

104-003-7786

MOTC-IOT-103-H3DB003a

臺灣四周海域長期性之海水面 變化趨勢評估



交通部運輸研究所

中華民國 104 年 3 月

104-003-7786

MOTC-IOT-103-H3DB003a

臺灣四周海域長期性之海水面 變化趨勢評估

著者：郭重言、林立青、藍文浩、莊文傑、李俊穎

交通部運輸研究所

中華民國 104 年 3 月

104 臺灣四周海域長期性之海水面變化趨勢評估

交通部運輸研究所

GPN : 1010400139

定價 250 元

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

臺灣四周海域長期性之海水面變化趨勢評估 /
郭重言等著.-- 初版.-- 臺北市：交通部運研所，
民 104.03
面；公分
ISBN 978-986-04-4248-9(平裝)

1.海洋水文學 2.臺灣

351.93

104001343

臺灣四周海域長期性之海水面變化趨勢評估

著 者：郭重言、林立青、藍文浩、莊文傑、李俊穎
出版機關：交通部運輸研究所
地 址：10548 臺北市敦化北路 240 號
網 址：www.ihmt.gov.tw (中文版/中心出版品)
電 話：(04) 26587176
出版年月：中華民國 104 年 3 月
印 刷 者：九易數碼科技印刷有限公司
版(刷)次冊數：初版一刷 70 冊
本書同時登載於交通部運輸研究所臺灣技術研究中心網站
定 價：250 元
展 售 處：
交通部運輸研究所運輸資訊組•電話：(02)23496880
國家書店松江門市：10485 臺北市中山區松江路 209 號 F1•電話：(02)25180207
五南文化廣場：40042 臺中市中山路 6 號•電話：(04)22260330

GPN：1010400139

ISBN：978-986-04-4248-9 (平裝)

著作財產權人：中華民國(代表機關：交通部運輸研究所)

本著作保留所有權利，欲利用本著作全部或部份內容者，須徵求交通部運輸研究所書面授權。

交通部運輸研究所合作研究計畫出版品摘要表

出版品名稱：臺灣四周海域長期性之海水面上升變化趨勢評估			
國際標準書號 ISBN978-986-04-4248-9 (平裝)	政府出版品統一編號 1010400139	運輸研究所出版品編號 104-003-7786	計畫編號 103-H3DB003a
本所主辦單位：港研中心 主管：邱永芳 計畫主持人：莊文傑 研究人員：李俊穎 聯絡電話：04-26587185 傳真號碼：04-26564415	合作研究單位：財團法人成大研究發展基金會 計畫主持人：郭重言 計畫協同主持人：林立青 專任研究助理：藍文浩 地址：701 台南市大學路 1 號 聯絡電話：06-2757575 轉 63826	研究期間 自 103 年 2 月 至 103 年 12 月	
關鍵詞：海水面上升、測站地表垂直變動、衛星測高、潮位站			
<p>報告內容重點摘要：</p> <p>近年來全球海水面上升為全球氣候暖化衍伸出的重要問題之一，然而全球各區域海水面上升速率並非一致，且臺灣四周海域之海水面上升速率較全球平均快。此外，臺灣為海島型國家，主要經濟發展與人口皆集中於沿海地區，因此臺灣受到海水面上升之影響相較於世界其他地區顯得更為嚴重，故精確估計臺灣周圍海域之絕對海水面上升速率，以及了解臺灣附近海水面上升的主要原因為兩個相當重要課題。一般而言，研究海水面上升之兩種主要觀測量為潮位站與衛星測高資料，而前人利用潮位站資料研究臺灣海水面上升之相關成果中皆未完全考慮海潮、逆氣壓、基準偏移和測站地表垂直變動等影響因素。因此，本研究將結合近二十年(1993-2012)衛星測高與潮位站資料，評估上述四項改正對於海水面上升速率之影響，並分析臺灣周圍潮位站地表垂直變動情形。最後利用已改正的潮位站和衛星測高資料，評估臺灣四周海域近二十年絕對海水面上升速率，並分析臺灣周圍海域海水面上升的主要原因。</p> <p>研究結果顯示，基準偏移改正與潮位站地表垂直變動改正對於近二十年潮位站資料估算海水面上升速率之影響最為顯著，偏移量改正影響量平均值為 23 mm/yr，測站地表垂直變動改正影響量平均值約 4~5 mm/yr。因此，若應用未經偏移量和測站地表垂直變動改正的潮位站資料進行臺灣周圍海水面上升速率估算，將造成嚴重誤差。由衛星測高與潮位站資料估算近二十年測站地表垂直變動速率之成果顯示，臺灣本島、橫瀾島與馬尼拉潮位站呈現地表下降之情形，其中臺灣西南部為下沉最顯著之區域，東石與塭港潮位站之地表每年約 23-27 mm 下沉量。</p> <p>本研究依據潮位站位置，將臺灣周圍海域劃分為五個區域並估算各區域內絕對海水面上升速率，由衛星測高與潮位站資料估算結果顯示，臺灣周圍海域的絕對海水面上升變化主要呈現上升現象，上升速率由北向南遞增，臺灣北部絕對海水面上升速率為 2.0~3.1 mm/yr，臺灣南部為 2.3~3.4 mm/yr，往南至菲律賓地區則變為 5.8~7.5mm/yr。衛星測高資料估算整個臺灣四周（緯度：10°N~30°N、經度：110°E~130°E）近二十年海水面上升變化則以 4.4~5.2 mm/yr 的速率在上升。</p> <p>經由比較臺灣周圍海域近二十年(1993-2012)衛星測高絕對海水面上升變化與溫鹽比容海水面上升變化後可知，絕對海水面上升變化與比容海水面上升變化在年週期到多年週期訊號上呈現高相關（相關係數≥ 0.9），近二十年之比容海水面上升速率雖然持續上升，但從 2008 年臺灣周圍比容海水面上升速率已開始減緩。比較臺灣周圍海域近十年（2003-2011）衛星測高絕對海水面上升變化、重力反演和氣候實驗(GRACE)重力衛星海水質量、溫鹽比容海平面變化得知，近十年比容海平面與海洋質量速率亦持續上升，兩者分別約占海水面上升的 30%~40%與 25%，但仍有 40%~50%的海水面上升速率無法解釋，可能的原因為缺乏深海之實測比容海水面上升變化資料或資料本身和改正不正確所致。</p>			

研究成果之效益：

- (1) 學術成就(科技基礎研究)方面：發表國內研討會論文 1 篇；出版研究報告 1 冊。
- (2) 技術創新(科技整合創新)方面：引進及應用國際培訓資源，建置專業整合環境，強化國際互動機制，從海洋到海岸，整合衛星測高、地科及大氣之科研成果，提昇海洋科技—藍色科技之科研能力，落實跨領域之合作研究，堅實科技人力資源，統合 PSMSL、UHSLC 與中央氣象局之臺灣環島近岸驗潮站資料庫及 ECMWF、NCEP 及中央氣象局之大氣壓力等海洋物理資料庫，並將相關資料成功應用於分析臺灣近岸海域的平均海平面升降變動率，並分區提供詳實地殼板塊擠壓之造山陸昇與地層下陷的地殼垂直變動率資訊。
- (3) 在經濟效益(經濟產業促進)方面：提供政府及業界掌握臺灣近岸海域長年期(近二十年)詳實的平均海平面升降變動率特性，可促進都市防洪、排水之規劃、設計及維護工程提昇效能，有效因應全球暖化所造成的氣候變遷課題，強化防災、減災與救災資訊，敦節實施全面監測之人力及物力之投注成本。
- (4) 在社會影響(社會福祉提升、環保安全)方面：透過詳實的平均海平面升降變動率特性，反饋及確認全球暖化、氣候變遷所造成的影響，減少人為溫室效應，達成海岸保育與永續利用之目標。
- (5) 在其它效益(政策管理及其它)方面：具體配合政府推展「海洋國家」之策略目標，落實海洋經理政策，補充既有海象監測及防災資料庫之完整，強化因應全球暖化、氣候變遷課題之決策資訊，厚植近岸防災預警與風險管理機制之關鍵技術，提升近岸海域災害應變與預警能力，精進災害風險評估系統，強化救災及預警科技之評估效能及應用。

可供本所或其他政府機關後續應用情形：

本研究結合國際海洋科學資源，擴展海岸科技學能，強化跨領域之合作研究，堅實科技人力資源，在國內自力完成詳實的平均海平面升降變動率與地殼垂直變動率(地殼板塊擠壓之造山陸昇與地層下陷)分析。相關成果可提供交通部、環資部、內政部、本所、各港務分公司、經濟部水利署、各工程顧問公司等相關產、官、學、研單位從事海岸開發、港灣規劃、設計、擴建及維護的應用參考；推動並落實總體性之海岸保育與防災策略。

出版日期	頁數	定價	本 出 版 品 取 得 方 式
104 年 3 月	166	250	凡屬機密性出版品均不對外公開。普通性出版品，公營、公益機關團體及學校可函洽本所免費贈閱；私人及私營機關團體可按定價價購。

機密等級：

密 機密 極機密 絕對機密

(解密條件： 年 月 日解密，公布後解密，附件抽存後解密，

工作完成或會議終了時解密，另行檢討後辦理解密)

普通

備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。

**PUBLICATION ABSTRACTS OF RESEARCH PROJECTS
INSTITUTE OF TRANSPORTATION
MINISTRY OF TRANSPORTATION AND COMMUNICATIONS**

TITLE: Assessment of long-term sea level changes around Taiwan			
ISBN 978-986-04-4248-9 (pbk)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1010400139	IOT SERIAL NUMBER 104-003-7786	PROJECT NUMBER 103-H3DB003a
DIVISION: Harbor & Marine Technology Center DIVISION DIRECTOR: Chiu Yung-fang PRINCIPAL INVESTIGATOR: Juang Wen-jye PROJECT STAFF: Lee Chun-ying PHONE: (04) 26587185 FAX: (04) 26564415			PROJECT PERIOD FROM February 2014 TO December 2014
RESEARCH AGENCY: NCKU Research and Development Foundation PRINCIPAL INVESTIGATOR: Kuo Chung-yen CO-PRINCIPAL INVESTIGATOR: Lin Li-ching RESEARCH ASSISTANT: Lan Wen-hau ADDRESS: No.1, University Rd., Tainan 701, Taiwan PHONE: 06-2757575 ext 63826			
KEY WORDS: Sea level change, Vertical motion, Satellite altimetry, Tide gauge			
ABSTRACT: <p>In recent years, global sea level rise resulting from global warming has been one of the highly respected issues. Since the rates of sea level changes are not uniform in global oceans and sea level trend around Taiwan has risen faster than global averaged trend, it is not reasonable to consider Taiwan and global averaged sea level trends are identical. On the other hand, Taiwan is an island country and the main population and developed cities are mostly located near the coastlines, so global sea level rise may more severely threaten Taiwan compared with other countries. Therefore, accurate estimation of sea level rise and understanding of the contributions to sea level rise around Taiwan are both extremely important in this project. Traditionally, tide gauges and satellite altimetry are the common instruments used to determine the sea level change; however, the effects of ocean tide, inverted barometer, relative bias, vertical motion were not completely taken into account to correct the tide gauge records for Taiwan sea level determination in previous studies. In the study, we will analyze the effects of these corrections on two-decadal (1993-2012) sea level trends derived from tide gauges around Taiwan by combining satellite altimetry. Vertical motions at tide gauge sites will also be estimated through the combination of tide gauge and satellite altimetry data. Finally, the absolute sea level trends around Taiwan are determined using the corrected tide gauge records and satellite altimetry data. In addition, we will also focus on the contributions of sea level rise around Taiwan.</p> <p>In this study, we find out that the relative bias and vertical motion have a significant impact on the determination of sea level trends compared with ocean tide and inverted barometer. The averages of relative bias and vertical motions at tide gauges are 23 <i>mm/yr</i> and 4~5 <i>mm/yr</i>, respectively, meaning they have to be corrected in tide gauge records for estimating absolute sea level trend around Taiwan. The results of estimated vertical motions at tide gauges around Taiwan, Waglan Island and Manila show that the land generally subsided during the past two decades and the southwestern area of Taiwan has larger rates of subsidence, especially at Wengang and Dongshi tide gauge stations with a rate of 23-27 <i>mm/yr</i>.</p> <p>The absolute sea level trends in five regions around Taiwan are all positive and increase gradually from the north of Taiwan with a rate of 2.0~3.1 <i>mm/yr</i> to the south of</p>			

Taiwan at 2.3~3.4 *mm/yr* and become larger at 5.8~7.5 *mm/yr* near the Philippines. The absolute sea level trend derived from altimetry data in the region of latitude 10°N~30°N and longitude 110°E~130°E during the past two decades is 4.4~5.2 *mm/yr*.

In order to comprehend the contribution factor of sea level rise, altimetry-derived sea level change, GRACE-derived ocean mass change, and steric sea level change derived from ocean temperature and salinity data around Taiwan are also investigated in the study. Results show absolute sea level and steric sea level are highly correlated with all correlation coefficients ≥ 0.9 and steric sea level has been increasing on average in the past two decades (1993-2012) but with a slightly decreasing trend after 2008. Steric sea level and ocean mass have been increasing during 2003-2012. Steric sea level and ocean mass changes could contribute about 30%~37% and 24%~25% to total sea level, respectively, but 40%~50% of the sea level budget still remains unexplained and may be caused by not taking deep-ocean steric sea level or the errors of measurements and corrections into consideration.

DATE OF PUBLICATION March 2015	NUMBER OF PAGES 166	PRICE 250	CLASSIFICATION <input type="checkbox"/> RESTRICTED <input type="checkbox"/> CONFIDENTIAL <input type="checkbox"/> SECRET <input type="checkbox"/> TOP SECRET <input checked="" type="checkbox"/> UNCLASSIFIED
-----------------------------------	------------------------	--------------	--

The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.

臺灣四周海域長期性之海水面變化趨勢評估

目 錄

中文摘要	I
ABSTRACT	III
表目錄	VIII
圖目錄	XI
第一章 緒論	1-1
1.1 研究動機與目的	1-1
1.2 本計畫之流程	1-9
1.3 本文架構	1-10
第二章 研究資料	2-1
2.1 衛星測高	2-1
2.2 潮位站	2-9
2.3 重力反演和氣候實驗(GRACE)重力衛星	2-18
2.3.1 重力反演和氣候實驗(GRACE)衛星介紹	2-18
2.3.2 重力反演和氣候實驗(GRACE)重力衛星觀測原理	2-21
2.3.3 去相關演算法	2-22
2.3.4 高斯濾波	2-24
2.3.5 洩漏效應	2-24
2.3.6 海水質量變化計算	2-25
2.4 溫度與鹽度資料	2-27
第三章 潮位站資料改正	3-1

3.1 海潮改正	3-1
3.2 逆氣壓改正	3-4
3.3 偏移量改正	3-7
3.4 潮位站地表垂直變動改正	3-18
3.4.1 潮位站地表垂直變動速率	3-18
3.4.2 衛星測高資料與潮位站資料之相關性	3-19
3.4.3 近二十年潮位站地表垂直變動速率	3-24
3.4.4 近十年與近二十年潮位站之地表垂直變動速率	3-28
3.4.5 估算之地表垂直變動速率與全球衛星定位系統和水準資料成果比較	3-33
3.5 中央氣象局潮位站資料之改正流程	3-37
3.6 間接平差	3-39
第四章 臺灣四周海域近二十年之絕對海水面上升速率	4-1
4.1 改正前後海水位上升速率之差異	4-2
4.2 絕對海面水位昇降變動速率	4-8
4.2.1 近二十年絕對海水面上升速率	4-9
4.2.2 估算之絕對海水面上升速率與前人研究成果比較	4-15
4.2.3 臺灣周圍海域海水面上升速率之原因	4-17
第五章 結論與建議	5-1
5.1 結論	5-1
5.2 建議	5-4
參考文獻	參-1
附錄一 潮汐分潮週期	附錄 1-1

附錄二 調和分析	附錄 2-1
附錄三 期中報告審查意見處理情形表	附錄 3-1
附錄四 期末報告審查意見處理情形表	附錄 4-1
附錄五 期末簡報	附錄 5-1

表目錄

表 2.1 衛星測高基本資料表.....	2-3
表 2.2 本計畫採用之衛星測高資料改正模型.....	2-9
表 2.3 臺灣附近海域平均海平面永久服務中心資料庫之潮位站資訊	2-13
表 2.4 臺灣附近海域平均海平面永久服務中心與夏威夷大學海水位中心 的潮位站資料之相關係數.....	2-13
表 2.5 臺灣附近海域夏威夷大學海水位中心資料庫之潮位站資訊 .	2-14
表 2.6 臺灣附近海域中央氣象局資料庫之潮位站資訊.....	2-14
表 3.1 平均海平面永久服務中心潮位站資料與對應的衛星測高資料之 相關係數.....	3-23
表 3.2 夏威夷大學海水位中心潮位站資料與對應的衛星測高資料之相 關係數.....	3-23
表 3.3 中央氣象局潮位站資料與對應的衛星測高資料之相關係數 .	3-24
表 3.4 平均海平面永久服務中心潮位站垂直變動速率.....	3-25
表 3.5 夏威夷大學海水位中心基隆與高雄潮位站垂直變動速率	3-25
表 3.6 中央氣象局潮位站垂直變動速率.....	3-26
表 3.7 平均海平面永久服務中心潮位站之近十年與近二十年之地表垂 直變動速率.....	3-31
表 3.8 美國夏威夷大學海水位中心基隆與高雄潮位站之近十年與近二 十年之地表垂直變動速率.....	3-32
表 3.9 中央氣象局潮位站近十年與近二十年之地表垂直變動速率 .	3-32
表 3.10 估算之潮位站地表垂直變動速率與全球衛星定位系統成果比較	

.....	3-36
表 3.11 估算之潮位站地表垂直變動速率與水準成果比較.....	3-37
表 3.12 地表垂直變動量.....	3-41
表 4.1 平均海平面永久服務中心潮位站資料經各項改正後所估算之海 水面上升速率.....	4-3
表 4.2 平均海平面永久服務中心潮位站資料經各項改正後所估算之海 水面上升速率.....	4-4
表 4.3 夏威夷大學海水位中心基隆與高雄潮位站資料經各項改正後所 估算之海水面上升速率.....	4-4
表 4.4 夏威夷大學海水位中心基隆與高雄潮位站資料經各項改正後所 估算之海水面上升速率.....	4-5
表 4.5 中央氣象局潮位站資料經各項改正後所估算之海水面上升速率	4-5
表 4.6 中央氣象局潮位站資料經各項改正後所估算之海水面上升速率	4-5
表 4.7 平均海平面永久服務中心潮位站固定範圍之海水面上升速率	4-12
表 4.8 夏威夷大學海水位中心潮位站固定範圍之海水面上升速率 .	4-12
表 4.9 中央氣象局潮位站固定範圍之海水面上升速率.....	4-12
表 4.10 台灣五大商港之近十年與近二十年絕對海水面上升速率比較	4-14
表 4.11 台灣周圍各海域近十年與近二十年絕對海水面上升速率 ...	4-15
表 4.12 估算之海水面上升速率與前人研究成果比較.....	4-17

表 4.13 台灣附近海域比容海水面變化、海水質量變化與絕對海水面上 升速率	4-19
---	------

圖目錄

圖 1.1 計畫流程圖	1-8
圖 2.1 Skylab 衛星照片	2-2
圖 2.2 測高衛星之軌道誤差比較	2-2
圖 2.3 測高衛星基本觀測原理	2-6
圖 2.4 高雄潮位站周圍半徑經緯度 2° 之範圍與 T/P 測高資料之地面軌跡	2-8
圖 2.5 潮位站觀測海水面示意圖	2-10
圖 2.6 臺灣附近海域之潮位站分佈圖	2-15
圖 2.7 平均海平面永久服務中心之修正地方基準和 Metric 潮位站資料比較圖	2-15
圖 2.8 平均海平面永久服務中心與夏威夷大學海水位中心之潮位站資料比較圖	2-16
圖 2.9 中央氣象局之基隆潮位站資料比較圖	2-16
圖 2.10 中央氣象局之台中海平面氣壓觀測站資料	2-17
圖 2.11 重力反演和氣候實驗重力衛星示意圖	2-20
圖 2.12 重力反演和氣候實驗球諧係數之誤差	2-23
圖 2.13 重力反演和氣候實驗重力場解計算之海洋質量	2-25
圖 2.14 重力反演和氣候實驗重力場解計算質量變化流程圖	2-26
圖 3.1 基隆潮位站之海潮效應改正	3-3
圖 3.2 高雄潮位站之海潮效應改正	3-3
圖 3.3 海潮改正前後之基隆與高雄潮位站資料差異圖	3-4

圖 3.4 歐洲中期天氣預報中心全球月平均海水面平均壓力.....	3-5
圖 3.5 基隆潮位站之逆氣壓效應改正.....	3-6
圖 3.6 高雄潮位站之逆氣壓效應改正.....	3-6
圖 3.7 中央氣象局基隆潮位站之季節性訊號移除.....	3-10
圖 3.8 中央氣象局高雄潮位站之季節性訊號移除.....	3-10
圖 3.9 基隆潮位站之偏移量偵測.....	3-11
圖 3.10 高雄潮位站之偏移量偵測.....	3-11
圖 3.11 橫瀾島潮位站資料偏移量偵測.....	3-12
圖 3.12 宿霧潮位站資料與其 2° 範圍內之衛星測高海水面變化	3-12
圖 3.13 夏威夷大學海水位中心的基隆潮位站資料偏移量偵測	3-14
圖 3.14 夏威夷大學海水位中心的高雄潮位站資料偏移量偵測	3-14
圖 3.15 夏威夷大學海水位中心與中央氣象局基隆潮位站資料比較圖	3-15
圖 3.16 中央氣象局的基隆潮位站資料偏移量改正.....	3-16
圖 3.17 中央氣象局的高雄潮位站資料偏移量改正.....	3-17
圖 3.18 中央氣象局的基隆潮位站資料偏移量改正.....	3-17
圖 3.19 中央氣象局的高雄潮位站資料偏移量改正.....	3-17
圖 3.20 馬尼拉潮位站之地表垂直變動訊號.....	3-18
圖 3.21 衛星海洋數據存檔、驗正與解釋衛星測高資料與平均海平面永久服務中心和夏威夷大學海水位中心潮位站資料之相關係數	3-20

圖 3.22 雷達測高資料收集衛星測高資料與平均海平面永久服務中心和 夏威夷大學海水位中心潮位站資料之相關係數.....	3-20
圖 3.23 衛星海洋數據存檔、驗正與解釋衛星測高資料分別與平均海平 面永久服務中心、夏威夷大學海水位中心和中央氣象局潮位站資料之 相關係數.....	3-21
圖 3.24 雷達測高資料收集衛星測高資料分別與平均海平面永久服務 中心、夏威夷大學海水位中心和中央氣象局潮位站資料之相關係數	3-22
圖 3.25 平均海平面永久服務中心、夏威夷大學海水位中心與中央氣象 局的高雄潮位站資料比較圖.....	3-26
圖 3.26 中央氣象局高雄潮位站資料分別與平均海平面永久服務中心 和夏威夷大學海水位中心的高雄潮位站資料比較圖.....	3-27
圖 3.27 中央氣象局高雄潮位站資料分別與平均海平面永久服務中心 和夏威夷大學海水位中心的高雄潮位站資料比較圖.....	3-27
圖 3.28 潮位站近二十年之地表垂直變動速率圖.....	3-28
圖 3.29 平均海平面永久服務中心潮位站之近十年與近二十年地表垂 直變動成果.....	3-30
圖 3.30 美國夏威夷大學海水位中心與中央氣象局潮位站之近十年與 近二十年地表垂直變動速率.....	3-31
圖 3.31 坎門潮位站地表垂直變動訊號.....	3-32
圖 3.32 黎牙實比與宿霧潮位站地表垂直變動訊號.....	3-33
圖 3.33 估算之潮位站地表垂直變動速率、全球衛星定位系統成果與水 準點成果比較.....	3-35

圖 3.34 估算之潮位站地表垂直變動速率、全球衛星定位系統成果與水準點成果比較.....	3-36
圖 3.35 五大商港之地表垂直變動訊號與擬合之垂直變動速率	3-38
圖 3.36 地表垂直變動量圖	3-42
圖 3.37 地表垂直變動量與估算之垂直變動速率圖.....	3-43
圖 4.1 原始與改正後平均海平面永久服務中心潮位站資料所估算之海水面上升速率與標準偏差.....	4-6
圖 4.2 原始與改正後夏威夷大學海水位中心與中央氣象局潮位站資料後所估算之海水面上升速率與標準偏差.....	4-6
圖 4.3 各項改正對於平均海平面永久服務中心潮位站資料進行海水面上升速率計算之影響量.....	4-7
圖 4.4 各項改正對於夏威夷大學海水位中心與中央氣象局潮位站資料估算海水面上升速率之影響量.....	4-7
圖 4.5 臺灣周圍絕對海水面上升速率.....	4-10
圖 4.6 臺灣周圍絕對海水面上升速率.....	4-11
圖 4.7 台灣周圍海域潮位站之分佈與分區圖.....	4-15
圖 4.8 台灣周圍比容海水面變化、海水質量變化與絕對海水面變化	4-20
圖 4.9 台灣周圍絕對海水面變化.....	4-21

第一章 緒論

1.1 研究動機與目的

過去的數十年間，由於全球暖化衍生出許多氣候變遷問題，其中海水面上升(sea level rise)與其他環境變遷息息相關，例如南北極冰原融化和海水溫度上升，海水面上升將造成嚴重之災害已引起產學各界關注。海水面變化所包含的訊息十分廣泛，它與社會、經濟、環境等方面皆息息相關，舉例來說，在中太平洋海域發生的聖嬰與反聖嬰現象就和此有高度相關。距今約 21000 年前為末次冰盛期(last glacial maximum)，當時海水面比現今低了約 125 公尺，紐奧良和邁阿密等沿海都市不像今日緊鄰海邊，海岸線較現今往海洋多延伸了數百公里。全球海水面上升被廣泛認為是可量測的訊號[Wilson *et al.*, 2011]，且主要由人為造成之全球暖化所致[Cazenave and Remy, 2011; Shum and Kuo, 2011]。近年來研究指出二十世紀全球海水面上升速率每年約為 1.5 到 2.4 公釐 [e.g., Douglas, 2001; Mitrovica *et al.*, 2001; Church *et al.*, 2004; Church and White, 2011; Shum and Kuo, 2011]，因衛星測高技術發展，近二十年的全球海水面上升變化速率可精確估計求得[Blewitt *et al.*, 2010; Cazenave *et al.*, 2010]，其中利用測高衛星 Topex/Poseidon(T/P)和 Jason-1/-2(J-1/-2) 計算自 1993 年來之全球海水面上升速率為 3.2 ± 0.4 mm/yr [Ablain *et al.*, 2009; Nerem *et al.*, 2010; Willis *et al.*, 2010; Shum and Kuo, 2011; Church and White, 2011]，表示可居住地正逐漸被海水淹沒。Leatherman 等人[2000]指出，當全球海水面上升時，侵蝕海岸速率為海水面上升速率的幾十至幾百倍，導致可居住區域越來越受到嚴重威脅，而暴風浪也會因海水面上升而增強，造成沿岸生態、建築物及人類生命財產遭受巨大損失。Webster 等人[2005]亦提到海水面上升將導致熱帶氣旋的頻率與強度增加。Ericson 等人[2006] 研究成果顯示如果全球海水面變化以 2 mm/yr 速率上升，在 2050 時，全球 40 個三角洲上的 8,710,000 人會因海水面上升遭受到災害。在 2001 年時，太平洋島國(Tuvalu Island)成為世界上首個因為海水面上升而舉國移民之

國家。2005年，颶風卡崔娜（Hurricane Katrina）襲擊美國著名城市紐奧良，數百萬人被迫撤離，損失高達上千億美元，造成損失為大西洋颶風有史以來最嚴重。同年，中國大陸由沿海直接登入的強颱風達8次，損失達數百億人民幣。相較於暴風浪或強降雨所造成之災害（例如淹水），海水面上升將造成不可逆之災害。

由政府間氣候變遷委員會(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)於2001年提出的第三次報告中，海水面上升在1990-2100年間的估算值約為0.1-0.9 m，平均每年之上升率約為0.9-8 mm/yr [IPCC, 2001]，此數據約是二十世紀全球海水面上升速率的4倍。2007年政府間氣候變遷委員會的第四次報告中更提出於1980-1999年及2090-2099年間之上升速率約為2.1及6 mm/yr [IPCC, 2007]，該次報告對未來海水面上升速率之推算仍抱持悲觀的看法，仍遠大於目前二十世紀的海水面上升速率。自1980-1999年後海水面推算，則成為第5次報告的比較基準 [Stocker *et al.*, 2010]，於2013年九月政府間氣候變遷委員會提出的第五次報告中，已明確指出海水面上升之推算值將大於第四次報告之結果，在最嚴重之推算情境下(代表濃度過程 (Representative Concentration Pathways 8.5))，本世紀末海水面上升約0.53-0.97公尺 [IPCC, 2013]，其中並指出區域海水面上升速率受到當地氣候連動之影響，其不同區域的海水面上升速率將可能大於全球平均值約100%，且報告中指出本世紀末約有95%區域的海水面變化速率將會是正值。由於潮位站估算之二十世紀海水面上升速率與衛星測高估算之近二十年速率明顯不同，因此近年來許多學者致力於海水面上升加速之研究，例如：Church and White [2006] 結合衛星測高與潮位站資料進行1870-2001年全球海水面重建(sea level reconstruction)，並以二階多項式(second order polynomial)估算全球海水面上升之加速度為 $0.013 \pm 0.006 \text{ mm/yr}^2$ (95%信賴區間)。Jevrejeva 等人[2008]結合衛星測高與潮位站資料進行1700-2003年(約300年)全球海水面重建，並估算海水面上升加速度，由成果顯示全球海水面上升速率約從18世紀末開始加速，由二階多項式擬合1700-2003海水面上升之加速度約為 0.01 mm/yr^2 。Merrifield等人[2009]利用潮位站資料估算1962-1990全球海水

面上升速率為 1.5 ± 0.5 mm/yr，而1990-2007全球海水面速率為 3.2 ± 0.4 mm/yr，此數據與衛星測高成果(3.2 ± 0.4 mm/yr; [Church and White, 2011])相當一致，由於海面上升速率隨著時間增加，作者推測全球海水面正在加速上升，且主要地區為赤道附近海域與南半球海域。Calafat and Chambers [2013] 利用分佈於全球的九個潮位站資料估算1952–2011海水面變化之加速度為 0.022 ± 0.015 mm/yr² (90%信賴區間)，此外結果亦顯示海面上升之加速度隨著時間的增加而逐漸加大且與溫室氣體(Greenhouse gas)濃度增加有關。

海水面變動主要因大氣、海洋、冰界與水界各系統間交互作用而產生，而導致海水面變化主要原因可大致分為兩方面：1. 比容海水面(steric sea level)變化，主要由海水溫度與鹽度變化造成的海水體積變化，其中海水溫度與鹽度分別造成的海水面變化稱之為熱比容(thermosteric sea level)和鹽比容(halosteric sea level)海水面變化；2. 海水質量變化，主要由於陸上、海洋、大氣各系統之間的質量交換(如冰川或冰山融化、蒸發、降雨、徑流等)所造成之變化。

臺灣四面環海，中央為高山區，平原大多位於海岸附近，大部分的城市距離海岸線約為10-30 公里，由Nicholls和Cazenave [2010]與Llovel等人[2010]計算衛星測高資料的成果可知，全球各區域的海面上升速率並不一致，且臺灣附近海域之海面上升速率相較於全球海面上升速率來的大，因此精確估計臺灣附近海域海面上升速率並了解臺灣周圍海面上升速率的主要原因就顯得非重要。而前期(102年度)計畫僅利用台灣周圍十年衛星測高與潮位站資料進行潮位站地表垂直變動與海水面變化變化速率計算，導致估算潮位站地表垂直變動速率之標準偏差(standard deviation)較大，以中央氣象局潮位站資料為例，各潮位站地表垂直變動速率的標準偏差之平均值約為 ± 2.41 mm/yr，進而影響海面上升速率之計算精度。而衛星測高時間涵蓋範圍可達二十年(1993-至今)，且相關研究亦說明採用較長時間(如20年)衛星測高與潮位站資料將可大幅減低潮位站地表垂直變動速率之標準偏差[Kuo *et al.*, 2004; Kuo *et al.*, 2008; Ray *et al.*, 2010]，因此本計畫將應用台灣四周

海域近二十年衛星測高資料與潮位站資料估算潮位站地表變動速率與海水面上升速率之分析。

現今主要監測海面水位變化為兩種方式—長時間觀測紀錄之潮位站資料和衛星測高資料，潮位站資料主要包含基準點的地表垂直變動資訊、位置分佈不平均、觀測時間長短不一致等特性，而臺灣管理的潮位站資料還包含資料嚴重缺漏以及資料基準偏移等情形；衛星測高技术觀測海水面變化資料之特性為觀測範圍近乎全球，但觀測時間僅約二十年，且近岸資料較少，因此結合衛星測高資料和驗潮站資料進行臺灣附近海域之海水面變化研究，可避免使用單一資料之缺點。海水面高度變化主要由比容海水面變化與海水質量變化造成，其中比容海水面變化可結合海洋各水層之溫度與鹽度資料計算得到[Gill, 1982]，在早期，常以浮標(Buoys)和船載儀器收集海洋溫度與鹽度資料，資料收集時間涵蓋數十年之久，然而浮標與船測所能收集溫、鹽資料的數量與範圍有限，因此取樣點的分佈不均勻且較為稀疏。近年來，由世界海洋環流實驗 (World Ocean Circulation Experiment, WOCE) 室所進行之海洋計畫-地轉海洋學即時觀測陣列(Array for Real-time Geostrophic Oceanography, ARGO)已可提供全球 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 溫度與鹽度觀測資料，資料涵蓋由海水表面到深度2000公尺。海水質量變化可由美國航空暨太空總署(National Aeronautics and Space Administration, NASA)與德國太空中心(German Aerospace Center) 於2002年共同研發發射重力反演和氣候實驗(Gravity Recovery and Climate Experiment, GRACE)重力衛星所觀測之全球重力場變化計算求得。因此本計畫將對於近二十年臺灣附近海水面變化進行研究與分析，希望能夠為臺灣附近海水面變化與臺灣沿海城市的環境安全提供科學根據。

Zhan 等人 [2009] 利用14年衛星測高資料估計黃海、東海、南海之海面上升速率分別為 3.91 mm/yr 、 4.28 mm/yr 、 3.49 mm/yr ，此外，他們利用經驗正交函數(empirical orthogonal functions)和小波分解衛星測高資料得到此區域海水面空間分佈，其分佈與海洋循環相符合，然而此研究僅使用衛星測高資料，並無其他配合或比較之資料。Peng等

人[2013]結合衛星測高資料與潮位站資料進行1950-2009南海海水面重建，1993-2009衛星測高資料估計南海之海水面上升速率為 3.9 ± 0.6 mm/yr，而1950-2009南海海水面重建資料之海水面上升速率為 1.7 ± 0.1 mm/yr，此外作者等人表示南海地區地表垂直變動訊號較小，因此在該研究區域中並無對於潮位站資料進行地表垂直變動改正。Cheng等人[2014]利用1993-2012衛星測高資料估計南海之海水面上升速率為 5.1 ± 0.8 mm/yr，其中比容海水面變化速率約占南海海水面變化速率的45%，而在整個南海中，以越南東海岸與南海的東部海域之海水面上升速率最為快速，最大可達 8.4 mm/yr。Tseng等人[2009]利用8個潮位站資料和衛星測高資料估計臺灣附近海水變化，並以局部回歸 (Local Regression, LOESS)分析 [Hastie and Tibshirani, 1990]處理非線性海水面趨勢，研究結果顯示利用1955-2003和1961-2003年潮位站資料計算之海水面趨勢分別為 3.5 mm/yr 和 2.4 mm/yr，此結果不甚合理，因為由1955-2003之澎湖潮位站資料估算海水面上升速率竟然高達約 11 mm/yr。Tseng等人[2009]亦而利用1993-2003年潮位站和測高資料計算求得海水面變化趨勢分別為 5.7 mm/yr 和 5.3 mm/yr，速率皆比全球海水面上升速率之平均值 3.2 ± 0.4 mm/yr [Church and White, 2011]來的大，此外該研究總結臺灣四周海水面變化是由海洋上層溫度上升所致，然而該研究中僅探討海水上層溫度與海水面時間序列相關係數，然而相關係數並無法真正顯示海水溫度變化對海水面上升速率之貢獻。黃清哲等人[2009]利用線性迴歸與傅立葉分析(Fourier analysis)方法分析衛星測高和臺灣本島5個潮位站資料資料來估算臺灣周圍海水面上升速率，其中以線性迴歸分析估算1992-2009年潮位站資料與衛星測高資料之海水面上升速率結果顯示，利用兩資料分別估算於臺灣北部、西部、西南部、南部以及東部之海水面上升速率為 4.95 與 3.18 mm/yr、 10.7 與 3.07 mm/yr、 4.31 與 3.81 mm/yr、 9.80 與 5.72 mm/yr以及 55.6 與 6.61 mm/yr，其中臺灣東部潮位站和測高資料計算之趨勢相差約 50 mm/yr，作者認為可能臺灣東部潮位站所處的地表垂直變動較劇烈所導致。Tseng等人[2009]與黃清哲等人[2009]之研究在利用潮位站進行海水面上升速率計算時皆未考慮潮位站地表垂直變動之影響，而Ching等人

[2011]利用全球定位系統 (Global Positioning System, GPS) 連續觀測站與精密水準資料估算台灣本島地表垂直變動速率，結果發現台灣東南部與西南部等區域的地表垂直變動量比台灣附近海水面上升速率來的大，表示台灣潮位站資料中包含的地表垂直變動訊號將顯著影響潮位站資料所估算之海水面上升速率，因此直接利用未改正地表垂直變動的潮位站資料估算絕對海水面上升速率誤差將會很大。前期(102年度)計畫利用衛星測高資料與已進行各項改正(海潮改正、逆氣壓(inverse barometer)效應改正、偏移量改正與測站垂直變動改正)後的潮位站資料估算台灣四周近十年(2002-2011)之絕對海水面上升速率，成果表示台灣北部的絕對海水面上升速率為-1~2 *mm/yr*，台灣南部的絕對海水面上升速率為4~8 *mm/yr*，表示台灣南方海域的海水面上升速率較台灣北部快，而由衛星測高資料估算近十年(2002-2011)整個台灣附近周圍海域(緯度: 10°N~30°N、經度: 110°E~130°E)的絕對海水面上升速率為6~8 *mm/yr*。Zhan 等人 [2009]、Tseng等人[2009]、黃清哲等人[2009]與前期(102年度)計畫成果雖然皆利用衛星測高資料估算臺灣附近海水面上升速率，但由於資料來源、時間涵蓋範圍以及資料處理方式不完全相同，因此雖然造成估算海水面上升速率之結果不同，但各成果皆顯示臺灣附近海水面變化正在上升，且上升速率皆大於全球海水面上升速率之平均值 3.2 ± 0.4 *mm/yr* [Church and White, 2011]。

臺灣潮位站資料除了受到上述地表垂直變動影響外，潮位站資料亦受到人為因素造成資料基準偏移，因此臺灣氣候變遷推估與資訊平台計畫(Taiwan Climate Change projection and Information Platform, TCCIP)中海水面均一化之校正工作針對臺灣17個長期潮位站資料進行均一處理[陳進益等人，2014]，然而該研究在處理資料偏移時，將會連同地表垂直變動量一併移除，因此該方法須多加考慮校正方法的正確性。

另外，衛星資料之地球物理校正亦是影響海水位變遷的重要因素，Cheng等人[2013]分析初始地球物理校正(Default-corrections)後臺灣海域之海水面上升速率差異分別為-0.1至1.6 *mm/yr*；若是經過區域特

性之地球物理校正(Alternative corrections)，其校正前後差異為-0.4至0.4 mm/yr。然而應用初始地球物理校正於海水面上升速率的計算則會在臺灣東南及西北海域出現過高及過低的推估。因此，區域之海水位變遷則須合理考慮區域特性之地球物理校正。Wu等人[2012]雖然應用衛星資料分析海水位變遷的特性，其結論在未考慮地球物理校正的影響下，其所推估之海水面上升速率具有較大之不確定性。

本計畫的研究範圍為臺灣附近海域(緯度: 10°N~30°N、經度: 110°E~130°E)，研究時間為1993-2012年(~20年)。研究中將收集臺灣附近歷年潮位站資料與衛星測高資料，分析臺灣周圍絕對海水面變化情形。然而潮位站及衛星資料皆需進行率定及改正，因此本計畫將分析海潮改正、逆氣壓效應改正、偏移量改正與測站垂直變動改正對於臺灣附近潮位站資料估計1993-2012年海水面上升速率之影響量。衛星測高之改正模型精度亦將直接影響衛星測高海水面觀測量的精度，而前期(102年度)計畫中已分析不同模型改正對於衛星測高資料之海水面上升速率結果，因此本研究著重於分析各項改正對於潮位站資料估算的海水面上升速率之影響量。另外，最後亦將利用溫度與鹽度資料和重力反演和氣候實驗(GRACE)重力衛星資料分析臺灣周圍海水面變化的主要原因。本計畫之工作項目如下所示：

- (1) 海面水位變化相關研究、觀測和學術文獻之蒐集與匯整分析
- (2) 國內驗潮站實測潮位紀錄和國際衛星海面測高資料之蒐集、改正和率定
- (3) 結合應用國內驗潮站資料並配合國際衛星測高資料，分區分析臺灣四周海域長(~20年)、短(~10年)期之海面水位升降變動速率
- (4) 評估國內各商港海域長(~20年)、短(~10年)期之海面水位升降變動速率趨勢
- (5) 結合應用國內驗潮站資料並配合國際衛星測高資料，分區分析臺灣近岸長(~20年)、短(~10年)期之地殼變動速率
- (6) 臺灣近岸驗潮站潮位基準偏移量校正方法研究

- (7) 探討國內近岸驗潮站實測潮位紀錄應用於平均海水位變動率之準確度與可行性
- (8) 分區比較與評估臺灣四周海域應用驗潮站和衛星測高資料進行長(~20 年)、短(~10 年)期海水面變化速率分析結果之可靠度與準確度
- (9) 海洋溫度、鹽度等海洋物理資料對於海水面變化速率之貢獻量評估
- (10) 重力衛星資料對於海水面變化速率之貢獻量評估

1.2 本計畫之流程

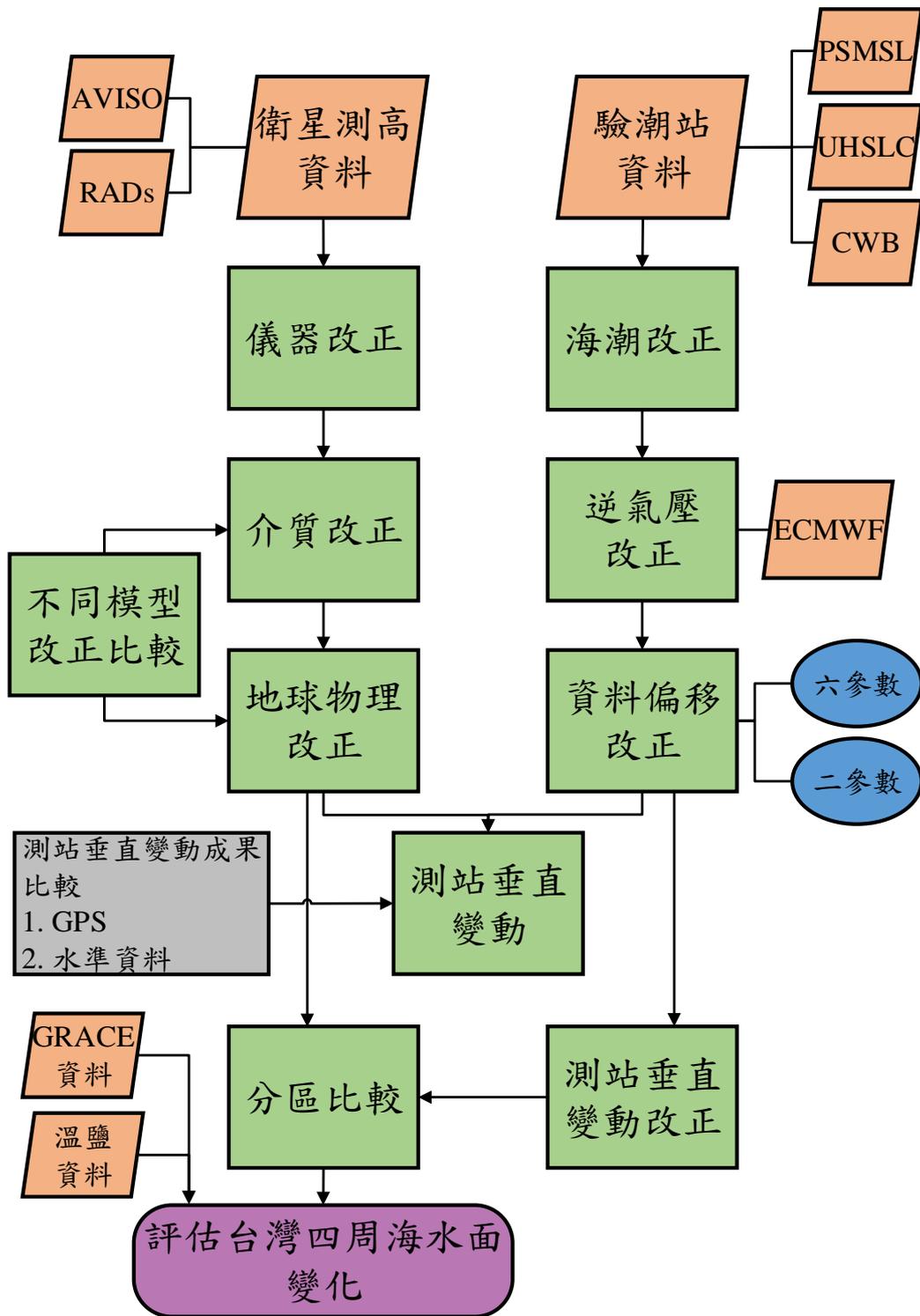


圖 1.1 計畫流程圖

1.3 本文架構

本文共分為五個章節，以下依序為：

第一章：介紹本計畫之研究動機與目的，其中說明海水位昇降變化的影響、上升速率在不同時間尺度的變化與影響海水位上升速率的因素等。

第二章：詳細說明本計畫使用之相關資料來源及特性。關於衛星測高資料與重力反演和氣候實驗(GRACE)重力衛星資料則分別闡述其觀測及率定改正原理。

第三章：潮位站資料各項改正方法與結果，並詳細說明台四周潮位站地表垂直變動成果。

第四章：評估各項改正對於臺灣周圍潮位站資料的影響程度，估算台灣附近近二十年絕對海水位昇降變化之情形，並分析台灣周圍海水面變化之主要原因。

第五章：結論與建議

第二章 研究資料

2.1 測高衛星

測高衛星可用於觀測全球海水面高度，其優點為觀測量涵蓋近乎全球，且所觀測海水面高度不受固體地球變形之影響，為相對於參考橢球之絕對量。因為海水表面較為平滑穩定，且對於雷達波訊號反射率較佳，故測高衛星一開始被設計於海水面監測，而陸地表面因植被、建物等造成地形起伏較大，且地表面對於雷達訊號反射率較差，因此測高觀測量於陸地上之精度欠佳，但近幾年來因為波形重定(waveform retracking)演算法快速發展，衛星測高可用來監測陸地、陸地水體或冰原等變化，例如。

最早提出利用測高雷達技術觀測海水面變化的想法可追溯到1969年於美國威廉斯鎮(Williamstown)所召開會議中，此想法為測量衛星至海水面距離之雷達技術與精密軌道定位技術定出衛星位置進而設計出測高衛星。第一顆測高衛星Skylab於1973年5月由NASA研製發射（如圖2.1所示），隨後Geos-3、Seasat、Geosat、ERS-1、T/P、ERS-2、J-1、J-2、Cryosat-2、HY-2、Saral等測高衛星陸續發射，表2.1為各測高衛星任務參數比較表。第一顆測高衛星Skylab觀測精度約為1公尺，其中以衛星軌道誤差最大，後續發射衛星之軌道已有顯著改進，現今之軌道誤差已小於海洋變化訊號，軌道精度由1公尺提升至2-3公分(如圖2.2所示)，因此測高衛星觀測量可廣泛應用於海水面訊號監測。



圖 2.1 Skylab 衛星照片。[圖片來源：<http://www.nasa.gov/>]

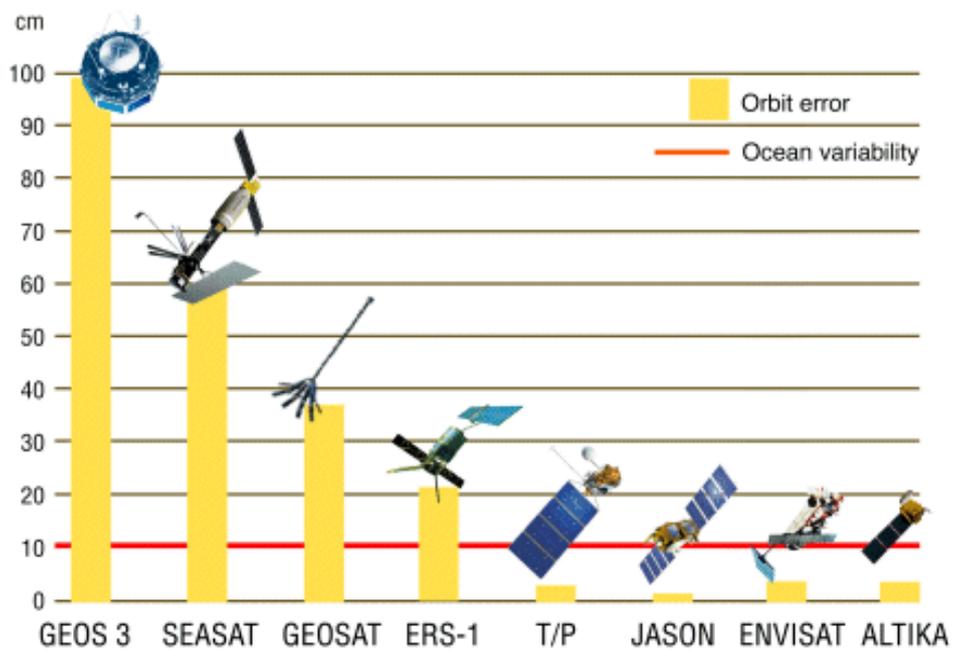


圖 2.2 測高衛星之軌道誤差比較。[圖片來源：
<http://www.aviso.oceanobs.com/>]

表 2-1 衛星測高基本資料表[資料來源：
<http://www.aviso.altimetry.fr/en/home.html>]

衛星名稱	研製單位	發射時間 – 結束時間	軌道高度	軌道傾角	週 期(天)
Skylab	NASA	1973/05 – 1979/07	435	50	–
GEOS-3	NASA	1975/04 – 1979/07	845	115	–
Seasat	NASA	1978/07 – 1978/10	800	108	3; 17
Geosat	U.S. Navy	1985/03 – 1990/01	800	108	17.05
ERS-1	ESA	1991/07 – 2000/03	785	98.52	3; 35; 168
T/P	NASA, CNES	1992/08 – 2006/01	1336	66	9.9156
ERS-2	ESA	1995/04 – 2011/07	785	98.52	35
GFO	U.S. Navy	1998/10 – 2008/11	880	108	17
Jason-1	NASA/CNES	2001/12 – 2013/07	1336	66	9.9156
EnviSat	ESA	2002/03 – 2012/04	782.4 – 799.8	98.55	30; 35
ICESat	NASA	2003/01 – 2010/02	600	94	8; 91
Jason-2	CNES, NASA, Eumetsat and NOAA	2008/06 – Present	1336	66	9.9156
Cryosat-2	ESA	2010/04 – Present	717	92	369 days with 30 day sub-cycle
HY-2	CAST	2011/08 – Present	971	99.3	14; 168
Saral	ISRO, CNES	2013/02 – Present	800	98.55	35

測高衛星之基本觀測原理為測高儀由天底方向向海水面發射雷達微波脈衝訊號，訊號則經由海水面反射後由衛星接收，經取得雷達波精密傳遞時間而計算得衛星至海水面之距離，而測高衛星至一參考橢球之距離可由精密軌道定軌計算求得，結合兩項距離即可得到相對於參考橢球之海水面高度，其原理如圖2.3所示。測高衛星觀測之海水面相對於平均海水面之高度變化(Δh)可表示為：

$$\Delta h = H - R + \sum_j \Delta R_j - h_M \dots\dots\dots(2.1)$$

其中 H 為精密定軌求得之衛星至參考橢球距離， R 為衛星至反射面之距離， h_M 為平均海水面（平均海水面是由衛星測高經長時間測量全球海水面後平均求得）至橢球之高度， ΔR_j 為各項改正量，包含電離層與對流層改正、海面狀態偏差(Sea state bias)、逆氣壓效應改正、潮汐(海潮、海潮負載和固體潮)以及極潮改正，各改正詳細敘述如下：

- (1) 電離層與對流層改正：測高衛星觀測基本公式假設雷達脈衝行環境為真空，而實際上大氣層對於雷達脈衝行進會產生延遲，因此須進行路徑延遲改正。大氣層對雷達脈衝路徑影響可分為電離層與對流層之影響。電離層主要由於太陽和其他天體的各種輻射線對空氣產生電離作用而形成帶電等離子體的大氣，分佈於地面上 50~1000 公里的範圍，電離層的電子密度隨太陽與其他天體的輻射強度、季節、時間以及地理位置等因素而變化，其中以太陽黑子活動強度對其影響最大。當測高雷達脈衝訊號通過電離層時，將會產生各種物理效應，其中最主要的影響為折射效應，對訊號產生延遲影響，造成訊號往返時間的誤差，進而形成測距誤差，造成的誤差量約為 0.2 至 20 公分。電離層延遲與通過電磁波頻率平方成反比，故不同頻率訊號會產生不同之延遲量，其解決方法可藉由搭載雙頻雷達測高儀(例如 T/P)或都卜勒追蹤系統接收儀(Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite, DORIS)系統測得，如果是單頻測高儀如 Geosat 等，則需使用電離層模型來改正延遲量。

對流層分佈在地球表面向上延伸約 40 公里範圍內的大氣底層，當訊號通過對流層時，由於大氣折射率的變化，使訊號傳播路徑會產生彎曲，造成訊號往返時間量測誤差。對流層延遲可分為乾對流層分量與濕對流層分量，乾對流層延遲改正量約為 2.3 公尺，為測高資料中最大之改正量，但其變化量僅在數公分內，可由下式簡單計算 [Rosmorduc *et al.*, 2011]：

$$\Delta R_{dry} = -0.002277P_{ocean} \times (1 + 0.0026 \cos 2\lambda) \dots\dots\dots (2.2)$$

其中 ΔR_{dry} 為乾對流層延遲改正量(單位: 公分)， p_{ocean} 為海水面之大氣壓力(單位: 毫巴)， λ 為緯度。

濕對流層延遲改正為雷達脈衝受到大氣中水氣影響導致路徑延遲，造成影響約為 0-50 公分，因傳播路徑上之水氣含量較難估計，故精度較低。目前可透過多波段微波輻射儀 (Microwave Radiometer) 計算求得，但在陸地以及海岸地區因多波段微波輻射儀無法觀測，故此區域則以氣象模型取代。

- (2) 海面狀態偏差(Sea state bias): 海面反射誤差為實際海面狀況對反射測高訊號之影響，由於海面並不是一直處於平穩的狀態，海面上會有波浪起伏的影響，然而波谷的反射能力優於波峰，造成回波功率的重心偏離於平均海面而趨向於波谷，此偏差稱為海面狀態偏差。
- (3) 逆氣壓效應改正: 逆氣壓效應為海水面隨大氣壓力變化而產生些微升降，一般而言大氣壓力每增加 1 毫巴 (*mbar*)，海水面將降低 1 公分，一般逆氣壓效應影響量約 ± 15 公分 [Rosmorduc *et al.*, 2011]。
- (4) 海潮改正 (Ocean tide) 與海潮負載(Ocean tide loading): 海水因日月引力的影響產生漲落的現象，稱為海潮。海水壓力會使地殼發生形變，稱為海潮負載。海面的變化會受到海潮的影響，在廣闊海域中變化幅度約 1 m，而在近海岸線或淺海區域可達 10 公尺的影響。舊有之全球海潮模型 [Schwidorski, 1984]精度可達 10 公分，近來海潮精度提昇至 3 公分 [Wagner, 1991]，但在淺海區

域預估精度仍然較差，需以區域性海潮模型取代。現在利用 T/P 測高衛星資料計算之海潮模型，精度可達到 2~3 公分 [Chelton *et al.*, 2001]。

- (5) 地球固體潮改正(Solid Earth tide): 地球構造並非剛體，實為一半彈性體，因為日、月引力的影響，造成固體地球產生形變，稱之為固體潮，改正量可達 50 公分。目前採用模型進行改正，其精度可達 1 公分[Chovitz, 1983]。
- (6) 極潮改正(Pole tide): 極運動 (Polar motion)是因為地球本身內部質量與幾何形狀不均勻所引起的[Torge,1991]。極運動會產生極潮，造成海水面形狀改變，故需進行此項誤差改正，改正量約為 2 公分。

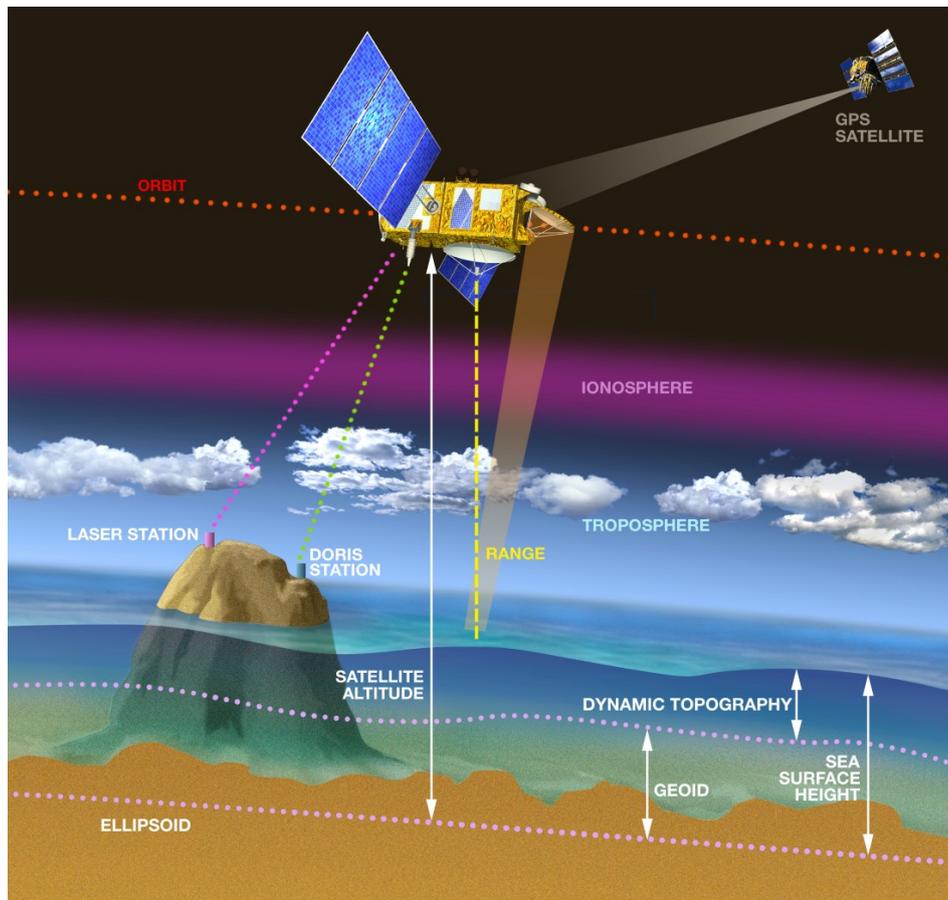


圖 2.3 測高衛星基本觀測原理。[圖片來源：
<http://www.aviso.oceanobs.com/>]

T/P是第一顆專為量測海流及海水面變化所設計之衛星，能提供長時間且不間斷之海水面監測，其量測海水面高度之精度約為5公分 [Shum *et al.*, 1995]，而J-1衛星的目的是為接替T/P衛星，J-2 衛星為接替J-1衛星，因此本計畫使用T/P、 J-1 與J-2等測高衛星資料，其每一秒平均之海水面高度觀測量精度可達 ± 4.2 公分 [AVISO and PODAAC User Handbook, 2001]，因三顆測高衛星的設計相同，因此三個衛星資料可合併使用，三顆衛星涵蓋之時間範圍為1992/09-至今。另外，本研究中使用的衛星測高資料為經由時間和空間上的平均，衛星測高觀測精度可再提升精度。測高衛星資料可分別由雷達測高資料收集 (Radar Altimeter Data Acquisition, RADs) [<http://rads.tudelft.nl/rads/rads.shtml>] 與法國衛星海洋數據存檔、驗正與解釋 (Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic, AVISO) [<http://www.aviso.oceanobs.com/en/>] 資料中心取得。測高資料均需進行儀器改正、介質改正 (雙頻電離層改正、濕對流層改正、乾對流層改正)、地球物理改正 (固體潮改正、海潮改正、海潮負載改正、極潮改正、海面狀態偏差改正、逆氣壓效應改正)。

由於改正模型精度會直接影響測高衛星海水面觀測量的精度，因此需比較不同模型改正之結果，而前期(102年度)計畫中已利用各改正模型分別對T/P、J-1、J-2衛星測高資料進行改正，估算改正後之衛星測高時間序列海面上升速率，並分析速率之差異。測試之T/P、J-1、J-2測高資料所涵蓋時間範圍分別為1992/09-2002/08、2002/1-2009/1、2008/7-2013/6，其涵蓋時間範圍已包含本計畫的研究時間，故本計畫將沿用前期(102年度)計畫中改正模型。本研究後續計算潮位站地表垂直變動速率和海面上升速率之改正模型皆以AVISO和RADs資料中心預設之改正來進行 (如表2.2所示)。

潮位站大多設置於岸邊，而衛星測高技術在近岸海域之應用上，會因測高儀回波受到陸地地形、海潮、海底地形、河口等影響，造成衛星接收到複雜的波形訊號，導致近岸之衛星測高資料較少。為了配合潮位站資料使用，本計畫分別等權平均與距離加權平均潮位站周圍半徑經緯度 2° 、 3° 、 5° 範圍內的測高資料，圖2.4為高雄潮位站周圍半

徑經緯度 2° 之圖例。然而根據黃清哲等人[2009]利用衛星測高估算臺灣東部與西部海水面上升速率的研究成果顯示，東部與西部的海水面上升速率差異量約 4 mm/yr ，表示海水面上升速率於太平洋與臺灣海峽的變化並不一致，且Cheng and Anderson (2013)亦提出初始地球物理校正(Default-corrections)於大陸沿岸約為 1.4 mm/yr ；於臺灣海峽則約為 2.1 mm/yr ，為避免區域海水面上升速率不一致而影響潮位站地表垂直變動速率的估算成果，因此不同區域之海水面上升速率計算以東經 121° （約臺灣本島之中間線）為基準，將臺灣附近的潮位站及衛星測高資料分為東西部分，分別包含臺灣海峽及太平洋區域，位於基準線東邊的潮位站僅使用基準線以東的半徑 2° 、 3° 、 5° 測高資料，而位於基準線西邊的潮位站則使用基準線以西的半徑 2° 、 3° 、 5° 測高資料。

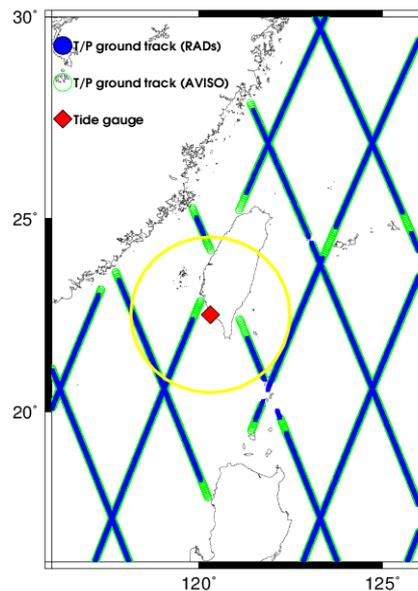


圖 2.4 高雄潮位站周圍半徑經緯度 2° 之範圍與 T/P 測高資料之地面軌跡

表 2.2 本計畫採用之衛星測高資料改正模型

各項改正	RADs	AVISO
乾對流層改正	1. T/P: ECMWF 2. J-1: ECMWF 3. J-2: ECMWF	1. T/P: Rectangular grid 2. J-1: Gaussian grid 3. J-2: Gaussian grid
濕對流層改正	1. T/P: TMR 2. J-1: enhanced JMR 3. J-2: AMR	1. T/P: from TMR and from ECMWF (if near coast) 2. J-1: from JMR and from ECMWF (if near coast) 3. J-2: from AMR and from ECMWF (if near coast)
電離層改正	1. T/P: smoothed dual-frequency 2. J-1: smoothed dual-frequency 3. J-2: smoothed dual-frequency	1. T/P: dual-frequency 2. J-1: dual-frequency 3. J-2: dual-frequency
逆氣壓改正	1. T/P: MOG2D total IB correction 2. J-1: MOG2D total IB correction 3. J-2: MOG2D total IB correction	1. T/P: MOG2D+ Rectangular grid 2. J-1: MOG2D+ Rectangular grid 3. J-2: MOG2D+ Rectangular grid
海潮改正	1. T/P: GOT4.8 2. J-1: GOT4.8 3. J-2: GOT4.8	1. T/P: GOT4.7 2. J-1: GOT4.7 3. J-2: GOT4.7
海潮承載改正	1. T/P: GOT4.8 2. J-1: GOT4.8 3. J-2: GOT4.8	1. T/P: GOT4.7 2. J-1: GOT4.7 3. J-2: GOT4.7
海面狀態偏差改正	1. T/P: CLS 2. J-1: CLS 3. J-2: CLS	1. T/P: Non parametric SSB(from GDR) (Topex) BM4 formula (Poseidon) 2. J-1: Non parametric SSB (from GDR) 3. J-2: Non parametric SSB (from GDR)

2.2 潮位站

潮位站的海水面觀測量為相對於岸邊的基準點，基準點會因為該區域的地表變動而產生位移，而使潮位站觀測資料包含海水面變化與基準點周圍的地表垂直變動訊號，因此潮位站資料為一相對於地表之觀測量，如圖2.5所示。若以潮位站資料估算絕對海面上升速率時，需進行潮位站地表垂直變動改正，此外，還需改正海潮和逆氣壓效應等非海水面變化之週期訊號和人為造成的潮位資料基準不一致之情形。一般而言，全球衛星定位系統 (Global Positioning System, GPS) 觀測量為常見用於監測地表變動之觀測技術，但由於臺灣附近潮位站大多未設置全球衛星定位系統(GPS)連續觀測站，因此無法利用GPS觀測量估算潮位站的潮位站地表垂直變動量。然而測高衛星資料為觀測海

水面高度的絕對量，潮位站資料則為相對量，因此可結合測高衛星資料與潮位站資料估算出潮位站垂直變動訊號並自潮位站資料中改正之 [Kuo *et al.*, 2004, 2008; Braitenberg *et al.*, 2011; Chang *et al.*, 2012; Wöppelmann and Marcos, 2012; Santamaria-Gomez *et al.*, 2014]。

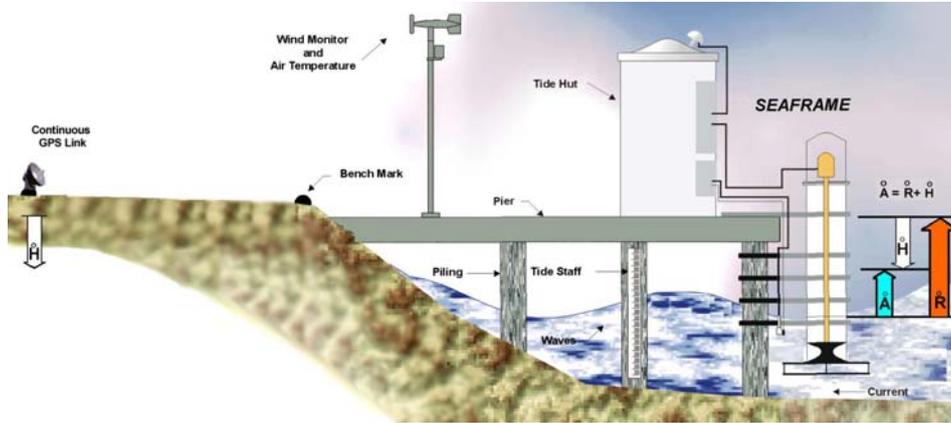


圖 2.5 潮位站觀測海水面示意圖

本研究中，臺灣附近海域之潮位站資料由下述三處資料中心取得：

1. 平均海平面永久服務中心(Permanent Service for Mean Sea Level, PSMSL) [Holgate *et al.*, 2013; PSMSL, 2014]，資料可由 [<http://www.psmsl.org/>]下載。
2. 美國夏威夷大學海水位中心(University of Hawaii Sea Level Center, UHSLC)，資料可由 [<http://uhslc.soest.hawaii.edu/>]下載。
3. 中央氣象局(Central Weather Bureau, CWB)。

平均海平面永久服務中心(PSMSL)為一個負責收集、分析和提供全球潮位站資料的機構，其潮位站資料基準分為修正地方基準 (Revised Local Reference, RLR)與Metric，修正地方基準(RLR)與Metric的資料格式皆為每個月平均的觀測數據。修正地方基準(RLR)與Metric資料的不同之處在於修正地方基準(RLR)資料已經由各潮位站管理單位提供的基準資料，將同一潮位站資料化算至相同基準點上，表示修正地方基準(RLR)資料應無基準不一致之問題，而Metric資料則表示未校正基準問題。平均海平面永久服務中心(PSMSL)資料庫中符合本計畫設定的研究範圍與時間區段(1993-2012年)的潮位站數量為40個，由於各潮位站

觀測資料涵蓋時間長短不一，為避免觀測時間較短影響後續成果，且本計畫中將比較近二十年與近十年海水面變動速率趨勢，因此移除觀測資料涵蓋時間小於15年的潮位站資料，故本計畫共使用19個平均海平面永久服務中心(PSMSL)的潮位站資料，潮位站分佈如圖2.6所示，平均海平面永久服務中心(PSMSL)的潮位站詳細資訊如表2.3所示。19個潮位站之修正地方基準(RLR)與Metric資料涵蓋的時間範圍不完全相同(如表2.3所示)，如基隆與高雄潮位站的修正地方基準(RLR)與Metric資料涵蓋的時間範圍並不一致(中之島潮位站的修正地方基準(RLR)與Metric資料涵蓋的時間段亦不一致，但因未涵蓋到本計畫設定的時間區段，因而在此不討論)，修正地方基準(RLR)的基隆與高雄潮位站資料並無包含近15年潮位記錄，如圖2.7所示，而兩Metric潮位站資料皆有明顯資料基準偏移情形，因此在後續潮位站資料校正將需改正含有偏移量的潮位站資料。故本研究中平均海平面永久服務中心(PSMSL)之資料使用Metric基隆與高雄潮位站資料，其餘則使用修正地方基準(RLR)潮位站資料。

夏威夷大學海水位中心(UHSLC)的資料庫中符合本計畫設定的研究範圍與時間區段的潮位站資料共有9個(已移除觀測資料涵蓋時間範圍低於15年的潮位站資料)，資料格式為1天平均1筆數據，詮釋資料(metadata)中說明已改正潮汐影響與明顯基準偏移。平均海平面永久服務中心(PSMSL)與夏威夷大學海水位中心(UHSLC)的潮位站資料來源相同，因此比較9個測站的平均海平面永久服務中心(PSMSL)與夏威夷大學海水位中心(UHSLC)的資料間之相關係數如表2.4所示，除了基隆與高雄潮位站的相關係數分別為0.32與-0.27外，其他7個潮位站資料的相關係數皆為1。基隆與高雄潮位站的平均海平面永久服務中心(PSMSL)與夏威夷大學海水位中心(UHSLC)資料相比較可知，1995-1997年間平均海平面永久服務中心(PSMSL)基隆與高雄潮位站資料皆有一明顯偏移量(如圖2.8所示)，因此造成兩潮位站(基隆與高雄)的平均海平面永久服務中心(PSMSL)與夏威夷大學海水位中心(UHSLC)資料間相關係數較低。故本計畫後續將使用夏威夷大學海水位中心(UHSLC)的基隆與高雄潮位站資料，點位分佈如圖2.6所示，詳

細資訊如表2.5所示，其他7個夏威夷大學海水位中心(UHSLC)的潮位站資料與平均海平面永久服務中心(PSMSL)的資料之相關係數皆為1，故不使用。

目前臺灣沿岸約有40個潮位站，各潮位站分別由不同單位設立維護，目前主要由中央氣象局統一管理資料。依據本計畫研究的空間與時間(1993-2012年)範圍，向中央氣象局申請並取得10個潮位站資料(已剔除觀測資料涵蓋時間低於15年的潮位站資料)，點位分佈如圖2.6所示。中央氣象局提供的潮位站之詳細資訊如表2.6所示，由表可知，各潮位站管理單位並不完全相同，因此在計畫初期申請潮位站資料時，常因為資料權屬不透明以及申請資料限制等問題，增加收集潮位站資料的難度。表2.6中亦顯示，各站可能有多個不同的測站編號，更改測站編號的原因通常為測站觀測儀器更換或位置移動，造成記錄中斷之後，測站再重新記錄資料時便會更換測站編號[陳進益等人，2014]，更換測站編號後潮位站未重新進行基準量測，將可能與之前潮位資料之基準不同，以基隆潮位站為例(如圖2.9所示)，基隆潮位站有1511、1513、1516三個站號，測站1513與測站1516可明顯看出基準不一致，表示更換測站編號前後可能因為儀器不同或人為疏失，且未重新進行基準量測，造成更換站號前後潮位資料基準不一致，因此在本研究中，對於測站編號更換前後未涵蓋相同時間潮位站資料或雖涵蓋相同時間但資料卻不一致等情形皆進行基準偏移量改正。潮位站資料之各項改正將於第三章中詳細說明。

圖2.6為本計畫使用臺灣附近海域之潮位站分佈圖，平均海平面永久服務中心(PSMSL)的潮位站資料分佈最廣，資料中包含中國大陸、日本與菲律賓等地潮位站資料，而中央氣象局的潮位站資料主要分佈於臺灣沿岸，最遠為澎湖潮位站，夏威夷大學海水位中心(UHSLC)的資料庫中僅使用基隆與高雄潮位站資料。另外，平均海平面永久服務中心(PSMSL)、夏威夷大學海水位中心(UHSLC)與中央氣象局皆有提供基隆與高雄潮位站資料，因此後續在使用基隆與高雄潮位站英文縮寫時，平均海平面永久服務中心(PSMSL)為KL與KS，UHSLC為KL2與

KS2，中央氣象局為KL3與KS3，如表2.3、表2.5與表2.6所示。

表 2.3 臺灣附近海域平均海平面永久服務中心(PSMSL)資料庫之潮位站資訊。平均海平面永久服務中心(PSMSL)的潮位站依地區分類，依序為中國大陸、臺灣、日本以及菲律賓

Country	Station ID.	Station name			Lon(°)	Lat(°)	Data period	
		Ch.	Eng.	Abbr.			RLR	Metric
China	610002	閩坡	Zhapo	ZP	111.8	21.6	1959-2012	1959-2012
	610004	西沙	Xi Sha	XS	112.3	16.8	1990-2012	1989-2012
	610016	坎門	Kanmen	KM	121.3	28.1	1959-2012	1959-2012
	611007	橫瀾島	Waglan Island	WGI	114.3	22.2	1987-2012	1987-2012
	611010	鰲魚涌	Quarry Bay	QB	114.2	22.3	1986-2012	1986-2012
	611012	大廟灣	Tai Miu Wan	TMW	114.3	22.3	1997-2012	1997-2012
	611014	大浦滘	Tai Po Kau	TPK	114.2	22.4	1963-2012	1963-2012
	611017	尖鼻咀	Tsim Bei Tsui	TBT	114.0	22.5	1974-2012	1974-2012
	611023	石壁	Shek Pik	SP	113.9	22.2	1998-2012	1998-2012
Taiwan	612002	基隆	Keelung	KL	121.7	25.1	1956-1995	1948-2010
	612012	高雄	Kaohsiung	KS	120.3	22.5	1973-1989	1973-2010
Japan	646003	內斯	Nase	NS	129.5	28.5	1981-2012	1981-2012
	646011	中之島	Nakano Sima	NKNS	129.9	29.8	1984-2012	1965-2012
	646021	沖繩	Okinawa	OKNW	127.8	26.2	1975-2012	1975-2012
	646024	那霸	Naha	NH	127.7	26.2	1966-2012	1966-2012
	646042	石垣島	Ishigaki	IGK	124.2	24.3	1986-2012	1986-2012
Philippines	660011	馬尼拉	Manila	MNL	121.0	14.6	1901-2011	1901-2011
	660021	黎牙實比	Legaspi	LGSP	123.8	13.2	1947-2011	1947-2011
	660101	宿霧	Cebu	CB	123.9	10.3	1935-2011	1935-2011

表 2.4 臺灣附近海域平均海平面永久服務中心(PSMSL)與夏威夷大學海水位中心(UHSLC)的潮位站資料之相關係數

Station ID. (PSMSL)	Station ID. (UHSLC)	Station name	Correlation coefficient
611010	329	Quarry Bay	1.00
612002	341	Keelung	-0.27
612012	340	Kaohsiung	0.32
646003	359	Nase	1.00
646011	345	Nakano Sima	1.00
646024	355	Naha	1.00
646042	365	Ishigaki	1.00
660011	370	Manila	1.00
660021	371	Legaspi	1.00

表 2.5 臺灣附近海域夏威夷大學海水位中心(UHSLC)資料庫之潮位站
資訊

Station ID.	Station name			Lon(°)	Lat(°)	Data period
	Ch.	Eng.	Abbr.			
341	基隆	Keelung	KL2	121.8	25.2	1980-2012
340	高雄	Kaohsiung	KS2	120.3	22.6	1980-2012

表 2.6 臺灣附近海域中央氣象局資料庫之潮位站資訊。表中排序前五
個潮位站位於臺灣五大商港

Ch.	Station name		Station ID.	Lon(°)	Lat(°)	Records (minutes)	Data period	Originator
	Eng.	Abbr.						
基隆	Keelung	KL3	1511	121.7	25.2	60	1992-2000	基隆港務局
			1513	X	X	60	2004-2006	基隆港務局
			1516	121.8	25.2	6	2006-2013	中央氣象局
蘇澳	Su-ao	SA	124	121.9	24.6	6	1991-2005	中央氣象局
			1246	121.9	24.6	6	2005-2014	中央氣象局
花蓮	Hualien	HL	125	121.6	24	6	1991-2003	中央氣象局
			1256	121.6	24	6	2003-2013	中央氣象局
高雄	Kaohsiung	KS3	148	120.3	22.6	60	1987-2006	高雄港務局
			1486	120.3	22.6	6	2004-2013	內政部
台中	Taichung Port	TCP	1433	120.5	24.3	10	1993-1997	港灣技術研究中心
			143	120.5	24.3	6	1997-1999	港灣技術研究中心
			1434	120.5	24.3	6	2001-2004	港灣技術研究中心
			1436	120.5	24.3	6	2004-2013	內政部
成功	Chenggong	CHG	127	121.4	23.1	6	1993-2005	中央氣象局
			1276	121.4	23.1	6	2002-2014	中央氣象局
東石	Dongshi	DS	116	120.1	23.4	6	1993-2004	中央氣象局
			1162	120.1	23.4	6	1999-2012	中央氣象局
			1166	120.1	23.5	6	2012-2014	中央氣象局
塭港	Wengang	WG	1361	X	X	60	1963-2002	經濟部水利署
			1366	120.1	23.5	6	2003-2013	中央氣象局
澎湖	Penghu	PH	135	119.6	23.6	60	1991-2007	中央氣象局
			1356	119.6	23.6	6	2007-2013	中央氣象局
新竹	Hsinchu	HSC	112	120.9	24.8	6	1992-2013	中央氣象局

X: 表示原始資料中未提供該項資訊

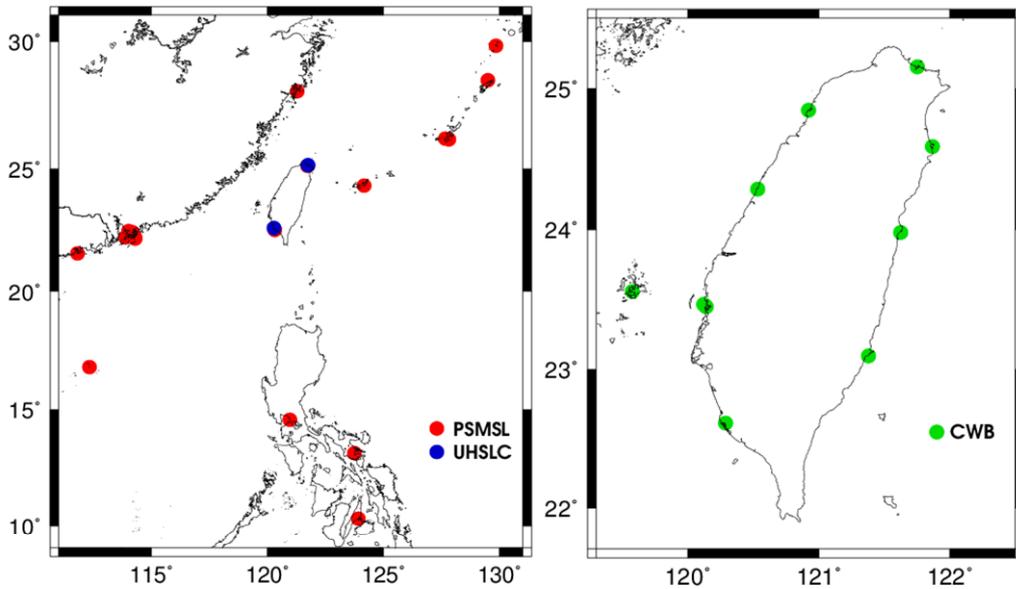


圖 2.6 臺灣附近海域之潮位站分佈圖。左圖：平均海平面永久服務中心 (PSMSL)與夏威夷大學海水位中心(UHSLC)的潮位站；右圖：中央氣象局(CWB)潮位站

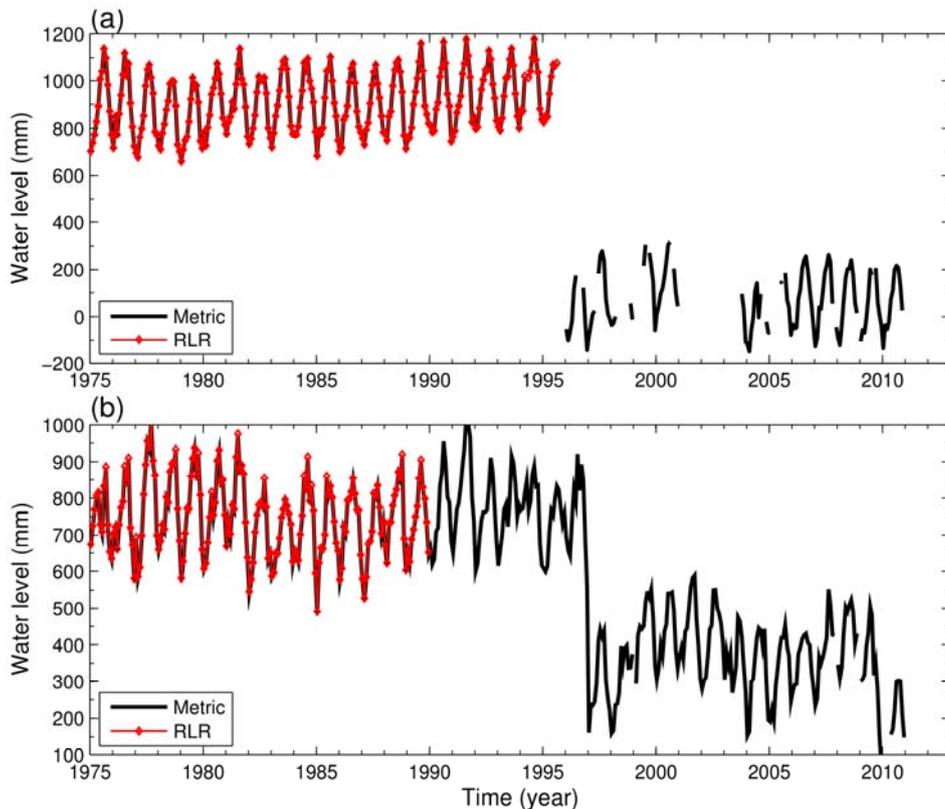


圖 2.7 平均海平面永久服務中心(PSMSL)之修正地方基準(RLR)和 Metric 潮位站資料比較圖。(a) 基隆潮位站，(b) 高雄潮位站

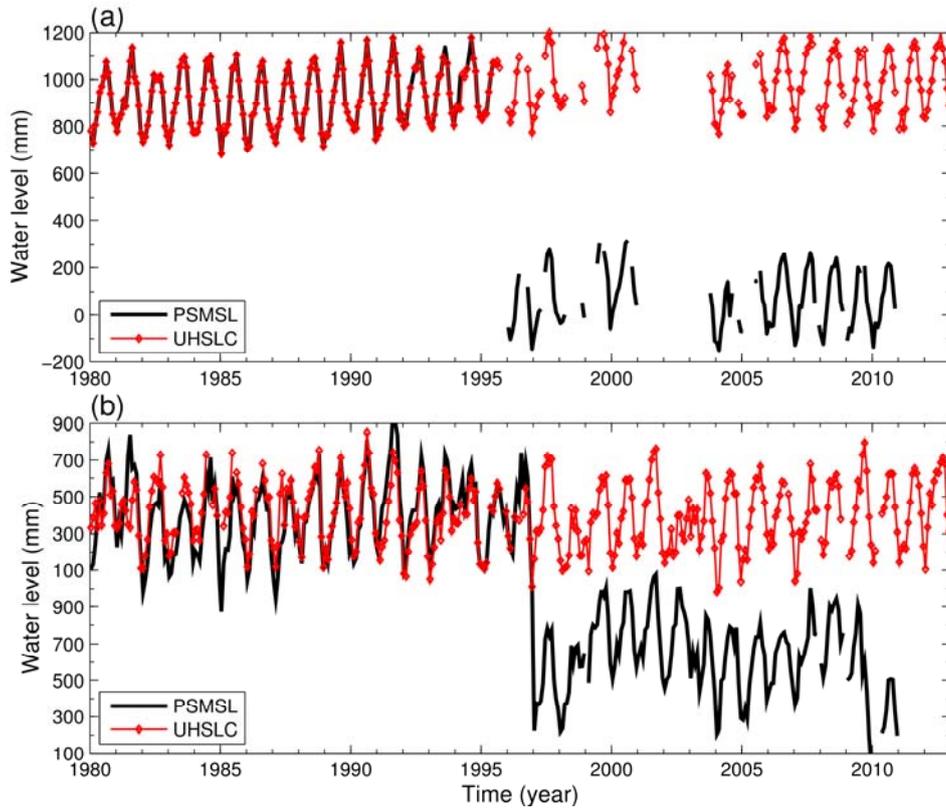


圖 2.8 平均海平面永久服務中心(PSMSL)與夏威夷大學海水位中心(UHSLC)之潮位站資料比較圖。(a) 基隆潮位站，(b) 高雄潮位站

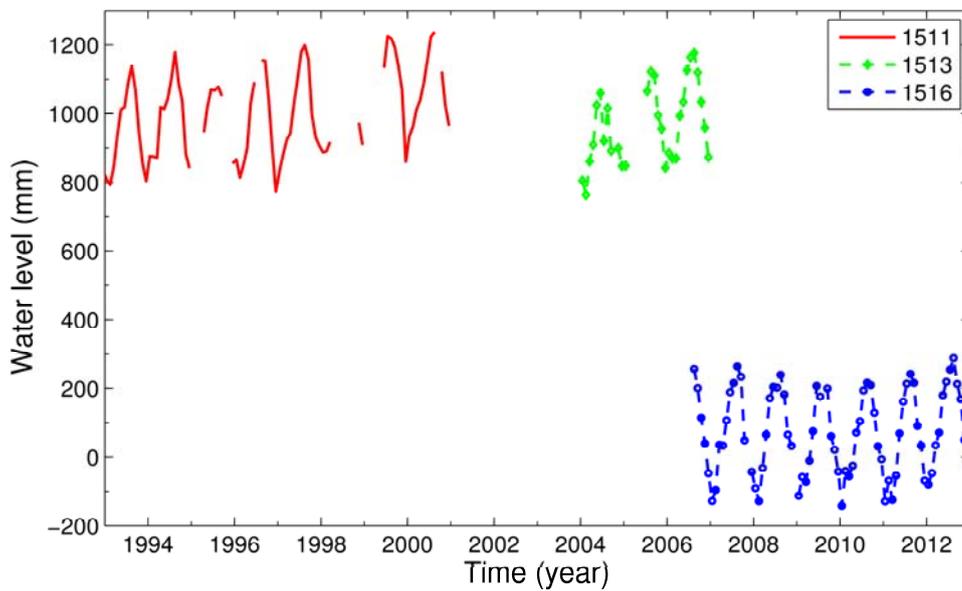


圖 2.9 中央氣象局之基隆潮位站資料比較圖。測站的資料均已平均為月平均資料

潮位站為觀測海水面變化的主要方式之一，由於潮位站資料包含潮位站地表垂直變動訊號，若以潮位記錄資料估算絕對海面上升速率時，則需考慮潮位站地表垂直變動速率，此外，還需進行海潮、逆氣壓效應以及基準偏移等改正。逆氣壓效應改正所需之海水表面大氣壓力資料可由下列三個資料中心取得：1. 歐洲中期天氣預報中心 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) [資料下載網址: <http://www.ecmwf.int/>]提供 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 全球海水面氣壓網格資料，時間間隔為6小時，模型中亦包含高度、相對濕度、溫度等資料。2. 美國國家氣象局國家環境預測中心 (National Centers for Environmental Prediction, NCEP) [Kistler *et al.* 2001] [資料下載網址: <http://www.cdc.noaa.gov>]提供 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 全球海水面氣壓網格資料，時間間隔為六小時，模型中亦包含風速、高度、相對濕度、大氣溫度等資料。3. 大氣研究資料庫 (Data Bank for Atmospheric Research, DBAR) [資料下載網址: <http://dbar.ttfri.narl.org.tw/Default.aspx>] 提供中央氣象局佈設於臺灣各地海水面氣壓觀測站之資料，全臺灣共有33個測站。根據前期(102年度)計畫成果可知，臺灣附近歐洲中期天氣預報中心 (ECMWF)與美國國家氣象局國家環境預測中心(NCEP)的海水面氣壓資料之相關係數皆趨近於1，表示兩海水面氣壓資料間具有一致性。而多數中央氣象局氣壓觀測站在2000年以前資料收集並不完整，如圖2.10所示，故本計畫不採用中央氣象局的海水面氣壓觀測資料。因此今年度(103年)本研究計畫將使用歐洲中期天氣預報中心 (ECMWF)氣壓資料進行各潮位站資料之逆氣壓效應改正。

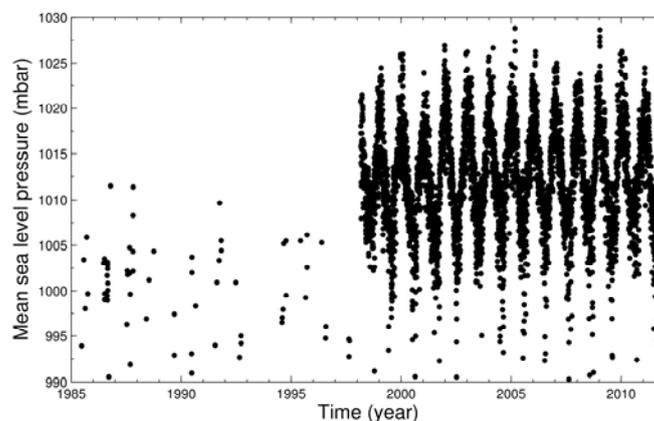


圖 2.10 中央氣象局之台中海水面氣壓觀測站資料

2.3 重力反演和氣候實驗(GRACE)重力衛星

2.3.1 重力反演和氣候實驗(GRACE)衛星介紹

宇宙中的物質遵守萬有引力定律，質量與質量之間互相吸引，在地球上的物體會受到地球自轉造成之離心力以及地球引力影響 [Torge, 1989]，這些力的合力稱為重力 g ，地球的平均重力為 9.8 ms^{-2} 。重力會受到質量分佈影響，由於地球非密度均勻之球體，當地球系統中質量重新分佈時，會造成重力的改變，因此地球各處之重力值並非一致。重力的改變可分為全球性的重力變化、區域性的重力變化以及局部性的重力變化 [Torge, 1989]。全球性重力變化為地球內部長時期逐漸形成之質量位移所造成；區域性重力變化週期長，一般發生在板塊構造邊緣如板塊運動造成之板塊擠壓，以及板塊內部如冰後回彈；局部性重力變化較劇烈且周期較短，一般為火山活動或地震所造成。除了地球內部質量重新分布以外，各種自然現象如地殼變動、風化、河流侵蝕等導致各種不同之地貌，亦會造成地球各處之重力差異。地貌變化為一緩慢之過程，於一般情況下，短時間內之地貌變化並未造成重力變化，因此重力場視為恆定，稱之為平均重力場 (Mean gravity field) 或靜態重力場 (Static gravity field)；除此之外，地球受到大氣層、陸地水文、海洋、冰山及冰河間水循環產生質量變化，此變化較前者而言快速且劇烈。短時間內之質量重新分布導致重力場變化，稱之為時變重力場 (Time variable gravity field) [陳盈樺, 2009]。近年來，全球環境變遷劇烈，例如因溫室效應造成南極和格陵蘭冰原融化，因此對時變重力場的研究越來越重視。

地球重力場主要由兩個方式描述：大地水準面 (Geoid) 與重力異常。大地水準面為自平均海水面像陸地延伸之一等位面，與無風、無洋流、無潮汐之海水面一致，為物理大地中重要之參考面。重力異常為地球實際重力場與大地水準面間之差異，通常來自於區域內之質量異常。重力異常可表現出地球實際重力場與一個均勻分布、沒有地形特徵之參考橢球表面重力場兩者間之差異，可凸顯地表上的重力強度變化。大地、地球物理及海洋學中對於重力異常之精度要求約為 1

mgal，大地水準面之相對精度為 1 至 2 公分。起初對於地球重力場之研究受限於儀器，僅能在陸地上利用重力儀觀測相對重力或絕對重力，雖然隨科技演進觀測精度提升，但是點位僅分布於陸地，無法建立完整包含全球且高精度之重力模型。人造衛星發明之後，藉由衛星之觀測量以及陸地、海洋之地面觀測至做重力場模型，然而模型僅於部分區域有高精度之成果，無精確之全球重力場模型，直到 2002 年重力反演和氣候實驗(GRACE)發射後則成功解決此問題。

重力反演和氣候實驗(GRACE)衛星由美國航空暨太空總署(NASA)與德國太空中心共同研發發射，其科學目的為觀測靜態和動態重力場變化以及重力場與氣候變遷之關係 [Tapley *et al.*, 2004a]，計算全球高解析度重力場解以及瞬時之重力變化。透過重力變化觀測水文質量交換為重力反演和氣候實驗(GRACE)任務主要目標之一，由於地表質量之變化較地球內部大且快速，在移除大氣質量之影響後，可由重力反演和氣候實驗(GRACE)之觀測量反推水文變化。

重力反演和氣候實驗(GRACE)的軌道高度為 485 公里，軌道傾角為 89 度，空間解析度可高達 400 公里 [Tapley *et al.*, 2004b]，可解決極區未經過之區域，觀測資料範圍涵蓋整個地球，軌道週期為 90 分鐘。重力反演和氣候實驗(GRACE)由兩顆子衛星所組成(如圖 2.11 所示)，衛星上裝載以下裝置：

- (1) K 波段測距(K-band Ranging, KBR)系統：發射 24 和 32 *GHz* 雙頻的微波訊號，每秒量測兩顆子衛星之間的距離，精度約 $1\mu m$ 。
- (2) 超穩定之微型震盪器 (Ultra-Stable Oscillator, USO)：提供 K 波段測距穩定的頻率。
- (3) 超星加速度 (SuperSTAR Accelerometers, ACC)：精密計算衛星的非重力加速度。
- (4) 恆星敏感器 (Star Camera Assembly, SCA)：利用兩顆子衛星與星體的相對位置計算出子衛星的位置。

(5) Black-Jack GPS Receiver and Instrument Processing Unit (GPS)：訊號處理，計算相對於全球衛星定位系統(GPS)衛星距離的改變。

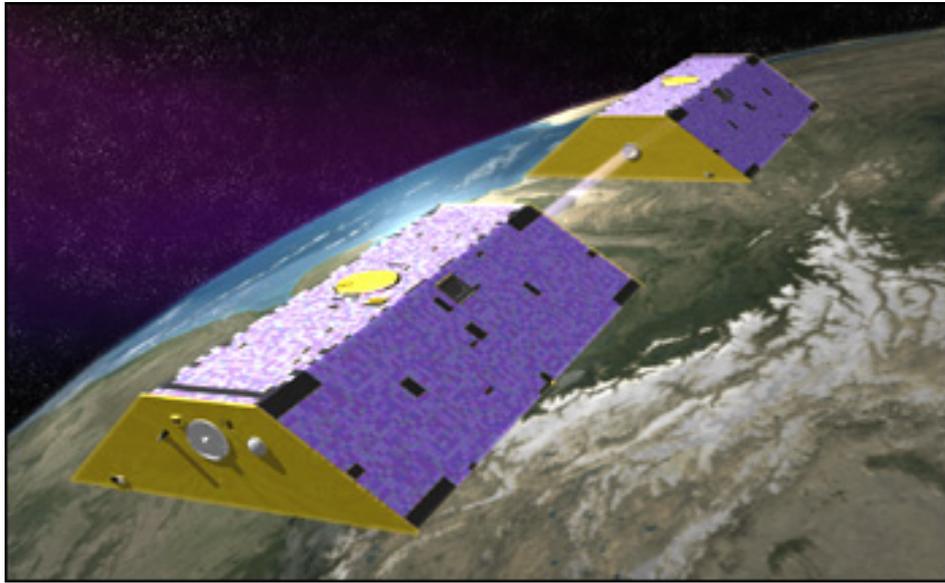


圖 2.11 重力反演和氣候實驗(GRACE)重力衛星示意圖 [圖片來源：<http://earthobservatory.nasa.gov/Features/GRACE/>]。

自 2002 年發射後，空間研究中心(Center for Space Research, CSR)、噴氣推進實驗室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)、德國地球科學研究中心 (GeoForschungsZentrum, GFZ) 三個單位分別提供各自所計算之重力反演和氣候實驗(GRACE)月平均之 2-60、2-180 階與 2-120 階球諧係數重力場解。球諧係數為拉普拉斯方程式 (Laplace's equation) 在球面坐標系之解，由於其正交性質，大地領域中常利用球諧係數展開來代表地球重力場、大地起伏、重力異常等相關研究 [Hofmann-Wellenhof and Moritz, 2006; 游輝欽, 2000]。各階的球諧係數互相不影響，而計算階數愈高之係數所產生之重力場解空間解析度則愈高。萬有引力位與球諧係數之間的關係可由下式表示 [Heiskanen and Moritz, 1967]：

$$V(r, \phi, \lambda) = \frac{GM}{r} \left\{ 1 + \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{R_E}{r} \right)^n \bar{P}_{nm}(\sin \phi) [\bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda] \right\} \dots \dots \dots (2.3)$$

其中 r 為觀測點位置至坐標原點距離， $G = 6.6742 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kgs}^2$ ， M 為

地球質量， R_E 為地球平均半徑(6378136.3 m)， n 為階數(Degree)， m 為次數(Order)， \bar{C}_{nm} 與 \bar{S}_{nm} 為正規化 Stokes 球諧係數， \bar{P}_{nm} 為正規化之雷建德函數(Normalized associated Legendre function)， θ 為餘緯度(Co-latitudes)， φ 為經度。重力反演和氣候實驗(GRACE)重力場球諧係數解中缺少零階與一階項。零階項表示地球的總質量，包含固體地球、海洋及大氣等，為一定量，理論上不會增減，故球諧係數解中零階項 \bar{C}_{00} 與 \bar{S}_{00} 之變化為零 [Wahr *et al.*, 1998]。一階球諧係數表示地球質心在地固坐標系統中的位置 [Cretaux *et al.*, 2002]，在重力反演和氣候實驗(GRACE)的任務中，重力場參考地球瞬時之質量中心，也就是說任何時刻的 \bar{C}_{10} 、 \bar{C}_{11} 、 \bar{S}_{11} 皆為零。

重力反演和氣候實驗(GRACE)球諧係數重力場解中， \bar{C}_{20} 受到軌道誤差以及其他因素影響導致誤差較大，而此項係數之誤差會影響海水質量變化之計算，使計算之海水質量有較大之海水面變化速率 [Chen *et al.*, 2005]，若以衛星雷射測距 (Satellite laser ranging) 觀測之 \bar{C}_{20} 取代重力反演和氣候實驗(GRACE)的重力場解之 \bar{C}_{20} ，其估計之海水質量與比容海水面後之衛星測高資料較吻合 [Chen *et al.*, 1999]。

2.3.2 重力反演和氣候實驗(GRACE)重力衛星觀測原理

以往衛星觀測方式為主動式—對地表發射訊號並接收反射訊號以計算觀測量；以及被動式—接收地表發射之輻射訊號，而重力反演和氣候實驗(GRACE)與以往地球觀測任務衛星不同。重力反演和氣候實驗(GRACE)計畫由兩顆子衛星組成，包括位於前端的子衛星(重力反演和氣候實驗(GRACE)-A)，以及位於後端的子衛星(重力反演和氣候實驗(GRACE)-B)，兩子衛星相距平均 220 公里。重力反演和氣候實驗(GRACE)在軌道上運行時，兩子衛星以微波脈衝訊號相連接，並持續紀錄兩子衛星間之距離變化。假設行經地面重力較大地區時，首先重力反演和氣候實驗(GRACE)-A 受到重力影響而飛行速度加快，使得兩子衛星距離增加；而當重力反演和氣候實驗(GRACE)-A 通過而重力反演和氣候實驗(GRACE)-B 接近該地區時，重力反演和氣候實驗

(GRACE)-A 受重力影響而飛行速度減慢，同時重力反演和氣候實驗 (GRACE)-B 速度增加，兩子衛星間距離則縮短；最後當重力反演和氣候實驗 (GRACE)-B 飛離時，受重力影響而飛行速度降低；反之當通過重力較小地區時情況則相反。重力反演和氣候實驗 (GRACE) 沿軌道路徑記錄兩衛星距離變化，此觀測量經計算轉換後即可以得到沿軌道地面路徑 (Ground track) 之重力場變化。重力反演和氣候實驗 (GRACE) 所測得之重力場變化來自於地表與內部地殼變動，陸上水文變化，以及冰山、冰棚與海水間的質量交換。除了觀測重力變化外，重力反演和氣候實驗 (GRACE) 重力衛星同時可觀測地球大氣層，其結果對於全球氣候變遷之研究有莫大貢獻。

2.3.3 去相關(Decorrelation)演算法

Swenson 和 Wahr [2006] 發現重力反演和氣候實驗 (GRACE) 重力場解係數間呈現相關造成計算之重力場呈現條紋 (Stripes)，此相關性需要去除。去相關的方法可以分成兩種，第一種是經驗法 (Empirical method)，此種方法無須任何相關資訊 [例如 Swenson and Wahr, 2006]。另一方法則需球諧係數訊號的誤差變方協變方 (An error variance-covariance matrix) [Kusche, 2007]。本研究採用 Duan 等人 [2009] 利用經驗法所推導之去相關濾波，其基本概念為讓低階之階數和次數係數不改變，而其他階數和次數利用移動視窗多項式濾波 (Moving-window polynomial filter) 進行處理，視窗寬度用來決定濾波的強度。圖 2.12 為 GRACE 重力場解之球諧係數誤差，黑色曲線為不改變之低階係數，第一條黑色曲線其階數和次數 (l, m) 由 (20,0) 到 (10, 10)，其他黑色曲線和第一條曲線相似 [Duan *et al.*, 2009]。

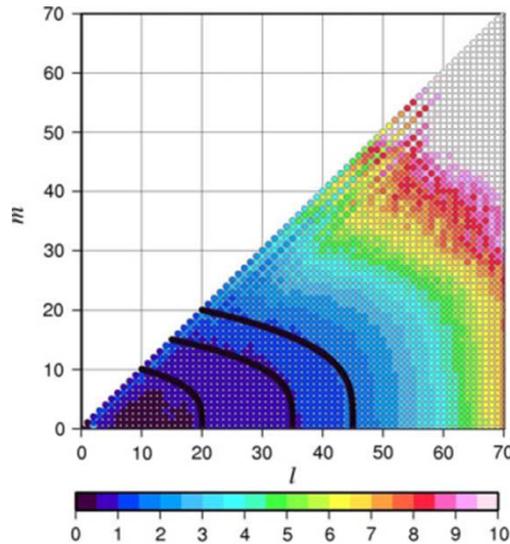


圖 2.12 重力反演和氣候實驗(GRACE)球諧係數之誤差 (Scaled by $\times 10^{12}$)，三條黑色曲線用來表示沒有變化之區域[Duan *et al.*, 2009]

依據圖 2.11，不變區域黑色曲線可以下式來表示

$$n = n_0 + \beta m^r \dots\dots\dots (2.4)$$

其中 n 和 m 分別為階數和次數，依據重力反演和氣候實驗(GRACE)公佈 04 版本計算之 $r=3.5$ ， n_0 和 β 則由黑色曲線兩端點之 (n,m) 來定義，其中一端點的 $m=0$ ，另一端點 $n=m$ 。

Duan 等人[2009]採用 Swenson 和 Wahr [2006] 移動視窗的方法，但採用二次多項式，且視窗大小利用誤差模式來決定，其理論為誤差越大，越多係數被濾除，因此視窗口寬度越小。視窗口寬度可由下式來計算：

$$\omega = \max \left\{ Ae \frac{\left[\frac{(1-\gamma)m^p + \gamma n^p}{K} \right]^{n/p}}{K} + 1.5 \right\} \dots\dots\dots (2.5)$$

求得後無條件去除小數取得奇整數。

其中 $A = 30$ 為常數， $\gamma = 0.1$ 和 $p = 3$ 為常數，可擬合圖 2.11 之誤差模式，函數 $\max()$ 為兩者之最大值，最後 K 用來決定視窗大小。

相較於其他去相關濾波演算法，Duan 等人 [2009] 利用均方根 (Root mean square, RMS) 計算來評估去除條紋的成果，成果顯示視窗大小採用 $K = 15$ 和 $UP = (35, 0) (10, 10)$ 可取得最小均方根(RMS)。本研究後續利用 GRACE 計算海水質量變化皆採用此組數據進行計算。

2.3.4 高斯濾波(Gaussian Filter)

重力反演和氣候實驗(GRACE)重力場解中高階球諧係數(階數大於 15 階)之雜訊較訊號強，因此實際使用重力反演和氣候實驗(GRACE)資料時需採用濾波消除計算質量之雜訊。本研究採用高斯濾波，高斯濾波為一低通濾波，可用來消除資料中的高頻訊號。高斯濾波公示可寫成：

$$G(x) = \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}\right)$$

$$\sigma_x = -\frac{r_x}{\sqrt{2\ln(2)}} \dots\dots\dots(2.6)$$

其中 r_x 為濾波半徑 (本研究採用 300 公里)， x 為地心角度 (Geocentric angle)。

2.3.5 洩漏效應(Leakage effect)

重力反演和氣候實驗(GRACE)重力場解的空間解析度為 300-600 公里，因為訊號變化不均勻且不連續，故產生所謂洩漏效應，例如質量變化訊號在陸地上遠大於海洋，故陸地上的訊號會洩漏到海洋上，使得海洋上計算之質量變化大於真實訊號。Wahr 等人 [1998] 提出一演算法用來減低洩漏效應，此演算法簡單地分別平滑陸地和海洋區域。Guo 等人 [2010] 改進 Wahr 等人 [2008] 之演算法，其處理步驟為：1. 平滑重力反演和氣候實驗(GRACE)計算之全球質量來移除大部分的誤差或條紋，然後令海洋質量為零，這裡我們稱之為平滑後之陸地質量。2. 利用步驟 1 之平滑後陸地質量來計算重力位球諧係數，然後從重力反演和氣候實驗(GRACE)球諧係數中減去，取得海洋質量之

重力球諧係數。3. 利用步驟2計算之球諧係數計算海洋質量，並進行平滑。[Guo *et al.*, 2010].

由圖 2.13 可見，為進行洩漏改正前，海岸旁的質量變化相對來說過大或過小，改正後與真實訊號較為相近。

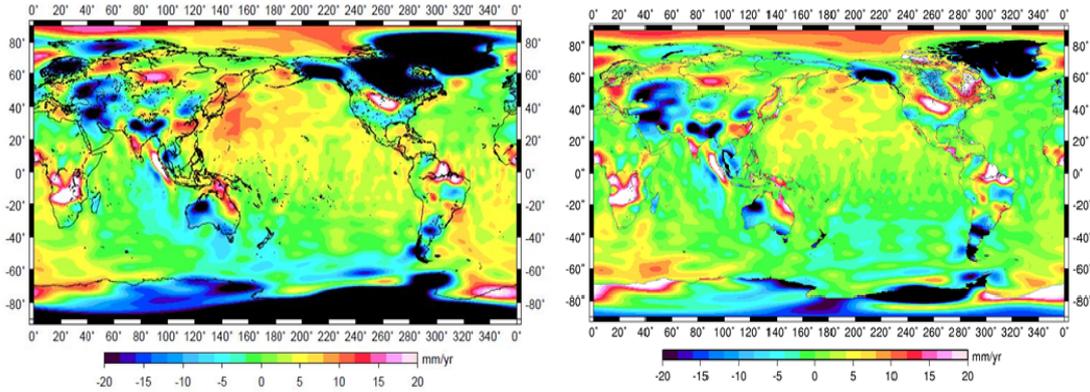


圖 2.13 重力反演和氣候實驗(GRACE)重力場解計算之海洋質量。左：未進行洩漏效應改正，右：進行洩漏效應改正

2.3.6 海水質量變化計算

本研究採用空間研究中心(CSR)發佈之月平均重力反演和氣候實驗(GRACE)的重力場解 (L2 Release 5 or RL05 產品，此版本之低階項球諧係數，例如 J_2 項，比以前版本精度已經大幅改進)，稱之為重力反演和氣候實驗(GRACE)衛星重力模型 (GRACE satellite-only model, GSM)，重力場解以球諧係數形式提供 2-60 階。計算海水質量變化之處理流程如圖 2.14 所示。當利用重力反演和氣候實驗(GRACE)的觀測量計算重力場球諧係數解時，表示 non-IB barotropic 訊號之大氣-海洋去混疊模型 (Atmosphere-ocean de-aliasing (AOD) model) 被當成背景力模式，用來減低海洋高頻之 barotropic 訊號，因本研究要計算海洋質量變化，故需將大氣-海洋去混疊(AOD)模型加回重力反演和氣候實驗(GRACE)重力場解中，因此步驟 8 中將大氣-海洋去混疊(AOD)資料經過高斯濾波平滑加到步驟 7 計算之海洋質量變化中。

依據 Wahr 等人 [1998]，水高變動可由重力場球諧係數變化， $\overline{\Delta C_{nm}}$, $\overline{\Delta S_{nm}}$ ，計算求得，其公式如下所示：

$$\Delta h(\theta, \lambda) = \frac{a\sigma_E}{3\sigma_w} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n \bar{P}_{nm}(\cos\theta) \frac{(2n+1)}{(k_n+1)} \times (\Delta\bar{C}_{nm} \cos(m\lambda) + \Delta\bar{S}_{nm} \sin(m\lambda))$$

.....(2.7)

其中 σ_w 為純水密度 (1000 kg m^{-3})， σ_E 為地球平均密度 (5517 kg m^{-3})， $\Delta\bar{C}_{nm}$ 與 $\Delta\bar{S}_{nm}$ 為 \bar{C}_{nm} 、 \bar{S}_{nm} 減去所有月份球諧係數平均值，即為隨時間變化之斯托克斯(Stokes)球諧係數， k_n 為洛夫數 (Love number)。

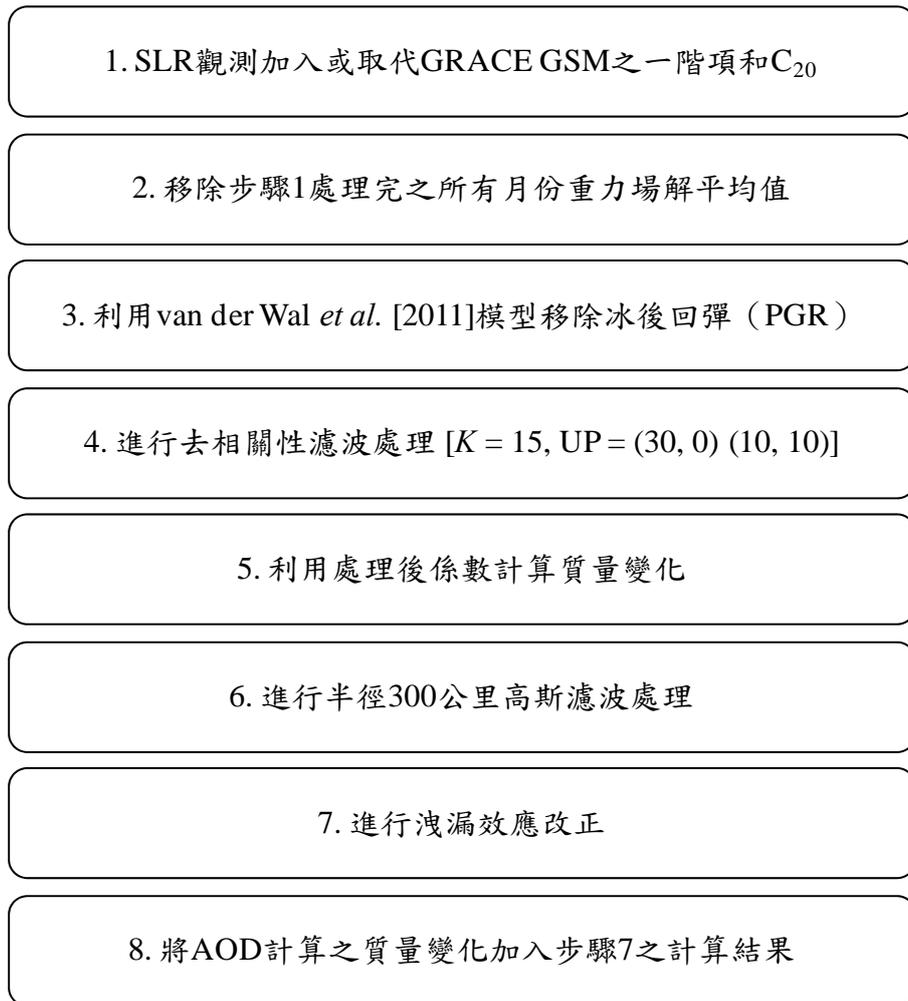


圖 2.14 重力反演和氣候實驗(GRACE)重力場解計算質量變化流程圖

2.4 溫度與鹽度資料

本計畫利用海洋各深度之溫度與鹽度資料估算比容海水面變化 [Gill, 1982]。計畫中採用的溫度與鹽度資料為Ishii和Kimoto [2009]更新後之資料，該資料為一組 $1^\circ \times 1^\circ$ 之月平均海水溫度和鹽度網格資料，資料涵蓋時間為1945/01-2012/12，涵蓋範圍近乎全球，資料由海水表面至水深1500 m共分為24層。

比容海水面可分為由溫度所造成之海水面變化稱為熱比容海水面，以及由鹽度所造成之海水面變化稱為鹽比容海水面，兩者間之關係為非線性 [Pattullo *et al.*, 1955]。熱比容海水面佔比容海水面中之大部分，約為鹽比容海水面造成之十倍，

比容海水面可由海水溫度及鹽度資料計算海水密度加上由深度轉換之壓力積分求得，其公式如下：

$$h_{steric} = \int_{z_1}^{z_2} \frac{\rho_0(S_0, T_0, z) - \rho(S, T, z)}{\rho_0(S_0, T_0, z)} dz \dots\dots\dots (2.8)$$

其中 S_0 與 T_0 為長時間平均之鹽度及溫度資料， S 與 T 為月平均之鹽度及溫度資料， ρ 和 ρ_0 分別為海水密度和參考海水密度， z 為海水深度，可由考慮溫度及鹽度混合效應之狀態方程 (equation of the state) 計算求得 (Gill, 1982)。

第三章 潮位站資料改正

潮位站觀測量為相對於岸邊固定基準點之水位變動觀測值，基準點可能受地表面垂直變動影響而使潮位站觀測資料含有自然之海水面變化與長期或短期之地表垂直變動資訊。若以未經修正之潮位站資料來估算海水面上升速率，將求得相對於潮位站地表面之海水面上升速率。本研究之目標為估計台灣四周海域絕對海水面上升速率，因此潮位站資料需進行地表垂直變動改正。此外，還需改正天體引力造成之海潮和氣壓變化造成之逆氣壓效應以及人為造成之偏移量來移除非海洋變化之訊號。本章將分別說明海潮效應、逆氣壓效應、資料偏移量與潮位站地表垂直變動速率之改正理論與方法，並於下一章(第四章)比較改正前(未改正)與改正後之海水面上升速率成果，並估計台灣海域絕對海水面上升速率。本研究中將使用間接平差進行海水面上升速率估算與海潮效應擬合等，因此在 3.6 節詳細說明間接平差理論，並利用海水面上升速率與地表垂直變動速率為計算範例進行說明。

3.1 海潮改正

潮汐是由於天體相對運動引起的引潮力所造成，不同的引潮力可對應至特定的潮汐週期，不同的潮汐週期稱之為分潮，理論上潮汐包括無限多的分潮成份，但應用上只就主要分潮進行分析。一般而言，海潮效應常以平均潮位資料來降低或調和分析法(Harmonic analysis)來移除，然而潮位資料中若包含基準偏移時(如圖 3.1 所示)，若以平均潮位資料來移除海潮效應時，於基準偏移發生時間附近之潮位資料將受到偏移量之影響，而產生誤差。本計畫利用目前最常使用的調和分析法(Schwartz, 2005)估算各分潮之震幅，並且於調和分析法中加上 m 個步階函數 b_j 來擬合偏移量，以避免偏移量影響海潮效應之改正，其公式如下：

$$TG(t) = a_0 + a_1 t + \sum_{i=1}^n [A_i \sin(\omega_i t) + B_i \cos(\omega_i t)] + \sum_{j=1}^m b_j \dots\dots\dots (3.1)$$

其中

TG : 潮位站觀測水位高度資料

t : 時間

a_0 、 a_1 、 A_i 、 B_i 、 b_j : 未知參數，其中為 a_0 與 a_1 分別為時間序列之偏移量與斜率， b_j 為步階函數(m : 基準偏移之個數)， C_i 為各分潮之振幅 ($C_i = \sqrt{A_i^2 + B_i^2}$)

n : 分潮個數，本研究 $n=37$ ，37 個分潮的週期請參閱附錄一

ω_i : 各分潮之頻率

本計畫以間接平差計算方式，依最小二乘法原理求解式(3.1)中未知參數(間接平差請參閱第 3.6 節)，再將擬合的高頻訊號(週期 < 28 天)自潮位站資料中移除，以提高日後推算海水面上升速率之精度。以中央氣象局提供的基隆與高雄潮位站資料為例(如圖 3.1 與圖 3.2 所示)，未改正海潮效應的基隆與高雄潮位站資料中皆包含高頻海潮訊號以及基準偏移情形，依最小二乘法原理求得式(3.1)中的未知參數(由基隆與高雄潮位站資料估算式(3.1)的未知參數，請參閱附錄二)，再將擬合高頻海潮訊號自潮位站資料中移除後顯示出低頻訊號(週期 > 182 天)。比較海潮改正前後之基隆與高雄潮位站資料可以清楚看出，移除高頻海潮訊號後之剩餘低頻訊號中含有明顯之年週期與半年週期海水面變化，如圖 3.3 所示。

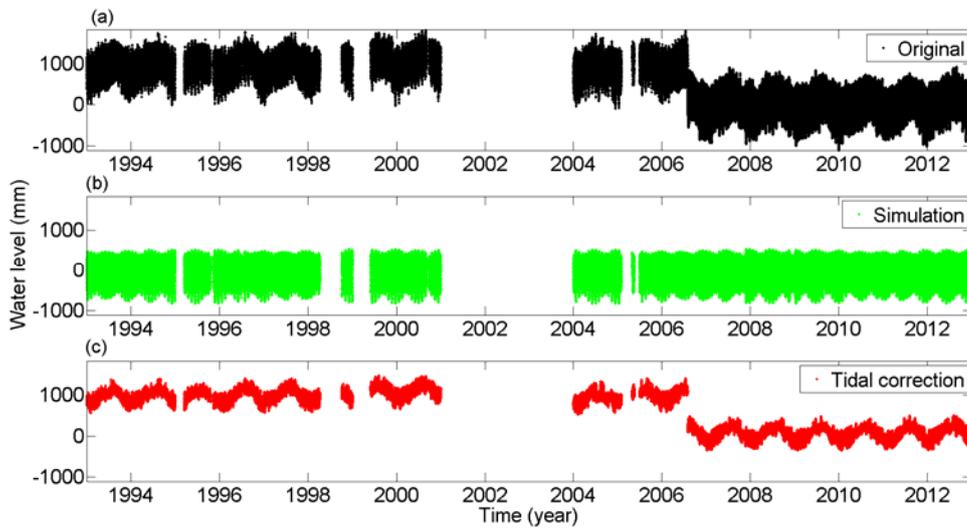


圖 3.1 基隆潮位站之海潮效應改正。(a) 未改正海潮效應之潮位資料，
(b) 擬合高頻海潮訊號，(c) 移除高頻海潮訊號分量後之潮位資料

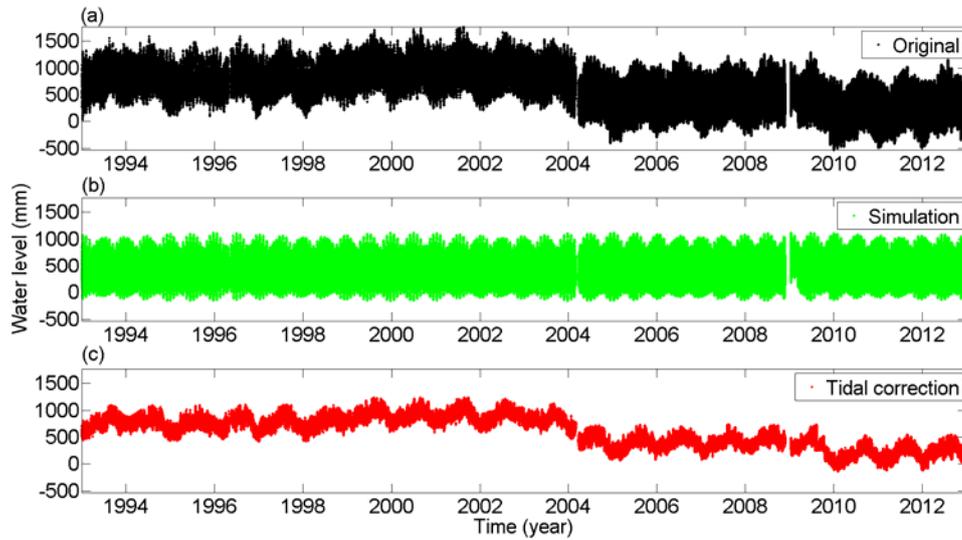


圖 3.2 高雄潮位站之海潮效應改正。(a) 未改正海潮效應之潮位資料，
(b) 擬合高頻海潮訊號，(c) 移除高頻海潮訊號分量後之潮位資料

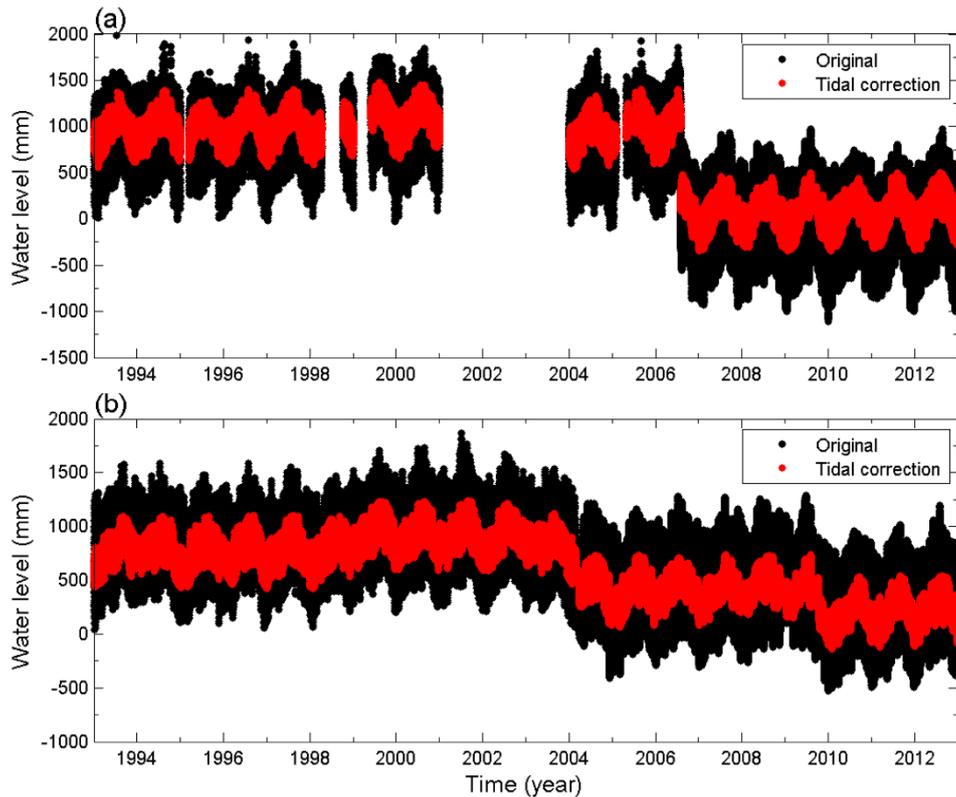


圖 3.3 海潮改正前後之基隆與高雄潮位站資料差異圖。(a) 基隆潮位站、(b) 高雄潮位站。黑色時間序列(Original)為未改正海潮效應之潮位資料，紅色時間序列(Tidal correction)為移除高頻海潮訊號分量後之潮位資料。基隆潮位站資料在進行海潮改正前、後的標準偏差分別為 424 mm、339 mm。高雄潮位站資料在進行海潮改正前、後的標準偏差分別為 315 mm、215 mm

3.2 逆氣壓改正

先前之海水面變化研究中，較少考慮逆氣壓效應對海水面上升速率計算之影響，然而研究發現，除了熱帶和西邊界流(western boundary current)等區域外，海洋各處海水面變化皆受到大氣壓力變化的影響 [Wunsch and Stammer, 1997]，故本計畫各潮位站資料皆進行逆氣壓改正。一般而言，當氣壓升高 1 mbar，海水面高度約降低 1.01 cm [Chelton and Enfield, 1986]。逆氣壓效應改正(*IB*; 單位:公釐)公式如下所示：

$$IB = -9.948 \times (P_{atm} - P) \dots \dots \dots (3.2)$$

其中， P_{atm} 為海水表面壓力（單位為毫巴）， P 為隨時間變化之全球平均海水表面壓力，尺度因子 9.948 為中緯度之經驗值 [Wunsch, 1972]

公式(3.2)中 P 為隨時間變化之全球平均海水表面壓力(如圖 3.4 所示)，全球海水表面壓力平均應為常數不變，故公式中 P 之目的為移除全球平均氣壓變化之斜率影響。本計畫使用的潮位站資料分別為平均海平面永久服務中心(PSMSL)月平均資料、夏威夷大學海水位中心(UHSLC)日平均資料與中央氣象局之資料(包含每 6 分鐘、10 分鐘與 60 分鐘之潮位記錄資料)，根據前期(102 年度)計畫成果，利用不同時間段平均之 P 值(6 小時、日及月平均全球平均海水面壓力)對台灣四周潮位站的逆氣壓效應改正之影響甚小，因此本研究皆使用月平均全球平均海水表面壓力變化來進行逆氣壓效應改正。而海水表面壓力 P_{atm} 亦沿用前期(102 年度)之改正方式，平均海平面永久服務中心(PSMSL)潮位站資料為月平均資料，故逆氣壓改正之 P_{atm} 則為月平均資料；而夏威夷大學海水位中心(UHSLC)與中央氣象局潮位站資料的逆氣壓改正之 P_{atm} 則使用日平均資料。

以中央氣象局提供的基隆與高雄潮位站資料為例（如圖 3.5 與圖 3.6 所示），逆氣壓效應改正前後的基隆與高雄潮位站資料差異不大，兩潮位站資料經逆氣壓改正後的標準偏差皆降低，而基隆與高雄潮位站上的逆氣壓效應主要為季節性變化(年週期與半年週期)。

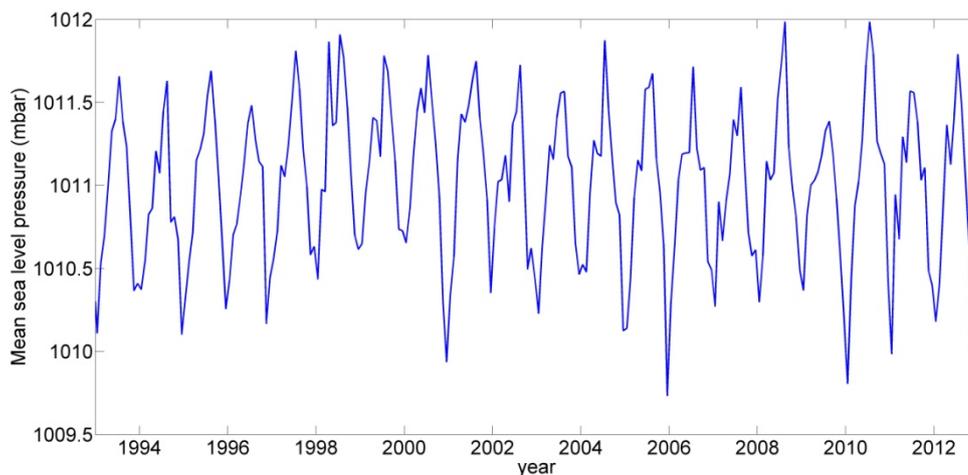


圖 3.4 歐洲中期天氣預報中心(ECMWF) 月平均全球平均海水面壓力

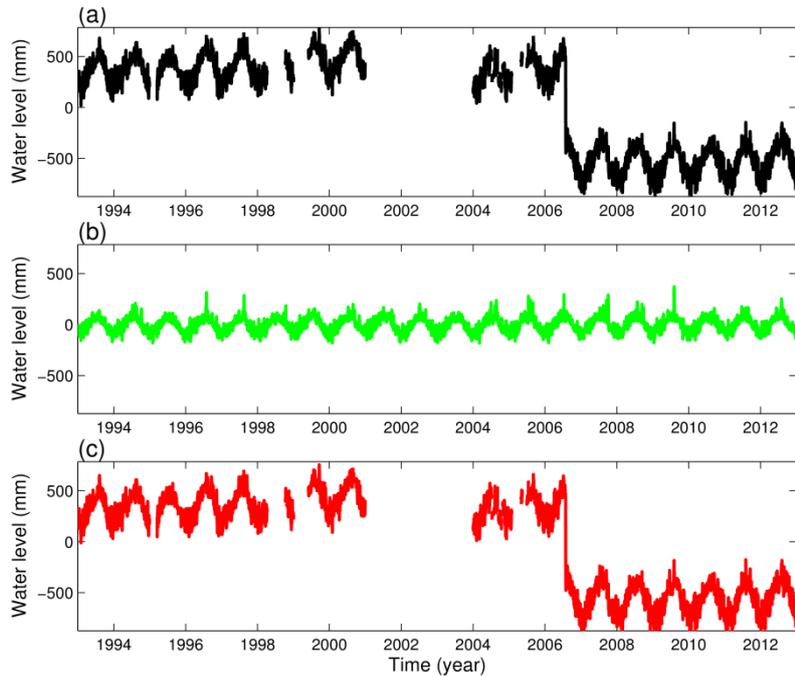


圖 3.5 基隆潮位站之逆氣壓效應改正。(a) 未改正逆氣壓效應之潮位資料，(b) 逆氣壓效應，(c) 改正逆氣壓效應後之潮位資料。基隆潮位站資料在進行逆氣壓效應改正前、後的標準偏差分別為 473 mm 、 465 mm

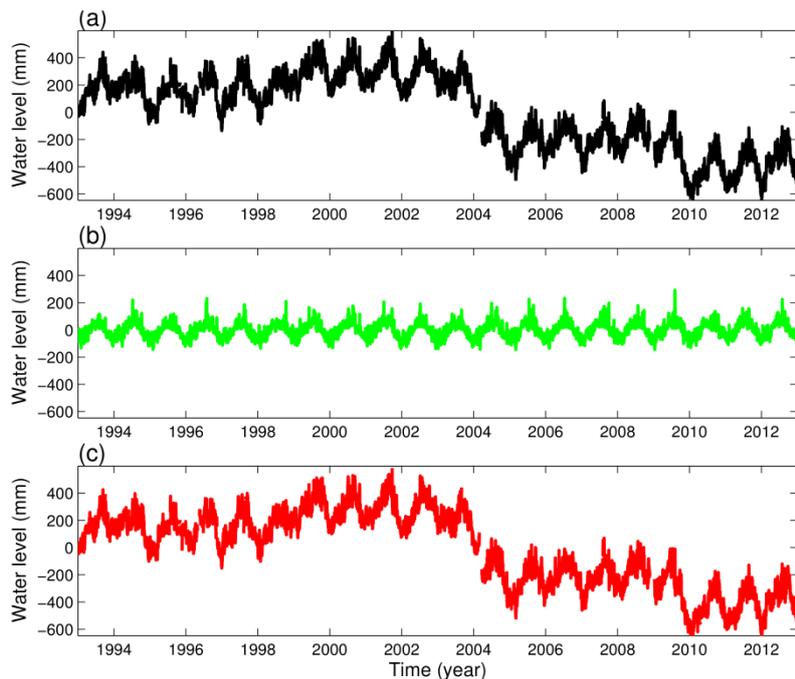


圖 3.6 高雄潮位站之逆氣壓效應改正。(a) 未改正逆氣壓效應之潮位資料，(b) 逆氣壓效應，(c) 改正逆氣壓效應後之潮位資料。高雄潮位站資料在進行逆氣壓效應改正前、後的標準偏差分別為 277 mm 、 272 mm

3.3 偏移量改正

潮位站使用一段時間後，因儀器調整、設備維修、儀器更換或變更設置地點(遷站)等情形，造成觀測記錄中斷。理論上儀器更換或遷站皆須按規定重新量測參考基準，而實際上常常不按照規定進行基準重新量測，造成新舊觀測資料之參考基準不一致，因此使用潮位站資料前需先檢查資料是否有基準偏移之情形[陳進益，2014]。本研究偏移量偵測主要分為三個部份，第一部份為潮位站換站檢測，潮位站可能有多個不同的測站編號(如表 2.6 所示)，而更改測站編號通常是因為儀器更換或遷移，若儀器更換或位置遷移後，無重新進行基準量測，則後續觀測資料將與先前資料存在一偏移量，因此若測站編號更換前後未涵蓋相同時間潮位資料或雖涵蓋相同時間，但資料卻有不一致情形皆需進行基準偏移量改正。第二部分為資料中斷檢測，潮位站觀測儀器因為故障、機器維修或設備更換等因素造成觀測記錄中斷，當潮位站資料不連續時，代表潮位資料中可能有基準偏移情形[陳進益，2014]。然而若以記錄中斷為檢核條件，將會檢測出許多中斷情形，以中央氣象局潮位站資料為例，10 個潮位站資料中，中斷超過一個月的事件共發生 172 次，平均一個潮位站資料會有 17 次中斷情形，然而記錄中斷事件與基準偏移量情形並非完全相關，因此本研究以記錄中斷半年之上事件為門檻值，若超過半年以上中斷記錄，將視該時間點有資料偏移情形。本研究使用的中央氣象局潮位站資料中含有記錄中斷時間超過半年的次數共有 8 次。第三部份進一步分析潮位資料中是否有基準偏移之情形，以中央氣象局基隆與高雄潮位站資料為例之步驟說明如下，

- (1) 進行偏移量偵測之前，為了減少其他已知訊號影響偏移量偵測，先將上述海潮與逆氣壓效應自潮位站資料中移除（如圖 3.7 與圖 3.8 所示），圖中潮位資料皆已移除海潮與逆氣壓效應。
- (2) 為了降低季節性(年周期與半年週期)訊號對偏移量偵測之影響，利用六參數擬合步驟(1)處理後之潮位資料，擬合公式如下，

$$TG(t) = a + bt + c \sin(2\pi t) + d \cos(2\pi t) + e \sin(4\pi t) + f \cos(4\pi t) \quad (3.3)$$

其中， TG 為步驟(1)處理後之潮位站資料， a 為偏差， b 為斜率， c 和 e 分別為年訊號和半年訊號之正弦振幅， d 和 f 分別為年訊號和半年訊號之餘弦振幅， t 為時間。式(3.3)以間接平差計算方式，依最小二乘法原理，求解式中未知參數(間接平差計算方式請參閱第 3.6 節)。擬合之基隆與高雄潮位站資料的季節性(年周期與半年週期)訊號如圖 3.7 與圖 3.8 所示。

- (3) 將步驟(1)處理後之潮位站資料與步驟(2)擬合之季節性(年周期與半年週期)訊號進行相減，將季節性訊號自潮位資料中移除，結果如圖 3.7 與圖 3.8 所示。由圖中可明顯看出季節性(年周期與半年週期)訊號已被移除。
- (4) 將步驟(3)處理後之潮位站資料以哈爾(Haar)小波分解(wavelet decomposition)進行分解，然後移除資料中的高頻訊號，保留低頻訊號(如圖 3.9 與圖 3.10 所示)。由圖可知，移除高頻訊號後，低頻訊號變得相對平滑，僅在基準偏移點位附近有較大變化。
- (5) 將步驟(4)處理後之剩餘低頻訊號進行相臨時間海水面變化值相減(差值)，分析訊號中在短時間內是否有劇烈變化(spike)。然而在評估前需對相減值(差值)設定門檻值，若相減值(差值)大於設定的門檻值，該時間可能存在基準偏移。設定門檻值需利用台灣附近無基準問題的水位變化資料，估算出較適合的門檻值。因衛星測高觀測絕對海水面變化，且本研究使用之三顆測高衛星，其設計皆相同的，也經過基準校正，理論上已無基準問題，另外平均海平面永久服務中心(PSMSL)提供之修正地方基準(RLR)資料已將潮位站資料改正至同一基準點上，因此本計畫利用衛星測高資料與台灣附近平均海平面永久服務中心(PSMSL)中修正地方基準(RLR)資料進行步驟(1)-(5)計算測試，由計算測試結果可知，僅有少數差值超過 50 mm，因此本研究以 50mm 做為步驟(6)之門檻值。

- (6) 對步驟(4)處理後之低頻訊號的相臨時間海水面變化值進行相減(差值)，分析訊號中在短時間內是否有劇烈變化，若差值大於步驟(5)估算出的門檻值，該時間點可能因人為或自然(如地震)造成偏移情形。圖 3.9 與圖 3.10 中紅色點位為差值大於設定門檻值(50 mm)之時間，因此該時間附近被認為可能存在基準偏移。
- (7) 計算步驟(6)判斷之可能為偏移點位前後特定時間段(約 2 年)之資料偏差值，評估步驟(6)獲取的偏移點位是否有基準偏移發生。然而在評估前需對資料偏差值設定門檻值，此門檻值設定與步驟(5)設定門檻值方式相同，為評估台灣附近衛星測高資料與平均海平面永久服務中心(PSMSL)中修正地方基準(RLR)資料中海水面時間序列變化較劇烈前後特定時間段偏差值，分析在無人為影響造成資料基準偏移情形下，台灣周圍海水面變化之時間序列偏差值範圍。測試結果發現衛星測高資料之時間序列偏差值範圍約為 0~120 mm，而平均海平面永久服務中心(PSMSL)資料之時間序列偏差值範圍皆在 0~130 mm 範圍內，但橫瀾島潮位站於 2003/04 時間點以及宿霧潮位站於 1998/06 時間點前後之資料偏差值皆可達 160~170 mm。橫瀾島潮位站資料與附近潮位站(鰲魚涌)以及衛星測高資料比較可知，在時間段 2003-2004 年間有明顯基準變動情形(如圖 3.11 所示)，表示橫瀾島潮位站資料中包含基準偏移之情形，因此在資料處理時需進行偏移量改正。而宿霧潮位站資料與衛星測高資料皆呈現相同變化趨勢(如圖 3.12 所示)，表示該潮位站應無基準偏移問題。由上述可知台灣附近海域確實可能發生海水面相臨時間段偏差值高達 10 公分以上。本計畫中以 130mm 做為步驟(8)之門檻值。
- (8) 利用步驟(6)判斷之可能發生偏移點位前後特定時間段(約 2 年)之資料偏差值，評估步驟(6)獲取的偏移點位是否真正存在偏移量。若資料偏差值遠大於步驟(7)估算出的門檻值，則認定該時間點潮位資料存在基準偏移量，若資料偏差值接近門檻值則輔以衛星測高資料與其他相鄰潮位站資料來進行評估。利用步驟(1)~

步驟(8)分別偵測出基隆與高雄潮位站資料有1個與4個偏移量，結果如圖 3.9 與圖 3.10 所示。

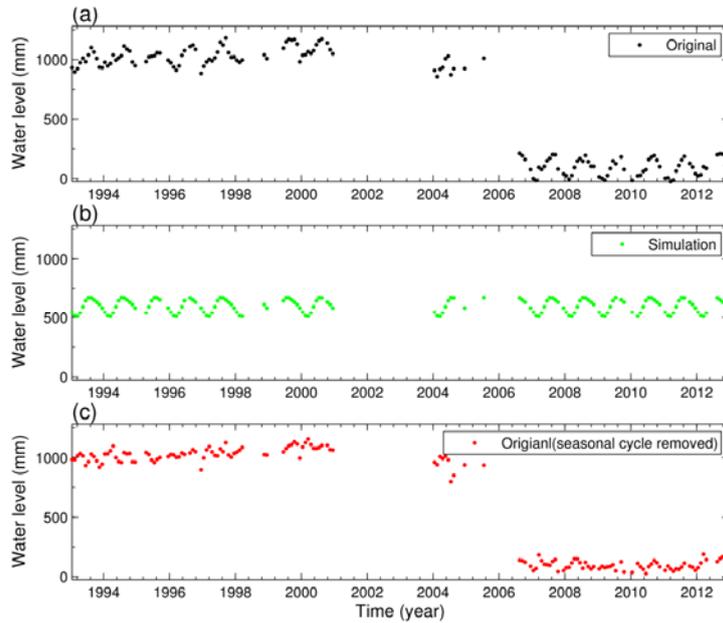


圖 3.7 中央氣象局基隆潮位站之季節性訊號移除(海水面的年週期與半年週期變化)。(a) 未移除季節性之潮位資料(已移除海潮與逆氣壓效應)，(b) 擬合潮位資料的季節性訊號，(c) 移除季節性訊號後之潮位資料

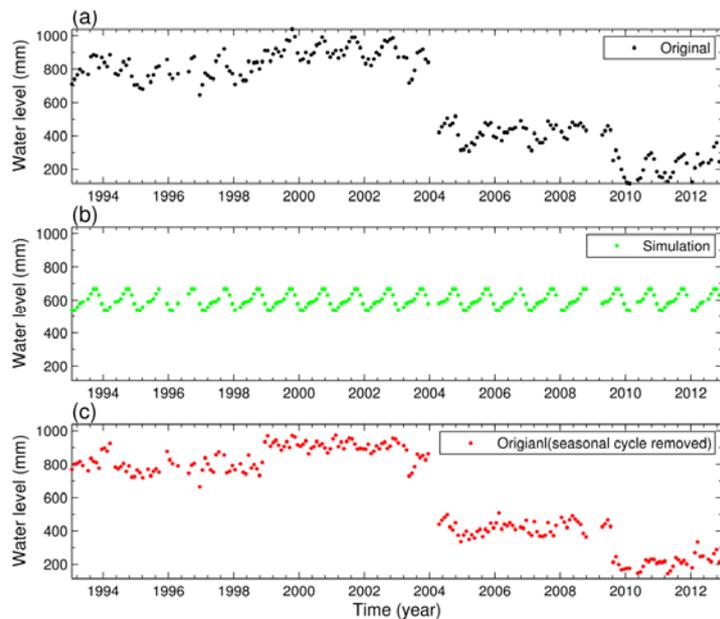


圖 3.8 中央氣象局高雄潮位站之季節性訊號移除(海水面的年週期與半年週期變化)。(a) 未移除季節性之潮位資料(已移除海潮與逆氣壓效應)，(b) 擬合潮位資料的季節性訊號，(c) 移除季節性訊號後之潮位資料

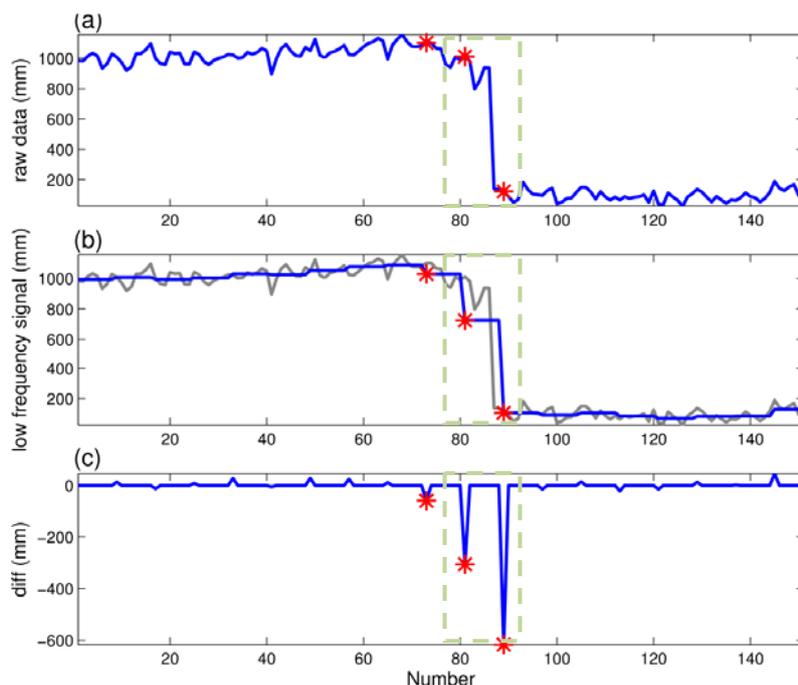


圖 3.9 基隆潮位站之偏移量偵測。紅色點表示可能之偏移點位。綠色虛線框表示偵測出之偏移點位。(a) 移除海潮、逆氣壓與季節性訊號之潮位站資料，(b) 利用小波分解移除(a)的資料之高頻訊號，(c) 剩餘訊號(low frequency signal)之相臨時間海水面變化值相減

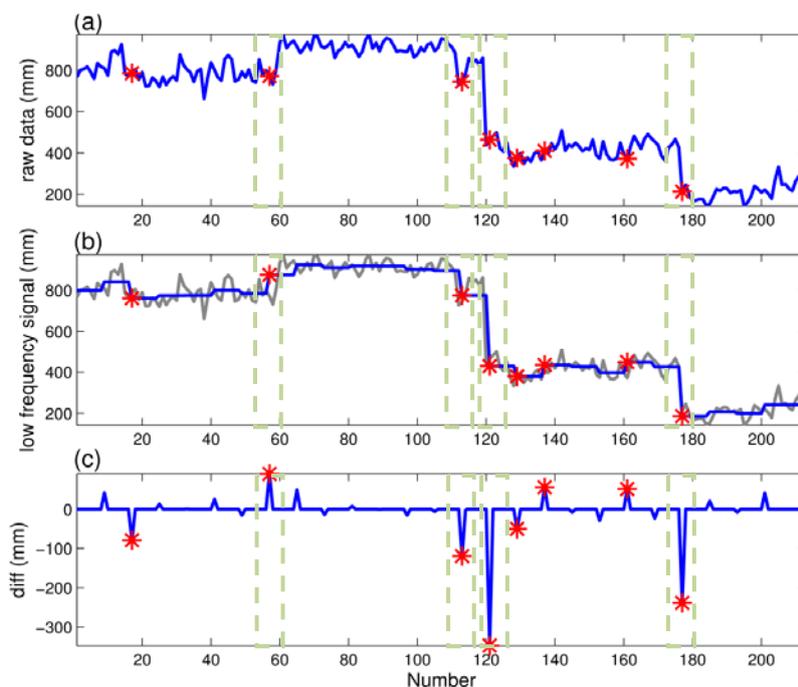


圖 3.10 高雄潮位站之偏移量偵測。紅色點表示可能之偏移點位。綠色虛線框表示偵測出的偏移點位。(a) 移除海潮、逆氣壓與季節性訊號之

潮位資料，(b) 利用小波分解移除(a)的資料之高頻訊號，(c) 剩餘訊號 (low frequency signal)之相臨時間海水面變化值相減

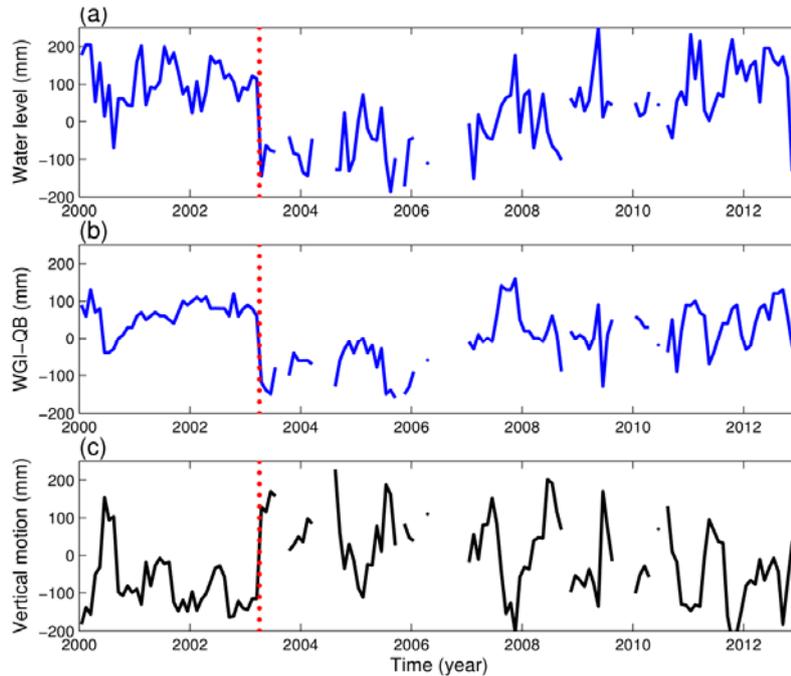


圖 3.11 橫瀾島(WGI)潮位站資料偏移量偵測。紅色虛線點表示各資料皆有明顯跳動情形。(a) 移除海潮、逆氣壓與季節性訊號之潮位站資料，(b) 橫瀾島(WGI)與鯛魚涌(QB)潮位站資料之差值，(c) 衛星海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)衛星測高資料與橫瀾島潮位站資料差值

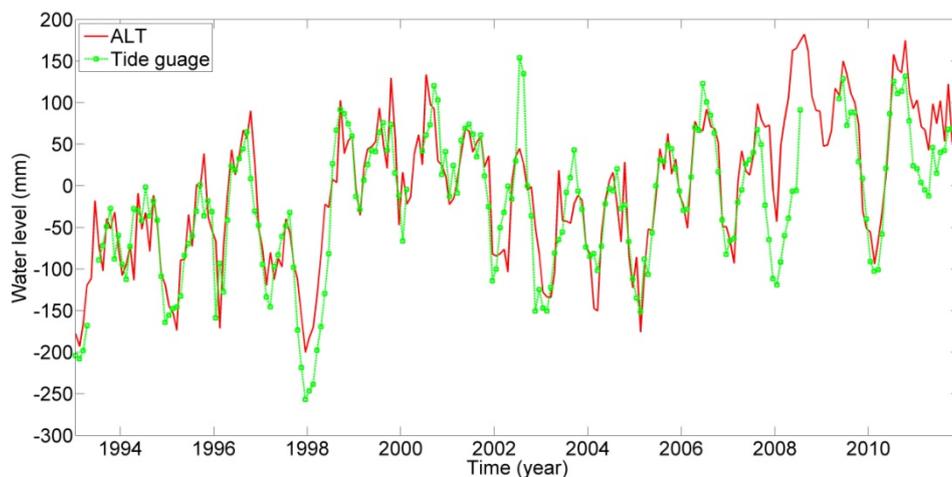


圖 3.12 宿霧潮位站資料與其 2° 範圍內之衛星測高海水面變化

根據夏威夷大學海水位中心(UHSLC)提供的詮釋資料，夏威夷大學海水位中心(UHSLC)潮位站資料皆已改正偏移量，但該中心並非完全根據潮位站管理單位提供之參考基準資料進行改正，部分偵測與改正為中心自行研發之方法，因此本研究需評估夏威夷大學海水位中心(UHSLC)的基隆與高雄潮位站是否有基準不一致之情形。將夏威夷大學海水位中心(UHSLC)的基隆與高雄潮位站資料利用上述偏移量偵測第三部分之步驟進行偵測，成果如圖 3.13 與圖 3.14 所示，圖中高雄潮位站雖然有 6 個為可能的偏移點位，但經由上述步驟(8)並與門檻值(130 mm)比較後可知，6 個可能偏移點位前後時間段之資料偏差值皆未超過門檻值，因此高雄潮位站資料無偵測出偏移情形。而基隆潮位站資料中包含 4 個可能的偏移點位，經由上述步驟(8)估算個數(number)介於 60~80 的紅色點位前後特定時間段之資料偏差值為 130~140 mm，該點位時間為 2004 年。將夏威夷大學海水位中心(UHSLC)與中央氣象局基隆潮位資料相比(如圖 3.15 所示)，夏威夷大學海水位中心(UHSLC)與中央氣象局的基隆潮位站資料幾乎一致，夏威夷大學海水位中心(UHSLC)基隆潮位站資料僅於 2006 年進行一次偏移量校正，然而基隆潮位站 1993-2012 共更換過兩次測站編號，分別約為 2004 年與 2006 年(如圖 2.9 所示)，且 2001-2003 年間基隆潮位站無記錄任何水位變化資料，根據偏移量偵測之第一部份與第二部份，時間段 2004 年的點位被視為偏移點位，因此需進行偏移量改正。

由上述可知，平均海平面永久服務中心(PSMSL)的修正地方基準(RLR)資料與夏威夷大學海水位中心(UHSLC)資料雖然皆已進行資料基準改正，但經由本研究偏移量偵測方式，仍然偵測出兩單位的部分潮位站資料仍含有基準偏移情形，因此在使用台灣周圍潮位資料前皆應審慎評估使用之潮位資料中是否有基準不一致情形，避免潮位資料基準不同影響後續成果。

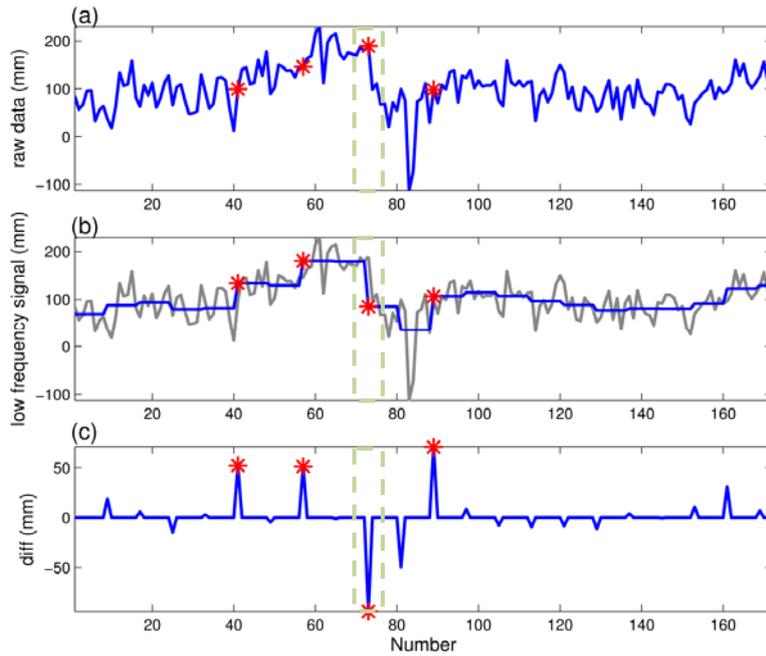


圖 3.13 夏威夷大學海水位中心(UHSLC)的基隆潮位站資料偏移量偵測。紅色點表示可能為偏移點位。綠色虛線框表示偵測出的偏移點位。(a) 移除海潮、逆氣壓與季節性訊號之潮位站資料，(b) 利用小波分解移除(a)的資料之高頻訊號，(c) 剩餘訊號(low frequency signal)之相臨時間海水面變化值相減

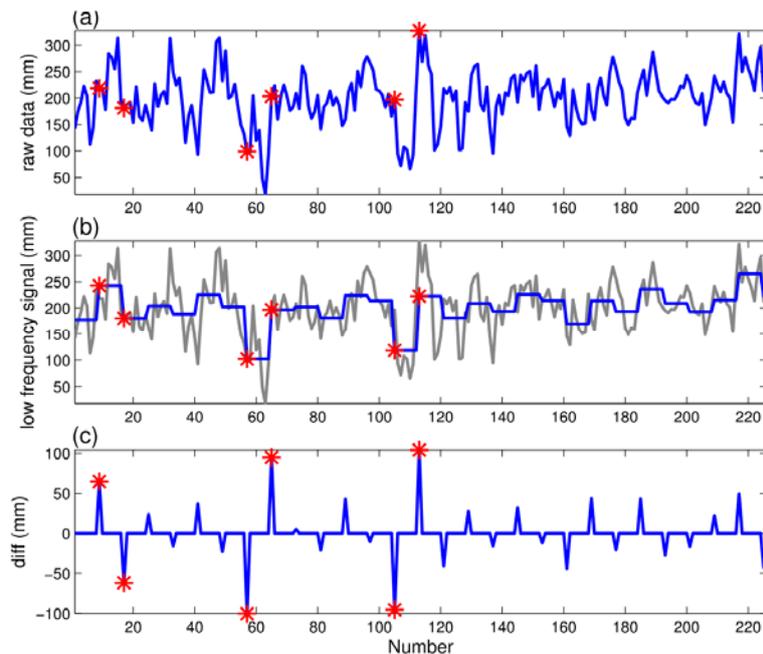


圖 3.14 夏威夷大學海水位中心(UHSLC)的高雄潮位站資料偏移量偵測。紅色點表示可能為偏移點位。(a) 移除海潮、逆氣壓與季節性訊號

之潮位站資料，(b) 利用小波分解移除(a)的資料之高頻訊號，(c) 剩餘訊號(low frequency signal)之相臨時間海水面變化值相減

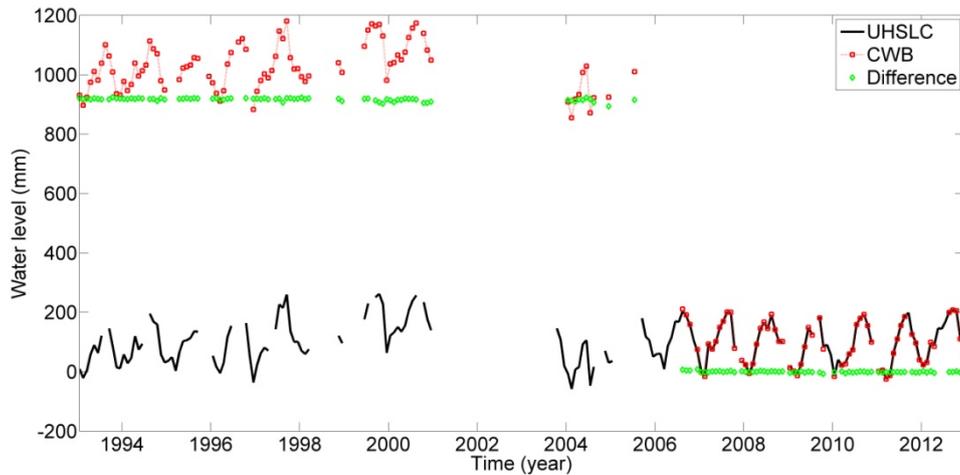


圖 3.15 夏威夷大學海水位中心(UHSLC)與中央氣象局(CWB)基隆潮位站資料比較圖

利用上述偏移量偵測之成果進行偏移量改正，本研究偏移量校正方式分為兩種，方法 I 為將包含海水面變化與潮位站地表垂直變動的訊號以六參數(如式(3.3)所示)加上步階函數(step function)進行潮位站資料擬合並改正之，其公式如下所示：

$$TG(t) = a_0 + b't + c \sin(2\pi t) + d \cos(2\pi t) + e \sin(4\pi t) + f \cos(4\pi t) + \sum_{i=1}^n a_i \dots \dots \dots (3.4)$$

其中 n 為偏移量個數， TG 為潮位站資料， b' 為包含海水上升速率與潮位站地表垂直變動速率。

方法 II 為在偏移量改正前，先降低其他可能會影響偏移量改正之訊號，除了將上述已提到的海潮效應與逆氣壓效應自潮位站資料中移除外，並利用衛星測高資料消除海水面變化訊號，估算出主要包含潮位站地表垂直變動訊號與偏移量之時間序列 u ，公式如下式所示，

$$u(\lambda, \varphi, t) = alt(\lambda, \varphi, t) - TG(\lambda, \varphi, t) \dots \dots \dots (3.5)$$

其中 φ 為緯度， λ 為經度， TG 為潮位站資料， alt 為測高資料， t 為時

間。潮位站垂直變動的時間序列 u 主要包含偏差量與潮位站垂直變動的斜率訊號（假設為線性變化），故使用二參數加上步階函數 a_i 擬合併改正之，公式如下所示，

$$u(t) = a_0 + b''t + \sum_{i=1}^n a_i \dots\dots\dots (3.6)$$

其中 a_0 為偏差， b'' 為潮位站地表垂直變動速率。當基隆與高雄潮位站時間序列未改正基準偏移前，潮位站資料有明顯不一致，而偏移量改正後，基隆與高雄潮位站時間序列較有一致性，方法 I 改正成果如圖 3.16 與圖 3.17 所示，而方法 II 改正成果如圖 3.18 與圖 3.19 所示。

此 3.3 節已完成工作項目”臺灣近岸驗潮站潮位基準偏移量校正方法研究”。本研究偏移量偵測方式包含偵測更換站號後之基準情形、資料缺漏情形 (> 半年)以及資料中含有顯著基準偏移之情形(> 10 公分)。由偵測結果可知，台灣周圍之平均海平面永久服務中心(PSMSL)、夏威夷大學海水位中心(UHSLC)以及中央氣象局的潮位站資料皆被偵測出含有基準偏移情形，因此往後在使用台灣周圍潮位站資料時，需謹慎評估潮位資料中是否有基準偏移情形，避免潮位資料基準問題影響後續成果。對於含有偏移量的資料可利用兩方法進行偏移量改正，分別為六參數加上步階函數與二參數加上步階函數擬合併改正之。

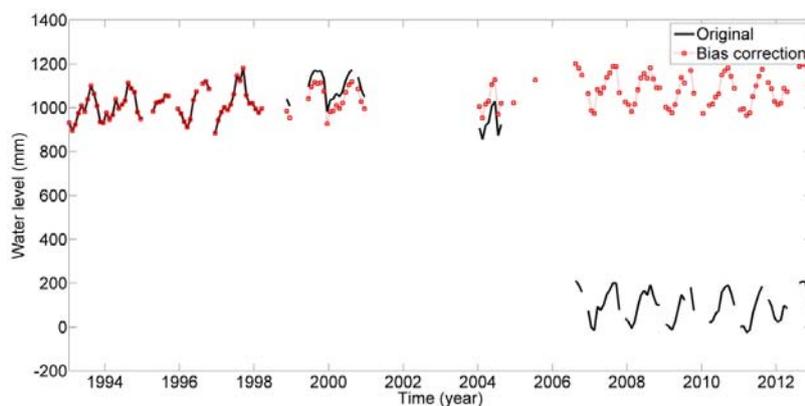


圖 3.16 中央氣象局的基隆潮位站資料偏移量改正（六參數加上步階函數）。偏移量改正前、後相對海平面上升速率分別為 $-60.31 \pm 2.96 \text{ mm/yr}$ 、 $4.87 \pm 0.40 \text{ mm/yr}$

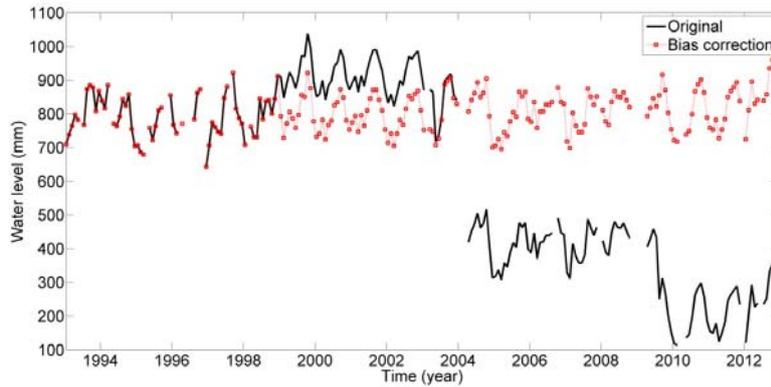


圖 3.17 中央氣象局的高雄潮位站資料偏移量改正 (六參數加上步階函數)。偏移量改正前、後相對海平面上升速率分別為 $-38.14 \pm 1.85 \text{ mm/yr}$ 、 $1.75 \pm 0.47 \text{ mm/yr}$

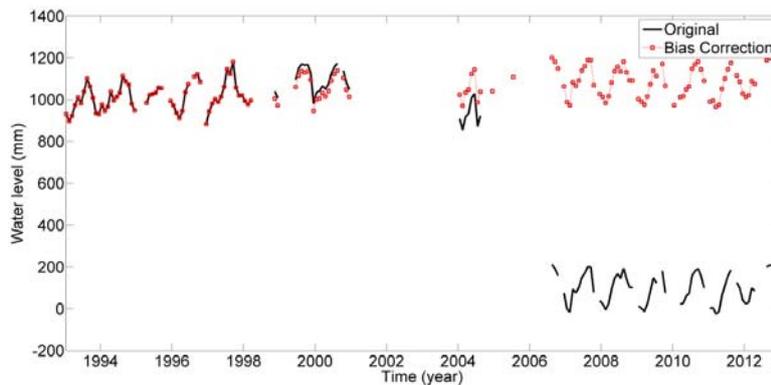


圖 3.18 中央氣象局的基隆潮位站資料偏移量改正 (二參數加上步階函數)。偏移量改正前、後相對海平面上升速率分別為 $-60.31 \pm 2.96 \text{ mm/yr}$ 、 $4.72 \pm 0.43 \text{ mm/yr}$

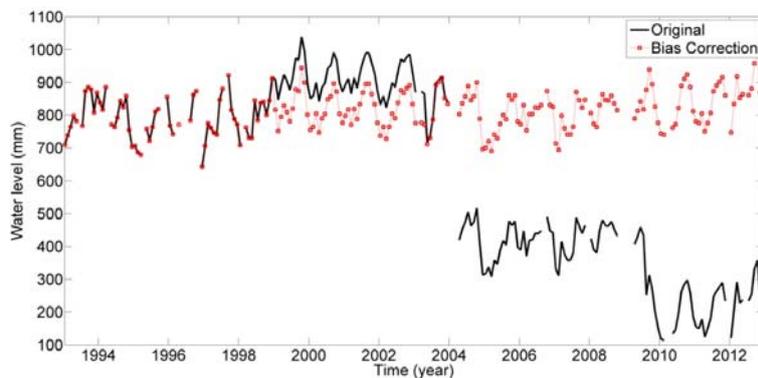


圖 3.19 中央氣象局的高雄潮位站資料偏移量改正 (二參數加上步階函數)。偏移量改正前、後相對海平面上升速率分別為 $-38.14 \pm 1.85 \text{ mm/yr}$ 、 $2.21 \pm 0.50 \text{ mm/yr}$

3.4 潮位站地表垂直變動改正

3.4.1 潮位站地表垂直變動速率

衛星測高觀測之海水面高度為相對於參考橢球之絕對觀測量，因此該觀測量不受固體地球形變之影響，然而潮位站所量測之海水面高度則是相對於陸地上固定參考點之觀測值，其觀測量中包含潮位站地表垂直變動訊號，因此結合潮位站水位變化資料與衛星測高資料即可求得該潮位站之地表垂直變動量(如式(3.7)所示)。本研究使用之潮位站中，以馬尼拉測站之潮位站垂直變動訊號最為明顯(如圖 3.20 所示)，比較 1993-2011 年衛星海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)衛星測高資料和平均海平面永久服務中心(PSMSL)潮位站資料，由其差值之時變特性可知，馬尼拉潮位站周圍地表有明顯地殼下陷情形，其量值約為 10 mm/yr。因潮位站地表垂直變動的時間序列資料 u 主要包含偏差量 a 與潮位站地表垂直變動的斜率訊號 b'' ，因此潮位站垂直變動速率之推算為應用線性方程式(二參數)擬合，依最小二乘法原理求解式中未知參數，線性方程式公式如下所示，

$$u(t) = a + b''t \dots\dots\dots(3.7)$$

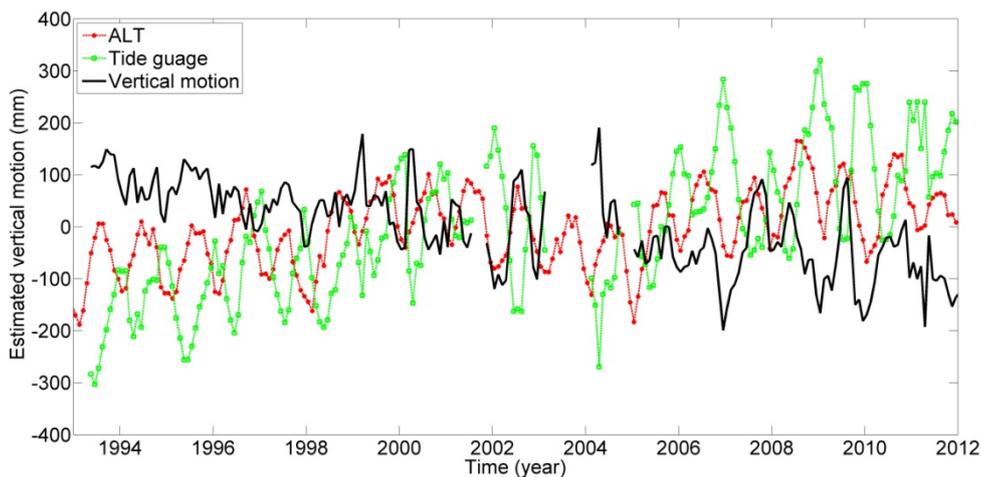


圖 3.20 馬尼拉潮位站之地表垂直變動訊號。ALT 為衛星海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)衛星測高之海水面高

3.4.2 衛星測高資料與潮位站資料之相關性

本研究結合潮位站與衛星測高資料改正測站地表垂直變動量，然而測高儀的回波會受到陸地地形、海潮、海底地形、河口等影響，導致近岸之衛星測高資料較少，因此在進行地表垂直變動改正前需評估何者衛星測高資料較適用於估算地表垂直變動速率，本研究以衛星測高與潮位站資料間相關係數做為評估標準。因並非所有潮位站資料皆進行偏移量改正，如平均海平面永久服務中心(PSMSL)的修正地方基準(RLR)資料(橫瀾島潮位站除外)與夏威夷大學海水位中心(UHSLC)高雄潮位站並無基準偏移問題，因此將相關係數成果分為兩部份，未進行偏移量改正的成果如圖 3.21 與圖 3.22 所示，而已進行偏移量改正的成果如圖 3.23 與圖 3.24 所示。根據潮位站與衛星測高資料間相關係數，平均海平面永久服務中心(PSMSL)中修正地方基準(RLR)資料(橫瀾島除外)適合使用平均 2° 衛星測高資料以及加權平均固定範圍(2° 、 3° 、 5°)之資料(如圖 3.21 與圖 3.22 所示)，其中以加權平均 2° 範圍相關係數為最高，相關係數平均值約為 0.89 (衛星海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO))與 0.86(雷達測高資料收集 (RADs))。

已進行偏移量改正的潮位資料包括中央氣象局所有潮位站、平均海平面永久服務中心(PSMSL)的橫瀾島、基隆與高雄潮位站以及夏威夷大學海水位中心(UHSLC)的基隆潮位站。根據潮位站與衛星測高資料間相關係數，台灣本島潮位站資料較適用於等權平均 5° 範圍內衛星測高資料(如圖 3.23 與圖 3.24 所示)，相關係數平均值約為 0.60(衛星海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO))與 0.56(雷達測高資料收集 (RADs))。而澎湖潮位站因位於台灣的離島，相關係數以加權平均 2° 範圍為最高(如圖 3.23 與圖 3.24 所示)，相關係數為 0.86 (衛星海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO))與 0.85 (雷達測高資料收集 (RADs))。另外，比較偏移量改正成果與衛星測高間相關係數，由圖 3.23 與 3.24 可知，方法 I 與方法 II 之相關係數成果差異不大，但計算相關係數平均值後發現方法 II 相關係數略高於方法 I。

潮位站與衛星測高間相關係數越高，表示當兩資料結合使用時越

能夠降低資料間因空間與時間取樣頻率不同而導致的誤差，因此本研究後續成果中將選擇方法 II 做為偏移量改正，而台灣本島上潮位站資料使用等權平均 5° 範圍內之衛星測高資料，離島的澎湖潮位站使用等權平均 2° 範圍內之衛星測高資料，其他區域的潮位站資料(如中國大陸、日本、菲律賓等)則使用加權平均 2° 範圍內衛星測高資料。潮位站使用的偏移量改正方法與對應衛星測高資料如表 3.1~表 3.3 所示。

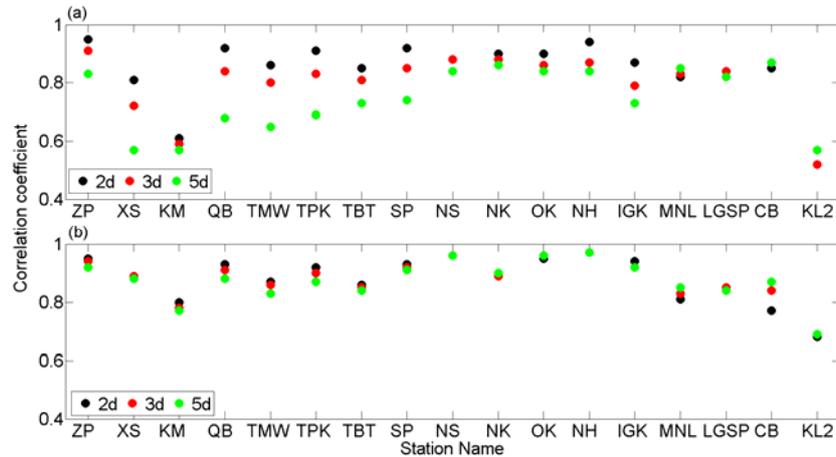


圖 3.21 衛星海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)衛星測高資料與平均海平面永久服務中心(PSMSL)和夏威夷大學海水位中心(UHSLC)潮位站資料之相關係數。(a) 等權平均，(b) 加權平均。KS2 為夏威夷大學海水位中心(UHSLC)基隆潮位站

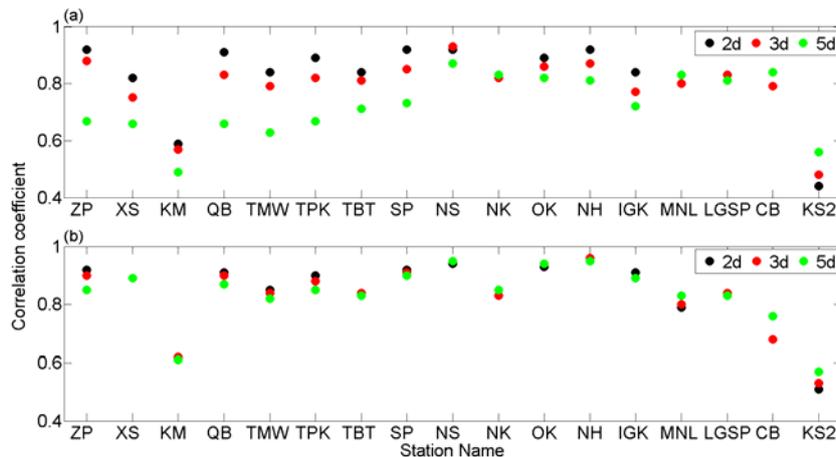


圖 3.22 雷達測高資料收集(RADs)衛星測高資料與平均海平面永久服務中心(PSMSL)和夏威夷大學海水位中心(UHSLC)潮位站資料之相關

係數。(a) 等權平均，(b) 加權平均。KS2 為夏威夷大學海水位中心 (UHSLC) 基隆潮位站

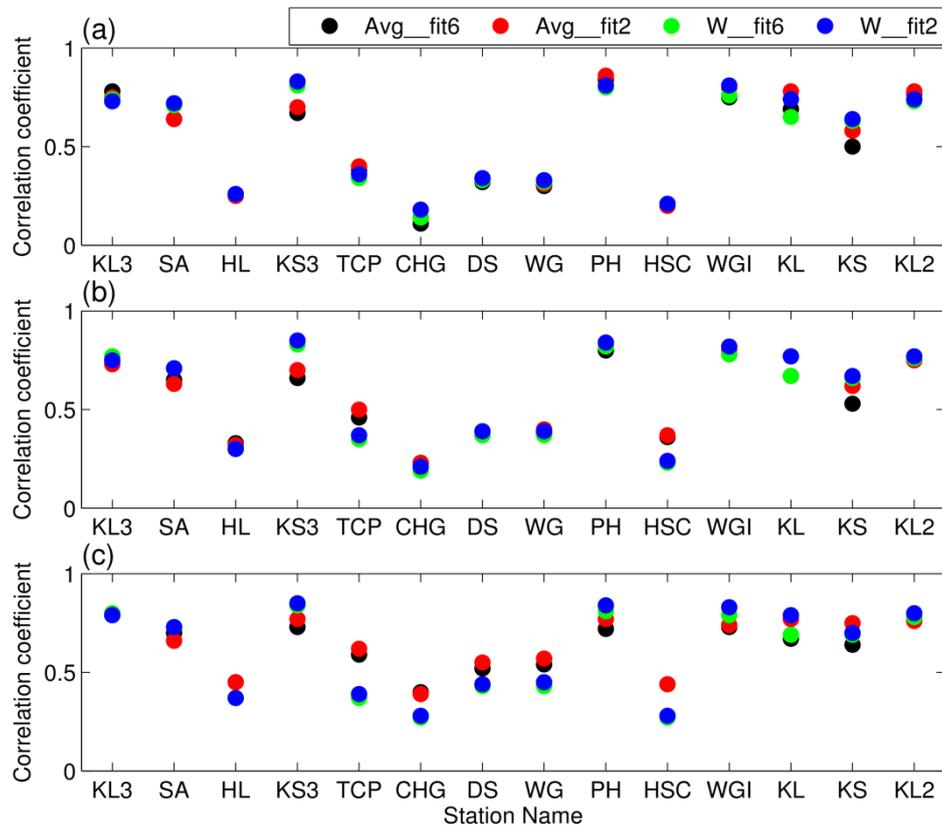


圖 3.23 衛星海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)衛星測高資料分別與平均海平面永久服務中心(PSMSL)、夏威夷大學海水位中心(UHSLC)和中央氣象局潮位站資料之相關係數。(a) 平均 2° 範圍內衛星測高資料、(b) 平均 3° 範圍內衛星測高資料、(c) 平均 5° 範圍內衛星測高資料。

Avg_fit6 為利用方法 I 改正偏移量，而衛星測高資料為等權平均，Avg_fit2 為利用方法 II 改正偏移量，而衛星測高資料為等權平均，W_fit6 為利用方法 I 改正偏移量，而衛星測高資料為加權平均，W_fit2 為利用方法 II 改正偏移量，而衛星測高資料為加權平均。KL、KS、WG 分別為平均海平面永久服務中心(PSMSL)的基隆、高雄、橫瀾島潮位站。KL2 為夏威夷大學海水位中心(UHSLC) 的基隆潮位站

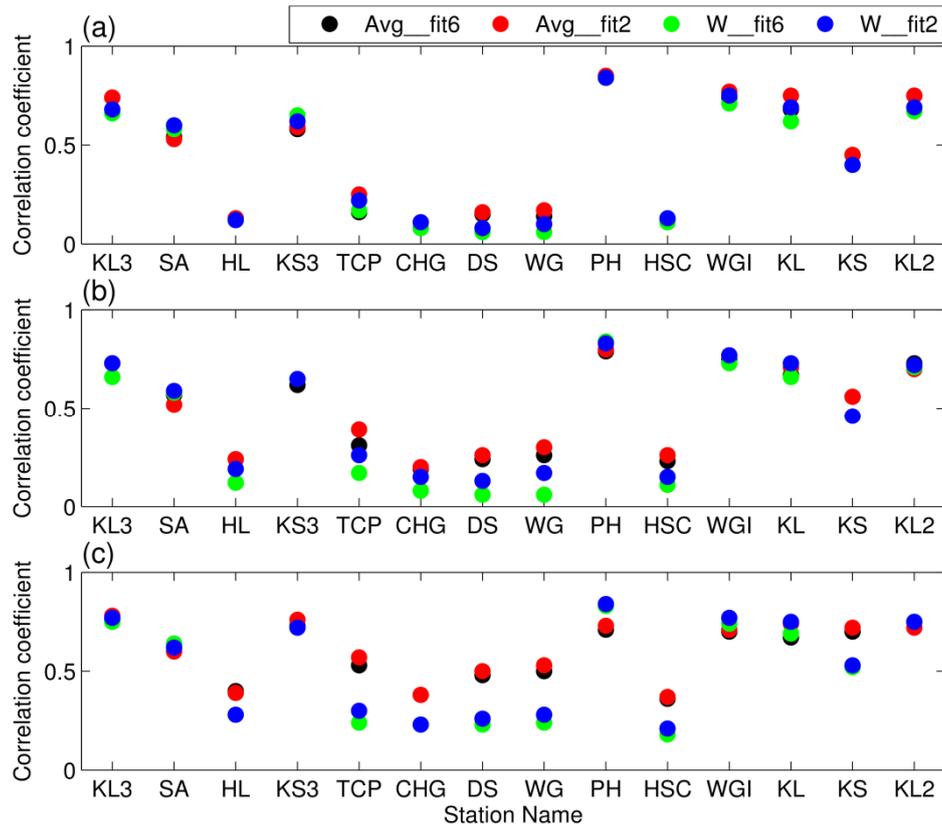


圖 3.24 雷達測高資料收集(RADs)衛星測高資料分別與平均海平面永久服務中心(PSMSL)、夏威夷大學海水位中心(UHSLC)和中央氣象局潮位站資料之相關係數。(a) 平均 2° 範圍內衛星測高資料、(b) 平均 3° 範圍內衛星測高資料、(c) 平均 5° 範圍內衛星測高資料。Avg_fit6 為利用方法 I 改正偏移量，而衛星測高資料為等權平均，Avg_fit2 為利用方法 II 改正偏移量，而衛星測高資料為等權平均，W_fit6 為利用方法 I 改正偏移量，而衛星測高資料為加權平均，W_fit2 為利用方法 II 改正偏移量，而衛星測高資料為加權平均。KL、KS、WG 分別為平均海平面永久服務中心(PSMSL)的基隆、高雄、橫瀾島潮位站。KL2 為夏威夷大學海水位中心(UHSLC)的基隆潮位站

表 3.1 平均海平面永久服務中心(PMSL)潮位站資料與對應的衛星測高資料之相關係數。Fit2 為以方法 II 改正資料偏移，W. (2°) 與 W. (3°) 為固定 2° 與 3° 範圍內衛星測高資料加權平均，A. (5°) 為固定 5° 範圍內衛星測高資料等權平均

Station ID.	Station name		AVISO			RADs		
	Ch.	Abbr.	Bias correction	Zone	Correlation coefficient	Bias correction	Zone	Correlation coefficient
610002	開坡	ZP	x	W. (2°)	0.95	x	W. (2°)	0.92
610004	西沙	XS	x	W. (2°)	0.89	x	W. (2°)	0.89
610016	坎門	KM	x	W. (2°)	0.80	x	W. (2°)	0.62
611007	橫瀾島	WGI	Fit2	W. (2°)	0.81	Fit2	W. (2°)	0.77
611010	鯽魚涌	QB	x	W. (2°)	0.93	x	W. (2°)	0.91
611012	大廟灣	TMW	x	W. (2°)	0.87	x	W. (2°)	0.85
611014	大浦滘	TPK	x	W. (2°)	0.92	x	W. (2°)	0.90
611017	尖鼻咀	TBT	x	W. (2°)	0.86	x	W. (2°)	0.84
611023	石壁	SP	x	W. (2°)	0.93	x	W. (2°)	0.92
612002	基隆	KL	Fit2	Avg. (5°)	0.77	Fit2	Avg. (5°)	0.74
612012	高雄	KS	Fit2	Avg. (5°)	0.75	Fit2	Avg. (5°)	0.72
646003	內斯	NS	x	W. (5°)	0.96	x	W. (2°)	0.94
646011	中之島	NKNS	x	W. (2°)	0.89	x	W. (2°)	0.83
646021	沖繩	OKNW	x	W. (5°)	0.95	x	W. (2°)	0.93
646024	那霸	NH	x	W. (2°)	0.97	x	W. (2°)	0.95
646042	石垣島	IGK	x	W. (2°)	0.94	x	W. (2°)	0.91
660011	馬尼拉	MNL	x	W. (2°)	0.81	x	W. (2°)	0.79
660021	黎牙實比	LGSP	x	W. (2°)	0.84	x	W. (2°)	0.84
660101	宿霧	CB	x	W. (3°)	0.77	x	W. (3°)	0.79

x 為潮位資料中無偏移量情形

表 3.2 夏威夷大學海水位中心(UHSLC)潮位站資料與對應的衛星測高資料之相關係數。Fit2 為以方法 II 改正資料偏移，W. (5°) 為固定 5° 範圍內衛星測高資料加權平均

Station ID.	Station name		AVISO			RADs		
	Ch.	Abbr.	Bias correction	Zone	Correlation coefficient	Bias correction	Zone	Correlation coefficient
341	基隆	KL2	Fit2	Avg. (5°)	0.76	Fit2	W. (5°)	0.72
340	高雄	KS2	x	Avg. (5°)	0.57	x	W. (5°)	0.56

x 為潮位資料中無偏移量情形

表 3.3 中央氣象局潮位站資料與對應的衛星測高資料之相關係數。Fit2 為以方法 II 改正資料偏移，A. (5°) 為固定 5° 範圍內衛星測高資料等權平均

Station ID.	Station name		AVISO			RADs		
	Ch.	Abbr.	Bias correction	Zone	Correlation coefficient	Bias correction	Zone	Correlation coefficient
1516	基隆	KL3	Fit2	Avg. (5°)	0.80	Fit2	Avg. (5°)	0.78
1246	蘇澳	SA	Fit2	Avg. (5°)	0.66	Fit2	Avg. (5°)	0.60
1256	花蓮	HL	Fit2	Avg. (5°)	0.45	Fit2	Avg. (5°)	0.39
1486	高雄	KS3	Fit2	Avg. (5°)	0.77	Fit2	Avg. (5°)	0.76
1436	台中港	TCP	Fit2	Avg. (5°)	0.62	Fit2	Avg. (5°)	0.57
1276	成功	CHG	Fit2	Avg. (5°)	0.39	Fit2	Avg. (5°)	0.38
1166	東石	DS	Fit2	Avg. (5°)	0.55	Fit2	Avg. (5°)	0.5
1366	塭港	WG	Fit2	Avg. (5°)	0.57	Fit2	Avg. (5°)	0.53
1356	澎湖	PH	Fit2	Avg. (2°)	0.85	Fit2	Avg. (2°)	0.86
112	新竹	HSC	Fit2	Avg. (5°)	0.44	Fit2	Avg. (5°)	0.37

x 為潮位資料中無偏移量情形

3.4.3 近二十年(1993-2012)潮位站地表垂直變動速率

本小節結合衛星測高與潮位站資料估算近二十年(1993-2012)潮位站地表垂直變動速率，其中潮位站資料皆已進行海潮效應、逆氣壓效應與基準偏移改正，成果如表 3.4-3.6 所示。平均海平面永久服務中心 (PSMSL)、夏威夷大學海水位中心(UHSLC)與中央氣象局的高雄潮位站地表垂直變動速率並不一致，三資料中心的高雄潮位站成果差異量最大為 9 mm/yr，因為三資料中心的高雄潮位站資料不完全相同(如圖 3.25 所示)，將中央氣象局的高雄潮位站資料分別與平均海平面永久服務中心(PSMSL)和夏威夷大學海水位中心(UHSLC)高雄潮位站資料進行相減可以更清楚發現三者資料間之差異(如圖 3.26 所示)，因此導致後續進行偏移量改正成果不一致(如圖 3.27 所示)，進而影響潮位站地表垂直變動速率之估算成果。Ching 等人[2011]利用基隆潮位站附近之 2002-2008 年全球衛星定位系統(GPS)資料估算地表垂直變動速率為 -1.95 mm/yr，與由中央氣象局基隆潮位站資料估算之地表垂直變動速率(-1.65~-1.40 mm/yr)最為接近。其原因可能為中央氣象局的潮位資料為較為原始之資料，對於本研究使用與分析上較有一致性，因此其成果與全球衛星定位系統(GPS)成果較接近。

本研究展示各潮位站垂直變動速率於圖 3.28 中，由圖可知，雖然兩衛星測高資料估算各潮位站垂直變動速率有些微差異，但整體而言，兩資料估算各潮位站垂直變動速率之趨勢相當一致。近二十年(1993-2012)臺灣本島、橫瀾島、馬尼拉潮位站的地表主要呈現下降情形，臺灣本島以東部地區與西南部地區之地表呈現明顯下降情形，其中西南部東石與塭港潮位站垂直變動速率最大，每年約 23-27 mm 下沉量；菲律賓潮位站中除馬尼拉潮位站地表呈現下降情形(~ 10 mm/yr)外，其餘潮位站周圍地表無明顯變動($0\sim 1$ mm/yr)；香港潮位站中除了橫瀾島潮位站地表呈現下降情形($\sim 14\sim 16$ mm/yr)外，其餘潮位站周圍地表無明顯變動；日本潮位站周圍地表無明顯垂直變動情形。

表 3.4 平均海平面永久服務中心(PSMSL)潮位站垂直變動速率

Station Name	Vertical motion trend (mm/yr)	
	AVISO-TG	RADs-TG
ZP	0.25±0.58	0.26±0.71
XS	2.08±0.30	0.57±0.31
KM	0.03±0.81	-1.41±1.03
WGI	-13.77±1.12	-15.72±1.17
QB	0.51±0.64	-0.92±0.68
TMW	-1.11±1.34	-2.87±1.37
TPK	0.15±0.69	-1.05±0.76
TBT	-0.49±0.67	-1.70±0.71
SP	1.72±0.84	-1.08±0.88
KL	-4.79±0.60	-5.84±0.62
KS	-6.69±0.57	-7.69±0.60
NS	-0.17±0.30	-1.05±0.35
NKNS	-0.91±0.49	-0.37±0.61
OKNW	-0.12±0.31	-0.19±0.39
NH	-0.37±0.23	-0.90±0.29
IGK	0.05±0.35	-1.51±0.40
MNL	-9.54±0.81	-10.65±0.80
LGSP	-0.23±0.53	-0.89±0.54
CB	1.58±0.45	3.84±0.92

表 3.5 夏威夷大學海水位中心(UHSLC)基隆與高雄潮位站垂直變動速率

Station Name	Vertical Motion Trend (mm/yr)	
	AVISO-TG	RADs-TG
KL2	-2.48±0.55	-5.53±0.57
KS2	3.31±0.67	2.64±0.68

表 3.6 中央氣象局潮位站垂直變動速率

Station Name	Vertical Motion Trend (mm/yr)	
	AVISO-TG	RADs-TG
KL3	-1.40±0.49	-1.65±0.52
SA	-8.69±0.63	-10.03±0.63
HL	-5.02±1.18	-6.38±1.20
KS3	2.34±0.50	1.84±0.52
TCP	-5.77±0.84	-5.99±0.87
CHG	2.01±0.79	0.70±0.80
DS	-25.43±0.84	-27.16±0.85
WG	-23.16±1.09	-23.48±1.09
PH	0.81±0.44	-0.90±0.47
HSC	-0.09±0.88	-1.36±0.92

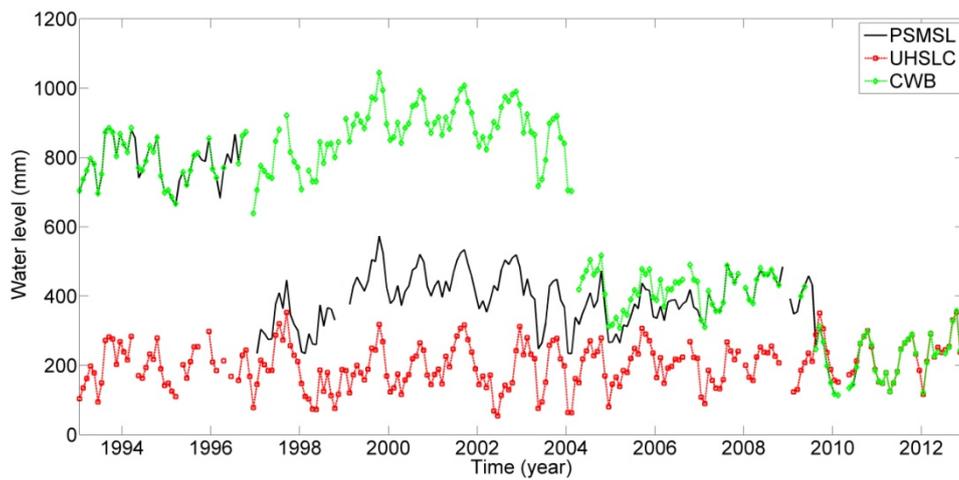


圖 3.25 平均海平面永久服務中心(PSMSL)、夏威夷大學海水位中心(UHSLC)與中央氣象局的高雄潮位站資料比較圖。潮位站資料已改正海潮及逆氣壓效應

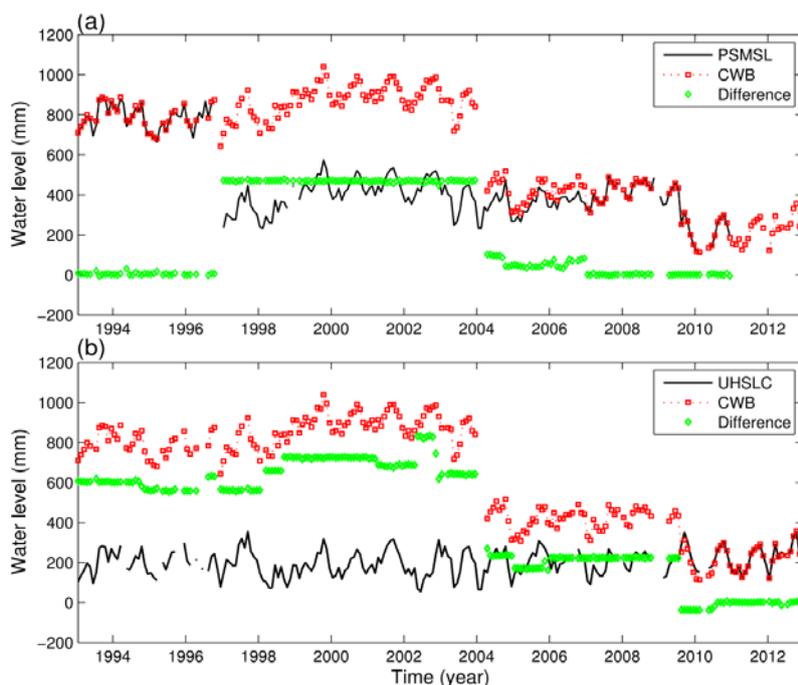


圖 3.26 中央氣象局高雄潮位站資料分別與平均海平面永久服務中心 (PSMSL)和夏威夷大學海水位中心(UHSLC)的高雄潮位站資料比較圖。
潮位站資料已移除海潮、逆氣壓效應

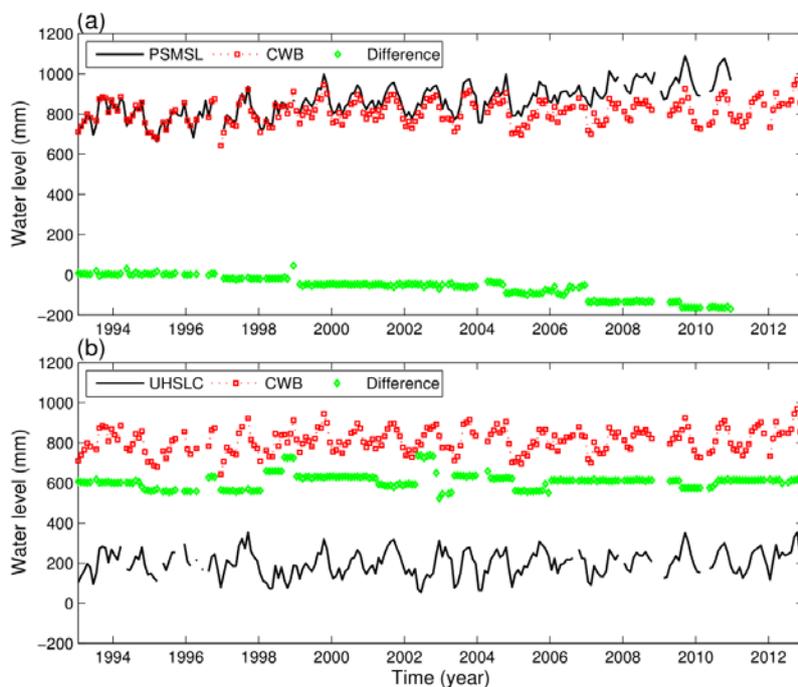


圖 3.27 中央氣象局高雄潮位站資料分別與平均海平面永久服務中心 (PSMSL)和夏威夷大學海水位中心(UHSLC)的高雄潮位站資料比較圖。
潮位站資料已移除海潮、逆氣壓效應，並改正基準偏移

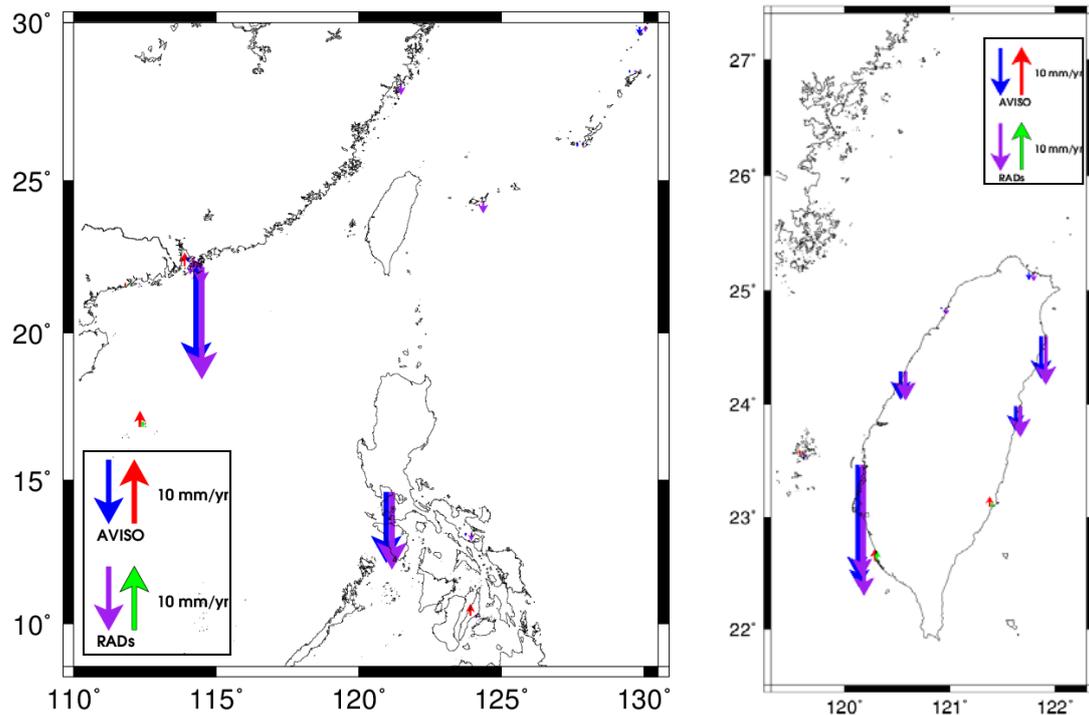


圖 3.28 潮位站近二十年(1993-2012)之地表垂直變動速率圖。其中基隆與高雄潮位站垂直變動速率為中央氣象局潮位資料所估算。

3.4.4 近十年與近二十年潮位站之地表垂直變動速率

平均海平面永久服務中心(PSMSL)近十年(2003-2012)與近二十年(1993-2012)之潮位站垂直變動速率趨勢是一致的(如圖 3.29 與表 3.7 所示)，但標準偏差明顯變小。由圖可知，近十年與二十年的香港地區除橫瀾島外地表皆呈現無明顯垂直變化，台灣基隆與高雄潮位站之地表呈現些微下降趨勢，日本潮位站之地表無明顯高程變化，菲律賓中馬尼拉測站呈現明顯下降($\sim 10\text{ mm/yr}$)情況。十年與二十年的垂直變動速率差異較大為坎門、黎牙實比與宿霧潮位站(如圖 3.29 所示)，其中坎門潮位站與雷達測高資料收集 (RADs)測高資料估算十年與二十年的垂直變動速率差值為 12.27 mm/yr ，而與衛星海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)測高資料估算十年與二十年的垂直變動速率差值僅為 3.85 mm/yr ，其原因應為衛星海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)測高資料於近岸較雷達測高資料收集 (RADs)資料多(如圖 2.4 所示)，因此衛星海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)衛星測高資料計算而得垂直變動訊

號相對較為穩定(垂直變動速率標準偏差: $\pm 2.15 \text{ mm/yr}$)，而雷達測高資料收集 (RADs)衛星測高資料計算的垂直變動訊號較為不穩定(垂直變動速率標準偏差: $\pm 2.87 \text{ mm/yr}$)，從 2002-2006 年雷達測高資料收集 (RADs)測高資料計算的垂直變動訊號雜訊量較多，並於 2009 年後垂直變動訊號呈現下降趨勢(如圖 3.31 所示)。比較圖 3.29 中利用兩位衛星測高資料估算近十年與近二十年垂直變動訊號之差異量平均值約為 2.00 mm/yr 與 3.49 mm/yr ，表示利用衛星海洋數據存檔、驗正與解釋 (AVISO)衛星測高資料計算之垂直變動訊號相對為穩定。而黎牙實比與宿霧潮位站 1993-2003 年地表垂直變動訊號皆呈現穩定變化，垂直變動速率分別為 $-3.07 \pm 1.07 \text{ mm/yr}$ 與 $-0.74 \pm 1.37 \text{ mm/yr}$ ，但從 2003 年底後，兩潮位站垂直變動速率由負轉正，2004-2011 年兩潮位站垂直變動速率分別為 $8.23 \pm 2.23 \text{ mm/yr}$ 與 $9.28 \pm 2.00 \text{ mm/yr}$ ，目前推測造成兩潮位站地表垂直變動速率變化可能原因與 2003 年 11 月發生於黎牙實比潮位站附近規模 6.5 的地震有關，地震發生後可能造成震央附近地表位移，進而影響兩潮位站地表高程速率變化，地震發生時間點與兩潮位站垂直變動速率由負轉正時間點非常相近(如圖 3.32 所示)。

美國夏威夷大學海水位中心(UHSLC)與中央氣象局近十年與近二十年潮位站的地表垂直變動速率趨勢是一致的(如圖 3.30、表 3.8 與表 3.9 所示)，近十年台灣西南部地表仍呈現穩定下沉，其中東石與塭港每年呈現 2 公分的地表下沉量。而花蓮潮位站近十年與近二十年的地表變動速率差異較大，速率差值約 $8.10 \sim 8.40 \text{ mm/yr}$ ，其差異量較大的原因除了十年的時間段較短造成計算之精度較差外，還可能為近十年間花蓮潮位站資料中包含較小基準偏移量，因本研究偏移量偵測僅能偵測出明顯基準偏移(>10 公分)的點位變化，因此近十年資料中若包含較小偏移量將對於潮位站資料的影響較為顯著。

另外，由圖 3.29 與 3.30 可知，亦如前期(102 年)計劃成果所示，由十年資料估算垂直變動速率之標準偏差較大(平均標準偏差: $\pm 1.81 \text{ mm/yr}$)，而由二十年資料估算的地表垂直變動速率之精度較佳(平均標準偏差: $\pm 0.66 \text{ mm/yr}$)。後續將以估算之近二十年(1993-2012)地表垂直

變動速率成果與全球衛星定位系統(GPS)以及水準成果相比較。

此 3.4.3 與 3.4.4 小節已完成工作項目”結合應用國內驗潮站資料並配合國際衛星測高資料，分區分析臺灣近岸長(~20 年)、短(~10 年)期之地殼變動速率”。由成果可知，大致上近十年與近二十年潮位站垂直變動速率趨勢是一致的，但仍然有部分潮位站成果差異量較大，如坎門、黎牙實比、宿霧與花蓮等潮位站，其影響原因可能為資料涵蓋時間長度、潮位站與衛星測高資料品質以及地震發生等因素所導致。

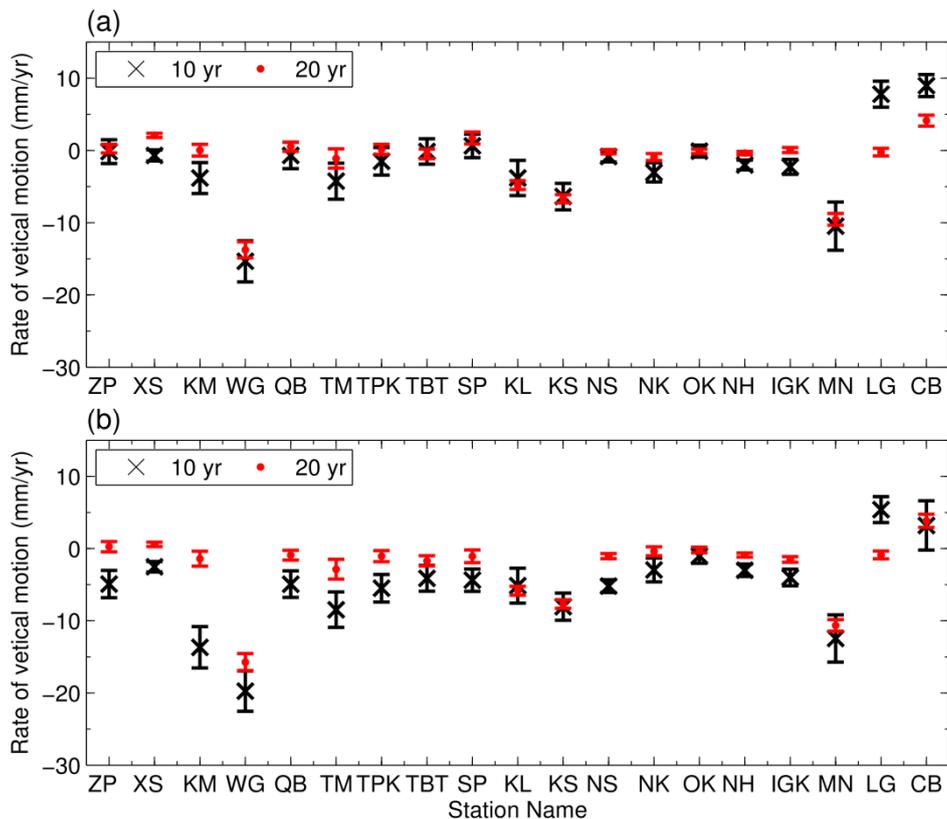


圖 3.29 平均海平面永久服務中心(PSMSL)潮位站之近十年(10 yr; 2003-2012)與近二十年(20 yr; 1993-2012)地表垂直變動成果。(a) 衛星海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)衛星測高，(b) 雷達測高資料收集 (RADs)衛星測高

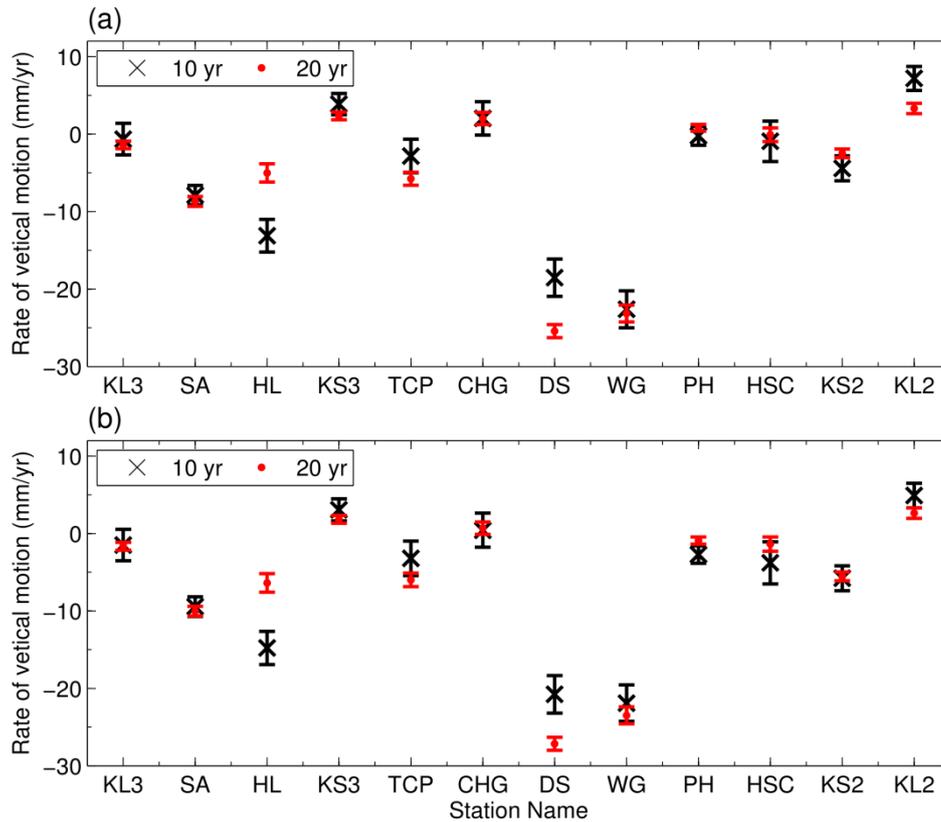


圖 3.30 美國夏威夷大學海水位中心(UHSLC)與中央氣象局潮位站之近十年(10 yr; 2003-2012)與近二十年(20 yr; 1993-2012)地表垂直變動速率(a) 衛星海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)衛星測高, (b) 雷達測高資料收集 (RADs)衛星測高

表 3.7 平均海平面永久服務中心(PSMSL)潮位站之近十年(10 yrs; 2003-2012)與近二十年(20 yrs; 1993-2012)地表垂直變動速率

Station Name	Vertical Motion Trend (mm/yr)			
	AVISO-TG		RADs-TG	
	10 yrs	20 yrs	10 yrs	20 yrs
ZP	-0.16±1.65	0.25±0.58	-4.92±1.89	0.26±0.71
XS	-0.69±0.76	2.08±0.30	-2.52±0.72	0.57±0.31
KM	-3.82±2.15	0.03±0.81	-13.68±2.87	-1.41±1.03
WGI	-15.35±2.84	-13.77±1.12	-19.75±2.78	-15.72±1.17
QB	-0.69±1.83	0.51±0.64	-4.93±1.84	-0.92±0.68
TMW	-4.26±2.49	-1.11±1.34	-8.47±2.45	-2.87±1.37
TPK	-1.50±1.91	0.15±0.69	-5.50±1.90	-1.05±0.76
TBT	-0.14±1.75	-0.49±0.67	-4.12±1.79	-1.70±0.71
SP	0.63±1.62	1.72±0.84	-4.37±1.55	-1.08±0.88
KL	-3.81±2.44	-4.79±0.60	-5.14±2.41	-5.84±0.62
KS	-6.39±1.84	-6.69±0.57	-8.05±1.88	-7.69±0.60
NS	-0.85±0.75	-0.17±0.30	-5.20±0.88	-1.05±0.35
NKNS	-3.04±1.33	-0.91±0.49	-2.97±1.65	-0.37±0.61
OKNW	-0.09±0.82	-0.12±0.31	-1.02±1.02	-0.19±0.39
NH	-2.00±0.68	-0.37±0.23	-3.01±0.85	-0.90±0.29
IGK	-2.27±1.04	0.05±0.35	-4.00±1.15	-1.51±0.40

MNL	-10.49±3.34	-9.54±0.81	-12.46±3.27	-10.65±0.80
LGSP	7.79±1.80	-0.23±0.53	5.39±1.79	-0.89±0.54
CB	8.98±1.53	4.13±0.75	3.20±3.41	3.84±0.92

表 3.8 美國夏威夷大學海水位中心(UHSLC)基隆與高雄潮位站之近十年(10 yrs; 2003-2012)與近二十年(20 yrs; 1993-2012)地表垂直變動速率

Station Name	Vertical Motion Trend (mm/yr)			
	AVISO-TG		RADs-TG	
	10 yrs	20 yrs	10 yrs	20 yrs
KL2	-4.42±1.61	-2.48±0.55	-5.78±1.60	-5.53±0.57
KS2	7.193±0.5	3.31±0.67	4.91±0.67	2.64±0.68

表 3.9 中央氣象局潮位站之近十年(10 yrs; 2003-2012)與近二十年(20 yrs; 1993-2012)地表垂直變動速率

Station Name	Vertical Motion Trend (mm/yr)			
	AVISO-TG		RADs-TG	
	10 yrs	20 yrs	10 yrs	20 yrs
KL3	-0.65±2.04	-1.40±0.49	-1.49±2.03	-1.65±0.52
SA	-7.89±1.26	-8.69±0.63	-9.44±1.28	-10.03±0.63
HL	-13.12±2.11	-5.02±1.18	-14.78±2.15	-6.38±1.20
KS3	3.87±1.38	2.34±0.50	3.06±1.43	1.84±0.52
TCP	-2.83±2.18	-5.77±0.84	-3.21±2.24	-5.99±0.87
CHG	2.02±2.15	2.01±0.79	0.43±2.21	0.70±0.80
DS	-18.54±2.40	-25.43±0.84	-20.77±2.43	-27.16±0.85
WG	-22.62±2.38	-23.16±1.09	-21.90±2.34	-23.48±1.09
PH	-0.22±1.22	0.81±0.44	-2.72±1.13	-0.90±0.47
HSC	-0.93±2.61	-0.09±0.88	-3.79±2.72	-1.36±0.92

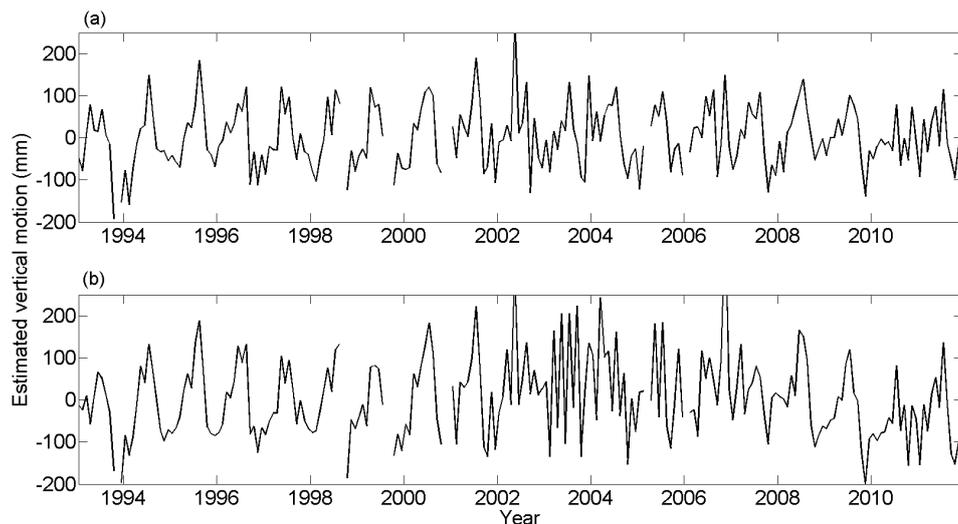


圖 3.31 坎門潮位站地表垂直變動訊號。(a) 衛星海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)衛星測高，(b) 雷達測高資料收集 (RADs)衛星測高

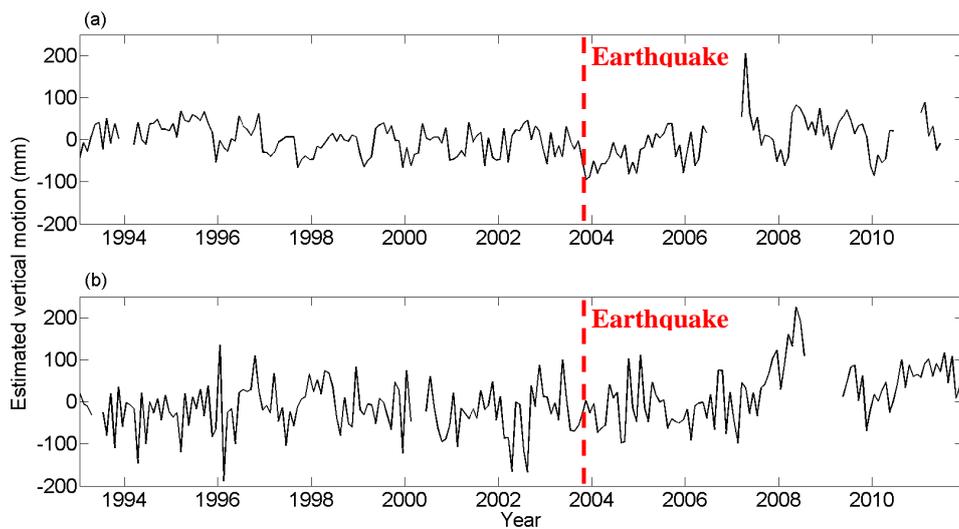


圖 3.32 黎牙實比(Legaspi)與宿霧(Cebu)潮位站地表垂直變動訊號。(a) 衛星海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)衛星測高，(b) 雷達測高資料收集 (RADs)衛星測高。紅色虛線為黎牙實比潮位站附近發生規模 6.5 地震

3.4.5 估算之地表垂直變動速率與全球衛星定位系統(GPS)和水準資料成果比較

本研究估算之潮位站地表垂直變動速率將與台灣地區全球衛星定位系統(GPS)連續觀測資料和內政部水準成果[內政部國土測繪中心，2014]相比較。台灣地區全球衛星定位系統(GPS) 成果為 Ching 等人[2011]所提供，Ching 等人[2011]提供的全球衛星定位系統(GPS)觀測資料分佈於台灣周圍，共有 199 個觀測站資料，199 個全球衛星定位系統(GPS)觀測站為相對於澎湖全球衛星定位系統(GPS)觀測站(S01R)，因澎湖全球衛星定位系統(GPS)觀測站於板塊相對穩定的區域[Ching *et al.*, 2011]，故選定此點作為相對的固定點。而內政部水準成果為潮位站岸邊基準點相對於相臨一等水準點高程變化量，若一等水準點高程有變化，則由內政部水準資料所估算出來的潮位站變動速率即為相對速率。

本計畫中使用的潮位站資料分佈於台灣、中國大陸、日本與菲律賓賓等地，Ching 等人[2011]的全球衛星定位系統(GPS)觀測站資料與內政

部的水準資料幾乎僅限於台灣本島上，因此選擇台灣本島附近的潮位站成果，並與最接近各潮位站的全球衛星定位系統(GPS)觀測站與水準點之成果進行比較，成果如表 3.10 與表 3.11 所示。將本計畫成果與全球衛星定位系統(GPS)成果相比較可知，本計畫估算之地表垂直變動速率與全球衛星定位系統(GPS)成果應為一致，在台灣東部(蘇澳與花蓮)、西部(台中)、西南部(東石與塭港)之地表皆估算出明顯下沉，而其他地區無較明顯變動，如圖 3.33 與圖 3.34 所示。估算之地表垂直變動速率與全球衛星定位系統(GPS)觀測成果之差值平均值±標準偏差為 $1.82 \pm 4.04 \text{ mm/yr}$ ，此差值可能原因為資料涵蓋時間長度不同與參考原點不同所導致。本計畫選定的研究時間為近二十年(1993-2012)，而全球衛星定位系統(GPS)成果估算時間約 8~10 年(如表 3.10 所示)，時間涵蓋長度不同可能造成部分的差異。另外，全球衛星定位系統(GPS)成果為相對澎湖全球衛星定位系統(GPS)觀測站(S01R)，若澎湖全球衛星定位系統(GPS)觀測站的高程在變動，將影響 Ching 等人[2011]的全球衛星定位系統(GPS)成果。整體而言，本計畫估算之地表垂直變動速率與全球衛星定位系統(GPS)成果是一致的。

本計畫成果與內政部水準成果[內政部國土測繪中心，2014]相比較可知(如表 3.11 所示)，本計畫估算之地表垂直變動速率與水準成果並不一致，而全球衛星定位系統(GPS)成果與水準成果亦不一致(如圖 3.33 與圖 3.34 所示)，本計畫成果與水準成果之差值平均值±標準偏差為 $-6.12 \pm 8.90 \text{ mm/yr}$ ，而全球衛星定位系統(GPS)成果與水準成果之差值平均值±標準偏差為 $-6.11 \pm 10.06 \text{ mm/yr}$ ，其差異的原因為內政部水準資料為相對於潮位站附近的一等水準點，而根據 Ching 等人[2011]利用全球衛星定位系統(GPS)連續觀測站資料與精密水準資料(兩資料皆相對於澎湖全球衛星定位系統(GPS)觀測站(S01R))估算台灣本島地表垂直變動速率，結果發現台灣東南部與西南部等區域的地表垂直變動量每年有 10 mm 以上變動量，而 Yen 等人[2011]利用 2004-2008 合成孔徑雷達(Synthetic Aperture Radar, SAR)技術量測花蓮地表變動，由其成果發現花蓮潮位站附近地表每年約下降 1 cm(相對於花蓮市)，表示台灣部

分區域之地表高程有顯著變化情形，因此可以間接推估台灣部分的一等水準點之高程已變動，因此水準成果與本計畫成果不一致是合理的。

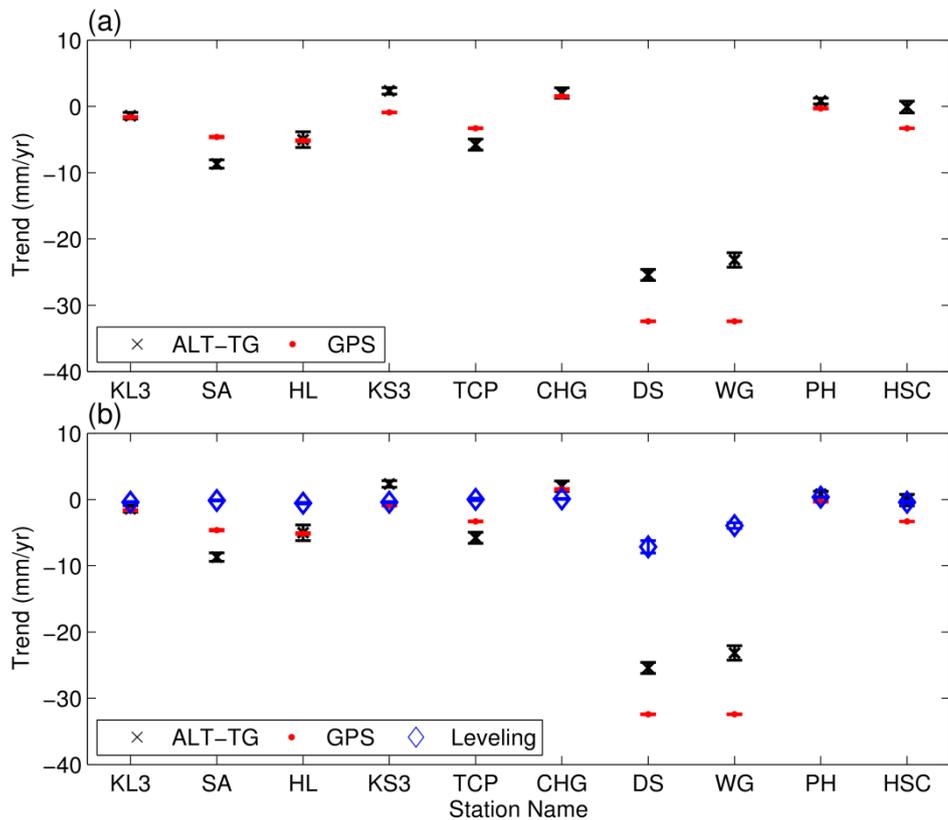


圖 3.33 估算之潮位站地表垂直變動速率、全球衛星定位系統(GPS)成果與水準點成果比較。(a) 估算之潮位站垂直變動速率與全球衛星定位系統(GPS)成果比較，(b) 估算潮位站垂直變動速率、全球衛星定位系統(GPS)成果與水準點成果相比較。ALT: 衛星海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)衛星測高，TG: 潮位站，Leveling: 水準成果

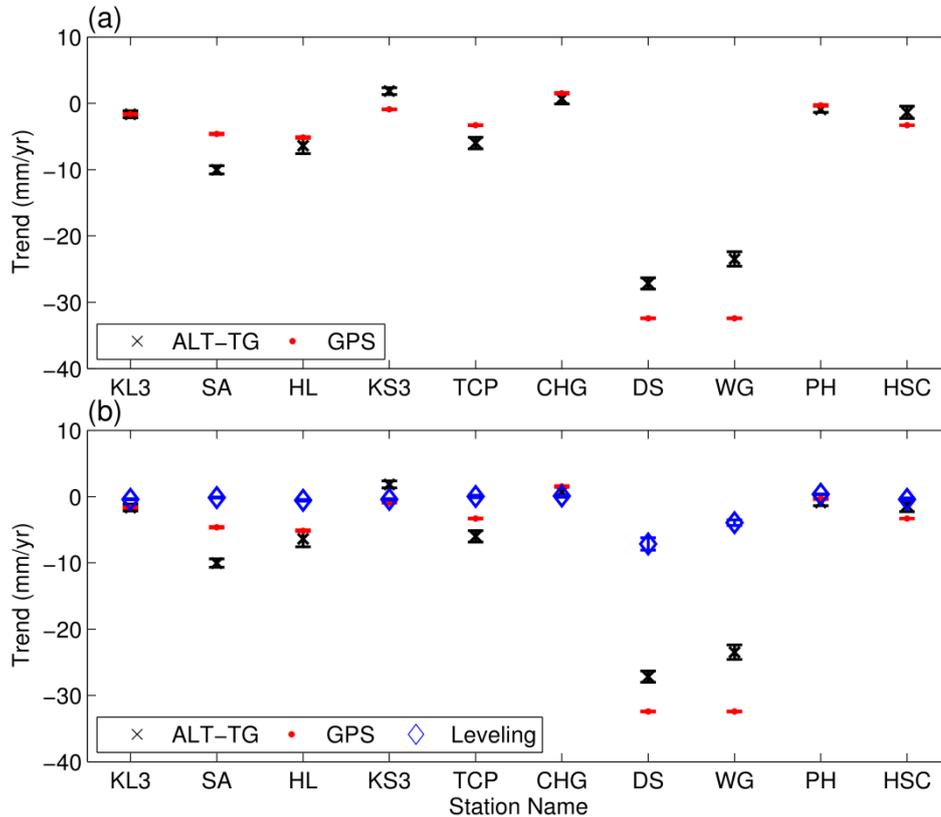


圖 3.34 估算之潮位站地表垂直變動速率、全球衛星定位系統(GPS)成果與水準點成果比較。(a) 估算之潮位站垂直變動速率與全球衛星定位系統(GPS)成果比較，(b) 估算潮位站垂直變動速率、全球衛星定位系統(GPS)成果與水準點成果比較。ALT: 雷達測高資料收集 (RADs)衛星測高，TG: 潮位站，Leveling: 水準成果

表 3.10 估算之潮位站地表垂直變動速率與全球衛星定位系統(GPS)成果比較。Distance 為潮位站與全球衛星定位系統(GPS)觀測站距離

Station Name	Trend (mm/yr)			GPS period	Distance (km)
	AVISO-TG (1993-2012)	RADs-TG (1993-2012)	GPS [Ching <i>et al.</i> , 2011]		
KL3	-1.40±0.49	-1.65±0.52	-1.63±0.09	2002/1-2012/12	9.80
SA	-8.69±0.63	-10.03±0.63	-4.63±0.12	2002/1-2012/8	0.02
HL	-5.02±1.18	-6.38±1.20	-5.15±0.13	2002/1-2012/12	1.18
KS3	2.34±0.50	1.84±0.52	-0.91±0.07	2004/1-2012/8	0.01
TCP	-5.77±0.84	-5.99±0.87	-3.31±0.07	2004/2-2012/8	0.39
CHG	2.01±0.79	0.70±0.80	1.52±0.12	2002/1-2012/12	0.60
DS	-25.43±0.84	-27.16±0.85	-32.42±0.07	2004/1-2012/8	0.27
WG	-23.16±1.09	-23.48±1.09	-32.42±0.07	2004/1-2012/8	2.52
PH	0.81±0.44	-0.90±0.47	-0.30±0.11	2002/1-2012/8	1.45
HSC	-0.09±0.88	-1.36±0.92	-3.31±0.05	2004/2-2012/8	0.42

表 3.11 估算之潮位站地表垂直變動速率與水準成果比較

Station Name	Trend (mm/yr)			Leveling period
	AVISO-TG (1993-2012)	RADs-TG (1993-2012)	Leveling [內政部國土測繪中心，2014]	
KL3	-1.40±0.49	-1.65±0.52	-0.40±0.09	2002-2012
SA	-8.69±0.63	-10.03±0.63	-0.14±0.08	2003-2012
HL	-5.02±1.18	-6.38±1.20	-0.55±0.12	2003-2012
KS3	2.34±0.50	1.84±0.52	-0.41±0.10	2003-2012
TCP	-5.77±0.84	-5.99±0.87	0.02±0.19	2003-2012
CHG	2.01±0.79	0.70±0.80	0.10±0.07	2004-2012
DS	-25.43±0.84	-27.16±0.85	-7.14±0.94	2005-2011
WG	-23.16±1.09	-23.48±1.09	-3.94±0.43	2003-2013
PH	0.81±0.44	-0.90±0.47	0.36±0.05	2005-2012
HSC	-0.09±0.88	-1.36±0.92	-0.40±0.20	2005-2012

3.5 中央氣象局潮位站資料之改正流程

本計畫欲將潮位站相對於沿岸地表高程的海水面變化改正為絕對海水面變化，改正流程依序為海潮改正、逆氣壓效應改正、偏移量改正與地表垂直變動改正，但若資料中包含基準偏移情形，在移除海潮效應時，需在調和分析法中加上步階函數(如式(3.1)所示)，以免偏移量影響海潮效應之改正，然後再進行逆氣壓效應、基準偏移以及地表垂直變動等改正。本研究使用的潮位資料分別由平均海平面永久服務中心(PSMSL)、夏威夷大學海水位中心(UHSLC)與中央氣象局等資料中心取得，然而中央氣象局為較為原始之資料，因此以中央氣象局的潮位站資料為範例，以下為處理中央氣象局的潮位站資料之詳細步驟:

➤ 中央氣象局的潮位站資料

- (1) 中央氣象局潮位站資料為 6 分鐘、10 分鐘或 60 分鐘一筆之記錄，因此需進行海潮改正，海潮改正如式(3.1)所示，改正成果如圖 3.3 所示。
- (2) 將步驟(1)處理後之資料平均為 1 天一筆，然而因其時間系統為格林威治時間(Greenwich mean time)+8 小時，因此計算時需將潮位站資料的時間各修正 8 小時，轉換時間系統至格林威治時間，並且檢查中央氣象局的潮位資料是否占當天全部時段 75% 以上，

若大於 75%則將該日資料平均為 1 天，若小於 75%，則捨棄該日資料。

- (3) 將步驟(2)處理後之潮位站資料進行逆氣壓效應改正。本計畫從歐洲中期天氣預報中心 (ECMWF)的平均海水面氣壓資料中估算出潮位站的逆氣壓效應如式(3.2)所示，並將該效應自潮位站資料中移除。
- (4) 將步驟(3)處理後之日平均資料平均為月平均資料。
- (5) 檢查步驟(4)處理後之資料中是否包含基準偏移。
- (6) 若步驟(4)處理後之資料中包含基準偏移情形，則將該潮位站的原始資料重新進行海潮改正，並重複步驟(2)-步驟(4)。將步驟(4)處理後之資料進行偏移量改正，改正方法如式(3.4)與式(3.6)所示。
- (7) 結合衛星測高資料與潮位站資料估算地表垂直變動速率，方法如式(3.5)與式(3.7)所示，五大商港地表垂直變動如圖 3.35 所示，
- (8) 移除潮位站資料中的地表垂直變動訊號。

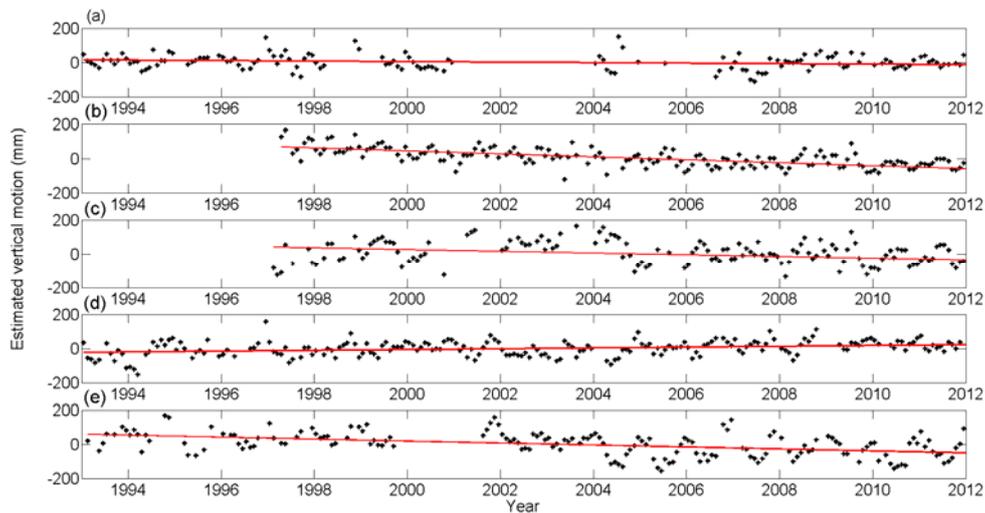


圖 3.35 五大商港之地表垂直變動訊號與擬合之垂直變動速率。(a)基隆、(b)蘇澳、(c)花蓮、(d)高雄和(e)台中潮位站

3.6 間接平差

通過被觀測量與未知數間函數關係來確定未知參數的觀測方式稱之為間接觀測，而每個觀測值可表達成未知參數的函數，組成觀測方程，而以觀測方程為函數模型的平差方法稱之為間接平差[武漢大學測繪學院測量平差學科組，2005]。間接平差的函數模型為

$$L + V = AX, \quad V \sim N(0, \sigma_0^2 P^{-1}) \dots\dots\dots(3.8)$$

其中 L 為 $n \times 1$ 的觀測量矩陣、 V 為 $n \times 1$ 的改正數矩陣、 A 為 $n \times u$ 的設計矩陣、 X 為未知參數、 N 表示標準常態分佈、 σ_0 為先驗單位權中誤差、 P 為觀測值之權矩陣， n 與 u 分別為觀測數個數與未知參數個數。平差計算時，對於非線性的函數模型需進行線性化，然而在本研究使用的間接平差函數模型皆為線性，因此在本文中不介紹非線性函數模型線性化之處理方式。

當 $n = u$ 時，可求得唯一解，而改正數為零，但在測量作業中，需要對觀測值有檢核的能力，改正數為零則無法進行後續檢核評估，故需要 $n > u$ ，則有多餘觀測數可進行檢核。本研究依高斯最小二乘(Least-square)原理，目標函數 $V^T P V$ (本研究中觀測值設定為等權，因此 P 為單位矩陣) 為最小時，可求解未知參數 X 的最或是值解，公式如下式所示

$$\hat{X} = N^{-1} A^T P L \dots\dots\dots(3.9)$$

其中 \hat{X} 為未知參數 X 的估值， $N = A^T P A$ 。

將式(3.9)之解代入式(3.8)，可求得平差後改正數 \hat{V} (式 3.10)，改正數 \hat{V} 代入式(3.11)可計算出未知參數估值的中誤差 ($\sum_{\hat{X}\hat{X}}$)，公式如式(3.10)所示，而中誤差 ($\sum_{\hat{X}\hat{X}}$) 開根號後則為參數估值之標準偏差。

$$\hat{V} = A\hat{X} - L \dots\dots\dots(3.10)$$

$$\hat{\Sigma}_{\hat{X}\hat{X}} = \hat{\sigma}_0^2 N^{-1} \dots\dots\dots(3.11)$$

其中 $\hat{\sigma}_0$ 為 σ_0 之估計值，

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{\hat{V}^T P \hat{V}}{r} \dots\dots\dots(3.12)$$

r 為多餘觀測數 ($r = n - u$)。

本研究主要目標為估算臺灣四周近二十年海水面上升速率，本研究將使用六參數擬合海水面變化，並計算出海水面上升速率，因此下面將以六參數擬合海水面變化為例，說明如何使用間接平差方式，並且依最小二乘法原理估算未知參數。擬合公式如式(3.3)所示，式中 TG 為潮位站或衛星測高海水面高度時間序列，式(3.3)以間接平差方式表示，如下式所示，

$$\begin{aligned} TG(t_1) + v_1 &= a + bt_1 + c \sin(2\pi t_1) + d \cos(2\pi t_1) + e \sin(4\pi t_1) + f \cos(4\pi t_1) \\ TG(t_2) + v_2 &= a + bt_2 + c \sin(2\pi t_2) + d \cos(2\pi t_2) + e \sin(4\pi t_2) + f \cos(4\pi t_2) \\ &\vdots \\ TG(t_n) + v_n &= a + bt_n + c \sin(2\pi t_n) + d \cos(2\pi t_n) + e \sin(4\pi t_n) + f \cos(4\pi t_n) \\ &\dots\dots\dots(3.13) \end{aligned}$$

其中 TG 為觀測量 L ， v 為改正數 V ，未知參數 $X=[a、b、c、d、e、f]$ ， n 為資料個數，而設計矩陣 A 如下所示

$$A = \begin{bmatrix} 1 & t_1 & \sin(2\pi t_1) & \cos(2\pi t_1) & \dots & \sin(4\pi t_1) & \cos(4\pi t_1) \\ 1 & t_2 & \sin(2\pi t_2) & \cos(2\pi t_2) & \dots & \sin(4\pi t_2) & \cos(4\pi t_2) \\ & & & \vdots & & & \\ 1 & t_n & \sin(2\pi t_n) & \cos(2\pi t_n) & \dots & \sin(4\pi t_n) & \cos(4\pi t_n) \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

將式(3.13)與式(3.14)代入式(3.9)，可求解未知參數 \hat{X} ，其中未知參數 b 即為海水面上升速率。將未知參數 \hat{X} 代入式(3.8)，可求得各個觀

測量於平差後改正數 \hat{V} ，改正數 \hat{V} 代入式(3.11)並開根號可計算出未知參數估值的標準偏差。

先前於第二章中已提到衛星測高資料每一秒平均之海水面高度觀測量精度可達 ± 4.2 公分[AVISO and PODAAC User Handbook, 2001]，而本研究使用的衛星測高資料是經由空間與時間上的平均，衛星測高觀測精度可再提升。而估算衛星測高量測的海水面上升速率是經由六參數擬合，如式(3.3)所示，由誤差傳播理論可估算衛星測高觀測中誤差 \sum_{LL} 與未知參數中誤差 \sum_{XX} 之關係，

$$\sum_{LL} = A \sum_{XX} A^T \dots\dots\dots(3.15)$$

由上式可知，衛星測高觀測誤差將分散於各未知參數中，而觀測量中誤差與斜率 b 中誤差之比例為 t^2 (本研究中 t^2 為遠大於1之正值，資料涵蓋時間越長， t^2 越大)，因此估算之海水面上升速率精度可小於 1 mm/yr 。

以下以另一範例說明間接平差之計算方式。此範例估算地表垂直變動速率，觀測量為一月一筆數據之地表垂直變動量，觀測量為等權且不相關，數據如表 3.12 與圖 3.36 所示，

表 3.12: 地表垂直變動量

Time (month)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Vertical motion (mm)	8.1	8.4	9.2	9.8	10.3	11.2	11.8	11.7	12.0

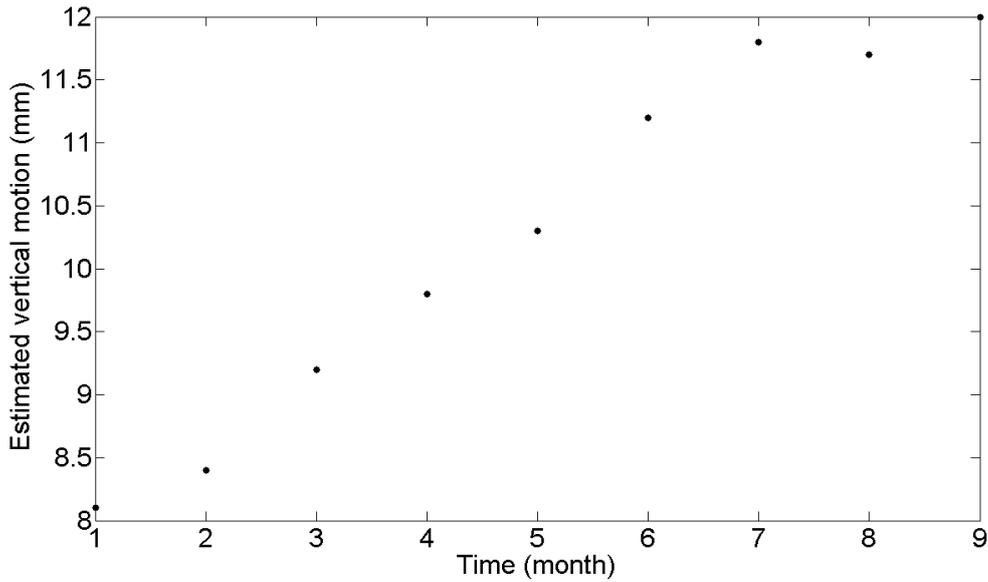


圖 3.36 地表垂直變動量圖

地表垂直變動速率之推算為應用線性方程式(二參數)擬合，公式如式(3.7)所示，將式(3.7)以間接平差方式表示，如下式所示，

$$u(t) + v = a + b''t \dots\dots\dots(3.16)$$

其中 u 為觀測量 L ， v 為改正數 V ，設計矩陣 $A=[1, t]$ ，未知參數 $X=[a, b'']$ 。將表 3.12 數據代入式(3.16)可得

$$L = \begin{bmatrix} 8.1 \\ 8.4 \\ 9.2 \\ 9.8 \\ 10.3 \\ 11.2 \\ 11.8 \\ 11.7 \\ 12.0 \end{bmatrix} (mm) \text{、} A = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \\ 1 & 3 \\ 1 & 4 \\ 1 & 5 \\ 1 & 6 \\ 1 & 7 \\ 1 & 8 \\ 1 & 9 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(3.17)$$

依據最小二乘法原理，將式(3.17)代入式(3.9)，可求解未知參數 \hat{X} ，如下式所示，

$$\hat{X} = N^{-1} A^T PL = \begin{bmatrix} 7.60 \\ 0.54 \end{bmatrix} (mm) = \begin{bmatrix} \hat{a} \\ \hat{b}' \end{bmatrix} \dots\dots\dots(3.18)$$

其中 P 為單位矩陣，而 N^{-1} 與 $A^T PL$ 分別如下式所示，

$$N^{-1} = (A^T PA)^{-1} = \begin{bmatrix} 0.53 & -0.08 \\ -0.08 & 0.02 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(3.19)$$

$$A^T PL = \begin{bmatrix} 92.50 \\ 494.60 \end{bmatrix} (mm) \dots\dots\dots(3.20)$$

將求得的未知參數(如式(3.18)所示)帶入式(3.7)，並與地表垂直變動量相比較，結果如圖 3.37 所示。另外，將求得的未知參數代入式(3.11)並開根號可估算出垂直變動速率之標準偏差為 ± 0.04 mm/yr。

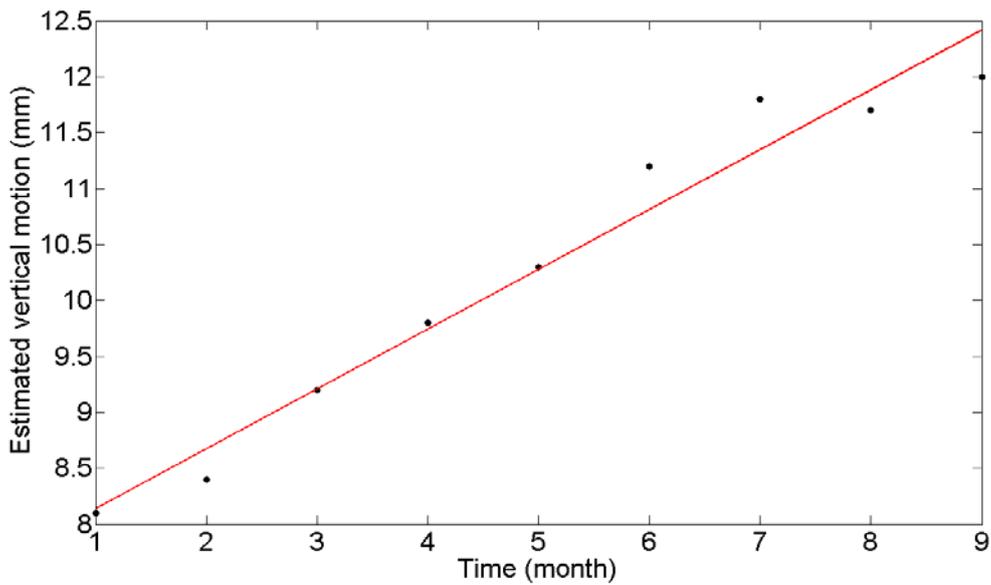


圖 3.37 地表垂直變動量(黑點)與估算之垂直變動速率(紅線)圖

第四章 台灣四周海域近二十年之絕對海水面上升速率

本計畫之目的為利用衛星測高儀及潮位站資料計算臺灣附近海域絕對海水面上升速率。衛星測高資料需經過儀器改正、介質改正與地球物理因子改正；應用潮位站資料估算絕對海水面上升速率時，需經過海潮、逆氣壓、偏移量與測地表垂直變動改正。往昔利用臺灣周圍潮位站資料分析海水面上升速率的研究中[黃清哲等人, 2009; Tseng *et al.*, 2009; Chang *et al.*, 2012]，並未完全考慮海潮、逆氣壓、基準偏移、測站地表垂直變動等影響，因此本章將分析上述四項改正對於近二十年(1993-2012)潮位站資料計算海水面上升速率之影響，並利用改正後的潮位站和衛星測高資料，評估臺灣四周海域近二十年絕對海面變動速率，最後利用海水溫度和鹽度資料計算之比容海面變化以及重力反演和氣候實驗(GRACE)衛星資料計算之海水質量變化來分析臺灣周圍海水面上升的主要原因。本計畫於 4.1 節評估改正前、後潮位站資料的海水面上升速率之差異，並分析各項改正因子對於近二十年潮位站資料估計海水面上升速率之影響程度，4.2 節分析衛星測高及潮位站資料之臺灣周圍絕對海水面上升速率空間分佈特性，並與前人研究成果相比較，最後分析臺灣周圍海水面上升的主要原因。

本章中使用之的潮位站資料皆已進行海潮效應、逆氣壓效應、偏移量與地表垂直變動改正。偏移量改正方法中可使用六參數(方法 I)與二參數(方法 II)加上步階函數擬合並改正之，就方法合理性以及與衛星測高資料間相關性而言，方法 II 為較適合之方法，因此本章中基準偏移改正皆使用方法 II。地表垂直變動改正為結合潮位站資料與衛星測高資料估算並改正之，然而測高儀回波在靠近海岸易受到陸地地形、海底地形、海潮與河口等影響，造成測高資料在近海岸處資料較為稀少且精度差，為配合潮位站資料使用，本計畫以相關性評估何者範圍內的測高資料較適用台灣周圍潮位站資料。由相關性結果可知，台灣周圍不同區域適用平均不同範圍內之衛星測高資料(詳細數據請參閱第 3.4.2 小節)，台灣本島上的潮位站資料適用等權平均半徑 5° 範圍內衛星

測高資料，離島的澎湖潮位站則使用等權平均半徑 2° 範圍內衛星測高資料，其他區域潮位站(如中國大陸、日本、菲律賓等)資料則適用加權平均半徑 2° 範圍內衛星測高資料。

4.1 改正前後海水面上升速率之差異

潮位站資料在經過海潮與逆氣壓改正後，並利用衛星測高資料(衛星海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)和雷達測高資料收集 (RADs))進行基準偏移以及潮位站地表垂直變動改正。潮位站資料經各項改正後估算的海水面上升速率如表 4.1~表 4.6 所示，比較改正前(原始潮位站資料)與改正後(經四項改正後的潮位站資料)潮位站資料可知(如圖 4.1 與圖 4.2 所示)，改正前各區域潮位站資料估算的絕對海水面上升速率差異非常大(-59~23 *mm/yr*)，而經過改正後各區域潮位站資料估算的絕對海水面上升速率獲得較一致性的結果(-1~10 *mm/yr*)，其原因為各區域潮位資料受到自然(海潮、逆氣壓、地表垂直變動)或人為(資料基準偏移)因子影響程度不一，造成各區域原始的潮位站資料估算之海水面速率差異較大，當改正後測站資料計算之海水面變速率成果則較為一致。經由比較改正前、後潮位站資料估算之海水面速率變化量(或稱差值)，其中平均海平面永久服務中心(PSMSL)的基隆(KL)、高雄(KS)與馬尼拉(MNL)等潮位站資料以及中央氣象局的基隆(KL3)、高雄(KS3)、東石(DS)與塭港(WG)等潮位站的差值遠大於海水面速率之標準偏差數倍之多，其原因為基隆、高雄與塭港潮位站的原始資料中含有相當顯著基準偏移情形，偏移量改正前、後估算海水面上升速率差值皆 39 *mm/yr* 以上 (如圖 4.3 所示); 而塭港與東石潮位站所在區域的地表垂直變動量較大，每年約有 20 *mm* 以上的下沉量 (如圖 4.3 所示)。由上述結果可知，經各項改正對於台灣周圍近二十年潮位資料估算海水面上升速率有顯著影響，表示若使用未經改正的台灣周圍原始潮位站資料估算海水面上升速率，則其上升速率可能包含自然或人為因子之影響而產生較大的誤差。

由各項改正前、後所估算海水面上升速率之差值可知，自然及人

為因子對於各區域潮位站資料之影響量(影響量為各項改正前、後潮位站資料估算之海水面上升速率差值(或稱變化量))不一，如圖 4.3 所示。由圖可知，海潮因子與逆氣壓因子對於全部潮位資料估算海水面上升速率之影響較小，影響量為 0~2 mm/yr，顯示移除高頻的海潮週期訊號與大氣壓力的變化對於海水面上升速率影響較小，但對於海水面上升速率精準推估仍須納入考慮。基準偏移與測站地表垂直變動因子影響海水面上升速率最為顯著，偏移量改正對於全部潮位站資料的影響量約 0~69 mm/yr，影響量平均值約 23 mm/yr，而台灣周圍潮位站之地表垂直變動改正對於海水面上升速率影響量平均值約 4~5 mm/yr，皆大於 1993-2009 年全球平均海水面上升速率的 3.2 ± 0.4 mm/yr [Church and White, 2011]。因此在臺灣附近海域，若以未經過基準偏移和測站地表垂直變動改正之潮位站資料估算絕對海水面上升速率，將造成顯著的誤差。

表 4.1 平均海平面永久服務中心(PSMSL)潮位站資料經各項改正後所估算之海水面上升速率。採用衛星海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO) 衛星測高資料

Station Name	Trend (mm/yr)			
	With Ocean tide corrections	With Ocean tide and IB corrections	With Ocean tide, IB, and bias corrections	With Ocean tide, IB, bias, and vertical motion corrections
Zhapo	2.53±0.72	2.13±0.71	x	2.38±0.72
Xi Sha	4.49±0.78	4.03±0.75	x	6.11±0.75
Kanmen	3.72±0.70	3.27±0.69	x	3.24±0.69
Waglan Island	3.23±1.36	2.69±1.34	16.39±1.11	2.60±1.11
Quarry Bay	1.92±0.79	1.49±0.77	x	2.00±0.77
Tai Miu Wan	2.75±1.53	2.67±1.50	x	1.56±1.50
Tai Po Kau	2.56±0.76	2.12±0.75	x	2.27±0.76
Tsim Bei Tsui	3.48±0.85	3.21±0.83	x	2.71±0.83
Shek Pik	-0.42±1.09	-0.37±1.07	x	1.35±1.07
Keelung	-44.71±3.67	-45.66±3.67	8.81±0.48	4.03±0.48
Kaohsiung	-26.17±1.73	-28.08±1.66	11.00±0.58	4.32±0.58
Nase	2.56±0.63	2.24±0.61	x	2.07±0.61
Nakano Sima	4.23±0.55	3.93±0.53	x	3.02±0.53
Okinawa	3.35±0.64	2.88±0.62	x	2.77±0.61
Naha	3.55±0.67	3.15±0.62	x	2.78±0.62
Ishigaki	3.68±0.70	3.19±0.69	x	3.24±0.70
Manila	16.76±0.86	16.33±0.79	x	6.79±0.79
Legaspi	7.97±0.79	7.51±0.70	x	7.28±0.70
Cebu	6.26±0.82	5.83±0.74	x	8.45±0.74

x 為潮位資料中無偏移量情形

表 4.2 平均海平面永久服務中心(PSMSL)潮位站資料經各項改正後所估算之海水面上升速率。採用雷達測高資料收集(RADs)衛星測高資料

Station Name	Trend (mm/yr)			
	With Ocean tide corrections	With Ocean tide and IB corrections	With Ocean tide, IB, and bias corrections	With Ocean tide, IB, bias, and vertical motion corrections
Zhapo	2.53±0.72	2.13±0.71	x	2.39±0.72
Xi Sha	4.49±0.78	4.03±0.75	x	4.60±0.75
Kanmen	3.72±0.70	3.27±0.69	x	1.86±0.69
Waglan Island	3.23±1.36	2.69±1.34	17.16±1.10	1.42±1.11
Quarry Bay	1.92±0.79	1.49±0.77	x	0.57±0.77
Tai Miu Wan	2.75±1.53	2.67±1.50	x	-0.20±1.50
Tai Po Kau	2.56±0.76	2.12±0.75	x	1.07±0.76
Tsim Bei Tsui	3.48±0.85	3.21±0.83	x	1.50±0.83
Shek Pik	-0.42±1.09	-0.37±1.07	x	-1.45±1.07
Keelung	-44.71±3.67	-45.66±3.67	9.21±0.49	3.38±0.49
Kaohsiung	-26.17±1.73	-28.08±1.66	11.84±0.58	4.16±0.58
Nase	2.56±0.63	2.24±0.61	x	1.19±0.61
Nakano Sima	4.23±0.55	3.93±0.53	x	3.56±0.53
Okinawa	3.35±0.64	2.88±0.62	x	2.70±0.61
Naha	3.55±0.67	3.15±0.62	x	2.25±0.62
Ishigaki	3.68±0.70	3.19±0.69	x	1.68±0.70
Manila	16.76±0.86	16.33±0.79	x	5.68±0.79
Legaspi	7.97±0.79	7.51±0.70	x	6.62±0.70
Cebu	6.26±0.82	5.83±0.74	x	9.67±0.74

x 為潮位資料中無偏移量情形

表 4.3 夏威夷大學海水位中心(UHSLC)基隆與高雄潮位站資料經各項改正後所估算之海水面上升速率。採用衛星海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)衛星測高資料

Station Name	Trend (mm/yr)			
	With Ocean tide corrections	With Ocean tide and IB corrections	With Ocean tide, IB, and bias corrections	With Ocean tide, IB, bias, and vertical motion corrections
Keelung	0.26±0.58	-0.38±0.50	7.11±0.44	4.63±0.44
Kaohsiung	2.13±0.61	1.41±0.59	x	4.72±0.59

x 為潮位資料中無偏移量情形

表 4.4 夏威夷大學海水位中心(UHSLC)基隆與高雄潮位站資料經各項改正後所估算之海水面上升速率。採用雷達測高資料收集(RADs)衛星測高資料

Station Name	Trend (mm/yr)			
	With Ocean tide corrections	With Ocean tide and IB corrections	With Ocean tide, IB, and bias corrections	With Ocean tide, IB, bias, and vertical motion corrections
Keelung	0.26±0.58	-0.38±0.50	7.23±0.45	1.70±0.44
Kaohsiung	2.13±0.61	1.41±0.59	x	4.05±0.59

x 為潮位資料中無偏移量情形

表 4.5 中央氣象局潮位站資料經各項改正後所估算之海水面上升速率。採用衛星海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)衛星測高資料

Station Name	Trend (mm/yr)				
	Original	With Ocean tide corrections	With Ocean tide and IB corrections	With Ocean tide, IB, and bias corrections	With Ocean tide, IB, bias, and vertical motion corrections
Keelung	-59.17±3.15	-59.65±2.94	-60.31±2.96	4.72±0.43	3.32±0.43
Su-ao	9.54±0.91	10.16±0.85	9.22±0.80	10.22±0.53	1.53±0.53
Hualien	1.81±0.86	1.18±0.86	0.72±0.82	6.55±0.86	1.53±0.86
Kaohsiung	-37.31±1.95	-36.86±1.76	-38.14±1.85	2.21±0.50	4.55±0.50
Taichung Port	9.52±0.79	9.77±0.72	8.96±0.68	10.41±0.53	4.64±0.53
Chenggong	-1.92±0.59	-1.86±0.57	-2.39±0.53	0.87±0.51	2.88±0.51
Dongshi	22.96±0.98	22.71±0.92	22.25±0.95	29.96±0.65	4.53±0.65
Wengang	-42.08±2.94	-40.65±2.60	-41.51±2.89	27.97±0.67	4.81±0.67
Penghu	9.66±0.77	9.87±0.72	9.46±0.68	1.37±0.48	2.18±0.48
Hsinchu	5.52±0.74	3.85±0.69	3.36±0.68	3.06±0.49	2.97±0.49

表 4.6 中央氣象局潮位站資料經各項改正後所估算之海水面上升速率。採用雷達測高資料收集(RADs)衛星測高資料

Station Name	Trend (mm/yr)				
	Original	With Ocean tide corrections	With Ocean tide and IB corrections	With Ocean tide, IB, and bias corrections	With Ocean tide, IB, bias, and vertical motion corrections
Keelung	-59.17±3.15	-59.65±2.94	-60.31±2.96	3.89±0.43	2.24±0.43
Su-ao	9.54±0.91	10.16±0.85	9.22±0.80	10.21±0.53	0.18±0.53
Hualien	1.81±0.86	1.18±0.86	0.72±0.82	6.58±0.86	0.20±0.86
Kaohsiung	-37.31±1.95	-36.86±1.76	-38.14±1.85	2.09±0.51	3.93±0.51
Taichung Port	9.52±0.79	9.77±0.72	8.96±0.68	9.79±0.53	3.80±0.53
Chenggong	-1.92±0.59	-1.86±0.57	-2.39±0.53	0.98±0.51	1.68±0.51
Dongshi	22.96±0.98	22.71±0.92	22.25±0.95	30.80±0.64	3.64±0.64
Wengang	-42.08±2.94	-40.65±2.60	-41.51±2.89	27.64±0.67	4.16±0.67
Penghu	9.66±0.77	9.87±0.72	9.46±0.68	1.16±0.48	0.26±0.48
Hsinchu	5.52±0.74	3.85±0.69	3.36±0.68	3.38±0.48	2.02±0.48

x 為潮位資料中無偏移量情形

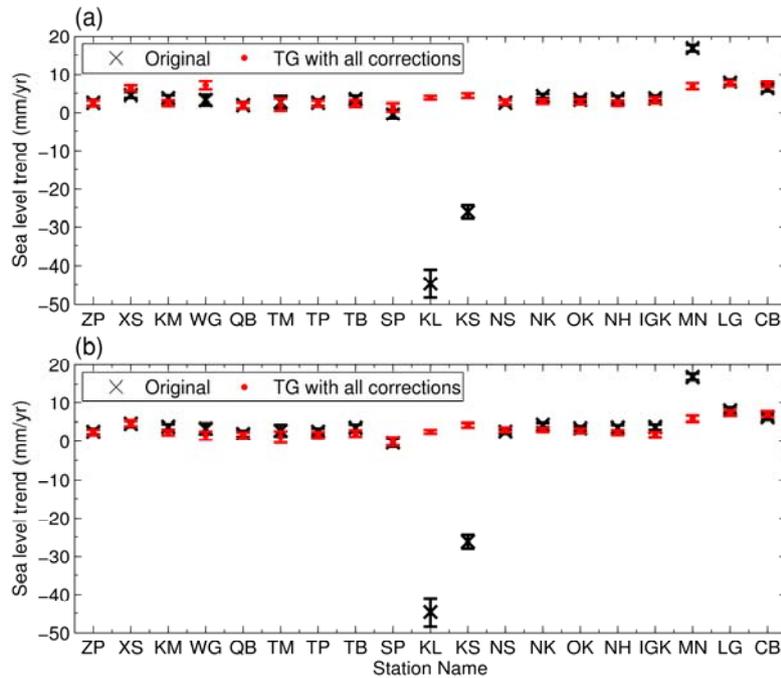


圖 4.1 原始與改正後平均海平面永久服務中心(PSMSL)潮位站資料所估算之海面上升速率與標準偏差。(a) 採用衛星海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)衛星測高資料，(b) 採用雷達測高資料收集(RADs)衛星測高資料

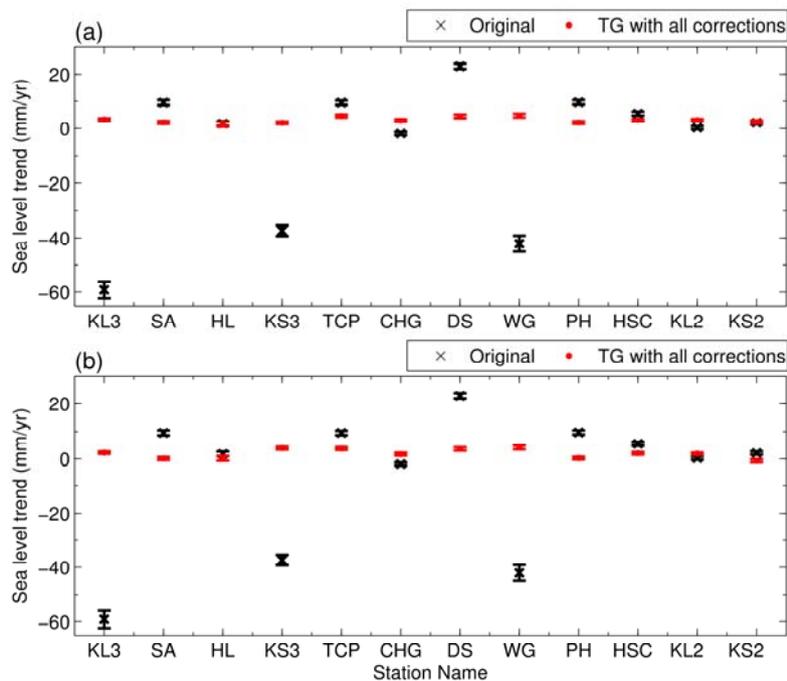


圖 4.2 原始與改正後夏威夷大學海水位中心(UHSLC)與中央氣象局潮位站資料後所估算之海面上升速率與標準偏差。(a) 採用衛星海洋數

據存檔、驗正與解釋(AVISO)衛星測高資料，(b) 採用雷達測高資料收集 (RADs)衛星測高資料。KL2 與 KS2 為夏威夷大學海水位中心 (UHSLC)基隆與高雄潮位站資料、KL3 與 KS3 為中央氣象局基隆與高雄潮位站資料

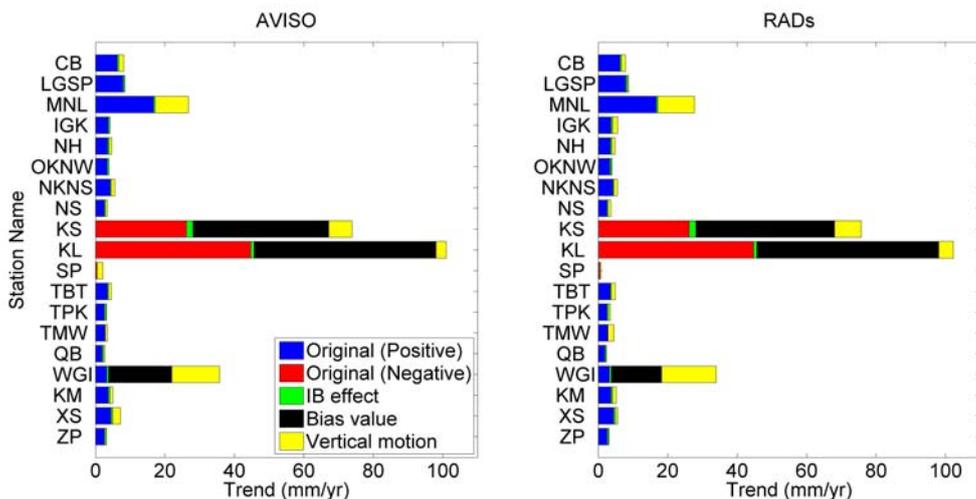


圖 4.3 各項改正對於平均海平面永久服務中心(PSMSL)潮位站資料進行海面上升速率計算之影響量(變化量)。Original 為原始資料之海面上升速率，其中 Positive 與 Negative 分別表示海面上升速率為正與負。Ocean tide effect、IB effect、Bias value 與 Vertical motion 分別為海潮、逆氣壓效應、基準偏移與測站地表垂直變動改正

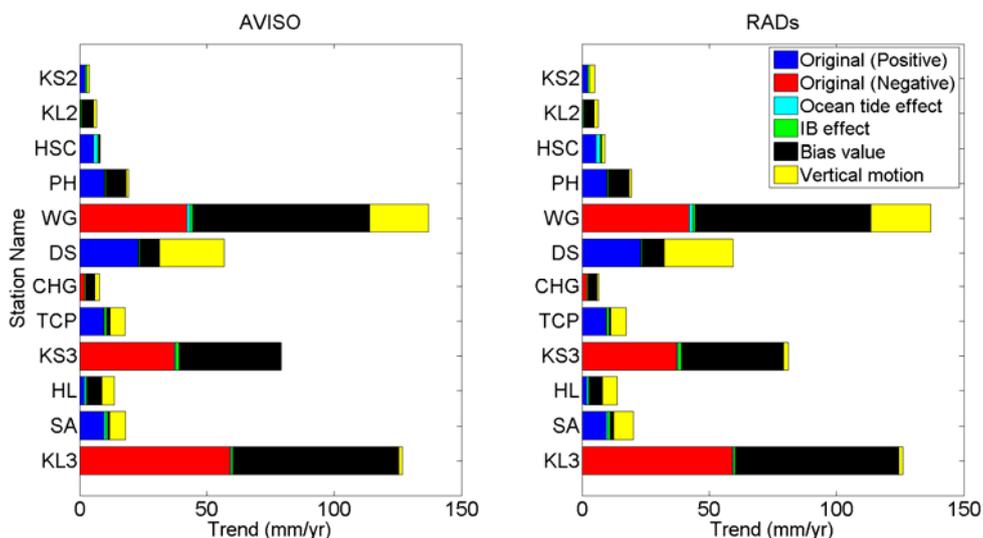


圖 4.4 各項改正對於夏威夷大學海水位中心(UHSLC)與中央氣象局潮位站資料估算海面上升速率之影響量(變化量)。Original 為原始資料

之海水面上升速率，其中 Positive 與 Negative 分別表示海水面上升速率為正與負。Ocean tide effect、IB effect、Bias value 與 Vertical motion 分別為海潮、逆氣壓效應、基準偏移與潮位站地表垂直變動改正。KL2 與 KS2 為夏威夷大學海水位中心(UHSLC)之基隆與高雄潮位站資料，KL3 與 KS3 為中央氣象局之基隆與高雄潮位站資料

潮位站資料品質對於估算測站地表垂直變動速率與海水面上升速率相當重要，然而全部中央氣象局潮位站皆有基準偏移情形(如圖 4.3 與圖 4.4 所示)，造成估算海水面上升速率 0~69 mm/yr 的影響，平均值約 23 mm/yr。另外，部分中央氣象局潮位站資料中有嚴重缺漏情形，以基隆潮位站為例，基隆潮位站為臺灣相當重要的潮位站之一，臺灣水準原點是以基隆潮位站長期監測所得之平均海水面做為其參考基準面，然而基隆潮位站從 2001-2003 間無潮位記錄資料，且 2006 年可發現嚴重基準不一致情形(如圖 2.9 所示)，對於如此重要的潮位站之管理方式尚有待加強。由此可知，政府對於潮位站的輕忽，將嚴重影響潮位資料的後續應用之成果，例如：測站地表垂直變動速率之估算與絕對海水面上升速率之估算。而且臺灣潮位站並非由相同單位管理(如表 2.6 所示)，管理單位的資訊不透明以及申請資料重重限制，將提高完整收集潮位站資料之難度，對於相關研究單位無疑是一大阻礙，因此希望有關單位能重視潮位站資料品質以及資料管理的透明化。以利未來氣候變遷的情境下，可以提供更有利的數據來分析海水面上升的問題。

4.2 絕對海面水位昇降變動速率

本小節為估算台灣周圍海域之絕對海水面上升速率，各節內容依序介紹如下：4.2.1 節為利用衛星測高資料與全部潮位站資料估算絕對海水面上升速率，並將研究範圍分為五個區域，估算各區域的絕對海水面上升速率，最後分析十年(2003-2012)與二十年(1993-2012)臺灣四周海域各區域之絕對海水面變化速率；4.2.2 節為將估算之近二十年絕對海水面上升速率與前人研究成果比較；4.2.3 節為分析近年來台灣周圍海水面上升的主要原因。

4.2.1 近二十年(1993-2012)絕對海面上升速率

由改正後的潮位站資料和衛星測高資料估算臺灣四周海域近二十年絕對海水面變動速率，成果如表 4.7-表 4.9 所示，其中平均海平面永久服務中心(PSMSL)、夏威夷大學海水位中心(UHSLC)以及中央氣象局皆提供基隆與高雄潮位站資料，由於各單位的基隆與高雄潮位站資料經各項校正後所估算的絕對海面上升速率間之差值皆低於 1.50 mm/yr ，且中央氣象局的潮位站資料應為較原始之資料，對於本研究使用與分析上較有一致性，因此台灣四周海域近二十年絕對海面上升速率之空間分佈圖中將展示衛星測高與全部潮位站資料(未包含平均海平面永久服務中心(PSMSL)與夏威夷大學海水位中心(UHSLC)的基隆與高雄潮位站)之估算成果，如圖 4.5 與圖 4.6 所示。由圖可知，衛星測高資料與全部潮位站資料所估算絕對海面上升速率大致相近，臺灣周圍海水面變化幾乎呈現上升情形，且海面上升速率正由北往南加速，例如以坎門、高雄與黎牙實比為例，坎門潮位站周圍絕對海面上升速率約為 1.86~3.61 mm/yr ，高雄潮位站約為 3.82~4.55 mm/yr ，黎牙實比潮位站約為 6.13~7.28 mm/yr 。以衛星海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)與雷達測高資料收集 (RADs)衛星測高資料分別估算臺灣四周海域(緯度: 10°N~30°N、經度: 110°E~130°E)近二十年絕對海面上升速率為 5.23 ± 0.31 mm/yr 與 4.43 ± 0.31 mm/yr 。

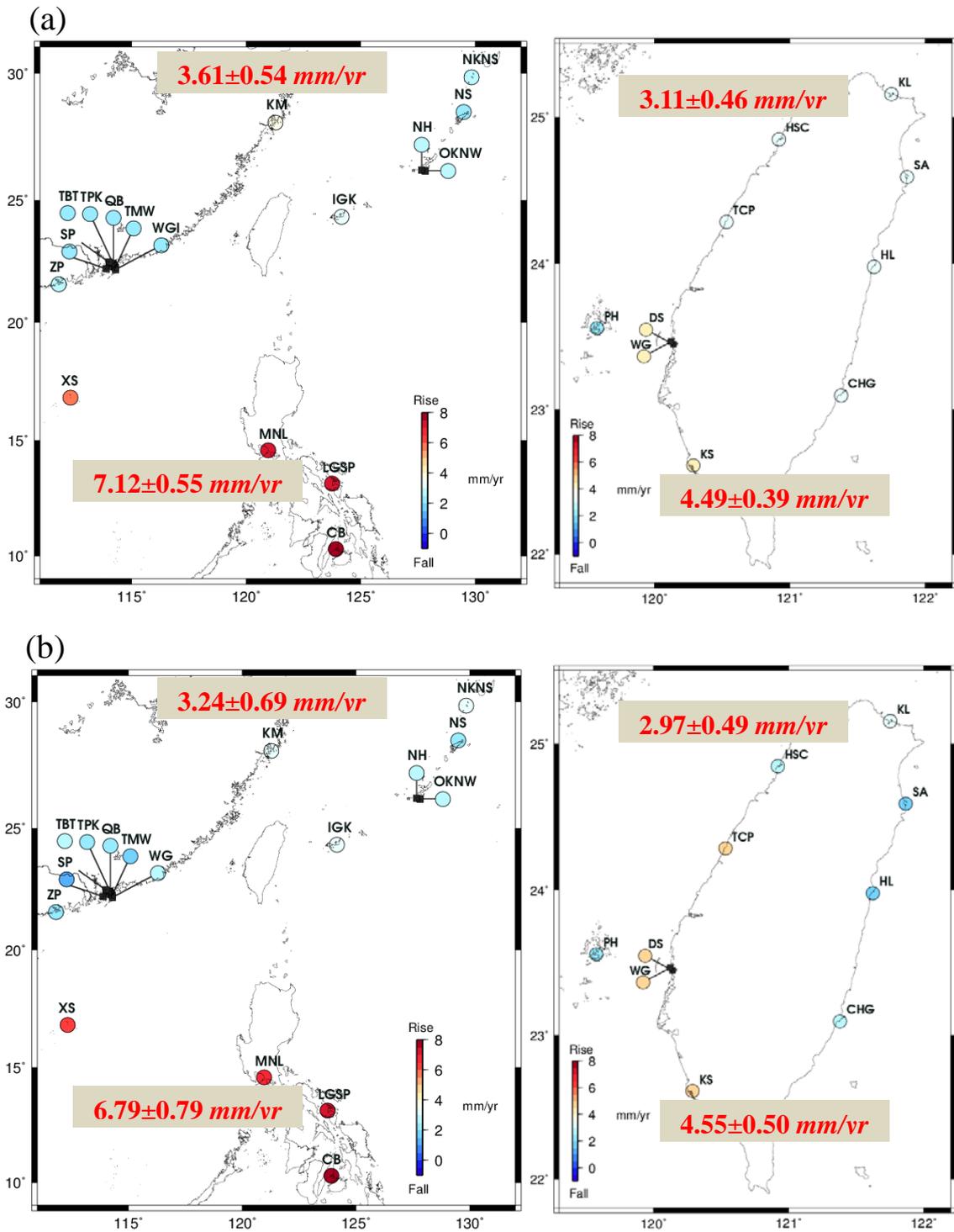


圖 4.5 臺灣周圍絕對海面上升速率。(a)衛星海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)測高資料所估算(b)全部潮位站資料所估算

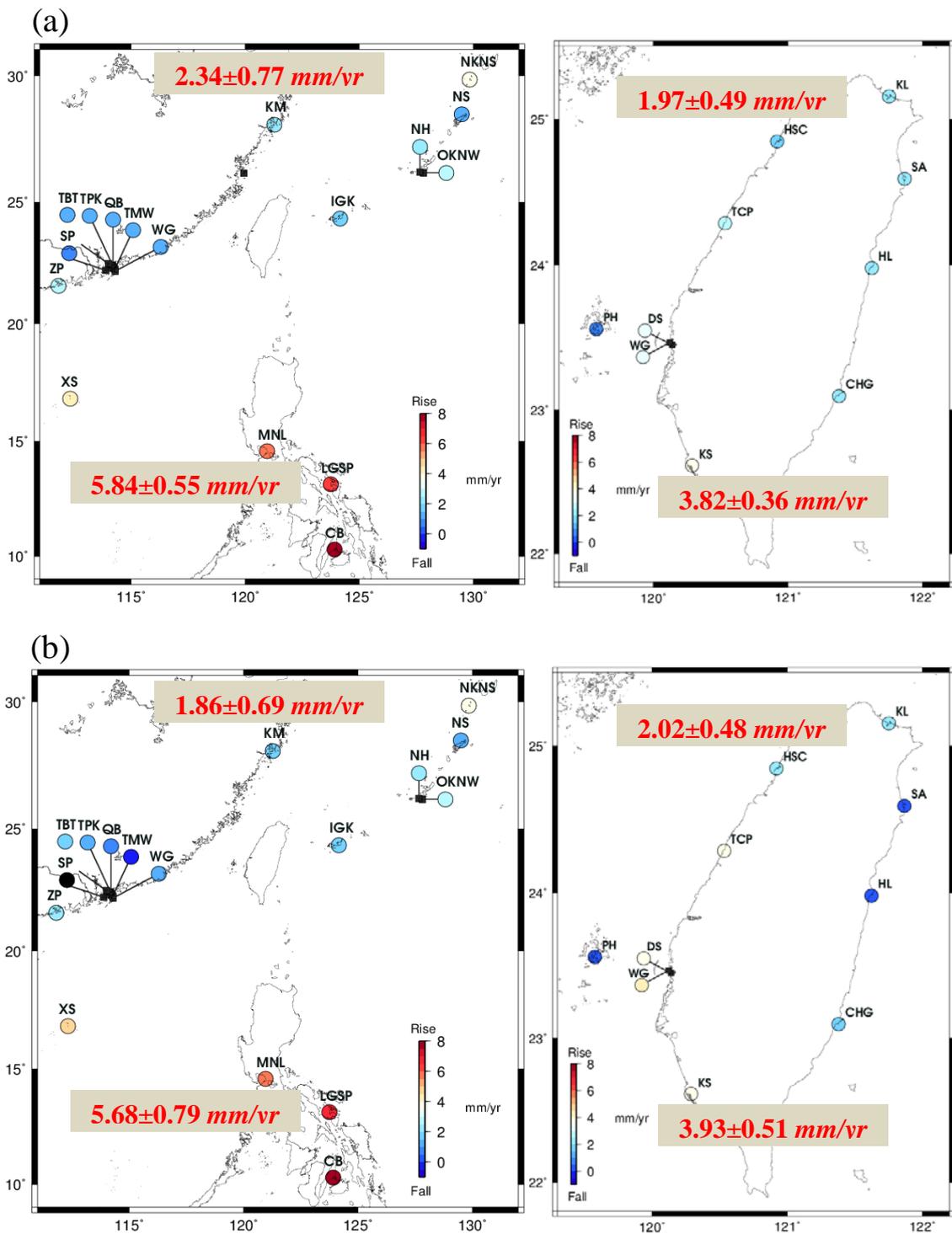


圖 4.6 臺灣周圍絕對海面上升速率。(a) 雷達測高資料收集(RADs)測高資料所估算(b)全部潮位站資料所估算

表 4.7 平均海平面永久服務中心(PSMSL)潮位站固定範圍之海水面上升速率。ALT 為衛星測高資料，TG 為潮位站資料

Station Name	Sea level trend(mm/yr)			
	AVISO		RADs	
	ALT	TG	ALT	TG
Zhapo	2.62±0.60	2.38±0.72	2.74±0.59	2.39±0.72
Xi Sha	5.57±0.70	6.11±0.75	4.05±0.71	4.60±0.75
Kanmen	3.61±0.54	3.24±0.69	2.34±0.77	1.86±0.69
Waglan Island	2.44±0.55	2.60±1.11	1.17±0.59	1.42±1.11
Quarry Bay	2.43±0.56	2.00±0.77	1.17±0.60	0.57±0.77
Tai Miu Wan	2.42±0.55	1.56±1.50	1.22±0.59	-0.20±1.50
Tai Po Kau	2.44±0.56	2.27±0.76	1.21±0.59	1.07±0.76
Tsim Bei Tsui	2.48±0.57	2.71±0.83	1.20±0.61	1.50±0.83
Shek Pik	2.49±0.58	1.35±1.07	0.86±0.66	-1.45±1.07
Keelung	3.16±0.36	4.03±0.48	2.39±0.37	3.38±0.49
Kaohsiung	4.52±0.36	4.32±0.58	3.83±0.36	4.16±0.58
Nase	2.15±0.60	2.07±0.61	1.28±0.60	1.19±0.61
Nakano Sima	2.80±0.54	3.02±0.53	3.58±0.61	3.56±0.53
Okinawa	2.59±0.71	2.77±0.61	2.53±0.75	2.70±0.61
Naha	2.71±0.66	2.78±0.62	2.15±0.72	2.25±0.62
Ishigaki	3.23±0.62	3.24±0.70	1.70±0.62	1.68±0.70
Manila	7.12±0.55	6.79±0.79	5.84±0.55	5.68±0.79
Legaspi	7.27±0.60	7.28±0.70	6.13±0.62	6.62±0.70
Cebu	9.77±0.69	8.45±0.74	10.87±0.93	9.67±0.74
total	3.78±0.13	3.63±0.18	2.96±0.15	2.77±0.18

表 4.8 夏威夷大學海水位中心(UHSLC)潮位站固定範圍之海水面上升速率。ALT 為衛星測高資料，TG 為潮位站資料

Station Name	Sea level trend(mm/yr)			
	AVISO		RADs	
	ALT	TG	ALT	TG
Keelung	3.16±0.36	4.63±0.44	2.39±0.37	1.70±0.44
Kaohsiung	4.49±0.36	4.72±0.59	3.83±0.36	4.05±0.59
total	3.82±0.25	4.68±0.37	3.11±0.26	2.88±0.37

表 4.9 中央氣象局潮位站固定範圍之海水面上升速率。ALT 為衛星測高資料，TG 為潮位站資料

Station Name	Sea level trend(mm/yr)			
	AVISO		RADs	
	ALT	TG	ALT	TG
Keelung	3.16±0.36	3.32±0.43	2.38±0.37	2.24±0.43
Su-ao	3.20±0.37	1.53±0.53	2.22±0.38	0.18±0.53
Hualien	3.20±0.39	1.53±0.86	2.10±0.40	0.20±0.86
Kaohsiung	4.49±0.36	4.55±0.50	3.82±0.36	3.93±0.51
Taichung Port	3.45±0.43	4.64±0.53	2.68±0.44	3.80±0.53
Chenggong	3.34±0.42	2.88±0.51	2.03±0.44	1.68±0.51
Dongshi	4.04±0.37	4.53±0.65	3.46±0.37	3.64±0.64
Wengang	4.04±0.37	4.81±0.67	3.46±0.37	4.16±0.67
Penghu	2.45±0.52	2.18±0.48	0.67±0.53	0.26±0.48
Hsinchu	3.11±0.46	2.97±0.49	1.97±0.49	2.02±0.48
Total	3.45±0.13	3.30±0.18	2.48±0.13	2.21±0.18

臺灣五大國際商港(基隆、蘇澳、花蓮、高雄、台中)有著為臺灣提供產業供應及交通運輸之重要地位，因此了解五大商港長期水位變化趨勢是對因應氣候變遷下之海水位上升之重要課題。比較台灣五大商港近十年(2003-2012)與近二十年(1993-2012)絕對海水面變化趨勢可知(如表 4.10 所示)，五大商港近二十年絕對海水面變化皆呈現穩定上升，絕對海水面上升速率約 0~5 mm/yr，高雄海水面上升速率最為快速約 3.82~4.55 mm/yr。近十年，基隆、蘇澳與花蓮商港的海水面無明顯變化之趨勢(-1.74~0.61 mm/yr)，而高雄與台中商港海水面則呈現快速上升之情形(5.53~9.98 mm/yr)。相較於二十年成果，近十年的五大商港絕對海水面變化呈現較不一致的變化，此差異除了資料涵蓋時間較短，導致估算精度較差 ($\pm 0.82 \sim \pm 1.70$ mm/yr)，進而影響海水面上升速率之成果外，還可能為十年期的水位變動資料受到低頻海洋訊號(如聖嬰-南方振盪現象 (El Niño Southern Oscillation, ENSO) 或太平洋年代際振盪 (Pacific Decadal Oscillation, PDO)) 的影響可能較大，而二十年期的資料已降低部分低頻海洋訊號之影響，因而造成近二十年五大商港絕對海水面變化皆呈現較一致之現象。

另外，依照潮位站位置分佈，將台灣周圍海域劃分為五個區域(分區方式如圖 4.7 所示)，由衛星測高資料與潮位站資料估算近十年(2003-2012)與近二十年(1993-2012)台灣周圍各區域內絕對海水面上升速率，成果如表 4.11 所示。由表可知，衛星測高與潮位站資料估算近二十年之各區域之趨勢大致上是一致的，近二十年台灣周圍各海域絕對海水面變化皆呈現上升情形，其中台灣南部海水面上升速率(2.17~3.41 mm/yr)略快於台灣北部(2.02~3.14 mm/yr)，往南至菲律賓海地區海水面上升速率為 5.79~7.51 mm/yr，表示台灣周圍海水面上升速率由北往南遞增，而台灣西方海域(香港地區-區域 IV)的海水面上升速率(1.24~5.16 mm/yr)又快於台灣東方海域(2.28~3.12 mm/yr；日本地區-區域 V)。表 4.11 中菲律賓與香港地區的潮位站資料所估算之絕對海水面上升速率和衛星測高成果有 1~3 mm/yr 之差異量(如表 4.11 所示)，造成此差異量的原因為潮位站位置分佈不平均以及越低緯度海水面上升

速率越快所造成。造成台灣周圍海水面上升速率由北往南加速以及台灣西方海域海水面上升快於東方海域的現象之主要原因為台灣四周海域的海水面升降受到聖嬰-南方振盪現象(ENSO)的影響，導致越往南海水面上升越快速，而台灣西方海域的潮位站的地理位置較偏南部，受到聖嬰現象(ENSO)影響較大，造成台灣西方海域海水面上升速率較東方海域快。

整體而言，潮位站資料與測高資料估算近二十年台灣周圍絕對海水面上升速率的趨勢相同。相較於二十年成果，近十年的各區域絕對海水面變化亦呈現相同趨勢：台灣周圍海域絕對海水面變化由北往南加速、台灣西方海域的海水面上升速率快於東方海域。然而各區域的十年與二十年成果還是有些差異，其差異量之原因如同先前所言，因資料時間長度不同以及受到低頻海洋訊號的影響程度不同所造成。

表 4.10 台灣五大商港之近十年(10yrs)與近二十年(20 yrs)絕對海水面上升速率比較

Region	Trend (mm/yr)							
	10 yrs (2003-2012)				20 yrs (1993-2012)			
	AVISO		RADs		AVISO		RADs	
	ALT	TG	ALT	TG	ALT	TG	ALT	TG
Keelung	0.39±1.08	-0.03±1.70	-1.03±1.07	-1.41±1.70	3.16±0.36	3.32±0.43	2.38±0.37	2.24±0.43
Su-ao	-0.03±1.13	0.61±1.18	-1.48±1.13	-0.93±1.18	3.20±0.37	1.53±0.53	2.22±0.38	0.18±0.53
Hualien	-0.17±1.19	-0.09±1.41	-1.72±1.20	-1.74±1.41	3.20±0.39	1.53±0.86	2.10±0.40	0.20±0.86
Kaohsiung	9.64±0.82	9.98±1.37	7.31±0.83	7.84±1.37	4.49±0.36	4.55±0.50	3.82±0.36	3.93±0.51
Taichung Port	8.40±1.01	8.66±1.29	5.53±1.06	5.86±1.29	3.45±0.43	4.64±0.53	2.68±0.44	3.80±0.53

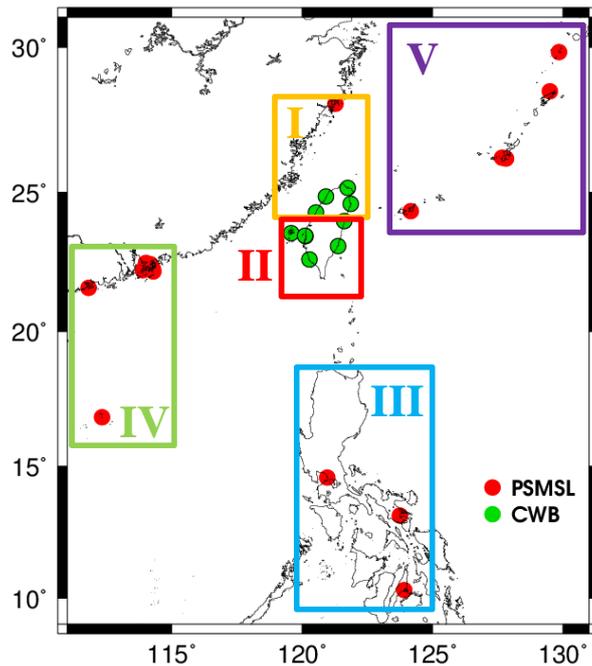


圖 4.7 台灣周圍海域潮位站之分佈與分區圖

表 4.11 台灣周圍各海域近十年(10 yrs)與近二十年(20 yrs)絕對海水面上升速率。ALT 為衛星測高資料，TG 為潮位站資料。NT、ST、PP、HK、JP 依序為台灣北部、台灣南部、菲律賓、香港、日本，Total regions: 區域 I~區域 V 絕對海水面上升速率，All study areas: 整個研究區域絕對海水面變化

Region	Trend (mm/yr)							
	10 yrs (2003-2012)				20 yrs (1993-2012)			
	AVISO		RADs		AVISO		RADs	
	ALT	TG	ALT	TG	ALT	TG	ALT	TG
NT (I)	4.33±1.13	4.46±0.69	1.35±1.15	0.65±0.69	2.84±0.40	3.14±0.24	2.19±0.39	2.02±0.24
ST (II)	5.52±1.32	5.31±0.58	2.75±1.67	3.08±0.58	3.17±0.44	3.41±0.26	2.17±0.47	2.31±0.26
PP (III)	13.48±1.60	16.6±1.36	9.84±1.66	13.22±1.36	7.46±0.52	7.51±0.43	5.79±0.60	7.32±0.43
HK (IV)	8.51±1.09	7.29±0.78	7.07±1.04	3.26±0.78	5.16±0.39	2.62±0.34	4.55±0.39	1.24±0.34
JP (V)	0.63±0.91	-0.44±0.74	0.05±0.92	-2.03±0.74	3.12±0.34	2.78±0.28	2.89±0.35	2.28±0.28
Total regions	5.89±0.79	5.93±0.36	4.55±0.81	5.93±0.36	4.46±0.28	3.47±0.14	3.84±0.28	2.49±0.14
All study areas	8.12±0.88	5.93±0.36	6.66±0.88	5.93±0.36	5.23±0.31	3.47±0.14	4.43±0.31	2.49±0.14

4.2.2 估算之絕對海水面上升速率與前人研究成果比較

本計畫估算之台灣周圍絕對海水面上升速率與前人研究成果相比，因各研究[黃清哲等人，2009; Tseng *et al.*, 2009; Chang *et al.*, 2012]使用的資料來源、選取資料範圍、涵蓋資料時間段以及資料處理方式皆不完全相同，因此成果上有些差異是合理的。為方便比較，將臺灣分為

台灣北部、台灣西部、台灣西南部、臺灣南部、台灣東部等五區域，由各研究中選取最接近該區域之潮位站與衛星測高之成果相比較，成果如表 4.12 所示。由表可知，本研究估算之絕對海水面上升速率與前人研究中衛星測高成果[黃清哲等人，2009; Tseng *et al.*, 2009; Chang *et al.*, 2012]大多一致，表示本研究改正潮位站資料之方法是可行的。而台灣東部差異較大，本研究與黃清哲等人[2009]相差 3.01~4.67 *mm/yr*，而黃清哲等人[2009]亦與 Chang 等人[2012]東部成果相差 2.05 *mm/yr*，可能為不同的資料來源與不同的時間段造成推估台灣東部海水面速率之差異。而本研究利用衛星測高資料估算近二十年整個臺灣四周海域(緯度: 10°N~30°N、經度: 110°E~130°E) 絕對海水面上升速率與 Tseng 等人[2009]成果相當一致(如表 4.12 所示)。另外，比較本研究成果與前人研究之潮位站成果，在臺灣西部、西南與東部等區域成果差異較大，其原因為黃清哲等人[2009]與 Tseng 等人[2009]研究中皆用未改正潮位站資料中地表垂直變動之影響，因此造成成果不甚合理，由此可知，若無改正台灣潮位站資料中的地表垂直變動訊號將可能嚴重影響潮位資料推估海水面上升速率之準確性。

綜合上述海水面上升速率成果可知，台灣周圍絕對海水面變化主要呈現上升趨勢，此結果與前人研究估算海水面上升速率成果一致(如表 4.12 所示)。政府間氣候變遷委員會(IPCC)[2013]第五次報告指出，海水面將持續上升，本世紀末平均海水面將上升約 0.53~0.97 公尺，而近二十年(1993-2012)台灣周圍海域絕對海水面上升速率大於全球上升速率的 3.2 ± 0.4 *mm/yr* (涵蓋時間為 1993-2009 年) [Church and White, 2011]，並且海水面速率正由北向南逐漸加速。相對於風浪等短週期災害，海水面上升可能造成海岸淹沒、居住地減少、土地流失、海岸侵蝕海岸速率加快、地下水與土壤鹽化等影響，將會對於台灣社會與經濟造成極大的衝擊，然而台灣西南部地區潮位站周圍地表卻主要呈現下沉情形，其中塭港與東石潮位站每年可呈現約 20 *mm* 以上的下沉量。兩種因素結合下，政府當局制訂未來防災機制時，台灣西南部沿海地區應為首先考慮的地區之一。

4.2.1 小節已完成工作項目”結合應用國內驗潮站資料並配合國際衛星測高資料，分區分析臺灣四周海域長(~20 年)、短(~10 年)期之海面水位昇降變動速率”與評估國內各商港海域長(~20 年)、短(~10 年)期之海面水位昇降變動速率趨勢”並於 4.2.2 小節將本研究海水面變化趨勢成果與其他前人研究成果相比，可知經過本研究所改正的潮位站資料是可以應用於估算絕對海水面上升速率，因此 4.2.2 小節已完成工作項目”探討國內近岸驗潮站實測潮位紀錄應用於平均海水位變動率之準確度與可行性”與”分區比較與評估臺灣四周海域應用驗潮站和衛星測高資料進行長(~20 年)、短(~10 年)期海水面變化速率分析結果之可靠度與準確度”。

表 4.12 估算之絕對海水面上升速率與前人研究成果比較。ALT 為衛星測高資料，TG 為潮位站資料。NT、WT、SWT、ST、ET 依序為台灣北部、台灣西部、台灣西南部、臺灣南部、台灣東部。本研究衛星測高與潮位站成果相似，因此比較各區域成果時以合併成果展示。另外，Tseng 等人[2009]研究中無使用台灣本島上位於西南部潮位站，因此使用澎湖(Penghu)潮位站成果

Area	Trend (mm/yr)				
	This study (1993-2012)	[黃清哲等人，2009] (1992-2009)		[Tseng <i>et al.</i> , 2009] (1993-2003)	[Chang <i>et al.</i> , 2012] (1992-2008)
	ALT&TG	ALT	TG	TG	ALT
NT	2.24~3.32	3.14	4.95	-0.3	4.90
WT	2.68~4.64	3.06	10.70	x	5.00
SWT	3.46~4.81	3.87	4.31	17.1 (Penghu)	x
ST	3.82~4.55	6.00	9.80	7.3	1.10
ET	1.68~3.34	6.35	55.60		4.30
All study area (only TG)	2.49~3.47	x	x	5.70 (TG)	x
All study area (only ALT)	4.43~5.23	x	x	5.30 (ALT)	x

x 為成果中未展示之數據

4.2.3 臺灣周圍海域海水面上升速率之原因

本計畫利用 Ishii 和 Kimoto [2009]更新後之溫度和鹽度資料、重力反演和氣候實驗(GRACE)重力衛星資料與衛星測高資料(衛星海洋數

據存檔、驗正與解釋(AVISO)與雷達測高資料收集 (RADs))估算台灣周圍海域(緯度: 10°N~30°N、經度: 110°E~130°E) 比容海水面變化、海水質量變化與絕對海水面變化。溫度和鹽度資料估算的比容海水面變化之時間序列與兩衛星測高資料估算的絕對海水面變化的時間序列非常一致，相關係數為 0.90~0.92，而海水質量變化的時間序列與絕對海水面變化時間序列則呈現相反方向的震盪(如圖 4.8 所示)，相關係數為 -0.02~0.02(如表 4.13 所示); 而比容海水面變化和海水質量變化相加後推估之絕對海水面變化的時間序列與衛星測高資料之絕對海水面變化則更加一致，相關係數約 0.91~0.93(如圖 4.9 與表 4.13 所示)。

近二十年台灣周圍絕對海水面變化與比容海水面上升速率分別為 4.43~5.23 *mm/yr* 與 2.34*mm/yr*，表示台灣附近海水面近 20 年來呈現穩定上升，而比容海水面變化占衛星測高估算之絕對海水面變化的 45%~53%。但近十年(2003-2012 年)台灣周圍絕對海水面上升速率為 6.66~8.11 *mm/yr*，而近十年比容海水面上升速率仍呈現相同速率(2.46 *mm/yr*)上升 (如表 4.13 所示)。相較於二十年成果，近十年比容海水面變化占絕對海水面上升速率之比例已下降至 30%~37%。比較比容海水面變化與絕對海水面時間序列可知，從 2008 年後兩時間序列差異較大，比容海水面上升速率開始減緩(如圖 4.8 所示)，此現象與其他估算全球比容海水面之研究成果相似[Cazenave *et al.*,2008; Llovel *et al.*, 2011]，表示近年來台灣海域或全球之比容海水面雖持續上升，但已開始減緩上升速率。

由上面結果可知，台灣周圍近十年與近二十年海水面變化皆呈現上升趨勢，而近十年比容海水面上升速率為 2.46 *mm/yr*，而海洋質量上升速率為 1.59 *mm/yr* (如表 4.13 所示)，表示影響海水面變動的比容海水面變化與海洋質量變化亦呈現上升情形，其中近十年的比容海水面變化與海洋質量變化分別占衛星海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)衛星測高資料估算之絕對海水面變化的 30% 與 25%，而比容海水面變化與海洋質量變化分別占雷達測高資料收集 (RADs)衛星測高資料估算之絕對海水面變化的 37%與 24%。表示三者資料(衛星測高、溫鹽資

料與重力反演和氣候實驗(GRACE)重力衛星)間約有 2~4 mm/yr 的不確定量，約為絕對海水面上升速率的 40%~50%，這個不確定量是相當大的。Leuliette 與 Miller [2009]利用地轉海洋學即時觀測陣列(ARGO)溫度和鹽度資料、重力反演和氣候實驗(GRACE)重力衛星資料與衛星測高資料估算 2004-2007 年全球海水面變化，三者資料間的不確定量約 1 mm/yr，表示海水面變化結果仍然存有一定的不確定量，除了資料本身的誤差外，還可能是由冰後回彈模型與深海比容海水面變化所造成 [Boe' *et al.*, 2009]，因重力反演和氣候實驗(GRACE)重力衛星測得的重力場變化訊號中包含冰後回彈(post-glacial rebound)訊號，在重力反演和氣候實驗(GRACE)的重力場資料裡，冰後回彈訊號相對於海水質量變化訊號來說影響很大，若要利用重力反演和氣候實驗(GRACE)解計算海水質量變化，必須將冰後回彈訊號自重力反演和氣候實驗(GRACE)重力場解中移除，然而若以水厚度表示不同冰後回彈模型，其差值約可達 1 mm/yr [Chambers *et al.*, 2010]，表示現今冰後回彈改正模型存有很大的差異量。另外，因本研究使用的溫度與鹽度資料僅包含水深最深至 1500 公尺，因此部分不確定量可能由深海(水深 > 1500 m) 比容海水面變化所引起 [Boe' *et al.*, 2009]。

4.2.3 小節已完成工作項目”海洋溫度、鹽度等海洋物理資料對於海水面變化速率之貢獻量”與”評估重力衛星資料對於海水面變化速率之貢獻量評估”。由成果可知，臺灣周圍近十年與二十年之絕對海水面變化、比容海水面變化與海水質量上升速率皆呈現上升情形，然而三者資料(衛星測高、溫鹽資料與重力反演和氣候實驗(GRACE)重力衛星)間約有 2~4 mm/yr 的不確定量。

表 4.13 台灣附近海域比容海水面變化、海水質量變化與絕對海面上升速率

Data	10 yrs (2003-2012)			20 yrs (1993-2012)		
	Trend (mm/yr)	Corr. with AVISO	Corr. with RADs	Trend (mm/yr)	Corr. with AVISO	Corr. with RADs
AVISO	8.11±0.88	x	x	5.23±0.31	x	x
RADs	6.66±0.88	x	x	4.43±0.31	x	x
Ishii	2.46±0.82	0.90	0.92	2.34±0.29	0.90	0.91
Mass	1.59±0.29	0.02	-0.02	x	x	x
Ishii+mass	4.19±0.92	0.91	0.93	x	x	x

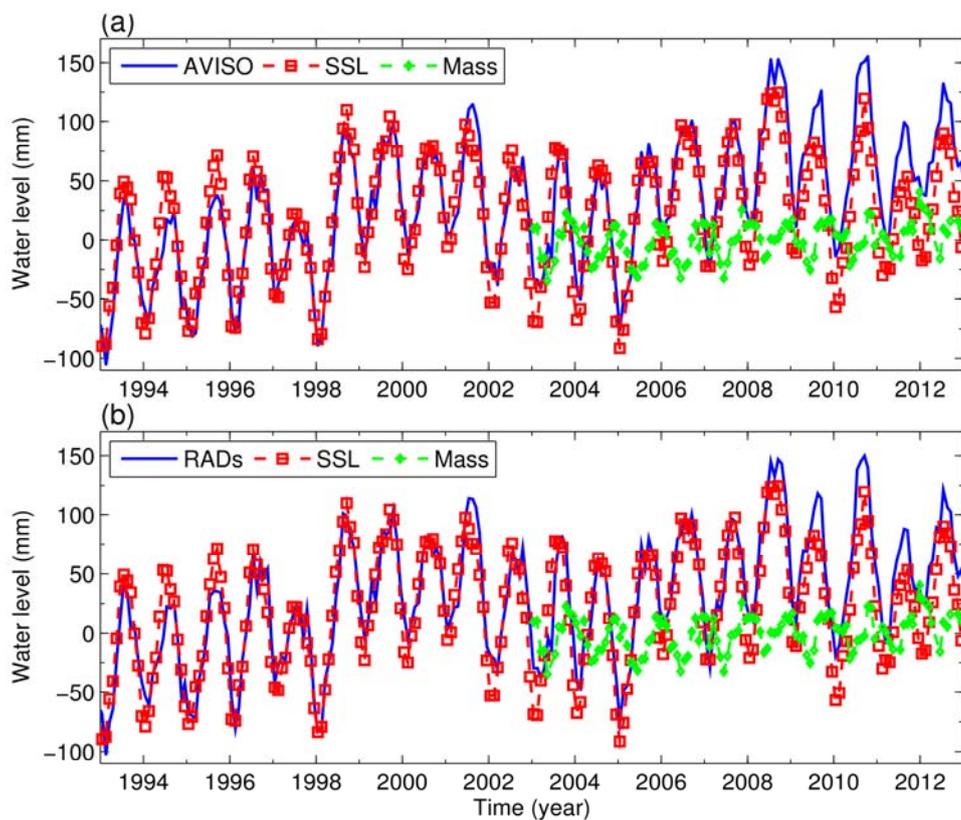


圖 4.8 台灣周圍比容海水面變化、海水質量變化與絕對海水面變化。(a) 衛星海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)衛星測高資料所估算，(b) 雷達測高資料收集 (RADs)衛星測高資料所估算

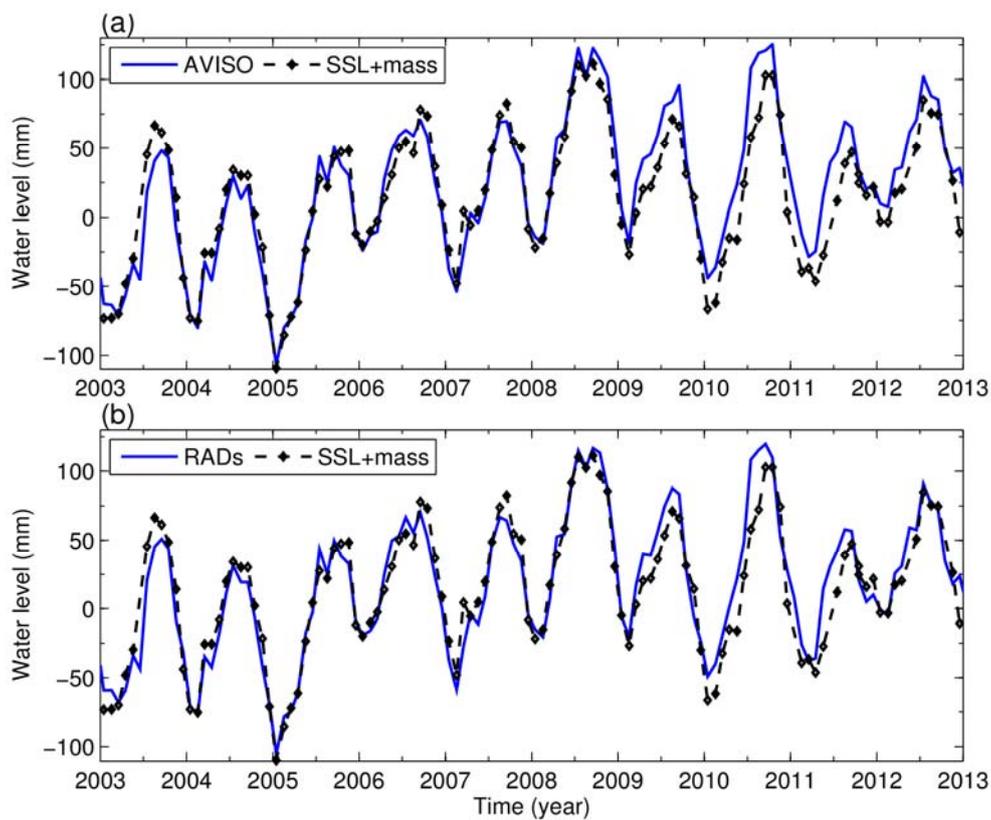


圖 4.9 台灣周圍絕對海水面變化。(a) 衛星海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)衛星測高資料所估算，(b) 雷達測高資料收集 (RADs)衛星測高資料所估算。SSL+mass 為比容海水面變化和海水質量變化相加後推估絕對海水面的時間序列

第五章 結論與建議

近年來研究海水面變化之兩種主要觀測量分別為潮位站水位資料與衛星測高資料，因此，本計畫結合潮位站與衛星測高資料估算臺灣附近海域近二十年(1993-2012)之絕對海水上升速率。然而前人利用臺灣周圍潮位資料估算絕對海面上升速率的研究中並未完全考慮海潮、逆氣壓、基準偏移與測站地表垂直變動等影響，因此本研究評估上述四項改正對於臺灣周圍潮位資料估算海面上升速率之影響，並分析臺灣周圍潮位站之地表垂直變動情形，最後以經各項改正後的潮位站資料與衛星測高資料估算臺灣周圍海域絕對海面上升速率，並結合重力反演和氣候實驗(GRACE)重力衛星資料與溫度和鹽度資料分析臺灣周圍海域海水面變化主要原因，以下為綜合本研究成果歸納出幾點結論與建議：

5.1 結論

1. 本計畫結合衛星測高資料與潮位站資料估算潮位站垂直變動速率。由於衛星測高技术近岸海域之應用上，會因測高儀回波受到陸地地形、海潮、海底地形、河口等影響，導致近岸之衛星測高資料較少，因此本計畫分別等權平均或距離倒數平方加權平均潮位站周圍不同範圍(2° 、 3° 、 5°)內之測高資料，以評估潮位資料與衛星測高資料間之相關性予以估算地表垂直變動速率。由相關性結果得知，臺灣本島之潮位站資料較適用等權平均 5° 範圍內之衛星測高資料，其他區域潮位站資料則適用平均 2° 範圍或加權平均各範圍(2° 、 3° 、 5°)內衛星之測高資料
2. 利用原始潮位站資料與改正後的潮位站資料估算海面上升速率有顯著差異，其中海潮與逆氣壓改正影響潮位站資料計算海面上升速率變化皆為 $0\sim 2\text{ mm/yr}$ ，而偏移量改正之影響量平均值為 23 mm/yr ，潮位站地表垂直變動改正之影響量平均值約 $4\sim 5\text{ mm/yr}$ ，顯

示海潮效應與大氣壓力變化對海水面上升速率推估之影響較小，而資料基準偏移與測站地表垂直變動因子之影響最為顯著，大於全球平均海水面上升速率 $3.2 \pm 0.4 \text{ mm/yr}$ (涵蓋時間為 1993-2009 年) [Church and White, 2011]。故本研究推斷若使用未經改正的原始潮位站資料來計算近二十年臺灣周圍海域海水面上升速率，則其上升速率可能包含上述因子之影響而產生較大的誤差，其中基準偏移與測站地表垂直變動影響則是對於潮位站資料估算海水面上升速率之必要改正。

3. 本計畫結合近二十年衛星測高與潮位站資料估算測站地表面垂直變動速率，成果顯示整個研究區域大多呈現地表下降情形，例如臺灣本島的東部與西南部呈現明顯下沉情形，其中西南部的東石與塭港潮位站為下沉量最大之潮位站，每年約有 23-27 mm 下沉量；菲律賓地區除馬尼拉潮位站之地表呈現下降情形($\sim -10 \text{ mm/yr}$)外，其餘潮位站周圍無明顯變化情形，而香港地區除橫瀾島潮位站之地表呈現下降情形($\sim -14 \sim -16 \text{ mm/yr}$)外，其於潮位站周圍無明顯垂直變動情形，而日本地區潮位站周圍地表亦無明顯變動情形。
4. 將本研究估算之潮位站地表垂直變動速率與台灣地區全球衛星定位系統(GPS)連續觀測成果應為一致，在台灣東部(蘇澳與花蓮)、西部(台中)、西南部(東石與塭港)皆估算出明顯地表下降情形，而其他地區較無明顯變動。兩成果之差值平均值 \pm 標準偏差為 $1.82 \pm 4.04 \text{ mm/yr}$ ，此差異量除了資料本身誤差外，還可能為資料涵蓋時間範圍不同以及兩者資料之參考原點不一致所造成的差異。
5. 由衛星測高與潮位站資料計算臺灣周圍絕對海水面變化主要呈現上升現象，而海水面上升速率由北往南遞增，表示臺灣南方海域的海水面上升速率較臺灣北部快。由衛星海洋數據存檔、驗正與解釋(AVISO)與雷達測高資料收集(RADs)衛星測高資料估算台灣周圍海域近二十年的絕對海水面化速率分別為 $5.23 \pm 0.31 \text{ mm/yr}$ 與 $4.43 \pm 0.31 \text{ mm/yr}$ 。

6. 本計畫依潮位站位置進行分區並估算近二十年的絕對海水面上升速率，區域共分為台灣北部、台灣南部、菲律賓、香港與日本五區。台灣北部絕對海水面上升速率為 2.02~3.14 mm/yr，台灣南部為 2.17~3.41 mm/yr，菲律賓地區為 5.79~7.51 mm/yr，表示台灣南方海域的海水面上升速率較台灣北部快，且海水面上升速率越往南越快，而台灣西方海域(香港地區)絕對海水面上升速率(1.24~5.16 mm/yr)較台灣東方海域(日本地區) (2.28~3.12 mm/yr)快。另外，比較十年與二十年各區域的絕對海水面變化呈現相同趨勢，然而各區域十年與二十年海水面上升速率之數據上仍然有些差異，其原因可能為資料涵蓋時間長度不同以及受到低頻海洋訊號(如聖嬰-南方振盪現象(ENSO)或太平洋年代際振盪(PDO))的影響不同所造成。
7. 臺灣本島潮位站之地表主要呈現下沉情形，其中西南部地區東石與塭港潮位站為研究區域中下沉量最大之潮位站，每年呈現約 23-27 mm 的下沉量，而臺灣西南部海水面每年呈現 3~5 mm 上升量。兩種因素結合下，未來政府在制訂防災機制時，西南區域應為首要考慮的地區之一。
8. 本計畫利用溫度和鹽度資料與衛星測高資料估算近二十年台灣周圍海域比容海水面變化與絕對海水面變化。近二十年絕對海水面變化與比容海水面上升速率分別為 4.43~5.23 mm/yr 與 2.34 mm/yr，比容海水面變化約占絕對海水面變化的 45%~53%。而近十年(2003-2012) 絕對海水面變化與比容海水面上升速率分別為 6.66~8.11 mm/yr 與 2.46 mm/yr。相較於二十年成果，近十年比容海水面變化占絕對海水面上升速率之比例已下降至 30%~37%。其原因為從 2008 年開始台灣周圍比容海水面上升速率已開始減緩，此現象與其他估算全球比容海水面之研究成果相似[Cazenave *et al.*, 2008; Llovel *et al.*, 2011]，表示近年來台灣周圍或全球比容海水面雖持續上升，但其上升速率已開始減緩。
9. 溫度與鹽度資料、重力反演和氣候實驗(GRACE)重力衛星資料與衛星測高資料估算近十年台灣周圍海域比容海水面變化、海水質量變

化與絕對海水面變化。比容海水面變化與絕對海水面變化的相關係數(R-square)約為 0.90;海水質量變化與絕對海水面變化的相關係數約為-0.20。近十年絕對海水面上升速率、比容海水面上升速率與海洋質量上升速率分別為 6.66~8.11 mm/yr、2.46 mm/yr 與 1.59 mm/yr，表示影響海水面變動的比容海水面變化與海洋質量變化皆呈現上升，兩者分別約占海水面上升速率的 30%~37%與 24~25%。然而三者資料間約有 2~4 mm/yr 的不確定量，除了資料本身的誤差外，其中部份因素可能是由改正重力反演和氣候實驗(GRACE)之冰後回彈模型誤差[Chambers *et al.*, 2010]與深海比容海水面變化所造成 [Boe' *et al.*, 2009]。

5.2 建議

1. 本計畫利用近二十年衛星測高與潮位站資料進行測站地表垂直變動和絕對海水面上升速率計算。而相關研究說明若採用的衛星測高或潮位站資料涵蓋時間較短，可能受到全球氣候變化之年際變動(inter-annual)等因素影響區域或全球的海水面變動，例如聖嬰-南方振盪現象(ENSO)已被認為是影響太平洋熱帶地區的海水位變化之主要因素 [Nerem *et al.*, 1999; Landerer *et al.*, 2008]，而 Newman 等人[2003]認為數十年的年際變動(如太平洋年代際振盪(PDO))受到聖嬰-南方振盪現象(ENSO)變動的影響，太平洋年代際振盪(PDO)與聖嬰-南方振盪現象(ENSO)的年際變化將影響太平洋區域的溫度與氣候等，進而影響區域或全球的海水面變動 [Hamlington *et al.*, 2013]。故展望未來工作將利用時頻分析工具對海水面資料進行分解，分解出海水各個週期的變化量，探討低頻震盪與台灣周遭之海水位變化的關係，以降低衛星測高與潮位站資料中低頻訊號的影響，對於十年與二十年海水面上升速率之分析將更為精確，因此將更能掌握未來台灣地區附近海域水位升降變動之情形，進而預估未來海水面變化趨勢。
2. 全球衛星定位系統 (GPS)常用於長時間持續監測地表變動之觀測

技術，但目前台灣周圍潮位站大多未設置全球衛星定位系統(GPS)連續觀測站，為了能夠長期監測潮位站周圍地表垂直變動情形以及進行潮位站資料地表垂直變動改正更加完整，建議潮位站應同時增設全球衛星定位系統(GPS)。

參考文獻

1. Ablain, M., A. Cazenave, G. Valladeau, and S. Guinehut (2009), A new assessment of the error budget of global mean sea level rate estimated by satellite altimetry over 1993–2009, *Ocean Sciences*, 5, 193-201.
2. AVISO and PODAAC User Handbook (2001), IGDR and GDR Jason Products.
3. Blewitt, G., Z. Altamimi, J. Davis, R. Gross, C. Kuo, F. Lemoine, A. Moore, R. Neilan, H.P. Plag, M. Rothacher, C. Shum, M. Sideris, T. Schöne, P. Tregoning, and S. Zerbini (2010), Geodetic observations and global reference frame contributions to understanding sea-level rise and variability in *Understanding Sea-Level Rise and Variability*, 256–284, Eds. J. Church, P.L. Woodworth, T. Aarup, and S. Wilson. Wiley-Blackwell, ISBN: 978-1-443-3451-7.
4. Boe´, J., A. Hall, and X. Qu (2009), Deep ocean heat uptake as a major source of spread in transient climate change simulations, *Geophysical Research Letters*, 36, doi: 10.1029/2009gl040845.
5. Braitenberg, C., P. Mariani, L. Tunini, B. Grillo, and I. Nagy (2011), Vertical crustal motions from differential tide gauge observations and satellite altimetry in southern Italy, *Journal of Geodynamics*, 51(4), 233-244, doi: 10.1016/j.jog.2010.09.003.
6. Calafat, F. M., and D. P. Chambers (2013), Quantifying recent acceleration in sea level unrelated to internal climate variability, *Geophysical Research Letters*, 40(14), 3661-3666, doi: 10.1002/grl.50731.
7. Cazenave, A., K. Dominh, S. Guinehut, E. Berthier, W. Llovel, G. Ramillien, M. Ablain, and G. Larnicol (2009), Sea level budget over 2003-2008: A reevaluation from GRACE space gravimetry, satellite

- altimetry and Argo, *Global and Planetary Change*, 65(1-2), 83-88, doi: 10.1016/j.gloplacha.2008.10.004.
8. Cazenave, A., D. Chambers, P. Cipollini, L. Fu, J. Hurrell, M. Merrifield, R. Nerem, H. Plag, C. Shum, and J. Willis (2010), The challenge of measuring sea level rise and regional and global trends, Geodetic observations of ocean surface topography, ocean currents, ocean mass, and ocean volume changes, Proc. OceanObs09: Sustained Ocean Observations and Information for Society, 2, Venice, Italy, 21-25 Sept. 2009, Hall. J., Harrison D.E. and Stammer, D., Eds., ESA Publication WPP-306.
 9. Cazenave, A., and F. Remy (2011), Sea level and climate: measurements and causes of changes, *Wiley Interdisciplinary Reviews-Climate Change*, 2, 647-662, doi: 10.1002/wcc.139.
 10. Chambers, D.P., J. Wahr, M.E. Tamisiea, and R.S. Nerem (2010), Ocean mass from GRACE and Glacial Isostatic Adjustment, *Journal of Geophysical Research*, 115, doi: 10.1029/2010jb007530.
 11. Chang, T.Y., B.F. Chao, C.-C. Chiang, and C. Hwang (2012), Vertical crustal motion of active plate convergence in Taiwan derived from tide gauge, altimetry, and GPS data, *Tectonophysics*, 578, 98-106.
 12. Chelton, D.B., and D.B. Enfield (1986), Ocean signals in tide gauge records, *Journal of Geophysical Research*, 91, 9081-9086.
 13. Chelton, D.B., J.C. Ries, B.J. Haines, L.-L. Fu, and P.S. Callahan (2001), Satellite altimetry. In: L.-L. Fu and A. Cazenave (editors), *Satellite Altimetry and Earth Sciences: A Handbook of Techniques and Applications*, Elsevier, New York, 1-132.
 14. Chen, J. L., C. R. Wilson, R. J. Eanes, and R. S. Nerem (1999), Geophysical interpretation of observed geocenter variations, *Journal of Geophysical Research*, 104, 2683- 2690.
 15. Chen, J. L., M. Rodell, C. R. Wilson, and J. S. Famiglietti (2005), Low degree spherical harmonic influences on Gravity Recovery and Climate

Experiment (GRACE) water storage estimates, *Geophysical Research Letters*, 32, L14405, doi: 10.1029/2005GL022964.

16. Chen, K.H., M. Yang, Y.T. Huang, K.E. Ching, and R.J. Rau (2011), Vertical displacement rate field of Taiwan from geodetic levelling data 2000–2008, *Survey Review* 43, 296-302, doi: 10.1179/003962611X13055561708380.
17. Cheng, Y., and O. B. Andersen (2013), Impacts of altimeter corrections on local linear sea level trends around Taiwan, *International Journal of Remote Sensing*, 34, 6738-6748, doi: 10.1080/01431161.2013.805283.
18. Cheng, Y., Q. Xu, and O. B. Andersen (2014), Sea-level trend in the South China Sea observed from 20 years of along-track satellite altimetric data, *International Journal of Remote Sensing*, 35, 4329-4339.
19. Ching, K.E., M.L. Hsieh, K.M. Johnson, K.H. Chen, R.J. Rau, and M. Ying (2011), Modern vertical deformation rates and mountain building in Taiwan from precise leveling and continuous GPS observations, 2000–2008, *Journal of Geophysical Research*, 116, B08406, doi: 10.1029/2011JB008242.
20. Chovitz, B.H. (1983), Geodetic results from Seasat, *Marine Geodesy* 7, 315-330.
21. Church, J.A., N.J. White, R. Coleman, K. Lambeck, and J.X. Mitrovica (2004), Estimates of regional distribution of sea level rise over the 1950-2000 period, *Journal of Climate*, 17, 2609-2625.
22. Church, J., and N.J. White (2006), A 20th century acceleration in global sea-level rise, *Geophysical Research Letters*, 33(1), doi: 10.1029/2005gl024826
23. Church, J., and N.J. White (2011), Sea-level rise from the late 19th to the Early 21st Century, *Surveys in Geophysics*, doi: 10.1007/s10712-011-9119-1.

24. Cretaux, J.-F., L. Soudarin, F. J. M. Davidson, M.-C. Gennero, M. Berge-Nguyen, and A. Cazenave (2002), Seasonal and interannual geocenter motion from SLR and DORIS measurements: Comparison with surface loading data, *Journal of Geophysical Research*, 107, 2374, doi: 10.1029/2002JB001820.
25. Douglas, B. C. (2001), Sea level change in the era of the recording tide gauge, In B. C. Douglas, M. S. Kearney, and S. P. Leatherman (Eds.), *Sea Level Rise; History and Consequences*, Chapter 3, Academic Press.
26. Duan, X.J., J.Y. Guo, C.K. Shum, and W. van der Wal. (2009), On the postprocessing removal of correlated errors in GRACE temporal gravity field solutions, *Journal of Geodesy*, 83, 1095-1106, doi:10.1007/s00190-009-0327-0.
27. Ericson, J.P., C.J. Vorosmarty, S.L. Dingman, L.G. Ward, and M. Meybeck (2006), Effective sea level rise and deltas: causes of change and human dimension implications, *Global and Planetary Change*, 50, 63-82.
28. Gill, A. E. (1982), *Atmosphere-Ocean Dynamics*, Academic Press, New York.
29. Guo, J. Y., X.J. Duan, and C.K. Shum (2010), Non-isotropic Gaussian Smoothing and Leakage Reduction for Determining Mass Changes over Land and Ocean using GRACE data, *Geophysical Journal International*, 181, 290-302, doi: 10.1111/j.1365-246X.2010.04534.x.
30. Hamlington, B.D., R.R. Leben, M.W. Strassburg, R.S. Nerem, and K.Y. Kim (2013), Contribution of the Pacific Decadal Oscillation to global mean sea level trends, *Geophysical Research Letters*, 40, 5171-5175, doi: 10.1002/grl.50950.
31. Hastie, T., and R. Tibshirani (1990), Exploring the nature of covariate effects in the proportional hazards model, *Biometrics*, 46, 1005–1016.
32. Heiskanen, W. A., and H. Moritz (1967), *Physical Geodesy*, W. H.

Freeman, New York.

33. Hofmann-Wellenhof B., and H. Moritz (2006), *Physical geodesy*, Springer Wien New York, 3-14.
34. Holgate, S. J., A. Matthews, P. L. Woodworth, L. J. Rickards, M. E. Tamisiea, E. Bradshaw, P. R. Foden, K. M. Gordon, S. Jevrejeva, and J. Pugh (2013), New Data Systems and Products at the Permanent Service for Mean Sea Level. *Journal of Coastal Research*, 29(3), 493-504, doi: 10.2112/JCOASTRES-D-12-00175.1.
35. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2007), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by S. Solomon et al., Cambridge Univ. Press, Cambridge, U. K.
36. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2013), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Summary for Policymakers*, edited by L. Alexander et al., available at http://www.climatechange2013.org/images/uploads/WGIAR5-SPM_Approved27Sep2013.pdf.
37. Ishii, M., and M. Kimoto (2009), Reevaluation of historical ocean heat content variations with time-varying XBT and MBT depth bias corrections, *Journal of Oceanography*, 65, 287-299, doi: 10.1007/s10872-009-0027-7.
38. Jevrejeva, S., J. Moore, A. Grinsted, and P. Woodworth (2009), Recent global sea level acceleration started over 200 years ago?, *Geophysical Research Letters*, 35, doi:10.1029/2008GL033611.
39. Kistler, R., and coauthors (2001), The NCEP–NCAR 50-year reanalysis: Monthly means CD-ROM and documentation, *Bulletin Of the American Meteorological Society*, 82, 247–268.
40. 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, *Geophysical Research Letters*, 31(1), 4-7, doi: 10.1029/2003GL0191064.
41. Kuo C. Y., C.K. Shum, A. Braun, K.C. Cheng, and Y. Yi (2008), Vertical Motion determined using Satellite Altimetry and tide Gauges, *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 19(1-2), 21-35, doi: 10.3319/TAO.2008.19.1-2.21(SA)1.21.
 42. Kusche, J. (2007), Approximate decorrelation and non-isotropic smoothing of time-variable GRACE-type gravity field models, *Journal of Geodesy*, 81, 733-749. doi: 10. 1007/s00190- 007- 0143- 3.
 43. Landerer, F.W., J.H. Jungclauss, and J. Marotzke (2008), El Niño–Southern Oscillation signals in sea level, surface mass redistribution, and degree-two geoid coefficients, *Journal of Geophysical Research*, 113, C08014, doi: 10.1029/2008JC004767.
 44. Leatherman, P. S., K. Zhanng, and B.C. Douglas (2000), Sea level rise drives coastal erosion, *EOS Transactions, Agu*, 81, 55-57.
 45. Leuliette, E. W., and L. Miller (2009), Closing the sea level rise budget with altimetry, Argo, and GRACE, *Geophysical Research Letters*, 36, doi: 10.1029/2008gl036010.
 46. Llovel, W., S. Guinehut, and A. Cazenave (2010), Regional and interannual variability in sea level over 2002-2009 based on satellite altimetry, Argo float data and GRACE ocean mass, *Ocean Dynamics*, 60, 1193-1204, doi: 10.1007/s10236-010-0324-0.
 47. Merrifield, M. A., S. T. Merrifield, and G. T. Mitchum (2009), An Anomalous Recent Acceleration of Global Sea Level Rise, *Journal of Climate*, 22(21), 5772-5781, doi: 10.1175/2009jcli2985.1.
 48. Mitrovica, J. X., M.E. Tsimplis, J.L. Davis, and G.A. Milne (2001), Recent mass balance of polar ice sheets inferred from patterns of global sea-level change, *Nature*, 409, 1026-1029.
 49. Nerem, R.S., D.P. Chambers, E.W. Leuliette, G.T. Mitchum, and B.S.

- Giese (1999), Variations in global mean sea level associated with the 1997–1998 ENSO event: Implications for measuring long term sea level change, *Geophysical Research Letters*, 26(19), 3005-3008, doi: 10.1029/1999GL002311.
50. Nerem, R.S., D.P. Chambers, C. Choe, and G.T. Mitchum (2010), Estimating mean sea level change from the TOPEX and Jason altimeter missions, *Marine Geodesy*, 33, 435-446.
51. Nicholls, R.J., and A. Cazenave (2010), Sea-Level Rise and Its Impact on Coastal Zones, *Science*, 328, 1517-1520.
52. Pattullo, J., W. Munk, R. Revelle, and E. Strong (1955), The seasonal oscillation in sea level, *Journal of Marine Research*, 88-156.
53. Peng, D., H. Palanisamy, A. Cazenave, B. Meyssignac (2013), Interannual Sea Level Variations in the South China Sea Over 1950–2009, *Marine Geodesy*, 36, 164-182, doi: 10.1080/01490419.2013.771595.
54. Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL) (2014), Tide Gauge Data, Retrieved 03 Nov 2014 from <http://www.psmsl.org/data/obtaining/>.
55. Ray RD, BD Beckley, and FG Lemoine (2010), Vertical crustal motion derived from satellite altimetry and tide gauges, and comparisons with DORIS measurements, *Advances in Space Research*, 45(12), 1510-1522, doi:10.1016/j.asr.2010.02.0201510.
56. Rosmorduc, V., J. Benveniste, E. Bronner, S. Dinardo, O. Lauret, C. Maheu, M. Milagro, and N. Picot (2011), Radar Altimetry Tutorial, *CSL*.
57. Santamaria-Gomez, A., M. Gravelle, and G. Wöppelmann (2014), Long-term vertical land motion from double-differenced tide gauge and satellite altimetry data, *Journal of Geodesy*, 88(3), 207-222, doi: 10.1007/s00190-013-0677-5.
58. Schwartz, M. L. 2005, *Encyclopedia of Coastal Science*, Dordrecht,

The Netherlands: Springer, 1-1086.

59. Schwiderski, H. (1984), Combined hydrodynamical and empirical modeling of ocean tides, In: Seeber, Apel (eds.), *Geodetic Feature of the Ocean Surface and their Implications*, 215-229, D. Reidel, Dordrecht
60. Shum, C. K., J. C. Ries, and B. D. Tapley (1995), The accuracy and applications of satellite altimetry, *Geophysical Journal International*, 121, 321-336.
61. Shum, C. K., and C. Y. Kuo (2011), Observation and geophysical causes of present-day sea level rise, In: *Climate Change and Food Security in South Asia*, R. Lal, M. Sivakumar, S. Faiz, A. Rahman, and K. Islam (Eds.), Part 2, Chapter 7, 85-104, doi: 10.1007/978-90-481-9516-9_7.
62. Stocker, T., Q. Dahe, G.K. Plattner, M. Tignor, S. Allen, and P. Midgley (2010), IPCC Workshop on Sea Level Rise and Ice Sheet Instabilities (Kuala Lumpur, Malaysia, IPCC)
63. Swenson, S., and J. Wahr (2006), Post-processing removal of correlated errors in GRACE data, *Geophysical Research Letters*, 33, L08402, doi: 10.1029/2006JB004882.
64. Tapley, B. D., S. Bettadpur, J. C. Ries, P. F. Thompson, and M. M. Watkins (2004a), GRACE measurements of mass variability in the Earth system, *Science*, 305, 503-505.
65. Tapley, B. D., S. Bettadpur, M. Watkins, and C. Reigber (2004b), The Gravity Recovery and Climate Experiment: Mission overview and early results, *Geophysical Research Letters*, 31, L09607, 10.1029/2004GL019920.
66. Torge, W. (1989), *Gravimetry*. de-Gruyter, Berlin-New York.
67. Torge, W. (1991), *Geodesy*, W. de Gruyter, Berlin.
68. Tseng, Y.H., C.L. Breaker, and T.Y. Chang (2010), Sea level

- variations in the regional seas around Taiwan, *Journal of Oceanography*, 66, 27-39.
69. Wagner, C.A. (1991), How well do we know the deep ocean tides An intercomparison of altimeter, hydrodynamic and gauge data, *Marine Geodesy*, 16, 118-140.
 70. Wahr, J., M. Molenaar, and F. Bryan (1998), Time variability of the Earth's gravity field: Hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE, *Journal of Geophysical Research*, 103, 30,205-30,229.
 71. Webster, P.J., G.J. Holland, and J.A. Curry (2005), Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment, *Science*, 16(309), 844-846.
 72. Willis, J., D. P. Chambers, C.Y. Kuo, and C.K. Shum (2010), Global sea level rise: Recent progress and challenges for the decade to come, *Oceanography*, 23(4), 14-25.
 73. Wilson, A.B., D.H. Bromwich, and K.M. Hines (2011), Evaluation of Polar WRF forecasts on the Arctic System Reanalysis domain: Surface and upper air analysis, *Journal of Geophysical Research*, 116, D11112, doi: 10.1029/2010JD015013.
 74. Wöppelmann, G., and M. Marcos (2012), Coastal sea level rise in southern Europe and the nonclimate contribution of vertical land motion, *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 117, doi: 10.1029/2011jc007469.
 75. Wu, L., C. Kao, T. Hsu, Y. Wang and J. Wang (2012), Spatial and Temporal Features of Regional Variations in Mean Sea Level around Taiwan, *Open Journal of Marine Science*, 2(2), 58-65. doi: 10.4236/ojms.2012.22008.
 76. Wunsch, C. (1972), Bermuda sea level in relation to tides, weather and baroclinic fluctuations, *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 10, 1-49.

77. Wunsch, C., and D. Stammer (1997), Atmospheric loading and the oceanic “inverted barometer” effect, *Reviews of Geophysics*, 35, 79-107.
78. Yen, J. Y., C. H. Lu, C. P. Chang, A. J. Hooper, Y. H. Chang, W. T. Liang, T. Y. Chang, M. S. Lin, and M. S. Chen (2011), Investigating Active Deformation in the Northern Longitudinal Valley and City of Hualien in Eastern Taiwan Using Persistent Scatterer and Small-Baseline SAR Interferometry, *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 22(3), 291-304, doi: 10.3319/tao.2010.10.25.01(tt).
79. Zhan, J.G., Y. Wang, and Y.S. Cheng (2009), The analysis of China sea level change, *Chinese Journal of Geophysics*, 52(7), 1725-1733. (in Chinese)
80. 內政部國土測繪中心，2014。102 年度「高程基準檢測工作」報告書。
81. 武漢大學測繪學院測量平差學科組，2005。誤差理論與測量平差基礎，1，3，武漢大學出版社，中國大陸。
82. 姜介中，2009，利用驗潮記錄估計臺灣沿岸地表垂直運動。國立臺灣大學理學院海洋研究所碩士論文，台北。
83. 陳盈樺，2009，利用測高衛星、重力衛星、NCEP氣候模型估計地心與 C_{20} 變動。國立成功大學測量及空間資訊學系碩士論文，台南。
84. 陳進益、高嘉婉、曾于恆、楊智傑、余文彥，2014，海平面均一化校正工作，臺灣氣候變遷推估與資訊平台計畫之期末報告。
85. 游輝欽，2000，球諧分析衛星加速度求定地球重力場。國立交通大學土木工程學系碩士論文，新竹。
86. 黃清哲、許泰文、吳立中，2010，運用潮位與衛星資料推估海平面變遷量技術之研發(2/2)，經濟部水利署出版，台北市。

附錄一 潮汐分潮週期

附表 1-1 37 個潮汐分潮週期[姜介中，2009]

	分潮名稱	周期 (hr)
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	23.9345
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 evectional 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 evectional 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 evectional 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

附錄二 調和分析

附表 2-1 基隆與高雄潮位站資料估算調和分析的未知參數值

偏移與斜率	基隆 (mm)		高雄 (mm)	
	$a_0 \cdot a_1 \cdot b_1 \sim b_4$		$a_0 \cdot a_1 \cdot b_1 \sim b_4$	
偏移量	970.29		756.53	
斜率	0.01 (1/day)		0.01 (1/day)	
步階函數 1	1050.29		883.79	
步階函數 2	897.57		756.81	
步階函數 3	961.54		359.53	
步階函數 4	28.86		147.97	
分潮名稱	A_i	B_i	A_i	B_i
M2	221.12	65.94	131.97	121.10
S2	-53.50	-18.16	-55.40	-40.71
N2	-58.28	2.09	-40.16	-7.29
K1	-46.03	-189.49	-181.55	3.94
M4	-8.89	-7.29	-1.32	1.32
O1	69.20	149.50	170.93	20.82
M6	-1.01	2.40	-1.88	-2.16
MK3	2.35	1.19	-0.53	-1.20
S4	-1.31	0.29	0.27	0.16
MN4	2.66	4.00	0.70	-0.60
NU2	8.81	10.16	1.72	7.98
S6	-0.16	0.21	0.18	0.20
MU2	25.47	0.07	3.93	-6.54
2N2	9.52	3.21	6.14	1.51
OO1	-2.38	-6.19	-2.70	0.29
LAM2	0.79	8.21	-0.16	1.41
S1	-2.46	-1.65	2.00	-3.18
M1	8.30	9.62	10.98	-2.67
J1	-0.45	11.14	7.22	3.48
MM	0.08	0.40	3.67	-0.71
MSF	4.87	2.50	-0.74	-5.33
MF	-4.83	1.00	1.55	2.71
RHO	-3.10	6.31	2.78	5.69
Q1	-19.58	-27.92	-34.78	-2.29
T2	-4.06	-0.60	-3.85	-2.17
R2	-2.00	2.45	-1.48	-0.32
2Q1	4.26	3.18	3.70	-1.76
P1	-38.06	-48.56	-52.21	19.87
2SM2	3.33	3.16	0.61	0.15
M3	-3.47	-4.70	-2.53	2.18
L2	9.86	-9.64	3.26	0.97
2MK3	-2.31	-0.02	0.46	3.43
K2	10.88	11.01	13.64	15.56
M8	-0.25	-0.13	-0.15	0.01
MS4	6.87	-4.49	-1.20	-1.29
SSA	10.48	-6.44	-3.67	-19.79
SA	-78.91	-145.10	-60.54	-86.44

附錄三 期中報告審查意見處理情形表

期中報告審查意見處理情形表

交通部運輸研究所合作研究計畫

期中 期末 報告審查意見處理情形表

計畫名稱：臺灣四周海域長期性之海水面變化趨勢評估

計畫編號：MOTC-IOT-103-H3DB003a

執行單位：財團法人成大研究發展基金會/國立成功大學測量及空間資訊學系

參與審查人員及其所提意見	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
<p>林銘崇 委員</p> <p>1. 驗潮站資料校正在國際上是否有通用之作業程序(SOP)?</p> <p>2. 海洋溫度、鹽度等海洋物理資料影響海水面變化速率之評估，具</p>	<p>意見答覆</p> <p>1. 目前校正驗潮站資料在國際上並無通用之作業程序，依照所能取得的原始資料不同而有所不同。前人研究在利用驗潮站資料估算海水面變化速率時，進行的改正項目不盡相同[例如: Tseng <i>et al.</i>, 2009; 黃清哲等人, 2009; Chang <i>et al.</i>, 2012; Peng <i>et al.</i>, 2013]。本研究其中一項的工作項目為分析各項改正對於利用台灣附近驗潮站資料估算海水面變化速率之影響量。以驗潮站資料而言，影響驗潮站資料因子主要有風、海潮、逆氣壓效應、偏移量以及地殼變動等，其中因為風對於海水面變化速率的影響較小[Proshutinsky <i>et al.</i>, 2004]，因此在本計劃中並無對於驗潮站資料進行風影響之改正，其餘影響因子皆於驗潮站資料處理步驟中改正之。</p> <p>2. 海水溫度/鹽度上升造成海水膨脹/壓縮，海水溫度/鹽度降低則</p>	<p>審查同意。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p>

<p>體作法如何？</p>	<p>造成海水壓縮/膨脹，此種海水面變化可稱為比容海水面變化 (Steric sea level)，計算時可以利用海水月平均溫度與鹽度網格資料（由 XBT、ARGO 等測得）計算海水密度加上由深度轉換之壓力積分求得，詳細公式請參閱本文。比容海水面變化對於海水面變化速率之影響程度評估，可以由比較比容海水面與海水面變化速率，可知比容海水面變化對於海水面變化之影響程度。</p>	
<p>張憲國 委員</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 此報告內容豐富，深具學術價值。 2. 本研究分析驗潮站垂直變動速率結果與中央大學張中白教授的研究地殼上升速度在台灣東部有所差異，請在期末報告說明差異的原因。 3. 高雄及基隆驗潮站與衛星資料偏差比較大的原因，是否全是潮位站基準問題，還是還有其他原因？ 	<p>意見答覆</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝委員肯定。 2. 感謝委員建議，已於期末報告 3.4.5 小節中比較本研究驗潮站垂直變動速率結果與中央大學張中白教授的研究地殼上升速率。 3. 由圖 4.3 研究成果可知，潮位站基準校正對於基隆與高雄潮位資料估算海水面變化速率將有非常大的影響，因此目前認為高雄及基隆驗潮站與衛星資料偏差比較大，主要的原因是潮位站基準問題。 	<p>審查同意處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意處理說明。</p>
<p>董東璟 委員</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 報告內容符合預定進度，予以肯定。 2. PSMSL、UHSLC 資料均來自於 CWB，研究中為何區分來探討，部份結果並不一致（如表 	<p>意見答覆</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝委員肯定。 2. PSMSL 與 UHSLC 資料中僅有基隆與高雄驗潮站資料來自於 CWB。另外，由圖 3.23 中高雄 	<p>審查同意處理說明。</p> <p>審查同意處理說明。</p>

<p>4.7~4.9), 原因為何, 能否探討?</p> <p>3. 可否於文中再加強說明為何需要進行海潮校正。</p> <p>4. 衛星高度計精度為 cm 等級, 潮位站精度為 mm 等級, 利用衛星高度計來探討潮位站之垂直變動是否合理?</p> <p>5. 潮位站垂直變動結果建議可與內政部每年檢測結果比較。</p> <p>6. 建議勿強調 20 年資料分析為長期分析。</p>	<p>驗潮站可知, 不同單位有各自處理資料的步驟與方法, 因此不同單位提供的驗潮站資料並不相同, 導致後續成果不一致。</p> <p>3. 感謝委員建議, 已於期末報告 3.1 節中加強說明為何需要進行海潮校正。</p> <p>4. 衛星測高資料每一秒平均之海水水面高度觀測量精度可達±4.2 公分 [AVISO and PODAAC User Handbook, 2001], 而本研究使用的衛星測高資料是經由空間與時間上的平均, 衛星測高觀測精度可再提升, 因此結合衛星測高與驗潮站資料估算地表垂直變動是可行的。此結合衛星測高與驗潮站資料估算驗潮站地表垂直變動的方法已有多位學者發表於國際期刊上, 例如 Kuo et al. [2004; 2008]、Braitenberg et al. [2011]、Chang et al. [2012]、Wöppelmann and Marcos [2012]、Santamaria-Gomez et al. [2014]。</p> <p>5. 感謝委員建議, 已於期末報告 3.4.5 小節中與內政部每年檢測地表之結果相比較。</p> <p>6. 感謝委員建議, 此建議需與甲方 (交通部港灣研究中心) 再進行討論。</p>	<p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意處理說明。</p>
<p>滕春慈 委員</p> <p>1. 地表垂直變動速率應和內政部公布資料比較。</p> <p>2. 圖 4.8 基隆驗潮站內 UHSLC 與 CWB 資料一致性, 但是在圖 4.9 二者就有差異, 就分析結果解</p>	<p>意見答覆</p> <p>1. 感謝委員建議, 已於期末報告 3.4.5 小節中與內政部每年檢測地表之結果相比較。</p> <p>2. 由圖 4.8 可知, CWB 基隆驗潮站資料含有資料偏移量, 而 UHSLC 資料已無明顯偏移量之</p>	<p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p>

<p>釋。</p> <p>3. 圖 4.7 基隆、高雄的 vertical motion 和 KS2、KL2 不一致，同樣的資料，僅各改正造成最後結果不一致，請解釋。</p> <p>4. 計畫執行充實，各個方法也儘可能嚴謹的修正可能出現的誤差，成果豐碩。</p>	<p>情形(根據 UHSLC 提供的詮釋資料中說明，UHSLC 提供的驗潮站資料已進行偏移量改正)，因此本研究中僅對於 CWB 基隆驗潮站資料進行偏移量改正，而在目前研究中並無對於 UHSLC 資料進行偏移量改正，如圖 4.9 所示。已於期末報告 3.3 節中重新評估 UHSLC 基隆與高雄驗潮站是否有基準不一致之情形。</p> <p>3. 不同單位有各自處理資料的步驟與方法，因此不同單位提供的驗潮站資料並不一致。另外，根據 UHSLC 提供的詮釋資料中說明，UHSLC 提供的驗潮站資料已進行偏移量改正，因此在目前研究中並無對於 UHSLC 資料進行偏移量改正，而 CWB 基隆與高雄驗潮站資料皆需進行偏移量改正，因而造成期中報告圖 4.7 之結果。</p> <p>4. 感謝委員肯定。</p>	<p>審查同意處理說明。</p>
<p>溫志中 委員</p> <p>1. 報告內容豐富，能符合計畫需求。</p> <p>2. 建議增加單獨驗潮站垂直變動高程圖。</p> <p>3. 結論中提及東石與塭港海水面每年上升 3cm，描述方式請加以修正。</p> <p>4. 偵測偏移量中，2 倍 STD 門檻值</p>	<p>意見答覆</p> <p>1. 感謝委員肯定。</p> <p>2. 感謝委員建議，已於期末報告 3.4 節中增加五大商港潮位站垂直變動高程圖。</p> <p>3. 感謝委員建議，期末報告中對於結論中提及”東石與塭港海水面每年上升 3cm”之描述方式，將以更完整方式描述。已於期末報告結論中修改。</p> <p>4. 利用模擬資料進行偵測偏移</p>	<p>審查同意處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意處理說明。</p>

<p>如何訂定？</p> <p>5. diff→1 階微分精度為何？</p>	<p>量，嘗試多組數據後得知 2 倍 STD 門檻值可偵測出較為適當的偏移量。</p> <p>5. 1 階微分的目的為分析剩餘訊號中是否在短時間內有劇烈變化並不需要評估精度。</p>	<p>審查同意處理說明。</p>
<p>簡仲璟 委員</p> <p>1. 海水面上升速率目前是以全體資料時間段之平均來看，是否可由個別年份之海水面上升速率逐年檢視，以明瞭海水面上升之趨勢是否逐年逐漸明顯。</p> <p>2. 圖 4.8 及圖 4.9 之縱座標是否為海水面上升速率(SLR)？或僅是海水面月平均高度？此外由圖中似乎不易看出海水面上升趨勢，若以表 4.12 保守估算高雄港海水面上升速率 3.82mm/yr 20yr≐72mm(以 1993~2012 約 20 年計)。換言之，20 年累計海水面上升高度約 72mm，但此與圖 4.9 不一致。請再查對。</p> <p>3. 潮位資料改正，建議以相同的資料為例，以瞭解各種改正對資料的影響(由改正前後的對照比較)。</p> <p>4. 相關專有名詞建議以中文表示(第一次出現時可附英文)。</p>	<p>意見答覆</p> <p>1. 前期(102 年度)計畫已說明時間長短對於估算海水面變化速率之精度有顯著影響，因此若估算個別年份之海水面上升速率，將會因為估算時間較短導致計算之海水面上升速率之精度較差。</p> <p>2. 圖 4.8 的各驗潮站資料已改正海潮及 IB 效應，而圖 4.9 的各驗潮站資料已移除海潮、IB 效應與基準不一致情形，因此兩圖中資料皆包含測站地表垂直變動訊號。</p> <p>3. 感謝委員建議，期末報告將以相同的資料為例，使各種改正對資料的影響更為清楚。已於期末報告第三章中以中央氣象局的基隆與高雄潮位站為例。</p> <p>4. 感謝委員建議，期末報告中的名詞皆改以中文表示。</p>	<p>審查同意處理說明。</p> <p>審查同意處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p>
<p>莊文傑 委員</p> <p>1. 感謝合作研究單位的協力配合及努力，並如期提送繳交期中報告。</p> <p>2. P.I 摘要、章節、內文、及參考文</p>	<p>意見答覆</p> <p>1. 感謝委員肯定。</p> <p>2. 感謝委員建議，期末報告格式將</p>	<p>審查同意處理說明。</p> <p>審查同意並確認處</p>

<p>獻，請應用本中心所提供之相關格式；摘要內容請著重期中研究之具體成果。</p> <p>3. P.II 縮寫表請將英文縮寫放在原文之前，其後再將中文譯置於括號內，如 CSR：Center of Space Research (空間研究中心)。</p> <p>4. 第一章緒論中，請於適當段落引入及評述本研究第一年之成果。</p> <p>5. 請搭配“執行進度”適當展示“工作項目”相關之初步研究成果。</p> <p>6. P.2-17 陳示 PSMSL 與 UHSLC 之驗潮站資料差異，請以 PSMSL 基準偏移及 UHSLC 之基準偏移改正為範例，對照探討並比較本研究(第 3.3 節)所研提基準偏移改正方法之有效性。另外，亦請以圖 2.9 之 CWB 基隆驗潮站之基準偏移為例，示範並評估本研究(第 3.3 節)所研提基準偏移法之應用。</p> <p>7. 謹請補充應用式(3.2)之既有海潮改正結果與應用移動平均法之差異，並評估其優劣性；另外，在存在有 n 個基準偏移資料中，請補充應用式(3.2)之 n 個步階函數進行分析所得各段步階值與單純分段平均值之差異。</p> <p>8. 在第三章式(3.3)逆氣壓改正中，請補充有關時變全球海水面平均壓力與臺灣區域海域之時</p>	<p>應用貴中心所提供之相關格式。另外，期末報告中摘要內容將著重研究之具體成果。</p> <p>3. 感謝委員建議，期末報告將改善縮寫表之表示方式。</p> <p>4. 感謝委員建議，期中報告中已有引入本研究第一年之成果，已於期末報告之緒論中更完整評述本研究第一年之成果。</p> <p>5. 感謝委員建議，期末報告已適當展示“工作項目”之研究成果。</p> <p>6. 感謝委員建議，已於期末報告 3.3 節中重新評估 UHSLC 基隆與高雄驗潮站是否有基準不一致之情形，並且以 CWB 基隆驗潮站之基準偏移為例，示範並評估本研究所提基準偏移法之應用。</p> <p>7. 移動平均法雖然可有效改正潮位資料中的海潮效應，但若資料中含有偏移量，經移動平均後的偏移量將會分散於部分資料中，對於後續偏移量改正將是不利的。另外，後續研究將補充 n 個步階函數進行分析所得各段步階值與單純分段平均值之差異。</p> <p>8. 所有改正皆因區域自然及人為的影響所致，因此全球平均之氣象特性僅能表示綜合的特性，而</p>	<p>理說明。</p> <p>審查同意處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意處理說明。</p> <p>審查同意處理說明。</p>
---	--	--

<p>變全球海水面平均壓力之相關圖示，並作差異比較與應用性探討。</p> <p>9. 關於第三章第 3.3 節之基準偏移量改正，請以基隆及高雄驗潮站為例，依照圖 3.2 所陳示之流程圖或 P3.5~3.6 之改正步驟，補充各流程或步驟處理前、後之圖示，俾利對照。另外，請補充說明“一階微分”之定義。又在圖 3.3 及圖 3.4 中，圖說請強化說明；並請檢視 d1，其係為移除高頻訊號之結果，但為何其縱座標與 raw data 具顯著變化？</p> <p>10. 第 3.5 節間接平差，請提供計算例。</p> <p>11. 第四章相關圖表所示之初步成果，請與前期(102 年度)研究成果作對照比較，並加強評估與差異說明。</p>	<p>區域特性仍呈現不同的統計特性，因此本計畫才需將區域特性考慮其中，全球的壓力變化等因素將不適合用於海水位之改正</p> <p>9. 感謝委員建議，期末報告將以基隆及高雄驗潮站為例，詳述偏移量各步驟處理前、後之圖示。“一階微分”之定義為 dy/dx，dy 為相鄰資料的海水面高度變化，dx 為相差的月份數目，此定義將補充於期末報告中。另外，圖 3.3 與 3.4 中 d1 與 raw 的縱座標不同，主要原因為 d1 是由 raw 資料利用小波分解後的低頻係數，因此其縱座標會與 raw data 之縱座標稍微不同，但整體趨勢變化幾乎一致，此部分將於期末報告中強化說明。</p> <p>10. 期末報告中已補充第 3.6 節間接平差之計算例。</p> <p>11. 期末報告已比較與分析本研究成果與前期(102 年度)研究成果。</p>	<p>審查同意處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p>
--	--	--

附錄四 期末報告審查意見處理情形表

期末報告審查意見處理情形表

交通部運輸研究所合作研究計畫

期中 期末 報告審查意見處理情形表

計畫名稱：臺灣四周海域長期性之海水面變化趨勢評估

計畫編號：MOTC-IOT-103-H3DB003a

執行單位：財團法人成大研究發展基金會/國立成功大學測量及空間資訊學系

參與審查人員及其所提意見	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
<p>林銘崇 委員</p> <p>1. 利用海洋水溫、鹽度資料，經由壓力之求得，以評估海水面變化速率之貢獻量，但由於水壓力之計算依不同處理，其變化大，故是否將影響推估正確性？</p>	<p>意見答覆</p> <p>1. 本計畫利用海洋各深度之溫度與鹽度資料計算海水密度變化，再利用密度變化估算比容海水面變化，而壓力僅用來換算深度，其換算誤差影響比容海水面變化計算很小。</p>	<p>審查同意處理說明。</p>
<p>張憲國 委員</p> <p>1. 此報告從多方面的資料及各種影響資料的因子修正，分析出臺灣四周海域長期性之海水面變化趨勢，並與其他方法比較，撰寫內容相當精闢完整且正確，深具學術價值。</p> <p>2. 圖 3.27 顯示臺灣附近潮位站的 20 年資料長度推算地表垂直變動量似乎比 10 年資料有集中於零的趨勢，此原因為何</p> <p>3. 第 3.6 節利用間接平差求出地表變動速度的目的為何？</p>	<p>意見答覆</p> <p>1. 感謝委員肯定。</p> <p>2. 10 年與 20 年成果大致上是一致的，而 20 年成果似乎比 10 年成果有趨近於零的趨勢，其原因為 PSMSL 所選定之標準潮位站大部分建置於地表較穩定之地殼上，因此長期之潮位站地表變動則將趨近於零。</p> <p>3. 因計畫之甲方於工作會議與期中報告中指出，其他學術領域對</p>	<p>審查同意處理說明。</p> <p>審查同意處理說明。</p> <p>審查同意處理說明。</p>

	於間接平差計算方式應較不熟悉，因此希冀利用一節的篇幅說明間接平差計算方式。	
<p>蕭松山 委員</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 資料蒐集豐富，分析詳細，研究成果頗佳且具學術價值。 2. 計畫工作項目 10 項應均已執行，建議報告書中能明確於各章節展示各項目成果。 3. 偏移量改正需不需要之判別門檻值訂定依據，建議詳加論述。 4. P.3-33 提到由表 3-10、表 3-11 顯示「所估算之地表垂直變動速率與 GPS 成果非常一致」，建議能就表列數據詳加說明。 5. 由研究成果顯示，地表垂直變動量為重要的改正量，與臺灣西海岸因超抽地下水導致地層下陷嚴重相符合，建議提供研究成果於工程實務單位，應用於港灣碼頭工程、海堤工程等設計高程依據。 	<p>意見答覆</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝委員肯定。 2. 感謝委員建議，已於部分章節後面說明完成之各工作項目。 3. 本研究已於 3.3 節中詳細說明偏移量改正之門檻值訂定依據。另外，本研究使用的方法必須要有門檻值才能讓偏移量偵測更趨近於自動化，否則僅能利用手動判識。 4. 感謝委員建議，本研究估算成果與 GPS 成果間的差值平均值±標準偏差為 $1.82\pm 4.04\text{ mm/yr}$，因此已將原文中的文句改為「所估算之地表垂直變動速率與 GPS 成果應為一致」。另外，文中已利用差值平均值±標準偏差說明兩者成果間差異情形，並已說明造成差異的可能原因。 5. 感謝委員建議，我們也希望能將研究成果應用於工程實務上。 	<p>審查同意處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意處理說明。</p>
<p>董東璟 委員</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 研究成果豐碩，予以肯定。 2. 驗潮站資料各種改正(報告圖 	<p>意見答覆</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝委員的肯定。 2. 潮位站資料有執行順序，如圖 1.1 	<p>審查同意處理說明。</p> <p>審查同意處理說明。</p>

<p>1.1)是否有執行順序之要求？</p> <p>3. 驗潮站資料改正後如何確認其正確性？</p> <p>4. 偏移量改正處理時，本研究似乎視早期資料為正確，將後期資料修正至早期資料基準，請加以說明。</p> <p>5. 不同時期研究人員所得之海平面上升速率差異頗大，除了可能遺漏了相關改正之進行外，也可能和使用之資料長度及迴歸方法有關，譬如線性迴歸結果對資料筆數(尤其是資料少時)較敏感。</p> <p>6. 驗潮站資料在時間上若有重疊，如何處理？</p>	<p>所示，執行順序依序為海潮改正、逆氣壓改正、資料偏移改正、測站垂直變動改正。其主要目的為去除高頻訊號的影響，若資料中包含偏移量影響時以利減少計算誤差。</p> <p>3. 可以利用改正前後資料標準偏差與改正前後估算海水面變動速率之標準偏差做初步判斷，最後判斷是否改正確則是將估算測站垂直變動速率與 GPS 成果相比較或將估算之海水面變化與測高估算比較。</p> <p>4. 偏移量改正為將資料修正至同一基準，本研究是以最初資料為基準，後續資料中若有出現基準偏移情形，皆一併修正至最初資料之基準。</p> <p>5. 線性回歸確會受資料數量的影響而有差異，但是若其標準偏差小於數倍之上升趨勢，則在統計上其上升趨勢值是合理的呈現其變化趨勢。另外不同時期受到低頻海洋訊號的影響亦會影響其趨勢值。</p> <p>6. 若潮位站資料在時間上有重疊，將比較兩者資料品質，選取品質較佳的資料，若兩資料的品質一致，則選取測站時間較新之資料。</p>	<p>審查同意處理說明。</p> <p>審查同意處理說明。</p> <p>審查同意處理說明。</p> <p>審查同意處理說明。</p>
<p>滕春慈 委員</p> <p>1. 資料逐步自動客觀訂正，結果豐富嚴謹。</p> <p>2. 為什麼海潮改正(週期<28 天)不能修正氣壓效果，另要進行逆氣壓修正？</p>	<p>意見答覆</p> <p>1. 感謝委員的肯定。</p> <p>2. 逆氣壓效應主要為季節性變化(年週期與半年週期)，而海潮僅修正週期小於月之高頻水位變</p>	<p>審查同意處理說明。</p> <p>審查同意處理說明。</p>

<p>3. 期中報告有提到在資料基準面偏移判定有和其它站比較，期末則未提，請說明。</p> <p>4. 基準面偏移判定後進行修正，可否比較和原判定偏移時間比較及關係。</p>	<p>動，因此海潮改正不能修正氣壓效果，需另行進行逆氣壓改正。</p> <p>3. 雖然期中報告與期末報告在偵測偏移量的方法上並不相同，但期中與期末的偵測偏移量方法中皆有納入和其他站比較之步驟，如期末報告中 P.3-8 有提到”資料偏差值接近門檻值則輔以衛星測高資料與其他相鄰潮位站資料來進行評估”。</p> <p>4. 圖 3.16-圖 3.19 為比較偏移量改正前後的成果。</p>	<p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p>
<p>簡仲璟 委員</p> <p>1. 本研究很仔細的考慮海潮、逆氣壓、基準偏移與測站地表垂直變動等對海水面變化速率估算的影響，而得到較可靠可信的結果，其努力值得肯定。</p> <p>2. 參照表 4.10 及表 4.11，臺灣四周海域海水面上升速率是否因比容海水面上升速率減緩而減緩？此外，臺灣西南部地區之地層下陷趨勢是否也逐漸緩和？建議補充說明。</p> <p>3. 相關專用語辭宜統一，且其涵義應補充說明。例如”海平面”與”海水面”；”海水面變化速率”與”</p>	<p>意見答覆</p> <p>1. 感謝委員的肯定。</p> <p>2. 衛星測高資料(AVISO 與 RADs)估算近十年與近二十年台灣附近海水面上升速率分別為 6.66~8.12 mm/yr 與 4.43~5.23 mm/yr，由數據上來看近十年之海水面上升速率較二十年更快，但十年海水面上升速率之標準偏差比二十年大，但差別在三倍中誤差內，所以無法給此結論。另外，目前成果並無法確定臺灣西南部地區之地層下陷趨勢是否逐漸緩和，若要確定則需納入更多資料，如 GPS、精密水準等資料。</p> <p>3. 感謝委員的建議，在期末報告中除了專有名詞平均海平面永久服務中心(PSMSL)外，已將”海</p>	<p>審查同意處理說明。</p> <p>審查同處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p>

<p>海水面上升速率"; "上升速度"與"上升速率"等。</p>	<p>平面”改為"海水面"; "海水面變化速率"與"海水面上升速度"皆改為"海水面上升速率"。</p>	
<p>莊文傑 委員</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝合作研究單位的協力配合及努力，並如期提送繳交期末報告。 2. P.2-9、P.2-17 請於文中(第3章)再強化說明：潮位站地表垂直變動和人為造成的潮位資料基準徧移之區別辨識與改正。 3. P.2-9 請將驗潮站應增加設置全球衛星定位系統(GPS)，俾能利用 GPS 觀測量估算潮位站的潮位站地表垂直變動量，列為建議。 4. P.2-14 表 2-6 請再作排版編輯。又表 2.6 中所陳述國內各驗潮站之紀錄取樣間距分別為 6、10、60 分鐘，這與圖 2.9 所示基隆驗潮站之紀錄間距(應為逐月?)應不相同，請作補充說明。 5. P.3-2 請列出以式(3.1)進行圖 3.1 與圖 3-2 海潮改正程序中，其 a_0、a_1、及 b_j $j=1..m$ 各值，俾供相關分析之比較參考。另外，是否可應用步階函數值(b_j)直接進行徧移量校正? 又步階函數值(b_j)與分段平均值是否有相關性? 在未進行徧移量偵測前，如何決定步階函數之個數 m? 6. P.3-5 因 UHSLC 與 CWB 潮位站資料的逆氣壓改正之 P_{atm} 使用日平均資料，因此，請於圖 3.4 中補充式(3.2)之日平均全球平 	<p>意見答覆</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝委員的肯定。 2. 已於 3.3 節說明潮位資料基準徧移(跳動)之區別辨識與改正; 已於 3.4 節說明地表垂直變動速率(斜率)的估算與改正。 3. 已於第五章結論與建議中加入”潮位站旁應增加設置全球衛星定位系統(GPS)之建議”。 4. 已重新排版編輯表 2-6，並於圖 2.9 中補充說明”各測站之資料已平均為月平均資料”。 5. 已將圖 3.1 與圖 3.2 海潮改正參數列於附錄二中。本研究進行徧移量改正是利用 P.3-14 與 P.3-15 的步階函數值進行徧移量改正。步階函數值(b_j)與分段平均值是有相關性，但若資料的變化速率較大，則步階函數值(b_j)與分段平均值差異較大。另外，若無進行徧移量偵測，則無法決定步階函數之個數。 6. 本研究所有潮位站資料進行逆氣壓改正中的 P 皆為月平均全球平均海水面壓力，為避免誤解，因此不補充日平均全球平均海 	<p>審查同意處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p>

<p>均海水面壓力(P)變化圖。並請補充說明原 CWB 之原始逐時紀錄，經圖 3.3 海潮改正後(紅色)，其再進行逆氣壓改正之前後處理過程之相關結果圖。亦即請說明圖 3.5 與圖 3.6 中，中央氣象局基隆與高雄潮位站之(a)未移除季節性之潮位資料(已移除海潮與逆氣壓效應)之資料來源及其所應進行之處理程序。</p> <p>7. P.3-6 請說明應用式(3.1)進行海潮改正之擬合過程，為何不能同時將式(3.3)之季節性(年周期與半年週期)訊號同時納入考量?而需於進行海潮改正與逆氣壓改正後，再單獨進行式(3.3)之擬合，藉以降低對偏移量偵測之影響?</p> <p>8. P. 3-7 以哈爾(Haar)小波分解(wavelet decomposition)進行分解，其高頻訊號與低頻訊號之分界為何?</p> <p>9. P.3-9~P.3-10 請補充說明圖 3.5 與圖 3.7 及圖 3.6 與圖 3.8 中，圖橫軸之年序與數序之對應關聯性或彼此間如何換算?</p> <p>10. P.3-15 請補充提供並標註基隆與高雄潮位站以方法 I 改正偏移量</p>	<p>水面壓力於圖 3.4。另外，已補充 CWB 高雄、基隆潮位站進行逆氣壓改正之相關結果圖。圖 3.7 與圖 3.8 中 (a)未移除季節性之潮位資料(已移除海潮與逆氣壓效應)之資料處理程序已於 3.1 節與 3.2 節中說明。</p> <p>7. 海潮季節性訊號很小，因此在進行海潮改正過程中不考慮移除季節性訊號，以免將海洋季節性訊號移除。而單獨進行式(3.3)之擬合，是為了移除季節性訊號對偏移量偵測之影響。</p> <p>8. 本研究利用以小波理論為基礎的多層次解析方法自動將原始月平均資料分解出低頻訊號分量。多層次解析為分層進行分解，第一次分解原始資料得到的近似(低頻)與細節(高頻)兩種訊號稱為第一層，第二層為將第一層之近似(低頻)訊號再分解成近似(低頻)與細節(高頻)訊號稱之，本研究依據經驗法則使用第三層的近似(低頻)訊號進行偏移量偵測。</p> <p>9. 期末報告中 P.3-7~P.3-9 已說明圖 3.7 與圖 3.8 及圖 3.9 與圖 3.10。</p> <p>10. 已於期末報告 P.3-16 與 P.3-17 補充圖 3.16、圖 3.17、圖 3.18 與</p>	<p>審查同意處理說明。</p> <p>審查同意處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p>
---	--	---

<p>後(圖 3.14 與圖 3.15)及以方法 II 改正偏移量後(圖 3.16 與圖 3.17)，各圖中，包含海水變化速率與潮位站地表垂直變動速率之 b' 值(式 3.4)，或潮位站地表垂直變動速率 b''(式 3.6)。</p>	<p>圖 3.19 中的相對海水面上升速率。</p>	
<p>11. P.3-17 請於進行 3.4 潮位站地表垂直變動改正 章節前，針對 CWB 各驗潮站，單純就進行海潮改正、逆氣壓改正、基準偏移校正等通常處理程序後，列表補充 CWB 各驗潮站之 SLR(變動速率之 b' 值)，並與應用近十年紀錄(前期)之相同分析成果作對照、比較。或在 3.4 節中，針對 CWB 各驗潮站，補充說明並討論在進行潮位站地表垂直變動速率校正前後之差異性，俾強化進行潮位站地表垂直變動速率校正之必要性</p>	<p>11. 海水面受到海洋低頻訊號影響，因此不同時期(十年與二十年)海水面變化速率並不相同，因此比較十年與二十年潮位站資料經每一項改正後所估算之海水面上升速率並無意義。本研究已於 4.1 節中列出潮位站各項校正前後之差異(如圖 4.3 與圖 4.4 所示)，文中已討論地表垂直變動速率校正之必要性”地表垂直變動改正對於海水面上升速率影響量平均值約 4~5 mm/yr，皆大於全球平均海水面上升速率的 3.2 ± 0.4 mm/yr [Church and White, 2011]。因此在臺灣附近海域，若以未經過測站地表垂直變動改正之潮位站資料估算絕對海水面上升速率，將造成顯著的誤差”。另外，第一章中已回顧 Ching 等人 [2011] 與 Chen 等人 [2011] 等關於台灣地表垂直變動的相關研究成果，由上述文獻可知台灣東南部與西南部等區域的地表垂直變動量比台灣附近海水面變動量來的大，表示台灣周圍潮位站資料中包含的地表垂直變動訊號將顯著影響潮位站資料所估算之海水面上升速率。</p>	<p>審查同意並確認處理說明。</p>
<p>12. P.3-38 請於 3.6 間接平差章節</p>	<p>12. 已於 3.6 節中補充說明斜率(b'')</p>	<p>審查同意並確認處</p>

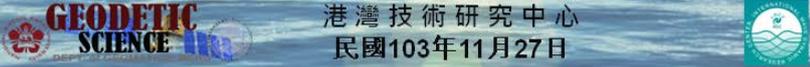
<p>內，具體指出斜率(b')之誤差範圍($\pm ?$)值，或誤差範圍($\pm ?$)值如何計算？另外，圖 3.35 之縱座標應是 vertical motion？並請標註黑點(measured ?)與紅線(estimated slope ?)之圖說。</p> <p>13. 請於內文強化工作項目(7)之內涵，亦即探討國內近岸驗潮站實測潮位紀錄應用於平均海水位變動率之準確度與可行性。</p> <p>14. P.4-17 表 4.12 中，對於臺灣環島分區之絕對海水面變化率之估算，本研究結果顯示：北小_南大；東小_西大，請皆補充說明其可能之原因，尤其是東小_西大之趨勢。</p> <p>15. 現場簡報資料中，對於各項改正成果評估比較所提列之前後 STD 分析值及相關斜率與誤差值，均請於定稿報告內文之對應圖表中補註。此外，簡報資料第 19、20 頁之絕對海面水位昇降變動速率圖，請將其列入定稿報告中。</p>	<p>之誤差範圍($\pm ?$)值。圖 3.35 之縱座標可使用 vertical motion 或 Estimated vertical motion。已補充說明黑點與紅線之圖說。</p> <p>13. 已於 4.2 節中加強探討國內近岸驗潮站實測潮位紀錄應用於平均海水位變動率之準確度與可行性。</p> <p>14. 期末報告中已補充北小_南大以及東小_西大等現象皆應受到 ENSO 影響，其中西部的潮位站的地理位置較偏南部，因此西部海水面受到 ENSO 影響較大，造成海面上升速率東小_西大。</p> <p>15. 已補充期末簡報中的相關資料於期末報告中。</p>	<p>理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p> <p>審查同意處理說明。</p> <p>審查同意並確認處理說明。</p>
---	---	--

附錄五 期末簡報

臺灣四周海域長期性 之海水面變化趨勢評估 【期末報告】

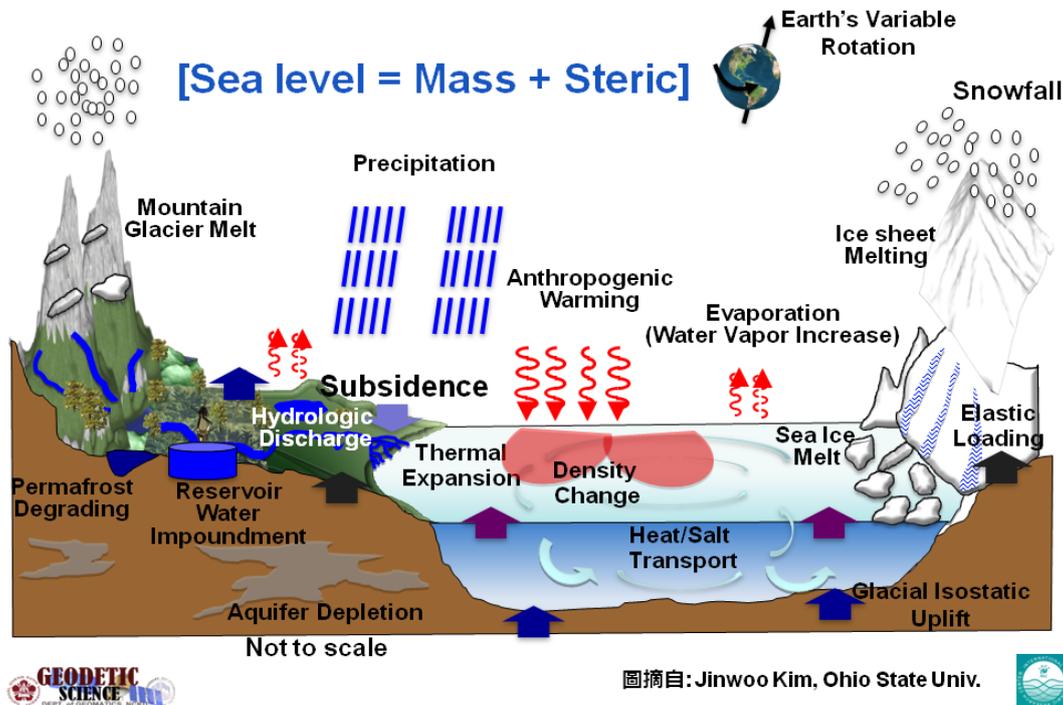
主持人：郭重言 國立成功大學測量及空間資訊學系
協同主持人：林立青 國立成功大學國際波動力學研究中心
Géosciences, Université Montpellier 2, France

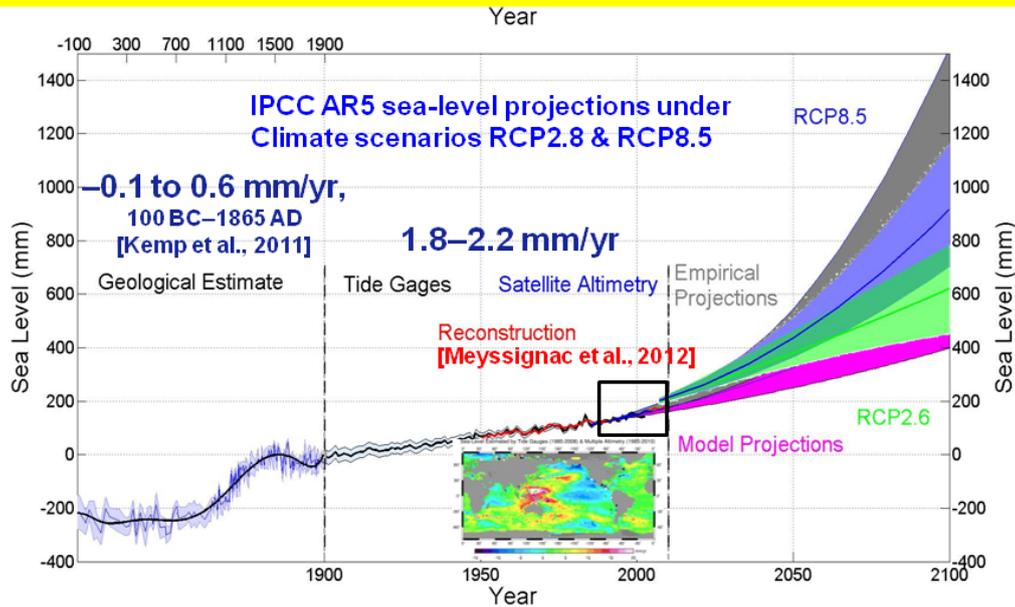
港灣技術研究中心
民國103年11月27日



研究動機與目的

2





2007 IPCC AR4 海平面上升預測 [Bindoff et al., Solomon et al. 2007]: 2100可達0.58 m
2013 IPCC AR5 海平面上升預測 [Church et al., 2013]: 2100 最高可達 0.98 m
2013 海平面上升預測中包含冰蓋(ice-sheets)融化後的影響
 海平面上升預測為全球性海水面變化，非區域性海水面變化

台灣周圍海水面變化相關研究

- Zhan等人[2009]利用14年衛星測高(Satellite altimetry)資料估計黃海、東海、南海之海平面上升(Sea level rise)速率分別為3.91 mm/yr、4.28 mm/yr、3.49 mm/yr，表示台灣附近海域之海水面變化主要呈現上升情形。
- Tseng等人[2009]與黃清哲等人[2010] 利用潮位站進行台灣周圍海水面變化速率計算時皆未考慮測站地表垂直變動等影響，然而台灣地區地表垂直變動量可能較海水面變動訊號大[Ching et al., 2011; Chang et al., 2012]。
- 陳進益等人[2014]針對臺灣17個長期潮位站進行資料均一化處理，然而此處理方式移除了資料中變化速率，例如塭港潮位站資料經均一化處理後變化速率為 4.93 mm/yr，與該報告中塭港潮位站周圍衛星測高資料估算絕對海水面變化速率(4.60 mm/yr)相符合。然而由前期(102年度)計畫、Ching等人 [2011]與Chen等人[2011]等研究可知，塭港潮位站及其附近地區每年可呈現 20 mm 以上的下沉量，與均一化處理後之塭港潮位站成果不符。
- 前期(102年度)計畫利用台灣周圍十年衛星測高與潮位站資料進行絕對海水面變化速率計算，研究成果發現臺灣周圍近十年海水面變化速率呈現上升情形。另外，由於資料涵蓋時間較短，導致估算變動速率之標準偏差(Standard Deviation, STD)較大，以中央氣象局潮位站之地表垂直變動速率的標準偏差之平均值約為 ± 2.41 mm/yr。

- 海面水位變化相關研究、觀測和學術文獻之蒐集與匯整分析。
- 國內驗潮站實測潮位紀錄和國際衛星海面測高資料之蒐集、改正和率定。
- 結合應用國內驗潮站資料並配合國際衛星測高資料，分區分析臺灣四周海域長(~20年)、短(~10年)期之海面水位昇降變動速率。
- 結合應用國內驗潮站資料並配合國際衛星測高資料，分區分析臺灣近岸長(~20年)、短(~10年)期之測站垂直變動速率。
- 臺灣近岸驗潮站潮位基準偏移量校正方法研究。
- 探討國內近岸驗潮站實測潮位紀錄應用於平均海水位變動率之準確度與可行性。
- 海洋溫度、鹽度等海洋物理資料對於海水面變化速率之貢獻量評估。
- 重力衛星資料對於海水面變化速率之貢獻量評估。



研究資料

■ 潮位站

1. 平均海平面永久服務中心(PSMSL)
[Holgate *et al.*, 2013; PSMSL, 2014]
2. 美國夏威夷大學海水位中心 (UHSLC)
3. 中央氣象局(CWB)

■ 衛星測高 (資料來源: AVISO與RADs)

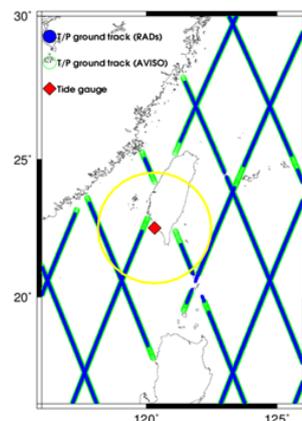
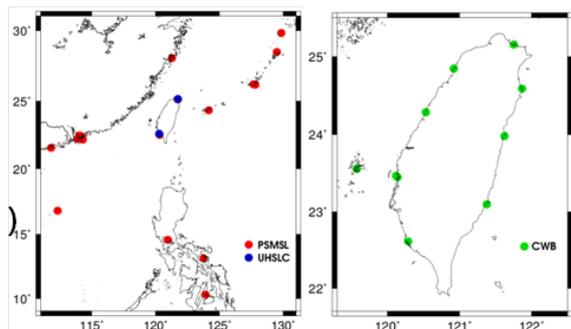
1. TOPEX/Poseidon(T/P), 1992/09~2002/08
2. Jason-1(J-1), 2002/01~2009/01
3. Jason-2(J-2), 2008/07~now

■ 重力反演和氣候實驗(Gravity Recovery and Climate Experiment, GRACE)重力衛星

■ 溫鹽資料

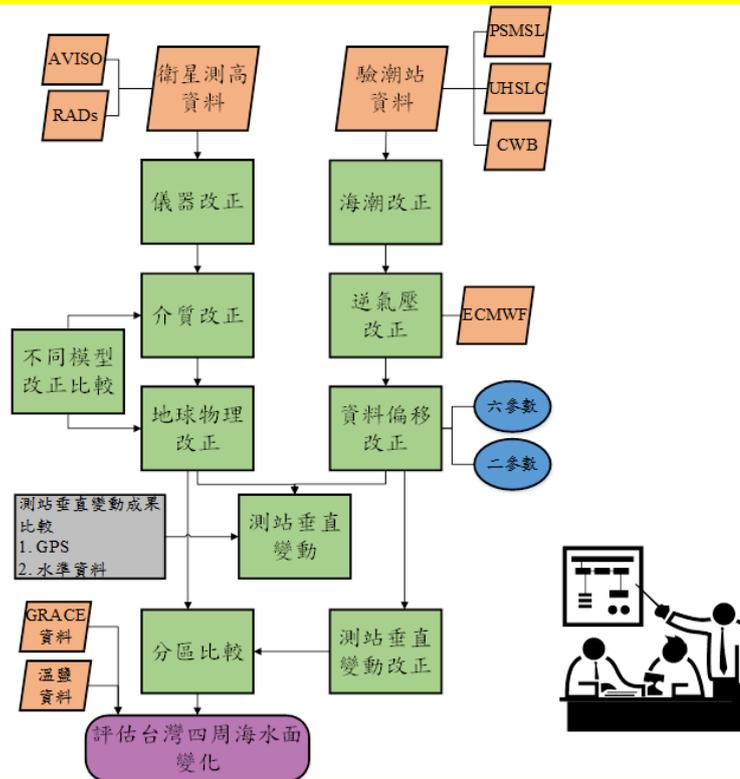
Ishii, 1945/01~2012/12 [Ishii and Kimoto, 2009]

- 研究時間: 1993-2012年
- 研究範圍: 10°N~30°N 與 110°E~130°E



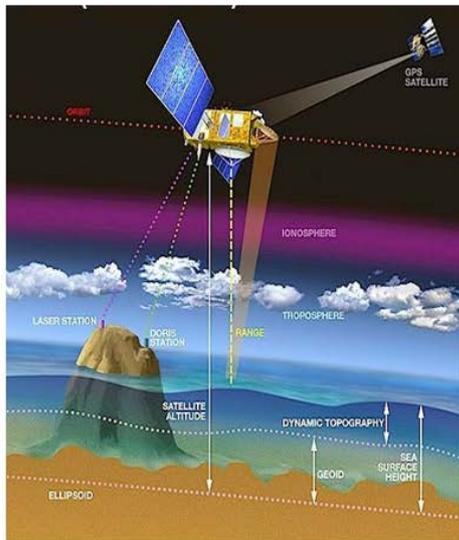
流程圖

7



衛星測高模型改正評估

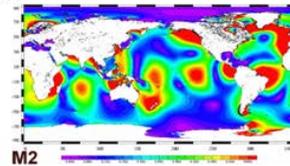
8



Courtesy CNES/D. Ducros

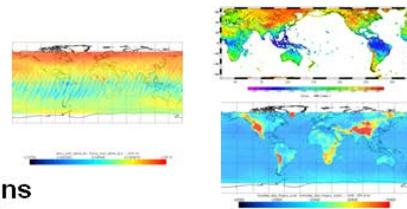
Geophysical corrections

- Ocean tides
- Solid earth tides
- Pole tides
- Tidal loading



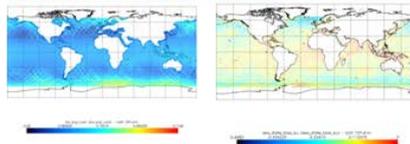
Propagation corrections

- Ionosphere
- Wet troposphere
- Dry troposphere



Surface corrections

- Inverse barometer
- Electromagnetic bias



Data Corrections



Sea Level Rise, SLR



潮位站資料校正



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

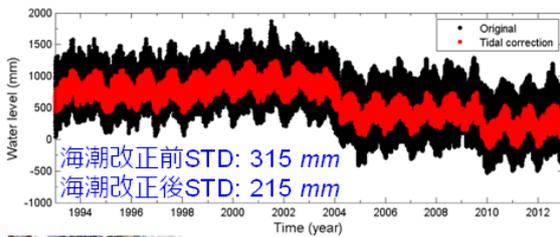
TG: 潮位站觀測水位高度資料
t: 時間
 a_0 、 a_1 、 A_i 、 B_i : 未知參數
 ω_i : 各分潮之頻率

$$IB = -9.948 \times (P_{atm} - P)$$

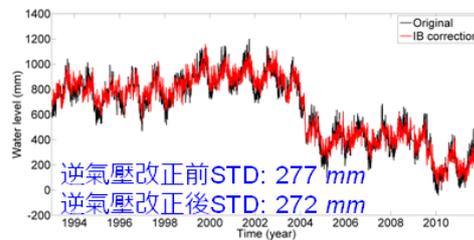
P_{atm} : 海水表面壓力 (毫巴)
P: 隨時間變化之全球海水表面平均壓力
尺度因子 9.948: 中緯度之經驗值 [Wunsch, 1972]

ECMWF

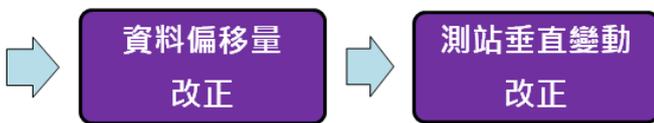
海潮改正(中央氣象局之高雄潮位站)



逆氣壓改正(中央氣象局之高雄潮位站)



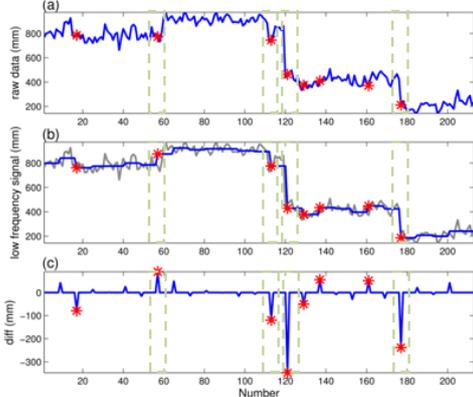
潮位站資料校正



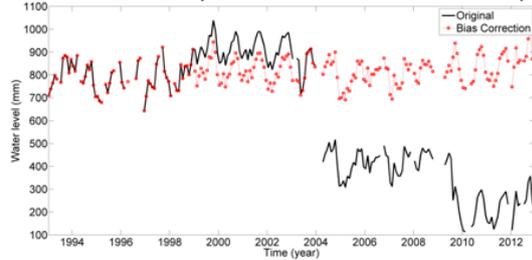
$$VM(t) = a + bt$$

VM: 地表垂直變動時間序列
a 與 b: 偏差與垂直變動斜率

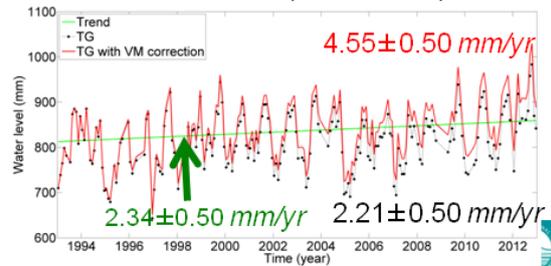
偏移量偵測(中央氣象局之高雄潮位站)



偏移量改正(中央氣象局之高雄潮位站)

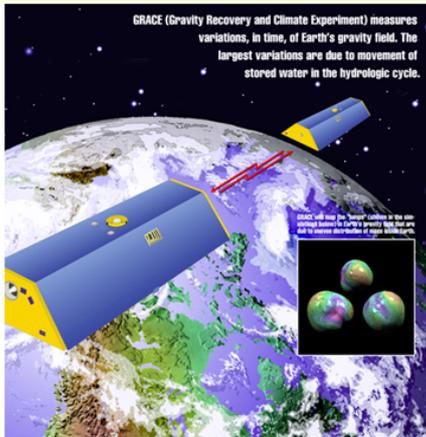


測站垂直變動改正(高雄潮位站)



重力反演和氣候實驗(GRACE)

11



圖摘自: <http://grace.jpl.nasa.gov/>

- 美國及德國太空中心研發並於2002年3月發射
- 軌道高度485公里，傾角89度，兩顆子衛星間相距220公里，空間解析度可達400~40000公里 [Tapley *et al.*, 2004]
- 提供高解析度重力場解及觀測靜態與動態重力場之變化用於觀測水文質量交換

■ GRACE重力場解計算質量變化

1. 衛星雷射測距觀測加入或取代GRACE GSM之一階項和C₂₀
2. 移除步驟1處理完之所有月份重力場解平均值
3. 利用van der Wal *et al.* [2011]模型移除冰後回彈效應
4. 進行去相關性濾波處理 [K = 15, UP = (30, 0) (10, 10)]
5. 利用處理後係數計算質量變化
6. 進行半徑300公里高斯濾波處理
7. 進行洩漏效應改正
8. 將AOD計算之質量變化加入步驟7之計算結果



溫度與鹽度資料

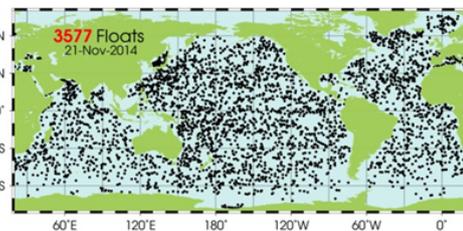
12

- 比容海面(Steric sea level)變化可由海水溫度及鹽度資料計算海水密度加上由深度轉換之壓力積分求得，公式如下：

$$h_{steric} = \int_{z_1}^{z_2} \frac{\rho_0(S_0, T_0, z) - \rho(S, T, z)}{\rho_0(S_0, T_0, z)} dz$$

其中S₀與T₀為長時間平均之鹽度及溫度資料，S與T為月平均之鹽度及溫度資料，ρ和ρ₀分別為海水密度和參考海水密度，z為海水深度

Data	Spatial resolution	Depth (layers)	Data period	Data Sources
Ishii [Ishii and Kimoto, 2009]	1°x1°	1500m (24)	1945/01-2012/12	CTD/XBT/Argo



圖摘自: <http://www.argo.ucsd.edu/>



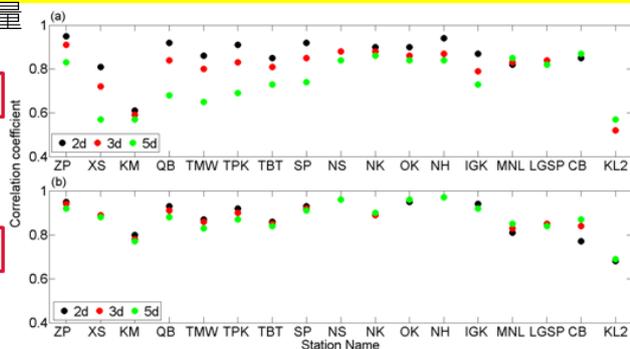
- 衛星測高與潮位站資料間之相關性
- 改正前後海水面變化速率之差異
- 潮位站之地表垂直變動速率
- 絕對海面水位昇降變動速率
- 台灣周圍海面上升之主要原因



衛星測高與潮位站資料間相關性

➤ 無偏移量

等權平均



✓ 使用AVISO衛星測高資料

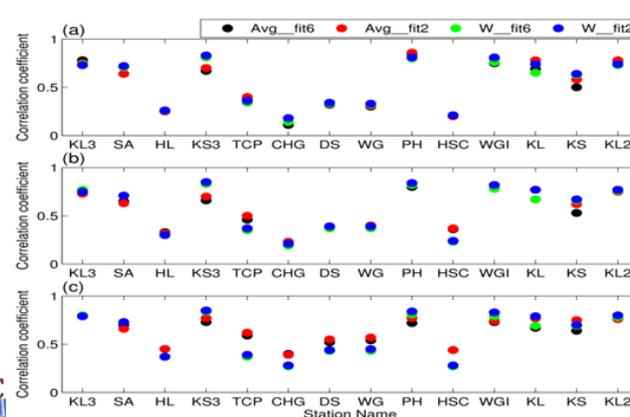
➤ 相關係數平均值

Area	Avg.	W.
2°	0.86	0.89
3°	0.82	0.89
5°	0.75	0.88

加權平均

➤ 偏移量

二度



➤ 相關係數平均值

	Area	Avg.	W.
方法 I (fit6)	2°	0.45	0.47
	3°	0.50	0.50
	5°	0.59	0.53
方法 II (fit2)	2°	0.46	0.48
	3°	0.51	0.50
	5°	0.60	0.54

三度

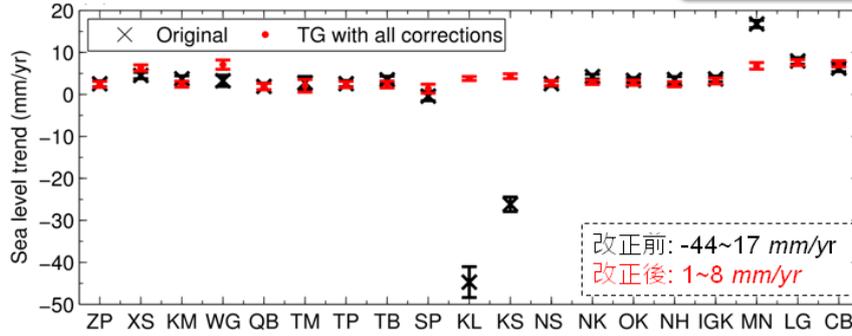
五度



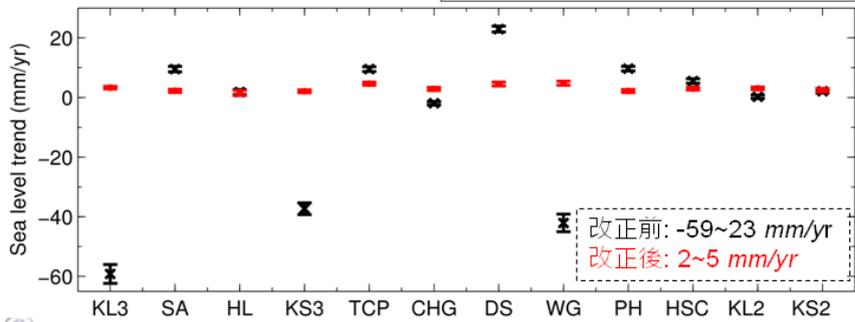
潮位站資料校正之影響量

PSMSL

使用AVISO衛星測高資料

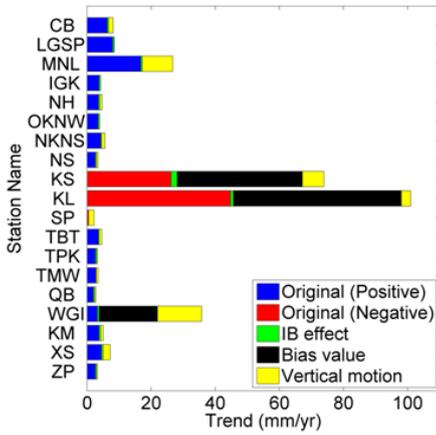


UHSLC與CWB



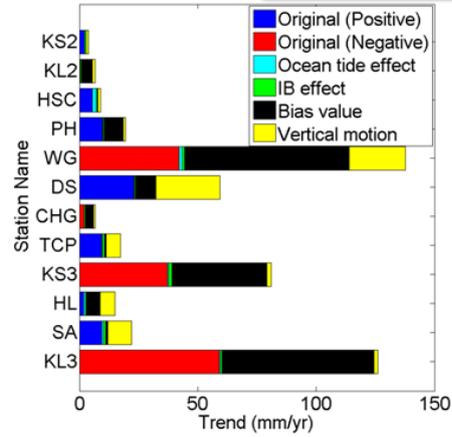
潮位站資料校正之影響量

PSMSL

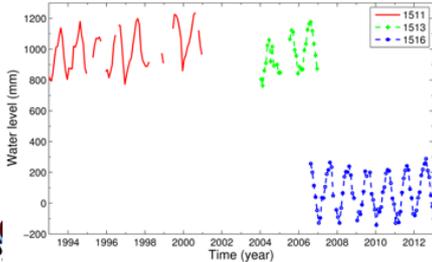


UHSLC與CWB

使用AVISO衛星測高資料



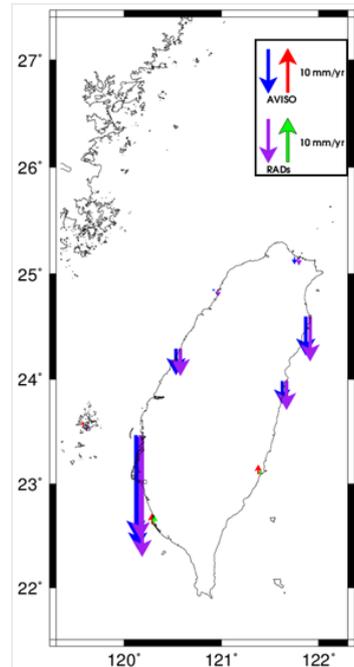
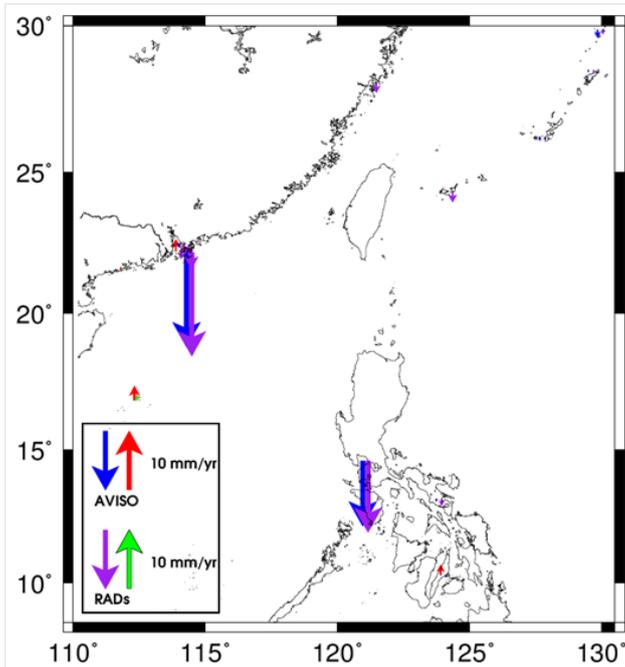
中央氣象局基隆潮位站



各項改正之影響量 (mm/yr):

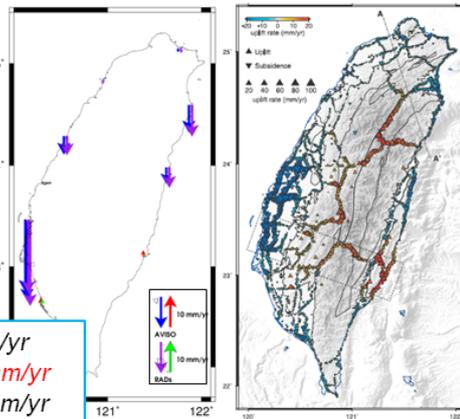
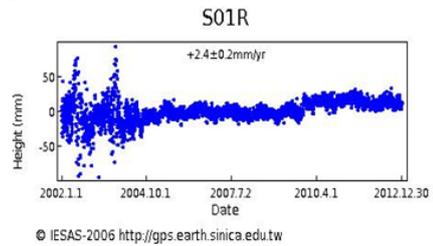
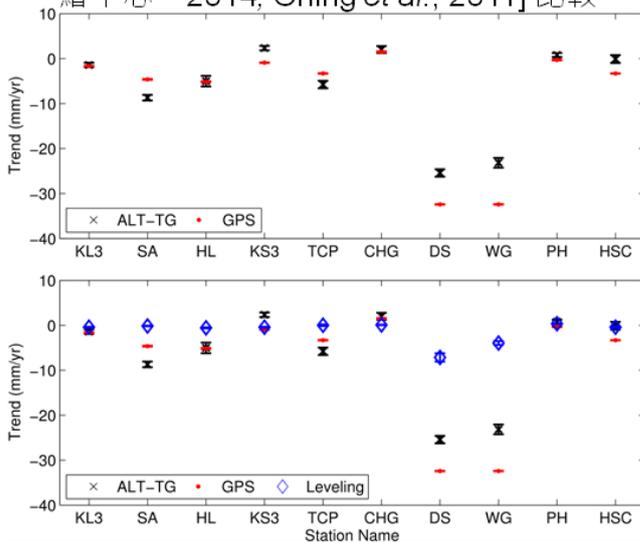
- 海潮改正: 0-2
影響量平均值: 0.6
- 偏移量改正: 1-69
影響量平均值: 23
- 逆氣壓改正: 0-2
影響量平均值: 0.6
- 垂直變動改正: 0-25
影響量平均值: 4





- 估算之地表垂直變動速率與現有成果(水準與全球衛星定位系統(GPS) 觀測成果)[內政部國土測繪中心·2014; Ching *et al.*, 2011] 比較

✓ 使用 AVISO 衛星測高資料



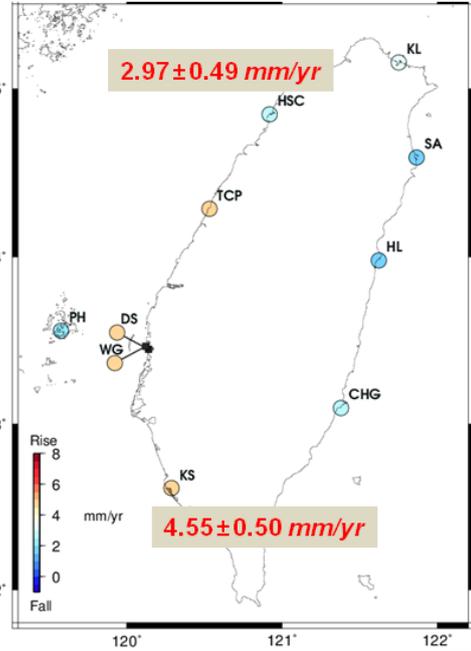
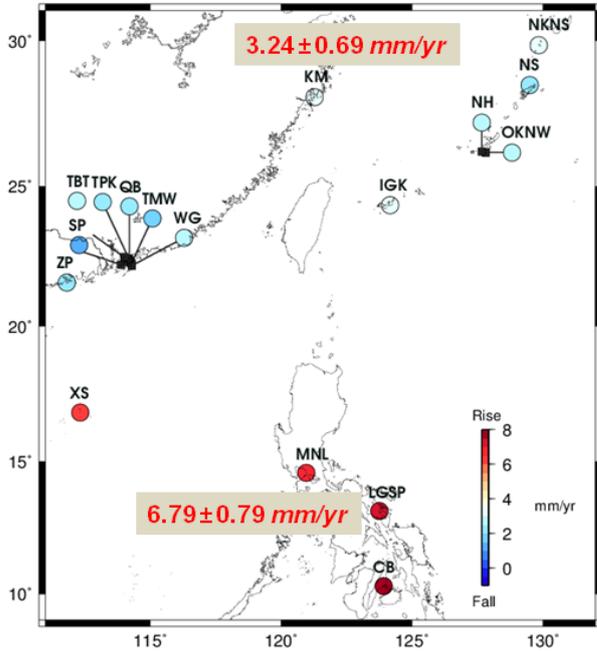
ALT-TG V.S. GPS	差值平均值±標準偏差: 1.82±4.04 mm/yr
移除東石與塭港	差值平均值±標準偏差: -0.24±2.52 mm/yr
ALT-TG V.S. Leveling	差值平均值±標準偏差: -6.12±8.90 mm/yr
GPS V.S. Leveling	差值平均值±標準偏差: -6.11±10.06 mm/yr

[Ching *et al.*, 2011]

絕對海面水位昇降變動速率

■ 潮位站資料

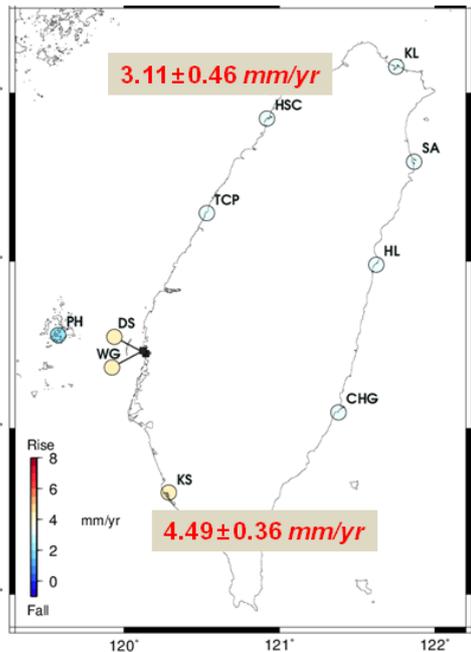
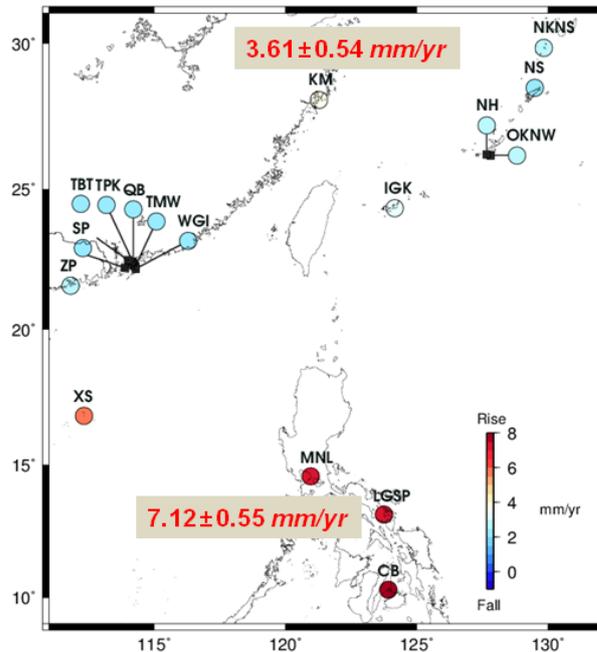
✓ 使用AVISO衛星測高資料



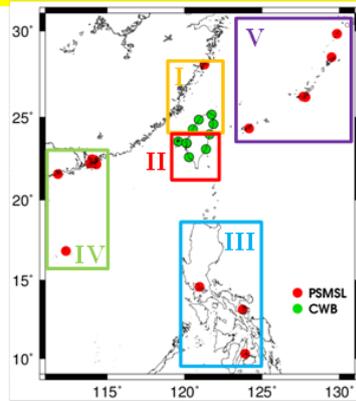
絕對海面水位昇降變動速率

■ AVISO衛星測高資料

✓ 使用AVISO衛星測高資料

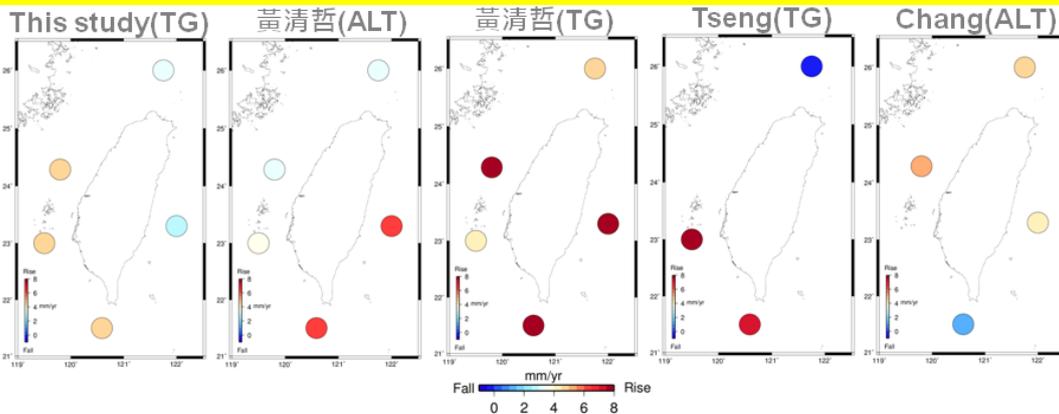


絕對海面水位升降變動速率



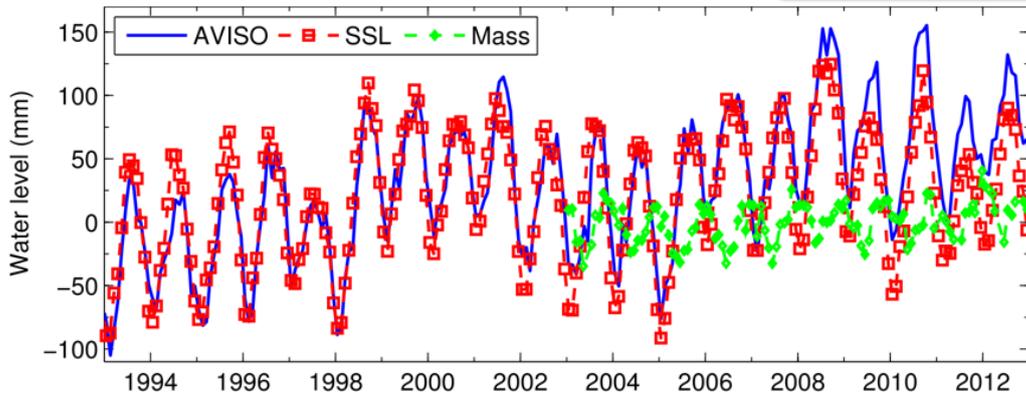
Region	Trend (mm/yr)							
	10 yrs (2003-2012)				20 yrs (1993-2012)			
	AVISO		RADs		AVISO		RADs	
	ALT	TG	ALT	TG	ALT	TG	ALT	TG
NT (I)	4.33±1.13	4.46±0.69	1.35±1.15	0.65±0.69	2.84±0.40	3.14±0.24	2.19±0.39	2.02±0.24
ST (II)	5.52±1.32	5.31±0.58	2.75±1.67	3.08±0.58	3.17±0.44	3.41±0.26	2.17±0.47	2.31±0.26
PP (III)	13.48±1.60	16.6±1.36	9.84±1.66	13.22±1.36	7.46±0.52	7.51±0.43	5.79±0.60	7.32±0.43
HK (IV)	8.51±1.09	7.29±0.78	7.07±1.04	3.26±0.78	5.16±0.39	2.62±0.34	4.55±0.39	1.24±0.34
JP (V)	0.63±0.91	-0.44±0.74	0.05±0.92	-2.03±0.74	3.12±0.34	2.78±0.28	2.89±0.35	2.28±0.28
Total (I-V)	5.89±0.79	5.93±0.36	4.55±0.81	5.93±0.36	4.46±0.28	3.47±0.14	3.84±0.28	2.49±0.14
All areas	8.12±0.88	5.93±0.36	6.66±0.88	5.93±0.36	5.23±0.31	3.47±0.14	4.43±0.31	2.49±0.14

絕對海面水位升降變動速率



Area	Trend (mm/yr)				
	This study (1993-2012)	[黃清哲等人, 2009] (1992-2009)		[Tseng et al., 2009] (1993-2003)	[Chang et al., 2012] (1992-2008)
	ALT&TG	ALT	TG	TG	ALT
NT	2.24~3.32	3.14	4.95	-0.30	4.90
WT	2.68~4.64	3.06	10.70	x	5.00
SWT	3.46~4.81	3.87	4.31	17.1 (Penghu)	x
ST	3.82~4.55	6.00	9.80	7.3	1.10
ET	1.68~3.34	6.35	55.60	x	4.30
All area (only TG)	2.49~3.47	x	x	5.70 (TG)	x
All area (only ALT)	4.43~5.23	x	x	5.30 (ALT)	x

✓使用AVISO衛星測高資料



Data	10 yrs (2003-2012)			20 yrs (1993-2012)		
	Trend (mm/yr)	Corr. with AVISO	Corr. with RADs	Trend (mm/yr)	Corr. with AVISO	Corr. with RADs
AVISO	8.11±0.88	x	x	5.23±0.31	x	x
RADs	6.66±0.88	x	x	4.43±0.31	x	x
Ishii	2.46±0.82	0.90	0.92	2.34±0.29	0.90	0.91
Mass	1.59±0.29	0.02	-0.02	x	x	x
Ishii+mass	4.19±0.92	0.91	0.93	x	x	x



結論與建議

- 由潮位站與衛星測高資料間相關性結果得知，臺灣本島潮位站資料與等權平均5°範圍內測高資料較一致，而其他區域潮位站資料則與等權平均2°範圍內測高資料或加權平均各範圍(2°、3°、5°)內測高資料較一致。
- 利用原始潮位站資料與改正後的潮位站資料估算的海水面變化速率有顯著差異，其中海潮與逆氣壓改正影響潮位站資料計算海水面變化速率皆為 0~2 mm/yr，而偏移量改正之影響量平均值為23 mm/yr，測站地表垂直變動改正之影響量平均值為4~5 mm/yr。因此在臺灣附近海域，若以未經改正的原始潮位站資料計算海水面變化速率，將造成嚴重之估算誤差，其中偏移量和測站地表垂直變動為必要之改正。
- 近二十年潮位站地表垂直變動速率之成果顯示整個研究區域中台灣本島、橫瀾島嶼馬尼拉地區呈現明顯下沉情形，其中位於臺灣西南地區的東石與塭港潮位站之地表垂直下沉速率最大，每年呈現約23-27 mm下沉量。



- 將本研究估算之測站地表垂直變動速率與全球衛星定位系統 (GPS) 連續觀測成果 [Ching *et al.*, 2011] 非常一致。兩成果間差異量平均值為 3 mm/yr ，此差異量可能為資料涵蓋時間範圍不同以及資料參考原點不一致所造成的差異。
- 臺灣附近海域海水面變化主要呈現上升現象，而海面上升速率由北向南遞增，表示臺灣南方海域的海水面變化速率較臺灣北部快。由 AVISO 與 RADs 衛星測高資料估算台灣周圍海域近二十年的絕對海水面化速率分別為 $5.23 \pm 0.31 \text{ mm/yr}$ 與 $4.43 \pm 0.31 \text{ mm/yr}$ 。

- 台灣周圍海域近二十年 (1993-2012) 之絕對海水面變化與比容海水面變化在年週期到多年週期訊號上呈現高相關 (相關係數 ≥ 0.9)。相較於絕對海水面持續上升，近二十年之比容海水面變化速率雖然亦持續在上升，但從 2008 年台灣周圍比容海面上升速率已開始減緩。
- 比較台灣周圍海域近十年 (2003-2012) 衛星測高絕對海水面變化、重力反演和氣候實驗 (GRACE) 重力衛星海水質量、溫鹽比容海平面變化得知，近十年比容海平面與海洋質量速率亦持續上升，兩者分別約占海面上升的 30%~40% 與 25%，但仍有 40%~50% 的海水面變化速率無法解釋，可能為深海比容海水面變化 [Boe' *et al.*, 2009] 和重力反演和氣候實驗 (GRACE) 之冰後回彈模型之誤差 [Chambers *et al.*, 2010] 所造成。

■ 建議：

本計畫利用近二十年衛星測高與潮位站資料進行測站地表垂直變動和絕對海水面變化速率計算。然而若採用時間段較短的資料，海水面變動將可能受到低頻海洋訊號影響。故展望未來工作將探討低頻震盪與台灣周遭之海水位變化的關係，對於十年與二十年海水面變化速率之分析將更為精確，將更能掌握未來台灣地區附近海域水位昇降變動之情形，進而預估未來海水面變化趨勢。

