

# 彙整分析台灣地震前兆監測資料

## Integrated and analysis on the earthquake precursor monitoring data

主管單位：交通部中央氣象局

葉義雄

Yeh, Yih-Hsiung

中央研究院地球科學研究所

### 摘要

地震前兆與預測之研究被認為是一種直接而且有效降低大地震之衝擊之方法，也一直是國際地球科學界長久以來之重要目標。雖然目前還未獲得正面之結果，但經過多年的努力，有不少可能與地震發生有關之前兆現象被觀測到，很值得地震學界作進一步的深入探討。本計畫整合以下四個子計畫所組成，包括高取樣率 GPS 定位解算及其在地震學之應用研究；GPS 應變的建立與應用；重力、地磁變化與地震活動相關性研究；台灣 GPS 連續觀測資料分析與地震前兆偵測研究。利用現有之豐富資料與人力資源，希望藉由彙整和分析這些完整且系統性的地震活動、GPS、重力和地磁的監測資料，尋找其間的相關性，進而提出有關地震前兆現象之物理機制及資訊。在執行上述子計畫時，我們將繼續收集國內外地球科學界有關地震前兆之相關研究成果，以調整台灣地震預測之未來研究方向。

**關鍵詞：**全球定位系統、重力、磁力

### Abstract

Earthquake prediction is one of the main goals in the seismological research in the world. Some valuable observations and results about the earthquake precursors have been obtained in the past decades, even although they are not really promising for predicting earthquake yet. This project consists of four inter-related sub-projects, including high-rate GPS processing and its applications in seismology, establishments and applications of GPS strain, study of the gravity and geomagnetic variations related with the seismicity, and analysis of continuous GPS data related with earthquake precursor. We would like to integrate and analyze all these studies to look for possible earthquake precursors. And we also try to establish the physical mechanisms of the precursory phenomena. In the process of conducting these sub-projects, we shall collect continuously all results on the earthquake prediction and then make a suggestion for the future direction on the study of the earthquake prediction.

**Keywords:** GPS, Gravity, Magnetic

## 一、前言

由近20年間對地震密集觀測的結果顯示，台灣陸地及鄰近海域，保守估計每年平均約發生15,000次地震(Wu et al., 2008)。由近年全球衛星定位系統(GPS)之測量資料證實，菲律賓海板塊與歐亞大陸板塊以每年約8公分的速度相聚合，顯示板塊擠壓依然持續且活躍地進行中，本島大小地震活動仍將會不斷的發生。

根據過去的資料，台灣地區曾遭受許多次大地震的侵襲，並造成嚴重生命與財產的損失。台灣的災害性地震主要發生在西部地區，如1906年的梅山地震及1935年的新竹苗栗烈等。梅山地震地震共有1,258人喪生，而新竹苗栗烈震更奪走了3,276條人命。發生於1999年9月21日凌晨發生芮氏規模7.3的集集大地震(Ma et al., 1999)，此地震及其餘震造成超過2444人的死亡及8700多人的輕重傷、超過10000間的房子全倒或半倒，使得十萬多人無家可歸，並且有許多棟公共建築物損毀。災區的範圍很大，北至台北，南達嘉義，可說是台灣有史以來損失最嚴重、災區範圍最廣的一次天然災害。

地震前兆與預測之研究被認為是一種直接而且有效降低大地震之衝擊之方法。地震發生的主要原因，是由於地層受到大地應力作用，開始變形且累積能量，直到地層無法承受而斷裂，將累積的能量在一瞬間釋放出來，即所謂的地震。地震預測就是希望在地震醞釀過程中，找出相關的蛛絲馬跡。臺灣地區大規模地震發生頻率高且震央位置較為集中，同時台灣擁有非常高密度之各式各樣地球科學觀測系統，故臺灣為世界上少有且絕佳之地震前兆觀測及理論模式研究場所。實際上過去台灣已經有些地震前兆之相關研究與觀測，並且已經獲得不少有意義之結果。

一般認為較可信賴之地震前兆，必須同時仰賴多項觀測結果方可達到預測之目標。本計畫整合多位不同專長之學者專家及多種觀測資料，共同分析各種資料異常現象，同時也針對較大規模之地震發生前後，檢視各種觀測資料是否有前兆現象。

## 二、研究方法

中央氣象局建置台灣地區GPS觀測網，共有152全球衛星定位連續觀測站，全省地磁連續觀測網設置11個磁力連續觀測站及前兆地球物理資料庫，是本計畫執行最主要的資料來源。

本計畫主要整合地殼變形前兆之研究人力及彙整其他單位的資料，尋找其間的相關性，以期了解台灣地區在孕震過程所衍生之地震前兆特性與可能的異常現象，進而提出造成地震前兆現象之物理機制。四個子計畫包括：

(1) 子計畫1—台灣GPS連續觀測資料分析與地震前兆偵測研究：目前由中央氣象局、中央研究院、內政部、中央地質調查所及其他機構營運之台灣GPS連續觀測網測站總數已超過370站。台灣GPS連續觀測網持續運轉所蒐集的大量GPS連續觀測資料，可用於偵測微小地形變訊號，以掌握地殼應變累積的時空變化及其與地震活動的相關性。當有大地震發生時，更可精確量測震前、同震與震後變形，提供孕震與發震過程及斷層力學研究的重要素材。將分析『台灣GPS連續觀測網』之時間序列資料，估算年週期及半年週期變化量、同震位移量、及震後變形，並求得較可靠的地殼運動速度及其誤差值。再根

據精確估算之台灣地區速度場或座標變化推求應變率及其變化。以了解地殼應變在空間之變化與斷層活動及板塊運動的關係，做為評估地震潛能的參考；並探討地殼形變時空變化與地震活動之關聯性，偵測可能之地殼形變地震前兆現象。

(2) 子計畫2—GPS應變的建立與應用：該計畫在協助中央氣象局，建立GPS數據處理及應變技術，應用於監測短中長期地表變動，並尋找可能的地震前兆的異常應變。利用連續GPS站和井下應變儀觀測資料，計算各地區的GPS應變時間序列，並比對井下應變儀資料，可以用來探討地震與地殼應變間的關係，或是其他因素如颱風、水庫蓄水等因素與地殼應變間的關係，並用來對地殼應力變化的原因做最適當的解釋。今(101)年度研究目標在針對GPS在跟井下應變資料與地震資料做比對時有較大跳動的問題提出解決的方案。計畫中在高頻地殼位移方面使用四組地震案例之GPS數據經過處理及分析，結果顯示所發展之技術，足以偵測因地震而導致的地表變動。

(3) 子計畫3—重力、地磁變化與地震活動相關性研究：本計畫將分重力及磁力兩部份進行。重力方面，選擇橫跨觸口、玉里和池上斷層的重力基點進行重複觀測，以監測該斷層活動所衍生的重力變化。該計畫新增研究方法是選擇強烈應力作用地區，於適當的GPS觀測站進行重力重複觀測，以傅立葉分析法分離研究地區重力場之非潮汐變化的長波長和短波長項，利用重力場產生的散度場計算公式，求出各時段的散度值，並分別繪製出低頻項、高頻項及散度等值線圖，再結合該地區的地震活動和地殼深部構造資料進行綜合分析研究，探討其可能的地震前兆訊息及物理機制。磁力方面，將藉由中央氣象局全省地磁連續觀測網資料，分析磁力變化與地震發生的關聯性。另該計畫也利用位於中正大學三分量磁力站的秒數據資料，尋找異常高電導率物質存在的方向。本研究利用該異常方向與地震震央方向做比對，結果顯示此帕金森矢量異常方向與地震方位具78%的相關性。因此帕金森矢量扣除海岸效應與地下物質或構造所得到的異常，將可以用於地震前兆的研究上。

(4) 子計畫4—高取樣率GPS定位解算及其在地震學之應用：該研究以高取樣率GPS觀測量解算三維位移技術為出發點，並與地震儀觀測進行比對分析，評估高頻GPS作為地震儀之可行性。101年度計畫蒐集台灣210個高頻GPS連續站資料，計算2011年3月11號日本仙台地震時所造成台灣的地表位移。並同步蒐集15個台灣之寬頻地震站，並進行積分處理求得位移，與GPS結果進行比較與驗證。經由位移場之呈現，觀察到了在發震時間後約590秒出線了西北-東南向擾動的Love波，最大之振幅可到達16 cm；並於710秒產生了逆時針旋轉的Rayleigh波。此外，利用高密度高頻之GPS三維位移量，針對台灣幾個大地震時間段進行高時間解析之斷層滑移模式，進而加深了解台灣活動斷層滑移特性，101年度計畫利用特高頻GPS觀測網，以屏東霧台地震為例進行分析與探討。

### 三、研究成果

#### 3.1 針對2月26日霧台地震進行不同觀測資料的比對

2012年2月26日10時35分發生芮氏規模6.4之強震，震央位置為22.75°N，120.75°E，位於屏東縣霧台鄉；震源深度為26.3 km。地震震源機制為帶輕微走滑分量之逆斷層，P波初動解顯示斷層走向及傾角分別為 $315^{\circ}\pm 10^{\circ}$ 及 $30^{\circ}\pm 10^{\circ}$ ，斷層滑移方

向角為  $55^{\circ}\pm 10^{\circ}$  (圖一；張建興，2012)。地震發生後，本計畫邀集各子計畫主持人，針對 2 月 26 日霧台地震進行不同觀測資料的比對，並探討有些異常資料和大地震之關連性。

子計畫 2 根據霧台地震前 3 天及震後 3 天 GPS 連續觀測之坐標平均值估算同震位移，發現各測站之同震水平位移量並不顯著，在震央附近之水平位移量為 4~8 mm，運動方向大致呈西南向，垂直位移量為 -5~10 mm，水平及垂直位移量的誤差分別為 2~4 mm 及 2~10 mm (圖二)。以 RunGamt 自動化 GPS 資料處理系統解算 2005 年 1 月至 2012 年 8 月各測站每天之 ITRF2005 坐標；結合一段期間的每日解而獲得各測站之坐標時間序列，據此探討 2012 年霧台地震前震央區附近的地殼應變時空變化。在霧台地震之前約 4 年及震後約半年期間，坐標時間序列與面膨脹量均呈相當線性變化，無明顯地震前兆及震後變形現象。

子計畫 3 研究目標在尋求較大地震前後之 GPS 應變，並比對 GPS 相位解算位移與地震儀積分位移之差異，應用不同的 GPS 相位解算方式，比對因地震而引起之位移時間變化差異。里港 GPS 站(LIKN)較靠近震度五級的三地門，最近之地震儀為 KAU070，相距超過 4 公里，且記錄時間未鎖定，但初步比較結果，證實此位置差距及時間問題尚不至於造成無法比對。圖三左為 KAU070 地震儀(Seis 紅色線)及里港 GPS 站(Doppler 藍色點線)向東速度結果，兩種結果顯示地震發生時間相當吻合，而速度大小變化則有些差距。地震儀速度經積分後之位移量顯示於圖三右的 Seis 紅色線，PR 藍色點線則為 GPS 站平滑化後虛擬距離解算向東位移結果，圖三右兩種儀器結果皆明確顯示地震發生時間，而向東位移變化亦十分吻合。

子計畫 4 以屏東霧台地震為例，利用特高頻觀測網來探討特高頻 GPS 定位應用於地震波獲取之可行性。結果發現測站 HSHS 與 LOMU 在 17-25 秒間有不同於背景雜訊 1-3 cm 之擾動。FUAN 站則以約 1.3 cm 之震幅持續至 38 秒。MOV1 站則以頻率約 2-3 Hz，在 24 秒至 30 秒間以約 1 cm 之振幅持續擾動。經由對各站之頻譜分析可發現，地震波訊號頻段即在 0.2-2 Hz。而在此 4 站中，地震波信號頻率最高為 MOV1 站，可達 3 Hz。而經由取樣頻率與所獲取之地震波波形之關係，發現就屏東霧台地震而言，利用 10 Hz 以上之觀測才足以有效擷取地震波波形，此也凸顯了特高頻 GPS 觀測網之可貴。

### 3.2 分析 2010 年 0304 地震的 GPS 資料

2010 年 3 月 4 日在台灣西南部發生規模 6.4 的甲仙地震，根據其斷層機制解求得此地震由西北-東南向斷層所造成，然而此斷層走向與台灣大多數的地體構造走向(東北-西南向)垂直，因此認為是盲斷層錯動所致。本研究使用 100 個中央氣象局 GPS 觀測站的觀測資料，以金門站為參考站，採用 Chen et al. (2011) 年的分析方法，檢驗盲斷層所引發的地震是否可能造成地殼變形異常。在扣除短期擾動(雜訊與同震效應)與長期干擾(板塊運動與大氣擾動造成的半年週期擾動)後，GPS 殘餘位移方向將呈現雜亂無章，此表示未有明顯的地震相關應力作用於台灣地區的地殼；反之，如果一個區域的 GPS 殘餘位移朝近同一方向運動，意味著應力累積於地殼，很可能有較大地震將要發生。

圖四顯示運用 Chen et al. (2011) 方法所得到甲仙地震前 20 天至地震前 1 天的地殼

變形結果。於地震前 20 天至地震前 8 天，除台灣東北部與中部西側受到小規模地震影響導致 GPS 殘餘方向朝同一方向運動(即呈現黃色)，全台灣多數區域的 GPS 殘餘方向，並沒有明顯的方向性(粉紅色)；甲仙地震 8 天前，台灣西南部的 GPS 殘差方向開始朝東北方向運動。此朝東北的運動方向與盲斷層的走向垂直，這與 Chen et al. (2011) 研究雲林古坑地震的觀測結果一致。此範圍逐漸擴大，於地震前 6 天涵蓋全台灣。然而一個沒有明顯相同 GPS 殘差運動方向的區域，於甲仙地震 7 天前出現於台灣南部。如黃色區域表示地震應力干擾地殼的區域，GPS 殘差運動方向表示地震應力干擾地殼的方向，則地震前 7 天台灣南部出現的粉紅色區域表示：朝東北向的地震相關應力於該粉紅色區域受到阻礙。該地震相關應力仍持續干擾台灣至 2010 年 3 月 4 日發生甲仙地震，而粉紅色區域的受力前緣恰為甲仙地震震央的位置。

該結果顯示，地震前的應力干擾可能存在著兩種完全不同的形態，一者為甲仙型態：即大範圍的應力干擾，於小區域該應力干擾受到阻礙，最終發生地震。另一者為名間型態：即大範圍的應力干擾，於小區域該應力干擾產生高度平行的地殼運動，最終於該區發生地震。

### 3.3 在池上地區選擇適當的 GPS 測點進行重力重複觀測

此項觀測結合了 GPS 及重力觀測。重力場的時間變化包含潮汐變化和非潮汐變化。非潮汐變化之重力場時間變化，認為是由地面位移和地球質量分布變化所引起的。一般而言，深部因素所造成的重力變化在空間會產生長波長之重力異常，在時間上為長周期的變化；而淺部因素所造成的重力變化則相反。張伯宏等人(1997)根據前述理論，在河西—祁連山地區曾進行重複重力測量的地震前兆研究，認為無論是長波長或短波長結果圖，其等值線走向大多數與區域構造的走向相一致而重力短波長項的變化與地震活動有比較直接的關係；重力場隨時間的長波長變化是由地殼深部物質遷移所引起。該子計畫選定池上斷層兩側七個 GPS 連續觀測站進行重力重複測量，GPS 所解算出高程的變化是為並與 GPS 連續觀測資料進行比對，對於長波長和短波長項及重力梯度、散度場，探討其可能的地震前兆訊息及物理機制。

### 3.4 2011 年 3 月 11 日日本東北外海大地震之相關研究

2011 年 3 月 11 日日本東北外海發生規模 9.0 的大地震後，我們發現地磁連續觀測網所有的測站都記錄到地磁場受擾動的現象。全台磁力站在地震發生後約第 18 分記錄到低頻與高頻的磁場變動訊號，低頻振幅約 2nT。同時在日本與中國大陸也記錄到相同週期及振幅有的磁力異常訊號(圖五)。將測站與磁力資料依照與震央距離排序可以發現，低頻的擾動與震央距離有一定的相關性。越接近震央的磁力觀測站越早記錄到擾動的訊號，初步研判應該和這個地震有關。而在日本、大陸和全省觀測站皆在 14:16 前後記錄到高頻的擾動訊號，初步認為造成擾動的因素來自於空間。簡單的將測站距離及到時做計算，其速度大約為 3.3 km/s (圖六)，此速度與表面波速度相近。此一磁力擾動訊號是日本東北外海地震表面波傳遞到台灣，引起空氣重力波震動所造成的。在距該地震震央五千以外的地磁站，就沒有記錄到此磁力擾動訊號。

子計畫 4 蒐集台灣 210 個高頻 GPS 連續站資料，計算 2011 年 3 月 11 號日本仙台

地震時所造成台灣的地表位移。並同步蒐集 15 個台灣之寬頻地震站，並進行積分處理求得位移，與 GPS 結果進行比較與驗證。經由位移場之呈現，觀察到了在發震時間後約 590 秒出線了西北-東南向擾動的 Love 波，最大之振幅可到達 16 cm。並於 710 秒產生了逆時針旋轉的 Rayleigh 波。除此之外，垂直方向也同樣呈現了明顯的地震波波傳行為，估計所有站在主震之發震時段之最大振幅，結果發現振幅大小主要是由北向南遞減。徑向振幅範圍為 3-9 cm，切向則為 8-16 cm。探討最大振幅與其震源距離之關係，發現在台灣內部切向（Love 波）在西台灣和東台灣與震源距離產生顯著之線性關係，而東台灣的振幅衰減率約為西台灣的 3 倍。由後波之震幅大小與分布，可以發現徑向（Rayleigh 波）之西南台灣、切向（Love 波）之西南和西北台灣，有較大（4-8 cm）之後波震幅。具較大後波振幅之分布地點，正好與台灣西部基盤厚度最高的兩個地點相符，分別為台中台西盆地與台南盆地。

#### 四、結論

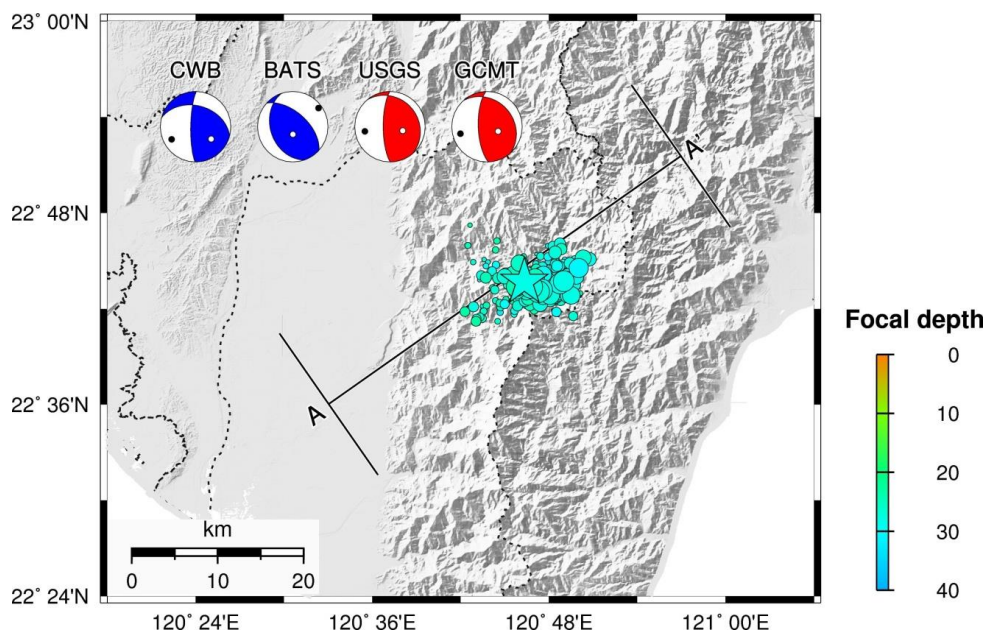
臺灣地區大規模地震發生頻率高且震央位置較為集中，同時台灣擁有非常高密度之各式各樣地球科學觀測系統，故臺灣為世界上少有且絕佳之地震前兆觀測及理論模式研究場所。近年來，國內從事地震預測相關研究的單位，如中央氣象局建置台灣地區 GPS 觀測網，由該 GPS 觀測網之地殼形變監測分析，計算台灣之板塊移動速度，比較台灣地震之時空分布趨勢。中央地質調查所在全台進行活動斷層監測工作，包括近斷層 GPS 觀測網（約 1000 個監測點）、GPS 連續追蹤站（共 50 站）、跨斷層精密水準測線（40 條測線總長約 1000 公里）、井下應變儀觀測站（共 12 站）等，以期了解斷層活動與地震發生的關聯性。中央氣象局在台灣地區設置 11 個磁力連續觀測站，藉由全省地磁連續觀測網資料，分析磁力變化與地震發生的關聯性。中央大學地球物理研究所在中正大學校園內興建磁通量地磁觀測站，站內安裝可以紀錄磁偏角、磁傾角與磁通量的儀器，希望能對嘉南地震活動進行監測。

本計畫主要整合地殼變形前兆之研究人力及彙整其他單位的資料，尋找其間的相關性，以期了解台灣地區在孕震過程所衍生之地震前兆特性與可能的異常現象，進而提出造成地震前兆現象之物理機制。本計畫也定期召集所有參與計畫研究人員彙報，加強測向的聯繫，利用不同的觀測方法針對同一個地區進行監測，探討影響各項前兆觀測的因素；同一個地震事件是否在所有的監測資料都有前兆現象，釐清沒有前兆的原因；解析與地震有關之前兆現象的物理機制，朝著累積觀測資料及提出物理機制並行且並重。同時也要結合其他單位有關地震前兆即時監測資訊，若有特殊異常情形則召開不定期會議，以掌握最新情勢，進行整體前兆預警的評估。

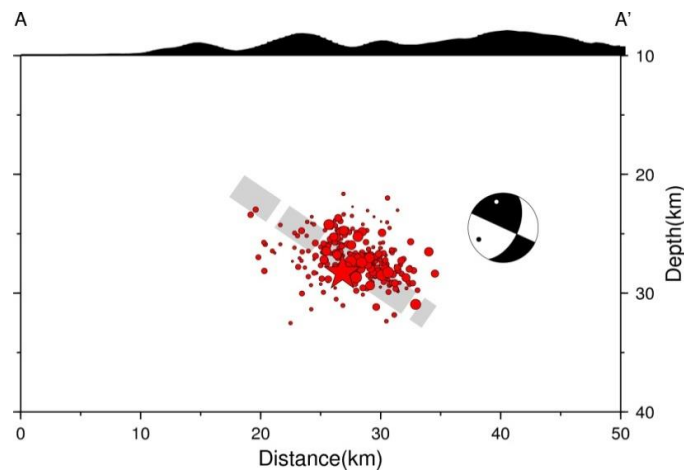
#### 參考文獻

1. 陳界宏，葉大綱，溫士忠，汪中和，劉正彥（2011）。地震時間、地點、震級與深度的短臨預測，中華民國地球物理學會暨中華民國地質學會學術研討會，台北。
2. 張伯宏，劉天銘（1995）。地殼波浪運動與中國西部地震的遷移：以河西—祁連山地區為例，高原地震，7(4)，24-31。

3. Chen, C.H., Yeh, T.K., Liu, J.Y., Wang, C.H., Wen, S., Yen, H.Y., Chang, S.H., 2011. Surface Deformation and Seismic Rebound: implications and applications. *Surv. Geophys.* 32 (3), 291-313, doi:10.1007/s10712-011-9117-3.
4. Ma, K. F., C.T. Lee and Y. B. Tsai, The Chi-Chi, Taiwan earthquake: large surface displacements on an inland thrust fault, *EOS*, **80**, 605, 1999.
5. Wu, Y. M., L. Zhao, C. H. Chang, and Y. J. Hsu (2008) Focal mechanism determination in Taiwan by genetic algorithm. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 98, 651–661.



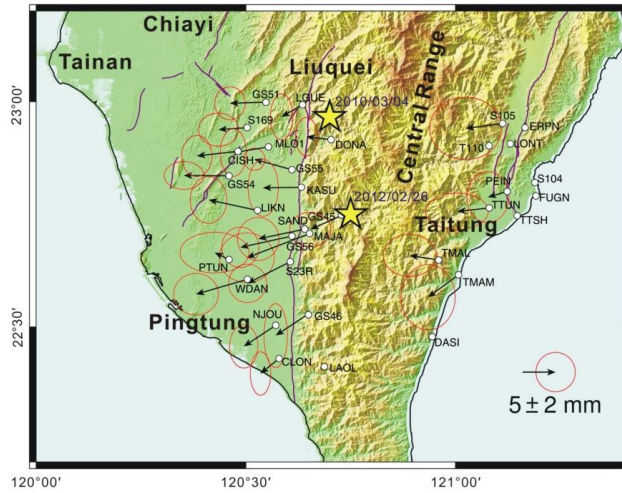
(a)



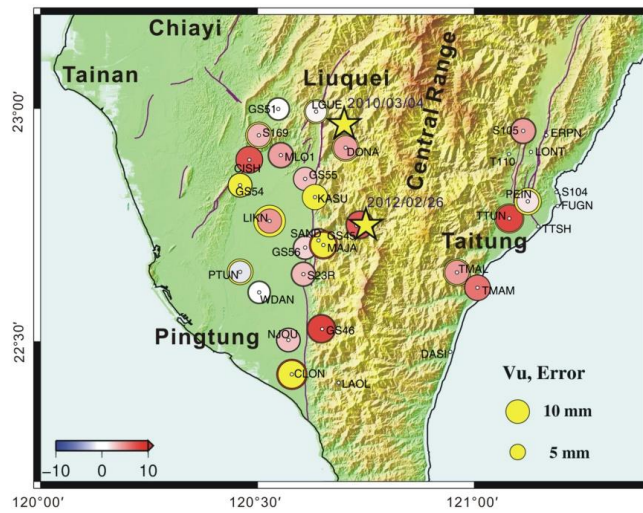
(b)

圖一、2012年2月26日霧台地震，(a)主震震源機制解及餘震分布(藍點)，(b)A-A'剖面之地震分布(張建興，2012/3/15中央氣象局霧台地震報告)。



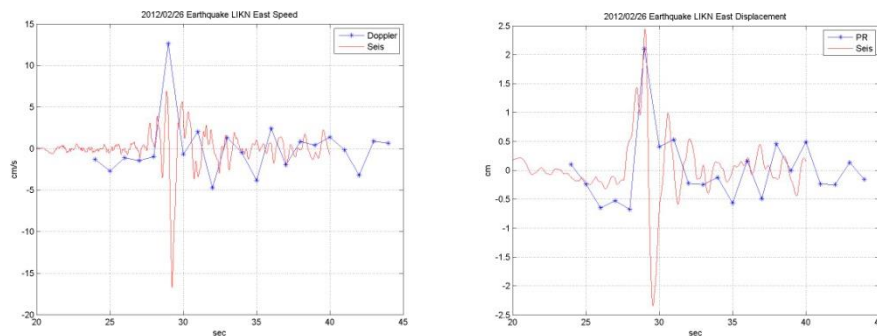


(a)



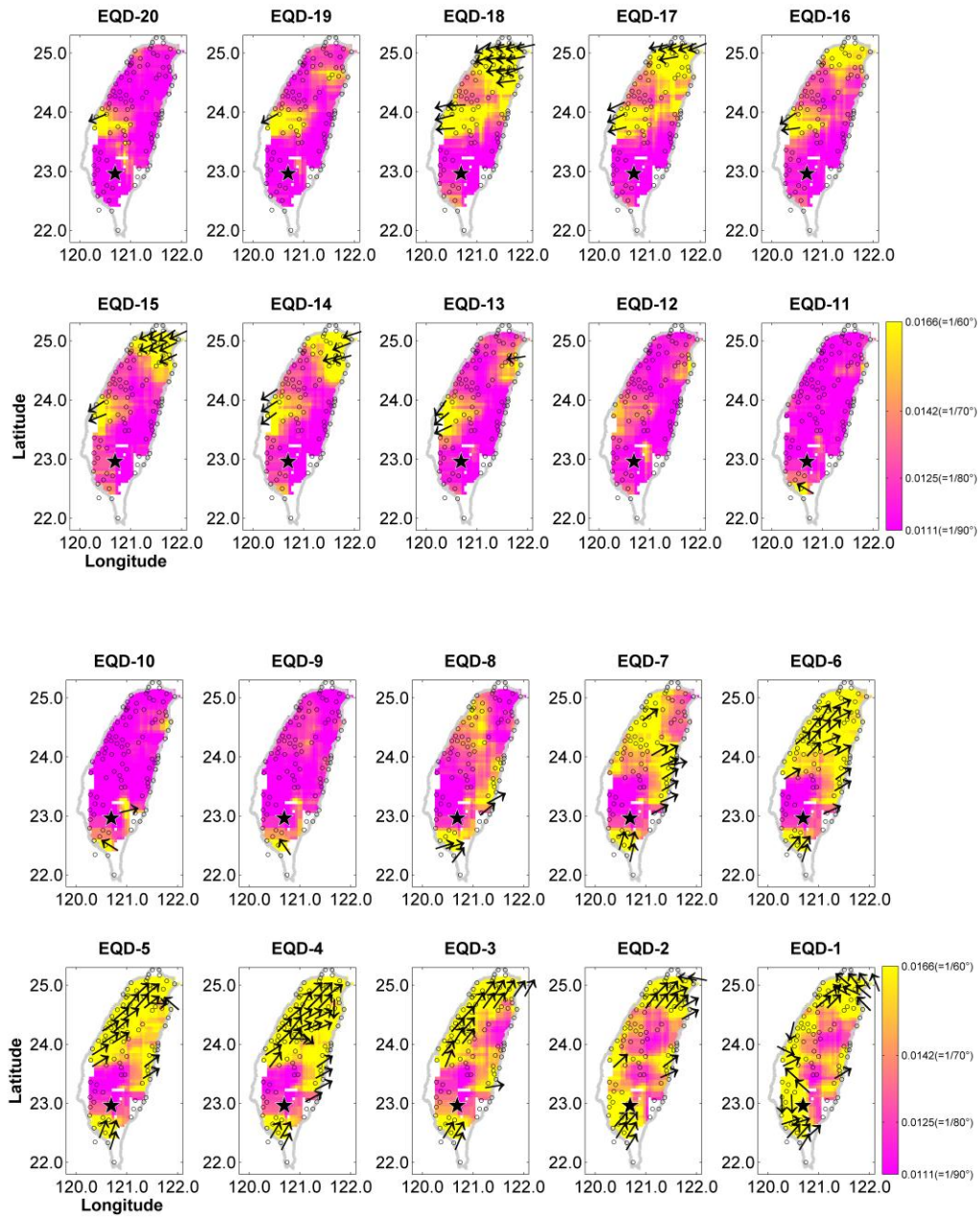
(b)

圖二、2012年2月26日霧台地震同震位移量。(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2010年3月4日甲仙及2012年2月26日霧台地震震央位置。(b) GPS觀測之垂直位移量，紅色圓圈代表抬升，藍色圓圈代表下降，黃色圓圈代表一倍標準偏差之範圍。

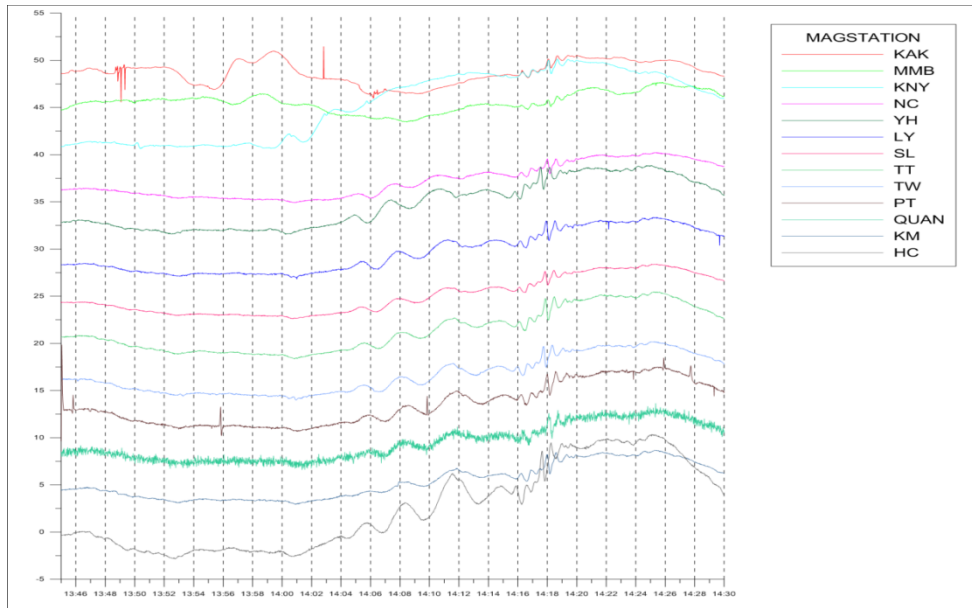


圖三、里港GPS與地震儀向東速度(圖左)與位移(圖右)比較圖。

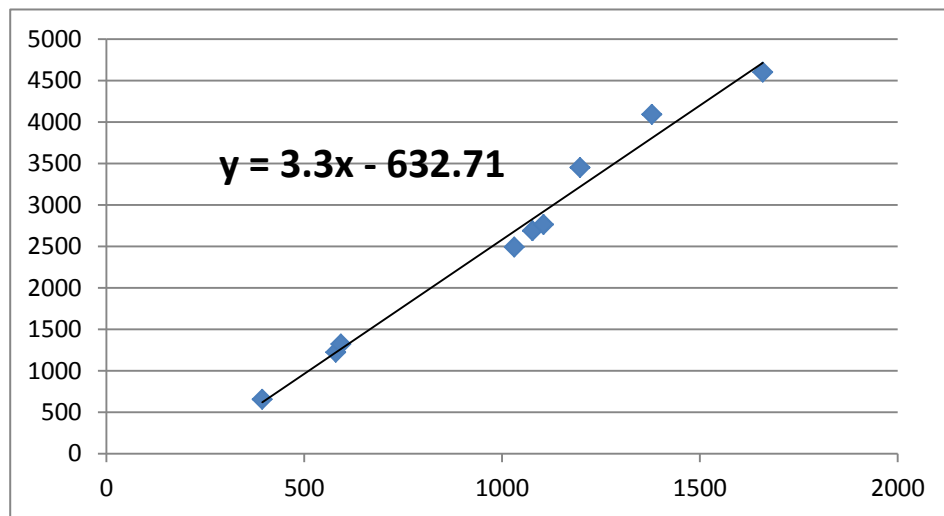




圖四、甲仙地震前 20 天至地震當天的 GPS 指標變化。GPS 指標為一空間移動範圍內殘差方向平均角度差的倒數。



圖五、台灣、福建泉州與日本磁力站於0311地震發生後置14點30分的地磁資料。低頻訊號：大陸、日本都有，擾動開始時間與距離有關；而高頻訊號：所有測站都是在14點16分記錄到，應該是空間來的擾動。



圖六、每個磁力測站記錄到異常訊號開始時間與磁力測站到震央距離作圖，可得到此異常訊號的傳播速度為 3.3 km/sec。