

國立臺灣大學理學院海洋研究所

碩士論文

Institute of Oceanography

College of Science

National Taiwan University

Master Thesis

利用驗潮紀錄估計臺灣沿岸地表垂直運動

Estimating Vertical Crustal Motion along Taiwan Coast

Using Tide Gauge Records



指導教授：張翠玉 博士

趙 丰 博士

Advisor: Emmy T.-Y. Chang, Ph.D.

Benjamin F. Chao, Ph.D.

中華民國 98 年 6 月

June, 2009

國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書

利用驗潮紀錄估計臺灣沿岸地表垂直運動
Estimating Vertical Crustal Motion along Taiwan Coast
Using Tide Gauge Records

本論文係姜介中君（學號 R96241317）在國立臺灣大學海洋研究所完成之碩士學位論文，於民國 98 年 6 月 17 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：

（簽名）

李本 (指導教授) 張翠鳳

吳逸凡

許惠言

曾于怡

李本

系主任、所長

俞桂芳 (簽名)

誌 謝

這論文獻給我的祖母，您是我最重要也最愛的親人。

我何其有幸能夠擁有兩位指導老師，並且與兩間實驗室的伙伴相處，讓我的研究之路不寂寞。能夠走到這一步，最要感謝的是張翠玉老師，您是我在研究室的嚴父兼慈母，耐心指導著一開始什麼都不會的我，直到現在不只是完成這本論文，還有讓我學到很多研究的態度和方法。另一位也非常重要的趙丰老師，您在科學或人為的思維以及待人處事之道，都是我望塵莫及而且非常值得學習的，能夠被您指導是我的榮幸。此外還要謝謝黃金維老師、郭重言老師、Dr. Ole Andersen、給予專業的指導和建議。

我文筆很差，寫不出什麼感性的話，但這一路上大家的鼓勵卻我感動到數度要哭了出來。謝謝秋萍、阿忠和博森，總是在我手忙腳亂的時候給我很多重要的提醒，無法想像沒有你們在實驗室陪伴的日子。感謝中央趙老師研究室的大家，雖然一週一次的見面卻讓我體驗做研究的溫馨又快樂。謝謝喬老師研究室和 201 實驗室的大家，長期提供假日及夜間座位還聽我發悶又陪我解無聊，讓我不會一個人孤守工作。感謝所有地質地物組的同班同學，這兩年有你們一起分享做研究的甘苦真好。還要謝謝所上的排球隊，特別是謝志豪老師和昭成學長，雖然戰績不理想，但與你們打球卻非常開心，也學到很多。當然更不能少了地質系排和地質所的伙伴，發哥、惠雯、彭彭、Maple、宜蓉，能認識你們真好。

給我的老爸老媽，感謝你們在我求學過程上的一路支持，還放任我的愛玩不愛回家。我也很擔心你們的健康，市場工作很辛苦，多讓自己放個假，不要讓自己太累了，特別是老爸，多多休息，要一直健健康康快快樂樂的喔，謝謝你們的照顧，我愛你們。

摘要

驗潮站設立於碼頭或岸邊，記錄即時水位變化，反應水面與陸地的相對高程變化。吾人利用中央氣象局海象測報中心所提供之臺灣沿岸之 23 個驗潮站之紀錄，估計地殼在垂直方向上運動的量值。本研究主要有二工作方向：

一、估計近十年臺灣沿岸地區地殼垂直運動量

驗潮紀錄在陸地保持不動時，即為絕對海平面變化。因此驗潮紀錄與絕對海水位變化的差值，可視為地表相對於固定參考高程在垂直方向上的運動量。本研究以 TOPEX/Poseidon 與 Jason-1 兩組測高衛星於臺灣周圍海域的測量值，為絕對海平面的變化值，將驗潮紀錄以及測高衛星資料的時間序列，使用最小平方法（Least Squares Method）移除季節性與潮汐訊號，並同時取得整個時間序列的平均線性趨勢，這兩種觀測資料的線性趨勢的差值，即反應資料所涵蓋之時間段，其陸地的平均運動率。研究結果顯示，臺灣全島沿岸的地表幾乎是以下降為主，在臺灣西部嘉南地區的下陷量達 -52.2 mm/yr ，此應與該區域抽取地下水有關。在臺灣東部，地表運動的量值分布自 -37.1 至 $+7.5 \text{ mm/yr}$ ，而沿著岸線自富岡約至花蓮有下陷量增大的趨勢。

二、研究 1951 年花蓮歷史地震的震源機制

1951 年 10 月 22 日花蓮市區東南外海發生 $M_L 7.3$ 之地震，六小時後在主震北方約 22 公里處發生 $M_L 7.1$ 之餘震，與該餘震時間對應，花蓮驗潮紀錄基線下降大約 350 mm，我們認為此顯示驗潮站所在的地點受到餘震的同震變形抬升約 350 mm。然而我們利用氣象局對這個地震的規模及震源機制定義模擬花蓮驗潮站於餘震的同震位移，顯示對應的地表變動量約為 100mm 的下陷運動，與驗潮紀錄的觀測量不符合，造成觀測量及模擬結果定性上的差異。參考該地區所發生過之地震的震源機制及破裂行為，與 Cheng et al. [1997] 之震源機制相似而可信賴；而當時為數

不多的地震儀及其在本島的分布主要於臺灣島西部，對於東部外海的地震，可能有相當的定位誤差。本研究以花蓮驗潮站 350mm 的抬升量為參考值，使用網格空間索，重新驗證花蓮地震主要餘震發生的震源位置。研究結果顯示，斷層的空間最佳位置與米崙斷層一致，我們依此推測 1951 年花蓮地震應為米崙斷層的錯動，斷層幾何中心之深度可能在 13.5km 附近。所以本研究驗證 1951 年花蓮地震的餘震的發震機制，為米崙斷層的再次錯動。

關鍵字：驗潮站、測高、 垂直運動、1951 花蓮地震



Abstract

This study adopts 23 TG records from the Marine Meteorology Center of the Central Weather Bureau over several decades to estimate the magnitude of vertical crustal motion along the coast around Taiwan. There are two main targets in this study:

A. Estimating vertical crustal motion along Taiwan coast in recent decades

The tide gauge (TG) monitors the relative sea level w.r.t. the ground at the TG location, whereas satellite altimetry (ALT), for example TOPEX/Poseidon and Jason-1, measures the absolute sea level w.r.t. the terrestrial reference frame. Their difference signifies the absolute vertical ground motion for each of the available TG locations. Seasonal signals, primarily periodic tides are removed from both TG and ALT data beforehand by linear regression. We can therefore map out a whole profile of vertical crustal motion along the Taiwan coast. The majority of these motions tend to descend during the latest decade. Southwestern Taiwan shows a clear land subsidence reflecting the over withdrawal of groundwater with the largest magnitude -52.2 mm/yr in Bozihliao. The sites in the eastern Taiwan from Fugang to Hualien generally have a smaller descending rate with higher descending trend northward.

B. Re-examination of the coseismic deformation of the 1951 Hualien earthquakes

We re-examine the earthquake events occurring in Hualien downtown on Oct. 22, 1951. The mainshock was magnitude of M_L 7.3, and a large M_L 7.1 aftershock event occurred 6 hours afterwards, which caused the vertical shift of 350 mm in the TG record that reflected a vertical crustal uplift. We simulate the amount in this event based on the focal mechanic reconstructed by Chen et al. [1997]. The result shows the TG location had a -100mm coseismic vertical drop in contrast with the observed 350mm uplift,

apparently because of the sparse seismometer distribution and the resultant mis-locationing of the epicenter. Furthermore, we use the gridding search method to relocate the epicenter which fits the TG observation, putting the epicenter along the onland portion of the active Meilun Fault nearby the downtown of Hualien.

Key Words: Tide Gauge, Altimetry, Vertical Motion, 1951 Hualien Earthquake



目 錄

誌 謝	i
中文摘要	ii
英文摘要	iv
目 錄	vi
圖目錄	viii
表目錄	x
第一章 緒論	1
1.1 研究動機與目的	1
1.2 本文內容	3
第二章 資料來源與介紹	5
2.1 驗潮紀錄	5
2.1.1 驗潮站—Tide Gauge	5
2.1.2 潮汐與分潮	8
2.1.3 驗潮紀錄處理	10
2.2 衛星測高—SATELLITE ALTIMETRY	15
2.2.1 測高衛星簡述	15
2.2.2 衛星測高原理與誤差來源	19
2.2.3 測高資料處理	23
第三章 估計近十年臺灣沿岸地區地殼升降情形	26
3.1 前人研究	26
3.2 計算方法	28
3.3 結果與討論	30
第四章 估計歷史地震在高程之同震變形量	40
4.1 臺灣東部地質及地理概況	40
4.2 從驗潮紀錄推估同震位移量	41
4.2.1 同震位移量計算	41
4.2.2 同震變形模式研究	43
4.3 2003 成功地震	43
4.3.1 池上斷層與 2003 成功地震背景	43
4.3.2 驗潮紀錄與其同震位移量	45
4.3.3 變形模擬的操作結果	46

4.4 1951 花蓮地震	48
4.4.1 米崙斷層與 1951 花蓮地震	48
4.4.2 驗潮紀錄與其同震位移量	49
4.4.3 震源參數調整測試	57
第五章 結論	63
5.1 估計近十年臺灣沿岸地區地殼升降情形	63
5.2 估計歷史地震在垂直方向上造成之同震變形量	64
參考文獻	65
附錄一 驗潮紀錄展示及斜率	69
附錄二 各測站之分潮振幅與相位	83



圖 目 錄

圖 2.1	早期(左)與現代(右)驗潮站.....	5
圖 2.2	驗潮測站分布圖.....	6
圖 2.3	本研究所使用之 23 個驗潮站紀錄時間跨距	8
圖 2.4	芳苑驗潮紀錄.....	12
圖 2.5	移除潮汐及颱風訊號之時間序列	12
圖 2.6	成功地震造成驗潮紀錄的基線錯移	13
圖 2.7	驗潮紀錄的人為位移動校正。	14
圖 2.8	連續性及穩定性不佳的蘭嶼驗潮紀錄	15
圖 2.9	TOPEX/Poseidon 與 Jason-1 的衛星軌道圖	17
圖 2.10	衛星測量海平面變化示意圖	20
圖 2.11	本研究選取的測高資料區塊與驗潮站分布對應圖	24
圖 2.12	六個區域的測高資料時間序列	25
圖 3.1	以梗枋站為例，移除潮汐後之每 10 日取平均值	29
圖 3.2	以梗枋站為例，方法 (2) 之 ALT、TG 與 ALT-TG 圖示	30
圖 3.3	GPS 測站的時間跨距	32
圖 3.4	ALT-TG 及 GPS 所觀測到的陸地升降趨勢	35
圖 3.5	臺灣西岸之 GPS 與 ALT-TG 結果.....	36
圖 3.6	臺灣東岸之 GPS 與 ALT-TG 結果.....	37
圖 3.7	地殼受到同震變形與間震潛移在垂直方向位移示意圖	39
圖 4.1	本章研究區域.....	40
圖 4.2	臺灣區活動斷層分布圖	42
圖 4.3	成功地震之餘震分布 [Kuo Chen et al., 2007]	44
圖 4.4	石梯、成功、富岡、大武及綠島之 Detide 驗潮紀錄與成功地震發震時間	46
圖 4.5	成功地震之垂直方向地表同震變形。	47
圖 4.6	米崙斷層地震表分布[地質調查所，2004].....	49
圖 4.7	三角測量得到的陸地錯移量(1914-1921 與 1976-1979) [Chung et al., 2008].....	50
圖 4.8	花蓮驗潮紀錄與 1951 花蓮地震發震的時間	50

圖 4.9 各種地震規模對地震矩規模對應圖 [Healton et al., 1986]	51
圖 4.10 斷層幾何之附視圖及立體圖	53
圖 4.11 1951 花蓮地震主要餘震之錯位模式結果	54
圖 4.12 錯位模式下東西向共軛面的錯移模擬結果	55
圖 4.13 1996-2005 經由寬頻地震網重定位之震源機制解	56
圖 4.14 格子點搜尋最佳斷層位置之格子設計	58
圖 4.15 斷層於各個位置下對驗潮站的抬升量	59
圖 4.16 斷層幾何中心之最佳位置軌跡	59
圖 4.17 不同斷層幾何中心深度之最佳位置軌跡	60
圖 4.18 地震規模 $M_L 7.3$ 之斷層幾何最佳位置軌跡	61



表目錄

表 2.1	本研究所使用之測站詳細資料列表	7
表 2.2	本研究採用的 37 個潮汐分潮週期	9
表 2.3	歷史測高衛星的資料跨距、測量精度與軌道準度	16
表 3.1	ALT – TG 結果	31
表 3.2	GPS 各測站的位置與趨勢	32
表 4.1	成功斷層之位置及斷層幾何 [Wu et al., 2006]	45
表 4.2	驗潮站受 2003 成功地震影響之垂直變形量	47
表 4.3	花蓮地震主震及餘震的位置及震源機制 [Cheng et al.,1997]	48
表 4.4	簡單斷層幾何及其錯移量	53
表 4.5	1996-2005 BATS 重定位之震源機制 ($M_L > 4.0$).....	56





第一章 緒論

1.1 研究動機與目的

臺灣位於歐亞板塊與菲律賓海板塊的聚合帶上，北部位於菲律賓海板塊向北隱沒到歐亞板塊的西緣，為一年輕的造山帶。由全球定位系統（Global Positioning System, 簡稱 GPS）水平連續監測紀錄可知，菲律賓海板塊相對於歐亞板塊每年以 7 至 8 公分的速率持續向西北聚合[Yu et al., 1997]，截至目前為止，已經有相當多的研究，討論臺灣水平方向的地表變形行為，如 Yu et al. [1999] 利用 GPS 觀測臺灣地區地表水平方向運動情形；然而垂直方向的地表變形行為還沒有被充分討論，目前對臺灣地區地表垂直變形多半對應重大地震的同震變形或特定的構造帶，如 Yu et al. [2003] 與 Cheng et al. [2006] 分別利用 GPS 觀測 1999 集集地震以及 2003 成功地震之同震與震後變形的情形，均能有效進行定量觀測。

近代太空大地測量(Space Geodesy) 的各項技術，如 SLR(Satellite Laser Range) 及 VLBI(Very Long Baseline Interferometry) 皆可量測垂直方向的地表變形量。SLR 是利用極短的雷達波來量測衛星至地面之距離。先由地面測站向衛星傳雷達波，經衛星反射至原測站，以其時間差乘上光速測量衛星與地面測站之距離。VLBI 是利用多座無線電天文望遠鏡同時追蹤外太空某一個訊號發射源，記錄無線電磁波訊號，經由對電磁波的相關處理，可求得發射源至測站的時間差，進而解算出測站間之距離。目前臺灣地區有中研院自 1990 年起建立的 GPS 觀測網，來監測臺灣地區地表三度空間的變形行為，但由於 GPS 垂直方向精度不佳，且其 GPS 測站大量設立於 2000 年之後，許多高程的測量，則另外藉由精密水準測量來觀測高程變化的速度場。然而精密水準測量耗時耗人力，且無法達到廣大面積固定連續監測的能力。為了增進對臺灣複雜地體構造的了解，本研究使用臺灣沿岸之驗潮站 (tide gauge) 紀錄，配合測高衛星觀測的絕對海水面高度，利用其差值估計地殼在垂直

方向上運動的量值，測量地表垂直方向變形的能力，期望能幫助了解臺灣的地體構造。

驗潮站在臺灣設立的歷史早於 GPS 數十年，而主要的測站也有十年以上的紀錄時段；本研究所使用之測高衛星(altimeter satellite)，於 1992 即開始運行，至今有超過十五年的完整紀錄。利用其分別可量測相對及絕對海平面高度的特性，估計近十年臺灣沿岸在垂直上方向的運動。

驗潮紀錄所量測的海平面高度，包含了許多的訊息，大尺度的趨勢變化反應了海平面與陸地之間高程相對位移，其他不同尺度下的水位變化除了日月重力造成的潮汐外，還有各種區域性地質、氣候或人為影響海平面高度改變。因此本研究也針對這些現象討論驗潮紀錄之修正方法。而在大地震中，潮位站所處地區若有明顯同震變形，顯示在驗潮紀錄中為基線變動，也可以將此基線變動量對應同震垂直位移，研究地震的震源參數。

臺灣位處於環太平洋地震帶，地震頻繁，地震與活動斷層造成許多的災害。2003 年臺東成功地區發生 Mw6.5 之地震，此地震是自 1951 花東序列地震及 1972 年瑞穗地震後，在此地區發生規模大於 6.0 之災害地震。花東縱谷地區有相當大的地表同震變形量，此變形量也因地表抬升改變了驗潮站記錄的基線。因為驗潮紀錄具有數十年以上的連續觀測量，便有機會檢視在 GPS 廣設之前歷史地震的震源機制，如 1951 年花蓮地震。

1951 年的花蓮序列地震被視為臺灣過去一百年中，除了 1999 年集集地震之外，距今最近，破壞區域最廣的地震事件。此地震造成 68 人死亡、856 受傷，破毀房屋 2382 棟，並伴隨米崙斷層的錯動。但在地震發生當時，缺乏詳細地震斷層破裂的資訊及其與地形構造的關聯，加上當時地震儀的數量不足及分布不均，震源機制及震源位置都具有很大的討論空間。花蓮驗潮站自於 1950 年 4 月設立，明顯記錄了同震變形量。本研究利用錯位模式模擬，當斷層錯動造成地表在垂直方向抬

升的情形，進而檢視震源可能的位置，幫助了解這曾經對臺灣社會造成重大傷亡的歷史地震。

1.2 本文內容

本論文主要內容共分為五個章節，除了本章介紹本研究之目的及動機外，以下依序為：

第二章—資料來源與介紹：分別介紹驗潮站及測高衛星的測量原理、資料來源，及各紀錄中可能的測量誤差來源及改正方法，並且說明如何利用最小平方法求取各觀測資料之趨勢。

第三章—估計近十年臺灣沿岸地區地殼升降情形：利用測高資料及驗潮資料估計高程變形的方法，並做結果的呈現及討論不同地區造成地殼不同抬升量的原因。

第四章—估計歷史地震在高程之同震變形量：本章先介紹臺灣東部地質概況，再以 2003 成功地震為例，討論驗潮紀錄估計同震變形量的能力。最後將此方法運用在 1951 年花蓮地震，以同震錯位模式，討論在不同參數調整下之最適斷層位置。以及第五章結論。



第二章 資料來源與介紹

2.1 驗潮紀錄

2.1.1 驗潮站—Tide Gauge

驗潮站即為記錄海水面高度之工具，是簡單、有效且擁有悠久歷史的方法。一般而言，在岸邊設有固定的參考點，早期有專人在固定時間記錄海水面相對於參考點的高度（如圖 2.1 所示），後來進步到用浮筒帶動機械式的記錄裝置，即可做連續的記錄，最後進步到浮筒式、水壓式、超音波式、紅外線等的數字紀錄，資料可直接輸入電腦處理。海水面的變化，主要受天文潮汐、氣象因素、洋流以及冰帽溶解所影響，但由於參考點是固定在岸邊的岩盤或較穩固的地方，因此，地殼變動造成驗潮站及其參考點的升降，也會記錄到海水水位面的變化之中。



圖 2.1 早期(左)與現代(右)驗潮站

臺灣沿海設有數十個驗潮測站，不少測站有超過十年的紀錄，但有些紀錄並不連續，尤其是臺灣西部淤沙嚴重的地區，一個驗潮站往往維持不了幾年就中斷，

而過去對驗潮站的維護與架設也缺乏維持每個測站參考點穩定不變的觀念，而輕易改變參考點的高度，造成許多資料處理的困難。

目前臺灣沿岸約有 30 個驗潮測站（圖 2.2 方塊所示），各驗潮站由不同單位所設立維護，目前由中央氣象局統一管理資料。本研究採用 23 個測站資料（圖 2.2 紅色方塊），格式為逐時的潮高紀錄，本研究所使用的測站名稱、代號、資料起訖日期，請參見表 2.1。同一地區的驗潮站若重新設站，測站編號也會隨之改變，因此同一個測站名稱可能會有數段紀錄。

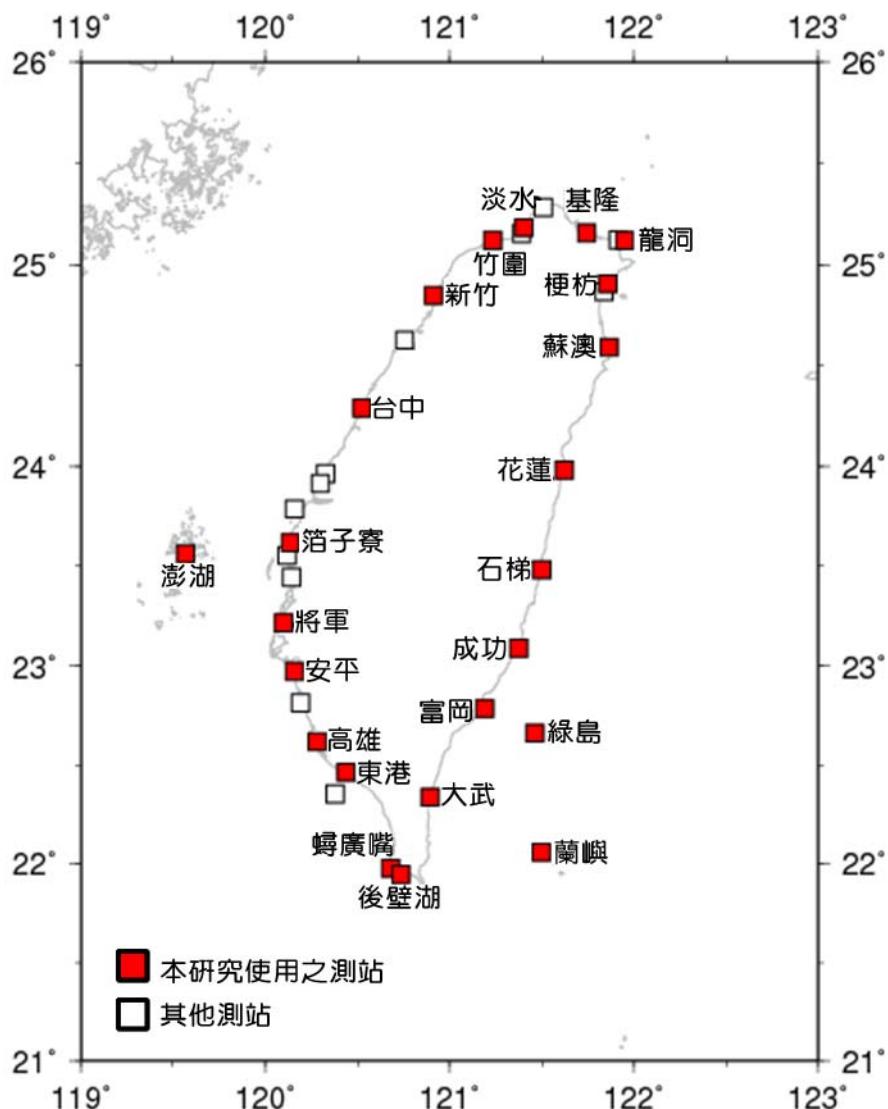


圖 2.2 驗潮測站分布圖

表 2.1 本研究所使用之測站詳細資料列表

站名	English	縮寫	經度	緯度	編號	設置單位	起使時間	結束時間
基隆	KeeLung	KL	121°44'39"E	25°09'26"N	1511	基隆港務局	19920101	19941231
			121°44'39"E	25°09'26"N	151	基隆港務局	19950317	200001231
			121°44'39"E	25°09'26"N	1516	中央氣象局	20040101	20061231
龍洞	LongDong	LD	121°57'00"E	25°07'12"N	1226	中央氣象局	20040101	20070831
梗枋	GengFang	GF	121°52'07"E	24°53'31"N	153	水利署	19921001	19960731
			121°51'43"E	24°54'26"N	123	中央氣象局	19960801	20070831
蘇澳	SuAo	SA	121°52'02"E	24°35'33"N	124	中央氣象局	19920101	20051020
			121°52'02"E	24°35'33"N	1246	中央氣象局	20051020	20061231
花蓮	HuaLien	HL	121°37'23"E	23°58'49"N	125	中央氣象局	19961217	20030831
			121°37'23"E	23°58'49"N	1256	中央氣象局	20031211	20070831
石梯	ShihTi	ST	121°30'22"E	23°29'41"N	1566	水利署	20011101	20070831
成功	ChengKung	CK	121°22'36"E	23°05'20"N	127	中央氣象局	19930301	20051206
			121°22'36"E	23°05'20"N	1276	中央氣象局	20020101	20061230
富岡	FuGang	FG	121°11'28"E	22°47'05"N	158	水利署	19920701	20010831
			121°11'32"E	22°47'27"N	1586	水利署	20010801	20070831
綠島	LuTao	LT	121°27'53"E	22°39'44"N	1676	水利署	20011005	20071230
大武	DaWu	DW	120°53'46"E	22°20'14"N	1596	水利署	20031001	20070831
蘭嶼	LanYu	LY	121°29'59"E	22°03'35"N	139	中央氣象局	19920723	20061231
後壁湖	HouBiHu	HBH	120°44'14"E	21°56'50"N	119	中央氣象局	19960801	20070831
蠋廣嘴	SyunGuangZuei	SGZ	120°42'43"E	21°59'08"N	149	水利署	19920801	20021231
			120°42'43"E	21°59'08"N	1496	水利署	20010801	20070831
東港	DongGang	DG	120°26'15"E	22°27'50"N	1186	中央氣象局	20040101	20070831
高雄	KaohSiung	KS	120°16'49"E	22°36'59"N	148	高雄港務局	19920101	20061231
安平	AnPing	AP	120°09'29"E	22°58'22"N	1471	高雄港務局	20010701	20070731
將軍	JianGyun	JG	120°06'00"E	23°13'05"N	146	中央氣象局	19920601	20010831
			120°06'00"E	23°13'05"N	1176	水利署	20020101	20080228
箔子寮	BoZihLiao	BZL	120°08'15"E	23°37'07"N	115	中央氣象局	19950401	20040630
			120°08'15"E	23°37'07"N	1156	中央氣象局	20040801	20080228
臺中港	TaiChung Port	TC	120°31'31"E	24°17'22"N	143	港灣技術研究中心	19970701	19991030
			120°30'13"E	24°17'22"N	1431	港灣技術研究中心	20010701	20041231
			120°31'59"E	24°17'16"N	1436	內政部	20040101	20080229
新竹	HsinChu	HC	120°54'44"E	24°51'01"N	112	中央氣象局	19920601	20080229
竹圍	Zhuwei	ZW	121°14'07"E	25°07'12"N	111	中央氣象局	19921001	20071231
淡水河口	Danshui Estuary	DS	121°24'07"E	25°11'04"N	140	水利署	19940101	20080930
澎湖	PongHu	PH	119°34'01"E	23°33'49"N	135	中央氣象局	19920101	20061231

本研究使用之各測站時間跨距如圖 2.3 所示，長條的長度代表資料紀錄長度。受到各種氣候或人為校正重新設站等因素，驗潮紀錄可能會有基線高程的改變或是部分紀錄品質不佳的情況，在資料使用時，有必要將各段紀錄進行檢視及修正，

此部分將於 2.1.3 節討論。圖 2.3 各測站長條灰色的部分為本研究資料檢視後不採納後續計算的部分，其他的紅色部分則進行結果的計算。

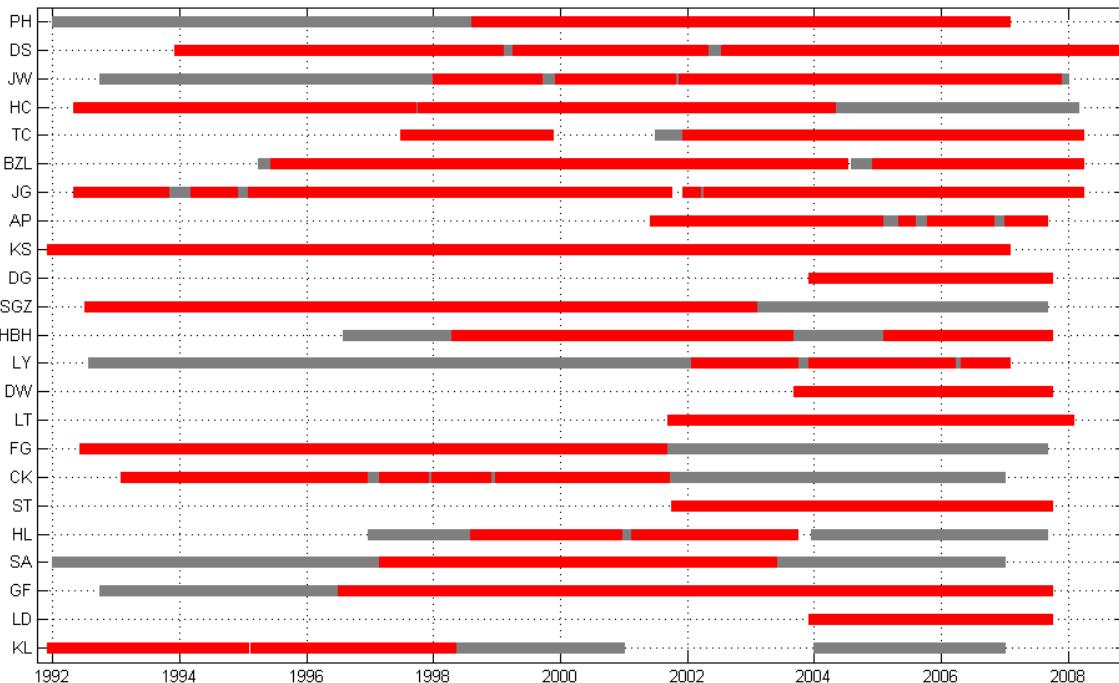


圖 2.3 本研究所使用之 23 個驗潮站紀錄時間跨距。

2.1.2 潮汐與分潮

除了儀器本身的誤差之外，潮汐振幅常常大過我們所希望觀測的訊號，影響最小平方迴歸的結果，所以計算時必須先移除主要潮汐的振幅。

由於潮汐是天體間相對運動下形成之引潮力所造成，不同的引潮力則可對應到特定的潮汐週期，而不同的潮汐週期則稱之為分潮。各分潮的相位及振幅大小在不同的地點，會因為緯度及地形的不同而有差異，但由於各分潮是由天體之間的相對運動所造成，週期並不會改變，因此可使用調和分析法(harmonic analysis)得到不同測站所有分潮的相位及振幅。地球上潮汐的主要影響來自月球，其次為太陽。地球與其他星體間的萬有引力太小，可略而不計。

不論在什麼地方，振幅最大的分潮主要為：主太陰半日週期分潮-M2、主太陰日週期分潮-O2、主太陽半日週期分潮-S2、日月合成日週期分潮-K1。其它分

潮振幅相對較小。本研究採用 37 個最普遍使用之分潮，其可涵蓋絕大多數潮汐的引潮力，這些引潮力以外的驗潮紀錄振幅則可視為其他氣象因素造成的雜訊。

表 2.2 本研究採用的 37 個潮汐分潮週期

Name of the Tidal Components	Period (hour)
M2 Principal lunar semidiurnal constituent	12.4206
S2 Principal solar semidiurnal constituent	12.0000
N2 Larger lunar elliptic semidiurnal constituent	12.6583
K1 Lunar diurnal constituent	11.9672
M4 Shallow water overtides of principal lunar constituent	6.2103
O1 Lunar diurnal constituent	25.8193
M6 Shallow water overtides of principal lunar constituent	4.1402
MK3 Shallow water terdiurnal	8.1771
S4 Shallow water overtides of principal solar constituent	6.0000
MN4 Shallow water quarter diurnal constituent	6.2692
NU2 Larger lunar evctional constituent	12.6260
S6 Shallow water overtides of principal solar constituent	4.0000
MU2 Variational constituent	12.8718
2N2 Lunar elliptical semidiurnal second-order constituent	12.9054
OO1 Lunar diurnal	22.3061
LAM2 Smaller lunar evctional constituent	12.2218
S1 Solar diurnal constituent	24.0000
M1 Smaller lunar elliptic diurnal constituent	24.8332
J1 Smaller lunar elliptic diurnal constituent	23.0985
MM Lunar monthly constituent	661.3092
SSA Solar semiannual constituent	4382.9052
SA Solar annual constituent	8765.8210
MSF Lunisolar synodic fortnightly constituent	354.3670
MF Lunisolar fortnightly constituent	327.8589
RHO Larger lunar evctional diurnal constituent	26.7231
Q1 Larger lunar elliptic diurnal constituent	26.8684
T2 Larger solar elliptic constituent	12.0164
R2 Smaller solar elliptic constituent	11.9836
2Q1 Larger elliptic diurnal	28.0062
P1 Solar diurnal constituent	24.0659
2SM2 Shallow water semidiurnal constituent	11.6070
M3 Lunar terdiurnal constituent	8.2804
L2 Smaller lunar elliptic semidiurnal constituent	12.1916
2MK3 Shallow water terdiurnal constituent	8.3863
K2 Lunisolar semidiurnal constituent	11.9672
M8 Shallow water eighth diurnal constituent	3.1052
MS4 Shallow water quarter diurnal constituent	6.1033

Sa 及 Ssa 代表的是引潮力所造成的年週期，然而由於地球公轉造成氣候的季節性變化，因此驗潮紀錄中 365.25 天年週期及 182.63 天半年週期的訊號，不僅止於天體間的引潮力，也包含其他來自如溫度、氣壓……等的季節性氣候因素。

2.1.3 驗潮紀錄處理

本研究計算臺灣沿岸地區近十年的平均運動量，使用最小平方法做線性迴歸，以整段時間序列的斜率，代表驗潮站在整個驗潮紀錄時間段中的升降趨勢。在求取時間序列趨勢的過程中，為了提高迴歸值的穩定度，因此在對斜率及平均值做線性迴歸的同時，也扣除已知各潮汐週期的分量，同樣使用最小平方法，求取各分潮在該測站的振幅及相位，如此可降低潮汐振福對整段時間序列趨勢所造成的誤差。驗潮資料的時間序列可由時間的(一次)線性函數以及上一個小節所提到的 37 個潮汐諧和函數表示，如下：

$$TG(t) = a_0 + a_1 t + \sum_{i=1}^{37} \{A_i \sin(\omega_i t) + B_i \cos(\omega_i t)\} + n(t) \quad (2.1)$$

TG：驗潮紀錄，為每小時一筆潮位高度

t：時間序列

ω_i ：各分潮頻率，三十七個週期如表 2.2

a_0 、 a_1 、 A_i 與 B_i ：各項迴歸後所得之係數，其中 a_1 為時間序列之趨勢

n：移除平均值、斜率及週期性訊號後之剩餘值

物理上各分潮可用單一正弦函數表示：

$$H_i = C_i \sin(\omega_i t + \phi_i) \quad (2.2)$$

其中 H 為該分潮造成之潮高， ω_i 是該分潮的頻率，各測站之分潮振幅 C_i 及相位 ϕ_i 可使用以下公式換算：

$$C_i = \sqrt{A_i^2 + B_i^2} \quad (2.3)$$

$$\phi_i = \tan^{-1}\left(\frac{B_i}{A_i}\right) \quad (2.4)$$

A 與 B 為公式(2.1)迴歸所得各分潮之正弦及餘弦函數之係數，各測站計算所得各分潮之振幅及相位，請參見附錄二。由於 Sa 及 Ssa 之分潮週期與其他氣候因素造成海水面變化之季節性週期相同，所擬合出的振幅及相位並非如其他分潮單由引潮力所造成，因此在附錄中將不列 Sa 及 Ssa 之擬合結果。

本研究使用中央氣局提供之 23 個測站，各測站設立的位置不同，資料的品質可能受到各種區域性地質、氣候或人為因素而影響實際潮位紀錄，故使用前必須先討論資料品質，並做適當的調整。影響驗潮紀錄品質的因素如下：

(1) 淤沙：當淤沙堆積高度高過原先在驗潮站的低潮線時，則退潮時海水會退到比淤沙還低，驗潮紀錄便記錄到積沙的高度，如此便無法得知該日的低潮為何，此現象在臺灣西岸的驗潮站較常見，對於此現象我們便將此段時間序列移除而不使用。以位在彰化縣的芳苑測站為例（圖 2.4），1992 至 2007 年全段的驗潮紀錄皆有淤沙現象，以至於完全無法使用。類似的情況在外埔測站也有發生。

(2) 颱風：颱風的低氣壓造成水位抬升，尤其在移除潮汐後的紀錄中顯而易見，為了避免其大振幅影響線性迴歸的結果，只要是在時間序列中有颱風訊號出現時，此段潮位紀錄便不予使用。本研究進行多次統計測試，最後以三倍潮高標準差做為範圍，視超過三倍標準差的潮高為歧異值，此方法可有效移除大多數由颱風造成的異常高潮位。

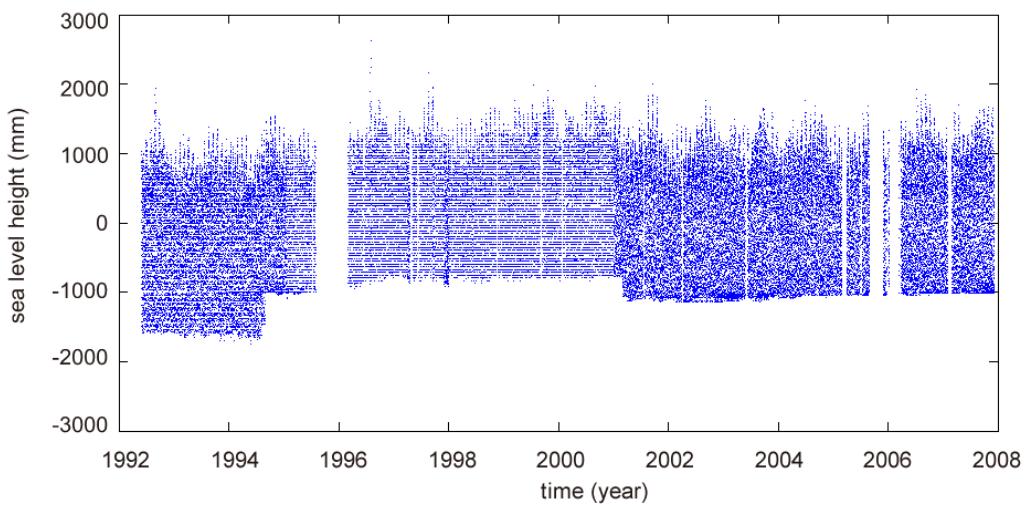


圖 2.4 芳苑驗潮紀錄

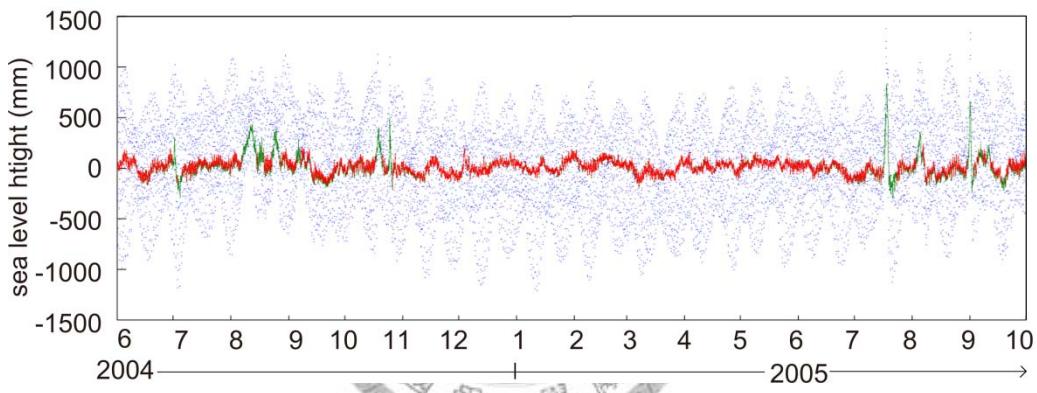


圖 2.5 移除潮汐及颱風訊號之時間序列

以石梯測站為例（圖 2.5），藍點為每小時的原始潮位，利用最小平方法移除潮汐訊號後即為墨綠色之潮位訊號，七八月時颱風低壓造成的潮位上升，在移除潮汐後明顯可見。將這些受到颱風影響的時間段移除後，留下來的資料即為圖中的紅色線段。

(3) 地震：大型地震若造成地殼抬升或下降，同樣會影響到基線的變化情形，以成功測站為例（圖 2.6），藍色為原始潮汐紀錄，移除潮汐後之時間序列以紅色表示，黑色虛線為全段時間序列平均值。紫色虛線標出 2003 成功地震發震的時間，

可看出在地震發震之前，潮位的平均值在黑色虛線之上，而發震後平均潮位在黑色虛線以下，表示驗潮站在地震發生時，受到垂直方向同震變形的影響而抬升。

因為考慮到地震發生後可能會有震後變形，且地震前後地殼運動的速度可能不同，因此本研究僅使用地震發生前較完整的驗潮紀錄段。

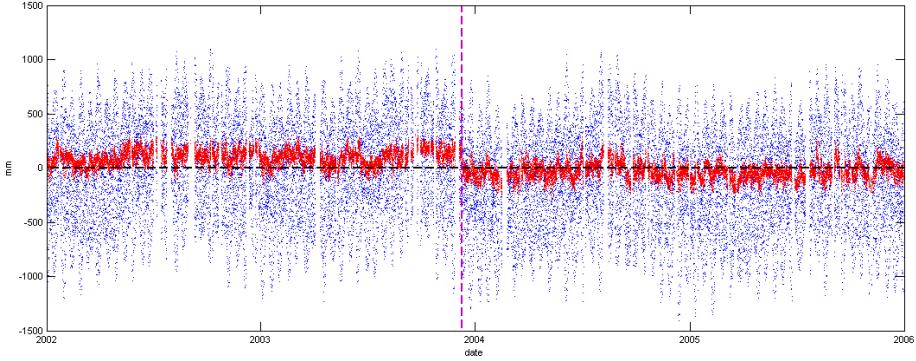


圖 2.6 成功地震造成驗潮紀錄的基線錯移

(4) 測站人為調整：大部分的驗潮儀在使用一段時間之後，就會有人為調整，例如更新儀器，或是遷站，造成驗潮站的基線與調整前不同，導致基線改變。我們假設驗潮站在做人為調整時，均在同一個地點上，而儀器雖然經過調整移動，但地殼運動是不受人為影響，在調整前後的驗潮紀錄的斜率不變，這段基線差可以當作是瞬時的基線位移，因此針對某些確定為人為調整的驗潮記錄，本研究在公式(2.1) 中加入步階函數 (step function)，擬合這段基線差。公式(2.1)改為：

$$TG(t) = a_0 + a_1 t + a_2 S(t) + \sum_{i=1}^{37} \{A_i \sin(\omega_i t) + B_i \cos(\omega_i t)\} + n(t) \quad (2.5)$$

其中 $S(t)$ 為步階函數，其係數 a_2 為最小平方法擬合出基線的差量。

以綠島站為例（圖 2.7），2002 至 2007 年底之驗潮紀錄中，測站於 2004 年 1 月 1 日重新調整驗潮站之基線高程，故在此時間前後有明顯基線變化情況情形。

利用公式(2.5)擬合這段基線差值，推得有 842.2 mm 的基線漂移量，將基線校正後的時間序列以紅色表示，即可修正此偏移量，得到完整的驗潮紀錄。

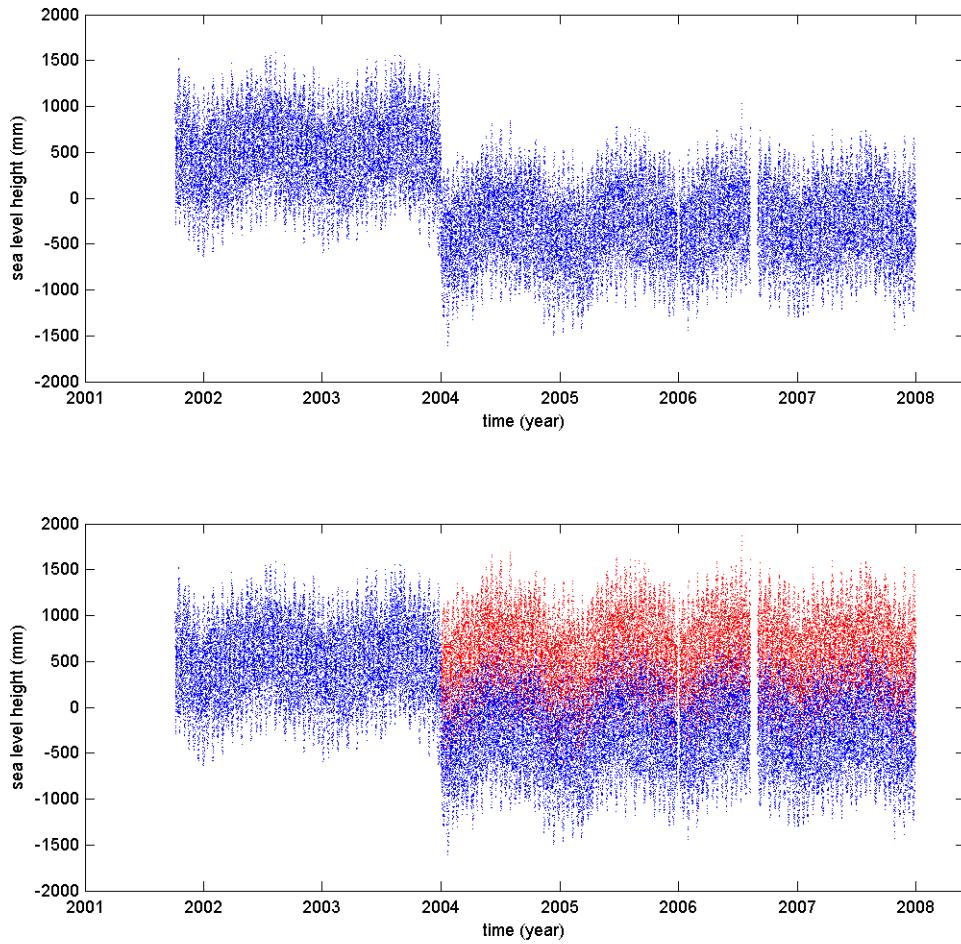


圖 2.7 驗潮紀錄的人為位移動校正。

另外也有同測站但人為調整前後趨勢不同的情形，蟠廣嘴測站位在臺灣本島最南端的恆春半島，前後兩段時間分別為 1992 至 2001 (SGZa) 及 2001 至 2008 (SGZb)，經過線性迴歸的結果，兩段的趨勢完全相反，此現象有可能是測站在設立時穩定性不夠所致。

良好的測站紀錄除了應避免上述的情況發生外，更重要的是測站本身的穩定性及紀錄的連續性。若驗潮站在同一地點長時間紀錄，卻因為儀器故障或測站設置不良，時常更動基線高度，將導致無法反應真實的陸地與海水面的相對運動。以蘭嶼測站為例（圖 2.8），雖有 1992 年至 2006 年長時間的時間序列，但 2000 年之前的紀錄有多次間斷，且每段的海平面變化趨勢不太一致，即使 2001 年後有略長時間的紀錄，但每段連續紀錄仍然不超過三年便有一明顯基線移動情形。基線的不穩定加上紀錄時間長度不夠，增加資料修正的難處，蘇澳測站及花蓮測站皆有類似情形。本研究考慮觀測空間分布的完整性，將蘇澳及花蓮測站列入分析，但其分析結果僅供參考。

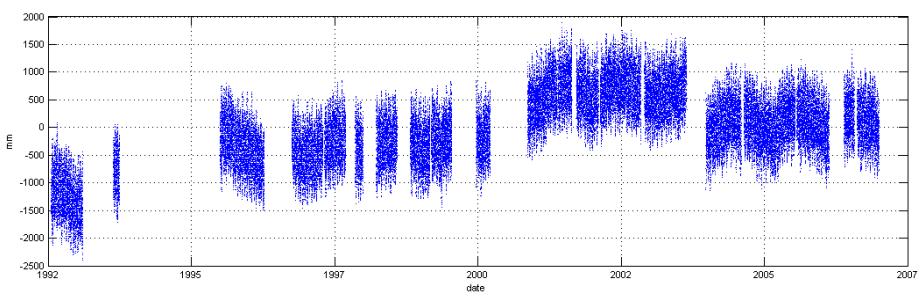


圖 2.8 連續性及穩定性不佳的蘭嶼驗潮紀錄

2.2 衛星測高 – Satellite Altimetry

2.2.1 測高衛星簡述

測高衛星最基本的功能為量測衛星與海水面之間距離。原理是由衛星發出雷達脈衝，經由水面反射後再由衛星本身接收，即可利用雷達在介質中的速度與所經過的時間求得距離。

最早成功發射搭載測高儀的衛星是由美國太空總署(NASA)於 1975 年所發射的 GEOS-3 以及 1978 的 Seasat。隨後美國海軍(US Navy)及歐洲太空總署(ESA)也分別於 1985 及 1991 成功發射搭載測高儀的 Geosat 及 ERS-1 衛星。而 1992 由美國太空總署及法國太空總署(CNES)共同合作的衛星 TOPEX/Poseidon，更將測

量誤差縮減到幾個公分的精度，增加資料的可信度（表 2.3）。至今，仍有 Jason-1、Envisat、GFO 等搭載雷達測高儀的衛星持續運行。本研究即採用 TOPEX/Poseidon 以及其任務的接續者 Jason-1 的量測結果做為研究資料。

TOPEX / Poseidon (1992 - 2006)

TOPEX/Poseidon 衛星發射於 1992 年，衛星軌道高度為 1336 公里，傾角 66 度，繞行地球一圈約 112 分鐘，共有 127 條軌道，每 10 天重複軌道一次，為非太陽同步衛星，主要目標是避免與潮汐週期相同造成混疊，如此資料處理時便能有效將潮汐造成的海水面變化移除(detide)，如圖 2.9。

表 2.3 歷史測高衛星的資料跨距、測量精度與軌道準度

Satellite	Mission period	Measurement precision (cm)	Orbit accuracy (cm)
GEOS-3	1975 – 1978	25	~500
Seasat	1978 – 1978	5	~100
Geosat	1985 – 1989	4	30 – 50
ERS-1	1991 – 1996	3	8-15
TOPEX/Poseidon	1992 – 2006	2	2-3
Jason-1	2002 – present	2	1-2

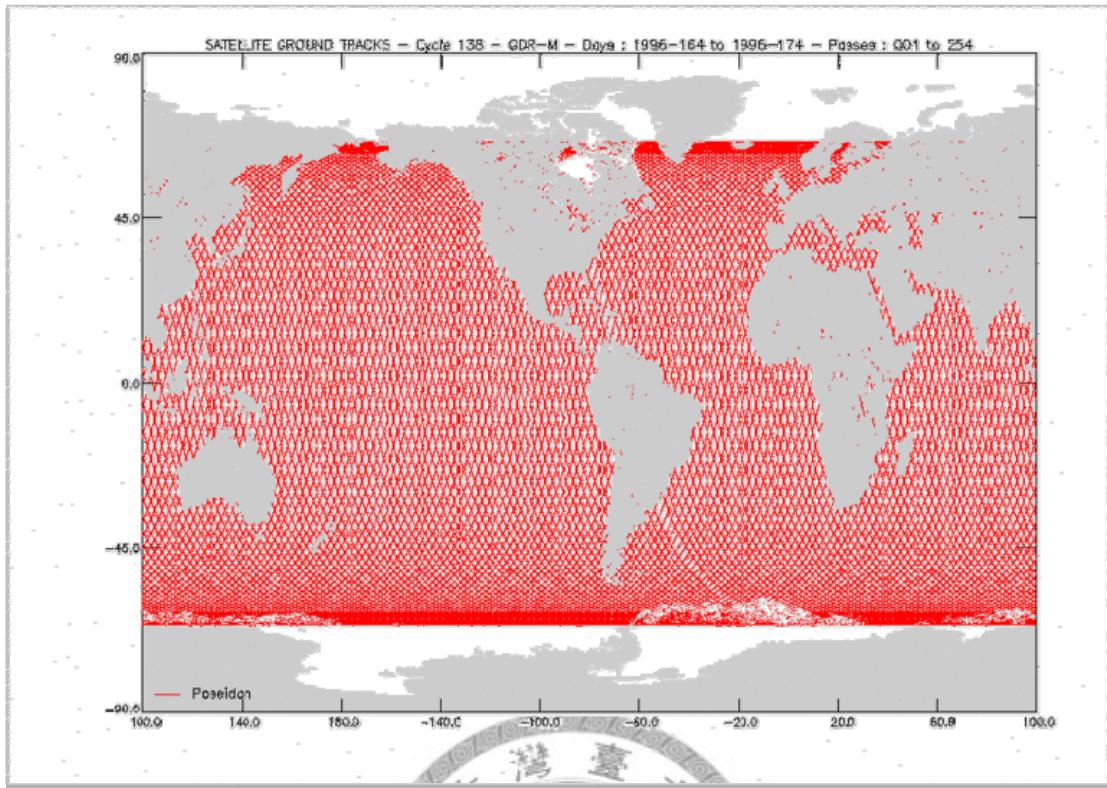


圖 2.9 TOPEX/Poseidon 與 Jason-1 的衛星軌道圖

TOPEX/Poseidon 上所搭載之儀器有：

NRA (Dual-frequency Ku/C band NASA Radar Altimeter, NRA)：NASA 設計的 NRA 又名為 TOPEX，為 TOPEX/Poseidon 衛星上最主要的儀器。使用 13.6 GHz (Ku band)與 5.3GHz (C band)兩個波段，結合兩種頻率的觀測量可獲得海面到衛星的高度、風速、波高與電離層改正參數。

SSALT (Single frequency Ku band Solid State ALTimeter)：CNES 設計的 SSALT 又名為 Poseidon，相較於 NRA 功率 237 W 及重量 206 kg，SSALT 僅使用 49W 及 23kg，以低功率及質輕的特色作為實驗性質的測高儀器。由於兩個測高儀共同使用同一組天線，無法同時運作，一次只有一組測高儀在觀測，使用比例為 TOPEX 占 90%而 Poseidon 占 10%，以每 5 個軌道週期做一循環。

TMR (Topex Microwave radiometer)：用利用微波量測水蒸氣含量，用以做為雷達經過大氣層時速度的改正。

GPSDR (GPS Demonstration Receiver)：GPSDR 以雙頻(1227.6MHz 與 1575.4 MHz) 接收 GPS 訊號，並以 GPS 差分測距離技術來精密定軌。

DORIS (Doppler tracking system receiver)：由 CNES 發展的定位系統，衛星上搭載接收器，接收來自地球表面測站發射的都卜勒信號進行衛星定位。

SLR (Laser Retroreflector Array)：由 NASA 開發的定位系統，利用反射來自地面測站的雷達進行衛星定位。

Jason-1 (2001 – present)

Jason-1 為延續 TOPEX/Poseidon 任務的衛星，其軌道高度、傾角、與 TOPEX/Poseidon 完全相同。



Jason-1 發射於 2001 年，同樣是由 NASA 與 CNES 共同合作的計畫。在發射後進入軌道時，前半年與 TOPEX/Poseidon 共用軌道，用以做為軌道改正，其後 TOPEX/Poseidon 變換軌道，用意為提高測高衛星的空間解析度，而原本 TOPEX/Poseidon 原軌道的觀測任務，也就順利轉交給 Jason-1。Jason-1 上所搭載之儀器有：

Poseidon-2 Altimeter (Dual-frequency Ku/C band solid State Radar Altimeter)：延續 CNES 開發之 SSALT，使用 13.535GHz (Ku band) 及 5.3GHz (C band) 的測高儀，具有重量輕及省電的特色，為 Jason-1 上執行任務最主要的感測器。結合以上兩種頻率的觀測量可獲得海面到衛星的高度、風速、波高與電離層改正參數。不同於 TOPEX/Poseidon，Jason-1 僅搭載一個測高儀。

JMR (Three-frequency Jason-1 Microwave radiometer)：與 TMR 類似，使用 18.7GHz、23.8GHz 與 34.0GHz 三個微波頻率量測水蒸氣含量，用以做為雷達經過大氣層時的改正用。

TRSR (Turbo Rogue Space Receiver)：利用 GPS 系統做衛星軌道定位。

DORIS (Doppler tracking system receiver)：由 CNES 發展的定位系統，衛星上搭載接收器，接收來自地球表面測站發射的都卜勒信號進行衛星定位。

SLR (Laser Retroreflector Array)：由 NASA 開發的定位系統，利用反射來自地面測站的雷達進行衛星定位。

2.2.2 衛星測高原理與誤差來源

測高的原理用圖 2.10 簡單說明之：衛星利用 GPS、SLR(地面站為 laser station) 及 DORIS (地面站為 DORIS station) 進行軌道定位，得知衛星與參考橢球體 (ellipsoid) 之間的距離 H ，再利用測高衛星接收來自海面反射之雷達回波，得到衛星與水面之距離 R ，而 H 與 R 的差值即為海平面相對於參考橢球體之間的距離 h ，亦為絕對海平面高度。

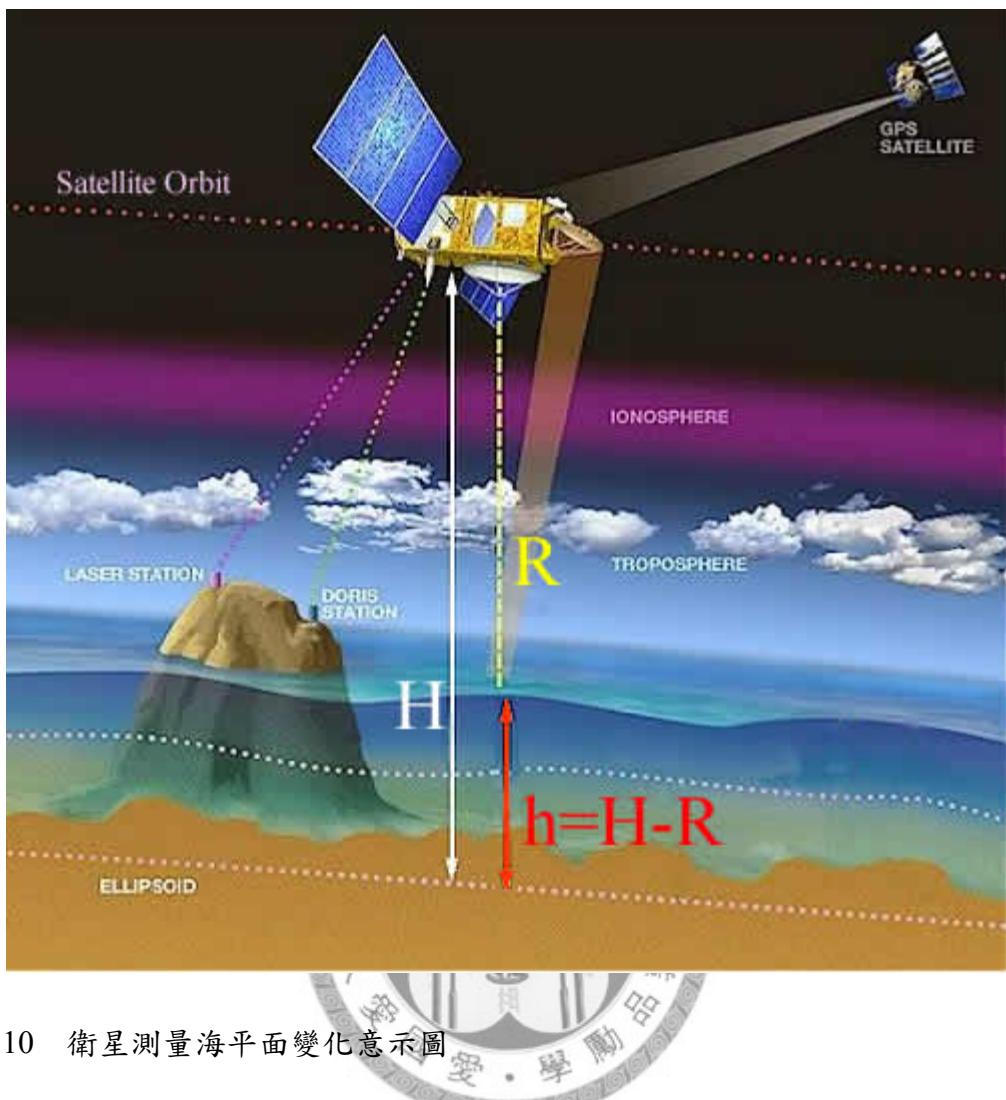


圖 2.10 衛星測量海平面變化示意圖

其中真空中光速為 c ， \hat{R} 為雷達在真空中所得衛星到海平面的距離，但實際上雷達經過了大氣層，因此需要進行各種大氣修正量 ΔR_j 。本研究希望得到海水面的絕對高度變化，故目的為求出海水面與參考橢球體（reference ellipsoid）之間的高度 h ，即絕對海水高度。

$$h = H - R \\ = H - \hat{R} - \sum_j \Delta R_j \quad (2.7)$$

上式中， H 為衛星與參考橢球體之間的距離，由衛星上的軌道定位系統(GPS, DORIS, SLR)量測而得。如此便可得到粗略的絕對海水面高度，然而為了得到更精

確的海平面變化量，必須扣除潮汐、大氣壓力……等等對海面造成的效應。公式(2.7)改為：

$$\begin{aligned} h_d &= h - h_T - h_a \\ &= H - \hat{R} - \sum_j \Delta R_j - h_T - h \end{aligned} \quad (2.8)$$

h_d 海平面高度

h_T 潮汐造成的海平面變化高度

h_a 大氣壓力造成的平面變化高度

由以上的關係式，我們將可獲得絕對海水面的高度變化，即海平面相對於參考橢球面的高度變化。但由於驗潮測站之紀錄並無進行氣壓修正，因此本研究所使用之測高資料也不將大氣壓力修正納入，使兩資料進行比較時較為公平。

衛星測高的誤差來源主要有三：

(一) 衛星軌道誤差

TOPEX/Poseidon 在 1336 公里的高空沿著固定的軌道飛行，但並非完美地走在軌道上，受到地球重力場的影響，衛星實際上沿著軌道在擺動，這也是早期衛星在測量上嚴重的誤差來源之一。藉由 GPS、DORIS 以及 SLR 在 TOPEX/Poseidon 及 Jason-1 上的應用，已可將誤差精確到 2 至 3 公分。

(二) 雷達經過大氣層導致的誤差

雷達脈衝受大氣層內氣體和水氣含量之影響而降低速度，也就是乾對流層、溼對流層與電離層的影響，下面進行簡單描述：

- a. 乾對流層作用(dry troposphere influence)：大氣層折射率受對流層的密度以及溫度的影響，當流體靜力平衡(hydrostatic equilibrium)及理想氣體定律(ideal gas

law)成立時，則垂直距離延遲為表面壓力的函數。由於目前並沒有任何儀器可以搭載於衛星直接量測天底(nadir)表面壓力，故必須依賴歐洲中期天氣預報中心(European Center for Medium range Weather Forecasting , ECMWF)所建立的數值模式針對乾對流層改正，每隔六小時提供資料。此效應造成的誤差約為 0.7 公分。

b. 濕對流層作用(wet troposphere influence)：水氣含量多寡亦會影響大氣層的折射率，TOPEX/Poseidon 與 Jason-1 分別搭載的 TMR 與 JMR，使用 18、21、37GHz 三頻微波輻射儀，其中 21GHz 頻率可偵測水氣含量；18GHz 頻率用來移除表面逸散(surface emission)，如風速的影響；37GHz 頻率可消除其他大氣層影響，如雲層覆蓋。由上述三種頻率的微波輻射儀所得的觀測量，可得濕對流距離改正量(wet troposphere range correction)。

c. 電離層影響(ionosphere influence)：雷達脈衝之傳播速度與電離層自由電子含量成正比，與測高儀頻率平方成反比。電離層影響可造成 13.6GHz 頻率的測高儀所測得之距離較實際多出 0.2 至 20 公分，其中自由電子含量白天比晚上多；冬天比夏天多；太陽活動週期(solar cycle)小的時候，其量較少。電離層效應可由測高儀及 DORIS 系統分別測得，前者準確度達 2.2 公分，但其測得之資料只適用於 NASA 雷達測高儀(NASA Radar Altimeter, NRA)，後者之資料 NRA 與固態側高儀(Solid State ALTimeter, SSALT)皆可使用。

(三) 瞬間海水面與大地水準面的距離

瞬間海水面與大地水準面的距離可分為兩部分，一為平均海水面(mean sea surface)與大地水準面(geoid)間的距離 H ，又稱為海面地形(Sea Surface Topography)；另一為平均海水面與瞬間海水面的距離 ΔH ，乃瞬間海潮效應(instantaneous tidal effects)所引起， ΔH 是隨時間變化的。測高衛星目的為求平均海水面，故必須消除與時間相關的瞬間海潮效應部分。海水面的變化主要是因為

海潮與大氣壓力的影響。海浪引起的面變化可忽略，因為在測高儀觀測過程已被平均。

由空氣荷重造成的海面高程變化的效應稱之為逆氣壓效應(inverse barometer effect)，影響大約在 10 至 15 公分。此改正量目前普遍使用由 ECMWF 所提供之 MOG2D 模型做修正。

造成海面變化的主要原因來自海潮(ocean tides)，在開放性的海域中，振幅可達 1 公尺；在海岸附近或是淺地區振幅可達 2 公尺。幾個計算全球性海潮的模型精度已經達到 10 公分，區域性的海潮模式甚至可以達到約 3 公分的精度。然而衛星重覆同一地點取樣的週期遠超過潮汐變化的週期，故必須使用海潮模式進行修正。本研究使用的改正模式為 NAO.99b [Matsumoto et al., 2000]

本研究使用的測高資料為，以經過臺灣周圍的四條軌道(Pass 051、127、164、240)，擷取六個區域如圖 2.11，與相鄰驗潮測站資料做比較。資料來源為荷蘭臺夫特科技大學（ Delft University of Technology ）設立的測高衛星資料庫 <http://rads.tudelft.nl> 。前一節所述之各項誤差改正量，均可從資料庫設定預先修正的選項，下載後即為改正完之測高資料。

由於驗潮測站所記錄到的海平面高度受到區域性氣壓的影響，為使兩筆資料的背景因素能趨於一致，測高資料在取得時將不作逆氣壓改正，。

2.2.3 測高資料處理

本研究所圈選六個測高衛星軌道所經過的區域，衛星每 10 天經過此區域一次，將此區域內之測高值平均，視為該區域該時間的海水面高度，以此方法建立測高時間序列。

測高資料同樣利用最小平方法取其趨勢，而潮汐測高資料在下載時，除了逆氣壓修正外，均加入前一章所述之各種改正，而下載後的時間序列在諧和函數部分僅須做年週期及半年週期之線性迴歸即可，公式與前列之公式（2.1）相同。

圖 2.12 為各區域海水面變化。ABCD 為臺灣東岸由北往南的四個測高區域，E 為臺灣海峽新竹外海附近的區域，F 則為臺灣西南外海。E 的時間序列明顯相較於其他 5 個區域不同，不但振幅較大，頻率也較高，可能是存在某個無法使用海潮模式移除的潮汐，或因臺灣海峽的潮汐較複雜的緣故。

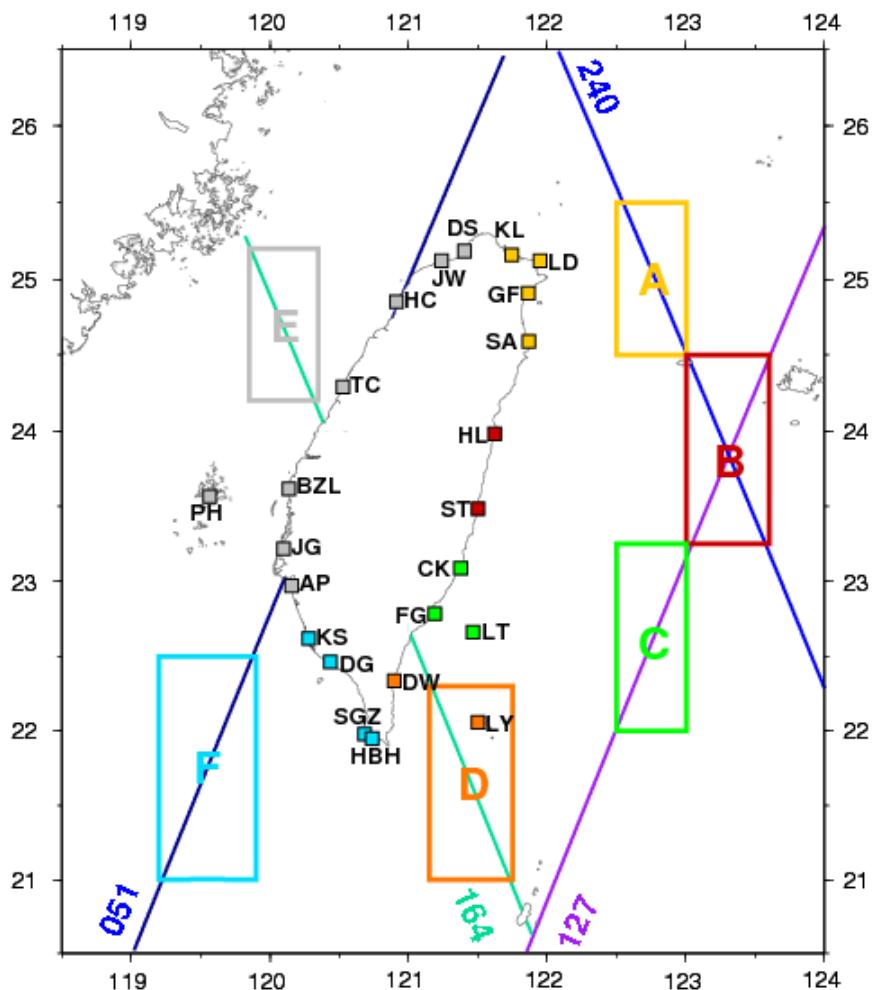


圖 2.11 本研究選取的測高資料區塊與驗潮站分布對應圖

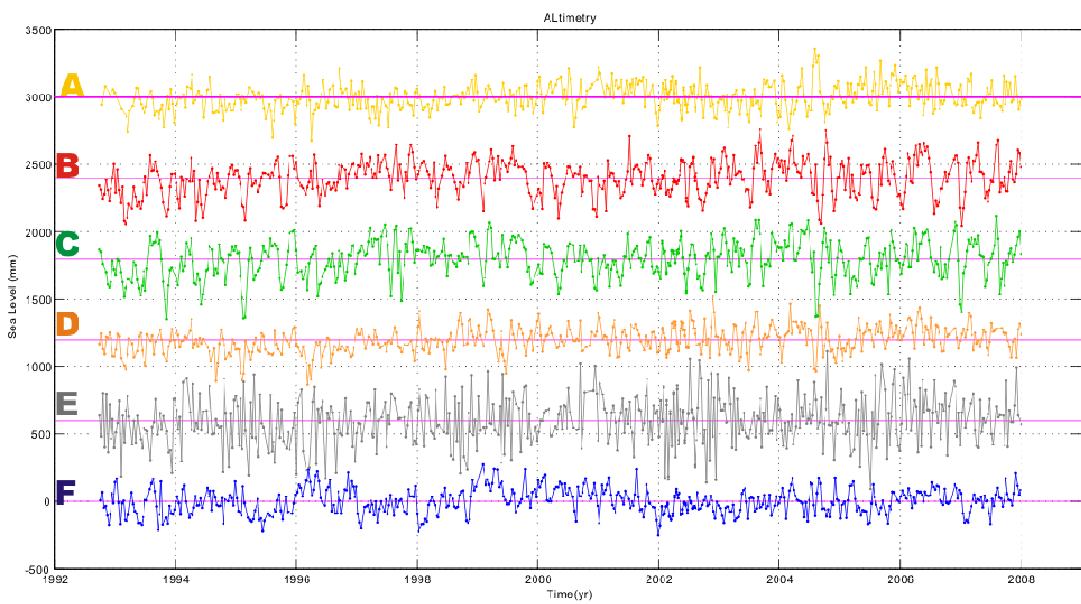


圖 2.12 六個區域的測高資料時間序列



第三章 估計近十年臺灣沿岸地區地殼升降情形

由於衛星測高測量的資料為絕對海水位，而潮位紀錄為相對海水位，在學理上，以測高資料當作海平面參考值，而潮位紀錄與測高資料的差量，可視為構造作用所造成的區域地表垂直運動量。

3.1 前人研究

前人曾利用各種相對海水位紀錄估計臺灣地殼在垂直方向抬升量，除了驗潮站之外，也有利用珊瑚礁及海蝕臺階紀錄的方法，方法簡述如下：

Liu [1989] 使用臺灣沿岸的六個驗潮紀錄（中壢/6年、臺西/12年、躉廣嘴/3年、富岡/6年、花蓮/36年與梗枋/3年）估計各測站所在地殼垂直運動速率，絕對海平面變化則統一使用全球平均值 $+2.5 \text{ mm/year}$ 做改正，其結果以臺西的 -25 mm/year 與富岡 $+27.0 \text{ mm/year}$ 的下沉與抬升量為最劇烈。其結果認為是超抽地下水造成臺西地區的地層下陷及板塊運動造成臺灣東岸劇烈的抬升。

Wang et al. [1990] 利用珊瑚礁可記錄相對海平面高度的原理，進行珊瑚礁定年。根據可採樣的地點分成恆春半島、海岸山脈及綠島蘭嶼三個區域，認為自全新世以來以海岸山脈的 $+5.3$ 至 $+4.7 \text{ mm/yr}$ 抬升速度最快，其次為恆春半島的 $+3.5 \text{ mm/yr}$ 及綠島蘭嶼區域的 $+2.2 \text{ mm/yr}$ 。

海蝕臺階隨著陸地的抬升，亦記錄了不同時期的海平面高度。Heish et al. [2004] 利用花蓮至富岡沿海一系列的海蝕臺階定年，研究全新世以來海岸山脈沿岸的抬升情形。其結果顯示地殼抬升速度最快的地方為南邊的都蘭及富岡，約為 $+9.3 \text{ mm/yr}$ ，抬升速率往北漸漸減少，直至花蓮附近，抬升速率大約為 $+3.1 \text{ mm/yr}$ 。

以上方法綜括來看，後兩者利用的是長時間尺度下的相對海水位變化，且樣本皆為出露海平面之上的樣本，因此所記錄到的結果必然只有抬升量而無下降量，特別是資料主要集中在臺灣東部，亦說明了長時間以來臺灣東部是持續抬升的情

況。反觀只有十數年小尺度的驗潮紀錄，Liu [1989] 與本研究方法類似，但本研究使用更密集的測站分布紀錄進行臺灣沿岸垂直升降運動的討論。而本研究與前人研究最大的不同處即在絕對海平面之估計並非使用全球海平面上升的估量，而是利用衛星在區域性所測量到海平面的升降變化，國外學者已有此方法之相關研究。

自 1992 年衛星測高技術成熟發展後，絕對海平面高度已經可由數年的測高時間序列估算。Mitchum [1998] 使用 TOPEX/Poseidon 將近 1200 天的觀測值與全球的 101 個驗潮紀錄做比較，在改正軌道漂移誤差後，兩者之間差值的時間序列仍有約 -2 mm/year 的斜率，初步認為可能是由於衛星上搭載之儀器準度偏移與隨著地殼變動之驗潮紀錄造成。

DORIS 系統是利用都卜勒效應進行衛星定位的系統，其可應用在觀測地殼運動情形，Cazenave et al. [1999] 利用六個 DORIS 測站 (Socorro, Easter, Helena, Kerguelen, Noumea, and Papeete) 鄰近之驗潮紀錄和測高資料之間差值，比對該 DORIS 觀測地殼高程變化的時間序列，兩者的時間序列呈現的高相關，說明了測高衛星在精密定軌後，其測高值與驗潮紀錄之間差值的變化，主要是來自於陸上測站觀測值的變化，即反應地表在垂直方向上的起伏。

利用測高值與驗潮紀錄之間差值的變化，Kuo et al. [2004] 進行區域性的研究，使用 10 年 TOPEX/Poseidon 測高資料及 25 個超過 40 年觀測的驗潮紀錄，觀察北歐芬諾斯堪的亞半島 (Fennoscandia) 地殼的垂直運動情形，其成果與該地 BIFROST (Baseline Inferences for Fennoscandian Rebound, Sea-level, and Tectonics) 的觀測結果僅有 $+0.2 \pm 0.9 \text{ mm/yr}$ 的差異，顯示測高資料與驗潮紀錄的結合，有效地反應了該區域冰後回彈現象 (post-glacial rebound)。García et al. [2007] 利用 TOPEX/Poseidon 與歐洲 ERS1/2 衛星的複合格子點資料 (gridded multi-mission data) 與地中海及黑海沿岸 49 個驗潮站的觀測紀錄，觀測其地體運動情形。其結果反應

亞得里亞海(Adriatic Sea)的東岸及希臘西岸有陸地下沉的現象，並認為是亞德里亞岩石圈(Adriatic Lithosphere)沿著 Dinarides 斷層隱沒至歐亞板塊之下造成的結果。

前人研究顯示此方法的確可以做為大地測量於垂直方向的其中一種參考，本研究便利用驗潮站之相對海水位以及測高資料之區域性絕對海水位，討論臺灣沿岸之地殼在垂直方向運動情形。

3.2 計算方法

在了解驗潮紀錄及測高衛星資料的特性之後，即可分別計算其時間序列的趨勢。測高資料 (ALT) 的趨勢代表著海平面相對於參考橢球體之間的高度變化，而驗潮紀錄 (TG) 的趨勢為海平面與測站所在之陸地的相對高度變化，兩者的差值即為陸地相對於參考橢球體之高程變化值 (H)。

$$ALT - TG = H \quad (3.1)$$

在公式 (3.1) 中，我們得到的結果是高程差的時間序列，接下來以最小平方法計算 H 的線性斜率，即為地殼於觀測時間內的平均運動率。然而顧及資料迴歸的穩定性，我們除了直接計算 H 的線性斜率，同時以前列公式 (2.1)，分別利用最小平方法計算 ALT 與 TG 之趨勢，再將兩者的趨勢相減，將這兩種計算的流程詳述如下：

(1) 分別求取測高資料及驗潮紀錄的趨勢，得到各測站及衛星所經海域，該區間的海水升降速率後，再將測高資料及驗潮紀錄的趨勢相減，便可得到陸地抬升速率。

(2) 將驗潮紀錄與測高資料在相同時間的海水位高程相減，其結果對應的是地表隨著時間的高程值 H，此時間序列之斜率即為陸地的升降速率。

方法（1）是假設測高資料及驗潮紀錄分別在該測站或該區域是長期維持穩定的高程變化，因此不論資料記錄的時間長度為何，皆為反應該地點持續的高程變化。方法（2）是假設驗潮站及測站對應到的測高區域，在同一時間反應相同的海面高度，因此相減後得到陸地瞬時高程的時間序列。

方法（2）看似較為合理，但是各驗潮測站記錄的時間長度不一，測高資料雖然有長達約 15 年的連續紀錄，也必須要捨去沒有對應到驗潮紀錄的時間段。再者，驗潮紀錄也要配合測高資料 10 天一筆的時間解析度。因此方法(2)在 ALT-TG 反應的陸地高程連續紀錄，其時間序列長度受制於驗潮站，取樣率則為配合測高資料的 10 天一筆，如此得到的斜率的誤差值也會大受影響。

以梗枋站（GF）為例，如圖 3.1，灰色為每小時一筆潮位之原始測站資料，經過修正後為紅色的部分，再對應衛星飛行至該測站所飛經區域 A 的時間，並取該時間前後五日之間所有潮位的平均值，視為衛星經過當時相對海水位的平均高度，以綠色表示。

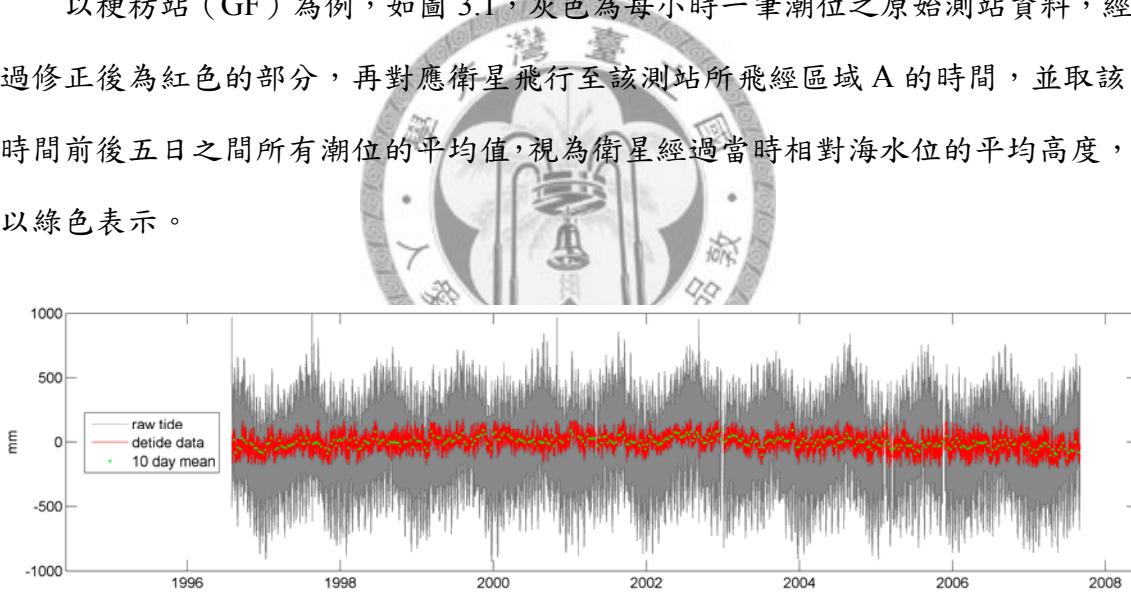


圖 3.1 以梗枋站為例，移除潮汐後之每 10 日取平均值

如圖 3.2，藍線為區域 A 之測高資料，綠線為梗枋站之潮位紀錄之每十日平均值，紅線為測高資料與驗潮紀錄相減後之結果，其趨勢反應陸地之抬升趨勢。潮位紀錄經過十日的平均，故振幅相較未平均前來得小，但趨勢不受振幅影響，唯時間解析度從一小時降至每十日一筆，故其誤差值較原值增加。而在 ALT-TG 之時間序列，誤差值則明顯受到測高衛星相對較大的振幅的影響，因此若驗潮紀錄的

紀錄時間不夠長，則過短的時間序列將會使迴歸誤差明顯增加，

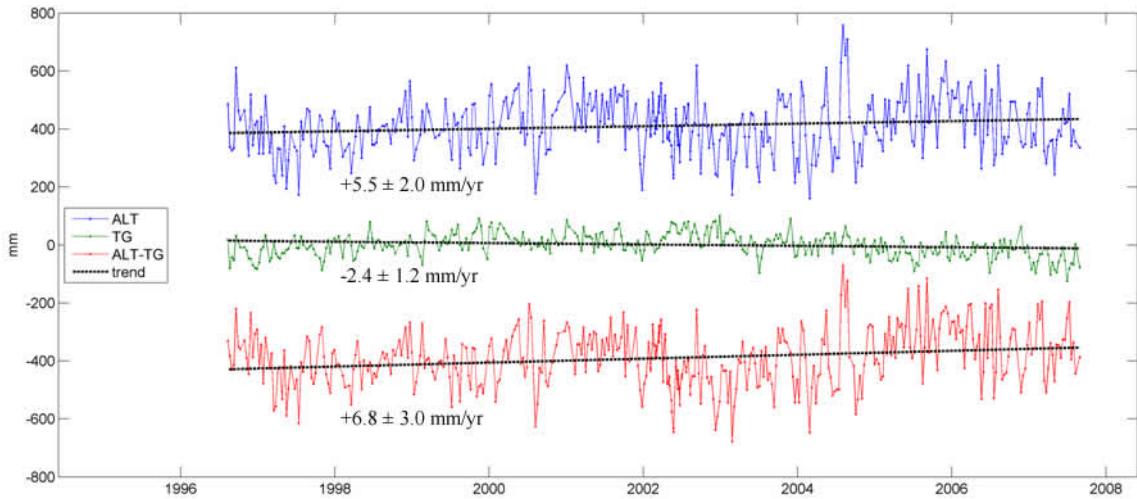


圖 3.2 以梗枋站為例，方法（2）之 ALT、TG 與 ALT-TG 圖示

3.3 結果與討論

本研究使用 23 個潮位站資料以及衛星測高值，計算臺灣地區沿岸地區垂直運動率的結果如下表 3.1，第一欄及第二欄分別為測高及驗潮站各自獨立計算的趨勢，第三欄及第四欄分別為是 3.2 節中所討論的方法（1）及方法（2），誤差為 95% 的信賴區間。



23 個測站紀錄中，蟠廣嘴測站 2001 年重新設站前後都有相當的連續紀錄，但兩段紀錄之趨勢有相當大的差異，故將兩段資料分開計算，並在下節中詳細討論。前後分別為 1992 至 2001 (SGZa) 及 2001 至 2008 (SGZb)

方法（1）方法（2）兩者計算的結果受到驗潮站紀錄時間段長度上的限制，而方法（2）必須將驗潮站逐時的取樣率降低至測高衛星十天的取樣率，部分測站因為驗潮紀錄時間較短，所以表現出較大的誤差量，如：龍洞（LD）3 年、大武（DW）3 年、東港（DG）3 年、安平（AP）5 年的觀測紀錄，其使用方法（2）的誤差值皆相當高，使得這些測站的結果較不可信。

表 3.1 ALT-TG 結果

ALT trend			TG trend		ALT-TG (1)		ALT-TG (2)		備註
A	$+5.5 \pm 2.0$		KL	$+15.5 \pm 0.4$	-10.0	± 2.0	-17.4	± 8.4	
			LD	$+10.1 \pm 1.0$	-4.6	± 2.2	-14.9	± 18.1	
			GF	-2.3 ± 0.1	+7.8	± 2.0	+6.8	± 3.0	
			SA	$+19.6 \pm 0.2$	-14.1	± 2.0	-11.6	± 6.5	驗潮紀錄穩定性不足
B	$+3.9 \pm 1.6$		HL	-8.8 ± 0.2	+12.7	± 1.6	+7.5	± 5.2	驗潮紀錄穩定性不足
			ST	$+11.7 \pm 0.5$	-7.8	± 1.7	-12.6	± 11.0	
C	$+4.3 \pm 2.6$		CK	$+12.6 \pm 0.2$	-8.3	± 2.6	-4.2	± 7.3	
			FG	$+8.4 \pm 0.3$	-4.1	± 2.6	+0.7	± 6.1	
			LT	$+13.4 \pm 0.4$	-9.1	± 2.6	-12.1	± 7.8	
			DW	$+7.4 \pm 0.6$	-2.8	± 1.9	-9.6	± 21.6	
D	$+4.6 \pm 1.8$		LY	-7.3 ± 0.6	+11.9	± 1.9	+11.8	± 8.7	驗潮紀錄穩定性不足
			DS	-5.3 ± 0.2	+10.5	± 4.1	+10.3	± 4.3	
E	$+5.2 \pm 4.1$		JW	$+32.8 \pm 0.3$	-27.6	± 4.1	-28.1	± 7.4	
			HC	$+11.8 \pm 0.2$	-6.6	± 4.1	-6.7	± 5.2	
			TC	$+8.9 \pm 0.5$	-3.7	± 4.1	-7.7	± 7.1	
			BZL	$+58.4 \pm 0.3$	-53.2	± 4.1	-49.5	± 5.1	
			JG	$+3.3 \pm 0.2$	+1.9	± 4.1	+2.6	± 3.7	
			AP	$+18.2 \pm 0.5$	-13.0	± 4.1	-11.8	± 14.7	
			PH	-0.8 ± 0.4	+6.0	± 4.1	+3.6	± 5.1	
			KS	$+0.7 \pm 0.1$	+0.5	± 1.9	+2.6	± 2.1	
F	$+1.2 \pm 1.9$		DG	$+21.5 \pm 0.8$	-20.3	± 2.1	-21.0	± 13.3	
			SGZa	$+16.6 \pm 0.2$	-15.4	± 1.9	-11.8	± 3.4	紀錄自 1992 至 2001
			SGZb	-21.1 ± 0.4	+22.3	± 1.9	+32.9	± 6.8	紀錄自 2001 至 2008
			HBH	$+30.2 \pm 0.2$	-29.0	± 1.9	-35.0	± 4.4	

Unit: mm/yr

本研究選取驗潮站附近之 GPS 垂直觀測紀錄做為比對，資料來源為中央研究院地球科學所 GPS Lab Website (<http://gps.earth.sinica.edu.tw/>)，資料取樣率為每日一筆，各 GPS 測站時間跨距如圖 3.3。GPS 測站的選取是以驗潮測站為中心尋找測站鄰近的 GPS 站，除了臺東地區的部分測站因為受到 2003 年成功地震的同震及

震後變形影響，所以選取以地震發震前的時間段，其他 GPS 測站均使用設站以來至今的量測紀錄，但大多數的 GPS 測站的紀錄時間長度仍不達十年，甚至更短。各測站的位移均為相對於國際地球參考框架(International Terrestrial Reference Frame of 2000, ITRF00)，其參考框架與測高衛星相同，即 GPS 測站亦量測陸地的絕對運動。其結果如下表 3.2，採用 2 個標準差 95% 信賴區間。

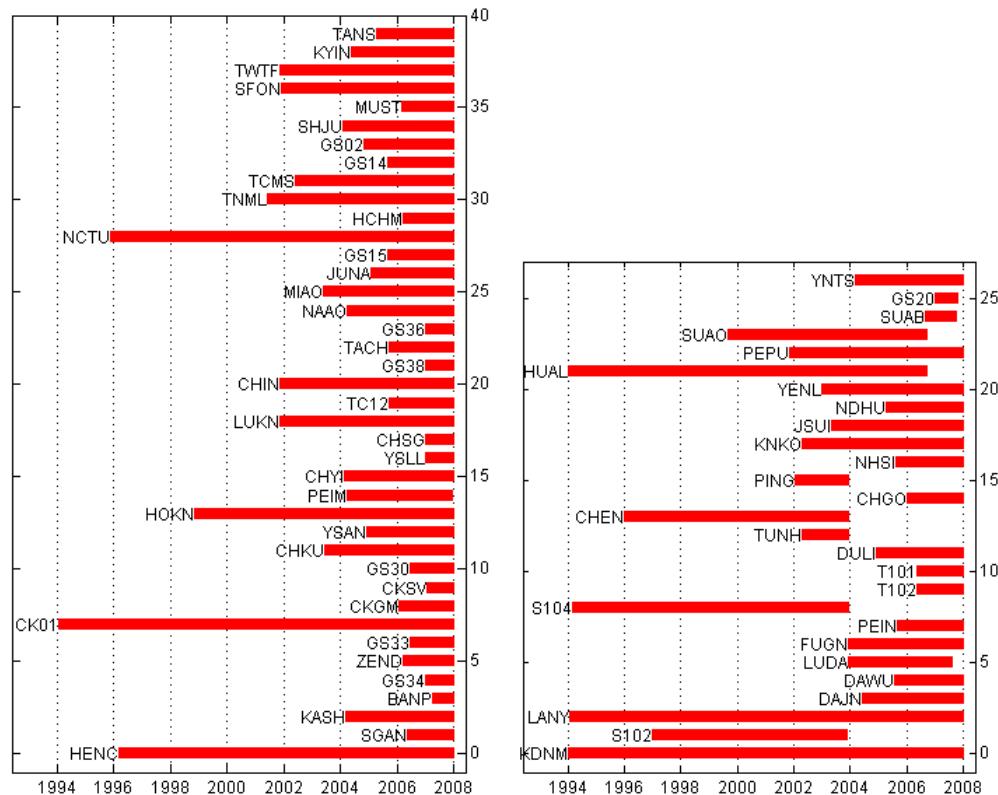


圖 3.3 GPS 測站的時間跨距

表 3.2 GPS 各測站的位置與趨勢

	GPS site	Longitude	Latitude	Trend	2σ
1	HENC	120.7465	22.0039	-3.61	0.17
2	SGAN	120.3497	22.5813	-4.19	1.93
3	KASH	120.2884	22.6145	-5.26	0.39
4	BANP	120.3054	22.6931	2.20	6.53
5	GS34	120.2751	22.9392	-3.58	2.27
6	ZEND	120.2176	22.9433	5.19	1.41
7	GS33	120.1878	22.9644	2.46	1.39
8	CK01	120.2105	22.9759	-4.30	0.13
9	CKGM	120.2201	22.9988	6.02	1.00
10	CKSV	120.2200	22.9989	-1.97	3.46

11	GS30	120.2263	23.0205	6.28	1.33
12	CHKU	120.0928	23.0558	-1.19	0.30
13	YSAN	120.0860	23.1466	-7.31	0.55
14	HOKN	120.1349	23.1884	-13.36	0.17
15	PEIM	120.1686	23.2938	-18.10	0.69
16	CHYI	120.1402	23.4508	-33.47	0.37
17	YSLL	120.2223	23.7392	-22.16	2.72
18	CHSG	120.2891	23.8603	-37.37	2.71
19	LUKN	120.4351	24.0600	-2.88	0.27
20	TC12	120.5979	24.2075	-4.34	0.80
21	CHIN	120.5822	24.2710	0.89	0.39
22	GS38	120.6006	24.2798	-1.20	2.18
23	TACH	120.5351	24.2908	-3.45	0.69
24	GS36	120.6253	24.3620	4.50	2.38
25	NAAO	121.8102	24.4493	-8.71	0.57
26	MIAO	120.8103	24.5835	-5.92	0.39
27	JUNA	120.8754	24.6840	-1.04	0.54
28	GS15	120.9905	24.7666	-2.25	0.74
29	HCHM	120.9846	24.7925	3.00	1.49
30	TCMS	120.9874	24.7980	-1.40	0.29
31	GS14	120.9594	24.8032	-0.88	0.79
32	GS02	120.9823	24.8097	-12.43	0.59
33	SHJU	120.9220	24.8451	-5.32	0.36
34	SFON	121.0102	24.9329	0.12	0.26
35	TWTF	121.1645	24.9536	-0.57	0.30
36	TANS	121.4269	25.1815	-2.94	0.78
37	KDNM	120.7820	21.9494	0.65	0.13
38	S102	121.5582	22.0372	0.82	0.31
39	DAJN	120.8650	22.3113	-6.22	0.60
40	DAWU	120.8900	22.3406	-6.24	0.90
41	LUDA	121.4759	22.6581	-2.98	0.54
42	FUGN	121.1922	22.7907	0.11	0.88
43	PEIN	121.1231	22.8011	-20.86	1.32
44	S104	121.1894	22.8208	0.39	0.19
45	T102	121.2768	23.0160	7.59	1.51
46	T101	121.3236	23.0203	6.43	1.96
47	DULI	121.3306	23.0257	6.43	0.61
48	TUNH	121.3002	23.0752	-7.20	4.02
49	CHEN	121.3736	23.0974	-1.14	0.31
50	CHGO	121.3745	23.0983	2.00	1.19
51	PING	121.4543	23.3195	-9.93	2.24
52	NHSI	121.4530	23.4062	-3.74	1.12
53	KNKO	121.5057	23.4722	-3.10	0.36
54	JSUI	121.4239	23.4920	-5.41	0.54
55	NDHU	121.5508	23.8972	-11.24	0.79
56	YENL	121.6018	23.9035	-11.82	0.39
57	HUAL	121.6135	23.9754	-5.24	0.17
58	PEPU	121.6103	24.0179	1.02	0.43
59	SUAO	121.8671	24.5924	-6.56	0.39

60	SUAB	121.8679	24.5939	3.85	3.66
61	GS20	121.9400	24.8425	-17.33	3.76
62	YNTS	121.7789	24.8617	0.90	0.62

Unit of trend and 2 sigma: mm/yr

本研究將 ALT-TG 與 GPS 繪於圖 3.4，結果顯示臺灣大部分地區為下陷的情況，但臺灣地處歐亞板塊與菲律賓海板塊擠壓邊界，地質構造複雜。臺灣西岸地質以沉積作用為主，而東岸地處於造山運動活躍的地帶，本研究嘗試從東西岸地質上的差異，討論各地在垂直方向上運動的可能原因。

如圖 3.5 與圖 3.6 將方法（1）及方法（2）的結果繪於同一圖上，縱軸為各測站的升降速度，橫軸為各測站沿著緯度分布，方法(1)的結果以藍圈表示，方法（2）則以黃圈表示。兩種計算方法結果顯示，兩種方法的計算結果在整體上來看是相當接近的，而方法（2）之誤差量受到驗潮紀錄時間長度影響較大，如前段所討論。

臺灣西岸



在西岸表現結果中，ALT-TG 與 GPS 的結果大致吻合，幾乎是下降或是無抬升量的表現，而下陷的程度以中部以南較為明顯，我們可從臺灣地質上分成西南及西北兩部分討論。

而澎湖雖位於臺灣西半部(圖 3.5 中間位置)，但其地理位置在臺灣海峽中間，而並非臺灣沿岸，地質上屬於玄武岩，也與臺灣本島西岸之沉積岩不同，一般認為澎湖所在之地殼變化不論在水平或垂直位移皆相對臺灣本島穩定，因此大地測量研究常以澎湖為相對運動之參考基準點。本研究顯示澎湖之絕對高程變化有約 $+3.6 \pm 5.1$ mm/yr 之輕微抬升量。

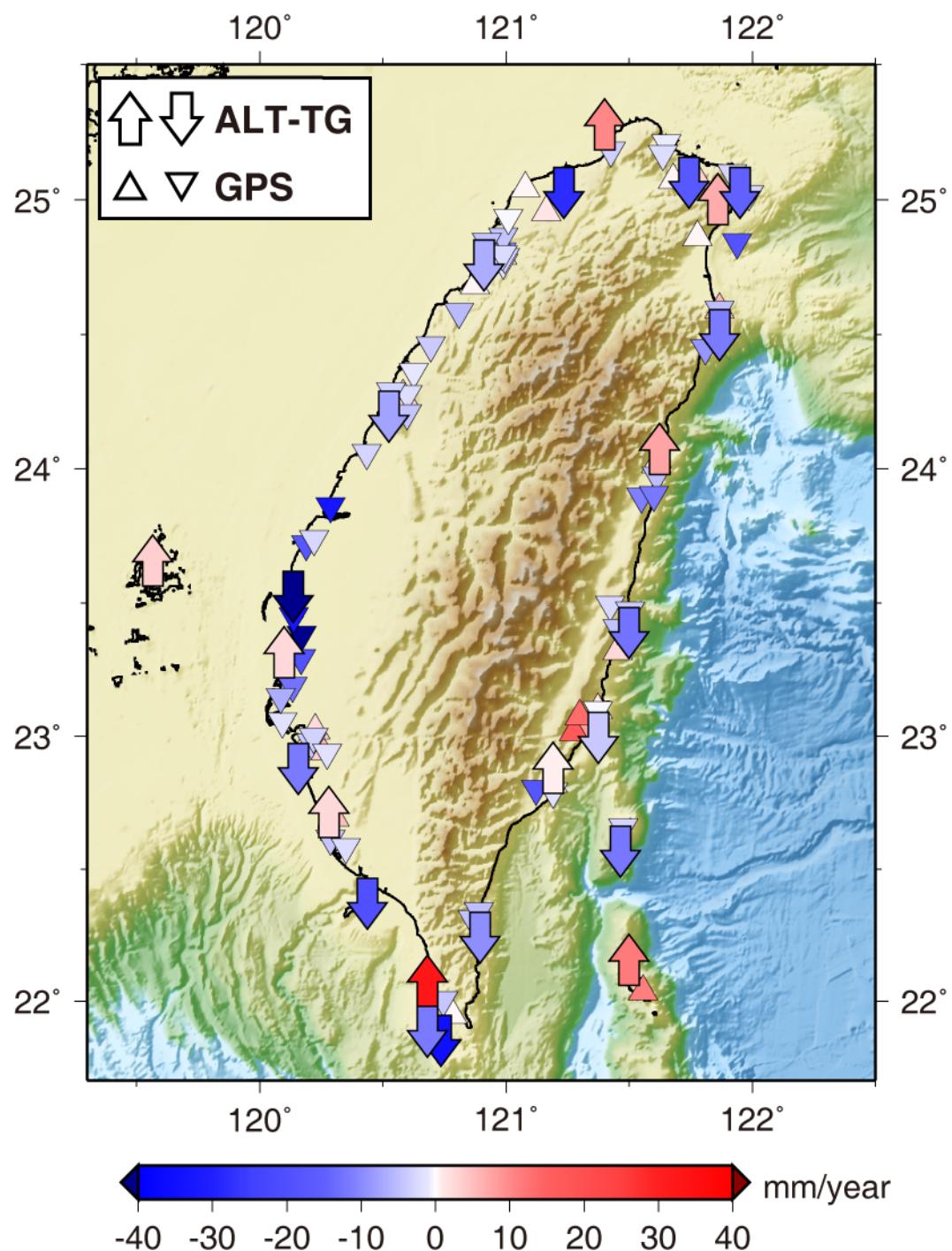


圖 3.4 ALT-TG 及 GPS 所觀測到的陸地升降趨勢

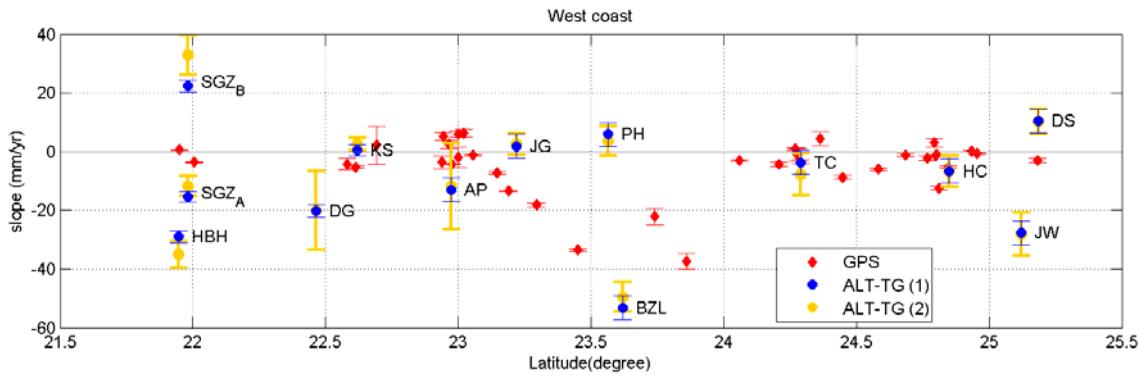


圖 3.5 臺灣西岸之 GPS 與 ALT-TG 結果

臺灣本島西南沿海一帶，包含自臺中港以南至後壁湖，主要屬於沖積平原。此區有明顯的下陷量，一般認為與西南部沿海地區養殖者超抽地下水有關。此區地下水資源蘊藏豐富，沿海地區養殖業興盛，因此大量抽取地下水為此區普遍現象。由於沖積平原淺部地層並未擠壓固結，地下水蘊含在孔隙中，如果抽出大量的地下水，引起孔隙壓縮，地層便因此下降。根據水利署的資料顯示，近年下陷量最嚴重的地區為彰化、雲林一帶，2006 年的下陷速率約為 $82 \sim 84 \text{ mm/yr}$ ，其結果與本研究成果一致。而竹圍 (JW) 的下陷量則可能反應該區附近中壢觀音工業區使用大量工業用地下水 [Chang et al., 2004]。

後壁湖及蟠廣嘴測站位在臺灣本島最南端的恆春半島，且均位在恆春斷層的西側，其中後壁湖站的觀測時間為 1996 至 2007；蟠廣嘴測站則在 2001 年重新設站，前後分別為 1992 至 2001 (SGZa) 及 2001 至 2008 (SGZb)。此二測站之間直線距離僅有 4 公里之差，測站之間如此接近，應當反應相同的運動趨勢，但此三段 ALT-TG 所顯示之地殼升降速率卻明顯不同，尤其以同一測站位置之蟠廣嘴在 2001 年前後段差異最大，很有可能是設站時並沒有維持驗潮站儀器本身穩定性所致。此區唯一在恆春斷層西邊的 GPS 測站僅 HENC 測站(1996 - 2008)，其顯示地殼為 $-4.1 \pm 0.3 \text{ mm/yr}$ 的下陷，而位在恆春斷層另一側的 KDNM 測站(1994-2008)，則顯示 $+0.2 \pm 0.3 \text{ mm/yr}$ 的趨勢，為幾乎沒有垂直方向上的運動。綜觀來看，此區定性上是以下陷的趨勢為主。

臺灣東岸

如圖 3.6，臺灣東岸的 ALT-TG 結果也多呈現下沉的現象，而 GPS 顯示的結果，大體上無明顯區域性的地殼升降。

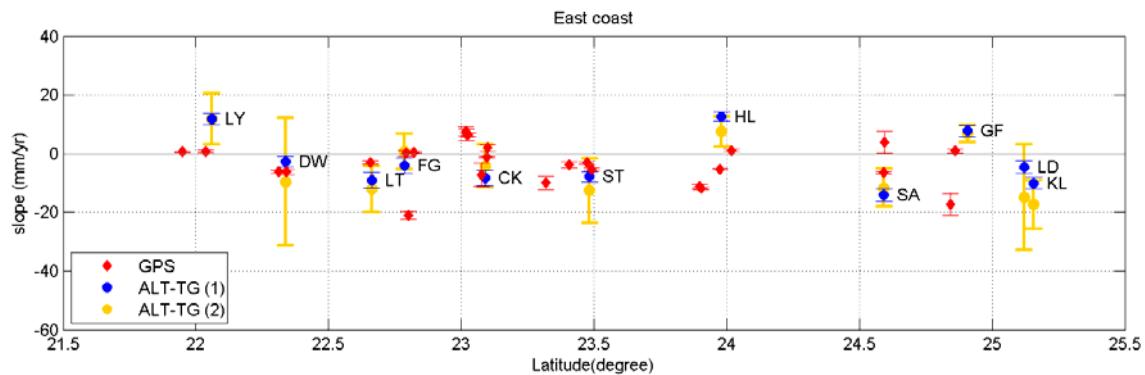


圖 3.6 臺灣東岸之 GPS 與 ALT-TG 結果

在臺灣東南方成功附近，受到 2003 成功地震的影響，在地表有明顯同震變形，成功測站(CK)及富岡測站(FG)的驗潮資料只選擇發震前的時間段。

成功測站的 ALT-TG 結果是下沉的表現，而附近有六座 GPS 測站：DULI 、 T102 、 T101 、 CHGO 、 CHEN 與 TUNH 。其中 CHEN 及 TUNH 因為設立較早，故可以選取震前的資料段計算，而不受成功地震同震及震後變形的影響，其表現也均為下沉的情形，表示驗潮站所在的區域在發震前的確是持續在下沉的狀態；另外四個測站因為是震後才設立的測站，其趨勢卻都顯示陸地抬升，與震前的觀察相反，這非常可能是由於成功地震在震後變形的地殼運動方式。

富岡測站同樣受到地震同震變形影響，其附近有三座 GPS 測站：S104 、 FUGN 與 PEIN ，但無論是震前的 S104 或是震後的 FUGN ，其趨勢與富岡站的 ALT-TG 值都很接近；而 PEIN 站顯示較大下沉量，但很有可能是因為資料僅有 2 年左右，紀錄時間較短所致。

將空間尺度放大為花蓮至大武沿岸，臺灣東岸的驗潮紀錄中，蘇澳、花蓮及蘭嶼的測站紀錄連續性及穩定性不佳，若我們忽略此測站之 ALT-TG 的結果並連

同 GPS 的觀測結果一同觀察，那麼自富岡往北至花蓮沿海一帶，下陷量逐漸增大。此觀察結果對應到臺灣地體構造：菲律賓海板塊向西碰撞歐亞板塊後隆起形成海岸山脈，因此臺灣的東岸雖持續造山，使得地殼抬升，但菲律賓海板塊向北則隱沒至歐亞板塊之下，表示沿著海岸山脈往北，地形會隨著板塊隱沒而增加向下運動的分量。花蓮正處於花東縱谷北端，即板塊縫合線向北入海處，故表現出的下陷量較海岸山脈南段遠離隱沒處來得大。

不論是本研究結果或是近年的 GPS 連續觀測紀錄，臺灣東岸近十年在垂直方向高程變化的表現，大多數顯示著此區的地層是處於下陷的狀況。認知上臺灣東岸為臺灣造山活動最活躍的區域，垂直方向上的抬升速率應是持續進行的，但本研究結果與此認知有異，說明了臺灣造山運動在短時間尺度上的變化可能與長時間的變化有差異。

臺灣東部地區地震活動頻繁，每隔數十年不乏有大地震造成嚴重災害，而發生大地震的主要因素被認為是由於板塊之間擠壓，形成斷層上下盤間應力的累積，一旦累積的程度足以造成斷層錯動時，能量便被釋放並以斷層位移方式表現，若斷層出露地表則會促使地表破裂，亦為構成地表抬升的重要因素。如圖 3.9，我們在此稱每次大地震之間的時間段為間震期（interseismic phase），因此假設間震期的地表運動可能處於應力累積的階段，地殼在垂直向上的運動可能是緩慢上升或下降，而未造成地表即時的破裂，我們稱這種運動方式為潛移（creeping）。當大地震發生時，擠壓的應力便被釋放產生垂直方向上的抬升，若抬升的量相較於間震期的地表位移的量來得大，那麼此一區域在長時間尺度下的垂直運動便會是抬升的趨勢。

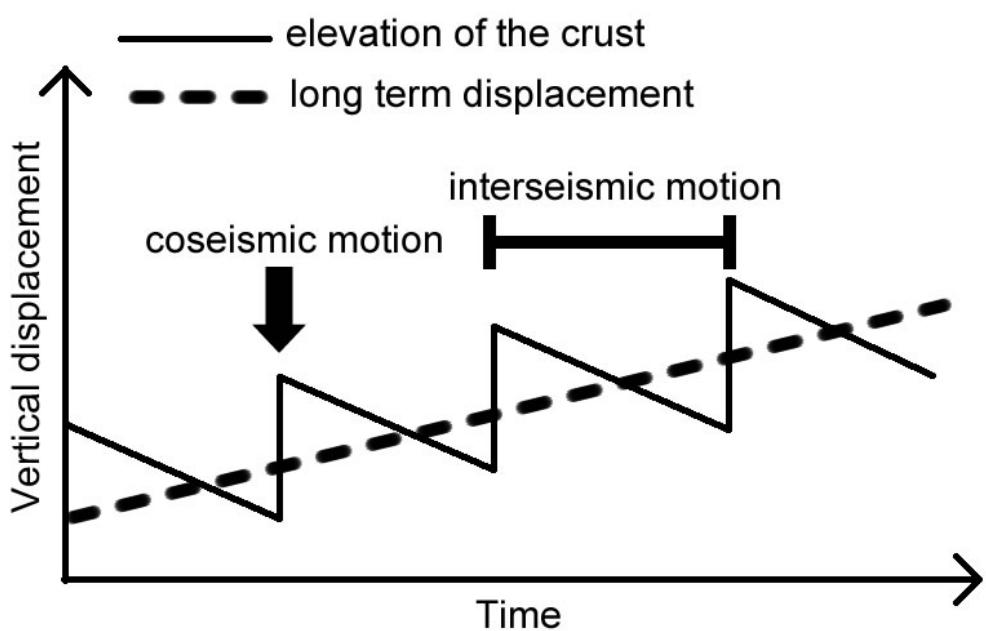


圖 3.7 地殼受到同震變形與間震潛移在垂直方向位移示意圖



第四章 估計歷史地震在高程之同震變形量

4.1 臺灣東部地質及地理概況

本研究區域位於臺灣東部的花東縱谷地區(Longitudinal Valley, LV)(圖 4.1)；為菲律賓海板塊與歐亞大陸塊之間的縫合帶[Ho, 1986]。此區域存在著因板塊聚合而造成的特殊地形與地質特性，成為臺灣地質構造上的重要分界。地質上，主要以花東縱谷及海岸山脈兩種地質分區為主；以下對此區域相關之研究及地質概況做簡單之描述。

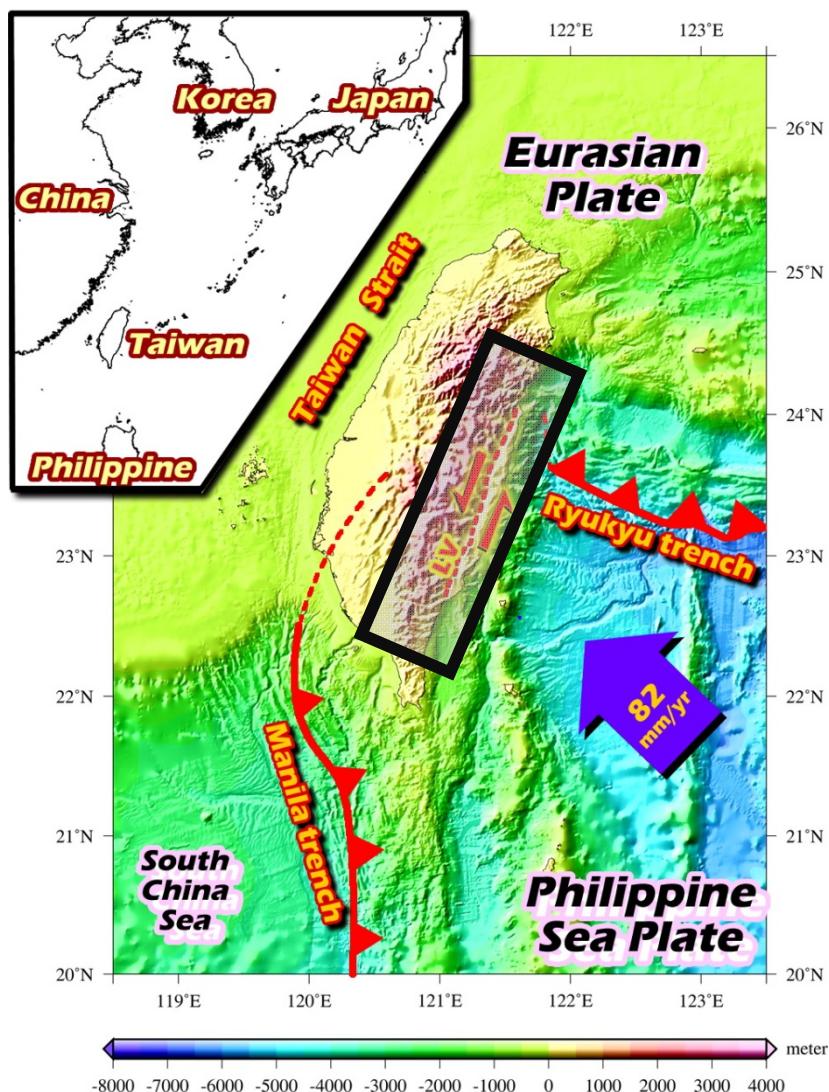


圖 4.1 本章研究區域

花東縱谷

花東縱谷北起於花蓮，南延至臺東，分隔了中央山脈地質區與海岸山脈地質區，其特性為地形起伏小、水系奇特、谷地狹長且筆直、以及有高頻率的地震事件發生等[Hsu, 1976 ; York, 1976]。縱谷南北長約 150 公里，東西寬度約為 3 至 7 公里之間。在地體構造上的意義代表著歐亞板塊和菲律賓海板塊的縫合線。

海岸山脈

海岸山脈介於花東縱谷與臺灣東海岸之間，走向約為北偏東 20 度，全長約 135 公里，最大寬度在中段，約為 10 公里，在南北兩端寬僅約 3 公里，最大高度約為 1600 公尺，為一陡峭之山脈。在板塊構造的架構中，海岸山脈代表菲律賓海板塊西側前緣的新第三紀島弧，亦即呂宋島弧的一部份[何春蓀, 1986]。

活動斷層分佈情形

海岸山脈斷層是一活動斷層，最早是由 Hsu [1962] 所提出，並認為可確知的現代斷層有三條，分別為米崙（美崙）斷層、玉里斷層，還有池上斷層。這三條活動斷層皆有一些相似的特性；例如：皆為北北東走向，相互連接且在縱谷東側成一直線分佈，皆為左移逆衝斷層，且抬升側皆為東側。而現今之活斷層分佈如圖 4.2 所示，資料來源為經濟部地質調查所。

4.2 從驗潮紀錄推估同震位移量

4.2.1 同震位移量計算

驗潮站在地震發生時，受到地表變形的影響，造成垂直方向的抬升或下降，反應在驗潮紀錄時間序列即為基線高程改變。我們可利用最小平方法在移除潮汐週期振幅時，同時使用步階函數擬合地震造成的基線改變量。此做法即於公式(2.5) 中，係數 a_2 為同震位移量。

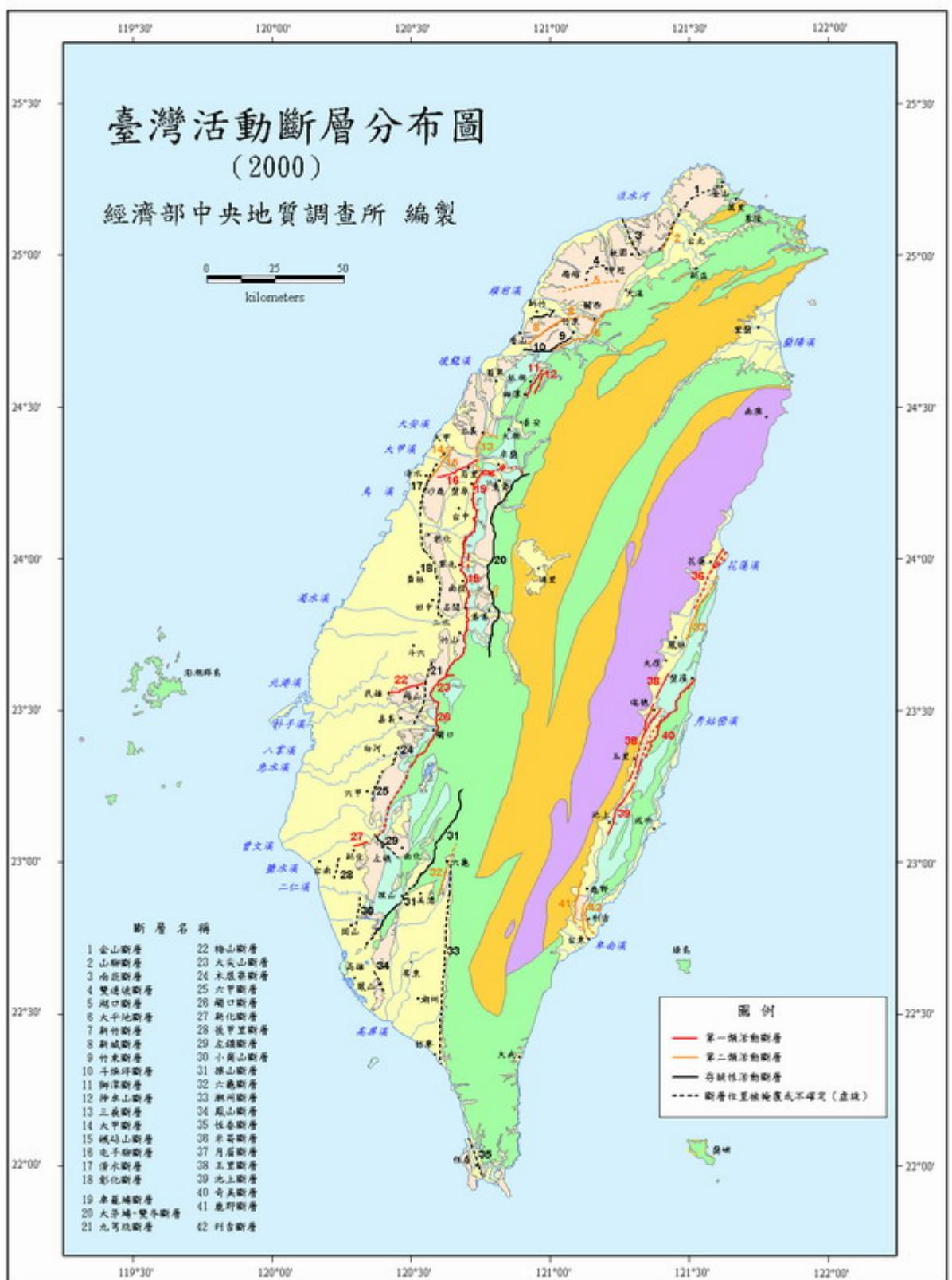


圖 4.2 臺灣區活動斷層分布圖

4.2.2 同震變形模式研究

地震造成地殼在垂直方向上的升降，反應在紀錄中便是測站基線下陷變化，可從大尺度的驗潮紀錄明顯觀察得到。本研究針對驗潮紀錄觀察到的抬升量，分別檢視成功站—2003 成功地震，及花蓮站—1951 花蓮地震的震源機制。

彈性半空間錯位模式 (elastic half-space dislocation model)

早在 1936 年 Mindlin [1936] 就已經推導出彈性半空間錯位模式的格林函數，本研究使用 Wang et al. [2006] 開發的程式進行同震錯移模擬，其方法乃根據 Okada [1985] 建立的彈性錯移理論(elastic dislocation theory)設計，此理論是利用地下斷層面錯動量來計算地表特定點之位移量。即一斷層在 i 方向的錯動量 s_i 造成均質均向的彈性半空間產生 k 方向位移 u_k ，並對整個矩形斷層錯動範圍積分。彈性錯移理論的數學表示法如式 (4.2)：

$$u_k(x) = \iint_{\Sigma} s_i(\xi) \left[\mu \left(\frac{\partial g_k^i}{\partial \xi_j} + \frac{\partial g_k^j}{\partial \xi_i} \right) + \lambda \delta_{ij} \frac{\partial g_k^m}{\partial \xi_m} \right] n_j d\Sigma \quad (4.2)$$

其方程式描述地底下一斷層面 Σ 與地表任一點位移的關係， n_j 為斷層面 Σ 的垂直向量， λ 與 μ 為區域的拉梅常數(Lamé constants)、 g_k^i 為受到破裂面(ξ_1, ξ_2, ξ_3)上 j 方向單位應力作用而在地表(x_1, x_2, x_3)處 i 方向上的位移。藉由此方程式，我們可以設計一斷層幾何與其錯移量，模擬斷層錯動時對地表造成的位移。

4.3 2003 成功地震

4.3.1 池上斷層與 2003 成功地震背景

池上斷層位於臺灣花東縱谷中，屬縱谷斷層南段的一個活動斷層區段。在地質的組成上，池上斷層所代表意義為海岸山脈向西逆衝至縱谷；池上斷層上盤為海岸山脈之利吉混同層，下盤為縱谷之第四紀及現代沖積層。從各項野外觀測資

料綜合分析，海岸山脈與縱谷邊界之池上斷層為一走向約北 20 度東、向東傾斜約 50 度、存有 30% 左移分量之逆衝斷層 [李建成等人, 2002] 。

池上斷層在 2000 年之前一次的錯動，認為是 1951 年 11 月 24 日花東序列地震中規模 7.0 的台東地震，造成當時 17 人死亡，1016 房屋倒塌的重大災害 [Hsu, 1962] 。而 2003 年發生的成功地震為此區域最近一次規模大於 6 的地震，從其餘震分布的延伸來看（圖 4.3），亦認為對應到池上斷層的再錯動 [Kuochen et al., 2007] 。

臺東成功地震發生於 2003 年 12 月 10 日 12 時 38 分，中央氣象局定其地震芮氏規模 6.5，震央在中央氣象局臺東成功地震站西方 3.0 公里，東經 121.34 度、北緯 23.10 度，震源深度約 10 公里。

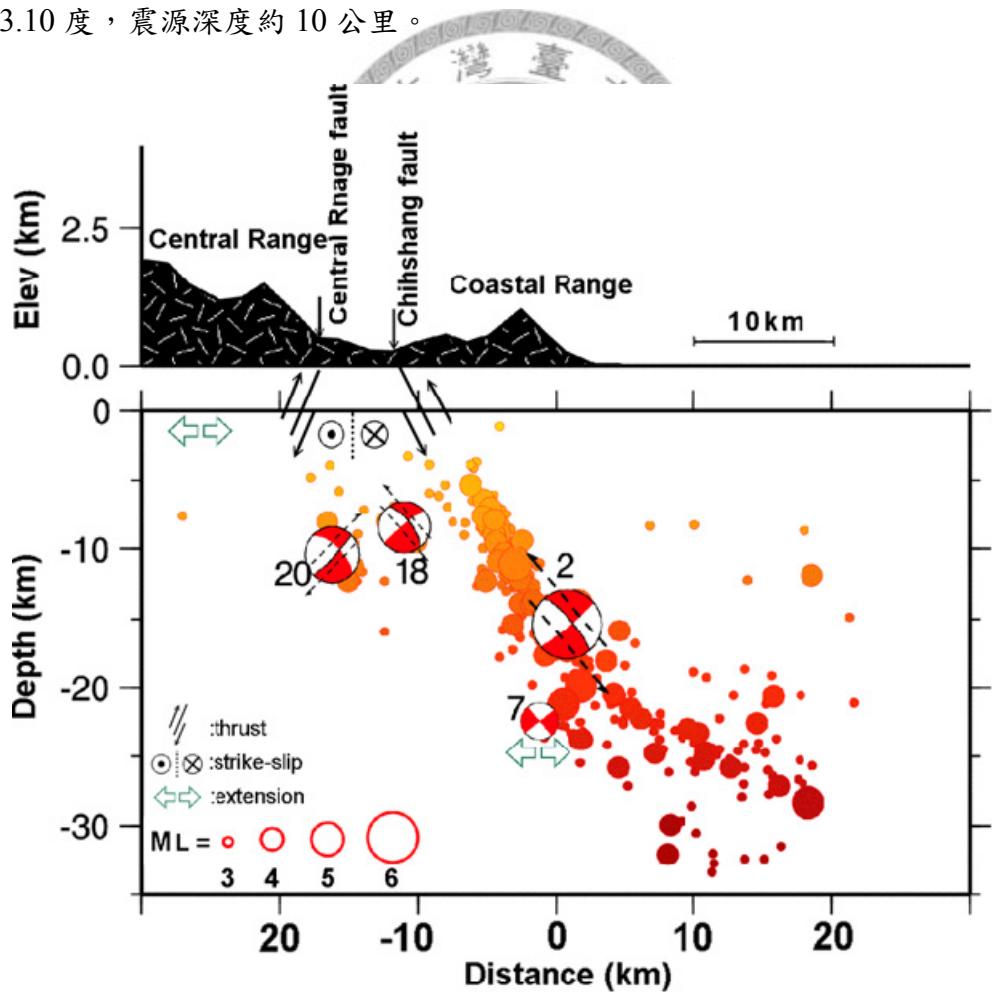


圖 4.3 成功地震之餘震分布 [Kuochen et al., 2007]

Wu et al. [2006] 根據 2003 年成功地震的強地動觀測資料，推估地震造成的同震變形量，並利用運用餘震分布建立兩層斷層幾何，模擬成功地震錯動造成地表變形。因地表至地下 5 公里處無明顯餘震，故斷層幾何自地表下 5 公里處開始東傾 45 度角，至 18 公里處則轉為東傾 60 度角。其模擬的結果不論是水平或是垂直方向皆與強地動紀錄估算的同震變形量相當。其斷層幾何如表 4.1：

表 4.1 成功斷層之位置及斷層幾何 [Wu et al., 2006]

Left Bottom Point		Depth km	Strike	Dip	Length km	Width km	Strike Slip cm	Dip Slip cm
Long., E	Lat., N							
Upper Plane	121.216°	22.820°	18.0	020°	45°	33.0	25.0	8.9
Lower Plane	121.147°	22.843°	5.0	020°	60°	33.0	15.0	17.6

4.3.2 驗潮紀錄與其同震位移量

圖 4.4 為臺灣東南石梯、成功、富岡、大武、綠島五個潮位站，移除潮汐週期後的驗潮紀錄。紅色虛線是各紀錄的平均值，黃線是 2003 成功地震的發震時間，從 2001 年至 2007 年的時序列中可看出，成功驗潮紀錄在地震發生的時候，其測站基線明顯下降，表示測站受到地震造成地表變形而抬升；富岡站也有相似的情況，只是量值較小。成功站及富岡站分別為 149 mm 與 57 mm 之抬升量。

然而在成功測站北方的石梯站並沒有明顯的錯位紀錄；大武測站時間序列的起始時間，在發震前三個月，而綠島測站則在 2003 年底即做了儀器更換之動作，由於此二測站分別在發震前後的資料長度不足，在計算基線的位置的誤差較大，也無明顯基線位移，故不討論之。

為了驗證驗潮紀錄在的基線錯移量的可信度，本研究比對 Chen et al. [2006] 利用 GPS 觀測成功地震同震變形的結果。由於驗潮站的位置並沒有 GPS 站，所以選用與驗潮站最鄰近的 GPS 測站來與驗潮紀錄比對。結果如圖 4.4，成功站的部分，驗潮站西邊約 1.5 公里處代號為 CHEN 之 GPS 連續站得到垂直方向約 154 mm 的抬升量，與驗潮紀錄的錯移量相當接近。其他測站方面，富岡站也有約 60mm 的

抬升量，然而北邊的石梯(ST) 與南邊的大武(DW)測站，則無明顯同震位移紀錄。

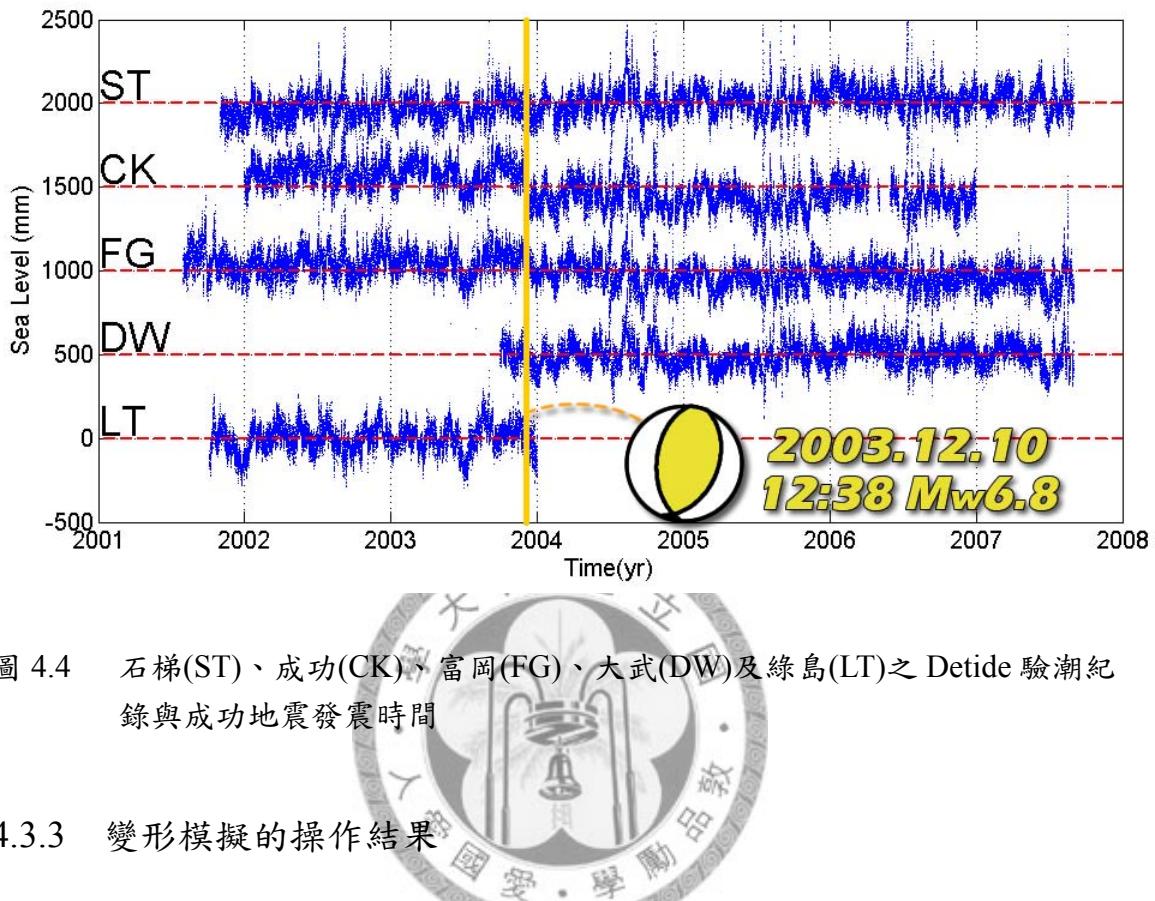


圖 4.4 石梯(ST)、成功(CK)、富岡(FG)、大武(DW)及綠島(LT)之 Detide 驗潮紀錄與成功地震發震時間

4.3.3 變形模擬的操作結果

我們對成功地震進行錯位模式。在模擬之前必須先知道斷層的幾何型態及滑移量，由於前人的研究已有諸多討論，也有很成功的模擬。我們這裡僅使用[Wu et al., 2006]的斷層參數進行錯位模擬。模擬的結果同樣繪於圖 4.5。

箭號及其長度表示垂直方向的抬升量。藍色箭號是驗潮紀錄的觀測量，粉紅色是此區域的 GPS 觀測量，而最靠近驗潮站的 GPS 測站的 GPS 以特別以深紅色外框表示，資料來源為[Chen et al., 2006]；綠色箭號為錯位模擬的結果，其位置與 GPS 及驗潮站相同。

表 4.2 整理成功測站及富岡測站分別用驗潮站、最近之 GPS 測站及錯位模式的結果，可看出驗潮紀錄的確有相當的程度可以同 GPS 觀測反應地殼高程的同震

變形量。雖然錯位模式的結果顯示地表變形量略小於 GPS 及驗潮站的觀測量，但大體上仍然是相近的。

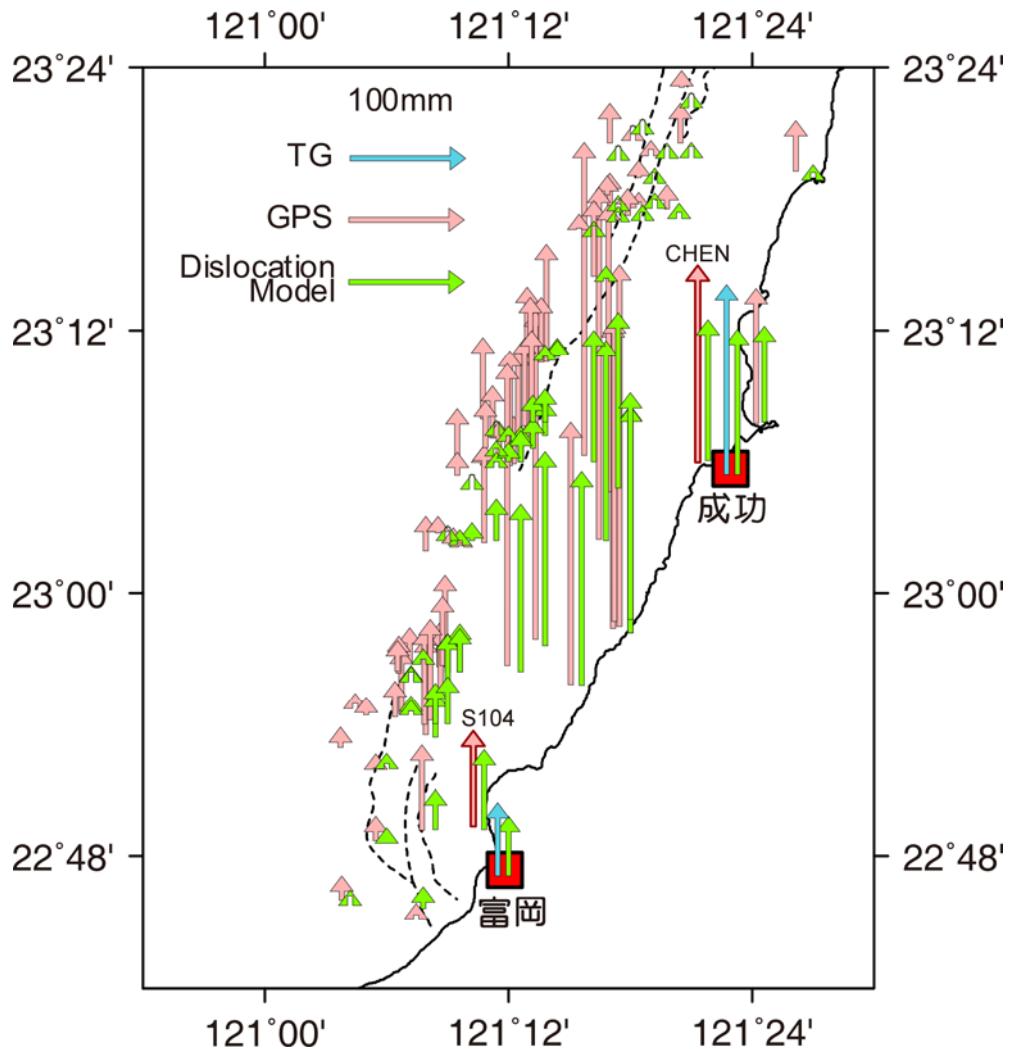


圖 4.5 成功地震之垂直方向地表同震變形。

表 4.2 驗潮站受 2003 成功地震影響之垂直變形量

	成功 CK (mm)	富岡 FG (mm)
Tide Gauge	+149	+57
Nearest GPS	+154.4	+74.2
Dislocation Modeling	+113.8	+46.4

4.4 1951 花蓮地震

4.4.1 米崙斷層與 1951 花蓮地震

米崙斷層位於花東縱谷北端、米崙臺地西側邊界，在陸地上的分佈北起七星潭海岸、南至花蓮市美崙山西南側，向南延伸並不顯著，陸地上全長大約 8 公里。根據海底地形及震測剖面資料，米崙斷層持續以北北東走向延伸入海[何邦碩, 1974]。斷層為逆移斷層兼具左移分量，呈北偏東 30 度走向。

最近的一次歷史地震為 1951 年的花蓮外海地震，認為是米崙斷層錯動造成地表破裂(如圖 4.6 紅線)，顯示米崙斷層的分佈可能延伸至花蓮北側外海。而米崙斷層的南端到了花蓮市區內則逐漸趨於不明顯，依據地質調查所分類屬第一級活動斷層。

針對米崙斷層地表變形研究, Chung et al. [2008] 對 1951 花東序列地震進行研究，利用 1914-1921 與 1976-1979 兩次臺灣地區三角測量(triangulation survey)的差值，推估 1951 年花東序列地震造成的同震變形量並建立斷層幾何，使用錯位模式討論地表的同震變形。其結果顯示，在米崙附近不論是三角測量或是模擬的量值，水平方向有約 4.9 公尺的左移分量，而垂直向則幾乎沒有任何的變形，認為 1951 年米崙斷層的地表破裂是以走向滑移為主的錯移（圖 4.7）。

Cheng et al. [1997] 進行 1951 年花蓮-臺東地震系列的重定位，利用當時臺灣省氣象所十個地震儀收錄的 S-P 時間資料，以蒙地卡羅逆推程序進行重新定位。位態的部分，配合地表地質調查的結果（斷層走向、錯動量）與餘震的震源分佈情形建立可能的震源機制解，其結果如表 4.3。

表 4.3 花蓮地震主震及餘震的位置及震源機制 [Cheng et al., 1997]

Local Time	Lon.	Lat.	Dep.	M _L	Strike	Dip	Rake
1951/10/22 05:34	121.73°	23.88°	4km	7.3	25°	85°	31°
1951/10/22 11:29	121.73°	24.08°	1km	7.1	25°	85°	73°

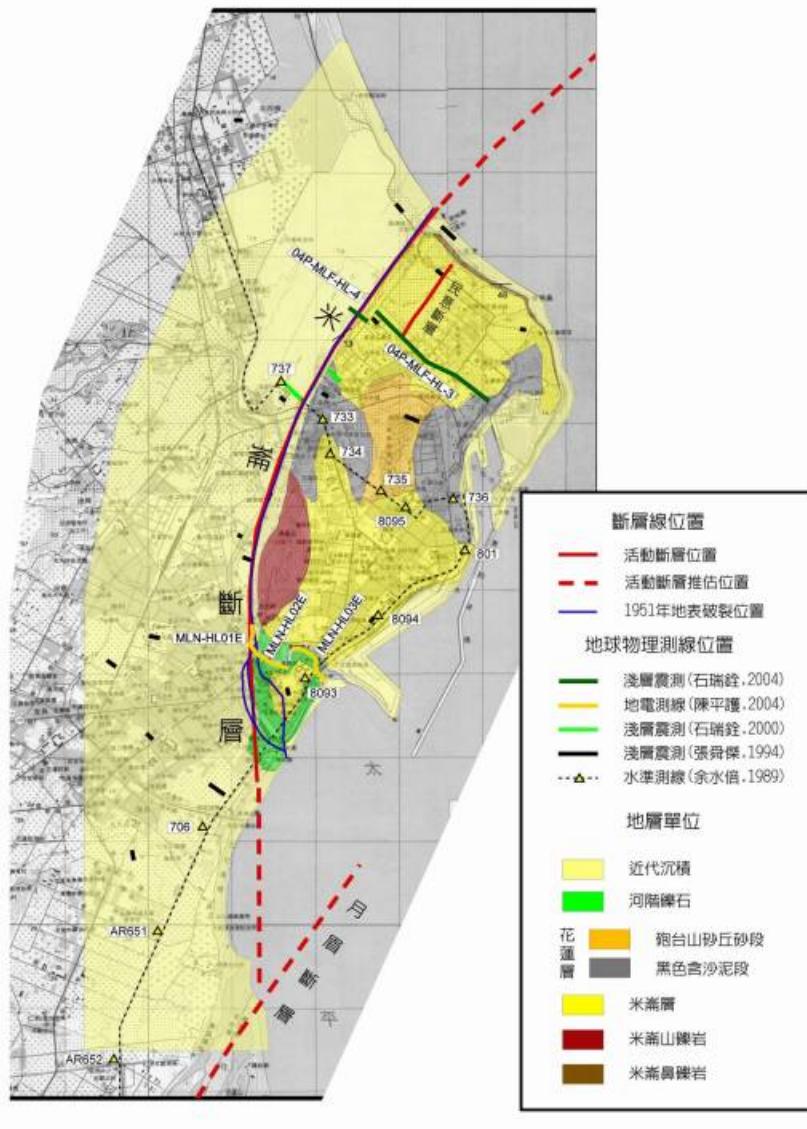


圖 4.6 米崙斷層地震表分布[地質調查所，2004]

4.4.2 驗潮紀錄與其同震位移量

1951 年 10 月 22 日 5 時 34 分及 11 時 29 分發生規模 7.3 的地震及 7.1 之餘震。從圖 4.8 的花蓮驗潮紀錄可知，地表的垂直抬升應由第二個地震事件引發，基線下降大約 350 mm，表示陸地抬升了 350 mm。然而發震年代較早，並無其他精確的儀器可檢驗其同震變形量。故針對此地震，使用錯位模式進行模擬，檢驗花蓮地區之同震變情形。

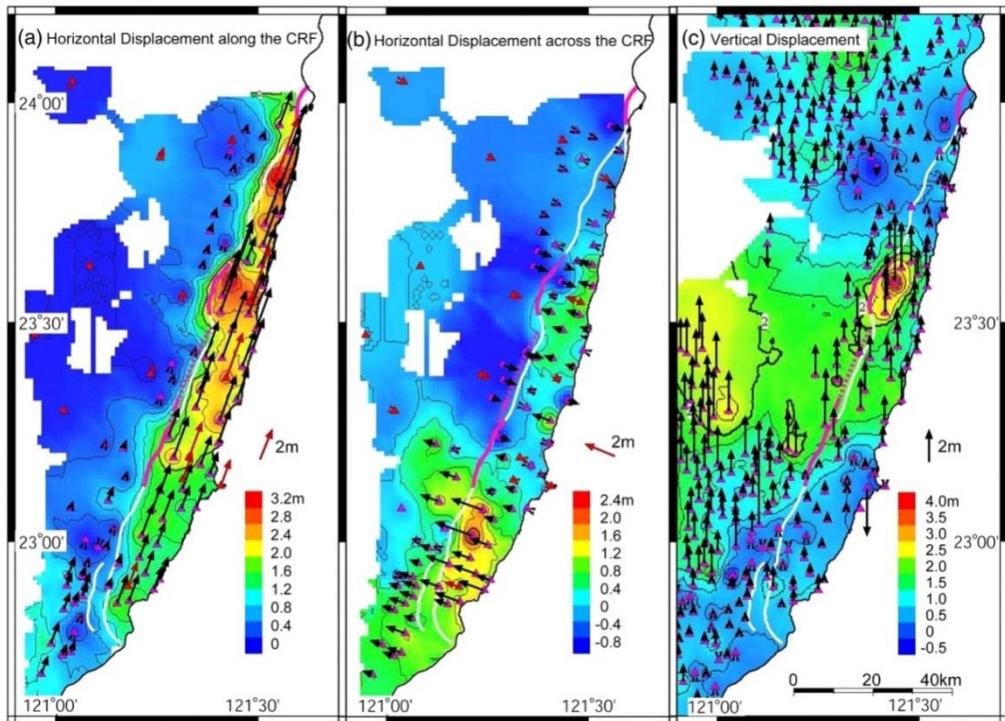


圖 4.7 三角測量得到的陸地錯移量(1914-1921 與 1976-1979) [Chung et al., 2008]

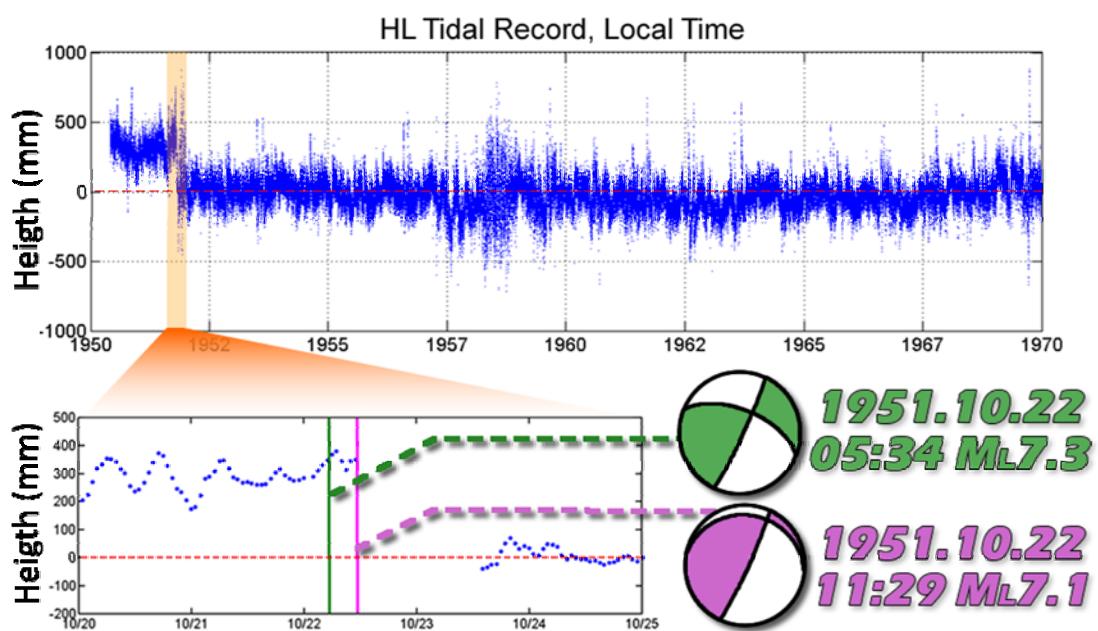


圖 4.8 花蓮驗潮紀錄與 1951 花蓮地震發震的時間

斷層幾何設計

本研究採用 Chen et al. [2008] 針對 1951 年花蓮地震設計的斷層幾何，其藉由 Cheng et al. [1997] 震源重定位的結果，設計一系列的斷層面解，討論發震後應力轉移的情形，驗證花東序列地震觸發是應力由北往南傳遞的結果。其斷層幾何建立的方法如下：

由於斷層的面積無法從前人研究切確得知，因此利用 $M_w - M_L$ 關係式[Huang et al., 2000]決定 M_w 的大小。

$$M_w = (0.91 \pm 0.03)M_L + (-0.07 \pm 0.15) \quad (4.3)$$

根據 Heaton et al. [1986] 的討論， M_L 在規模大於 6.5 後便有飽和現象，而無法真實反應真實的地震能量，因此利用式 4.3 的線性關係式，所得到的 M_w 可能會被低估。針對此一可能，本研究將在本章後面的部分討論。

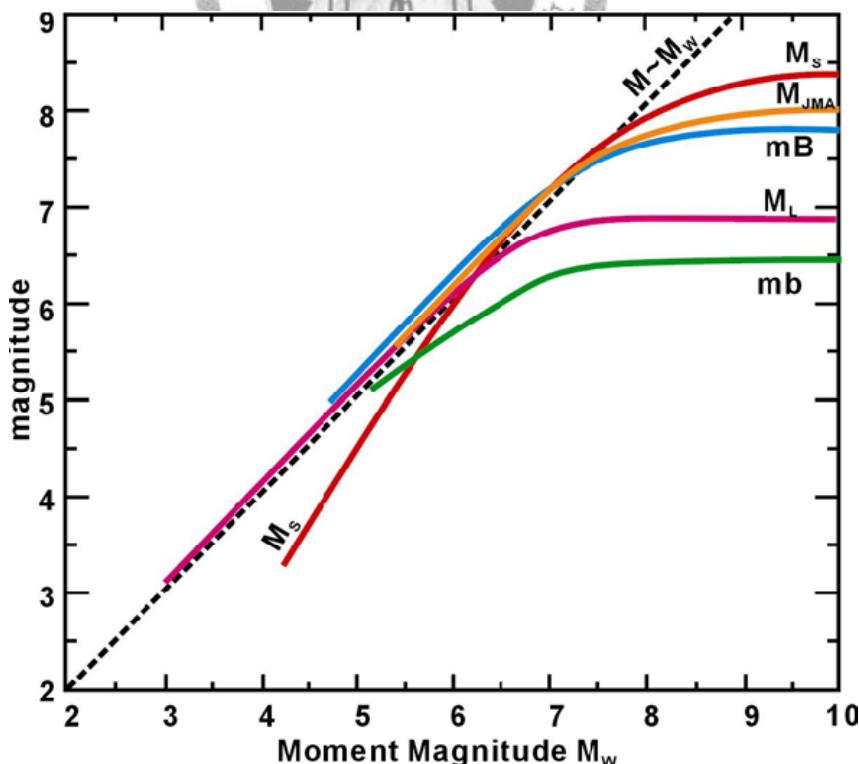


圖 4.9 各種地震規模對地震矩規模對應圖 [Heaton et al., 1986]

利用 Wells and Coppersmith [1994] 的經驗公式從 M_w 推估斷層幾何型態。斷層的長 (rupture length, RL) 與寬 (rupture Width, RW)：

$$\log RL = -2.42 + 0.58M_w \quad (4.4)$$

$$\log RW = -1.61 + 0.41M_w \quad (4.5)$$

滑移量(slip offset)為

$$\text{Slip offset} = \frac{M_0}{\text{Shear modulus} \times \text{Rupture area}} \quad (4.6)$$

其中 Rupture area 為 $RL \times RW$ ，而 M_0 是參考 Hanks and Kanamori [1979] 的公式：

$$M_0 = 10^{1.5(M_w + 10.73)} \quad (4.7)$$

因此斷層參數如表 4.4，所繪出之斷層幾何如圖 4.10 左圖，紅線為地表破裂位置，右圖為斷層幾何之立體表現，紅色方塊為花蓮驗潮站所在位置，黑線為米崙斷層的斷層線，白色星號為依據 Cheng et al. [1997] 定位之震源位置，紅色星號為斷層幾何中心。

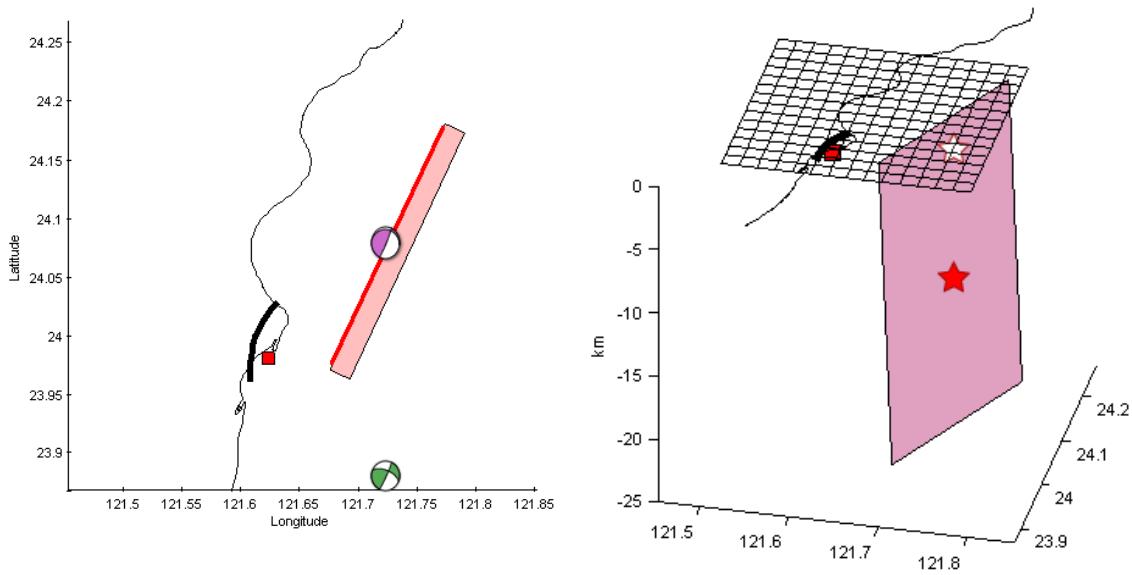


圖 4.10 斷層幾何之附視圖及立體圖

表 4.4 簡單斷層幾何及其錯移量

Fault Geometry						
Strike (°)	Dip (°)	Rake (°)	Length (km)	Width (km)	Strike Slip (cm)	Dip Slip (cm)
25	85	73	25.72	23.47	30	99

我們利用震源機制解提供的訊息設計斷層幾何的大小，但震源機制為表現壓應力及張應力的方向，在餘震資訊不足的情況下，我們無從判別真實的斷層面，因此針對兩共軛面均進行錯位模式運算。

如圖 4.11 所示，顏色代表地表抬升量，黑色直線為斷層在地表的破裂位置，其斷層面解對應到震源機制解的紅線位置。第一組斷層面為東北—西南向，東傾 85 度之高角度逆斷層，其錯移量最大可達到超過 400 mm；而第二組斷層面（圖 4.12）為北傾 18 度，右移之低角度走向滑移斷層，其造成地表在垂直方向的抬升量，最多只有約 150 mm。從前人研究及驗潮站紀錄之抬升量來看，第二組斷層造成地表抬升量似乎略小，而第一組斷層面的走向及位移量較合理。因此我們由第一組斷層面的結果繼續討論。

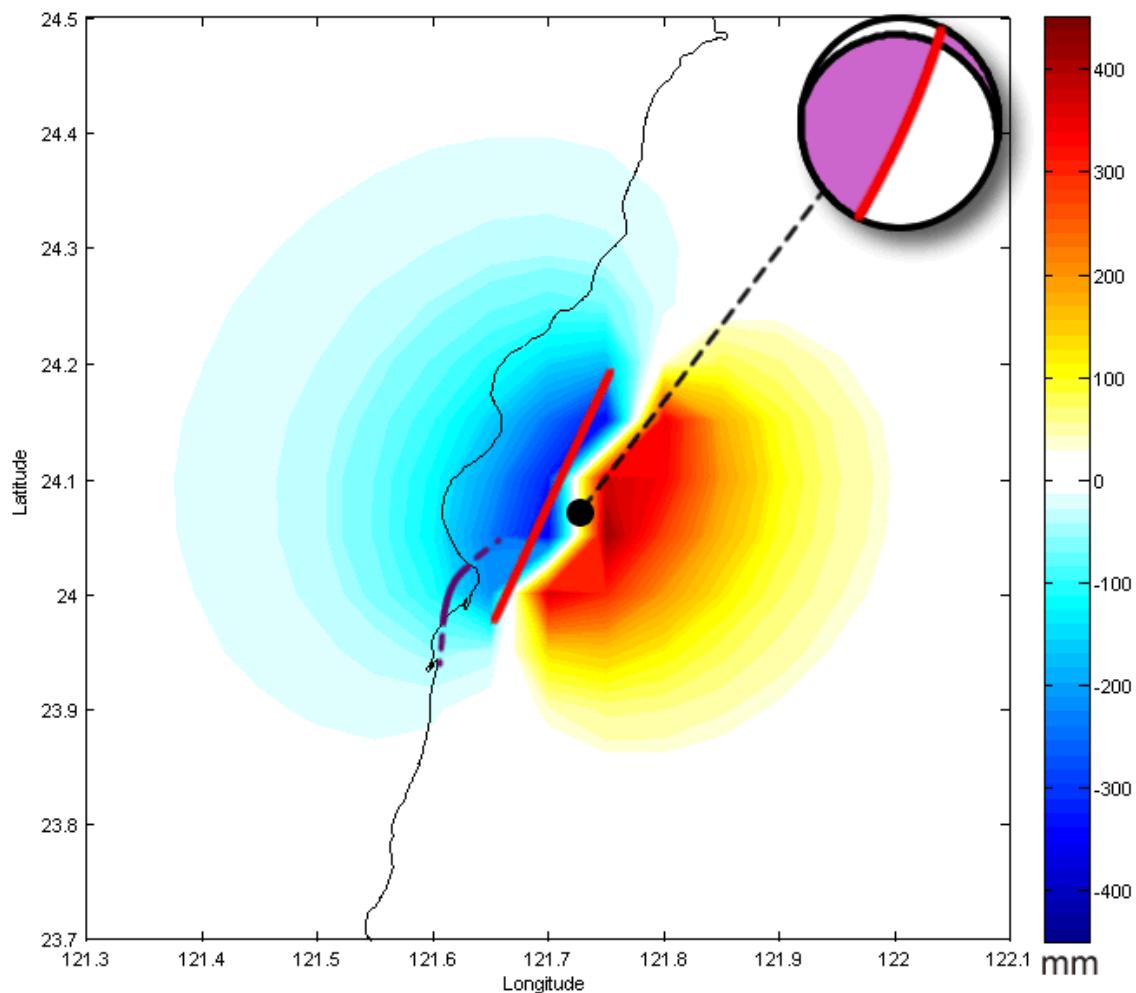


圖 4.11 1951 花蓮地震主要餘震之錯位模式結果

錯位模式模擬結果與討論

如圖 4.11 所示，模擬的結果得出花蓮測站應該產生約-100 mm 的下陷量，與驗潮紀錄之觀測量不符。有如此定性上的差異，勢必其中有某些參數是不正確的。從震源機制來討論，震源機制顯示震源東側為抬升的上盤，而西側為下陷的下盤，因此才會模擬出驗潮站下陷的情況。

此震源機制是 Cheng et al. [1997] 利用臺灣省氣象所收錄的 S-P 時間資料進行 1951 年花蓮-臺東地震系列的重定位。1951 年臺灣省氣象所在臺灣地區已有 10 處

觀測所（臺北、新竹、臺中、阿里山、臺南、恆春、宜蘭、花蓮、臺東與大武）備有地震儀進行地震監測的工作。但各觀測站的時間系統並不一致，以初達 P 波或 S 波到時推求之震源參數的誤差相當大，僅能利用各測站所收錄 S-P 時間差，由震央距與 S-P 時間差的經驗式，並配合圖解法以推大略的震央位置。

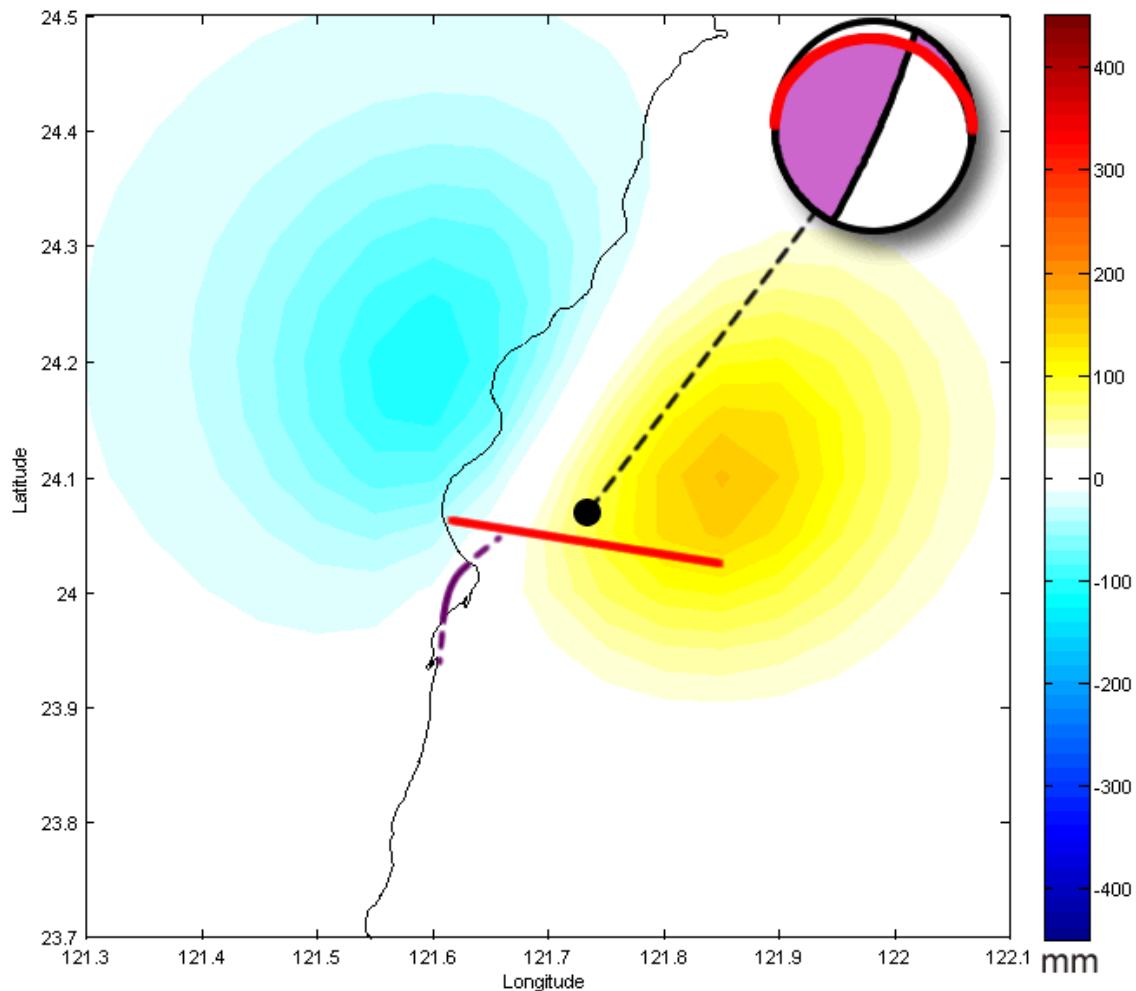


圖 4.12 錯位模式下東西向共軛面的錯移模擬結果

Cheng et al. [1997] 為改善此時段的定位品質，利用各測站的 S-P 時間資料，使用蒙地卡羅逆推程序進行重新定位。位態的部分，由於當時臺灣省氣象所只有 10 個測震站，加上大部份地震缺少初動 P 波相位的報告，故配合地表地質調查的

結果(斷層走向、錯動殘等資)與餘震的震源分佈情形建立可能的斷層面解 [Cheng et al., 1997]。

我們利用臺灣寬頻地震網 (Broadband Array in Taiwan for Seismology, 簡稱 BATS)，自 1996 至 2005 所記錄花蓮市區附近規模大於 4 的震源機制 (表 4.5，圖 4.13)，可大致看出震源機制中的走向幾乎是東北-西南方向，與 [Cheng et al., 1997] 的結果接近，因此我們認為此震源機制是可以信賴。故我們調整震源的位置，以測站的觀測量為基準，尋找最佳的震源位置。

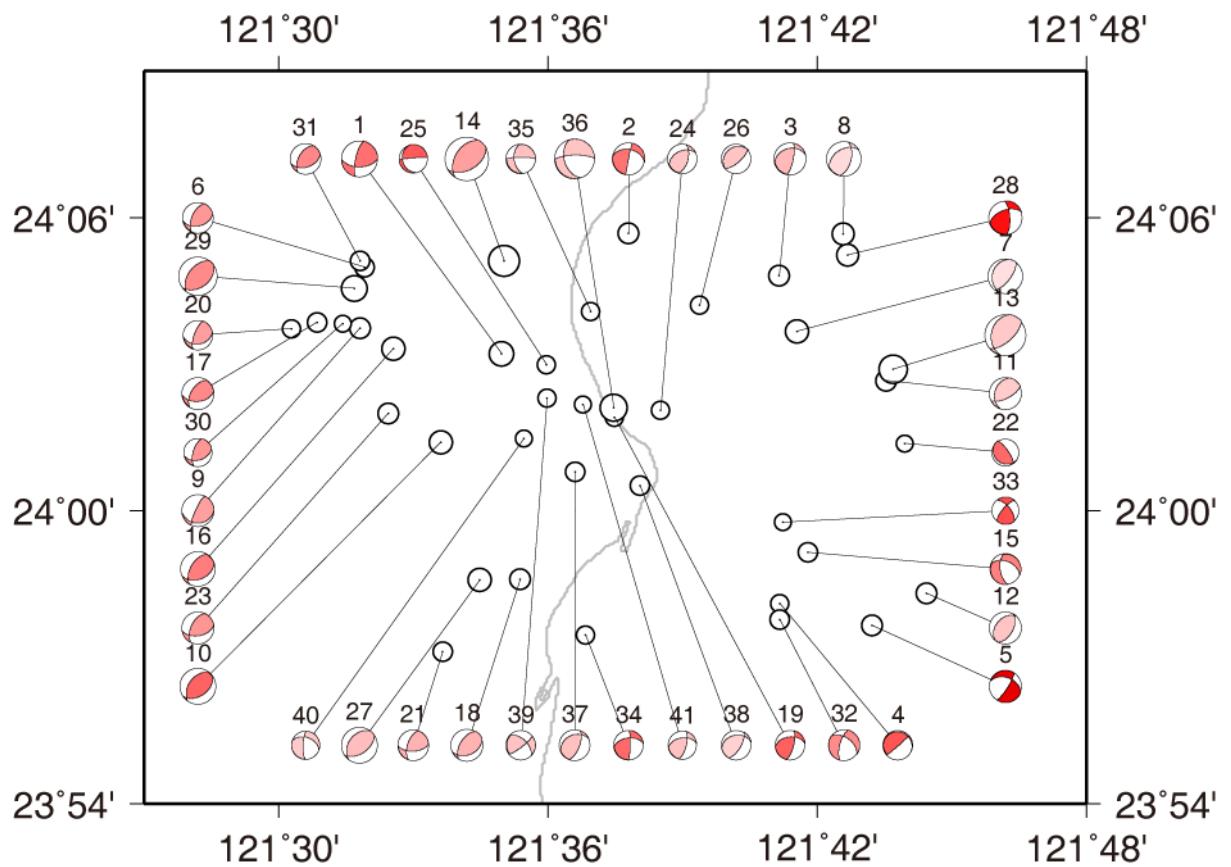


圖 4.13 1996-2005 經由寬頻地震網重定位之震源機制解

表 4.5 1996-2005 BATS 重定位之震源機制 ($M_L > 4.0$)

No	Time (GMT time)	Long.	Lat.	Depth	M_L	Strike ¹	Dip ¹	Rake ¹	Strike ²	Dip ²	Rake ²
1	1996/05/28 21:53:22	24.05	121.58	25.0	5.1	89.5	53.3	158.2	193.0	72.7	38.8
2	1997/01/26 19:18:00	24.09	121.63	24.7	4.6	282.5	41.2	-178.7	191.5	89.1	-48.8
3	1997/09/08 16:17:08	24.08	121.69	11.3	4.7	257.1	33.9	151.7	11.3	74.7	59.4
4	1998/04/28 07:09:01	23.97	121.69	28.7	4.6	298.7	9.9	160.0	48.5	86.6	80.7
5	1998/05/15 08:50:29	23.96	121.72	46.0	4.9	290.7	43.5	-15.5	32.1	79.4	-132.4
6	1998/05/17 16:36:01	24.08	121.53	19.7	4.6	76.0	43.9	131.7	204.9	58.8	57.4

7	1998/07/17 18:44:40	24.06	121.69	1.8	4.8	196.3	24.0	71.0	37.0	67.4	98.3
8	1999/04/10 07:52:24	24.09	121.71	3.0	4.9	238.9	43.0	126.3	13.8	56.6	61.1
9	1999/10/01 04:39:02	24.06	121.53	17.8	4.5	86.7	24.2	149.5	205.0	78.0	68.8
10	2000/05/06 13:41:53	24.02	121.56	27.0	5.1	56.1	44.9	104.6	215.8	47.0	75.9
11	2000/07/07 10:17:49	24.04	121.73	6.7	4.8	198.3	33.2	50.1	63.3	65.1	112.8
12	2000/07/13 17:36:06	23.97	121.74	8.1	4.9	222.5	38.9	101.5	27.9	52.0	80.9
13	2000/07/14 00:07:33	24.05	121.73	7.2	5.7	193.9	31.5	59.5	48.5	63.2	107.3
14	2000/09/10 08:54:47	24.09	121.58	17.7	6.2	213.3	44.7	70.6	59.7	48.5	108.2
15	2001/05/10 04:06:36	23.99	121.70	22.9	4.5	294.0	46.9	-137.0	171.4	60.1	-52.0
16	2001/06/30 04:07:38	24.06	121.54	23.4	5.0	68.5	42.0	120.7	209.9	54.9	65.3
17	2001/07/26 02:19:42	24.06	121.51	21.9	4.6	83.5	48.0	129.6	212.4	55.1	54.7
18	2001/08/20 16:57:59	23.98	121.59	12.8	4.8	65.7	40.1	116.7	212.3	54.8	69.3
19	2001/09/11 00:31:19	24.03	121.62	27.1	4.4	264.7	43.4	153.4	14.7	72.1	49.8
20	2001/09/12 01:52:33	24.06	121.50	18.0	4.3	81.2	36.5	145.0	200.6	70.0	58.8
21	2001/10/13 20:07:06	23.95	121.56	12.7	4.4	86.4	57.1	142.3	199.2	59.1	39.2
22	2002/06/17 05:03:40	24.02	121.73	26.0	4.1	124.3	15.7	70.1	324.9	75.3	95.5
23	2002/06/24 01:12:21	24.03	121.54	19.9	4.7	80.2	49.6	131.6	206.3	55.2	52.0
24	2002/10/28 10:24:54	24.03	121.64	8.5	4.1	247.0	44.1	132.8	14.9	59.3	56.6
25	2002/12/16 00:59:47	24.05	121.60	28.2	4.2	164.2	24.4	-12.4	265.5	84.9	-113.9
26	2003/07/14 05:18:51	24.07	121.66	8.4	4.4	233.8	21.5	94.3	49.2	68.6	88.3
27	2003/08/06 12:23:09	23.98	121.57	10.3	5.1	218.3	39.8	76.5	55.6	51.5	101.0
28	2003/11/14 15:54:03	24.09	121.71	37.8	4.9	250.2	53.5	154.8	355.8	70.0	39.3
29	2004/05/01 07:56:11	24.08	121.53	21.6	5.2	53.4	41.1	101.6	218.2	49.9	80.1
30	2004/05/13 15:28:50	24.06	121.52	20.0	4.2	74.0	42.6	137.9	197.5	63.0	55.7
31	2004/07/22 06:36:41	24.09	121.53	22.0	4.6	72.0	45.0	121.8	210.8	53.0	62.2
32	2004/08/03 00:43:45	23.96	121.69	21.5	4.5	306.3	50.2	-149.4	195.5	67.0	-44.1
33	2004/11/13 15:22:04	24.00	121.69	29.6	4.3	321.0	61.9	21.6	220.5	71.1	150.1
34	2005/02/11 22:56:21	23.96	121.61	26.0	4.5	263.9	49.5	168.7	1.3	81.4	41.1
35	2005/04/30 05:19:15	24.07	121.62	9.2	4.1	173.0	50.3	-11.1	270.2	81.5	-139.8
36	2005/04/30 14:48:17	24.04	121.62	8.5	5.6	163.0	45.0	-22.1	269.0	74.5	-132.9
37	2005/04/30 15:07:38	24.01	121.61	9.4	4.4	246.7	33.1	130.7	20.9	65.5	66.9
38	2005/04/30 17:43:12	24.01	121.63	5.3	4.3	258.9	33.3	133.4	30.3	66.5	65.7
39	2005/04/30 18:01:17	24.04	121.60	8.7	4.2	314.9	56.4	167.6	51.8	79.7	34.3
40	2005/04/30 19:20:18	24.02	121.59	7.0	4.2	289.2	43.9	-157.3	182.4	74.5	-48.4
41	2005/04/30 19:30:13	24.04	121.61	9.1	4.1	262.9	46.6	150.4	14.2	69.0	47.4

Unit: Time (year/ month/ day hour: min: sec), Latitude (°N), Longitude (°E), Depth (km), Strike (°), Dip (°), Rake (°)

4.4.3 震源參數調整測試

格點搜尋

如圖 4.14, 震源機制為 Cheng et al. [1997] 重定位結果, 粉紅矩形為斷層幾何, 我們嘗試將震源調整各種位置, 即每個格子均為新的斷層位置, 並計算該位置發

生錯動時可造成驗潮站的抬升量，試圖尋找可以造成符合驗潮紀錄同震位移的最佳斷層幾何位置。

其計算結果如圖 4.15 所示，每個格子代表每次計算時斷層幾何中心的位置，該格的顏色代表驗潮站受到的抬升量。從此結果可大致看出，若驗潮站要得到向上抬升的量值，則斷層錯動的位置須要在驗潮站的西側。

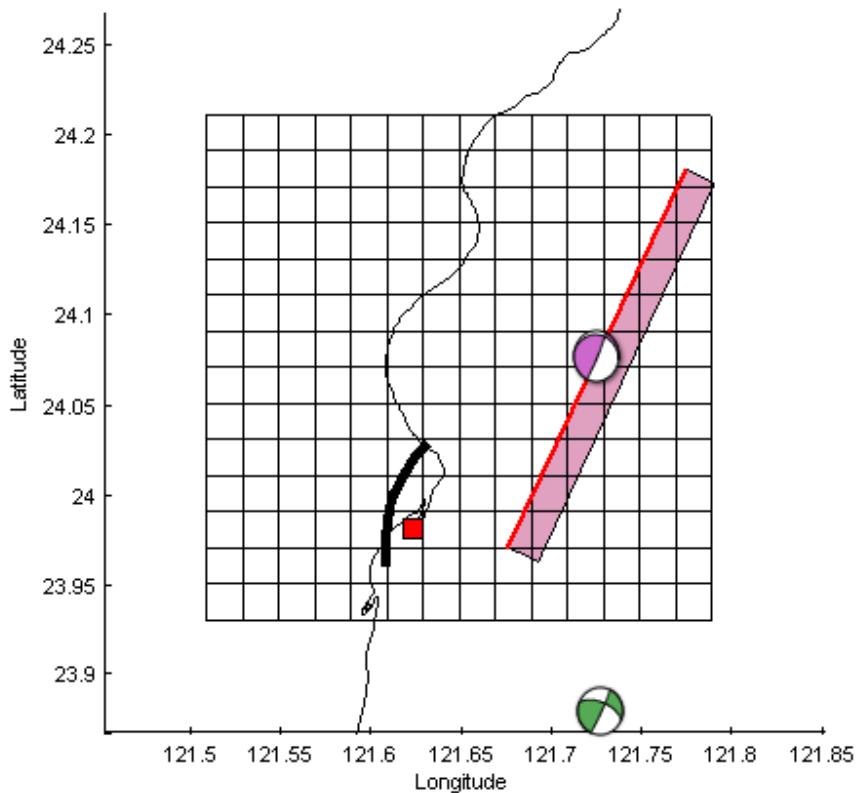


圖 4.14 格子點搜尋最佳斷層位置之格子設計

由於驗潮站在驗潮紀錄中觀測到 350 mm 的抬升量，因此我們將圖 4.15 每個格子點的結果內插出 350 mm 的位置，找出所有可能造成符合驗潮紀錄觀測量的位置。其結果如圖 4.16 的紅線軌跡，即斷層幾何中心若是設定在紅線上的任何位置時，均能對驗潮站造成 350 mm 的抬升量。從圖 4.16 可推測此軌跡可形成一封閉曲線，當斷層的位置在曲線內時，可對驗潮站產生超過 350 mm 的抬升量，而在曲線之外則造成小於 350 mm 的抬升量。

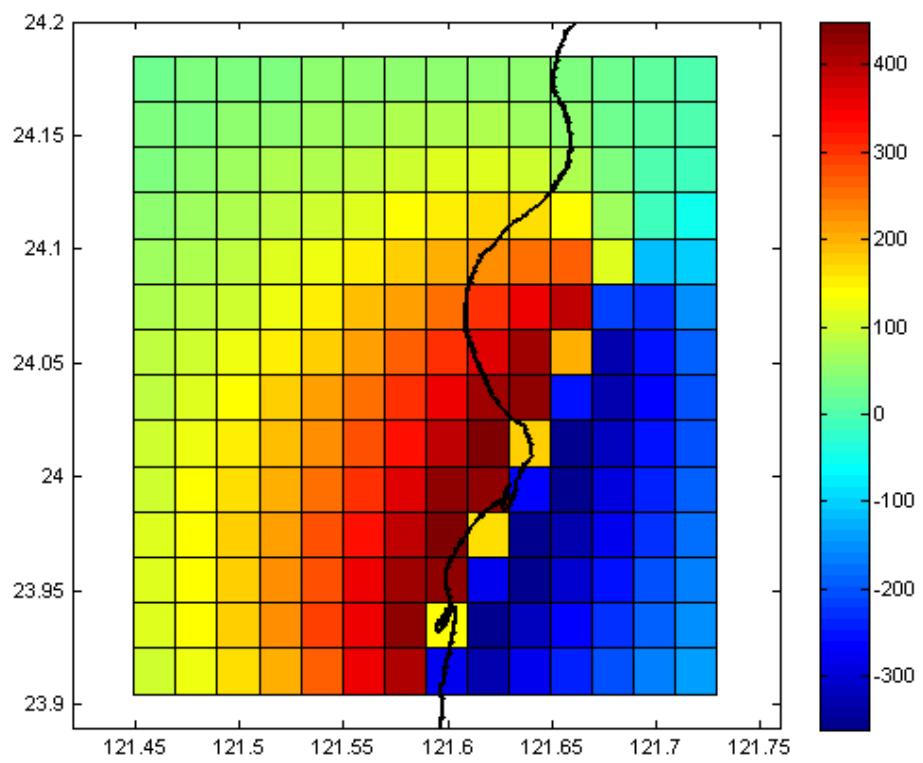


圖 4.15 斷層於各個位置下對驗潮站的抬升量

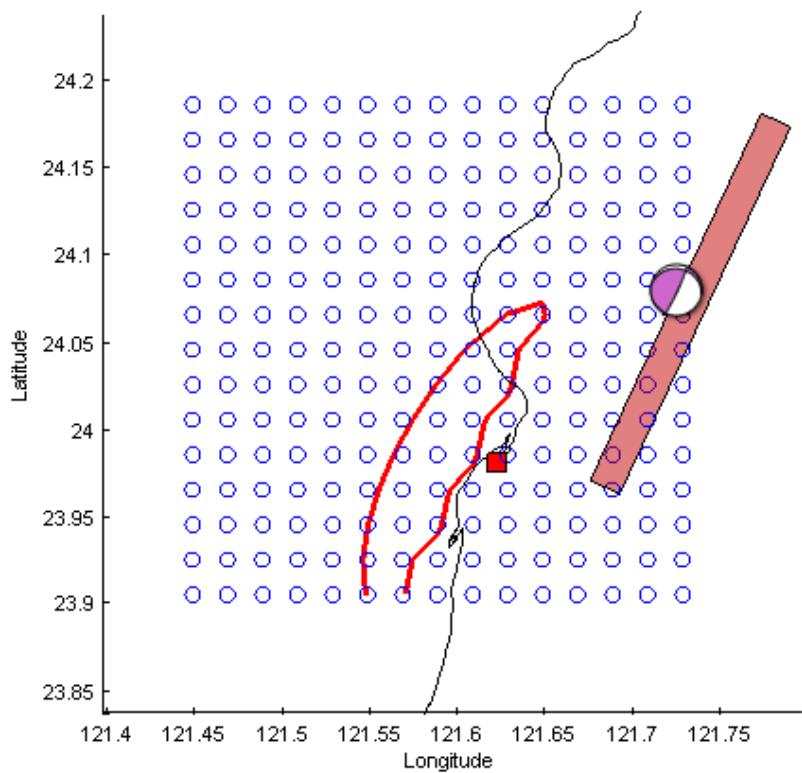


圖 4.16 斷層幾何中心之最佳位置軌跡

斷層幾何深度測試

斷層的深度直接影響其能量傳到地表的能力，即深度是影響地表變形的重要參數之一。我們同樣使用格子點搜尋，在固定斷層位態的情況下，計算斷層在不同深度及各個位置下對驗潮站的抬升量。其中斷層幾何中心的深度為 12.5 km，每歡計算深度增加 1 km，直至無法對驗潮站產生 350 mm 抬升量的深度為止。

如圖 4.17 所示，紅、黃、綠實線分別代表斷層幾何深度在不同深度下模擬的結果，當斷層幾何中心位於紅、黃、綠實線時，驗潮站均可得到 350 mm 的抬升量。由此可知斷層幾何在深度 12.5 km 開始往下增加，至深度超過 14.5 km 後即無法在地表任何位置以同樣的斷層參數造成驗潮紀錄所觀測到的抬升量。

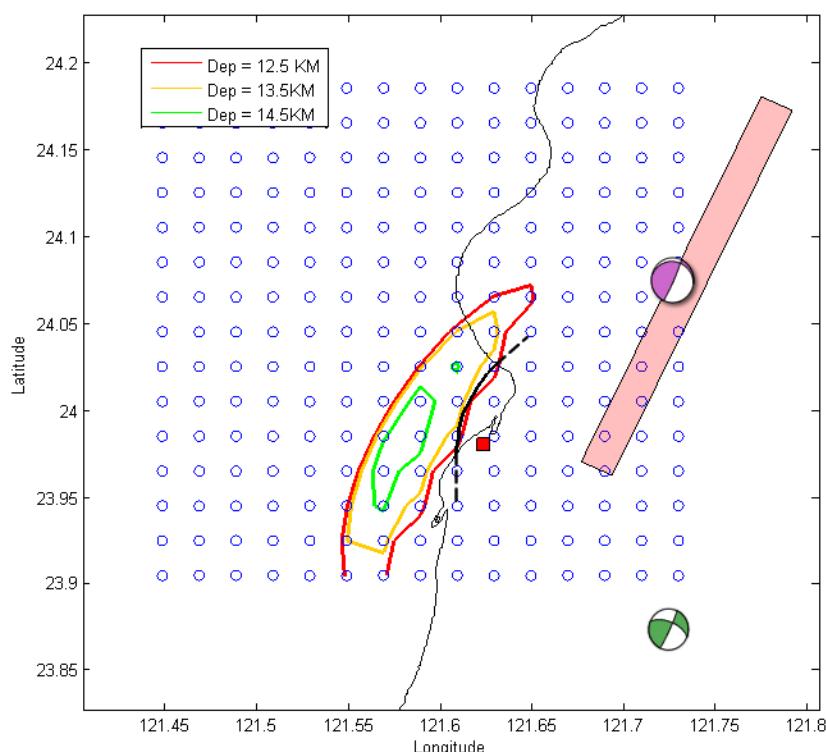


圖 4.17 不同斷層幾何中心深度之最佳位置軌跡

由於 1951 年花蓮地震有明顯的地表變形，而驗潮站也有明顯的抬升量，在前人研究也明顯指出地表錯動是沿著米崙斷層破裂，因此我們可以推測斷層的位置應該也是在米崙斷層附近。圖 4.17 將米崙斷層的位置以黑線表示，可明顯觀察出

米崙斷層就在靠近驗潮站的東側曲線上。而曲線與斷層線的重疊代表錯位模式的結果與地表的觀察是一致的，在這情況下的推論，斷層的錯動非常有可能是反應了米崙斷層的錯動。

斷層能量錯移測試

針對原地震能量可能被低估，本研究亦測試增加地震能量大小，進行如前述之計算。由式 4.6 可知，若地震能量增加，則直接影響到斷層面積與錯移量的大小，因此地震規模的增加可能造成地表變形的範圍增加及抬升量的增大。

我們將規模增加至 $M_L 7.3$ ，此規模大小為當時的主震，亦為當時所能記錄到的最大規模。並同樣使用式 4.3 至式 4.7 之經驗公式及前述之格點搜尋法，計算斷層幾何在各種位置及深度下可以滿足驗潮站觀測量的最佳軌跡，其結果如圖 4.18。

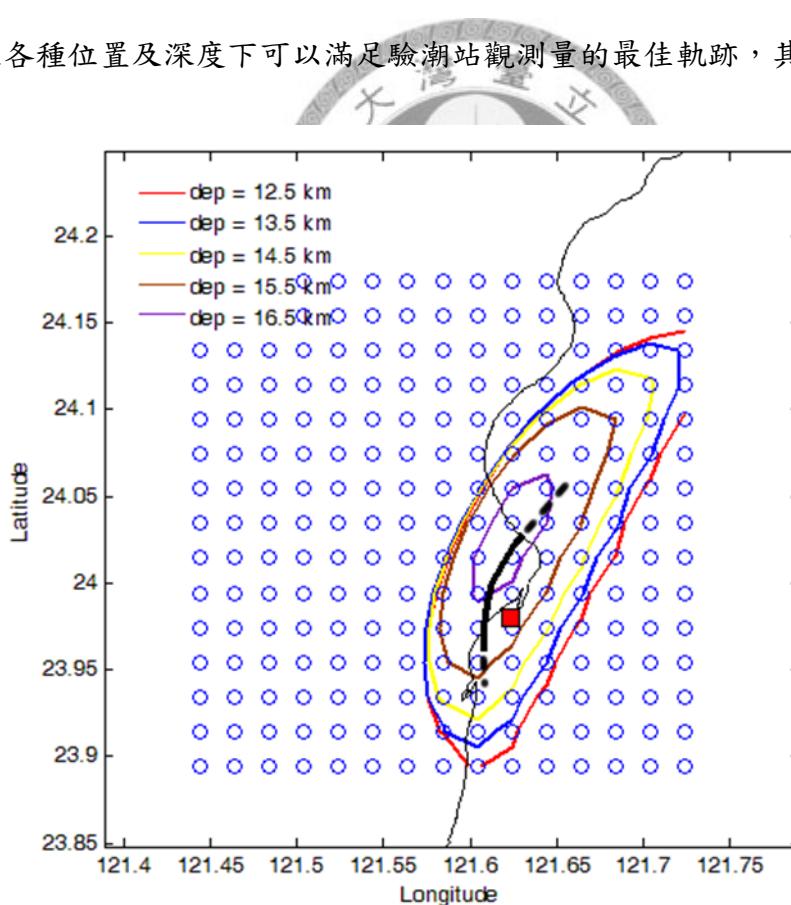


圖 4.18 地震規模 $M_L 7.3$ 之斷層幾何最佳位置軌跡

由圖 4.18 可知，若地震的能量增加，在高角度逆衝斷層的錯移下，可造成的地表變形量將明顯增加，而斷層可能的深度亦會增加，最深可達到 16.5 公里附近，並且在花蓮市北方七星潭附近收斂，代表此區可能為抬升量最大的地方，與前人野外觀察在七星潭及機場東側有明顯地表抬升的結果一致，即對應到米崙斷層在地表的位置，此結果更添增本研究可信賴的程度。



第五章 結論

5.1 估計近十年臺灣沿岸地區地殼升降情形

利用相對及絕對海平面變化差值研究垂直高程變形的方法中，ALT-TG 可提供相較短時間尺度的變化量結果，然而驗潮紀錄為一簡單的儀器，其記錄的資訊不僅受到陸地抬升的影響，也包含了氣候及人為的因素，在進行計算操作前，必須先進行資料檢視及校正的步驟。

本研究使用兩種 ALT-TG 計算過程，方法（1）是假設測高資料及驗潮紀錄分別在該測站或該區域是長期維持穩定的高程變化所表現的結果；方法（2）考慮陸地並非維持固定的線性抬升或下降速度，僅求取各段紀錄跨距下高程的平均變化速率。然而結果顯示，不論方法（1）或方法（2），只要驗潮測站紀錄時間夠長，且驗潮紀錄穩定性足夠，那麼得到的結果即可反應該地區在垂直方向之運動趨勢。

臺灣地殼在垂直方向的地表變形，因東西岸地質上的差異而有不同的成因。

臺灣西部沿海之驗潮站均位在以沉積岩為主的地層上，受到人文活動的影響，對地下水的過度利用造成了西南沿海嚴重的地層下陷，以彰化及雲林的下陷量為最大，而西北部除了竹圍外，地層較無明顯垂直方向變形。

在臺灣東部海岸山脈沿岸，地表處於板塊擠壓的活躍地區，然而菲律賓海板塊的向北隱沒，使得抬升量隨著緯度向北而減小。而近十年來地表垂直方向高程主要以下陷的方式表現，可能是正處於間震時期的潛移變化，為受制於資料觀測時間長度的不足的結果。

5.2 估計歷史地震在垂直方向上造成之同震變形量

驗潮站受到地震同震變形造成垂直方向上的抬升或下降，反應在驗潮紀錄便是紀錄基線的改變。計算地震造成的基線改變量，2003 年成功地震測站抬升約 150 mm，其結果與 GPS 觀測之錯移量的結果相當，也與錯位模式的結果相近，表示驗潮站的連續紀錄是有能力定量反應垂直方向上的變形量。

從驗潮站連續紀錄顯示，1951 花蓮地震主震並沒有造成垂直方向的明顯變形，而 11:29 餘震可能造成 350 mm 垂直方向抬升量，這個觀察對應到這兩個地震的震源機制解。

研究餘震造成花蓮地區的地表抬升量，1951 年花蓮地震應該對應米崙斷層的再錯動。



參考文獻

- 何邦碩（1974），花蓮近海海域地球物理初步測勘，海洋彙刊，第12期，39-47頁。
- 何春蓀(1986)，臺灣地質概論-臺灣地質圖說明書，增訂第二版，經濟部中央地質調查所出版，共164頁。
- Angelier, J., H. T. Chu, and J. C. Lee (1997), Shear concentration in a collision zone: kinematics of the active Chihshang fault, Longitudinal Valley, eastern Taiwan, *Tectonophysics*, 274, 117-144.
- Cazenave, A., K. Dominh, F. Ponchaut, L. Soudarin, J. F. Cretaux, and C. Le Provost (1999), Sea level changes from Topex–Poseidon altimetry and tide gauges, and vertical crustal motions from DORIS, *Geophys. Res. Lett.*, 26(14), 2077–2080.
- Chang, C. P., C. T. Wang, H. C. Wang, and K. S. Chen (2004), Application of DInSAR in monitoring the metropolitan land-surface deformation: Jungli industry park as an example. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 9(3), 9-14. (in Chinese with English abstract)
- Chen, H. Y., S. B. Yu, L. C. Kuo, and C. C. Liu (2006), Coseismic and postseismic surface displacements of the 10 December 2003 (M_w 6.5) Chengkung, eastern Taiwan, earthquake, *Earth Planets Space*, 58, 5-21.
- Chen, K. H., S. Toda, and R. J. Rau (2008), A leaping, triggered sequence along a segmented fault: The 1951 M_L 7.3 Hualien-Taitung earthquake sequence in eastern Taiwan, *J. Geophys. Res.*, 113, B02304, doi:10.1029/2007JB005048.
- Cheng, S. N., T. T. Yu, Y. T. Yeh, and Z. S. Chang (1997), Relocation of the 1951 Hualien, Taitung earthquake sequence, in *Proceedings of Meteorology, Conference on Weather Analysis and Forecasting*, 690–699, 1997, March, Central Weather Bureau, Taipei, Taiwan.

- Ching, K. N., R. J. Rau, and Y. Zeng (2007), Coseismic source model of the 2003 Mw6.8 Chengkung earthquake, Taiwan, determined from GPS measurements, *J. Geophys. Res.*, 112, B06422.
- Chung, L. H., Y. G. Chen, Y. M. Wu, J. B. H. Shyu, Y. T. Kuo, and Y. N. 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, 416-429.
- García, D., I. M. Vigo, B. F. Chao, and M. C. Martinez (2007), Vertical Crustal Motion along the Mediterranean and Black Sea Coast Derived from Ocean Altimetry and Tide Gauge Data , *Pure and Appl. Geophys.*, 164, 851-863, doi:10.1007/s00024-007-0193-8.
- Hanks, T. C., and H. Kanamori (1979), A moment magnitude scale, *J. Geophys. Res.*, 84, 2348–2350.
- Heaton, T., F. Tajima and A.W. Mori (1986), Estimating ground motions using recorded accelerograms, *Surveys in Geophysics*, 8, 25-83.
- Ho, C. S. (1986), A synthesis of the geologic evolution of Taiwan, *Tectonophysics*, 125, 1-16
- Huang, K. C., H. Kao, and Y. M. Wu (2000), The determination of ML - MW in Taiwan, *8th Annual Meeting of Geophysical Society of China*, 193–201. (in Chinese).
- Hsieh, M. L., and P. M. Liew, and M.Y. Hsu (2004), Holocene tectonic uplift on the Hua-tung coast, eastern Taiwan, *Qua. Int.*, 115-116, 47-70.
- Hsu, T. L. (1962), Recent faulting in the Longitudinal Valley of eastern Taiwan, *Mem. Geol. Soc. China*, 1, 95– 102.
- Hsu, T.L. (1976), The Lichi Melange in the Coastal Range framework. *Bull. Geol. Surv.*

Taiwan 25, 87–95.

Kuo, C. Y., C. K. Shum, A. Braun, and J. X. Mitrovica (2004), Vertical crustal motion determined by satellite altimetry and tide gauge data in Fennoscandia, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L01608, doi:10.1029/2003GL019106.

Kuochen, H., Y. M. Wu, Y. G. Chen, and R.Y. Chen (2007), 2003 M_w 6.8 Chengkung earthquake and its associated seismogenic structures, *J. Asian Earth Sci.*, 31 ,332-339, doi:10.1016/j.jseaeas.2006.07.028.

Liu, C. C. (1989), Impact of crustal deformation on tide gauge records, *Proc. Geol. Soc. China*, 32(4), 321-338.

Matsumoto, K., T. Takanezawa, and M. Ooe (2000), Ocean tide models developed by assimilating Topex/Poseidon altimeter data into hydrodynamical Model: A Global Model and a Regional Model Around Japan, *J. Oceanogr.*, 56 ,567-581.

Mindlin, R. D. (1936), Force at a point in the interior of a semi-infinite solid, *Physics*, 7, 195-202.

Mitchum, G. T. (1998), Monitoring the stability of satellite altimeters with tide gauges, *J. Atmos. Oceanic Tech.*, 15, 721–730.

Shyu, J.B.H., K. Sieh, Y. G. Chen, and C. S. Liu (2005), Neotectonic architecture of Taiwan and its implications for future large earthquakes, *J. Geophys. Res.*, 110, B08402, doi: 10.1029/2004JB003251.

Teng, L. S. (1990), Late Cenozoic arc-continent collision in Taiwan, *Tectonophysics*, 183, 57-76

Wang, C. H., and W. C. Burnett (1990), Holocene mean uplift rate across an active plate-collision boundary in Taiwan, *Science*, 248, 204-206.

Wang, R., Francisco Lorenzo-Martín, and Frank Roth (2006), PSGRN/PSCMP-a new code for calculating co- and post-seismic deformation, geoid and gravity changes

based on the viscoelastic-gravitational dislocation theory, *Comput. Geosci.*, 32, 527-541.

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

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 (2006), 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, L02312, doi:10.1029/2005GL024711.

York, J. E. (1976), Quaternary faulting in eastern Taiwan, *Bull. Geol. Surv. Taiwan*, 25, 63– 75.

Yu, S. B., H.Y. Chen, and L.C. Kuo (1997), Velocity field of GPS stations in the Taiwan area. *Tectonophysics*, 274, 41-59.

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

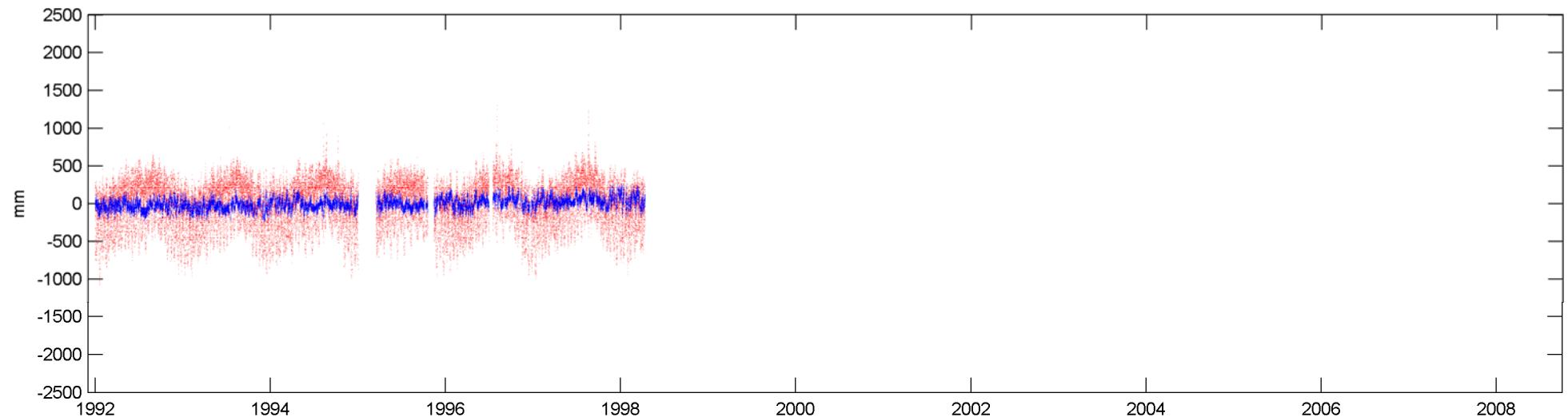
Yu, S. B. and Y. R. Hsu, L. C. Kuo, H. Y. Chen, and C. C. Liu(2003), GPS measurement of postseismic deformation following the 1999 Chi-Chi, Taiwan , earthquake, *J. Geophys. Res.*, 108(B11), 2520. doi:10.1029/2003JB002369.

附錄一 驗潮紀錄展示及斜率

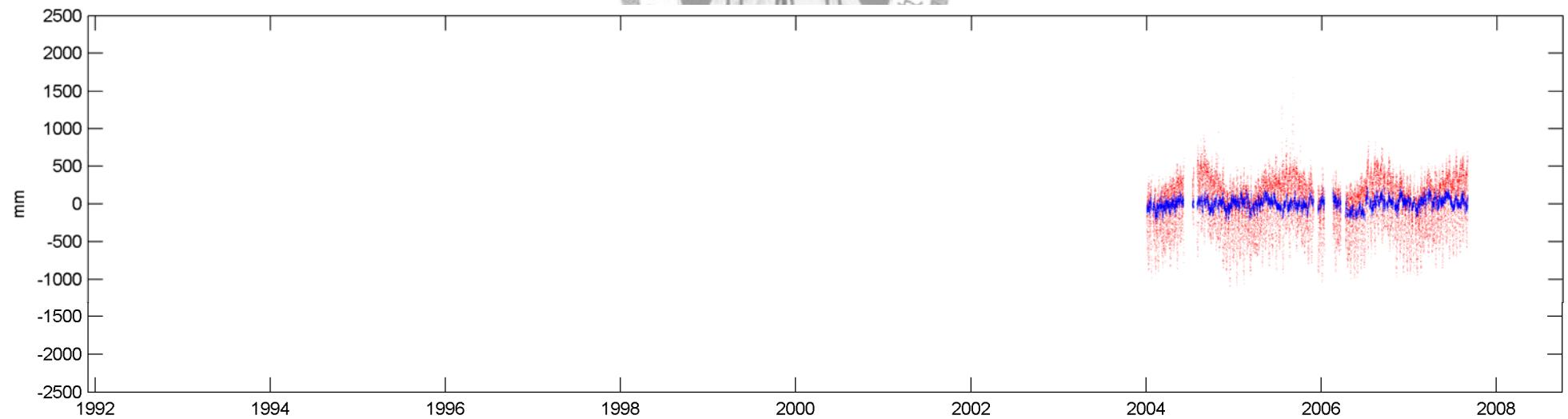
本附錄展示各測站之驗潮紀錄，各段選取之資料長度，請參考第二章之圖 2.3。紅色為驗潮站之原始資料，各種誤差均未作修正。藍色部分為修正後之驗潮資料，並附上該時間序列迴歸後所得之斜率。



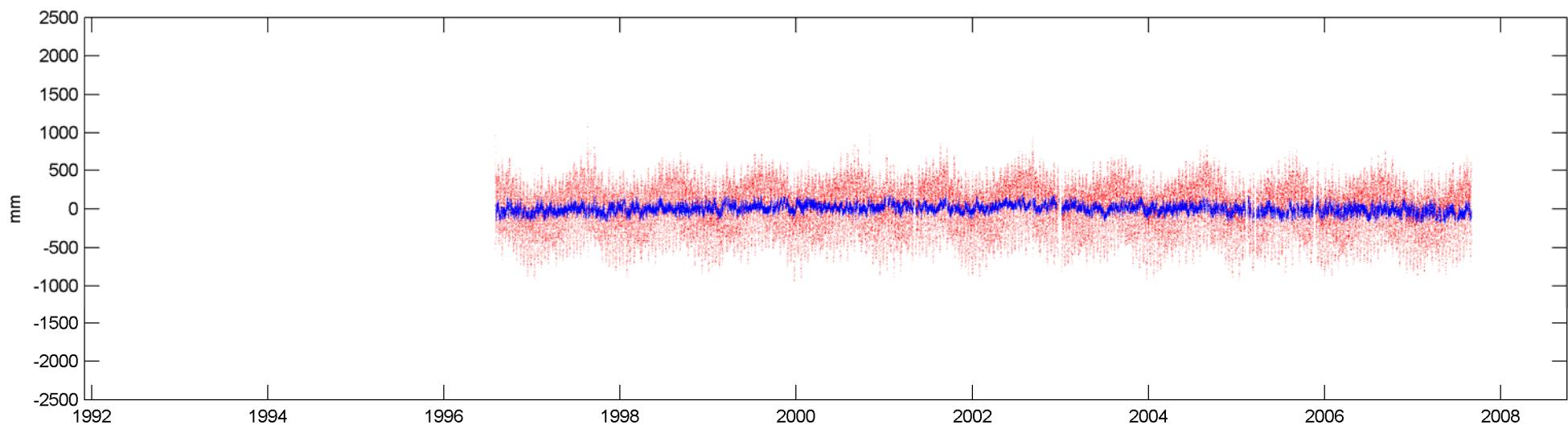
基隆 (KL), 斜率 : $+15.5 \pm 0.4 \text{ mm/yr}$



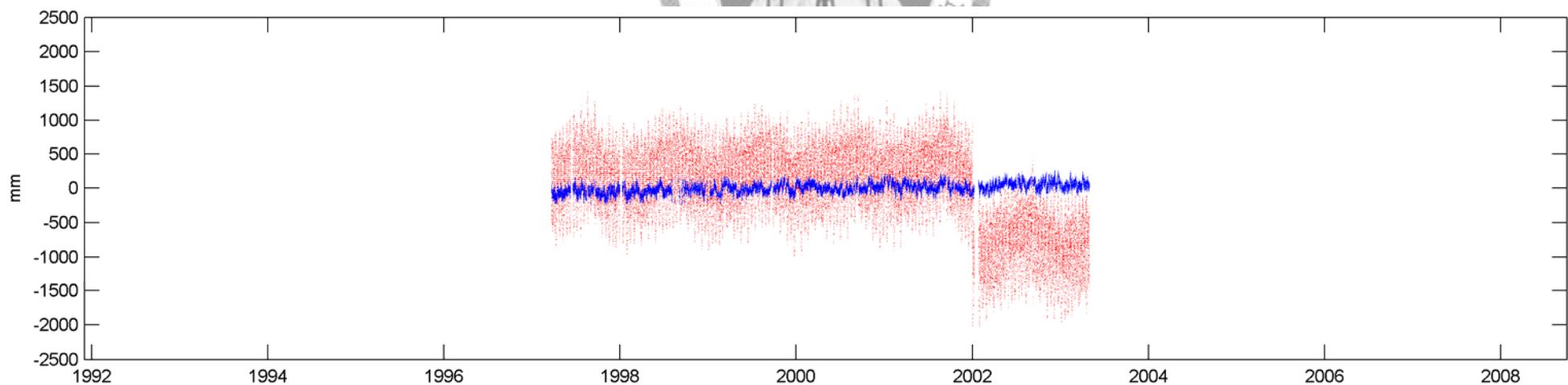
龍洞 (LD), 斜率 : $+10.1 \pm 1.0 \text{ mm/yr}$



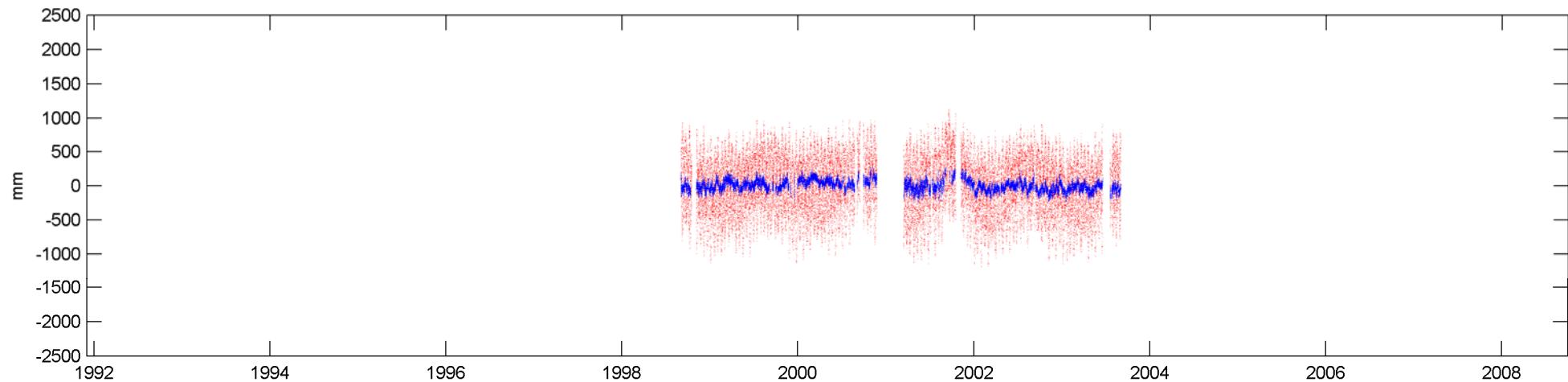
梗枋 (GF), 斜率 : $+2.3 \pm 0.1 \text{ mm/yr}$



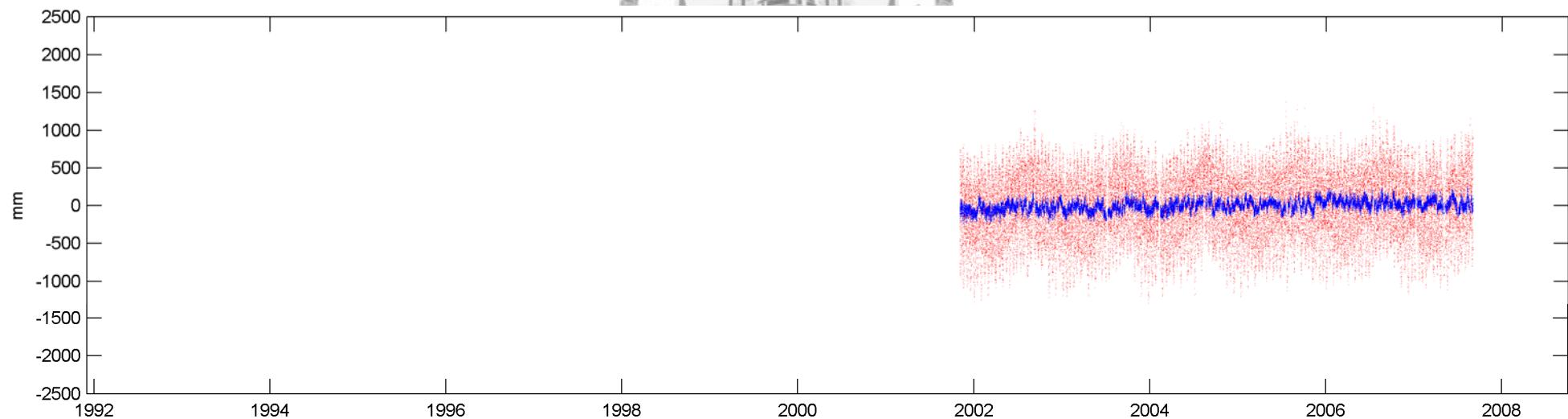
蘇澳 (SA), 斜率 : $+19.6 \pm 0.2 \text{ mm/yr}$



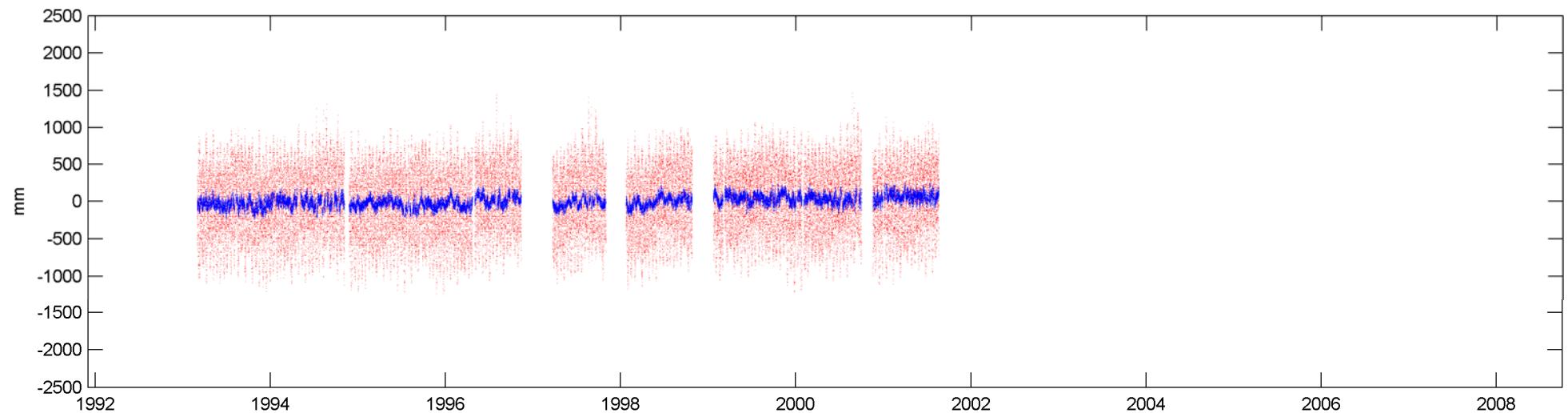
花蓮 (HL), 斜率 : $-8.8 \pm 0.2 \text{ mm/yr}$



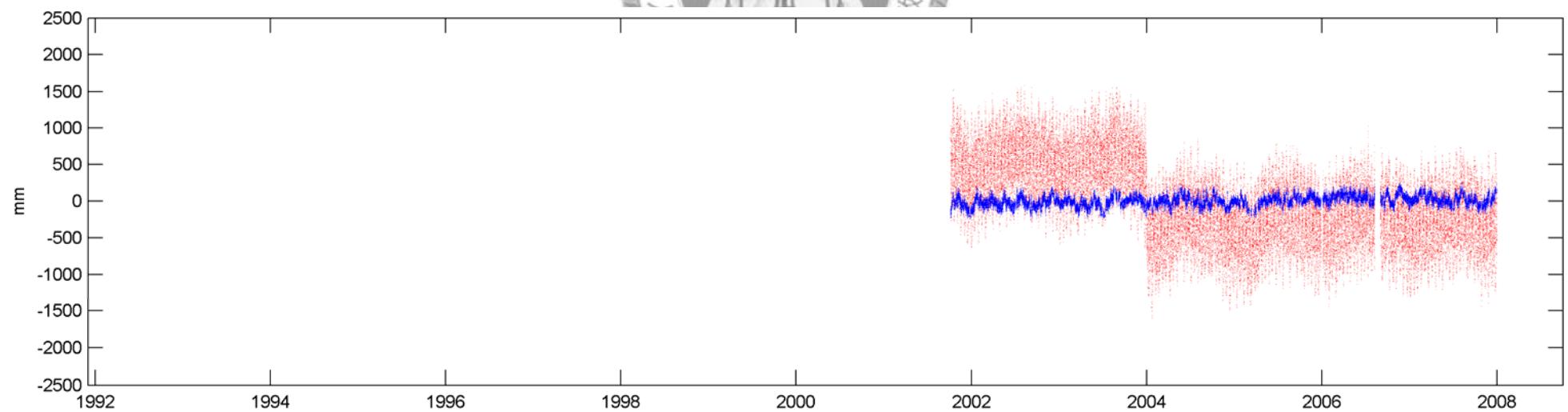
石梯 (ST), 斜率 : $+11.7 \pm 0.5 \text{ mm/yr}$



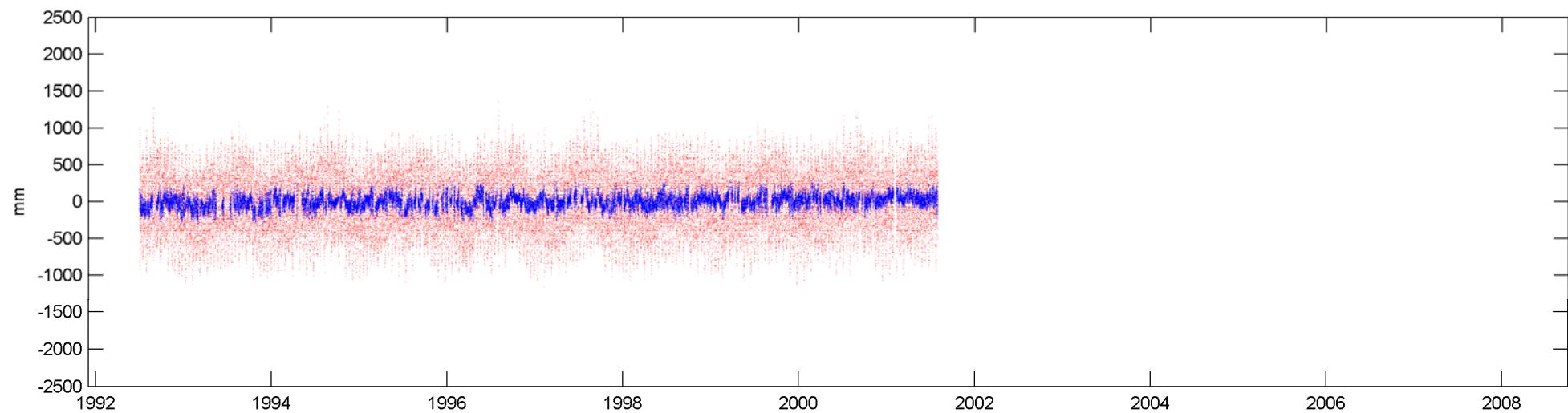
成功 (CK), 斜率 : $+12.6 \pm 0.2 \text{ mm/yr}$



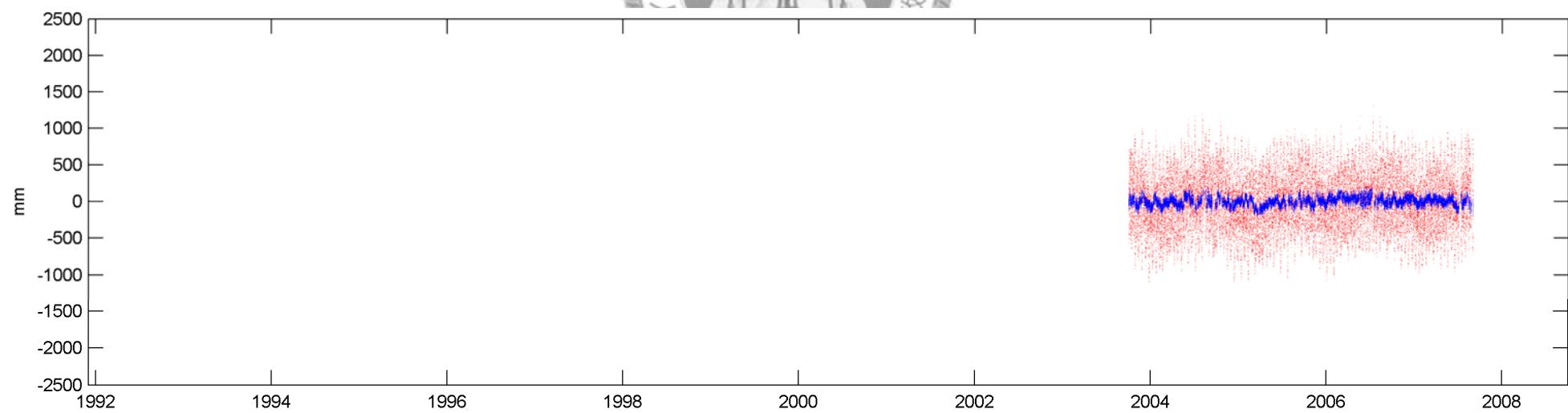
綠島 (LT), 斜率 : $+13.4 \pm 0.4 \text{ mm/yr}$



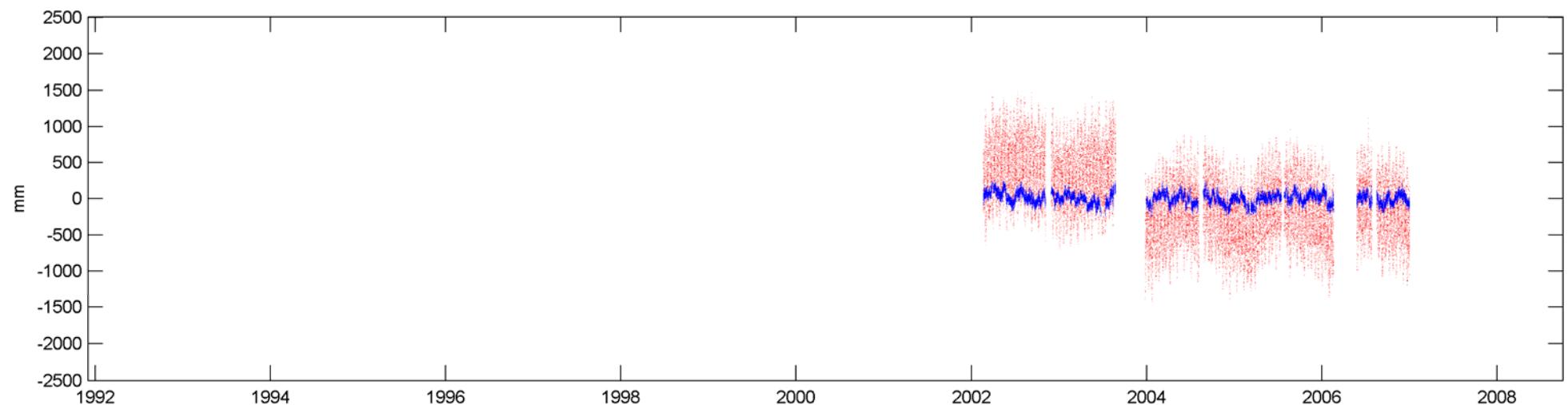
富岡 (FG), 斜率 : $+8.4 \pm 0.3 \text{ mm/yr}$



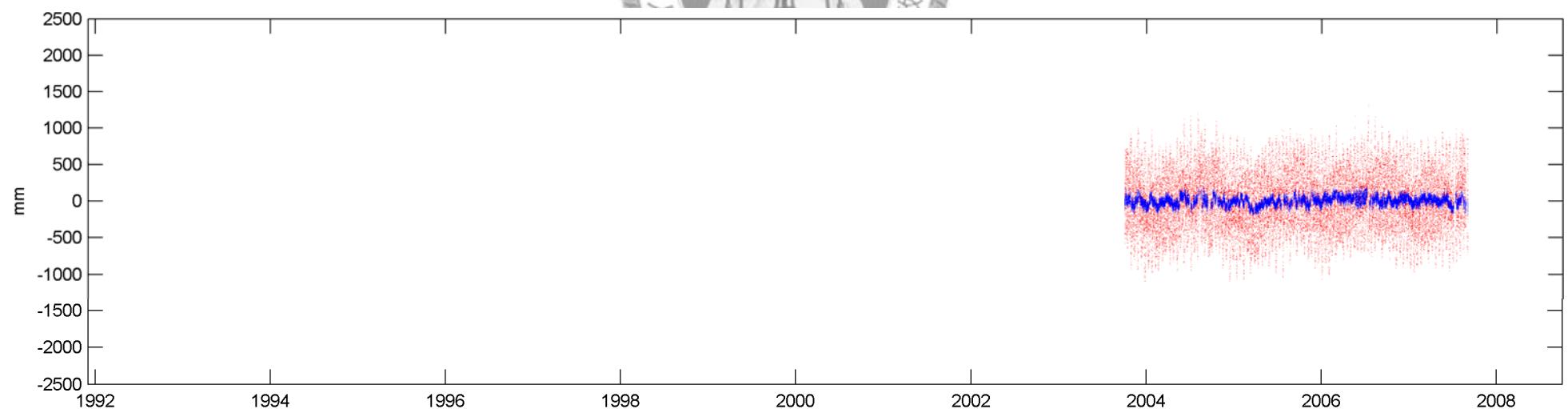
大武 (DW), 斜率 : $+7.4 \pm 0.6 \text{ mm/yr}$



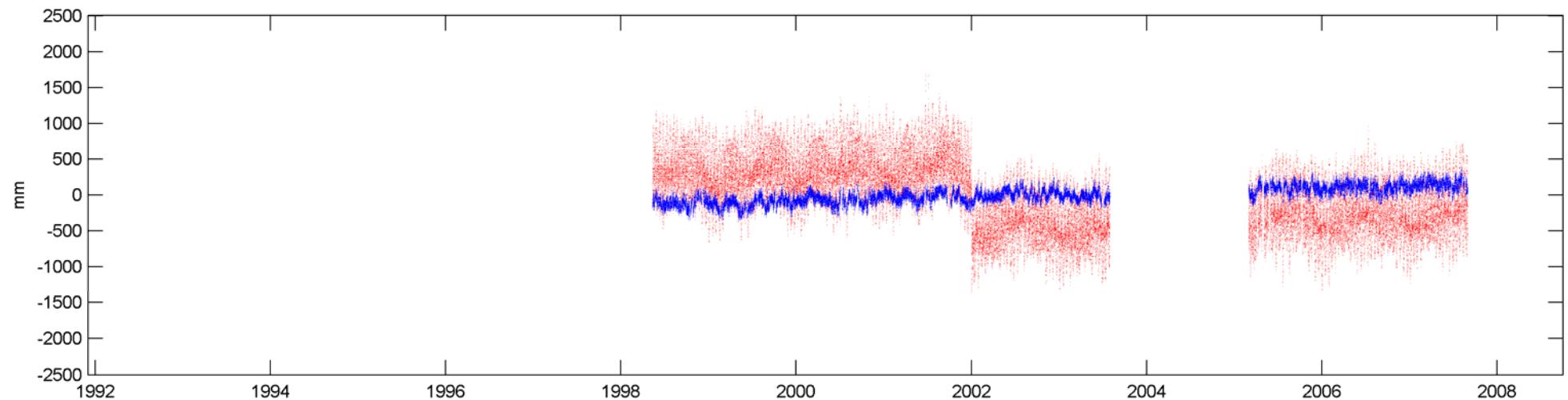
蘭嶼 (LY), 斜率 : $-7.3 \pm 0.6 \text{ mm/yr}$



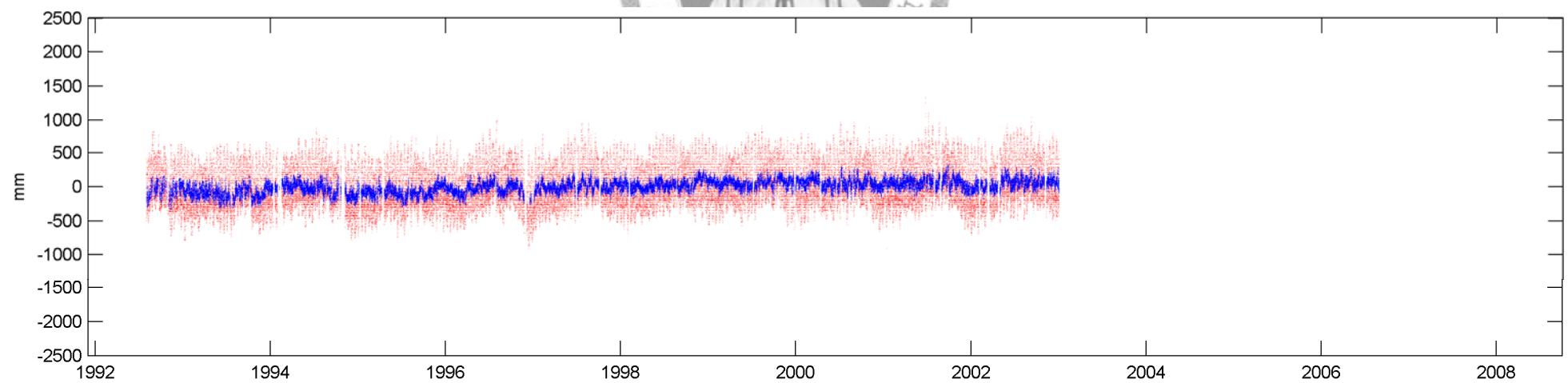
大武 (DW), 斜率 : $+7.4 \pm 0.6 \text{ mm/yr}$



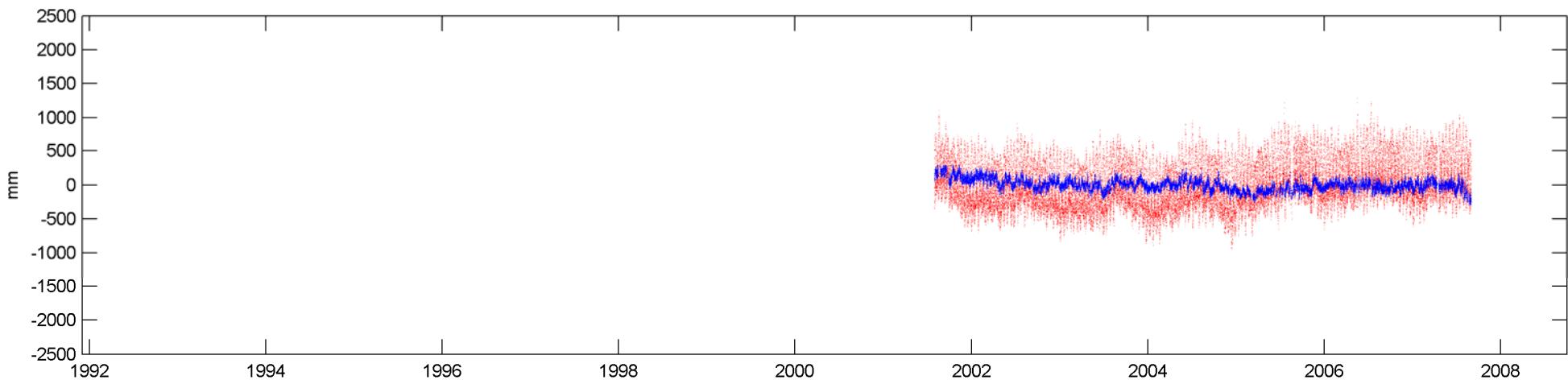
後壁湖 (HBH), 斜率 : $+30.2 \pm 0.2 \text{ mm/yr}$



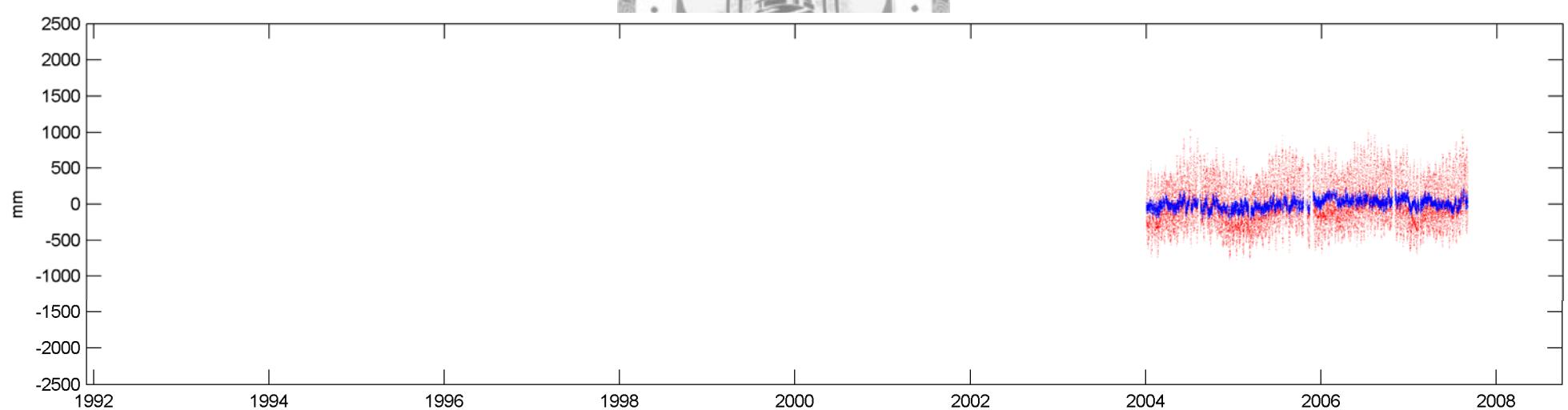
躉廣嘴 (SGZa), 斜率 : $+16.6 \pm 0.2 \text{ mm/yr}$



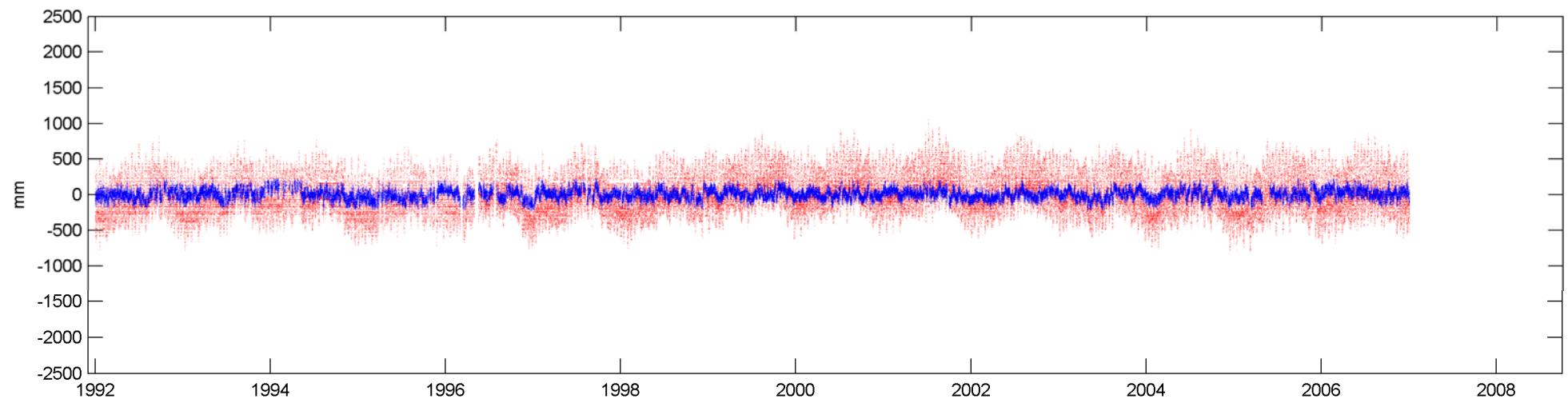
躉廣嘴 (SGZb), 斜率 : $-21.1 \pm 0.4 \text{ mm/yr}$



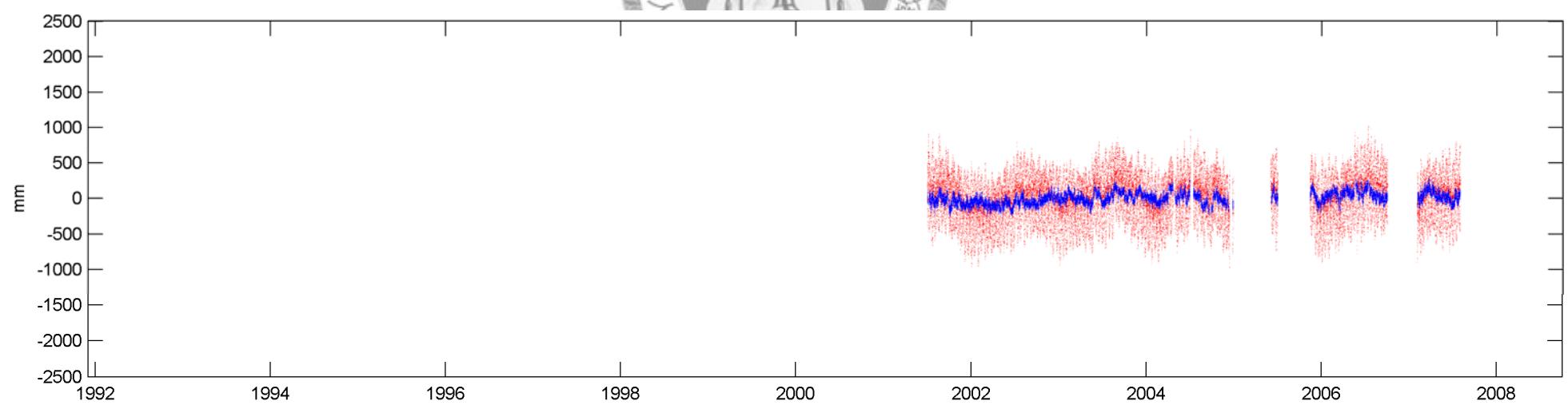
東港 (DG), 斜率 : $+21.5 \pm 0.8 \text{ mm/yr}$



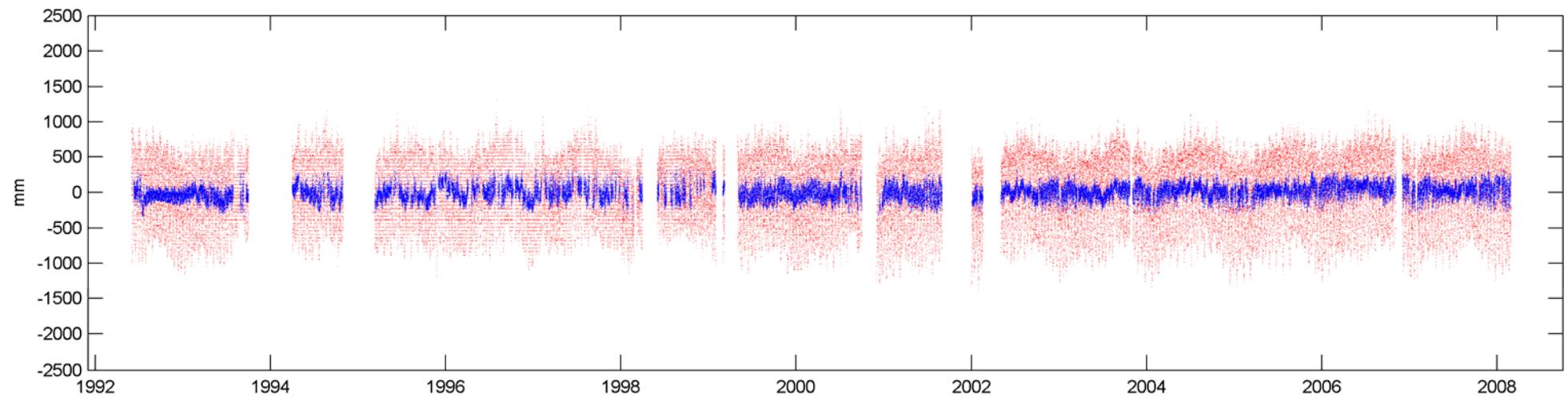
高雄 (KS), 斜率 : $+0.7 \pm 0.1$ mm/yr



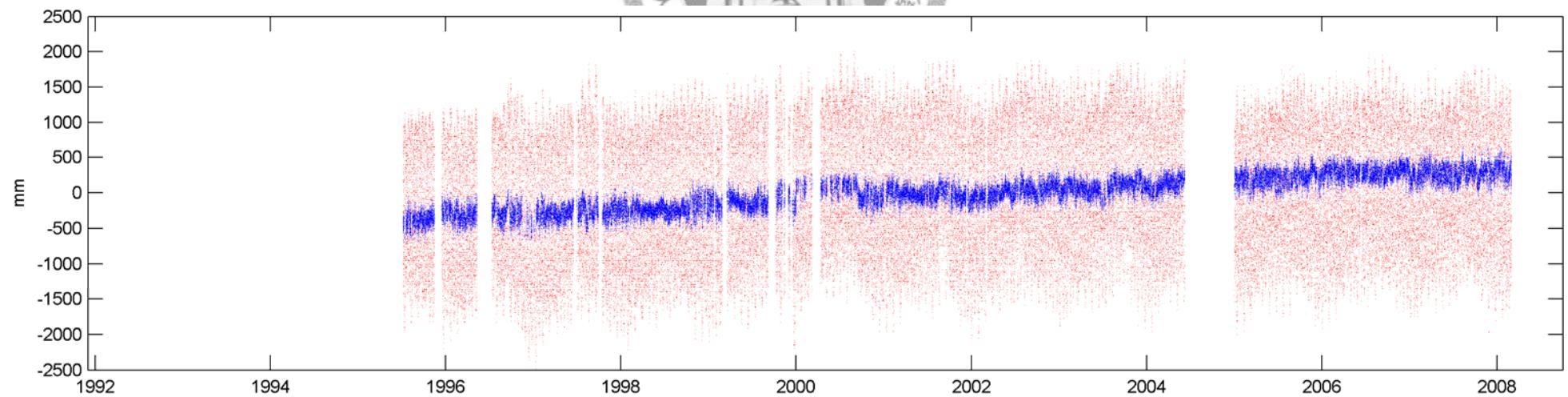
安平 (AP), 斜率 : $+18.2 \pm 0.5$ mm/yr



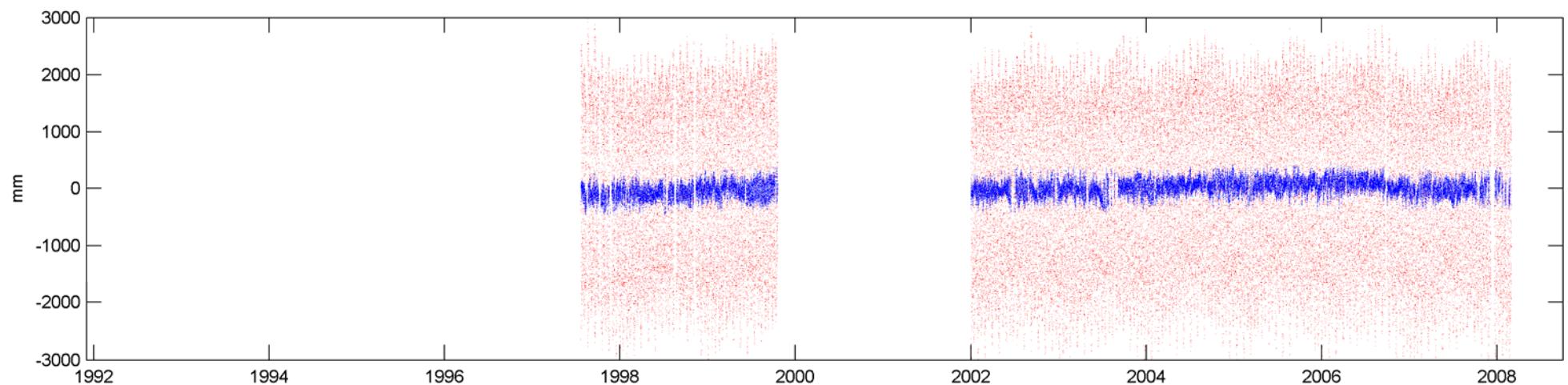
將軍 (JG), 斜率 : $+3.3 \pm 0.2 \text{ mm/yr}$



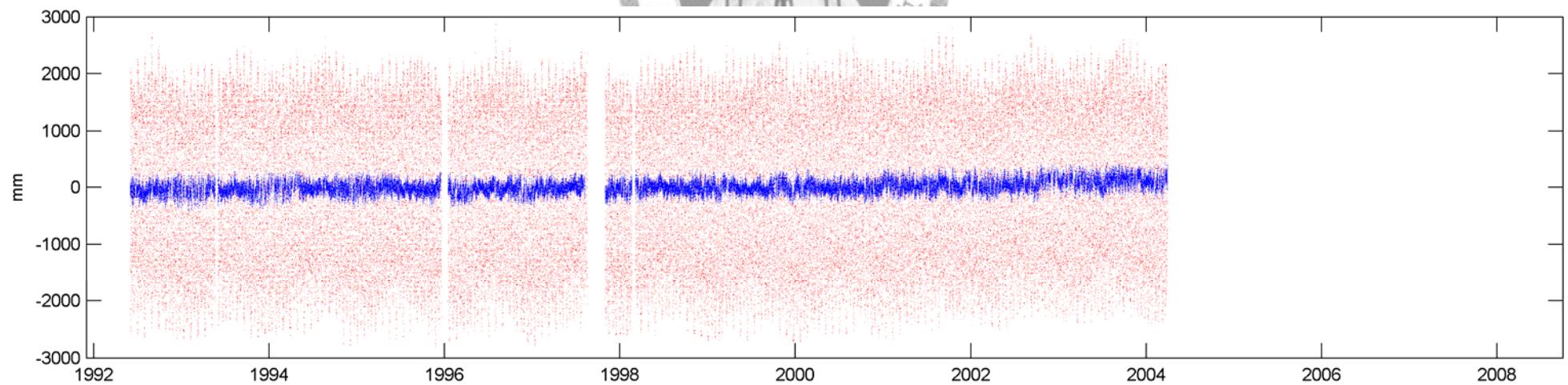
箔子寮 (BZL), 斜率 : $+58.4 \pm 0.3 \text{ mm/yr}$



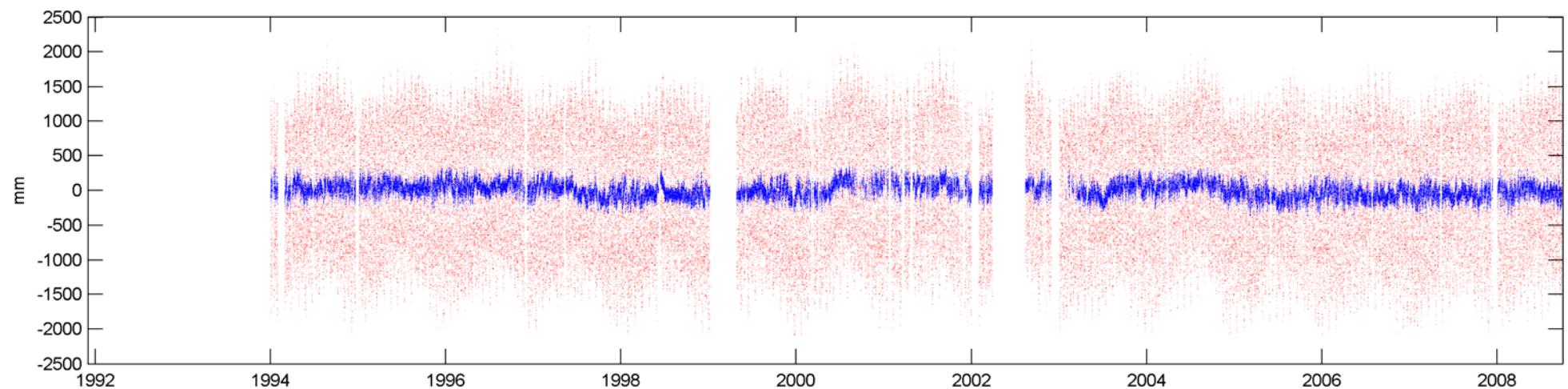
臺中 (TC), 斜率 : $+8.9 \pm 0.5 \text{ mm/yr}$



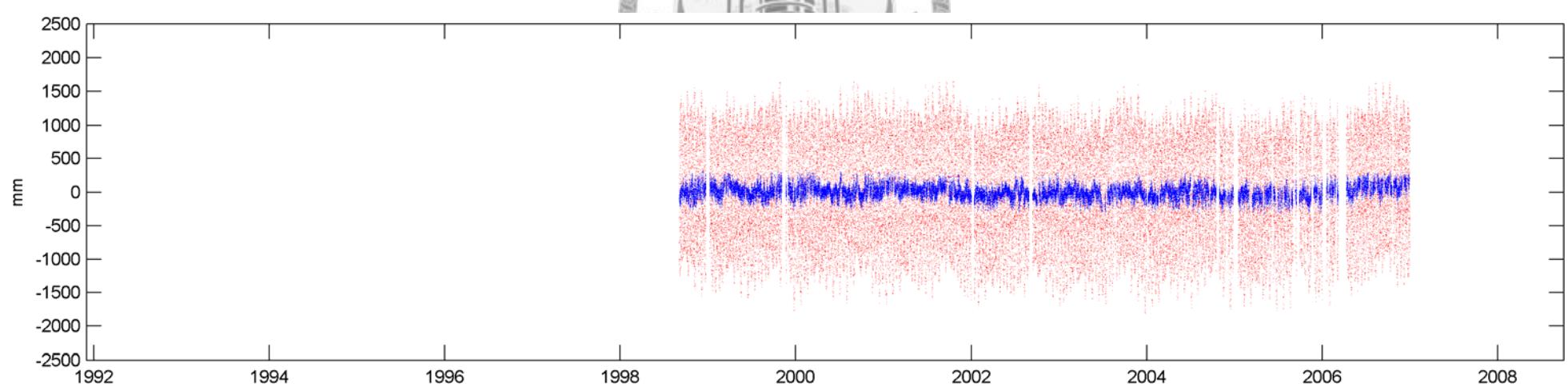
新竹 (HC), 斜率 : $+11.8 \pm 0.2 \text{ mm/yr}$



淡水 (DS), 斜率 : $-5.3 \pm 0.2 \text{ mm/yr}$



澎湖 (PH), 斜率 : $-0.8 \pm 0.4 \text{ mm/yr}$





附錄二 各測站之分潮振幅與相位

	基隆 KL		梗枋 GF		龍洞 LD		蘇澳 SA	
	振幅(mm)	相位(°)	振幅(mm)	相位(°)	振幅(mm)	相位(°)	振幅(mm)	相位(°)
M2	225.247	-88.037	212.133	33.777	280.660	-74.814	419.143	-88.112
S2	56.525	-10.297	106.706	43.976	118.759	-33.364	177.525	9.709
N2	58.608	9.836	52.589	88.209	57.168	77.398	82.144	-78.194
K1	174.573	57.547	220.159	56.861	147.452	42.962	184.411	7.170
M4	10.816	9.157	12.003	-76.302	0.977	81.900	2.905	-47.870
O1	127.751	0.075	128.719	-1.444	52.558	-0.126	54.496	-0.777
M6	50.165	87.378	141.254	89.241	110.874	89.900	146.725	-89.869
MK3	2.459	-67.864	3.228	-52.607	0.642	43.781	1.207	54.370
S4	0.835	-28.079	1.404	-71.327	0.143	52.742	0.535	-67.110
MN4	5.001	-87.651	4.285	-25.988	0.518	-84.616	0.902	20.267
Nu2	13.319	-56.057	7.270	-53.063	10.698	85.891	15.665	-24.714
S6	0.417	83.438	0.289	-78.199	0.124	6.527	0.215	-63.762
Mu2	27.103	-18.125	21.637	82.784	10.507	81.343	16.086	-14.554
2N2	8.517	-68.100	7.098	-32.697	8.293	52.310	11.161	-68.147
Oo1	3.760	-37.012	9.396	55.144	4.480	-42.404	3.797	72.286
Lam2	8.513	-35.762	3.598	-75.401	1.571	-80.900	2.875	34.655
S1	6.455	66.983	5.062	-16.183	2.132	-10.150	1.653	80.801
M1	11.402	-31.598	14.706	-61.944	9.304	15.436	11.387	17.955
J1	9.306	-25.384	13.310	-11.608	8.087	63.035	9.720	-10.975
Mm	4.341	-86.293	3.274	4.939	1.759	-54.955	1.610	63.724
MSf	11.342	-83.026	10.111	44.746	2.929	-5.187	4.490	73.081
Mf	3.883	21.009	10.204	43.520	5.358	-88.474	6.047	34.925
Rho1	4.933	27.821	7.185	-3.349	4.883	-76.297	6.592	5.709
Q1	28.604	65.298	39.293	-69.823	24.556	-87.484	32.502	-51.775
T2	6.295	0.149	5.146	49.031	5.819	-65.031	10.585	-60.687
R2	3.520	-86.921	1.311	-7.600	2.031	44.458	1.381	-68.606
2Q1	4.290	-32.178	5.492	-20.719	3.173	62.513	3.732	-46.488
P1	61.705	35.820	64.681	41.826	47.945	-31.132	62.357	19.756
2Sm2	4.288	74.251	3.031	15.252	0.374	8.096	1.154	61.116
M3	6.123	80.161	5.817	-26.698	5.135	37.481	6.915	-7.622
L2	13.916	-72.132	2.173	-14.913	4.580	-44.041	10.516	86.526
2MK3	3.090	-23.501	4.738	-68.704	0.780	-38.778	0.475	-46.864
K2	12.008	25.382	38.399	69.596	34.342	45.524	44.322	-2.958
M8	0.751	40.807	0.266	8.850	0.121	55.101	0.142	-56.980
MS4	7.871	64.084	7.578	-74.209	0.513	20.864	2.440	11.613

	花蓮 HL		石梯 ST		成功 CK		富岡 FG	
	振幅(mm)	相位(°)	振幅(mm)	相位(°)	振幅(mm)	相位(°)	振幅(mm)	相位(°)
M2	437.205	45.396	448.823	-6.284	489.473	-85.789	435.616	76.944
S2	190.248	67.552	198.942	-17.224	199.316	66.384	181.761	65.376
N2	87.222	-6.492	84.294	-67.569	96.742	23.697	84.380	-60.063
K1	152.082	-65.512	184.212	-43.723	168.089	-64.301	165.251	45.310
M4	6.291	65.375	5.323	-24.606	3.017	3.447	2.317	-53.721
O1	113.487	-0.343	61.352	-0.281	141.094	-0.047	104.944	-0.529
M6	74.087	89.545	145.686	-89.567	25.065	-87.978	117.829	89.927
MK3	1.280	59.799	0.623	-55.527	0.739	44.714	1.112	-72.762
S4	0.812	81.966	0.615	-27.302	0.421	-5.122	0.131	-71.251
MN4	1.940	43.952	2.249	-65.498	1.432	-44.915	0.849	31.232
Nu2	14.711	73.631	16.149	59.816	18.919	5.712	16.966	38.093
S6	0.253	-70.018	0.296	11.062	0.108	12.057	0.061	75.717
Mu2	14.646	33.204	13.503	-11.756	12.637	-60.047	12.529	83.776
2N2	12.568	-56.858	11.443	55.198	13.283	-42.509	11.999	-16.091
Oo1	4.697	56.570	6.925	6.666	3.972	18.811	3.950	44.732
Lam2	3.036	37.231	3.490	-83.460	3.582	-40.625	3.779	-50.292
S1	2.245	76.666	5.446	16.495	4.757	83.144	6.626	-88.229
M1	9.651	58.063	11.871	76.636	9.683	44.663	10.841	-88.360
J1	8.582	-17.724	10.428	7.080	8.908	1.686	8.320	-1.884
Mm	2.583	-10.399	4.291	-28.110	6.622	-43.652	4.806	-86.806
MSf	2.158	-28.827	5.525	87.101	5.197	-80.748	5.022	-67.113
Mf	6.164	-65.996	8.461	31.228	4.189	75.929	2.621	-73.311
Rho1	4.837	-11.484	6.457	-50.247	5.718	-80.181	5.703	11.735
Q1	29.123	-80.905	34.245	10.474	28.819	-58.823	30.915	-82.177
T2	13.802	15.875	16.464	51.732	14.135	14.449	13.490	-89.752
R2	4.546	-44.793	4.665	-55.747	2.126	-63.107	2.008	2.719
2Q1	3.878	50.081	4.356	-54.943	4.042	43.755	3.926	-34.187
P1	50.895	-15.586	55.276	58.132	57.096	-17.610	55.204	32.703
2Sm2	0.582	59.483	0.945	-65.013	1.179	-32.919	1.264	2.000
M3	6.175	-70.930	5.911	-71.663	6.442	-0.396	6.153	59.070
L2	11.885	-84.494	14.133	55.620	13.167	-14.550	11.626	36.037
2MK3	1.114	22.223	1.960	-14.914	1.491	17.435	2.263	79.110
K2	53.069	13.261	67.663	60.585	53.499	24.594	49.375	84.875
M8	0.264	67.742	0.108	25.151	0.047	-2.307	0.071	-6.121
MS4	3.958	46.186	3.207	-69.100	1.244	-69.285	0.933	81.295

	綠島 LD		大武 DW		蘭嶼 LY		後壁湖 HBH	
	振幅(mm)	相位(°)	振幅(mm)	相位(°)	振幅(mm)	相位(°)	振幅(mm)	相位(°)
M2	423.920	-9.896	376.190	-25.204	436.356	-54.086	260.585	77.130
S2	187.999	37.579	167.786	67.048	192.418	62.801	114.933	86.650
N2	84.014	-76.513	72.744	-27.899	86.510	84.263	52.659	37.593
K1	155.320	38.520	192.294	-52.092	141.137	82.544	225.992	-18.514
M4	4.824	3.727	1.356	41.164	4.569	13.985	4.138	81.219
O1	133.162	0.281	180.618	0.023	113.403	0.614	47.782	-1.292
M6	88.280	-89.530	84.003	-89.407	92.553	-88.963	201.623	-89.674
MK3	3.706	-38.228	3.166	14.889	2.323	-62.730	7.464	-82.740
S4	0.715	-55.125	0.386	29.633	0.865	57.399	1.340	11.325
MN4	2.402	-53.451	0.203	-58.281	2.028	-26.705	2.215	60.130
Nu2	15.482	-0.855	12.832	61.694	16.898	41.849	9.578	-77.210
S6	0.304	-17.820	0.180	3.441	0.144	-47.028	0.410	30.738
Mu2	13.018	-64.888	12.317	57.416	13.650	-4.474	9.397	75.233
2N2	11.279	41.607	9.612	-32.527	12.111	48.899	7.468	7.422
Oo1	5.020	-56.521	6.818	39.985	4.625	-68.954	5.090	44.503
Lam2	3.483	-27.149	0.953	56.493	4.849	20.536	2.677	54.899
S1	6.726	-49.725	0.822	-25.079	6.020	37.746	4.666	53.758
M1	10.521	-32.288	13.321	-51.347	8.176	46.667	13.239	-49.413
J1	8.396	-87.165	9.986	-58.385	7.283	-64.689	11.018	5.946
Mm	5.103	-5.450	3.601	-71.186	8.425	-73.952	3.388	-39.550
MSf	4.222	25.737	2.495	42.915	3.000	-65.757	3.566	-61.601
Mf	5.859	81.271	8.832	54.699	3.311	82.287	12.637	7.734
Rho1	6.325	-15.704	8.409	-64.564	5.190	-32.204	8.073	-69.689
Q1	32.566	88.996	40.851	35.162	31.096	7.265	43.581	48.911
T2	12.873	-35.476	11.232	-18.892	12.938	21.462	8.951	-31.151
R2	1.934	-50.213	2.857	86.480	6.946	-65.374	0.422	-3.722
2Q1	4.299	29.591	5.652	32.314	4.045	-23.691	4.848	20.473
P1	47.479	17.486	56.508	-67.590	44.536	-27.396	71.874	71.722
2Sm2	1.194	52.006	1.170	63.583	1.455	-77.184	0.998	4.399
M3	6.022	19.636	6.296	-89.788	5.301	46.385	3.930	66.965
L2	11.311	56.726	10.417	-19.081	13.620	-13.595	6.181	-66.248
2MK3	4.722	80.147	3.444	-54.292	3.210	-78.934	5.724	16.497
K2	62.247	63.352	57.005	85.698	71.200	-9.100	32.617	5.500
M8	0.137	-3.170	0.127	27.247	0.676	-80.846	0.114	-49.591
MS4	3.287	34.975	1.134	2.749	3.068	-61.085	2.384	63.322

	螺廣嘴 SGZ		東港 DG		高雄 KS		安平 AP	
	振幅(mm)	相位(°)	振幅(mm)	相位(°)	振幅(mm)	相位(°)	振幅(mm)	相位(°)
M2	204.220	-48.182	207.951	18.357	179.845	-32.146	246.977	-51.943
S2	90.928	-6.174	70.398	34.172	68.846	39.341	59.853	-2.619
N2	41.432	-58.204	46.200	77.998	41.246	49.741	55.631	76.392
K1	205.118	2.573	211.752	-11.489	171.123	-7.925	205.183	-3.042
M4	2.540	-68.610	4.022	3.568	2.083	-24.283	7.365	49.337
O1	24.342	2.450	199.863	0.227	81.418	-0.067	169.349	-0.787
M6	165.293	89.387	24.320	83.774	132.694	-88.972	91.690	89.346
MK3	2.329	49.130	1.193	-46.634	1.170	14.900	0.350	-30.378
S4	0.232	-21.642	1.311	65.392	0.264	62.964	1.017	84.624
MN4	1.050	-57.956	2.049	70.506	0.900	46.151	3.044	-7.348
Nu2	6.283	-80.137	10.178	-43.316	8.373	1.503	12.817	-29.235
S6	0.159	9.127	0.221	-86.268	0.216	76.591	0.403	25.696
Mu2	9.141	-76.206	6.337	-84.288	7.898	-45.944	10.577	40.430
2N2	5.340	-57.359	7.083	-33.584	6.531	-39.199	8.148	30.907
Oo1	3.314	70.090	4.445	-37.588	2.227	45.933	6.282	12.183
Lam2	0.487	-68.336	3.232	-10.725	1.015	26.744	5.441	46.837
S1	2.884	-62.959	4.424	-78.517	4.042	85.667	4.238	-47.514
M1	10.238	0.978	13.801	59.600	10.305	84.882	14.435	-58.716
J1	7.926	-3.633	7.835	-68.075	7.033	-87.166	10.406	54.560
Mm	4.549	-58.066	5.517	-67.796	4.828	69.489	9.046	-5.926
MSf	4.616	-45.761	5.276	-50.613	2.934	-27.337	0.611	-64.924
Mf	1.556	26.818	1.301	-25.236	1.649	86.973	0.475	-39.243
Rho1	7.467	65.113	7.261	-54.056	5.521	-5.864	7.249	14.855
Q1	33.124	80.903	39.871	63.362	31.667	32.871	38.777	-81.115
T2	7.098	-40.039	4.156	69.384	4.107	53.233	3.511	20.730
R2	2.516	71.623	5.371	-69.985	0.908	0.552	3.430	1.888
2Q1	4.465	86.483	4.866	-64.796	3.880	-62.491	4.653	40.752
P1	70.180	-71.627	61.010	-23.845	57.541	-20.177	61.344	-11.812
2Sm2	1.389	34.243	1.541	32.344	1.064	74.015	1.824	76.302
M3	3.961	58.110	3.288	-67.138	3.921	23.428	3.237	42.734
L2	4.374	-35.762	4.768	-85.135	2.787	36.150	11.397	-44.012
2MK3	0.474	10.696	2.088	82.157	3.081	-76.136	0.585	-69.660
K2	20.547	66.570	25.901	52.121	17.803	51.246	19.688	2.376
M8	0.160	-26.606	0.262	56.995	0.201	-17.831	0.197	62.776
MS4	1.429	-51.684	2.843	-12.414	1.937	12.412	6.115	62.293

	將軍 JG		箔子寮 BZL		臺中 TC		新竹 HC	
	振幅(mm)	相位(°)	振幅(mm)	相位(°)	振幅(mm)	相位(°)	振幅(mm)	相位(°)
M2	491.913	-42.444	1058.313	-55.283	1771.587	76.744	1648.178	-55.301
S2	106.459	-76.921	277.126	-63.573	514.769	85.595	467.095	-89.555
N2	95.502	46.611	198.643	18.496	325.715	-58.949	308.787	32.165
K1	201.832	-32.771	237.693	-72.244	256.202	31.214	222.898	-7.739
M4	25.103	-51.422	50.479	-41.387	13.620	20.709	24.540	87.691
O1	121.425	-2.172	21.412	71.084	187.375	1.681	69.142	-5.415
M6	129.480	89.979	205.165	88.256	120.515	82.114	167.256	89.495
MK3	7.469	1.933	12.838	-20.850	12.614	-82.159	7.215	85.500
S4	2.413	51.200	5.261	-54.986	0.792	62.812	2.179	-4.399
MN4	9.489	33.802	18.776	33.623	4.653	71.084	9.029	-8.977
Nu2	25.023	-88.484	55.861	64.630	88.954	29.246	82.592	76.102
S6	0.228	0.182	0.348	39.317	0.374	73.790	0.580	-41.137
Mu2	23.839	-14.594	52.235	-38.626	78.141	77.201	71.713	-14.692
2N2	11.493	-46.824	21.139	-89.676	31.333	-6.648	37.099	-57.671
Oo1	4.245	50.933	6.362	-73.024	8.945	71.464	4.628	52.293
Lam2	12.279	-18.608	25.031	-2.858	45.623	-68.435	39.832	-21.564
S1	5.853	64.846	2.755	29.434	2.721	71.089	3.457	-58.328
M1	11.329	46.637	15.579	-10.081	18.298	60.076	13.320	64.316
J1	10.340	66.133	11.986	33.349	14.518	-16.793	10.725	78.720
Mm	1.974	61.241	4.195	-35.026	2.546	26.641	4.926	79.543
MSf	4.312	-37.967	4.582	-1.591	4.570	64.255	6.858	19.420
Mf	1.792	-23.792	4.038	-83.363	2.839	-22.218	4.032	-28.355
Rho1	6.632	0.442	7.857	29.446	9.117	-78.532	7.165	16.585
Q1	35.785	-50.166	41.837	-19.310	44.984	6.380	35.871	-30.972
T2	11.172	-24.678	26.406	-45.850	39.617	86.691	33.067	-49.262
R2	3.993	-84.679	7.455	-5.082	10.570	-9.632	6.429	-81.971
2Q1	5.183	31.065	5.060	42.729	5.496	47.762	4.034	48.850
P1	64.780	13.989	74.085	84.379	79.585	-21.451	74.089	37.993
2Sm2	5.095	2.512	10.313	68.261	18.565	54.099	14.867	10.032
M3	2.341	-10.413	3.498	-64.195	6.589	-29.456	5.123	4.789
L2	26.247	32.223	59.280	45.321	92.415	22.849	90.114	25.066
2MK3	7.524	79.022	12.912	-45.215	11.529	61.509	6.071	-0.025
K2	31.029	60.787	80.533	-39.508	156.675	-40.002	113.838	46.317
M8	0.710	61.992	1.449	81.666	0.672	-11.678	1.114	-1.559
MS4	17.060	86.576	34.619	-50.759	7.344	25.925	16.366	46.258

	竹園 JW		淡水 DS		澎湖 PH	
	振幅(mm)	相位(°)	振幅(mm)	相位(°)	振幅(mm)	相位(°)
M2	1188.655	2.624	1039.112	81.673	895.036	-15.831
S2	343.027	36.128	291.669	-51.650	232.510	46.582
N2	225.743	-34.482	198.073	-15.060	169.387	-87.151
K1	227.484	20.883	214.559	50.176	248.436	41.839
M4	21.710	-29.946	26.795	-83.050	66.300	48.903
O1	68.104	-2.924	172.092	-1.149	201.121	-1.076
M6	183.272	-89.881	52.241	89.283	84.793	-88.141
MK3	6.690	-11.143	4.541	-61.412	15.036	-49.684
S4	2.304	39.664	2.501	13.744	5.670	10.875
MN4	7.653	-72.460	9.857	-7.768	25.020	-23.357
Nu2	61.574	13.885	52.805	-41.300	46.464	-3.615
S6	0.142	77.371	0.241	-46.071	0.184	-8.610
Mu2	53.512	-30.633	48.192	31.609	45.591	-71.567
2N2	27.519	-67.246	26.512	72.149	23.068	23.030
Oo1	7.251	-89.292	5.629	-83.617	6.937	38.044
Lam2	29.853	-26.987	25.814	1.287	22.486	-36.015
S1	3.246	-56.225	1.536	-44.012	2.881	-75.606
M1	14.360	-35.355	12.610	-63.042	14.804	-40.618
J1	11.412	56.403	11.216	-33.901	11.992	-64.897
Mm	4.077	-46.104	2.376	7.559	7.379	-22.417
MSf	13.348	89.382	10.699	-55.048	8.000	-13.269
Mf	7.564	-65.516	7.725	-85.319	4.961	57.944
Rho1	8.119	-53.936	7.180	41.602	8.380	31.996
Q1	38.978	66.381	36.158	59.984	43.131	-54.445
T2	22.953	15.160	19.962	-49.997	22.785	12.479
R2	3.431	-54.122	4.391	-42.580	7.884	-10.639
2Q1	4.651	20.595	4.644	-44.083	5.072	36.583
P1	71.132	-36.529	68.827	34.610	77.260	86.909
2Sm2	13.533	10.114	10.937	-62.994	10.269	79.863
M3	4.618	60.415	4.374	72.770	2.528	9.283
L2	61.348	24.875	53.815	-17.667	51.639	50.051
2MK3	5.693	82.557	4.243	38.639	14.903	-74.233
K2	101.003	-86.666	78.998	-31.912	68.735	0.848
M8	0.293	-1.009	1.624	-5.852	1.580	-15.675
MS4	15.893	2.282	18.423	-34.813	43.192	-64.953