

交通部中央氣象局
委託研究計畫期末成果報告

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

計畫類別：氣象 海象 地震

計畫編號：MOTC-CWB- 100-E08

執行期間：100 年 1 月 日至 100 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 100 年 11 月 25 日

政府研究計畫期末報告摘要資料表

計畫中文名稱	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		
計畫編號	MOTC-CWB100-E08		
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	100	執行期間	100/2-12
本期經費 (單位：千元)	1420		
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(%)
	1420	1420	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	火山、地震		
研究目的	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，為了減少未來大地震之衝擊，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。		
研究成果	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。		
具體落實應用情形	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。		
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)			

(以下接全文報告)

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

林正洪、李憲忠

中央研究院地球科學研究所

摘 要

歷史上地震對人類所造成之災害，堪虞為自然界中最嚴重的一項。特別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。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：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。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。過去一年主要初步成果在大型地震之庫倫破壞應力研究，甲仙地震可能觸發觸口斷層 ($\Delta CFS = \sim 0.05 \text{ MPa}$) 的破裂並抑制旗山斷層 ($\Delta CFS = \sim -0.01 \text{ MPa}$) 的破裂；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。此外，即時自動確定地震震源機制系統已經初步建立完

成，開始對臺灣地區有感地震自動計算震源機制解。以 2010 年甲仙地震為例，對有限震源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。

關鍵詞： 中大規模地震、源機制解、庫倫破壞應力、破裂過程

Abstract

Earthquake disaster is one of the most significant impacts in nature. Particularly, 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, these source parameter information are 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.

Key words: 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。

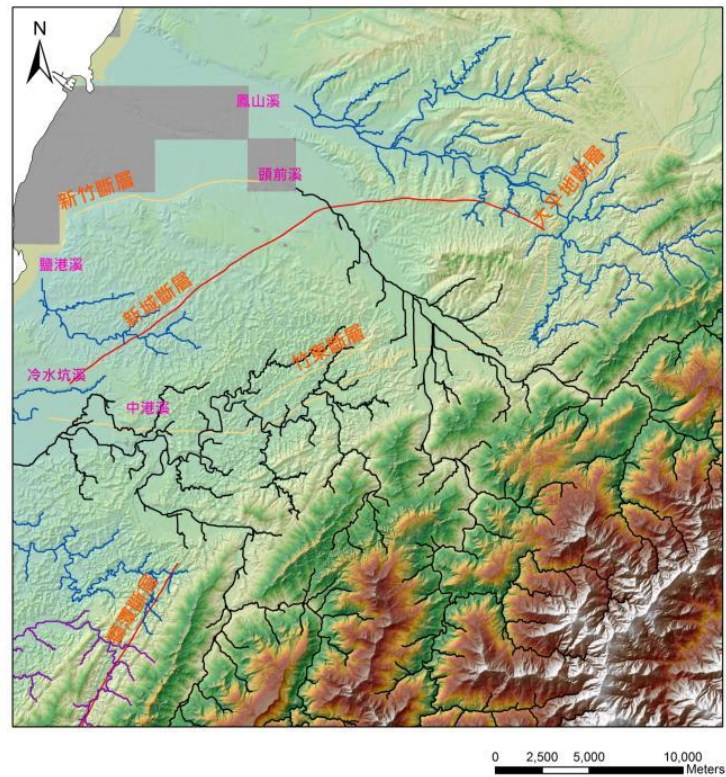


圖 1 新城斷層及其鄰近的水系分布情形

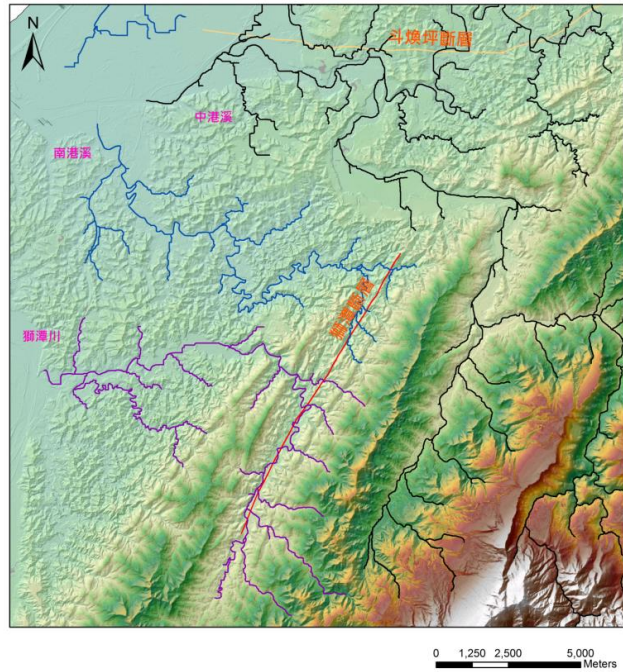


圖 2 獅潭斷層及其鄰近水系分布情形

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。

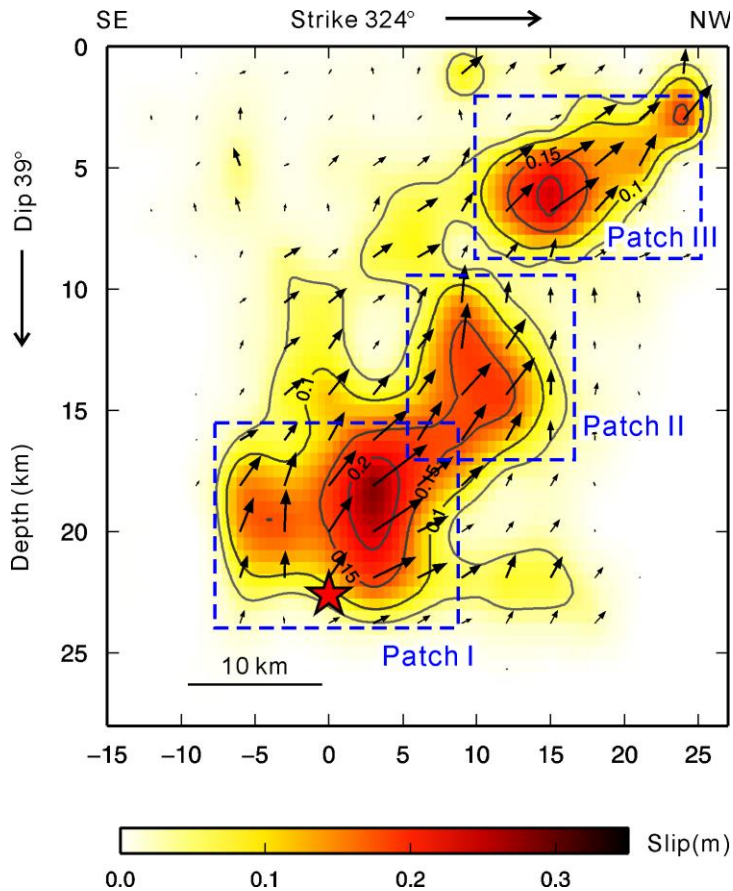
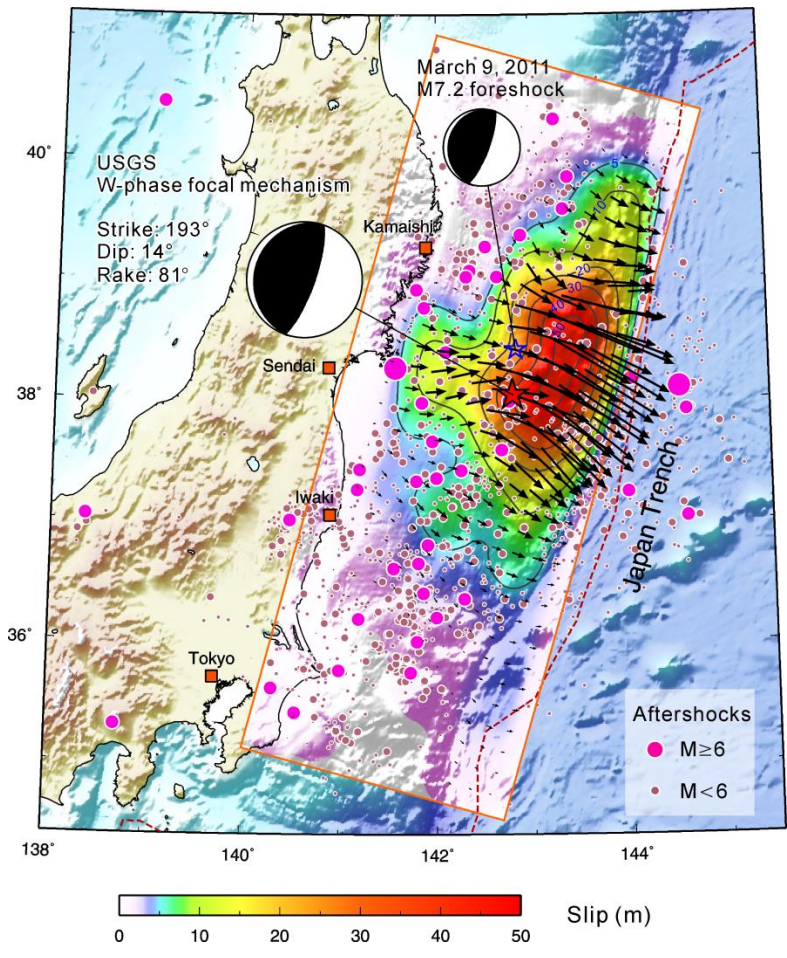


圖 3 甲仙地震錯動量空間分佈

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)

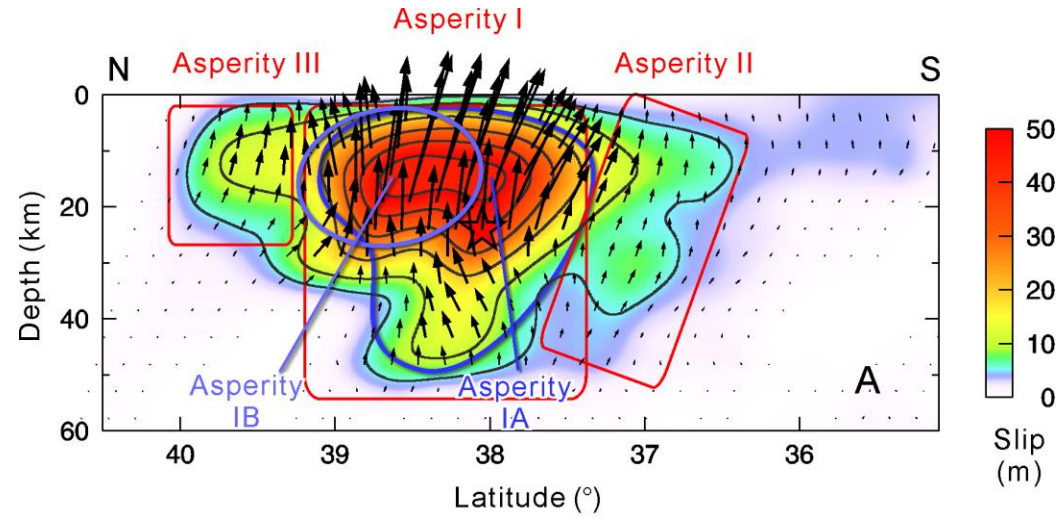


圖 4 日本 311 地震錯動量空間分佈：(a)錯動量分佈水平投影，(b)錯動量分佈斷層面投影。

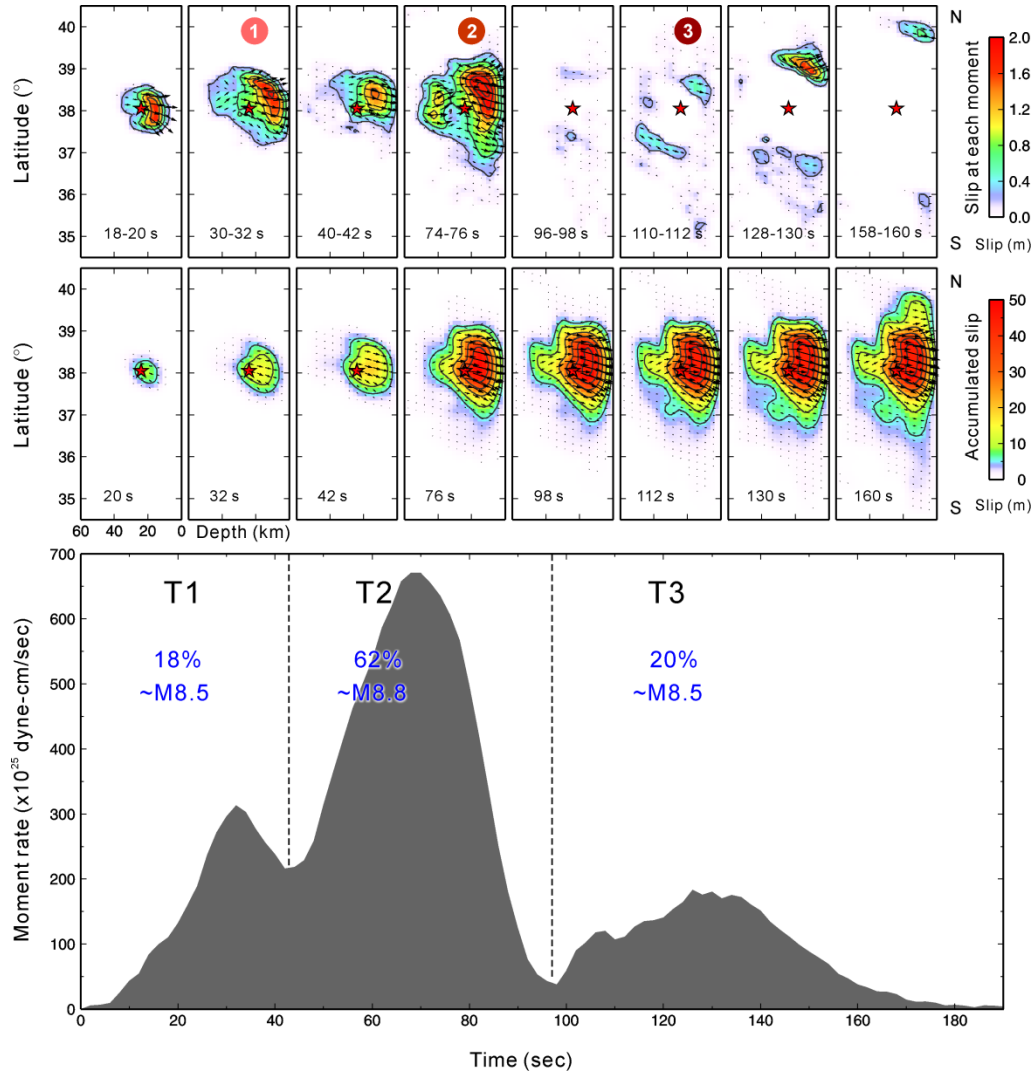


圖 5 日本 311 地震破裂過程。最上方為瞬時破裂分佈，中間為累加滑移量，下方為震源時間函數。

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。

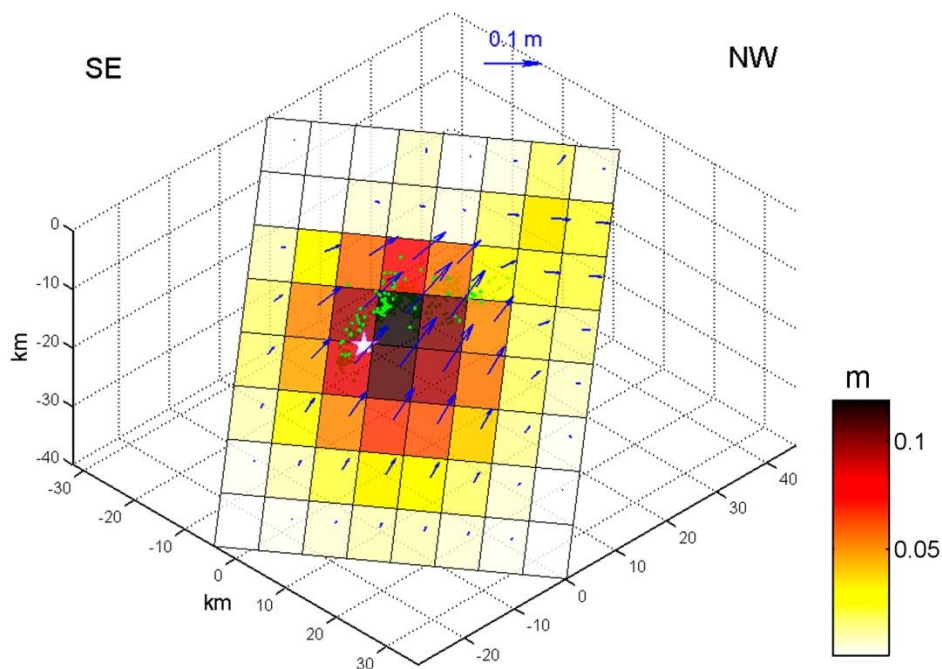


圖 6 甲仙地震同震滑移分佈與斷層幾何形貌。

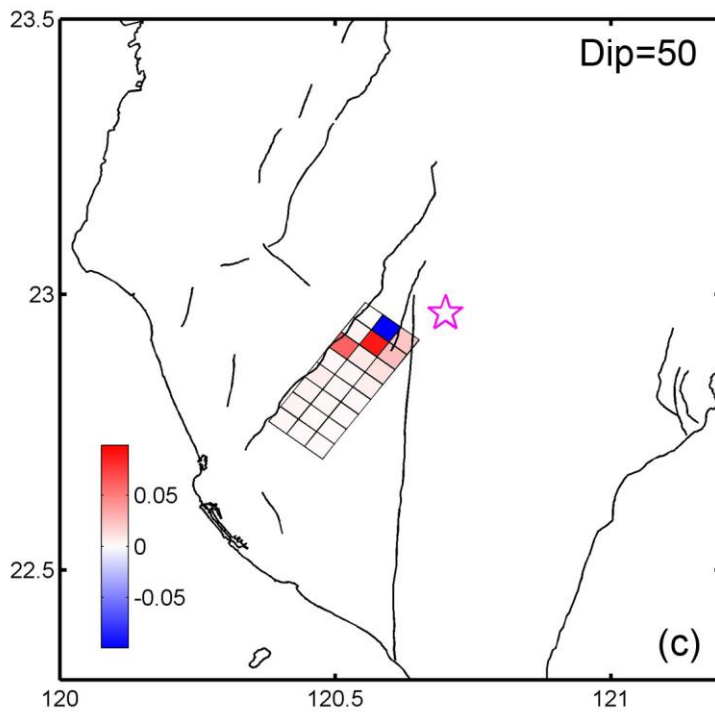


圖 7 斷層系統的庫倫應力變化(ΔCFS)

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。

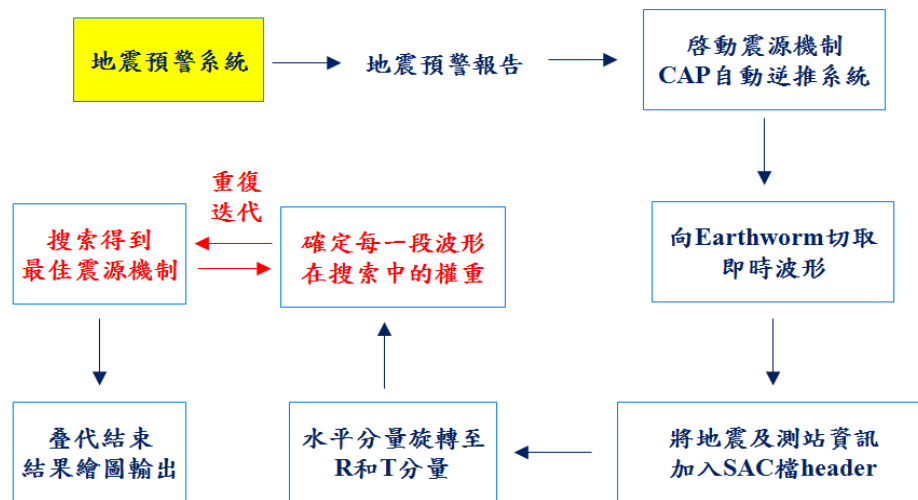


圖 8 即時自動震源機制逆推系統運行流程圖

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。

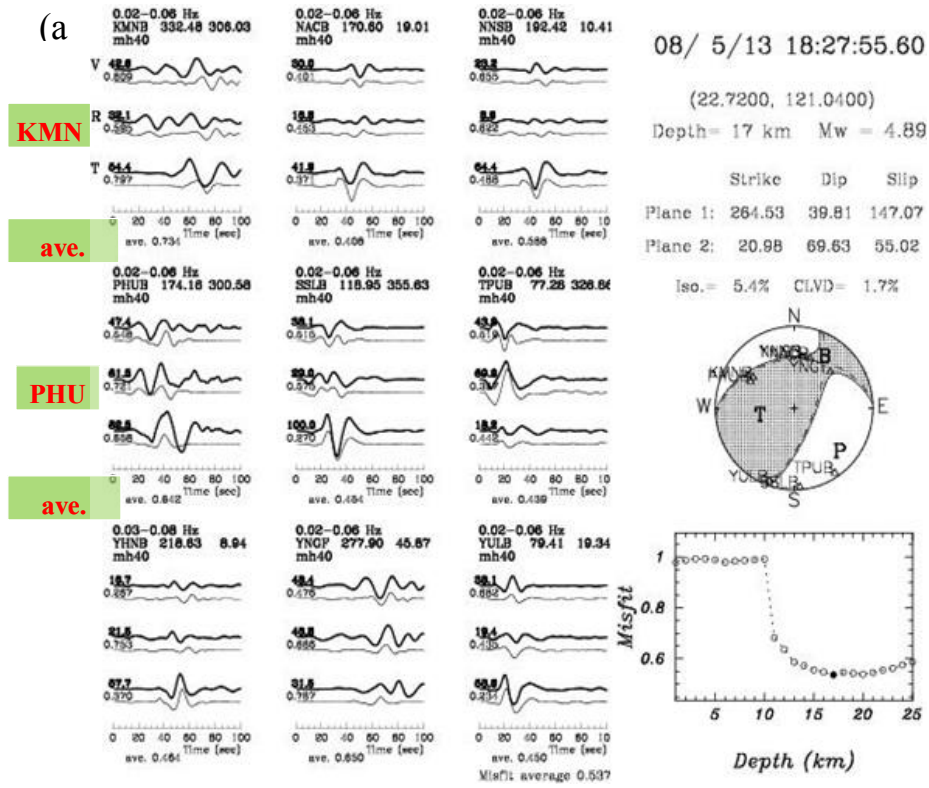


圖 9 台東地震(2008 年 5 月 13 日)震源機制解比較。

交通部中央氣象局
委託研究計畫期末成果報告

庫倫應力變化之推演

計畫類別：氣象 海象 地震

計畫編號：MOTC-CWB-100-E-08

執行期間：100 年 1 月 1 日至 100 年 12 月 31 日

計畫主持人：許雅儒

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 100 年 12 月 日

政府研究計畫期末報告摘要資料表

計畫中文名稱	庫倫應力變化之推演		
計畫編號	MOTC-CWB-100-E-08		
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	100	執行期間	100年1月1日至100年12月31日
本期經費 (單位：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(%)
研究人員	計畫主持人	協同主持人	研究助理
	許雅儒		
報告頁數		使用語言	
中英文關鍵詞			
研究目的	<p>大地震發生過後，常伴隨許多餘震，科學家為了解主震所造成的應力改變對鄰近斷層的影響，在1994年首次提出庫倫破壞應力的概念。當庫倫破壞應力為正值時表示鄰近地區之斷層有可能發生破裂；為負值時則表示較不容易發生破裂。藉由計算目標區或鄰近斷層上庫倫破壞應力之上升和下降，可評估該區地震之潛能。台灣地區震頻繁，經由計算大地震過後造成之庫倫應力改變，可評估較大餘震可能發生之區域，避免造成災害傷亡。</p>		

研究成果	<p>本研究利用 GPS 觀測之同震位移和彈性半空間錯位模型，推求 2010 年 3 月 4 日甲仙地震 ($M_w=6.4$) 斷層最佳模型為走向 $N324^\circ$，傾角 40° 往東北。斷層面上的傾向滑移量為 0.05~0.1 m，左移分量為 0.04 m。斷層幾何形貌與台灣寬頻地震網 (BATS)，美國地質調查 (USGS/NEIC)，和全球 CMT 所計算出的震源機制比對也相當吻合。斷層最大滑移量約 0.12 m，位在震源西側深度 15 ~20 km 處。計算主震對鄰近斷層系統之庫倫應力變化 (ΔCFS) 顯示：甲仙地震可能觸發觸口斷層的破裂並抑制旗山斷層的破裂；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。</p> <p>另計算 2002 年 3 月 31 日發生在宜蘭花蓮外海之 331 地震 ($M_w=7.1$) 之同震滑移分佈及主震造成之應力改變。331 地震震源深度約 40 km，斷層面可能為台灣北部隱沒帶上之分叉斷層。使用 GPS 資料逆推得到最佳斷層模型為走向 $N290^\circ$、傾角 30°，斷層頂部沒有出露海床，位於深度 12 km 處。斷層面上最大滑移量為 0.56 m，分佈在震央東側深度 25 km 處。計算台灣東部縱谷斷層、中央山脈斷層、及台灣北部山腳斷層斷層面上之庫倫應力變化顯示：331 地震過後，山腳斷層及縱谷斷層中段及南段斷層滑移面上的庫倫應力增加；而縱谷斷層北段及中央山脈斷層大部份區域庫倫應力下降。</p>
具體落實應用情形	<p>藉由大地震過後計算主震造成之庫倫應力，評估較大餘震可能發生之區域，避免造成災害傷亡，並了解主震造成之區域應力改變對周遭區域地震活動度及鄰近斷層帶之交互影響。台灣地區地震頻繁，可提供足夠多的地震數目從事相關研究，再利用統計學進行可信度及危害度分析，對地震防災提供實質助益。綜言之，由於甲仙地震規模較小，而 2002 年花蓮外海之 331 地震又是外海地震，初步研究顯示主震造成的應力改變對台灣本島斷層之影響有限。</p>
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)	
--------	--

(以下接全文報告)

庫倫應力變化之推演

許雅儒

中央研究院地球科學研究所

摘 要

本研究計算大型地震之庫倫破壞應力 (ΔCFS)，藉以了解主震所造成的應力改變對鄰近斷層的影響，庫倫破壞應力為正值時表示鄰近地區之斷層很有可能發生破裂；為負值時則表示較不容易發生破裂。藉由計算目標區或鄰近斷層上庫倫破壞應力之上升和下降，可評估該區地震之潛能及較大餘震可能發生之區域，避免造成災害傷亡。

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，此地震為盲斷層破裂所引發。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。台灣GPS連續觀測網所計算出之同震地表位移顯示：在震央西側具有5~27 mm的水平位移量，運動方向介於西北和西南向，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。利用GPS同震位移和彈性半空間錯位模型，即可逆推甲仙斷層的幾何形貌和同震滑移分佈。最佳斷層模型顯示斷層走向為N324°(西北-東南)，傾角40°往東北方向，斷層面上的傾向滑移量為0.05~0.1 m，左移分量為0.04 m。斷層幾何形貌與台灣寬頻地震網(BATS)，美國地質調查(USGS/NEIC)，和全球CMT所計算出的震源機制比對也相當吻合。斷層最大滑移量0.12 m位在震源西側深度15~20 km處。計算主震對鄰近斷層系統之庫倫應力變化顯示：甲仙地震可能觸發觸口斷層($\Delta CFS \sim 0.05$ MPa)的破裂並抑制旗山斷層($\Delta CFS \sim -0.01$ MPa)的破裂；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。

本研究另外選取2002年3月31日發生在宜蘭花蓮外海之331地震($M_w=7.1$)計算其同震滑移分佈及主震造成之應力改變。台灣東北部海域地震頻繁，歷史地震記錄中已有多次規模大於7.5之地震及可能海嘯事件發生，計算331地震對陸地上主要斷層系統之影響，將有助於地震災害評估。331地震震源深度約40 km，斷層面可能為台灣北部隱沒帶上之分叉斷層。GPS觀測之最大水平同震位移在蘇澳可高達50 mm，運動方向為東南方，位移量往西北方遞減，新竹以南地區同震位

移已不顯著；花蓮鄰近測站之水平位移約為 10 mm，往西北方運動；琉球群島上之測站位移量約為 5~15 mm，主要往東南方運動。在垂直位移量方面，近震央處之蘇澳觀測到最大下陷量 25 mm，宜蘭和台北之間之 GPS 測站大部份呈現下陷，琉球群島上之 GPS 測站有些許抬升現象。使用 GPS 資料逆推之最佳斷層模型為走向 N290°、傾角 30°，斷層頂部沒有出露海床，位於深度 12 km 處。斷層面上最大滑移量為 0.56 m，分佈在震央東側深度 25 km 處。

利用 331 同震滑移計算台灣東部縱谷斷層、中央山脈斷層、及台灣北部山腳斷層斷層面上之庫倫應力變化顯示：331 地震過後，山腳斷層及縱谷斷層中段及南段斷層滑移面上的庫倫應力增加 (0.001~0.02 MPa)；而縱谷斷層北段及中央山脈斷層大部份區域庫倫應力下降 (~0.005 MPa)。

綜言之，由於甲仙地震規模較小，而 2002 年花蓮外海之 331 地震又是外海地震，初步研究顯示主震造成的應力改變對台灣本島斷層之影響有限。

壹、前言

近年快速發展的全球衛星定位系統 (GPS)，已成為研究地殼變形與地體動力學之利器。中央研究院地球科學研究所於 1989 年，建立涵蓋台灣全島及附近主要離島的「台灣 GPS 觀測網」監測地殼變形。台灣地區運轉中的原有約 50 站 GPS 連續觀測站，分別由內政部、中央氣象局、中央研究院、成功大學及交通大學設立與營運；其中有 8 站位於金門、馬祖、澎湖、東沙、小琉球及蘭嶼等離島。在 1999 年集集地震發生後，中央氣象局地震測報中心與中央研究院地球科學研究所合作於 2001-2005 的五年期間在台灣地區新設 150 個 GPS 連續觀測站。連同各機構原有的 50 站，形成一個總數超過 200 站的密集 GPS 連續觀測網(余水倍等, 2010)。配合近斷層 GPS 密集觀測結果，可偵測活動盲斷層的位置及其變形，估算斷層的滑移率，據以判定斷層活動度，提供地震潛勢評估之重要依據。當有較大地震發生時，密集的連續 GPS 資料更能有效用於觀測震前、同震與震後變形，並計算主震所造成的應力改變對鄰近斷層及地震活動度之影響，獲知地殼應變累積與能量釋放過程、震源斷層之力學性質及地殼應力重新分配之情形。

本研究選取 2010 年 3 月 4 日發生的甲仙地震 ($M_w=6.4$) 及 2002 年 3 月 31 日發生的花蓮 331 大地震 ($M_w=7.1$) 計算庫倫破壞應力。甲仙地震由未知的盲斷層活動所引起，餘震之分布大致呈西北東南走向，但和主震斷層及鄰近斷層之走向有顯著之差異，其發震構造和周遭大地構造之關係至今尚未釐清。花蓮 331 地震，震央位於宜蘭南澳外海與隱沒作用有關，震源深度約 40 km。台灣東北部海域地震頻繁，歷史地震記錄中已有多次規模大於 7.5 之地震發生，這些地震和歷史記載海嘯事件之關係仍不清楚。另外，東部外海大型地震對陸地上主要斷層系統影響之相關研究仍欠缺。有鑑於此，本研究特別選取花蓮 331 地震，了解主震發生後，鄰近斷層系統之應力改變及地震活動度變化之情形。

貳、GPS 資料蒐集及分析

(一) 甲仙地震

2010 年 3 月 4 日之甲仙地震發生在高雄甲仙地震站東南方 17 km 處，主震深度為 23 km，不過甲仙地震並非鄰近的潮州斷層活動引起，而是由未知的盲斷

層活動所引起，由於地表無顯著破裂面，因此在甲仙地震發生後，中研院地球所利用 GPS 連續站之資料來找尋可能的地震破裂面、計算同震滑移分布及同震應力改變對鄰近斷層之影響。位於甲仙地震附近之 GPS 連續觀測站在震前至少有五年之觀測資料，研究中選取距甲仙地震震央距離小於 80 km 之測站，逆推斷層幾何形貌及滑移分佈。蒐集之 GPS 資料以 Bernese 4.2 軟體求解，利用加權最小二乘法處理不同觀測時段的所有資料，以決定各測站的坐標。求解過程中使用 IGS 提供之精密星歷表，以最小二乘法同時調整對流層天頂延遲估計及測站座標。最後，固定位於中國大陸邊緣較穩定之澎湖白沙測站 (S01R)，使其座標值與國際地球參考框架 ITRF00 一致，進而求取其它測站之座標。研究中使用甲仙地震前後 4 天 GPS 觀測之平均值估算同震位移 (Hsu et al., 2010)。

(二) 花蓮 331 地震

2002 年 3 月 31 日發生規模 7.1 之 331 大地震，震央位於宜蘭南澳外海，震源深度約 40 km，此次地震與台灣北部菲律賓海板塊向琉球海溝隱沒之作用有關。台灣東北部海域地震頻繁，歷史地震記錄中已有多次規模大於 7.5 之地震發生，為了研究東部外海大型地震對陸地上主要斷層系統之影響，本研究蒐集在台灣東部、北部及在琉球群島之 GPS 資料，計算同震位移。台灣本島 GPS 測站資料由中研院地球所提供，而琉球附近的 GPS 資料可經由日本國土地理院 (Geospatial Information Authority of Japan, GSI) 之網站申請。GPS 資料以 RunGamt 自動化 GPS 資料處理系統解算各測站每天之 ITRF2005 座標。RunGamt 系統乃以 GAMIT/GLOBK 軟體為核心之自動化 GPS 資料處理系統，由美國地質調查所 (USGS) 出資研發後提供各界免費使用。可自動將一大型 GPS 觀測網分成數個由不大於 40 個測站組成的子網，並分配於不同的伺服器同時計算，提高資料處理效率。各子網未經約制之每日鬆弛解，經由 GLOBK 結合約制在 ITRF2005 座標架構下；整合一段期間的每日解而獲得各測站之 ITRF2005 座標時間序列 (余水倍等, 2010)。另藉由美國噴射推進實驗室 (JPL) 董大南博士發展的 QOCA 軟體 (Quasi Observation Combination Analysis, <http://gipsy.jpl.nasa.gov/qoca/>) 進行時間序列分析，移除 GPS 測站共有之誤差並進行雜訊分析，最後再利用所得之 ITRF2005 時間序列及最小二乘法計算 331 地震之同震位移。

參、台灣地區大型地震之庫倫破壞應力

(一) 甲仙地震

甲仙地震所造成之 GPS 同震水平位移約為 5~27 mm，移動方向為西北至西南方向，水平運動在震央東側並不顯著。垂直位移在近震央處有 5~25 mm 之抬升量，遠場之垂直位移則不顯著，大概只有 5~10 mm（圖一）。由於甲仙地震之破裂並沒有延伸至地表，我們使用主震震源機制來約制斷層幾何形貌。假設模擬斷層的長度為 50 km，寬度為 62 km，斷層傾角界於 40°~70°之間，斷層由地表延伸至 40 km 的深度，將斷層劃分成 64 個小區塊，根據地表 GPS 測站移動方向，限制斷層滑移方向為左移及逆斷層滑移，並以彈性半無限空間錯位模型（Okada, 1985）及加權最小二乘算法來推求最佳的斷層幾何形貌和同震滑移分布。地表 GPS 觀測值（ d ）和斷層面上的滑移（ s ）可以寫成下列關係式：

$$d = G(m)s + \varepsilon$$

$G(m)$ 為格林函數， m 為斷層參數，包含斷層的走向、傾角、長度、寬度、深度和位置， ε 為觀測誤差。在逆推中，給定各個斷層參數合理的範圍，經由網格搜尋法（grid search）求得一組較佳之斷層參數並計算相對應之同震滑移量。

由於甲仙地震為盲斷層破裂引發，無法由地表破裂決定斷層面。逆推中使用地震震源機制解求得的二個可能斷層面進行逆推，雖然二者都能夠提供令人滿意之結果。但是西北-東南走向之斷層面相較於東北-西南走向之斷層面有較低之殘差值。另外，甲仙地震餘震投影至地表有一 N300°之條帶，顯示西北-東南走向、向東北傾之斷層似乎是比較可能之斷層面。因此，在網格搜尋過程中假設斷層走向為 290°~330°，斷層傾角為 30°~70°，研究中得到的最佳斷層模型為走向為 N324°、傾角 40°。斷層面上有 0.05~0.1 m 之傾向滑移，0.04 m 之左移運動（圖二）。圖三顯示 GPS 的殘差值在大部份區域都在一倍的標準偏差之下，少數較大之殘差值可能涉及震後變形或受限於簡單的彈性錯位模型假設。斷層最大滑移量為 0.12 m，分佈在震央西側，深度範圍介於 15~20 km，該區在主震前地震活動度並不顯著（圖三）。若假設剛性係數為 60 GPa，大地測量求得地震釋放之能量為 4.95×10^{18} 牛頓米，相當於規模 6.4 地震，與全球 CMT、NEIC、和台灣 BATS 震源機制解所估計之地震矩一致（Hsu et al., 2010）。

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。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。

在甲仙地震震央附近，地震破裂潛在的來源包括潮州斷層、旗山斷層、新化斷層及觸口斷層 (圖四)。潮州斷層分隔西側之屏東平原的第四紀地層及東側的中央山脈中新世地層。從地形圖上，其地層差異和線性特徵顯示此斷層具有垂直與走向滑移二種分量 (Ho, 1988; Shyu *et al.*, 2005)。東北-西南走向的旗山斷層屬於右移逆斷層 (Lacombe *et al.*, 2001)。由間震期 GPS 觀測結果顯示，橫跨斷層有明顯之右移分量，速率為 24~30 mm/yr (Hu *et al.*, 2007)。新化斷層造成 1946 年規模 6.3 之台南新化地震，為一右移斷層，傾角向北 (Hsu, 1971)。其斷層傾角隨深度有明顯改變，近地表約為 70° 到斷層深部約為 17° (Lee *et al.*, 2000)。觸口斷層為台灣西部褶皺逆衝帶和嘉南地區沿海平原之分界線 (Ho, 1986)，斷層為向東傾 30°~40° 之逆斷層。在庫倫應力計算中所使用的斷層參數列於表一。

將這些斷層分為小區塊，並利用甲仙地震的同震滑移分布計算其庫倫應力在斷層面上的變化量。計算庫倫應力變化需要假定視摩擦係數 (μ')。本研究測試結果發現使用不同的 μ' 值 (0-0.75)，庫倫應力變化並沒有顯著變化。此外，研究台灣區域之震源機制發現視摩擦係數約介於 0.2~0.5 (Hsu *et al.*, 2010)。本研究決定使用 μ' 值 0.4 計算庫倫應力。結果顯示：庫倫應力在潮州斷層 (圖四 a) 的深部，旗山斷層之大部分區域 (圖四 c) 以及觸口斷層 (圖四 f) 為增加 (~0.05 MPa)。另一方面，庫倫應力在潮州斷層的淺部 (圖四 a) 以及新化斷層 (圖四 e) 為減少 (~0.01 MPa)。大部分餘震分佈在震央西側，位於深度 15~20 km 範圍 (圖四 e)。餘震排列呈西北西-東南東走向，似乎與此區域現存的斷層構造不相關。由於只有少數的餘震落在表一中斷層模型深度加減 5 km 之範圍，餘震僅標示於圖四 e。

為了探討斷層幾何形狀對庫倫應力的影響，研究中改變潮州斷層之傾角，使用 60° 的斷層面 (圖四 b)；旗山斷層使用 60° 的斷層傾角 (圖四 d)，計算庫倫應力並和表一受地質資料控制之斷層模型作比較 (圖四 a 和 b，表一)。測試發現在潮州斷層深部和旗山斷層北側，庫倫應力有顯著變化。該結果顯示在解釋庫倫應力變化時須謹慎 (Hsu *et al.*, 2010)。此外，庫倫應力大小對於同震滑動分佈和地質材料特性 (例如剛性係數) 也相當敏感；近一步的研究將有助於研究其影響量。

(二) 花蓮 331 地震

2002 年 3 月 31 日發生規模 7.1 之 331 大地震，震央位於宜蘭南澳外海，震源深度約 40 km，此次地震與台灣北部菲律賓海板塊向琉球海溝隱沒之作用相關。雖然震央距台北市約 100 km，不過由於盆地效應，災情卻集中在遠離震央的台北市 (Chen, 2003)。此次地震為宜蘭花蓮近海 16 年來規模最大之地震，前一次的大地震發生在 1986 年，地震規模 6.8，震央位於花蓮外海 (圖五)，當時造成 15 人死亡。

331 地震之最大 GPS 水平同震位移在蘇澳測站 (SUAO) 可高達 50 mm，向東南方運動，位移量往西北方遞減 (圖六 a)，到板橋測站 (BANC) 只有 18 mm，到新竹及其以南地區水平位移已不顯著；在花蓮鄰近測站之同震位移量約為 10 mm，往西北方運動；琉球群島上之測站位移量約為 5~15 mm，主要往東南方運動。在垂直位移量方面，近震央處之蘇澳測站 (SUAO) 觀測到最大下陷量 25 mm，宜蘭和台北附近的 GPS 測站大部份呈現下陷，琉球群島上之測站有些許抬升現象，抬升量小於 5 mm (圖六 b)。

由於 331 地震之破裂並沒有延伸至海床，因此，使用主震震源機制及餘震分佈來約制斷層幾何形貌。地震震源機制中的二個斷層面分別為向北及向南傾，斷層走向介於 N270°至 N290°，由於大部份的餘震分佈在震央的西北方 (圖六 b)，向北傾的斷層面較能符合餘震分布及區域大地構造，此斷層面有可能是菲律賓海板塊往北隱沒到歐亞大陸板塊時在板塊介面附近所發育之分叉斷層 (spray fault)。模型假設斷層的長度為小於 100 km，斷層傾角介於 20°~70°之間，斷層由地表延伸至 50 km 之深度，將斷層劃分成 25 個小區塊，根據地表 GPS 測站移動方向，限制斷層滑移為右移及逆斷層滑移，並以彈性半無限空間錯位模型 (Okada, 1985) 及加權最小二乘算法來推求最佳的斷層幾何形貌和同震滑移分布，逆推方法與甲仙地震斷層模型之建立相同，請參照前述說明。

研究中得到的最佳斷層模型為走向 N290°、傾角 30°，斷層頂部沒有出露海床，位於深度 12 km 處，斷層寬度 76 km (圖七)。斷層面上有 0.2~0.4 m 之傾向滑移及 ~0.2 m 之右移運動 (圖六、七)。斷層最大滑移量為 0.56 m，分佈在震央東側，深度 25 km 處 (圖七)。若假設剛性係數為 40 GPa，大地測量求得地震釋放之能量為 7.4×10^{19} 牛頓米，相當於規模 7.1 地震，與全球 CMT、NEIC、和台灣 BATS 震源機制解所估計之地震矩一致。

本研究亦試圖探討 331 地震對台灣東部之縱谷斷層、中央山脈斷層、及台灣北部山腳斷層之影響 (圖八)。縱谷斷層位於菲律賓海板塊與歐亞大陸板塊之縫合

帶，西側的中央山脈屬於歐亞大陸，而東側的海岸山脈則屬於菲律賓海板塊。GPS 資料顯示跨過縱谷斷層兩側之縮短量為 30 mm/yr，台灣造山帶之板塊聚合速率為 80 mm/yr (Seno et al. 1993; Yu et al. 1997)，其所積累之變形量有超過三分之一在縱谷斷層釋放。縱谷斷層淺層 (0~2 km) 有明顯之潛移現象 (Yu and Liu 1989; Liu and Yu 1990; Angelier et al., 1997; Lee et al. 2001; Yu and Kuo 2001)，潛移速率約為 30 mm/yr，但斷層深部仍屬於鎖住之狀態。本研究將縱谷斷層分為二段，北段之傾角為 70° 向東，南段之傾角為 50° 向東，傾角之選擇乃根據地質調察、地震層析法所得到之影像及 2003 年成功地震之餘震分佈求得 (Chen and Rau, 2002)。位於縱谷斷層西側之中央山脈斷層其位置、形貌與活動性仍不清楚。野外地質考察及河階研究顯示：斷層為向西傾之高角度正斷層，本研究假設中央山脈斷層斷層傾角為 65°。位於台北盆地西北方之山腳斷層為正斷層，呈北北東走向，可以分為 2 段：南段自新北市樹林區向北延伸至台北市北投區，長約 13 km；北段由北投向北延伸至金山，長約 21 km (丹桂之助, 1939; 林朝榮, 1957; 王執明等, 1978; 林朝宗, 2005)。在台北盆地內，山腳斷層被第四紀沖積層所掩覆，由地形特徵認為斷層位於林口台地與台北盆地的交接帶；由鑽探結果顯示：斷層跡的位置距台地東緣數百公尺以上，在盆地內斷層兩側的基盤落差約 60~220 m，而斷距似乎有由南向北增加之趨勢。GPS 大地測量結果顯示：山腳斷層兩側並未有明顯的水平速度變化，但斷層的上盤有明顯的下陷趨勢。山腳斷層的最近一次活動時間，可能在距今約一萬年以前。山腳斷層可能是控制台北盆地構造發育的一條新構造，其活動特性值得注意。本研究簡化山腳斷層之幾何形貌，假設其走向為 N45°、傾角 30° 之正斷層。

在計算庫倫應力時，使用 μ' 值為 0.4 計算斷層面上之應力變化。結果顯示：庫倫應力在縱谷斷層北段近花蓮處為負值，花蓮以南轉為正值 (圖八 a)；縱谷斷層南段全段庫倫應力皆為正值 (圖八 b)；中央山脈斷層北段近花蓮之區域庫倫應力為負值，但中段及南段則為正值 (圖八 c)；在台北盆地附近之山腳斷層全段庫倫應力皆為正值 (~0.02 MPa, 圖八 d)。331 地震大部分餘震分佈在震央西北側，震央位於宜蘭及南澳外海，深度介於 10~30 km (圖八、九)，只有少數餘震落在表二中斷層模型深度加減 5 km 之範圍，這些地震在圖八中標示為藍色圓點，而黃色圓點則為震後一個月震源深度小於 50 km 之所有地震。圖九 b 顯示縱谷斷層東側在 331 地震後發生二起規模大於四之逆斷層機制地震，與縱谷斷層南段庫倫應力結果相符。山腳斷層雖然也處於應力增加之狀態，但並沒有較大地震發生。

肆、綜合結果討論

庫倫破壞應力被廣泛地應用在評估大地震後可能發生較大餘震或地震災害之區域。國內學者在 1999 年集集地震過後研究主震造成之庫倫應力發現應力上升區域和餘震發生區域大致吻合 (Wang, 2000; Wang and Chen, 2001; Ma et al., 2005; Chan and Stein, 2009)。本研究利用 GPS 同震位移和彈性半空間錯位模型，推求甲仙地震斷層最佳模型為走向 N324°，傾角 40°往東北，斷層面上的傾向滑移量為 0.05~0.1 m，左移分量為 0.04 m。計算主震對鄰近斷層系統之庫倫應力變化顯示：甲仙地震可能觸發觸口斷層 ($\Delta\text{CFS} \sim 0.05 \text{ MPa}$) 的破裂並抑制旗山斷層 ($\Delta\text{CFS} \sim -0.01 \text{ MPa}$) 的破裂；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 (Hsu et al., 2010)。

2002 年 3 月 31 日發生在宜蘭花蓮外海之 331 地震 ($M_w=7.1$) 之最佳斷層模型走向 N290°、傾角 30°，斷層頂部沒有出露海床，位於深度 12 km 處。斷層面上最大滑移量為 0.56 m，分佈在震央東側深度 25 km 處。利用 331 同震滑移計算台灣東部縱谷斷層、中央山脈斷層、及台灣北部山腳斷層斷層面上之庫倫應力變化顯示：331 地震過後，山腳斷層及縱谷斷層中段及南段斷層滑移面上的庫倫應力增加 (0.001~0.02 MPa)；而縱谷斷層北段及中央山脈斷層大部份區域庫倫應力下降 (0.005 MPa)。

綜言之，由於甲仙地震規模較小，而 2002 年花蓮外海 331 地震又是外海地震，初步研究顯示主震造成的應力改變對台灣本島斷層之影響有限。

在計算庫倫破壞應力時，礙於有許多變因尚無法完全得知，在判讀結果時必須謹慎。這些因子包含區域應力 (King et al., 1994; Toda et al., 1998)、地球介質非均勻性、斷層幾何形態及主震滑移分布之不確定性。例如在本研究中使用不同之斷層幾何形貌計算甲仙地震所造成之應力改變，發現應力的大小對斷層位態非常敏感 (圖四)。隨著日益增加之觀測資料，不久將來，應可提供一個較為真實之地球模型來進行相關之計算工作。

伍、誌謝

感謝中央研究院蘇宣翰、陳新壹、李炘旻、柯世遊及王福全等諸位同仁協助 GPS 連續觀測站維護事宜，蔡宜純協助 GPS 資料分析及黃一剛協助 GMT 繪圖。本計畫由中央氣象局地震測報中心支助，計畫編號：MOTC-CWB-100-E-08。

陸、參考文獻

- 丹桂之助，1939，台北盆地之地質，矢部教授還曆紀念論文集，第1卷，371-380 頁。
- 王執明、鄭穎敏、王源，1978，台北盆地之地質及沉積物研究，台灣礦業，第30卷，第4期，78-108 頁。
- 余水倍、蔡宜純、許雅儒、蘇宣翰，2010，台灣地區地殼形變之時空變化研究(IV)，MOTC-CWB-99-E-15。
- 林朝宗，2005，山腳斷層與台北盆地西緣的地質構造，大台北地區火山活動與山腳斷層研討會論文集，191-197頁。
- 林朝榮，1957，台北盆地，台灣省通誌稿，第一冊，地形，303 頁。
- Angelier, J., H. T. Chu, and J. C. Lee, 1997, Shear concentration in a collision zone: Kinematics of the Chihshang Fault as revealed by outcrop-scale quantification of active faulting, Longitudinal Valley, eastern Taiwan, *Tectonophysics*, 274, 117-143.
- Chan, C. H., and R. S. Stein, 2009, Stress evolution following the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake: consequences for afterslip, relaxation, aftershocks and departures from Omori decay, *Geophys. J. Int.*, 177, 179-192
- Chen, K. H., and R. J. Rau, 2002, Earthquake locations and style of faulting in an active arc-continental plate boundary: The Chishang Fault of eastern Taiwan *EOS Trans. AGU 83 (47)*, Fall Meet. Suppl., Abstract T61B-1277.
- Chen, K.C., 2003, Strong ground motion and damage in the Taipei basin from the Moho reflected seismic waves during the March 31, 2002, Hualien, Taiwan earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 30, doi:10.1029/2003gl017193.
- Ho, C.S., 1986, A synthesis of the geologic evolution of Taiwan, *Tectonophysics*, 125, 1-16.
- Ho, C.S., 1988, An introduction to the geology of Taiwan, explanatory text of the geological map of Taiwan, 2nd edn, pp. 192, Cent. Geol. Surv., Taipei.
- Hsu, M.T., 1971, Seismicity of Taiwan and some related problems, *Bull. Int. Inst. Seismol. Earthquake Eng.*, 8, 41-60.
- Hsu, Y.J., Rivera, L., Wu, Y.M., Chang, C.H., Kanamori, H., 2010, Spatial heterogeneity of tectonic stress and friction in the crust: new evidence from earthquake focal mechanisms in Taiwan, *Geophys. J. Int.*, 329-342.
- Hsu, Y. J., S. B. Yu, L. C. Kuo, Y. C. Tsai, and H. Y. Chen, 2011, Coseismic

- deformation of the 2010 Jiashian, Taiwan earthquake and implications for fault activities in southwestern Taiwan, *Tectonophysics*, 502, 328-335.
- Hu, J.C., Hou, C.S., Shen, L.C., Chan, Y.C., Chen, R.F., Huang, C., Rau, R.J., Chen, K.H.H., Lin, C.W., Huang, M.H., Nien, P.F., 2007, Fault activity and lateral extrusion inferred from velocity field revealed by GPS measurements in the Pingtung area of southwestern Taiwan, *J Asian Earth Sci.*, 31, 287-302.
- King, G.C.P., Stein, R.S., Lin, J., 1994, Static stress changes and the triggering of earthquakes, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 84, 935-953.
- Lacombe, O., Mouthereau, F., Angelier, J., Deffontaines, B., 2001, Structural, geodetic and seismological evidence for tectonic escape in SW Taiwan, *Tectonophysics*, 333, 323-345.
- Lee, C.T., Chen, C.T., Chi, Y.M., Liao, C.W., Liao, C.F., Lin, C.C., 2000, Engineering investigation of Hsinhua fault, National Central University 7, (in Chinese) .
- Lee, J. C., J. Angelier, H. T. Chu, J. C. Hu, and F. S. Jeng, 2001, Continuous monitoring of an active fault in a plate suture zone: a creepmeter study of the Chihshang Fault, eastern Taiwan, *Tectonophysics*, 333, 219-240.
- Liu, C. C., and S. B. Yu, 1990, Vertical crustal movements in eastern Taiwan and their tectonic implications, *Tectonophysics*, 183, 111-119.
- Ma, K. F., C. H. Chan, and R. S. Stein, 2005, Response of seismicity to Coulomb stress triggers and shadows of the 1999 M-w=7.6 Chi-Chi, Taiwan, earthquake, *J. Geophys. Res.*, 110, doi: 10.1029/2004JB003389.
- Okada, Y., 1985, Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space Bull. Seismol. Soc. Am. 75, 1135-1154.
- Okada, Y., 1992, Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space Bull. Seismol. Soc. Am. 82, 1018-1040.
- Seno, T., S. Stein, and A. E. Gripp, 1993, A model for the Motion of the Philippine Sea Plate consistent with Nuvel-1 and geological Data, *J. Geophys. Res.*, 98, 17941-17948.
- Shyu, J.B.H., Sieh, K., Chen, Y.G., Liu, C.S., 2005, Neotectonic architecture of Taiwan and its implications for future large earthquakes, *J. Geophys. Res.* 110, doi:10.1029/2004JB003251.
- Toda, S., R. S. Stein, P. A. Reasenber, J. H. Dieterich, and A. Yoshida, 1998, Stress

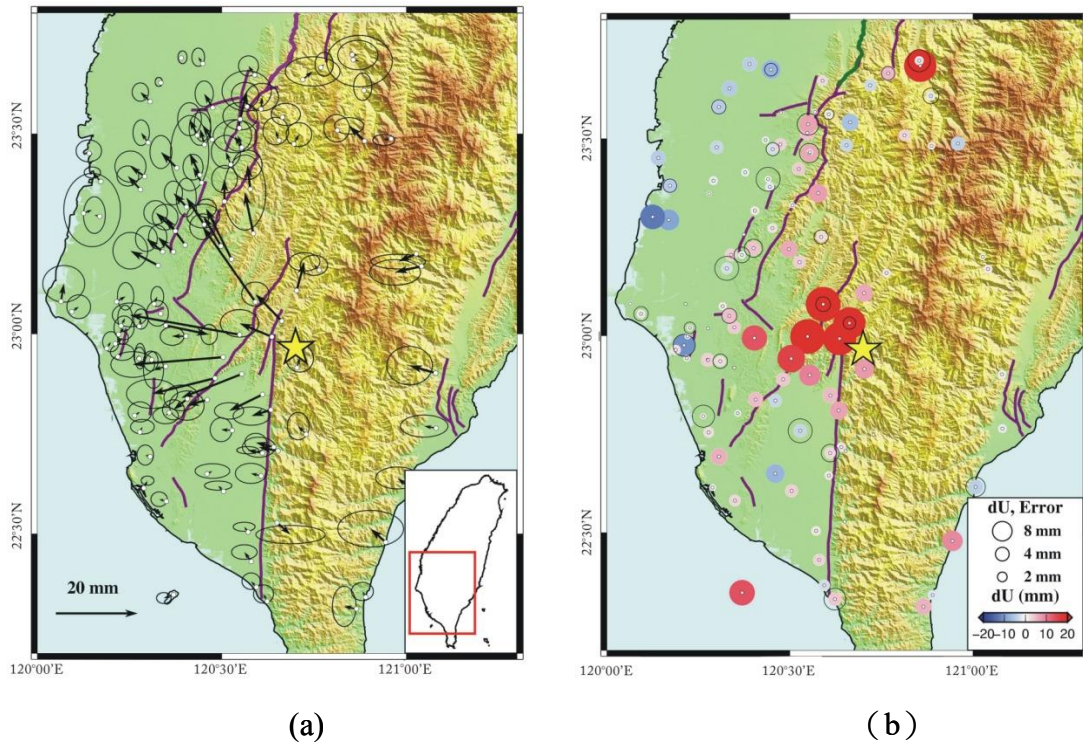
- transferred by the 1995 M-w = 6.9 Kobe, Japan, shock: Effect on aftershocks and future earthquake probabilities, *J. Geophys. Res.*, *103*, 24543-24565.
- Wang, W. H., 2000, Static stress transfer and aftershock triggering by the 1999 Chi-Chi earthquake in Taiwan, *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, *11*, 631-642.
- Wang, W. H., and C. H. Chen, 2001, Static stress transferred by the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake: Effects on the stability of the surrounding fault systems and aftershock triggering with a 3D fault-slip model, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, *91*, 1041-1052.
- Yu, S. B., H. Y. Chen, and L. C. Kuo, 1997, Velocity field of GPS stations in the Taiwan area, *Tectonophysics*, *274*, 41-59.
- Yu, S.B., and C.C. Liu, 1989, Fault creep on the central segment of the Longitudinal Valley fault, eastern Taiwan: Proc. Geol. Soc. China, *32*, 3, 209-231.
- Yu, S. B., and L. C. Kuo ,2001, Present-day crustal motion along the Longitudinal Valley Fault, eastern Taiwan, *Tectonophysics*, *333*, 199-217.

表一 計算甲仙地震在其它斷層系統造成之庫倫應力改變所使用之斷層參數

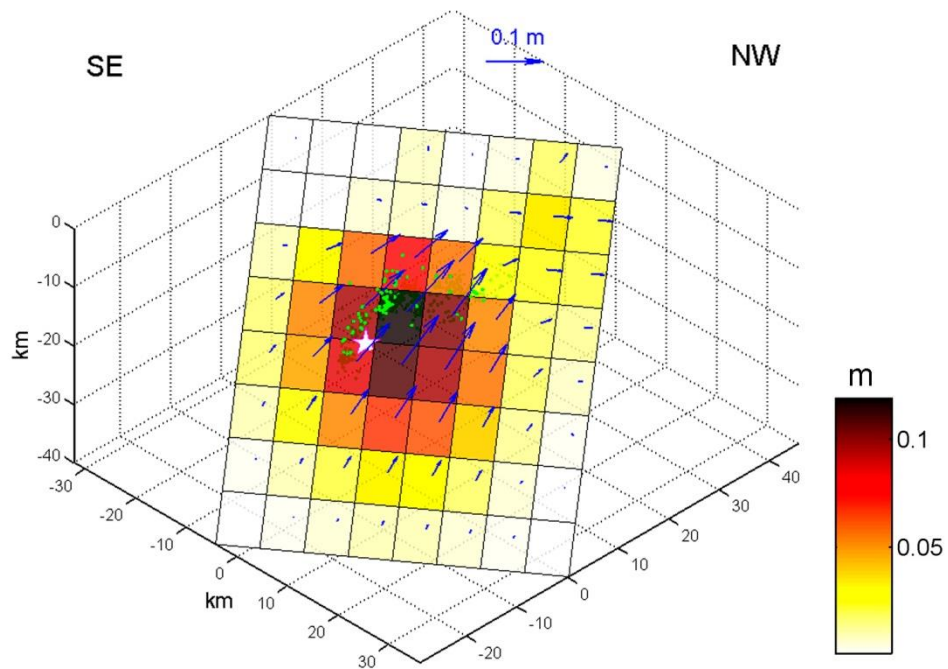
斷層名稱	走向 (°)	傾角 (°)	滑移方向 (°)	長度 (km)	寬度 (km)	深度 (km)
潮州斷層	4	75	45	80	16	15
旗山斷層	37	50	120	30	20	15
觸口斷層	30	35	90	40	26	15
新化斷層	250	80	180	10	15	15

表二 計算 331 地震在其它斷層系統造成之庫倫應力改變所使用之斷層參數

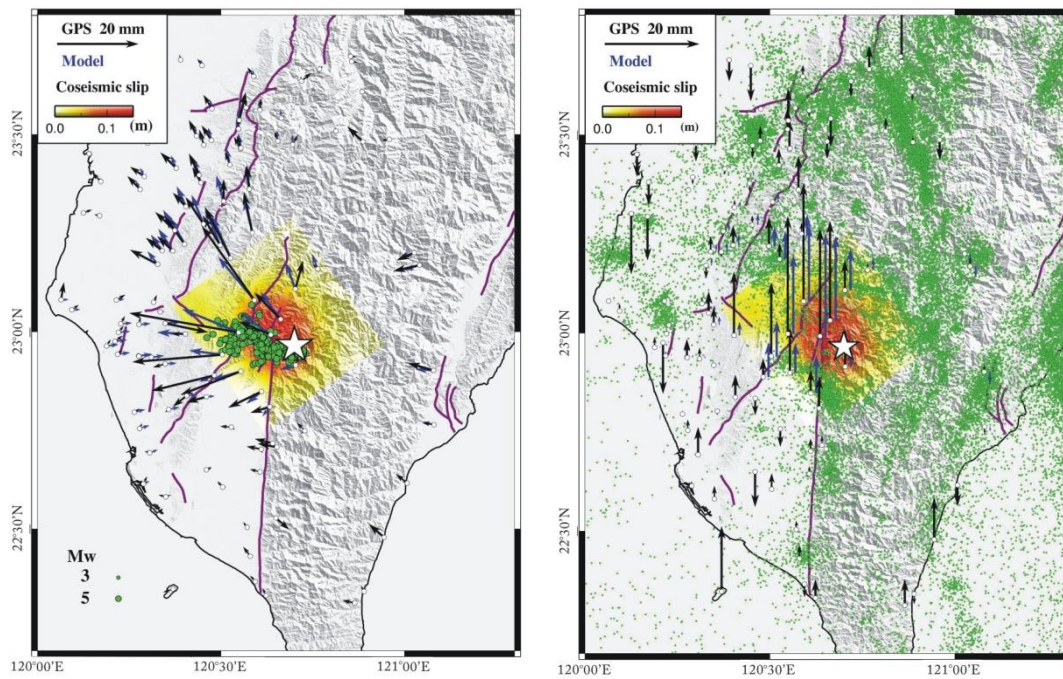
斷層名稱	走向 (°)	傾角 (°)	滑移方向 (°)	長度 (km)	寬度 (km)	深度 (km)
縱谷斷層北段	20	70	70	60	21	20
縱谷斷層南段	20	50	70	50	26	20
山腳斷層	45	65	-90	40	22	20
中央山脈斷層	202	65	-90	150	22	20



圖一、2010年甲仙地震同震滑移量。(a) 黑色箭頭代表由GPS觀測得到各測站之水平位移量及其95%信心區間誤差橢圓。紫色實線為地表主要斷層，黃色星號代表甲仙地震震央位置。(b) GPS垂直位移量，紅色圓圈代表抬升，藍色圓圈代表下降，黑色圓圈代表一倍標準偏差之範圍。



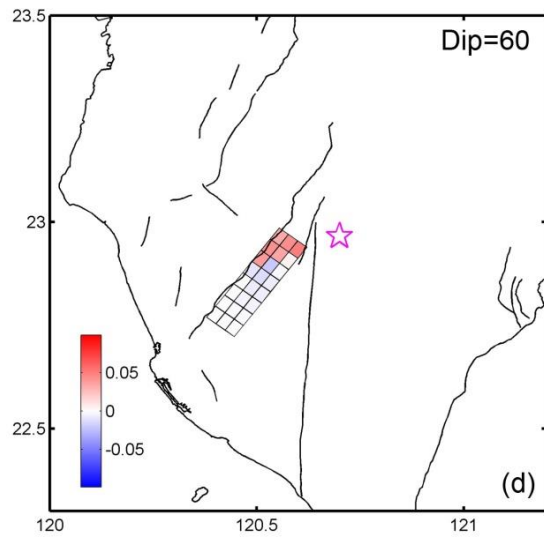
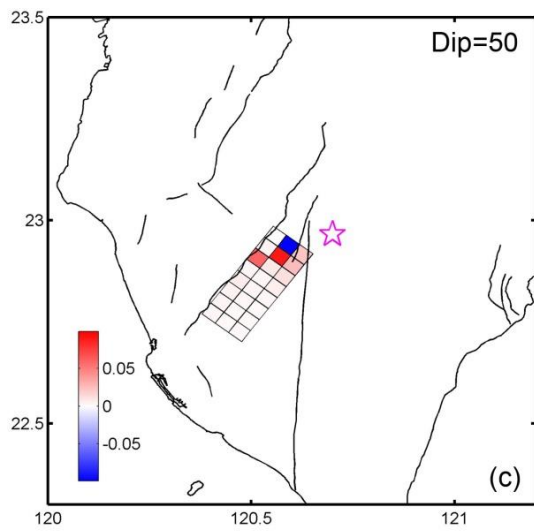
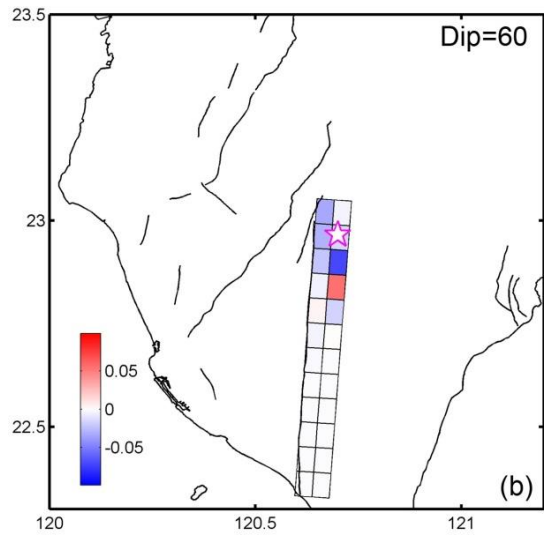
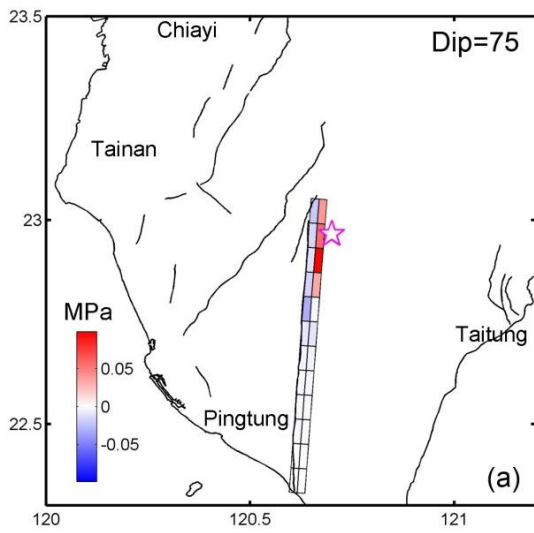
圖二、甲仙地震同震滑移分佈與斷層幾何形貌。斷層面走向為 $N324^\circ$ ，傾角 40° 向東北。藍色箭頭代表滑移方向，滑移量以紅黃色階作表示。白色星號代表震源位置，綠點為餘震分佈。此模型顯示沿斷層面有向上以及向左滑移之分量。

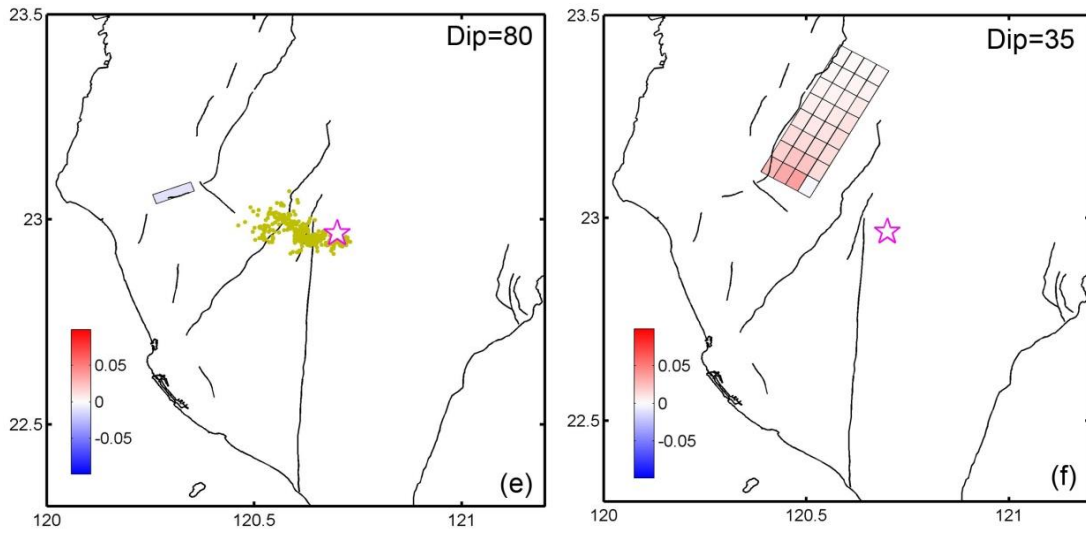


(a)

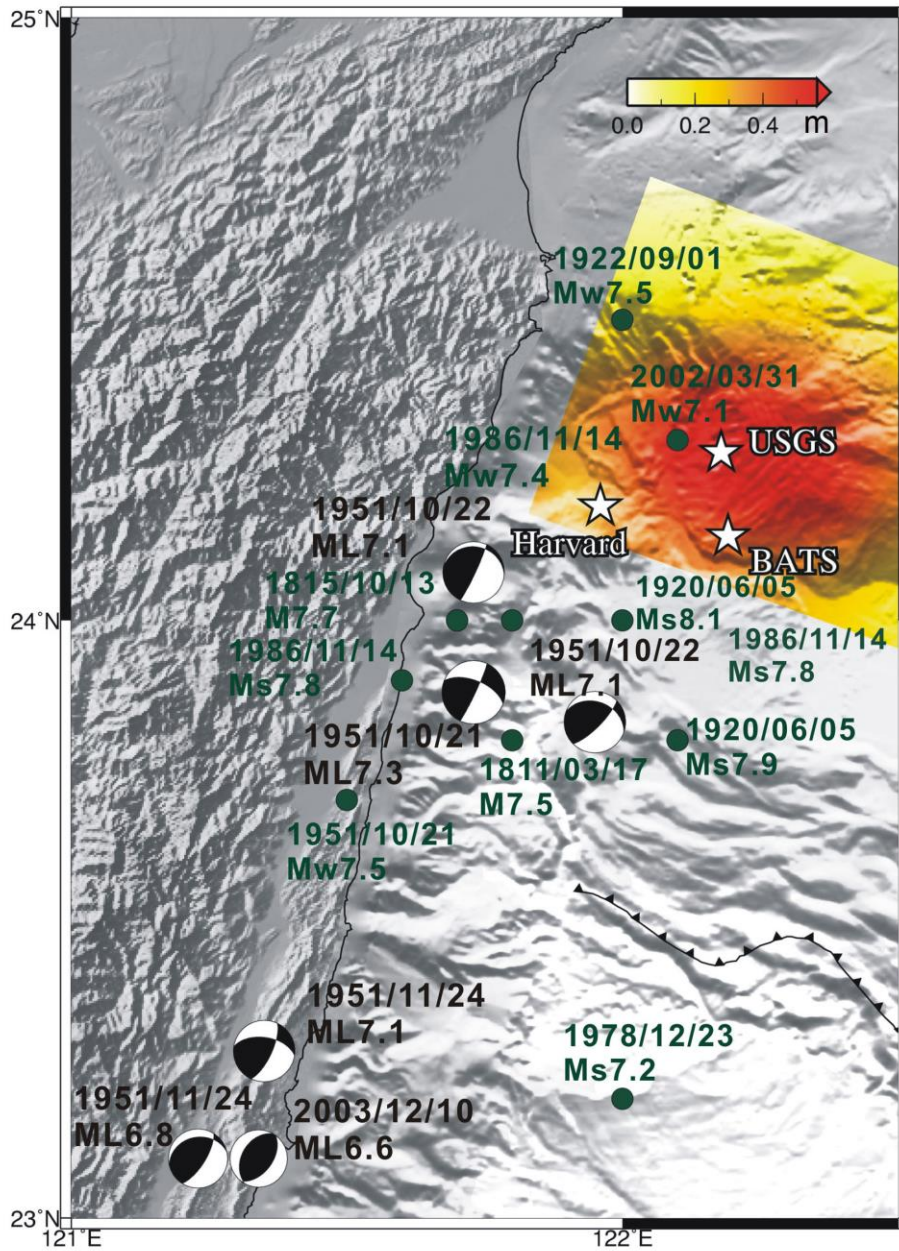
(b)

圖三、甲仙地震的同震滑移分布。(a) 色階代表將斷層同震滑移量投影至地表，黑色與藍色箭頭分別代表觀測與模式預測之水平位移，紫色實線為地表主要斷層，白色星號代表震央位置，綠點為餘震分佈。(b) 黑色箭頭代表觀測之 GPS 垂直位移量，藍色代表模式預測值。綠點代表從 1991 到 2007 年所發生之震源深度小於 40km 之地震 (Wu et al., 2010)。

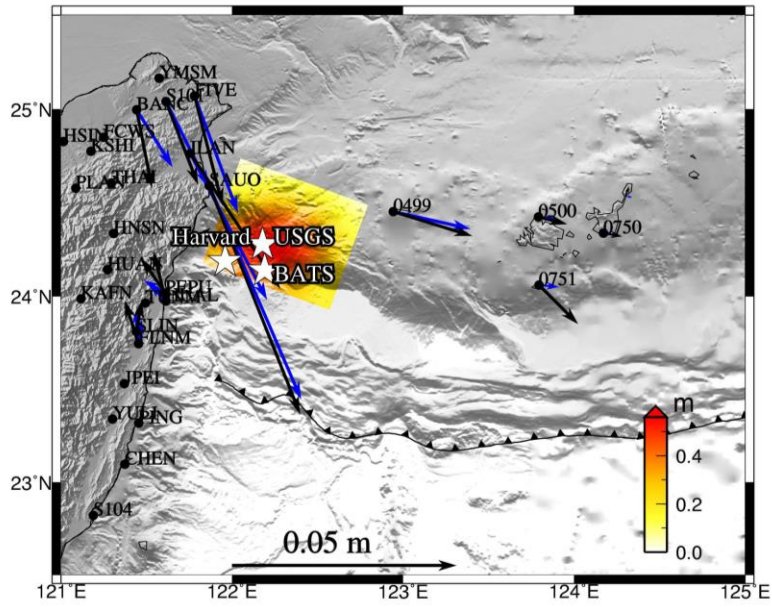




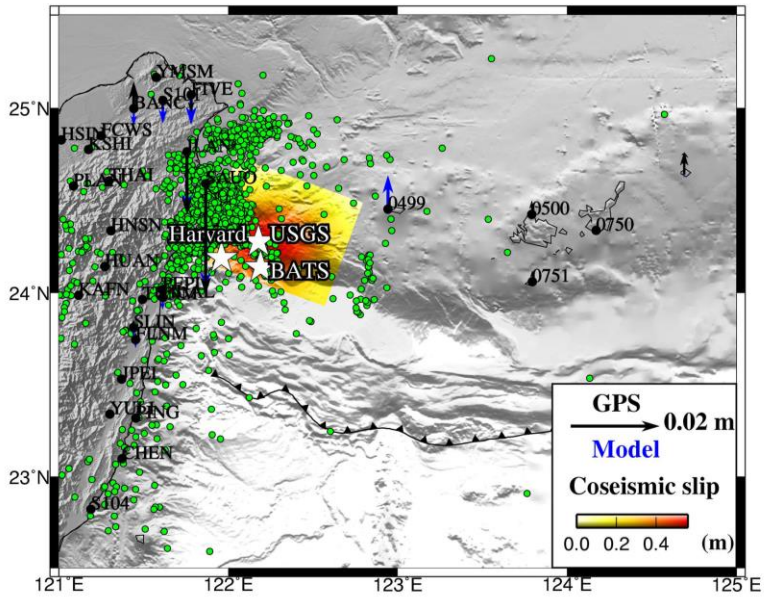
圖四、各斷層系統之庫倫應力變化 (ΔCFS)。 ΔCFS 為紅色代表庫倫破壞應力為正，主震造成之應力改變驅使斷層破裂；藍色為負值，顯示主震造成之應力改變抑制斷層破裂。(a) 潮州斷層 (傾角=75 度，向東)；(b) 潮州斷層 (傾角=60 度，向東)；(c) 旗山斷層 (傾角=50 度，向東)；(d) 旗山斷層 (傾角=60 度，向東)；(e) 新化斷層 (傾角=80 度，向北)，黃色點代表餘震；(f) 觸口斷層 (傾角=35 度，向東)，白色星星代表甲仙地震震央位置。



圖五、綠色圓點為 18 世紀以來地震規模大於 7.5 之地震及 20 世紀以來地震規模大於 7 之地震，海灘球為 1951 年花蓮-台東地震系列及 2003 成功地震之地震震源機制，紅黃色階為 331 地震之同震滑移量投影至地表。

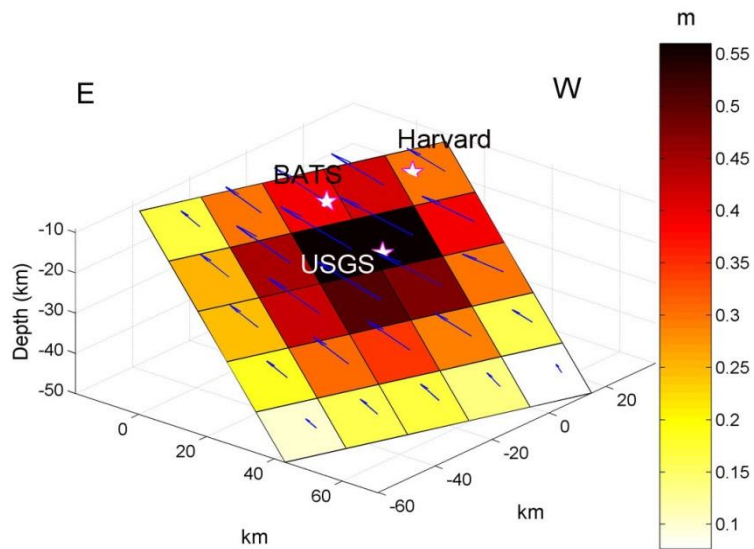


(a)

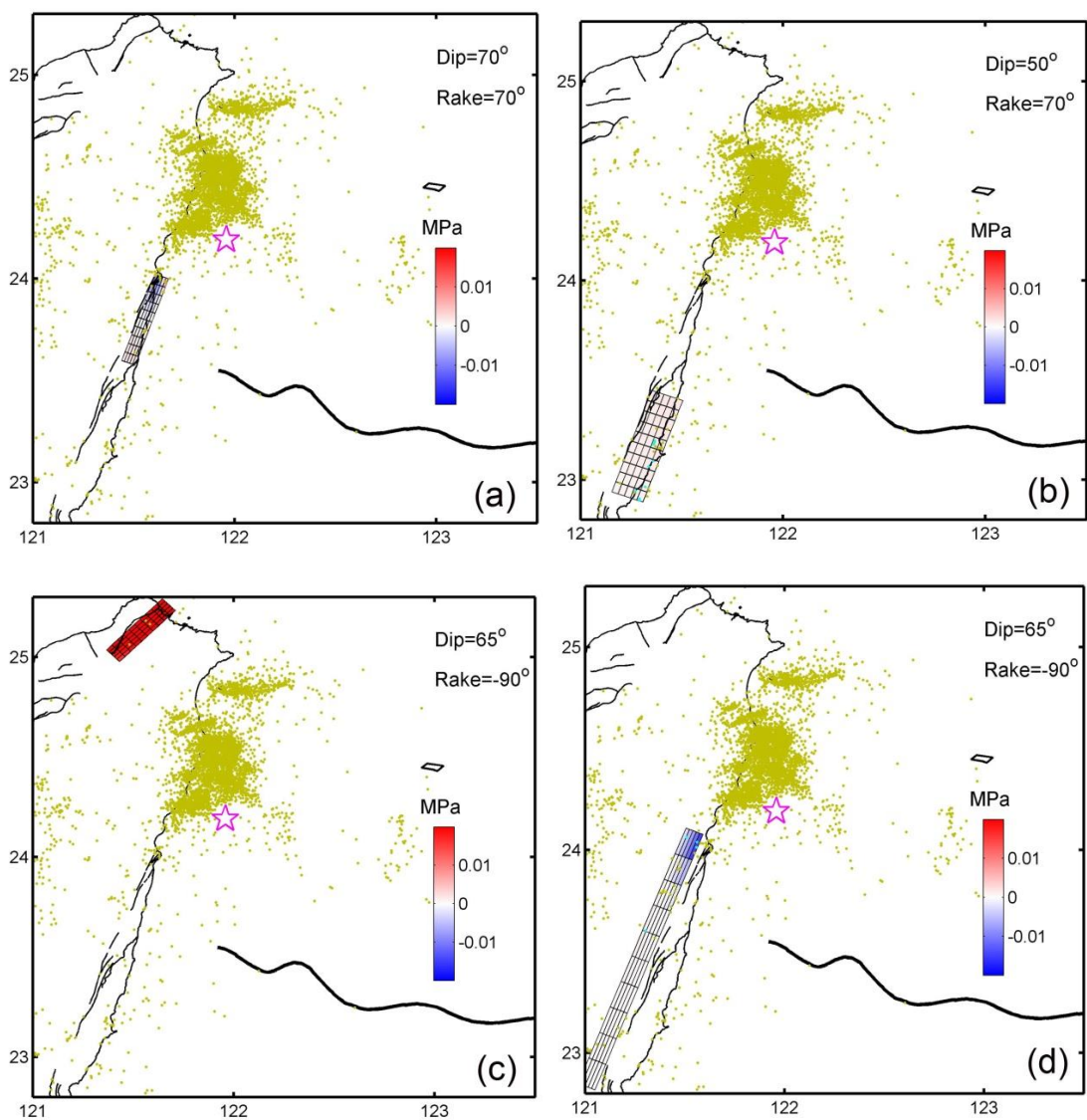


(b)

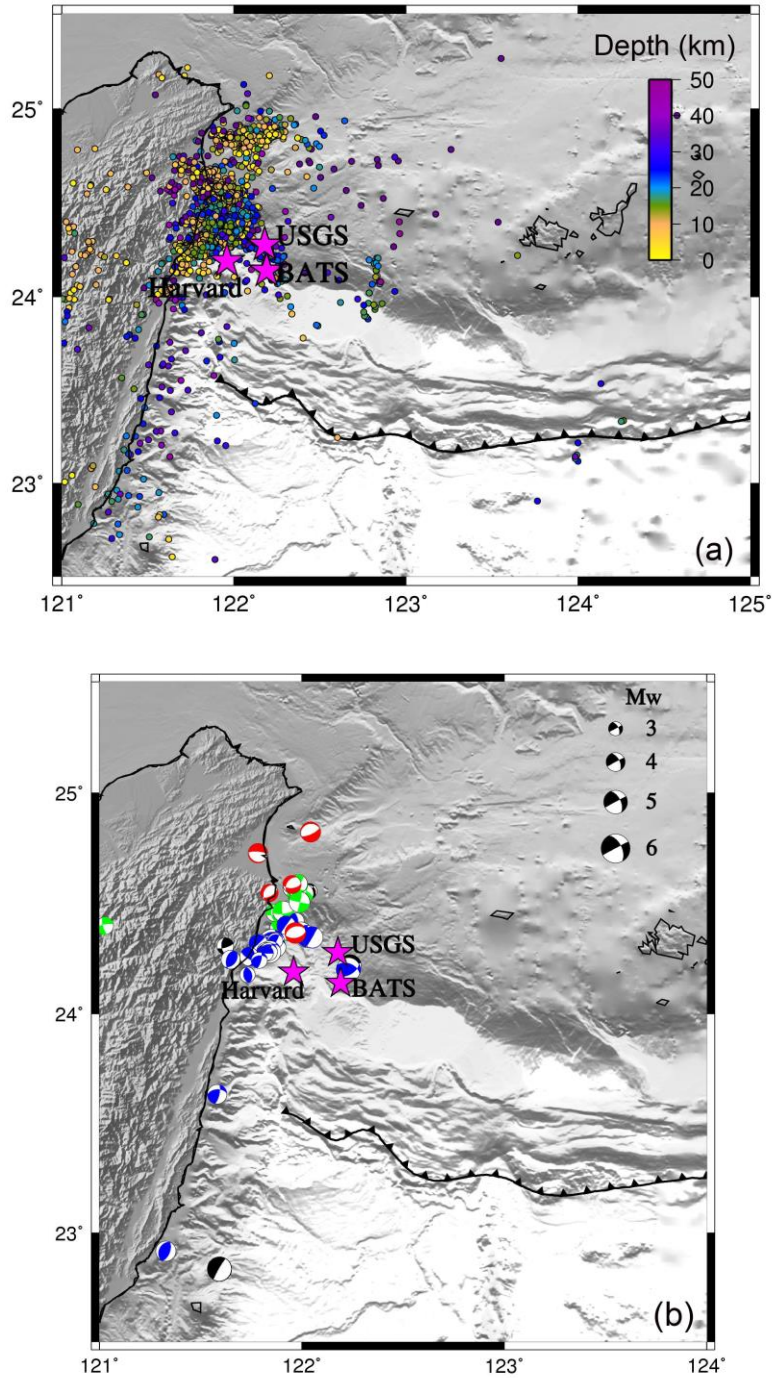
圖六、花蓮 331 地震的同震滑移分布。(a) 色階代表將斷層同震滑移量投影至地表，黑色與藍色箭頭分別代表觀測與模式預測之水平位移，白色星號代表不同機構求得之震央位置；(b) 黑色箭頭代表觀測之 GPS 垂直位移量，藍色代表模式預測值。綠點代表震後一個月震源深度小於 50 km 之地震。



圖七、花蓮 331 地震同震滑移分佈與斷層幾何形貌。斷層面走向為 N290°，傾角 30°向北。藍色箭頭代表滑移方向，滑移量以紅黃色階作表示。白色星號代表不同機構求得之震源位置。此模型顯示沿斷層面有逆衝及右移之分量。



圖八、各斷層系統之庫倫應力變化 (ΔCFS)。 ΔCFS 為紅色代表庫倫破壞應力為正，主震造成之應力改變驅使斷層破裂；藍色為負值，顯示主震造成之應力改變抑制斷層破裂。(a) 台東縱谷斷層北段 (傾角=70 度，向東)；(b) 縱谷斷層南段 (傾角=50 度，向東)；(c) 山腳斷層 (傾角=65 度，向南)；(d) 中央山脈斷層 (傾角=65 度，向西)。粉紅色星號代表 331 地震震央位置 (Harvard CMT)，黃色圓點為震後一個月深度小於 50 km 之餘震，藍色圓點為距目標斷層 ± 5 km 之地震。



圖九、花蓮 331 地震之 (a) 震後一個月深度小於 50 km 之餘震分布及 (b) 規模大於 4 之地震震源機制，紅色及藍色分別代表正斷層及逆斷層，綠色及黑色為走向滑移斷層及其它種類之斷層。

交通部中央氣象局
委託研究計畫期末成果報告

震源機制與地震破裂面之迅速判定

計畫類別：氣象 海象 地震

計畫編號：MOTC-CWB-100-E-08

執行期間：2011年1月1日至2011年12月31日

計畫主持人：趙里

執行機構：中央研究院地球科學研究所

中華民國一十年十一月二十五日

政府研究計畫期末報告摘要資料表

計畫中文名稱	震源機制與地震破裂面之迅速判定		
計畫編號	MOTC-CWB-100-E-08		
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	1	執行期間	100年1月1日至100年12月31日
本期經費 (單位：千元)	參拾肆萬參仟		
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	14	使用語言	中文
中英文關鍵詞	震源機制，強地面運動，斷層面判定。 Focal mechanism, strong ground motion, fault-plane identification.		
研究目的	本計畫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内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。		
研究成果	從去年(99年)下半年以來，即時自動確定地震震源機制系統已經初步建立完成，開始對臺灣地區有感地震自動計算震源機制解，但結果仍需進一步仔細分析以提高該系統的適應性以及震源機制結果的可靠性和準確性。自動製作 shakemovie 及 PGA 和 PGV 分佈圖的流程及需要的應變 Green 函數庫也已經建成，能夠在獲得震源解以後自動計算 shakemovie 及 PGA 和 PGV 分佈圖。此外，以 2010 年甲仙地震為例，對有限震源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。		

<p>具體落實應用情形</p>	<p>即時自動震源機制確定系統已與地震預警系統連接運行，對臺灣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。目前自動製作 shakemovie 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 以及 PGA 和 PGV 分佈圖。</p>
<p>計畫變更說明</p>	<p>無</p>
<p>落後原因</p>	<p>無</p>
<p>檢討與建議 (變更或落後之因應對策)</p>	<p>本系統經運行證明實用可靠，但仍有一些技術問題需要在未來的運行過程中針對不同情況進行調整和測試，以提高本系統震源機制解的可靠性和精確性。目前看來自動 CAP 系統最需要改進之處是在多次疊代過程中對於測站及波形的取捨，雖然通過修改 script 對自動系統的取捨過程進行了改進，使得結果的可靠性提高，但仍有一些情形因自動系統的適應性較差，使得許多也許可以保留的測站和波形被捨棄，即使一些規模相對較大的地震最終也因為測站和波形過少而無法得到準確的震源機制解。因此還必需對自動系統進行持續的檢測和改進。此外自動系統在使用不同速度模型和波形擬合頻段方面的自適應性也需要通過測試而加以改進。</p>

100 年交通部中央氣象局委託研究計畫期末報告

計畫編號：MOTC-CWB-100-E-08

計畫名稱：震源機制與地震破裂面之迅速判定

計畫主持人：趙里，中央研究院地球科學研究所

一、前言

本計畫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。

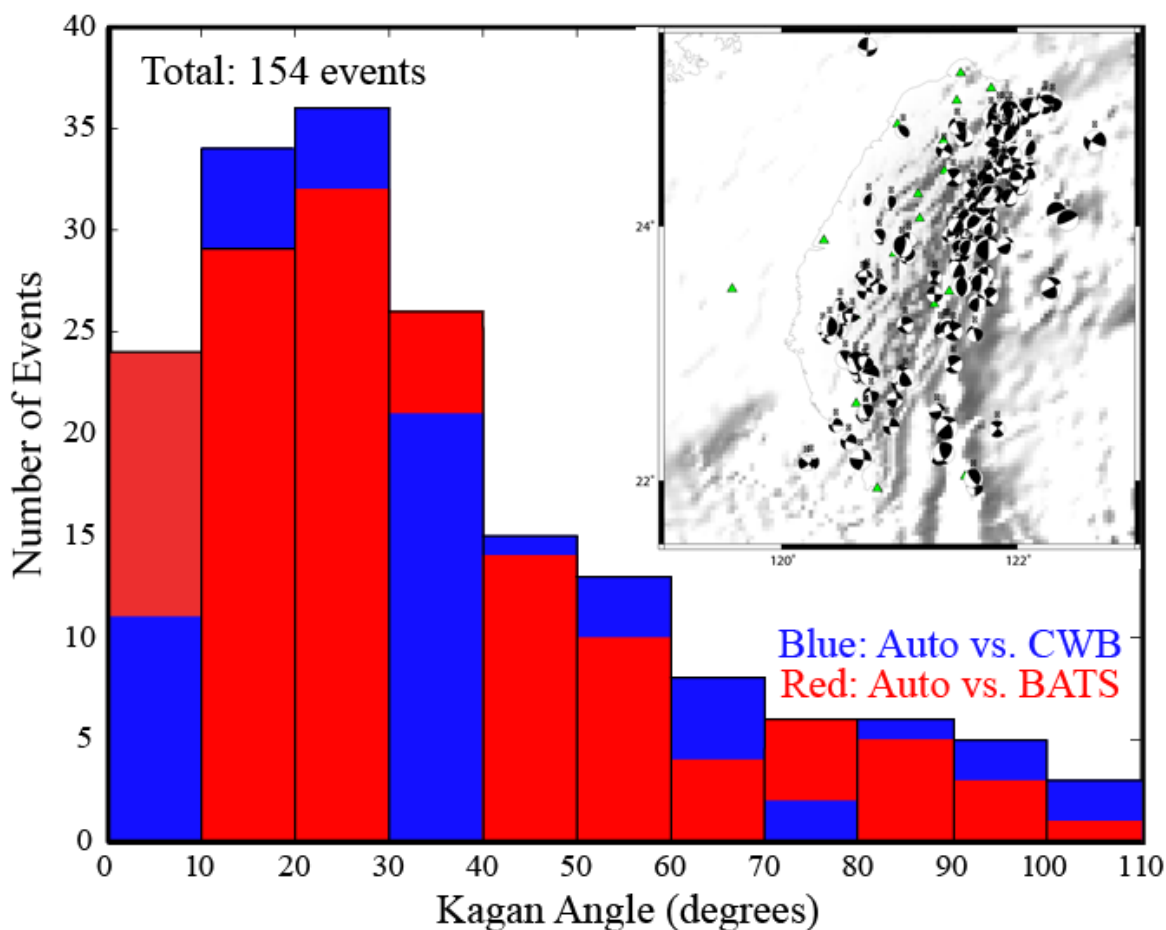
從去年(99年)下半年以來，即時自動確定地震震源機制系統已經開始運行，對發生在臺灣本島及其附近海域地區有感地震基本上能夠在三分鐘以內自動計算出震源機制解，但結果仍需進一步仔細分析以提高該系統震源機制結果的可靠性和精確性。目前自動製作 shakemovie 以及 PGA 和 PGV 分佈圖的流程也已經在中研院電腦系統開始運行，利用預先計算並存儲好的應變 Green 函數庫，該系統能夠在獲得震源解以後約 15 分鐘得到 shakemovie 及 PGA 和 PGV 分佈圖。此外，應變 Green 函數庫的另一個功效是它可以使即時判斷真實斷層面成為可能。我們以 2010 年甲仙地震為例，在考慮三維速度結構，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。

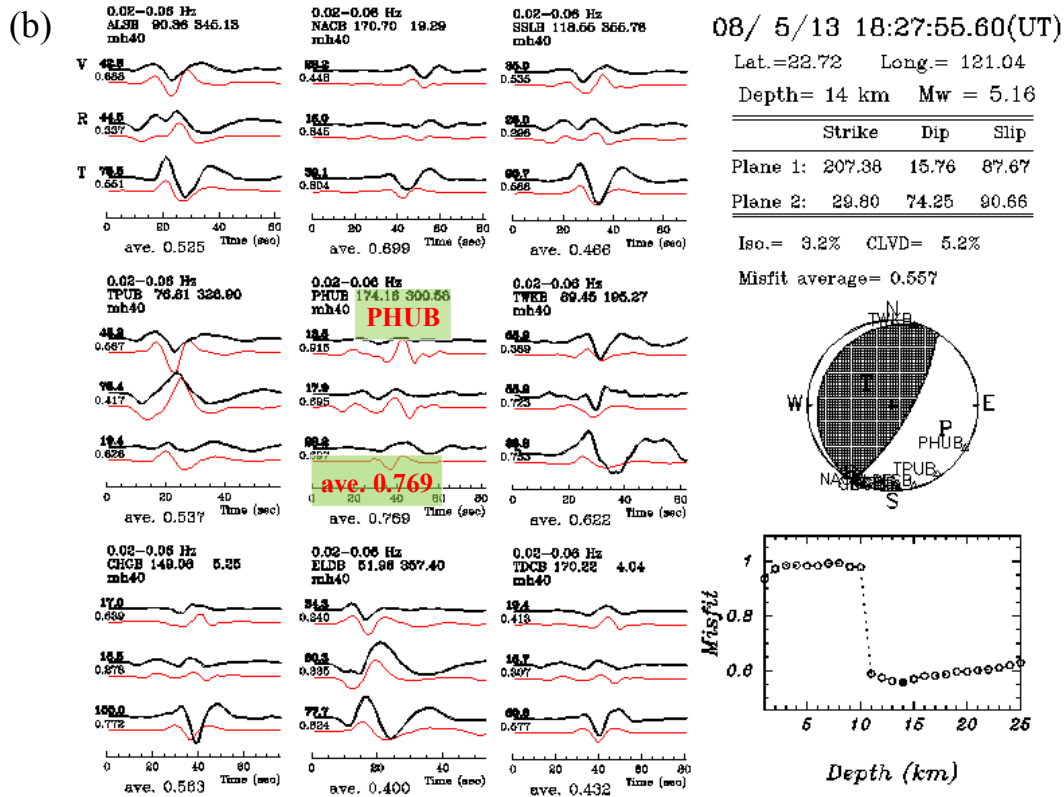
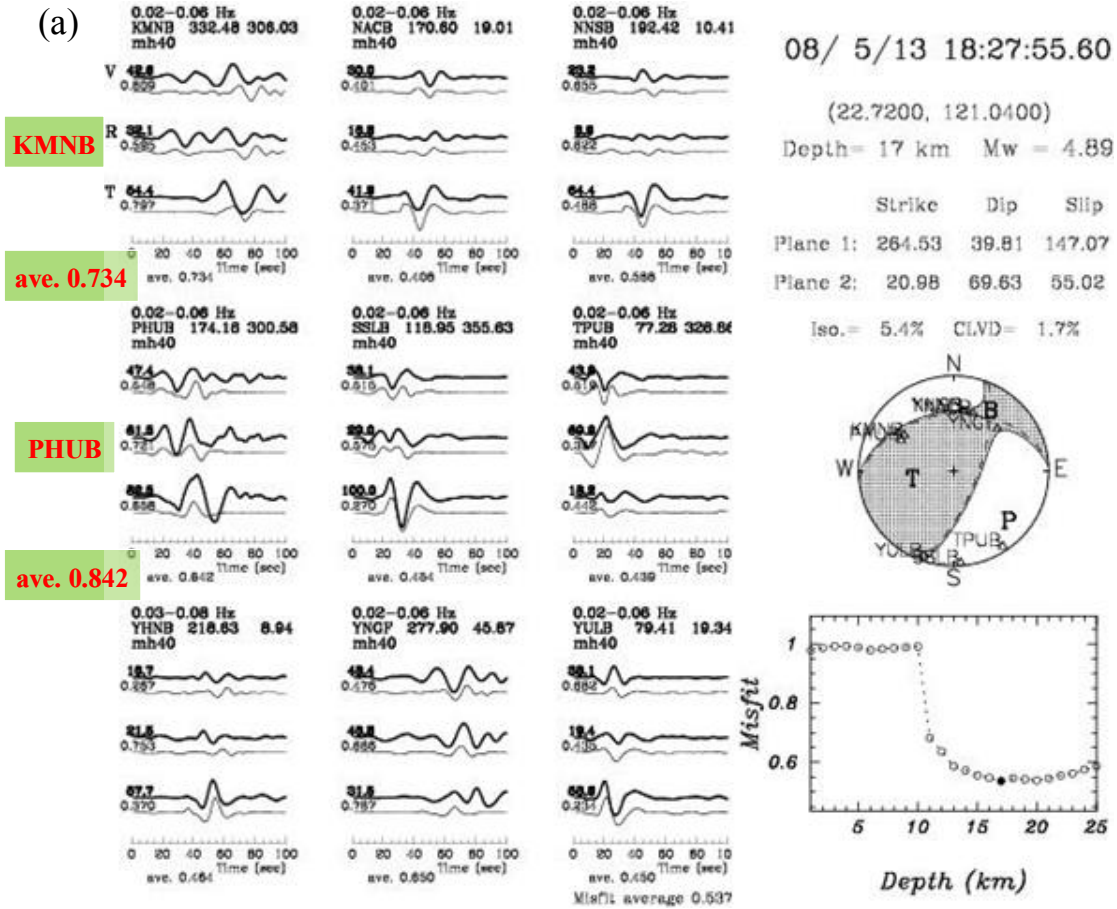
本系統從 2010 年 7 月開始試運行至 2011 年 4 月，對發生在臺灣本島及其附近海域地區有感地震的處理結果基本上令人滿意，如果以 Kagan 角度作為衡量不同震源機制解之間的一致性程度，有超過 60% 的自動震源機制解與氣象局和中研院地球所 BATS

的人工計算結果 Kagan 角度 (Kagan 1991) 小於 40° ，即結果基本一致。然而，2011 年 4 月以來，由於自動震源機制確定系統中準備地震記錄 SAC 檔案過程中的錯誤，致使自動系統之震源機制解無法使用。經檢查修改，目前自動系統已經恢復正常運行。由於地球所也安裝了該自動系統，因此在這裡我們用地球所自動系統計算得到的截止到 2011 年 11 月 17 日第 155 號地震的震源機制解進行分析。圖一顯示了自動震源機制解與氣象局和中研院地球所 BATS 的人工計算結果之間的 Kagan 角度，其中有 66% 的自動震源機制解與氣象局的結果 Kagan 角度小於 40° ，而與 BATS 結果 Kagan 角度小於 40° 的自動震源機制解有 72%。

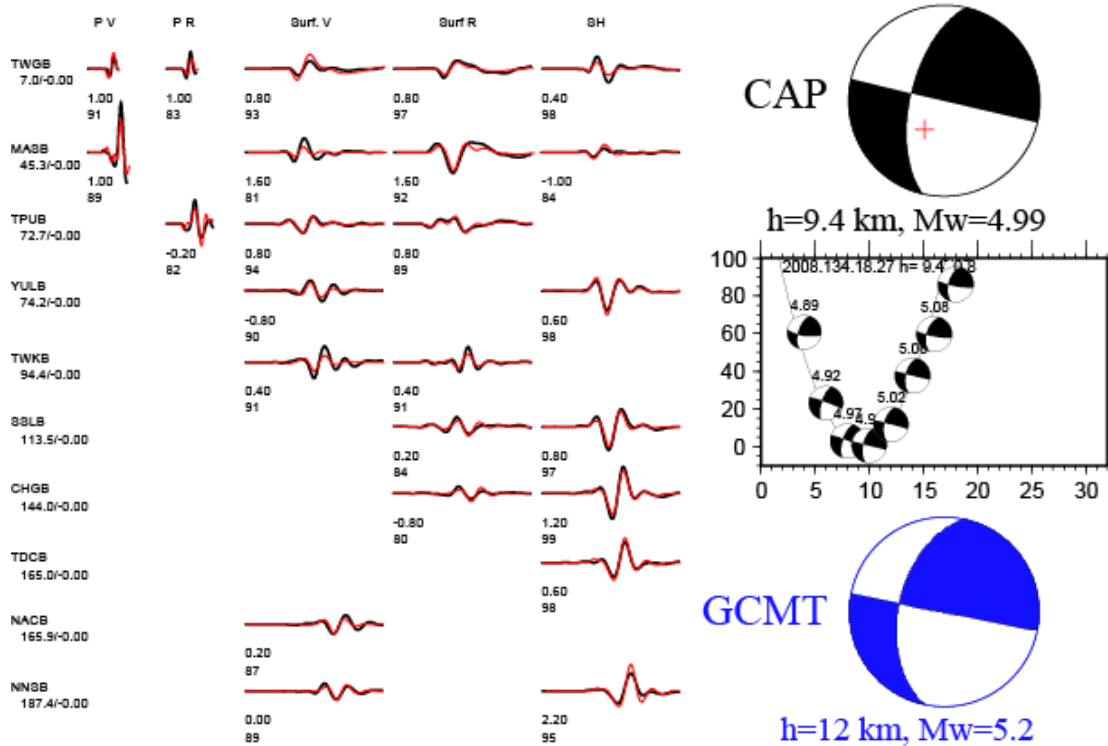


圖一、自動震源機制確定系統得到的震源機制解（內嵌地圖）及其與氣象局和中研院地球所 BATS 的人工計算結果之間的 Kagan 角度的統計。從 2010 年 7 月截止到 2011 年 11 月 17 日第 155 號地震，共有 154 個地震三種方法均給出結果。

另外一些有感地震由於規模較小或者位于距島上地震觀測網較遠或較深的地方使得震源機制解難以確定。除此以外，仍有一些地震由自動震源機制確定系統給出的結果與其它方法得到的結果相差較大。因此，自動震源機制確定系統在設計上仍有需要改進的地方，包括不同地區之間速度模型上可能的差別以及根據地震規模大小而改變波形擬合的頻段，這些改進需要後續對衆多震源機制解逐一進行細緻的分析，同時也需要與其它方法的震源機制解進行比較。在與及其與氣象局和地球所 BATS 的人工計算結果的初步比較中，我們也發現一些問題給這種比較帶來困難，如圖二所示。



(c) Event 2008.134.18.27 Model tw_010 FM 193 61 0 Mw 4.99 rms 2.658e-02 147 ERR 2 3 4



圖二、2008年5月13日台東地震震源機制解比較。(a, 前頁)地球所BATS結果，波形比較中黑綫為記錄，灰綫為理論地震圖。(b, 前頁)氣象局結果，波形比較中黑綫為記錄，紅綫為理論地震圖。(c)CAP結果，波形比較中黑綫為記錄，紅綫為理論地震圖。藍色震源機制解為Global CMT結果。CAP震源機制解與BATS，氣象局和GCMT震源機制解的Kagan角度分別為 74° ， 89° 和 11° 。

從圖二中四種方法的結果的比較看出，該地震的震源機制似乎更接近是CAP和GCMT的走滑型地震，而不是像BATS和氣象局的近逆沖型地震。從CAP結果的波形擬合情形來看，該震源機制解是可信的，與GCMT結果的一致性不大可能是偶然的巧合，因此有必要分析BATS和氣象局解的誤差的可能的原因。在(a)中BATS結果的波形比較中，可以看出在KMNB和PHUB兩個測站記錄與理論波形之間的misfit較大(ave=0.734和0.842)，其原因或許是由於從台東的震源到這兩個測站路經較遠，且沿這兩條路徑波速結構變化複雜，會與計算中使用的一維模型差別較大。因此，在確定震源機制解時，似乎有必要在保證足夠測站的前提下盡量去除波形misfit較大的測站。而在(b)中氣象局結果的波形比較中，PHUB測站不僅misfit較大(ave=0.769)，而且其振幅與(a)中BATS結果使用的同一測站振幅相差3倍以上。這種在個別測站的振幅誤差勢必會導致震源機制解和地震規模上的誤差。從圖二中結果的分析來看，儘管這是一個規模不小的地震，以目前的測站分佈應可得到可靠而準確的震源機制解。但是在震源機制求解過程中有必要對所使用的測站記錄質量以及記錄波形與理論地震圖之間的misfit設定適當的取捨條件，在最終所使用的測站數目及其分佈與波形的misfit之間找到一種更好的折中(compromise)。綜上所述，要找到圖一中一些地震自

動系統與其它方法結果之間 Kagan 角度較大的原因，必須對這些地震在不同方法中波形比較的情形逐一進行檢視以後才能確定。

三、即時自動強地面運動模擬系統的建立

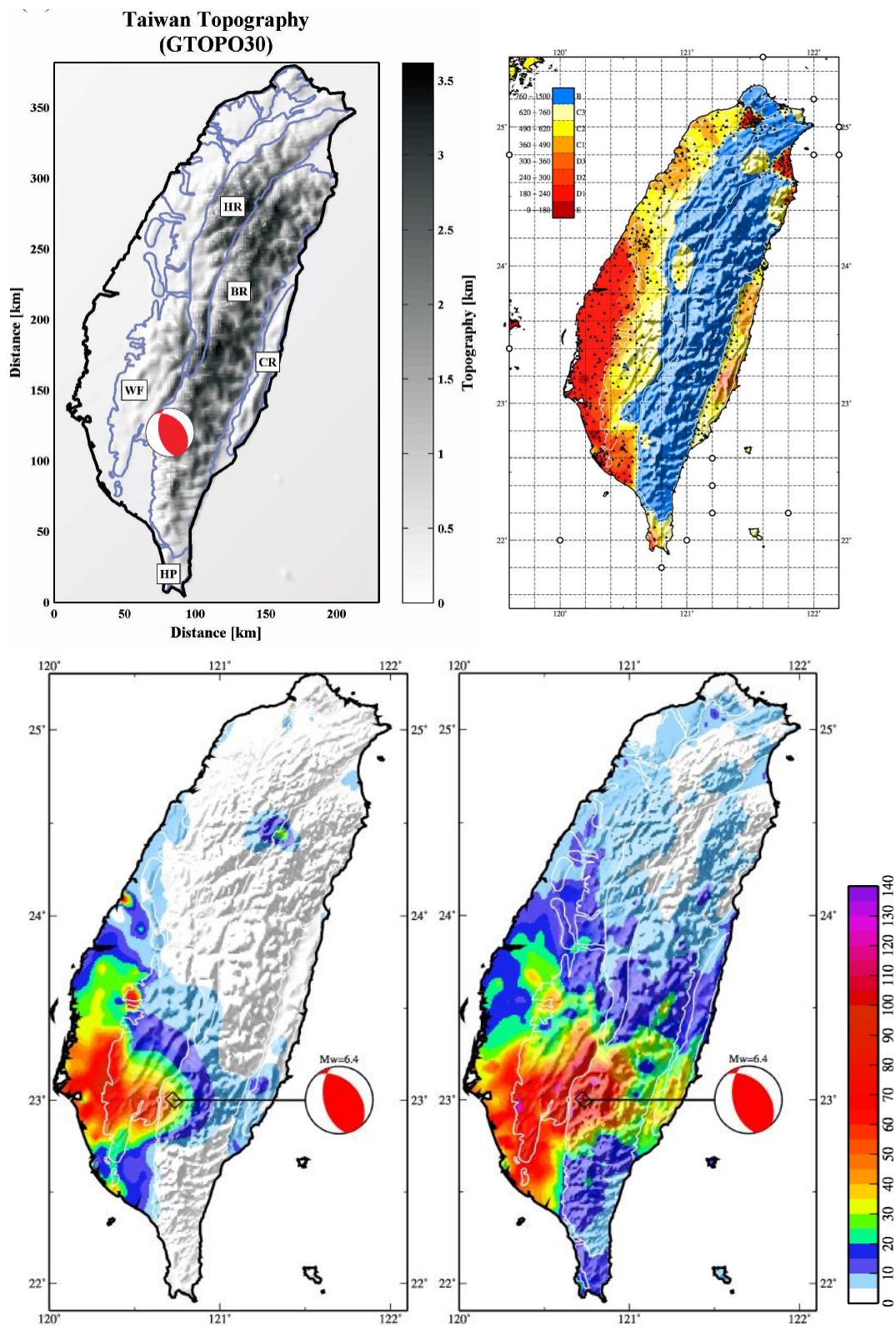
臺灣由於所處的地理位置使其面臨多種地質災害如火山，地震，土石流，甚至海嘯等等的威脅，社會大眾對有關資訊十分關心。在從事科學研究的同時，我們要讓研究成果為社會服務，以及時而準確的資訊，既為防災與救災提供幫助，又達到普及科學知識的目的。為此，我們利用現有地震波模擬方法，建立了一個根據地震預警報告提供的地震震源位置和震源機制即時自動計算臺灣全島強地面運動，並製作地震動動畫 (shakemovie)，以及計算和繪製 PGA 和 PGV 分佈圖的系統。

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考慮適當的場地放大修正(Wald et al. 2006)。圖三中以 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。

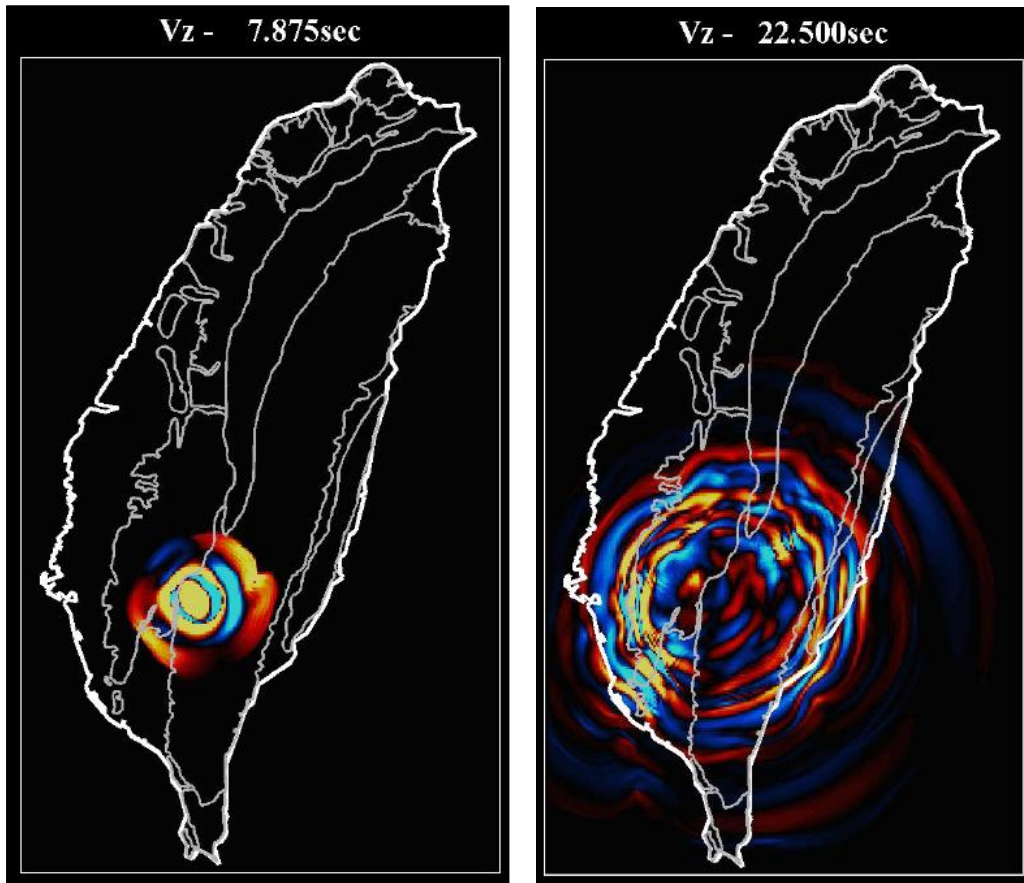
由於三維模型中地震波模擬在計算上的巨大需求，即使利用大型電腦系統，也需要幾小時甚至幾天的時間才能得到準確的強地面運動分佈結果。因此，實現即時迅速提供震後強地面運動估測的關鍵是要有一個預先建立好的應變 Green 函數庫 (Zhao et al. 2006)。有了應變 Green 函數數據庫，無論地震發生在什麼地方，地面運動的計算只需要從數據庫中讀取適當的應變 Green 函數，與震源機制解進行相乘就可以得到，而無需進行任何數值模擬，從而不僅不需要大型電腦系統，而且可以在幾分鐘以內迅速地計算許多地方的地面運動用來製作 shakemovie 以及 PGA 和 PGV 分佈圖。對於有限震源也可以用同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 2,200 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 公里處。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 2,200 個採樣點處的地面運動。

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。圖四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。



圖三、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。



圖四、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。

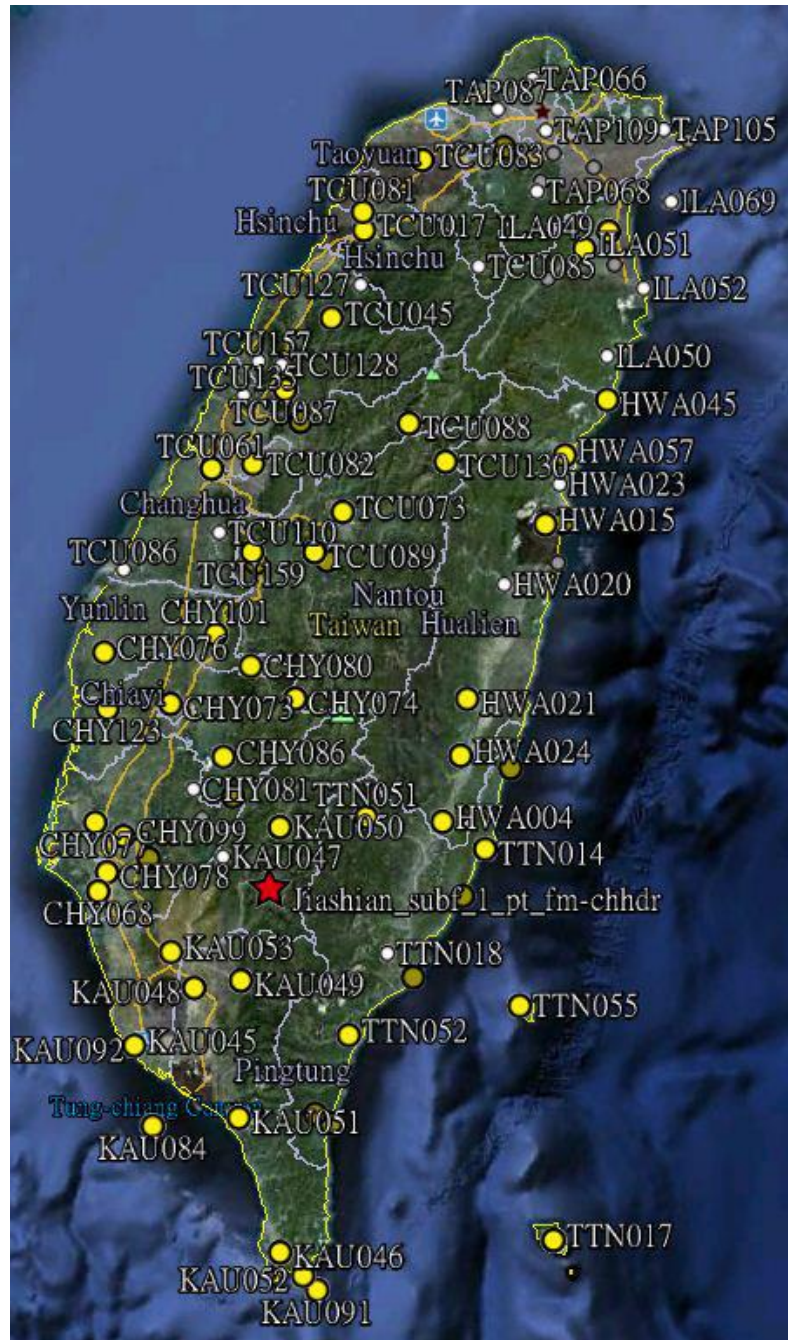
四、震源實際破裂面的迅速判定

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。

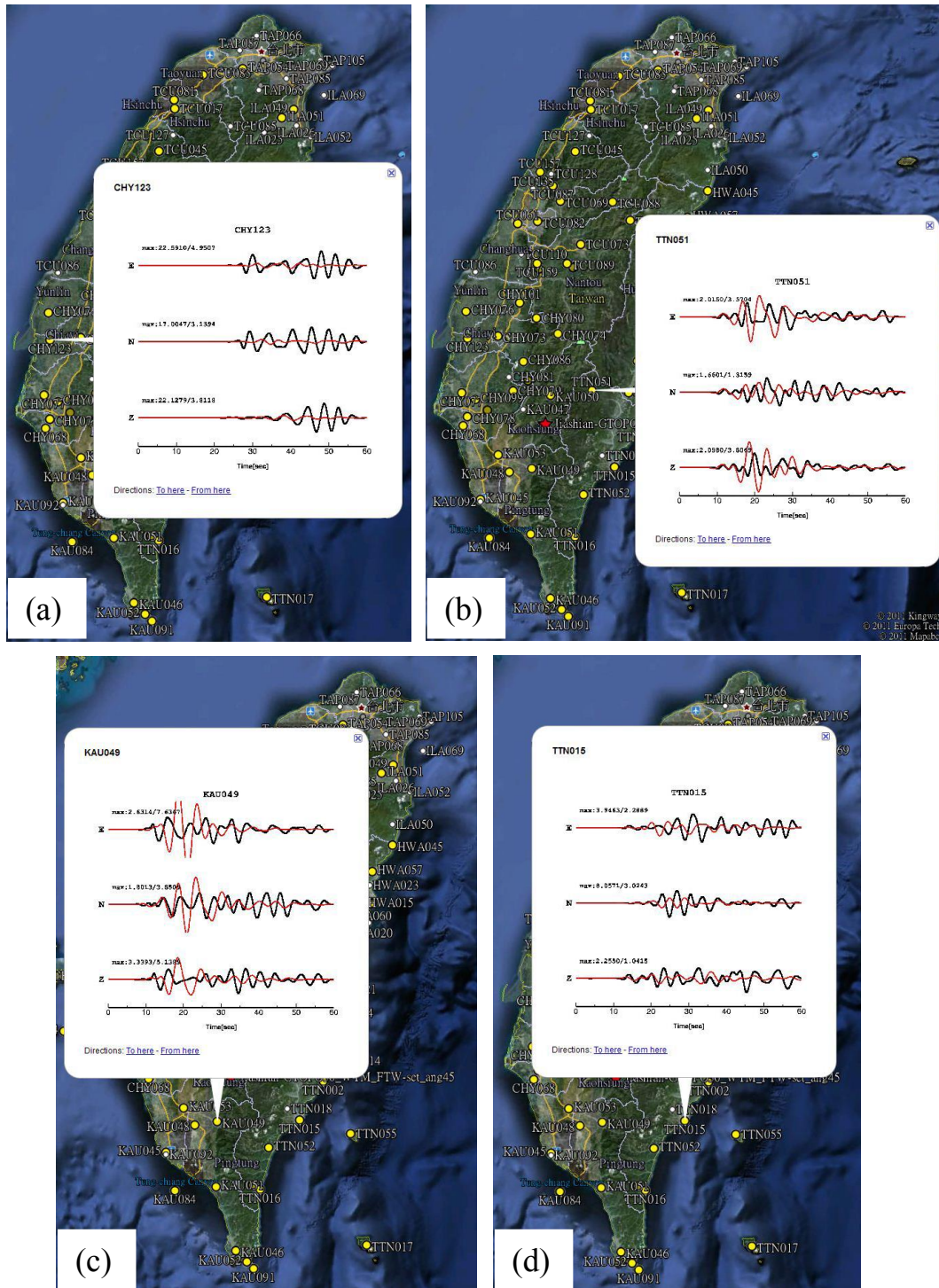
點震源模型的震源機制解有其特有的地震波輻射花樣，即地震波振幅大小隨方位的變化。這種點源的輻射花樣通常有空間上的對稱性，如在相反的方向上振幅相同，正是這種對稱性使得無法用振幅隨方位的變化來判斷兩個共軛平面中哪一個是真正的斷層面。然而在考慮震源的有限面積以後，這種輻射的對稱性會遭到破壞，兩個共軛平面的輻射振幅會具有不同的方位變化特徵。因此，在得到點源震源機制以後，如果我們分別以兩個共軛平面為震源面，並以有限震源模型計算不同方位上的地面運動，並與觀測的地面運動作對比，就能夠從兩個共軛平面中找出一個對地面運動預測較好的平面，從而判斷真正的地震斷層面。

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

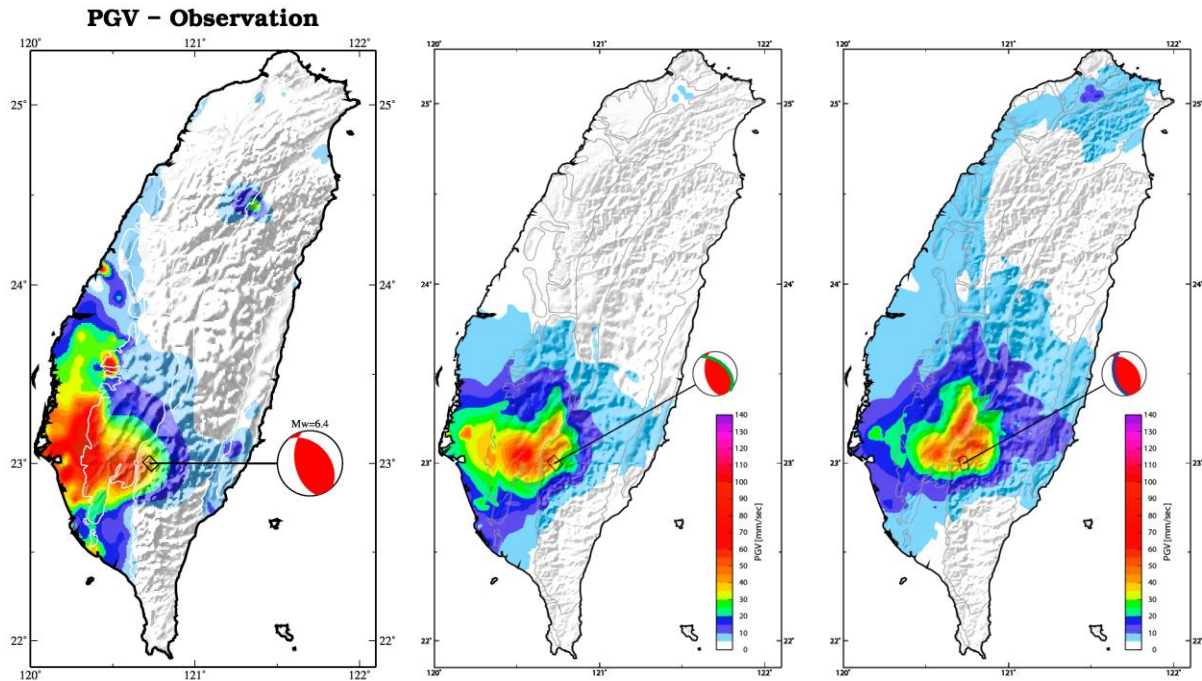
象局強地面運動即時觀測台站处的地面運動，來與觀測記錄作對比。圖五顯示甲仙地震震央位置和即時強地面運動台站分佈。從位于臺灣本島的 95 個即時強地面運動台站中，我們選出 61 個三分向記錄波形訊雜比較高的台站計算了理論波形。在強地面運動的數值模擬中，我們使用了 Wu et al. (2007) 的三維速度模型以及 GTOTO30 的地表地形變化 (http://eros.usgs.gov/#/Find_Data/Products_and_Data_Available/gtopo30_info)，圖六中顯示了點源所模擬的強地面運動與觀測記錄的對比。



圖五、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。



圖六、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。



圖七、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 分佈圖比較如圖七所示。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。

五、誌謝

自動即時震源機制確定系統在中央氣象局數據系統的運行及其結果分析是在中央氣象局陳達毅先生和廖哲緯先生的幫助下完成的。

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.

交通部中央氣象局
委託研究計畫期末成果報告

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

計畫類別：氣象 海象 地震

計畫編號：MOTC-CWB- 100-E08

執行期間：100 年 1 月 日至 100 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 100 年 11 月 25 日

政府研究計畫期末報告摘要資料表

計畫中文名稱	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		
計畫編號	MOTC-CWB100-E08		
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	100	執行期間	100/2-12
本期經費 (單位：千元)	1420		
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(%)
	1420	1420	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	火山、地震		
研究目的	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，為了減少未來大地震之衝擊，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。		
研究成果	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。		
具體落實應用情形	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。		
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)			

(以下接全文報告)

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

林正洪、李憲忠

中央研究院地球科學研究所

摘 要

歷史上地震對人類所造成之災害，堪虞為自然界中最嚴重的一項。特別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。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：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。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。過去一年主要初步成果在大型地震之庫倫破壞應力研究，甲仙地震可能觸發觸口斷層 ($\Delta\text{CFS} = \sim 0.05 \text{ MPa}$) 的破裂並抑制旗山斷層 ($\Delta\text{CFS} = \sim -0.01 \text{ MPa}$) 的破裂；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。此外，即時自動確定地震震源機制系統已經初步建立完

成，開始對臺灣地區有感地震自動計算震源機制解。以 2010 年甲仙地震為例，對有限震源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。

關鍵詞： 中大規模地震、源機制解、庫倫破壞應力、破裂過程

Abstract

Earthquake disaster is one of the most significant impacts in nature. Particularly, 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, these source parameter information are routinely reported by Central Weather Bureau. Based on these information, rapid source inversion analysis 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.

Key words: 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。

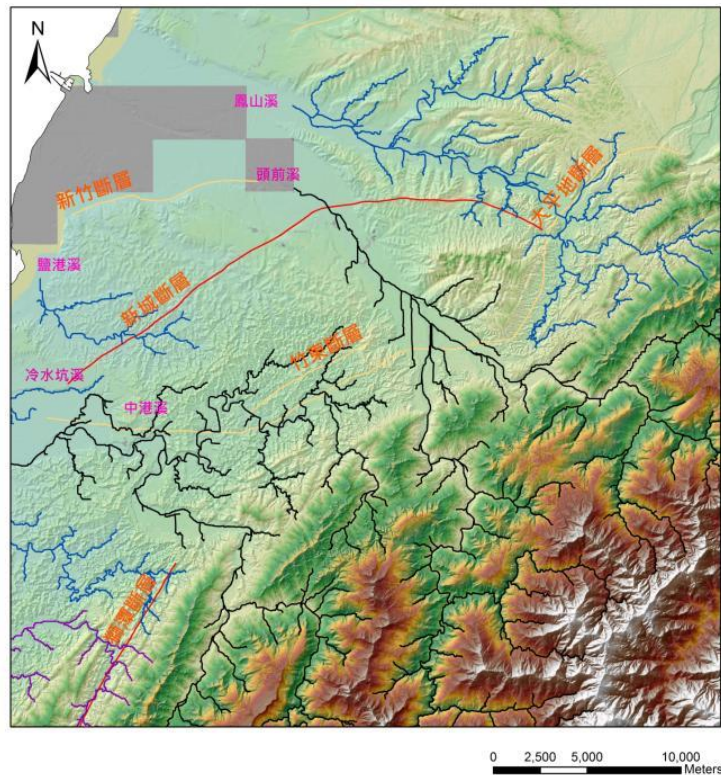


圖 1 新城斷層及其鄰近的水系分布情形

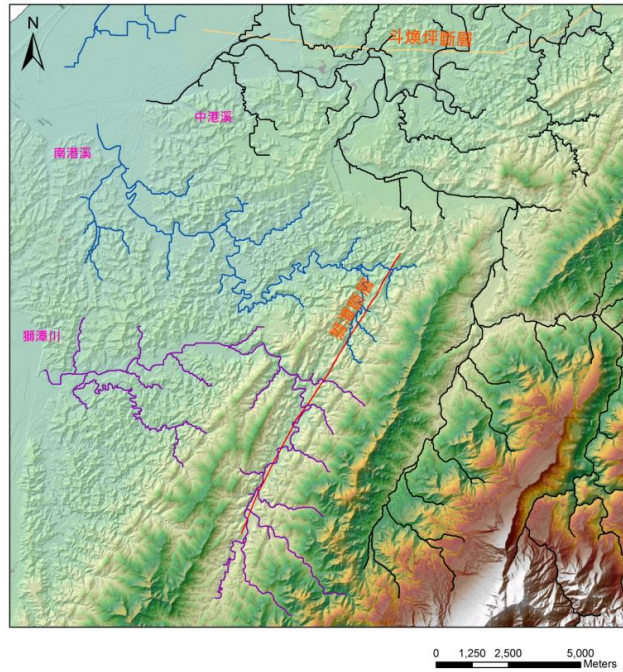


圖 2 獅潭斷層及其鄰近水系分布情形

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。

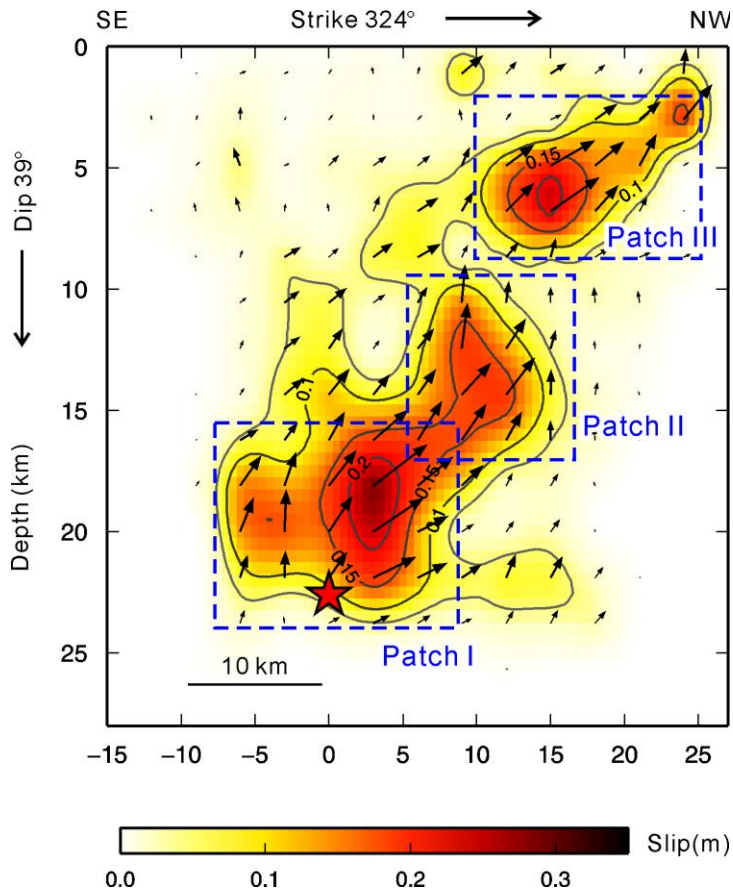
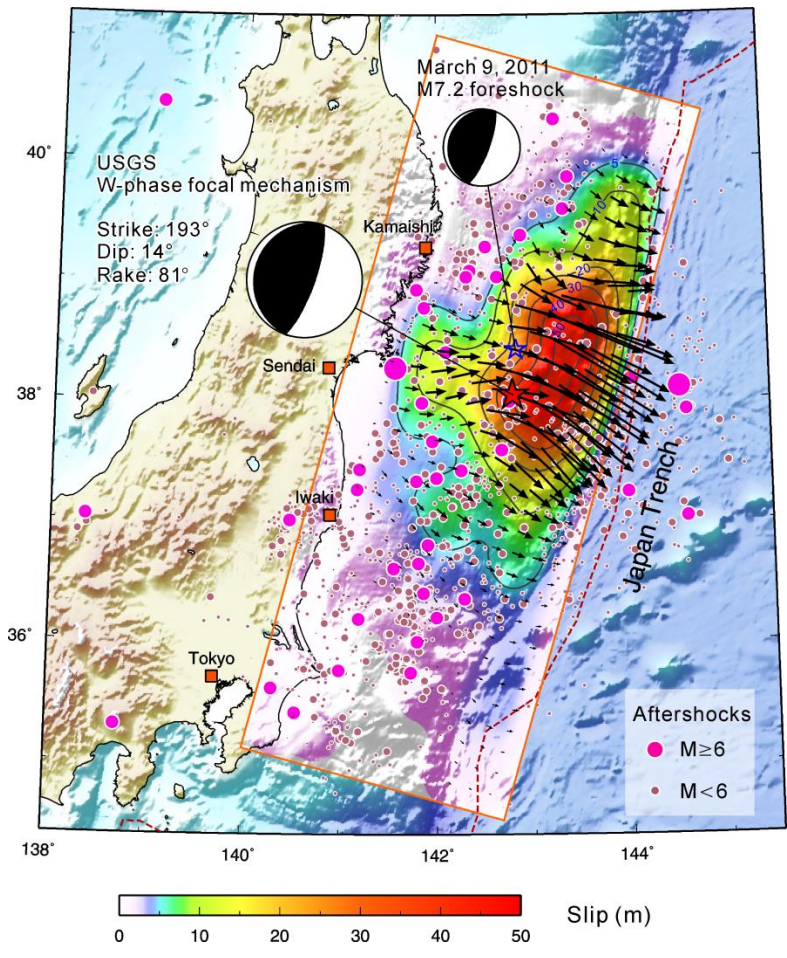


圖 3 甲仙地震錯動量空間分佈

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)

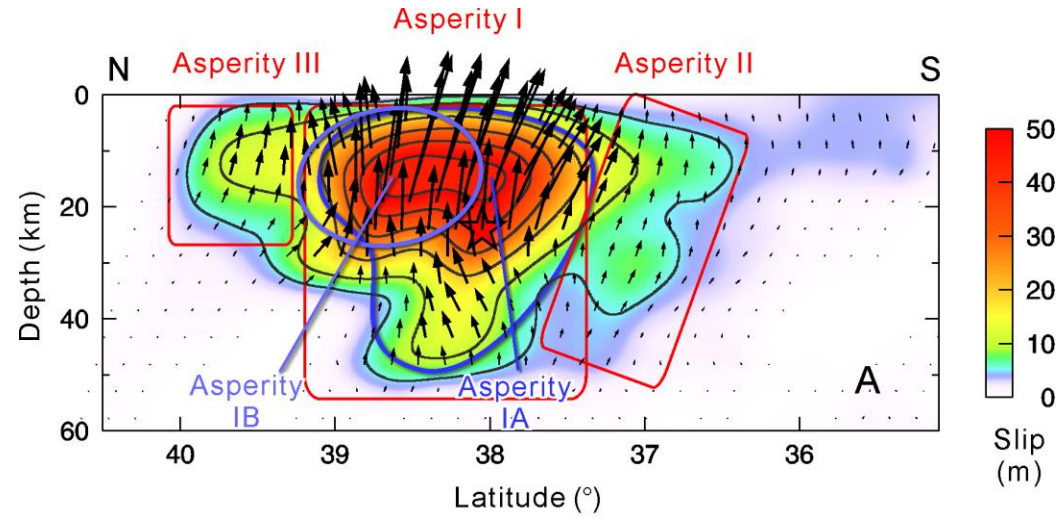


圖 4 日本 311 地震錯動量空間分佈：(a)錯動量分佈水平投影，(b)錯動量分佈斷層面投影。

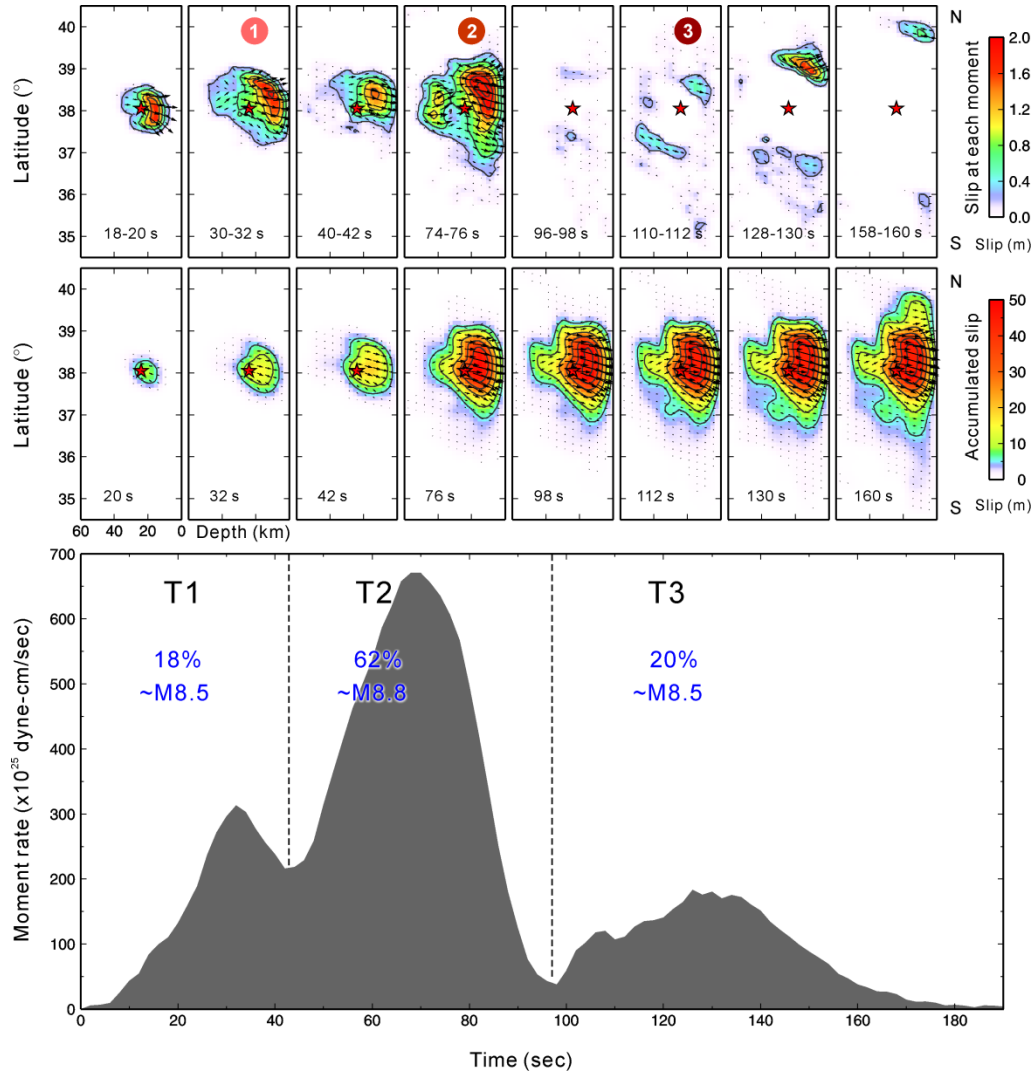


圖 5 日本 311 地震破裂過程。最上方為瞬時破裂分佈，中間為累加滑移量，下方為震源時間函數。

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。

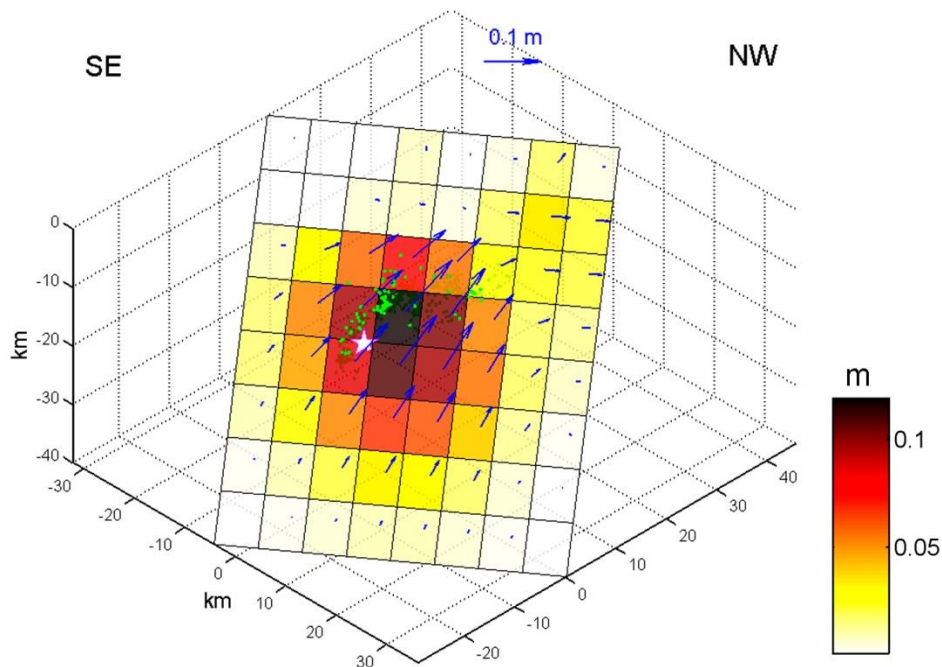


圖 6 甲仙地震同震滑移分佈與斷層幾何形貌。

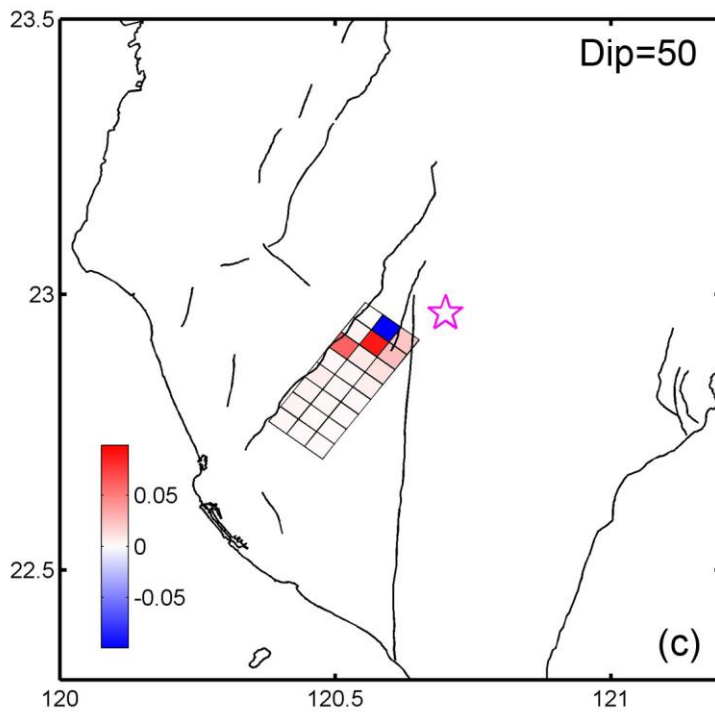


圖 7 斷層系統的庫倫應力變化(ΔCFS)

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。

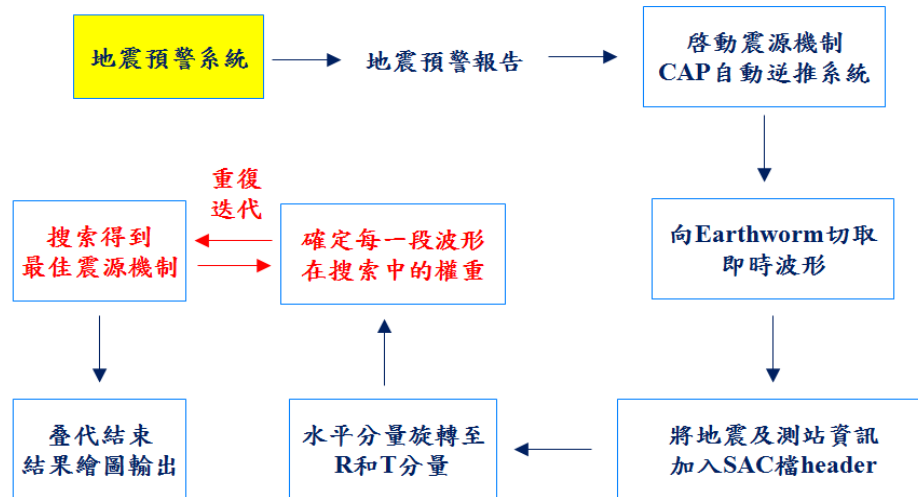


圖 8 即時自動震源機制逆推系統運行流程圖

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。

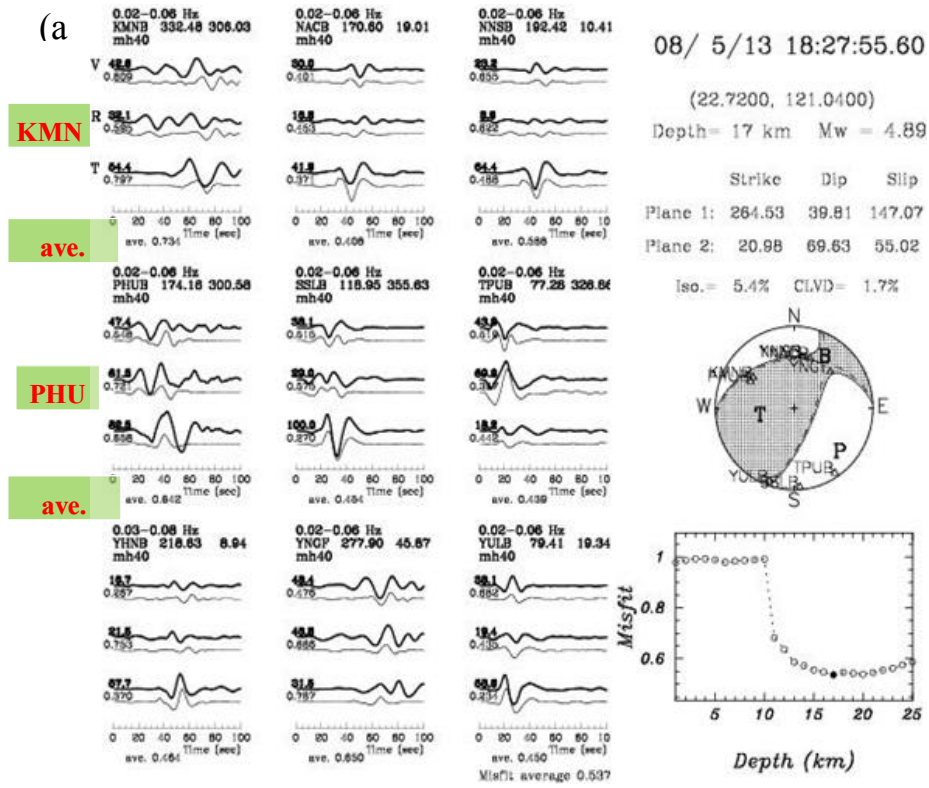


圖 9 台東地震(2008年5月13日)震源機制解比較。

交通部中央氣象局
委託研究計畫期末成果報告

庫倫應力變化之推演

計畫類別：氣象 海象 地震

計畫編號：MOTC-CWB-100-E-08

執行期間：100 年 1 月 1 日至 100 年 12 月 31 日

計畫主持人：許雅儒

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 100 年 12 月 日

政府研究計畫期末報告摘要資料表

計畫中文名稱	庫倫應力變化之推演		
計畫編號	MOTC-CWB-100-E-08		
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	100	執行期間	100年1月1日至100年12月31日
本期經費 (單位：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(%)
研究人員	計畫主持人	協同主持人	研究助理
	許雅儒		
報告頁數		使用語言	
中英文關鍵詞			
研究目的	<p>大地震發生過後，常伴隨許多餘震，科學家為了解主震所造成的應力改變對鄰近斷層的影響，在1994年首次提出庫倫破壞應力的概念。當庫倫破壞應力為正值時表示鄰近地區之斷層有可能發生破裂；為負值時則表示較不容易發生破裂。藉由計算目標區或鄰近斷層上庫倫破壞應力之上升和下降，可評估該區地震之潛能。台灣地區震頻繁，經由計算大地震過後造成之庫倫應力改變，可評估較大餘震可能發生之區域，避免造成災害傷亡。</p>		

研究成果	<p>本研究利用 GPS 觀測之同震位移和彈性半空間錯位模型，推求 2010 年 3 月 4 日甲仙地震 ($M_w=6.4$) 斷層最佳模型為走向 $N324^\circ$，傾角 40° 往東北。斷層面上的傾向滑移量為 0.05~0.1 m，左移分量為 0.04 m。斷層幾何形貌與台灣寬頻地震網 (BATS)，美國地質調查 (USGS/NEIC)，和全球 CMT 所計算出的震源機制比對也相當吻合。斷層最大滑移量約 0.12 m，位在震源西側深度 15 ~20 km 處。計算主震對鄰近斷層系統之庫倫應力變化 (ΔCFS) 顯示：甲仙地震可能觸發觸口斷層的破裂並抑制旗山斷層的破裂；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。</p> <p>另計算 2002 年 3 月 31 日發生在宜蘭花蓮外海之 331 地震 ($M_w=7.1$) 之同震滑移分佈及主震造成之應力改變。331 地震震源深度約 40 km，斷層面可能為台灣北部隱沒帶上之分叉斷層。使用 GPS 資料逆推得到最佳斷層模型為走向 $N290^\circ$、傾角 30°，斷層頂部沒有出露海床，位於深度 12 km 處。斷層面上最大滑移量為 0.56 m，分佈在震央東側深度 25 km 處。計算台灣東部縱谷斷層、中央山脈斷層、及台灣北部山腳斷層斷層面上之庫倫應力變化顯示：331 地震過後，山腳斷層及縱谷斷層中段及南段斷層滑移面上的庫倫應力增加；而縱谷斷層北段及中央山脈斷層大部份區域庫倫應力下降。</p>
具體落實應用情形	<p>藉由大地震過後計算主震造成之庫倫應力，評估較大餘震可能發生之區域，避免造成災害傷亡，並了解主震造成之區域應力改變對周遭區域地震活動度及鄰近斷層帶之交互影響。台灣地區地震頻繁，可提供足夠多的地震數目從事相關研究，再利用統計學進行可信度及危害度分析，對地震防災提供實質助益。綜言之，由於甲仙地震規模較小，而 2002 年花蓮外海之 331 地震又是外海地震，初步研究顯示主震造成的應力改變對台灣本島斷層之影響有限。</p>
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)	
--------	--

(以下接全文報告)

庫倫應力變化之推演

許雅儒

中央研究院地球科學研究所

摘 要

本研究計算大型地震之庫倫破壞應力 (ΔCFS)，藉以了解主震所造成的應力改變對鄰近斷層的影響，庫倫破壞應力為正值時表示鄰近地區之斷層很有可能發生破裂；為負值時則表示較不容易發生破裂。藉由計算目標區或鄰近斷層上庫倫破壞應力之上升和下降，可評估該區地震之潛能及較大餘震可能發生之區域，避免造成災害傷亡。

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，此地震為盲斷層破裂所引發。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。台灣GPS連續觀測網所計算出之同震地表位移顯示：在震央西側具有5~27 mm的水平位移量，運動方向介於西北和西南向，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。利用GPS同震位移和彈性半空間錯位模型，即可逆推甲仙斷層的幾何形貌和同震滑移分佈。最佳斷層模型顯示斷層走向為N324°(西北-東南)，傾角40°往東北方向，斷層面上的傾向滑移量為0.05~0.1 m，左移分量為0.04 m。斷層幾何形貌與台灣寬頻地震網(BATS)，美國地質調查(USGS/NEIC)，和全球CMT所計算出的震源機制比對也相當吻合。斷層最大滑移量0.12 m位在震源西側深度15~20 km處。計算主震對鄰近斷層系統之庫倫應力變化顯示：甲仙地震可能觸發觸口斷層($\Delta CFS \sim 0.05$ MPa)的破裂並抑制旗山斷層($\Delta CFS \sim -0.01$ MPa)的破裂；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。

本研究另外選取2002年3月31日發生在宜蘭花蓮外海之331地震($M_w=7.1$)計算其同震滑移分佈及主震造成之應力改變。台灣東北部海域地震頻繁，歷史地震記錄中已有多次規模大於7.5之地震及可能海嘯事件發生，計算331地震對陸地上主要斷層系統之影響，將有助於地震災害評估。331地震震源深度約40 km，斷層面可能為台灣北部隱沒帶上之分叉斷層。GPS觀測之最大水平同震位移在蘇澳可高達50 mm，運動方向為東南方，位移量往西北方遞減，新竹以南地區同震位

移已不顯著；花蓮鄰近測站之水平位移約為 10 mm，往西北方運動；琉球群島上之測站位移量約為 5~15 mm，主要往東南方運動。在垂直位移量方面，近震央處之蘇澳觀測到最大下陷量 25 mm，宜蘭和台北之間之 GPS 測站大部份呈現下陷，琉球群島上之 GPS 測站有些許抬升現象。使用 GPS 資料逆推之最佳斷層模型為走向 N290°、傾角 30°，斷層頂部沒有出露海床，位於深度 12 km 處。斷層面上最大滑移量為 0.56 m，分佈在震央東側深度 25 km 處。

利用 331 同震滑移計算台灣東部縱谷斷層、中央山脈斷層、及台灣北部山腳斷層斷層面上之庫倫應力變化顯示：331 地震過後，山腳斷層及縱谷斷層中段及南段斷層滑移面上的庫倫應力增加 (0.001~0.02 MPa)；而縱谷斷層北段及中央山脈斷層大部份區域庫倫應力下降 (~0.005 MPa)。

綜言之，由於甲仙地震規模較小，而 2002 年花蓮外海之 331 地震又是外海地震，初步研究顯示主震造成的應力改變對台灣本島斷層之影響有限。

壹、前言

近年快速發展的全球衛星定位系統 (GPS)，已成為研究地殼變形與地體動力學之利器。中央研究院地球科學研究所於 1989 年，建立涵蓋台灣全島及附近主要離島的「台灣 GPS 觀測網」監測地殼變形。台灣地區運轉中的原有約 50 站 GPS 連續觀測站，分別由內政部、中央氣象局、中央研究院、成功大學及交通大學設立與營運；其中有 8 站位於金門、馬祖、澎湖、東沙、小琉球及蘭嶼等離島。在 1999 年集集地震發生後，中央氣象局地震測報中心與中央研究院地球科學研究所合作於 2001-2005 的五年期間在台灣地區新設 150 個 GPS 連續觀測站。連同各機構原有的 50 站，形成一個總數超過 200 站的密集 GPS 連續觀測網(余水倍等, 2010)。配合近斷層 GPS 密集觀測結果，可偵測活動盲斷層的位置及其變形，估算斷層的滑移率，據以判定斷層活動度，提供地震潛勢評估之重要依據。當有較大地震發生時，密集的連續 GPS 資料更能有效用於觀測震前、同震與震後變形，並計算主震所造成的應力改變對鄰近斷層及地震活動度之影響，獲知地殼應變累積與能量釋放過程、震源斷層之力學性質及地殼應力重新分配之情形。

本研究選取 2010 年 3 月 4 日發生的甲仙地震 ($M_w=6.4$) 及 2002 年 3 月 31 日發生的花蓮 331 大地震 ($M_w=7.1$) 計算庫倫破壞應力。甲仙地震由未知的盲斷層活動所引起，餘震之分布大致呈西北東南走向，但和主震斷層及鄰近斷層之走向有顯著之差異，其發震構造和周遭大地構造之關係至今尚未釐清。花蓮 331 地震，震央位於宜蘭南澳外海與隱沒作用有關，震源深度約 40 km。台灣東北部海域地震頻繁，歷史地震記錄中已有多次規模大於 7.5 之地震發生，這些地震和歷史記載海嘯事件之關係仍不清楚。另外，東部外海大型地震對陸地上主要斷層系統影響之相關研究仍欠缺。有鑑於此，本研究特別選取花蓮 331 地震，了解主震發生後，鄰近斷層系統之應力改變及地震活動度變化之情形。

貳、GPS 資料蒐集及分析

(一) 甲仙地震

2010 年 3 月 4 日之甲仙地震發生在高雄甲仙地震站東南方 17 km 處，主震深度為 23 km，不過甲仙地震並非鄰近的潮州斷層活動引起，而是由未知的盲斷

層活動所引起，由於地表無顯著破裂面，因此在甲仙地震發生後，中研院地球所利用 GPS 連續站之資料來找尋可能的地震破裂面、計算同震滑移分布及同震應力改變對鄰近斷層之影響。位於甲仙地震附近之 GPS 連續觀測站在震前至少有五年之觀測資料，研究中選取距甲仙地震震央距離小於 80 km 之測站，逆推斷層幾何形貌及滑移分佈。蒐集之 GPS 資料以 Bernese 4.2 軟體求解，利用加權最小二乘法處理不同觀測時段的所有資料，以決定各測站的坐標。求解過程中使用 IGS 提供之精密星歷表，以最小二乘法同時調整對流層天頂延遲估計及測站座標。最後，固定位於中國大陸邊緣較穩定之澎湖白沙測站 (S01R)，使其座標值與國際地球參考框架 ITRF00 一致，進而求取其它測站之座標。研究中使用甲仙地震前後 4 天 GPS 觀測之平均值估算同震位移 (Hsu et al., 2010)。

(二) 花蓮 331 地震

2002 年 3 月 31 日發生規模 7.1 之 331 大地震，震央位於宜蘭南澳外海，震源深度約 40 km，此次地震與台灣北部菲律賓海板塊向琉球海溝隱沒之作用有關。台灣東北部海域地震頻繁，歷史地震記錄中已有多次規模大於 7.5 之地震發生，為了研究東部外海大型地震對陸地上主要斷層系統之影響，本研究蒐集在台灣東部、北部及在琉球群島之 GPS 資料，計算同震位移。台灣本島 GPS 測站資料由中研院地球所提供，而琉球附近的 GPS 資料可經由日本國土地理院 (Geospatial Information Authority of Japan, GSI) 之網站申請。GPS 資料以 RunGamt 自動化 GPS 資料處理系統解算各測站每天之 ITRF2005 座標。RunGamt 系統乃以 GAMIT/GLOBK 軟體為核心之自動化 GPS 資料處理系統，由美國地質調查所 (USGS) 出資研發後提供各界免費使用。可自動將一大型 GPS 觀測網分成數個由不大於 40 個測站組成的子網，並分配於不同的伺服器同時計算，提高資料處理效率。各子網未經約制之每日鬆弛解，經由 GLOBK 結合約制在 ITRF2005 座標架構下；整合一段期間的每日解而獲得各測站之 ITRF2005 座標時間序列 (余水倍等, 2010)。另藉由美國噴射推進實驗室 (JPL) 董大南博士發展的 QOCA 軟體 (Quasi Observation Combination Analysis, <http://gipsy.jpl.nasa.gov/qoca/>) 進行時間序列分析，移除 GPS 測站共有之誤差並進行雜訊分析，最後再利用所得之 ITRF2005 時間序列及最小二乘法計算 331 地震之同震位移。

參、台灣地區大型地震之庫倫破壞應力

(一) 甲仙地震

甲仙地震所造成之 GPS 同震水平位移約為 5~27 mm，移動方向為西北至西南方向，水平運動在震央東側並不顯著。垂直位移在近震央處有 5~25 mm 之抬升量，遠場之垂直位移則不顯著，大概只有 5~10 mm（圖一）。由於甲仙地震之破裂並沒有延伸至地表，我們使用主震震源機制來約制斷層幾何形貌。假設模擬斷層的長度為 50 km，寬度為 62 km，斷層傾角界於 40°~70°之間，斷層由地表延伸至 40 km 的深度，將斷層劃分成 64 個小區塊，根據地表 GPS 測站移動方向，限制斷層滑移方向為左移及逆斷層滑移，並以彈性半無限空間錯位模型（Okada, 1985）及加權最小二乘算法來推求最佳的斷層幾何形貌和同震滑移分布。地表 GPS 觀測值（ d ）和斷層面上的滑移（ s ）可以寫成下列關係式：

$$d = G(m)s + \varepsilon$$

$G(m)$ 為格林函數， m 為斷層參數，包含斷層的走向、傾角、長度、寬度、深度和位置， ε 為觀測誤差。在逆推中，給定各個斷層參數合理的範圍，經由網格搜尋法（grid search）求得一組較佳之斷層參數並計算相對應之同震滑移量。

由於甲仙地震為盲斷層破裂引發，無法由地表破裂決定斷層面。逆推中使用地震震源機制解求得的二個可能斷層面進行逆推，雖然二者都能夠提供令人滿意之結果。但是西北-東南走向之斷層面相較於東北-西南走向之斷層面有較低之殘差值。另外，甲仙地震餘震投影至地表有一 N300°之條帶，顯示西北-東南走向、向東北傾之斷層似乎是比較可能之斷層面。因此，在網格搜尋過程中假設斷層走向為 290°~330°，斷層傾角為 30°~70°，研究中得到的最佳斷層模型為走向為 N324°、傾角 40°。斷層面上有 0.05~0.1 m 之傾向滑移，0.04 m 之左移運動（圖二）。圖三顯示 GPS 的殘差值在大部份區域都在一倍的標準偏差之下，少數較大之殘差值可能涉及震後變形或受限於簡單的彈性錯位模型假設。斷層最大滑移量為 0.12 m，分佈在震央西側，深度範圍介於 15~20 km，該區在主震前地震活動度並不顯著（圖三）。若假設剛性係數為 60 GPa，大地測量求得地震釋放之能量為 4.95×10^{18} 牛頓米，相當於規模 6.4 地震，與全球 CMT、NEIC、和台灣 BATS 震源機制解所估計之地震矩一致（Hsu et al., 2010）。

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。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。

在甲仙地震震央附近，地震破裂潛在的來源包括潮州斷層、旗山斷層、新化斷層及觸口斷層 (圖四)。潮州斷層分隔西側之屏東平原的第四紀地層及東側的中央山脈中新世地層。從地形圖上，其地層差異和線性特徵顯示此斷層具有垂直與走向滑移二種分量 (Ho, 1988; Shyu et al., 2005)。東北-西南走向的旗山斷層屬於右移逆斷層 (Lacombe et al., 2001)。由間震期 GPS 觀測結果顯示，橫跨斷層有明顯之右移分量，速率為 24~30 mm/yr (Hu et al., 2007)。新化斷層造成 1946 年規模 6.3 之台南新化地震，為一右移斷層，傾角向北 (Hsu, 1971)。其斷層傾角隨深度有明顯改變，近地表約為 70° 到斷層深部約為 17° (Lee et al., 2000)。觸口斷層為台灣西部褶皺逆衝帶和嘉南地區沿海平原之分界線 (Ho, 1986)，斷層為向東傾 30°~40° 之逆斷層。在庫倫應力計算中所使用的斷層參數列於表一。

將這些斷層分為小區塊，並利用甲仙地震的同震滑移分布計算其庫倫應力在斷層面上的變化量。計算庫倫應力變化需要假定視摩擦係數 (μ')。本研究測試結果發現使用不同的 μ' 值 (0-0.75)，庫倫應力變化並沒有顯著變化。此外，研究台灣區域之震源機制發現視摩擦係數約介於 0.2~0.5 (Hsu et al., 2010)。本研究決定使用 μ' 值 0.4 計算庫倫應力。結果顯示：庫倫應力在潮州斷層 (圖四 a) 的深部，旗山斷層之大部分區域 (圖四 c) 以及觸口斷層 (圖四 f) 為增加 (~0.05 MPa)。另一方面，庫倫應力在潮州斷層的淺部 (圖四 a) 以及新化斷層 (圖四 e) 為減少 (~0.01 MPa)。大部分餘震分佈在震央西側，位於深度 15~20 km 範圍 (圖四 e)。餘震排列呈西北西-東南東走向，似乎與此區域現存的斷層構造不相關。由於只有少數的餘震落在表一中斷層模型深度加減 5 km 之範圍，餘震僅標示於圖四 e。

為了探討斷層幾何形狀對庫倫應力的影響，研究中改變潮州斷層之傾角，使用 60° 的斷層面 (圖四 b)；旗山斷層使用 60° 的斷層傾角 (圖四 d)，計算庫倫應力並和表一受地質資料控制之斷層模型作比較 (圖四 a 和 b，表一)。測試發現在潮州斷層深部和旗山斷層北側，庫倫應力有顯著變化。該結果顯示在解釋庫倫應力變化時須謹慎 (Hsu et al., 2010)。此外，庫倫應力大小對於同震滑動分佈和地質材料特性 (例如剛性係數) 也相當敏感；近一步的研究將有助於研究其影響量。

(二) 花蓮 331 地震

2002 年 3 月 31 日發生規模 7.1 之 331 大地震，震央位於宜蘭南澳外海，震源深度約 40 km，此次地震與台灣北部菲律賓海板塊向琉球海溝隱沒之作用相關。雖然震央距台北市約 100 km，不過由於盆地效應，災情卻集中在遠離震央的台北市 (Chen, 2003)。此次地震為宜蘭花蓮近海 16 年來規模最大之地震，前一次的大地震發生在 1986 年，地震規模 6.8，震央位於花蓮外海 (圖五)，當時造成 15 人死亡。

331 地震之最大 GPS 水平同震位移在蘇澳測站 (SUAO) 可高達 50 mm，向東南方運動，位移量往西北方遞減 (圖六 a)，到板橋測站 (BANC) 只有 18 mm，到新竹及其以南地區水平位移已不顯著；在花蓮鄰近測站之同震位移量約為 10 mm，往西北方運動；琉球群島上之測站位移量約為 5~15 mm，主要往東南方運動。在垂直位移量方面，近震央處之蘇澳測站 (SUAO) 觀測到最大下陷量 25 mm，宜蘭和台北附近的 GPS 測站大部份呈現下陷，琉球群島上之測站有些許抬升現象，抬升量小於 5 mm (圖六 b)。

由於 331 地震之破裂並沒有延伸至海床，因此，使用主震震源機制及餘震分佈來約制斷層幾何形貌。地震震源機制中的二個斷層面分別為向北及向南傾，斷層走向介於 N270°至 N290°，由於大部份的餘震分佈在震央的西北方 (圖六 b)，向北傾的斷層面較能符合餘震分布及區域大地構造，此斷層面有可能是菲律賓海板塊往北隱沒到歐亞大陸板塊時在板塊介面附近所發育之分叉斷層 (spray fault)。模型假設斷層的長度為小於 100 km，斷層傾角介於 20°~70°之間，斷層由地表延伸至 50 km 之深度，將斷層劃分成 25 個小區塊，根據地表 GPS 測站移動方向，限制斷層滑移為右移及逆斷層滑移，並以彈性半無限空間錯位模型 (Okada, 1985) 及加權最小二乘算法來推求最佳的斷層幾何形貌和同震滑移分布，逆推方法與甲仙地震斷層模型之建立相同，請參照前述說明。

研究中得到的最佳斷層模型為走向 N290°、傾角 30°，斷層頂部沒有出露海床，位於深度 12 km 處，斷層寬度 76 km (圖七)。斷層面上有 0.2~0.4 m 之傾向滑移及 ~0.2 m 之右移運動 (圖六、七)。斷層最大滑移量為 0.56 m，分佈在震央東側，深度 25 km 處 (圖七)。若假設剛性係數為 40 GPa，大地測量求得地震釋放之能量為 7.4×10^{19} 牛頓米，相當於規模 7.1 地震，與全球 CMT、NEIC、和台灣 BATS 震源機制解所估計之地震矩一致。

本研究亦試圖探討 331 地震對台灣東部之縱谷斷層、中央山脈斷層、及台灣北部山腳斷層之影響 (圖八)。縱谷斷層位於菲律賓海板塊與歐亞大陸板塊之縫合

帶，西側的中央山脈屬於歐亞大陸，而東側的海岸山脈則屬於菲律賓海板塊。GPS 資料顯示跨過縱谷斷層兩側之縮短量為 30 mm/yr，台灣造山帶之板塊聚合速率為 80 mm/yr (Seno et al. 1993; Yu et al. 1997)，其所積累之變形量有超過三分之一在縱谷斷層釋放。縱谷斷層淺層 (0~2 km) 有明顯之潛移現象 (Yu and Liu 1989; Liu and Yu 1990; Angelier et al., 1997; Lee et al. 2001; Yu and Kuo 2001)，潛移速率約為 30 mm/yr，但斷層深部仍屬於鎖住之狀態。本研究將縱谷斷層分為二段，北段之傾角為 70° 向東，南段之傾角為 50° 向東，傾角之選擇乃根據地質調察、地震層析法所得到之影像及 2003 年成功地震之餘震分佈求得 (Chen and Rau, 2002)。位於縱谷斷層西側之中央山脈斷層其位置、形貌與活動性仍不清楚。野外地質考察及河階研究顯示：斷層為向西傾之高角度正斷層，本研究假設中央山脈斷層斷層傾角為 65°。位於台北盆地西北方之山腳斷層為正斷層，呈北北東走向，可以分為 2 段：南段自新北市樹林區向北延伸至台北市北投區，長約 13 km；北段由北投向北延伸至金山，長約 21 km (丹桂之助, 1939; 林朝榮, 1957; 王執明等, 1978; 林朝宗, 2005)。在台北盆地內，山腳斷層被第四紀沖積層所掩覆，由地形特徵認為斷層位於林口台地與台北盆地的交接帶；由鑽探結果顯示：斷層跡的位置距台地東緣數百公尺以上，在盆地內斷層兩側的基盤落差約 60~220 m，而斷距似乎有由南向北增加之趨勢。GPS 大地測量結果顯示：山腳斷層兩側並未有明顯的水平速度變化，但斷層的上盤有明顯的下陷趨勢。山腳斷層的最近一次活動時間，可能在距今約一萬年以前。山腳斷層可能是控制台北盆地構造發育的一條新構造，其活動特性值得注意。本研究簡化山腳斷層之幾何形貌，假設其走向為 N45°、傾角 30° 之正斷層。

在計算庫倫應力時，使用 μ' 值為 0.4 計算斷層面上之應力變化。結果顯示：庫倫應力在縱谷斷層北段近花蓮處為負值，花蓮以南轉為正值 (圖八 a)；縱谷斷層南段全段庫倫應力皆為正值 (圖八 b)；中央山脈斷層北段近花蓮之區域庫倫應力為負值，但中段及南段則為正值 (圖八 c)；在台北盆地附近之山腳斷層全段庫倫應力皆為正值 (~0.02 MPa, 圖八 d)。331 地震大部分餘震分佈在震央西北側，震央位於宜蘭及南澳外海，深度介於 10~30 km (圖八、九)，只有少數餘震落在表二中斷層模型深度加減 5 km 之範圍，這些地震在圖八中標示為藍色圓點，而黃色圓點則為震後一個月震源深度小於 50 km 之所有地震。圖九 b 顯示縱谷斷層東側在 331 地震後發生二起規模大於四之逆斷層機制地震，與縱谷斷層南段庫倫應力結果相符。山腳斷層雖然也處於應力增加之狀態，但並沒有較大之地震發生。

肆、綜合結果討論

庫倫破壞應力被廣泛地應用在評估大地震後可能發生較大餘震或地震災害之區域。國內學者在 1999 年集集地震過後研究主震造成之庫倫應力發現應力上升區域和餘震發生區域大致吻合 (Wang, 2000; Wang and Chen, 2001; Ma et al., 2005; Chan and Stein, 2009)。本研究利用 GPS 同震位移和彈性半空間錯位模型，推求甲仙地震斷層最佳模型為走向 N324°，傾角 40°往東北，斷層面上的傾向滑移量為 0.05~0.1 m，左移分量為 0.04 m。計算主震對鄰近斷層系統之庫倫應力變化顯示：甲仙地震可能觸發觸口斷層 ($\Delta CFS \sim 0.05$ MPa) 的破裂並抑制旗山斷層 ($\Delta CFS \sim -0.01$ MPa) 的破裂；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 (Hsu et al., 2010)。

2002 年 3 月 31 日發生在宜蘭花蓮外海之 331 地震 ($M_w=7.1$) 之最佳斷層模型走向 N290°、傾角 30°，斷層頂部沒有出露海床，位於深度 12 km 處。斷層面上最大滑移量為 0.56 m，分佈在震央東側深度 25 km 處。利用 331 同震滑移計算台灣東部縱谷斷層、中央山脈斷層、及台灣北部山腳斷層斷層面上之庫倫應力變化顯示：331 地震過後，山腳斷層及縱谷斷層中段及南段斷層滑移面上的庫倫應力增加 (0.001~0.02 MPa)；而縱谷斷層北段及中央山脈斷層大部份區域庫倫應力下降 (0.005 MPa)。

綜言之，由於甲仙地震規模較小，而 2002 年花蓮外海 331 地震又是外海地震，初步研究顯示主震造成的應力改變對台灣本島斷層之影響有限。

在計算庫倫破壞應力時，礙於有許多變因尚無法完全得知，在判讀結果時必須謹慎。這些因子包含區域應力 (King et al., 1994; Toda et al., 1998)、地球介質非均勻性、斷層幾何形態及主震滑移分布之不確定性。例如在本研究中使用不同之斷層幾何形貌計算甲仙地震所造成之應力改變，發現應力的大小對斷層位態非常敏感 (圖四)。隨著日益增加之觀測資料，不久將來，應可提供一個較為真實之地球模型來進行相關之計算工作。

伍、誌謝

感謝中央研究院蘇宣翰、陳新壹、李炘旻、柯世遊及王福全等諸位同仁協助 GPS 連續觀測站維護事宜，蔡宜純協助 GPS 資料分析及黃一剛協助 GMT 繪圖。本計畫由中央氣象局地震測報中心支助，計畫編號：MOTC-CWB-100-E-08。

陸、參考文獻

- 丹桂之助，1939，台北盆地之地質，矢部教授還曆紀念論文集，第1卷，371-380 頁。
- 王執明、鄭穎敏、王源，1978，台北盆地之地質及沉積物研究，台灣礦業，第30卷，第4期，78-108 頁。
- 余水倍、蔡宜純、許雅儒、蘇宣翰，2010，台灣地區地殼形變之時空變化研究(IV)，MOTC-CWB-99-E-15。
- 林朝宗，2005，山腳斷層與台北盆地西緣的地質構造，大台北地區火山活動與山腳斷層研討會論文集，191-197頁。
- 林朝榮，1957，台北盆地，台灣省通誌稿，第一冊，地形，303 頁。
- Angelier, J., H. T. Chu, and J. C. Lee, 1997, Shear concentration in a collision zone: Kinematics of the Chihshang Fault as revealed by outcrop-scale quantification of active faulting, Longitudinal Valley, eastern Taiwan, *Tectonophysics*, 274, 117-143.
- Chan, C. H., and R. S. Stein, 2009, Stress evolution following the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake: consequences for afterslip, relaxation, aftershocks and departures from Omori decay, *Geophys. J. Int.*, 177, 179-192
- Chen, K. H., and R. J. Rau, 2002, Earthquake locations and style of faulting in an active arc-continental plate boundary: The Chishang Fault of eastern Taiwan *EOS Trans. AGU 83 (47)*, Fall Meet. Suppl., Abstract T61B-1277.
- Chen, K.C., 2003, Strong ground motion and damage in the Taipei basin from the Moho reflected seismic waves during the March 31, 2002, Hualien, Taiwan earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 30, doi:10.1029/2003gl017193.
- Ho, C.S., 1986, A synthesis of the geologic evolution of Taiwan, *Tectonophysics*, 125, 1-16.
- Ho, C.S., 1988, An introduction to the geology of Taiwan, explanatory text of the geological map of Taiwan, 2nd edn, pp. 192, Cent. Geol. Surv., Taipei.
- Hsu, M.T., 1971, Seismicity of Taiwan and some related problems, *Bull. Int. Inst. Seismol. Earthquake Eng.*, 8, 41-60.
- Hsu, Y.J., Rivera, L., Wu, Y.M., Chang, C.H., Kanamori, H., 2010, Spatial heterogeneity of tectonic stress and friction in the crust: new evidence from earthquake focal mechanisms in Taiwan, *Geophys. J. Int.*, 329-342.
- Hsu, Y. J., S. B. Yu, L. C. Kuo, Y. C. Tsai, and H. Y. Chen, 2011, Coseismic

- deformation of the 2010 Jiashian, Taiwan earthquake and implications for fault activities in southwestern Taiwan, *Tectonophysics*, 502, 328-335.
- Hu, J.C., Hou, C.S., Shen, L.C., Chan, Y.C., Chen, R.F., Huang, C., Rau, R.J., Chen, K.H.H., Lin, C.W., Huang, M.H., Nien, P.F., 2007, Fault activity and lateral extrusion inferred from velocity field revealed by GPS measurements in the Pingtung area of southwestern Taiwan, *J Asian Earth Sci.*, 31, 287-302.
- King, G.C.P., Stein, R.S., Lin, J., 1994, Static stress changes and the triggering of earthquakes, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 84, 935-953.
- Lacombe, O., Mouthereau, F., Angelier, J., Deffontaines, B., 2001, Structural, geodetic and seismological evidence for tectonic escape in SW Taiwan, *Tectonophysics*, 333, 323-345.
- Lee, C.T., Chen, C.T., Chi, Y.M., Liao, C.W., Liao, C.F., Lin, C.C., 2000, Engineering investigation of Hsinhua fault, National Central University 7, (in Chinese) .
- Lee, J. C., J. Angelier, H. T. Chu, J. C. Hu, and F. S. Jeng, 2001, Continuous monitoring of an active fault in a plate suture zone: a creepmeter study of the Chihshang Fault, eastern Taiwan, *Tectonophysics*, 333, 219-240.
- Liu, C. C., and S. B. Yu, 1990, Vertical crustal movements in eastern Taiwan and their tectonic implications, *Tectonophysics*, 183, 111-119.
- Ma, K. F., C. H. Chan, and R. S. Stein, 2005, Response of seismicity to Coulomb stress triggers and shadows of the 1999 M-w=7.6 Chi-Chi, Taiwan, earthquake, *J. Geophys. Res.*, 110, doi: 10.1029/2004JB003389.
- Okada, Y., 1985, Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space Bull. Seismol. Soc. Am. 75, 1135-1154.
- Okada, Y., 1992, Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space Bull. Seismol. Soc. Am. 82, 1018-1040.
- Seno, T., S. Stein, and A. E. Gripp, 1993, A model for the Motion of the Philippine Sea Plate consistent with Nuvel-1 and geological Data, *J. Geophys. Res.*, 98, 17941-17948.
- Shyu, J.B.H., Sieh, K., Chen, Y.G., Liu, C.S., 2005, Neotectonic architecture of Taiwan and its implications for future large earthquakes, *J. Geophys. Res.* 110, doi:10.1029/2004JB003251.
- Toda, S., R. S. Stein, P. A. Reasenber, J. H. Dieterich, and A. Yoshida, 1998, Stress

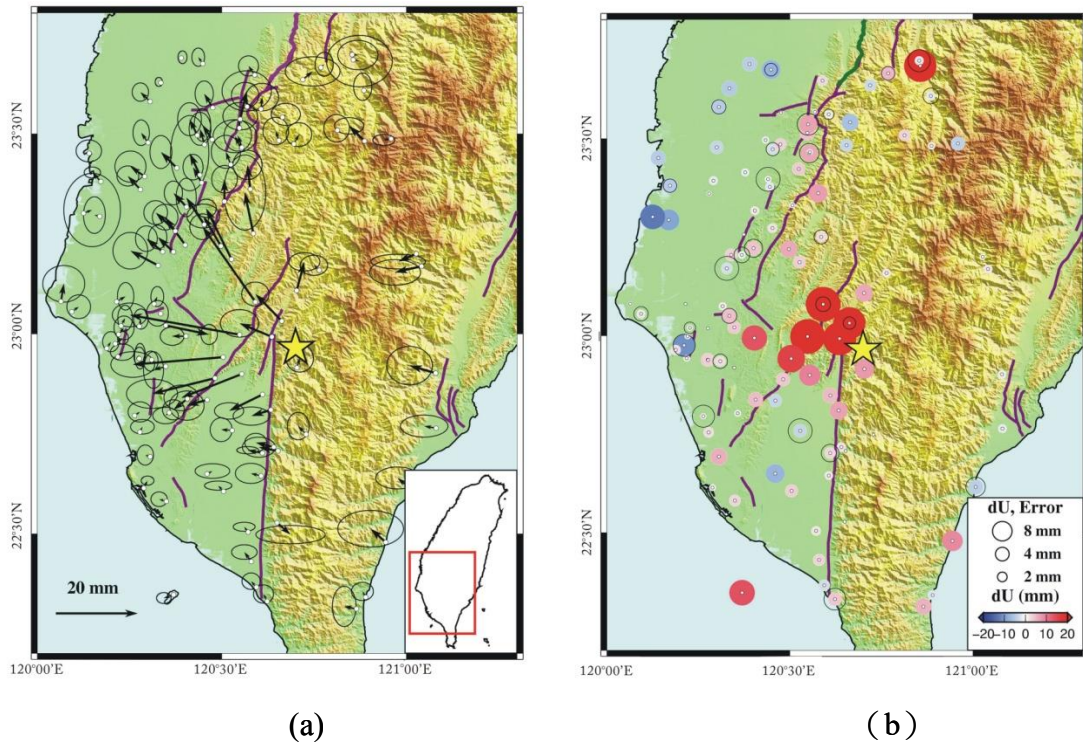
- transferred by the 1995 M-w = 6.9 Kobe, Japan, shock: Effect on aftershocks and future earthquake probabilities, *J. Geophys. Res.*, *103*, 24543-24565.
- Wang, W. H., 2000, Static stress transfer and aftershock triggering by the 1999 Chi-Chi earthquake in Taiwan, *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, *11*, 631-642.
- Wang, W. H., and C. H. Chen, 2001, Static stress transferred by the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake: Effects on the stability of the surrounding fault systems and aftershock triggering with a 3D fault-slip model, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, *91*, 1041-1052.
- Yu, S. B., H. Y. Chen, and L. C. Kuo, 1997, Velocity field of GPS stations in the Taiwan area, *Tectonophysics*, *274*, 41-59.
- Yu, S.B., and C.C. Liu, 1989, Fault creep on the central segment of the Longitudinal Valley fault, eastern Taiwan: Proc. Geol. Soc. China, *32*, 3, 209-231.
- Yu, S. B., and L. C. Kuo ,2001, Present-day crustal motion along the Longitudinal Valley Fault, eastern Taiwan, *Tectonophysics*, *333*, 199-217.

表一 計算甲仙地震在其它斷層系統造成之庫倫應力改變所使用之斷層參數

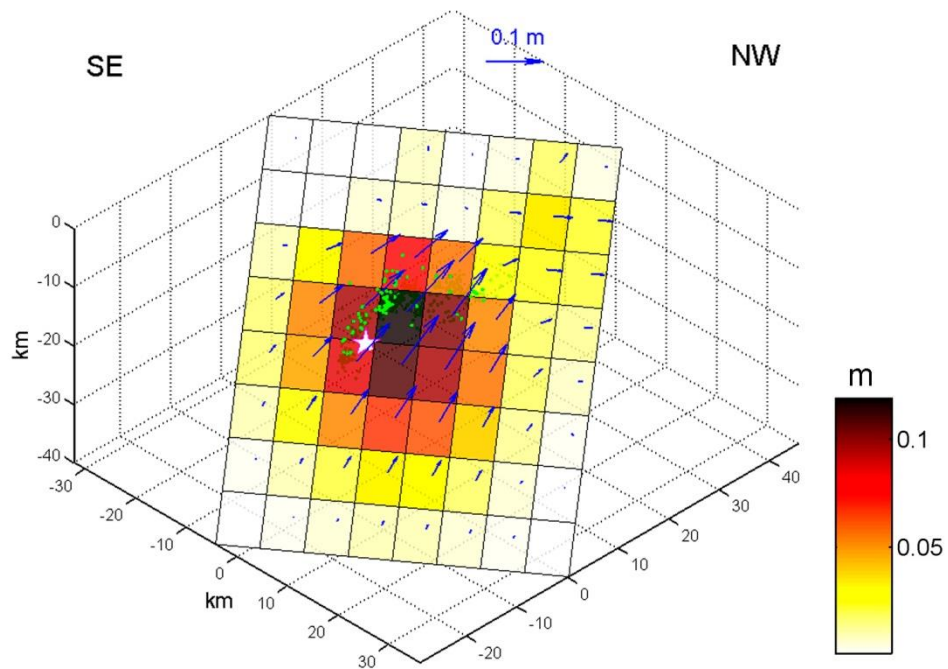
斷層名稱	走向 (°)	傾角 (°)	滑移方向 (°)	長度 (km)	寬度 (km)	深度 (km)
潮州斷層	4	75	45	80	16	15
旗山斷層	37	50	120	30	20	15
觸口斷層	30	35	90	40	26	15
新化斷層	250	80	180	10	15	15

表二 計算 331 地震在其它斷層系統造成之庫倫應力改變所使用之斷層參數

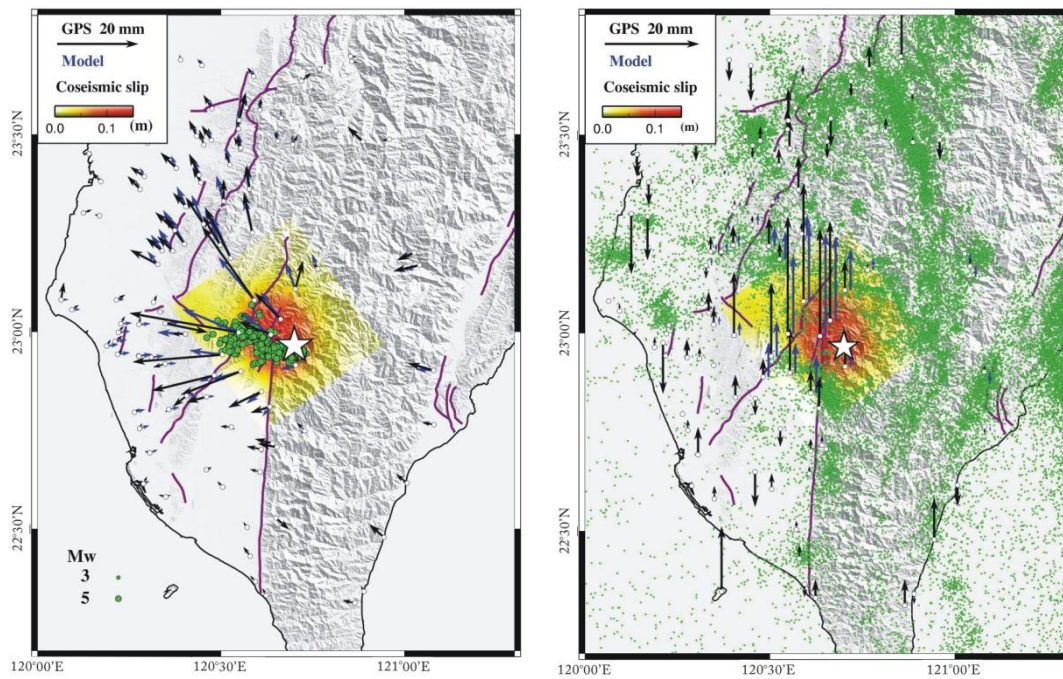
斷層名稱	走向 (°)	傾角 (°)	滑移方向 (°)	長度 (km)	寬度 (km)	深度 (km)
縱谷斷層北段	20	70	70	60	21	20
縱谷斷層南段	20	50	70	50	26	20
山腳斷層	45	65	-90	40	22	20
中央山脈斷層	202	65	-90	150	22	20



圖一、2010年甲仙地震同震滑移量。(a) 黑色箭頭代表由GPS觀測得到各測站之水平位移量及其95%信心區間誤差橢圓。紫色實線為地表主要斷層，黃色星號代表甲仙地震震央位置。(b) GPS垂直位移量，紅色圓圈代表抬升，藍色圓圈代表下降，黑色圓圈代表一倍標準偏差之範圍。



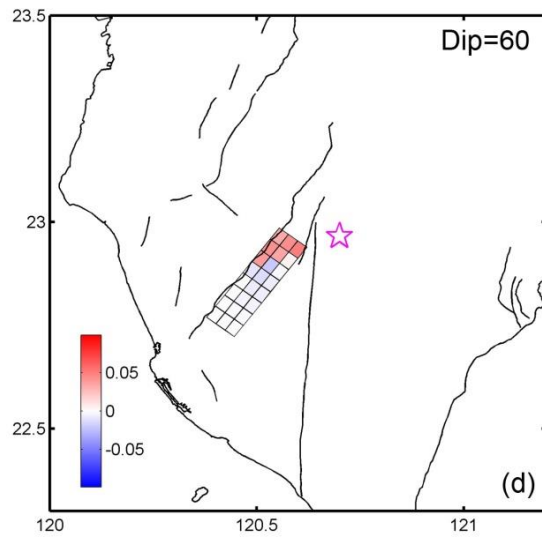
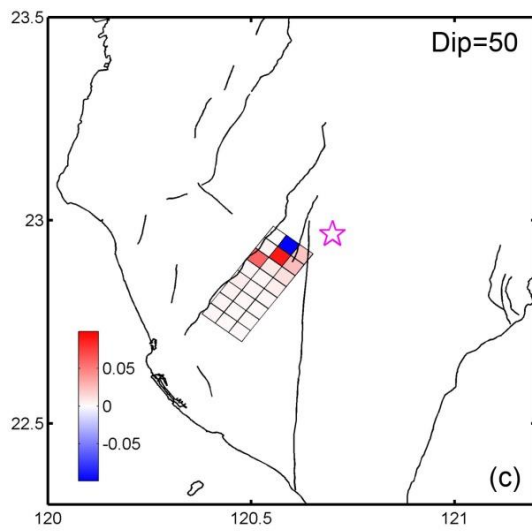
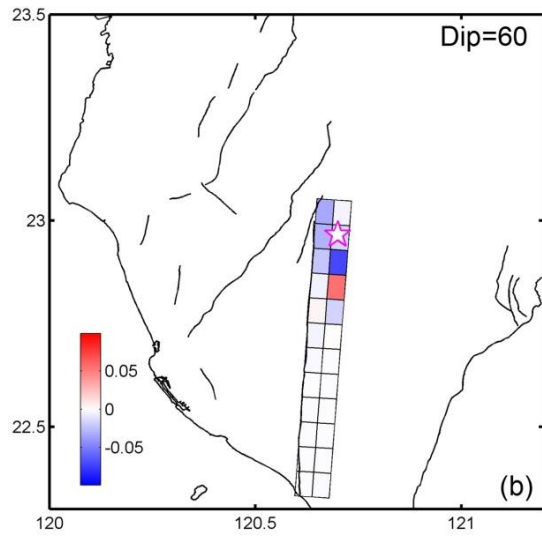
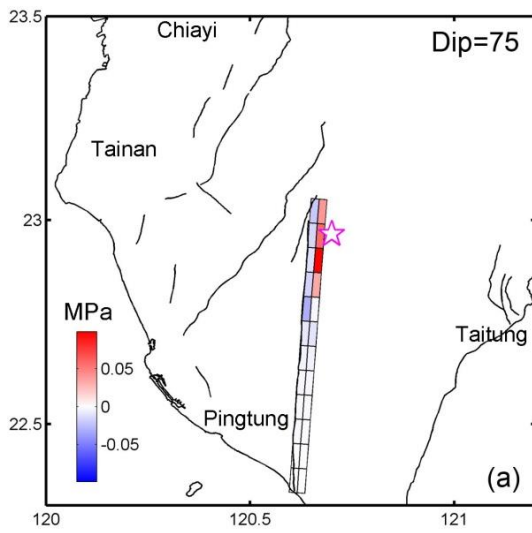
圖二、甲仙地震同震滑移分佈與斷層幾何形貌。斷層面走向為 $N324^\circ$ ，傾角 40° 向東北。藍色箭頭代表滑移方向，滑移量以紅黃色階作表示。白色星號代表震源位置，綠點為餘震分佈。此模型顯示沿斷層面有向上以及向左滑移之分量。

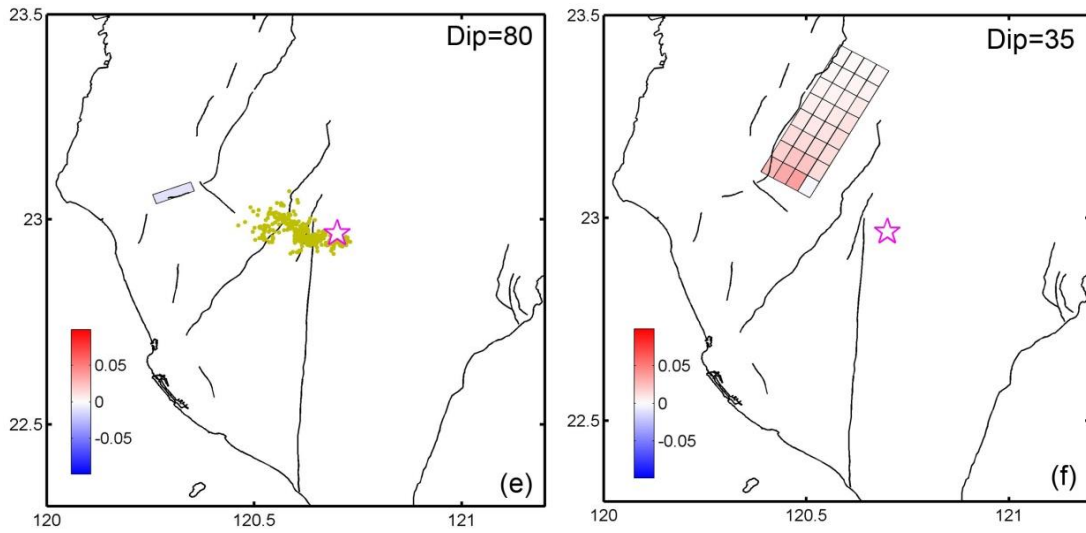


(a)

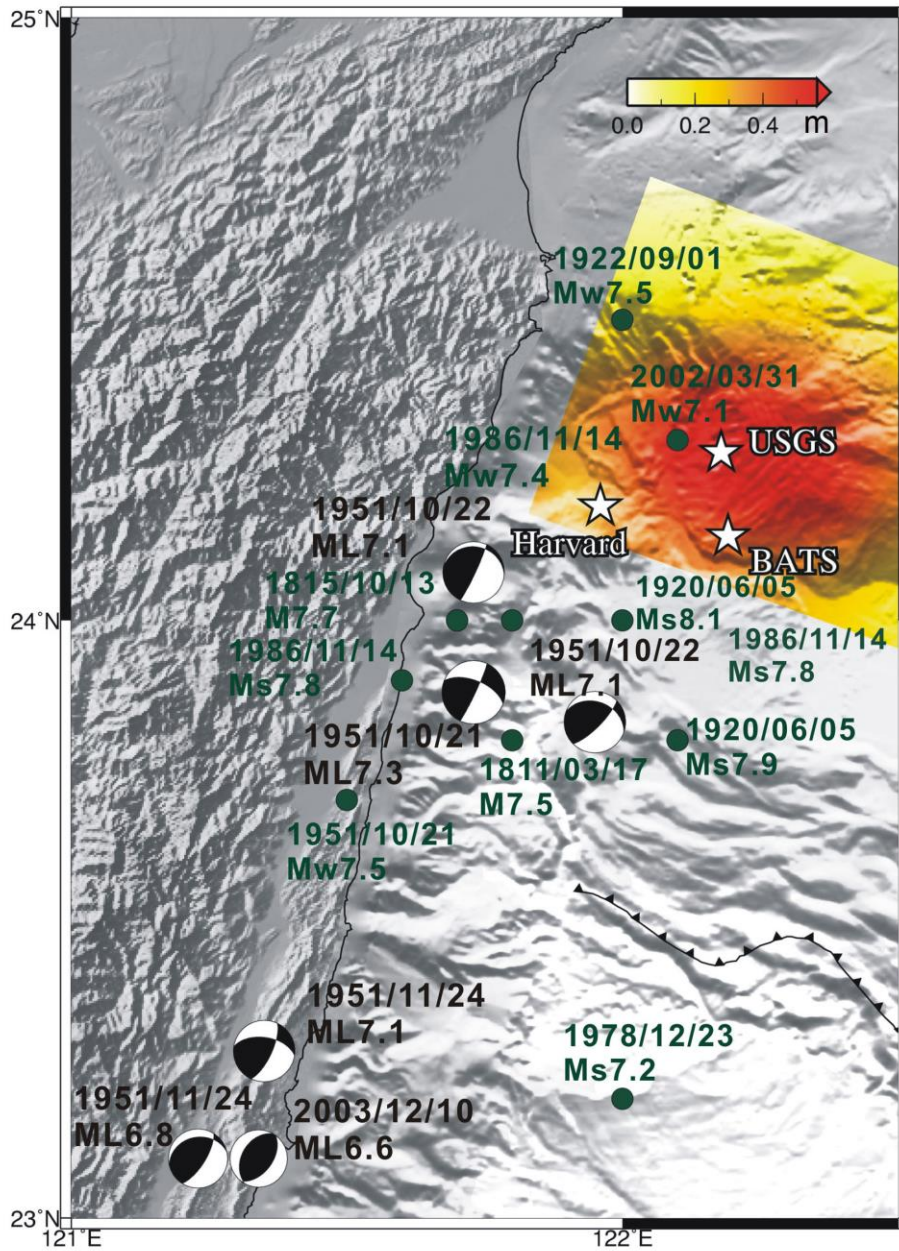
(b)

圖三、甲仙地震的同震滑移分布。(a) 色階代表將斷層同震滑移量投影至地表，黑色與藍色箭頭分別代表觀測與模式預測之水平位移，紫色實線為地表主要斷層，白色星號代表震央位置，綠點為餘震分佈。(b) 黑色箭頭代表觀測之 GPS 垂直位移量，藍色代表模式預測值。綠點代表從 1991 到 2007 年所發生之震源深度小於 40km 之地震 (Wu et al., 2010)。

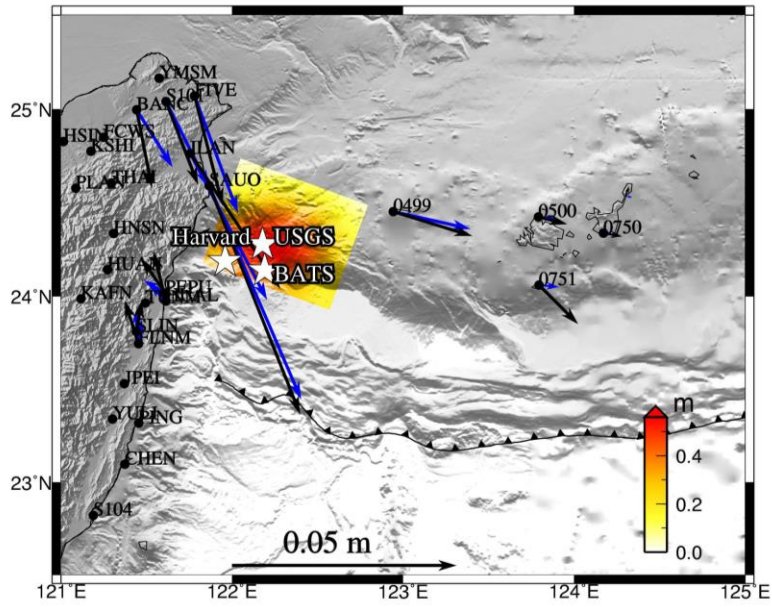




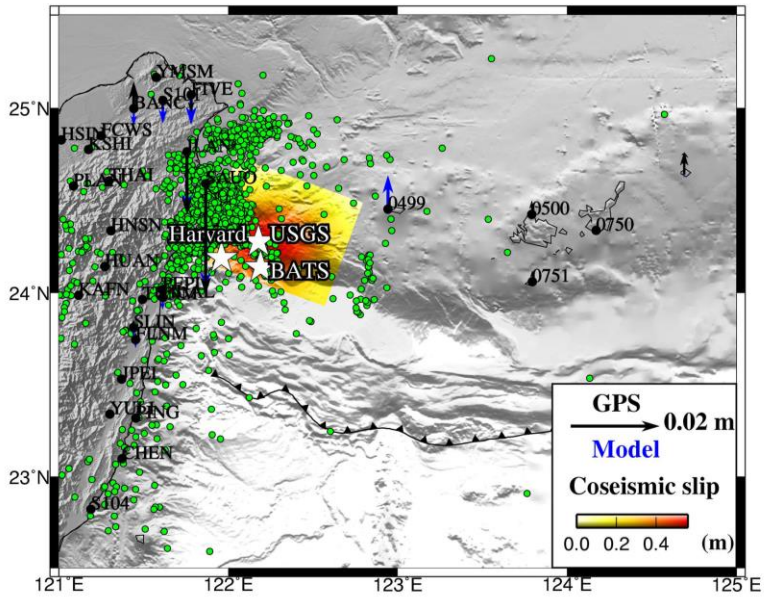
圖四、各斷層系統之庫倫應力變化 (ΔCFS)。 ΔCFS 為紅色代表庫倫破壞應力為正，主震造成之應力改變驅使斷層破裂；藍色為負值，顯示主震造成之應力改變抑制斷層破裂。(a) 潮州斷層 (傾角=75 度，向東)；(b) 潮州斷層 (傾角=60 度，向東)；(c) 旗山斷層 (傾角=50 度，向東)；(d) 旗山斷層 (傾角=60 度，向東)；(e) 新化斷層 (傾角=80 度，向北)，黃色點代表餘震；(f) 觸口斷層 (傾角=35 度，向東)，白色星星代表甲仙地震震央位置。



圖五、綠色圓點為 18 世紀以來地震規模大於 7.5 之地震及 20 世紀以來地震規模大於 7 之地震，海灘球為 1951 年花蓮-台東地震系列及 2003 成功地震之地震震源機制，紅黃色階為 331 地震之同震滑移量投影至地表。

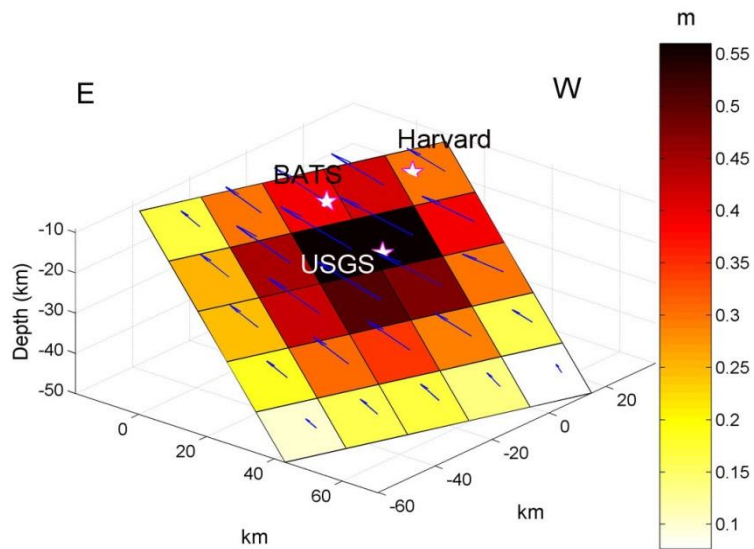


(a)

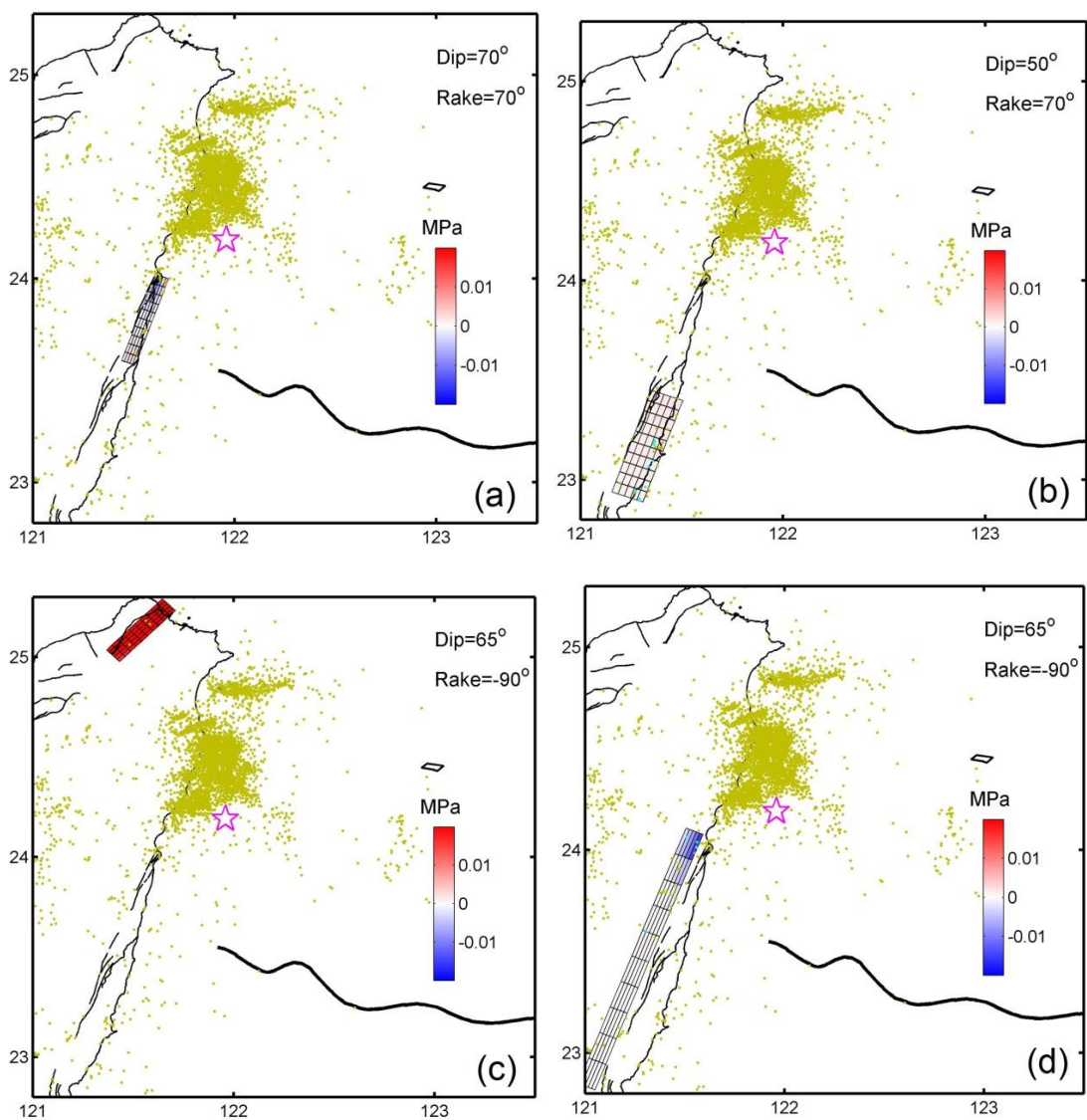


(b)

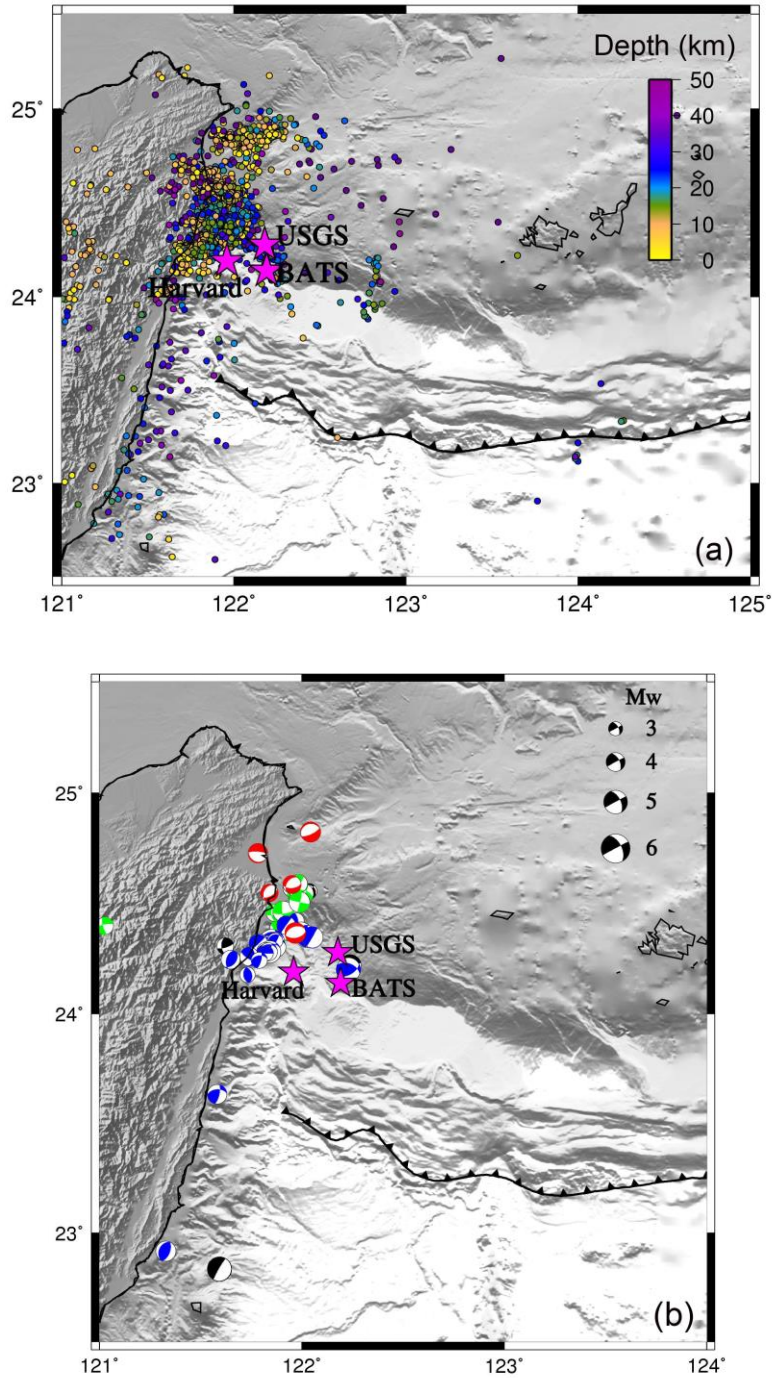
圖六、花蓮 331 地震的同震滑移分布。(a) 色階代表將斷層同震滑移量投影至地表，黑色與藍色箭頭分別代表觀測與模式預測之水平位移，白色星號代表不同機構求得之震央位置；(b) 黑色箭頭代表觀測之 GPS 垂直位移量，藍色代表模式預測值。綠點代表震後一個月震源深度小於 50 km 之地震。



圖七、花蓮 331 地震同震滑移分佈與斷層幾何形貌。斷層面走向為 N290°，傾角 30°向北。藍色箭頭代表滑移方向，滑移量以紅黃色階作表示。白色星號代表不同機構求得之震源位置。此模型顯示沿斷層面有逆衝及右移之分量。



圖八、各斷層系統之庫倫應力變化 (ΔCFS)。 ΔCFS 為紅色代表庫倫破壞應力為正，主震造成之應力改變驅使斷層破裂；藍色為負值，顯示主震造成之應力改變抑制斷層破裂。(a) 台東縱谷斷層北段 (傾角=70 度，向東)；(b) 縱谷斷層南段 (傾角=50 度，向東)；(c) 山腳斷層 (傾角=65 度，向南)；(d) 中央山脈斷層 (傾角=65 度，向西)。粉紅色星號代表 331 地震震央位置 (Harvard CMT)，黃色圓點為震後一個月深度小於 50 km 之餘震，藍色圓點為距目標斷層 ± 5 km 之地震。



圖九、花蓮 331 地震之 (a) 震後一個月深度小於 50 km 之餘震分布及 (b) 規模大於 4 之地震震源機制，紅色及藍色分別代表正斷層及逆斷層，綠色及黑色為走向滑移斷層及其它種類之斷層。

交通部中央氣象局
委託研究計畫期末成果報告

震源機制與地震破裂面之迅速判定

計畫類別：氣象 海象 地震

計畫編號：MOTC-CWB-100-E-08

執行期間：2011年1月1日至2011年12月31日

計畫主持人：趙里

執行機構：中央研究院地球科學研究所

中華民國一百一十一年十一月二十五日

政府研究計畫期末報告摘要資料表

計畫中文名稱	震源機制與地震破裂面之迅速判定		
計畫編號	MOTC-CWB-100-E-08		
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	1	執行期間	100年1月1日至100年12月31日
本期經費 (單位：千元)	參拾肆萬參仟		
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	14	使用語言	中文
中英文關鍵詞	震源機制，強地面運動，斷層面判定。 Focal mechanism, strong ground motion, fault-plane identification.		
研究目的	本計畫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内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。		
研究成果	從去年(99年)下半年以來，即時自動確定地震震源機制系統已經初步建立完成，開始對臺灣地區有感地震自動計算震源機制解，但結果仍需進一步仔細分析以提高該系統的適應性以及震源機制結果的可靠性和準確性。自動製作 shakemovie 及 PGA 和 PGV 分佈圖的流程及需要的應變 Green 函數庫也已經建成，能夠在獲得震源解以後自動計算 shakemovie 及 PGA 和 PGV 分佈圖。此外，以 2010 年甲仙地震為例，對有限震源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。		

<p>具體落實應用情形</p>	<p>即時自動震源機制確定系統已與地震預警系統連接運行，對臺灣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。目前自動製作 shakemovie 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 以及 PGA 和 PGV 分佈圖。</p>
<p>計畫變更說明</p>	<p>無</p>
<p>落後原因</p>	<p>無</p>
<p>檢討與建議 (變更或落後之因應對策)</p>	<p>本系統經運行證明實用可靠，但仍有一些技術問題需要在未來的運行過程中針對不同情況進行調整和測試，以提高本系統震源機制解的可靠性和精確性。目前看來自動 CAP 系統最需要改進之處是在多次疊代過程中對於測站及波形的取捨，雖然通過修改 script 對自動系統的取捨過程進行了改進，使得結果的可靠性提高，但仍有一些情形因自動系統的適應性較差，使得許多也許可以保留的測站和波形被捨棄，即使一些規模相對較大的地震最終也因為測站和波形過少而無法得到準確的震源機制解。因此還必需對自動系統進行持續的檢測和改進。此外自動系統在使用不同速度模型和波形擬合頻段方面的自適應性也需要通過測試而加以改進。</p>

100 年交通部中央氣象局委託研究計畫期末報告

計畫編號：MOTC-CWB-100-E-08

計畫名稱：震源機制與地震破裂面之迅速判定

計畫主持人：趙里，中央研究院地球科學研究所

一、前言

本計畫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。

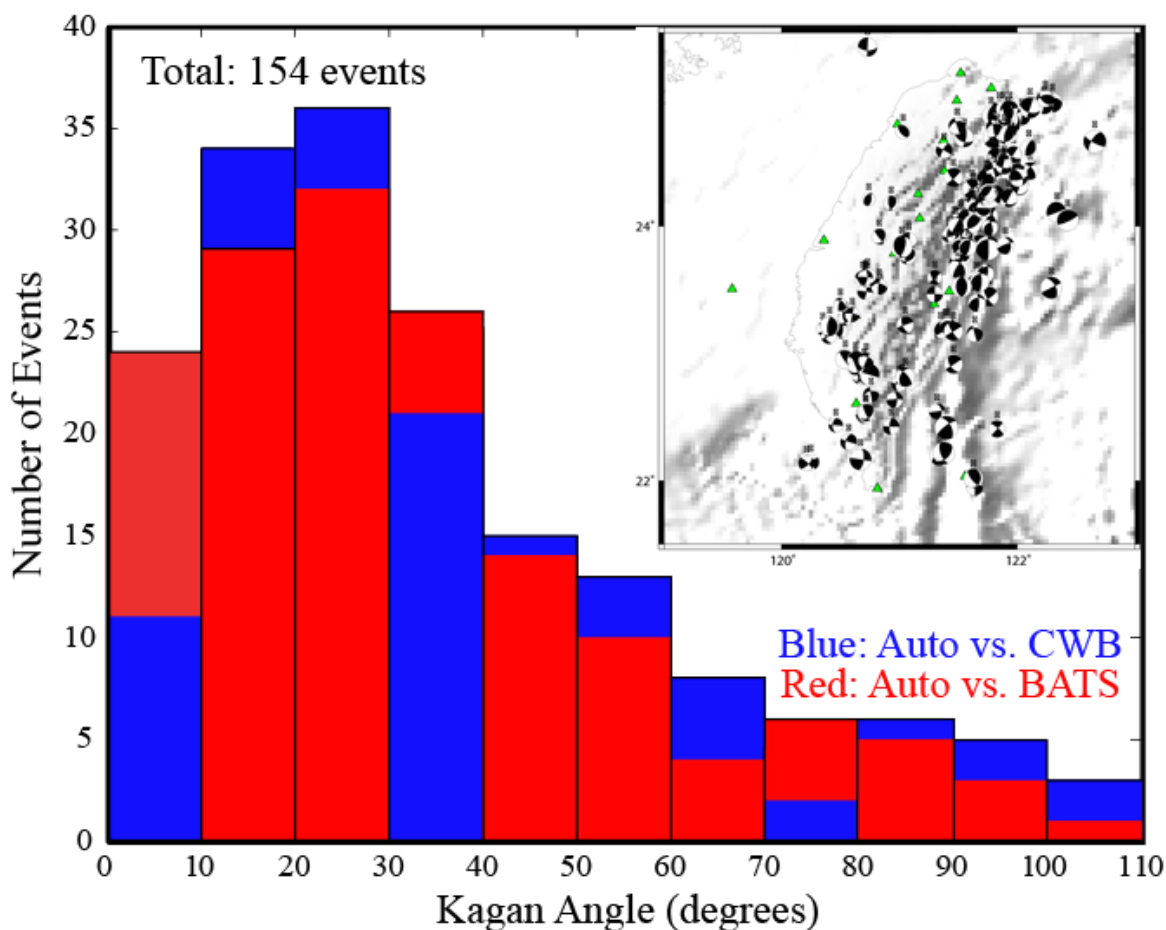
從去年(99年)下半年以來，即時自動確定地震震源機制系統已經開始運行，對發生在臺灣本島及其附近海域地區有感地震基本上能夠在三分鐘以內自動計算出震源機制解，但結果仍需進一步仔細分析以提高該系統震源機制結果的可靠性和精確性。目前自動製作 shakemovie 以及 PGA 和 PGV 分佈圖的流程也已經在中研院電腦系統開始運行，利用預先計算並存儲好的應變 Green 函數庫，該系統能夠在獲得震源解以後約 15 分鐘得到 shakemovie 及 PGA 和 PGV 分佈圖。此外，應變 Green 函數庫的另一個功效是它可以使即時判斷真實斷層面成為可能。我們以 2010 年甲仙地震為例，在考慮三維速度結構，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。

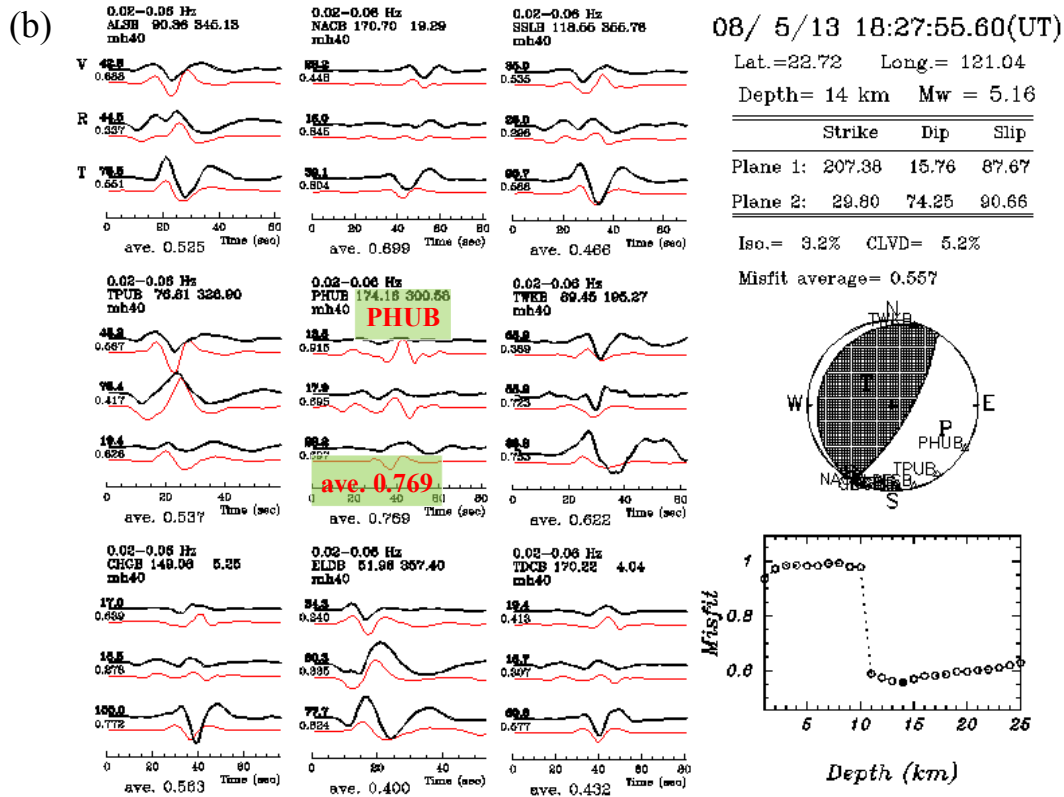
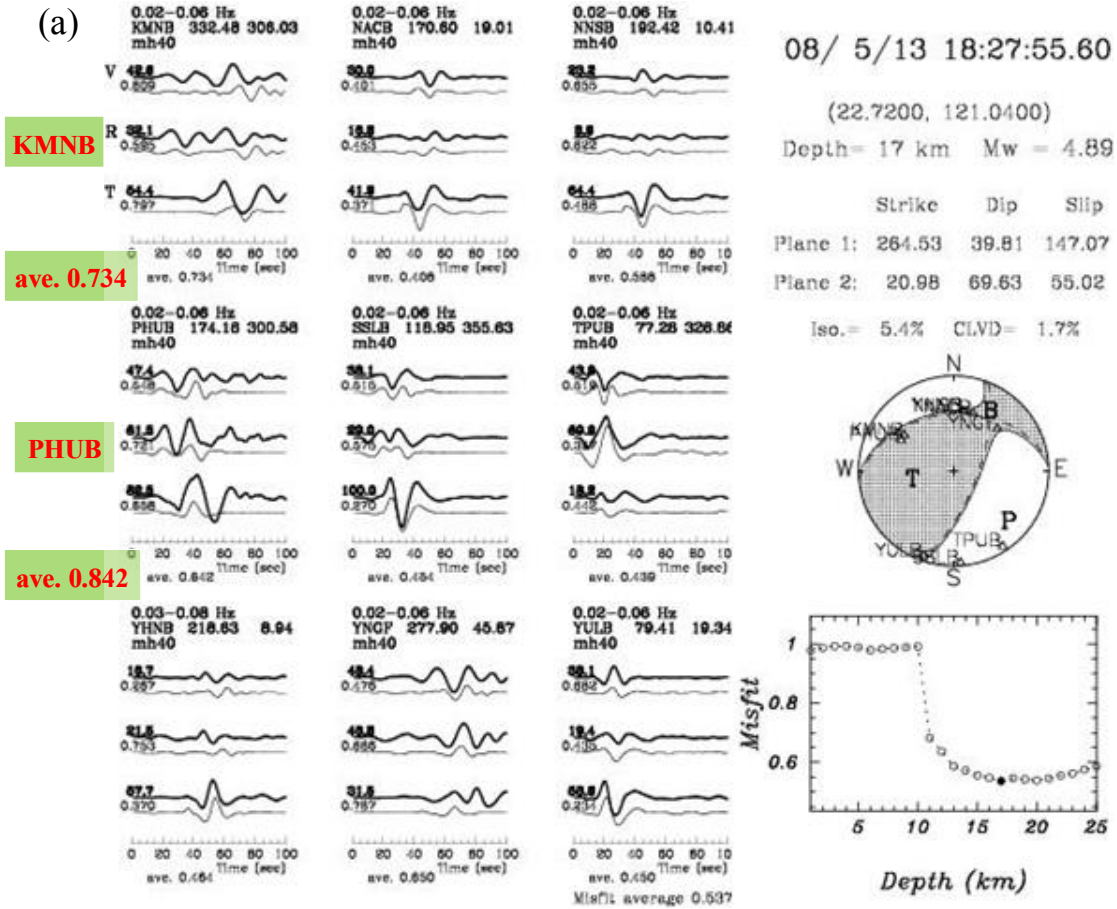
本系統從 2010 年 7 月開始試運行至 2011 年 4 月，對發生在臺灣本島及其附近海域地區有感地震的處理結果基本上令人滿意，如果以 Kagan 角度作為衡量不同震源機制解之間的一致性程度，有超過 60% 的自動震源機制解與氣象局和中研院地球所 BATS

的人工計算結果 Kagan 角度 (Kagan 1991) 小於 40° ，即結果基本一致。然而，2011 年 4 月以來，由於自動震源機制確定系統中準備地震記錄 SAC 檔案過程中的錯誤，致使自動系統之震源機制解無法使用。經檢查修改，目前自動系統已經恢復正常運行。由於地球所也安裝了該自動系統，因此在這裡我們用地球所自動系統計算得到的截止到 2011 年 11 月 17 日第 155 號地震的震源機制解進行分析。圖一顯示了自動震源機制解與氣象局和中研院地球所 BATS 的人工計算結果之間的 Kagan 角度，其中有 66% 的自動震源機制解與氣象局的結果 Kagan 角度小於 40° ，而與 BATS 結果 Kagan 角度小於 40° 的自動震源機制解有 72%。

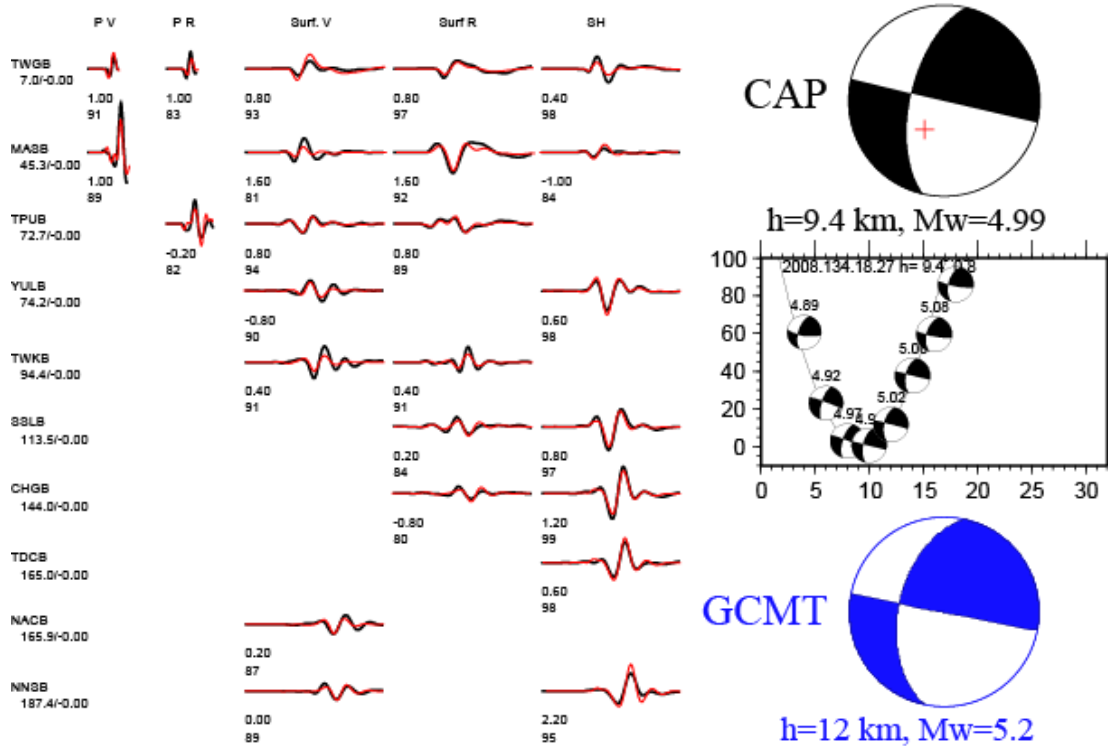


圖一、自動震源機制確定系統得到的震源機制解（內嵌地圖）及其與氣象局和中研院地球所 BATS 的人工計算結果之間的 Kagan 角度的統計。從 2010 年 7 月截止到 2011 年 11 月 17 日第 155 號地震，共有 154 個地震三種方法均給出結果。

另外一些有感地震由於規模較小或者位于距島上地震觀測網較遠或較深的地方使得震源機制解難以確定。除此以外，仍有一些地震由自動震源機制確定系統給出的結果與其它方法得到的結果相差較大。因此，自動震源機制確定系統在設計上仍有需要改進的地方，包括不同地區之間速度模型上可能的差別以及根據地震規模大小而改變波形擬合的頻段，這些改進需要後續對衆多震源機制解逐一進行細緻的分析，同時也需要與其它方法的震源機制解進行比較。在與及其與氣象局和地球所 BATS 的人工計算結果的初步比較中，我們也發現一些問題給這種比較帶來困難，如圖二所示。



(c) Event 2008.134.18.27 Model tw_010 FM 193 61 0 Mw 4.99 rms 2.658e-02 147 ERR 2 3 4



圖二、2008年5月13日台東地震震源機制解比較。(a, 前頁)地球所BATS結果，波形比較中黑綫為記錄，灰綫為理論地震圖。(b, 前頁)氣象局結果，波形比較中黑綫為記錄，紅綫為理論地震圖。(c) CAP結果，波形比較中黑綫為記錄，紅綫為理論地震圖。藍色震源機制解為Global CMT結果。CAP震源機制解與BATS，氣象局和GCMT震源機制解的Kagan角度分別為 74° ， 89° 和 11° 。

從圖二中四種方法的結果的比較看出，該地震的震源機制似乎更接近是CAP和GCMT的走滑型地震，而不是像BATS和氣象局的近逆沖型地震。從CAP結果的波形擬合情形來看，該震源機制解是可信的，與GCMT結果的一致性不大可能是偶然的巧合，因此有必要分析BATS和氣象局解的誤差的可能的原因。在(a)中BATS結果的波形比較中，可以看出在KMNB和PHUB兩個測站記錄與理論波形之間的misfit較大(ave=0.734和0.842)，其原因或許是由於從台東的震源到這兩個測站路經較遠，且沿這兩條路徑波速結構變化複雜，會與計算中使用的一維模型差別較大。因此，在確定震源機制解時，似乎有必要在保證足夠測站的前提下盡量去除波形misfit較大的測站。而在(b)中氣象局結果的波形比較中，PHUB測站不僅misfit較大(ave=0.769)，而且其振幅與(a)中BATS結果使用的同一測站振幅相差3倍以上。這種在個別測站的振幅誤差勢必會導致震源機制解和地震規模上的誤差。從圖二中結果的分析來看，儘管這是一個規模不小的地震，以目前的測站分佈應可得到可靠而準確的震源機制解。但是在震源機制求解過程中有必要對所使用的測站記錄質量以及記錄波形與理論地震圖之間的misfit設定適當的取捨條件，在最終所使用的測站數目及其分佈與波形的misfit之間找到一種更好的折中(compromise)。綜上所述，要找到圖一中一些地震自

動系統與其它方法結果之間 Kagan 角度較大的原因，必須對這些地震在不同方法中波形比較的情形逐一進行檢視以後才能確定。

三、即時自動強地面運動模擬系統的建立

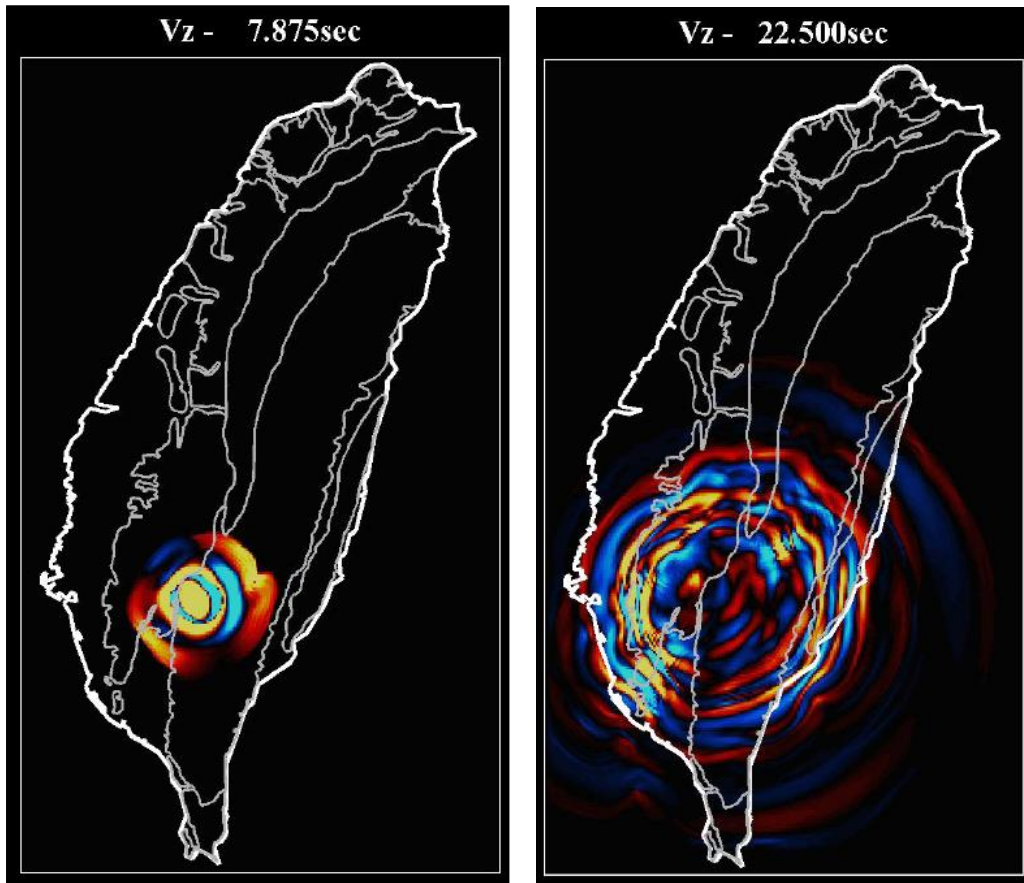
臺灣由於所處的地理位置使其面臨多種地質災害如火山，地震，土石流，甚至海嘯等等的威脅，社會大眾對有關資訊十分關心。在從事科學研究的同時，我們要讓研究成果為社會服務，以及時而準確的資訊，既為防災與救災提供幫助，又達到普及科學知識的目的。為此，我們利用現有地震波模擬方法，建立了一個根據地震預警報告提供的地震震源位置和震源機制即時自動計算臺灣全島強地面運動，並製作地震動動畫 (shakemovie)，以及計算和繪製 PGA 和 PGV 分佈圖的系統。

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考慮適當的場地放大修正(Wald et al. 2006)。圖三中以 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 2,200 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 公里處。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 2,200 個採樣點處的地面運動。

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。圖四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。



圖四、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。

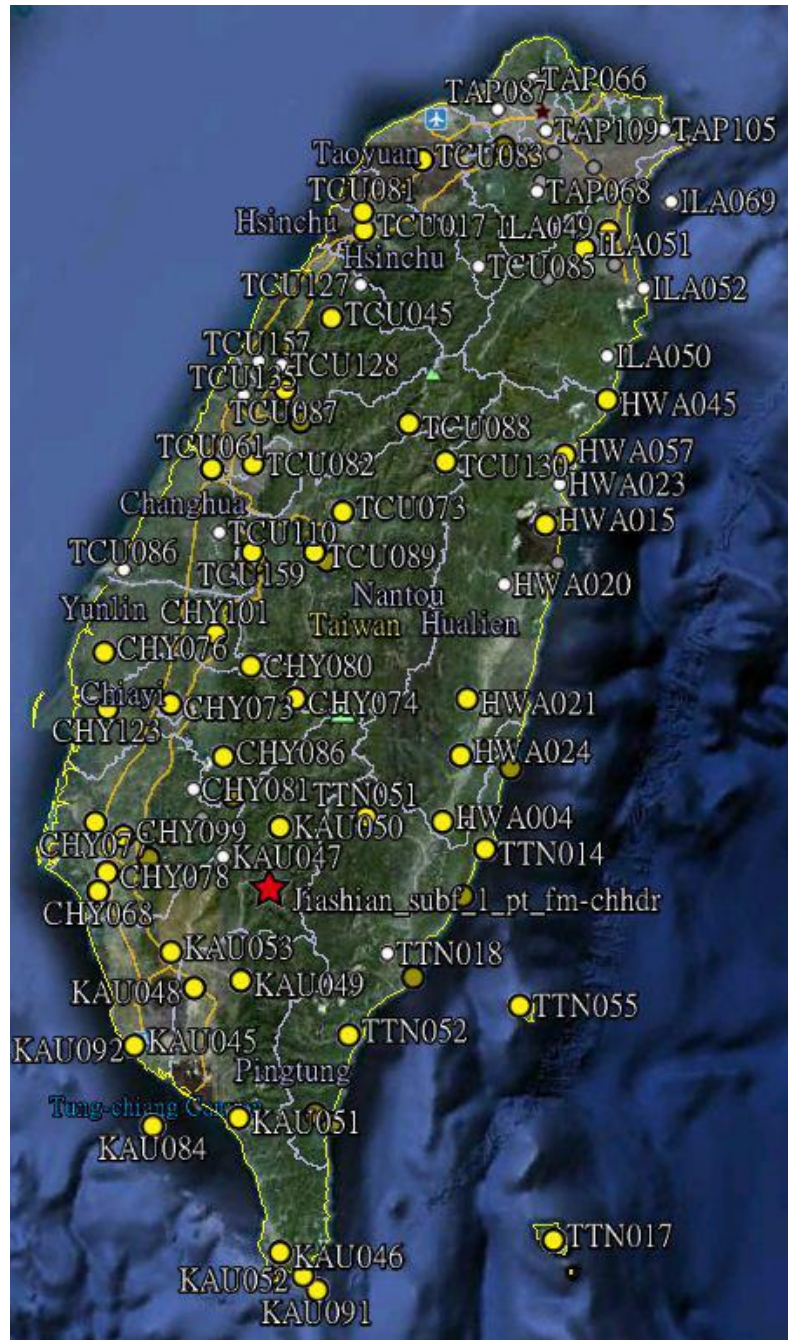
四、震源實際破裂面的迅速判定

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。

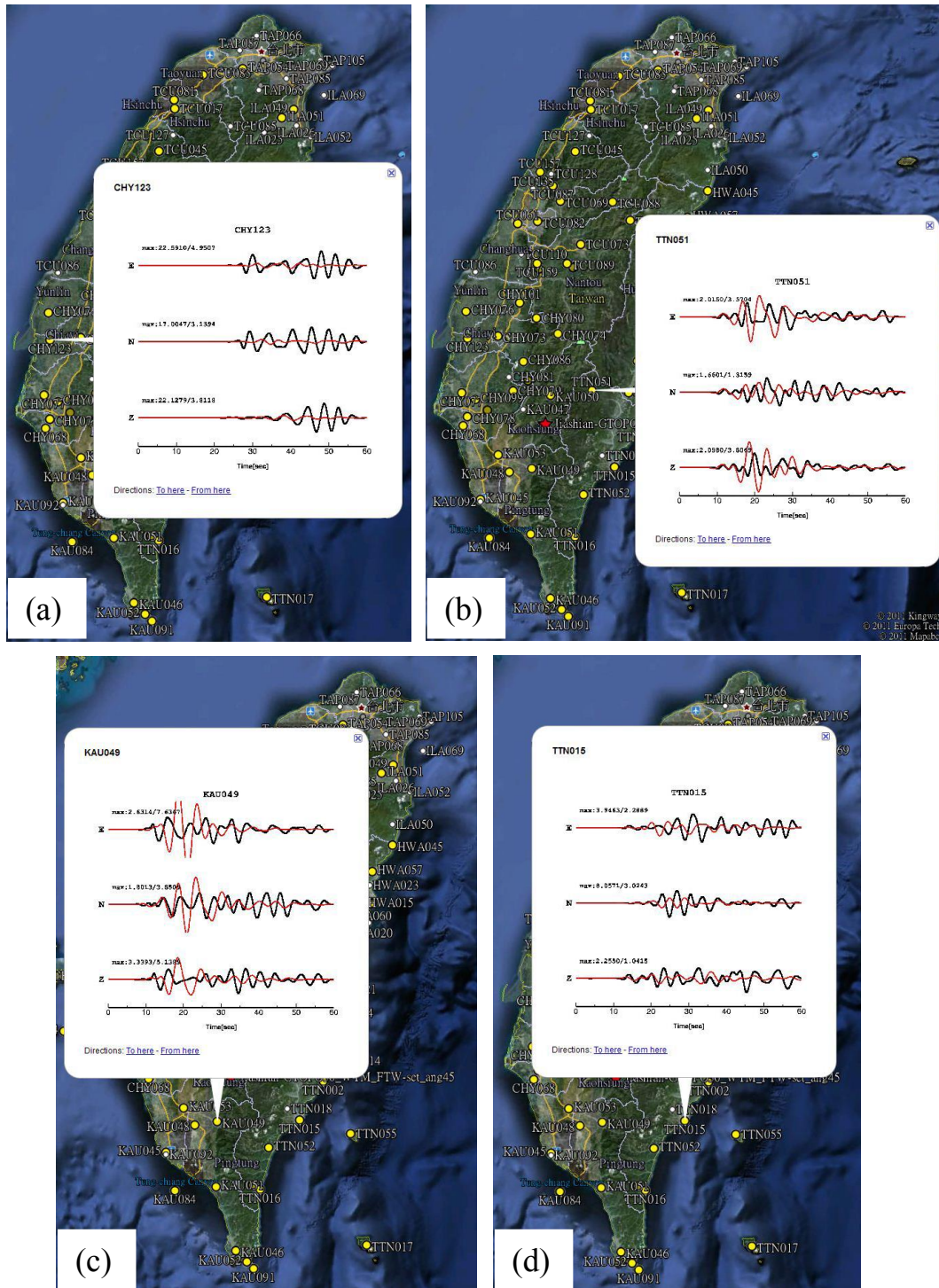
點震源模型的震源機制解有其特有的地震波輻射花樣，即地震波振幅大小隨方位的變化。這種點源的輻射花樣通常有空間上的對稱性，如在相反的方向上振幅相同，正是這種對稱性使得無法用振幅隨方位的變化來判斷兩個共軛平面中哪一個是真正的斷層面。然而在考慮震源的有限面積以後，這種輻射的對稱性會遭到破壞，兩個共軛平面的輻射振幅會具有不同的方位變化特徵。因此，在得到點源震源機制以後，如果我們分別以兩個共軛平面為震源面，並以有限震源模型計算不同方位上的地面運動，並與觀測的地面運動作對比，就能夠從兩個共軛平面中找出一個對地面運動預測較好的平面，從而判斷真正的地震斷層面。

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

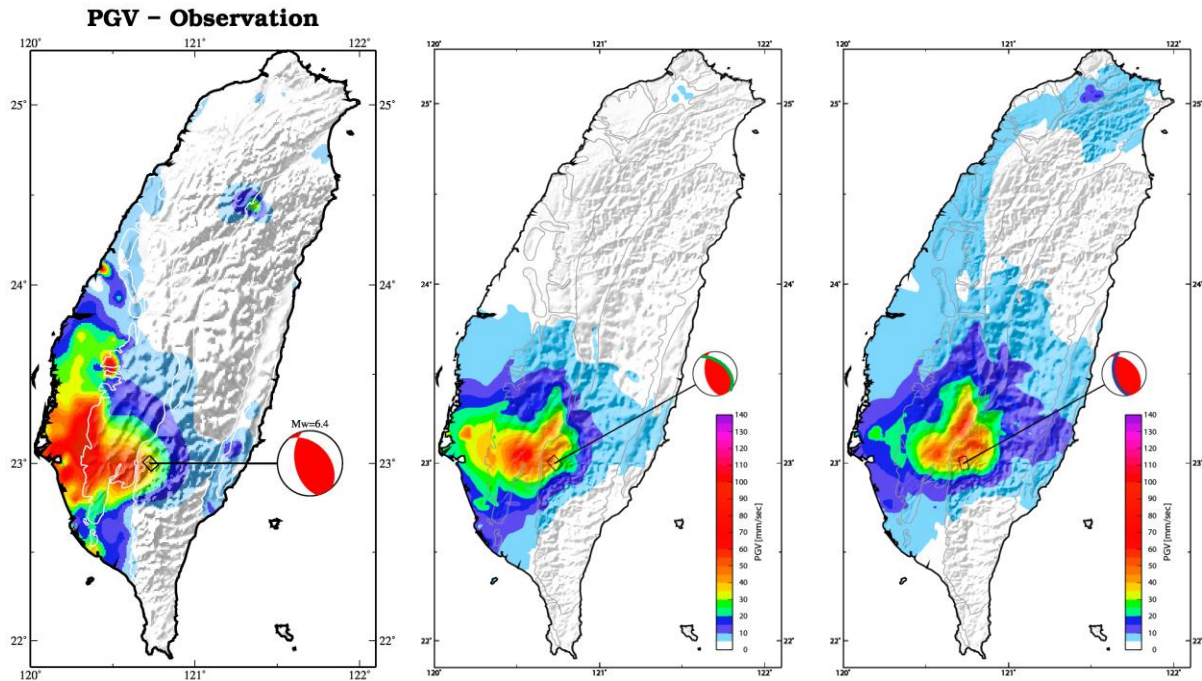
象局強地面運動即時觀測台站处的地面運動，來與觀測記錄作對比。圖五顯示甲仙地震震央位置和即時強地面運動台站分佈。從位于臺灣本島的 95 個即時強地面運動台站中，我們選出 61 個三分向記錄波形訊雜比較高的台站計算了理論波形。在強地面運動的數值模擬中，我們使用了 Wu et al. (2007) 的三維速度模型以及 GTOTO30 的地表地形變化 (http://eros.usgs.gov/#/Find_Data/Products_and_Data_Available/gtopo30_info)，圖六中顯示了點源所模擬的強地面運動與觀測記錄的對比。



圖五、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。



圖六、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在沿西北走向的斷層上逆沖滑動的結果。



圖七、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 分佈圖比較如圖七所示。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。

五、誌謝

自動即時震源機制確定系統在中央氣象局數據系統的運行及其結果分析是在中央氣象局陳達毅先生和廖哲緯先生的幫助下完成的。

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.