

斷層活動性觀測研究第三階段- 斷層整合性觀測與潛勢分析(2/4)

Observation of Fault Activity (III): Integrated Monitoring of Active Faults and Earthquake Probabilities Analysis (2/4)

主管單位：經濟部中央地質調查所

胡植慶¹

劉啟清

楊燦堯¹

景國恩²

鄭錦桐³

Hu, Jyr-Ching Liu, Chi-Ching Yang, Tsanyao Ching, Kuo-En Cheng Chin-Tung

¹國立臺灣大學地質科學系

²國立成功大學測量及空間資訊學系

³中興工程顧問社防災科技研究中心

摘要

本計畫 103 年度完成精密水準 30 條測線共 1,099 個測段之施測及查核；GPS 完成北宜地區 116 點、桃竹苗地區 112 點、嘉南地區 181 點、中部地區 155 點、高屏地區 111 點、花東地區 69 點和恆春地區 32 點之移動站測量及查核工作。藉由誤差分析及與 GPS 連續站座標時間序列比對後，顯示觀測資料品質符合歷年施測水準且穩定可靠。PS-InSAR 工作為彙整臺灣北部地區衛星影像，由 ALOS、ERS-1/2 以及 ENVISAT 等衛星所拍攝的 SAR 影像，利用影像對相關值挑選出主影像干涉配對副影像，產生雷達影像干涉圖，並且與此區域同期間水準測線和連續 GPS 測站得到的變形速率比較。ERS 結果顯示，北部區域於 1996 年到 1999 年之間最大抬升速率為位於士林、北投地區的 8 mm/yr。而土城地區則有最大下陷速率，約為 5 mm/yr。以 ENVISAT 結果來看，在 2003 年到 2008 年這段期間，最大下陷速率為位於泰山、五股地區的 9 mm/yr，而盆地西側則為平均 3~4 mm/yr 的下陷速率。其 PS 結果與四條由北至南的水準測線比較，雖有部份速率不同但趨勢相當一致，皆為由西向東跨過山腳斷層下陷速率越來越大。最後，由 ALOS 結果顯示，此區域在 2007 年到 2011 年其間，臺北盆地主要以往視衛星方向輕微抬升或不動的運動為主。其速率結果與 CGPS 相當一致。另外，與水準測線比較上，由於此期間地表變動不大，在第一條與第二條測線上因 PS-InSAR 誤差較大，無法明確比較兩者異同，而第三條與第四條測線則呈現相同的變形情形。另在與 LiDAR 對比上，除了將 PS-InSAR 速度場套疊在臺北盆地 DTM 上以呈現更精確的 PS-InSAR 選點位置可靠性外，也套疊在構造線形相對較多的臺灣東部地區。結果顯示線形明顯的地方也為視衛星方向抬升活躍的區域，具有高度的吻合。

藉由三維塊體模型 DEFNODE，針對臺灣中部及西北部地區由 GPS 所觀測到的現今（2002-2012）水平地表變形速率進行運動學分析。研究結果顯示大甲斷層及屯子腳斷層上的平均滑移虧損率皆大約 1~2 mm/yr，因此此兩斷層的地震潛能可能相對較小。在三義斷層部分則計算出 11.4 mm/yr 的高平均滑移虧損率。總結來說，在中臺灣以麓山帶

斷層之滑移虧損率最高，而北臺灣則是整體構造活動度較低，各斷層面上反應的滑移虧損皆較小。

井下應變儀部份，處理臺北網、新竹網及嘉義網共 11 個測站，目前利用幾年來多次較大氣壓變化時的資料，試圖建立氣壓對井下應變儀資料的影響模式並做修正，以建立移除環境影響因素後的殘餘地殼應變時間序列，作為尋找與大地震相關的應變"異常"。2013 年 12 月至 2014 年 11 月期間，在嘉義網觀測到 1 個應變異常事件：5 月 21 日芮氏規模 5.9 花蓮地震；新竹網觀測到 1 個應變異常事件：2 月 5 日至 2 月 8 日新竹群震；臺北網觀測到 2 個應變異常事件：2 月 12 日芮氏規模 4.2 陽明山地震和 8 月 16 日芮氏規模 3.8 新北市烏來區地震。以上地震除了使用原本的平面應變來分析，也嘗試利用剪應變來分析新北市烏來區地震案例，初步判斷出該應變異常為該地震的前兆訊號。而在井下應變儀應變異常判釋統計方面，分析至 2014 年 8 月為止，檢視井下應變儀含有前兆訊號並成功對應地震的機率在嘉義網、新竹網與臺北網分別有：40%、71%與 67%；而有前兆訊號卻沒有對應地震的誤判機率分別為：60%、29%與 33%；地震前沒有前兆訊號的機率为：0%、29%與 25%。

在 2014 年 1 月 15 日芮氏規模 5 南投地震發生前於大平地、古坑和池上土壤氣體觀測站，以及 2014 年 5 月 21 日芮氏規模 5.9 花蓮鳳林地震發生前於中崙和東華站都有出現顯著的土壤氬氣濃度異常上升，可視為該地震的前兆訊息。此外，大平地測站對於 2 月初發生在新竹地區的群震，也觀察到土壤氬氣異常升高的反應；期間，新樂地下水位站也出現顯著的異常變化，也可視為成功的前兆反應。2014 年水位異常多對應於當地的小型地震，主要為 2 月份新竹群震與嘉義地區零星地震；大型地震僅 5 月 21 日花蓮鳳林地震，於中興站出現震前水位異常。2014 年 11 月前，海岸山脈南段及恆春半島附近均未發生強震 ($M_w > 6$)，此期間安通站與社頂站地下水水氬濃度觀測均無發現異常下降之地震前兆。由長期觀測結果發現，安通站水樣來自受限含水層，地下水水氬濃度不受降雨及其他環境因子影響。社頂站水樣出自自由含水層，地下水水氬濃度受降雨環境因子影響。

整合分析部分，包括地下水位異常、地化異常、井下應變儀異常和地震訊號異常之整合，整合期間含跨 2009 年整年到 2014 年 11 月間 174 個地震事件。考慮的異常觀測中為 2014/05/21 規模 5.9 發生在花蓮縣鳳林鎮的地震 (ID=163)，造成嘉義網中同時觀測到地下水位、井下應變儀和地化氣體記錄三樣異常。另外在 2014 年 2 月 5~8 日間在新竹有十個群震，規模在 2.3~3.4 之間，有多種當地的觀測異常，對這兩系列的地震觀測，都做了綜合性的整合解釋。

斷層潛勢評估完成北部 9 條進行評估，分別為山腳斷層、湖口斷層、新竹斷層、新城斷層、三義斷層、獅潭斷層、屯子腳斷層、鐵砧山斷層、大甲斷層。首先建立活動斷層參數表，透過本計畫建立之活動斷層潛勢評估方法論，了解斷層的重複間隔相關資訊後，以機率法評估活動斷層未來 30、50、100 年最大可能地震規模之發生機率。山腳斷層利用 BPT 模式，得到未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.2~7.5、6.5 以上和 7.0 以上之機率分別為 9.9%、15.0%及 24.6%； 8.1%、12.5%及 21.4%； 0.7%、1.1%及 2.4%。湖口斷層利用 Poisson 模式，其未來 30、50、100 年發生地震矩規模 6.1~7.3、

6.5 以上和 7.0 以上之機率分別為 19.6%、29.8%及 48.7%；13.5%、21.0%及 35.5%；1.1%、1.8%及 3.2%。新竹斷層 Poisson 模式，其未來 30、50、100 年發生地震矩規模 6.1~7.2、6.5 以上和 7.0 以上之機率分別為 18.4%、28.3%及 47.3%；8.5%、13.4%及 23.4%；0.2%、0.3%及 0.5%。新城斷層利用 BPT 模式，得到未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.1~7.1、6.5 以上和 7.0 以上之機率分別為 28.1%、41.6%及 63.9%；15.3%、23.3%及 37.6%；0.1%、0.2%及 0.4%。三義斷層利用 Poisson 模式，其未來 30、50、100 年發生地震矩規模 6.4~7.4、6.5 以上和 7.0 以上之機率分別為 10.0%、15.8%及 28.1%；9.9%、15.6%及 27.7%；1.4%、2.2%及 4.1%。獅潭—屯子腳斷層系統，利用 BPT 模式，得到未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 5.9~7.2、6.5 以上和 7.0 以上之機率分別為 45.2%、58.6%及 74.9%；17.1%、23.6%及 32.8%；0.3%、0.5%及 1.1%。鐵砧山斷層屬於大甲斷層的背衝斷層，不會有單獨破裂之可能性，不會造成大規模的地震，因此鐵砧山斷層不列入潛勢評估中考慮。大甲—彰化斷層系統利用 BPT 模式，得到未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.2~7.6、6.5 以上、7.0 以上和 7.5 以上之機率分別為 27.7%、39.9%及 58.9%；26.8%、38.6%及 57.3%；9.6%、14.5%及 23.1%；0.05%、0.08%及 0.16%。

關鍵詞：全球衛星定位系統、連續觀測站、塊體模型、PS-InSAR、井下應變儀、氣體地球化學、水位觀測井、斷層活動潛勢分析、滑移虧損率

Abstract

We utilize GAMIT/GLOBK software to estimate the precise coordinates for continuous GPS station (CGPS) of Central Geological Survey (CGS) in Taiwan. To promote the software estimation efficiency, 250 stations are divided by 8 subnets which have been considered by station numbers, network geometry and fault distributions. Each of subnets include around 50 CGPS and 10 international GNSS service (IGS) stations. Furthermore, 8 subnets are process in parallel mode and combined into a daily solution. Due to the data comes from different research centers, the basic information for stations such as antenna types, antenna height and other maintain record cannot be obtained by exchanging the data. Under the requirement of processing procedure, the basic information of stations needs to be corrected. A poor accuracy or a big error will be occurred by incorrect basic information, and then the station will be removed. After long period of data collection and estimation, a time series variation can be build up to study the effect of earthquakes and estimate the velocity of stations. In terms of co-seismic deformation research, the coseismic deformation of the Fanglin earthquake occurred on May 2014 was carried out. However, no significant coseismic deformation was detected by continuous GPS stations due to the moderate magnitude and deep hypocenter. For the 2014 final-term report, we have achieved the examinations of results from 30 precise leveling routes with 1,099 sessions and from 116 campaign-mode GPS stations in Peiyi area ,112 campaign-mode GPS stations in Taochumiao area ,181 campaign-mode GPS stations in Jianan area , 155 campaign-mode GPS stations in central area,111 campaign-mode

GPS stations in Kaoping area, 69 campaign-mode GPS stations in Huatung area and 32 campaign-mode GPS stations in Hengchun area, that have been measured up-to-date. After comparing the coordinates from campaign-mode GPS sites and precise leveling benchmarks with the time series from continuous GPS stations, the velocity field is consistent with previous measurement which show the reliability of observation.

No matter which kind of SAR images used, all master images are paired with slave images according to temporal baseline, perpendicular spatial baseline, Doppler centroid frequency, and thermal noise. In this moment, we first compare PS-InSAR results with deformation rate from leveling profiles and continuous GPS station in study area. The results of ERS1/2 in the period 1996-1999 shows that the maximum uplift rate of 8 mm/yr located in Shihlin and Peitao area, meanwhile the maximum subsidence of 5 mm/yr located in Tucheng area. In the period of 2003-2008 with ENVISAT images, maximum subsidence rate of 9 mm/yr located in Taishan and Wukou area. On average, the subsidence rate is about 3-4 mm/yr. The comparison of PS results and four leveling profiles demonstrate that the general trends are consistent even some disturbances occurred in some area. In the period of 2007-2011, Taipei basin revealed a slight uplift or no significant deformation along LOS from PS-InSAR with ALOS images. The deformation rate from INSAR is consistent with that of continuous GPS. In comparison with the leveling profiles, the accuracy of PS-InSAR is not good enough along the routes 1 and 2, thus the match of two data is unclear. However the comparison of routes 3 and 4 with PS-results is quite consistent. In addition, we first try to superimpose the PS-InSAR results on LiDAR-derived DEM to improve the precise locations of PS and characterize deformation pattern across and along the lineaments revealed by LiDAR-derived DEM. We also try it in eastern Taiwan in which the lineaments are quite dense from the geomorphological analysis of LiDAR-derived DEM. In general, the significant uplift along LOS is consistent with the significant lineaments in eastern Taiwan.

The goal of probability analysis of active faults is to establish the flow chart of 33 active faults in Taiwan. In this year, 9 active faults in northern Taiwan have been assessed to get the recurrence interval and the probabilities for the characteristic earthquake occurred in 30, 50 and 100 years. The faults are as followings: Shanchiao, Hukou, Hsinchu, Hsincheng, Sanyi, Shitan, Tuntzuchiao, Tiehchanshan, and Tachia faults. For Shanchiao fault, BPT model was used, and the last event is set at year 1867 for the northern segment, and year 1694 for the southern segment respectively. The probabilities for the $6.2 \leq M_w \leq 7.5$ earthquake occurred in 30, 50, and 100 years are 9.9%, 15.0%, and 24.6%, and the probabilities for the $M_w \geq 6.5$ earthquake occurred in 30, 50, and 100 years are 8.1%, 12.5%, and 21.4%, and the probabilities for the $M_w \geq 7.0$ earthquake occurred in 30, 50, and 100 years are 0.7%, 1.1%, and 2.4%. For Hukou fault, Poisson model was used, the probabilities for the $6.1 \leq M_w \leq 7.3$ earthquake occurred in 30, 50, and 100 years are 19.6%, 29.8%, and 48.7% respectively. The probabilities for the $M_w \geq 6.5$ earthquake occurred in 30, 50, and 100 years are 13.5%, 21.0%,

and 35.5%, and the probabilities for the $M_w \geq 7.0$ earthquake occurred in 30, 50, and 100 years are 1.1%, 1.8%, and 3.2%. For Hsinchu fault, Poisson model was used, the probabilities for the $6.1 \leq M_w \leq 7.2$ earthquake occurred in 30, 50, and 100 years are 18.4%, 28.3%, and 47.3%, and the probabilities for the $M_w \geq 6.5$ earthquake occurred in 30, 50, and 100 years are 8.5%, 13.4%, and 23.4%, and the probabilities for the $M_w \geq 7.0$ earthquake occurred in 30, 50, and 100 years are 0.2%, 0.3%, and 0.5%. For Hsincheng fault, BPT model was used, and the last event is set at 300 years ago. The probabilities for the $6.1 \leq M_w \leq 7.1$ earthquake occurred in 30, 50, and 100 years are 28.1%, 41.6%, and 63.9%, and the probabilities for the $M_w \geq 6.5$ earthquake occurred in 30, 50, and 100 years are 15.3%, 23.3%, and 37.6%, and the probabilities for the $M_w \geq 7.0$ earthquake occurred in 30, 50, and 100 years are 0.1%, 0.2%, and 0.4%. For Sanyi fault, Poisson model was used, then the results showed that the probabilities for the $6.4 \leq M_w \leq 7.4$ earthquake occurred in 30, 50, and 100 years are 10.0%, 15.8% and 28.1%, and the probabilities for the $M_w \geq 6.5$ earthquake occurred in 30, 50, and 100 years are 9.9%, 15.6% and 27.7%, and the probabilities for the $M_w \geq 7.0$ earthquake occurred in 30, 50 and 100 years are 1.4%, 2.2% and 4.1%. The Shitan fault and Tuntzuchiaio fault, which may trigger each other, can be considered as a Shitan – Tuntzuchiaio fault system. BPT model was used for the fault system, and the last event is set at year 1935, then the results showed that the probabilities for the $5.9 \leq M_w \leq 7.2$ earthquake occurred in 30, 50, and 100 years are 45.2%, 58.6%, and 74.9%, and the probabilities for the $M_w \geq 6.5$ earthquake occurred in 30, 50, and 100 years are 17.1%, 23.6%, and 32.8%, and the probabilities for the $M_w \geq 7.0$ earthquake occurred in 30, 50 and 100 years are 0.3%, 0.5%, and 1.1%. Tiehchanshan fault is a back thrust of Tachia fault, and may not rupture independently. Besides, the fault length is so short that the fault will not generate earthquakes with large magnitude, thus Tiehchanshan fault is not taken into account for assessment of earthquake hazard. Considering Tachia fault may rupture together with Changhua fault, the Tachia – Changhua fault system is assessed. BPT model was used for this fault system, and the last event is set at year 1848. The probabilities for the $6.2 \leq M_w \leq 7.6$ earthquake occurred in 30, 50, and 100 years are 27.7%, 39.9%, and 58.9%, and the probabilities for the $M_w \geq 6.5$ earthquake occurred in 30, 50, and 100 years are 26.8%, 38.6%, and 57.3%, and the probabilities for the $M_w \geq 7.0$ earthquake occurred in 30, 50, and 100 years are 9.6%, 14.5%, and 23.1%, and the probabilities for the $M_w \geq 7.5$ earthquake occurred in 30, 50, and 100 years are 0.05%, 0.08%, and 0.16%.

This research evaluated the slip rate and slip deficit rate of active faults in northern and central Taiwan by 3D block model DEFNODE. We first get the surface fault traces and the subsurface fault geometry parameters, and then establish the block boundary model of our study area. The surface deformation observations are the 2002-2012 average horizontal velocities measured by GPS networks in northern and central Taiwan. By employing the DEFNODE technique, we invert these GPS velocities for the best-fit block rotate rates, long term slip rates and slip deficit rates. Our results show that the slip deficit rates of the Tachia

and Tuntzuchia faults are low (about 1 ~ 2 mm/yr), inferring that the earthquake potential of these two faults may be relatively low. On the other hand, the slip deficit rates of the Sanyi fault are higher than the surrounding faults (about 11.4 mm/yr), implying a relatively high earthquake potential. In northern Taiwan, because the horizontal velocities observed by GPS are generally lower than that of the central Taiwan, the modeled fault slip deficit rates are therefore relative low. Our results also indicate that the detachment faults with low dipping angles play an important role on the surface deformation of this study area.

The persisted data processing on 11 borehole strainmeter stations is carried out in Chiayi, Hsinchu and Taipei networks. The barometric effect was removed from the strainmeter data by several events with significant barometric pressure changes to search the strain anomalies associated with big earthquakes. From December 2013 to November 2014, One strain-anomaly event in Chiayi network related to the M_L 5.9 event occurred in Hualien on May 21, one strain-anomaly event in Hsinchu network related to the swarm earthquakes in Hsinchu from February 5 to February 8 and one strain-anomaly event in Taipei network related to the M_L 4.2 event occurred in Yangmingshan on February 12 were detected. Besides the analysis of areal strain, the shear strain is also used to study the pre-event anomalous strain of earthquake occurred in Wulai, New Taipei City. This pre-event strain anomaly is considered as a precursor in our preliminary results. Statically, the probability for successful prediction of strain anomaly with corresponding earthquake in Chiayi, Hsinchu and Taipei network is 40%, 71% and 67% respectively. The probability of no significant stain anomaly found prior to a significant earthquake is 0%, 29% and 25% in above-mentioned networks. Time series data of areal strain associated with events of earthquake are analyzed via time-frequency analysis. Those data are collected in stations of Hsinchu network. Time span of analysis ranges from October 2013 to September 2014. Analysis results show existence of long lasting characteristic frequencies being 0.05、0.09、0.1 Hz. The areal strain intensity's frequency response ranges from 0.0 to 0.03 Hz, which reflects the phenomenon that the areal strain increases and then releases on the earthquake. Different station has different characteristic frequencies. The frequency response ranges from 0.2 to 0.5 Hz on average. It is shifted to 0.1 to 0.5 Hz when precipitation or pressure riches its extreme value.

During the period from December 2013 to November 2014, the Tapingti, Gukeng and Chihshang stations show a significant increase of soil radon concentrations, which might be an precursor related to Nantou earthquakes (M_L 5.0) occurred on January 15, 2014. Furthermore, the Chunglun and Donghua stations show a progressively increasing of soil radon, and TSUN monitoring well also show a big water-level raising anomaly 13hrs before the Fanglin earthquake ($M_L=5.9$) which occured at May 21st, as a precursor. Before the earthquake swarm occurred at Hsinchu area in February, variations of soil radon at TPT station and water level at CINT station present a significant change. However, most of the groundwater anomalies related to the local earthquake. In this year, neither large earthquakes

($M_L > 6.0$) occurred nor precursory declines in the concentration of groundwater radon were recorded near the Antung station and the Kenting station. Based on our long-term observations, the concentration of groundwater radon is not affected by the precipitation and other environmental factors at the Antung station with water sampled from a confined aquifer. On the other hand, the concentration of groundwater radon is affected by the precipitation at the Kenting station with water sampled from an unconfined aquifer.

We have searched for possible precursory anomalies for magnitude greater than 5 earthquakes ($M > 5$), using geochemical, hydrological observation, borehole strainmeter, and seismological observations. During the study period of January 2009 to November 2014, 174 $M > 5$ events have been occurred in and around Taiwan. For the study period of this report, the $M = 5.9$ Hualien earthquake occurred on 2014/05/21 (ID=163) might be related to three individual anomalies in the same network with groundwater anomaly, borehole strain anomaly and geochemical gas anomalies occurred simultaneously. In addition, some anomalies were also observed, which might be related to the 10 swarm events occurred on February 5-8 in Hsinchu area, an integrated discussion was made so far.

We also try to integrate 3 observations of geodetic strain from PS-InSAR, CGPS and high frequency CGPS strain data. The PS-InSAR could provide the displacement of LOS which is sensitive to the vertical deformation. If the traditional geodetic measurement is integrated with the deformation observed by PS-InSAR, the 3D deformation could be achieved with large area. High frequency GPS could not only provide the nearfield coseismic deformation but also can be used to co-analyze with seismometers and borehole strainmeters to get the crustal displacement, acceleration and strain. The strain calculated from high frequency GPS is similar to that from borehole strainmeters, but the strain from high frequency GPS is obviously with less sensitivity. However, due to the densely distributed CGPS networks, it can be useful for co-analysis of strain anomaly in the future.

Keywords: GPS, CGPS, Block model, PS-InSAR, Borehole strainmeter, Gas geochemistry, Water-level observation well, Probabilistic analysis for active faults, Slip deficit rate

一、前言

災害性地震主要源於斷層的活動，瞭解活動斷層的活動性及分析潛在孕震斷層的潛勢評估是地震與活動斷層危害度評估的重要參考數據。經濟部中央地質調查所於 91~95 年「地震地質調查及活動斷層資料庫建置」計畫中，已逐年在活動斷層帶設置監測點位，包括全球定位系統(Global Positioning System，簡稱 GPS)與井下應變儀(borehole strainmeter)。累積至 103 年為止，已完成連續 GPS 站共 76 站、13 口井下應變儀及地球化學觀測站共 17 站(圖 1.1)。而從 98 年至 101 年的「斷層活動性觀測研究第二階段-斷層監測與潛勢分析研究」四年計畫研究中，已藉由高精度的水準與大地測量瞭解各斷層的活動特徵；利用地球化學方法與地下水位觀測斷層活動性。在整合性地表變形觀測的手段中，針對各孕震構造的觀測的重點在於是否可以觀測到災害性地震前的應變異常訊號，井下應變儀可以觀測到極小的應變率變化，但此應變速率變化亦可能由環境因子所引起，包含地下水位升降、降雨、氣壓變化(一般是颱風引起)和潮汐。2011 年 3 月 11 日發生於日本 M_w 9.0 宮城外海的地震，深深提醒我們下列兩件事之重要性：(1)辨識已知與未知高發震潛能構造的位置及(2)評估其所蘊含之地震潛能。因此，本計畫利用整合性大地測量技術所獲得之地表運動觀測值，期望得到：(1)辨識台灣地區已知與未知高發震潛能構造的位置；(2)推估這些區域地殼內能量之變化及(3)探討大地測量觀測資料在地震災害分析上的應用。並經由本計畫系統性地研究各活動斷層之活動特性，建立全國之活動斷層發生機率潛勢圖，以及可能引致之地震規模，據此成果可後續再完成鄰近斷層地區之震度，可充分利用地調所研究之活動斷層與孕震構造之地質資訊，逐步充實我國地震防災整備資訊內容。

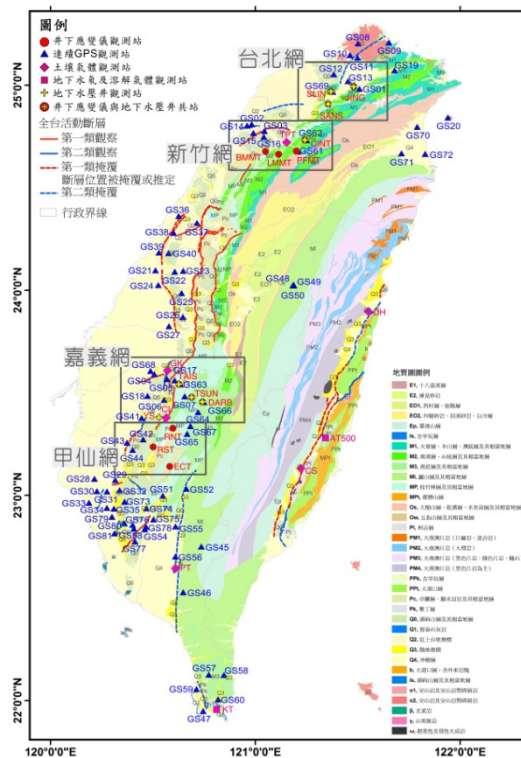


圖1.1：中央地質調查所設置之連續GPS、井下應變儀及地球化學觀測站之全台分布圖。

二、研究成果

2.1 大地測量資料分析：GPS、精密水準測量及 PS-InSAR

過去研究將臺灣地區 2002-2014 年所測量之 GPS 移動站與連續站觀測資料作時序分析，藉由各站的座標時間序列可知各點之位移變化情形並求得各地區速度場分布。以臺北地區、宜蘭地區、桃竹苗地區、中部地區、嘉南地區、高屏地區、恆春地區及花東地區 8 個測網，解算 860 座移動站之水平方向速度場（圖 2-1.1），並由移動站及連續站平面速度場計算得平面應變速率場（圖 2-1.2）。

GPS 部分，宜蘭地區在宜蘭平原地區之速度場就整個臺灣北部而言其速度變化亦是最顯著的，由西向東其速度變化亦由西北快速地往東南方向移動，越靠近外海移動速度越快，速度變化由西向東南順時針旋轉且愈靠近沿海速度愈大，值由西向東約在 3-40 mm/yr。

桃竹苗地區在獅潭斷層及神卓山斷層東側速度場值約為 10 mm/yr 方向為西北向，至斷層西側速度場值降為 7 mm/yr，竹東、斗煥坪及大平地斷層東南側速度場值約為 9 mm/yr，竹東、斗煥坪及大平地斷層與新城斷層間速度場值約為 6 mm/yr，新城斷層以北速度場約為 4 mm/yr；由解算結果可知本區速度場分布大致保持西北向趨勢，速度變化由南向北呈順時針旋轉，值約 0-10 mm/yr。

中部地區在大茅埔斷層以東速度場約 30-45 mm/yr，方向朝西北西，大茅埔斷層及車籠埔斷層間速度場值約 16-20 mm/yr，方向朝西北西，往西彰化斷層及車籠埔斷層間值逐漸縮小約 6-15 mm/yr，方向轉為朝西或西南西，往西至沿海地區速度場值小於 5 mm/yr，卓蘭地區及獅潭地區點位速度場分布轉為西北向值約 12-16 mm/yr。

嘉南地區在觸口斷層和九芎坑斷層—木屐寮斷層—六甲斷層系統間有明顯的速度梯度存在。由東向西，跨越觸口斷層，其水平位移速率由約 20 mm/yr 降至約 17 mm/yr；跨越九芎坑—木屐寮—六甲斷層系統，其水平位移速率由約 17 mm/yr 降至約 10 mm/yr。繼續往西之西部海岸平原，其水平位移速率皆小於 10 mm/yr，臺南地區速度場分布則以後甲里斷層為分界，斷層以西之水平位移速率約 12-15 mm/yr。後甲里斷層以東水平位移速率約 15-20 mm/yr 速度場呈西向東逐漸遞增。

高屏地區主要之活動構造為東北—西南走向之旗山斷層與南北走向之潮州斷層。由東向西跨越旗山斷層之速度場，由約 60 mm/yr 降至約 50 mm/yr，顯示旗山斷層吸收約 10 mm/yr 之縮短量，並具有右移之分量。橫跨潮州斷層東西兩側之測站速度差異顯示，跨過潮州斷層及恆春斷層之東西向壓縮量極小，值約 60 mm/yr。由沿著斷層走向之速度剖面分析可知，跨龍船斷層有約 40-50 mm/yr 之縮短量及約 6 mm/yr 之左移分量，同時塊體二之垂直速度量由 34 mm/yr 上升至約 95 mm/yr，說明龍船斷層為一具有左移分量之逆衝斷層。鳳山斷層是一條以左移為主的走向滑移斷層，斷層北段為鎖定斷層並有擠壓分量，中段與南段則為具伸張分量之潛移斷層。且依據斷層模擬結果指出，鳳山斷層的傾角約為 50°，深度約至 7-13 公里。

恆春地區由於 2006 年 12 月 26 日發生屏東外海地震對恆春地區之影響，採震後觀測時間為 2010 至 2014 年的資料解算速度場，速度場由東向西跨過恆春斷層由西北轉為西向，值約 41-62 mm。

花東地區自北段花蓮至中段玉里瑞穗方位角由西北西轉為西北，至南段臺東則再轉為西北西，速度值由約 20-40 mm/yr 增加至 50-70 mm/yr 再減少為 20-60 mm/yr，在東西向速度場由西向東有逐漸增加的趨勢，方向由西向東跨越海岸山脈後由西北西轉為西北北。

精密水準部分，2014 年進行 29 條水準測線施測。從圖 2-1.3 所示，臺灣北部及新竹地區大致呈現穩定下陷狀態，垂直速度大多落在 -10 mm/yr 內；中部在靠近山區呈現抬升，但在平原及沿海地區呈現下陷，最大值超過 -25 mm/yr；南部地區的垂直速率也是呈現平原下降、山區抬升；恆春半島地區在恆春斷層以東有顯著的抬升現象，速率達到 10 mm/yr 以上，說明恆春斷層仍有活動；花東地區在海岸山脈呈現抬升，在縱谷及跨過海岸山脈靠近沿海一帶則為沉陷的趨勢，速率約落在 -10mm/yr 至 -15mm/yr 之間。

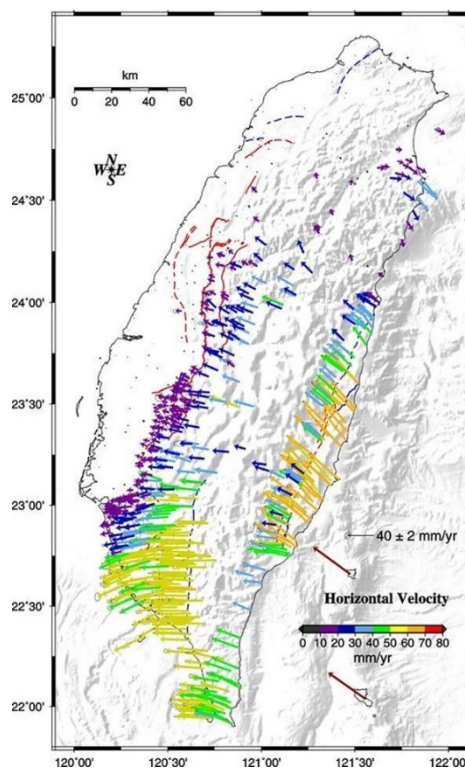


圖 2-1.1：全臺灣相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 連續站水平方向 2002-2014 年速度場。

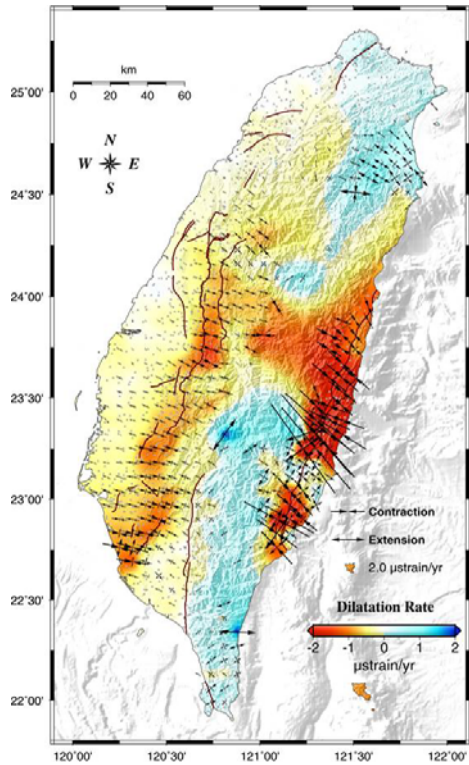


圖 2-1.2：全臺灣應變率場分布圖。黑色箭頭顯示地表為壓縮或是伸張變形模式，色階反映地表變形情形，暖色系為壓縮、冷色系為伸張。

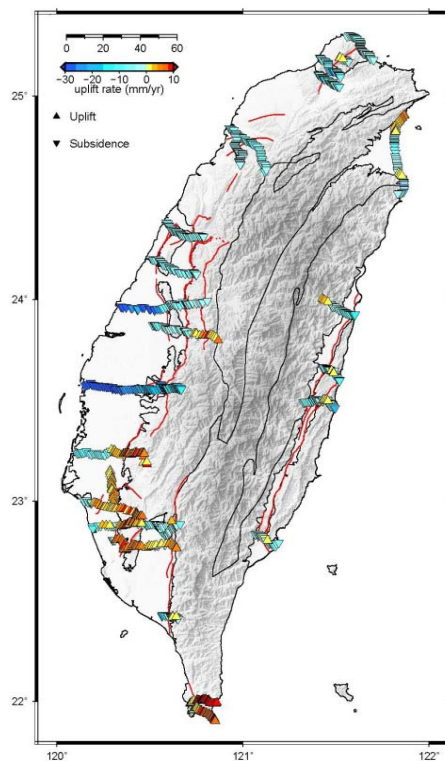


圖 2-1.3：2001-2014 年全台精密水準速度場。暖色系為抬升，冷色系為下降。

統計自2013年12月至2014年9月的連續GPS資料月報，利用點位透空圖分析資料接收品質，統計出所有交換測站資料接收度分布圖，明顯看出大部份接收度較低的測站都位於靠近中央山脈區域，建議應定期清除測站周圍環境，以避免測站遮蔽過度嚴重導致資料品質隨時間變差。

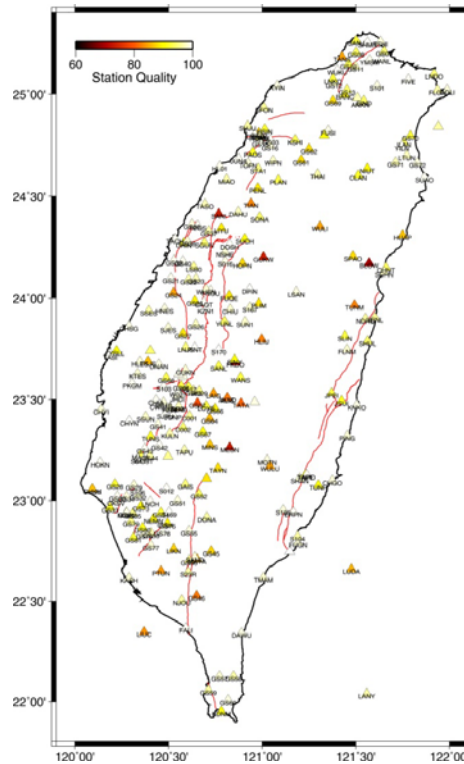


圖 2-1.4 : GPS 連續觀測站接收度品質分布圖（顏色越深表示測站遮蔽越嚴重）。

分析由經濟部中央地質調查所提供之全台連續全球定位系統（Continuous Global Positioning System, CGPS）連續測站，其包括中央地質調查所、中央氣象局、中央研究院、內政部、國土測繪中心、中正大學等單位，共267 站。結果顯示水平速度場相對澎湖白沙，中南部測站多為東南往西北移動，臺南以南地區多呈現東北往西南移動；另外北部地區則是由南往北移動，在宜蘭地區有一速度方向轉向東南的旋轉行為，此結果與過去長期解算結果約略相同。

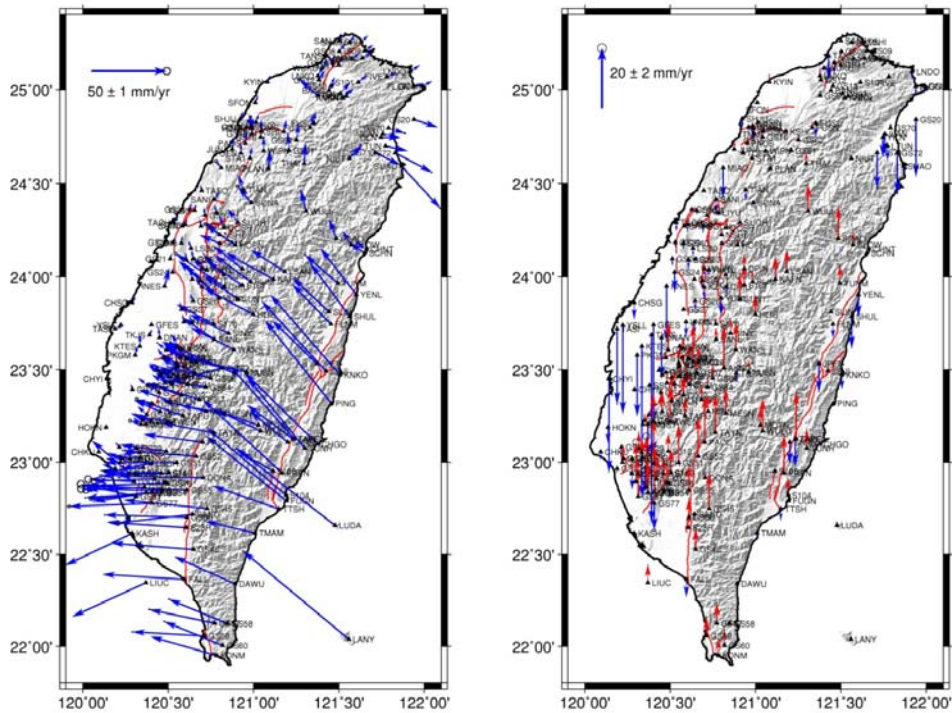


圖 2-1.5：整合歷史資料至 2014 年 11 月，並修正同震位移及測站異常之年速度場（相對 S01R 澎湖白沙）。左圖為水平方向速度場，右圖為垂直方向速度場。

針對台灣北部地區，我們利用 Stamps 軟體 (Hooper, 2009) 計算得到 PS-InSAR 成果來分析活動構造的活動情形，由 ERS 結果顯示，北部區域於 1996 年到 2000 年之間主要以為對視衛星方向抬升的運動為主。以 ENVISAT 結果來看，在 2003 年到 2008 年這段期間，臺北盆地主要以往視衛星方向下陷的運動為主 (圖 2-1.6)。而以 ALOS 結果顯示，此區域在 2007 年到 2011 年其間，臺北盆地主要以往視衛星方向輕微抬升或不動的運動為主 (圖 2-1.7)。儘管三個時期北部地區呈現的變形大不相同，但其分別與連續 GPS 以及精密水準測量比較結果都相當吻合，顯示 PSInSAR 結果的可信度，其更提供了北部地區完整以及全面性的地表時空變化。並且，由 ENVISAT 結果顯示出，台北盆地由西向東跨過山腳斷層下陷速率明顯增大 (圖 2-1.8)。

另外，利用套疊 PSInSAR 在台北盆地 DTM 上更能確定 PSInSAR 選點的可靠性。以構造線形相對較多的台灣東部地區來說，根據資料比較結果，線形明顯的地方與視衛星方向抬升活躍的區域，具有高度的吻合。依照 PSInSAR 資料比對推測瑞穗地區斷層跡應該在更西緣靠近秀姑巒溪溪床處。因此，利用 PSInSAR 辨識斷層跡位置可列為後續地表地質調查重點項目，以補足可能誤判上覆河床沖積物錯動情形 (圖 2-1.9)。

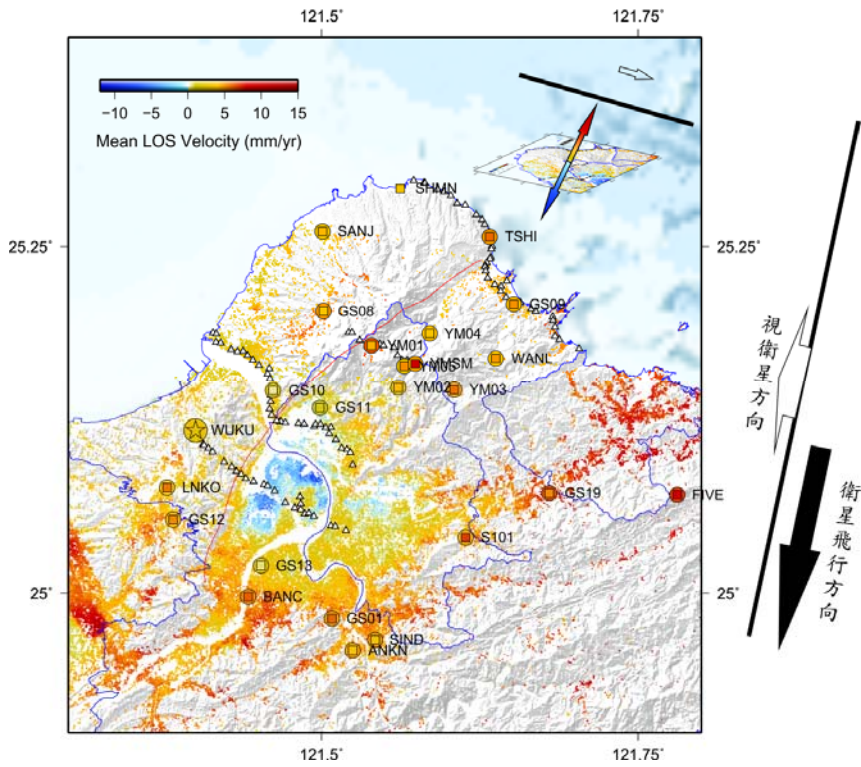


圖 2-1.6：ENVISAT 與 GPS 視衛星方向速率比對，GPS 參考站為 WUKU。

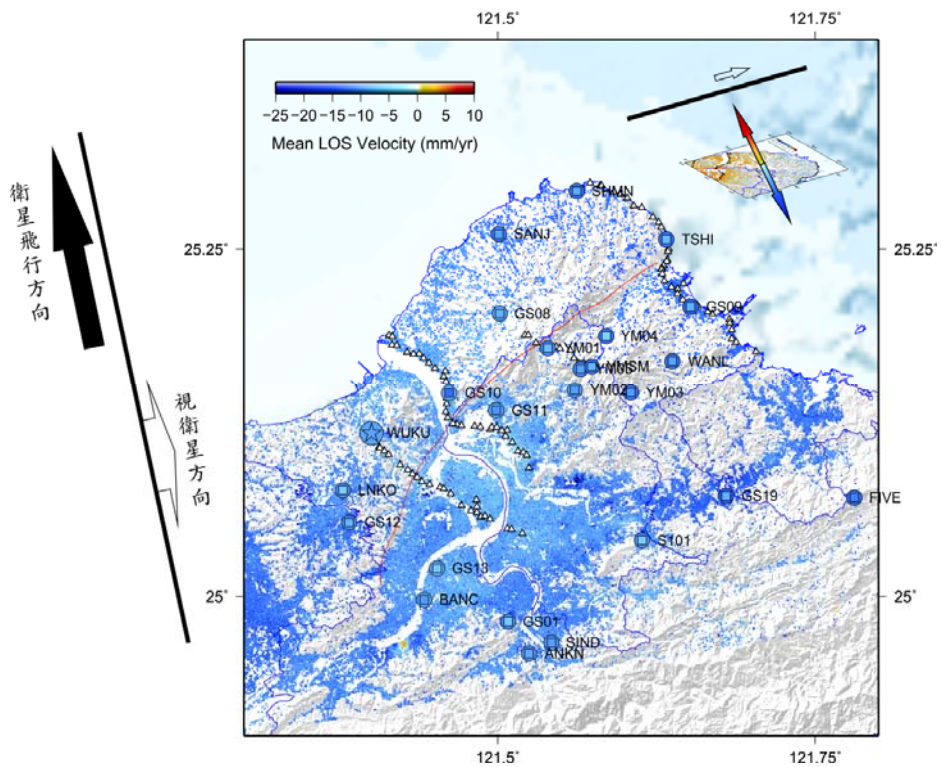


圖 2-1.7：ALOS 與 GPS 視衛星方向速率比對，GPS 參考站為 WUKU。

Profile 04

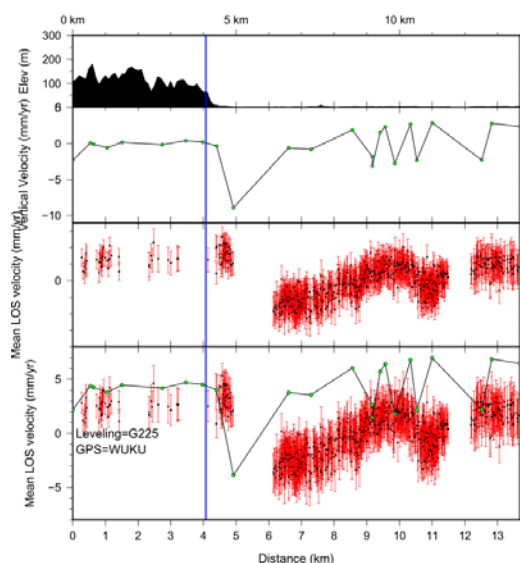


圖 2-1.8：ENVISAT 與編號 4 精密水準測量垂直變形速率和平均衛星方向變形速率，跨過山腳斷層有明顯改變。

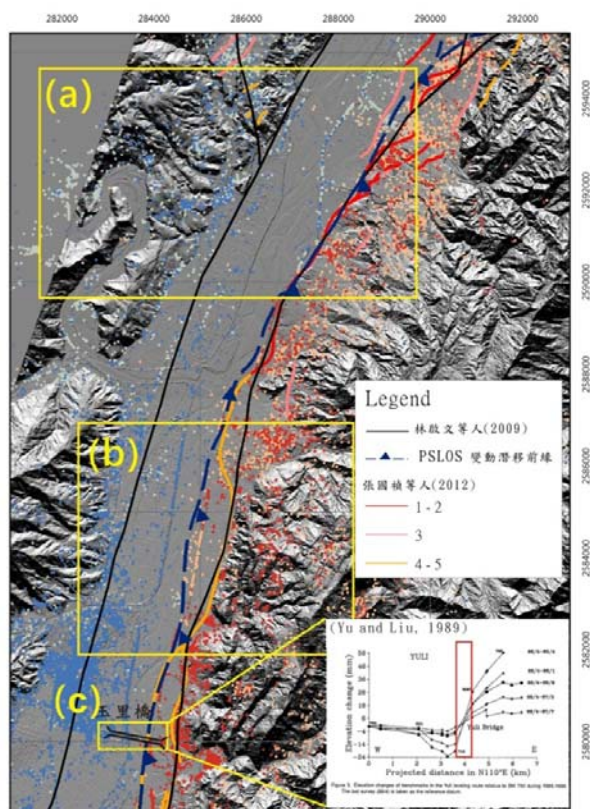


圖 2-1.9：判識斷層跡之比較。黑色線為兩萬五千分之一地質圖標示斷層位置(林啟文等，2009)。藍色線為利用 PS-InSAR 判釋斷層前緣；紅、橘色線為張國禎等(2012)構造線形分布，確實度愈高，線條愈趨於鮮紅色。

2.2 斷層活動潛勢分析

關於斷層活動潛勢分析部分，以中部 7 條及北部 9 條活動斷層進行評估。首先建立活動斷層參數表，透過本計畫建立之活動斷層潛勢評估方法論，了解斷層的重複間隔相關資訊後，以機率法評估活動斷層未來 30、50、100 年最大可能地震規模之發生機率（圖 2-2.1-圖 2-2.3）。

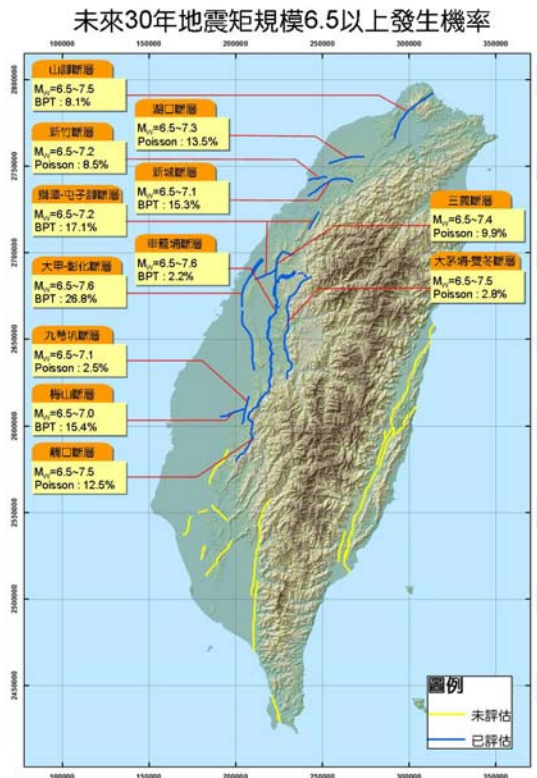


圖 2-2.1：本計畫活動斷層分布及未來 30 年地震發生機率。此大地震發生潛勢評估之說明如下：

- (1) 斷層滑移速率之推估誤差仍大，故發生機率需謹慎參考使用。
- (2) 活動斷層之地震規模大小是由斷層破裂面積所決定，因活動斷層分段與模式有所差異，故斷層規模有不確定之區間。
- (3) 活動斷層錯動與大規模地震時間仍無法準確預測，本機率圖不宜作為地震預測之用途。
- (4) 本機率圖只推估各活動斷層錯動之特徵地震規模區間，有關地震動之評估必須進一步進行地震危害度分析 (seismic hazard analysis) 始能獲得。

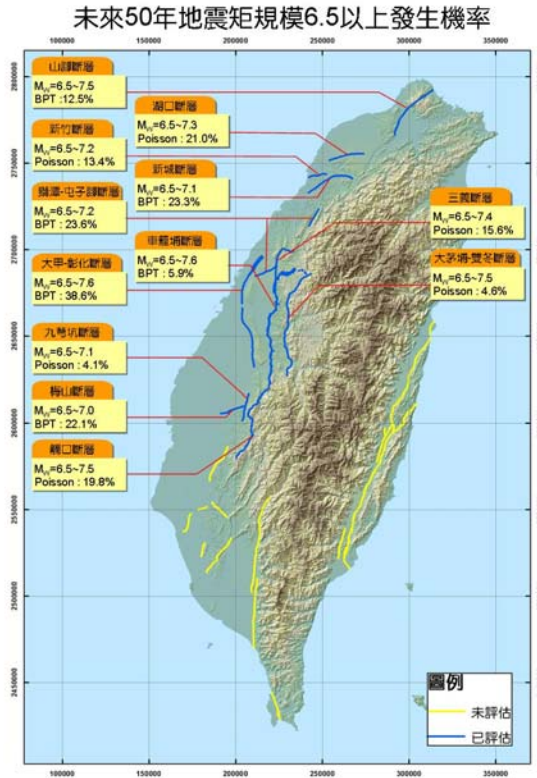


圖 2-2.2：本計畫活動斷層分布及未來 50 年地震發生機率。此大地震發生潛勢評估之說明如下：

- (1) 斷層滑移速率之推估誤差仍大，故發生機率需謹慎參考使用。
- (2) 活動斷層之地震規模大小是由斷層破裂面積所決定，因活動斷層分段與模式有所差異，故斷層規模有不確定之區間。
- (3) 活動斷層錯動與大規模地震時間仍無法準確預測，本機率圖不宜作為地震預測之用途。
- (4) 本機率圖只推估各活動斷層錯動之特徵地震規模區間，有關地震動之評估必須進一步進行地震危害度分析 (seismic hazard analysis) 始能獲得。

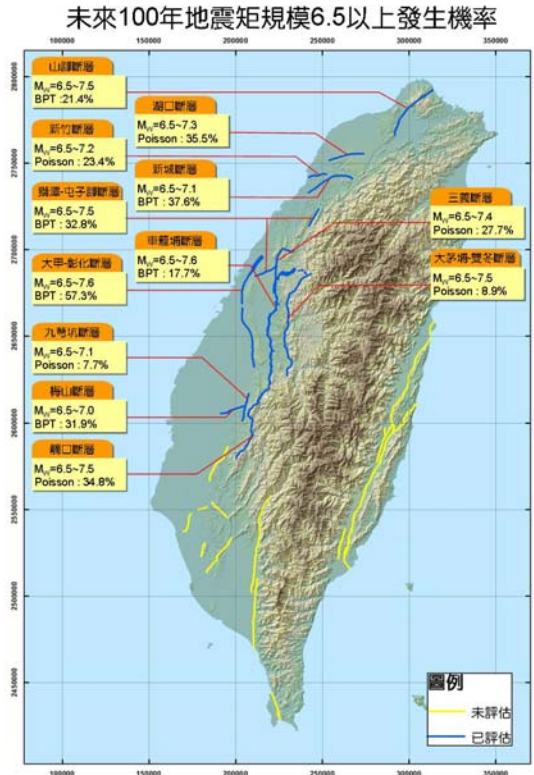


圖 2-2.3：本計畫活動斷層分布及未來 100 年地震發生機率。此大地震發生潛勢評估之說明如下：

- (1) 斷層滑移速率之推估誤差仍大，故發生機率需謹慎參考使用。
- (2) 活動斷層之地震規模大小是由斷層破裂面積所決定，因活動斷層分段與模式有所差異，故斷層規模有不確定之區間。
- (3) 活動斷層錯動與大規模地震時間仍無法準確預測，本機率圖不宜作為地震預測之用途。

本機率圖只推估各活動斷層錯動之特徵地震規模區間，有關地震動之評估必須進一步進行地震危害度分析（seismic hazard analysis）始能獲得。

2.3 井下應變儀觀測資料分析

井下應變儀是一種相當敏感的地殼變形監測儀器，通常需要埋設於地底下一至二百公尺深度以下，以減少溫度變化或其它環境或地表活動所產生的地殼變形。然而，縱使如此細心的設計，仍然無法排除所有的環境變化因素，其中影響較大的幾種因素包括每日的地體潮汐變化、地表空氣壓地變化、地下水文變化以及岸邊海水潮汐負載所造成的地殼變形...等。

但估計各種因素對井下應變儀的影響，不可僅有單一因素來估計，也無法由幾個單一時間多種因素來做回歸分析，畢竟在這階段還無法把所有會影響井下應變儀的所有因素都放在多變數回歸模式中，不完整的回歸模式會因為各種變數間的高相關性而產生錯誤的回歸模式，例如颱風來時的低氣壓往往伴隨著很大的降雨量，氣壓、氣溫、潮汐與地下水都有很明顯的年週期，各變數間的高相關性很容易產生偏差的模式，因此，本

計畫將依各測站各變數一步一步的試圖建立起正確的修正模式，希望能將可以移除的各種效應盡量移除，然後才在剩餘的資料中，試圖找出可能的地震前兆訊號，或是由地震相關的變化找出斷層在地震前、後或同震的活動狀況。

在本計畫中嘗試定義井下應變儀的地震前兆訊號，其搜尋原則如下：

因為尚未修正降雨的效應，本計畫僅搜尋台灣地區規模大於 5.0 的地震前後各 15 天可能的異常，對於降雨期間應變變化的現象先不考慮。對於間隔太長的前兆也先不與考慮。這是因為台灣地區規模大於五的地震並不少，考慮太長的期間會牽扯到太多的地震，往往無法分辨何者與何者相關。在沒有地震事件的影響下才可考慮觀察較長時段的應變資料是否有異常。

對於"異常"的定義，是假設地殼的應力累積除了受地體構造力的穩定作用外，就是受環境變化因素的影響與斷層活動力的作用。在除去了各種環境因素的影響後，理論上在數十天之內，應變的累積大致上該是固定斜率平滑線(意指忽略每日潮汐的變化後)。因此，明顯的斜率改變或應變突跳都可以考慮為"異常"。

事後檢定"異常"是否為地震前兆的判斷：要判斷一個異常現象是否與某一地震相關有三個主要的條件：

在該地震發生的適當時間內，必須要有同震的應變變化，這變化可能是應變突跳(徒升或突降)，也可能是斜率的改變。若無相對應的同震應變，就表示這測站並不在該地震的應力影響範圍內。

在附近幾個井下應變儀觀測站中盡量要有兩個以上的測站在接近的時期中都有呈現"異常"。

對於所看到的"異常"要再回過來看看該時間的環境變化是否也有奇怪的變化。由於環境因子的觀測儀器與觀測程序往往較不嚴謹，資料突跳與資料缺失是經常發生的，適當的資料補遺與篩選是必要的程序，"異常"資料的再確認也是必須的。

2013 年 12 月至 2014 年 11 月期間，針對規模 5 以上的地震，應變異常事件較明顯的有 1 個事件，嘉義網記錄到 1 個應變異常為 5 月 21 日芮氏規模 5.9 花蓮地震；其餘有 3 個規模小於 5 但卻有應變異常的地震分別為 2 月 12 日芮氏規模 4.2 陽明山地震、2 月 5 日至 2 月 8 日新竹群震與 8 月 16 日芮氏規模 3.8 的新北市烏來區地震。圖 2-3.1 為 2013 年 12 月至 2014 年 11 月所有規模大於 5 之地震事件與特別地震事件位置，圖 2-3.2~圖 2-3.5 為地震事件期間的井下應變儀資料。

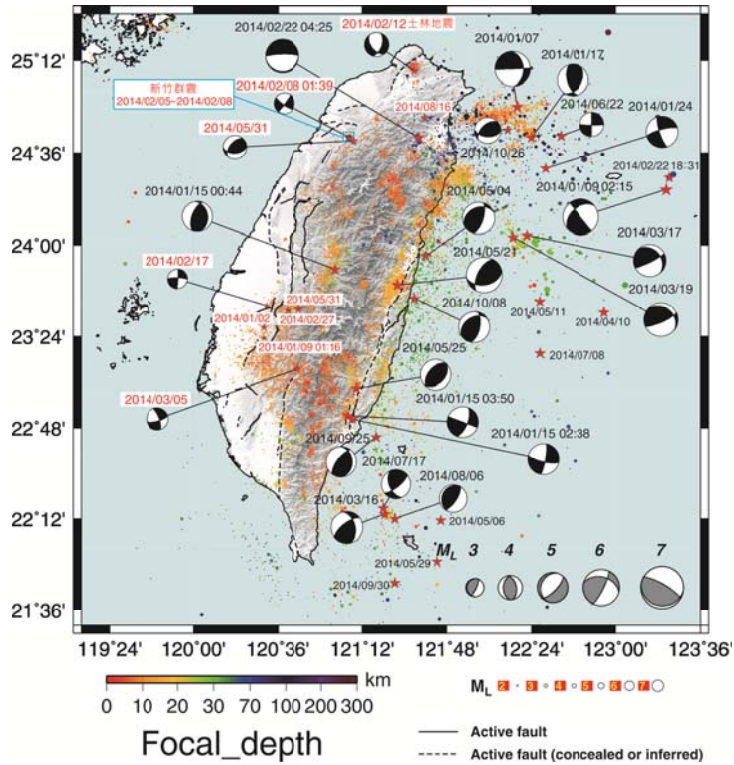


圖 2-3.1：2013 年 12 月至 2014 年 11 月規模大於 5 的地震事件及規模小於 5 的特別地震事件（白底紅字表示）之位置及震源機制圖。2014/11/21 地震事件已於圖框外無秀出。

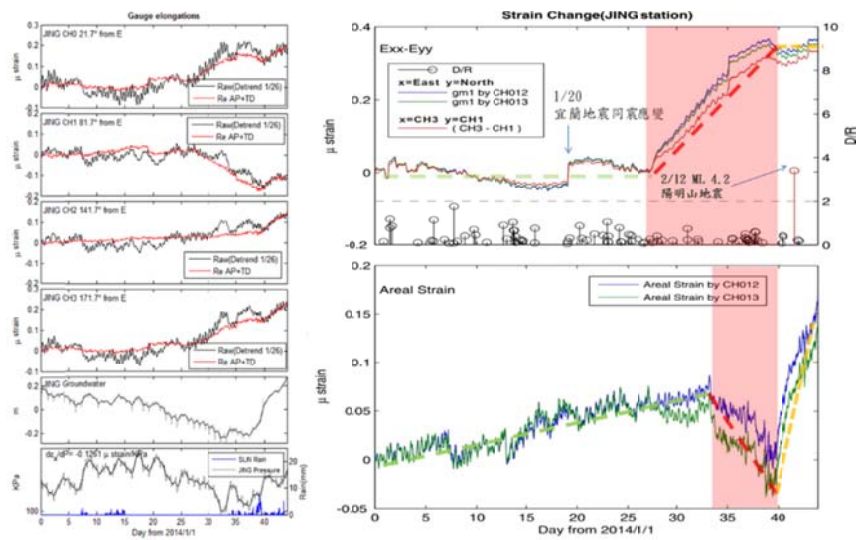


圖 2-3.2：臺北網錦和測站 (JING) 於 2014 年 2 月陽明山地震前的應變資料。左圖為測站 4 個方向應變反應、地下水與氣壓資料，右圖為計算後剪切應變與平面應變。

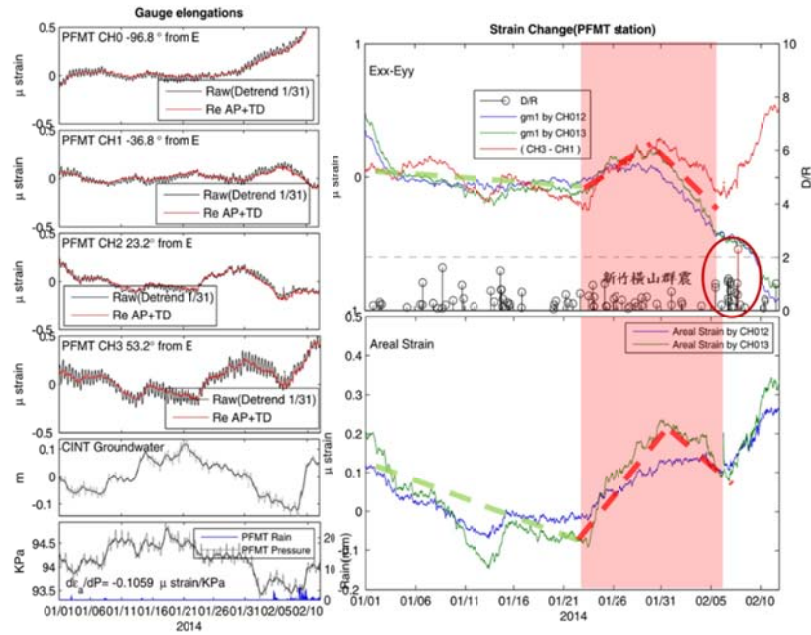


圖 2-3.3：2014 年 2 月新竹群震前後新竹網井下應變儀梅花站應變資料。左圖為測站 4 個方向應變反應、地下水與氣壓資料，右圖為計算後剪切應變與平面應變。

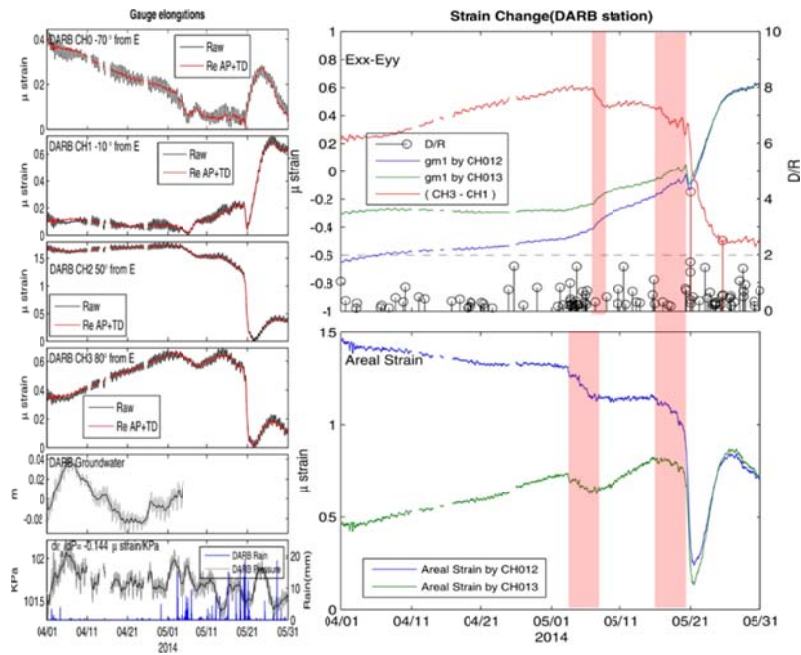


圖 2-3.4：2014 年 5 月花蓮地震前嘉義網達邦站井下應變儀資料。左圖為測站 4 個方向應變反應、地下水與氣壓資料，右圖為計算後剪切應變與平面應變。

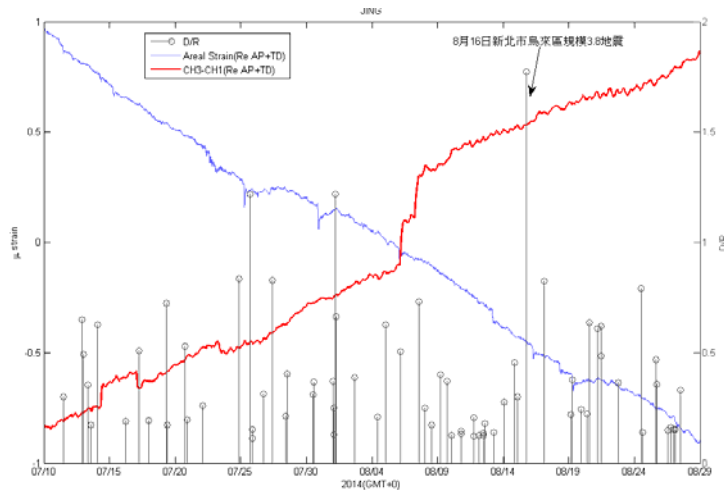


圖 2-3.5：2014 年 8 月新北市烏來區地震前台北網錦和站（JING）井下應變儀資料。應變儀應變資料（藍色:CINT 平面應變;紅色:CINT 剪應變），D/R 為測站距震源的距離的比值，資料皆移除氣壓、地潮影響。地震發生 9 天前有異常應變上升約 0.39 μstrain 。

目前每個月會進行一次井下應變儀的資料分析，分析當月前三個月的一整個月資料（10 月初分析 7 月），資料必須先移除環境變因，如無法移除者，也必須列出環境影響資料，以做為比對之用。當有無法藉由環境因子解釋的應變率變化時，則是為應變儀的應變異常訊號，在藉由必對之後的地震資料，判斷是否地震相關的前兆訊號。分析至 2014 年 10 月為止，井下應變儀有前兆訊號，也成功對應地震的機率在嘉義網、新竹網與台北網分別為：40%、71%與 71%；而有前兆訊號卻沒有對應地震的誤判機率分別為：60%、29%與 29%；地震前沒有前兆訊號的機率為：10%、38%與 25%（表 2-3.1）。

井下應變儀資料時頻分析之目的在於了解應變資料的特性，並借用時頻特性的相似性來了解產生應變異常或變化的環境影響因素。不同事件之頻譜圖中，大坪國小(BMMT)測站與新樂國小(CINT)測站於時頻圖分析結果中均有出現持續不斷的能量分布，其中大坪國小自 2008 年地震事件至 2014 年地震事件時頻圖中固定有 0.1Hz 的頻率，新樂國小(CINT)設站則是以 0.05、0.09Hz 為主，根據上一節自然頻率相關說明，此頻率即為大坪國小(BMMT)測站與新樂國小(CINT)測站之特徵頻率。

井下應變儀資料時頻分析之目的在於了解應變資料的特性，並借用時頻特性的相似性來了解產生應變異常或變化的環境影響因素。102 年度分析嘉義網之達邦(DARB)、太興國小(TAIS)、中興國小(TSUN)三測站的資料，針對 2013 年 1~9 月的井下應變儀面應變資料進行時頻分析。103 年度分析新竹網之大坪國小(BMMT)、新樂國小(CINT)、梅花國小(PFMT)三測站中七項地震事件及 2013 年 10 月~2014 年 10 月的井下應變儀面應變資料進行時頻分析。分析流程為先去除面應變資料的趨勢變化，並針對不同頻率範圍進行短時距傅立葉轉換分析，頻率範圍分別為高頻(0.15~0.5 Hz)、中頻(0.07~0.15 Hz)以及低頻(0.0~0.07 Hz)。再對各個頻段之面應變資料的時間積分(Marginal Time)，取面應變資料的變化趨勢與其對應之累積雨量、地下水水位和氣壓的變化趨勢正規化(Normalize)後進行比對，透過井下應變儀面應變資料與水文資料之

趨勢比對兩者之間的關聯性。

成果顯示各個測站的特徵頻率(0.05、0.09、0.1Hz)會隨站井環境的不同而變;0.03Hz以下之面應變強度變化,能夠反應地震發生前後,應變量開始累積而後釋放的現象。嘉義網分析中採用天然事件(地震與颱風)所產生的應變與環境變數來尋找事件所造成變化的特性與原因。高頻強度變化趨勢與氣壓變化趨勢,在颱風影響台灣期間具有顯著的負相關現象:當氣壓極低時,對應之高頻面應變強度較大(伸張)。而高頻面應變強度與地下水水位趨勢有正相關的情形;地下水壓高則地殼有伸張應變颱風時大氣壓力與累積雨量為逆相關的關係,是故高頻強度變化與累積雨量變化趨勢具有正比關係,這些都是已知的合理現象。在這一次的分析中,證實此方法的可信度,並可以此方法來找出變數與應變數之間的精確數值關係。未來期望也可以對未知原因的異常應變,利用時頻分析來找出異常的原因,或是與其它因素的相關性。

亦針對中央氣象局花蓮地震地下水測站(HWA:緯度 23.9769 度、經度 121.6047 度)所紀錄之水位變化(資料長度:2013/9/12 至 2014/11/02)進行時頻分析,地下水時頻圖中於地震發生前後皆會發生頻率變化,其物理機制原因仍待討論。

表 2-3.1: 井下應變儀前兆判釋統計表。

	嘉義網		新竹網		臺北網	
	應變異常判斷	一個月內是否有對應之地震	應變異常判斷	一個月內是否有對應之地震	應變異常判斷	一個月內是否有對應之地震
2013-08	X	X	O	X	X	X
2013-09	X	X	O	O	O	O
2013-10	O	O	O	O	X	O
2013-11	X	X	X	X	O	X
2013-12	O	X	O	X	X	X
2014-01	X	X	X	O	X	O
2014-02	X	X	O	O	O	O
2014-03	O	X	O	O	O	O
2014-04	O	X	X	X	X	X
2014-05	O	O	X	O	X	X
2014-06	X	X	X	X	X	X
2014-07	X	X	X	X	O	O
2014-08	X	X	X	X	X	X
2014-09	X	X	O	O	O	X
2014-10	X	O	X	O	O	O
前兆判斷成功機率	40%		71%		71%	
前兆誤判機率	60%		29%		29%	
未指示前兆機率	10%		38%		25%	

2.4 地球化學與地下水觀測資料分析

本計畫前兩階段之觀測計畫中（2005-2012 年）主要著重於區域之土壤氣體調查與氣體連續觀測站之設置、水壓觀測站之設置，逐年於各地區鄰近斷層之敏感地區分別設置土壤氣體觀測站、與水位觀測井(表 2-4.1 與圖)，進行氣體成份與水位之觀測，成為一個初步的觀測網，配合鄰近地殼變形與地震觀測資料，探討各研究區域內斷層、地震活動與觀測結果之關聯，並進一步觀測可能之前兆訊息、及其活動可能機制。

表 2-4.1：第二階段已設置之連續觀測站配置儀器及分析項目。

站位	配置儀器	分析樣品	分析成份
中崙濁水潭站 (CL)	四極桿質譜儀、氬氣分析儀、 不斷電系統、數據專線	土壤氣體	N ₂ , O ₂ , Ar, H ₂ O, CO ₂ , CH ₄ , Rn
新竹大平地站 (TPT)	氬氣分析儀、二氧化碳分析儀、 不斷電系統、數據專線、氣象控制系統	土壤氣體	Rn, CO ₂
雲林古坑站 (GK)	氬氣分析儀、二氧化碳分析儀、 不斷電系統、數據專線、氣象控制系統	土壤氣體	Rn, CO ₂
屏東屏科大站 (PT)	氬氣分析儀、二氧化碳分析儀、 不斷電系統、數據專線、氣象控制系統	土壤氣體	Rn, CO ₂
台東池上站 (CS)	氬氣分析儀、二氧化碳分析儀、 不斷電系統、數據專線、氣象控制系統	土壤氣體	Rn, CO ₂
花蓮東華站 (DH)	氬氣分析儀、二氧化碳分析儀、 不斷電系統、數據專線、氣象控制系統	土壤氣體	Rn, CO ₂
雙溪水位站 (SS)	水壓計、不斷電系統、 數據專線，資料記錄器	水壓變化	-
沄水水位站 (YS)	水壓計、不斷電系統、 數據專線，資料記錄器	水壓變化	-
安通水氣站 (AT)	氬氣分析儀、不斷電系統、 數據專線，資料記錄器	溶解氣體	Rn
社頂水氣站 (ST)	氬氣分析儀、不斷電系統、 數據專線，資料記錄器	溶解氣體	Rn, CO ₂

過去第一階段的主要研究成果包含土壤逸氣調查與當地構造關連之探討、氣體成份變化之連續觀測與斷層地震活動之關連、以及斷層帶土壤逸氣量之測量與其應用。根據已經設立之各個觀測站之觀測結果，顯示各觀測站之氣體成份皆有顯著的變化，可能與地震活動有關，適合予以持續觀測。其中嘉義中崙濁水潭站對於發生於南部與東南部地區的地震活動有較為敏感的反應(圖)；而新竹大平地站則對於北部與東北部地區的地震較為敏感(圖)。南部的的水位觀測結果亦顯示對於南部之地震活動有敏感反應(圖)。

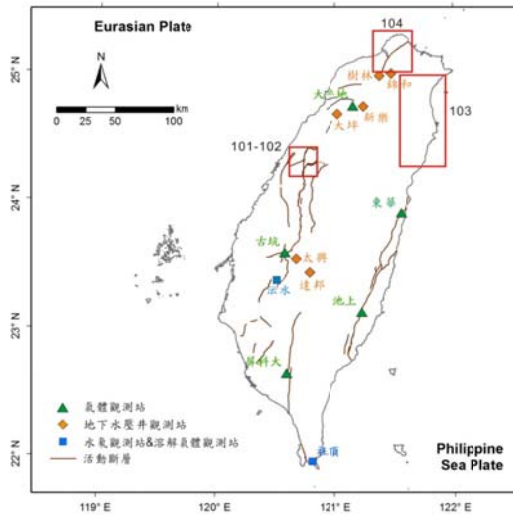


圖 2-4.1：本計畫已設置之觀測站與本階段（102~105 年）預定設置觀測站之區域。方框為本階段（年度）預計調查之觀測站設站評選區域；方框所標示之數字代表計畫年份。

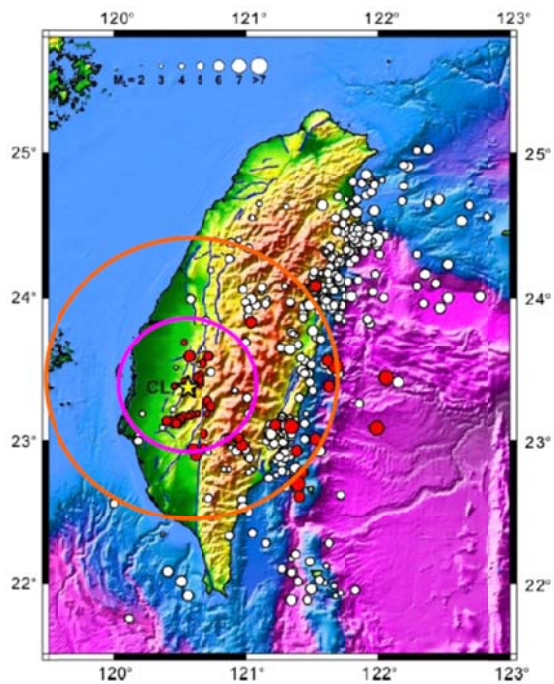


圖 2-4.2：嘉義中崙濁水潭觀測站對於發生於台灣南部與東南部地區的地震活動有敏感的反應（2003/1/1~2004/7/31），非常適合持續長期觀測。其中星形符號位置為觀測站；圓形符號為地震發生之位置（符號大小代表不同規模），其中紅色圓形符號為觀測站有反應的地震。初步結果看來，發生於觀測站 60 公里內且地震規模大於 4.5 者，本觀測站皆有很好的感應；而發生於 60-120 公里之地震則對於較大之地震活動（規模大於 5.0）才有反應。

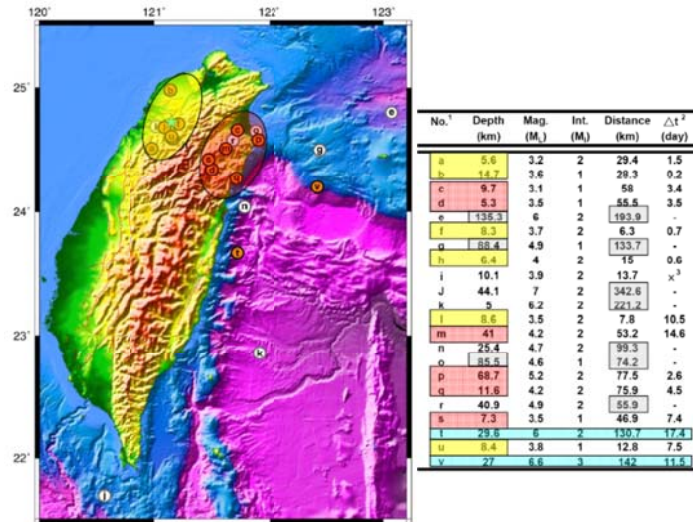


圖 2-4.3：新竹大平地觀測站對於發生於台灣北部與東北部地區的地震活動有敏感的反應 (2006/6/14-2007/9/9)，非常適合持續長期觀測。其中星形符號位置為觀測站；圓形符號為地震發生之位置，實心圓形符號為觀測站有反應的地震。初步看來，發生於觀測站附近 30 公里內且淺源 (<15 公里) 之地震，本觀測站皆有很好的感應；而發生於 40-80 公里之地震亦有不錯之反應。

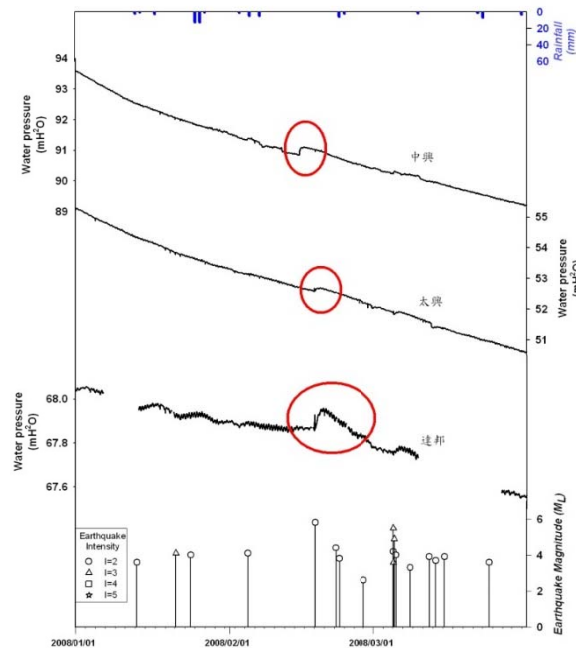


圖 2-4.4：嘉南地區的中興、太興、達邦水位觀測站 (2008/1/1-2008/3/31) 對於發生於台灣南部與東南部地區的地震活動有敏感的反應。於 2009 年與 2010 年執行計畫期間，亦多次於地震發生前有異常水位之變化，顯示這些水位觀測井，適合持續長期觀測。

除了部分測站由於觀測結果不佳而停止觀測或遷站（例如：嘉義中崙土壤氣體觀測站與原汴水地下水位觀測站），本年度承續前二階段已設置之氣體、水壓與地下水氦和溶解氣體觀測站，持續進行測站維護與資料分析，以期於全島能夠完成較為完整之觀測網。

根據過去的土壤氣體與水位觀測結果顯示，許多觀測站在主要的大地震發生前幾天都有異常的變化，可以視為震前反應。目前我們正持續累積更多的經驗，以評估不同站位對於不同地震（不同規模、發生位置、與地震發生機制等）的異常反應範圍。

總結土壤氣體觀測結果顯示，新竹大平地測站對於台灣北部的地震活動較為敏感，尤其是宜蘭地區一帶；雲林古坑觀測站則對於台灣中南部地區的地震活動較為敏感；屏東屏科大站對於台灣南部地區的地震活動比較有關聯；花蓮東華站對於台灣東部地區鄰近之地震活動有關；而台東池上站之土壤氦氣氣體成份則與台東及花蓮南部附近的地震活動有很顯著的關連性。尤其新竹大平地、嘉義中崙、與台東池上站之觀測結果與地震活動有明顯關連、且有幾次規模較大的地震活動皆有異常的前兆變化（表 2-4.2），非常值得進一步持續觀測。

表 2-4.2：主要地震活動發生前於多個測站皆有異常氦氣反應。

地震資料				大平地站			古坑站			中崙站			屏科大站			池上站		
西元時間	規模	深度 (km)	震央位置	震度	gal	氦氣異常	震度	gal	氦氣異常	震度	gal	氦氣異常	震度	gal	氦氣異常	震度	gal	氦氣異常
2009/11/5 17:32	6.2	24.1	南投名間	2	6.2	●				5	175.8	●				2		●
2009/12/19 21:02	6.9	43.8	花蓮市	4	29.4	●				5	131.5	●				4		●
2010/1/19 14:09	5.6	41	花蓮市							3	22.5	●				2	5.0	●
2010/2/12 10:41	5.2	14	南投埔里	1	1.0	●	2	4.6	●	4	27.2	●				2	2.9	●
2010/3/4 08:18	6.4	22.6	高雄甲仙				4	36.0	●	6	377.5	●	5	99.5	●	4		●
2010/11/21 20:31	6.1	40.7	花蓮市	2	4.8	●										4	28.1	●
2010/12/06 10:14	5.2	25	花蓮西林	2		●				4		●				2		●
2011/03/20 16:00	5.8	16	台東外海									●			●	4	28.1	●

● 表示氦氣濃度有震前異常

經由地震活動所造成的異常變化而可以初步劃分出各觀測站的異常反應範圍，如**錯誤！找不到參照來源**。所示，當各測站的反應區間出現交集處，則地震可能將發生

在這個區域。例如：當北部的大平地觀測站出現異常且嘉義的中崙測站也出現異常變化時，此時兩個測站的反應區間交集處則可能為地震即將發生的位置；如果東部的池上觀測站也出現異常變化，那則可更提高準確度。

2009 年度至今的水壓觀測結果顯示，新竹及嘉義地區之地下水壓觀測井記錄到數次地震前兆反應。譬如 2012 年 2 月 26 日的霧台地震，新竹新樂站於震前 7 至 8 日出現明顯的水位下降異常，正好也與 2013 年 3 月 27 日的南投地震震前異常相當類似。將 2008 年 11 月至 2013 年 11 月有震前地下水壓異常之地震震央空間分布圖繪製於圖 2-4.6。

過去研究初步觀測結果顯示，土壤氬氣之變化經常與鄰近水位站之變化可以對比，且土壤氬氣之變化經常發生於水位之變化（錯誤！找不到參照來源。），有助於我們往後對於異常前兆之判定。

然而，嘉義四座地下水壓觀測井，中興、太興兩站屬於新井，水位監測已經穩定進行，而達邦站目前狀況不佳，正在處理中；沄水站因 2012-2013 年未觀察出任何異常，且發現井體本身有產氣，故建議將沄水測站改為進行氣體地球化學的觀測，目前已前往沄水井採取水樣，進行初步分析與調查。此外，中崙濁水潭土壤氣體測站近年由於大雨影響，持續沖刷侵蝕測站地基，目前測站後方與潭水僅有一步之隔，觀測站及其旁邊的 FRP 箱（內有地震儀）皆已傾斜，短期內雖尚無倒塌風險，惟之後若繼續大雨發生，很難確保測站不會因後方遭沖刷而掉落潭水裡（如圖 2-4.8 所示）。由 2013 年觀察結果顯示，每當梅雨季或是颱風季，土壤逸氣通道常會受到雨水侵入，導致儀器抽到水故障，增加辨識該段時期資料的困難，因此只有在乾季才有較佳的觀測品質。綜合上述，認為嘉義濁水潭測站現地已不適合進行連續觀測且遷站實屬必要。本計畫於 2014 年 4 月初，已將原中崙濁水潭土壤氣體測站設備移沄水地下水觀測站，改建為溶解氣體觀測站。

計畫研究團隊郭明錦教授自 2003 年 7 月起，持續在台灣東部玉里（安通溫泉）長期觀測地下水水氬濃度異常變化至今，已有優良之研究成果。2003 年 12 月 10 日地震規模 Mw 6.8 成功地震來臨前，成功在安通溫泉地下水水氬監測站捕捉到震前地下水水氬濃度異常下降之地震前兆。此外也在 2006 年 4 月 1 日及 2008 年 2 月 17 日池上斷層發生地震矩規模 Mw 6.1 及 Mw 5.4 強震前，觀測到地下水水氬濃度異常下降之地震前兆（圖），此為在同一監測點觀測到地震前兆氬濃度異常之再現性。

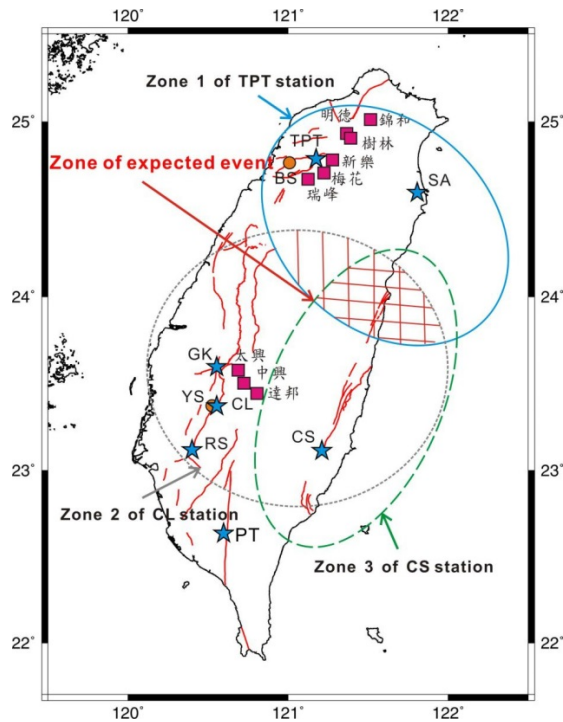


圖 2-4.5：地球化學觀測站的地震反應區間示意圖，藍圈、灰圈和綠圈分別代表大平地測站、中崙測站和池上測站的可能地震反應區間範圍，其交集處代表地震可能發生的地點。

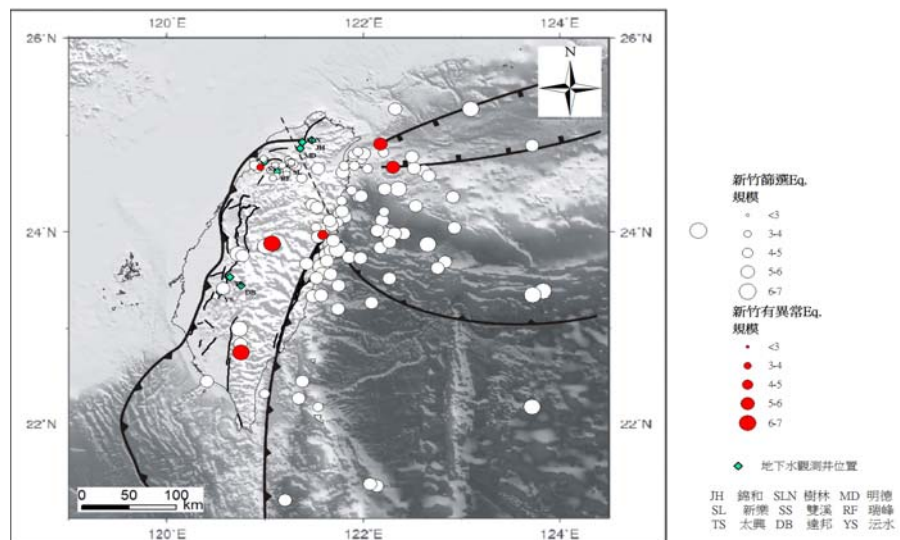


圖 2-4.6：台灣島與鄰近地區的板塊構造架構以及新竹地區觀測井有前兆反應的地震震央分布圖（2008 年 11 月至 2013 年 11 月）。

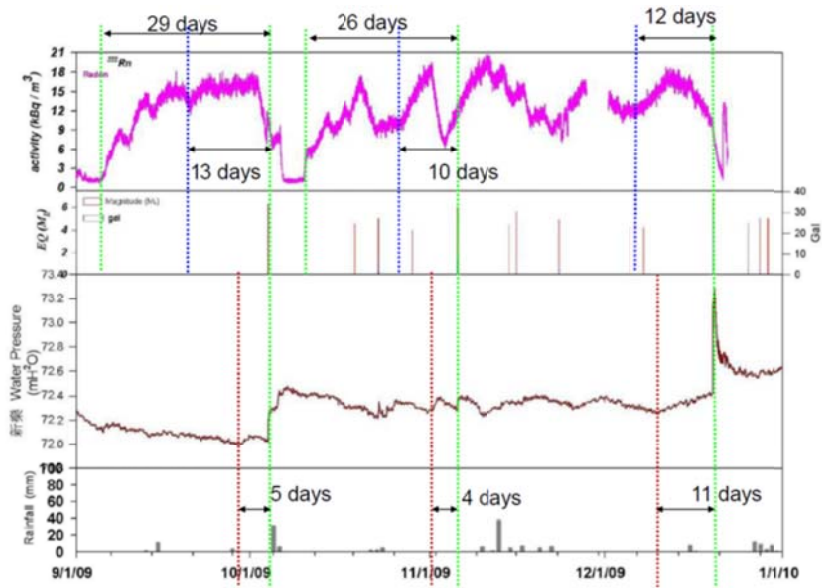


圖 2-4.7：大平地氣體觀測站與新樂水位觀測站之比較（2009/9/1-2009/12/31）。氣體之前兆異常變化經常比水位之異常變化要早數天發生。



圖 2-4.8：中崙濁水潭觀測站野外現地照片，圖中顯示測站與潭水之間的距離逐漸接近，有崩塌之疑慮，現已改裝為溶解氣體觀測站。

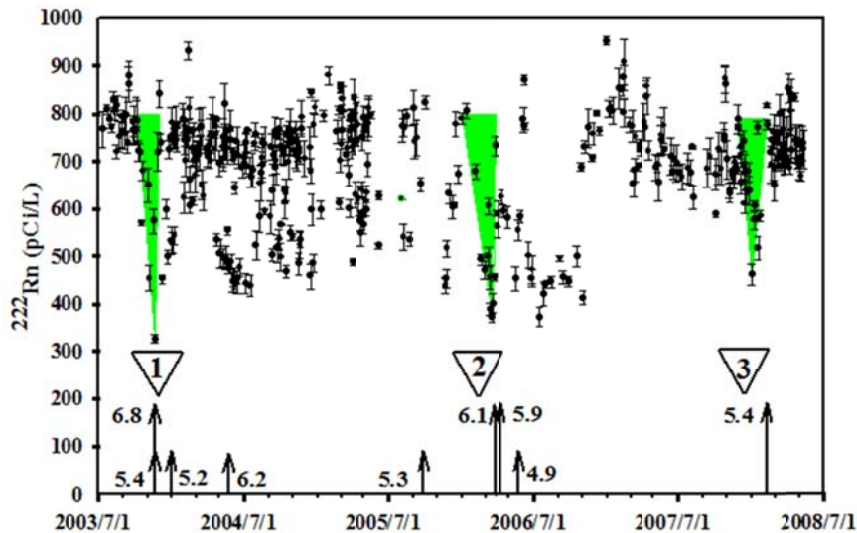


圖 2-4.9：台灣東部吉祥水氣監測站 2003-2008 年之水氣濃度監測圖 (Kuo et al., 2006a, b; 2009; 2010a, b, c; 2011)。

本計畫在花東縱谷南段附近安通溫泉安通站監測井定期採集水樣，分析地下水水氣及溶解氣體（甲烷及氮氣）。同時，現地連續監測地下水溫度及水位。2009 年 3 月至 2011 年 11 月，花東縱谷南段未發生強震（ $M_w > 6.0$ ），在這期間，安通溫泉飯店監測井（安通站）中地下水水氣及地下水溶解氣體（氮氣及甲烷）濃度亦未觀測到異常之變化。雖然在執行本計畫期間安通溫泉安通站未發現地下水水氣異常下降之變化，但安通站在 2008 年 2 月 17 日發生地震矩規模 $M_w 5.4$ 安通地震前，能捕捉到地下水水氣異常下降之地震前兆，顯示安通溫泉具適當地質條件成為理想地下水水氣地震前兆觀測站，建議持續長時間監測安通站地下水水氣濃度，預期捕捉下次在花東縱谷南段發生災害性地震（大約 $M_w > 6.0$ ）之前兆。

本計畫於 2010 年在恆春半島墾丁社頂監測站執行地下水水氣及溶解氣體（二氧化碳）之定期採樣及實驗室分析，並且於 2010 年 3 月 4 日發生芮氏地震規模 $M_L = 6.4$ 的高雄甲仙地震前，觀測到地下水水氣及溶解氣體（二氧化碳）同時有明顯的異常下降之前兆行為，且趨勢一致（圖），此結果支持安通溫泉地震前兆地下水水氣逸散機制 (Kuo et al., 2006a, b; 2009; 2010a, b, c; 2011)。本計畫並於 2011 年分別在安通溫泉和墾丁公園社頂新設置地下水水氣和溶解氣體連續監測站，以期即時的連續監測資料，能有助於釐清溶解氣體與地震活動的關聯性，使全島能夠完成較為完整之地球化學觀測網。

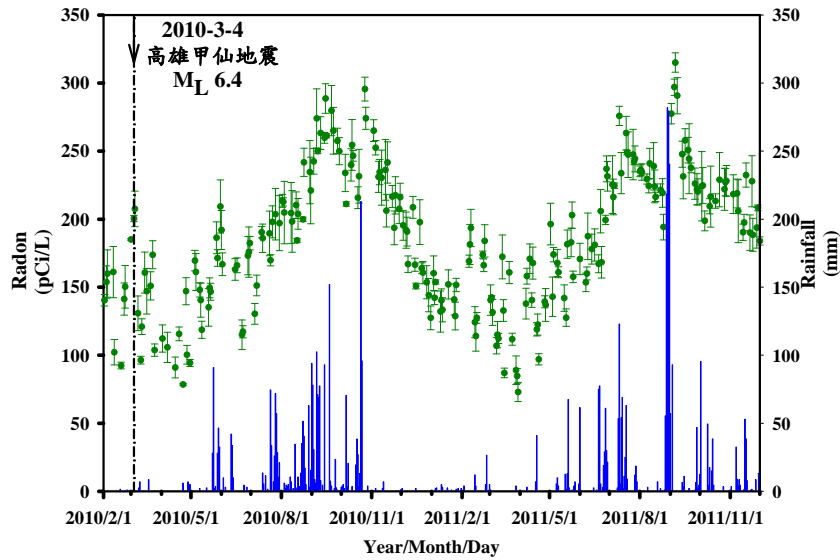


圖2-4.10：社頂站地下水水氡濃度變化與雨量關係圖（雨量資料來源：中央氣象局）。

2.5 整合資料分析

累計 2009 年 1 月至 2014 年 11 月共 174 個規模大於 5 之地震事件，在這期間各種觀測的異常記錄標示在相關的地震編號上，如圖 2-5.1。圖 2-5.2 為 2013 年 12 月至 2014 年 11 月間規模大於 5.0 的地震事件，其中發生於 2014/05/21 10:03 規模 5.9 發生在花蓮縣政府南偏西方 33.3 公里的地震 (ID=163) 同時在嘉義地區觀測到三樣異常，分別為：(1) 二個地化氣體記錄異常（中崙測站、東華測站）；(2) 井下應變儀（達邦站）及該地區尚未正式列入異常觀測運作的 GPS 地表應變；(3) 嘉義地區中興地下水站水位在震前 13 小時突然急速上升。

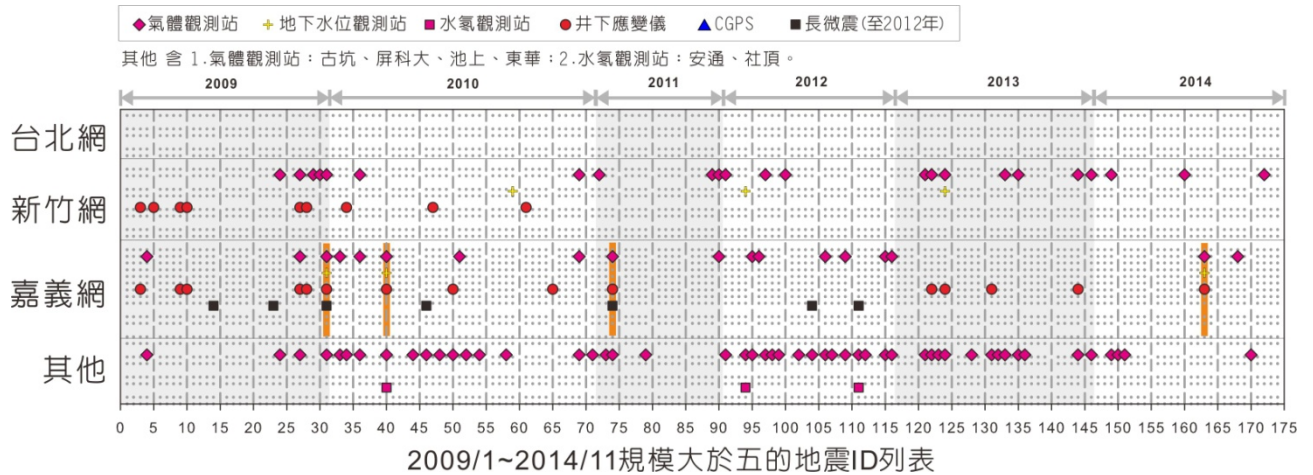


圖 2-5.1：2009 年 1 月至 2014 年 11 月規模大於五地震之異常記錄對應比較圖。水平軸的數字代表事件 ID，粉紅色菱形、黃色十字、粉紅色方形、紅色圓圈和黑色方塊分別代表氣體、地下水位、水氡、井下應變儀和地震訊號異常，而垂直橘線則代表同一觀測網有三個或以上的同步異常觀測。

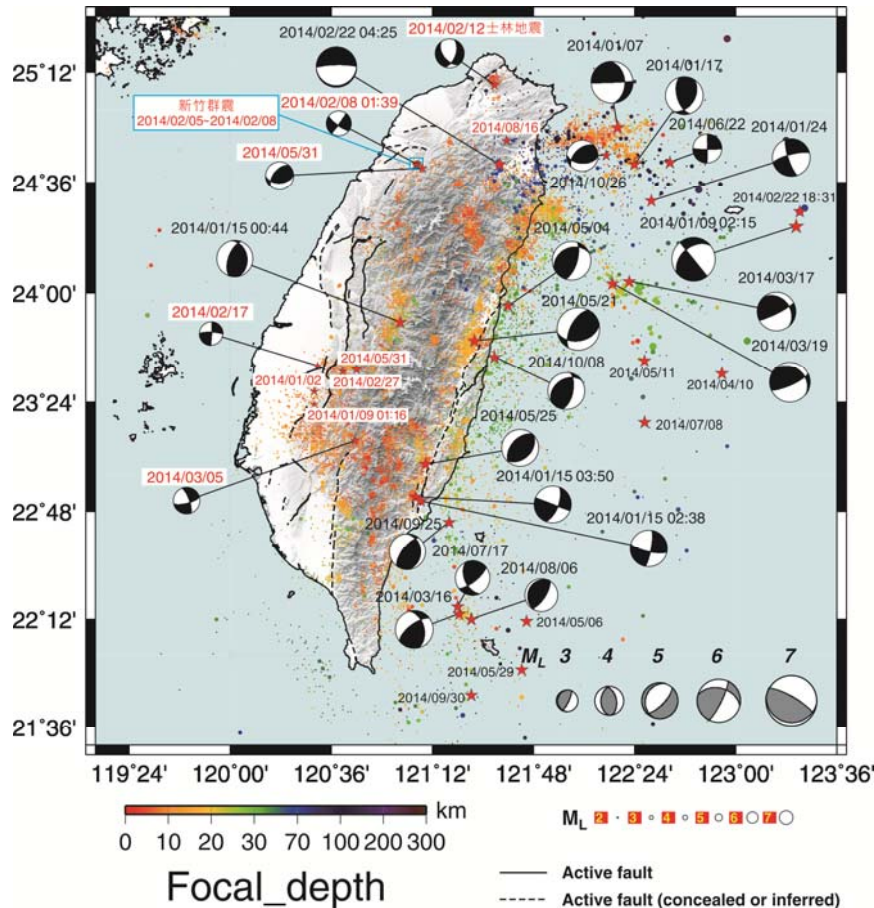


圖 2-5.2：2013 年 12 月至 2014 年 11 月規模大於 5 的地震事件及規模小於 5 的特別地震事件（白底紅字表示）之位置及震源機制圖。

在這一階段的觀測中，主要可以分為三個時段的異常事件，下面將探討各種觀測的異同點，希望對各類異常與地震的關係能有進一步的了解。

● **2014/5/21 花蓮鳳林地震 (M_L 5.9) (ID=163)**

此地震對於嘉義井下應變儀網產生疑似的應變異常訊號，該訊號發生於地震前 5/3 ~ 5/8 之間（約 15 天前），由於資料已排除氣壓與地潮，相對於可能影響應變的降雨，可以比對 5/21 降雨對於應變的反應，結果顯示 5/3 ~ 5/8 的應變反應與 5/21 降雨的應變反應趨勢並不相似，大致可以排除降雨的影響。

在地球化學觀測方面，土壤氣測站嘉義中崙 (CL) 與花蓮東華 (DH) 兩站均出現氬氣的異常，中崙站在 22 天前，東華站在 31 天前，即有氣體異常的前兆反應。由於地震規模大，地底下釋放的氣體濃度長達三週以上，兩站皆超過異常門檻值。中崙站扣除掉中間偶有受到降雨影響的部分，仍可看出其異常變化的趨勢。東華站則是從 4 月中開始緩慢上升，直到下降仍維持平穩的趨勢，唯有利用時序分析標準化，才能看出其有異常變化。

地下水觀測則在嘉義地區的中興國小觀測站於三月起水位異常穩定，水位讀數維持在 8.9 公尺（上下波動不超過 10 公分）持續兩個多月，直到 5 月 20 日夜間，也就是地

震前約 13 小時的時間點突然快速上升，地震發生後也未回降，可惜在 5 月 28 日水位計遭受雷擊而資料停止，無法進行後續的判讀。太興地下水壓觀測站甚至有同震的變化。

這一個地震的規模較大，但大多數有異常的觀測站都離地震較遠，所以異常的啟動期差異甚大，從一天前一直到 30 天前不等。若考慮 GPS 的地表應變，因 DARB 站的地下水停止記錄，改用 TAIS 站的地水資料勉強修正，圖 2-5.3 中可看出在震前修正結果的一致性。5 月 21 日花蓮地震，井下應變儀與 GPS 應變在地震前約 20 天由壓縮變為鬆弛的變化，地震後約一個月，兩種資料都顯示地殼壓縮，但在六月中以後，井下應變儀資料持續壓縮，但 GPS 應變則回復變為鬆弛，一直延續到年底。圖中亦可看出新竹群震對這一組資料也略有影響，不過若單獨只看這資料並不容易往這一方向去解釋，畢竟，臺灣斷層太密集，任一地方的地殼都受遠近每一斷層活動的影響。

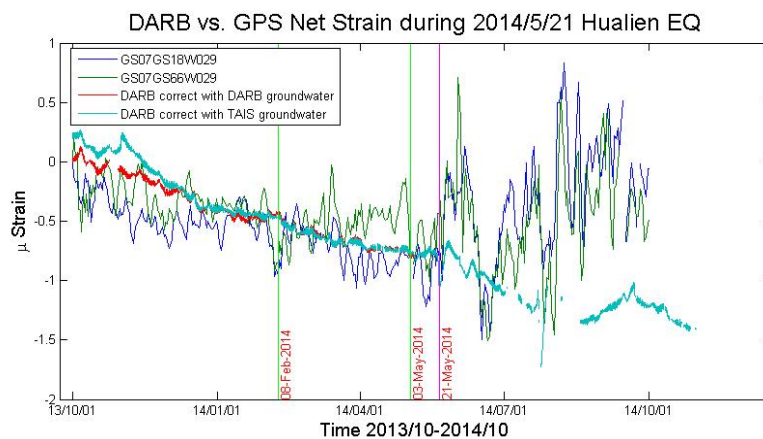


圖 2-5.3：DARB 井下應變與其附近兩個 GPS 網的地表應變的時間序列，圖中並標示了新竹群震 2/8 與井下應變異常起始時間 5/3。

● 2014/2/5~2/8 新竹橫山群震 (M_L 2.3~3.4)

新竹地區的井下應變儀共有 BMMT、CINT 與 PFMT 三個站，地震前大約 1/31 有異常應變，其中 PFMT 在 1/31 ~ 2/4 之間上升約 $0.0688 \mu\text{strain}$ ，然後在 2/4 地震前極速降低（壓縮），緊接著發生群震，然後至 2/7 間下降約 $0.057 \mu\text{strain}$ ，再到 2/10 升至最高點，然後仍持續有相當大的變化。若再看同期間的另外兩個站：BMMT 與 CINT，其變化與 PFMT 大不相同，這顯示這些測站位於震源附近，在斷層的不同方位就會有大不相同的應變，甚至完全相反（擠壓 vs. 舒張）的應變。

在地球化學氣體觀測方面，大平地站（TPT）在 10 天前，由原始資料觀察有明顯的氣體異常反應，氬氣是緩慢的上升，到 2 月 4 日才下降，不過隨即於一天內又緩慢上升，直到因雨影響逸氣來源導致氬氣降至空氣值狀態。利用時序分析方法，仍可看出其標準差切過我們定義的異常門檻。

在水位觀測方面，以往新樂（CINT）站水位異常的型態，多以突降的方式呈現，而今年 1 月 13 日起的水位異常則是出現先升後降的型態，與以往不同；經過氣壓修正後，仍能發現 1 月 13 日新樂水位在無雨的情況下上升約 7 公分左右，這段較高的水位維持

了 22 天，在 2 月 4 日快速的降回原本的水位高度，之後便發生 2 月 5 日開始的新竹橫山群震。

綜觀幾種異常的變化，地下水約在 22 天前開始有異常，氣體異常則在 10 天前開始，井下應變則在 5 天前開始有異常，但所有的觀測都在 2/4 群震開始的前一天突然轉向。

若看此地區較長期的應變，包括井下應變以及地表的 GPS 應變，如圖 2-5.4 顯示震源附近的 GPS 觀測站與井下應變儀觀測站的相關位置，並利用兩個 GPS 三角網，GS16-GS61-KSHI 與 GS61-PLAN-KSHI，來計算地表應變。這次的群震剛好位於兩個 GPS 三角網交界之處。其結果如圖 2-5.5 所示。

自 2013 年起，BMMT 與 GPS 的地表應變較為吻合，在 2013 年 3 月底有顯著壓縮，9 月底些微膨脹，整體上與地表 GPS 應變相當一致。GPS 在 2013 年 6 月到 8 月的大幅度跳動，但 BMMT 與 PFMT 井下應變資料並無對等的變化。2013 年 10 月各種應變資料開始有所差異，BMMT 與 GS16-GS61-KSHI GPS 三角網的地表應變走勢一直都很接近，GS61-PLAN-KSHI GPS 三角網的地表應變則居中，PFMT 的井下應變則顯示完全相反的變化，而且所有的應變並不因 2 月的群震而結束，反而一直持續到資料處理的最後，5 月 31 日。若仔細追蹤此地區的地震，可發現在 2014 年 5 月還有兩個地震(表 2-5.1)，最大規模 4.2，其震源機制海灘球可見圖 3.73，應為東北西南走向那一條斷層面。此地區應變在 2 月群震後仍持續壓縮，至 5 月 31 日再發生兩個地震後才趨平穩(見圖 2-5.6)。

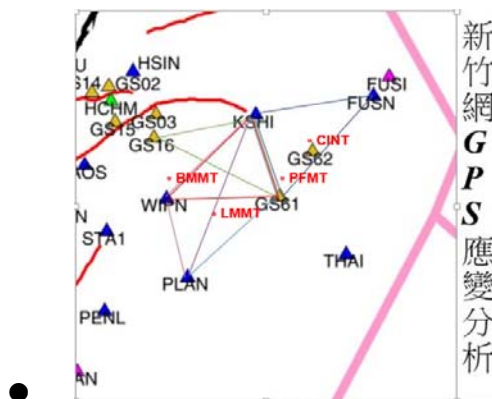


圖 2-5.4: 顯示震源附近的 GPS 觀測站三角網，GS16-GS61-KSHI 與 GS61-PLAN-KSHI，以及井下應變儀觀測站的相關位置。

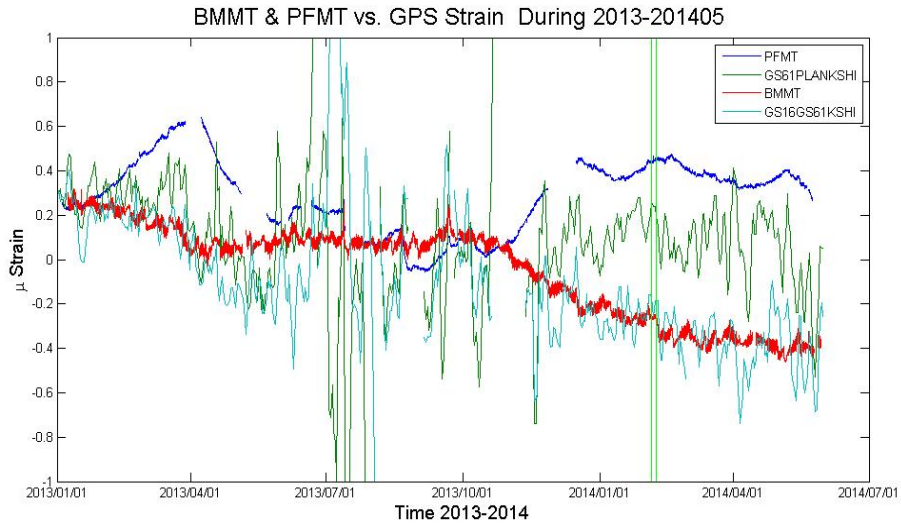


圖 2-5.5：新竹井下應變儀觀測站 BMMT 與 PFMT 於 2013 ~ 2014 年間的資料與震源附近的 GPS 觀測站三角網，GS16-GS61-KSHI 與 GS61-PLAN-KSHI 的時間序列。

表 2-5.1：新竹地區在 2014 年 2 月群震之後，5 月底在相同位置仍有兩個地震。

編號	發生時間	經度	緯度	深度	規模	地點
第 079 號	5 月 31 日 10 時 51 分	121.11	24.70	9.2	4.2	新竹縣政府 東南方 17.7 公里
小區域	5 月 31 日 12 時 36 分	121.14	24.67	5.0	2.8	新竹縣政府 東南方 21.4 公里

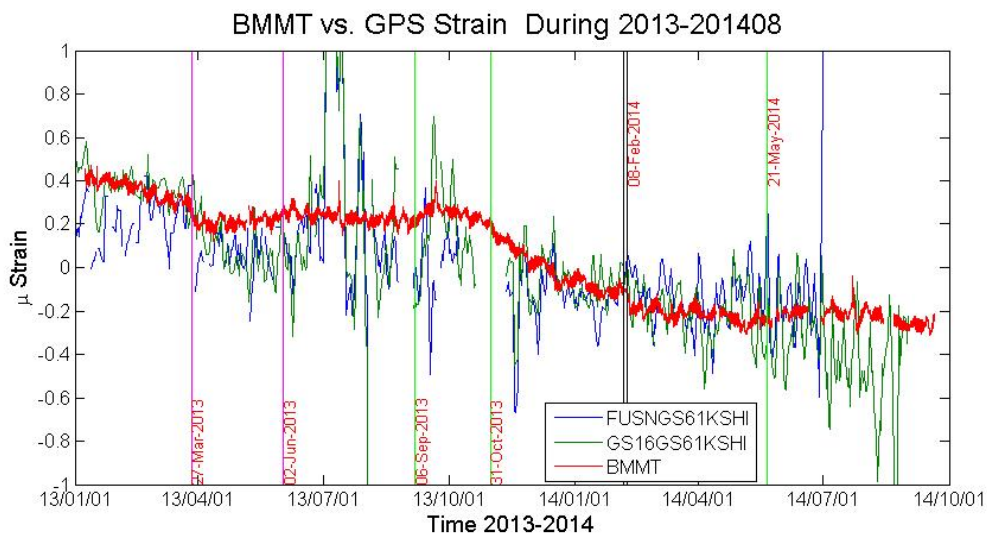


圖 2-5.6：新竹井下應變儀觀測站 BMMT 在 2014 年 2 月群震後，應變仍持續壓縮，至 5 月 31 日再發生兩個地震後才趨平穩。

● 2014/2/12 陽明山地震 (M_L 4.2)

2014 年 2 月 12 日在臺北市士林區發生一規模 4.2 的有感地震，臺北市全區震度可達 4 級，利用錦和國小井下應變儀資料分析的結果顯示地震前在 1/5 至 1/20 間呈現穩定的情形，直到於 1/21 宜蘭縣政府東偏北方 33.1 公里發生規模 4.0 的淺層地震時所造成同震反應，又持續維持約一個星期的穩定，自 1/28 開始差應變數值即異常地持續增加，約至 2/9 才又恢復穩定，而在 2/12 發生了地震，整個過程紀錄了岩層中的應變累積、鎖死、破壞的過程，顯示利用差應變結果來判釋地震前兆能夠提供不錯的結果。近年來由於對大屯火山的關注，陽明山附近設置了一些 GPS 連續觀測站，全部在震央距離數公里之內，如圖 2-5.7 所示。因此，利用這一些資料選取最接近的兩個三角網做應變之分析，如下：(a) GS08-GS11-YMSM (b) GS08-WANL-YMSM

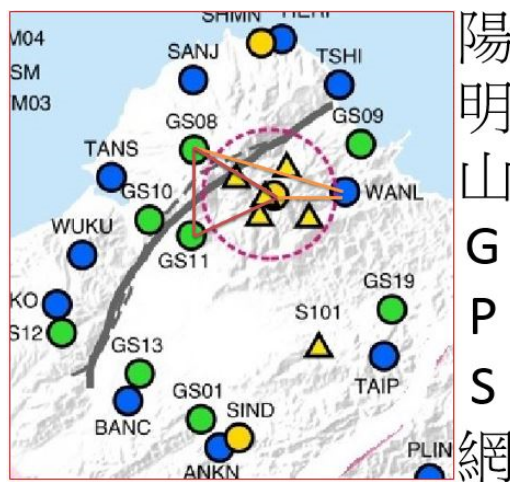


圖 2-5.7：陽明山地區 GPS 連續站網。

圖 2-5.8 為第一個三角網的面應變（上）、第一工程剪斜應變（中）、第二工程剪斜應變（下），圖中可看出在 2013 年幾乎一整年都維持穩定的面應變，直至 2013/12/30 日突然有個壓縮的突跳，約較低了 $3 \mu\text{strain}$ ，第一工程剪斜應變也降了約略相等的量。這樣維持較低的應變量直至 2014/04/30 才跳回原來的應變水準。

圖 2-5.9 為第二個三角網應變量，圖中可看出在 2013 年幾乎一整年都維持穩定的面應變，直至 2013/12/30 日突然有個壓縮的突跳，約較低了 $15 \mu\text{strain}$ ，第一工程剪斜應變卻是增加約略相等的量。這樣維持較低的應變量直至 2014/04/30 才跳回原來的應變水準。這樣大的應變還是第一次發現，在相鄰兩個三角網有相同的應變，一大一小，表示主要的變形較靠近萬里這一邊。

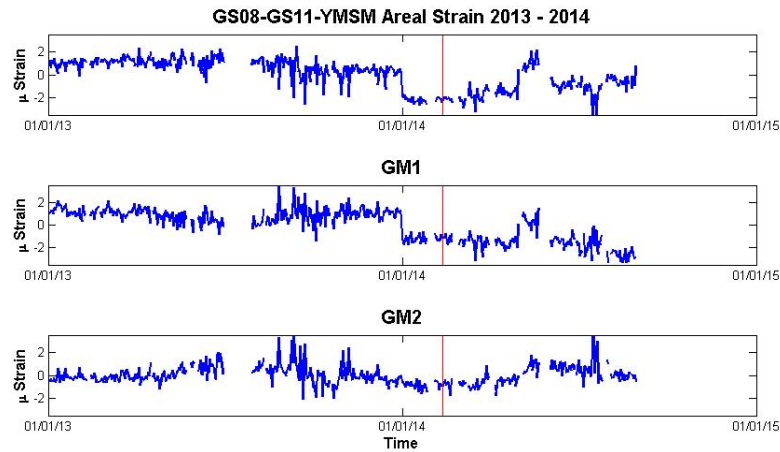


圖 2-5.8：為 GS08-GS11-YMSM 三角網 GPS 應變分析的結果，其中顯示面應變（上）、第一工程剪斜應變（中）、第二工程剪斜應變（下）。

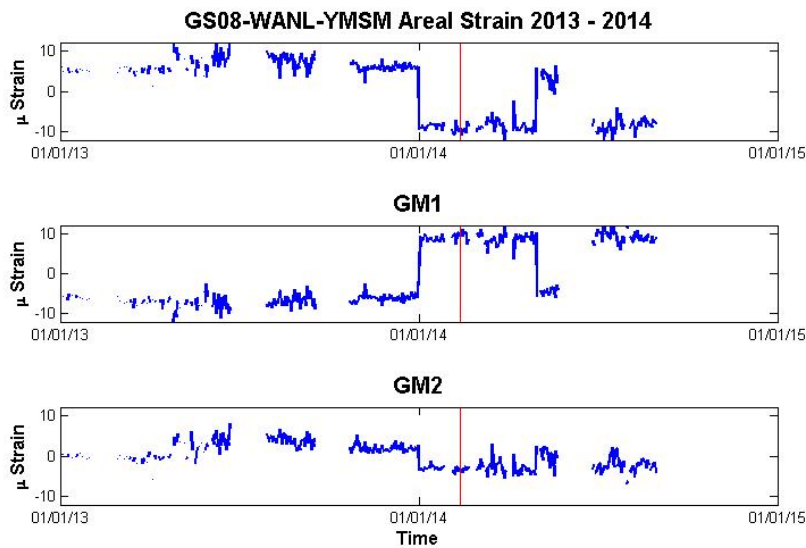


圖 2-5.9：為 GS08-WANL-YMSM 三角網 GPS 應變分析的結果，其中顯示面應變（上）、第一工程剪斜應變（中）、第二工程剪斜應變（下）。

三、結論與建議

本計畫計算2014年全臺連續全球定位系統測站共250站，由於各測站設置背景不同，利用GAMIT計算時所需提供基本資料各有差異，由於某些測站資料精度不佳，造成解算誤差過大而遭剔除。因此今年本研究除彙整時間序列外，也分析各測站遮蔽狀況，來瞭解各測站周遭環境，探討座標跳動與誤差過大的點位，瞭解發生的原因，以利於測站移動速度場分析。在同震變形研究方面，2014年5月21日於鳳林地區發生芮氏規模5.9的地震，本次期末報告同樣針對該地震分析鄰近測站的同震變形行為。

精密水準的部分已有30測線（共計1,099測段）完成施測並送審，藉由誤差分析及

與GPS連續站座標時間序列比對後，顯示觀測資料品質符合歷年施測水準穩定且可靠；GPS亦完成高屏地區111點、中部地區155點和花東地區69點之移動站測量及查核工作。關於GPS及精密水準測量的建議如下：

- (1) GPS部分，桃竹地區速度異常點位為G416、T007及GE24、中部地區速度異常點位為G047及GF35，經過實地勘驗，除G416推測為地質構造所引起外，其餘皆為人為因素，分析時應特別注意。非地質構造所引起之異常點位，建議可減少觀測次數。
- (2) 精密水準部分，台2_石門至萬里測線之水準點0811、五股至台北測線之水準點1001、縣115_新屋至童話世界測線水準點GB55、縣122_新竹至五峰測線之水準點G416、縣177_新竹至五峨眉測線之水準點GB90、苗栗至南庄測線之水準點GD56、縣164_金湖至瑞峰測線水準點G757、紅葉至靜浦測線之水準點W044，縣182_安平至龍崎之水準點G435、台22_岡山至安坡測線之水準點G533及和台2_梗枋至東澳測線之水準點9053，前述點位皆有異常變動。經過實地勘驗，是因為點位附近施工或設置地點不穩定而造成，建議分析時應特別注意並停止測量或重新設置該點位。
- (3) 跨車籠埔斷層之五條精密水準短測線，建議在有重大事件發生後再進行測量，或者將其連結成一水準網，可以觀測出該地區之整體變化。

PS-InSAR工作為彙整本實驗室既有的臺灣北部地區衛星影像，ERS-1/2衛星SAR影像區域為Track 461，Frame 3105，該區域範圍共有29張影像；ENVISAT衛星SAR影像區域跟ERS-1/2衛星一樣，則有30張影像；ALOS衛星SAR影像區域為Path 444，Frame 480及490，共有21幅SAR影像。不論使用何種衛星所拍攝的SAR影像，本計畫首先利用影像對相關值挑選出主影像干涉配對副影像，產生雷達影像干涉圖，並且與此區域同期間水準測線和連續GPS測站得到的變形速率比較。

在本年度期末報告中，利用本實驗室既有衛星影像生成差分干涉圖以及平均速度場，並針對衛星影像時間與同期間CGPS速度場以及水準測線速率比較。首先，由ERS結果顯示，北部區域於1996年到1999年之間主要以為對視衛星方向抬升的運動為主（圖2-6.5），最大抬升速率為位於士林、北投地區的8 mm/yr。而土城地區則有最大下陷速率，約為5 mm/yr。將臺北盆地及周圍CGPS三分量轉換到LOS方向上，其速度值與PS-InSAR相當符合。以ENVISAT結果來看，在2003年到2008年這段期間，臺北盆地主要以為對視衛星方向下陷的運動為主（圖2-6.8），最大下陷速率為位於泰山、五股地區的9 mm/yr，而盆地西側則為平均3~4 mm/yr的下陷速率。同樣轉換CGPS速率到LOS方向上，與此時期PS-InSAR得到的速率相符。另外和早期精密水準測量變形速率比較，整體而言，而其PS結果與四條由北至南的水準測線比較，雖有部份速率不同但趨勢相當一致，皆為由西向東跨過山腳斷層下陷速率越來越大。最後，由ALOS結果顯示，此區域在2007年到2011年其間，臺北盆地主要以往視衛星方向輕微抬升或不動的運動為主（圖2-6.12）。其速率結果與CGPS相當一致。另外，與水準測線比較上，由於此期間地表變動不大，在第一條與第二條測線上因PSInSAR誤差較大，無法明確比較兩者異同，而第三條與第四條測線則呈現相同的變形情形。

另外，在與LiDAR對比上。本年度除了將PS-InSAR速度場套疊在臺北盆地DTM上以呈現更精確的PS-InSAR選點位置可靠性外，也嘗試將PS-InSAR結果套疊在構造線形相對較多的臺灣東部地區。根據資料比較結果，線形明顯的地方也為視衛星方向抬升活躍的區域，具有高度的吻合。依照PS-InSAR資料比對推測瑞穗地區斷層跡應該在更西緣靠近秀姑巒溪溪床處。因此，利用PS-InSAR辨識斷層跡位置可列為後續地表地質調查重點項目，以補足可能誤判上覆河床沖積物錯動情形。至於臺北地區地下水位與CGPS時間序列關係可能由於（1）地下水位站與GPS觀測站非共站；（2）地下水位高程或GPS高程向時間序列包含其他雜訊因子尚未去除；（3）選擇之地下水位觀測站深度與地下水位層無密切關係；（4）GPS高程向精度較差等等因素。於本年度報告中並無觀察到明顯的相關性，未來，我們將繼續使用地下水位資料對比於GPS測站以及InSAR觀測資料，期望得到地表高層與地下水位的互動模式。

本計畫為「斷層活動性觀測研究第三階段-斷層整合性觀測與潛勢分析（2/4）」（第二年度）成果，主要進行北部地區9條活動斷層潛勢評估，蒐集了活動斷層幾何面及活動性之相關文獻，建立了斷層參數表，並評估活動斷層未來30、50及100年之發生機率，可做為後續地震危害度分析參考使用。

為了避免重複計算的問題，在未來的潛勢評估中，需考慮以斷層系統的方式，針對可能產生系統性破裂之斷層進行潛勢評估，例如大甲—彰化斷層系統。另外部份斷層是屬於基底滑脫面之變形而形成之被動地震斷層，非主動破裂，例如獅潭斷層，部份斷層則實為前緣斷層之背衝斷層，例如鐵砧山斷層，在未來進行潛勢評估時可降低權重或是甚至不考慮其潛勢。未來則必須考慮底脫面、深部孕震構造及盲斷層系統之影響，納入潛勢評估中。除此之外，為了建立塊體模型與潛勢評估之連結性，建議建立全臺灣的斷層模型，反推基底的滑移速率，並檢視各斷層虧損量的合理性。

部分活動斷層缺乏地質調查的資料評估長期滑移速率，本計畫建議暫時以GPS短期滑移速率或是塊體模型之結果作為長期滑移速率進行評估，然而短期滑移速率是否能取代長期滑移速率，仍應審慎使用。

最後，建議對於活動斷層誘發地震之次數與規模特性仍未知者，可再加入截切指數模式為邏輯樹之分支進行評估。

本研究利用GPS觀測資料和三維塊體模型DEFNODE，針對臺灣中部及北部地區的活動斷層進行斷層滑移虧損率分析。模型中將此區共分為23個塊體，並由地調所公佈的活斷層（義竹斷層除外）當成各塊體的邊界。利用DEFNODE，我們同時解算符合GPS觀測速度的各塊體最佳剛體旋轉速率及邊界斷層上的最佳滑移速率及滑移虧損率（slip deficit rate）。雖然在定性討論上，滑移虧損率高低可顯示該斷層在未來破裂及發生地震的潛勢；但如何將此虧損率與地質資料顯示的長期滑移速率結合，來定量地計算斷層破裂機率，並放入機率地震災害評估的邏輯樹中，將是本計畫未來的研究重點。另外，GPS資料及塊體模型均顯示臺灣西北部的地表變形和地底10 km附近的低角度detachment faults相關。由於整個三維塊體模型在建立這些detachment faults時會引入很多參數，降低反演結果的解析度；因此未來將使用二維的dislocation model，將三維模型分成數個二維剖面來進行分析，並和DEFNODE的結果進行比對。

井下應變儀部分，目前利用幾年來多次較大氣壓變化時的資料，試圖建立氣壓對井下應變儀資料的影響模式，並作修正，以建立移除環境影響因素後的殘餘地殼應變時間序列，作為尋找與大地震相關的應變"異常"。從2013年12月至2014年11月，在嘉義網觀測到1個應變異常事件：5月21日芮氏規模5.9花蓮地震；新竹網觀測到1個應變異常事件：2月5日至2月8日新竹群震；臺北網觀測到2個應變異常事件：2月12日芮氏規模4.2陽明山地震和8月16日芮氏規模3.8新北市烏來區地震。針對這四個異常事件進行分析，除了使用原本的平面應變來分析，也嘗試利用剪應變來分析新北市烏來區地震案例，經由剪應變結果來初步判斷出該應變異常為該地震的前兆訊號。而在井下應變儀應變異常判釋統計方面，分析至2014年8月為止，檢視井下應變儀含有前兆訊號並成功對應地震的機率在嘉義網、新竹網與臺北網分別有：40%、71%與67%；而有前兆訊號卻沒有對應地震的誤判機率分別為：60%、29%與33%；地震前沒有前兆訊號的機率為：0%、29%與25%。在時頻分析方面，由於各測站材質及岩性等材料條件不同，而有不同的特徵頻率發生（0.05、0.09、0.1Hz）。而當颱風影響臺灣，氣壓降低並具有顯著累積雨量及地下水變化時，各站時頻圖中皆在0.2~0.5Hz之間出現有雲狀頻率變化，特殊事件則會產生異常頻率，如降雨或氣壓於極值點時，雲狀頻率之頻段則為0.1~0.5Hz與0.0~0.1Hz之間有局部如山狀的頻率變化，這可能與慢地震有關。規模6.0以上的地震發生時，地下水位會有突然上升或下降的變化。0.03Hz以下之面應變強度變化，能夠反應地震發生前後，應變量開始累積而後釋放的現象。地下水位、氣壓與降雨皆會影響井下應變儀應變量的變化，於井下應變儀分析中水文與氣象資料品質亦重要，儀器保養與數據維護為不可缺少的環節。

以土壤氣體異常變化之方法來評估斷層活動性或地震活動之發生，並利用時序分析方法處理不同觀測站的數據，可進一步以較客觀的方式辨識出與地震前兆的異常反應。觀測期間，在2014年1月15日芮氏規模5南投地震發生前，大平地、古坑和池上土壤氣體觀測站，分別在8天、20天和21天前出現土壤氬氣異常升高的變化，可能為該地震之地震前兆反應。同一天於臺灣東南部連續發生了兩起芮氏規模5.1的臺東卑南地震，古坑、屏東和池上土壤氣體觀測站皆觀察到顯著的異常變化。在2月初新竹地區發生的群震，鄰近的大平地土壤氣體觀測站約在10天前即出現持續的異常升高變化；期間，鄰近的地下水壓新樂站，在1月13日出現了水位異常變化，呈現先升後降的型態，這可能也跟隨後發生的新竹群震有關。此外，2014年5月21日芮氏規模5.9的花蓮鳳林地震發生前，中崙和東華土壤氣體觀測站出現顯著的土壤氬氣濃度異常上升的變化；而中興地下水壓觀測站在該地震發生前也出現水位大幅度升高的變化，可視為顯著的前兆反應。然而，於觀測期間地下水溶解氣的觀測結果並未發現明顯的異常變化，這可能是由於在海岸山脈南段及恆春半島附近並未發生強震（ $M_w > 6.0$ ）有關。安通站為受限含水層，地下水水氬濃度未受環境因子影響；而社頂站屬於自由含水層，地下水水氬濃度受季節性降雨量影響，呈現一週期變化。未來可進一步應用時頻分析方法，分離出水氬濃度之週期訊號，並探討此訊號與降雨量及地下水位之關係。

中崙濁水潭觀測站由於常受到豪大雨影響而導致逸氣通道受阻或儀器故障且有崩塌的疑慮，故本年度另尋合適地點進行遷站。現已於地下水壓澆水測站原址將其改裝為

地下水溶解氣體觀測並完成相關測試，待未來累積較多的觀測資料後，期能對於地震前兆研究有更進一步的瞭解。

整合分析部分，共包括地下水位異常、地化異常、井下應變儀異常和地震訊號異常之整合，整合期間含跨2009年整年到2014年11月間174個地震事件。本次報告考慮的異常觀測中，發生於2014/05/21 規模5.9發生在花蓮縣鳳林鎮的地震（ID=163）在嘉義網中同時觀測到地下水位、井下應變儀和地化氣體記錄三樣異常。另外在2014年2月5~8日間在新竹有十個群震，規模在 2.3~3.4之間，有多種當地的觀測異常。

GPS應變是將距離數公里以上的三個測站資料加以整合，畢竟期間因環境因素的影響，精度遠不及井下應變儀，在空間上也不及其他連續觀測方法的單純，所以在短時期的異常觀測上可能比較困難，然而，經過這一年的測試，可以證實長期（數個月到數年）與井下應變儀的趨勢相當一致。因此，未來GPS地表應變可以作為其他監測方法的佐證，以及作為監測長期地殼應力累積變化的工具。

在這一年的累積經驗，至少證實了井下應變儀監測與GPS地表應變監測是真正的反應地殼的應力累積，因為這兩者在長期的趨勢相當一致。另外，也發現了在一些應變改變方向（正或負向）、改變變化速率時（也就是說有異常時），兩者會有差異，初步判斷，這種差異可能來自地區性的斷層活動，因為距離近，所以對不同方位、不同距離或不同深度的觀測站，可能會有不同，甚至完全相反的變化。

在這一年的中，也觀察到GPS地表應變的長期變化，可能都與臺灣四周的較大地震有關聯，由於臺灣地震相當多，或許每一個變化都可以找到一個地震與它關聯，所以繼續觀察這些現象，並試圖對每一地震，或每一群地震對全臺各地的地殼是否造成合理且系統性的變化，這樣才能更進一步的對這些現象做更合理的判斷。

本次應變整合性的觀測資料包括PS-InSAR、GPS應變與高頻GPS等觀測，用來配合有大地震或井下應變儀觀測異常時，GPS可提供應變的觀測，亦可提供獨立觀測，增加觀測的可靠性，也助於應變異常的解釋。在這些觀測中，PS-InSAR與GPS及水準高程測量有趨勢上的一致性，但在精度上，尚待進一步的提升，包括提高衛星軌道精度與大氣誤差修正。GPS應變則與井下應變儀的觀測量有極高的相似性，但精度略差，可用來做應變儀校準的一種參考資料，但不可忽略的是，GPS應變所代表的區域是一個數平方公里的區域，與井下應變儀不到一平方公尺的面積大為不同。其所受的誤差與環境影響因素也不同，有待進一步分析。高頻GPS也是一個正在發展的方法，目前僅試用Bernese 與MIT 的 TRACK 軟體，近年來尚有幾種新發展的軟體，正在聯繫如何取得使用權。高頻GPS資料的分析將有助於在地震時或在無地震時的應變異常解釋。

在這一年的觀測中，唯一有多種資料觀測異常的地震是5/21的花蓮鳳林地震，井下應變儀與GPS應變在地震前約20天由壓縮變為鬆弛的變化，地震後約一個月，兩種資料都顯示地殼壓縮，但在六月中以後，井下應變儀資料持續壓縮，但GPS應變則回復變為鬆弛，一直延續到年底。而且有些資料，高頻的GPS資料由於地震較深，附近並無太大的地表應變，GPS的高頻位移並不太明顯。