}$ 。

比較模式背景場七座雷達四公里合成結果以及 NCEP 1200UTC 背景場的七座合成結果，有雷達覆蓋的地區，風場結構都很類似，差異不大，但是模式的背景場渦旋中心較雷達合成出來的渦旋中心偏北，因此在沒雷達覆蓋的地區，尤其是渦旋中心無雷達資料區域，看到四公里高度，風速值差到 15m/s~20m/s，圖 5-4。而且模式合成結果的外圍環流比 1200UTC 背景場的環流來的狹長，與渦旋中心不同心，外圈中心大概在  $(121^{\circ}, 23.5^{\circ})$ ，內圈中心大概在  $(120.5^{\circ}, 23.25^{\circ})$ ，圖 5-7。

放大渦旋區域東經  $119.8^{\circ}\sim 121.5^{\circ}$  以及北緯  $22.8^{\circ}\sim 24^{\circ}$  來比對，圖 5-8，其中沒有回波區域是沒有雷達資料提供，風場資訊來自背景場，因此模式背景場的合成結果才會在沒雷達資料覆蓋的地區又有一個打轉的結構出現，位置在  $(121.5^{\circ}, 23.5^{\circ})$ ，沒有雷達資料覆蓋的地區，程式取背景場資料，到了有雷達資料則修正，因此背景場特性對這種區域容易造成很大的差異。

## 第六章 合成結果驗證與資料交接異常值測試

### 6-1 合成結果驗證

目前使用兩種背景場製作方式，不管是哪一種背景場，加入雷達資料合成後，有雷達資料覆蓋的地方，各個合成結果都很類似，最大的差異出在有無雷達資料交接帶以及背景場主導的地區。

因此希望藉由氣象局地面測站的資料，驗證哪個背景場的結果比較好。因為使用地面測站資料，每個測站海拔位置不同，因此風向風速會略有差異，但是除了玉山與阿里山之外，其他測站都在一公里以下的高度，差異還不會太大，在這只是比較個估計值。圖 6-1 分別為 0600UTC(a)、1200UTC(b)、0900UTC(c)以及 0800UTC 模式輸出背景場(d)的合成結果與氣象局各測站比較。

圖 6-1 中可以看到，在外圍環流上測站觀測，例如彭佳嶼，不管那個背景場的觀測風向風速大致接近，只有 0600UTC 的背景場風速偏弱。再來看到花蓮、宜蘭地區測站觀測結果。除了 0600UTC 之外，另外三個背景場的合成結果都與觀測風向相近，合成結果的風速皆偏強。南部地區的風向除了 0600UTC 差異較大之外，另外兩個背景場的結果也很相近，合成風速有偏高的情形。而澎湖附近的風向風速各背景場都很接近，因為那裡完全有雷達資料覆蓋，但模式輸出背景場的風向最為接近。最後討論環流中心的表現。首先 0600UTC 的表現最差，很多站的風向都不相符。而模式輸出結果比 0600UTC 來的好一點。比較接近的還是 1200UTC 以及 0900UTC 背景場結果。其中在台南站的風向，以 0900UTC 以及模式背景場最為相近。

由以上的驗證，可以發現到 1200UTC 以及 0900UTC 的背景場所合成出來之風場與實際觀測最為接近。比較中發現到許多風向有抓到但風速仍略有差異的結果，本研究所使用的風場合成程式是透過疊代過程最小化價值函數，之後可以考慮在程式中讀進部分測站資料，比較合成結果與測站觀測之間差異當作疊代次數

的門檻。

## 6-2 資料交接異常值測試

### 6-2-1 改變 damping 層數與省略背景場結果

由第四、第五章的討論發現在雷達資料交接處，尤其是馬公資料覆蓋北邊以及五分山的地區，因為背景風場與實際雷達觀測合成出來的風場並不連續，因此在資料交接處的運動場像是：輻散場、渦度場以及垂直速度都會有不正確的運動場數值出現，因此在這裡測試增加 damping 的層數，分析是否會有改善的情形。

原始 damping 層數垂直速度為三層，也就是從十四公里開始 damp 到十五公里而變為 0，水平速度為五層，從十三公里開始 damp 到十五公里變為與背景場相符，現在改為水平與垂直速度各十層，也就是從十公里開始水平與垂直風速就會開始 damp。由圖 6-2 可以看到，在水平風的部分，damp 十層也就是圖 6-2 (a) 的風場比較為圓滑，不會和 damp 五層，圖 6-2(b) 一樣因為高層仍有些微雷達資料，又要與背景場修正而造成不連續的風場結構。垂直速度方面，damp 十層的數值在整個合成範圍中都一起減弱了，因此雷達資料交接處的異常值問題仍未解決，反而減小了主要雨帶上的運動場數值，圖 6-2(c)。

另外測試使背景場權重為零，也就是不加入背景場的情形，然而這個風場合成方法是會填補整個合成範圍，因為沒有資料的部分還是會經過疊代得到很弱的風速，在資料交接帶的問題反而更嚴重。因此關於雷達資料交接上的不合理問題，仍需繼續尋找解決方法。

### 6-2-2 不同垂直層數合成結果

在風場合成的結果，雷達資料交接位置上，因為背景場與雷達觀測常有出入，而雷達資料到了十公里以上幾乎已經非常零碎甚至沒資料，本節探討把原本垂直層數三十層到十五公里高度降為二十層十公里高度的結果差異。

圖 6-3 是十五公里合成結果與十公里合成結果差異。在低層幾乎沒有不同，

一直到七公里半以上才開始出現差異，而差異大概只有 10m/s。比較其他運動場結果，圖 6-4 是渦度場的差異，同樣到七公里半才開始有差異，差異出現在主要雨帶以及馬公資料交接位置，且差異都在  $1s^{-1}$  以內。由以上的探討可以得到，在七公里以下資料交界異常值無法藉由改變合成高度而解決，然而在高層仍有些修正作用。

另外研究中所使用的多雷達風場合成考慮的約束條件包括了連續方程以及渦度方程，在進行最小化的疊代過程，是考慮三維空間下的極小化，因此如果可以減少高層雷達資料破碎的部分，減少程式中雷達資料交接區域，降低雷達資料交接處的不正常數值，或許在進行極小化過程是能夠得到較好的結果。

### 6-2-3 改變水平風平滑係數測試

以上兩種針對高層資料進行修正的方式並未明顯改善低層雷達資料交接處不正常數值問題，因此這裡針對多雷達風場合成程式中其中一個約束條件：拉普拉斯平滑項的權重係數進行調整。原本設定水平方向的風場拉普拉斯平滑項係數為  $10^{11}$ ，垂直方向的水平風場權重為  $10^{12}$ ，現在改為水平方向的水平風以及垂直方向的水平風權重皆調高 100 倍，也就是  $10^{13}$  以及  $10^{14}$ 。

圖 6-5 是把原本的合成結果與水平風場平滑係數調高 100 倍的結果相減，由圖中可以看到在有無雷達資料交接位置有明顯的風場差異，兩公里的結果差了 5 到 8m/s，四公里高度上的差異比較小，多在 6m/s 以下。看到渦度場的部分，不管是主要雨帶或資料交接處都有明顯的差異，差異在  $1.5\sim 2s^{-1}$ ，圖 6-6。看到平滑 100 倍後的渦度場，明顯看出渦度分布較平滑完整，見圖 6-7，不像圖 4-13 分布那麼破碎。

另外針對增加平滑係數以及改變 damping 層數結果做比較，圖 6-8(a、b)是風場差異在兩公里及四公里高度結果，圖中可以看到差異並不大，主要出現在有無雷達資料交接處，但看到十公里，圖 6-8(c)也就是 damp 明顯差異的高度，在破碎的雷達資料處，有較大的風速差異，大約都有 8~10m/s 的差異。然而比較垂直

速度，在底層兩者測試差異較大，最大可到 4~5m/s，到了十公里左右的高度，垂直速度差異不明顯，差異大約只有 1m/s，圖 6-9。

在雷達資料交接處，增加平滑係數仍未完全解決這個問題，但是這樣比較平滑的資料，對於未來把合成資料放進模式中做預報等處理時，平滑過後的結果對模式比較不會有太大的問題。因此增加平滑係數仍是個可以考慮修正的部分。而雷達資料交接問題仍需繼續尋找解決方法。

## 第七章 結論與未來展望

本研究是第一個同時進行七座雷達風場合成。研究中進行了不同背景場測試以補足沒有雷達資料覆蓋的地區，不管是哪一種背景場的製作，都可以看到加進雷達資料後，颱風的渦旋中心都有重置的情形，不同背景場加入相同個數雷達，最後合成出來的渦旋中心位置都非常接近。主要是因為不管那種背景場，都不可能真正符合颱風的實際渦旋中心，雷達資料正是把這樣背景場偏差的渦旋結構重置回較正確的位置。

相較於黃(2012)的研究範圍，本研究合成範圍擴展到整個臺灣。圖 4-11(a)中的回波部分即為本研究雷達資料涵蓋範圍，沒雷達資料的部分佔了四成左右，相較於圖 4-11(d)一個與黃(2012)研究範圍接近的區域，雷達資料覆蓋率很高，缺資料的部分大概只佔一成多，因此背景場的影響以及雷達資料交接不正確運動值問題在當時的研究還沒那麼明顯。對於多雷達風場合成方法，能有越高的雷達覆蓋率，對於合成結果相信能有更高的可信度，因為可以少掉許多不確定的背景場結果。

在 NCEP 1200UTC 背景場的部分，探討不同雷達個數合成結果，其中可以發現到，隨著加入的雷達越多，渦旋中心向陸地的偏移情形逐漸增加，但隨著高度增加南北上的偏移有逐漸變小的情形，有兩座以上雷達覆蓋的地區，風場結構大致確定，加入越多雷達資料可以得到越細微的風場資訊。

臺灣是個複雜地形，而我們仍可以順利反演出風場結構，並且在切縱向及橫向剖面時，可以看到風場隨著地形變化情形，並且與運動場相符，因此證實加入了 IBM 的方法後可以處理複雜地形結果。

另外颱風是個環流的風場結構，不管使用何種背景場，如果環流中心有所偏移，在有無雷達資料交界處，也就是颱風眼或者雨帶間隔地區常會有不連續的合成風場結果，造成背景的記憶效應，也就是在這些沒有雷達資料地區，風場資訊是直接複製背景場的結果。對於大範圍的風場合成，雷達資料相對覆蓋率較低，

背景場的選擇很重要。如果想要更清楚的驗證雷達資料加入後對背景場的修正結果，未來可以嘗試背景風場比較單純的鋒面系統或者西南氣流個案，或許會有比較好的差異結果。

此外，本研究中 NCEP 1200UTC 的再分析資料所做出來的背景場結果比較好，然而在即時分析時，並不可行，因為進行 0846UTC 風場合成時，應該是沒有 1200UTC 的 NCEP 資料，因此如果要把多雷達風場合成方法擴展到即時分析，最可行的還是模式輸出結果投影到雷達上與徑向風作比較挑出差異最小的模式輸出時間結果。未來可以嘗試利用不同的初始資料或不同模式進行預報，以找出更好的背景場進行多雷達風場合成。

研究中最花時間的是雷達資料品管部分，因為每座雷達的掃描策略不盡相同，因此每座雷達處理方法以及需要解決的問題也不相同。風場去折疊是最為費時的工程，儘管本實驗室所發展出 RAKIT 系統可以自動去折疊，仍會有些部分是程式所無法順利處理，必須進 SOLOII 系統手動修改，在這裡就會有人為判斷上的問題產生。

最後，研究中透過加入背景場來補足沒有雷達覆蓋區域的資訊，因此得到的是整個完整合成範圍的風場結構，希望未來可以把這樣的資料放入模式進行資料同化，分析有了雷達資料所提供的細部資訊對模式預報改善情形。並繼續尋找方法解決有無雷達資料交接處的風場不連續問題，避免在運動場上有誤差產生。另外希望藉由之前的雷達資料處理經驗，可以繼續做更多時間上的風場合成，期待找到回波強度及動力上的變化情形，並且希望可以看到眼牆重建時期風場變化現象。

## 參考文獻

- 紀博庭，2005：利用中央大學雙偏極化雷達資料反求雨滴粒徑分佈及降雨率方法的研究。國立中央大學大氣物理研究所碩士論文，70 頁
- 黃沛瑜，2012：使用多部都卜勒/偏極化雷達分析凡那比颱風(2010)的眼牆重建過程。國立中央大學大氣物理研究所碩士論文，90 頁
- 蔡宜君，2012：使用偏極化/多部都卜勒雷達資料研究莫拉克颱風(2009)地形降雨特性。國立中央大學大氣物理研究所碩士論文，83 頁
- Armijo, L., 1969: A theory for the determination of wind and precipitation velocities with Doppler radars. *J. Atmos. Sci.*, **26**, 570–573.
- Chong, M., and O. Bousquet, 2001: On the application of MUSCAT to a ground-based dual-Doppler radar system. *Meteor. Atmos. Phys.*, **78**, 133–139.
- Friedrich, K. and M. Hagen, 2004: Wind Synthesis and Quality Control of Multiple-Doppler-Derived Horizontal Wind Field. *J. Appl. Meteor.*, **43**, 38-57.
- Gao, J., M. Xue, A. Shapiro, and K. K. Droegemeier, 1999: A variational method for the analysis of three-dimensional wind fields from two Doppler radars. *Mon. Wea. Rev.*, **127**, 2128–2142.
- Gao, J., M. Xue, K. Brewster, and K. K. Droegemeier, 2004: A three-dimensional variational data analysis method with recursive filter for Doppler radars. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **21**, 457–469.
- Liou, Y. C. and Y. J., Chang, 2009: A Variational Multiple-Doppler Radar Three-Dimensional Wind Synthesis Method and Its Impacts on Thermodynamic Retrieval. *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 3992-4010.
- Liou, Y. C. and S. F., Chang, J. Sun, 2012: An Application of the Immersed Boundary Method for Recovering the Three-Dimensional Wind Fields over Complex Terrain Using Multiple-Doppler Radar Data. *Mon. Wea. Rev.*, **140**, 1603-1619.



- Lundquist, K. A., and F. K. Chow,2010: An Immersed Boundary Method for the Weather Research and Forecasting Model. *Mon. Wea. Rev.*, **138**, 796-817.
- Park, S. –G. and D. K., Lee,2009:Retrieval of High-Resolution Wind Fields over the Southern Korean Peninsula Using the Doppler Weather Radar Network. *Wea. Forecasting*, **24**, 87-103.
- Shun, C. M., S. Y. Lau, and O. S. M. Lee,2003:Terminal Doppler Weather Radar Observation of Atmospheric Flow over Complex Terrain during Tropical Cyclone Passages. *J. Appl. Meteor.*, **42**, 1697-1710
- Tseng, Y. –H., and J. H. Feiziger,2003: A Ghost-Cell Immersed Boundary Method for Flow in Complex Geometry. *J. Comput. Phys.*, **192**,593-623.
- Yu, C. –K., and L. W. Cheng,2008:Radar Observations of Intense Orographic Precipitation Associated with Typhoon Xangsane(2000). *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 497-521

## 附圖

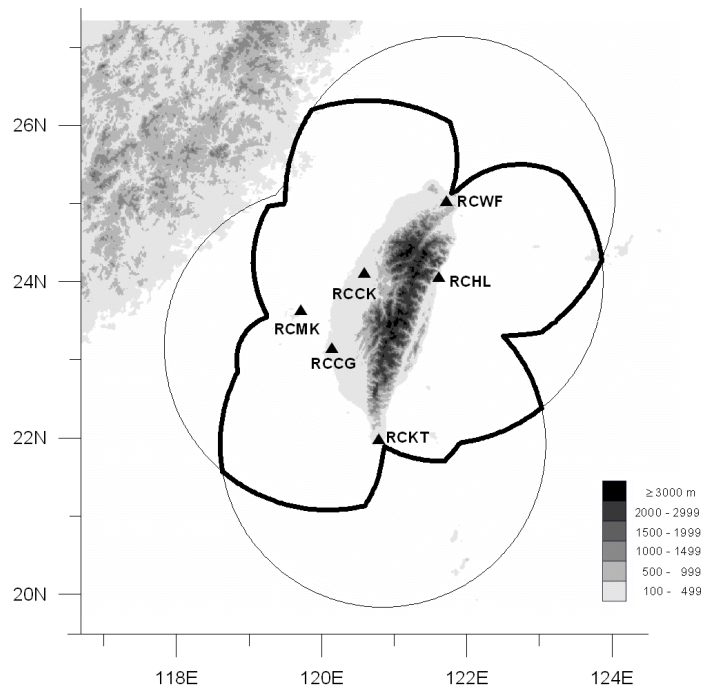


圖 1-1、氣象局風場合成方法，淺灰色圓形邊線是雷達觀測最大範圍，粗黑線則為合成風場範圍。圖片由氣象局張保亮博士提供。

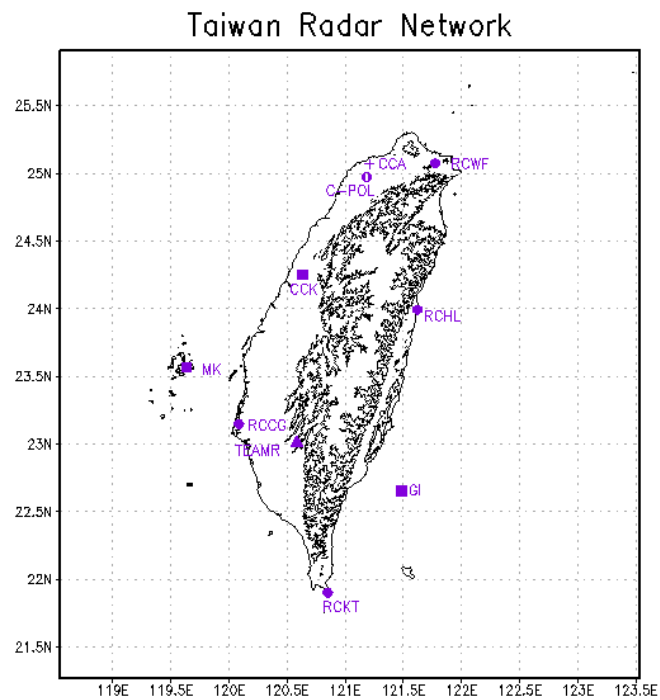


圖 1-2、臺灣雷達網分布情形。圓形為氣象局所屬雷達，方形則為軍方所屬雷達。整個範圍為本研究風場合成的大小。

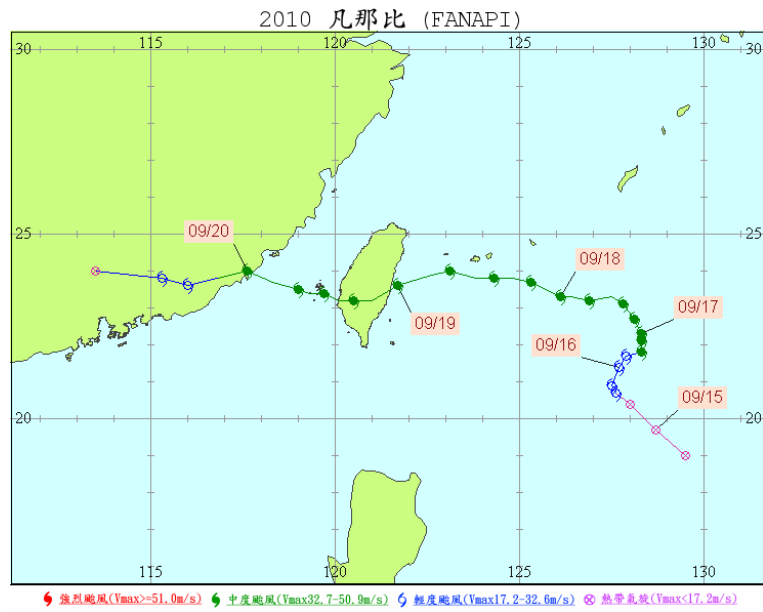


圖 1-3、凡那比颱風(2010)路徑圖，藍色為輕度颱風，綠色為中度颱風。

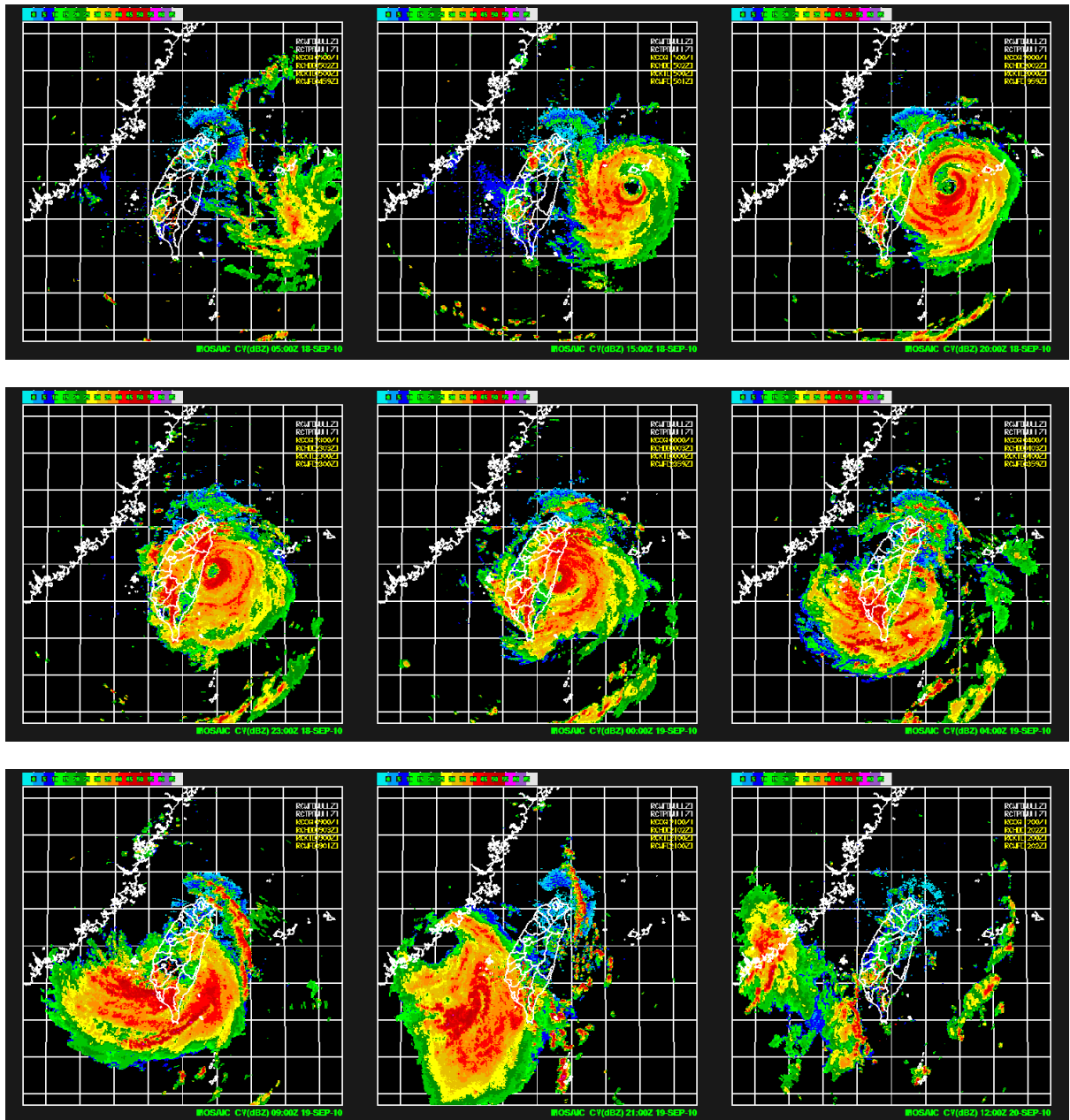


圖 1-4、氣象局合成回波時序圖。取自氣象局。色標如各圖中左上角所示，為回波強度。時間由左到右，由上到下分別為 9/18 0500UTC、1500UTC、2000UTC、2300UTC、9/19 0000UTC、0400UTC、0900UTC、2100UTC、9/20 1200UTC。

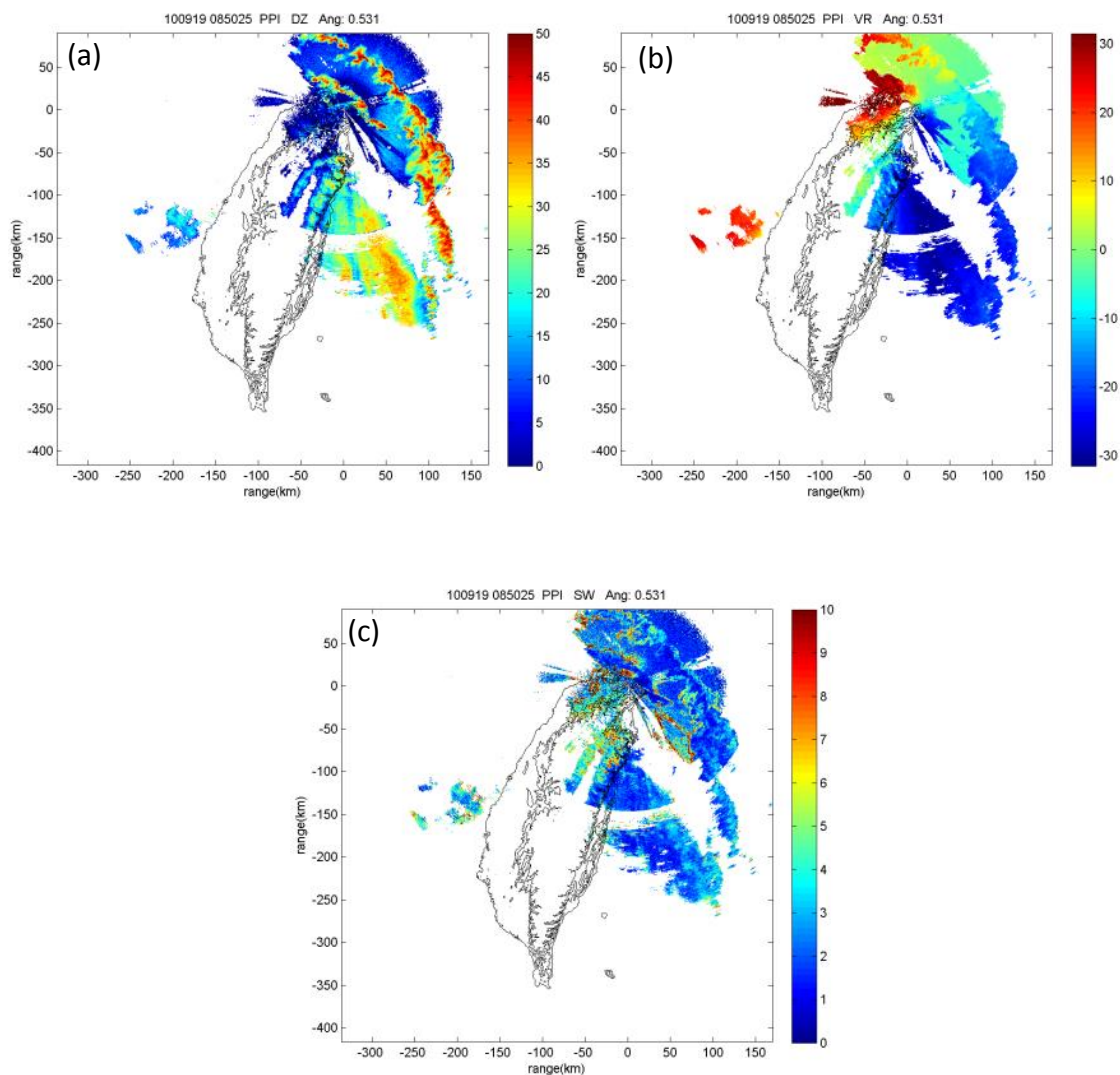


圖 2-1、五分山雷達 9 月 19 日 0850UTC 在 0.5°仰角的觀測結果。分別為回波(a)、風速 (b)以及波譜寬(c)，各數值如右側色標所示。

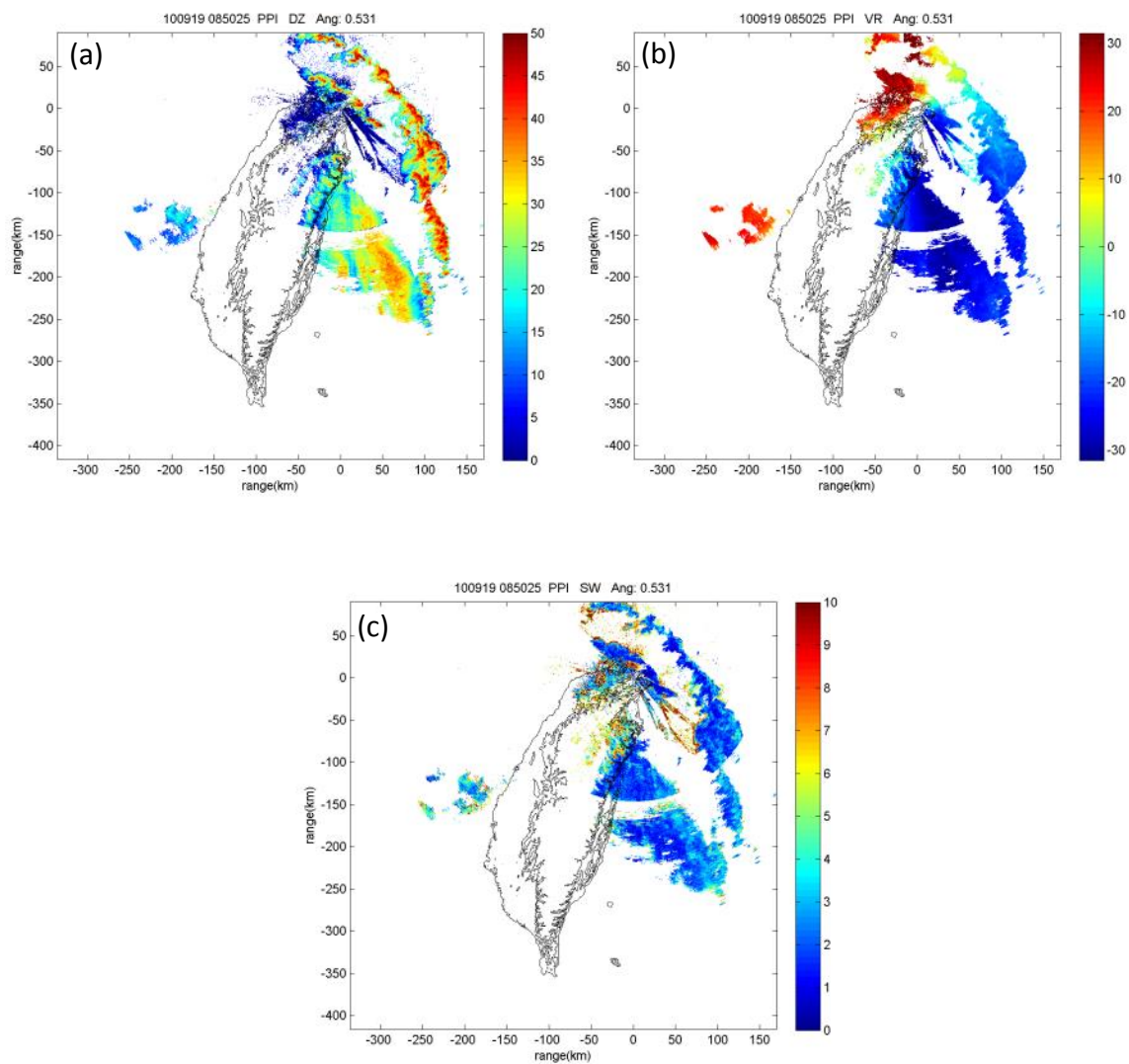


圖 2-2、五分山雷達 9 月 19 日 0850UTC 在  $0.5^\circ$  仰角濾除海洋雜波後的結果。分別為回波(a)、風速(b)以及波譜寬(c)，各數值如右側色標所示。

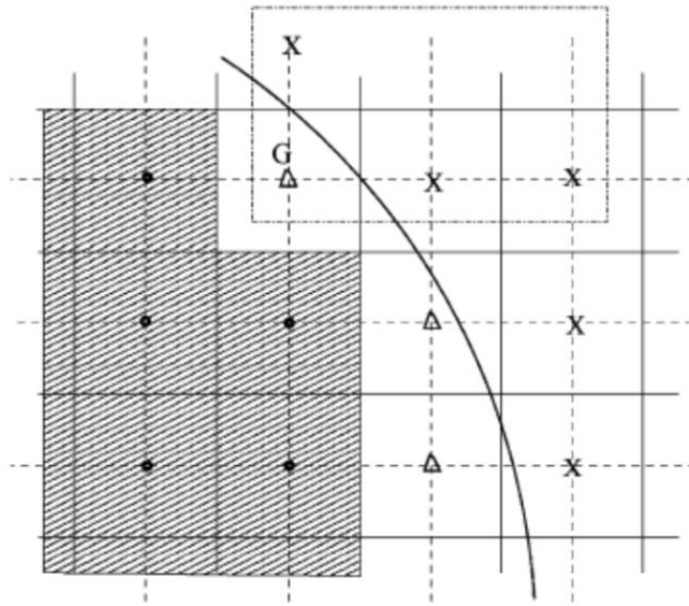


圖 3-1、判定 ghost cell。黑曲線為地形，斜線黑點的網格是地形，X 代表流體區域，三角形即為 ghost cell。

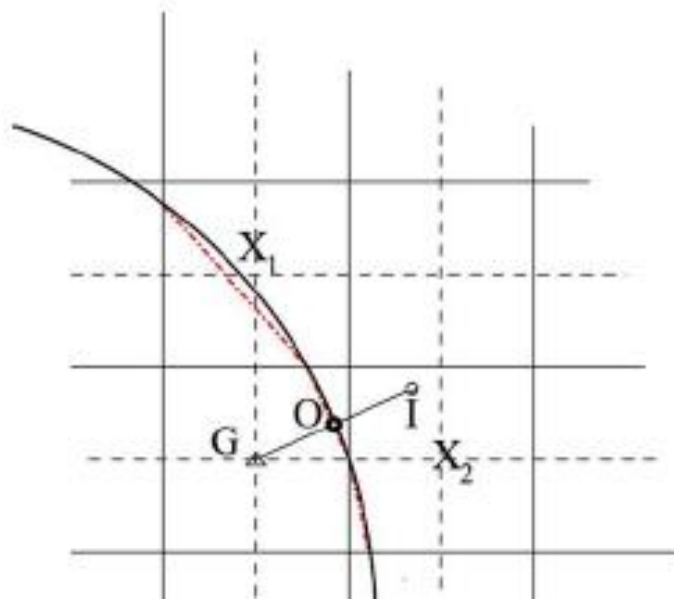


圖 3-2、求取 ghost cell 值的方法。G 為 ghost cell，I 為鏡像點，O 為 G、I 連線中點位在地形上， $X_1$ 、 $X_2$  為流體區域鄰近地形的數據，用來內插到 I。

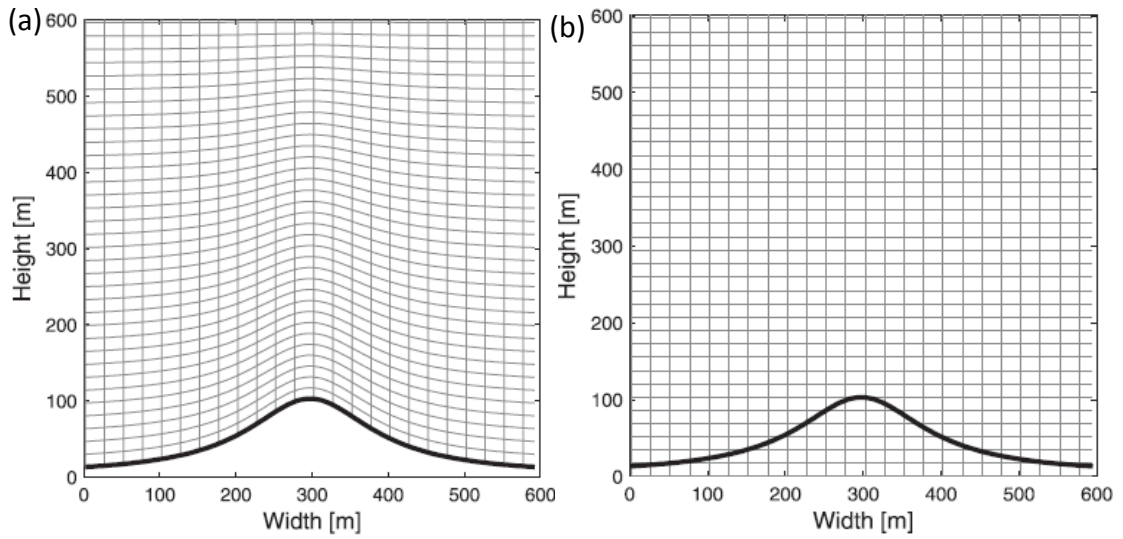


圖 3-3、(a)為地勢追隨座標，(b)為卡式座標。

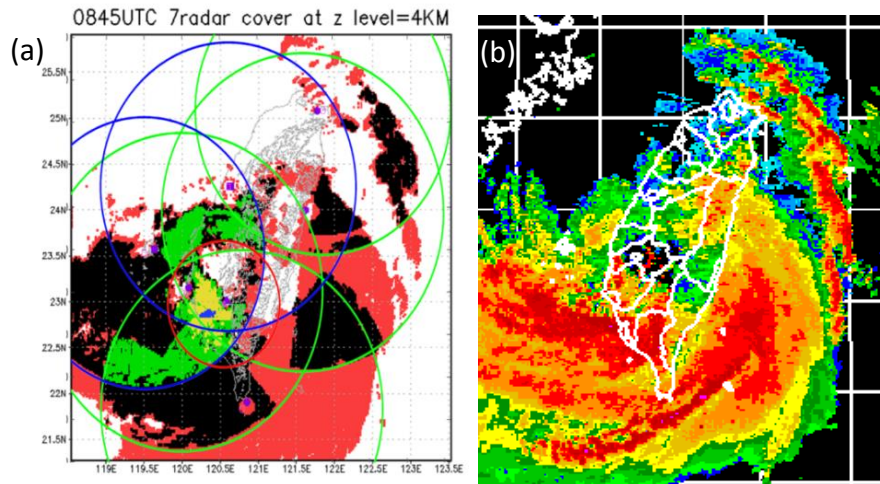


圖 3-4、(a)中綠色(氣象局雷達)、藍色(軍方雷達)、紅色(TEAM-R)圓圈代表本研究中七座雷達在凡那比(2010)中最大掃瞄範圍。陰影則代表 9/19 0846UTC 實際雷達覆蓋情形，紅色為一座雷達、黑色為兩座、綠色為三座、黃色為四座、藍色為五座覆蓋。(b)為 9/19 0900UTC 氣象局合成回波圖。



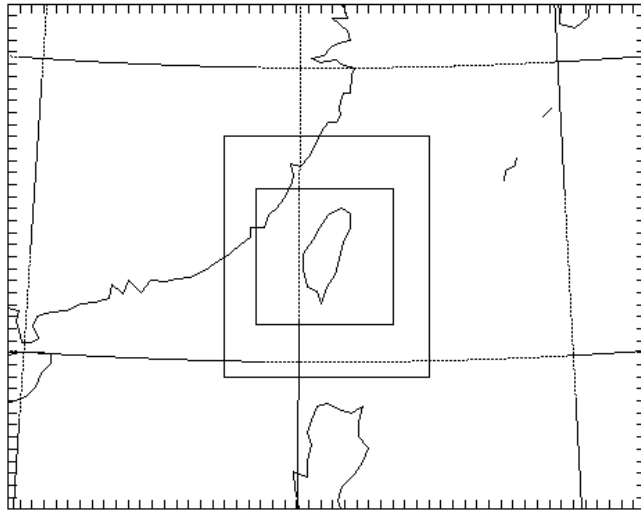


圖 3-5、模式三層巢狀網格設計。由外到內水平解析度分別為 45km、15km、5km。

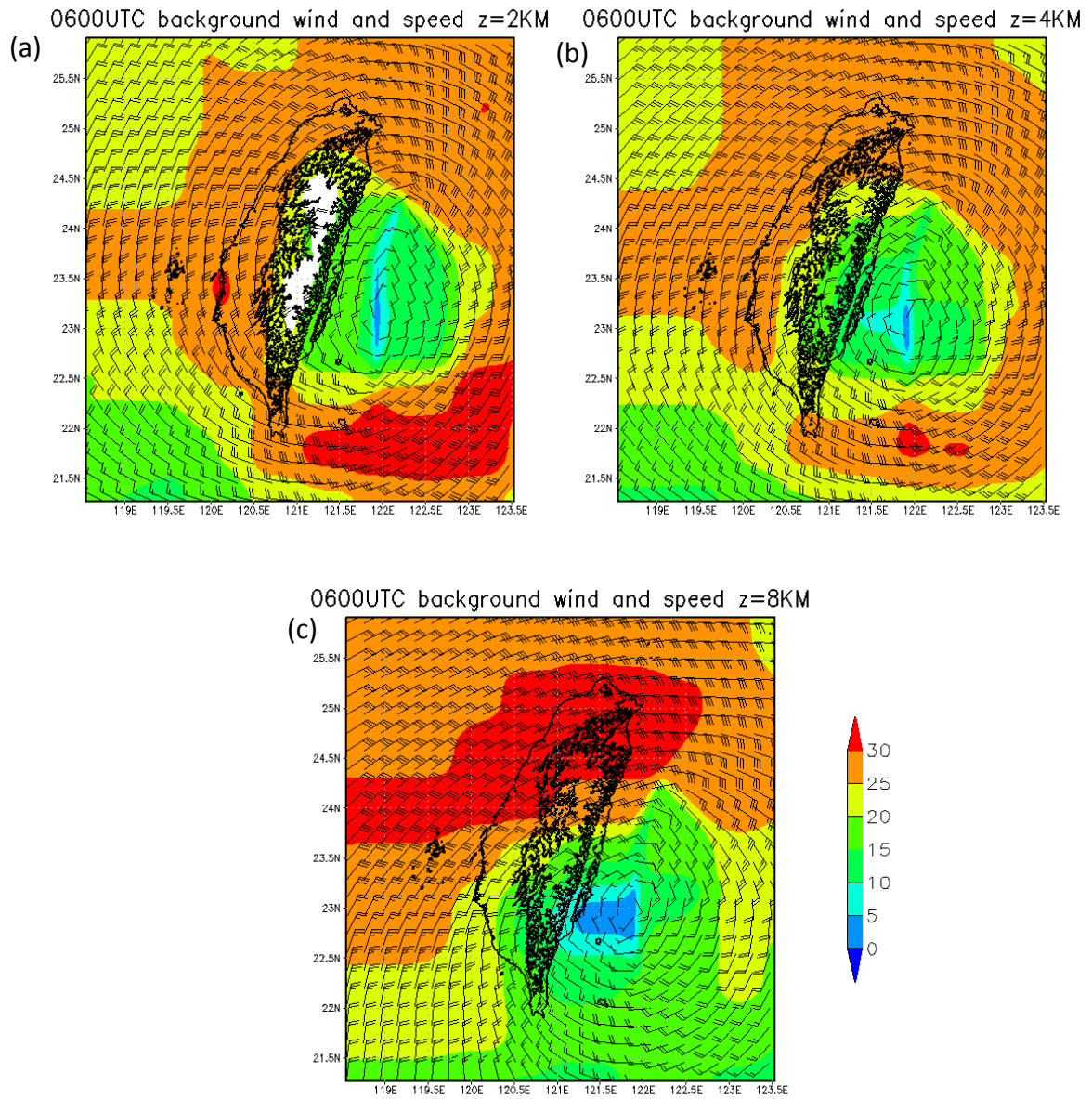


圖 4-1、0600UTC 背景風場分布。分別為兩公里(a)、四公里(b)、八公里(c)的結果。風標長槓代表 10m/s，短槓代表 5m/s，陰影為風速，數值如圖右色標所示。

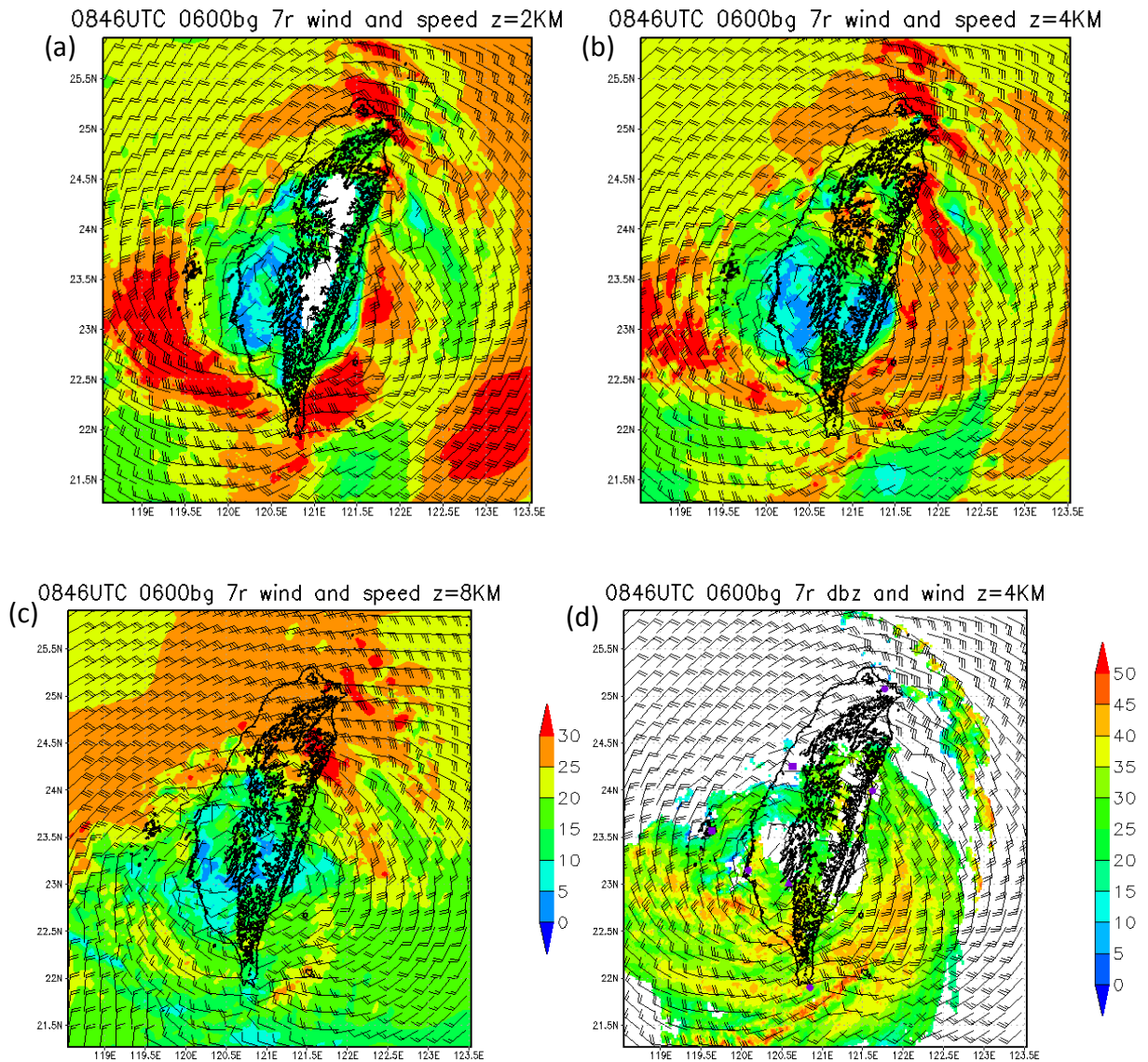


圖 4-2、0600UTC 背景場在 0846UTC 下的風場合成結果，分別為兩公里(a)、四公里(b)、八公里(c)的結果。陰影為風速，數值如圖右色標所示。(d)是 0846UTC 以 0600UTC 為背景場四公里高度所合成之風場與回波結果。陰影為回波，數值如圖右色標所示。各圖風標長槓代表 10m/s，短槓代表 5m/s。

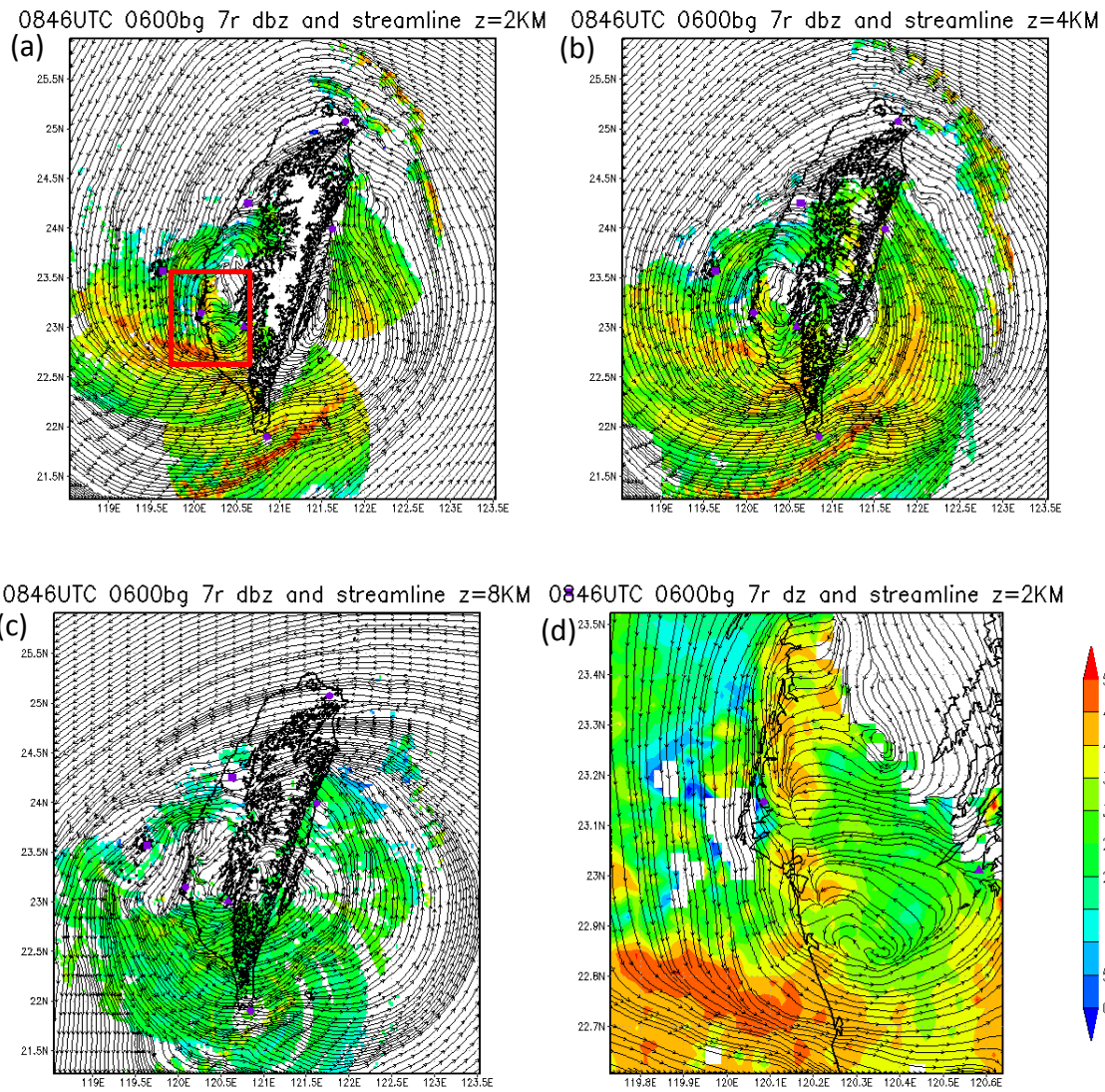


圖 4-3、0600UTC 背景場在 0846UTC 的風場合成結果以流線表示，分別為兩公里(a)、四公里(b)、八公里(c)的結果。(d)是放大(a)紅框中區域的結果。黑線代表流線。陰影代表回波強度，數值如右側色標。紫色點為各雷達位置。

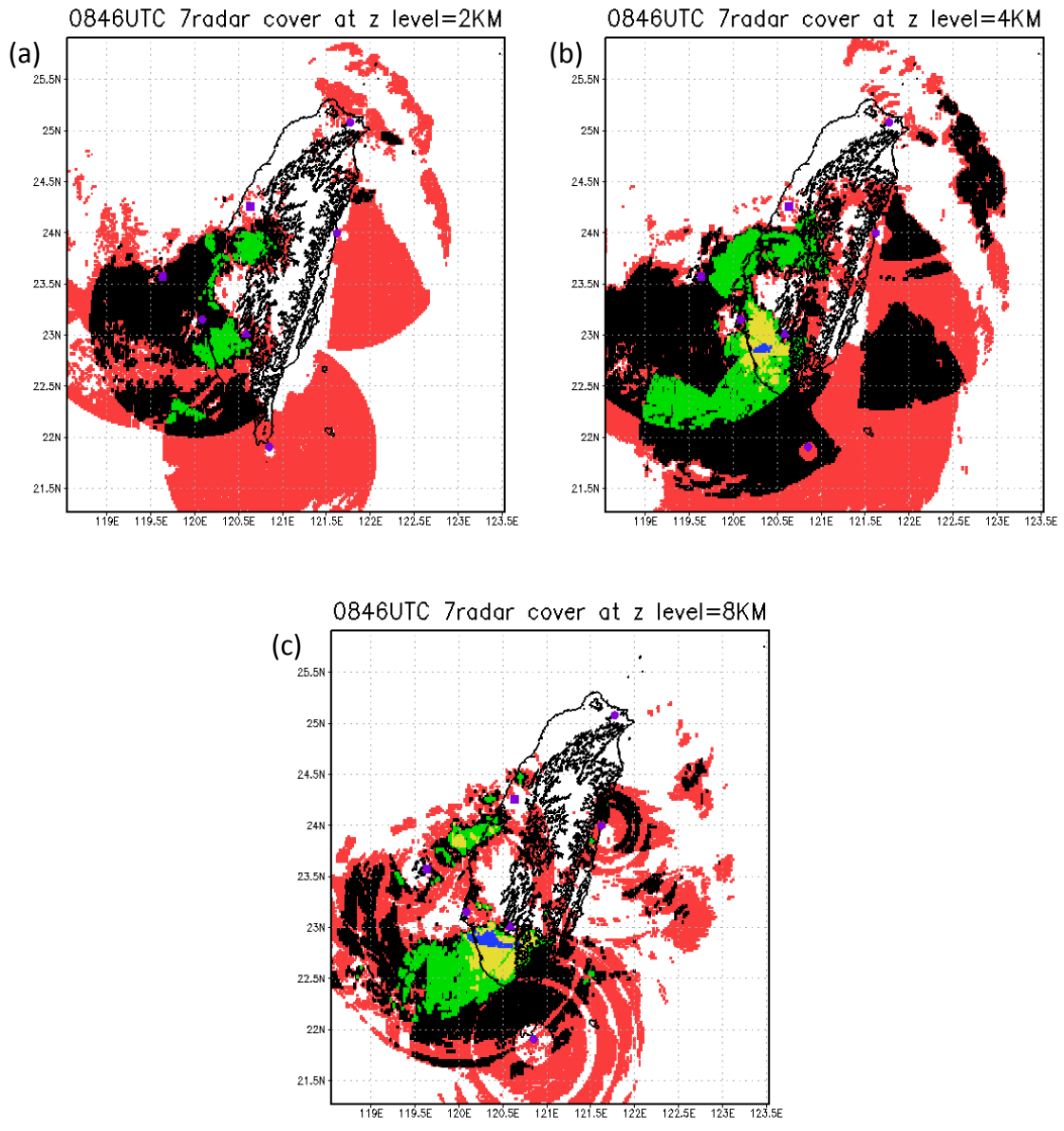


圖 4-4、0846UTC 雷達資料覆蓋情形，分別為兩公里(a)、四公里(b)、八公里(c)的結果。其中紅色為一座雷達覆蓋，黑色為兩座、綠色是三座，黃色四座，藍色則有五座雷達覆蓋。紫色點為各雷達位置。

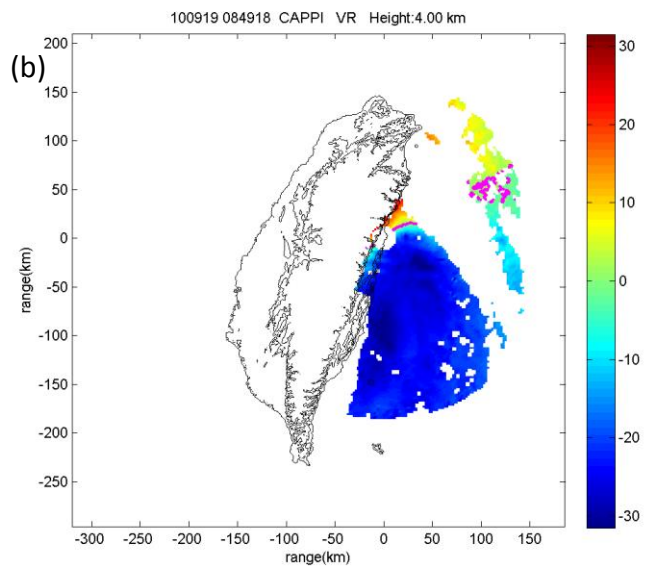
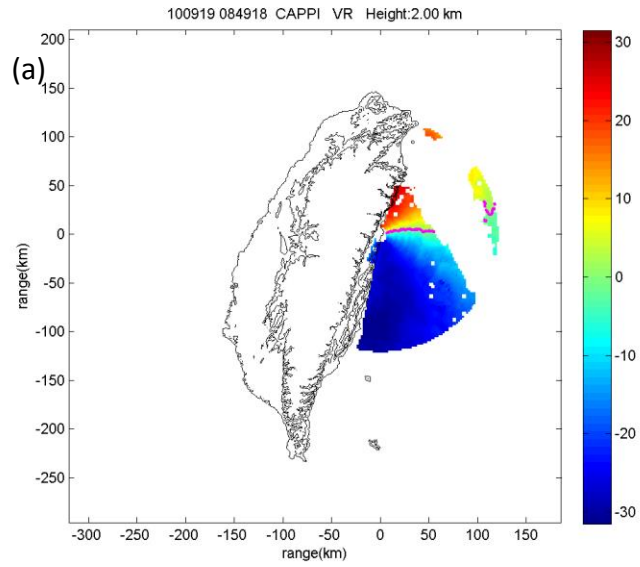
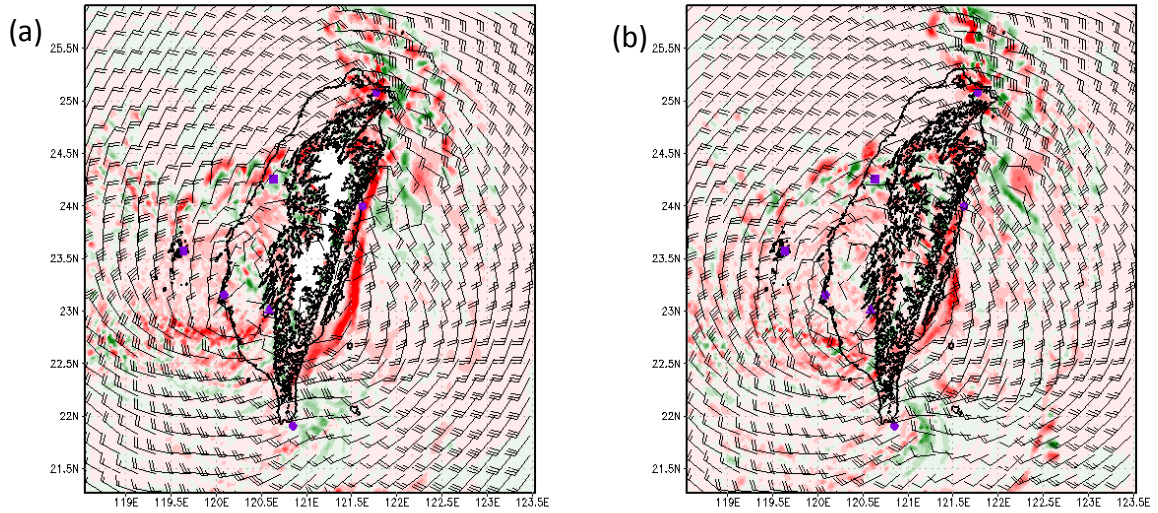


圖 4-5、花蓮雷達在 0849UTC 所觀測風場內插到兩公里(a)及四公里(b)CAPPI 結果。陰影代表風速，數值對照右側色標。其中暖色系是吹離雷達，冷色系則吹向雷達。

0846UTC 0600bg 7radar vort and wind level=2KM 0846UTC 0600bg 7radar vort and wind level=4KM



0846UTC 0600bg 7radar vort and wind level=8KM

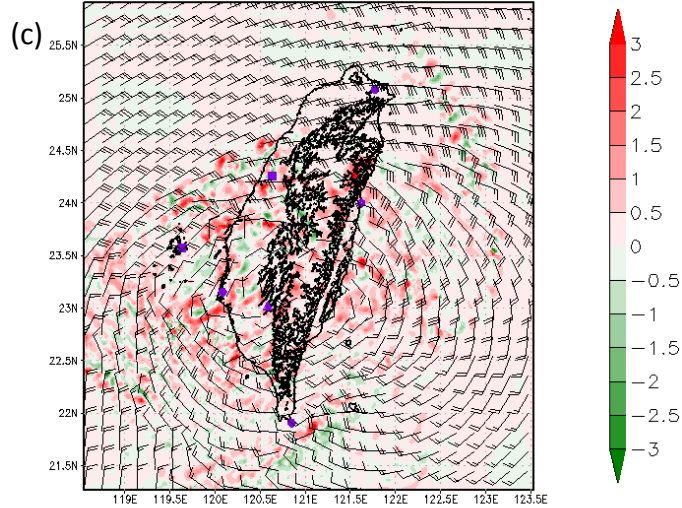


圖 4-6、0846UTC，以 0600UTC 背景場合成的渦度場。分別為兩公里(a)、四公里(b)、八公里(c)的結果。風標長槓代表 10m/s，短槓代表 5m/s。陰影代表渦度，數值如右側色標，紅色為正渦度，綠色為負渦度。紫色點為各雷達位置。

0846UTC 0600bg 7radar divg and wind level=2KM 0846UTC 0600bg 7radar divg and wind level=4KM

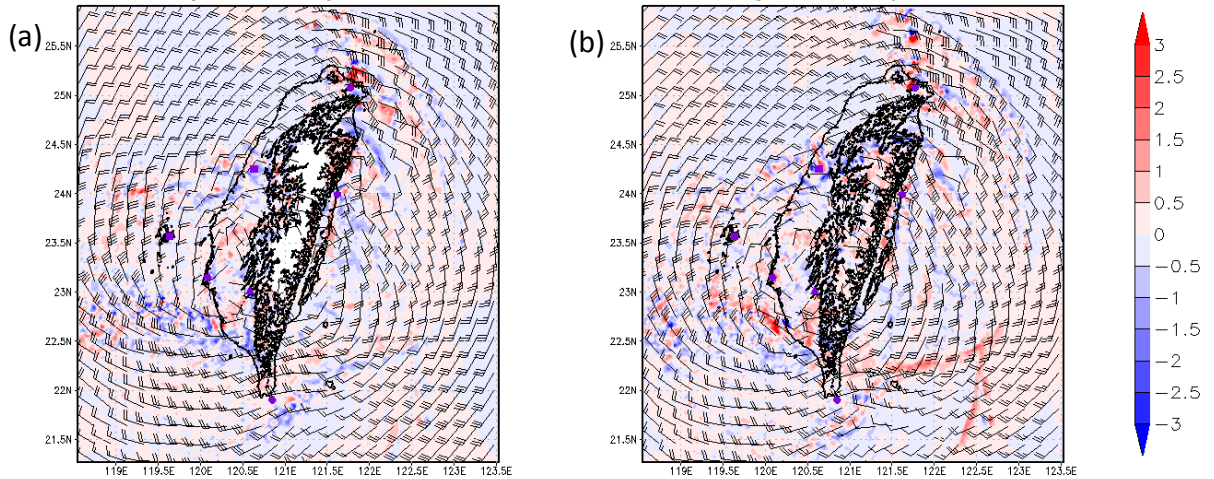


圖 4-7、0846UTC，以 0600UTC 背景場合成的輻散場。分別為兩公里(a)、四公里(b)的結果。風標長槓代表 10m/s，短槓代表 5m/s。陰影代表輻合輻散，數值如右側色標，紅色為輻散，藍色為輻合。紫色點為各雷達位置。

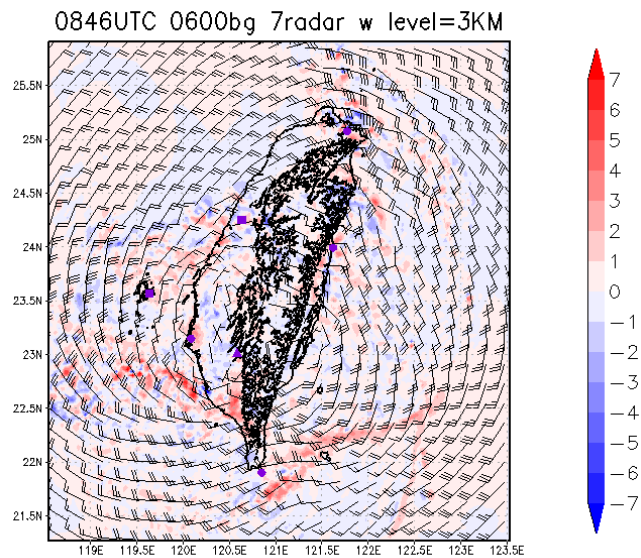


圖 4-8、0846UTC，以 0600UTC 背景場合成的三公里高度垂直運動場。風標長槓代表 10m/s，短槓代表 5m/s。陰影代表垂直速度，數值如右側色標，紅色為上升運動，藍色為下降運動。紫色點為各雷達位置。



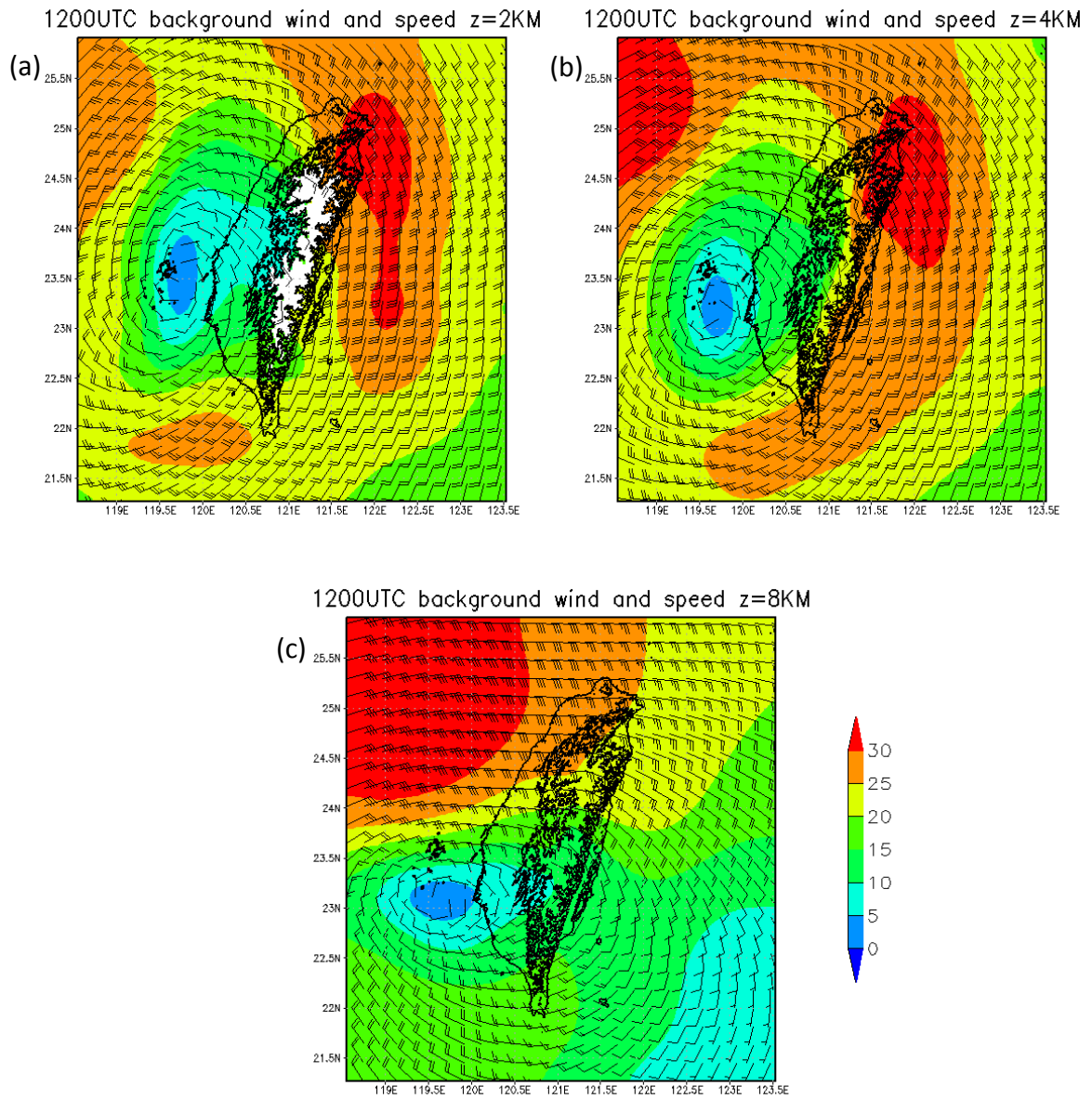


圖 4-9、1200UTC 背景風場分布。分別為兩公里(a)、四公里(b)、八公里(c)的結果。風標長槓代表 10m/s，短槓代表 5m/s。陰影為風速，各數值如右側色標所示。

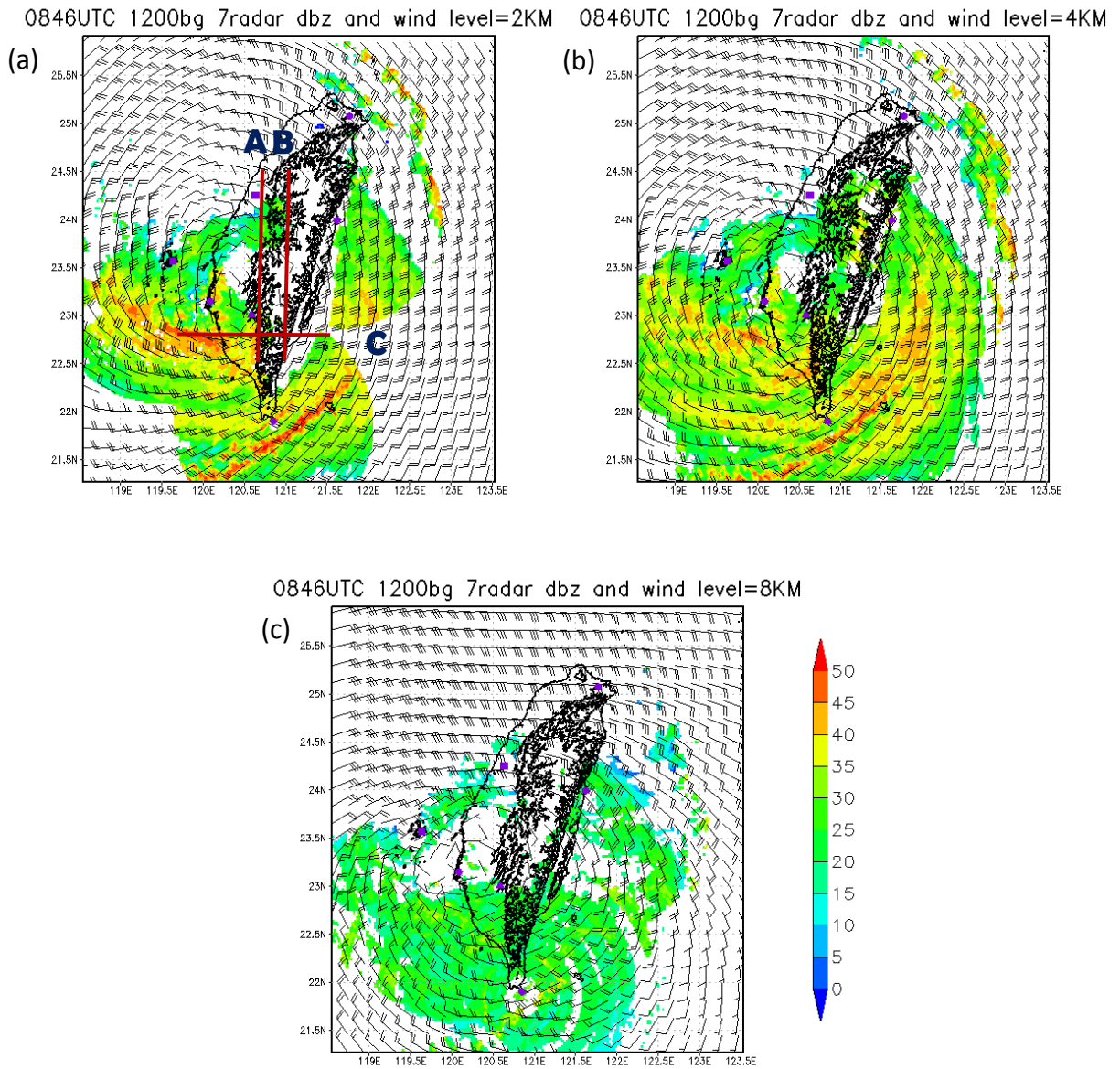
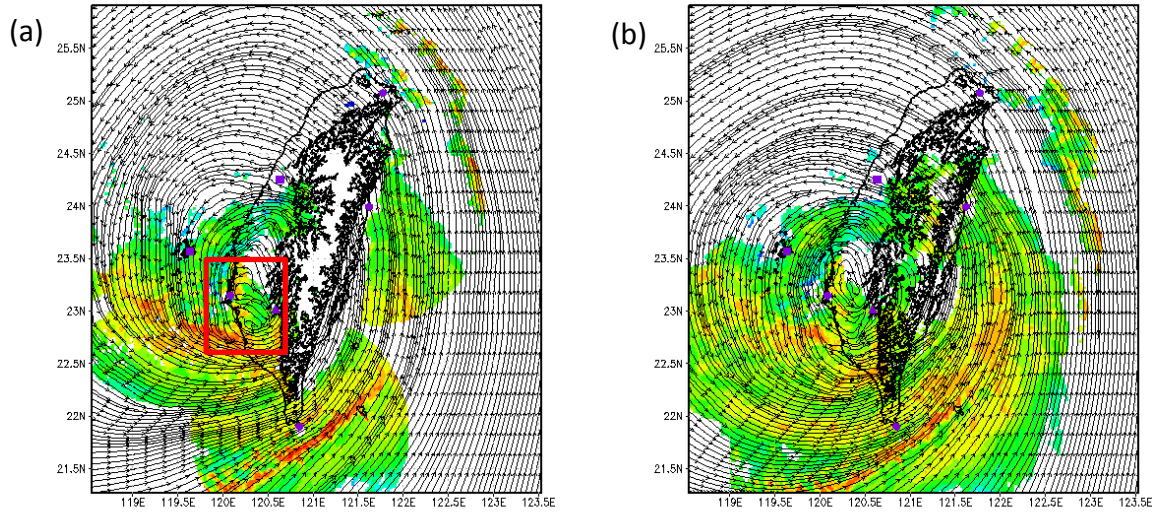


圖 4-10、1200UTC 背景場在 0846UTC 下的風場合成結果，分別為兩公里(a)、四公里(b)、八公里(c)的結果。其中風速以風標表示，長槓代表 10m/s，短槓代表 5m/s。陰影代表回波強度，數值如右側色標。紫色點為各雷達位置。

0846UTC 1200bg 7r dbz and streamline level=2KM 0846UTC 1200bg 7r dbz and streamline level=4KM



0846UTC 1200bg 7r dbz and streamline level=8KM 0846UTC 1200bg 7r dbz and streamline z=2KM

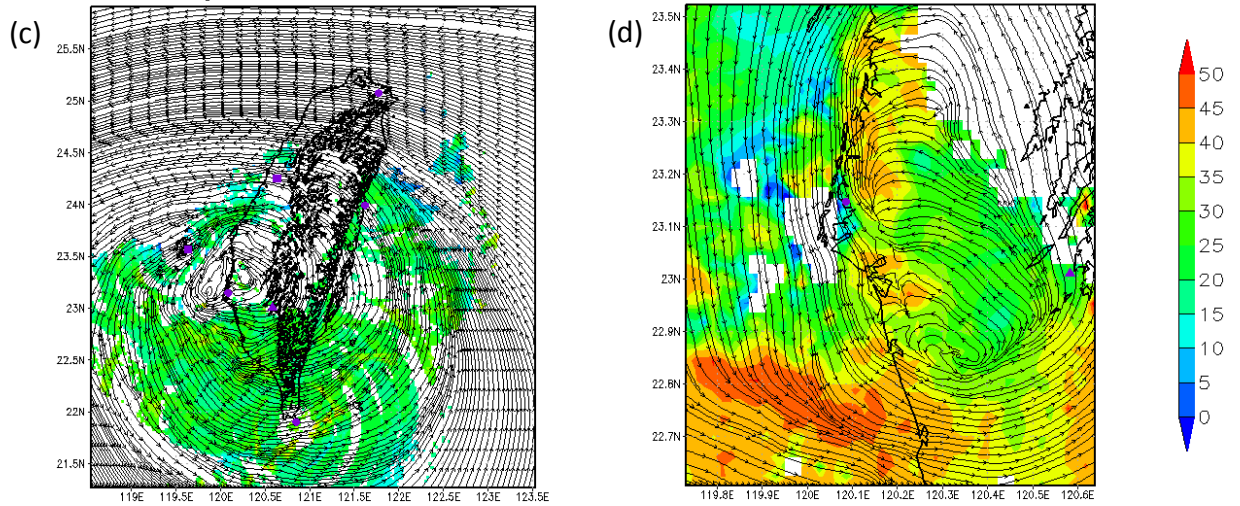


圖 4-11、1200UTC 背景場在 0846UTC 下的風場合成結果以流線表示，分別為兩公里(a)、四公里(b)、八公里(c)的結果。(d)是放大(a)紅框中區域的結果。黑線代表流線。陰影代表回波強度，數值如右側色標。紫色點為各雷達位置。

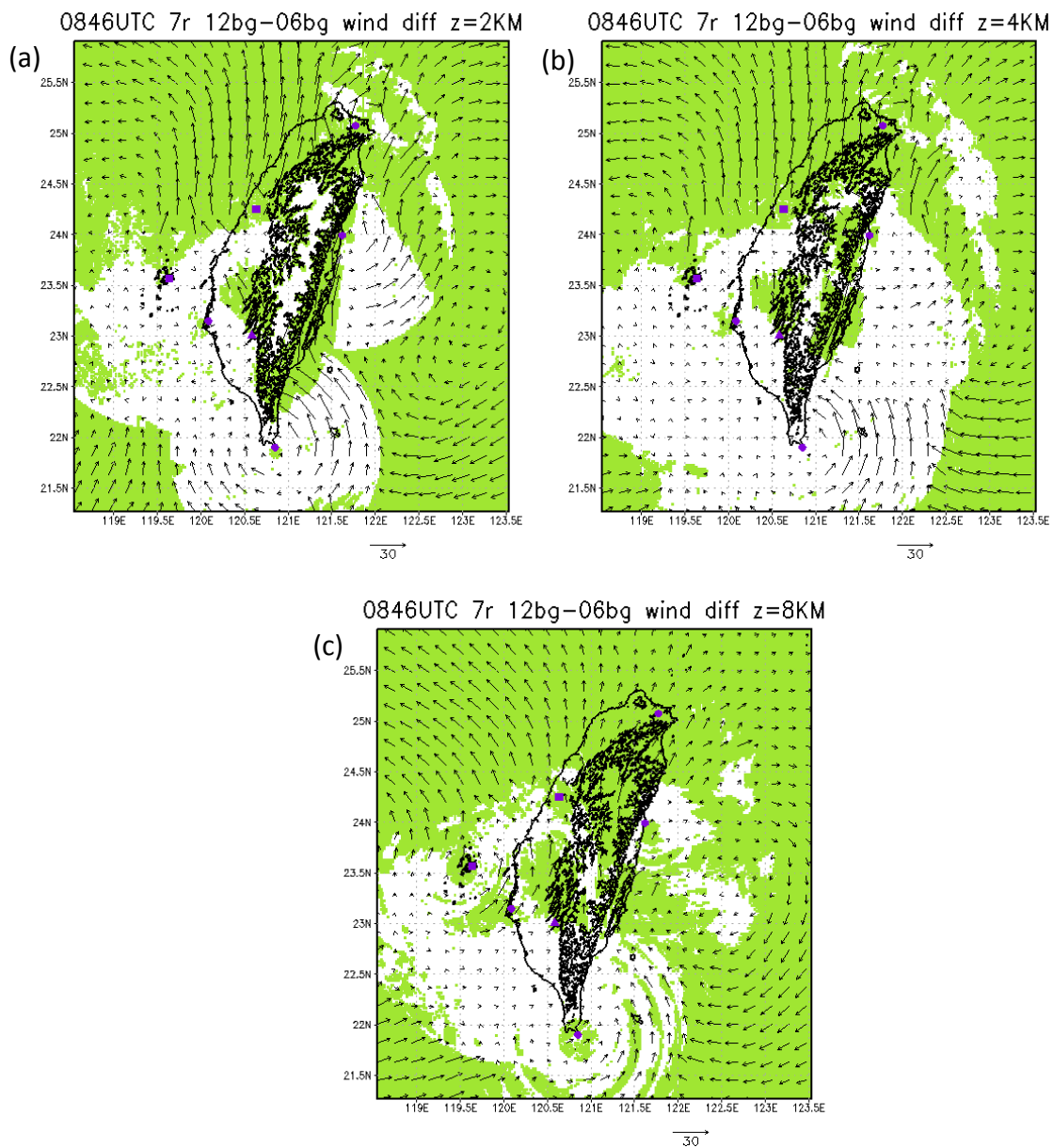


圖 4-12、0846UTC 以 1200UTC 背景場合成結果減去 0600UTC 背景場合成結果，分別為兩公里(a)、四公里(b)、八公里(c)的結果。箭頭代表風速，大小如圖下標示，以 30m/s 為單位。綠色陰影代表沒有雷達資料覆蓋區域。紫色點為各雷達位置。

0846UTC 1200bg 7radar vort and wind level=2KM 0846UTC 1200bg 7radar vort and wind level=4KM

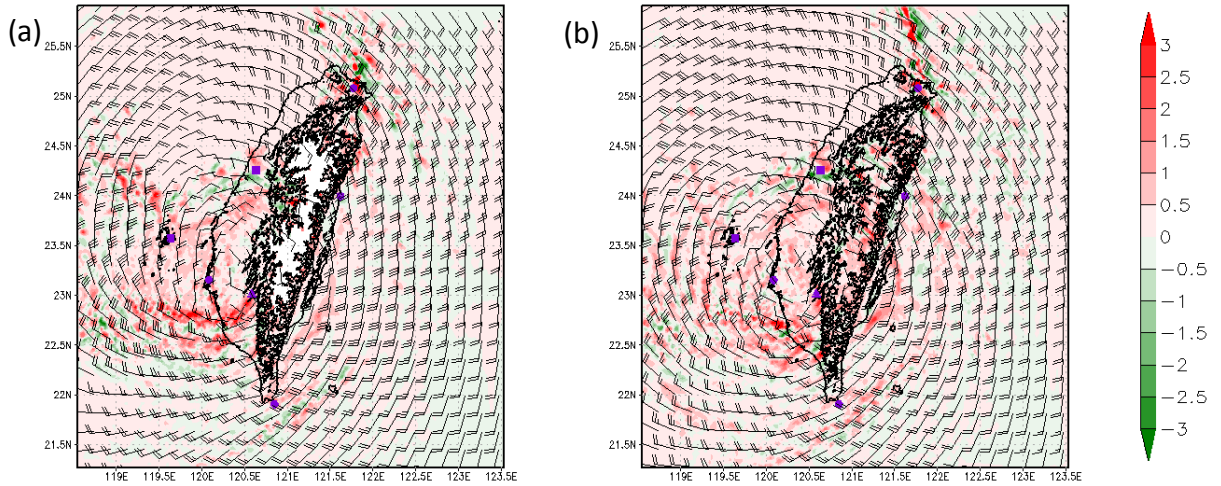


圖 4-13、0846UTC，1200UTC 背景場合成的渦度場。分別為兩公里(a)、四公里(b)的結果。其中風速以風標表示，長槓代表 10m/s，短槓代表 5m/s。陰影代表渦度，數值如右側色標，紅色為正渦度，綠色為負渦度。紫色點為各雷達位置。

0846UTC 7r 12bg-06bg vort diff z=2KM 0846UTC 7r 12bg-06bg vort diff z=4KM

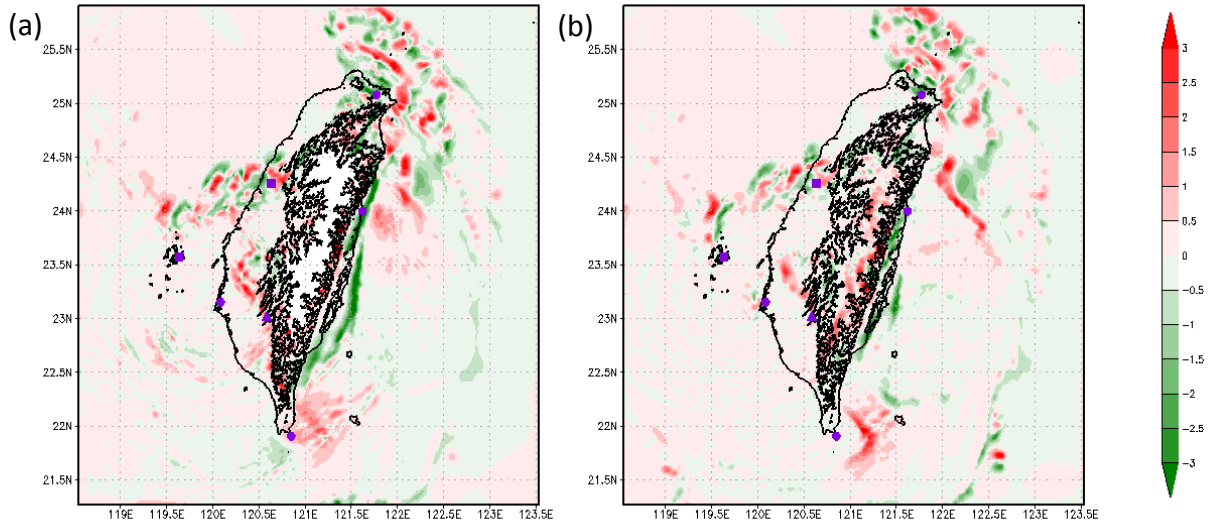


圖 4-14、0846UTC 以 1200UTC 背景場合成渦度減去 0600UTC 背景場合成渦度，分別為兩公里(a)、四公里(b)的結果。陰影代表渦度增減，數值如右側色標，紅色為增加，綠色為減少。紫色點為各雷達位置。

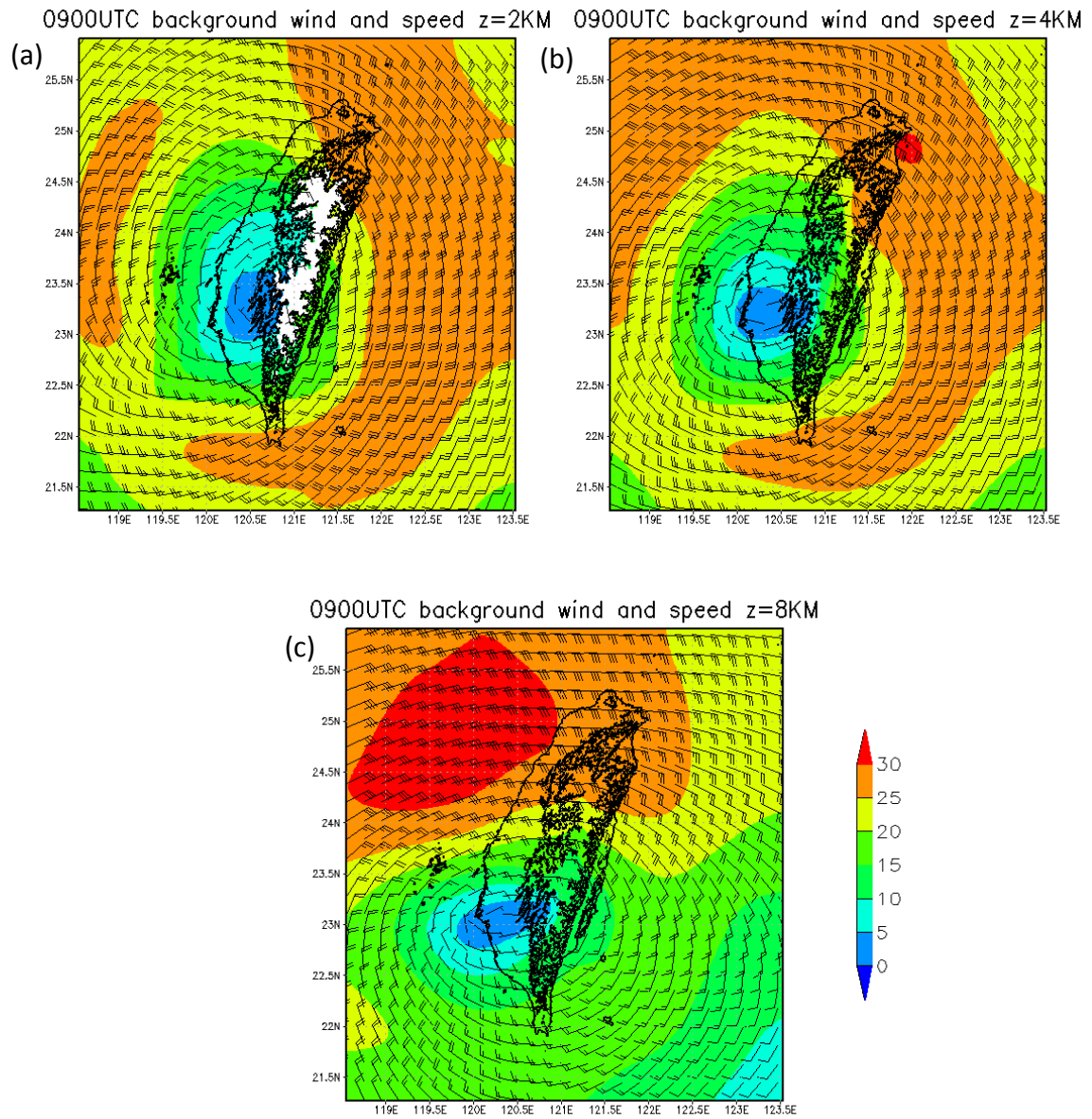


圖 4-15、0900UTC 背景風場分布。分別為兩公里(a)、四公里(b)、八公里(c)的結果。風標長槓代表 10m/s，短槓代表 5m/s。陰影為風速，各數值如右側色標所示。

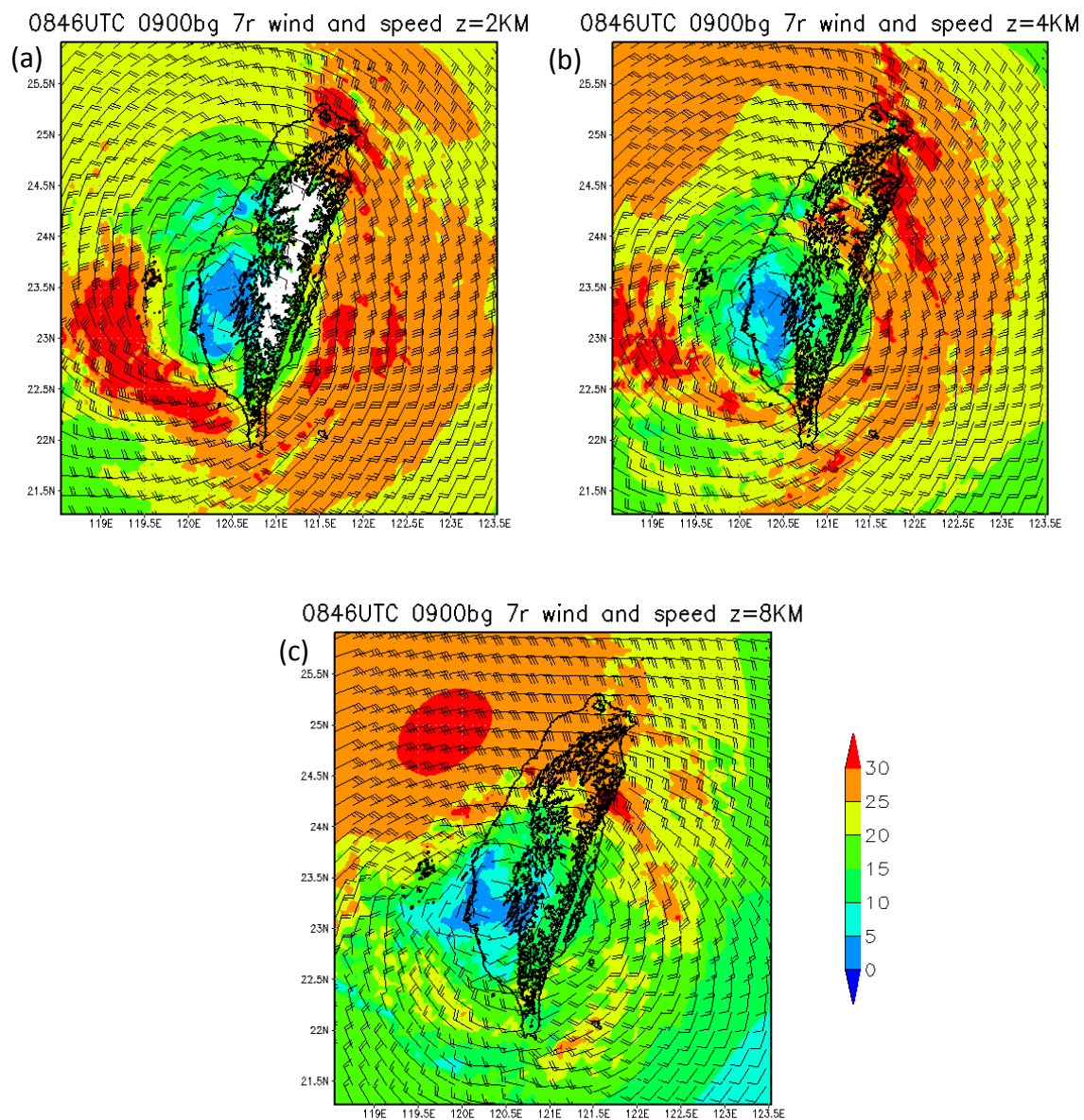


圖 4-16、0900UTC 背景場在 0846UTC 下的風場合成結果，分別為兩公里(a)、四公里(b)、八公里(c)的結果。陰影為風速，數值如圖右色標所示。風標長槓代表 10m/s，短槓代表 5m/s。

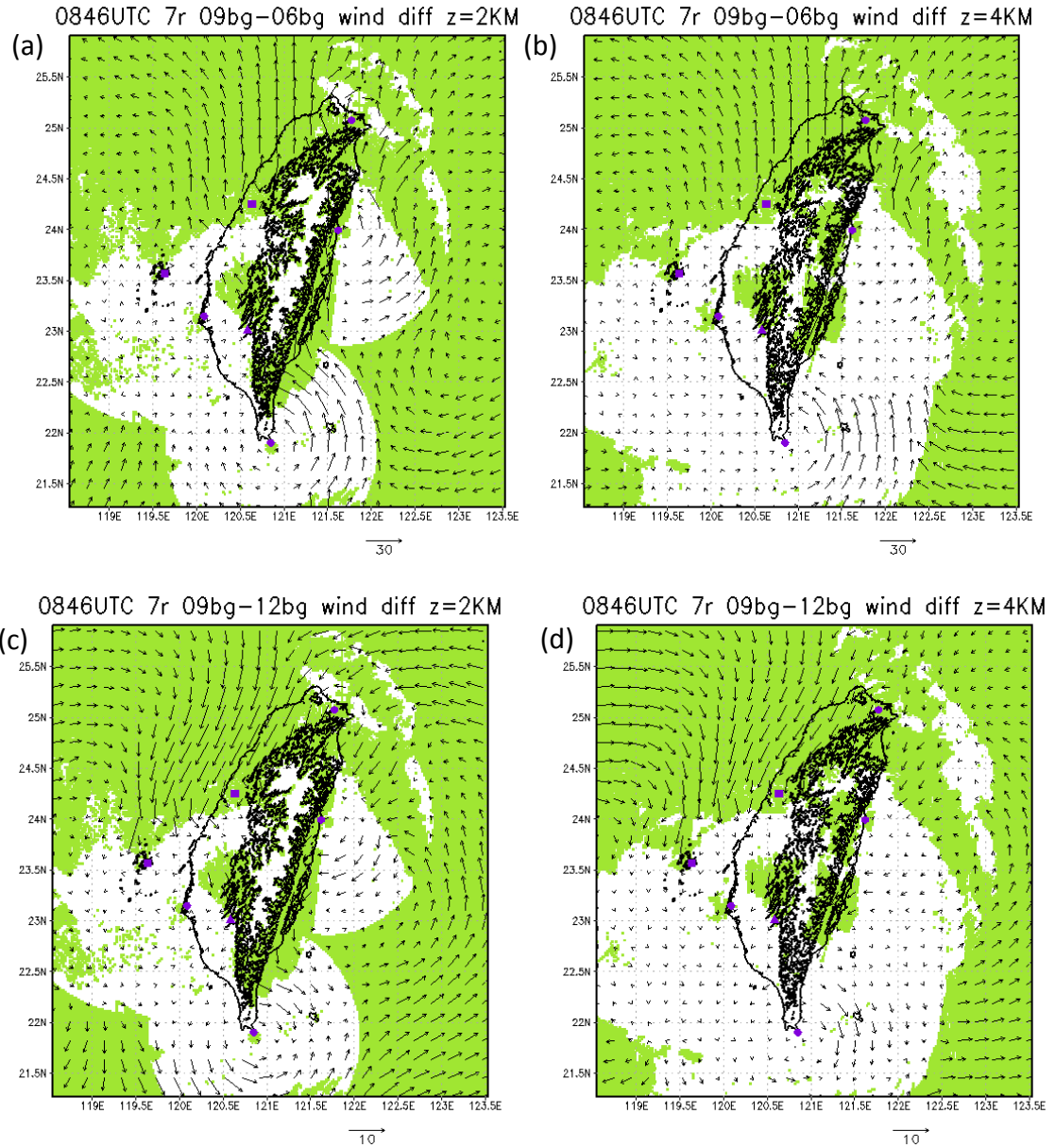


圖 4-17、0846UTC 以 0900UTC 背景場合成結果減去 0600UTC 背景場合成結果，兩公里(a)、四公里(b)。以 0900UTC 背景場合成結果減去 1200UTC 背景場合成結果，兩公里(c)、四公里(d)。箭頭代表風速，大小如圖下標示，(a、b)為 30m/s 一單位，(c、d)為 10m/s 一單位。綠色陰影代表沒有雷達資料覆蓋區域。紫色點為各雷達位置。



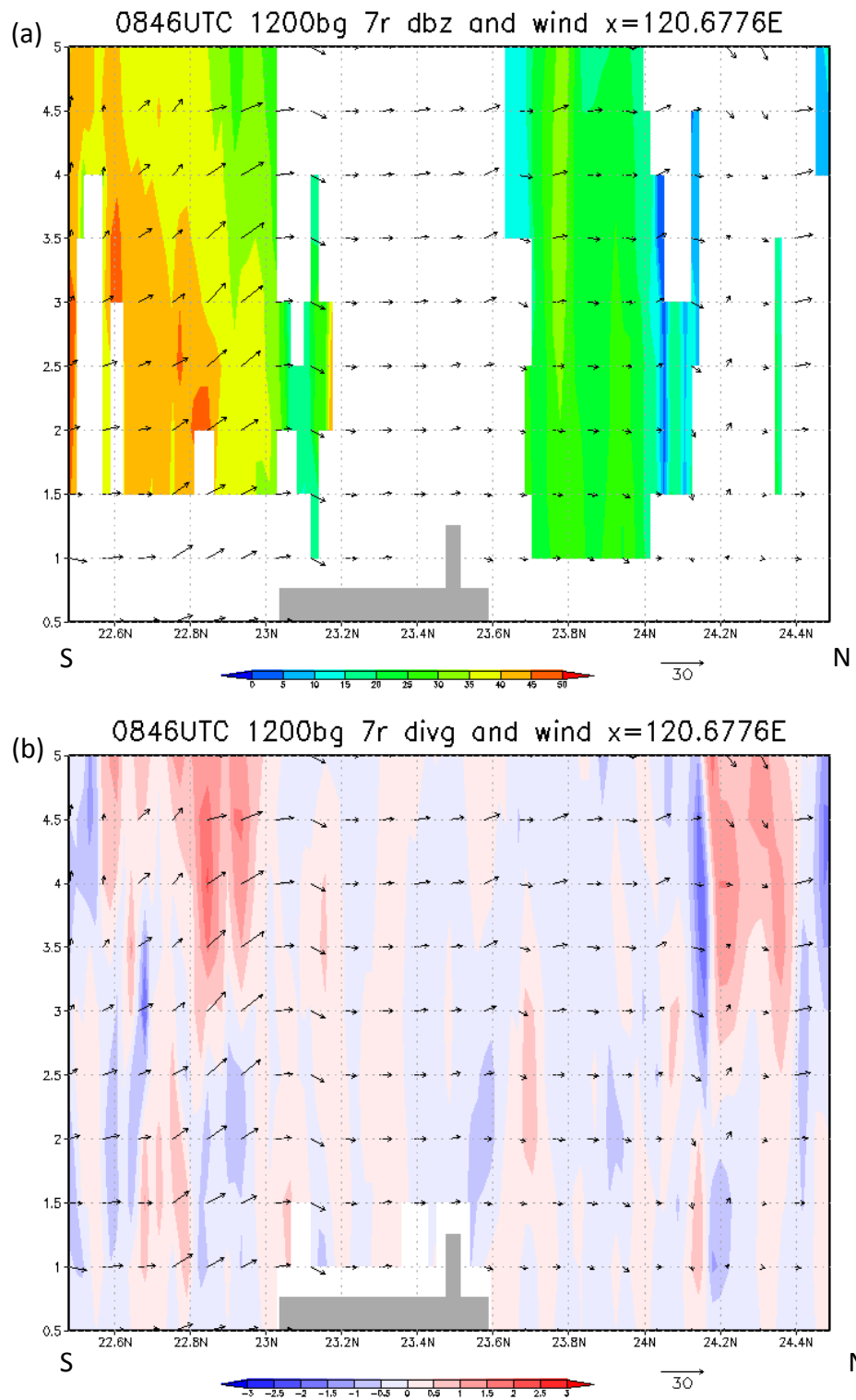


圖 4-18、切東經 120.68°的垂直剖面，圖 4-10(A)線，北緯取 22.48°到 24.5°的回波(a)和輻合輻散(b)，圖左為南右為北。灰色陰影為地形，箭頭為垂直速度乘上五倍與南北向的風合成之風速，比例尺如圖右下所示，30m/s 為一單位。彩色陰影為回波(a)和輻散值(b)，數值如圖下色標所示。

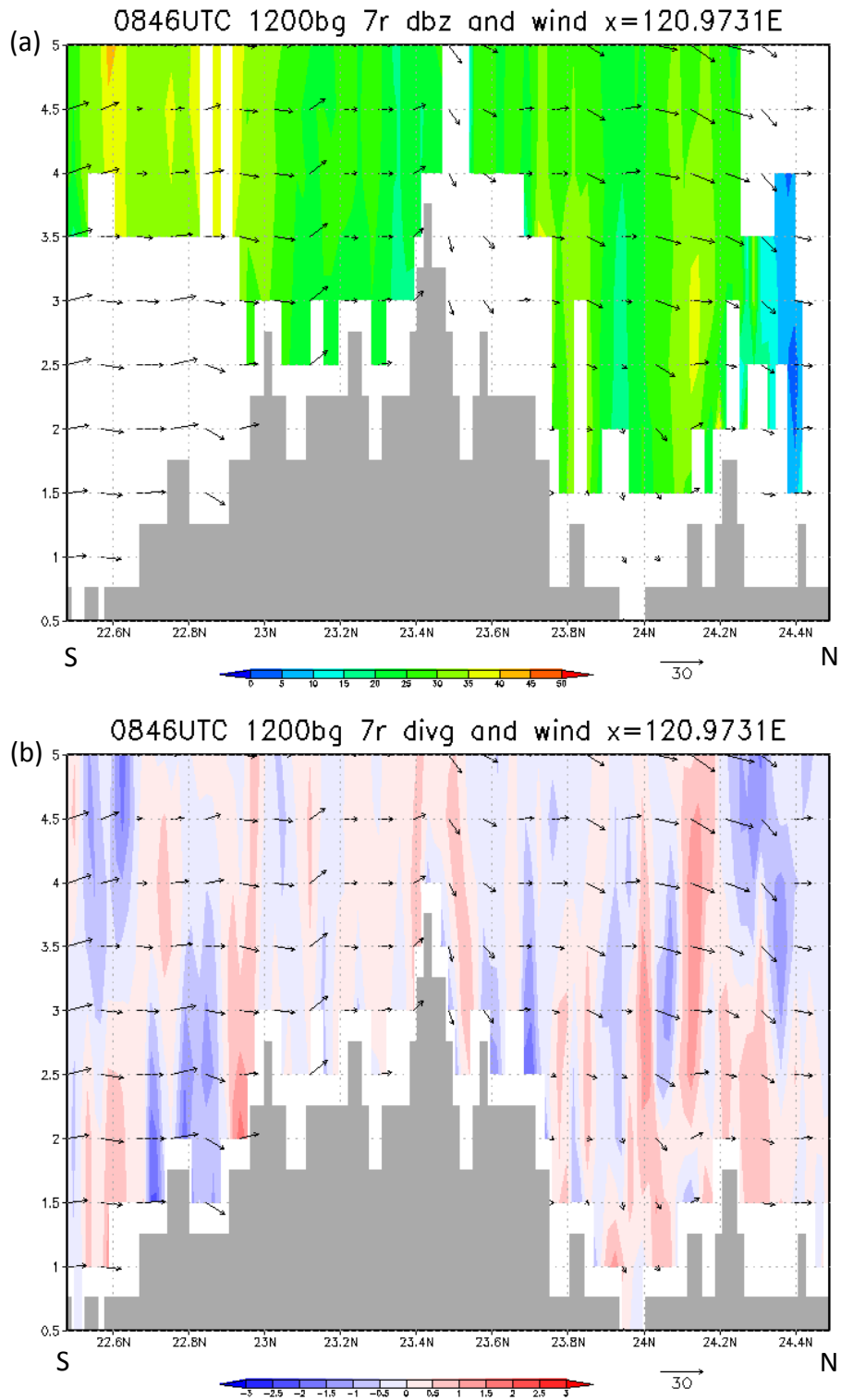


圖 4-19、切東經 120.97°的垂直剖面，圖 4-10(B)線，北緯取 22.48°到 24.5°的回波(a)和輻合輻散(b)，圖左為南右為北。灰色陰影為地形，箭頭為垂直速度乘上五倍與南北向的風合成之風速，比例尺如圖右下所示，30m/s 為一單位。彩色陰影為回波(a)和輻散值(b)，數值如圖下色標所示。

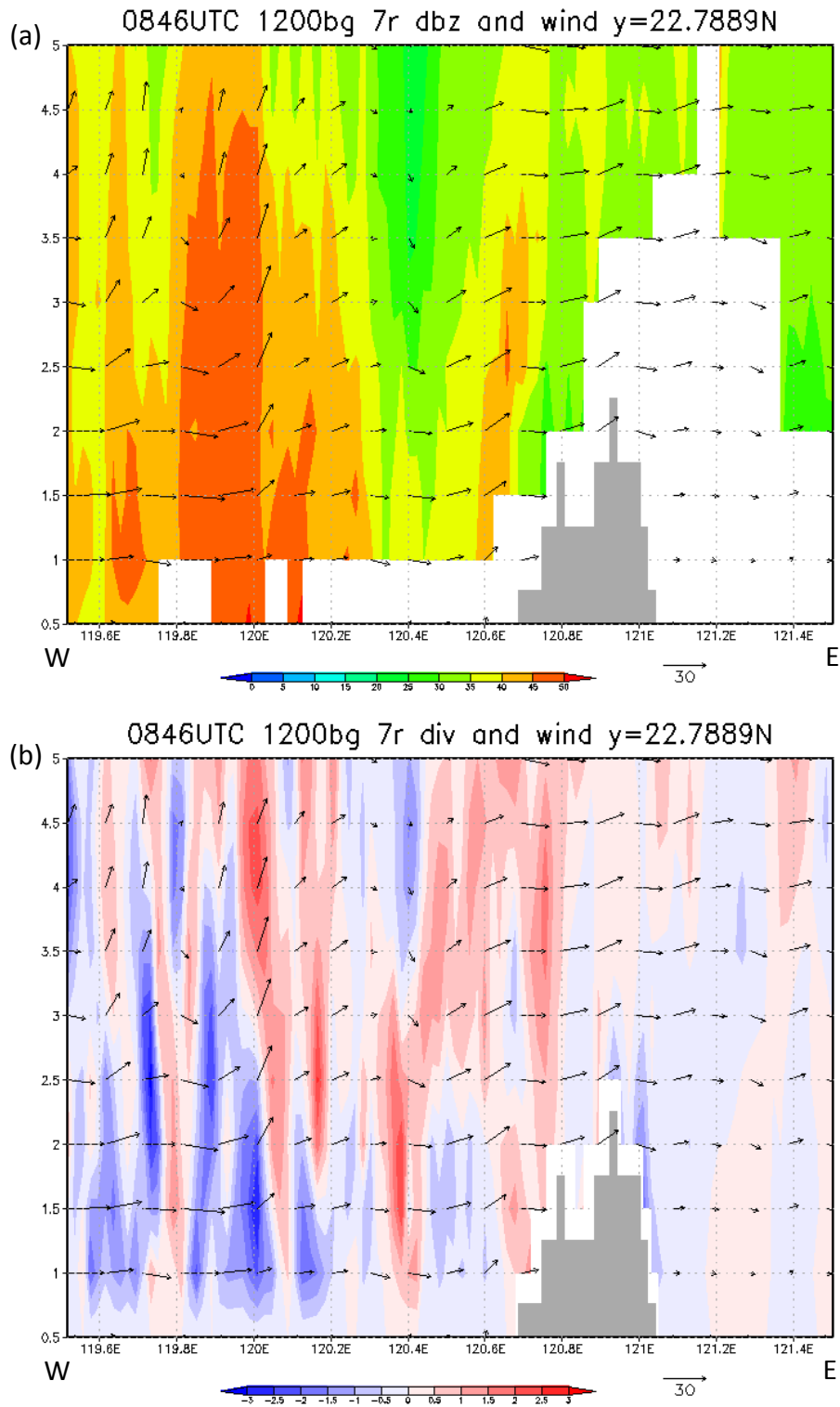


圖 4-20、切北緯 22.79° 的垂直剖面，圖 4-10(C) 線，東經取 119.5° 到 121.5° 的回波(a)和輻合輻散(b)，圖左為西右為東。灰色陰影為地形，箭頭為垂直速度乘上五倍與東西向的風合成之風速，比例尺如圖右下所示，30m/s 為一單位。彩色陰影為回波(a)和輻散值(b)，數值如圖下色標所示。

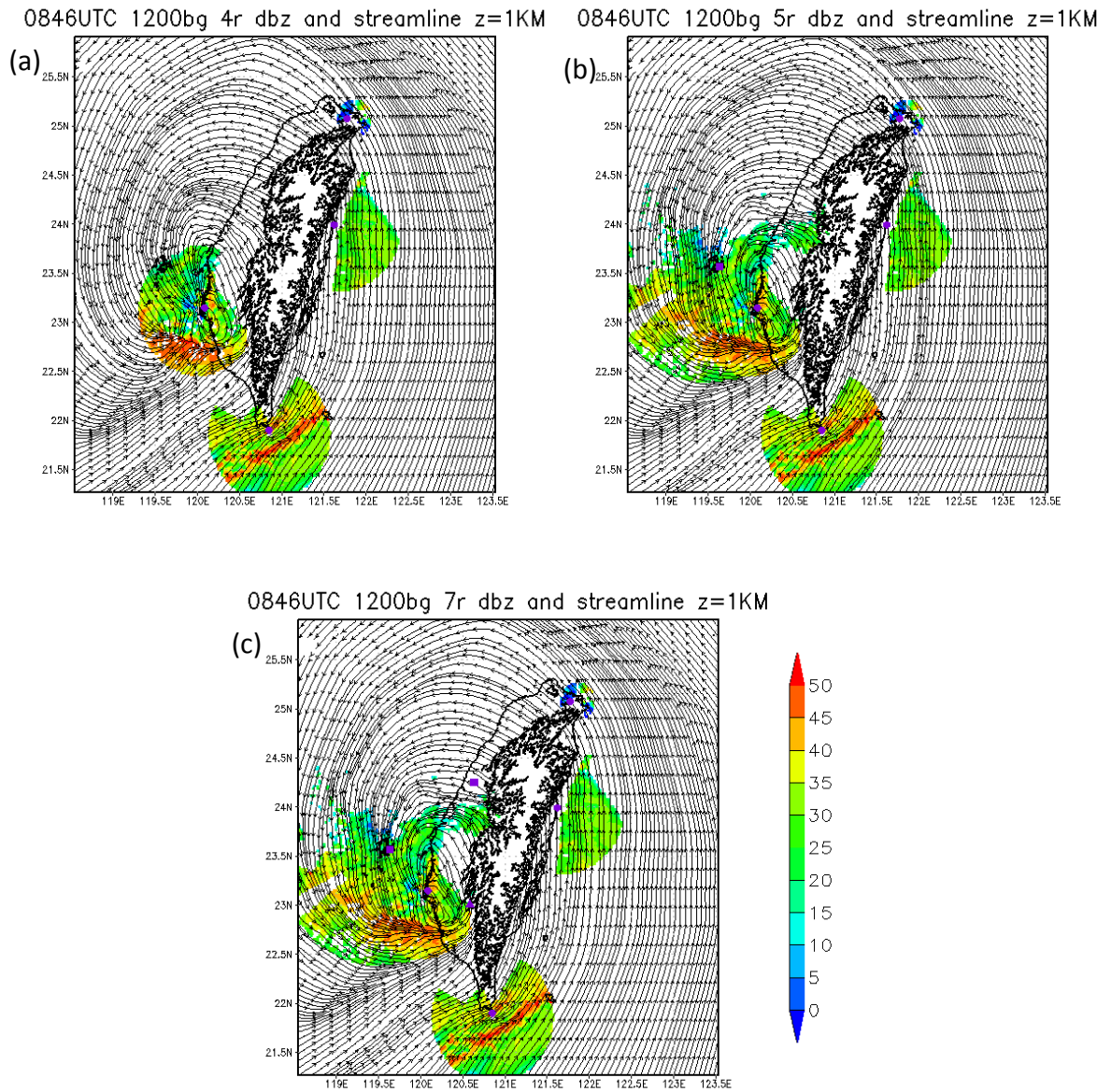


圖 4-21、一公里高度不同個數雷達合成之風場結果與回波。分別為四座(a)、五座(b)及七座(c)。黑線為流線，陰影則為回波，數值大小如右圖色標所示。

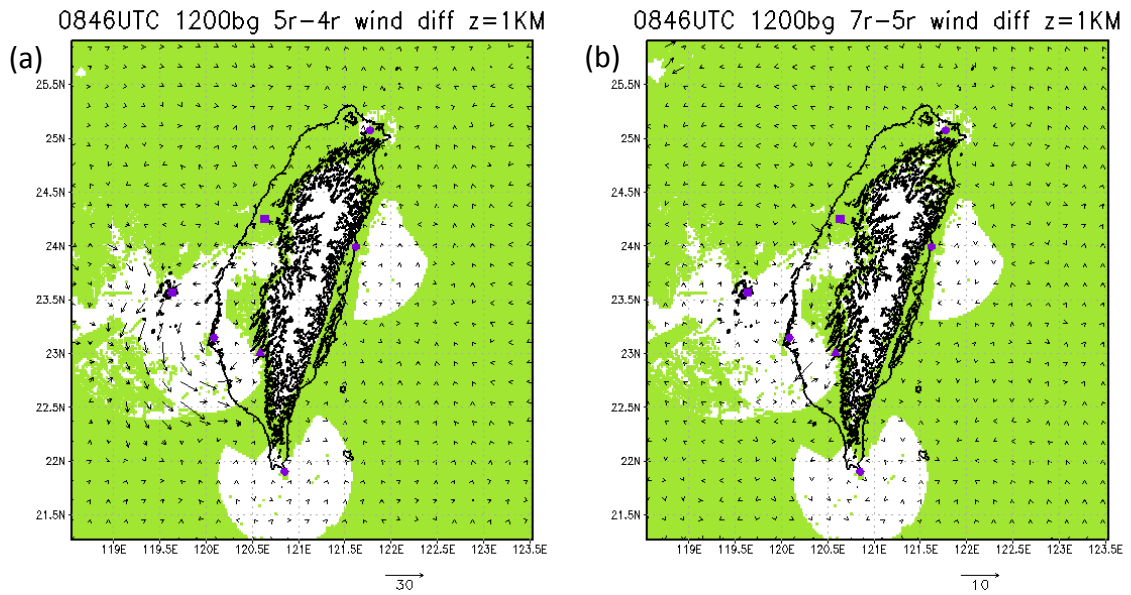


圖 4-22、一公里高度上 0846UTC 以 1200UTC 背景場合成多了馬公資料(a)及多了清泉崗和 TEAM-R(b)的差異。箭頭代表風速，大小如圖下標示，(a)為 30m/s 一單位，(b)為 10m/s 一單位。綠色陰影代表沒有雷達資料覆蓋區域。紫色點為各雷達位置。

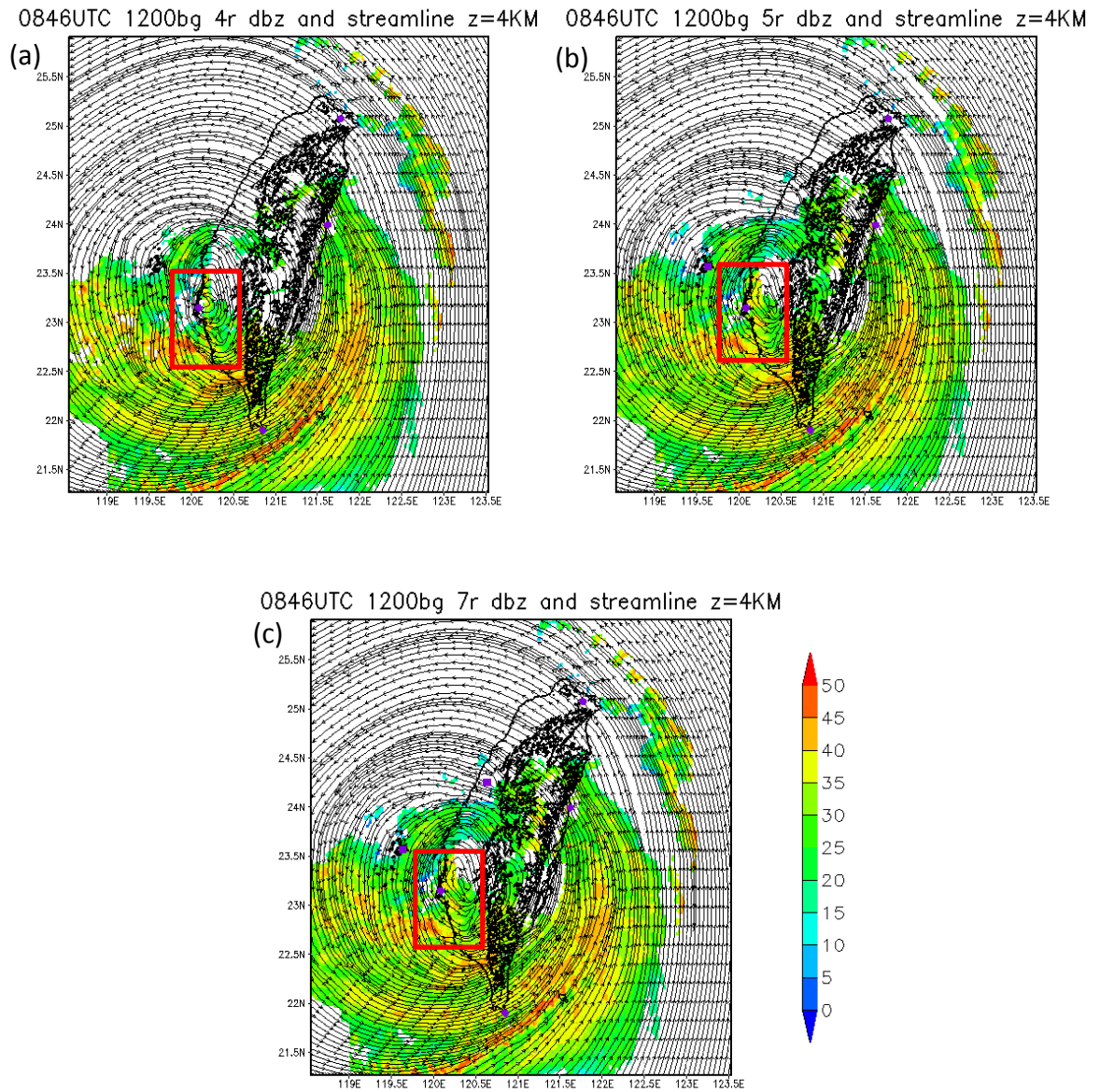


圖 4-23、四公里高度不同個數雷達合成之風場結果與回波。分別為四座(a)、五座(b)及七座(c)。黑線為流線，陰影則為回波，數值大小如右圖色標所示。

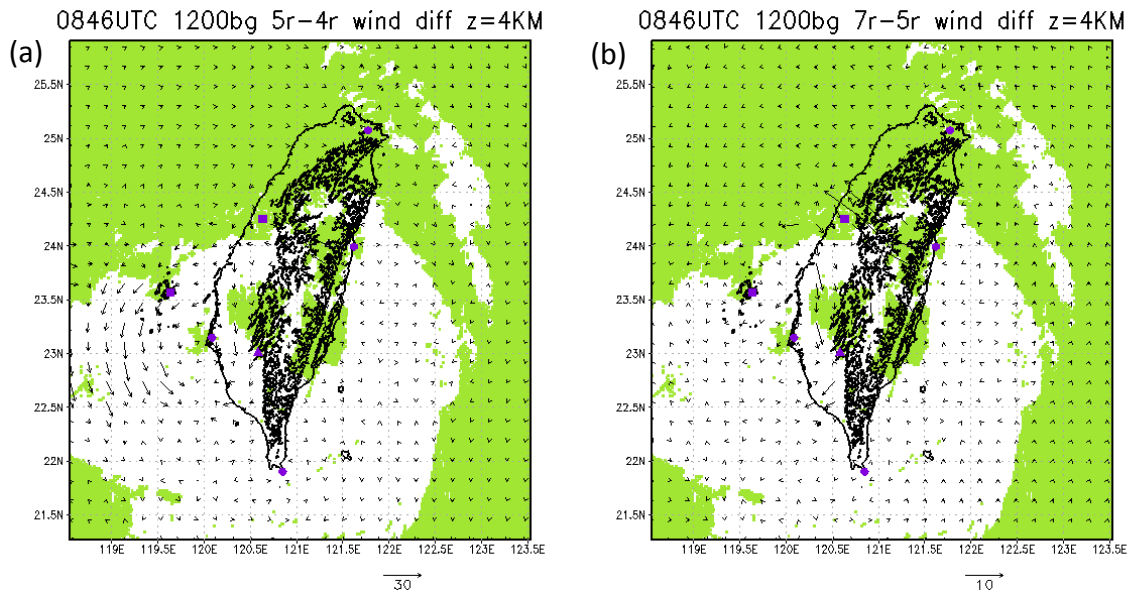


圖 4-24、四公里高度上 0846UTC 以 1200UTC 背景場合成了多了馬公資料(a)及多了清泉崗和 TEAM-R(b)的差異。箭頭代表風速，大小如圖下標示，(a)為 30m/s 一單位，(b)為 10m/s 一單位。綠色陰影代表沒有雷達資料覆蓋區域。紫色點為各雷達位置。

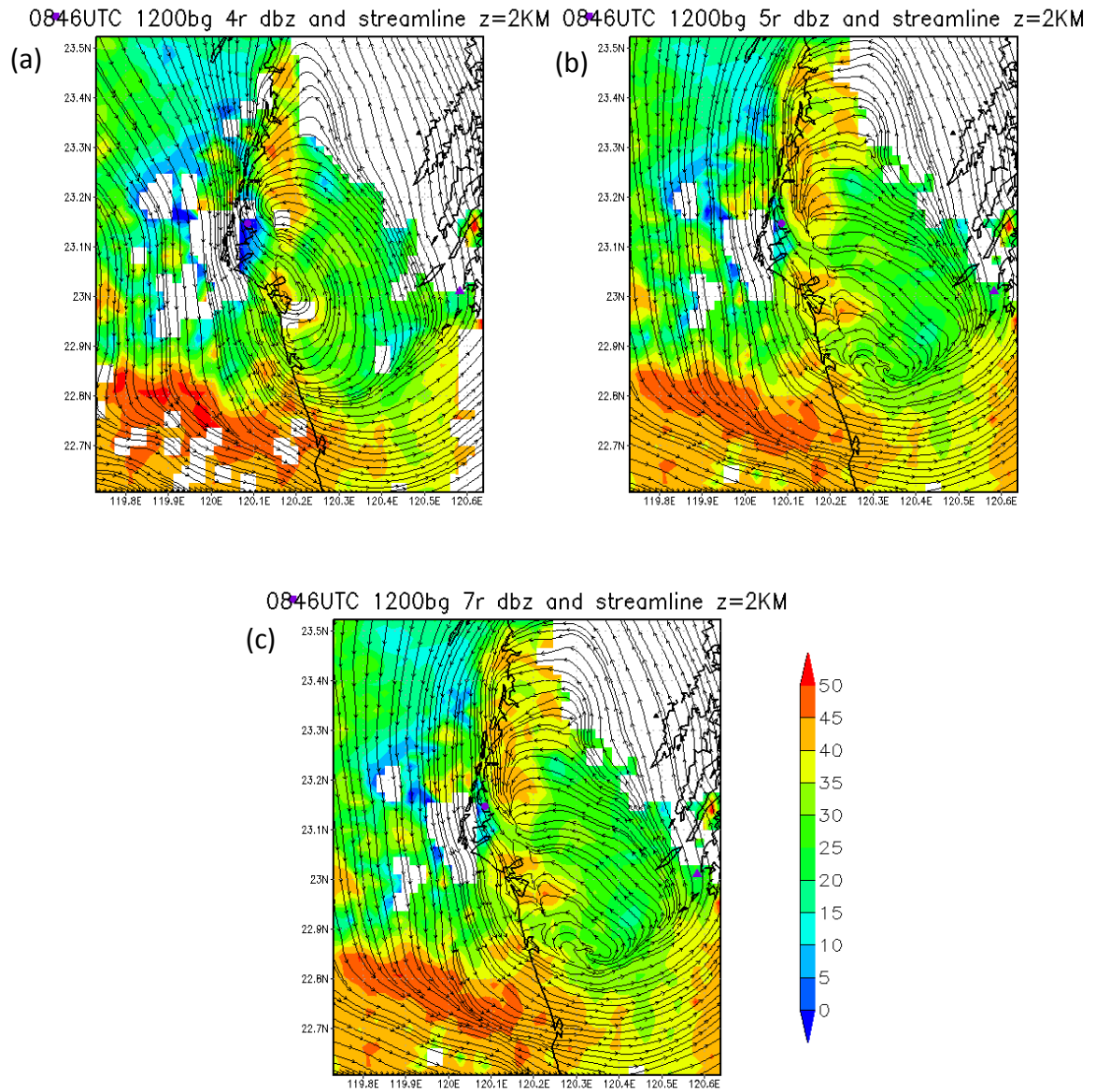
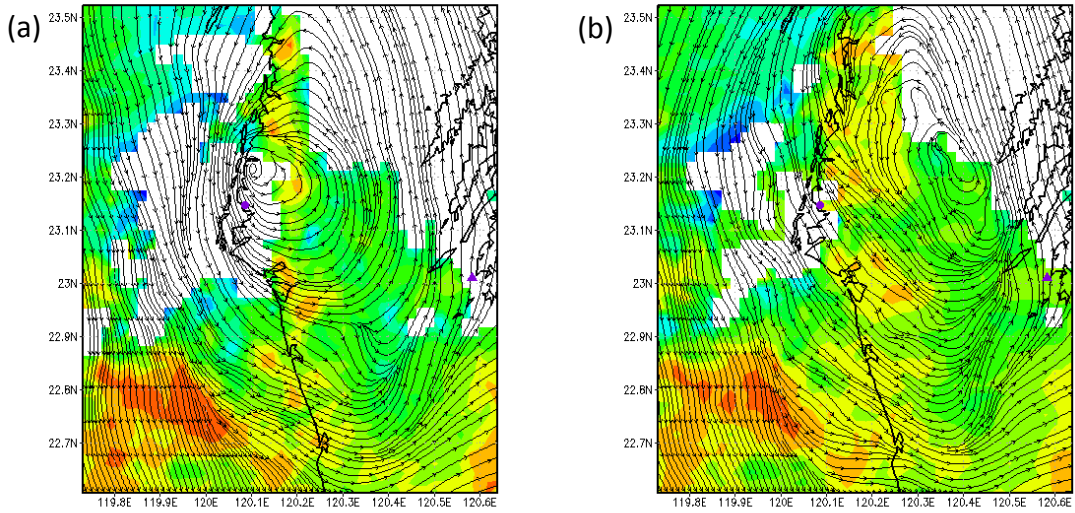


圖 4-25、兩公里高度切 4-23 紅框範圍不同個數雷達合成之風場結果與回波。分別為四座(a)、五座(b)及七座(c)。黑線為流線，陰影則為回波，數值大小如右圖色標所示。



0846UTC 1200bg 4r dbz and streamline z=4KM 0846UTC 1200bg 5r dbz and streamline z=4KM



0846UTC 1200bg 7r dbz and streamline z=4KM

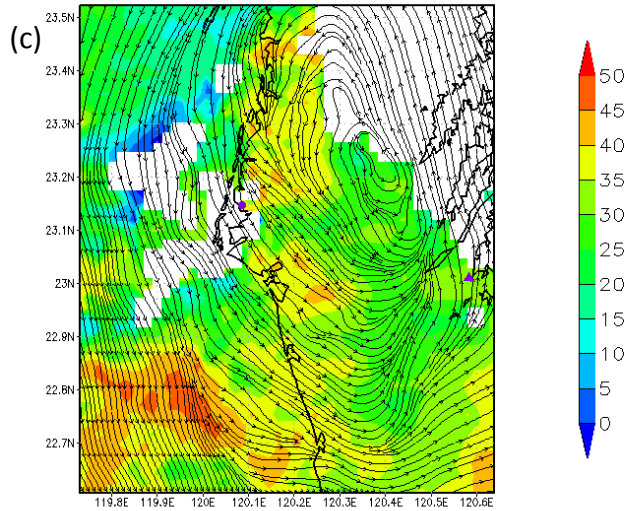


圖 4-26、四公里高度切 4-23 紅框範圍不同個數雷達合成之風場結果與回波。分別為四座(a)、五座(b)及七座(c)。黑線為流線，陰影則為回波，數值大小如右圖色標所示。

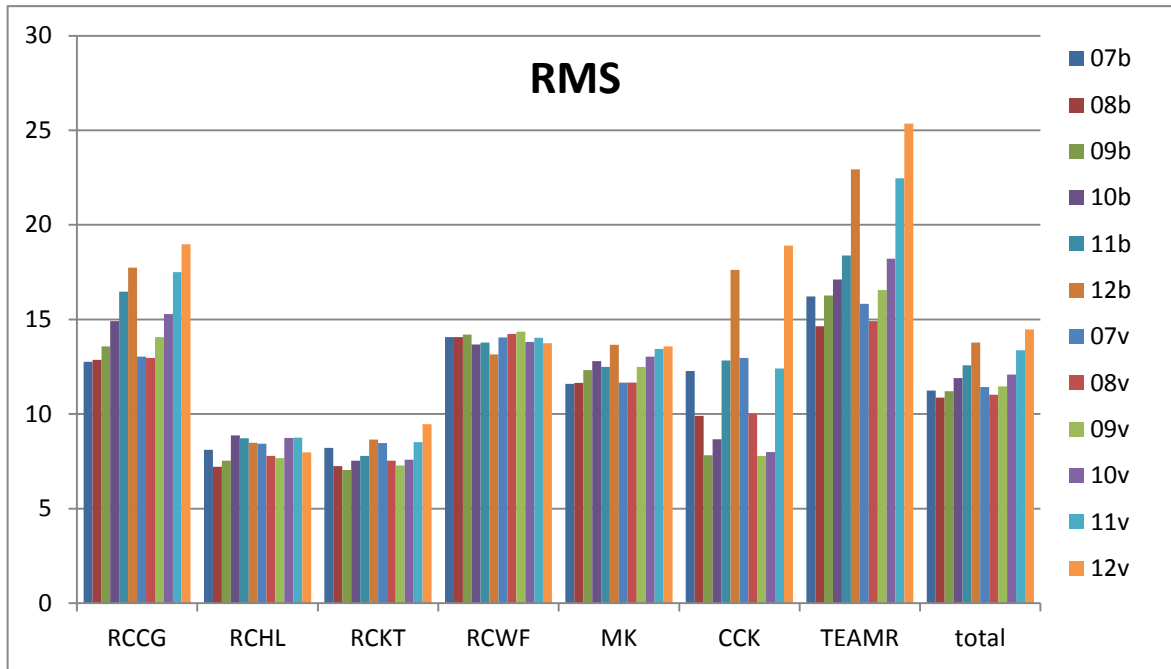
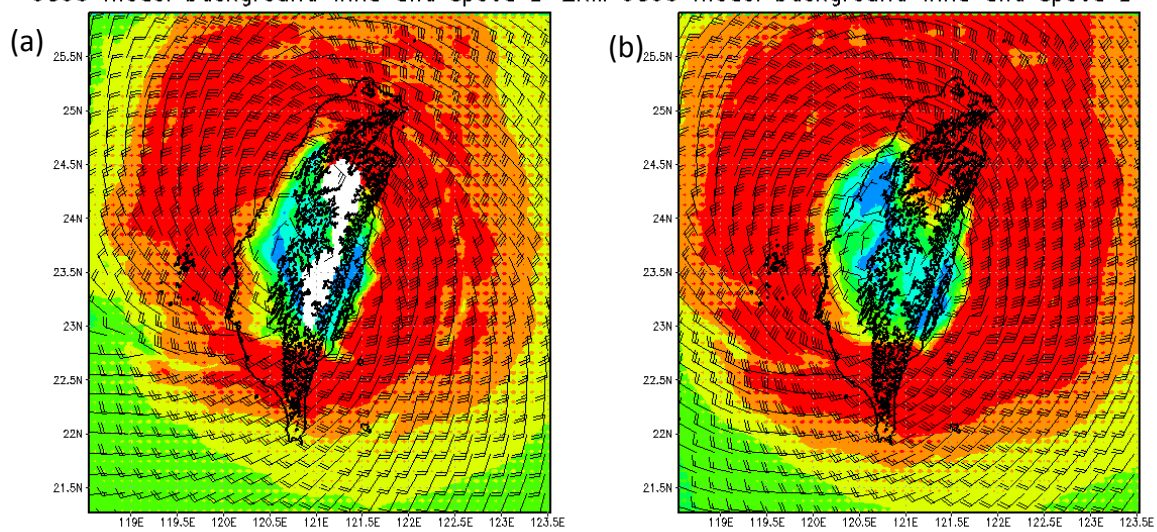


圖 5-1 各模式輸出結果投影到各雷達與徑向風比較的方均根差異。各長條代表不同模式輸出時間結果。數字代表時間，b 是第一種模式微物理設定，v 為第二種模式微物理設定。橫軸由左到右代表分別投影到七股、花蓮、墾丁、五分山、馬公、清泉崗、TEAM-R 以及整個合成範圍的風場方均根差異。縱軸則為方均根數值。

0800 model background wind and speed z=2KM 0800 model background wind and speed z=4KM



0800 model background wind and speed z=8KM

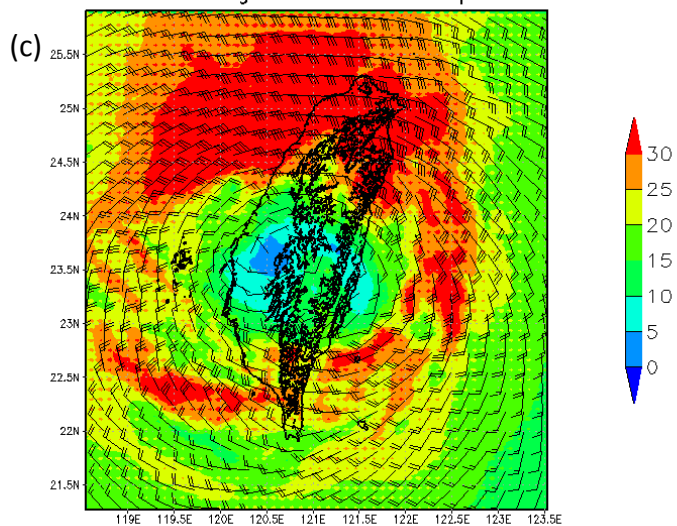
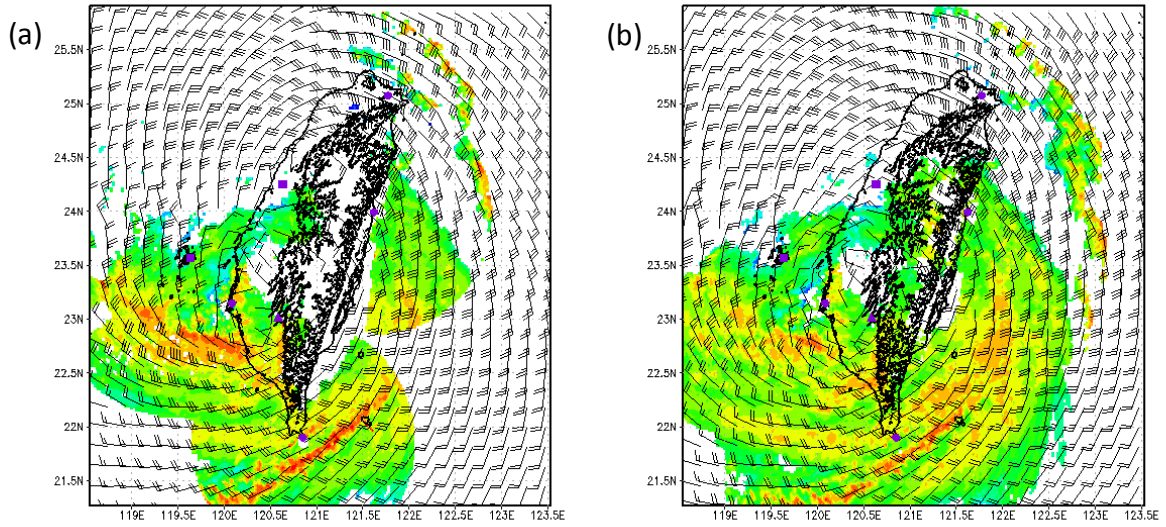


圖 5-2、模式 0800UTC 輸出結果所做出之背景場。分別為兩公里(a)、四公里(b)、八公里(c)的結果。其中風速以風標表示，長槓代表 10m/s，短槓代表 5m/s，陰影為風速，數值如右側所示。

0846UTC 0800model bg 7r dbz and wind z=2KM 0846UTC 0800model bg 7r dbz and wind z=4KM



0846UTC 0800model bg 7r dbz and wind z=8KM

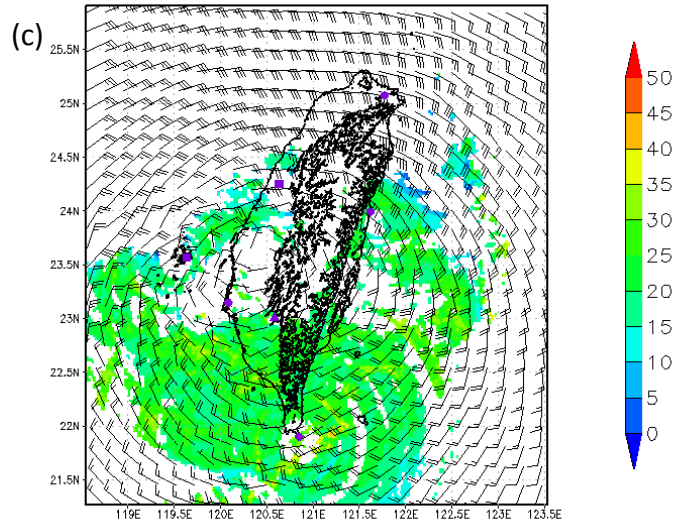


圖 5-3、0800UTC 模式輸出背景場在 0846UTC 下的風場合成結果，分別為兩公里(a)、四公里(b)、八公里(c)的結果。其中風速以風標表示，長槓代表 10m/s，短槓代表 5m/s。陰影代表回波強度，數值如右側色標。紫色點為各雷達位置。

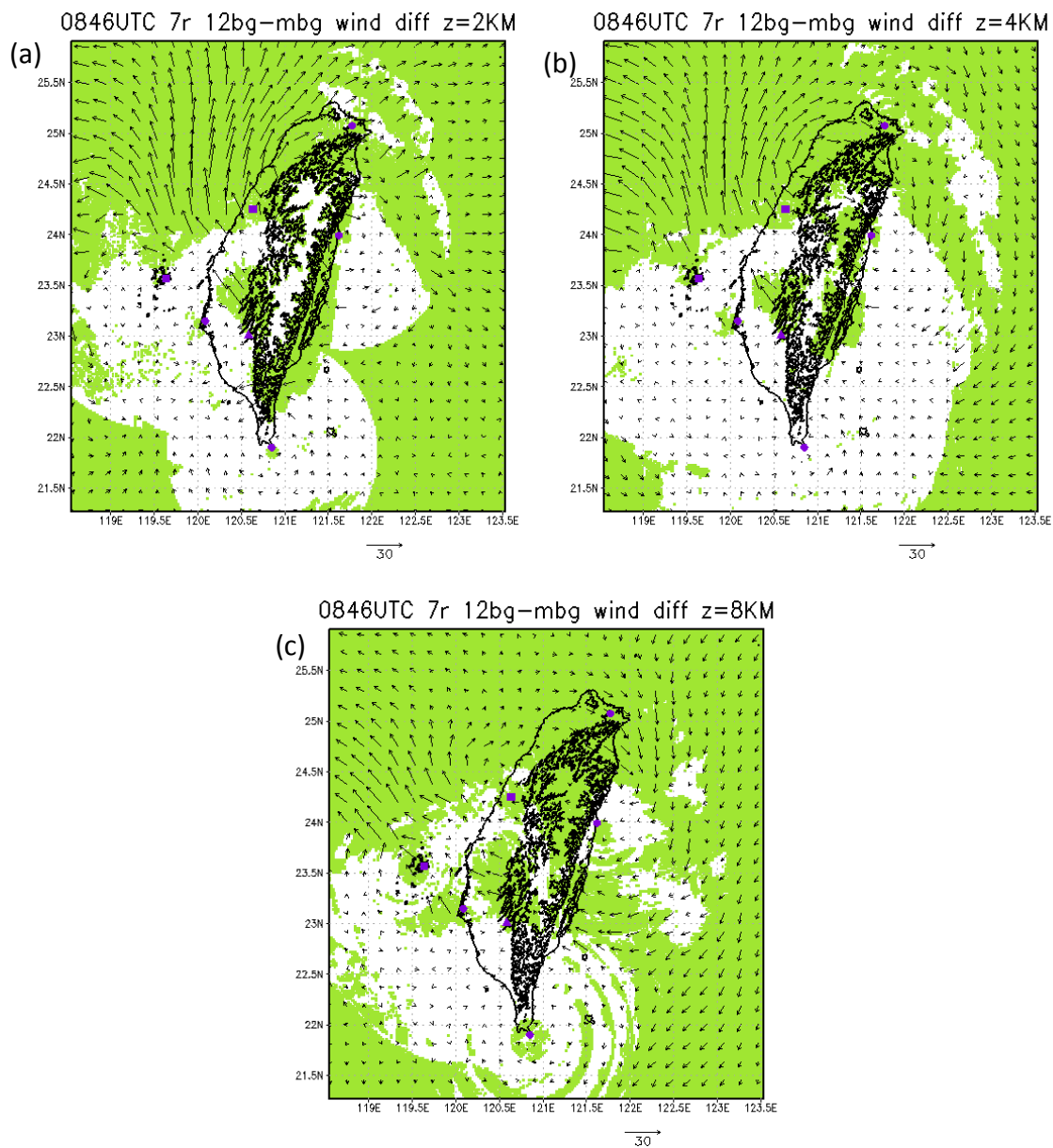


圖 5-4、0846UTC 以 1200UTC 背景場合成結果減去 0800UTC 模式輸出背景場合成結果，分別為兩公里(a)、四公里(b)、八公里(c)的結果。箭頭代表風速，大小如圖下標示，以 30m/s 為單位。綠色陰影代表沒有雷達資料覆蓋區域。紫色點為各雷達位置。

0846UTC 0800model bg 7r vort and wind z=2KM 0846UTC 0800model bg 7r vort and wind z=4KM

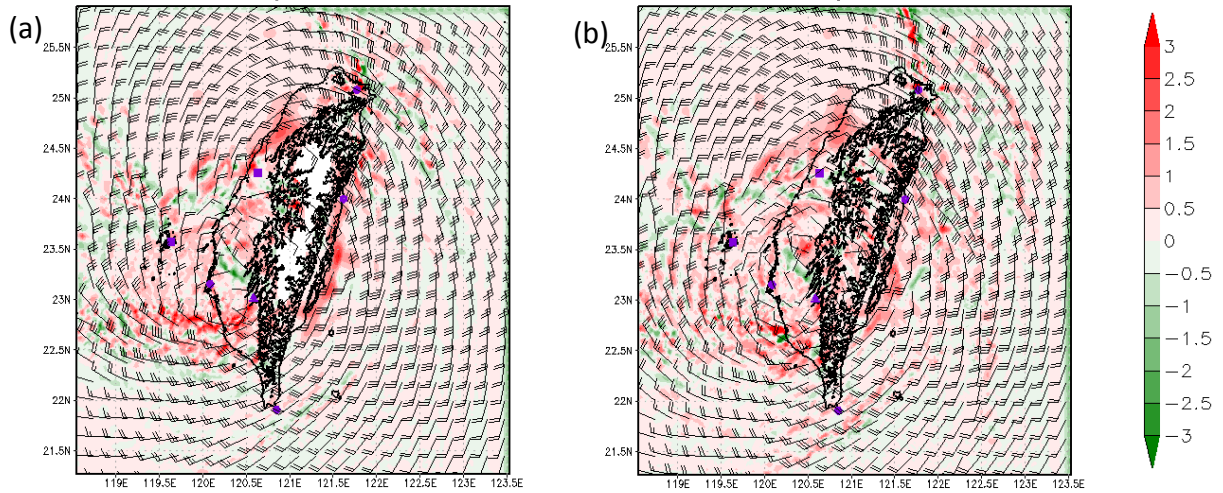


圖 5-5、0846UTC，0800UTC 模式輸出背景場合成的渦度場。分別為兩公里(a)、四公里 (b)的結果。其中風速以風標表示，長槓代表 10m/s，短槓代表 5m/s。陰影代表 渦度，數值如右側色標，紅色為正渦度，綠色為負渦度。紫色點為各雷達位置。

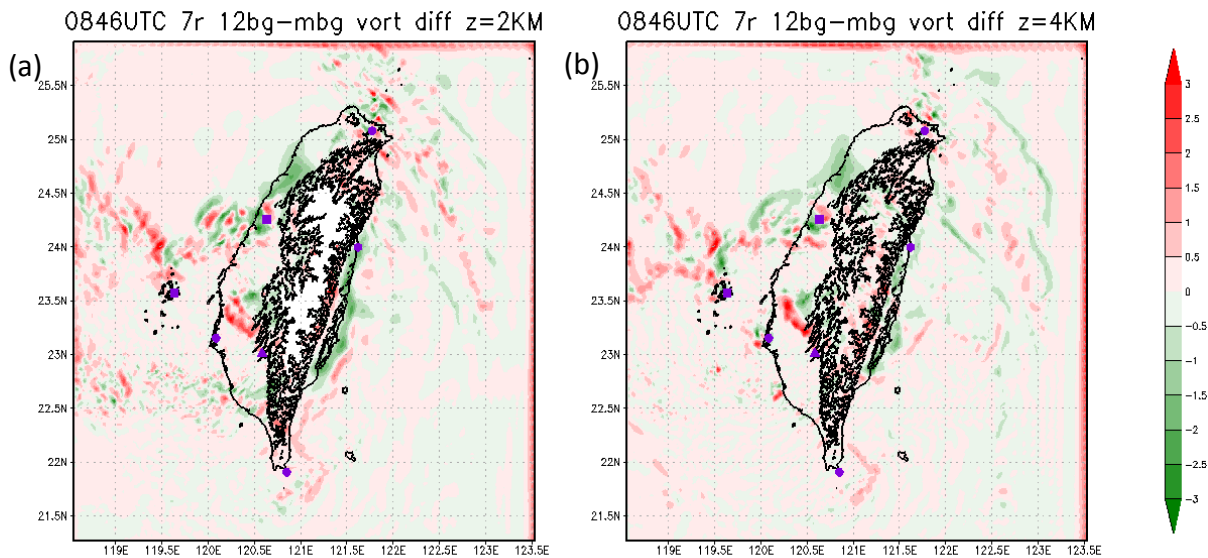


圖 5-6、0846UTC 渦度場以 1200UTC 背景場合成減去 0800UT 模式輸出背景場合成結果 差異，分別為兩公里(a)、四公里(b)的結果。陰影代表渦度，數值如右側色標， 紅色為增加，綠色為減少。紫色點為各雷達位置。

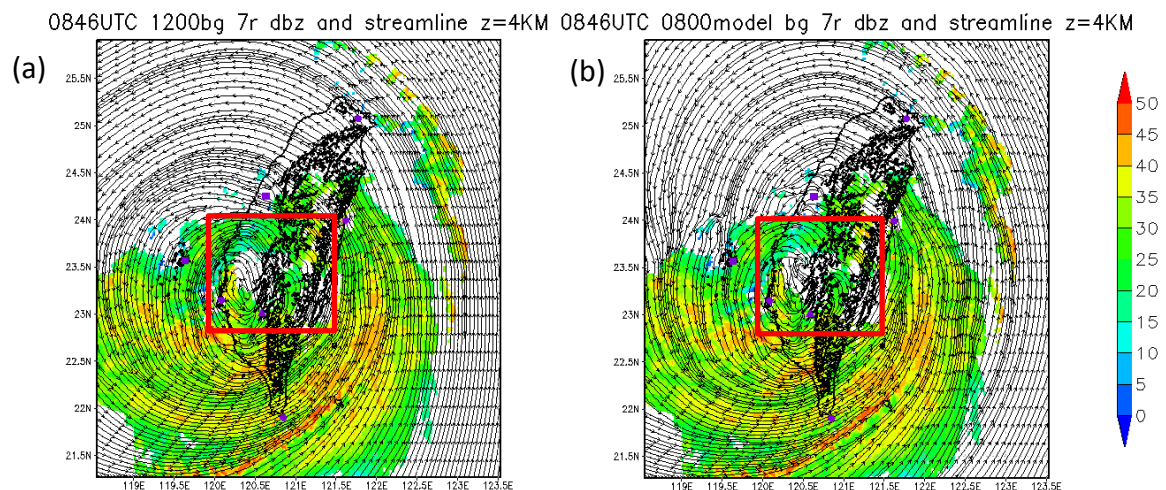


圖 5-7、四公里高度不同背景場合成之風場結果與回波。分別為 1200UTC 背景場(a)以及 0800UTC 模式輸出背景場(b)。黑線為流線，陰影則為回波，數值大小如右圖色標所示。

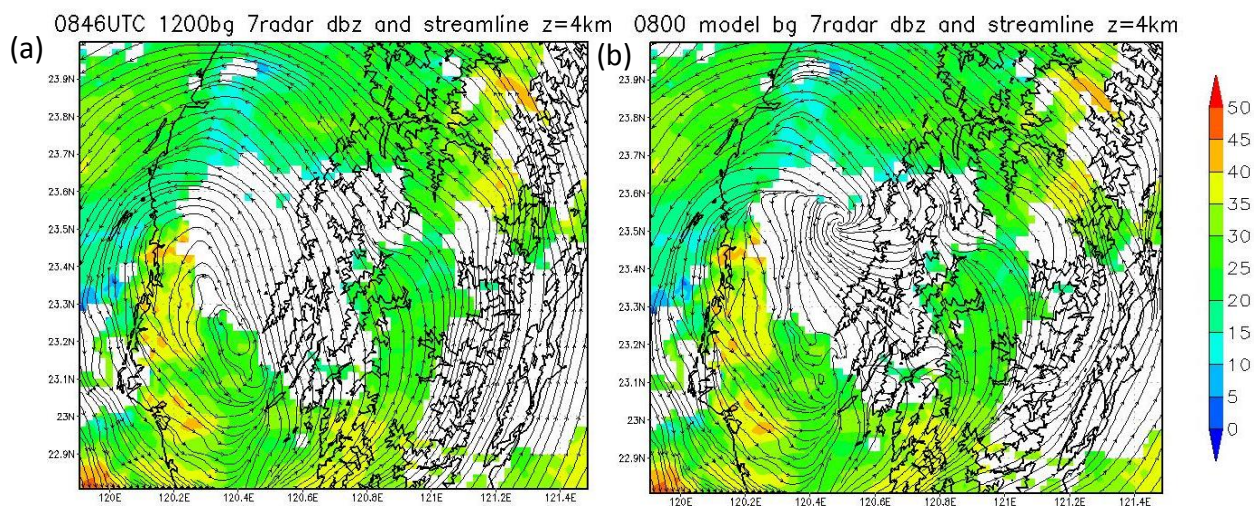
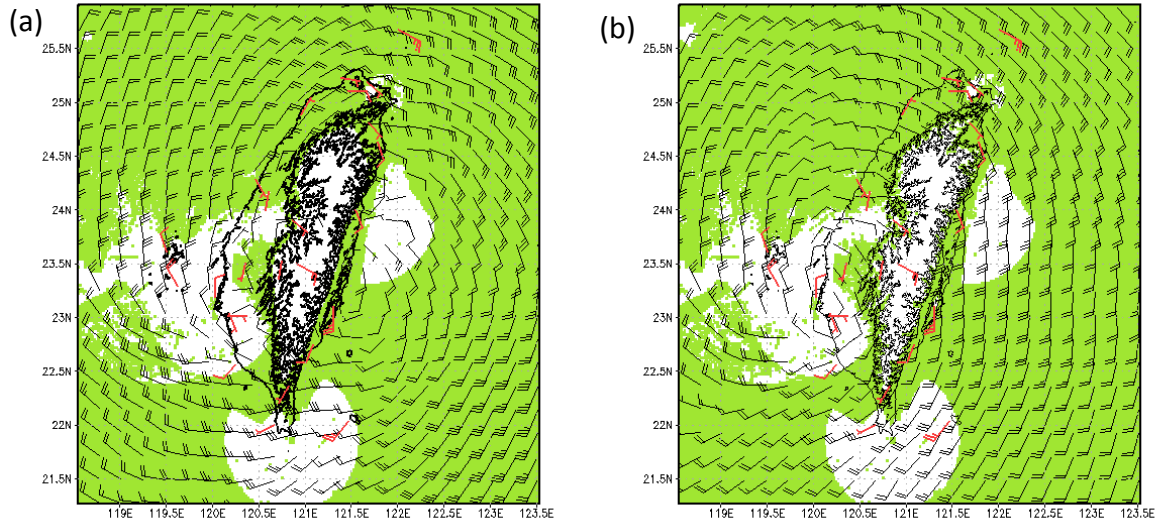


圖 5-8、四公里高度不同背景場合成之風場結果與回波，取圖 5-7 紅框範圍。分別為 1200UTC 背景場(a)以及 0800UTC 模式輸出背景場(b)。黑線為流線，陰影則為回波，數值大小如右圖色標所示。

0846UTC 0600bg CWB ave. wind and z=1KM wind 0846UTC 1200bg CWB ave. wind and z=1KM wind



0846UTC 0900bg CWB ave. wind and z=1KM wind 0846UTC 0800 model bg CWB ave. wind and z=1KM wind

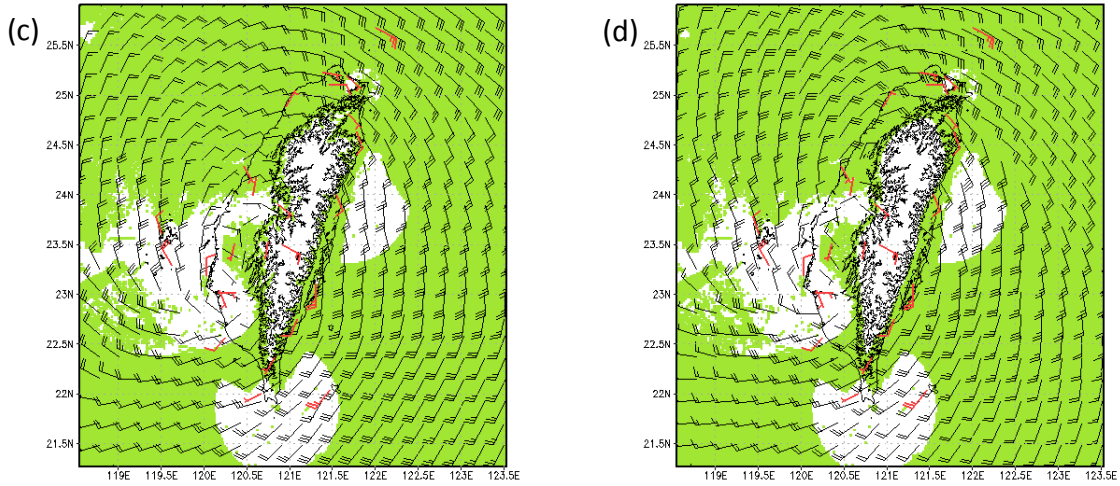


圖 6-1、地面測站觀測的風(紅色風標)與各背景場合成結果(黑色風標)比較，背景場分別為 0600UTC(a)，1200UTC(b)、0900UTC(c)以及 0800UTC 模式輸出背景場(d)。其中風速以風標表示，長槓代表 10m/s，短槓代表 5m/s。綠色陰影為沒有雷達覆蓋地區。



0846UTC 1200bg 7radar dbz and wind level=10KM 0846UTC 1200bg 7radar dbz and wind level=10KM

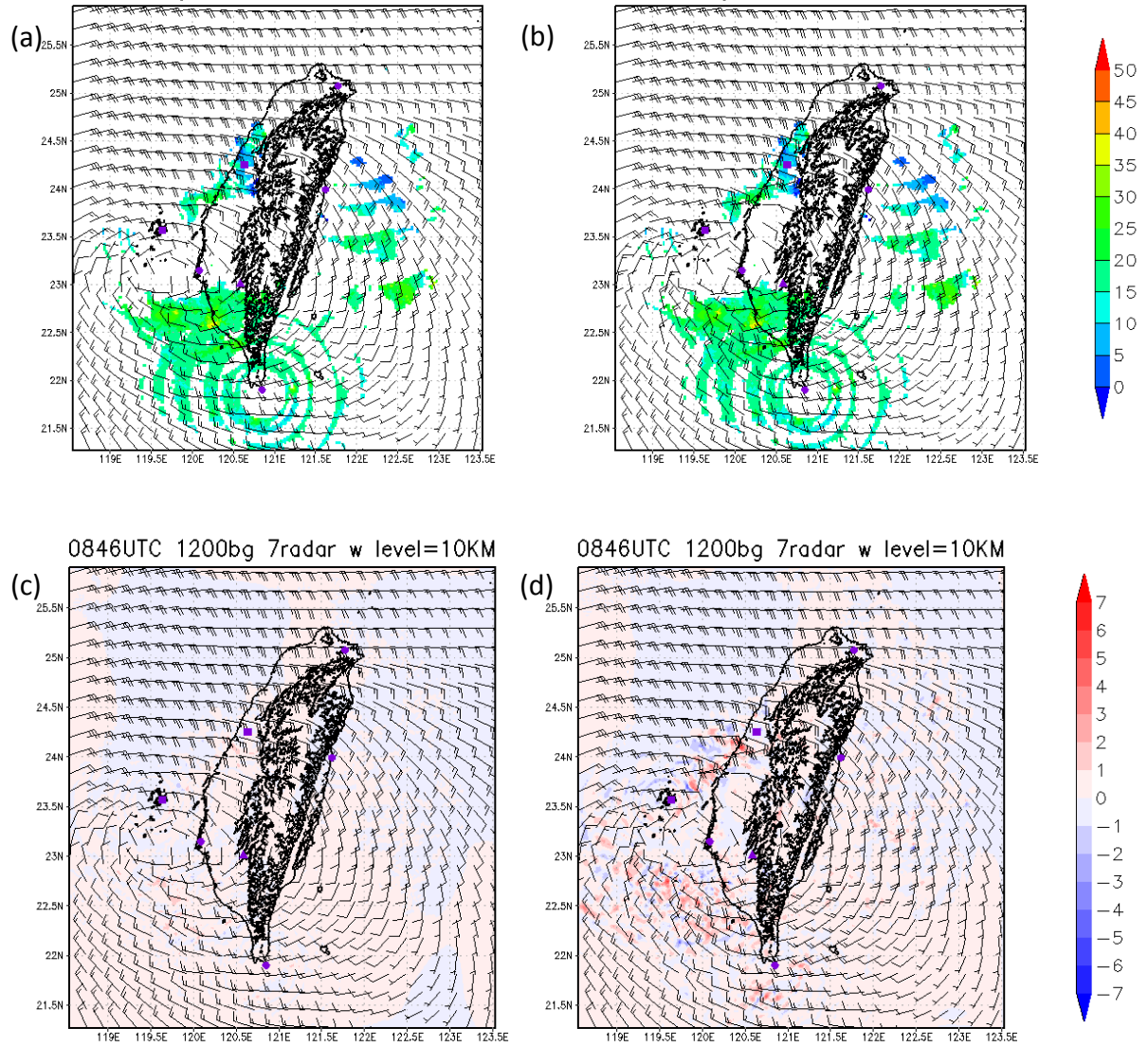


圖 6-2、改變 damping 層數的十公里高度合成結果，(a、c)為水平速度與垂直速度均 damping 十層，(b、d)為水平速度五層，垂直速度三層。陰影的部分(a、b)為回波，(c、d)為垂直速度，數值對照右側色標。其中風速以風標表示，長槓代表 10m/s，短槓代表 5m/s。

0901UTC 1200bg 7r 15z-10z wind diff z=4KM 0901UTC 1200bg 7r 15z-10z wind diff z=8KM

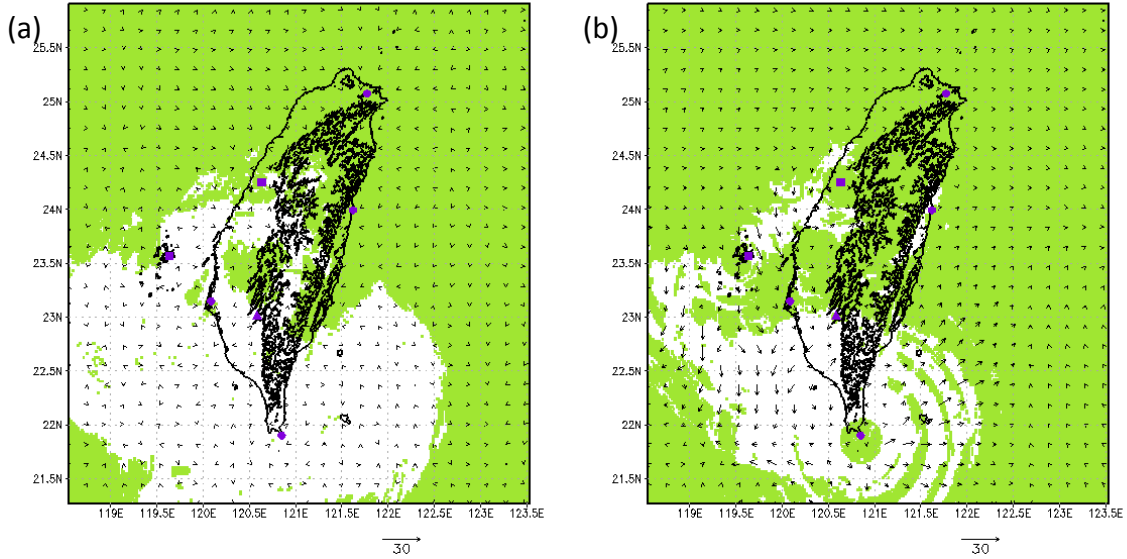


圖 6-3、以 1200UTC 為背景場 0901UTC 垂直層到 15km 與垂直層到 10km 合成結果差異，分別為四公里(a)、八公里(b)的結果。箭頭代表風速，大小如圖下標示，以 30m/s 為單位。綠色陰影代表沒有雷達資料覆蓋區域。紫色點為各雷達位置。

0846UTC 1200bg 7r 15z-10z vort diff z=4KM 0846UTC 1200bg 7r 15z-10z vort diff z=8KM

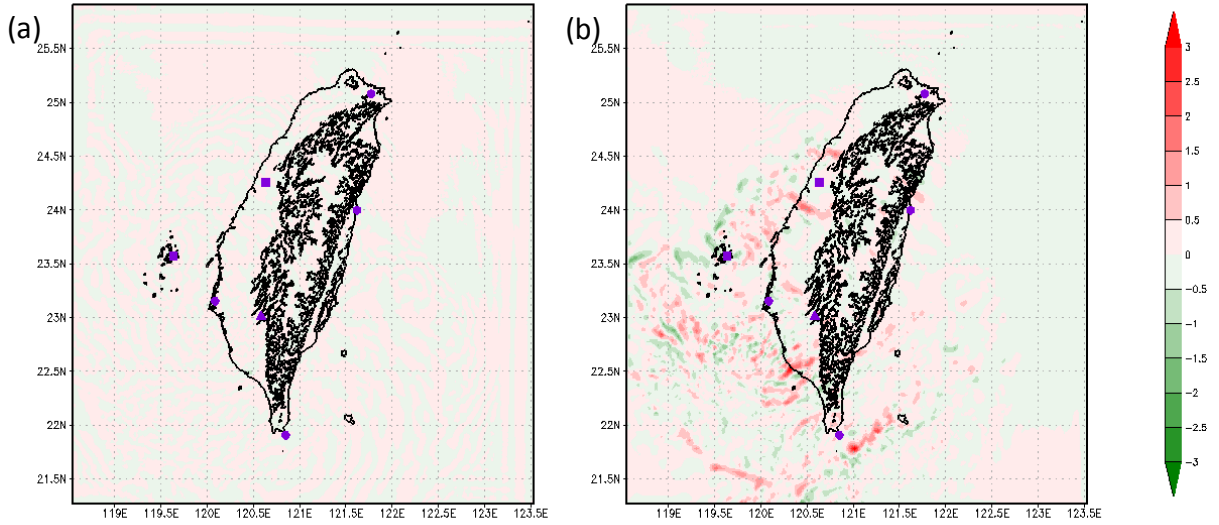


圖 6-4、以 1200UTC 為背景場 0901UTC 垂直層到 15km 與垂直層到 10km 合成結果渦度差異，分別為四公里(a)、八公里(b)的結果。陰影代表渦度，數值如右側色標，紅色為增加，藍色為減少。紫色點為各雷達位置。

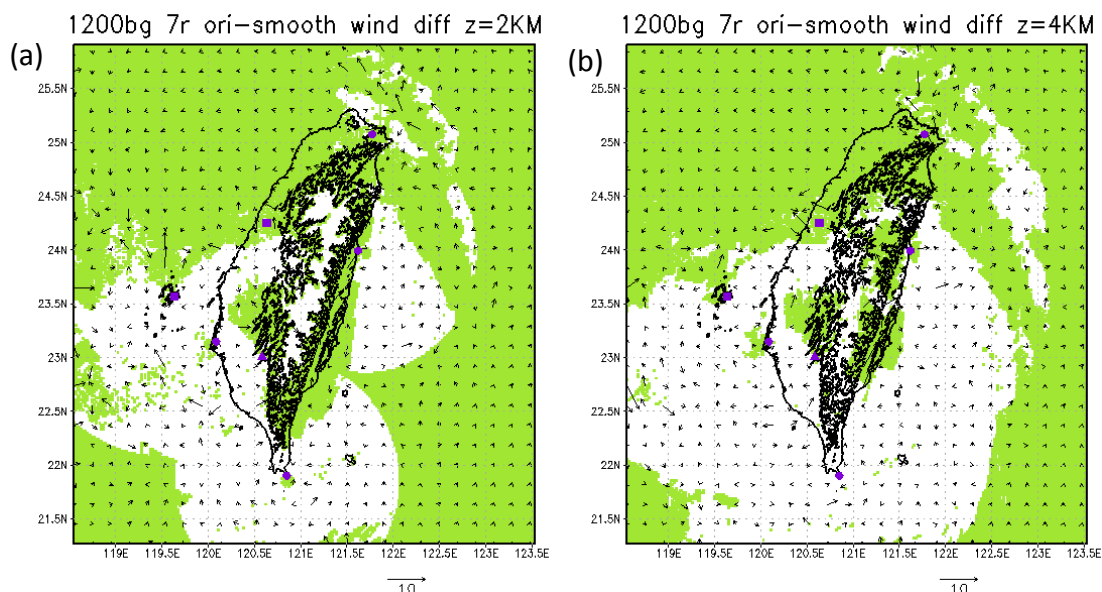


圖 6-5、以 1200UTC 為背景場，拉普拉斯平滑項被調高 100 與原本設定之間風場差異，分別為兩公里(a)、四公里(b)的結果。箭頭代表風速，大小如圖下標示，一單位是 10m/s。綠色陰影代表沒有雷達資料覆蓋區域。紫色點為各雷達位置。

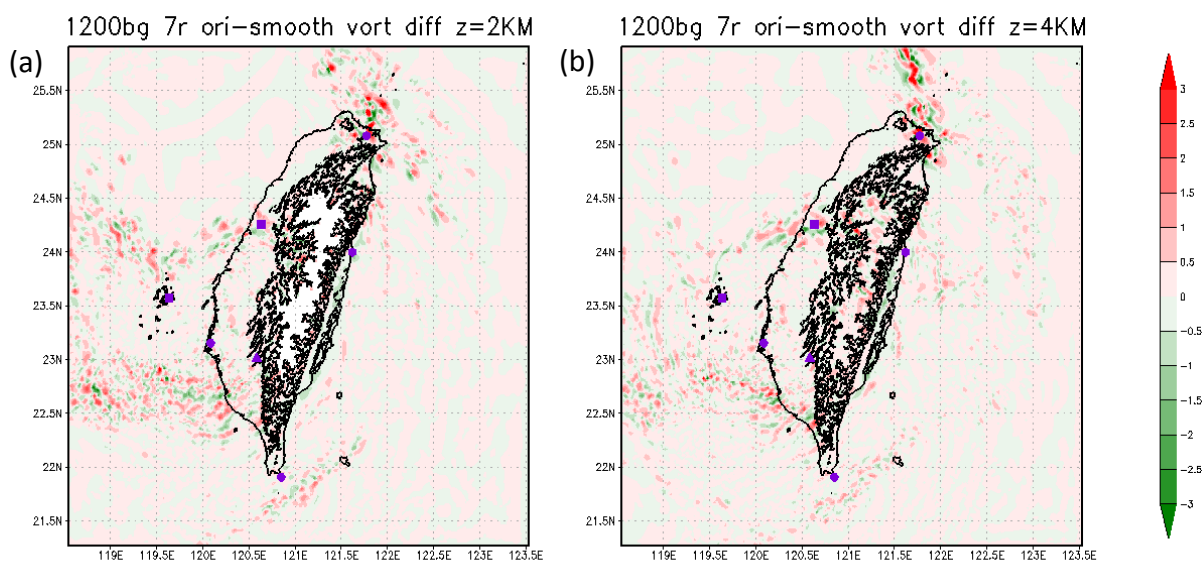


圖 6-6、以 1200UTC 為背景場，拉普拉斯平滑項被調高 100 與原本設定之間渦度差異，分別為兩公里(a)、四公里(b)的結果。陰影代表渦度場差異，各數值如圖右側色標，紅色為增加，綠色為減少。紫色點為各雷達位置。

0846UTC 1200bg 7r vort and wind z=2KM 0846UTC 1200bg 7r vort and wind z=4KM

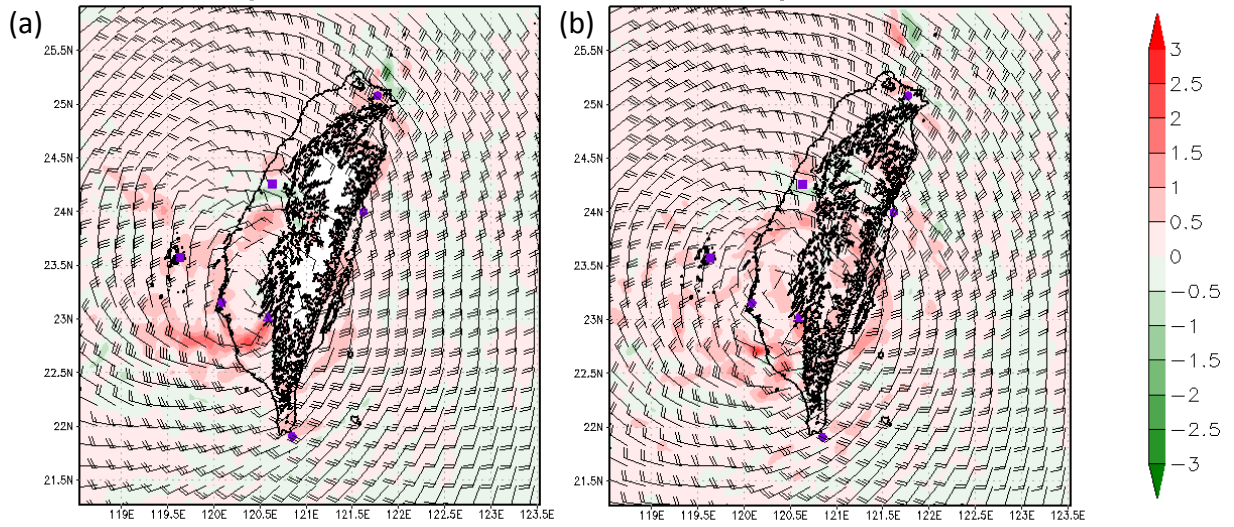


圖 6-7、0846UTC，1200UTC 模式輸出背景場，平滑項水平風係數調高 100 倍合成的渦度場。分別為兩公里(a)、四公里(b)的結果。其中風速以風標表示，長槓代表 10m/s，短槓代表 5m/s。陰影代表渦度，數值如右側色標，紅色為正渦度，綠色為負渦度。紫色點為各雷達位置。

0846UTC 7r smooth-more damp wind diff z=2KM 0846UTC 7r smooth-more damp wind diff z=4KM

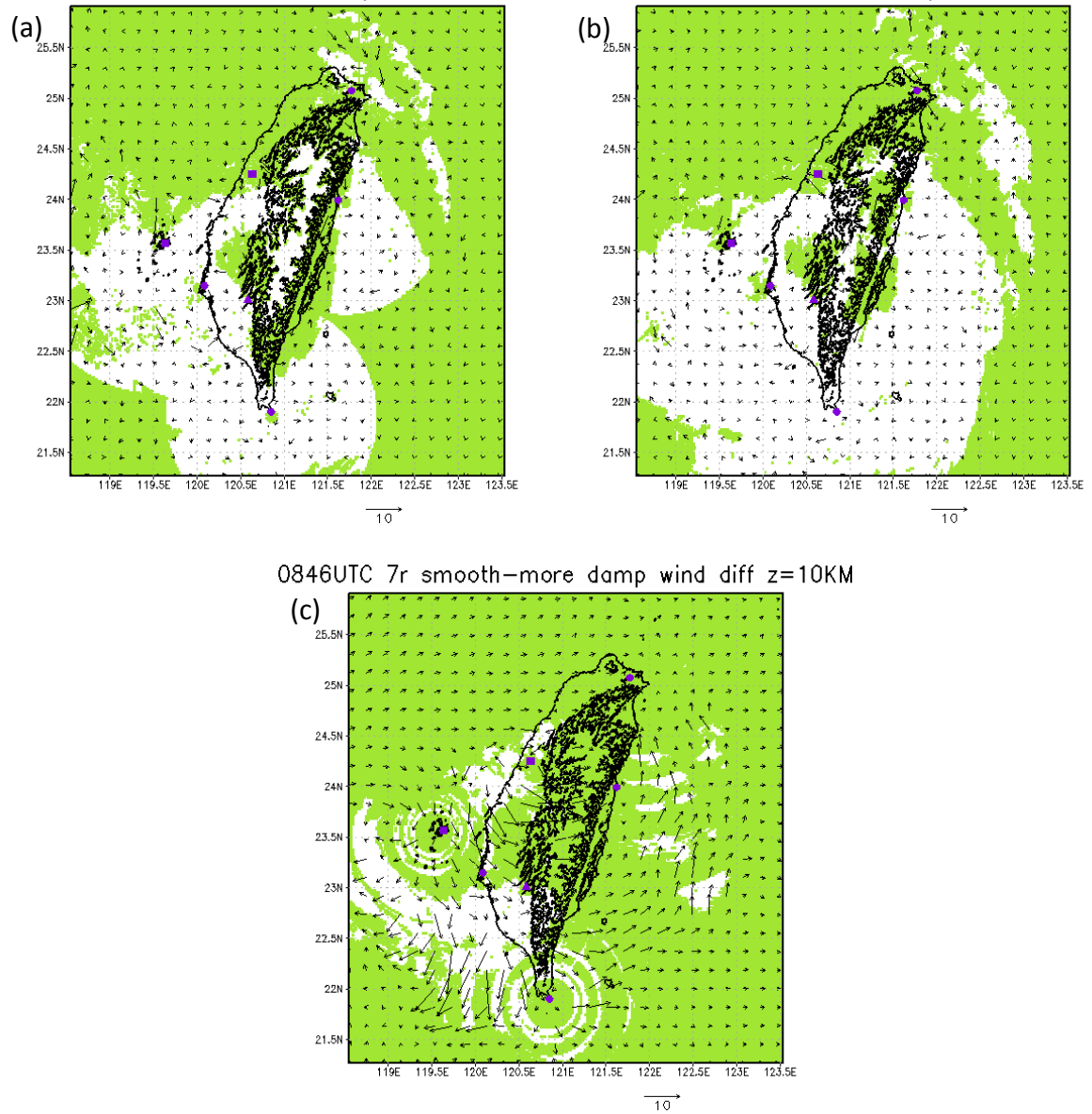
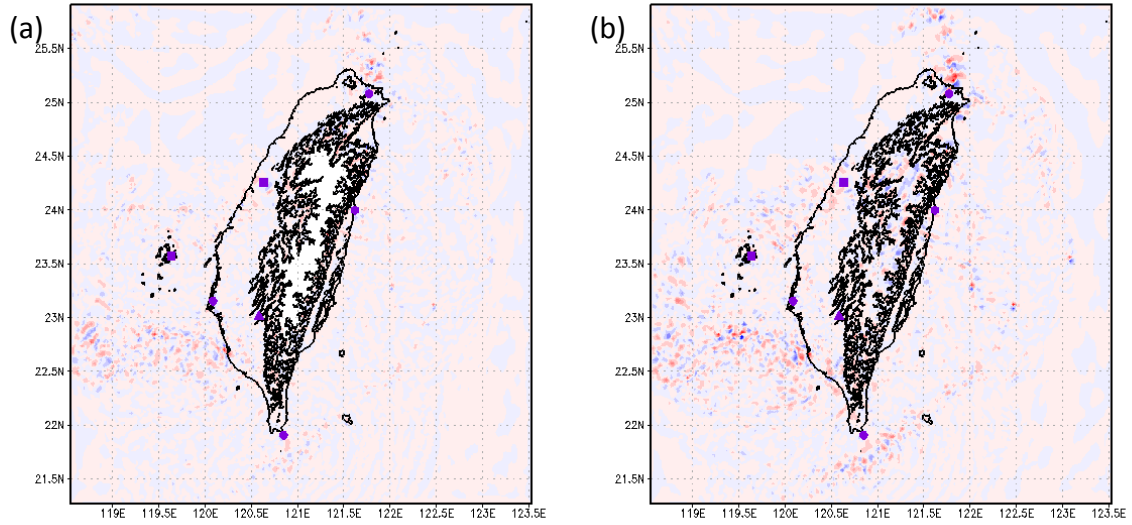


圖 6-8、0846UTC 以 1200UTC 為背景場，拉普拉斯平滑項被調高 100 與增加 damping 層數風場差異，分別為兩公里(a)、四公里(b)以及十公里(c)的結果。箭頭代表風速，大小如圖下標示，一單位是 10m/s。綠色陰影代表沒有雷達資料覆蓋區域。紫色點為各雷達位置。

0846UTC 7r smooth-more damp w diff z=2KM 0846UTC 7r smooth-more damp w diff z=4KM



0846UTC 7r smooth-more damp w diff z=10KM

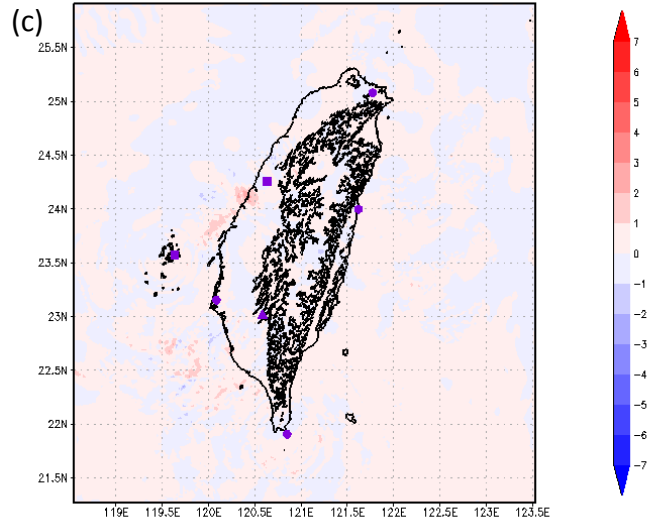


圖 6-9、0846UTC 以 1200UTC 為背景場，拉普拉斯平滑項被調高 100 與增加 damping 層數垂直速度差異，分別為兩公里(a)、四公里(b)以及十公里(c)的結果。陰影代表垂直速度差異，紅色為增加，藍色為減少。紫色點為各雷達位置。

## 附表

表 2-1 七座雷達資料品質管控設定。

雷達名稱	濾線除非氣象資訊	風場去折疊
七股雷達	地形+強回波弱風速(40dBZ,2m/s)	空 間 連 續
花蓮雷達	地形+強回波弱風速(40dBZ,2m/s)	
墾丁雷達	X	
五分山雷達	地形+海洋雜波(15m/s,20dBZ,6)	
馬公雷達	$\rho_{HV} < 0.7$	
清泉崗雷達	$\rho_{HV} < 0.7$ + 強回波弱風速 (40dBZ,2m/s)	
TEAMR	地形+ $\rho_{HV} < 0.8$	

表 3-1 第一種模式微物理設定

	Domain 1	Domain 2	Domain 3
水平網格間距	45000	15000	5000
雲微物理參數	Kessler scheme		WSM 3-class simple ice scheme
輻射參數化(長波)	rrtm scheme		CAM scheme
輻射參數化(短波)	Dudhia scheme		
地面層物理	MM5 Monin-Obukhov scheme		
陸地地面物理	unified Noah land-surface model		
邊界層物理	YSU scheme		
積雲參數化	n/a		

表 3-2 第二種模式微物理設定

	<b>Domain 1</b>	<b>Domain 2</b>	<b>Domain 3</b>
水平網格間距	45000	15000	5000
雲微物理參數	WSM 6-class graupel scheme		
輻射參數化(長波)	rrtm scheme		
輻射參數化(短波)	Dudhia scheme		
地面層物理	MM5 Monin-Obukhov scheme		
陸地地面物理	thermal diffusion scheme		
邊界層物理	YSU scheme		
積雲參數化	Grell-Devenyi ensemble scheme	n/a	