

溪頭山谷邊界層觀測與模擬

王嘉瑋¹ 林博雄¹ 曾于恆¹ 莊振義² 魏聰輝³ 賴彥任³

¹臺灣大學大氣科學系 ²臺灣大學地理環境資源系 ³臺灣大學實驗林管理處

摘要

山谷邊界層氣象與一般平地不同，除了常見的山谷風現象之外，複雜的地形也會造成風場的變形，對邊界層的發展有相當大的影響。過去研究文獻指出，山谷地區除了熱力效應產生的山谷風環流之外，環境的盛行風也會影響山谷內的流場，但影響的程度卻遠不及山谷風。本研究以實際觀測和時空高解析度數值模式的風場模擬，來呈現南投縣臺灣大學實驗林溪頭營林區之山谷邊界層氣象和流場特徵。

觀測結果顯示，不論白天或夜間，溪頭地區的垂直大氣剖面都與一般平地相似，但是混合層厚度較薄。當地農業氣象站和通量塔以及無線電探空儀都顯示溪頭地區相當明顯的山谷風現象，並且發現山谷風侷限於山脊線(海拔 2000 公尺)以下高度，山谷高度外的風場則漸漸趨向盛行風。40m 通量塔的溫度和風場垂直觀測則顯示樹冠層高度是近地面層相當重要的明顯邊界。

電腦風場模擬的部分，本研究以日本 Cradle 公司 Computational Fluid Dynamics(CFD) STREAM Model，模擬風場經過溪頭地區實際地形後的結果，並以理想穩定的北風(谷風)和兩次實際無線電探空的風場做為模式的風場邊界條件，以及植入 40 m 高解析度地形進行模擬；結果顯示，開口朝向北方的溪頭山谷對於大部分吹著西風或西南風的盛行風來說，其位於綜觀環境風場的背風側的位置，山谷內的風速偏低；換言之，盛行風對於山谷內的風場影響很小，並且我們可以發現不從論觀測和電腦模擬都發現呈現山脊高度區隔風場的現象重要性，因此山谷周遭的山脈也就是可做為溪頭山谷邊界層的高度。

關鍵字: 山谷邊界層、山谷風、流體動力模式

一、前言

早期大氣邊界層的一些電腦模擬，定性上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，然而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。

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。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。另一方面，本研究使用日本 CRADLE 公司 STREAM model，設定 40m 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。

二、資料來源與模式介紹

2.1 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 度，東經 120.79 度，海拔高度 1150m；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，為溫暖高溼氣候型，降雨集中於每年 5~9 月，此期間之雨量約佔年雨量 76%以上(張等，2008)。地形特徵方面，溪頭位在一個開口朝向北方，且略為朝向北西北方的山谷中，形狀如 V 字形。水文特徵方面，溪頭山谷為北勢溪之集水區，而鳳凰山脈東側為陳有蘭溪集水區，也是濁水溪最大支流。至於地表植被部分，包含柳杉、臺灣杉、紅檜、銀杏、孟宗竹等。

2.2 觀測工具

為了瞭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 度，東經 120.79 度，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(鄭,2010)，該通量塔在固定高度分別架設溫度、濕度計以及風速與風向計，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，透過過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。

2.3 密集觀測

第一次密集觀測(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、溫濕場的剖面。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。

第二次密集觀測期間(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，每隔三小時施放一次，直到 7 月 27 日 05:00LST，而最後在 7 月 27 日 14:00LST 施放最後一份探空氣球。

2.4 STREAM 模式

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。從極小尺度的房間內空調的對流模擬，到地方性的煙囪污染物擴散模擬，甚至是整座都市地區紊流的模擬等等，都可在 STREAM model 中進行設定。現今國內大氣科學界所採用的 WRF 中尺度模式 (Weather Research and Forecasting)，善於模擬自由大氣，但對於邊界層複雜地形的處理是經由邊界層參數化，因此 WRF 中尺度模式較適合用於平坦地形或海面上大氣的模擬；況且 WRF 中尺度模式的空間解析度不足 (3km 以上)，對於小區域流場的研究來說，並無法明確地呈現細微流場的分布情形。相對地，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。

STREAM model 的模擬過程包含三個步驟，依序是 Pre-processor、Solver、Post-processor。Pre-processor 是模式設計的部分，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。Pre-processor 設定完成後交給 Solver 內部的控制方程進行計算，最後則是 Post-processor 的結果輸出，並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

3.1 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期間，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。

3.2 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(谷風)；夜間吹拂南南東風(山風)。10:00LST 與 18:00LST 則是風向轉換的過渡期；換言之，溪頭地區日夜變化的山谷風現象相當明顯(魏等，1995)。風速範圍約 0.6~1.7m/s，中午和夜晚的風速較大，風向轉換期(10:00LST 與 18:00LST)的風速較小。

IOP-2 的觀測期間，最低溫為 17.7°C，最高溫為 24.3°C；整個七月份的平均低溫為 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 09:00LST 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。

3.3 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。通量塔周遭植物以柳杉為主，高度約 28m，樹冠層約位於 18~28m 高度。本節觀測資料分析是以 IOP-1 的二月份平均值，和 IOP-2 七月份的平均值，來進行分析討論。二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現象；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；而七月份溫度剖面方面，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，夜間逆溫層則是出現在樹冠層以上高度。

風速觀測方面，二月與七月的特徵類似，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，這一現象也跟 Staebler and Fitzjarrald (2005)的研究相當，他們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，二月與七月兩個月份也是彼此類似，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。

3.4 探空資料分析

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。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（皆有逆溫層），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%，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 5m/s 左右，而在 2000m(Mean Sea Level，海拔高度)以上快速增強。風向則顯示在 2000m 以下的風向呈現相當雜亂的情形，而在 2000m 以上才漸漸穩定，並且趨向西風。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，而這 2000m 的高度也恰好跟山谷周遭的山稜線的海拔高度相當(嶺頭山:2025m)。綜合言之，2000m 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 度到 45 度間的風向視為谷風，而 135 度到 225 度間的風向視為山風，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。而下午的風場，在 2200m 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。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，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 高度以下風速較低，而 2000m 高度以上風速增加很快。風向方面，2000m 高度以下依然呈現不規則，而 2000m 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 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

4.1 理想流場模擬

在理想風場模擬中，首先在 Pre-processor 設定模式水平範圍為 8 公里平方，垂直高度 3 公里，接著以溪頭通量塔氣象站地點為中心匯入實際臺灣地區 DEM 資料(網格解析度為 40 公尺)。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(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)，並分別設定北風為 2 m/s、5 m/s、10 m/s 三種均勻風場，以了解不同風速的流場分布差異。模式的模擬時間為 Solver 模擬 12 小時後的穩定結果，再由 Post-processor 加以輸出繪圖呈現模式輸出結果與討論。

三種不同風速的北風吹進模式後模擬氣流在山谷的繞行細節，首先近地面受到摩擦而風速偏低，而小山丘以及背風側(朝南面的山坡)風速更加微弱，甚至在這些區域產生順時針的逆向環流，使得背風側的山腳下反而吹著南風。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。藉由 XY、XZ、YZ 不同截面可發現不同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。

4.2 真實流場模擬

(1) IOP-1 探空模擬

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。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 以下的近地面吹著東北風，風速約 3 m/s；而在 1500~2300m 高度以西南風為主，風速約 5m/s。2500m 以上則進入西風帶，風速隨高度增加很快。

結果顯示在東西方向 u 風場，明顯看到高層較強西風(約 6 ms⁻¹)，山谷較低溼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 5 m/s)，如同探空風場中 1500~2300m 這段西南風較強的高度。我們分別再以 x=4000m、y=4000m 等兩個截面來討論風場特徵。x=4000m 截面表示南北向的剖面，除了近地面風速偏低之外，山谷內(北向坡)風速也相當低(< 1 m/s)。風向的分布情形，發現中層才有明顯南風分量，高層以西風為主。而 y=4000m 截面表示東西向的剖面，並通過通量塔觀測位置；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；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。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)。

(2) IOP-2 探空模擬

IOP-2 期間臺灣北部有低壓過境，中西部吹著旺盛的西南氣流，導致中低層大氣吹著西南風，因此本研究選用 7 月 25 日 06:00LST 的探空所得之風場，具有整層大氣吹著西南風之特性，作為模式的風場輸入。東西方向 u 風場，顯示當時環境西風的分量偏低，3000m 以下的風速低於 2 m/s，絕大部分區域都在 1 m/s 以下。而南北方向 v 風場，當時環境主要吹著南南西風，並且中高層區域有明顯的南風。整體風速的分布情況，同樣以 x=4000m、y=4000m 兩個截面來看。x=4000m 截面顯示山谷內風速偏低，中高層風速較高的情況，形成一個垂直方向均勻的風速梯度；風向的部分則顯示均勻明顯的南風。y=4000m 截面顯示不論在山谷或山頂的區域，離地一段高度的風速都偏低；風向部分，由於西風風速較低的關係，鳳凰山脈西側的區域並沒有觀察到迴流的現象。綜合言之，2010 年 7 月 25 日 06:00LST 的實際探空所得風場，匯入模式中進行高解析度模擬，除了

低層風速較低，高層風速較高之外，發現風向的垂直變化很小，都以南南西風為主。 $y=4000\text{m}$ 截面顯示不論在山谷或山頂的區域，離地一段高度的風速都偏低，主要可能是因為山谷南方的山脈海拔高度較高，加上風向偏南風，導致整個 $y=4000\text{m}$ 截面位於背風側的位置使得風速偏低。至於山谷東側並沒有觀察到迴流的情況，也可能與西風的分量較弱有關。

五、總結與討論

本研究透過臺灣大學實驗林溪頭營林區(開口朝北的畚箕型山谷)，經過觀測與模擬的配合，總結二項成果與可能應用：

(1)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。

(2)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。

透過這一研究，有助於界定森林水氣、二氧化碳垂直通量傳送的 footprint 範圍；此外，高解析度的 CFD 模式結合探空觀測剖面資料，提供了山谷的立體風場特徵，也能應用於森林火災擴散評估與防範參考。

參考文獻

洪敏勝，2010：山坡地區森林次冠層通量特徵之研究。國立臺灣大學地理環境資源學研究所碩士論文，pp129。

鄭森松，2010：二氧化碳通量試驗站。國立臺灣大學生物資源暨農學院實驗林管理處 2009 年年報，pp9。

張振生，王亞男，賴彥任，梁治文，許炳修，魏聰輝，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，22，9-19。

魏聰輝，姚榮鼎，周瑞龍，1995：溪頭山谷風特性之研究。臺灣大學生物資源暨農學院

實驗林研究報告，9，71-95。

Baklanov, A. A., B. Grisogono, R. Bornstein, L. Mahrt, S. S. Zilitinkevich, P. Taylor, S. E. Larsen, M. W. Rotach, and H. J. S. Fernando, 2011: The nature, theory, and modeling of atmospheric planetary boundary layers. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92, 123-128.

Staebler, 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, 1161-1179.