

地震震源資訊成果彙整與孕震成因研判 及震源破裂時空模擬

**Large earthquake mechanism interpreted from its source
spatial-temporal slip distribution and other earthquake parameters**

主管單位：中央氣象局 計畫編號：MOTC-CWB-100-E-08

林正洪，李憲忠

Lin, Cheng-Horng and Lee, Shiann-Jong

中央研究院 地球科學研究所

摘要

台灣位處於環太平洋地震帶上，地震發生非常頻繁。過去無數次的大地震，均曾經對臺灣地區造成嚴重之衝擊與災害。為了減少未來大地震之衝擊，本計畫首先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。透過高解析與高精確度的聯合震源逆推，以 311 日本東北大地震為例，結果發現的破裂過程是由大尺度的重複破裂所構成。此重複破裂行為造成異常大的最大滑移量於最大破裂集中區中，最大滑移量甚至超過 50 公尺。其次本計畫彙整其他三項研究分析結果，包括(1)震源機制與地震破裂面之迅速判定、(2)庫倫應力變化之推演、(3)震源區域地質與孕震構造之分析，對臺灣地區中大型地震發生後進行快速研判其發生之原因及地質構造關係，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。

關鍵詞：中大規模地震、源機制解、庫倫破壞應力、破裂過程

Abstract

Taiwan is located at parts of Pacific belts where a lot of earthquakes have been occurred. Some deadly earthquakes had impacted Taiwan during the past decades. In order to mitigate possible earthquake damages in the future, at first, this project will analyze the spatial-temporal slip distribution of large earthquakes occur in Taiwan. The body wave source inversion method will apply in this study. To follow this approach, basic source parameters should be prepared, including the magnitude, epicenter location, focal mechanism and fault plane solution. Recently, the source parameter information is routinely reported by Central Weather Bureau. Based on these

information, rapid source inversion analyze can be done once big earthquake occur. In addition, we will combine results from some other studies, including (1) Rapid Determination of Earthquake Focal Mechanism and Fault Plane, (2) Static Coulomb stress changes associated with large earthquakes and (3) geological analyses in the earthquake source area, to interpret the possible mechanism of large earthquakes in the Taiwan area. All of information will provide government as well as publics to assess and mitigate possible impact by future large earthquakes.

Keywords: Large earthquake, focal mechanism, Coulomb failure stress, rupture process.

一、 背景

地震對人類所造成之災害，堪虞為自然界中最嚴重的一項。台灣更位處於環太平洋地震帶上，地震發生非常頻繁。過去無數次的大地震均對臺灣造成嚴重之衝擊與災害。

為了減少未來大地震之衝擊，本計畫首先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。

其次本計畫將彙整其他三項研究分析結果，包括(1)震源機制與地震破裂面之迅速判定、(2)庫倫應力變化之推演、(3)震源區域地質與孕震構造之分析，對臺灣地區中大型地震發生後進行快速研判其發生之原因及地質構造關係，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。

二、 震源區域地質與孕震構造

震源區域地質與孕震構造之分析本年度工作重點為新城(圖 1)、獅潭(圖 2)、梅山、大尖山、六甲及觸口等斷層。先利用衛星影像初步判釋地表破裂情形，並規劃至震央附近進行地質調查，以提供斷層活動資訊。由於活動斷層發生地震的可能性很高，本研究在地震未發生時，亦會針對活動斷層附近，利用地形資料，加上已有的構造地質資料進行孕震構造之分析。已初步完成之工作包括背景地質資料收集與地形計量分析。

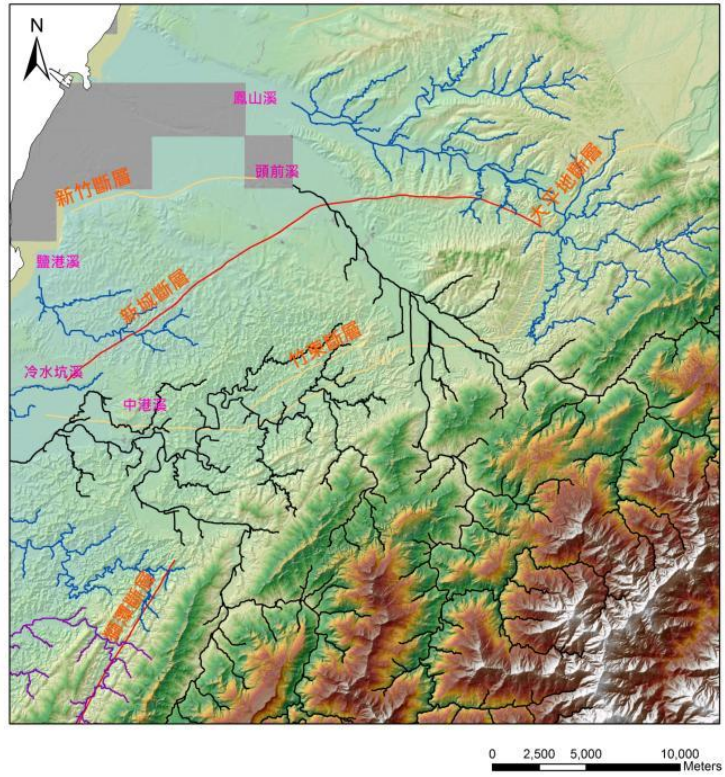


圖 1 新城斷層及其鄰近的水系分布情形

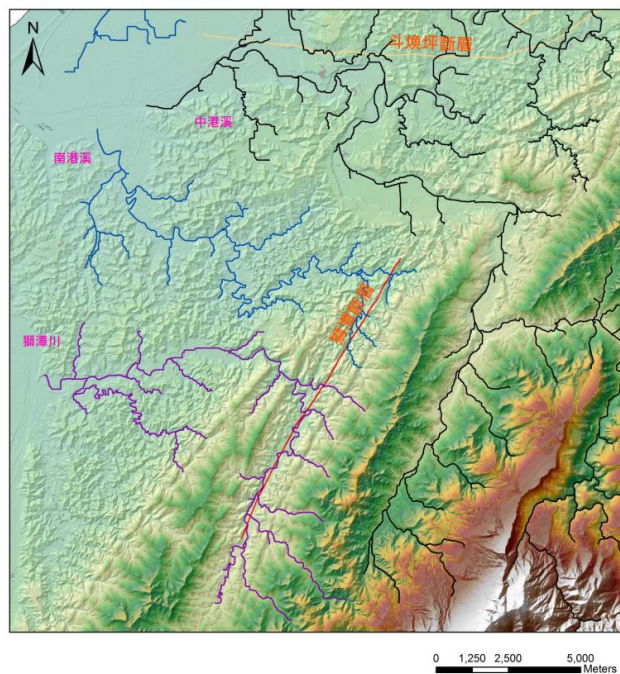


圖 2 獅潭斷層及其鄰近水系分布情形

三、震源破裂過程研究：

首先以 2010 年 3 月 4 日甲仙地震(M6.4)為對象，本研究採用近場強震資料、GPS 同震位移資料以及遠場體波資料進行聯

合震源過程逆推。在這個研究中採用一個西北-東南走向、朝東北下傾的斷層面做為斷層模型(圖 3)，此斷層模型可以對 GPS 同震位移資料以及餘震分佈有比較好的解釋。此外研究中我們採用三維格林函數來擬和近場資料，並採用平行化非負最小平方法來進行逆推，希望能藉此獲得較高解析度的震源時間-空間破裂過程模型。

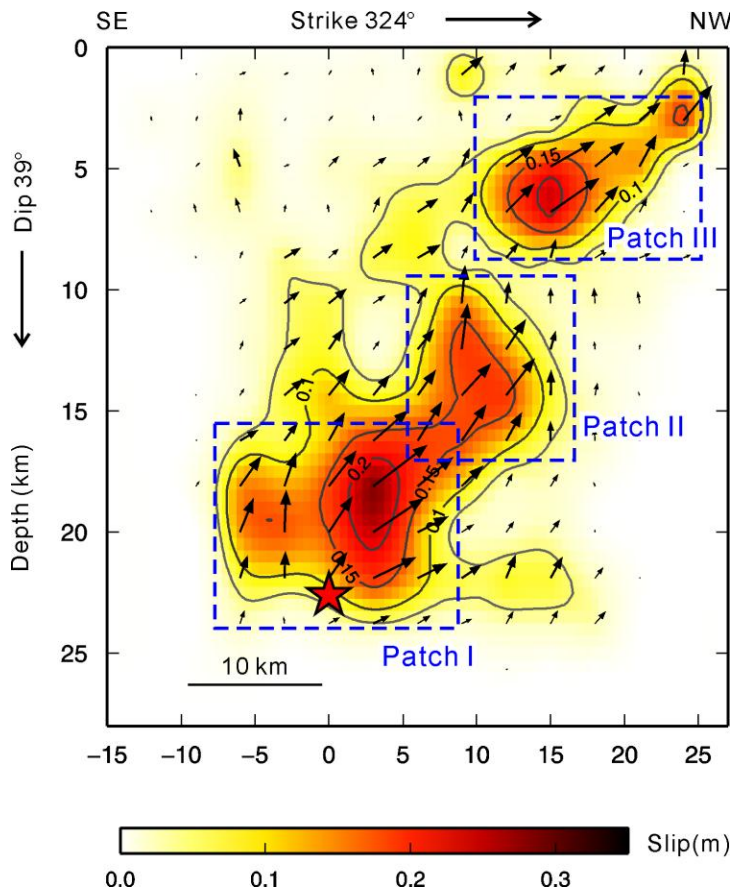
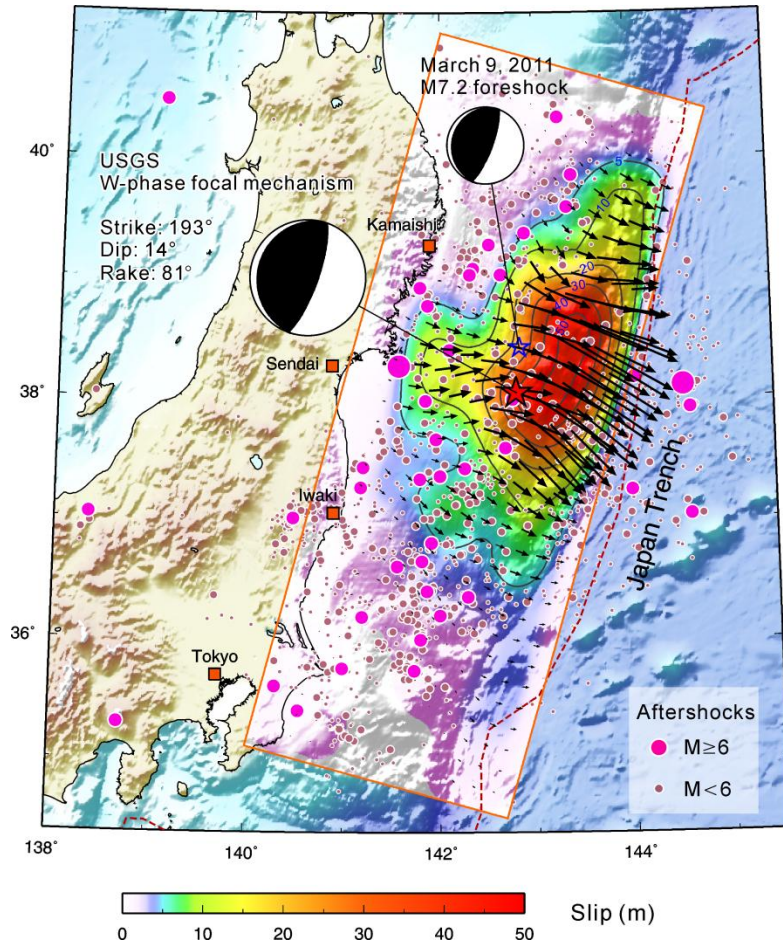


圖 3 甲仙地震錯動量空間分佈

其次，透過高解析與高精確度的聯合震源逆推，對 311 日本東北大地震的破裂過程進行研究，結果發現重複破裂行為造成異常大的最大滑移量於最大破裂集中區中，最大滑移量甚至超過 50 公尺(圖 4)。其滑移區不僅侷限在沿日本海溝的斷層淺部，同時破裂亦延伸到比較深的隱沒帶深處。從破裂的時間分佈上來看，此次地震的能量釋放大致可分為三個階段(圖 5)：第一個階段從 0-40 秒，為震央附近的初始破裂所釋放；第二個階段為 40-100 秒，為震央區的重複破裂行為所釋放出來的能量；第三階段 100-160 秒的能量是破裂沿日本海溝朝南北兩端傳播延伸所釋放。此震源破裂模型可以對區域強震記錄的特性有很好的解釋。



(b)

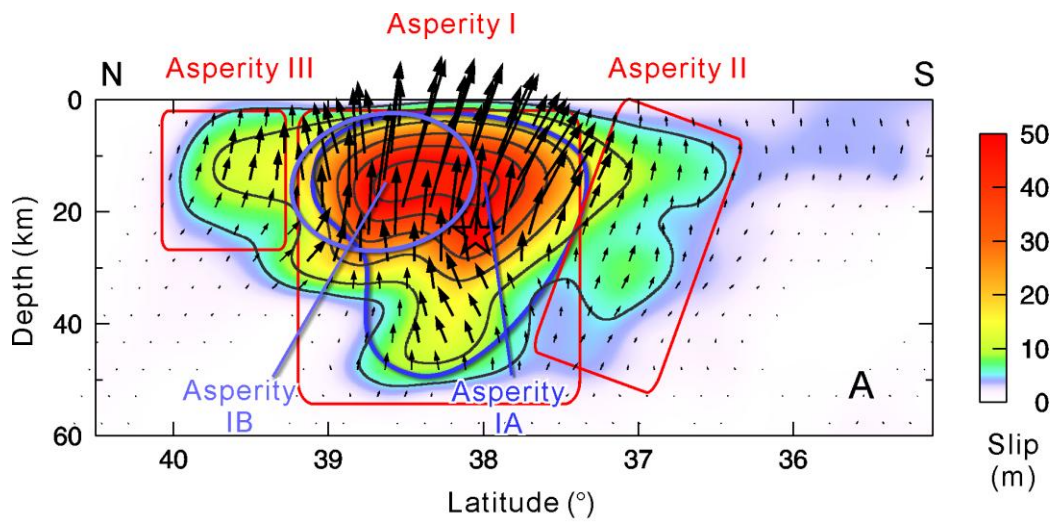


圖 4 日本 311 地震錯動量空間分佈：(a)錯動量分佈水平投影，(b)錯動量分佈斷層面投影。

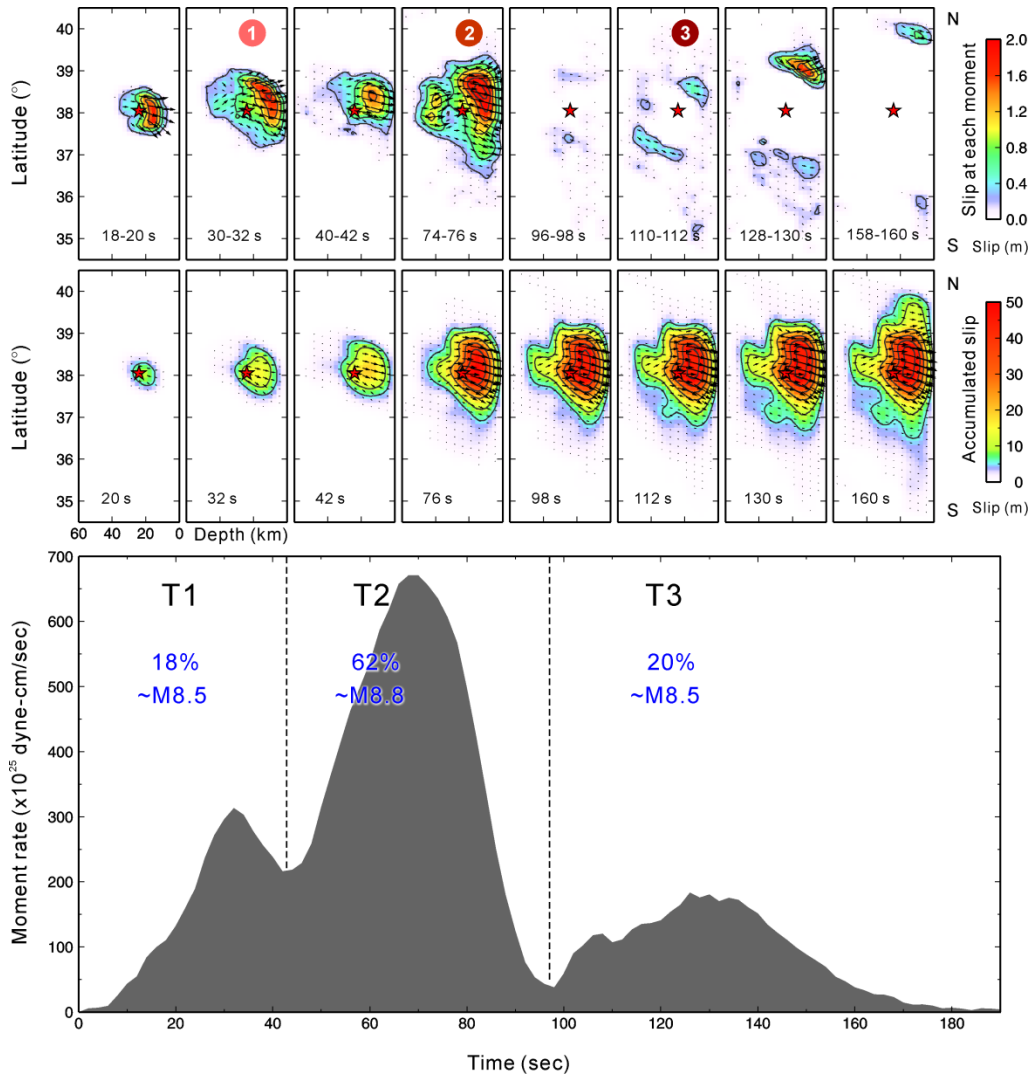


圖 5 日本 311 地震破裂過程。最上方為瞬時破裂分佈，中間為累加滑移量，下方為震源時間函數。

四、庫倫應力變化：

目前以 2010 年 3 月 4 日，台灣西南部發生了芮氏規模 6.4 的甲仙地震，此地震為一個未知斷層之破裂所引發。主震震央位置靠近六龜鄉，震源深度 23 km，斷層破裂主要向西延伸。經由台灣 GPS 連續觀測網所計算出之同震滑移分布(圖 6)，顯示在震央西側具有 5-27 mm 的水平位移量，運動方向界於西北和西南向，在震央東側則沒有顯著的水平位移；GPS 垂直位移顯示在震央附近之測站抬升了 5-25 mm，相較之下，在遠場 GPS 測站只觀測到 5-10 mm 的垂直位移量。

為了調查甲仙地震對於鄰近斷層系統之影響，研究中計算台灣西南部主要斷層在甲仙地震過後之庫倫應力變化(圖 7)。庫倫應力變化的定義為， $\Delta CFS = \Delta\tau - \mu' \Delta\sigma_n$ ，其中 $\Delta\tau$ 是在斷層面上的剪切應力變化， μ' 為視摩擦係數，受孔隙液壓之影響，其值一般約介於 0~0.7， $\Delta\sigma_n$ 為正應力變化，壓制 (clamping) 為正

。若 $\Delta CFS > 0$ ，斷層破裂會被激發；相反地，若 $\Delta CFS < 0$ ，斷層破裂則會被壓制（*King et al., 1994*）。我們利用 *Okada (1992)* 的方法來計算斷層錯動造成的應力改變，泊松比和剛性係數採用固定值，分別為 0.25 和 60 GPa。然後，再將應力張量旋轉到目標斷層的法線向量，求取目標斷層面上之正應力以及斷層滑移方向之剪應力，藉已求取庫倫應力變化量。但是庫倫應力的變化在潮州斷層以及旗山斷層更為複雜，同時可見到應力增加和減小的區域。

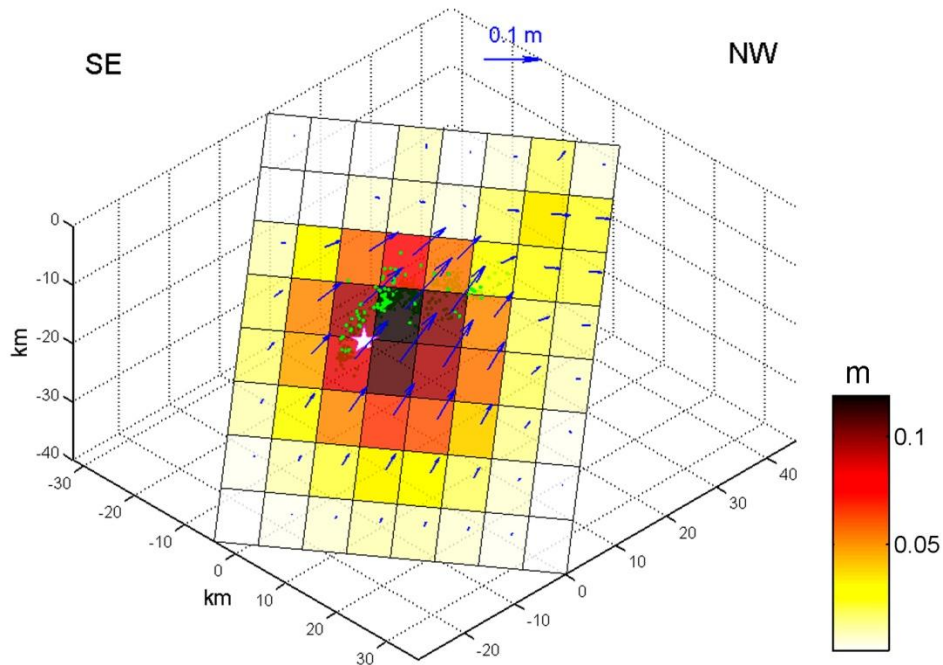


圖 6 甲仙地震同震滑移分佈與斷層幾何形貌。

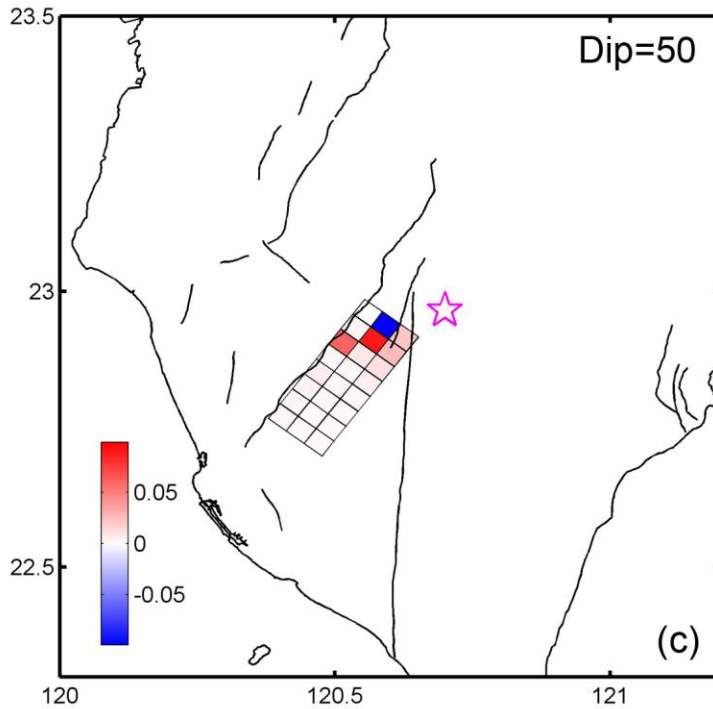


圖 7 斷層系統的庫倫應力變化(ΔCFS)

五、震源機制與地震破裂面之迅速判定

震源機制與地震破裂面之迅速判定是首先對該系統加以改善來提高它的穩定性，適應性和震源機制解之精確性，然後在準確確定地震震源機制的基礎上在三維速度模型中進一步分析地震的有限地震矩以便對地震的實際斷層面作出判斷。在過去幾個月的計劃執行中，主要針對目前震源機制計算流程做了一些改進(圖 8)，以提高系統的穩定性和適應性。

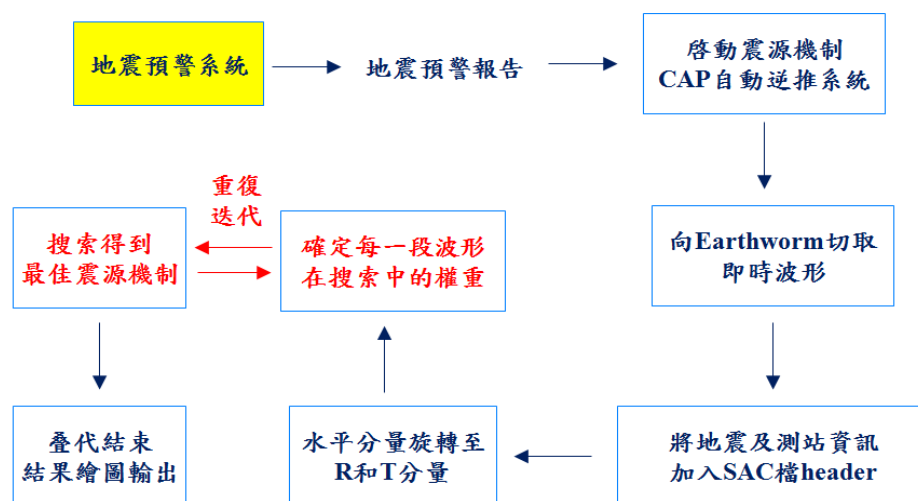
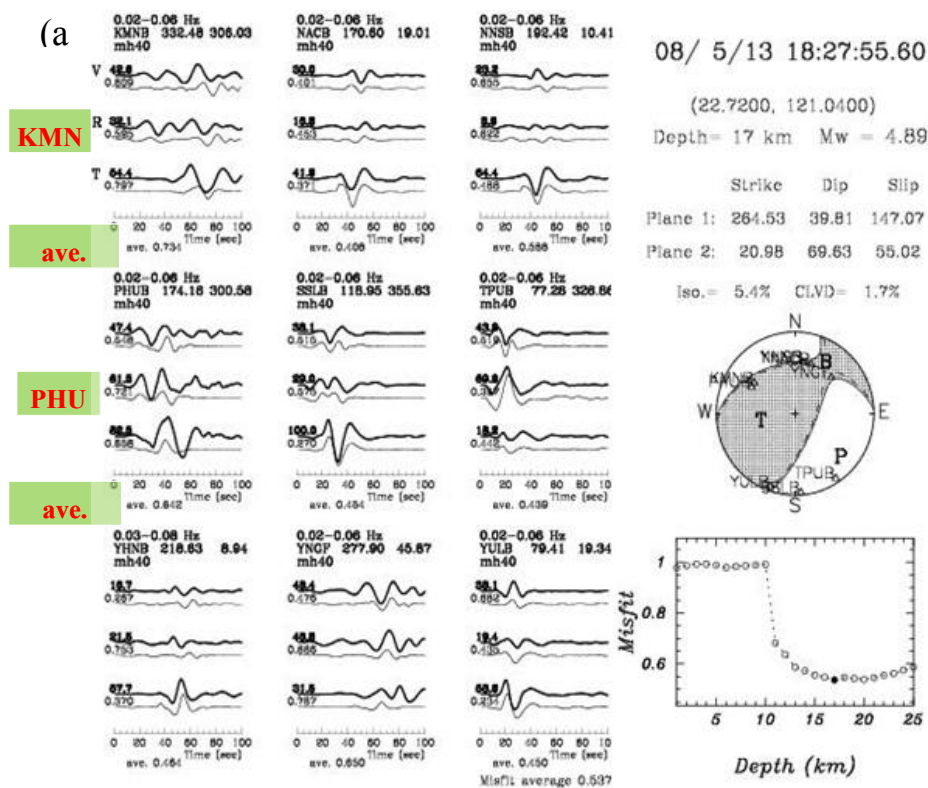


圖 8 即時自動震源機制逆推系統運行流程圖

同時在提高震後快速反應能力方面經初步嘗試建立了一個根據地震速報報告提供的震源位置和震源機制即時自動計算臺灣全島強地面運動，製作地震動動畫(shake movie)，以及計算和繪製 PGA 和 PGV 分佈圖的系統。目前此系統已經經過測試(圖 9)，如果與現有的地震預警和即時自動震源機制反演系統連接，對於臺灣及其附近有感地震該系統將能夠在 15 分鐘左右提供模擬得到的 shake movie 和 PGA 和 PGV 分佈圖。若進一步利用志願者提供計算資源(volunteer computing)的理念，shake movie 和 PGA 和 PGV 分佈圖的計算和製作將可以縮減到 5 分鐘以內。



台灣中大型地震震源資訊之快速彙整與提供－震源 機制與地震破裂面之迅速判定

**Large earthquake mechanism interpreted from its source
spatial-temporal slip distribution and other earthquake parameters:
Rapid determination of earthquake focal mechanism and fault plane**

主管單位：中央氣象局

趙里

Zhao, Li

中央研究院地球科學研究所

摘要

台灣位處環太平洋地震帶上，不僅地震活動頻繁，災害性地震也經常發生。因此，防震減災是地震學界必須持續加強的研究課題。快速且豐富的地震資訊，包括地震的位置，規模和震源機制，以及實際破裂面的判定，可以為地震防救災反應提供重要的科學依據，也能在震後迅速滿足社會大眾及新聞媒體對相關資訊的期待。比如 2010 年 3 月 4 日發生的甲仙地震，發震數日後地學界對實際的發震斷層仍無定論。過去三年在中央氣象局支助下我們建立了震源機制的即時確定系統，本計劃在此基礎上將該系統加以改進，以提高其成功度與穩定度。然後在該系統的基礎上增加對地震斷層面判定之能力。這些更加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。

關鍵詞：震源機制，發震斷層，地震預警。

Abstract

Taiwan is situated in the western portion of the circum-Pacific seismic belt with frequently occurring earthquakes, some of them causing significant damage 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, and the fault-plane orientation, etc., is crucial to disaster relief and to meeting the demands by the society and news organizations for information. For example, after the March 4, 2010, Jiahsian earthquake in southern Taiwan, it took many days for the seismological community to determine the actual fault plane. In the past three years, with the support of the Central Weather Bureau we have established an automatic system for rapid determination of focal mechanisms. The current project

will improve the effectiveness of the system. Then we will extend the ability of the system so the actual fault plane can be determined. The more accurate and detailed earthquake information will be helpful for quick assessment of hazard distribution, seismic potential, and disaster relief deployment immediately after damaging earthquakes.

Keywords : focal mechanism, rupture plane, earthquake early warning.

一、前言

本計劃之研究目的是在業已建立的即時自動確定地震震源機制系統的基礎上，進一步解決震源機制中兩個共軛斷層面(conjugate planes)的不可確定性(ambiguity)，對地震的實際斷層破裂面作出判斷。同時利用這些即時震源參數通過對地面運動的更為精確和詳細的評估來為地震減災提供更多的資訊，如製作地震動動畫(shakemovie)，以及計算和繪製 PGA 和 PGV 分佈圖，從而將更多更豐富的內容納入地震預警報告之中，使各界在震後能迅速獲得有關地震更詳細的信息，也使對強地面運動的預估達到定量化，並具有更大的可靠性。

從 99 年下半年以來，即時自動確定地震震源機制系統已經開始運行，對發生在臺灣本島及其附近海域地區有感地震基本上能夠在三分鐘以內自動計算出震源機制解，但結果仍需進一步仔細分析以提高該系統震源機制結果的可靠性和精確性。目前自動製作 shakemovie 以及 PGA 和 PGV 分佈圖的流程也已經在中研院電腦系統開始運行，利用預先計算並存儲好的應變 Green 函數庫，該系統能夠在獲得震源解以後約 15 分鐘得到 shakemovie 及 PGA 和 PGV 分佈圖。此外，應變 Green 函數庫的另一個功效是它可以使即時判斷真實斷層面成為可能。我們以 2010 年甲仙地震為例，在考慮三維速度結構，地表地形變化以及地表淺層場地放大效應的情況下，分別以點震源和有限震源對強地面運動的空間分佈進行了模擬，通過與觀測對比表明，用 PGA 和 PGV 分佈可以有效並迅速地判斷地震的實際破裂面。

二、自動震源機制反演系統運行情況

在即時自動確定地震震源機制的系統中，我們所採取的方法是在地震學界得到廣泛使用的 CAP 方法，即 Cut And Paste 方法。它是 Zhao & Helmberger (1994) 提出，由 Zhu & Helmberger (1996) 改善並推廣的。它分別從三分量整體地震波形記錄中切出體波和面波時間窗中的波形，再用記錄與理論波形之間的互相關係數為依據來判斷兩個波形的相似程度，並以此作為體波和面波的波形擬合的判據來尋找最佳震源機制解和震源深度。我們通過編寫的 shell script 程式將 CAP 方法中所有的計算與搜索步驟自動化，完全避免了人工干預。

本系統從 2010 年 7 月開始試運行至 2011 年 4 月，對發生在臺灣本島及其附近海域地區有感地震的處理結果基本上令人滿意，如果以 Kagan 角度作為衡量不同震源機制解之間的一致性程度，有超過 60% 的自動震源機制解與氣象局和中

研院地球所 BATS 的人工計算結果 Kagan 角度 (Kagan 1991) 小於 40° ，即結果基本一致。

三、即時自動強地面運動模擬系統的建立

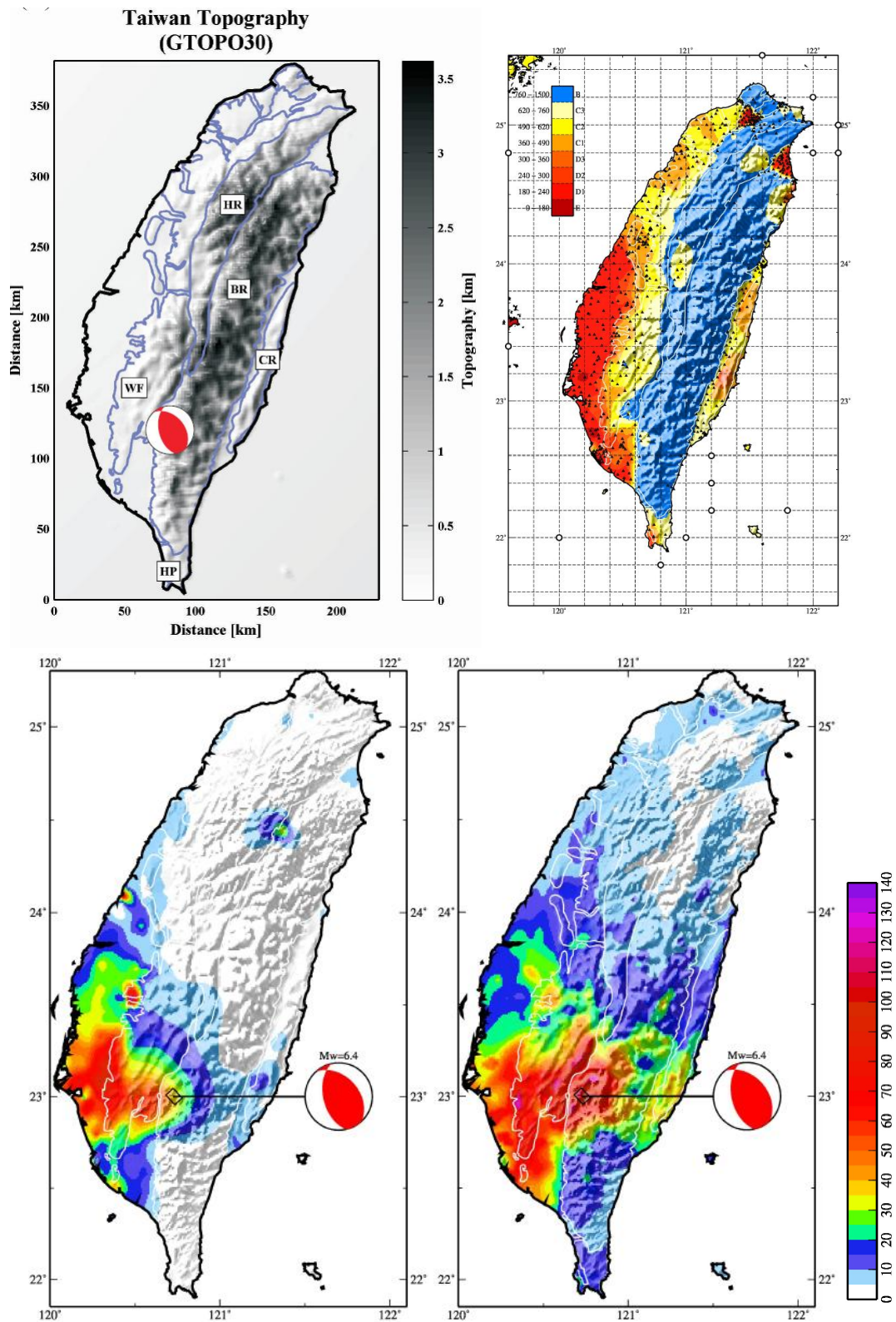
臺灣由於所處的地理位置使其面臨多種地質災害如火山，地震，土石流，甚至海嘯等等的威脅，社會大眾對有關資訊十分關心。在從事科學研究的同時，我們要让研究成果為社會服務，以及時而準確的資訊，既為防災與救災提供幫助，又達到普及科學知識的目的。為此，我們利用現有地震波模擬方法，建立了一個根據地震預警報告提供的地震震源位置和震源機制即時自動計算臺灣全島強地面運動，並製作地震動動畫(shakemovie)，以及計算和繪製 PGA 和 PGV 分佈圖的系統。

目前地震波的模擬有多種已經發展較成熟的方法，我們所使用的是有限差分法(如 Olsen 1994; Zhang & Chen 2006)。該方法除比較容易應用之外，在確保地面運動模擬結果的真實性方面我們特別考慮了三個因素(1)使用三維速度模型(Wu et al. 2007)；(2)考慮地表地形的影響；(3)利用地表場址分類(如 Lee & Tsai 2008)對模擬結果根據場地條件(即地面表層速度)考慮適當的場地放大修正(Wald et al. 2006)。圖一中以 2010 年 3 月 4 日甲仙地震為例比較了在考慮這些因素后 PGV 分佈的變化。

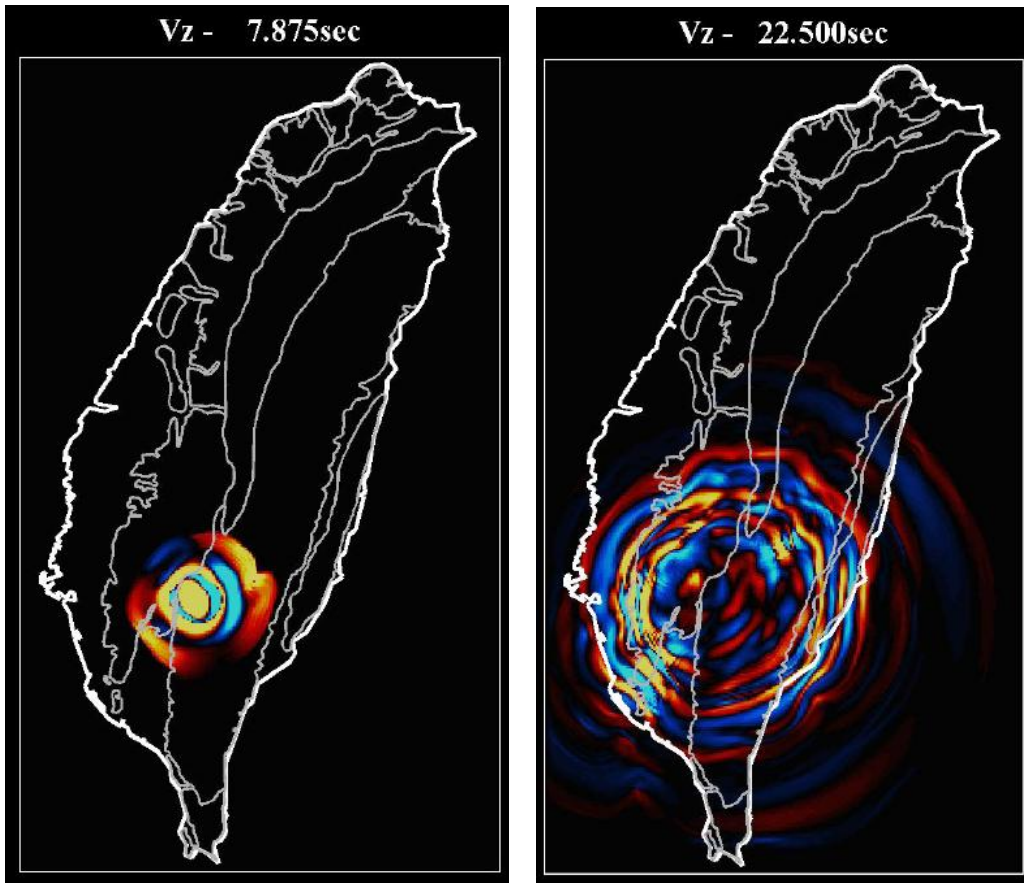
由於三維模型中地震波模擬在計算上的巨大需求，即使利用大型電腦系統，也需要幾小時甚至幾天的時間才能得到準確的強地面運動分佈結果。因此，實現即時迅速提供震後強地面運動估測的關鍵是要有一個預先建立好的應變 Green 函數庫(Zhao et al. 2006)。有了應變 Green 函數數據庫，無論地震發生在什麼地方，地面運動的計算只需要從數據庫中讀取適當的應變 Green 函數，與震源機制解進行相乘就可以得到，而無需進行任何數值模擬，從而不僅不需要大型電腦系統，而且可以在幾分鐘以內迅速地計算許多地方的地面運動用來製作 shakemovie 以及 PGA 和 PGV 分佈圖。對於有限震源也可以用同樣方法處理而無需增加任何計算上的複雜性。

目前我們已經用 Wu et al. (2007)的三維速度模型建立了臺灣本島陸地地區的應變 Green 函數數據庫。該數據庫選取約 2,282 個陸上採樣點，計算應變 Green 函數的範圍包括地表至 80 公里深度及整個臺灣本島至東部海岸綫以外約 50 公里。在此區域內發生的任何地震都可以利用該數據庫迅速計算在島上 2,282 個採樣點的地面運動。

本系統目前已經在中研院電腦系統經過測試，並與現有自動震源機制反演系統連接，能夠自動地對臺灣及其附近有感地震迅速(目前在 15 分鐘左右)提供模擬得到的 shakemovie 及 PGA 和 PGV 分佈圖。圖二中顯示了以甲仙地震為例所計算的 shakemovie 中兩個時刻的畫面。若進一步利用目前新興的志願者提供計算資源(volunteer computing)的理念，shakemovie 及 PGA 和 PGV 分佈圖的計算和製作將可以縮減到 5 分鐘以內。



圖一、2010年3月4日甲仙地震PGV地圖模擬結果。左上圖為臺灣地形圖，右上圖為地表場地類型及臺灣強震台網測站分佈圖(TSMIP)分佈圖。下圖為觀測(左)與模擬(右)PGV(周期長於3秒)分佈比較，色標單位為mm/s。模擬震源為點源，考慮了地形變化以及近地表場地放大效應。



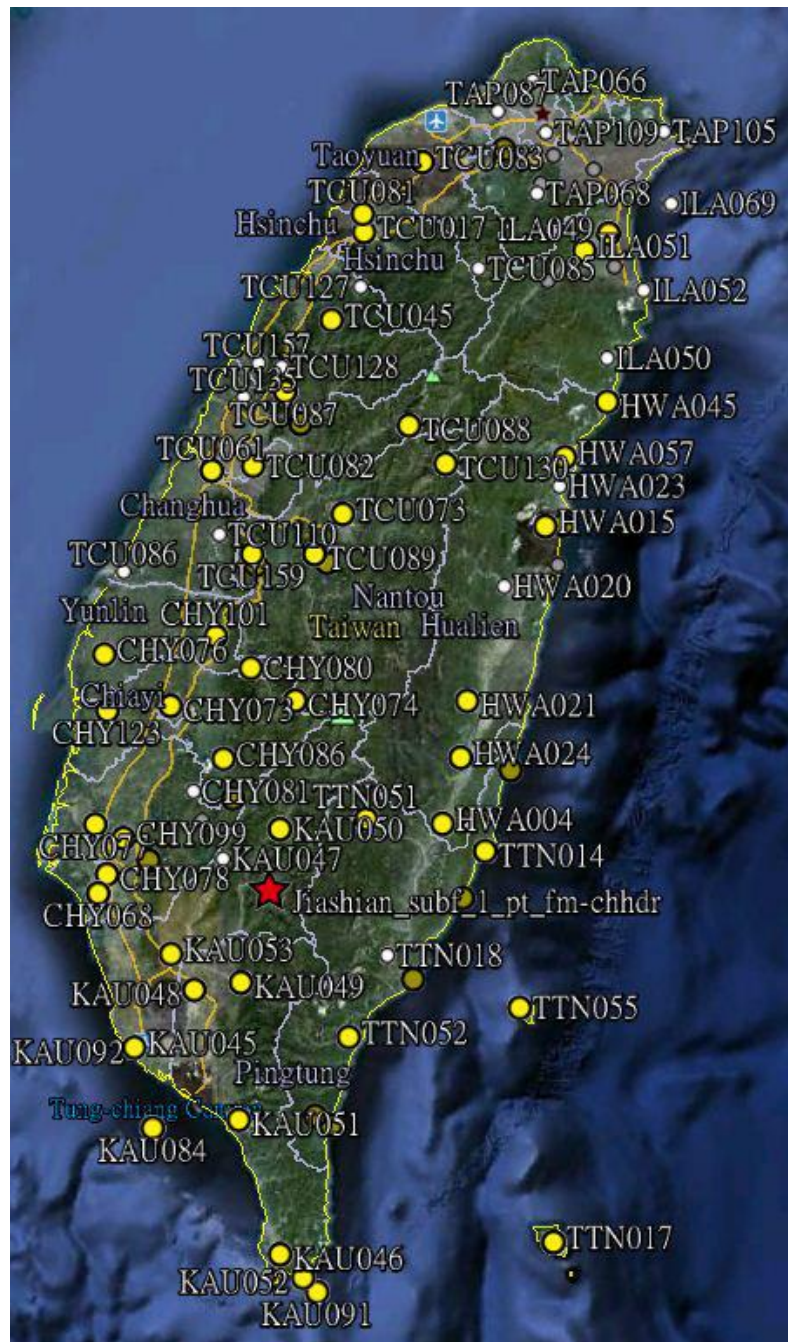
圖二、甲仙地震地表震動動畫(shakemovie)的兩幅畫面。左圖為發震后 7.875 秒，右圖為發震后 22.5 秒。模擬震源為點源，考慮了地形變化。

四、震源實際破裂面的迅速判定

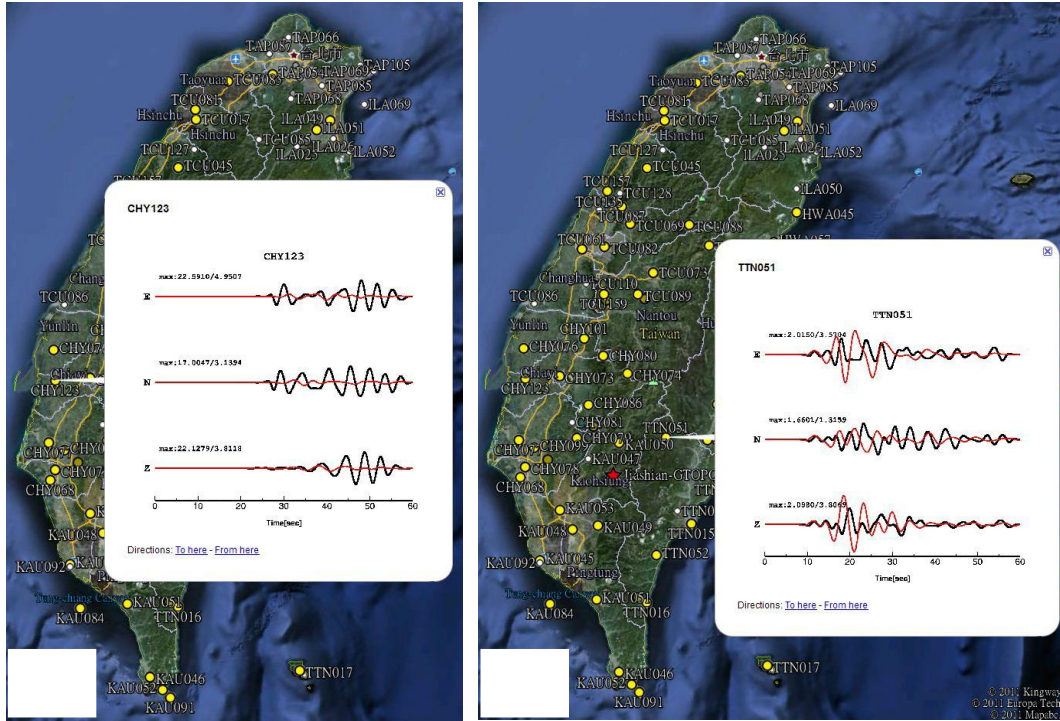
目前普遍接受的地震震源模型是地下兩個不同塊體沿著它們之間的接觸表面（即斷層面）互相滑動，斷層面上發生滑動的部分就是震源，因此震源一般是有一定的面積的。然而由前述自動系統得到的震源機制解是基於近似的點震源模型，在這一模型下，震源機制解中包含兩個互為共軛的平面，它們所產生的地震波形完全一樣，因此從震源機制解並不能知道真實斷層面的特徵。本計劃將在獲得準確的震源機制解的前提下，進一步在震源機制解的兩個共軛平面中找出真正的地震斷層面。

點震源模型的震源機制解有其特有的地震波輻射花樣，即地震波振幅大小隨方位的變化。這種點源的輻射花樣通常有空間上的對稱性，如在相反的方向上振幅相同，正是這種對稱性使得無法用振幅隨方位的變化來判斷兩個共軛平面中哪一個是真正的斷層面。然而在考慮震源的有限面積以後，這種輻射的對稱性會遭到破壞，兩個共軛平面的輻射振幅會具有不同的方位變化特徵。因此，在得到點源震源機制以後，如果我們分別以兩個共軛平面為震源面，並以有限震源模型計算不同方位上的地面運動，並與觀測的地面運動作對比，就能夠從兩個共軛平面中找出一個對地面運動預測較好的平面，從而判斷真正的地震斷層面。

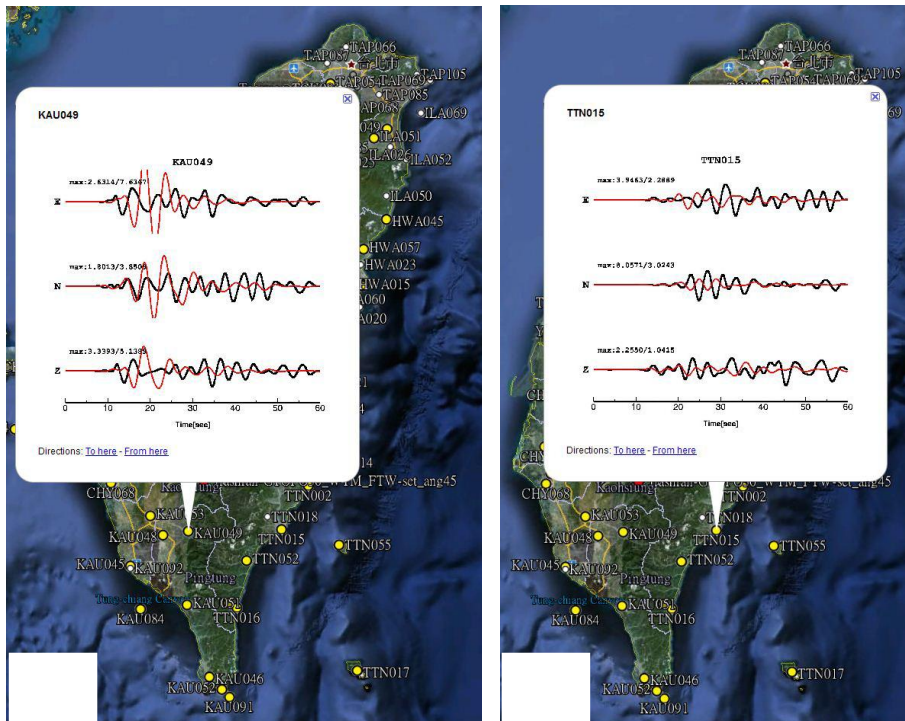
基於以上分析，我們以甲仙地震為例，分別以點震源和有限震源模型計算了在氣象局強地面運動即時觀測台站處的地面運動，來與觀測記錄作對比。圖三顯示甲仙地震震央位置 and 即時強地面運動台站分佈。從位于臺灣本島的 95 個即時強震站中，我們選出 61 個三分向記錄波形訊雜比高的計算了理論波形。在地面運動模擬中，我們使用 Wu et al. (2007) 的三維模型以及 GTOTO30 的地表地形變化 (http://eros.usgs.gov/#/Find_Data/Products_and_Data_Available/gtopo30_info)，圖四中顯示了點源所模擬的強地面運動與觀測記錄的對比。



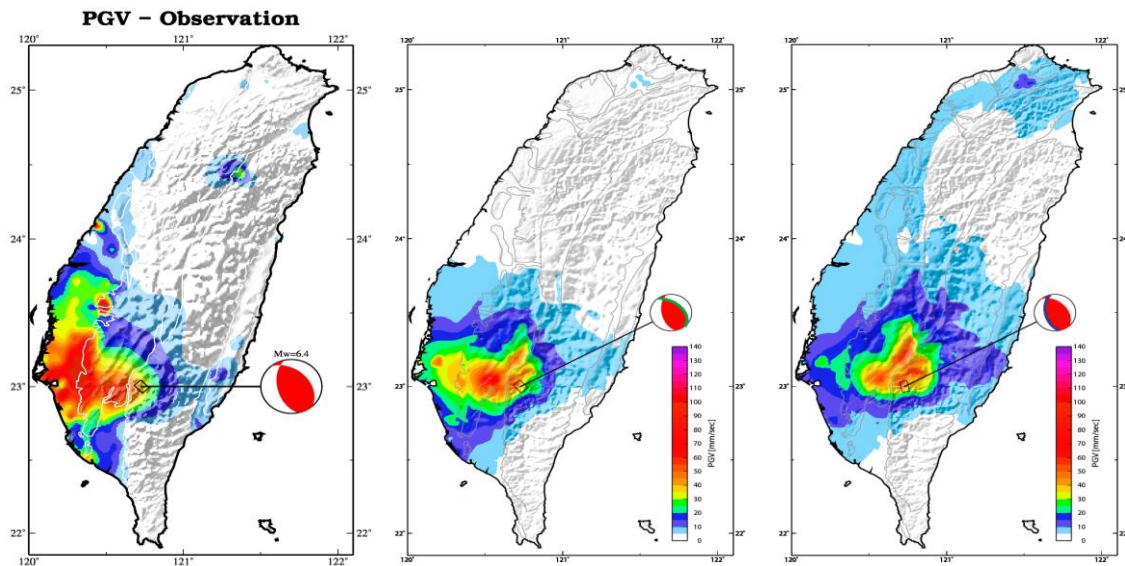
圖三、2010年3月4日甲仙地震震央位置（紅色五角星）及氣象局95個強地面運動測站（圓圈）分佈圖。黃色圓圈表示61個對於甲仙地震有訊雜比較高的三分量波形記錄的測站，用來做波形和PGV對比。



© 2011 Kingway
© 2011 Europa Techn
© 2011 MacBee



圖四、以點源為震源模擬的甲仙地震三分量地面運動（紅色曲線）與觀測記錄（黑色曲線）在位於四個不同方位的測站的對比。對比頻段為周期大於3秒左右。模擬中考慮了點源震源機制，三維速度結構和地形變化。理論與記錄波形對比可以發現，模擬振幅在西北方向（a）明顯偏小，而在東北（b）和西南（c）兩個方向則明顯偏大。由於對比中使用的波形不是高頻，近地表場地放大效應不大，且震源機制和三維速度模型已經在模擬中有所考慮，因此這裡所看到的振幅差別應當主要來自有限震源的方向性效應。點源結果與觀測之間的差別顯示甲仙地震很有可能是沿西北走向的斷層上逆沖滑動的結果。



圖五、甲仙地震 PGV 分佈圖對比 (周期長於 3 秒)。左圖為即時強地面運動台網觀測結果，中圖為以西北走向的共軛平面 (震源機制球中綠色大圓弧) 為有限震源斷層面模擬得到的結果，右圖為以東南走向的共軛平面 (震源機制球中藍色大圓弧) 為有限震源斷層面模擬得到的結果。模擬中考慮了三維速度結構，近地表放大效應和地形變化。與觀測的對比顯示兩個共軛平面中西北走向的共軛面 (中圖) 最有可能是甲仙地震中發生滑動的斷層面。

從點源模擬的振幅分佈與觀測的比較，我們可以觀察到實際有限震源地震波輻射的方向性。為了進一步對震源機制的兩個共軛平面做出區分，我們可以分別以兩個共軛平面為基礎，根據甲仙地震規模的大小以及震源物理上的經驗公式 (如 Yen & Ma 2011)，建立兩個有限震源模型。然後計算這兩個有限震源所產生的 PGA 或 PGV 分佈圖，通過與觀測的 PGA 或 PGV 分佈圖比較，最終選出與觀測較為接近的共軛平面作為真實斷層面。甲仙地震的觀測和兩個共軛平面模擬的 PGV 分佈圖比較如圖五所示。從初步的定性比較可以發現，沿西北走向的共軛面更有可能是此次地震的真實斷層面。

在後續的工作中，我們會引入模擬與觀測分佈圖之間的定量的比較，並且將整個流程盡可能實現自動化，與目前的震源機制自動確定系統銜接，利用已經建立的應變 Green 函數數據庫，使包括建立有限震源模型，PGA 或 PGV 分佈圖的計算和與觀測之間的定量比較和真實斷層面的判定能夠在短時間內自動完成。

參考文獻

- Kagan, Y. Y. 3-D rotation of double-couple earthquake sources, *Geophys. J. Int.*, 106, 709-716, 1991.
- Lee, C. T. and Tsai, B. R. Mapping Vs30 in Taiwan, *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 19, 671-682, 2008.
- Olsen, K. B. Simulation of three-dimensional wave propagation in the Salt Lake Basin, *Ph.D. Thesis*, University of Utah, Salt Lake City, Utah, 157pp., 1994.

- Wald, D. J., Worden, B. C., Quitoriano, V. and Pankow, K. L. *ShakeMap® Manual*, United States Geological Survey, 2006.
- Wu, Y.-M., Chang, C.-H., Zhao, L., Shyu, J. B. H., Chen, Y.-G., Sieh, K. and Avouac, J.-P. Seismic tomography of Taiwan: Improved constraints from a dense network of strong-motion stations, *J. Geophys. Res.*, 112, B08312, doi:10.1029/2007JB004983, 2007.
- Yen, Y.-T. and Ma, K.-F. Source-scaling relationship for M4.6–8.9 earthquakes, specifically for earthquakes in the collision zone of Taiwan, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 101, 464-481, 2011.
- Zhang, W and Chen, X. Traction image method for irregular free surface boundaries in finite difference seismic wave simulation, *Geophys. J. Int.*, 167, 337-353, 2006.
- Zhao, L., Chen, P. and Jordan, T. H. Strain Green tensor, reciprocity, and their applications to seismic source and structure studies, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 96, 1753-1763, doi:10.1785/0120050253, 2006.
- Zhao, L. S. and Helmberger, D. V. Source estimation from broadband regional seismograms, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 84, 91-104, 1994.
- Zhu, L. and Helmberger, D. V. Advancement in source estimation techniques using broadband regional seismograms, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 86, 1634-1641, 1996.

震源區域地質與孕震構造之分析

Regional geology and earthquake potential structure of the near-epicenter area

主管單位：中央氣象局地震測報中心

張中白

徐乙君

Chang, Chung-Pai

Hsu, Yi-Chun

國立中央大學太空及遙測中心

摘要

台灣位處於非常活躍的造山帶，菲律賓海板塊每年以 82mm/yr 的速率向歐亞板塊聚合，使得台灣島地殼變動劇烈，活動斷層遍布且地震活動頻繁，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。本研究擬於大型地震發生後，先利用衛星影像初步判釋地表破裂情形，並規劃至震央附近進行地質調查，以提供斷層活動資訊。由於活動斷層發生地震的可能性很高，本研究在地震未發生時，亦會針對活動斷層附近，利用地形資料，加上已有的構造地質資料進行孕震構造之分析。

本年度工作重點為新城、獅潭、梅山、大尖山、六甲及觸口等斷層。利用地形計測指標量化地形資訊，藉由水系分析，得知流經斗煥坪斷層之頭前溪及中港溪之相對構造抬升率較高，反映該斷層的活動性。此外，利用永久散射體干涉量測技術，針對西部平原及麓山帶區域進行活動斷層變形分析，由分析結果顯示新城斷層、新化斷層及左鎮斷層兩側地表的變形量較大。

關鍵詞：孕震構造、地形計測指標、永久散射體干涉量測技術

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. This study aims to use the satellite images to illustrate the co-seismic surface ruptures soon after the large earthquake, and plans to carry out geological surveys of the near the epicenter area in order to provide information of the earthquake related fault. Because the active faults

are generally the candidates for the future earthquake, before the occurrence of large earthquake in the period of this study, we also carried a series of morphological analysis and combine then with the existing geological data to understand the earthquake potential for the vicinity of chosen active faults.

For this year our main target is focused on the active faults, including Shinchon, Meishan, Tachienshan, Liuchia and Chukou Faults. The works of geological data accumulating and geotopographic indices analysis are carried out in this report. We applied Persistent Scatters SAR Interferometry to measure surface deformation in Coastal Plain and Western Foothills. After this study, the significant deformation around the Hsincheng, Hsinhua and Tsochen faults can be clearly observed.

Keywords : Earthquake potential structure, Geomorphic Indexes, Persistent Scatterers SAR Interferometry.

一、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。

二、研究方法及進行步驟

本研究在未發生地震時，將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，利用衛星影像及數值高程模型(DEM)進行分析。

根據 Sin Mei Ng 提出(2009)統計台灣西部地區 5 個區塊內於 17~19 世紀期間，歷史地震發生之時間、震源位置及地震規模，再利用地殼累積能量尚未釋放之觀點，推論桃園-新竹-苗栗區塊及雲林-嘉義區塊具有發生地震之潛勢。再由經濟部中央地質調查所公布之活斷層分布圖(圖 1)顯示，桃園-新竹-苗栗區塊及雲林-嘉義區塊內共有 6 條第一類活動斷層，包括新城、獅潭、梅山、大尖山、六甲及觸口斷層，故本研究將針對這 6 條活動斷層來進行孕震構造分析。

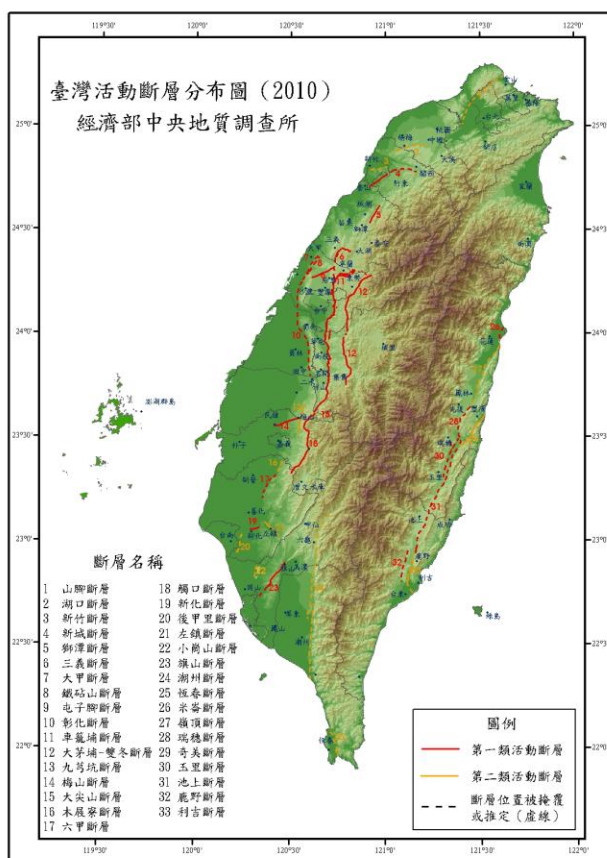


圖 1、台灣活動斷層分布圖(經濟部中央地質調查所，2010)。

三、孕震構造分析

3.1 地形計測指標分析

河流作用為外營力作用中最普遍且影響最大的一種，最能反映地殼變動也會在地形上留下如河階、曲流地形及河流的凹曲度等證據(古兆禎, 1965; Hsu and Chai, 1974; Kirby and Whipple, 2001)，故在研究地形發育與構造運動之關係時常會從分析河流地形著手。由許多文獻指出，河流在經歷岩層抬升時，下切速率會反映抬升速率；藉由河流會隨地形發育而調整其坡度和集水面積的特性，本研究針對流經高潛感斷層的水系，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，透過水系分析，以了解斷層的活動性。

本研究主要利用 6 條高潛感斷層鄰近之水系，進行地形計測指標分析，其水系分布圖分別如圖 2、圖 3 所示。

1. 水力基盤侵蝕模型

利用岩盤上升和地形侵蝕之間的相互作用(Howard, 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)：

$$\frac{dz}{dt} = U - E = U - KA^m S^n \quad (1)$$

其中 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，而 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，而 m 與 n 則為正常數值。當河道剖面達均衡穩定之狀態，利用 dz/dt=0 可求出穩定坡度(S)和集水面積(A)之相關性：

$$S = \left(\frac{U}{K}\right)^{\frac{1}{n}} A^{-\frac{m}{n}} \quad (2)$$

$$S = k_s A^{-\theta} \quad (3)$$

$$\log(S) = -\theta \times \log(A) + \log(k_s) \quad (4)$$

其中(U/K)^{1/n}為平衡剖面的陡峭度指標(steeptness index, k_s)，它與岩層抬升速率、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)，θ 值越大代表河流的凹曲度越大。但因為河流剖面的凹曲度尚會受到岩性、河流蜿蜒度、與河道寬度及性質之影響(Wobus et al., 2006)，本計畫主要利用河流之陡峭度進行岩層抬升率之探討。

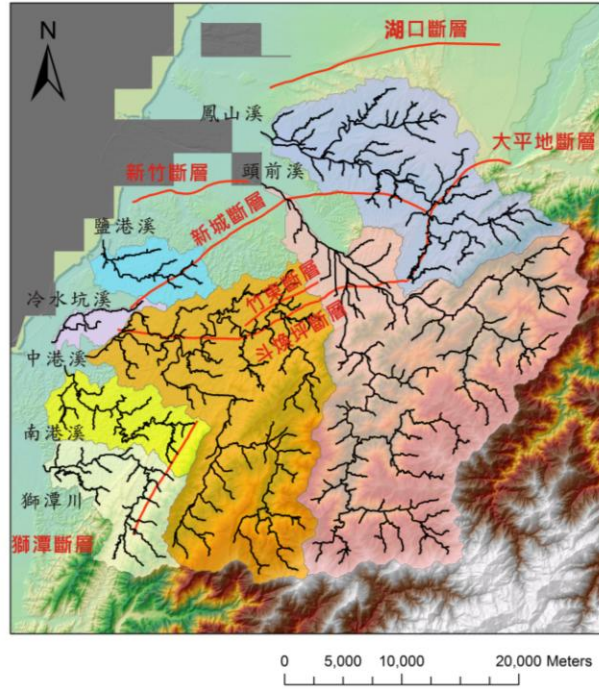


圖 2、新城、獅潭斷層區域之水系分布圖。



圖 3、大尖山、觸口、梅山及六甲斷層區域之水系分布圖。

2. 相對構造抬升速率

利用河流的坡度為縱軸，流域面積為橫軸，以雙對數座標圖(圖 4)，即可透過資料回歸求出凹曲度指標(θ)，也就是 m/n ratio 值，並可得知陡峭度指標 (steepness index ; k_s)。

由於 k_s 和 θ 有極高的相關性，故需要導入參數 θ_{ref} (reference concavity)，使陡峭程度正常化，並得到一個與河流上升率正相關之數值-正規化陡峭程度參數(k_{sn} , normalized steepness indices)。公式如下：

$$k_{sn} = k_s A_{cent}^{\theta_{ref} - \theta} \quad (5)$$

$$A_{cent} = 10^{(\log A_{max} - \log A_{min})/2} \quad (6)$$

式中的 k_s 與 θ 可由回歸法求之， θ_{ref} 為區域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、最小範圍， A_{cent} 為分析河段流域面積的中位數。

新竹-苗栗地區採用之 θ_{ref} 為 0.83，雲林-嘉義地區採用之 θ_{ref} 為 0.98，其計算求得之 k_{sn} 結果分別如圖 5、圖 6 所示，由新竹-苗栗地區的資料顯示在獅潭斷層上，南邊的抬升速率較北邊高，在新城斷層上，頭前溪鄰近區域之抬升率相對較高，但因頭前溪及中港溪另有斗煥坪斷層通過，故其 k_{sn} 值較其他河流高，此現象可能反應斗煥坪斷層之活動性 (圖 5)。

由圖 6 可觀察雲林-嘉義地區的相對抬升速率，因清水溪和八掌溪的流域面積相對較大，故其對應的區域構造活動較其他河流多，暫不列入討論。由其他河流的 k_{sn} 值分布情形，可觀察觸口斷層中間段，河流反應的構造抬升量相對較低，亦可能和這段區域恰好無其他斷層構造重疊相關。三疊溪及牛稠埔坑溪的 k_{sn} 值位居第 3、第 4，顯示此區域的構造抬升情形相對較為明顯。

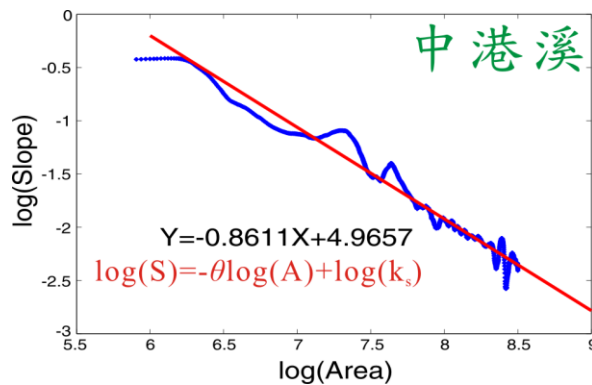


圖 4、河流之坡度-流域面積雙對數圖(以中港溪為例)。

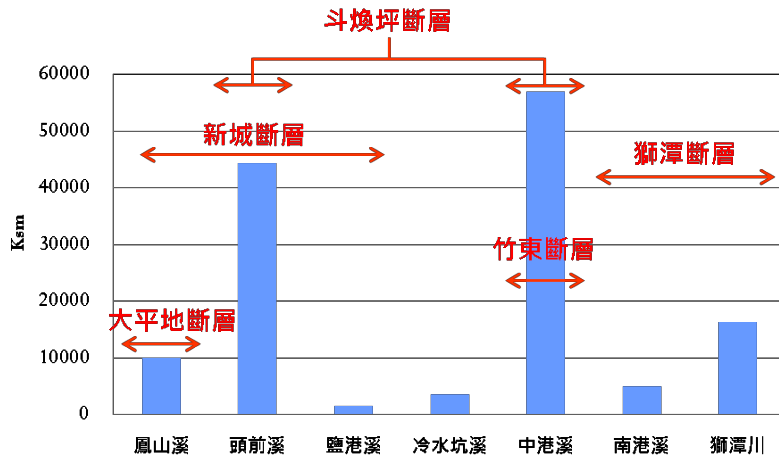


圖 5、新竹-苗栗地區河流之陡峭程度參數值(k_{sn})。

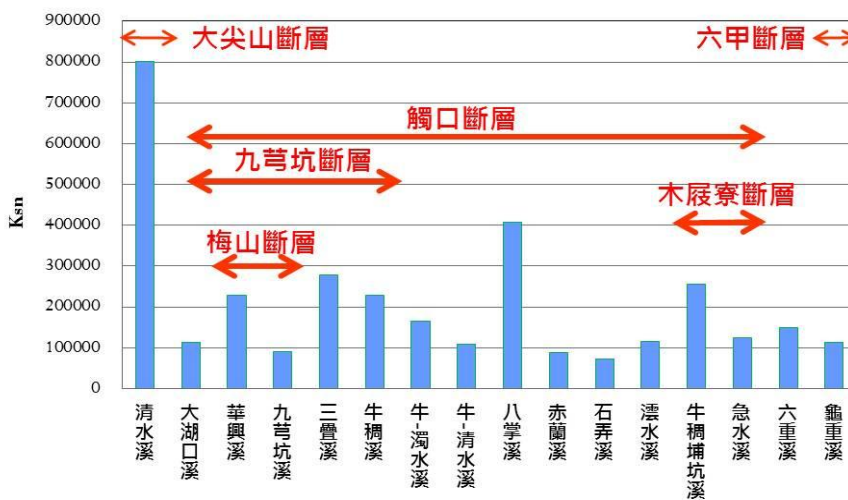


圖 6、雲林-嘉義地區河流之陡峭程度參數值(k_{sn})。

3.2 永久散射體差分干涉分析

雷達差分干涉技術(DInSAR)的基本的原理是利用衛星酬載的雷達對地面發射雷達波，地面反射的雷達波有一部份會被衛星接收，這些接收到的訊號包含了雷達波的強度訊號以及相位訊號。雷達波的強度訊號通常反應了地表的特性，相位訊號則包含了距離的資訊，故可利用前後不同時間的雷達影像，萃取地表在時間內的相對變動量(圖 7)。但 DInSAR 技術仍受限於多山坡、厚植被與豐富的水氣含量等影響，故本計畫嘗試利用能有效降低軌道、DEM、大氣效應及地表物非同調性誤差的永久散射體干涉量測技術 (Persistent Scatterers SAR Interferometry, PSI) 進行觀測。

PSI 的基本原理是以 SAR 影像中像素的強度值為基準，篩選在空間上波散特性較強且長時間存在的點位(即永久散射體, Persistent Scatterers, PS)，再針對這些 PS 點於時間序列上相位的時間與空間特性進行高、低通濾波與三維相位資訊回復(Unwrapping)，將可從訊號中影響 DInSAR 結果最大的軌道、DEM 誤差與大氣效應因素，甚至消除，進而達到對於 PS 點位的精密觀測(圖 8, Hooper et al., 2004, 2007a, 2007b)。

本年度使用歐洲太空總署所於 2004 年初到 2008 年底的 Envisat 衛星影像，分別針對台灣西部麓山帶及平原區（Track：232；Frame：3105、3123、3141，圖 9）進行影像處理分析，並針對這些地區於這 4 年來的地表變形進行觀測與解釋。

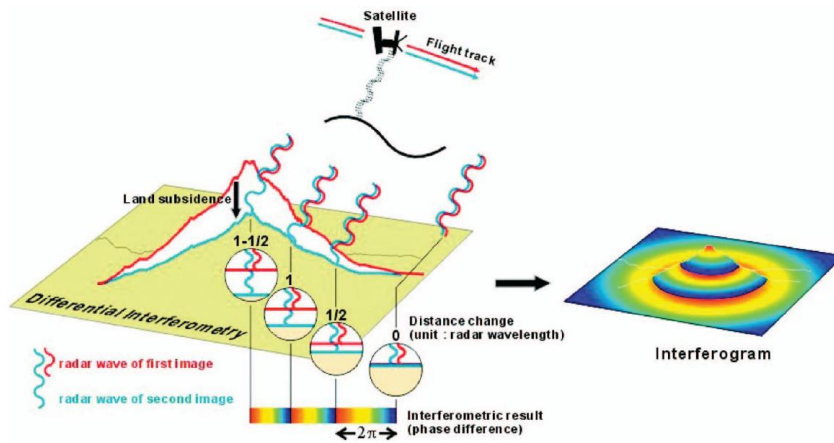


圖 7、雷達差分干涉示意圖。

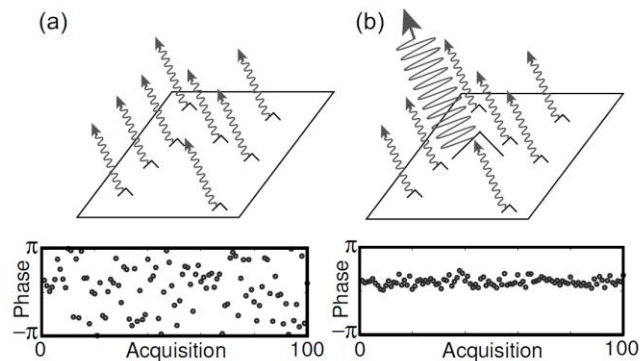


圖 8、永久散射體雷達回波示意圖。(a)普通散射體在一個像素內雷達回波的分布示意圖，(b)永久散射體在一個像素內雷達回波的分布示意圖。

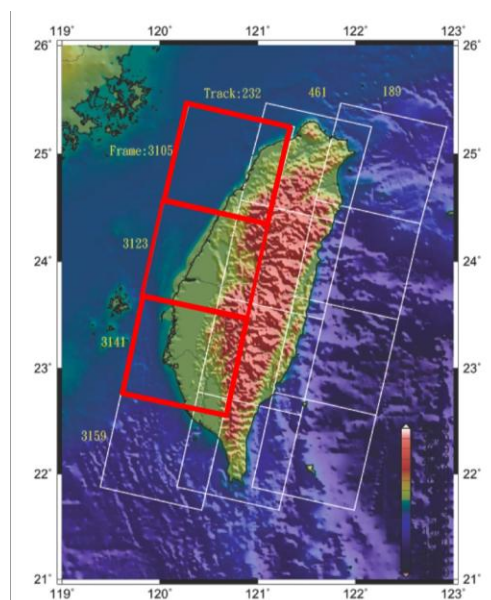


圖 9、Envisat 衛星的軌道示意圖。紅色方框為本計畫所選取之圖幅。

1. 桃竹苗地區

圖 10 為 PSI 技術於桃竹苗地區所處理完成的平均地表位移變化量化圖，圖中有兩處的位移變化量較大之區域，一為新城斷層附近區域，另一為獅潭斷層附近區域。新城斷層為一向北逆衝的低角度逆衝斷層，斷層面向南傾 30° ，在觀測期間內，新城斷層東段南北兩側之錯動量較明顯(可達 10 mm/yr)，上盤(南側)相對下盤有活動造成的抬升發生，此變形可能為構造活動造成。於觀測期間，獅潭斷層附近則有下陷之現象發生，由於此下陷與斷層線兩側變形的關係不一致，判斷此下陷與構造活動無關，可能和當地的地下水抽取，土壤水含量變化有關。

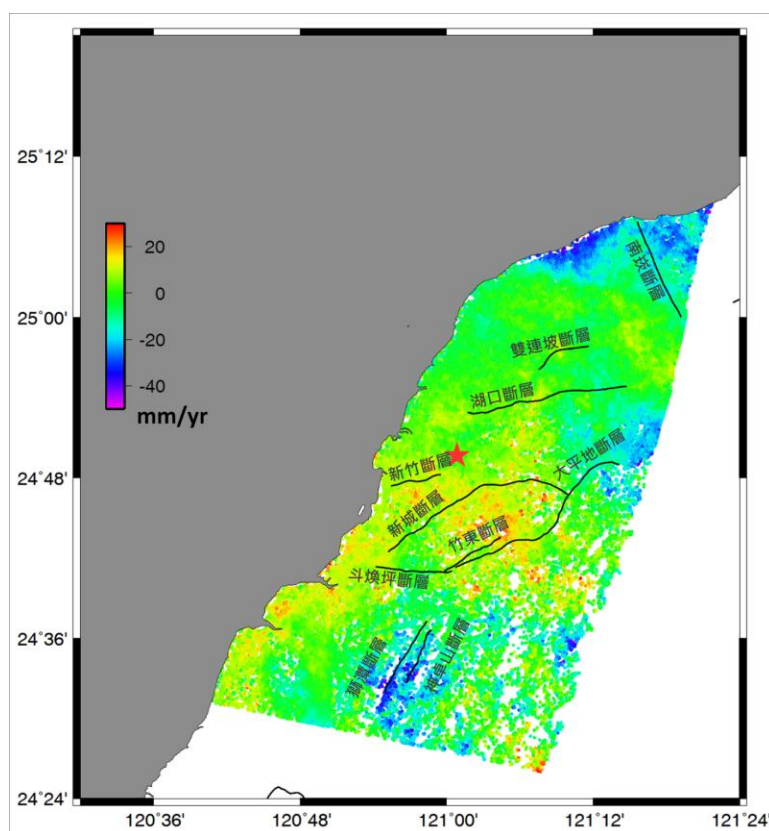


圖 10、T232_3105 區域 Envisat 衛星影像的平均地表位移變化量化圖。圖中冷色系代表沿雷達方向延伸(下陷)，暖色系則代表縮短(抬升)，星號為參考點位置。

2. 中彰雲地區

圖 11 為 PSI 技術於中彰雲地區所處理完成的平均地表位移變化量化圖，可觀察到在濁水溪沖積平原處之地表位移變化以下陷為主，其主要和超抽地下水造成之地層下陷有關(圖 12)。此外，在台中盆地區域，可觀察到約有 20 mm/yr 的地表抬升，但此抬升應與車籠埔斷層活動無關。在彰化斷層中段，東側相對西側亦有接近 3 mm/yr 的地表位移速率。

察到輕微的地表變形量；新化、後甲里和左鎮斷層分別為右移、逆和左移斷層，其地表變形情形顯示的斷層活動和其活動特性大致吻合。在屏東平原的下陷情形可能和平行造山運動的逃脫作用有關(rogen-parallel extrusion)。此外，山區部分有明顯的抬升，應為板塊碰撞造成的區域抬升作用。

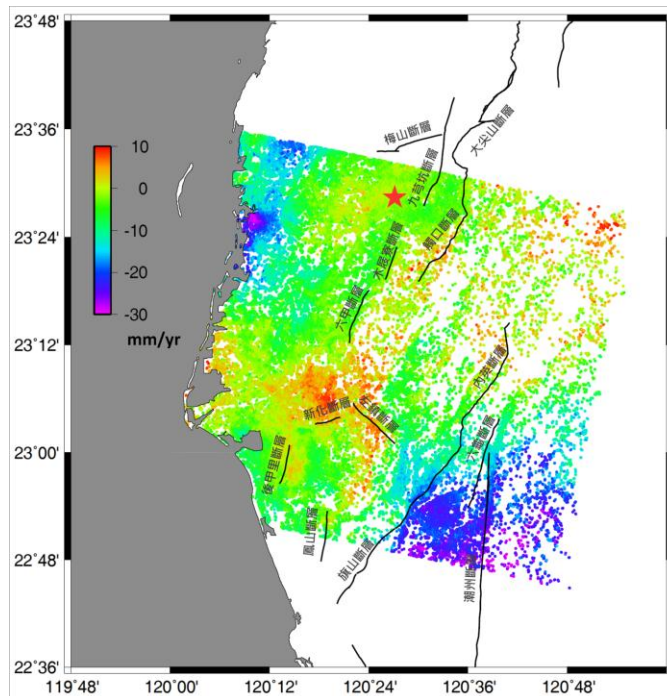


圖 13、T232_3141 區域 Envisat 衛星影像的平均地表位移變化量化圖。圖中冷色系代表沿雷達方向延伸（下陷），暖色系則代表縮短（抬升），星號為參考點位置。

四、結果分析與討論

今年藉由分析水系之地形計測指標，計算各流域之正規化陡峭度指標(k_{sn})，得知各水系的相對構造抬升速率，以了解新竹-苗栗區域及雲林-嘉義區域之斷層活動性。由分析結果顯示，流經斗煥坪斷層之頭前溪及中港溪相對構造抬升速率較高，可能反應斗煥坪斷層之活動性。

此外，針對西部平原與麓山帶地區進行衛星雷達差分干涉測量，觀測近活動斷層區的地表變形情形，由 PSInSAR 的分析結果顯示，新城斷層、新化斷層及左鎮斷層兩側有較明顯的地表變形，初步判斷可能與斷層活動有關。而部分下陷區域，如濁水溪沖積平原，其原因主要為過度抽取地下水造成之地層下陷，和構造活動無關。

參考文獻

1. 古兆禎 (1965) 臺灣地形發育與地殼運動之關係。中國地質學會會刊，第 8 號，第 102-105 頁。
2. 林啟文、盧詩丁、陳文山 (2010) 台灣活動斷層分布圖(第二版，1/500,000)。經濟部中央地質調查所。

3. Duvall, A., Kirby, E. and Burbank, D. (2004) Tectonic and lithologic controls on bedrock channel profiles and processes in coastal California: *Journal of Geophysical Research*, **109**, F03002, 18 PP., doi:10.1029/2003JF000086, 2004.
4. Hooper, A.J., Zebker, H., Segall, P. and Kampes, B.M. (2004) A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers: *Geophysical Research Letters*, **31**, L23611.
5. Hooper, A.J. and Zebker, H. (2007a) Phase unwrapping in three dimensions with application to InSAR time series: *Journal of Optical Society of America*, **24(9)**, p. 2737-2747.
6. Hooper, A.J., Segall, P. and Zebker, H. (2007b) Persistent Scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcán Alcedo, Galápagos: *Journal of Geophysical Research*, **112**, B07407.
7. Howard, A.D. (1994) A detachment-limited model of drainage basin evolution: *Water resources research*, **30(7)**, p. 2261-2285.
8. Hsu, T.L. and Chai, M.S. (1974) Coastal features of northern Taiwan and their neotectonic significance: *Proceedings of the Geological Society of China*, **17**, p. 123-130.
9. Kirby, E. and Whipple, K. (2001) Quantifying differential rock-uplift rates via stream profile analysis: *Geology*, **29(5)**, p. 415-418.
10. Ng, S. M., Angelier, J. and Chang, C.P (2009), Earthquake cycle in Western Taiwan: Insights from historical seismicity: *Geophysical Journal International*, **178**, p. 53-774.
11. Snyder, N., Whipple, K.X., Tucker, G.E. and Merritts, D. (2000) Landscape response to tectonic forcing: digital elevation model analysis of stream profiles in the Mendocino Triple Junction region, Northern California: *Geological Society of American Bulletin*, **112**, p. 1250-1263.
12. Whipple, K.X. (2004) Bedrock rivers and the geomorphology of active orogens: *Annu. Rev. Earth Planet.*, **32**, p. 151-185.
13. Wobus, C., Whipple, K.X., Kirby, E., Snyder, N., Johnson, J., Spyropolou, k., Crosby, B. and Sheenhan, D. (2006) Tectonics from topography: Procedures, promise, and pitfalls: *Special Papers-Geological Society of America*, **398**, pp. 55.