

應用空載光達數值地形模型於基隆河之 河流地形研究

陳柔妃^{1*} 詹瑜璋² 張國楨³ 謝有忠⁴

摘要

本研究利用空載雷射掃描技術(Airborne LiDAR)製作高精度數值地形模型,探討基隆河流域河階分佈及水系發育,結果顯示河川水系受控於地質及地形條件,主要支流發育在中游的八堵向斜,北側的集水區較南側平緩,對稱性的水系暗示集水區內並無差異性的地殼變動。基隆河自暖暖到侯硐之間,各次集水區之面積、形態差異較大,較無法以單一河流階地或構造整體抬升來解釋,而在暖暖附近之坡地地形具有崩塌特徵,導致古山崩造成河道的堰塞並影響次集水區發育。經野外勘查結果,判定本區可能坡面破壞形式以岩石傾翻(toppling)或楔型岩石崩落(wedge failure)型態存在。

關鍵字：空載雷射掃描技術、數值高程模型、構造地形、古山崩

1. 前言

河流地形常受到不同的岩石特性、地質構造所影響,透過研究河流水系的幾何分佈與剖面型態特徵,可瞭解河流地形受到相關地質作用的影響。長久以來,有關於基隆河流域發育、河流襲奪的相關議題一直受到學者們的注意(早坂一郎, 1930; 林朝榮, 1957; Hsu, 1974; 周淑文和鄧屬予, 1998; 劉明錡, 2004),尤其是在三貂嶺至瑞芳一帶河流水系呈現出180度反向流路、河流兩側遍佈不同比高的大小河階地、以及存在於河流縱剖面的數個遷急點等,似乎都隱藏了基隆河發育與地形、地質以及北台灣地體構造的密切關係。

本研究藉由 LiDAR DTM 去除地表人工建築物以及植被的功能,完整呈現基隆河流域地區原始地表起伏的特性。以2公尺網格之 LiDAR DTM 進行本研究區之水系分析、河階分析、河流縱剖面、以及次集水區盆地分析等。本研究將分析基隆河流

域之水系分佈、河階地分佈、以及次集水區盆地等,精確建立基隆河的流路變遷,以及進一步瞭解基隆河階地的形成特性。最後綜合 LiDAR 分析結果與野外實地查核等相關資料,提出基隆河位於暖暖—侯硐段,存在的狹長型等高河階地可能形成的原因。

2. 基隆河流域地形與地質背景

基隆河位於台北盆地東北為淡水河系三大支流之一,其源頭於平溪鄉菁桐山,上游流路從菁桐坑一路流向東北經平溪、六分寮,自三貂嶺、侯硐、瑞芳至八堵間,呈現近乎直角大轉彎,峽谷、瀑布與壺穴地形多集中於此河段(圖1)。瑞芳以西中下游地區地勢平緩,曲流地形顯著,且因河流下切作用旺盛,兩岸皆有階地分布,掘鑿曲流和寬廣的河階地形是基隆河這段地形的主要特徵。八堵為基隆河中游的起點,流向轉西南,經五堵、汐止至南港,

¹中國文化大學地質學系 助理教授

²中央研究院地球科學所 副研究員

³台北科技大學土木與防災研究所 副教授

⁴經濟部中央地質調查所 技士

*通訊作者, 電話, (02)2861-0511#26132, E-mail: roufei@earth.sinica.edu.tw

收到日期: 民國 102 年 08 月 23 日

修改日期: 民國 102 年 11 月 08 日

接受日期: 民國 105 年 08 月 02 日

因河流坡降較緩，向兩側侵蝕較下切作用為強，進入河谷平原後多處成為低位河階。最後，於北投附近匯入淡水河，主流約 86 公里，流域面積 501 平方公里。林朝榮(1957)認為原本古基隆河由東北方深澳灣出海，因臺北盆地下陷，河蝕作用轉盛，被西側河流襲奪轉而匯入臺北盆地。基隆河其主要支流包括東勢坑溪、拔西猴溪、瑪陵坑溪、鹿寮溪、北港溪、大坑溪及四分溪等大小支流，集水區整體而言呈現北緩南陡的地勢。

比之研究成果(早坂一郎，1930；林朝榮，1957；Hsu, 1974；杜友仁，1997；吳麗娟，2000)，認為基隆河流域的發育與臺北盆地的演化息息相關。由於北臺灣在更新世以來的構造活動，從壓縮型應力區轉換為伸張型應力區，以致造成臺北盆地的陷落。在河流地形演育部分，因為侵蝕基準面的改變，加劇了盆地周圍河流的向源侵蝕，並且改變原有的河流的流路，反應在基隆河流域的結果是襲奪了早期向北出海的古基隆河。

綜合前人在河流縱剖面、水系分析以及河階對

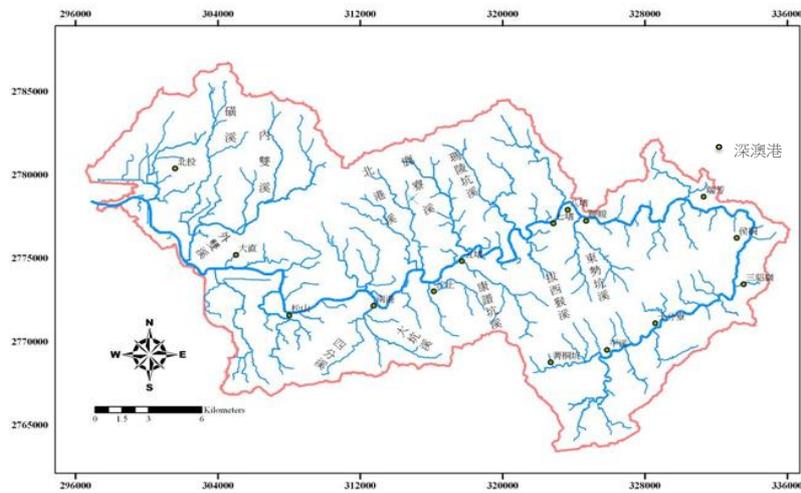


圖 1 基隆河流域及其支流水系分佈圖

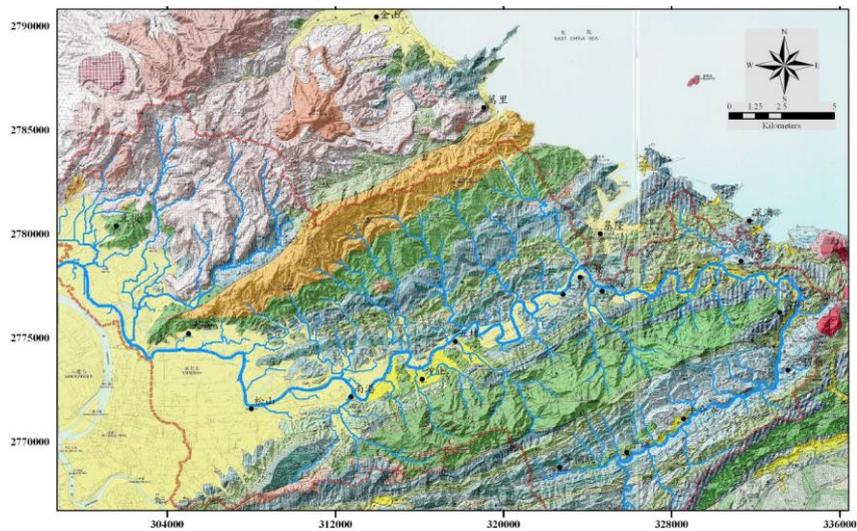


圖 2 基隆河流域及其支流之地質圖(套疊地調所台北及雙溪圖幅)

就地質岩性而言，基隆河流域除東北方地區有基隆火山群，西北方地區有大屯火山群外，大部分地區位於臺灣北部第三系沈積岩區，其下游地區已進入臺北盆地第四系地層中(圖 2)。基隆河的水系發育主要受控於三個主要的地質構造：石底向斜、侯硐背斜以及八堵向斜。基隆河流域上游流經石底向斜的軸部，由侯硐背斜構成本流域中央的嶺線，在三貂嶺至瑞芳段呈現圓弧狀的流路發育，則是受到侯硐背斜傾沒的影響。基隆河流域中游呈現蜿蜒的河曲，大致沿八堵向斜的軸部發育。

基隆河流域涵蓋北臺灣褶皺衝斷帶及雪山山脈帶內之數條逆斷層，各方面之資料指出現今台灣北部之應力場已由壓縮轉為伸張性，並由山腳斷層之活動及地表特徵相互印證。Chan (2007)利用地表 LiDAR 資料之分析，顯示基隆河流域內較老之逆斷層，基本上並無明顯之近期內的正斷層活動跡象，其結果和 GPS 大地變形測量之結果不謀而合(Yu *et al.*, 1997)。綜合地形及地質相關資料顯示，本區內之地質構造特徵，其活動年代可能較久遠，並無保留近期活動之地形特徵。

3. 基隆河流域水系及階地分析

河流地形常受到不同的岩石特性、地質構造所影響，透過研究河流水系的幾何分佈與剖面型態特徵，可瞭解河流地形受到相關地質作用的影響。近來年，利用數值地形推衍各種地表地形參數，如：坡度、坡向、曲率、剖面、集水區、水系等，可用於水文分析與模擬、土壤侵蝕研究、以及其他生態環境之模擬與分析等。數值地形模型常用者有三類：包括規則網格(regular grid)、數值等高線(digital contour)、以及不規則三角網(Triangulated Irregular Network, TIN)等(Mark, 1978; Burrough, 1986)。利用網格式數值地形於水系分析，在運算上是最有效

率的方法(Moore *et al.*, 1991)，因此網格式數值地形幾乎是數值地形的代名詞(Theobald, 1989)。

水系相關圖層被廣用於輔助水文分析、地形分析、地質岩性分析、以及地質構造分析等(Bertoldi *et al.*, 2008; Snyder, 2009)，本研究利用 2 公尺網格式 LiDAR DTM 進行水系分析，利用地表逕流隨著地形起伏的原理，在萃取坡度、坡向、水系網路及集水區特性，得到流域內完整的水系網路以及流域集水區之地形型態與特徵(圖 3)。利用 ArcGIS 地理資訊系統中地形分析的模組，產製相關之圖層包括：坡度圖、坡向圖、集水區邊界圖、與水系網路圖等四種網格式圖層以及集水區邊界圖與水系網路圖等兩種向量圖層，進行萃取河川網系與地形特徵，以獲得研究區域內之水系分析圖、集水區分佈圖以及坡度、坡向之空間分析圖等，其目的在於提供 ArcGIS 地理資訊系統中進行各圖層套疊與資料分析之用。

坡度分析反應出的是地形起伏的劇烈程度，本區地形起伏平緩處，除了廣布於臺北盆地內，位於八堵到南港之間也存在著大規模的平緩地形，反應基隆河中游地區沿岸階地的分布情形。傳統階地判釋多半藉由航照立體對在立體鏡中的成像，加上人為的判釋以區別不同的階地。近年來進行河流階地分析時，利用高解析度數值地面模型資料，配合高解析度的航空照片，可以清楚地繪製河道與階地分布，精確完整地呈現原始階地地形面的特性，以及其兩側沖積平原之範圍(Lane, 2003)。本研究在劃定河流階地的分佈時，將坡度分析圖中坡度低於五度視為同一原始地形面，並配合五分之一高精度之彩色航空照片，加強地表特徵物的判釋，以區別該地形面是否為人工開發平坦面或天然的河階地形，最後藉由地形剖面圖中之河流比高加以區分出不同時期的階地(圖 4)。

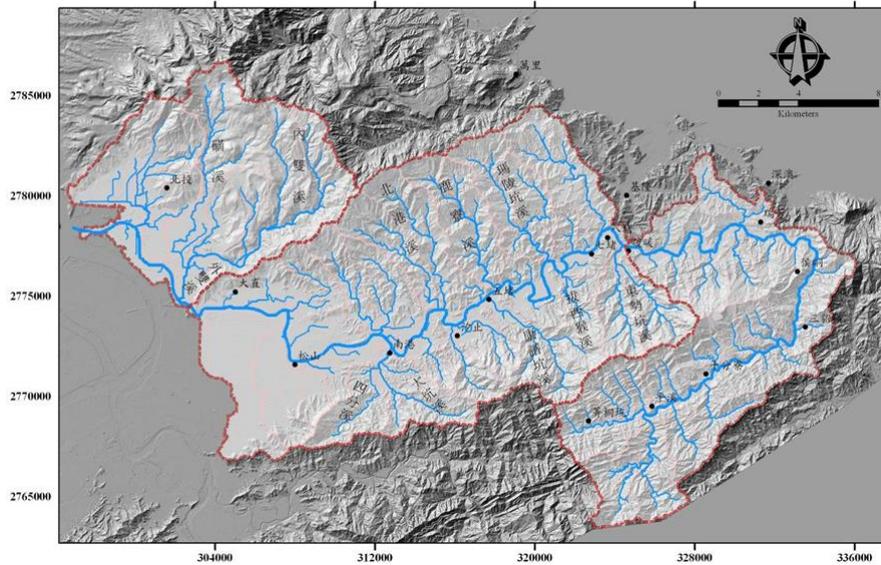


圖 3 基隆河流域及其支流水系分佈圖，底圖為 2 公尺的 LIDAR DTM

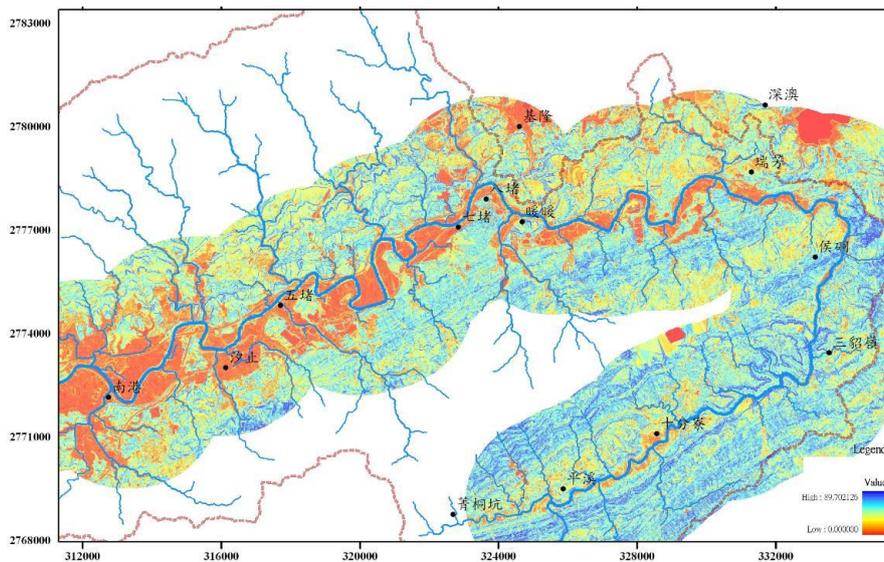


圖 4 基隆河流域及其支流之坡度分析圖，紅色區域清楚顯示河流沿線之河階分布

4. 結果與討論

4.1 基隆河流域水系與階地分析

綜合水系分析的結果，說明了基隆河的發育受到構造條件以及地形坡度的影響，主要的支流發育在中游地區較為開闊的八堵向斜軸部附近，位於北

側的集水區也較南側平緩，對稱性的水系代表了近期並無重大的構造活動造成劇烈的地殼變動。藉由基隆河流域水系分析的結果，可將基隆河大致分成三個區段：上游地區菁桐坑—暖暖段，其主流流經石底向斜在侯硐與瑞芳地區轉向，其支流短小且與主流正交。中游地區八堵—南港段，其主流發育在較為開闊的八堵向斜兩側，河谷較為廣寬，曲流發達、並分佈階地。下游地區南港—關渡段，進入台

北盆地後呈現樹枝狀水系。從河流平面的型態，可以發現基隆河流域之上、中游，其支流方向均大致與主流方向呈正交，暗示著河流型態與區域構造之間的關係。

階地分析結果顯示基隆河流域的河階可分為三群，第一群從南港至八堵之間，存在大規模的河階，分布於河道兩側，可以視為自由曲流之間的產物。第二群分布自暖暖到侯硐之間，階地型態以狹長型為主，其中等高的階地面延伸約 2 公里，我們發現在暖暖地區存在順向坡地形，經檢視本區為發生大型順向坡滑動之殘餘地形，而此處之河流剖面亦顯示出遷急點，推測可能與古山崩崩積物堰塞河道有關，後續將於 4.4 節進行討論。

第三群分布在上游地區，位於十分寮至菁桐坑一帶，存在著連續且面積小的階地。中下游階地群普遍可見二至三階低位河階的分布，而高位河階分布零星，僅於四腳亭與瑞濱附近可見兩處階地，此兩階地之高度分別為 95 及 110 公尺，然向下游方向延伸情況不佳。上游階地群可見兩階河階的分布，最低的一階在嶺腳瀑布的上游未見其蹤。而高於此兩河階之上，可見有河階礫石零星分布。

4.2 基隆河流域縱剖面分析

以河道縱剖面來看，基隆河呈階狀分段式均夷剖面，剖面上明顯轉折點代表新、舊河道剖面的交會點(稱遷急點 *knick point*)。其中，十分瀑布為基隆河上游最明顯的遷急點，透過河階面的對比，推測為台北盆地變遷引發河流回春作用所造成的遷急點。十分瀑布遷急點以下，由於河流侵蝕力加大，加上岩性以厚層砂岩為主，抗蝕力高，因而在大華及三貂嶺有峽谷與壺穴地形出現。就十分瀑布來說，後退的機制因瀑壁節理發達，岩石隨著節理不斷崩落，整體呈平行後退。

本研究利用 2 公尺 DTM 繪製進行基隆河主河道之縱剖面圖，藉由縱剖面上的河道高度變化(遷急點)反應出河流侵蝕水準改變後新舊剖面的交界，結合區域地質圖將主要河床之岩性標示於河流縱剖面。由河流縱剖面圖(圖 6)中清楚顯示基隆河從上游至下游依序出現嶺腳瀑布遷急點、十分瀑布遷急點、侯硐遷急點以及碇內遷急點。尤其是位於南港層中的十分瀑布遷急點高差將近 40 公尺，明顯與其下游河段之縱剖面不同。整體來說，這些分佈於基隆河的遷急點似乎沒有反應在不同的岩性交接處，亦沒有出現在主要的斷層帶上，說明了這些遷急點的成因與其河流侵蝕基準面的變化有關，至於造成侵蝕基準面的改變，可能與近期台北盆地張裂活動有關。

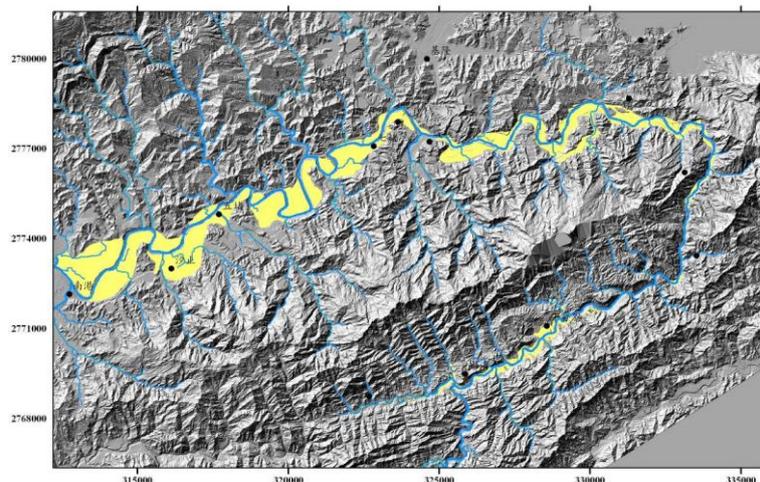


圖 5 基隆河流域水系及河流階地分佈圖

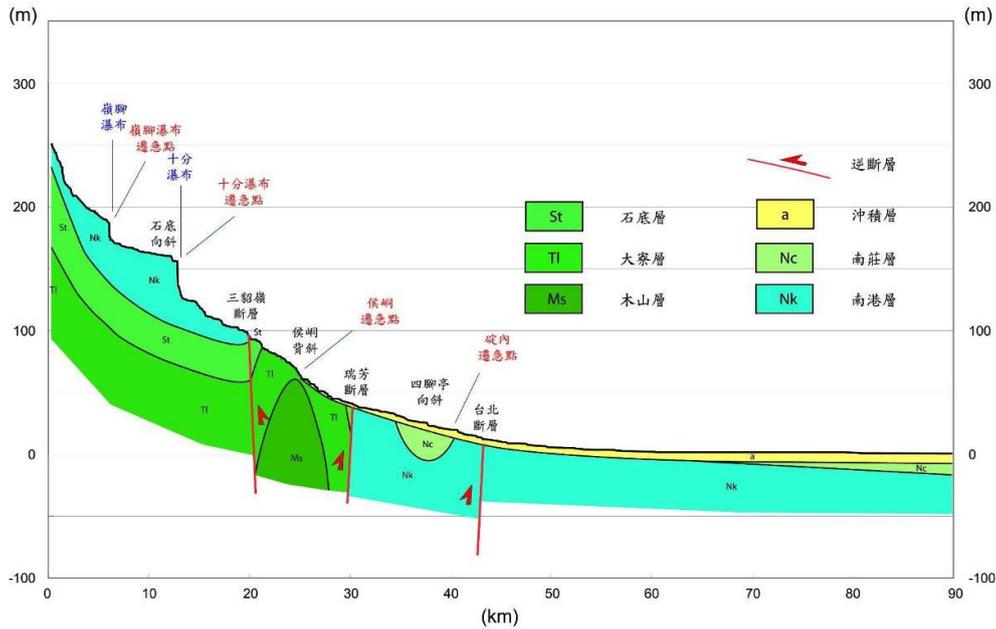


圖 6 基隆河流域河流縱剖面與其重要遷急點分佈位置圖

4.3 基隆河流域次集水區盆地分析

如同基隆河階地分析結果，將基隆河流域的河階分為三群，第一區分佈在南港至八堵之間，受控於八堵向斜及台北盆地演育的影響，東北岸、西南岸基本上呈現對稱分布的形式。依據不同的河流級數亦可區分基隆河流域次集水區盆地，其中河流級數越高其集水區面積越大，此區兩側之各次集水區盆地發展大致均等(圖 7)。

第二區分布自暖暖到侯硐之間，本區內各次集水區之面積、形態差異較大，較無法以單一構造因素解釋，在基隆暖暖附近之順向坡地形可能導致古山崩堰塞河道及影響次集水區發育。第三區位於十分寮至菁桐坑之間，和第一區段之次集水區形貌類似，受控於石底向斜影響，東北岸、西南岸基本上亦呈對稱分布。同岸之各次集水區盆地發展大致均等，唯東北岸位於較平緩之石底向斜東北翼，故次集水區長度基本上較西南岸長。

4.4 基隆河流域暖暖—侯硐段之河道堰塞研究

綜合本研究在基隆河流域之河流地形分析，發現自暖暖到侯硐之間河階分佈、集水區之面積等形態特徵差異較大，我們進一步針對暖暖—侯硐段進行塊體滑動地形特徵與河流階地地形之相關研究，在實際進行野外觀察與調查後推論河道堰塞形成的機制。

本研究利用 2 公尺 DTM 繪製基隆河流域中游一帶的河道與階地分佈圖(圖 8(a))，其主要河道兩側分佈著大小不一的河流階地，特別是在暖暖地區原有寬廣的河谷，突然成為狹窄的河谷，在地形特徵上清楚顯示塊體滑移的特徵。基隆河進入八堵之後，主河道兩側的階地又開始變得寬廣。利用不同高度的 DTM 呈現不同的階地，圖 8(b)可以看到 2D 的階地分佈平面圖，配合 3D 河流縱剖面(圖 8(c))可以看出河床與階地之相對位置與高度，值得注意的是古山崩位置其河流比高可達 40 公尺，而上游

地區平均階地比高約為 25 公尺，有別於正常河流堆積形態(謝孟龍，2007)，因此判斷古山崩形成之時，可視為一個自然的堤壩，並且造成暫時侵蝕基準面的改變。

暖暖地區的山坡型態為順向坡地形(圖 9)，順向坡是指坡地之傾斜與地層之傾斜同一方向，此一古山崩地形，可能因為受到基隆河侵蝕，坡腳遭切除致失去下方支撐力，或雨水下滲至地層面上造成潤滑作用，使上方岩層沿層面下滑產生順向坡滑動，遺留平面狀地形。順向坡所造成的岩層崩落

主要受控地層傾向與傾角，在傾斜、互層狀沉積岩區此為相當常見之地質災害。

通常順向坡之坡面是由砂岩之組成，坡面有分布著深層之表土或崩積土等，這種情形最常出現在本區木山層、大寮層、石底層及南港層等地層出露之區域，因為前述兩岩層都是由砂頁岩所組成，而且砂岩層厚且堅硬，加上地層傾角在 20°至 80°之間，常形成明顯之順向坡地形。基隆河北岸都有大面積之順向坡區域，坡面傾向東南，坡面傾向變化很小，使得地形等高線幾乎呈直線狀。

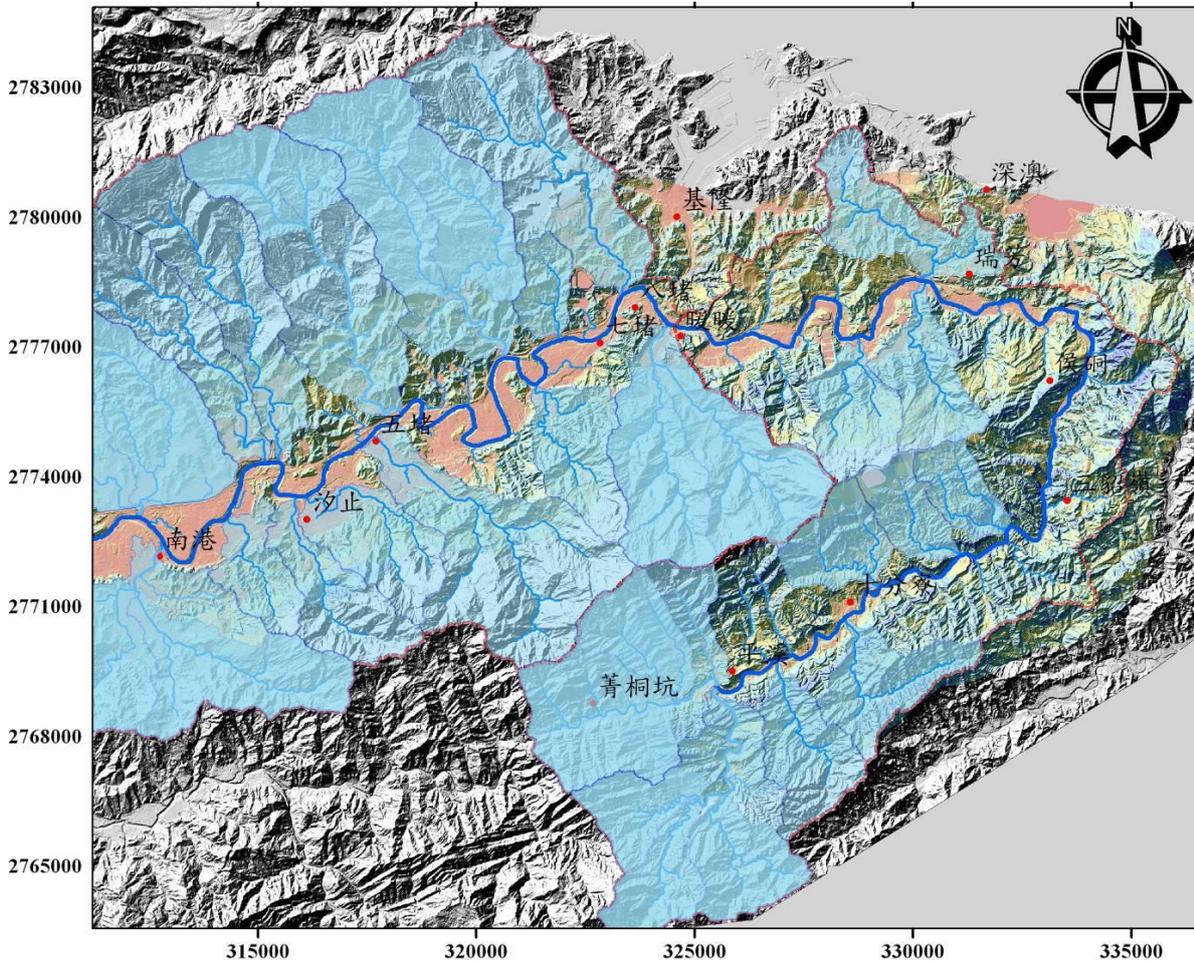


圖 7 基隆河流域及其支流之集水區分析圖

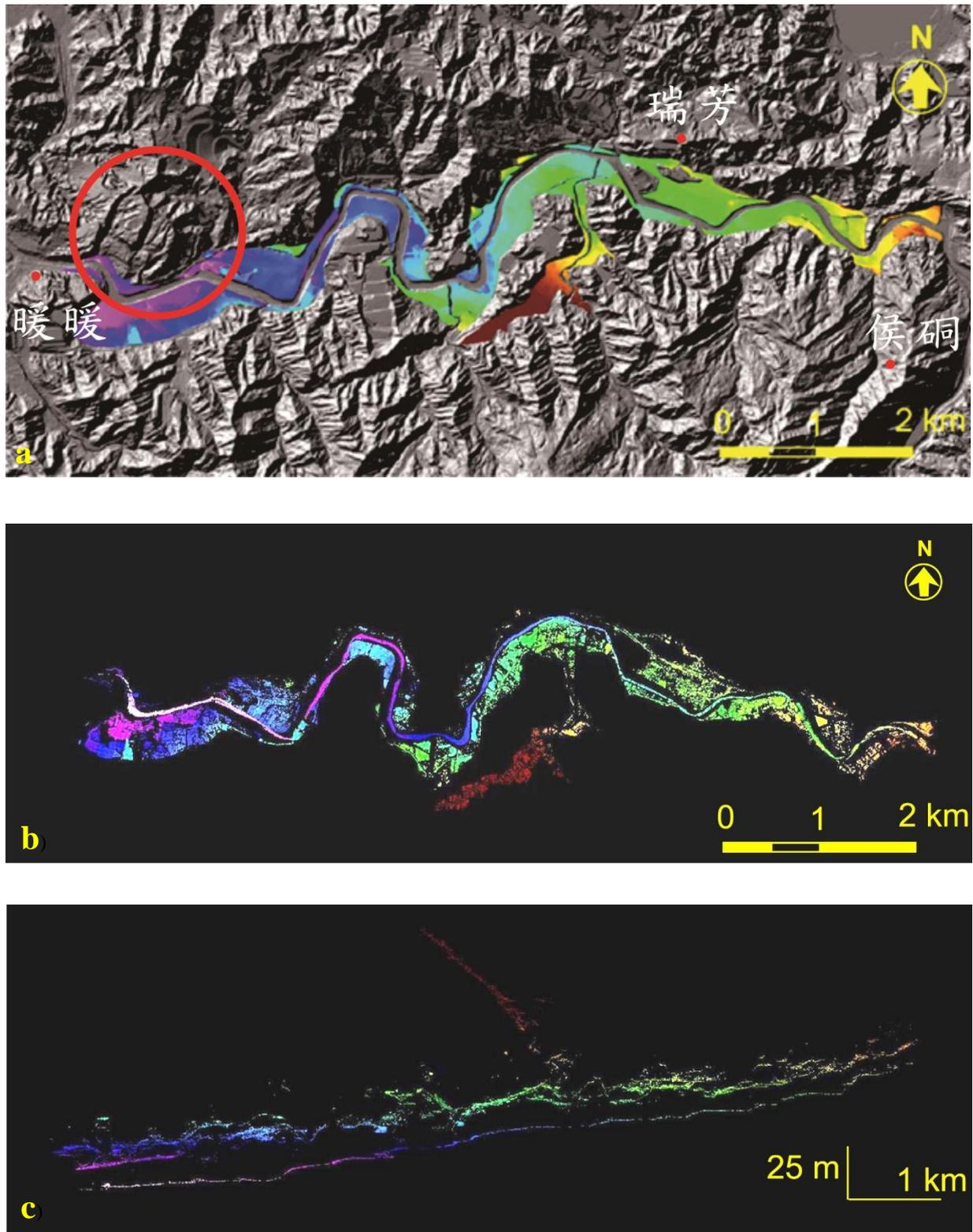


圖 8 (a)基隆河流域暖暖-侯硐地區之河階分佈圖，紅色圓圈地區為推測之古山崩發生區，(b)階地平面分佈圖可見主河道兩側之河流階地，不同的顏色反應出相異的階地高差，(c)三維型態呈現之基隆河中段縱剖面圖與階地分佈，垂直放大 30 倍



圖 9 基隆河流域暖暖地區古山崩滑動之殘餘地形

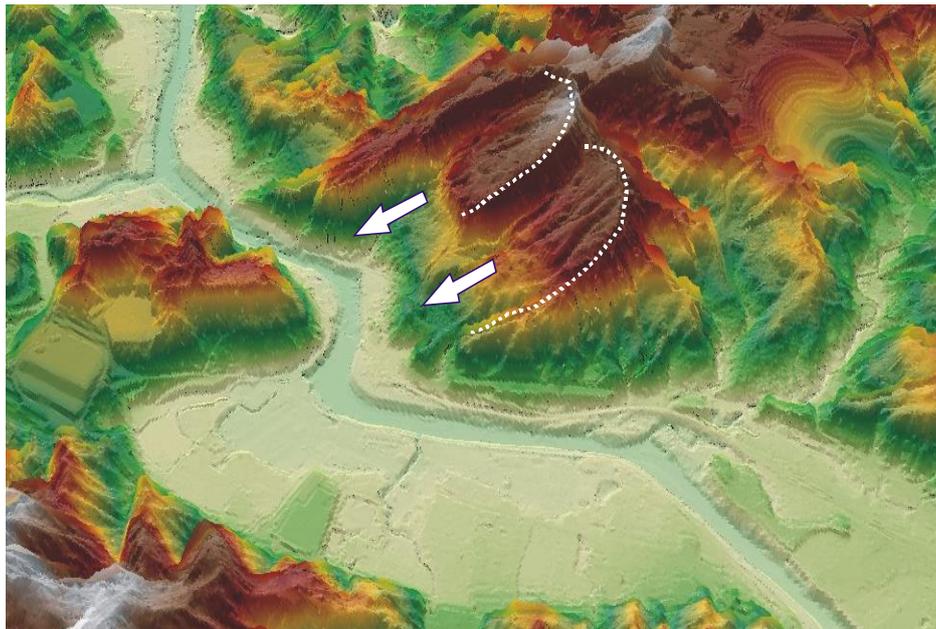


圖 10 基隆河流域暖暖地區之大型塊體滑動之殘餘地形及可能堰塞河道的地點，垂直放大 1.5 倍

本研究利用地形特徵分析上的成果，進行野外考察。經碇內地區野外勘查結果，在暖暖附近之基隆河道形成一隘口，隘口上游處立即有一老河階地分佈(圖 11)；經過實際野外調查與資料分析後，初步判定本區之可能坡面破壞形式以岩石傾翻 (toppling)或楔型岩石崩落(wedge failure)形成，其

坡面穩定分析如圖 12 所示。從坡面與層面資料顯示其滑動區為順向坡地形，二組節理面所造成的不穩定區域則反應了其主控崩塌面的發育。綜合暖暖－侯硐地區所做的相關研究，提供了基隆河流域中游之大型河階生成的機制。



圖 11 基隆河暖暖附近河谷照片。圖中兩處可能之古地滑區及堰塞形成之河階地

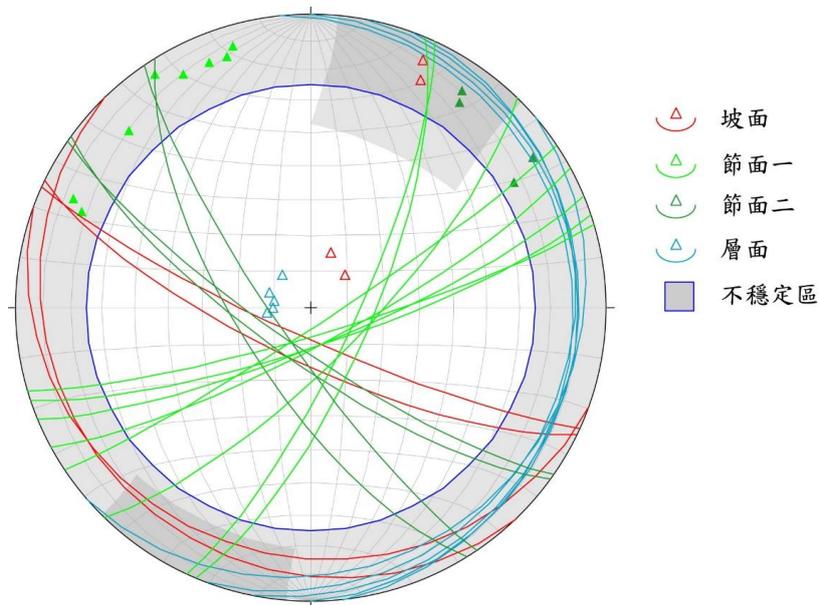


圖 12 坡面穩定分析結果。圖中層面位態為 N20E 傾角為 10 度及三組弱面(含坡面)

5. 結論

本研究利用高精度空載光達資料進行基隆河河流地形分析，包括集水區盆地、水系分布、河流發育、地形特徵等分析。綜合各項結果顯示，基隆河的發育受到區域構造的影響，主要的支流發育在中游地區的八堵向斜軸部，位於北側的集水區也較

南側平緩，對稱性的水系及次集水區盆地，暗示本區近期並無重大的構造活動造成劇烈的地殼變動。利用高精度空載光達數值地形資料，去除地表植被與建物之餘，有助於呈現原始地形面，增加地形分析與階地對比之可靠性。另本研究發現基隆河第二群河階，自暖暖到侯硐之間，各次集水區之面積、形態差異較大，較無法以單一構造因素解釋。利用地形特徵分析上的成果，經過實際野外調查與構造

分析後，在暖暖－侯硐地區發現一處順向坡地形可能導致古山崩堰塞河道及影響次集水區發育，初步判定本區之可能坡面破壞形式以岩石傾翻(toppling)或楔型岩石崩落(wedge failure)形成，古山崩的形成造成了一個暫時侵蝕基準，提供了基隆河流域中游之大型河階生成的機制。

參考文獻

- 早坂一郎，1930。基隆川溪谷的研究(日文)，臺灣地學記事，1：60-637。
- 杜友仁，1997。基隆河之地形研究，國立中央大學應用地質研究所碩士論文。
- 吳麗娟，2000。臺灣北部主要河川遷急點之地形學研究，中國文化大學地學研究所，共 120 頁。
- 林朝榮，1957。台灣地形，台灣省文獻委員會出版，共 424 頁。
- 周淑文，鄧屬予，1998。基隆河襲奪之探討，地質，18(2)：1-16。
- 劉明錡，2004。臺灣西北部河階之地形學研究，國立師範大學地理研究所博士論文。
- 謝孟龍，2007。臺灣河階地形研究的回顧，檢討與展望。經濟部中央地質調查所特刊，18：209-242。
- Bertoldi, W., Gurnell, A.M., and Drake, N.A., 2011. The topographic signature of vegetation development along a braided river: Results of a combined analysis of airborne lidar, color air photographs, and ground measurements. *Water Resour. Res.*, 47, W06525, doi:10.1029/2010WR010319.
- Burrough, P.A., 1986. *Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment*. Oxford: Clarendon Press.
- Chan, Y.C., 2007. "Acquisition of High-Resolution Digital Elevation Model Using Airborne LIDAR Technique and Its Application to Active Geomorphology in the Taipei Metropolitan Area.(3/3)" Project Final Report, Central Geological Survey in Taiwan. pp. 150.
- Hsu, T.L., 1974. Fluvial landforms of northern Taiwan and their neotectonic significance: *Bull. Geol. Surv. Taiwan*, 24:109-118.
- Lane, S.N., 2000. *The Measurement of River Channel Morphology Using Digital Photogrammetry*. *The Photogrammetric Record*, 16: 937-961. doi: 10.1111/0031-868X.00159
- Mark, D.M., 1978. Concepts of Data Structure for Digital Terrain Model. *Proceedings of DTM Symposium, ASP-ASCM*, 24-31.
- Moore, I.D., Grayson, R.B., and Landson, A.R., 1991. Digital Terrain Modeling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological Process*, 5:3-30.
- Theobald, D.M., 1989. Accuracy and bias issues in surface representation. In: Goodchild, M.F., Gopal, S. (Eds.), *The Accuracy of Spatial Database*, Taylor and Francis, New York, 99-106.
- Snyder, N.P., 2009. Studying Stream Morphology With Airborne Laser Elevation Data. *Eos Trans. AGU*, 90(6):45-46, doi:10.1029/2009EO060001.
- Yu, S.B., Chen, H.Y., and Kuo, L.C., 1997. Velocity of field of GPS stations in the Taiwan area. *Tectonophysics*, 1-3:41-59.

Using airborne LiDAR derived DEMs to analyze river morphology in Keelung stream

Rou-Fei Chen^{1*} Yu-Chang Chan² Kuo-Jen Chang³ Yu-Chung Hsieh⁴

ABSTRACT

We organized and performed airborne LIDAR mapping in the Metropolitan Taipei area in order to produce high-resolution and high-precision digital elevation models for geological research. Applying the newly acquired LIDAR DEMs from the MOEA Central Geological Survey, we analyzed geologic and geomorphic features of the Keelung River drainage area. The studied features include topographic scarps and lineaments, river terraces, drainage basins, and landslide scarps. Based on our analysis of the acquired LIDAR DEMs, we arrived at the following findings and conclusions: 1) The river basin analysis based on the LIDAR DTM indicates that the development of the Keelung River was influenced by regional structural patterns and topographic slopes. Tectonic influences appear to be relatively small for the development of the Keelung River. 2) Along the Keelung River, the LIDAR DTM indicates anomalous terrace morphology and river drainage at the middle section of the river. We interpreted this area to be caused by paleo-landslides, which form a dammed lake in the river and subsequently developed the main terrace of the same level for large area.

Key Words: airborne LIDAR, digital elevation model, river geomorphology, Paleo-landslide