

交通部中央氣象局

委託研究計畫(期末)成果報告

臺灣地區 103 年中大型與火山地震震源資訊之快速彙整與提供
-火山地震之辨識與分析研究

計畫類別：氣象 海象 地震

計畫編號：MOTC-CWB- 103 -E- 06-

執行期間： 103 年 1 月 1 日至 103 年 12 月 31 日

計畫主持人：林正洪

執行機構：中華民國地球物理學會

本成果報告包括以下應繳交之附件(或附錄)：

赴國外出差或研習心得報告 1 份

赴大陸地區出差或研習心得報告 1 份

出席國際學術會議心得報告及發表之論文各 1 份

中華民國 103 年 11 月 17 日

政府研究計畫(期末)報告摘要資料表

| | | | |
|-----------------|---|--------|----------------------|
| 計畫中文名稱 | 火山地震之辨識與分析研究 | | |
| 計畫編號 | MOTC-CWB103-E-06 | | |
| 主管機關 | 交通部中央氣象局 | | |
| 執行機構 | 中央研究院地球科學研究所 | | |
| 年度 | 103 | 執行期間 | 103/01/01/-103/12/31 |
| 本期經費 (單位：千元) | 995 | | |
| 執行進度 | 預定(%) | 實際(%) | 比較(%) |
| | 100 | 100 | |
| 經費支用 | 預定(千元) | 實際(千元) | 支用率(%) |
| | 995 | 995 | 100 |
| 研究人員 | 計畫主持人 | 協同主持人 | 研究助理 |
| | 林正洪 | | |
| | | | |
| 報告頁數 | | 使用語言 | |
| 中英文關鍵詞 | | | |
| 研究目的 | <p>監控各項火山活動訊號，進行收錄資料處理及火山地震之記錄與頻普分析，俾便協助中央氣象局了解並掌握火山之現在狀況，評估未來可能之火山活動情況，以提供政府單位及所有民眾正確之地震資訊，進行有效之防救災工作。</p> | | |
| 研究成果 | <p>根據過去地質調查顯示，雖然大屯火山群已經沉寂長久，但是地表地熱與地震活動還是很明顯，故大屯火山群是否復活的可能性，不僅是一個值得研究的科學問題，更關係大台北附近民眾的生命財產安全。本計畫利用大屯火山地區現任之地震記錄，仔細研判與分析與火山活動有關之地震，並監控各項火山活動訊號，進行收錄資料處理及分析，俾便協助中央氣象局了解並掌握火山之現在狀況，評估未來可能之火山活動情況，以提供政府單位及所有民眾正確之地震資訊，進行有效之防救災工作。</p> <p>火山地區常會發現一些特殊地震訊號，特別研究火山在活動前必定會伴隨許多不尋常的現象產生，而且火山微震個數會明顯增加。所以仔細監測火山異常之地震活動可提前對人們預警，以減少火山活動所帶來的災害。但是火山地震之震源特性非常複雜，除了與一般斷層錯動相似之雙力偶震源外，常可發現一些因火山氣體或岩漿活動造成之非雙力偶震源，這些火山地震之地震波形與</p> | | |

| | |
|-------------------------------|---|
| | <p>一般構造地震可能非常不同。所以如何正確地觀測火山地區之火山地震活動情形，必須要充分了解其地震波特性和火山地震和一般因構造成因所引起的地震有相當大的不同，基本特徵是震源淺、規模不大且常為群震發生。與構造地震相比，火山地震不具有構造地震的主震、餘震系列地震群，規模較小。震央主要集中位於火山及其附近。利用地震學的方法來監測火山活動，乃是在火山周圍埋設地震儀，透過觀測地震的活動，來推測發生的原因，進而達到監測火山的目的。</p> |
| <p>具體落實應用情形</p> | <p>利用大屯火山地區現任之地震記錄，仔細研判與分析與火山活動有關之地震，並監控各項火山活動訊號，進行收錄資料處理及火山地震之記錄與頻譜分析，協助中央氣象局了解並掌握火山之現在狀況，評估未來可能之火山活動情況，以提供政府單位及所有民眾正確之地震資訊，進行有效之防救災工作。</p> |
| <p>計畫變更說明</p> | <p>(若有)</p> |
| <p>落後原因</p> | <p>(若有)</p> |
| <p>檢討與建議 (變更或落後之因應對策)</p> | <p>無</p> |

(以下接全文報告)

臺灣地區 103 年中大型與火山地震震源資訊之快速彙整與提供- 火山地震之辨識與分析研究

林正洪

中央研究院地球科學研究所

摘要

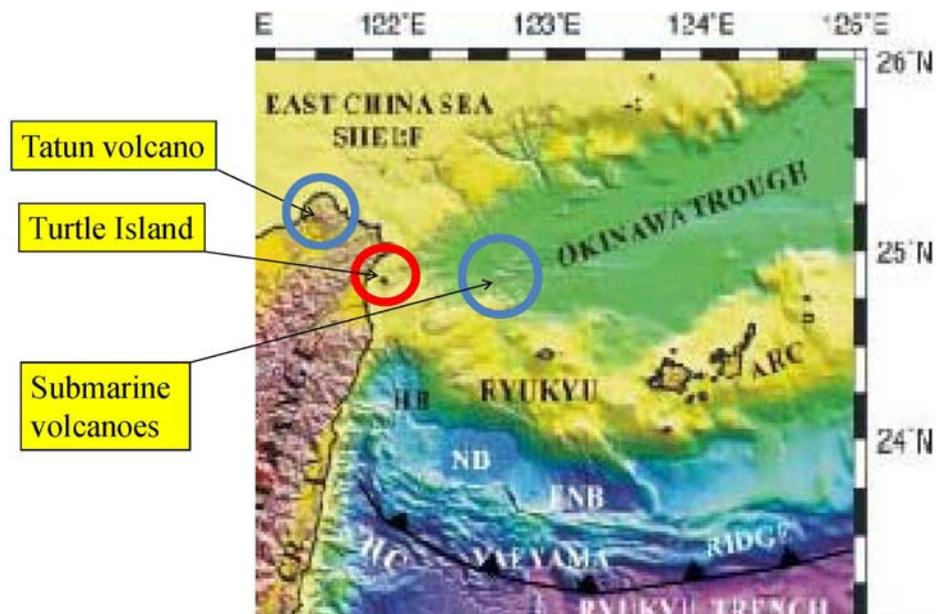
本計畫利用大屯火山地區現任之地震記錄，仔細研判與分析與火山活動有關之地震，並監控各項火山活動訊號，進行收錄資料處理及分析，俾便協助中央氣象局了解並掌握火山之現在狀況，評估未來可能之火山活動情況，以提供政府單位及所有民眾正確之地震資訊，進行有效之防救災工作。火山地區常會發現一些特殊地震訊號，特別研究火山在活動前必定會伴隨許多不尋常的現象產生，而且火山微震個數會明顯增加。所以仔細監測火山異常之地震活動可提前對人們預警，以減少火山活動所帶來的災害。但是火山地震之震源特性非常複雜，除了與一般斷層錯動相似之雙力偶震源外，常可發現一些因火山氣體或岩漿活動造成之非雙力偶震源，這些火山地震之地震波形與一般構造地震可能非常不同。所以如何正確地觀測火山地區之火山地震活動情形，必須要充分了解其地震波特性和震源特性。火山地震和一般因構造成因所引起的地震有相當大的不同，基本特徵是震源淺、規模不大且常為群震發生。與構造地震相比，火山地震不具有構造地震的主震、餘震系列地震群，規模較小。震央主要集中在位於火山及其附近。利用地震學的方法來監測火山活動，乃是在火山周圍埋設地震儀，透過觀測地震的活動，來推測發生的原因，進而達到監測火山的目的。

一、背景

台灣地區雖無明顯活動的火山，但過去的歷史文獻紀錄從十八世紀以來，台灣東部鄰近海域有四次的海底火山活動(圖一)。眾所周知，台灣北部地區存有兩個火山活動記錄之地區(Chen, 1990; Tsao, 1994)。首先是大屯火山地區，它位於台北盆地北方，雖然人類歷史上並無任何火山噴發之記錄，但地表地熱活動極為明顯。大屯火山群不僅緊鄰大台北地

區，同時其北側之金山萬里地區有兩座核能發電廠，所以大屯山是否再度活動(包括火山或地震)，不僅是一個科學上的問題，更關係著大台北都會區內數百萬居民之生命及財產之安全。故政府該有責任與義務積極整合所屬的相關部門及廣納學術研究單位之意見，朝基礎研究與防震減災的兩個目標，妥善規劃該地區的中、長期之監測計畫。

北台灣地區另一處活躍的火山地區是宜縣龜山島(圖一)。龜山島上的火成岩年齡只有 7000 年(誤差 ± 800 年)，以火山地質上的定義來說，龜山島是一個活火山。根據海洋地球物理與最近之地震觀測等研究清楚地指出，該島及其附近有許多火山活動。龜山島雖然位於宜蘭外海，離台北都會區較遠，其火山活動亦將可能造成北台灣嚴重災害。例如雖然龜山島離台灣本島依舊有大約二十公里之距離，但如果龜山島或附近之海底火山有任何活動(包括火山及地震)，均有可能對蘭陽平原居民之生命與財產造成威脅。其中特別是因地震或火山所造成之海嘯，對北台灣沿岸之村落更具有非常大之衝擊。如此，政府及相關學術研究單位應對此地區進行更詳盡的研究及監測。因此有必要對其進行監測研究以期對台灣地區可能的火山活動獲得全盤的了解。由於龜山島位於海域，監測不易，因此本研究對龜山島的地震監測，僅設立一個長期監測站實施長期監測。



圖一台灣北部地區可能存在之火山活動分佈。

台灣的鄰近國家(如日本、菲律賓、印尼等)都有為數眾多的活火山，仍不斷活動中。這些國家均屬於「環太平洋火環」的一部分，火山在活動前必定會伴隨許多不尋常的現象產生，特別是火山微震個數會明顯增加。所以仔細監測火山異常之地震活動可提前對人們預警，以減少火山活動所帶來的災害。但是火山地震之震源特性非常複雜，除了與一般斷層錯動相似之雙力偶震源外，常可發現一些因火山氣體或岩漿活動造成之非雙力偶震源，這些火山地震之地震波形與一般構造地震可能非常不同。所以如何正確地觀測火山地區之火山地震活動情形，必須要充分了解其地震波特性。

北台灣依舊有少數火山活動之可能，其中特別大屯火山群緊鄰於台北盆地，根據過去地質調查顯示，雖然大屯火山群已經沉寂長久，但是地表地熱與地震活動還是很明顯，故大屯火山群是否復活的可能性，不僅是一個值得研究的科學問題，更關係大台北附近民眾的生命財產安全。本計畫將利用大屯火山

地區現任之地震記錄，仔細研判與分析與火山活動有關之地震，並由專人全職監控各項火山活動訊號，進行收錄資料處理及分析，俾便協助中央氣象局了解並掌握火山之現在狀況，評估未來可能之火山活動情況，以提供政府單位及所有民眾正確之地震資訊，進行有效之防救災工作。

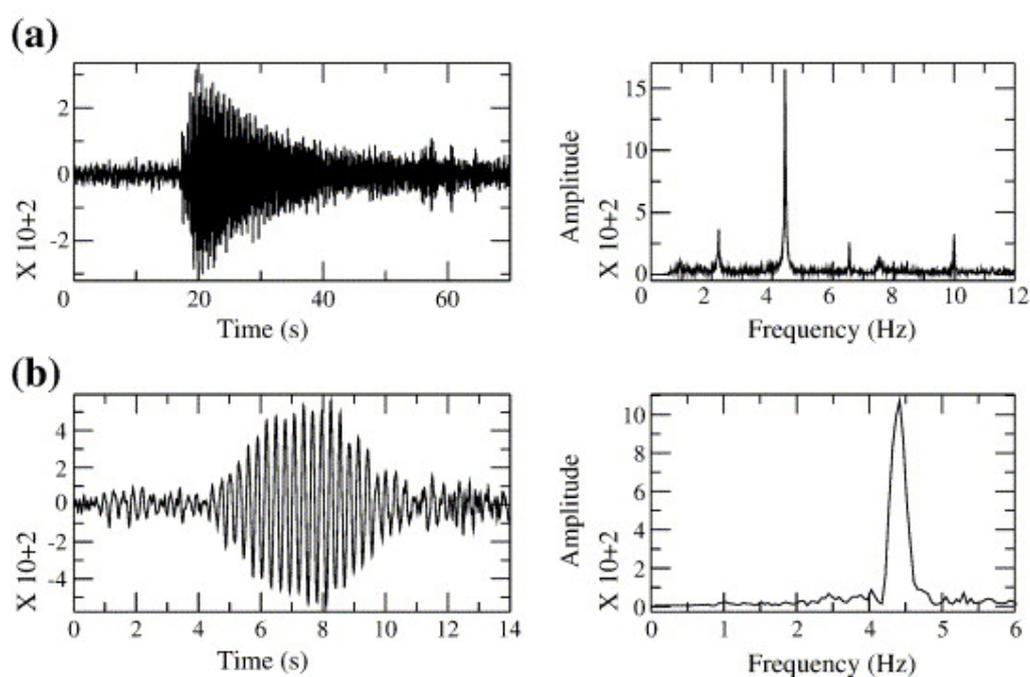
大屯火山群位於西環太平洋火山地震頻繁帶上，且與岩漿活動有關的地熱活動仍然十分頻繁。過去數個研究認為台灣北部火山活動是因菲律賓海板塊向西北隱沒所造成島弧岩漿活動，大屯火山群為琉球島弧向西的延伸。然而這些具有「島弧」地球化學特徵的熔岩，不一定與現在正在進行中琉球海溝隱沒作用有直接關係。這些岩漿活動，可能與台灣北部因為碰撞作用所生成的造山崩解張裂作用有關。若是此說法是正確的，則傳統認為大屯山及北部諸火山島已經逐漸停止活動的看法將必須要作很大的修正，因為台灣北部的張裂活動現正逐步加強發育當中，若是地殼下方有岩漿庫存在，則隨時有可能提供管道給岩漿噴發至地表。

二、火山地震

火山地區常會發現一些特殊地震訊號(圖二)，特別研究火山在活動前必定會伴隨許多不尋常的現象產生，例如地震波之波包形狀類似水滴狀(Drop)，其振動時間很短，僅約十秒左右。從這些地震訊號中，並無法辨識其 P 波與 S 波之到達，故有別於一般所謂之構造地震(tectonic earthquake)所產生之地震波。並且這些水滴狀之地震訊號頻率組成也很特殊，似乎主要為某種單一頻率所組成。經由一般頻譜分析法，即快速傅利葉轉換法(Fast Fourier Transfer)計算所得，可更清楚看出這些水滴狀之地震訊號之主要頻率落於 3.4 赫斯附近。根據全世界其他國家火山地區之觀測與研究經驗，一般認為這些單頻水滴狀之地震訊號產生原因，最可能是由液態或氣態物質共振所引起(Chouet, 2003)。初步推斷可能與岩層裂縫中液態或氣態物質，突然增加或減少壓力所造成之振動

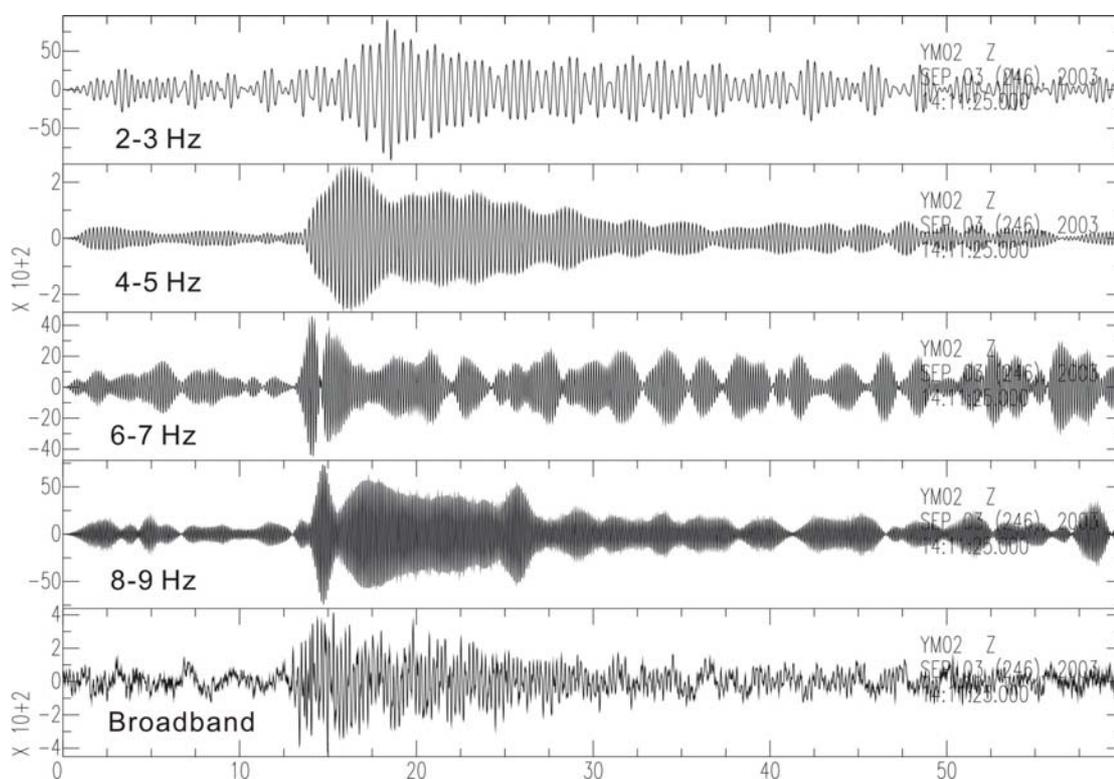
有關。

除了上述單頻火山地震訊號外，本研究中也曾經發現另一種更為重要之記錄。其地震波形之外觀類似螺絲釘一樣。一般火山地震學家以西班牙文之螺絲釘 (Tornillos)。這些螺絲釘狀之火山地震訊號之振動時間，明顯大於單頻水滴狀火山地震訊號，可長達數十秒。同樣地仔細分析這些螺絲釘狀之火山地震訊號，可清楚發現，其主要頻率從 2 Hz 到 15 Hz 中包括有好幾個。訊號中之最大能量落於 2.1 Hz 左右，其次為 4.2 Hz、6.3 Hz、8.3 Hz 及 9.6 Hz。仔細比較這些訊號之頻率，似乎成等差級數。這現象與一般地震非常不同。根據一般火山地震觀測之經驗，這些螺絲釘狀之火山地震訊號，極可能代表該火山活躍性很強。並且，曾於中美洲之一些火山噴發前，常可發現這些所謂螺絲釘狀之地震記錄 (Tornillos)。故大屯山地區亦有類似之記錄，非常值得我們注意與深入研究。



圖二 大屯火山地區兩種特殊火山地震訊號(Volcanic earthquakes)。

所以仔細監測火山異常之地震活動可提前對人們預警，以減少火山活動所帶來的災害。但是火山地震之震源特性非常複雜，除了與一般斷層錯動相似之雙力偶震源外，常可發現一些因火山氣體或岩漿活動造成之非雙力偶震源，這些火山地震之地震波形與一般構造地震可能非常不同。所以如何正確地觀測火山地區之火山地震活動情形，必須要充分了解其地震波不同頻譜的特性(圖三)。



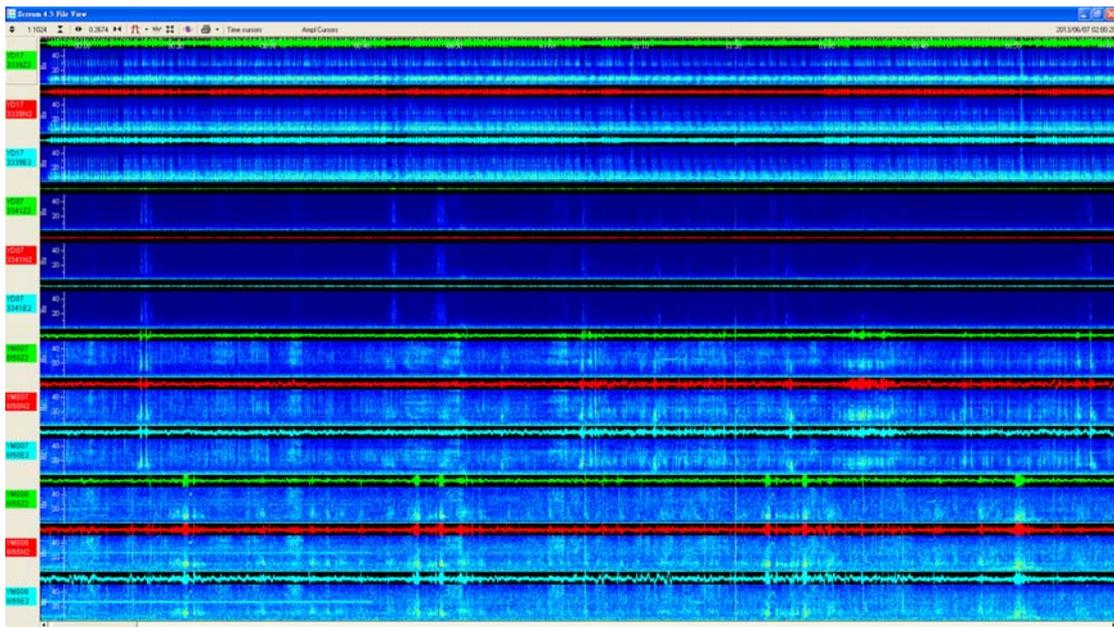
圖三 大屯火山地區特殊振動訊號(Tremors)之不同頻譜分析。

三、群震活動

火山地震和一般因構造成因所引起的地震有相當大的不同，基本特徵是震源淺、規模不大且常為群震(圖四)發生。與構造地震相比，火山地震不具有構造地震的主震、餘震系列地震群，規模較小。震央主要集中位於

火山及其附近。利用地震學的方法來監測火山活動，乃是在火山周圍埋設地震儀，透過觀測地震的活動，來推測發生的原因，進而達到監測火山的目。

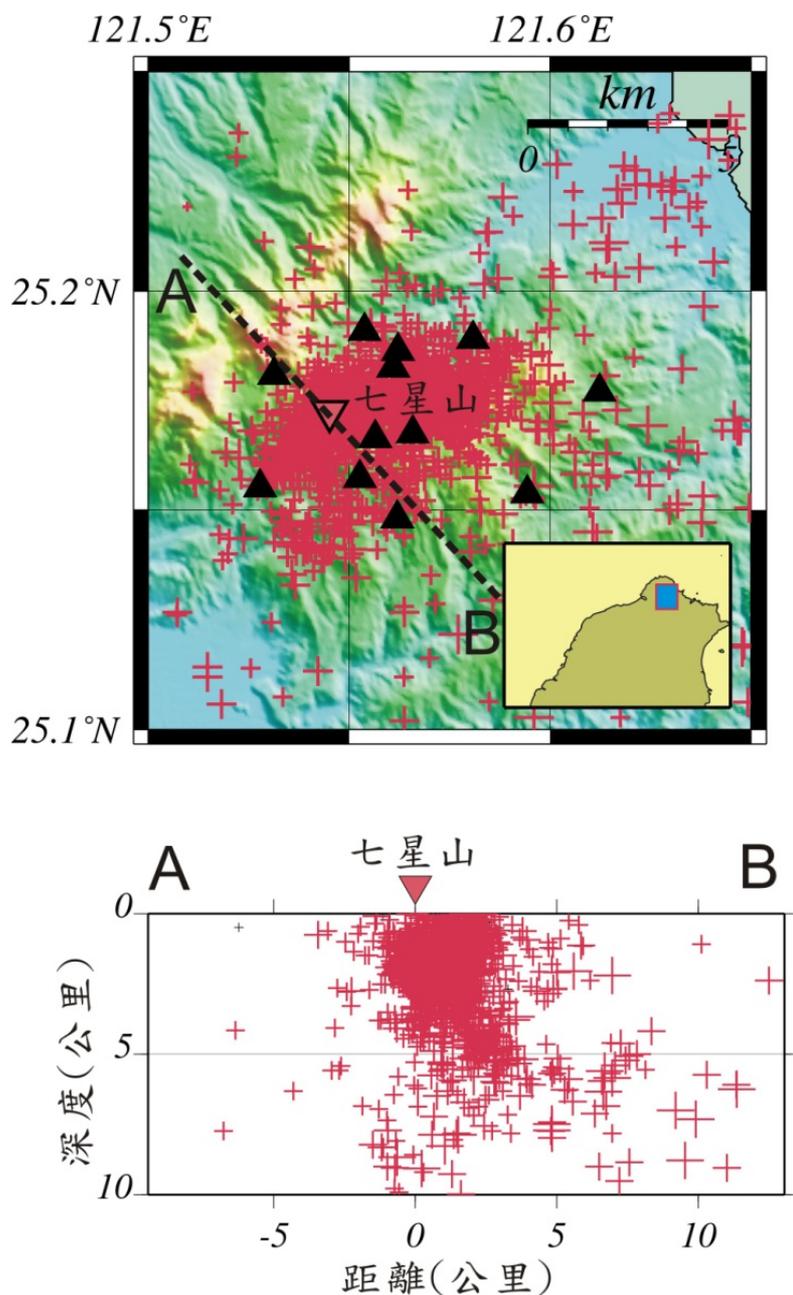
依據本研究設置之大屯火山群微震網所觀測之地震記錄顯示，陽明山國家公園內之七星山及大油坑下方，有明顯的微震活動存在，大多數之微震震源深度均集中於二至五公里附近。此外，比較每日之連續地震記錄，常發現一些不尋常的連續振動訊號。本研究也發現另一種更為強烈且連續性之爆發性火山地震訊號。初步定位顯示這些來源亦落於七星山及大油坑地區之淺部地殼。目前雖無法正確地判識其振動之機制，初步推斷可能與岩層裂縫中液態或氣態物質，突然增加或減少壓力所造成之振動有關。這些現象與國外其他火山地區，所觀測之岩漿相關活動類似。故很值得未來研究，作更進一步探討。



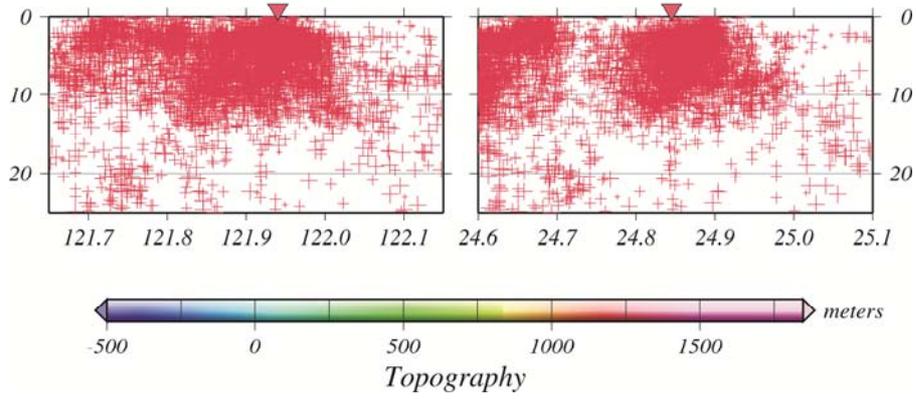
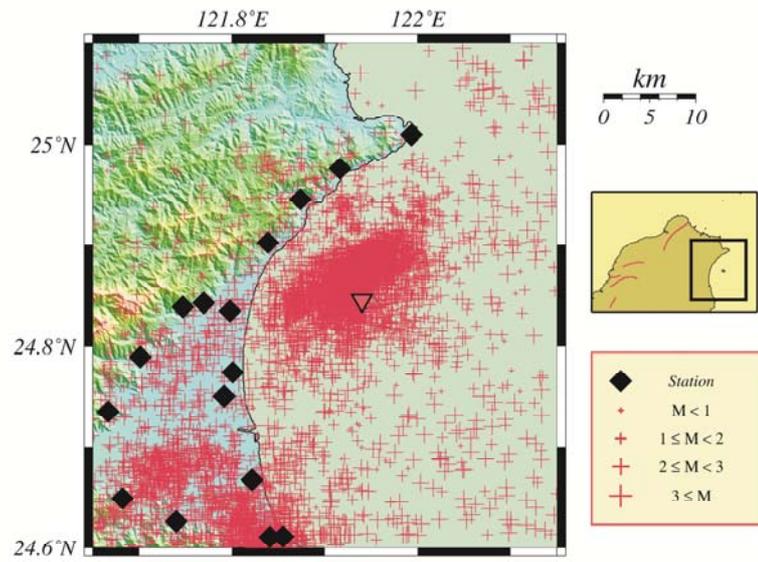
圖四 火山地區群震現象之地震記錄。

此外本計畫目前利用大屯火山地區與龜山島現任之地震記錄，仔細研判與分析與火山活動有關之地震(圖五及圖六)，若火山活動逐漸活躍，首先火山微震

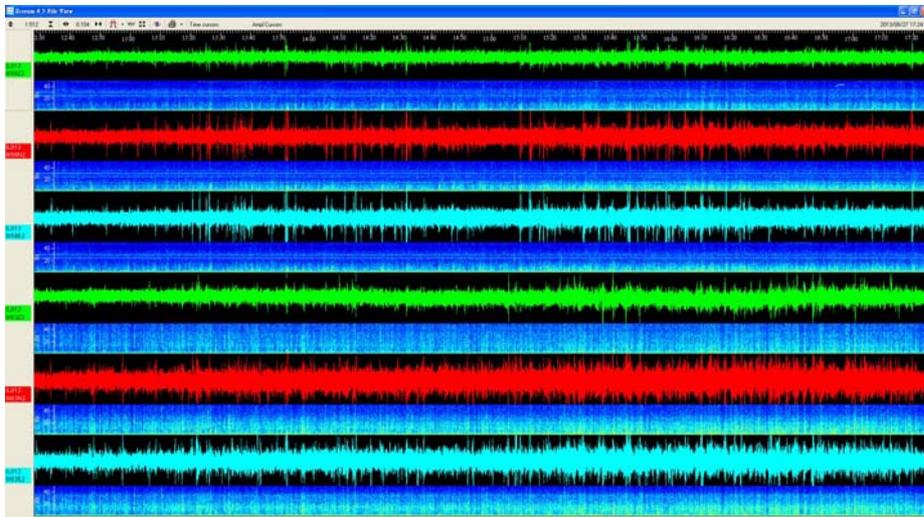
個數會明顯增加。因此本計畫由專人全職監控各項火山活動訊號(圖七與圖八)，進行收錄資料處理及仔細地火山地震之記錄與頻普分析(如圖六)，特別針對火山活動常伴隨之 B-type 火山地震進行分析記錄，充分辨識 B-type 火山地震(圖九)與 A-type 火山地震(圖十)之差異，俾便協助中央氣象局了解並掌握火山之現在狀況，評估未來可能之火山活動情況，以提供政府單位及所有民眾正確之地震資訊，進行有效之防救災工作。



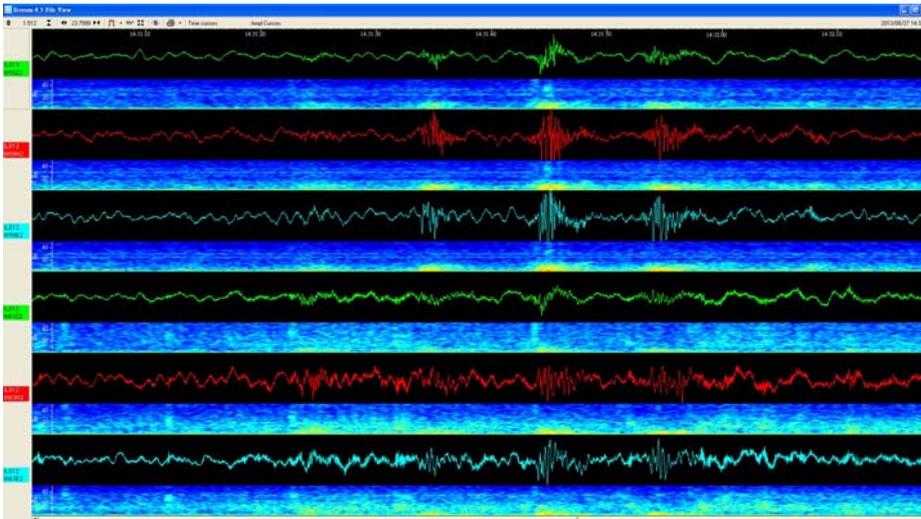
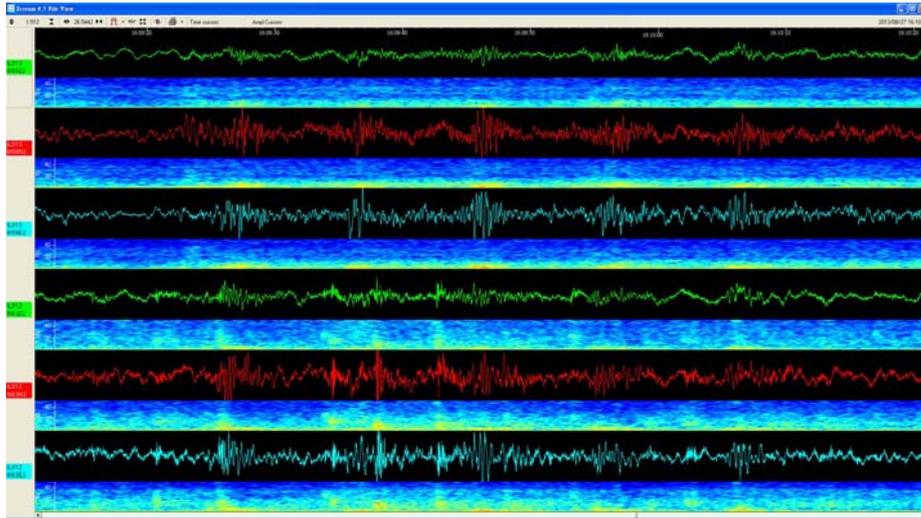
圖五 大屯火山地區地震活動分佈。



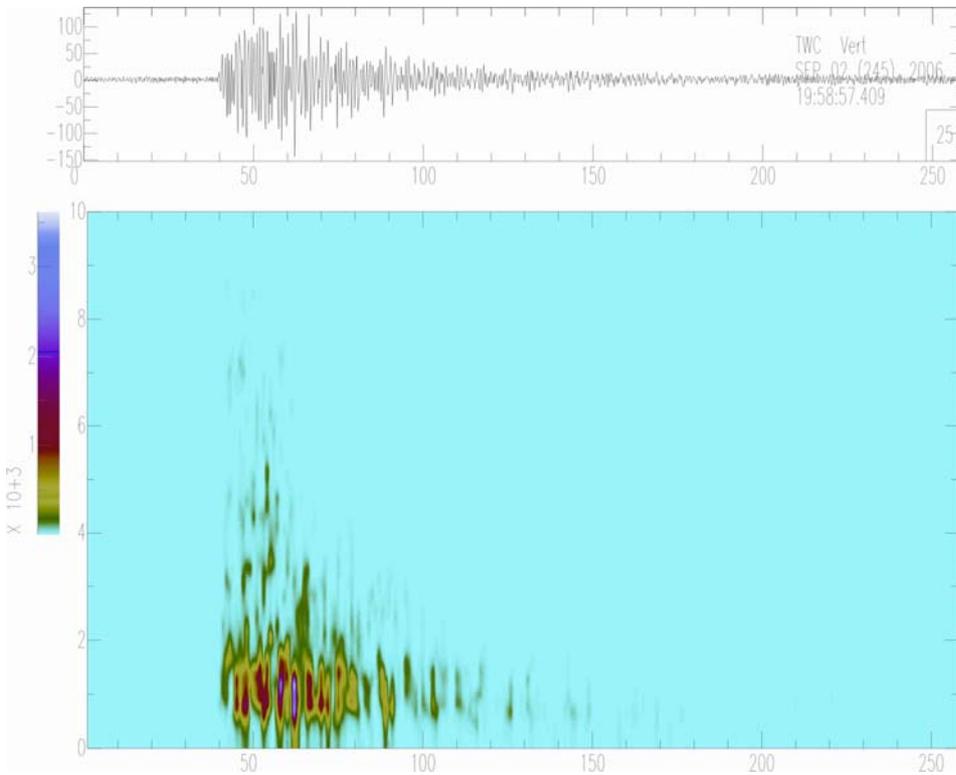
圖六 宜蘭龜山島附近地區地震活動分佈。



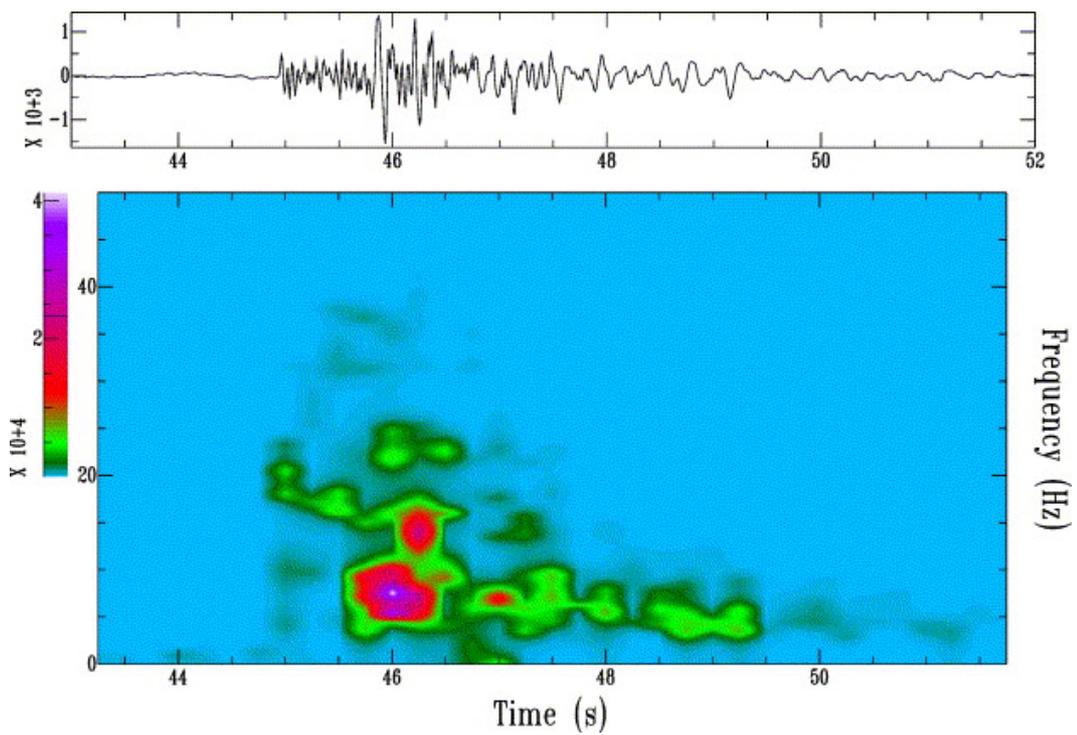
圖七 宜蘭龜山島附近地區群震記錄。



圖八 宜蘭龜山島附近海底火山之 B-type 地震記錄。



圖九 火山地震(B-type)之記錄與頻普分析實例。



圖十 火山地震(A-type)之記錄與頻普分析實例。

四、陣列地震資料分析

利用在大屯山地區所設置的密集地震儀陣列(圖十一)，以頻率-波數法(Frequency-wavenumber method, F-K method)分析密集地震儀陣列資料，辨識可能的火山活動來源方向。每個視窗經由頻率-波數分析結果；假如偵測到明顯特定方向的震波能量入射陣列，結果如圖十二(a)；反之，在一般情況下，是沒有特別方向的震波能量入射陣列，結果如圖十二(b)。當偵測到明顯特定方向的震波能量入射陣列時，還要綜合多個密集地震儀陣列分析結果，一起判斷是不是屬於大屯山地區的地震及火山型震動訊號，還是屬於台灣地區、世界上其他地區的地震。

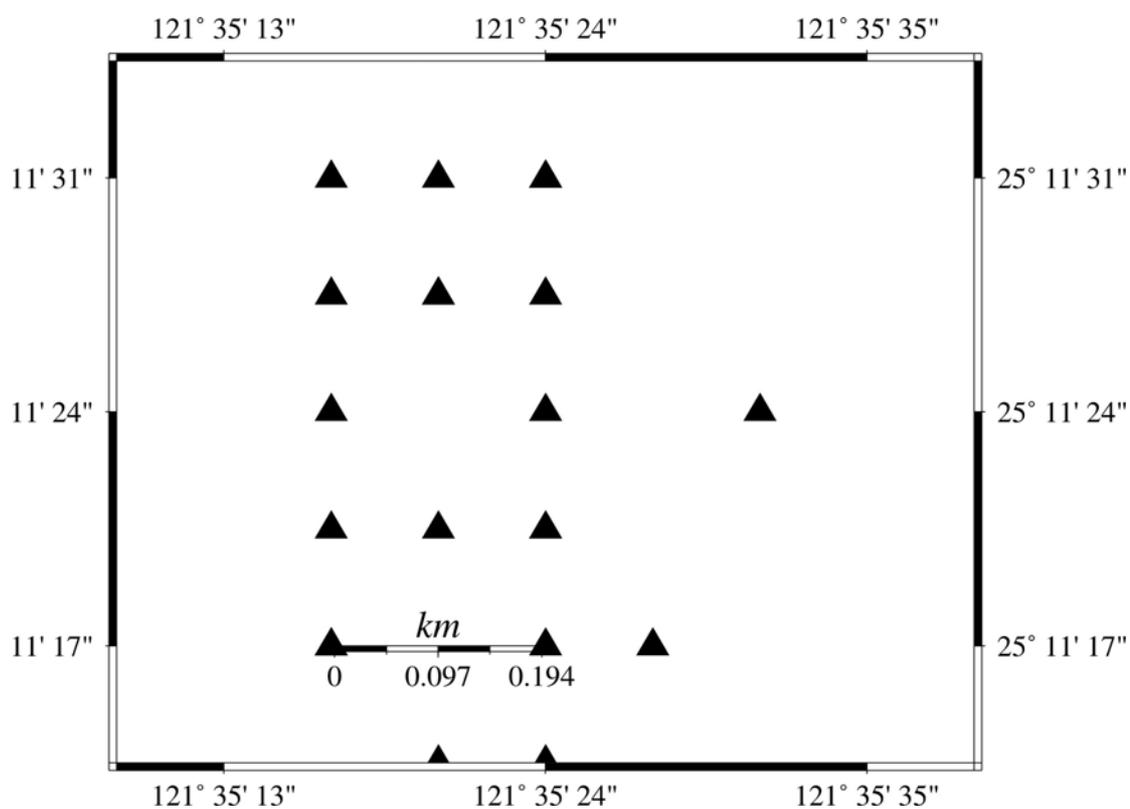


圖 十一 八煙密集地震儀陣列的直角座標系統。

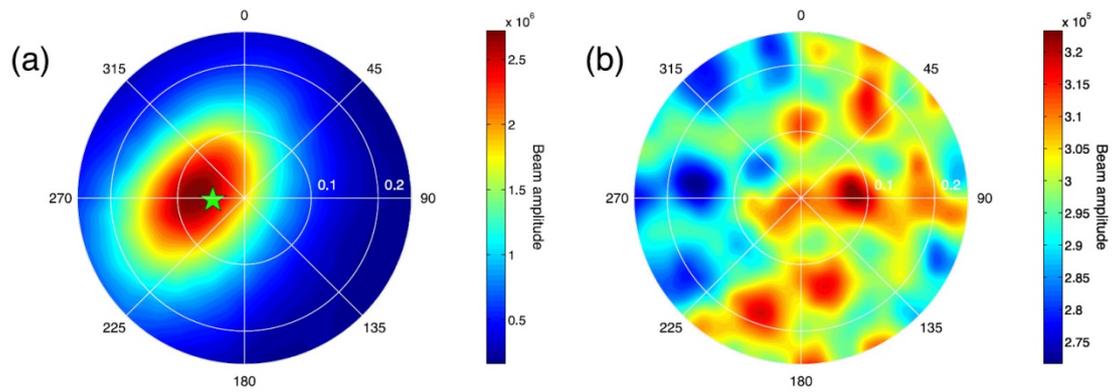
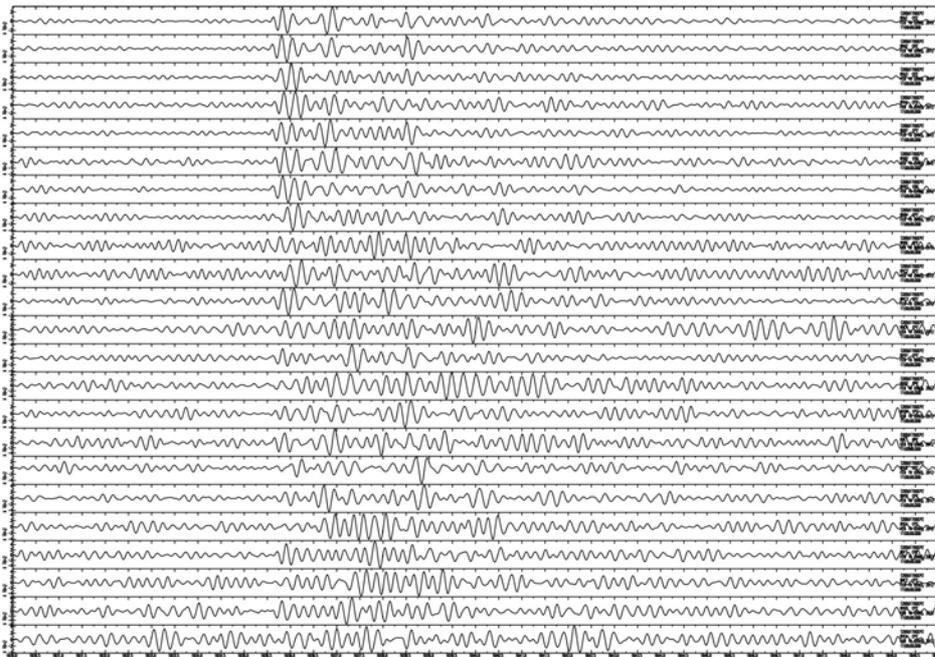
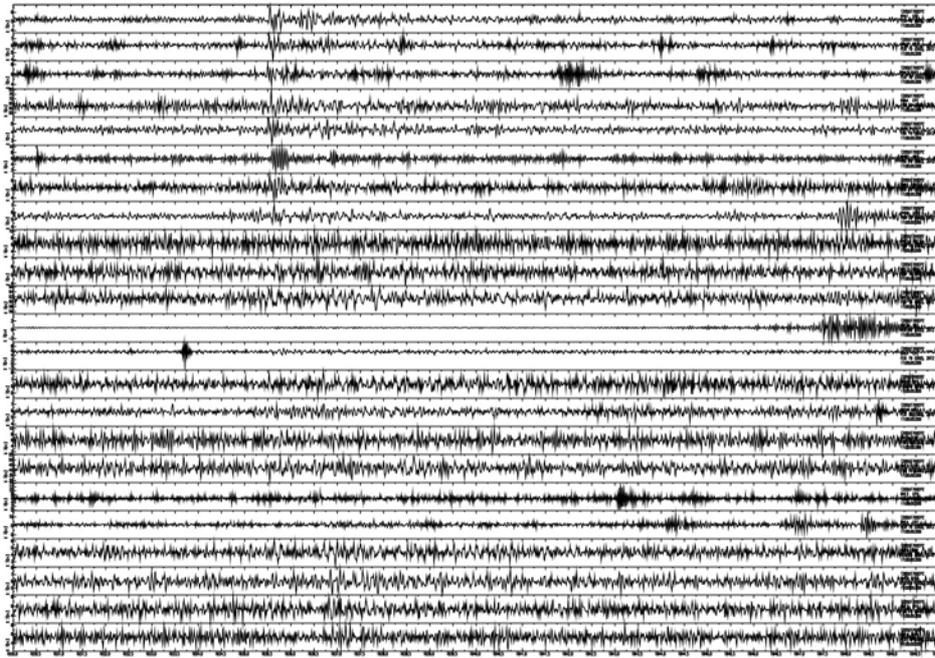
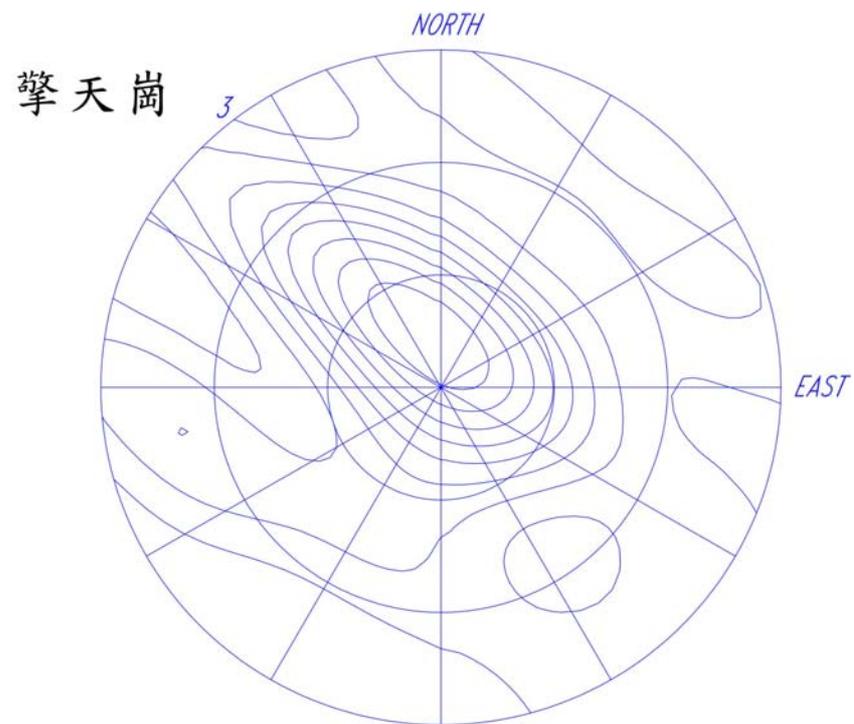
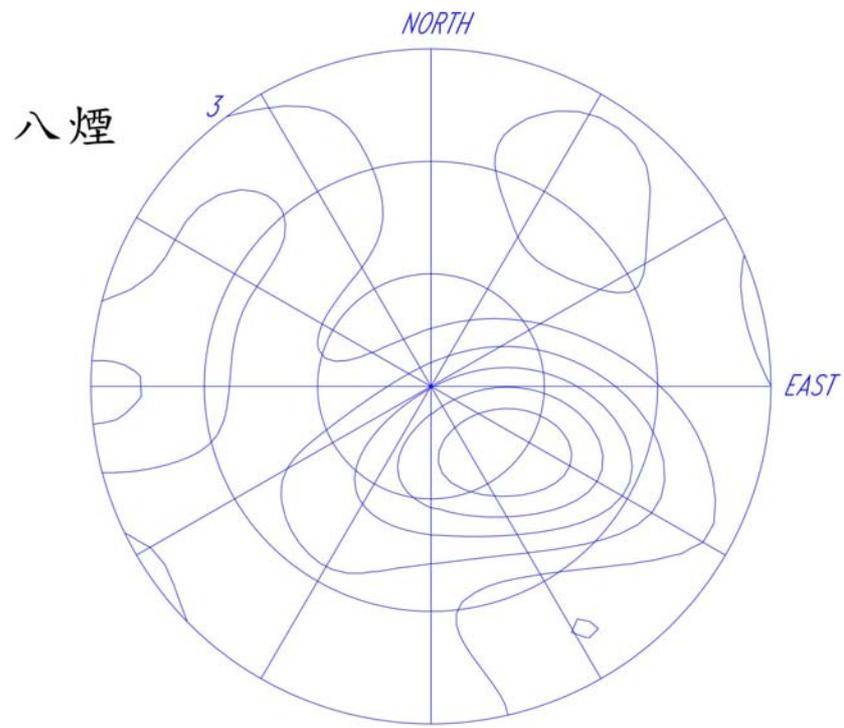


圖 十二 利用頻率-波數法分析結果(Ghosh *et al.*, 2009)。(a) 偵測到特定方向的震波能量入射陣列；(b) 一般情況下，沒有偵測到特定方向的震波能量入射陣列。

從頻率-波數法初步分析大屯山地區的三個密集地震儀陣列資料結果發現，可以判定一些地震或火山型震動訊號可能來源方向及區域。首先對地震資料進行濾波過程，可以清楚發現濾波前後有明顯的差別(如圖十三)，仔細利用 F-K 的分析方法，可以清楚的看出地震波訊號來源在八煙陣列的後方位角約 120° - 140° ，比較接近水平入射；同時在擎天崗陣列的後方位角約 330° - 350° ，比較接近垂直入射(如圖十四)。密集地震儀陣列相對位置，和頻率-波數法分析結果，發現有些可能地震波訊號來源從大屯火山群中的大尖後山與磺嘴山地區。往後希望能發展出一套頻率-波數法分析密集地震儀陣列資料模式，更有效率的找出大屯山地區，地震或火山型震動訊號可能來源方向及區域。



圖十三 地震資料進行濾波過程前(上圖)與後(下圖)有明顯的差別。



圖十四 利用頻率-波數法分析大屯山地區兩個密集地震儀陣列資料分析結果。

交通部中央氣象局
委託研究計畫(期中/期末)成果報告

計畫名稱

震源破裂之時空模擬 (IV)

計畫類別：氣象 海象 地震

計畫編號：MOTC-CWB-103-E-06

執行期間：103 年 1 月 1 日至 103 年 12 月 31 日

計畫主持人：李憲忠

執行機構：中華民國地球物理學會

本成果報告包括以下應繳交之附件(或附錄)：

- 赴國外出差或研習心得報告 1 份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告 1 份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各 1 份

中華民國 103 年 11 月 8 日

政府研究計畫(期中/期末)報告摘要資料表

| | | | |
|--------|--|---------------|-----------------------|
| 計畫中文名稱 | 震源破裂之時空模擬 (IV) | | |
| 計畫編號 | MOTC-CWB-103-E-06 | | |
| 主管機關 | 交通部中央氣象局 | | |
| 執行機構 | 中央研究院地球科學研究所 | | |
| 年度 | 103 | 執行期間 | 103. 1. 1-103. 12. 31 |
| 本期經費 | 新臺幣 316, 249 元 | | |
| 執行進度 | 預定 (%) | 實際 (%) | 比較 (%) |
| | 100 | 100 | 100 |
| 經費支用 | 預定(千元) | 實際(千元) | 支用率 (%) |
| | 316. 249 | 316. 249 (未定) | 100 (未定) |
| 研究人員 | 計畫主持人 | 協同主持人 | 研究助理 |
| | 李憲忠 | | 王以旻 |
| | | | |
| 報告頁數 | 32 | 使用語言 | 中文 |
| 中英文關鍵詞 | 震源破裂過程、即時地震矩張量監測 | | |
| 研究目的 | <p>本計畫將針對台灣地區中大規模地震進行震源破裂過程的時間-空間分佈分析。所採用的方法為體波震源逆推法，此方法在進行分析前需要完整的震源參數資訊，包括地震規模、震源位置、震源機制、斷層面解等，目前這些資訊氣象局已經於地震發生後快速地做例行公布，因此在現有的資訊架構下，於中大型地震發生後快速建立震源破裂過程的初步結果是可以達到的。本研究將透過世界地震觀測網的遠震體波資料或中央氣象局即時強震網的近場資料，依地震規模大小以不同資料進行震源逆推。針對台灣中大型地震進行震源模式分析，可對發震區的震源破裂特性有更清楚的瞭解，同時所建立之震源破裂模型對於後續之研究，如庫倫應力轉移分析、地震波傳遞模擬與強地動評估等可提供重要的資訊。由長遠目標來看，震源破裂模型持續、有系統地分析與建立將可以作為震源物理研究以及地震防災、減災上的參考。</p> | | |
| 研究成果 | <p>本年度(民國 103 年)台灣島內無規模大於 M_L6.0 的中大規模地震，其中最大地震為 2014 年 5 月 21 日的鳳林地震 (M_L5.9)。</p> | | |

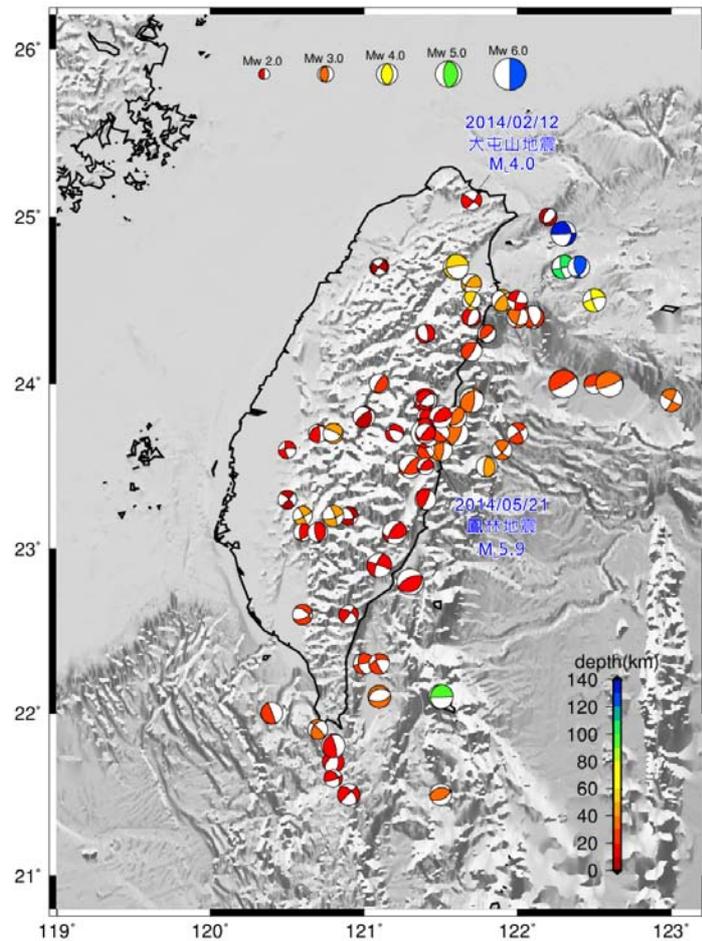
另於 2014 年 2 月 12 日發生的大屯山地震($M_L 4.0$)其規模雖然不大，但由於其發生位置靠近大台北都會區，其發震構造亟需深入瞭解與探討。

2014 年 5 月 21 日鳳林地震是 2014 年至今於台灣本島內的最大規模的地震，氣象局之地震報告指出其規模為 $M_L 5.9$ 。地震發生位置與 2013 年 10 月 31 日瑞穗地震相當接近，震源機制解也雷同，初步研判為瑞穗地震之後續餘震活動。為了瞭解這個地震究竟如何發生、破裂過程為何，本研究採用遠場體波資料進行震源過程逆推。研究中採用氣象局之震源位置，並對震源機制解中的西南-東北走向，分別朝東以及朝西下傾的兩個斷層面做為斷層模型，以平行化非負最小平方法來進行震源逆推，由震源逆推結果顯示，此次鳳林地震的規模僅 $M_w 5.9$ ，具相對單純的破裂過程可以預期。然而由於遠震波形逆推的解析能力有限，其結果並無法判定兩個斷層面何者具有較顯著的可能性。兩個斷層面上的錯動都發生在震源附近 10-25 公里深的區域，兩者均有一個主要的錯動區，在震源上方為逆衝滑移，而震源下方則以走向分量為主。斷層面 strike 208° , dip 60° 於斷層淺部亦有錯動量出現，經推測並沒有破裂到地表。儘管遠震波形震源逆推結果無法進一步幫助推斷可能的斷層面，但由於鳳林地震與去年的瑞穗地震之震源機制解相當，且地震發生的時間、位置也相當接近，由此研判鳳林地震應該是屬於瑞穗地震之餘震，發生在朝西下傾的中央山脈斷層上。進一步透過該區背景地震的分析以及野外調查將有助於對震源區的地震與構造背景有更詳細的解釋。

2014 年 2 月 12 日大屯山地震是近年台北都會區附近發生的最大規模地震。震央位在大屯山下方，非常接近士林區，雖然規模只有 $M_L 4.0$ ，但非常接近地表，深度淺只有 6 公里，屬於淺源地震。由於人口密集的台北都會區近年少有有感地震發生，所以引起民眾與學者的關注。本研究結合地震矩張量逆推與網格搜尋技術來求得此地震的震源參數，包括發震時間、發震位置、規模與震源機制解，希望能進一步釐清這個地震發生的背景。分析結果指出儘管震源參數仍有不確定性，但根據現有的

震源參數仍可進一步進行地表強地動的模擬，特別是針對人口稠密的大台北都會區。

此外，由於中大規模地震之震源時間-空間分析需要有快速、準確的震源參數，尤其是震源機制以進行斷層面初判，為此發展了一個即時地震矩張量監測系統來快速獲得這些震源參數資訊。此系統於 2012 年開始進行線上即時監測，至今即將線上運作滿三年。圖一為 2014 年所監測到的地震位置與震源機制，其中包括 2 月 12 日的大屯山地震與 5 月 21 日的瑞穗地震。該系統之例行監測結果亦納入本年度的例行研究成果中。



圖一、2014 年地震矩張量監測系統之成果。

具體落實應用情形

針對中大型地震進行快速震源破裂過程分析，可對發震區的震源破裂特性有更清楚的瞭解，同時所建立之震源破裂模型對於

| | |
|-----------------------|--|
| | 後續之研究，如庫倫應力轉移分析、地震波傳遞模擬與強地動評估等可提供重要的資訊。 |
| 計畫變更說明 | (若有) |
| 落後原因 | (若有) |
| 檢討與建議 (變更或落後之因應對策) | 以遠震波形進行震源逆推分析，通常需要規模較大的地震，規模介於5.5~6.0之中等規模地震的遠震波形紀錄品質常常無法進行這方面的研究。而近場測站雖然能對中等規模地震有很好的紀錄，但卻需考慮較為精確的近場速度構造來計算格林函數。未來解決此問題之因應對策有:(1)採用較近的遠震紀錄(震央距10-30度)，並以三維全球格林函數來處理淺部地殼構造的問題；(2)建立三維近場格林函數資料庫。 |

(以下接全文報告)

2014 年 2 月 12 日大屯山地震($M_L 4.0$)震源參數分析

摘要

2014 年 2 月 12 日大屯山地震是近年台北都會區附近發生的最大規模地震。震央位在大屯山下方，非常接近士林區(圖一)，雖然規模只有 $M_L 4.0$ ，但非常接近地表，深度淺只有 6 公里，屬於淺源地震。由於人口密集的台北都會區近年少有有感地震發生，所以引起民眾與學者的關注。本研究結合地震矩張量逆推與網格搜尋技術來求得此地震的震源參數，包括發震時間、發震位置、規模與震源機制解，希望能進一步釐清這個地震發生的背景。

一、震源機制解

氣象局的中心地震矩張量(CMT)震源機制解出來的機制接近正斷層，近南北走向，東西拉張。這個解的震央深度較淺，Centroid 的位置只有兩公里。除了氣象局外，TEC DC 也提供了多個不同方法所求得的震源機制解，包括 gCAP、FMNEAR 以及 NewBATS(見圖二)。這些解都是採用氣象局的震源位置資訊，再進一步以波形逆推找出最佳深度與最佳震源機制。儘管初始資訊相同，但這幾個解仍有所差異，特別是 FMNEAR 呈現以走向滑移為主的機制形式，跟其他兩組解呈現正斷層機制有明顯不同。

除了上述的幾個即時震源參數分析外，中研院地球所還有一個即時震源機制解監測系統，簡稱 RMT (圖三)。這套系統是結合震源逆推與網格收尋，持續不斷地對台灣附近的地震活動進行監測。一旦地震發生，所有震源參數，包括發震時間、位置、規模與震源機制解可以在兩分鐘內分析出來。RMT 與其他系統不同的地方，在於其不需要氣象局的震源資訊，包括發震時間與位置都在單一系統中解算出來。不過這樣的系統也是會有盲點存在，像這次的地震就是由於地震發生在所選用測站的最北端，所有測站都在震央南方，落在相近的方位角，當地震訊號近來時，最先到達 YHNB 測站，其他測站則完全沒有訊號，這時候僅需要擬合一個測站的波形，由於相對容易擬合，MR 很快便上升超過門檻值。一旦震波開始被其他測站收到，MR 便會下降，在這種情況下決定出來的發震時間與位置便會出錯，震源機制也隨之呈現問題。

所幸根據氣象局的發震時間，RMT 系統在非上線的情況下仍然可以找到一個比較適切的解，其呈現走向斷層的型態，跟 FMNEAR 的解比較接近。然而測站包圍性

的問題還是存在，若要求得更精確的震源參數，較好的測站包圍性與更密的網格以及更準確的格林函數是必須要考量的。

二、震源參數逆推與網格收尋

本報告針對 2 月 12 日的大屯山地震，透過 RMT 的方法採用近場記錄與較密的網格進行網格收尋，來求得較為精確的震源參數資訊。圖四顯示網格設定以及所能分析的測站資訊。總網格數 5400 個，水平與垂直間距均約 0.7km。測站方面，目前能即時獲得的資料包括 BATS 寬頻記錄以及氣象局提供的即時強震資料 RTD。整個來看測站包圍性算是不錯，特別是大屯山近震源區的兩個測站，BATS 的 YD07 以及 RTD 的 ANP，這兩個測站對震源參數的控制相當關鍵。另外，WFSB(BATS) 跟 NWF(RTD)共站，可以用來檢驗紀錄的一致性。

圖五左上方是 YD07 的寬頻速度型紀錄，上至下分別是 E、N、Z 三分量。可以看到幾個明顯波相，包括最先出現的 P 波以及比較晚到、較低頻的 S 波，後面還有一些 phase，可能是近地表的 reflection 或是高頻表面波。水平分量(E,N)有很明顯的 S 波，垂直分量則是 P 波比較明顯。圖五左下方是氣象局 RTD 的 ANP 測站所記錄到的波形，為加速度型紀錄，同樣可以看到明顯的 P 波、S 波以及後面的一些 phase。這些地震波的特性都是教科書上常看到的，也就是標準的 double-couple 地震的震波特性。關於後面的 phase，科士達等在 2006 年有一篇關於大屯山的文章中有提到，火山活動的震波記錄中有高頻以及較低頻的 harmonic coda 存在。經此推估，後續波相可以相當於是該文章中所提到的 harmonic coda。

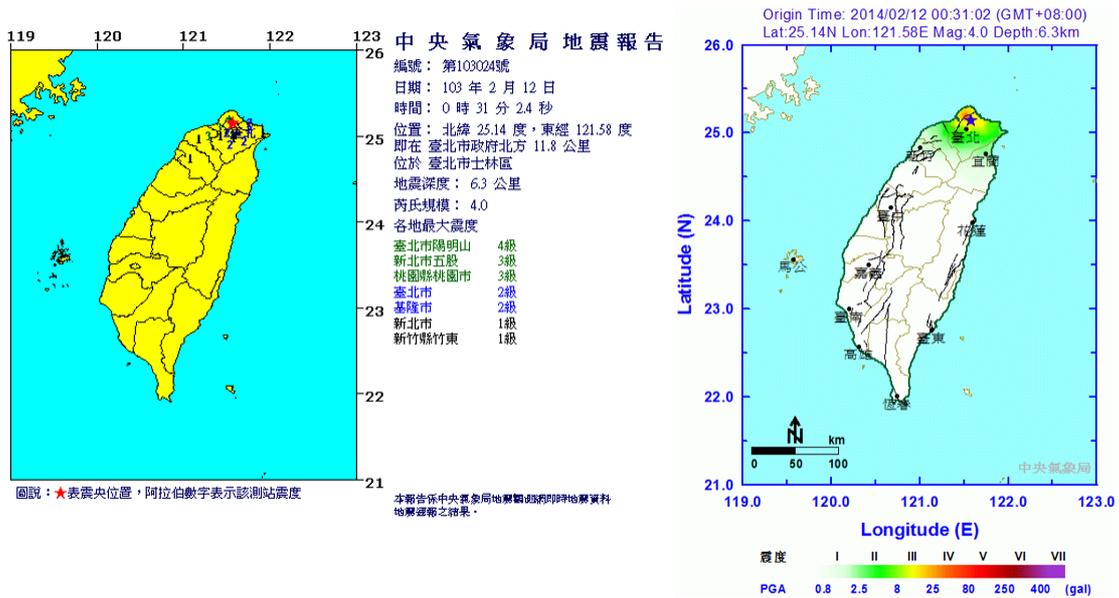
雖然有兩個地震網的資料可以分析，但兩者的儀器不同，紀錄的特性也不太一樣。BATS 是寬頻網為速度型紀錄，RTD 則是加速度型紀錄。以共站的 WFSB、NWF 紀錄來看(圖六)，兩者在加速度上波形還算一致，但積分到速度時，RTD 的 NWF 便開始有些低頻的漂移。若在進一步進行濾波，兩者便出現明顯的不同，也就是說 RTD 資料僅適合在高頻段進行分析，到了低頻段僅有 BATS 資料可以使用。

三、分析結果

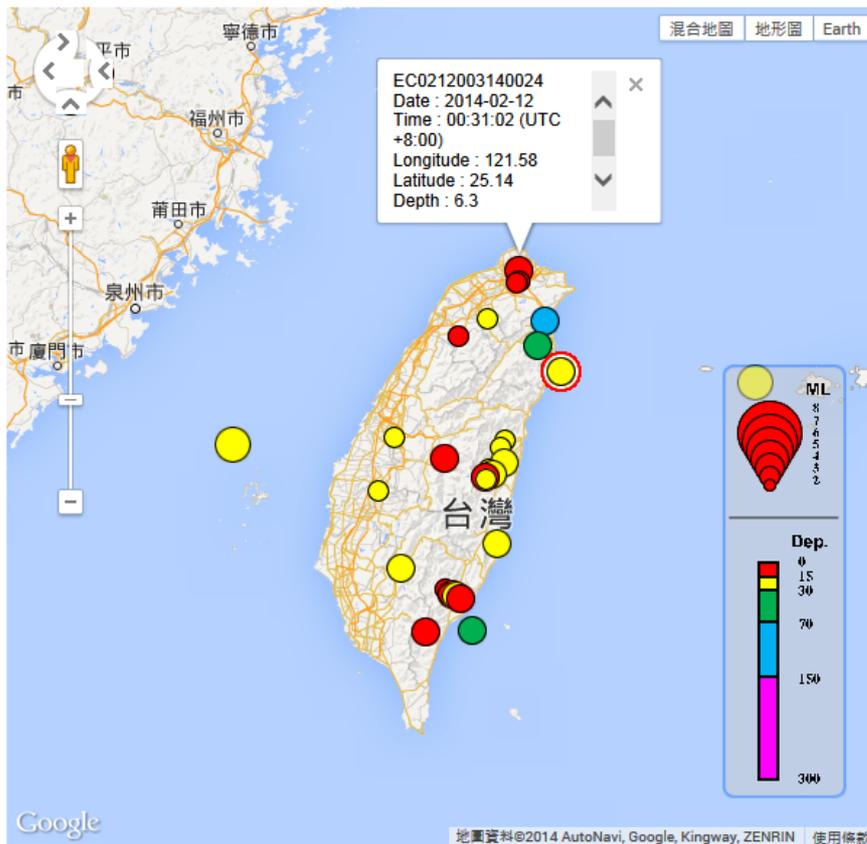
圖七為分析結果，首先看到的是高頻的部分(1Hz)，這個頻段 RTD 跟 BATS 都可以使用，不過因為頻段到達 1Hz，所以波形相當複雜，已經不是目前三維格林函數所能夠解釋，所以在擬合上並不是很好，僅能解釋一開始的 P 波波相，後續非常複雜的波形很難去解釋。儘管如此還是可以看到一個網格搜尋到的最佳結果，這個解震央落在比較北邊的地方，呈現一個走向斷層的型態。由於波形上的擬合不是很好所以這個結果僅當參考。到比較低的頻段 3-20s，RTD 無低頻訊號所以只能採用 BATS 三個測站的波形。雖然是低頻，但相較於傳統的 moment tensor inversion 所採用的頻段還是高很多。格點搜尋的結果，震央位在北邊，成走向斷層型態，這結果與高頻段結果一致。由於不論高頻或是低頻的波形擬合仍有改進的空間，所以這暫時性的結果僅提供於報告中作為參考。

四、結果討論

儘管震源參數仍有不確定性，但根據現有的震源參數仍可以進行 ShakeMap 的模擬。由觀測的結果可以看到(圖八)，氣象局的 ShakeMap 中較大的震動出現在震央附近及上方。由吳逸民教授的 Palert 資料可以更清楚看到大的 PGA 落在震央北邊，特別是震央附近的東側，但進入到台北盆地便迅速衰減下來，到了基隆、臺北盆地外圍，由於地震不大，PGA 更是減弱到很難觀測，這和氣象局的 ShakeMap 相當一致。圖八別是 CWB CMT、gCAP、FMNEAR 以及 GRIDMT 的結果，所有的 ShakeMap 都採用相同的色階。由於 CWB CMT 的 centroid 位置比較淺僅有兩公里，所以 ShakeMap 中強烈震動的範圍較大較廣，相對的 gCAP 的 centroid 位置深達 17 公里，ShakeMap 的震動小很多，範圍也相對縮小。另外 FMNEAR 的強烈震動集中在台北盆地內，因為其落在 S 波 radiation pattern 放大的區域，GRIDMT 則分散在盆地與大屯山區，且盆地外衰減較快，這點與觀測紀錄算是一致，但後續仍有改進的空間。



圖一：2014年2月12日大屯山地震。氣象局地震報告與 ShakeMap。



2014.042.16.31



[Historic CMTs](#)



[gCAP Solution](#)

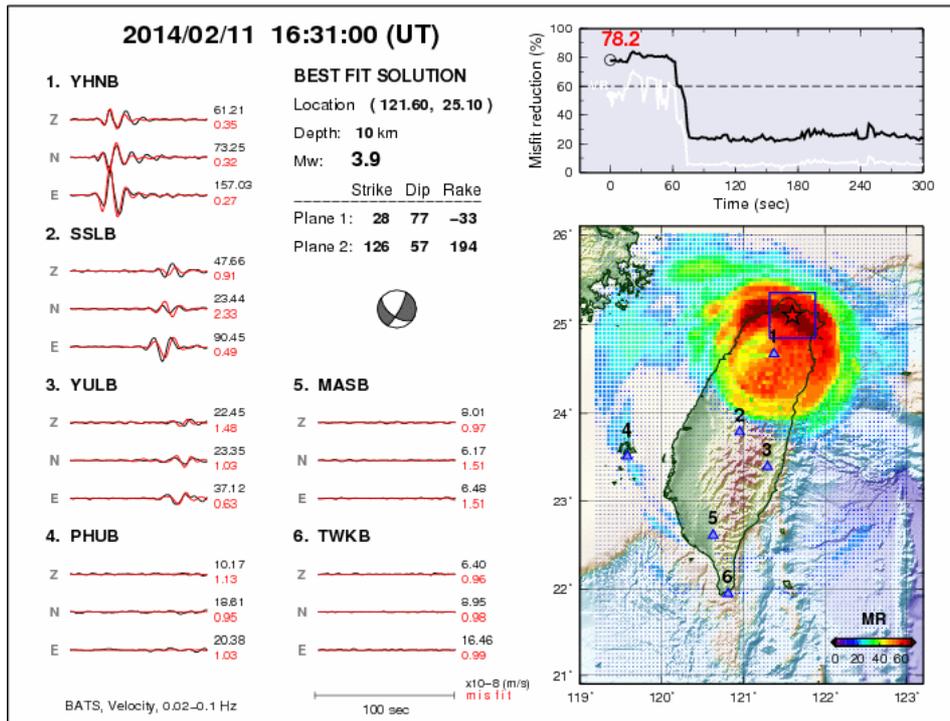


[FMNEAR Solution](#)

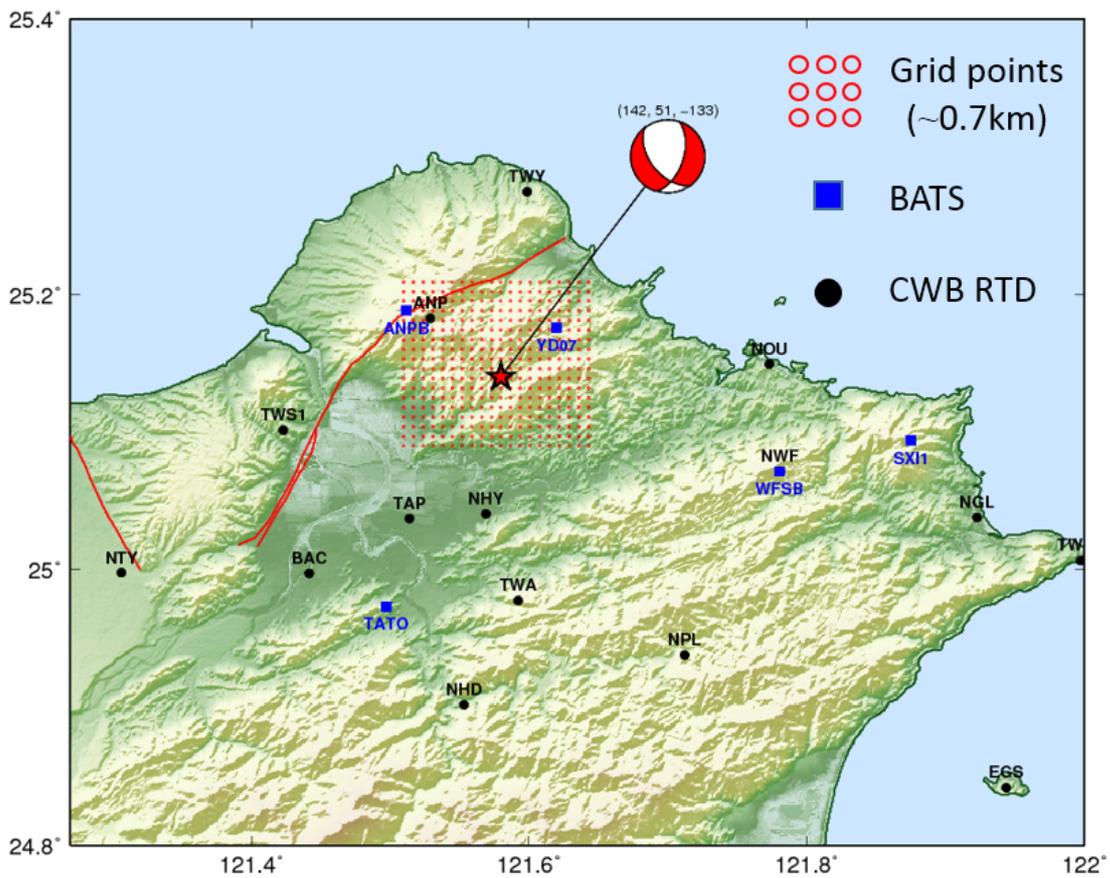


[New BATS Solution](#)

圖二: TEC DC 所提供的多個不同方法所求得的震源機制解, 包括 gCAP、FMNEAR 以及 NewBATS。



圖三：即時地震矩張量監測系統(RMT)所測得的震源參數。



圖四：網格設定以及測站資訊。總網格數 5400 個，水平與垂直間距均約 0.7km。測站方面，目前能即時獲得的資料包括 BATS 寬頻記錄以及氣象局提供的即時強震資料 RTD。整個來看測站包圍性算是不錯，特別是大屯山近震源區的兩個測站，BATS 的 YD07 以及 RTD 的 ANP，這兩個測站對震源參數的控制相當關鍵。另外，WFSB(BATS)跟 NWF(RTD)共站，可以用來檢驗紀錄的一致性。

Near-field data

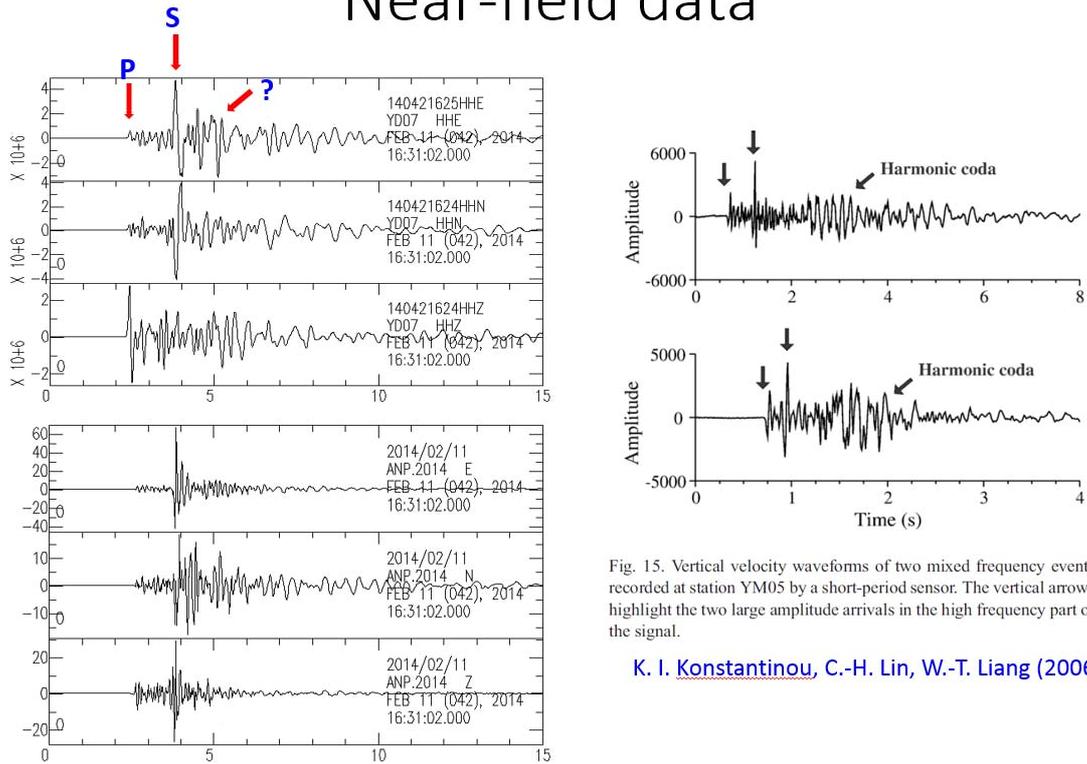
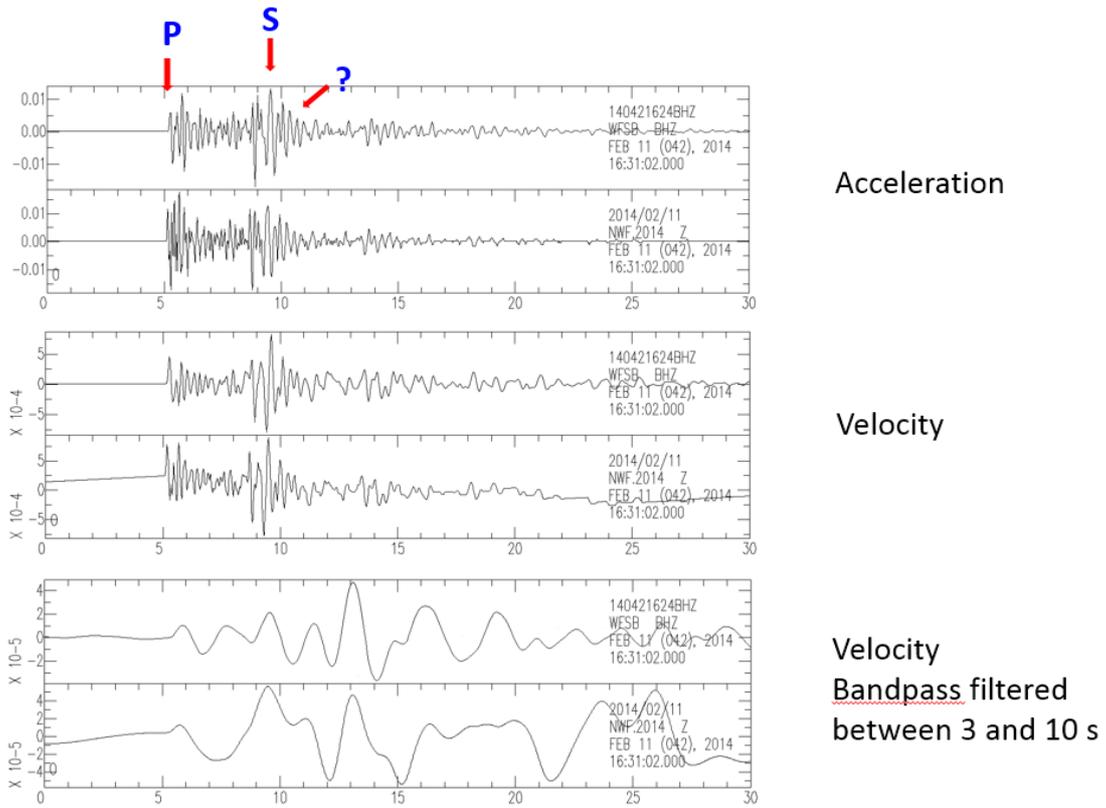


Fig. 15. Vertical velocity waveforms of two mixed frequency events recorded at station YM05 by a short-period sensor. The vertical arrows highlight the two large amplitude arrivals in the high frequency part of the signal.

[K. I. Konstantinou, C.-H. Lin, W.-T. Liang \(2006\)](#)

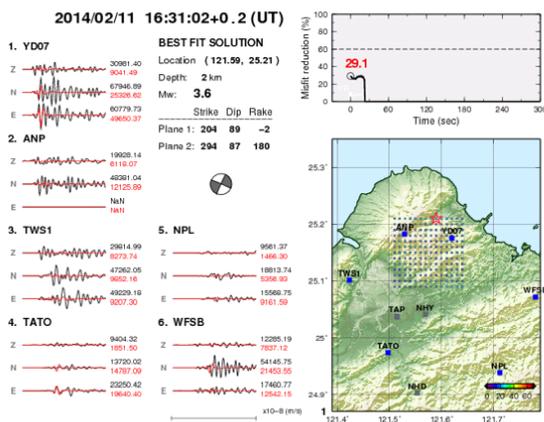
圖五：左上方是 YD07 的寬頻速度型紀錄，上至下分別是 E、N、Z 三分量。可以看到幾個明顯波相，包括最先出現的 P 波以及比較晚到、較低頻的 S 波，後面還有一些 phase，可能是近地表的 reflection 或是高頻表面波。左下方是氣象局 RTD 的 ANP 測站所記錄到的波形，為加速度型紀錄，同樣可以看到明顯的 P 波、S 波以及後面的一些 phase。右邊圖示為科士達等在 2006 年文章中有提到，火山活動的震波記錄中有高頻以及較低頻的 harmonic coda 存在。



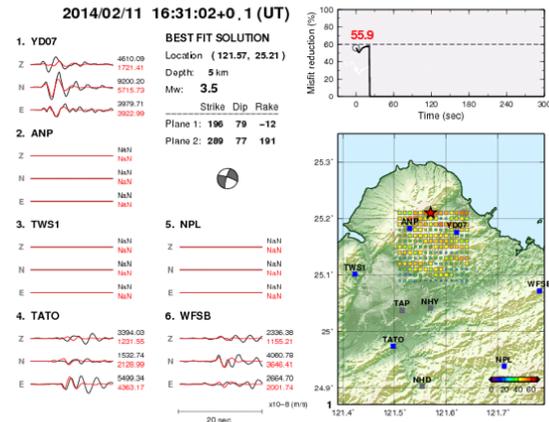
圖六: BATS 與 RTD 共站記錄比較。BATS 是寬頻網為速度型紀錄，RTD 則是加速度型紀錄。以共站的 WFSB、NWF 紀錄來看，兩者在加速度上波形還算一致，但積分到速度時，RTD 的 NWF 便開始有些低頻的漂移。若在進一步進行濾波，兩者便出現明顯的不同。

1~5s

3~20s

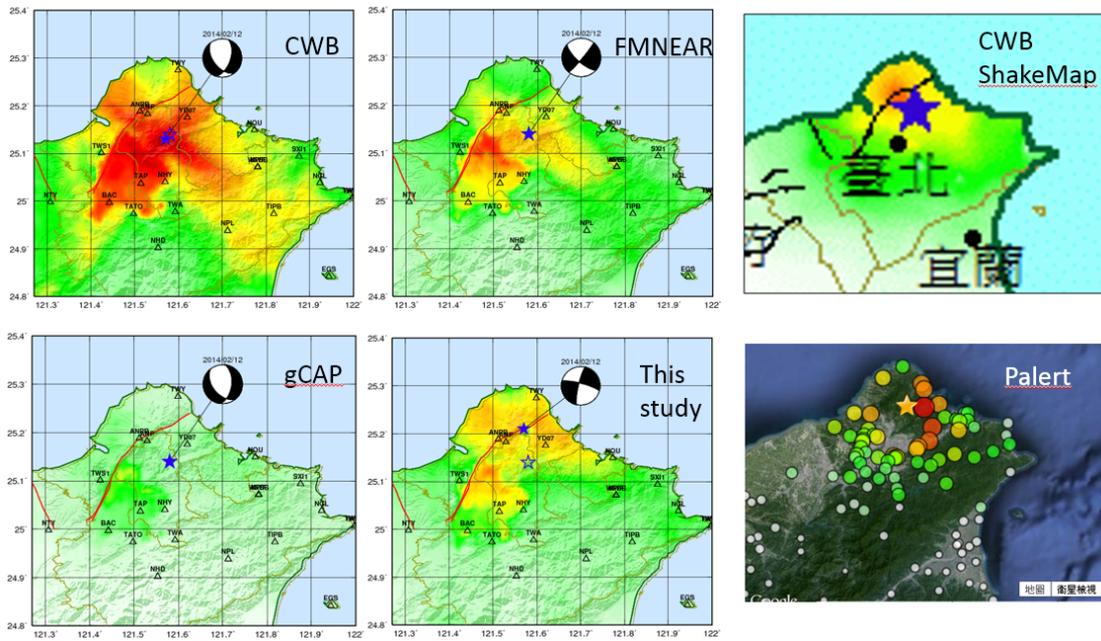


Velocity, band pass filtered between 1 and 5 s



Velocity, band pass filtered between 3 and 20 s

圖七: 格點收尋分析結果, 左邊為高頻的結果(1Hz), 右邊是較低的頻段 3-20s 的結果。格點搜尋的結果顯示, 震央位在北邊, 成走向斷層型態, 低頻與高頻段的結果一致。



圖八: 氣象局觀測記錄的 ShakeMap、Palert 與 CWB CMT、gCAP、FMNEAR 以及 GRIDMT 的 ShakeMap 模擬結果比較，所有數值模擬之 ShakeMap 都採用相同的色階。

2014 年 5 月 21 日鳳林地震(M_L 5.9)震源破裂分析

一、前言

2014 年 5 月 21 日鳳林地震是 2014 年至今於台灣本島內的最大規模的地震，氣象局之地震報告指出其規模為 M_L 5.9 (圖一)。地震發生位置與 2013 年 10 月 31 日瑞穗地震相當接近，震源機制解也雷同，初步研判為瑞穗地震之後續餘震活動。瑞穗地震之斷層面經研究應為朝西下傾之逆衝斷層，此機制不同於花東縱谷系列斷層，推測瑞穗地震為朝西下傾之中央山脈斷層活動所致，若鳳林地震亦屬於同一斷層機制，將可幫助進一步釐清中央山脈斷層在花東縱谷北段的存在。為了瞭解這個地震究竟如何發生、破裂過程為何，本研究採用遠場體波資料進行震源過程逆推。研究中採用氣象局之震源位置，並對震源機制解中的西南-東北走向，分別朝東以及朝西下傾的兩個斷層面做為斷層模型(圖二)，以平行化非負最小平方法來進行震源逆推，希望能藉由震源破裂的時間-空間過程來研判此次地震的物理背景與地質上的意義。

二、資料收集與分析

本研究之遠震波形資料取自聯合地震研究機構 (IRIS) 之資料管理中心 (DMC)，以 Broadband 之垂直分量進行逆推。為避開淺部地殼構造的複雜性，使用震央距 30° 到 100° 間之測站記錄，並考量資料之記錄品質與方位角的包圍性等因素，共選取 28 個測站進行分析(圖三)。在進行逆推之前必須先對遠震波形進行處理。此分析直接將原始的速度型資料做帶通濾波 0.02-0.5Hz，保留 P 波前 10 秒與之後 30 秒之時間段，並僅採取 Z-component 進行逆推。所採用之波形時間長度為 40 秒，取樣率為 0.1 秒。

三、研究方法

就有限斷層而言，一個測站的觀測波形可視為由斷層面上所有子斷層所貢獻的波形線性疊加的結果。研究過程中經不同斷層面積大小的測試，盡量將可能的破裂範圍納入模型中，最後假設此次錯動之斷層面積為沿走向長 50 公里、沿傾角寬 50 公里之矩形，並將斷層面分成 10x10 個子斷面，每個子斷面長 5 公里、寬 5 公里，以其中心點表示子斷層之點震源位置。子斷層至各測站間之遠場格林函數採 Kikuchi & Kanamori (1982) 之方法計算。將求得之各子斷層格林函數與觀測波形寫為 $Ax=b$ ，其中 A 為子斷面之格林函數矩陣， b 為觀測波形向量， x 向量則為各子斷面上之地震矩釋放量。研究中以非負最小平方法求解 x 。並透過平行計算來提升逆推效率與逆推解析度，此方法已經成功應用在多個大型地震的震源研究上(Lee et al., 2011; 2013; 2014)。求出 x 向量後帶回 $Ax=b$ 可得到理論合成波形，可藉此分析觀測與理論波形的擬合情形，評估斷層面上的錯動量分布。研究中，逆推誤差之估算採 $(Ax-b)^2/b^2$ 。

四、結果與討論

首先看到的是斷層面 strike 79° , dip 42° ，之逆推結果錯動量空間分佈 (圖四)，最大錯動量發生的位置落在震源上方約 5 公里。斷層面上的滑移主要集中在震源附近，從震源朝淺處擴展，於 10~25 公里深處產生一個 Asperity。最大的錯動量約 25 公分，滑動的範圍約 25x25 平方公里，主要滑動為逆衝向上的分量，在震央下方側之破裂略微帶左移分量。斷層淺部(<5km)的錯動量不明顯，並沒有直接破到地表。在斷層右側深處也有些許錯動量分佈，但錯動範圍不大且錯動量約 5 公分，可能為波形逆推殘餘值所造成的假錯動，可忽略不加以討論。震源時間函數為在一開始短時間釋大量能量後接續一個較緩和的能量釋放，總破裂時間約 30 秒，釋放能量之總地震矩 0.401×10^{18} Nm，相當於 Mw 5.67。此斷層面之合成波與觀測波形比較見圖五。觀測記錄主要由一個大的 P 波震幅加上後續震幅較小的波相所組成，大致上合成波對於主要能量的震幅與波形都解釋的不錯，波形擬合誤差為 0.387。

接下來分析斷層面 strike 208° , dip 60° , 之逆推結果錯動量空間分佈 (圖六)。同樣最大錯動量發生的位置落在震源上方。斷層面上的滑移主要也是集中在震源附近, 於 5~25 公里深處產生一個 Asperity。最大的錯動量約 25 公分, 滑動的範圍約 15x30 平方公里, 震源上方為逆衝滑移, 在震源下方之破裂略微帶走向分量。不同於前一個斷層面的是, 此斷層面於淺部(<5km)亦有明顯的錯動量, 其呈現逆衝滑移的機制, 然而此次地震的野外調查並未有發現地表破裂, 應該沒有直接破到地表, 推測逆推所看到的錯動量為近地表子斷層之格林函數不夠精確所致。同樣於斷層右側深處也有些許錯動量分佈, 可能為波形逆推殘餘值所造成的假錯動, 可忽略不加以討論。震源時間函數與前一個斷層面相當, 具有一個大的能量於短時間釋放後接續一個較緩和的能量釋放, 總破裂時間同樣約 30 秒, 釋放能量之總地震矩略大, 為 0.528×10^{18} Nm, 相當於 Mw 5.75。此斷層面之合成波與觀測波形比較見圖七。與前一斷層面之結果相比略差, 但大致上合成波對於主要能量的震幅與波形都有所擬合, 波形擬合誤差為 0.392。

由於鳳林地震的規模 $M_L 5.9$ 屬於中型地震, 斷層破裂的範圍相對較小, 加上遠震波形資料並無法提供足夠解析度來分析詳細的錯動時間-空間分布, 因此破裂傳播的時間過程在此不加以探討。

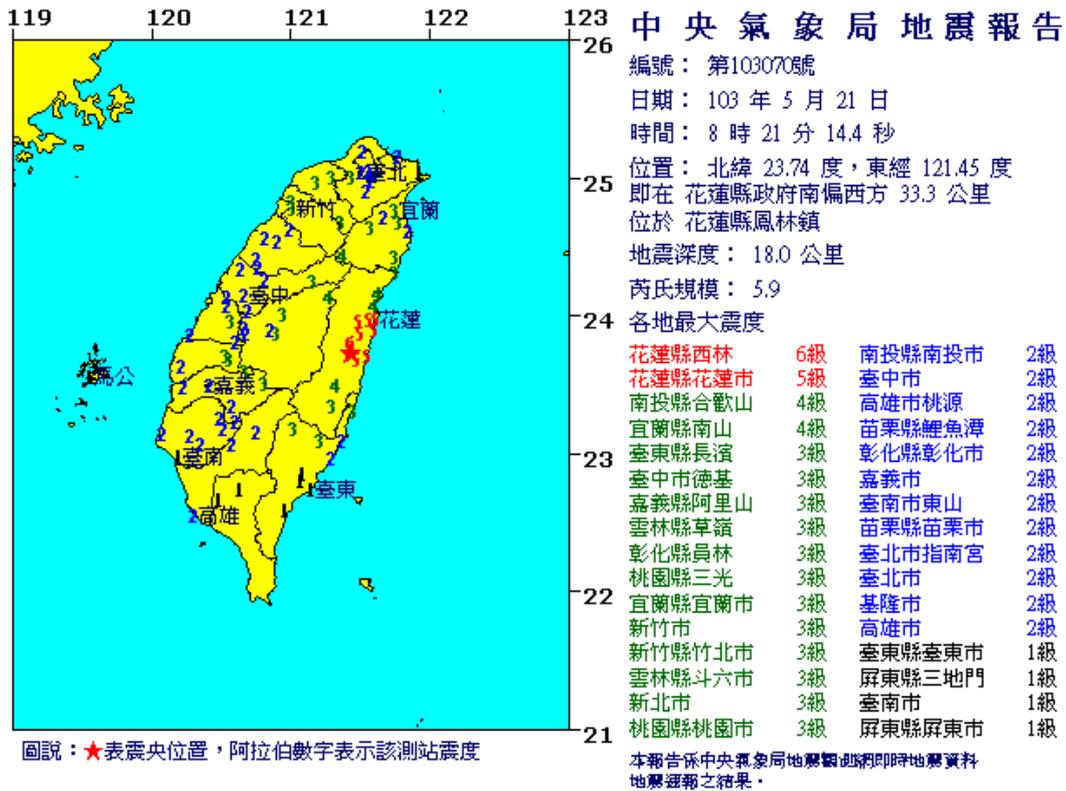
五、小 結

由震源逆推結果顯示, 此次鳳林地震的規模僅 Mw5.9, 具相對單純的破裂過程可以預期。然而由於遠震波形逆推的解析能力有限, 其結果並無法判定兩個斷層面何者具有較顯著的可能性。兩個斷層面上的錯動都發生在震源附近 10-25 公里深的區域, 兩者均有一個主要的錯動區, 在震源上方為逆衝滑移, 而震源下方則以走向分量為主。斷層面 strike 208° , dip 60° 於斷層淺部亦有錯動量出現, 經推測並沒有破裂到地表。儘管遠震波形震源逆推結果無法進一步幫助推斷可能的斷層面, 但由於鳳林地震與去年的瑞穗地震之震源機制解相當, 且地震發生的時間、位置也相當接近, 由此研

判鳳林地震應該是屬於瑞穗地震之餘震，發生在朝西下傾的中央山脈斷層上。進一步透過該區背景地震的分析以及野外調查將有助於對震源區的地震與構造背景有更詳細的解釋。

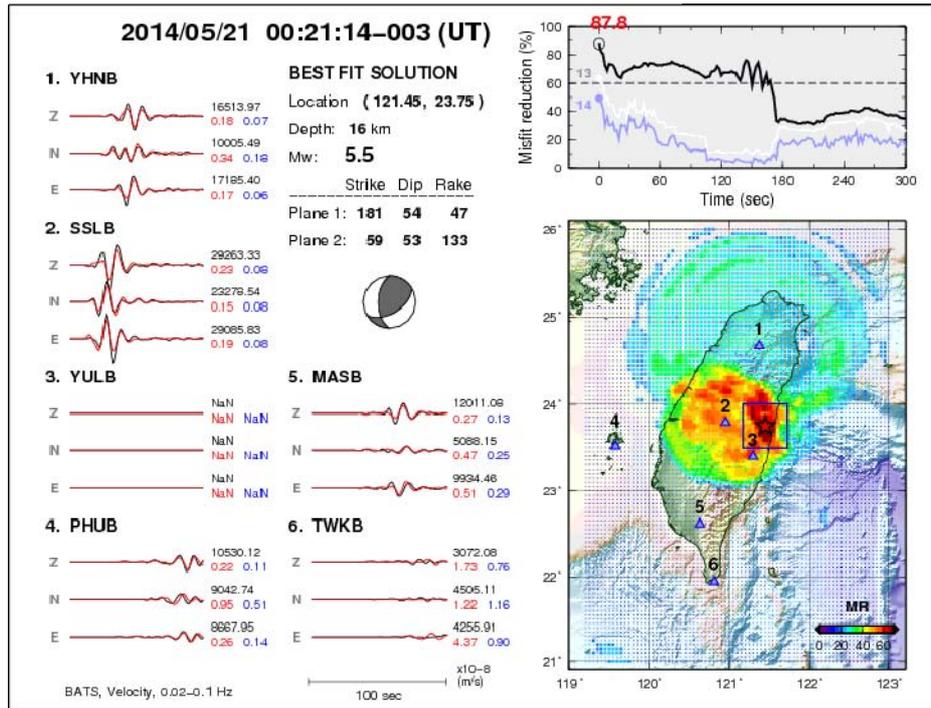
參考文獻

- Kikuchi, M., and H. Kanamori, 1982. Inversion of complex body waves. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 72, 491 – 506.
- Lee, S. J., B. S. Huang, M. Ando, H. C. Chiu, and J. H. Wang, 2011. Evidence of large scale repeating slip during the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L19306, doi:10.1029/2011GL049580.
- Lee, S. J., W. T. Liang, L. Mozziconacci, Y. J. Hsu, W. G. Huang and B. S. Huang, 2013. Source complexity of the 4 March 2010 Jiashian, Taiwan Earthquake determined by joint inversion of teleseismic and near field data. *Journal of Asian Earth Sciences*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jseas.2012.11.018>.
- Lee, S. J., H. H. Huang, J. Bruce H. Shyu, T. C. Lin and T. Y. Yeh, 2014. Numerical earthquake model of the 31 October 2013 Ruisui, Taiwan, Earthquake: Source rupture process and seismic wave propagation. *Journal of Asian Earth Sciences*, 96, 374-385.



圖一、2014年5月21日，鳳林地震中央氣象局地震報告。

(a)

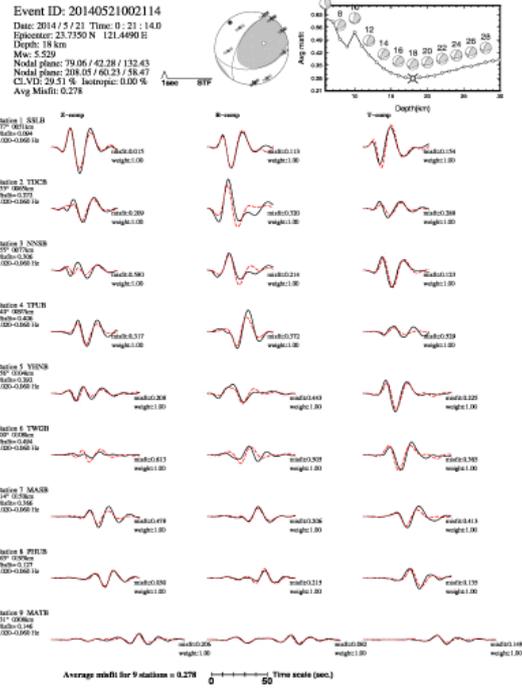
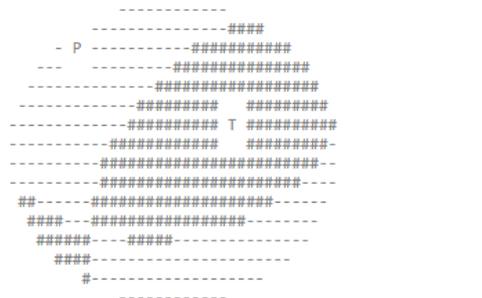


(b)

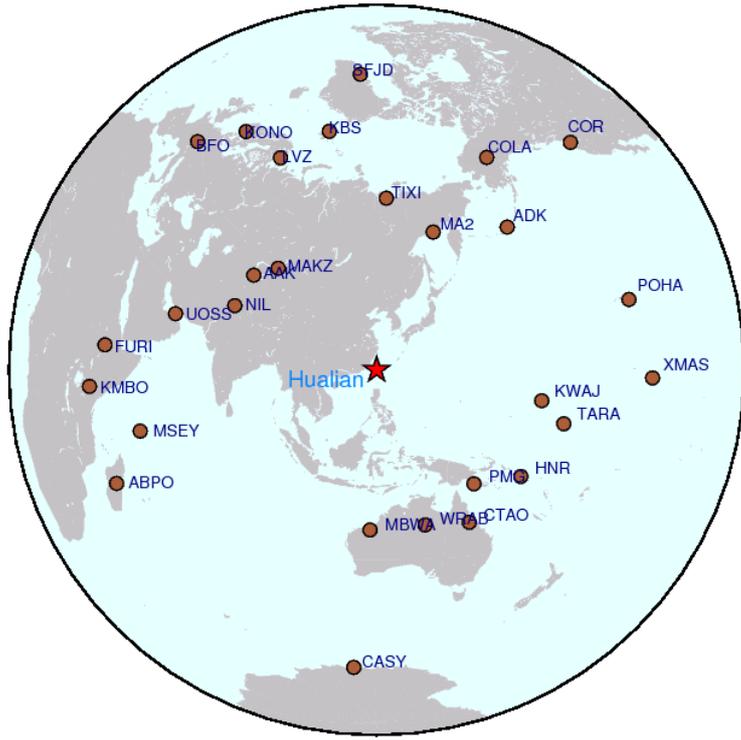
CWB Early Automatic Report (EAR) :
 Origin Time : 2014 5 21 0:21:14.00 (UT)
 Hypocenter : 23.74 N 121.45 E 18.01 km
 ML : 5.92

CWBSN_BB moment-tensor solution :
 -13.4416780 11.2295437 2.2866533
 11.2295437 -5.1080537 13.8602686 x 1E+16 Nt-m
 2.2866533 13.8602686 18.5497322
 Centroid depth : 18 km
 Mw : 5.53
 Azgap : 204.56
 Average MISFIT : 0.278 (The fit is excellen)

Best double couple solutions :
 nodal plane(1) strike/dip/slip: 79.06/42.28/ 132.43
 nodal plane(2) strike/dip/slip: 208.05/60.23/ 58.47



圖二、2014年5月21日，鳳林地震震源機制解：(a) RMT CMT solution; (b) CWB CMT solution。

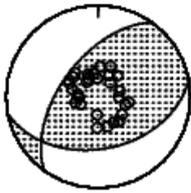


圖三、遠震波形逆推之測站分布圖。

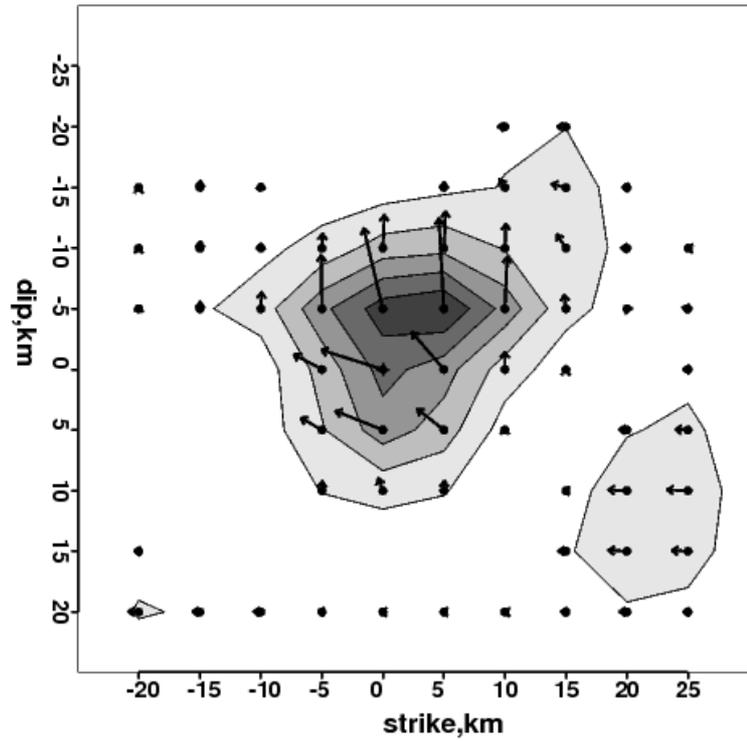
1405210021 Hualian

$M_0 = 0.401E+18 \text{ Nm}$ $M_w = 5.67$

$H = 18.0\text{km}$ $T = \text{s}$ $\text{var.} = 0.3874$



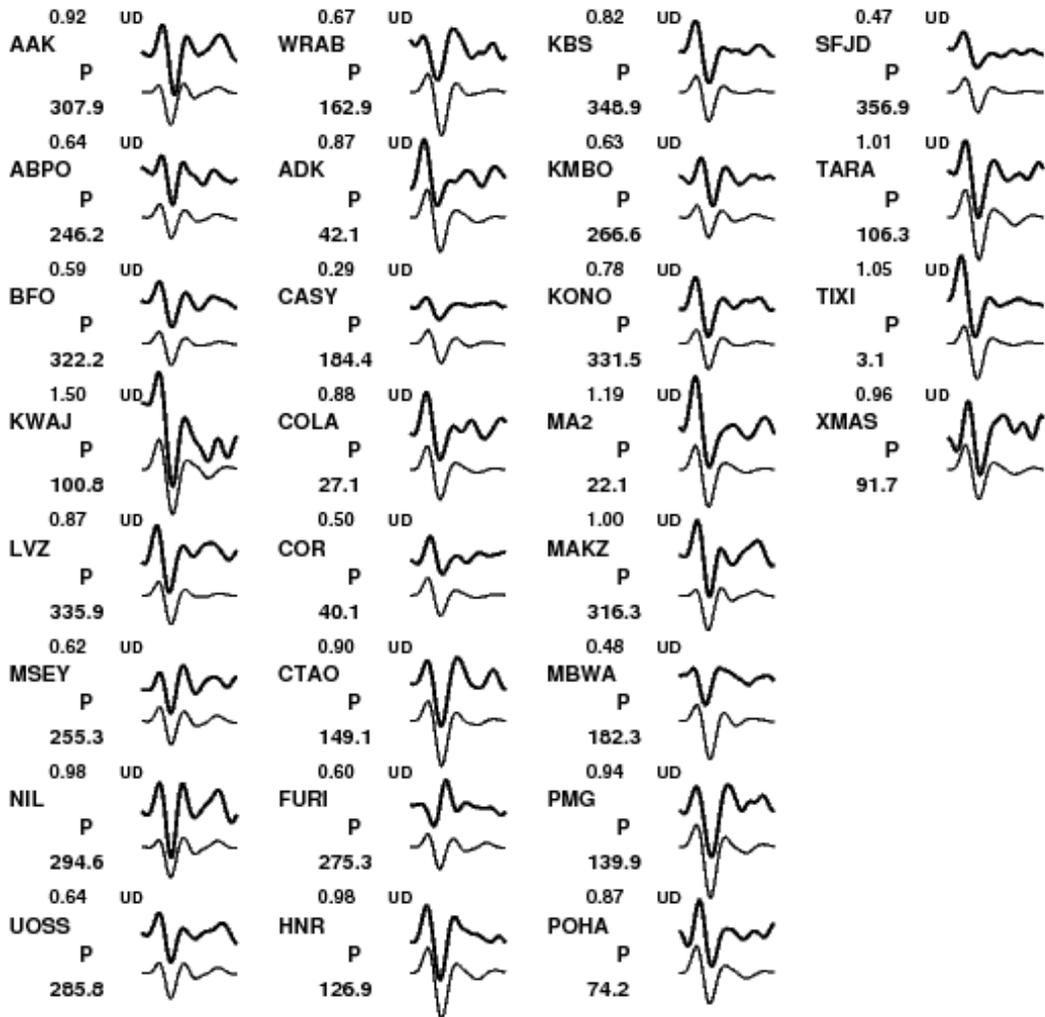
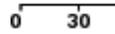
(79.,42., 125.)



圖四、斷層面 strike 79°, dip 42°, 之逆推結果：(a) 震源時間函數 (b) 平均震源機制 (c) 錯動量分布。

1405210021 Hualian

0.3874

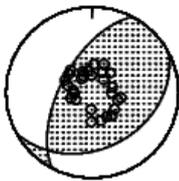
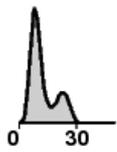


圖五、斷層面 strike 79°, dip 42°, 之遠震波形擬合情形。上方粗黑線為觀測波形；
下方細黑線為合成波形。

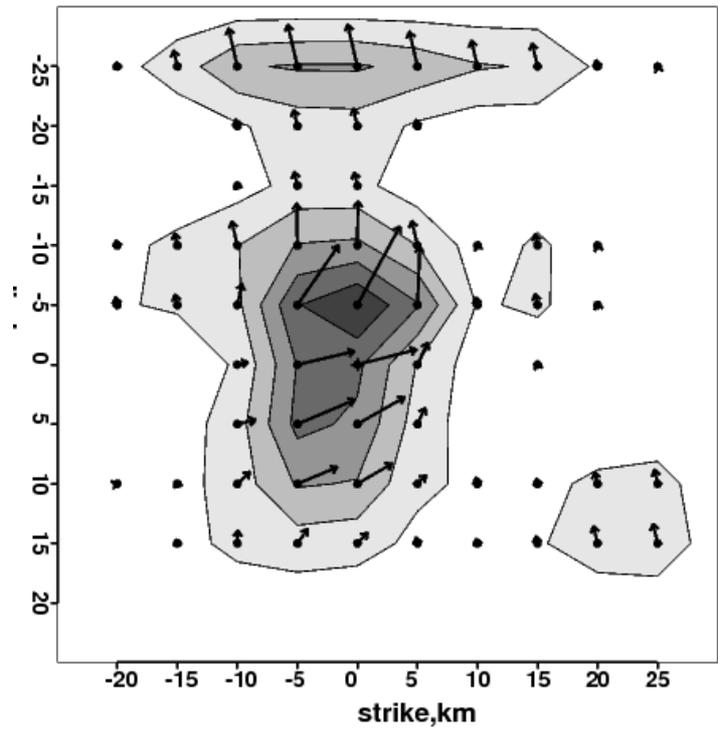
1405210021 Hualian

$M_0 = 0.528E+18 \text{ Nm}$ $M_w = 5.75$

$H = 18.0\text{km}$ $T = \text{s}$ $\text{var.} = 0.3926$



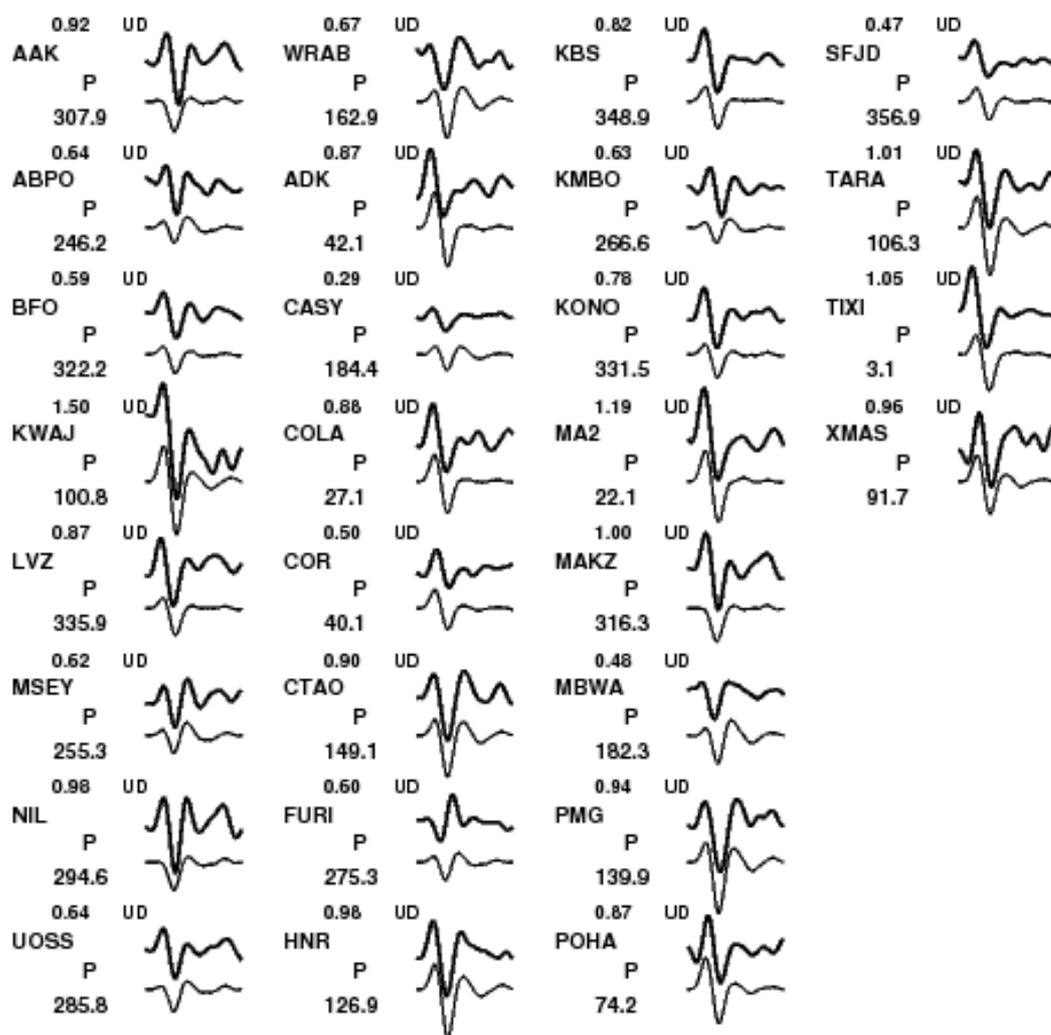
(208.,60., 71.)



圖六、斷層面 strike 208°, dip 60°, 之逆推結果：(a) 震源時間函數； (b) 平均震源機制； (c) 錯動量分布。

1405210021 Hualian

0.3926



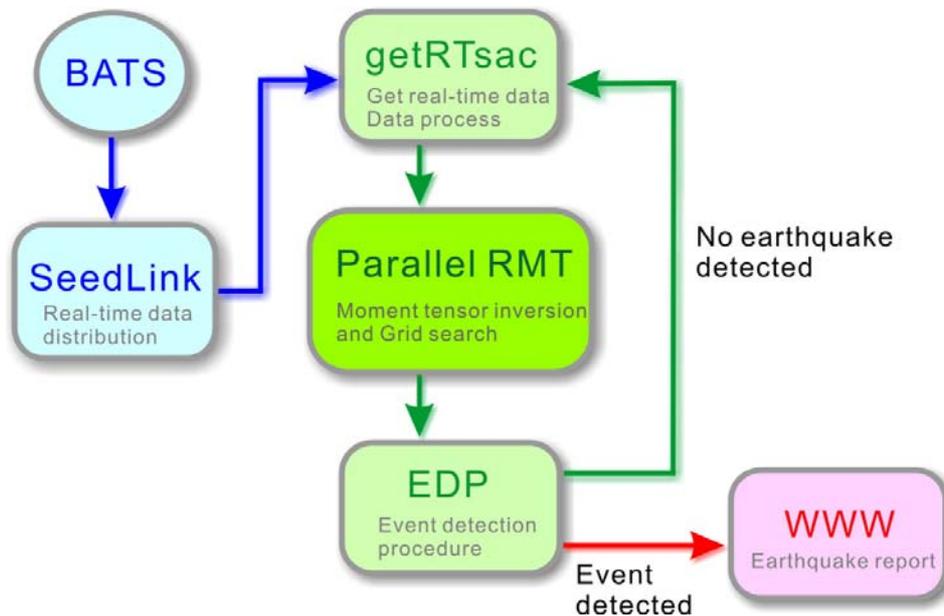
圖七、斷層面 strike 208°, dip 60°, 之遠震波形擬合情形。上方粗黑線為觀測波形；
下方細黑線為合成波形。

即時地震矩張量監測系統(RMT)

2014年年度例行報告

簡介

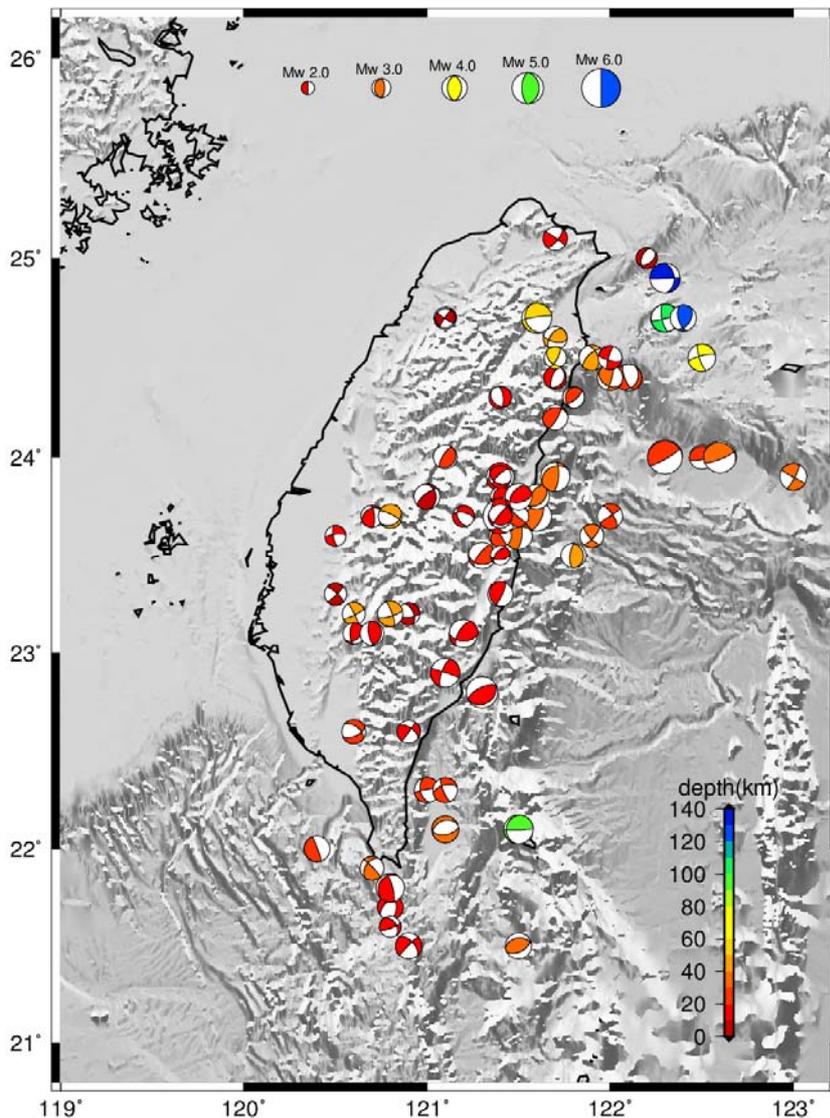
即時地震矩張量監測系統(Real-time moment tensor monitoring system, RMT)結合了中心矩張量(Centroid moment tensor, CMT)、隔點搜尋演算法(grid-based search algorithm)以及寬頻地震網(BATS)訊號，即時且自動地進行台灣地區的地震活動監測。本系統利用格點(0.1°X 0.1°X 10km)搜尋法，在東經119.3度至123.0度、北緯21.0度至26.0度與深度6公里至136公里範圍內，透過一維格林函數演算合成波形(0.02 Hz - 0.1 Hz)，並將演算結果與寬頻地震儀接收的訊號進行全波形逆推擬合，以每兩秒的時間間隔即時並連續地偵測地震訊號。若波形擬合度超過既定之經驗門檻(MR>60)，表示監測區域可能有地震發生，系統可於地震發生之後兩分鐘以內同時提供該地震的發震時間、水平座標、震源深度、地震矩規模以及震源機制等資訊。系統運作流程如圖一，RMT線上實際運作情形(<http://rmt.earth.sinica.edu.tw/>)。經比較2010至2012年的氣象局地震目錄與RMT系統的計算結果可以發現，兩者的平均發震時間差距小於2秒，平均震源距小於10公里，大部分的震源機制解也與CWB CMT計算結果相近。



圖一，RMT 系統之運作流程

監測結果

本系統本年度(2014年)至11月初為止共偵測得101個地震事件(表一)，最小地震矩規模(M_w)為2.9，氣象局芮氏規模(M_L)3.2，最大地震矩規模為5.5，氣象局芮氏規模5.9，震央及深度分佈如圖二，其中約56%(57/101)為編號地震，33%為小區域型地震，另有10%(11/101)為氣象局無記錄之地震，編號地震偵測率約為44%(57/129)，其中芮氏地震規模4.0以上偵測率約為61%(42/69)。由震源機制的分布圖看來，陸上部分仍以70公里以內之淺層逆衝型地震為主，伴隨少數走向滑移地震，且多數分布於0-30公里深度範圍；震源深度向東北方向遞增，70公里以上較深部之中層地震主要發生於東北外海。整體而言，震央的分佈情形較集中於本島東部並有分別向東北外海及東南外海延伸的趨勢，反映出菲律賓海板塊的輪廓與琉球島弧的隱沒作用。



圖二，2014年RMT系統所測得之震央分佈圖

表一、2014 年 RMT 地震監測結果列表

| No. | Date (yyyy/mm/dd) | Time (hh:min:ss) | Long. (°E) | Lat. (°N) | Depth (km) | Strike (°) | Dip(°) | Rake(°) | Mw | MR (percent) |
|-----|-------------------|------------------|------------|-----------|------------|------------|--------|---------|-----|--------------|
| 1 | 2014/11/01 | 05:44:48 | 121.4 | 23.7 | 16 | 91 | 45 | 150 | 3.7 | 69.6 |
| 2 | 2014/10/28 | 23:16:53 | 120.5 | 23.3 | 6 | 313 | 78 | -9 | 3.5 | 61.1 |
| 3 | 2014/10/26 | 04:47:02 | 122.3 | 24.7 | 76 | 91 | 33 | 147 | 4.5 | 75.9 |
| 4 | 2014/10/23 | 00:53:41 | 120.7 | 23.7 | 16 | 236 | 32 | 146 | 3.5 | 64.8 |
| 5 | 2014/10/07 | 18:08:11 | 121.6 | 23.7 | 36 | 22 | 63 | 77 | 4.7 | 78.9 |
| 6 | 2014/09/29 | 16:44:17 | 121.5 | 21.5 | 36 | 63 | 54 | 79 | 4.1 | 62.3 |
| 7 | 2014/09/29 | 11:16:28 | 121.7 | 24.4 | 16 | 40 | 25 | -72 | 3.5 | 64.0 |
| 8 | 2014/09/26 | 11:44:36 | 121.6 | 23.8 | 36 | 47 | 40 | 106 | 4.0 | 69.4 |
| 9 | 2014/09/25 | 21:49:51 | 121.7 | 24.6 | 46 | 214 | 55 | 36 | 3.7 | 77.7 |
| 10 | 2014/09/25 | 10:35:03 | 121.3 | 22.8 | 16 | 61 | 26 | 88 | 4.9 | 70.9 |
| 11 | 2014/09/24 | 01:01:15 | 121.8 | 24.3 | 6 | 166 | 65 | -56 | 3.4 | 65.0 |
| 12 | 2014/09/20 | 21:14:04 | 121.5 | 23.6 | 36 | 6 | 70 | 57 | 4.3 | 67.7 |
| 13 | 2014/09/10 | 20:54:04 | 123.0 | 23.9 | 36 | 119 | 88 | 10 | 4.2 | 61.0 |
| 14 | 2014/09/10 | 05:12:31 | 122.1 | 24.4 | 26 | 28 | 32 | -44 | 4.2 | 67.7 |
| 15 | 2014/09/05 | 15:18:35 | 122.0 | 23.7 | 26 | 326 | 71 | 2 | 4.0 | 61.0 |
| 16 | 2014/09/04 | 10:15:35 | 120.6 | 23.2 | 46 | 333 | 86 | -10 | 3.6 | 56.8 |
| 17 | 2014/09/04 | 01:22:40 | 121.4 | 23.6 | 26 | 121 | 49 | 148 | 3.3 | 72.0 |
| 18 | 2014/08/30 | 07:44:30 | 121.4 | 23.3 | 16 | 16 | 63 | 76 | 3.3 | 73.7 |
| 19 | 2014/08/27 | 00:21:22 | 120.9 | 23.2 | 6 | 12 | 46 | -15 | 3.0 | 63.1 |
| 20 | 2014/08/26 | 11:40:08 | 121.1 | 22.3 | 36 | 126 | 85 | 15 | 3.6 | 63.7 |
| 21 | 2014/08/25 | 16:53:52 | 121.4 | 23.6 | 26 | 225 | 27 | 168 | 3.5 | 76.1 |
| 22 | 2014/08/15 | 02:03:24 | 120.8 | 21.7 | 16 | 229 | 51 | -54 | 4.0 | 61.9 |
| 23 | 2014/08/14 | 23:49:26 | 120.8 | 21.8 | 16 | 349 | 72 | 75 | 3.4 | 71.9 |
| 24 | 2014/08/14 | 20:23:01 | 120.8 | 21.8 | 16 | 215 | 20 | 138 | 4.5 | 67.4 |
| 25 | 2014/08/11 | 18:35:55 | 120.9 | 23.2 | 6 | 5 | 53 | -6 | 3.1 | 61.6 |
| 26 | 2014/08/06 | 03:46:05 | 121.5 | 22.1 | 96 | 189 | 19 | 12 | 4.6 | 71.4 |
| 27 | 2014/07/28 | 10:14:03 | 121.0 | 22.3 | 26 | 165 | 48 | -7 | 4.0 | 69.9 |
| 28 | 2014/07/02 | 02:52:11 | 121.9 | 24.5 | 16 | 112 | 56 | -29 | 3.4 | 67.6 |
| 29 | 2014/07/01 | 23:21:31 | 122.0 | 24.4 | 36 | 20 | 78 | 120 | 3.9 | 76.1 |
| 30 | 2014/07/01 | 23:02:06 | 122.0 | 24.4 | 36 | 121 | 36 | 19 | 4.0 | 70.6 |
| 31 | 2014/06/28 | 18:17:22 | 121.8 | 24.3 | 26 | 51 | 70 | 109 | 3.4 | 70.1 |
| 32 | 2014/06/26 | 02:05:53 | 121.2 | 23.7 | 16 | 157 | 45 | -45 | 3.4 | 69.5 |
| 33 | 2014/06/25 | 17:06:52 | 120.8 | 23.7 | 46 | 297 | 74 | -67 | 3.8 | 67.0 |
| 34 | 2014/06/25 | 09:31:58 | 121.0 | 23.8 | 36 | 190 | 60 | 85 | 3.5 | 74.9 |
| 35 | 2014/06/24 | 17:34:32 | 121.4 | 23.3 | 16 | 17 | 77 | 89 | 3.3 | 72.5 |

| | | | | | | | | | | |
|----|------------|----------|-------|------|-----|-----|----|-----|-----|------|
| 36 | 2014/06/22 | 12:27:45 | 121.5 | 23.8 | 26 | 213 | 44 | 13 | 3.8 | 72.7 |
| 37 | 2014/06/22 | 12:26:15 | 122.3 | 24.7 | 106 | 168 | 71 | 4 | 4.4 | 83.2 |
| 38 | 2014/06/21 | 02:21:09 | 121.8 | 23.5 | 46 | 346 | 24 | 71 | 4.0 | 71.9 |
| 39 | 2014/06/19 | 17:46:33 | 120.9 | 23.2 | 6 | 337 | 55 | -33 | 3.5 | 67.1 |
| 40 | 2014/06/17 | 21:13:13 | 121.4 | 23.9 | 16 | 136 | 45 | -33 | 3.2 | 62.5 |
| 41 | 2014/06/17 | 19:49:14 | 121.9 | 24.5 | 46 | 341 | 49 | 36 | 4.0 | 78.7 |
| 42 | 2014/06/14 | 22:22:44 | 121.4 | 23.9 | 16 | 129 | 58 | -45 | 4.4 | 67.4 |
| 43 | 2014/06/11 | 08:20:58 | 120.4 | 22.0 | 26 | 163 | 3 | 93 | 4.1 | 64.2 |
| 44 | 2014/06/09 | 11:33:04 | 121.1 | 22.1 | 36 | 81 | 57 | -84 | 4.2 | 66.3 |
| 45 | 2014/06/06 | 09:00:42 | 122.5 | 24.0 | 26 | 261 | 16 | 96 | 3.9 | 64.6 |
| 46 | 2014/06/06 | 07:36:47 | 121.4 | 23.7 | 26 | 95 | 40 | 132 | 3.6 | 77.4 |
| 47 | 2014/06/02 | 16:25:48 | 120.8 | 21.6 | 16 | 68 | 79 | 47 | 3.4 | 65.3 |
| 48 | 2014/06/02 | 16:00:03 | 120.9 | 21.5 | 16 | 224 | 86 | -35 | 4.1 | 69.7 |
| 49 | 2014/06/01 | 14:05:53 | 121.1 | 24.7 | 6 | 23 | 85 | -23 | 2.9 | 70.4 |
| 50 | 2014/05/31 | 02:51:53 | 121.1 | 24.7 | 6 | 98 | 38 | 154 | 3.5 | 81.1 |
| 51 | 2014/05/28 | 11:20:51 | 121.2 | 23.1 | 16 | 62 | 50 | 97 | 3.2 | 67.7 |
| 52 | 2014/05/28 | 10:59:26 | 121.2 | 23.1 | 16 | 69 | 44 | 105 | 3.5 | 77.4 |
| 53 | 2014/05/25 | 12:41:14 | 121.2 | 23.1 | 16 | 91 | 47 | 140 | 4.5 | 74.6 |
| 54 | 2014/05/21 | 07:39:48 | 121.4 | 23.8 | 16 | 189 | 33 | 25 | 3.1 | 60.1 |
| 55 | 2014/05/21 | 00:21:14 | 121.4 | 23.7 | 16 | 161 | 54 | 47 | 5.5 | 87.8 |
| 56 | 2014/05/18 | 10:20:43 | 121.7 | 24.5 | 56 | 135 | 45 | 22 | 3.5 | 67.8 |
| 57 | 2014/05/05 | 08:28:01 | 122.6 | 24.0 | 36 | 75 | 80 | 83 | 4.4 | 60.4 |
| 58 | 2014/05/04 | 12:43:36 | 121.7 | 23.9 | 36 | 5 | 71 | 65 | 4.6 | 81.8 |
| 59 | 2014/05/03 | 22:56:18 | 122.2 | 25.0 | 6 | 53 | 45 | -65 | 3.3 | 65.8 |
| 60 | 2014/05/03 | 16:03:15 | 121.7 | 24.2 | 26 | 29 | 76 | 73 | 4.0 | 80.3 |
| 61 | 2014/05/02 | 04:34:25 | 120.6 | 23.1 | 16 | 53 | 41 | 135 | 3.4 | 61.9 |
| 62 | 2014/04/25 | 16:33:06 | 121.3 | 23.5 | 26 | 96 | 31 | 145 | 4.3 | 74.5 |
| 63 | 2014/04/24 | 21:59:16 | 120.7 | 21.9 | 36 | 216 | 43 | 168 | 3.7 | 64.5 |
| 64 | 2014/04/16 | 15:34:27 | 122.0 | 24.5 | 16 | 103 | 72 | -12 | 3.7 | 70.1 |
| 65 | 2014/04/12 | 20:05:19 | 121.5 | 23.7 | 26 | 132 | 86 | -72 | 3.3 | 72.5 |
| 66 | 2014/04/12 | 00:11:04 | 121.4 | 23.3 | 16 | 221 | 89 | -82 | 3.4 | 91.2 |
| 67 | 2014/04/08 | 17:33:24 | 121.9 | 23.6 | 36 | 137 | 73 | 16 | 3.7 | 70.2 |
| 68 | 2014/04/01 | 00:11:23 | 121.1 | 24.0 | 26 | 41 | 18 | 99 | 3.7 | 68.8 |
| 69 | 2014/03/29 | 13:44:25 | 121.4 | 24.3 | 16 | 349 | 66 | -62 | 3.4 | 71.4 |
| 70 | 2014/03/29 | 12:38:32 | 121.4 | 24.3 | 16 | 354 | 68 | -71 | 3.5 | 67.0 |
| 71 | 2014/03/27 | 03:04:26 | 121.4 | 23.3 | 16 | 80 | 4 | -49 | 3.2 | 91.7 |
| 72 | 2014/03/26 | 20:45:54 | 121.4 | 23.3 | 16 | 25 | 84 | 85 | 3.4 | 90.1 |
| 73 | 2014/03/26 | 20:44:31 | 121.4 | 23.3 | 16 | 19 | 75 | 78 | 3.6 | 80.9 |

| | | | | | | | | | | |
|-----|------------|----------|-------|------|-----|-----|----|-----|-----|---------|
| 74 | 2014/03/26 | 16:12:07 | 121.4 | 23.3 | 16 | 16 | 68 | 77 | 3.4 | 88.4 |
| 75 | 2014/03/26 | 12:23:57 | 121.4 | 23.3 | 16 | 17 | 68 | 74 | 3.6 | 90.4 |
| 76 | 2014/03/26 | 09:43:21 | 121.4 | 23.3 | 16 | 23 | 76 | 79 | 3.4 | 69.8 |
| 77 | 2014/03/19 | 12:19:27 | 122.3 | 24.0 | 26 | 60 | 81 | 85 | 5.5 | 62.7 |
| 78 | 2014/03/17 | 13:12:57 | 122.6 | 24.0 | 36 | 290 | 14 | 131 | 5.1 | 63.0 78 |
| 79 | 2014/03/14 | 08:14:14 | 121.1 | 22.3 | 26 | 157 | 77 | -35 | 3.9 | 66.5 |
| 80 | 2014/03/12 | 13:16:06 | 121.4 | 23.5 | 16 | 85 | 49 | 126 | 3.1 | 77.4 |
| 81 | 2014/03/08 | 12:06:29 | 120.9 | 22.6 | 16 | 36 | 87 | 29 | 3.6 | 68.6 |
| 82 | 2014/03/04 | 16:02:41 | 120.8 | 23.2 | 46 | 340 | 78 | -16 | 4.0 | 72.6 |
| 83 | 2014/02/21 | 20:25:17 | 121.6 | 24.7 | 56 | 159 | 25 | -14 | 4.7 | 86.8 |
| 84 | 2014/02/16 | 22:28:54 | 120.5 | 23.6 | 16 | 169 | 73 | -15 | 3.3 | 56.4 |
| 85 | 2014/02/15 | 16:14:19 | 120.7 | 23.1 | 16 | 169 | 67 | 79 | 3.8 | 80.7 |
| 86 | 2014/02/14 | 23:31:42 | 120.6 | 22.6 | 26 | 307 | 52 | -43 | 3.8 | 71.1 |
| 87 | 2014/02/11 | 16:31:02 | 121.7 | 25.1 | 16 | 38 | 70 | 4 | 3.8 | 77.5 |
| 88 | 2014/02/07 | 17:39:31 | 121.1 | 24.7 | 6 | 124 | 84 | 176 | 3.0 | 67.5 |
| 89 | 2014/01/29 | 02:26:54 | 121.4 | 23.3 | 16 | 36 | 58 | 97 | 3.2 | 60.4 |
| 90 | 2014/01/29 | 02:14:51 | 121.4 | 23.3 | 16 | 25 | 77 | 103 | 4.0 | 87.6 |
| 91 | 2014/01/25 | 03:16:11 | 121.5 | 23.8 | 16 | 81 | 53 | 123 | 4.2 | 77.5 |
| 92 | 2014/01/24 | 01:43:19 | 121.4 | 23.9 | 16 | 112 | 37 | -29 | 3.5 | 71.2 |
| 93 | 2014/01/23 | 22:51:39 | 122.5 | 24.5 | 66 | 162 | 77 | -14 | 4.3 | 60.0 |
| 94 | 2014/01/23 | 12:41:54 | 121.4 | 23.7 | 16 | 83 | 49 | 133 | 3.7 | 72.9 |
| 95 | 2014/01/22 | 16:28:39 | 121.4 | 23.7 | 16 | 102 | 27 | 152 | 3.7 | 61.4 |
| 96 | 2014/01/16 | 20:40:36 | 122.4 | 24.7 | 126 | 32 | 43 | 129 | 4.1 | 60.2 |
| 97 | 2014/01/14 | 23:06:43 | 121.1 | 22.9 | 16 | 110 | 83 | 155 | 4.0 | 67.7 |
| 98 | 2014/01/14 | 19:50:05 | 121.1 | 22.9 | 16 | 108 | 82 | 170 | 4.4 | 66.0 |
| 99 | 2014/01/14 | 18:38:13 | 121.1 | 22.9 | 16 | 199 | 70 | -1 | 4.6 | 67.1 |
| 100 | 2014/01/14 | 16:44:27 | 121.0 | 23.8 | 6 | 352 | 31 | 36 | 4.1 | 82.2 |
| 101 | 2014/01/06 | 18:50:05 | 122.3 | 24.9 | 136 | 356 | 39 | 178 | 4.7 | 73.4 |

參考文獻

- Lee, S. J., W. T. Liang, H. W. Cheng, F. S. Tu, K. F. Ma, H. Tsuruoka, H. Kawakatsu, B. S. Huang and C. C. Liu, 2013. Toward real-time regional earthquake simulation I: Real-time Moment Tensor monitoring (RMT) for regional events in Taiwan, *Geophys. J. Int.*, doi: 10.1093/gji/ggt371.

交通部中央氣象局
委託研究計畫(期末)成果報告

震源區域地質與孕震構造之分析

計畫類別：氣象 海象 地震

計畫編號：MOTC-CWB-103-E-06

執行期間：103 年 1 月 1 日至 103 年 12 月 31 日

計畫主持人：張中白

執行機構：國立中央大學-太空遙測研究中心

本成果報告包括以下應繳交之附件(或附錄)：

- 赴國外出差或研習心得報告 1 份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告 1 份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各 1 份

中華民國 103 年 11 月 12 日

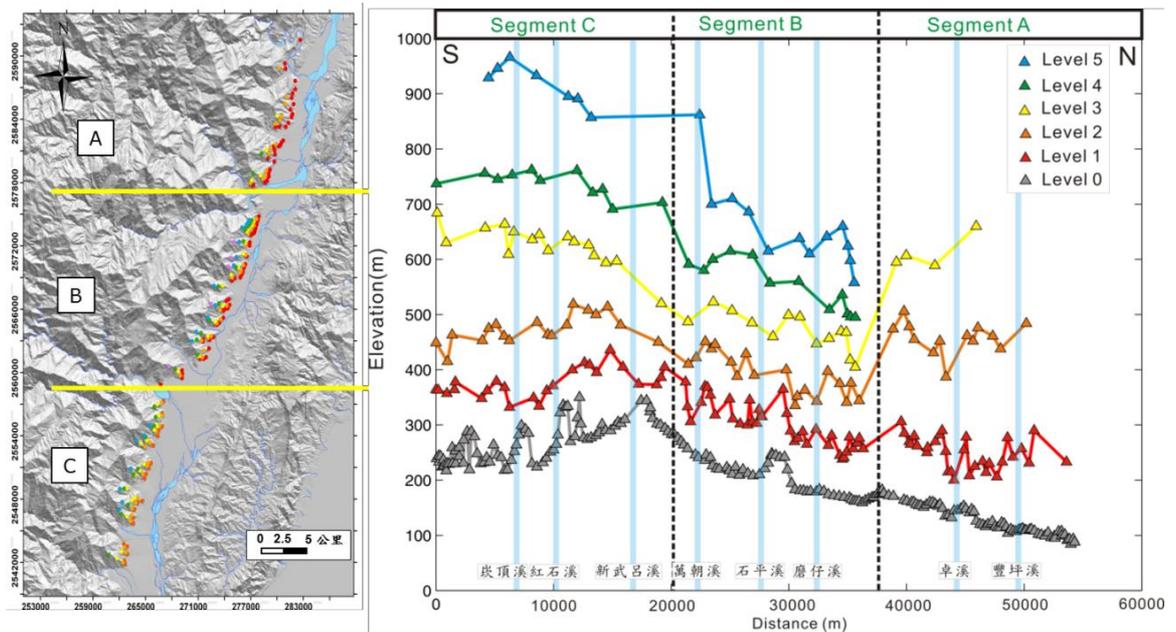
政府研究計畫期末報告摘要資料表

| | | | |
|-----------------|---|---------|--------------------------------|
| 計畫中文名稱 | 震源區域地質與孕震構造之分析 | | |
| 計畫編號 | MOTC-CWB-103-E-06 | | |
| 主管機關 | 交通部中央氣象局 | | |
| 執行機構 | 國立中央大學-太空及遙測研究中心 | | |
| 年度 | 103 年度 | 執行期間 | 103 年 1 月 1 日至 103 年 12 月 31 日 |
| 本期經費 (單位：千元) | 316.249 千元 | | |
| 執行進度 | 預定 (%) | 實際 (%) | 比較 (%) |
| | 100% | 100% | 100% |
| 經費支用 | 預定(千元) | 實際(千元) | 支用率 (%) |
| | 316.249 | 316.249 | 100% |
| 研究人員 | 計畫主持人 | 協同主持人 | 研究助理 |
| | 張中白 | | 徐乙君 |
| | | | |
| 報告頁數 | 50 頁 | 使用語言 | 中文 |
| 中英文關鍵詞 | 中文：瑞穗地震、三角崖切面、中央山脈斷層、構造翻轉 英文：Ruisui earthquake, triangular facets analyses, Central Range Fault, structural roll back. | | |
| 研究目的 | <p>台灣的地體構造位於菲律賓海板塊和歐亞板塊聚合的構造活動帶上，根據 GPS 的測量結果，菲律賓海板塊以 82mm/yr 左右的速度推擠歐亞板塊。台灣的造山運動大約在 5 百萬年前展開，逐漸加速並且向南傳遞，因台灣島的造山活動持續進行，使得台灣島地殼變動劇烈，活動斷層遍布且地震活動頻繁，平均每年大小地震超過 4 千個，其中有感地震可達 2 百餘個。</p> <p>發生於東部海域之地震主要屬於板塊隱沒作用所致，且因為震央通常位於外海，對民眾造成傷害較小；花東縱谷以及西部麓山帶內發生之地震皆為斷層引起的，通常屬淺源地震，會伴隨著地表變形及地表破裂，災情較為嚴重。</p> <p>斷層活動是台灣島造山過程中必然的現象，但斷層活動亦會伴隨著許多災害，因此瞭解活動斷層有助於地震防災和減災。</p> <p>本研究依據是否發生伴隨地表變形之地震分兩種狀況，當未發生地震時，將會選取高潛感之活動斷層，彙整活動斷層相關文獻資料及背景資料，利用航空照片、衛星影像及數值模型(DEM)進行構造判釋及分析，並進行野外調查工作。當發生地震後，</p> | | |

將先利用衛星影像進行分析作業，再至震央鄰近區域進行野外調查及彙整地質資料，於調查結束後進行震源區域孕震構造之分析，並將此分析及調查結果匯整成完整報告，可供其它子計畫參照使用。

研究成果

2013年10月31日，於花蓮縣瑞穗鄉發生芮氏規模6.4的地震，震源深度達19.5公里，野外調查並無發現地表破裂。震央鄰近中央山脈斷層，本研究將研究主軸放置在中央山脈活動性之調查。本團隊進行地震活動性調查，地表地形分析，河流地形分析，以及地質調查工作，研究中央山脈斷層的活動特性。透過地表地形分析，觀測到中央山脈東緣與縱谷交界有許多正斷層的地形特徵，三角崖切面，且透過不同階段的三角崖切面可以得知中央山脈東緣有持續抬升之現象，且以新武呂溪口南側的抬升速率最快。利用河流地形分析推得豐坪溪與樂樂溪區域有相對較高的抬升速率，可能與玉里斷層的活動有關。透過地質調查可證實中央山脈東翼有正斷層證據及發達的伸張節理，可反映地表正斷層的活動特性，此外，透過早期形成的褶皺和劈理位態分布，可推論其於出露地表後，隨著斷層發育有翻轉的現象。綜合地形資料及地質調查結果並配合餘震分布位置，可推論中央山脈斷層在深部為逆斷層系統，並於近地表反轉成正斷層系統。



圖說：中央山脈東緣沿線的三角崖切面的位置分布及高度變化趨勢。Level1~5分別代表五期的三角崖切面頂點高度變化，Level 0為坡腳的高度變化。中央山脈東緣的抬升速率變化於A段有往南遞減之趨勢，B、C段的抬升速率則是有往南增加的趨勢。B區塊各期的三角崖切面高度差變化皆為100公尺，顯示此區段的抬升活動有穩定性的變化，A段及C段則有早期抬升速率較快的現象，在新武呂溪南側有明顯的較高抬升量。

| | |
|----------------------|---|
| | <p>圖說：中央山脈斷層翻轉模型。根據野外所觀察的褶皺伸向向西，以及軸面劈理向東傾斜的現象，綜合地表觀察到的正斷層及由地震資料推得的深部存在一向西傾斜的逆斷層現象，推論此現象應為中央山脈斷層於近地表翻轉(rollback)之結果。</p> |
| <p>具體落實 應用情形</p> | <ol style="list-style-type: none"> 1. 經由三角崖切面地形分析可觀察出中央山脈東緣的抬升速率變化有往南增加的趨勢，長良—池上段，各期的三角崖切面高度差一致，顯示此區段的抬升活動有穩定性的變化，瑞穗—玉里段及海端—關山段則有早期抬升速率較快的現象，抬升速率最快的地方位於新武呂溪口南側。 2. 透過河流地形分析得知豐坪溪和樂樂溪一帶的抬升速率較快，應與其前緣的玉里斷層活動有關。 3. 綜合三角崖切面及河流地形分析結果，皆可觀察豐坪溪以南之構造活動有一先向南遞減(至北新武呂溪)，再向南遞增的趨勢存在，顯示地形分析結果一致。 4. 透過地質調查結果顯示，於中央山脈東翼南段的河谷中，可找到正斷層的活動證據，並由 $118^{\circ}\sim 152^{\circ}$ 方向的伸張節理系統觀察此區存在東北-西南方向的拉張應力，可能和正斷層活動有關。 5. 針對緊密褶皺和劈理位態的相關研究，可推論於深部形成的褶皺和劈理在於出露地表，隨著斷層活動一起發生翻轉。 6. 根據瑞穗地震和台東地震的餘震資料，可得知於中央山脈東翼深部存在一向西傾斜的逆斷層系統，並於淺層約 5 公里處呈現鎖住的狀態，無地震活動。 7. 綜合以上資料可推得中央山脈斷層於深部為一向西傾斜的逆斷層系統，但於近地表 5 公里深處翻轉成正斷層系統，並於地表發育一系列和正斷層相關的地形及構造。 |
| <p>計畫變更 說明</p> | <p>無變更</p> |

| | |
|-------------------|-----|
| 落後原因 | 無落後 |
| 檢討與建議(變更或落後之因應對策) | 無 |

(以下接全文報告)

震源區域地質與孕震構造之分析

張中白

中央大學太空及遙測中心

徐魁江

中央氣象局地震測報中心

摘 要

台灣位處於非常活躍的造山帶，菲律賓海板塊每年以8.2公分的速度向歐亞板塊聚合，使得台灣島地殼變動劇烈，活動斷層遍佈且地震活動頻繁，過去幾年已發生許多災情慘重的大地震。為更了解台灣活動斷層之分布，以進行災後之規劃及降低未來地震發生的損傷，於大型地震發生後震央區域的地質調查工作實為重要。去年10月31日，於花蓮縣瑞穗鄉發生芮氏規模6.4的地震，震源深度達19.5公里，野外調查並無發現地表破裂。震央鄰近中央山脈斷層，本研究將研究主軸放置在中央山脈活動性之調查。本團隊進行地震活動性調查，地表地形分析，河流地形分析，以及地質調查工作，研究中央山脈斷層的活動特性。透過地表地形分析，觀測到中央山脈東緣與縱谷交界有許多正斷層的地形特徵，三角崖切面，且透過不同階段的三角崖切面可以得知中央山脈東緣有持續抬升之現象，且以新武呂溪口南側的抬升速率最快。利用河流地形分析推得豐坪溪與樂樂溪區域有相對較高的抬升速率，可能與玉里斷層的活動有關。透過地質調查可證實中央山脈東翼有正斷層證據及發達的伸張節理，可反映地表正斷層的活動特性，此外，透過早期形成的褶皺和劈理位態分布，可推論其於出露地表後，隨著斷層發育有翻轉的現象。綜合地形資料及地質調查結果並配合餘震分布位置，可推論中央山脈斷層在深部為逆斷層系統，並於近地表反轉成正斷層系統。

Abstract

Taiwan Island is located on an active orogenic belt where the Philippine Sea plate converges toward the Eurasian plate with a speed of 8.2 cm per year. This rapid convergence induced dramatic crustal deformation, very active faults and high seismic activity over the past few years in Taiwan, and brought many earthquake disasters. In order to better understand the distribution of active faults in Taiwan, to conduct post-seismic planning, and to reduce future earthquake damage, the geological survey of the near-epicenter area after the large earthquake is crucial. On 31th October of 2013, an earthquake with magnitude 6.4 occurred around the Ruisui Township, Hualien County in eastern Taiwan. We carried out geological surveys of the epicenter area after the main shock but no co-seismic surface rupture has been found.

Through the morphology analyses, we observe many triangular facets along the eastern flank of the Central Range. These triangular facets can be divided to 3~5 stages which represent different uplift events. A complete geomorphic analysis has been applied for the terrain from Mukua River to Tanan River to obtain the concavity index, steepness index and normalized steepness indices to check the relative uplift rate of different region. According to our field investigation, there are many normal faults in the near surface strata. Some of these reverse faults event roll back to form the normal faulting when extending close to the surface. Combining the morphologic analysis, field observation and the distribution of earthquakes, we conjecture the Ruisui Fault is reverse in depth and rollbacks to normal fault in shallow. It can also explain why the Central Range Fault is so unclear on the field.

壹、前言

台灣位處於非常活躍的造山帶，菲律賓海板塊每年以 82mm/yr 的速率向歐亞板塊聚合，使得台灣島地殼變動劇烈，因台灣島的造山活動持續進行，使得台灣島地殼變動劇烈，活動斷層遍布且地震活動頻繁，平均每年大小地震超過 4 千個，其中有感地震可達 2 百餘個。

台灣災害性地震肇因於斷層活動，斷層活動是台灣島造山過程中必然的現象，但斷層活動亦會伴隨著許多災害，因此瞭解活動斷層有助於地震防災和減災。

去年 10 月 31 日在霧台地區發生芮氏規模 6.4 的地震，其震源深度為 19.5 公里，全台都能感受到晃動，最大震度為 5 級，本團隊至震央鄰近區域進行地質調查。

貳、研究目的及意義

台灣的地體構造位於菲律賓海板塊和歐亞大陸板塊相互擠壓所造成的板塊碰撞活動帶上，根據GPS的測量結果，菲律賓海板塊以82mm/yr左右的速度推擠歐亞板塊。台灣的造山運動大約在5百萬年前展開，逐漸加速並且向南傳遞，因台灣島的造山活動持續進行，使得台灣島地殼變動劇烈，活動斷層遍布且地震活動頻繁，平均每年大小地震超過4千個，其中有感地震可達2百餘個。

如圖1所示，台灣的地震主要發生在東部海域、花東縱谷以及西部麓山帶變形前緣。發生於東部海域之地震主要屬於板塊隱沒作用所致，且因為震央通常位於外海，對民眾造成傷害較小；花東縱谷以及西部麓山帶內發生之地震皆為斷層引起的，通常屬淺源地震，會伴隨著地表變形及地表破裂，災情較為嚴重；根據中央氣象局資料統計，台灣自有儀器觀測以來的一百年間(1898-2005年)，災情最為慘重之十次災害地震如表1所示。

台灣災害性地震肇因於斷層活動，中央地質調查所於2010年公佈全台活斷層分布資料如圖2所示，共列出33條活動斷層，其中包括21條第一類活動斷層(全新世以來曾經發生錯移之斷層)，及12條第二類活動斷層(晚更新世以來曾經發生錯移之斷層)。

斷層活動是台灣島造山過程中必然的現象，但斷層活動亦會伴隨著許多災害，因此瞭解活動斷層有助於地震防災和減災。

表 1、台灣十大災害地震(資料統計時間：1898~2005 年，資料來源：中央氣象局)

| 時間 | 地震名稱 | 震央 | 規模 | 傷亡 |
|------------|-----------|---------|-----|------------------|
| 1904.11.06 | 斗六 | 嘉義附近 | 6.1 | 145 死 158 傷 |
| 1906.03.17 | 梅山 | 嘉義民雄 | 7.1 | 1,258 死 2,385 傷 |
| 1935.04.21 | 新竹—台中 | 竹縣關刀山附近 | 7.1 | 3,276 死 12,053 傷 |
| 1941.12.17 | 中埔 | 嘉義市東南 | 7.1 | 358 死 733 傷 |
| 1951.10.22 | 花東縱谷 | 花蓮東南東 | 7.3 | 68 死 856 傷 |
| 1959.08.15 | 恆春 | 恆春東南方 | 7.1 | 17 死 68 傷 |
| 1964.01.18 | 白河 | 台南東北東 | 6.3 | 106 死 650 傷 |
| 1964.12.05 | 新化 | 台南新化附近 | 6.1 | 74 死 482 傷 |
| 1986.11.15 | 花蓮 | 花蓮東偏南 | 6.8 | 13 死 45 傷 |
| 1999.09.21 | 集集 (南投) | 南投附近 | 7.3 | 2,418 死 11,569 傷 |

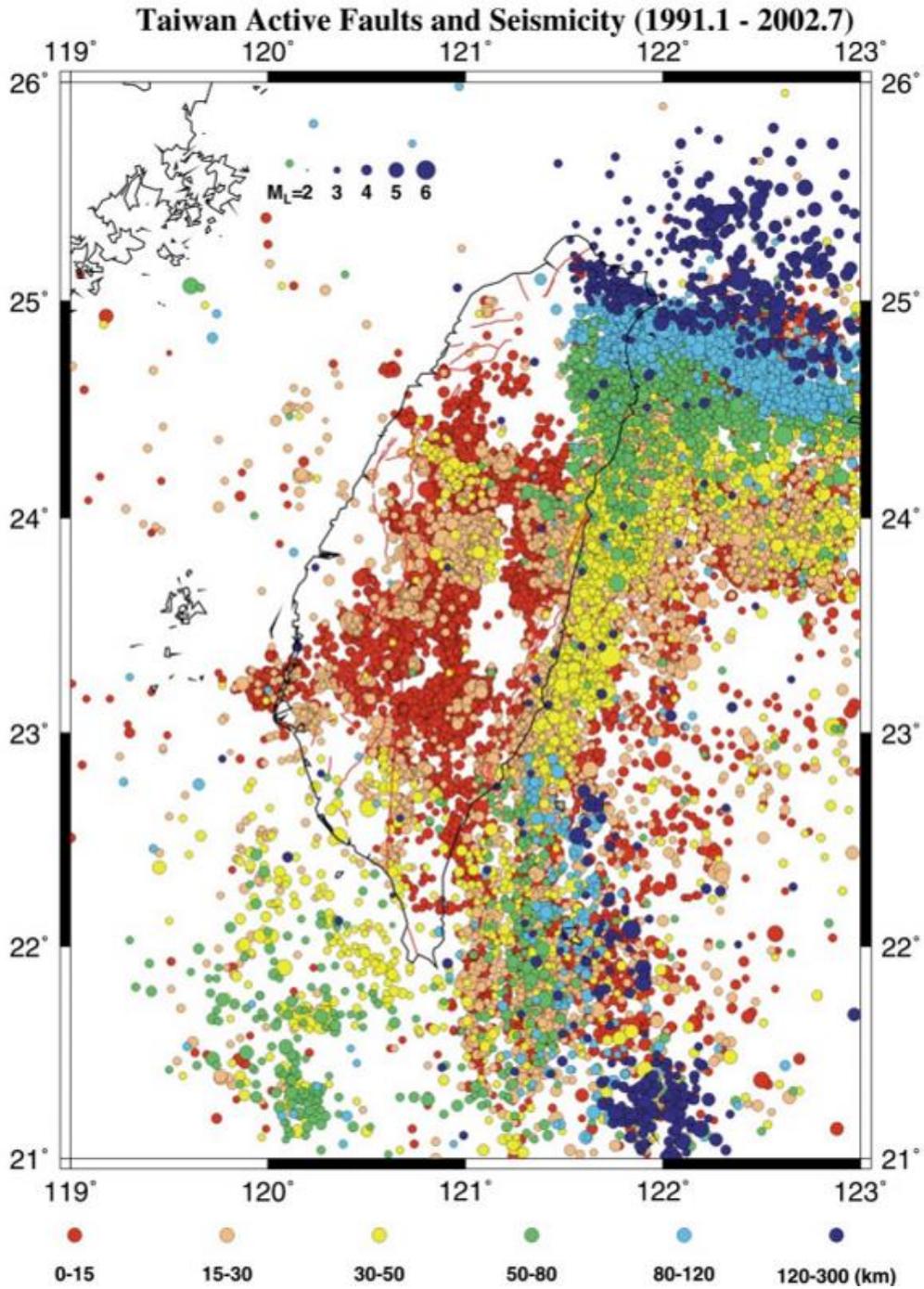


圖 1、台灣活動構造與地震分布圖(地震資料自 1991~2002 年 7 月，資料來源：中央氣象局)。紅色實線為 2000 年中央地質調查所發表台灣陸地上之活斷層分布位置(林啟文等，2000)。

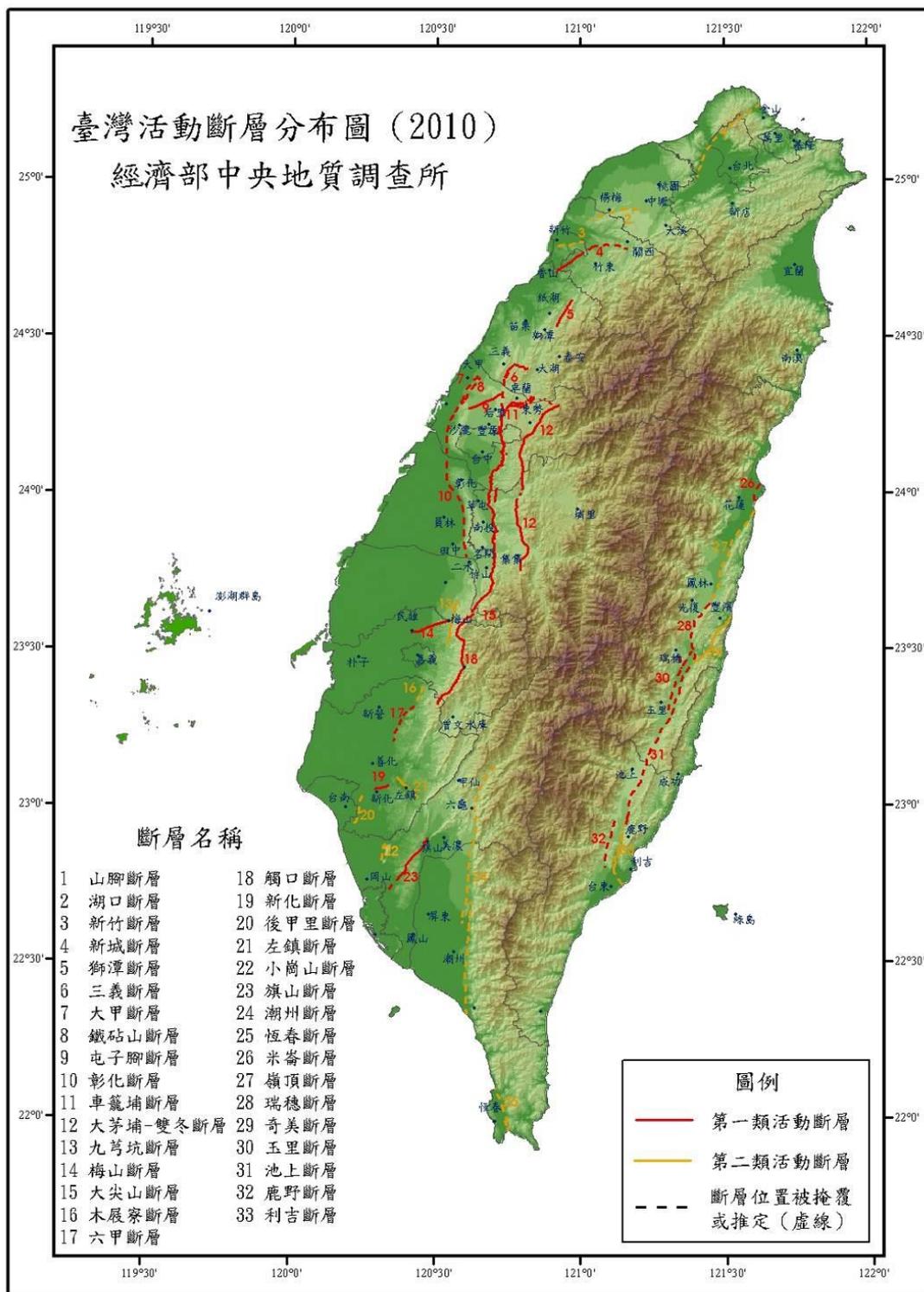


圖 2、台灣活動斷層分布圖(經濟部中央地質調查所，2010)。

參、研究方法及進行步驟

本研究研究流程如圖3所示，依據是否發生伴隨地表變形之地震分兩種狀況，當未發生地震時，將會選取高潛感之活動斷層，彙整活動斷層相關文獻資料及背景資料，利用航空照片、衛星影像及數值模型(DEM)進行構造判釋及分析，並進行野外調查工作。當發生地震後，將先利用衛星影像進行分析作業，再至震央鄰近區域進行野外調查及彙整地質資料，於調查結束後進行震源區域孕震構造之分析，並將此分析及調查結果匯整成完整報告，可供其它子計畫參照使用。

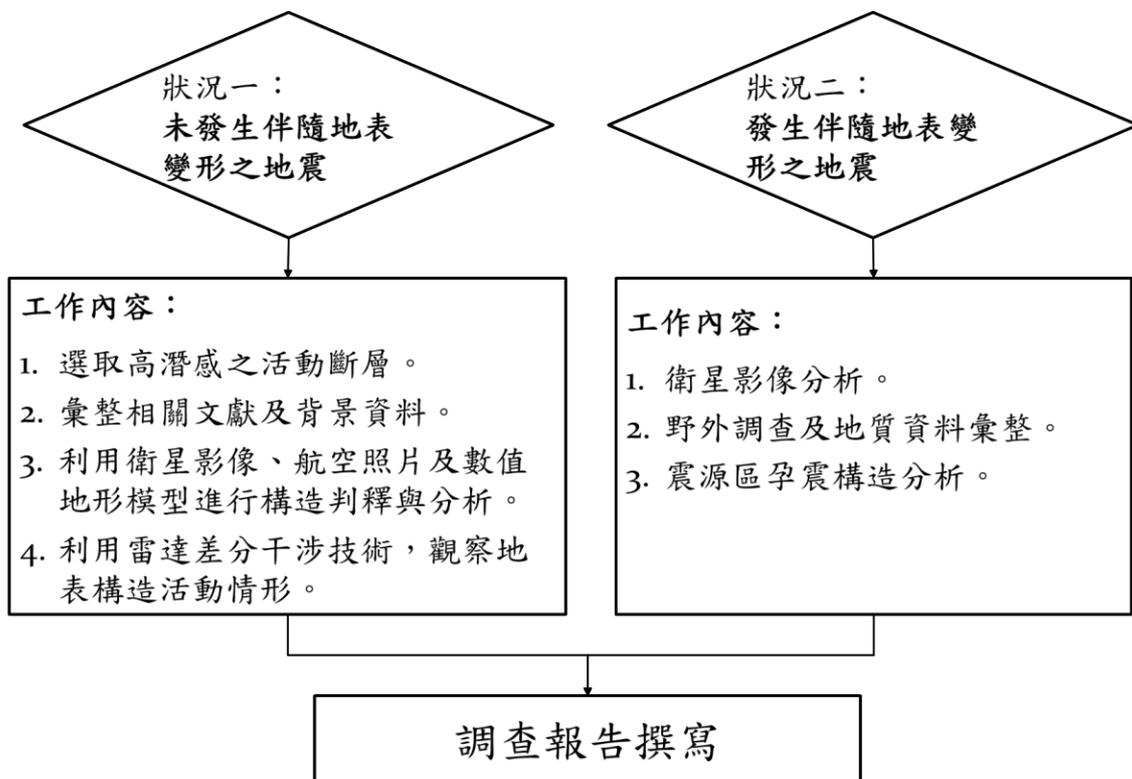


圖 3、本研究計畫工作流程。

3.1 野外調查

透過野外露頭觀察，對中視尺度的節理、斷層、擦痕與褶皺等構造進行紀錄與統計，利用地表露頭量測斷層帶擦痕等資料可推演斷層的移位方式，以及在不同時間上的運動方式。本研究除一般的基礎野外地質調外，更要針對岩層的脆性破裂進行分析。主要工作是在野外對微斷層進行廣泛的測量，蒐集完整斷層資料後予以分期計算，求取當地之區域應力演化情形。

就變形方式而言，可依主應力的方向改變與否略分為單期變形(monophase)及多期變形(polyphase)。單期變形在受壓縮變形時，其主壓應力軸(σ_1)不會隨時間發生改變。如圖4所示，從初始狀態到高度擠壓變形，主壓應力軸(σ_1)的方向未曾改變，然而隨著褶皺與斷層的發育，以及變形程度加劇，第二與第三應力軸(σ_2, σ_3)都發生了置換。即便如此，岩石最終的變形結果仍是十分複雜。

多期變形在受壓縮變形時，其主壓應力軸(σ_1)會隨時間發生改變，如圖5所示。由於主壓應力軸的變化，再加上局部地層在擠壓時會伴隨發生旋轉，因此這種形式的變形通常很難重建期變形歷史，及應力發育的過程。

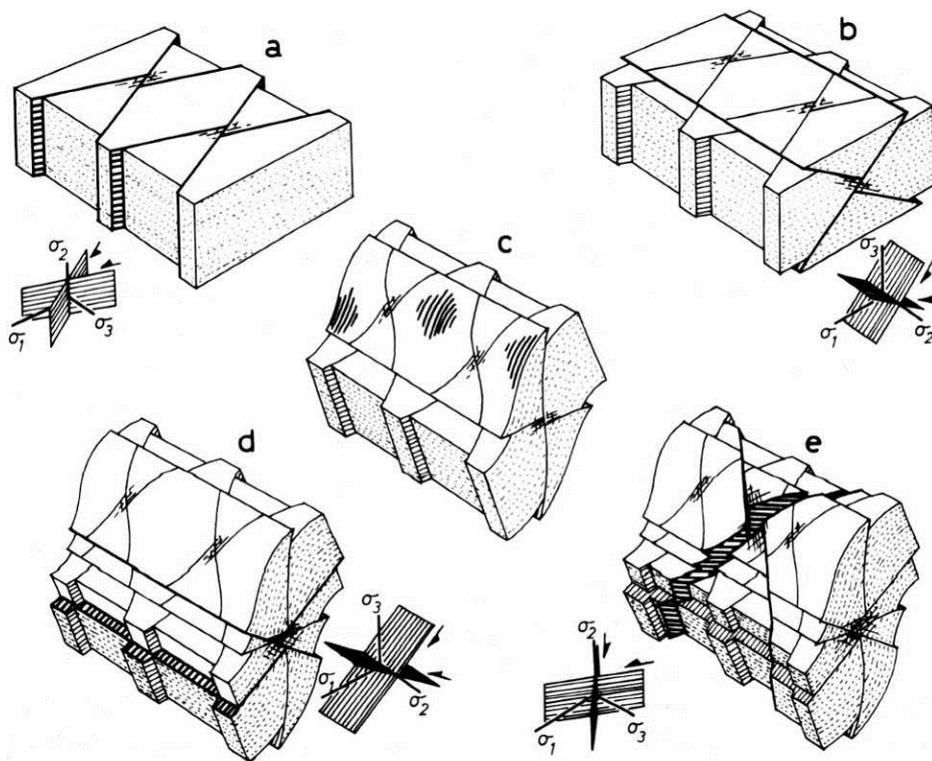


圖 4、單期壓縮變形示意圖(Angelier et al., 1986)。由固定主壓應力軸重建的 5 個階段的壓縮變形。

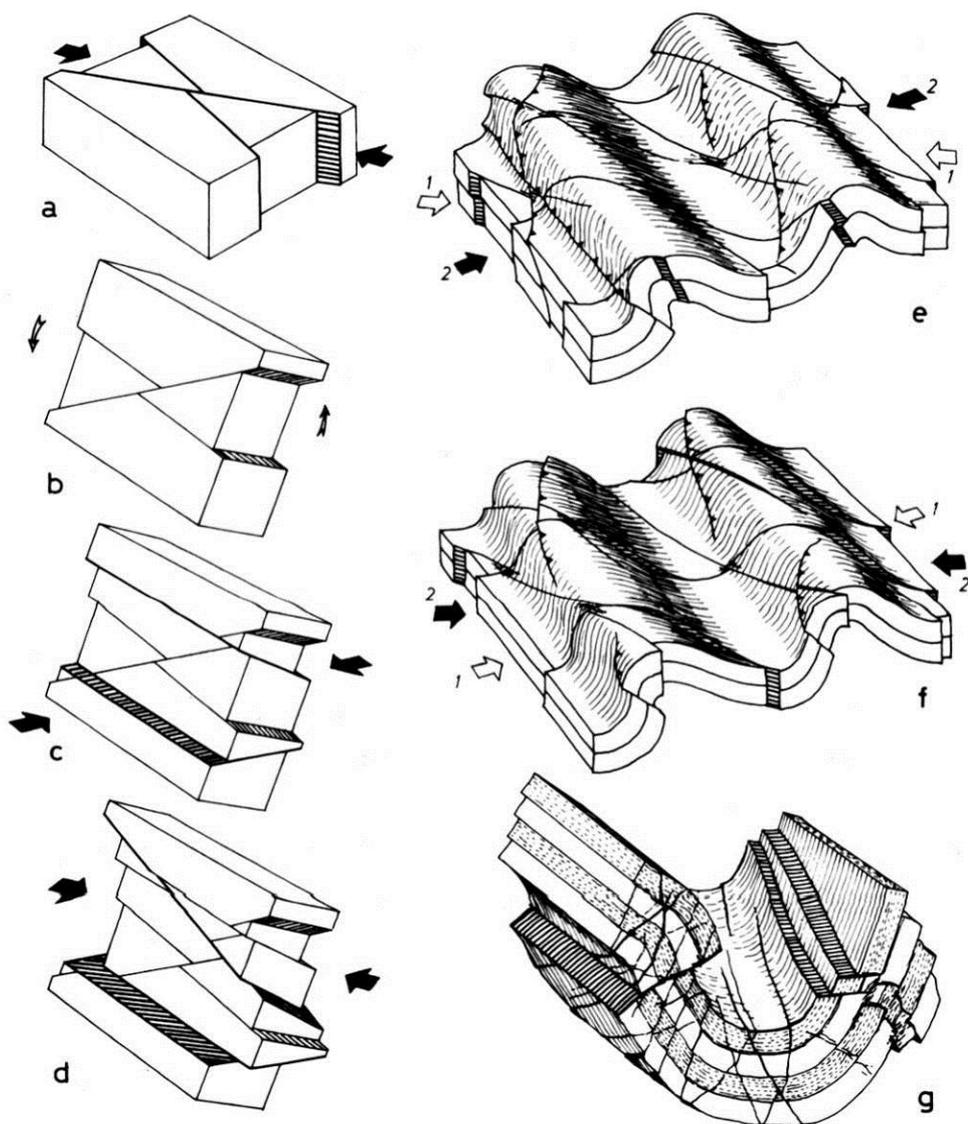


圖 5、多期壓縮變形示意圖(Angelier et al., 1986)。在岩石受變形的過程中，主壓應力軸的方向不斷發生改變，造成觀測與測量的困難。

3.2 地形分析

活動構造地形在地表留下的痕跡，乃內營力（地殼變動）與外營力（風化作用、塊體崩壞、侵蝕作用、堆積作用）交互作用的結果。台灣位在環太平洋地震帶上，地震頻繁，常伴隨斷層的活動，在地表留下變形痕跡，因此，我們可以地形特徵的比對來判別岩層的分布、斷層的延伸位置與性質、同時由斷層是否切過較新期的地形面來推估其活動性。

3.2.1 三角崖切面分析

由於活動構造容易在第四紀地形面上，如河道、階地、沖積扇等地形發生變位，而中央地質調查所之台灣活動斷層說明書引用其中較完整的日本活動斷層研究會（1982,1992）與石再添等（1986）所建立的地形準則加以描述，所提出活動斷層存在的地形特徵，如：線狀構造、構造崖、構造窪地、構造隆起、三角崖切面及水平斷錯地形：包括斷錯河、斷錯河階、斷錯山腳、閉塞丘等等。其中，三角崖切面是在正斷層活動處經常出現的地形特徵，因斷層會重複活動，地形變位亦會逐漸累積，而留下斷層活動的地表地形記錄。

本研究於中央山脈東緣與縱谷交界處觀測到許多三角崖切面之地形特徵，三角崖切面的形成如圖6所示，斷層崖是出露在地表的線性陡坡，沿著斷層錯動位置產生，崖的高度近乎斷層的錯移量，當斷層崖被河谷切過，所殘留的部分則形成三角形的切面，稱為三角崖切面(圖6B)，因為斷層的錯移常是間歇發生，在河流持續侵蝕的作用下，亦會記錄不同時期的三角崖切面(如圖6C-H)，不同時期的三角崖切面的高度，可反映斷層多次斷錯的錯動量，故可藉由崖頂的高度變化推斷斷層活動速率的改變。

計算方式如圖7所示，假設斷層活動由左側擴展至右側， L 為三角崖切面長度， D 為兩次斷層活動時間的間距，則可由 L/D 的比例看出不同的斷層活動速率及其提供相對高度變化。

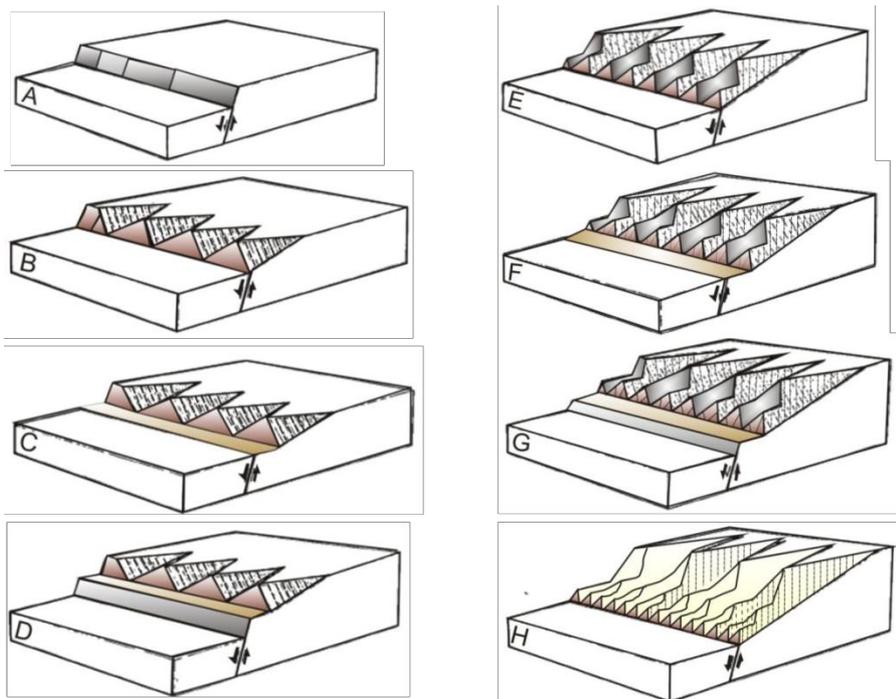


圖 6、三角崖切面形成過程。當正斷層活動後，若有斷層崖有河流流經，則會形成三角形的崖切面，若斷層持續活動，則會形成多期的三角崖切面。

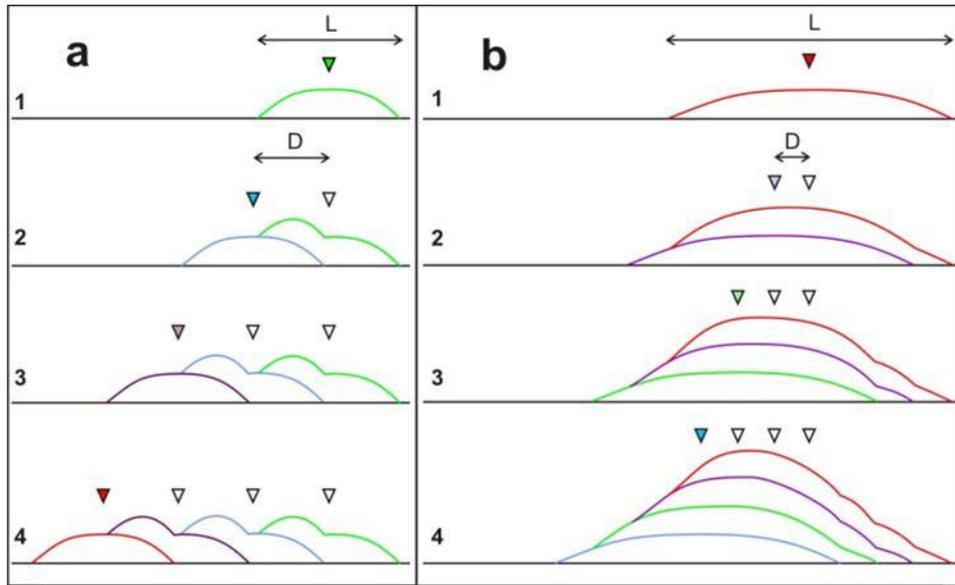


圖 7、利用不同時期的三角崖切面計算斷層活動速率。斷層活動方向由左至右，L 為三角崖切面長度，D 為兩次斷層活動時間的間距。(a) $L = 2D$ ，(b) $L = 8D$ 。

3.2.2 河流地形分析

在地形演育過程中，河流下切侵蝕扮演著相當重要之角色。水系可以完整記錄地形的演變歷史，藉由河流會隨地形發育而調整其坡度和集水面積的特性，本研究針對中央山脈東緣的16條水系，進行萃取定量的河流參數，並導入水力基盤侵蝕模型(Stream power bedrock incision model)，利用地形計測指標(Geomorphic Indexes)量化地形資訊，期能藉由水系分析，以了解中央山脈東緣的構造活動性。

假設河流處於均衡剖面(steady-state longitudinal profile)狀態之下，河流下切速率(E)會與岩層抬升速率(U)達到平衡關係，兩者速率相同，使河流縱剖面的形貌維持不變，最後達到一個新的均衡剖面。河流的侵蝕作用往往伴隨相對的地體抬升回饋，因此陡峭的地形常常發生在岩層抬升相對快速的區域。本研究將選取定量的河流參數導入地形計測指標 (Geomorphic Indexes)，並導入水力基盤侵蝕模型，藉由河流會隨地形發育而調整其坡度與集水面積的特性，以了解研究區域地體抬升資訊。

利用岩盤上升和地形侵蝕之間的相互作用(Howard et al., 1994)，將剪應力下切模型結合在質量守恆的概念中，分析河流基岩高程的隨時間的變化(dz/dt)：

$$\frac{dz}{dt} = U - E = U - KA^m S^n$$

U為相對於基岩的岩石抬升速率，E為基岩河道的侵蝕速率，A為上游集水區的面積，S為河道坡度，K、m、n皆為經驗參數，K為侵蝕係數(包括：岩性、岩體強度、河流寬度等)，反應岩層抗侵蝕強度與河流侵蝕能力，m、n為正常數值。當河道剖面達均衡穩定之狀態(steady-state landscape；dz/dt=0)，可求出穩定坡度(S_e)和集水面積(A)之相關性：

$$S = \left(\frac{U}{K}\right)^{\frac{1}{n}} A^{-\frac{m}{n}}$$

$$S = k_s A^{-\theta}$$

$$\log(S) = -\theta \log(A) + \log(k_s)$$

$(U/K)^{1/n}$ 為平衡剖面的陡峭度指標(steeptness index, k_s)，與岩層抬升速率、岩性和氣候相關(Snyder et al., 2000; Kirby and Whipple, 2001; Duvall et al., 2004; Whipple, 2004)； m/n 為河流平衡剖面的凹曲度指標(concavity index, θ)，當 θ 值越大代表河流的凹曲度越大。一般而言，達到均衡之河流凹曲度指標介於0.35~0.6之間(Hack, 1957; Tarboton et al., 1991; Moglen and Bras, 1995)，在活動抬升區域，當岩層的抬升速率發生改變，河流剖面的凹曲度也會有相當的變化，可反映不同的岩層抬升率(Kirby and Whipple, 2001)，但因凹曲度尚會受到岩性、蜿蜒度、河道寬度及性質之影響(Wobus et al., 2006a)，故於本文中，主要利用河流之陡峭度進行岩層抬升率之探討。

河流地形從上游至下游的地形演育機制不同。下游的河段主要受到堆積(Alluvial)作用影響，分析時應避免；而位於上游之河段集水面積區域較小，河道主要受崩積(colluvial)作用影響，崩積作用造成河床高程之變化效應會大於地體抬升效應(圖8)，因此利用水力基盤侵蝕模型時一般僅分析中間區段的基岩河道。河流坡度-面積關係圖大致可分成5個部分(圖9, Sklar and Dietrich, 1998; Tarboton et al., 1991)，分別為山崩-崩積河道、土石流-崩積河道區、粗顆粒沖積層堆積區、細顆粒沖積層堆積區，和基岩河道區。一般而言河段上游集水面積(A)到達約 $10^5 \sim 10^6$ 平方公尺時，河道性質會由崩積河道過渡至基岩河道(圖9, Tarboton et al., 1991; Montgomery and Foufoula-Georgiou, 1993)，而當河道坡度-面積關係小於 $S=0.07A^{-0.5}$ 時，河道性質會由基岩河道過渡至粗顆粒沖積層堆積區(Montgomery et al., 1996)。本研究中基岩河道之選取範圍自上游集水面積大於 10^5 平方公尺，及河道坡度-面積關係大於 $S=0.07A^{-0.5}$ 處。

研究資料使用5m數值高程模型，透過RiverTools3.0軟體進行河流資料萃取。此軟體採用最大坡降法(Deterministic eight-node, D8)從規則網格中產生水系(O'Callaghan and Mark, 1984)；在讀取DEM後會先對凹地進行填補(Fill Depression Layer, 圖10)，並計算每個網格點與相鄰八個網格點的高程差、水流方向與累積流量(如圖11)，當選取河流並給定門檻值後，軟體會自動匯出整個流域的水系分布和

流域盆地之界線，而河流會沿著最大高程差之方向流動，可視為模擬地表逕流受重力影響而隨地形起伏流動的過程。透過RiverTools3.0軟體，可得到水系及其集水盆地內的相關資訊，包括：河流的距離(km)、高程(m)，及上游流域面積資料(m²)等。本研究分析工作藉由分析河流之凹曲度，計算各流域區域的相對構造抬升速率。

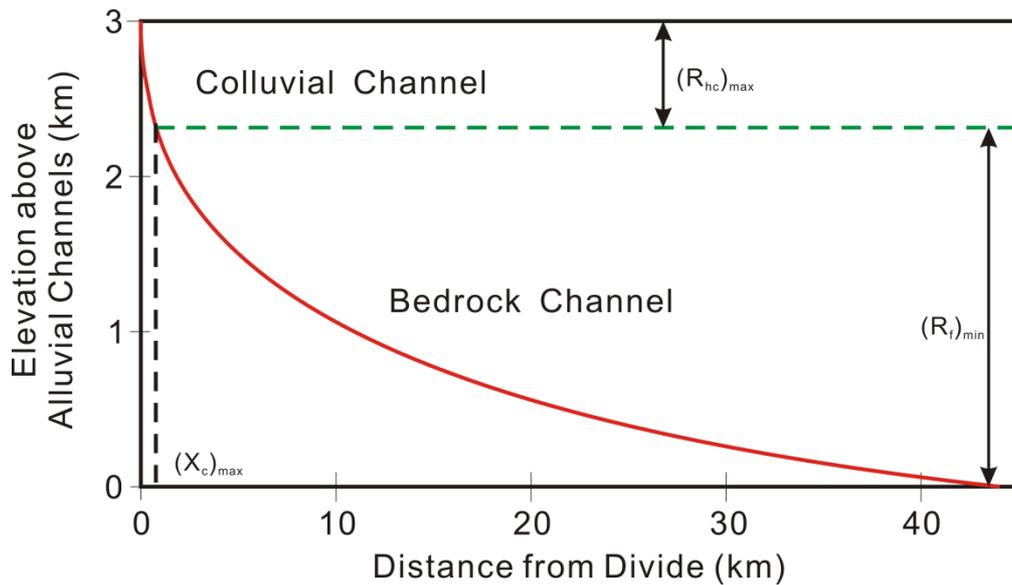


圖 8、河流河道區分示意圖。Xc 的上游為崩積河道，下游為基岩河道 (修改自 Whipple and Tucker, 1999)。

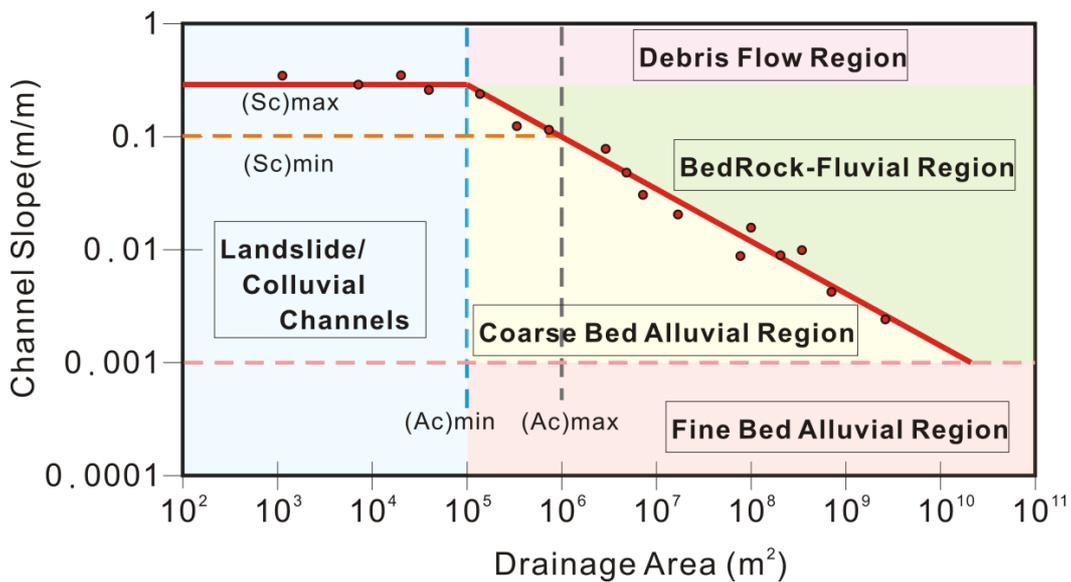


圖 9、河流坡度-面積關係圖。5 種不同性質之河道分布範圍修改自 Sklar and Dietrich(1998)及 Tarboton et al(1991)。

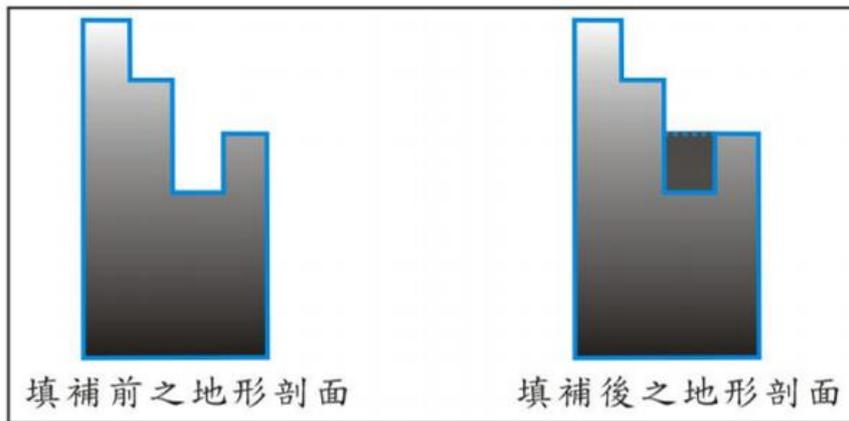


圖 10、River Tools 凹陷點補償 (修改自洪文傑，1996)。

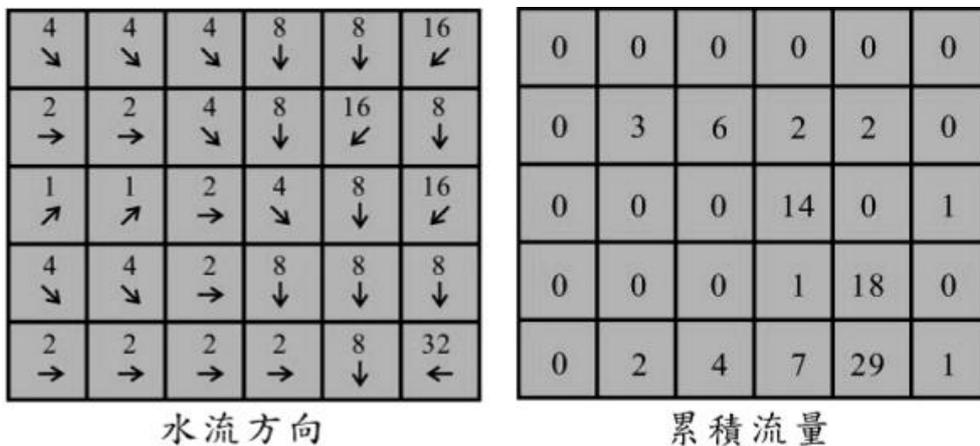


圖 11、水流方線與累計流量示意圖 (修改自洪文傑，1996)。

肆、具體成果

瑞穗地震於2013年10月31日發生，震央在花蓮縣瑞穗鄉(圖12)，地震規模6.4，震源深度達19.5公里，隨後亦發生多起規模大於3大之餘震，累計大小餘震有數百個，餘震位置主要分布在主震東北側之光復地區(圖12)。主震震央位於中央山脈東緣，從餘震群於深度分布位置顯示發震斷層為一斷層面傾向西方的斷層，推測可能和前人所提的中央山脈斷層有關(Hsu et al.,1976; Shyu et al., 2006)。

本次地震發生規模及深度均未達斷層發育至地表之程度，野外調查亦無發現明顯地表變形，故無利用衛星影像進行破裂追蹤之必要。由於中央山脈東緣的斷層活動構造並不顯著，地質調查結果不盡理想，故本研究將研究主軸放置在中央山脈活動性之調查，針對前人研究中所推測的中央山脈斷層沿線進行地形資料分析及彙整，藉由地形資訊得知中央山脈東緣的構造活動性，並針對中央山脈南段進行野外調查，藉由次生構造推得中央山脈斷層地活動性，其成果如下。

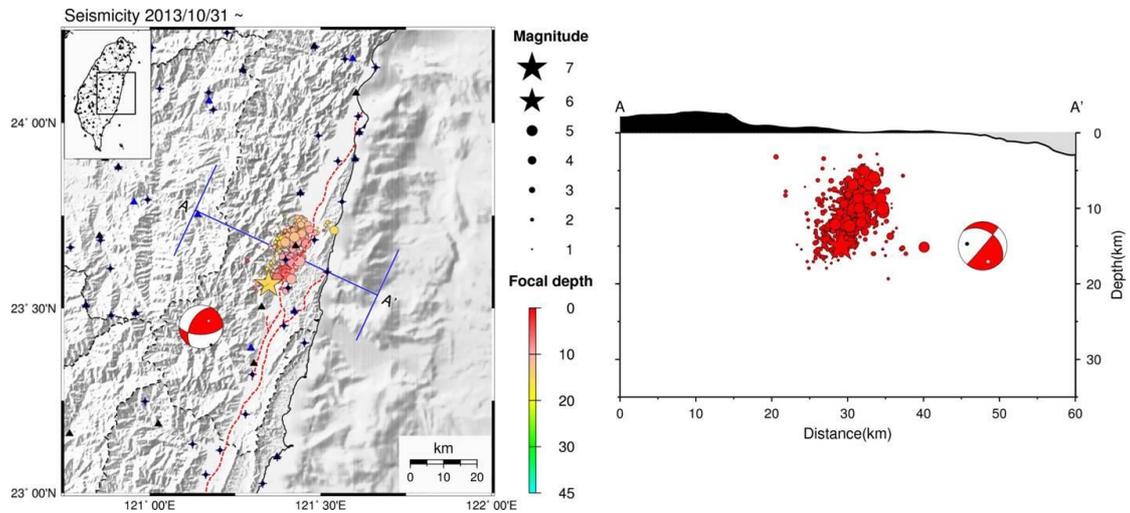


圖 12、瑞穗地震之震央位置及餘震分布位置(資料來源:中央氣象局地震測報中心)。

4.1 地質背景

10月31日震央位於花蓮縣瑞穗鄉，此區域位於中央山脈東緣，鄰近縱谷與中央山脈交界處，屬富源溪水系。此區岩層以第三紀變質雜岩為主，震央鄰近區域的主要活動斷層由北向南包括嶺頂斷層、瑞穗斷層、奇美斷層、玉里斷層及池上斷層(圖13)，以及前人提出的中央山脈斷層。活動斷層詳細描述如下：

1、嶺頂斷層

嶺頂斷層呈北北東走向，由花蓮溪出海口的嶺頂岬向南延伸，經月眉至光復鄉東富村(陳文山等，2008)，長約30公里，可能是左移斷層兼具逆移性質。在斷層上盤有一系列斷續出現的線狀崖，原被稱為月眉斷層(林啟文等，2000)。

嶺頂斷層在地表上並未發現斷層地形特徵，斷層可能被山麓沖積扇與沖積平原所掩覆，由GPS測量結果顯示斷層跡兩側明顯在垂直與水平的速度場有變化，暫列為第二類活動斷層。

2、瑞穗斷層

瑞穗斷層，為逆移斷層兼具左移性質，呈東北走向，由光復鄉東富村向南延伸至玉里鎮春日里(陳文山等，2006；林啟文等，2007；陳文山等，2008)，長約33公里。瑞穗斷層向南延伸在春日附近與奇美斷層連接。

瑞穗斷層，以往稱為玉里斷層的北段，由於兩者的斷層特性不同，另外將其分出。此斷層也是1951年11月25日地震的地震斷層，將其暫列第一類活動斷層。透過槽溝開挖，可觀察到除了1951年的地震之外，尚有3次古地震事件，古地震的活動週期約 190 ± 20 年。

3、奇美斷層

奇美斷層由玉里鎮春日里向東北延伸，經德武、奇美村至花蓮豐濱，全長約30公里，為一條東北走向的逆移斷層，截切海岸山脈。奇美斷層切過全新世的河階礫石層(陳文山等人，1991)，為第一類活動斷層。

賴文基(1995)於奇美村附近秀姑巒溪河谷觀察到奇美斷層出露位置，為都巒山層安山岩逆衝於大港口層之上，斷層位態為北81°東，朝南傾斜75°。由斷層面上的斷層擦痕可得知其滑動的形式為逆斷層並帶有左移分量。

4、玉里斷層

玉里斷層由瑞穗鄉瑞良村向南延伸至玉里鎮客城里，長約23公里，斷層呈北北東走向，為一左移兼具逆衝分量之斷層。在瑞美南方有明顯的線形特徵，由秀山橋向南延伸至三民，三民以南的線形特徵則不明顯。根據地質調查發現舞鶴台地東北端的秀山大橋附近的河谷可發現玉里斷層出露處，河谷東側的舞鶴礫岩層面呈垂直，且礫岩受到擠壓破碎，局部具有摩擦線理，而西側的礫岩層面仍接近水平，推測該斷層露頭可向北北東方向延伸至瑞良的河階崖。於1951年11月25日地震時，玉里斷層有地表破裂現象。

5、池上斷層

池上斷層由瑞穗東南方一帶向南南西延伸至池上東方，錦園南方萬安附近，總長約47公里(林啟文等，2000)，斷層為北北東走向。斷層面呈現上陡下緩向東傾斜曲面，斷層面接近地表傾斜約60度，至深度約25-30公里處則轉為接近水平，除了逆衝性質之外，並兼具左移分量，為一逆衝斷層。由測量結果得知，於1951年地震後，池上斷層主要以潛移的方式活動，造成路面、水溝、房屋等遭到破壞，以大坡、錦園、萬安一帶最為明顯，平均每年約有2公分的錯移量(Angelier et al., 1997)。由槽溝剖面初步估計，池上斷層在過去約1000年以來，至少存在3次的古地震事件(陳文山等，2006)，顯示此斷層的活動具有累積性與重複性。

6、中央山脈斷層

前人研究利用地形資訊，將中央山脈東緣與縱谷的交界及河階高程變化處，辨識為中央山脈斷層所在處(圖12; Hsu et al., 1976)，徐濤德等人(Shyu et al., 2006)利用40米解析度之數值地形模型(DEM)進行分析與判識，並透過野外實地調查，指出縱谷內有許多近期的河川堆積層被褶曲抬升形成階地，顯示縱谷內的構造活動相當快速(圖13)。其中位於縱谷西側的中央山脈斷層附近，階地形貌雖於部分區段較模糊不清，但是從北邊的舞鶴台地到池上附近，仍可觀察到抬升的紅土階地，推論中央山脈斷層應為一逆斷層，並有持續活動。

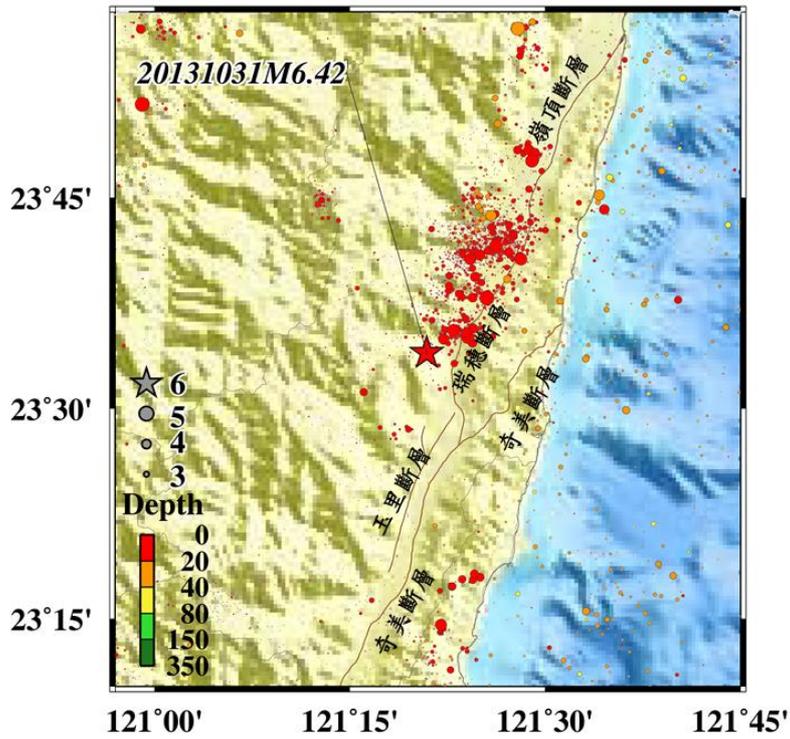


圖13、瑞穗地震主震及餘震分布圖，及其鄰近區域的活動斷層分布。

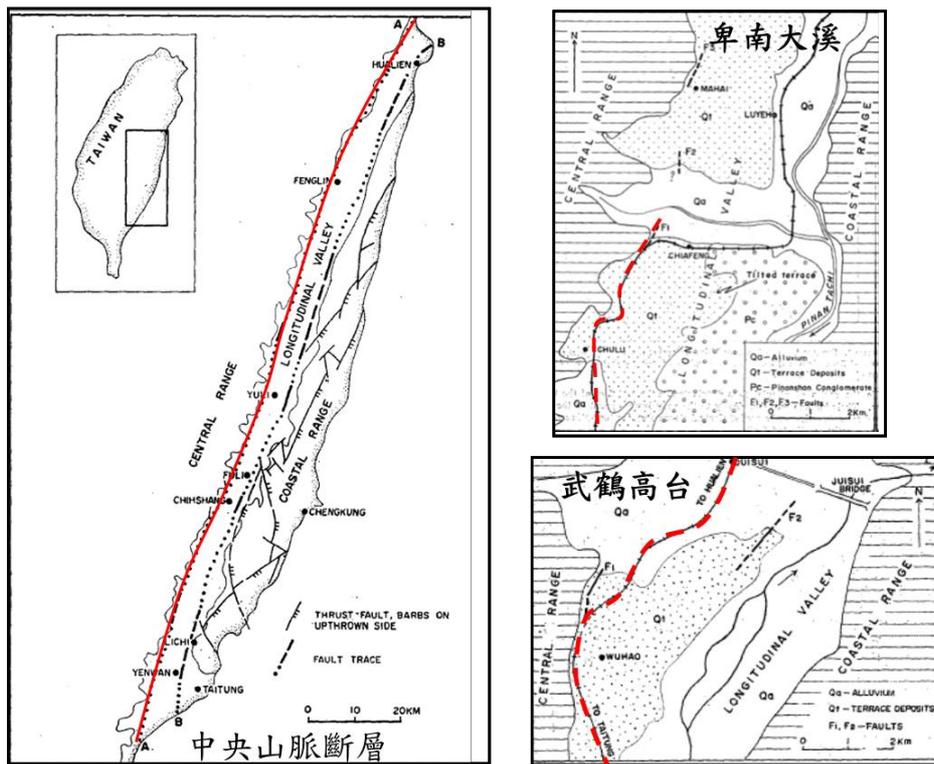


圖 14、利用地形資訊將中央山脈東緣與縱谷邊界辨識為中央山脈斷層(Hsu et al.,1976)。

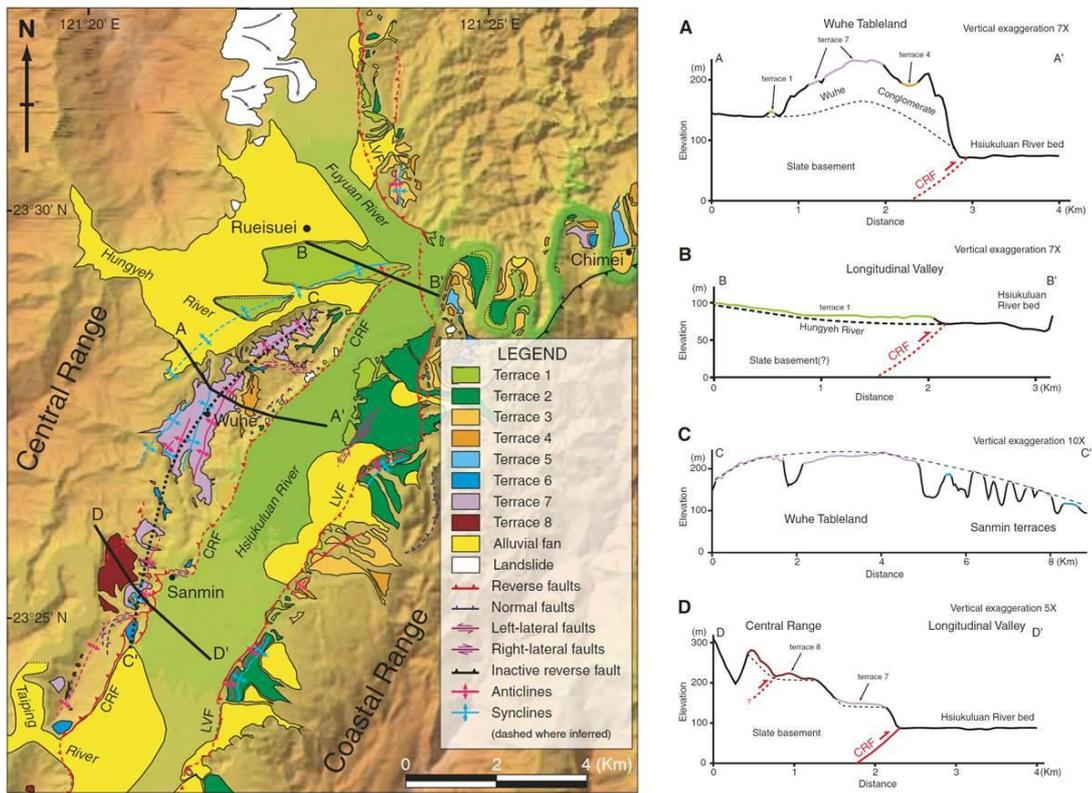


圖 15、利用 40 米解析度的數值地形及野外資料，觀測河階地的高程變化以推測中央山脈斷層出露位置(Shyu et al., 2006)。

4.2 地震活動分析

圖16為縱谷的地震活動圖(chuang et al., 2014)，可觀察縱谷的地震活動度很高，但大部分為縱谷斷層系統所引發的地震，中央山脈斷層的地震資料少，僅有2013年的瑞穗地震(圖12)，及2006年的台東地震的發震斷層顯示中央山脈東翼存在一條向西傾斜的斷層(Wu et al., 2006)。

在縱谷北段區域，由震源機制解(規模大於4的地震)及重新定位後的餘震資料分布顯示縱谷下方除了向東傾斜的縱谷斷層外，尚有一向西傾斜的逆斷層系統，推測為中央山脈斷層(圖17、圖18；資料時間範圍:2000年~2014年5月)，藉由瑞穗地區的剖面顯示(圖18)，向西傾斜的斷層餘震分僅分布至地表約5公里深處，並無延伸至地表，推測中央山脈斷層於地表5公里深處仍處於鎖住(lock)的狀態。

台東地震發生於2006年4月1日，地震深度達10.8公里，規模為6.1，根據震源機制解顯示發震斷層為帶有左移分量的逆斷層系統(圖19；Wu et al., 2006)。利用餘震分布的剖面可以得知縱谷南段的下方亦存在一條高角度向西傾斜的逆斷層系統。

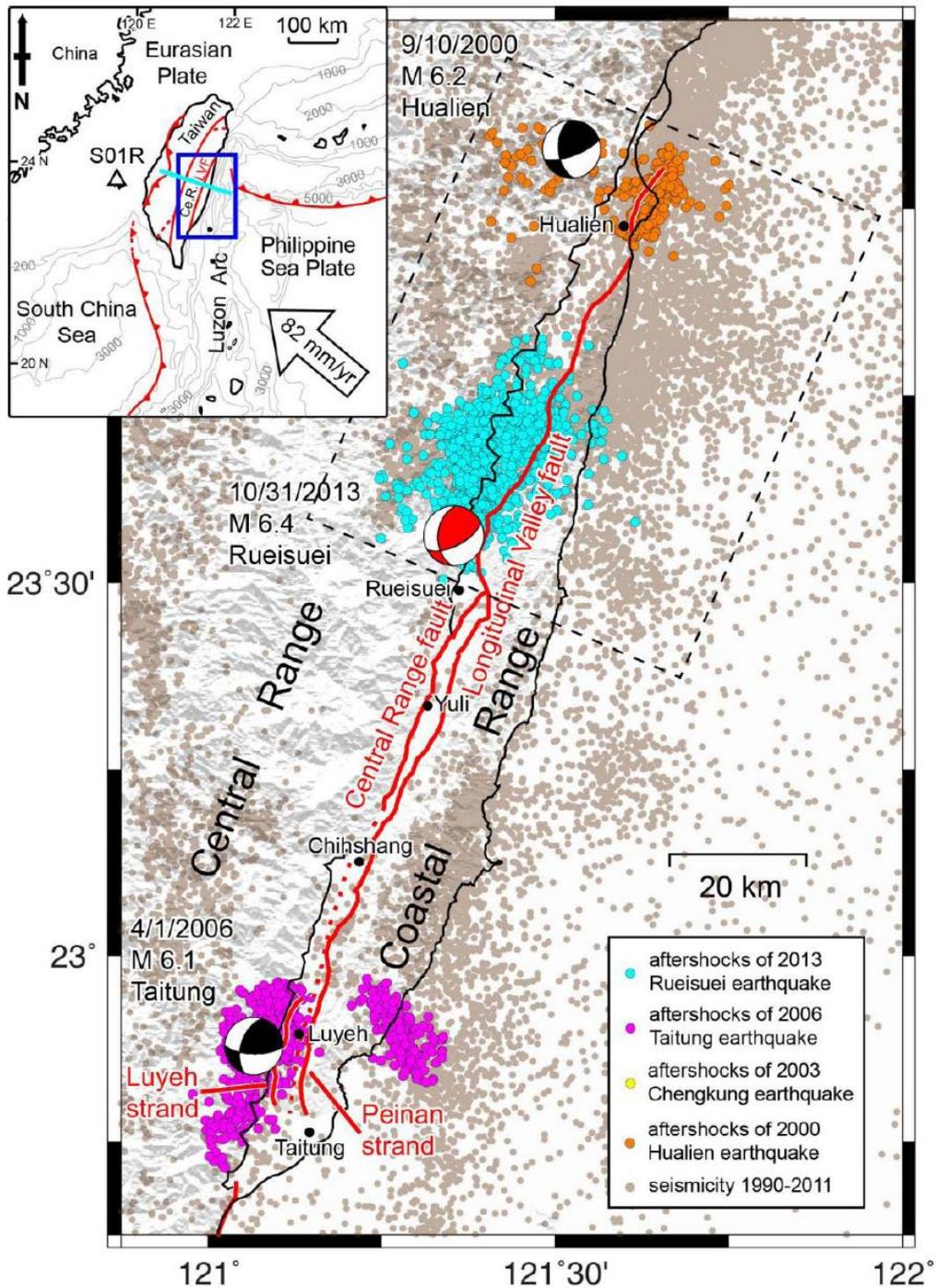


圖 16、縱谷的活動斷層和地震活動圖。紅色實線為斷層出露位置(shyu et al., 2005)，紅色虛線為推測的中央山脈斷層位置，黑色的震源機制解分別為 2000 年的花蓮地震，及 2006 年的台東地震，紅色的震源機制解為 2013 年的瑞穗地震，橙色、青綠色和紫紅色的小點分別為 2000 年、2006 年和 2013 年的餘震，灰色小點為 1990~2011 年的餘震(chuang et al., 2014)。

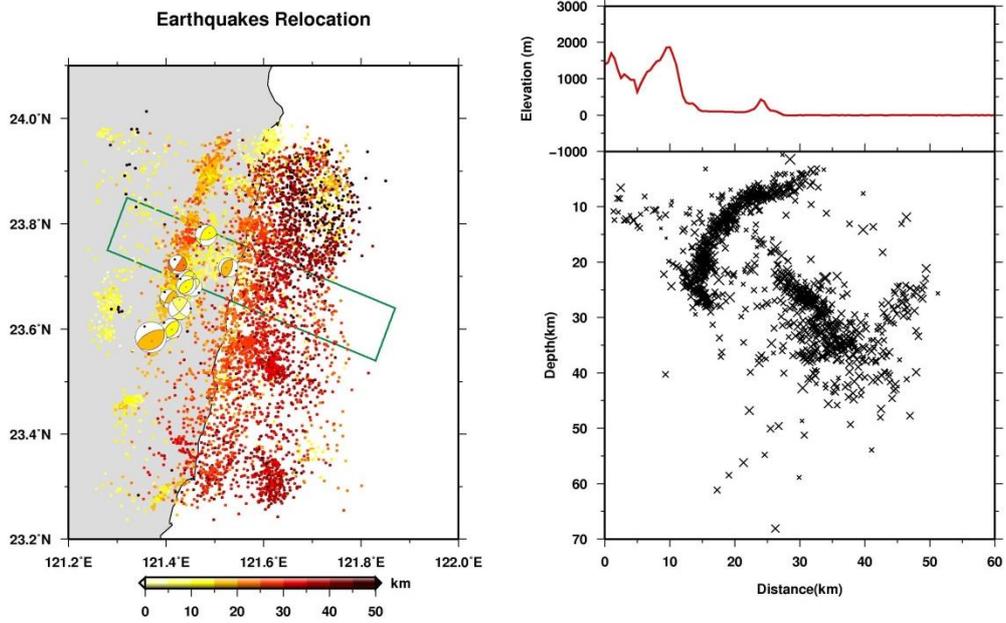


圖 17、縱谷北段的地震分布圖，鳳林地區之剖面。根據震源機制解(規模大於 4 的地震)及地震資料重新定位結果可觀察在縱谷下方有一條向西傾斜的逆斷層系統。(資料來源:中央氣象局，2000~2014/5/20 地震資料)

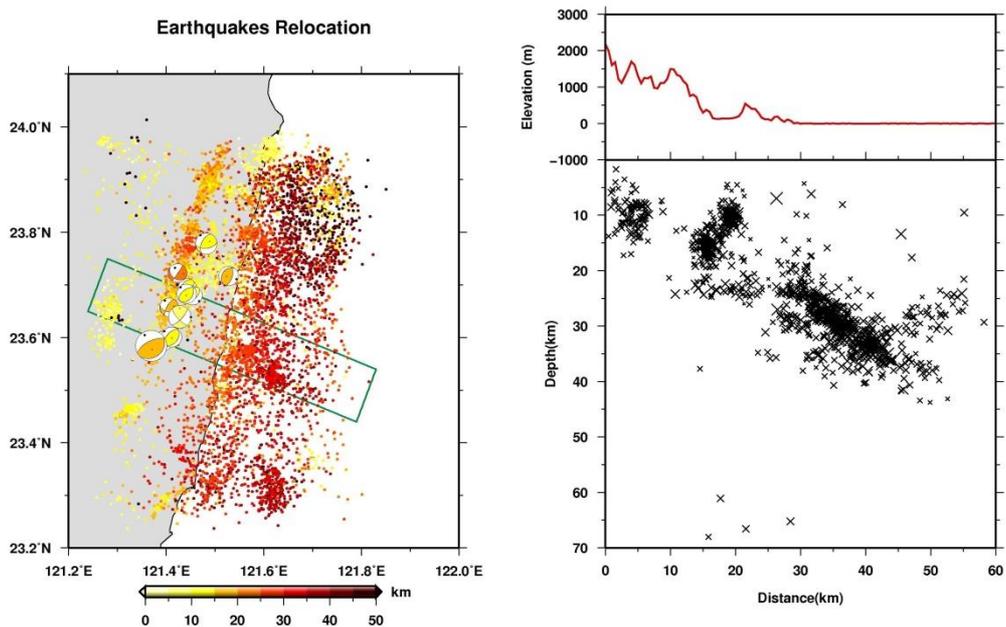


圖 18、縱谷北段的地震分布圖，瑞穗地區之剖面。根據震源機制解(規模大於 4 的地震)及地震資料重新定位結果可觀察在縱谷下方有一條向西傾斜的逆斷層系統。(資料來源:中央氣象局，2000~2014/5/20 地震資料)。

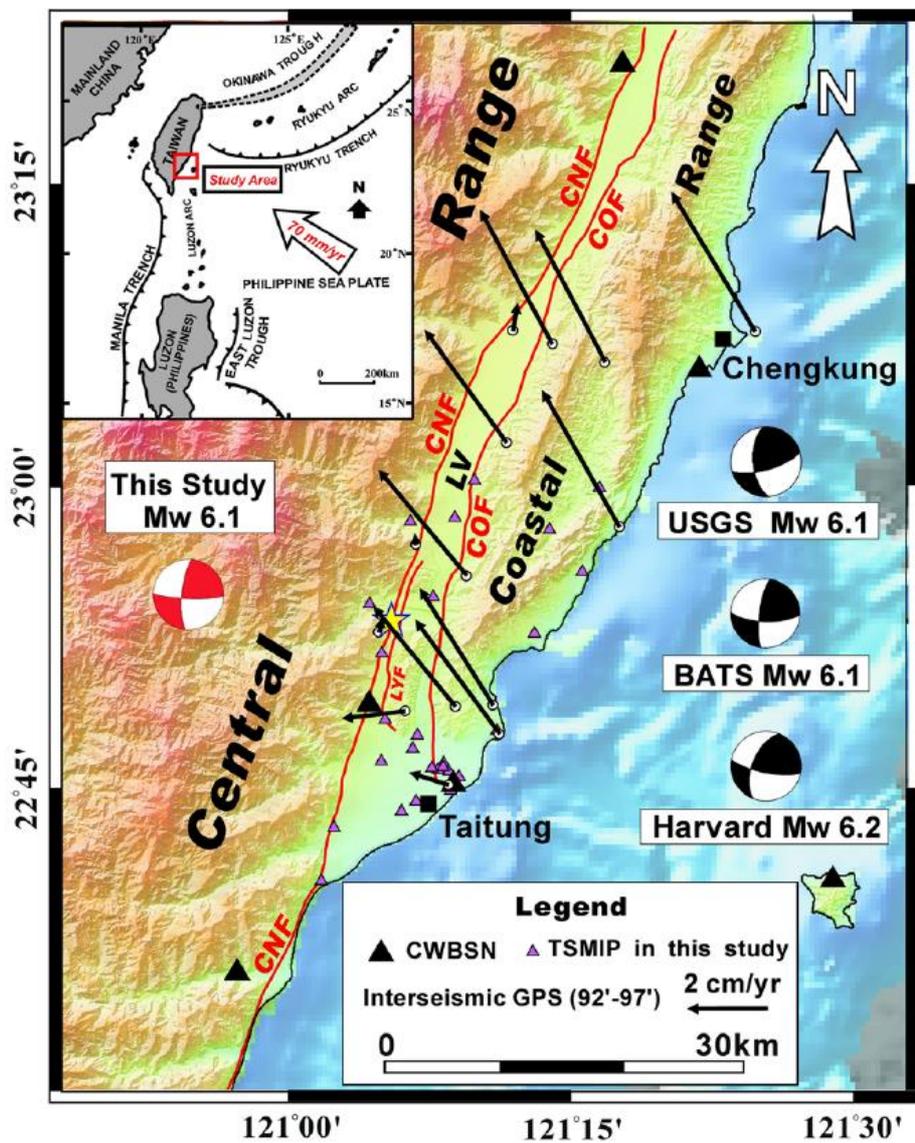


圖 19、2006 年台東地震的震央位置(星號)及震源機制解。圖中箭頭顯示同震地表位移的速度場(Wu et al., 2006)。

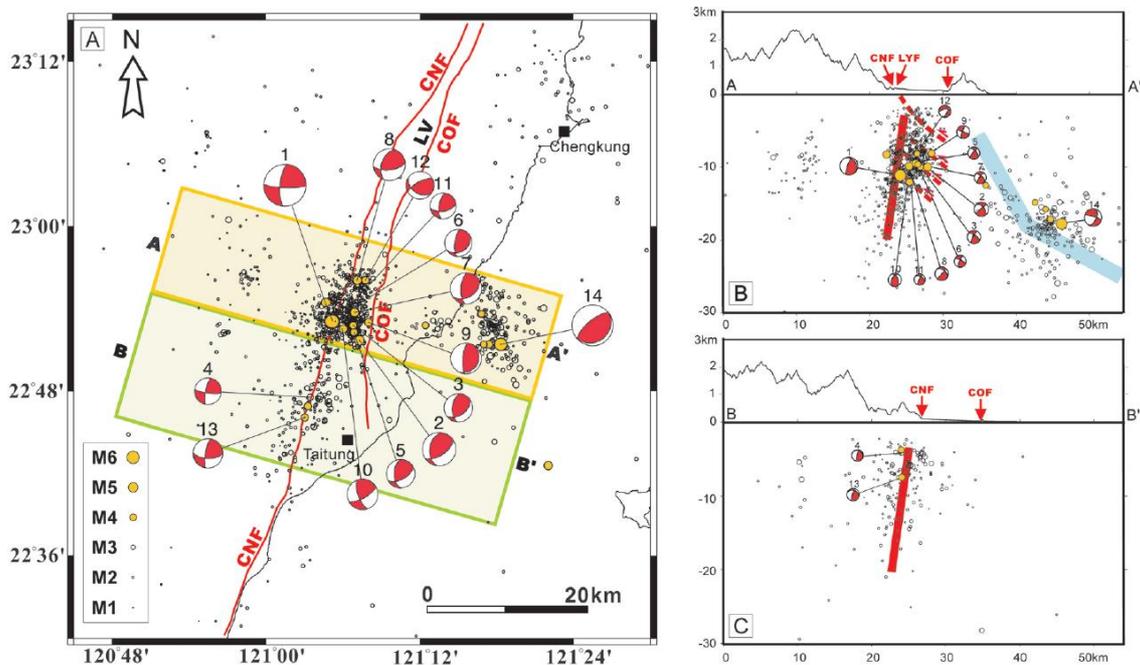


圖 20、2006 年台東地震序列的震央分布圖。(A)14 個震源機制解為規模大於 3.8 之餘震，編號為時間的順序。餘震分布分成三組群集；一為位於近海，另外兩個是則位於的陸地，北方的餘震群集較密集，南方的群集較稀疏。(B)北方餘震群的橫剖面，由剖面資料顯示，中央山脈東翼下方存在一高角度向西傾斜的逆斷層系統，而東部外海有一角度較緩並向東傾斜的斷層系統。(C)南方餘震群的橫剖面，由剖面資料亦可觀察到高角度向西傾斜的斷層系統。(Wu et al., 2006)

4.3 三角崖切面分析

中央山脈東緣鄰近縱谷側存在許多三角崖切面的地形特徵，如前所述，此種地形特徵顯示中央山脈東緣可能存在一活動的正斷層。為了討論中央山脈東緣的活動性，本研究究區域從光復往南延伸至縱谷南端，主要分成三個區塊進行討論，由北到南分別為A段:瑞穗-玉里段，B段:長良-池上段，C段:海端-關山段(圖21)。透過前方定位交會法，以量測三角崖切面下方的兩點座標位置及角度之方式推算其頂點高度(圖22)，並將研究區域沿線的三角崖切面定點位置標示於地圖上，探討其高度變化趨勢。

A段的三角崖切面位置與崖頂高度變化如圖23、圖24所示，此區段的三角崖切面主要可分成3期，每期之間約有100-200公尺的高程差，由沿線的高度變化可推測南端的抬升速率較快。B段的三角崖切面主要可分為5期，部分區域可找到的6期的地形(圖25)，每期高度差約100公尺，由5期的三角崖切面頂點高度變化可推得南端

的抬升速率較北端快(圖26)。C段的三角崖切面可分成5個階段，部分區域僅找到4期證據(圖27)，透過三角崖切面頂高分布，得知在第一期及第二期的三角崖切面發育時，南北端的抬升速度差異較小，在第三期~的五期時，南端的三角崖切面頂點較高，推論在此區塊於第三~五期崖切面發育時，北端的抬升速率較南端快速(圖28)。

綜合三個區塊的資料分布(圖29)，由A，B和C三區段從北到南的三角崖切面特性來看，可明顯的觀察出各區塊的抬升速率並不相同，區塊分界恰好是由不同時期的抬升構造所造成的不連續；中央山脈東緣的抬升速率變化於A段有往南遞減之趨勢，B、C段的抬升速率則是有往南增加的趨勢。B區塊各期的三角崖切面高度差變化皆為100公尺，顯示此區段的抬升活動有穩定性的變化，A段及C段則有早期抬升速率較快的現象，在新武呂溪南側有明顯的較高抬升量。

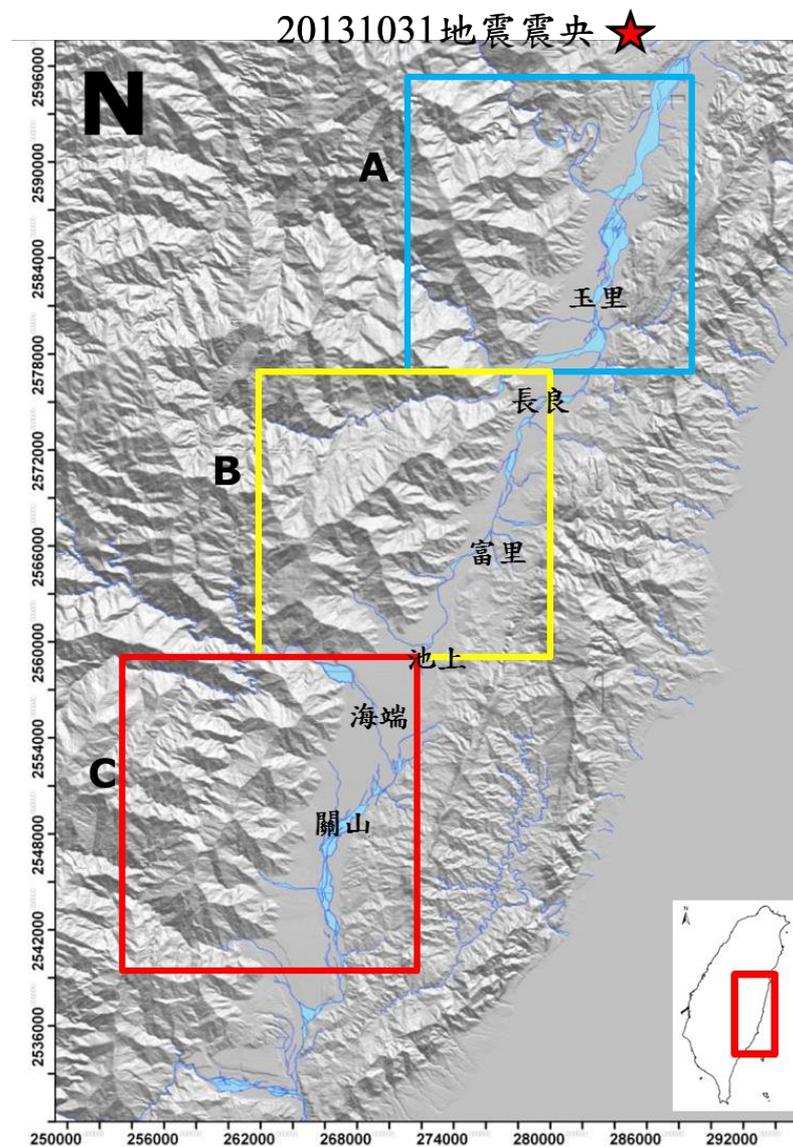


圖21、研究區域及3個區塊位置。由北到南分別為:瑞穗-玉里段、長良-池上段、海端-關山段。

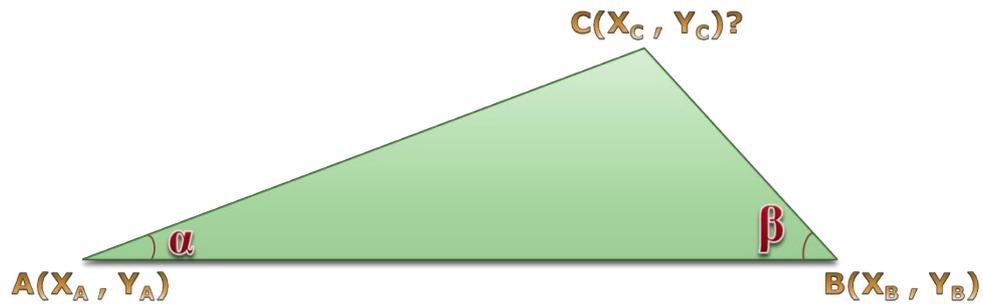


圖22、前方定位交會法。利用三角崖切面下方的兩點座標位置及角度推算其頂點高度。

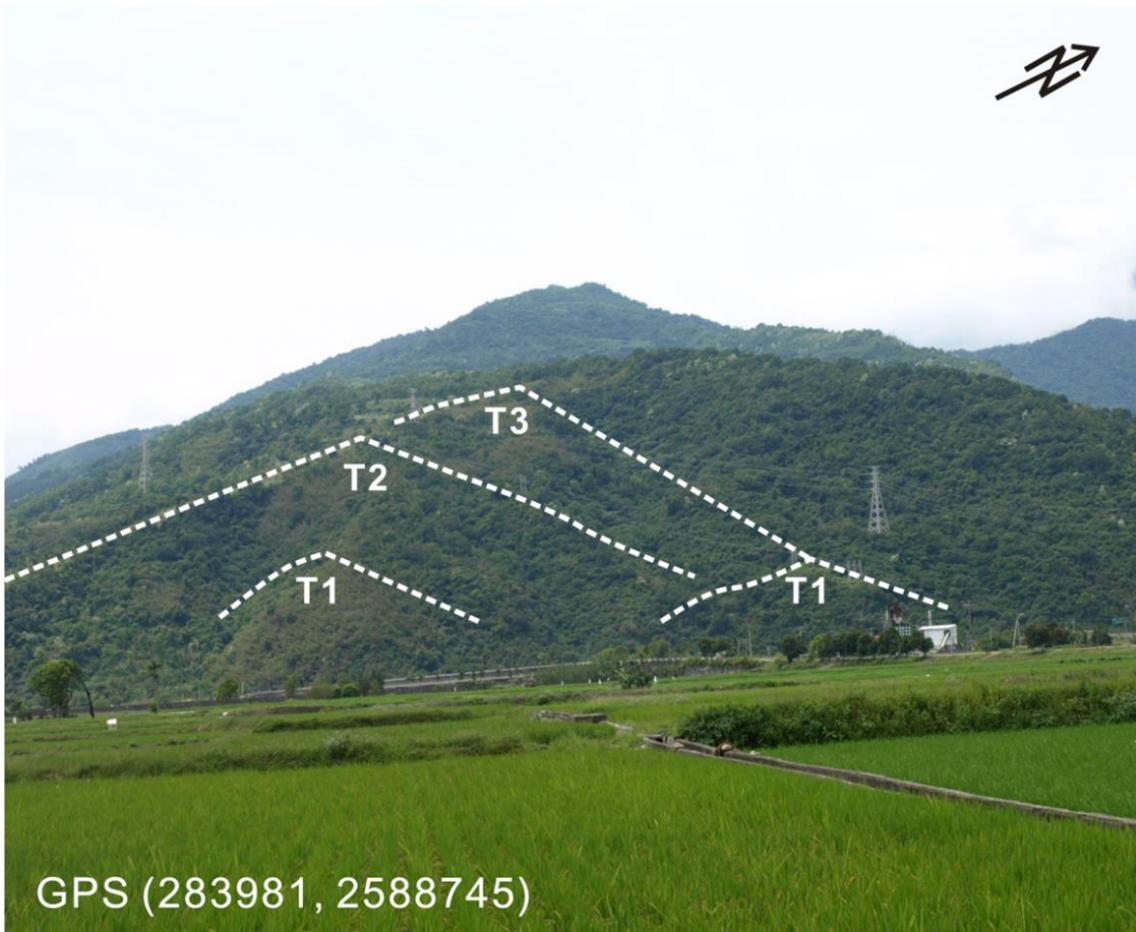


圖23、瑞穗-玉里段的三角崖切面形貌，可分為3期。

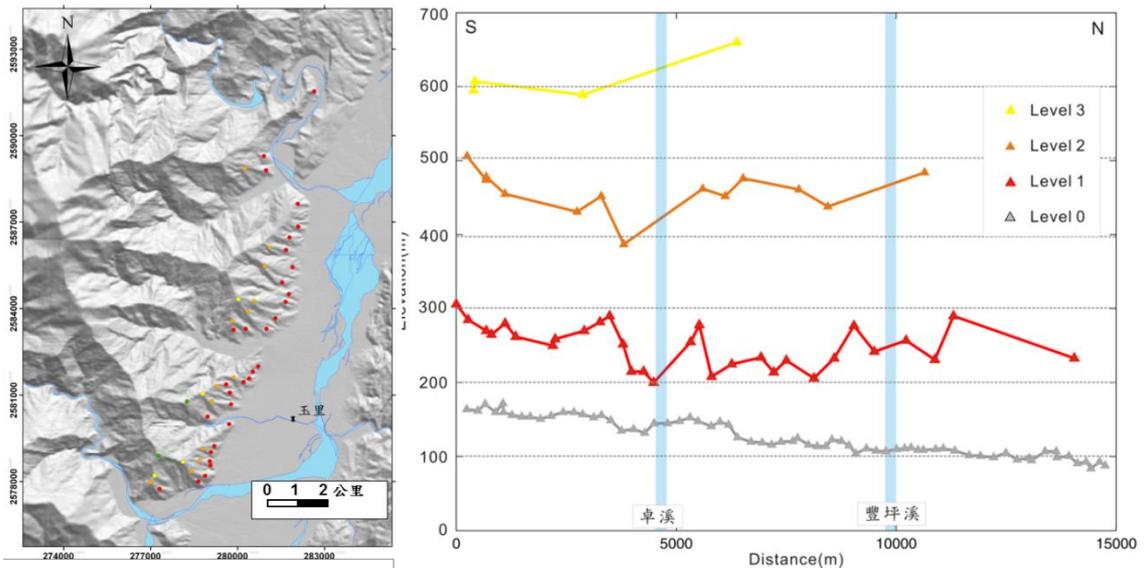


圖24、瑞穗-玉里段的三角崖切面的位置分布。Level1~3分別代表三期的三角崖切面頂點高度變化，Level 0為坡腳的高度變化。

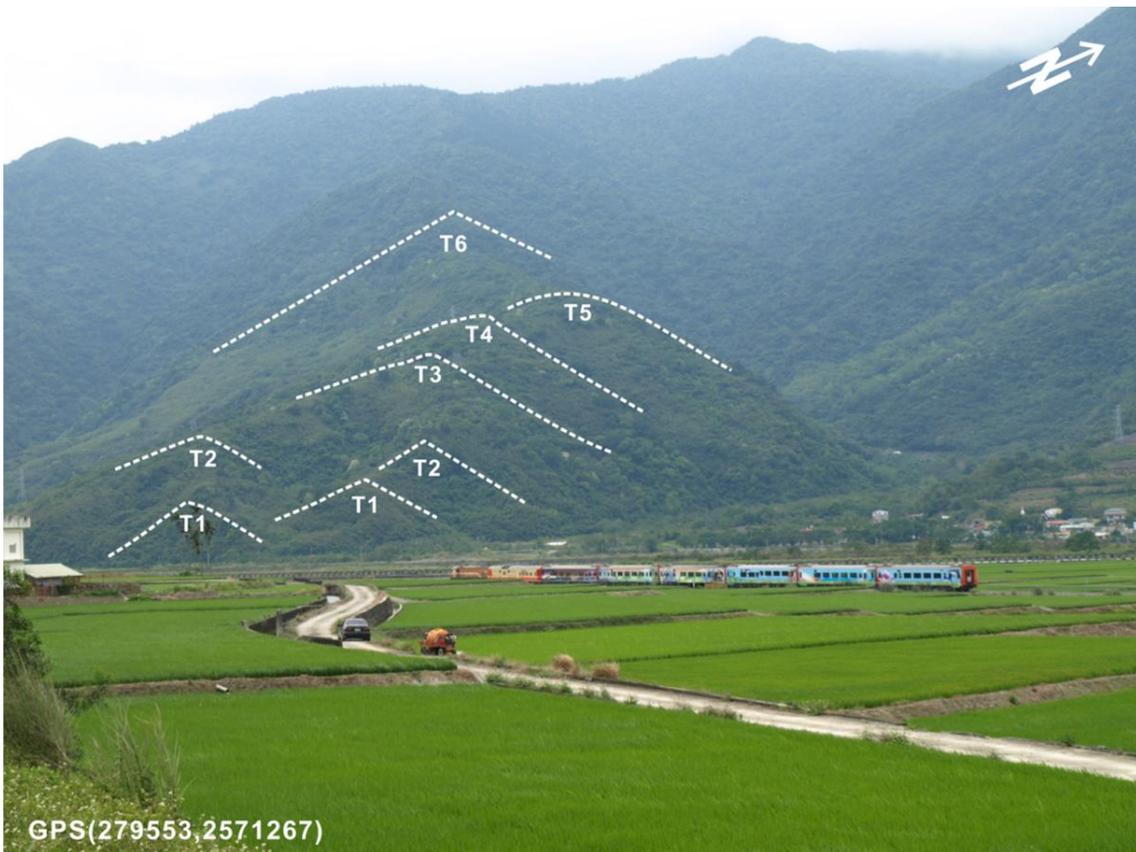


圖25、長良-池上段的三角崖切面形貌，可分為5~6期。

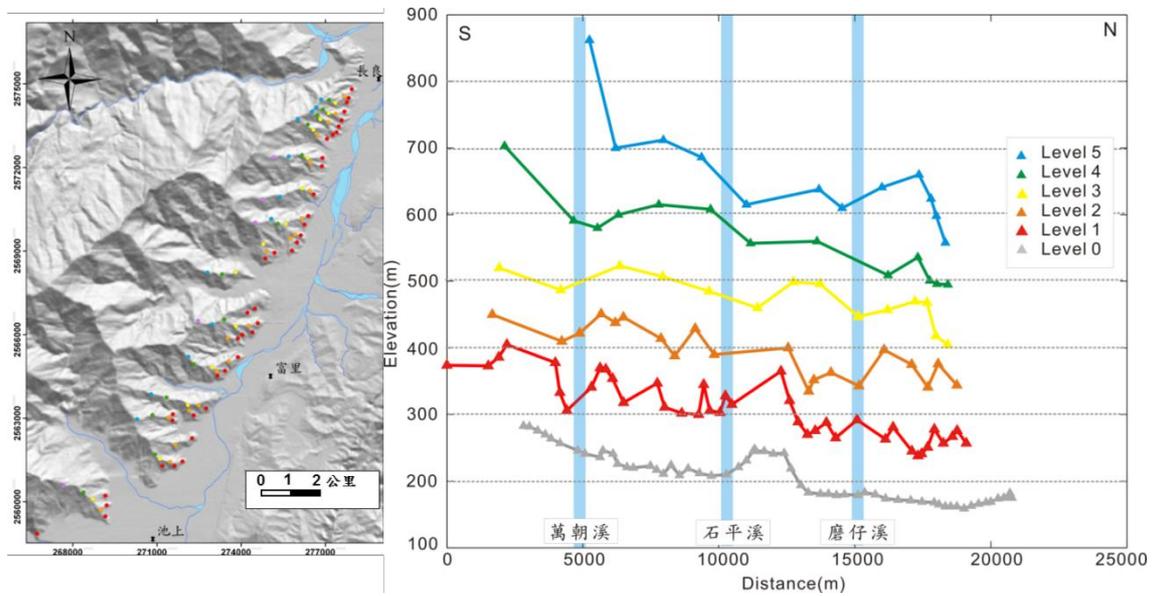


圖26、長良-池上段的三角崖切面的位置分布。Level1~5分別代表五期的三角崖切面頂點高度變化，Level 0為坡腳的高度變化。



圖27、海端-關山段的三角崖切面形貌，可分為4~5期。

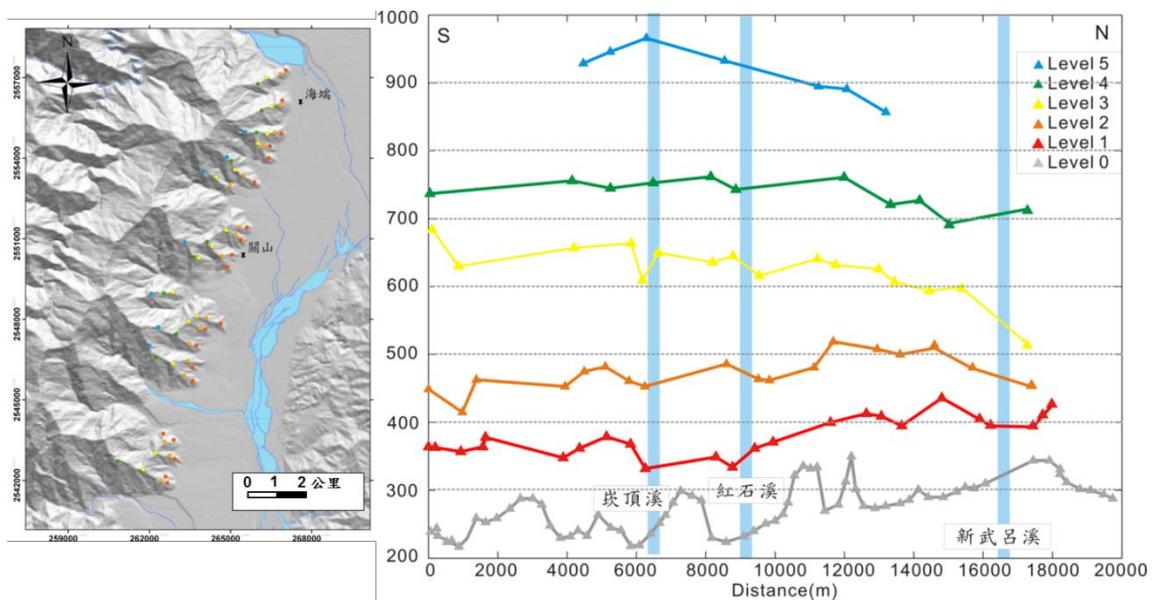


圖28、海端-關山段的三角崖切面的位置分布。Level1~5分別代表五期的三角崖切面頂點高度變化，Level 0為坡腳的高度變化。

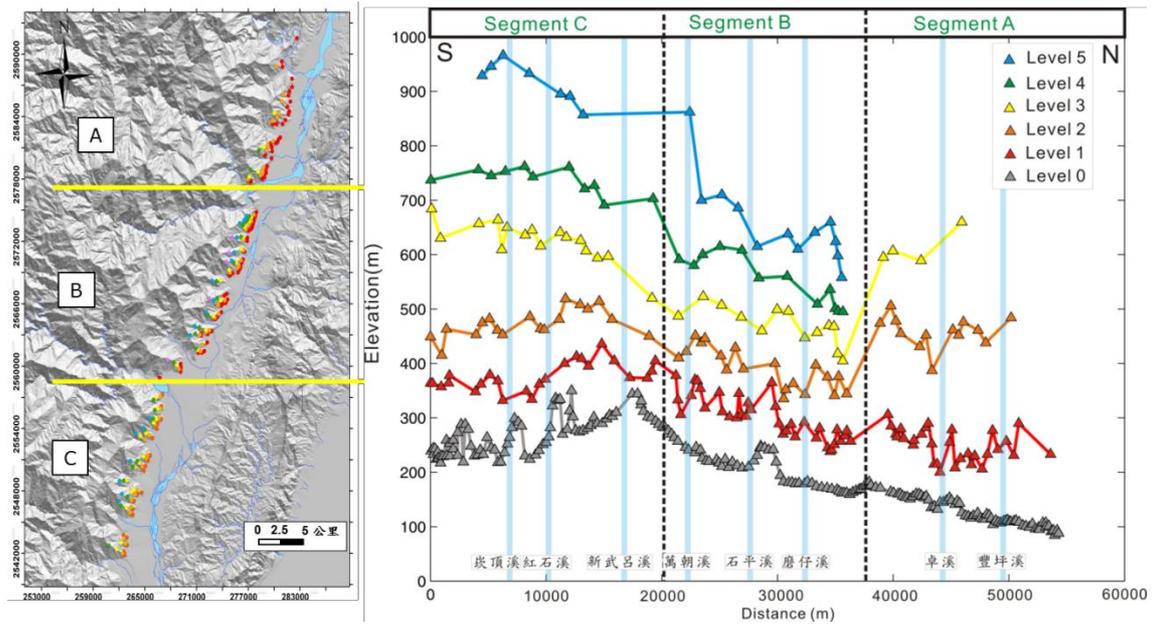


圖29、中央山脈東緣沿線的三角崖切面的位置分布及高度變化趨勢。Level1~5分別代表五期的三角崖切面頂點高度變化，Level 0為坡腳的高度變化。

4.4 河流地形分析

本研究選取16條河流主河道進行河流地形分析(圖30)，利用河流的坡度和流域面積資料繪製雙對數座標圖(以豐坪溪為例，圖31)，以基岩河道的坡度與面積之分布進行線性回歸，便可求得各水系的凹曲度指標(θ)，也就是m/n ratio 值，並得知陡峭度指標(steeptness index, ks)；圖31中的線性回歸公式： $Y=-aX+b$ 中， $-a$ 即為 θ 值， b (截距)則為陡峭度指標之對數值($\log(ks)$)。

Wobus (2006)指出，河流的凹曲度可反應構造的抬升速率，但影響凹曲度的因素還包括：河道的寬度和蜿蜒度、河床各種性質、侵蝕土石流發生頻率和山岳地形降雨增強效應等，因此以河流陡峭程度(ks值)來反映相對抬升速率會較正確。但由於ks和 θ 有極高的相關性，故需要導入參數 θ_{ref} (reference concavity)，使陡峭程度常態化，並得到一個與河流上升率正相關之數值-常態化陡峭程度參數(normalized steepness indices, k_{sn})。公式如下：

$$k_{sn} = k_s A_{cent}^{\theta_{ref} - \theta}$$

$$A_{cent} = 10^{(\log A_{max} - \log A_{min})/2}$$

式中的 k_s 與 θ 可由回歸法求之， θ_{ref} 為區域內所測得河流凹曲度的平均值， A_{max} 和 A_{min} 為分析河段流域面積的最大與最小範圍， A_{cent} 為分析河段流域面積的中位數。而求得之 k_{sn} 值則可反映區域的相對抬升速率。

透過陡峭度常態化的修正方式，去除凹曲度所提供的河流背景資訊，本研究選取之20條河流計算求得之 k_{sn} 結果如

表2、圖32及圖33示。由 k_{sn} 資料分布可將縱谷東側河流以豐坪溪為界分成南北兩段。北段的 k_{sn} 值偏高，除了光復溪和紅葉溪因流域面積小，造成 k_{sn} 值較低以外，其餘河流皆高於3000，以木瓜溪為北段最高(k_{sn} :5323)。包括豐坪溪在內的南段河流中，以豐坪溪、樂樂溪及清水溪的 k_{sn} 值為最高，於整體趨勢中 k_{sn} 值往南逐漸變小。豐坪溪及樂樂溪相對抬升速率較高，因其前緣有玉里斷層，推測可能與斷層活動有關。

綜合觀察三角崖切面分析及河流地形分析結果，皆可發現於豐坪溪以南之構造活動有一先向南遞減(至北新武呂溪)，再向南遞增的趨勢存在，顯示地形分析結果一致(圖29、圖32)。

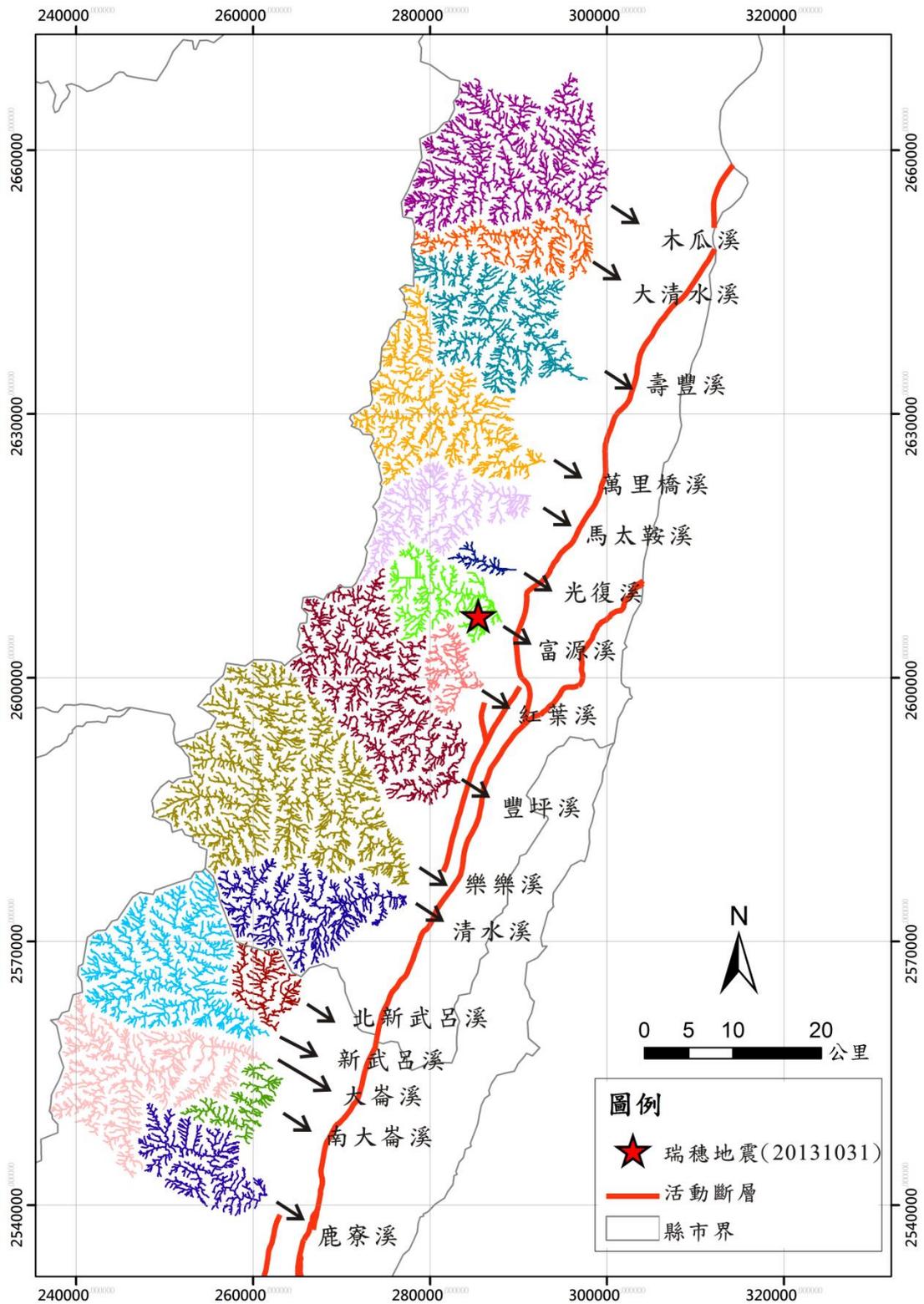


圖 30、研究區域內水系分布圖。

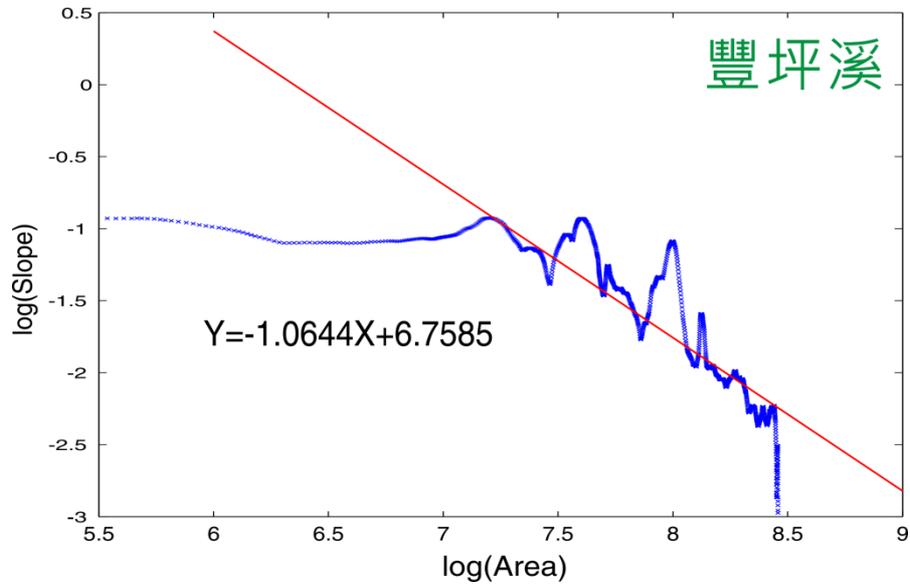


圖 31、河流之坡度-流域面積雙對數圖(以豐坪溪為例)。

表 2、本計畫各河流陡峭程度參數(k_{sn})所用參數($\theta_{ref}=0.6674$)。

| 河流名稱 | θ | $\log(k_s)$ | k_s | A_{cent} | K_{sn} |
|-------|----------|-------------|-----------|------------|----------|
| 鹿寮溪 | 0.8191 | 4.7702 | 58,911 | 9,632,900 | 5,141 |
| 南大崙溪 | 0.3780 | 1.4493 | 28 | 6,760,400 | 2,668 |
| 大崙溪 | 0.5673 | 2.8897 | 776 | 11,020,000 | 3,935 |
| 新武呂溪 | 0.7306 | 3.9978 | 9,949 | 11,547,000 | 3,563 |
| 北新武呂溪 | 0.6509 | 3.4042 | 2,536 | 6,649,700 | 3,289 |
| 清水溪 | 0.5334 | 2.7916 | 619 | 11,616,000 | 5,478 |
| 樂樂溪 | 0.7454 | 4.4121 | 25,829 | 12,773,000 | 7,213 |
| 豐坪溪 | 1.0644 | 6.7585 | 5,734,559 | 9,939,800 | 9,569 |
| 紅葉溪 | 0.7553 | 3.9987 | 9,970 | 5,246,300 | 2,560 |
| 富源溪 | 0.4954 | 2.4707 | 296 | 5,246,300 | 4,235 |
| 光復溪 | 0.9839 | 5.7346 | 542,750 | 5,246,300 | 4,056 |
| 馬太鞍溪 | 0.5163 | 2.7507 | 563 | 7,285,400 | 6,136 |
| 萬里橋溪 | 0.5293 | 2.7203 | 525 | 10,888,000 | 4,925 |
| 壽豐溪 | 0.7281 | 4.2081 | 16,147 | 6,866,500 | 6,215 |
| 大清水溪 | 0.4472 | 2.2406 | 174 | 7,665,100 | 5,713 |
| 木瓜溪 | 0.7345 | 4.3544 | 22,615 | 14,414,000 | 7,488 |

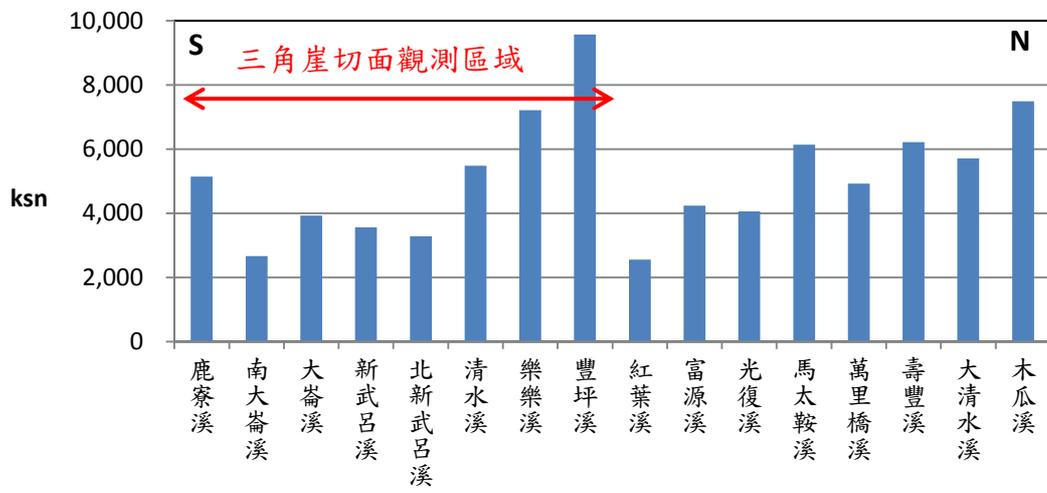


圖 32、研究區域內水系之陡峭程度參數值(k_{sn})。

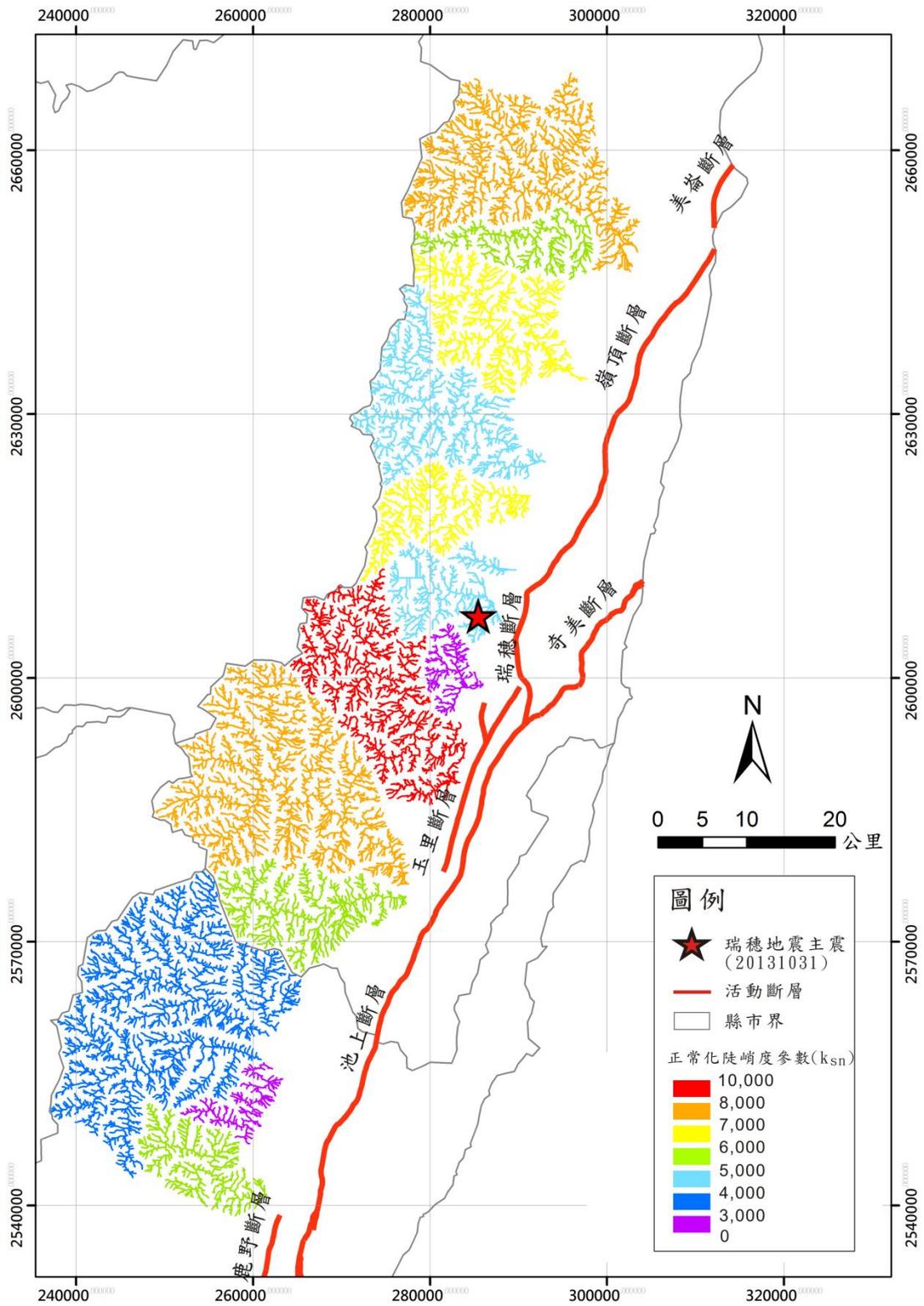


圖 33、研究區域之 k_{sn} 值分布圖。

4.5 野外調查

中央山脈斷層雖無出露地表的野外證據資料，但我們可由伴隨斷層而生的次生構造進行斷層活動分析，以探究中央山脈斷層的活動及構造特性。本次野外調查地點主要位於中央山脈東翼南段區域，調查重點主要為伴隨斷層活動產生的節理、褶皺及劈理等構造；褶皺和劈理可以反映斷層於早期的活動特性，而節理則反映斷層近期的活動特性，其結果分區介紹如下所述。

4.5.1 現生的三角崖切面-龍泉山崩

龍泉溪崩塌事件在2006年7月發生，其位置在台東縣海端鄉龍泉溪之上游(圖34)，雖崩塌事件發生已將近6年，至今仍可清楚觀察到大規模的崩塌面(圖35)。

經由現地觀察，龍泉溪的崩塌面主要方位為 065° ，崩塌面向東南方，呈現數個重疊的三角切面(圖36)，且崩塌面上仍留有岩層滑落造成之擦痕，此組位態的崩塌面為張應力造成之構造。此區岩性主要以板岩為主，發達的板劈理使得岩層較為破碎，其板劈理位態約為 $144^\circ, 28^\circ\text{N}$ 。除了板劈理外，此區亦普遍存在一組節理，其位態約為 $133^\circ, 87^\circ\text{S}$ (圖36、圖37)；節理走向大致與劈理面成正交，岩層在劈理面及節理面的相互切割下顯得相當破碎，進而促使板岩大量崩落。

龍泉山崩的三角切面崩崖與中央山脈東緣鄰近縱谷側存在許多三角崖切面的地形特徵相似，推測和中央山脈斷層的發育於近地表區域所造成的張應力環境相關。



圖34、龍泉溪上游崩塌區域(圖中紅色方框)，此影像為Google Earth公佈，於2012年所拍攝之衛星影像(座標位置:[N23°10'22.74", E121°10'51.84"])。

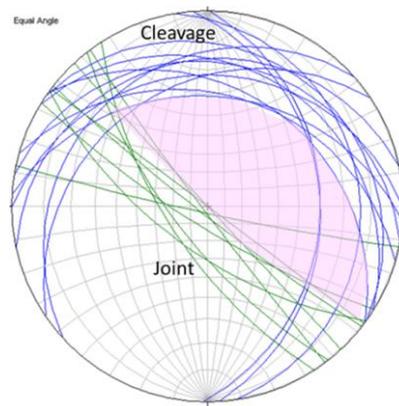


圖 37、龍泉溪上游崩塌區域中，節理(綠線)及劈理(藍線)位態分布之下半球投影圖。此區崩塌乃因節理和劈理交互存在，形成一不利岩楔(圖中粉紅色區塊)。

4.5.2 正斷層系統及伴隨的張裂節理

除了從三角崖切面可觀察中央山脈斷層於地表呈現正斷層的地形特徵外，我們亦於河谷內發現正斷層的活動證據，以及伴隨正斷層發育產生的張裂節理構造(extension joint)。

於鹿野溪河谷內(圖38)觀察到大型斷層，並根據斷層面上的擦痕紀錄可得知此為正斷層系統，斷層擦痕位態為 $100^{\circ}, 34^{\circ}\text{S}, 80^{\circ}\text{E}$ (圖39)。於利嘉溪比利良橋旁的河谷內(圖44)，可觀察到一系列的斷層系統(圖45、圖46)；於三條並行的斷層帶中(圖45)，根據斷層帶內岩層剪動後的破碎產狀以及斷層兩側石英脈的型態可推得三條斷層都帶有正斷層的分量(圖45b)，斷層位態為 $038^{\circ}, 48^{\circ}\text{E}$ ，此外根據斷層面上的擦痕紀錄資料($030^{\circ}, 52^{\circ}\text{E}, 22^{\circ}\text{S}$)顯示，三條斷層在後期有右移帶有逆衝的運動分量(圖45c)。在三條斷層系統的東南方，尚有一組共軛的斷層(圖46)，根據岩層破碎及位移的產狀，可推得斷層1(F1)和斷層2(F2)皆為正斷層，斷層位態分別為 $048^{\circ}, 48^{\circ}\text{E}$ (F1)、 $035^{\circ}, 46^{\circ}\text{E}$ 。

在發育正斷層時的應力分布為拉張環境(σ_3 在水平方向， σ_1 在垂直方向，圖39左下圖)，此時容易產生伸張節理系統(圖43)，故可藉由觀察伸張節理的位態分布，推估正斷層的活動特性。經過地質調查，在鹿寮溪(圖44)、鹿野溪，以及利嘉溪皆可觀察到發達的伸張節理；鹿寮溪的伸張節理位態約為 $118^{\circ}, 70^{\circ}\text{S}$ (圖45)，節理截切岩層內的其他構造，包括褶皺的地層面、劈理以及被褶曲的石英脈，為近期發育的構造。於鹿野溪中，伸張節理發育成小型正斷層系統截切並錯動岩層內的劈理構造，伸張節理的走向分布可分成 118° 和 148° 兩群，皆呈現高角度傾斜(圖46)。利嘉溪的伸張節理走向約介於 $118^{\circ}\sim 152^{\circ}$ ，其節理面亦呈現高角度。三個野外地點的伸張節理位態相近，走向位於 $118^{\circ}\sim 152^{\circ}$ 之間，可反映東北-西南方向的拉張應力。



圖38、鹿野溪的露頭位置(黃色線段)及出露的正斷層(紅色線段)。(座標位置:[N22°53'23.70",E121°04'06.29"]影像來源: Google Earth於2012年所拍攝之衛星影像)。

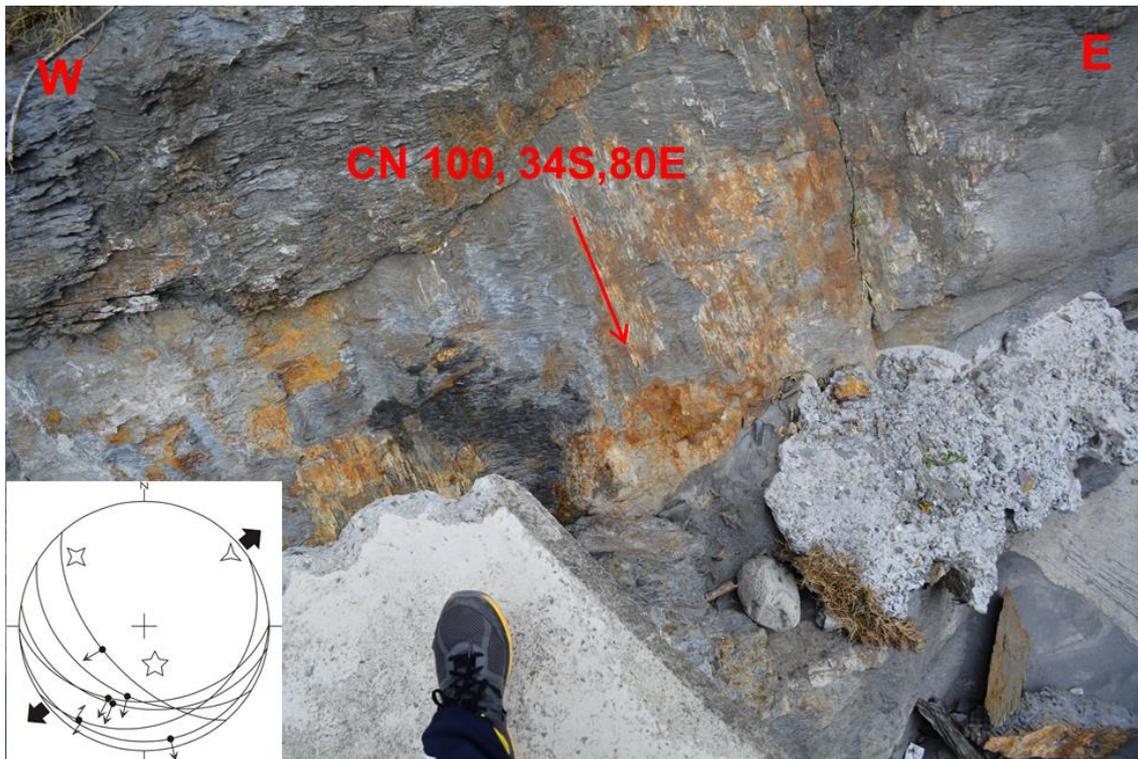


圖39、鹿野溪的正斷層系統。根據斷層面上的擦痕資料(圖中紅色箭頭;位態為 100° , 34°S , 80°E)顯示, 此為正斷層系統, 右下角為擦痕資料的下半球投影圖。



圖 40、利嘉溪的露頭位置(黃色線段)及出露的正斷層(紅色線段)。(座標位置:[N22°59'17.16", E121°07'20.14"], 影像來源: Google Earth於2012年所拍攝之衛星影像)。

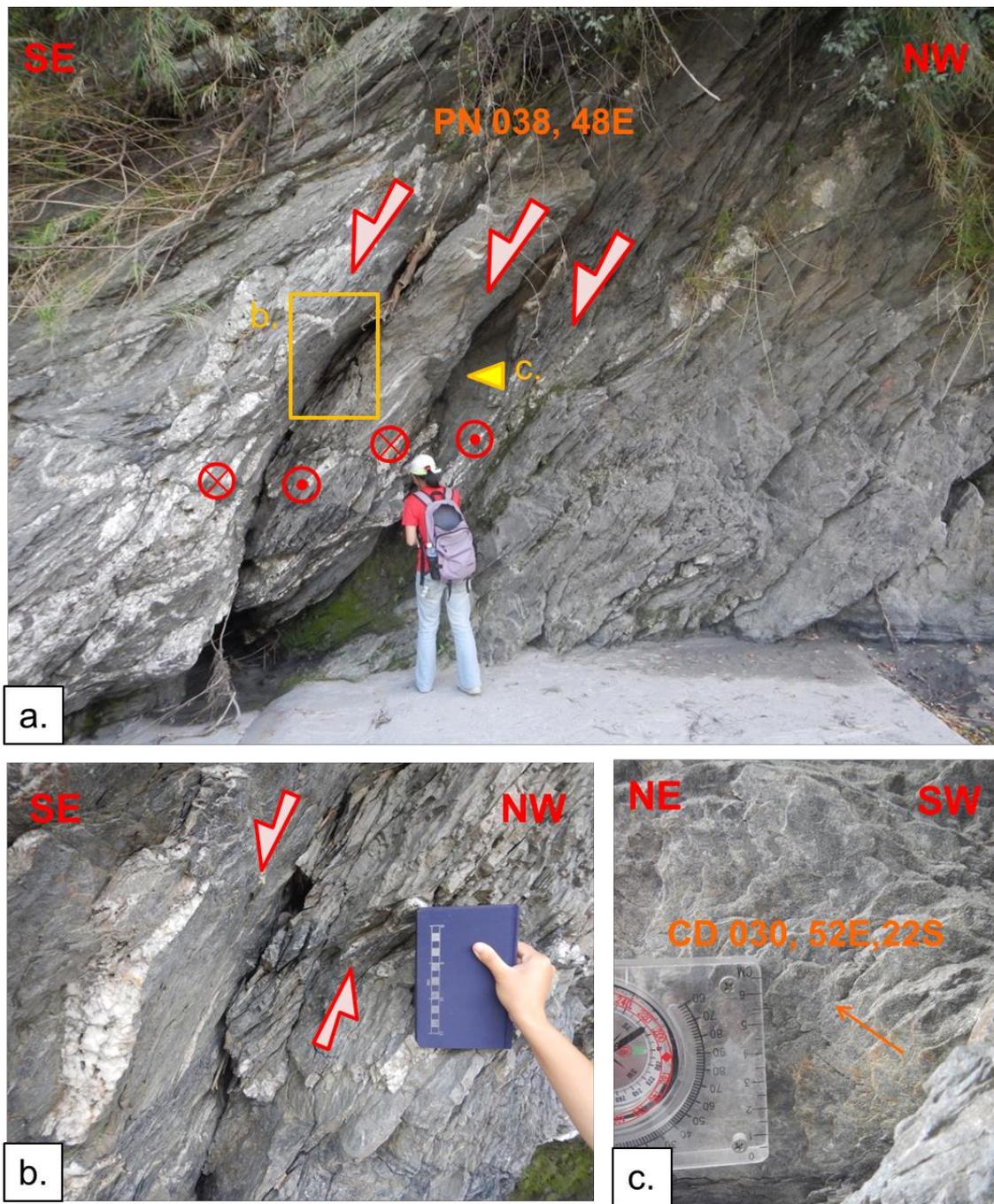


圖41、利嘉溪的正斷層系統。(a)為3條帶有右移分量的正斷層系統，斷層位態為 038° , 48°E ，(b)根據岩層剪動產狀及石英脈型態，判斷此為正斷層系統，(c)透過斷層面上的擦痕資料(圖中橘色箭頭，位態為 030° , 52°E , 22°S)顯示，此斷層後期帶有右移逆衝分量。

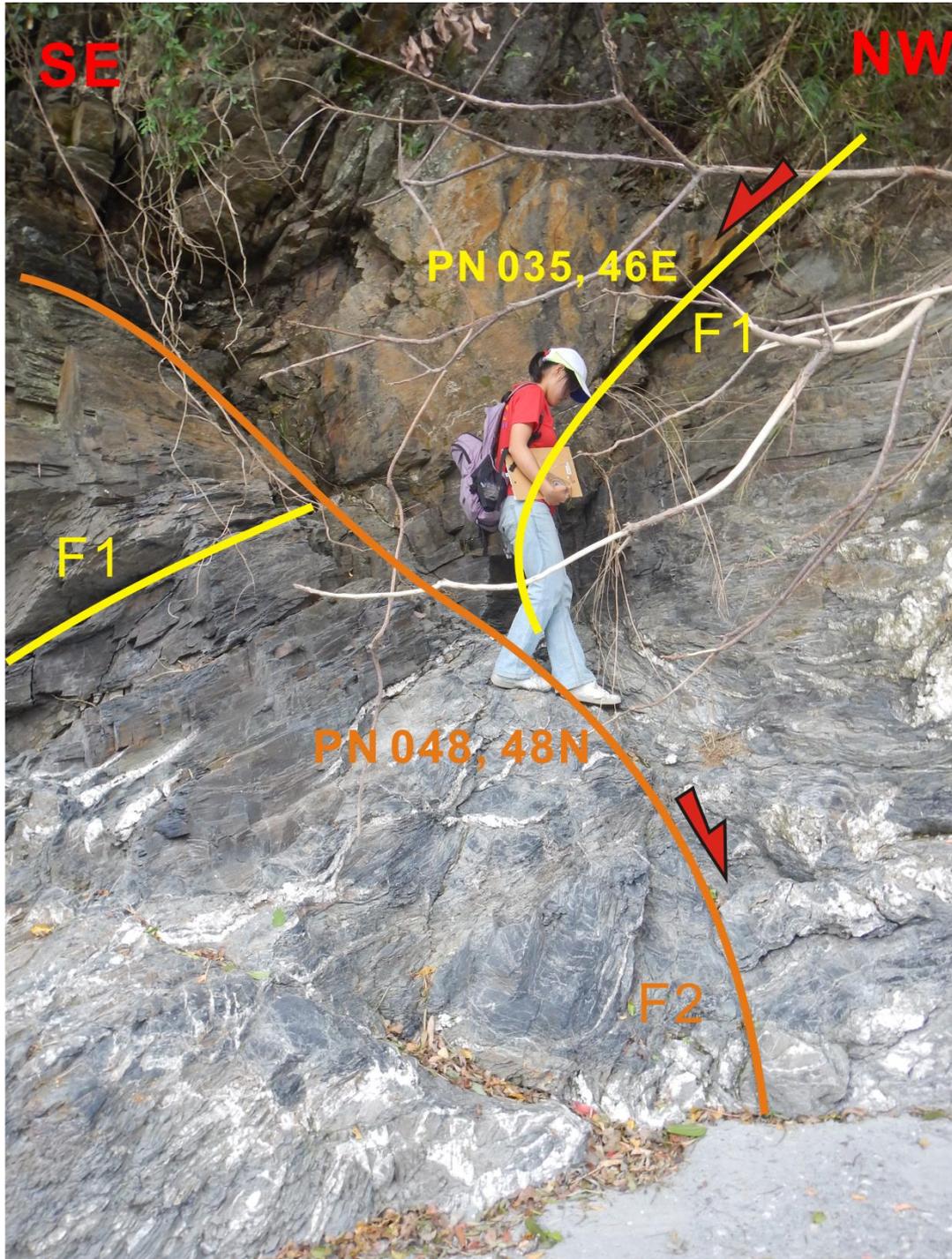


圖42、利嘉溪的共軛正斷層系統。根據岩層剪動產狀及石英脈型態，判斷兩組斷層皆為正斷層系統，斷層1(F1)的位態為 $035^{\circ}46^{\circ}\text{E}$ ，斷層2(F2)的位態為 $048^{\circ}, 48^{\circ}\text{N}$ 。

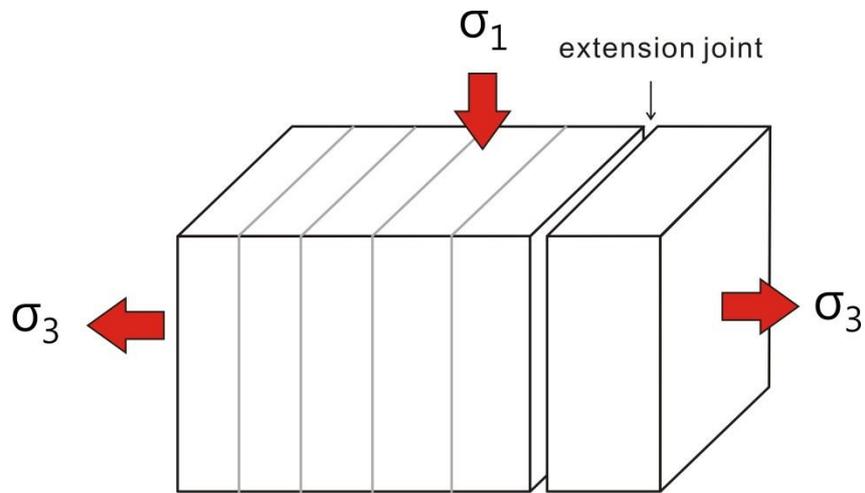


圖43、伸張節理(extension joint)的示意圖。伸張節理垂直於最小主應力軸方向(σ_3)所發生張裂所形成的節理，是位於張應力環境下的脆性變形，推論此區域的伸張節理可能和正斷層的發育有關。



圖44、鹿寮溪的露頭位置(黃色線段)及出露的右移斷層(紅色線段)。(座標位置:[N22°57'59.82",E121°06'18.60"]影像來源: Google Earth於2012年所拍攝之衛星影像)。

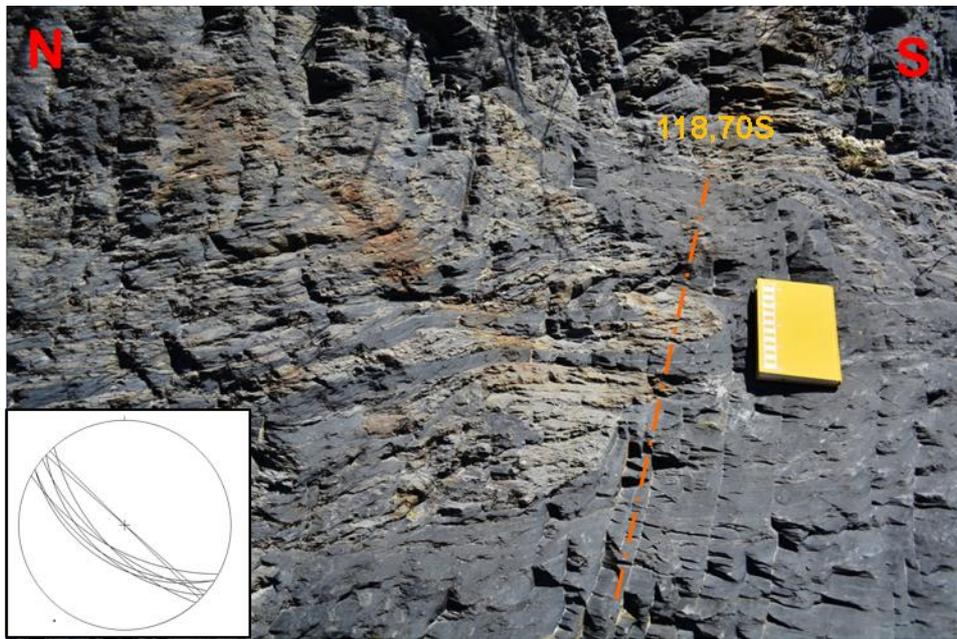


圖45、鹿寮溪的節理及其位態分布。節理位態為 $118^{\circ}, 70^{\circ}\text{S}$ ，右下角為節理的下半球投影。

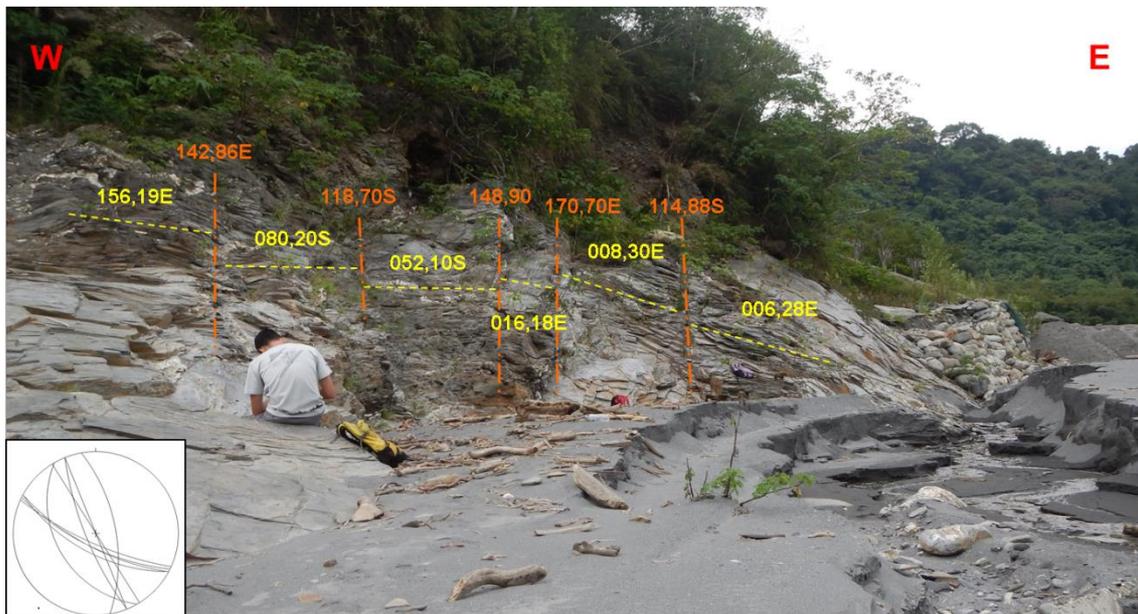


圖46、鹿野溪的節理及劈理構造。橘線為節理位態，黃線表示劈理位態，此區域的節理位態約為 $118^{\circ}, 70^{\circ}\text{S}$ ，右下角為節理的下半球投影。

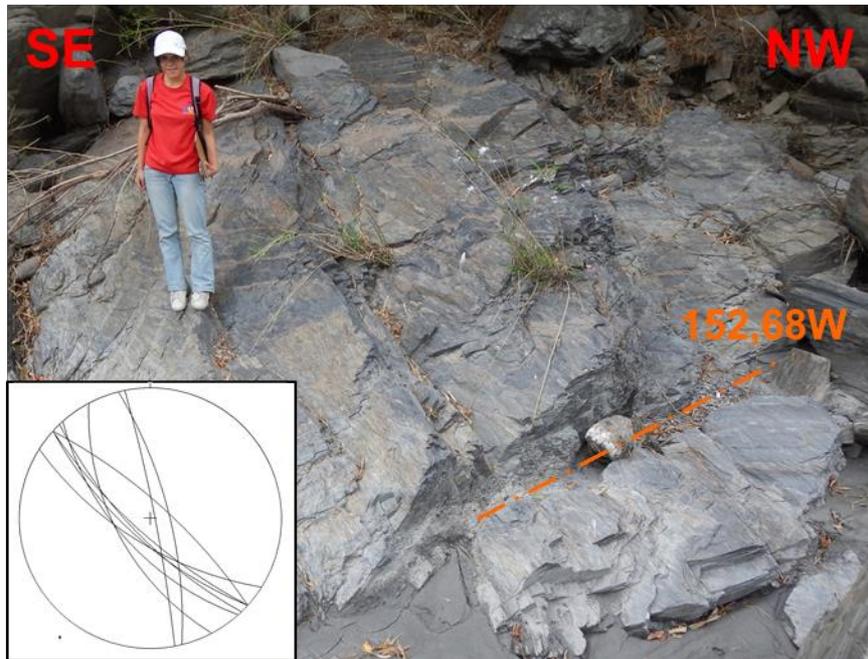


圖47、利嘉溪的節理及其位態分布。此區域的節理位態約為 $152^{\circ}, 68^{\circ}W$ ，右下角為節理的下半球投影。

4.5.3 伴隨逆斷層活動發育的褶皺及軸面劈理

於逆斷層發育時，常伴隨著褶皺構造，因地層深部的岩層較為塑性，故在斷層快速活動時，岩層受到擠壓會形成緊密褶皺，並發育一系列的軸面劈理 (Crenulation cleavage)，而緊密褶皺的伸向(verging)會與逆斷層的運動方向一致，軸面劈理的傾斜方向會與逆斷層的傾斜方向相同(圖48)。

於鹿寮溪和利嘉溪的溪谷的露頭，可觀察岩層受到強烈擠壓而形成的緊密褶皺及軸面劈理。從砂岩層的變形可觀察鹿寮溪的岩層形成向西南伸向的褶皺(圖49a)，由砂岩層的位態分布得知褶皺軸面的位態為 $120^{\circ}, 57^{\circ}S$ (圖49b)，而軸面劈理隨著褶皺發育有扇狀分布的現象，其位態分布介於 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ ，向東傾斜(圖49c)。利嘉溪的砂岩層形成向西北伸向的褶皺，並伴隨著 $0^{\circ}\sim 40^{\circ}$ ，向東傾斜約 30° 的軸面劈理(圖50)。

根據緊密褶皺的伸向及軸面劈理的位態，推論造成岩層變形的斷層應含有向西逆衝的分量，而非單純向東逆衝的斷層所致，綜合地表觀測到的正斷層位態，及由地震資料推得的深部存在一向西傾斜的逆斷層現象，推論褶皺和劈理應於中央山脈深部形成，而後隨著中央山脈斷層活動逆衝於地表，並隨著中央山脈斷層於近地表發生翻轉，使逆衝斷層發生轉向，並造成褶皺伸向改變(圖51)。

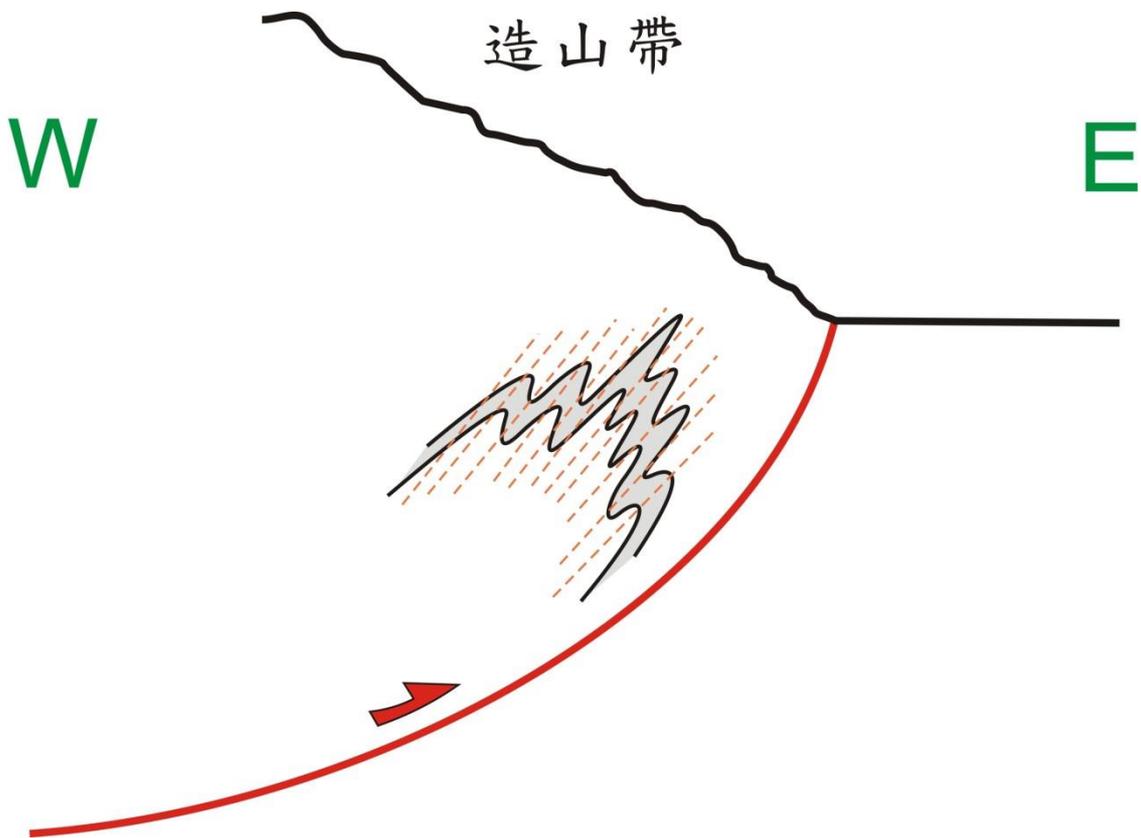


圖48、於逆斷層發育時，經常會伴隨強烈的褶皺作用及發育軸面劈理；褶皺的伸向會與逆衝方向一致，而軸面劈理的傾向會與斷層傾向相同。

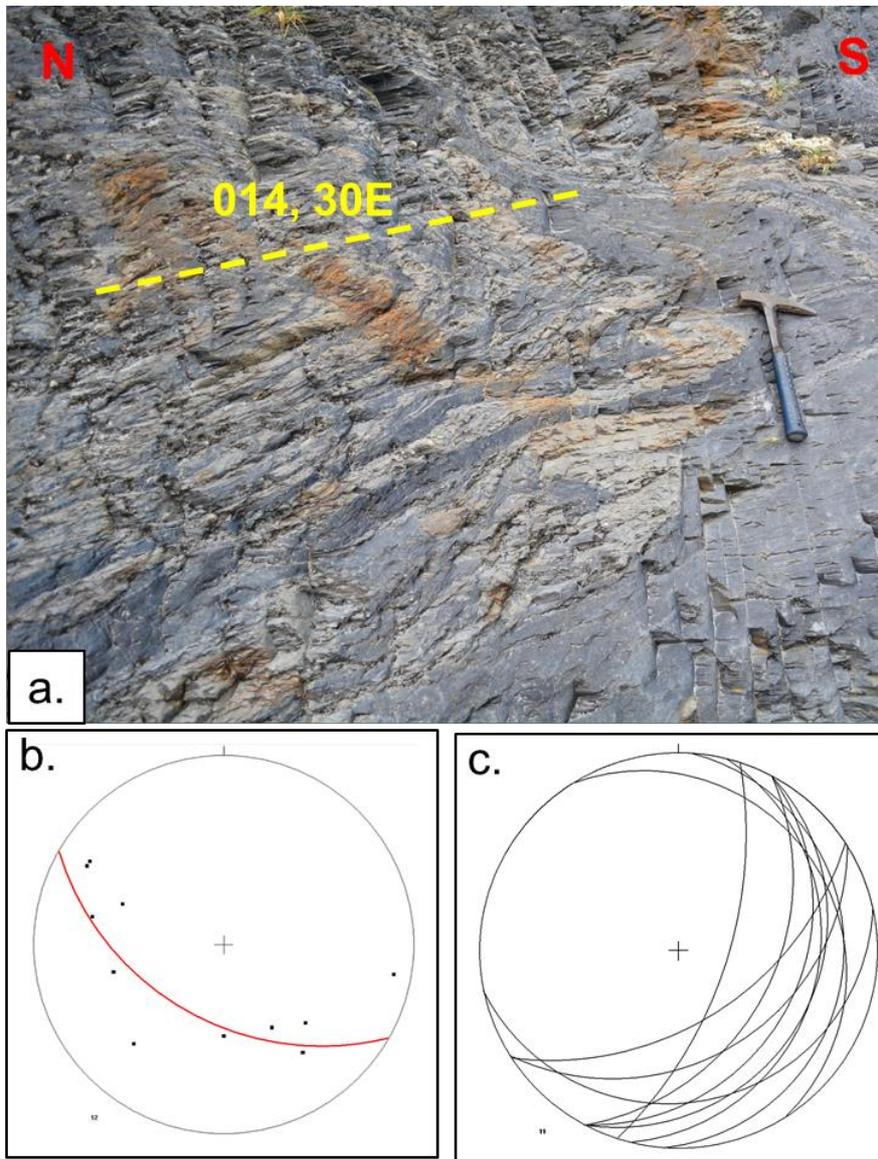


圖49、鹿寮溪的緊密褶皺及軸面劈理。(a)由砂岩層的變形可觀察此區域的褶皺伸向向西南方向傾斜，軸面劈理的位態約為 $14^{\circ}, 30^{\circ}\text{E}$ ；(b)砂岩層的位態分布(黑點)及褶皺軸面(紅線)的下半球投影，褶皺軸面的位態 $120^{\circ}, 57^{\circ}\text{S}$ ；(c)為此區域軸面劈理的下半球投影。

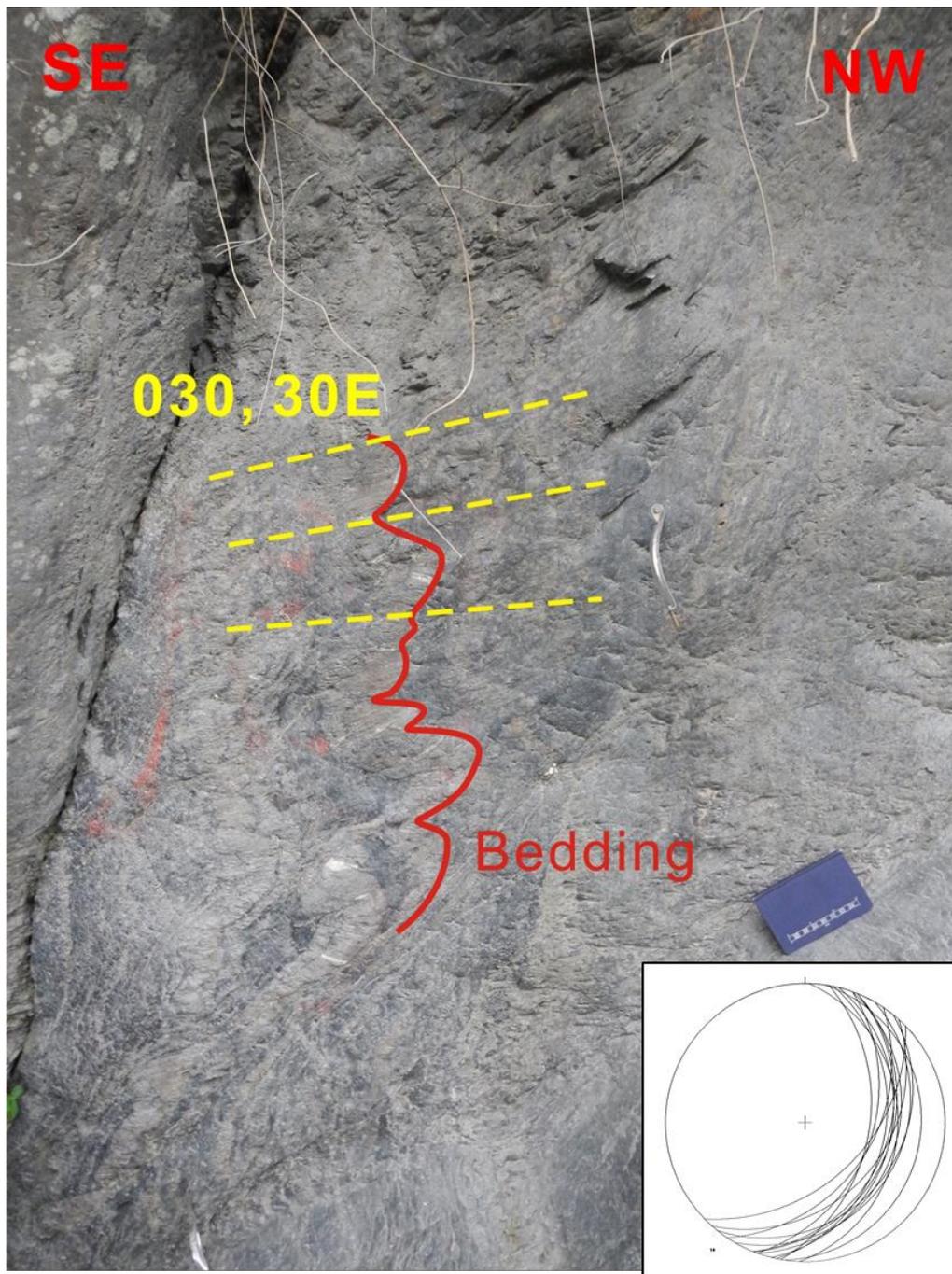


圖50、利嘉溪的緊密褶皺及軸面劈理(黃線)。此區域的褶皺的伸向為西北方向，軸面劈理的位態約為 $30^{\circ}, 30^{\circ}\text{E}$ ，右下角為此區域劈理構造的下半球投影。

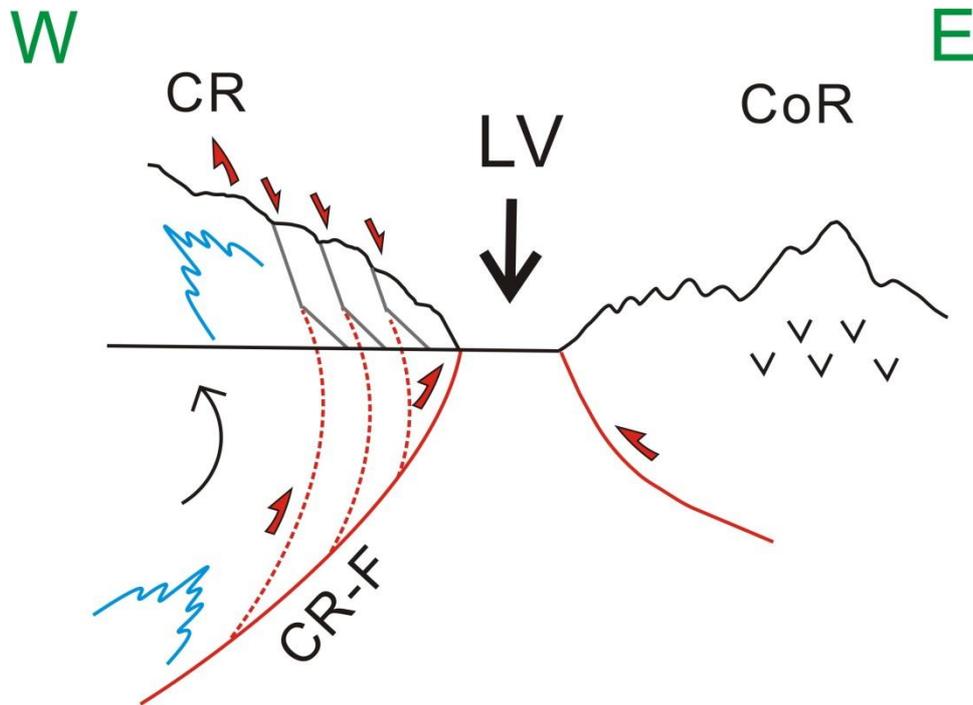


圖51、中央山脈斷層翻轉模型。根據野外所觀察的褶皺伸向向西，以及軸面劈理向東傾斜的現象，綜合地表觀察到的正斷層及由地震資料推得的深部存在一向西傾斜的逆斷層現象，推論此現象應為中央山脈斷層於近地表翻轉(rollback)之結果。

4.6 構造模型

透過地表地形分析，於中央山脈東緣與縱谷交界處觀察到許多三角崖切面之斷層地形特徵，顯示地表有正斷層活動之證據，加上透過不同時期的三角崖切面，及河流地形分析，得知中央山脈東側有持續抬升之現象，推測中央山脈東側下方應存在發達的抬升構造。由野外地質調查觀察之正斷層，及伸張節理的分佈位態，可證實中央山脈東翼有正斷層活動證據。另外，透過緊密褶皺的伸向和軸面劈理的傾向，可得知在早期在深部形成的褶皺和劈理構造出露地表後，隨著斷層活動翻轉成向西伸向的褶皺及向東傾斜的軸面劈理(圖51)。

透過瑞穗地震和台東地震的餘震深度分布位置(圖12、圖20)，得知瑞穗地震和台東地震之發震斷層為一向西傾的逆斷層系統，配合地表地形資訊推測此斷層之型態如圖52所示，此斷層於深部為逆斷層系統，但接近地表時斷層有翻轉(rollback)之現象，故會在地表觀測到正斷層的地形特徵。

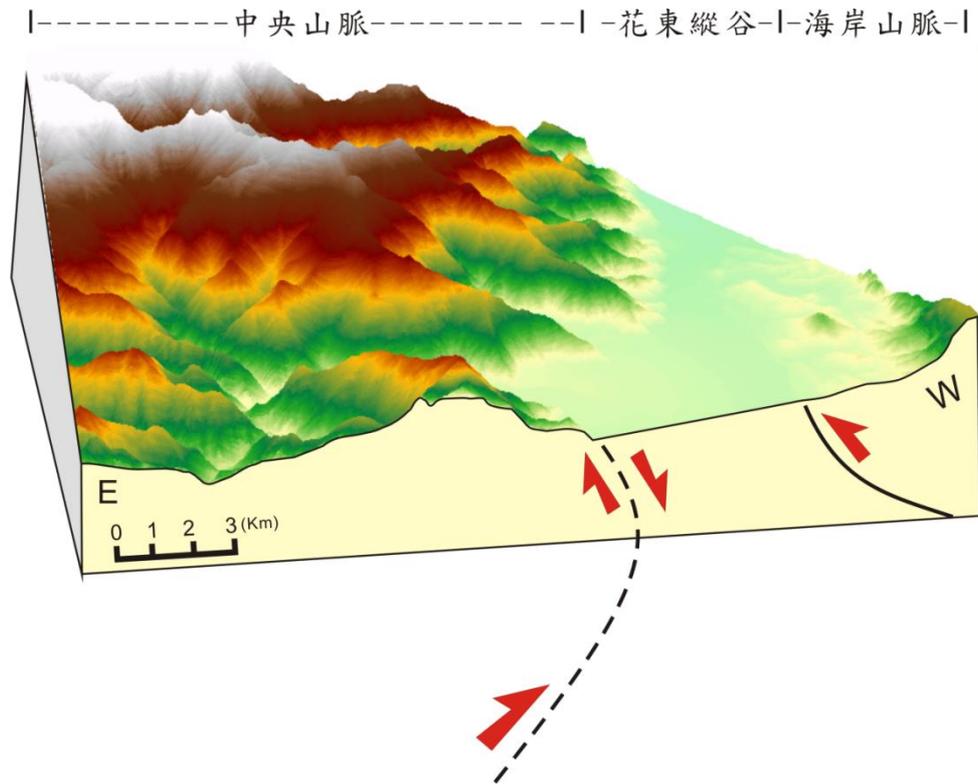


圖 52、中央山脈斷層之構造模型。

伍、結論

花蓮地區於2013年10月31日規模6.3之地震，震源深度在19.5公里，於地表未發現地表變形及破裂，故無法利用光學影像進行地表變異初步分析。本團隊於震後至震央鄰近區域進行地質調查，由於中央山脈東緣的斷層活動構造並不顯著，地質調查結果不盡理想，故本研究將研究主軸放置在中央山脈活動性之調查，針對前人研究中所推測的中央山脈斷層沿線進行地形資料分析及彙整，藉由地形資訊得知中央山脈東緣的構造活動性，並針對中央山脈南段進行野外調查，藉由次生構造推得中央山脈斷層地活動性，其成果如下：

1. 經由三角崖切面地形分析可觀察出中央山脈東緣的抬升速率變化有往南增加的趨勢，長良—池上段，各期的三角崖切面高度差一致，顯示此區段的抬升活動有穩定性的變化，瑞穗—玉里段及海端—關山段則有早期抬升速率較快的現象，抬升速率最快的地方位於新武呂溪口南側。
2. 透過河流地形分析得知豐坪溪和樂樂溪一帶的抬升速率較快，應與其前緣的玉里斷層活動有關。
3. 綜合三角崖切面及河流地形分析結果，皆可觀察豐坪溪以南之構造活動有一先向南遞減(至北新武呂溪)，再向南遞增的趨勢存在，顯示地形分析結果一致。
4. 透過地質調查結果顯示，於中央山脈東翼南段的河谷中，可找到正斷層的活動證據，並由 $118^{\circ}\sim 152^{\circ}$ 方向的伸張節理系統觀察此區存在東北-西南方向的拉張應力，可能和正斷層活動有關。
5. 針對緊密褶皺和劈理位態的相關研究，可推論於深部形成的褶皺和劈理在於出露地表，隨著斷層活動一起發生翻轉。
6. 根據瑞穗地震和台東地震的餘震資料，可得知於中央山脈東翼深部存在一向西傾斜的逆斷層系統，並於淺層約5公里處呈現鎖住的狀態，無地震活動。
7. 綜合以上資料可推得中央山脈斷層於深部為一向西傾斜的逆斷層系統，但於近地表5公里深處翻轉成正斷層系統，並於地表發育一系列和正斷層相關的地形及構造。

陸、參考文獻

1. 日本活斷層研究會，1980，日本的活斷層—分布圖與資料，東京，東京大學出版會，363頁。
2. 日本活斷層研究會，1992，日本的活斷層圖，東京，東京大學出版會，73頁。(日文英文對照)
3. 石再添、楊貴三、張瑞津，1993，台灣活斷層的地形學研究概要，地工技術雜誌，44，26-51。
4. 石再添，1986，台灣地區活動斷層的地形研究，師大地理，第12期，1-45頁。
5. 林啟文、張徽正、盧詩丁、石同生、黃文正，2000，台灣活動斷層概論第二版。五十萬分之一台灣活動斷層分布圖說明書。經濟部中央地質調查所特刊，13，79-80。
6. 林朝榮，1957，台灣地形，台灣省文獻委員會。
7. 林啟文、張徽正、盧詩丁、石同生、黃文正，2000a，台灣活動斷層概論(第二版)。經濟部中央地質調查所，共122頁。

8. 李建成、黃文正、詹瑜璋，2010，台灣西南部山區的東北-西南走向構造及其與甲仙地震之關係。中華民國地質學會與中華民國地球物理學會-99年會暨學術研討會「永續生存發展的新課題」論文集，100頁。
9. 沈淑敏、張瑞津、楊貴三，2005，地震地質調查及活動斷層資料庫建置—活動構造地形及資料庫建置分析（1/2）。經濟部中央地質調查所研究報告94-6號，共80頁。
10. 陳文山，1993，海岸山脈地區花東縱谷斷層的活動性淺談。地工技術雜誌，第44期，52-57頁。
11. 張徽正、林啟文、陳勉銘、盧詩丁，1998，台灣活動斷層概論，經濟部中央地質調查所特刊第10號，103頁。
12. 張中白、張文和、侯進雄、劉彥求、馬國鳳，2010，台灣西南部山區的東北-西南走向構造及其與甲仙地震之關係。中華民國地質學會與中華民國地球物理學會-99年會暨學術研討會「永續生存發展的新課題」論文集，99頁。
13. 經濟部中央地質調查所，2009, 2010，「台灣活動斷層分布圖(第二版，1/500,000)。
14. Angelier, J., E. Barrier, H.T. Chu, 1986, Plate collision and paleostress trajectories in a fold-thrust belt: the Foothills of Taiwan. *Tectonophysics*, v. 125, p. 161-178.
15. Burgmann, R., Rosen, P. A. and Fielding, E. J., 2000, Synthetic Aperture Radar Interferometry to Measure Earth's Surface Topography and Its Deformation, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, v. 28, p.169-209.
16. Bruce, J., Shyu, H., Sieh, K., Chen, Y.-G., and Chung, L.-H., 2006, Geomorphic analysis of the Central Range fault, the second major active structure of the Longitudinal Valley suture, eastern Taiwan: *Geological Society of America Bulletin*, v. 118, no. 11-12, p. 1447-1462.
17. Chang, C.-P., Chen, K. S., Wang, C. T. and Yen, J.-Y., 2004, Application of Space-Borne Radar Interferometry on Crustal Deformations in Taiwan: A Perspective From the Nature of Events, *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, v. 3, p.523-543.
18. Chuang, R. Y., Johnson, K. M., Kuo, Y. T., Wu, Y. M., Chang, C. H., & Kuo, L. C., 2014, Active back thrust in the eastern Taiwan suture revealed by the 2013 Rueisuei earthquake: Evidence for a doubly vergent orogenic wedge?. *Geophysical Research Letters*. v. 41(10), p. 3464-3470.
19. Hack, J.T., 1957, Studies of longitudinal stream profile in Virginia and Maryland: *U.S. Geol. Surv, Prof.*, 294-B, 45-95.
20. Hamblin, W., 1976, Patterns of displacement along the Wasatch fault: *Geology*, v. 4, no. 10, p. 619-622.
21. Massonnet, D. and Feigl, K. L., 1998, Radar Interferometry and Its Application to Changes in the Earth's Surface, *Reviews of Geophysics*, v. 36, p. 441-500.
22. Ng, S. M., Angelier, J. and Chang, C. P., 2009, Earthquake cycle in Western Taiwan: Insights from historical seismicity, *Geophysical Journal International*, v. 178, p. 753-774.
23. Tang, C.H., 1968, Photogeological Observations on the Low Hilly Terrain and Coastal Plain Area of Hsinchu, Taiwan: *Petrol. Geol. Taiwan*, v. 6, p. 71-79.
24. Rosenbloom, N. A., and Anderson, R. L., 1987, Hillslope and channel evolution in a marine terraced landscape: Santa Cruz, California, *J. Geophys. Res.*, 99, 14013-14029.

25. Snow, R. S., and Slingerland R. L., 1987, Mathematical modeling of graded river profile: *Journal of Geology*, 95, 15-33.
26. Ohmori, H., 1991, Change in the mathematical function type describing the longitudinal profile of a river through an evolutionary process: *Journal of Geology*, 99, 97–110.
27. Whipple, K. X., Kirby, E., and Brocklehurst, S. H., 1999, Geomorphic limits to climate induced increases in topographic relief: *Nature*, 401, 39-43.
28. Whipple, K. X., and Tucker, G. E., 1999, Dynamics of the stream-power river incision model: Implications for height limits of mountain ranges, landscape response timescales, and research needs: *J. Geophys. Res.*, 104, 17661-17674.
29. Whipple, K. X., 2004, Bedrock rivers and the geomorphology of active orogens: *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 32, 151-185.
30. Wobus, C., Whipple, K. X., Kirby, E., Snyder, N., Johnson, J., Spyropoulou, K., Crosby, B., and Sheehan, D., 2006a, Tectonics from topography: Procedures, promise, and pitfalls. *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.*, 398, 55-74, doi:10.1130/2006.2398(04).
31. Wu, Y. M., Chen, Y. G., Chang, C. H., Chung, L. H., Teng, T. L., Wu, F. T., & Wu, C. F., 2006, Seismogenic structure in a tectonic suture zone: With new constraints from 2006 Mw6.1 Taitung earthquake. *Geophysical research letters*, v. 33(22), pp. 5.
32. Yu-Chang Chan, Yue-Gau Chen, Tian-Yuan Shih, Chung Huang, 2007, Characterizing the Hsincheng Active Fault in Northern Taiwan Using Airborne LiDAR Data: Detailed Geomorphic Features and Their Structural Implications, *Journal of Asian Earth Sciences* 31, p.303-316.

交通部中央氣象局

委託研究計畫期末成果報告

臺灣地區 103 年中大型與火山地震震源
資訊之快速彙整與提供-
地震震源滑移量分佈之即時逆推(1/3)

計畫類別：氣象 海象 地震

計畫編號：MOTC-CWB-103-E-06

執行期間：103 年 1 月 1 日至 103 年 12 月 31 日

計畫主持人：趙里

執行機構：中華民國地球物理學會

中華民國一百零三年十一月九日

政府研究計畫期末報告摘要資料表

| | | | |
|--------|--|--------|--------------------------------|
| 計畫中文名稱 | 臺灣地區 103 年中大型與火山地震震源資訊之快速彙整與提供-地震震源滑移量分佈之即時逆推(1/3) | | |
| 計畫編號 | MOTC-CWB-103-E-06 | | |
| 主管機關 | 交通部中央氣象局 | | |
| 執行機構 | 中華民國地球物理學會 | | |
| 年度 | 1 | 執行期間 | 103 年 1 月 1 日至 103 年 12 月 31 日 |
| 本期經費 | 參拾壹萬陸仟貳佰肆拾玖 | | |
| 執行進度 | 預定 (%) | 實際 (%) | 比較 (%) |
| | | | |
| 經費支用 | 預定(千元) | 實際(千元) | 支用率 (%) |
| | | | |
| 研究人員 | 計畫主持人 | 協同主持人 | 研究助理 |
| | 趙里 | | |
| | | | |
| 報告頁數 | 11 | 使用語言 | 中文 |
| 中英文關鍵詞 | 震源滑移量分佈，強地面運動，小波變換。 Source slip distribution, strong ground motion, wavelet transformation. | | |
| 研究目的 | 本計畫之研究目的是在業已建立的迅速、自動確定中大規模地震震源機制解以及有限震源平均破裂模型並判斷實際破裂面的能力基礎上，進一步開發在三維速度模型中即時逆推中大規模地震震源滑移量時空分佈的系統。震源滑移量時空分佈結果將包含震源最為詳細和完整的資訊，可以為震后迅速研判地震發展趨勢，震害分佈的評估和救災應急反應提供最可靠的地震學依據。以震源滑移量時空分佈計算得到的 PGA 和 PGV 分佈圖，將具有更大的可靠性，更加與實際情況相符合。因此該系統的建立將使地震預警系統包含更多的有關地震震源和構造 | | |

| | |
|-----------------------|--|
| | 的信息，為研究與社會服務。 |
| 研究成果 | 目前已經將 Ji et al. (2002a,b)的有限震源滑移量波形逆推程式安裝調試成功，並將該程式與我們已經建立的臺灣地區三維格林函數庫結合起來，使該程式既能夠在一維模型中用遠震記錄擬推大地震（規模 7.0 或更大）的震源滑移量時空分佈，同時也能夠在三維速度模型中處理中等規模地震（規模 6.0 或更大）的有限震源滑移量時空分佈。該程式的理論測試已經完成，並以 2013 年 10 月 31 日的瑞穗地震為例，對其震源滑移量時空分佈用 6 個 TSMIP 測站的波形記錄進行了逆推，結果與其它研究得到的震源過程整體上一致。一些在時間與空間上滑移量分佈的可靠性，仍需要做更多的逆推測試，並且通過增加測站數目（如加入寬頻測站等）及方位上的分佈，來提高滑移量逆推在時間和空間上的解析度。 |
| 具體落實應用情形 | 程式安裝調試及理論測試已經完成，並初步用於 2013 年 10 月 31 日的瑞穗地震震源滑移量時空分佈逆推，結果與其它研究得到的震源過程整體上一致。仍需要做更多的實際測試，來提高滑移量逆推在時間和空間上的解析度及可靠性。 |
| 計畫變更說明 | 無 |
| 落後原因 | 無 |
| 檢討與建議 (變更或落後之因應對策) | 無 |

地震震源滑移量分佈之即時逆推(1/3)

趙里

中央研究院地球科學研究所

蕭乃祺

中央氣象局地震測報中心

摘 要

台灣位在環太平洋地震帶上，東南部沿岸地區是菲律賓板塊與歐亞板塊的碰撞帶，東部與南部海外又有兩個隱沒帶存在，整個區域地震活動頻繁，災害性地震也經常發生。因此，防震減災是必須持續加強的研究課題。地震發生以後迅速獲得完整的地震資訊，包括地震的位置，規模和震源機制，破裂面的判定，甚至震源滑移量的時空分佈，可以為研究地震構造和地震防救災反應提供重要的指標，也能滿足社會大眾及新聞媒體的需求。過去幾年在中央氣象局支助下我們已經建立了近即時自動確定震源機制以及中大規模地震實際破裂面及有限源平均破裂模型的系統。本計劃的目的是在此基礎上建立在三維速度模型中即時逆推中大規模地震震源滑移量時空分佈的系統。這些詳細的震源資訊可以為震后迅速研判地震發展趨勢，震害分佈的評估和救災應急反應提供可靠的科學依據。

Taiwan is situated in the western portion of the circum-Pacific seismic belt. The collision between Eurasian and Philippine Sea plates in the east coastal region and the two subduction zones off the east and south coasts lead to frequent earthquakes, some of them causing significant damages to the society. Therefore earthquake hazard mitigation has always been an important task for the earth science community. After the occurrence of large earthquakes, rapid report of earthquake information, including the earthquake location, magnitude, focal mechanism, the fault-plane orientation, and the spatial-temporal slip distribution, etc., is crucial not only for the seismotectonic studies but also for disaster relief and for the demands of the society and news organizations for information dissemination. In the past few years, with the support of the Central Weather Bureau, we have established an automatic system for near real-time determinations of focal mechanism solutions of point sources, the identification of actual rupture planes and average finite rupture models. In the current project we will develop the capability of real-time automatic inversions of source slip distributions for moderate and large earthquakes in three-dimensional structural model. These more accurate and detailed earthquake information will be helpful for quick assessment of hazard distribution and seismic potential, and for disaster relief deployment immediately after damaging earthquakes.

壹、前言

臺灣本島以及周邊近海海域地震活動頻繁，每年均有上百個有感地震發生。在地震學研究以及震後的應急與地震危險性分析中，震源機制與震源過程的描述是一項重要的資訊，它們可以幫助我們了解地震發生的過程、應力場的特徵與變化，以及可能引起地震的構造環境。在過去幾年裡，在氣象局的支助下我們已經建立了一個基於 Zhu & Helmberger (1996)和 Zhu & Ben-Zion (2013)的 gCAP 方法，用地震波波來自動、迅速確定震源機制解的系統，使得在臺灣本島及近海有感地震發生後，能夠在幾分鐘內給出可靠的震源機制解。在此基礎上，我們還發展了在三維速度模型中自動確定中大規模地震實際破裂面及有限源平均破裂模型的方法，建立了在台灣中大規模（規模 5 以上）地震發生以後迅速確定震源平均破裂模型並判斷實際發震面的能力。

本計劃將在此基礎上建立在三維速度模型中即時逆推中大規模（規模 6 以上）地震震源滑移量時空分佈的系統。在自動確定了準確的實際破裂面的基礎上，我們將進一步建立一個在三維速度模型(Kuo-Chen et al., 2012)和真實地表地形中自動即時逆推中大規模地震震源滑移量時空分佈的系統。目前地震震源滑移量時空分佈在一維速度模型中的逆推方法已經發展成熟(Kikuchi & Kanamori, 1982; Hartzell & Heaton, 1983; Graves & Wald, 2001; Ji et al., 2002a,b)，本研究之目的是將該逆推方法推廣到三維模型中，在保證逆推結果的精確可靠性的前提下，提高計算效率，使整個過程達到近即時、自動的效果。最後，在得到震源滑移量時空分佈以後，計算地震引起的強地面運動，得到地面運動的 shakemovie 以及 PGA 和 PGV 分佈圖。

貳、地震有限震源滑移量分佈逆推：方法概述

地震有限震源破裂過程的逆推方法從三十多年前提出開始，目前已經是發展成熟的領域。一些穩定而可靠的逆推方法也已經被全世界衆多研究小組採用(如 Kikuchi & Kanamori, 1982; Hartzell & Heaton, 1983; Graves & Wald, 2001)，在有大地震（通常在規模 7.5 或更大）發生時，都會有一些震源破裂過程的逆推結果在互聯網上公佈或發表在學術期刊上。本研究使用 Ji et al. (2002a,b)所提出的震源滑移量時空分佈的逆推方法，該方法採用小波變換的方式對地震記錄中不同頻率的地震波訊號分別擬合，並通過定義一個綜合、多尺度的誤差函數來更加合理地處理不同頻率的地震波波形，使逆推結果對震源的滑移量在時間和空間上的解析度達到最佳。由該方法所發展出的一套震源滑移量逆推程式已經被美國地調局(USGS)採納作為大地震以後震源滑移量逆推的日常處理工具。

在滑移量的時空參數化方面，Ji et al. (2002a,b)的做法採常用的將震源斷層面沿走向與傾向分別劃分為 N 段與 M 段，即 $N \times M$ 個子斷層，每個子斷層分別具有不同的錯動量 D ，錯動角(rake) λ ，破裂速度 V ，以及時間函數 $S(t)$ ，因此在位于 x 處測站的位移可以用如下公式表示：

$$u(\mathbf{x}, t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M D_{ij} [\cos(\lambda_{ij}) G_{ij}^C(\mathbf{x}, t, V_{ij}) + \sin(\lambda_{ij}) G_{ij}^S(\mathbf{x}, t, V_{ij})] * \dot{S}_{ij}(t), \quad (1)$$

其中 G 為子斷層到 \mathbf{x} 處的 Green 函數。子斷層震源時間函數採用一個借助餘弦函數光滑函數：

$$\dot{S}(t) = [1 - \cos(t/r)]/r. \quad (2)$$

Ji et al. (2002a,b)的方法中一個特別之處是將地震波形的時間序列進行小波變換，來對不同階（頻率）的小波分量進行擬合，而不是直接去擬合時間域裏面的波形。這種做法的優點是避免在波形擬合時高頻的訊號被能量較大的低頻訊號所掩蓋，而使逆推結果失去對震源小尺度特徵的解析度。在做小波變換以後，位移時間序列的小波分量可以用其小波係數來表示：

$$y_{k,l} = \int_{-\infty}^{\infty} u(t) \psi_{k,l}(t) dt. \quad (3)$$

在實際操作中，只要對記錄波形和理論波形分別進行小波變換，得到它們的小波係數 $o_{l,k}$ 與 $s_{l,k}$ ，就可以通過擬合兩組小波係數的辦法來達到擬合時間域波形的目的。而在擬合小波係數時，通過分別定義低頻與高頻小波係數的誤差函數 e_L 與 e_H 來達到同時擬合低高頻波形的目的：

$$e_L = \sum_{l=l_{\min}}^{l_c} W_l \left[\frac{1}{k_l} \sum_{k=k_{\min}}^{k_l} |o_{l,k} - s_{l,k}| + \sqrt{\frac{1}{k_l} \sum_{k=k_{\min}}^{k_l} (o_{l,k} - s_{l,k})^2} \right], \quad (4)$$

$$e_H = \sum_{l=l_c+1}^{l_{\max}} W_l \left(1.0 - \frac{2 \sum_{k=k_{\min}}^{k_l} o_{l,k} s_{l,k}}{\sum_{k=k_{\min}}^{k_l} o_{l,k}^2 + \sum_{k=k_{\min}}^{k_l} s_{l,k}^2} \right). \quad (5)$$

從兩種定義可以看出，在波形擬合中低頻小波係數中考慮了它們的 L_1 與 L_2 模數（見 4 式），而在高頻小波係數中考慮的則是它們之間的相關性（見 5 式）。最終的綜合誤差函數是兩個誤差函數的疊加：

$$e = e_L + e_H. \quad (6)$$

因此，在這種方法中波形擬合的實現既不是通過在時間域中直接比對記錄與理論波形，也不是通過在頻率域中比對記錄與理論頻譜，而是通過在小波域中比對小波係數。

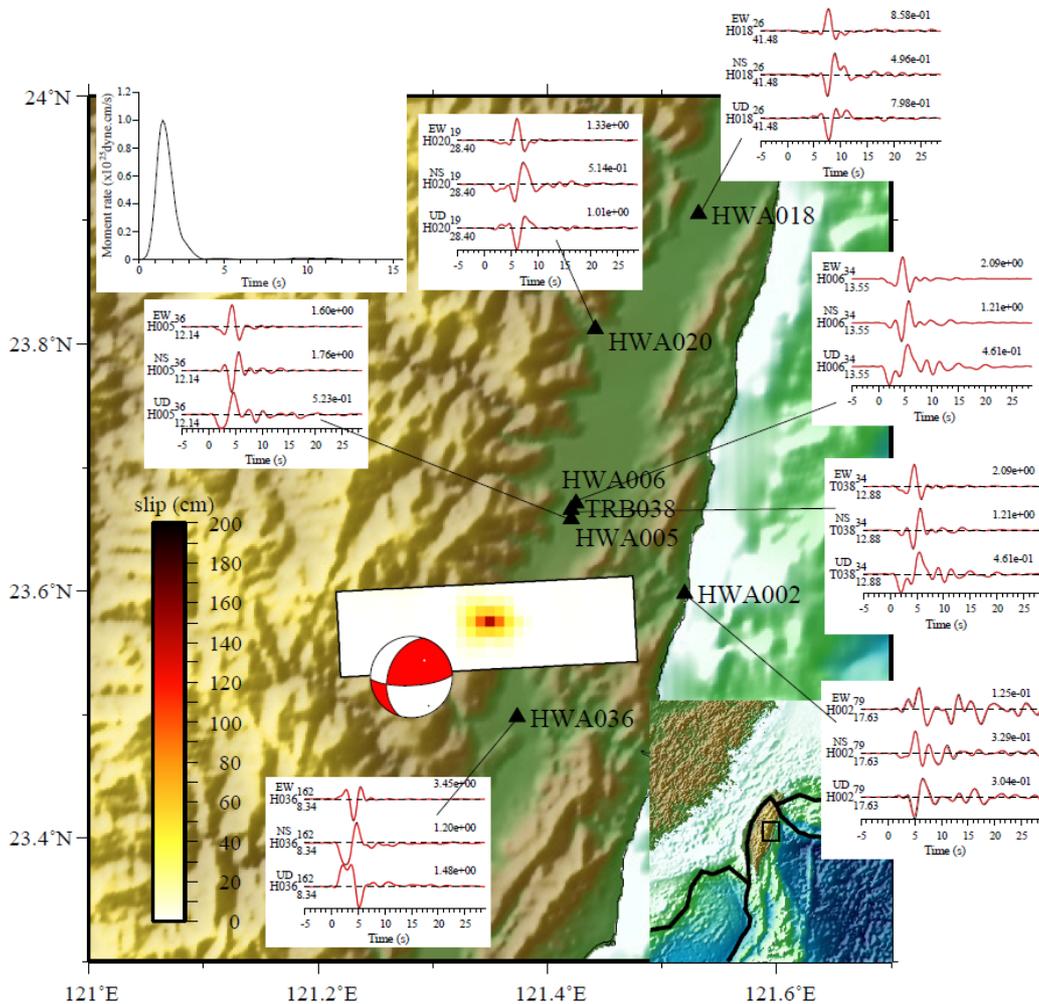
紀晨教授于 7 月份來臺灣訪問兩個星期，在他的幫助下，我們已經將程式安裝調試成功。同時也將該程式與我們已經建立的臺灣地區三維格林函數庫結合起來，使該程式既能夠在一維模型中用遠震記錄擬推大地震（規模 7.0 或更大）的震源滑移量時空分佈，同時也能夠在三維速度模型中處理中等規模地震（規模 6.0 或更大）的有限震源滑移量時空分佈。

三、有限震源滑移量分佈逆推：理論測試

在將 Ji et al. (2002a,b) 的有限震源滑移量波形逆推程式用於實際地震之前，我們首先通過一系列的理論測試來確認了程式運行的正確性以及該方法的逆推結果的可靠性。在本報告中介紹兩個理論測試的例子。一個是最簡單的在斷層面上一個點發生的脈衝震源作為輸入震源，另一個是用在一個斷層面上三個不同點分別先後發生的脈衝點源作為輸入震源，從逆推結果來分析程式的可靠性。

單點震源測試

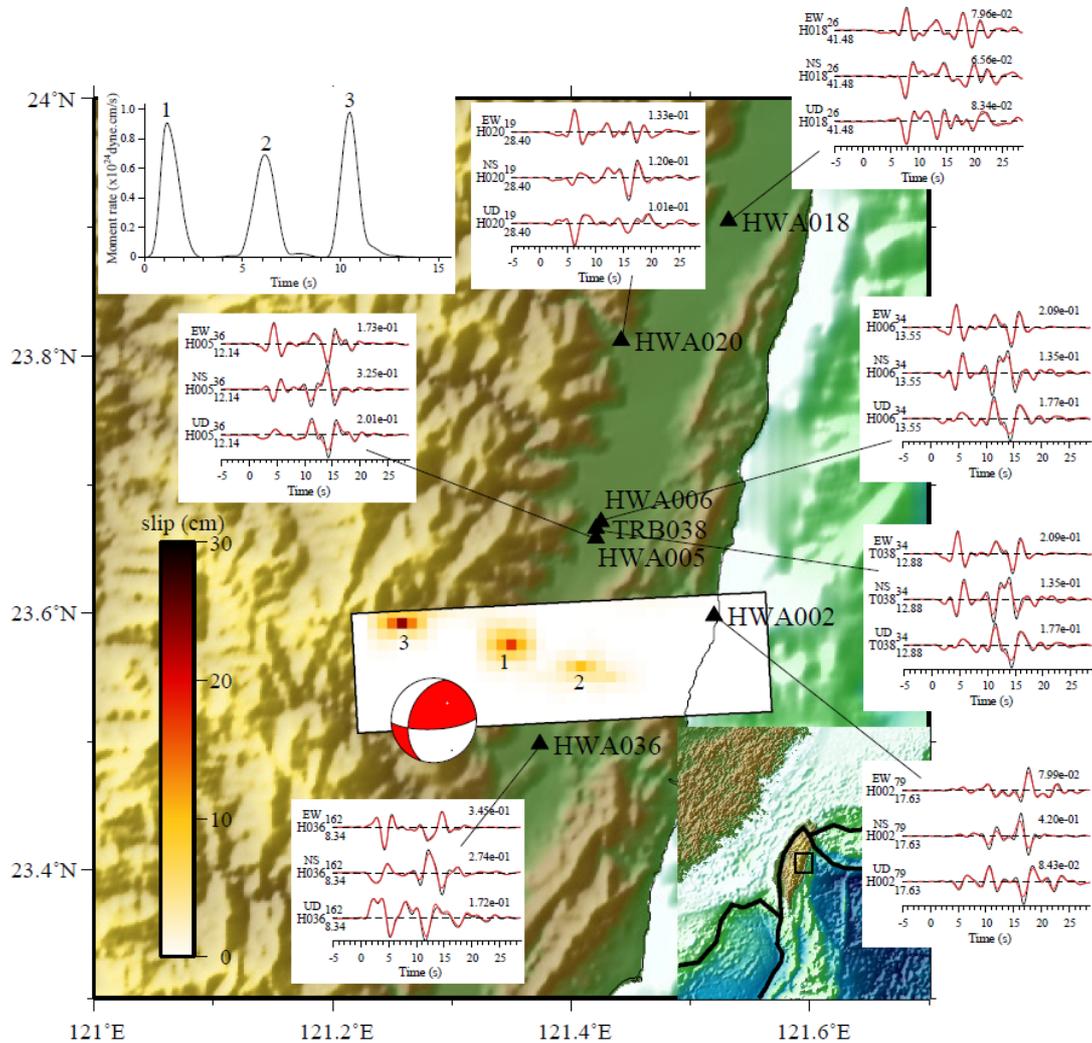
在此測試中，我們以 2013 年 10 月 31 日瑞穗地震震源機制中向南傾斜的斷層面（走向 87° ，傾角 73° ）上位於震央處的脈衝點源為輸入震源，滑動角 129° ，地震矩為 1.0×10^{24} dyne.cm。用以此震源在三維模型中（Kuo-Chen et al. 2012）並考慮地表地形計算的理論地震圖為假想觀測記錄，使用震源附近 7 個 TSMIP 測站的逆推結果如圖一所示。逆推出的震源仍然是一個點源，且震源機制結果與輸入值一致，波形的擬合也接近完美。單點震源測試結果表明逆推程式達到了預期目的。



圖一、單點震源逆推測試。沙灘毯為瑞穗地震震源機制（Hsieh et al. 2013），其中向南傾斜的共軛面為輸入斷層面。波形圖中黑色為（假想）觀測位移記錄，紅色為以逆推震源結果計算的理論地震圖。左上角為逆推得到的震源時間函數。

三點震源測試

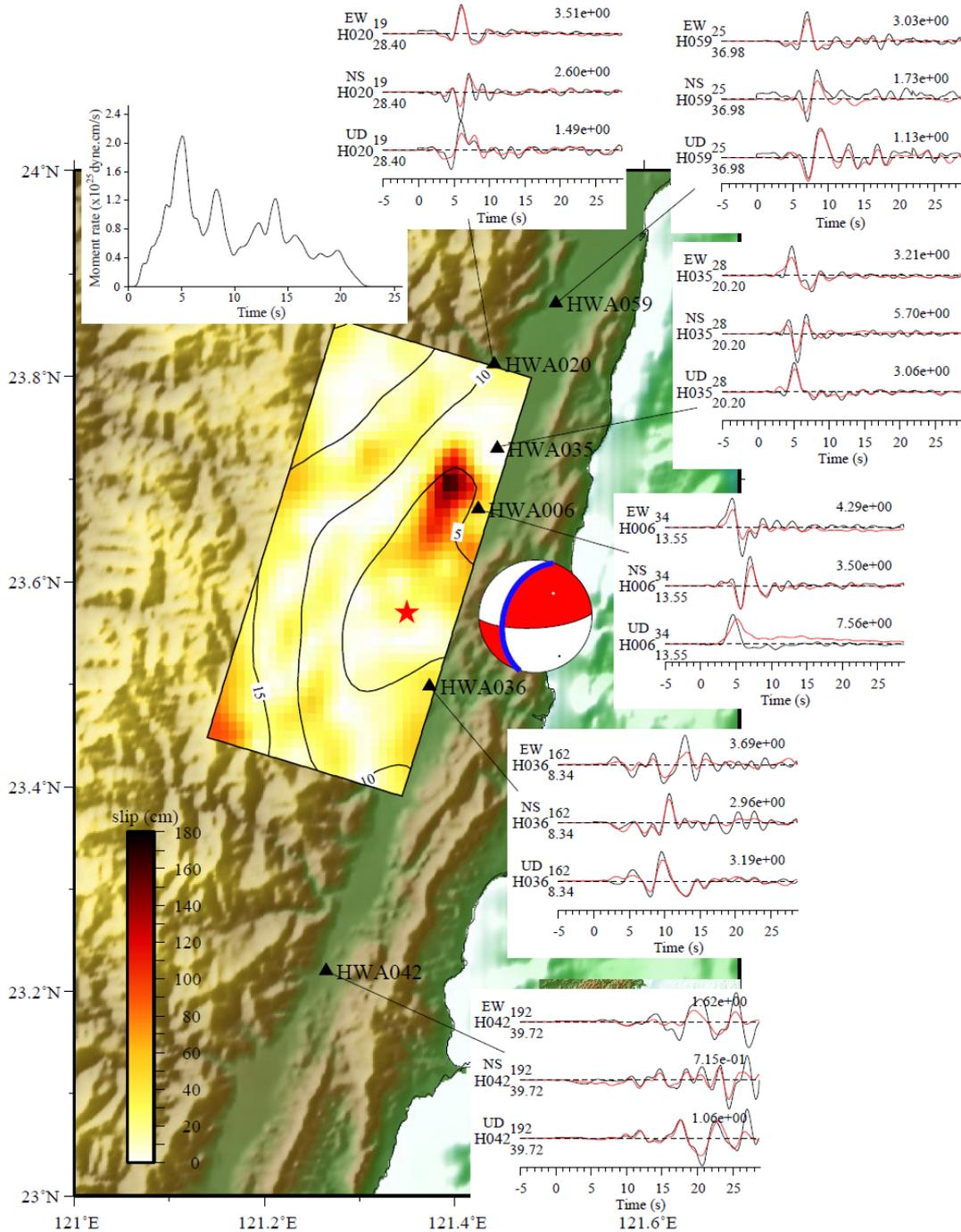
我們仍然用瑞穗地震的震源機制中向南傾斜的斷層面，但除在瑞穗地震震央處放置一個脈衝點源外，另加上兩個相繼在發震以後第 4.8 秒和 9.6 秒發生在同一斷層上不同位置的點源，以此來模擬一個簡單的有限震源。三個點源的震源機制中滑動角分別為 129° ， 99° 和 59° ，地震矩均為 1.0×10^{24} dyne.cm。用單點震源測試同樣的方法計算出假想觀測記錄，使用同樣 7 個 TSMIP 的測站逆推震源過程。結果如圖二所示。逆推結果可以很好地分辨出三個點源，且震源機制結果均與輸入值一致，波形的擬合也接近很好。三點震源測試結果表明逆推程式對震源滑移量具有很好的時間與空間的分辨能力。



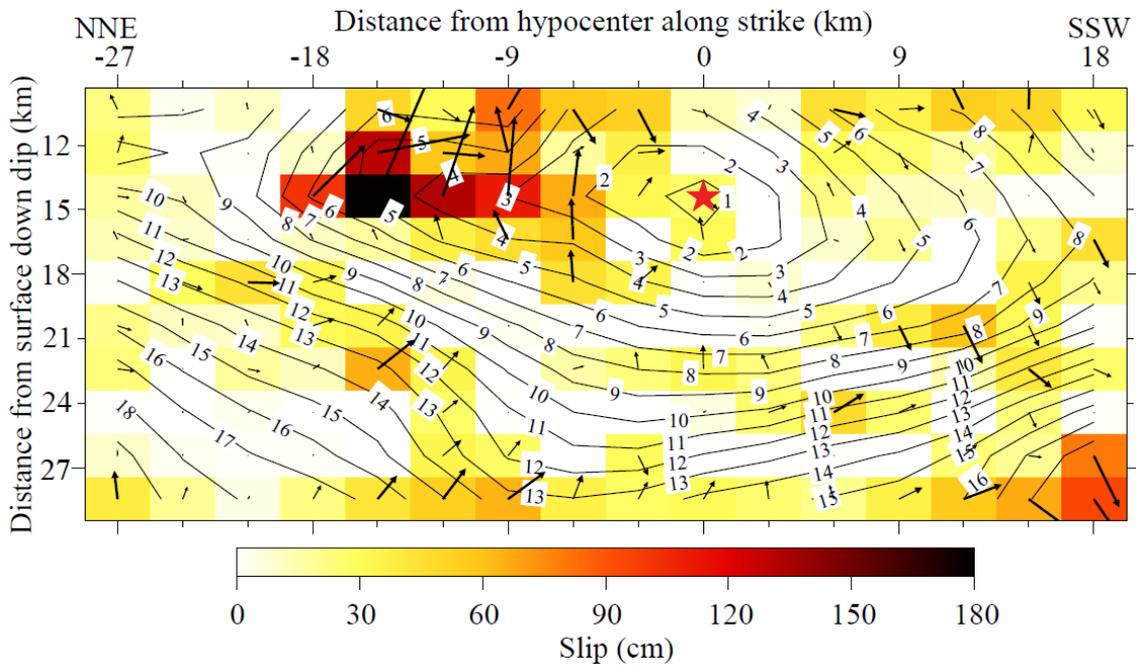
圖二、三點震源逆推測試。沙灘毯為瑞穗地震震源機制 (Hsieh et al. 2013)，其中向南傾斜的共軛面為輸入斷層面。斷層面上三個點源 1-2-3 依序發生三個點震源地震。波形圖中黑色為 (假想) 觀測位移記錄，紅色為以逆推震源結果計算的理論地震圖。左上角為逆推得到的震源時間函數。斷層面圖中顏色表示滑移量的大小，三個點源具有相同的輸入地震矩 1.0×10^{24} dyne.cm，但由於速度結構模型中剪切模量 (μ) 隨深度增加，因而導致最深的點源 2 滑移量最小，而最淺的點源 3 滑移量最大。

四、地震震源滑移量分佈逆推：瑞穗地震應用

最後我們討論將該方法應用於瑞穗地震的實際觀測記錄。使用 6 個 TSMIP 測站的逆推結果如圖三所示。從殘差的大小可以判斷實際斷層面為向西傾斜，震源破裂主要分佈在震央的北北東方向，持續時間約 20 秒鐘。



圖三、瑞穗地震有限震源滑移量逆推。沙灘球為點源震源機制 (Hsieh et al. 2013)，其中向西傾斜的共軛面實際斷層面。波形圖中黑色為觀測位移記錄，紅色為以逆推震源結果計算的理論地震圖。左上角為逆推得到的震源時間函數。斷層面圖中顏色表示滑移量的大小，紅色五角星顯示震央位置。



圖四、瑞穗地震有限震源逆推得到的斷層面上滑移量時空分佈。圖中背景顏色表示滑移量大小，等值綫為破裂相對於發震時刻後以秒為間隔的時間。紅色五角星為震央位置，黑色箭頭顯示滑移方向，其長度與滑移量大小成正比。

這裡所得到的結果只是應用 Ji et al. (2002a,b)的震源滑移量逆推方法的初步嘗試，從圖三與圖四中顯示的滑移量時空分佈結果來看，該方法對瑞穗地震的逆推結果與其它研究所得到的結果大致相符，一些細節方面，包括時間上的演變以及空間上滑移方向以及滑移量大小的分佈，仍然需要做更多的逆推測試，並且引入更多的測站，包括寬頻地震站的波形記錄，以增加測站覆蓋的方位，來提高逆推結果對震源滑移量在時間和空間上的解析度。

參考文獻

- Hartzell, S. H., and Heaton, T. H., 1983. Inversion of strong ground motion and teleseismic waveform data for the fault rupture history of the 1979 Imperial Valley, California, earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 73, 1553-1583.
- Hsieh, M.-C., Zhao, L., and Ma, K.-F., 2013. Preliminary results of the 10/31 Ruisui earthquake revealed by efficient waveform inversion, 中央氣象局/台灣地震研究中心瑞穗地震學術研討會，2013年11月7日。
- Ji, C., Wald, D. J., and Helmberger, D. V., 2002(a). Source description of the 1999 Hector Mine, California, earthquake, part I: Wavelet domain inversion theory and resolution analysis, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 92, 1192-1207.
- Ji, C., Wald, D. J., and Helmberger, D. V., 2002(b). Source description of the 1999 Hector Mine, California, earthquake. II: Complexity of slip history, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 92, 1208-1226.
- Kikuchi, M., and Kanamori, H., 1982. Inversion of complex body waves, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 72, 491-506.
- Kuo-Chen, H., Wu, F., and Roecker, S., 2012. Three-Dimensional P Velocity Structures of the Lithosphere Beneath Taiwan from the Analysis of TAIGER and Related Seismic Datasets, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2011JB009108.
- Graves, R. W., and Wald, D. J., 2001. Resolution analysis of finite source inversion using 1D and 3D Green's functions. I. Strong motion, *J. Geophys. Res.*, 106, 8745-8766.
- Zhu, L., and Helmberger, D. V., 1996. Advancement in source estimation techniques using broadband regional seismograms, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 86, 1634-1641.
- Zhu, L., and Ben-Zion, Y., 2013. Parameterization of general seismic potency and moment tensors for source inversion of seismic waveform data, *Geophys. J. Int.*, 194, 839-843.