

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫 期中進度報告

## 地形降水之雷達觀測研究(1/2)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC94-2111-M-034-001-

執行期間：94年08月01日至95年07月31日

執行單位：中國文化大學大氣科學系

計畫主持人：游政谷

計畫參與人員：張韶珩 林哲佑 鄭凌文 蔡家倫

報告類型：精簡報告

報告附件：出席國際會議研究心得報告及發表論文

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 95 年 5 月 17 日

## 一、計畫摘要

### (一) 中文摘要

過去絕大部分的理論研究已針對乾大氣下之地形效應進行探討，這使得我們對於氣流受地形影響下之基本動力有相當程度的瞭解。然而相反地，由於地形附近常缺乏高解析度的觀測資料，而且伴隨降水的非絕熱效應常導致問題的複雜化，這使得我們對於地形降水的瞭解非常有限。

本研究計畫主要的科學目的在於藉著地形附近所收集的高解析度都卜勒雷達資料(包括台灣地區雷達資料與其他中尺度實驗計畫所收集的雷達資料)來廣泛檢視地形降水內部詳細的氣流與回波結構，以期增進我們對於地形降水過程的瞭解，而研究方向將同時著重地形上游效應(Upstream Effects)、地形斜坡強迫(Upslope Forcings)與局部環流的探討。

關鍵詞：地形降水，地形上游效應，局部環流，都卜勒雷達

### (二) 英文摘要

The fundamental dynamics of orographic effects have been explored in previous observational and modeling studies for the special, idealized case of adiabatic condition (i.e., without precipitation). In contrast, our understanding of orographic precipitation is largely limited due to the lack of high-resolution observations in the vicinity of topography, and the diabatic effects also complicate the processes associated with the interactions between airflow and terrain.

In this study, detailed ground-based and airborne Doppler radar observations collected from the Taiwan area and recent mesoscale field experiments are used to document the mesoscale airflow and reflectivity associated with orographic precipitation occurring in different environmental conditions. The upstream effect, the upslope forcings and the local circulations will be investigated.

Key words: orographic precipitation, upstream effect, local circulations, Doppler radar

## 二、研究計畫之背景及目的

關於地形效應的相關研究議題，過去絕大部分的理論研究乃針對乾大氣之下進行探討(Smith 1979)，這使得我們對於氣流受地形影響下之基本動力有相當程度的瞭解；然而相反地，我們對於地形效應與降水相關的瞭解則非常有限。雖然我們對於各種基本的地形降水型態有所認識(如圖一所示；Houze et al.

1998)，但由於缺乏地形附近高解析度的觀測資料，加上伴隨降水的非絕熱效應常導致問題的複雜化，這使得我們無法對此科學議題作較深入的探討。

1970年代之後雷達觀測技術的進步，讓我們有機會去研究地形降水的中尺度結構。早期研究學者(Hobbs et al. 1975; Parsons and Hobbs 1983; Trier et al. 1990)利用單都卜勒雷達資料去檢視鋒面降水如何受地形影響而改變其分佈與強度，雖然他們提供一些有趣的初步概念，不過因為缺乏雙都卜勒雷達觀測，這些早期研究並無法分析山區附近詳細的三維風場結構，而它與降水的物理相關也不甚清楚。隨著近期一些中尺度實驗計畫的進行與研究(如1987 TAMEX, Kuo and Chen 1990; 1993&1995 COAST, Bond et al. 1997; 1997 CALJET, Ralph 1997)，許多研究學者已藉著詳細的雙都卜勒雷達觀測與中尺度數值模式，對地形與降水的關係作進一步的探討(Braun et al. 1997; Yu and Smull 2000; Chien et al. 2001; Doyle and Bond 2001; Yu et al. 2001; Colle et al. 2002; Yu and Bond 2002)。這些研究結果指出了地形上游阻礙(Upstream Blocking，即圖一(d)所示)的重要性以及說明該地形效應如何對天氣系統內部風場結構及降水強度造成影響。

由於高解析度觀測資料主要集中在地形上游區域收集，因此這些先前所提及的研究工作常侷限在對於地形上游效應(Upstream Effects; Pierrehumbert and Wyman 1985)的檢視，至於與地形斜坡相關的降水機制並沒有探討。如圖一所示，一些地形降水型態都與伴隨地形斜坡的強迫機制有關，因此如何拓展我們對於地形降水的認識仍有賴進一步的實驗觀測與分析。另外值得提及的是，1999年晚秋初冬，在義大利北部阿爾卑斯山區所進行的“阿爾卑斯山中尺度外場實驗計畫”(MAP, Mesoscale Alpine Program, Bougeault et al. 2001)是一個結合地面及飛機都卜勒雷達密集觀測的國際大型研究計畫，其主要的科學探討重心在於了解山區局部豪大雨的降水過程。有別於過去的外場中尺度實驗(如COAST與CALJET)，MAP之實驗區域及季節常常具有對流不穩定性的環境大氣條件，而且在山地斜坡及其上游區皆有密集都卜勒雷達觀測資料收集，所以將可提供我們廣泛檢視地形效應及其對於深對流降水的影響。圖二為MAP IOP5雷達資料初步分析結果之示意圖 (Yu et al. 2003)，顯示此個案包含三種主要的地形降水機制，這些地形降水的強度、位置與地形形狀高度、環境氣流與穩定度密切相關，此分析也進一步說明了簡單的基本地形降水型態(如圖一所提及的)可能無法全然解釋實際的地形降水過程，因為地形地貌迥異與綜觀環境多樣化都會顯著增加地形降水發生的複雜度。

在台灣方面，過去一些個案研究(TAMEX期間與TAMEX之後)我們已大略認知到暖季(即梅雨與颱風季節)豪雨或強風的發生常與台灣地形有所關連(Lin 1993; 林與郭 1997; Li and Chen 1998)，而不論地形上游效應或地形斜坡強迫似乎都

扮演重要的角色。從台灣豪大雨事件(>100 mm/day)在梅雨季的氣候頻率分佈(如圖三, 陳與楊 1988)顯示梅雨季豪雨頻率之極大值位於台灣西南部中央山脈西側的斜坡上, 其極值軸心從中央山脈西側斜坡向西南延伸到沿岸平原地區, 此結果強烈暗示著地形斜坡強迫的重要性以及它與強降水事件的密切相關。而一些 TAMEX 的研究(如 Trier et al. 1990; Yu et al. 2001)也清楚指出台灣地形上游效應對登陸梅雨鋒面降水與中尺度對流系統的重要性(如圖四與圖五)。另外, 對於侵台的颱風而言, 其外圍環流與地形的交互作用也常造成局部豪雨的發生(張 2000; Wu et al. 2002)。然而, 受限於都卜勒雷達資料的缺乏, 早期我們對於這些降水系統的了解只能透過低解析度的傳統觀測資料或透過數值模擬來進行。隨著近年來國內地面氣象都卜勒雷達全島觀測網的陸續建置完成, 它提供了一絕佳機會來檢視發生於台灣本島及附近海域的降水系統, 並探討地形(斜坡)在這些降水系統可能扮演的角色。另外如我們所知的, 台灣梅雨季節環境大氣常具有明顯的對流性不穩定度, 與 MAP 實驗計畫地理位置的環境條件類似, 因此我們可預期的是, 透過 MAP 的研究經驗與成果, 對於台灣梅雨季地形降水方面的研究將有重要參考價值。

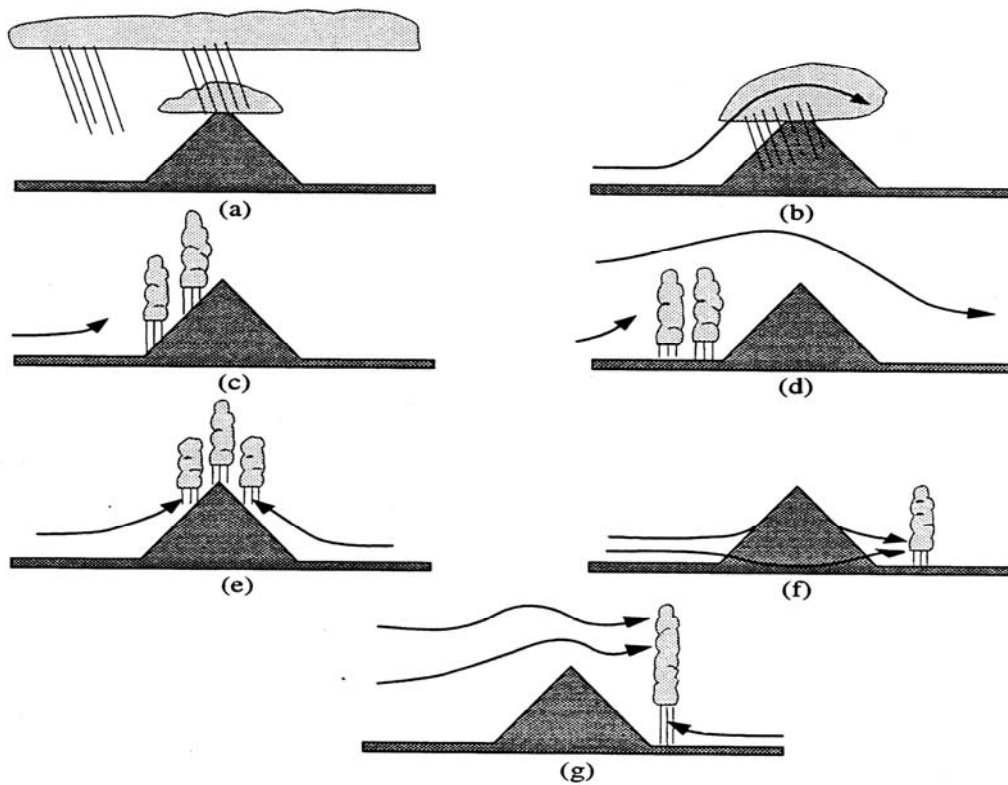
本研究計畫主要的科學目的在於藉著地形附近所收集的高解析度都卜勒雷達資料(包括台灣地區雷達資料與其他中尺度實驗計畫所收集的雷達資料)來廣泛檢視地形降水的內部氣流與回波結構與其可能伴隨的物理過程, 而研究方向將同時著重地形上游效應(Upstream Effects)與地形斜坡強迫(Upslope Forcings)的探討。

### 參考文獻

- 陳泰然與楊進賢, 1988: 台灣梅雨期豪雨之時空分佈特徵. *大氣科學*, **16**, 151-162.
- 林熹閔與郭鴻基, 1997: 1994 年南台灣夏季午後對流之研究. *大氣科學*, **24**, 249-280。
- 張保亮, 2000: 登陸中颱風環流變化分析: 賀伯(1996)個案研究. 國立台灣大學大氣科學研究所博士論文, 158 頁.
- Bond, N. A., C. F. Mass, B. F. Smull, R. A. Houze, Jr., M.-J Yang, B. A. Colle, S. A. Braun, M. A. Shapiro, B. R. Colman, P. J. Neiman, J. E. Overland, W. D. Neff, and J. D. Doyle, 1997: The Coastal Observations and Simulations with Topography (COAST) experiment. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **78**, 1941-1955.
- Bougeault P., P. Binder, A. Buzzi, R. Dirks, R. Houze, J. Kuettner, R. B. Smith, R. Steinacker, and H. Volkert, 2001: The MAP Special Observing Period. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **82**, 433-462.

- Braun, S. A., R. A. Houze, Jr. and B. F. Smull, 1997: Airborne dual-Doppler observations of an intense frontal system approaching the Pacific Northwest coast. *Mon. Wea. Rev.*, **125**, 3131-3156.
- Chien, F.- C., C. F. Mass, and P. J. Neiman, 2001: An observational and numerical study of an intense landfalling cold front along the northwest coast of the United States during COAST IOP 2. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 934-955.
- Colle, B. A., B. F. Smull, and M.- J. Yang, 2002: Numerical simulations of a landfalling cold front observed during COAST: Rapid evolution and responsible mechanisms. *Mon. Wea. Rev.*, **130**, 1945-1966.
- Doyle, J. D., and N. A. Bond, 2001: Research aircraft observations and numerical simulations of a warm front approaching Vancouver Island. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 978-998.
- Hobbs, P. V., R. A. Houze, Jr., and T. J. Matejka, 1975: The dynamical and microphysical structure of an occluded frontal system and its modification by orography. *J. Atmos. Sci.*, **32**, 1542-1562.
- Houze, R. A., Jr., J. Kuettner and R. Smith, Eds., 1998: Mesoscale Alpine Programme U.S. Overview Document and Experiment Design. UCAR, Boulder, Colorado (available from UCAR via email request to [rjm@ucar.edu](mailto:rjm@ucar.edu)).
- Kuo, Y.-H., and G. T.-J. Chen, 1990: The Taiwan Area Mesoscale Experiment (TAMEX): An overview. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **71**, 488-503.
- Li, J., and Y.- L. Chen, 1998: Barrier jets during TAMEX. *Mon. Wea. Rev.*, **126**, 959-971.
- Lin, Y.- L., 1993: Orographic effects on airflow and mesoscale weather systems over Taiwan. *Terrestrial Atmos. Oceanic Sci.*, **4**, 381-420.
- Parsons, D. B., and P. V. Hobbs, 1983: The mesoscale and microscale structure and organization of clouds and precipitation in midlatitude cyclones. IX: Some effects of orography on rainbands. *J. Atmos. Sci.*, **40**, 1930-1949.
- Pierrehumbert, R. T., and B. Wyman, 1985: Upstream effects of mesoscale mountains. *J. Atmos. Sci.*, **42**, 977-1003.
- Ralph, F. M., 1997: The California Land-Falling Jets Experiment (CALJET). NOAA/ERL/Environmental Technology Laboratory, Boulder, Colorado.
- Smith, R. B., 1979: The influence of mountains on the atmosphere. *Advances in Geophysics*, **21**, Academic Press, 87-230.
- Trier, S. B., D. B. Parsons, and T. J. Matejka, 1990: Observations of a subtropical cold front in a region of complex terrain. *Mon. Wea. Rev.*, **118**, 2449-2470.
- Wu, C. -C., T. -H. Yen, Y. -H. Kuo, W. Wang, 2002: Rainfall Simulation Associated

- with Typhoon Herb (1996) near Taiwan. Part I: The Topographic Effect. *Wea. and Forecasting*, **17**, 1001–1015.
- Yu, C.- K., and B. F. Smull, 2000: Airborne Doppler observations of a landfalling cold front upstream of steep coastal orography. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 1577-1603.
- Yu, C.- K., B. J.- D. Jou, and D. P. Jorgensen, 2001: Retrieved thermodynamic structure of a subtropical, orographically influenced, quasi-stationary convective line. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 1099-1116.
- Yu, C.- K., and N. A. Bond, 2002: Airborne Doppler observations of a cold front in the vicinity of Vancouver Island. *Mon. Wea. Rev.*, **130**, 2692-2708.
- Yu, C.- K., D. P. Jorgensen, and F. Roux, 2003: Airborne Doppler Observations of a Cold Frontal System Encountering the Eastern Alps during MAP IOP5. *Proceedings*, 31<sup>th</sup> International Conference on Radar Meteorology, Seattle, Washington, 6-12 August 2003.



圖一：各種地形降水基本型態之示意圖。(a)種雲播雲機制(Seeder-feeder mechanism)；(b)地形斜坡強迫舉升凝結(Upslope forcing)；(c)地形斜坡激發機制(Upslope triggering)；(d)地形上游減速激發機制(Upstream triggering)；(e)熱力激發機制(Thermal triggering)；(f)背風面輻合激發機制(Lee-side triggering)；(g)背風面重力波加強機制(Lee-side enhancement by gravity waves)。其中(b)與(c)之地形強迫過程類似，只是其伴隨的環境條件不同；(b)具有對流穩定的大氣條件，因此屬於層狀性的降水；(c)具有對流不穩定的大氣條件，故為對流性降水。(圖摘取於 Houze 1998)

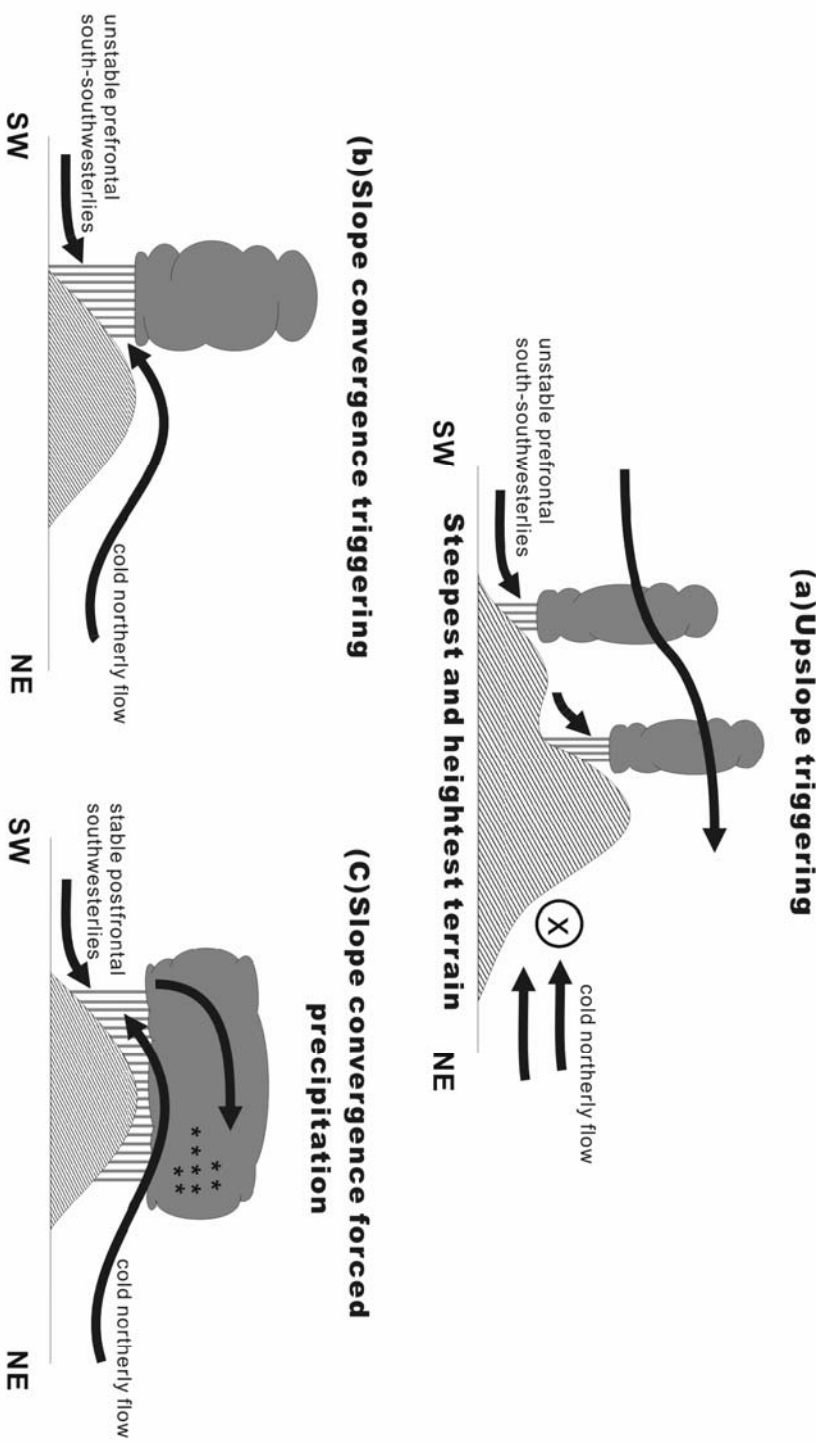
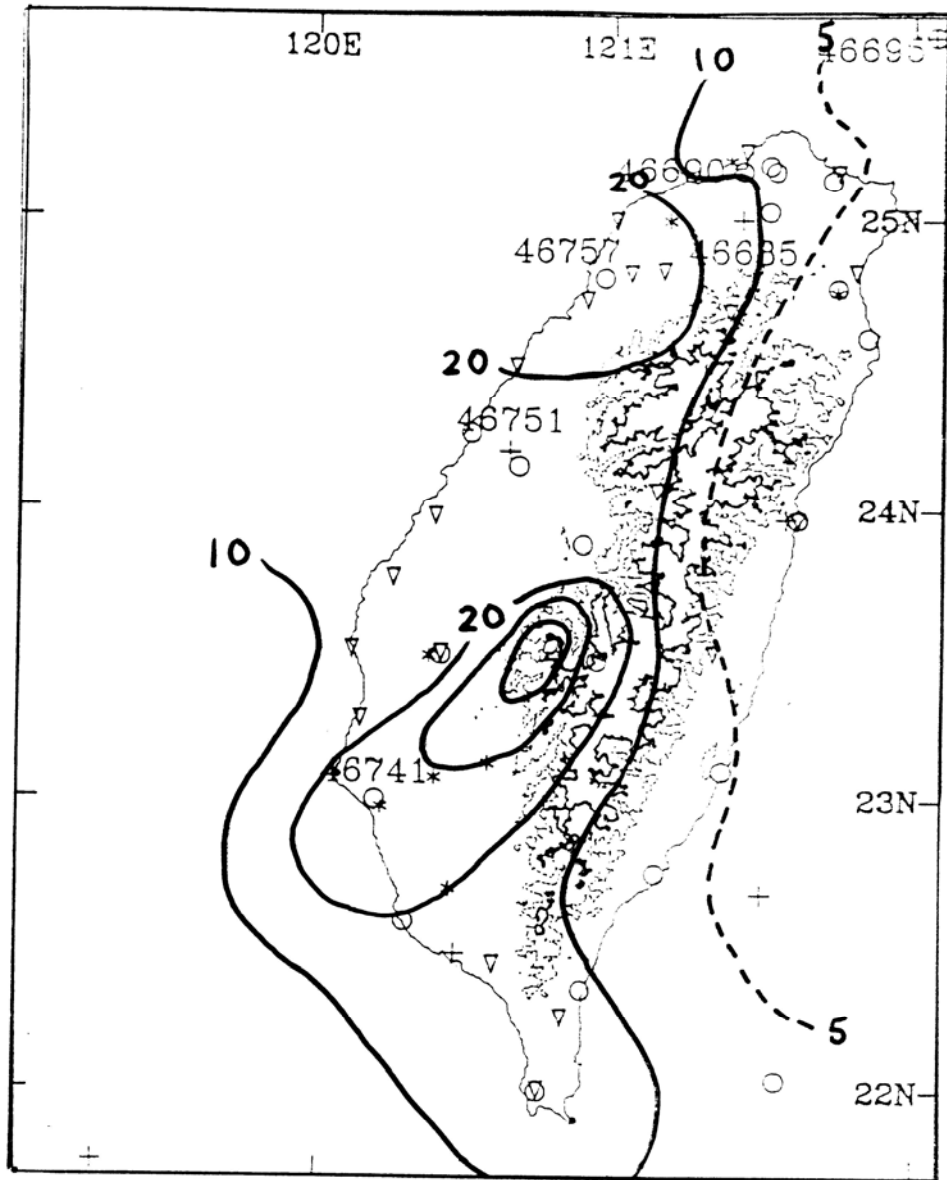


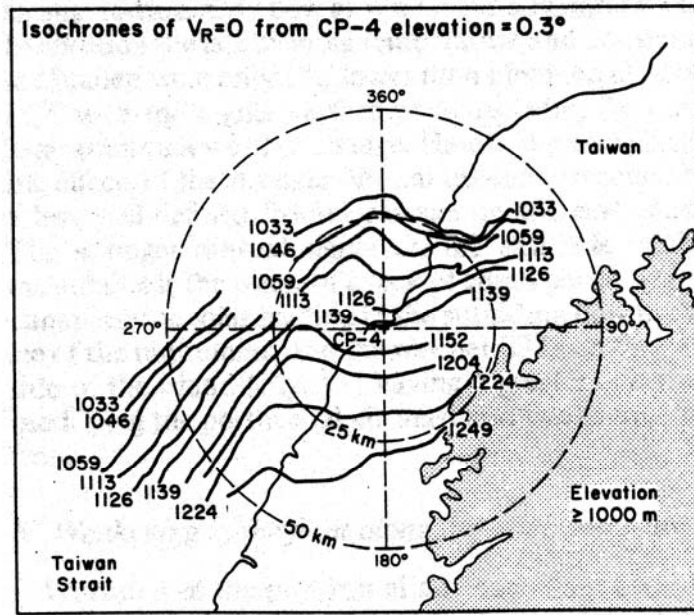
Fig. 2. Schematic vertical cross section depicting three different precipitation mechanisms identified by airborne Doppler observations on 4 October 1999 during MAP IOP 5. This section is oriented approximately southwest-northeast normal to the orientation of the mountain barrier.



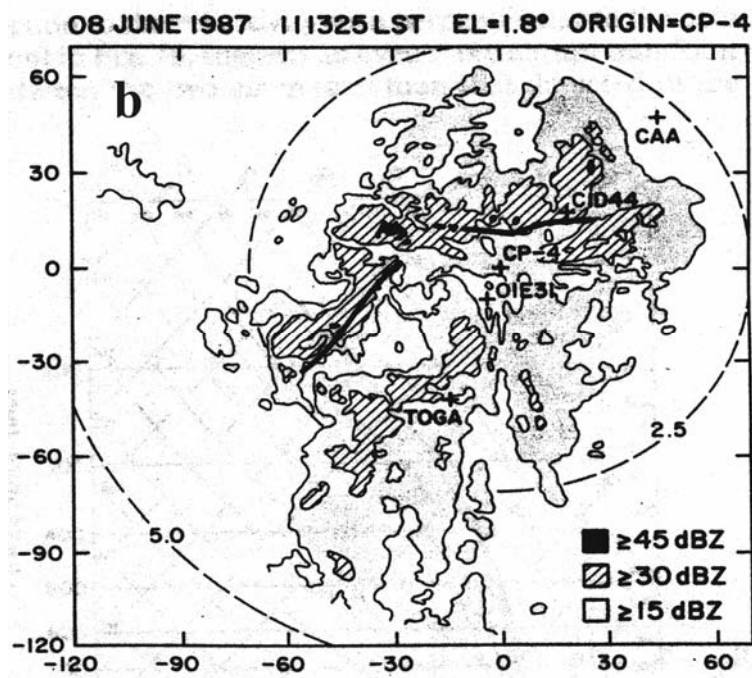


圖三：台灣地形高度與梅雨季強降水事件氣候頻率分佈(粗實線；陳與楊 1988).

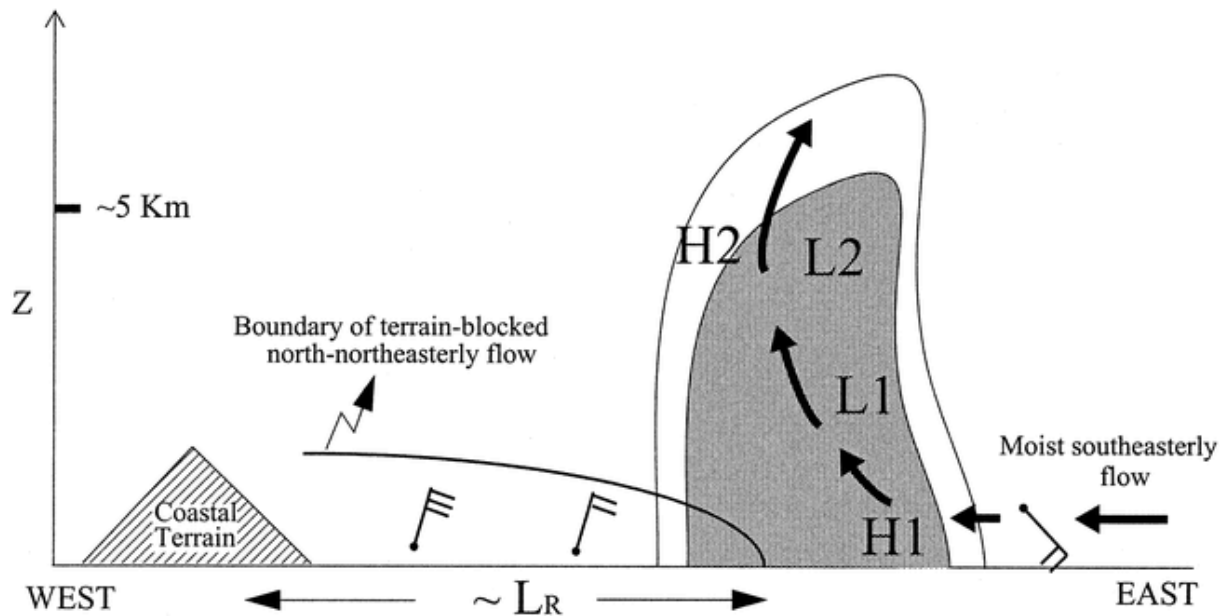
(a)



(b)



圖四: (a) NCAR CP4 雷達 0.3 度仰角在不同時間所觀測到的鋒面位置(即低層風切線); 由圖中可明顯看出梅雨鋒面接近台灣地形時, 受地形影響而被扭曲。(b) CP4 低層 1.8 度仰角之雷達回波, 粗實現為相對應回波時間的鋒面位置; 由圖中可看出鋒面彎曲處伴隨較強的回波值(大於 45dBZ)。 (取自 Trier et al. 1990)



圖五: Two-dimensional schematic vertical cross section normal to a south-north quasi-stationary convective line that developed off the southeastern coast of Taiwan on 16 June 1987. The symbols H1, H2, L1, and L2 denote major components of the pressure field retrieved from airborne dual-Doppler synthesis winds. Heavy solid arrows indicate salient airflow features within the convective line, and shading denotes main precipitation associated with the line. Near-surface horizontal airflow (indicated by wind barbs) in the vicinity of the convective line is primarily derived from a combination of flight-level winds at ~310 m MSL measured by the NOAA P-3 and sparse island observations. ' $L_R$ ' denotes the Rossby radius of deformation, an approximate horizontal scale of upstream extent for the orographically blocked north-northeasterly flow present to the west of the convective line. (adapted from Yu et al. 2001)

### 三、研究工作執行

第一年(執行期間 94/8/1~95/7/31)：針對發生在台灣地區與阿爾卑斯山區的降水系統，利用地面都卜勒雷達資料與飛機都卜勒雷達資料來進行詳細的個案研究分析，以了解地形效應在深對流降水所扮演的角色；具有對流不穩定環境大氣條件的個案將列為較優先的選取對象。由於在地形附近所收集的雷達資料常包含非大氣現象的地形及地面回波，這些雜波會顯著降低觀測降水場與風場的正確性，事實上對於利用雷達資料研究地形降水而言，這是一個關鍵且具挑戰性的問題。因此，如何能夠正確地將這些地面雜波從雷達資料中去除將是本研究計畫技術發展的重點。而本研究計畫會在第一年度首先會對飛機都卜勒雷達資料所觀測的地面雜波進行其特性分析。

第二年(執行期間 95/8/1~96/7/31)：本年度的研究工作將針對所選取的不同個案作進一步的診斷分析，以增進我們對於發生在不同綜觀天氣與環境穩定度下地形降水過程的基本了解。

### 四、研究成果說明

研究成果從二方面來作簡短說明：

(一) MAP 實驗計畫飛機(雙)都卜勒雷達觀測資料的分析—此方面的研究重點可分為兩部份。一為個案研究分析部份；目前已針對個案 IOP#5 進行地面與飛機都卜勒雷達資料分析，此個案的獨特性在於其具有組織性深對流的中尺度特徵，而且山區的飛機雷達觀測資料也相當完整，提供研究地形降水機制的好個案。另一研究重點為雷達資料處理技術部份；由於 MAP 飛機都卜勒雷達資料絕大部份都是在山區收集，飛機都卜勒雷達之天線為一前一後連續性的傾斜垂直掃描，所以其資料中會包含顯著的地形及地面回波，如何能夠正確地將這些雜波從雷達資料中去除與如何從山區觀測資料反求得飛機各種飛行角度(位置、速度)的誤差是一個重要且具有挑戰的問題，唯有準確掌握這些不確定性，才能獲得在山區附近合理且正確的風場與降水資訊。而這部份的技術發展重點包括了雷達地面雜波客觀(自動)去除及各種飛機航空誤差(navigation errors)求取與其伴隨之雷達風場修正。關於 MAP IOP#5 之相關研究成果已投稿至 Monthly Weather Review (Yu et al. 2006)，目前根據審稿者意見，正在進行論文修改工作。

(二) 台灣地區氣象都卜勒雷達觀測資料的分析—此部份的研究工作著重在台灣本島或沿岸發展的個案研究分析，現階段已針對發生在梅雨季台灣東南部外海之線狀對流進行分析，而其研究成果已發表至 Monthly Weather Review 期刊(Yu

and Jou 2005)。除此之外，關於台灣東南沿海對流線雷達觀測之氣候統計特性的了解，也正在進行研究當中，初步成果發表在林與游(2005)。另外一個研究議題為颱風環流與地形交互作用下所產生降水之雷達觀測。目前已針對在 2000 年的象神颱風進行雷達資料的分析，初步成果發表在鄭與游(2005)及 Yu and Cheng (2006)。

## 五、研究成果著作 (近五年發表著作, 2001 年以後)

### (A) 期刊論文

Yu, C.- K., D. P. Jorgensen, and F. Roux, 2006: Multiple precipitation mechanisms over mountains observed by airborne Doppler radar during MAP IOP 5. *Mon. Wea. Rev.*, accepted with revision. (SCI)

Yu, C.- K., and B. J.-D. Jou, 2005: Radar observations of diurnally forced, offshore convective lines along the southeastern coast of Taiwan. *Mon. Wea. Rev.*, **133**, 1613-1636. (SCI)

林品芳、周仲島與游政谷，2003：北台灣夏季電暴之雙都卜勒雷達分析。大氣科學, **31**, 333-354。

Yu, C.- K., and N. A. Bond, 2002: Airborne Doppler observations of a cold front in the vicinity of Vancouver Island. *Mon. Wea. Rev.*, **130**, 2692-2708. (SCI)

Yu, C.- K., B. J.- D. Jou, and D. P. Jorgensen, 2001: Retrieved thermodynamic structure of a subtropical, orographically influenced, quasi-stationary convective line. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 1099-1116. (SCI)

### (B) 研討會論文

Yu, C.- K., and L.- W. Cheng, 2006: Radar observations of intense orographic precipitation associated with typhoon Xangsane (2000). Submitted to 12<sup>th</sup> Conference on Mountain Meteorology. 28 August-1 September 2006, Santa Fe, New Mexico.

游政谷與蔡嘉倫，2006: 微波降雨雷達觀測之初步分析。氣象與航空安全研討會，台北，73-76。

林哲佑與游政谷，2005:台灣東南沿海對流線雷達觀測之氣候統計特性。天氣分析與預報研討會，台北，93-96。

鄭凌文與游政谷，2005:北台灣地形對颱風降水分佈及強度之影響:象神颱風雷達觀測研究。天氣分析與預報研討會，台北，544-547。

Yu, C.- K., 2005: Radar Observations of Orographically Enhanced Precipitation Embedded within Typhoons: 2nd AOGS Annual Meeting 2005, Singapore, 20-24.

**Yu, C.- K.**, 2005: Radar Observations of Landfalling Typhoons and Mesoscale Convective Systems over the Taiwan Area: International Training Program for Typhoon and Flood Disasters Reduction, Taipei.

**Yu, C.- K.**, 2004: Upstream Influences of Orographic Blocking on Precipitation Associated with Landfalling Fronts: An Overview and Perspective. *Preprints*, 8<sup>th</sup> Atmospheric Sciences Conference, Taoyuan, 247-250.

**Yu, C.- K.**, D. P. Jorgensen, and F. Roux, 2003: Airborne Doppler Observations of a Cold Frontal System Encountering the Eastern Alps during MAP IOP5. *Proceedings*, 31<sup>th</sup> International Conference on Radar Meteorology, Seattle, Washington, 6-12 August 2003.

林品芳、周仲島與游政谷，2002：北台灣地區雷暴之形成機制與結構特徵。海峽兩岸大氣科學研究生學術研討會，台北，35-37。

**Yu, C.- K.**, and B. J.- D. Jou, 2002: Characteristics and Formative mechanism of the Offshore Convective lines along the Southeastern Coast of Taiwan. *Proceedings*, International Conference on Heavy Rainfall/Snowfall in East Asia, Tokyo, Japan, 491-496.

**Yu, C.- K.**, 2001: Airborne Doppler observations of a strongly retarded cold front upstream of coastal orography. *Preprints*, 7<sup>th</sup> Atmospheric Sciences Conference, Taipei, 45-49.

**Yu, C.- K.**, and B. J.- D. Jou, 2001: Single Doppler radar observation of the offshore convection along the southeastern coast of Taiwan. *Proceedings*, International Conference on Mesoscale Meteorology and Typhoon in East Asia, Taipei, Taiwan, 76-81.

**Yu, C.- K.**, F. Roux, and D. P. Jorgensen, 2001: Airborne Doppler observations of a convective system over the eastern Alps during MAP IOP5. *Preprints*, 30<sup>th</sup> International Conference on Radar Meteorology, Munich, Germany, 530-532.