

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

鄭凌文* 游政谷

中國文化大學大氣科學系

摘 要

本研究主要是以北台灣都卜勒雷達資料(氣象局五分山及民航局中正機場雷達)分析2000年象神颱風個案，探討颱風外圍環流與地形之間交互作用所產生的地形降水。分析顯示大屯山與南港-基隆山脈自10月31日2000 UTC地形上游之風場轉向東北風開始，皆發生顯著的地形降水，持續約10小時，北部山區降水可超過400釐米。強降水回波持續滯留於大屯山迎風面的山腰(接近山頂)，以及南港-基隆山脈的山頂(延伸至背風面)，且兩山區的強降水(大於40 dBZ)頻率極大值位於地形引發的垂直速度(大於 1 m s^{-1})頻率極大值之下游區，顯示地形抬舉對降水加強的重要性。

降水回波分析顯示大屯山與南港-基隆山脈的降水回波垂直結構不同。大屯山強降水回波(大於40 dBZ)發展高度侷限在地面至2~3公里且回波強度與地形上游風速成正相關，暗示大屯山區的地形降水過程與上坡風凝結機制較為有關。南港-基隆山脈低層雷達回波強度與地形上游的氣流有顯著關係，但降水回波最強位置與地形上游的氣流並無明顯相關，並具有對流性降水的特徵，而且南港-基隆山脈有受到颱風外圍雨帶移入影響。另外，大屯山區主要降水位置與跨山氣流分量之大小密切相關，而南港-基隆山脈主要降水位置與跨山氣流分量的關係則較不顯著，此差異亦暗示著大屯山與南港-基隆山脈之地形降水過程不同。

關鍵字：地形降水；颱風；都卜勒雷達

一、前言

根據過去的研究顯示(李與蔡 1995；范 2000；張 2000；Wu et al. 2002；顏 2003)地形對於颱風降水的影響大致可分為兩方面：其中之一為地形會影響颱風路徑，並間接改變各地區的降水分佈；另外就是颱風環流在地形迎風面上受到抬舉，造成舉升凝結並增加該處降雨量。所以在一複雜的地形上，因颱風所產生的降水可分為兩類，一是伴隨颱風環流的降水，一是環流(包括外圍環流)與地形交互作用所產生的降水。伴隨颱風環流的降水雨帶通常會有明顯的移動，而颱風環流與地形交互作用所產生的地形降水常常接近滯留，所以造成的災害可能更為嚴重。

從先前所提及的觀測與模擬研究顯示地形對颱風降水有相當程度的影響，過去的研究常著重於降水分佈與颱風路徑的相關性(王等 1985；Chang et al. 1993；謝等 2000)，而且這些研究主要是以傳統地面雨量觀測資料分析為主。透過高空間與時間解析度的

雷達觀測資料，我們可以進一步了解地形降水的中小尺度結構與其可能的物理過程。

對於地形效應對颱風降雨分佈的影響，目前我們的了解甚少，而在颱風的環境下，我們對於地形降水機制的認知亦不足。雖然李與蔡(1995)和張(2000)皆有指出颱風環境下地形降水的基本特徵(如位於斜坡上的地形雨帶近似滯留，且多為對流的降水回波型態)，但是這些過去的研究對於產生地形降水的物理過程並沒有深入探討。由於颱風環境下之地形降水機制存在相當大的不確定性，導致現今颱風環境下的降水強度及分佈難以準確預報。而透過更多的觀測研究，可以增進我們對於當中降水過程的了解，進而改善降水預報的準確性。

本研究主要針對2000年象神颱風個案進行個案分析。主要是利用雷達資料來詳細分析颱風環流與地形交互作用所產生的地形降水，藉此來探討北台灣地形對於颱風降水的強度及分佈的影響，並嘗試釐清當中的物理機制，期望能夠藉由詳細的觀測分

* 聯絡作者地址：鄭凌文，(111)台北市華岡路 55 號中國文化大學大義館 6 樓大氣科學系

聯絡電話：(02)28610511轉25705

傳真電話：(02)28615274

E-mail：s89219333@yahoo.com.tw

析，了解地形對颱風降水分佈的影響，並且拓展我們對於颱風環流與地形交互作用所產生地形降水的知識。

二、資料與研究方法

本研究主要是以五分山雷達與民航局中正機場雷達資料配合地面觀測資料作分析，其測站分佈如圖1所示。由於地形降水分佈強度與地形上游低層風場之關係密切，所以透過中央氣象局五分山都卜勒雷達與民航局中正機場雷達反演地形上游的風場(風場選取範圍標示於圖1)，對於此研究的幫助非常大。

三、個案描述

象神颱風為2000年編號第20號的侵台颱風，在10月31日到11月1日(UTC)期間行經台灣東部並向北移動(圖2)，因象神颱風未登陸台灣本島，所以其結構未受到地形明顯破壞。在颱風影響期間，大量降水集中在北部迎風面及山區，造成北台灣嚴重的災情。11月1日0329 UTC的五分山雷達回波圖(圖3a)可清楚看到象神颱風弱回波中心(以 \bullet 符號標示)及颱風雨帶在東北外海，而強降水回波主在侷限在北台灣山區及其迎風面。此時北部風向大致上偏北北西，徑向風速超過 30 m s^{-1} (圖3b)，而此強勁低層地形上游風速與山區強降水之相關，我們將於往後章節作進一步探討。為了解颱風接近北台灣時山區降水回波隨時間變化的特性，我們針對大屯山區域及雪山山脈北側兩個主要降水區，取長為110公里且寬為20公里的區域，方向則大略平行盛行東北風(如圖3a所示)，並將20公里寬的低層雷達回波值(1.4度仰角)作平均，繪製兩區域平均雷達回波隨時間(10月31日1534 UTC到11月1日0600 UTC，約14.5小時)的變化(圖4a與圖4b)。

圖4a為大屯山區域平均雷達回波隨時間的變化，分析顯示約在10月31日2000 UTC開始，地形上游的低層(兩公里以下)平均風場開始轉為東北風，且在10月31日2000 UTC之前與之後的降水形態截然不同。在10月31日2000 UTC之前，降水大多是來自台灣北部約東南方外海的颱風外圍雨帶，此雨帶移入台灣北部，隨後朝北北西方向移出陸地，而在10月31日2000 UTC之後，大屯山區出現滯留型的強降水回波，大致上強度皆超過40 dBZ，而在11月1日0100 UTC到11月1日0330 UTC之間有部份區域的雷達回波值超過45 dBZ。此滯留型強降水回波於11月1日0600 UTC往地形上游區(即北部外海)消散，持續時間約十小時。這十小時內，北部地形上游低層(2公里以下)平均風場大致上介於東北風與北風之間，地形上游低層(2公里以下)平均風速介於 20 m s^{-1} 到 35 m s^{-1} 之間。另外在大屯山背風側的平均雷達回波似乎持

續有個局部最小值存在(縱座標X約為90公里處)。

圖4b則為雪山山脈北側平均雷達回波隨時間的變化，在10月31日2000 UTC之前，亦可發現有降水回波是自陸地移出外海(與圖4a有著類似情形)，同樣也在北部地形上游的風向轉向東北風時(即10月31日2000 UTC開始)，滯留型回波出現於地形迎風面，而雷達回波強度比大屯山區域更強，大部分皆超過45 dBZ，且明顯有強降水回波自外海移入陸地，以11月1日0000 UTC至0400 UTC最為明顯。

四、地形降水之分佈與強度

由前章得知，在10月31日2000 UTC到11月01日0600 UTC這十小時期間，有強降水回波持續性的滯留於北部山區，因此我們將針對此十小時作更深入之分析。由於地形降水常接近滯留，而螺旋雨帶則是具有隨著颱風中心轉動以及徑向傳播的特徵。藉著上述的特性，我們將PPI(1.4度仰角)雷達回波網格資料作累積，繪製十小時累積雷達回波圖(即圖5)，藉此了解這段時間內北台灣地形降水水平分佈特性。圖中顯示大屯山強降水回波主要有兩個局部最大值(約4000 dBZ)皆分佈在大屯山迎風斜坡上，雪山山脈則主要集中在南港-基隆山脈(雪山山脈北端第一個山脈)且延伸至背風側(超過4300 dBZ)，而且累積雷達回波分佈大略與地形走向平行。

圖6為北部山區強降水回波(大於40 dBZ)發生的頻率分佈，此分佈基本上與累積雷達回波分佈(圖5)相當類似，台灣北部有三處雷達回波頻率局部最大值，1)南港-基隆山脈(強降水回波頻率超過80%)，2)大屯山東南側迎風面(可達70%)，3)大屯山西北側迎風面(介於60~70%之間)，大屯山的強降水回波頻率主要發生在迎風斜坡上，而南港-基隆山脈則發生在山頂附近，而且平行地形走向。透過累積雷達回波圖(即圖5)及雷達回波頻率圖(即圖6)顯示此十小時內的強降水的分佈與地形有高度相關性，而兩山區(南港-基隆山脈與大屯山)強降水回波分佈位置也有明顯差異。

由於此時段的降水可能是地形及颱風環流的交互作用所造成的，而且本個案的Froude number很大，因此地形抬舉氣流凝結過程可能相當重要。為了評估此一假設與釐清地形可能扮演的角色，本研究透過下列方程式，計算地形引發的垂直速度：

$$w_{terrain}(z) = u(Z) \frac{\partial h}{\partial x} + v(Z) \frac{\partial h}{\partial y} \quad (4.1)$$

式中 h 代表地形高度， u 、 v 為地形上游的區域平均風場分量(u 為東西方向的分量； v 為南北方向的分量)，此處 u 、 v 為高度(Z)的函數，由地形上游的區域平均風場內插或外推而得。

透過(4.1)式計算地形引發的垂直速度(大於 1 m s^{-1})頻率，並且與雷達回波(大於40 dBZ)頻率圖疊加

在一起，如圖7所示。發現大屯山迎風面兩處垂直速度頻率大於90%區域的下游即為雷達回波頻率局部最大值的位置。而南港-基隆山脈的雷達回波(大於40 dBZ)頻率與垂直速度(大於 1 m s^{-1})頻率的分佈也很相似。大致上北部兩山區的強降水回波頻率與垂直速度頻率較高的區域是符合的，更明確顯示地形抬舉對降水加強的重要性。

五、地形上游條件與地形降水的相關

由前一章節我們得知北部山區的強降水回波與地形引發的垂直速度有相當程度的相關，但是在位置上有些位移。這結果暗示著低層飽和空氣是在地形斜坡上被舉升且凝結成水粒子，但是隨後又受到其他因素影響，導致與實際降水位置有所不同。所以本章主要是針對大屯山兩處和南港-基隆山脈的強降水回波(大於40 dBZ)頻率較高的區域，探討地形上游的風場與降水回波位置的相關性。

本研究將地形上游平均風場分別投影到平行剖面(D1、D2及N剖面，如圖6所標示)的方向，得到各剖面的跨山氣流分量(Cross-barrier flow)，再分別將三個剖面的底層(750公尺處)雷達回波依跨山氣流分量大小依序排列(跨山氣流分量相等時則作雷達回波平均)並將雷達回波作縱方向的內插(縱軸以 0.1 m s^{-1} 為間距)，藉此分析跨山氣流分量與底層(750公尺處)雷達回波之間的相關性，其結果為圖8-10。圖中黑線表示在該跨山氣流分量下，雷達回波最大值的位置。從圖中可發現D1剖面(圖8)與D2剖面(圖9)這兩區域的雷達回波最大值的位置有著隨跨山氣流分量增加而顯著往地形下游移動的趨勢。相較之下，N剖面(圖10)雷達回波最大值的位置與跨山氣流分量之間的關係並沒有那麼顯著。

六、結論

透過五分山雷達與民航局中正機場雷達資料配合地面觀測資料顯示地形效應在此個案中扮演重要角色，大屯山與南港-基隆山脈自10月31日2000 UTC地形上游兩公里以下之平均風場轉向東北風開始，皆發生顯著的地形降水，持續約十小時。南港-基隆山脈雖受到來自外海之颱風外圍雨帶影響，但在颱風外圍雨帶移入北臺灣之後，隨即山區的雷達回波有明顯增強的現象，此乃顯示地形仍然扮演著加強降水的角色。

強降水回波持續滯留於大屯山迎風面的山腰(接近山頂)，以及南港-基隆山脈的山頂(延伸至背風面，並且平行南港-基隆山脈走向)。兩山區的強降水回波(大於40 dBZ)頻率分佈皆與地形引發的氣流垂直速度(大於 1 m s^{-1})之頻率分佈相關，強降水回波頻率

極大區域位於地形引發的氣流垂直速度頻率極大值的下游，顯示地形抬舉對降水加強的重要性。

大屯山區主要降水位置與跨山氣流分量大小密切相關，而南港-基隆山脈主要降水位置與跨山氣流分量的關係則較不顯著，此差異暗示著大屯山與南港-基隆山脈之地形降水過程不同。大屯山區低層降水回波最強的位置隨跨山氣流分量的增加而向地形下游移動，此平移效應的程度隨跨山氣流分量大小而改變，此觀測結果與Colle(2004)透過MM5在理想化情況下的模擬結果類似，顯示其地形降水過程與地形斜坡強迫舉升凝結機制較為有關。南港-基隆山脈因受颱風外圍雨帶影響，且山半寬比大屯山小，地形抬舉氣流的時間相對較短，所以地形斜坡強迫舉升凝結機制在南港-基隆山脈或許並非扮演主要的角色，該處的地形降水過程或許是颱風外圍雨帶的雨滴降到因地形強迫舉升所形成並籠罩在南港-基隆山脈的低雲(但不一定有降水)，形成沖刷(washout)而間接加強南港-基隆山脈的降水。

參考文獻

- 王時鼎、陳泰然、謝信良，1985：台灣颱風降雨特性及其預報(二)。行政院國家科學委員會防災科技研究報告，73-47，100頁。
- 李清勝與蔡德攸，1995：利用CAA都卜勒雷達資料分析四個侵台颱風伴隨雨帶之特徵。《大氣科學》，23，209-235。
- 范銚燾，2000：台灣颱風地形效應豪雨預警區之研究。私立中國文化大學地學研究所博士論文，225頁。
- 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。
- 謝信良、王時鼎、鄭明典、葉天降、丘台光，2000：建立台灣地區颱風預報輔助系統之研究(第三階段之二)。中央氣象局專題研究報告CWB88-1M-01，449頁。
- 顏自雄，2003：賀伯颱風(1996)及受其台灣地形影響之數值模擬研究。國立台灣大學大氣科學研究所博士論文，108頁。
- Chang, C.P., T. C. Yeh, and J. M. Chen, 1993: Effects of terrain on the surface structure of typhoons over Taiwan. *Mon. Wea. Rev.*, 121, 734-752.
- Colle, B. A., 2004: "Sensitivity of Orographic Precipitation to Changing Ambient Conditions and Terrain Geometries: An Idealized Modeling Perspective", *Journal of the Atmospheric Sciences*, 61, 588-606
- Wu, C.-C., and T.-H. Yen, Y.-H. Kuo, W. Wang, 2002: Rainfall simulation associated with

typhoon Herb (1996) near Taiwan. Part I: The topographic effect. *Wea. Forecasting*, 17, 1001-1015.

誌謝

本研究由國科會計畫NSC 95-2111-M-034-001 支助進行。五分山雷達資料、民航局中正機場雷達資料及全台逐時地面觀測資料由台大大氣研究資料庫楊明錚先生提供。

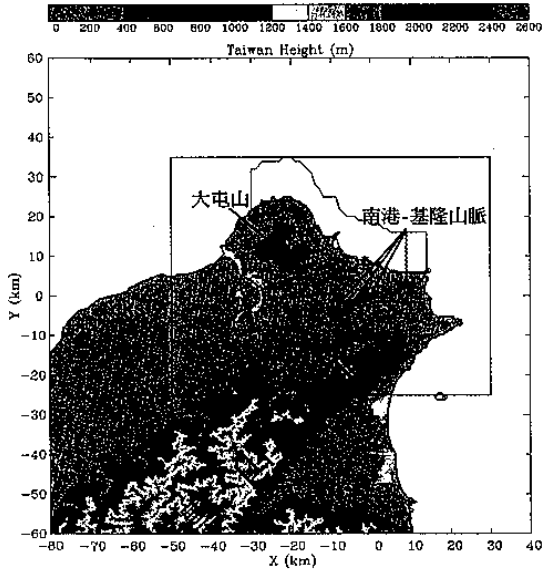


圖1 台灣地形高度及測站分佈，圖中色階為地形高度(間距為200公尺)，五分山雷達站(WFS)及民航局中正機場雷達(CKS)以紅色三角形標示，局屬觀測站以紅色正方形標示，自動氣象站以黑色空心圓標示，自動雨量站以黑色實心圓標示，板橋探空站則以紅色星號標示。紅色長方形為本研究主要分析區域，紅線所圍之範圍為地形上游風場選取區域。

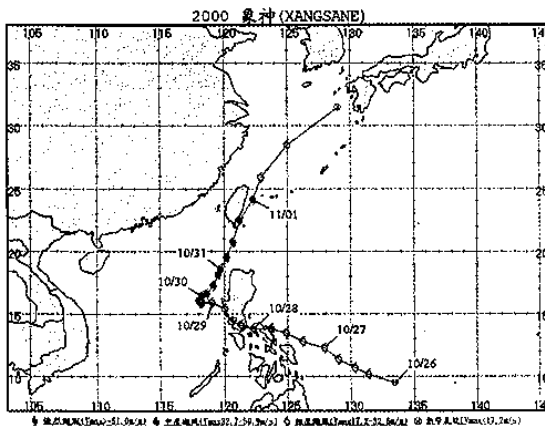


圖2 2000年象神(編號第20號)颱風路徑圖，颱風中心定位每隔6小時一點，時間為UTC (資料來源：中央氣象局)。

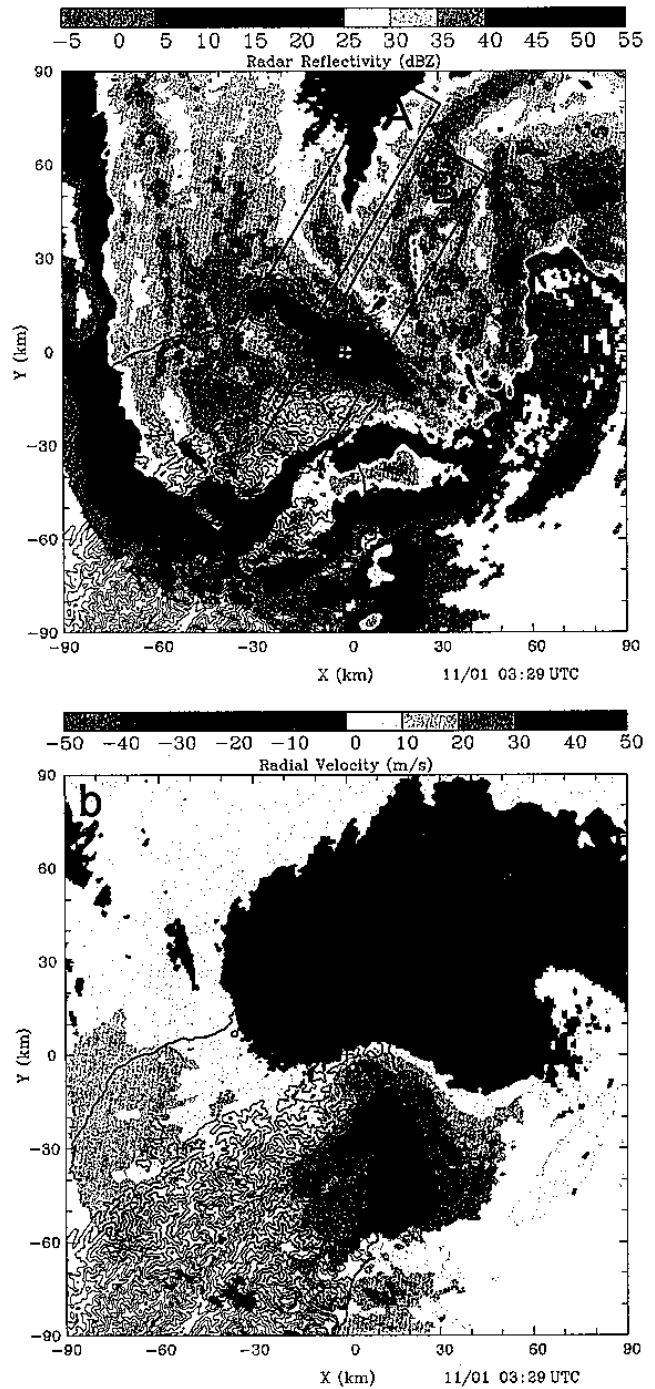


圖3 五分山 (1.4 度仰角PPI掃描)雷達觀測，時間為11月1日0329 UTC (雷達位置以+號標示，颱風弱回波中心以⊕符號標示)。(a)雷達回波圖(色階，單位為dBZ)及(b)徑向風場(色階，單位為 $m s^{-1}$)，等值線為地形高度(單位為公尺，間距為300公尺)。圖中兩區域乃針對大屯山區域(A區域)及雪山山脈北側(B區域)兩個主要降水區，取長為110公里且寬為20公里，方向則大略平行盛行東北風，計算其平均回波隨時間變化(結果於圖4表示)。

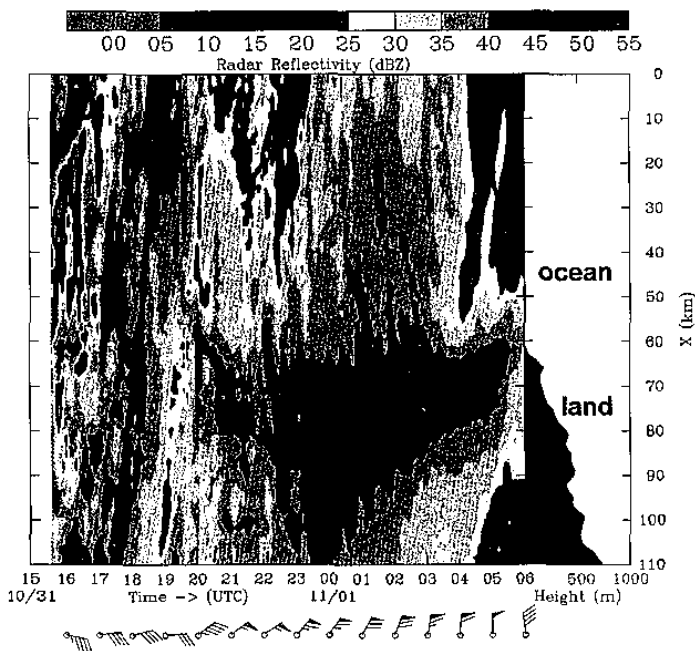
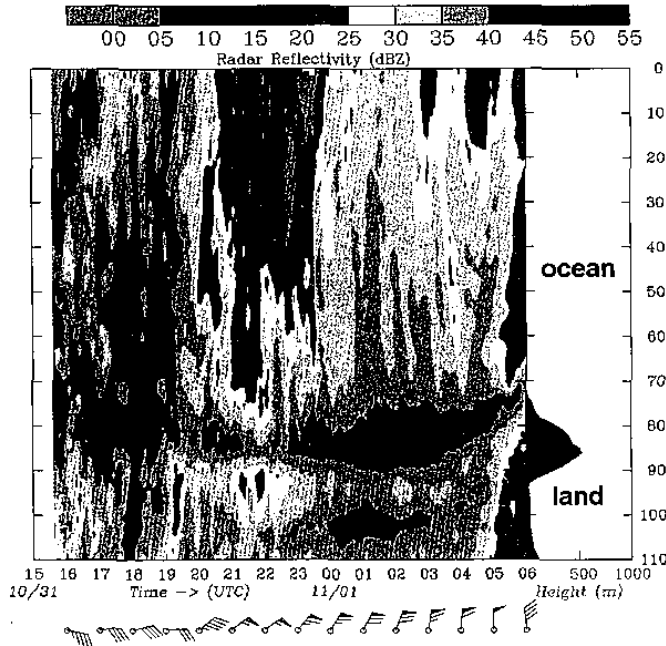


圖4 平均雷達回波隨時間的變化，色階為平均雷達回波（單位為dBZ，間距如圖上所標示），下方風標表示地形上游兩公里以下平均風場（區域選取範圍已於圖1說明）逐時變化（half-bar = 2.5 m s^{-1} ，full bar = 5 m s^{-1} ，flag = 25 m s^{-1} ），右側棕色區域表示地形高度（單位為公尺）。時間自10月31日1500 UTC至11月1日0600 UTC。(a) 大屯山區域及 (b) 雪山山脈北側。

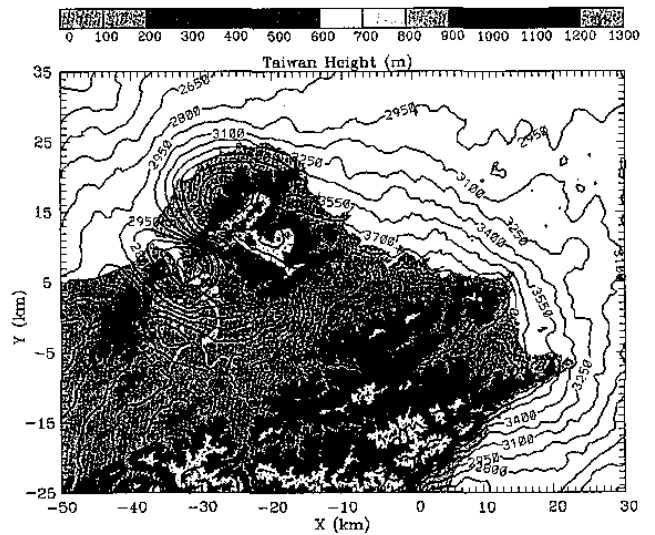


圖5 10小時累積回波，色階為地形高度（間距如圖上所標示），等值線為累積回波（間距為150dBZ）。累積時間自10月31日2000UTC至11月1日0600UTC，共10小時。

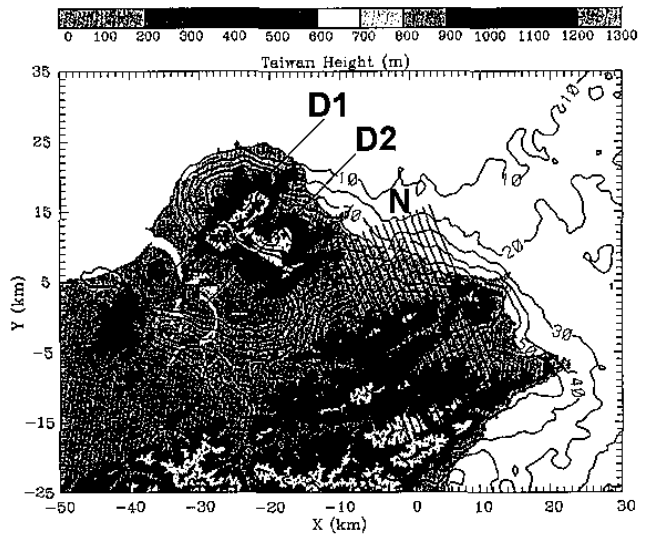


圖6 回波（大於40dBZ）頻率分佈圖及剖面選取區域，色階為地形高度（間距如圖上所標示），等值線為回波（大於40dBZ）頻率（間距為10%）。大屯山針對兩個局部回波頻率最大值（D1，D2剖面）各取一條剖面（如圖黑線所示）。南港-基隆山脈（N剖面）則垂直地形的走向選取16條剖面（如圖所示，每條剖面相距1公里）再平均。剖面長度皆為30公里。

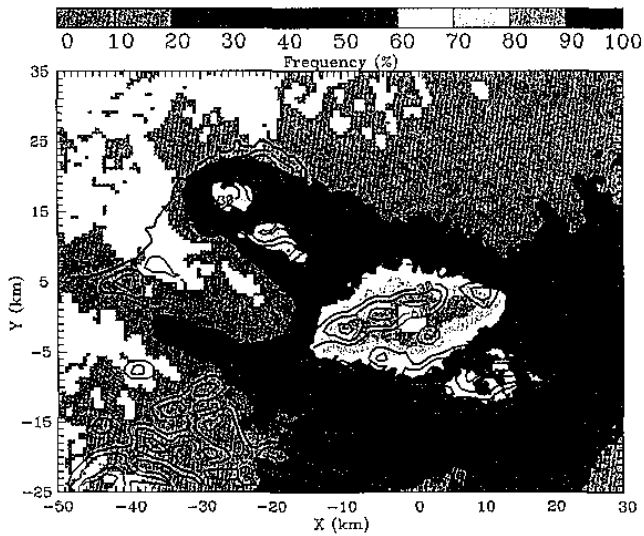


圖7 雷達回波 (大於40 dBZ) 頻率與地形引發之垂直速度 (大於 1 m s^{-1}) 頻率之相關, 色階為雷達回波頻率 (頻率間距為10%, 如圖上所標示), 等值線為地形引發之垂直速度 (大於 1 m s^{-1}) 頻率, 間距為30%。

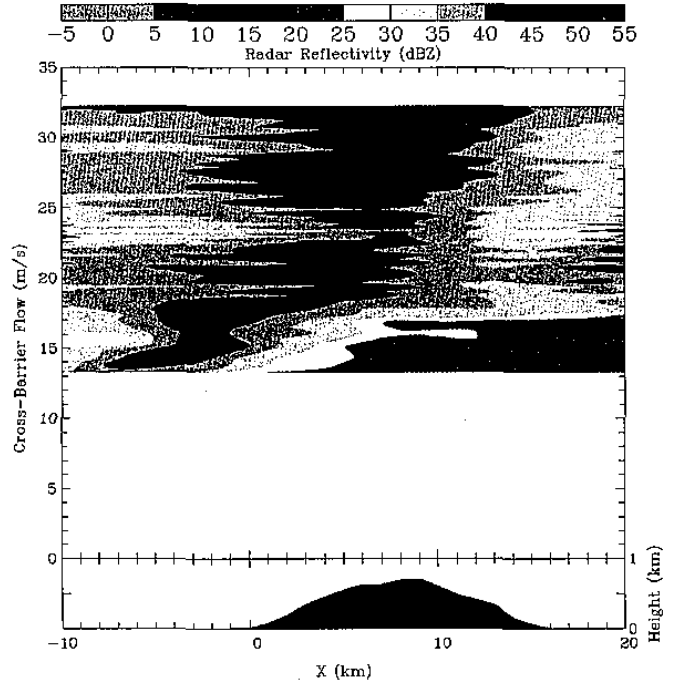


圖9 同圖8, 但為D2剖面

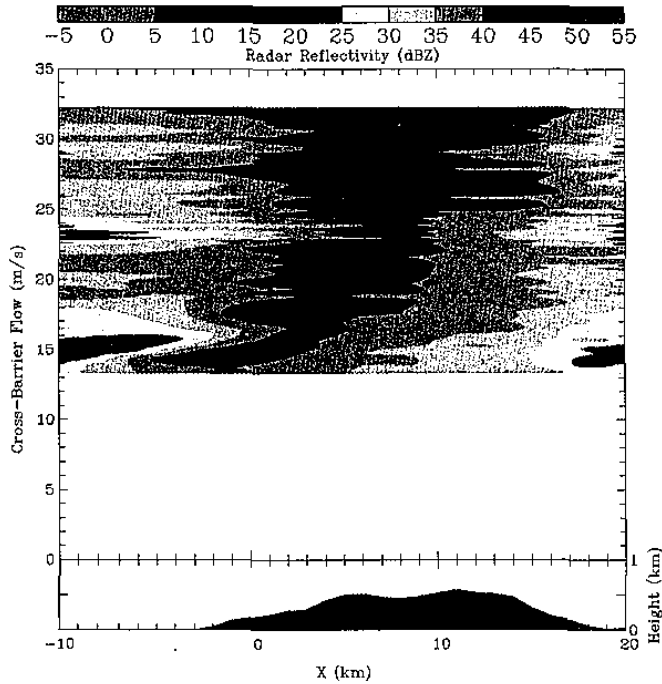


圖8 D1剖面之底層(750公尺高度)雷達回波最大值的位置(相對於地形)與跨山氣流分量大小(Cross-Barrier Flow)之相關。圖中色階為底層雷達回波 (單位為dBZ, 間距如圖上所示), 圖下方的棕色區域為地形剖面, 黑實線為雷達回波最大值的位置之連線。

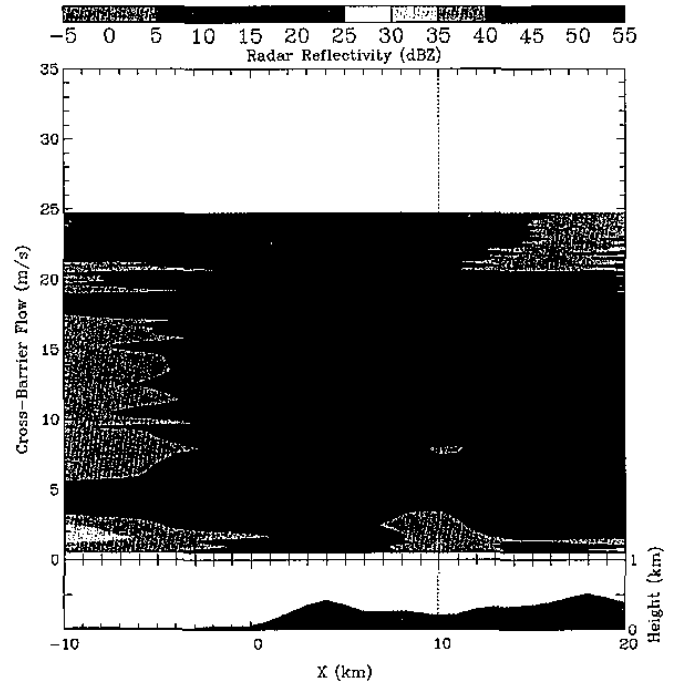


圖10 同圖8, 但為N剖面