經濟部

案號：B10618

經濟部中央地質調查所

106年度委託技術服務採購案全年度資料處理報告

「斷層活動性觀測研究第四階段-井下應變儀資料處理暨地殼變形分析（1/4）」（第一年度）

全 程 計 畫：自106年3月至109年12月止
本 年 度 計 畫：自106年3月至106年12月止

委託機關：經濟部中央地質調查所
執行單位：國立臺灣大學
中 華 民 國 106 年 12 月

案號：B10618

經濟部中央地質調查所

106年度委託技術服務採購案全年度資料處理報告

「斷層活動性觀測研究第四階段-井下應變儀資料處理暨地殼變形分析（1/4）」（第一年度）

全 程 計 畫：自106年3月至109年12月止
本年度計畫：自106年3月至106年12月止

委託機關：經濟部中央地質調查所
執行單位：國立臺灣大學

中 華 民 國 106 年 12 月

目錄

目錄.....I
表目錄.....II
圖目錄.....III
摘要.....IX
Abstract.....X
第一章、緒　論.....1
1-1 計畫整體概述.....1
1-2 研究目的.....5
1-3 本年度工作內容概述.....5
第二章、井下應變儀資料處理.....7
2-1 Level-0.....7
2-2 Level-1：經過儀器常數修正及資料突跳修正.....7
2-3 Level-2：包含正確原始面積應變、剪應變.....11
2-4 環境影響因子.....15
第三章、井下應變儀資料分析.....27
3-1 應變異常與地震之關係探討.....27
3-2 井下應變儀時頻分析.....33
3-3 井下應變儀測站資料與現況.....41
第四章、地殼連續變形計算分析.....43
第五章、結論與建議.....59
參考文獻.....61

（附錄請參閱光碟）

[附錄一]　CGPS 三角網成果

[附錄二] 原始資料

[附錄三] 處理後之解釋資料

表目錄

表A：本年度預期進度甘梯圖（GANTT CHART）。 V
表B：預期進度查核點（CHECK POINT）。 VI
表C：期中須交付之各項工作項目。 VII
表 1-1.1：井下應變儀測站資料及接收起始時間表。 1
表 1-1.2：中央地質調查所建置的GPS連續觀測站資料接收起始時間表。 4
表 2-4.1：多變數迴歸法補遺使用之頻率。 25
表 3-1.2：井下應變儀前兆判釋統計表。 30
表 3-1.3 應變異常時間與空間統計表 32
表 4.1：所有三角網的代號、測站名稱、震前年面應變率、震後年應變率及同震應變。 44

圖目錄

圖 1-1.1：井下應變儀觀測站分布圖及GPS連續觀測站逐年分析範圍。 2
圖 2-2.1：錦和測站應變分量。 8
圖 2-2.2：明德中學測站應變分量。 8
圖 2-2.3：樹林焚化廠測站應變分量。 9
圖 2-2.4：大坪國小測站應變分量。 9
圖 2-2.5：太興測站應變分量。 10
圖 2-2.6：曾文水庫北測站應變分量。 10
圖 2-2.7：曾文水庫南測站應變分量。 11
圖 2-3.1：錦和測站應變方向。 12
圖 2-3.2：明德中學測站應變方向。 12
圖 2-3.3：樹林焚化廠測站應變方向。 13
圖 2-3.4：大坪國小測站應變方向。 13
圖 2-3.5：太興國小測站應變方向。 14
圖 2-3.6：曾文水庫北測站應變方向。 14
圖 2-3.7：曾文水庫南測站應變方向。 15
圖 2-4.1：錦和國小測站原始面應變與模式修正。 16
圖 2-4.2：明德國中測站原始面應變與模式修正。 17
圖 2-4.3：樹林焚化廠測站原始面應變與模式修正。 18
圖 2-4.4：大坪國小測站原始面應變與模式修正。 19
圖 2-4.5：太興國小測站原始面應變與模式修正。 20
圖 2-4.6：曾文水庫北測站原始面應變與模式修正。 21
圖 2-4.7：曾文水庫南測站原始面應變與模式修正。 22
圖 2-4.8 氣壓與面應變響應。 23
圖 2-4.9 氣壓響應評估之比較。 24
圖 2-4.10：井下應變儀中地潮分量的評估。 25
圖 3-1.1：2016 年 10 月至 2017 年 9 月規模大於 5 的地震事件之位置及震源機制圖。 28
圖 3-1.2：南部網曾文北測站（RNT）於 2017 年 2 月 10 日高雄市近海地震前的應變資料。 29
圖 3-1.3 應變前兆訊號時間與D/R值。 33
圖 3-2.1：錦和站(JING)面應變資料時頻圖與能量變化。 34
圖 3-2.2：明德中學站(SANS)面應變資料時頻圖與能量變化。 35
圖 3-2.3：樹林焚化廠站(SLIN)面應變資料時頻圖與能量變化。 36
圖 3-2.4：大坪國小站(BMMT)面應變資料時頻圖與能量變化。 37
圖 3-2.5: 太興國小(TAIS)面應變資料時頻圖與能量變化。 38
圖 3-2.6: 曾文水庫北站(RNT)面應變資料時頻圖與能量變化。 39
圖 3-2.7：曾文水庫南站(RST)面應變資料時頻圖與能量變化。 40
圖 4.1：龍船斷層（粗紅虛線）與附近的其它斷層以及GPS固定站的相對位置。 43
圖 4.2：橫跨龍船斷層北段剖面的一條串連的三角網。 45
圖 4.3：北段測線的九個三角網的長期應變的時間序列。 45
圖 4.4：北段剖面靠西側的五個三角網的長期應變的時間序列。 46
圖 4.5：本區域總計分析 18 個三角網。 47
圖 4.6：顯示橫跨龍船斷層南段剖面的一條串連的三角網。 48
圖 4.7：在龍船斷層南段以西的的四個三角網時間序列。 48
圖 4.8：三角網GS28-GS29-GS30 的應變時間序列。 49
圖 4.9：三角網GS29-GS30-GS32 的應變時間序列。 49
圖 4.10：三角網GS73-NEMN-S169 的應變時間序列。 50
圖 4.11：三角網GS32-GS35-LNCH的應變時間序列。 50
圖 4.12：三角網GS35-LNCH-NEMN的應變時間序列。 51
圖 4.13：三角網GS35-GS53-GS74 的應變時間序列。 51
圖 4.14：三角網CISH-GS74-S169 的應變時間序列。 52
圖 4.15：三角網GS55-GS78-S169 的應變時間序列。 52
圖 4.16：三角網GS45-GS55-GS56 的應變時間序列。 53

圖 4.17：三角網GS34-GS35-GS79 的應變時間序列。 53
圖 4.18：三角網GS79-GS80-GS81 的應變時間序列。 54
圖 4.19：三角網AKND-CTOU-GS81 的應變時間序列。 54
圖 4.20：三角網GS77-GS81-NAZI的應變時間序列。 55
圖 4.21：三角網AKND-GS77-NAZI的應變時間序列。 55
圖 4.22：三角網DASU-GS77-NAZI的應變時間序列。 56
圖 4.23：三角網DASU-KASH-NAZI的應變時間序列。 56
圖 4.24：三角網DASU-LIKN-S23R的應變時間序列。 57
圖 4.25：三角網GS46-S23R-WDAN的應變時間序列。 57

表 A：本年度預期進度甘梯圖（Gantt Chart）。

月次 工作項目　　月份	第1月 (3)	第2月 (4)	第3月 (5)	第4月 (6)	第5月 (7)	第6月 (8)	第7月 (9)	第8月 (10)	第9月 (11)	第10月 (12)	備註
第一季查核點	▬										
第二季查核點				▬							
繳交第一期交付項目				▬							
第三季查核點							▬				
第四季查核點										▬	
繳交第二期交付項目										▬	
井下應變儀資料校正及計算分析	▬	▬	▬	▬	▬	▬	▬	▬	▬	▬	
分析應變異常事件	▬	▬	▬	▬	▬	▬	▬	▬	▬	▬	
時頻分析	▬	▬	▬	▬	▬	▬	▬	▬	▬	▬	
維護並更新井下應變儀資料庫	▬	▬	▬	▬	▬	▬	▬	▬	▬	▬	
GPS 連續站資料分析	▬	▬	▬	▬	▬	▬	▬	▬	▬	▬	
龍船斷層鄰近區域 GPS 連續站面應變分析	▬	▬	▬	▬	▬	▬	▬	▬			
預定進度（累積數）	5 %	15 %	30 %	45 %	55 %	60 %	70 %	80 %	90 %	100 %	

表 B：預期進度查核點（Check Point）。

序號	查核點 請詳填交付項目	預定達成日期	完成狀態
1	（第一季查核點） 1. 工作進度 a. 井下應變儀資料分析 10-12 月 b. GPS 連續站資料分析 10-12 月	三月三十一日	契約書與工作計畫書修正 第一期款請款
2	（第二季查核點） 1. 工作進度 a. 井下應變儀資料分析 1-3 月 b. GPS 連續站資料分析 1-3 月 2. 半年度資料處理報告：書面 6 份 3. 原始與處理後之解釋資料：光碟 3 份	六月三十日	繳交第一期交付項目 驗收後第一期款請款
3	（第三季查核點） 1. 工作進度 a. 井下應變儀資料分析 4-6 月 b. GPS 連續站資料分析 4-6 月	九月三十日	
4	（第四季查核點，驗收） 1. 工作進度 a. 井下應變儀資料分析 7-9 月 b. GPS 連續站資料分析 7-9 月 2. 全年度資料處理報告：書面 6 份 3. 原始與處理後之解釋資料：光碟 3 份	十二月三十一日	繳交第二期交付項目 驗收後尾款請款

表 C：期末須交付之各項工作項目。

	工作項目	章節
井下應變儀資料接收與處理	1. 各站的觀測應變資料。	已完成
	2. 將井下應變儀觀測站資料轉換為平面應變，包含面應變、差應變與剪應變。	2-1~2-3
	3. 分析井孔回復效應所產生的趨勢，及去除井孔回復效應之結果。	2-4
	4. 測站應變訊號中的趨勢訊號、氣壓訊號、井孔溫度及潮汐訊號之影響。	2-4
井下應變資料異常分析與資料維護	1. 以應變儀分析解算的結果解釋應變累積與地震之關係。	3-1
	2. 面應變與剪應變異常分析，提出應變異常的時間點與異常情況。	3-1
	3. 應變異常與地震之時間關係與空間關係。	3-1
	4. 完成各測站之時頻分析，以及統整其分析結果在各應變儀測站的特徵頻率對颱風或地震事件是否有異常。	3-2
	5. 更新井下應變儀資料庫。	已完成
	6. 測站資料接收與記錄情況，檢視資料完整性、資料品質與資料缺漏情況。	3-3
地殼連續變形計算	1. 龍船斷層鄰近地區內 GPS 連續應變變化情形。	第四章
	2. 運用區域內之 GPS 連續追蹤站，組成三角形網格，並計算網格內之平面應變連續變化情形。	第四章
綜合部分	1. 全年度(105 年 10 月至 106 年 9 月)資料處理報告 1 式 6 份 (書面，含 PDF 及 WORD 電子檔)。	已完成
	2. 原始與處理後之解釋資料 1 式 3 份(光碟)。	已完成

摘要

在本計畫處理 2016/10~2017/09 的工作中，已順利的接收井下應變儀各測站的資料，並檢查資料品質及做詳細的分析，將各階段的資料及成果置入資料庫中。在井下應變儀對於地震相關的異常方面，有觀測到一個單一測站的應變異常事件為 2017/02/11 規模 5.7 的高雄市近海地震，並針對應變異常與地震之時間、空間來進行分析，也完成每一測站之時頻分析。

在地殼連續變型計算方面，共蒐集了龍船斷層四周的 45 個 GPS 測站，2013/01~2017/09 的資料，組成了斷層附近 18 個 GPS 三角網，以 GAMIT 軟體重新處理每天資料，利用計算成果，對龍船斷層附近做了地表應變分析，資料顯示 18 個 GPS 三角網中有 14 個屬快速壓縮應變 (-2.81 ~ -0.21 μstrain/a)，而在地震後這 14 個三角網只剩下 4 個仍為緩和的壓縮應變(-0.23 ~ -0.00 μstrain/a)，由這一完整性的應變分析可以看到地殼在長期應力壓縮所累積的能量，如何在一個較大的地震中，幾乎完全的釋放出來，也看到了斷層的幾何形狀如何影響到應變累積的穩定性與集中性。

關鍵詞：GPS 連續追蹤站、井下應變儀， GPS 面應變

Abstract

In this project, we continue the routine maintenance work of the borehole strainmeter stations, these including data collection, quality check, data processing, analysis, and put all the results into strainmeter database. We also found a strain anomaly on a single site data related to the 2017/02/11 Kaoshiung off shore earthquake (M_L = 5.7) several days before the event.

For GPS strain analysis, we collect about 45 sites of continuous GPS data around LongChuan Fault, and forms 18 GPS triangulation for areal strain analysis. GAMIT GPS date processing software was used to do daily baseline solutions. Daily areal strain and shear strain for each GPS triangle was compiled during 2013/01~2017/09. We found in 14 GPS triangles with steady compression strain accumulation rate (-2.81 ~ -0.21 μstrain/a) during 3 year period before Meilung earthquake in 2017/02/06. And 4 out of these 14 triangles remain in moderate compression strain accumulation (-0.23 ~ -0.00 μstrain/a). We can see a complete strain accumulation-and-release process during this period of study. We also see how the fault geometry can affect the strain concentration in the crust.

KEYWORDS: CGPS, Borehole Strainmeter, GPS Areal Strain

第一章、緒　論

1-1 計畫整體概述

經濟部中央地質調查所於民國 91 年至 95 年「地震地質調查及活動斷層資料庫建置」計畫中，已逐年在臺灣重要陸上活動斷層帶設置井下應變儀，至今設置使用 7 口井下應變儀測站，並持續記錄、收取及分析資料（表 1-1.1 及圖 1-1.1）。

從 98 年至 101 年的「斷層活動性觀測研究第二階段-斷層監測與潛勢分析研究」四年計畫研究當中，由井下應變儀分析的經驗得知，井下應變儀可以觀測到極小的應變率變化，但此應變速率變化亦可能由環境因子所引起，這些環境因子包含地下水位升降、降雨、氣壓變化（一般是颱風引起）和潮汐等。有些應變速率異常與慢地震（slow earthquake）和長微震（tremor）有關，有些極可能與規模大於 5.5 以上的地震前應變異常相關。

經濟部中央地質調查所於「斷層活動性觀測研究第三階段-斷層整合性觀測與潛勢分析」計畫中之井下應變儀分析部分，利用幾年來多次較大氣壓變化時的資料，建立氣壓對井下應變儀資料的影響模式並作修正，以建立移除環境影響因素後的殘餘地殼應變時間序列，作為尋找與大地震相關的應變異常。針對異常事件檢視井下應變儀各測網記錄到的地震前應變異事件，並就井下應變儀應變異常判釋進行統計，檢視井下應變儀在各測網是否含有前兆訊號及是否成功對應地震的機率，已建立系統化的管理與分析方式。

井下應變儀設置於深入地下深處約 200 公尺，有效降低干擾地表人為雜訊，又緊密接觸地下厚實且未經風化之堅硬岩盤，在精度上可量測到小至 10^{-8} 的地潮應變訊號（可感測 10^{-9}~10^{-12} 之微細應變），且取樣頻率最高 100Hz，並可連續監測數十年，對於短中、長期甚至數十年以上的構造變化都可作為良好的監測工具，並填補地震儀與 GPS 測量等觀測不到的訊號範圍。井下應變儀若能結合連續 GPS 觀測結果，對於數個月至數十個 Hz 的範圍內的微細地殼應變研究，提供另一更有力的工具，有助於臺灣活動斷層的活動度及其地震潛勢之評估。

由於井下應變儀的資料處理、分析與解釋之技術的確來源不易取得，應變儀觀測資料預計需時三年才能達穩定狀態，同時也容易受到環境因素所影響，其中影響較大的幾種因素包括每日的地體潮汐變化、空氣壓力變化、降雨、地下水文變化以及岸邊海水潮汐負載所造成的地殼變形等。若能將各測站建立起正確的應變異常修正模式，並藉此盡量移除各種環境效應後，地殼變動的訊號就較能突顯在最後較乾淨的訊號中，再藉由與地震相關的變化，試圖從這乾淨的訊號中，獲取與地震斷層活動相關的應變資訊。

表 1-1.1：井下應變儀測站資料及接收起始時間表。

觀測網	觀測站代碼	站　名	資料接收起始時間
北部網	JING	錦和	2007/11/20
	SANS	明德中學	2007/11/12
	SLIN	樹林焚化廠	2009/09/11
	BMMT	大坪國小	2005/06/09
南部網	TAIS	太興國小	2006/03/04
	RNT	曾文水庫北	2003/10/28
	RST	曾文水庫南	2003/10/23

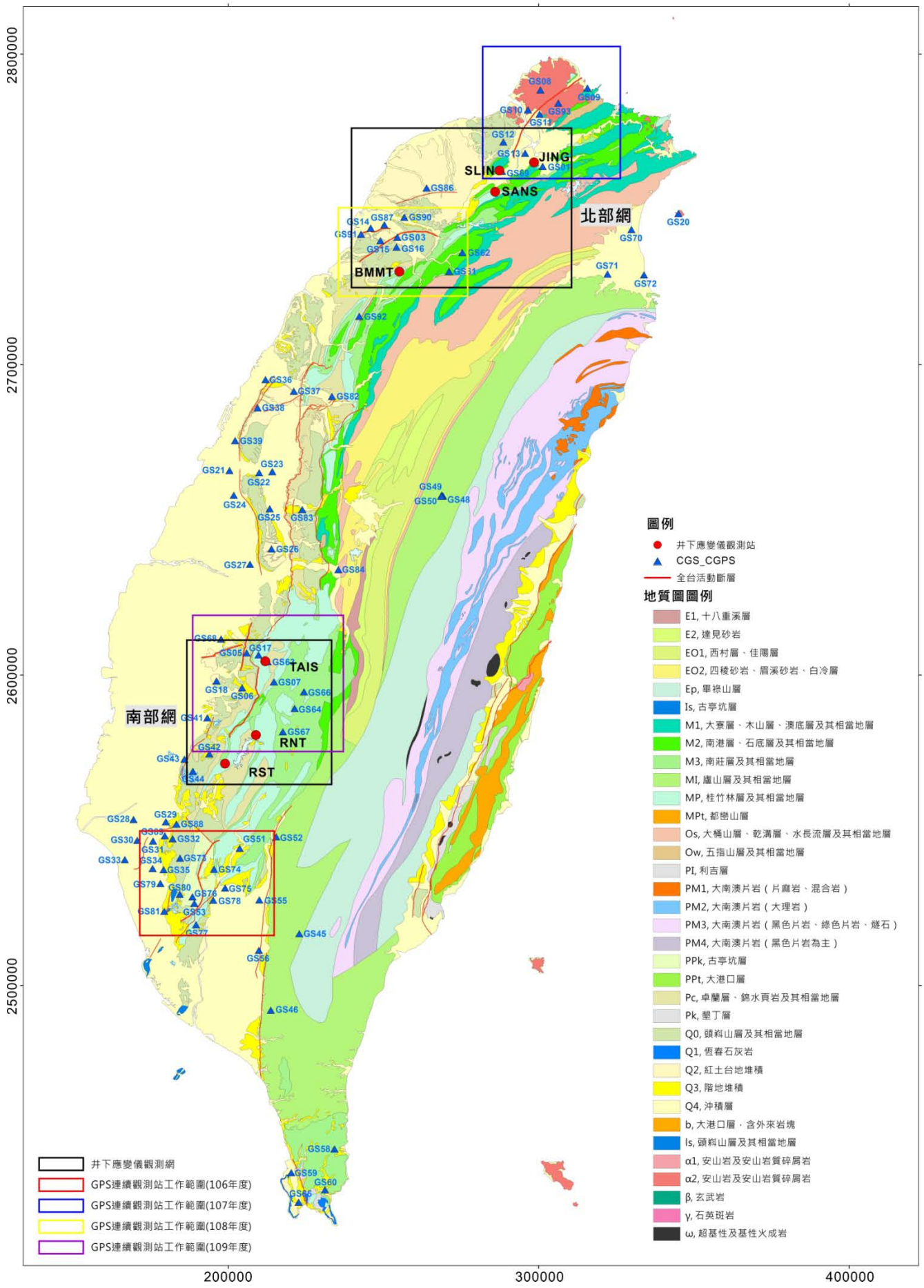


圖 1-1.1：井下應變儀觀測站分布圖及 GPS 連續觀測站逐年分析範圍。

以往利用多種大地測量的方法來對斷層活動作不同時空分布的觀測，其中包括持續 GPS 連續站資料、井下應變儀觀測資料及地下水觀測資料，固定時段觀測的 GPS 及精密水準測量觀測，與間歇性的 PS-InSAR 觀測，這些資料詳細地記錄了地表或近地表的地殼變形活動，各有著不同的時空分布，例如 GPS 連續站資料每天計算一個精密座標的解，其空間分布遍及全臺灣，平均約每 10 km x 10 km 有一個測站，井下應變儀及地下水觀測則只有十多站，是連續的觀測資料，固定時段觀測的 GPS 及精密水準測量的測站沿斷層分布，每年觀測 1~2 次，PS-InSAR 則依賴衛星通過時對臺灣地區的雷達掃瞄，空間涵蓋相當大，資料點則是看地面是否有可當做雷達波散射體的地表人工結構體或天然岩石露頭，通常呈散彈狀的區域分布，因此這些資料的綜合分析解釋則要利用各個的基本特性，通常以井下應變儀資料為中心，因其精度最高，頻率響應最廣，可在 10 Hz 至無窮大，但因敏感度太高，雜訊較大，所以長期的觀測骨架還是以 GPS 連續站資料為主，由於 GPS 連續站具有全球參考網的穩定性，可當作長期穩定的地殼變動參考觀測網。本計畫將運用區域內之 GPS 連續追蹤站，組成三角形網格，並計算網格內之平面應變連續變化情形，進而計算與分析特定斷層鄰近區域的 GPS 連續觀測站平面應變情形。表 1-1.2 為中央地質調查所建置的 GPS 連續觀測站資料接收起始時間表。

表 1-1.2：中央地質調查所建置的 GPS 連續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	2002/06/17	GS48	警光山莊	2009/04/01
GS02	新竹高工(2015.08.17 廢站)	2004/10/21	GS49	馬赫坡民宿	2009/04/01
GS03	工研院	2004/10/19	GS50	蔡宅	2009/03/25
GS04	大埔美農場 (2009.11.11 廢站)	2004.10.16	GS51	杉林國小	2009/12/18
GS05	半天寮淨水廠	2004/10/21	GS52	新發國小	2009/12/18
GS06	民和國中	2004/10/21	GS53	星星兒的家	2009/12/19
GS07	培英國小	2004/10/21	GS54	大洲國中(2013.7.12 廢站)	2009/12/15
GS08	興華國小	2005/08/15	GS55	舊寮國小	2009/12/11
GS09	大鵬國小	2005/08/16	GS56	瑪家國中	2009/12/14
GS10	竹圍國中	2005/09/06	GS57	石門國小(2016.12.27 廢站)	2009/12/15
GS11	北投國小	2005/08/15	GS58	高士國小	2009/12/14
GS12	樂善國小	2005/09/06	GS59	車城國小射寮分校	2009/12/17
GS13	國光國小	2005/08/16	GS60	永港國小	2009/12/18
GS14	西門國小	2005/09/13	GS61	梅花國小	2010/10/06
GS15	雙溪國小	2005/09/13	GS62	新樂國小	2010/09/20
GS16	寶山水庫	2005/09/13	GS63	太興國小	2010/09/24
GS17	太平國小	2005/09/14	GS64	里佳國小	2010/09/28
GS18	嘉義農業試所	2005/09/14	GS65	茶山國小(2011.7.28 廢站)	2010/10/14
GS19	保長國小(2012.5.25 廢站)	2006/07/12	GS66	達邦	2010/09/28
GS20	龜山島	2006/08/04	GS67	新美國小	2010/09/28
GS21	大嘉國小	2006/06/10	GS68	三和國小	2010/12/17
GS22	快官交流道	2006/06/10	GS69	樹林垃圾掩埋場	2011/09/22
GS23	五光國小	2006/05/30	GS70	玉田國小	2011/09/23
GS24	文祥國小	2006/05/30	GS71	大隱國小	2011/09/22
GS25	寶山國小	2006/05/31	GS72	利澤國中	2011/09/22
GS26	名崗國小	2006/05/31	GS73	新光國小	2012/11/02
GS27	彰化農場	2006/05/31	GS74	內門國小	2012/11/02
GS28	中崙加壓站	2006/06/17	GS75	旗美高中	2012/10/31
GS29	潭頂自來水廠	2006/06/16	GS76	新興國小	2012/11/02
GS30	大橋國小	2006/06/25	GS77	深水國小	2012/11/14
GS31	西勢國小	2006/06/17	GS78	溪洲國小	2013/10/22
GS32	虎頭埤風景區	2006/06/23	GS79	中路國小	2013/10/16
GS33	永華國小	2006/06/22	GS80	田寮國中	2013/10/16
GS34	成大航太試驗場	2006/06/24	GS81	嘉興國中	2013/10/16
GS35	南沙崙農場	2006/06/24	GS82	卓蘭實驗高中	2014/12/16
GS36	德化國小	2006/10/21	GS83	土城國小	2014/12/22
GS37	泰安服務區	2006/10/25	GS84	水里國中	2014/12/17
GS38	清水服務區	2006/10/21	GS85	水泉國小龍泉分校	2015/01/08
GS39	龍井國小	2006/10/21	GS86	水美國小	2015/09/15
GS40	龍峰國小(2016.11.7 廢站)	2006/10/21	GS87	水源國小	2015/09/08
GS41	竹門國小	2007/11/23	GS88	那拔國小	2015/09/14
GS42	東原國中	2007/11/23	GS89	新化國中	2015/09/14
GS43	果毅國小	2007/11/27	GS90	新埔工作站	2016/09/02
GS44	六甲國小湖東分校	2007/11/30	GS91	香山高中	2016/09/02
GS45	霧台鄉公所	2009/01/05	GS92	獅潭國中	2016/09/05
GS46	來義國小	2009/01/06	GS93	七星山	2017/01/01
GS47	台電南展館 (2013.7.25 廢站)	2009/01/05			

1-2 研究目的

本計畫主要運用臺灣既有正常運作中的井下應變儀，進行西部地區北部以及南部兩個觀測網的應變觀測。此外，亦針對變形行為明顯地區，利用地調所設置以及交換之 GPS 連續追蹤站資料進行地區性的應變變化計算，以瞭解區域性的地殼變形現象。

本計畫又每年選定一特定斷層附近區域內之 GPS 連續追蹤站，組成三角形網格，並計算網格內之平面應變連續變化情形，進而計算與分析特定斷層鄰近區域的 GPS 連續觀測站長期平面應變情形，本年度將選定龍船斷層，計算與分析鄰近區域的 GPS 連續觀測站平面應變情形。

1-3 本年度工作內容概述

（1）井下應變儀資料接收與處理：

a. 進行北部網及南部網兩個觀測網內現有井下應變儀觀測站之資料收集及編修。
b. 將井下應變儀觀測站資料轉換為平面應變，包含面應變、差應變與剪應變。
c. 進行氣壓與潮汐影響校正，估計因自然環境對應變資料的影響量，井孔回復與水泥膨脹效應的影響趨勢，計算地潮的影響量，移除不正常的突出資料，分析應變累積與地震之關係。
d. 持續接收井下應變儀之資料，並運用多變量回歸方式及地潮模式理論分析解算。

（2）井下應變資料異常分析與資料維護：

a. 進行面應變、剪應變分析，經由分析解算結果，解釋應變累積與地震之關係，分析應變異常事件。
b. 針對各網測站進行時頻分析，利用時頻分析技術尋找應變儀測站之特徵頻率、分析颱風或地震事件是否有異常頻率的發生，進而探討可能的產生原因。
c. 維護並持續更新井下應變儀資料庫。
d. 配合地調所規模大於 6 之地震調查，提供地震事件一個月內之觀測與處理之結果，包含地震前後區段應變時間序列與時頻分析、地震對應變之影響及地震前後有無應變異常訊號。

（3）地殼連續變形計算：

a. 運用區域內之 GPS 連續追蹤站，組成三角形網格，並計算網格內之平面應變連續變化情形。
b. 計算與分析龍船斷層鄰近區域的 GPS 連續觀測站平面應變情形。

第二章、井下應變儀資料處理

2-1 Level-0

井下應變儀 Level-0 原始的應變紀錄為 Bottle 格式，自測站傳回並接收後，只檢查資料的正確性，不加以做任何的處理，即放入資料庫中，原始資料中包括四個應變分量的資料、井底溫度、氣壓與雨量等，每一小時的資料儲存為一個壓縮檔案，其中四個應變分量的單位為電壓的計數，並非應變。

2-2 Level-1：經過儀器常數修正及資料突跳修正

儀器 GTSM21 中

$$\frac{R}{1-R}=\frac{d_2}{d_1}$$

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，紀錄上的每一計數約相當於 0.0919540 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，則紀錄上的每一計數約相當於 0.1411661 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 = 200μm；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：

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

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 $1/2 \times 10^8 = 50{,}000{,}000$，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，如圖 2-2.1 至圖 2-2.7 所示。

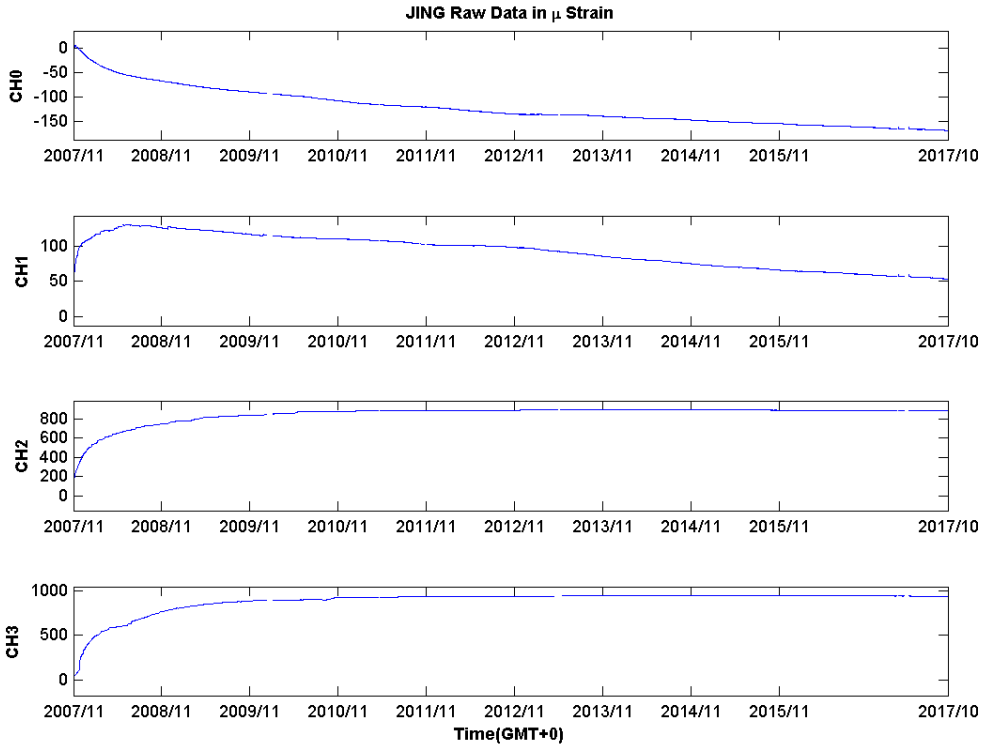


圖 2-2.1：錦和測站應變分量。2007-2017 年 9 月的資料轉變成應變後，各分量之資料。

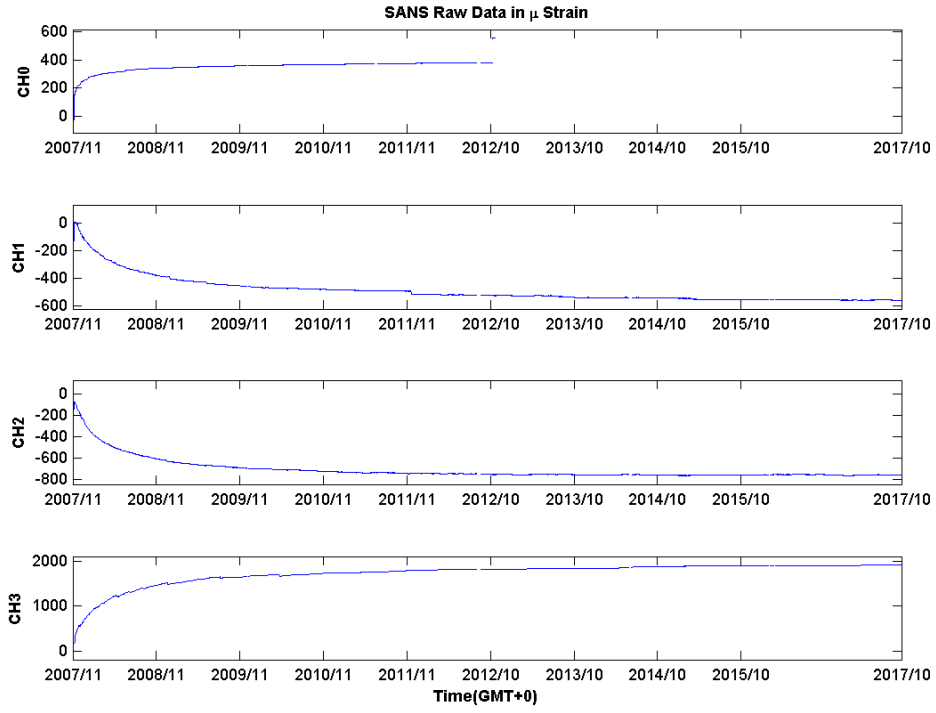


圖 2-2.2：明德中學測站應變分量。2007-2017 年 9 月的資料轉變成應變後，各分量之資料。

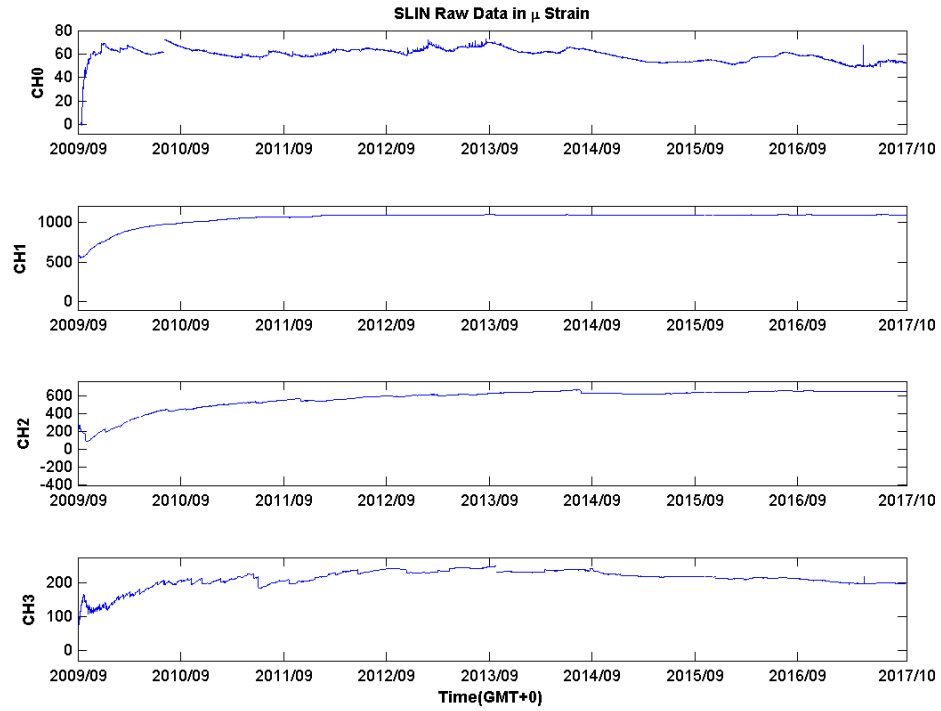


圖 2-2.3：樹林焚化廠測站應變分量。2009-2017 年 9 月的資料轉變成應變後，各分量之資料。

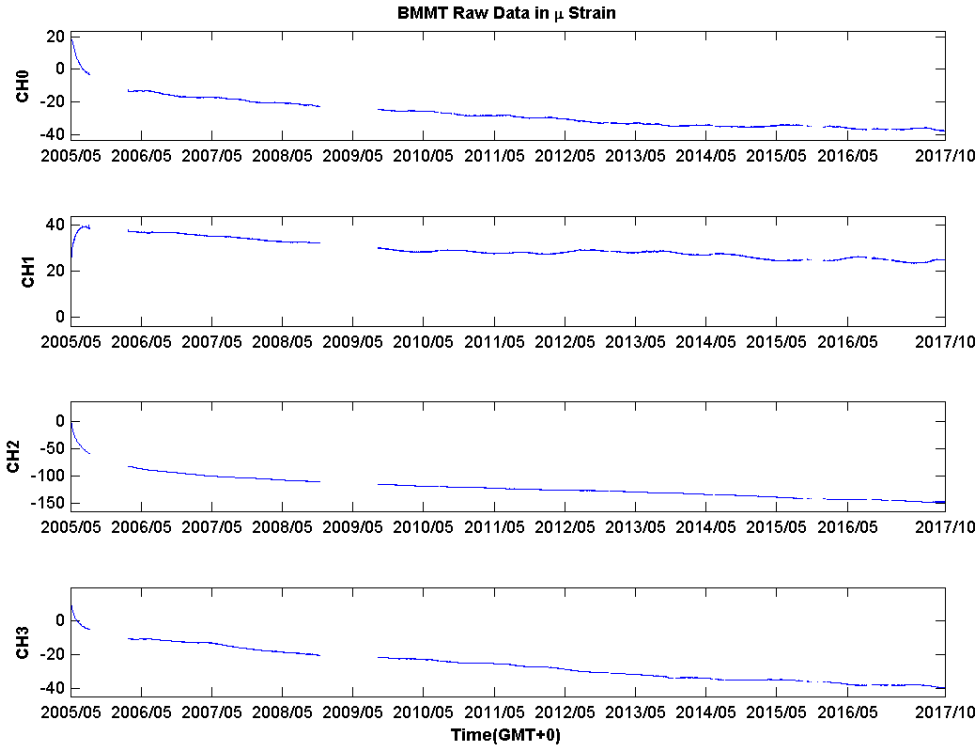


圖 2-2.4：大坪國小測站應變分量。2005-2017 年 9 月的資料轉變成應變後，各分量之資料。

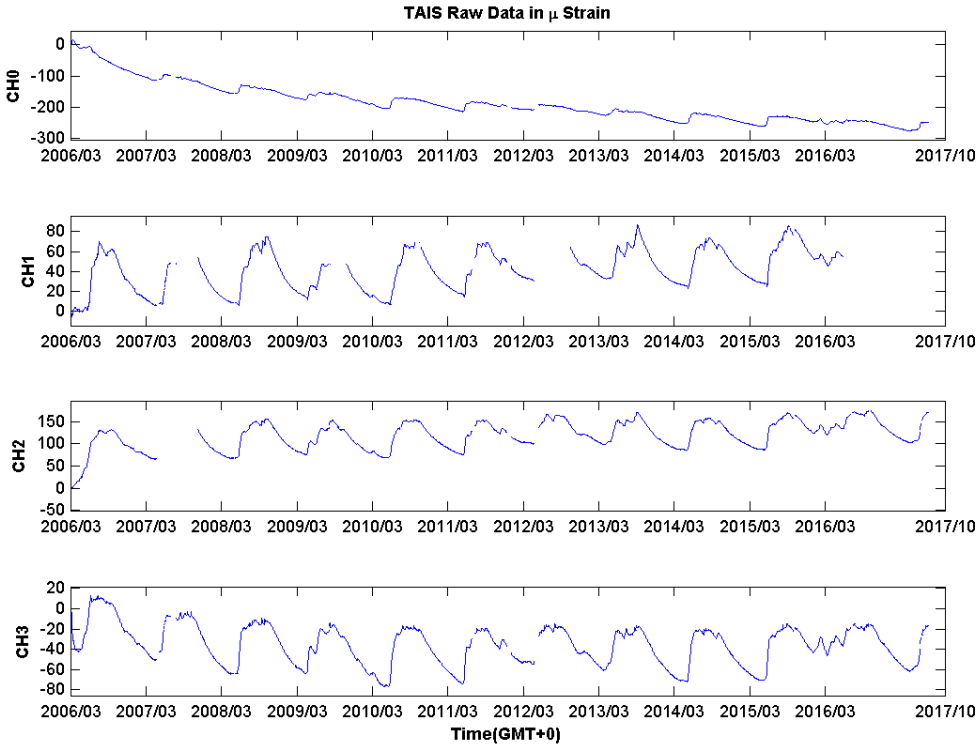


圖 2-2.5：太興測站應變分量。2006-2017 年 9 月的資料轉變成應變後，各分量之資料。

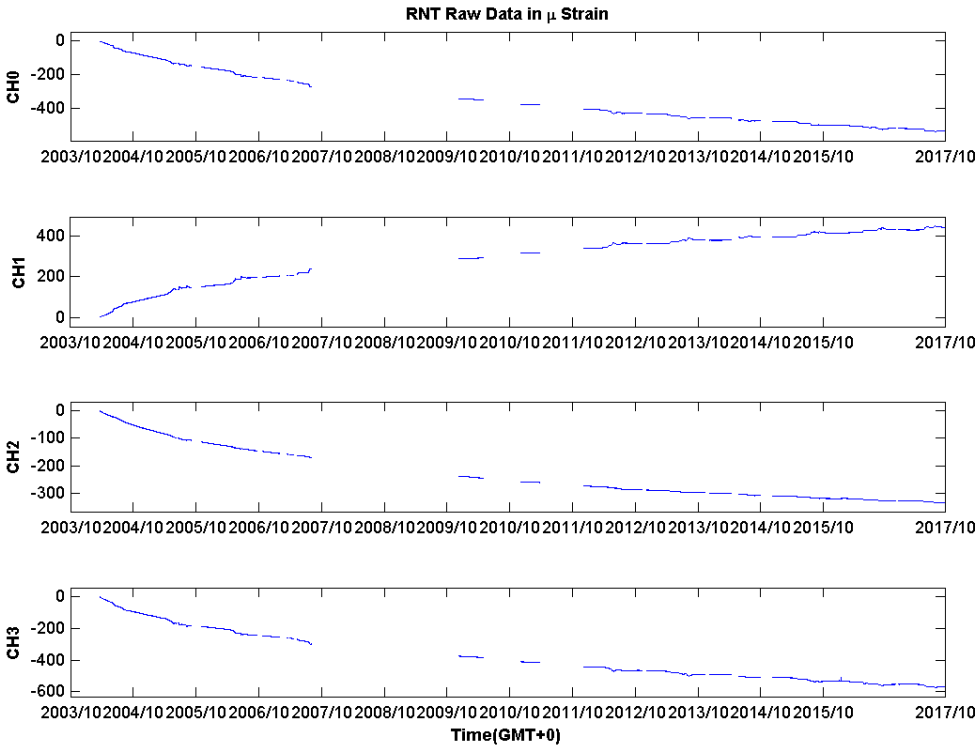


圖 2-2.6：曾文水庫北測站應變分量。2003-2017 年 9 月資料轉變成應變後，各分量之資料。

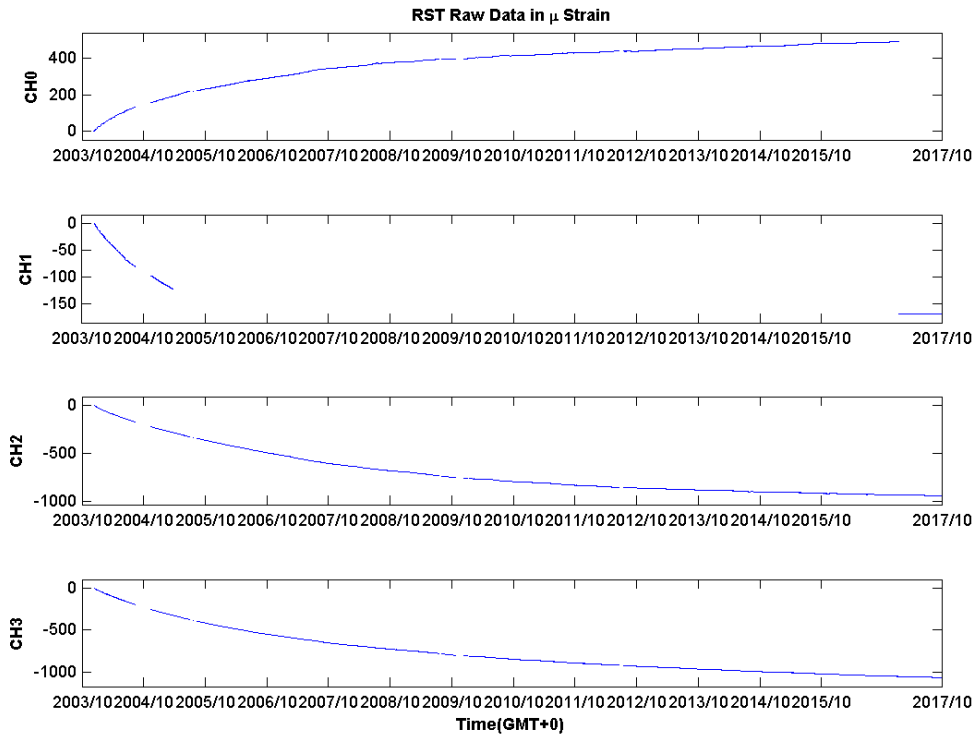


圖 2-2.7：曾文水庫南測站應變分量。2003-2017 年 9 月的資料轉變成應變後，各分量之資料。

由以上資料可看出各測站資料資料偶因儀器故障中斷外，其餘大致完整。除了嘉義地區測站受地下水變化所影響外，其餘都可看出較完整的井孔回復的雙指數鬆弛效應(Dual-Exponential Relaxation)。太興國小測站有數 10 微應變(μstrain)的上下起伏變動，井孔回復的鬆弛效應並不明顯，再因其它效應(應該是地下水位變化的效應)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。

2-3 Level-2：包含正確原始面積應變、剪應變

Gladwin 的 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：

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2}\cos 2\theta_1 & \frac{1}{2}\sin 2\theta_1 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2}\cos 2\theta_2 & \frac{1}{2}\sin 2\theta_2 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2}\cos 2\theta_3 & \frac{1}{2}\sin 2\theta_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_a \\ \gamma_1 \\ \gamma_2 \end{bmatrix} \quad \text{（式 2-3.1）}$$

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，可於前面三分量有問題時，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，

$\cos 2\theta_2=\cos 2(\theta_1+90°)=-\cos 2\theta_1$；而 $\sin 2\theta_2=\sin 2(\theta_1+90°)=-\sin 2\theta_1$，因此，若前三個方向有良好的應變記錄，則可簡易求得 ε_a、γ_1、γ_2 三個工程量，其中 ε_a 是面積應變，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

(Extension)量，而 γ_2 在西北或東北平面產生了最大的延伸量。圖 2-3.1 至圖 2-3.7 為轉換成 ε_a、γ_1、γ_2 三個工程量所的的結果。

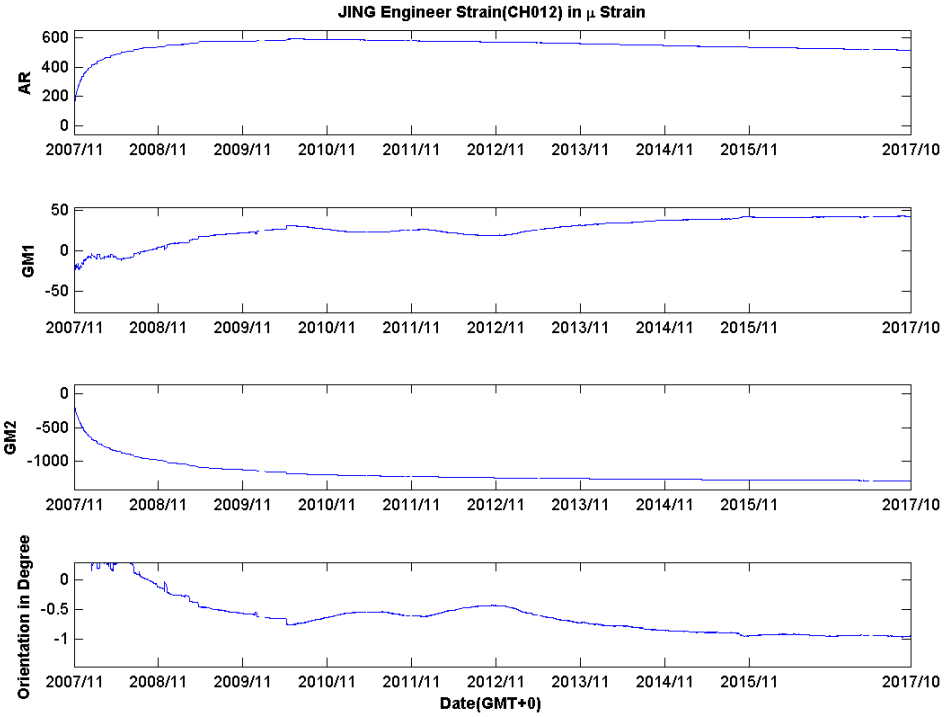


圖 2-3.1：錦和測站應變方向。於 2007 年到 2017 年 9 月資料所轉換而得的結果。可由前三個分量估計出來的三個工程量 ε_a (AR)、γ_1 (GM1)、γ_2 (GM2)及最大應變方向。

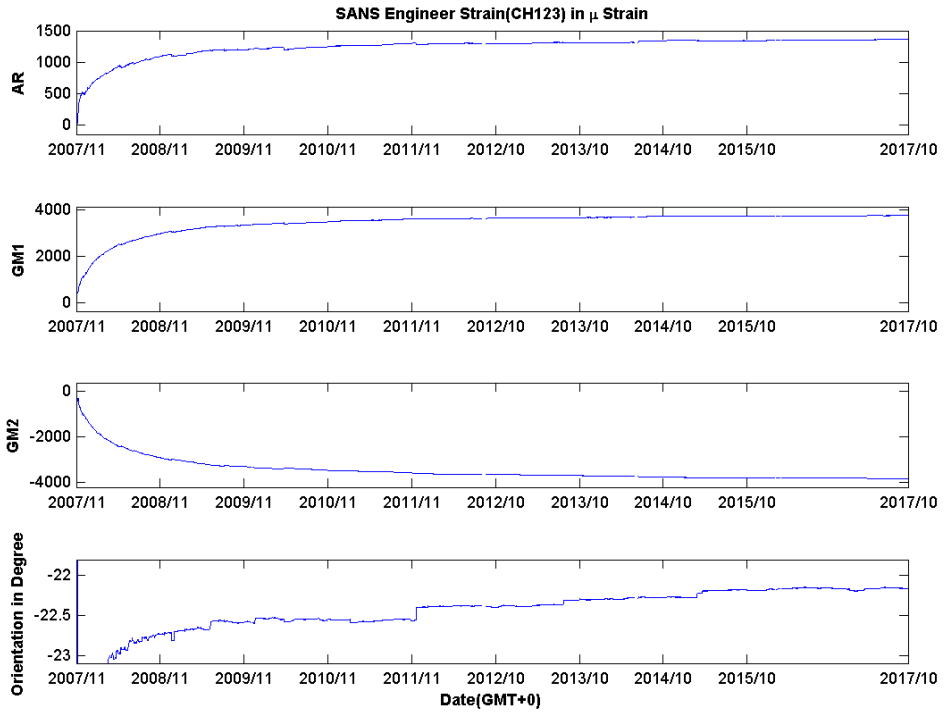


圖 2-3.2：明德中學測站應變方向。於 2007 年到 2017 年 9 月資料所轉換而得的結果。可由前三個分量估計出來的三個工程量 εa (AR)、γ1 (GM1)、γ2 (GM2)及最大應變方向。

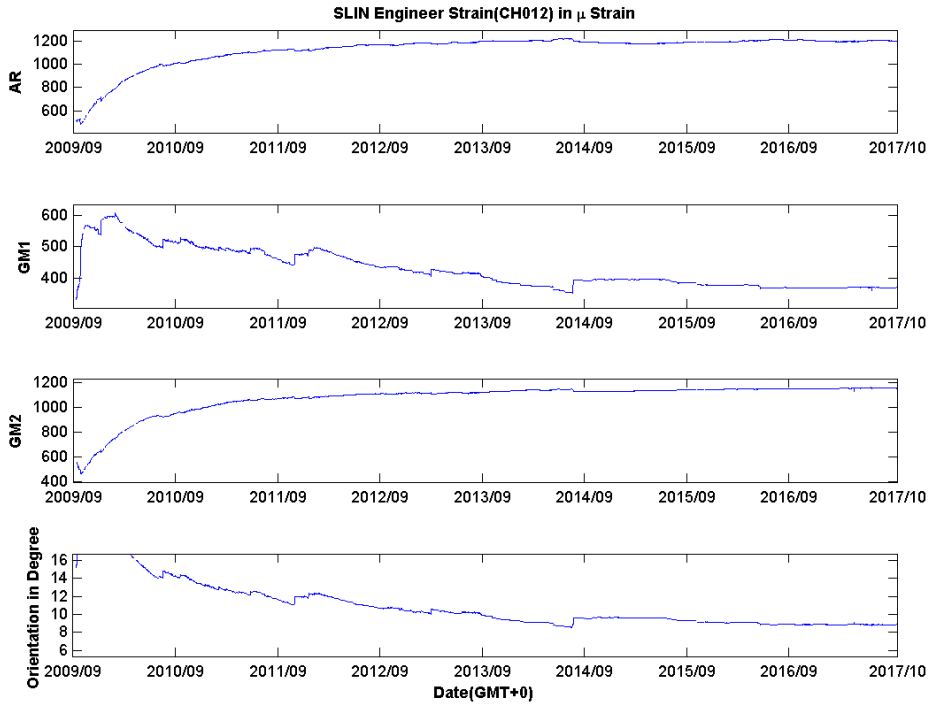


圖 2-3.3：樹林焚化廠測站應變方向。於 2009 年到 2017 年 9 月資料所轉換而得的結果。可由前三個分量估計出來的三個工程量 εa (AR)、γ1 (GM1)、γ2 (GM2)及最大應變方向。

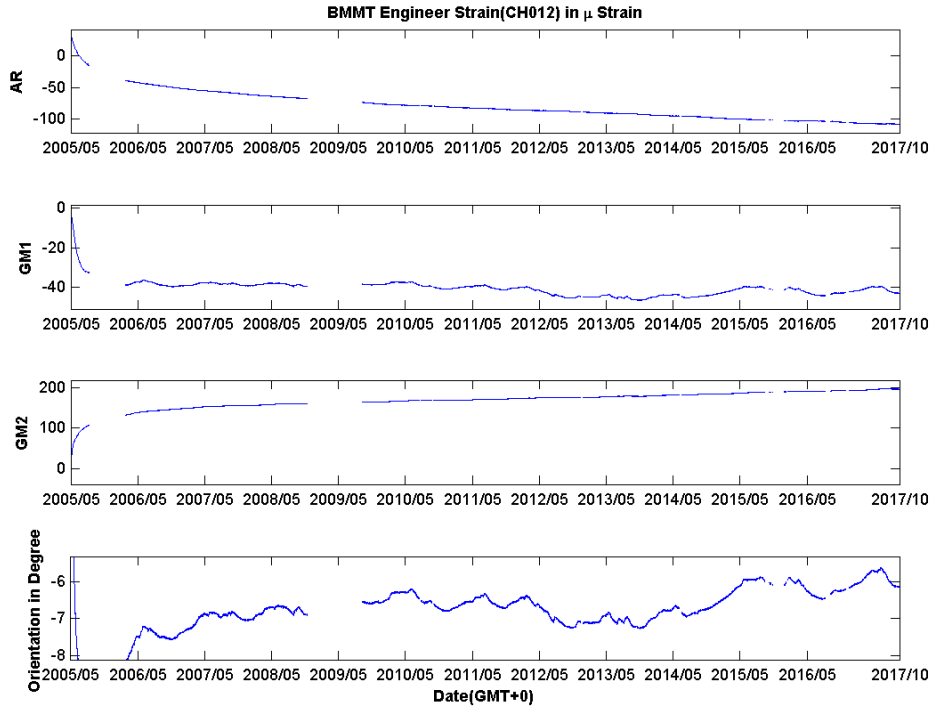


圖 2-3.4：大坪國小測站應變方向。於 2005 年到 2017 年 9 月資料所轉換而得的結果。可由前三個分量估計出來的三個工程量 εa (AR)、γ1 (GM1)、γ2 (GM2)及最大應變方向。



圖 2-3.5：太興國小測站應變方向。於 2006 年到 2017 年 9 月資料所轉換而得的結果。可由前三個分量估計出來的三個工程量 εa (AR)、γ1 (GM1)、γ2 (GM2)及最大應變方向。

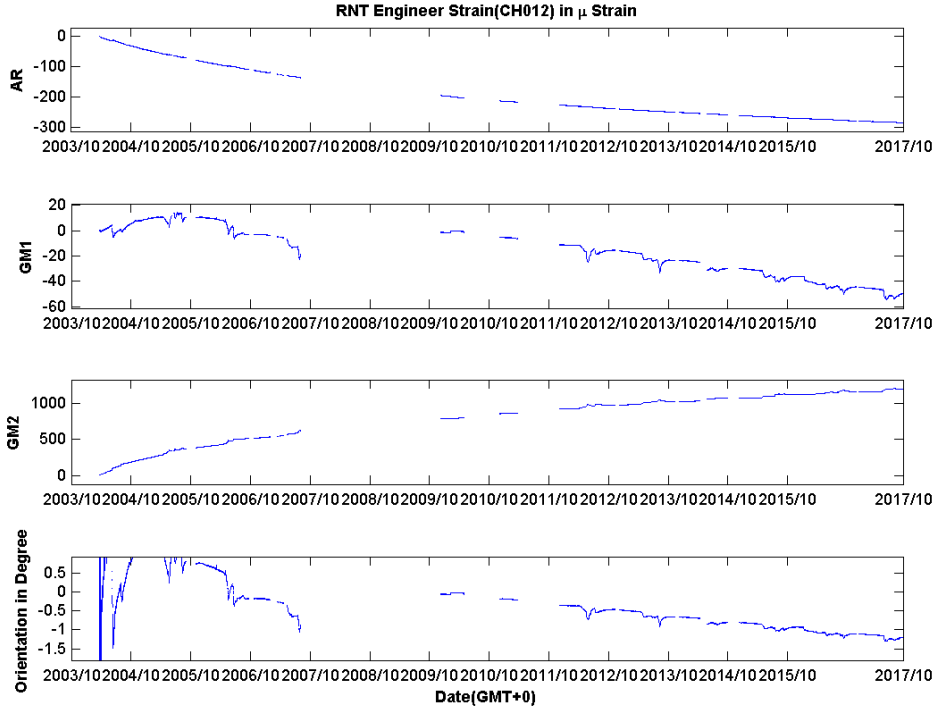


圖 2-3.6：曾文水庫北測站應變方向。於 2004 年到 2017 年 9 月資料所轉換而得的結果。可由前三個分量估計出來的三個工程量 εa (AR)、γ1 (GM1)、γ2 (GM2)及最大應變方向。

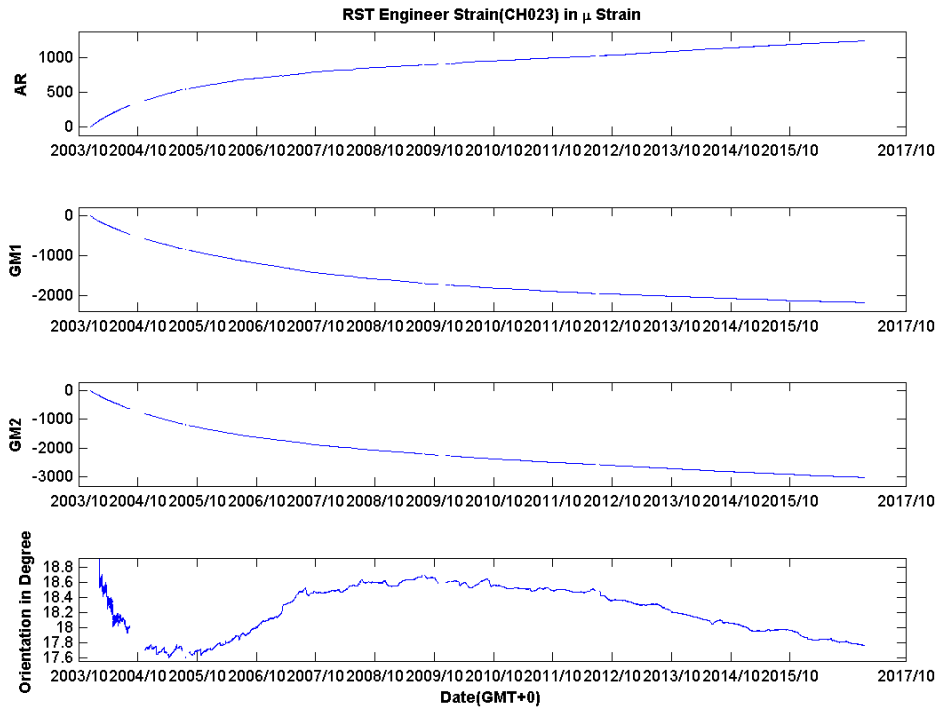


圖 2-3.7：曾文水庫南測站應變方向。於 2003 年到 2017 年 9 月資料所轉換而得的結果。可由前三個分量估計出來的三個工程量 εa (AR)、γ1 (GM1)、γ2 (GM2)及最大應變方向。

2-4 環境影響因子

(1) 井孔回復與水泥膨脹效應

井下應變儀安裝在井洞之內後，用不收縮水泥封井，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，因此可藉由函數回歸模式來做修正，以下為各測站回歸模式的參數與修正後的資料(圖 2-4.1 至圖 2-4.7)。

JING	
y = B1*exp(-t/L1) + B2*exp(-t/L2) + m*t +a t : days from 2007/11/07(GMT+0) y : micro strain ---------- L1 = 28.9088 (28.8653 28.9523) L2 = 313.7433 (313.5241 313.9626) B1 = -250.9753 (-251.1644 -250.7862) B2 = -248.8502 (-248.9628 -248.7376) m = -0.031676 (-0.031691 -0.031661) a = 628.2265 (628.188 628.2651)	Goodness of fit: sse: 3.9696e+006 rsquare: 0.9962 dfe: 502048 adjrsquare: 0.9962 rmse: 2.8119

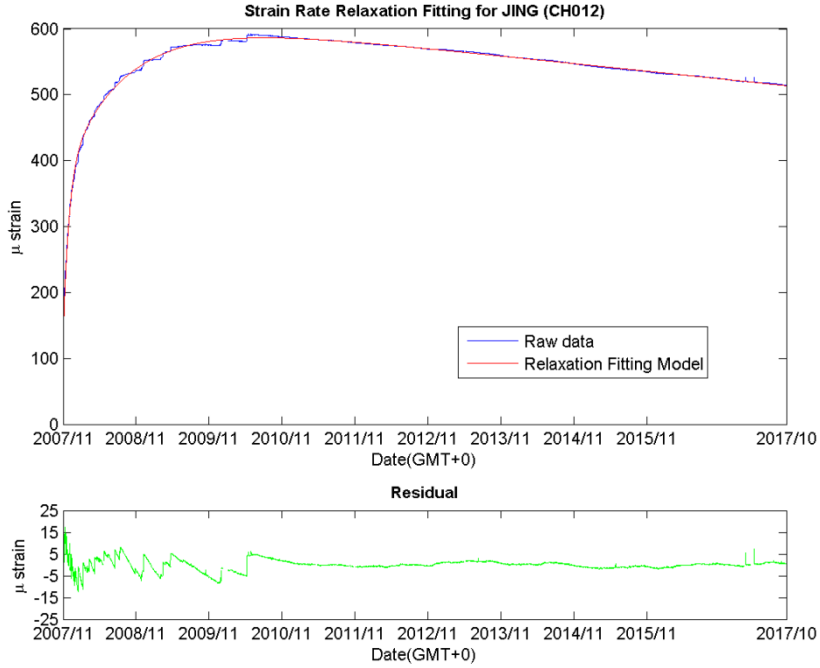


圖 2-4.1：錦和國小測站原始面應變與模式修正。原始面應變觀測的時間序為藍色，水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式為紅色，綠色為除掉水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式之後，所得到的面應變殘差值。

SANS	
y = B1*exp(-t/L1) + B2*exp(-t/L2) + m*t +a t : days from 2007/11/02(GMT+0) y : micro strain ---------- L1 = 96.3436 (96.2506 96.4367) L2 = 559.5015 (558.8244 560.1785) B1 = -396.0852 (-396.3165 -395.854) B2 = -292.2212 (-292.4103 -292.0322) m = 0.013099 (0.013064 0.013134) a = 958.1964 (958.086 958.3069)	Goodness of fit: sse: 4.3016e+006 rsquare: 0.9993 dfe: 507240 adjrsquare: 0.9993 rmse: 2.9121

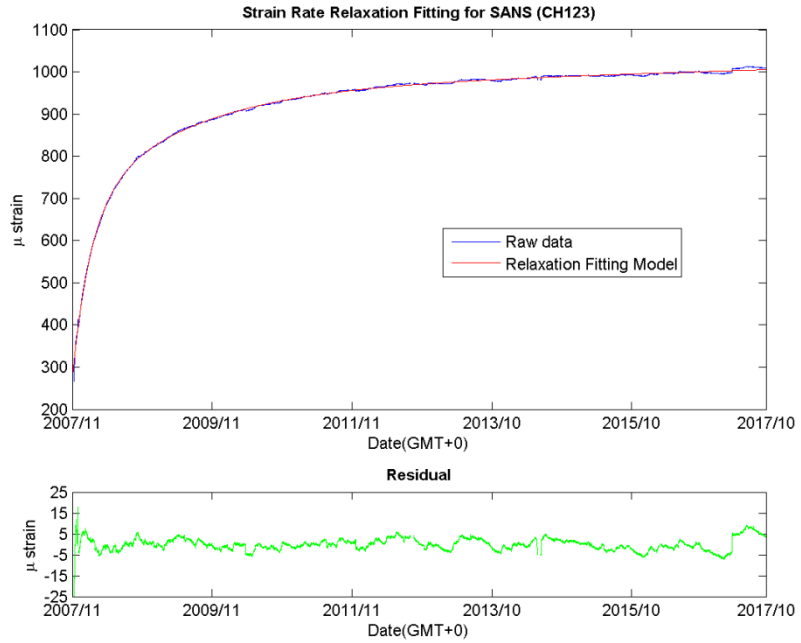


圖 2-4.2：明德國中測站原始面應變與模式修正。原始面應變觀測的時間序為藍色，水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式為紅色，綠色為除掉水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式之後，所得到的面應變殘差值。

SLIN	
y = B1*exp(-t/L1) + B2*exp(-t/L2) + m*t t : days from 2009/09/11(GMT+0) y : micro strain ---------- L1 = 257.8132 (257.5455 258.0809) L2 = 0.67807 (-5772.3278 5773.684) B1 = -745.3329 (-745.72 -744.9457) B2 = 43288.921 (-6690106961.731 6690193539.573) m = 0.040083 (0.039979 0.040188) a = 709.7403 (709.5229 709.9577)	Goodness of fit: sse: 9.2428e+007 rsquare: 0.9901 dfe: 400834 adjrsquare: 0.9901 rmse: 15.1852

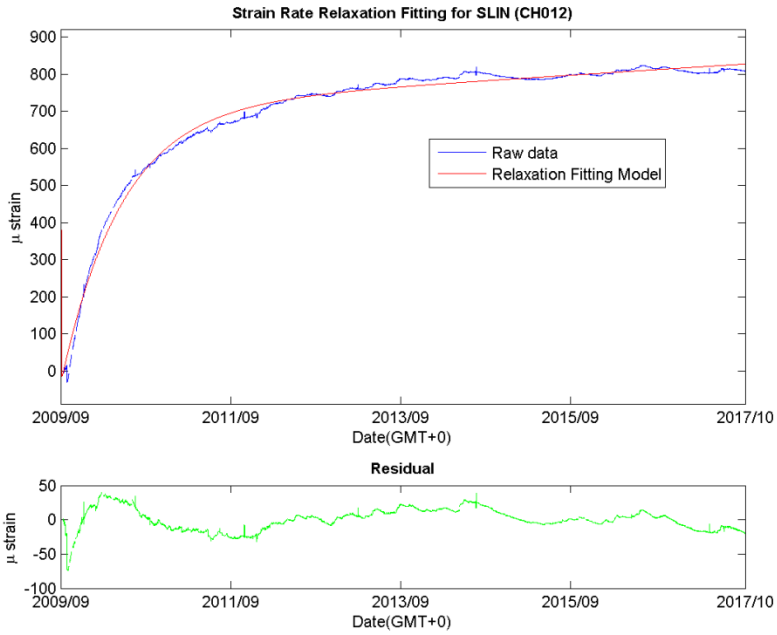


圖 2-4.3：樹林焚化廠測站原始面應變與模式修正。原始面應變觀測的時間序為藍色，水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式為紅色，綠色為除掉水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式之後，所得到的面應變殘差值。

BMMT	
y = B1*exp(-t/L1) + B2*exp(-t/L2) + m*t +a t : days from 2005/05/18(GMT+0) y : micro strain ---------- L1 = 71.6058 (71.5211 71.6905) L2 = 722.6408 (721.6724 723.6092) B1 = 52.7709 (52.7372 52.8046) B2 = 36.5474 (36.5281 36.5668) m = -0.01045 (-0.010455 -0.010446) a = -60.7596 (-60.7779 -60.7413)	Goodness of fit: sse: 1.7301e+005 rsquare: 0.9994 dfe: 539640 adjrsquare: 0.9994 rmse: 0.5662

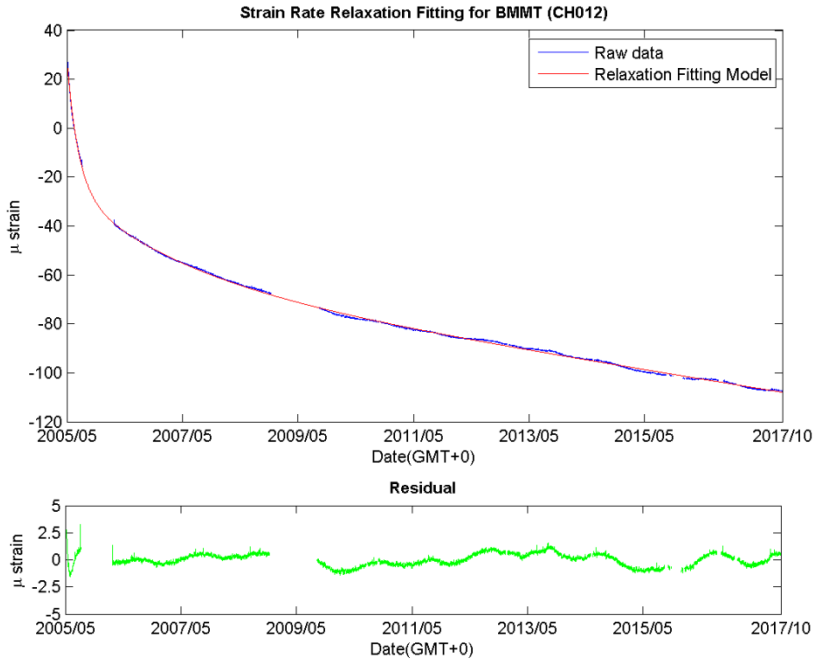


圖 2-4.4：大坪國小測站原始面應變與模式修正。原始面應變觀測的時間序為藍色，水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式為紅色，綠色為除掉水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式之後，所得到的面應變殘差值。

TAIS	
y = B1*exp(-t/L1) + B2*exp(-t/L2) + m*t +a t : days from 2006/03/04(GMT+0) y : micro strain ---------- L1 = 203652.1616 (-517245.0066 924549.3297) L2 = 202667.2384 (-521080.4785 926414.9554) B1 = 451102.2285 (-1398241.519 2300445.976) B2 = 441643.3154 (-1378155.4435 2261442.0744) m = 4.3379 (0.6709 8.0048) a = -892702.6217 (-2386592.4794 601187.23594)	Goodness of fit: sse: 2.7848e+006 rsquare: 0.9439 dfe: 193423 adjrsquare: 0.9439 rmse: 3.7944

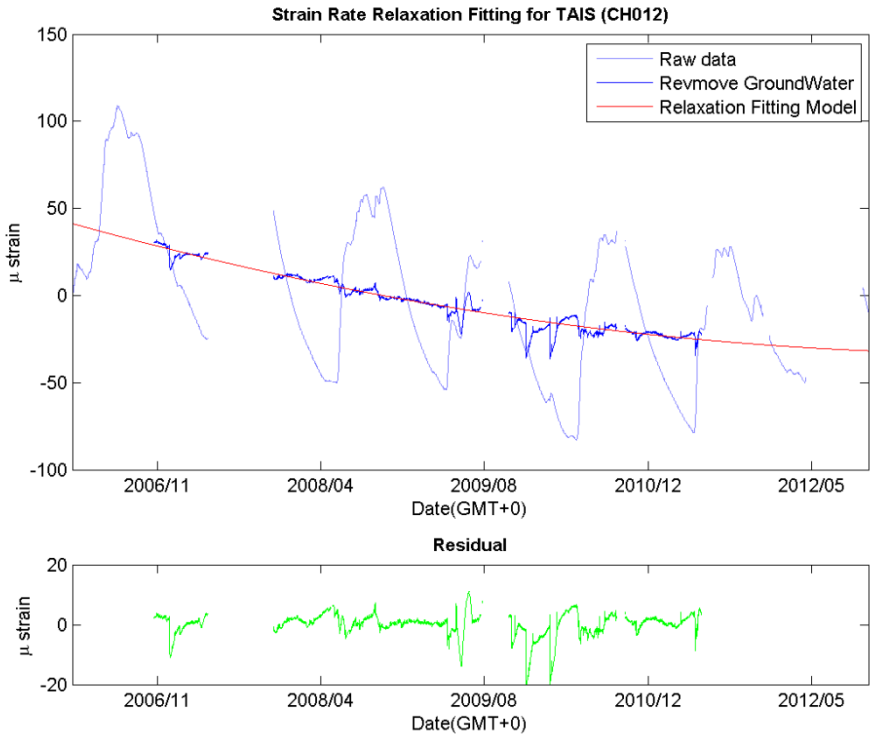


圖 2-4.5：太興國小測站原始面應變與模式修正。此測站受地下水影響特別明顯，必須先校正原始面應變中的地下水影響，才可進行井孔回復與水泥乾枯效應的評估。原始面應變觀測的時間序為淺藍色，修正過地下水影響的時間序為藍色，水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式為紅色，綠色為除掉水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式之後，所得到的面應變殘差值。(因 2013 年更換地下水井，地下水影響必須重新估計，因此不列入 2013 年之後資料)。

RNT	
y = B1*exp(-t/L1) + B2*exp(-t/L2) + m*t +a t : days from 2003/10/28(GMT+0) y : micro strain ---------- L1 = 1839.0173 (1837.1078 1840.9269) L2 = 83.5715 (81.6159 85.527) B1 = 271.3203 (271.1226 271.5179) B2 = 27.7862 (26.4278 29.1447) m = -0.010216 (-0.010251 -0.010181) a = -250.2271 (-250.4609 -249.9933)	Goodness of fit: sse: 3.8323e+005 rsquare: 0.9999 dfe: 429207 adjrsquare: 0.9999 rmse: 0.9449

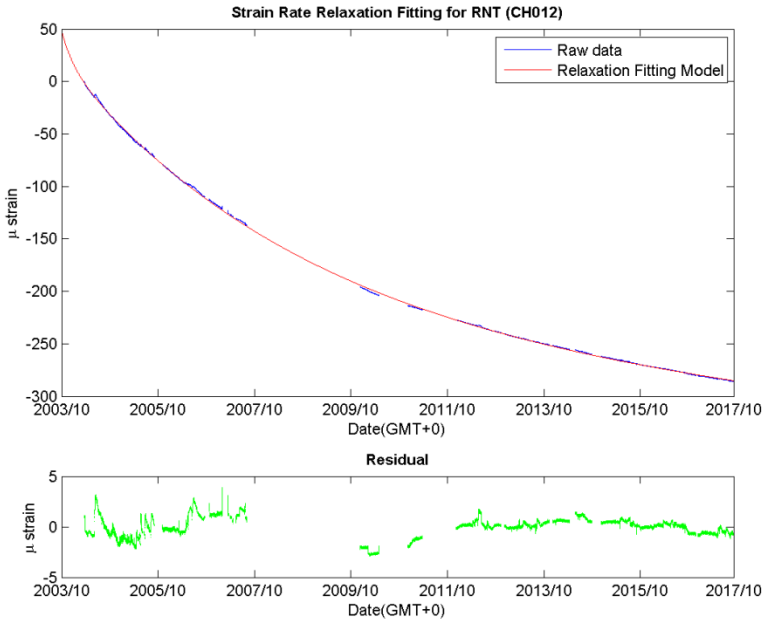


圖 2-4.6：曾文水庫北測站原始面應變與模式修正。原始面應變觀測的時間序為藍色，水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式為紅色，綠色為除掉水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式之後，所得到的面應變殘差值。

RST	
y = B1*exp(-t/L1) + B2*exp(-t/L2) + m*t +a t : days from 2003/10/23(GMT+0) y : micro strain ---------- L1 = 497.0444 (496.5632 497.5256) L2 = -3650.3376 (-3879.9749 -3420.7003) B1 = -760.8058 (-761.4455 -760.166) B2 = 50.0854 (40.7718 59.3991) m = 0.089644 (0.087417 0.091871) a = 620.3124 (611.6881 628.9368)	gof1 = sse: 1.2156e+007 rsquare: 0.9997 dfe: 614033 adjrsquare: 0.9997 rmse: 4.4495

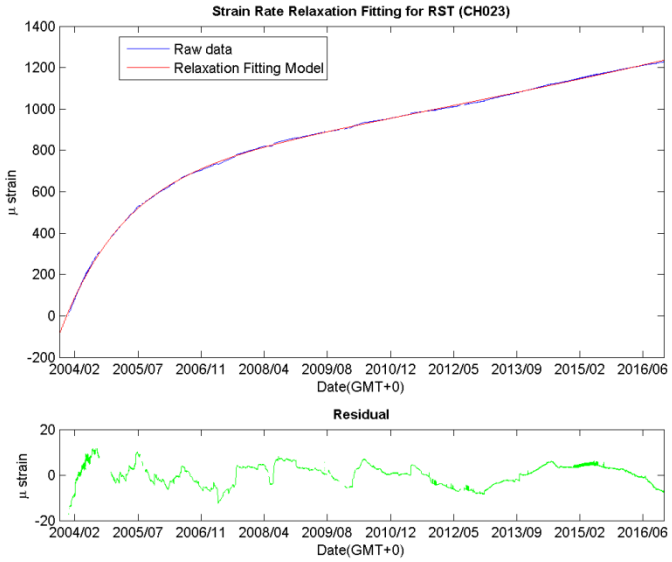


圖 2-4.7：曾文水庫南測站原始面應變與模式修正。原始面應變觀測的時間序為藍色，水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式為紅色，綠色為除掉水泥乾涸與井孔回復的雙自然對數的指數函數的模式之後，所得到的面應變殘差值。

(2) 氣壓響應評估

過去的研究已顯示影響井下應變儀的環境因子相當廣泛，包括潮汐、降雨、地下水，氣壓是其中一種，有效與正確的估計這些環境因素對於井下應變儀的影響，對於資料校正是必須的。Roeloffs(2010)以美國西部 PBO 的井下應變儀為例，指出氣壓與應變的關係，需要先將資料以 60 天做分段，步階每次間隔 30 天，再利用帶通濾波(band-pass filter)取兩者週期 4-6 天之資料後，進行線性回歸，可得到較佳的結果。相較於美國西部，Roeloffs(2010)的方法應用在台灣有些不同的特性，氣壓與應變在 3-7 天的周期有比較大的相關性，因此通帶濾波的範圍需要調整(圖 2-4.8)，另外由於台灣年雨量可達 2,500 公釐以上，太長的資料段容易受到降雨干擾，必須縮短分段與步階各為 30 天與 5 天，並且排除有降雨干擾的資料，才能得到較佳的結果。台灣平均每年有 3 到 4 個颱風侵襲，冬季則有強烈大陸冷氣團與寒流，這些天氣系統通過時，氣壓影響的量值相對於平時會特別大，可以降低事件中其他因素所造成的應變變化比例，進而提升井下應變儀當中氣壓影響量的估計，在這期間氣壓與應變間的關係可透過線性回歸來估計。利用氣壓事件的計算結果與 Roeloffs(2010)方法所得到結果有相當的一致性，面應變的氣壓響應約 -0.14~-0.38 μstrain/KPa(圖 2-4.9)。

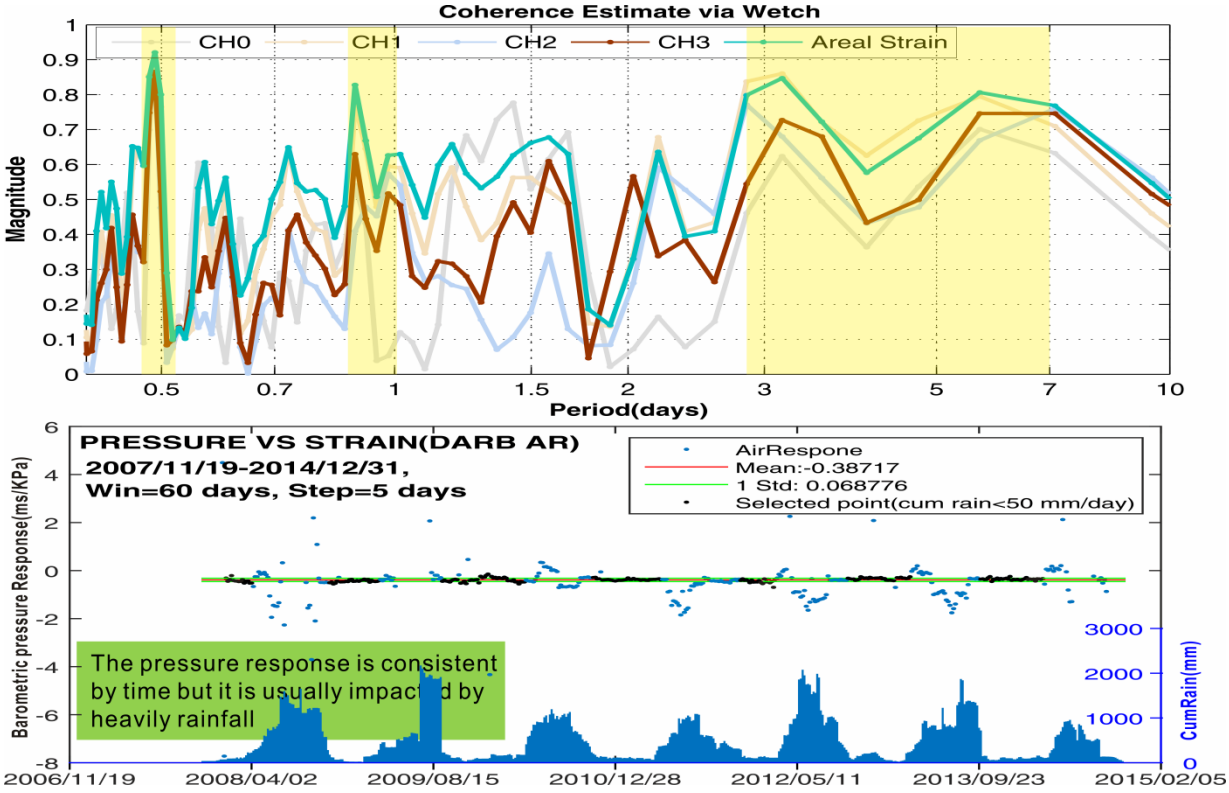


圖 2-4.8 氣壓與面應變響應。上圖為氣壓與面應變在頻率上相關的程度，排除與地潮交互影響的頻率後，3-7 天有較大的相關性。下圖為氣壓響應(microstrain/KPa)的長期趨勢，排除較大降雨期間的資料混染，長期是穩定的。

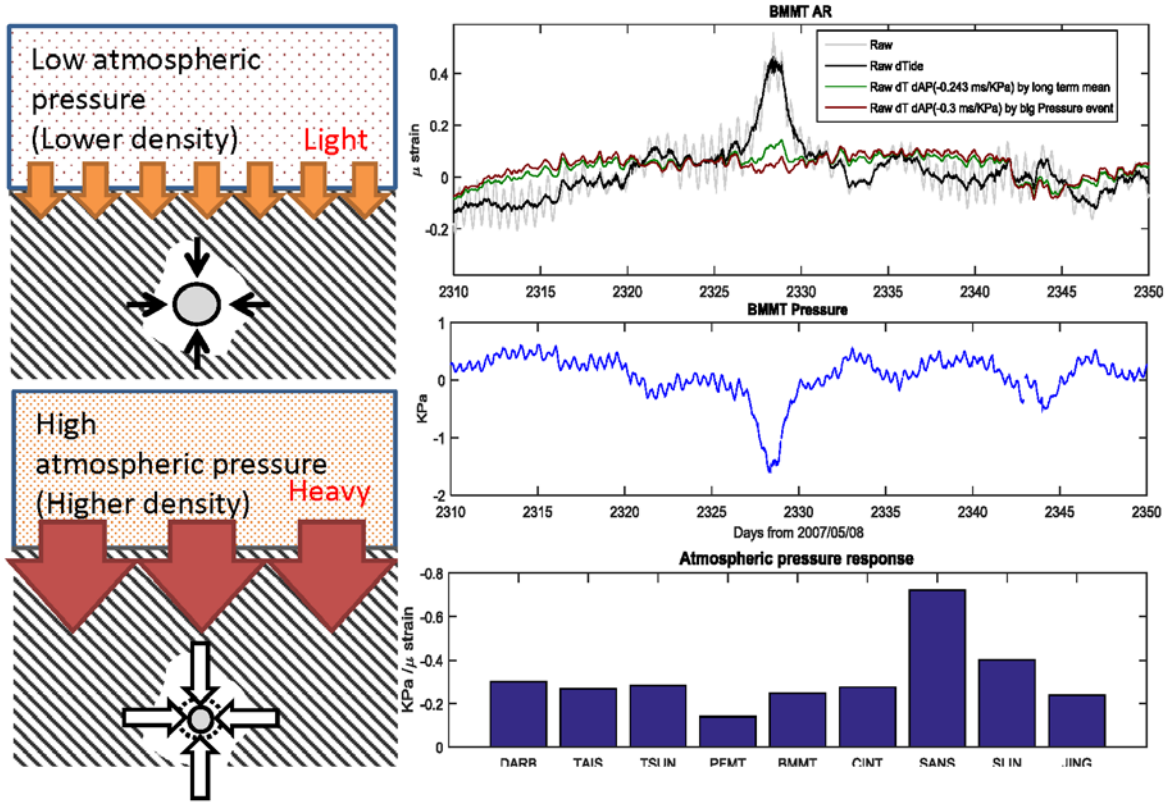


圖 2-4.9 氣壓響應評估之比較。左側為氣壓對應變影響的模型圖；右側上圖表示原始資料經過兩種校正(濾波長期平均與大氣壓事件)後之比較；中圖為對應之氣壓；下圖為各站所計算之氣壓響應。

(3) 地潮響應評估

本計畫利用多變數迴歸法來分析井下應變儀觀測中的潮汐分量，其原理就是利用半天、一天、半月及一月週期的顯著頻率的正弦與餘弦函數做成相同時間的序列，利用多變數迴歸法來分析潮位。

利用多變數迴歸法進行潮位資料分析，Rossiter（1972）同時考慮海水面高度所受的不同影響因素，利用迴歸分析的方法，求出各種因素對潮汐的影響。所用的公式如下：

$$Z_t = \sum_{p=0} a_p t^p + \sum_{r=0} b_r B_r(t) + \sum_i \left[c_i \cos 2\pi\omega_i t\right] + \sum_i \left[d_i \sin 2\pi\omega_i t\right] + \varepsilon_t \qquad \text{（式 2-4.1）}$$

其中 Z_t 是在 t 時間的海水面高度，是 P 次多項式來表示長期性的變動

B_r 代表各種不同的氣象因素，如氣壓、氣溫降雨量等，

ω_i 則是各種天文潮汐分量的角頻率

ε_t 則是其他為考慮進去的各種殘餘影響量及誤差

c_i 、d_i 為各種週期天文潮汐之振幅

本計畫中利用多變數迴歸補遺法主要參照式 2-4.1，但選擇 p=1 以消除資料的整體斜率。另外，氣壓效應與地下水影響已經消除，所以 b_rB_r 項可以不用，而 ω_i 項則只採用 9 個主要頻率，如表 2-4.1 所示。

多變數迴歸法原理簡單，執行迅速，成功率與精度都高，一次處理一個月到三個月的資料，不至於造成長期的系統誤差，當然與其它的起潮頻率分析相同，越長期的資料若能得到顯著的成果則越好，否則容易造成系統誤差。另外，過大或具有與主要潮汐分量相近頻率的雜訊也會干擾到簡諧函數的估計，往往會造成錯誤的結果。我們編輯以及測試了潮汐分析的程式，基本

上對於無特殊事件（如颱風、地震、突跳等事件）以外，大多可將潮汐週期變化移除 90%以上(圖 2-4.10)。

表 2-4.1：多變數迴歸法補遺使用之頻率。

名稱	頻率(cycle/hr)	名稱	頻率(cycle/hr)	名稱	頻率(cycle/hr)
O_1	0.0387307	M_2	0.0805114	S_2	0.0833333
K_1	0.0417807	P_1	0.0415526	N_2	0.0789992
K_2	0.0835615	M_F	0.0030501	M_M	0.0015122

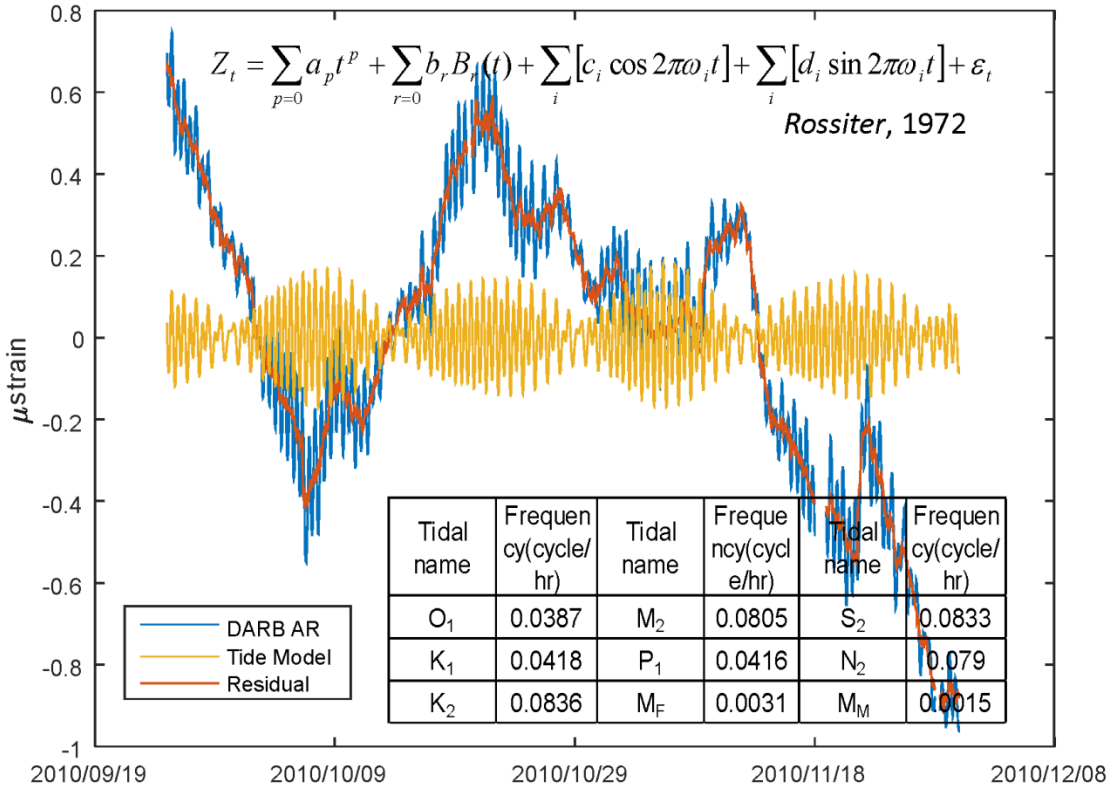


圖 2-4.10：井下應變儀中地潮分量的評估。利用固定幾個主要起潮頻率的正弦函數與餘弦函數所組成的時間序列，再加上氣壓的時間序列，用多變數迴歸法估計每一個時間序列對潮位資料時間序列的響應。藍色線段是原始面應變資料、黃色線段為所評估出來的地潮分量，而橘色線段為原始面應變扣掉地潮分量後的殘差。

第三章、井下應變儀資料分析

3-1 應變異常與地震之關係探討

由於現今對地震前後地殼應變是否會有什麼前兆會出現？多久前會出現？其大小會有多大？哪些地震（多大的或多遠的）會在某一測站出現異常前兆？這些都是我們所關切的，但至今仍無確切的答案。因此，在本計畫中定義井下應變儀的地震前兆訊號，其搜尋原則如下：

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

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

(3) "異常"前兆的判斷：要判斷一個異常現象是否與某一地震相關有三個主要的條件：

a. 在該地震發生的適當時間內，必須要有同震的應變變化，這變化可能是應變突跳（徒升或突降），也可能是斜率的改變。若無相對應的同震應變，就表示這測站並不在該地震的應力影響範圍內，任何半個月前或一個月前的地殼應變應該與地震不相關。

b. 在附近幾個井下應變儀觀測站中至少有兩個以上的測站在接近的時期中都有呈現"異常"，若只有一個測站的明顯"異常"僅能存疑。

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

根據以上的思考與原則，我們主要測試兩個井下應變儀網，即北部網，包括大坪國小（BMMT）、楸林 （SLIN）、明德中學（SANS）與錦和（JING）和南部網，包括太興國小（TAIS）、曾文水庫北（RNT）與曾文水庫南（RST）。

為了避免因為環境因子的資料缺失或不同採樣率，而在做環境因子的模式修正時損失了部份的觀測量，所以原來地下水每分鐘一筆的資料下降到每十分鐘一筆，氣壓資料量原為每卅分鐘一筆，而且多有缺失，先將同一地區的氣壓資料互相補遺，也就是假設同一地區氣壓在短時期的變化大致相同，若其中某一測站氣壓資料缺失一小段時期，則可以用另外一測站的氣壓變化值補遺。如此各網的三個測站互相補遺，可以得到完整的資料。再用適當的內插法，將每卅分鐘一筆的資料內插成每十分鐘一筆，如此所有的井下應變儀、氣壓、地下水位資料都有相同的取樣率，依照上面的原則建立環境因子模式，並做修正，最後再估算資料中的地潮訊號，進而扣除地潮的訊號，然後再依上述原則判斷所有規模大於五的地震（依氣象局公告）是否有同震以及震前的異常應變。

修正的資料中，由於大坪測站（BMMT）地下水觀測紀錄損壞，一直都無資料，考慮該地區短時期的地下水變化不大，所以先停止該地區的地下水影響量修正。另外臺北地區的地下水水位與井下應變儀面應變的關係還不明確，也暫不做臺北地區的地下水影響量修正。

2016 年 10 月至 2017 年 9 月期間，針對規模 5 以上的地震，應變異常事件較明顯的有 1 個事件（表 3-1.1），各測網有記錄到地震前應變異常的記錄事件如下：南部網記錄到 1 個應變異常事件為 2017/02/11 高雄市近海地震。圖 3-1.1 為 2016 年 10 月至 2017 年 9 月所有規模大於 5 之地震事件與特別地震事件，紅色海灘球為井下觀測網記錄到應變異常之地震事件。以下

針對有應變前兆反映的地震事件進一步說明。

表 3-1.1：2016 年 10 月至 2017 年 3 月，針對規模 5 以上的地震，井下觀測網記錄到之應變異常事件。

No	時間(GMT+0)	規模	經度	緯度	深度 km	震央位置
1	2017/02/11 01:12	5.7	120.14	22.87	16.2	臺南市政府南偏西方 14.6 公里 (位於高雄市近海)

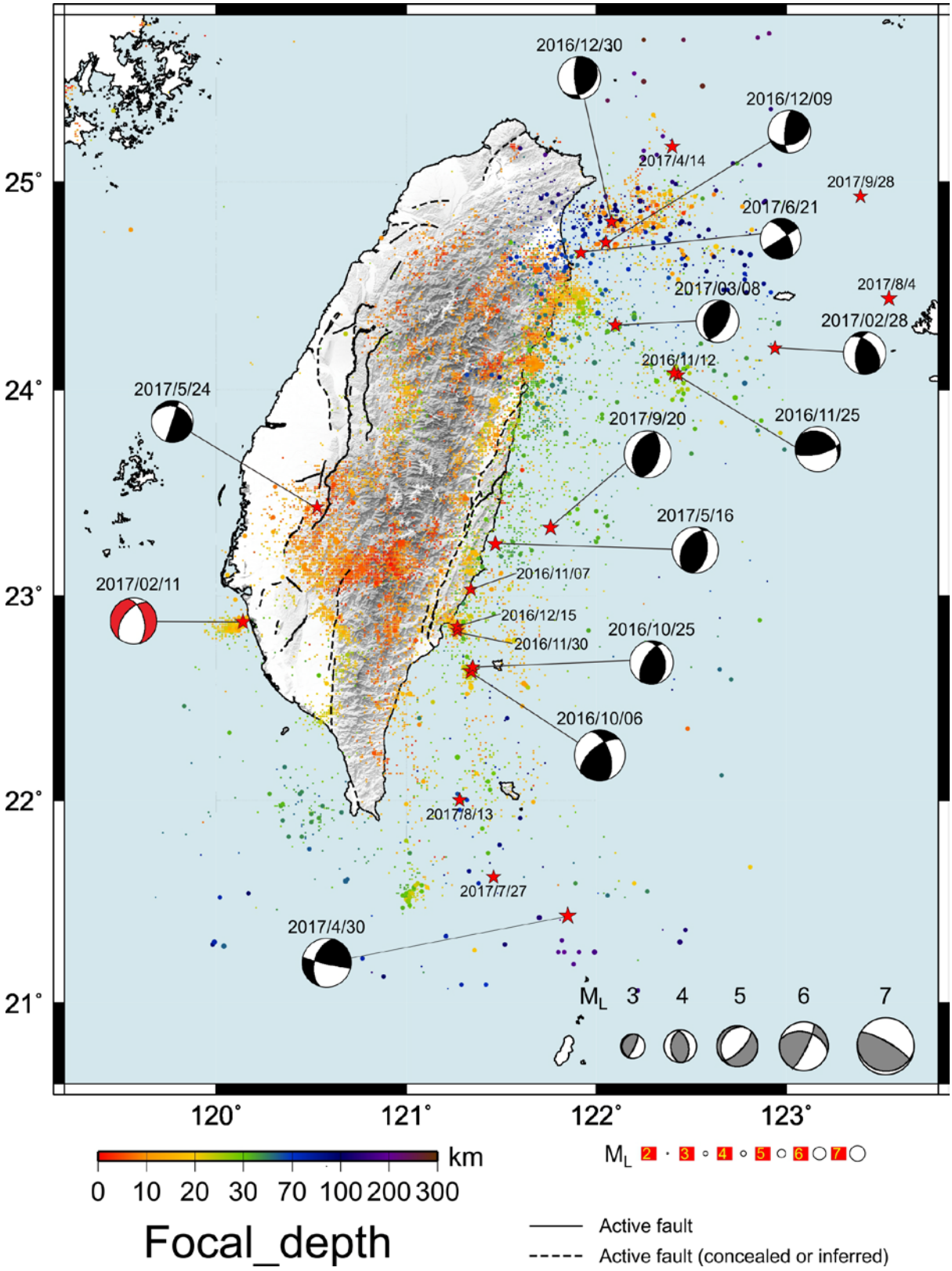


圖 3-1.1：2016 年 10 月至 2017 年 9 月規模大於 5 的地震事件之位置及震源機制圖。紅色海灘球為井下觀測網紀錄到應變異常之地震事件。

(1) 2017/02/11 高雄市近海地震（ML 5.7，Depth 16.2 km）

南部測網的曾文北站(RNT)的剪應變與面應變在 2017 年 1 月 16 日與 2 月 4 日都有明顯應變率異常變化，應變異常期間沒有特別大的水文影響。第一次應變異常發生於地震前約 26 天，第二次應變異常發生於地震前 6 天，特別的是從第一次應變異常開始，地震發生數量有明顯減少，第二次應變異常期左右，地震數量相對增加，6 天後就發生地震(圖 3-1.2)。

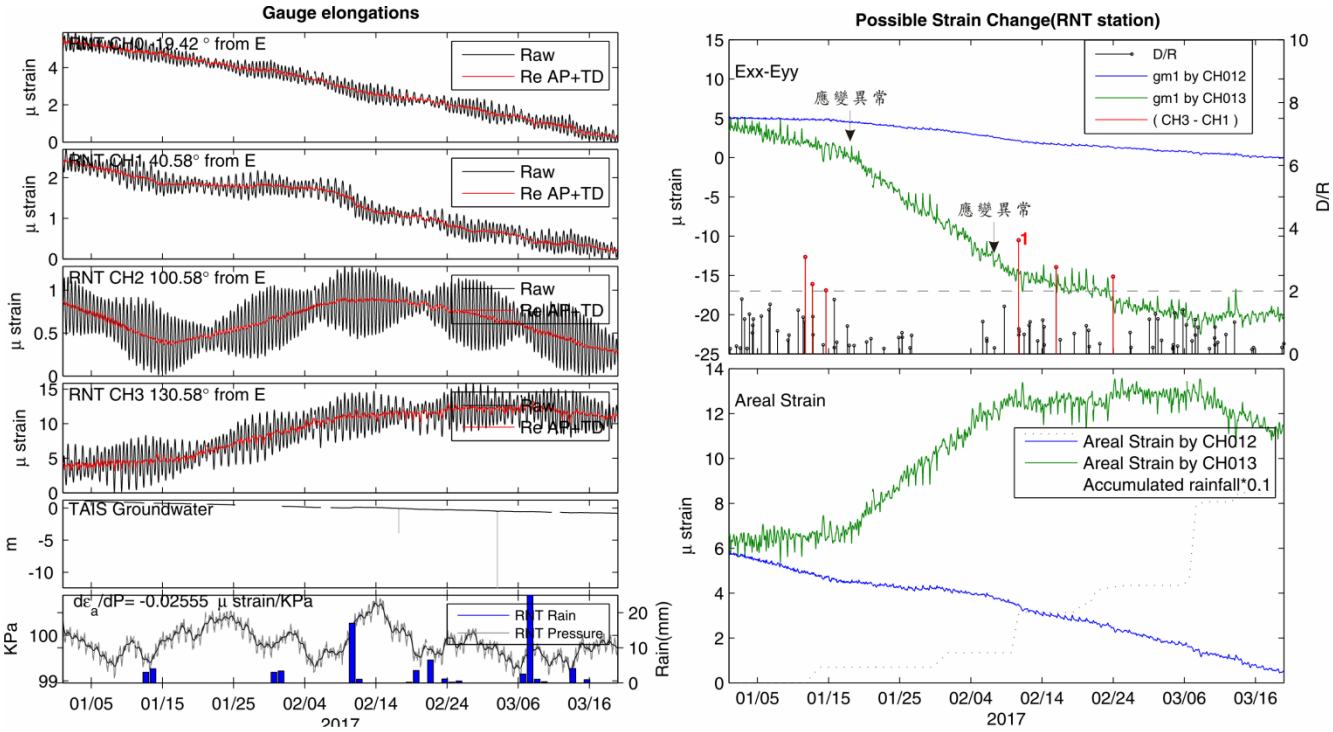


圖 3-1.2：南部網曾文北測站（RNT）於 2017 年 2 月 10 日高雄市近海地震前的應變資料。左圖為測站 4 個方向應變反應、地下水與氣壓資料，右圖為計算後剪應變與面應變。右上圖所標示為 1 是 2017/02/11 地震，紅色代表 D/R>2 之地震。

3-1-1 井下應變儀應變異常判釋統計

經每個月一次的井下應變儀資料分析，分析當月前三個月的一整個月資料（例如 10 月初分析 7 月），資料必須先移除環境變因，如無法移除者，也必須列出環境影響資料，以做為比對之用。當有無法藉由環境因子解釋的應變率變化時，則是為應變儀的應變異常訊號，再藉由比對地震資料後，判斷是否為地震相關的前兆訊號。目前分析至 2017 年 9 月為止，井下應變儀有前兆訊號，也成功對應地震的機率，在南部網與北部網分別為：78.6%、77.8%；而有前兆訊號卻沒有對應地震的誤判機率分別為：21.4%與 22.2%；地震前沒有前兆訊號的機率為：53.3%與 61.5%。

表 3-1.2：井下應變儀前兆判釋統計表（表列 2013/08-2017/09）。

	南部網		北部網	
	應變異常判斷	一個月內是否有對應之地震	應變異常判斷	一個月內是否有對應之地震
2013-08	X	X	O	X
2013-09	X	X	O	O
2013-10	O	O	O	O
2013-11	X	X	O	X
2013-12	O	X	O	X
2014-01	X	X	X	O
2014-02	X	X	O	O
2014-03	O	X	O	O
2014-04	O	X	X	X
2014-05	O	O	X	O
2014-06	X	X	X	X
2014-07	X	X	O	O
2014-08	X	X	X	X
2014-09	X	X	O	O
2014-10	X	O	O	O
2014-11	-	-	O	O
2014-12	X	X	X	O
2015-01	O	O	O	X
2015-02	O	O	O	O
2015-03	O	O	O	O
2015-04	O	O	O	O
2015-05	X	X	O	O
2015-06	X	X	O	O
2015-07	X	O	X	O
2015-08	X	O	X	O
2015-09	X	O	O	O
2015-10	X	O	O	X
2015-11	X	X	O	O
2015-12	X	O	O	O
2016-01	X	O	O	O
2016-02	X	O	O	O
2016-03	X	O	X	O
2016-04	X	O	X	O
2016-05	X	X	O	O
2016-06	X	X	X	X
2016-07	-	-	O	O
2016-08	-	-	X	X
2016-09	-	-	X	X
2016-10	O	O	O	O
2016-11	O	O	O	X
2016-12	O	O	-	O
2017-01	O	O	-	X

	南部網		北部網	
	應變異常判斷	一個月內是否有對應之地震	應變異常判斷	一個月內是否有對應之地震
2017-02	O	O	-	X
2017-03	X	O	-	X
2017-04	X	O	-	
2017-05	X	O	X	O
2017-06	-		X	X
2017-07	X	O	X	X
2017-08	-		O	X
2017-09	X	O	O	X
前兆判斷成功機率	78.6%		77.8%	
前兆判斷誤判機率	21.4%		22.2%	
無前兆機率	53.3%		61.5%	

3-1-2 應變異常與地震之時間及空間關係

在本章節中之研究主要在於分析地調所所有之井下應變儀測站應變異常訊號，試圖建立這些應變異常訊號與未來發生之地震在時間與空間上的關係，雖然其中的物理模型並非完全，且每次應變異常訊號與地震的對應關係也並非百分百確定，但統計越多事件越有可能建構其應變異常與地震之關係(表 3-1.3)。初步將每次有前兆訊號之事件的應變反應半徑與測站震源距(D/R)與前兆發生時間距投圖，結果顯示隨著事件的 D/R 值越大，其前兆發生時間會比較長，到約 30 天以上，D/R 小於 5 的前兆反應大部分在 10-20 天，仍有幾個事件的前兆時間超過 30 天，這個現象在過去達邦站(DARB)較為明顯，但其他測站卻沒有如此漸進變化的現象，這可能由於測站特性或者該測站所記錄到的前兆事件不夠多，無法解析出來(圖 3-1.3)。

表 3-1.3 應變異常時間與空間統計表

臺灣時間	規模	深度	震央位置	有前兆訊號測站	測站與地震距離(km)	D/R 值	前兆發生時間	前兆與地震時間距(天)
2015/05/11 16:38	4.9	12.3	苗栗縣政府西方 39.2 公里 (位於臺灣西部海域)	BMMT	64	2.13	2015/5/3	8
2015/06/21 14:15	5.0	22.4	花蓮縣政府東方 83.4 公里 (位於臺灣東部海域)	BMMT	167	0.95	5/24-6/9	12
2016/05/12 11:17	5.8	17.5	宜蘭縣政府東偏南方 19.7 公里 (位於臺灣東部海域)	BMMT	93	4.44	2016/5/10	2
2016/11/13 17:14	3.2	8.5	新竹縣政府南偏東方 12.7 公里(位於新竹縣竹東鎮)	BMMT	5	2.38	2016/10/17	27
2013/03/07 11:36	5.9	5.6	花蓮縣政府北偏西方 38.1 公里(位於花蓮縣秀林鄉)	DARB	118	2.9	2013/3/2	5
2013/03/27 10:03	6.2	19.4	南投縣政府東方 36.9 公里(位於南投縣仁愛鄉)	DARB	58	7.5	2013/3/2	25
2013/06/02 13:43	6.5	14.5	南投縣政府東方 29.3 公里(位於南投縣魚池鄉)	DARB	50	12	2013/5/1	32
2013/10/31 20:02	6.3	19.5	花蓮縣政府南偏西方 44.5 公里(位於花蓮縣光復鄉)	DARB	63	8.7	9/18-9/23	38
2014/05/21 08:21	5.9	18	花蓮縣政府南偏西方 33.3 公里 (位於花蓮縣鳳林鎮)	DARB	79	4.2	5/3-5/15	16
2015/02/14 04:06	6.3	27.8	臺東縣政府東偏南方 27.4 公里(位於臺灣東部海域)	DARB	115	3.6	2015/1/30	15
2015/03/23 18:13	6.2	38.4	花蓮縣政府南方 29.8 公里(位於臺灣東部海域)	DARB	107	3.44	2015/3/9	14
2015/04/20 09:42	6.3	17.5	花蓮縣政府東方 76.2 公里(位於臺灣東部海域)	DARB	178	2.5	2015/4/9	11
2016/02/06 03:57	6.6	14.6	屏東縣政府北偏東方 27.1 公里 (位於高雄市美濃區)	DARB	63	10.6	2016/1/4	33
2014/2/12 00:31	4.2	6.4	臺北市政府北方 10.5 公里 (位於臺北市士林區)	JING	18	3.4	1/26-2/1	8
2014/12/11 05:03	6.7	268.6	基隆市政府東偏北方 93.6 公里(位於臺灣東北部海域)	JING	104	2.8	2014/11/30	11
2015/01/07 12:48	5.5	30.4	花蓮縣政府北偏東方 30.6 公里(位於花蓮縣秀林鄉)	JING	84	2.4	2015/12/27	11
2015/03/23 18:13	6.2	38.4	花蓮縣政府南方 29.8 公里(位於臺灣東部海域)	JING	146	2.5	2015/3/9	14
2015/10/19 10:17	5.2	17.4	宜蘭縣政府東偏北方 28.1 公里 (位於臺灣東部海域)	JING	56	2.94	2015/9/23	26
2016/02/02 22:19	6.7	203.7	基隆市政府東方 183.2 公里 (位於臺灣東北部海域)	JING	212	2.58	2016/1/22	10
2016/05/12 11:17	5.8	17.5	宜蘭縣政府東偏南方 19.7 公里 (位於臺灣東部海域)	JING	61	6.84	2016/5/8	4
2014/02/05-02/08	2.3-3.4	6.6-11.3	新竹橫山群震	PFMT	9.4	1	2014/1/24	13
2014/12/11 05:03	6.7	268.6	基隆市政府東偏北方 93.6 公里(位於臺灣東北部海域)	PFMT	149	2.6	11/10-11/22	19
2015/01/07 12:48	5.5	30.4	花蓮縣政府北偏東方 30.6 公里(位於花蓮縣秀林鄉)	PFMT	67	2.9	2015/1/2	5
2015/03/23 18:13	6.2	38.4	花蓮縣政府南方 29.8 公里(位於臺灣東部海域)	PFMT	122	3	2015/3/16	7
2015/04/20 09:42	6.3	17.5	花蓮縣政府東方 76.2 公里(位於臺灣東部海域)	PFMT	137	3.7	2015/4/10	10
2015/05/11 16:38	4.9	12.3	苗栗縣政府西方 39.2 公里 (位於臺灣西部海域)	PFMT	80	1.74	2015/5/4	7
2015/06/21 14:15	5.0	22.4	花蓮縣政府東方 83.4 公里 (位於臺灣東部海域)	PFMT	154	1	5/24-6/9	12
2016/02/06 03:57	6.6	14.6	屏東縣政府北偏東方 27.1 公里 (位於高雄市美濃區)	PFMT	206	3.3	2016/1/4	33
2017/01/12 01:31	4.4	5	嘉義市政府東南方 46.4 公里(位於高雄市桃源區)	RNT	25	3.08	2016/12/1	42
2017/02/11 01:12	5.6	18.4	臺南市政府西南方 12.2 公里(位於臺南市近海)	RNT	68	3.62	2017/1/16	26
2017/02/11 01:12	5.6	18.4	臺南市政府西南方 12.2 公里(位於臺南市近海)	RNT	68	3.62	2017/2/4	7
2017/03/24 01:09	4.1	6.3	嘉義市政府南偏東方 8.2 公里(位於嘉義縣中埔鄉)	RNT	15	3.55	2017/3/6	18

臺灣時間	規模	深度	震央位置	有前兆訊號測站	測站與地震距離(km)	D/R 值	前兆發生時間	前兆與地震時間距(天)
2013/10/31 20:02	6.3	19.5	花蓮縣政府南偏西方 44.5 公里(位於花蓮縣光復鄉)	TAIS	74	7.5	9/18-9/23	38
2016/10/26 15:07	3.7	4.6	嘉義市政府東偏北方 18.2 公里(位於嘉義縣梅山鄉)	TAIS	1	8.36	2016/10/20	6
2013/03/07 11:36	5.9	5.6	花蓮縣政府北偏西方 38.1 公里(位於花蓮縣秀林鄉)	TSUN	120	2.8	2013/2/14	21
2013/03/27 10:03	6.2	19.4	南投縣政府東方 36.9 公里(位於南投縣仁愛鄉)	TSUN	60	7.4	2013/2/14	56

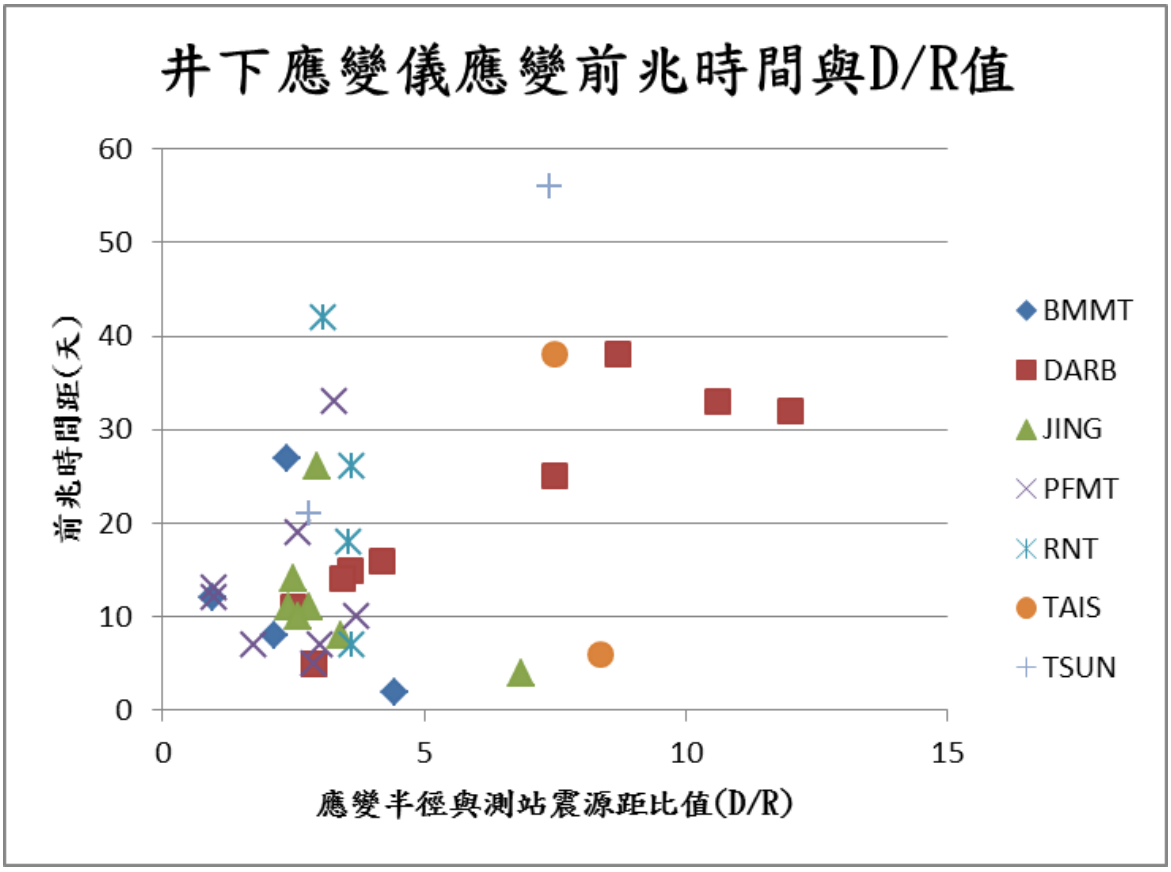


圖 3-1.3 應變前兆訊號時間與 D/R 值。

3-2 井下應變儀時頻分析

本章節針對 2016 年 10 月至 2017 年 9 月的井下應變儀面應變資料進行時頻分析，了解各個測站面應變資料之頻譜圖變化。而分析流程則是先去除面應變資料的趨勢變化，並進行短時距傅立業轉換時頻圖的繪製，頻率範圍分別是全頻(0.0~0.5Hz)、高頻(0.15~0.5Hz)及低頻(0.0~0.15Hz)。

時頻圖分析之結果中，錦和站(JING)在低頻 0.065、0.08、0.085Hz 有橫線出現，明德中學站(SANS)在低頻 0.05、0.065、0.08Hz 附近有橫線出現，樹林焚化廠站 (SLIN)在低頻 0.07、0.095、0.1Hz 有橫線出現，大坪國小站 (BMMT)測站在低頻 0.08、0.095、0.1、0.102Hz 有橫線出現，太興國小站 (TAIS)測站在低頻 0.086、0.095Hz 有橫線出現，此橫線代表各站之特徵頻率，此特徵頻率係因震動觸發，由於材質及岩性等材料條件，每個測站各有其基本的自然頻率，當受到任何震盪觸發，便會在時頻圖上以橫線表現。這裡提到自然頻率的概念，簡單說明如下，舉例來說，由於材質的不同，木板、塑膠板各有其自然頻率，當給予敲擊時，不論用什麼東西敲、敲得或快或慢，聽到的聲響都相同，其發出的聲音頻率便是其自然頻率，等同於在

井下應變儀資料中看到 0.05~0.09Hz 與 0.1Hz 附近的橫線，因此，若將一個站井視為一個系統，此自然頻率即為該站之特徵頻率。高頻(0.15~0.5Hz)頻段於此時段間有雲狀頻率變化，雲狀頻率變化發生原因，目前資料不足尚無法確定。

將各頻段進行時間積分之分析結果顯示全頻與低頻有一天 2 次的能量變化，而高頻(0.15~0.5Hz)能量變化則會隨著時頻圖中雲狀頻率分布有山巒起伏的波形，有時則會出現 spike，低頻(0~0.15)能量變化中則有較多的 spike 出現，spike 的出現原因目前尚待進一步分析確定。

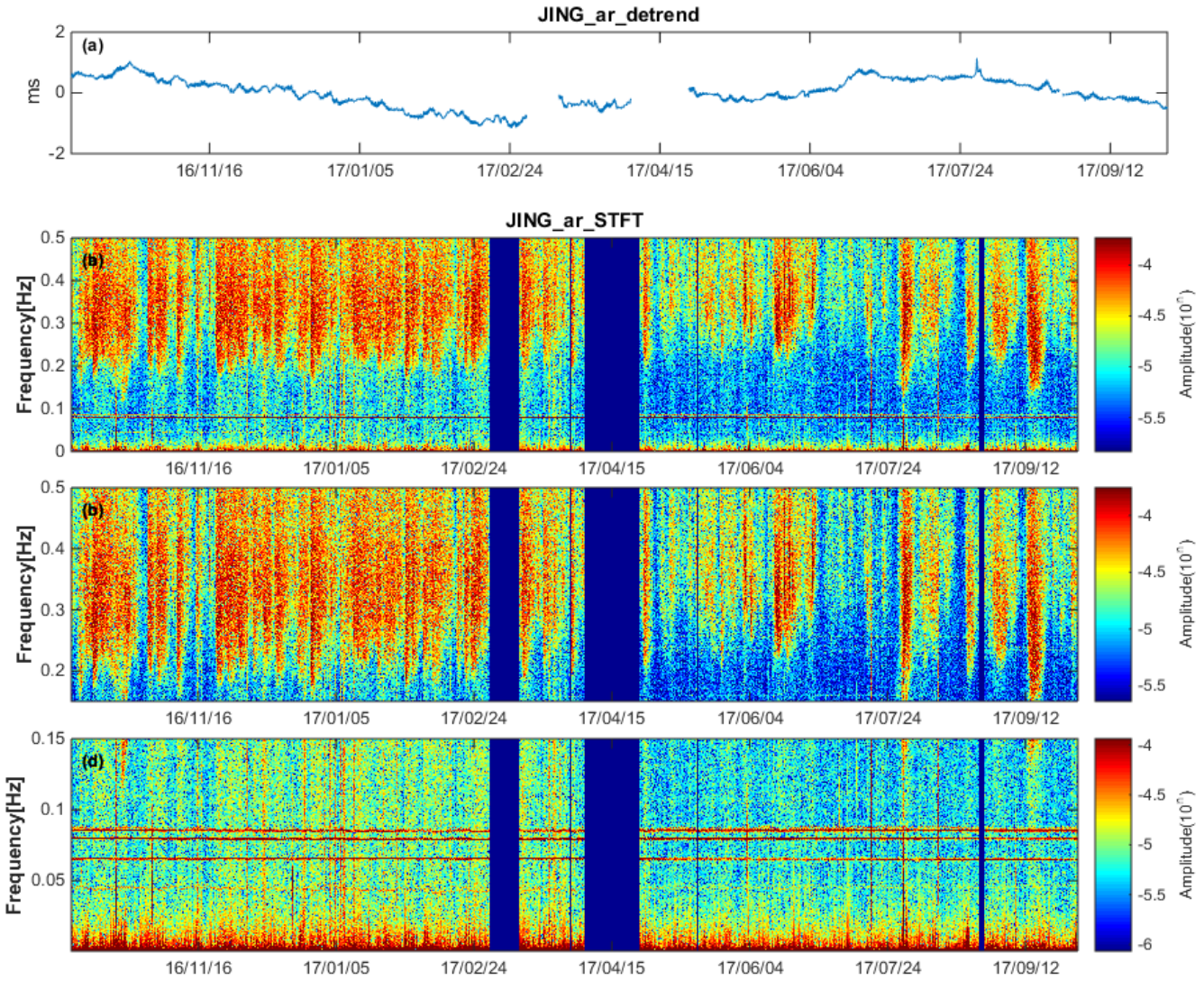


圖 3-2.1：錦和站(JING)面應變資料時頻圖與能量變化。(a)面應變時間序列、(b)全頻(0.0~0.5Hz)、(c)高頻(0.15~0.5Hz)、(d)低頻(0~0.15 Hz)。

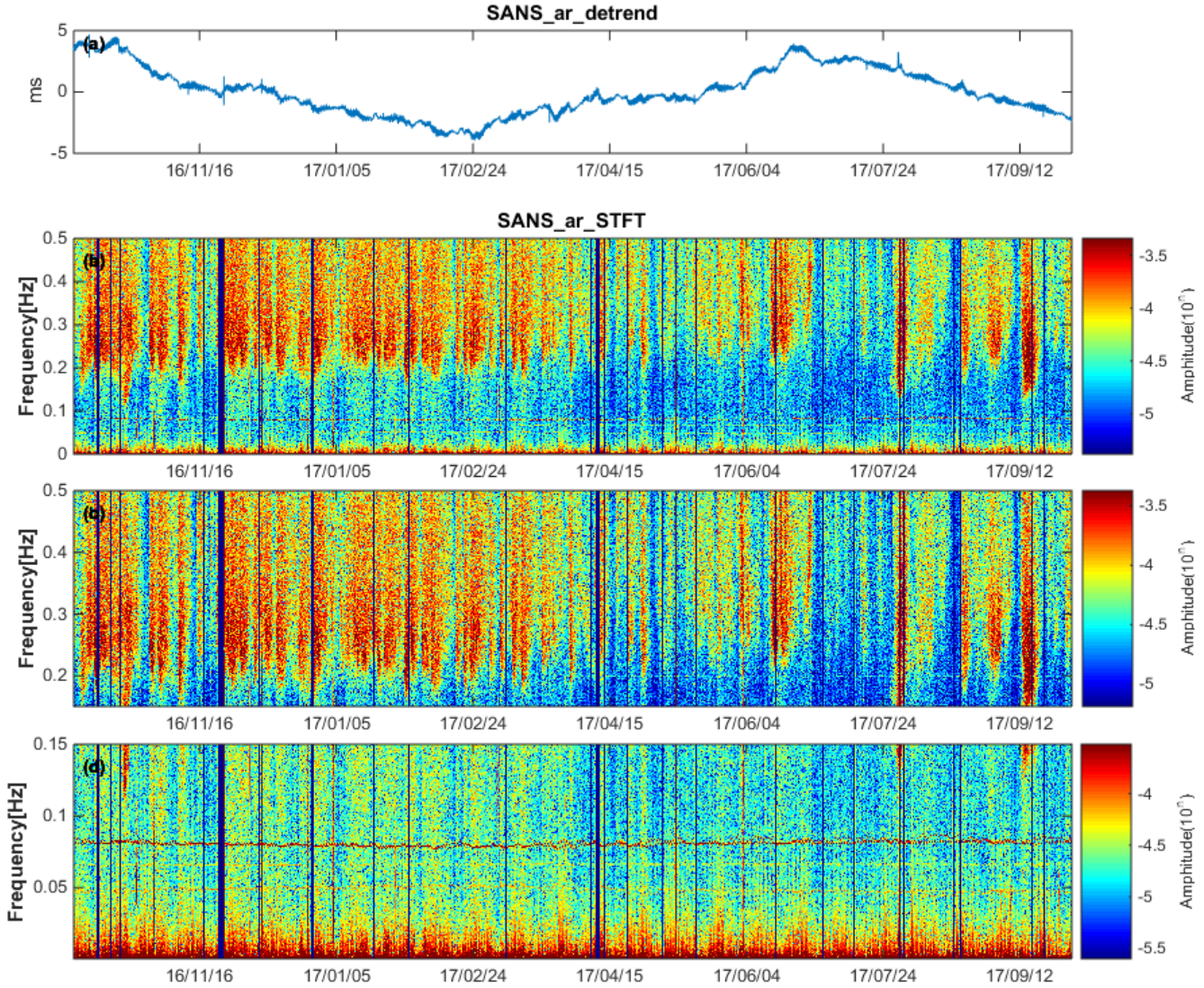


圖 3-2.2：明德中學站(SANS)面應變資料時頻圖與能量變化。(a)面應變時間序列、(b)全頻(0.0~0.5Hz)、(c)高頻(0.15~0.5Hz)、(d)低頻(0~0.15 Hz)。

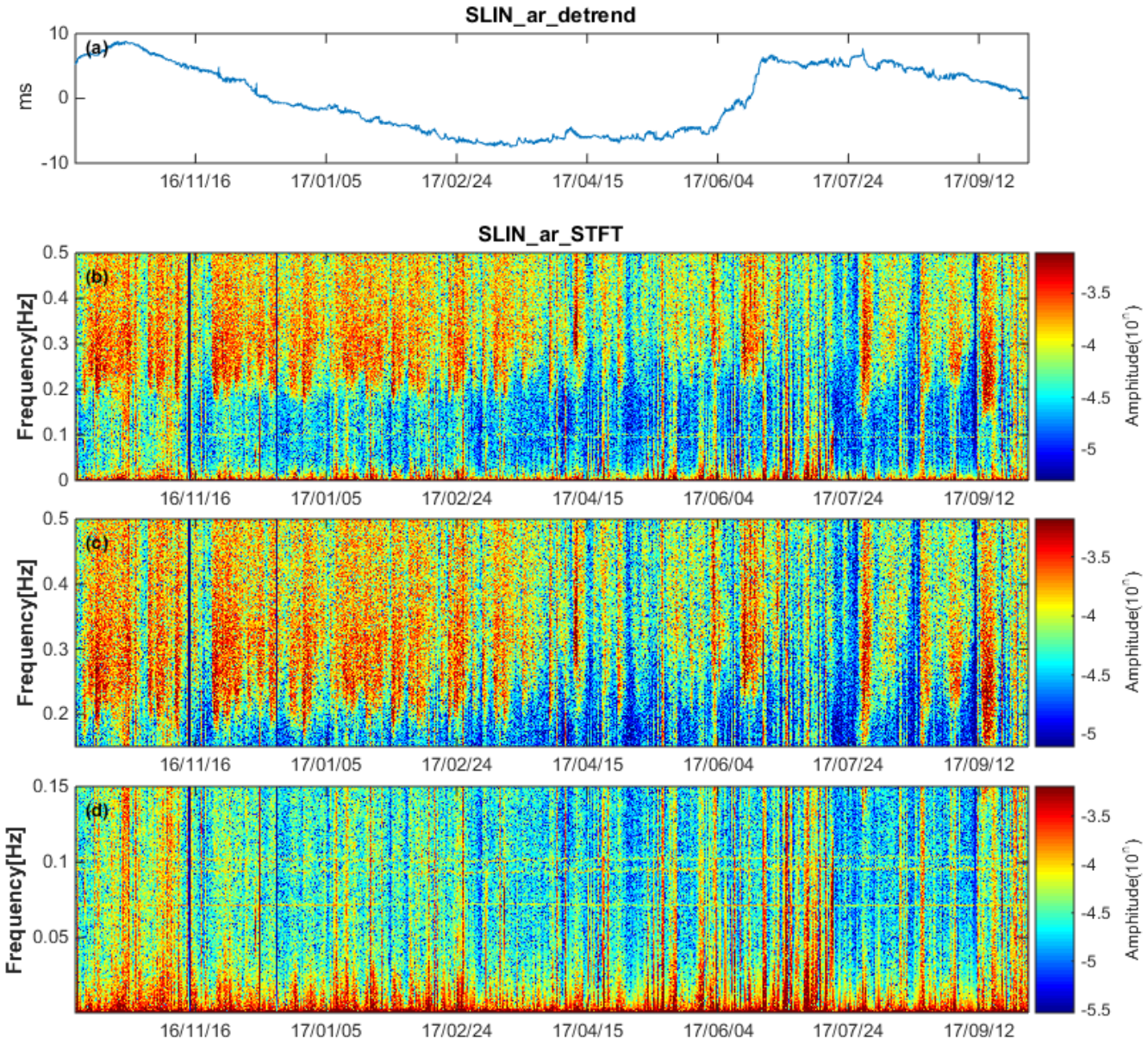


圖 3-2.3：樹林焚化廠站(SLIN)面應變資料時頻圖與能量變化。(a)面應變時間序列、(b)全頻(0.0~0.5Hz)、(c)高頻(0.15~0.5Hz)、(d)低頻(0~0.15 Hz)。

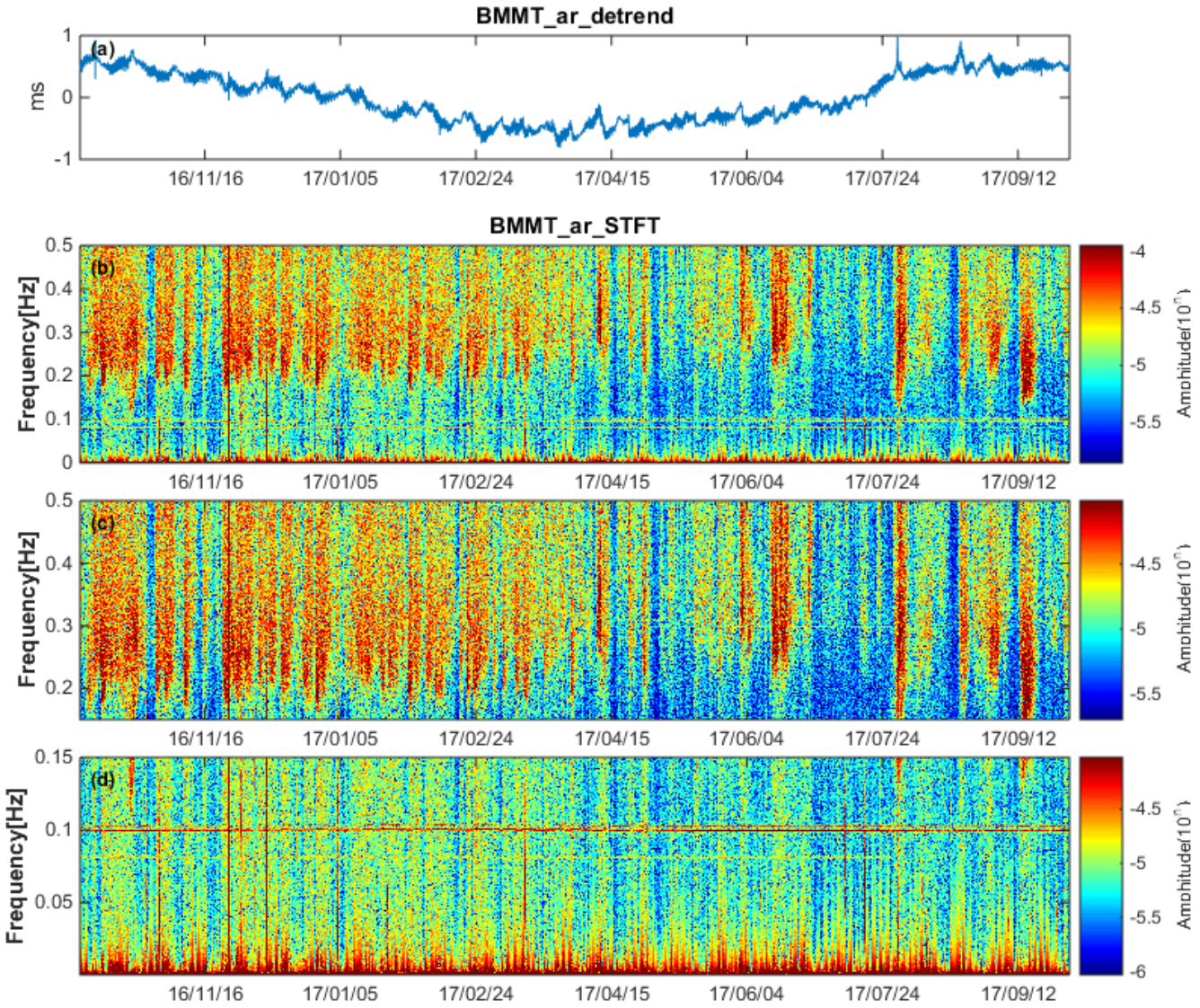


圖 3-2.4：大坪國小站(BMMT)面應變資料時頻圖與能量變化。(a)面應變時間序列、(b)全頻(0.0~0.5Hz)、(c)高頻(0.15~0.5Hz)、(d)低頻(0~0.15 Hz)。

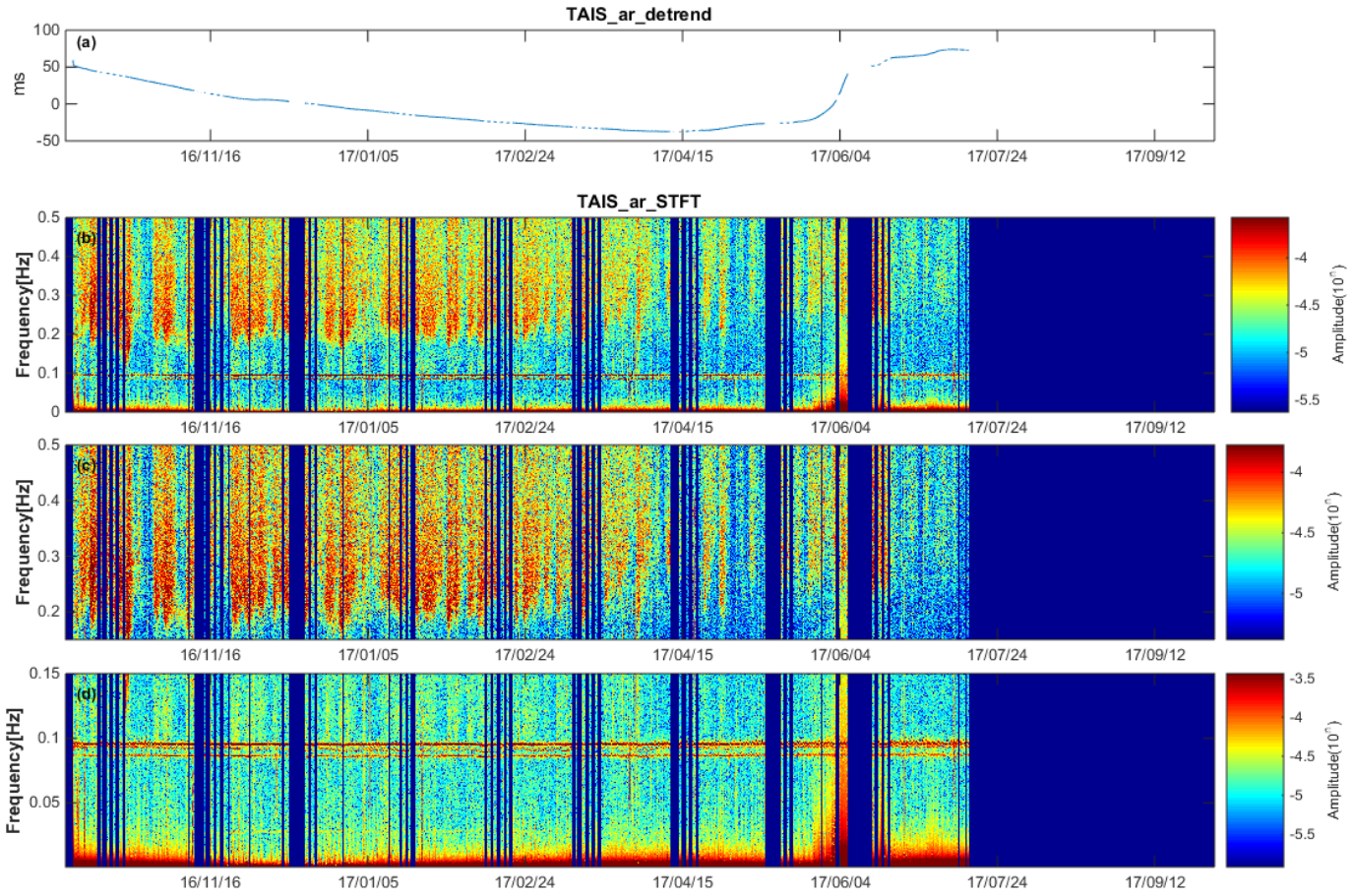


圖 3-2.5: 太興國小(TAIS)面應變資料時頻圖與能量變化。(a)面應變時間序列、(b)全頻(0.0~0.5Hz)、(c)高頻(0.15~0.5Hz)、(d)低頻(0~0.15 Hz)。

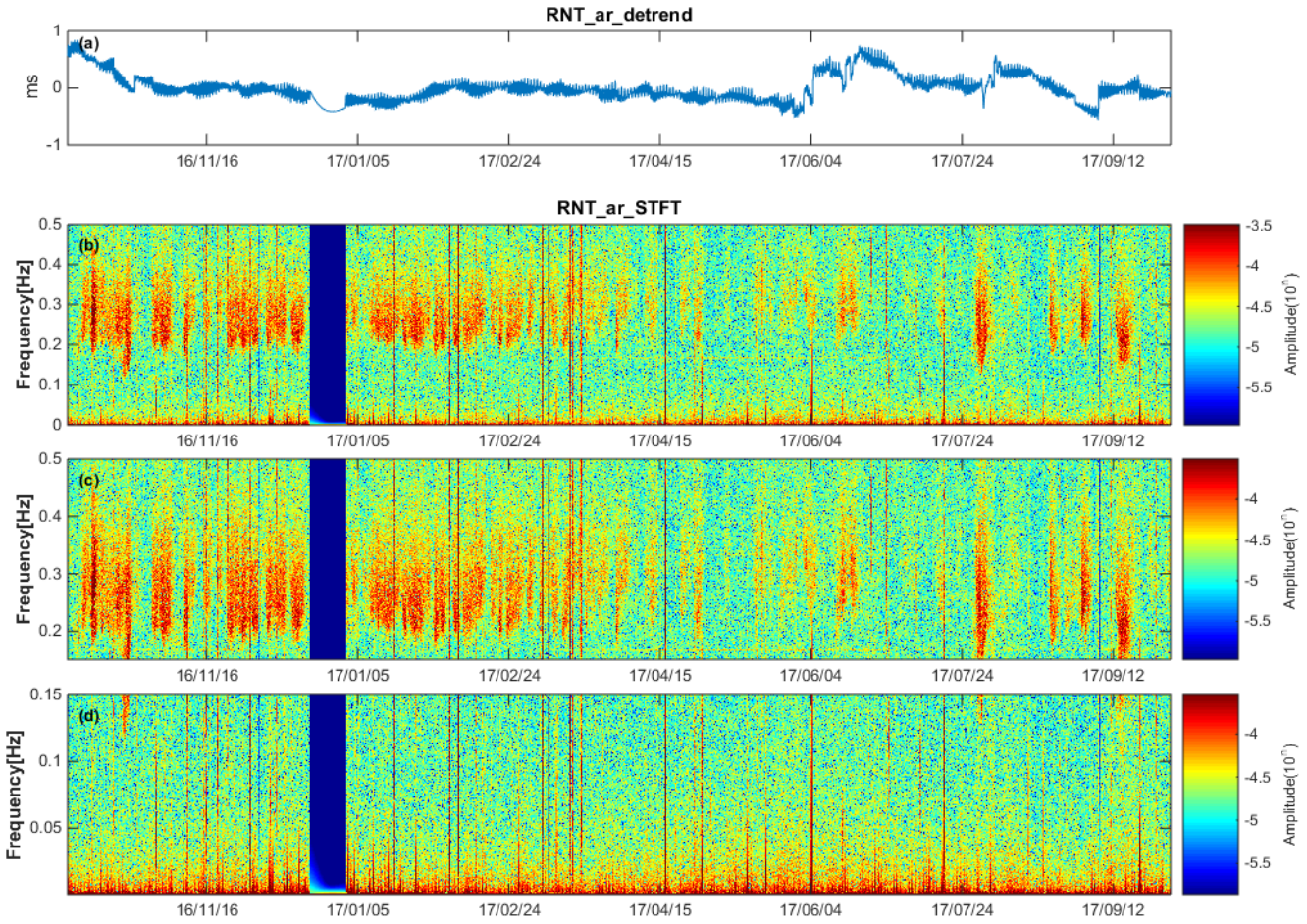


圖 3-2.6: 曾文水庫北站(RNT)面應變資料時頻圖與能量變化。(a)面應變時間序列、(b)全頻(0.0~0.5Hz)、(c)高頻(0.15~0.5Hz)、(d)低頻(0~0.15 Hz)。

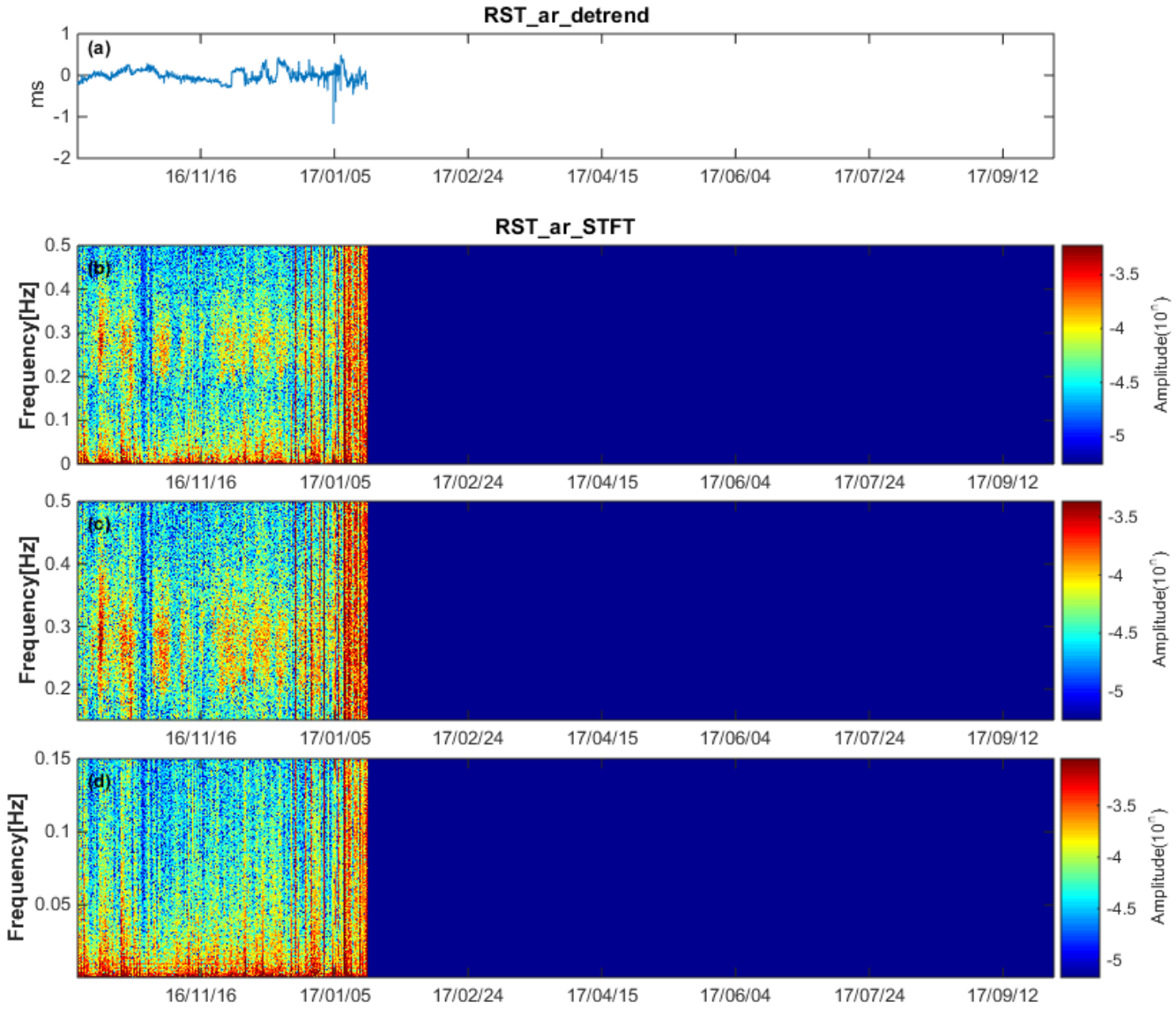


圖 3-2.7：曾文水庫南站(RST)面應變資料時頻圖與能量變化。(a)面應變時間序列、(b)全頻(0.0~0.5Hz)、(c)高頻(0.15~0.5Hz)、(d)低頻(0~0.15 Hz)。

3-3 井下應變儀測站資料與現況

在本報告中的測站資料的起始期間自 2016 年 10 月到 2017 年 9 月，大部分資料完整，以下為有資料異常之部分：

1. 曾文南站(RST)CH1 自 2004 年後因儀器故障無資料，CH0 自 2017/1/17 後資料缺失，原因不明待查。
2. 太興站(TAIS) 2017 年 7 月 14 日之後無資料。
3. 明德中學測站(SANS)從 2012 年 11 月之後，CH0 不再有資料。

表 3-3.1：井下應變儀測站之經緯度與資料接收起迄時間表。

觀測網	觀測站代碼	站　名	儀器狀況	資料接收起始時間	資料接收最新時間
北部網	JING	錦和	良好	2007/11/20	2017/11/30
	SANS	明德中學	CH0 無資料	2007/11/12	2017/11/30
	SLIN	樹林焚化廠	良好	2009/09/11	2017/12/01
	BMMT	大坪國小	良好	2005/06/09	2017/10/17
南部網	TAIS	太興國小	2017 年 7 月 14 日後遭雷擊，無資料	2006/03/04	2017/07/14
	RNT	曾文水庫北	良好，2009 年 9 月後為現地下載	2003/10/28	2017/11/03
	RST	曾文水庫南	CH1 永久損壞	2003/10/23	2017/11/28

第四章、地殼連續變形計算分析

本計畫在分析井下應變儀資料的同時，也同時進行龍船斷層附近的 GPS 網的應變分析，來做為一種獨立的地殼應變資料，近而來討論近年龍船斷層活動的特性。龍船斷層位於臺灣西南部，其附近有潮州斷層、旗山斷層、左鎮斷層、新化斷層及台南後甲里斷層環繞，並有相當多的 GPS 連續觀測站(如圖 4.1 所示)。此地區附近於 2016 年 02 月 06 日曾經發生規模 6.6 的美濃地震，針對該地震中央地質調查所對此區域的 GPS 連續觀測站資料做了一次系統性的分析，本計畫將延續該次的分析成果，對龍船斷層附近的地殼變形再做延續性的分析，希望能進一步了解龍船斷層附近的地殼構造活動。在期中報告時使用其延續原有的分析架構做了一些分析，發現原來分析中 GPS 資料蒐集並不齊全完備，故於期末報告中詳細規劃蒐集本地區 2013/01~2017/09 的完整 GPS 資料，重新加以詳細分析，並利用其組合成 GPS 應變三角網，來討論 2013 年以來龍船斷層附近地區的地殼應變。

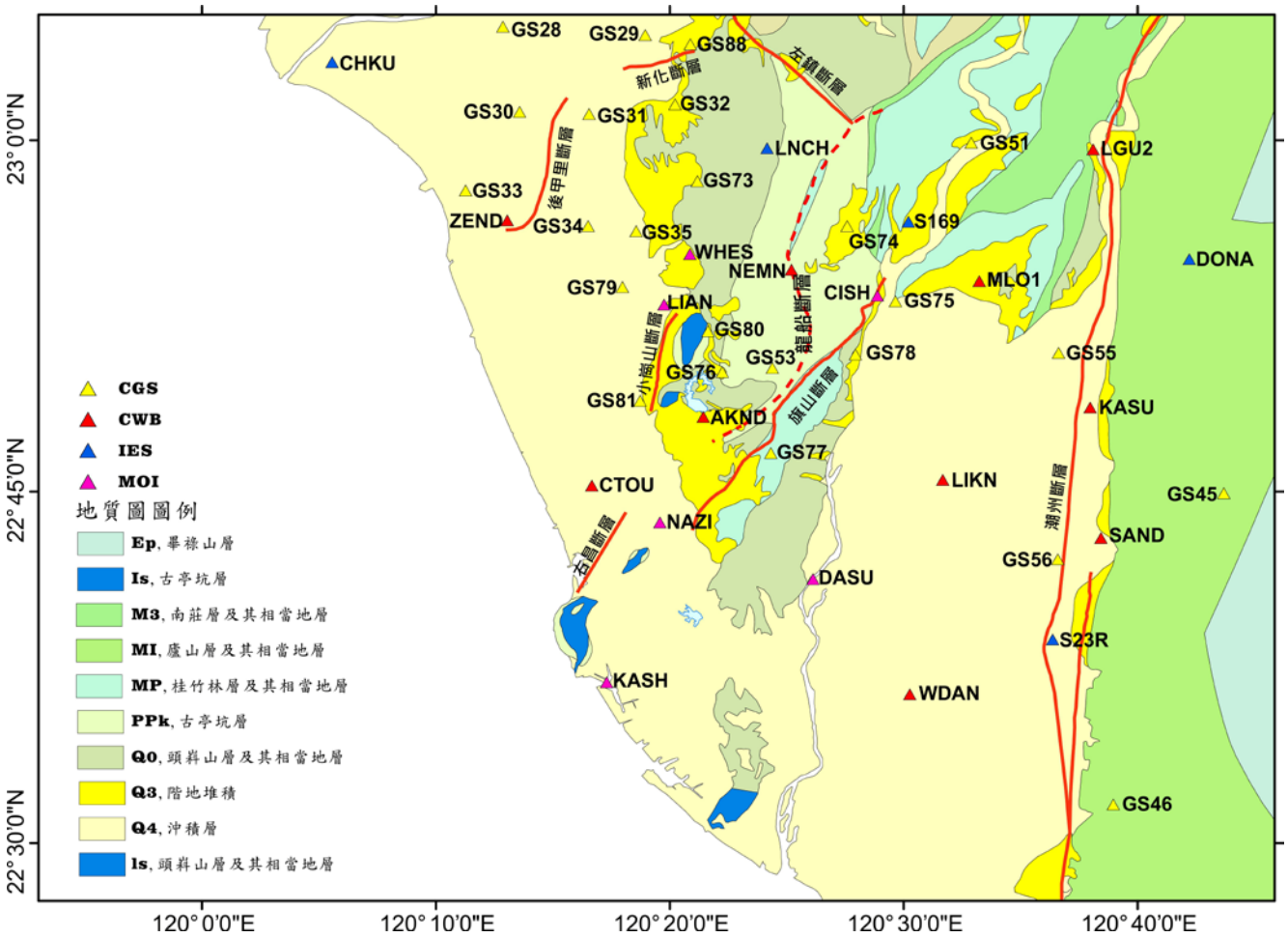


圖 4.1：龍船斷層（粗紅虛線）與附近的其它斷層以及 GPS 固定站的相對位置。

圖 4.1 顯示為本期末報告中所蒐集到的 GPS 測站的名稱及位置(GPS 測站為三角形標誌，顏色代表設置的單位）以及與附近斷層（紅線）的相關位置。在本報告最後的分析中，共組成了 18 個三角網，分成兩條三角網組成測線：北方的組成測線涵蓋了後甲里斷層、新化斷層、龍船斷層北段、旗山斷層北段及潮州斷層附近的區域(見圖 4.2)；南方組成測線則涵蓋了後甲里斷層、小岡山斷層、龍船斷層南段、右昌斷層及潮州斷層附近的區域(見圖 4.6)，用來探討 2013 年至 2017 年 9 月以來此一區域的下列相關地殼應變的特性:

1. 在後甲里斷層、新化斷層、左鎮斷層與龍船斷層所包圍的區域的長期地殼應變率，美濃地震所扮演的角色為何?
2. 龍船斷層附近顯示有較大的地表變形，這樣的變形在時空的分佈為何?
3. 這個地區在 2016 年美濃地震時各區域的同震應變 (大小、方向)如何?
4. 龍船斷層往南的地殼變形如何延伸或如何結束?

● 2013/01~2017/09 的長期年應變率

本期末報告主要針對 2013/01~2017/09 的 GPS 資料進行分析，每三個測站可形成一個三角網來做為面應變及剪斜應變的分析，選擇其中 18 個三角網，其成果檢附於附錄一中。進一步再根據 2013/01/01~2017/02/05 期間的面應變資料來做震前年應變率的估計，而震後年應變率的估計則使用 2017/02/06~2017/09/30 期間的面應變資料來做分析，最後則有一個三角網(GS29-GS30-GS32)在地震前有特別明顯的壓縮的面應變率(-2.28 μstrain/a)，有五個三角網在地震前屬較高的壓縮面應變率(-2.00~-1.00 μstrain/a)，有四個三角網在地震前顯示中度的壓縮面應變率(-1.00~-0.30 μstrain/a)，其餘八個三角網在地震前顯示低度的應變率(-0.30 ~ +0.30 μstrain/a)，分別為四個壓縮和四個伸張，所有三角網的結果如表 4.1 所示。

表 4.1：所有三角網的代號、測站名稱、震前年面應變率、震後年應變率及同震應變。

三角網代號	站名組合	震前年面應變率 μstrain/a	震後同震應變率 μstrain/a	同震應變 μstrain
SA1	GS28-GS29-GS30	-1.406328	+0.000236	+2.3
SA2	GS29-GS30-GS32	-2.812655	+0.000040	+0.0
SA4	GS32-GS35-LNCH	-0.275354	+0.246850	-5.7
SA5	GS35-LNCH-NEMN	-1.187008	+0.031492	+5.7
SA3	GS73-NEMN-S169	-1.084886	-0.108585	+7.3
SA6	GS35-GS53-GS74	-0.719944	+0.034749	+3.0
SA7	CISH-GS74-S169	-1.469988	+0.128260	+0.2
SA8	GS55-GS78-S169	-0.211267	+0.055291	-0.0
SA9	GS45-GS55-GS56	-0.257460	-0.229260	+0.6
SB1	GS34-GS35-GS79	+0.000371	+1.741163	-4.6
SB2	GS79-GS80-GS81	-0.946998	-0.001166	-2.6
SB3	AKND-CTOU-GS81	+0.002783	-1.226283	0.0
SB4	GS77-GS81-NAZI	+0.026349	-0.486697	0.0
SB5	AKND-GS77-NAZI	-1.619694	-0.000410	0.0
SB6	DASU-GS77-NAZI	-0.364216	+0.148543	0.0
SB7	DASU-KASH-NAZI	+0.152378	+0.229385	0.0
SB8	DASU-LIKN-S23R	-0.163434	+0.657085	0.0
SB9	GS46-S23R-WDAN	-0.514968	-0.000102	0.0

圖 4.2 顯示橫跨龍船斷層北段測線的一條串連的三角網，其中每一三角網分成內外兩個顏色，內心的顏色代表震前的應變率，紅色之深淺代表壓縮應變率的大小，藍色之深淺代表舒張應變率的大小，外圍的顏色則顯示震後的年應變率。由圖 4.2 可看出震前應變大多屬紅色系列，震後則為淺藍系列，而且震前的壓縮應變在後甲里-新化斷層附近的壓縮應變較大，龍船斷層附近的壓縮應變也不小，其餘區域的應變累積則相對的較緩和。

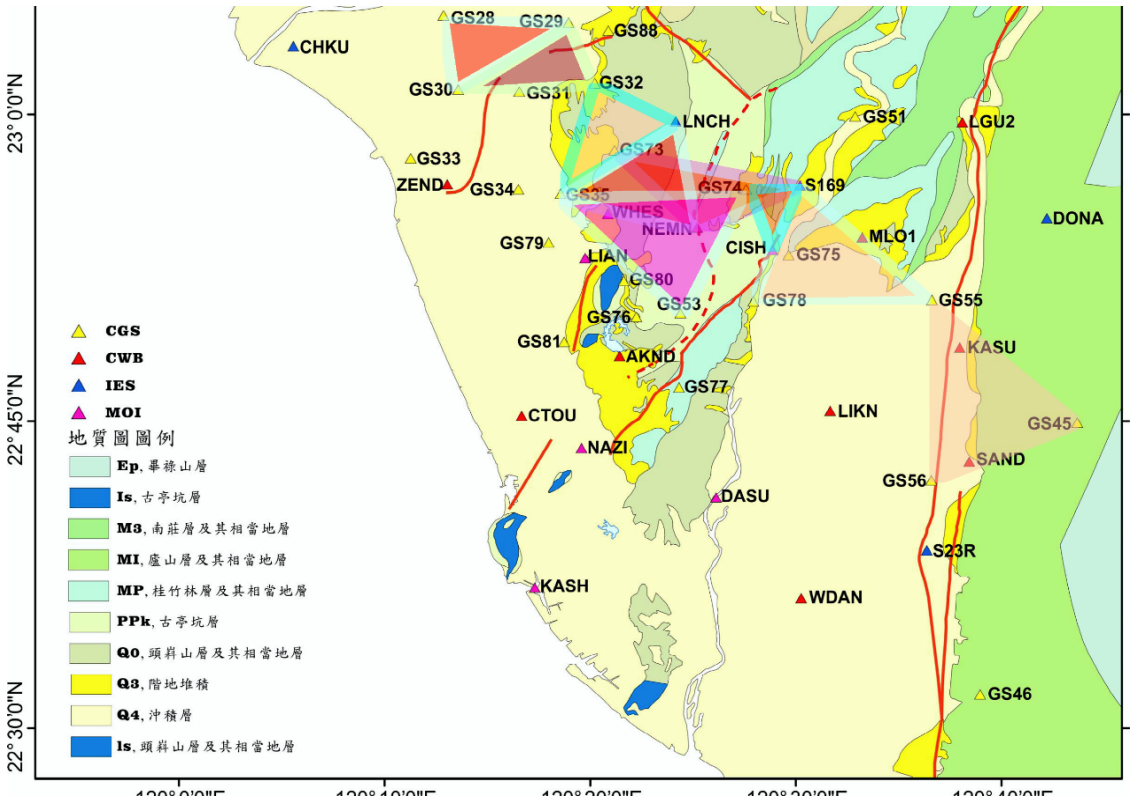


圖 4.2：顯示橫跨龍船斷層北段剖面的一條串連的三角網，其中每一三角網分成內外兩個顏色，內心的顏色代表震前的應變率，紅色之深淺代表壓縮應變率的大小，藍色之深淺代表舒張應變率的大小，外圍的顏色則顯示震後的年應變率。

若將北段測線的九個三角網的長期應變的時間曲線展示出來，如圖 4.3 所示，則可看出除了 CISH-GS74-S169 這個三角網的應變在時間上變動較大以外，其餘的三角網則在震前以穩定的速率壓縮應變累積，震後應變則為相當緩和。CISH-GS74-S169 這一個三角網位於龍船斷層與旗山斷層之間，有可能是因為這兩條不同斷層活動在同一地區中的互相作用，抑或是此區地殼較為破碎，而造成應變的幅度較大，而且有趣的是在美濃地震發生時，該三角網雖然很靠近震央，卻沒有明顯的同震應變。

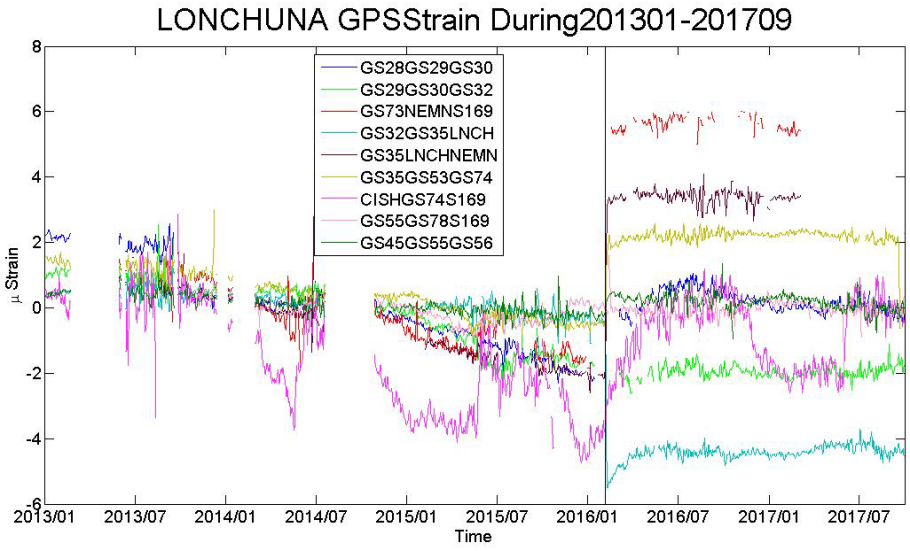


圖 4.3：北段測線的九個三角網的長期應變的時間序列。

圖 4.4 顯示北段測線靠西側的五個三角網的長期應變的時間，其中靠後甲里、新化斷層及龍船斷層的三個三角網在震前的年應變率(-2.81 ~ -1.08 μstrain/a) 都相當的快速，同震應變都往壓縮方向，震後的地殼應變就非常的緩和，很顯然這一區域在美濃地震前地殼層經快速的有應力累積的現象，地殼急速的被壓縮。而遠離斷層的 GS32-GS35-LNCH 的三角網在震前震後的應變都很緩和，各為 -0.275 μstrain/a 與 +0.247 μstrain/a，而同震應變則為-5.7 μstrain，地殼瞬間被壓縮了。

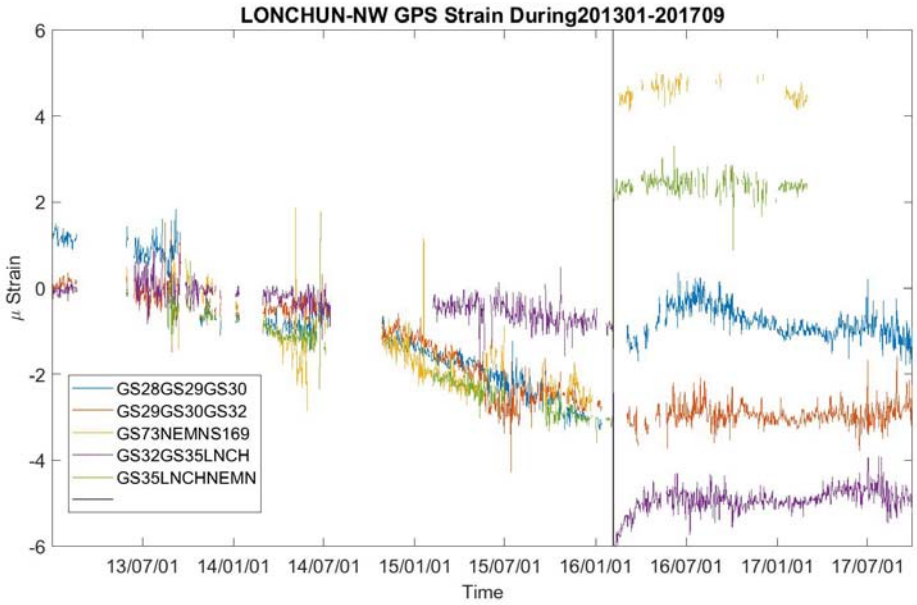


圖 4.4：北段剖面靠西側的五個三角網的長期應變的時間序列。

圖 4.5 顯示本區域各三角網的同震應變，其中 9 個具明顯的同震應變，6 個為舒張(藍色系列)同震，3 個為壓縮(紅色系列)同震，顏色越深表示應變越大。同震應變與斷層的同震變形有相同的意義，通常表示地殼在地震前的應力累積狀態已經接近岩石強度的的極限，地震發生時所產生的應力降或應力升與原來的累積應力總合會使得地殼產生較劇烈的變化，因此在長期地表應變的時間序列上會產生應變的跳動。由圖 4.5 中也可看出本研究區域的同震應變除了東西兩端各有一個三角網的舒張同震應變(+2.3 與 +3.0 μstrain)外，其餘(-5.7~ 7.3 μstrain)都集中在幾個活斷層所包圍的中央區域，而且東邊為舒張應變升，西邊為壓縮應變降，這表示這幾個斷層，包括後甲里、新化、左鎮、龍船和旗山斷層在過去數十年，甚至數百年來就有密切的互動關係，在這期間的地殼必須累積不等量的應力來達到此區域的地殼力學的平衡。2010 年 3 月 4 日的甲仙地震顯然並未釋放此一區域地殼所累積的應力，甚至有可能加速了此一區域的應力累積。在所顯示的同震應變三角網，只有兩個(GS34-GS35-GS79 與 GS79-GS80-GS81)在本研究中是屬於南部的測線，而且兩個都是屬於壓縮應變的同震。

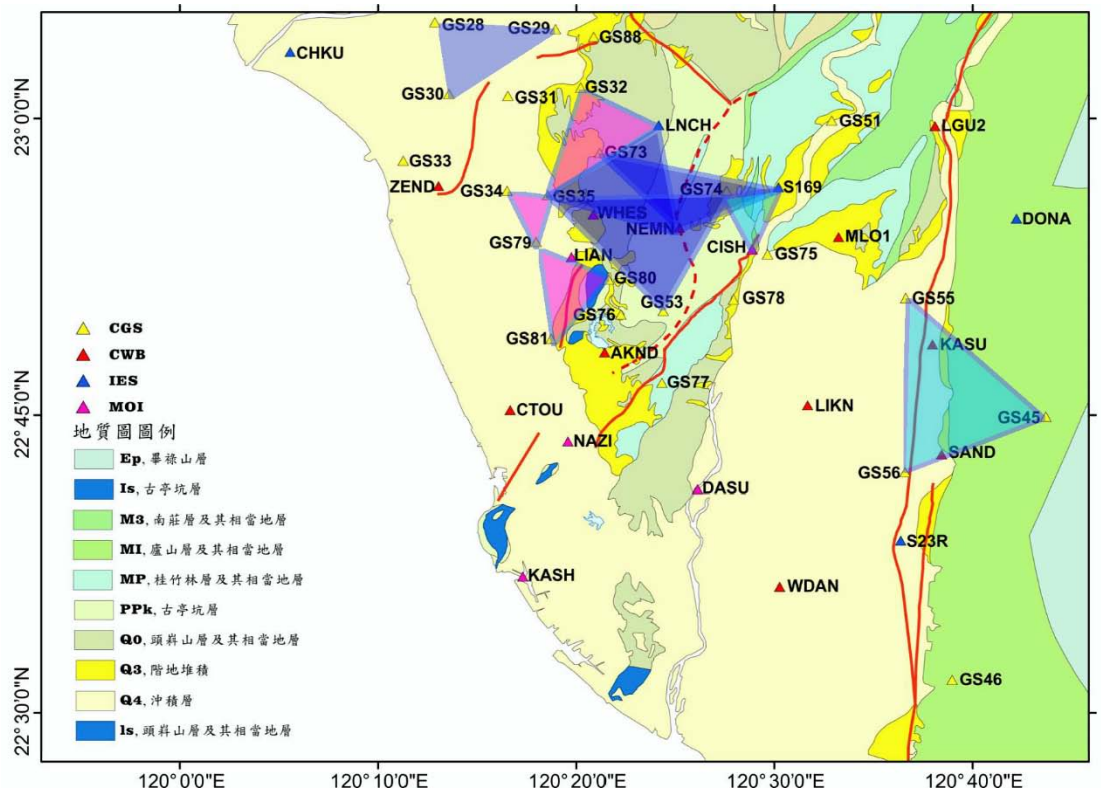


圖 4.5：本區域總計分析 18 個三角網，其中 9 個具明顯的同震應變，6 個為舒張(藍色系列)同震，3 個為壓縮(紅色系列)同震，顏色越深表示應變越大。

在南部測線中的三角網連線就顯得較為複雜，圖 4.6 顯示橫跨龍船斷層南段測線的一條串連的三角網，由圖 4.6 可看出地震前只有四個三角網顯示紅色(壓縮)的應變，而且都坐落在都在幾條斷層，包括橫跨小岡山、旗山及潮州斷層的區域附近。而在較南端高雄附近以及幾條斷層所包圍區域的南端開口區域顯示震前的微略伸張的應變，震後除了龍船斷層南向延伸區域由伸張轉壓縮外，其餘則傾向舒張變化。另外一個比較特殊的現象是在旗山斷層南端西側與龍船斷層往南延伸區域的兩個三角網 GS77-GS81-NAZI 與 AKND-CTOU-GS81 都由原來地震前緩和的舒張應變(+0.00 與 +0.03 μstrain/a)，在震後轉變成壓縮的應變(-1.23 與 -0.49 μstrain/a)，在四周都是由震前壓縮震後舒張的轉變，這反向變化代表此一區域壓縮的能量並非全部由熱能、動能和位能釋放掉了，有可能一部分往西南方轉移。而且從這一地區的應變時間序列(圖 4.7)顯示，在研究的時段內只有在 2014/10~2015/05 間比較穩定，其餘時段有相當大的應變變化，幅度可高達 4.0 μstrain。

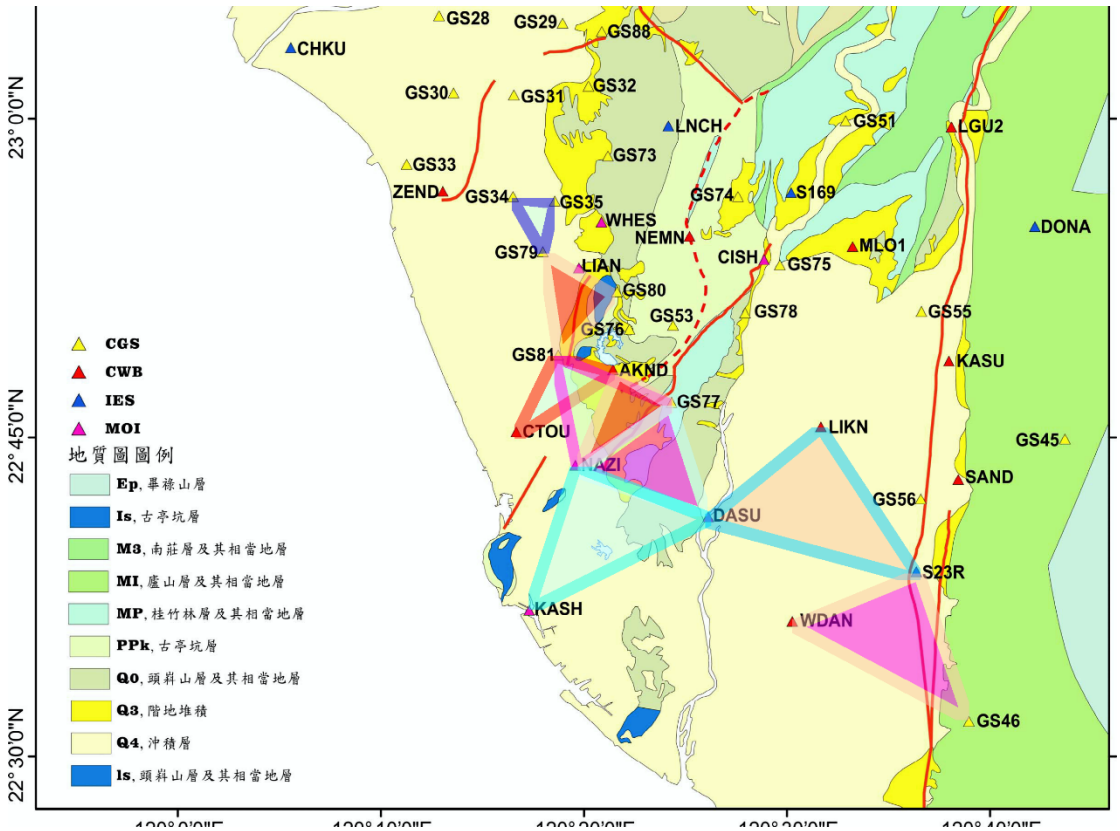


圖 4.6：顯示橫跨龍船斷層南段剖面的一條串連的三角網。

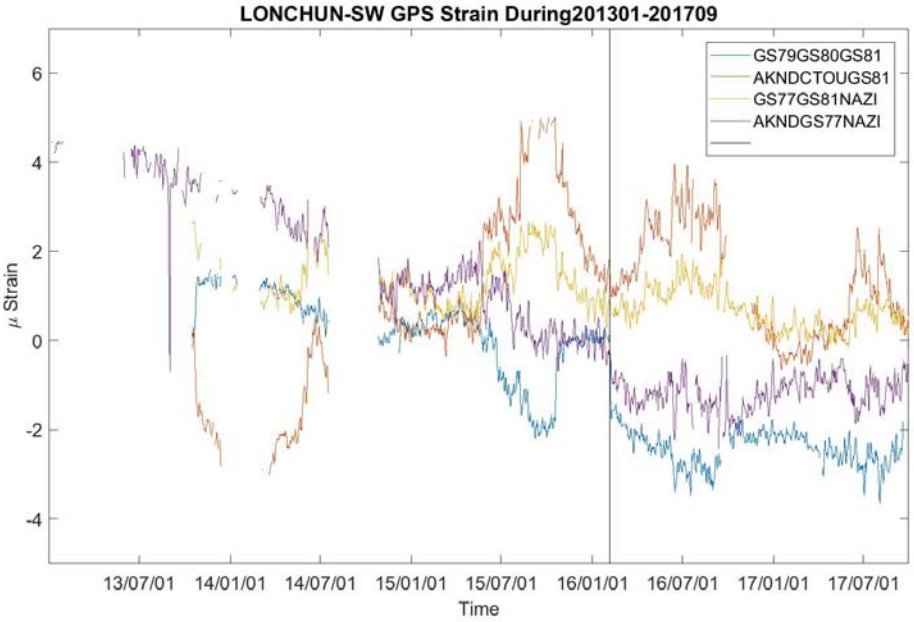


圖 4.7：在龍船斷層南段以西的的四個三角網時間序列顯示變化較大，顯示此一地區比較不穩定。

圖 4.8~圖 4.25 顯示 18 個三角網的資料，包括 2016/02/06 美濃地震前與地震後的個別的應變趨勢線，以供參考，地震前的資料用藍色點表示，地震後則用紅色點以示區別。

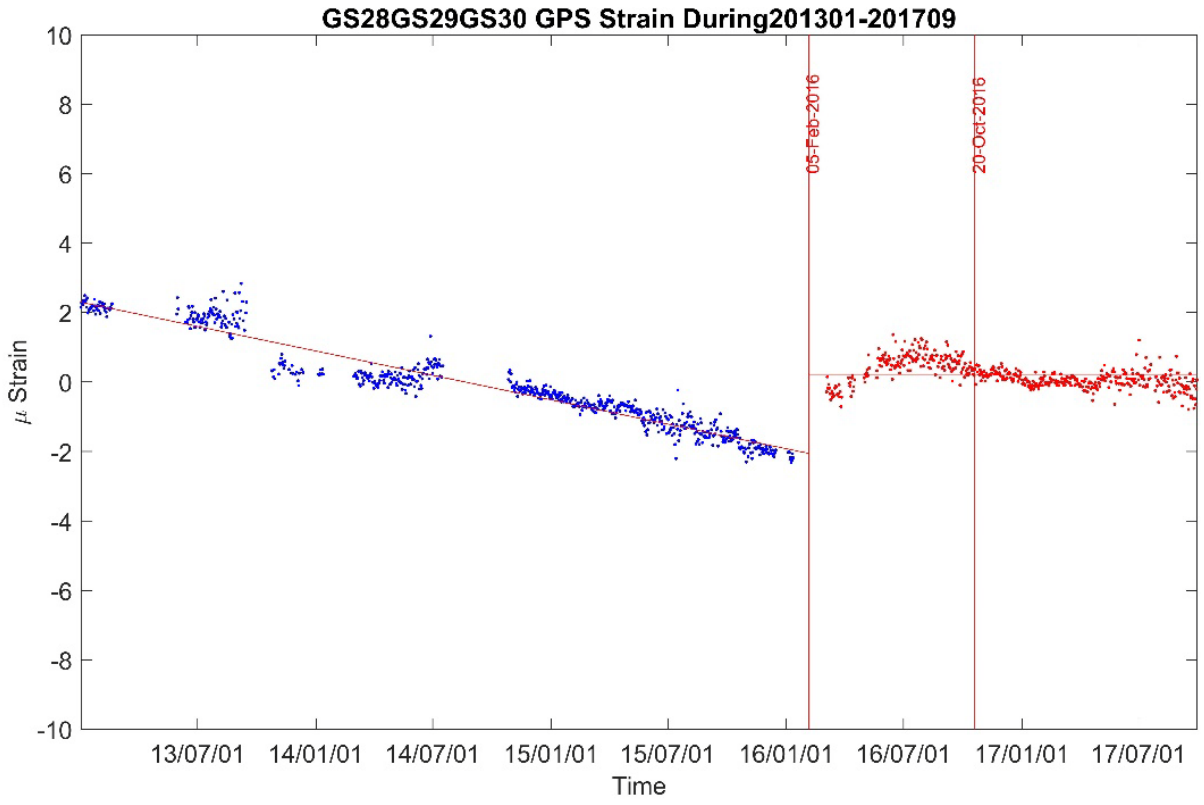


圖 4.8：三角網 GS28-GS29-GS30 的應變時間序列，藍色代表美濃地震前，紅色則代表地震後的應變資料。

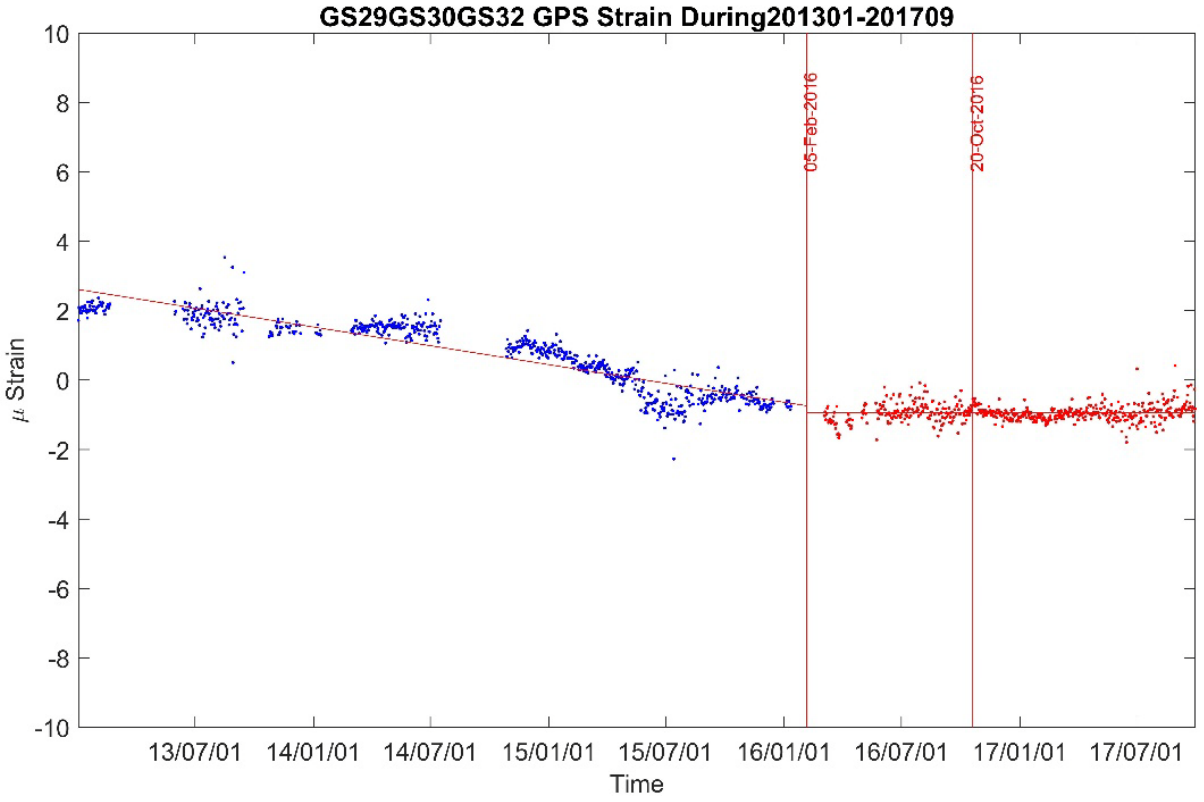


圖 4.9：三角網 GS29-GS30-GS32 的應變時間序列，藍色代表美濃地震前，紅色則代表地震後的應變資料。

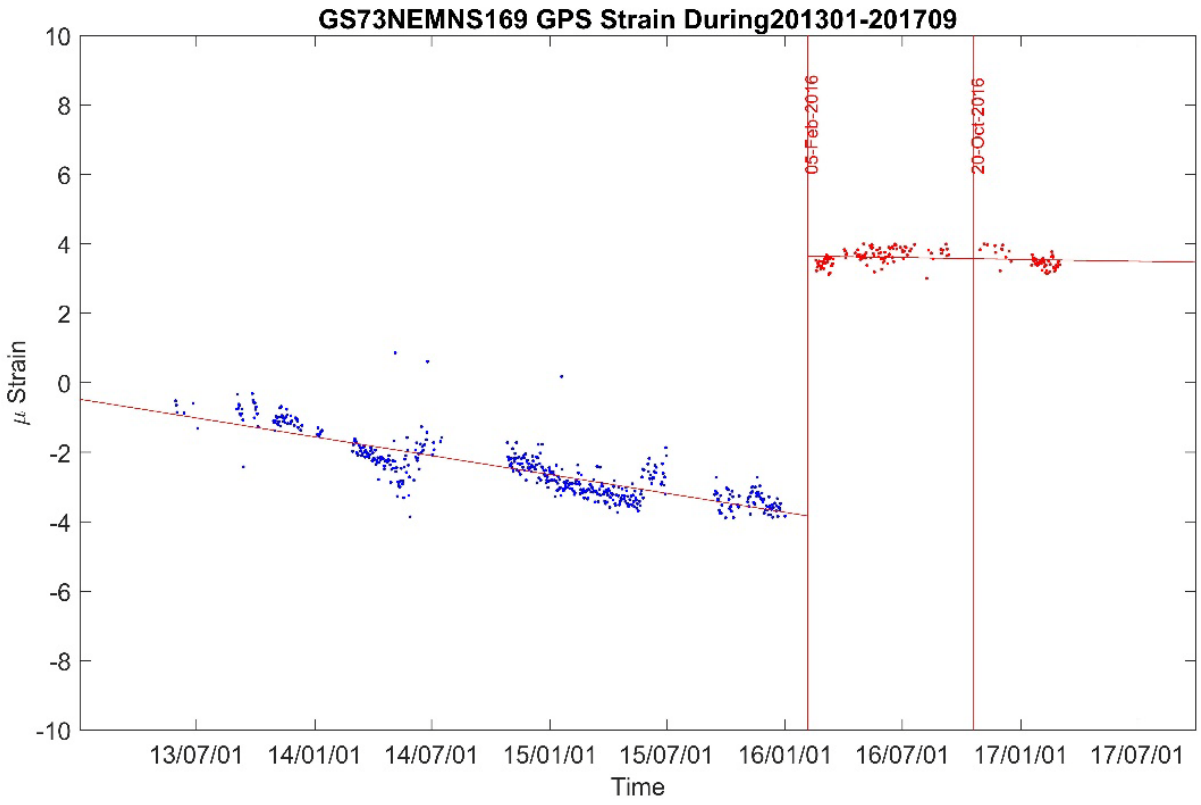


圖 4.10：三角網 GS73-NEMN-S169 的應變時間序列，藍色代表美濃地震前，紅色則代表地震後的應變資料。

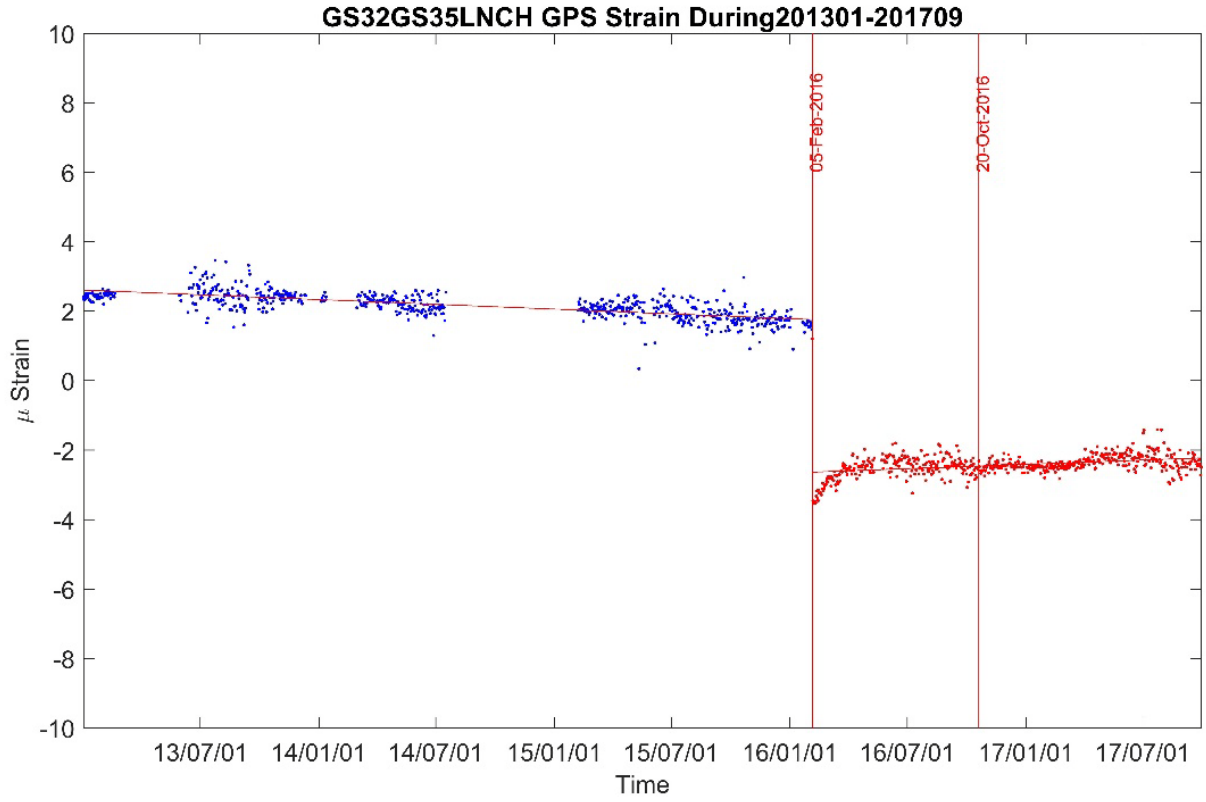


圖 4.11：三角網 GS32-GS35-LNCH 的應變時間序列，藍色代表美濃地震前，紅色則代表地震後的應變資料。

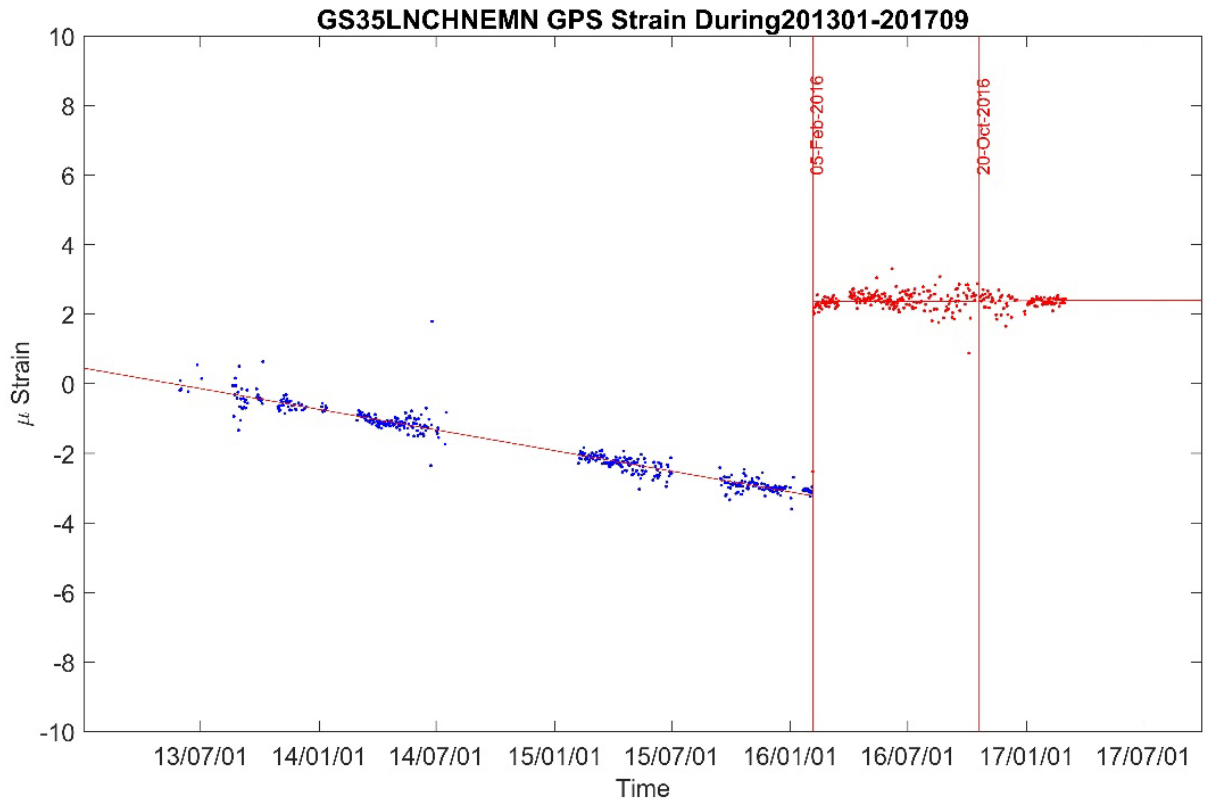


圖 4.12：三角網 GS35-LNCH-NEMN 的應變時間序列，藍色代表美濃地震前，紅色則代表地震後的應變資料。

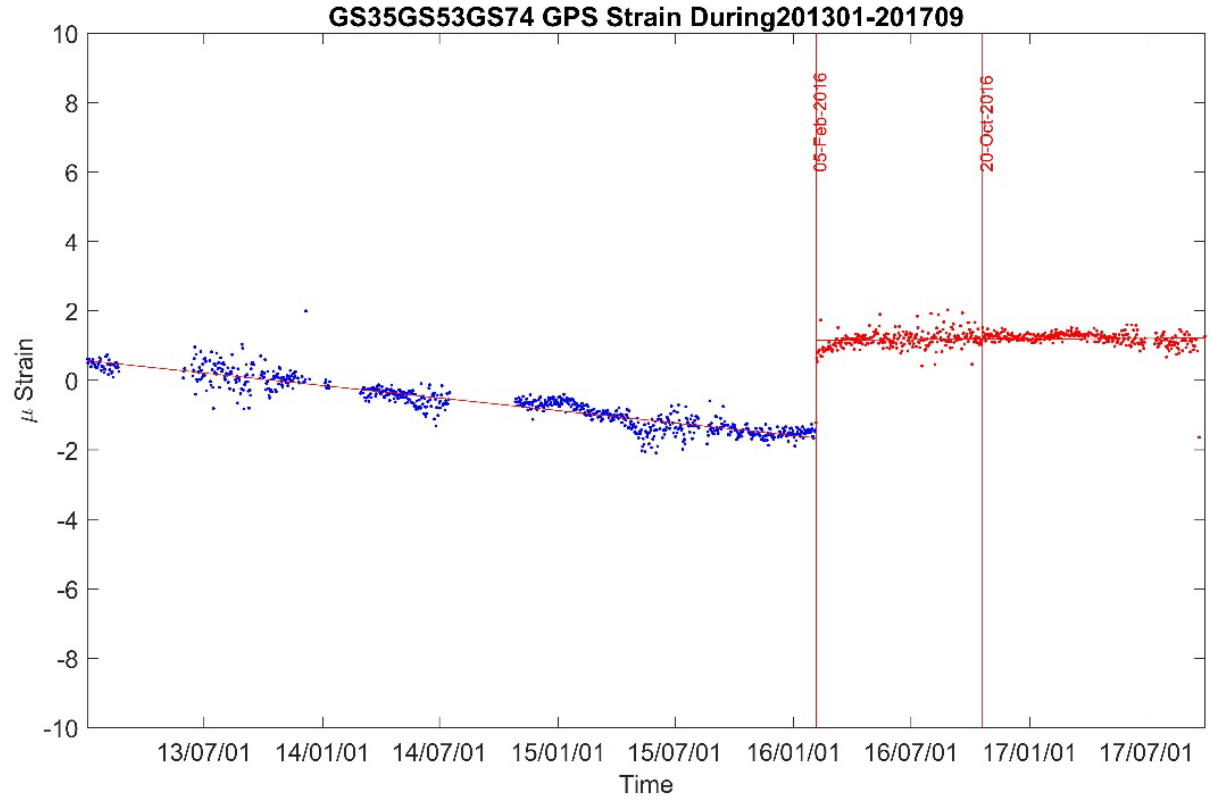


圖 4.13：三角網 GS35-GS53-GS74 的應變時間序列，藍色代表美濃地震前，紅色則代表地震後的應變資料。

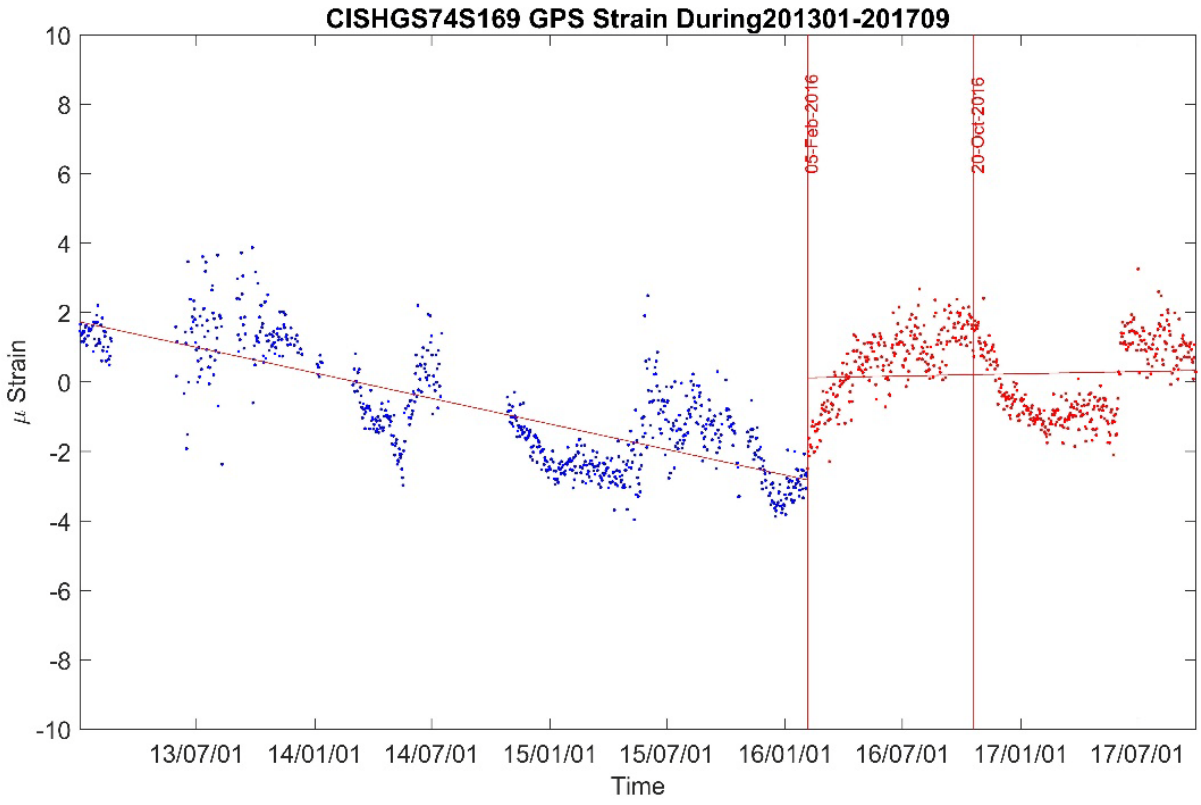


圖 4.14：三角網 CISH-GS74-S169 的應變時間序列，藍色代表美濃地震前，紅色則代表地震後的應變資料。

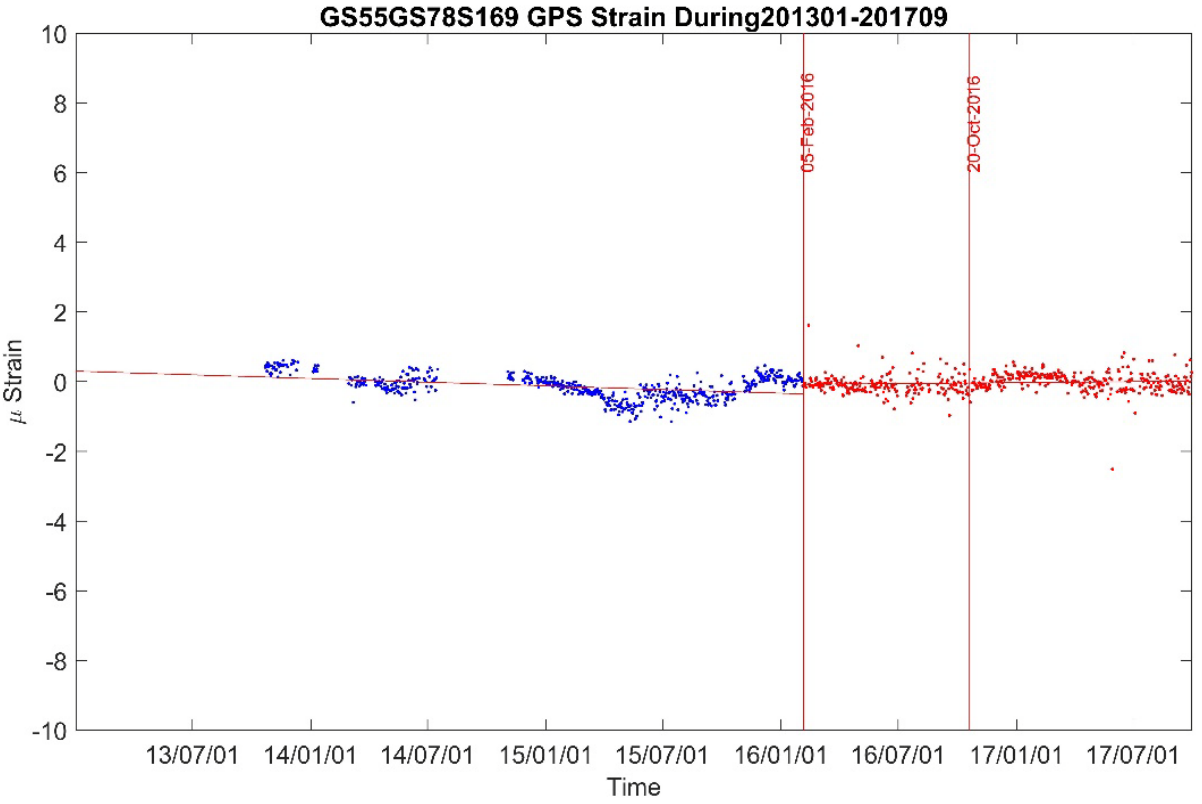


圖 4.15：三角網 GS55-GS78-S169 的應變時間序列，藍色代表美濃地震前，紅色則代表地震後的應變資料。

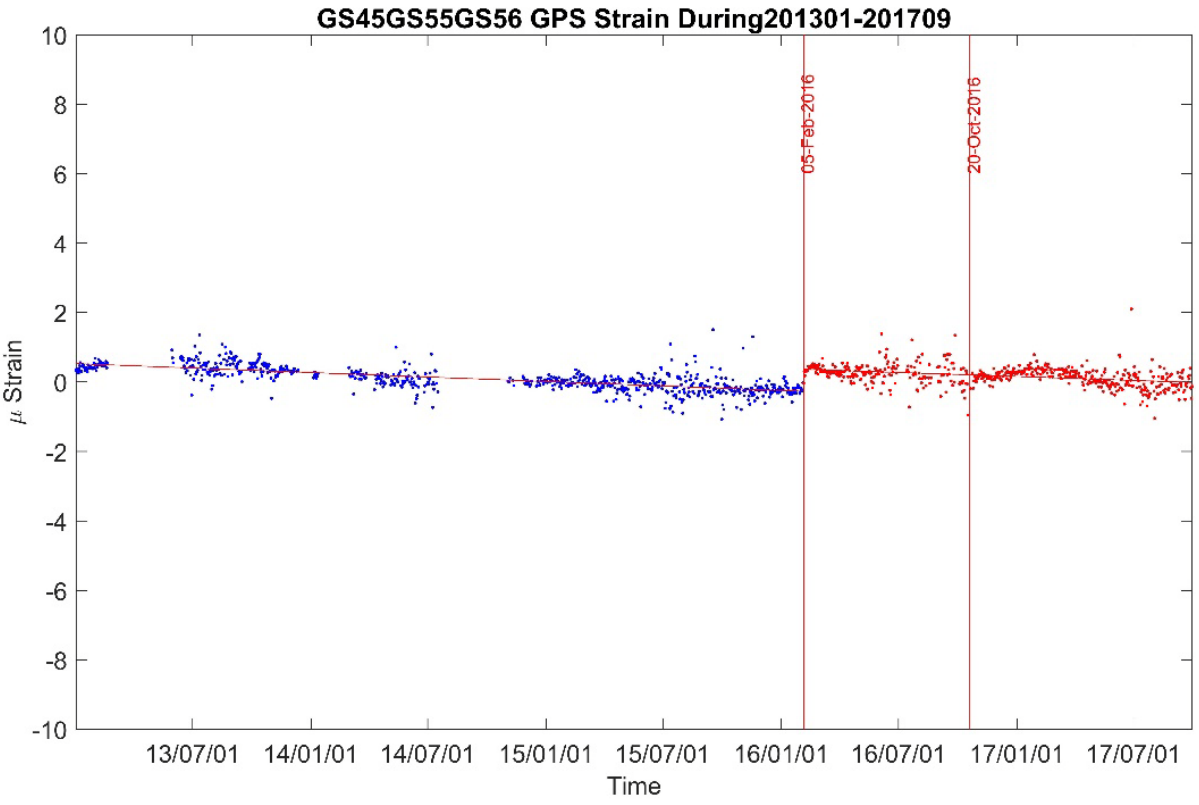


圖 4.16：三角網 GS45-GS55-GS56 的應變時間序列，藍色代表美濃地震前，紅色則代表地震後的應變資料。

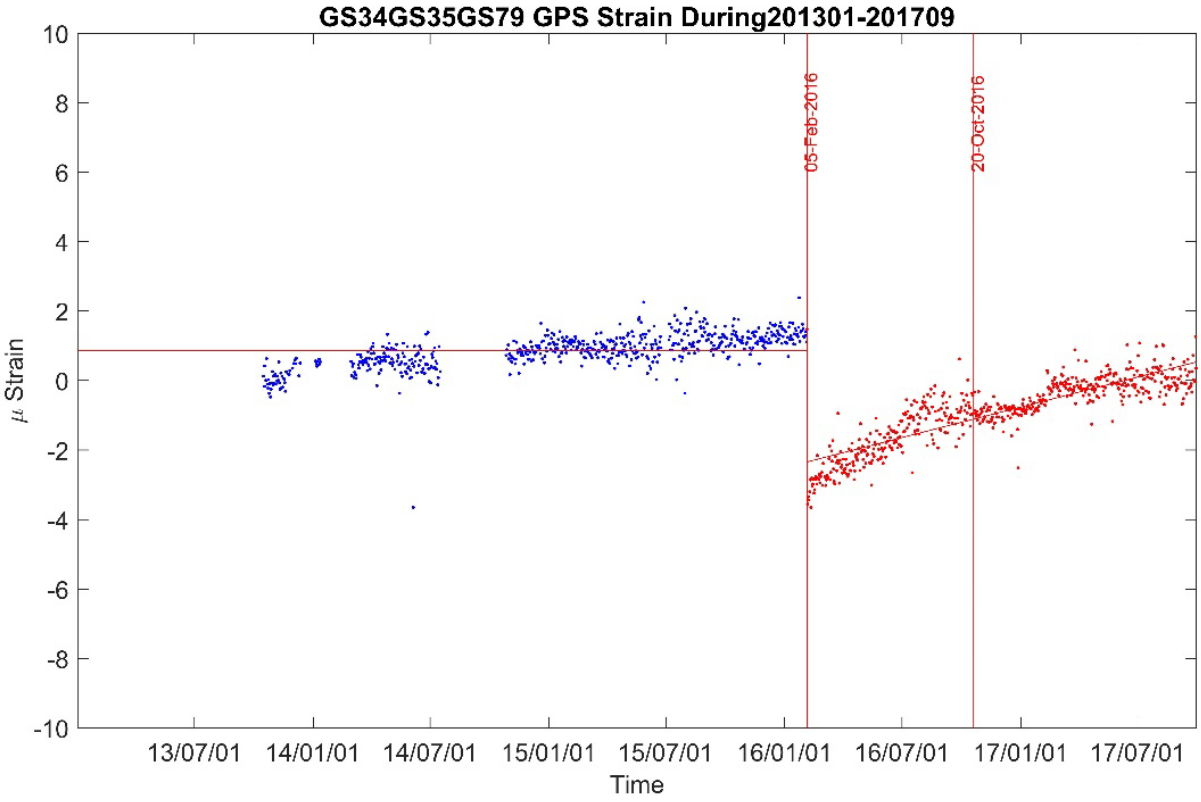


圖 4.17：三角網 GS34-GS35-GS79 的應變時間序列，藍色代表美濃地震前，紅色則代表地震後的應變資料。

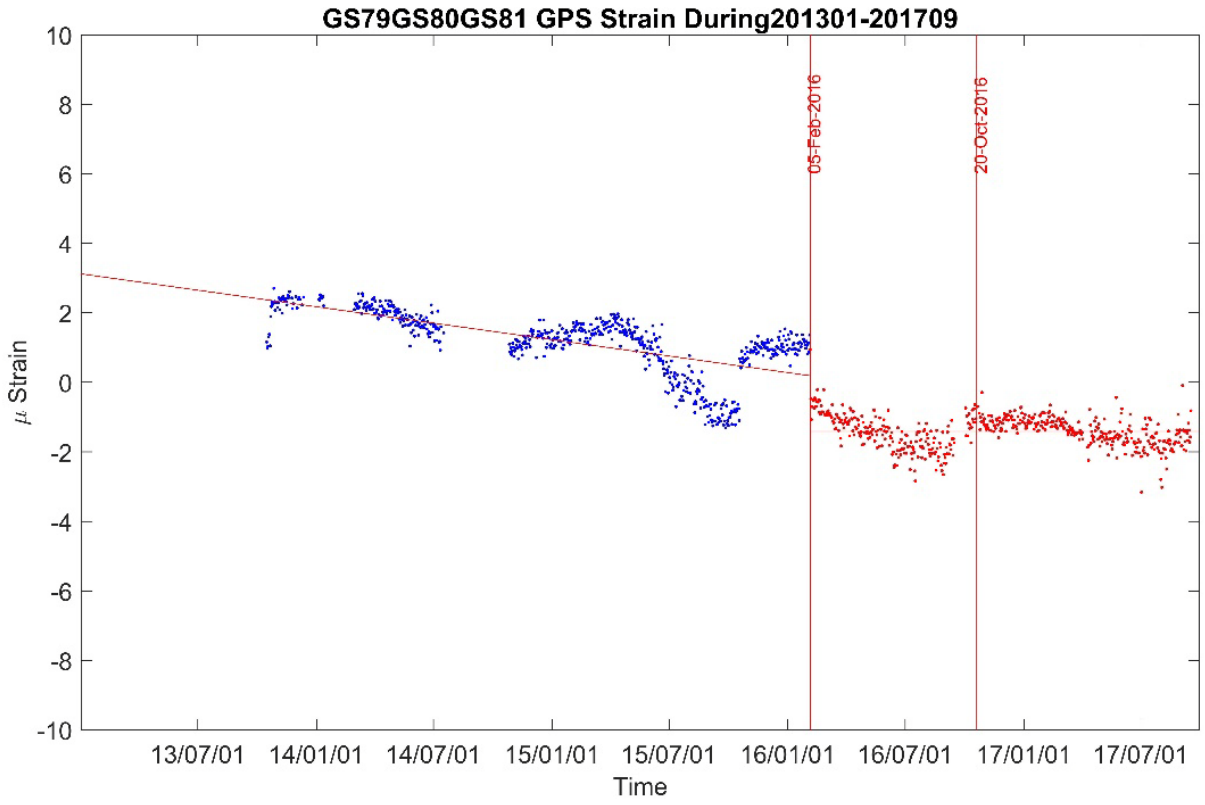


圖 4.18：三角網 GS79-GS80-GS81 的應變時間序列，藍色代表美濃地震前，紅色則代表地震後的應變資料。

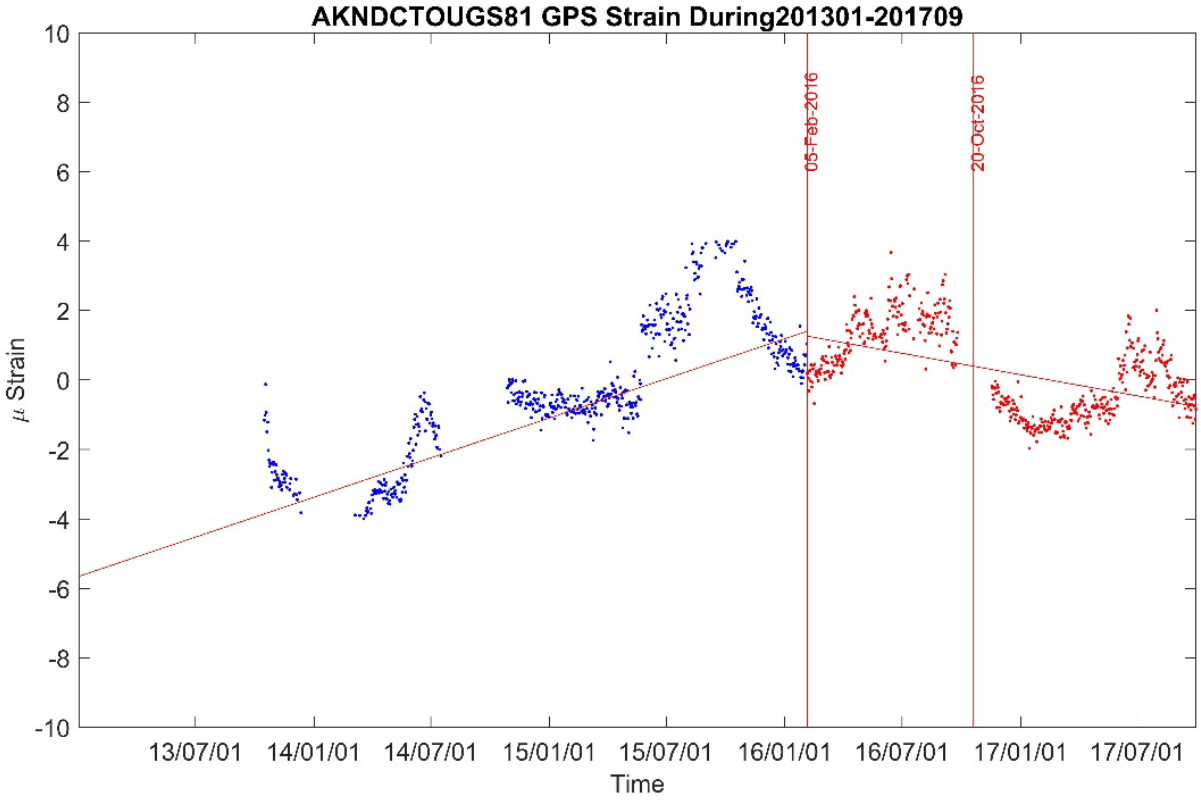


圖 4.19：三角網 AKND-CTOU-GS81 的應變時間序列，藍色代表美濃地震前，紅色則代表地震後的應變資料。

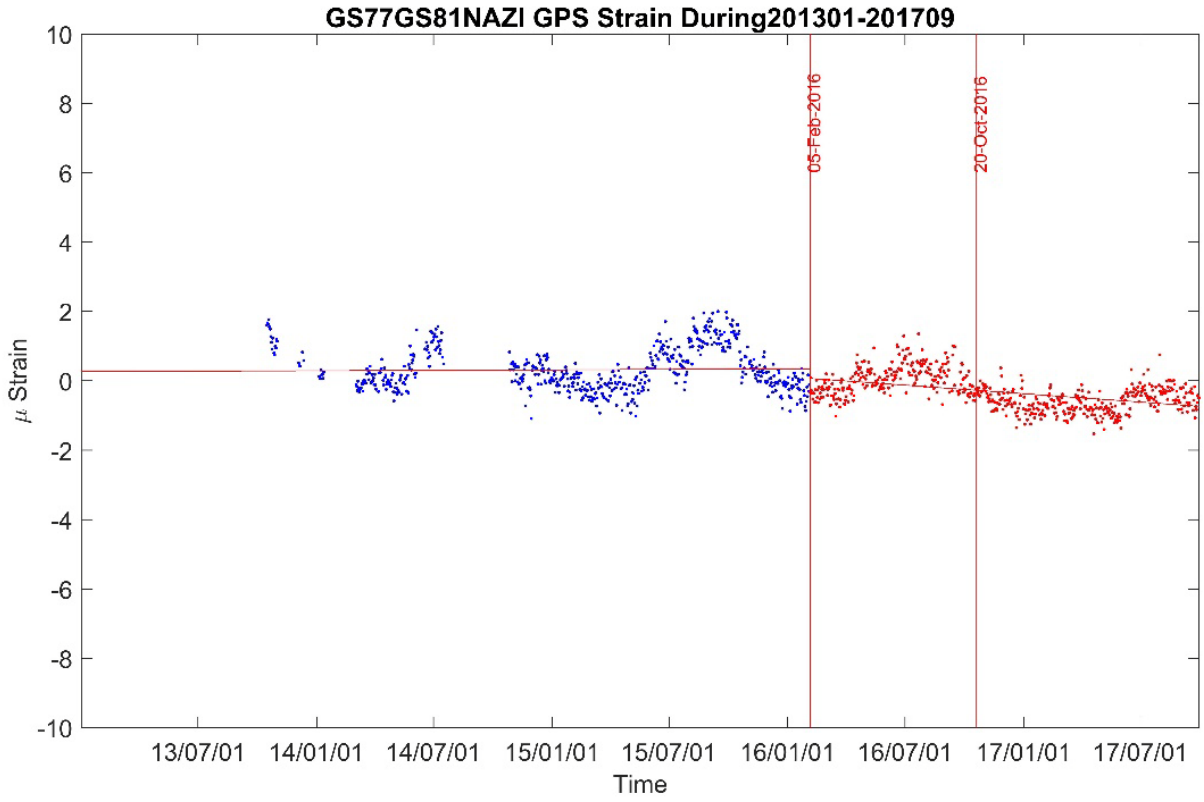


圖 4.20：三角網 GS77-GS81-NAZI 的應變時間序列，藍色代表美濃地震前，紅色則代表地震後的應變資料。

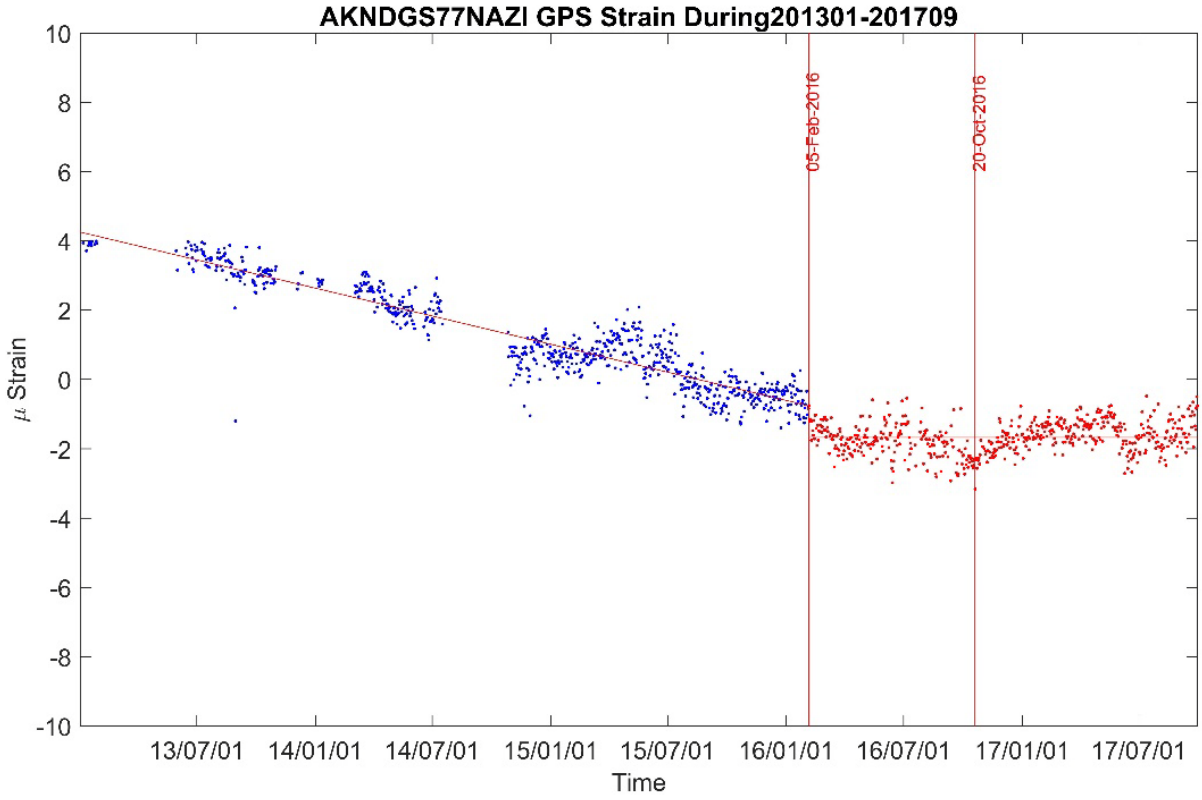


圖 4.21：三角網 AKND-GS77-NAZI 的應變時間序列，藍色代表美濃地震前，紅色則代表地震後的應變資料。

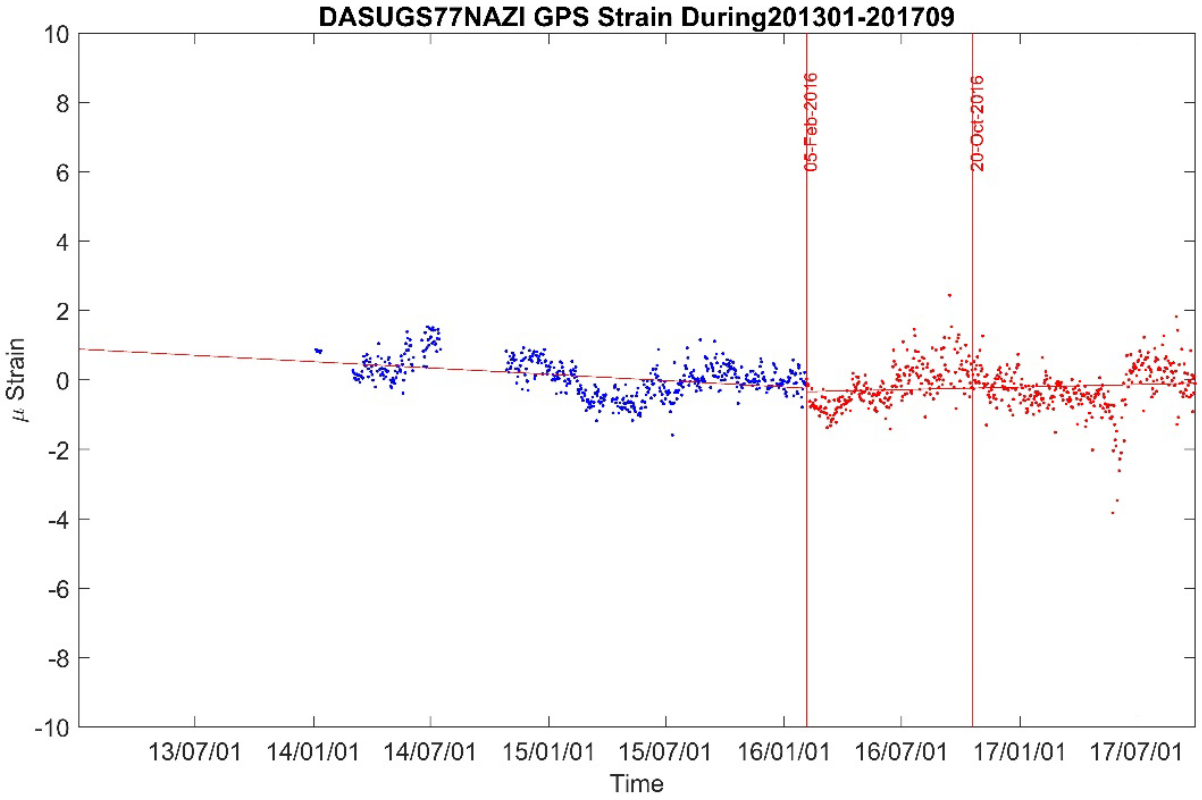


圖 4.22：三角網 DASU-GS77-NAZI 的應變時間序列，藍色代表美濃地震前，紅色則代表地震後的應變資料。

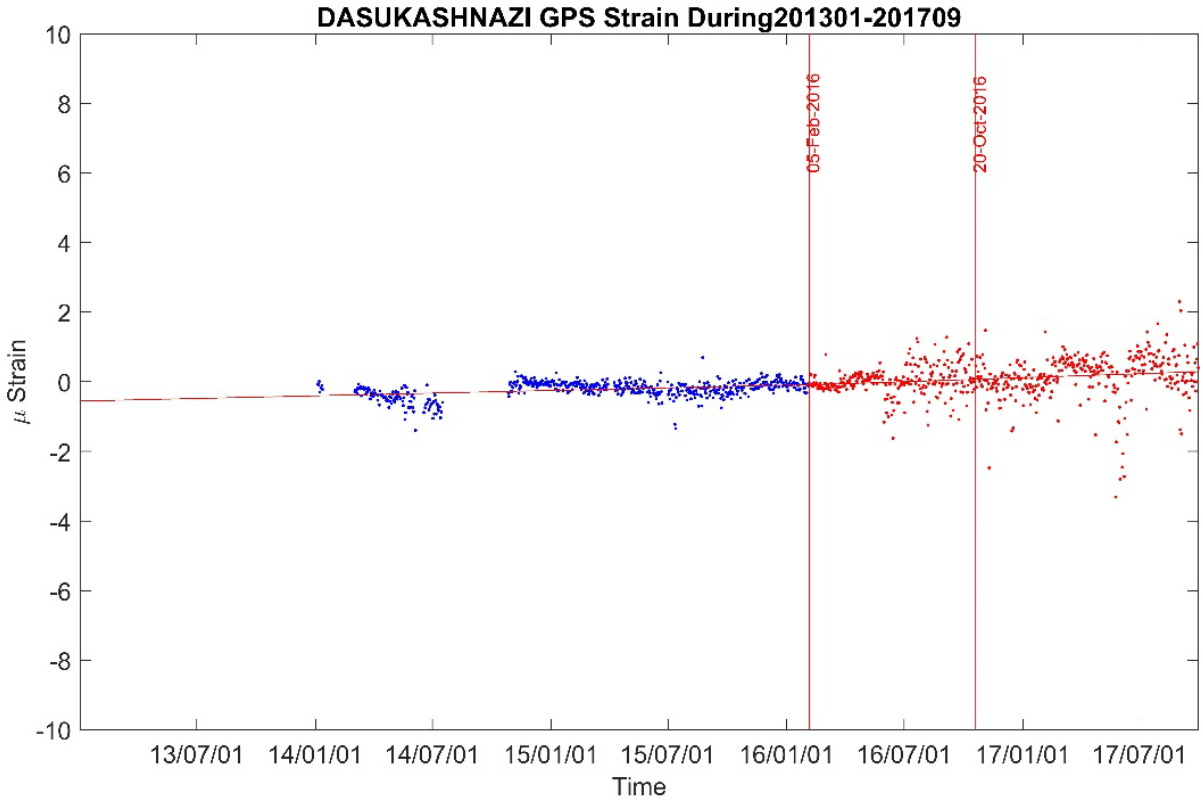


圖 4.23：三角網 DASU-KASH-NAZI 的應變時間序列，藍色代表美濃地震前，紅色則代表地震後的應變資料。

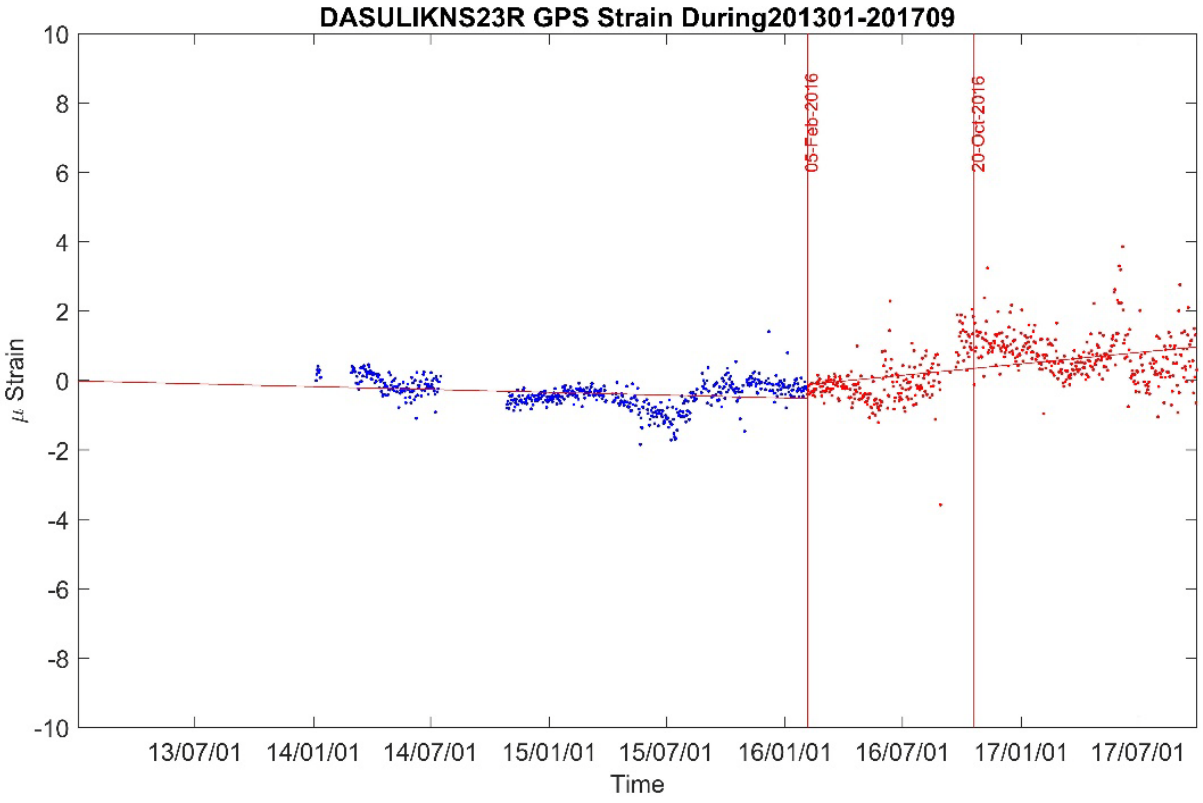


圖 4.24：三角網 DASU-LIKN-S23R 的應變時間序列，藍色代表美濃地震前，紅色則代表地震後的應變資料。

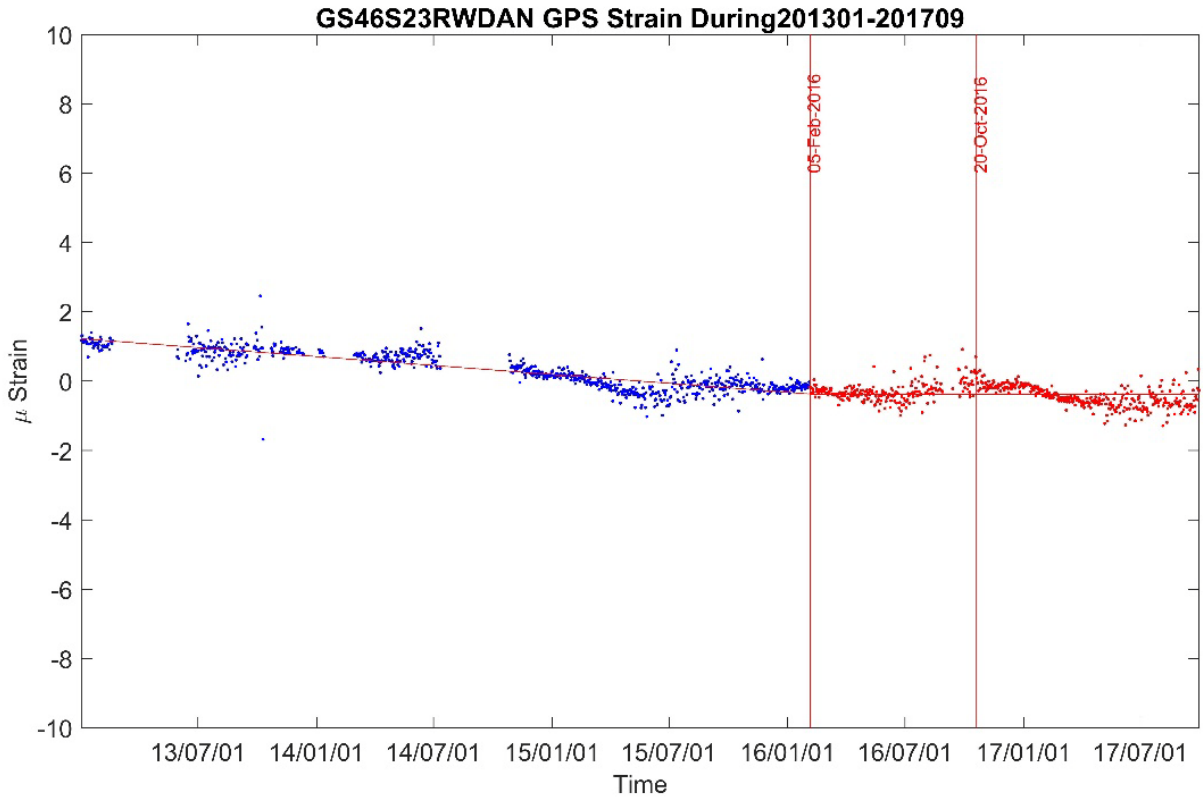


圖 4.25：三角網 GS46-S23R-WDAN 的應變時間序列，藍色代表美濃地震前，紅色則代表地震後的應變資料。

第五章、結論與建議

井下應變儀部分，利用幾年來多次較大氣壓變化時的資料，建立氣壓對井下應變儀資料的影響模式並作修正，以建立移除環境影響因素後的殘餘地殼應變時間序列，作為尋找與大地震相關的應變"異常"。2016 年 10 月至 2017 年 9 月期間，針對規模 5 以上的地震，應變異常事件較明顯的有 1 個事件，有記錄到地震前應變異常的井下應變儀測網為南部網曾文北站記錄到 1 個應變異常事件為 2017/02/11 高雄市近海地震。而在井下應變儀應變異常判釋統計方面，分析至 2017 年 9 月為止,檢視井下應變儀含有前兆訊號並成功對應地震的機率在南部網和北部網分別為：78.6%與 77.8%；而有前兆訊號卻沒有對應地震的誤判機率分別為：21.4%與 22.2%；地震前沒有前兆訊號的機率為：53.3%與 61.5%。

從這一些龍船斷層附近的 GPS 三角網的應變分析，我們可以得到下面幾點結論:

1. 龍船斷層附近的 GPS 三角網的應變分布與龍船斷層有相當密切的關係，在南北段的應變累積速率明顯的比中段來的快，近龍船斷層的累積速率比較遠處來得快，這表示在美濃地震前所累積的應力大部分都已釋放了。。
2. 整個研究區域在美濃地震之前，除了少數幾個靠西南部的三角網之外，其餘地區都以顯著且穩定的壓縮應變在累積應力中，而在地震之後，大部分的應變累積速率趨於緩和，由快速壓縮應變轉成較慢的壓縮應變，或甚轉成舒張應變，這是發生在旗山斷層南端西側與龍船斷層往南延伸區域的兩個三角網 GS77-GS81-NAZI 與 AKND-CTOU-GS81，都由原來地震前緩和的舒張應變(+0.00 與 +0.03 μstrain/a)，在震後轉變成壓縮且較快速的應變(-1.23 與 -0.49 μstrain/a)。在四周都是壓縮應變累積轉舒張的區域，這種反向變化代表此一區域壓縮的能量並非全部由熱能、動能和位能釋放掉了，而有可能一部分能量往西南方轉移。
3. 此一區域的應變累積，不管在美濃地震前的快速應變累積，或是在美濃地震後的緩和應變的舒張，在大部分區域都以穩定的累積速率進行，這表示此斷層受大區域穩定地殼應力場的長期作用力之影響。但有兩個區域在地震前後都顯示不穩定的變化，其幅度可高達 4.0 μstrain。這兩個區域一個坐落在龍船斷層的北端，即是龍船斷層與旗山斷層所夾住的狹長區域；另一個區域坐落在龍船斷層的往南延伸，旗山斷層南端的區域，應變累積起伏較大的原因，有可能是在斷層末梢，或是幾條非平行斷層間的平衡作用下的結果。至於如此高的應變率是否真正代表地殼內部的應力累積，還是這些地區的地殼較軟弱，或是較脆性，亦或是地殼已經破裂了，在無其他佐證之下，無法做正確的判斷。
4. 本區域在地震前壓縮應變累積速率最快的 6 個三角網中，有 5 個三角網是集中在後甲里斷層、新化斷層、左鎮斷層與龍船斷層所包圍成的 n 形封閉區域，在幾條斷層互相擠壓的影響，地殼快速的累積擠壓的應力，這個區域性的地殼應力都集中在這由斷層所包圍的半封閉區域，直至美濃地震的發生才將這些應力釋放出來，部分的應力由南端的開放口釋放出去。美濃地震以後，這 6 個三角網的應變幾乎都在 0.13 μstrain/a 以下。

由這次利用多年來 GPS 固定站的資料來分析美濃斷層附近地殼的應變累積的時序，可以看到地殼在長期應力壓縮所累積的能量，如何在一個較大的地震中，幾乎完全的釋放出來。在分析中，也看到了斷層的幾何形狀也會影響到應變累積的穩定性與集中性。在應變的時序的分析中，有時也要非常的小心，一個三角網所顯現出來的地表應變，並不一定是代表三角網中應力的累積，假如三角網中的地殼已經破裂了，在 GPS 應變的分析中，也會顯示相同的應變，所以 GPS 地表應變無法正確的判斷該應變是地殼累積應力所造成，還是地殼已經破裂了，所看到的應變是因為地殼破裂能量已經釋放了的結果，所以必須要用其它的觀測資料來做佐證，或是像這一次的分析中，因為地震的發生，震後應變幾乎完全歸零，才知道前面的應變累積是真正的

應力累積在受擠壓的地殼中。

在類似的觀測法中，封閉水層的地下水壓或水位觀測方法，以及井下應變儀的觀測，都是很好的共站觀測之方法。地下水的觀測也有同樣的問題，要考慮封閉水層是否未完全封閉，或是已經有裂隙缺口，造成資料較大的雜訊。井下應變儀因為觀測的範圍只有數百平方公分，沒有破裂的問題，所看到的應變應該就是該數百平方公分的真正變形量，但在複雜的地殼中，數百平方公分的應變是否可以代表數十或數百平方公里的應變量，也是在解釋時的一個變數。因此，在封閉地下水層難以找到，而且雜訊較高，井下應變儀裝設造價高，無法普遍設置的情況下，多功能且已經普遍設置的 GPS 連續追蹤站資料反而是很好的地殼應變的觀測方法。

參考文獻

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

Dobrovolsky, I. P., Zubkov, S. I., & Miachkin, V. I. (1979) Estimation of the size of earthquake preparation zones. Pure and Applied Geophysics, 117(5), 1025-1044.

Feng, Z.-Y. (2012) The seismic signatures of the surge wave from the 2009 Xiaolin landslide-dam breach in Taiwan. Hydrological Processes, 26(9), 1342-1351, doi: 10.1002/hyp.8239.

Gladwin, M.T. (1974) Ultrasonic stress monitoring in active sites: Observation of the time dependence of stress relief mechanisms in mining pillars, Eos Trans. AGU, 55, 1192.

Gladwin, M.T. (1977) Simultaneous monitoring of stress and strain in massive rock. Pageoph, 115, 267-274.

Gladwin, M.T. (1982) Ultrasonic stress monitoring in underground mining. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 19, 221-228.

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.

Haubrich, R. A. (1965) Earth noise, 5 to 500 millicycles per second: 1. Spectral stationarity, normality, and nonlinearity. Journal of Geophysical Research, 70(6), 1415-1427.

Haubrich, R. A., & MacKenzie, G. S. (1965) Earth noise, 5 to 500 millicycles per second: 2. Reaction of the Earth to oceans and atmosphere. Journal of Geophysical Research, 70(6), 1429-1440.

Hsu, Y. J., Y. S. Chang, C. C. Liu, H. M. Lee, A. T. Linde, S. I. Sacks, G. Kitagawa, and Y. G. Chen (2015) Revisiting borehole strain, typhoons, and slow earthquakes using quantitative estimates of precipitation induced strain changes, J. Geophys. Res., 120, 4556–4571.

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, M_W 7.3 Landers, California Earthquake. Bull. Seismol. Soc. Am., 84, 799-805.

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.

Le Provost, C., Genco, M. L., & Lyard, F. (1995) Modeling and predicting tides over the World Ocean. Quantitative skill assessment for coastal ocean models, 175-201.

Liu C.C., Linde, A.T., Sacks, I.S. (2009) Slow earthquakes triggered by typhoons. Nature, 459, 11, 833-836.

Munk, W. H., & Cartwright, D. E. (1966) Tidal spectroscopy and prediction. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 259(1105), 533-581.

Roeloffs, E.A. (2005) Coupling of Hydrologic Effects to Borehole Strain Data. PBO.

Roeloffs, E.A. (2010) Tidal calibration of Plate Boundary Observatory borehole strainmeters: Roles of vertical and shear coupling. J. Geophys. Res., 115, B06405.

Rossiter, J. R. (1972). Sea-level observations and their secular variation. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 272(1221), 131-139.

Scherer, G. W. (1990) Theory of drying. Journal of the American Ceramic Society, 73(1), 3-14.

Schureman, P. (1941) Manual of tide observations (Vol. 4). US Government Printing Office.

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.

Tamura, M., Nakazawa, Y., Shiomi, D., Nozawa, K., Hosokoshi, Y., Ishikawa, M., ... & Kinoshita, M. (1991) Bulk ferromagnetism in the β-phase crystal of the p-nitrophenyl nitronyl nitroxide radical. Chemical Physics Letters, 186(4), 401-404.

Zadro, M., Plenizio, E., Ebblin, C., and Chiaruttini, C. (1988) Influence of groundwater table level variations and of rainfall on tilting in the Friuli area, NE, Italy. Acta Geophysica Polonica, 35, 323-338.

胡植慶、劉啟清、饒瑞鈞（2011）斷層活動性觀測研究第二階段：斷層監測與潛勢分析研究(3/4)。經濟部中央地質調查所報告 100-07 號，共 265 頁。

陳致言（2007）臺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。