

國立臺灣大學理學院地質科學研究所

碩士論文

Department of Geosciences

College of Science

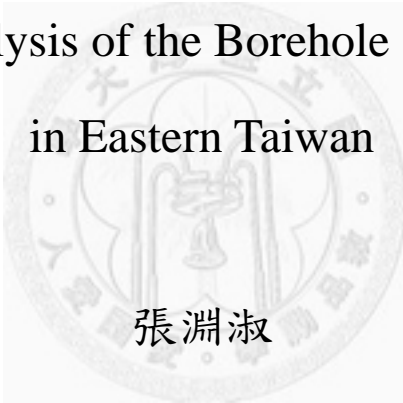
National Taiwan University

Master Thesis

臺灣東部井下應變儀陣列觀測資料處理與初步分析

Preliminary Analysis of the Borehole Strainmeter Data

in Eastern Taiwan



張淵淑

Yuan-Shu Chang

指導教授：許雅儒 博士

陳于高 博士

Advisors: Ya-Ju Hsu, Ph.D.

Yue-Gau Chen, Ph.D.

中華民國 101 年 7 月

July, 2012

國立臺灣大學碩士學位論文  
口試委員會審定書

臺灣東部井下應變儀陣列觀測資料處理與初步分析  
Preliminary Analysis of the Borehole Strainmeter Data  
in Eastern Taiwan

本論文係 張淵淑 君 (R98224108) 在國立臺灣大學地質科學學系、所完成之碩士學位論文，於民國一百零一年六月五日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明

口試委員：

陳子高

(簽名)

許雅儒

(指導教授)

(簽名)

胡祖慶

(指導教授)

劉路清

張子毅

## 誌謝

花了三年時間，我終於完成碩士論文了！第一位要感謝的就是雅儒老師，謝謝您從我大三當暑期生以來用心的指導，提供大量的協助和資源，引領我一步步完成碩士論文。在完成這本論文的同時，回首以前經歷的挫折，感覺真如您所說這只是個過程，學到東西才是重點。再來要感謝的就是陳于高老師，謝謝老師在這三年來的支持鼓勵，同時我也從您那學到不少待人與做事的道理，對我而言受用無窮。能當兩位老師的學生真的是一件很幸運很開心的事情，更感謝兩位老師提供資源與幫助，讓我能參與 AGU Fall Meeting（第一次搭長程飛機出國就是獻給這一年一度的地科界大拜拜了！）、AOGS、WPGM、地質地物年會及許多系上的野外，有這難得的機會和不同領域的人腦力激盪。能完成這本論文要特別感謝口試委員：劉啟清老師、胡植慶老師和張午龍老師，謝謝老師們撥空審視論文內容，給予許多寶貴建議，讓論文內容更臻完整。感謝忻旻學長，提供井下應變儀的可用資料與討論問題，讓我在這個領域打滾時少花很多時間。Also, I'd like to thank Alan T. Linde, thank you for offering kindly help and giving suggestion of my thesis.

回首碩士班的生活都是充滿歡笑，這都要感謝實驗室的學長姐學弟妹：蛋哥、小眼、韶、殷田、阿和、鴉哥、林蔭、巫茲、珀儂、采倫、緯豪、嘉俞、怡偉、繹如、小希、姊妹、張冕和徐志煌，以及兩位可愛的助理琬鈐和小飛，其中特別感謝怡偉和嘉俞，在我初來乍到地質系時給我很多的關心與幫忙。還有全變 311 實驗室的各位：信樺、VVN、kukuli、嘉儀、翰方與閔涵，有你們就有很多歡樂！來地質系後認識的好友們也是我歡笑的來源：小黃、劭璿、尚庭、惠雯和布魯斯實驗室的各位，謝謝你們！

感謝在我到台大後仍持續關心我的老師們：張午龍老師、馬國鳳老師、顏宏元老師、郭本垣老師和林殿順老師，謝謝您們一路來對我的照顧。特別感謝張午龍老師，每次的長談都讓我收穫不少。冷彥學長，謝謝你平常跟我在學術問題與生活上的討論及關心。中央地科的好友們：小喵、斐文、阿梅、kola、小騷、小肥妞、小粽、石頭、若呆、海龜、糟糕人、洪搞、紀瑜、victor、花哈哈、小明和宗翰，上研究所後的碰面都讓我感覺像是回到了大學時代。

在中研院地球所待著的這段時間謝謝依玲、忻旻、童忻、一剛、阿桂、宜純、小魚、小紅你們的照顧，中午能和你們吃飯以及平日的聊天真的很開心！還有，感謝礙於篇幅無法寫到的，平日關心我的各位朋友。

最後，我要特別謝謝的是中山女高兩位地科老師：凱夫老師和淑華老師，當年兩位的鼓勵與指導，是我能繼續發展地球科學興趣的關鍵。感謝添崙多年來的支持與鼓勵，陪我一起佔據頭頂上的星空放鬆我的心情。這本論文謹獻給最愛的家人，謝謝你們從我高中確定興趣方向後的大力支持，讓我能盡情做我所有我想做的事情，揮灑我的畫筆彩繪我這段最青春的人生！

淵淑 2012.07

## 中文摘要

中研院地球所於 2002 年開始陸續在臺灣東部裝設 Sacks-Evertson 類型井下應變儀，目前共設置 11 個測站。井下應變儀測量微小的地殼活動訊號，其精度可達  $10^{-12}$  量級。但也因儀器的高敏感度，使觀測記錄會受到埋設地點周圍環境因子變化影響，干擾儀器所記錄到的地殼變形訊號。因此在使用井下應變儀的應變記錄探討區域性地殼變形及斷層活動之前，釐清環境因子對於應變記錄的影響為一項重要的前提工作。本研究嘗試分析裝設在海岸山脈中部 Sacks-Evertson 類型井下應變儀陣列所觀測到的應變資料，探討此區域的應變變化與環境因子之間的關係。之後，在釐清環境因子對於應變影響程度後，本研究刻意避開環境因子的影響時間，再比較數月時間尺度下 GPS 與井下應變儀記錄，以探討井下應變儀記錄的穩定度。

井下應變儀的觀測資料須經過一系列資料處理，才能變成可應用的數據。首先，不連續之應變觀測資料要被串接成連續的應變時間序列，並利用兩個指數函數移除應變資料中井孔回復及水泥乾涸效應造成的變形量。另外，又由於大氣變化對應變記錄有所影響，使用線性函數計算井下應變儀記錄對大氣壓力變化的響應並修正之。本研究利用 SPOTL 計算理論潮汐模型，比較應變觀測記錄中潮汐振幅與理論潮汐模型之振幅，將應變資料單位由電壓讀數 (count) 轉換為真實的應變 (strain)，最後使用交互耦合矩陣完成三分量井下應變儀記錄的校正。

初步結果顯示，體應變與面應變常記錄到伴隨著颱風侵臺氣壓劇降的地殼永久壓縮應變，於 2006 年後加入的剪切應變記錄變化一同比較，發現剪切應變在颱風期間的變化並不顯著。若是颱風期間造成的氣壓或降雨量之變化進而造成斷層活動，則剪切應變也會同時記錄到顯著的永久變形訊號，且體應變與面應變會有壓縮和伸張訊號出現。根據上述概念，可以推論在 2006 年之後颱風侵臺期間，井下應變儀所記錄之壓縮應變和斷層活動較無關聯性。在強降雨時亦出現體應變與面應變產生永久壓縮應變但剪應變並未出現顯著變化。假設井下應變儀埋設點附近的岩石大致為均質分布，因降雨產生的水文荷重會直接反應在岩石的體積變化，產生壓縮應變，但此一荷重對剪切應變的影響較小，因此在剪切應變訊號上對於雨量的荷重反應較不顯著。本研究亦針對臺灣東部乾季時的體應變記錄進行分析，並與 GPS 的膨縮率比對，發現兩者的變化一致。此結果表示若能避開水文效應，



井下應變儀在數個月尺度下的應變記錄應該是可靠的。因此未來若能有效移除水文的影响，便可使用井下應變儀的應變記錄，探討地體構造運動的變化。

**關鍵字：**井下應變儀、應變變化、臺東縱谷、降雨、氣壓



# Abstract

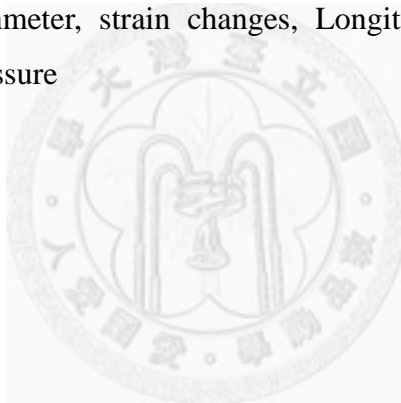
The institute of Earth Sciences, Academia Sinica (IESAS) has deployed eleven Sacks-Evertson-type borehole strainmeters in eastern Taiwan since 2002. The high sensitivity borehole strainmeter enable us to detect crustal strain in the scale of  $10^{-12}$ . Due to such high precision, the recorded strain is affected by environmental disturbances as well. In order to extract tectonic signals from borehole strainmeter data, it is of importance to clarify the influences of environmental factors on borehole strainmeter records. This study analyzed the datasets recorded by Sacks-Evertson borehole strainmeters installed in the central Coastal Range of eastern Taiwan. We first remove the effects of hole relaxation and grout-curing as well as strain steps due to valve resets and data gaps in the raw data using two exponential functions and a linear rate. Since it has been well known that atmospheric pressure would provide a significant influence on the crustal strain, we accordingly compute the barometric pressure admittance using a linear function. The SPOTL program is then applied in calculating the theoretical tide to obtain tidal admittance. The data processing method for single-component and three-component strainmeters are similar, except that the three-component instrument requires a coupling matrix to convert strain records at three gauges into the engineering shear strain and area strain.

Our preliminary results show the contractional strain may be affected by strong precipitation. Although the contractional signals associated with heavy rainfall are often recorded in dilatometer and areal strain, the recorded shear strain in 3-component strainmeter does not show significant changes at the same time. This finding indicates the hydrological loading due to rainfall only affects the volumetric strain and presumably has little influence on shear strain given assumption of isotropic materials. If the contractional signals are generated by fault activities, both shear strain and

volumetric strain should record significant signal changes in the same time; nevertheless, shear strain doesn't show significant signal changes while volumetric strain and areal strain have permanent strain changes. Thus, we eliminate the possibility of tectonic-origin motions.

We further compare month-scale volumetric strain from borehole strainmeters with surface dilatation rate derived from GPS velocity, in particular in the dry season. It shows correlated signal changes, suggesting that the borehole strainmeter record in month-scale may be a good index to recognize the crustal strain when the impact from the hydrologic influence is insignificant.

**Keywords:** borehole strainmeter, strain changes, Longitudinal Valley, precipitation, barometric pressure



# 目錄

口試委員會審定書 .....	i
誌謝 .....	ii
中文摘要 .....	iii
Abstract .....	v
目錄 .....	vii
圖目錄 .....	ix
表目錄 .....	xi
<b>第一章 緒論 .....</b>	<b>1</b>
1.1 研究目的與動機 .....	1
1.2 井下應變儀相關文獻回顧 .....	6
1.2.1 井下應變儀潮汐校正與耦合 (Coupling) .....	6
1.2.2 井下應變儀記錄應用於地震學 .....	6
1.2.3 井下應變儀記錄與大氣及水文因子相關性 .....	7
<b>第二章 Sacks-Evertson 井下應變儀原理與特性 .....</b>	<b>8</b>
2.1 Sacks-Evertson 井下應變儀設計與原理 .....	8
2.1.1 Sacks-Evertson 單分量井下應變儀 .....	10
2.1.2 Sacks-Evertson-Sakata 三分量井下應變儀 .....	11
2.2 Sacks-Evertson 井下應變儀儀器響應 .....	14
2.3 Sacks-Evertson 井下應變儀選址與安裝 .....	14
2.3.1 井下應變儀選址 .....	14
2.3.2 井下應變儀安裝 .....	15
2.4 臺灣東部 Sacks-Evertson 井下應變儀現況 .....	16
<b>第三章 井下應變儀資料處理 .....</b>	<b>19</b>
3.1 井下應變儀資料前處理 .....	19
3.2 井下應變儀資料校正 (Calibration) .....	20
3.2.1 不連續資料記錄修正 .....	21
3.2.2 水泥乾涸及井孔回復效應修正 .....	23
3.2.3 氣壓修正 .....	28

3.2.4	潮汐擬合與資料單位轉換修正 .....	30
3.3	三分量井下應變儀記錄校正 .....	34
	<b>第四章 結果與討論 .....</b>	<b>38</b>
4.1	應變變化與氣象因子關聯性分析 .....	38
4.1.1	應變變化與降雨之關聯性 .....	38
4.1.2	氣壓變化與應變變化之關聯性 .....	53
4.2	井下應變儀長期地殼應變速率分析 .....	59
	<b>第五章 結論 .....</b>	<b>63</b>
	<b>Reference .....</b>	<b>64</b>
	<b>附錄一 井下應變儀資料前處理過程 .....</b>	<b>69</b>
	<b>附錄二 .xxx 檔案分割後之檔案列表 .....</b>	<b>74</b>



## 圖目錄

圖 1	臺灣三維地體架構圖[Chang et al., 2000]。	3
圖 2	臺灣東部 1992-1999 年 GPS 速度場[Yu and Kuo, 2001]。	4
圖 3	研究區域測站分布圖。	5
圖 4	Benioff 提出之體應變儀概念示意圖[Benioff, 1935]。	8
圖 5	監測板塊運動應變速率主要大地測量儀器敏感度範圍[Nikolaidis, 2002]。	9
圖 6	Sacks-Evertson 體應變儀內部構造示意圖[Linde and Roeloffs, 2006]。	11
圖 7	三分量井下應變儀內部構造示意圖[Sakata and Sato, 1986]。	12
圖 8	東河站 (DONB) 安裝的三分量井下應變儀。	13
圖 9	三分量井下應變儀內部應變感應空腔剖面圖[Sakata and Sato, 1986]。	13
圖 10	氣壓記錄與井下應變儀記錄同調性[Sacks et al., 1969-1970]。	14
圖 11	SSNB 站岩心照片。	15
圖 12	井下應變儀與地面記錄器設置示意圖[Linde and Roeloffs, 2006]。	16
圖 13	中研院地球所設置之井下應變測站儀分布圖。	17
圖 14	井下應變儀資料前處理流程圖。	19
圖 15	井下應變儀資料處理與校正流程圖。	20
圖 16	ZANB 站不連續記錄之閥門一與閥門二開啟時間判斷圖。	22
圖 17	ZANB 站記錄經過不連續資料修正之結果。	22
圖 18	ZANB 站閥門一開啟時之資料變化特性圖。	23
圖 19	時間常數 $\lambda_1$ 的最佳解。	25
圖 20	時間常數 $\lambda_2$ 的最佳解。	25
圖 21	水泥乾涸與井孔回復效應修正模型與觀測值。	26
圖 22	ZANB 站經水泥乾涸和井孔回復效應修正後記錄。	26
圖 23	ZANB 站 2007 年應變記錄與氣壓記錄。	29
圖 24	ZANB 站經氣壓修正前與修正後應變記錄。	29
圖 25	潮汐各分潮頻率與振幅圖[Agnew, 2007]。	31
圖 26	SSNB 站 DT1、DT2、DT3 經 3.3 節校正前之資料記錄。	37
圖 27	SSNB 站經應變校正後之資料。	37
圖 28	2009 年 7 月中至 7 月底中部陣列應變、氣壓及雨量變化。	43

圖 29	2009 年 9 月中至 10 月初中部陣列應變、氣壓及雨量變化圖。	44
圖 30	中部陣列應變、氣壓及 RSUI 地下水觀測站觀測記錄變化。	45
圖 31	CHMB 站壓縮變形量與累積雨量關係圖。	47
圖 32	CHMB 站壓縮變形量與最大降雨強度關係圖。	47
圖 33	ZANB 站壓縮變形量與累積雨量關係圖。	48
圖 34	ZANB 站壓縮變形量與最大降雨強度關係圖。	48
圖 35	HGSB 站壓縮變形量與累積雨量關係圖。	49
圖 36	HGSB 站壓縮變形量與最大降雨強度關係圖。	49
圖 37	SSNB 站面應變壓縮變形量與累積雨量關係圖。	50
圖 38	SSNB 站面應變壓縮變形量與最大降雨強度關係圖。	50
圖 39	SSNB 站 $\gamma_1$ 變形量與累積雨量關係圖。	51
圖 40	SSNB 站 $\gamma_1$ 變形量與最大降雨強度關係圖。	51
圖 41	SSNB 站 $\gamma_2$ 變形量與累積雨量關係圖。	52
圖 42	SSNB 站 $\gamma_2$ 變形量與最大降雨強度關係圖。	52
圖 43	2008 年 7 月底至 8 月初中部陣列應變、氣壓及雨量變化。	55
圖 44	2008 年 9 月中至 10 月初中部陣列應變、氣壓及雨量變化。	56
圖 45	2007 年 10 月柯羅莎颱風侵臺時的應變記錄。	57
圖 46	2007 年 9 月韋帕颱風侵臺時的應變記錄。	58
圖 47	2009 年 1 月至 5 月 HGSB 站與 GPS 膨縮率。	61
圖 48	2010 年 1 月至 5 月 HGSB 站與 GPS 膨縮率。	62

## 表目錄

表 1	中研院地球所安裝之 Sacks-Evertson 型井下應變儀基本資料一覽表。.....	18
表 2	井下應變儀中部陣列各站參數一覽表。.....	27
表 3	本研究使用的理論地潮四個分潮模式週期。.....	32
表 4	中部陣列各站以 SPOTL 計算得出之理論地潮振幅與相位表。.....	33
表 5	各站應變訊號異常變化事件時間表。.....	41





# 第一章 緒論

## 1.1 研究目的與動機

臺灣位於菲律賓海板塊與歐亞大陸板塊聚合交界處，鄰近區域有兩大弧溝系統，在臺灣南方歐亞大陸板塊向東隱沒至菲律賓海板塊下；而在臺灣以東，菲律賓海板塊則向西北隱沒至歐亞板塊之下，前者所伴生的呂宋島弧，則隨著後者的運動，在約五六百萬年前與歐亞大陸板塊邊緣發生弧陸碰撞而造山，因而有了臺灣島的生成（[Teng, 1990]；圖 1）。整體而言，目前菲律賓海板塊仍以相對於澎湖白沙站（S01R）約 80 mm/yr 的聚合速率向西北方移動[Hsu *et al.*, 2009；Yu *et al.*, 1997]，由地表地質看來，臺灣東部的花東縱谷即為兩個板塊的縫合帶。沿著這個縫合帶發育的花東縱谷斷層上盤與下盤的 GPS 速度場及運動方向有顯著的差異：位於縱谷斷層下盤的 GPS 站以 18-35 mm/yr 的速率，往方位角 283°-311° 的方向移動；而在縱谷斷層上盤的 GPS 站則以 28-69 mm/yr 的速率往方位角 303°-324° 的方向運動，橫跨縱谷斷層平均約有 30 mm/yr 的高縮短率([Yu and Kuo, 2001]；圖 2)。臺灣地殼應變最大處其中之一位於花東縱谷，應變壓縮方向大致呈西北東南向，且最大應變速率超過 1  $\mu$ strain/yr [Hsu *et al.*, 2009]。縱谷斷層的地殼變形量大，近期內亦有 2006 年臺東地震[Wu *et al.*, 2006a]、2003 年成功地震[Hsu *et al.*, 2009; Wu *et al.*, 2006b]和 1951 年 10 月至 11 月的花蓮臺東地震序列[Chung *et al.*, 2008; Lee *et al.*, 2008]等大地震事件發生。為了釐清臺灣東部斷層系統釋放能量的方式、尋找慢地震事件與觀測地震前兆，中央研究院地球科學研究所於 2002 年開始在臺灣東部陸續設置三個井下應變儀陣列，至今共安裝了 11 個 Sacks-Evertson 類型井下應變儀測站。

但在使用井下應變儀記錄尋找斷層釋放能量的方式之前，釐清環境因子對於井下應變儀記錄造成的影響為一件重要的工作。前人研究指出，氣壓的變化、降雨量的多寡及地下水的變化，都會對於測量地殼變形產生一定程度的干擾[Dal Moro and Zadro, 1998; Gebauer *et al.*, 2010; Linde and Roeloffs, 2006; Liu *et al.*, 2009; Roeloffs, 2001; Wolfe *et al.*, 1981; Yamauchi, 1987]。又因為環境因子會因為空間及時間上的變化而隨之變化，因此研究臺灣東部環境因子對於井下應變儀記錄的影響是利用井下應變儀資料分析地體構造活動的前導工作。

在中研院地球所已安裝的三個井下應變儀陣列中，位於海岸山脈中段的中部

陣列為最早設置的觀測陣列（圖 3），累積資料量多且記錄尚稱穩定與完整。因此本研究利用井下應變儀中部陣列的三個體應變儀（dilatometer）與一個三分量井下應變儀記錄來探討下列三個主題：

1. 建立井下應變儀資料處理之流程：

自 2002 年東部井下應變儀設站以來，尚無一套完整的資料處理流程。因此本研究嘗試建立一套較為清楚且完整的資料處理流程，以利後續資料能精確又有效率的處理與分析。

2. 應變資料中之氣象因子的影響：

在井下應變儀資料中，屬於環境因子的氣象因子與水文的變化會影響應變記錄，也是應變儀要利用來探討地殼變形主要的雜訊（Noise）來源之一。在氣象因子部分，前人研究曾指出大氣壓力的變化[Dal Moro and Zadro, 1998; Evertson, 1977]以及降雨[Yamauchi, 1987; Zadro and Braitenberg, 1999]的影響對應變儀記錄的影響甚為顯著。和乾燥地區環境因子特性不同，臺灣位於亞熱帶地區，整體平均降雨量可達每年 2500 mm 以上[CWB, 1991]，因此降雨的影響應該更值得釐清。此外，尤其是每年的七到九月亦會有來自西太平洋的颱風侵襲臺灣，不但帶來強降雨並同時使氣壓產生劇烈變化。因此本研究將針對海岸山脈中部陣列應變記錄和鄰近氣象站（圖 3）記錄的氣象因子變化做時間序列上的初步分析，以釐清氣象因子對應變記錄的影響。

3. 井下應變儀資料於數個月時間尺度下之穩定度：

在前人研究中指出，應變儀易受水文因素影響，使水文因素產生的應變訊號蓋過地殼變形所產生的應變訊號[Dal Moro and Zadro, 1998; Zadro and Braitenberg, 1999]，進一步影響應變記錄的穩定度。因此本研究嘗試利用乾季的應變資料與 GPS 的時間序列做比較，藉由避開水文因子影響的時間，初步探討東部井下應變儀中部陣列資料於數月時間尺度記錄之穩定度。

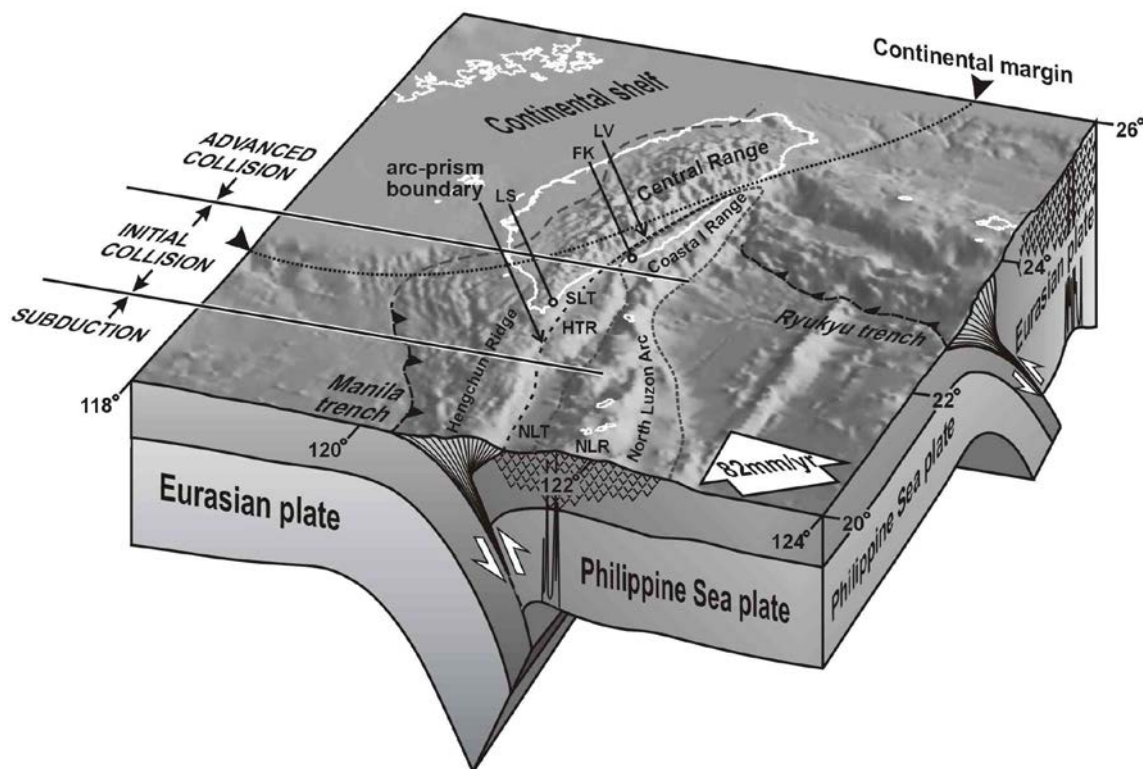


圖 1 臺灣三維地體架構圖[Chang et al., 2000]。菲律賓海板塊在臺灣北部向北隱沒至歐亞大陸板塊下方；而歐亞大陸板塊則於臺灣南部向東隱沒至菲律賓海板塊下方。圖中 LV 為花東縱谷斷層，FK 為富岡，LS 為樂水，HTR 為花東海脊，NLT 為北呂宋海槽，NLR 為北呂宋海脊，SLT 為南縱海槽。

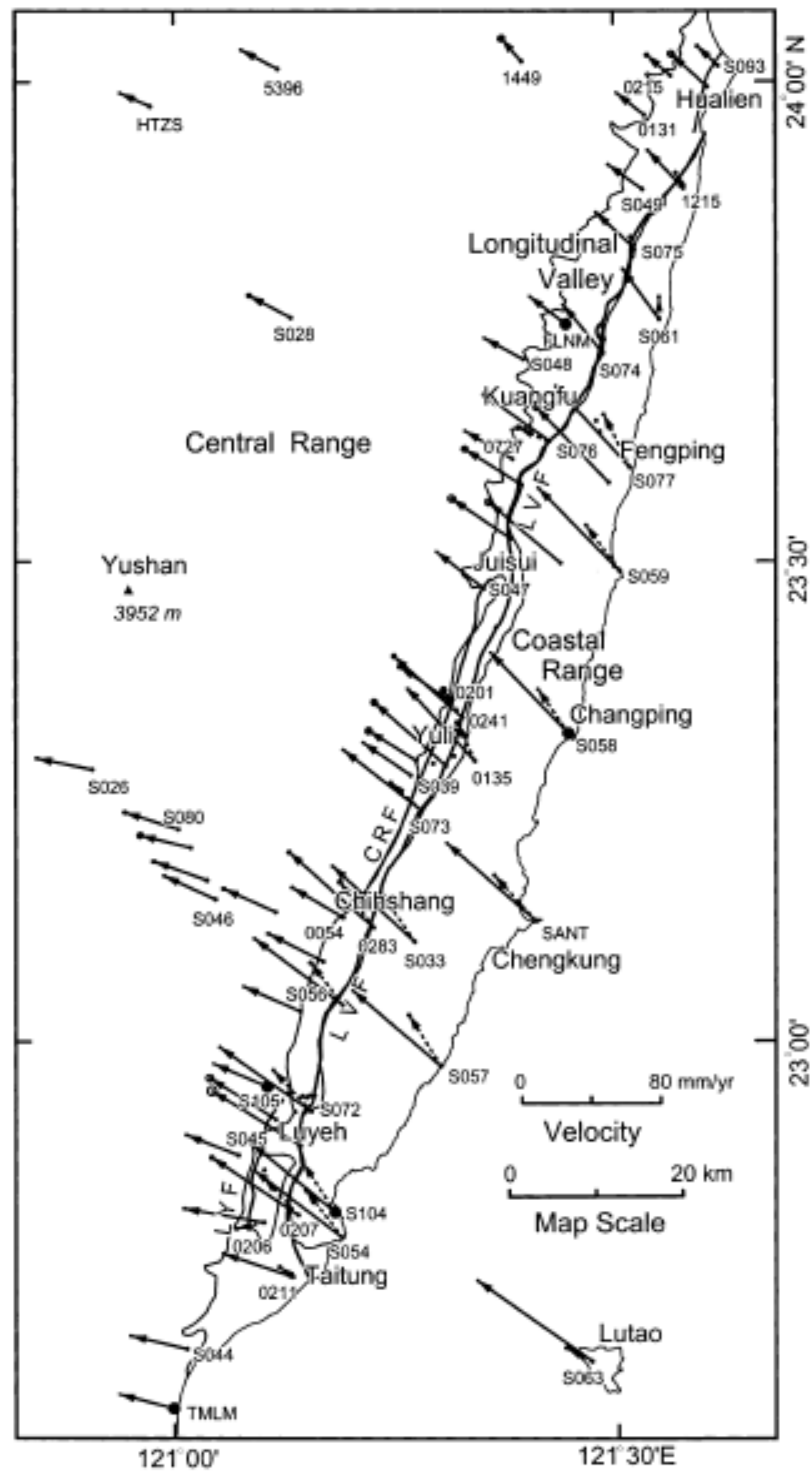


圖 2 臺灣東部 1992-1999 年 GPS 速度場[Yu and Kuo, 2001]。

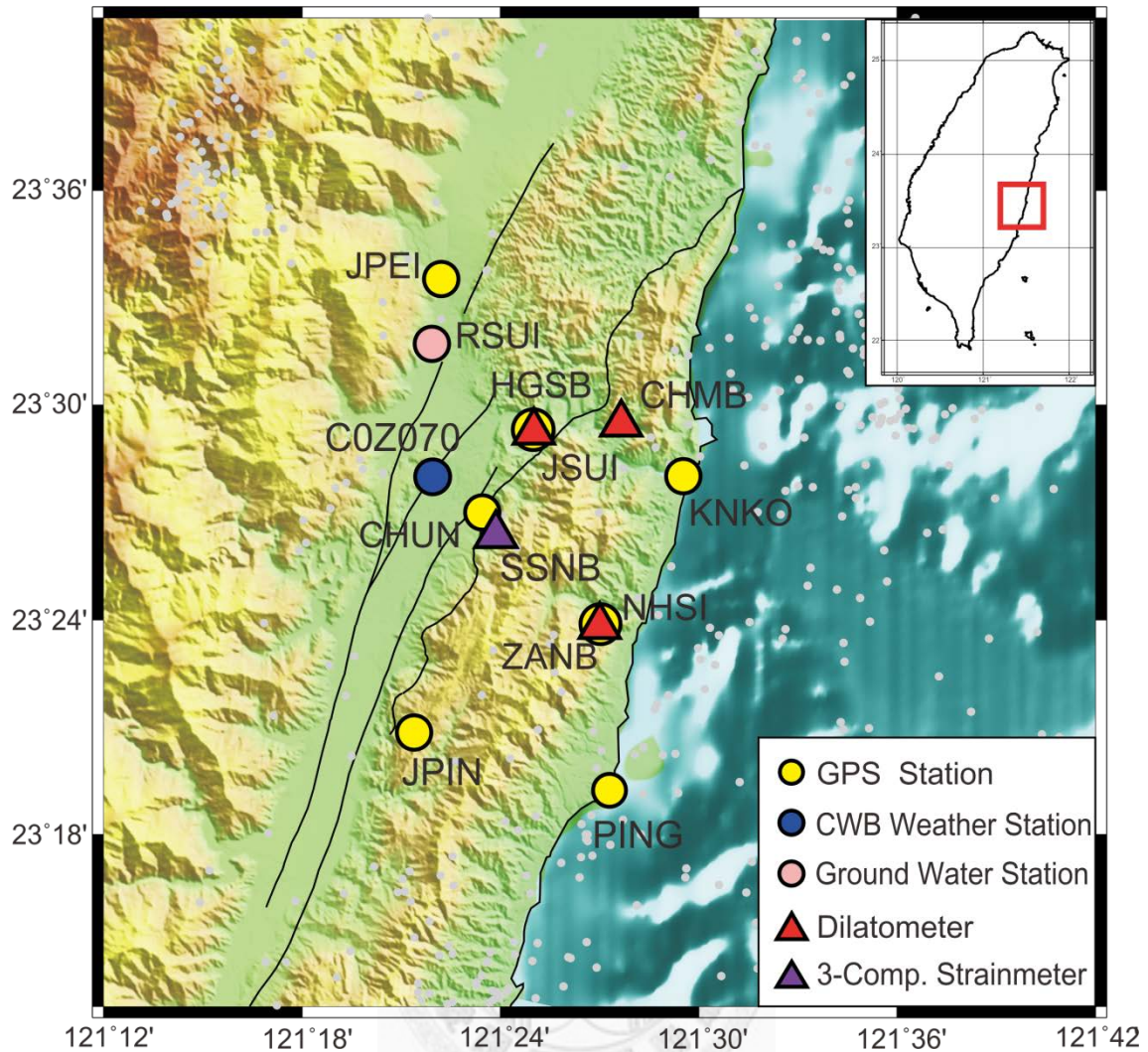


圖 3 研究區域測站分布圖。圖中右上角臺灣全圖中的紅色方框為研究區域。本圖為井下應變儀中部陣列各站、鄰近井下應變儀中部陣列氣象站、地下水觀測站與 GPS 連續站分布圖。紅色三角形為體應變儀奇美站 (CHMB)、猴子山站 (HGSB) 與樟原站 (ZANB)，紫色三角形為三分量井下應變儀春日站 (SSNB)，藍色圓圈為氣象局舞鶴氣象自動站 (C0Z070)。黃色圓圈為本研究使用的 GPS 連續站，其中 GPS 的 NHSI 站與井下應變儀 ZANB 站共站、GPS 的 JSUI 站與井下應變儀 HGSB 站共站。粉紅色圓圈是最靠近井下應變儀中部陣列的地下水觀測站。縱谷斷層在圖中以黑色實線表示，灰色圓圈為 1997-2009 年規模大於 4 的背景地震活動 (Seismicity)。

## 1.2 井下應變儀相關文獻回顧

### 1.2.1 井下應變儀潮汐校正與耦合 (Coupling)

井下應變儀因為儀器設計特殊，使其記錄輸出單位並非應變 (strain) 而是電壓讀數 (count)，因此需要用理論潮汐振幅比對觀測的潮汐振幅校正其單位。但因為井下應變儀和井壁耦合的程度為決定觀測品質好壞的其中一項因素，因此探討用理論地潮校正儀器記錄及儀器記錄是否能真實反應大地應變成為井下應變儀研究中重要議題之一。在儀器校正部分，[Hart *et al.*, 1996]利用共站的雷射應變儀記錄去比對井下應變儀記錄，發現若使用交互耦合方法校正井下應變儀的觀測潮汐記錄可以移除約 30% 的系統性誤差，但在區域的理論潮汐校正上，目前發展出的交互耦合校正法並不精確。另外他們也發現在潮汐校正上，有一半以上的校正誤差來自海潮 (ocean load tide) 的影響。除了[Hart *et al.*, 1996]的研究，[Roeloffs, 2010]也在其後針對井下應變儀的校正提出討論，她發現安裝在美國加州的數個井下應變儀在垂直應變方向有很大的耦合係數，此結果會讓儀器對氣壓的反應 (response) 增加。[Langbein, 2010]也曾使用[Roeloffs, 2010]的潮汐校正方法對潮汐校正後的應變結果做進一步的分析，他發現潮汐模型的估計誤差達 10-30% 時，會讓應變儀記錄中出現暫態應變變化 (transient strain change) 而產生估計誤差，且此誤差會大於儀器記錄飄移 (drift) 造成的誤差。

### 1.2.2 井下應變儀記錄應用於地震學

井下應變儀最初設計目的是借助其高精度 ( $10^{-9}$ - $10^{-12}$ ) 尋找地震前兆 (precursor) 現象[Evertson, 1977; Roeloffs, 1999]。之後[Linde *et al.*, 1988]利用井下應變儀的記錄，探討 1983 年發生於日本外海地震的地震前兆。[Roeloffs and Quilty, 1997] 觀察到在 1985 年美國加州 Kettleman Hills 地震發生前，地下水以及井下體應變儀記錄到異常訊號。而[Johnston *et al.*, 2006; Johnston *et al.*, 1994] 針對 2004 年的加州 Parkfield 地震和 1992 年加州 Landers 地震的震前及震後井下應變儀記錄，分析震時間前數週至數小時應變記錄，討論應變是否有明顯的異常變化。[Agustsson *et al.*, 1999]則使用安裝在冰島的井下應變儀分別記錄到的震前、同震及震後數小時內應變變化，討論觸發 1987 年南冰島 Vatnafjöll 地震的可能機制。另外，井下應變儀的記錄敏感度在時間尺度上比地震儀來得長，因此發生時間持續數日的慢地震



事件 (slow earthquake) 亦可被儀器記錄。[Linde *et al.*, 1996] 用設置在聖安德烈斯斷層 (San Andreas Fault) 附近的井下應變儀觀察到聖安德烈斯斷層產生的慢地震序列。[Barbour and Agnew, 2010] 則是利用 PBO 埋設在聖安德烈斯斷層附近的井下應變儀地震記錄中分析同震應變，以釐清井下應變儀記錄到的同震應變是否真實反應斷層錯動的應變量。

### 1.2.3 井下應變儀記錄與大氣及水文因子相關性

在井下應變儀的記錄中，氣壓與水文條件的改變會產生不同程度的應變[Sacks *et al.*, 1969-1970]。[Dal Moro and Zadro, 1998] 曾對地表變形量受降雨與氣壓變化影響議題探討，結果顯示當氣壓產生 1 hPa 的變化時，會影響約 1 nε (之後以 nε 表示單位為  $1 \times 10^{-9}$  的應變量) 的面應變變化，但因降雨造成的水文影響會讓面應變的變化比大氣造成的面應變變化大一百倍左右。而他們也發現當一天的降雨量達到 100 mm 的時候，安裝於義大利的應變儀會反應約 600 nε 的面應變變化。安裝在不同地點的應變記錄也有類似因降雨所造成的應變變化，例如 [Wolfe *et al.*, 1981] 觀察到夏威夷的應變儀產生和降雨有關的應變變化，他們利用雨水滲入和地下水後退 (recession) 模型去計算兩者之間的關聯，結果顯示應變因為降雨量產生的變化大約為  $1-2.1 \frac{\text{n}\epsilon}{\text{mm}}$ 。[Yamauchi, 1987] 則是利用日本的應變儀觀測資料，發現降雨伴隨的應變變化，並用水箱模型 (tank model) 模擬該處的水文情況並同時修正應變資料。另外，[Liu *et al.*, 2009] 使用安裝在臺灣東部的井下應變儀，觀測到當颱風侵襲臺灣時，因氣壓改變而被觸發的慢地震事件。

## 第二章 Sacks-Evertson 井下應變儀原理與特性

### 2.1 Sacks-Evertson 井下應變儀設計與原理

井下應變儀最早的概念由 Benioff 提出[Benioff, 1935]。Benioff 認為，在一任意形狀容器內部注滿離子溶液，並以隔板（diaphragm）阻隔（圖 4）。容器邊上的管子則設計用以平衡因氣壓、溫度或其他因素造成的緩慢壓力變化。將此儀器設置在近地表處，並與圍岩接觸。當圍岩受大地應力產生變形，就可藉由設置在儀器上方的電磁轉換器（electromagnetic transducer）或電流檢流器（galvanometer）偵測容器產生體積改變時離子溶液改變的濃度，進而推算此容器的體應變量。

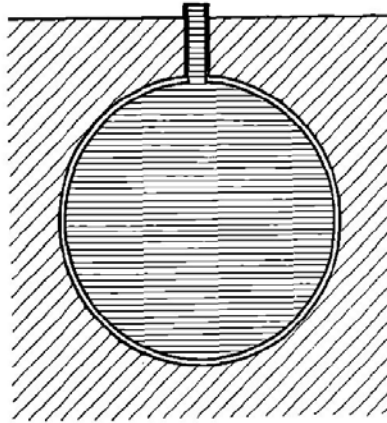


圖 4 Benioff 提出之體應變儀概念示意圖[Benioff, 1935]。 Benioff 提出利用容器受力變形，偵測內部離子溶液改變離子濃度的特性測量容器的體積變形，進而推估圍岩變形量。

根據 Benioff 的概念，在其後發展出 Sacks-Evertson 類型井下應變儀[Sacks et al., 1971]。井下應變儀觀測的時間尺度依其設計不同而略為相異，但綜觀而言，井下應變儀記錄之資料取樣率可補足 GPS 和地震儀觀測時間尺度之空白帶。換言之，儀器的頻率響應特性使其記錄的時間尺度短至地震事件，長可至數月甚至數年的岩石應變變化（圖 5）。

本研究使用的儀器為 Sacks-Evertson 類型井下應變儀，此類井下應變儀又可分為兩類：單分量井下應變儀（又稱體應變儀，Dilatometer）及三分量井下應變儀，儀器原理與安裝細節詳述如下。



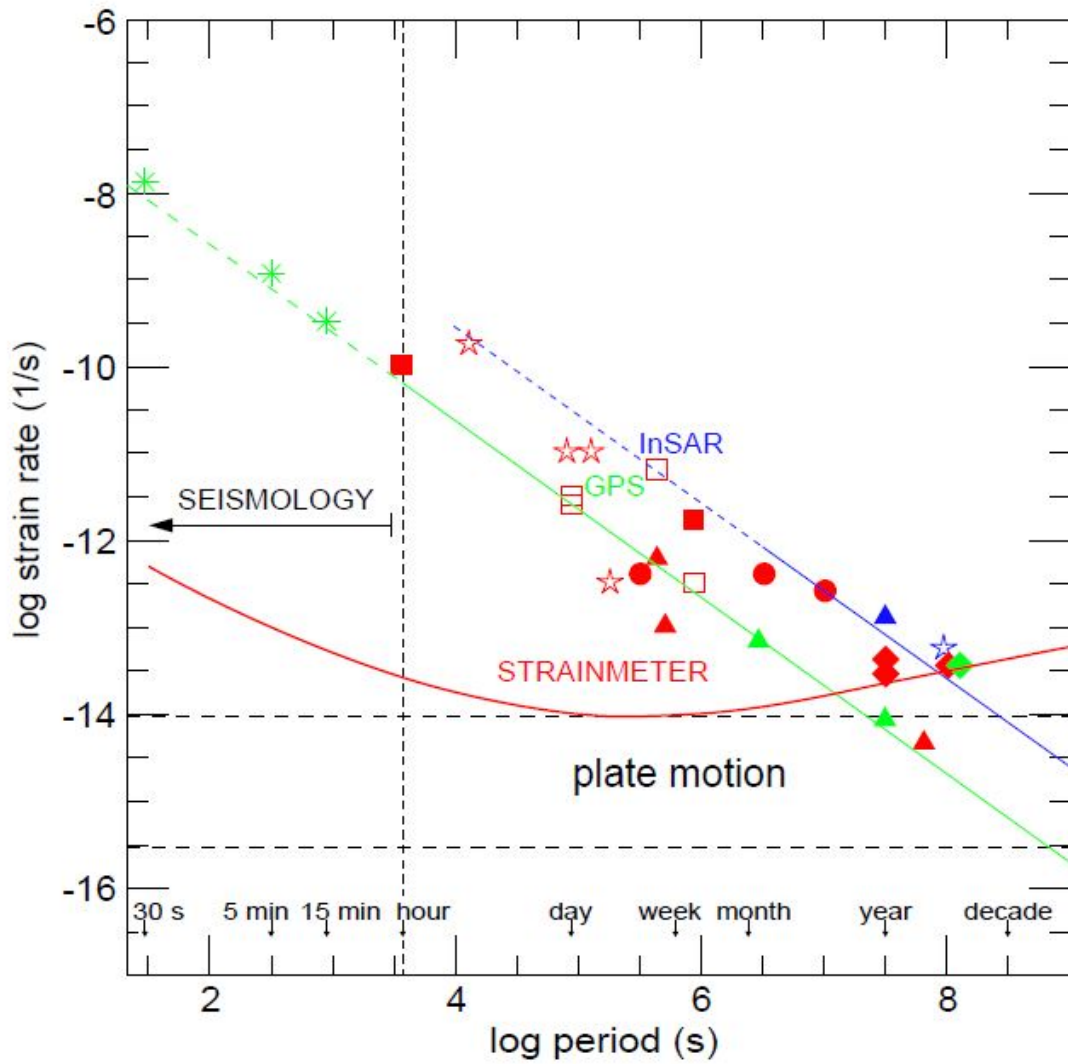


圖 5 監測板塊運動應變速率主要大地測量儀器敏感度範圍[Nikolaidis, 2002]。應變儀（紅色實線）資料記錄的時間尺度可從數秒至數月，涵蓋地震儀、GPS（綠色實線）及 InSAR（InSAR, Interferometric Synthetic Aperture Radar，藍色實線）的時間記錄範圍。對於時間尺度較小之變化（如：數天至數週），應變儀敏感度較 InSAR 及 GPS 來得高。InSAR 與 GPS 對數個月以及數年的變化則有較高的靈敏度，在空間解析度上則分別為 2 mm 和 2 cm。

### 2.1.1 Sacks-Evertson 單分量井下應變儀

Sacks-Evertson 單分量井下應變儀[Sacks *et al.*, 1971]發展始於 1965 年，由 Sacks I.S.與 Evertson D.W.設計，用於量測岩石受到外力作用時所產生之體積變化，屬於體應變儀（Dilatometer）的一種。井下應變儀全長約 4 公尺（圖 6），呈圓柱狀，其中儀器感應應變變化的鋼製圓柱形薄壁空腔（strain-sensing chamber）位於儀器下部，長約 3 公尺，內部盛滿液體，盛裝的液體通常為聚矽氧油（silicone oil）。當圓柱形薄壁空腔外壁承受應力時，體積產生改變，聚矽氧油便會流出或流入此一空腔。應變感應空腔上方設置直徑為 12.7 mm 的伸縮盒（bellow），其長度會隨著聚矽氧油在空腔內的流出或流動成比例變化。伸縮盒的長度變化則由在其上方差動變壓位移轉換器（differential-transformer-based displacement transducer 1，以下簡稱 DT1）測得。DT1 的解析度（resolution）為 1nm，而在應變感應空腔與伸縮盒之間有液壓放大器（hydraulic amplification）可提供幾何比例（geometric ratio）將訊號放大約 40,000 倍，且液壓放大器為無雜訊（noise free）輸出，因此井下應變儀 DT1 測量應變變化的解析度可達  $10^{-12}$  量級。DT1 的訊號輸出為類比訊號（電壓，單位為電壓讀數），經由 A/D 轉換器將輸出訊號轉換為數位訊號[Linde and Roeloffs, 2006]。

伸縮盒的可伸縮長度有其限制，最大的伸縮長度約為 5 mm。當伸縮盒長度因應變感應空腔中的聚矽氧油流出或流入導致其長度增長或縮減至極限時，在地表的電子設備（electronics）會控制液壓閥門（hydraulic valve）開啟，讓儀器的感應液壓系統（sensing hydraulics）歸零，重新記錄應變變化。1998 年後，儀器設計上增加了第二個差動變壓位移轉換器（differential-transformer-based displacement transducer 2，以下簡稱 DT2）與閥門二（hydraulic valve 2）。DT2 的靈敏度較 DT1 低，但 DT2 的優勢在於當 DT1 的閥門開啟致使感應液壓系統歸零，這時 DT1 無法記錄當下應變變化，因為 DT2 因伸縮盒的伸縮長度限制較小，便可在 DT1 無法記錄時持續記錄應變變化，以確保井下應變儀資料記錄之連續性。另外，DT2 可記錄地下溫度變化，其靈敏度大於  $10^{-4}^{\circ}\text{C}$  [Linde and Roeloffs, 2006]。

當儀器正常運作時，兩個閥門皆為關閉狀態，DT1 穩定記錄應變變化，而 DT2 亦可以較低的靈敏度記錄應變變化。整組儀器以纜線連接至地面的電子系統，並傳送資料訊號至電子系統記錄之。

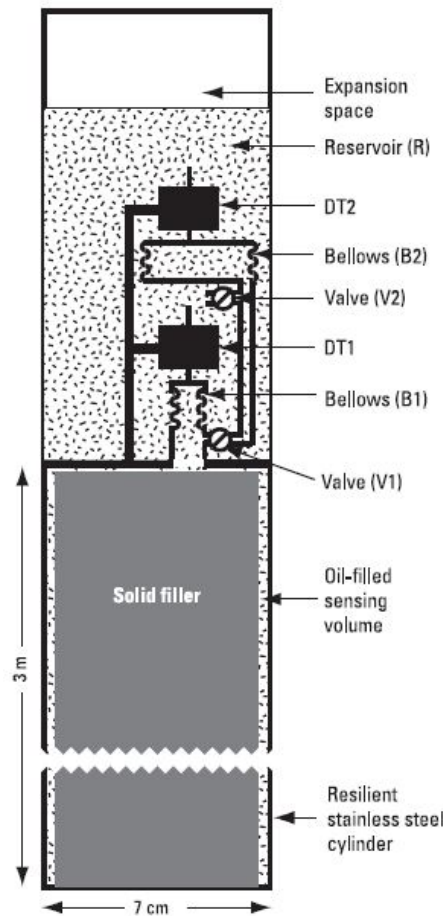


圖 6 Sacks-Evertson 體應變儀內部構造示意圖[Linde and Roeloffs, 2006]。

### 2.1.2 Sacks-Evertson-Sakata 三分量井下應變儀

Sacks-Evertson 類型的單分量井下應變儀只能記錄體積應變變化，其記錄資料並無方向性的資訊，因此[Sakata, 1981]根據 Sacks-Evertson 類型的井下應變儀原理進一步發展出三分量井下應變儀。三分量井下應變儀儀器設計與原理大致上和 Sacks-Evertson 類型的單分量井下應變儀相同，三分量井下應變儀將應變感應空腔由體應變儀的單一圓柱等分為三等份，應變感應空腔的形狀改為細長型（圖 7），且空腔的各個中心點與兩側空腔中心點之距離角度為 120 度。現階段中研院地球所使用的為改良式 Sacks-Evertson-Sakata 三分量井下應變儀，應變感應空腔形狀改為新月形，並加大內部容量（圖 8）。

當三分量井下應變儀外部水平有效應力施加於儀器感應應變空腔，造成空腔體積改變，使聚矽氧油流出或流入，會迫使連接至各個應變感應空腔上方的伸縮盒改變其長度，並由 DT1、DT2 及 DT3 記錄聚矽氧油流出流入伸縮盒而改變的長

度讀數值（圖 9）。將 DT1、DT2 及 DT3 的讀出數值經過獨立校正後，便可用 3.3 之校正方法計算便可得到該三分量井下應變儀的面應變與工程剪應變 $\gamma_1$ 與 $\gamma_2$ 。

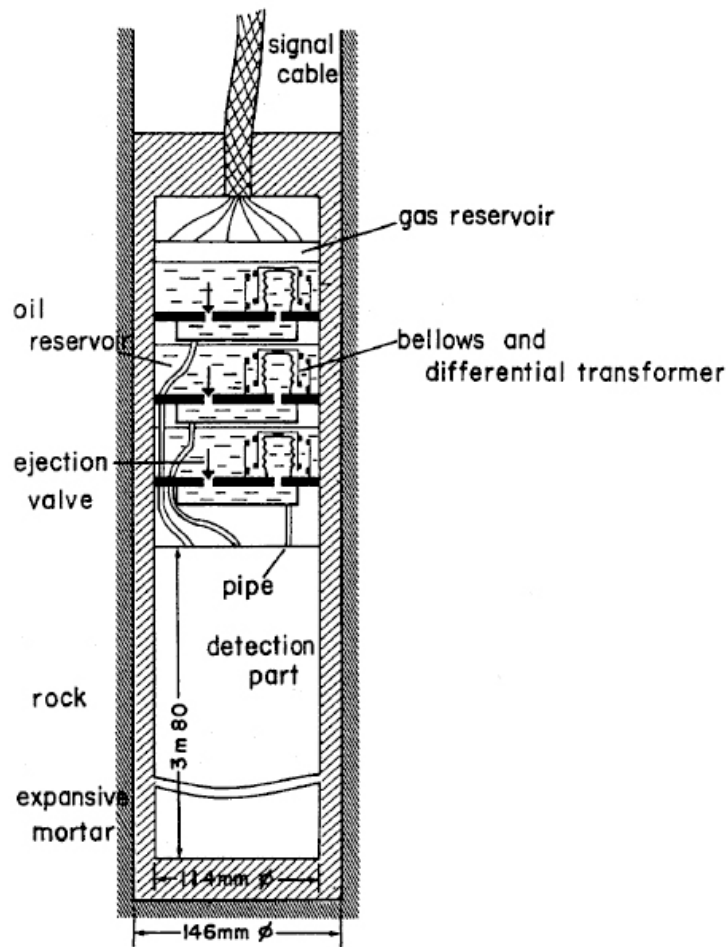


圖 7 三分量井下應變儀內部構造示意圖[Sakata and Sato, 1986]。



圖 8 東河站 (DONB) 安裝的三分量井下應變儀。

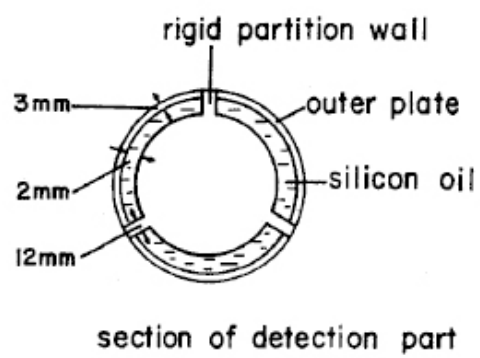


圖 9 三分量井下應變儀內部應變感應空腔剖面圖[Sakata and Sato, 1986]。



## 2.2 Sacks-Evertson 井下應變儀儀器響應

Sacks 等人[Sacks *et al.*, 1969-1970]利用設置在同個位置的氣壓計與體應變儀測試應變記錄與氣壓記錄的同調性 $\gamma$  (coherence)。在各個不同的頻率下，應變記錄與氣壓記錄在平方同調性 $\gamma^2$ 上成比例 (圖 10)。由圖中可得知，井下應變儀最佳記錄頻段約在頻率小於 10 mHz 至 0 mHz，在此處 $\gamma^2$ 值大於 0.8，代表在此頻段內的訊號可被體應變儀記錄且訊號不失真。當頻率大於 10 mHz 後， $\gamma^2$ 值開始大幅度且快速下降，原因可能為在高頻處，訊號開始受到微震的雜訊影響，且儀器本身並非設計用來記錄高頻訊號，故在高頻訊號的訊號解析度不佳。

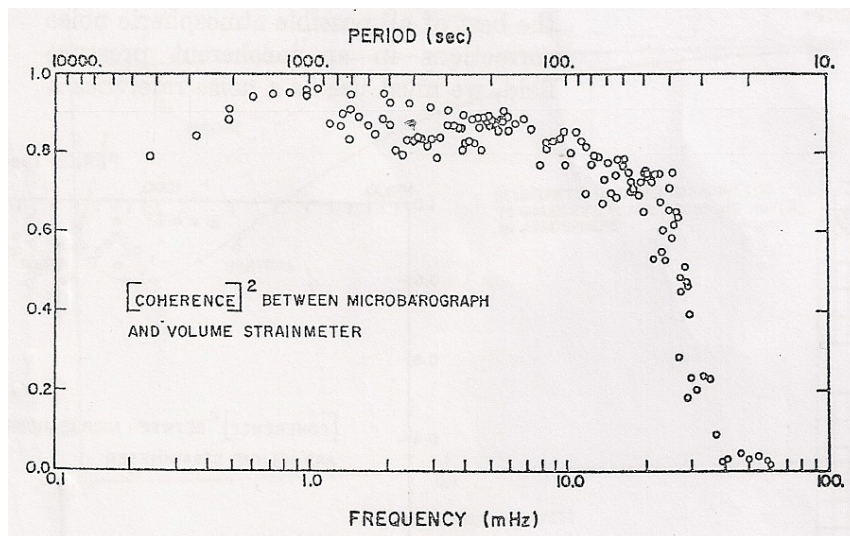


圖 10 氣壓記錄與井下應變儀記錄同調性[Sacks *et al.*, 1969-1970]。

## 2.3 Sacks-Evertson 井下應變儀選址與安裝

### 2.3.1 井下應變儀選址

井下應變儀選址需考慮以下幾點因素：

1. 鄰近井下應變儀的區域不可有抽水水井、溪流或溫泉。因上述幾項因子容易產生生長週期的雜訊（頻率：小時至數天）。
2. 井下應變儀在井內的位置需設置在厚層且堅硬的岩盤上並遠離岩石裂隙。在檢視岩心時，於深度約 200 公尺左右尋找連續且不破碎的岩心（圖 11），便可大致判定儀器安裝位置。
3. 在斷層上盤較容易觀測到斷層活動所產生的應變訊號，因此在選址時會選擇在斷層上盤安裝應變儀，但於安裝時需避開斷層破碎帶。



圖 11 SSNB 站岩心照片。設置井下應變儀挑選擺設深度時，會參考岩心記錄決定設置深度，通常在深度兩百公尺附近挑選岩心連續且裂隙少之位置擺放儀器。此處以 SSNB 站岩心記錄為例，本站的井下應變儀設置深度在 185 公尺處。

### 2.3.2 井下應變儀安裝

井下應變儀設置在地表下約 200 公尺處（圖 12），深度依照該站址的岩性變化而異。為了增加儀器與井壁的耦合度（coupling），當井孔挖掘完成要安裝應變儀前，需先灌入不收縮水泥。此一過程通常是將已灌入不收縮水泥的容器沉降至井底，此一容器觸及井底後，盛裝於容器中的不收縮水泥會從容器內緩慢流出，利用容器裝水泥製井底流出充填井中的目的是減少水泥充填時所產生的空氣泡。當容器內水泥全部流入井中後，便會將井下應變儀垂放至預定深度。在垂放井下應變儀之前，會在儀器底部設置重物增加儀器重量，以利垂放至密度較高的不收縮水泥中。當儀器順利垂降至預定安裝深度後，儀器與井壁之間的空隙會被不收縮水泥充填至覆蓋住整個儀器本體。最後利用放下去的纜線長度計算並確認井下應變儀所在深度，連接應變儀與地表記錄器的纜線、應變儀本體、記錄器與校正記錄器時間的 GPS 正常運作後，儀器安裝大抵完成。

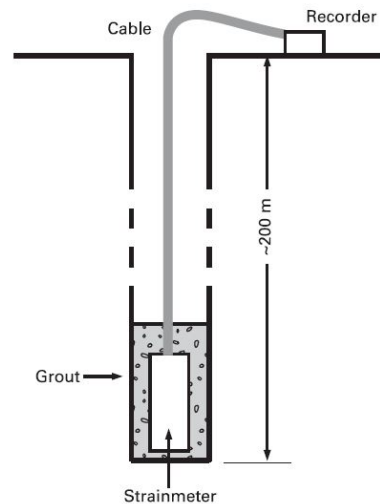


圖 12 井下應變儀與地面記錄器設置示意圖[Linde and Roeloffs, 2006]。  
井下應變儀埋設在約兩百公尺的深度，在設置時被不收縮水泥完全覆蓋，使儀器與井壁能有良好的耦合。另外，儀器本體接出一條電纜連接至設置於地表的記錄器。

## 2.4 臺灣東部 Sacks-Evertson 井下應變儀現況

中央研究院地球科學研究所自 2002 年起截至 2012 年 6 月，於臺灣東部區域設置三個 Sacks-Evertson 型井下應變儀陣列，共十一個測站（圖 13）。

北部陣列（Northern Array）位於花蓮縣秀林鄉，儀器分別為體應變儀九曲洞站（NTTB）、大清水站（BCWB）與三棧北溪站（SJNB）及三分量井下應變儀太魯閣站（TRKB）。

中部陣列（Central Array）設置在海岸山脈中段，分別為三個體應變儀奇美站（CHMB）、猴子山站（HGSB）、樟原站（ZANB）與三分量井下應變儀，春日站（SSNB）。其中猴子山站（HGSB）的岩層較軟，因此該站的體應變儀設計有經過修改，使該站體應變儀適用於較軟的岩層。

南部陣列（Southern Array）安裝於海岸山脈南段，預計設置四站，目前已安裝三站。此三站分別為體應變儀五號橋站（FBRB）、三分量井下應變儀三仙台站（SSTB）與東河站（DONB）。

各測站詳細資料詳見表 1。本研究使用的資料為中部陣列井下應變儀的記錄資料。



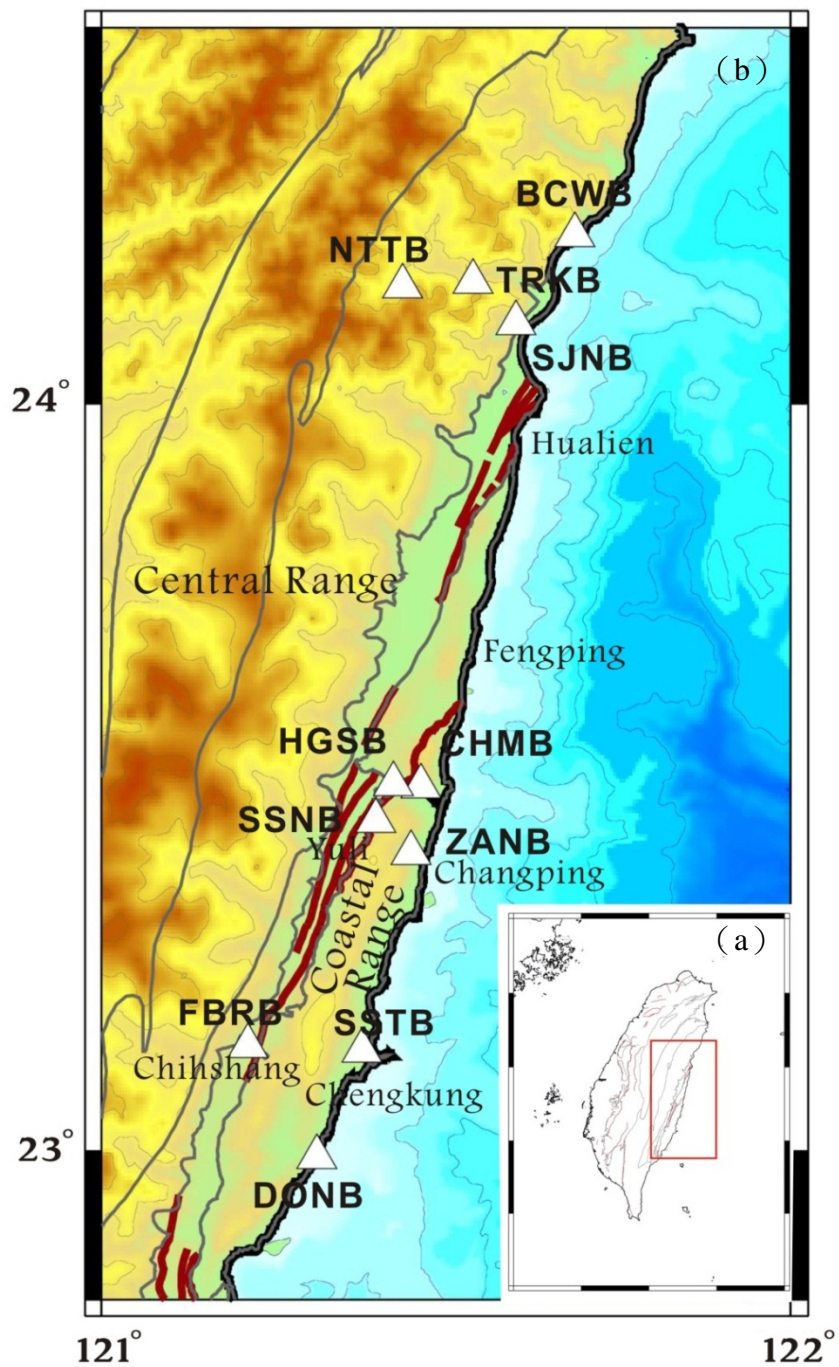


圖 13 中研院地球所設置之井下應變測站儀分布圖。(a) 紅框為中研院地球所井下應變儀設置區域。(b) 白色三角形為井下應變儀測站，紅色粗線為縱谷斷層。中研院地球所在臺灣東部的北段、中段與南段共設置三個陣列，截至 2012 年 6 月為止共安裝了 11 個測站。

表 1 中研院地球所安裝之 Sacks-Evertson 型井下應變儀基本資料一覽表。

	站名	埋設深度(m)	岩性	岩層單壓強度(kg/cm <sup>2</sup> )	破壞應變(%)	應變儀類型	記錄器	安裝日期
北部 陣列	大清水 (BCWB)	191.78	大理岩	960.6	1.4	體應變	Shoe BOX	2008/09/27
	太魯閣 (TRKB)	191.5	大理岩	541.9	0.9	三分量	Q330	2007/11/12
	三棧北溪 (SJNB)	193.11	從缺	從缺	從缺	體應變	Shoe BOX	2008/10/08
	九曲洞 (NTTB)	172.5	大理岩	954.7	1.3	體應變	Q330	2005/11/13
中部 陣列	奇美 (CHMB)	200	安山岩	391.1	1.1	體應變	Q330	2002/10
	猴子山 (HGSB)	266	安山岩	29.9	1.6	體應變	Q330	2003/05
	樟原 (ZANB)	218	安山岩	198.4	1.4	體應變	Q330	2003/12
	春日 (SSNB)	185	角礫岩	342.5	0.8	三分量	Q330	2005/11/10
南部 陣列	五號橋 (FBRB)	200	安山岩	從缺	從缺	體應變	Q330	2007/11/16
	三仙台 (SSTB)	199	砂岩	159.9	0.9	三分量	Shoe BOX	2008/10/02
	東河 (DONB)	181	凝灰岩	28.1	2.0	三分量	Shoe BOX	2011/02/13

### 第三章 井下應變儀資料處理

#### 3.1 井下應變儀資料前處理

本研究所使用之井下應變儀中部陣列記錄器為 Q330，其記錄的原始資料 (raw data) 為經過壓縮之檔案 (MiniSeed)，故需做資料之前處理 (pre-processing)，將資料轉換成程式能處理的 SAC 檔案格式。資料前處理流程圖如圖 14 所示，詳細過程請見附錄一 井下應變儀資料前處理過程。為了方便之後資料處理，此處將連續的資料時間區間切割為一個月一筆檔案，並從 MiniSeed 檔案格式轉換成 SAC 檔案格式。此外，因本研究所使用的資料時間區段為數年之資料，且原始資料的頻率為 100 Hz 和 1 Hz，在考慮校正時所使用的氣象資料取樣率為 1 小時 1 點，因此本研究將 1 Hz 資料降頻至 0.01667 Hz (資料取樣頻率為 1 小時 1 點) 以方便後續的資料氣壓校正。經過資料前處理後的檔案，為 3.2 節所使用的資料。

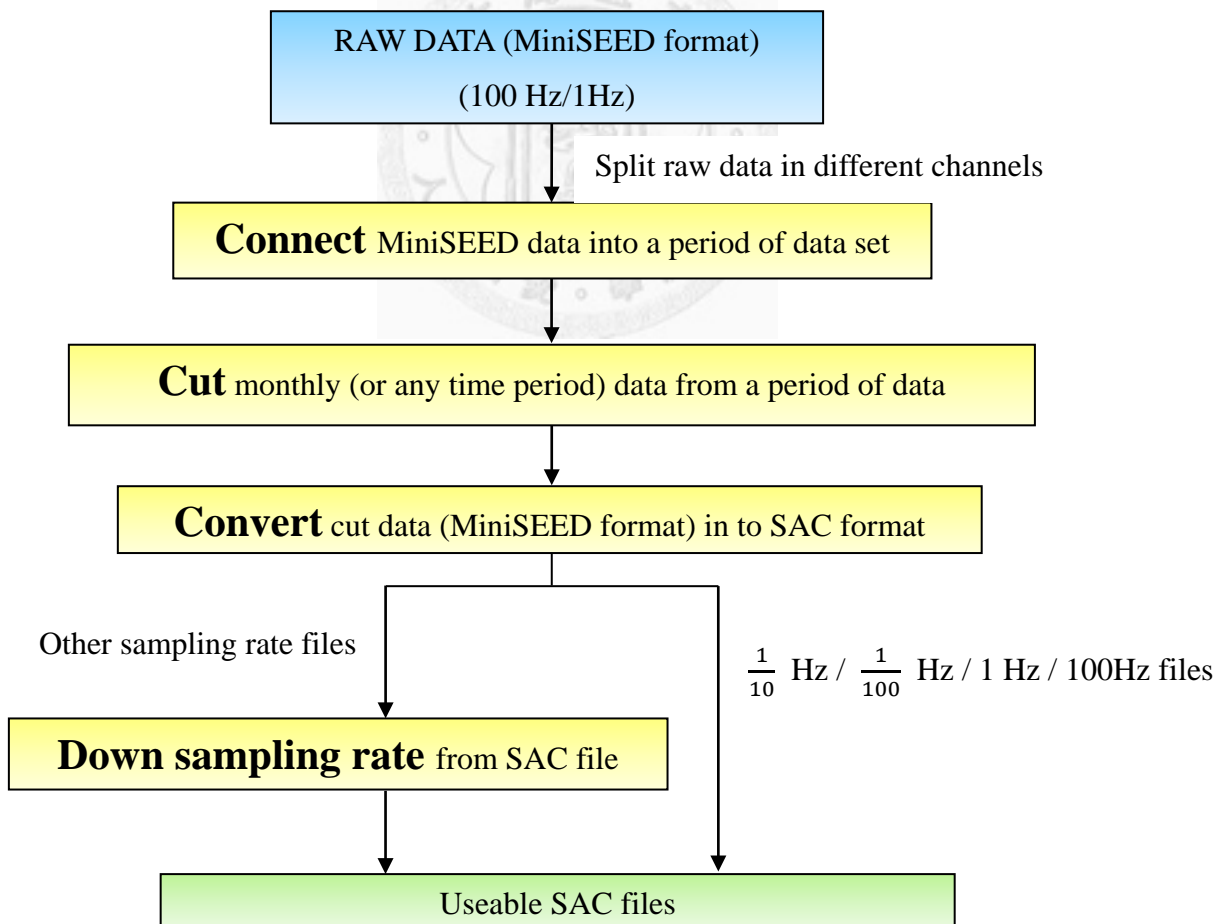


圖 14 井下應變儀資料前處理流程圖。

### 3.2 井下應變儀資料校正 (Calibration)

在進行井下應變儀資料分析前，需進行一系列的校正，得出可能與地殼變形有關的訊號。本研究資料處理與校正在以下各節詳述，資料處理與校正流程圖如圖 15。

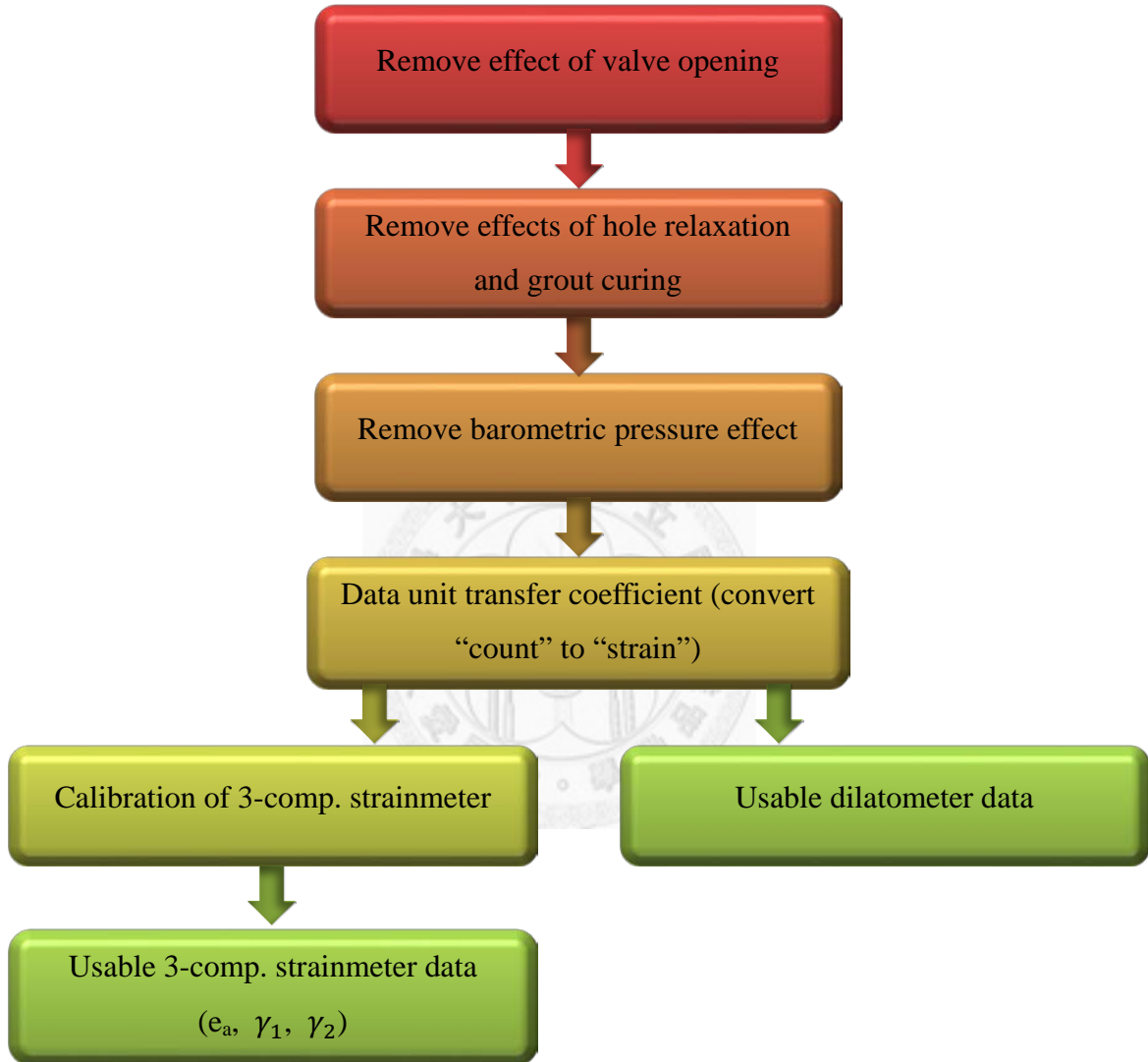


圖 15 井下應變儀資料處理與校正流程圖。

### 3.2.1 不連續資料記錄修正

Sacks-Evertson 型態的井下應變儀主要由 DT1 記錄儀器受力產生的變形，為了達到記錄觀測資料的高解析度( $10^{-12}$ )，因此在伸縮盒伸縮量達到儀器設計極限時，閥門一 (Valve 1) 便會自動開啟約 15 秒的時間，使 DT1 記錄在閥門一開啟的數秒內歸零，重新記錄。在閥門一關閉後約 2 至 3 小時，閥門二 (Valve 2) 亦會開啟，使 DT2 記錄歸零，重新記錄。此一儀器歸零動作導致 DT1 觀測資料的不連續，因此必須修正觀測資料的不連續，以利後續觀測資料分析研究。

而 Q330 記錄器並不會記錄閥門一及閥門二開啟時間，因此只能從觀測資料判斷閥門的開啟時間。根據閥門一開啟約 2 至 3 小時後閥門二跟著開啟的特性，以及觀察閥門一開啟時 DT1 的記錄平均下降門檻值 (threshold)，便可用程式判斷井下應變儀閥門一開啟時間 (圖 16)。得到閥門一開啟時間後，假設觀測記錄在閥門一開啟前與閥門一關閉後的記錄值相同，計算出閥門開啟前後的觀測記錄差值，並將此一差值加回閥門開啟後的觀測資料，便可將觀測資料修正成連續記錄 (圖 17)。此外，猴子山站 (HGSB)、奇美站 (CHMB) 及春日站 (SSNB) 礙於 DT2 記錄的不穩定，無法利用閥門一開啟之後 2 至 3 小時閥門二接續開啟的特性判斷閥門一開啟時間，因此上述三個測站測站僅利用觀察閥門一開啟時觀測記錄的平均下降值，將此下降值做為門檻值。另外每次閥門一開啟時訊號皆有相同特性 (圖 18)。在閥門開啟前約 10 秒處，應變記錄開始震盪，直到閥門開啟前約 2 至 3 秒內震盪之振幅達到最大，接著閥門開啟 15 秒，應變記錄歸零，閥門跟著關閉，應變記錄在歸零之後的 20 秒內持續震盪，且震盪的振幅與相位近似。在閥門關閉約 20 秒後，應變記錄回歸正常。藉由比對觀測資料在不連續處震盪的特性及當訊號超過門檻值的變化，便可判斷閥門一開啟時間，以修正資料不連續。

在三分量井下應變儀的不連續資料記錄修正中，本研究將三個感測器 DT1、DT2 和 DT3 所記錄的訊號各自獨立以上述方法做不連續資料記錄修正。獨立修正三分量資料的優點是當 DT1、DT2 及 DT3 記錄並非同時歸零而是先後歸零時，可避免誤判導致錯誤修正結果。中部陣列各站閥門一開啟門檻值詳列表 2。

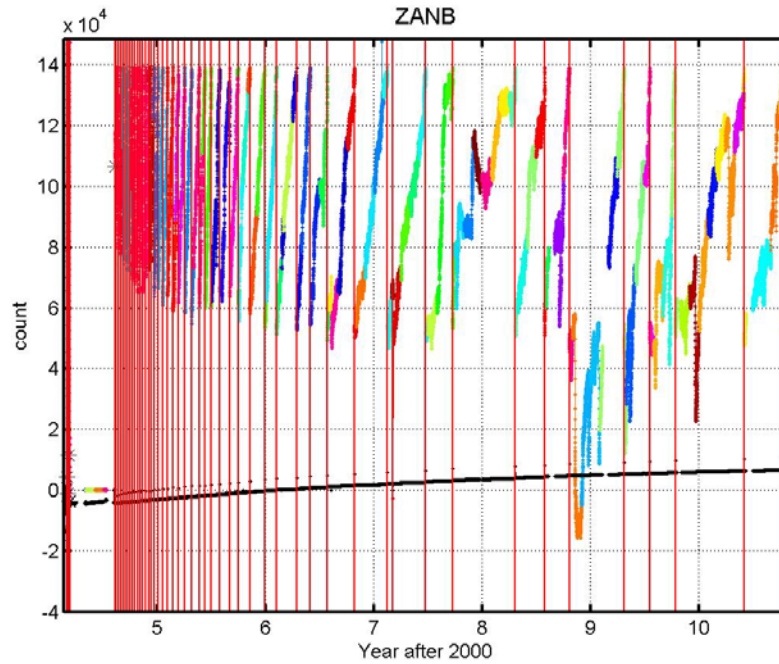


圖 16 ZANB 站不連續記錄之閘門一與閘門二開啟時間判斷圖。以 ZANB 站為例，圖中縱軸單位為電壓讀數 (count)，橫軸時間單位為 2000 年之後的年份。彩色線為 DT1 每個月的應變連續時間序列，黑色橫線為 DT2 連續時間序列，紅色垂直線為程式判斷出的閘門一開啟時間。

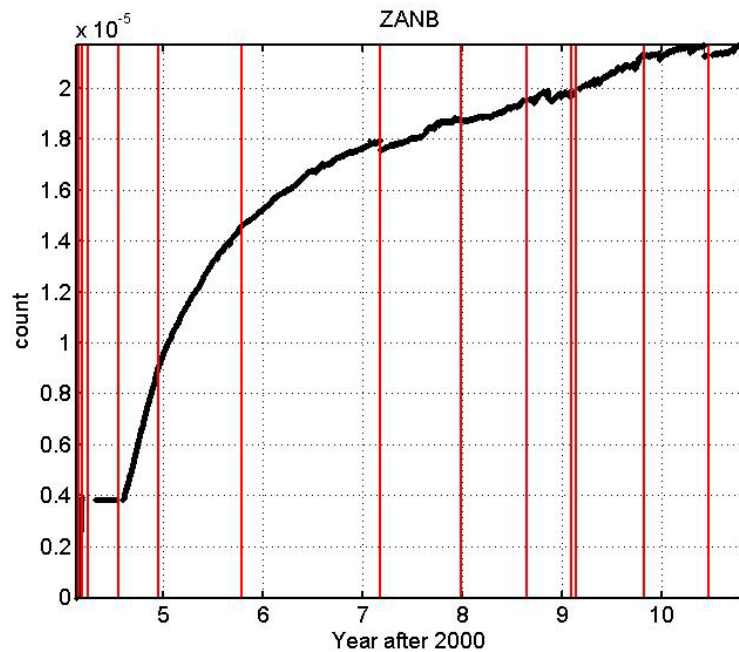


圖 17 ZANB 站記錄經過不連續資料修正之結果。黑色實線代表 ZANB 站從 2004 年以來至 2010 年 10 月經過不連續資料修正後的記錄，垂直紅線為記錄中斷時間。



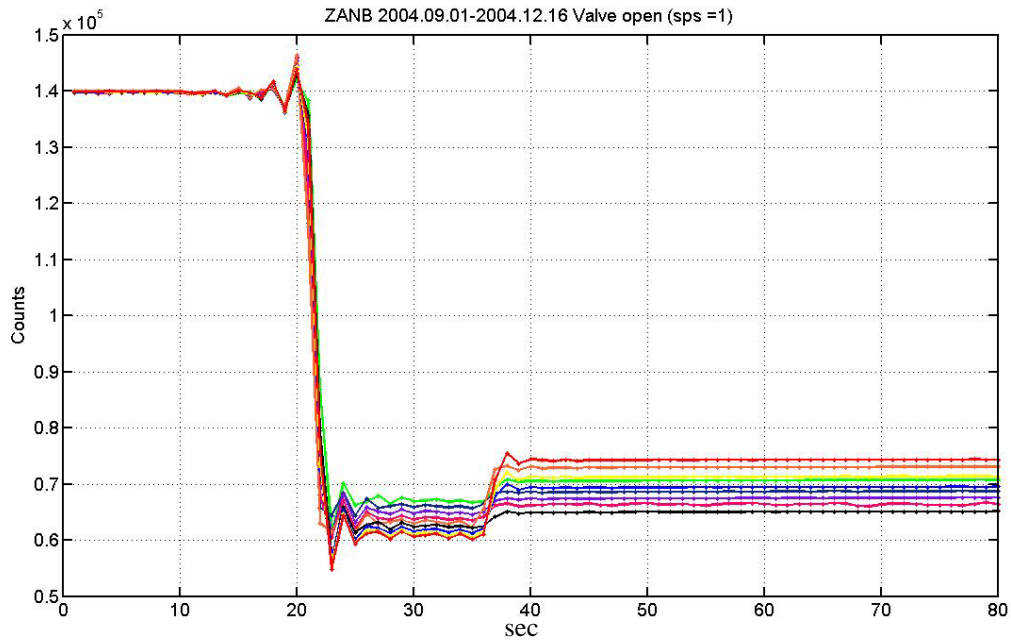


圖 18 ZANB 站閥門一開啟時之資料變化特性圖。 本圖以 ZANB 站 2004 年 9 月 1 號至 2004 年 12 月 6 號間閥門一開啟的資料為例，彩色線為在此時間區段中，不同時間閥門一開啟資料。資料頻率為 1 Hz，圖中為閥門一開啟前 20 秒至開啟後 60 秒，共 80 秒的應變記錄變化。

### 3.2.2 水泥乾涸及井孔回復效應修正

井下應變儀原始觀測記錄中主要訊號來源為水泥乾涸（Grout Curing）及井孔回復效應（Hole Relaxation）造成的應變。因埋設井下應變儀前鑽井破壞岩層穩定度，加上利用不收縮水泥填滿儀器及井壁之間的空隙，使井下應變儀的記錄主要被水泥乾涸作用及井孔回復效應所控制，此兩種效應影響觀測記錄的時間尺度為數月至數年，因此必須加以修正。

水泥乾涸及井孔回復效應造成的應變變化可用下列理論公式表示：

$$S(t) = F + A_1 e^{\frac{-t}{\lambda_1}} + A_2 e^{\frac{-t}{\lambda_2}} + mt \quad (\text{Eq. 3-1})$$

$S(t)$  為應變記錄， $t$  為觀測資料時間。 $F$  為常數截距（offset），其值決定於起始應變記錄，為未知常數。 $A_1 e^{\frac{-t}{\lambda_1}}$  為水泥乾涸的應變變化量， $A_2 e^{\frac{-t}{\lambda_2}}$  為井孔回復效應的

應變變化量，其中 $\lambda_1$ 與 $\lambda_2$ 為未知的時間常數，與岩石強度有關。 $m$  描述長期且穩定的應變記錄線性趨勢。

井下應變儀歸零之動作會使常數截距  $F$  成為非穩定常數，使估計水泥乾涸及井孔回復效應產生誤差。為避免此一誤差，本研究採用[劉啟清等人，2007]所提出之方法，將(Eq. 3-1)對時間  $t$  微分後，成為下式：

$$\frac{dS(t)}{dt} = \frac{-A_1}{\lambda_1} e^{\frac{-t}{\lambda_1}} - \frac{A_2}{\lambda_2} e^{\frac{-t}{\lambda_2}} + m \quad (\text{Eq. 3-2})$$

(Eq. 3-1)經微分運算後， $F$  項消失，成為(Eq. 3-2)，如此可避免估計  $F$  時所引進的誤差。

為求得各個井下應變儀的水泥乾涸及井孔回復效應，本研究利用各站設站以來至 2010 年 10 月，取樣率 1 小時 1 點的觀測資料，以格點搜尋（grid search）與逆推求得兩項時間常數的最佳解（圖 19、圖 20），以計算各站水泥乾涸及井孔回復效應最佳模型（圖 21）。將觀測資料減去最佳模型，殘餘值便為修正水泥乾涸及井孔回復效應後的結果（圖 22）。

對體應變儀而言，其記錄只有單分量，故一個測站只會對應到一組 $\lambda_1$ 與 $\lambda_2$ 。三分量井下應變儀記錄有方向性，加以考慮水泥乾涸和井孔回復現象並非均向（isotropy）變化，在做資料校正時，需將三個分量以本節方法各自獨立校正，使三分量井下應變儀測站三個分量各自對應到不同的時間常數 $\lambda_1$ 與 $\lambda_2$ 。各站的 $\lambda_1$ 與 $\lambda_2$ 值見表 2。



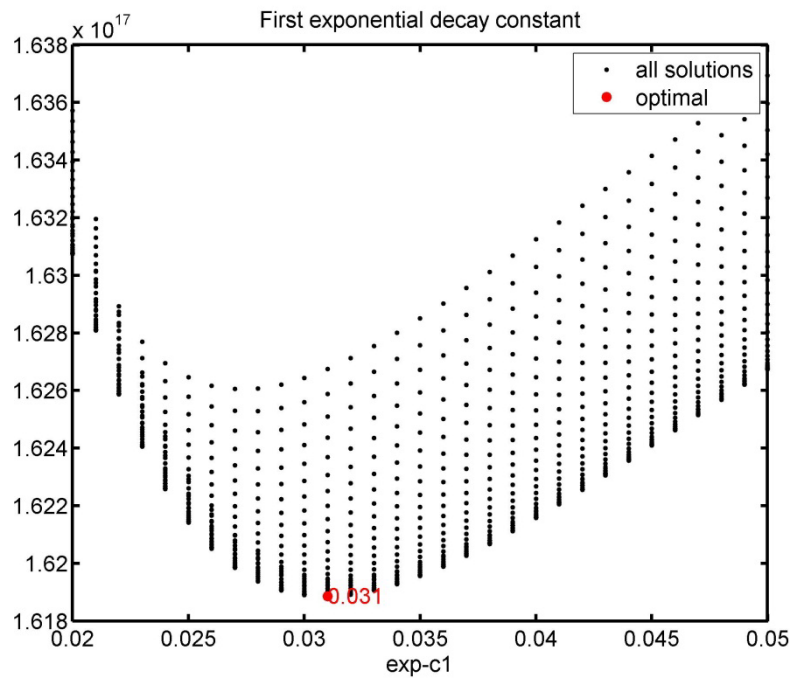


圖 19 時間常數 $\lambda_1$ 的最佳解。黑點是使用逆推與格點搜尋找出 ZANB 站記錄 $\lambda_1$ 所有的解，紅點則為 $\lambda_1$ 最佳解，本站 $\lambda_1$ 最佳解為 0.31。

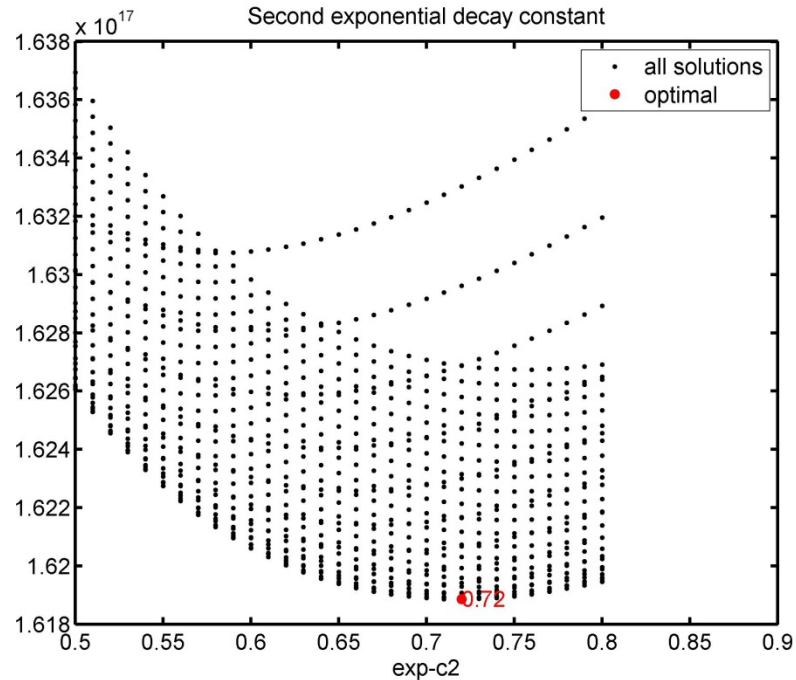


圖 20 時間常數 $\lambda_2$ 的最佳解。黑點是使用逆推與格點搜尋找出 ZANB 站記錄 $\lambda_2$ 所有的解，紅點則為 $\lambda_2$ 最佳解，本站 $\lambda_2$ 最佳解為 0.72。

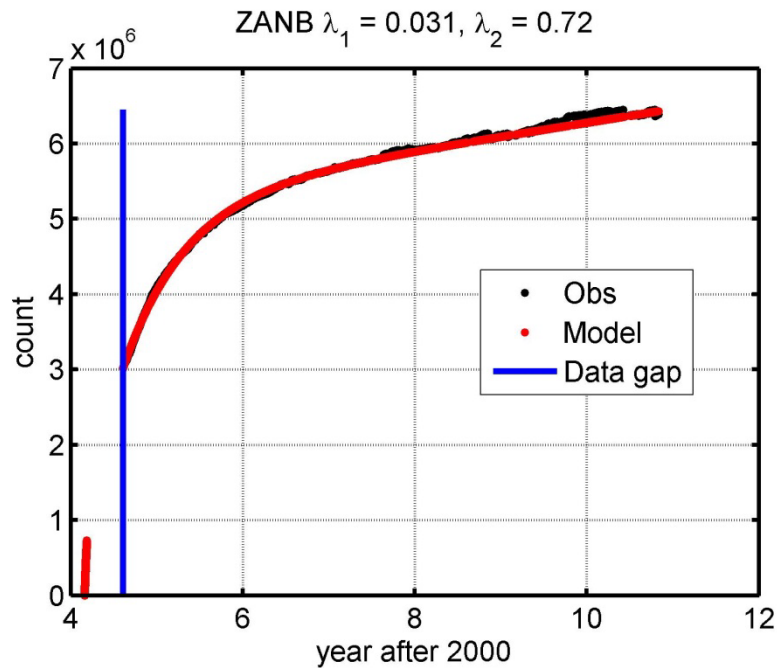


圖 21 水泥乾涸與井孔回復效應修正模型與觀測值。黑點為 ZANB 站從 2004 年設站以來之觀測資料，紅點代表水泥乾涸與井孔回復效應預測模型，藍色為資料記錄中斷時間。

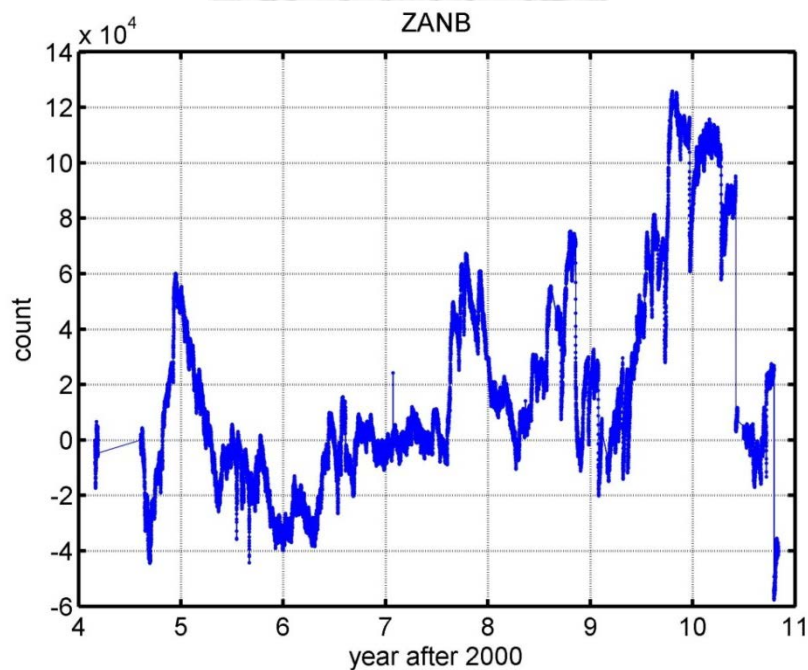


圖 22 ZANB 站經水泥乾涸和井孔回復效應修正後記錄。藍色實線為 ZANB 站經修正水泥乾涸和井孔回復效應後的記錄，資料記錄斜率負值為壓縮訊號，反之則為伸張訊號。

表 2 井下應變儀中部陣列各站參數一覽表。

Station Parameter	CHMB	ZANB	HGSB	SSNB DT1	SSNB DT2	SSNB DT3
Transfer Coefficient (strain/count)	$-2.5 \times 10^{-12}$	$-5.25 \times 10^{-12}$	$-4.45 \times 10^{-12}$	$-5.25 \times 10^{-12}$	$-5.25 \times 10^{-12}$	$-5.25 \times 10^{-12}$
$\lambda_1$	0.6	0.03	0.04	0.01	0.17	0.28
$\lambda_2$	1.6	0.68	0.15	0.76	2	3.5
Valve Opening Threshold (count)	$1 \times 10^5$	$5 \times 10^4$	$1.2 \times 10^5$	$5 \times 10^4$	$5 \times 10^4$	$5 \times 10^4$
$C_a$ (strain/hPa)	$4.97 \times 10^{-11}$	$3.5 \times 10^{-9}$	$2.6 \times 10^{-9}$	$9.1 \times 10^{-10}$	$9.1 \times 10^{-10}$	$9.1 \times 10^{-10}$
Azimuth (degree)	dilatometer	dilatometer	dilatometer	298	58	178

### 3.2.3 氣壓修正

應變觀測記錄中，亦會包含氣壓變化造成的岩石應變。當氣壓值降低，地表岩石單位面積空氣柱重量減少，岩石便會膨脹，產生伸張應變訊號；當氣壓值升高，地表岩石單位面積上的空氣柱重量增加，會造成壓縮應變訊號，此一關係在井下應變記錄中甚為明顯(圖 23)，因此必須針對氣壓造成的岩石應變進行修正。

假設此一氣壓變化造成的岩石應變量為一線性關係式：

$$\Delta S(t) = C_a \Delta P(t) \quad (\text{Eq. 3-3})$$

$\Delta S(t)$  為應變隨時間變化量，斜率正值為伸張訊號，斜率負值為壓縮訊號。 $\Delta P(t)$  為氣壓隨時間變化量， $C_a$  為氣壓導致岩石應變轉換係數，單位為 strain/hPa。此係數因各站圍岩不同而相異。

本研究挑選颱風過境期間，氣壓急遽降低導致岩石對於氣壓變化所產生的伸張應變量來計算各站井下應變儀的轉換係數  $C_a$ 。氣象資料使用最接近中部陣列的舞鶴自動氣象站 (C0Z070) 記錄，以降低空間上氣象因子不一致的誤差。氣壓資料取樣頻率為 1 小時 1 點，應變記錄亦為相同取樣率。本研究挑選颱風過境氣壓值下降和上升過程期間，應變儀記錄到伸張訊號的時間區段，利用(Eq. 3-3)計算岩石因氣壓改變產生的應變量。此處假設岩石伸張訊號最大值為氣壓值達到最低的時候，且氣壓變化觸發的應變伸張訊號為即時反應。將氣壓急遽下降前五天的平均氣壓值以及應變量做為參考基準，計算氣壓變化量觸發的應變變化量，進而得到各站  $C_a$  值，並以(Eq. 3-3)計算該站岩石受氣壓變化產生的理論變形訊號，以修正應變資料(圖 24)。各站的  $C_a$  值詳見表 2。

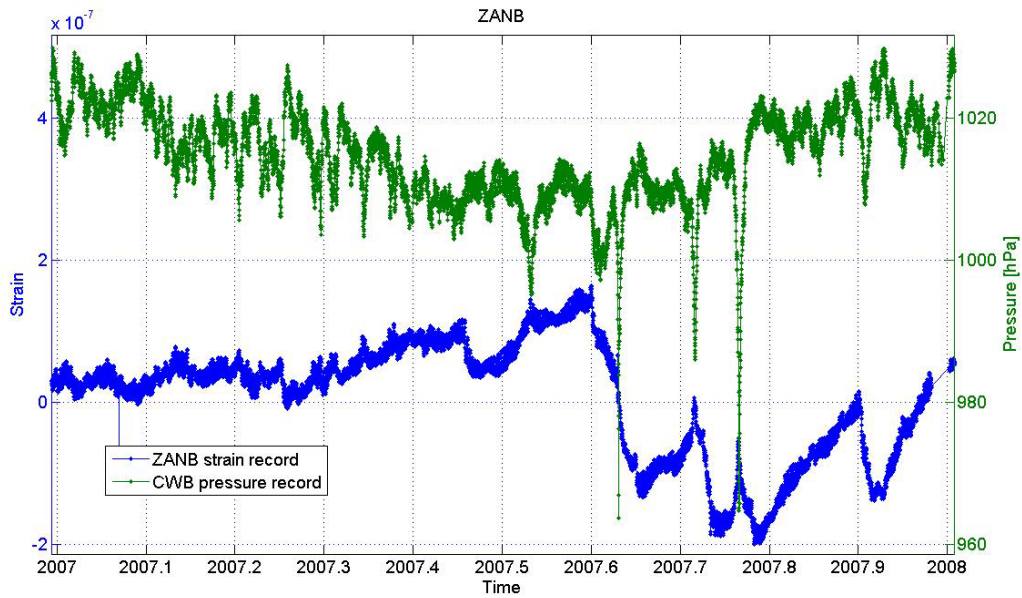


圖 23 ZANB 站 2007 年應變記錄與氣壓記錄。本圖為 ZANB 站與氣象局 C0Z070 自動氣象站氣壓記錄。藍色線為 ZANB 站記錄，負斜率代表壓縮應變，正斜率代表伸張應變；綠色線為氣壓記錄。由圖中可看出氣壓對應變記錄的影響。

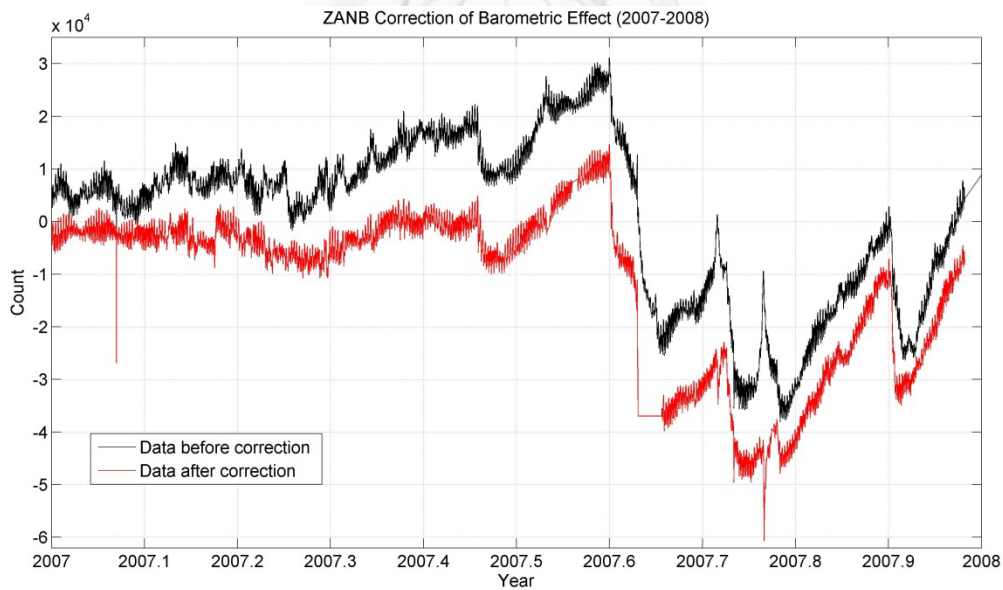


圖 24 ZANB 站經氣壓修正前與修正後應變記錄。ZANB 站使用 C0Z070 測站 2007 年的應變資料經氣壓修正後結果。黑色實線為修正氣壓變化前的應變記錄，紅色實線是修正氣壓變化後的應變記錄。

### 3.2.4 潮汐擬合與資料單位轉換修正

井下應變儀儀器設計輸出的訊號單位為電壓讀數 (count) 而非真實應變，因此在使用井下應變儀記錄分析之前需做單位校正，將讀數值轉換為真實的「應變 (strain)」。校正方法為將儀器記錄的讀數需與已知應變量做對比，便可計算各井下應變儀測站電壓讀數單位轉換成應變的轉換係數。目前可使用的已知應變對比方法有下列兩種：

1. 將井下應變儀記錄到潮汐分潮振幅與理論潮汐模型中同一個分潮振幅做對比，其比值即為轉換係數。在應變儀資料處理中習慣以半日潮或全日潮振幅最大的  $M_2$  或  $O_1$  模式 (mode) 做比較。
2. 以井下應變儀記錄到的遠震表面波中的雷利波振幅和附近 (或共站) 之地震儀記錄到的同筆地震事件雷利波振幅相對比，其比值即為轉換係數。

在訊號中，以電壓讀數 (count) 記錄的觀測訊號值與用以做校正的訊號值為線性關係，關係式如下：

$$S(t) = CV(t) \quad (\text{Eq. 3-4})$$

$S(t)$  為應變時間序列，可用地潮振幅或遠震表面波中的雷利波振幅做為參考值，單位為應變 (strain)。  $V(t)$  為井下應變儀讀出值，係電壓讀數隨時間變化訊號，單位為電壓讀數 (count)。  $C$  為轉換係數 (transfer coefficient)。其中轉換係數  $C$  會隨各測站圍岩岩性及狀態不同而改變，單位為 strain/count。本研究計算轉換係數的方法為上述第一種方法：用潮汐分潮之振幅觀測值與潮汐分潮振幅理論值的比值做為各站的轉換係數。

本研究嘗試使用兩種方法來擬合潮汐振幅，以用來做應變記錄的單位轉換：第一種方法是使用 sin 函數與 cos 函數擬合并下應變儀觀測到的一個月潮汐應變變化，得出各潮汐分潮 (tidal constituent) 於觀測記錄中的振幅。第二種方法使用 SPOTL 程式 [Agnew, 1996] 推算該測站的理論潮汐模型，估計該站受理論潮汐影響產生的真實應變量，並計算 SPOTL 估計出的潮汐分潮振幅和應變觀測擬合結果的潮汐振幅之比值，兩者比值即為該站的轉換修正參數  $C$ 。

第一種擬合方法係利用 sin 函數與 cos 函數擬合并下應變儀觀測記錄中潮汐效

應所引發的應變訊號，而用來擬合應變觀測值的潮汐效應可用下列方程式描述：

$$T(t) = A_i \sin(2\pi\omega_i t) + B_i \cos(2\pi\omega_i t) \quad (\text{Eq. 3-5})$$

其中， $i$  代表不同的潮汐模式 (mode)， $A$  與  $B$  分別為  $\sin$  函數和  $\cos$  函數之振幅， $\omega$  為潮汐頻率， $t$  為時間。本研究使用地潮中振幅最為顯著的 4 個潮汐分潮做潮汐擬合 (圖 25)，使用的 4 個分潮模式分別為半日潮的  $M_2$  和  $K_2$ ，全日潮的  $K_1$ 、 $O_1$ ，各分潮的週期詳見表 3。

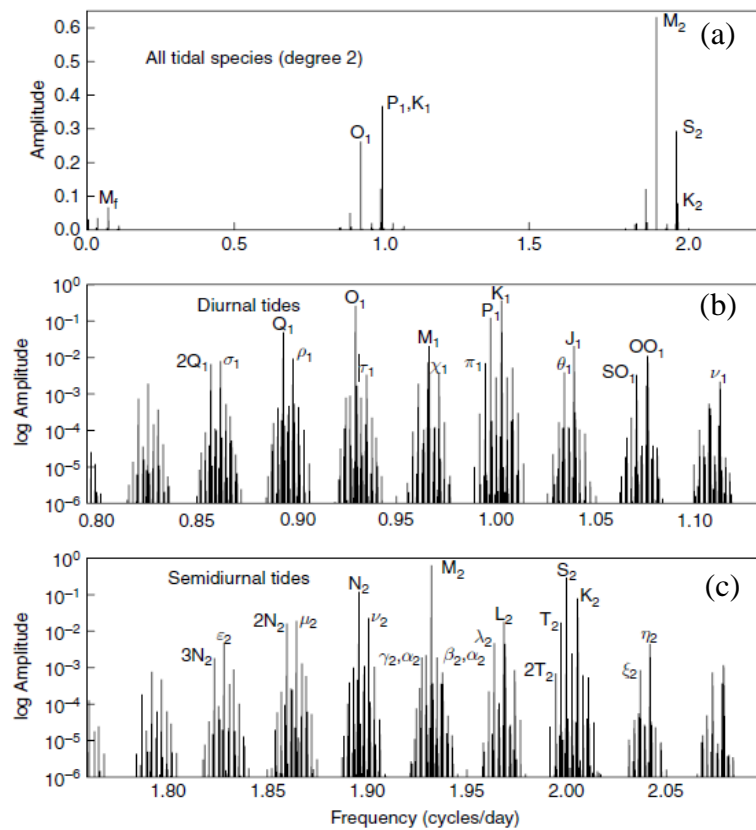


圖 25 潮汐各分潮頻率與振幅圖[Agnew, 2007]。(a) 潮汐各分潮頻率與振幅圖，橫軸為頻率縱軸為振幅。由圖上可看出潮汐分潮中振幅較明顯的分潮分別為全日潮 (diurnal) 的  $O_1$ 、 $P_1$  和  $K_1$  模式以及半日潮 (semidiurnal) 的  $M_2$ 、 $S_2$  和  $K_2$  模式。本研究挑選振幅最明顯的  $O_1$ 、 $K_1$ 、 $M_2$  與  $S_2$  做潮汐觀測振幅擬合。(b) 全日潮中各模式振幅與頻率關係圖，橫軸為頻率，縱軸為振幅取對數值，圖中顯示全日潮內振幅最大的前兩個模式分別為  $K_1$  和  $O_1$ 。(c) 半日潮中各模式振幅與頻率關係圖，橫軸為頻率，縱軸為振幅取對數值。



表 3 本研究使用的理論地潮四個分潮模式週期。

分潮	M <sub>2</sub>	S <sub>2</sub>	K <sub>1</sub>	O <sub>1</sub>
週期 (小時)	12.4206	12.0000	23.9344	25.8194

將潮汐週期換算成頻率之後代入(Eq. 3-5)，利用逆推方法求解觀測值中的潮汐振幅，其中逆推所用的格林函數 G 建立如下：

$$G = \begin{bmatrix} 1 & t_1 & e^{\lambda_1 t_1} & e^{\lambda_2 t_1} & \sin(2\pi\omega_1 t_1) & \cos(2\pi\omega_1 t_1) & \cdots & \sin(2\pi\omega_4 t_1) & \cos(2\pi\omega_4 t_1) \\ 1 & t_n & e^{\lambda_1 t_n} & e^{\lambda_2 t_n} & \sin(2\pi\omega_1 t_n) & \cos(2\pi\omega_1 t_n) & \cdots & \sin(2\pi\omega_4 t_n) & \cos(2\pi\omega_4 t_n) \end{bmatrix}_{n \times 12} \quad (\text{Eq. 3-6})$$

格林函數 G 為  $n \times 12$  之矩陣，式中前 4 項代表應變資料趨勢 (trend)，後 8 項則為潮汐分潮項。t 為應變時間序列，n 為資料個數， $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  是於 3.2.2 所求得之水泥乾涸與井孔回復效應參數， $\omega_1$  至  $\omega_4$  為潮汐各分潮的頻率，順序為 M<sub>2</sub>、S<sub>2</sub>、K<sub>1</sub> 與 O<sub>1</sub>。求得之模型值第 4 至第 12 項即為各個分潮在觀測值中的振幅。

第二種修正方法則利用 SPOTL 程式[Agnew, 1996]計算中部陣列各站的理論潮汐。此一程式的優點在於它能計算除了理論重力潮汐外，亦可估計理論潮汐造成的位移、傾斜 (tilt) 以及應變的變化。此外，若有當地詳細的海底地形資料，此程式亦可估計海潮於該地點的應變時間序列。本研究應用 SPOTL 程式內建的套件 NLOADF[Agnew, 1997]，以 NAO.99b 潮汐預測模型計算潮汐四個分潮 (M<sub>2</sub>、S<sub>2</sub>、K<sub>1</sub> 與 O<sub>1</sub>) 於中部陣列各測站的振幅和相位，各站分潮的振幅和相位數據列於表 4。理論潮汐分潮振幅可以與觀測值中的潮汐振幅相比得出轉換係數 C。在井下應變儀單位轉換校正中，習慣以潮汐中振幅最大的 M<sub>2</sub> 或 O<sub>1</sub> 分潮求得觀測與理論值之比值做為該站校正值。而本研究以振幅最為顯著的 M<sub>2</sub> 模式做為計算轉換值的依據，並於各站挑選數筆數天不等且記錄乾淨的應變資料做計算，將計算結果平均後即為該站的單位轉換係數。各站的轉換係數詳見表 2。



表 4 中部陣列各站以 SPOTL 計算得出之理論地潮振幅與相位表。

表中四個分潮之振幅值單位為  $10^{-9}\varepsilon$ ，相位單位為度。

測站名稱 潮汐分量		ZANB	HGSB	CHMB	SSNB
<b>M<sub>2</sub></b>	Amplitude	4.4033	3.6178	4.2484	3.4184
	Phase	32.25	23.64	29.71	22.45
<b>S<sub>2</sub></b>	Amplitude	1.9458	1.5692	1.8635	1.4839
	Phase	21.11	15.72	19.33	15.33
<b>K<sub>1</sub></b>	Amplitude	2.8913	2.5039	2.8107	2.4200
	Phase	-115.64	-116.96	-115.41	-117.91
<b>O<sub>1</sub></b>	Amplitude	2.5743	2.2286	2.4960	2.1601
	Phase	-88.54	-89.24	-88.28	-89.91



### 3.3 三分量井下應變儀記錄校正

三分量井下應變儀記錄到的數值無法直接用來分析面應變與剪應變的變化，需要將 DT1、DT2 和 DT3 的記錄各自獨立經 3.2 節所述步驟修正後，再用其得到之結果校正為面應變  $e_a$ 、軸差應變  $\gamma_1$  與工程剪應變  $\gamma_2$ 。

本研究於三分量井下應變儀資料中使用的校正方法為[Hart et al., 1996]提出的交互耦合(cross coupling)校正方法。目前美國的 PBO(Plate Boundary Observation)亦使用此一方法校正井下應變儀。在三分量應變儀應變量測中，應變張量  $s$  可以下式表示：

$$s = \begin{bmatrix} e_a \\ \gamma_1 \\ \gamma_2 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix}, \text{ 其中 } A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 3-7})$$

$\varepsilon_{ij}$ 代表應變張量中的各個應變分量，1 為軸系統(axis system)中的東方，2 指示北方。在一個垂直的井中， $e_a$  是平行地表且近地表的面應變，而  $\gamma_1$  與  $\gamma_2$  分別為軸差應變與工程剪應變，兩者主應變軸分別平行軸系統及與軸系統夾  $45^\circ$  角。

[Hart et al., 1996]認為井壁、水泥和儀器等因素會讓岩石產生非均勻性(inhomogeneity)，此一現象使儀器記錄到的應變場並不能代表地體構造活動產生的應變，因此需要以下述方式找出地殼應變與儀器量測的應變之間的關係。又儀器觀測到的應變訊號小，且假設為線性耦合模型，故可用下列式子表示地殼應變量與儀器記錄訊號之間的關係：

$$s' = K s^R \quad (\text{Eq. 3-8})$$

$s^R$ 為來自地殼的應變(remote strain)，而  $K$  則為一個  $3 \times 3$  的耦合矩陣(coupling matrix)。在三分量井下應變儀記錄中， $s'$  為儀器量測之三個不同方向的應變張量。若假設儀器設站位置此處的岩石為均質分布(isotropic)，則此一耦合矩陣  $K$  可表示成：

$$K = \begin{bmatrix} c & 0 & 0 \\ 0 & d & 0 \\ 0 & 0 & d \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 3-9})$$

其中  $c$  與  $d$  為三分量井下應變儀的耦合係數。因此應變場與三分量井下應變儀記錄之間的關係可以用下列式子表示：

$$s^R = Se \quad , \quad \text{其中 } s^R = \begin{bmatrix} e_a \\ \gamma_1 \\ \gamma_2 \end{bmatrix}, \quad e = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 3-10})$$

$e$  為儀器記錄應變矩陣，代表應變儀所量測的徑向應變(radial strain)，其中  $e_1$  至  $e_3$  分別代表三個分量的儀器記錄。 $S$  則為和(Eq. 3-9)有關的耦合矩陣。因三分量井下應變儀應變轉換器具有方向性，故儀器量測到的特定方位徑向應變  $e_j$  和儀器量測到的應變張量  $s'$  可表示成：

$$e_j = \frac{1}{2}e_a^l + \frac{1}{2}\gamma_1^l \cos 2\theta_j + \frac{1}{2}\gamma_2^l \sin 2\theta_j \quad (\text{Eq. 3-11})$$

其中轉換器的方位角  $\theta_j$  單位為度，方向是以北方為起始點順時針方向旋轉。而一組三分量的轉換器儀器記錄  $e$  便可以下列公式表示之：

$$e = Os^l \quad (\text{Eq. 3-12})$$

在(Eq. 3-12)中， $O$  為轉換器方向矩陣：

$$O = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2}\cos 2\theta_1 & \frac{1}{2}\sin 2\theta_1 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2}\cos 2\theta_2 & \frac{1}{2}\sin 2\theta_2 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2}\cos 2\theta_3 & \frac{1}{2}\sin 2\theta_3 \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 3-13})$$

利用(Eq. 3-8)和(Eq. 3-12)，便可建立轉換器讀出值  $e$  和地殼應變  $s^R$  的耦合關係式：

$$e = Cs^R \quad (\text{Eq. 3-14})$$

$C$  代表儀器記錄  $e$  和地殼應變  $s^R$  的耦合矩陣，此一矩陣為：

$$C = OK \quad (\text{Eq. 3-15})$$

三分量井下應變儀的校正公式(Eq. 3-10)中的校正矩陣  $S$  可從(Eq. 3-15)以逆推求得：

$$S = C^{-1} = K^{-1}O^{-1} \quad (\text{Eq. 3-16})$$

整理(Eq. 3-10)與(Eq. 3-16)，可推導出(Eq. 3-17)，此公式即為校正三分量井下應變儀讀數至面應變  $e_a$ 、軸差應變  $\gamma_1$  與工程剪應變  $\gamma_2$  之式子：

$$\begin{bmatrix} e_a \\ \gamma_1 \\ \gamma_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c & 0 & 0 \\ 0 & d & 0 \\ 0 & 0 & d \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \cos 2\theta_1 & \frac{1}{2} \sin 2\theta_1 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \cos 2\theta_2 & \frac{1}{2} \sin 2\theta_2 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \cos 2\theta_3 & \frac{1}{2} \sin 2\theta_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 3-17})$$

$e_1$ 、 $e_2$  與  $e_3$  是三分量井下應變儀的記錄，本研究將 SSNB 站 DT1、DT2 和 DT3 的應變記錄以(Eq. 3-17)校正至面應變  $e_a$ 、軸差應變  $\gamma_1$  與工程剪應變  $\gamma_2$ ，校正後結果即為第四章討論中所用之三分量井下應變儀資料。

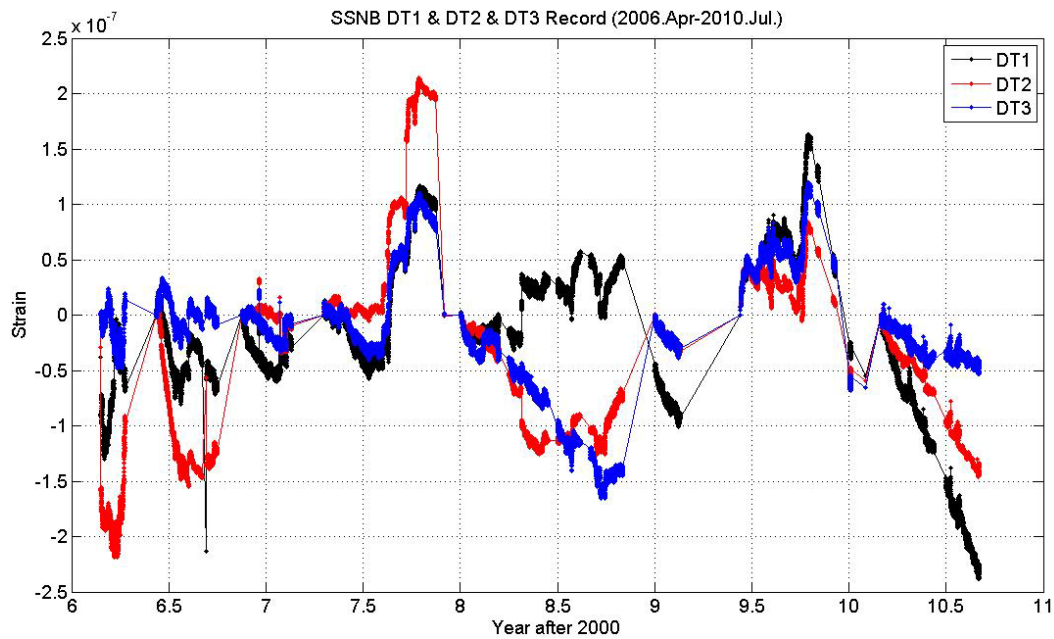


圖 26 SSNB 站 DT1、DT2、DT3 經 3.3 節校正前之資料記錄。圖中黑色實線為 DT1 記錄，紅色實線代表 DT2 記錄，藍色實線代表 DT3 記錄。資料區間為 2006 年 4 月至 2010 年 7 月，取樣率為 1 小時 1 點，資料已經過 3.2 節所述步驟校正以移除井孔回復效應、水泥乾涸效應與因氣壓變化而產生的變形效應。

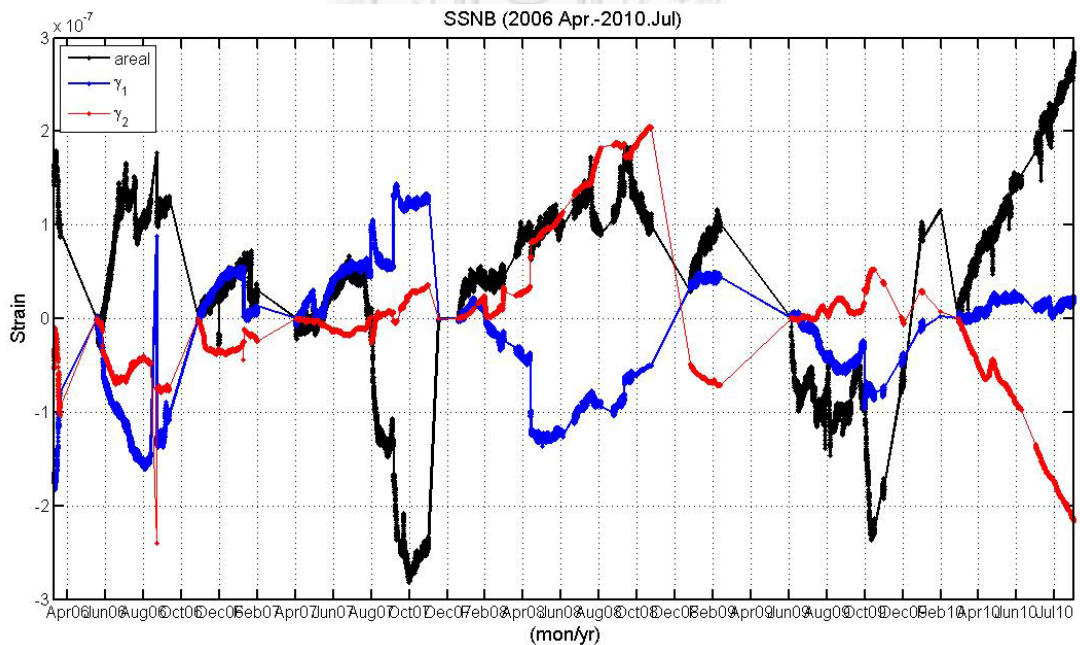


圖 27 SSNB 站經應變校正後之資料。圖中黑色實線為面應變  $\epsilon_a$ ，紅色實線代表工程剪應變  $\gamma_1$ ，藍色實線則為  $\gamma_2$ 。

## 第四章 結果與討論

### 4.1 應變變化與氣象因子關聯性分析

本研究使用之氣象資料為氣象局自動氣象站的雨量以及氣壓記錄，資料的取樣頻率 1 小時 1 點。考慮雨量及氣壓變化有其空間變化性，因此本研究使用靠近中部井下應變儀陣列之自動氣象站：舞鶴（C0Z070）氣象站（圖 3）從 2002 年至 2010 年 8 月氣象記錄，做為應變資料與氣象因子比對和分析之依據。

#### 4.1.1 應變變化與降雨之關聯性

本研究發現，中部陣列各站的應變記錄於強降雨發生時，井下應變儀的體應變與面應變同時會記錄到顯著壓縮應變，但工程剪應變對雨量的反應不明顯。從中部陣列設站以來至 2010 年，和降雨同步出現的應變訊號事件共 34 次（表 5）。在 34 次事件中，累積雨量最小值達 43 mm 就會觸發壓縮應變。以 2009 年下半年其中三次的降雨事件為例，2009 年 7 月中發生兩次降雨事件，累積降雨量分別為 103 mm 和 182.5 mm（圖 28），事件發生前後兩天內最大降雨強度為 11 mm/hr 與 22 mm/hr。在事件一中各站體應變皆有約 25 nε 至 60 nε 不等的壓縮應變量。事件二期間，最小的壓縮應變發生在 SSNB 站，約有 30 nε，而最大的壓縮應變量出現在 ZANB 站的記錄，約有 70 nε。工程剪應變  $\gamma_1$  與  $\gamma_2$  在這兩次的降雨期間訊號沒有明顯的變化，但  $\gamma_2$  在事件二降雨期間過後變形速率有所改變。在 2009 年 9 月的事件中，該區累計降雨量 220 mm，最大降雨強度為 39.5 mm/hr。降雨期間各站皆有記錄到體應變與面應變的顯著改變，SSNB 站面應變約有 35 nε 的壓縮量，HGSB 站則有 60 nε 的壓縮應變。壓縮應變最大的記錄出現在樟原站，約有 200 nε。CHMB 站在 9 月 27 號後記錄中斷，但在記錄中斷前，記錄到的壓縮體應變量亦超過 50 nε。在此同時，SSNB 站的工程剪應變  $\gamma_1$  並沒有明顯的變化，但在降雨之前  $\gamma_1$  應變記錄有緩慢的趨勢變化。而  $\gamma_2$  的應變紀錄似乎與降雨有同步的現象，但其應變變化相較於體應變記錄而言，斜率較為平緩且連續。就 34 次降雨伴隨應變變化事件，可觀察到體應變和面應變記錄產生變化時間幾乎與降雨時間同步，而工程剪應變  $\gamma_1$  和  $\gamma_2$  的記錄較不被降雨影響。推測造成此一現象的可能原因是因降雨導致地表岩石荷重（loading）產生變化。假設測站附近的岩石大約為均質（isotropic）分布，當

雨水累積在地表時，對於埋設在井內的應變儀而言是來自上方荷重的增加，導致岩石壓縮產生體積變形，因此體應變或面應變分量會記錄到壓縮變形訊號。又因為荷重變化是造成岩石體積改變，故工程剪應變的記錄並不會有明顯和降雨同步反應的訊號出現。而在所有降雨伴隨壓縮應變事件中，中部陣列四站的壓縮訊號持續時間大致上都和降雨期間相符，應變儀會記錄到降雨期間造成的岩石永久變形。但當降雨結束，應變記錄不會再出現短時間內顯著的應變變化。而 ZANB 站對降雨結束之後的反應時間則與其餘三站並不類似，壓縮變形的訊號在降雨結束之後還會持續 1 至數天不等（圖 28、圖 29）。若與同一次降雨期間，應變儀未經修改的 CHMB 站和 SSNB 站應變變化量相比，ZANB 站的壓縮量通常都是三站中變化最大的一站（表 5）。可能原因為根據各站的岩石強度試驗，ZANB 站的岩石硬度相較於 CHMB 站和 SSNB 站的岩石硬度要來得低（表 2），因此對於降雨造成的岩石荷重增加會產生比 CHMB 站和 SSNB 站更大的變形量。但降雨亦會使地下水的流動與地下水位面產生變化。

因此，為了初步釐清地下水、降雨與應變變化的相關性，本研究選擇最接近中部陣列的 RSUI 地下水觀測站做比較（圖 3）。以 2006 年 5 月到 2010 年 9 月的地下水記錄與 ZANB 站應變記錄為例（圖 30），在地下水記錄中，可以看出地下水位面的升降與降雨有正相關，累積降雨量越大，地下水水位上升，反之亦然。而觀察 ZANB 站的應變記錄，可以發現當地下水位面上升時，ZANB 站的記錄反應壓縮應變訊號；反之，當地下水位面下降時，ZANB 站的記錄則出現伸張訊號。原因可能是因在地下水位面上升時，孔隙液壓（pore pressure）增加，使岩石產生壓縮體積變形。當地下水位面下降，孔隙液壓被移除，岩石出現伸張變形。前人研究也指出在在岩層中有受壓含水層（confined aquifer）的情況下，大約 30-100 cm 的地下水位變動會造成約  $10^{-6}$   $\epsilon$  的岩石體積變形[Linde and Roeloffs, 2006]。因此初步推估，體應變記錄與面應變記錄和地下水位面升降可能也有關聯性，但因為地下水位面會有空間上的變化，RSUI 站位於花東縱谷西側，但井下應變儀中部陣列位於山區，縱谷與山區的地下水位面變化可能有些許差異，且在 2011 年 12 月前的井下應變儀測站沒有可做為控制的共站水位計資料，故此處無法排除體應變與面應變的變化是否單純為降雨產生的地表荷重所導致，或是降雨造成測站周圍的地下水因降雨的補充造成岩石孔隙液壓改變，致使體應變及面應變記錄到壓縮訊



號的可能性。

除了臺灣的應變儀記錄到與降雨同步的應變變化，日本[Yamauchi, 1987]、夏威夷[Wolfe *et al.*, 1981]與義大利[Dal Moro and Zadro, 1998]等各地裝設的不同類型應變儀都發現降雨與地下水等水文因素會影響應變。[Dal Moro and Zadro, 1998]研究指出，義大利安裝的傾斜式應變儀 (tilt-strainmeter) 面應變記錄會受降雨影響。而[Wolfe *et al.*, 1981]也發現 Benioff 類型的應變儀在降雨時也會反應出異常的應變變化，這些發現與本研究的結果一致，顯示面應變與體應變記錄易受水文的影響。



表 5 各站應變訊號異常變化事件時間表。

下表為各站產生異常應變訊號時的累積雨量、最大降雨強度、氣壓變化以及侵襲臺灣的颱風名字。其中應變變化值為正代表壓縮，負值為伸張。Nd 代表無資料。最大降雨強度的定義在應變事件發生前兩天與後兩天所有降雨記錄中，每小時降雨量的最大值為該次應變訊號異常事件中的最大降雨強度。氣壓變化之數字皆為該次應變事件中，最大的氣壓降低值。

No.	Year	Month	Day	CHMB (nε)	ZANB (nε)	HGSB (nε)	SSNB Areal (nε)	SSNB Y <sub>1</sub> (nε)	SSNB Y <sub>2</sub> (nε)	Pressure Change (hPa)	Maximum Intensity of Rainfall (mm/hr)	Accumulated Rainfall (mm)	Typhoon Name
1	2003	8	2	70	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	<5	34	241.5	MORAKOT
2	2004	6	30	120	Nd	60	Nd	Nd	Nd	23	Nd	Nd	MINDULLE
3	2004	12	2	200	185	80	Nd	Nd	Nd	24	62.5	491.5	NANMADOL
4	2005	5	25	Nd	40	Nd	Nd	Nd	Nd	<5	16	70	No Typhoon
5	2005	6	27	Nd	60	Nd	Nd	Nd	Nd	<5	11.5	71	No Typhoon
6	2005	7	17	Nd	-140	Nd	Nd	Nd	Nd	48	39.5	117	HAITANG
7	2005	8	4	Nd	-100	Nd	Nd	Nd	Nd	25	3.5	10.5	MATSA
8	2005	8	12	Nd	80	Nd	Nd	Nd	Nd	6	44.5	307.5	SANVU
9	2005	8	31	Nd	-157	Nd	Nd	Nd	Nd	53	38	140.5	TALIM
10	2005	9	9	Nd	-43	Nd	Nd	Nd	Nd	10	0	0	KHANUN
11	2005	9	21	Nd	90	Nd	Nd	Nd	Nd	11	34.5	235	DAMREY
12	2005	10	8	Nd	45	30	Nd	Nd	Nd	<5	21	120	No Typhoon
13	2005	11	11	0	20	10	Nd	Nd	Nd	<5	15	43	No Typhoon
14	2006	5	16	80	60	Nd	Nd	Nd	Nd	14.5	41	289	CHUNCHU
15	2006	6	8	Nd	70	50	10	0	0	10	7	119.5	No Typhoon

No.	Year	Month	Day	CHMB	ZANB	HGSB	SSNB Areal	SSNB $\gamma_1$	SSNB $\gamma_2$	Pressure Change (hPa)	Maximum Intensity of Rainfall (mm/hr)	Accumulated Rainfall (mm)	Typhoon Name
16	2006	7	24	Nd	130	Nd	25	0	10	17	22	218.5	KAEMI
17	2006	9	9	Nd	80	Nd	Nd	Nd	Nd	2	15	157	No Typhoon
18	2006	10	15	Nd	60	30	0	0	0	46.2	0	0	KOROSA
19	2007	8	6	Nd	100	50	40	0	0	12	32.5	237	PABUK
20	2007	8	16	Nd	65	100	100	0	0	46	20.5	205.5	SEPAT
21	2007	11	24	90	120	Nd	Nd	Nd	Nd	15	32	379	MITAG
22	2008	7	27	80	120	100	50	0	0	39.2	15.5	179	FUNG-WONG
23	2008	8	4	Nd	40	20	0	0	0	<5	16	121.5	No Typhoon
24	2008	9	22	70	80	35	15	0	0	8.5	13.5	101.5	HAGUPIT
25	2008	9	27	40	90	50	45	0	0	34.5	21	123.5	JANGMI
26	2008	11	7	Nd	-400	25	Nd	Nd	Nd	<5	5	77.5	No Typhoon
27	2009	6	14	30	50	Nd	10	-5	0	<5	14.5	64.5	No Typhoon
28	2009	6	20	100	80	Nd	20	0	0	<5	46	184	LINFA
29	2009	7	12	25	60	35	25	0	0	6	11	103	No Typhoon
30	2009	7	16	80	70	40	30	0	0	5	22	182.5	MOLAVE
31	2009	8	6	85	130	Nd	60	0	0	40	19	164	MORAKOT
32	2009	9	26	Nd	200	60	35	-50	0	<5	39.5	220	No Typhoon
33	2009	10	4	Nd	140	75	80	0	0	5	30	383	PARMA
34	2009	10	9	Nd	60	Nd	50	10	0	<5	26.5	164	No Typhoon

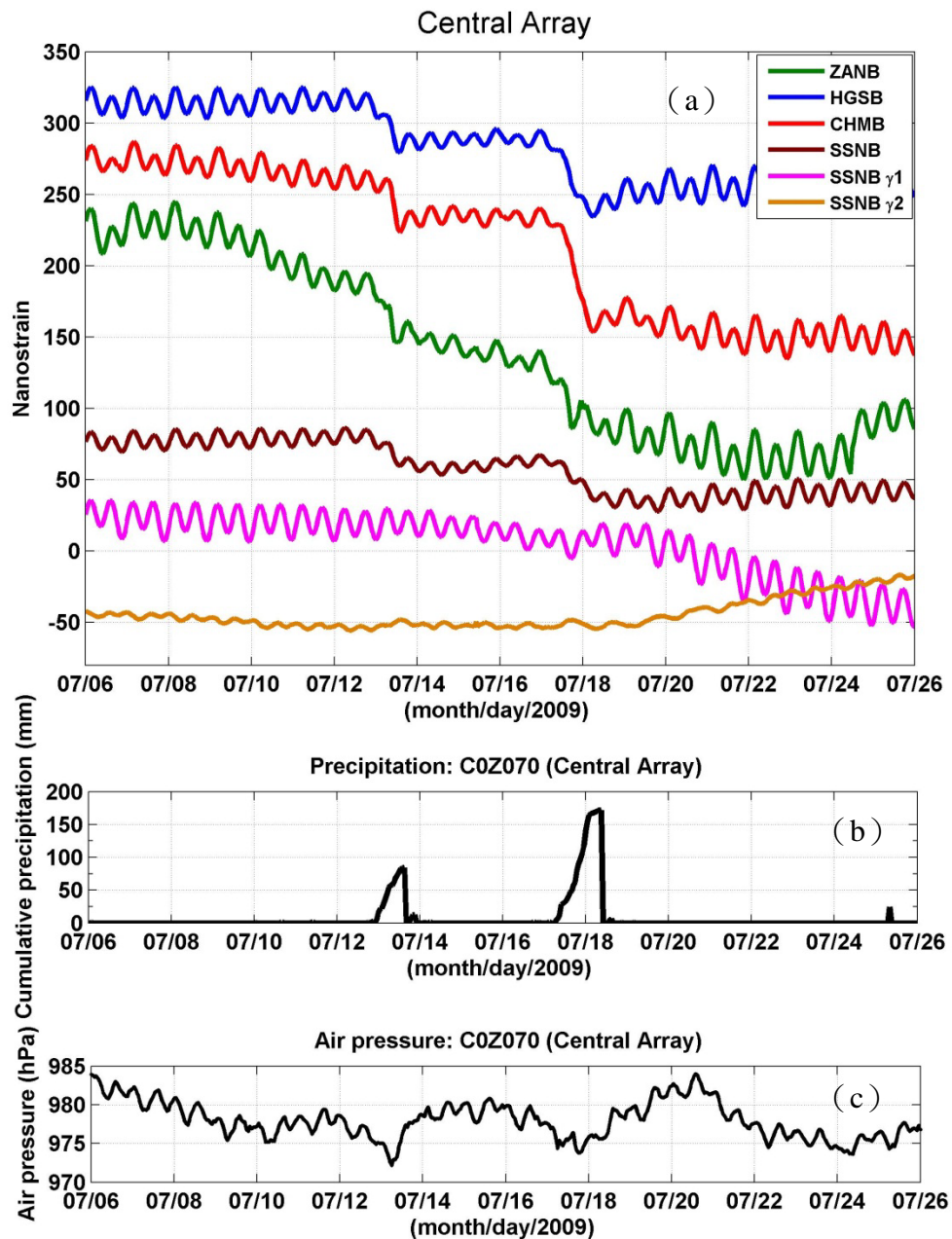


圖 28 2009 年 7 月中至 7 月底中部陣列應變、氣壓及雨量變化。(a) 中部井下應變儀陣列應變變化圖，橫軸為時間，縱軸為應變量，綠色線、藍色線、紅色線、咖啡色線分別為 ZANB 站、HGSB 站、CHMB 站及 SSNB 站取樣率一小時的體應變記錄，亮粉紅色線與土黃色線分別為春日站的工程剪應變  $\gamma_1$  及  $\gamma_2$ 。應變斜率為負指示岩層受到壓縮應變，應變斜率為正指示岩層受到伸張應變。(b) 累積雨量圖，橫軸單位為時間，縱軸單位為公厘 (mm)，本時段中共有兩次降雨事件。(c) 中央氣象局 C0Z070 自動氣象站之氣壓記錄，橫軸單位為時間，縱軸單位為百帕 (hPa)。

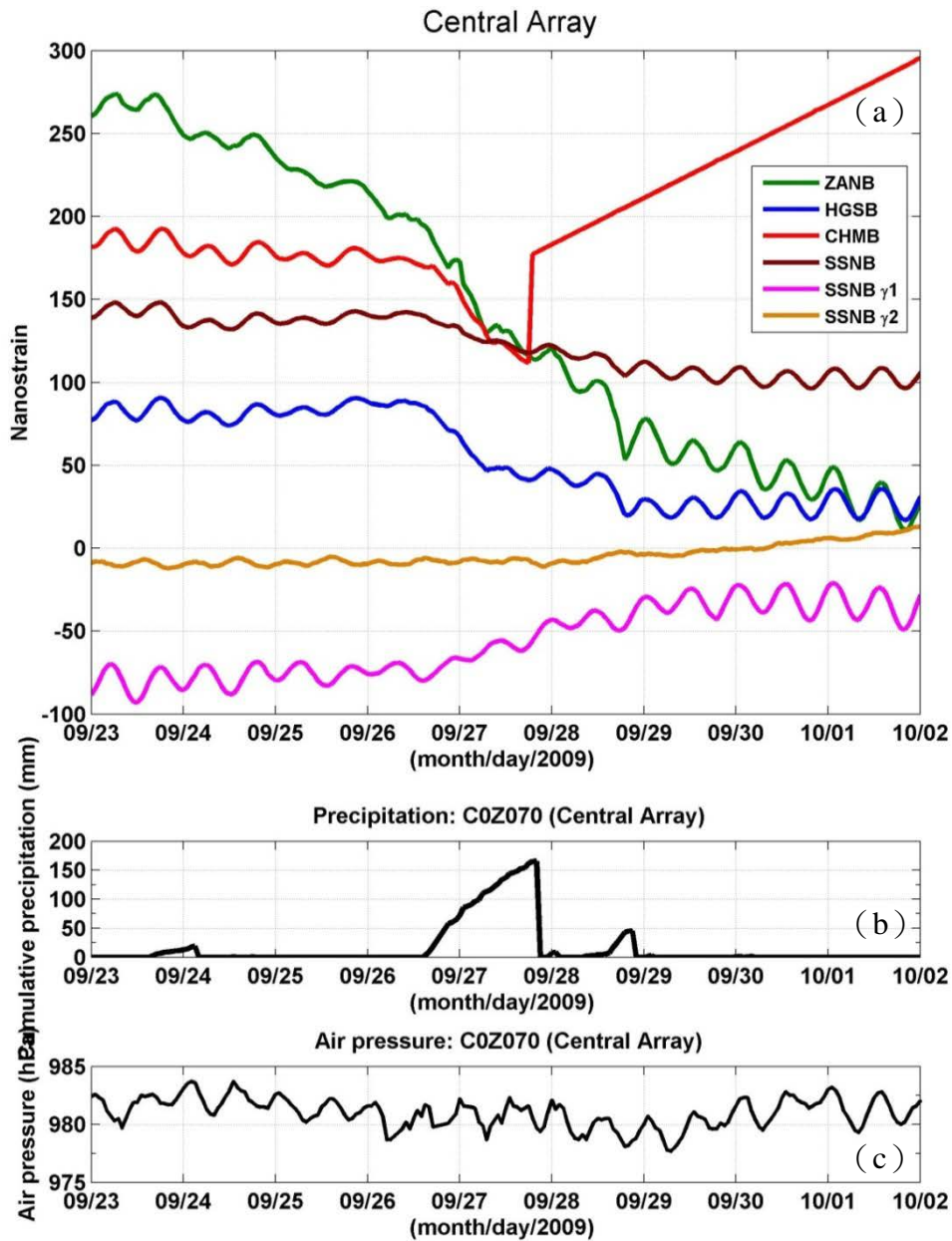


圖 29 2009 年 9 月中至 10 月初中部陣列應變、氣壓及雨量變化圖。(a) 中部井下應變儀陣列應變變化圖，橫軸為時間，縱軸為應變量，綠色線、藍色線、紅色線、咖啡色線分別為 ZANB 站、HGSB 站、CHMB 站及 SSNB 站取樣率一小時的體應變記錄，亮粉紅色線與土黃色線分別為春日站的工程剪應變  $\gamma_1$  及  $\gamma_2$ 。應變斜率為負指示岩層受到壓縮應變，應變斜率為正指示岩層受到伸張應變。(b) 累積雨量圖，橫軸單位為時間，縱軸單位為公厘 (mm)，本時段中共有兩次降雨事件。(c) 中央氣象局 C0Z070 自動氣象站之氣壓記錄，橫軸單位為時間，縱軸單位為百帕 (hPa)。

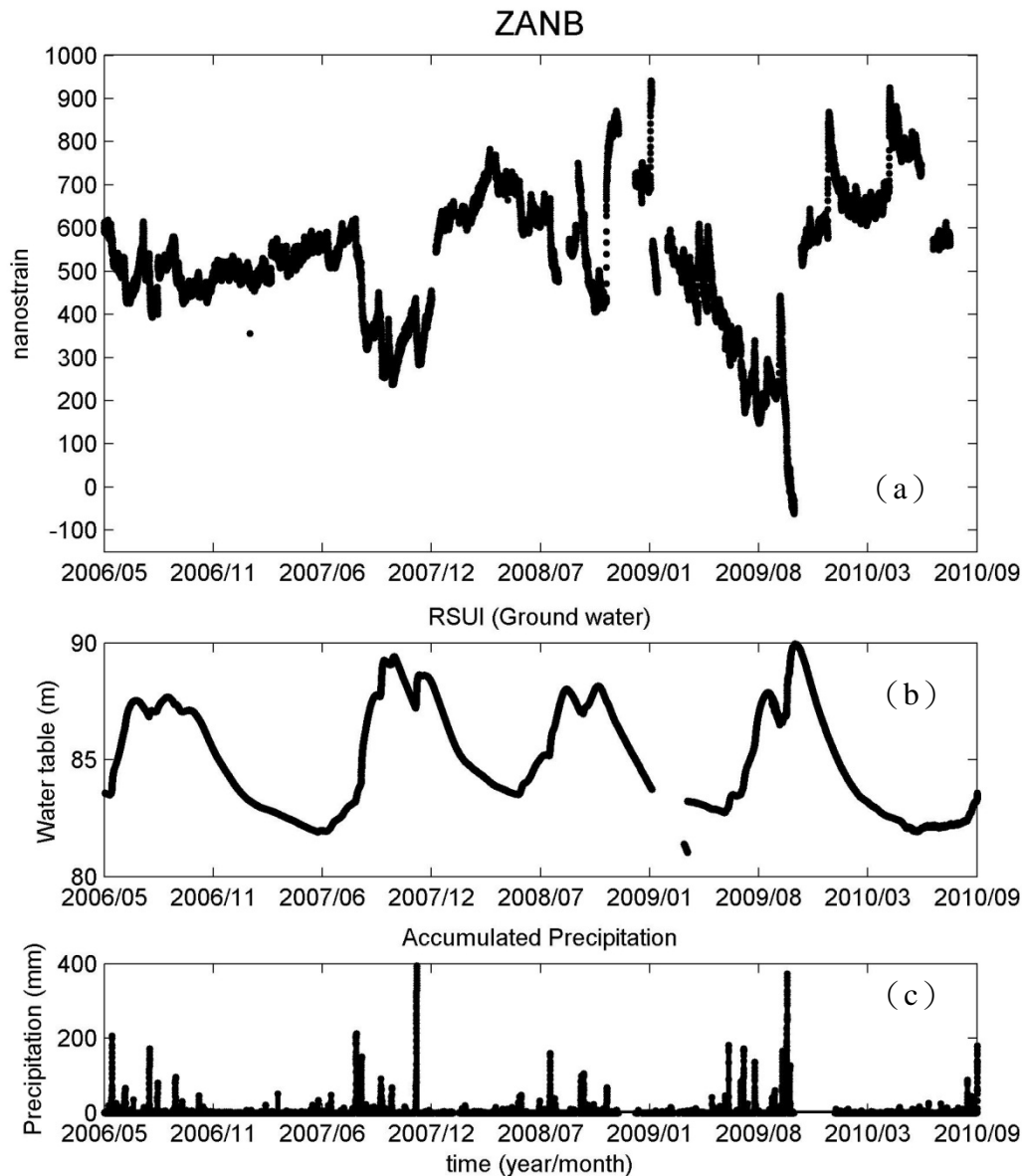


圖 30 中部陣列應變、氣壓及 RSUI 地下水觀測站觀測記錄變化。(a) ZANB 站於 2006 年 5 月至 2010 年 9 月的應變記錄，斜率負值代表壓縮訊號，斜率為正值代表伸張訊號。(b) RSUI 地下水位站觀測記錄。(c) 中央氣象具 C0Z070 自動氣象站累積雨量記錄。

另外本研究亦針對降雨特性對應變變化量進行初步分析，就 34 次事件中，分別探討四個測站於降雨期間壓縮體應變量與累積雨量及該時間內最大降雨強度之關係。累積雨量的計算方式為異常壓縮訊號出現時間之前兩天至事件發生後兩天共五天的總雨量，最大降雨強度則是尋找異常壓縮訊號出現時間之前兩天與後兩天中間的時間所下的最大的時雨量。各事件發生時的累積雨量與最大時雨量詳列於表 5。本研究針對累積降雨量與應變變化以及最大降雨強度與應變變化關係分別對四個測站作圖。CHMB 站於降雨時間產生的應變量與該時間的累積降雨量大致上為線性關係，從圖中亦可看出，累積降雨量超過 50 mm 之時，CHMB 站就會發生伴隨降雨的應變變化，累積雨量與應變量的相關係數為 0.86（圖 31）。而應變量與該時間內最大降雨強度亦為線性相依，記錄到應變變化之時，最大降雨強度皆超過 10 mm/hr，最大降雨強度與應變量的相關係數為 0.82（圖 32）。其中產生最大應變量的事件發生於 2004 年 12 月初，該時間累積降雨量與降雨強度皆為所有事件中最大。結果顯示，CHMB 站記錄到的壓縮應變量與最大降雨強度和累積降雨量的相關係數皆大於 0.8，整體有累積降雨量越大則壓縮變形量越大之趨勢。ZANB 站的應變量與 CHMB 站類似，相關係數大於 0.6（圖 33），且降雨強度與應變量大小亦有些許正相關（圖 34），兩者的相關係數超過 0.5。HGSB 站自設站以來記錄到 16 次伴隨強降雨的壓縮應變變化，應變量從 10-100  $\mu\epsilon$  不等。根據相關係數分析，HGSB 站記錄到的壓縮應變量值和累積雨量關係較高（圖 35），與最大降雨強度較無關聯性（圖 36）。SSNB 站於 2006 年設站後至 2010 年共記錄到 15 筆面應變伴隨降雨而產生的變化，而兩項工程剪應變似乎較不受降雨影響，無論在累積雨量與應變量分析，或該事件最大降雨強度與應變量分析，相關係數皆低。（圖 39 至圖 42），原因為在這些事件中，兩項工程剪應變較不受影響，因此在紀錄中並沒有產生永久變形。此外，利用 SSNB 店面應變的變化對累積降雨量和最大降雨強度做相關係數分析，結果顯示 SSNB 站的面應變量與累積降雨量的大小相關係數超過 0.6（圖 37），但與最大降雨強度做比較，相關係數僅有約 0.21（圖 38）。

綜合四站應變量與累積降雨量和最大降雨強度比較，累積雨量與應變量於每一站的相關係數皆大於 0.5，相較於最大降雨強度，應變量的大小與累積降雨量多寡較為相關。



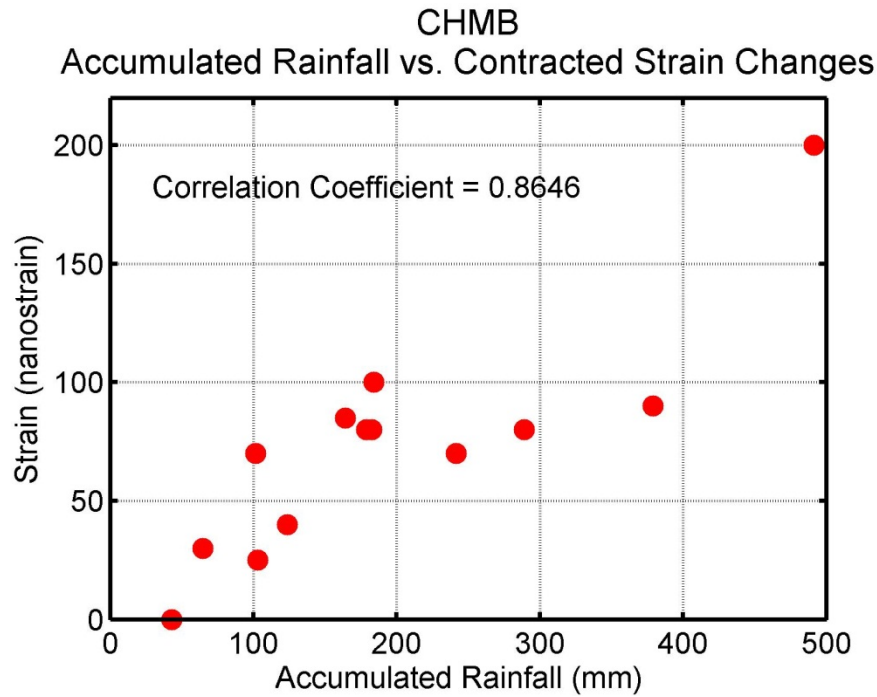


圖 31 CHMB 站壓縮變形量與累積雨量關係圖。

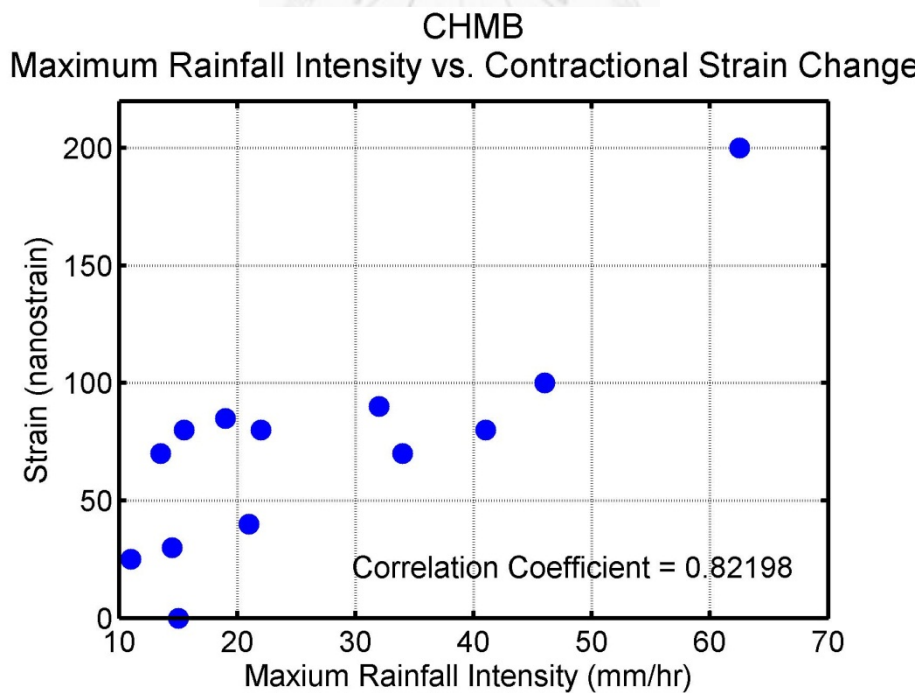


圖 32 CHMB 站壓縮變形量與最大降雨強度關係圖。

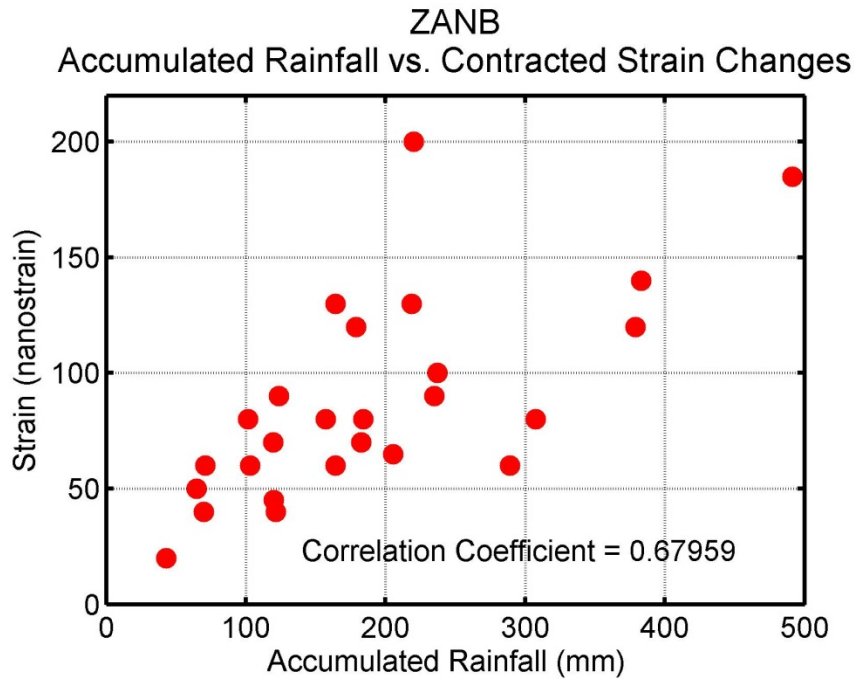


圖 33 ZANB 站壓縮變形量與累積雨量關係圖。

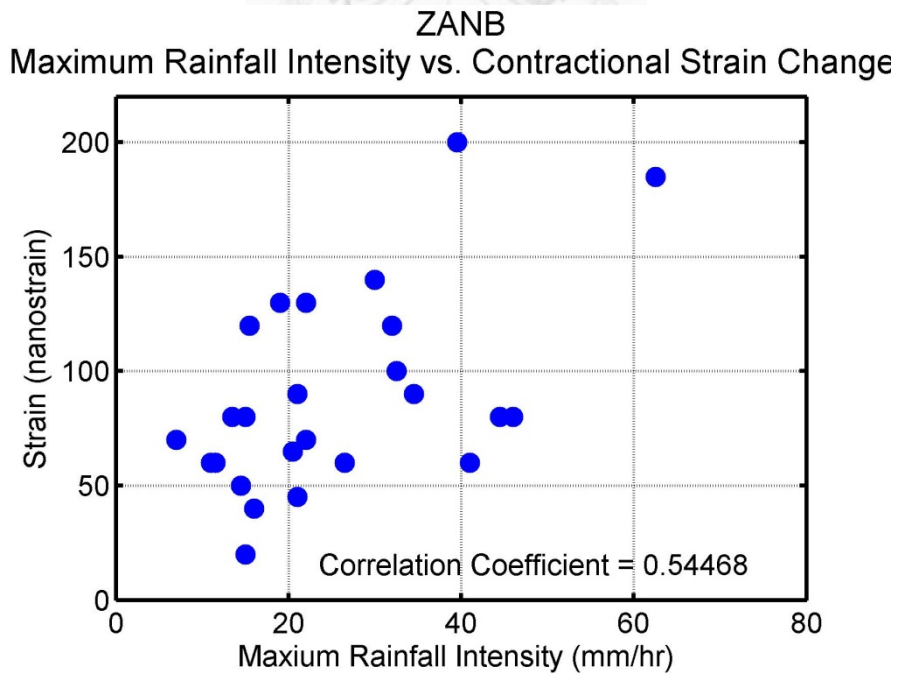


圖 34 ZANB 站壓縮變形量與最大降雨強度關係圖。

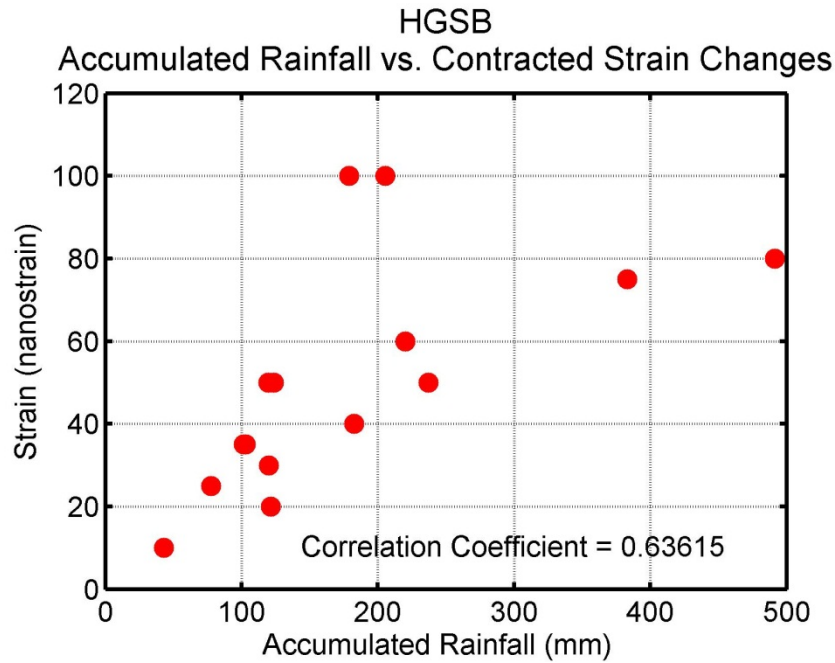


圖 35 HGSB 站壓縮變形量與累積雨量關係圖。

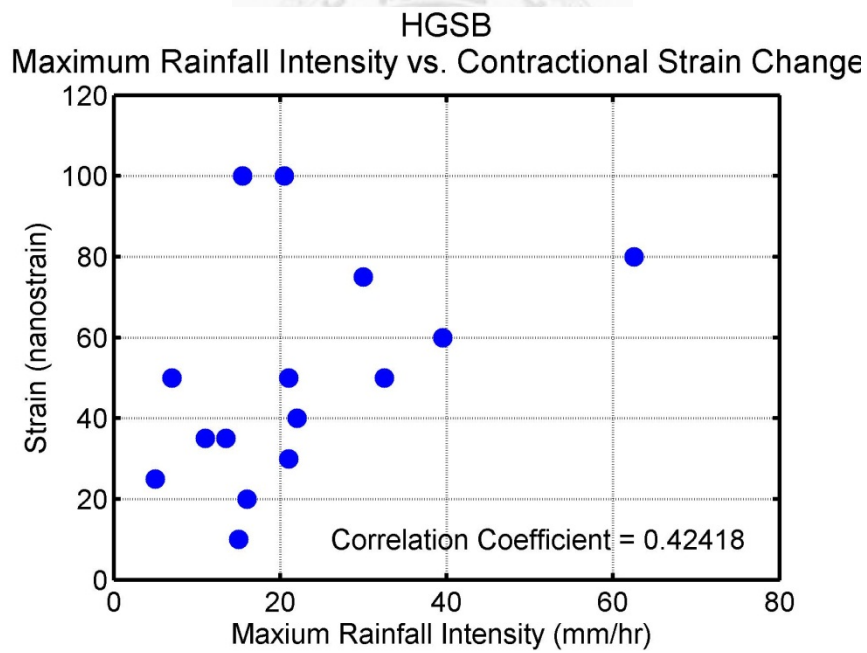


圖 36 HGSB 站壓縮變形量與最大降雨強度關係圖。

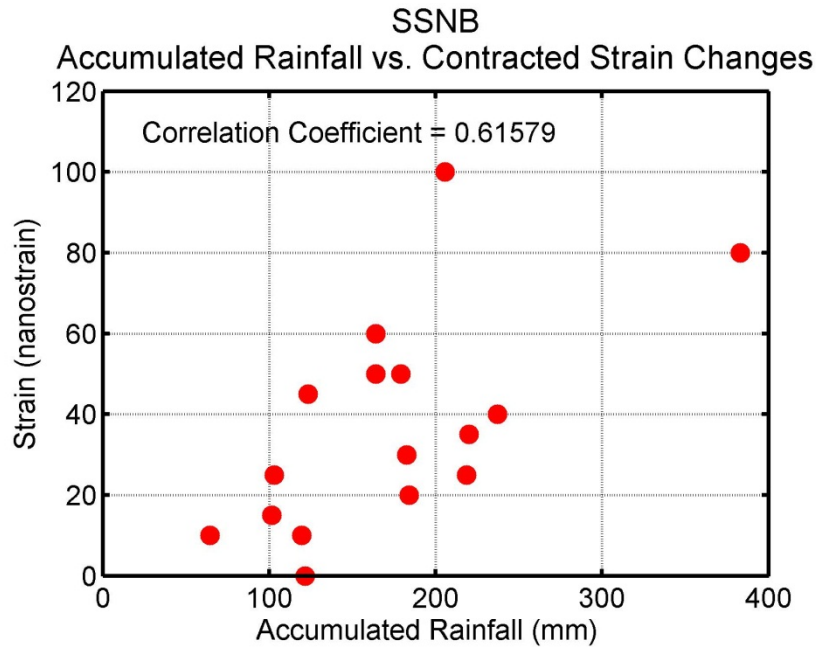


圖 37 SSNB 站面應變壓縮變形量與累積雨量關係圖。

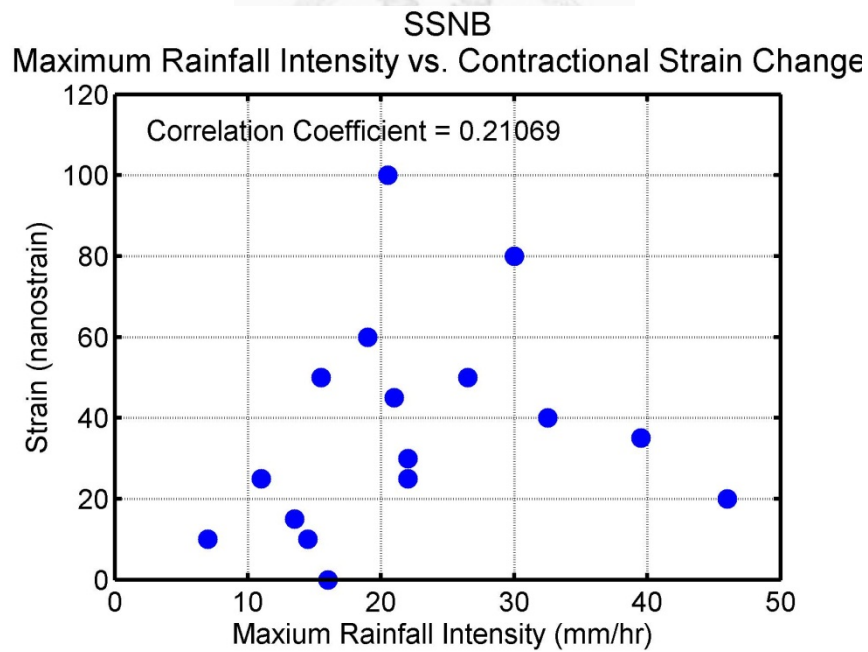


圖 38 SSNB 站面應變壓縮變形量與最大降雨強度關係圖。

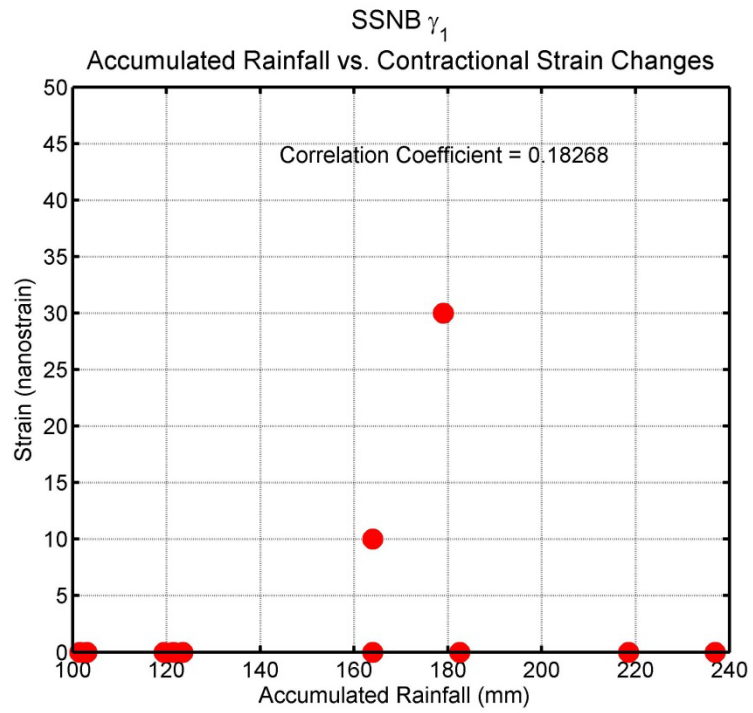


圖 39 SSNB 站 $\gamma_1$ 變形量與累積雨量關係圖。

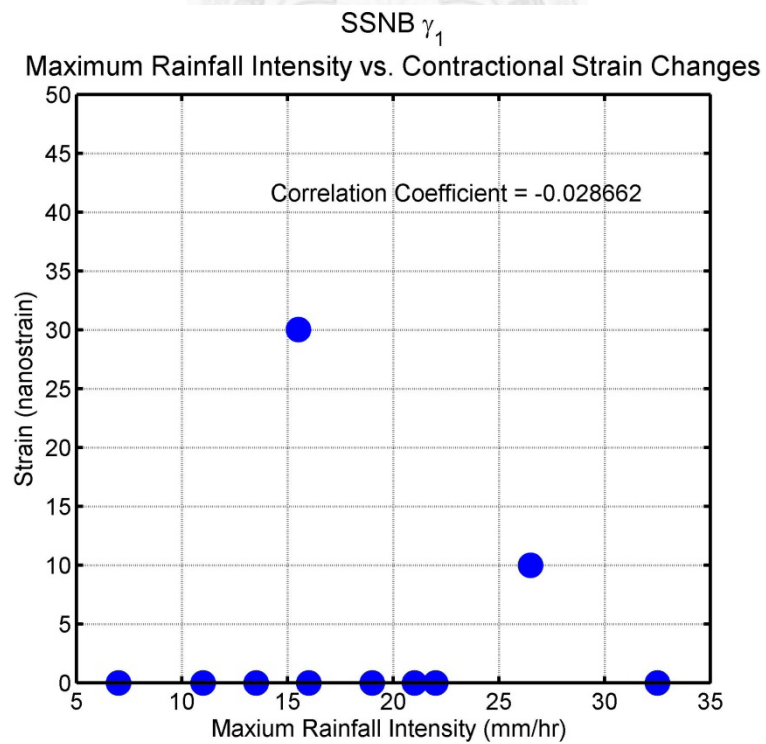


圖 40 SSNB 站 $\gamma_1$ 變形量與最大降雨強度關係圖。

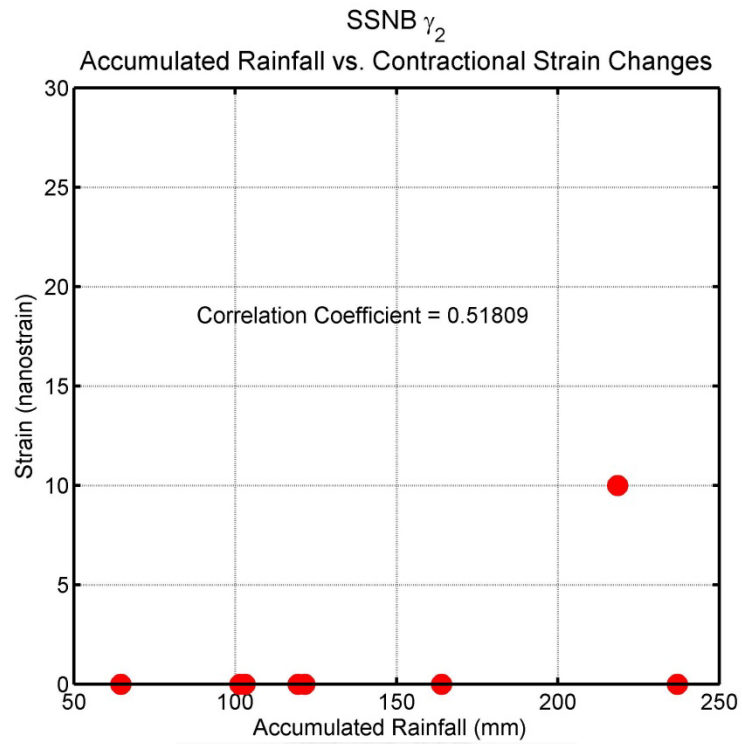


圖 41 SSNB 站 $\gamma_2$ 變形量與累積雨量關係圖。

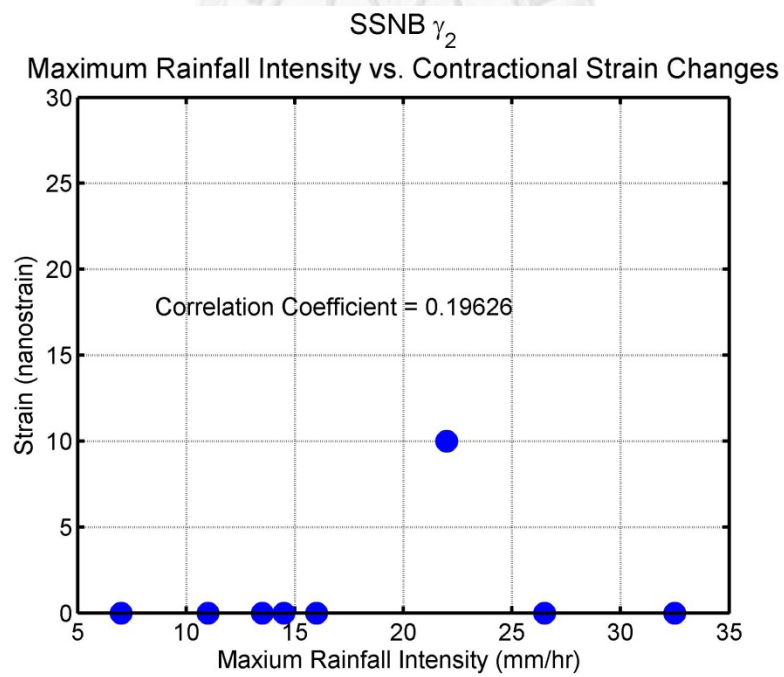


圖 42 SSNB 站 $\gamma_2$ 變形量與最大降雨強度關係圖。

#### 4.1.2 氣壓變化與應變變化之關聯性

劉啟清等人利用井下應變儀中部陣列發現在 2004 年 12 月南瑪都颱風侵襲臺灣時，臺灣東部氣壓降低觸發斷層活動產生慢地震 (slow earthquake)，使體應變儀記錄到約 250 nε 至 550 nε 不等的永久壓縮應變 [Liu et al., 2009]。為了探討因颱風侵襲氣壓降低觸發的慢地震是否有再現性，本研究檢視 2010 年以前颱風侵襲時間的應變資料，且增加了三分量應變儀記錄探討颱風侵臺時氣壓變化所觸發的應變變化關係。結果發現，從井下應變儀安裝以來至 2009 年底颱風侵臺時間，經常出現類似 2004 年 12 月慢地震事件的應變記錄 (表 5)。以 2008 年三個颱風侵臺期間氣壓及應變變化的關係為例 (圖 43、圖 44)，在 2008 年 7 月底中度颱風鳳凰侵襲臺灣，氣壓變化為 39.2 hPa，累積雨量為 179 mm。在這期間中部陣列四個測站皆有觀測到應變變化，最大的應變變化出現在 ZANB 站，約產生 120 nε 的永久壓縮變形；而最小的應變變化則被 SSNB 站的面應變所記錄，約 50 nε 的永久變形，但在工程剪應變  $\gamma_1$  及  $\gamma_2$  沒有明顯變化 (圖 43)。2008 年 9 月底則有兩次颱風侵臺，分別為中度颱風哈格比以及強烈颱風薔蜜。哈格比颱風造成的氣壓變化約 8.5 hPa，累積總雨量為 101.5 mm，ZANB 站記錄到本次事件中的最大壓縮應變量，約 80 nε；SSNB 站的面應變則記錄到本次事件中最小的壓縮量，約 15 nε (圖 44)，在工程剪應變  $\gamma_1$  及  $\gamma_2$  沒有顯著改變。薔蜜颱風侵襲臺灣為中部陣列附近帶來 123.5 mm 的累積降雨量，並使該區域有 34.5 hPa 的氣壓變化。伴隨此次颱風產生的壓縮應變最大值出現在 ZANB 站，有 90 nε 的變化量，最小的壓縮應變變化出現在奇美站，約有 40 nε。

此外，在 2007 年 10 月強烈颱風柯羅莎侵臺時，東部區域只產生氣壓變化而沒有降雨，氣壓降低 46.2 hPa，因此可以做為釐清氣壓、降雨量與應變變化關係的例子。在柯羅莎颱風影響臺灣氣壓期間，ZANB 站出現短暫的 60 nε 壓縮應變後又回復至一開始的應變量，HGSB 站記錄到 30 nε 的壓縮變形後，當颱風影響的氣壓回復後，應變記錄也回復至一開始的量值。SSNB 站的面應變、 $\gamma_1$  及  $\gamma_2$  則沒有出現顯著的變化 (圖 45)。在柯羅莎影響臺灣之前，中度颱風韋帕也曾在同年九月影響臺灣，韋帕颱風也未帶來降雨，只使東部氣壓於颱風影響期間降低 20.3 hPa。於此期間，ZANB 站與 HGSB 站皆有約 10 nε 壓縮變形量，但在氣壓恢復為一般水平後，應變記錄也恢復至原來的水平，而 SSNB 站的面應變、 $\gamma_1$  及  $\gamma_2$  並無表現出明



顯的變化（圖 46）。

一般而言，斷層面上的滑移也會產生剪切應變（shear strain），因此，若是斷層活動所造成的訊號，應該可以在井下應變儀的工程剪應變 $\gamma_1$ 及 $\gamma_2$ 分量發現永久變形。若 2006 年之後的體應變與面應變壓縮訊號是因氣壓劇烈變化觸發斷層活動，則工程剪應變 $\gamma_1$ 及 $\gamma_2$ 應同時反應永久變形的應變訊號，但結果顯示工程剪應變 $\gamma_1$ 及 $\gamma_2$ 在 2006 年後每次颱風侵臺期間沒有顯著的改變。而從柯羅莎颱風和韋帕颱風侵臺的應變記錄顯示，劇烈的地表氣壓降低並不一定會讓面應變與體應變產生永久變形的壓縮應變訊號，又根據 4.1.1 的討論，降雨造成的效果會讓體應變與面應變記錄到顯著的永久變形，但在工程剪應變 $\gamma_1$ 及 $\gamma_2$ 並沒有明顯的變化。因此根據上述結果初步推測，2006 年後颱風侵臺時該區域的斷層在颱風侵臺期間並沒有顯著的慢地震事件，體應變儀與面應變記錄到的永久壓縮變形主要來源可能為颱風帶來的強降雨造成地表岩石荷重增加而致，而非斷層活動。而低氣壓所造成的氣壓劇烈變化在此處扮演的角色較為次要。



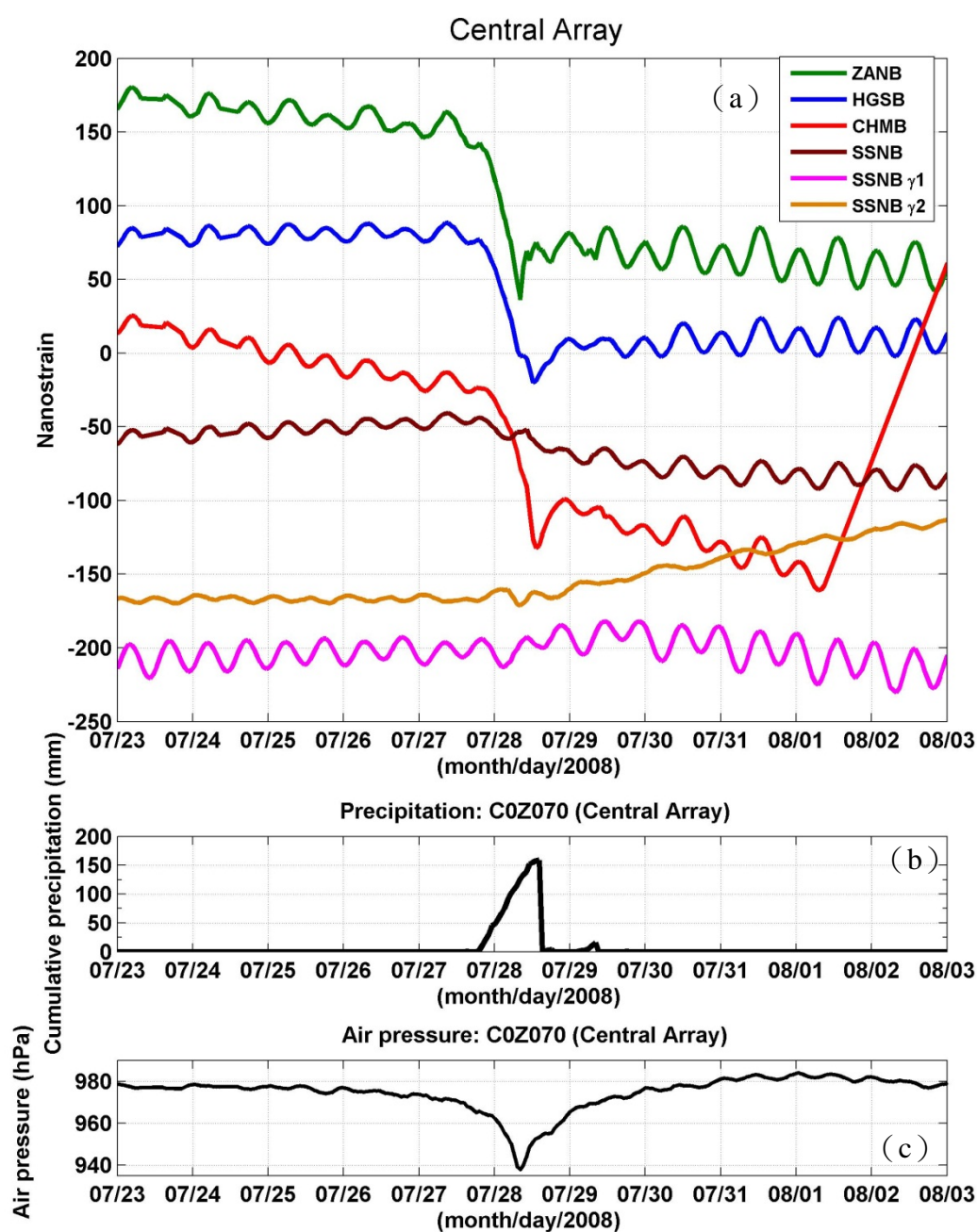


圖 43 2008 年 7 月底至 8 月初中部陣列應變、氣壓及雨量變化。(a) 本圖為 2008 年中度颱風鳳凰侵台期間，中部井下應變儀陣列應變、氣壓及雨量的變化。本圖圖示與圖 28 相同，CHMB 站 7/31 之後資料中斷。，四個井下應變儀在體應變分量皆有記錄到壓縮訊號，但在 SSNB 站的工程剪應變 $\gamma_1$ 及 $\gamma_2$ 並沒有顯著變化 (b) 中央氣象局 C0Z070 自動氣象站累積雨量圖。(c) 中央氣象局 C0Z070 自動氣象站之氣壓記錄。

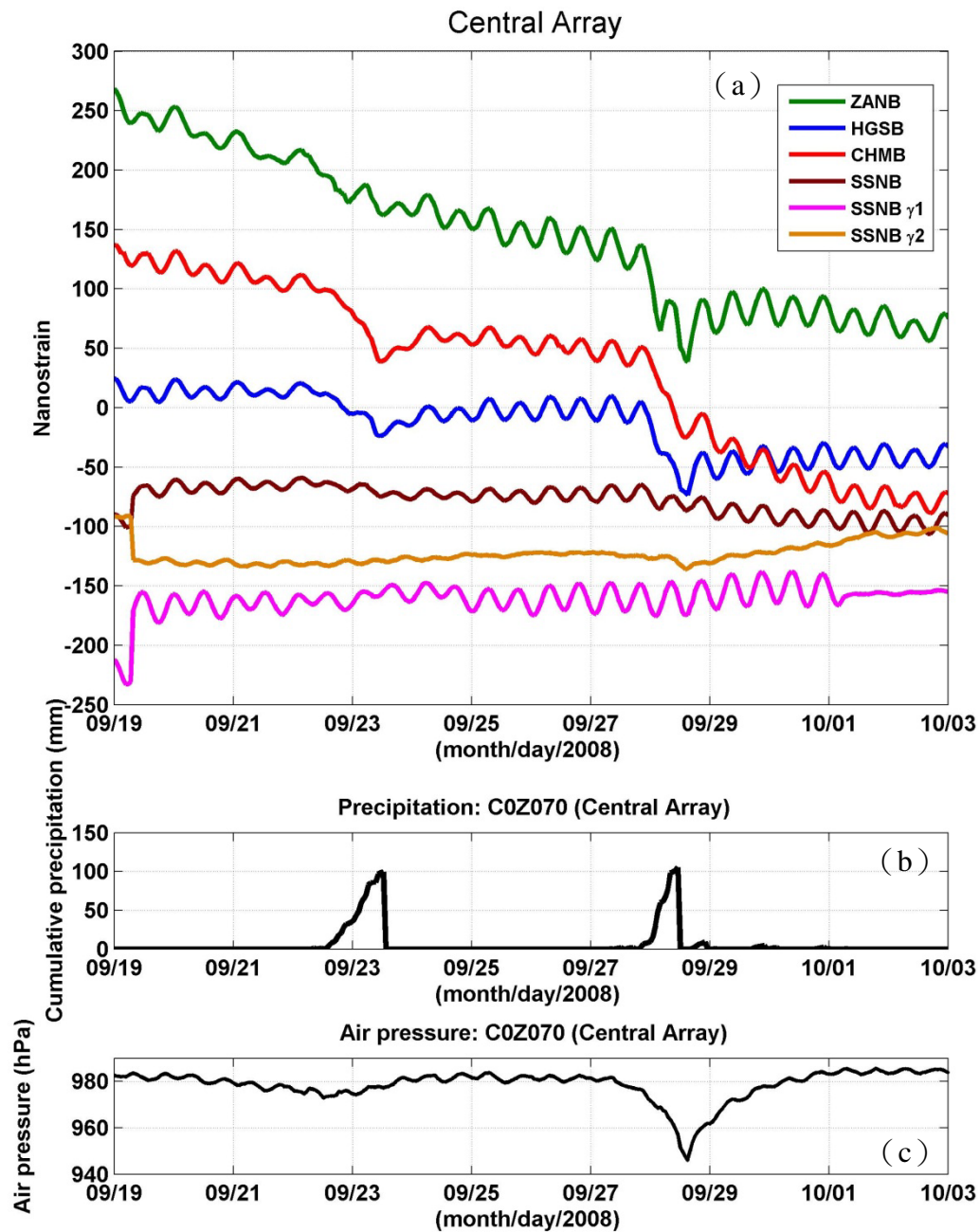


圖 44 2008 年 9 月中至 10 月初中部陣列應變、氣壓及雨量變化。(a) 本圖為 2008 年中度颱風哈格比 (9/23 前後) 與強烈颱風薔蜜侵台期間 (9/28 前後)，中部井下應變儀陣列應變變化。本圖圖示與圖 28 相同。此兩個颱風侵臺期間四個井下應變儀在體應變和面應變皆有記錄到壓縮訊號，但 SSNB 站的工程剪應變  $\gamma_1$  及  $\gamma_2$  並沒有顯著變化。(b) 中央氣象局 C0Z070 自動氣象站累積雨量圖。(c) 中央氣象局 C0Z070 自動氣象站之氣壓記錄。

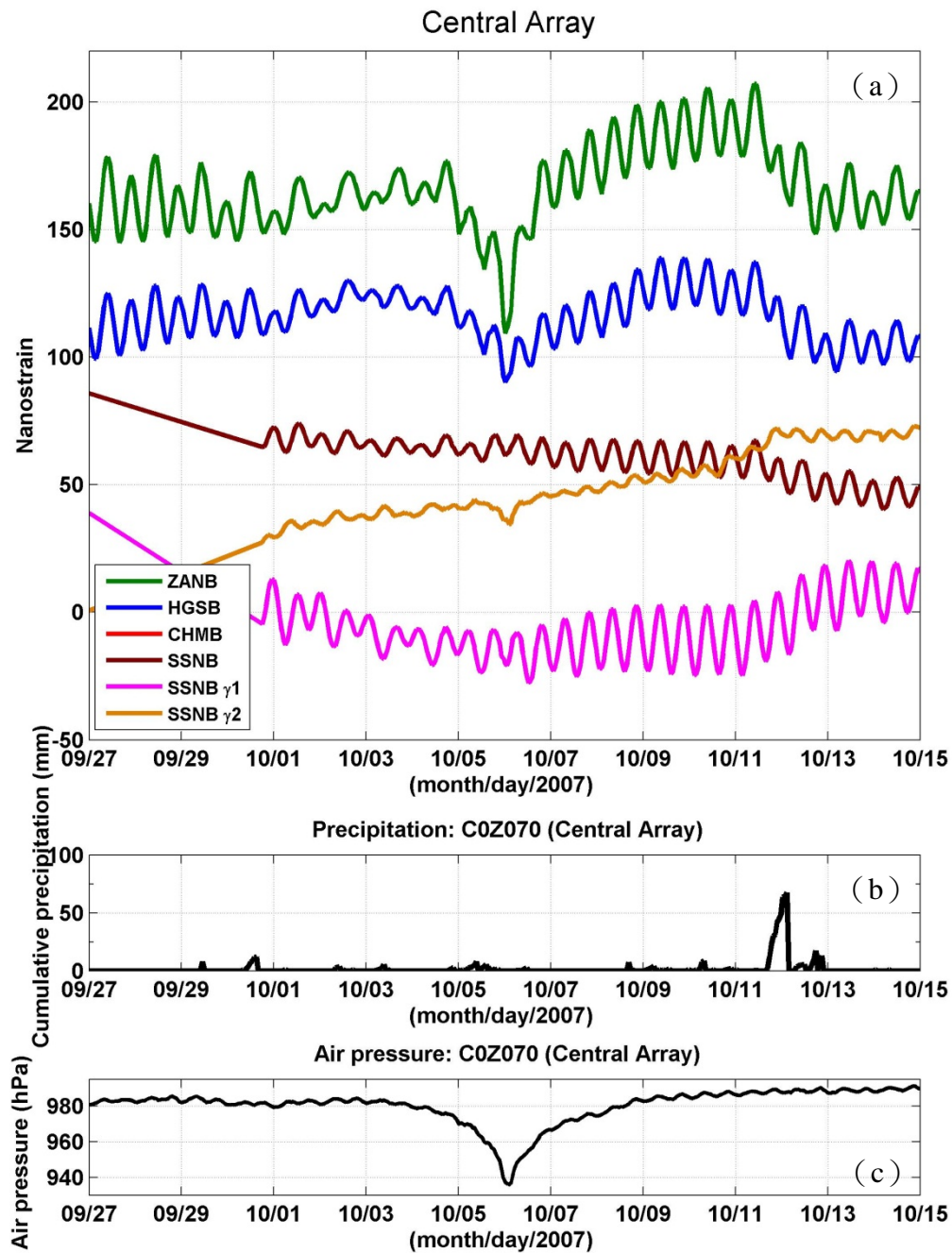


圖 45 2007 年 10 月柯羅莎颱風侵臺時的應變記錄。(a) 本圖為 2007 年柯羅莎颱風侵臺期間的中部陣列應變記錄，圖示與圖 28 相同。在此段時間內 CHMB 站記錄中斷，其餘三站皆有記錄。(b) 中央氣象局 C0Z070 自動氣象站累積雨量圖。柯羅莎侵臺期間並沒有為東部地區帶來明顯降雨。(c) 中央氣象局 C0Z070 自動氣象站之氣壓記錄，氣壓降低 46.2 hPa。

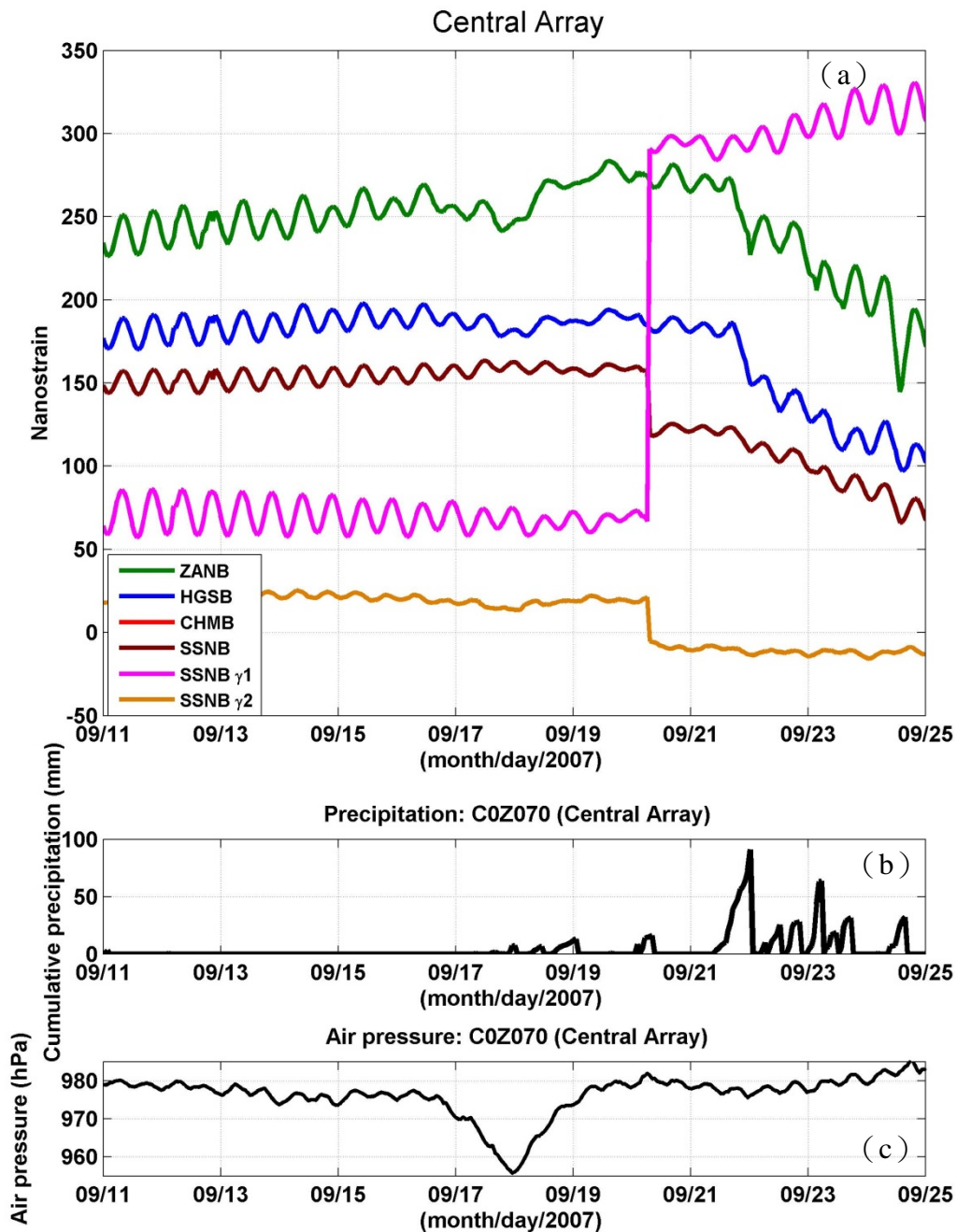


圖 46 2007 年 9 月韋帕颱風侵臺時的應變記錄。(a) 本圖為 2007 年韋帕颱風侵臺期間的中部陣列應變記錄，圖示與圖 28 相同。在此段時間內 CHMB 站記錄中斷，其餘三站皆有記錄。SSNB 站 9/20 附近的記錄跳動為原始資料跳點所造成。(b) 中央氣象局 C0Z070 自動氣象站累積雨量圖。柯羅莎侵臺期間並沒有為東部地區帶來明顯降雨。(c) 中央氣象局 C0Z070 自動氣象站之氣壓記錄，氣壓降低 46.2 hPa。氣壓降低 20.3 hPa。



## 4.2 井下應變儀長期地殼應變速率分析

為了解井下應變儀在數月的時間尺度下應變速率是否與 GPS 所記錄之長期應變速率有所差異，以及探討儀器記錄的穩定性，本研究嘗試使用井下應變儀應變資料與 GPS 記錄資料進行應變分析。

在井下應變儀資料部分，根據 4.1 的討論，降雨會使地表岩石產生變形，為避免水文影響造成分析上的誤差，以及儀器閥門開啟使記錄歸零產生的資料中斷，因此在分析應變資料前設立兩項資料挑選原則，當資料記錄時間滿足挑選準則即為分析目標：1. 資料記錄時間在兩次閥門開啟時間之間及 2. 東部非颱風侵襲和非雨季的時間。綜合上述兩項挑選原則，中部陣列的四個井下應變儀站只有猴子山站於 2009 年和 2010 年前 150 天之資料符合上述原則，故以下使用的應變資料為猴子山站在 2009 年 1 月 1 號至 5 月 30 號與 2010 年 1 月 1 號至 5 月 30 號的記錄。此外，為了表現出數個月時間尺度下的資料整體趨勢，本研究使用移動平均(moving average)的統計方法將取樣率為 1 小時 1 點的應變資料以 10 天的期間 (window) 做平均，藉以平均較高頻的訊號。

本研究使用中研院地球所的 GPS 資料，選擇包圍井下應變儀猴子山站 7 個永久 GPS 連續站之資料，分別為：CHUN、JSUI、NHSI、KNKO、PING、JPIN 和 JPEI(圖 3)。GPS 資料用 GPS Analysis at MIT 軟體(GAMIT)以澎湖白沙站(S01R)為參考站解算各站一日解 (daily solution)，再經 Quasi-Observation Combination Analysis 軟體 (QOCA) 後處理。處理完的 GPS 資料使用[Hsu et al., 2009]提出的 GPS 速度場計算方法，求出該測量網的 GPS 速度場，並挑選有共同時間資料的測站，對空間微分，得出 7 個 GPS 站包圍區域測網於 2009 年 1 月 1 號至 5 月 30 號與 2010 年 1 月 1 號至 5 月 30 號的膨縮率 (dilatation rate)。

從結果來看，2009 年上半年的 GPS 膨縮率與井下應變儀的應變速率相近，且訊號皆反應出該區域受到壓縮變形控制 (圖 47)。2009 年由 GPS 計算得出的膨縮率為  $-1.8562 \times 10^{-6} \text{ } \varepsilon/\text{yr}$ ，從井下應變儀 HGSB 站得到的應變率為  $-8.5751 \times 10^{-6} \text{ } \varepsilon/\text{yr}$ 。而 2010 年上半年的訊號形式亦和 2009 年上半年的結果類似，同樣反應該區域持續受到壓縮 (圖 48)。在 2010 年上半年區域應變變化，由 GPS 計算的膨縮率為  $-1.7468 \times 10^{-6} \text{ } \varepsilon/\text{yr}$ ，HGSB 站記錄到的應變率則為  $-4.1197 \times 10^{-6} \text{ } \varepsilon/\text{yr}$ 。從結果來看，在整體趨勢上，GPS 和井下應變儀兩者應變變化的形式

以及應變率皆相似。而 HGSB 站記錄到的應變率變化顯示在臺灣東部應變率約在  $10^{-6} \text{ } \varepsilon / \text{yr}$ ，此結果也和[Hsu et al., 2009]與[Chang et al., 2003]等研究結果類似。井下應變儀在數個月尺度下的記錄中常被質疑容易受水文因素影響，因此無法記錄真實的地殼應變量。但從本結果顯示，在不考慮資料中斷的情形且避開水文影響的時間，井下應變儀記錄的資料和 GPS 資料十分類似，代表 HGSB 站的應變記錄於東部乾季時應較不受當地水文變化影響，且在不受此兩項因素影響下的應變記錄似乎是穩定的，因此可記錄到與 GPS 在相同測量時間尺度下類似的地殼變形結果。若 HGSB 站在此段時間記錄穩定，而其記錄到的地殼變形與 GPS 測站構成的網狀區域變形趨勢一致，也間接代表在此區域單點與小區域內的變形行為類似。



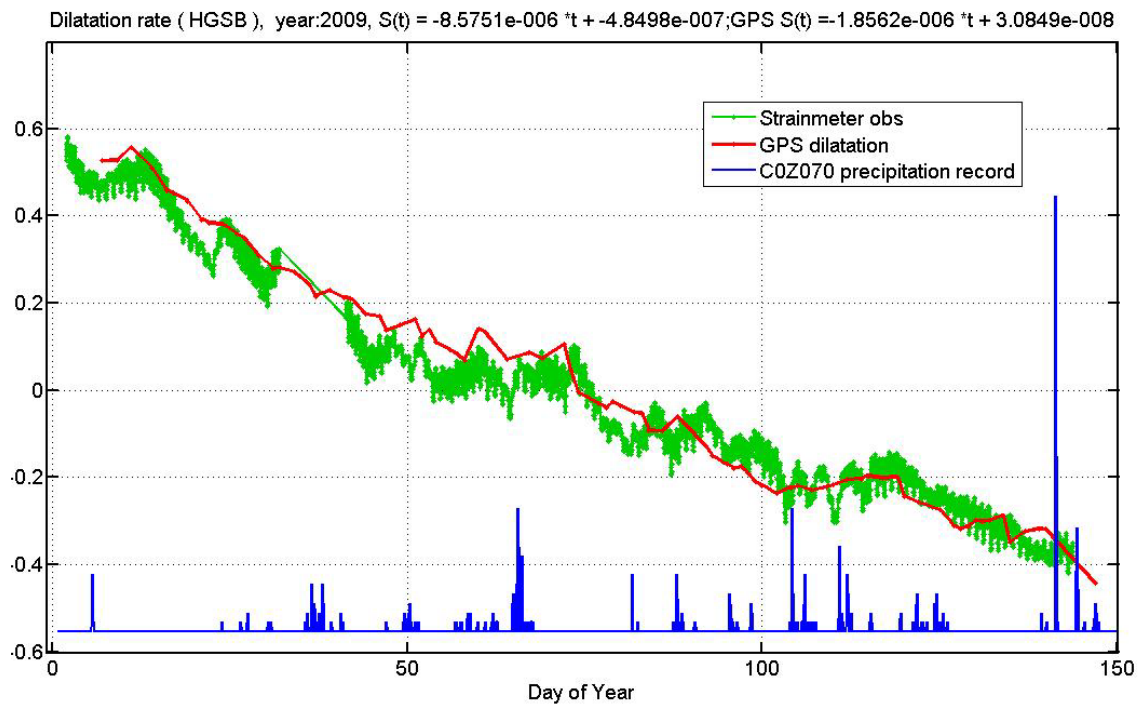


圖 47 2009 年 1 月至 5 月 HGSB 站與 GPS 膨縮率。圖中綠線為 HGSB 站的應變記錄，斜率為負代表壓縮應變。紅線是 GPS 膨縮率，藍線代表 C0Z070 測站記錄到的降雨量。為了比較三者之關係，已將三種資料正規化 (Normalize)。HGSB 站的記錄與此一區域的 GPS 膨縮率相近，猴子山站的膨縮率為  $-8.5751 \times 10^{-6} \text{ } \varepsilon/\text{yr}$ ；GPS 計算而得的膨縮率為  $-1.8562 \times 10^{-6} \text{ } \varepsilon/\text{yr}$ 。圖中右方最明顯的降雨尖峰值為 23 mm/hr，其他降雨時雨量最大不超過 6.5 mm/hr。而在東部濕季的平均時雨量超過 10 mm/hr。



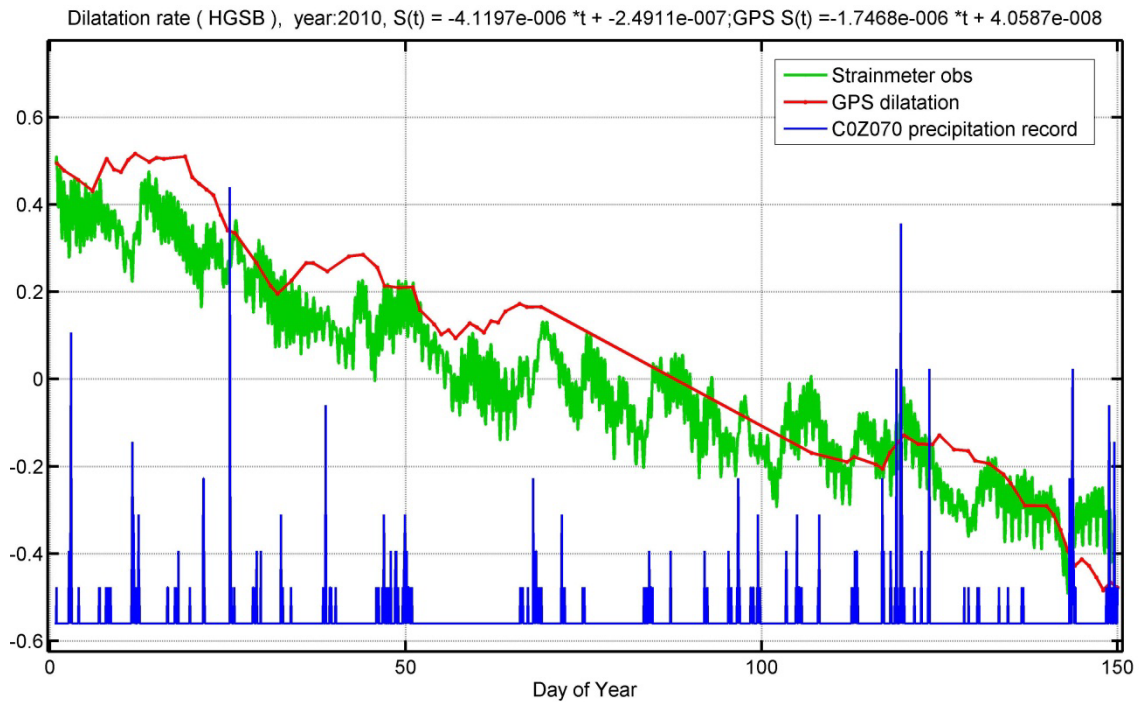


圖 48 2010 年 1 月至 5 月 HGSB 站與 GPS 膨縮率。圖中綠線為猴子山站的應變記錄，斜率為負代表壓縮應變。紅線代表 GPS 膨縮率，藍線代表 C0Z070 測站記錄到的降雨量降雨量。為了比較三者之關係，已將三種資料正規化 (Normalize)。HGSB 站的記錄與此一區域的 GPS 膨縮率相近，HGSB 站的膨縮率為  $-4.1197 \times 10^{-6} \text{ } \varepsilon / \text{yr}$ ；GPS 在 70 天至 107 天處無資料，根據 GPS 資料計算而得的膨縮率為  $-1.7468 \times 10^{-6} \text{ } \varepsilon / \text{yr}$ 。最大雨量出現在約 2010 年第 25 天處的尖峰值，該時間最大降雨量為 6 mm/hr，第二個較為明顯的降雨尖峰值出現在第 107 天處，該時間最大降雨量為 5.5 mm/hr。

## 第五章 結論

本研究利用位於臺灣東部的中部 Sacks-Evertson 類型井下應變儀陣列 2002 年至 2010 年 10 月的應變記錄，建立基本應變資料處理與校正流程，並初步探討臺灣東部的應變變化。

井下應變儀體應變與面應變記錄易受強降雨影響產生壓縮應變訊號，而工程剪應變 $\gamma_1$ 及 $\gamma_2$ 並沒有明顯的變化。藉由分析該次事件最大降雨強度與累積雨量大小和應變量的相關係數，結果顯示應變量大小與累積雨量大小有較大的關聯性。推測是因岩石受雨量影響產生的荷重造成體積變形，致使體應變和面應變記錄產生永久應變，而工程剪應變 $\gamma_1$ 及 $\gamma_2$ 記錄則不受影響。本研究亦發現，2006 年之後颱風侵臺同時發生的應變變化事件，可能與颱風帶來的強降雨較有關，氣壓變化的影響較為次要，且和斷層活動較無顯著關係。因為若井下應變儀記錄到的體應變與面應變變化為斷層活動造成，則 $\gamma_1$ 及 $\gamma_2$ 也應記錄到斷層活動產生之剪切應變，且同時伴隨伸張及壓縮訊號，但在本研究中並沒有看到此一現象。

在上述討論中得知當地水文狀況會影響井下應變儀的記錄，因此本研究嘗試避開東部受降雨量大的影響季節，針對數月時間尺度下的應變資料進行應變率分析。本研究挑選 HGSB 站連續資料段並選擇東部乾季時間的應變資料，與區域的 GPS 測網經由換算而得的膨縮率比較。結果顯示兩者的應變率相近，HGSB 站的應變記錄於東部乾季時應較不受當地水文變化影響，且在不受此兩項因素影響下的應變記錄似乎是穩定的，因此可記錄與 GPS 在相同測量時間尺度下類似的地殼變形行為，也間接代表在此區域單點與小區域內的變形行為可能相似。因此未來若能有效移除水文對應變記錄造成的影響，或許可使用井下應變儀的應變記錄，探討區域地體構造運動的變化。

## Reference

- Agnew, D. C. (1996), SPOTL: Some programs for ocean-tide loading, *SIO Ref. Ser.* 96-8, 35 pp., Scripps Inst. of Oceanogr., La Jolla, Calif.
- Agnew, D. C. (1997), NLOADF: A program for computing ocean-tide loading, *J. Geophys. Res.*, 102, 5109-5110, doi:10.1029/96jb03458.
- Agnew, D. C. (2007), Earth tides, in *Treatise on Geophysics*, vol. 3, Geodesy, edited by T. Herring, pp. 163–195, Elsevier, Boston, Mass.
- Agustsson, K., A. T. Linde, R. Stefansson, and S. Sacks (1999), Strain changes for the 1987 Vatnafjoll earthquake in south Iceland and possible magmatic triggering, *J. Geophys. Res.*, 104, 1151-1161, doi:10.1029/1998JB900027.
- Barbour, A., and D. C. Agnew (2010), Coseismic Offsets on PBO Borehole Strainmeters: Real, or Spurious?, Abstract presented at 2010 *Fall Meeting, AGU*, San Francisco, Calif., 13-17 Dec.
- Benioff, H. (1935), A linear strain seismograph, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 25(4), 283-309.
- Chang, C. P., J. Angelier, and C. Y. Huang (2000), Origin and evolution of a melange: the active plate boundary and suture zone of the Longitudinal Valley, Taiwan, *Tectonophysics*, 325, 43-62, doi:10.1016/S0040-1951(00)00130-X.
- Chang, C. P., T. Y. Chang, J. Angelier, H. Kao, J. C. Lee, and S. B. Yu (2003), Strain and stress field in Taiwan oblique convergent system: constraints from GPS observation and tectonic data, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 214, 115-127, doi: 10.1016/S0012-821X(03)00360-1.
- Chung, L. H., Y. G. Chen, Y. M. Wu, J. B. H. Shyu, Y. T. Kuo, and N. Y. N. Lin (2008), Seismogenic faults along the major suture of the plate boundary deduced by dislocation modeling of coseismic displacements of the 1951 M7.3 Hualien–Taitung earthquake sequence in eastern Taiwan, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 269, 416-426, doi:

10.1016/j.epsl.2008.02.035.

CWB (1991), Climatic Atlas of Taiwan, Republic of China, edited, Ministry of Communications, Taipei, Taiwan, Republic of China.

Dal Moro, G., and M. Zadro (1998), Subsurface deformations induced by rainfall and atmospheric pressure: tilt/strain measurements in the NE-Italy seismic area, *Earth Planet. Sci. Lett.*, *164*, 193-203, doi: 10.1016/S0012-821X(98)00203-9.

Evertson, D. W. (1977), Borehole strainmeters for seismology, *Technical Report*.

Gebauer, A., H. Steffen, C. Kroner, and T. Jahr (2010), Finite element modelling of atmosphere loading effects on strain, tilt and displacement at multi-sensor stations, *Geophys. J. Int.*, *181*, 1593–1612, doi: 10.1111/j.1365-246X.2010.04549.x.

Hart, R. H. G., M. T. Gladwin, R. L. Gwyther, D. C. Agnew, and F. K. Wyatt (1996), Tidal calibration of borehole strain meters: Removing the effects of small-scale inhomogeneity, *J. Geophys. Res.*, *101*, 25553-25571, doi: 10.1029/96JB02273.

Hsu, Y. J., S. B. Yu, and H. Y. Chen (2009), Coseismic and postseismic deformation associated with the 2003 Chengkung, Taiwan, earthquake, *Geophys. J. Int.*, *176*, 420-430, doi:10.1111/j.1365-246X.2008.04009.x.

Hsu, Y. J., S. B. Yu, M. Simons, L. C. Kuo, and H. Y. Chen (2009), Interseismic crustal deformation in the Taiwan plate boundary zone revealed by GPS observations, seismicity, and earthquake focal mechanisms, *Tectonophysics*, *479*, 4-18, doi: 10.1016/j.tecto.2008.11.016.

Johnston, M. J. S., A. T. Linde, and D. C. Agnew (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.

Johnston, M. J. S., R. D. Borchardt, A. Linde, and M. T. Gladwin (2006), Continuous borehole strain and pore pressure in the near field of the 28 September 2004 M 6.0

- Parkfield, California, earthquake: Implications for nucleation, fault response, earthquake prediction, and tremor, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 96, S56-S72, doi:10.1785/0120050822.
- Langbein, J. (2010), Effect of error in theoretical Earth tide on calibration of borehole strainmeters, *Geophys. Res. Lett.*, 37, doi:10.1029/2010gl044454.
- Lee, Y. H., G. T. Chen, R. J. Rau, and K. E. Ching (2008), Coseismic displacement and tectonic implication of 1951 Longitudinal Valley earthquake sequence, eastern Taiwan, *Journal of Geophysical Research*, 113, doi:10.1029/2007JB005180.
- Linde, A. T., and E. A. Roeloffs (2006), Borehole observations of continuous strain and fluid pressure, in *Volcano Deformation*, edited by D. Dzurisin, pp. 305-322, Springer.
- Linde, A. T., K. Suyehiro, S. Miura, I. S. Sacks, and A. Takagi (1988), Episodic aseismic earthquake precursors, *Nature*, 334, 513-515, doi:10.1038/334513a0.
- Linde, A. T., M. T. Gladwin, M. J. S. Johnston, R. L. Gwyther, and R. G. Bilham (1996), A slow earthquake sequence on the San Andreas fault, *Nature*, 383, 65-68, doi:10.1038/383065a0.
- Liu, C. C., A. T. Linde, and I. S. Sacks (2009), Slow earthquakes triggered by typhoons, *Nature*, 459, 833-836, doi:10.1038/nature08042.
- Nikolaidis, R. (2002), Observation of geodetic and seismic deformation with the Global Positioning System., *PhD thesis, Univ. California, San Diego*.
- Roeloffs, E. (1999), Earth science - Radon and rock deformation, *Nature*, 399, 104-105, doi:10.1038/20072.
- Roeloffs, E. (2001), Creep rate changes at Parkfield, California 1966-1999: Seasonal, precipitation induced, and tectonic, *J. Geophys. Res.*, 106, 16525-16547, doi:10.1029/2001jb000352.
- Roeloffs, E. (2010), Tidal calibration of Plate Boundary Observatory borehole

- strainmeters: Roles of vertical and shear coupling, *J. Geophys. Res.*, *115*, doi: 10.1029/2009jb006407.
- Roeloffs, E., and E. Quilty (1997), Case 21: Water level and strain changes preceding and following the August 4, 1985 Kettleman Hills, California, earthquake, *Pure Appl. Geophys.*, *149*(1), 21-60, doi:10.1007/bf00945160.
- Sacks, I. S., D. W. Evertson, and L. M. Dorman (1969-1970), Borehole Strainmeter, *Carnegie Year Book*, *69*.
- Sacks, I. S., S. Suyehiro, Yamagishi, Y., and D. W. Evertson (1971), Sacks-Evertson strainmeter, its installation in Japan and some preliminary results concerning strain steps, *Papers in Meteorology and Geophysics*, *22*(3-4).
- Sakata, S. (1981), On the concepts of some newly-invented borehole three-component strainmeters, *Rep. Natl. Res. Cent. Disas. Prev.*, *25*, 95-126.
- Sakata, S., and H. Sato (1986), Borehole-type tiltmeter and three component strainmeter for earthquake prediction, *J. Phys. Earth*, *34*(Suppl.), S129-S140.
- Wolfe, J. E., E. Berg, and G. H. Sutton (1981), The change in strain comes mainly from the rain Kipapa, Oahu, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, *71*, 1625-1635.
- Teng, L. S. (1990), Geotectonic evolution of late Cenozoic arc-continent collision in Taiwan, *Tectonophysics*, *183*, 57-76, doi: 10.1016/0040-1951(90)90188-E.
- Wu, Y. M., Y. G. Chen, C. H. Chang, L. H. Chung, T. L. Teng, F. T. Wu, and C. F. Wu (2006a), Seismogenic structure in a tectonic suture zone: With new constraints from 2006 Mw6.1 Taitung earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, *33*, doi:10.1029/2006gl027572.
- Wu, Y. M., Y. G. Chen, T. C. Shin, H. Kuochen, C. S. Hou, J. C. Hu, C. H. Chang, C. F. Wu, and T. L. Teng (2006b), Coseismic versus interseismic ground deformations, fault rupture inversion and segmentation revealed by 2003 Mw 6.8 Chengkung

- earthquake in eastern Taiwan, *Geophys. Res. Lett.*, 33, doi:10.1029/2005gl024711.
- Yamauchi, T. (1987), Anomalous strain response to rainfall in relation to earthquake occurrence in the Tokai area, Japan, *J. Phys. Earth*, 35(1), 19-36.
- Yu, S. B., and L. C. Kuo (2001), Present-day crustal motion along the Longitudinal Valley Fault, eastern Taiwan, *Tectonophysics*, 333, 199-217, doi:10.1016/S0040-1951(00)00275-4.
- Yu, S. B., H. Y. Chen, and L. C. Kuo (1997), Velocity field of GPS stations in the Taiwan area, *Tectonophysics*, 274, 41-59, doi:10.1016/S0040-1951(96)00297-1.
- Zadro, M., and C. Braitenberg (1999), Measurements and interpretations of tilt-strain gauges in seismically active areas, *Earth-Sci. Rev.*, 47, 151-187, doi:10.1016/s0012-8252(99)00028-8.
- 劉啟清、吳慶餘、陳威志，2007。井下應變儀資料處理模式之建立。中央氣象局地震技術報告，第48期。



## 附錄一 井下應變儀資料前處理過程

### 一、目的

此部分在描述井下應變儀原始資料從野外載回來之後，資料預處理流程細節。

### 二、原始資料

(存放路徑未來有可能會變動)

#### 1. 原始資料 存放路徑及資料夾名稱

Path: /gpsdb/Q330/ 各個站名資料夾下。

Ex: ZANB 資料存放於 /gpsdb/Q330/ZANB/ 之下，並且依照記錄時間的年份存放。

在各站年份資料夾底下 RAW DATA 存放資料夾的名稱意義為「年.資料記錄期間」。

Ex: /gpsdb/Q330/ZANB/2008/ 之下有三個記錄期間的資料夾，舉 2008.316-041 資料夾為例，這個資料夾名稱為「2008.316-041」，意為此一資料夾內存放的原始資料時間從 2008 年的第 316 天起至 2009 的第 41 天止。

#### 2. 原始資料種類

依照副檔名開頭第一個英文字母可初步劃分為不同取樣率的 MiniSEED 檔案(表一)：

壓縮檔副檔名	.Hxx	.Bxx	.Xxx
取樣率 (Sampling rate)	100 Hz	20 Hz	內含 1 Hz (.Lxx), $\frac{1}{10}$ Hz(.Vxx), $\frac{1}{100}$ Hz(.Uxx)檔案以及 Q330 的一些參數檔案(附錄二)

(表一)

而上述三種副檔名內又包含了不同的紀錄內容，以下列出常使用到的幾種資料檔名與資料內容的對照表(表二至表四)：



(表二)

<b>.H<sub>xx</sub></b>						
井下應變 儀類型	單分量井下應變儀			三分量井下應變儀		
檔案名稱	.HS1 或.H1A	.HS2 或.H2A	.HAP 或 .HDO	.HS1, .HS2,.HS3 或.H1A, .H2A, .H3 A	.HS4 或.H4A	.HAP 或 .HDO
內容	Valve 1 Record	Valve 2 Record	氣壓紀錄	Valve 1 Record	Valve 2 Record	氣壓紀錄

(表三)

<b>.B<sub>xx</sub></b>						
井下應變 儀類型	單分量井下應變儀			三分量井下應變儀		
檔案名稱	.BS1 或.B1A	.BS2 或.B2A	.BAP 或 .BDO	.BS1, .BS2,.BS3 或.B1A, .B2A, .B3 A	.BS4 或.B4A	.BAP 或 .BDO
內容	Valve 1 Record	Valve 2 Record	氣壓紀錄	Valve 1 Record	Valve 2 Record	氣壓紀錄

(表四)

<b>.X<sub>xx</sub></b>						
井下應變 儀類型	單分量井下應變儀			三分量井下應變儀		
檔案名稱	.LS1 或.L1A	.LS2 或.L2A	.LAP 或 .LDO	.LS1, .LS2,.LS3 或.L1A, .L2A, .L3 A	.LS4 或.L4A	.LAP 或 .LDO
內容	Valve 1 Record	Valve 2 Record	氣壓紀錄	Valve 1 Record	Valve 2 Record	氣壓紀錄

### 3. 原始資料記錄時間

在以下處理流程中，原始資料記錄時間皆為一年之中的第幾天。例如若想看 2008 年 11 月的資料，則需要尋找記錄時間為 2008 年第 306 到 335 天的資料。

#### 4. 原始資料處理資料夾路徑

將所需的原始資料複製至/gpsdb/Q330/站名/tmp/底下處理。以下預處理流程皆以.xxx 壓縮檔解出的原始資料，要分割出 ZANB 2008 年 9 月至 11 月(第 245-335 天)的 1Hz DT1 資料為例。(其他檔案作業流程均相同)

### 三、Step 1: Split Raw Data in Different Channels

目的：將 MiniSEED 檔案依 channel 做分割。

使用指令：`sdrsplit -C filename`

-C 為依 channel 分割

Ex：要分割 C081111072721\_ZANB.xxx 檔案，

輸入 `sdrsplit -C C081111072721_ZANB.xxx`。

結果：會出現 ZANB.TW.OCF.\*等等不同 Channel 的檔案，可以檔名中，TW 後的三個英文字判斷何者是要用的檔案。以下過程皆以 1Hz Data 為例，因此只留下 ZANB.TW.LS1.\*、ZANB.TW.LS2.\*和 ZANB.TW.LAP.\*的檔案（其他檔案為不同 Sampling rate data 及 Q330 參數檔案，在此可先移除）。

### 四、Step 2: Connect MiniSEED data into a period of data set

目的：將不同時間段的 MiniSEED data 接起來，以方便之後分割出不同月份的 data。

使用指令：`cat input_filename > output_filename.ms`

Ex：若需要分割出 ZANB 2008 年 9 月至 11 月(第 245-335 天)的 1Hz Valve 1 Data，則需至 Raw Data 存放資料夾內找出所有橫跨第 245-335 天區間內，副檔名為.xxx 檔案複製至工作資料夾，並以 step1 分割檔案後，將同一種記錄（LS1 files）的資料相接為連續的時間，輸入：`cat *.TW.LS1*> output_filename.ms`

結果：將兩個不同但連續時間區段檔案接起來，成為 `output_filename.ms`（`output_filename` 名稱可任取）。

查詢檔案(MiniSEED format)時間區段指令：`qmerge -n filename`

### 五、Step 3: Cut monthly (or any time period) data from a period of data

目的：將 Step 2 的輸出檔案分割成時間區段為一個月一筆的 MiniSEED 檔案。

使用指令：`qmerge -T -f timeperiod -t timeperiod input_file -o`

*output\_file.ms*

-T：裁減最靠近指定時間的 data。

-f：裁切起始時間 (from)。

-t：裁切終止時間 (to)，必須為裁切終止時間後一天的 00:00:00.00 (範例請見下面第 3 點)。

*timeperiod*：時間格式為「年.天,小時.分.秒.毫秒」。(範例請見下面第 3 點)

*input\_file*：需要裁切時間的檔案。

-o：輸出檔案指令。

*output\_file.ms*：站名.年份.起始日期.副檔名.ms (副檔名處請依所需檔案來給定，可參考表二至表四)。

Ex：需要從 *new\_filename.ms* 檔案輸出 ZANB 2008 年 9 月 1 號 (第 245 天) 至 9 月 30 號 (第 274 天) 的 1Hz Valve 1 記錄。

```
qmerge      -T      -f      2008.245,00:00:00.00      -t      2008.275,00:00:00.00  
new_filename.ms -o ZANB.2008.0901.LS1.ms。
```

結果：輸出 ZANB.2008.0901.LS1.ms 檔案。

#### 六、Step 4: Convert cut data (MiniSEED format) in to SAC format

目的：將 MiniSEED 格式的檔案轉成 SAC 格式。

使用指令：bsm2sac *filename*

Ex：轉換 ZANB.2008.0901.LS1.ms 檔案至 SAC 格式。

```
bsm2sac ZANB.2008.0901.LS1.ms
```

結果：輸出 ZANB.2008.0901.LS1.ms.sac

若有大量檔案需批次轉檔，可使用 testbsm2sac.csh 程式，直接執行即可。

#### 七、Step 5 : Down sampling rate from SAC file

目的：若欲分析的檔案並非 Raw Data 所記錄到的 sampling rate (1/10 Hz / 1/100 Hz / 1 Hz / 100Hz files)，例如 1 count/hr，則在此步驟降頻。

使用程式：OOtest.csh

程式說明：利用 SAC 內建的 decimate 指令將檔案降頻。

```
#!/bin/csh

# list sac format files
set stn = `ls *.sac`

foreach sta($stn)
# enter SAC program
sac << !
# read sac files
r $sta

# down sampling rate
decimate 5 filter off
decimate 5 filter off
decimate 3 filter off
decimate 3 filter off
decimate 4 filter off
decimate 4 filter off

# rename down sampling rate files
w $sta-1hr

q
!
end
```

Ex：將 1 count/sec (1Hz) 檔案降頻成 1 count/hr 的檔案。  
decimate 指令使用上可當成跳點取點(實際上還有經過 FIR filter)，意即 1 秒 1 點的 sampling rate 檔案若要降成 1 小時 1 點，則跳 3600 點後再取 1 點。

decimate 後接的數字僅可為 2-5。以此處為例，1 小時有 3600 秒，所以需利用 2,3,4,5 組合成的數字相乘為 3600 跳點降頻。若需降頻成別的 sampling rate 以此類推。

結果：輸出 ZANB.2008.0901.LS1.ms.sac-1hr。

## 八、Useable SAC files

經過上述步驟所得之 SAC format 檔案即為原始資料經預處理後可用之檔案。

## 附錄二 .xxx 檔案分割後之檔案列表

Borehole strainmeter mainly files		
Channel Name	Conversion	Description
HS1/H1A	miniseed; 100 count/sec	Valve 1 record (for <u>single-component strainmeter and three-component strainmeter</u> )
HS2/H2A HS3/H3A	miniseed; 100 count/sec	Valve 1 record (for <u>three-component strainmeter</u> )
HS2/H2A	miniseed; 100 count/sec	Valve 2 record (for <u>single-component strainmeter</u> )
HS4/H4A	miniseed; 100 count/sec	Valve 2 record (for <u>three -component strainmeter</u> )
HAP/HDO	miniseed; 100 count/sec	Atmospheric pressure record
LS1/L1A	miniseed; 1 count/sec	Valve 1 record (for <u>single-component strainmeter and three-component strainmeter</u> )
LS2/L2A LS3/L3A	miniseed; 1 count/sec	Valve 1 record (for <u>three-component strainmeter</u> )
LS2/L2A	miniseed; 1 count/sec	Valve 2 record (for <u>single-component strainmeter</u> )
LS4/L4A	miniseed; 1 count/sec	Valve 2 record (for <u>three -component strainmeter</u> )
LAP/LDO	miniseed; 1 count/sec	Atmospheric pressure record
VS1/V1A	miniseed; 1 count/10 sec	Valve 1 record (for <u>single-component strainmeter and three-component strainmeter</u> )
VS2/V2A VS3/V3A	miniseed; 1 count/10 sec	Valve 1 record (for <u>three-component strainmeter</u> )
VS2/V2A	miniseed; 1 count/10 sec	Valve 2 record (for <u>single-component strainmeter</u> )
VS4/V4A	miniseed; 1 count/10 sec	Valve 2 record (for <u>three -component strainmeter</u> )
VAP/VDO	miniseed; 1 count/10 sec	Atmospheric pressure record
US1/U1A	miniseed; 1 count/100 sec	Valve 1 record (for <u>single-component strainmeter and three-component strainmeter</u> )
US2/U2A US3/U3A	miniseed; 1 count/100 sec	Valve 1 record (for <u>three-component strainmeter</u> )
US2/U2A	miniseed; 1 count/100 sec	Valve 2 record (for <u>single-component strainmeter</u> )
US4/U4A	miniseed; 1 count/100 sec	Valve 2 record (for <u>three -component strainmeter</u> )
UAP/UDO	miniseed; 1 count/100 sec	Atmospheric pressure record

<b>REVIEW Q330 SOH and WAVEFORM CHANNELS</b> (Modify from <a href="http://www.passcal.nmt.edu/~eliana/Work/Documentation_files/APP-G_Q330-SOH.pdf">http://www.passcal.nmt.edu/~eliana/Work/Documentation_files/APP-G_Q330-SOH.pdf</a> )			
Channel Name	Conversion	Description	others
ACE	miniseed; not a time series	VCO quality expressed as SEED timing blockette 500	
LCE	1 microsecond / count	Absolute clock phase error	
LCQ	1 % / count	Clock quality	GPS lock interval (pql -m filename)
LOG	miniseed; not a time series	State of health expressed as ASCII miniseed records	Largest time jump after initial
OCF	miniseed; not a time series	Q330 configuration parameters expressed as opaque data records (B2000)	lock/adjustment (qlog logfilename   grep -i jump)
VCO	Count / count	VCO control voltage	
VEA	1 milliamp / count	GPS antenna current	
VEC	1 milliamp / count	Q330 system current	
VEP	150 millivolt / count	Input (system) voltage	
VKI	1 celsius / count	Q330 system temperature	
VPB	0.1 % / count	Q330 buffer usage	Baler dump % or time interval(pql -m filename)