

山谷邊界層之觀測與模擬

王嘉瑋 林博雄

國立台灣大學大氣科學研究所

摘要

山谷地形的風場模擬和探討在過去數十年的研究中已經不佔少數，大部分文獻討論的焦點在於山谷風的形成機制以及山谷內的地形效應對風場的影響。山谷地區不論是白天產生的谷風和夜間產生的山風，或是複雜地形造成風場的轉向、偏折效應，都屬於邊界層氣象的範疇；由於大氣邊界層是大部分生物和人類的活動範圍，也是地表和大氣之間的能量、動量、物質交換的空間，比如全球通量網(fluxnet)自 1998 年起跨國跨領域的合作，隨著觀測工具與電腦軟硬體的精進，如何更細緻更高解析度模擬和呈現邊界層內的氣象和流場特徵，再度成為大氣科學領域矚目的議題。過去的一些電腦模擬，定性上雖然可以呈現邊界層內的流場特徵，並且和觀測有一定程度吻合，但是通常這些邊界層大氣模擬大都侷限在平坦地形或是海面上的邊界層，對於山谷地區複雜地形來說一直存在解析度的問題，因為些微的局部地形高度起伏變化就能使風場明顯改變。Baklanov et al(2011)指出邊界層模擬的地形解析度和空間解析度是目前必須改善的問題，當解析度夠高時，可呈現細微的地形起伏，讓陸氣交互作用的物理機制更加真實，也使得劇烈天氣更容易被預測出來。

過去的文獻對於山谷地區的觀測與模擬已有相當程度的詮釋，大部分以理想地形來模擬山谷風的形成或氣流過山的情形，定性地探討風場的分布。臺灣山地多平原少，複雜地形下的風場更是重要，而亞熱帶氣候也凸顯出山谷邊界層內森林生態系和水氣、二氧化碳、能量交換等問題。

關鍵詞：山谷風

一、前言

本研究透過臺灣大學實驗林溪頭營林區(南投縣鹿谷鄉)建置 40m 高度通量塔的機會，於 2010 年進行冬、夏兩次的大氣邊界層密集觀測，包含探空氣球的大氣垂直剖面觀測、40m 高度通量塔觀測以及當地農業氣象站的氣候資料等等，了解當地山谷地形的大氣邊界層氣象，其中通量塔的觀測更是國內少有的垂直高密度觀測，提供地表植被影響

下的地面層型態。因此在觀測上，本研究試圖以不同尺度和角度來完整呈現臺灣的山谷氣象，而不光以單一地面氣象站的觀測，為本研究的優勢和突破。另一方面，本研究使用日本 CRADLE 公司 STREAM model，設定 40 公尺的地形空間解析度進行高解析度的風場模擬，比起現有的中尺度天氣數值模式有更高的解析度，並且能呈現局部完整地形和邊界層內的風場分布情形。綜合言之，本研

究將藉由觀測跟模擬的配合，來探索溪頭山谷邊界層內外風場特徵。其中，本研究模擬風場經過高解析度地形的過程，類似風洞實驗，而水平尺度達數公里的風洞實驗成為本研究的一大特色，預期能在應用方面，幫助解決山谷內的複雜風場問題，如水氣、二氧化碳傳送、森林火災的防範等。

二、資料來源與模式介紹

本章將介紹本研究資料來源和模式工具，實際觀測資料來自於臺灣大學實驗林溪頭營林區的現場觀測；除了無線電探空數據之外，近地面的部分則有 40m 高的通量塔觀測數據，以及長年運作的溪頭農業氣象站；流場模擬方面，本研究採用的 STREAM model 為高解析度的 CFD (Computational Fluid Dynamic) 模式，並且以實際觀測的風場剖面，做為 STREAM model 的邊界條件與初始條件，以進行高解析度的溪頭山谷風場模擬。

(一) 觀測與模式模擬地點介紹：

臺灣大學實驗林溪頭營林區(以下簡稱溪頭)，位於臺灣中部南投縣鹿谷鄉，空間位置為北緯 23.66°，東經 120.79°，海拔高度 1150m(圖 2-1)；二月最高溫約 18°C，七月最高溫約 24°C，年均溫 16.6°C，年降雨量約 2600mm，為溫暖高濕氣候型，冬季期間旱象會造成當地溪水乾涸，而降雨集中於每年 5~9 月，為實驗林之洪澇期，此期間之雨量約佔年雨量 76% 以上；尤其是颱風或熱帶性低氣壓降雨，雨勢甚大，經常帶來豪雨導致山洪爆發，沖毀路基及相關設施，造成程度不等之危害(張等，2008)。地形特徵方面，溪頭位在一個開口朝向北方，且略為朝向北西方的山谷中，形狀如 V 字形(圖 2-2)。

(二) 觀測工具：

為了了解溪頭的邊界層大氣的垂直結構，本研究在 2010 年 2 月和 7 月，分別進行

為期約一週的邊界層剖面觀測，主要設備是芬蘭 Vaisala 公司 MW15 無線電探空機台，經由 200g 氣球和 RS92 型探空儀施放來進行高空觀測。除此之外，尚有地面氣象觀測設備(包括農業氣象站和 40m 通量塔觀測站)，分別敘述如下：

1、溪頭苗圃農業氣象站：

溪頭地區苗圃農業氣象站，於西元 1941 年架設至今，空間位置為北緯 23.66°，東經 120.79°，海拔高度 1150m。氣象觀測儀器包含溫度計、溼度計、氣壓計、風速風向計、可見光輻射計以及地溫計等，並以每 10 分鐘平均值記錄一次所有氣象參數。此農業氣象站提供了多樣的氣象參數資料，用以呈現溪頭之氣候特徵。

2、溪頭二氧化碳通量觀測塔：

近地面部分，溪頭當地設有一座高 40m 的通量塔(圖 2-3)，該通量塔在 0.5、2.5、6、10、14、18、22、25、28、36m 高度分別架設溫度、濕度計；10、18、25、32、36m 高度則架設風速與風向計，另外還包含可見光輻射計、紅外線地表輻射溫度計，土壤熱通量計等儀器，並以每分鐘平均值記錄所有氣象參數。此外，於 32、40m 高度設有 LI-7500 型開放式二氧化碳、水氣濃度分析儀以及 CSAT3 三維超音波風速計，透過渦流相關法計算二氧化碳、水氣通量，幫助研究森林生態系的二氧化碳和能量收支情形(洪，2010)。藉由通量塔的高密度觀測資料，可從事二氧化碳通量監測，或森林生態系水文收支與能量收支之相關研究；大氣科學方面，則用以幫助研究山谷內近地面動量與能量分布情形。

(三) 密集觀測計畫：

1. 第 1 次密集觀測計畫：

第 1 次密集觀測(Intensive Observation

Period, 以下簡稱 IOP-1) 期間為 2010 年 2 月 2 日到 2 月 6 日, 代表的是乾季觀測。觀測期間每天 05:00LST(Local Standard Time) 以及 14:00LST 施放無線電探空氣球, 用以獲得山谷內外的風場、濕濕場的剖面, 以及日夜的差異。此外, 於上述之二氧化碳通量觀測塔頂端架設數位相機並固定視角, 設定每分鐘自動拍攝一張, 用以觀察山谷日變化之天氣型態和雲相狀況。

2. 第 2 次密集觀測計畫:

第 2 次密集觀測期間(IOP-2)為 2010 年 7 月 24 日到 7 月 27 日, 代表的是濕季觀測。觀測期間於 7 月 25 日 05:00LST 和 14:00LST 各施放一份探空氣球, 並從 7 月 26 日 08:00LST 開始, 每隔 3 小時施放一次, 直到 7 月 27 日 05:00LST, 而最後在 7 月 27 日 14:00LST 施放最後 1 份探空氣球。

(四) STREAM 模式:

1. 模式概述:

本研究在山谷地形的風場模擬使用了 STREAM model, 它是一個高解析度的計算 Computational Fluid Dynamics (簡稱 CFD), 由日本 Cradle 公司開發。該模式擅長處理粒子擴散以及流體遭遇障礙物或複雜地表產生的變化。本研究目標在於山谷複雜地形的流場模擬, 因此高解析度地形, 必須做為數值模式下邊界條件, 完整的山谷地形或是山稜線形狀, 才能讓流場模擬更加真實, 本研究預期 STREAM model 將能滿足這一目標。

STREAM model 的模擬過程在本研究中, 以東西向 8 公里, 南北向 8 公里, 垂直方向 3 公里的 domain box 為模擬範圍, 並以觀測地點為中心, 匯入溪頭地區的實際地形。網格解析度和地形解析

度都是 40m。邊界條件的設定方面, 以真實或理想的風場垂直剖面輸入模式以進行高解析度的風場模擬, 並考慮地表摩擦。最後以圖形化的方式呈現各項參數的時空分布情形。

三、個案觀測資料分析:

(一) 綜觀天氣概況:

在溪頭進行的兩次密集觀測(IOP), 分別在 2010 年 2 月 2 日到 2 月 6 日(IOP-1)與 2010 年 7 月 24 日到 7 月 27 日(IOP-2); IOP-1 處於雨量較少的乾季季節期間, 除了 2 月 6 日白天有鋒面通過之外, 其他 4 天則是大陸高壓中心位在長江口附近, 屬於穩定晴朗的天氣; 上午雲量很少, 中午開始起霧, 下午則是霧籠罩整個溪頭山谷, 傍晚霧的現象消退, 晚上又恢復晴朗天氣狀態。IOP-2 處於雨量較多的濕季觀測, 當時綜觀天氣是臺灣北部有低壓系統通過, 臺灣中部、西南部地區吹著旺盛的西南暖濕氣流, 使得溪頭地區天氣相當不穩定; 觀測期間四天都有顯著降雨情況, 即使如此, 中午起霧的現象如同 IOP-1 依然相當明顯。

(二) 溪頭農業氣象站資料分析:

溪頭苗圃的農業氣象站觀測資料顯示, IOP-1 觀測期間最低溫 10.2°C, 最高溫為 21.4°C; 而整個二月份的平均低溫為 11.5°C, 平均高溫為 18.1°C, 因此 IOP-1 期間的日夜溫差大於月平均狀態。風向特徵方面, 當地白天吹拂北北西風(相對於溪頭山谷而言, 屬於谷風狀態); 夜間吹拂南南東風(相對於溪頭而言, 屬於山風狀態)。10:00LST 與 18:00LST 則是風向轉換的過渡期(圖 3-1); 換言之, 溪頭地區日夜變化的山谷風現象相當明顯。

IOP-2 的觀測期間, 最低溫為 17.7°C, 最高溫為 24.3°C; 整個 7 月份的平均低溫為 18°C, 平均高溫為 24°C, 因此 IOP-2 期間的日夜溫差也是大於當月平均狀態; 風向特徵

方面, 白天吹拂北北西風(谷風), 夜間吹拂南南東風(山風)。風向轉換時段發生在 09:00 LST 和 19:00LST, 和 IOP-1 相比, 早上風向轉換時間提早一些; 換言之, 溪頭地區山谷風現象並沒有冬夏季節的明顯差異。

(三) 通量塔多層氣象資料分析:

40m 高度溪頭通量觀測塔採每分鐘平均值記錄。這些資料提供了寶貴的近地面層高密度垂直剖面觀測, 反應當地植被覆蓋下的近地面層微氣象狀態。通量觀測塔周遭植物以柳杉為主, 高度約 28m, 樹冠層約位於 18~28m 高度, 因此通量塔資料可區分為樹冠層以下(<18m), 樹冠層(18~28m)以及樹冠層以上(28m~40m)等 3 層。本研究也在兩次 IOP 期間於通量塔最上層工作平台, 安置數位相機向北自動拍攝記錄溪頭山谷天氣狀態(圖 3-2)。由這些影像可辨識出溪頭起霧時間約在 12:00LST, 並隨時間從北方山谷開口處往南方山谷深處移入, 並在 14:00LST 籠罩整個溪頭山谷, 16:00LST 左右這一霧層漸漸向北消退。這一霧團進入與退出山谷的時段跟當地谷風盛行時間相當一致, 顯示谷風與霧團兩者的伴隨關係。

由於通量塔由實驗林管理處持續運作, 因此本節觀測資料分析是以 IOP-1 的 2 月份平均值, 和 IOP-2 的 7 月份的平均值, 來進行分析討論。2 月份溫度剖面結果呈現, 白天溫度最高溫在 25m 樹冠層頂部位置(約 17°C), 而在樹冠層以下形成逆溫(圖 3-3); 夜間時, 逆溫層則是出現在樹冠層以上高度; 換言之, 樹冠層高度扮演邊界層介面的角色, 這一現象與 Staebler and Fitzjarrald(2005)的看法一致, 他們也發現最高溫存在於樹冠層高度位置, 並推論主要原因是由於太陽光直接照射加熱在樹冠層頂所導致, 樹冠層以下高度受到樹冠層陰影遮蔽, 所以溫度相對較低。而 7 月份溫度剖面方面白天最高溫在 25m 高度的現象更為突出; 同樣地, 白天樹冠層

以下高度有逆溫層, 夜間逆溫層則出現在樹冠層以上高度。

風速觀測方面, 2 月與 7 月的特徵類似, 明顯呈現樹冠層以上高度的風速較大, 而且風速變化的形式與當地苗圃氣象站(20m 高度)相當; 風速剖面方面, 樹冠層以下高度風速偏低, 樹冠層以上風速明顯增加(圖 3-4), 這一現象也跟 Staebler and Fitzjarrald (2005) 的研究相當, 他認為是受到樹冠層摩擦力偏大的影響所造成, 這也再度顯示出樹冠層扮演的風速臨界高度的角色。

風向觀測方面, 2 月與 7 月兩個月份也是彼此類似, 將 360° 的風向簡化為東西方向的 u 風場, 以及南北方向的 v 風場分別討論(圖 3-5)。結果顯示夜間正值的南風, 是朝向開口向北溪頭山谷地形的「山風」; 白天情況完全相反, 吹的是負值的北風, 所以是「谷風」。至於東西向風場的部分, 則是呈現整天微弱東風的情形。通量塔觀測的風向再度顯示溪頭地區山谷風現象相當明顯, 並與當地農業氣象站觀測一致, 風向並沒有季節上的差異。

(四) 探空資料分析:

兩次 IOP 的氣球無線電探空(balloon radio sounding)觀測, 目的要去了解當時溪谷到自由大氣的垂直結構狀態, 包括大氣的濕濕剖面以及風場剖面, 以幫助我們分析溪頭山谷內的邊界層型態, 以及山谷內外的風場差異。

2 月 2 日到 2 月 5 日四天清晨的探空剖面顯示近地面因地表輻射冷卻而有逆溫層存在, 並在 750hPa 高度則有下沉逆溫的現象(圖 3-6)。下午的探空剖面顯示, 高空自由大氣與清晨時刻狀態差異不大, 但在近地面有很淺薄的超絕熱層與混合層, 並且離地約 1000 公尺的高度內的相對濕度接近 100%(溫度曲線與露點曲線幾乎重合), 顯示出溪頭當地下午霧層發生的情形。風速的部分, 近地面風速

約在 5ms^{-1} 左右，而在 2000m MSL (Mean Sea Level, 海拔高度) 以上快速增強(圖 3-7)。風向特徵方面，顯示在 2000m MSL 以下的風向呈現相當雜亂的情形，而在 2000m MSL 以上才漸漸穩定，並且趨向西風(圖 3-8)。以上的風場垂直結構特徵顯示，2000m MSL 高度是溪頭谷地大氣邊界層的重要指標高度，在 2000m MSL 以下的風場呈現不規則，其中風速的部分在這高度以上快速增加，風向也在這高度以上趨向綜觀風場(西風)，而這 2000m MSL 的高度也恰好跟山谷周遭的山稜線的海拔高度相當，突顯山谷內的風場受到地形的影響很大，並且山谷內的渦流將使風場不穩定。綜合言之，2000m MSL 同時也是山谷周遭的山稜線高度，可視為溪頭山谷的邊界層高度。

雖然山谷內風場不穩定，但是經由分析過程可幫助了解山谷內風場依然具有一些特性；由於溪頭山谷開口朝向北方，如果將 315° 到 45° 間的風向，也就是西北風到東北風這段風向視為谷風，而 135° 到 225° 間的風向，也就是東南風到西南風這段風向視為山風，山谷風出現的頻率隨高度變化顯示出 IOP-1 清晨時山風發生頻率大於谷風(圖 3-9)。而下午的風場，在 2200m MSL 以下谷風發生頻率大於山風，並且隨高度下降，谷風出現的頻率越高，甚至超過 50%(圖 3-10)。因此，由探空氣球的觀測也同樣可見溪頭山谷裡的山谷風現象，並發現山谷風只發生於山谷以下的高度，而山谷以上高度則沒有山谷風現象，這一現象再次說明山谷周遭地形高度區隔出自由大氣與山谷邊界層風場特徵的事實。

至於 IOP-2 期間的大氣狀態(圖略)，氣球探空觀測顯示這幾天溪頭處於不穩定天氣下，大氣相當潮溼。風場的部分，7 月 27 日風速隨高度變化較大，並且 2000m MSL 高度以下風速較低，而 2000m MSL 高度以上風速增加很快。風向方面，2000m MSL 高度以下

依然呈現不規則，而 2000m MSL 以上高度則趨於穩定，但不如 IOP-1 趨向西風，而是隨施放時間不同有所差異；當時可能受到低壓系統過境臺灣地區，大環境風向改變有關。

利用前一段敘述的山谷風分析方式再次討論 IOP-2 風場垂直特徵，其山谷風發生頻率隨高度變化，明顯看到白天時 2000m MSL 以下的谷風出現頻率遠大於山風的情形，可見山谷內谷風的現象非常明顯。

四、數值模式模擬與診斷：

針對第 3 章溪頭營林區山地邊界層的觀測分析，本章將再進一步檢視風場受到複雜地形影響產生後的變化，因此本研究將導入適當的風場進入數值模型，檢視高解析度起伏下的地形是如何改變流場特徵，以及風場經過或進入山谷以後，又會呈現何種程度的變形。因此，本章的數值模式模擬將分為兩個部分，首先為理想的剖面風場進入數值模式的模擬，其次為透過第 3 章探空觀測風場剖面進入數值模式的模擬。

(一) STREAM 模式-理想流場模擬：

模式設定：

在理想風場模擬中，首先設定模式水平範圍為 8 公里平方，垂直高度 3km，接著以溪頭通量塔氣象站地點為中心匯入實際臺灣地區地形資料(網格解析度為 40m)。風場邊界條件部分，本研究設定模式東西南北等四個側邊界皆為北風，並分別設定北風為 2ms^{-1} 、 5ms^{-1} 、 10ms^{-1} 三種均勻風場，以了解不同風速的流場分布差異。

由於溪頭山谷朝向北方，因此理想北風模擬是類似於白天溪頭吹谷風的情形。 2ms^{-1} 、 5ms^{-1} 、 10ms^{-1} 三種風速的北風吹進模式後的風場模擬結果顯示氣流爬山的情形(以 $x=4000\text{m}$ 之剖面呈現，圖 4-2)，近地面則是受到摩擦而風速偏低，而小山丘以及背風側(朝向南面的山坡)風速更加微弱，甚至在這

些區域產生順時針的逆向環流，使得背風側的山脚下反而吹著南風(圖 4-3)。風速的垂直變化方面，模擬得知風速並未隨高度而增大，而是在離地一段高度的風速達到最大，並且此一情形在氣流過山頂後特別明顯，與下方背風側微弱的風形成較大的風速梯度。如果將風速換成 2ms^{-1} 、 10ms^{-1} 的模擬結果，其風場分布的情況與 5ms^{-1} 的模擬類似，呈現定性上相同的結果。垂直方向之風速剖面結果顯示離地一段高度風速極值的現象，而這樣的情形也類似於 Liu(1990)模擬氣流過山的研究(圖 4-4)，他認為氣流爬山的過程受到地形抬升的效果，使得離地一段高度的風速受到加速，並且在山頂處的風剖面明顯看到這樣風速極值的現象。

藉由以上的剖面方式來探討高解析度的風場立體配置，清楚地顯示即使在小尺度的模式範圍內，也可發現不同位置截然不同的風場剖面，因為一個凸起的小山稜也會造成迎風面和背風面風場的差異，或造成風向轉彎等小尺度環流的現象。

(二) STREAM 模式-真實流場模擬：

1. IOP-1 探空模擬：

(1) 模式設定：

真實流場模擬的方法，乃是以實際探空得到的風場植入模式當中進行高解析度模擬。IOP-1 的部分選用 2 月 2 日 14:00LST 的探空所得之風場，表示白天穩定大氣的風場模擬，且當時近地面吹著偏北風(谷風)，是選用此探空的主要原因(圖 4-5)。在 STREAM model 中，模式範圍設定和地形的匯入以及地面摩擦處理方面，都與理想流場模擬相同，只是將東、西、南、北的四個側邊界的風場改成 2 月 2 日 14:00LST 的風場。當時風場在 1500m MSL 以下的近地面吹著東北風($u < 0$, $v < 0$)，風速約 3ms^{-1} ；而在 1500~2300m MSL 高度以西南風為主($u > 0$, $v > 0$)，風速約 5ms^{-1} 。2500m MSL 以上則進入西風帶($u > 0$, $v \sim 0$)，風

速隨高度增加很快。所以 STREAM model 就是以地面到 3000m MSL 這段高度的 u 、 v 風場匯入其中，並觀察模式在這樣實際環境運作之下，所呈現的流場結果。

(2) 模式輸出結果與討論：

結果顯示在東西方向 u 風場，明顯看到高層較強西風(約 6ms^{-1})，而近地面西風的風速偏低，山谷較低窪地區反而吹著微弱東風。南北方向 v 風場方面，大部分區域都呈現風速微弱的現象。垂直剖面上可發現中層吹著較強的南風(約 5ms^{-1})，如同探空風場中 1500~2300m MSL 這段西南風較強的高度。

我們分別再以 $x=4000\text{m}$ 、 $y=4000\text{m}$ 等兩個截面來討論風場特徵。 $x=4000\text{m}$ 截面表示南北向的剖面，並通過本研究之觀測位置，除了近地面風速偏低之外，山谷內(北向坡)風速也相當低(1ms^{-1} 以下，圖 4-6)。風向的分布情形，則是發現中層才有明顯南風分量，高層以西風為主(圖 4-7)。而 $y=4000\text{m}$ 截面表示東西向的剖面，通過本研究之觀測位置；同樣地，模式顯示出山谷內風速相當低，鳳凰山脈之東側也是風速偏低的狀況(圖 4-8)；風向方面，鳳凰山脈的西向坡這區域產生順時針迴流，造成觀測地點產生微弱東風(圖 4-9)。溪頭山谷詳細風場分布如圖 4-10 所示，顯示山谷內低層和高層風速之差異，並且低層的風向不如高層以西風或西南風為主，而是吹著微弱東風。

本研究分析採用 2010 年 2 月 2 日 14:00LST 的實際探空所得風場，匯入模式中進行高解析度模擬，並以不同剖面來觀察風速和三維風場的分布情形，整體而言，高層吹著強西風，中層吹西南風，低層風速則是偏小，原因是溪頭位於大環境的西南風背風側位置。除此之外，山谷東側觀察到微弱的東風，與部分西風在此一地點因受到山脈阻擋而產生迴流有關(山脈為南北走向)。

五、總結與討論

本研究探討的臺灣大學實驗林溪頭營林區，位於一個水平尺度數公里的畚箕型山谷中，經過觀測與模擬的配合，本研究預期之科學目標可歸結出以下結果：

- (一)以不同觀測資料多面向探討溪頭山谷內日夜風場變化和大氣邊界層特徵，從本文所討論的觀測結果(第3章)來看，溪頭山谷的溫度場垂直結構與一般平地差別不大。日夜風場變化的部分，從當地苗圃農業氣象站的風向機率，或是通量塔的南北風日變化以及探空氣球風向頻率分析等等，皆可發現明顯的山谷風，並且山谷風並無冬夏季節差異；通量塔的微氣象觀測方面，溪頭當地樹冠層高度(28m)可視為近地面的大氣邊界。較大空間尺度的探空氣球觀測方面，2000m MSL 高度以下的風向凌亂不均勻，而在2000m MSL 以上才漸漸穩定，並且趨向盛行風。風速特徵也是如此，2000m MSL 以上高度才明顯風速增加，顯示出2000m MSL 高度，也就是山谷周遭的山稜線高度，是上下層風場的區隔高度。可視為溪頭山谷的邊界層高度。
- (二)透過 STREAM model 模擬複雜山谷地形下，溪頭山谷地區風場的分布情形，在理想的固定風速北風模擬情境下(4.1節)，顯示背風側的風速偏低，而山頂以上一段高度有風速極值出現，而非簡單地隨高度線性增加風速。此一風速極值與風場在迎風面受到地形抬升作用有關。真實風場的模擬結果顯示，溪頭山谷開口朝向北方，對於大部分吹著西風或西南風的盛行風來說，溪頭山谷位於背風側的位置，山谷內風速偏低，因此盛行風對於山谷內的風場影響很小。而探空數據顯示風速在2000m MSL 以上高度才明顯增加，風向也是在此高度以

上趨向盛行風；因此，不論觀測和模擬都呈現山脊高度區隔風場的重要性，這一特點可將山脊高度做為溪頭山谷邊界層的高度。

- (三)幫助解決山谷內的風場問題，如水氣、二氧化碳傳送、森林火災防範等，本研究利用觀測和數值模擬呈現溪頭的山谷邊界層型態，可做為山地面積較多的臺灣地區山地氣象的參考。除了典型的山谷風之外，本研究透過模擬顯示山稜、山谷交錯的複雜地形導致風場分布不均勻，小尺度的模式範圍內也可發現不同位置呈現截然不同的風場剖面，而一個凸起的小山稜也會造成迎風面和背風面風場的差異。實際應用層面上，大氣-地表交互作用等議題所關切的通常是局部地區小尺度範圍的邊界層，地形的起伏可能造成熱通量、水氣通量、二氧化碳通量的差異，而本文的模擬結果具有高解析度風場分布的優點，日後可以做為陸氣交互作用研究的參考；另一方面，森林火災一直是人們關心的問題，本研究可提供近地面風場(圖 5-1，以 IOP-1 模擬為例)，幫助預測火勢延燒方向；而森林生態系關心的生物遷徙現象，也可做為本研究的應用範圍。此外，本研究也適時採用穿越樹冠層的通量塔觀測，更真實地考慮森林植被的近地層特徵與影響。

六、參考文獻

- 張振生, 王亞男, et al. (2008). "臺大實驗林溪頭營林區夏季降雨之長期趨勢." 臺灣大學生物資源暨農學院實驗林研究報告 22(1): 9-19.
- Baklanov, A. A., B. Grisogono, et al. (2011). "The Nature, Theory, and Modeling of Atmospheric Planetary Boundary Layers."

Bulletin of the American Meteorological Society 92(2): 123-128.

- Stabler, R. M. and D. R. Fitzjarrald (2005). "Measuring Canopy Structure and the Kinematics of Subcanopy Flows in Two Forests." *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 44(8): 1161-1179.

七、附圖

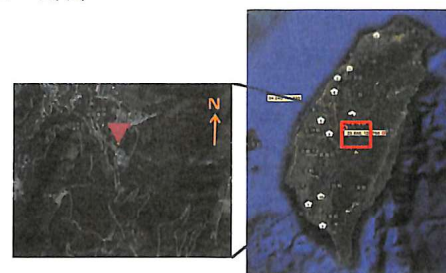


圖 2-1 臺灣大學實驗林溪頭營林區(溪頭)地理位置，紅色三角形為觀測地點。

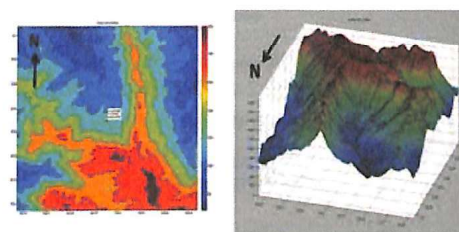


圖 2-2 溪頭地區之 8x8 km² 數位地形模型 (Digital Elevation Model), (a)二維和 (b)三維立體圖。



圖 2-3 溪頭二氧化碳通量觀測塔，(a)仰視圖以及(b)側視圖。

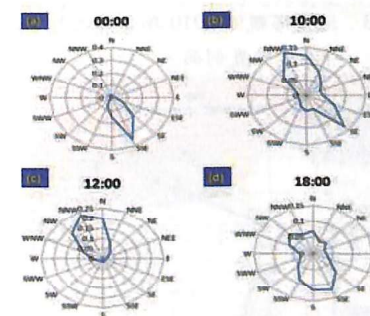


圖 3-1 2010 年 2 月之月平均於(a)00:00LST, (b)10:00LST, (c)12:00LST, (d) 18:00LST 之風向機率分布圖。



圖 3-2 自動拍攝之數位相機於通量塔頂向北拍攝之環境照片，時間是 2010 年 2 月 3 日(a)10:00LST, (b)12:00LST, (c)14:00LST, (d)16:00LST。

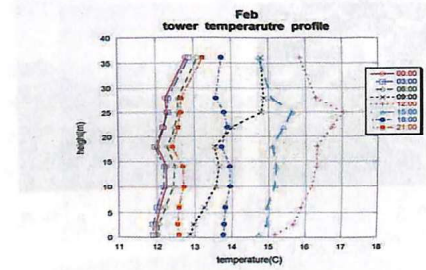


圖 3-3 通量塔觀測 2010 年 2 月之月平均逐時溫度垂直剖面。

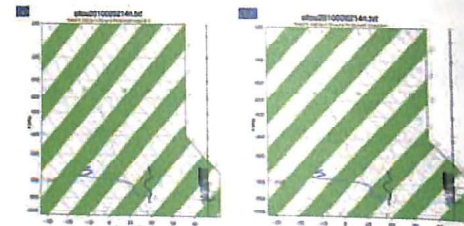


圖 3-6 2010 年 2 月 2 日 (a) 05:00LST (b) 14:00LST 探空斜溫圖。

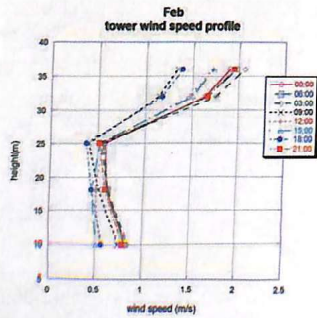


圖 3-4 通量塔觀測 2010 年 2 月之月平均逐時風速垂直剖面。

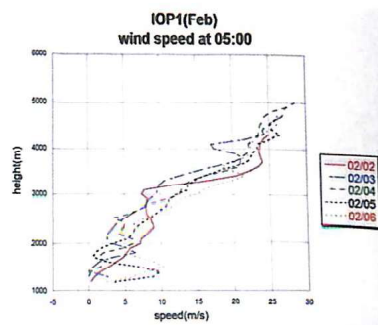


圖 3-7 2010 年 2 月 2 日~2 月 6 日 05:00 LST 探空風速垂直剖面。



圖 3-5 通量塔觀測 2010 年 2 月在 36m 高度之 (a) 東西風分量 u (紅線)、南北風分量 v (藍線) 風速日變化以及 (b) 山谷風示意圖。

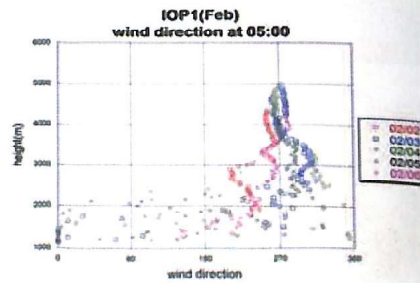


圖 3-8 2010 年 2 月 2 日~2 月 6 日 05:00LST 探空風向垂直剖面。

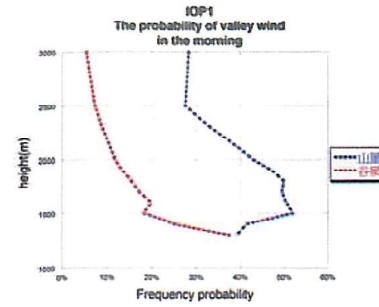


圖 3-9 IOP-1 觀測期間，05:00 LST 山谷風頻率垂直剖面。

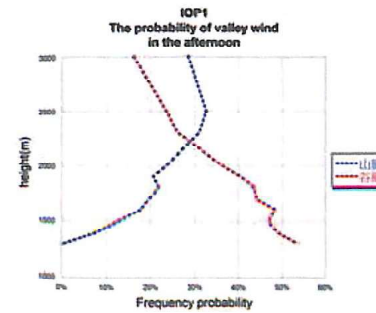


圖 3-10 IOP-1 觀測期間，14:00 LST 山谷風頻率垂直剖面。

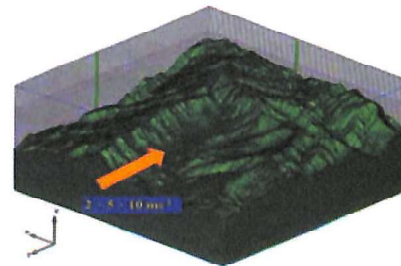


圖 4-1 分別以 2、5、10 ms^{-1} 風速之理想北風模擬示意圖。

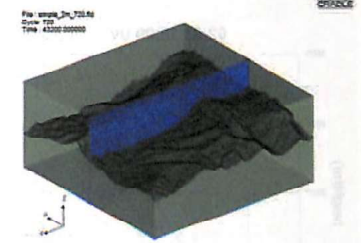


圖 4-2 位於 $x=4000\text{m}$ 之南北向剖面示意圖。

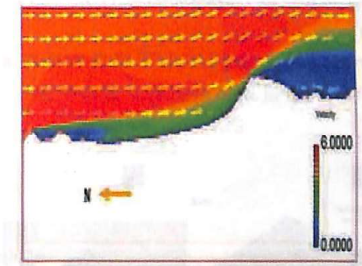


圖 4-3 5ms^{-1} 風速之理想北風模擬結果，顏色表示風速大小，箭頭表示風向。

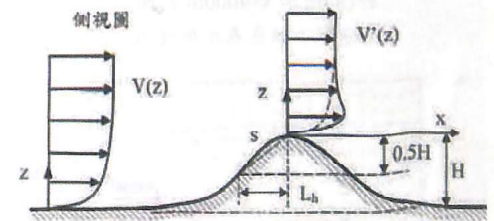


圖 4-4 Liu(1990) 模擬氣流過山前後之風速剖面示意圖。

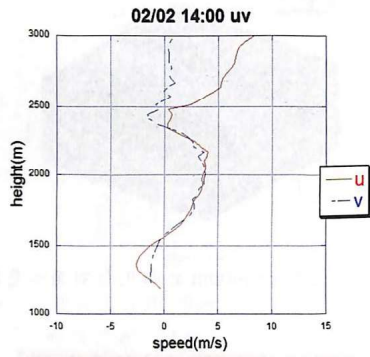


圖 4-5 2 月 2 日 14:00LST 探空所得之東西向 u 風場和南北向 v 風場剖面。

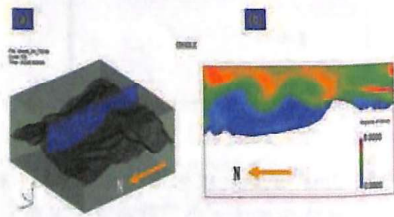


圖 4-6 2 月 2 日 14:00LST 探空模擬結果位於(a)所示 x=4000m 剖面以及(b)風速分布，顏色表示風速大。

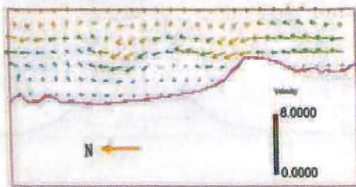


圖 4-7 2 月 2 日 14:00LST 探空模擬結果位於 x=4000m 剖面之風向分布，箭頭表示風向，顏色表示風速大小。

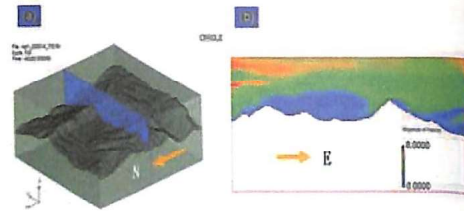


圖 4-8 2 月 2 日 14:00LST 探空模擬結果位於(a)所示 y=4000m 剖面以及(b)風速分布，顏色表示風速大小。

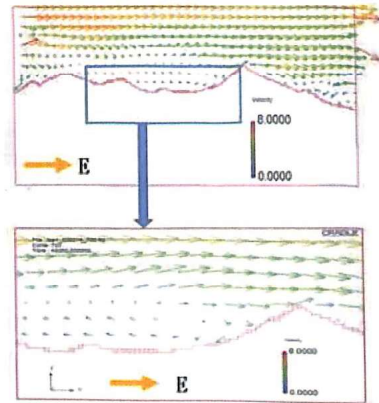


圖 4-9 2 月 2 日 14:00LST 探空模擬結果位於 x=4000m 剖面之(a)風向分布以及(b)藍色框線範圍局部放大之風向分布，箭頭表示風向，顏色表示風速大小。

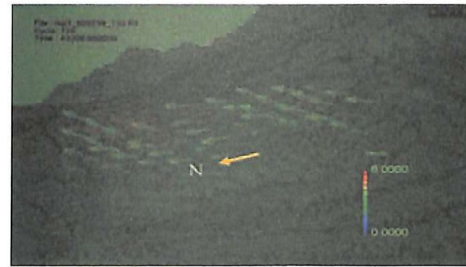


圖 4-10 2 月 2 日 14:00LST 探空模擬結果於溪頭山谷內風場分布，箭頭表示風向，顏色表示風速大小。

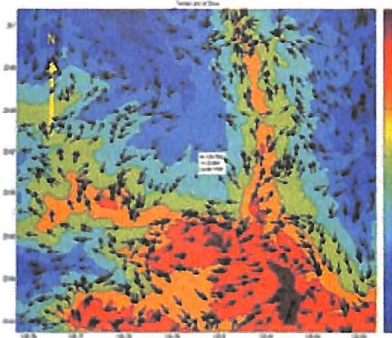


圖 5-1 以 IOP-1 模擬為例，溪頭地區離地 20m 地表風場分布(黑色箭頭)。

Mountain Valley Boundary Layer of Observation and to Simulate

Jia-Wei Wang AND Bo-Xiong Lin

National Taiwan University Atmospheric Sciences

ABSTRACT

The characteristics of atmospheric boundary layer in valleys differs from the same issue over plane terrain. Not only mountain-valley wind but also the deformation of wind field play a role in the development of boundary layer circulation. Some literatures showed that, in addition to mountain-valley wind circulation which is caused by the thermal effect, the prevailing winds have little impact on the wind flow in the valley. Through in-situ observation and high-resolution spatial-time numerical simulation, this research presents the phenomenon of valley boundary layer and the characteristics of wind flow in Sitou valley, which locates in the middle Taiwan with near 1000-m altitude and side is part of the Experimental Forest, College of Bio-Resources and Agriculture, National Taiwan University.

The in-situ observation showed that, except for the thinner mixed layer, the vertical atmospheric profile in Sitou is similar to that in a general plane. Obvious mountain-valley wind can be observed from local agricultural weather station, 40-m height flux tower and the balloon radiosondes. It was also found the mountain-valley wind can only blow under the height of mountain ridges (~2000m MSL), and the wind would approach to prevailing winds above the mountain ridges instead. The temperature and wind field observation of 40m-height flux tower indicate the top of canopy is the critical level near surface.

In computational simulations, this study uses STREAM Computational Fluid Dynamics model provide by Cradle Corp. of Japan, to simulate the wind field passing through the real topography in Sitou. In model settings, one stable northerly wind and two real vertical profiles of wind flow from radiosondes' measurement were set as the boundary condition of wind. The 40m-resolution topography was also imported in these simulations. The results indicated that the northerly V-shape Sitou valley has small wind speed all the time which is caused by the leeside of the mountains for synoptic winds (westerly or west-southerly wind) at Taiwan. In other words, the prevailing winds have little impact on the wind field of Sitou valley. We also found that the wind field was separated by the height of mountain ridges in observation and simulations similarly. Obviously, the height of boundary layer of Sitou valley is decided by the topographic factor. In addition, the numerical simulations with the high-resolution topography gave reasonable results on the characteristics of 3D wind flow in this small-scale valley.

Keywords : Mountain-Valley Wind