中央地質調查所報告第 98- 07 號
委辦計畫編號(98-5226904000-05-01)

斷層活動性觀測研究第二階段
斷層監測與潛勢分析研究(1/4)
【期末報告】

委託機關：經濟部中央地質調查所
執行單位：國立台灣大學
中華民國九十八年十二月

斷層活動性觀測研究-第二階段

斷層監測與潛勢分析研究(1/4)

【期末報告】

計畫主持人：胡植慶

協同主持人：劉啟清

研　究　員：饒瑞鈞

張午龍

陳卉瑄

鄭錦桐

委託機關：經濟部中央地質調查所

執行機關：國立台灣大學

中華民國九十八年十二月

目錄

目錄.....I
表目錄.....III
摘要.....XIII
Abstract.....XIV

一、緒論.....1
1-1 計畫整體概述.....1
1-2 工作內容概述.....4
1-3 本年度計畫期末之成果.....5
二、連續 GPS 觀測站之成果.....7
2-1 速度場、主軸應變與旋轉率.....7
2-1-1 北部地區.....16
2-1-2 新竹地區.....19
2-1-3 中部地區.....21
2-1-4 嘉義地區.....25
2-1-5 西南地區.....28
2-1-6 結論.....32
2-2 塊體模型 Defnode 研究斷層滑移行為.....33
2-2-1 斷層活動模擬方程式.....33
2-2-2 斷層長期滑移速率，速度虧損與斷層鎖定率之評估.....34
2-2-3 結論與未來方向.....38
三、井下應變儀之研究方法與成果.....39
3-1 資料校正.....39
3-1-1 潮汐修正.....39
3-1-2 氣壓和雨量的影響.....39
3-1-3 鑽孔回復的影響.....39
3-2 時間序列資料分析.....41
3-3 井下應變儀資料管理系統.....42
3-3-1 資料庫管理系統網頁簡介.....42
3-3-2 資料庫管理系統之更新.....43
3-3-3 資料庫查詢網站架構.....43
3-4 井下應變儀觀測站的資料處理.....45
3-4-1 曾文水庫南、曾文水庫北、甲仙十八灣等三站的資料校正實驗.....45
3-4-2 中興國小、太興國小及達邦等三站的資料校正實驗.....51
3-4-3 井下應變儀井孔回復的雙自然對數指數鬆弛效應的模式估計.....59

3-5 結果分析比對 67
3-5-1 井下應變儀資料與地下水因素的關係 67
3-5-2 井下應變儀資料與氣壓或颱風因素的關係 73
3-5-3 井下應變儀資料的突然變化 76
3-6 汶川地震遠端觸發台灣應變儀的永久變形現象 80
3-6-1 地下水變化情形 80
3-7 井下應變儀、地震儀工作展望 83
四、斷層活動潛勢分析 87
4-1 分析理論 87
4-1-1 板塊運動之能量分配 87
4-1-2 活動斷層參數與潛勢分析之關係 88
4-1-3 活動斷層特徵地震模式 95
4-1-4 機率密度函數計算條件機率 98
4-2 研究方法及流程 102
4-2-1 斷層參數表 102
4-2-2 特徵地震模式 104
4-2-3 選取機率模式 105
4-3 車籠埔斷層及瑞穗斷層之發震機率評估 106
4-3-1 車籠埔斷層 106
4-3-2 瑞穗斷層 112
4-4 未來展望 118
五、整合觀測資料分析 121
5-1 GPS 紀錄與氡氣異常之相關性 121
5-2 地震紀錄與氡氣異常之相關性 124
六、結論與建議 127
6-1 GPS 連續觀測站 127
6-2 井下應變儀觀測 129
6-3 斷層潛能分析模式之評估 129
6-4 整合觀測資料進行分析 130
6-5 綜合建議 131
七、參考文獻 133
附錄 A 中央地質調查所 GPS 連續站時間序列 139
附錄 B 速度場、應變率及旋轉率之評估 153
附錄 C 應變儀維護紀錄表格 159
附錄 D 審查委員意見 167

表目錄

表 A 本年度預期進度甘梯圖 IX
表 B 預期進度查核點 X
表 C 全程計畫預期進度甘梯圖 XI
表 D 期末預期完成工作項目 XII

表 1.1 連續 GPS 觀測站資料接收起始時間表 3
表 1.2 井下應變儀觀測站資料接收起始時間表 4
表 1.3 地球化學觀測站資料接收起始時間表 4

表 2.1 中央地質調查所 GPS 連續觀測站平均速度場 8

表 3.1 嘉義曾文水庫附近三個站的經緯度與資料日期 45
表 3.2 嘉義曾文水庫附近三個站的安裝日期、儀器與各分量的方位角 46
表 3.3 嘉義附近三個站的經緯度與資料日期 51
表 3.4 嘉義附近三個站的安裝日期、儀器與各分量的方位角 51
表 3.5 汶川地震所引發台灣西部地區井下應變儀的變化 81
表 3.6 汶川地震引發之地下水壓與面應變變化 81
表 3.7 不同構造區域之觀測 LFT 特徵頻率範圍及地震矩能量 85

表 4.1 斷層參數及地震矩規模關係式 90
表 4.2 美國 San Andreas Fault 及 San Gregorio Fault 各分段之參數 91
表 4.3 活動斷層推估分析採用的調查方法與分析模式 95
表 4.4 本計畫之斷層參數表格式 103
表 4.5 車籠埔斷層參數表 108
表 4.6 計算車籠埔特徵地震回復週期所使用的參數組合表(全段) 110
表 4.7 計算車籠埔特徵地震回復週期所使用的參數組合表(北段) 110
表 4.8 計算車籠埔特徵地震回復週期所使用的參數組合表(南段) 110
表 4.9 車籠埔斷層之 BPT 統計模式參數表及發震機率評估 111
表 4.10 瑞穗斷層參數表 115
表 4.11 計算瑞穗斷層特徵地震回復週期所使用的參數組合表 116
表 4.12 瑞穗斷層之 BPT 統計模式參數表及發震機率評估 117
表 4.13 日本地區主要活動斷層之長期發震機率評量 119

圖目錄

圖 1.1 中央地質調查所設置之 GPS 觀測站、井下應變儀及地球化學觀測站分布圖。 2

圖 2.1 中央地質調查所 GPS 連續觀測站平均速度場。 10
圖 2.2 中央地質調查所 GPS 連續觀測站相對於地球質心之平均速度場。 11
圖 2.3 中央地質調查所及其他單位 GPS 連續觀測站之測站分布圖。 12
圖 2.4 中央地質調查所及其他單位之 GPS 連續觀測站平均速度場。 13
圖 2.5 台灣地區之主軸應變率和面膨脹率。 14
圖 2.6 台灣地區之旋轉率。 15
圖 2.7 北部地區之 GPS 連續觀測站平均速度場。 16
圖 2.8 北部地區之 GPS 連續觀測站之主軸應變率和膨脹率。 17
圖 2.9 北部地區之 GPS 連續觀測站之旋轉率。 17
圖 2.10 測站 GS01、GS08、GS10 及 GS13 之時間序列。 18
圖 2.11 新竹地區之 GPS 連續觀測站平均速度場。 19
圖 2.12 新竹地區之 GPS 連續觀測站之主軸應變率和膨脹率。 20
圖 2.13 新竹地區之 GPS 連續觀測站之旋轉率。 20
圖 2.14 測站 GS03 及 GS15 之時間序列。 21
圖 2.15 中部地區之 GPS 連續觀測站平均速度場。 22
圖 2.16 中部地區之 GPS 連續觀測站之主軸應變率和膨脹率。 23
圖 2.17 中部地區之 GPS 連續觀測站之旋轉率。 23
圖 2.18 測站 GS23、GS36、GS39 與 GS40 時間序列圖。 24
圖 2.19 嘉義地區之 GPS 連續觀測站平均速度場。 25
圖 2.20 嘉義地區之 GPS 連續觀測站之主軸應變率和膨脹率。 26
圖 2.21 中部地區之 GPS 連續觀測站之旋轉率。 26
圖 2.22 測站 GS04、GS05、GS017 與 GS41 測站之時間序列。 27
圖 2.23 西南地區之 GPS 連續觀測站平均速度場。 29
圖 2.24 西南地區之 GPS 連續觀測站之主軸應變率和膨脹率。 30
圖 2.25 西南地區之 GPS 連續觀測站之旋轉率。 31
圖 2.26 測站 GS29 與 GS31 測站之時間序列。 32
圖 2.27 塊體模型 Defnode 使用之斷層幾何模擬圖。 33
圖 2.28 由塊體模型的尤拉極可求取跨塊體邊界斷層的長期滑移速率和滑移虧損。 34
圖 2.29 本計畫使用 27 個剛性塊體以及 24 條斷層進行塊體運動模擬分布。 35
圖 2.30 塊體模型模擬地表變形與 GPS 觀測結果。 36
圖 2.31 斷層面鎖定率分布圖。 37
圖 2.32 斷層長期滑移速率分布圖。 37

圖 2.33 斷層面上滑移速率虧損值分布圖。.....38

圖 3.1 應變儀所觀測到的潮汐週期訊號。.....40
圖 3.2 應變儀所觀測到氣壓和雨量的因素。.....40
圖 3.3 最小平方法求得之殘餘應變。.....41
圖 3.4 井下應變儀資料庫管理系統網站首頁。.....42
圖 3.5 井下應變儀資料管理系統之自動繪製功能。.....44
圖 3.6 井下應變儀資料管理系統之架構圖。.....45
圖 3.7 甲仙站的四個分量及經由模式預測成第四個分量的理論值。.....47
圖 3.8 曾文南站的四個分量及經由模式預測成第四個分量的理論值。.....47
圖 3.9 曾文北站的四個分量及經由模式預測成第四個分量的理論值。.....48
圖 3.10 甲仙站之角度轉換後之時間序列。.....49
圖 3.11 曾文南站角度轉換後之時間序列。.....49
圖 3.12 曾文北站角度轉換後之時間序列。.....50
圖 3.13 甲仙站角度調整後之面應變。.....50
圖 3.14 中興國小測站 2009 年的資料超過 2/3 無法解出。 53
圖 3.15 中興國小測站四個分量之面應變。.....53
圖 3.16 太興國小測站四個分量之面應變。.....54
圖 3.17 達邦測站四個分量之面應變。.....54
圖 3.18 中興國小測站之工程量。.....56
圖 3.19 太興國小測站之工程量。.....57
圖 3.20 達邦測站之工程量。.....57
圖 3.21 中興國小測站第四方向角的線性應變與原記錄（CH3）比較的結果。 58
圖 3.22 太興國小測站第四方向角的線性應變與原記錄（CH3）比較的結果。 59
圖 3.23 達邦測站第四方向角的線性應變與原記錄（CH3）比較的結果。 59
圖 3.24 甲仙十八灣站原始面應變之時間序列。.....61
圖 3.25 甲仙十八灣站之面應變殘差值。.....61
圖 3.26 曾文南站原始面應變之時間序列。.....63
圖 3.27 曾文水庫南站之面應變殘差值。.....63
圖 3.28 曾文北原始面應變之時間序列。.....65
圖 3.29 曾文水庫北站之面應變殘差值。.....65
圖 3.30 達邦測站面應變記錄的井孔回復的雙自然對數指數鬆弛效應的模式。.....66
圖 3.31 達邦測站扣除井孔回復的雙自然對數指數鬆弛效應的模式之面應變殘差變化。.....67
圖 3.32 達邦測站面應變殘差變化幾乎與水位變化同步。.....68
圖 3.33 達邦測站地下水位與面應變殘差量的比較圖。.....68
圖 3.34 曾文水庫水位變化與嘉義三站井下應變儀之地下水井觀測記錄的比較。.....69

圖 3.35 達邦測站面應變殘餘量。.....69
圖 3.36 太興國小測站面應變殘差變化與水位變化同步。.....70
圖 3.37 太興國小測站地下水位與面應變殘變化的比較圖。.....70
圖 3.38 太興國小測站面應變殘餘量。.....71
圖 3.39 中興國小測站面應變殘差變化與水位變化同步。.....71
圖 3.40 中興國小測站地下水位與面應變殘變化的比較圖。.....72
圖 3.41 中興國小測站面應變殘餘量。.....72
圖 3.42 聖帕颱風期間（2007 年 8 月）氣壓與應變變化。.....74
圖 3.43 曾文水庫南站的殘餘應變與第一次颱風時間的關係。.....74
圖 3.44 曾文北、曾文南與甲仙站的殘餘應變與每年颱風時間的關係。.....75
圖 3.45 曾文北站、曾文南站與甲仙站在 2004 年 7 月應變振幅的變化。.....75
圖 3.46 曾文北站、曾文南站與甲仙站在 2005 年 6 月應變振幅的變化。.....76
圖 3.47 汶川地震（2008 年 5 月）時應變儀紀錄顯示應變量突然的改變。.....77
圖 3.48 柯羅莎颱風期間（2007 年 10 月）應變儀紀錄顯示異常的改變。.....77
圖 3.49 達邦站在 2007 年 10 月間應變儀紀錄顯示異常的改變。.....78
圖 3.50 中興國小站在 2007 年 10 月間應變儀紀錄顯示異常的改變。.....78
圖 3.51 達邦站在 2007 年 2 月應變儀紀錄顯示異常的改變。.....79
圖 3.52 中興國小測站在 2007 年 9 月應變儀紀錄顯示異常的改變。.....79
圖 3.53 中國四川之汶川地震位置圖。.....82
圖 3.54 汶川地震觸發台灣西部地區的應變變化情形。.....82
圖 3.55 汶川地震造成台灣地區地下水壓觀測站的水壓變化。.....83
圖 3.56 兩不同測站的 LFT 地震圖（左圖）及包絡線（右圖）。.....84

圖 4.1 板塊運動能量分配示意圖。.....87
圖 4.2 台灣地區 GPS 測站相對於澎湖白沙站（S01R）的水平速度場。.....88
圖 4.3 台灣地區的地震規模與斷層長度關係。.....89
圖 4.4 斷層分段分布圖。.....91
圖 4.5 由斷層分區建立斷層破裂模式。.....92
圖 4.6 活動斷層錯移之露頭可用來評估斷層之滑移速率。.....94
圖 4.7 美國 San Andreas 斷層中南段之特徵地震模式。.....97
圖 4.8 假定相同滑移速率情形下比較指數地震分布模式與特徵地震模式的差異。.....98
圖 4.9 機率密度函數分布圖。.....100
圖 4.10 不同 α 值對 BPT 模式之影響。.....101
圖 4.11 計算震度 6 級以上之區域機率理論。.....101
圖 4.12 日本 BPT 模式評估示意圖。.....101
圖 4.13 各統計模型之條件機率比較圖。.....102

圖 4.14 斷層幾何參數示意圖。.....103
圖 4.15 間震期之變形模式即為剛體運動剪去彈性錯位變形。.....104
圖 4.16 斷層線、斷層面選取地震範圍及地震震央分布圖。.....105
圖 4.17 車籠埔斷層之 BPT 機率密度函數。.....106
圖 4.18 車籠埔斷層之地表分布圖及槽溝開挖位置。.....107
圖 4.19 剖面 12 顯示台中盆地中部位置之地質構造特徵。.....108
圖 4.20 車籠埔斷層面範圍內 1900 年至 2006 年以來實際地震發生率。.....111
圖 4.21 車籠埔斷層 BPT 統計模式機率密度函數分布圖。.....111
圖 4.22 車籠埔斷層 BPT 統計模式機率分布。.....112
圖 4.23 花東縱谷地區之 GPS 速度場分布。.....113
圖 4.24 重定位之台灣東部地震震央分布及 N110E 剖面。。.....113
圖 4.25 瑞穗斷層地面分布圖。.....114
圖 4.26 瑞穗斷層三個槽溝之歷史地震。.....114
圖 4.27 瑞穗斷層斷層面範圍內 1900 年至 2006 年以來實際地震發生率。.....116
圖 4.28 瑞穗斷層 BPT 統計模式機率密度函數分布圖。.....117
圖 4.29 瑞穗斷層 BPT 統計模式機率分布。.....117
圖 4.30 日本主要活動斷層潛勢評估成果。.....118
圖 4.31 美國舊金山灣地區活動斷層在未來 30 年內發生規模≧6.7 之機率。.....120

圖 5.1 梅山站、濁水潭站、二溪站 2007 年 10 月氣體濃度圖。.....121
圖 5.2 鄰近梅山站、濁水潭站、二溪站之 GPS 觀測站 2007 年之記錄結果。.....122
圖 5.3 地球化學監測站記錄之氣體異常時間點與 GPS 資料比對。.....123
圖 5.4 台灣規模四以上地震活動分布圖。.....125
圖 5.5 三個地化監測站的氣體異常持續期與發生時間分布圖。.....126
圖 5.6 地化異常在中大規模地震前後的表現與地震距離之關係圖。.....126

表 A 本年度預期進度甘梯圖（Gantt Chart）

計畫名稱：斷層活動觀測資料處理分析													
月 次 工 作 項 目	第1月	第2月	第3月	第4月	第5月	第6月	第7月	第8月					備註
GPS 連續站資料檢核	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)					
井下應變儀資料檢核													
地震、地質資料蒐集													
第二季查核點													
資料計算及分析													
期中報告													
整合地質及地震、地化資料進行相關性比對													
資料庫安全性提升													
第三季查核點													
地震活動度潛能分析模式													
期末報告													
第四季查核點													
預定進度（累積數）	5%	15%	30%	50%	60%	75%	90%	100%					

說明：（1）工作項目請視計畫性質及需要自行訂定。預定進度以粗線表示其起訖日期，期末報告必須明列於本表中。

(2)預定進度百分比一欄係為配合追蹤考核作業所需，累計百分比請視工作性質就以下因素擇一估計訂定：1.工作天數 2.經費之分配 3.工作量之比重 4.擬達成目標之具體數字。

表 B 預期進度查核點（Check Point）

序號	查核點 交付項目	預定達成日期	完成狀態
1	（第二季查核點） 1. 第一期款請款收據 2. 工作進度報告表 a.應變儀資料查核 1-3 月 b.GPS 資料查核 1-3 月	五月三十日	第一期款請款
2	（期中報告） 1. 工作進度報告表 2. 期中報告書面資料 3. 經費收支報告表 4. 第二期款請款收據	八月三十一日	期中報告書面資料 會議記錄與委員意見辦理狀況 第二期款請款
3	（第三季查核點） 1. 工作進度報表 a.GPS 資料 4-7 月 b.應變儀資料 4-7 月	九月三十日	第三季工作進度報告及繳交文件
4	（期末報告） 1. 工作進度報表 a.GPS 資料 8-9 月分析 b.應變儀資料 8-9 月分析 c.完成資料庫系統維護 2. 期末報告書初稿	十一月三十日	期末報告書面資料初稿 會議記錄與委員意見辦理狀況
5	（第四季查核點，驗收） 1. 工作進度報告表 2. 期末報告書 30 份及資料光碟一份 3. 經費收支報告表 4. 尾款請款收據	十二月三十一日	成果報告三十份 成果報告光碟十片

表 C 全程計畫預期進度甘梯圖

計畫名稱：斷層活動觀測資料處理分析								
年次 / 工作項目	第 1 年期中報告	第 1 年期末報告	第 2 年期中報告	第 2 年期末報告	第 3 年期中報告	第 3 年期末報告	第 4 年期中報告	第 4 年期末報告
GPS 連續站資料檢核與計算								
井下應變儀資料檢核與分析								
GPS 速度場計算應變率變化								
整合 GPS 交換站、地質及地震、地化資料進行相關性比對								
資料庫安全性提升與維護								
井下應變儀維護記錄格式，供巡察維護								
瑞穗及車籠埔斷層潛能分析評估								
山腳及池上斷層潛能分析評估								
六甲、木屐寮、新城及小崗山斷層潛能分析評估								
台北盆地與新竹地區斷層模型參數設定								
中部、嘉義、台南及高屏地區斷層模型參數設定								
GPS 測量及水準外業								
預定進度（累積數）	12%	25%	37%	50%	62%	75%	87%	100%

表 D 期末預期完成工作項目

	工作項目	已完成
GPS 連續站資料檢核與計算（詳見第二章）	1. 完成地調所設置之 GPS 連續觀測站 4～9 月資料檢核及計算。	V
	2. 校驗、誤差分析與測站觀測品質的查核並解算 GPS 連續觀測站時間序列。	V
	3. 將 GPS 時間序列擬合，並去除大誤差量之觀測天數，分析年週期與半年週期效應，以求得各測站之地表水平與垂直方向的位移量，並分析鄰近斷層的滑移速率與區域之應變率之改變。	V
	4. 利用地調所與其他單位交換之 GPS 連續觀測站資料（共 104 站），整合、計算全台各區域之應變率。	V
井下應變儀資料檢核與分析（詳見第三章）	1. 多分量井下應變儀的檢校，完成包含曾文（南）、曾文（北）、十八灣、中興、太興、達邦等 6 站井下應變儀軸向校正與氣壓、潮汐及井孔溫度變化之響應校正，並持續分析應變累積與地震之關係。	V
	2. 完成各觀測站之資料收集及編修，進行面應變、剪應變分析。	V
	3. 持續建立資料庫及井下應變儀維護紀錄表標準格式，供本案巡察及維護之參考（詳見附錄 C）。	V
	4. 收集鄰近地殼、地震活動觀測資料；分析應變儀觀測站及水位觀測井之資料與當地斷層、地震活動之關聯性並建立異常資料事件檔，期能歸納出可靠之斷層活動潛勢因子與經驗法則。	V
斷層潛能分析評估（詳見第四章）	1. 分析比較美國及日本之斷層活動度與地震潛能分析模式，並剖析其優缺點，提供作為建立台灣地區分析模式之借鏡。	V
	2. 挑選瑞穗斷層與車籠埔斷層，蒐集並確定斷層參數（包括斷層名稱、長度、走向、傾斜角度、單一事件變位量、最近一次活動時間、滑移速率、滑移赤字及地震重複週期、最大地震規模），進行斷層活動度與潛能分析模式之評估。	V
整合觀測資料分析（詳見第五章）	1. 整合分析累積至最新之 GPS 連續站資料、井下應變儀觀測資料，同時利用地球化學觀測站，以嘉義地區鄰近測站之資料加以比較，找出其相關性。	V

摘要

本計畫加入中央氣象局，中央研究院，內政部等所建立之 GPS 連續觀測站之速度場與本次計畫測站之速度場資料加以彙整共 161 個觀測站，進行應變率與旋轉率之評估。台灣北部、東北部至宜蘭地區、中央山脈延伸至屏東恆春半島地區以及高雄地區呈現伸張之主軸應變，最大伸張面膨脹率達 1.32 μstrain/yr；西部海岸平原壓縮量較小，西部麓山帶、中央山脈東側與花東縱谷至海岸山脈為壓縮主軸應變，最大壓縮面膨脹率 1.97 μstrain/yr。而旋轉率則是由花蓮北部沿中央山脈雪山山脈向東北方向順時鐘變化並增加旋轉角度，台南、高雄北部地區也為順時針旋轉，另一方面台東南部亦呈現順時鐘旋轉的變化；海岸山脈至中央山脈東側及屏東地區則呈現明顯的逆時針旋轉。在本研究中將台灣劃分為 27 個剛性塊體以及 24 條斷層進行塊體運動模擬的研究，我們可以發現鎖定率高的斷層有金山、山腳斷層、車籠埔斷層南段、大尖山斷層、旗山斷層、潮洲斷層以及縱谷斷層中段。塊體運動滑移速率以縱谷斷層中段至南段最快，有 30-45 mm/yr，其餘都在 30 mm/yr 以下。速率虧損代表塊體邊界斷層因為摩擦力而未表現出實際長期滑移速率的減少量，速率虧損越高，表示被留在斷層內部的應力越高。台灣塊體模擬結果顯示，斷層滑移速率虧損較高者在縱谷斷層的中段，有著高達 32-45 mm/yr 的虧損值，其他斷層約在 10 mm/yr 以下。

井下應變儀部分先處理中興國小（TUSN）、太興國小（TAIS）、達邦（DARB）等三站的資料，這三站資料中除了達邦測站可看出較完整的井孔回復的雙指數鬆弛效應，其餘中興與太興國小測站都有數十微應變的上下起伏變動，而且看不出井孔回復的鬆弛效應。另外利用井下應變儀前三個分量估計出面應變、工程剪應變和最大應變方向，其中中興國小測站紀錄差異相當大，需要進一步確認資料。達邦測站，在除去井孔效應以後，與地下水位的變化幾乎完全同步，1 公尺的水位變化可以造成約 7 μstrain 的變化。井下應變儀的資料，除了受到地下水層水壓改變而有明顯的變化外，還受大氣壓力的顯著影響，而颱風期間的氣壓降低是最顯著的氣壓變化。在 2008 年 5 月的汶川地震表面波到達時，達邦與中興國小都在應變儀紀錄顯示應變量突然的改變，而且都是約 0.1 μstrain 的膨脹，這是否顯示這表面波的經過會引發地區性斷層的小地震，還是只是儀器的特性所致？值得再進一步的探討。斷層活動潛勢分析部分利用 BPT 統計模式估算斷層之發震機率，推估車籠埔斷層全段於 2009-2039、2009-2059、2009-2109 之發震條件機率分別為 7.48×10^{-7}%、4.00×10^{-3}% 和 0.72%。瑞穗斷層於 2009-2039、2009-2059、2009-2109 之發震條件機率分別為 27.71%、36.56% 和 65.31%。2008 年 10 月 7 日在二溪站所觀察的氡氣異常，在達邦和中興國小的井下應變儀皆觀察到應變異常，是否與柯羅莎颱風所誘發之慢地震有關，值得進一步研究。

關鍵詞：GPS 連續觀測站、井下應變儀、斷層活動潛勢分析

Abstract

We combine 161 continuous GPS stations form Central Weather Bureau, IES Academia Sinica, Minister of Interior and Central Geological Survey to calculate the principal strain rate and rotation rate in whole Taiwan area. The extensional strain rate dominates in northern Taiwan, Ilan area, Central Range, Hengchun Peninsula, and Pingtung area, with the maximum extensional dilatation rate of 1.32 μstrain/yr. The compressional strain rate dominates in Western Foothills, eastern part of Central Range and Costal Range while the compressional strain rate is insignificant in Coastal Plain area. The maximum compressional dilatation rate is 1.97 μstrain/yr. The clockwise rotation rate increases from northern Hualien, Central Range, to Hsuehshan Range. The Tainan, northern Kaohsiung, and Taitung areas also demonstrate clockwise rotation. The Costal Range and the eastern Central Range demonstrate significant anti-clockwise rotation. The crustal deformation is represented by a combination of 27 rigid blocks motions with 24 faults due to slip deficit along the fault-bounding blocks. We find the highly locked faults are Chinshan, Sanchiao, southern Chelungpu, Tachienshan, Chishan, Chaochou, and central Longitudinal Valley faults. The block motions are estimated to be less than 30 mm/yr in Taiwan, whereas the central and southern Longitudinal Valley fault has the highest rate of 30-45 mm/yr. Slip deficit rates exceed 32-45 mm/yr along the central Longitudinal Valley fault, which is more than 3 times higher than the rates along other major faults (<10 mm/yr).

For development of processing borehole strainmeter data, we first check the data quality of stations TSUN, TAIS and DARB. DARB station data are dominated by the grout and hole recovery process which are characterized by dual exponential relaxation. However the data of stations TSUN and TAIS are dominated the fluctuations of several tens of microstrain and no gout and hole recovery process is observed. Furthermore, we use three components of borehole strainmeter to calculate the area strain, shear strain and principal strain direction. The fit of the station TSUN is quite poor, thus the further investigation of data is crucial. For earthquake probabilities predicted by BPT model in the Chelungpu fault during 2009-2039, 2009-2059 and 2009-2109 are 7.48×10^{-7}%, 4.00×10^{-3}% and 0.72%, respectively. For analysis in potential activity of faults, the earthquake probabilities predicted by BPT model of the Juishui fault during 2009-2039, 2009-2059 and 2009-2109 are 27.71%, 36.56% and 65.3%, respectively. The observed Rn anomaly occurred on October 7, 2008 might correlated to the strain anomaly revealed from DARB and TSUN stations due to the slow earthquake induced by the Typhoon Krosa. It is worthy to further investigation.

KEYWORDS: Continuous GPS Stations, Borehole Strainmeter, Analysis in Potential Activity of Faults

一、緒論

1-1 計畫整體概述

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，已逐年在台灣陸上活動斷層帶設置監測點位，包括全球衛星定位系統（Global Positioning System，簡稱 GPS）與井下應變儀（Borehole strainmeter）。累積至 98 年為止，已完成連續 GPS 站共 50 站（圖 1.1 和表 1.1）和 12 口井下應變儀（圖 1.1 和表 1.2）及 6 個地球化學觀測站（圖 1.1 和表 1.3）。本計畫每年持續蒐集、計算及累積至最新的 GPS 觀測站及應變儀觀測資料，同時還會將地震資料、GPS 連續觀測站及井下應變儀之資料整合分析探討，本團隊也會利用中央地質調查所 97 年度與 98 年度委辦計畫「斷層活動性觀測研究第 1、2 階段-斷層活動性之地球化學觀測與研究」之成果加入討論，利用地球化學之異常變化與地球物理之時間序列做比對，瞭解觀測資料間是否有變化之關聯性。另一方面，將以美國及日本先進國家之斷層活動度與斷層活動潛勢評估模式，剖析其優缺點，提供作為建立台灣分析模式後，實際進行斷層活動度與斷層活動潛勢之分析。

由於中央地質調查所計畫「地震地質與地變動潛勢分析－地變動監測分析」將於 99 年度結束，屆時 GPS 測量與水準測量計算及分析工作將整合至「斷層活動性觀測研究-第二階段」計畫（計畫期程：98-101 年）執行，因此本案規劃於第三年（100 年）開始，增加 GPS 測量與水準測量外業檢核、計算及分析工作。

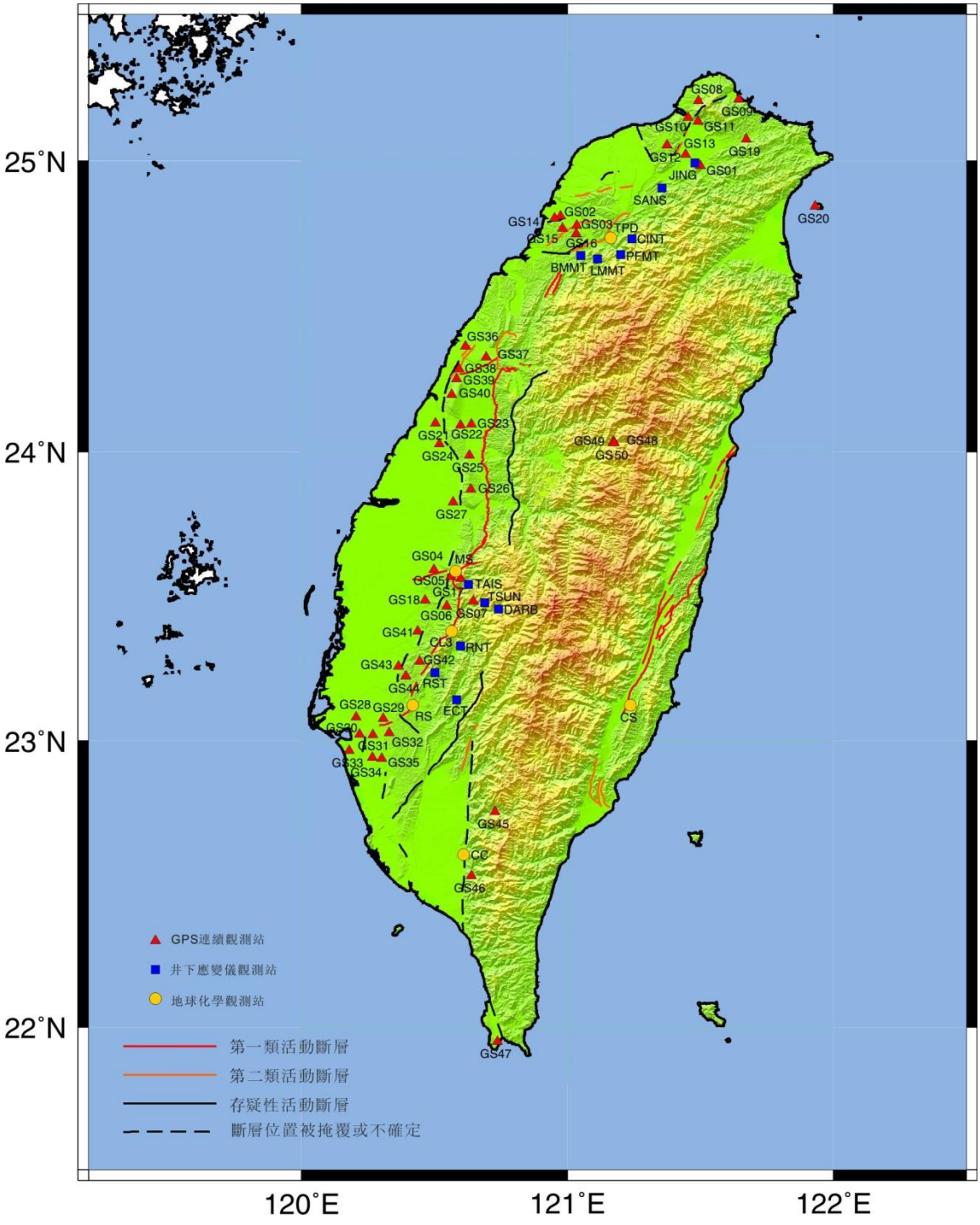


圖 1.1 中央地質調查所設置之 GPS 觀測站、井下應變儀及地球化學觀測站分布圖。

表 1.1 連續 GPS 觀測站資料接收起始時間表

測站代碼	測站名稱	接收起始時間	測站代碼	測站名稱	接收起始時間
GS01	地調所	2002.6.17	GS26	名崗國小	2006.5.31
GS02	新竹高工	2004.10.21	GS27	彰化農場	2006.5.31
GS03	工研院	2004.10.19	GS28	中崙加壓站	2006.6.17
GS04	大埔美農場	2004.10.16	GS29	潭頂自來水廠	2006.6.16
GS05	半天寮淨水廠	2004.10.21	GS30	大橋國小	2006.6.25
GS06	民和國中	2004.10.21	GS31	西勢國小	2006.6.17
GS07	培英國小	2004.10.21	GS32	虎頭埤	2006.6.23
GS08	興華國小	2005.8.15	GS33	永華國小	2006.6.22
GS09	大鵬國小	2005.8.16	GS34	成大航太實驗場	2006.6.24
GS10	竹圍國中	2005.9.6	GS35	南沙崙農場	2006.6.24
GS11	北投國小	2005.8.15	GS36	德化國小	2006.10.21
GS12	樂善國小	2005.9.6	GS37	泰安休息站	2006.10.25
GS13	國光國小	2005.8.16	GS38	清水服務區	2006.10.21
GS14	西門國小	2005.9.13	GS39	龍井國小	2006.10.21
GS15	雙溪國小	2005.9.13	GS40	龍峰國小	2006.10.21
GS16	寶山水庫	2005.9.13	GS41	竹門國小	2007.11.23
GS17	太平國小	2005.9.14	GS42	東原國中	2007.11.23
GS18	嘉義農試所	2005.9.14	GS43	果毅國小	2007.11.27
GS19	保長國小	2006.7.12	GS44	六甲國小湖東分校	2007.11.30
GS20	龜山島	2006.8.4	GS45	霧臺鄉公所	2008.12.20
GS21	大嘉國小	2006.6.10	GS46	來義國小	2008.12.20
GS22	快官交流道	2006.6.10	GS47	台電南展館	2008.12.20
GS23	五光國小	2006.5.30	GS48	廬山 1	2008.12.20
GS24	文祥國小	2006.5.30	GS49	廬山 2	2008.12.20
GS25	寶山國小	2006.5.31	GS50	廬山 3	2008.12.20

表 1.2 井下應變儀觀測站資料接收起始時間表

測站代碼	站名	資料開始接收時間	測站代碼	站名	資料開始接收時間
RNT	曾文水庫北	2004.04.15	TSUN	中興國小	2006.03.03
ECT	甲仙十八灣	2004.04.16	TAIS	太興國小	2006.03.04
RST	曾文水庫南	2004.07.18	CINT	新樂國小	2006.11.15
PFMT	梅花國小	2005.06.04	DARB	達邦	2006.11.19
LMMT	瑞峰國小	2005.06.07	JING	錦和	2007.11.20
BMMT	大坪國小	2005.06.09	SANS	明德	2007.11.12

表 1.3 地球化學觀測站資料接收起始時間表

測站代碼	站名	座標_TWD67（N,E）	資料接收起始時間
CL3	中崙濁水潭站	（2586520, 204643）	2004.1.14
TPD	大平地站	（2736929, 265637）	2005.12.16
MS	梅山站	（2609740, 206325）	2006.11.9
RS	二溪站	（2558154, 189642）	2006.11.9
CC	潮州站	（2500689, 209087）	2008.9.3
CS	池上站	（2558221, 273485）	2008.9.23

1-2 工作內容概述

本計畫目標在藉由地調所已設置 50 個 GPS 連續觀測站、12 個井下應變儀及 6 個地球化學觀測站（圖 1.1）的監測資料，同時配合地質構造、數值模擬與斷層活動度研究，分析斷層活動潛能，並利用觀測資料之時間序列比對連續觀測站之異常關聯性。其工作項目如下：

1. GPS 連續觀測站：
   - 本計畫加入中央氣象局，中央研究院，內政部等所建立之台灣連續觀測站之速度場與本次計畫測站之速度場資料加以彙整共 161 個觀測站，進行應變率與旋轉率之評估。
   - 分析連續性 GPS 時間序列觀測資料，以瞭解地殼變形隨時間變化狀況，由水平與垂直方向的 GPS 位移向量，推求斷層的短期滑移速率。

- 使用彈性塊體模型 McCaffrey（2002）所發展的軟體 DEFNODE 來演算塊體運動的模式與斷層活動之行為。

2. 井下應變儀觀測：
   - 分析井下應變儀資料，利用數值模式修正地形效應，同時校正氣壓和水文效應、井孔與灌漿回復效應和潮汐校正，求取各測站面應變及剪應變隨時間變化之趨勢。
   - 透過國際級研究團隊（USGS, GSJ）相互合作與交流，及國際研討會發表成果，以增進研究成果與展現研究之重要性。
   - 井下應變儀資料庫展示系統介面升級，提供管理者與使用者權限，以建立安全機制。
   - 建立資料庫及井下應變儀維護紀錄表標準格式，供本案巡察及維護之參考。
3. 斷層潛勢分析：
   - 利用斷層模型之建置，瞭解斷層的同震與震間活動特性之差異，並推求斷層滑移型態與斷層參數（包含斷層長度、走向、傾角、閉鎖或潛移區分布、深度、面積、跨斷層水平速度變化與跨斷層垂直速度變化等）。
   - 進行斷層活動度與潛能分析模式之評估，將上述斷層之斷層參數帶入統計模型中，計算未來 30、50、100 年之發震機率。
4. 整合觀測資料分析
   - 將地球化學監測站資料與 GPS 連續觀測站、井下應變儀以及地震儀資料統合並且探討其相關性為本計畫的重要成果之一。

1-3 本年度計畫期末之成果

1. GPS 連續觀測站：

- 台灣北部、東北部至宜蘭地區、中央山脈延伸至屏東恆春半島地區以及高雄地區呈現伸張之主軸應變，最大伸張面膨脹率為 1.32×10^{-6} μstrain/yr；西部海岸平原壓縮量較小，西部麓山帶、中央山脈東側與花東縱谷至海岸山脈為壓縮主軸應變，最大壓縮面膨脹率為 1.97×10^{-6} μstrain/yr。
- 由解算結果得知，速度場不是相當的穩定，解算結果誤差也較大。明年度之計畫將會把兩種不同來源的資料一起解算，並依目前 A 至 E 五區的分區方式，分別解算，將有助於縮短解算基線，以減少誤差。
- 目前時間序列中所觀察到的週期性變化之原因尚未明瞭，部分測站其週期為一年，有的更長，部分測站無法得知其週期為何，其仍須透過資料累積來判斷是否有重複出現的週期現象，或地表變形之異常變化，以釐清變化之原因。

2. 將台灣劃分為 27 個剛性塊體以及 24 條斷層進行塊體運動模擬的研究，我們可以發現鎖定率高的斷層有金山、山腳斷層、車籠埔斷層南段、大尖山斷層、旗山斷層、潮洲

斷層以及縱谷斷層中段。塊體運動滑移速率以縱谷斷層中段至南段最快，有 30-45 mm/yr，其餘都在 30 mm/yr 以下。速率虧損代表塊體邊界斷層因為摩擦力而未表現出實際長期滑移速率的減少量，速率虧損越高，表示被留在斷層內部的應力越高。台灣塊體模擬結果顯示，斷層滑移速率虧損較高者在縱谷斷層的中段，有著高達 32-45 mm/yr 的虧損值，其他斷層約在 10 mm/yr 以下。

3. 井下應變儀觀測：

- 井下應變儀部分先處理中興國小（TUSN）、太興國小（TAIS）、達邦（DARB）等三站的資料，這三站資料中除了達邦測站可看出較完整的井孔回復的雙指數鬆弛效應，其餘中興與太興國小測站都有數十微應變的上下起伏變動，而且看不出井孔回復的鬆弛效應。
- 井下應變儀達邦測站，在除去了井孔效應以後，與地下水位的變化幾乎完全同步，1 公尺的水位變化可以造成約 7 μstrain 的變化。井下應變儀的資料，除了受到地下水層水壓改變而有明顯的變化以外，還受大氣壓力的顯著影響，而颱風期間的氣壓降低是最顯著的氣壓變化。在 2008 年 5 月的汶川地震表面波到達時，達邦與中興國小都在應變儀紀錄顯示應變量突然的改變，而且都是約 0.1 μstrain 的膨脹，這是否顯示這表面波的經過會引發地區性斷層的小地震，還是只是儀器的特性所致？值得再進一步的探討。
- 汶川地震觸發台灣西部地區動態變形的現象，造成這種變形行為的原因目前尚未清楚。比照應變儀觀測資料，發現地下水壓的變化與面應變的變化並不一致，可推論地下水壓的變化並非直接影響應變變化的主要因素。

3. 斷層潛能分析模式之評估：

- 利用 BPT 統計模式估算發震機率，推估車籠埔斷層全段於 2009-2039、2009-2059、2009-2109 之發震條件機率分別為 7.48×10^{-7}%、4.00×10^{-3}% 和 0.72%。瑞穗斷層於 2009-2039、2009-2059、2009-2109 之發震條件機率分別為 27.71%、36.56% 和 65.31%。

4. 整合觀測資料進行分析：

- 在 GPS 部分與地震發生前無明顯異常變化，而地球化學部分則是在震前的分析中有異常變化，但目前仍無法分析出地震與地化異常的直接關連。
- 初步分析得知持續時間夠久的氡氣異常紀錄，皆與地震活動有關，其發生時間在地震前 10 天至 1 個月不等。

二、連續 GPS 觀測站之成果

2-1 速度場、主軸應變與旋轉率

中央地質調查所 GPS 連續觀測站於 2002 年資料記錄至 2009 年共設置 50 個連續觀測站，本計畫期末報告計算至 2009 年 9 月 30 日之觀測資料，並加入 2002 年以來的計算資料，提供速度場分析與時間序列觀測變化，由於 GS48、GS49 以及 GS50 為 2008 年底所建立之 GPS 連續觀測站，可使用之資料從 2009 年 3 月開始，其此三站之資料量較少，所解算出來之速度場誤差較大，於接下來的分區討論中未加於詳述，待後續更多觀測資料時，求取較穩定觀測資料後再加以討論。經由 Nikolaidis（2002）時間序列表示，將全台灣速度場擷取分析，其中，新竹高工 GS02 測站之時間序列變化受到大樓施工的影響，將於 2005 年 4 月至 2006 年 6 月所造成之偏移已扣除後再加以評估計算。因此，全台灣相對於澎湖 S01R 之速度場如圖 2.1 和表 2.1 所示；於 ITRF2005 框架下之相對於地球質心運動之速度場如圖 2.2 所示。由於地體構造與速度場變化之關連性，本計畫將討論區域分為 A-E（北部地區、新竹地區、中部地區、嘉義地區及西南地區），並將時間序列結果呈現於附錄 A，其中包含時間序列非線性變化，與異常變化皆未給予刪除。

另外，為了評估主軸應變率與旋轉率之情形，本計畫另加入地調所與其他單位（中央氣象局、中央研究院、內政部、中正大學、國土測繪中心等）交換之觀測資料進行解算，但因本期計畫時間較短，與其他單位交換之部分目前只解算 2008 年一年期資料，未來將加入其他年度，以求取更穩定之速度場。與其他單位交換之部分所建立連續觀測站之速度場共 111 個測站，與地調所測站加以彙整，共 161 個觀測站（圖 2.3），其速度如圖 2.4 所示，利用此 161 個測站之資料進行主軸應變率與旋轉率之評估（速度場、主軸應變率與旋轉率之評估方式詳見附錄 B）。

由圖 2.5 得知，台灣北部、東北部至宜蘭地區、中央山脈延伸至屏東恆春半島地區呈現伸張之主軸應變且最大伸張面膨脹率達 1.32 μstrain/yr；西部海岸平原壓縮量較小，西部麓山帶、中央山脈東側與花東縱谷至海岸山脈之主軸應變為壓縮應變，最大壓縮面膨脹率達 1.97 μstrain/yr。而旋轉率則是由花蓮北部沿中央山脈雪山山脈向東北方向順時鐘變化並增加旋轉角度，台南、高雄北部地區也為順時針旋轉，另一方面苗栗至台中地區亦呈現順時鐘旋轉的變化；海岸山脈至中央山脈東側及屏東恆春半島地區則呈現明顯的逆時針旋轉（圖 2.6）。

表 2.1 中央地質調查所 GPS 連續觀測站平均速度場（資料解算至 2009 年 9 月）

Station	Lon (^{o})	Lat (^{o})	V_E (mm/yr)	V_N (mm/yr)	V_H (mm/yr)	S_E (mm/yr)	S_N (mm/yr)	S_H (mm/yr)	V (mm/yr)	Azi (^{o})
GS01	121.5082	24.9820	2.35	3.57	-0.95	0.03	0.02	0.11	4.27	33.4
GS02	120.9823	24.8097	-4.24	1.36	-3.45	0.08	0.09	0.32	4.45	342.2
GS03	121.0441	24.7766	-2.45	4.43	-1.94	0.04	0.06	0.15	5.06	331.1
GS04	120.5068	23.5915	-5.18	3.27	-2.02	1.30	0.29	1.26	6.13	302.3
GS05	120.5684	23.5671	-14.29	4.19	0.40	0.07	0.03	0.21	14.89	286.3
GS06	120.5542	23.4656	-14.93	2.94	1.54	0.05	0.04	0.20	15.22	281.1
GS07	120.6548	23.4829	-18.18	3.47	5.64	0.05	0.05	0.24	18.51	280.8
GS08	121.5015	25.2037	1.27	2.47	-2.53	0.09	0.11	0.39	2.78	27.2
GS09	121.6519	25.2086	3.06	0.85	-0.77	0.06	0.06	0.33	3.18	74.5
GS10	121.4615	25.1462	2.7	1.91	-6.55	0.06	0.05	0.32	3.31	54.7
GS11	121.4988	25.1336	0.19	2.04	-4.89	0.06	0.06	0.30	2.05	5.3
GS12	121.3828	25.0530	1.68	2.03	-1.17	0.05	0.04	0.22	2.64	39.6
GS13	121.4522	25.0200	0.98	3.66	-7.63	0.07	0.04	0.35	3.79	22.7
GS14	120.9595	24.8032	-0.90	3.12	-2.44	0.04	0.03	0.16	3.25	343.1
GS15	120.9905	24.7666	-1.22	4.45	-1.72	0.04	0.04	0.16	4.61	346.9
GS16	121.0416	24.7479	-1.94	4.58	-1.67	0.04	0.04	0.19	4.97	338.7
GS17	120.6058	23.5612	-17.47	4.58	0.83	0.05	0.06	0.23	18.06	284.7
GS18	120.4738	23.4850	-9.34	1.71	-2.66	0.04	0.03	0.19	9.50	280.3
GS19	121.6798	25.0723	4.11	1.94	-1.26	0.08	0.08	0.36	4.54	64.5
GS20	121.9400	24.8425	14.11	-5.35	-17.23	0.08	0.07	0.60	15.09	110.9
GS21	120.5124	24.0973	-1.74	0.49	-4.01	0.05	0.05	0.25	1.81	298.7
GS22	120.6063	24.0909	-3.87	1.82	-3.30	0.05	0.05	0.27	4.28	299.2
GS23	120.6477	24.0946	-5.66	3.74	25.59	0.07	0.06	1.00	6.78	304.0
GS24	120.5261	24.0252	-2.54	0.68	-9.12	0.06	0.05	0.30	2.63	287.1
GS25	120.6402	23.9865	-4.65	1.92	-4.32	0.06	0.05	0.30	5.03	294.7
GS26	120.6460	23.8698	-4.75	1.66	-0.29	0.06	0.05	0.31	5.03	292.7
GS27	120.5779	23.8248	-3.70	1.22	-3.89	0.06	0.05	0.25	3.90	291.8
GS28	120.2144	23.0810	-6.66	0.19	-3.08	0.07	0.05	0.28	6.66	271.8
GS29	120.3158	23.0751	-10.69	-1.62	4.46	0.06	0.05	0.26	10.81	262.4
GS30	120.2263	23.0205	-11.45	-0.18	-0.88	0.07	0.06	0.23	11.45	269.8

表 2.1 中央地質調查所 GPS 連續觀測站平均速度場（續）

Station	Lon (^{o})	Lat (^{o})	V_E (mm/yr)	V_N (mm/yr)	V_H (mm/yr)	S_E (mm/yr)	S_N (mm/yr)	S_H (mm/yr)	V (mm/yr)	Azi (^{o})
GS31	120.2758	23.0189	-14.78	-1.11	-2.84	0.06	0.05	0.26	14.82	267.2
GS32	120.3371	23.0258	-16.86	-3.73	1.31	0.08	0.06	0.27	17.27	257.4
GS33	120.1878	22.9644	-11.45	0.20	-1.99	0.05	0.05	0.25	11.45	271.9
GS34	120.2751	22.9392	-20.63	-0.94	-0.93	0.06	0.05	0.25	20.65	268.4
GS35	120.3094	22.9355	-21.94	-1.61	-1.55	0.06	0.05	0.27	22.00	266.3
GS36	120.6253	24.3620	-2.00	1.58	-1.39	0.10	0.07	0.27	2.55	309.4
GS37	120.7154	24.3286	-4.48	2.11	-2.34	0.07	0.06	0.30	4.95	301.1
GS38	120.6006	24.2798	-2.21	0.44	-2.41	0.06	0.05	0.28	2.25	288.6
GS39	120.5296	24.1844	-1.33	0.88	-2.98	0.09	0.05	0.26	1.59	296.7
GS40	120.5763	24.1812	-1.84	1.93	-3.82	0.06	0.08	0.25	2.67	311.2
GS41	120.4449	23.3776	-12.06	1.98	-4.75	0.17	0.12	0.81	12.22	276.3
GS42	120.4520	23.2732	-18.06	2.92	4.36	0.16	0.12	0.67	18.29	290.8
GS43	120.3736	23.2572	-10.37	1.17	3.51	0.15	0.11	0.62	10.44	278.8
GS44	120.4004	23.2222	-15.15	0.68	7.63	0.15	0.12	0.61	15.17	261.0
GS45	120.7282	22.7491	-59.23	3.78	2.72	0.96	0.87	4.57	59.35	273.7
GS46	120.6495	22.5275	-58.62	1.47	8.17	0.97	0.86	6.12	58.64	271.4
GS47	120.7453	21.9487	-45.69	2.20	-9.81	0.94	0.83	3.15	45.74	272.8
GS48	121.1886	24.0236	-14.00	-49.88	-7.31	4.02	5.85	24.35	51.81	105.7
GS49	121.1845	24.0260	-12.55	-50.40	-24.57	3.84	6.50	25.00	51.94	104.0
GS50	121.1833	24.0231	-13.76	-53.90	-43.16	3.20	6.72	20.00	55.63	104.3

V_E, V_N, V_H 分別代表東西、南北與高程之速度場值；S_E, S_N, S_H 分別代表東西、南北與高程之速度場誤差值值；V 代表水平速度場值；Azi 為水平速度場之方位角。

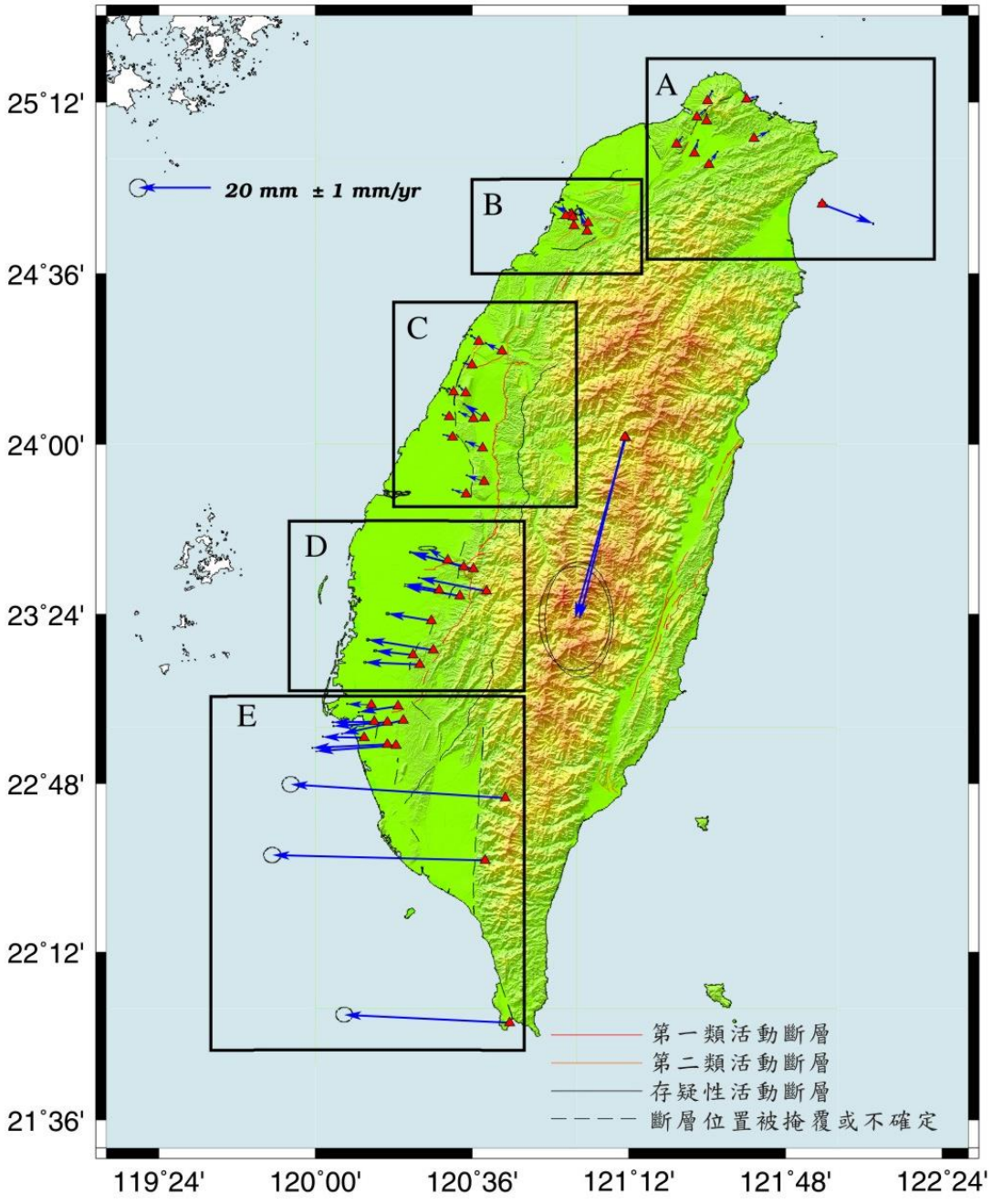


圖 2.1 中央地質調查所 GPS 連續觀測站平均速度場。方框 A-E 為本計畫探討之區域。

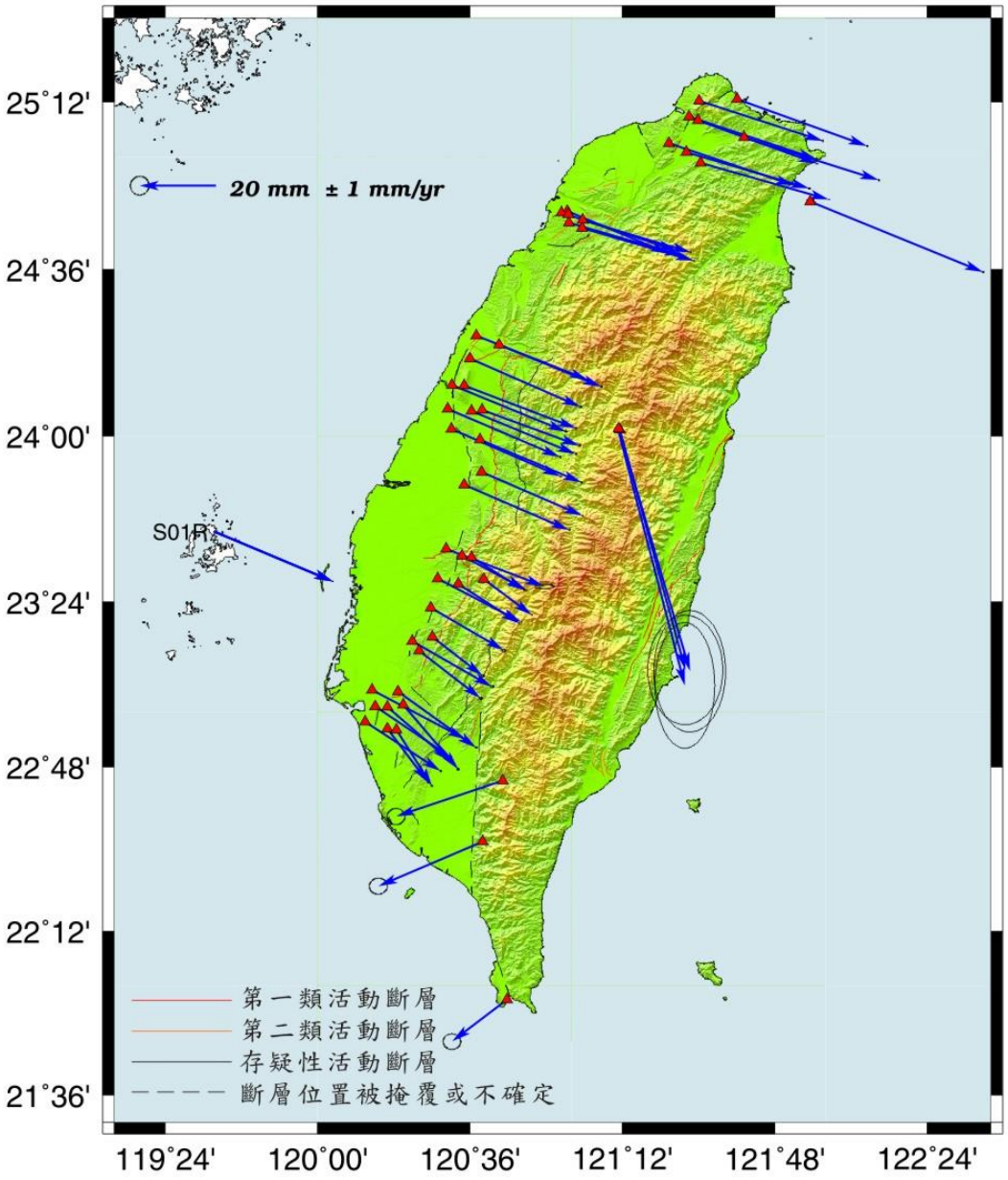


圖 2.2 中央地質調查所 GPS 連續觀測站相對於地球質心之平均速度場。

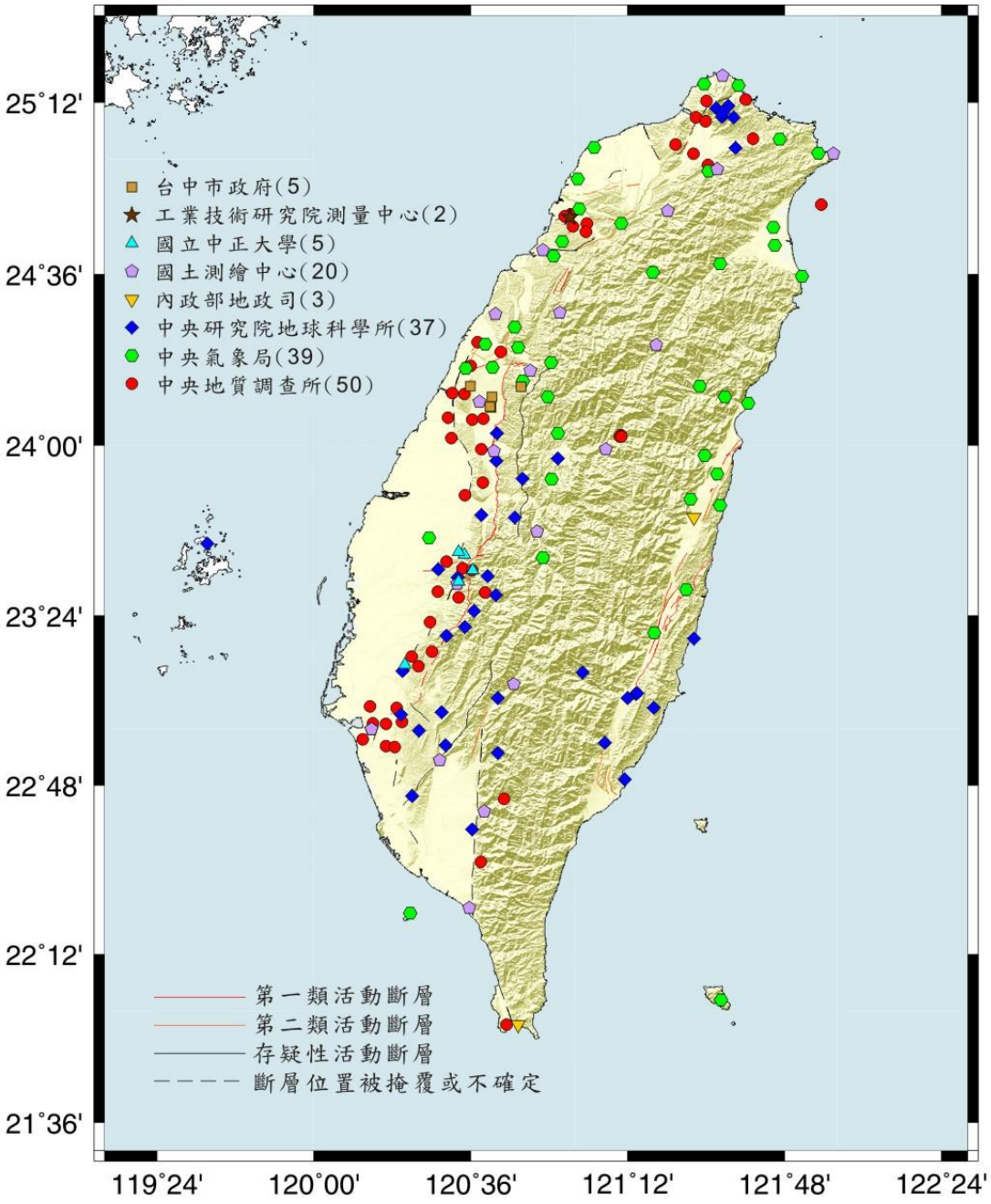


圖 2.3 中央地質調查所 50 個 GPS 連續觀測站以及其他單位共 111 個 GPS 連續觀測站之測站分布圖。

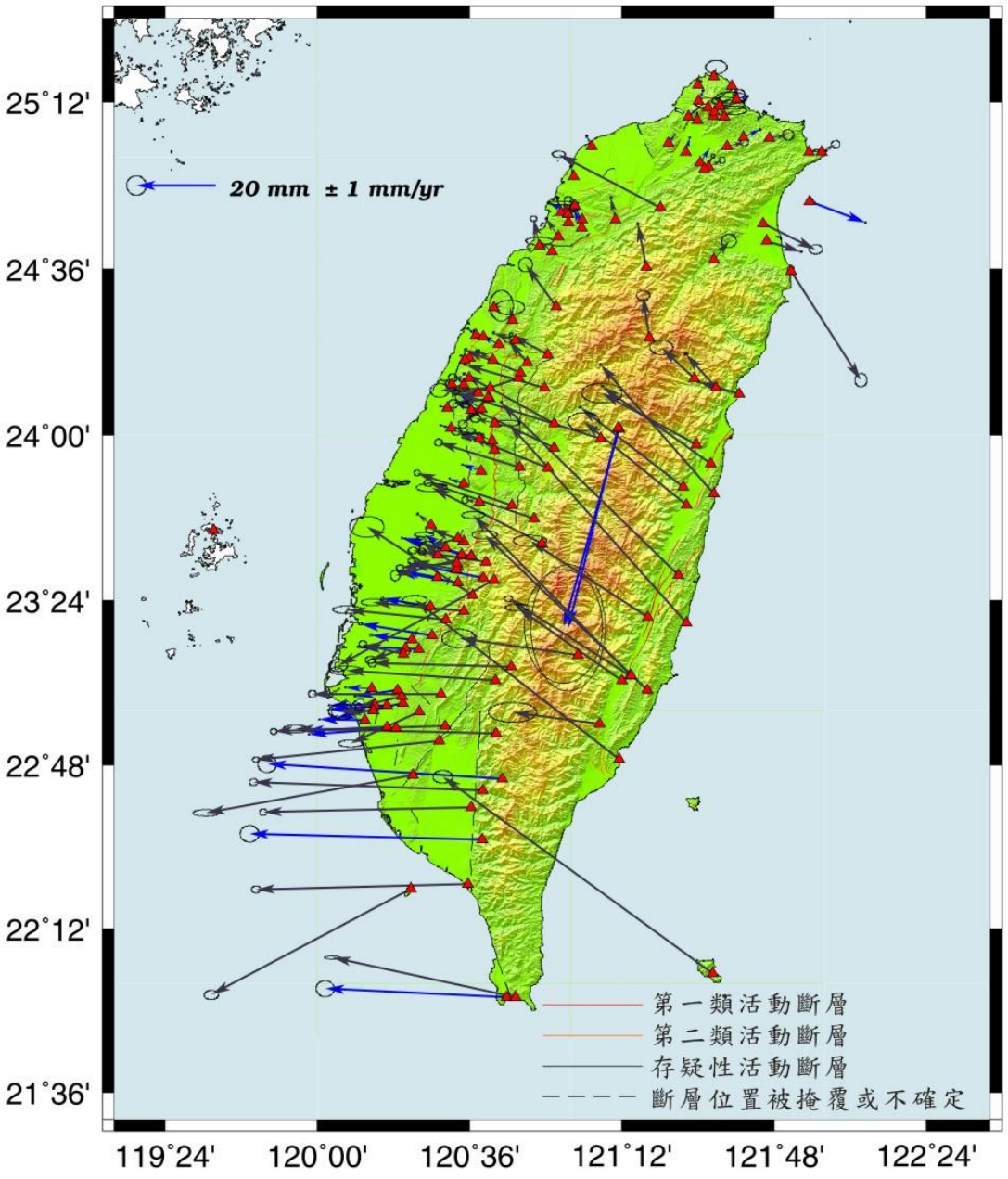


圖 2.4 中央地質調查所及其他單位之 GPS 連續觀測站平均速度場。藍色箭頭表示中央地質調查所測站之速度場，灰色箭頭為其他單位測站之速度場。

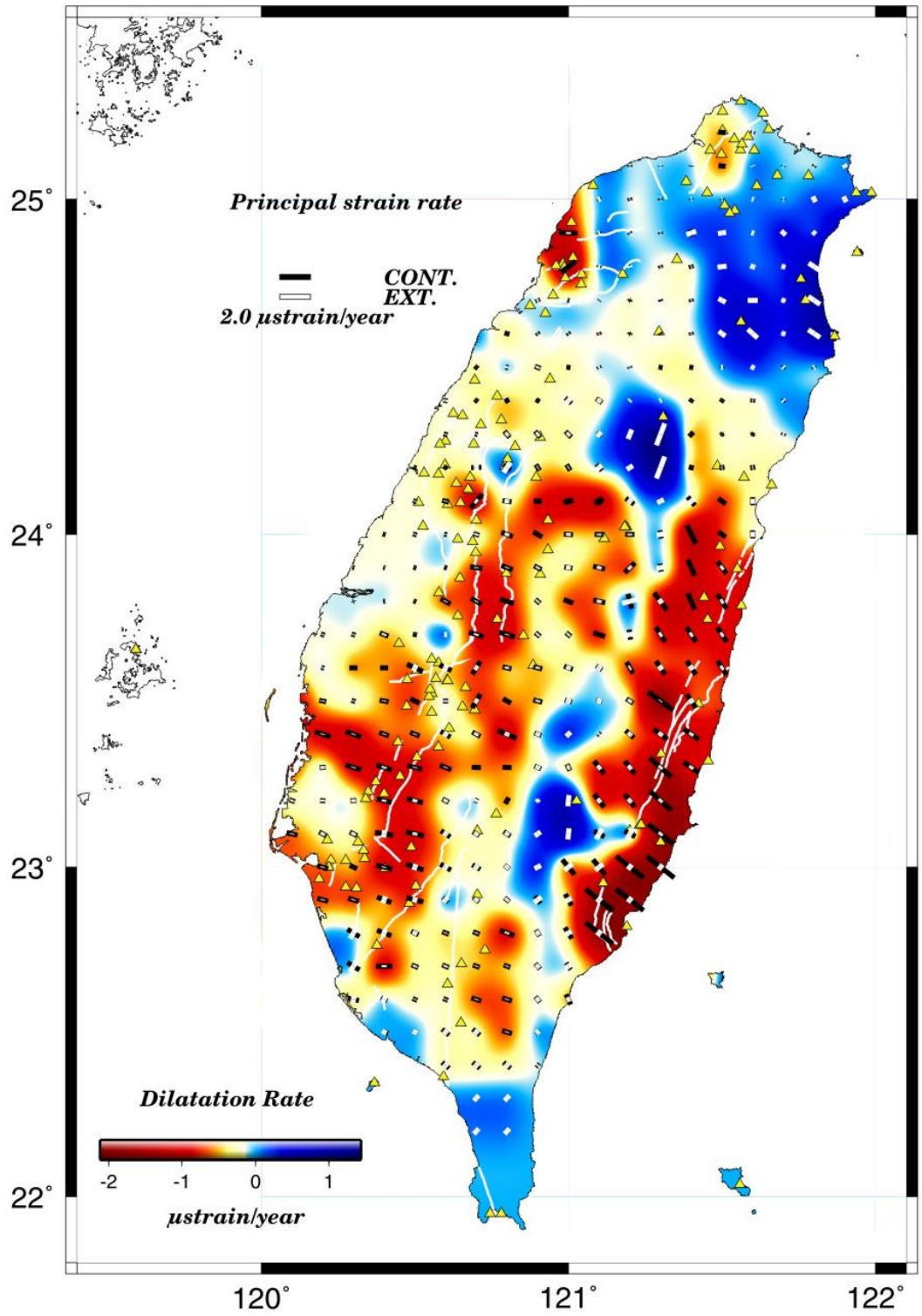


圖 2.5 台灣地區主軸應變率和面膨脹率。黑色粗線代表壓縮主軸應變軸，白色粗線代表伸張主軸應變軸。三角形表示所使用 GPS 觀測站之位置；底圖之顏色則是表示面膨脹率，其紅色表示壓縮，藍色表示伸張。

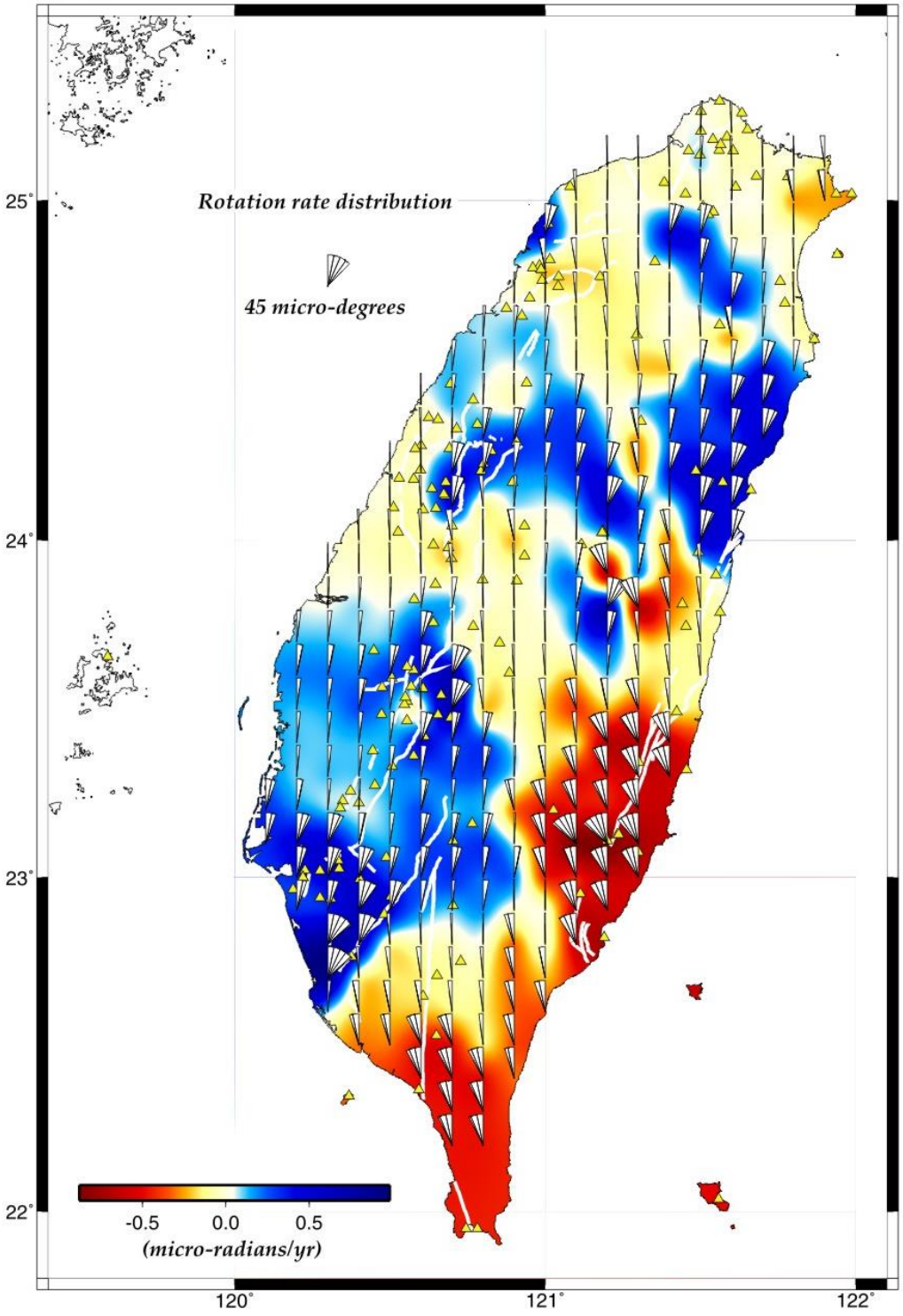


圖 2.6 台灣地區之旋轉率。扇形向右表示順時針旋轉，扇形向左則為逆時針旋轉；三角形表示所使用 GPS 觀測站之位置。

2-1-1 北部地區

本區域測站較多為沿著山腳斷層兩側分布，結果顯示台北地區相對於澎湖白砂 S01R 站之速度場介於 1.8 至 4.5 mm/yr，其方位角介於 5^{o} 至 75^{o} 之間，平均速度場為約 3.2 mm/yr，平均方位角為 40^{o}，另外位於東北角龜山島（GS20）之速度場為 15.1 mm/yr，其方位角為 111^{o}（圖 2.7）。本區域中大部分為伸張的主軸應變，僅在局部地區呈現壓縮應變之變化，但量級皆不是太大，其中伸張應變較大的區域為宜蘭地區伸張面膨脹達 0.95 μstrain/yr（圖 2.8）。雪山山脈及北部山區呈現順時針旋轉，其他地區則無明顯旋轉趨勢，如圖 2.9 所示。

時間序列中，GS01 測站觀測時間最久（2002 年 06 月 17 日開始記錄），資料累積較豐富，因此在時間序列可以明顯觀察到移動方向相反的年週期變化，變化時間約為每年的 2 月初及 8 月初，且三個方向皆有此年週期變化現象。除了 GS01 測站之外，GS08 測站之南北方向之時間序列亦可看出此年週期變化之情形，變化時間約為每年的 6 月及 11 月，如圖 2.10 所示。另一方面 GPS 資料接收與解算後結果明顯觀察出時間序列的離散程度有顯著的差異，而且具有時間段出現之現象，未來需再加入氣象資料並配合其他測站資料，再進一步佐證是否與季節變化有關。GS10 及 GS13 測站的高程分量，下降後回升再下降，一階階的趨勢，GS10 測站從每年 10 月開始下降至隔年 7 月開始上升之後 10 月再下降，接近年週期變化；而 GS13 測站從資料接收（2005 年 8 月）到次年同一時期高程明顯下降約 41.7 mm 之後有先回升再下降的趨勢，此變化週期較長約 22 個月（圖 2.10）。

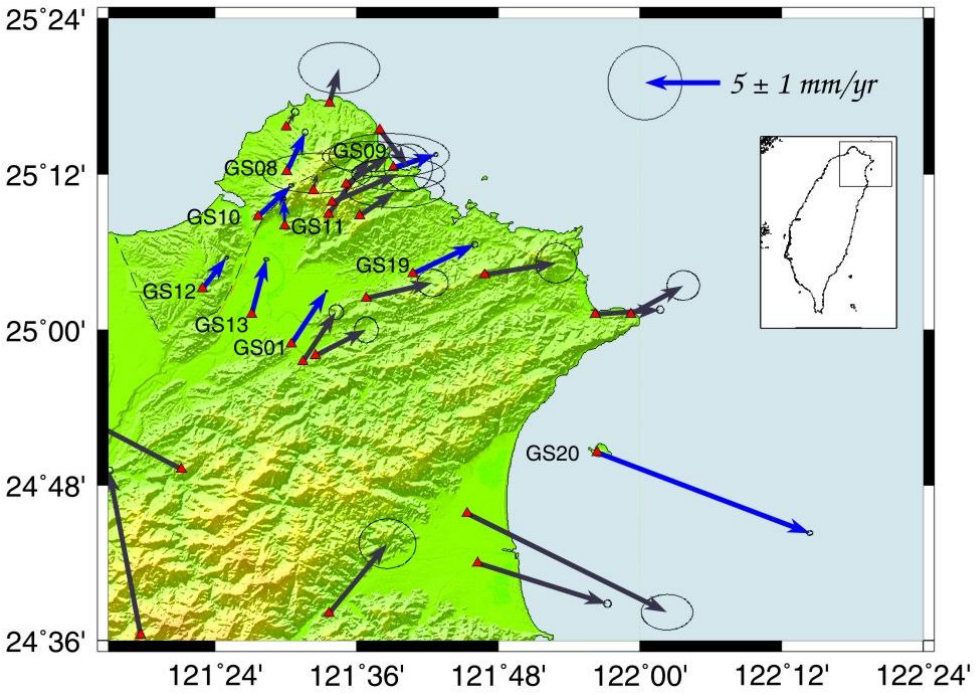


圖 2.7 北部地區之 GPS 連續觀測站平均速度場。藍色箭頭表示中央地質調查所測站之速度場，灰色箭頭為其他單位測站之速度場。

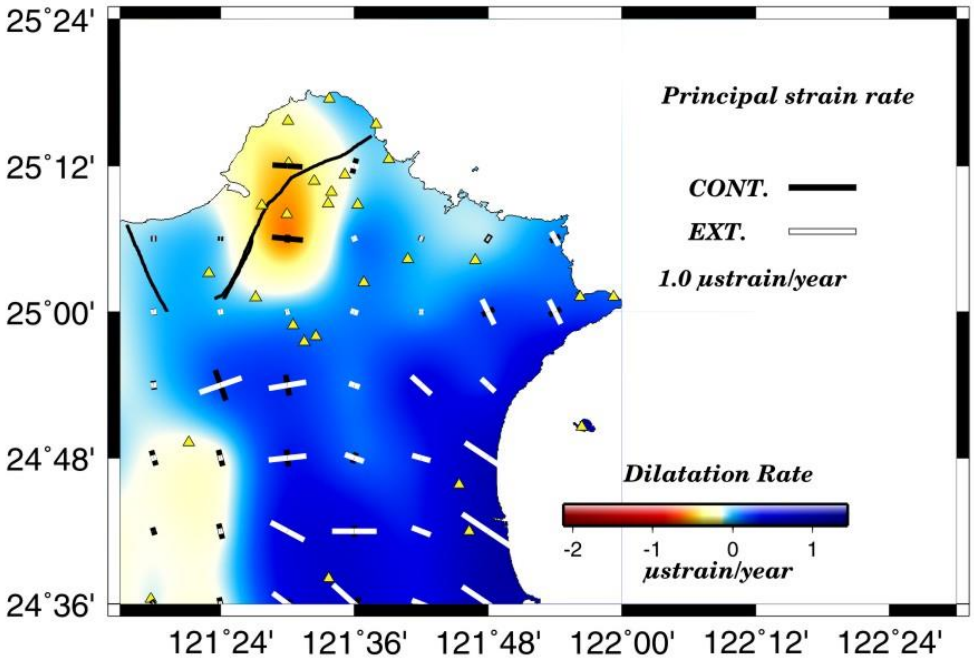


圖 2.8 北部地區之 GPS 連續觀測站之主軸應變率和膨脹率。黑色粗線代表壓縮主軸應變軸，白色粗線代表伸張主軸應變軸。三角形表示所使用 GPS 觀測站之位置；底圖之顏色則是表示面膨脹率，其紅色表示壓縮，藍色表示伸張。

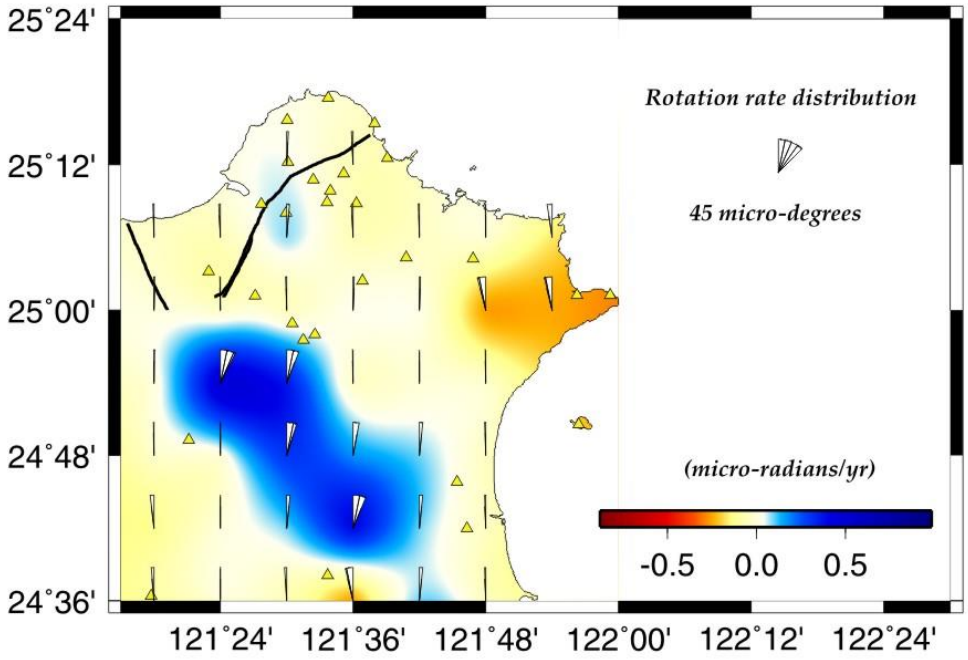


圖 2.9 北部地區之 GPS 連續觀測站之旋轉率。扇形向右表示順時針旋轉，扇形向左則為逆時針旋轉；三角形表示所使用 GPS 觀測站之位置。

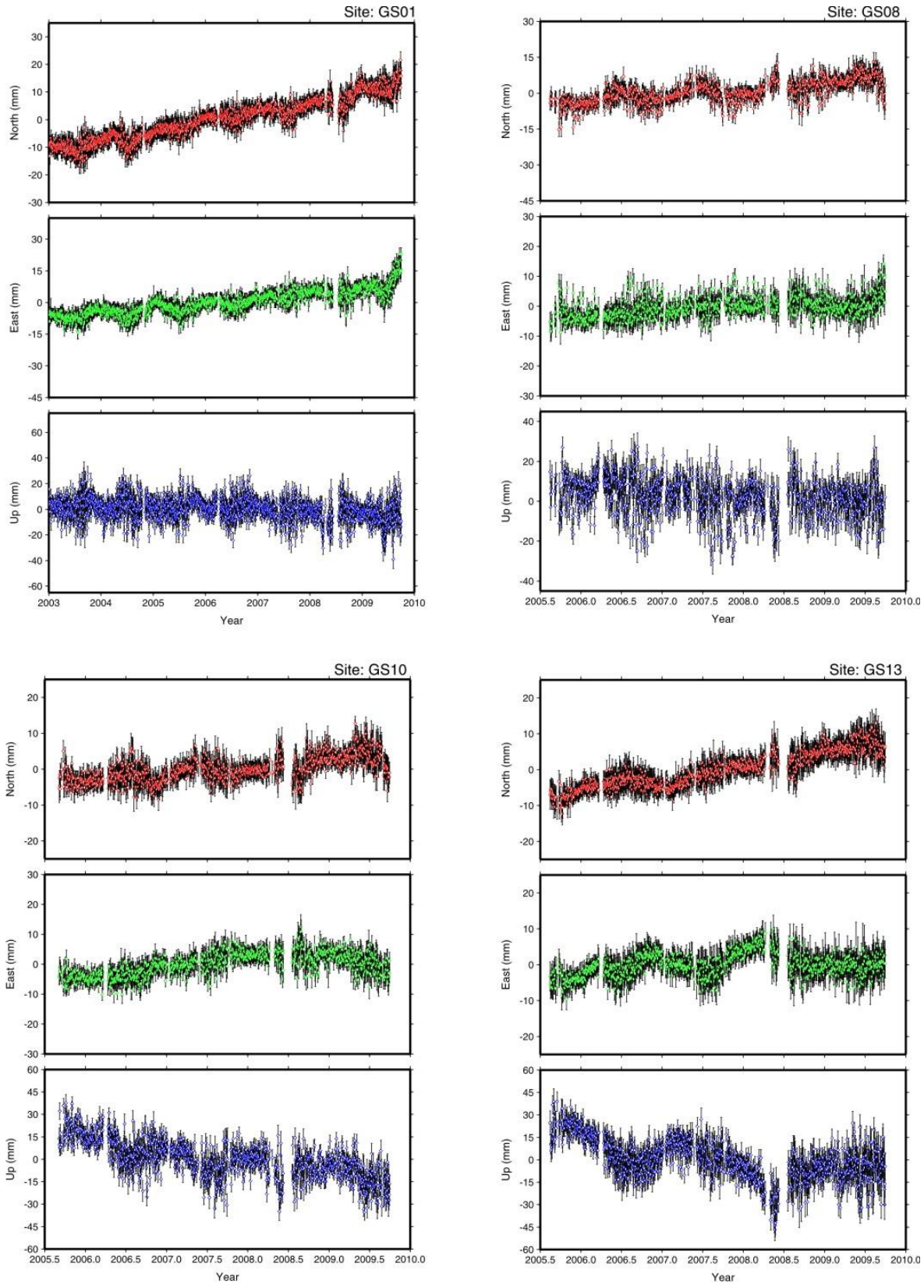


圖 2.10 測站 GS01、GS08、GS10 及 GS13 之時間序列。

2-1-2 新竹地區

新竹地區測站多分布於新城斷層兩側，相對於澎湖白砂 S01R 站之速度場介於 3.3 至 5.5 mm/yr，其方位角介於 331^{o} 至 347^{o} 之間，平均速度場為約 4.7 mm/yr，平均方位角為 340^{o}（圖 2.11）。新竹市區與竹北地區呈現明顯的壓縮之主軸應變，最大壓縮面膨脹率為 1.42 μstrain/yr；其他地區都相當的小，如圖 2.12。在旋轉率方面，除了北部沿海地區明顯的順時針旋轉外，其他地區皆無明顯旋轉趨勢，如圖 2.13 所示。

在時間序列方面，GS03 測站於 2005 年 4 月底，往南偏移了 8.2 mm，而高程方向抬升約 7.9 mm；GS03 測站及 GS15 測站從 2008 年 8 月起至 2009 年初，由南北方向之時間序列發現往北偏移約 10.8 mm 及 5.6 mm，之後有再下降的趨勢（圖 2.14），與前一台北地區之 GS11 測站具有相同趨勢。

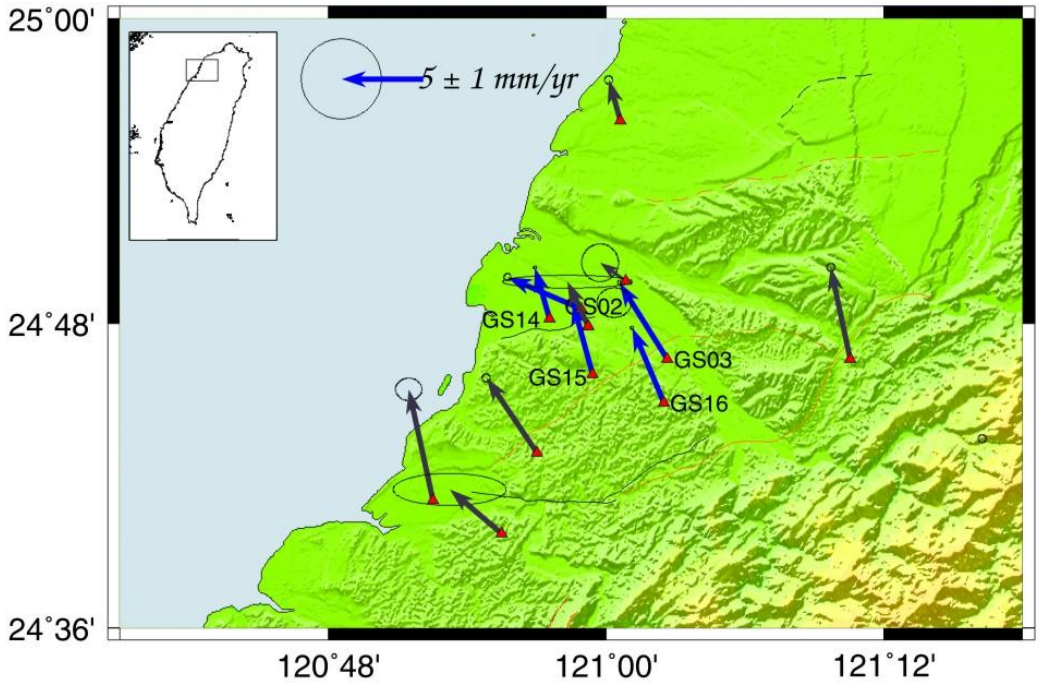


圖 2.11 新竹地區之 GPS 連續觀測站平均速度場。藍色箭頭表示中央地質調查所測站之速度場，灰色箭頭為其他單位測站之速度場。

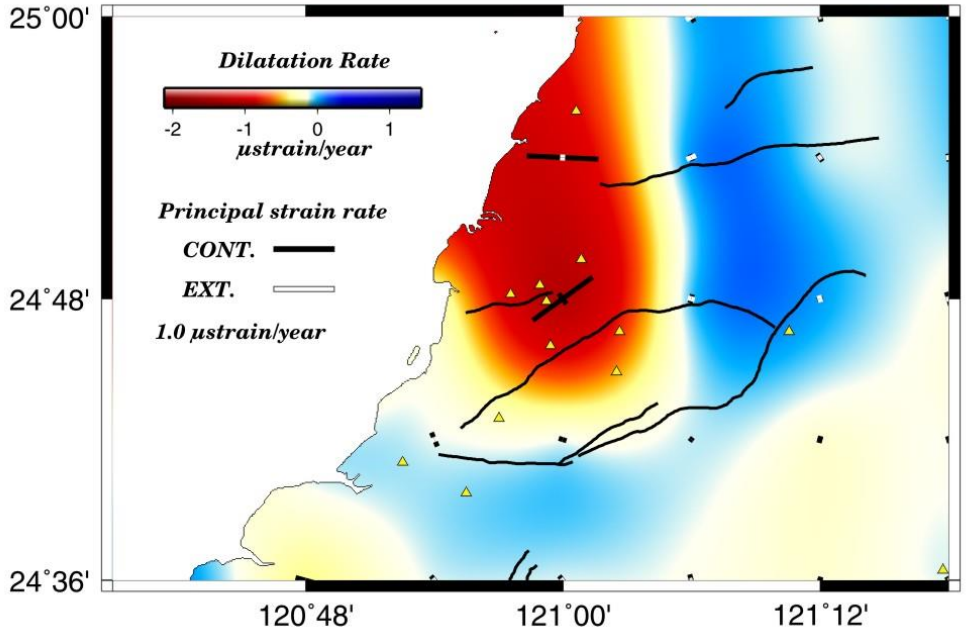


圖 2.12 新竹地區之 GPS 連續觀測站之主軸應變率和膨脹率。黑色粗線代表壓縮主軸應變軸，白色粗線代表伸張主軸應變軸。三角形表示所使用 GPS 觀測站之位置；底圖之顏色則是表示面膨脹率，其紅色表示壓縮，藍色表示伸張。

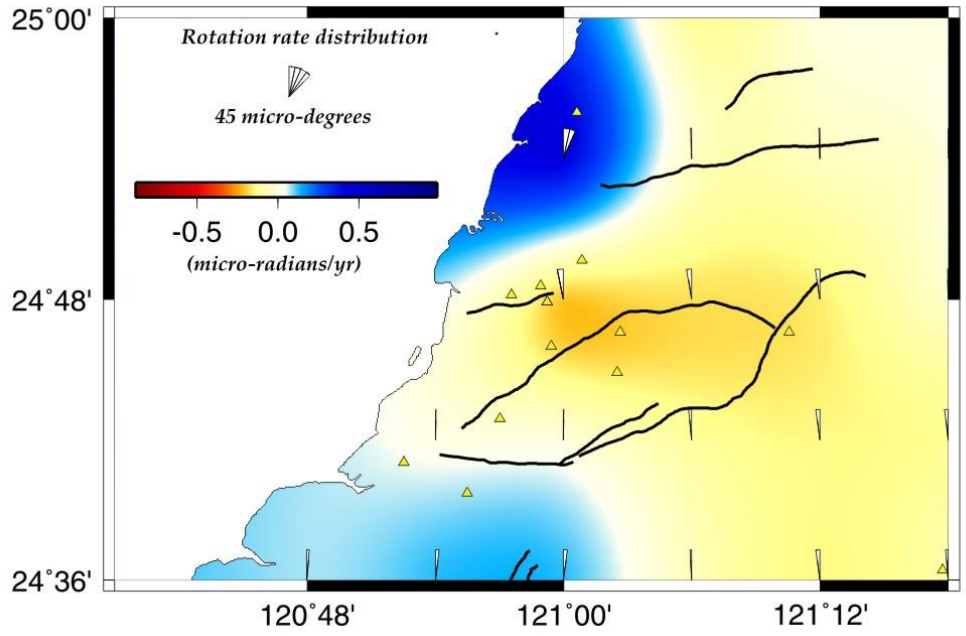


圖 2.13 新竹地區之 GPS 連續觀測站之旋轉率。扇形向右表示順時針旋轉，扇形向左則為逆時針旋轉；三角形表示所使用 GPS 觀測站之位置。

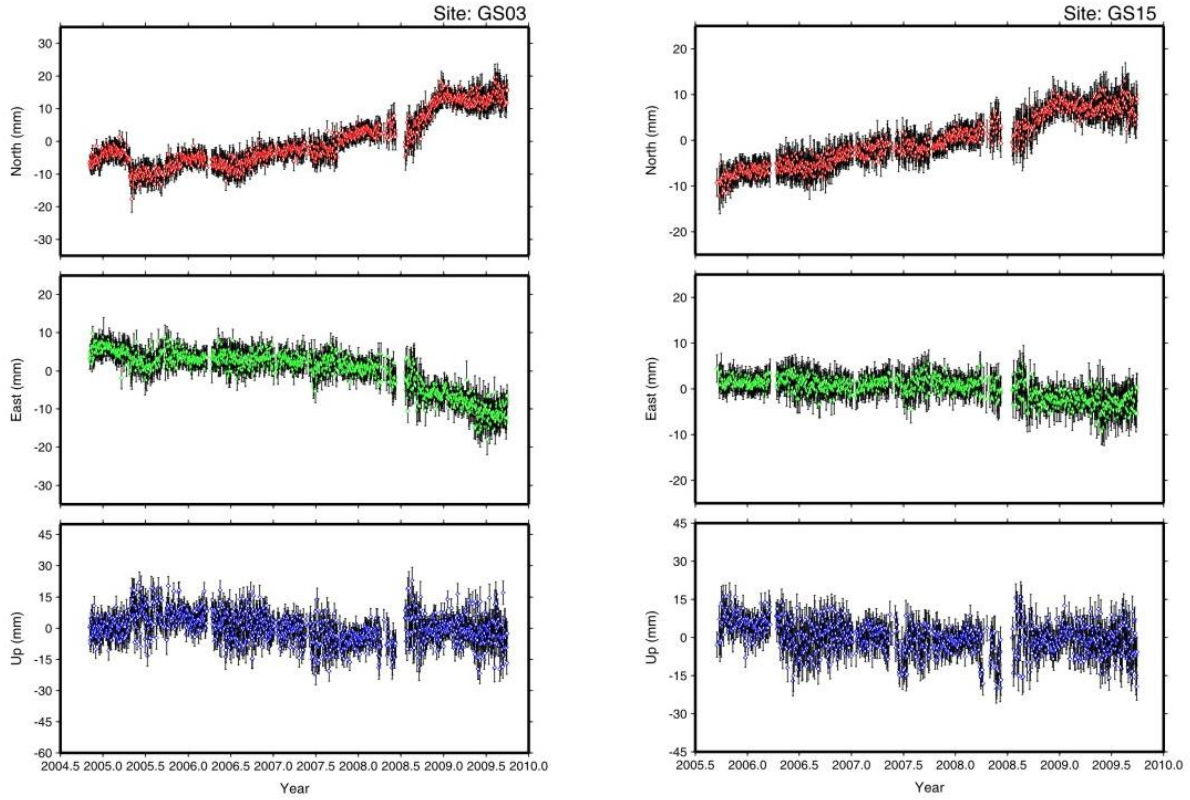


圖 2.14 測站 GS03 及 GS15 之時間序列。

2-1-3 中部地區

中部地區測站多分布於屯子腳斷層與彰化斷層兩側，921 集集地震主要破裂帶為車籠埔斷層，測站皆位於車籠埔斷層西側，亦可以提供震後該區域變形量之分析，然而主要還是以彰化斷層兩側測站基線變化為未來研究的方向。中部地區相對於澎湖白砂 S01R 之速度場介於 1.6 至 6.8 mm/yr，其方位角介於 287^{o} 至 311^{o} 之間，平均速度場為約 3.6 mm/yr，平均方位角為 298^{o}。彰化斷層西側平均位移量為 2.5 mm/yr，而東側為 4.7 mm/yr，顯示橫跨彰化斷層約有 2.2 mm/yr 的縮短量（圖 2.15）。本區域主要為壓縮應變為主，尤其橫跨車籠埔斷層出現較大量的壓縮應變，而車籠埔斷層上盤亦觀測到壓縮應變，如圖 2.16，顯示 921 震後速度場的變化在此斷層兩側呈現不均勻的分布。本區域之旋轉率變化，除了車籠埔斷層北段，有少許之順時針旋轉趨勢外，其他地區都無明顯之旋轉趨勢（圖 2.17）。

時間序列中，本區域測站大致穩定，其中 GS23 測站從 2008 年 6 月至同年 9 月，垂直方向共抬升 103.3 mm；而其中 GS36 及 GS39 測站於東西方向之時間序列，以及 GS40 測站於南北方向之時間序列有明顯波動之變化，圖 2.18 中之橘色箭頭所指出其斜率出現轉折變化之處，此三段時間分別為 2007 年 2 月 4 日、2008 年 3 月 2 日及 2009 年 1 月 3 日。目前其波動原因尚未明瞭，仍須透過資料累積來判斷是否有重複出現的週期現象，或地表變形之異常變化，以釐清變化之原因。

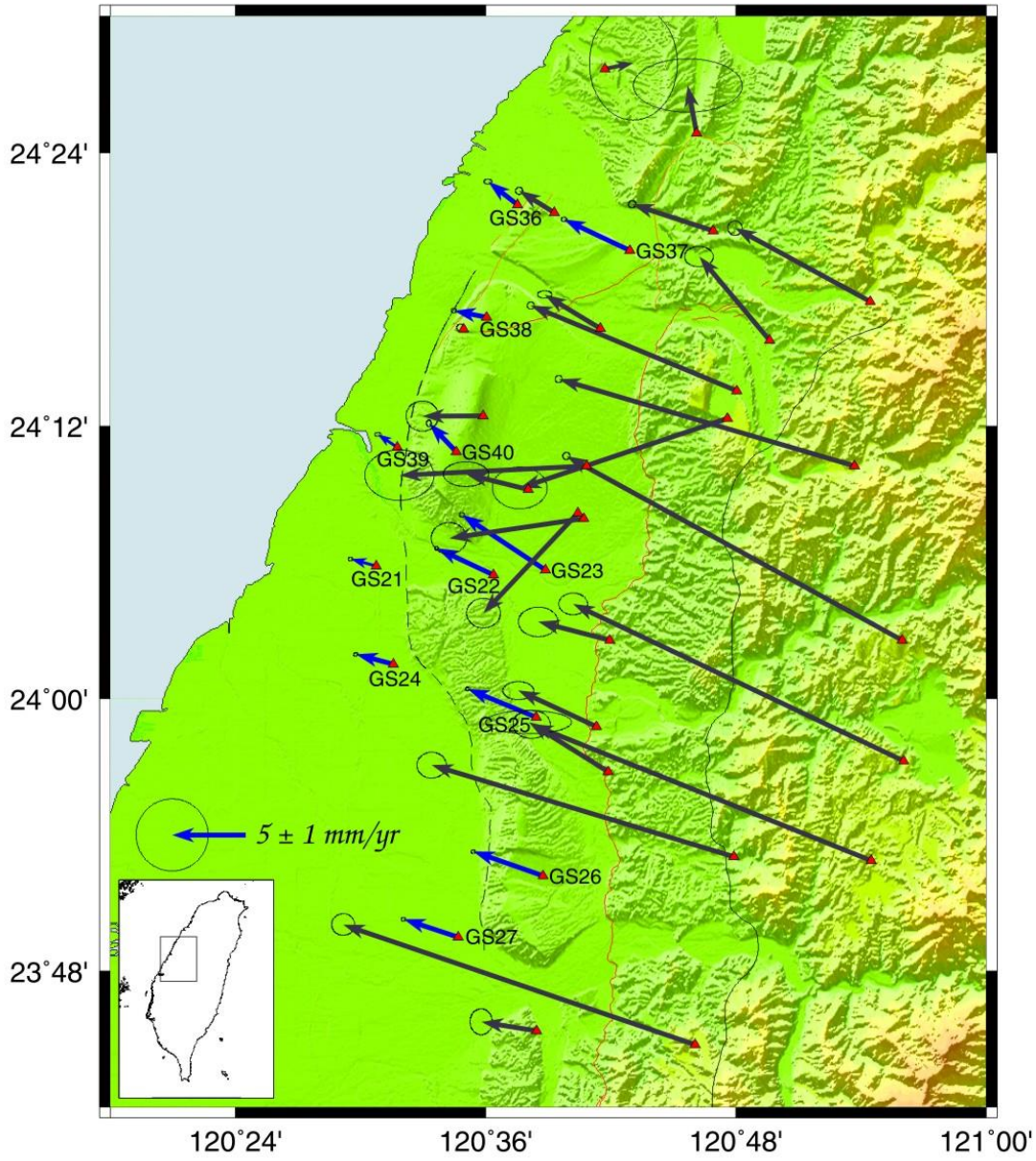


圖 2.15 中部地區之 GPS 連續觀測站平均速度場。藍色箭頭表示中央地質調查所測站之速度場，灰色箭頭為其他單位測站之速度場。

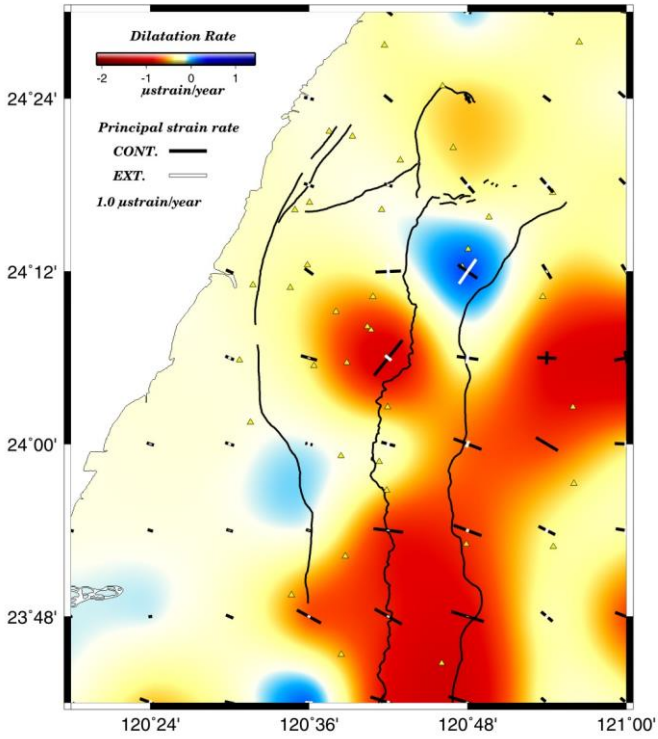


圖 2.16 中部地區之 GPS 連續觀測站之主軸應變率和膨脹率。黑色粗線代表壓縮主軸應變軸，白色粗線代表伸張主軸應變軸。三角形表示所使用 GPS 觀測站之位置；底圖之顏色則是表示面膨脹率，其紅色表示壓縮，藍色表示伸張。

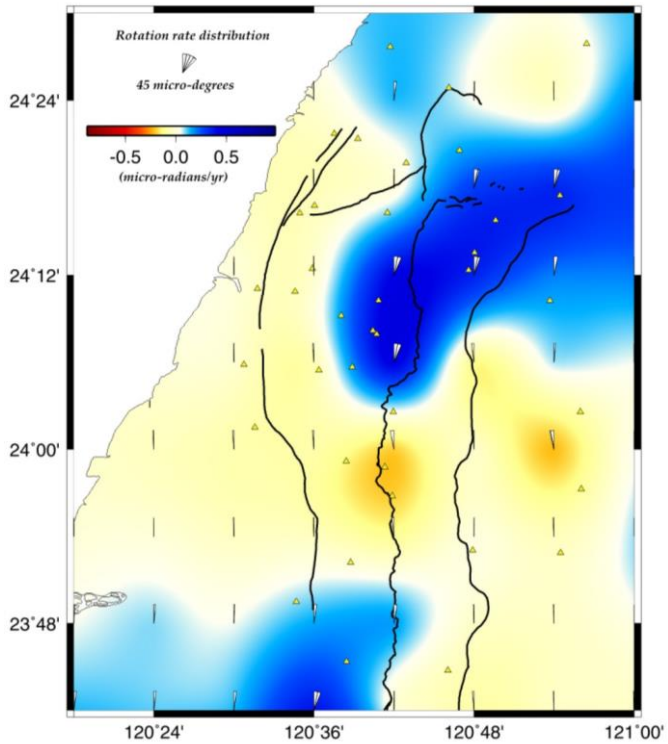


圖 2.17 中部地區之 GPS 連續觀測站之旋轉率。扇形向右表示順時針旋轉，扇形向左則為逆時針旋轉；三角形表示所使用 GPS 觀測站之位置。

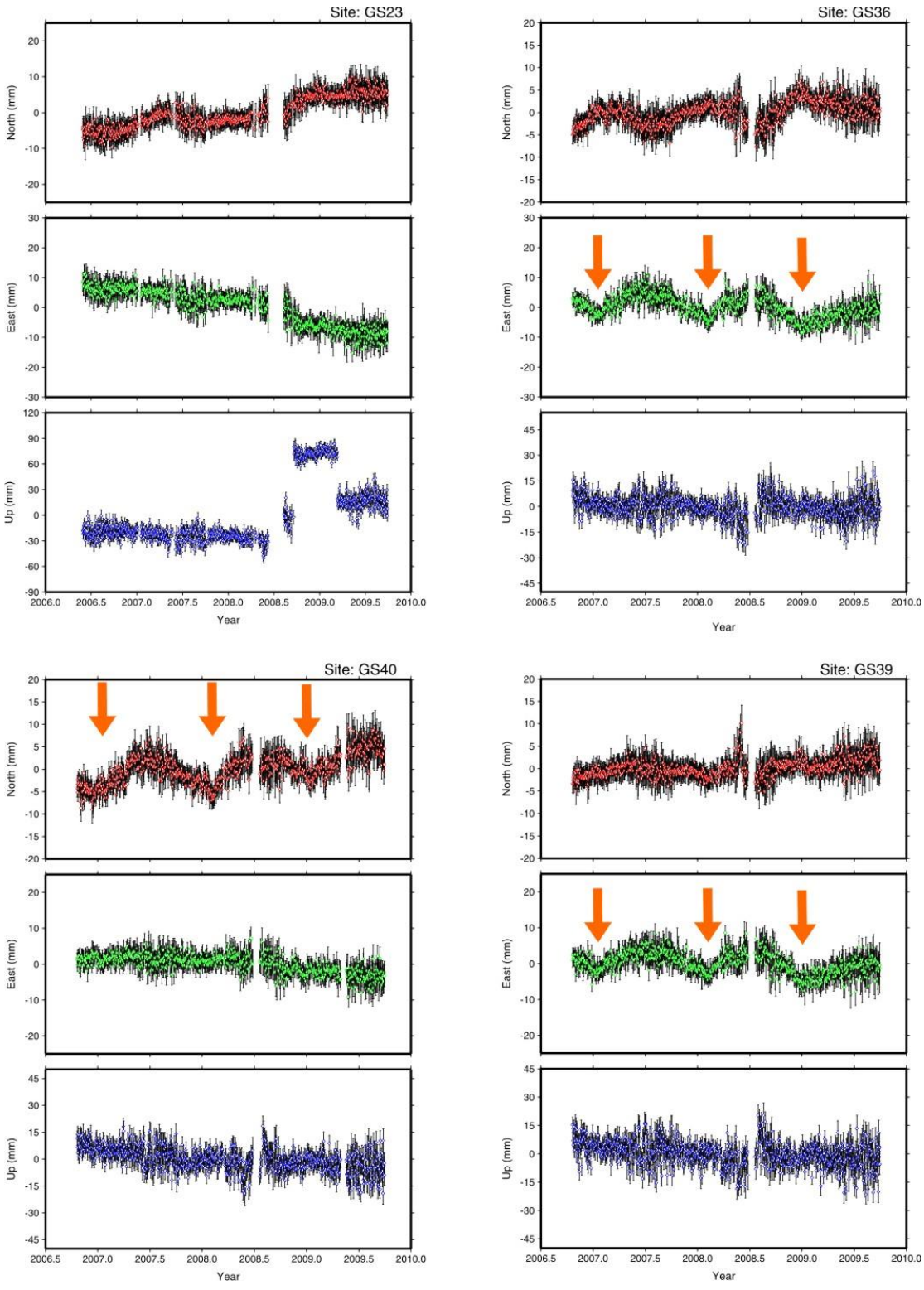


圖 2.18 測站 GS23、GS36、GS39 與 GS40 時間序列圖。

2-1-4 嘉義地區

嘉義地區連續 GPS 測站主要分布梅山斷層與九芎坑斷層附近。嘉義地區相對於澎湖 S01R 之速度場介於 6.4 至 19.0 mm/yr，其方位角介於 261^o 至 302^o 之間，平均速度場為約 13.9 mm/yr，平均方位角為 282^o ；速度場由西往東增加之趨勢。在速度場分析結果中梅山斷層南側平均速度場 9.5 mm/yr，而北側平均速度場 6.4 mm/yr，其顯示斷層兩側有約 3.1 mm/yr 之差異量。九芎坑斷層東側與西側之平均速度場分別為 15.2 mm/yr 及 9.5 mm/yr，顯示斷層兩側約 5.7 mm/yr 之差異量。而位於最東邊之觸口斷層，東側與西側平均速度場分別為 18.5 mm/yr 及 15.2 mm/yr，其斷層兩側約 3.3 mm/yr 之差異量。由此三條斷層之速度差異發現九芎坑斷層兩側區域差異量為最大（5.7 mm/yr）（圖 2.19）；與本年度期中報告中九芎坑斷層兩側區域差異量（7.4 mm/yr）相比，減少了 1.7 mm/yr。在應變率方面，本區域大多呈現壓縮應變僅有小區域的伸張變化，主要壓縮量集中於斷層兩側，顯示有不等量的移動變化，最大壓縮面膨脹率達 1.04 μstrain/yr，如圖 2.20。本區域之旋轉率呈現順時針旋轉之趨勢，於中部山區有較大的順時針旋轉率（圖 2.21）。時間序列中 GS04、GS05 與 GS17 測站在南北方向有明顯走勢的變化（藍色箭頭所表示之趨勢），該趨勢線在每一段中所呈現的走勢方向恰好相反，而且有重複出現的現象，而圖中橘色箭頭所指之處之時間分別為 2006 年 5 月、2007 年 5 月以及 2008 年 5 月，固定發生於每年之 5 月，意味的此重複現象是一種年週期變化（圖 2.22）。GS41 測站則是在高程方向有沉陷之現象，自設立該測站後至 2008 年 5 月該站緩慢沉陷，之後為慢慢抬升之趨勢，如圖 2.22 所示。

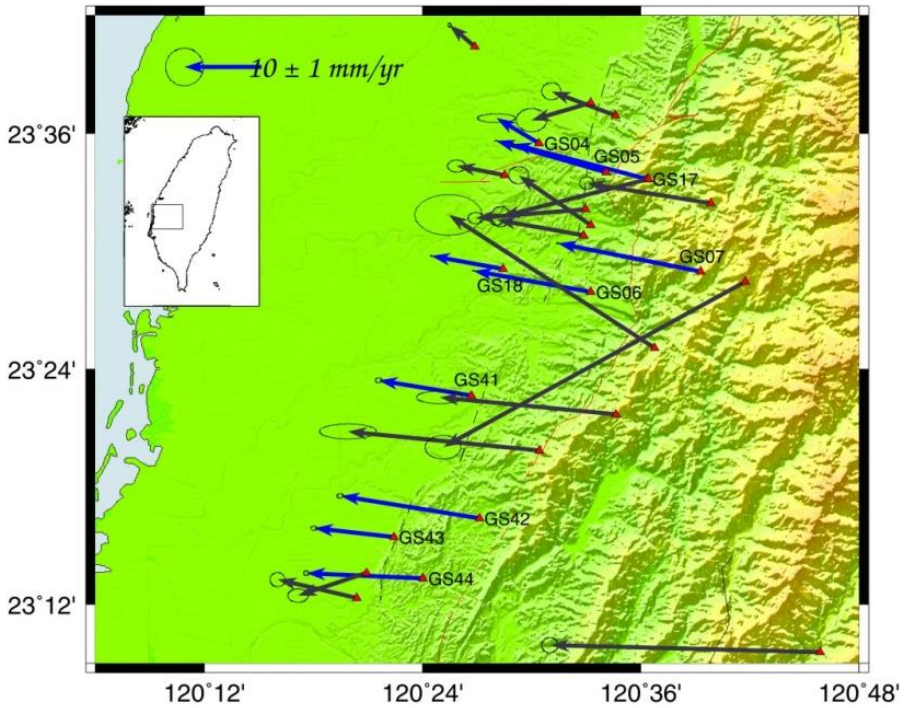


圖 2.19 嘉義地區之 GPS 連續觀測站平均速度場。藍色箭頭表示中央地質調查所測站之速度場，灰色箭頭為其他單位測站之速度場。

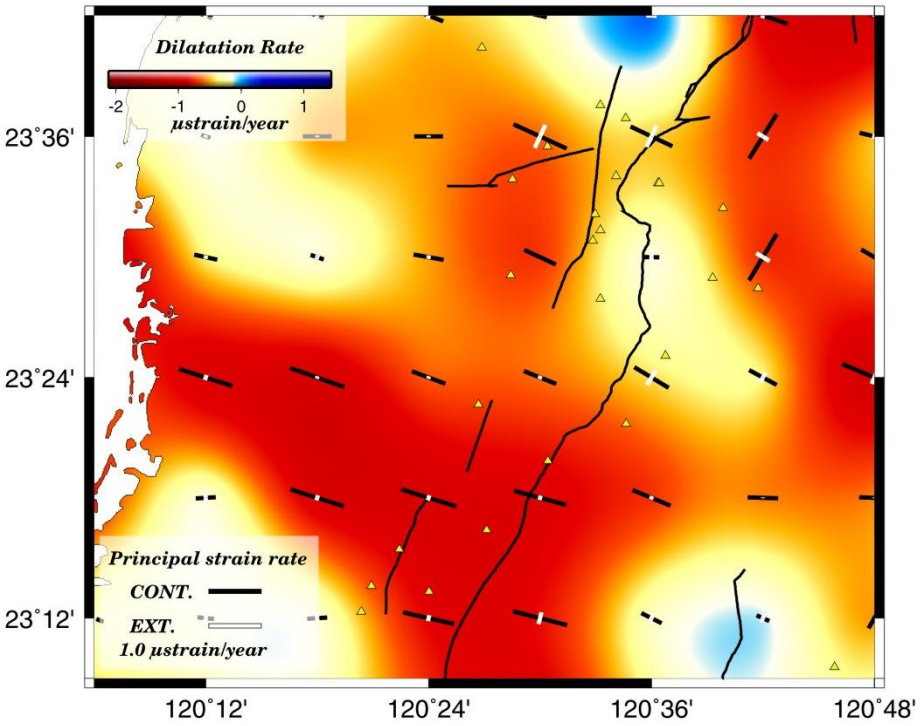


圖 2.20 嘉義地區之 GPS 連續觀測站之主軸應變率和膨脹率。黑色粗線代表壓縮主軸應變軸，白色粗線代表伸張主軸應變軸。三角形表示所使用 GPS 觀測站之位置；底圖之顏色則是表示面膨脹率，其紅色表示壓縮，藍色表示伸張。

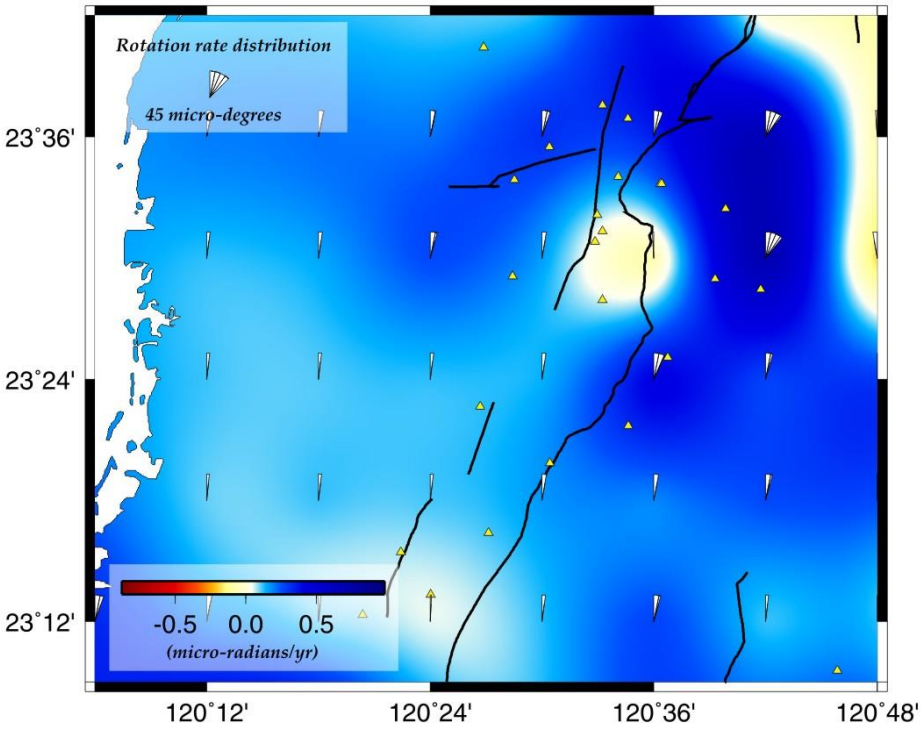


圖 2.21 中部地區之 GPS 連續觀測站之旋轉率。扇形向右表示順時針旋轉，扇形向左則為逆時針旋轉；三角形表示所使用 GPS 觀測站之位置。

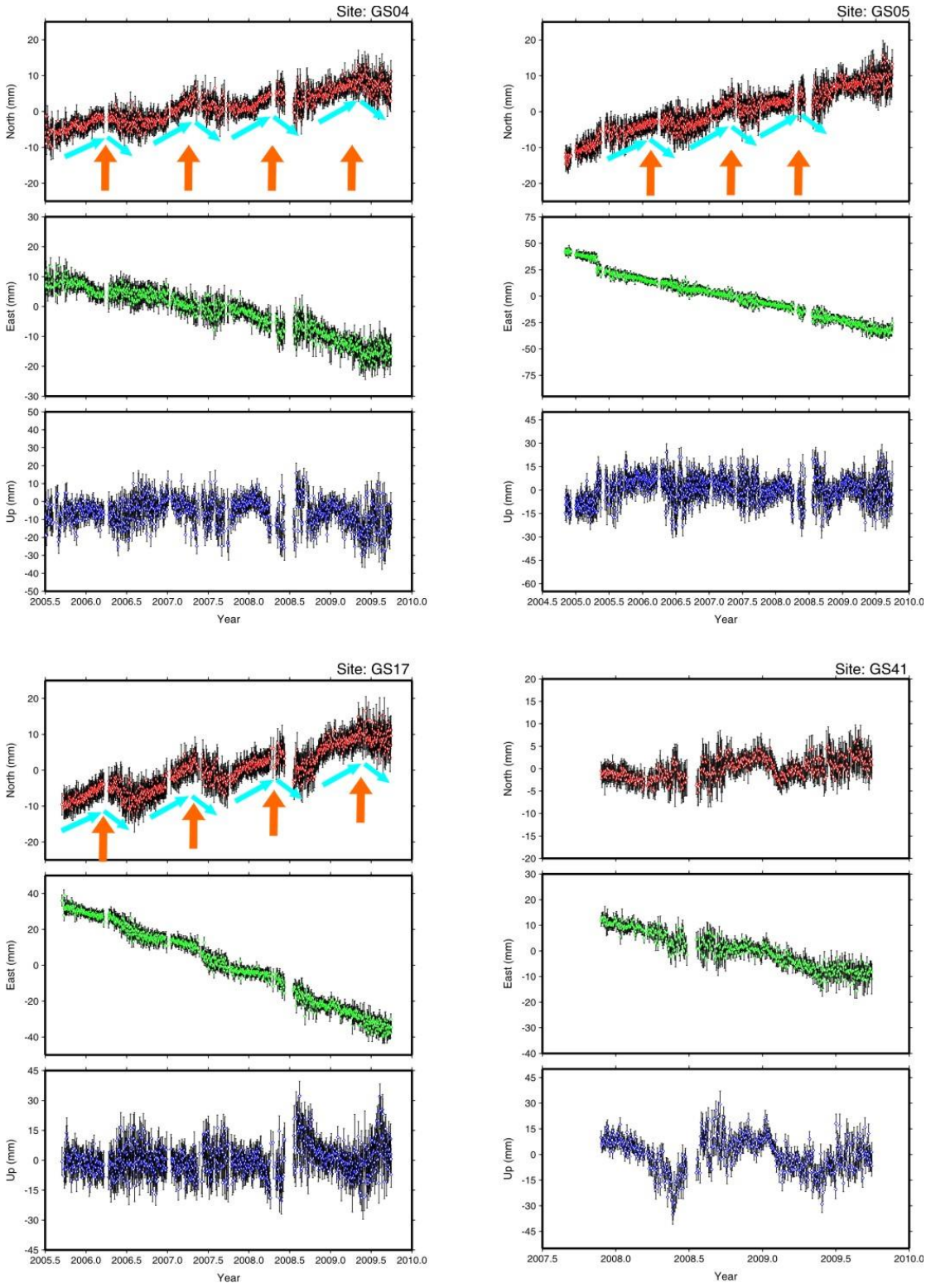


圖 2.22 測站 GS04、GS05、GS017 與 GS41 測站之時間序列。

2-1-5 西南地區

此區域與期中報告相比多加了高屏地區，因台南地區與高屏地區速度場不同，因此此部分分兩小區詳述。台南地區相對於澎湖白砂 S01R 站之速度場介於 7.0 至 22.0 mm/yr，其方位角介於 257^{o} 至 272^{o} 之間，平均速度場為約 14.4 mm/yr，平均方位角為 267^{o}；高屏地區相對於澎湖白砂 S01R 站之速度場介於 45.7 至 59.3 mm/yr，其方位角介於 271^{o} 至 274^{o} 之間，平均速度場為約 54.6 mm/yr，平均方位角為 273^{o}；整個西南地區速度場由西往東及由北往南增加之趨勢。台南地區在後甲里斷層以西，平均水平位移速率約為 11.5 mm/yr，後甲里斷層以東約為 18.7 mm/yr，顯示斷層兩側差異約 7.2 mm/yr 之縮短量。此外，新化斷層兩側之水平速度場由北往南增加約 6.5 mm/yr，此速度場結果顯示新化斷層之活動特性以右移分量為主（圖 2.23）。台南高雄地區主軸應變為壓縮應變，較大壓縮應變分為兩個區域，一為高雄山區域最大壓縮面膨脹率為 0.90 μstrain/yr，另一部份則為後甲里斷層西側，最大壓縮面膨脹率為 1.00 μstrain/yr。而屏東地區則主軸應變為伸張應變，約為 0.09 μstrain/yr，如圖 2.24 所示。本區域旋轉率方面，台南地區為順時針旋轉，由東往西旋轉率愈大；而台南往南逐漸變成逆時針旋轉，愈往南旋轉率愈大（圖 2.23）。

西南地區時間序列大致上呈線性走勢，其 GS29 測站於南北方向在 2007 年 5 月時開始呈現向南移動的趨勢（圖 2.25 中橘色箭頭處），該變化約有一個月的時間，之後又趨於穩定不變；GS29 及 GS31 測站則是在高程方向具有沉陷與抬升重覆出現之波動現象，如圖 2.26 所示。

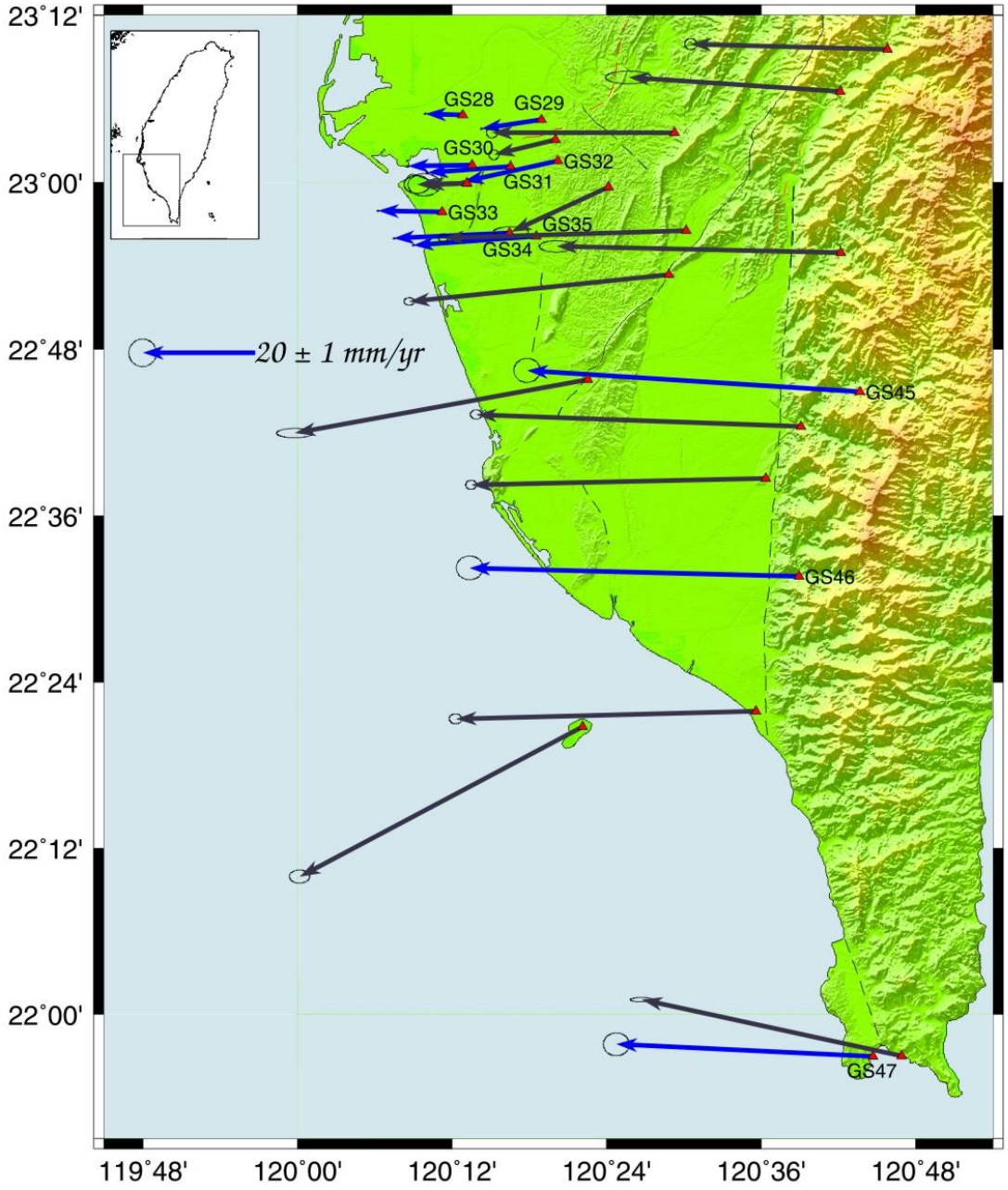


圖 2.23 西南地區之 GPS 連續觀測站平均速度場。藍色箭頭表示中央地質調查所測站之速度場，灰色箭頭為其他單位測站之速度場。

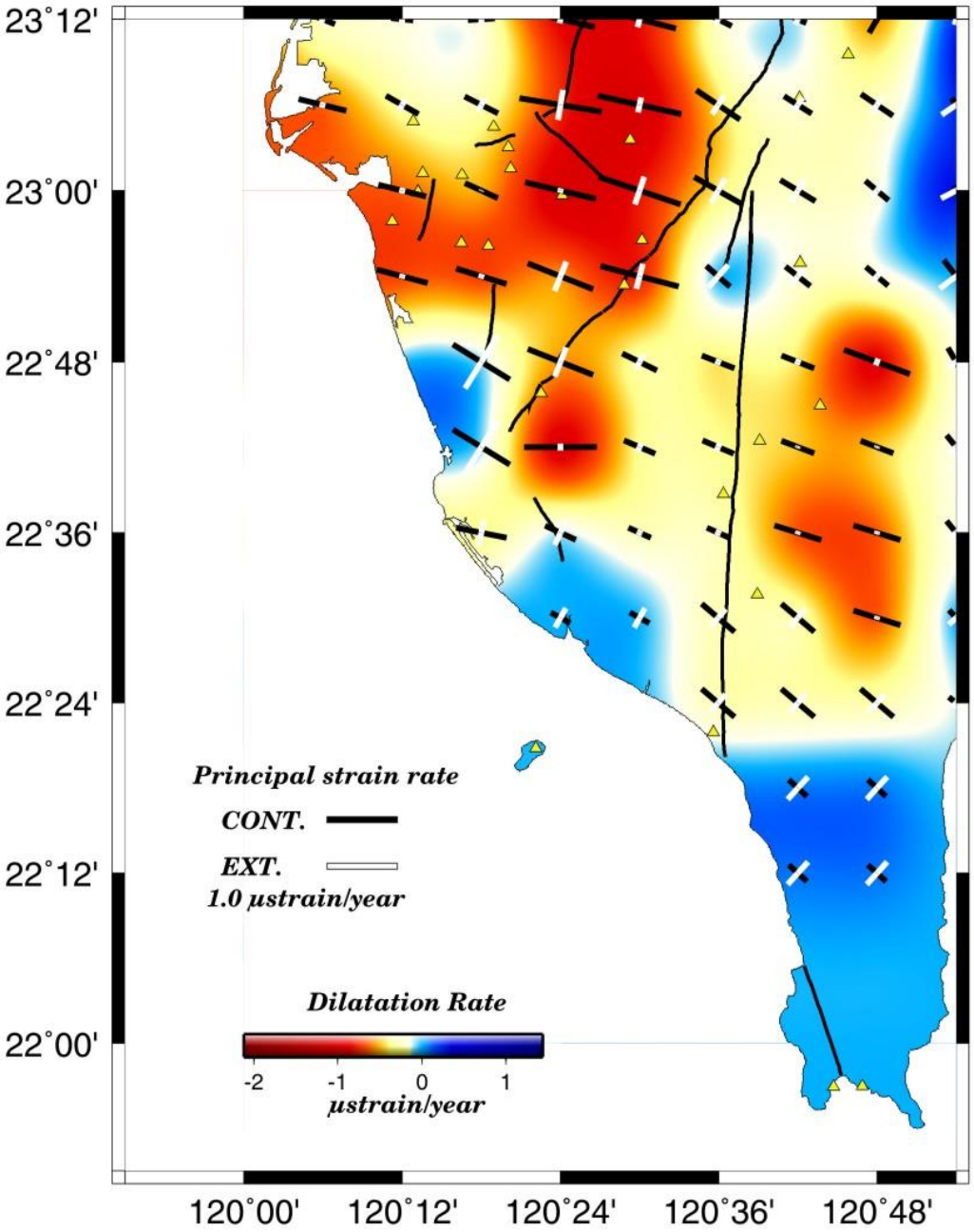


圖 2.24 西南地區之 GPS 連續觀測站之主軸應變率和膨脹率。黑色粗線代表壓縮主軸應變軸，白色粗線代表伸張主軸應變軸。三角形表示所使用 GPS 觀測站之位置；底圖之顏色則是表示面膨脹率，其紅色表示壓縮，藍色表示伸張。

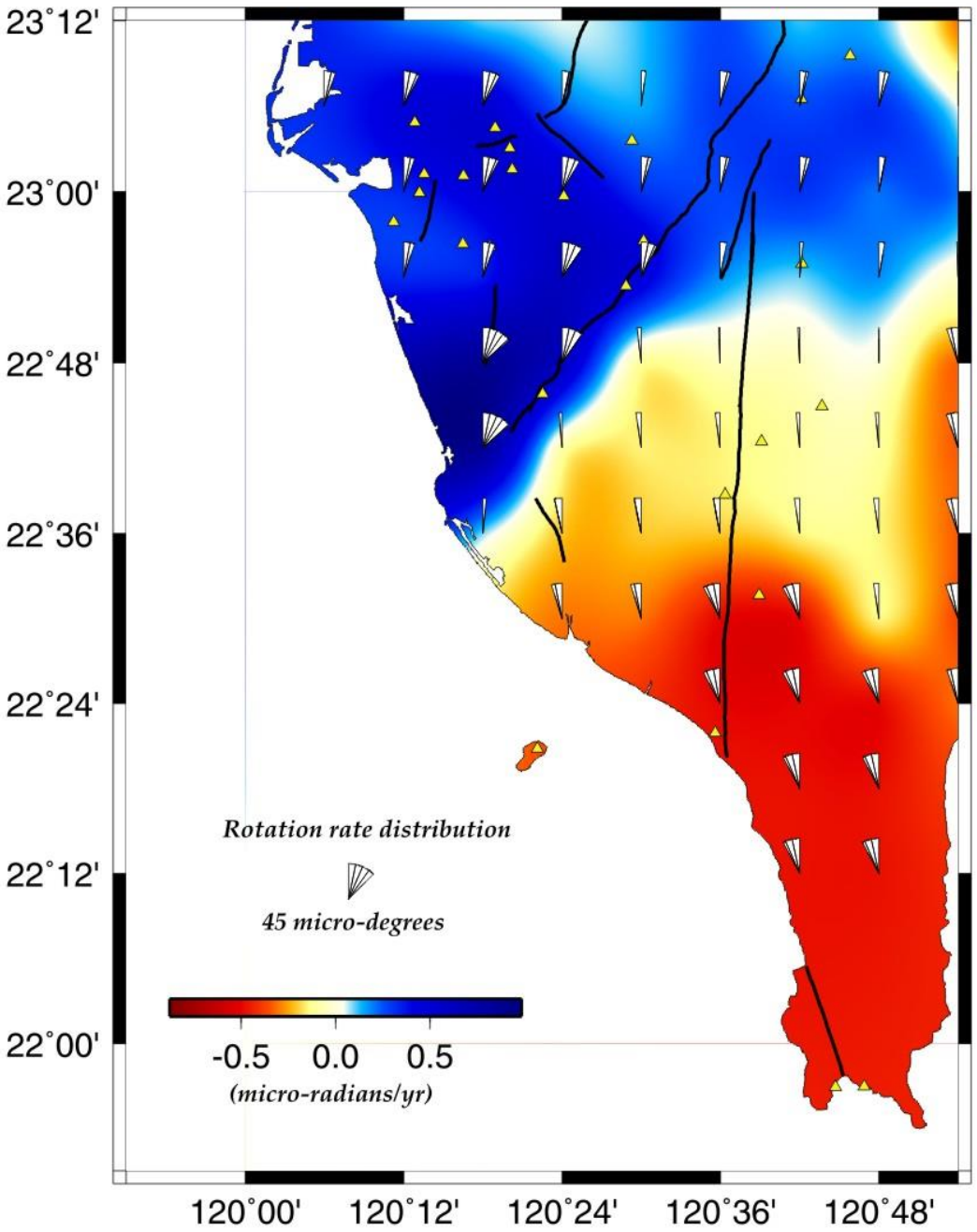


圖 2.25 西南地區之 GPS 連續觀測站之旋轉率。扇形向右表示順時針旋轉，扇形向左則為逆時針旋轉；三角形表示所使用 GPS 觀測站之位置。

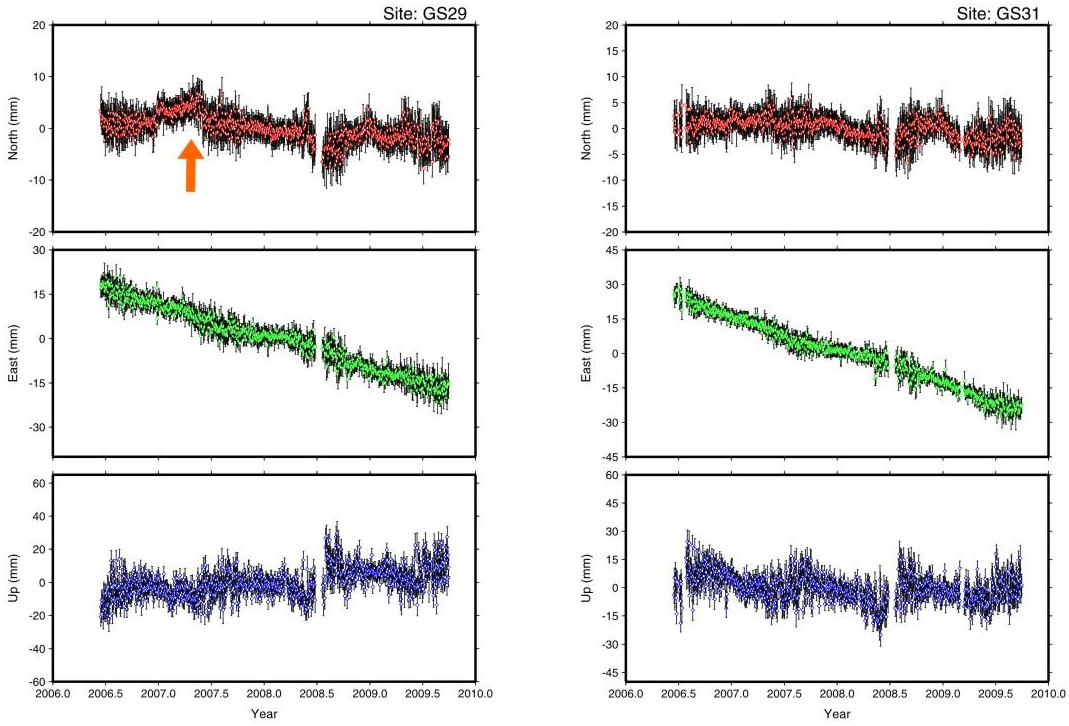


圖 2.26 測站 GS29 與 GS31 測站之時間序列。

2-1-6 結論

本計畫今年度除了地調所設立 50 個 GPS 連續觀測站，另嘗試解算與其他單位交換 111 個 GPS 連續觀測站之資料。目前其他單位之資料處理只完成一年期，且尚未與地調所之解算結果進行座標系統整合，因此所得速度場之精確度仍有改善空間。雖然如此，圖 2.4 仍正確顯示台灣地區地表運動之趨勢。明年度計畫將會對不同 GPS 的資料庫進行整合處理，並依目前 A 至 E 五區的分區方式（圖 2.1），分別計算其速度場。此步驟將有助於縮短解算基線，因而降低誤差。

利用地表速度場所推求的主軸應變率及旋轉率也會引入各站速度的計算誤差，因此上述的資料整合及分區解算除了可求取更穩定之速度場外，也會提升應變場的精確度。另外，引入交換資料可大幅提升 GPS 站數，進而增加應變率及旋轉率場的空間解析度。

2-2 塊體模型 Defnode 研究斷層滑移行為

2-2-1 斷層活動模擬方程式

板塊邊界地區的震間變形主要可以分為塊體的旋轉與塊體間斷層的活動，為了解釋台灣斷層活動模式，本研究使用 McCaffrey（2002）所發展彈性塊體模型 DEFNODE 來演算塊體運動的模式與斷層活動之行為。

由於整個區段斷層活動型態並不相同，因此，以數個節點（node）將斷層劃分為若干段，再控制斷層傾角位態，每隔一單位深度一個節點，使斷層面分成若干次斷層面來個別表現局部特性（圖2.27）。利用地表所觀測到的變形資料與反演旋轉及斷層滑移的主要關係為：

$$Vi(X)=\sum_{b=1}^{B}H(X\in\Lambda_b)\left[\Omega_{rb}\times X\right]\cdot\hat{i}-\sum_{k=1}^{F}\sum_{n=1}^{Nk}\sum_{j=1}^{2}\psi_{nk}G_{ij}\left(X,X_{nk}\right)\left[\Omega_{hf}\times X_{nk}\right]\cdot\hat{j} \qquad \text{（式 2-1）}$$

其中，第一項是用塊體內所有點位資料來描述塊體旋轉的分量，第二項則是得自尤拉極的反向滑移速率（back-slip）與鎖定分量（coupling ratio）乘積所產生的斷層速率虧損（slip deficit）再乘上格林函數G（Okada, 1985）而得到的地表速度值。F 為斷層的數目，X 為測站點位座標，Xnk 指第k 條斷層上第n 個節點位置，Nk 則為第k 條斷層上的節點數目，B 為塊體的數目，Λb 是塊體b 之區域範圍，H=1 表示測站X 位於塊體b 內部，H=0 則反之，i 和 j 分別為i、j 方向的單位向量，Ωrb 為塊體b 相對於參考框架r 的旋轉軸，Ωhf 為下盤f 相對於上盤 h 之旋轉軸，Gij 則為描述斷層活動所造成地表位移量大小的格林函數（Green function），φnk 為斷層k 上第n 個節點的鎖定分率（coupling fraction）。

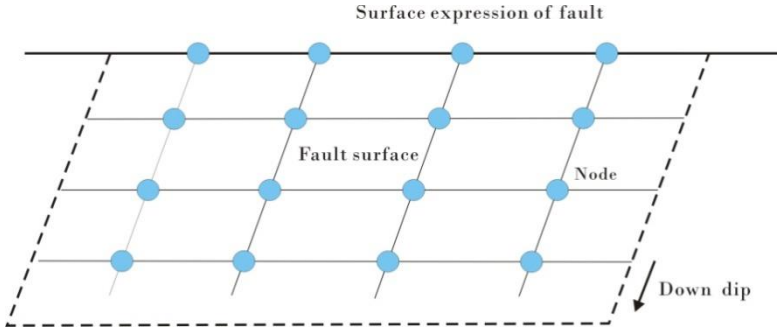


圖 2.27 塊體模型 Defnode 使用之斷層幾何模擬圖（修改自 McCaffery, 2002）。

2-2-2 斷層長期滑移速率，速度虧損與斷層鎖定率之評估

塊體相對於靜止的板塊作旋轉運動，對塊體而言，旋轉極可以描述兩個剛性塊體的相對運動，跨塊體邊界斷層的長期滑移速率是兩共軛塊體透過尤拉極求得兩塊體運動速度的差值（圖2.28）。滑移速率虧損（slip rate deficit）代表塊體邊界斷層因為摩擦力而未表現出實際長期滑移速率的減少量，速率虧損越高，表示被留在斷層內部的應變越高，速度虧損以 Vd 表示。在塊體模擬中，以ψ來表示斷層節點的鎖定率，若 V 代表是斷層的長期滑移速率，是由兩個共軛塊體間相對運動速率求得；Vc 代表的是短期的潛移速率，因此斷層鎖定率可以表示如下式：

$$\psi = \frac{Vd}{V} = 1 - \frac{Vc}{V} \qquad \text{（式 2-2）}$$

當 ψ=0 時，代表短期滑移速率 = 長期滑移速率，斷層是潛移的狀態；ψ=1時，表示短期滑移速率為 0 ，斷層為完全鎖定狀態，介於 0 與 1 之間的鎖定率，表示斷層活動部份潛移、部份鎖定，由於斷層的運動方式較少完全潛移或者是完全鎖定的情形，所以我們只能以ψ值大小來判斷此斷層活動以潛移為主或者以鎖定為主，另外滑移速率虧損之大小亦可用來評估斷層之活動潛勢。

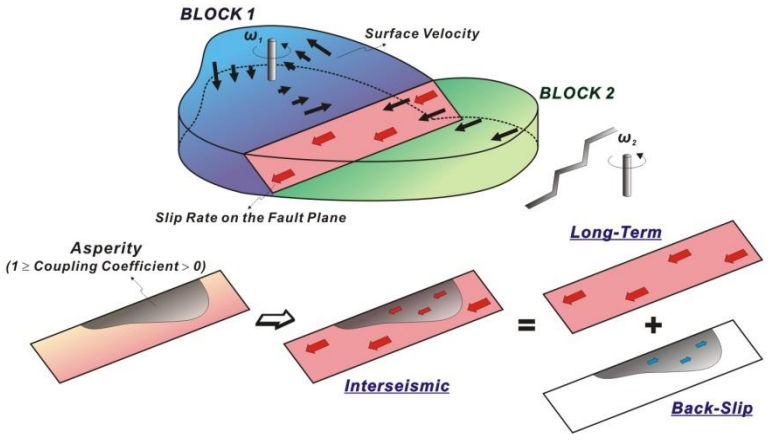


圖 2.28 由塊體模型的尤拉極可求取跨塊體邊界斷層的長期滑移速率和滑移虧損。

1. 塊體分割：

運用Defnode與饒瑞均等（2008）及Lin et al. (2009)共 976 個測站速度場資料運算來反演台灣各活動斷層的滑移速率、虧損速率及鎖定率等物理量值。剛性塊體的主要邊界斷層及分割邊界如圖2.29（饒瑞鈞等，2008），在本研究中將台灣劃分為EURA、CHYI、WCPS、EKSH、LUCU、KHSC、PINT、EFSB、SCEN、WCPN、WTFH、MIAO、SHSS、CHMO、HSSH、CENT、TAOC、WNOR、YMSD、NORT、NHSS、ILAN、RYUK、NCEN、LVFD、PHSP等 27 個剛性塊體以及 24 條斷層進行塊體運動模擬的研究，反演的結果如圖2.30所示，黑色箭頭代表GPS觀測結果，紅色為模擬結果。

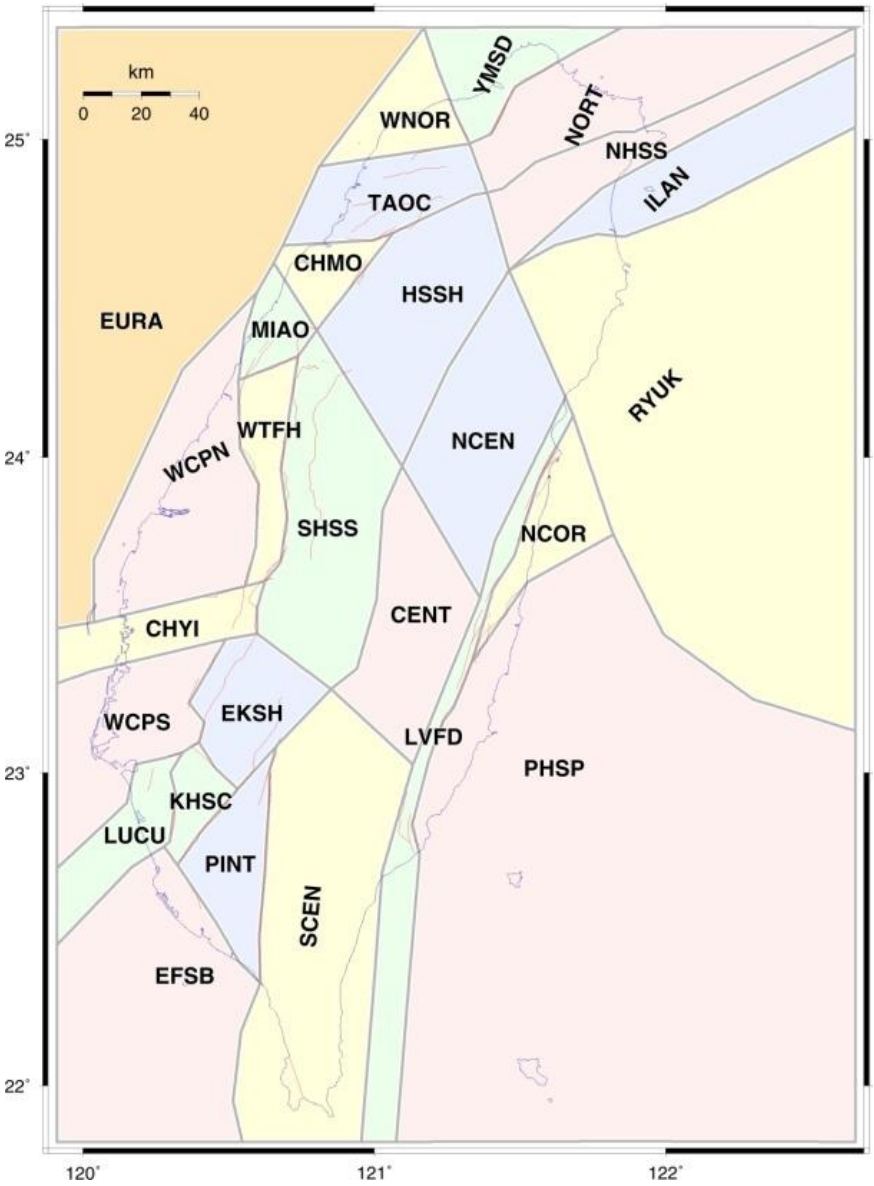


圖 2.29 本計畫使用 27 個剛性塊體以及 24 條斷層進行塊體運動模擬分布。

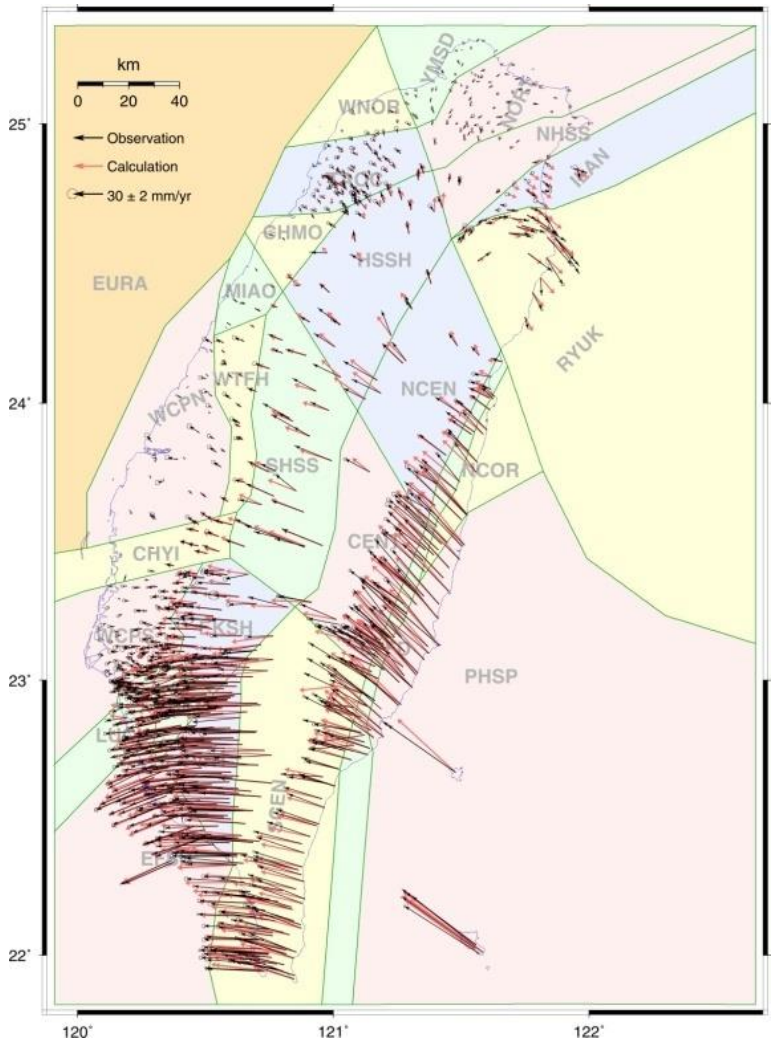


圖 2.30 塊體模型模擬地表變形與 GPS 觀測結果。黑色箭頭代表 GPS 觀測結果，紅色為模擬結果。

2. 模擬結果：

圖 2.31 為斷層鎖定率分布圖，紅色鎖定率為 100 %，斷層活動為完全鎖定，藍色代表鎖定率為 0 %，斷層活動為完全潛移。由圖 2.31 我們可以發現鎖定率高的斷層有金山、山腳斷層、車籠埔斷層南段、大尖山斷層、旗山斷層、潮洲斷層以及縱谷斷層中段。跨塊體邊界斷層的長期滑移速率是兩共軛塊體透過尤拉極求得兩塊體運動速度的差值。圖 2.32 為斷層長期滑移速率，塊體運動長期滑移以縱谷斷層中段至南段最快，有 30 - 45 mm/yr，其餘都在 30 mm/yr 以下。速率虧損代表塊體邊界斷層因為摩擦力而未表現出實際長期滑移速率的減少量，速率虧損越高，表示被留在斷層內部的應變越高。台灣塊體模擬結果顯示（圖 2.33），斷層滑移速率虧損較高者在縱谷斷層的中段，有著高達 32 - 45 mm/yr 的虧損值，其他斷層約在 10 mm/yr 以下。

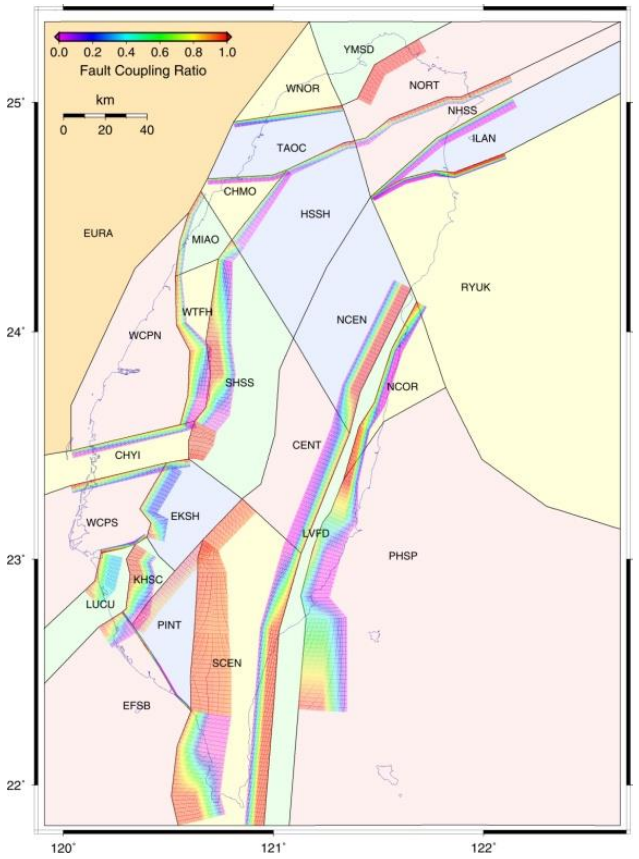


圖 2.31 斷層面鎖定率分布圖。色階代表鎖定率大小。

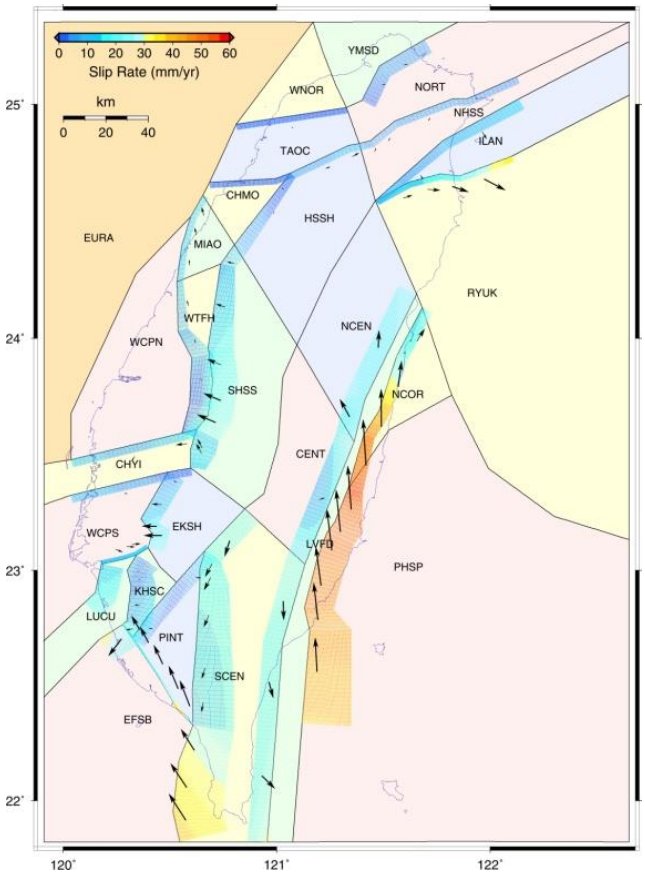


圖 2.32 斷層長期滑移速率分布圖。色階代表滑移速率大小。

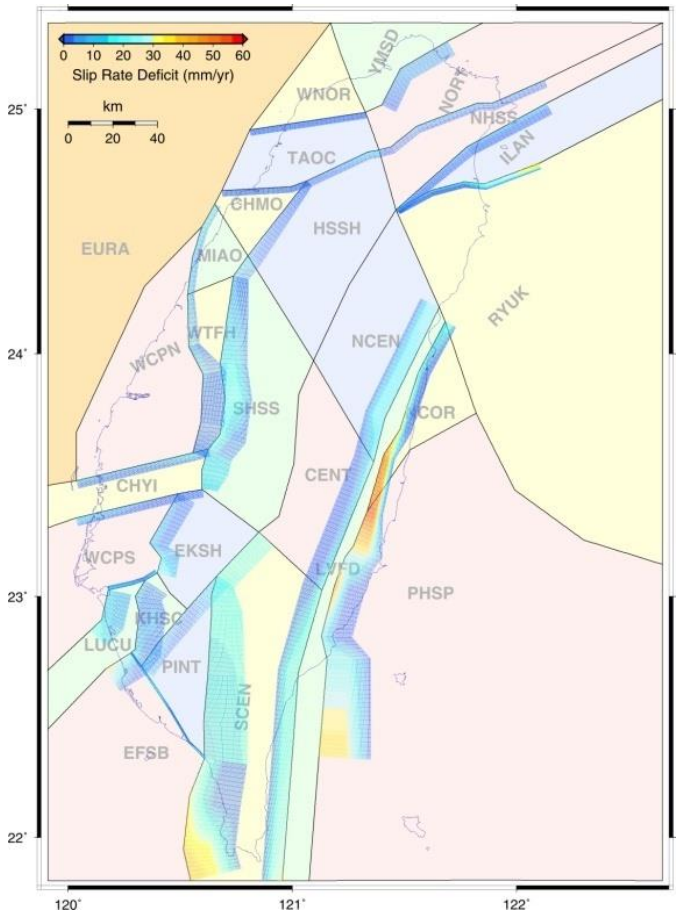


圖 2.33 斷層面上滑移速率虧損值分布圖。色階代表虧損值大小。

2-2-3 結論與未來方向

由於塊體模型假設塊體為一剛性塊體，並沒有考量塊體之內部變形，因此由塊體模型所求得之長期滑移速率有高估之可能性，但由塊體模型所估算之斷層面上滑移速率虧損和鎖定率，對於斷層活動潛勢之評估，仍有其參考價值。由於臺灣西部麓山帶，斷層作用常伴隨著摺皺作用，部分變形為摺皺作用所吸收，如何評估此部分之分配量，為未來研究的重點。建議未來研究時，將 GPS 和水準資料疊加在地質剖面上，詳細研判地質構造與 GPS 和水準資料觀測之變形相互比較。同時有關塊體模型中，斷層面之三維幾何位態亦影響到模擬的結果，未來將整合中油的地質剖面資料，以求得更精確的斷層面三維幾何位態。

三、井下應變儀之研究方法與成果

3-1 資料校正

3-1-1 潮汐修正

利用地潮中相對明顯的因子，校正出鄰近岩層變形與儀器觀測變形的關係（圖 3.1）。應變儀各向度元件直接量測地下岩層的變形，儀器透過應變計內部之電磁閥感測不同方向的變形大小，產生相對之電位差以求得之量測值，並不等同於實際變形量，須經過機器因子之校正，始能獲得各方向實際之變化值。一般影響機器因子的大小有幾個要素，主要包含圍岩的彈性係數、充填灌漿的性質、儀器製成的材質、井孔與儀器封裝後的口徑大小、儀器管壁厚度的大小等（Gladwin, 1984）。有關儀器製成之材質，井孔與儀器口徑與儀器管壁大小於實驗室裝配時已經決定，然而設置深度圍岩之彈性係數與充填灌漿的性質則必須透過現地實驗方能求得。現地實驗耗時花費大，且可能造成井孔之損壞，對於實際操作上並不實用。目前對於變形量之校正理論，國際上多採取比對觀測地潮與理論地潮的方式進行，利用地潮分量中最主要的兩個分量 O1 與 M2 來進行振幅與相位差的校正，可導出各向度應變之實際變化量（陳致言，2007）。

3-1-2 氣壓和雨量的影響

在短期至中期地殼變形與地潮研究中，氣壓與地下水文的變化常會在觀測訊號上造成不正常或是不預期的雜訊（圖 3.2），然而由於各觀測站地質與地形環境的不同，對氣壓和地下水文的變化反應也會有所不同，因此針對各站進行氣壓與水文的修正時，必須非常地謹慎（Zadro and Braitenberg, 1999）。並且在進行上述兩種效應修正前，有幾個問題必須先行解決。首先是氣壓變化與降雨的關係；其次是降雨與地下水位面的關係。第二個問題較為複雜，因為降雨與地下水位的升降並非線性的關係，其間牽涉到該地區的水文特性與水力係數，這些因素都讓這個問題更加複雜化；最後是氣候的變化在地潮的全日、半日或更長的週期變化的影響，都可能影響到應變儀觀測資料的品質（Chapman and Lindzen, 1970）。一些研究建議因氣壓變化所造成的應變響應可透過最小平方法濾除（Johnston et al., 1986），或是透過 BayTap-G 的統計方式抽離出應變資料中相對應的氣壓成分（Takemoto et al., 2003）。

3-1-3 鑽孔回復的影響

安裝井下應變儀時需灌注混凝土至孔內，且填滿儀器與孔壁之空隙，以減少井孔回復所產生的長期應變變化與避免地下含水層流動時造成影響（Johnston et al., 1994）。儘管如此，在觀測資料中仍可見到井孔回復效應在應變資料上所造成的影響（圖 3.3）。此外，混凝土的回復（Curing）性質也是必須濾除的雜訊。除去井孔效應與灌漿回復所產生的變應量，可得到較為乾淨的應變值，較能反應出儀器徑向的應變量（Gladwin et al., 1991）。在應變儀資料中，

井孔與灌漿的回復效應是一影響重大的趨勢，由於該效應在不同方位的感應單元中會有不同的響應，因此要修正這些效應須針對各個單元量測結果進行。根據美國 PBO 教育訓練資料（Roeloffs, 2005），會影響此趨勢的因子有：膨脹性水泥凝固時所施的壓縮力、熱的消散作用與井孔回復作用，綜合趨勢效應可以下列通式表示：

$$y = F + A_1 e^{T_1 t} + A_2 e^{T_2 t} + mt \qquad \text{（式 3-1）}$$

其中 F 是一截距常數，m 為一隨時間變化之線性趨勢，T_1 與 T_2 為時間常數，透過上式可以發現井孔效應的相近擬合模型之解釋，當有適當擬合模型後，運用最小平方法擬合是最佳的方式（陳致言，2007）。

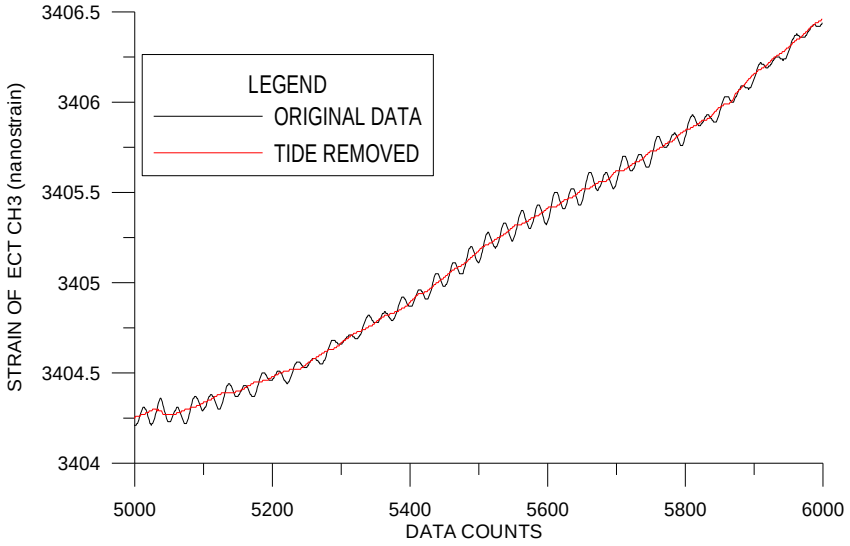


圖 3.1 應變儀所觀測到的潮汐週期訊號（陳致言，2007）。

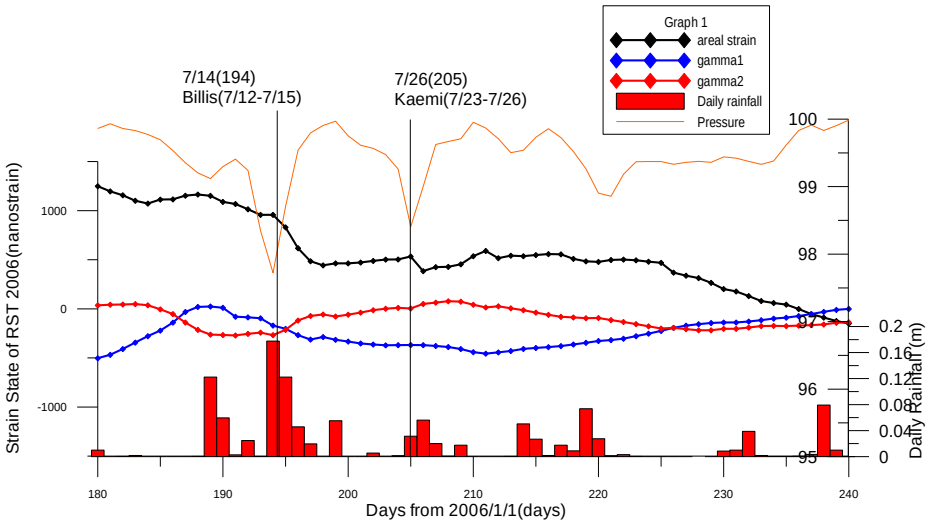


圖 3.2 應變儀所觀測到氣壓和雨量的因素（陳致言，2007）。

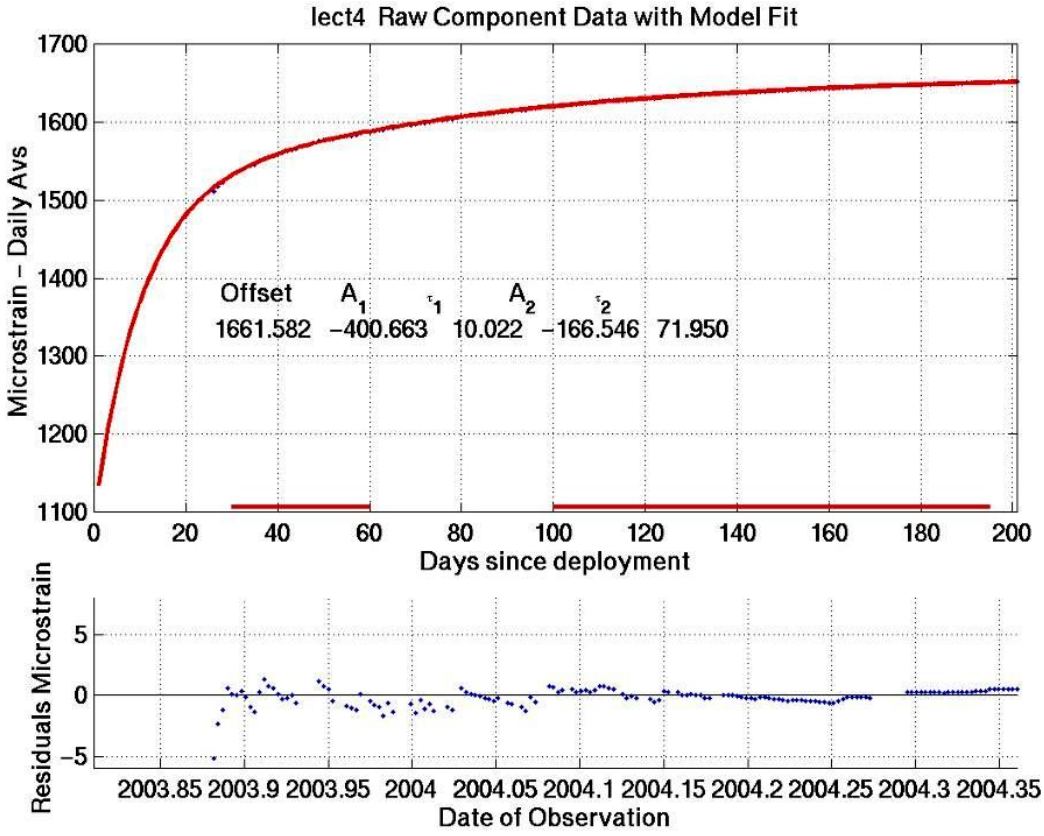


圖 3.3 最小平方法求得之殘餘應變。利用最小平方法求得最適模式曲線，以除去井孔回復效應而獲得殘餘應變（陳致言，2007）。

3-2 時間序列資料分析

應變儀之連續資料可視為時間序列資料，對於此種資料可以使用離散時間數位訊號處理技術，我們亦採用 Visual Signal 時頻分析工具，除能作傳統的傅立葉轉換外，我們還可使用時頻分析之希爾伯特黃轉換（Hilbert Huang Transform）來處理時間序列的資料。時頻分析相較傳統的頻譜分析多了頻率對時間的解析。時頻分析的研究始於 40 年代，主要的研究對象為非穩態訊號或時變訊號，主要的任務是描述訊號的頻含量如何隨時間變化。

在 80 年代後，隨著電腦運算的突飛猛進，時頻分析開始有突破性的發展，從短時間的傅立葉轉換（STFT）到小波轉換（Wavelet transform），進一步到目前開始被廣泛討論的希爾伯特黃轉換，提供了從時域到時頻域的轉換，且透過二維或三維的時頻分布圖形，表現各種分量及能量的變化趨勢。

3-3 井下應變儀資料管理系統

3-3-1 資料庫管理系統網頁簡介

本資料庫資料管理系統網站（圖 3.4），係委託廠商（承泰技研股份有限公司）以 ASP.NET 之網站架構設計，其網頁外觀是依經濟部中央地質調查所之網頁架構為藍本，並以陳列清楚、操作方便的原則，讓使用者進入網頁後能夠快速讀取各項資訊，並利用 FTP 的方式下載各項資料成果，冀資料庫管理系統的功能能夠完整發揮。

井下應變儀資料庫管理系統網頁的內容完善，包含井下應變儀的量測原理、台灣井下應變儀測站的建置與基本資料、應變資料的蒐集與成果展示、相關的問題解答與網站連結，以及美國「板塊邊界觀測計畫（Plate Boundary Observation, PBO）」的出版刊物與所屬研究團隊的陳列。

除了建構中文之井下應變儀資料庫管理系統網頁之外，也將會逐步建構完整的英文版網頁，以供有興趣的外國人或是慣用英文的使用者也能夠讀取與下載井下應變儀及其他相關的各項數據資料。

另外，提供第一期資料庫內容的線上更新機制，以便調查人員隨時修正資料內容，亦規劃後續功能擴充。並維護井下應變儀資料庫，進行資料庫登錄之身份檢核，以提供不同層級使用者觀測資料的查詢與資料展示權限。



圖 3.4 井下應變儀資料庫管理系統網站首頁。首頁先就井下應變儀的靈敏度等優點做簡介。

3-3-2 資料庫管理系統之更新

本計畫委託廠商進行資料庫管理系統之更新，以及井下應變儀資料庫展示系統介面升級，提供管理者與使用者權限，以建立安全機制。本報告資料庫之更新項目如下：

1. 依據現有資料庫、網頁架構將新增設之 GTSM 井下應變儀自接收日起的觀測資料檔（level-0）分類、整理及存放（含保固期內每日增加的資料部份），內容包含 1 sps 與 1/600 sps 之資料數據，彙整入網頁、資料庫。
2. 觀測資料以 Matlab Application 進行即時資料處理與分析，將分析結果以圖形介面顯示於網頁上，提供使用者進行觀測資料查詢。
3. 資料庫將保有未來資料輸入的空間。
4. 資料庫可輸出為國際通用 SEED 或 MiniSEED 或 XML 格式。
5. GTSM21 的原始資料以 Bottle 格式儲存後，以 tar 的壓縮方法將每日每站的原始資料縮成三個 tar 壓縮檔：

   SSSSYYDDDDay.tgz 每 10 分鐘一筆的應變與診測數據。

   SSSSYYDDD_01.tgz 每秒 1 筆的應變數據。

   SSSSYYDDD_20.tgz 每秒 20 筆的應變數據。

   其中 SSSS 表四字元的觀測代號，YY 表西元紀年末二位數，DDD 則表示該年度的第幾天。
6. 新增測站數據自動繪製功能，依據使用者所選擇之測站、資料形式、起迄時間點等，分別繪出原始資料（raw data），工程剪應變等等之時間序列（圖 3.5）。

3-3-3 資料庫查詢網站架構

除了前一節所提到建構網頁展示外，亦建立井下應變儀資料庫查詢系統，方便使用者根據不同的使用方法及目的，變更查詢之內容。今年度依據下列方式架設資料庫查詢系統：MS SQL 資料庫系統伺服器 Database Server 置於 LAN 區，屬於內網，透過防火牆設定專用傳輸埠與即時動態資料庫管理介面及 e-GPS 入口網站網頁管理介面進行資料傳輸。

井下應變儀資料庫查詢網站安裝於 WEB Server，透過網頁瀏覽方式呈現給網頁使用者，並提供應變儀觀測資料下載服務。井下應變儀資料庫查詢網站採用 Web 3-tire 架構、.Net、Ajax、Silverlight、Matlab Application 技術及 Brower 瀏覽器介面環境，其系統的標準架構如圖 3.6。

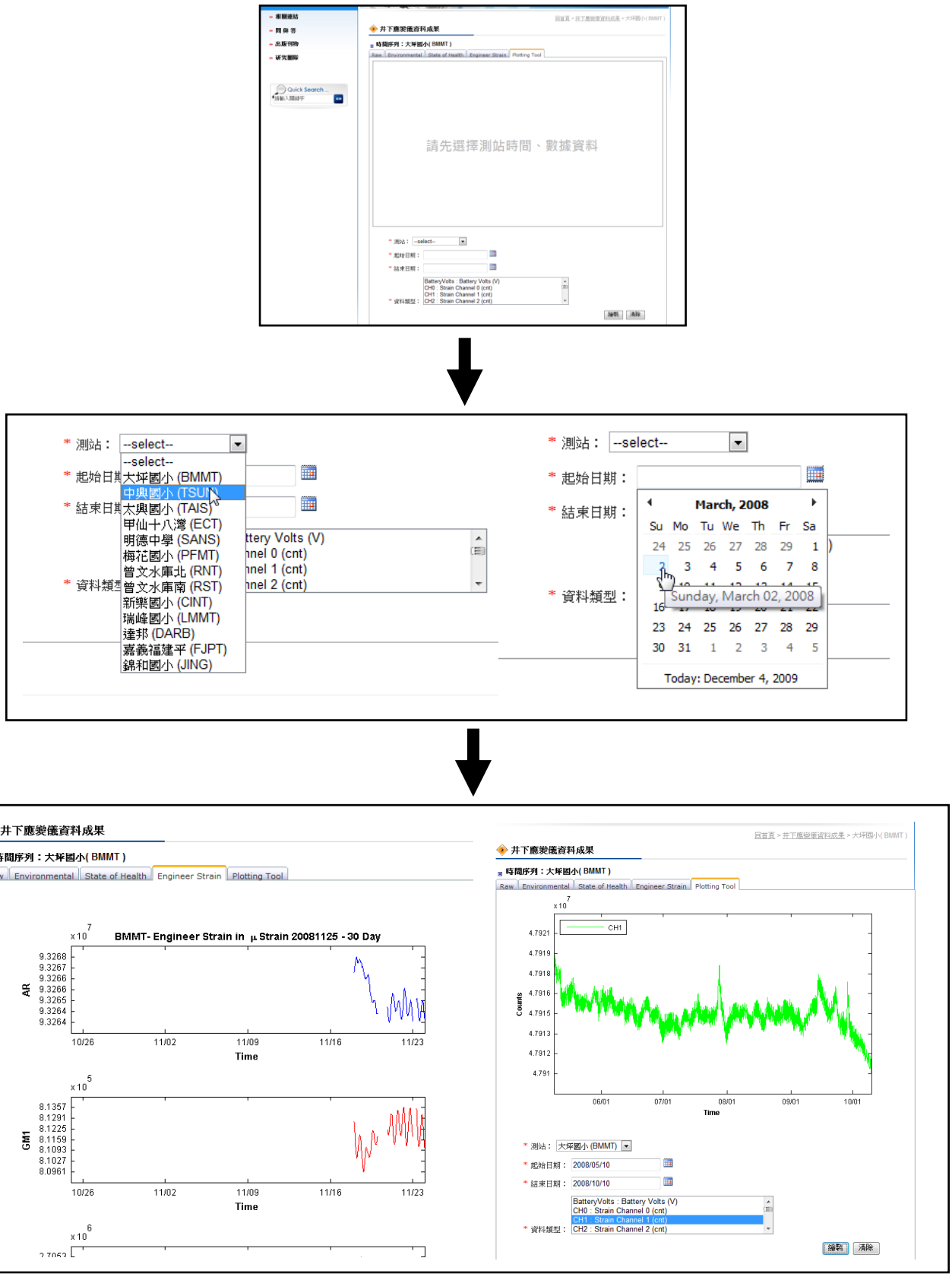


圖 3.5 井下應變儀資料管理系統之自動繪製功能。

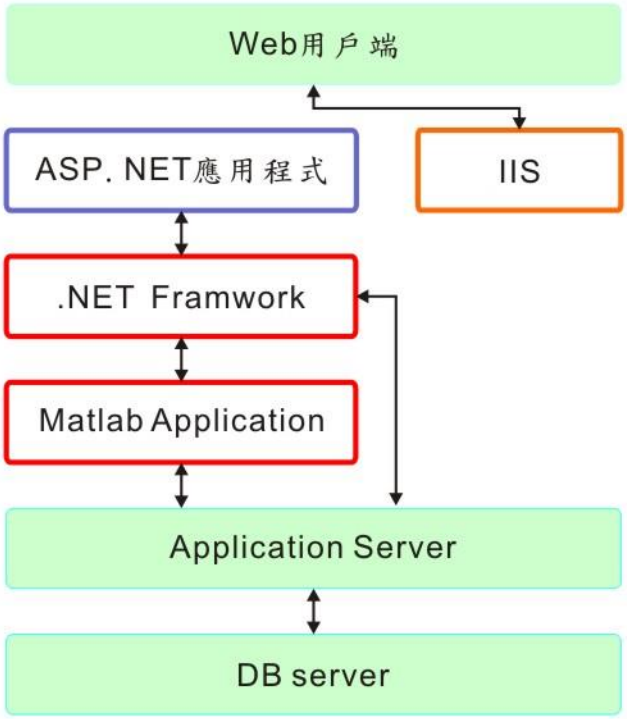


圖 3.6 井下應變儀資料管理系統之架構圖。

3-4 井下應變儀觀測站的資料處理

3-4-1 曾文水庫南、曾文水庫北、甲仙十八灣等三站的資料校正實驗

此三站是 GTSM 儀器在台灣最早裝置的三個站，因其位於通訊較困難的地方，高記錄頻率的資料無法完整的傳回台北資料中心，為求初期資料處理的完整性，以 600 秒一筆的資料為處理主軸，其各站之基本資料如表 3.1。

表 3.1 嘉義曾文水庫附近三個站的經緯度與資料日期

No.	測站	位置	可用資料		坐標		
			從	至	經度	緯度	高程 (m)
1	RST	曾文水庫南	2003-296	2009-348	120°30’04.68	23°14’11.24	110
2	RNT	曾文水庫北	2004-106	2007-241	120°35’53.52	23°19’40.08	252
3	ECT	甲仙十八灣	2004-107	2007-206	120°34’57.07	23°08’29.04	448

在每部儀器中都裝置有四個線性變形感應器，其主要儀器軸的方向分布於不同的方位角，基本上這些角度為了發揮最好的功能，設計為各相差 60-60-30 度，如此，若以某一分量為 0 度起算，依次為 CH0 - 0 度，CH1- 60 度，CH2 - 120 度，CH3 - 150 度，所以其中 CH1 與 CH3 互相垂直。當在裝設儀器時，其上有一電子羅盤，可以定出各分量由北方算起的真正方位角，如表 3.2 中所示。另外為了將來考慮孔隙與水泥的恢復效應，需要用到的儀器型態與裝儀器的時間，以及修正後的方位角也一併列入表 3.2 中。

表 3.2 嘉義曾文水庫附近三個站的安裝日期、儀器與各分量的方位角

No.	測站	位置	安裝時間	深度 (m)	儀器型態	變形感應器方位角 (修正後之方位角)			
						CH0	CH1	CH2	CH3
1	RST	曾文水庫南	2003/10/23	224.2	GTSM100	218 (158)	158 (218)	98	68 (78)
2	RNT	曾文水庫北	2003/10/28	198.95	GTSM100	289	229	169	139
3	ECT	甲仙十八灣	2003/10/26	193.82	GTSM100	229 (204)	169	109	79

在應變與應變公式的理論推導中，一個平面上若能量測到三個方向獨立的線性變形量，只要這三方向角度不都擠在一起（即其相關性不高），則可以由這三個分量的資料預測到這平面上任一方向的應變量，為了方便，我們可以轉到較常用的三個應變量，即 ε_a、γ_1、γ_2 三個工程量，其中 ε_a 是面應變，γ_1 是跨過西北（Northwest）或東北（Northeast）平面的最大純工程剪斜（Engineering Shear）應變量，而 γ_2 是跨過東西或南北平面的最大純工程剪斜應變量，也就是說，γ_1 在東西或南北平面產生了最大的延伸量（Extension），而 γ_2 在西北或東北平面產生了最大的延伸量。若以方位角的幾何關係與應變間的轉換，可如下之公式：

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5\cos 2\theta_1 & 0.5\sin 2\theta_1 \\ 0.5 \cdot & 0.5\cos 2\theta_2 \cdot & 0.5\sin 2\theta_2 \\ 0.5 & 0.5\cos 2\theta_3 & 0.5\sin 2\theta_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_a \\ \gamma_1 \\ \gamma_2 \end{bmatrix} \quad \text{（式 3-2）}$$

由同一站中的任三個分量 e_1 、e_2、 e_3 可以求得 ε_a、γ_1、γ_2 等三個量，再由這三個量去求得任一角度 θ_4 的線性變形量 e_4。如在我們的應變儀中，若所有角度是正確的，則應該符合（3-2）式。

在對每一站作上述的測試，將 CH0、CH1、CH2 作上述的計算，求取面應變及剪斜應變量，在計算第四個感應器（CH3）應有的應變量，其結果如圖 3.7 至 3.9 所示：

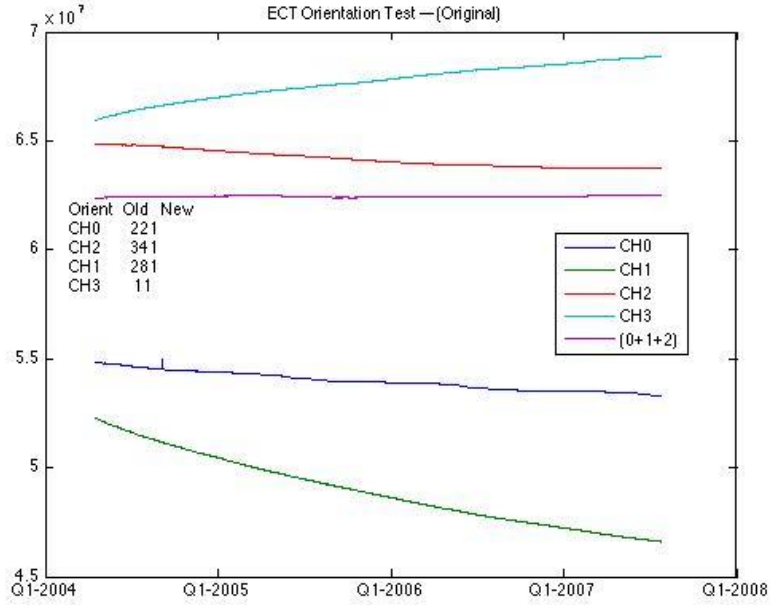


圖 3.7 甲仙站（ECT）的四個分量及經由模式預測成第四個分量的理論值。

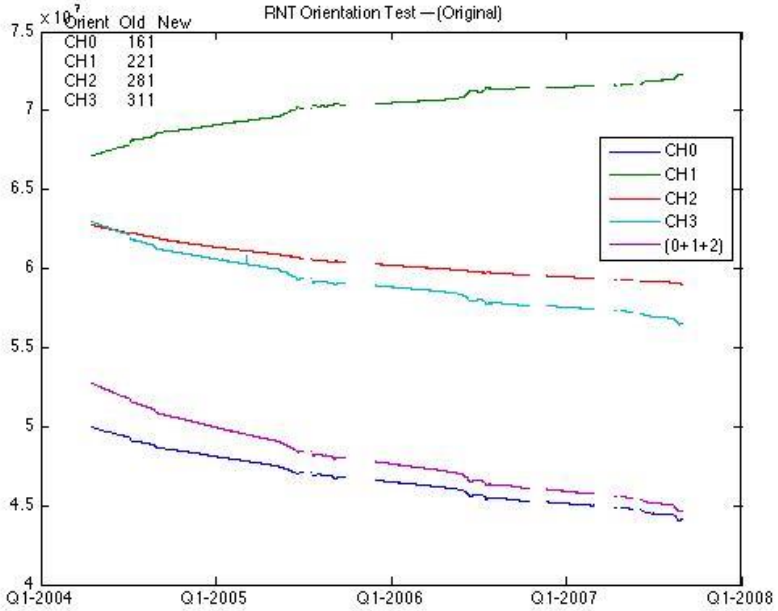


圖 3.8 曾文南站（RST）的四個分量及經由模式預測成第四個分量的理論值。

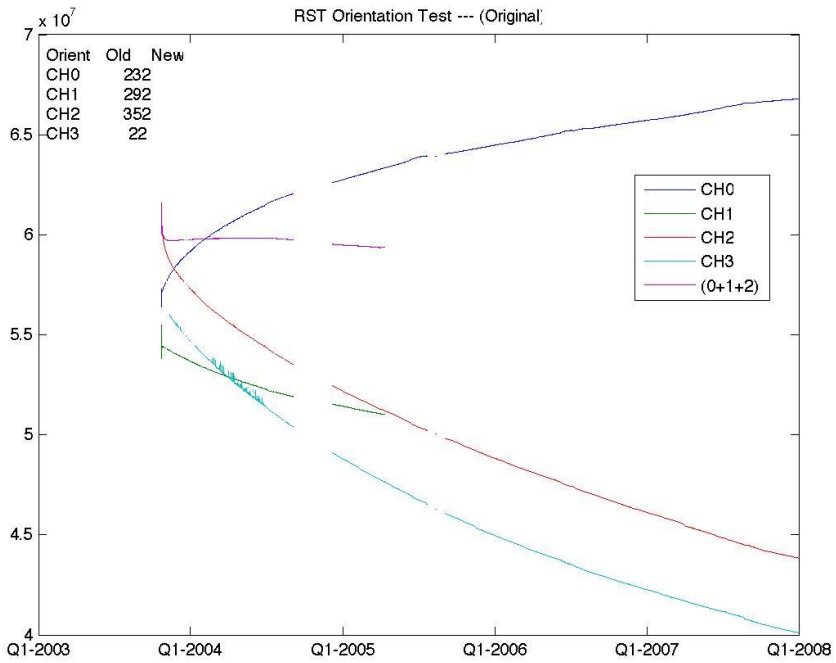


圖 3.9 曾文北站（RNT）的四個分量及經由模式預測成第四個分量的理論值。

經過此測試，但很可惜並未能滿足上述的理論。若對其中的一個方位角做適當的調整，或是對曾文南站的 CH0 與 CH1 的方位角作交換，再對第四個分量做 10 度的微調，才能滿足上面的理論，當然對於這樣的差異，我們還需要做很多的測試，才能證實。

另外，另一種測試方法，即利用 CH1 與 CH3 二者的互相垂直的特性，若不考慮剪斜應變，則 (CH0+CH1+CH2)/3 的量應該要等於 (CH1+CH3)/2 的量，我們也當場測試，結果發現原來的方位角還是不合乎這個測試，而新轉的方位角都可以滿足兩種測試。圖 3.10 至圖 3.12 展示校準方位角後，所有的預測值都與被預測的分量一致。

經過上述的測試，我們在找出新的方位角後，任何三個分量都可以用來測試第四個分量，唯有曾文北站會有問題，主要的原因是：CH2 與 CH3 的角度只差三度，幾乎是同一個分量，已失掉了其獨立性，由此也可看出，新的方位角應該較合理。

根據應變與應變公式的推導，若兩分量互相垂直時，其觀測值的算術和會等於面應變量 ε_a，所以我們將 CH(0+2) = (CH0+CH2)，CH(1+3) = (CH1+CH3)，與算出來的面積變形量 ε_a 畫於圖 3.13 中，可以看出它們的一致性。如此看起來，我們的角度校正結果合於應變的內部資料互相轉換，也合乎垂直分量和等於面應變量的兩種檢測方式。

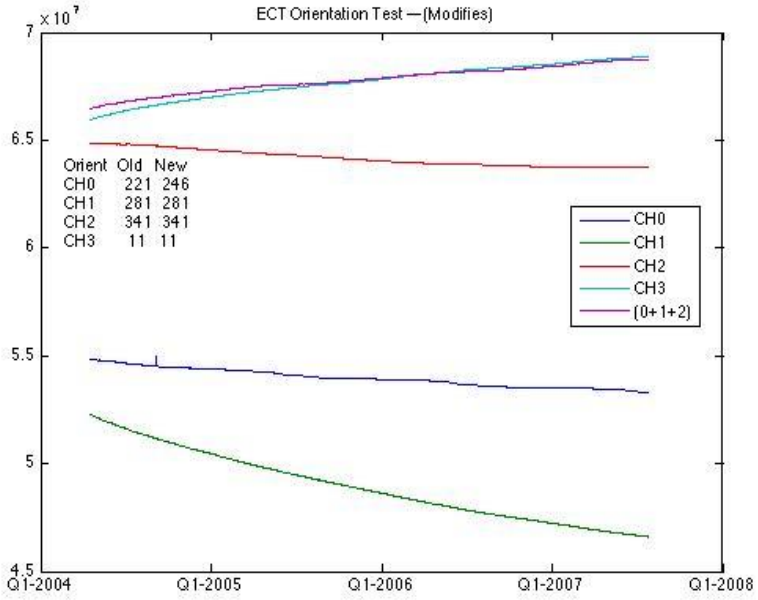


圖 3.10 甲仙站之角度轉換後之時間序列。CH0 方位角由 221 度轉成 246 度後，利用前三個分量經由模式預測成第四個分量的理論值（0+1+2），可看出相當一致。

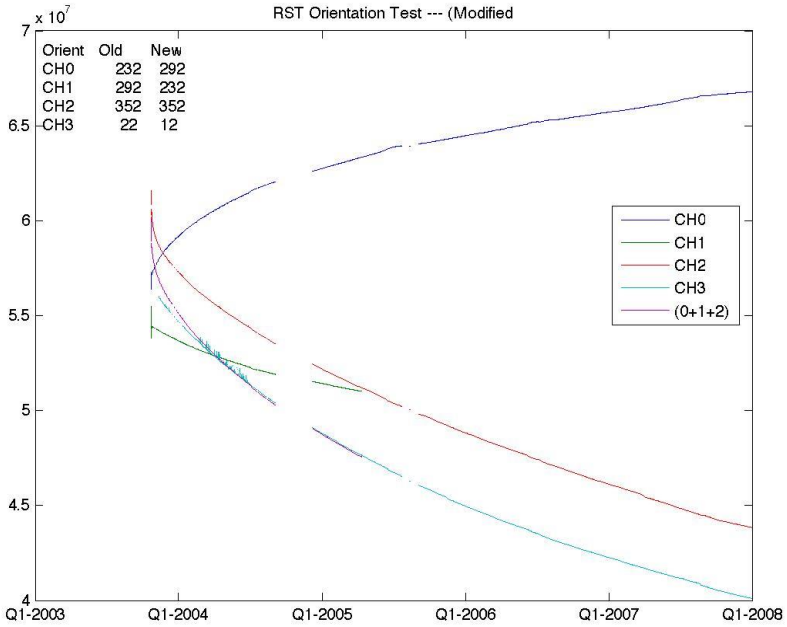


圖 3.11 曾文南站角度轉換後之時間序列。CH0 方位角與 CH1 方位角交換（可能是接錯電纜線），CH3 再由 22 度轉成 12 度後，利用前三個分量經由模式預測成第四個分量的理論值（0+1+2），可看出相當一致。

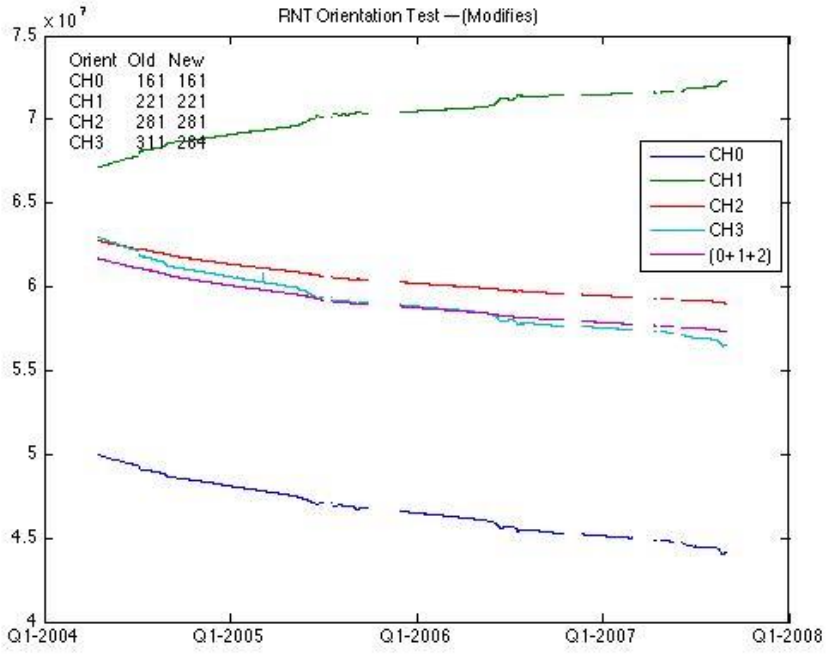


圖 3.12 曾文北站角度轉換後之時間序列。CH3 由 311 度轉成 284 度後，利用前三個分量經由模式預測成第四個分量的理論值（0+1+2），可看出相當一致。

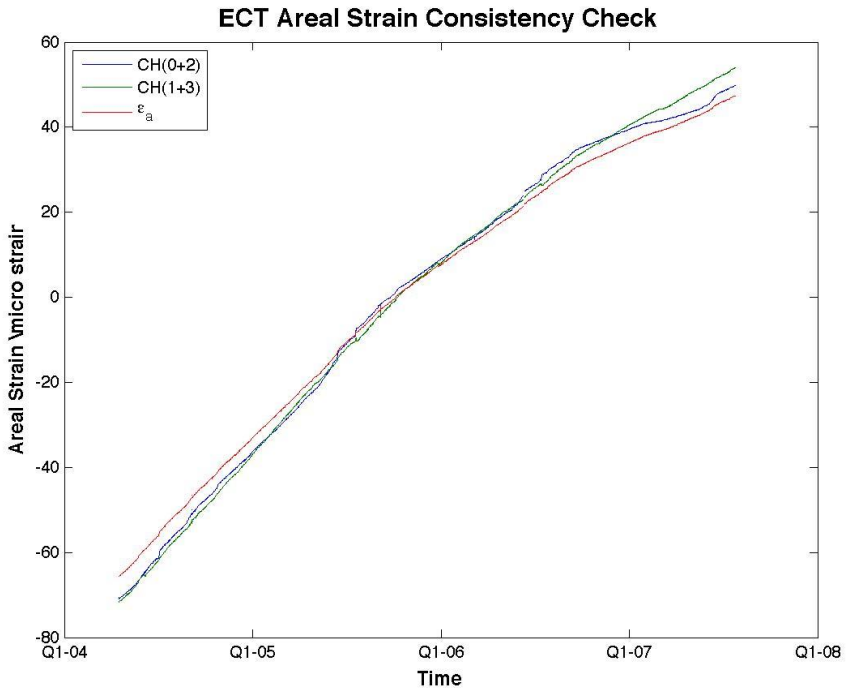


圖 3.13 甲仙站角度調整後之面應變。CH0 方位角在調整後非常接近於垂直 CH2 的方向，而 CH1 原本與 CH3 垂直，利用這一特性，可看出互相垂直的兩分量的和，和面應變量相當接近。

3-4-2 中興國小、太興國小及達邦等三站的資料校正實驗

中興國小、太興國小及達邦此三站是嘉義梅山、竹崎、阿里山附近的三個 GTSM21 井下應變儀觀測站，與在台灣最早裝置的三個站曾文水庫（南）、曾文水庫（北）、甲仙十八灣三站 GTSM1000 儀器不同的另一模型 GTSM21。資料處理以 1 分鐘一筆的資料為處理主軸（表 3.3）。

在每部儀器中都裝置有四個線性變形感應器 CH0、CH1、CH2 和 CH3，其主要儀器軸的方向分布於不同的方位角，基本上這些角度為了發揮最好的功能，設計為各相差 60-60-60-30 度，如此，若以某一分量為 0 度起算，依次為 CH0 - 0 度，CH1- 60 度， CH2 - 120 度，CH3 - 150 度，所以其中 CH1 與 CH3 互相垂直。當裝設儀器時，其上有一電子羅盤，可以定出各分量由北方算起的真正方位角，如表 3.4 中所示。另外為了將來考慮計算井孔隙與水泥的恢復效應，須要用到的參數如儀器型態與裝儀器的時間，也一併列入表 3.4 中。

表 3.3 嘉義附近三個站的經緯度與資料日期

No.	測站	位置	可用資料		坐標		
			從	至	經度	緯度	高程 (m)
1	TSUN	中興國小	2007-001	2009-348	120°41’21.04	23°28’42.48	1370
2	TAIS	太興國小	2007-001	2009-349	120°37’36.95	23°32’34.10	790
3	DARB	達邦	2007-001	2009-349	120°44’29.39	23°27’22.27	952.8

表 3.4 嘉義附近三個站的安裝日期、儀器與各分量的方位角

No.	測站	位置	安裝時間	深度 (m)	儀器型態	變形感應器方位角			
						CH0	CH1	CH2	CH3
1	TSUN	中興國小	2006/03/01	160	GTSM21	255.3	195.3	135.3	105.3
2	TAIS	太興國小	2006/03/04	182.5	GTSM21	180	120	60	30
3	DARB	達邦	2006/11/19	180	GTSM21	163	103	43	13

在今年度的井下應變儀的資料處理中，先做基本的資料整理與測試。在期中報告前的資料處理，以處理由 Level-0 到 Level-1 為主，另外再做資料的完整性測試，說明如下：

1. Level-0：

原始井下應變儀 1Hz 資料，以 Bottle 格式每小時儲存一個檔案，並加以 tgz（Compressed tar file）壓縮，儲存在每個月日數的子目錄中。因此一年的資料會有 31

個子目錄，每個子目錄下可能有最多 12 天的資料，每天有 24 個檔案。由於資料檔可能高達 24 × 12 = 288 個檔案，結果發現有些檔案太小，甚至為零大小檔案，表示資料有誤，或資料沒傳回來，可是因檔名出現在目錄中，常被誤認為資料正常。

在本次的三個測站，資料期間都是 2007 年 1 月到 2009 年 3 月，然而中興國小測站 2009 年的資料超過 2/3 都無法解出（圖 3.14）。這樣的缺失，將再進一步確定資料來源的問題。

2. Level-1：經過儀器常數修正及資料突跳修正。

本次三站的儀器都是 GTSM 21，該儀器的記錄單位與變形量的關係並非線性的，其設計是將 d_1 的兩塊電板間的距離固定不變，其移動的距離 δd_2 仍然相當於外殼的總變形量，當外殼被擠壓 d 距離的量時，電板間的距離也會改變 -d，若我們將電板兩端輸與固定的電壓，則間距的改變將會影響到中間電板的電壓，距離越近的一端電壓越大：

$$\frac{R}{1-R}=\frac{d_2}{d_1} \qquad \text{（式 3 -3）}$$

$$d_1 \cdot R = d_2 \cdot (1-R) \qquad \text{（式 3-4）}$$

$$d_2 = (d_1 + d_2) \cdot R \qquad \text{（式 3-5）}$$

取其微小量的變化 δd_2：

$$\delta d_2 = (d_1 + d_2) \cdot \delta R + R \cdot \delta(d_1 + d_2) \qquad \text{（式 3-6）}$$

其中 R 在一開始時約為 0.5（因 $d_1 = d_2$），此時的變形量量測精度較 GTSM100 約低一倍，在初始設定（R = 0.5）時，記錄上的每一計數約相當於 0.091954025492342 nano-strain，但其讀數與真正變形量間的關係就不再是線性了，當儀器已變形至 1.0 ppm 時，則記錄上的每一計數約相當於 0.141166086240207 nano-strain 所有的資料必須經過線性化修正，才能較接近地殼變動的觀測。

本儀器的 $d_1 = 200\ \mu m$；應變儀外徑為 D = 87 mm，而記錄的 1 讀數等於 10^{-8} 個電板兩端電壓，所以讀數的變形量大約等於：

$$\varepsilon=\frac{(d_2-d_{20})}{D}=\frac{d_1}{D}\cdot\left[\frac{R}{1-R}-\frac{R_0}{1-R_0}\right]=\frac{200\cdot10^{-6}}{87\cdot10^{-3}}\cdot\left[\frac{r\cdot10^{-8}}{1-r\cdot10^{-8}}-\frac{r_0\cdot10^{-8}}{1-r_0\cdot10^{-8}}\right]$$

（式 3-7）

在儀器初始設定時，在實驗室無變形量時，應該是 $d_1 = d_2$，此時讀數應為 $1/2 \times 10^8 = 50000000$，此時 $R_0 / (1-R_0) = 1.0$，其餘時間所得的變形量可相對於之前 t = 0 時間之相對變形。由此公式所求得各測站的資料轉變成應變後，各別繪出各分量之面應變-時間序列如圖 3.15 到圖 3.17 所示。

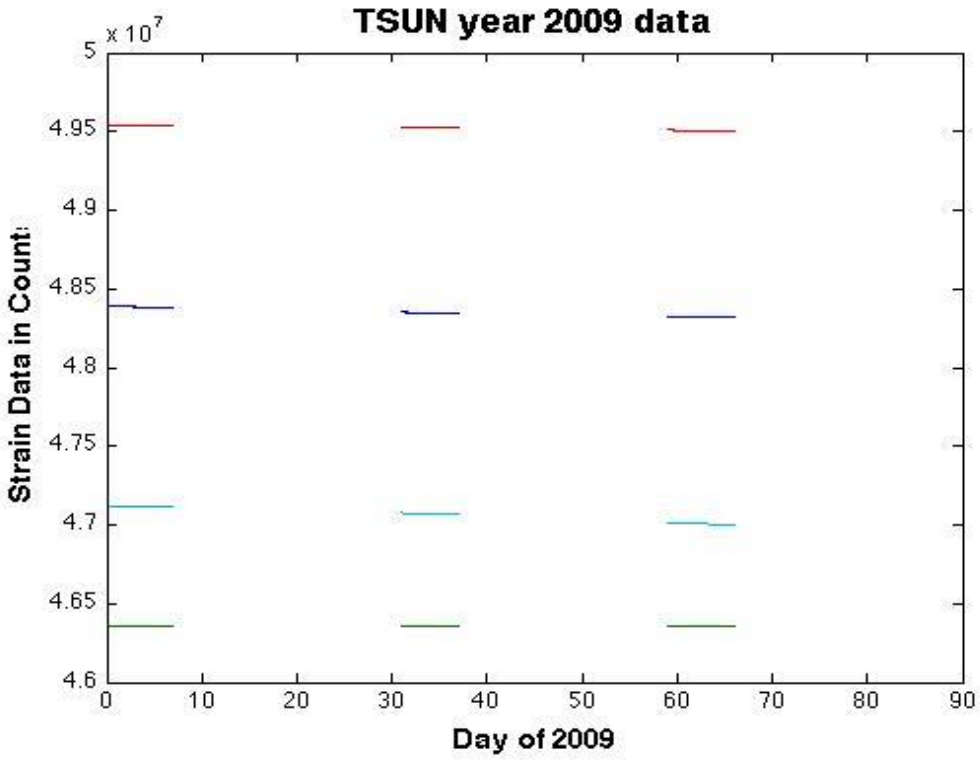


圖 3.14 中興國小測站 2009 年的資料超過 2/3 無法解出。

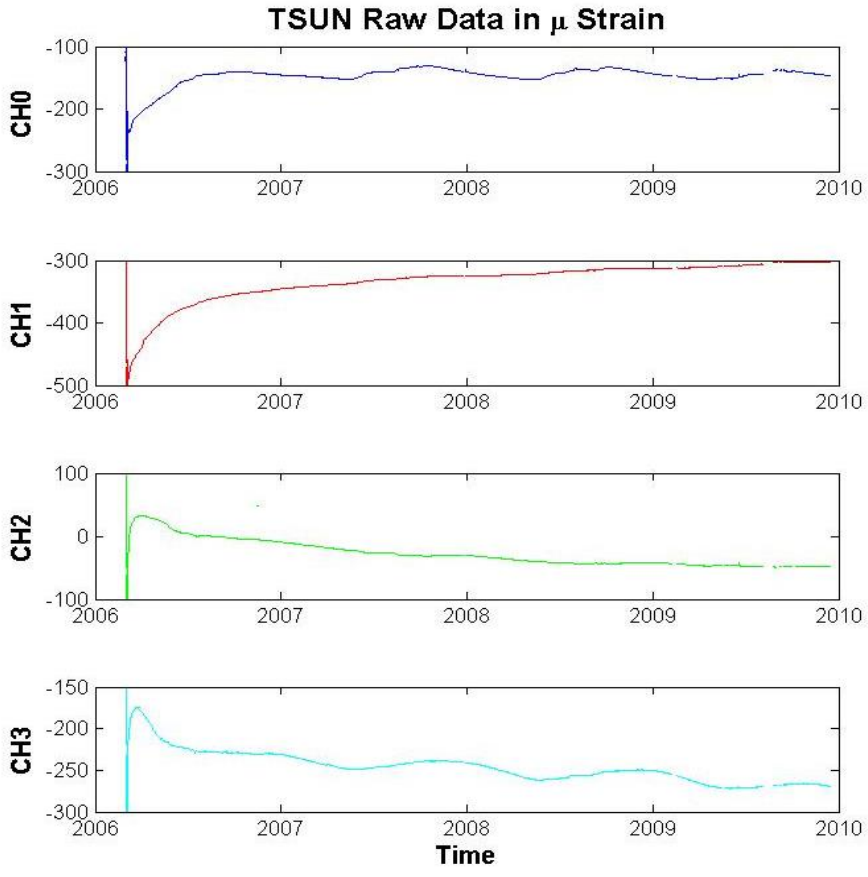


圖 3.15 中興國小測站四個分量之面應變。

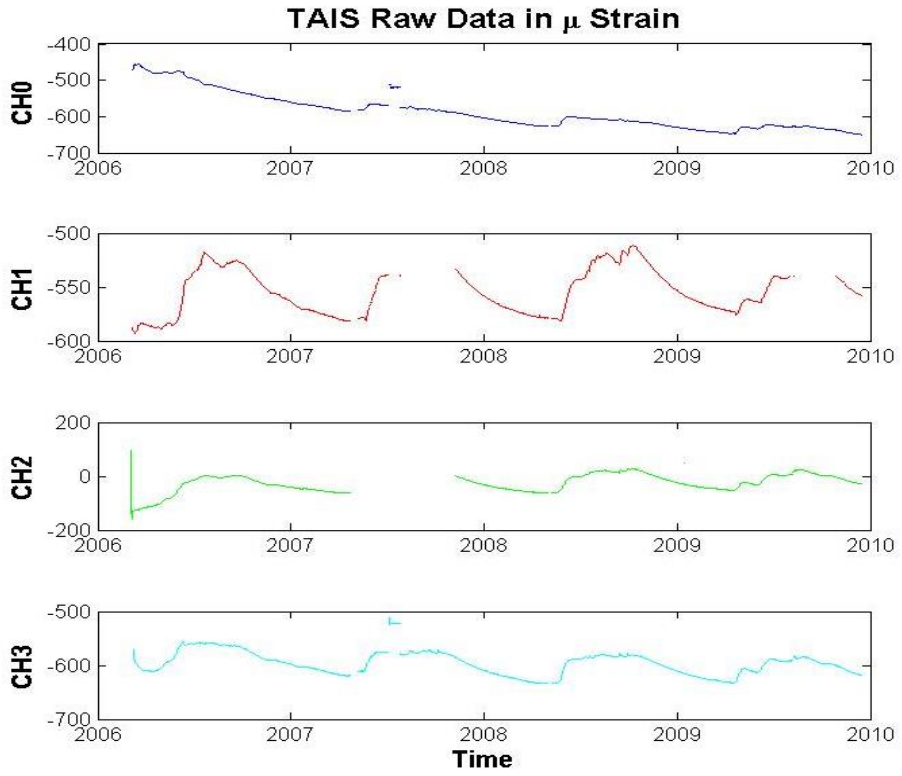


圖 3.16 太興國小測站四個分量之面應變。

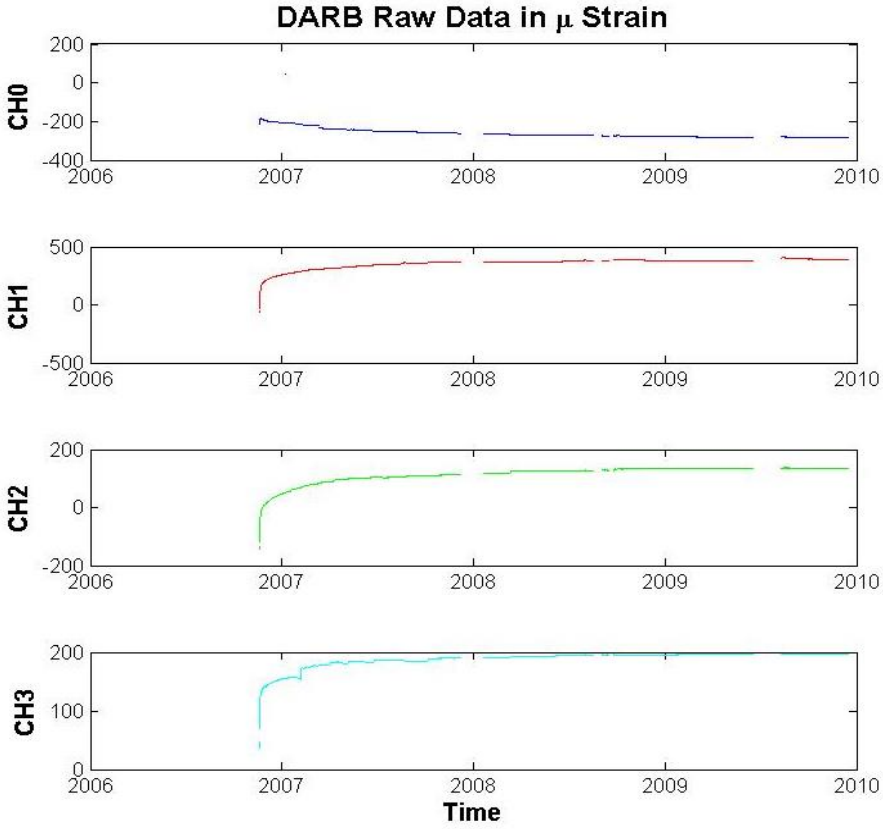


圖 3.17 達邦測站四個分量之面應變。

由以上資料可看出各站資料，除了 2009 年的中興國小測站資料以外，其餘大致完整。這三站資料，除了達邦測站可看出較完整的井孔回復的雙指數鬆弛效應（Dual-Exponential Relaxation），其餘中興與太興國小測站都有數十微應變（μstrain）的上下起伏變動，而且看不出井孔回復的鬆弛效應，這可能是因為兩口井都是在 2006 年 3 月就安裝，但因為未拿到早期的資料，看不到變化最大的井孔回復的鬆弛效應部分，再因其它效應（現階段尚未知是何效應）引起變化太大，可能會影響到井孔回復的雙指數鬆弛效應的估計。因此我們先考慮轉換到面應變後，再估計這效應的模式。

3. Level-2：包含正確原始面應變、剪應變。

GTSM 井下應變儀的設計就是利用至少三個的伸張計（Extensometer）放在一個平面上的三個方向，為方便計，各成 60 度角的差異（事實上，因空間的關係，無法是真正在同一平面上，而是上下有垂直差距），而又為保險起見，在加另一伸張計與第三支成 30 度角的差距，也就是與第 2 支成 90 度的差異。在這樣的設計下，可以用第 1 到第 3 支的延伸量量測結果來計算所有的變形量，因其分布均勻，量測誤差傳播的結果，也不至於造成大的偏差。此時，就可以用矩陣的方式來表示：

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ½ & ½\cos 2\theta_1 & ½\sin 2\theta_1 \\ ½ & ½\cos 2\theta_2 & ½\sin 2\theta_2 \\ ½ & ½\cos 2\theta_3 & ½\sin 2\theta_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_a \\ \gamma_1 \\ \gamma_2 \end{bmatrix} \qquad \text{（式 3-8）}$$

其中，$\theta_2=\theta_1+60°$；$\theta_3=\theta_1+120°$。至於第 4 支（$\theta_4=\theta_2+90°$）的觀測量，可於前面三分量有壞掉之時，可以取代之，或是第 4 支與第 2 支的觀測結果直接相加，也可以得到面積的變形量，這是因為二者成 90° 的夾角，在公式中，$\cos 2\theta_2 = \cos 2(\theta_1 + 90^o) = -\cos 2\theta_1$；而 $\sin 2\theta_2 = \sin 2(\theta_1 + 90^o) = -\sin 2\theta_1$，因此，若前三個方向有良好的應變記錄，則在（3-7）式中可簡易求得 ε_a、γ_1、γ_2 三個工程量，其中 ε_a 是面應變，γ_1 是跨過西北（Northwest）或東北（Northeast）平面的最大純工程剪斜（Engineering Shear）應變量，而 γ_2 是跨過東西或南北平面的最大純工程剪斜應變量，也就是說，γ_1 在東西或南北平面產生了最大的延伸（Extersion）量，而 γ_2 在西北或東北平面產生了最大的延伸量。

為了資料分析及解釋，將各分量之資料轉換成面應變與剪斜應變則是最基本的資料處理程序。在此同時，可由前三個方向所估計出來的三個工程量 ε_a、γ_1、γ_2 來估計第四個分量之值，以作為檢核之用。圖 3.18 至圖 3.20 為轉換成 ε_a、γ_1、γ_2 三個工程量所的的結果。

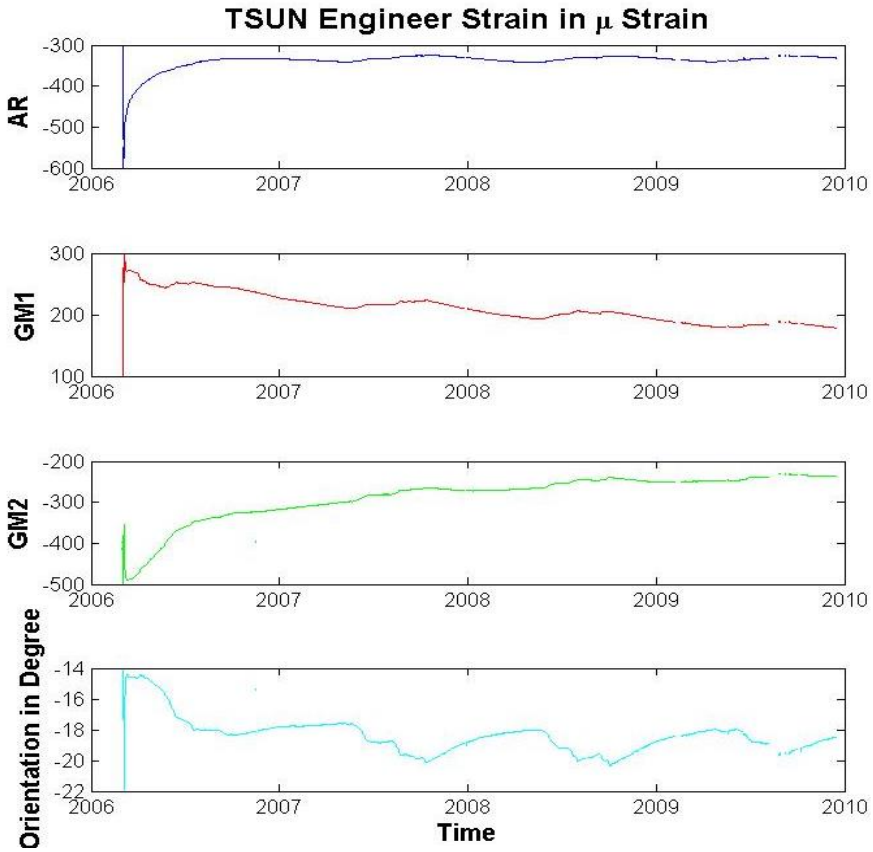


圖 3.18 中興國小測站之工程量。可由前三個分量估計出來的三個工程量 ε_a (AR)、γ_1 (GM1)、γ_2 (GM2)及最大主軸應變方向。

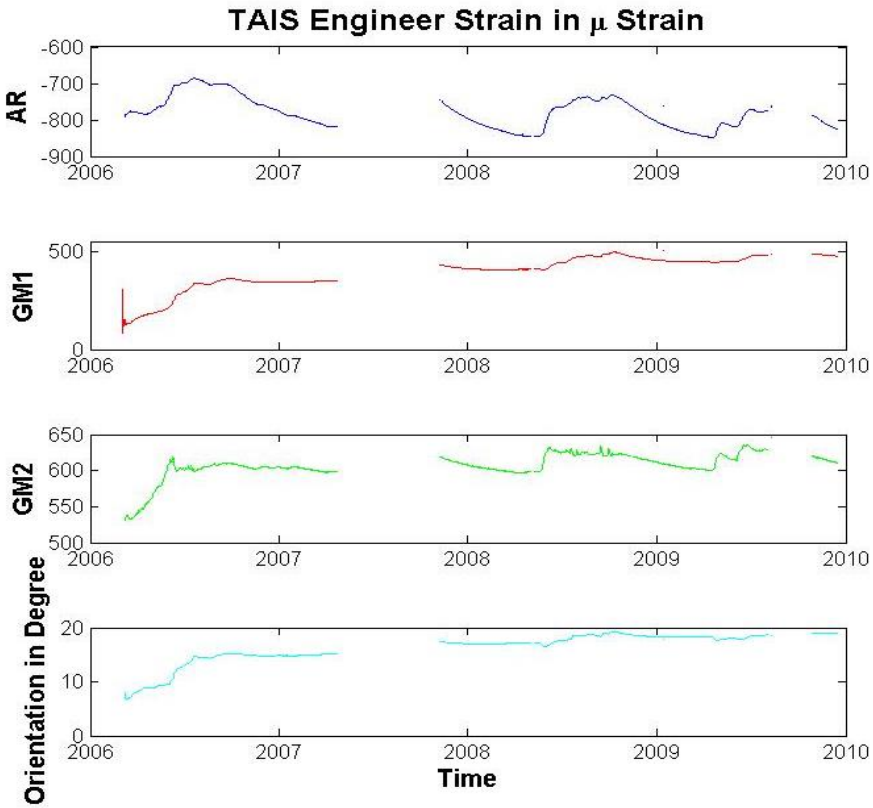


圖 3.19 太興國小測站之工程量。可由前三個分量估計出來的三個工程量 ε_a (AR)、γ_1 (GM1)、γ_2 (GM2)及最大主軸應變方向。

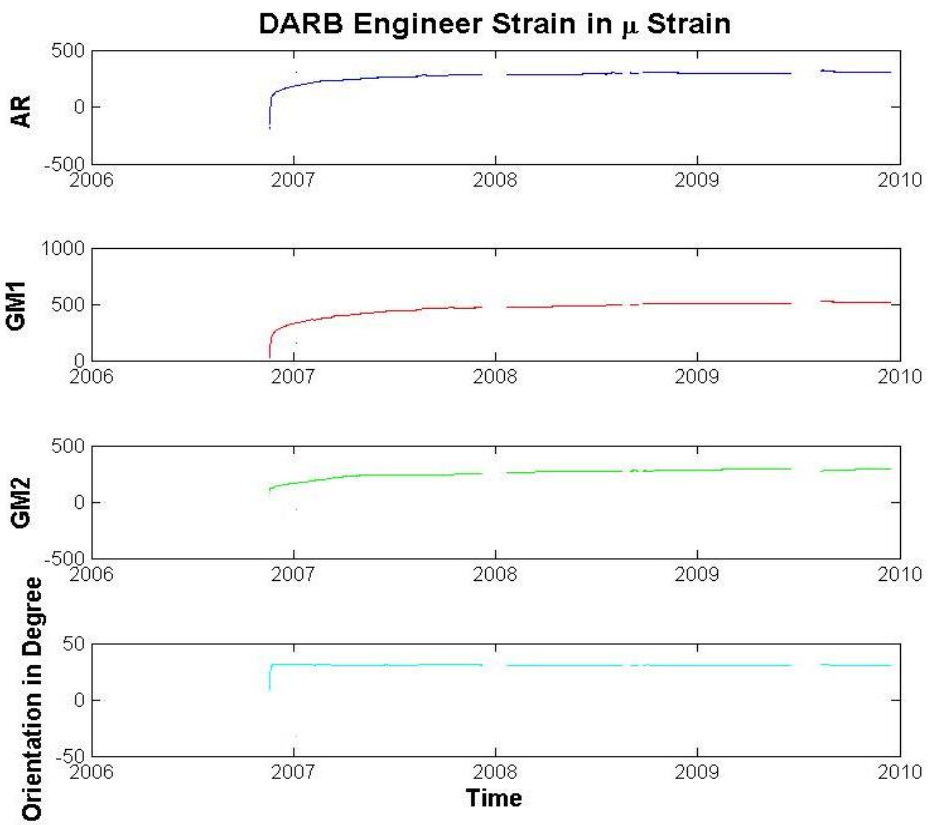


圖 3.20 達邦測站之工程量。可由前三個分量估計出來的三個工程量 ε_a (AR)、γ_1 (GM1)、γ_2 (GM2)及最大主軸應變方向。

在應變與應變公式的理論推導中，一個平面上若能量測到三個方向獨立的線性變形量，只要這三方向角度不都擠在一起(即其相關性不會太高)，則可以由這三個分量的資料預測到這平面上任一方向的線性應變量 e(θ) 及剪應變量 γ(θ)，即

$$e(\theta) = \tfrac{1}{2} e_a + \tfrac{1}{2}\gamma_1 \cos 2\theta + \tfrac{1}{2}\gamma_2 \sin 2\theta$$
$$\gamma(\theta) = -\gamma_1 \sin 2\theta + \gamma_2 \cos 2\theta \ \text{(engineering shear)}$$

（式 3 -9）

這即是在任一方位角 θ 的延伸量 $e(\theta)$ 以及工程剪斜應變 $\gamma(\theta)$。

若我們以此來推測第四個方向的線性應變量，則可以和原記錄比較，依此圖 3.21 至圖 3.23 顯示所比較的結果。這些比較顯示太興國小測站與達邦測站的估計量與原記錄相當地接近，而中興國小測站記錄則差異相當大，這是否代表各分量的真正的方向角與記錄有差異？

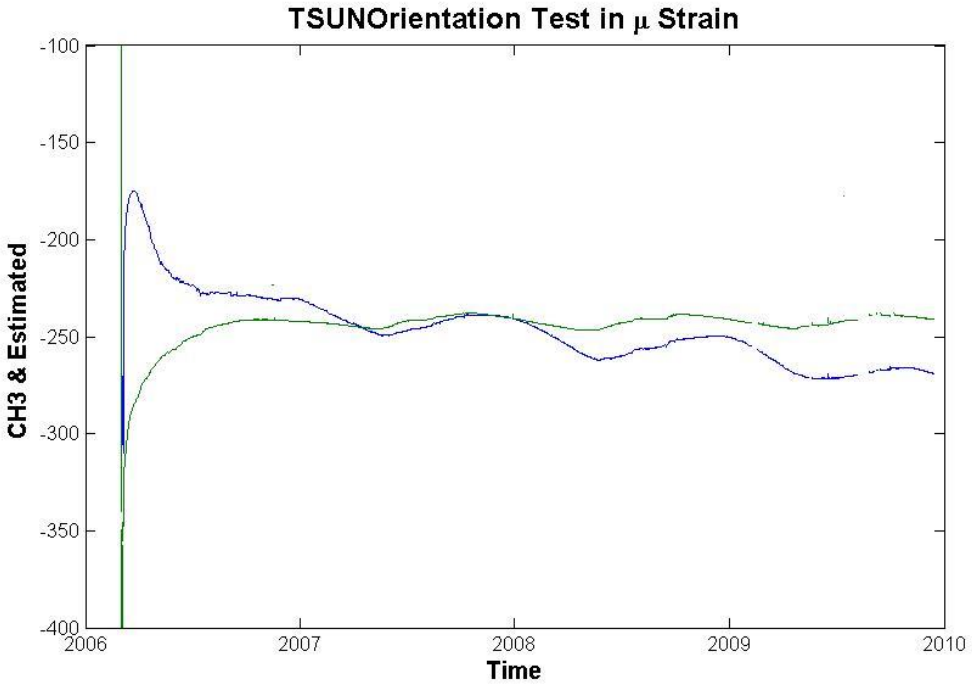


圖 3.21 中興國小測站第四方向角的線性應變與原記錄（CH3）比較的結果。利用的工程應變量的面應變 ε_a 及剪應變（γ_1、γ_2)可推算第四方向角的線性應變（綠線）。

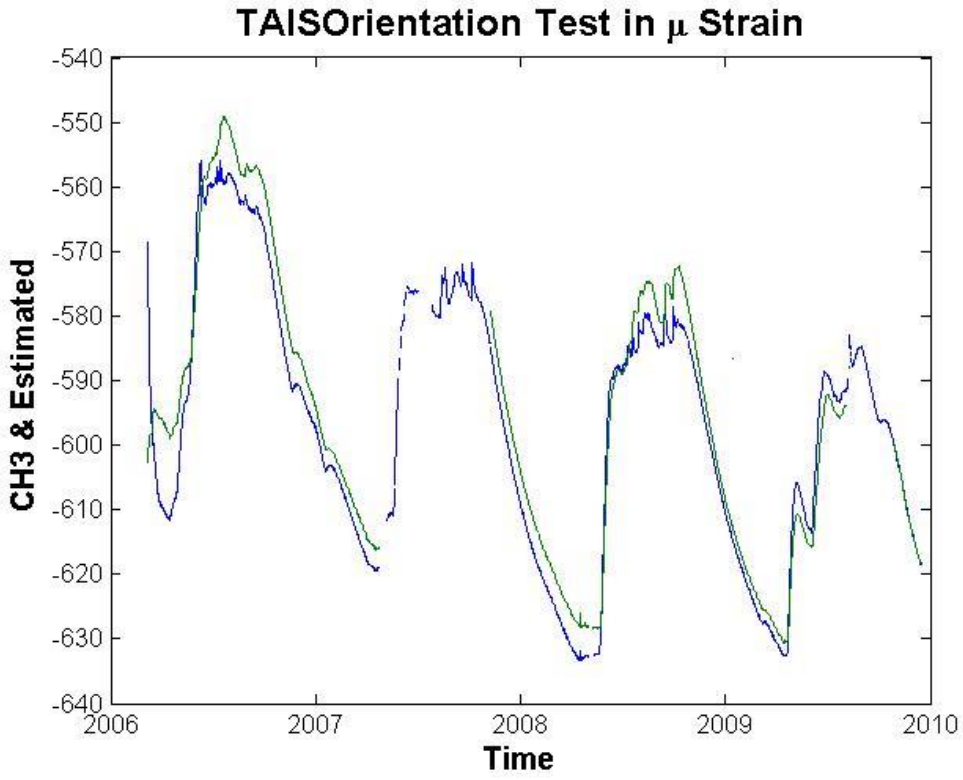


圖 3.22 太興國小測站第四方向角的線性應變與原記錄（CH3）比較的結果。利用的工程應變量的面應變 ε_a 及剪應變（γ_1、γ_2)可推算第四方向角的線性應變（綠線）。

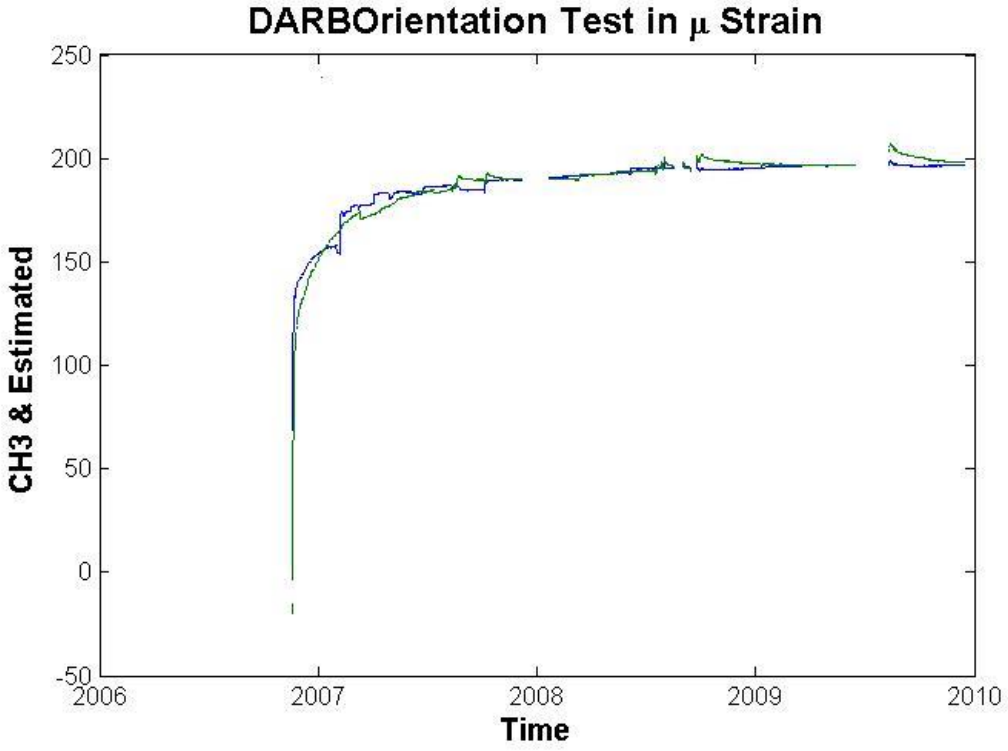


圖 3.23 達邦測站第四方向角的線性應變與原記錄（CH3）比較的結果。利用的工程應變量的面應變 ε_a 及剪應變（γ_1、γ_2)可推算第四方向角的線性應變（綠線）。

3-4-3 井下應變儀井孔回復的雙自然對數指數鬆弛效應的模式估計

當井下應變儀的儀器安裝在井洞之內後，用不收縮水泥封井，並藉以結合岩石與儀器。當不縮收水泥乾涸時，最先數十小時會釋放出許多熱量，導致溫度急遽上升，其所造成的效應在不同應變儀會有不同的反應，而且相當複雜，通常棄而不用。之後在數年之內，被挖開的井會慢慢恢復，岩石、水泥與儀器會結合成一體，不收縮水泥也會些許膨脹，慢慢的達到平衡，這兩種效應都會以自然對數的負指數方式衰減，如下列公式所示：

$$\varepsilon_a = a*e^{-2\pi t/T_1} + b*e^{-2\pi t/T_2} + C \qquad \text{（式 3-10）}$$

其中ε_a 為面應變，$e^{-2\pi t/T_1}$ 為井孔恢復的衰減（儀器被壓縮），$e^{-2\pi t/T_2}$ 為水泥膨脹的效應，其中 T_1 約為數十天到數百天，與井孔鑽井破壞的程度、岩層堅硬程度有關。T_2 則約為數百天到千天以上，與岩層的彈性係數有關。

在估計井孔衰減模式的各個係數時，並不是直接可由公式求取。由於雙自然對數的指數

函數的回歸模式並非線性，且兩種衰減最後都必須歸於平衡，亦就是其值必須為零，所以很難在有限的時間序列中，同時估計出雙自然對數的指數函數與最後的常數 C，因此有兩種方式去估計 a、b、T_1與T_2 ：

1. 估計 C 值(可利用 GPS 或其它來源資料，即為當地的長期平均應變量；或是用多次迭代計算，找出最合理之 C 值)，先行扣除，再去估計 a、b、T_1與T_2。
2. 先對時間做微分，即(3-9)式左邊取面積變形資料的斜率，右邊則仍維持雙自然對數的指數函數的形態，而 C 值在微分時可消去。

在這階段，我們採用第一種方式，可惜太興國小與中興國小因完全看不出鬆弛效應的變化曲線，無法估計，對其他四站所估計的結果如下：

甲仙十八灣 (ECT)：
資料：2004-2007 年的 600 秒取樣率的資料。
裝置日期：2003 年 10 月 26 日。
資料經雙自然對數的指數分析結果：

General Model Exp:

$f(x) = a \cdot \exp(b \cdot x) + c \cdot \exp(d \cdot x)$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

a =	99.47	(99.37, 99.57)
b =	-0.003757	(-0.003762, -0.003752)
c =	272.33	(272.53, 273.13)
d =	-0.001451	(-0.001452, -0.001450)

Goodness of fit:

SSE: 3.132e+05
R-square: 0.9986
Adjusted R-square: 0.9986
RMSE: 1.352

原始面應變資料與所估計出來的雙自然對數的指數函數 如圖 3.24 所示，其中測站的原始面應變觀測的時間序列（藍色），以及水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式（紅色），二者的吻合性相當高，這表示將近四年的資料可以吻合雙自然對數的指數函數。

而資料與模式相減後所得到的殘差則如圖 3.25 所示，這些殘差很明顯地表現出一年週期的訊號，其訊號強度約有 1.0-2.0 μstrain，比一般地殼中地潮所造成的應變大約 5 到 10 倍以上，是否與本站附近的曾文水庫的水量有關，尚待進一步的分析。

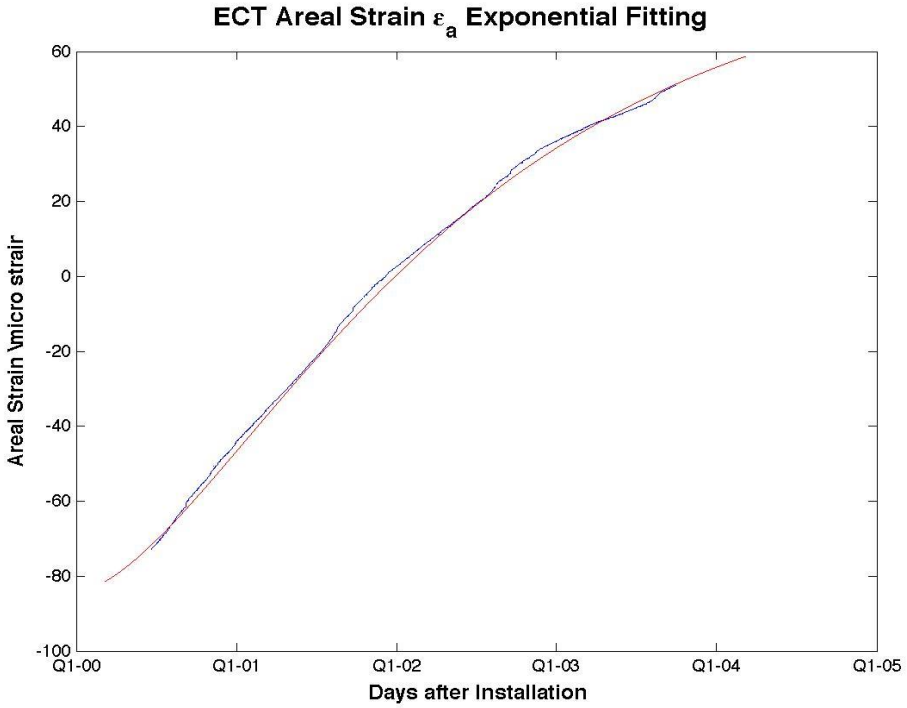


圖 3.24 甲仙十八灣站原始面應變之時間序列。原始面應變觀測的時間序為藍色，水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式為紅色。

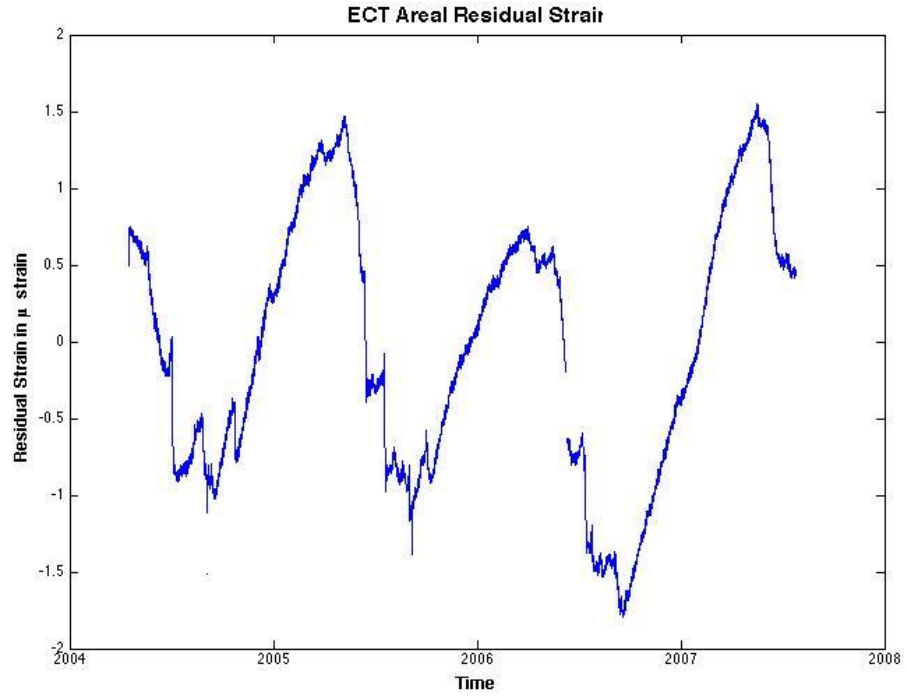


圖 3.25 甲仙十八灣站之面應變殘差值。除掉水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式之後，所得到的面應變殘差值。

曾文南站 (RST) ：
資料：2003/10/23-2007 年的 600 秒取樣率資料。
安裝日期： 2003 年 10 月 23 日

本站的資料記錄從安裝當日就開始（也有可能在安裝前數小時就開始），所以前 5 天的資料受溫度效應影響較大，捨去而不用。

另外，本站資料的 CH1 在 2005 年 3 月之後就沒記錄（可能因儀器壞掉）， 而 CH3 則在 2004 間約連續半年有很大的雜訊，因此，在做井孔恢復的分析時，我們在前半部（2005 年 3 月之前採用 3 個分量（CH0、CH1 及 CH2）所算出來的面應變，而在 2005 年 3 月之後則採用 3 個分量（CH0、CH2、CH3）所算出來的面應變。

資料經雙自然對數的指數分析結果：

Two Exponential Modeling

General model Exp2:

$f(x) = a \cdot \exp(b \cdot x) + c \cdot \exp(d \cdot x)$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

a =	35.25	(35.45, 35.06)
b =	-0.00532	(-0.00538, -0.00527)
c =	258.5	(258.4, 258.7)
d =	-0.001486	(-0.001487, -0.001485)

Goodness of fit:

SSE: 1.34e+06

R-square: 0.9979

Adjusted R-square: 0.9979

RMSE: 2.627

原始面應變資料與所估計出來的雙自然對數的指數函數 如圖 3.26 所示， 其中測站的原始面應變觀測的時間序列（藍色），以及水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式（紅色），二者的吻合性相當高，這表示將超過四年（1500 天以上）的資料可以吻合雙自然對數的指數函數。

而資料與模式相減後所的到的面應變殘差值則如圖 3.27 所示，這些殘差與圖 3.25 中 ECT 站的殘差不同，在這四年中，有兩次明顯較大的膨脹（Dilatation），其大小超過 10 μstrain，若除掉這兩個異常訊號，則其餘的仍有明顯的週期性，在年末年初之時，都是較低值（壓縮）的時候，剛好與 ECT 站相反。是否也與本站附近的曾文水庫的水量有關，而且因與 ECT 站相對於水庫的位置不同，而有相反的變化，尚待進一步的分析。

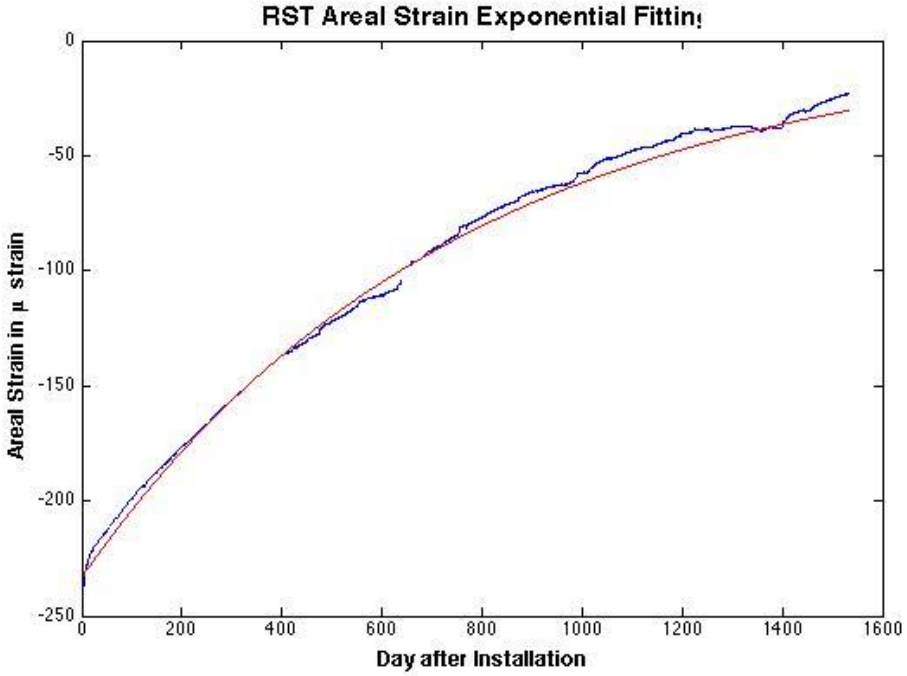


圖 3.26 曾文南站原始面應變之時間序列。原始面應變觀測的時間序為藍色，水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式為紅色。

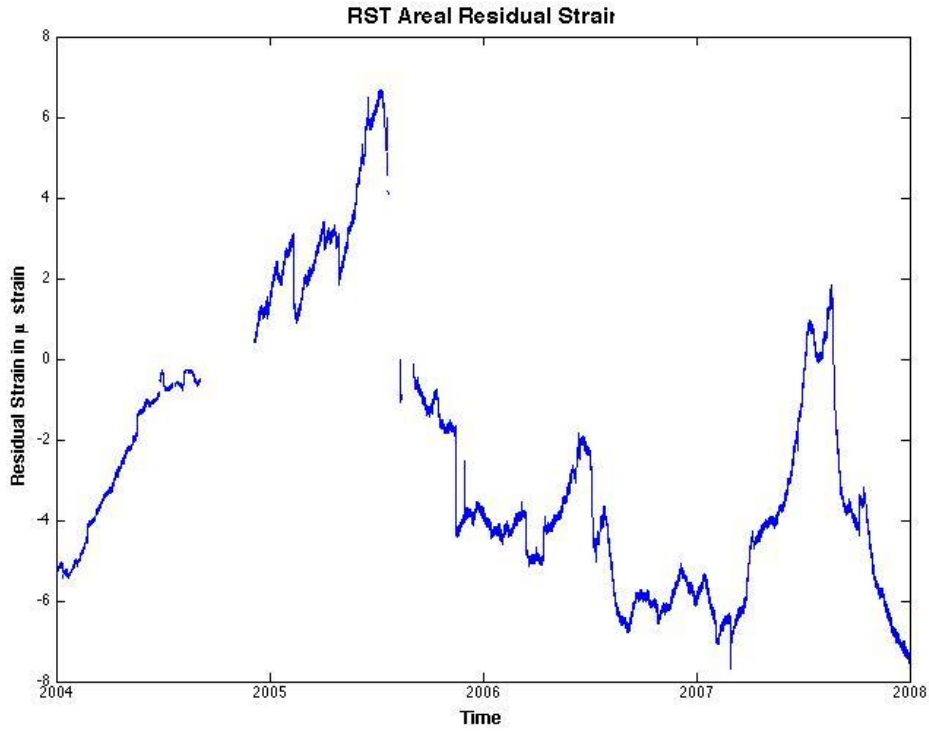


圖 3.27 曾文水庫南站之面應變殘差值。除掉水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式之後，所得到的殘差值。

曾文北站 (RNT) ：

採用之資料：2004-2007 年的 600 秒取樣率資料。

安裝日期：2003 年 10 月 28 日

資料經雙自然對數的指數分析結果：

General Model Exp:

f(x) = a・exp(b・x) + c・exp(d・x)

Coefficients (with 95% confidence bounds):

a = 1.369 (1.397, 1.341)

b = -0.001712 (-0.001724, -0.001693)

c = -129.4 (-129.4, -129.4)

d = -0.0009928 (-0.0009939, -0.0009916)

Goodness of fit:

SSE: 3.581e+04

R-square: 0.9996

Adjusted R-square: 0.9996

RMSE: 0.5417

原始面應變資料與所估計出來的雙自然對數的指數函數如圖 3.28 所示， 其中測站的原始面應變觀測的時間序列（藍色），以及水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式（紅色），二者的吻合性相當高，這表示將近四年的資料可以吻合雙自然對數的指數函數。

而資料與模式相減後所的到的面應變殘差值則如圖 3.29 所示，這些殘差與圖 3.25 中 ECT 站的殘差不同，在這四年中，有兩次明顯較大的膨脹，其大小大約在 1-2 μstrain，而且比較其它兩站顯得較沒有明顯的週期性。

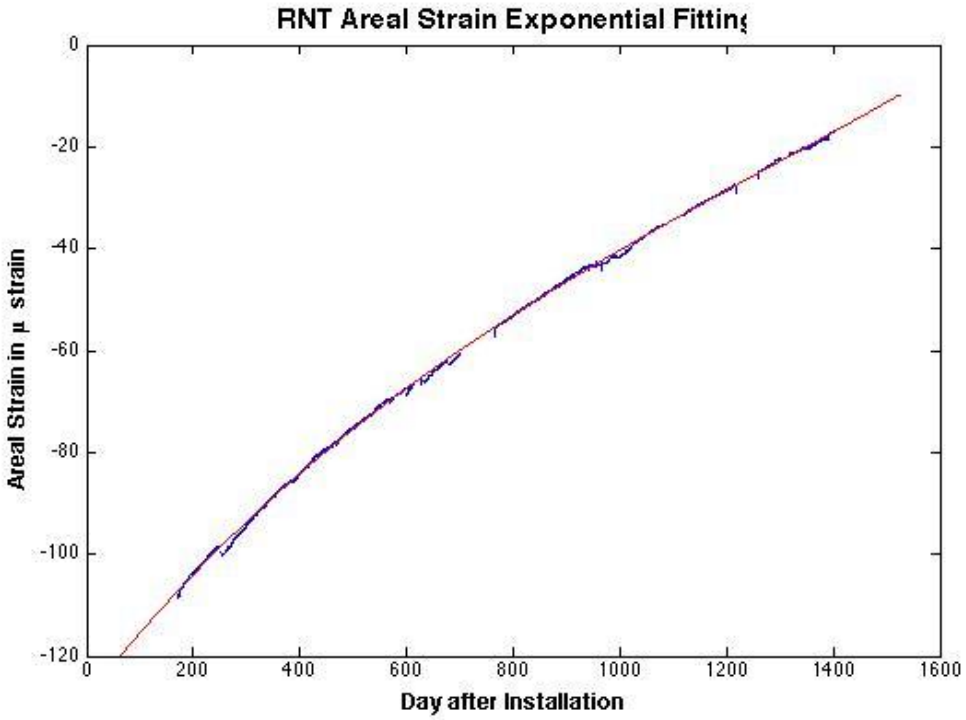


圖 3.28 曾文北原始面應變之時間序列。原始面應變觀測的時間序為藍色，水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式為紅色。

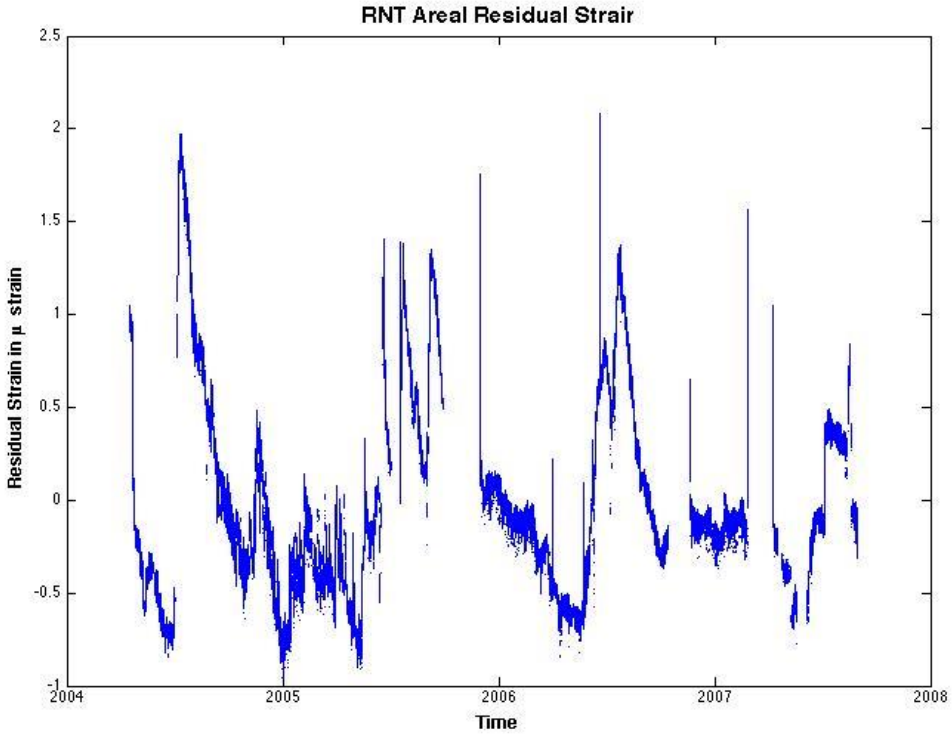


圖 3.29 曾文水庫北站之面應變殘差值。除掉水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式之後，所得到的殘差值。

達邦測站 (DARB)：

DARB 雙自然對數的指數函數

資料：用 2007-2009 年的 60 秒取樣率資料。

裝置日期是在 2006/11/19

資料經雙自然對數的指數分析結果：

General Model Exp:

f(x) = a*exp(b*x) + c*exp(d*x)

Coefficients (with 95% confidence bounds):

a = 121.9 (121.8, 122.0)

b = -0.001994 (-0.001998, -0.001991)

c = 57.63 (57.51, 57.75)

d = -0.01186 (-0.01188, -0.01184)

Goodness of fit:

SSE: 1.414e+07

R-square: 0.9824

Adjusted R-square: 0.9824

RMSE: 3.557

依此可估計出模式曲線，

$$\varepsilon_a = 170.0 - 121.9 * e^{-0.001994t} - 57.63 * e^{-0.01186t} \qquad \text{（式 3-11）}$$

所得結果與原記錄比較如圖 3.30 所示。扣除模式後的殘差才是代表地殼變動或其它影響到地層應變的訊號，如圖 3.31 所示。

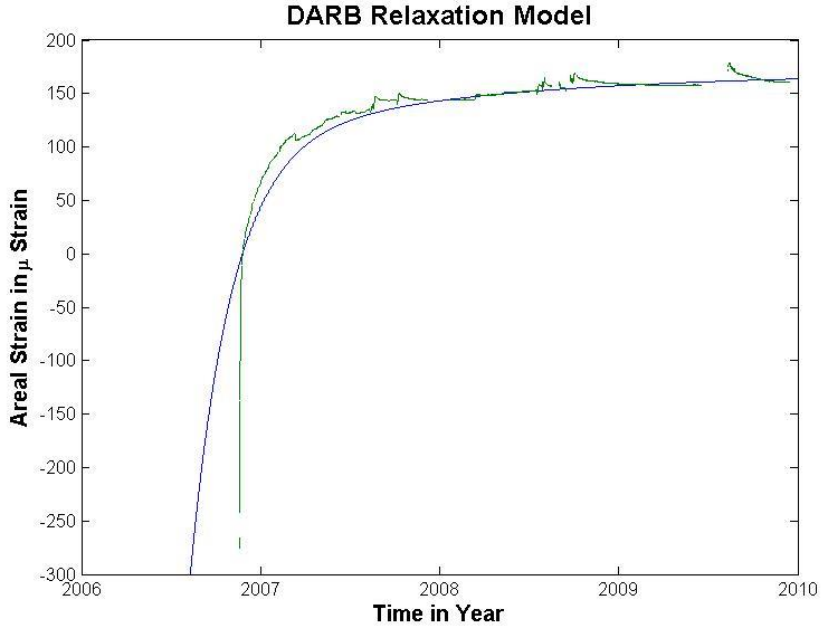


圖 3.30 達邦測站面應變記錄的井孔回復的雙自然對數指數鬆弛效應的模式。所得的模式曲線（藍線）可大致的符合原記錄（綠線）的變化。

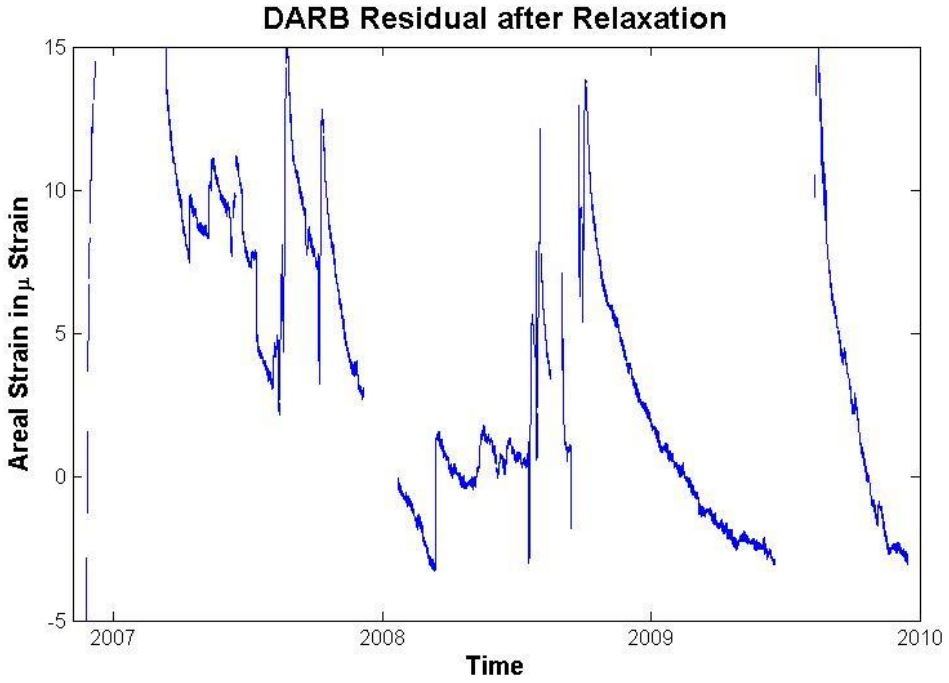


圖 3.31 達邦測站扣除井孔回復的雙自然對數指數鬆弛效應的模式之面應變殘差變化。

3-5 結果分析比對

3-5-1 井下應變儀資料與地下水因素的關係

井下應變儀的儀器所記錄的的資料，除了受到板塊活動施加於岩石的應變外，另外還會受到地下水層水壓改變、溫度改變與大地上的氣壓改變的影響。一般而言，氣壓的影響比較直接，通常氣壓的變化牽涉的區域較廣，所以其影響量能直接達於深部，所產生的影響也較接近於線性變化。溫度的變化一般較小，除非儀器斷電，或者重新起動，改變了儀器產生的熱量，造成了記錄上的變化。而最重要的影響可能來自地下水的變化，特別是在水庫附近的幾個測站，如達邦測站，在除去了井孔效應以後，如圖 3.31 所示的面應變變化曲線，與地下水位的變化幾乎完全同步（圖 3.32）。如此可看出 1 公尺的水位變化可以造成約 7 μstrain 的變化。

若將應變量相對於水位變化進行比對（圖 3.33），則可看出每次在低水位時，應變儀的記錄都在約 -5 μstrain 左右，而水位上升時，應變量隨之上升，最後可升至 +10 μstrain 上下，由此圖 3.32 可得到應變與地下水間的簡單線性關係，即每 1.0 公尺的地下水變化，可造成約 6.5875 μstrain 的變化。根據台灣地區曾文水庫水位變化的長期資料與這三個測站地下水位的關係（圖 3.34），可看出除了中興國小的變化略為延遲外，其餘地下水位變化與曾文水庫幾乎是同步，且所以水位變化都是一年一個周期，每年都是在夏天水位驟然上升，春天近入乾水期前水位驟然下降，而圖 3.32 顯示在高水位期，井下應變量幾乎都受水位變化控制，而在低水位期則變化與水位關係較低，可能是氣壓的效應較明顯，或是說，水位與應變的關係並非

線性，這一方面有待繼續研究，畢竟西部地區地下水豐富，變化較大，已明顯的影響到井下應變儀的觀測，必需建立一個好的修正模式，才能使得 200 公尺深的應變儀資料能正確的代表較深層的岩層應變，也才能看到較細微的構造應變。圖 3.35 顯示達邦測站面應變記錄扣除井孔回復的雙自然對數指數鬆弛效應的模式後，所得的殘差變化（藍色曲線）再扣除可能的地下水位影響的效應，所得的殘餘量（綠色曲線）就可清楚看到較細微的變化。

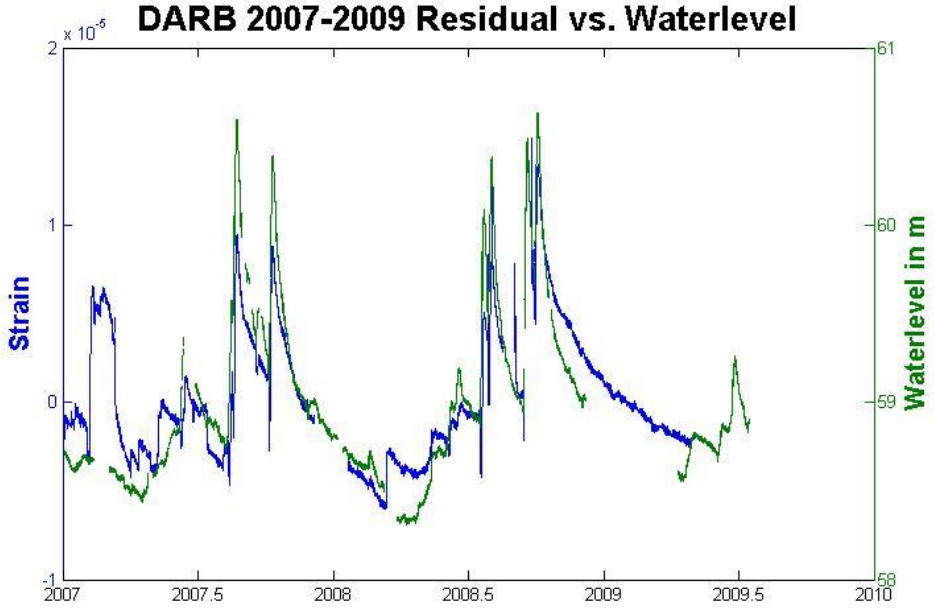


圖 3.32 達邦測站面應變殘差變化幾乎與水位變化同步(單位不同)。

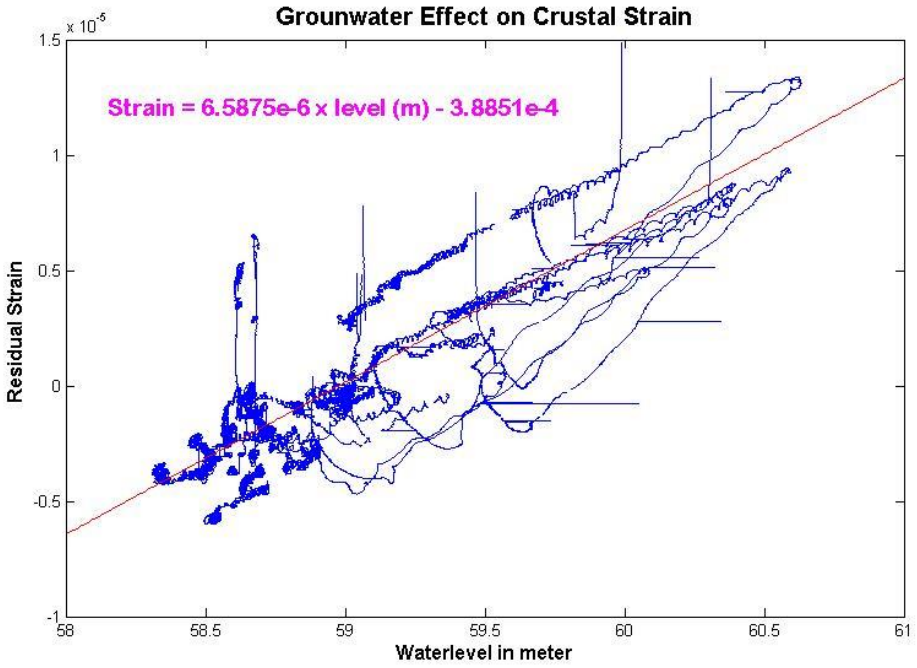


圖 3.33 達邦測站地下水位與面應變殘差量的比較圖。可看出有相當高的線性關係。

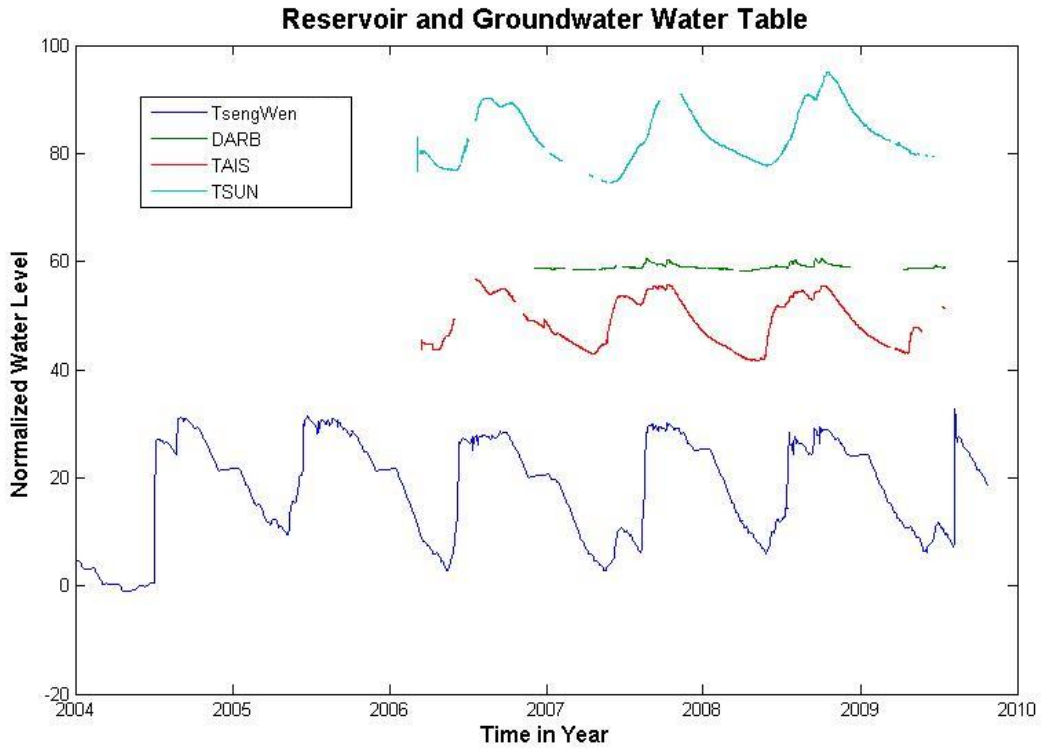


圖 3.34 曾文水庫水位變化（已除以 20 公尺）與嘉義三站井下應變儀（達邦、中興國小、太興國小）之地下水井觀測記錄的比較，可看出年週期的水位變化。

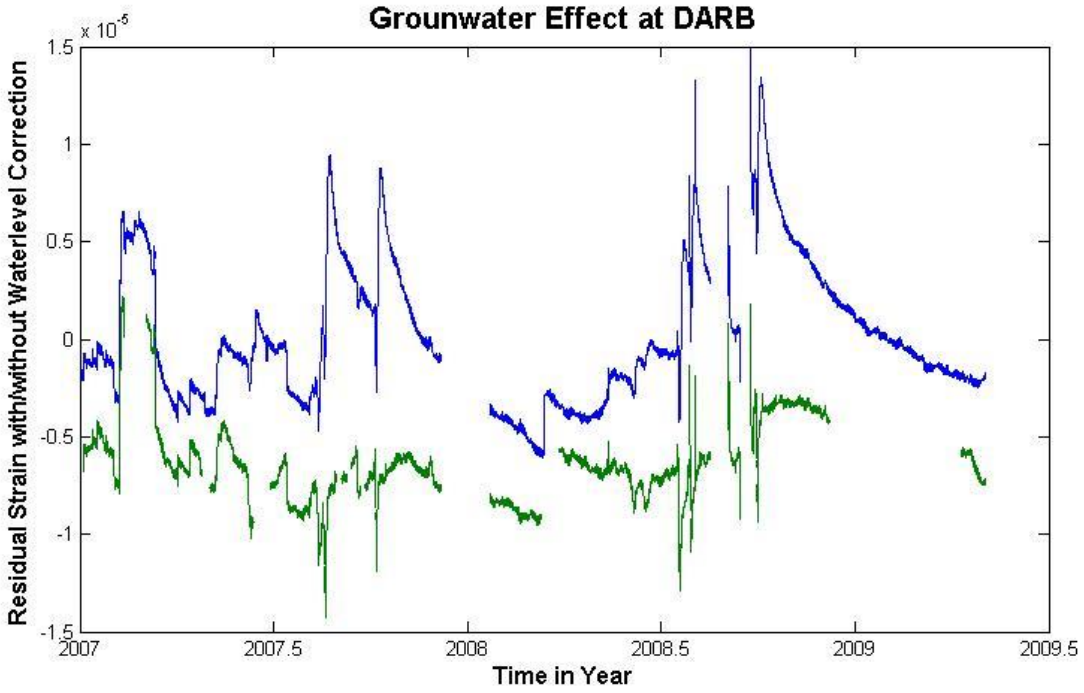


圖 3.35 達邦測站面應變殘餘量。面應變記錄扣除井孔回復的雙自然對數指數鬆弛效應的模式後，所得的殘差變化(藍色曲線)再扣除可能的地下水位影響的效應，所得的殘餘量(綠色曲線)就可清楚看到較細微的變化。

以上是達邦測站地殼應變受地下水影響的變化，以及試圖以簡單的線性關係來消除這些效應，以期看到更細微的應變。圖 3.36 至圖 3.41 則是對太興國小與中興國小測站所做相同分析的結果，地下水對應變的效應在太興站是 1.8222 μstrain/meter，約為達邦站的 1/3 強，而在中興國小站則為 0.85341 μstrain/meter，為所有測站最小者，約為達邦站的 1/8 而已，這數字越小，表是岩石越堅硬，對相同的作用力所產生的應變越小。

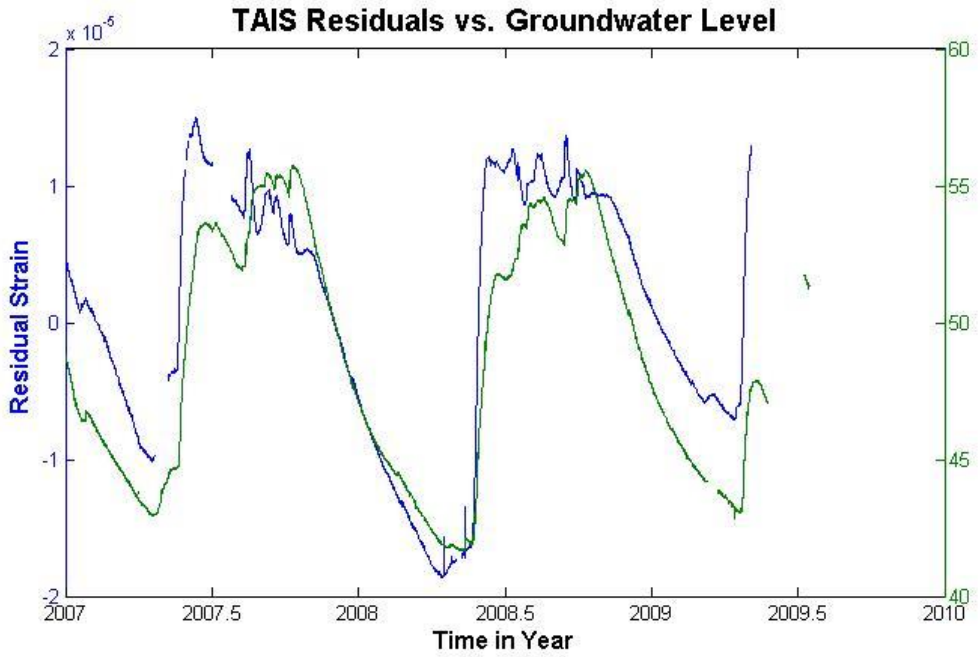


圖 3.36 太興國小測站面應變殘差變化與水位變化同步（單位不同）。

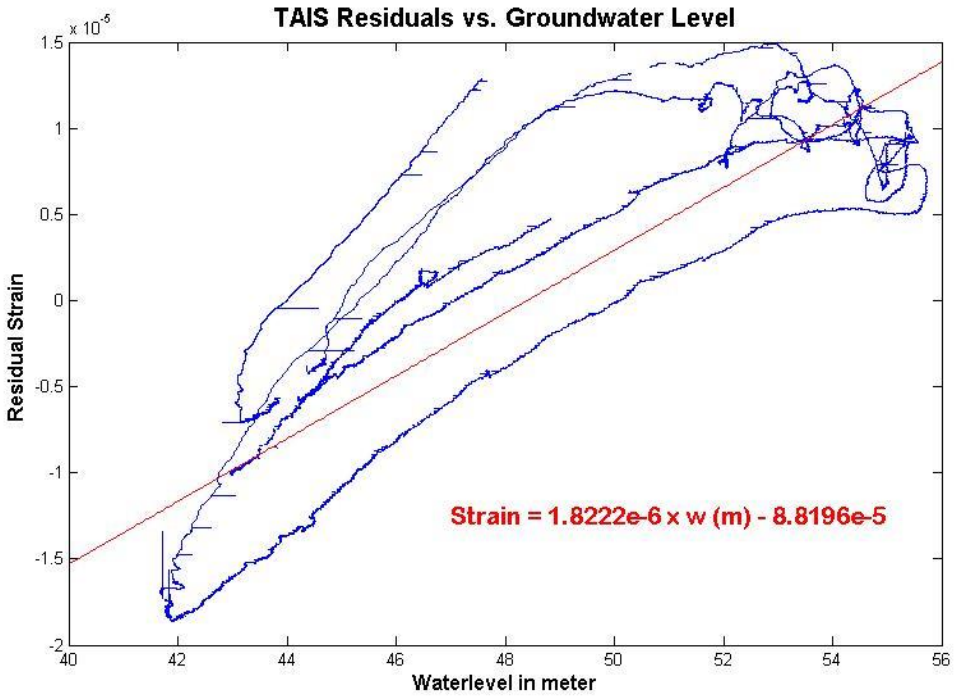


圖 3.37 太興國小測站地下水位與面應變殘變化的比較圖。可看出有相當高的線性關係。

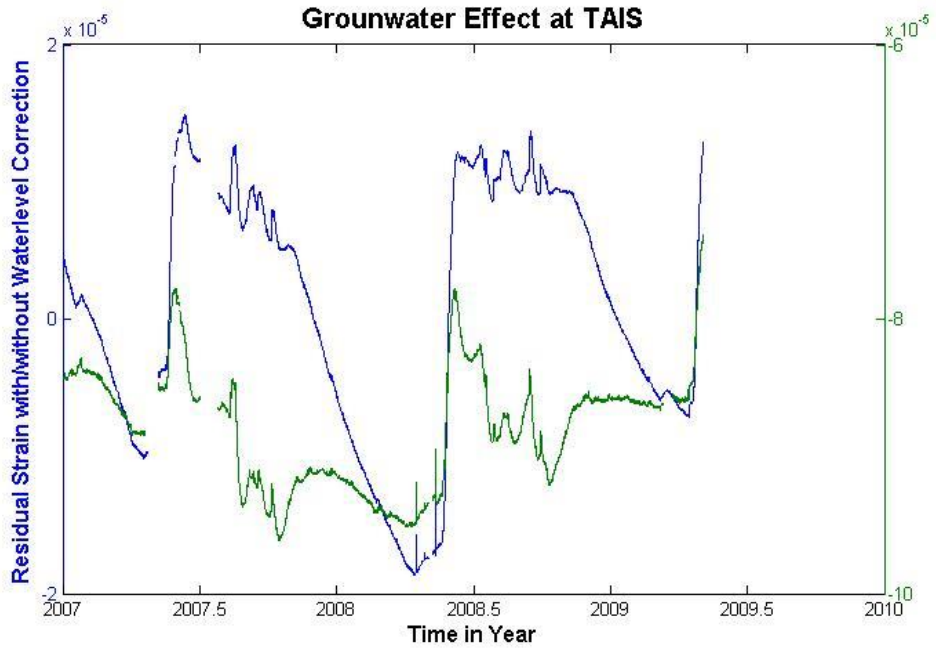


圖 3.38 太興國小測站面應變殘餘量。面應變記錄扣除井孔回復的雙自然對數指數鬆弛效應的模式後，所得的殘差變化（藍色曲線）再扣除可能的地下水位影響的效應，所得的殘餘量（綠色曲線）就可清楚看到較細微的化。

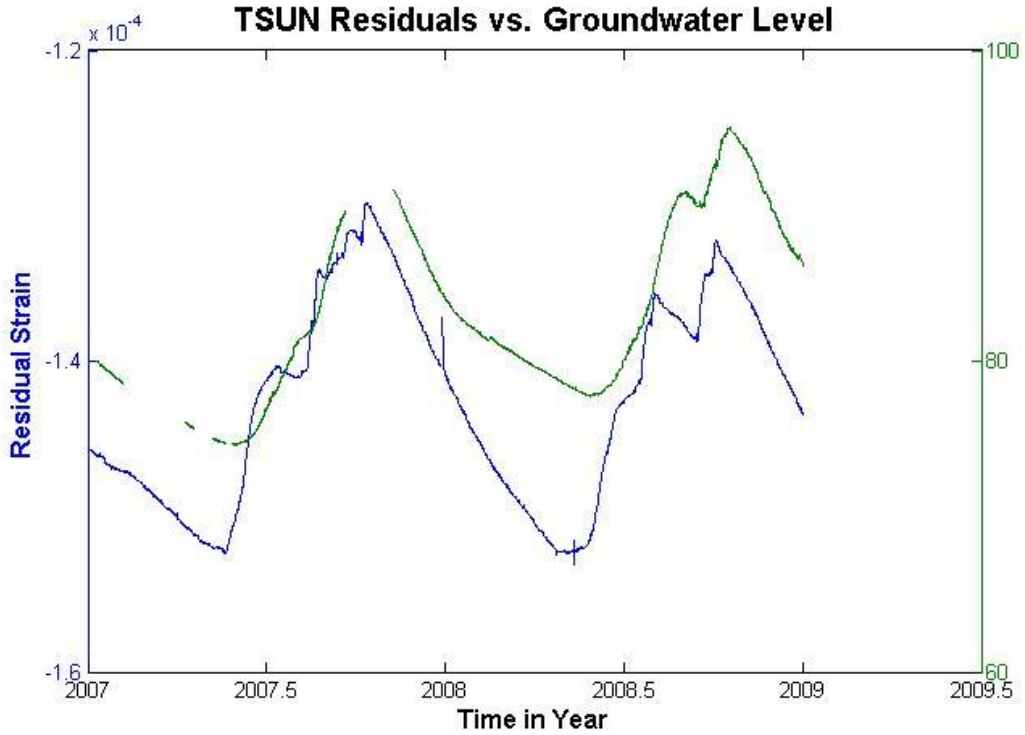


圖 3.39 中興國小測站面應變殘差變化與水位變化同步（單位不同）。

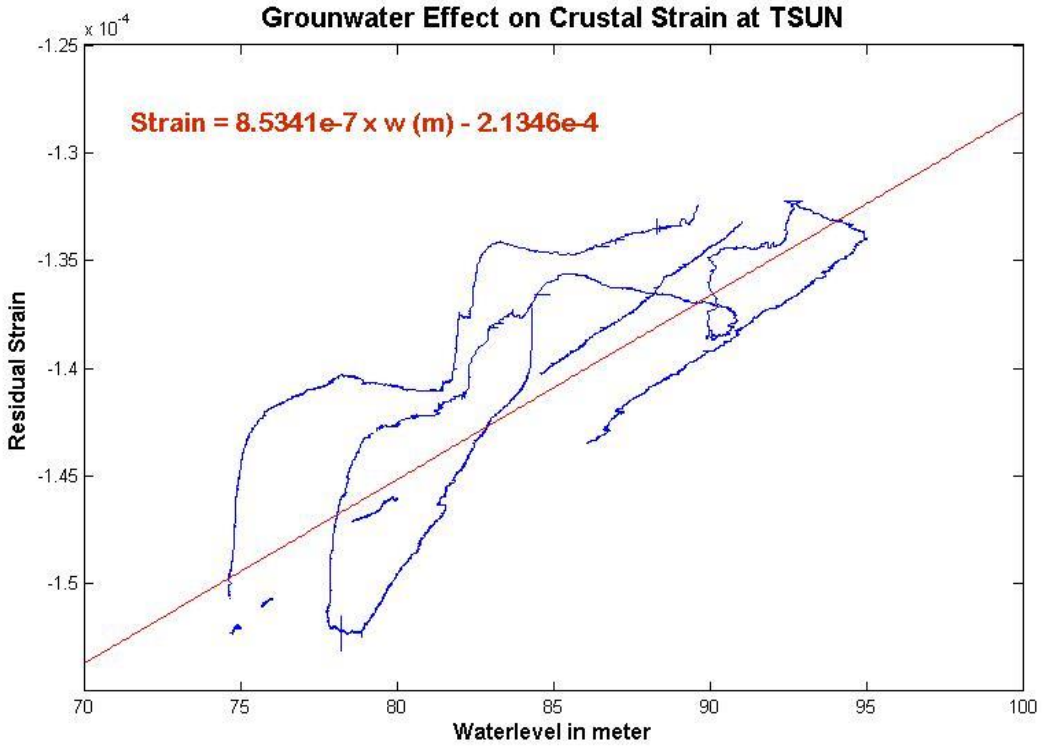


圖 3.40 中興國小測站地下水位與面應變殘變化的比較圖。可看出有相當高的線性關係。

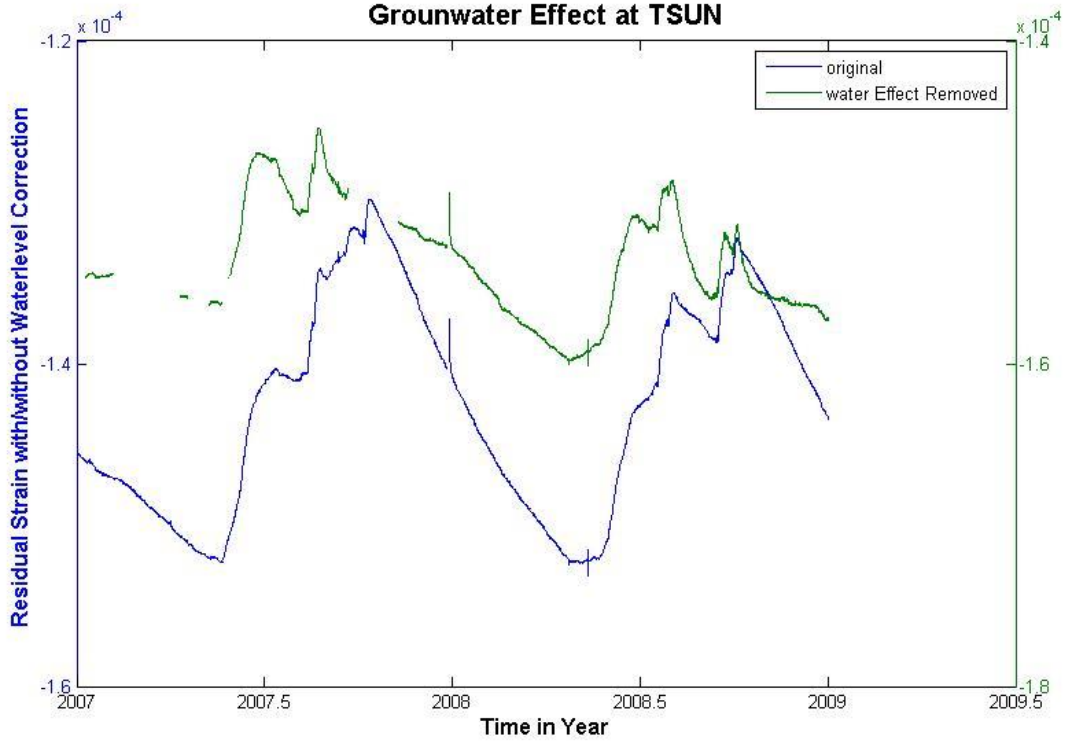


圖 3.41 中興國小測站面應變殘餘量。面應變記錄扣除井孔回復的雙自然對數指數鬆弛效應的模式後，所得的殘差變化(藍色曲線)，再扣除可能的地下水位影響的效應，所得的殘餘量(綠色曲線)，可清楚地看到較細微的變化。

3-5-2 井下應變儀資料與氣壓或颱風因素的關係

井下應變儀的資料，除了受到地下水層水壓改變而有明顯的變化以外，還受大氣壓力的影響，而颱風期間的氣壓降低是最顯著的氣壓變化。一般而言，氣壓升高時，地殼受到擠壓，應變量為壓縮（降低），反之則為膨脹。最明顯的例子為在颱風來時的變化（圖 3.42）。在颱風期間氣壓降低，然後才回升，總共約兩天時間，而達邦測站與中興國小測站的面應變變化也時立即性的膨脹，而且與地下水的影響一般，達邦的變化約為中興的三倍左右。更重要的是颱風過後，面應變量隨即升高（膨脹），這應該是地下水位因雨量補充而升高，造成面應變的升高。對於地下水的升降對應變儀變化的影響，其實還有個疑點，一般而言，地下水升高表示水壓增加，為何同樣在井底的應變儀反而是膨脹？這機制尚有待更多資料與更詳細的模式來探討。為了更進一步瞭解颱風的的氣壓、地下水壓、附近水庫負載等因素交錯對地殼應變的影響，接下來更進一步對具最長紀錄歷史的曾文水庫附近三個測站，包括曾文水庫北站、曾文水庫南站與甲仙十八灣站做進一步的分析。

首先分析最久歷史的曾文水庫南站在移除井孔回復效應之後的殘餘應變與颱風間的關係，圖 3.43 的上圖為此殘餘應變的變化與每年第一次颱風時間的關係，在颱風之前應變量緩慢的增加（膨脹），而在颱風過後，就急速的下降（壓縮） 3~5 μstrain，這應該是曾文水庫在颱風期間快速蓄水的效應，改變四周地殼的應變。所以在圖 3.43 的下圖顯示曾文水庫水位的變化。顯然在 2004、2007、2008 與 2009 年的水位在這颱風後立即升到當年最高，而其餘兩年（2005、2006）則在颱風之前就已達到最高點，但應變並未提前擠壓，所以這三者之間的關係可能還未完全能解釋，或許需要再加入地下水位與構造活動所產生的應力之間的互動。可惜這地區各站都未裝設水位計，需要在蒐集其它資料，以期找出更合理的解釋。

在圖 3.44 的上圖為曾文北測站（RNT，紅色）、曾文南測站（RST，綠色）與甲仙十八灣測站（ECT，藍色）三站的殘餘應變的變化與每年第一次颱風時間的關係，曾文水庫北站與甲仙十八灣站對颱風的反應與曾文水庫南站不同，反而因颱風略微的增加（膨脹），其量不到 1 μstrain，應變的增加或減少應該是曾文水庫的負載改變四周地殼的應變，對不同方位有不同的效應，但應變大小的變化，除了方位以外，還與岩層硬度有關。圖 3.44 的下圖則同樣的顯示水庫水位的變化。

各測站岩層的強硬程度可以從每日潮汐振幅相對的大小來判斷。圖 3.45 為曾文水庫北站、曾文水庫南站與甲仙十八灣站三站在 2004 年 7 月 2 至 7 日潮汐振幅的異常變化，可以明顯看出潮汐振幅以曾文水庫南站最大，這也表示該站岩層較軟弱，其次是曾文水庫北站，最硬的則是甲仙十八灣站。在這段期間內，三站的紀錄都有明顯的變化，甲仙十八灣站在 3 至 4 日顯現約 1 μstrain 的上升，曾文水庫北站顯示約 2 μstrain 的上升，曾文水庫南站則較複雜，在 3 日先出現約 1 μstrain 的上升，而在 6 日卻又出現約 1 μstrain 的下降。如此相鄰的測站具同時卻又各不相同的形態的變化，很可能是同一來源的起因，因相對於曾文水庫之不同方位與距離所造成的差異。 相類似的異常變化在 2005 年 6 月 12 至 17 日又出現一次（圖 3.46），各站的變化都約是 1 μstrain 的上升，而且曾文水庫南站也沒有出現上升後再下降的變化。

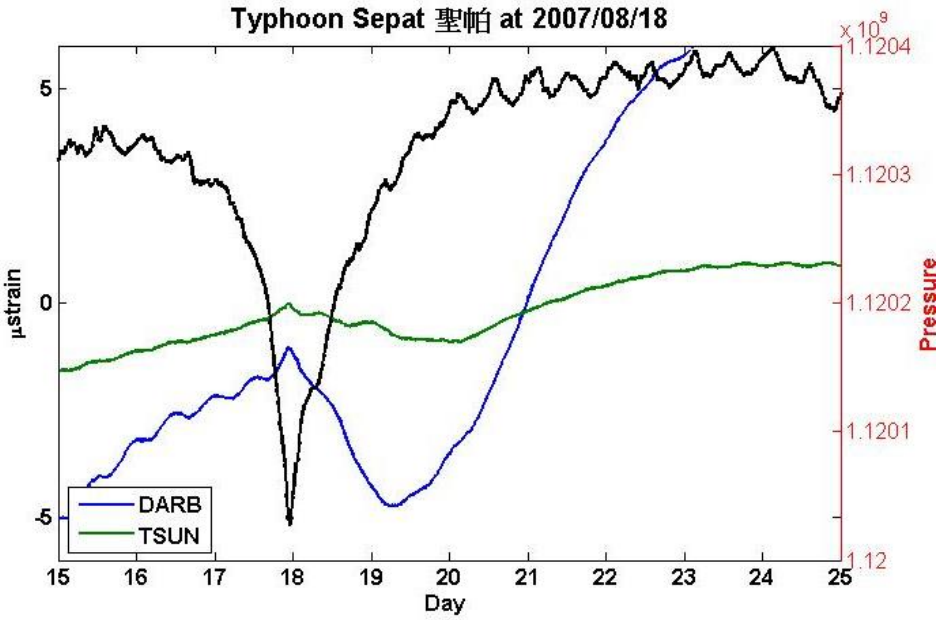


圖 3.42 聖帕颱風期間（2007 年 8 月）氣壓與應變變化。因氣壓變化造成應變量的變化，而颱風過後應變資料的突然上升，應該是受地下水位升高的影響。黑線表示氣壓變化。

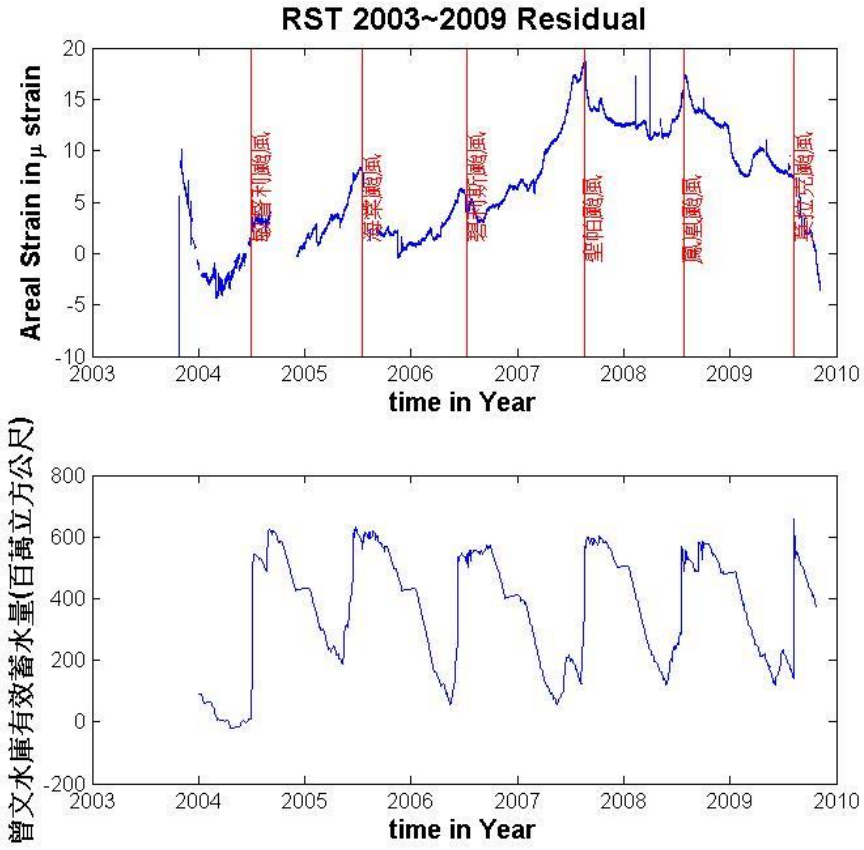


圖 3.43 曾文水庫南站的殘餘應變與第一次颱風時間的關係。在颱風之前應變量緩慢的增加（膨脹），而在颱風過後，就急速的下降（壓縮） 3~5 μstrain，下圖顯示水庫水位的變化。

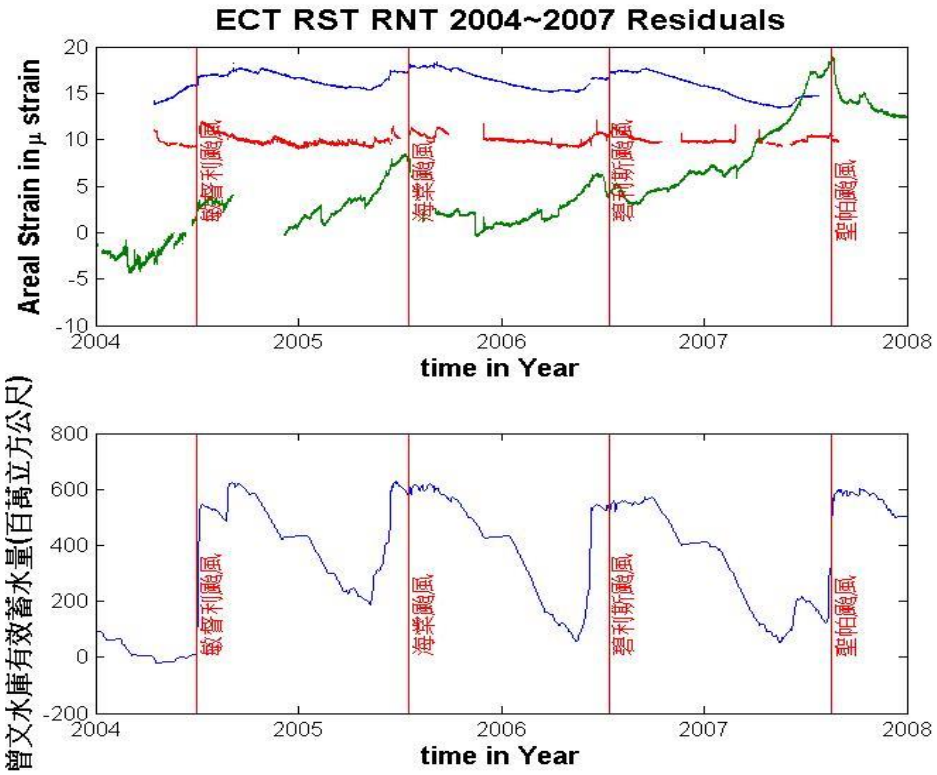


圖 3.44 曾文北、曾文南與甲仙站的殘餘應變與每年颱風時間的關係。上圖中紅色為曾文水庫北站、綠色為曾文水庫南站與藍色為甲仙十八灣站的殘餘應變的變化，下圖顯示曾文水庫水位的變化。

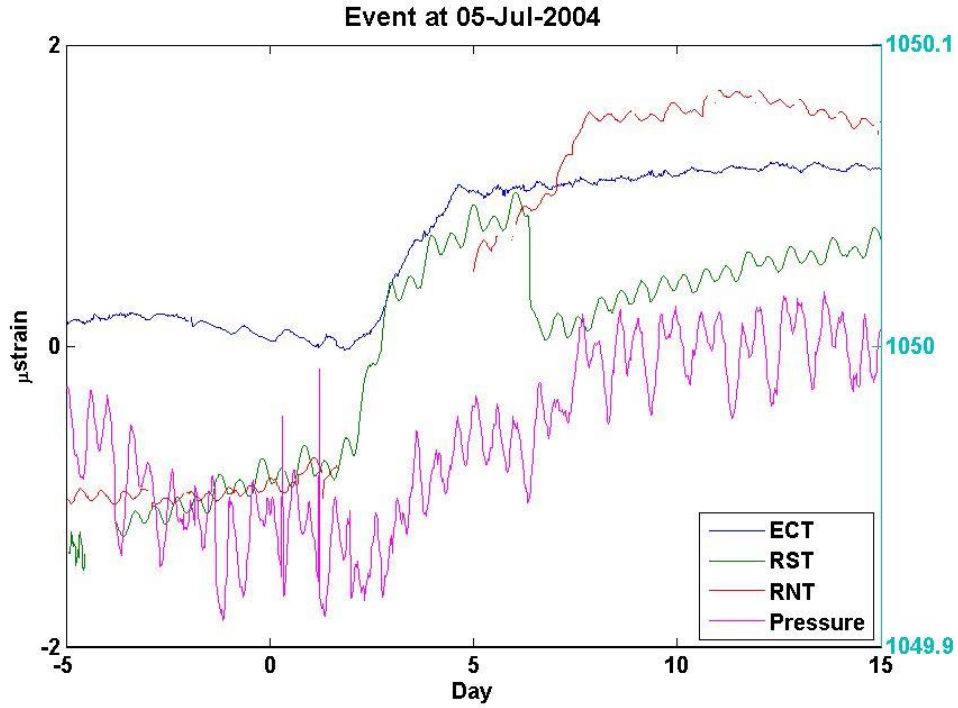


圖 3.45 曾文北站、曾文南站與甲仙站在 2004 年 7 月應變振幅的變化。橫軸 5 表示 2004/7/5。

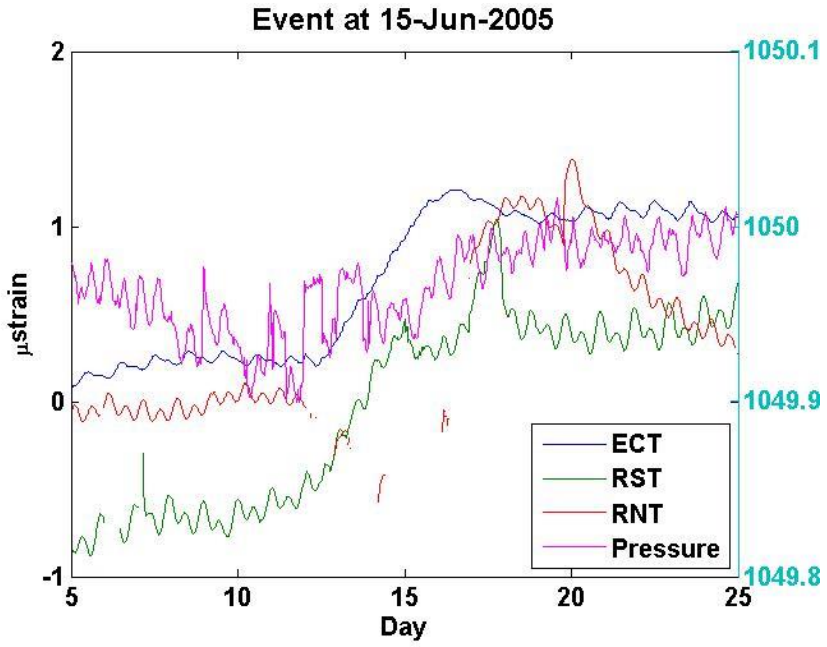


圖 3.46 曾文北站、曾文南站與甲仙站在 2005 年 6 月應變振幅的變化。橫軸 15 表示 2005/6/15。

3-5-3 井下應變儀資料的突然變化

在井下應變儀的資料中，看到許多階梯式的變化，其中很顯著的在儀器剛裝下去時特別的多，或許是儀器本身或井孔在裝下去後，須要一段時間與岩石結合，儀器旁邊的岩石的調整，可能會產生這樣的階梯式變化，或是上升（膨脹），或是降低（壓縮）。當然，有些變化也可能是真正的地殼變動變化，這樣的分辨尚待更多的經驗與研究來釐清。圖 3.47 至圖 3.52 的幾個例子，其中有些發生在地震或颱風之前，有一個例子是在汶川地震表面波到達時發生的，於本報告中下一節詳細討論。

圖 3.47 顯示在 2008 年五月的汶川地震表面波到達時，達邦與中興國小都在應變儀紀錄顯示應變量突然的改變，而且都是約 0.1 μstrain 的膨脹，這是否顯示這表面波的經過會引發地區性斷層的小地震，還是只是儀器的特性所致？而達邦站在地震前也有另一更大的階梯式膨脹變化，在其他測站也有類似的在表面波間的突變，有膨脹也有壓縮的變化，值得再進一步的探討。

圖 3.48 顯示在 2007 年 10 月的柯羅莎（Krosa）颱風期間，應變儀紀錄顯示異常的改變，達邦站在颱風後有明顯的約 4 μstrain 的壓縮，而後再回升，而中興站則相反，先有約 1 μstrain 的膨脹，而後壓縮再回升。這個變化看起來不像是受氣壓變化的影響，因為氣壓的降低比應變的變化約提早了一天（以最低點計），也不像是颱風過後水位提升的影響，因為方向與其他例子不一致，所以很可能是有構造上意義的變化。因此，在圖 3.49 與圖 3.50 個展示達邦站與中興國小站的面應變與剪斜應變量，可看出這兩站的變化非常相似，除了總變化量各為 10 μstrain 與 2 μstrain 是與岩層硬度有關外，其餘在時間與頻率，變化的方向都近似，變化期間約維持了 4 至 5 天，面應變與剪斜應變同時都有異常的變化。應該是同一個變化機制，將會蒐集更多的相關資料，做進一步的研究。

圖 3.51 顯示在 2007 年 2 月 7 日至 12 日期間，達邦站應變儀紀錄顯示有多次的異常改變，而中興國小站則沒有變化。這只是該站較多階梯式應變跳動的例子之一，是否與該儀器剛裝置不久（2006 年 11 月 19 日）有關，在 2008 年以後的資料，這種變化是相對的減少。圖 3.52 顯示在 2007 年 9 月 7 日，中興國小測站應變儀紀錄顯示有約 0.2 μstrain 的階梯式異常改變，而達邦站則沒有變化，尚待蒐集更多資料以做進一步的解釋。

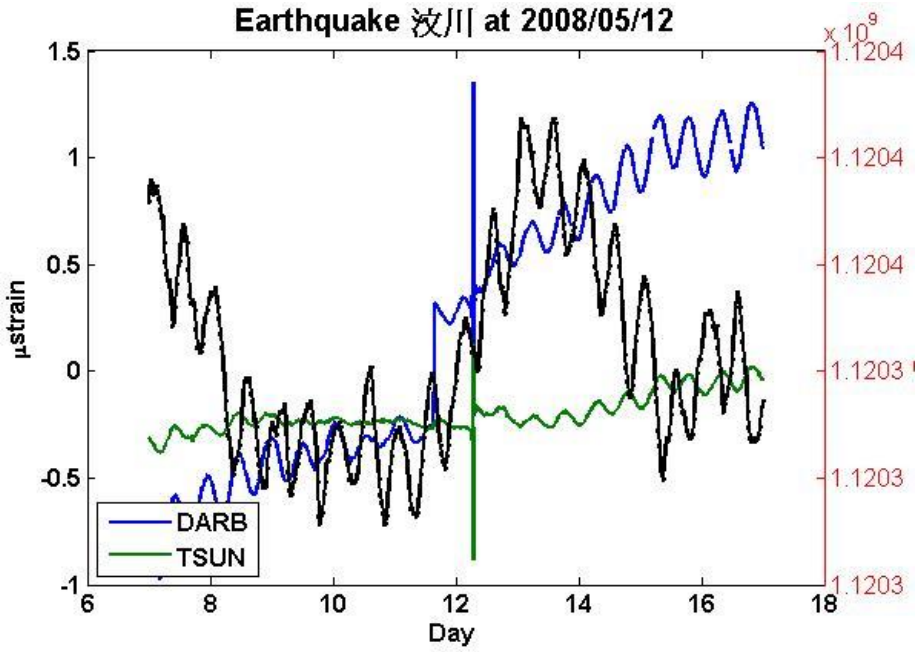


圖 3.47 汶川地震（2008 年 5 月）時應變儀紀錄顯示應變量突然的改變。達邦站在地震前也有另一更大的階梯式膨脹變化；黑線表示氣壓變化。

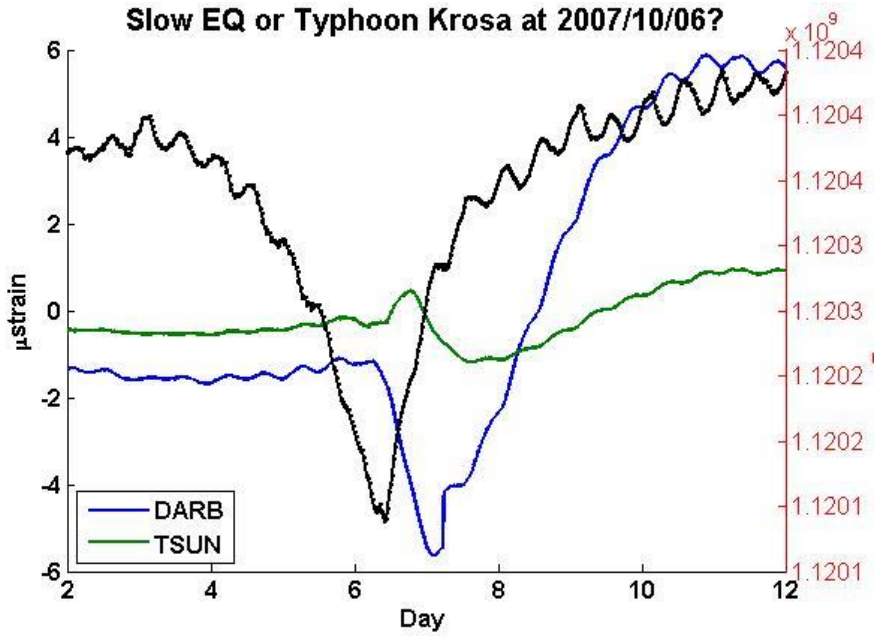


圖 3.48 柯羅莎颱風期間（2007 年 10 月）應變儀紀錄顯示異常的改變。達邦站在颱風後有明顯的壓縮再回升，而中興站則相反；黑線表示氣壓變化。

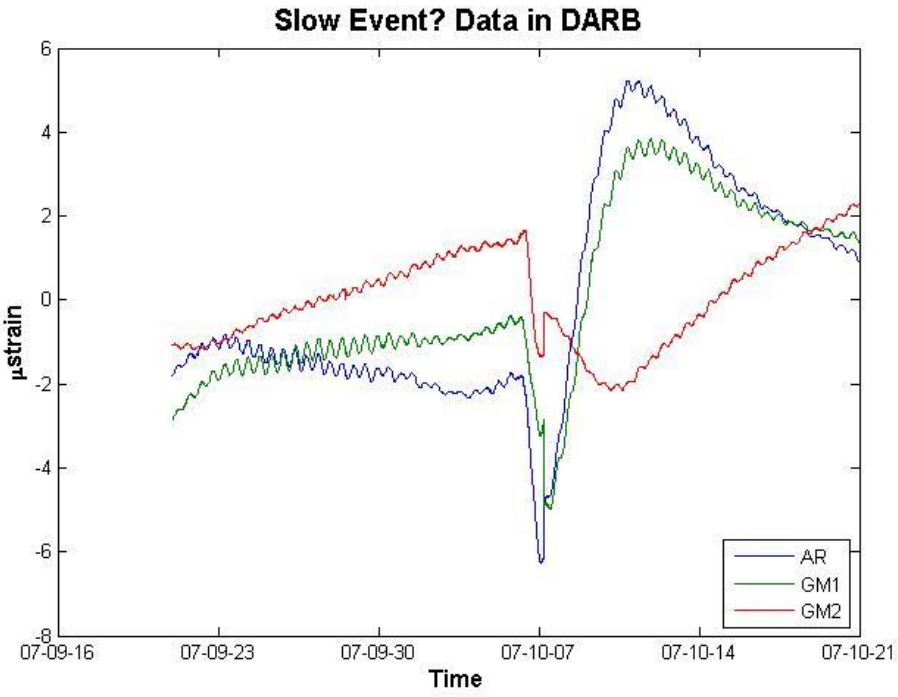


圖 3.49 達邦站在 2007 年 10 月間應變儀紀錄顯示異常的改變。整個變化約四五天，面應變與剪斜應變同時都有異常的變化。

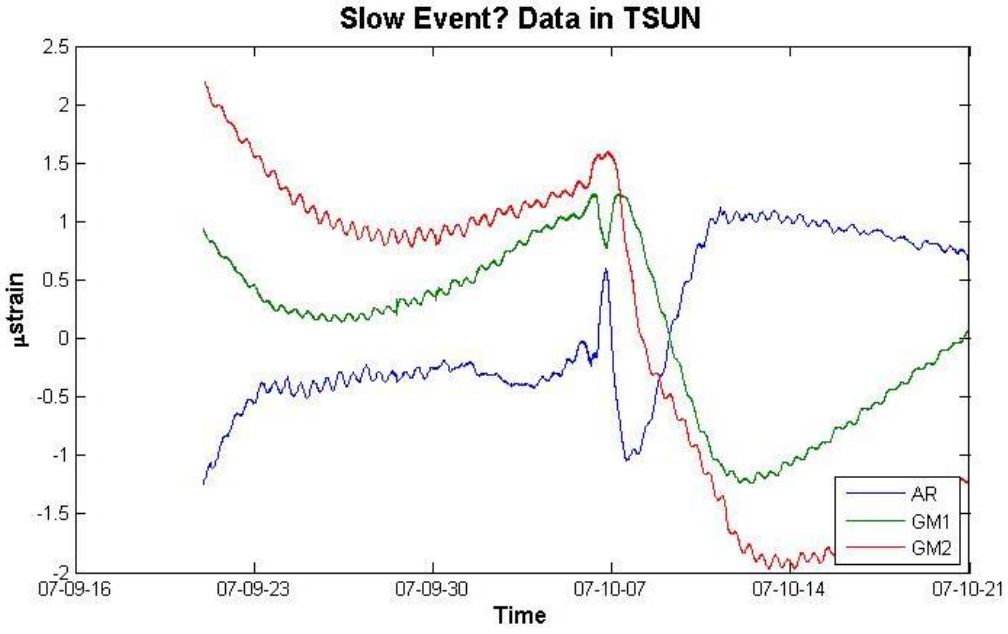


圖 3.50 中興國小站在 2007 年 10 月間應變儀紀錄顯示異常的改變。整個變化約四五天，面應變與剪斜應變同時都有異常的變化。

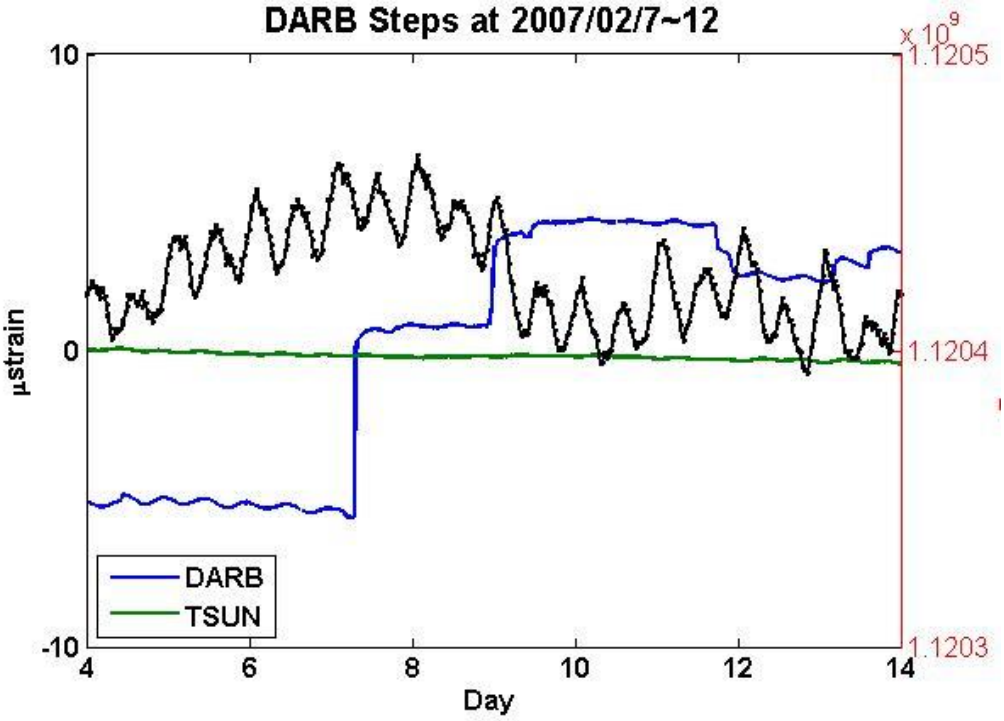


圖 3.51 達邦站在 2007 年 2 月應變儀紀錄顯示異常的改變。達邦站（藍線）應變儀紀錄顯示有多次的異常改變，而中興國小站（綠線）則沒有變化，這是否因儀器剛裝置不久（2006 年 11 月 19 日）。黑線表示氣壓變化。

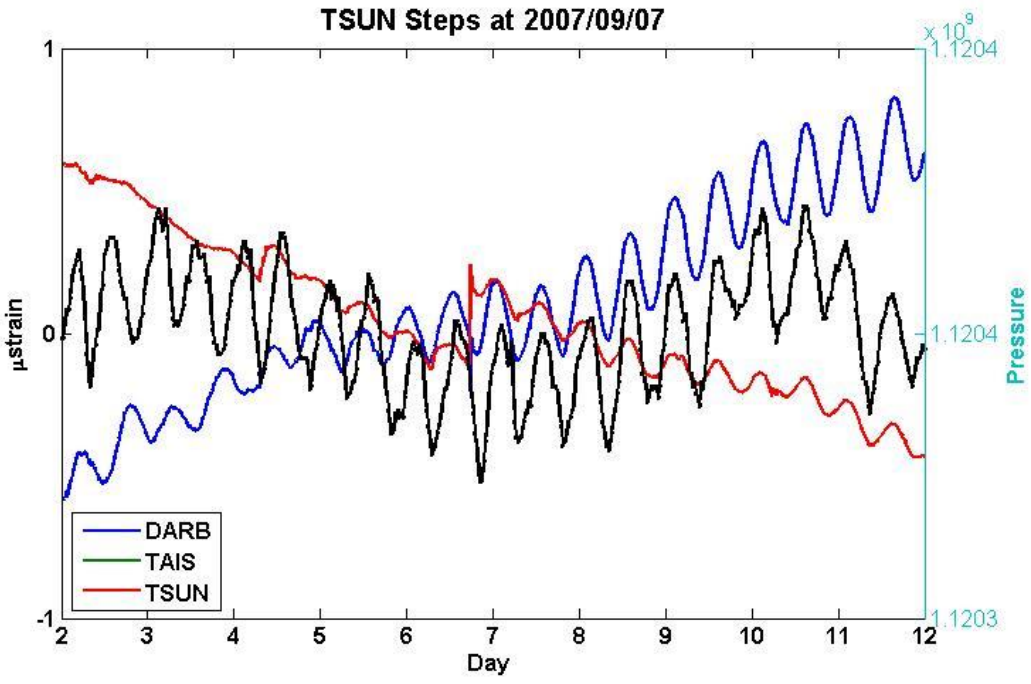


圖 3.52 中興國小測站在 2007 年 9 月應變儀紀錄顯示異常的改變。中興國小（紅線）應變儀紀錄顯示有約 0.2 µstrain 的異常改變，而達邦站（藍線）則沒有變化，尚待蒐集更多資料以做進一步的解釋。黑線表示氣壓變化。

3-6 汶川地震遠端觸發台灣應變儀的永久變形現象

汶川地震發生於 2008 年 5 月 12 日 14 時 28 分 04.1 秒（UTC 時間 5 月 12 日 06 時 28 分 04.1 秒），震央位於中國四川省阿壩藏族羌族自治州汶川縣映秀鎮附近、四川省省會成都市西北偏西方向 79 千米處。根據美國地質調查局的資料，地震規模達到了 7.9，破壞地區超過 10 萬平方公里。地震波及大半個中國及多個亞洲國家和地區。在臺灣也能感受到震感。此次地震造成極大的傷亡，據官方統計，死亡人數達 69,227 人，是從唐山大地震後傷亡最慘重的一次。地震造成的直接經濟損失達人民幣 8451 億元。汶川地震發震的位置位於西藏高原與四川盆地交界處的龍門山斷層帶，龍門山斷層產生了近 9 米的破裂，並在地表造成了 5-6 公尺高的變形（圖 3.53）。

汶川地震震央距離台灣約 1905 公里，在台灣的井下應變儀觀測站也觀察到明顯的影響，兩者相距 18° 但仍屬於同一時區（GMT+8），以下為免除時區上的轉換，所有討論中所提及的時間皆轉換為 UTC(Coordinated Universal Time)。汶川地震發生於 2008 年 5 月 12 日 6:28:04.1（UTC），當地時間為 12:28:04.1，從台灣的井下應變儀觀測資料中發現同震震波約在 4 分鐘後到達(06:32)，並造成面應變數個 μstrain 至十數個 μstrain 的震盪，時間持續數十分鐘。從兩地相距的距離與初達波抵達的時間來計算，初達的 P 波速度約為 7.978 km/s，S 波速度在約 189 秒後到達，並造成達十數 μstrain 的震盪，速度約為 4.432 km/s。

我們將各頻道的線應變轉換為面應變，結果如圖 3.54 中之紅線。為了清楚表現瞬時變形的大小，我們利用濾波工具以低通（lowpass）方式將 1/120 Hz 以上的頻率濾除，保留以下頻率，並將兩者畫在同一圖上以藍線表示。從圖 3.54 上可見，除了震波通過測站時所造成的震盪外，各個觀測站皆可觀察到大小不一的永久變形產生，從觀測資料中，在設定儀器處於一良好藕合的狀況下，汶川地震的震波在台灣南部 TSUN 觀測面應變造成上下約 2.5 μstrain 的震盪，並在 S 表面波到達後造成約 0.1 μstrain 的伸張量；TAIS 則震盪達 4.2 μstrain，震波亦造成約 0.01 μstrain 的伸張，但隨即就回復到零；同樣在台灣南部的 DARB 資料中，則觀察到達 11.7 μstrain 的震盪，並造成有 0.05 μstrain 的伸張應變量。由上述觀測中可見大的震波震盪未必會造成較大的永久變形。接著往北走來看看台灣北部的觀測資料，BMMT 觀測資料中，震盪約 6.5 μstrain，但卻與之前其他各站不同的，地震波在此站造成了約 0.2 μstrain 的壓縮應變，同樣的現象在 PFMT 也被觀察到，PFMT 震盪僅有 1.3 μstrain 的上下震盪，地震震波亦造成了約 0.05 μstrain 的壓縮應變，結果如表 3.5 所示。

3-6-1 地下水變化情形

汶川地震造成了地調所設置於台灣西部地區的井下應變儀產生了大小不等的變化，在與井下應變儀共站設置的水壓計也有相對應的變化情形，目前地下水壓計共設置 9 站，如表 3.6 所示，除第一年度（2003）設置的 RST、RNT 與 ECT 外，皆有設置高解析的水壓計，用以了解地下水壓對於應變觀測資料的影響。地下水壓數據取樣率目前為 60 秒一次，在地震解析上較不理想，但從觀測數據中顯示，各地的地下水壓也可發現明顯受到了地震的影響，進而

產生了水壓升降的情形。從圖 3.55 中可發現，地震波對地下水壓造成激烈的震盪現象，時間長達 1 個小時以上，部分井孔如 BMMT、SANS 與 LMMT 三站，地下水壓力在震盪後即回覆原有趨勢，然而其他如 CINT、DARB、TAIS、TSUN 與 JING 各站則產生 1-10 cm 左右的升降，其中 DARB 與 TAIS 更可發現地下水壓持續上升的情形。

由上述觀測資料可發現汶川地震觸發台灣西部地區動態變形的現象，這可從應變儀的觀測資料中得知。然而造成這種變形行為的原因目前尚未清楚，比照應變儀觀測資料，發現地下水壓的變化與面應變的變化並不一致，可推論地下水壓的變化並非直接影響應變變化的主要因素。Peng and Chao（2008）發現遠處地震的表面波常會觸發台灣中央山脈下的非火山性振動（Non-volcanic tremor, NVT）的發生，應變儀觀測到的變形現象也主要發生於表面波到達之後，究竟此現象是否也反應中央山脈下的底部滑脫面（detachment fault）受震波觸發產生的振動，還是因為其他的原因，仍待進一步的資料的佐證。

表 3.5 汶川地震所引發台灣西部地區井下應變儀的變化

Site	Transient variation (μstrain)	Oscillation range (μstrain)	Installed since	Installed depth (m)
DARB	+0.05	11.7	2006/11/19	198.9
CINT	+0.2	15.8	2006/11/15	198.1
JING	+0.05	5.9	2007/11/7	191
TSUN	+0.1	2.5	2006/3/1	195.6
TAIS	+0.01	4.2	2006/3/4	199.7
RST	-0.01	7.2	2003/10/23	224.2
SANS	-4.0	42.5	2007/11/2	200
BMMT	-0.2	6.5	2005/5/18	200
PFMT	-0.05	1.3	2005/6/4	165

表 3.6 汶川地震引發之地下水壓與面應變變化

Site	installed depth (m)	head before(m)	head after (m)	induced head (m)	induced strain (μstrain)
JING	59.6	59.299	59.277	-0.022	+0.05
SANS	68.3	68.054	68.051	-0.003	-4
BMMT	155	145.65	145.63	-0.02	-0.2
LMMT	135	129.52	129.51	-0.01	-
CINT	75	62.153	62.245	0.092	+0.2
TAIS	180	41.721	41.765	0.044	+0.01
TSUN	159.3	78.219	78.199	-0.02	+0.1
DARB	150	58.580	58.586	0.06	+0.05

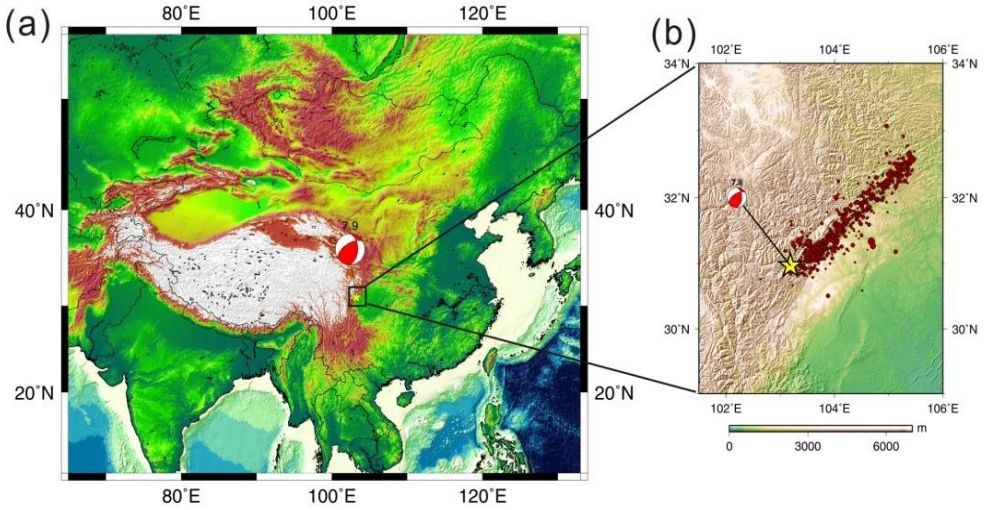


圖 3.53 中國四川之汶川地震位置圖。西藏高原與四川盆地間的龍門山發生約 9 公尺的滑動，在地表造成了 6 公尺高的地表變形，地震規模 7.9，震央位置位於成都西北方汶川縣映秀鎮附近，距離台灣約有 1905 公里遠。

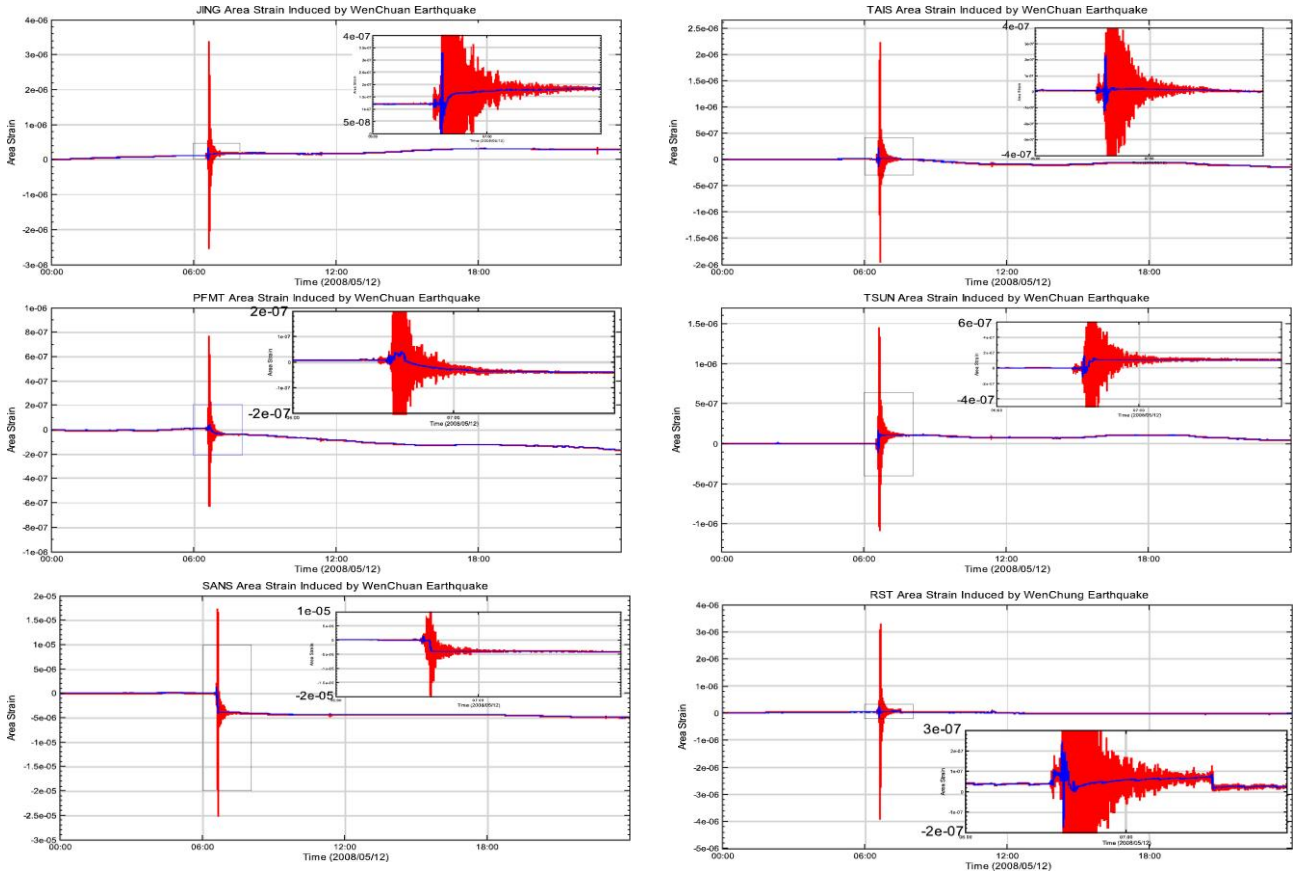


圖 3.54 汶川地震觸發台灣西部地區的應變變化情形。強烈地震波造成各站觀察到從- 4 到 0.2 μstrain 大小不一的變化。圖中紅色部分為原始觀測資料，因主要著眼在地震造成的變形現象，故並未進行氣壓因子的濾除。藍色為透過低通濾波方式將 1/120 Hz 以上資料濾除後的結果，使得各站資料的暫態變化更為明顯。

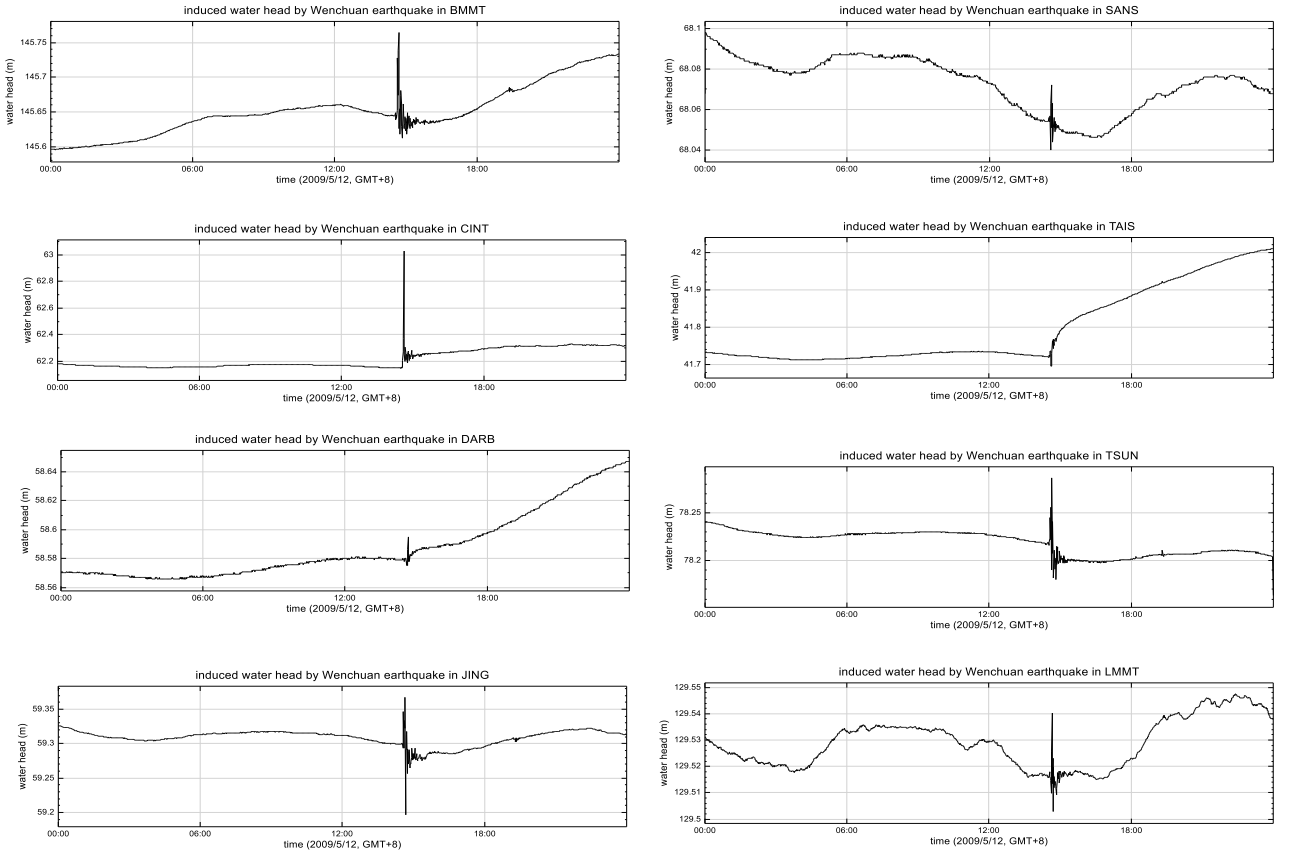


圖 3.55 汶川地震造成台灣地區地下水壓觀測站的水壓變化。

3-7 井下應變儀、地震儀工作展望

深低頻振動（deep low-frequency tremors, 後簡稱為 LFT）為類似雜訊的特殊地震訊號，其特徵為(1) 主要頻率為 1-8 Hz; (2)無明顯的 P 波、S 波到時; (3)長為數分鐘至數天的能量持續時間; (4)在相距數十公里的不同測站被發現具有一致的到達時間（圖 3.56）。火山地區常有相似的低頻訊號特徵，以往被理解與岩漿體的移動（magma movement）有關，在火山爆發前的此低頻訊號的異常活動被視作是爆發前兆。在非火山區域 LFT 近年來屢在隱沒帶（Obara, 2002; Roger and Dragert, 2003; Kao et al., 2005）及地殼尺度的斷層系統（Nadeau and Dolenc, 2005; Gomberg et al., 2008）被發現，其釋放的地震矩能量可對等於規模六的地震事件，因此被視作是地震潛能計算中不可忽略的重點研究。唯地表測站常受限於背景雜訊覆蓋了有效的低頻振動訊號，本計畫的井下應變儀、地震儀提供偵測 LFT、重新探討無震滑移潛勢的最佳契機。低頻脈動的週期行為在許多地區已證明和 GPS 記錄到的無震滑移事件（slow slip events, 簡稱 SSE）相關（Dragert et al, 2001; Hirose and Obara, 2005），更說明此類研究可與地表變形的監測相輔相成、以達到最佳科學及應用價值。

井下測站對區域變形具備良好的連續紀錄能力，利用中央地調所高精度井下地震儀監測 LFT、並估計對應的地震矩能量、以利地震潛勢分析，是本計畫下一階段目標。其具體方式為:(1)將水平方向地震圖分別進行 1~10 Hz、0.01~1 Hz、1~20 Hz 的帶通濾波（將由頻譜分析調整頻率範圍），將高頻與低頻成分對照以顯現低頻振動的持續時間; (2)將 1~10 Hz 的包絡線依測站展開，目視其時間上的一致性; (3)依相近測站的紀錄包絡線之相關性判斷 LFT 的存在與否。當超過 3 個測站具有長達 3 分鐘以上的低頻訊號時，即視為單獨的 LFT 事件。

以 LFT 的頻率特性出發，在不同構造區域觀測 LFT 特徵頻率範圍、地震矩能量如表 3.7，此統整資料將有助於未來 LFT 識別和自動檢測之規劃。本計畫擬在明年度詳細檢視井下地震儀的資料以評估 LFT 的觀測條件。

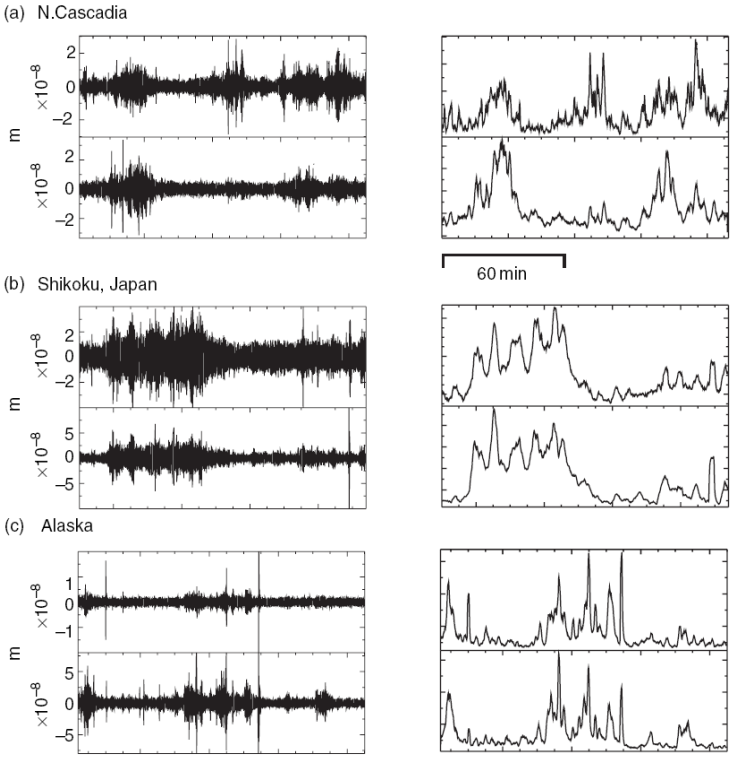


圖3.56 兩不同測站的LFT地震圖（左圖）及包絡線（右圖）。(a)北卡斯卡迪亞隱沒帶(b) 日本隱沒帶 (c) 阿拉斯加隱沒帶的特徵。地震記錄長度為8400秒，帶通濾波至2~4 Hz。包絡線強調此頻率範圍的能量持續時間超過數十分鐘，並在不同的測站有一致的到達時間和特徵（Schwartz and Rokosky, 2007）。

表 3.7 不同構造區域之觀測 LFT 特徵頻率範圍及地震矩能量

	對應的 SSE 滑移量 (cm) / 地震矩規模 (Mw)	地區名稱	LFT 頻率範圍	地震網	資料來源
加拿大卡斯卡迪亞隱沒帶	2~8 cm / Mw 6.5~6.9	Southern Cascadia	1~5 Hz	NCSN	Szeliga et al., 2004
		Northern Cascadia	1~5 Hz	CNSN, POLARIS, Temporal array	Kao et al., 2005
		Northern Cascadia	2~6 Hz	3 seismic arrays	La Rocca et al., 2009
		Northern Cascadia	2~6 Hz	NCSN, PNSN, PCC	McCausland et al., 2005
日本隱沒帶		Bungo Channel - Tokai	1~10 Hz	Hi-net	Obara, 2002
	5~20 cm / Mw 6.6~7.0	Western Shikoku	1~10 Hz	Hi-net	Obara and Hirose, 2006
	< 4 cm / Mw <6.2	Bungo Channel	1.5~10 Hz	Hi-net	Hirose and Obara, 2006
		Bungo Channel to eastern Shikoku	0.5~5 Hz	Hi-net	Obara and Hirose, 2006
		Nankai Through	2~8 Hz	Hi-net, F-net	Ide et al., 2007
		Shikoku	1~5 Hz	Hi-net	Shelly et al., 2007
	~10 cm / Mw > 7.0	Tokai	2~10 Hz		Watanabe et al., 2007
美國聖安地列斯斷層	Mw < 1.5	San Andreas fault	3~8 Hz	HRSN, SCSN	Nadeau and Dolenc, 2005

註：觀測網縮寫名稱解釋如下：

1. NCSN: 北加州地震網(Northern California Seismic Network)
2. CNSN: 加拿大國家地震網(Canadian National Seismograph Network)
3. POLARIS: 地震與岩石圈研究觀測網 (Portable Observatories for Lithospheric Analysis and Research Investigating Seismicity)
4. Temporal Array: 臨時地震儀陣列
5. 3 seismic arrays: 三分量短週期地震儀陣列 (站距 150~300 m)
6. PNSN: 太平洋西北地震網(Pacific Northwest Seismic Network)
7. PGC: 太平洋地球科學中心(Pacific Geoscience Center)
8. Hi-net: 高敏感度地震網(High Sensitivity Seismograph Network)
9. F-net: 三分像寬頻速度儀地震網(Three-component Broadband Velocity Seismometer Network)
10. HRSN: 高分辨率地震網(High Resolution Seismic Network)
11. SCSN: 南加州地震網(Southern California Seismic Network)

四、斷層活動潛勢分析

4-1 分析理論

4-1-1 板塊運動之能量分配

依彈性回跳理論指出，板塊之間的相對運動，使得應變能在局部斷層系統中累積，如圖 4.1 所示。累積的應變能可分為板塊地殼聚合變形（7%）和剪力應變（93%），其中以剪力應變形式的應變能累積為主。能量釋放比例可藉由各種變形測量結果獲得，例如：活動斷層長期的滑移率，藉由野外河階定年、槽溝開挖等方式獲得；短期的斷層活動，藉由大地測量的方式，如 GPS 量測斷層上下盤之地表變形、水準測量斷層帶變形等。從全台灣的 GPS 水平速度場推估，位於板塊邊界之花東縱谷以及台灣西南部，為主要釋放板塊能量之區域，其餘的則分布於台灣造山帶中，如中央山脈或是東部海岸山脈（圖 4.2）。

活動斷層可藉由潛移及地震滑移釋放其應變能（圖 4.1），在地震滑移中 F_{char}（特徵地震）+ F_{afetr}（餘震）+ F_{small}（微震）= 1，表示以地震滑移的方式釋放之能量可分配到三種地震型態，以舊金山灣地區之地震目錄為例，推估 F_{small}=0.06，F_{afetr} 則忽略不計，因此 F_{char} = 1 - 0.06 - 0 = 0.94。

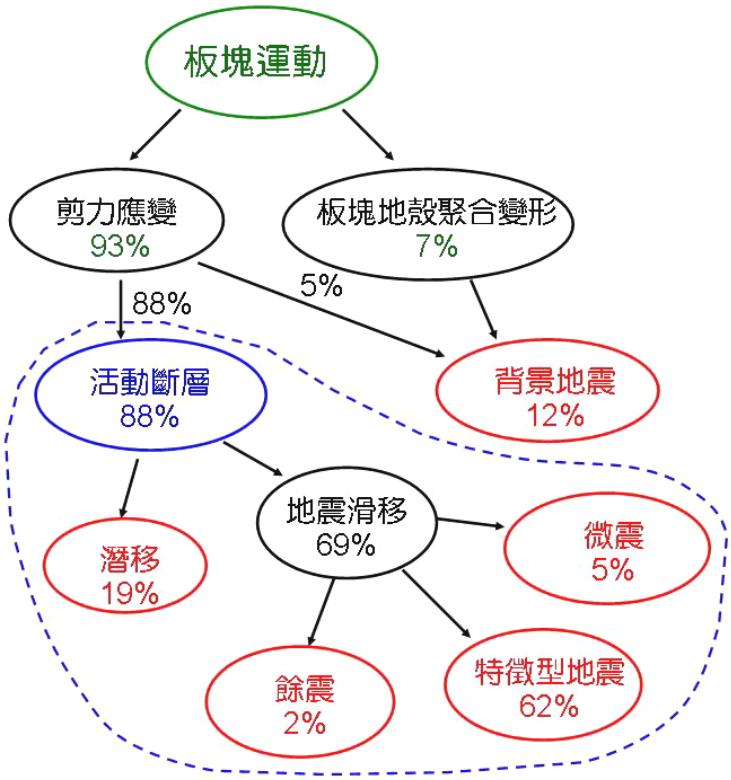


圖 4.1 板塊運動能量分配示意圖（WG02，2003）。

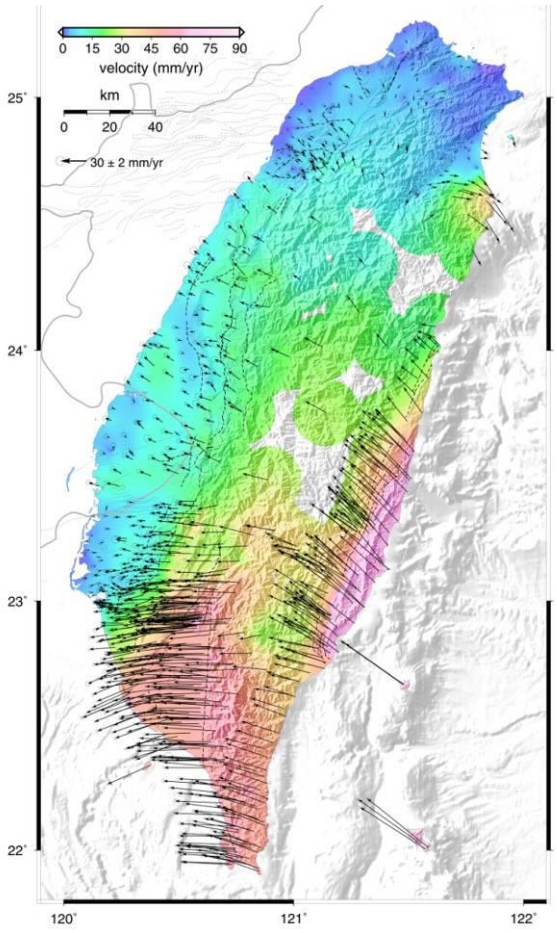


圖 4.2 台灣地區 GPS 測站相對於澎湖白沙站（S01R）的水平速度場（饒瑞鈞等，2008）。

4-1-2 活動斷層參數與潛勢分析之關係

1. 活動斷層幾何特性和地震矩規模

在活動斷層潛勢分析中常利用斷層幾何特性，間接採用各種斷層的地質調查結果，如斷層破裂長度、最大垂直抬升量、最大滑移量等證據，來推估斷層之最大可能地震規模，或彙整各區域震源內所有活動斷層分布與幾何關係，來決定區域震源其最大可能地震規模。蔡主權等人（1987）曾統計台灣地區的地震與斷層長度關係得到以下的結果：

$$L = \exp\ (1.006\ M_L\ -\ 3.232) \qquad \text{(式 4-1)}$$

其中 M_L 為地震規模，L 為斷層破裂長度(km) 統計之標準差 sln(L) = 0.422，其分布如圖 4.3 所示。

Wells and Coppersmith（1994）彙整並建置包含 244 個地震的資料庫，利用此資料庫中的資料，可以回歸分析出各型態的斷層性質（如走向、正、逆斷層）對地震規模、斷層長、斷層寬、斷層面積、地表位移之間的關係式（表 4.1）。吳相儀（2000）研究台灣地區 93 年至今，規模大於 5、震央位於島內、震源深度在 20 公里以上的 6 個地震及 99 年的集集地震、嘉義地震及嘉義地震之最大餘震（規模 6.0），求得之地震矩規模與震源參數斷層長（L）、斷層面積（A）、斷層平均滑移距（D）間的關係為：

$$Mw = (1.32\pm0.122)\ \log\ (L)+(4.817\pm0.132) \quad （式 4-2）$$

$$Mw = (0.82\pm0.071)\ \log\ (A)+(4.61\pm0.141) \quad （式 4-3）$$

$$Mw = (1.83\pm0.39)\ \log\ (D)+(6.85\pm0.\ 23) \quad （式 4-4）$$

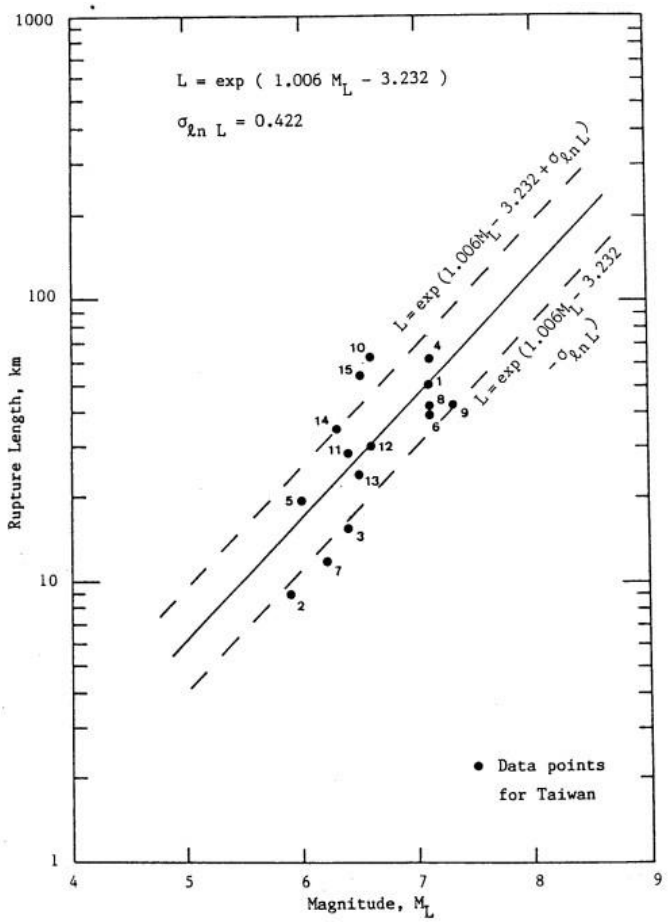


圖 4.3 台灣地區的地震規模與斷層長度關係（蔡主權等人，1987）。

表 4.1 斷層參數及地震矩規模關係式（Wells and Coppersmith, 1994）

斷層類型	參數	次數	經驗公式	$S_{(Mw)}$	經驗公式	$S_{log(L,A, or D)}$
平移斷層	破裂長度 L（km）	43	M_w =5.16+1.l2 log L	0.28	log L=0.74 M_w -3.55	0.23
逆斷層		19	M_w=5.00+1.22 log L	0.28	log L = 0.63 M_w -2.86	0.20
正斷層		15	M_w =4.86+1.32 log L	0.34	log L = 0.50 M_w -2.01	0.21
全部		77	M_w = 5.08+1.l6 log L	0.28	log L = 0.69 M_w -3.22	0.22
平移斷層	破裂面積 A（km^2）	83	M_w=3.98+ 1.02 log A	0.23	log A = 0.90 M_w 3.42	0.22
逆斷層		43	M_w =4.33+0.90 log A	0.25	Log A = 0.98 M_w -3.99	0.26
正斷層		22	M_w =3.93+1.02 log A	0.25	Log A = 0.82 M_w -2.87	0.22
全部		148	M_w =4.07+0.98 log A	0.24	Log A = 0.91 M_w -3.49	0.24
平移斷層	地表錯動量 D（m）	43	M_w =6.81+0.78 log D	0.29	Log D= 1.03 M_w -7.03	0.34
逆斷層		21	M_w = 6.52+0.44 log D	0.52	1og D=0.29 M_w - 1.84	0.42
正斷層		16	M_w =6.61+0.71 log D	0.34	Log D = 0.89 M_w -5.90	0.38
全部		80	M_w=6.69+0.74 log D	0.40	Log D = 0.82 M_w -5.46	0.42

2. 活動斷層分段特性

斷層活動往往為分段滑移，而非全段的破裂滑動，因此會造成規模、滑移量不一的地震。每一分段中，會重複的發生大致相同規模的最大地震，稱為特徵地震。分段的依據可根據以下幾點：

(1) 斷層線彎曲處；
(2) 雁形跳階處；
(3) 地形起伏巨變處；
(4) 橫斷構造交會處；
(5) 基岩種類或水文環境巨變處；
(6) 斷層滑移速率改變處；
(7) 最新活動時間不同者；
(8) 地震斷層不相連續者。

以美國為例，圖 4.4 為美國舊金山灣中之斷層分段分布圖，San Andreas Fault 分為 SAN、SAP、SAS 三段；San Gregorio Fault 分為 SGN、SGS 兩段，各分段都有其對應之參數表，如表 4.2 所示。斷層經過分段後，其破裂模式就會有各種排列組合方式，圖 4.5 為針對 Hayward -Rodgers Creek fault 分段，並進行破裂模式排列組合，區分出 4+1 個破裂事件後，由專家評估各事件之可能性，最後分配四個破裂模式之權重並提出斷層之破裂模式。

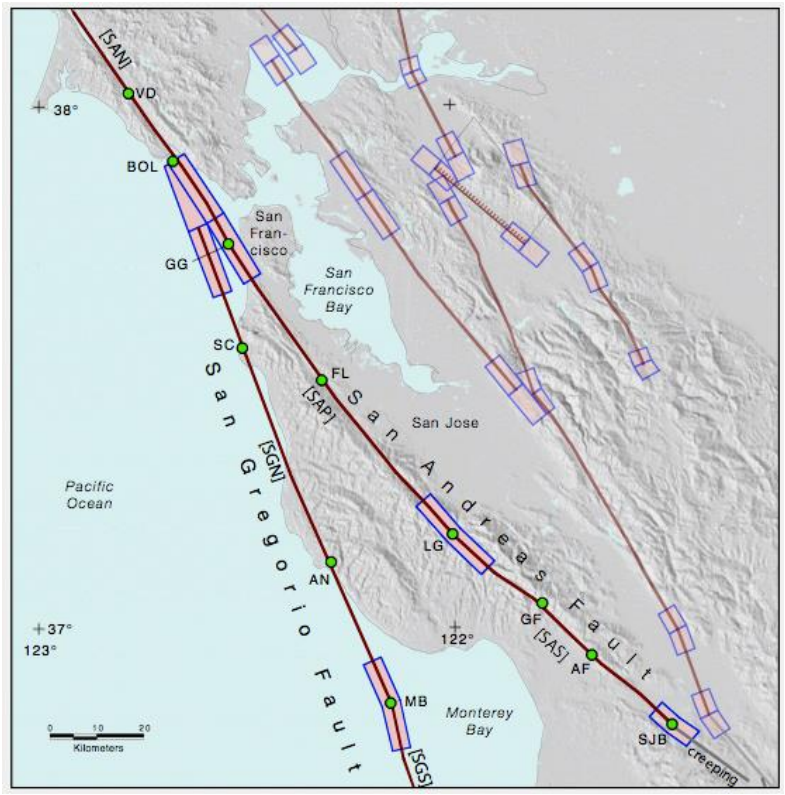


圖 4.4 斷層分段分布圖。San Andreas Fault 之分段：SAN、SAP、SAS； San Gregorio Fault 之分段：SGN、SGS（WG02，2003）。

表 4.2 美國 San Andreas Fault 及 San Gregorio Fault 各分段之參數（WG02，2003）

		Length, km			Width, km		R (seis. scaling factor)		Slip rate, mm/yr	
Fault	Seg.	Preferred	Min	Max	Preferred	90% bounds	Values	Weights*	Preferred	95% bounds
San Andreas	SAS	62	47	77	15	13-17	0.8/0.9/1.0	(a)	17	13-21
	SAP	85	60	110	13	11-15	0.9/1.0	(b)	17	13-21
	SAN	191	171	211	11	9-13	0.9/1.0	(b)	24	21-27
	SAO	135	115	155	11	9-13	0.9/1.0	(b)	24	21-27
San Gregorio	SGS	66	46	86	12	10-14	0.8/0.9/1.0	(a)	3	1-5
	SGN	110	85	134	13	11-15	0.8/0.9/1.0	(a)	7	4-10

* Weights: (a) Mean and 90% bounds: 0.185/0.63/0.185. (b) Only lower 90% bound set: 0.185/0.815.
(c) Weights determined by WG02: 0.4/0.5/0.1 (see text). (d) Equal weighting of 1/3 on each branch.

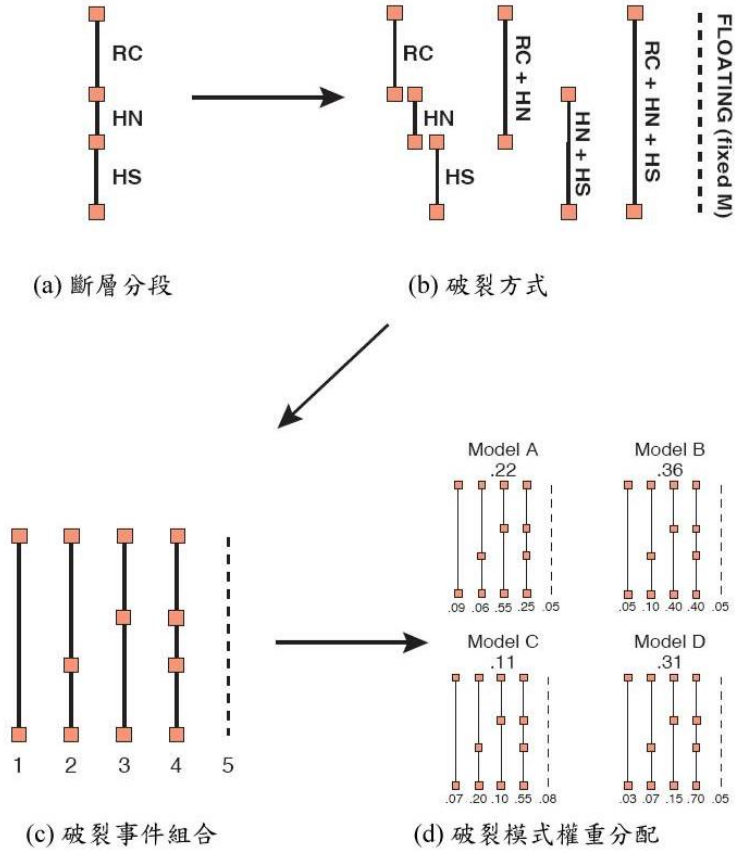


圖 4.5 由斷層分區建立斷層破裂模式。(a)圖中橘色方框為分區之邊界，以 Hayward -Rodgers Creek fault 為例，先劃分三個斷層分區；(b) 分區中可產生六種破裂組合（加上不明破裂方式 floating earthquake)；(c) 建立破裂事件；(d) 將各破裂模式及事件進行權重分配（摘錄自 WG02，2003)。

3. 斷層滑移速率：

活動斷層研究成果可用來建立地震規模與發震率（earthquake recurrence）之關係，其基本假設是斷層滑移速率（slip-rate）可反映斷層地震能量（strain energy）的累積與釋放速率。所謂斷層滑移速率是指單位時間內斷層滑移（錯動）的距離，由於斷層通常是間歇性錯移而零星連續滑動，所以一般指的是斷層的平均滑移速率。

(1) 斷層滑移速率與地震矩：

就單一地震而言，依 Kanamori（1977）對地震矩（seismic moment, M_0）之定義，地震釋放的能量可用斷層破裂面積(A_f)、平均滑移距離(D)與剪力模數（shear modulus, μ）來表示，即

$$M_0 = \mu A_f D \qquad \text{（式 4-5）}$$

若考慮多次地震活動與斷層能量釋放，則斷層滑移速率(slip rate, S)及地震矩率（seismic moment rate, $\dot{M}_0$）之關係可表示為（Anderson, 1979; Anderson and Luco, 1983）：

$$\dot{M}_0 = \mu A_f S \qquad \text{（式 4-6）}$$

上式中，斷層滑移速率(S)單位：mm/yr；地震矩率($\dot{M}_0$)單位：dyne-cm/yr，亦代表斷層能量釋放的速率。目前國內外分析多採用地震矩規模（moment magnitude, M_W），因為其可直接以具有地震能量觀念之地震矩(M_0)表示之（Kanamori, 1977; Hanks and Kanamori, 1979）。地震矩規模（M_W）與地震矩（M_0）如下所示：

$$\log M_0 = cm + d \qquad \text{（式 4-7）}$$

上式中，m 即為地震矩規模（M_W），而係數 c=1.5、d=16.1。

上述地震矩（M_0）亦可由地震波逆推出斷層面上的滑移(錯動)量分布（slip distribution）來獲得（Lee and Ma, 2000）。再者，透過斷層槽溝開挖之古地震研究獲得斷層滑移(錯動)量(D)，並且由構造解釋或是微震分布來推估活動斷層破裂面積(A_f)，即可間接推估 M_W 大小。

(2) 地震再現週期：

平均滑移速率是評估斷層活動性的重要指標，滑移速度越快則斷層活動程度也越高（Bollina, 1970; Matsuda, 1975; Slemmons, 1982）。對於工程評估上，斷層的滑移速率測定極為重要，若知道斷層的滑移速率及一次地震之錯移量，可推估地震重複間隔（李錫堤，1993），即為地震重複之再現週期。一般可根據 Wallace（1970）的公式來推求之：

$$RI = D/(S-C) \qquad \text{（式 4-8）}$$

式中，RI 是平均重複間隔；D 是單一且典型的斷層活動滑移（錯動）；S 是與大規模歷史地震活動有關的斷層滑移速率；C 是潛移速率（creep slip rate）。許多斷層常無潛移實際資料，一般假設 C 為零，所以地震重複間隔可簡示為 RI = D/S，亦即滑移速率 S =D/ RI。

斷層槽溝探挖的古地震研究、地形學研究以及第四紀沈積物定年的新地體構造（neotectonics）研究都有助於長時期、地震重複間隔及斷層滑移速率推估。測定滑移速率通常可藉由地形、地物及地貌標誌的錯移量來計算。例如：被錯移的古地形面、河系、山脊線、河階崖、被抬升的海階、海蝕洞及均夷面等，若能加上定年資料，則可計算出滑移速率。

在野外若能發現斷層擦痕（slickensides）及傾角，則能明確指出滑移速率的淨值與滑移方向。現今亦可利用精密的 GPS 測量、精密大地三角測量或三邊測量、水準測

量，經過數年的重複觀測後計算出斷層附近的滑移速率，但是此方式求得的滑移速率時間較短，亦可能僅表現出斷層的潛移量，因此使用時須特別注意（李錫堤，1993）。以實際研究調查成果為例，圖 4.6 說明 Schwartz 和 Coppersmith（1984）調查 Wasatch 斷層地質時，在 Utah 州 Nephi 市區域發現 North Creek 古沖積扇被斷層錯移的露頭，測得三次地震共垂直錯移 7 m，再根據碳 14 定年資料研判，古沖積表層土壤面約距今 4,580 年，藉由式(2.15)初步求得斷層的垂直滑移速率約為 1.5 mm/yr 左右，以及斷層活動的再現週期在 1,500 年左右。

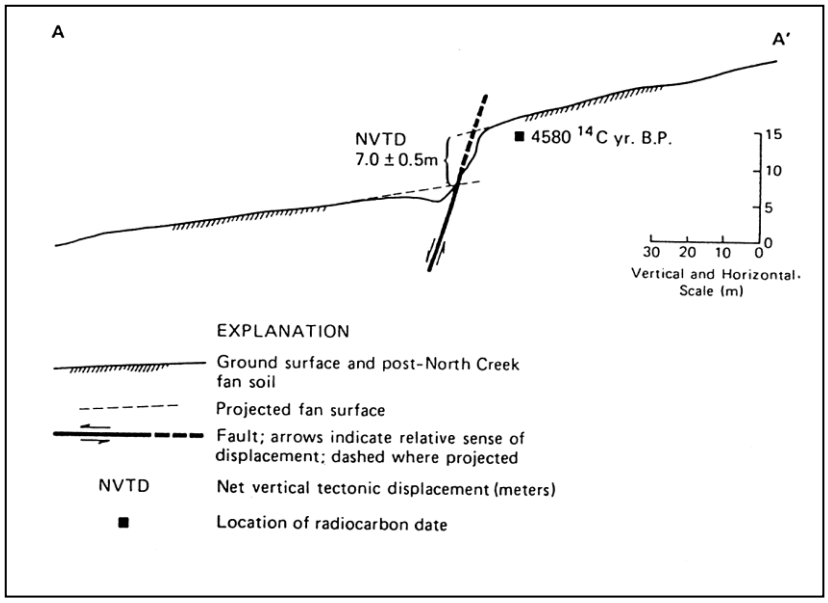


圖 4.6 活動斷層錯移之露頭可用來評估斷層之滑移速率（Schwartz and Coppersmith, 1984）。

4. 斷層參數之研究

斷層相關參數研究，可參考表 4.3 提出之研究方法進行研究，各活動斷層之參數研究成果可做為後續活動斷層研究之參考。

表 4.3 活動斷層推估分析採用的調查方法與分析模式

斷層參數		調查方法與分析模式
斷層位置與特性	斷層位置與長度	● 遙測地形判釋，搭配地表地質尋找斷層地形特徵。 ● 地表地質調查與河階地形研究。 ● 地物探勘瞭解地下地層錯動情形。 ● 既有鑽探瞭解跨斷層之地層差異。 ● 根據既有地質鑽探建構地質剖面。
	斷層分段與分支	● 遙測地形判釋，各分段地形抬升量有所差異。 ● 地表地質調查，以位態改變分辨之。 ● 跨斷層河階地形，各分段河階發育不一致。 ● 主斷層錯動量與地震規模皆大，分支斷層則次之。 ● 主斷層與分支斷層可以透過運動學分析反演來綜合解釋。
	斷層位態與 3D 幾何形貌	● 淺層與深層鑽探，斷層走向、傾角、震源機制提供建構三維構造模型之控制資訊。 ● 淺部與深部震測，提供建構三維構造模型之控制資訊。 ● 軟體模擬運動學分析與模擬地下三維構造。
	斷層機制	● 地表斷層露頭與斷層擦痕。 ● 斷層鄰近地震機制。 ● 以 GPS 速度場推估地殼應變量探討機制。
	最大可能地震規模	● 依據斷層破裂之尺度，由經驗公式推估最大可能地震規模。
斷層活動性與變形	活動歷程	● 歷史文獻資料有關地震記載。 ● 古地震研究（既有槽溝開挖、跨斷層河階定年）
	平均滑移速率	● 短期斷層滑移速率，以 GPS 速度場與精密水準資料推估。 ● 長期斷層滑移速率由槽溝開挖成果提供。
	活動間隔	● 利用長期斷層滑移速率資訊，採用特徵地震模式及適當的統計模式進行推估。
	地表變形量	● 根據斷層機制、GPS 與精密水準資料、透過運動學分析推測地表可能之變形量與變形模式。

4-1-3 活動斷層特徵地震模式

地震規模與發生率間的關係式，一般可以分為兩類：(1)截切指數模式（truncated exponential model）或稱指數規模分布模式（exponential magnitude distribution），以及(2)特徵地震模式（characteristic earthquake model）（Youngs and Coppersmith, 1985）。

截切指數模式一般適用於無確定活動斷層的區域震源，其地震規模與累積發生次數分布較符合 Gutenberg-Richter 函數（Gutenberg and Richter, 1944）。針對已知斷層而言，將單一斷層系統分段較符合特徵地震模式（Youngs and Coppersmith, 1985; Wesnousky, 1994），但若有數

條活動斷層系統的區域，則其整體之規模分布會呈現截切指數模式。另外，已經有多位國外學者建議，已知斷層震源或隱沒帶板塊介面型震源之地震規模與發生率間，應以特徵地震模式來描述較為合理（Schwartz and Coppersmith, 1984; Davison and Scholz, 1985; Youngs and Coppersmith, 1985; Wesnousky, 1994）。上述兩類模式均可利用斷層滑移速率或地震矩率、b 值（Gutenberg and Richter, 1944）及最大可能地震建立之（Youngs and Coppersmith, 1985）。

特定斷層震源如果採用指數分布模式，以中、小規模地震的發生率趨勢來外插推估大規模地震發生次數時，常會有低估的情形，而且活斷層通常會以適當的間隔重複發生特定規模大小的地震。為避免低估大規模地震的發生率，許多學者建議採用特徵地震模式來描述斷層的地震發生率（Schwartz and Coppersmith, 1984; Coppersmith, 1991; Davison and Scholz, 1985; Wesnousky, 1994）。大規模地震的發生率必須藉由地質資料來推估，如古地震及斷層長期滑移速率的研究成果，Schwartz 與 Coppersmith（1984）進行 Wasatch 斷層及 San Andreas 斷層的中南段調查時，驗證了此兩斷層屬特徵地震模式，圖 4.7 為 San Andreas 斷層的中南段，驗證此斷層屬特徵地震模式。

特徵地震模式的地震規模發生率是由 Youngs 與 Coppersmith（1985）提出，假設大規模的特徵地震規模分布於 $m_u - 1/2$ 至 m_u 之間，且大規模的特徵地震有固定的發生率。特徵地震的累積地震發生率公式如下所示：

$$\dot{N}(m) = \dot{N}^e \frac{\exp(-\beta(m-m_0)) - \exp(-\beta(m_u - 1/2 - m_0))}{1.0 - \exp(-\beta(m_u - 1/2 - m_0))} + \dot{N}^c \quad for \quad m_0 \le m < m_u - \frac{1}{2}$$

$$\dot{N}(m) = \dot{N}^c \frac{m_u - m}{1/2} \qquad for \quad m_u - \frac{1}{2} \le m < m_u \qquad \text{（式 4-9）}$$

上式 $\dot{N}^e$ 及 $\dot{N}^c$ 分別代表由指數分布模式及特徵地震模式的總累積的地震年發生率。$\dot{N}^c = N(m_u - 1/2)$ 是特徵地震規模大於 $m_u - 1/2$ 的總累積年發生率，而規模 m_0 以上的地震年發生率的總和是 $\dot{N}(m_0) = \dot{N}^e + \dot{N}^c$。（4-1）式中 $\dot{N}^e$ 與 $\dot{N}^c$ 改以斷層滑移速率（fault slip-rate）表示。

$$\dot{N}^c = \frac{1}{2}\dot{N}^e \frac{b \ln 10 \cdot \exp(-\beta(m_u - 3/2 - m_0))}{(1 - \exp(m_u - 1/2 - m_0))} \qquad \text{（式 4-9）}$$

$$\dot{N}^e = \frac{\mu A_f S \cdot (1 - \exp(-\beta(m_u - m_0 - 1/2)))}{\exp(-\beta(m_u - m_0 - 1/2)) \cdot M_0(m_u) \cdot [\frac{b \cdot 10^{-c/2}}{(c-b)} + \frac{b \exp(\beta)(1 - 10^{-c/2})}{c}]} \qquad \text{（式 4-11）}$$

（4-8）與（4-9）式中，A_f 是總斷層面積，S 是斷層滑移速率，μ 是剛性或是剪力模數（rigidity shear modulus），一般為 3×10^{11} dyne/cm^2，最大特徵地震地震矩為 M_0（m_u），而 c 與 d 是（4-9）式的常數。

圖 4.8 為相同地震矩率或斷層滑移速率狀況下，截切指數模式與特徵地震模式的差異，可以知道特徵地震模式在中小規模的地震活動度較低，主要的地震矩率是由大規模地震貢獻。

實際進行 PSHA 時採用式（4-10），但需要將累積地震發生率換算為各規模區間 $m_i \pm dm/2$ 的地震發生率，即

$$v(z)=\sum_{n=1}^{N}\sum_{m_i=m_0}^{m_i=m_u}\lambda_n(m_i)\cdot\left[\sum_{r_j=0}^{r_j=r_{\max}}P_n(R=r_j|m_i)\cdot P(Z>z|m_i,r_j)\right] \qquad \text{（式 4-12）}$$

$$\lambda(m_i)=N(m_i-dm/2)-N(m_i+dm/2) \qquad \text{（式 4-13）}$$

上式的 dm 是 PSHA 分析時採用的地震規模間距。

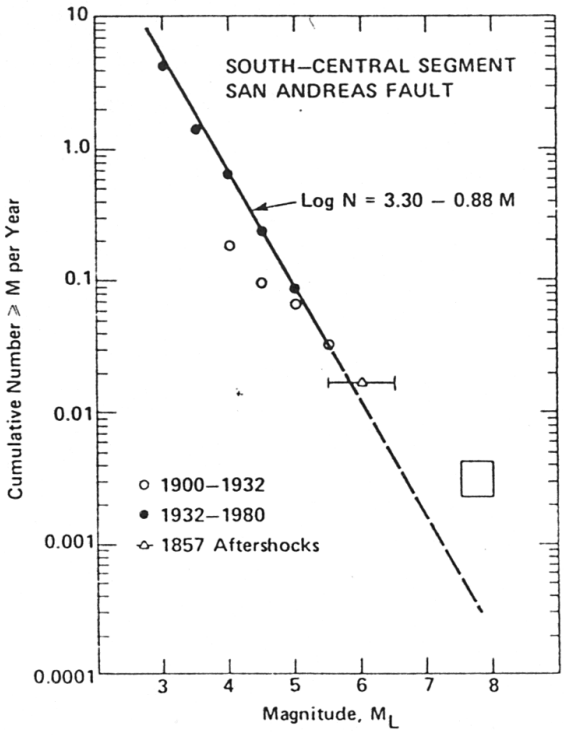


圖 4.7 美國 San Andreas 斷層中南段之特徵地震模式。圖中實心黑圓點、空心圓點、空心三角形皆為地震目錄資料，而空心方塊為活斷層槽溝探挖與地質調查所獲得的資料誤差範圍，實線為 G-R 關係式，而虛線部分為外差結果（Schwartz and Coppersmith, 1984）。

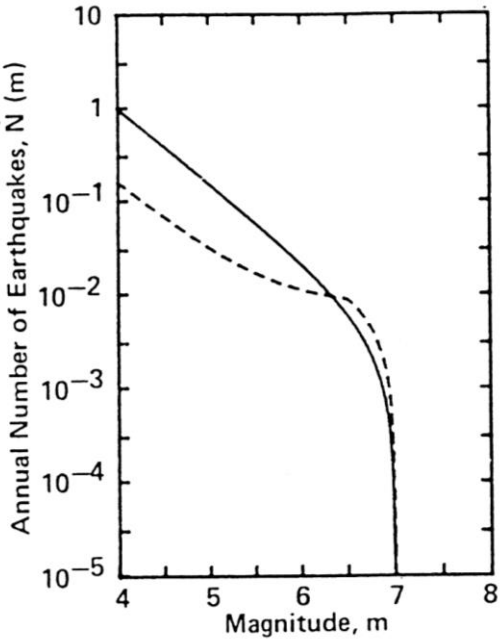


圖 4.8 假定相同滑移速率情形下比較指數地震分布模式與特徵地震模式的差異。實線為截切指數模式分布，虛線為特徵地震模式分布（Youngs and Coppersmith, 1985）。

4-1-4 機率密度函數計算條件機率

從上節之特徵地震模式，我們可以獲得幾個重要之參數，包括特徵地震矩規模之大小及年發生率，而年發生率倒數即再現週期，我們可將此再現周期帶入機率密度函數中來計算該斷層震源在未來幾年發生特徵地震之機率。

計算地震未來之發生機率，尚需要該斷層特徵地震最近一次發生之時間，有些統計模式會將不確定性帶入計算，例如再現週期之標準差。機率密度函數的計算方式如圖 4.9 所示，假設曲線為地震發生之機率密度函數 f（t），則從地震發生後經過時間 T 到 ΔT 之發震條件機率為斜線之面積/所有藍色區的面積，條件機率的公式為：

$$P(\leqq t \leqq T+\Delta T \mid t > T) = [F(T)-F(T+\Delta T)] / F(T) \qquad \text{（式 4-10）}$$

其中

$$F(T) = \int_{T}^{\infty} f(t)dt \qquad \text{（式 4-11）}$$

機率密度函數的選擇跟孕震之區域性、時間性、資料完整性有關，美國針對舊金山灣區採用五種機率模式，敘述如下：

1. Poisson model

大地震在時間上的分布常以廣義包桑模式（Poisson model）來解釋，此模式假設地震在時間上會有群聚現象，且群聚間是互不相關的。一系列地震事件時間之分布狀況由長期平均發震速率控制，可得下式：

$$f_{Exp}(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad \text{（式 4-12）}$$

其中 λ 為每個活動斷層震源之地震發生率。在 Poisson model 中，對於一指定之時間間隔的條件機率只考慮間隔長度 Δt，及每個破裂面的長期地震發生率。用於區域性震源統計及活動斷層活動性不明確之情形，例如背景地震發生率。因此發震的機率為：

$$1 - e^{-\lambda \Delta t} \quad \text{（式 4-13）}$$

2. Empirical Model

自 1906 年，舊金山灣地區便用規模大於 5.5 的地震目錄來修正 Poisson model（Reasenberg et al., 2003），也就是說，在原來的機率函數中，加入長年觀察的結果，可得到一變異函數 λ（t）：

$$\gamma(t) = \lambda(t) / \lambda \quad \text{（式 4-14）}$$

估算在未來一段時間（t, t+Δt）之機率，γ（t）是外插進來的一平均率。因此經驗模式在斷層 i 之機率如下：

$$P_i^{Emp} = 1 - e^{-\bar{\gamma} \lambda_i \Delta t} \quad \text{（式 4-15）}$$

其中 $\bar{\gamma}$ 等於 γ（t）在整個（t , t+Δt）的平均值。經驗模式假定在活動斷層中機率隨著時間變化，考慮與時間相依之分布，保留斷層中地震規模分布，因此，如地質架構、古地震歷史、斷層分區、潛移等因素均被保留。

3. Brownian Passage Time（BPT）model

當一地震在一斷層區發生地震後，除非這個區域再度累積一定時間之能量，不然不大可能發生另一地震（Ellsworth et al., 1999; Kagan and Knopoff, 1987）。要敘述這種模式至少需要兩個參數以及最後之地震記錄，其中一個參數為活動間隔 μ，另外一個是標準差 σ，公式如下：

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{（式 4-16）}$$

BPT 分布機率密度函數如下，其中 α=σ/μ：

$$f_{BPT}(t) = \sqrt{\frac{\mu}{2\pi\alpha^2 t^3}} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\mu t \alpha^2}} \quad \text{（式 4-17）}$$

$$h_{BPT}(t) = f_{BPT}(t) / F_{BPT}(t) \quad \text{（式 4-18）}$$

危險函數（hazard function）h_{BPT}（t）在 t = 0 時為零，並會隨時間漸漸趨於一最大值。BPT 的行為模式取決於 α，當 α 越小 f_{BPT}（t）將呈現 較高之峰值；當 α 值越大，延遲時間和結束時間變短，f_{BPT}（t）函數更近似於 Poisson（圖 4.10）。

4. BPT-step Model

區域應力的突然增加或減少會影響狀態函數，使上述模型在時間軸上並非漸進前進，這個模型具體描述了區域應力變化之於狀態函數的關係。亦即，考慮地震對區域產生應力改變之影響，BPT-step Model 考慮了區域發生大地震，可能對鄰近的活動斷層應力產生影響，應力釋放則發震機率會減少；應力累積則會造成發震機率增加，BPT-step Model 是經專家評估此影響後，再將權重加到 BPT 模式中進行活動斷層機率的估算。

5. Time Predictable Model

考慮最近期的地震滑移量在完整地震週期內扮演的角色。當應變累積到等同於上一次地震滑移量時，下一個地震就會發生；也就是根據最近幾次在斷層上滑移造成的地震推估下一次地震到來時的預期時間。WG88 及 WG90 利用時間可預測模式（time predictable model）進行 30 年之機率計算，採用 lognormal 分布。在 WG02 中，採用 BPT 分布來描述再現時間分布。而時間可預測模式只用在 San Andreas fault，這是由於其他斷層的不確定性及資料的缺乏。在獲得每一條斷層分支之再現時間之機率後，若要計算位於兩條以上斷層區域之破裂機率，或是多個斷層分支集合成之條件機率機率，可以使用下列計算方式：

$$P_{total} = 1-(1-P_1)(1-P_2)\ldots(1-P_n) \qquad (式\ 4\text{-}19)$$

其中 P_{total} 為將所有斷層之發生率交集後之發生率，P_1 至 P_n 則為各斷層發生率。此方法也可應用在區域震度的發生率評估上，如圖 4.11 所示，圖中兩個圓代表兩條斷層發生地震 A 及地震 B 震度 6 級以上機率，因此受這兩條斷層影響發生震度 6 級以上之區域機率：

$$P = 1-(1-P_A)(1-P_B) \qquad (式\ 4\text{-}20)$$

日本地區在評估陸域活動斷層發震之條件機率，採用 BPT 模式（圖 4.12）。BPT 模式符合彈性回彈理論，函數近似於對數常態分布，且在時間無限延伸時，其條件機率不會有顯著降低（圖 4.13），函數較具穩定性。本研究參考日本的經驗，將在下一節以 BPT 統計模式評估車籠埔斷層及瑞穗斷層之條件機率。

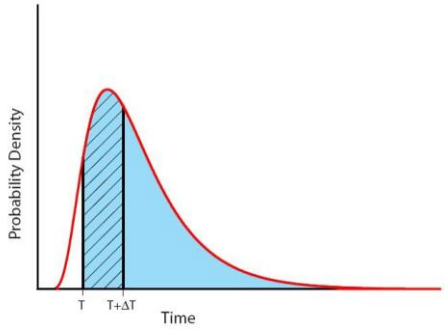


圖 4.9 機率密度函數分布圖。圖中紅色線段表示機率密度函數之線段，Time 為 0 代表最近一次地震發生之時間，Time 為 T 代表發生地震後經過了 T 時間。

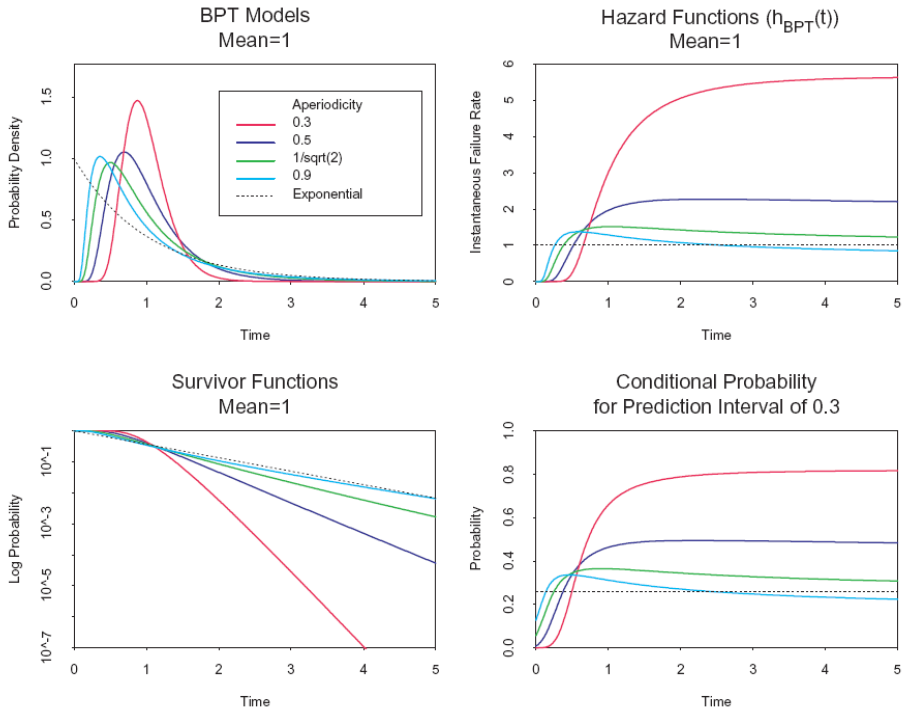


圖 4.10 不同 α 值對 BPT 模式之影響。其中紅線 α 值為 0.3、紫線 α 值為 0.5、藍線 α 值為 0.9，四張圖分別為機率密度、危險、存活及條件機率函數（Ellsworth et al., 1999）。

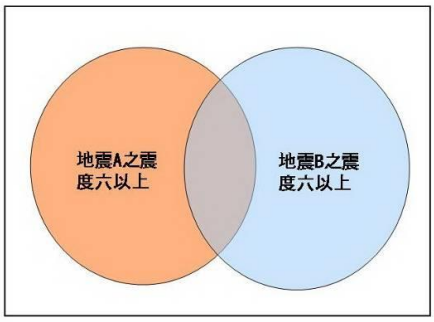


圖 4.11 計算震度 6 級以上之區域機率理論（日本全國地震動預測地圖，2008）。

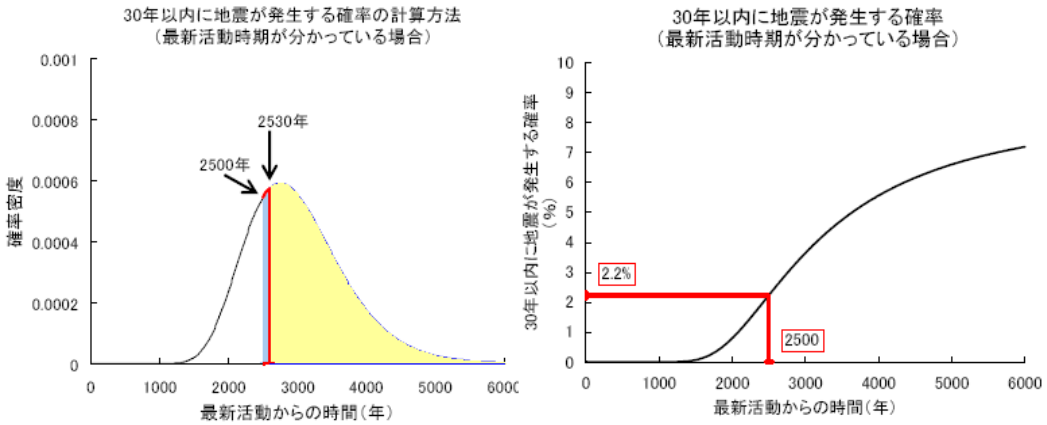


圖 4.12 日本 BPT 模式評估示意圖（日本全國地震動預測地圖，2008）。

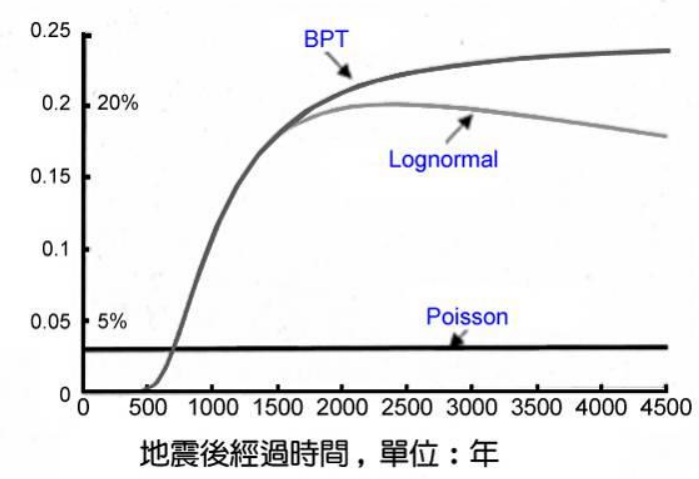


圖 4.13 各統計模型之條件機率比較圖。X 軸為地震後經過時間，Y 軸為發生率。

4-2 研究方法及流程

4-2-1 斷層參數表

本計畫根據特徵地震模式及機率密度函數所需之斷層參數，設計活動斷層之參數表，並且藉由此參數表之需求蒐集所需之斷層參數文獻，參數表格式如表 4.4 所示，斷層之長度、寬度、深度、面積、走向及傾斜角度之幾何關係可用圖 4.14 來表示，參數表之各斷層參數之意義如下所述：

1. 斷層分支為活動斷層分段之名稱。
2. 長度為斷層面與地平面所交之長度。
3. 寬度為斷層面寬度。
4. 深度為斷層面投影到垂直面之深度。
5. 面積為斷層面之面積，即示意圖 4.14 之藍色部分之面積。
6. 走向為斷層面與水平面交會線的方向。
7. 傾角為斷層面與水平面所交之銳角，傾角方向為斷層面向下延伸之方向。
8. 斷層機制為斷層活動之力學機制，主要分為正斷層、逆斷層及平移斷層三種機制。
9. 短期滑移速率為斷層於間震期量測到的斷層活動速率。
10. 長期滑移速率為斷層長期量測到的滑移速率，包含歷次同震、震後及間震之變位量與時間之關係。
11. 利用斷層區塊模型將斷層閉鎖區附近的變形視為剛體運動和彈性變形的線性組合，如圖 4.15 所示；剛體運動一般為板塊以尤拉極為圓心而做的運動，彈性變形可視為閉鎖區的反向運動，稱為 slip deficit，中文為為滑移赤字或滑移虧損（圖 2.28）。
12. 單一事件變位量為斷層之同震地表錯移量。
13. 斷層會重複的發生大致相同規模的最大地震，稱為特徵地震，其規模則為特徵地震規模。
14. 地震重複週期，表示地震會重複發生特徵地震之間隔時間。
15. 最近一次活動時間為活動斷層最後一次發生特徵地震之時間。

參數表之建立為蒐集該活動斷層之相關文獻資料進行研究，並從文獻中萃取斷層參數所需之數據，例如斷層幾何、斷層機制、斷層滑移速率……等，將參數數值，以及該文獻所使用之研究方法填於斷層參數表中，並在最後一欄填入該參考文獻。同樣的斷層參數會有不同之研究方法及研究成果，本計畫將會盡可能列舉蒐集之所有文獻研究結果以資比對，因此同一個斷層參數欄位會有多樣的數值、研究方法及參考文獻。

表 4.4 本計畫之斷層參數表格式

斷層名稱	斷層參數	數值	研究方法	參考文獻
___斷層	斷層分支			
	長度(km)			
	寬度(km)			
	深度（km）			
	面積(km^2)			
	走向			
	傾斜角度(度)			
	斷層機制			
	短期滑移速率（mm/yr）			
	長期滑移速率(mm/yr)			
	滑移赤字			
	單一事件變位量(m)			
	最大可能地震規模(M)			
	地震重複週期(年)			
	最近一次活動時間			

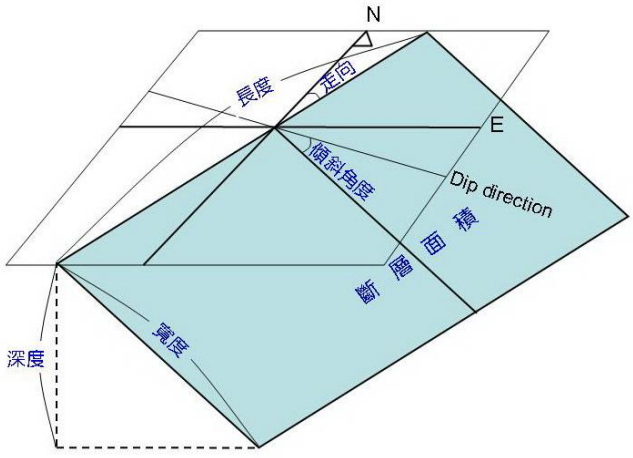


圖 4.14 斷層幾何參數示意圖。

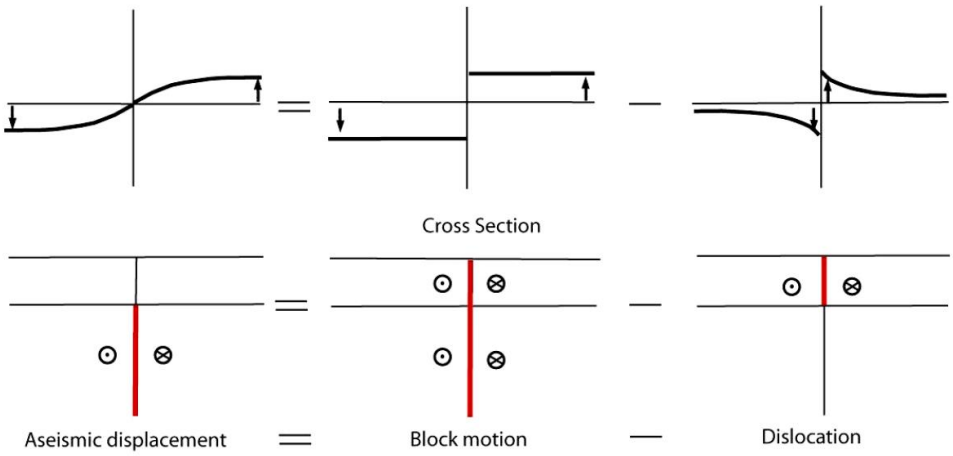


圖 4.15 間震期之變形模式即為剛體運動剪去彈性錯位變形。其變形為滑移赤字（slip deficit）等於剛體運動（Block motion）減去間震變形（Aseismic displacement）。

4-2-2 特徵地震模式

特徵地震模式是來描述斷層的地震發生率，在 Youngs and Coppersmith (1985)中提到，推估斷層的特徵地震模式需要使用到的參數計有：總斷層面積、斷層滑移速率、剛性或是剪力模數(rigidity shear modulus)(一般為 3×10^{11} dyne/cm^2)、Gutenberg-Richter 關係式中的 b 值、上限地震規模(最大可能地震)與下限地震規模。

1. 總斷層面積：是斷層參數表當中，以地表斷層破裂面、斷層深度與傾角及餘震分布來估計的斷層面積。
2. 斷層滑移速率：使用古地震研究的槽溝開挖成果，以長期滑移速率為主。
3. Gutenberg-Richter 關係式中的 b 值：b 值的推估是以斷層面的範圍選取地震（如圖 4.16），使用截切指數模式以最大概似估計法（maximum likelihood estimate, MLE）來估算。其中的地震目錄是經過去除前餘震的主震目錄，因為地震危害度分析中通常假定地震發生是符合卜桑過程（Merz and Cornell, 1973; Ang and Tang, 1975; Cornell and Winterstein, 1986），但實際地震發生時大多數會有前震及餘震序列。所以地震目錄必須先去除與主震相依的前震與餘震，並進行統計檢定以確定該地區地震發生過程能符合所假定的機率模式（Anagnos and Kiremidjian, 1988）。Coppersmith (1991)、美國 National Research Council (1988)、Kramer (1996)及 USGS(2008)認為，機率式地震危害度分析採用的地震目錄必須以 Wyss (1979)、Arabasz and Robinson (1976)、Gardner and Knopoff (1974)或 Uhrhammer (1986)所提出的主震與前餘震序列的時間視窗與距離視窗經驗關係式，來去除與主震有關的前震及餘震，而獲得獨立事件主震目錄，並要求其符合卜桑模式，而使地震的發生率不隨時間變化。在 MLE 法中，因為大規模地震次數較少，其地震發生率的誤差分布範圍較大；反之，小規模地震次數多，地震發生率誤差分布範圍較小。
4. 最大可能地震推估：參考斷層參數表中，使用 Wells and Coppersmith（1994）及吳相儀（2000）的斷層破裂面積與地震矩規模 MW 的關係式，來推估斷層的最大可能地震。
5. 一般在計算特徵地震模式時，為了避免與區域背景地震重複計算其發生率，會將特徵

地震設定其下限地震規模，本研究採用鄭錦桐（2002）以 MW 6.5 作為下限地震規模，來計算特徵地震模式。

完成上述參數蒐集後即以特徵地震模式來推估特徵地震的回復週期，並利用各參數的可能分布範圍計算出特徵地震的可能回復週期分布，最後可供 BPT 模式計算未來地震發生機率。

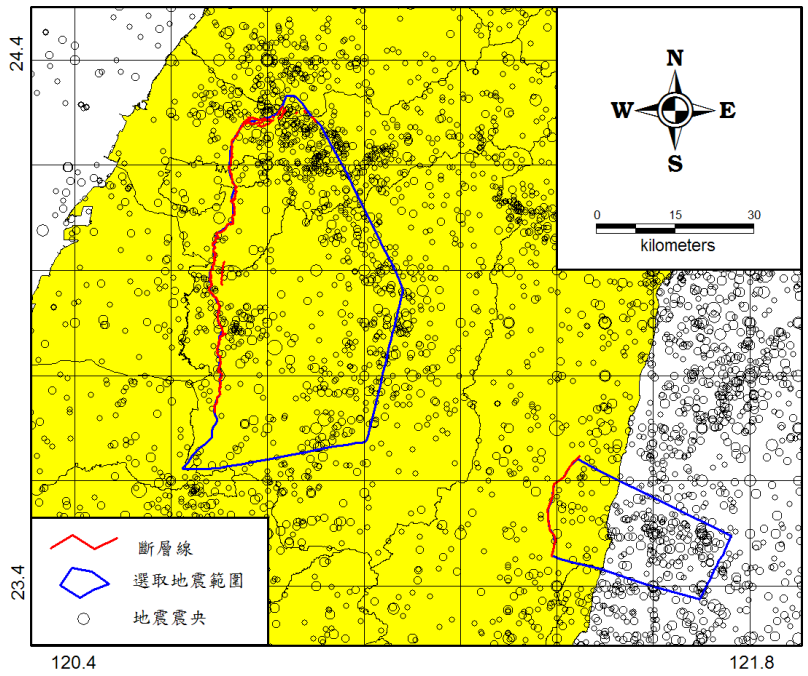


圖 4.16 斷層線、斷層面選取地震範圍及地震震央分布圖。

4-2-3 選取機率模式

在上節介紹機率密度函數統計模式中有提到，日本計算陸域活動斷層的發震條件機率是以 BPT 模式為主，本節將用 BPT 模式評估未來 100 年內之發震機率，參考資料則使用車籠埔斷層之槽溝古地震事件發生時間。

假設槽溝可觀察到五個古地震事件，距今的破裂時間分別為 365、735、830、1540、1805，則各古地震事件之間隔則為 365、370、95、710、265，其平均值 μ 為：

$$\mu=(365+370+95+710+265)/5=361 \text{ (單位:年)}$$

其標準差 σ 為：

$$\sigma=\sqrt{\frac{(365-361)^2+(370-361)^2+(95-361)^2+(710-361)^2+(265-361)^2}{5}}=200.9806$$

其變異係數 α 為：

$$\alpha=\frac{\sigma}{\mu}=\frac{200.9806}{361}=0.5566$$

將 μ 及 α 帶入 BPT 統計模式中：

$$f_{BPT}(t)=\sqrt{\frac{\mu}{2\pi\alpha^2 t^3}}e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\mu t\alpha^2}}$$

$$F(T)=\int_T^{\infty} f(t)dt$$

圖 4.17 所示即為 $f_{BPT}(t)$之函數分布，其中 t=0 之處表示大地震最後一次的發生時間（例如 1999 年 921 集集地震），推估車籠埔斷層於未來 100 年之發震條件機率為：

$$P(T\le t\le T+\Delta T\,|\,t>T)=\frac{F(T)-F(T+\Delta T)}{F(T)}=\frac{F(10)-F(10+100)}{F(10)}=0.0193=1.93\%$$

其中 T=10 代表地震後經過 10 年，ΔT=100 代表欲評估之時間間隔。

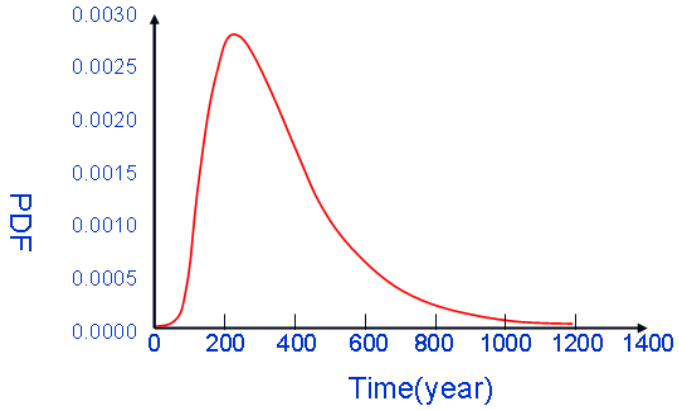


圖 4.17 車籠埔斷層之 BPT 機率密度函數，其中 X 軸為 t，在 t=0 的地方表示 1999 年集集大地震，t=200 表示集集地震後經過兩百年；Y 軸則為機率密度函數。

4-3 車籠埔斷層及瑞穗斷層之發震機率評估

4-3-1 車籠埔斷層

1999 年 9 月 21 日發生芮氏規模 7.3 的強震，震央位於台灣南投縣集集鎮，震源深度 10 公里，此次地震在地表造成的破裂帶，主要是車籠埔斷層 76 公里的錯動外，還包括斷層北端在豐原市北陽里以東之新破裂，長度約 16 公里，及大尖山斷層，長度約 11 公里。

首先建立車籠埔斷層參數表：在斷層幾何形貌上，由震測、重力、鑽探及地面調查資料，描繪台灣中部之平衡剖面，得知車籠埔斷層之傾角為東傾 40 度左右（楊耿明等，2003），如圖 4.19 所示。在長期滑移速率的推估上，陳文山（Chen et al., 2007a）在車籠埔斷層沿線進行槽溝開挖，位址如圖 4.18 所示，藉由從槽溝中觀察到的古地震事件抬升量及定年資料，可建立各槽溝事件之滑移速率；在短期滑移速率上，則採用饒瑞鈞等人（2006）於 1996 到 2006

跨車籠埔斷層之 GPS 測站觀測結果，並分為 1996~1999（震前）及 2000~2006（震後）兩個時段，分別列出 GPS 平行斷層走向、垂直斷層走向及垂直抬升之移動速率。在車籠埔斷層的分段特性上，則依中央地質調查所公布之版本，以烏溪為界分為南北兩段。在北段的同震抬升量平均可達 3.6 公尺，南段則為 1.5 公尺。

在最大可能規模上，除了列出 921 集集地震量測之實際發生的特徵地震規模外，另外可以用斷層長度或面積帶入經驗公式式求得，經驗公式採用 Wells 與 Coopersmith（1994）的關係式（表 4.1）以及吳相儀（2000）研究台灣活動斷層推求之關係式（式 4.2、式 4.3），斷層參數表將會一併呈現各最大可能規模之估算結果。

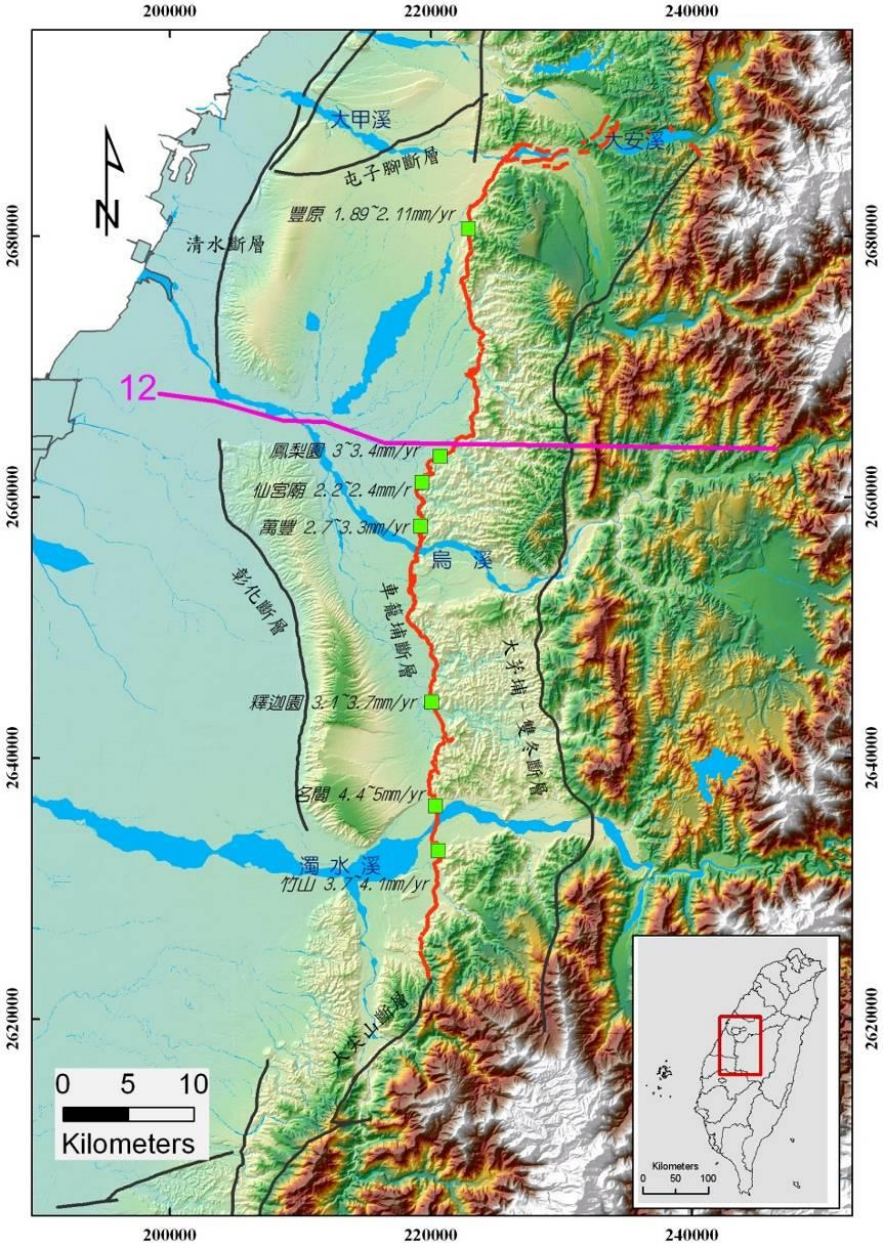


圖 4.18 車籠埔斷層之地表分布圖及槽溝開挖位置。圖中綠色方框為槽溝開挖位址，桃色線段為 LINE12 剖面線（修改自 Chen et al., 2007a）。

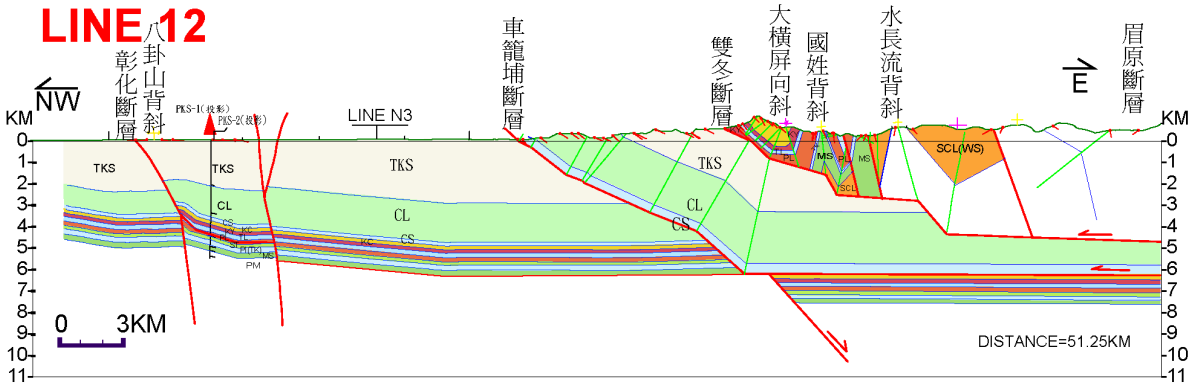


圖 4.19 剖面 12 顯示台中盆地中部位置之地質構造特徵。車籠埔斷層之主滑離面位於 6 公里深處（楊耿明等，2003）。

表 4.5 車籠埔斷層參數表

	斷層參數	斷層參數數據			研究方法	參考文獻
車籠埔斷層	斷層分支	整段	北段		地形、航照判釋、集集地震地表破裂判釋	林啟文等，2000
			南段			
	長度(km)	整段 76~92	北段 38-42			
			南段 38~50			
	寬度(km)	23.3~31.1			深度/sin（傾角）	
	深度（km）	15-20			統計於車籠埔斷層地震目錄深度	中央氣象局地震目錄
	面積(km^2)	整段 1773~2862	北段 887~1307		長度x寬度	
			南段 887~1555			
	走向	約呈南北走向			地形、航照判釋、地震地表破裂判釋	林啟文等，2000
	傾斜角度(度)	東傾 40 度			震測、重力、地面調查建立之平衡剖面	楊耿明等，2003
	斷層機制	具左移分量的逆斷層			集集地震震源機制解	Kao and Chen, 2000
	短期滑移速率（mm/yr）	1996-1999	全段平行斷層走向 1.1~6.1 全段垂直斷層走向 0.4~8.9 全段抬升率 0.5~19.1	北段平行斷層走向 1.1 北段垂直斷層走向 0.4 北段抬升率 0.5	GPS1996~2006 之速度場分析	饒瑞鈞等，2006
				南段平行斷層走向 4~6.1 南段垂直斷層走向 3.5~8.9 南段抬升率 1~19.1		

<table>
<tr><td></td><td></td><td rowspan="2">2000-2006</td><td rowspan="2">全段平行斷層走向7.6~8.6
全段垂直斷層走向6.9~9.7
全段抬升率1.2~10.1</td><td>北段平行斷層走向7.6
北段垂直斷層走向6.9
北段抬升率1.2</td><td rowspan="2"></td><td rowspan="2"></td></tr>
<tr><td>南段平行斷層走向8.2~8.6
南段垂直斷層走向9.1~9.7
南段抬升率9.1~10.1</td></tr>
<tr><td></td><td>長期滑移速率(mm/yr)</td><td colspan="2">全段1.9~5</td><td>北段1.9~3.4
南段3.1~5</td><td>槽溝之古地震事件</td><td>Chen et al., 2007a</td></tr>
<tr><td></td><td>滑移赤字</td><td colspan="3"></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td></td><td>單一事件變位量(m)</td><td colspan="3">在北段的同震抬升量平均可達3.6公尺
南段則為平均1.5公尺</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td></td><td rowspan="7">最大可能地震規模(Mw)</td><td colspan="2">7.6</td><td></td><td>1999年921集集地震</td></tr>
<tr><td rowspan="2">整段7.01~7.68</td><td>北段6.65~7.26</td><td rowspan="2">Mw = 5.00+1.22 log L
σ=0.28</td><td rowspan="4">Wells and Coppersmith, 1994</td></tr>
<tr><td>南段6.65~7.35</td></tr>
<tr><td rowspan="2">整段7~7.69</td><td>北段6.73~7.38</td></tr>
<tr><td>南段6.73~7.45</td><td>Mw =4.33+0.9 log A
σ=0.25</td></tr>
<tr><td rowspan="2">整段6.94~7.78</td><td>北段6.58~7.29</td><td rowspan="2">Mw = (1.32±0.122) log (L)+(4.817±0.132)</td><td rowspan="4">吳相儀，2000</td></tr>
<tr><td>南段6.58~7.4</td></tr>
<tr><td rowspan="2">整段6.9~7.83</td><td>北段6.68~7.53</td></tr>
<tr><td>南段6.68~7.6</td><td>Mw = (0.82±0.071) log (A)+(4.61±0.141)</td></tr>
<tr><td></td><td>地震重複週期(年)</td><td colspan="2">200 -700</td><td>車籠埔斷層帶數個槽溝古地震事件定年</td><td>Chen et al., 2007a</td></tr>
<tr><td></td><td>最近一次活動時間</td><td colspan="2">西元1999年</td><td>1999年
921集集大地震</td><td></td></tr>
</table>

車籠埔斷層特徵地震模式：特徵地震模式的計算是以斷層參數表當中推估的參數進行，配合推估參數的可能範圍搭配出計算再現週期的參數組合表，其中滑移速率採用槽溝之垂直抬生速率投影到斷層面之結果，潛移的部份則忽略不計，表4.6~4.8分別為車籠埔斷層全段、北段及南段所使用的參數組合表。特徵地震所推算出的車籠埔斷層特徵地震再現週期，全段為183年~997年，北段為211年494年，南段為144年～313年。圖4.20是以表4.6~4.8的參數組合所推估不同特徵地震模式與實際地震發生率的比較圖，分別比較全段、北段及南段，各種參數組合所推估的特徵地震發生率皆未超過實際地震的發生率。

以特徵地震模式得到之車籠埔斷層之重複週期，分別以BPT統計模式計算全段及南、北兩段30年、50年、100年之發震機率，其結果如表4.9所示，車籠埔斷層之機率密度函數分布及條件機率分布如圖4.21、圖4.22所示。

表 4.6 計算車籠埔特徵地震回復週期所使用的參數組合表(全段)

	面積(km^2)	滑移速率 (mm/yr)	最大可能規模 M_w	b 值	再現週期 (yr)
Case_1	1773	1.9	7.25	0.707	480
Case_2	1773	1.9	7.27	0.707	515
Case_3	1773	5.0	7.25	0.707	183
Case_4	1773	5.0	7.27	0.707	196
Case_5	2862	1.9	7.44	0.707	574
Case_6	2862	1.9	7.6	0.707	997
Case_7	2862	5.0	7.44	0.707	218
Case_8	2862	5.0	7.6	0.707	379

表 4.7 計算車籠埔特徵地震回復週期所使用的參數組合表(北段)

	面積(km^2)	滑移速率 (mm/yr)	最大可能規模 M_w	b 值	再現週期 (yr)
Case_1	887	1.9	6.98	0.707	378
Case_2	887	1.9	7.03	0.707	449
Case_3	887	3.4	6.98	0.707	211
Case_4	887	3.4	7.03	0.707	251
Case_5	1307	1.9	7.13	0.707	431
Case_6	1307	1.9	7.17	0.707	494
Case_7	1307	3.4	7.13	0.707	241
Case_8	1307	3.4	7.17	0.707	276

表 4.8 計算車籠埔特徵地震回復週期所使用的參數組合表(南段)

	面積(km^2)	滑移速率 (mm/yr)	最大可能規模 M_w	b 值	再現週期 (yr)
Case_1	887	3.1	6.98	0.707	232
Case_2	887	3.1	7.03	0.707	275
Case_3	887	5	6.98	0.707	144
Case_4	887	5	7.03	0.707	171
Case_5	1555	3.1	7.20	0.707	283
Case_6	1555	3.1	7.23	0.707	313
Case_7	1555	5	7.20	0.707	175
Case_8	1555	5	7.23	0.707	194

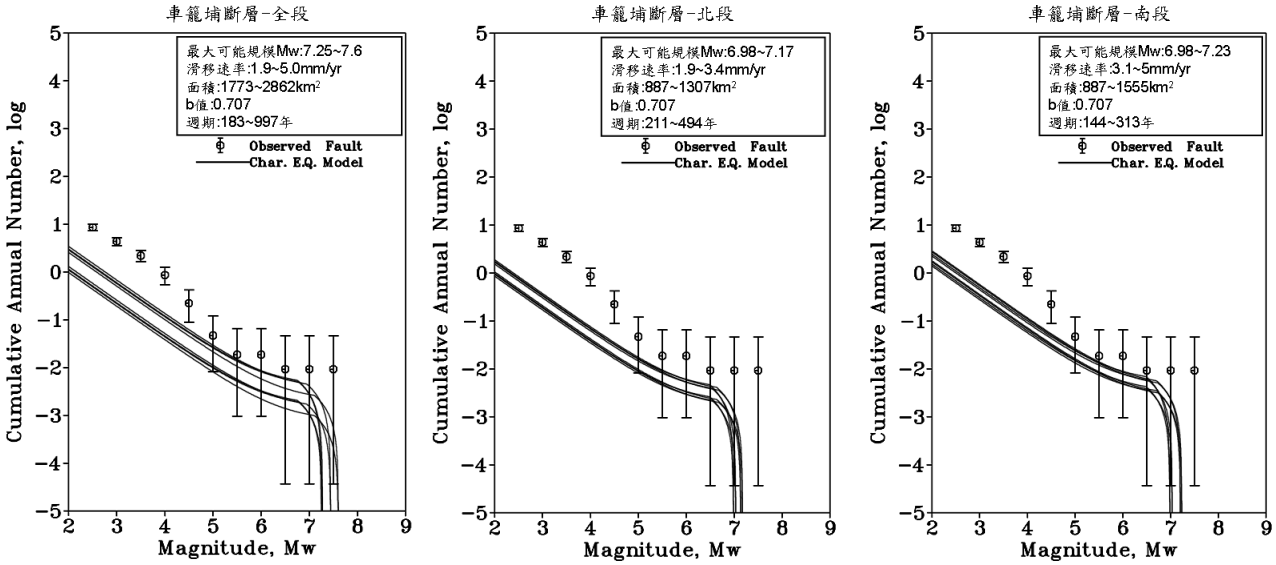


圖 4.20 車籠埔斷層面範圍內 1900 年至 2006 年以來實際地震發生率，與其使用不同參數組合之特徵地震模式推估的地震發生率比較圖。

表 4.9 車籠埔斷層之 BPT 統計模式參數表及發震機率評估

	特徵地震規模 Mw	平均再現週期 μ	變異係數 α	30 年之條件機率(%)	50 年之條件機率(%)	100 年之條件機率(%)
全段	7.25~7.6	442.75	0.572	7.48×10^{-7}	4.00×10^{-3}	0.72
北段	6.98~7.17	341.38	0.300	1.25×10^{-15}	6.15×10^{-9}	5.68×10^{-3}
南段	6.98~7.23	223.38	0.258	7.48×10^{-12}	4.42×10^{-6}	0.37

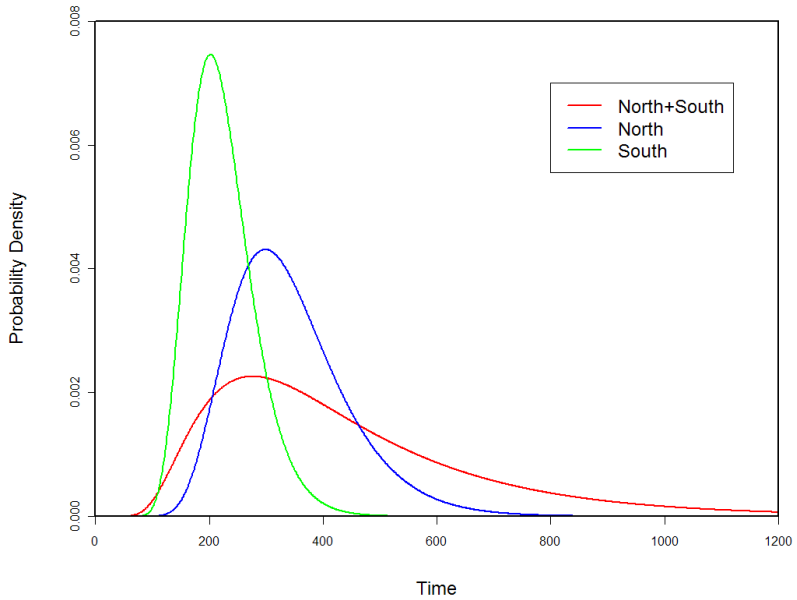


圖 4.21 車籠埔斷層 BPT 統計模式機率密度函數分布圖。其中紅線為全段、藍線為北段、綠線為南段。

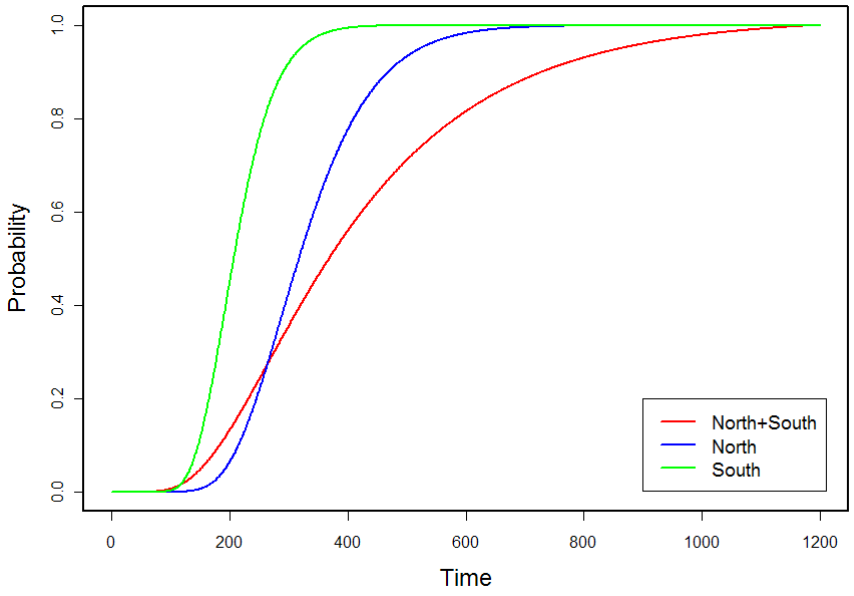


圖 4.22 車籠埔斷層 BPT 統計模式機率分布。

4-3-2 瑞穗斷層

首先建立瑞穗斷層之斷層參數表：1951 年，花東縱谷從北而南發生一系列大地震，在一個月內發生了包括規模 7.2 花蓮地震、規模 7.1 玉里地震、規模 6.2 池上地震、規模 5.8 鹿野地震。此地震序列也引發了花東縱谷活斷層研究的開始。大區域尺度的 GPS 的資料，提供了整個縫合帶區域的地殼變形大致型態（圖 4.23）：（1）縱谷吸收了每年約 3 公分的壓縮，佔了板塊聚合每年 8 公分的 37%（Yu and Kuo, 2001）；（2）縱谷斷層從北到南可以分成 4-5 條不同活動行為的斷層區段，除最北端之花蓮段為快速潛移外，在瑞穗以北之北段大致是鎖定，而南段則大致是以快速潛移為主。

瑞穗斷層從花蓮縣光復鄉南富往南延伸 25 公里至花蓮縣玉里鎮春日（圖 4.25）。從 1991 到 2002 背景地震震源分布顯示，瑞穗斷層有一不清楚之 40-50 度傾角之地震帶延伸至 25~35 公里深（Kuochen et al., 2004），如圖 4.24 所示。

在短期滑移速率上，參考 GPS 於 1996~1999 量測之跨斷層水平移動速度，根據 S098、S122 及 S123 相對於 S048 之觀測結果，瑞穗斷層的短期水平滑移量為 13.3~20.4 mm/yr，方向為 309~314 度（圖 4.25）。

在長期滑移速率推估上，陳文山在瑞穗斷層有三處的槽溝開挖（Chen et al., 2007b），如圖 4.26 所示，分別為大富、復興及安定橋槽溝，從這三個槽溝中可發現，在過去 700 年中有至少四次之古地震事件（包含 1951 年的地震），將各槽溝之古地震事件變位量除以定年資料，可獲得瑞穗斷層之長期抬升速率為 12.5~16 mm/yr。從槽溝開挖之古地震事件，推估其再現週期為 190 至 210 年。

在最大可能規模上，用斷層長度或面積帶入經驗公式式求得，經驗公式採用 Wells and Coopersmith（1994）的關係式（表 4.1）以及吳相儀（2000）研究台灣活動斷層推求之關係式（式 4-2、式 4-3），斷層參數表將會一併呈現各最大可能規模之估算結果。

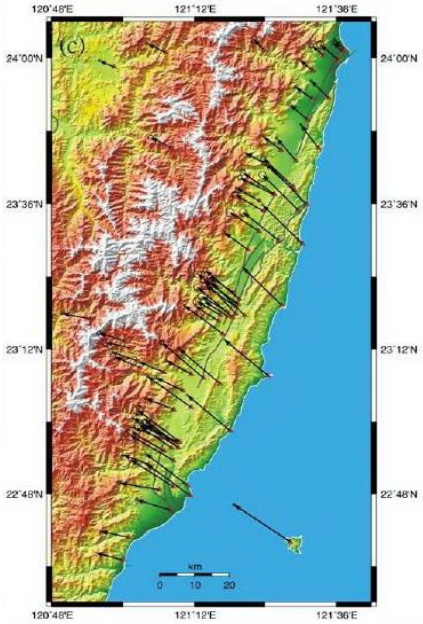


圖 4.23 花東縱谷地區之 GPS 速度場分布（Yu and Kuo, 2001）。

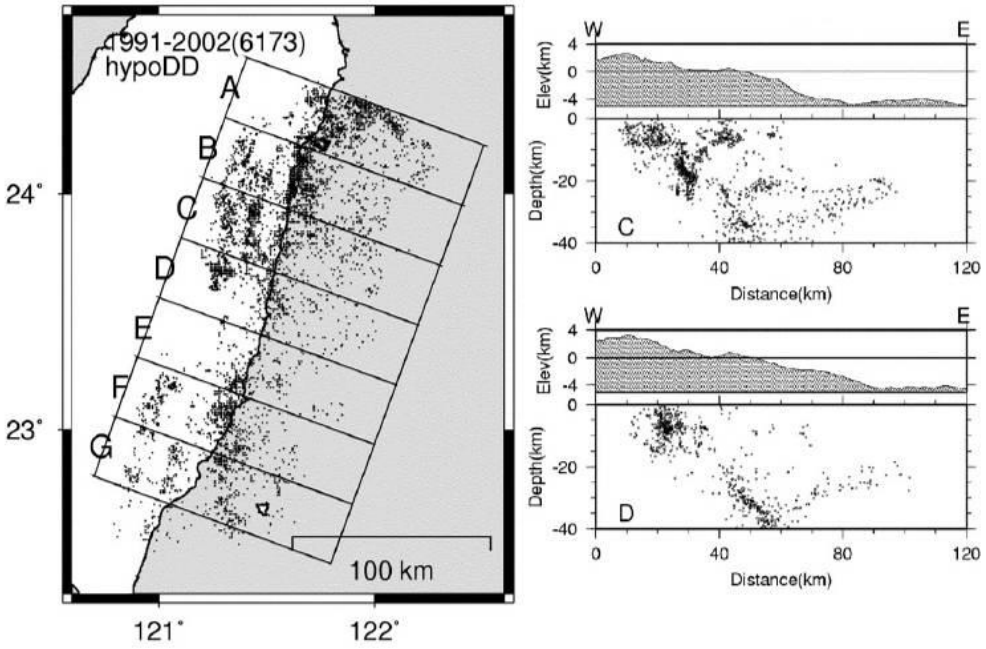


圖 4.24 重定位之台灣東部地震震央分布及 N110E 剖面。其中 D 剖面即瑞穗斷層通過之處，剖面於 25~35 公里深處有明顯之地震密集帶。（修改自 Kuochen et al., 2004）。

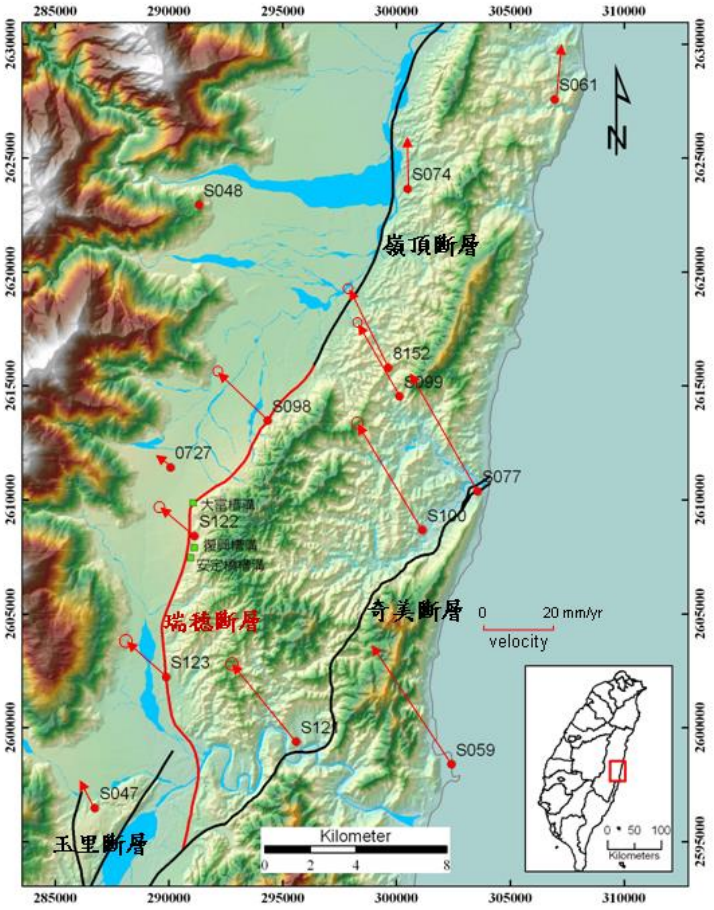


圖 4.25 瑞穗斷層地面分布圖。圖中綠色方框為槽溝開挖位置，紅點為 GPS 測站位置，GPS 速度場為相對於 S048 點位之速度變化，瑞穗斷層以紅線段表示其地面之分布（修改自 Yu and Kuo, 2001 及 Chen et al., 2007b）。

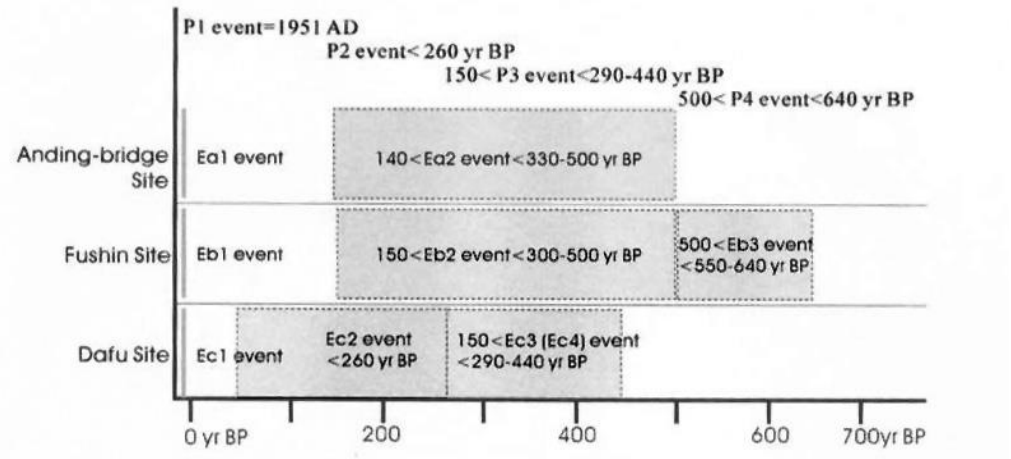


圖 4.26 瑞穗斷層三個槽溝之歷史地震。最左側灰色線段表示 1951 年之台東系列地震，灰色方框則是各槽溝古地震事件的分布年代（Chen et al., 2007b）。

表 4.10　瑞穗斷層參數表

	斷層參數	斷層參數數據	研究方法	參考文獻
瑞穗斷層	斷層分支	瑞穗段	大富槽溝、復興槽溝及安定橋槽溝有古地震事件及 1951 年地表破裂	Chen et al., 2007b
	長度(km)	25		
	寬度(km)	21.2~31.1	深度/sin(傾角)	
	深度（km）	15~20	統計於瑞穗斷層東方發生次數較多地震的深度	中央氣象局地震目錄
	面積(km^2)	530~778	長度 × 寬度	
	走向	N20E	地形、航照判釋、地震地表破裂判釋	林啟文等，2000
	傾斜角度(度)	東傾 40 度~45 度	縱谷地區地震重定位	Kuochen et al., 2004
	斷層機制	具左移分量的逆斷層	GPS 觀測顯示，海岸山脈帶以 284-294 度向中央山脈推擠。	Yu and Kuo, 2001
	短期滑移速率(mm/yr)	水平滑移量為 13.3~20.4 mm/yr，方向為 309~314 度	GPS1996~1999 之跨斷層速度場量測	Yu and Kuo, 2001
	長期滑移速率(mm/yr)	抬升速率：12.5~16	槽溝古地震事件抬升量除以古地震定年	Chen et al., 2007b
	滑移赤字			
	單一事件變位量(m)			
	最大可能地震規模(Mw)	6.43~6.99	$Mw = 5.00+1.22 \log L$ $\sigma=0.28$	Wells and Coppersmith, 1994
		6.53~7.18	$Mw = 4.33+0.9 \log A$ $\sigma=0.25$	
		6.36~6.96	$Mw = (1.32\pm0.122) \log (L)+(4.817\pm 0.132)$	吳相儀，2000
		6.51~7.33	$Mw = (0.82\pm0.071) \log (A)+(4.61\pm 0.141)$	
	地震重複週期(年)	190-210	大富槽溝、復興槽溝、安定橋槽溝古地震事件	Chen et al., 2007b
	最近一次活動時間	西元 1951 年	1951 年台東序列地震	

瑞穗斷層特徵地震模式：瑞穗斷層特徵地震模式的計算同樣使用斷層參數表中的參數進行，配合推估參數範圍搭配出計算再現週期的參數組合表，表 4.11 為瑞穗斷層所使用的參數組合表，滑移速率採用槽溝開挖之垂直抬生速率投影到斷層面上並扣除潛移速率，潛移速率採用投影到斷層面上之間震期 GPS 跨瑞穗斷層水平位移速率，特徵地震所推算出的瑞穗斷層特徵地震再現週期為 52 年~255 年。圖 4.27 是以表 4.11 的參數組合所推估不同特徵地震模式

與實際地震發生率的比較圖，瑞穗斷層參數組合所推估的特徵地震發生率有些微超過實際地震的發生率的情況，可能是因為東部地區的斷層潛移量較大，因此參數表中的滑移速率可能有高估的情形,此部分與假設斷層滑移速率均由特徵地震釋放有所不同,此部分需要加入 GPS 觀測資料來輔助釐清。

表 4. 11 計算瑞穗斷層特徵地震回復週期所使用的參數組合表

	面積(km^2)	滑移速率 (mm/yr)	特徵地震規模 M_w	b 值	再現週期 (yr)
Case_1	530	3.2	6.78	0.731	188
Case_2	530	3.2	6.84	0.731	231
Case_3	530	11.5	6.78	0.731	52
Case_4	530	11.5	6.84	0.731	64
Case_5	778	3.2	6.93	0.731	215
Case_6	778	3.2	6.98	0.731	255
Case_7	778	11.5	6.93	0.731	60
Case_8	778	11.5	6.98	0.731	71

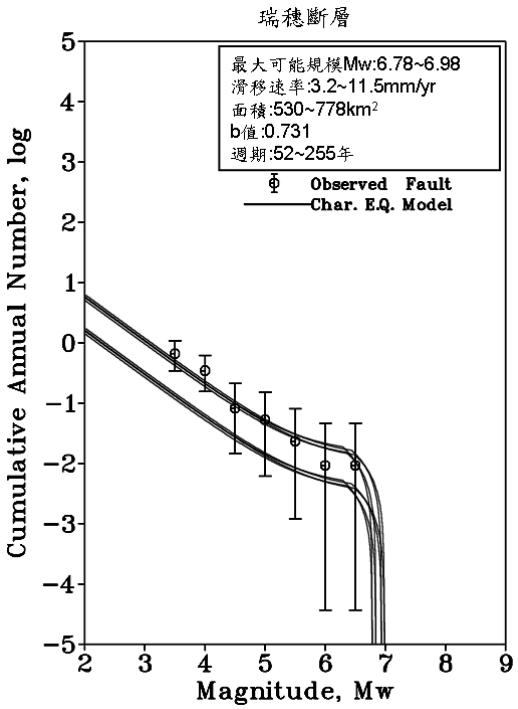


圖 4.27　瑞穗斷層斷層面範圍內 1900 年至 2006 年以來實際地震發生率，與其使用不同參數組合之特徵地震模式推估的地震發生率比較圖。

發震機率之推估：以特徵地震模式得到之瑞穗斷層之重複週期，以 BPT 統計模式計算 30 年、50 年、100 年之發震機率，其結果如表 4.12 所示，瑞穗斷層之機率密度函數分布及條件機率分布如圖 4.28 及圖 4.29 所示。

表 4.12 瑞穗斷層之 BPT 統計模式參數表及發震機率評估

	特徵地震規模 Mw	平均再現週期 μ	變異係數 α	30 年之條件機率(%)	50 年之條件機率(%)	100 年之條件機率(%)
瑞穗斷層	6.78~6.98	142	0.579	21.71	36.56	65.31

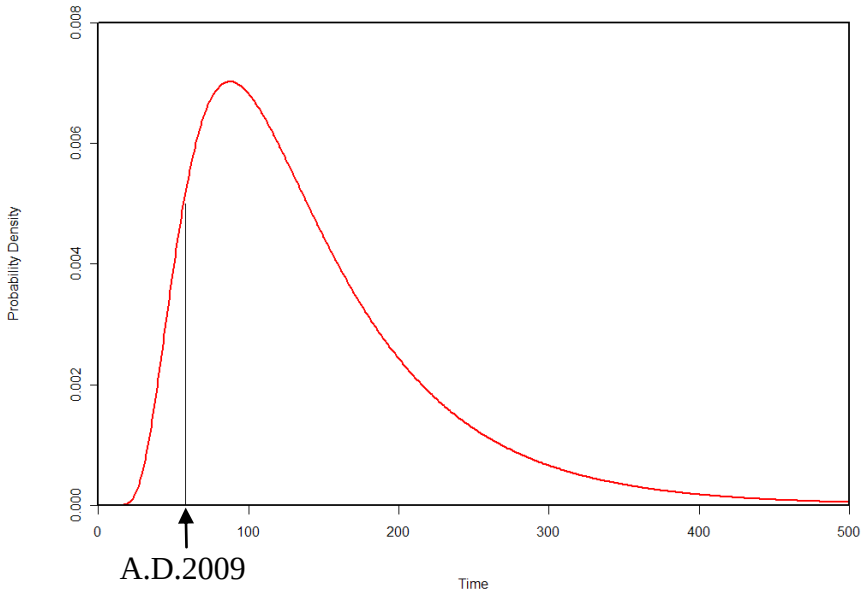


圖 4.28 瑞穗斷層 BPT 統計模式機率密度函數分布圖。

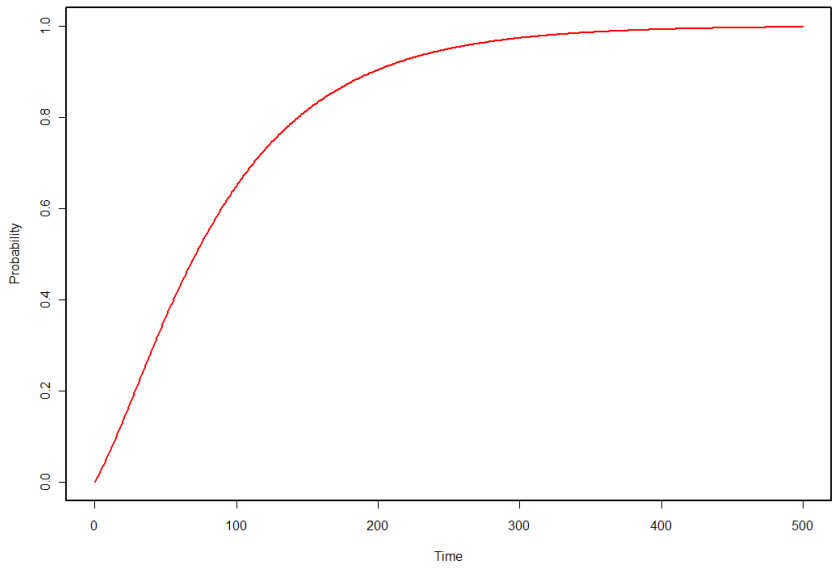


圖 4.29 瑞穗斷層 BPT 統計模式機率分布。

4-4 未來展望

活動斷層潛勢分析之成果，可以參考美、日兩國之展示方式，如圖 4.30 所示，為全日本活動斷層的潛勢分析成果圖，圖中包含了各活動斷層之分布位置、發生機率高低及發生之規模，且活動斷層潛勢以不同之顏色來表示，另以表格方式條列出各活動斷層 30 年，50 年，100 年之發生機率，如表 4.13 所示。至於美國的展示方式則類似於日本，如圖 4.31 所示為未來 30 年規模大於 6.7 之活動斷層分布及機率。

對於工程建設而言，活動斷層評估工作已經有其傳統。近年來，在斷層分段及特性上的了解，使得在決定最大可能地震或安全停機地震上會更為準確。了解斷層的重複間隔，可用來推算地震規模機率密度函數，以供進一步地震危害度分析之用。

台灣近年來由於中央地調所致力推動之「活動斷層資料庫建置」計畫，對於台灣幾條主要活動斷層已累積不少之資料，包括斷層位置、分段特性、大地測量、槽溝古地震研究等，整合這些資料，可以初步進行活動斷層潛勢評估，這個成果便能提供給工程界做為耐震設計參考及工址之風險評估，達到防災減災的目的。

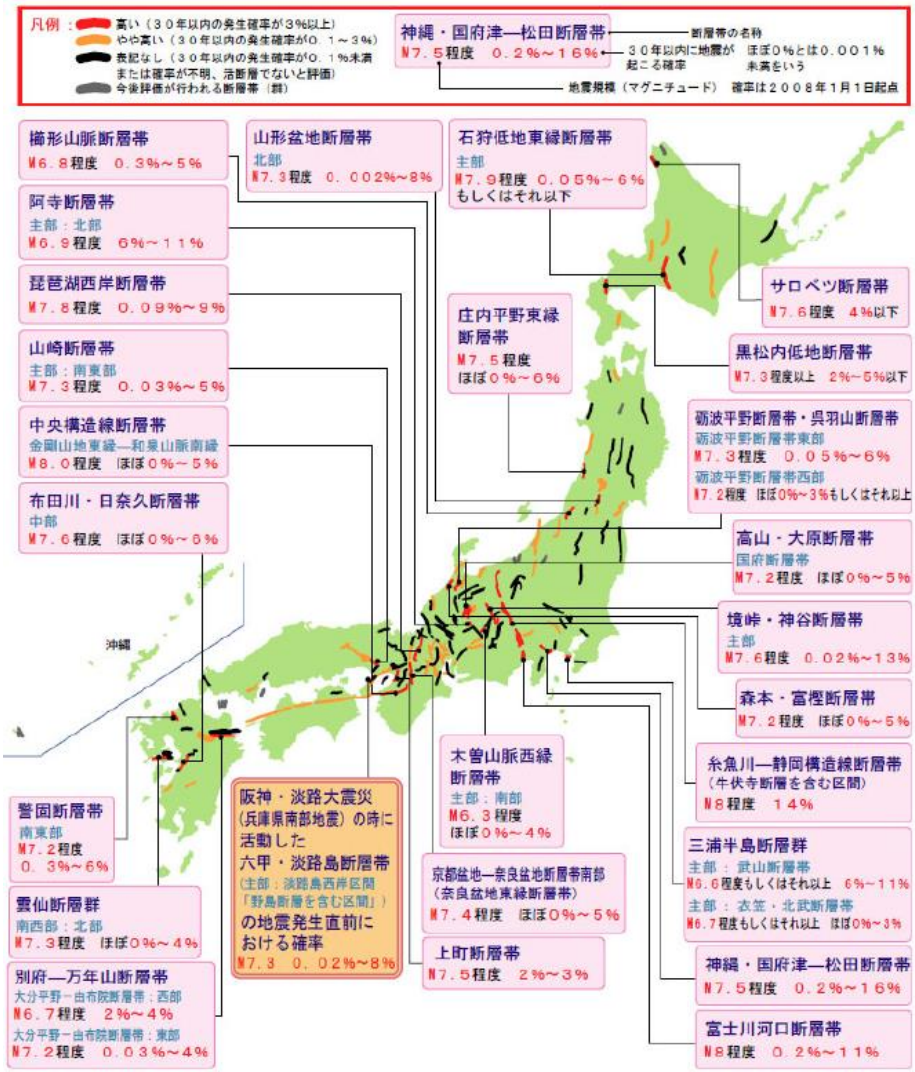


圖 4.30 日本主要活動斷層潛勢評估成果（日本全國地震動預測地圖，2008）。

表 4.13 日本地區主要活動斷層之長期發震機率評量（日本全國地震動預測地圖，2008）

斷層帶名	長期評量預期最大規模	活動斷層活動性評量	地震發震機率			地震後經過率	平均活動間隔 最新活動時期
			30 年以內	50 年以內	100 年以內		
神縄・国府津-松田断層帯	7.5 程度	日本主要活動斷層中分類為高度活動	0.2%~16%	0.4%~30%	1%~50%	0.5-1.1	約 800 年-1300 年 12 世紀-14 世紀前半
糸魚川-静岡構造線断層帯（牛伏寺断層を含む区間）	8 程度（7 1/2～8 1/2）		14%	20%	40%	1.2	約 1000 年 約 1200 年前
境峠・神谷断層帯（主部）	7.6 程度		0.02%~13%	0.04%~20%	0.09%~40%	0.5-2 より大	約 1800 年-5200 年 約 4900 年前-2500 年前
阿寺断層帯（主部/*北部*）	6.9 程度		6%~11%	10%~20%	20%~30%	1.2-1.9	約 1800 年-2500 年 約 3400 年前-3000 年前
三浦半島断層群（主部/*武山断層帯*）	6.6 程度もしくはそれ以上		6%~11%	10%~20%	20%~30%	1.0-1.4	1600 年-1900 年程度 約 2300 年前-1900 年前
富士川河口断層帯	8 程度（8±0.5）		0.2%~11%	0.4%~20%	1%~30%	0.5-1.4	1500 年-1900 年 約 2100 年前-1000 年前

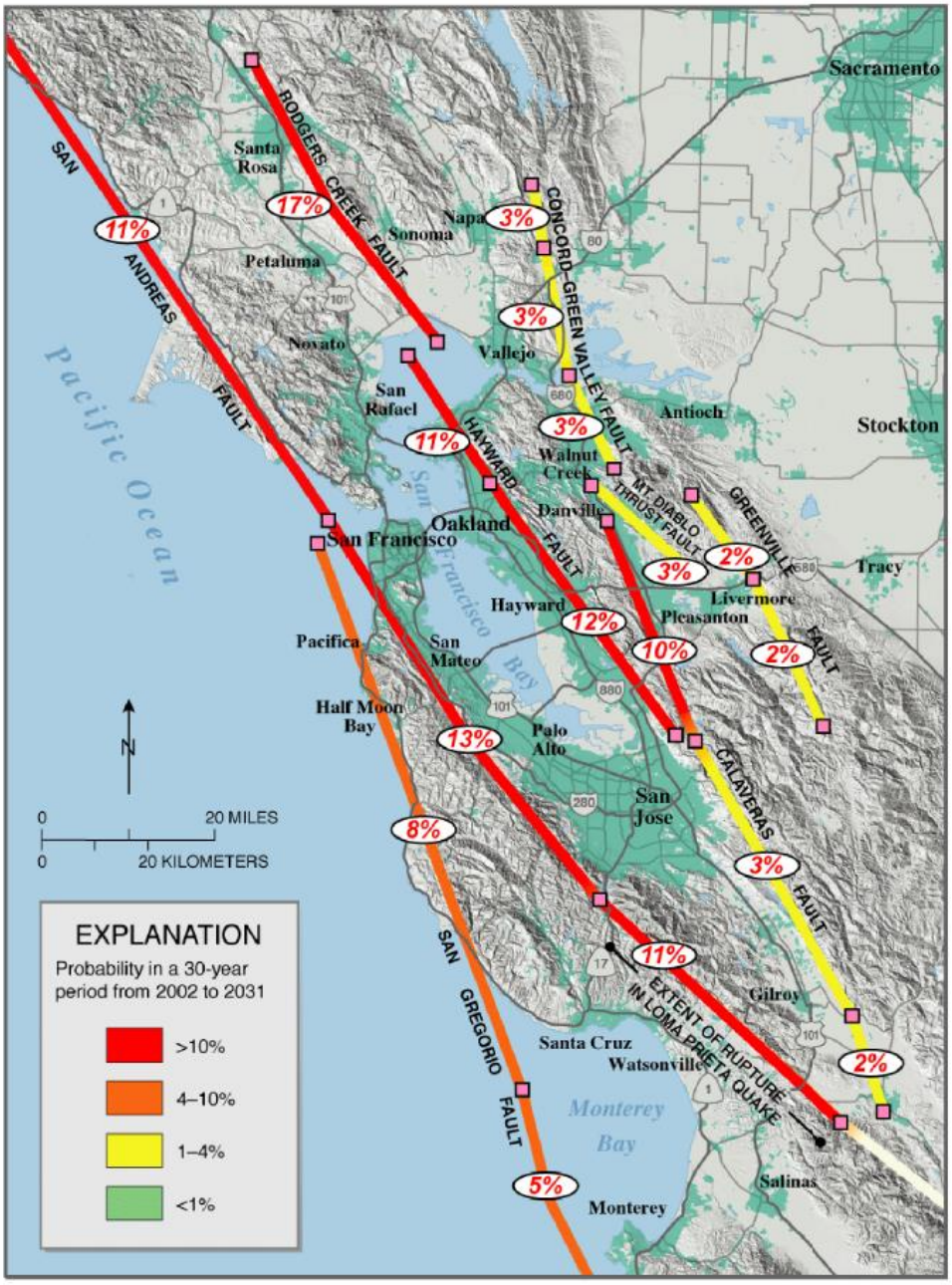


圖 4.31 美國舊金山灣地區活動斷層在未來 30 年內發生規模≧6.7 之機率（WG02，2003）。

五、整合觀測資料分析

將地球化學監測站資料與 GPS、井下應變儀以及地震儀資料統合並且探討其相關性為本計畫的重要目標之一。期初及期中報告中指出，於前人研究成果發現地球化學監測站所記錄到的氣體異常現象與地震發生的有高度對應關係，地震發生前，部分測站的氣體均產生明顯的異常現象。本章節分成兩部分，第一部份為目前整理所累積地球化學資料與 GPS 結果做初步比對，第二部分為氡氣異常與近測站的中大規模地震的統計分析結果。我們發現氡氣異常的發生並非隨機，與 100 公里內 M > 4 地震比較結果顯示，顯著的異常傾向於發生 M > 4 的地震前二年。而 GPS 連續記錄的取樣率以天為單位，難以判斷與地化異常的關係。

5-1 GPS 紀錄與氡氣異常之相關性

圖 5.1 為 2007 年 10 月地球化學監測站（梅山站、濁水潭站、二溪站）記錄到的氣體異常現象，三個測站分別於 10 月 18 日、10 月 14 日以及 10 月 07 日有氣體異常紀錄。我們將鄰近此三個地化站 2007 年的 GPS 資料畫出，如圖 5.2 所示。如圖 5.3 所示，地球化學監測站所記錄到的異常時間與 GPS 資料未顯現系統性相關，可能原因為 GPS 以一天為記錄單位，要與地化異常呈現相關性，需要持續時間夠長的地化異常紀錄。未來將朝向高時間取樣率的 GPS 資料處理研究，降低電離層干擾及週波未定值解所造成的跳動，以資加資料比對的解析程度。

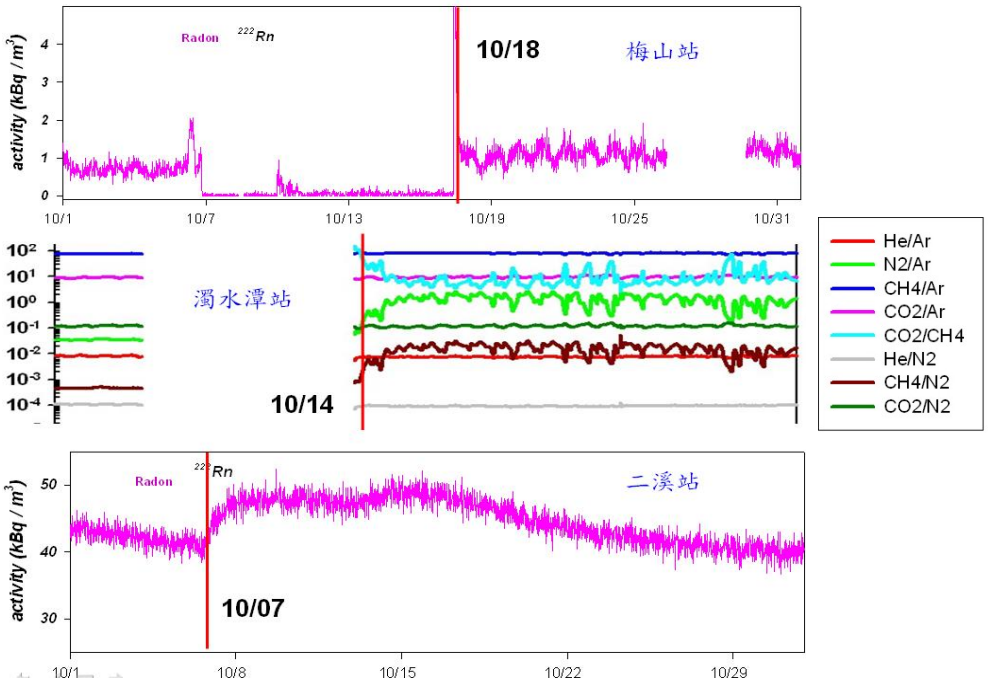


圖 5.1 梅山站、濁水潭站、二溪站 2007 年 10 月氣體濃度圖。梅山站與二溪站分別於 10 月 18 日及 10 月 07 日（紅色垂直線標出）氡氣濃度有明顯增高的趨勢；濁水潭站則於 10 月 14 日之後，氣體有明顯的跳動情況發生。

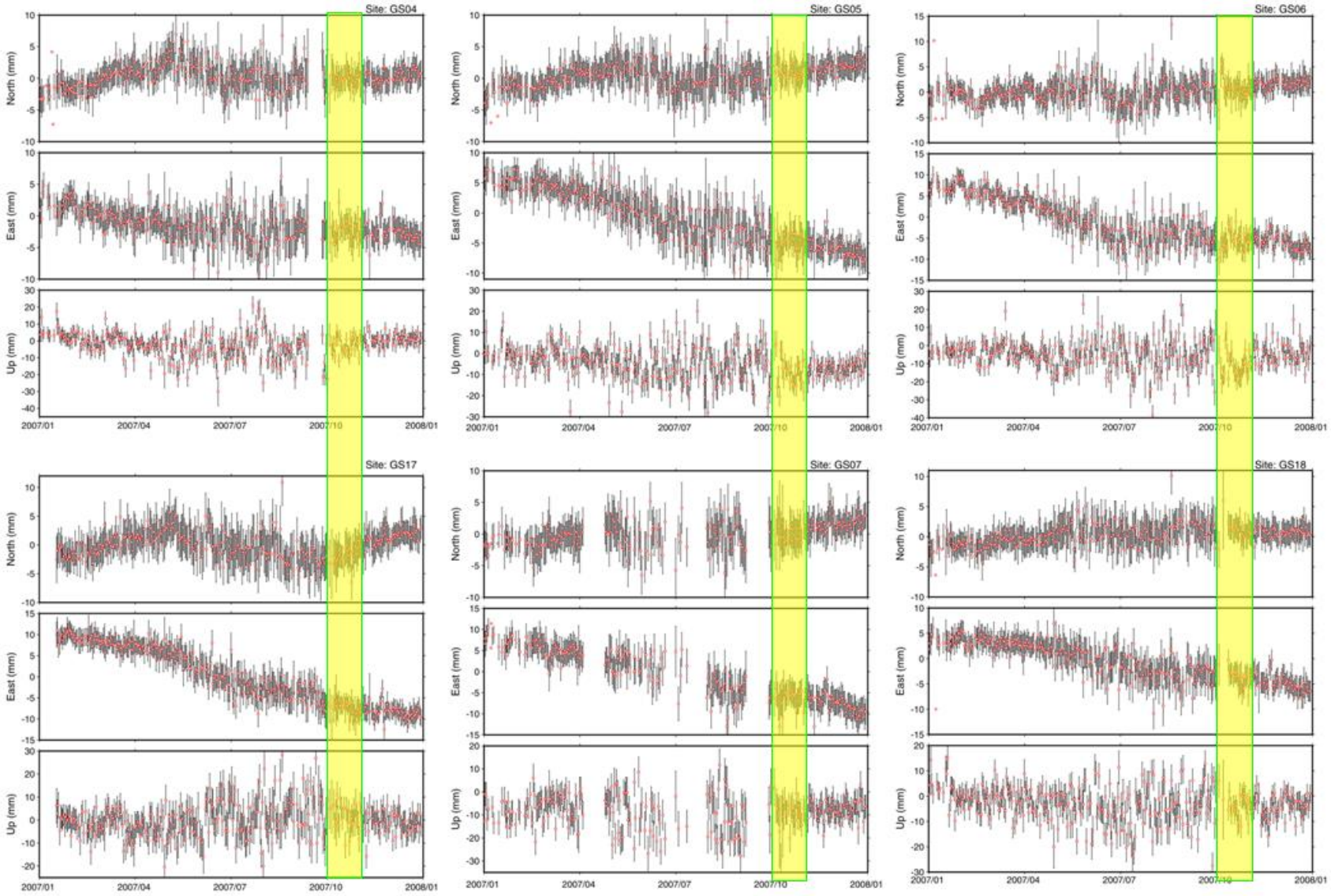


圖 5.2 鄰近梅山站、濁水潭站、二溪站之 GPS 觀測站 2007 年之記錄結果。黃色框線框出 2007 年 10 月的資料位置。

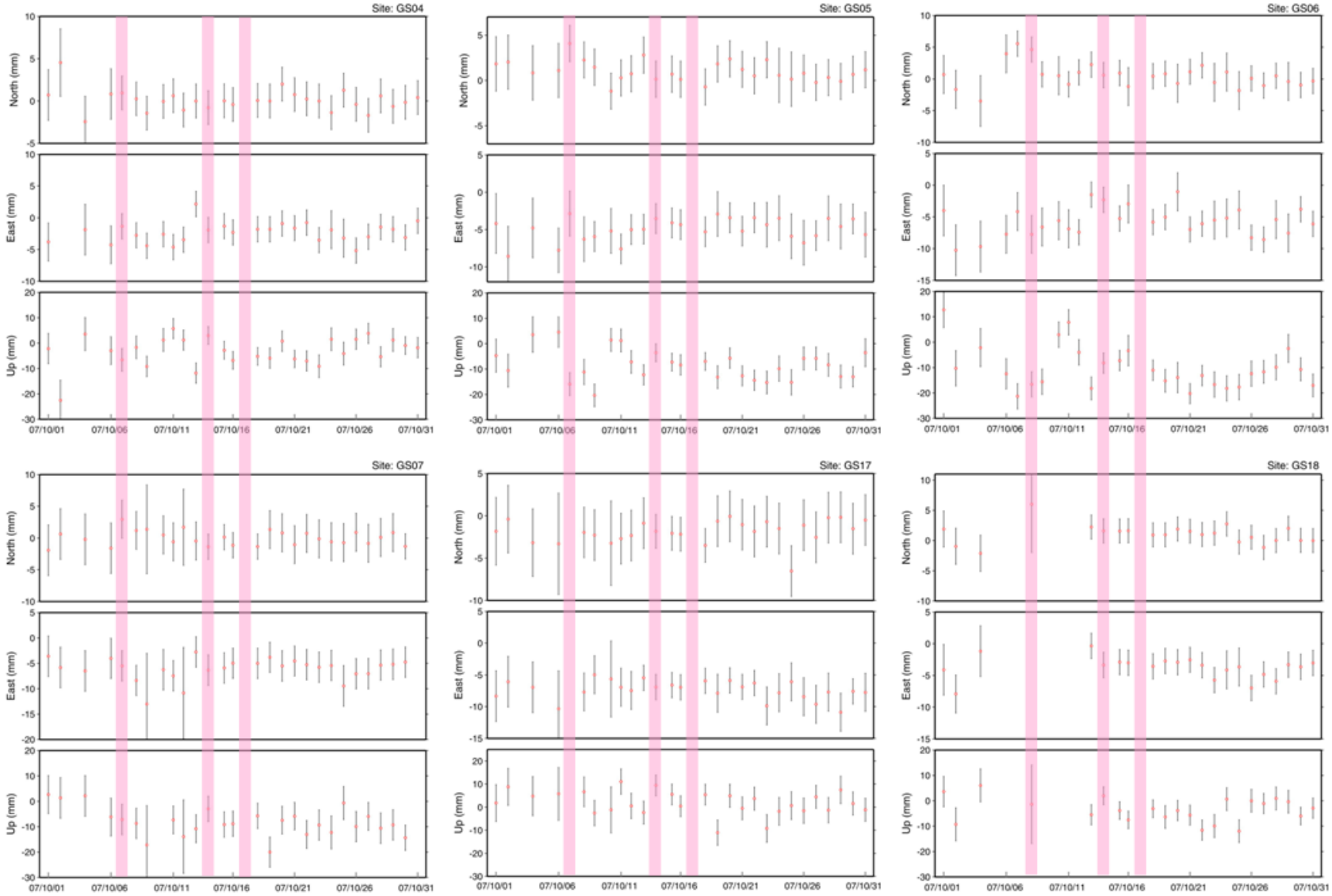


圖 5.3 地球化學監測站記錄之氣體異常時間點與 GPS 資料比對。圖中所標示的時間分別為 2007 年 10 月 18 日、10 月 14 日以及 10 月 07 日。

5-2 地震紀錄與氡氣異常之相關性

為了解氡氣異常與地震活動的相關性，圖 5.4 標示了地震活動與三個地化監測站的空間分布。在此，地震活動的時間範圍配合氡氣異常的觀測期（2005 年 11 月 23 日至 2009 年 10 月 8 日），然而地震目錄僅更新至 2009 年 5 月 31 日，因此如圖 5.4 所示，地震活動時間範圍為 2005 年 11 月 23 日至 2009 年 5 月 31 日。在此期間大部分的 M>5 地震(黃星)發生在台灣東部、南部外海，島內地震 M>5 地震除了集中分布在花東縱谷沿線之外，還有三個 M>5 地震皆發生於三個地化測站（紅三角形）附近。由於目前僅獲得三測站的氡氣異常資料，為初步對比地震活動與氣體異常的時間，我們主觀選取近測站的 M>4 地震事件（如圖 5.4 紅框所示）作後續時間相關性分析。

氡氣異常的持續時間（小時）與區域中規模地震的對比如圖 5.5 所示。我們發現氡氣異常持續時間超過 100 小時的紀錄皆與中規模地震有關，例如：梅山站氡氣異常持續時間最久的紀錄（>200 小時），與 2006 年 3 月 M5.09 僅相差 12 天; 地震前, 其他兩測站亦記錄到 100~150 小時的氡氣異常。然而，此區域的其他兩個 M>5 地震事件，卻未明顯相關於氡氣異常紀錄，說明地震規模與異常的持續時間並非一對一關係。梅山站在 2007~2008 年記錄到多起<50 小時的異常，大多數發生在無震期間（無中規模地震），相似情況也出現在中崙站 2008 年初及 2009 年初。二溪站觀測的地化異常數目較少，但在此站絕大多數的觀測皆發生於 M>4 地震前。

考慮地化異常與中大規模地震的時間依存關係，在圖 5.6 我們分別鎖定 M>4 地震前後半年、一年、一至二年、二至三年的時間段，理解地化異常與地震活動的時空關係。我們發現在地震發生前後半年內，所有觀測的地化異常有 61%是發生在地震前，若僅考慮較明顯的地化異常（持續時間超過 100 小時），我們發現 77%的明顯地化異常會在地震前發生（圖 5.6a）。在地震前後一年、一至二年、二至三年，分別有 66%、15%、0% 的明顯地化異常會在地震前發生（圖 5.6b-d）。此說明離地震時間越遠，震前的地化異常越不顯著，當時間長達兩年，氡氣的顯著異常衰減為零。而地化異常並不隨著地震的遠近而有系統性變化。

我們的初步分析得知，持續時間夠長的氡氣異常紀錄，皆與地震活動有關，其發生時間在地震前 10 天至 1 個月不等。未來擬加入更多地化測站異常資料，以朝能客觀的量化地震與地化異常的”觸發關係”，我們預期將地化異常大小與測站-地震距離、地震大小、震源機制等等相關參數作統計分析。

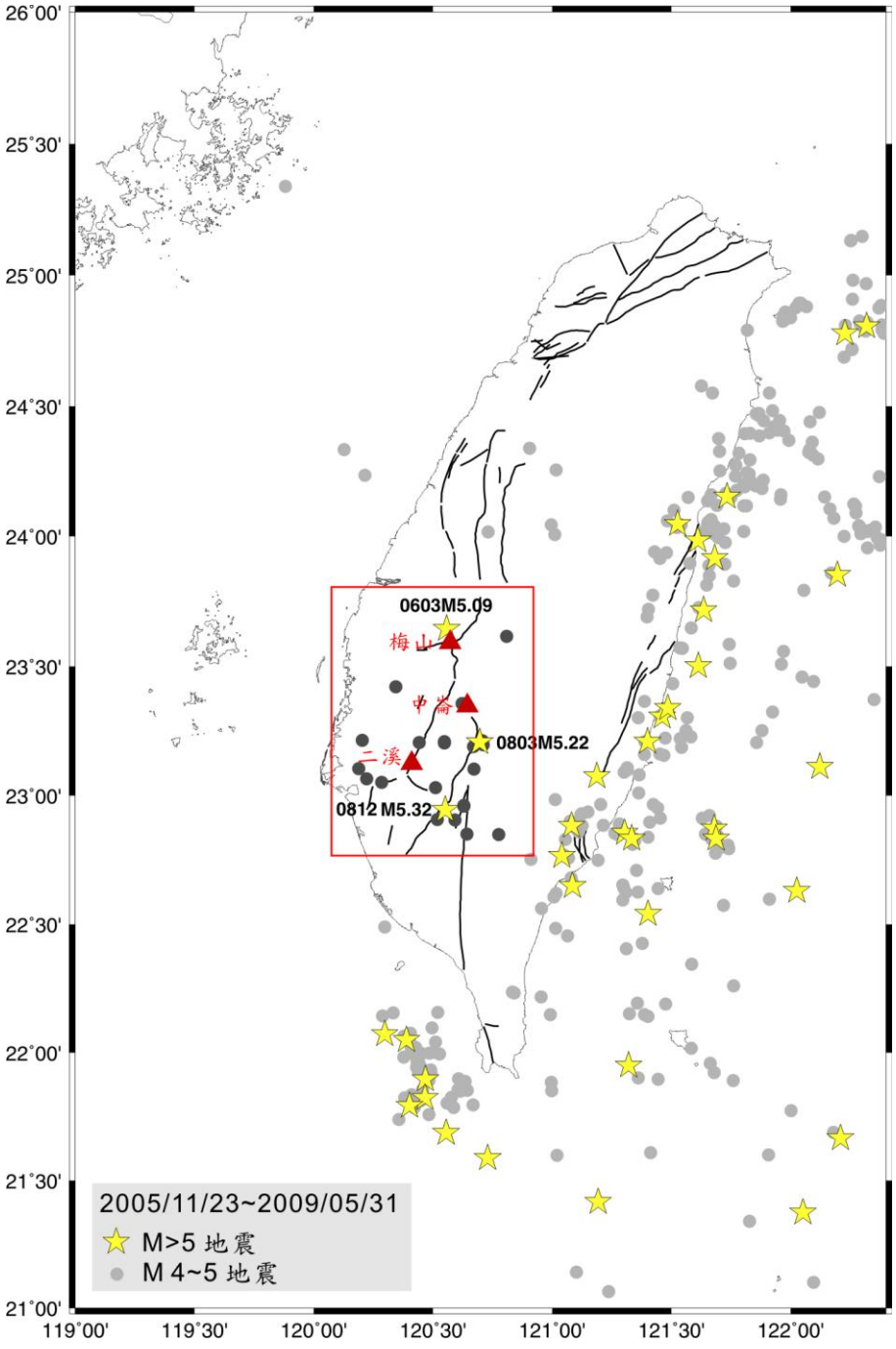


圖 5.4 台灣規模四以上地震活動分布圖。紅色三角形標示地球化學監測站；灰色圓與黃星分別代表 M4-5 及 M>5 地震。觀測時期為 2005 年 11 月 20 日（地化異常紀錄開始）至 2009 年 5 月 31 日（地震目錄結束）。紅色方形內中規模以上地震（M>4）被選取與三個測站的氡氣異作相關性比較。

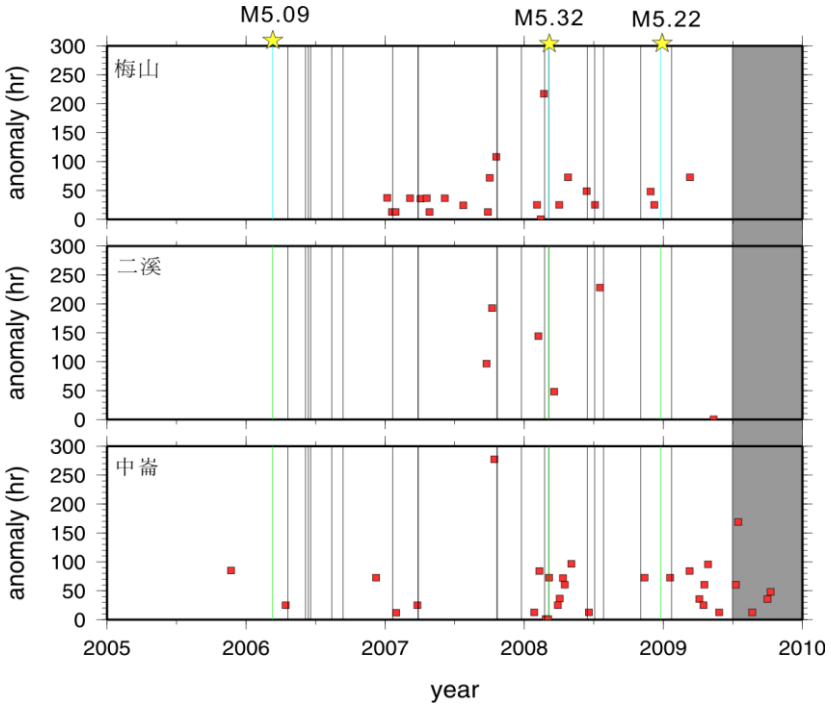


圖 5.5 三個地化監測站的氣體異常持續期與發生時間分布圖。綠線代表研究區域（圖 5.4 中紅框範圍）M>5 的地震發生時間，黑線代表 M4-5 的地震。灰色區域說明 2009 年 5 月 31 日之後地震資料尚未可得，不予比較。

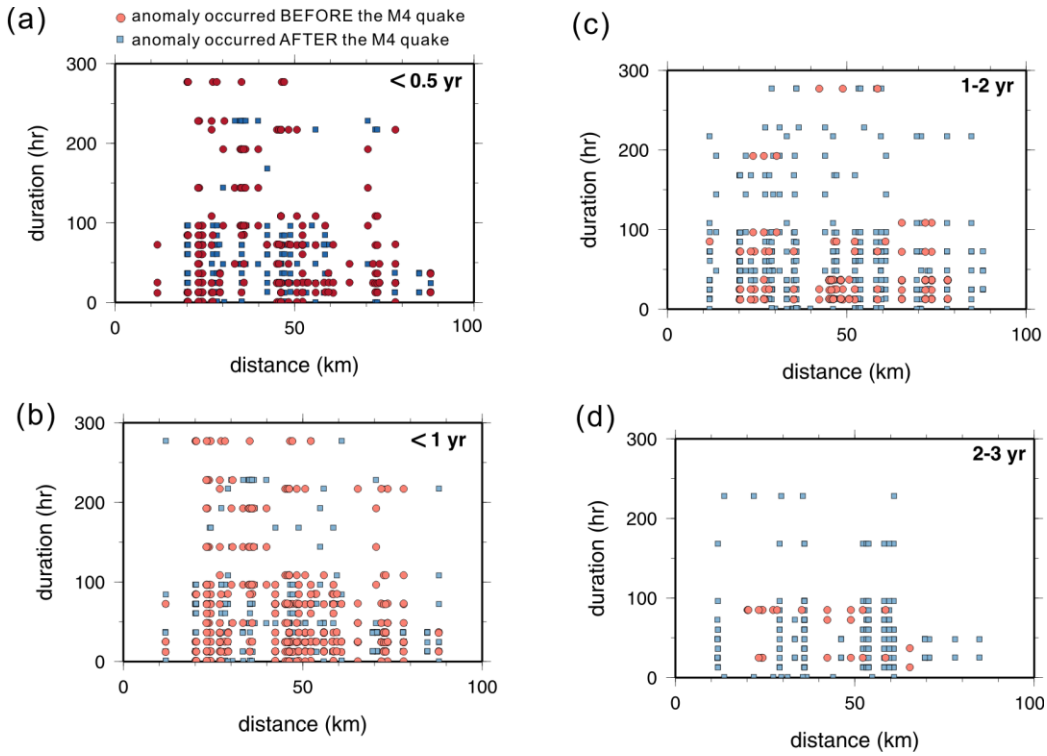


圖 5.6 地化異常在中大規模地震前後的表現與地震距離之關係圖。紅圓心為地化異常發生於中大規模地震前；藍方塊為地化異常發生於中大規模地震後。(a) 地化異常在中大規模地震相隔時間小於半年 (b) 相隔時間小於一年 (c) 相隔時間為一至兩年 (d) 相隔時間為兩至三年。

六、結論與建議

6-1 GPS 連續觀測站

1. 由 GPS 計算之主軸應變率顯示，台灣北部、東北部至宜蘭地區、中央山脈延伸至屏東恆春半島地區，呈現伸張之主軸應變。最大伸張面膨脹率可達 1.32 μstrain/yr；西部海岸平原之主軸壓縮應變較小，而西部麓山帶、中央山脈東側與花東縱谷至海岸山脈為之主軸應變率相當大，最大壓縮面膨脹率達 1.97 μstrain/yr。而旋轉率則是由花蓮北部沿中央山脈雪山山脈向東北方向順時鐘變化並增加旋轉角度，台南、高雄北部地區也為順時針旋轉，另一方面苗栗至台中地區亦呈現順時鐘旋轉的變化；海岸山脈至中央山脈東側及屏東恆春半島地區則呈現明顯的逆時針旋轉。
2. 北部地區結果顯示相對於澎湖白砂 S01R 站之速度場介於 1.8 至 4.5 mm/yr，其方位角介於 5^o 至 75^o 之間，平均速度場為約 3.2 mm/yr，平均方位角為 40^o，另外位於東北角龜山島之速度場為 15.1 mm/yr，其方位角為 111^o。本區域中大部分呈現伸張的主軸應變，僅在局部地區呈現壓縮變化，其中伸張較大的區域為宜蘭地區，最大伸張面膨脹率為 0.95 μstrain/yr。雪山山脈及北部山區呈現順時針旋轉，其他地區則無明顯旋轉趨勢。時間序列中，GS01 測站觀測時間最久，資料累積較豐富，因此可明顯觀察到移動方向相反的年週期變化，變化時間約為每年的 2 月初及 8 月初，且三個方向皆有此年週期變化現象。除了 GS01 測站之外，GS08 測站之南北方向之時間序列亦可看出此年週期變化之情形，變化時間約為每年的 6 月及 11 月，如圖 2.10 所示。GS10 及 GS13 測站的高程分量，下降後回升再下降，一階階的趨勢，GS10 測站從每年 10 月開始下降至隔年 7 月開始上升之後 10 月再下降，接近年週期變化；而 GS13 測站從資料接收（2005 年 8 月）到次年同一時期高程明顯下降約 41.7 mm 之後有先回升再下降的趨勢，此變化週期較長約 22 個月。
3. 新竹地區相對於澎湖白砂 S01R 站之速度場介於 3.3 至 5.5 mm/yr，其方位角介於 331^o 至 347^o 之間，平均速度場為約 4.7 mm/yr，平均方位角為 340^o。新竹市區與竹北地區呈現明顯的壓縮之主軸應變，最大壓縮面膨脹率為 1.42 μstrain/yr；其他地區都相當的小，都介於 0 之間。在旋轉率方面，除了北部沿海地區明顯的順時針旋轉外，其他地區皆無明顯旋轉趨勢。在時間序列方面，GS03 測站於 2005 年 4 月底，往南偏移了 8.2 mm，而高程方向抬升約 7.9 mm；GS03 測站及 GS15 測站從 2008 年 8 月起至 2009 年初，由南北方向之時間序列發現往北偏移約 10.8 mm 及 5.6 mm，之後有再下降的趨勢，與前一台北地區之 GS11 測站具有相同趨勢。
4. 中部地區相對於澎湖白砂 S01R 之速度場介於 1.6 至 6.8 mm/yr，其方位角介於 287^o 至 311^o 之間，平均速度場為約 3.6 mm/yr，平均方位角為 298^o。彰化斷層兩側差異約 2.2 mm/yr 之縮短量。本區域主要為壓縮應變為主，尤其橫跨車籠埔斷層出現較大量的壓縮應變，而車籠埔斷層上盤亦觀測到壓縮應變，顯示 921 震後速度場的變化在此斷層兩側呈現不均勻的分布。本區域之旋轉率變化，除了車籠埔斷層北段，有少許之順時針旋轉趨勢外，其他地區都無明顯之旋轉趨勢。時間序列中，本區域測站大致穩定，其中 GS23 測站從 2008

年 6 月至同年 9 月，垂直方向共抬升 103.3 mm；而其中 GS36 及 GS39 測站於東西方向之時間序列，以及 GS40 測站於南北方向之時間序列有明顯波動之變化，其斜率出現轉折變化之處時間分別為 2007 年 2 月 4 日、2008 年 3 月 2 日及 2009 年 1 月 3 日。目前其波動原因尚未明瞭，仍須透過資料累積來判斷是否有重複出現的週期現象，或地表變形之異常變化，以釐清變化之原因。

5. 嘉義地區相對於澎湖 S01R 之速度場介於 6.4 至 19.0 mm/yr，其方位角介於 261^{o} 至 302^{o} 之間，平均速度場為約 13.9 mm/yr，平均方位角為 282^{o} ；速度場由西往東增加之趨勢。在速度場分析結果中梅山斷層兩側有約 3.1 mm/yr 之差異量;九芎坑斷層兩側約 5.7 mm/yr 之差異量；而位於最東邊之觸口斷層兩側約 3.3 mm/yr 之差異量。由此三條斷層之速度差異發現九芎坑斷層兩側區域差異量為最大（5.7 mm/yr)；與本年度期中報告中九芎坑斷層兩側區域差異量（7.4 mm/yr）相比，減少了 1.7 mm/yr。在應變率方面，本區域大多呈現壓縮應變僅有小區域的伸張變化，主要壓縮量集中於斷層兩側，顯示有不等量的移動變化，最大壓縮面膨脹率達到 1.04 μstrain/yr。本區域之旋轉率呈現順時針旋轉之趨勢，於中部山區有較大的順時針旋轉率。時間序列中 GS04、GS05 與 GS17 測站在南北方向有明顯走勢的變化，該趨勢線在每年 5 月皆有位移方向的改變，意味的此重複現象是一種年週期變化。GS41 測站則是在垂直方向有沉陷之現象，自設立該測站後至 2008 年 5 月該站緩慢沉陷，之後為慢慢抬升之趨勢。
6. 台南地區相對於澎湖白砂 S01R 站之速度場介於 7.0 至 22.0 mm/yr，其方位角介於 257^{o} - 272^{o} 之間，平均速度場為約 14.4 mm/yr，平均方位角為 267^{o}；高屏地區相對於澎湖白砂 S01R 站之速度場介於 45.7 至 59.3 mm/yr，其方位角介於 271^{o} - 274^{o} 之間，平均速度場為約 54.6 mm/yr，平均方位角為 273^{o}；整個西南地區速度場由西往東及由北往南增加之趨勢。台南地區在後甲里斷層兩側差異約 7.2 mm/yr 之縮短量。此外，新化斷層兩側之水平速度場由北往南增加約 6.5 mm/yr，此速度場結果顯示新化斷層之活動特性以右移分量為主。台南高雄地區主軸應變為壓縮應變，較大壓縮應變分為兩個區域，一為高雄山區域最大壓縮面膨脹率為 0.90 μstrain/yr，另一部份則為後甲里斷層西側，最大壓縮面膨脹率為 1.00 μstrain/yr。而屏東地區則主軸應變為伸張應變，面膨脹率約為 0.09 μstrain/yr。本區域旋轉率方面，台南地區為順時針旋轉，由東往西旋轉率愈大；而台南往南逐漸變成逆時針旋轉，愈往南旋轉率愈大。西南地區時間序列大致上呈線性走勢，其 GS29 測站於南北方向於 2007 年 5 月時開始呈現向南移動的趨勢，該變化約有一個月的時間，之後又趨於穩定不變；GS29 及 GS31 測站則是在高程方向具有沉陷與抬升重覆出現之波動現象。
7. 運用 Defnode 與饒瑞鈞等（2008）及 Lin et al. (2009)共 976 個測站速度場資料運算來反演台灣各活動斷層的滑移速率、虧損速率及鎖定率等物理量值。在本研究中將台灣劃分為 27 個剛性塊體以及 24 條斷層進行塊體運動模擬的研究。模擬結果發現鎖定率高的斷層有金山、山腳斷層、車籠埔斷層南段、大尖山斷層、旗山斷層、潮洲斷層以及縱谷斷層中段。塊體運動長期滑移以縱谷斷層中段至南段最快，有 30 - 45 mm/yr，其餘都在 30 mm/yr

以下。斷層滑移速率虧損較高者在縱谷斷層的中段，有著高達 32 - 45 mm/yr 的虧損值，其他斷層約在 10 mm/yr 以下。

6-2 井下應變儀觀測

1. 井下應變儀部分先處理中興國小（TUSN）、太興國小（TAIS）、達邦（DARB）等三站的資料，這三站資料中除了達邦測站可看出較完整的井孔回復的雙指數鬆弛效應（Dual-Exponential Relaxation），其餘中興與太興國小測站都有數十微應變（μstrain）的上下起伏變動，而且看不出井孔回復的鬆弛效應。
2. 井下應變儀達邦測站，在除去了井孔效應以後，與地下水位的變化幾乎完全同步，1 公尺的水位變化可以造成約 7 μstrain 的變化。
3. 井下應變儀的資料，除了受到地下水層水壓改變而有明顯的變化以外，還受大氣壓力的顯著影響，而颱風期間的氣壓降低是最顯著的氣壓變化。在颱風期間氣壓降低，然後才回升，總共約兩天時間，而達邦與中興國小測站的面積應變變化也時立即性的膨脹，而且與地下水的影響一般，達邦的變化約為中興的三倍左右。更重要的是颱風過後，面積應變量隨即升高（膨脹），這應該是地下水位因雨量補充而升高，造成面積應變的升高。
4. 2007 年 10 月的柯羅莎（Krosa）颱風期間，應變儀紀錄顯示異常的改變，達邦站在颱風後有明顯的約 4 μstrain 的壓縮，而後再回升，而中興站則相反，先有約 1 μstrain 的膨脹，而後壓縮再回升。這個變化看起來不像是受氣壓變化的影響，因為氣壓的降低比應變的變化約提早了一天（以最低點計），也不像是颱風過後水位提升的影響，因為方向與其他例子不一致，所以很可能是有構造上意義的變化。
5. 在 2008 年 5 月的汶川地震表面波到達時，達邦與中興國小都在應變儀紀錄顯示應變量突然的改變，而且都是約 0.1 μstrain 的膨脹，這是否顯示這表面波的經過會引發地區性斷層的小地震，還是只是儀器的特性所致？值得再進一步的探討。
6. 汶川地震觸發台灣西部地區動態變形的現象，造成這種變形行為的原因目前尚未清楚。比照應變儀觀測資料，發現地下水壓的變化與面應變的變化並不一致，可推論地下水壓的變化並非直接影響應變變化的主要因素。

6-3 斷層潛能分析模式之評估

1. 由震測、重力、鑽探及地面調查資料，得知車籠埔斷層之傾角為東傾 40 度左右。在長期滑移速率的推估上，藉由從槽溝中觀察到的古地震事件抬升量及定年資料，可建立各槽溝事件之滑移速率；在短期滑移速率上，則採用於 1996 到 2006 跨車籠埔斷層之 GPS 測站觀測結果，並分為 1996~1999（震前）及 2000~2006（震後）兩個時段，分別列出 GPS 平行斷層走向、垂直斷層走向及垂直抬升之移動速率。在車籠埔斷層的分段特性上，則依中央地質調查所公布之版本，以烏溪為界分為南北兩段。在北段的同震抬升量平均可達 3.6

公尺，南段則為 1.5 公尺。在最大可能規模上，除了列出 921 集集地震量測之實際發生的特徵地震規模外，另外可以用斷層長度或面積帶入經驗公式式求得最大可能地震規模（Mw）約 6.58-7.78 之間。其車籠埔斷層之斷層參數詳見表 4.5。

2. 特徵地震模式的計算是以斷層參數表當中推估的參數進行，配合推估參數的可能範圍搭配出計算再現週期的參數組合表，特徵地震所推算出的車籠埔斷層特徵地震再現週期，全段為 183 年至 997 年，北段為 211 年至 494 年，南段為 144 年至 313 年。
3. 縱谷斷層從北到南可以分成 4 至 5 條不同活動行為的斷層區段，除最北端之花蓮段為快速潛移外，在瑞穗以北之北段大致是鎖定，而南段則大致是以快速潛移為主。瑞穗斷層從花蓮縣光復鄉南富往南延伸 25 公里至花蓮縣玉里鎮春日。從 1991 到 2002 背景地震震源分布顯示，瑞穗斷層有一不清楚之 40-50 度傾角之地震帶延伸至 25 至 35 公里深。在短期滑移速率上，參考 GPS 於 1996 至 1999 年量測之跨斷層水平移動速度，根據觀測結果顯示瑞穗斷層的短期水平滑移量為 13.3 至 20.4 mm/yr，方向為 309 至 314 度。在長期滑移速率推估上，陳文山在瑞穗斷層有三處的槽溝開挖，分別為大富、復興及安定橋槽溝，從這三個槽溝中可發現，在過去 700 年中有至少四次之古地震事件（包含 1951 年的地震），將各槽溝之古地震事件變位量除以定年資料，可獲得瑞穗斷層之長期抬升速率為 12.5 至 16.0 mm/yr。從槽溝開挖之古地震事件，推估其再現週期為 190 至 210 年。在最大可能規模上，用斷層長度或面積帶入經驗公式式求得最大可能地震規模（Mw）約 6.37 至 7.48 之間。其瑞穗斷層之斷層參數詳見表 4.10。
4. 由特徵地震所推算出的瑞穗斷層特徵地震再現週期為 52 年至 255 年。瑞穗斷層參數組合所推估的特徵地震發生率有些微超過實際地震的發生率的情況，可能是因為東部地區的斷層潛移量較大，因此參數表中的滑移速率可能有高估的情形，此部分與假設斷層滑移速率均由特徵地震釋放有所不同，此部分需要加入 GPS 觀測資料來輔助釐清。
5. 利用 BPT 統計模式估算發震機率，推估車籠埔斷層全段於 2009-2039、2009-2059、2009-2109 之發震條件機率分別為 7.48×10^{-7}%、4.00×10^{-3}% 和 0.72%。瑞穗斷層於 2009-2039、2009-2059、2009-2109 之發震條件機率分別為 27.71%、36.56% 和 65.31%。

6-4 整合觀測資料進行分析

1. 連續 GPS 測站與地化測站比對地震的相關性，在 GPS 部分與地震發生前無明顯異常變化，而地球化學部分則是在震前的分析中有異常變化，但目前仍無法分析出地震與地化異常的直接關連，因此是否在地震前有前兆現象仍需要更多的資料做為佐證，在 GPS 部分，未來將朝向高時間取樣率的資料處理研究，降低電離層干擾及週波未定值解所造成的跳動，以資加資料比對的解析程度。
2. 氡氣異常的持續時間與區域中規模地震的對比中，發現氡氣異常持續時間超過 100 小時的紀錄皆與中規模地震有關，例如：梅山站氡氣異常持續時間最久的紀錄（>200 小時），與 2006 年 3 月 M5.09 僅相差 12 天; 地震前, 其他兩測站亦記錄到 100 至 150 小時的氡氣異

常。然而，此區域的其他兩個 M>5 地震事件，卻未明顯相關於氡氣異常紀錄，說明地震規模與異常的持續時間並非一對一關係。梅山站在 2007~2008 年記錄到多起<50 小時的異常，大多數發生在無震期間（無中規模地震），相似情況也出現在中崙站 2008 年初及 2009 年初。

3. 初步分析得知持續時間夠久的氡氣異常紀錄，皆與地震活動有關，其發生時間在地震前 10 天至 1 個月不等。未來加入更多地化測站異常資料，我們將能客觀的量化地震與地化異常的"觸發關係"，我們預期將地化異常大小與測站-地震距離、地震大小、震源機制作統計分析。
4. 2008 年 10 月 7 日在二溪站所觀察的氡氣異常，在達邦和中興國小的井下應變儀皆觀察到應變異常，是否與柯羅莎颱風所誘發之慢地震有關，值得進一步研究。

6-5 綜合建議

本計畫今年度除了地調所設立 50 個 GPS 連續觀測站，另嘗試解算與其他單位交換 111 個 GPS 連續觀測站之資料。目前其他單位之資料處理只完成一年期，且尚未與地調所之解算結果進行座標系統整合，因此所得速度場之精確度仍有改善空間。雖然如此，仍正確顯示台灣地區地表運動之趨勢。明年度計畫將會對不同 GPS 的資料庫進行整合處理，並依目前 A 至 E 五區的分區方式，分別計算其速度場。此步驟將有助於縮短解算基線，因而降低誤差。

利用地表速度場所推求的主軸應變率及旋轉率也會引入各站速度的計算誤差，因此上述的資料整合及分區解算除了可求取更穩定之速度場外，也會提升應變場的精確度。另外，引入交換資料可大幅提升 GPS 站數，進而增加應變率及旋轉率場的空間解析度。

由於塊體模型假設塊體為一剛性塊體，並沒有考量塊體之內部變形，因此由塊體模型所求得之長期滑移速率有高估之可能性，但由塊體模型所估算之斷層面上滑移速率虧損和鎖定率，對於斷層活動潛勢之評估，仍有其參考價值。由於臺灣西部麓山帶，斷層作用常伴隨著摺皺作用，部分變形為摺皺作用所吸收，如何評估此部分之分配量，為未來研究的重點。建議未來研究時，將 GPS 和水準資料疊加在地質剖面上，詳細研判地質構造與 GPS 和水準資料觀測之變形相互比較。同時有關塊體模型中，斷層面之三維幾何位態亦影響到模擬的結果，未來將整合中油的地質剖面資料，以求得更精確的斷層面三維幾何位態。

地下水位與應變的關係是否為線性，這一方面有待繼續研究，畢竟西部地區地下水豐富，變化較大，已明顯的影響到井下應變儀的觀測，必需建立一個好的修正模式，才能使得 200 公尺深的應變儀資料能正確的代表較深層的岩層應變，也才能看到較細微的構造應變。對於地下水的升降對應變儀變化的影響，其實還有個疑點，一般而言，地下水升高表示水壓增加，為何同樣在井底的應變儀反而是膨脹？這機制尚有待更多資料與更詳細的模式來探討。

汶川地震觸發台灣西部地區動態變形的現象，這可從應變儀的觀測資料中得知。然而造成這種變形行為的原因目前尚未清楚，比照應變儀觀測資料，發現地下水壓的變化與面應變的變化並不一致，可推論地下水壓的變化並非直接影響應變變化的主要因素。應變儀觀測到

的變形現象也主要發生於表面波到達之後，究竟此現象是否也反應中央山脈下的底部滑脫面受震波觸發產生的振動，還是為其他的原因，仍待進一步的資料的佐證。

本計畫的井下應變儀、地震儀提供偵測 LFT、重新探討無震滑移潛勢的最佳契機。低頻脈動的週期行為在許多地區已證明和 GPS 記錄到的無震滑移事件（SSE）相關，更說明此類研究可與地表變形的監測相輔相成、以達到最佳科學及應用價值。井下測站對區域變形具備良好的連續紀錄能力，利用中央地調所高精度井下地震儀監測 LFT、並估計對應的地震矩能量、以利地震潛勢分析，是下一階段目標，本計畫擬在明年度詳細檢視井下地震儀的資料以評估 LFT 的觀測條件。

活動斷層潛勢分析之成果，可以參考美、日兩國之展示方式，如全日本活動斷層的潛勢分析成果圖，圖中包含了各活動斷層之分布位置、發生機率高低及發生之規模，且活動斷層潛勢以不同之顏色來表示，另以表格方式條列出各活動斷層 30 年，50 年，100 年之發生機率。至於美國的展示方式則類似於日本，為未來 30 年規模大於 6.7 之活動斷層分布及機率分布圖的方式展示。對於工程建設而言，活動斷層評估工作已經有其傳統。近年來，在斷層分段及特性上的了解，使得在決定最大可能地震或安全停機地震上會更為準確。了解斷層的重複間隔，可用來推算地震規模機率密度函數，以供進一步地震危害度分析之用。台灣近年來由於中央地調所致力推動之「活動斷層資料庫建置」計畫，對於台灣幾條主要活動斷層已累積不少之資料，包括斷層位置、分段特性、大地測量、槽溝古地震研究等，整合這些資料，可以初步進行活動斷層潛勢評估，這個成果便能提供給工程界做為耐震設計參考及工址之風險評估，達到防災減災的目的。

地球化學異常變化的整合成析，目前仍無法分析出地震與地化異常的直接關連，但 2008 年 10 月 7 日在二溪站所觀察的氡氣異常，在達邦和中興國小的井下應變儀皆觀察到應變異常，是否與柯羅莎颱風所誘發之慢地震有關，未來將加強此部分之研究。另外對於 GPS 之資料與地球化學異常變化之比對，未來將朝向高時間取樣率的資料處理研究，降低電離層干擾及週波未定值解所造成的跳動，以資加資料比對的解析程度。

七、參考文獻

日本地震調查研究推進本部地震調查委員會，2008，全國地震動預測地圖 2008 年版。

李錫堤，1993，活斷層工程評估的新發展。地工技術，第 44 期，第 5-18 頁。

林啟文、張徽正、盧詩丁、石同生、黃文正，2000，台灣活動斷層概論，第二版。經濟部中央地質調查所，共 122 頁。

吳相儀，2000，台灣地區中大型地震震源參數分析。國立中央大學地球物理研究所碩士論文。

陳致言，2007，台灣西南部井下應變研究。95 年度研究發展報告，經濟部中央地質調查所，共 51 頁。

楊耿明、黃旭燦、吳榮章、丁信修、李長之、梅文威、徐祥宏，2003， 斷層活動性觀測與地震潛勢評估調查研究：台灣陸上斷層帶地質構造與地殼變形調查研究(5/5)－台灣西部麓山帶地區地下構造綜合分析。經濟部地質調查所報告第 93-13 號，59 頁。

蔡主權、葉永田、鄭世楠，1987，南化水庫設計反應譜及人造合成地震之研究。南化水庫計畫檢討報告，第 16 號，中央研究院地球科學研究所。

鄭錦桐，2002，台灣地區地震危害度的不確定性分析與參數拆解。國立中央大學地球物理研究所博士論文，227 頁。

饒瑞鈞、余致義、洪日豪、胡植慶、李建成、詹瑜璋、許麗文，2006，地震地質調查活動及活動斷層資料庫建置—活動斷層監測系統計畫(5/5)。經濟部中央地質調查所研究報告 95-10 號，241 頁。

饒瑞鈞、胡植慶、李元希，2008，地變動監測分析(1/4)。經濟部中央地質調查所報告，第 96-11 號，共 152 頁。

Anagnos, T., and Kiremidjian, A.S., 1988. A review of earthquake occurrence models for seismic hazard analysis. Probabilistic Eng. Mech., 3, 3-11.

Anderson, J.G., 1979. Estimating the seismicity from geological structure for seismic-risk studies. Bull. Seism. Soc. Am., 69, 135-158.

Anderson, J.G., and Luco, J.E., 1983. Consequences of Slip Rate Constraints on Earthquake Occurrence Relations. Bull. Seismol. Soc. Am., 73, 471-496.

Ang, A.H.S., and Tang, W.H., 1975. Probability concepts in engineering planning and design. Vol. 1, Basic Principles, Wiley, N. Y.

Arabasz, W. J., and Robinson, R., 1976. Microseismicity and geologic structure in the northern south island, New Zealand. J. Geol. Geophys., 19, 569-601.

Bollina, M.G., 1970. Surface faulting and related effects: in Earthquake Engineering. R. L. Wiegel, Editor, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 47-74.

Chapman, S., and Lindzen, R.S., 1970. Atmospheric Tides. D. Reidel Publishing, Dordrecht-Holland, 200pp.

Chen, W.S., Yen, I.C., Keegan P. Fengler, Charles M. Rubin, Yang, C.C., Yang, H.C., Chang, H.C., Lin, C.W., Lin, W.H., Liu, Y.C., and Lin, Y.H., 2007a. Late Holocene paleoseismicity of the southern part of the Chelungpu Fault in central Taiwan: Evidence from the Chushan excavation ssite. Bull. Seismol. Soc. Am., 97(1B), 1-13.

Chen, W.S., Yang, C.C., Yen, I.C., Lee, L.S., Lee, K.J., Yang, H.C., Chang, H.C., Yoko Ota, Lin, C.W., Lin, W.H., Shih, T.S., and Lu, S.T., 2007b. Late Holocene paleoearthquake activity in the middle part of the Longitudinal Valley fault, eastern Taiwan. Earth Planet. Sci. Lett., 264, 420-437.

Coppersmith, K.J., 1991. Seismic source characterization for engineering seismic hazard analyses. Proceeding Fourth International Conference on Seismic Zonation. Stanford University, 4, 3-60.

Cornell, C.A., and Winterstein, S.R., 1986. Applicability of the Poisson earthquake-occurrence model, in seismic hazard methodology for the central eastern United States. EPRI Research Report NP-4736, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California.

Davison, F.C., and Scholz, C.H., 1985. Frequency-moment distribution of earthquakes in the Aleutian Arc: A test of the Characteristic Earthquake Model. Bull. Seismol. Soc. Am., 75, 1349-1361.

Dragert, H., Wang, K., and James, T.S., 2001. A silent slip event on the deeper Cascadia subduction interface. Science, 292, 1525–1528.

Ellsworth, W.L., Matthews, M.V., Nadeau, R.M., Nishenko, S.P., Reasenberg, P.A., and Simpson, R.W., 1999. A physically-based earthquake recurrence model for estimation of long-term earthquake probabilities. U. S. Geological Survey, OFR 99-522.

Gardner, J. K., and Knopoff, L., 1974. Is the sequence of earthquakes in southern California, with aftershocks removed, poissonian? Bull. Seismol. Soc. Am., 64, 1363-1367.

Gladwin, M.T., 1984. High Precision multi component borehole deformation monitoring. Rev. Sci. Instrum., 55, 2011-2016.

Gladwin, M.T., Gwyther, R.L., Higbie, J.W., and Hart, R.G., 1991. A medium term precursor to the Loma Prieta earthquake? Geophys. Res. Lett., 18, 1377-1380.

Gomberg, J., Rubinstein, J.L., Peng, Z., Creager, K.C., Vidale, J.E., and Bodin, P., 2008. Widespread triggering of nonvolcanic tremor in California. Science, 319, doi:10.1126/science.1149164.

Gutenberg, B., and Richter, C.F., 1944. Frequency of earthquake in California. Bull. Seismol. Soc. Am., 34, 185-188.

Hanks, T. C., and Kanamori, H., 1979. A moment magnitude scale. J. Geophys. Res., 84, 2348-2350.

Hirose, H., and Obara, K., 2005. Repeating short- and long-term slow slip events with deep tremor activity around the Bungo channel region, southwest Japan. Earth Planets and Space, 57, 961-972.

Hirose, H., and Obara, K., 2006. Short-term slow slip and correlated tremor episodes in the Tokai region, central Japan. Geophys. Res. Lett., 33, L17311, doi:10.1029/2006GL026579.

Ide, S., Beroza, G.C., Shelly, D.R., and Uchide, T., 2007. A scaling law for slow earthquake. Nature, 447, 76-79.

Johnston, M.J.S., Linde, A.T., Sacks, I.S., and Myren, D., 1986. Borehole dilatometer strain array-Preliminary results from Mojave Desert. Eos Trans. AGU, 63, 430.

Johnston, M.J.S., Linde, A.T., and Agnew, D.C., 1994. Continuous borehole strain in the San Andreas Fault zone before, during, and after the 28 June 1992, Mw 7.3 Landers, California Earthquake. Bull. Seismol. Soc. Am., 84, 799-805.

Kagan, Y.Y., and Knopoff, L., 1987. Random stress and earthquake statistics; time dependence. J. Geophys. Res., 88, 723-731.

Kanamori, H., 1977. The energy release in great earthquakes. J. Geophys. Res., 82, 2981-2987.

Kao, H., and Chen, W.P., 2000. The Chi-Chi Earthquake sequence: Active, out-of-sequence thrust faulting in Taiwan. Sciences, 288, 346-2,349.

Kao, H., Shan, S., Dragert, H., Rogers, G., Cassidy, J.F., and Ramachandran, K., 2005. A wide depth distribution of seismic tremors along the northern Cascadia margin. Nature, 436, 841–844.

Kramer, S. L., 1996. Geotechnical Earthquake engineering. Prentic-Hall, Upper Saddle River. 653 pp.

Kuochen, H., Wu, Y.M., Chen, C.H., Hu, J.C., and Chen, W.S., 2004. Relocation of the eastern Taiwan earthquakes and its tectonic implications. Terr. Atmos. Ocean. Sci., 15, 647-666.

Langbein, J., and Johnson, H. 1997. Correlated errors in geodetic time series: Implications for time-dependent deformation. J. Geophys. Res., 102, 591-604.

La Rocca, M., Creager, K.C., Galluzzo, D., Malone, S., Vidale, J.E., Sweet, J.R., and Wech, A.G., 2009. Cascadia tremor located near plate interface constrained by S minus P wave times. Science, 323, 620-623.

Lee, S.J., and Ma, K.F., 2000. Rupture process of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake from the inversion of teleseismic data. Terr. Atmos. Ocean. Sci., 11, 591-608.

Lin, K.C., Hu J.C., Wei, S.Y., Chang P.C., Ching, K.E., and Rau, R.J., 2009. Crustal deformation and coseismic displacement from continuous GPS in the last decade in Taiwan. European Geosciences Union General Assembly 2009. Vienna, Austria.

Matsuda, T., 1975. Magnitude and recurrence interval of earthquakes from a fault associated. J. Seism. Soc., 2, 28, 268-283.

McCaffrey, R., 2002. Crustal block rotations and plate coupling, in Plate Boundary Zones, Geodyn., 30, 101-122.

McCausland, W., Malone, S., and Johnson, D., 2005. Temporal and spatial occurrence of deep non-volcanic tremor: From Washington to Northern California. Geophys. Res. Lett., 32, L24311, doi:10.1029/2005GL024349.

Merz, H.A., and Cornell, C.A., 1973. Seismic Risk Analysis based on a Quadratic Magnitude-Frequency Law. Bull. Seismol. Soc. Am., 63, 1999-2006.

Nadeau, R., and Dolenc, D., 2005. Nonvolcanic tremors deep beneath the San Andreas Fault. Science, 307, 389.

National Research Council, 1988. Probabilistic Seismic Hazard Analysis. National Academic Press, Washington, D.C., 97pp.

Nikolaidis, R., 2002. Observation of geodetic and seismic deformation with the Global Positioning System. Ph.D. dissertation, Univ. of Calif. San Diego, San Diego., 249 pp,

Okada, Y., 1985. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. Bull. Seismol. Soc. Am., Vol. 75, No. 4, 1135-1154.

Obara, K., 2002. Nonvolcanic deep tremor associated with subduction in southwest Japan. Science, 296, 1679-1681.

Obara, K., and Hirose, H., 2006. Non-volcanic deep low-frequency tremors accompanying slow slips in the southwest Japan subduction zone. Tectonophysics, 417, 33-51.

Peng, Z., and Chao, K., 2008. Non-volcanic tremor beneath the Central Range in Taiwan triggered by the 2001 Mw 7.8 Kunlun earthquake. Geophys. J. Int., 175, 825-829, doi:10.111/j.1365-246X.2008.03886.x

Prescott, W.H., Savage, J.C., and Kinoshita, W.T., 1979. Strain accumulation rates in the western United States between 1970 and 1978. J. Geophys. Res., 84, 5423-5435.

Reasenberg, P.A., Hanks, T.C., and Bakun, W.H., 2003. An empirical model for earthquake probabilities in the San Francisco Bay region, California. Bull. Seismol. Soc. Am., 93, 1-13.

Roeloffs, E., 2005. Long-term trends in borehole strainmeter and tiltmeter data. Strainmeter and Tiltmeter Course.

Rogers, G., and Dragert, H., 2003. Episodic tremor and slip on the Cascadia subduction zone: The chatter of silent slip. Science, 300, 1942-1943.

Sagiya, T., Miyazaki, S., and Tada, T., 2000. Continuous GPS array and present-day crustal deformation of Japan. PAGEOPH, 157, 2303-2322.

Schwartz, D.P., and Coppersmith, K.J., 1984. Fault behavior and characteristic earthquakes: example from the Wasatch and San Andreas Fault Zones. J. Geophys. Res., 89, 5681-5698.

Schwartz, S.Y., and Rokosky, J.M., 2007. Slow slip events and seismic tremor at circum-Pacific subduction zones. Rev. Geophys., 45, doi:10.1029/2006RG000208.

Shelly, D.R., Beroza, G.C., and Ide, S., 2007. Non-volcanic tremor and low-frequency earthquake swarms. Nature, 446, 305-307.

Shen, Z.K., Jackson, D.D., and Ge, B.X., 1996. Crustal deformation across and beyond the Los Angeles basin from geodetic measurements. J. Geophys. Res., 101, 27957-27980.

Slemmons, D.B., 1982. Determination of design earthquake magnitudes for microzonation. Proceedings, 3rd International Earthquake Microzonation conference, Seattle, Washington, 1, 119-130.

Szeliga, W., Melbourne, T., Miller, M., and Santillian, V., 2004. Southern Cascadia episodic slow earthquakes. Geophys. Res. Lett., 31, L16602, doi:10.1029/2004GL020824.

Takemoto, S., Yamamoto, T., Mukai, A., Otsuka, S., and Fujimori, K., 2003. Crustal strain observation for nine years with a laser strainmeter in Kobe, Japan. J. Geody., 35, 483-498.

Uhrhammer, R.A., 1986. Characteristic of northern and central California seismicity. Abs. Earthquake Notes, 1, 21.

United States Geological Survey, 2008. Documentation for the 2008 Update of the United States National Seismic Hazard Maps Open-File Report. 2008–1128.

Wallace, R.E., 1970. Earthquake recurrence intervals on the San Andreas fault. Geol. Soc. Am. Bull., 81, 2875-2889.

Ward, S.N., 1998. On the consistency of earthquake moment rates, geological fault data, and space geodetic strain: the United States. Geophys. J. Int., 134, 172-186.

Watanabe, T., Hiramatsu, Y., and Obara, K., 2007. Scaling relationship between the duration and the amplitude of non-volcanic deep low-frequency tremors. Geophys. Res. Lett., 34, L07305, doi:10.1029/2007GL029391.

Wdowinski, S., Bock, Y., Zhang, J., Fang, P., and Genrich, J., 1997. Southern California permanent GPS geodetic array: Spatial filtering of daily positions for estimating coseismic and postseismic displacements induced by the 1992 Landers earthquake. J. Geophys. Res., 102, 18057-18070.

Wells, D.L., and Coppersmith, K.J., 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. Bull. Seismol. Soc. Am., 84, 974-1002.

Wesnousky, S.G., 1994. The Gutenberg-Richter or characteristic earthquake distribution, Which is it? Bull. Seismol. Soc. Am., 84, 1940-1959.

Working Group on California Earthquake Probabilities, 2003. Earthquake Probabilities in the San Francisco Bay Region: 2002-2031.USGS Open-File Report 03-214.

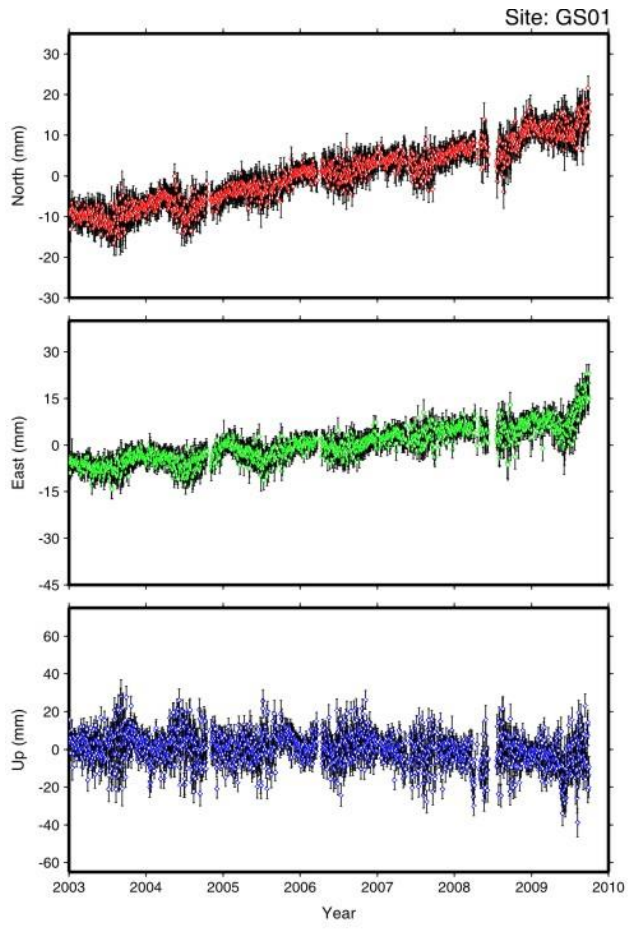
Wyss, M., 1979. Estimating maximum expectable magnitude of earthquakes from fault dimensions. Geology, 7, 336-340.

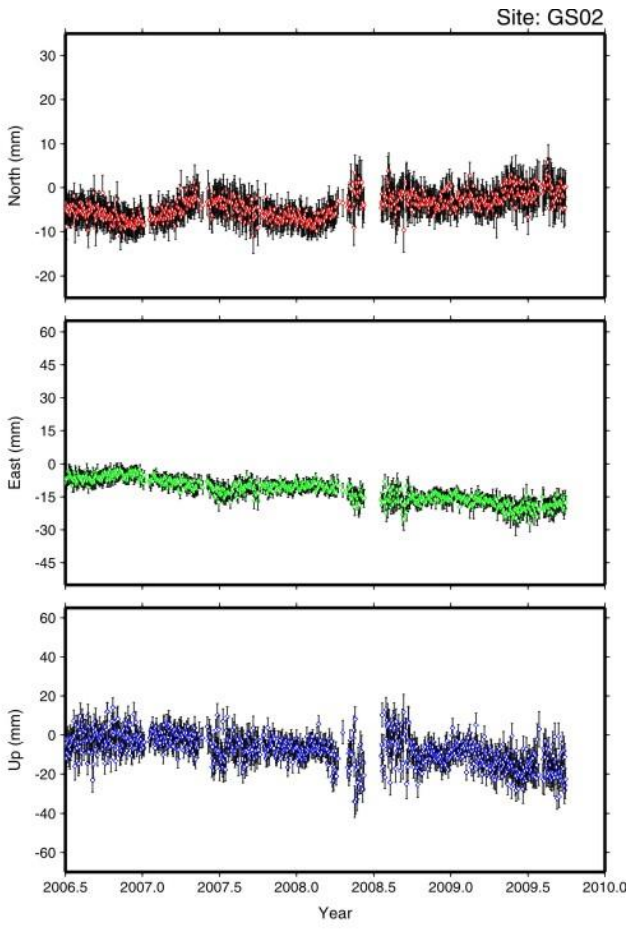
Youngs, R.R., and Coppersmith, K.J., 1985. Implications of fault slip rates and earthquake recurrence models to probabilistic seismic hazard estimates. Bull. Seismol. Soc. Am., 75, 939-964.

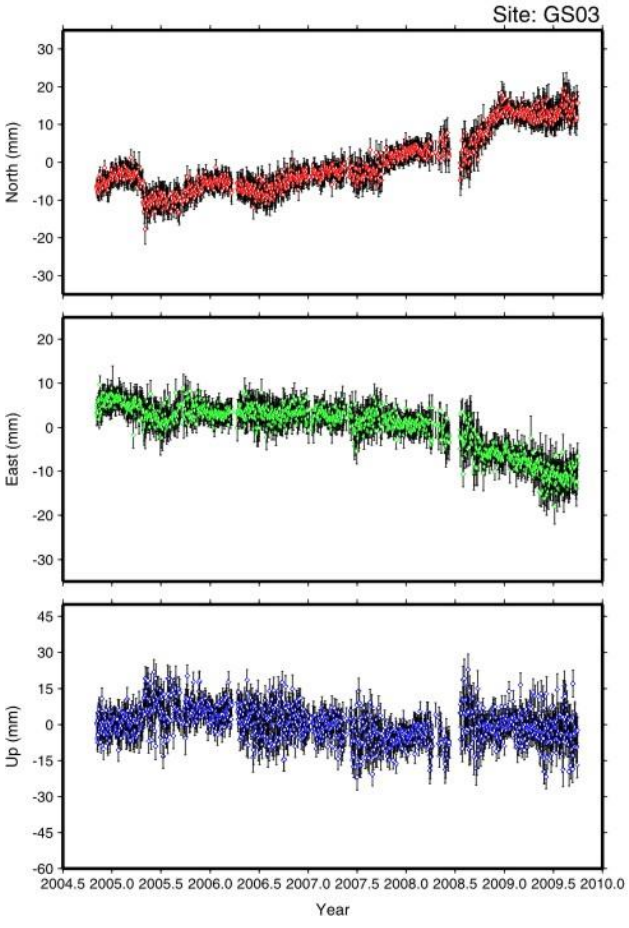
Yu, S.B., and Kuo, L.C., 2001. Present-day crustal motion along the Longitudinal Valley Fault, eastern Taiwan. Tectonophysics, Vol. 333, 199-217.

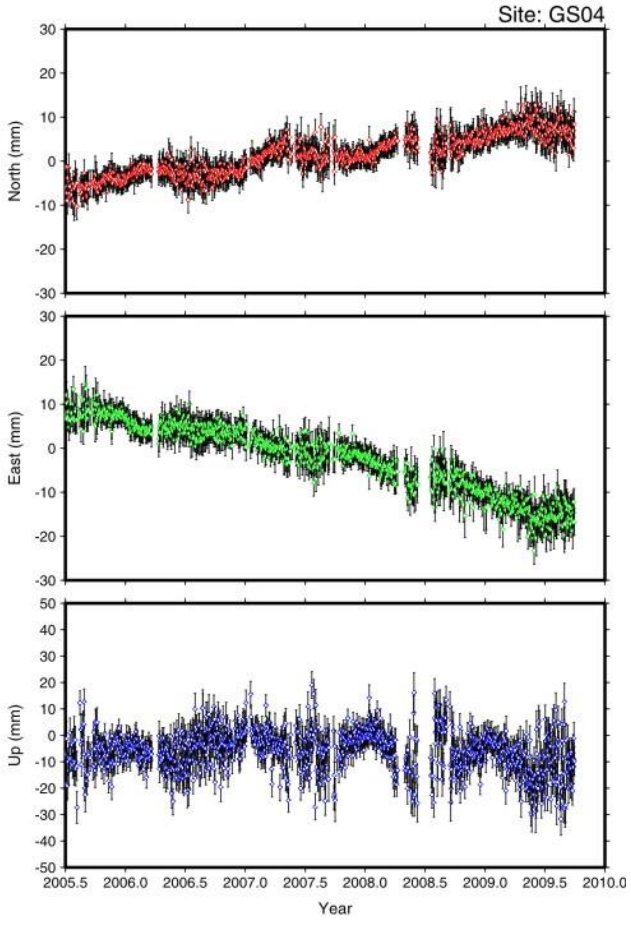
Zadro, M., and Braitenberg, C., 1999. Measurements and interpretations of tilt-strain gauges in seismically active areas. Earth. Sci. Rev., 47, 151-187.

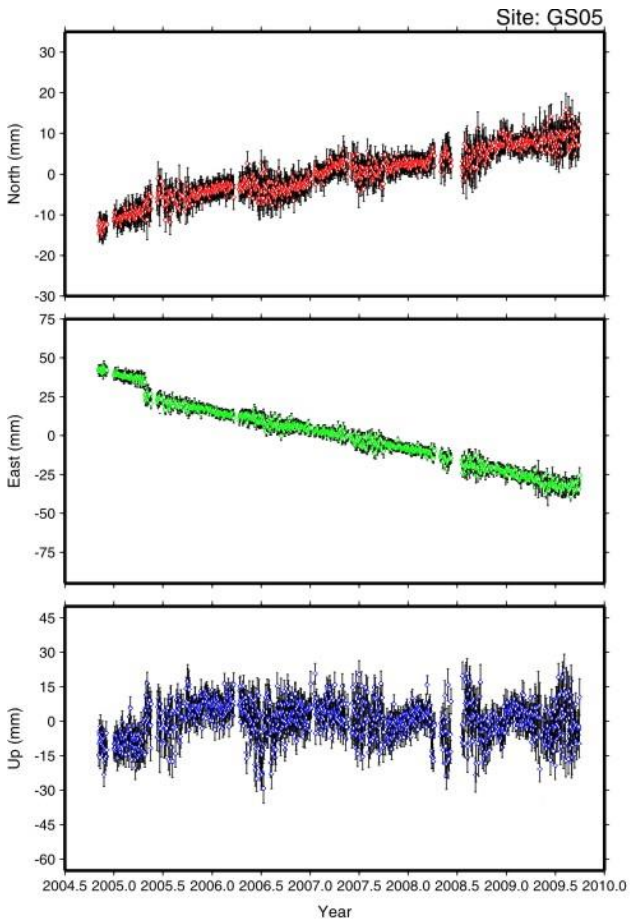
附錄A 中央地質調查所GPS連續站時間序列

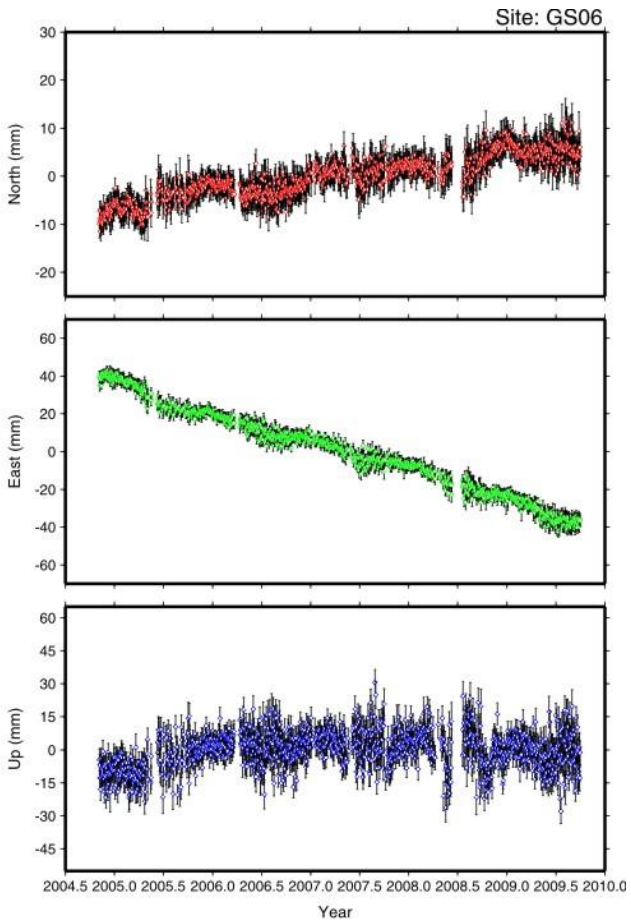

Site: GS01
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year

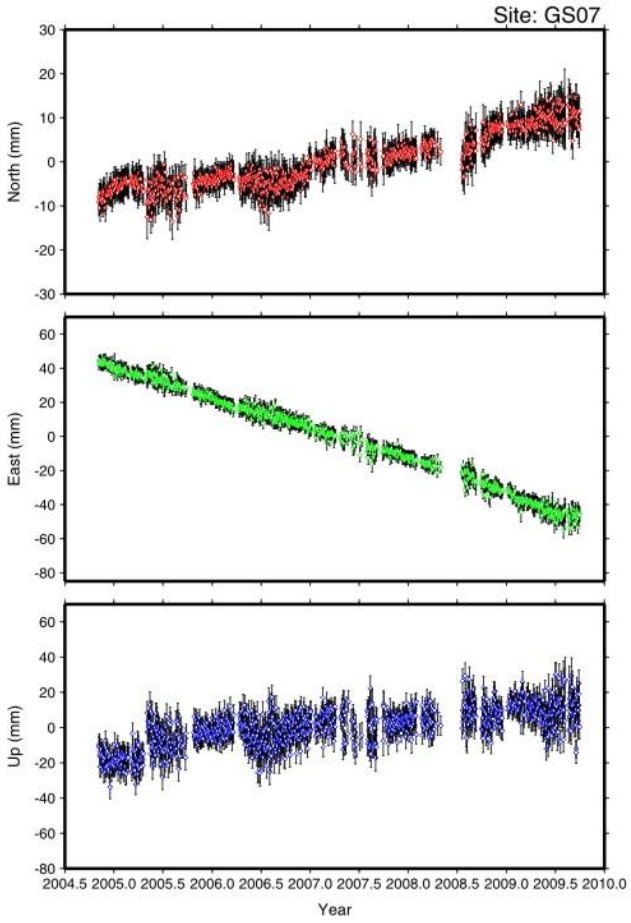

Site: GS02
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year

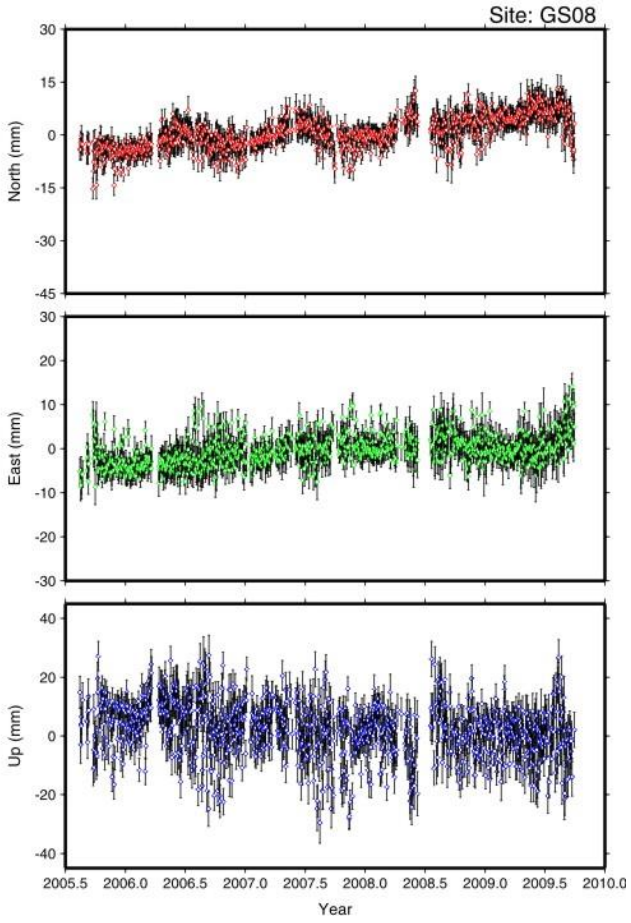

Site: GS03
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year

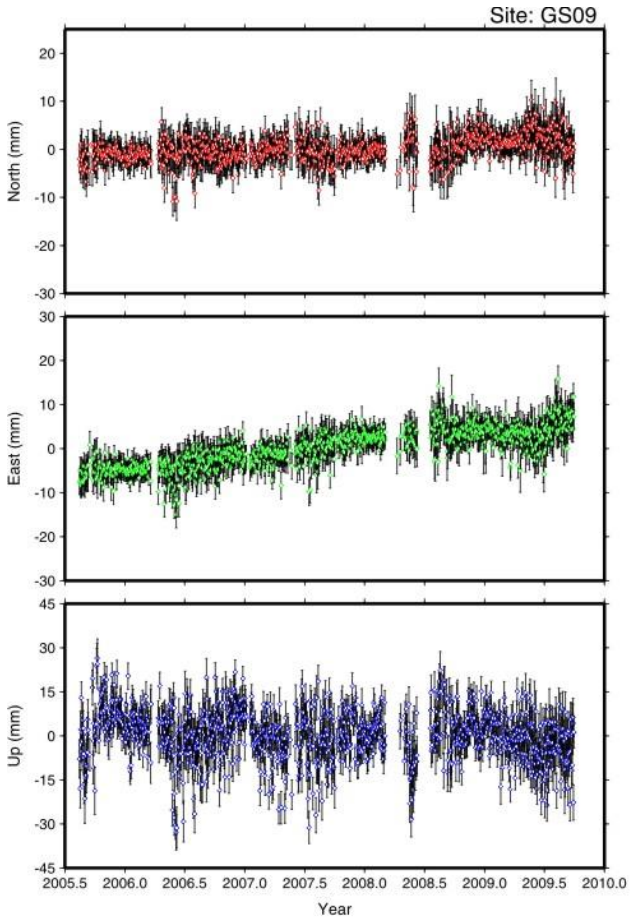

Site: GS04
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year

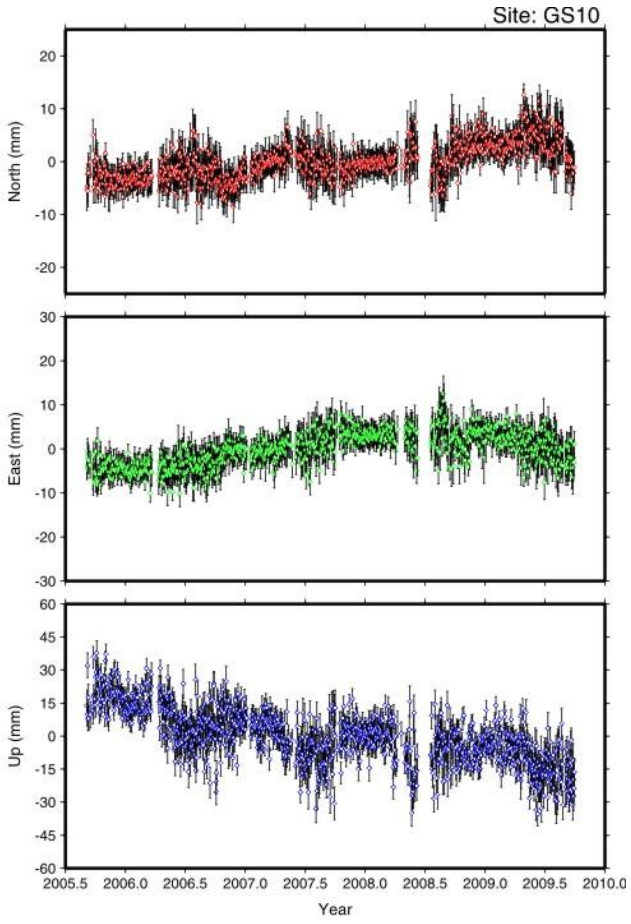

Site: GS05
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year

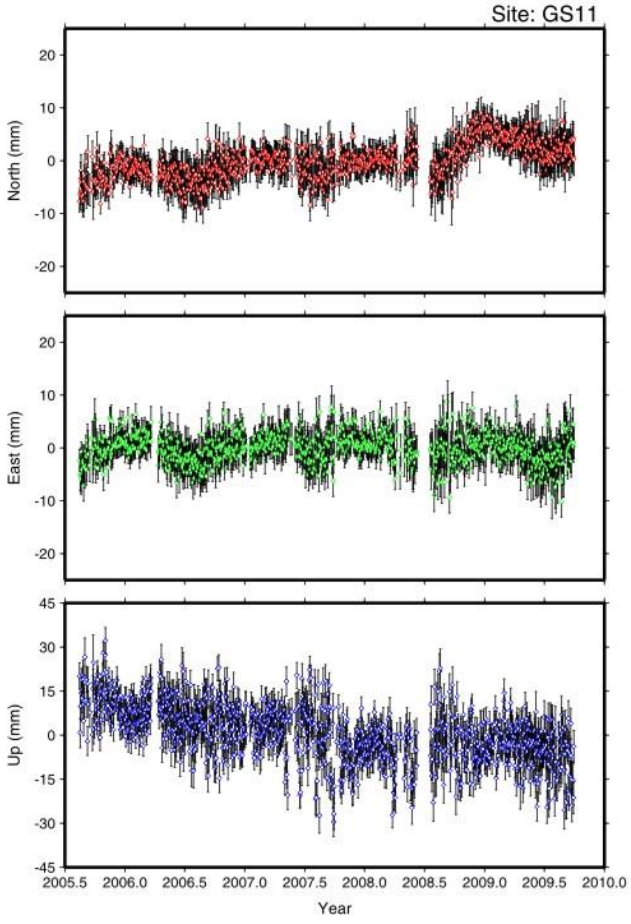

Site: GS06
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year

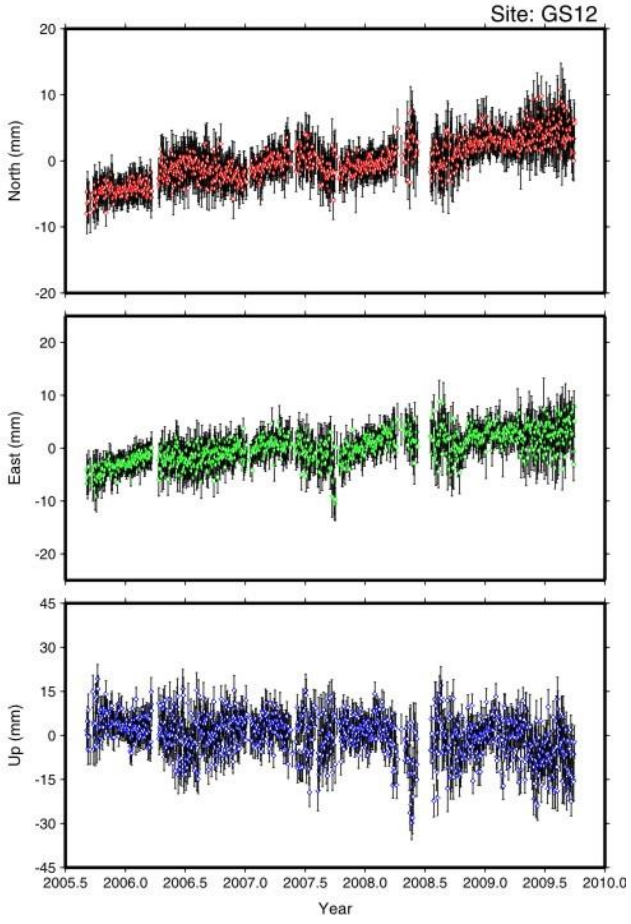

Site: GS07
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year

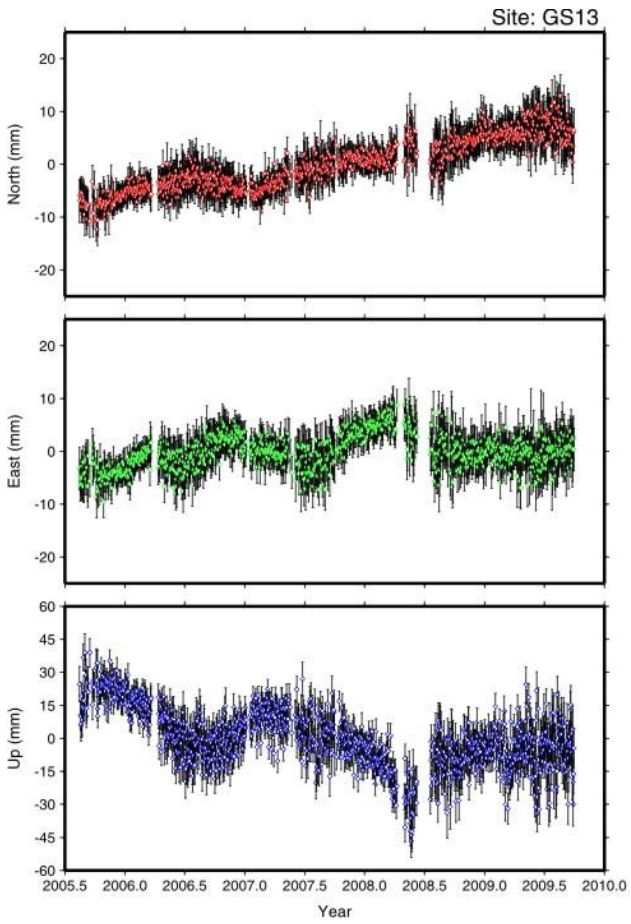

Site: GS08
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year

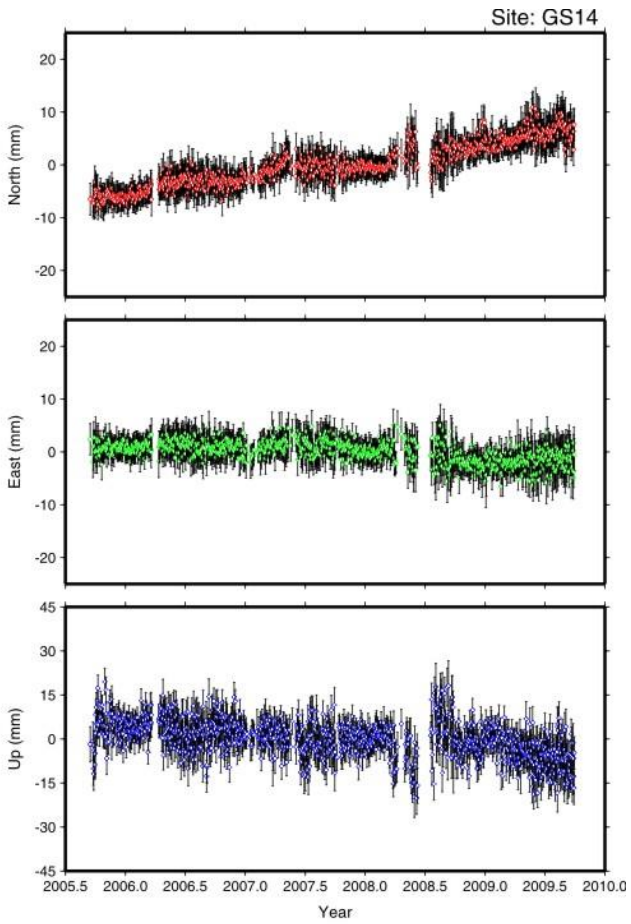

Site: GS09
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year

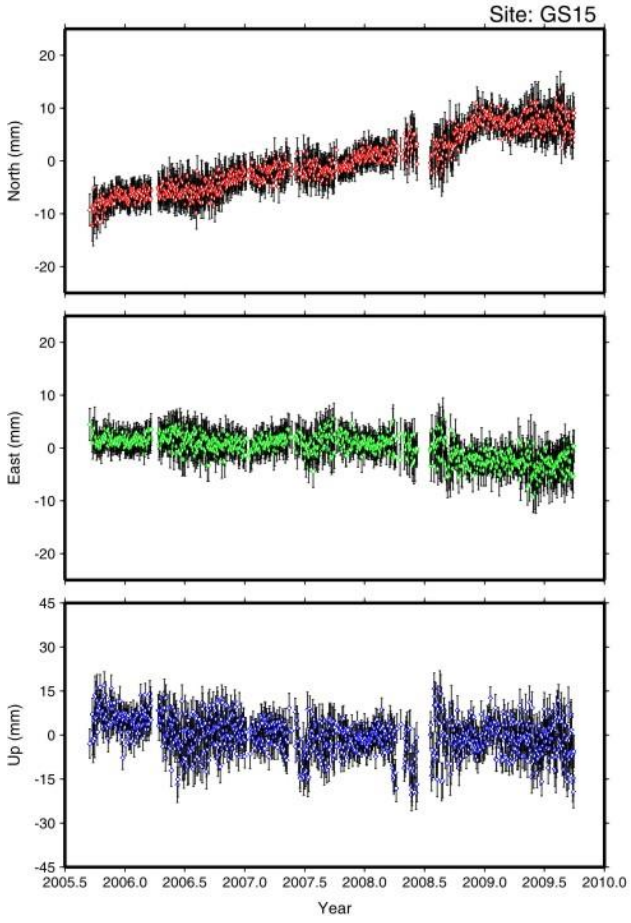

Site: GS10
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year

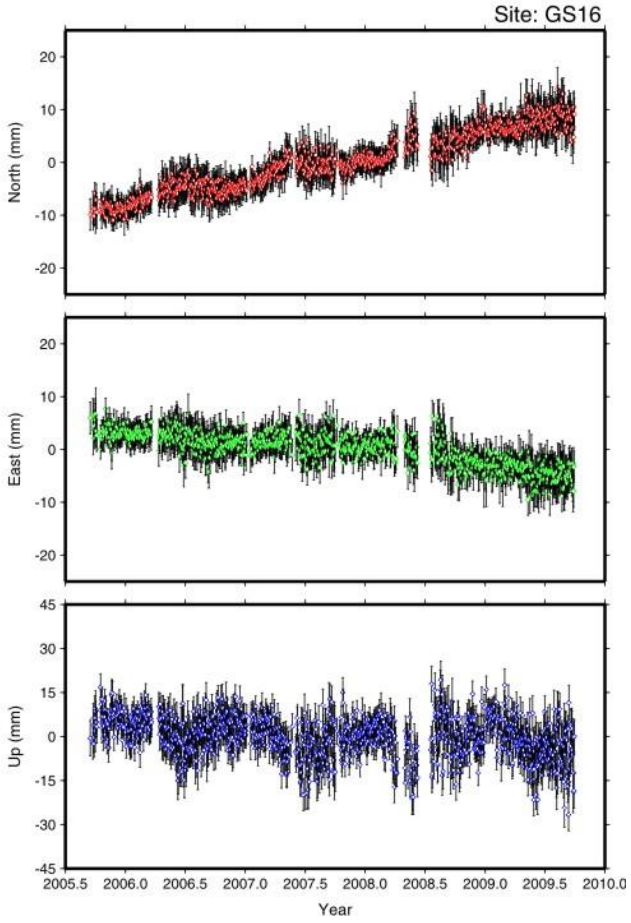

Site: GS11
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year

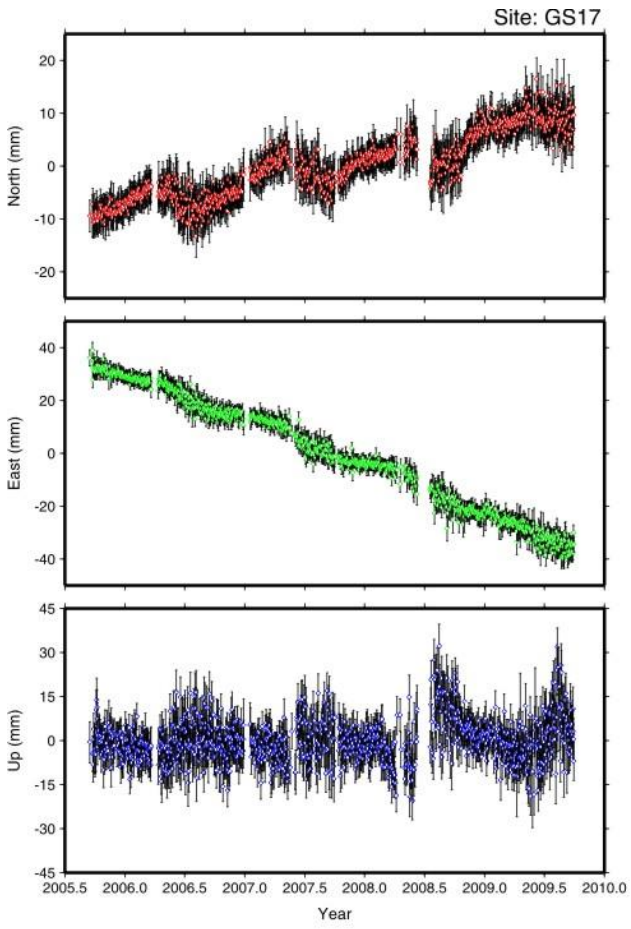

Site: GS12
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year

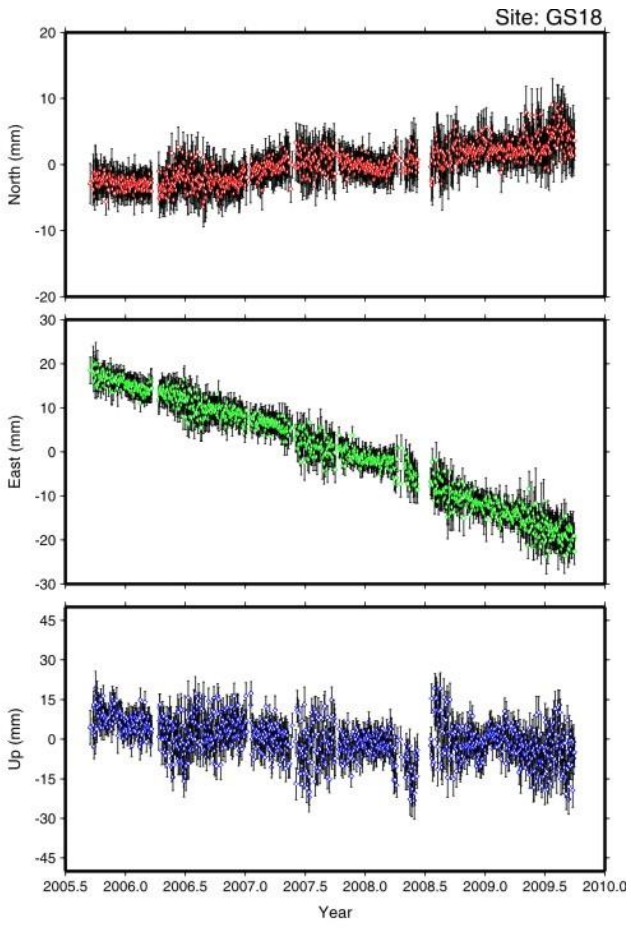

Site: GS13
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year

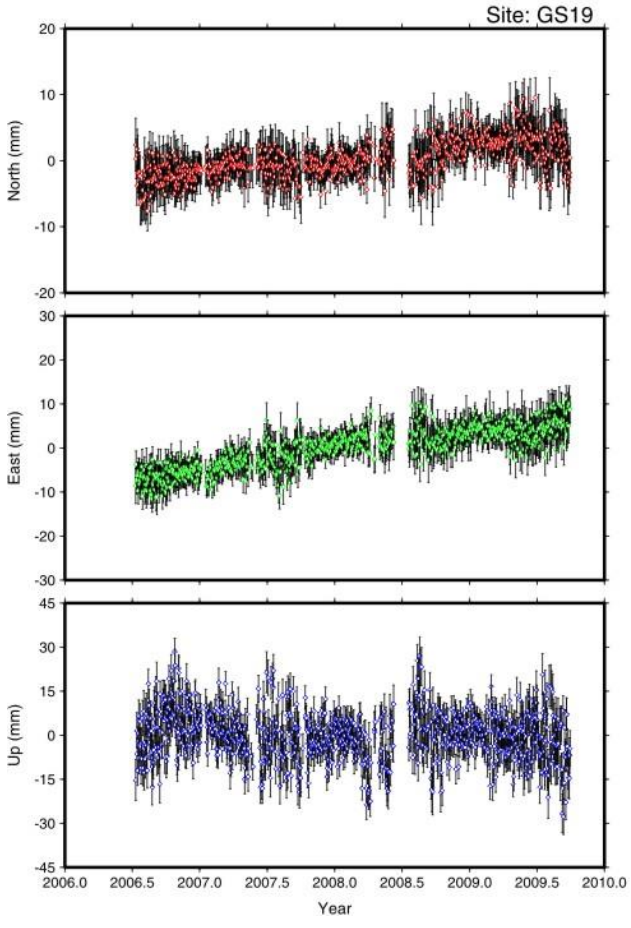

Site: GS14
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year

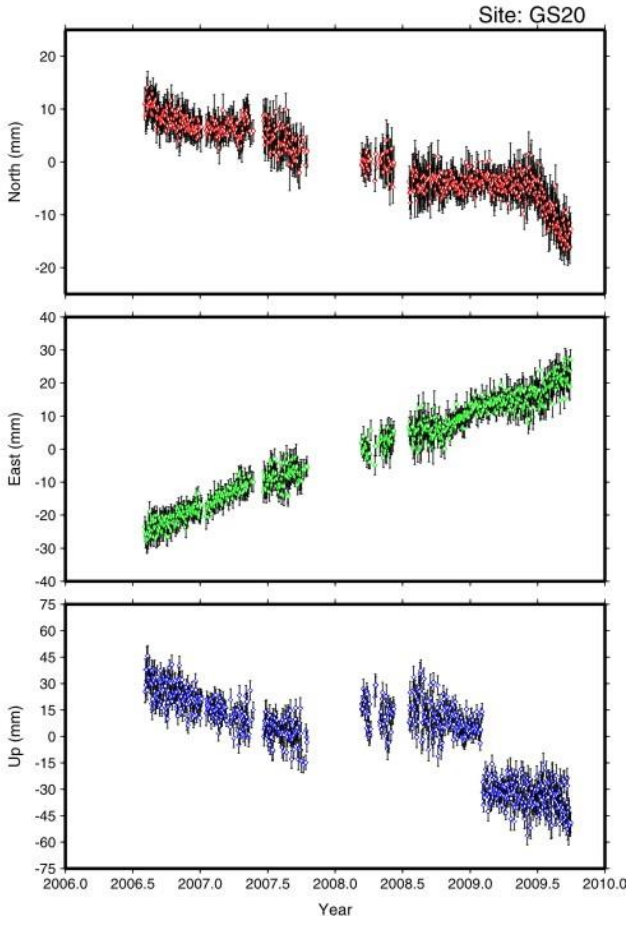

Site: GS15
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year

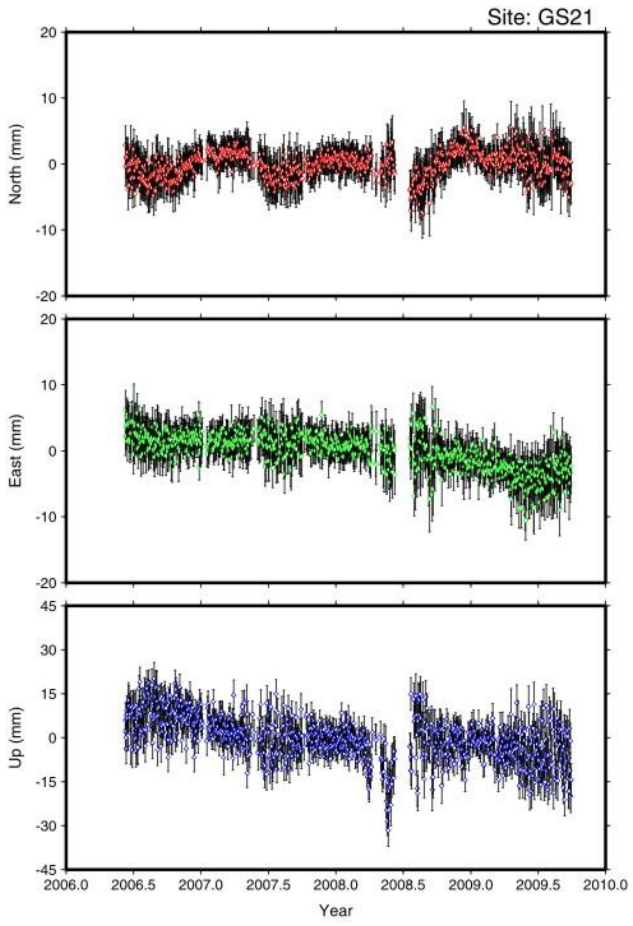

Site: GS16
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year

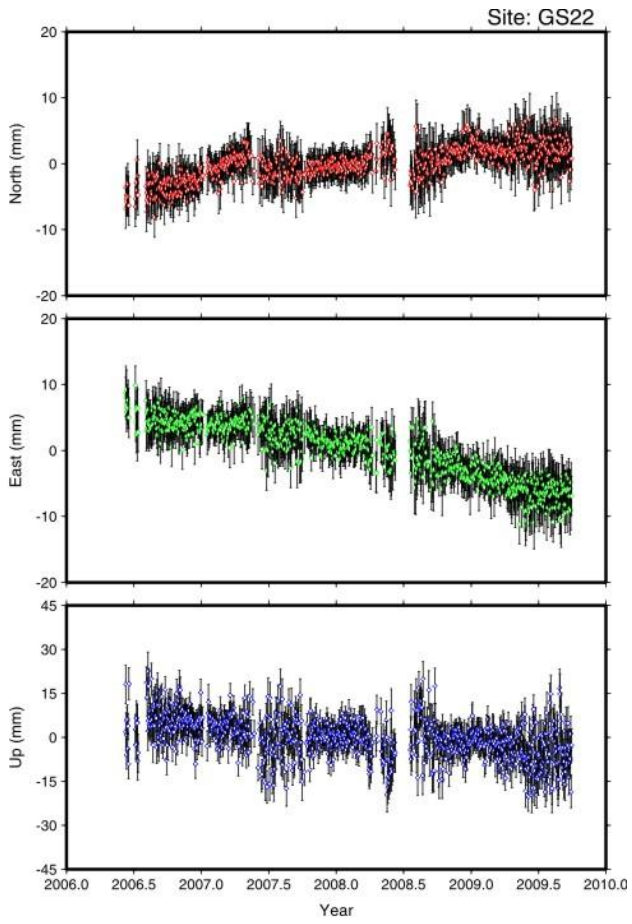

Site: GS17
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year

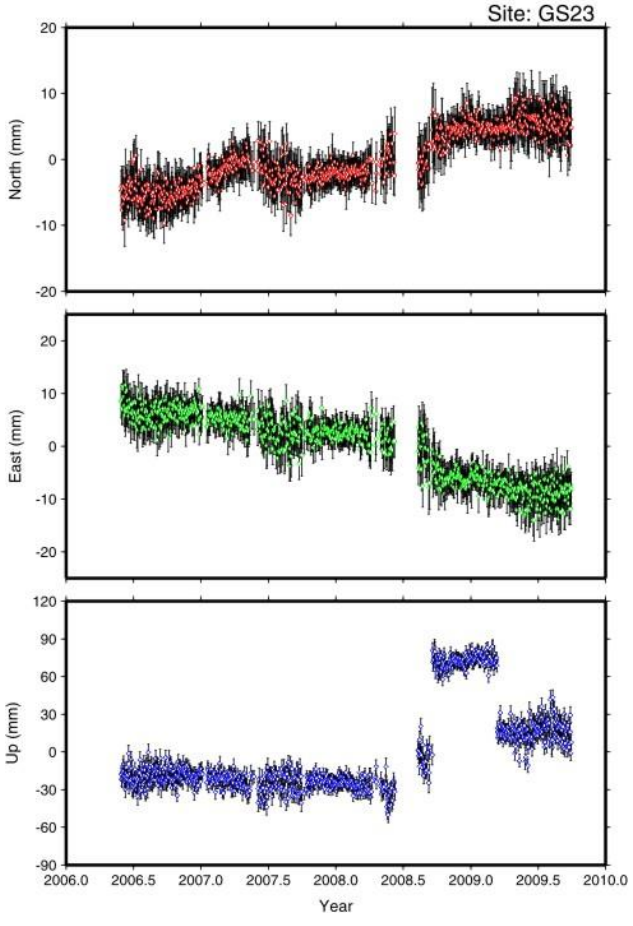

Site: GS18
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year

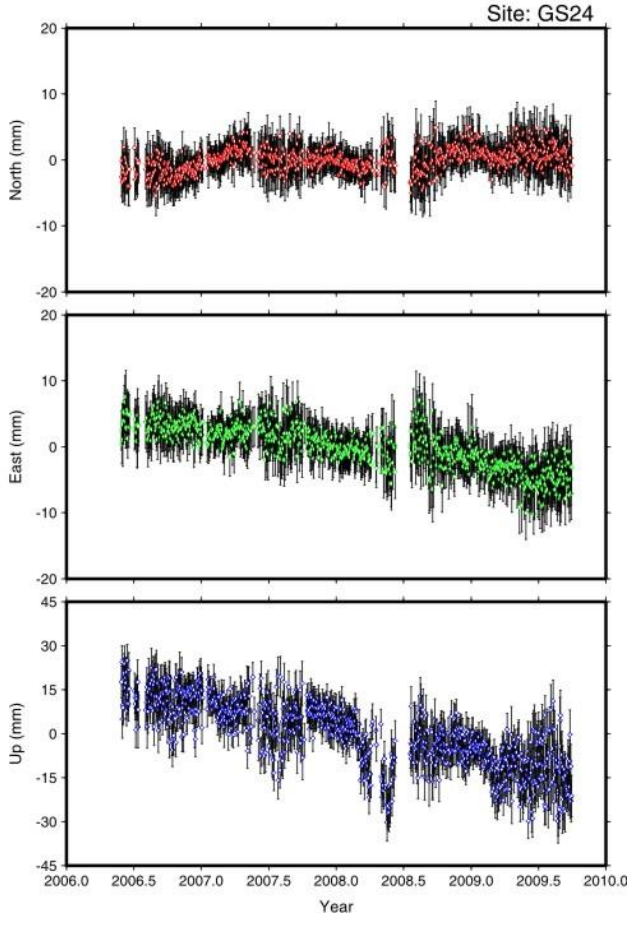

Site: GS19
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year

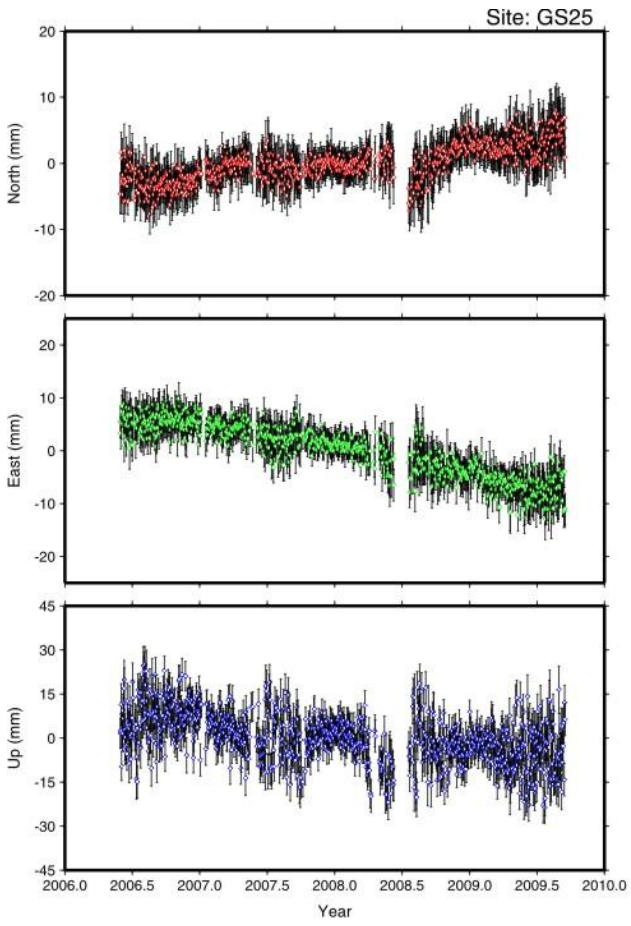

Site: GS20
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year

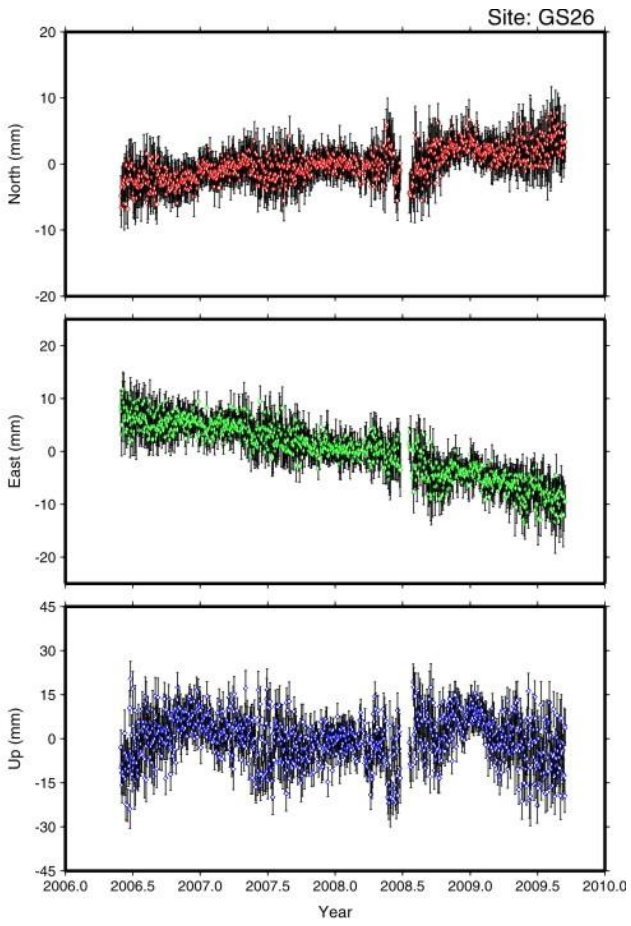

Site: GS21
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year

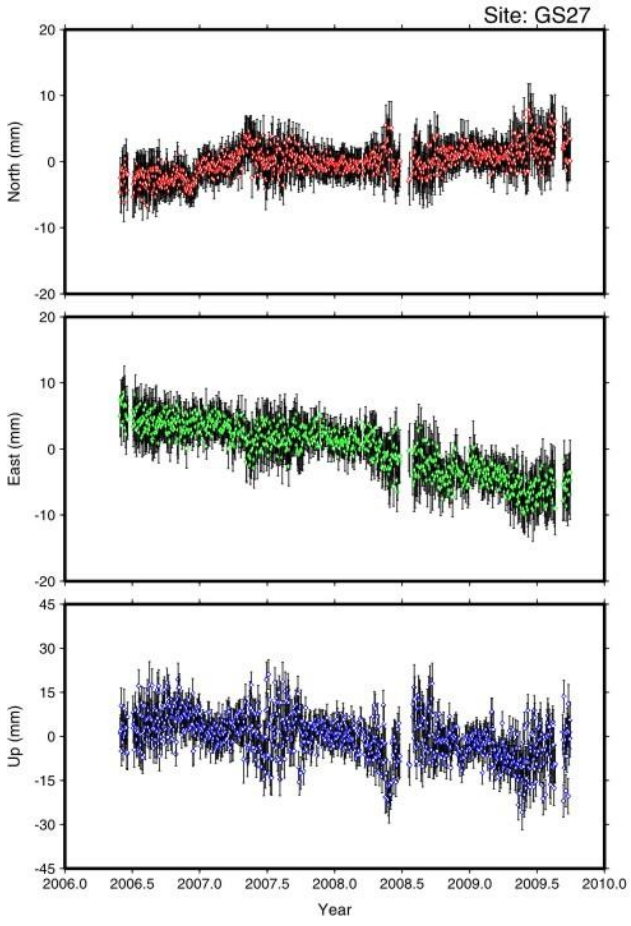

Site: GS22
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year

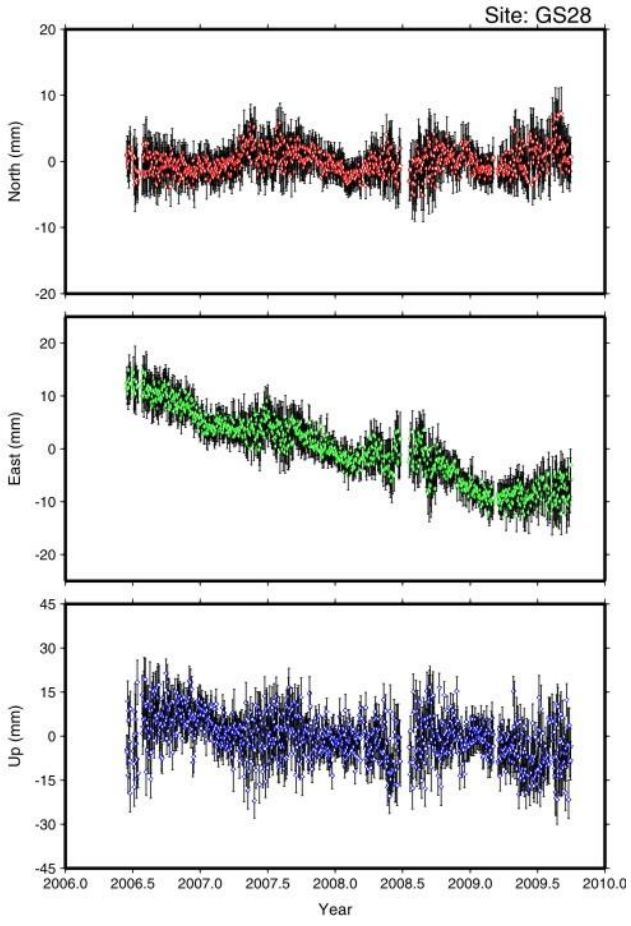

Site: GS23
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year

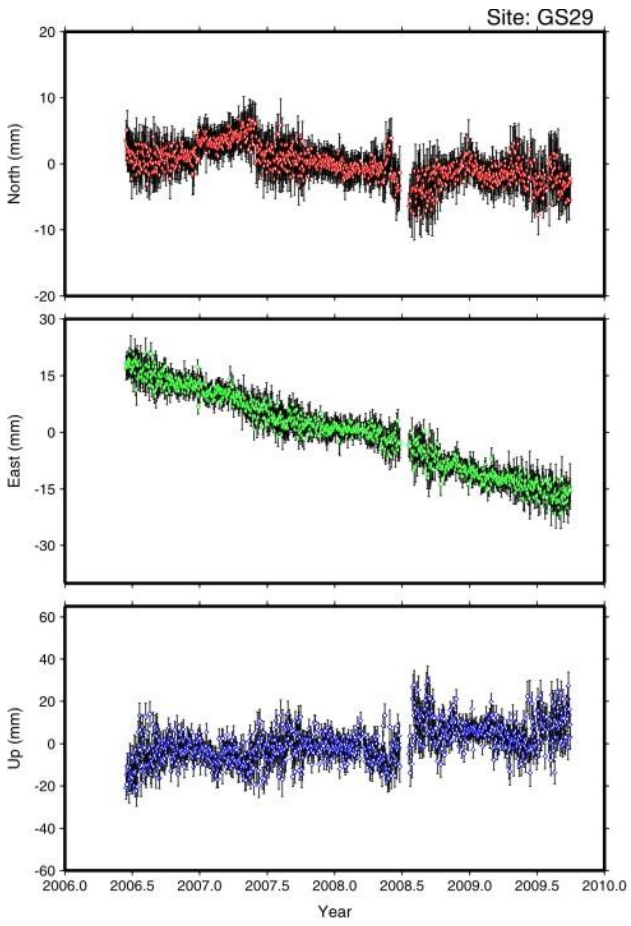

Site: GS24
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year

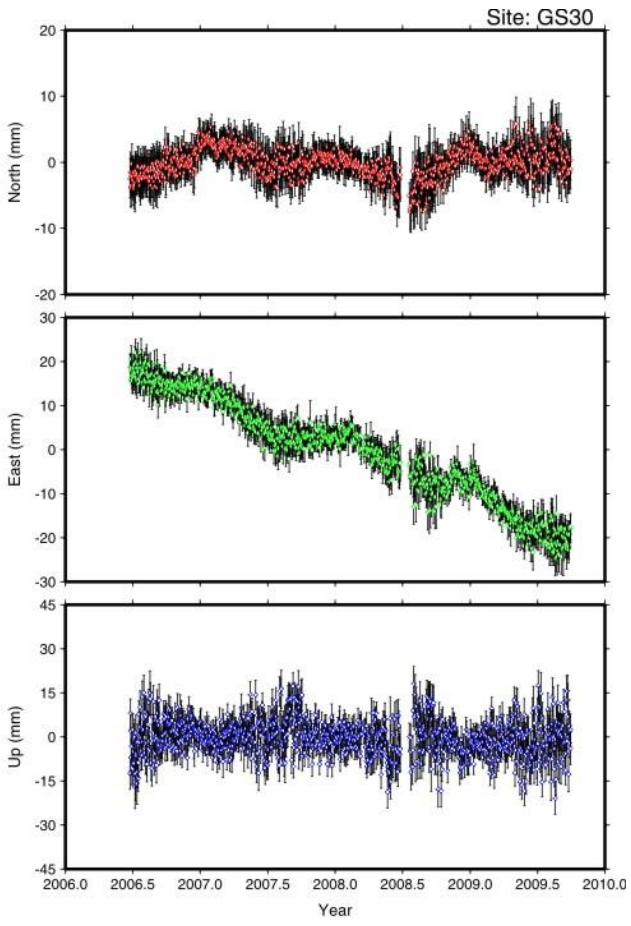

Site: GS25
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year

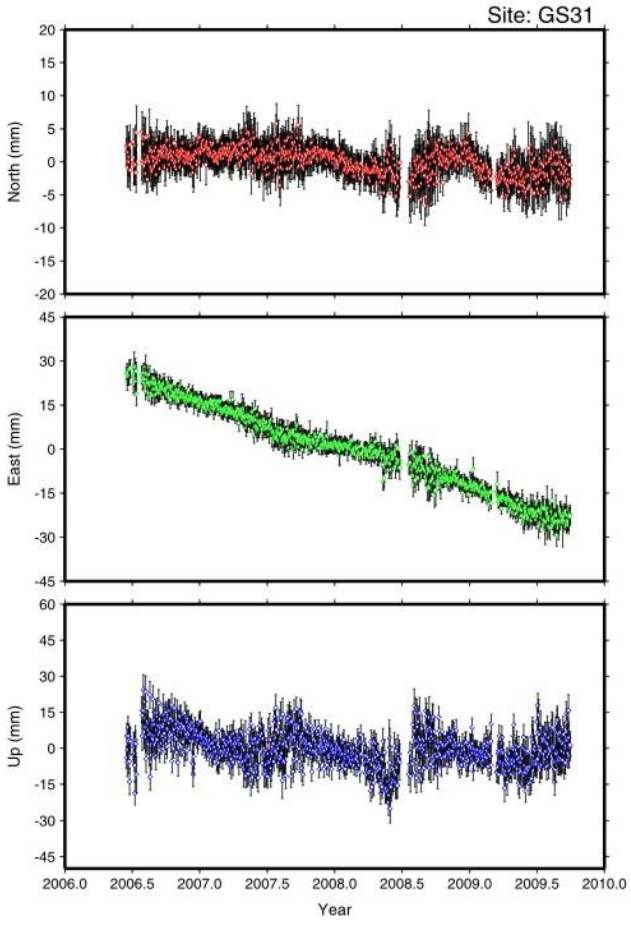

Site: GS26
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year

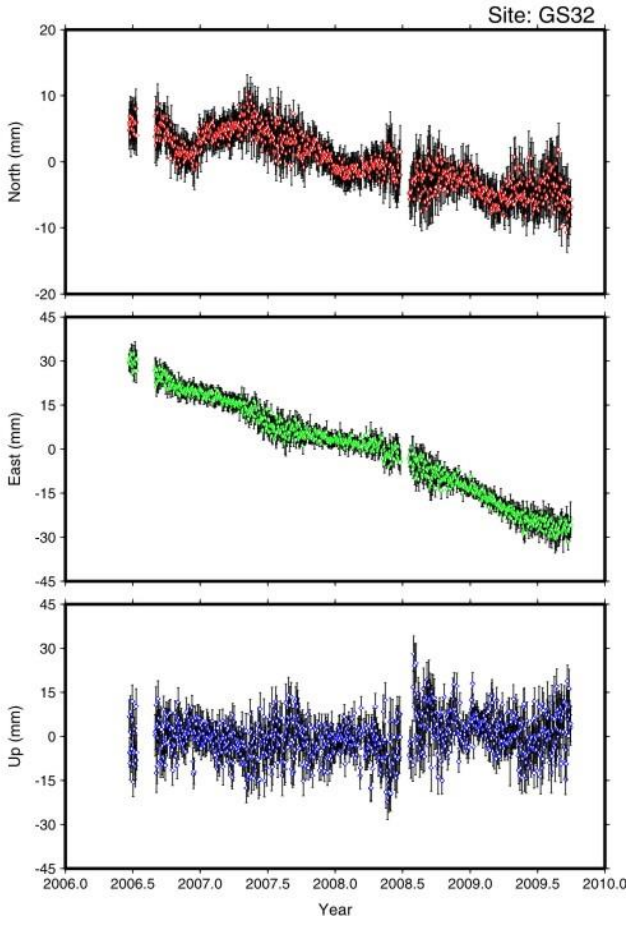

Site: GS27
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year

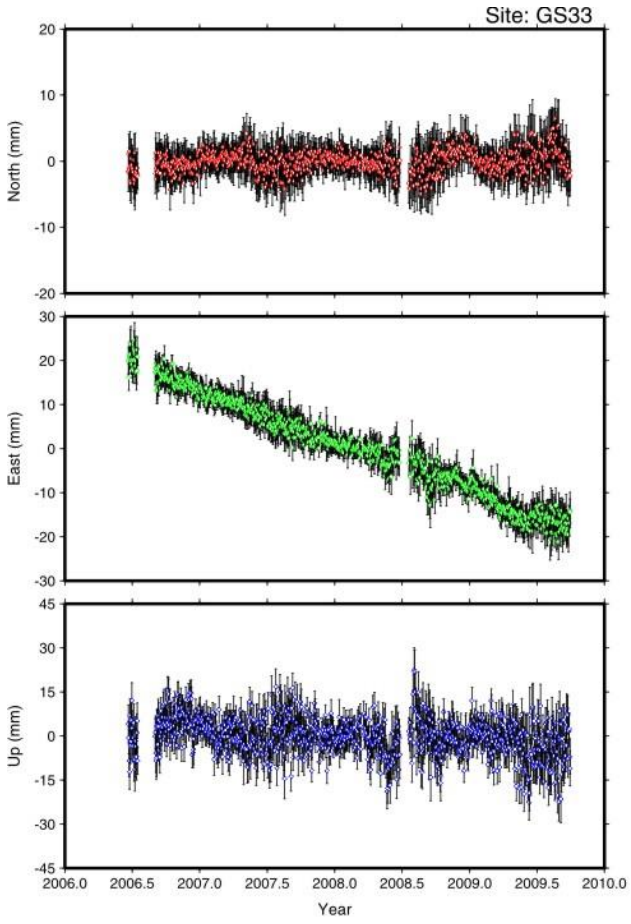

Site: GS28
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year

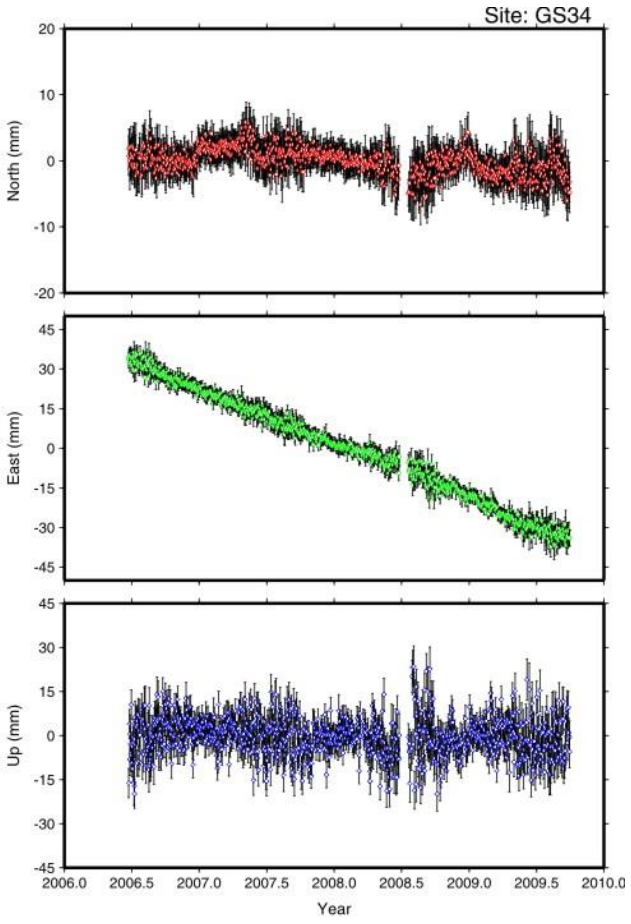

Site: GS29
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year

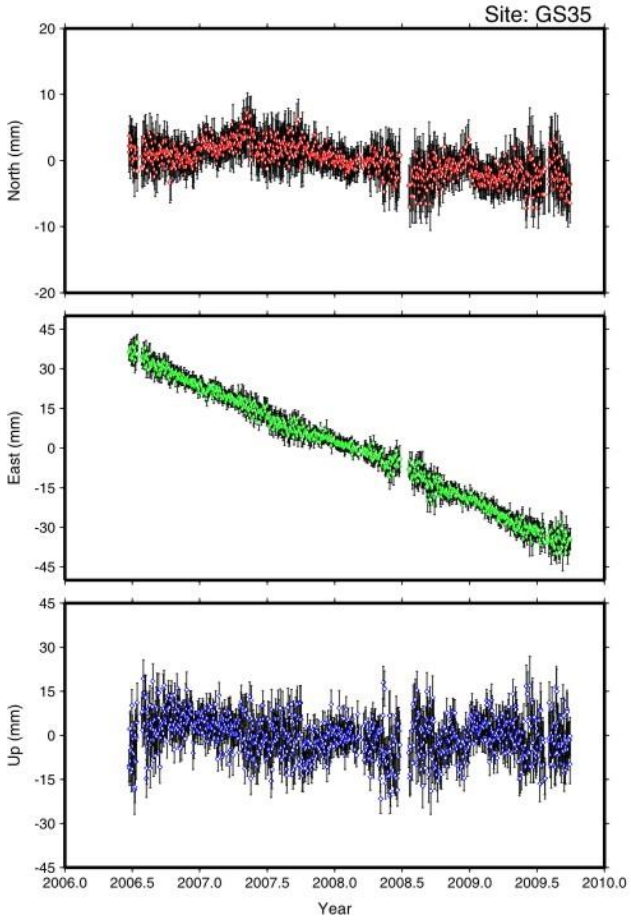

Site: GS30
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year

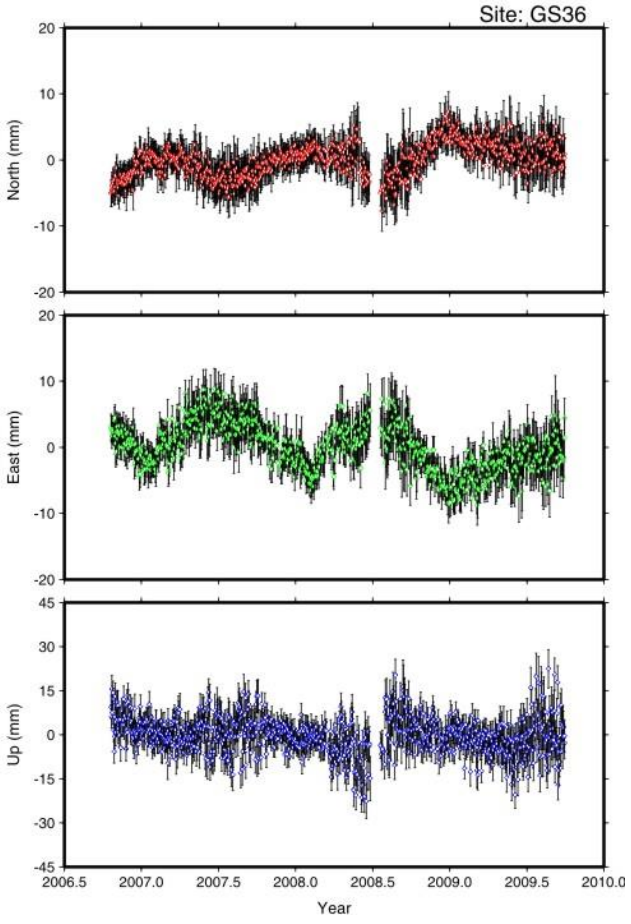

Site: GS31
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year

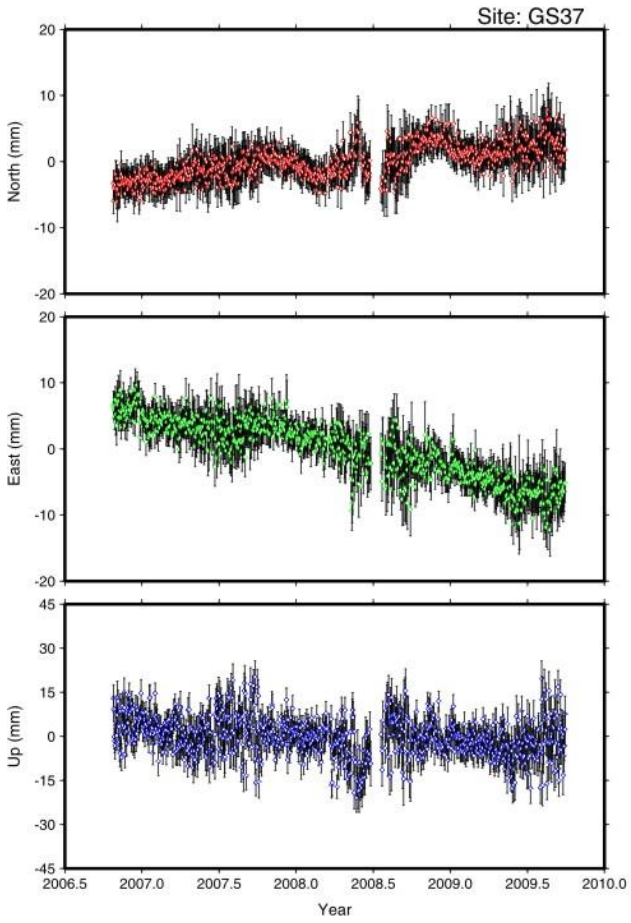

Site: GS32
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year

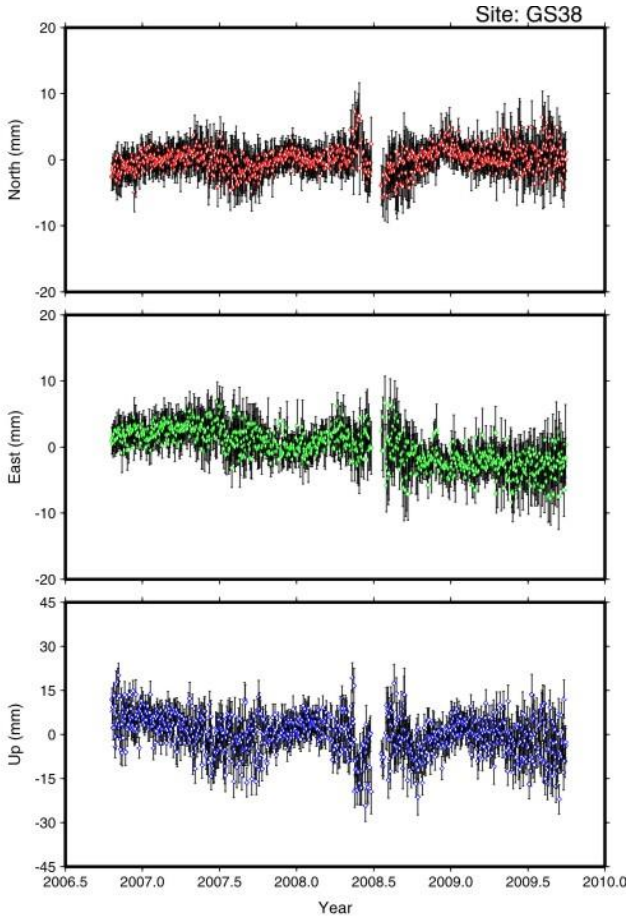

Site: GS33
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year

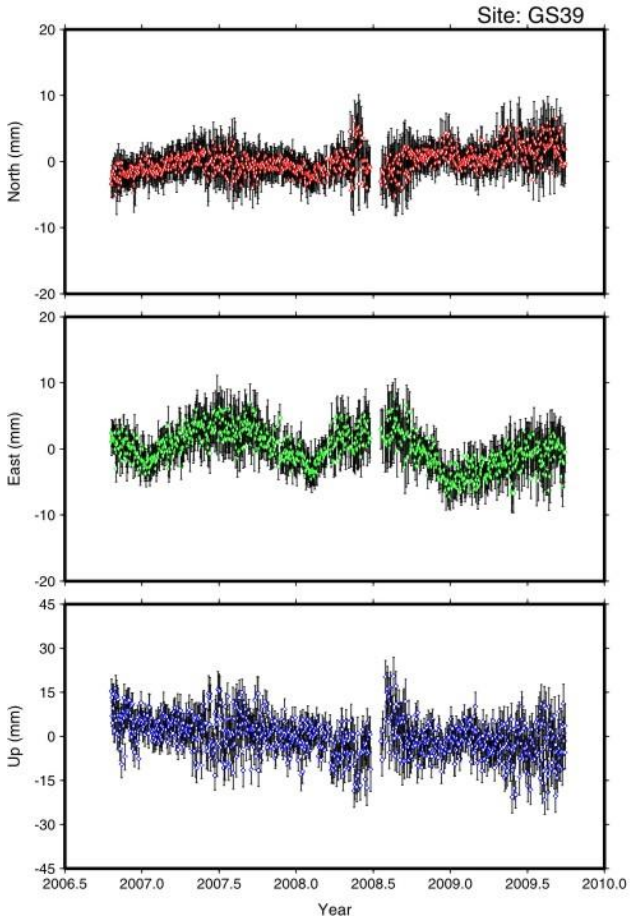

Site: GS34
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year

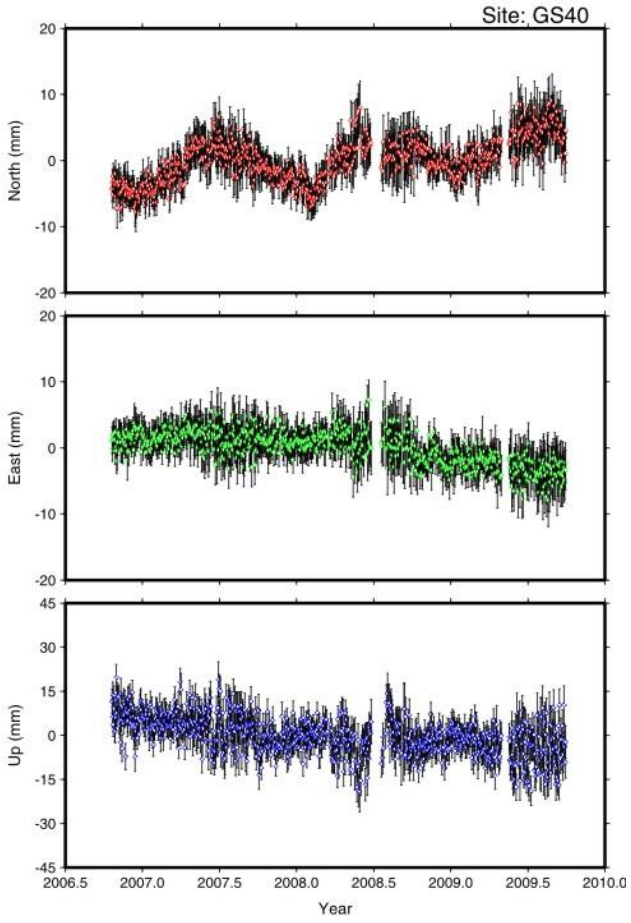

Site: GS35
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year

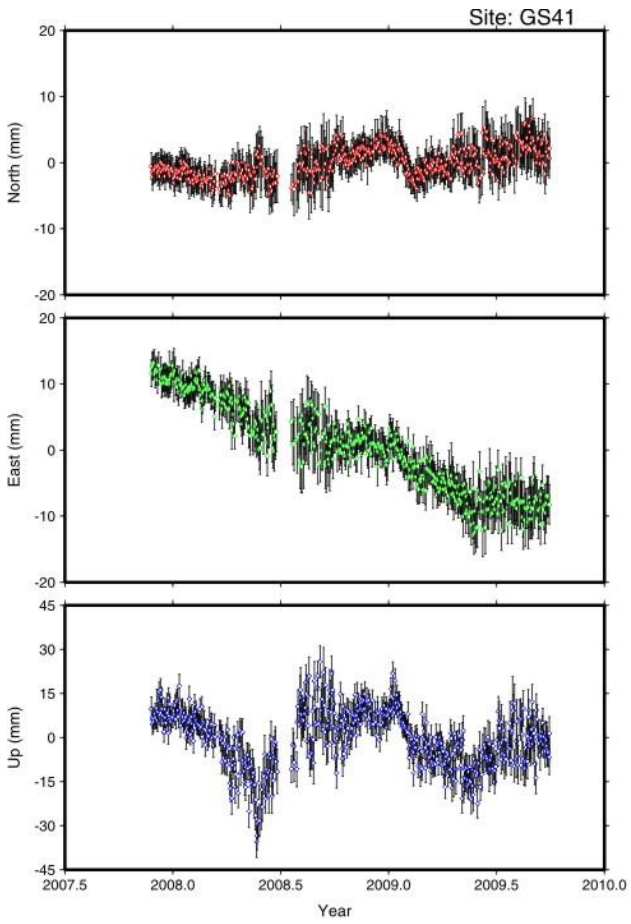

Site: GS36
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year

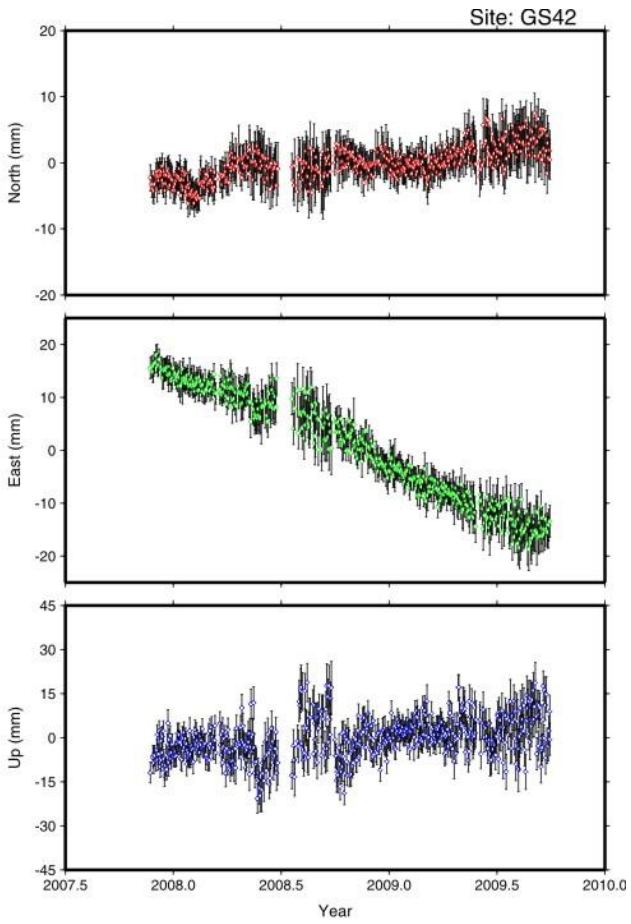

Site: GS37
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year

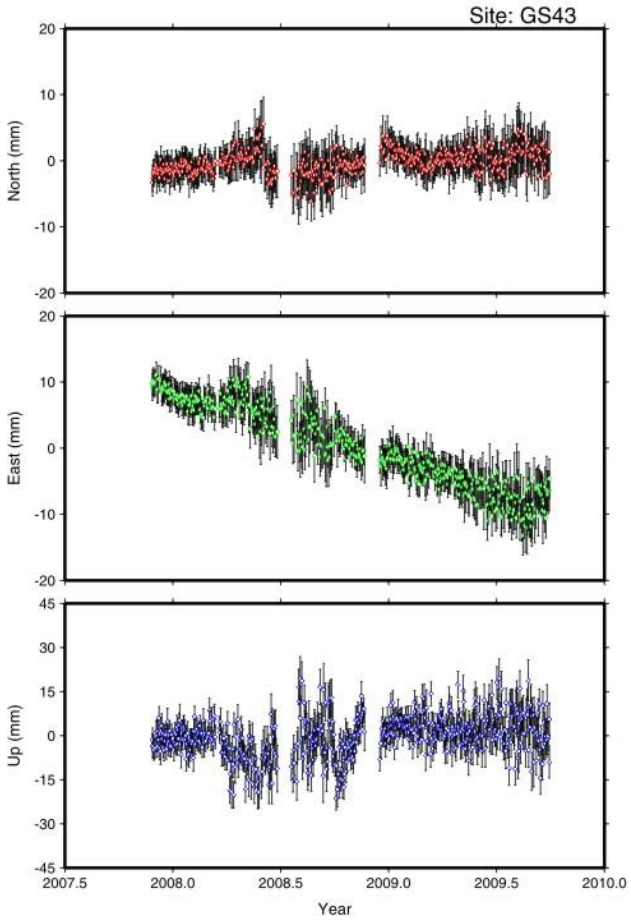

Site: GS38
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year

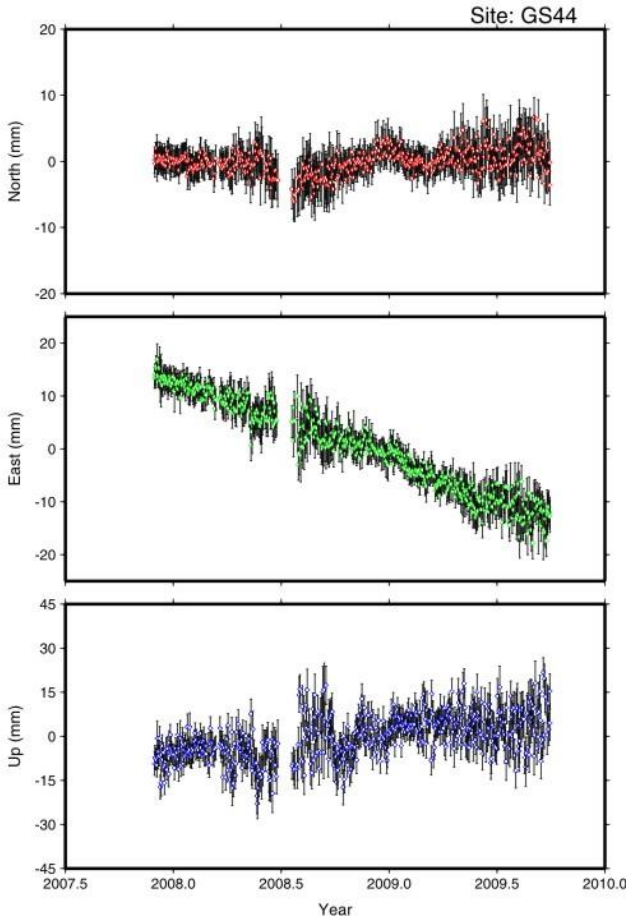

Site: GS39
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year

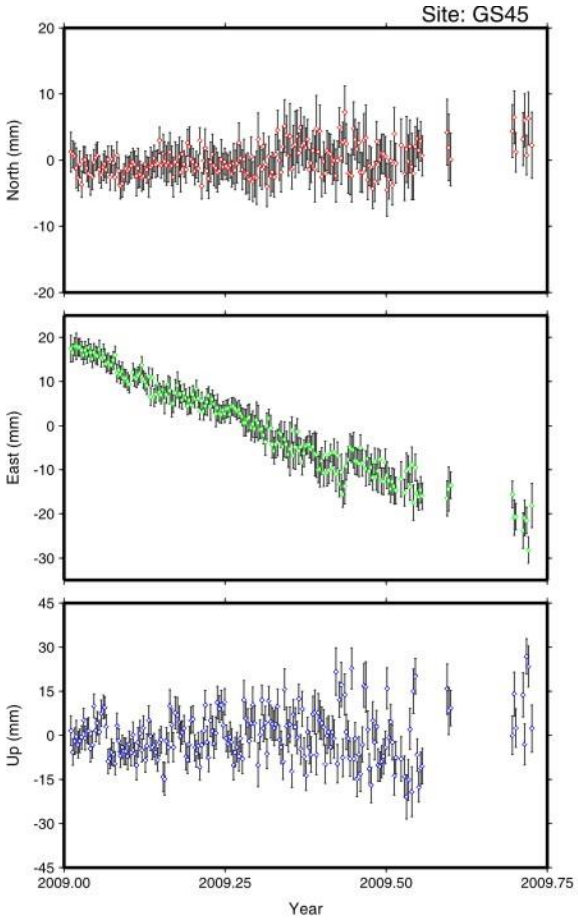

Site: GS40
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year

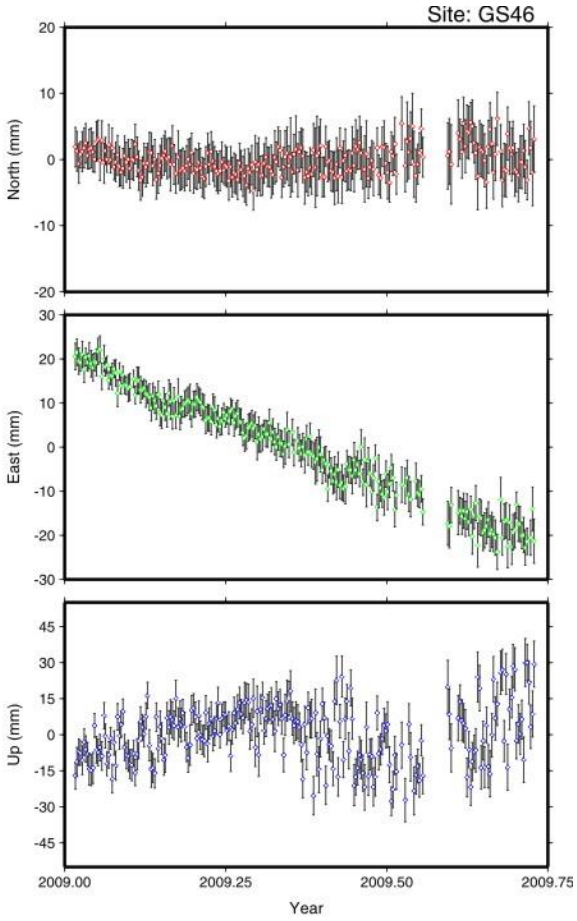

Site: GS41
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year

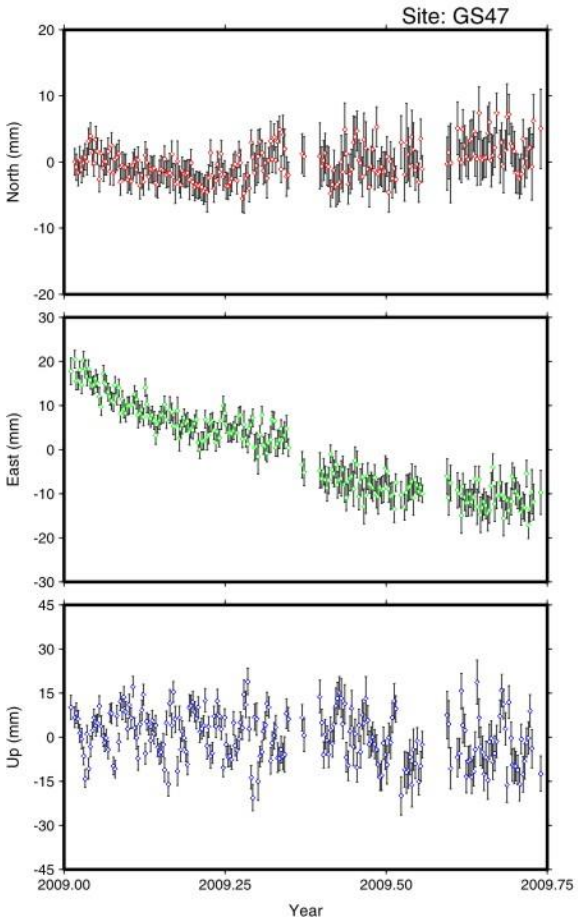

Site: GS42
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year

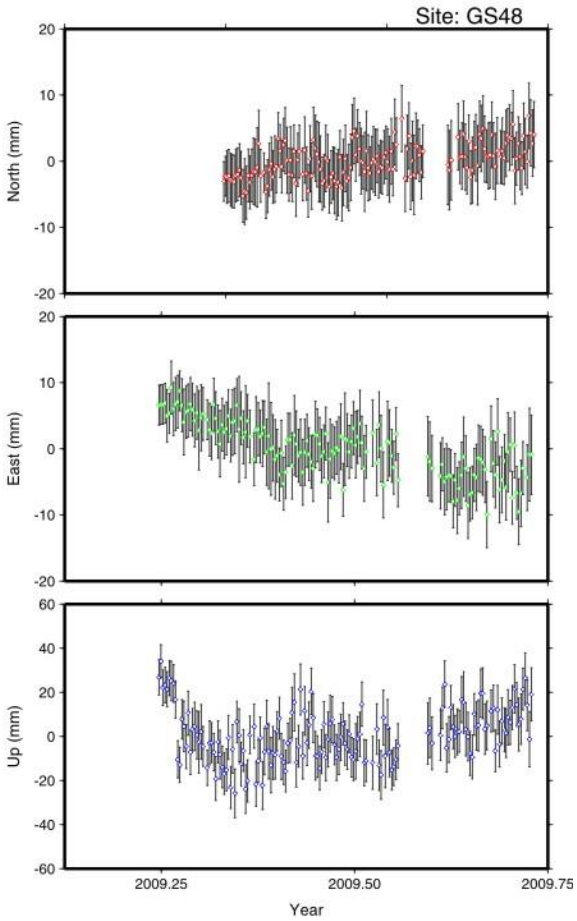

Site: GS43
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year

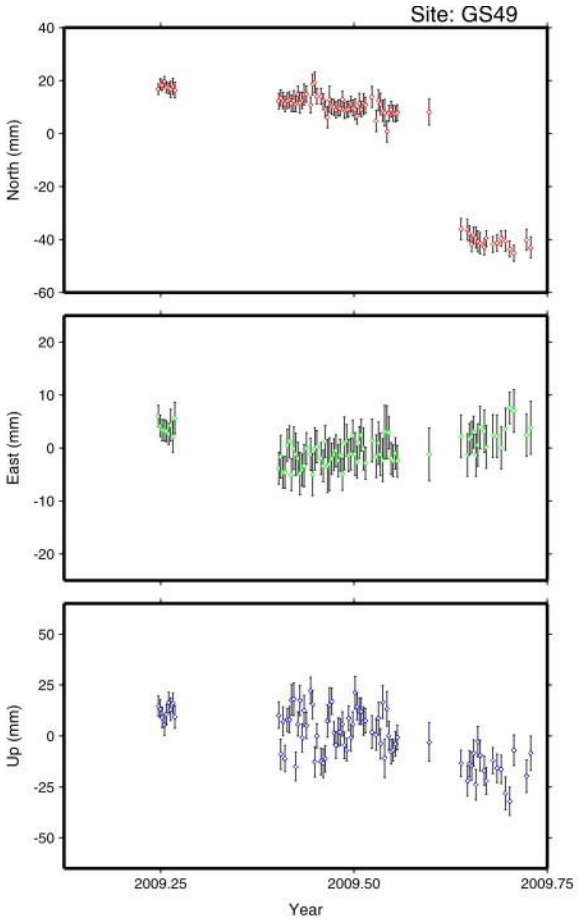

Site: GS44
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year

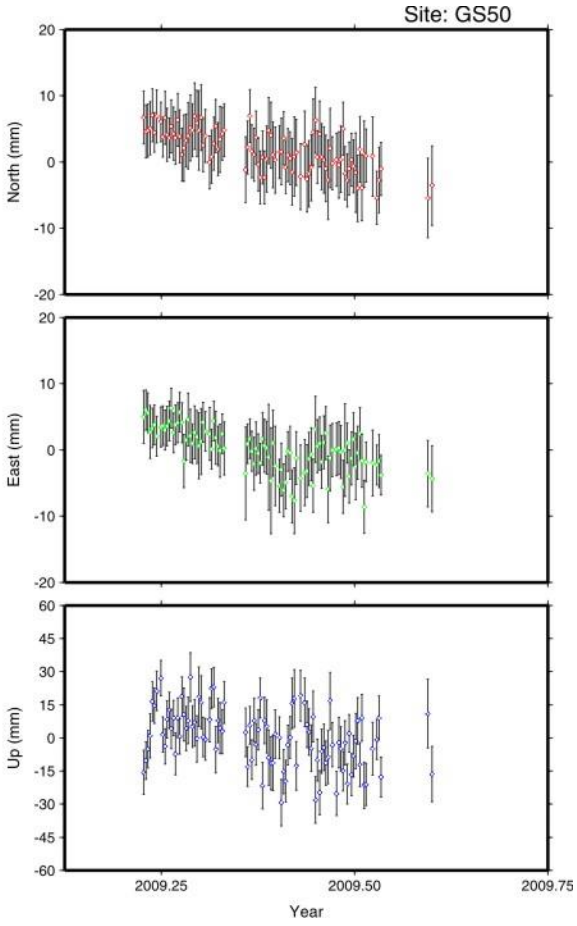

Site: GS45
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year
2009.00
2009.25
2009.50
2009.75


Site: GS46
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year
2009.00
2009.25
2009.50
2009.75


Site: GS47
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year
2009.00
2009.25
2009.50
2009.75


Site: GS48
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
Year
2009.25
2009.50
2009.75


Site: GS49
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
2009.25
2009.50
2009.75
Year


Site: GS50
North (mm)
East (mm)
Up (mm)
2009.25
2009.50
2009.75
Year

附錄B 速度場、應變率及旋轉率之評估

一、GPS 速度場評估

高精度 GPS 觀測座標之時間序列中包含非地殼變形之因子與共通性的誤差，因此時間序列的雜訊來源有幾種可能：季節性的降雨造成土壤膨縮，而使測站點位不穩定；求解 GPS 資料時引用了不正確或不完善的衛星軌道模型、大氣模型或天線相位中心的校正不確實等。因此利用 Common-mode errors 與 Spatial filtering（Wdowinski et al., 1997）濾除共通性之誤差值與錯誤值以減少對速度場變化之影響。

首先根據（Nikolaidis, 2002）並暫時將年週期與半年週期省略不做考量，而將時間序列表示如下式：

$$y(t_i) = a + bt_i + \sum_{j=1}^{n_c} c_j H(t_i - T_{cj}) + \sum_{j=1}^{n_d} d_j H(t_i - T_{dj}) t_i + \sum_{j=1}^{n_e} e_j \log(t_i - T_{ej}) H(t_i - T_{dj}) + v_i \quad \text{（式 B-1）}$$

$i = 1 \ldots N$ 為每日解，第一、二項（係數 a、b）代表線性變化，可視為間震期地殼運動速率, H 為階梯函數（Heaviside step function），第三項（係數 c_j）代表地震造成的同震位移；第四項（係數 d_j）為震後地殼運動速率的改變量；第五項（係數 e_j）描述震後變形呈指數衰減之現象，其中 H 為階梯函數，最後一項為量測誤差（v_i）。

（I） 降趨（Detrending）：經由時間序列資料回歸出一線性關係，並將每日 dy 每個測站 s 計算出觀測座標 $O^s(dy)$ 與回歸值 $C^s(dy)$ 的差異 $\varepsilon^s(dy)$

$$\varepsilon^s(dy) = O^s(dy) - C^s(dy) \quad \text{（式 B-2）}$$

在此將觀測資料 $O^s(dy)$ 若大於 3 倍最小平方差值則視為錯誤值直接剔除在時間序列中。

（II） 疊加（Stacking）：計算每日之 common-mode bias，N 為每日使用測站數目。

$$\hat{\varepsilon}(dy) = \frac{\sum_{s=1}^{N} \varepsilon^s(dy)}{N} \quad \text{（式 B-3）}$$

在此限定測站加入數目必須大於 4 個測站加入計算才有意義。

（III）濾波（Filtering）：原始觀測值 $O^s(dy)$ 經由 common-mode bias 濾除後所得新的座標為 $\hat{O}^s(dy)$。

$$\hat{O}^s(dy) = O^s(dy) - \hat{\varepsilon}(dy) \quad \text{（式 B-4）}$$

經由解決共通誤差成分與錯誤值後，則可對研究時間段之速度場做一初步結果之呈現。

速度場誤差評估方面，經由最小二乘法所獲得各速度值之誤差量主要是反映全頻等幅雜波（White noise）。然而，當我們考慮各速度值的誤差時，我們還必須同時考慮時間序列中和時間相關（time-correlated 或 colored）的誤差，即布朗運動（Brownian motion 或 Random walk noise），所造成的影響。根據 GPS 追蹤站長期觀測資料所獲得的經驗值（Langbein and Johnson, 1997），我們知道布朗運動（σ_R）在各個速度分量上的值分別為 0.9、1.0 和 3.0 mm/yr1/2。因此，在估算速度場誤差時，我們同時考慮布朗運動（σ_R）和最小二乘法所獲得各速度值之全頻等幅雜波（σ_W）的貢獻量，以 $\sqrt{\sigma_R^2+\sigma_W^2}$ 計算速度場誤差。根據經驗值（Langbein and Johnson, 1997），水平方向之布朗運動值為 1.0 mm/yr$^{1/2}$，垂直方向之布朗運動值則為 3.0 mm/yr$^{1/2}$。

二、應變率評估方法

應變速率反映的是各測站間的速度梯度變化，利用應變速率於空間中分布的特性，可以有效的協助我們討論各個區域應變累積（Strain accumulation）及其地震危害度之問題（Ward, 1998）。因此，經由速度場進一步的分析，可以協助我們初步推估地表之應變特性。由於各測站間之距離並不相同，因此採用 Shen et al.（1996）之內差技術來計算台灣地區之主應變速率（Principal strain rate）、面膨脹率（Dilatation rate）及旋轉率（Rotation rate）。而所使用應變計算之方法中將考慮測站和內插點的距離及測站速度的標準偏差，給予不同的權重來計算合理的應變率。

應變速率的基本計算原理是基於平面應變（Plane strain）的假設，考慮一個物體受到應力作用後，便只反映在水平（如 NE）平面上，垂直地表方向則無應變發生。應變速率正值表示伸張，負值表示縮短（壓縮）。基本的應變速率計算則是將測網分成各個多邊形，並計算每個測網內應變速率。由於測網內任一測線的應變率（$\dot{\varepsilon}$）可寫成：

$$\dot{\varepsilon}=\left(dL/dt\right)/L \qquad \text{（式 B-5）}$$

其中 L 是距離，dL 是距離變化量，dt 是時間間距，故 dL / dt 為基線長度之變化速率。應變張量（ε_{ij}）用以表示一物體產生的變形狀態，可以由矩陣型式表示物體的應變張量，稱為應變矩陣（Strain matrix）如 4-6 式，其為應變張量在某一座標中的表示方法。應變矩陣的主對角元素（如 ε_{xx}、ε_{yy}、ε_{zz}）為正向應變量，其餘元素（如 ε_{xy}、ε_{xz}、ε_{yx}、ε_{yz}、ε_{zx}、ε_{zy}）為剪應變量。2-6 式中，ε_{ij} 表示應變率在 i、j 方向上的張量。

$$\varepsilon_{ij}=\begin{bmatrix}\varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz}\\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz}\\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz}\end{bmatrix} \qquad \text{（式 B-6）}$$

假設應變率張量的參考座標為 E 軸向東、N 軸向北之地平座標系。而應變速率 $\dot{\varepsilon}$ 與地表應變率張量 $\dot{\varepsilon}_{ee}$、$\dot{\varepsilon}_{nn}$ 與 $\dot{\varepsilon}_{en}$（下標 e 代表 E 軸向東方向，下標 n 代表 N 軸向北方向）之關係為：

$$\dot{\varepsilon}=\dot{\varepsilon}_{ee}\sin^2\theta+\dot{\varepsilon}_{en}\sin 2\theta+\dot{\varepsilon}_{nn}\cos^2\theta \qquad \text{（式 B-7）}$$

其中 $\dot{\varepsilon}_{ee}$、$\dot{\varepsilon}_{nn}$ 正值表示伸張，負值表示縮短；$\dot{\varepsilon}_{en}$ 正值表示沿東西方向有右旋剪切應變率或沿南北方向有左旋剪切應變率（Shear strain rate），反之，$\dot{\varepsilon}_{en}$ 負值則表示沿東西方向有左旋剪切應變率或沿南北方向有右旋剪切應變率。θ 為自正北以順時鐘方向量度之測線方位角。若同一測網內有三條以上不同方向的測線，則可利用最小二乘法求得該網之應變速率張量 $\dot{\varepsilon}_{ee}$、$\dot{\varepsilon}_{nn}$ 與 $\dot{\varepsilon}_{en}$（Prescott et al., 1979）。

近年來由於觀測資料之觀測站密度與施測精度的提升，因此，Shen et al.（1996）採用幾個鄰近測站所量測的速度來計算任一點（內插點）的應變率與旋轉率，如圖 B.1 所示。各測站對計算點的貢獻量則使用距離的指數函數來計算，距離愈近，貢獻愈大，反之則愈小。另一方面，Shen et al.（1996）藉由大地測量之觀測資料，計算平面上每個格點之應變率，並將速度梯度表示為一個應變速率和旋轉速率的和，方程式如下：

$$\begin{bmatrix}\frac{\partial v_e}{\partial x} & \frac{\partial v_e}{\partial y}\\ \frac{\partial v_n}{\partial x} & \frac{\partial v_n}{\partial y}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\frac{\partial v_e}{\partial x} & \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v_e}{\partial y}+\frac{\partial v_n}{\partial x}\right)\\ \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v_n}{\partial x}+\frac{\partial v_e}{\partial y}\right) & \frac{\partial v_n}{\partial y}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}0 & \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v_e}{\partial y}-\frac{\partial v_n}{\partial x}\right)\\ \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v_n}{\partial x}-\frac{\partial v_e}{\partial y}\right) & 0\end{bmatrix} \qquad \text{（式 B-8）}$$

其中 v_e、v_n 為速度的東西和南北分量。經由矩陣運算適當的轉換，可寫成：

$$\begin{bmatrix}v_e^i\\ v_n^i\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1 & 0 & \Delta x_{ij} & \Delta y_{ij} & 0 & \Delta y_{ij}\\ 0 & 1 & 0 & \Delta x_{ij} & \Delta y_{ij} & -\Delta x_{ij}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}v_e^j\\ v_n^j\\ \dot{\varepsilon}_{ee}^j\\ \dot{\varepsilon}_{en}^j\\ \dot{\varepsilon}_{nn}^j\\ \dot{\omega}^j\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}r_e^i\\ r_n^i\end{bmatrix} \qquad \text{（式 B-9）}$$

其中 v_e^j 、v_n^j 為內插點 j 的速度分量；Δx_{ij} 、Δy_{ij} 為觀測點 i 到內插點 j 的距離分量；$\dot{\varepsilon}_{ee}^j$ 、$\dot{\varepsilon}_{en}^j$ 、$\dot{\varepsilon}_{nn}^j$ 為內插點 j 的應變率張量；$\dot{\omega}^j$ 為內插點 j 的旋轉速率；r_e^i 、r_n^i 為觀測點 i 速度分量之殘差。

此外，因測站與內插點的距離不相等，各測站的權重值是由測站速度標準偏差所得之權重 W_s 與測站和內插點之距離權重 W_d 來給定（Shen et al., 1996），利用下式表示：

$$W_s = 1/\sigma \qquad \text{（式 B-10）}$$

$$W_d = \exp\left(-d^2/D^2\right) \qquad \text{（式 B-11）}$$

其中，σ 為觀測誤差，d 為觀測點至內插點的距離，D 則為特性長度（distance-decaying constant）。特性長度 D 之決定是採用 Ward（1998）之方法，以距內插點第四個最接近點之距離訂為特性長度，因此，利用此方法，我們可以考慮到各區域測站密度之不同而採用不同的值。根據（B-9）式，若有四點以上的觀測量，就可以計算內插點各個待求參數。此外，為了避免計算過程中出現外插的結果而造成對結果的過度解釋，我們僅計算測網涵蓋範圍內的格點。但由於測網涵蓋範圍內的最外圈之格點，有可能測站皆位於同一側，非均勻分布，因此最外圍之內插點所計算出來之應變率等，誤差較大。

而應變率張量，以 Prescott et al.（1979）所想之數學式來計算平均之面膨脹率、主應變率、剪應變及其相應之方位角：

$$\dot{\varepsilon}_1 = \frac{1}{2}\left(\dot{\varepsilon}_{ee} + \dot{\varepsilon}_{nn}\right) + \left[\dot{\varepsilon}_{en}^2 + \frac{1}{4}\left(\dot{\varepsilon}_{ee} - \dot{\varepsilon}_{nn}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} \qquad \text{（式 B-12）}$$

$$\dot{\varepsilon}_2 = \frac{1}{2}\left(\dot{\varepsilon}_{ee} + \dot{\varepsilon}_{nn}\right) - \left[\dot{\varepsilon}_{en}^2 + \frac{1}{4}\left(\dot{\varepsilon}_{ee} - \dot{\varepsilon}_{nn}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} \qquad \text{（式 B-13）}$$

$$\phi = \frac{1}{2}\tan^{-1}\left[2\dot{\varepsilon}_{en}/\left(\dot{\varepsilon}_{nn} - \dot{\varepsilon}_{ee}\right)\right] \qquad \text{（式 B-14）}$$

$$\Delta = \dot{\varepsilon}_{ee} + \dot{\varepsilon}_{nn} \qquad \text{（式 B-15）}$$

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\dot{\varepsilon}_{en}^2 + \left(\dot{\varepsilon}_{ee} - \dot{\varepsilon}_{nn}\right)^2/4} \qquad \text{（式 B-16）}$$

$$\psi = \frac{1}{2}\arctan\left(\left(\dot{\varepsilon}_{nn} - \dot{\varepsilon}_{ee}\right)/2\dot{\varepsilon}_{en}\right) \qquad \text{（式 B-17）}$$

其中 $\dot{\varepsilon}_1$ 為最大主應變率，$\dot{\varepsilon}_2$ 為最小主應變率，ϕ 為 $\dot{\varepsilon}_1$ 之方位角，Δ 為面膨脹率；$\dot{\gamma}$ 為最大剪應變率，ψ 為 $\dot{\gamma}$ 之方位角。各項參數中，面膨脹率可用來反應和正向滑移斷層（Dip-slip faulting）有關之水平變形特性，最大剪應變率則反應和走向滑移斷層（Strike-slip faulting）有關之變形特性（Sagiya et al., 2000）。

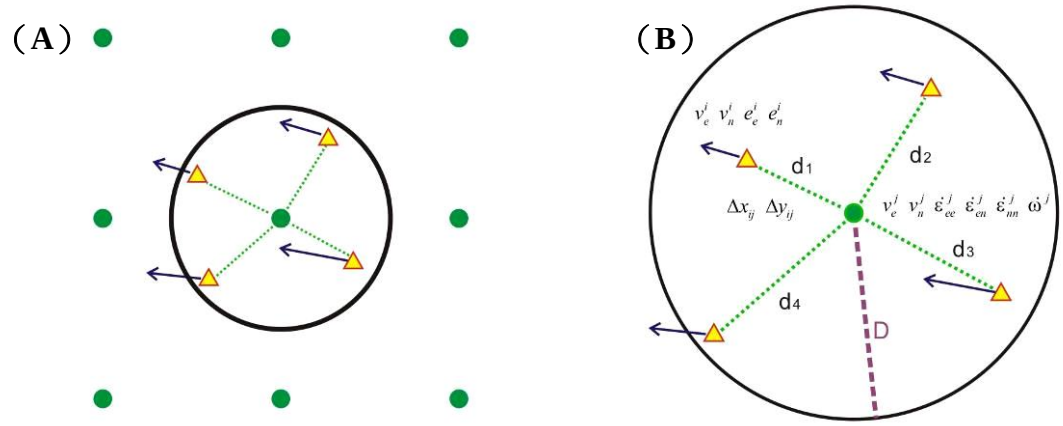


圖 B.1 應變計算方法示意圖。綠點表示內插點，黃色三角形觀測站，藍色向量為速度場。

附錄C 應變儀維護紀錄表格

一、儀器架構

GTSM21 控制與記錄系統是安裝在井口的裝置，以纜線與孔底的儀器相連。圖 C.1 與圖 C.2 顯示整個儀器的組成及各項硬體設備。各測站所架設之儀器有些許不同，以下先簡要敘述機箱內外之儀器設備。

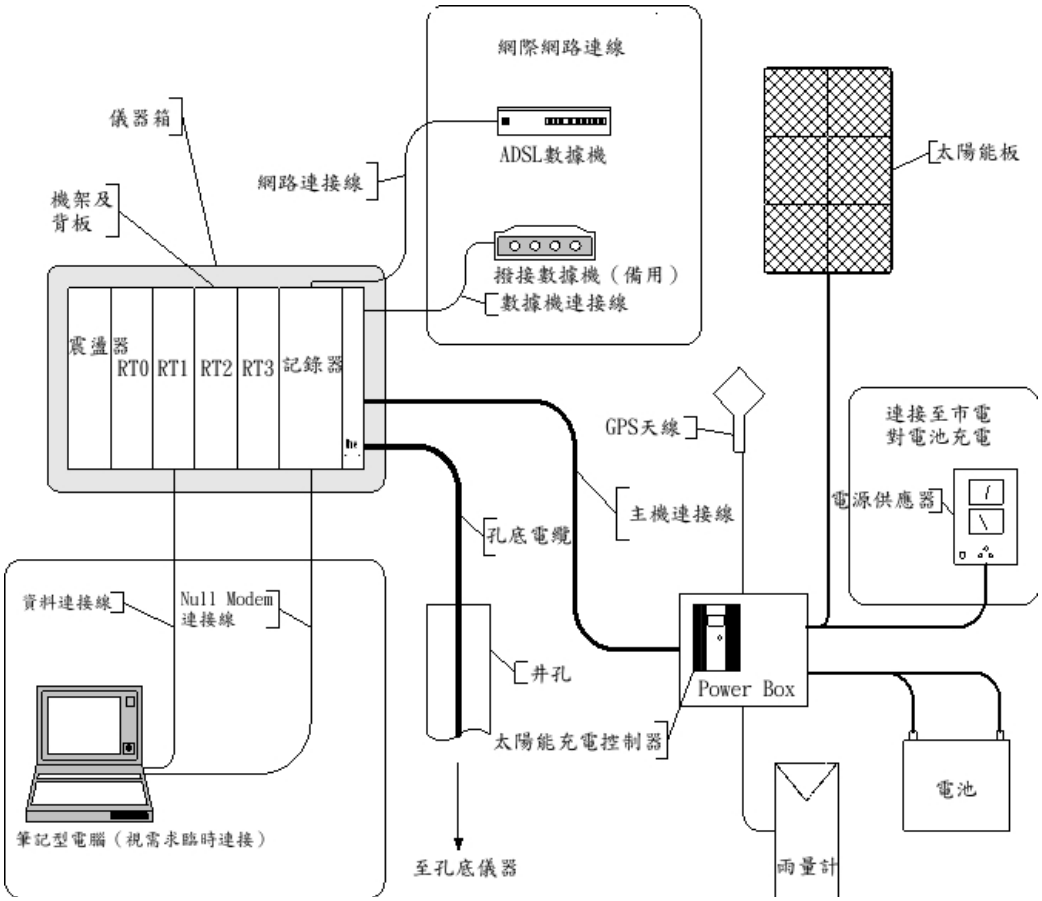


圖 C.1 應變儀觀測站機箱內部構造示意圖。

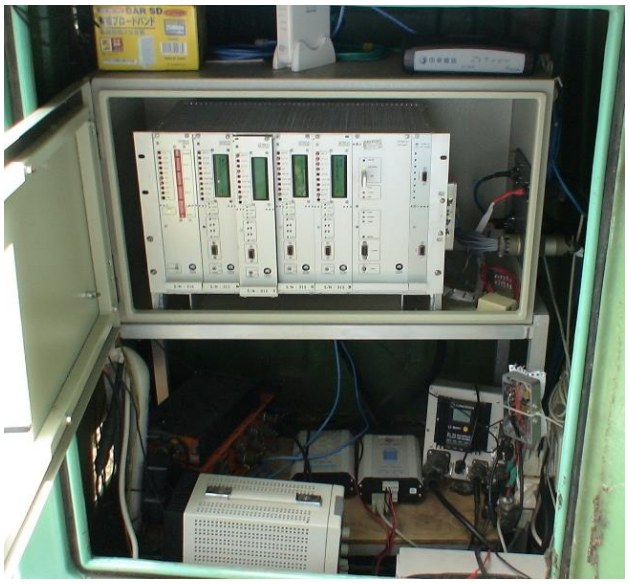


圖 C.2 曾文南觀測站內部儀器情形。

機箱內部分為三層：上層－主要放置連網工具，如 Modem 與 IP 分享器，有些測站另設有光纖訊號遮斷器，以防止高壓突波對儀器透過電話線對儀器造成損害。中層－放置主要觀測系統，各 RT 面板，資料記錄器與震盪器。下層－主要放置電源設備如電源供應器、電瓶、充電控制器等，有些測站則放有地震資料記錄器 Q330 與 bailer。機箱外之設備：以太陽能板、雨量計與 GPS 天線為主。

二、現地儀器檢查程序與應注意事項

1. 系統初始檢查

到了測站現場後，首先必須進行初始檢查，檢視系統燈號顯示並和以下的描述做比較，就可以知道系統目前的狀態。如果 GTSM 觀測系統(圖 C.3)的顯示與正常狀態的描述有任何不同，把不同之處確實記錄下來。詳細檢查項目在後面會有詳述。依電源供應狀況，POWER BOX 會自動調節系統進入待機狀態，以保護系統穩定與節省電力。



圖 C.3 GTSM 觀測系統，由左而右依序是震盪器(Oscillator)、RT 面板(RT Channel 0~3)、資料記錄器(Data Logger)與連線終端部(Cable Termination)。

2. 全系統重新開機

如果必要的話，依以下程序重新開啟系統。

(1) 關機：

(a) 關閉記錄器：按住 standby 按鈕直到 Logger LED 開始快速閃爍。當 LED 變成持續發亮時，就可以關掉記錄器電源。

(b) 關閉所有 RT 面板的電源。

(c) 關閉震盪器電源。

(d) 在有 ADSL 的測站，關閉 ADSL 數據機的電源，並把 IP 分享器的電源拔掉。

(e) 有撥接數據機的測站，關閉數據機電源。.

(2) 再啟動：

(a) 有 ADSL 的測站，開啟 ADSL 數據機的電源，然後插上 IP 分享器的電源。

(b) 如果有撥接數據機的話，打開電源。

(c) 打開震盪器電源。

(d) 依序打開 RT 面板的電源。等到所有 RT 面板完成開機程序，並顯示 MEAS 或 EVNT 時，再進行下一步驟。

(e) 打開記錄器電源。

(3) 設定 **RT** 面板最大增益：

所有 RT 面板的最大增益值必須盡可能調小，以抑制波形對訊號記錄帶來的影響。操作過程中，RT 面板不會超出最大增益設定的範圍。這個動作必須在分別每台 RT 的設定（configuration）模式下各自進行，而且必須是在剛開機的時後。操作程序如下：

(a) 關閉 RT 電源。

(b) 按住 RT 面板的+ 和 – 按鈕。

(c) 打開 RT 電源。

(d) 液晶面板應該顯示 Configuration。

(e) 放開按鈕。

(f) 液晶面板第二行應該顯示<Set Chan Num>. 按+ 鈕一次可跳到下一選項： <Set Max. Gain>。

(g) 按 Menu 鈕進入這一選項. 液晶面板第二行會顯示 Max Gain = <?(0~3 的數值)>。

(i) 按+ 或 – 鈕調整到希望的增益值，例如 2。

(j) 按下 Menu 決定增益值. 液晶面板第二行應該又是顯示<Set Chan Num>.。

(k) 按+ 鈕一次跳到<Exit>。

(l) 按 Menu 鈕跳出設定模式，完成設定。RT 面板會以新的設定重新啟動，新的設定值會儲存在唯讀記憶體，而且在之後每次啟動時都使用新的設定，只有進行同樣的步驟才能改變這個設定。

3. 存取資料

資料的存取需要花費一些時間，因此先以隨身碟存取資料(圖 C.4)，在等待資料存取完成期間進行其他檢查工作。



圖 C.4 以 USB 隨身碟直接進行資料的下載。

4. 電源設備

電源設備含：電源供應器－記錄顯示板顯示之電流及電阻值；電瓶（蓄電池）－以電阻計測量內阻；充電控制器－記錄顯示板顯示之電流及電阻值(圖 C.5)。若顯示板無訊號，按黃色按鍵重新啟動。下方三個接頭分別連接電瓶、市電、太陽能。右方插座則以電阻計測量並記錄電阻值。



圖 C.5 充電控制器。

5. 網路連線工具

檢查機器燈號是否正常。網路連線工具包含 Modem 與 IP 分享器，有些測站設有光纖網路設備，可將 ADSL 訊號與光纖訊號相互轉換(圖 C.6)。

6. Q330 與 bailer

檢查 Q330 Data logger 與 bailer 燈號是否正常，接頭是否皆有緊密接合(圖 C.7)。

7. 太陽能板

（1）測量太陽能板正極電流值。

（2）清潔太陽能板上方，以避免落葉、灰塵等影響日照的接收。

8. 雨量計

（1）雨量計外觀。降雨由上方漏斗狀的開口流入。

（2）上方開口偶被落葉阻塞，而使雨量計內的接受器無法接收降雨。

（3）雨量計內部。降雨由上方開口落入接收器，接收器由於水的重量左右震盪，降雨量便由震盪次數計算。

（4）調整固定雨量計於水泥基底上的三個螺絲，使雨量計保持水平，以避免接收器震盪異常。

（5）以安培計測量雨量計電流值。

（6）雨量計是否正常運作則以連線檢查。

9. 測試網路連線

將電腦接上網路線，將網路連線設定如 IP、SUB、Gateway 及 DNS 等改為該測站區域網路連線設定值（寫在機箱門內側），測試是否可連線。

10. Q330 資料下載

以該測站 Q330 之 IP 為網址，可連上地震儀資料首頁，若連線正常，則會顯現進入資料檔案列表之連結。進入資料檔案列表網頁，點選該檔案連結則可下載該檔案。



圖 C.6 光纖訊號遮斷器，透過光纖傳輸 ADSL 數據機與路由器間訊號，可有效遮斷經由電話線過來的強烈突波，以保護儀器的安全。



圖 C.7 Q330 地震資料紀錄器與其儲存配件 bailer。

三、建議井下應變儀維護紀錄表格

站名：_____ 檢查日期時間：_____ 天氣狀況：_____ 測試人員：_____			
儀器	正常	檢查項目	備註(記錄儀器異常後處理情形)
系統檢測			
POWER BOX		輸出電壓值是否在12v~14.5v範圍	
		輸出至電瓶電流值是否正常	
Osc Board		檢查燈號是否正常	
RT0~4 Board		檢查燈號及顯示是否正常	
LoggerBoard		檢查燈號是否正常	
		測試可否以USB隨身碟下載資料	
		登入測試網路傳輸狀況是否正常	
Q330		檢查燈號是否正常	
		測試可否正常登入	
Q330 Bailer		檢查燈號是否正常	
		測試可否正常登入	
水位計		測試可否正常登入	
雨量計		檢查有無遭異物阻塞	
		接點有無潮濕、鬆動等	
電力檢測			
蓄電池		測量電壓是否在12.5V以上狀況顯示燈是否正常	
太陽能光電板		現場日照條件下，測量輸出電壓是否正常	
		測量輸出電流是否正常	
電源轉換器(Inverter)		測量輸出電壓值是否在12v~14.5v正常值內	
		測量有無正常輸出電流至POWER BOX	
電源插座		電源座是否老化或破損	
不斷電系統（UPS）		檢查燈號及輸出電壓（110V）是否正常	
通訊測試			
ADSL數據機		檢查連線燈號（WAN/ADSL、LAN）有無異常	
		實際對外連線，測試網路連線是否正常	
MODEM 機（僅ECT）		檢查連線燈號（RD,TD,CD,OH,MR）有無異常顯示	
		撥號測試電話線路是否暢通	
路由器（IP分享器）		檢查各連線燈號是否正常	
		對外連線，測試連線狀況是否正常	
無線發射器（僅RNT）		登入主機試行資料傳輸，檢查燈號是否正常	
訊號強波器（僅RNT）		登入主機試行資料傳輸，檢查燈號是否正常	

雜項			
訊號線接頭		訊號檢查,是否表皮脫落或老化	
電源延長線		是否表皮脫落或老化	
網路/電話線，		網路線線路檢查	
外觀檢查與清潔			
一般項目		太陽能板清潔 雨量計清潔 觀測站整體清潔 觀測站周圍除草，樹木修剪	
其他應註記事項			

注意事項：

1. 請測試人員進行各項儀器檢測工作後，若儀器測試正常，則在欄位打勾，若否則進行初步故障排除作業，並將結果記錄於備註部分。
2. 測試人員應確實填寫測試日期時間與天氣狀況，以後未來進行資料檢測之參考。
3. 測試人員應於每次進行測試填寫此表，並於右上方簽名，以示負責。

附錄D 審查委員意見

期初審查（委員綜合意見）：

審查意見	處理情形
1. 無論是 GPS、strainmeter 或是 geochemical analysis 都建議先鑑定其與主要斷層系統在空間上的關係。	1. 將來 GPS、井下應變儀和地球化學資料分析中會先分析參考其變形現象和主要斷層系統在空間上的關係。
2. 潛勢分析與長期的速率有關，但長期滑移並非本計畫的主題，因此要界定潛勢分析的資料來源。	2. 遵照辦理。
3. Strain 是 3D 的表現，所以建立在斷層空間幾何上的剖面應變模式分析應為必要，全區 block model 固然重要，但針對個別系統的分析可以提供重要的 constraint。	3. 由於臺灣的斷層系統相當複雜，因此利用 GPS 觀測資料反演地下斷層系統之鎖定深度、滑移虧損及鎖定率的工作，最重要的部分是地下斷層系統之空間幾何關係與孕震構造之連結，因此在未來的分析上會針對個別斷層系統分析，以二維數值模擬求取上述之斷層參數。
4. Campaign mode 與 continuous mode 應該是一致的，應該合併分析，而不是個別分析再來比較，但 continuous mode 應有更多時序分析的工作。	4. 關於連續 GPS 資料分析，目前已針對時間序列分析，並嘗試與井下應變儀的時間序列分析比較。有關模擬的部分，我們會將移動站(Campaign mode) 和連續站的資料結合。
5. 為選擇中崙、梅山二站第化監測資料配合觀測結果討論，由於梅山站即將進行遷站，是否適當，可再進行討論。	5. 當時考慮選擇中崙、梅山二站進行與連續 GPS 和井下應變儀聯合分析，主要著眼於三種監測站在設站時間的重疊部分較長，且井下應變儀設站之後，因井孔與灌漿回復效應，資料並無法立即使用，因此選擇井下應變儀設站時間較長的嘉義地區之測站。若梅山站即將遷站，吾人將此因素列入考慮。
6. 針對不同斷層發震機率之評估，其評估先後順序應可再調整。	6. 對於斷層潛勢之評估，目前選定每年至少兩條斷層為評估之對象。目前選定之優先順序，以此斷層是否有長期滑移率的資料為優先考量。

7. 本斷層監測與潛勢的監測物理量與潛勢分析所需的參數間的關係，請再整合釐清(例如，P.23 中的 input data 是長期滑移率，GPS 的資料並非輸入資料)。	7. 在計算活動斷層特徵規模地震發生率流程圖中，為求取特徵地震規模，所需要之資料為長期滑移速率，此部分會做修正。目前本計畫中利用 GPS 所觀測得到為跨斷層之短期滑移速率，在斷層潛勢的分析上，會利 GPS 觀測資料，用數值模式反演各斷層之滑移虧損(Slip deficit)及鎖定率(coupling ratio)，以評估其斷層之孕震潛勢。
8. 孕震構造與活動斷層的定義與其相互間的關聯性，請先回顧釐清，如能列表綜合整理則更佳。	8. 目前活動斷層的定義採用經濟部中央地質調查所公布之活動斷層為依據。至於孕震構造則含所有可能引發破壞性地震之斷層系統，包含潛伏於地下之盲斷層系統。目前活動斷層潛勢評估中，先以表 4.3 台灣活動斷層特性一覽表中所列之斷層為主。
9. 監測的位移場(大範圍，小比例尺，地表)與應變儀(小範圍，點資料，地下岩盤中)之資料關聯與研究限制，請說明。	9. 利用連續 GPS 和應變儀皆為觀測地殼之應變之測地學方法，GPS 測量的精確度可達公厘等級，可精準地監測斷層帶的變形位移量與斷層的短期滑移速率外，對於潛伏在地下的活動斷層，亦可提供判釋的依據與高精度的偵測效果。井下應變儀的設置深入地下深處，可有效降低干擾雜訊，又可緊密接觸地下厚實且未經風化之堅硬岩盤，理論上可觀測到頻率 100 Hz 的微細應變，恰可填補地震儀與 GPS 觀測不到的頻率範圍。井下應變儀若能結合連續 GPS 觀測，對於數個月至每秒數十個週期範圍內的微細地殼應變研究，提供另一有利的工具，有助於台灣斷層活動度與地震潛能之評估。目前研究工作重點，為 GPS 和井下應變儀的應變資料比對。
10. 1935 年新竹台中地震有 2 段活動斷層活動，2008 年汶川地震亦有 2 條斷層活動，請問斷層潛勢分析(機率分析)如何處理這種現象?工程上關心的最大地震如何考量也請補充說明。	10. 根據加州的經驗，斷層潛勢分析(機率分析)中也會考慮不同區段活動的潛勢，例如針對 Hayward -Rodgers Creek fault 分段研究中，進行破裂模式排列組合，區分出 4+1

	個破裂事件後，由專家評估其可能性，最後分配四個破裂模式之權重。至於最大地震規模之估算，除了利用 Wells and Coppersmith（1994）彙整有關地震規模與斷層破裂長度、斷層破裂面積和斷層滑移距離之間的經驗關係式求取外，另外也會利用特徵地震模式和截切指數模式求得。
11. 對於 GPS 資料中的速度值，平均值<標準差者，期在成果說明時的統計意義上的限制，請加強說明，國外研究中是否也有類似情形。	11. 關於 GPS 觀測資料及處理精度，若有速度場的平均值小於其標準差誤差的情況，我們會個別討論其適用性和誤差來源。大部分於 GPS 速度場的平均值小於其標準差的情況發生於移動站，且其位移場較小的區域，根據國外的經驗，無論是移動站或連續站的觀測資料，若觀測時間拉長，仍可得到其長期變形之趨勢。
12. 由於 GPS 計算 strain 時，三角網格內的岩體預設是連續體，不能有斷層構造，是否在期初時，先完成斷層線三角網格之劃設，先得到地調所確認。	12. 關於利用 GPS 水平觀測資料計算主軸應變率，其假設網格內的岩體是連續體，意謂著網格間並沒有不連續構造存在。分析方法可以利用跨越斷層和非跨越斷層的網格區分討論，然而此種分析方式，亦有實際面的困難處，由於應變的累積和斷層的鎖定深度(locked depth)、鎖定率(coupling ratio) 和滑移虧損(slip deficit)相關，且各個斷層的位態不同，各個斷層的空間分布和其交互關係，更增添應變分析的困難度。然而間震期間，除了潛移斷層外，一般的情況下，斷層在淺部是鎖定的，利用 GPS 水平觀測資料計算主軸應變率，仍可以提供在各斷層鄰近區域應變速率累積的情況。
13. 本計畫與其他計畫之連結應說明清楚，如 P22 倒數第 6 行工作項目包含計算長期滑移速率，但 P46 表 4.3 列出由其他計畫成果提供。	13. 有關本計畫與其它計畫之連結，會進一步釐清並註明資料之來源。

14. 本計畫目前均個別列出斷層評估，但應考慮斷層系統，有些斷層可能一起發生，有些斷層應分段發生。	14.各個斷層的分段特性，會蒐集資料研判，在斷層潛勢分析(機率分析)中也會考慮不同區段活動的潛勢及不同破裂模式之權重。
15. 計畫書部分文字應注意，仍有多處錯誤，參考文獻有多篇未列，多篇列出為引用。圖 3.2 中斷層是否能更新?P58 表 4.6 中即有部分斷層與此圖不一致。	15.活動斷層之資料可以根據地質調查所資料更新，與表 4.3 一致。
16. 此計畫書彙整多年來的觀測評估地震潛勢，依每年兩條活動斷層為目標進行。	16.遵照辦理。
17. 為了使計畫達到預期目標，建議以普查方式進行計畫研究，並蒐集斷層相關參數以 constraint 模型的建立。	17.遵照辦理。
18. 宜檢討活動潛勢評估的斷層名單，其名稱宜使用地調所使用者。	18.遵照辦理。
19. 宜建立全程工作之分項表，以呈現整體觀，俾綜合了解其工作內容是否與目標之達成緊密相關。	19.遵照辦理。詳見表 C。
20. 不能僅以"距離"作為資料分析的參數。	20.遵照辦理。
21. 宜了解其他類似計畫之工作內容與成果，並加強彼此間之交流。	21.遵照辦理。將參考地震地質與地變動潛勢分析和其它相關計畫之工作成果和內容。
22. 必要時宜建議地調所其他工作之推動。	22.遵照辦理。會與地調所同仁討論加強本計畫與地調所正在進行之聯繫。
23. 縱谷斷層是否同一系統或由不同之獨立斷層組成，宜參考。	23.整個縱谷斷層是否為同一斷層系統或獨立斷層系統對於斷層潛勢分析(機率分析)研究，是非常重要的工作，1951 年花蓮-台東地震系列顯示縱谷斷層不同區段的相互影響，未來的分析中，會考慮不同區段活動的潛勢及不同破裂模式之權重。
24. 選擇何條斷層進行潛勢評估，應考慮優先順序。	24.對於斷層潛勢之評估，目前選定每年至少兩條斷層為評估之對象。目前選定之優先

	順序，以此斷層是否有長期滑移率的資料為優先考量。
25. 各監測方法之變化機制為何。	25.各監測方法主要觀測數個月至每秒數十個週期範圍內的微細地殼應變，各個監測方法所反應不同時間尺度和空間尺度的關聯性，將在未來的工作中評估釐清。
26. 如何評估各監測方法所獲得的異常是同一事件所引起的。	26.計畫執行初期，將先評估各監測方法是否同時記錄同一時間段之異常事件，至於是否為同一事件所引起，是本計畫研究重點，將仔細釐清異常現象之來源。

期中審查（委員綜合意見）：

審查意見	處理情形
1. 斷層活動潛勢分析所估算的地震發生機率計算模式（公式）為何？估算過程中所需採用的參數為何？請詳細說明各個參數如何獲得。	1. 特徵地震模式之公式詳見期末報告第四章 4-1-3 節，機率計算公式詳見第四章 4-1-4 節，評估之參數及獲得方式請詳見期末報告第四章 4-2 節，而車籠埔斷層及瑞穗斷層之斷層參數詳見第四章之 4-3 節。
2. 第 63 頁的斷層參數（A-G）是否應用在第 82 頁與第 85 頁的發震條件機率中？	2. 斷層幾何、斷層分段、斷層大可能地震規模、斷層滑移速率等參數將可以應用在特徵地震模式中；斷層之活動歷程則適用在機率評估中。
3. 第 64 頁，$\vec{V}_i = \vec{V}_b + \vec{V}_f$ 是否可以詳細說明，以及如何應用在發震機率的運算。$\vec{V}_b$ 的長期變形速率如何求得。	3. 本期尚未將此參數帶入機率模式之評估中。
4. 以 BPT 統計模式是估算地震規模為何的發震機率。	4. BPT 模式無法評估地震規模之大小，僅能評估發生特徵地震之機率，因此以特徵地震規模代表之，並用特徵地震模式推估之地震再現週期於 BPT 模式分析中。
5. 此計劃涵蓋範圍廣，以其報告方式難以了解其具體進度及成果，建議未來計劃期中及期末報告中，應分項列出其執行重點的分項工作及成果。	5. 遵照辦理。詳見第一章。

6. 報告書應依現行格式編印。	6. 遵照辦理。
7. 應有結論及討論章節，並說明已完成之工作。	7. 遵照辦理，各項成果詳見第第一章及第六章。
8. 內文中第四章所引用 Chen et al. 2007a/b 之資料有誤。	8. 文字已修正，詳見第四章。
9. 內文中第四章所引用 USGS, 2003 之引用有誤，日本文獻部份亦同。	9. 文字已修正，詳見第四章。
10. 章節之標示宜清楚。	10. 遵照辦理。
11. 地震規模的設定應合理，特徵地震是否在防災上合理？	11. 應屬合理，詳見第四章 4-1-3 節。
12. 活動斷層為本計重點，報告中之斷層圖並不一致，如山腳斷層，應更新並一致。	12. 斷層圖已修正，詳見第一、二章。
13. GTSM21 精度較 GTSM100 高一倍(P.43)或低一倍(P.52)，請釐清。	13. GTSM21 精度較 GTSM100 低一倍，文中文字已修正。
14. 活動斷層地震潛勢分析部分，很重要的是參數之決定，應討論如何來決定參數。否則任意定出參數，代入公式即可獲得機率，實際意義不大。如何定最大可能規模、重複周期？	14. 已蒐集各活動斷層相關之研究成果，並萃取所需之活動參數，在參數表上會列舉各研究結果來源。參數表已做修正，請詳閱期末報告第四章 4-3 節。
15. 第五章，梅山、濁水潭及二溪站是否一定要受同一地震影響造成異常？10 月 7 日至 19 日是否沒地震？如何判斷異常？如梅山站 10/18 有異常為何 10/7 是正常？	15. 目前根據初步的分析，梅山、濁水潭及二溪站是否受同一地震影響造成異常，目前分析還沒有結論，各站的差異性及不同的地震時空分布有可能造成不同的影響（如：應力傳遞至北部所需花費較長時間）。有關異常的判定，是根據楊燦堯教授所提供的地球化學觀測報告指出明顯高於背景值且未受到天候或濕度的影響。
16. 工作項目中含「建立井下應變儀維護記錄表標準格式」，應該是優先進行項目，在期中報告中均未提及？	16. 已加入報告內，詳見附錄 B。

17. 瑞穗斷層資料應放入表 4.3 中。表中大茅埔雙冬長度最長，1999 年有動，是否是地調所的意見，山腳斷層的水準資料年度變形量似乎不小。	17. 會將瑞穗斷層的資料放入表 4.3 中。本報告將車籠埔斷層及瑞穗斷層整理於表 4.5 及表 4.10 中。有關大茅埔雙冬斷層在 1999 年錯動是根據地調所資料，山腳斷層的水準資料已更改確認。
18. 地球化學的異常 10 月 18、14、07 日與 10 月 19、22、30 日的地震的關聯性是事前察覺還是事後諸葛，請於報告中說明清楚。這些站與震央(源)間的空間關係為何？	18. 目前這些異常的關連性與地震的空間關係是下一階段努力的目標，目前正嘗試與連續 GPS 觀測和井下應變儀比對。
19. 目前的測站是否有受到莫拉克颱風造成土石鬆動影響？若有相關經驗應了解，以作為未來設佔之參考。	19. 井下應變儀埋設在岩盤內，深度約 200 公尺，理論上應不會受地表土石鬆動的影響。我們重新檢視資料並到野外巡查所有的儀器設備。
20. 表 4.13 中日本的規模是何種規模？請說明。表中日本「斷層帶」是何定義？地震後經過率的定義？是否應為百分比？其平均活動間隔大都在千年的大小，與台灣是 200-700 的間隔不同，是否有地體構造背景上的意義。	20. 日本在該表中所採用的是長期評價地震規模，其與 M_{JMA} 等價；斷層帶名及斷層名，一般斷層破裂到地表不會為單一線形，而是呈條帶狀分布，因此稱「斷層帶」；地震後經過率為地震後經過時間除以平均再現週期；台灣板塊運動較日本為快，在活動斷層再現周期上就會相對較短。

期末審查（委員綜合意見）：

審查意見	處理情形
1. 報告內容的描述未能展現整個計畫的具體年度成果。	1. 已加入報告內，詳見第六章。
2. 本計畫為第一年，報告末應對第一年計劃檢討，有哪些困難？有哪些原先規劃的目標是無法達成的?後續計畫應如何調整？	2. 本年度計畫之檢討以及後續工作方向之調整已加入報告內，詳見第六章 6-5 節。
3. P.22 斷層兩側差異 2.2mm/yr 之縮短量？斷層兩側似乎沒有變化。而車籠埔斷層上盤應該有很大的縮短量。	3. 彰化斷層兩側差異 2.2mm/yr 之縮短量，是由彰化斷層兩側速度場相減所得；由於地調所之連續 GPS 測站於車籠埔斷層東側並沒有測站，因此本報告中沒有討論車籠埔斷層兩側之速度場差異。

4. P.24.圖 2.16 的 scale bar 放大，圖中看不見。	4. 分區主軸應變率圖已全部重畫，並把比例尺放大，詳見第二章。
5. P.120.用穗瑞斷層（地調所已經用這個名詞）。	5. 報告中已全部改用瑞穗斷層，詳見第四章。
6. P.124.表 4.6、4.7、4.8 所用的參數看不懂（面積、滑移速率）。	6. 面積與滑移速率是採用表 4.5 斷層參數表中之參數，面積以斷層長度的範圍搭配斷層深度及斷層傾角計算而獲得，可推估特徵地震規模之分布範圍。滑移速率則採用槽溝觀察並投影到斷層面上之長期滑移速率。
7. P.133.表 4.11 所估算的再現週期與古地震結果不吻合，請重新估算。	7. 表 4.11 已重新估算，詳見第 116 頁。
8. 所有圖中的斷層線都用深色來劃，不然看不見。	8. 遵照辦理。
9. 2-2-2（P36），在三維的深部塊體構造幾何，加以描述及圖示。	9. 已增加圖 2.28，可補強說明由塊體模型的尤拉極可求取跨塊體邊界斷層的長期滑移速率和滑移虧損之原理和塊體邊界條件。對於三維的深部塊體構造幾何而言，目前假設每條在地表看到的逆斷層，會在底部連結到一基底滑脫面(décollement)，但本研究在建模時，並無用到深部構造，因為在測試時，加入基底滑脫面，計算時間增加，擬合程度變差，未來將克服這部分的問題。我們也增加 2-2-3，建議未來研究方向。
10. 對於塊體模型的計算，雖為引用饒等人（2008）的成果，但因模型的幾何將影響計算成果，尤其在其深部構造幾何的建立，應於文中進行描述。	10. 謝謝委員建議，塊體模型的計算中，模型的幾何的確會影響計算成果，目前的斷層幾何根據地質調查所所發表的斷層資料簡化而來，未來將統整地質調查所資料和中油的地質剖面資料，以求得更精確的斷層面的位態。

11. 4-1-1 中，板塊運動之能量分布，其數據由何而計算得出，又其與地震潛勢分析有何關係？	11. 圖 4-1 為美國加州的板塊能量分配的經驗，要解決斷層潛勢的問題，必須要了解大尺度的板塊能量分配，由於本計畫是以每年評估兩條斷層，因此是逐年解決這個問題。在進行斷層潛勢評估時，活動斷層累積之能量又可分為潛移和地震滑移，需將潛移所釋放之能量扣除才是地震滑移釋放之部分，潛移可藉由 GPS 量得其短期滑移速率，地震滑移則用槽溝中之古地震或是階地定年來計算其長期滑移速率，從圖 4-1 的美國經驗可提供為台灣進行評估之參考。
12. GPS 測站成果之中應加其定義或如何算出（如旋轉率）。	12. 已加入報告內，詳見附錄 B。
13. blocks 的劃分依據是否考慮 GPS 的資料，使其更合理。	13. 塊體建立主要是參考饒瑞均等（2008）及 Lin et al. (2009)所發表之速度場，進而化分成 27 個剛性塊體以及 24 條斷層。
14. 井下 sensor 的深度的差異影響？	14. 目前所解算此六站之深度如表 3.2 及表 3.4，每口井深離地表約 200 公尺，因此井深對資料的影響不大。儀器若埋的太淺，可能受地表其它因素的干擾較大，埋設深一點，當然較好，但成本高，訊號傳遞也比較困難，還要考慮儀器對高溫的忍耐程度，因此 200 米是現在大部分的井下應變儀的埋設深度。
15. 可考慮水庫枯水、豐水的影響？	15. 詳見第三章 3-5 節，討論曾文水庫的有效蓄水量變化（含乾、雨季的變化）與井下應變資料之間的關係及影響。至於是水庫中水的重量產生地殼對附載的應變，還是水位高產對地下水壓力的變化，或是還有其它的效應，尚需更多經驗或更多資料來釐清。
16. dilatation 報告前後之中文用語不一致。	16. 文字已修正，已將全報告中 dilatation 中文用語統一為膨脹率。

17. 圖 2.2 相對於 ITRF2005 的意義為何，請說明。	17. ITRF 是描述地表相對於地球質量中心運動的座標系統。如相對於地球質量中心座標系統時，歐亞板塊東緣向東南，而太平洋板塊西緣向西北運動，表示相對於地球質心這兩板塊在台灣附近互相碰撞。因此圖 2.2 是表示 GPS 連續測站相對於地球質量中心座標系統的運動。
18. 井下應變儀的資料很有趣，請說明： (a) 汶川地震如何知道是"汶川"地震所造成，是否在附近的地震站的初達波佐證。 (b) 水位與 strain 間的關聯，就岩石力學而言，地下水位影響有效應力，有效應力影響應變。兩者之間關聯除了現在用相關性探討外，似乎可進一步從學理上精進。例如水位變化轉化成應力後與應變間的關聯，是否與岩石之彈性模數 order 上相符？因為 10m 左右的水位變化造成 10^{-6} 的 strain，則岩石之 E 值似乎還在完整岩石 α 應變下合理範圍。 (c) 水庫水位變化的圖 P3.42，2004 至 2005 年及莫拉克事件前後的水位資料請再查核。此處標為 0 的定義為何?壩高的 130m 左右而已！水庫水位與 strain 的關聯不若同場址之地下水位井的資料直接。	18. (a) 認為此事件之震波為"汶川"之初達波理由如下，各觀測站位置分布從台灣北部至台灣西南部，兩站距離最大可達 200 公里，檢視應變波形資料，各站的初達波發生時間皆相當接近，期間最多不超過數秒鐘，顯示此訊號來源非來自本地地震，應為距各站距離相近的遠端地震；此外，從氣象局的地震資料中，該段時間(2008/5/12 12-14)並無任何較明顯的本地地震發生；審視距離與波傳速度，推算震波抵達時間也與觀測到的結果相符，證明該波形與汶川地震的相關性；同時，與應變儀共站設置的地震宜觀測資料中也顯示出同時間抵達的震波波形，綜合上述原因，故認定此波形變化為汶川地震所造成。 (b) 井下應變儀一開始都要與地震儀、理論地潮等做比對，是符合大部份的岩石力學的原理。 (c) 文字已修正，圖 3.42 縱軸座標為水庫的有效蓄水量，單位是百萬立方公尺。
19. 第二章之 2-2 節中 Defnode 研究斷層滑移與本研究的關聯，請加強說明（此工作似乎不在原來的工作項目之內，塊體與斷層的力學行為假設為何？）P35 說明是彈性塊體 P.37 中 Fig.2.28 說明是剛性塊體？又此軟體是 2D 或 3D？ ψ 的定義中，須知道長期滑移率與短期滑移率，兩者都是難題，GPS 所得的是連續體的位移而非界面（斷層）的位移，用塊體位移求取界面	19. 雖然在原來的工作項目中，塊體模型非今年度的工作，但由於本研究斷層活動潛勢評估中，長期滑移速率是一重要參數，因此先由 Defnode 研究斷層長期滑移速率之評估。基本上 Defnode 是三維的塊體模型，其原理可由新增加的圖 2.28 說明，其基本假設為剛性塊體，表示剛性塊體內部沒有變形。塊體模型利用塊體內所有點位

位移需一定的假設，請務必說明。又長期滑移率的資料如何取得，亦請說明。	資料來描述塊體旋轉的分量，可由兩塊體旋轉的尤拉極，求取反向滑移速率(back-slip)與鎖定分量(coupling ratio)乘積所產生的斷層速率虧損(slip deficit)再乘上格林函數 G 而得到的地表速度值。因此由地表觀測速度值，可反演出反向滑移速率、鎖定率、速率虧損和長期滑移速率。
20. 中英文摘要均未整合觀測資料分析部分之工作。	20. 已將觀測資料分析結果加入中英摘要內，詳見中英文摘要。
21. 報告書仍有許多需勘誤處，請再校稿，包含參考文獻之漏列等。	21. 遵照辦理。並已補上漏列之參考文獻。
22. P.34，2-1-6 結論第一、二段是否修飾一下，似乎本年度結果不可信！	22. 文字已修正且潤飾，詳見第二章 2-1-6 節。
23. P.37，內文未提及圖 2.32，P.39 有圖！	23. 文字已修正，詳見第二章 2-2 節。
24. P.40，3-1-3 小節之名稱不對，應修改！	24. 文字已修正，詳見第三章 3-1 節。
25. P.47，表 3.2 中之角度是否加註修正後之角度？	25. 已將嘉義三站修正後之方位角列於表 3.2 中。
26. P.54 之公式請 check，式 3-6 與式 3-3 應一樣不需這樣導出！	26. 文字已修正，詳見第 52 頁。
27. P.63，如何估計 C 值？	27. 已加入報告內，詳見第 60 頁。
28. P.64 中 Areal strain 與時間關係為何？	28. 當井下應變儀的儀器安裝在井洞之內後，用不收縮水泥封井。之後在數年內，會受井孔回復效應域溫度變化的影響，除了這些有限期間的效應之外，儀器所記錄到的 Areal Strain 主要是受到板塊運動、斷層活動所產生的岩層應變的變化，以及氣候的影響，這些效應都會在面應變的時間記錄上產生變化。
29. P.65、P.67 之 a 值為正 or 負？	29. 已重新計算，文字已修正，詳見第三章 3-4-3 節。

30. P.69 之 b 與 d 是否反過來較合理？	30. 已重新檢核並修改 3-4-3 節雙自然對數的指數分析中的 a、b、c、d 值。b、d 值為相同的指數函數，兩值次序並不會影響結果。
31. P.81，Time 之單位應加註為 year or day？	31. 文字已修正，詳見圖 3.45 第 75 頁。
32. 圖 3.44 之說明應修改！圖上非 7 月 2-7 日！	32. 文字已修正，詳見圖 3.45 第 75 頁。
33. P.88 表 3.5 與 P.87 文字說明之 Oscillation range 不同處請修正！	33. 文字已修正，詳見第 80 頁及表 3.5。
34. P.110 式 4-14 中（T）→ F（T）；式 4-20 h_{BPT}（t）＝_____無 t，請 check！	34. 文字已修正，詳見第 98 頁。
35. P.115 第 4 點深度之定義與 P.116 圖 4-14 不同！	35. 深度修正為斷層面投影到垂直面之深度，詳見第 102 頁。
36. P.123 車籠埔斷層全段最大規模之估計為何不用逆斷層之公式？	36. 已修正表 4.5 中最大規模估計之公式，修改為表 4.1 中的逆斷層之公式。
37. P.127 表 4.9 之結果與 P.119 之結果，要用哪一個？	37. P119 之結果為斷層有完整槽溝資料所獲得之結果，因此主要是採用 P119 之評估結果，但在後續 99~101 年計畫中擬評估之活動斷層，較缺乏槽溝開挖及古地震資料，因此本計畫才提出以特徵地震模式來估算其預期可能之特徵地震規模與再現週期，也就是 P127 之估算結果，並比較其與古地震研究所計算之 BPT 模式推估之結果差異性。
38. P.133 表 4.11 之再現週期均＜100 年，與 P.132 之 190-210 年不一致！結果是否可信。	38. 已修正參數，週期分布為 52~255 年，平均為 142 年，詳見期末報告 4-3-2 節。
39. 本計畫工作量不少，執行團隊亦做了不少工作，建議主持人仍需花一些時間檢視報告。斷層活動潛勢之參數應注意，否則僅流為數學運算！	39. 謝謝委員建議，本團隊詳細檢視報告。斷層活動潛勢之參數評估以蒐集中央地質調查所出版之資料為主。