

# 112 年度融合多元感測成果 精進臺灣高程基準委託研究

## 成果報告

Refining Taiwan Vertical Datum by Integrating  
Multi-Sensing Results in 2023

內政部國土測繪中心委託研究

中華民國 112 年 11 月

(本報告內容及建議，純屬研究小組意見，不代表本機關意見)

# 112 年度融合多元感測成果 精進臺灣高程基準委託研究

## 成果報告

Refining Taiwan Vertical Datum by Integrating  
Multi-Sensing Results in 2023

受委託單位：國立成功大學

研究主持人：郭重言

研究期程：中華民國 112 年 2 月至 112 年 10 月

研究經費：新臺幣 72 萬元

內政部國土測繪中心委託研究

中華民國 112 年 11 月

(本報告內容及建議，純屬研究小組意見，不代表本機關意見)

## 摘要

臺灣採用正高高程系統，係利用 1957 年至 1991 年基隆潮位站資料計算求得之平均海水位(mean sea level)，此系統命名為 2001 臺灣高程基準 (TaiWan Vertical Datum 2001, TWVD 2001)，並以水準原點 K999 作為起算點、K998 為副點。然而，民國 99 年副點 K998 滅失，且周圍環境已無法滿足地質穩固之需求。民國 103 年內政部同意將水準原點遷至新建置之水準原點 K997，同時間在附近建置長潭里潮位站和全球導航衛星系統 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 連續觀測站，該潮位站之平均海水位可作為日後水準零點，以利後續建置一正高高程系統。本計畫評估基隆和長潭里潮位站資料品質後，使用 1991 年後近 30 年基隆潮位站水位資料，計算不同時期平均海水位，分析與 TWVD2001 水準零點差異之變化；亦考慮長潭里潮位資料之節點潮、逆氣壓、基準偏移影響，計算平均海水位求得水準零點，再結合水準零點和歷年水準檢測成果重新計算 K997 高程，來研議由 K997 研訂臺灣高程系統的可行性。此外，本計畫亦利用 GNSS 連續觀測量計算長潭里潮位站之地表垂直變動量，分析其周圍地質是否穩固。最後結合長潭里潮位站、GNSS 觀測量和波形重定衛星測高資料，分析對平均海水位和正高高程系統的影響。成果顯示四種方法(算術平均法、調和分析法、六參數擬合及多參數線性擬合)計算之 2004-2022 年(時間中點 2013.5)基隆平均海水位平均值高於 TWVD2001 水準零點約 67.3 mm，故現今基隆平均海水位與 TWVD2001 水準零點已有顯著差異變化，建議邀請專家進行討論研議水準零點差異之影響。而計算之 2015-2022 年(時間中點 2019.15)長潭里平均海水位高於

TWVD2001 水準零點為 121.0 mm，和利用基隆潮位站資料推估時間中點 2019.15 之平均海水位(82.0 mm)有 39.0 mm 差異，即分別利用兩水準零點計算之 K997 正高會有 39.0 mm 差異，其差值可能是長潭里潮位站資料涵蓋時間較短且資料品質較差、兩潮位站海水面地形不同、基隆潮位站參考基準未釐清等所致。最後，本案進行 2015~2023 長潭里 GNSS 資料精密單點定位解算，成果呈現長潭里 GNSS 地表高程變化速率為  $0.3\pm 0.1$  mm/yr，顯示長潭里潮位站周圍地表穩定平穩。

**關鍵詞:** 正高、平均海水位、水準原點、潮位站、GNSS、衛星測高

## Abstract

The vertical datum adopted by Taiwan is orthometric height, which is based on the mean sea level derived from Keelung tide gauge records covering from 1957 to 1991. This datum is named the TaiWan Vertical Datum 2001(TWVD 2001) and the original benchmark is K999, with the associate datum benchmark designed as K998. However, K998 was lost in 2010, and the surrounding environment no longer meets the requirements for geological stability. In 2014, the Ministry of the Interior consented to move the original benchmark to the newly established K997. Concurrently, a tide gauge station and a continuously operating Global Navigation Satellite System (GNSS) station were instituted at Changtan Village, proximate to K997. The mean sea level derived from this tide gauge can serve as a future reference (zero level) for establishing a subsequent orthometric height system. The project evaluates the data quality of Keelung and Changtan tide gauge records. The Keelung tide gauge records covering the past 30 years after 1991 were used to calculate the mean sea level at different time spans, and then we analyze the differences compared to the TWVD2001 original benchmark. Additionally, this project also considers the effects of nodal tide, inverse barometer, and datum offset on the Changtan tide gauge data, and calculate the mean sea level to obtain the zero level, which was combined with the leveling results to recalculate the new K997 orthometric height, and to discuss the feasibility of the establishment of Taiwan vertical datum using K997 as the original benchmark. Furthermore, the project also uses GNSS continuous observation data to calculate the vertical motion of the Changtan tide gauge and analyzes whether the surrounding geological environment is stable. Finally, in this project we combine the data from the Changtan tide gauge, GNSS observations, and waveform retracked satellite altimetry data to analyze the impact on the determination of mean sea level and the orthometric height system.

The results indicate that the mean sea surfaces in Keelung, as calculated by four different algorithms (arithmetic mean, harmonic analysis, six-parameter linear regression, multiple-variable linear regression) using tide gauge records from 2004 to 2022 (midpoint in time being 2013.5), are approximately 67.3 mm above the TWVD2001 zero level. It is recommended to invite experts to discuss and study the impacts of these discrepancies of the zero levels. The computed mean sea surface at Changtan tide gauge from 2015 to 2022 (midpoint in time being 2019.15) is 121.0 mm higher than the zero level of TWVD2001. Compared to the estimated mean sea level of 82.0 mm at the Keelung tide station for the same midpoint in time, a discrepancy of approximately 39.0 mm is observed, reflecting a similar variance in the computed elevations of K997 when using different zero levels. The discrepancy may be due to several factors such as the shorter time span and lower quality of the Changtan tide gauge records, variations in sea surface topographies between the two tide gauge

stations, and unclarified reference datum for the Keelung tide gauge station. Lastly, this study conducted precise point positioning solutions for GNSS at Changtan Village from 2015 to 2023. The findings show a vertical land motion rate of  $0.3\pm 0.1$  mm/yr, according to Changtan's GNSS observations, suggesting a consistent and stable surface elevation surrounding the Changtan tide gauge station.

**Keywords:** Orthometric height, mean sea level, original benchmark, tide gauge, GNSS, satellite altimetry.

# 目錄

摘要 .....	I
ABSTRACT .....	III
目錄 .....	V
表目錄 .....	VI
圖目錄 .....	VII
一、研究主旨 .....	1
二、進度及品質控管 .....	2
三、作業說明和文獻回顧 .....	4
四、研究說明 .....	14
五、研究成果 .....	33
六、成果結論和建議事項 .....	54
參考文獻 .....	58
附錄一、機關需求 .....	61
附錄二、期中報告審查意見及意見回覆 .....	63
附錄三、期末報告審查意見及意見回覆 .....	65

## 表目錄

表 2-1 預期和實際研究進度及工作項目 .....	3
表 4-1 本案使用之潮位站資訊 .....	15
表 4-2 各測高衛星對應之時間序列範圍 .....	18
表 4-3 AVISO 提供 X-TRACK 測高資料中各項任務時間資訊 .....	18
表 4-4 依據平衡潮理論推導 8 個主要分潮之節點參數 .....	28
表 5-1 各衛星測高月平均海水位變化與基隆潮位站資料比較 .....	41
表 5-2 四種方法計算之基隆潮位站平均海水位高 .....	46
表 5-3 多參數擬合法計算之基隆潮位站參數成果與顯著性測試 .....	47
表 5-4 多參數擬合法計算之長潭里潮位站參數成果與顯著性測試 .....	49
表 5-5 四種方法計算之長潭里潮位站平均海水位高 .....	50



## 圖目錄

圖 3-1 高程基準網檢測路線 .....	6
圖 3-2 衛星測高任務時序圖 .....	7
圖 3-3 當時水準原點和社寮島潮位站於臺灣堡圖位置 .....	10
圖 3-4 測高波形示意圖 .....	11
圖 3-5 波形重定原理示意圖 .....	11
圖 4-1 基隆原始潮位站水位紀錄 .....	15
圖 4-2 臺灣深度基準系統使用之 33 個潮位站位置分佈圖 .....	16
圖 4-3 ESA 沿海海水面產品覆蓋區域範圍圖 .....	18
圖 4-4 基隆氣象觀測站之逐時平均海表面氣壓資料與 ERA5 模型氣壓資料 比較 .....	20
圖 4-5 基隆氣象觀測站之逐時平均氣溫資料 .....	20
圖 4-6 基隆氣象觀測站之逐時降水量資料 .....	21
圖 4-7 逐時新竹潮位站資料之偏移量偵測 .....	23
圖 4-8 原始基隆潮位站資料分別和龍洞及麟山鼻潮位站資料相比較 .....	23
圖 4-9 逆氣壓效應改正後之基隆潮位站資料 .....	25
圖 4-10 K021 水準點相對於水準原點 K999 之高程差變化圖 .....	26
圖 4-11 基隆潮位站資料之地表垂直變動改正 .....	27
圖 4-12 本計畫研究流程圖 .....	32
圖 5-1 基隆海水位變化 .....	34

圖 5-2 各項改正前、後基隆潮位站月平均海水位變化.....	35
圖 5-3 基隆潮位站和衛星測高資料比較.....	35
圖 5-4 長潭里潮位站水位變化.....	37
圖 5-5 長潭里潮位站音波式和壓力式觀測資料之調和分析擬合結果 .....	38
圖 5-6 長潭里潮位站之壓力式和音波式差值計算.....	39
圖 5-7 長潭里潮位站參考點和鄰近新水準原點之地表垂直變動量.....	39
圖 5-8 長基隆潮位站和衛星測高資料比較.....	41
圖 5-9 長潭里潮位站和衛星測高資料比較.....	43
圖 5-10 四種方法計算之平均海水位高.....	43
圖 5-11 長潭里 GNSS 解以及擬合斜率.....	50
圖 5-12 水準零點、原水準原點、新水準原點、長潭里潮位站參考點以及 2019.15 年基隆和長潭里平均海水位間高程差關係圖.....	53

## 一、研究主旨

臺灣採用之正高高程系統，係利用 1957 年至 1991 年基隆潮位站資料計算求得之平均海水位(mean sea level)，此系統命名為 2001 臺灣高程基準 (TaiWan Vertical Datum 2001, TWVD 2001)，並以水準原點 K999 作為起算點、K998 為副點。然而，民國 99 年副點 K998 滅失，且周圍環境已無法滿足地質穩固之需求。民國 103 年內政部同意將水準原點遷至新建置之水準原點 K997，同時間在附近建置長潭里潮位站和全球導航衛星系統 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 連續觀測站，該潮位站之平均海水位預期可作為日後水準零點，以利後續建置一正高高程系統。本計畫將評估基隆和長潭里潮位站資料品質，並使用 1991 年後近 30 年基隆潮位站水位資料，計算不同時期平均海水位高，分析與 TWVD2001 水準零點差異之變化。另外本計畫將考慮長潭里潮位資料之節點潮、逆氣壓、基準偏移影響，計算平均海水位求得水準零點，再結合水準零點和歷年水準檢測成果重新計算 K997 高程，來研議由 K997 研訂臺灣高程系統的可行性。此外，本計畫亦利用 GNSS 連續觀測量計算長潭里潮位站之地表垂直變動量，分析其周圍地質是否穩固。最後結合長潭里潮位站、GNSS 觀測量和波形重定衛星測高資料，分析對平均海水位和正高高程系統的影響。綜合而言，本案有兩重要主旨：1.重新計算基隆潮位站水準零點，評估水準零點變動量；2. 計算長潭里潮位站水準零點後，結合水準高程差計算 K997 高程，評估長潭里潮位站作為台灣正高基準水準零點之可能性。

## 二、進度及品質控管

本計畫工作項目之時程規劃和完成進度如表 2-1 甘特圖所示，期末報告已按照規劃進度如期如質完成。本案中潮位站紀錄、衛星測高以及氣象模型等資料皆會與當地或是鄰近觀測站資料相互比對，進行資料檢核，確保資料準確及一致性。此外，本案的主要工作項目為計算長期平均海水位高，而本案將使用四種方式(算術平均法、調和分析法、六參數擬合及多參數線性擬合[劉啟清，1998])分別進行計算平均海水位高並互相比較分析，以提高成果品質和一致性。最後，本案各階段完成後皆需要撰寫期中或期末研究報告，並國土測繪中心會邀請國內專家學者進行審核，提供專業建議，以確保本計畫各項成果之品質。

表 2-1 預期和實際研究進度及工作項目

月次 工作項目	第 1 個月	第 2 個月	第 3 個月	第 4 個月	第 5 個月	第 6 個月	第 7 個月	第 8 個月	第 9 個月	備 註
使用近 30 年基隆潮位站潮位資料，分析 TWVD2001 是否已有差異性變化，並加入衛星測高資料後，分析對高程系統的影響										
研議由 K997 研訂臺灣高程系統的可行性										
作業計畫書										
期中研究報告										
期末研究報告										
預定進度 (累積數)	12%	24%	36%	48%	60%	72%	84%	96%	100%	
	<p>說明：1 工作項目請視計畫性質及需要自行訂定，預定研究進度以粗線表示其起訖日期。</p> <p>2 預定研究進度百分比一欄，係為配合追蹤考核作業所設計。請以每 1 小格粗組線為 1 分，統計求得本計畫之總分，再將各月份工作項目之累積得分(與之前各月加總)除以總分，即為各月份之預定進度。</p> <p>3 科技計畫請註明查核點，作為每 1 季所預定完成工作項目之查核依據。</p>									

預期: 

實際: 

### 三、作業說明和文獻回顧

#### (一)、研究背景

臺灣水準點之高程採用正高系統，其水準零點係定義在 1990 年 1 月 1 日標準大氣環境情況下，由基隆潮位站 1957 年至 1991 年之潮位資料計算求得之平均海水位(mean sea level)，並命名為 2001 臺灣高程基準 (TaiWan Vertical Datum 2001，簡稱 TWVD 2001)。TWVD2001 是以水準原點(datum benchmark) K999 作為起算點，所謂水準原點是國土測繪法規定地表高程(俗稱海拔高度)之起算原點 [史天元，2016]。為配合基隆港東岸聯外道路工程興建，民國 103 年於內政部同意下將臺灣水準原點遷移至國立海洋科技博物館對面的公園綠地，點號 K997 為主點，屬地下點位，點號 K996 為副點，屬地面點位，仍是雙水準原點設計；原水準原點主點 K999 樁位原地保留，原水準原點副點 K998 則已拆遷 [史天元，2016；國土測繪中心，2022]，並同時時間在新水準原點 K997 附近建置一新潮位站(長潭里潮位站)，潮位站水準點為 TG997，該潮位站資料計算之平均海水位可作為日後水準零點，以利後續建置一新正高高程系統。

傳統上水準測量是以平均海水位作為水準零點，因為長期海水面高平均值和重力等位面大致吻合[劉啟清，1998]，亦為一個長期穩定之參考面。若潮位站位於岩盤穩固之處，且潮位站紀錄涵蓋足夠的時間長度 (>18.6 年)，直接平均潮位資料將能消除各項影響海水面的地球物理因子，求得一穩定的平均海水位，以作為正高高程系統之水準零點。劉啟清[1998]在考量長周期如海面上升以及溫度、壓力、降水量等多項因素影響下，利用回歸模式計算 1990 年 1 月 1 日之平

均海水位，而非算術平均潮位資料求得平均海水位。內政部於民國九十年公布 TWVD2001 高程系統，近年來由於板塊變動、超抽地下水以及海水面上升等物理現象，至今基隆潮位站之平均海水位與 TWVD2001 水準零點是否已有差異性變化，乃是高程基準的重要課題，故本計畫將使用 1991 年後近 30 年基隆潮位站潮位資料，分析 TWVD2001 是否已有差異性變化，並加入衛星測高資料後，分析對高程系統的影響。

新水準原點位於國立海洋科技博物館對面的公園綠地上，周圍環境具有交通便利、視野開闊、地質穩固等特性，適合作為正高高程系統之水準原點。然而，目前新水準原點 K997 正高高程仍由 K999 聯測獲得，主要原因為之前長潭里潮位站紀錄時間較短，求得之平均海水位高易受到低頻訊號等因子影響。圖 3-1 為潮位站水準點和水準原點檢測路線。現階段長潭里潮位站資料涵蓋時間長度約有 8 年，潮位資料經由改正後，如節點潮(nodal tide)和大氣壓力改正，可利用調和分析法(harmonic analysis method)降低低頻訊號影響。本計畫將運用長潭里潮位站資料並加入衛星測高資料及 GNSS 連續站衛星測量等資料，獲得 K997 高程，進而評估由 K997 研訂臺灣高程系統的可行性。

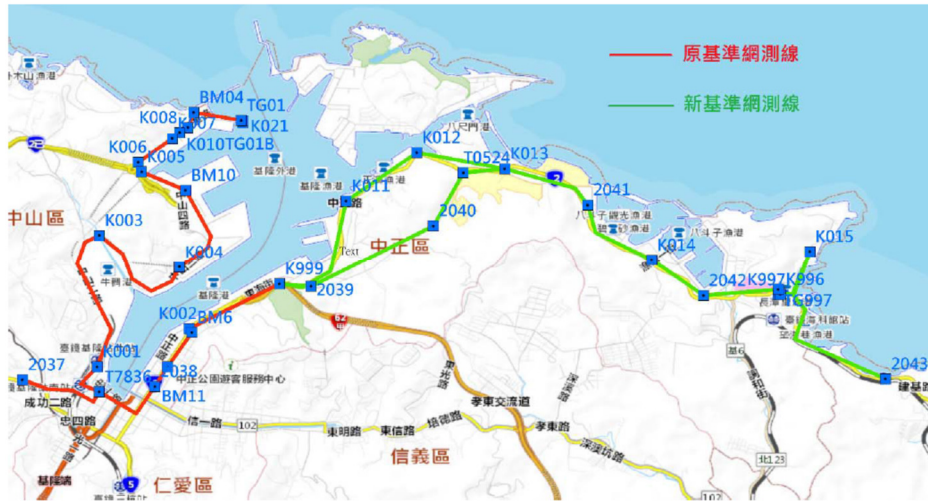


圖 3-1 高程基準網檢測路線[國土測繪中心，2022]。

然而，近年來全球暖化導致海面上升，並且由於臺灣本島位於菲律賓海板塊及歐亞板塊交界處及超抽地下水等因素影響，臺灣地表垂直變動非常嚴重 [Ching et al., 2011]，因此應分析不同時期基隆潮位平均海水位差異量，並且利用全球導航衛星系統(Global Navigation Satellite System, GNSS)觀測量分析潮位站之高程變動，並與歷年高程基準網檢測資料比較。

20 世紀初觀測海水面主要是利用潮位站進行監測，然而潮位站資料主要僅能監測沿岸水位變化，且資料含有基準點的地表垂直變動訊號、位置分佈不平均、觀測時間長短不一致等問題[郭重言等人，2015]。自 1990 年代以來，衛星測高已被證明是一種革命性地球環境監測技術，可應用於海水面監測、海面平均波浪高度及潮位模式(ocean tide model)等領域。衛星測高是以人造衛星做為載具，配合微波脈衝、電子和光電等高科技測量技術，量測衛星至反射面之距離，目前測高衛星技術發展為 ERS-1 (ERS1)、Topex/Poseidon (TP)、ERS-2 (ERS2)、Geosat Follow on (GFO)、Jason-1/2/3 (J1/2/3)、Envisat (ENV)、Cryosat-2、SARAL/AltiKa (SRL)、Sentinel-3 等多顆衛星，相關測高衛星時序如圖 3-2 所示，其中 TP 為第



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，量測海水面高度之精度約為 5 公分[Shum et al., 1995; 郭重言等人, 2015]; 而 Jason-1/-2/-3 衛星為後續接替衛星(圖 3-2)，每一秒平均海水面高度觀測量精度可達±4.2 公分[AVISO and PODAAC, 2001; 郭重言等人, 2015]。因此可分析加入衛星測高資料後，對平均海水位和正高高程系統的影響。

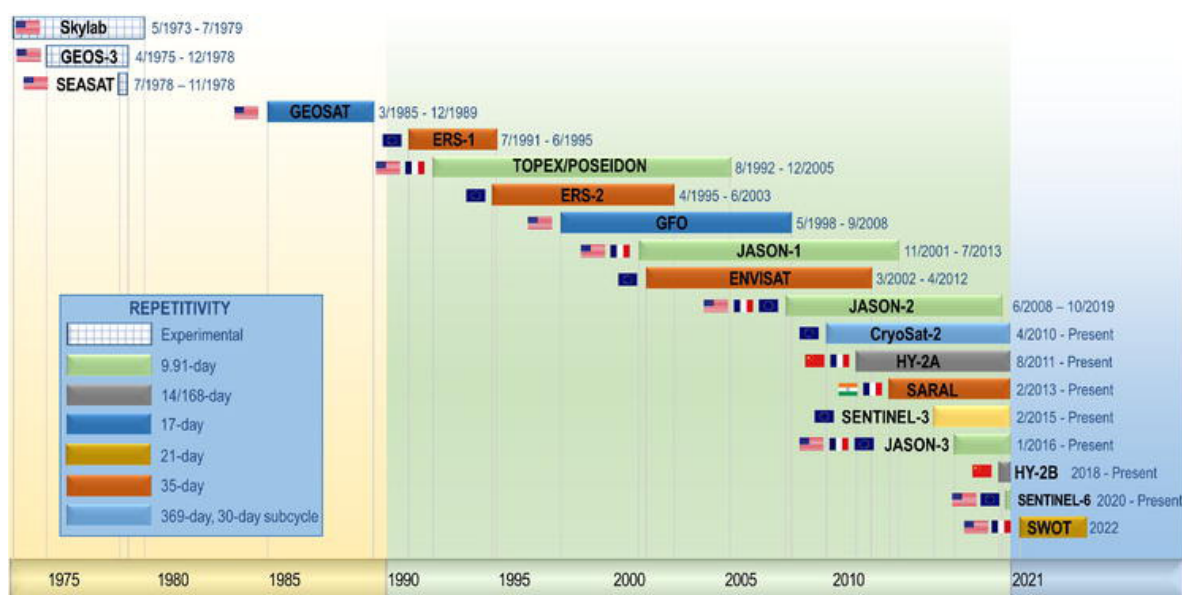


圖 3-2 衛星測高任務時序圖[Grgić and Bašić, 2021]。

## (二)、研究目的

本計畫將評估基隆和長潭里潮位站資料品質，並使用 1991 年後近 30 年基隆潮位站水位資料，計算不同時期平均海水位高，分析 TWVD2001 水準零點是否已有差異性變化，並加入衛星測高資料後，分析對正高高程系統的影響。另外亦將利用長潭里潮位站資料計算平均海水位高，為避免低頻訊號影響，將考慮節點潮(nodal tide)等因素影響量，求得一穩定平均海水位高，再結合高程基準檢測資料(圖 3-1)重新計算新 K997 正高高程，再與歷年以水準測量方式，由 K999 聯測而得之高程做比較分析，以分析 K997 是否適合作為新一代正高高程水準原

點。最後利用 GNSS 連續觀測量計算長潭里潮位站之地表垂直變動量，再與歷年水準測量結果進行比較，分析其周圍地質是否穩固。

### (三)、本研究計畫之重要性

由水準原點發展成全臺灣水準網系統，可提供一個完整且一致的正高高程系統，這是對於基礎建設具有相當大貢獻[史天元，2016]。內政部於民國九十年公布 TWVD2001 高程系統，近年來由於板塊變動、超抽地下水以及海水面上升等物理現象，至今基隆潮位站之平均海水位與 TWVD2001 水準零點是否已有差異性變化，乃是高程基準的重要課題，若水準零點已有巨大變化，將造成各種公共基礎建設的設計和建造問題。而新水準原點 K997 周圍環境具有交通便利、視野開闊、地質穩固等特性，適合作為高程系統之基準原點，目前 K997 高程由 K999 聯測求得。內政部已於新水準原點附近建置長潭里潮位站和 GNSS 連續觀測站，本計畫將評估長潭里潮位站資料並加入衛星測高資料及 GNSS 連續站衛星測量等資料，由 K997 訂定臺灣高程系統的可行性，以因應台灣未來經濟建設及智慧城市之需求。

#### (四)、相關研究

##### 1. 基隆臺灣水準原點發展

臺灣的科學化高程測量始於日據時代(1898-1945)，最早水準測量是由當時的土地調查局辦理，全臺灣水準測量始於 1902 年，隔年 12 月結束，並於 3 個月後完成內業計算作業，該正高高程系統是以基隆社寮島(和平島)潮位站資料來計算水準零點，而當時的水準原點是位於當時基隆大沙灣的築城部基隆支部(現在中正路和祥豐街附近)內[史天元，2016]，當時水準原點和社寮島潮位站相對位置如圖 3-3 所示。臺灣光復之後，中華民國政府分別於民國 64 年(1975)和 73 年(1984)進行全臺灣環島水準測量，其中基隆港潮位站平均海水位設置為正高高程水準零點，而水準原點設置在基隆港的海門公園內[史天元，2016]。而後由於原點佚失，內政部於民國 91 年復設於海門公園[史天元，2016]，該點標號為 K999，其副點標號為 K998。隨著時代進程，民國 99 年設置副點 K998 已遺失，而水準原點 K999 雖然尚在，但是原點所需穩固之需求已無法滿足[史天元，2016]，因此民國 103 年水準原點遷至海洋科技博物館，該點標號為 K997，其副點標號為 K996。



圖 3-3 當時水準原點(紅色方框)和社寮島潮位站(紅色圓圈)於臺灣堡圖位置[史天元，2016]。

## 2. 衛星測高及波形重定

波形是衛星測高儀脈衝經觀測面反射後主要接收成果，用來反演海面高度、有效波高、海面風速等海洋學參數，為測高數據的根源。不同於廣闊的海洋地區，在近岸海域，因多變的地形起伏導致波形複雜化與各項地球物理改正之可靠性較低，因此測高儀無法獲得精確的近岸觀測量，需透過波形重定技術提升近岸測高資料之精度及數量。

測高波形是測高儀微波脈衝經觀測面反射，由自動增益系統(Automatic gain control, AGC)以離散方式接收，藉由機率密度函數將接收之反射能量組成時間序列的圖形，為測高儀波形(altimeter waveform)，可用來反演海面高度、有效波高、海面風速等海洋學參數(如圖 3-4 所示)。圖 3-4 為典型之海洋波形，測高波形主要由三部分組成，分別是熱雜訊區 (Thermal noise 或稱 DC level)、上升區或稱前緣區 (Leading edge) 及下降區 (Trailing edge)。

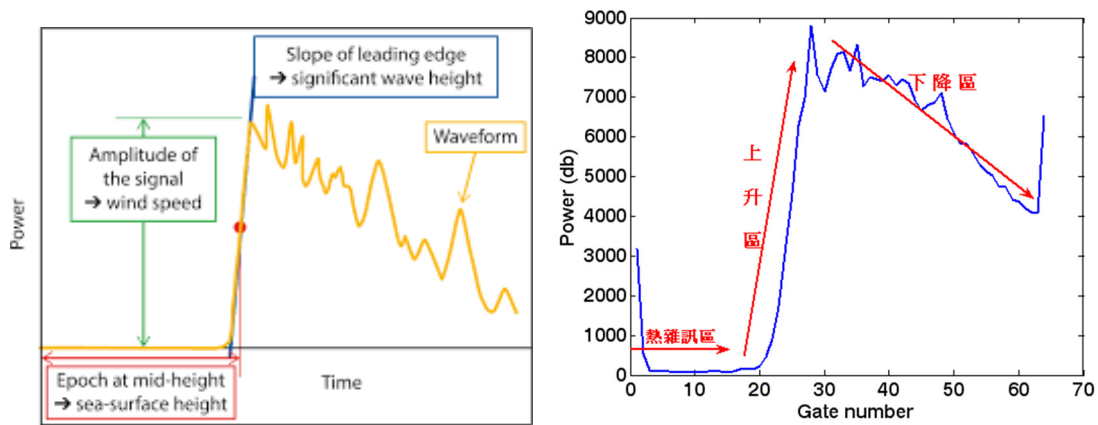


圖 3-4 測高波形示意圖。(左圖)測高波形與反演之地球物理參數示意圖[Credits: ECMWF]，(右圖)以 T/P 衛星深海波形為例[高煥欽, 2010]。

沿岸測高數據的退化，其中最重要的是沿海反射波形受陸地影響，導致與開闊海域反射波形不相符，容易造成距離誤差。測高波形會因觀測面的複雜性，使脈衝能量產生複雜反射情形，波形前緣中點並不一定位於衛星的預設閥門上，形成波形前緣中點偏移的現象，無法求得正確之距離，此時需要藉由波形重定 (waveform retracking) 重新找出正確之波形前緣中點，修正偏移量以得到正確之訊號往返時間，計算出實際距離(如圖 3-5)。

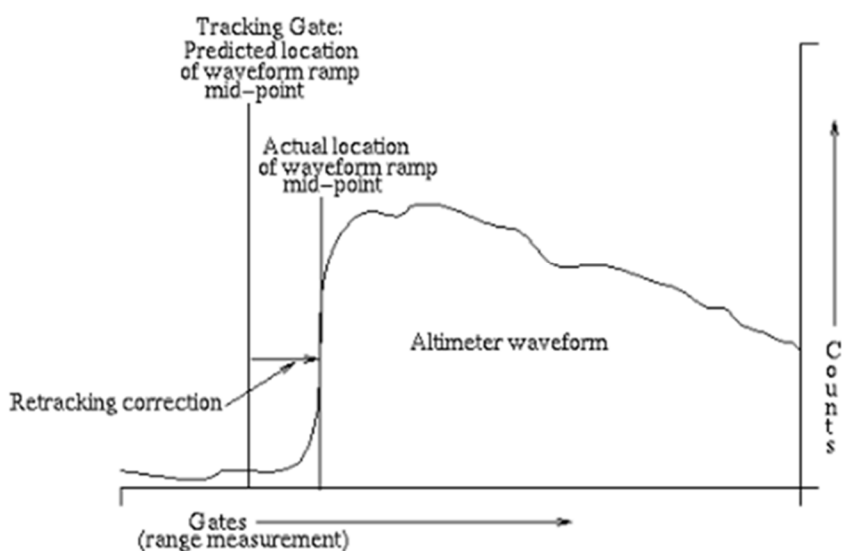


圖 3-5 波形重定原理示意圖[Credits: NASA/GSFC]。

波形重定求取之距離改正量 $\Delta R$ 係以重定後的前緣中點位置 (retracking gate,  $r_g$ )與預設閘門 (tracking gate,  $t_g$ )位置之差值，乘以閘門之間的間隔距離 (Spacing of the gate) 獲得。其中，閘門之間的間隔距離 $\Delta d$ ，可由式 3-1 求得，再得到距離改正量 $\Delta R$ ，公式如下[楊亭宜，2014]：

$$\Delta d = C \times \Delta G_a / 2 \quad (3-1)$$

$$\Delta R = (r_g - t_g) \Delta d \quad (3-2)$$

其中， $C$  為光速， $\Delta G_a$  為閘門時間間隔，如 T/P 衛星為 3.125ns，可得 $\Delta d=0.468$  m，由此可知，重定後的前緣中點位置若與預設閘門相差一個閘門，就有 0.468 m 的距離改正量。

近年來已開發許多針對沿海測高的波形重定演算法如根據波形形狀進行波形分類[Deng and Featherstone, 2006, Yang et al., 2012]、使用經驗參數和/或閾值來擬合波形[Hwang et al., 2006, Lee et al., 2010]、子波形萃取與計算[Guo et al., 2010, Mercier et al., 2009, Yang et al., 2012]等方式。然而，由於地形變化與監測環境的不同，波形重定演算法成果會隨研究時間和區域不同而有所差異，目前並無法以單一型式之演算法應用於世界各地之海域。

### 3. 台灣周圍海域海水面變化和地表垂直變動速率

以下將依據交通部港灣技術研究中心期末報告[郭重言等人，2015]說明台灣周圍海域海水面變化之內容。Zhan et al. [2009] 利用 14 年衛星測高資料估計黃海、東海、南海之海水面變化速率(+和-分別代表海水面上升和下降)分別為+3.91 mm/yr、+4.28 mm/yr、+3.49 mm/yr。Peng et al. [2013] 結合衛星測高資料與潮位

站資料進行南海海水面重建(sea level reconstruction)，1993-2009 衛星測高資料估計南海海水面變化速率為 $+3.9\pm 0.6$  mm/yr，而 1950-2009 南海海水面重建資料之海水面變化速率為 $+1.7\pm 0.1$  mm/yr。Tseng et al. [2010] 利用 1993-2003 年潮位站和測高資料計算臺灣附近海水面變化速率分別為 $+5.7$  mm/yr 和 $+5.3$  mm/yr，上升速率較全球海水面變化速率平均值來的大 ( $+3.2\pm 0.4$  mm/yr [Church and White, 2011])。Lan et al. [2017]利用衛星測高資料與 18 個潮位站資料估算台灣四周海水面變化速率，成果表示由衛星測高資料或潮位站估算 1993-2015 台灣附近周圍海域平均海水面變化速率皆為 $+2.2$  mm/yr，上升速率略低於全球海水面變化速率之平均值 $+3.2\pm 0.4$  mm/yr [Church and White, 2011]。此外，Lan et al. [2017]結合衛星測高與潮位站資料估算 1993-2015 測站地表垂直變動速率，成果顯示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 24-31 mm 下沉量。由上述文獻可知，台灣周圍海水面變化速率隨時間變化，皆呈現上升之趨勢；而臺灣地表垂直變動量各地盡皆不同，其中基隆潮位站地表垂直變動速率可由測繪中心提供歷年水準檢測成果確定。海面上升和地表變動皆會影響潮位站之平均海水位的求定。

## 四、研究說明

### (一)、研究資料

#### 1. 潮位站觀測紀錄

潮位站的海水面觀測量為相對於岸邊之基準點，該基準點會隨著地表變動而產生點位移動，因此潮位站觀測資料包含海水面變化和基準點所在地表周圍垂直變動之訊號，故潮位站水位觀測量又稱為相對(地表)海水面變化(relative sea leve change) [郭重言等人，2015]。若以潮位站資料計算平均海水位高時，需改正地殼變化速率、逆氣壓效應以及人為造成潮位資料基準不一致等情形。若潮位站時間涵蓋範圍未達 18.6 年，如長潭里潮位站，則還需考慮節點潮之影響，改正方式將在後續章節說明。

本計畫欲利用基隆和長潭里潮位站計算平均海水位高，上述兩潮位站資料可向中央氣象署申請，潮位站之詳細資訊如表 4-1 所示。基隆潮位站紀錄水位時間涵蓋範圍 1946-至今，其中包含 1212、1511、151、1514、1516 等五個站號，圖 4-1 顯示基隆原始潮位站水位紀錄。由圖可知，不同時期資料品質不一，測站 1212 於 1970 年附近可明顯看出資料缺漏(data gap)，而測站 1514 於 2016-2017 年資料可能有記錄錯誤或基準偏移等問題，因此在利用基隆和長潭里潮位站資料進行後續計算前需先進行資料品質管理，分析時將結合基隆和長潭里附近潮位站進行比較，因此亦向中央氣象署申請龍洞和麟山鼻潮位站水位紀錄(表 4-1 和圖 4-2)。另外，長潭里潮位站分別利用壓力式(12195)、音波式(12191)、雷達式(12197)等儀器進行潮位觀測，氣象署大多採用音波式潮位資料，本計畫將比



較三種觀測資料，並將三種資料與鄰近潮位站資料比較，最後採用品質最好的觀測資料。

表 4-1 本案使用之潮位站資訊

Ch.	Station name		Station ID.	Lon(°)	Lat(°)	Data period
	Eng.	Abbr.				
基隆	Keelung	KL	1212	121.7	25.1	1946-1990
			1511	121.7	25.2	1991-1995
			151	121.7	25.2	1995-2000
			1514	X	X	2003-2016
			1516	121.8	25.2	2006-now
長潭里	Changtan Village	CTV	12191	121.8	25.1	2015-now
			12195	121.8	25.1	2015-2023
			12197	121.8	25.1	2015-2022
龍洞	Longdong	LD	1226	121.9	25.1	2001-now
麟山鼻	Linshanbi	LSB	120	121.5	25.3	1999-2002
			1206	121.5	25.3	2003-now

X:表示原始資料中未提供該項資訊

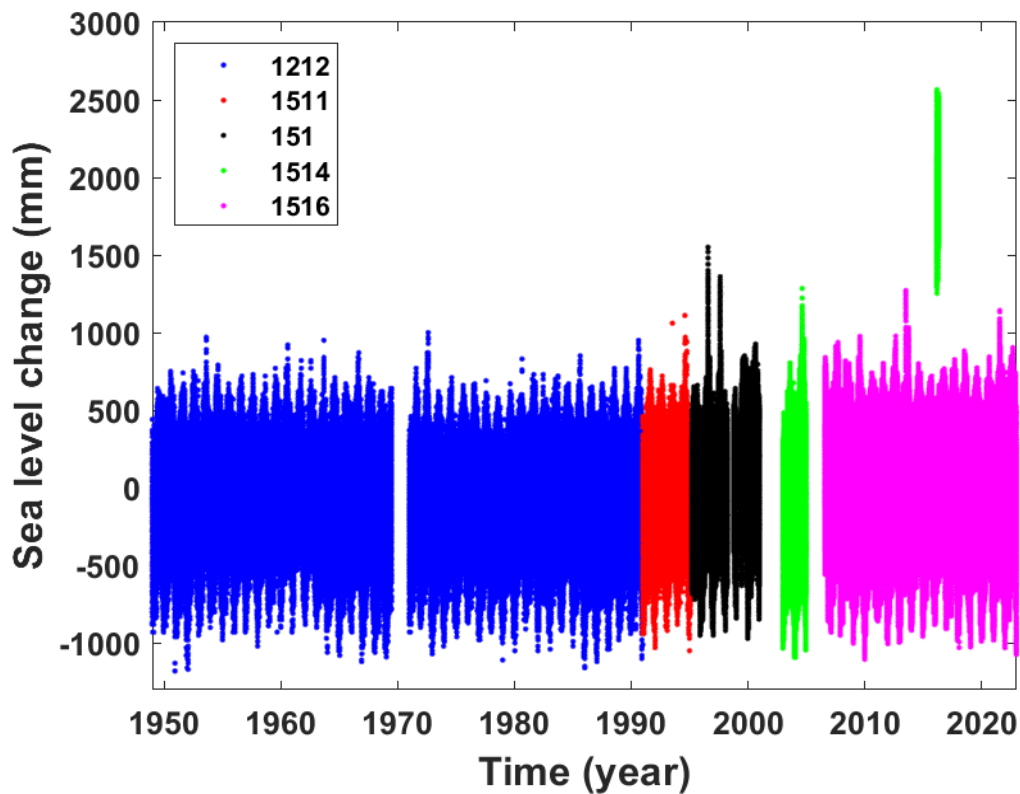


圖 4-1 基隆原始潮位站水位紀錄。

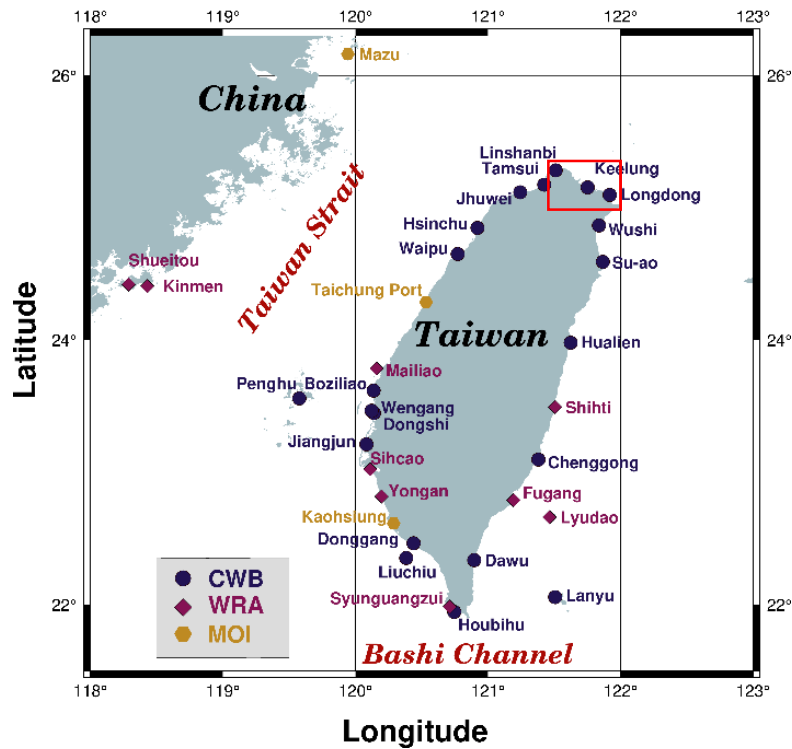


圖 4-2 臺灣深度基準系統使用之 33 個潮位站位置分佈圖[內政部，2021]。紅框為基隆、龍洞和麟山鼻等潮位站分布之區域。

## 2. 衛星測高近岸資料

測高衛星主要設計是用於觀測全球海水面高，進行海洋科學之研究，其優點為觀測範圍涵蓋近乎全球，然而近岸部分測高衛星會受到地形及環境影響，易接收到較為複雜的波形訊號，在資料處理中易被剔除，導致近岸之測高資料較少、觀測精度較低 [Illiffe et al., 2013]。本研究分別自國衛星海洋數據存檔、驗正與解釋 (Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic, AVISO) 資料中心 (<https://www.aviso.altimetry.fr/>) 和歐洲太空總署 ESA Sea Level Climate Change Initiative 計畫中 (<https://catalogue.ceda.ac.uk>) 下載 X-TRACK 沿軌跡點 (along-track) 海水面異常 (sea level anomaly) 資料、Gridded sea level heights、Altimeter along-track high resolution sea level anomalies in some coastal regions 等

產品，三個測高產品時間分別涵蓋 29 年(1993/03-2022/04)、29 年(1993/01-2022/07) 和 17 年(2002-2018)。AVISO 產品為 1 Hz 沿軌跡點  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$  全球網格海水面 變化，產品中包含 TP、TP interleaved、J1、J1 interleaved、J2、J2 interleaved、 J3、GFO、ENV、ERS1、ERS2、SRL、HaiYang-2A (HY-2A)及 Sentinel-3A 等系 列，各測高衛星對應之時間序列範圍如表 4-2，其沿軌跡點資料之點位間距為 6- 7 km，AVISO X-TRACK 將各測高任務整理不同系列資料，各項系列時間資訊如 表 4-3，後續將使用時間段超過 10 年 X-TRACK 系列資料進行比較;ESA 產品為 20 Hz 沿軌跡點海水面變化，產品包含 J1 (2002/01-2008/07)、J2 (2008/07-2016/02)、 J3 (2016/02-2018/05)等測高衛星系列，其軌跡點間距離 300 m。

ESA 產品是結合高取樣率、自適應前緣子波形波形重定技術 (Adaptive Leading Edge Subwaveform retracker, ALES)及沿軌跡點後處理演算法(X-TRACK) 並利用多種校正方法和過濾技術來排除不確定性和雜訊，提升沿海測高觀測數 據之品質，資料範圍涵蓋了全球大部分的沿海地區(東北大西洋、地中海、西非、 北印度洋、東南亞和澳大利亞)，針對這些沿海區域(圖 4-3 中紅框覆蓋區域)提 供更為詳細的海水面變化資訊。本計畫使用的三種測高資料均已進行儀器改正、 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)。本研究後續將分別自 AVISO 和 ESA 網站下載台灣基隆附近衛星測高 沿岸資料(圖 4-3)，並與基隆和長潭里潮位站資料相比較，評估兩觀測技術之資 料是否一致。

表 4-2 各測高衛星對應之時間序列範圍

Mission	Start	End
TP + J1/2/3	1993/02/28 (cycle 17 of TP)	2021/07/13 (cycle 199 of J3)
ERS1 + ERS2 + ENV + SRL	1992/10/23 (cycle 89 of ERS1)	2016/04/16 (cycle 32 of SRL)
GFO	2000/01/08 (cycle 37)	2008/09/08 (cycle 222)
TP interleaved+J1 interleaved	2002/09/20 (cycle 369 of TP)	2017/05/13 (cycle 327 of J2)
HY-2A	2014/04/12 (cycle 67)	2016/03/15 (cycle 119)
Sentinel-3A	2016/06/02 (cycle 5)	2022/03/08 (cycle 82)

表 4-3 AVISO 提供 X-TRACK 測高資料中各項任務時間資訊

Mission	Start	End
T/P + Jason-1 + Jason-2 + Jason-3	1993/02/28 (cycle 17 of T/P)	2022/04/07 (cycle 226 of Jason-3)
ERS-1 + ERS-2 + ENVISAT + SARAL	1992/10/23 (cycle 89 of ERS-1)	2016/04/16 (cycle 32 of SARAL)
GFO	2000/01/08 (cycle 37)	2008/09/08 (cycle 222)
T/P interleaved+Jason-1 interleaved	2002/09/20 (cycle 369 of T/P)	2017/05/13 (cycle 327 of Jason-2)
HY-2A	2014/04/12 (cycle 67)	2016/03/15 (cycle 119)
S3A	2016/03/12 (cycle 2)	2023/01/26 (cycle 94)

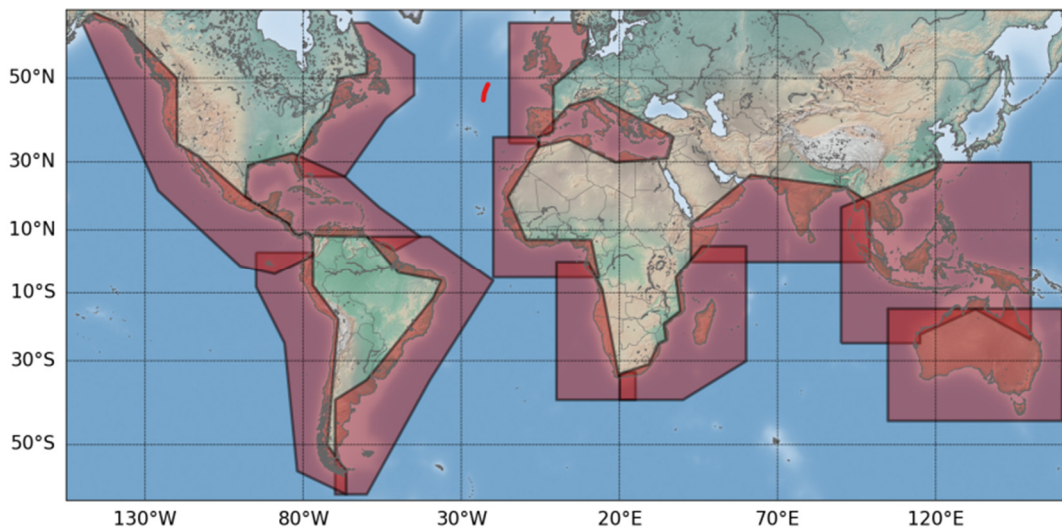


圖 4-3 ESA 沿海海水面產品覆蓋區域範圍圖[Cazenave et al., 2022]。

### 3. 降水量、溫度和海表面壓力資料

本研究後續需要改正潮位站資料之逆氣壓效應以及結合氣溫、壓力、降水量等資料計算平均海水位高，上述三項資料可選擇至氣象署網站(<https://e-service.cwb.gov.tw/HistoryDataQuery/>)下載基隆氣象站(站號 466940)觀測資料，氣象站海表面壓力(sea level pressure)、氣溫和降水量(total precipitation)等資料如圖 4-4~4-6 所示。由圖可知，基隆氣象觀測站海表面氣壓資料在 1998 年之前有較為嚴重的缺漏情形(圖 4-4)，而基隆氣象觀測站氣溫和降水量資料並無嚴重的缺漏情形(圖 4-5~4-6)，因此至歐盟 ESA 所產製全球氣候大氣再分析的第五代工具(ERA5)產品[Hersbach et al., 2018]下載海表面氣壓資料，並相互比較。該模型提供  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$  全球網格資料，時間涵蓋為 1940-至今，時間間隔為 1 小時，模型中亦包含降水量、溫度、風速、相對濕度等多參數資料。由比較結果可知，ERA5 模型海表面氣壓資料與基隆氣象觀測站資料相當一致，兩資料差值均方根誤差(Root Mean Square Error, RMSE)和標準偏差(Standard Deviation, STD)分別為 0.58 和 0.48 mbar，皆遠低於 1 mbar，表示該模型海表面氣壓資料於基隆地區相當準確。後續將利用 ERA5 模型海表面氣壓資料以及基隆氣象觀測站海表面氣溫和降水量資料進行平均海水位計算。

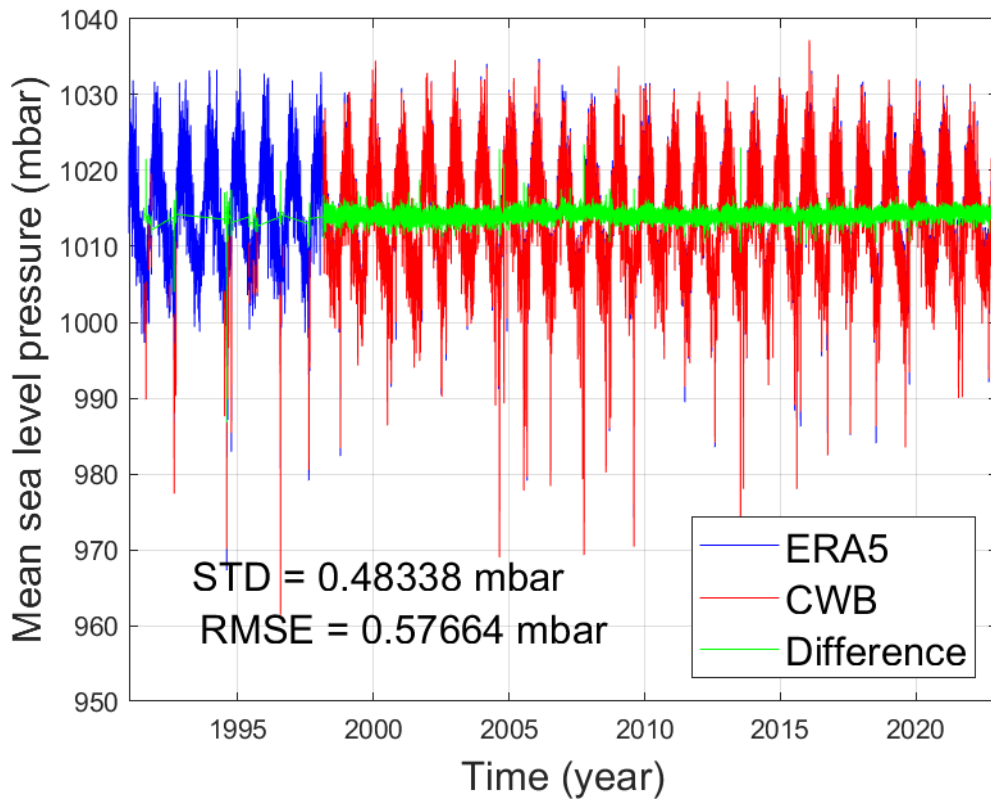


圖 4-4 基隆氣象觀測站之逐時平均海表面氣壓資料(紅線)與 ERA5 模型氣壓資料(藍線)比較。

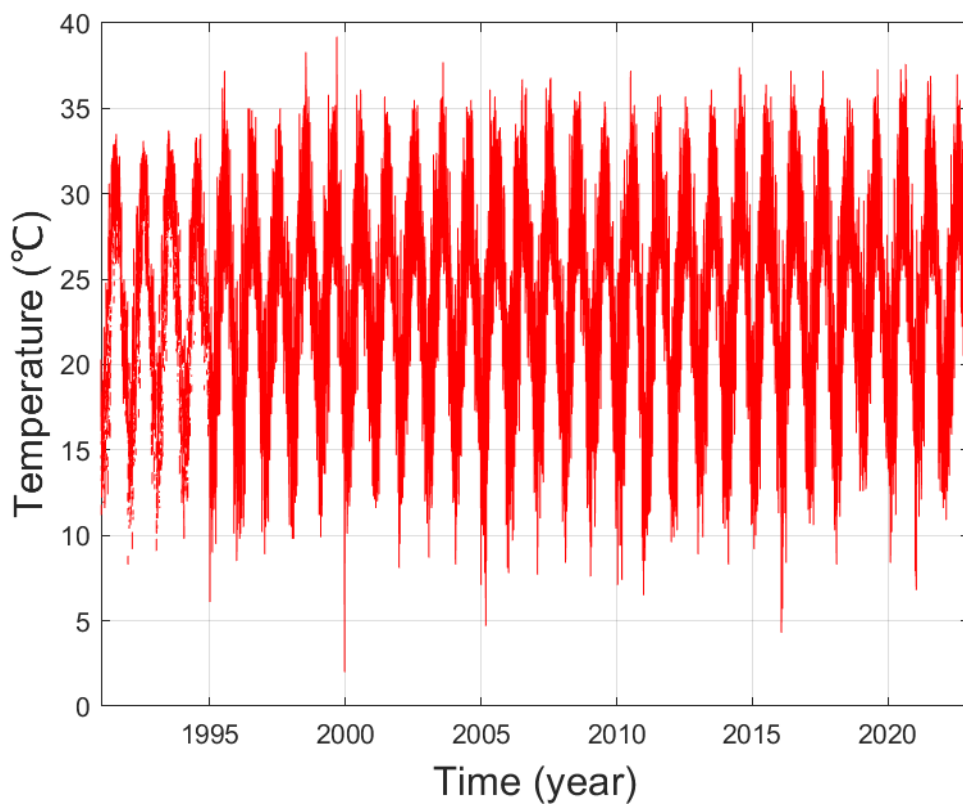


圖 4-5 基隆氣象觀測站之逐時平均氣溫資料。

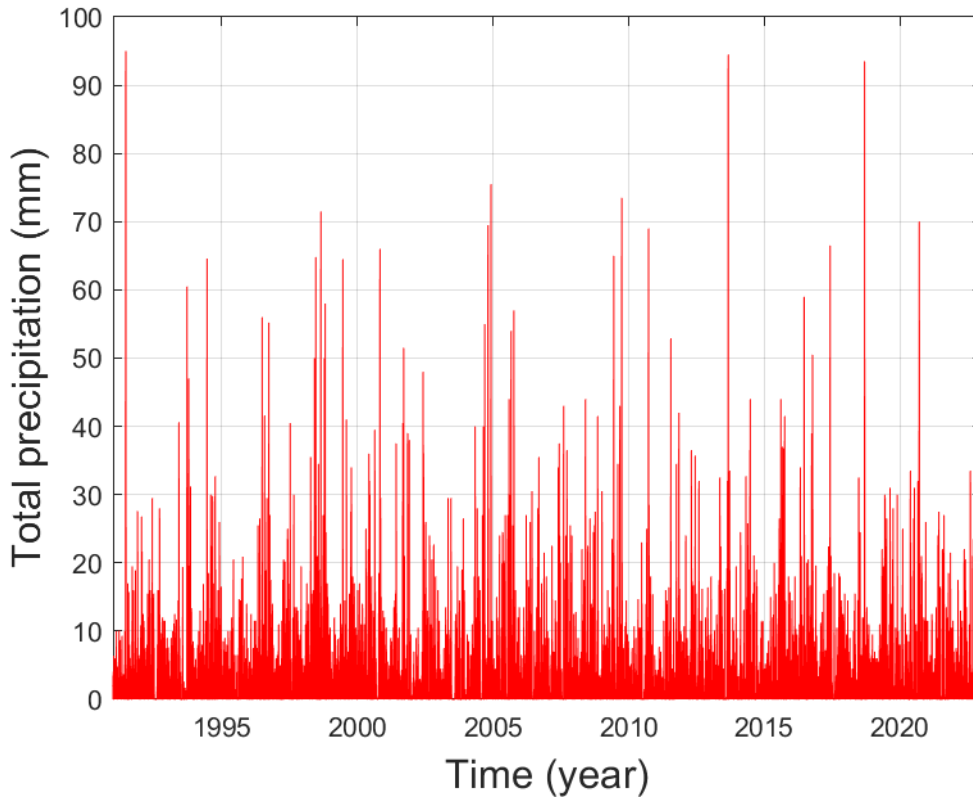


圖 4-6 基隆氣象觀測站之逐時降水量資料。

## (二)、研究方法

### 1. 潮位站觀測資料處理

使用潮位站水位觀測紀錄時，需進行資料品管。品管項目包含資料完整度 (data completeness; 1 - 缺漏率%)、基準偏移初步分析、觀測量粗差別除(大於三倍標準偏差)以及數據非線性變化分析等。若資料有上述情形，嚴重時會造成資料處理困難，此時將剔除該測站資料[內政部，2020]。傳統上，大多利用調和分析法[Parker, 2005]分析潮位站資料，公式如下[Parker, 2005]：

$$TG(t) = a + b(t) + \sum_{i=1}^n [A_i \sin(\omega_i(t)) + B_i \cos(\omega_i(t))] \quad (4-1)$$

其中， $TG$  為逐時潮位站水位紀錄； $t$  為時間； $a$ 、 $b$ 、 $A_i$ 、 $B_i$  為未知參數， $a$  為

截距、 $b$  為斜率， $A_i$  與  $B_i$  分別為分潮的正弦函數與餘弦函數之振幅，結合  $A_i$  與  $B_i$  可計算出各分潮之振幅  $C_i$  ( $C_i = \sqrt{A_i^2 + B_i^2}$ )； $n$  為分潮個數，本案欲使用 37 個分潮的調和常數[Parker, 2007; Chang et al., 2022]； $\omega_i$  為分潮之角頻率。

本計畫以間接觀測平差計算方式，依最小二乘法原理求解式(4-1)中未知參數。在進行調和分析計算前，因潮位站資料受到人為造成之基準偏移(datum shift)、大氣變動造成之逆氣壓效應(inverted barometer effect)以及資料變化速率(包含海水面變化速率和地表垂直變動速率)等三項因素影響[Lan et al., 2017]，因此需進行上述三項改正。

以下將依據內政部期末報告[內政部，2020]說明潮位站資料改正之內容。潮位站在使用一段時間後因需要進行儀器調整、設備維修或遷站等情形，若沒有進行率定或檢測可能造成資料基準偏移，導致後續計算成果錯誤[內政部，2018]。首先偵測測站資料中基準偏移情形，先利用調和分析法(式(4-1))逐兩年擬合，並移除該時間之海潮效應。對於可能存在偏移點位，計算該點位前後兩個月平均值並相減，若差值大於 100 mm 則該處可能有基準偏移情形[Lan et al., 2017]，須與鄰近潮位站相比較(圖 4-7)。本計畫欲利用基隆和長潭里潮位站資料分析高程系統，為了評估是否有基準偏移問題，需要與附近品質良好潮位站相比較，因此本案選擇基隆站附近之龍洞(Longdong)和麟山鼻(Linshanbi)潮位站(圖 4-2)作為輔助潮位站，比較圖如圖 4-8 所示。由圖可知，原始基隆潮位站水位觀測資料和龍洞及麟山鼻潮位站資料並不一致，差值振幅皆超過 20 公分，因此龍洞和麟山鼻潮位站並不適合做為基隆和長潭里潮位站之輔助站。自逐時潮位站資料偵測出



的基準偏移可利用調和分析法(式(4-1))加上步階函數 (step function)  $H$  進行改正，

公式如下，

$$TG(t) = a + \sum_{i=1}^m a_i H(t - t_{a_i}) + b(t) + \sum_{i=1}^n [A_i \sin(\omega_i(t)) + B_i \cos(\omega_i(t))] \quad (4-2)$$

$$H(t - t_{a_i}) = \begin{cases} 1 & , t \geq t_{a_i} \\ 0 & , t < t_{a_i} \end{cases}$$

經上述改正後，潮位站資料仍包含逆氣壓效應和資料變化速率(包含海水面變化速率和地表垂直變動速率)。

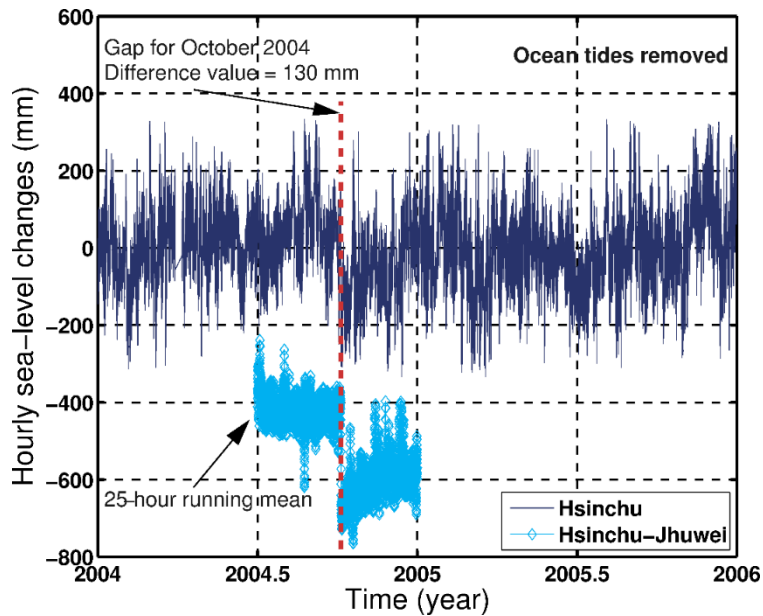


圖 4-7 逐時新竹潮位站資料之偏移量偵測。移除海潮效應之新竹潮位資料(藍黑線)、新竹與竹圍測站逐時資料相減並經 25 小時移動平均(青藍線) [內政部，2020]。

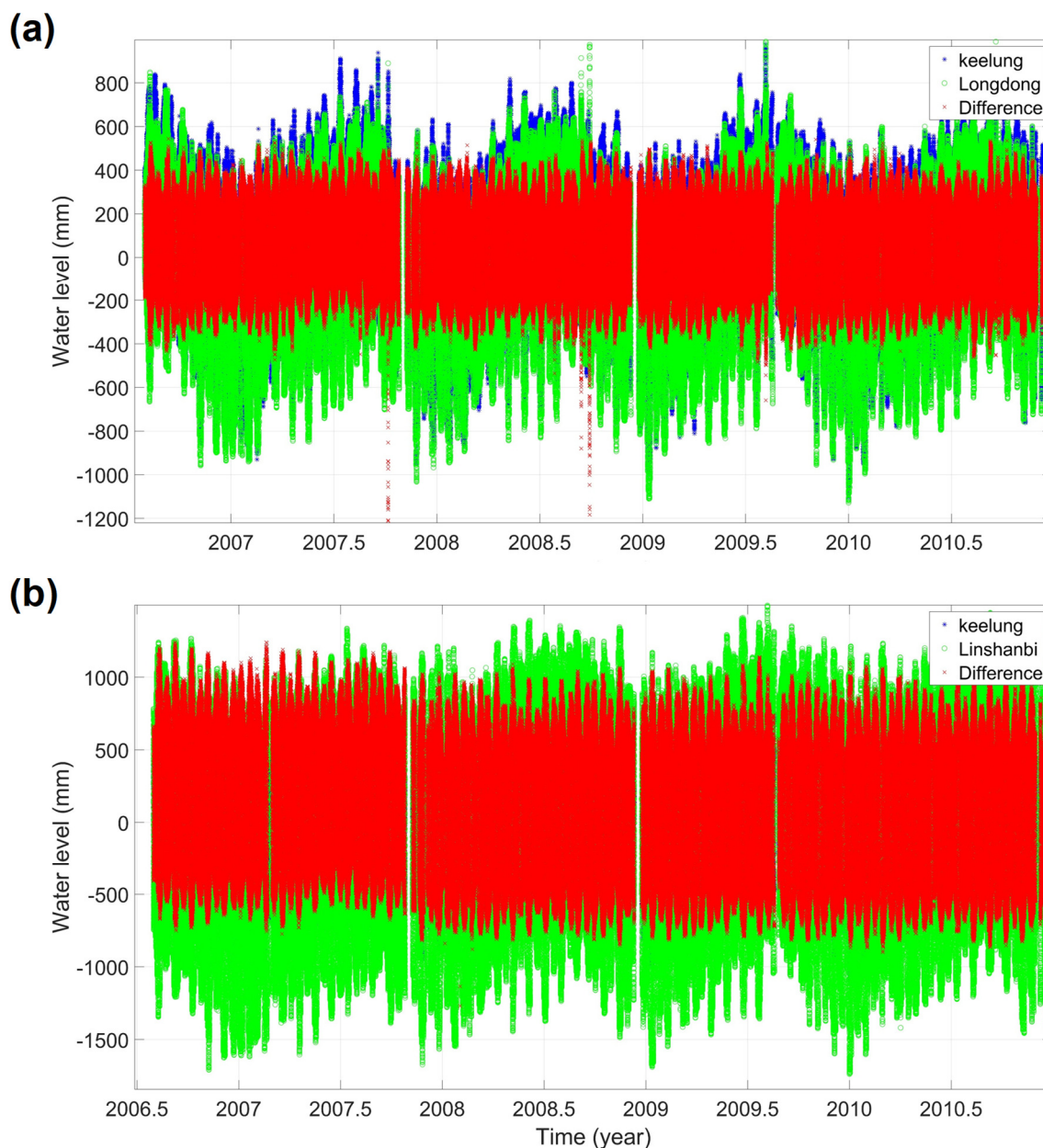


圖 4-8 原始基隆潮位站資料(藍點)分別和(a)龍洞及(b)麟山鼻潮位站資料(綠圈)相比較。

前人研究發現，除了熱帶和西邊界流(western boundary current)等區域外，海洋各處海水面皆受到大氣壓力變化的影響[Wunsch and Stammer, 1997; 內政部，2018]，且本國高程基準是定義在 1990 年 1 月 1 日標準大氣環境情況下，故本案將對潮位站資料進行逆氣壓改正。逆氣壓效應改正(IB; 單位:公釐)公式如下所示：

$$IB = -9.948 \times (P_{atm} - \bar{P}) \quad (4-3)$$

其中， $P_{atm}$  為海水表面大氣壓力（單位為毫巴）， $\bar{P}$  為隨時間變化之全球平均海水表面壓力或某一參考大氣壓力(如一大標準氣壓 1013.25 mbar)，尺度因子 9.948 為中緯度之經驗值 [Dalrymple et al., 2012]。

圖 4-9 為改正基隆潮位站資料之逆氣壓效應。逆氣壓效應改正前後的基隆潮位站資料差異不大，基隆潮位站資料改正逆氣壓前、後的標準偏差分別為 287 mm 和 268 mm，表示基隆潮位站資料經逆氣壓改正後的標準偏差降低，而基隆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)。

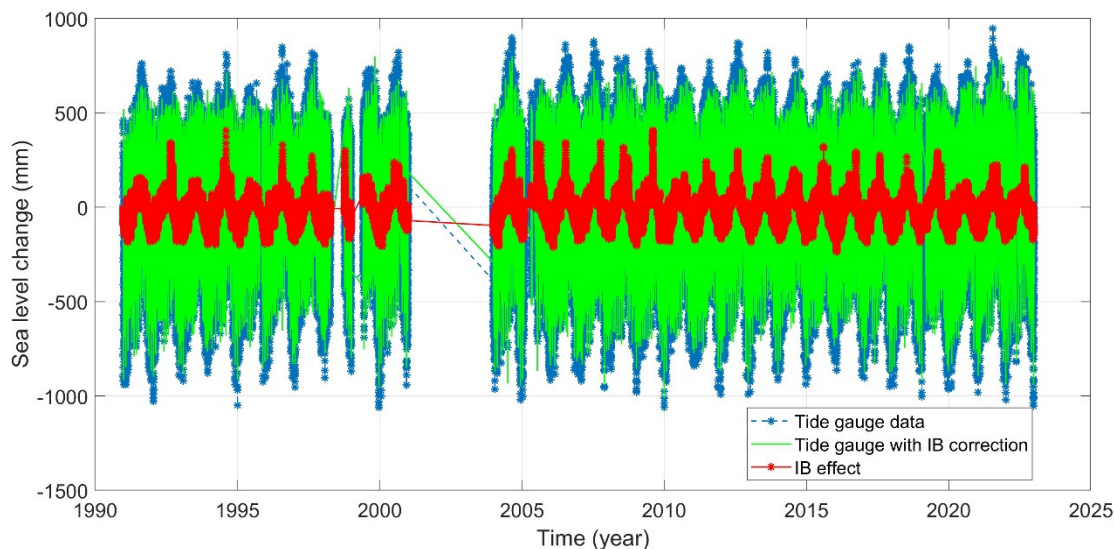


圖 4-9 逆氣壓效應改正後之基隆潮位站資料(綠線)。藍線為未改正逆氣壓效應之潮位資料、紅線為逆氣壓效應。

經上述改正後，潮位站資料仍包含海水面變化與測站地表垂直變化。若有水準資料或 GNSS 觀測資料之時間序列  $u$ ，可以利用線性方程式(二參數)擬合計算出地表垂直變動速率，公式如下：

$$u(t) = a + bt \quad (4-4)$$

其中， $a$  和  $b$  為截距和垂直變動速率， $t$  為時間。式(4-4)以最小二乘法原理求解

式中未知參數。擬合速率可改正潮位站之地表垂直變化。

根據 111 年度「高程基準檢測工作」報告[內政部國土測繪中心，2023]，基隆潮位站參考點(TG01)和鄰近水準點(K021)皆持續呈現穩定下陷，兩點水平距離非常接近，相距約 0.01 公里(圖 3-1)，因此呈現相同下陷趨勢。K021 水準點從民國 87 年起即開始監測，在 87-111 年間 K021 下陷量累積約達 120 mm(圖 4-10)，年平均下陷量約 5 mm/yr，此下陷速率可做為基隆潮位站之地表垂直變動速率。圖 4-11 為改正基隆潮位站資料之地表垂直變動速率，將改正前潮位站資料和測站地表垂直變動速率(-5 mm/yr)相加即可進行測站地表垂直變動改正，改正成果如圖 4-11 所示。

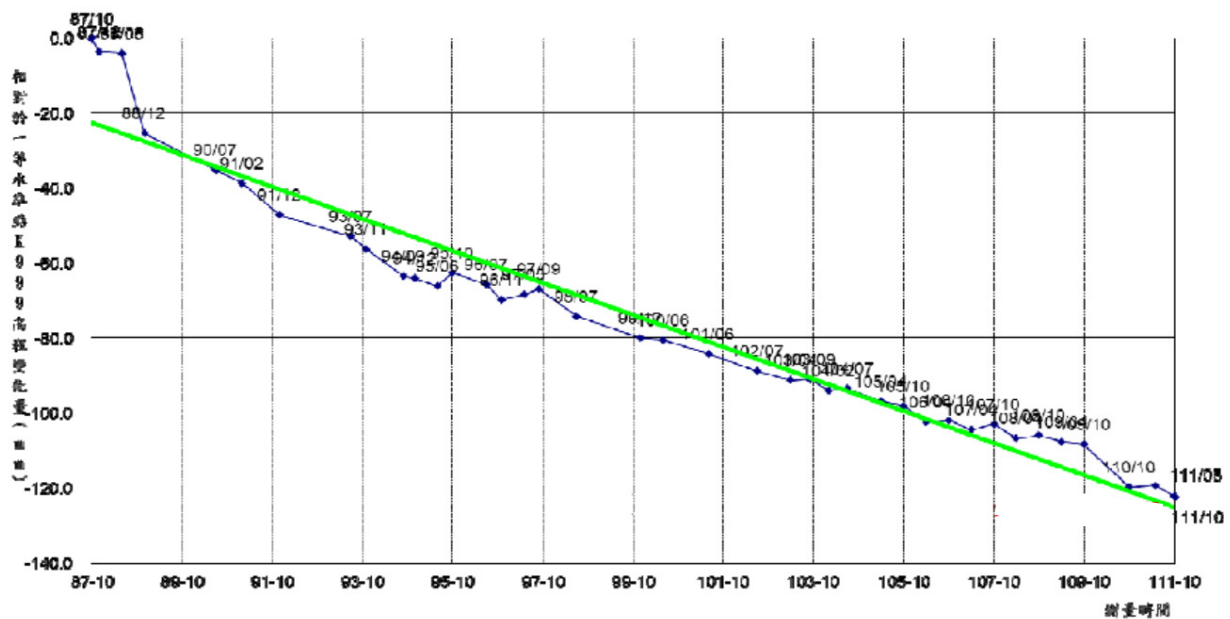


圖 4-10 K021 水準點相對於水準原點 K999 之高程差變化圖[內政部國土測繪中心，2023]。綠線為擬合斜率。

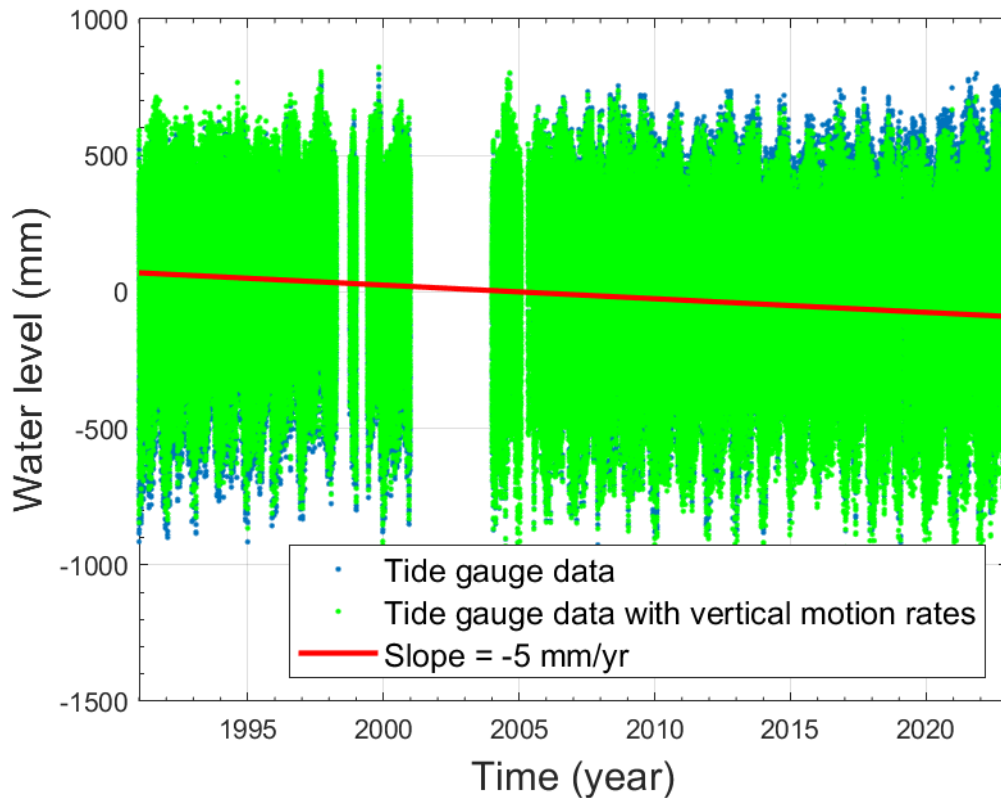


圖 4-11 基隆潮位站資料之地表垂直變動改正(綠點)。藍點為未改正地表垂直變動速率之潮位資料、紅線為地表垂直變動速率。

本計畫使用四種計算平均海水位方法，若使用算術平均法，則需先移除潮位站資料之斜率訊號(相對於某一參考時刻，本研究採時間序列中點時刻)再進行計算之；而使用其他演算法(如調和分析法、六參數擬合、多參數線性擬合)，則無需先移除資料斜率。

## 2. 平均海水位(Mean sea level)之計算

平均海水位定義為潮位站在一段時間內，所有有效之潮位觀測紀錄之平均值稱之。在高程測量之應用上，主要是以天體運行之章動週期 18.6 年為基礎，求得之平均海水位，作為高程系統之零點[內政部，2020]。一般而言，平均海水位計算方式常以算術平均計算 18.6 年或 19 年潮位資料[Pugh, 1987]，以避免低

頻潮汐訊號(天體運行之章動週期)影響。除了上述計算方式外，亦可利用六參數擬合月平均潮位站資料計算出平均海水位，公式如下，

$$TG_m(t) = a + bt + c \sin(2\pi t) + d \cos(2\pi t) + e \sin(4\pi t) + f \cos(4\pi t) \quad (4-5)$$

其中， $TG_m$  為潮位站月平均時間序列； $a$  為某一參考時刻的平均海水位高； $b$  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餘弦之振幅； $t$  為時間。若以逐時潮位站資料計算平均海水位，可利用調和分析法(式(4-1))進行計算，然而若資料涵蓋時間長度短於 19 年(如長潭里潮位站)容易受節點潮影響，因此可引入節點潮改正參數(振幅  $f_k$  和相位  $u_k$ )，可將調和分析法改寫為[Foreman et al., 2009]，

$$TG(t_i) = a + b(t_i) + \sum_{k=1}^n f_k(t_i) C_k \cos(\omega_k(t_i) + V_k + u_k(t_i) - g_k) \quad (4-6)$$

其中， $TG$  為潮位站水位高度資料； $t_i$  為觀測時間； $a$  為某一參考時刻的平均海水位高； $b$  為斜率； $C_k$ 、 $g_k$ 、 $\omega_k$  為各分潮之振幅、相位、角頻率； $V_k$  為各分潮的時間引數(argument) [張憲國和史天元，2022]。調和分析法(式(4-6))中各分潮之節點參數( $f$  和  $u$ ) 可由平衡潮理論推導出，如表 4-4 所示。

表 4-4 依據平衡潮理論推導 8 個主要分潮之節點參數(nodal factor  $f$  and nodal angle  $u$ ) [Haigh et al., 2011]

Constituents	Nodal factor $f$	Nodal angle $u$ (deg)
$M_m$	$1.000 - 0.130 \cos(N)$	$0.0^\circ$
$M_f$	$1.043 + 0.414 \cos(N)$	$-23.7^\circ \sin(N)$
$Q_1, O_1$	$1.009 + 0.187 \cos(N)$	$10.8^\circ \sin(N)$
$K_1$	$1.006 + 0.115 \cos(N)$	$-8.9^\circ \sin(N)$
$M_2, N_2$	$1.000 - 0.037 \cos(N)$	$-2.1^\circ \sin(N)$
$K_2$	$1.024 + 0.286 \cos(N)$	$-17.7^\circ \sin(N)$

$N$  是月球升交點之經度

此外，TWVD2001 的平均海水位高並非使用算術平均法或六參數擬合計算月平均潮位資料之平均海水位高，而是利用日平均潮位資料，並結合六參數(式(4-5))和其他分潮參數，以及加入基隆氣象觀測站之溫度  $T$ (相對於 1991-2022 基隆觀測站平均溫度(23°C))和降水量  $R$  以及 ERA5 模型之壓力  $P$ (相對於一大標準氣壓(1013.25 mbar))等多項參數同時進行多參數線性擬合，公式如下[劉啟清，1998]，

$$TG(t) = a + b(t) + c_1T(t) + c_2P(t) + c_3R(t) + \sum_{i=1}^m [A_i \sin(\omega_i(t)) + B_i \cos(\omega_i(t))] \quad (4-7)$$

其中， $c_1$ 、 $c_2$ 、 $c_3$  為未知參數，可估計出溫度、壓力、降水量對潮位站資料之影響量； $m$  為分潮個數，將根據劉啟清[1998]同樣採用 5 個天文潮汐之分潮，分別為  $M_f$ (13.6612 天)、 $M_m$ (27.5533 天)、 $S_a$ (364.9635 天)、 $S_{sa}$ (182.7040 天)以及  $M_N$ (18.6672 年)。

本研究將計算將利用上述四種方式分別計算平均海水位高並互相比較，然後將分析不同時期基隆潮位站平均海水位高是否與 TWVD2001 參考面已有差異性變化；亦利用長潭里潮位站之平均海水位高重新計算新 K997 高程，再與歷年水準測量結果進行比較，分析長潭里潮位站平均海水位是否適合作為新一代高程參考面。

### 3. GNSS 解算軟體

本案將解算 GNSS 連續觀測站資料，分析新水準原點附近地質是否穩固，利用加拿大 Canadian Spatial Reference System-Precise Point Positioning (CSRS-

PPP)進行 GNSS 精密單點定位解算，後續將依據內政部計畫[內政部，2022]之細部計劃書說明 CSRS-PPP 解算軟體之內容：CSRS-PPP 是全球導航衛星系統 (GNSS) 資料後處理 On-line 程式，此程式使用利用全球接收儀網路計算之精密衛星軌道、時鐘和偏差校正來計算全球任何地方用戶的精確坐標。使用者通過網路上傳單頻或雙頻接收機進行靜態或動態模式觀測的 RINEX 資料，計算成果為 1983 北美基準的加拿大空間參考系統 (NAD83(CSRS))或國際地球參考系 (ITRF)，本案採用 ITRF2014。

#### **4. 精進臺灣高程基準資料**

##### **(1) 評估 TWVD2001 水準零點之差異**

取得1991年後近30年基隆潮位站資料後，利用上述方式進行基準偏移改正、逆氣壓改正和節點潮改正，再利用改正後資料進行不同時間段平均海水位計算，研析與TWVD2001水準零點是否已有差異性變化；另外取得基隆潮位站周遭海域波形重定後測高資料，評估並加入衛星測高資料後，對高程系統的影響。

##### **(2) 結合長潭里潮位站、衛星測高和 GNSS 觀測資料分析對高程系統的影響**

在結合長潭里潮位站、衛星測高和 GNSS 觀測資料分析高程系統變化時，先利用上述方式得到已移除基準偏移、節點潮和逆氣壓之長潭里潮位資料、長潭里潮位站周遭海域之波形重定後測高資料和 GNSS 逐日解，利用改正後潮位資料進行平均海水位計算，求得水準零點，再結合歷年水準資料求得 K997 正高高程，在與目前公告 K997 高程(4.80638 公尺)比較；另外結合 GNSS 解和潮位站資料，可與測高資料相比較。



### (三)、研究步驟

本研究利用基隆潮位站計算平均海水位來求得不同時期之水準零點，分析與 TWVD2001 水準零點是否有差異性變化。本計畫亦利用長潭里潮位站資料計算平均海水位來求得水準零點，並搭配國土測繪中心水準成果重新計算新 K997 高程，再與由 K999 聯測而得之高程做比較分析，以分析 K997 是否適合作為新一代正高高程水準原點。最後利用 GNSS 解算軟體求解 GNSS 連續觀測量，計算長潭里之地表垂直變動量，分析其周圍地質是否穩固。本計畫案主要研究流程圖如圖 4-12 所示，將首先進行基隆和長潭里潮位站資料品管，品管項目包含資料完整度、基準偏移初步分析、水位極端值剔除(大於三倍標準偏差)以及數據非線性變化分析等，然後改正潮位站基準偏移問題、測站地表垂直變動速率和逆氣壓效應。經上述改正後，目前結合 GNSS 觀測解可改正潮位站資料之地表垂直變動訊號，並與衛星測高資料相比較，並且可利用調和分析法或多參數線性擬合計算潮位站平均海水位高，若要利用算術平均計算平均海水位，則需將斜率移除(相對於參考時間點)再進行計算。此外，亦可將逐時資料平均成逐月潮位站資料，再利用六參數擬合計算平均海水位高。以平均海水位高重新計算 K997 高程值，再與歷年水準測量成果相比較，以分析利用 K997 訂定臺灣高程系統之可行性。新高程基準將作為一等水準點高程之起算依據，高程基準應具備條件如：(1)潮位站、水準原點和附近水準點之周圍地質呈現穩定平穩狀態、(2)潮位站應有較佳資料品質(如長期記錄之潮位資料、資料缺漏短、基準偏移處少)可計算穩定之水準零點、(3)原水準原點、歷年水準檢測成果和

新水準原點間高程差應一致。

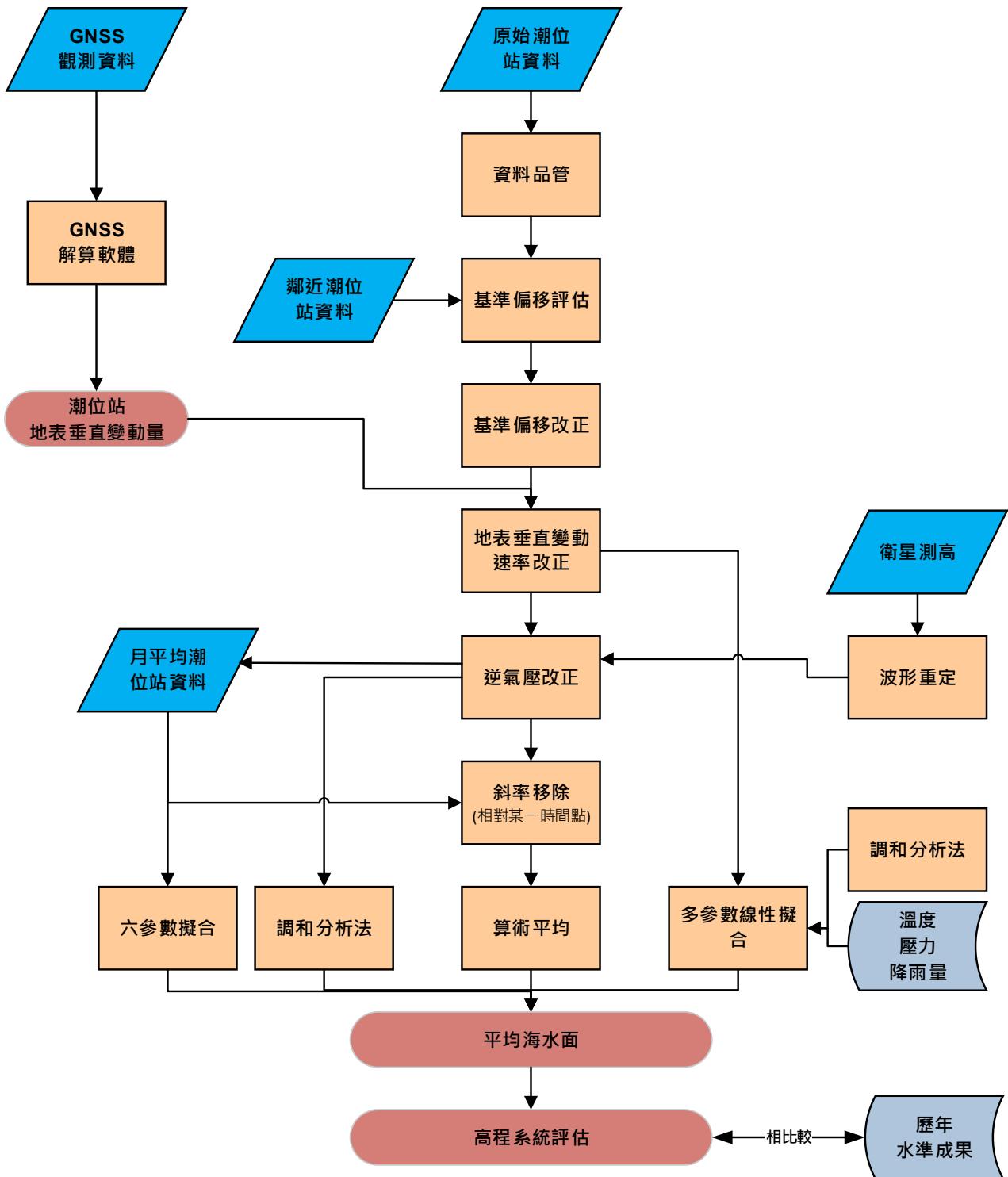


圖 4-12 本計畫研究流程圖。

## 五、研究成果

### (一)、基隆潮位站資料處理結果

圖 5-1 為潮位站資料經過各項改正後的海水位變化和 TP+J1/2/3 沿軌跡點 AVISO 測高資料(100 km 測高資料平均)比較。由圖可知，兩資料時間序列並不一致，主要差異為斜率，此測高資料和潮位站之海水位變化速率分別為 $+3.2 \pm 0.3$  mm/yr 和 $-4.1 \pm 0.2$  mm/yr (如圖 5-1)，差值超過 7 mm/yr，雖然測高和潮位站觀測位置不相同，但相鄰海域之海水位變化速率應相似或接近[Lan et al., 2017]，且經所有改正之潮位站海水位變化速率為負值在台灣附近海域並不合理，因而推測潮位站資料改正過程出現問題，以下呈現基隆潮位站各項改正前後月平均之時間序列和斜率，成果如圖 5-2 所示。由各項改正前、後所估算海水位變化速率之差值可知，基準偏移和地表垂直變動改正對於基隆潮位站資料估算海水位變化速率有顯著影響，兩項改正之影響量分別約 1.7 mm/yr 和 5 mm/yr；而逆氣壓效應影響較小，僅為 0.1 mm/yr，小於海水位變化速率中誤差(0.2 mm/yr)，但逆氣壓效應顯著影響潮位站資料之振幅變化。比較原始基隆潮位資料和基準偏移改正後成果可知，兩數據在 2005 年之後相當一致，主要差異為原始資料於 1998、1999 以及 2001~2003 年時間附近有三處較大資料缺漏，若依照處理程序此三個時間段將被認定需要進行基準偏移改正，導致基準偏移改正後會讓海水位變化速率由 $+2.8 \pm 0.2$  mm/yr 降低至 $+1.1 \pm 0.2$  mm/yr，與衛星測高之海水位變化速率比較，不改正基準偏移之基隆潮位資料斜率會更一致。

原始 2005-2021 基隆潮位站資料之斜率為 $+0.6 \pm 0.6$  mm/yr，遠小於測站地表

垂直年平均下陷量(-5 mm/yr)，顯示潮位資料並無受到地表下沉影響，因此目前基隆潮位資料並未改正地表垂直變動速率。另外，比較改正逆氣壓效應前、後之基隆潮位站和衛星測高資料(TP+J1/2/3 沿軌跡點 AVISO 資料(100 km 測高資料平均))，如圖 5-3 所示。由圖可知，改正前潮位站年週期振幅遠大於測高資料，改正逆氣壓效應後年週期振幅和測高資料相當一致，相關係數可高達 0.81，因此基隆潮位站資料建議需進行逆氣壓效應改正。綜合以上分析，本研究利用僅改正逆氣壓效應之基隆潮位站資料來計算平均海水位。

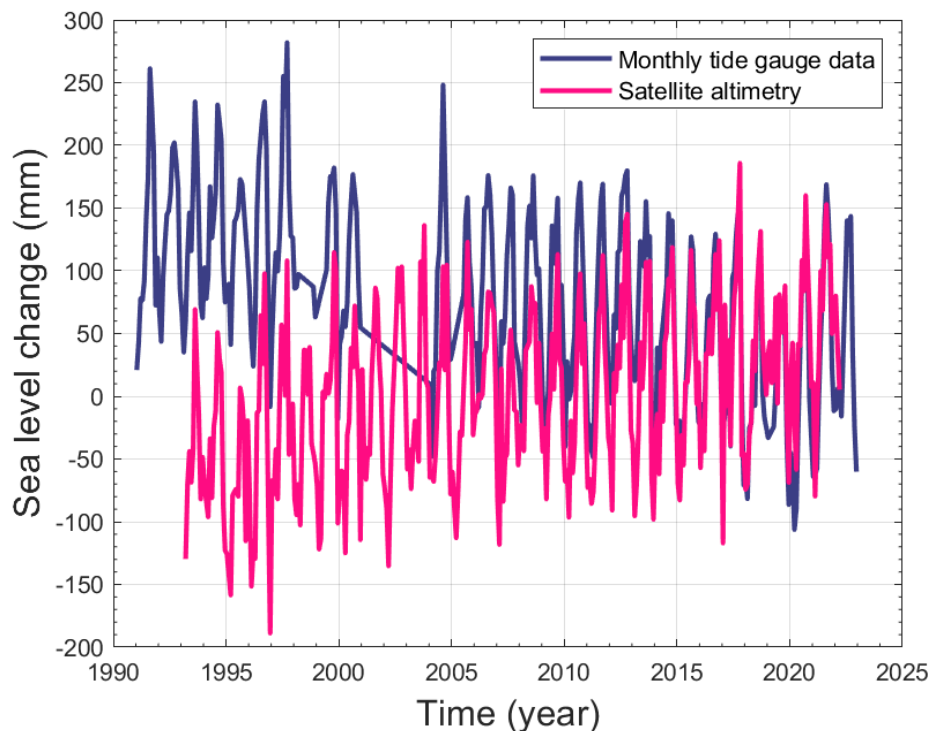


圖 5-1 基隆海水位變化。藍線為潮位站資料(改正基準偏移、逆氣壓效應以及地表垂直變動)、紅線為衛星測高資料(TP+J1/2/3 沿軌跡點 AVISO 資料(100 km 內測高資料平均))。

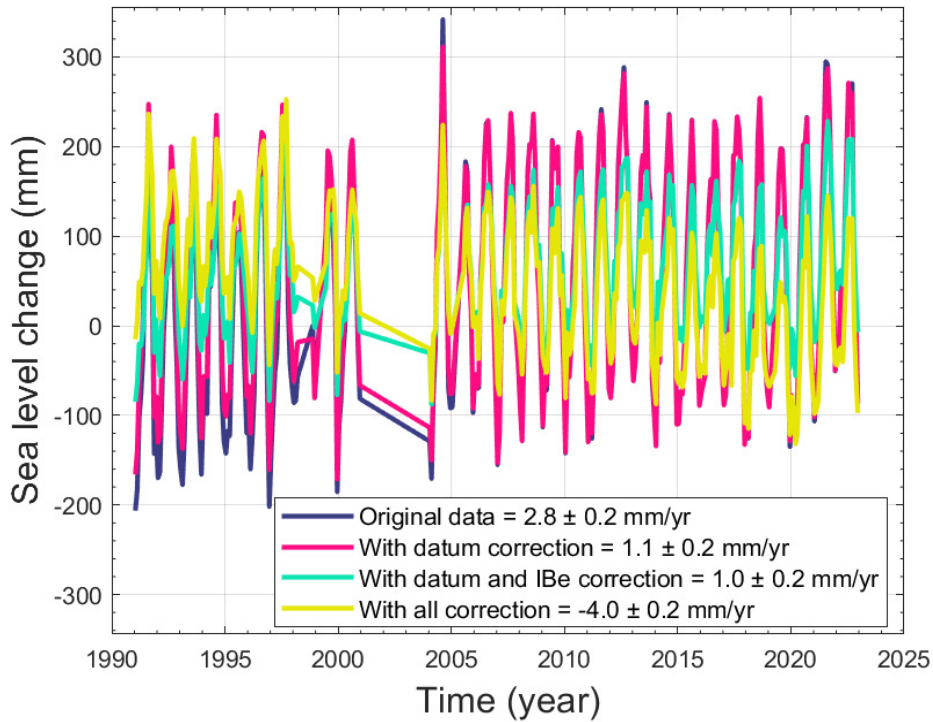


圖 5-2 各項改正前、後基隆潮位站月平均海水位變化。藍線為潮位站原始月平均變化、紅線為經基準偏移改正之潮位站月平均變化、綠線為經基準偏移和逆氣壓效應改正之潮位站月平均變化、黃線為經基準偏移、逆氣壓效應以及地表垂直變動改正之潮位站月平均變化。

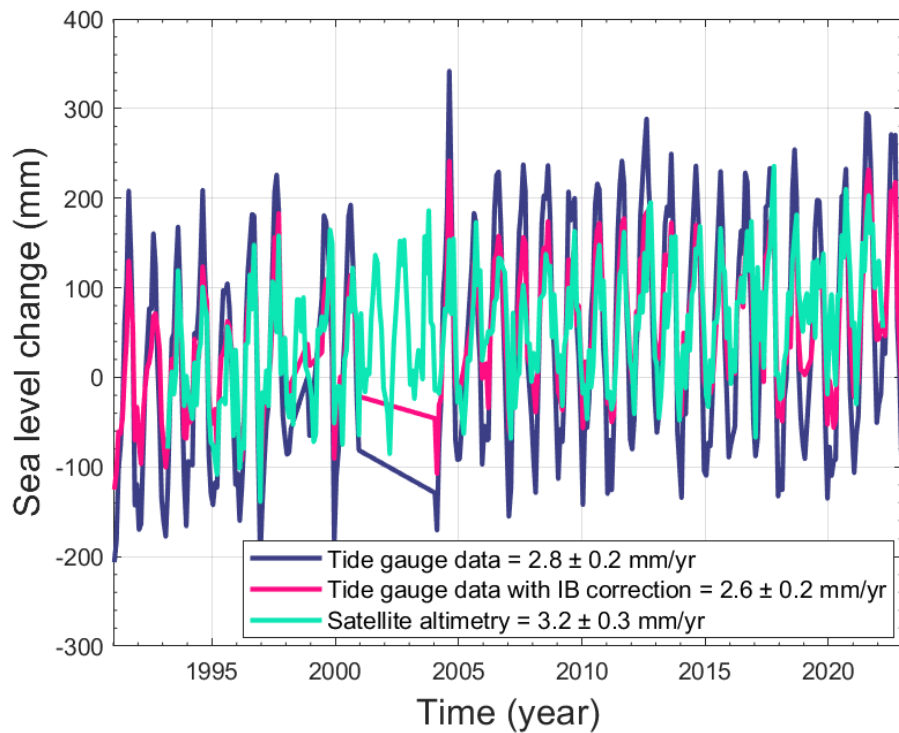


圖 5-3 基隆潮位站和衛星測高(綠線; TP+J1/2/3 沿軌跡點 AVISO 資料(100 km 測高資料平均))資料比較。藍線為潮位站原始月平均變化、紅線為經逆氣壓效應改正之潮位站月平均變化。

## (二)、長潭里潮位站資料處理結果

長潭里潮位站分別利用音波式、壓力式和雷達式等三種儀器觀測當地的水位變化，如圖 5-4 所示。由圖可知，相較於音波式和雷達式觀測數據，長潭里壓力式水位資料較為完整，從 2021/08 開始才有明顯基準偏移和顯著資料缺漏，而音波式和雷達式的水位觀測資料在 2021/08 前皆有顯著資料缺漏，又以雷達式資料缺漏最為嚴重，且 2020 年以前此兩儀器觀測資料的相位變化和壓力式資料並不相符，2021 年以後三個儀器觀測資料水位變化逐漸一致。利用調和分析法分別擬合長潭里潮位站音波式和壓力式觀測資料得知(圖 5-5 所示)，音波式觀測資料有嚴重問題，導致調和分析法計算的殘差(重建水位和原始潮位站資料差值)異常顯著，其原因為音波式於 2015-2019 年觀測資料的相位和 2020 年以後觀測資料相位並不一致。

相較於音波式觀測資料，2015-2021 年之壓力式資料品質較佳，但壓力式觀測資料於 2021 年年底有一明顯基準偏移(圖 5-5)。因此本案將 2015/04-2021/08 之壓力式資料和 2021/08-2022/12 之音波式資料整合成長潭里潮位資料，進行後續平均海水位計算。結合兩儀器觀測資料前須評估基準是否一致，因此將 2021/01~2021/08 觀測資料進行差值計算，成果如圖 5-6 所示。由圖可知，兩資料差值基本在 0 mm 上下震盪，但部分差值較大(可能因資料品質較差導致)，因此利用差值標準偏差(32 mm)將差值超過三倍標準偏差之資料移除，粗差移除後重新計算 2021/01~2021/08 差值平均值為 19 mm(音波式 - 壓力式)，因此將壓力式資料基準往上調整 19 mm。

根據 111 年度「高程基準檢測工作」報告[內政部國土測繪中心，2023]，長潭里潮位站參考點(TG997)和鄰近新水準原點(K997)地表垂直變動持續呈現穩定狀態(圖 5-7)，因此長潭里潮位站無須進行測站地表垂直變動改正。

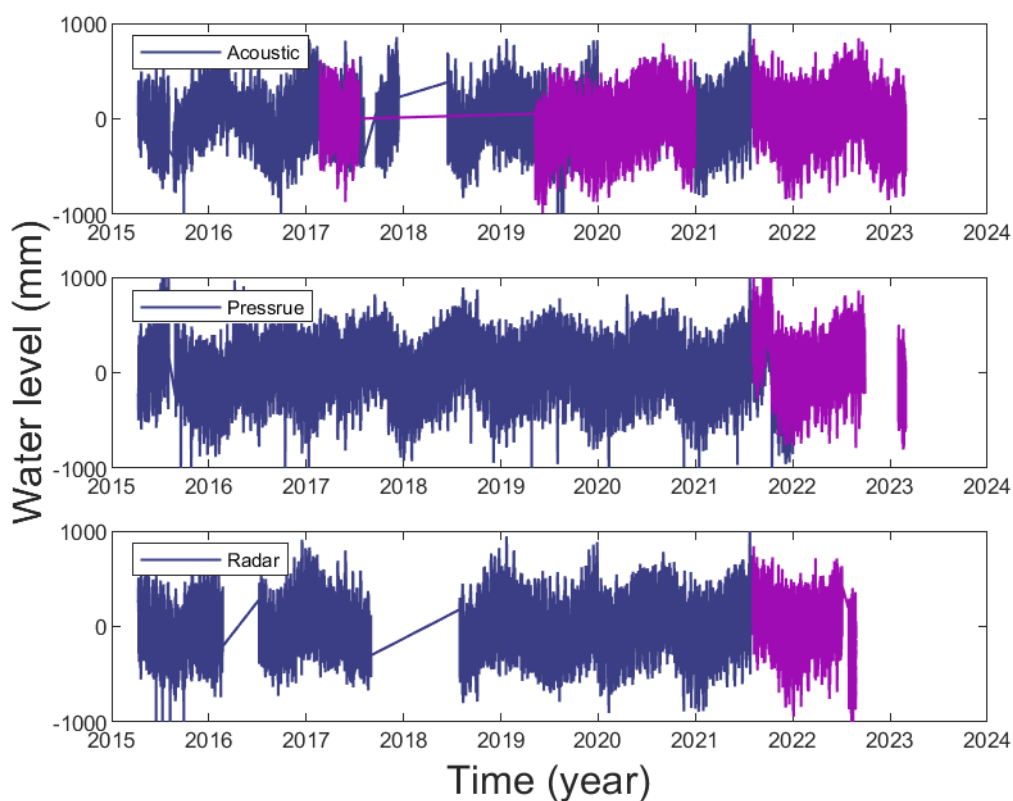


圖 5-4 長潭里潮位站水位變化。藍線為原始觀測數據，且未經過氣象署品管處理，而紫線為已經過氣象署品管處理，上圖為音波式、中圖為壓力式和下圖為雷達式水位觀測資料。

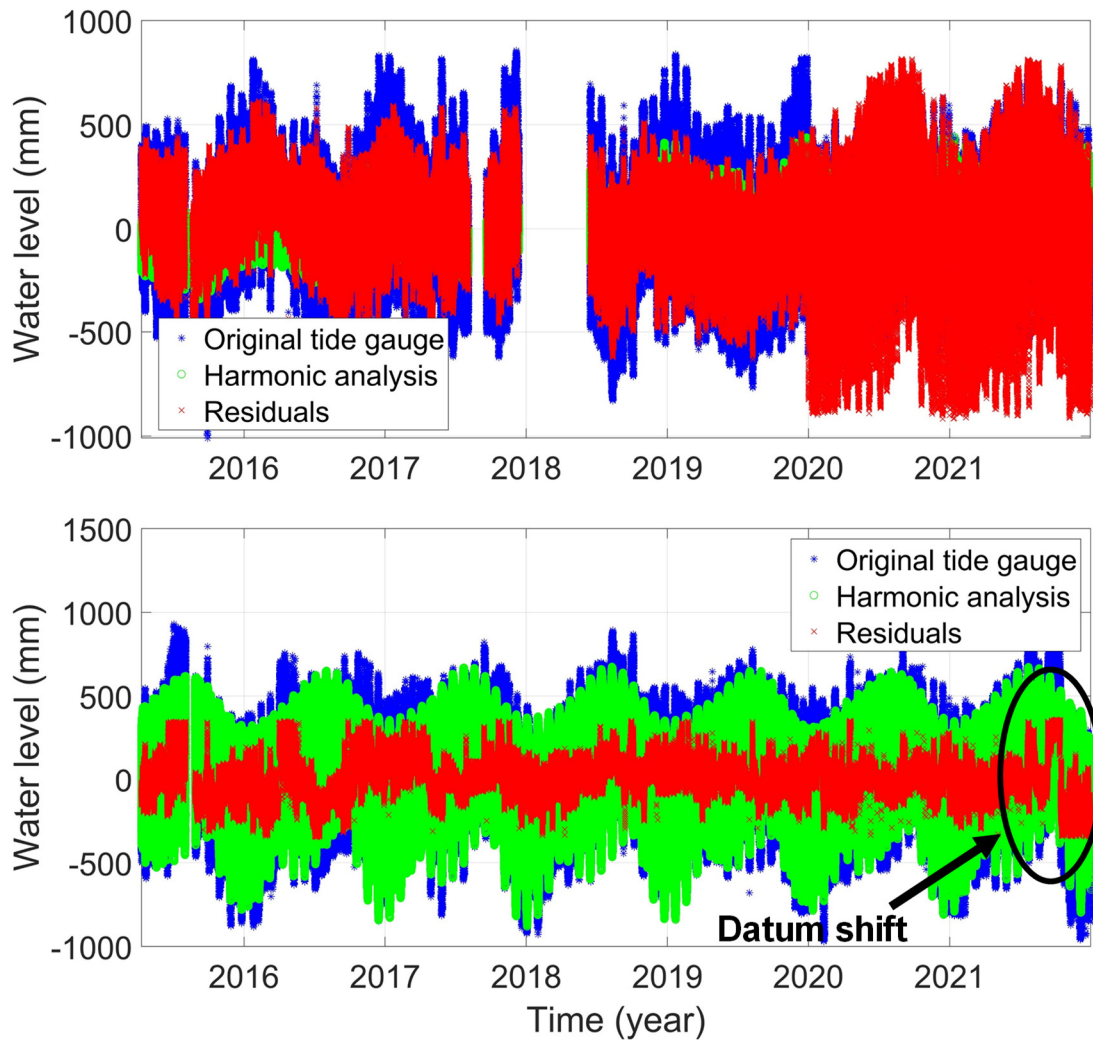


圖 5-5 長潭里潮位站(2015~2021)音波式(上圖)和壓力式(下圖)觀測資料之調和分析擬合結果。藍點、綠點和紅點分別為潮位站原始資料、調和分析擬合結果和殘差。



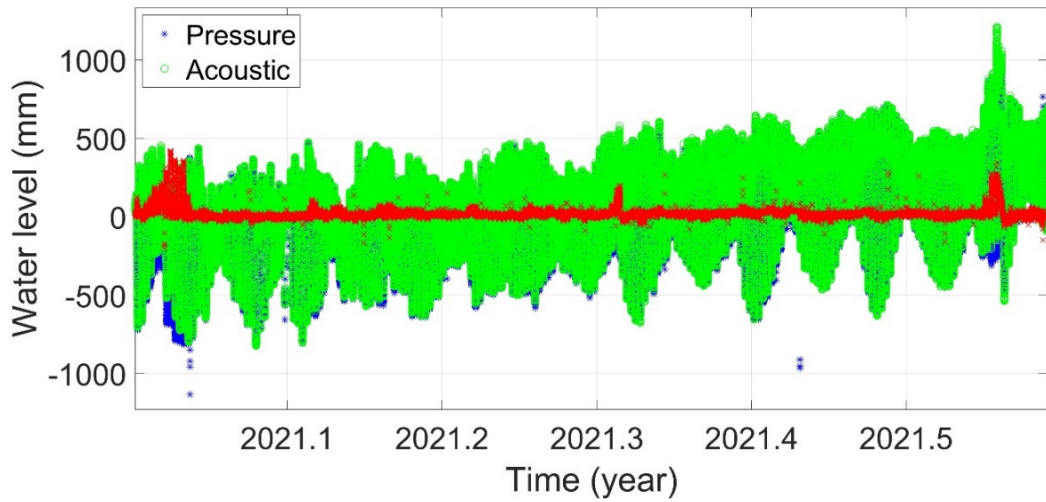


圖 5-6 長潭里潮位站(2021/01~2021/08)之壓力式(藍點)和音波式(綠點)差值(紅點)計算。

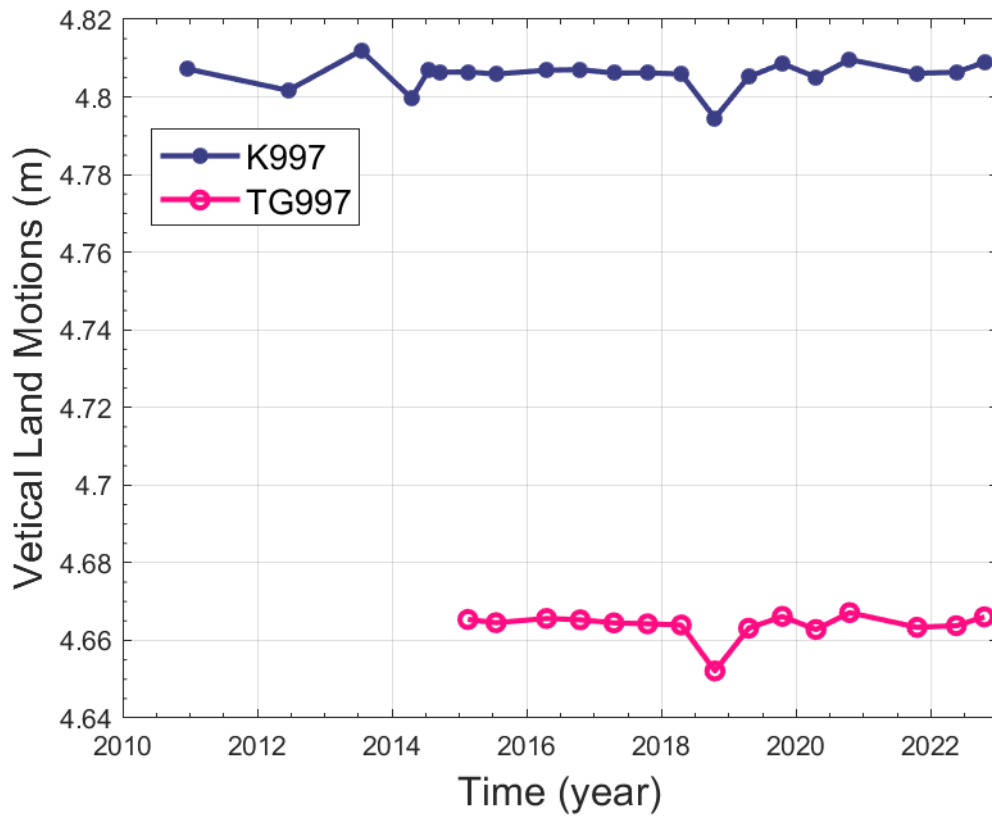


圖 5-7 長潭里潮位站參考點(TG997)和鄰近新水準原點(K997)之地表垂直變動量。

### (三)、衛星測高和潮位站資料比較

本計畫使用之基隆附近衛星測高沿岸資料由歐盟 ESA 和法國 AVISO 資料中心下載。資料內容包含網格或沿軌跡點資料，網格資料將選取與潮位站距離最近資料，而沿軌跡點並不適合僅選取距離潮位站最近點資料，其觀測量太少且雜訊較大，無法呈現當地海水位變化；一般而言，鄰近水域海水位變化應相似，因此本計畫將距離潮位站最近沿軌跡點作為基準點，分別將基準點周圍半徑 25 km、50 km 和 100 km 內測高觀測量取平均值作為當地海水位變化，後續與基隆潮位站資料相比較，評估半徑多少內之測高資料平均值較適合呈現基隆當地海水位變化。

經逆氣壓效應改正後之基隆潮位站資料和衛星測高資料相比較，成果如表 5-1 所示。由表可知，ESA、TP+J1/2/3 沿軌跡點 AVISO 以及 AVISO 網格等資料和基隆潮位站資料較為接近，相關係數為 0.79~0.86，差值標準偏差為 38~48 mm，其中基準點半徑 100 km 內測高觀測量平均值和基隆潮位站資料較一致，相關係數皆超過 0.82，差值標準偏差皆低於 42 mm。然而，ESA 資料涵蓋時間僅 2002~2018 年，遠短於 AVISO 資料時間長度，因此後續分析只使用 AVISO 網格資料與 TP+J1/2/3 沿軌跡點資料(100 km 測高資料平均)和基隆潮位站比較，如圖 5-8 所示。由圖可知，測高和基隆潮位站資料相當一致，相關係數為 0.83~0.86、差值標準偏差為 38~42 mm，然而 1991~2021 基隆潮位站海水位變化速率為 $+2.6 \pm 0.2$  mm/yr，略低於 TP+J1/2/3 沿軌跡點 AVISO 資料(100 km 測高資料平均)的 $+3.2 \pm 0.3$  mm/yr 以及 AVISO 網格資料的 $+3.6 \pm 0.2$  mm/yr，由於衛星測高資料並不

在基隆潮位站相同位置上進行觀測，因此速率上有些差異實屬合理。由測高結果可知，北台灣周圍海水位變化速率為+3~+4 mm/yr，此速率約等於全球海水位變化速率值+3.2 mm/yr ([SROCC, 2019])。

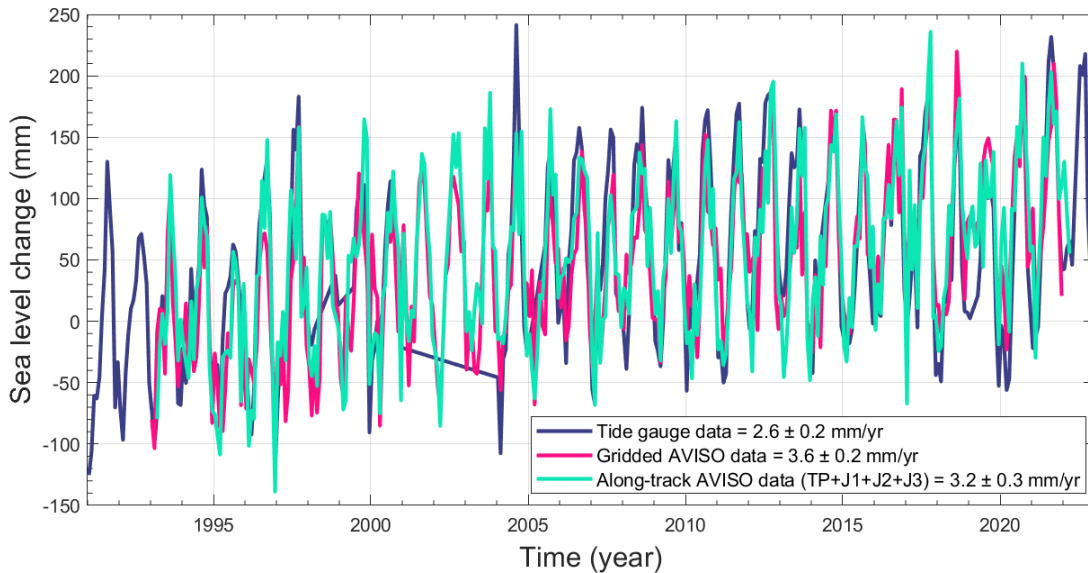


圖 5-8 基隆潮位站(藍線)和衛星測高資料比較。紅線為 AVSIO 網格資料、綠線為 TP+J1/2/3 沿軌跡點 AVISO 資料(100 km 測高資料平均)。

表 5-1 各衛星測高月平均海水位變化與基隆潮位站資料比較

資料來源	測高資料時間段	測高與潮位站最近距離(km)	半徑(km)	相關係數	差值標準偏差(mm)
ESA	2002-2018	62.8	25	0.79	48
ESA	2002-2018	62.8	50	0.80	44
ESA	2002-2018	62.8	100	0.82	41
AVISO 沿軌跡點資料(TP+J1+J2+J3)	1993-2022	62.8	25	0.82	47
AVISO 沿軌跡點資料(TP+J1+J2+J3)	1993-2022	62.8	50	0.84	43
AVISO 沿軌跡點資料(TP+J1+J2+J3)	1993-2022	62.8	100	0.86	38
AVISO 沿軌跡點資料(ERS1+ERS2+ENV+SRL)	1992-2016	15.7	25	0.60	74
AVISO 沿軌跡點資料(ERS1+ERS2+ENV+SRL)	1992-2016	15.7	50	0.71	56
AVISO 沿軌跡點資料(ERS1+ERS2+ENV+SRL)	1992-2016	15.7	100	0.68	54
AVISO 沿軌跡點資料(TPN+J1N+J2N)	2002-2017	47.9	25	0.70	54
AVISO 沿軌跡點資料(TPN+J1N+J2N)	2002-2017	47.9	50	0.69	54
AVISO 沿軌跡點資料(TPN+J1N+J2N)	2002-2017	47.9	100	0.62	59
AVISO 網格資料	1993-2021	12.8	X	0.83	42

\*X 無參數。 \*\*TPN+J1N+J2N:當新測高衛星開始進行觀測任務，舊測高衛星會由原始軌道變換至變軌軌道，變軌軌道觀測的數據後面加上” N” 來表示。

基於長潭里潮位站參考點(TG997)和鄰近新水準原點(K997)間之地表呈現穩定狀態(圖 5-7)，長潭里潮位站僅改正逆氣壓效應和基準偏移。且根據上述基隆潮位站和衛星測高資料比較成果，改正後之長潭里潮位站資料將和衛星測高 AVISO 網格資料與 TP+J1/2/3 沿軌跡點資料(100 km 測高資料平均)相比較，成果如圖 5-9 所示。由圖可知，TP+J1/2/3 沿軌跡點 AVISO 及 AVISO 網格等資料和長潭里潮位站資料相當一致，相關係數和差值標準偏差分別為 0.64~0.65 和 54~55 mm，其中 2015~2017 年底間差異較大，推測原因為 2015 年潮位站剛開始運行，觀測儀器需要進行調整，且 2019 年之前潮位站資料未經過氣象署品管處理，故此段時間(2015~2017)資料品質較差。而 2019 年之後長潭里潮位站資料品質較佳(圖 5-9)，且有經過氣象署品管處理(圖 5-5)，和 TP+J1/2/3 沿軌跡點 AVISO 及 AVISO 網格等測高資料之相關係數分別為 0.72 和 0.78，而差值標準偏差分別降至 42 和 39 mm。另外，利用六參數擬合 2015~2022 長潭里潮位站之海水位變化速率為 $-5.6\pm 3.0$  mm/yr，顯示此段時間長潭里潮位站水位有降低之趨勢。由於長潭里潮位站時間涵蓋僅 2015~2022 年，短期資料計算海水位變化速率的不確定量較大，且長潭里潮位資料前期品質較差(圖 5-4 和 5-9)，因此目前討論長潭里潮位資料變化速率值意義不大。

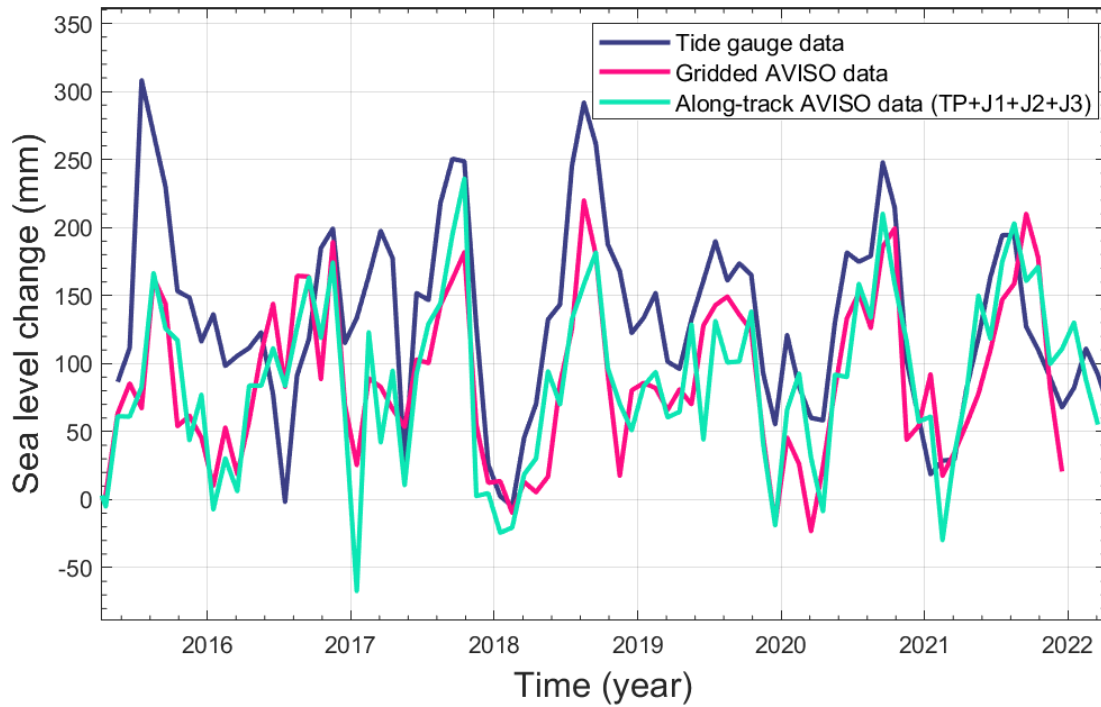


圖 5-9 長潭里潮位站(藍線)和衛星測高資料比較。紅線為 AVSIO 網格資料、綠線為 TP+J1/2/3 沿軌跡點 AVISO 資料(100 km 測高資料平均)。

#### (四)、基隆平均海水位計算

欲分析 TWVD2001 水準零點是否已有差異性變化，本研究使用 1991-2022 年後近 30 年基隆潮位站資料，計算不同時期基隆平均海水位高。從 1991 年開始，逐年計算每 19 年平均海水位高，以涵蓋時間段之中點做為參考時間。後續使用多參數擬合法時，海表面氣壓和氣溫皆分別相對於時間段中點時刻之一大標準氣壓(1013.25 mbar)和基隆觀測站長時間(1991-2022 年)平均溫度(23°C)。

圖 5-10 和表 5-2 為四種方法計算之平均海水位。由表可知，算術平均法、六參數擬合法、調和分析法以及多參數擬合法計算之各時間段基隆平均海水位高皆非常相近，並顯示不同時間段的基隆平均海水位和 TWVD2001 水準零點有 30-70 mm 的差異性變化，且差異性有逐年變大趨勢。各方法計算之 2004-2022

年(時間中點 2013.5)基隆平均海水位皆高於 TWVD2001 水準零點，四種方法計算之平均海水位的平均值為 67.3 mm。另四種方法計算之 2019-2022(時間中點 2013.5)平均海水位的平均值為 36.5 mm，與其他平均值有明顯不同，主要造成原因為潮位資料時間段太短，受到 2020 年海水為明顯偏低的影響(圖 5-9)。

表 5-3 為多參數擬合法[劉啟清，1998]計算每時間段基隆潮位站資料之擬合參數和其標準偏差，並對於擬合參數進行顯著性測試。由表可知，各時間段平均海水位高參數皆顯著，且標準偏差皆在 1.1 mm 以下，而各時間段氣壓擬合參數介於-11.0~-10.6 mm/mbar，此參數接近逆氣壓效應公式(式(4-3))中尺度因子-9.948[Dalrymple et al., 2012]，雖然仍約有 1 mm/mbar 差值，原因為多參數擬合法中潮汐年週期和半年週期等參數會些微影響氣壓擬合參數，因此氣壓擬合參數和逆氣壓效應之尺度因子有些微差異應屬合理。而降水量、溫度、分潮  $M_f$  和  $M_m$  等參數在擬合各時間段基隆站資料時多為不顯著(表 5-3)，其中分潮  $M_f$  和  $M_m$  為週期訊號，對於平均海水位計算影響較小，而降水量和溫度變化對於日平均基隆海水位的影響，在部分時間段的擬合參數是顯著的，但是其量值非常小，未來計算基隆平均海水位時可忽略此兩個參數。

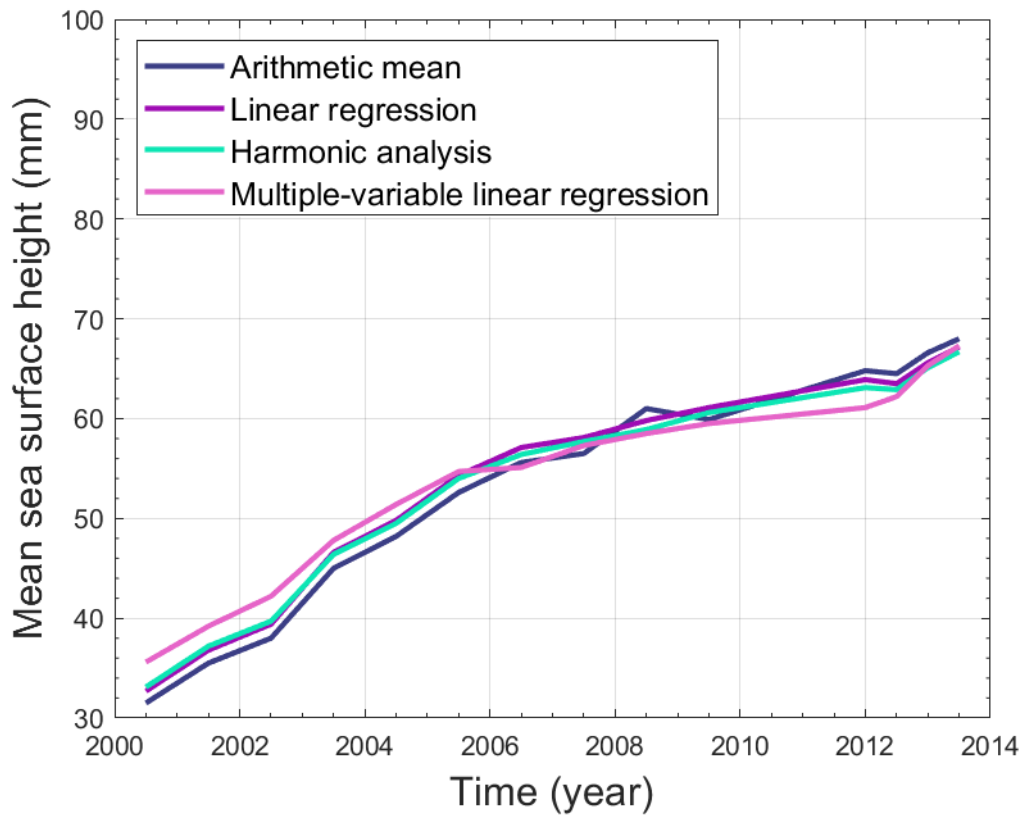


圖 5-10 四種方法計算之平均海水位高。藍線為算術平均法、紫線為六參數擬合法、綠線為調和分析法、粉紅線為多參數擬合法[劉啟清，1998]。

表 5-2 四種方法計算之基隆潮位站平均海水位高

時間中點	時間段	平均海水位高 (mm)					四種方法計算 平均海水位高 之平均值
		算術平均法 (月平均資料)	六參數擬合法 (月平均資料)	調和分析法 (逐時資料)	多參數擬合法 (日平均資料) [劉啟清， 1998]		
2000.5	1991-2009	31.5	32.7±2.5	33.1±0.2	35.6±1.0	33.2	
2001.5	1992-2010	35.5	36.8±2.5	37.2±0.2	39.2±1.0	37.2	
2002.5	1993-2011	38.0	39.4±2.5	39.7±0.2	42.2±1.0	39.8	
2003.5	1994-2012	45.0	46.6±2.6	46.4±0.2	47.8±1.0	46.5	
2004.5	1995-2013	48.2	49.8±2.6	49.5±0.2	51.4±1.1	49.7	
2005.5	1996-2014	52.6	54.3±2.7	54.0±0.2	54.7±1.1	53.9	
2006.5	1997-2015	55.6	57.1±2.7	56.4±0.2	55.1±1.1	56.1	
2007.5	1998-2016	56.5	58.1±2.7	57.7±0.2	57.3±1.1	57.4	
2008.5	1999-2017	61.0	59.8±2.7	58.9±0.2	58.5±1.0	59.6	
2009.5	2000-2018	59.9	61.1±2.7	60.6±0.2	59.5±1.0	60.3	
2012.0	2001-2019	64.8	63.9±2.7	63.1±0.2	61.1±1.0	63.2	
2012.5	2002-2020	64.5	63.5±2.6	62.9±0.2	62.2±1.0	63.3	
2013.0	2003-2021	66.6	65.6±2.6	65.1±0.2	65.3±1.0	65.7	
2013.5	2003-2022	68.0	67.2±2.5	66.7±0.2	67.3±0.9	67.3	
2019.15	2019-2022	34.6	34.7±10.5	37.3±0.8	39.4±3.6*	36.5	
2019.15	2015-2022	70.9	68.9±4.0	70.7±0.4	68.2±1.6*	69.7	
2019.15	2004-2022	77.6	74.2±2.5	73.9±0.2	84.0±1.6/ 75.4±1.3*	77.4/75.3*	
2019.15	1991-2022	83.3	80.7±3.2	80.1±0.3	83.8±1.1	82.0	
2022.0	1991-2022	91.7	88.3±3.6	87.6±0.3	92.0±1.3	89.9	

\*無計算分潮  $M_N$ (18.6 年)參數。



表 5-3 多參數擬合法計算之基隆潮位站參數成果與顯著性測試

參數	2000.5	2001.5	2002.5	2003.5	2004.5	2005.5	2006.5	2007.5	2008.5	2009.5	2010.5	2011.5	2012.5	2013.5
截距 (mm)	35.6±1.0	39.2±1.0	42.2±1.0	47.8±1.0	51.4±1.1	54.7±1.1	55.1±1.1	57.3±1.1	58.5±1.0	59.5±1.0	61.1±1.0	62.2±1.0	65.3±1.0	67.3±0.9
斜率 (mm/year)	4.6±0.2	4.0±0.2	3.5±0.2	4.0±0.2	4.4±0.2	3.2±0.2	0.7±0.2	1.5±0.3	2.3±0.2	1.1±0.3	-1.5±0.4	0.3±0.4*	2.6±0.3	3.0±0.2
氣壓 (mm/mbar)	-10.8±0.3	-10.6±0.3	-10.9±0.3	-11.0±0.3	-10.9±0.3	-11.0±0.3	-10.9±0.3	-10.8±0.3	-10.7±0.3	-10.6±0.3	-10.6±0.3	-10.7±0.3	-10.7±0.3	-10.8±0.3
降水量	0.2±1.0*	1.1±1.0*	1.6±0.9*	1.6±1.0*	2.0±1.0	1.8±1.0*	1.7±1.0*	1.7±1.0*	2.5±1.0	2.7±1.0	3.4±1.0	3.7±1.0	3.6±1.0	3.5±1.0
溫度 (mm/°C)	-0.8±0.5*	-0.7±0.5*	-0.5±0.5*	-0.5±0.5*	-0.4±0.5*	-0.7±0.5*	-1.0±0.5	-0.5±0.5*	-0.3±0.5*	0.0±0.5*	0.1±0.5*	0.0±0.5*	-0.1±0.5*	0.1±0.5*
M <sub>f</sub> (mm)	3.5±1.2	3.1±1.2	2.3±1.2*	2.2±1.2*	2.6±1.2	2.6±1.3	2.8±1.3	2.3±1.3*	2.4±1.3*	2.6±1.2	1.7±1.3*	1.1±1.2	1.3±1.2*	1.4±1.2*
M <sub>m</sub> (mm)	0.8±1.2*	0.7±1.2*	0.7±1.2*	0.3±1.2*	1.0±1.2*	1.6±1.3*	1.3±1.3*	0.6±1.3*	0.4±1.3*	0.3±1.2*	0.4±1.3*	0.7±1.2*	1.0±1.2*	1.4±1.2*
S <sub>sa</sub> (mm)	13.5±1.2	12.9±1.2	12.8±1.2	12.5±1.2	11.2±1.2	12.4±1.3	12.5±1.3	11.6±1.3	14.2±1.3	13.7±1.2	12.6±1.3	11.7±1.2	11.6±1.2	13.2±1.2
S <sub>a</sub> (mm)	83.7±2.4	84.3±2.3	84.3±2.3	83.8±2.4	83.4±2.4	87.3±2.5	86.7±2.5	82.4±2.5	83.1±2.5	81.9±2.5	81.6±2.5	82.4±2.4	84.4±2.4	81.8±2.3
M <sub>N</sub> (mm)	8.3±1.6	6.7±1.5	7.4±1.4	7.4±1.8	10.0±2.0	4.0±1.3	17.2±2.1	12.2±2.1	8.1±1.6	14.3±1.6	21.0±2.0	14.6±1.3	15.9±1.8	16.9±1.7

\*未通過 95%信心水準之顯著性測試。

### (五)、長潭里平均海水位計算

欲計算長潭里潮位站之平均海水位，以分析由 K997 研訂臺灣高程系統的可  
行性。後續計算長潭里平均海水位高，將以資料涵蓋時間段之中點做為參考時間  
(2019.15)。使用多參數擬合法時，海表面氣壓和氣溫皆分別相對於時間段中點時  
刻之一大標準氣壓(1013.25 mbar)和平均溫度(23°C)。

本研究使用 2015-2022 年長潭里潮位站資料計算平均海水位高，然而資料僅  
涵蓋 7~8 年(短於 18.6 年)，因此計算平均海水位時需改正節點潮。我們分別引  
入和未加入節點潮改正參數於調和分析法(式(4-6))計算平均海水位，結果顯示兩

平均海水位的差值僅 0.1 mm，表示節點潮改正對於利用 2015-2022 年長潭里潮位站資料計算平均海水位影響很小。另外，我們利用多參數擬合法計算長潭里潮位資料之平均海水位，計算參數結果如表 5.4 所示。由表可知，雖然分潮  $M_N$  通過 95%信心水準之顯著性測試，但  $M_N$  振幅之標準偏差為 17.7 mm，相較於基隆潮位站資料之  $M_N$  振幅之標準偏差 1.3~2.1 mm(表 5.3)，此誤差量並不合理；而且長潭里潮位站資料涵蓋僅 7~8 年，未到分潮  $M_N$  周期(18.6 年)之一半，強迫擬合長周期訊號，容易產生混疊效應(aliasing effect)而影響其他參數估計，例如長潭里潮位站之海水位變化速率達  $-9.5 \pm 8.1$  mm/yr; 當分潮  $M_N$  自多參數擬合法中移除時，長潭里海水位速率降至  $-3.6 \pm 0.6$  mm/yr(表 5-4)，與六參數擬合之海水位變化速率( $-5.6 \pm 3.0$  mm/yr)較一致，因此後續利用多參數擬合計算長潭里平均海水位高不考慮節點潮改正。

表 5-5 為利用四種方法計算 2015~2022 長潭里潮位站資料之平均海水位。由表可知，算術平均法、六參數擬合法、調和分析法以及多參數擬合法計算之長潭里平均海水位皆非常相近，並顯示長潭里平均海水位高於 TWVD2001 水準零點約 121.0 mm；此外為了與長潭里平均海水位比較，我們也利用四種方法計算 1991-2022 年和 2004-2022 年基隆潮位站資料(時間中點 2019.15)之平均海水位，其平均值為 82.0 和 75.3 mm，分別與長潭里平均海水位相差 39.0 和 45.7 mm，造成差異原因可能是長潭里潮位站資料涵蓋時間較短且資料品質較差、兩潮位站海水面地形不一樣、基隆潮位站參考基準未釐清(如基隆潮位資料無法反映出每年 5 mm 之地表下沉量)等所導致。

另外，若使用長潭里潮位站品質較佳的時間段(2019-2022)資料計算平均海水位，四種方法計算長潭里潮位站資料(時間中點 2019.15)之平均海水位為 122.8~129.9 mm (表 5-5)，造成極端差值 7.1 mm (最大和最小之差值)之主要原因是計算平均海水位時，需利用擬合的海水位變化速率推算平均海水位高至相同中點時間(2019.15)，而短期資料計算海水位變化速率的不確定量較大，容易導致不同方法計算之平均海水位高有些差距。另外，以 2019-2022 長潭里潮位站資料計算平均海水位的平均值為 127.8 mm，和 2015~2022 長潭里平均海水位平均值有 6.8 mm 的差異，表示長潭里潮位站資料涵蓋時間較短且資料品質較差會造成平均海水位計算上之差距。

表 5-4 多參數擬合法計算之長潭里潮位站參數成果與顯著性測試

參數	2019.15	2019.15
截距(mm)	99.1±5.1	120.4±1.8
斜率(mm/year)	-9.5±8.1*	-3.6±0.6
氣壓(mm/mbar)	-10.8±0.5	-10.7±0.5
降水量	5.0±1.7	4.9±1.7
溫度(mm/°C)	-0.3±0.8*	0.0±0.8*
M <sub>f</sub> (mm)	3.6±2.0*	3.5±2.0*
M <sub>m</sub> (mm)	3.7±2.0*	3.6±2.0*
S <sub>ss</sub> (mm)	19.8±2.1	20.6±2.1
S <sub>a</sub> (mm)	64.2±4.8	62.2±4.7
M <sub>N</sub> (mm)	35.6±17.7	X

\*未通過 95%信心水準之顯著性測試。X 無計算該參數。

表 5-5 四種方法計算之長潭里潮位站平均海水位高

時間中點	時間段	平均海水位高 (mm)				
		算術平均法 (月平均資料)	六參數擬合法 (月平均資料)	調和分析法 (逐時資料)	多參數擬合法 (日平均資料) [劉啟清, 1998]	四種方法計算 平均海水位高 之平均值
2019.15	2015-2022	122.1	120.5±5.6	121.1±0.3	120.4±1.8*	121.0
2019.15	2019-2022	122.8	128.7±9.9	129.8±0.7	129.9±3.4*	127.8

\*無計算分潮  $M_N$ (18.6 年)參數。

### (六)、長潭里 GNSS 計算結果

欲分析長潭里周圍地質是否穩固，需解算長潭里 GNSS 測站之觀測資料。

本研究利用加拿大 CSRS-PPP 進行 2015~2023 長潭里 GNSS 精密單點定位解

算，解算成果如圖 5-11 所示。由圖可知，長潭里 GNSS 解在平面方向上每年約有數公分移動量(E 和 N 方向移動速率分別為 $+4.6\pm 0.02$  cm/yr 和 $-1.2\pm 0.003$

cm/yr)，而高程每年變動量為 0.3 mm 往上(高程變化速率 $+0.3\pm 0.1$  mm/yr)，表示

長潭里潮位站地表高程呈現穩定平穩狀態，此結果和國土測繪中心提供 GNSS

高程變化速率 $+0.2\pm 0.03$  mm/yr 一致。另外，此成果也與 111 年度「高程基準

檢測工作」報告[內政部國土測繪中心，2023]中長潭里潮位站參考點(TG997)和

鄰近新水準原點(K997)地表持續呈現穩定狀態相符。

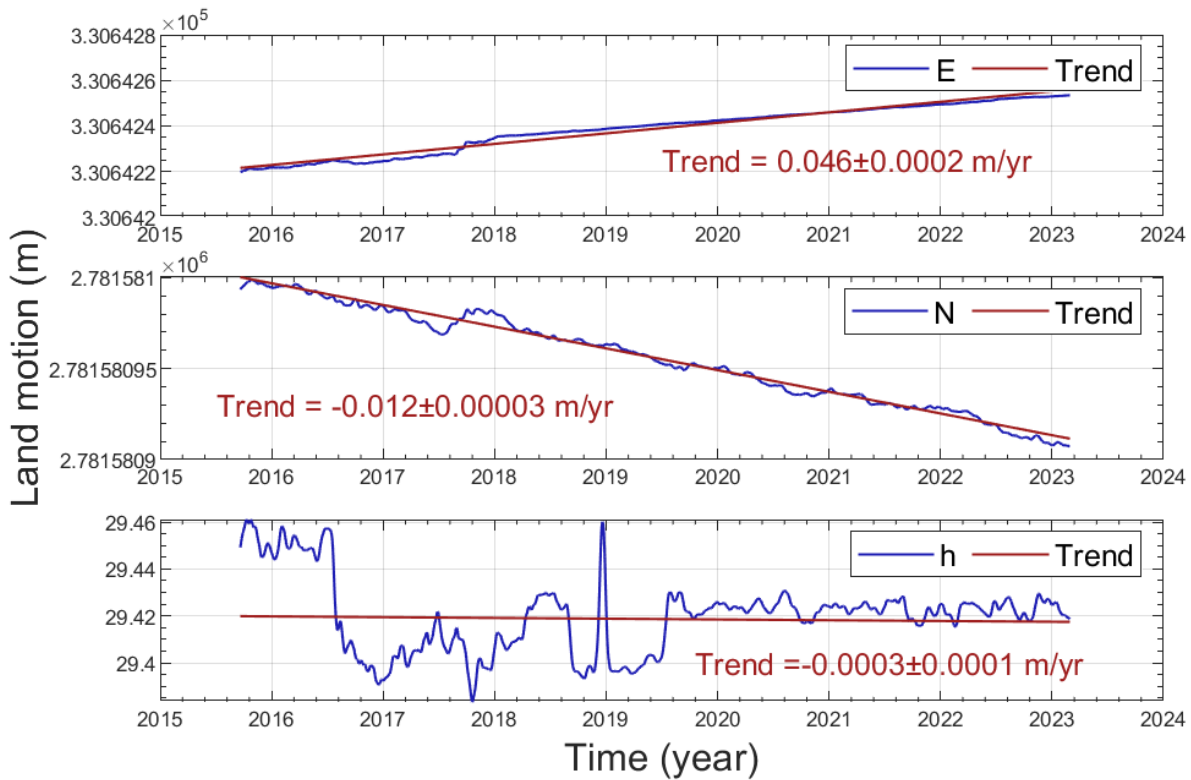


圖 5-11 長潭里 GNSS 解(藍線)以及擬合斜率(紅線)，其中各方向 GNSS 解皆應用 30 天移動平均進行平滑化。E、N、h 分別表示地理東方、地理北方、橢球高。

### (七)、以 K997 研訂臺灣高程系統可行性之討論

若欲以 K997 研訂臺灣高程系統，應根據 4.3 節所述，可分成三部分進行探討，(1) 潮位站、水準原點和附近水準點之周圍地表是否呈現穩定狀態、(2) 潮位站資料品質和長度是否可以計算穩定之水準零點、(3) 原水準原點、歷年水準檢測成果和新水準原點間高程差是否一致。

➤ 潮位站、水準原點和附近水準點之周圍地表是否呈現穩定狀態:

本案目的為欲研訂新高程系統，因此 GNSS 解僅討論高程方向。由 GNSS 高程解可知(圖 5-11)，長潭里 GNSS 高程方向變化速率為  $+0.3 \pm 0.1 \text{ mm/yr}$ ，表示長潭里潮位站地表高程呈現穩定狀態。另根據 111 年度「高程基準檢測工

作」報告[內政部國土測繪中心，2023]，長潭里潮位站參考點(TG997)和鄰近新水準原點(K997)地表高程變動亦呈現穩定情形(圖 5-7)。結合上述長潭里 GNSS 成果和國土測繪中心歷年「高程基準檢測工作」報告可推論，長潭里潮位站、附近潮位站參考點(TG997)和新水準原點(K997)之周圍地表高程呈現穩定狀態。

➤ 潮位站資料品質和長度是否可以計算穩定之水準零點:

計算之 2019.15 年長潭里平均海水位比 TWVD2001 水準零點高 121.0 mm，然而 1991-2022 和 2004-2022 年基隆潮位站資料推估相同時間點(2019.15)的平均海水位為 82.0 和 75.3 mm，分別和長潭里平均海水位相差 39.0 和 45.7 mm，此差值可能是長潭里潮位站資料涵蓋時間較短且資料品質較差、兩潮位站海水面地形不同、基隆潮位站參考基準未釐清(如基隆潮位資料無法反映出每年 5 mm 之地表下沉量)等所致。本研究建議繼續累積多年潮位站資料，將使長潭里潮位站資料更能計算穩定之水準零點。另外，亦建議國土測繪中心向長潭里潮位站管理單位(交通部中央氣象署)確定當地觀測情形是否可能長期維持優質水位觀測數據(如資料缺漏短、基準偏移處少)。

➤ 原水準原點、歷年水準檢測成果和新水準原點間高程差是否一致:

由國土測繪中心歷年「高程基準檢測工作」報告可知，原水準原點(K999)和新水準原點(K997)間高程差呈現一致狀態(圖 5-7)。根據 111 年度「高程基準檢測工作」報告[內政部國土測繪中心，2023]，原水準原點(K999)高程為 5.6156 m，新水準原點(K997)和原水準原點(K999)高程差為 0.80666 m，

故新水準原點(K997)高程為 4.80894 m; 長潭里潮位站參考點(TG997)和新水準原點(K997)高程差為 0.14288 m, 故長潭里潮位站參考點(TG997)高程為 4.66606 m (圖 5-12)。目前計算時間 2019.15 年長潭里平均海水位為 121.0 mm, 若以長潭里潮位站之平均海水位做為水準零點, 並結合 111 年度「高程基準檢測工作」報告[內政部國土測繪中心, 2023]水準檢測成果重新計算 K997 高程為 4.68794 公尺(圖 5-12), 與利用原水準原點(K999)計算之 K997 高程(4.80894 公尺)相差為 121 mm, 此差值為 2019.15 年長潭里平均海水位比 TWVD2001 水準零點高 121 mm 所造成。另外, 2019.15 年長潭里平均海水位(2015~2022)比 2019.15 年基隆平均海水位(1991-2022)高 39 mm (圖 5-12), 亦表示分別以基隆潮位站和長潭里潮位站計算之平均海水位為水準零點, K999 和 K997 的正高會有 39 mm 的差異。

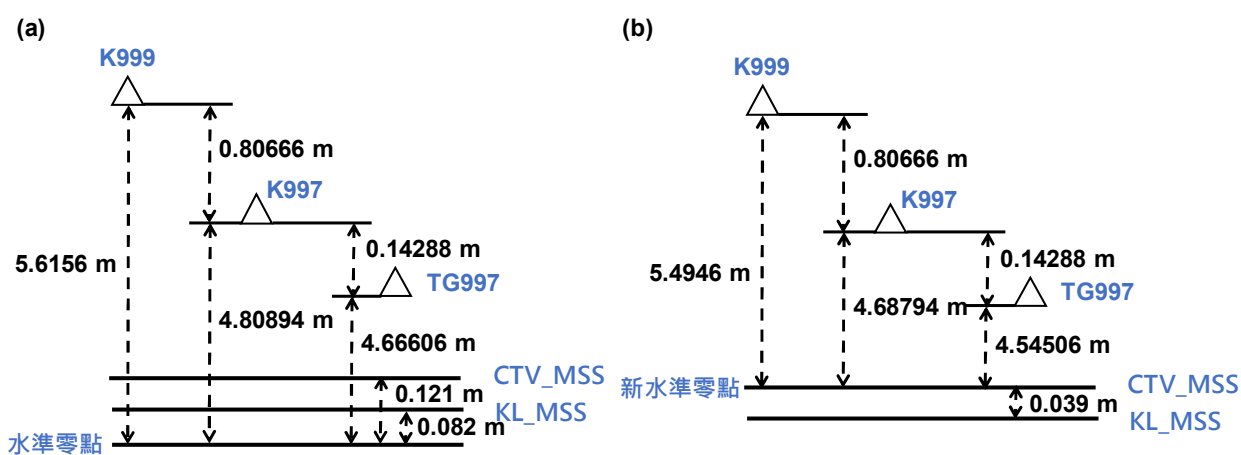


圖 5-12 水準零點、原水準原點(K999)、新水準原點(K997)、長潭里潮位站參考點(TG997)以及 2019.15 年基隆(KL\_MSS)和長潭里平均海水位(CTV\_MSS)間高程差關係圖。(a) 以 TWVD2001 水準零點做為高程起算零點, (b) 以長潭里平均海水位(CTV\_MSS)做為高程起算零點。

## 六、成果結論和建議事項

### (一)、結論

本計畫工作項目之時程規劃和完成進度如表 2-1 甘特圖所示，期末報告已按照規劃進度如質如期完成。本案中基隆和長潭里潮位站紀錄、衛星測高以及氣象模型等資料皆與當地或是鄰近觀測站資料相互比對進行資料檢核，確保資料準確及一致性，基隆潮位站資料最後僅改正逆氣壓效應，而長潭里潮位站資料經逆氣壓效應和基準偏移改正，做為後續研究資料。本案利用四種方法分別計算基隆潮位站和長潭里潮位站之平均海水位高，並比較分析。研究成果總結下如，

- (1). 四種方法計算之平均海水位皆相近，因此將四種方法計算平均海水位高取平均值，做為後續分析使用。
- (2). 各時間段基隆平均海水位皆高於 TWVD2001 水準零點約 33.2~67.3 mm，2004-2022 年(時間中點 2013.5)比 TWVD2001 水準零點高 67.3 mm，故現今基隆平均海水位與 TWVD2001 水準零點已有顯著差異變化。
- (3). 2015-2022 年(時間中點 2019.15)長潭里平均海水位比 TWVD2001 水準零點高 121.0 mm。另外，本案亦利用 1991-2022 年和 2004-2022 年基隆潮位站資料分別計算時間中點 2019.15 之平均海水位為 82.0 和 75.3 mm，與長潭里平均海水位相差 39.0 和 45.7mm，此差值可能是長潭里潮位站資料涵蓋時間較短(約 7~8 年)且前期資料品質較差、兩潮位站海水面地形不同、基隆潮位站參考基準未釐清(如基隆潮位資料無法反映出每年 5 mm 之地表下沉量)等所導致。



(4). 本案利用加拿大 CSRS-PPP 進行 2015~2023 長潭里 GNSS 精密單點定位解算。由成果可知，長潭里 GNSS 高程變化速率為  $0.3\pm 0.1$  mm/yr (圖 5-11)，與國土測繪中心提供 GNSS 高程變化速率  $0.2\pm 0.03$  mm/yr 相符，表示長潭里潮位站地表高程方向呈現穩定狀態。另根據 111 年度「高程基準檢測工作」報告[內政部國土測繪中心，2023]，長潭里潮位站參考點(TG997)和鄰近新水準原點(K997)之地表高程皆呈現穩定狀態(圖 5-7)。結合上述可推論，長潭里潮位站、附近潮位站參考點(TG997)和新水準原點(K997)之周圍地表高程呈現穩定狀態。

## (二)、建議

(1). 根據 111 年度「高程基準檢測工作」報告[內政部國土測繪中心，2023]，自民國 87 年(西元 1998 年)起，基隆潮位站水準點(TG01)和鄰近水準點(K021)相對於 K999 皆持續呈現穩定下陷，年平均下陷量約 5 mm (圖 4-10)，然而基隆潮位站資料並無明顯受地表下陷量影響(圖 5-2)，顯示這兩個數據並不一致，建議國土測繪中心每年在進行潮位站高程基準檢測工作時，亦可在潮位站水準點和鄰近水準點上進行 GNSS 觀測，用來釐清觀測資料之差異性。基隆潮位站周圍水準網每年皆有檢測，因此只要從水準網中至少選擇一點進行 GNSS 觀測，結合水準檢測成果，即可獲得周圍水準點之絕對地表垂直變動量。另外，根據美國海洋作業圖資產品服務中心(Center for Operational Oceanographic Products and Services ) [CO-OPS, 2013]和澳洲政府[POTMSL,

2018]建置國家潮位站之標準規範，建議 GNSS 觀測頻率為至少每年一次，澳洲規範中建議每次至少觀測 12 小時。

(2). 若要以長潭里潮位站資料計算精確之水準零點，建議能收集更長期穩定之海水位觀測資料，因此建議國土測繪中心向長潭里潮位站管理單位(交通部中央氣象署)確定長潭里潮位站當地觀測情形是否可能持續維持優質水位觀測數據(如資料缺漏短、基準偏移處少)。

(3). 本計畫計算之基隆潮位站水準零點已有變化，基隆平均海水位隨著時間持續變高，目前基隆平均海水位(時間中點 2022)比 TWVD2001 水準零點高 89.9 mm。後續建議邀請國內專家學者針對水準零點進行研析討論，針對水準零點是否修正方式進行研商，建議討論議題如下，

#### I. TWVD2001 水準零點是否重新公告?

理論上，基隆平均海水位高於 TWVD2001 水準零點並不影響高程測量的實務工作；但因海水面持續上升，目前基隆平均海水位(時間中點 2022)比 TWVD2001 水準零點高 89.9 mm，對於港口、海堤或河堤等需考慮海水位來設計和竣工的工程，則有影響。

#### II. 臺灣正高系統水準零點是否需要更新?

臺灣正高系統水準零點多久需評估是否需要更新?水準零點採用靜態、動態或半動態?；或更新至未來某一時刻(如 2030 年)，以符合基隆平均海水位之現況或增加安全性等。

#### III. 長潭里潮位站是否可提供精確水準零點?

長潭里 2019.15 年平均海水位(2015~2022)比基隆 2019.15 年平均海水位(1991-2022)高 39 mm，表示若分別以基隆潮位站和長潭里潮位站資料計算之平均海水位為水準零點，K999 和 K997 的正高會有 39 mm 的差異。

#### IV. 討論未來台灣高程系統發展

目前世界已在發展下一代高程系統。美國 National Geodetic Survey 提出的 GRAV-D 方案，旨在於 2022 年重新定義美國的垂直基準面。國際大地測量協會 (IAG) 2015 年發布了關於國際高程參考系統 (IHR) 的定義和實現的決議，根據這一決議，IHR 是一個與地球共同旋轉的地球位能參考系統。美國新的垂直基準面將以重力法大地水準面模型為基礎，並利用 National Geodetic Survey GRAV-D 方案的重力資料進行加強。

## 參考文獻

- 內政部，2018，我國垂直基準轉換模式建置工作案第四期成果期末報告。
- 內政部，2020，我國近岸平均海水面與海潮模式精進工作案第四期成果期末報告。
- 內政部，2021，109 年我國垂直基準轉換模式測試及評估工作案第四期成果期末報告。
- 史天元，2016，基隆臺灣水準原點，地籍測量，35(1)，第 1-14 頁。
- 高煥欽，2010，台灣附近波形重定之測高資料精度評估，碩士論文，國立成功大學測量及空間資訊學系，臺南。
- 國土測繪中心，2022，111 年臺灣一等水準網水準測量成果說明。
- 郭重言、林立青、藍文浩、莊文傑、李俊穎，2015，臺灣四周海域長期性之海水面變化趨勢評估，交通部港灣技術研究中心。
- 張憲國、史天元，2022，最低天文潮位計算標準作業程序探討，國土測繪與空間資訊，10(1)，第 1-19 頁。
- 楊亭宜，2014，利用波形重定改善近岸與內陸小水體 Envisat 測高資料，碩士論文，國立成功大學測量及空間資訊學系，臺南。
- 劉啟清，1998，台灣地區驗潮站長期監測資料之計算及高程基準網之建立工作，內政部。
- AVISO and PODAAC User Handbook, 2001, IGDR and GDR Jason Products.
- Cazenave A., Y. Gouzenes, F. Birol, F. Legér, M. Passaro, F.M. Calafat, A. Shaw, F. Niño, J.F. Legeais, J. Oelmann, and J. Benveniste, 2022, New network of virtual altimetry stations for measuring sea level along the world coastlines, *SEANOE*, doi:10.17882/74354.
- Chang, H.K., C.C. Cheng, and P.T.Y. Shih, 2022, On the variation of LAT resulting from predictions computed using different tidal constituent sets, *J. Chin. Inst. Eng.*, doi:10.1080/02533839.2022.2141342.
- 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, *J. Geophys. Res.*, 116, doi:10.1029/2011JB008242.
- Church, J., and N.J. White, 2011, Sea-level rise from the late 19th to the Early 21<sup>st</sup> Century, *Surv. Geophys.*, doi: 10.1007/s10712-011-9119-1.
- CO-OPS, 2013, CO-OPS Specifications and Deliverables for the Installation, Operation and Removal of Water level Stations, NOAA/NOS, updated March 2013.

- Dalrymple, R.A., L.C. Breaker, B.A. Brooks, D.R. Cayan, G.B. Griggs, W. Han, B.P. Horton, C.L. Hulbe, J.C. McWilliams, P.W. Mote et al., 2012, *Sea-Level Rise for the Coasts of California, Oregon, and Washington: Past, Present, and Future*, The National Academies Press: Washington, DC, USA, 1–217.
- Deng, X., and W.E. Featherstone, 2006, A Coastal Retracking System for Satellite Radar Altimeter Waveforms: Application to ERS-2 Around Australia, *J. Geophys. Res.*, 111 (C6), C6012. doi:10.1029/2005JC003039.
- Foreman, M.G.G., J.Y. Cherniawsky, and V.A. Ballantyne, 2009, Versatile Harmonic Tidal Analysis: Improvements and Applications, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 26(4), 806-817, doi:10.1175/2008JTECHO615.1.
- Guo, J., Y. Gao, C. Hwang, and J. Sun, 2010, A multi-subwaveform parametric retracker of the radar satellite altimetric waveform and recovery of gravity anomalies over coastal oceans, *Science China Earth Sciences*, 610–616.
- Grgić, M. and T. Bašić, 2021, Radar Satellite Altimetry in Geodesy-Theory, Applications and Recent Developments, *In* B. Erol and S. Erol, eds, IntechOpen, London, UK, doi:10.5772/intechopen.97349.
- Haigh, I., M. Eliot, and C. Pattiaratchi, 2011, Global influences of the 18.61 year nodal cycle and 8.85 year cycle of lunar perigee on high tidal levels, *Journal of Geophysical Research*, 116, C06025, doi:10.1029/2010JC006645.
- Hersbach, H., B. Bell, P. Berrisford, G. Biavati, A. Horányi, J. Muñoz Sabater, J. Nicolas, C. Peubey, R. Radu, I. Rozum, D. Schepers, A. Simmons, C. Soci, D. Dee, and J.N. Thépaut, 2018, ERA5 hourly data on single levels from 1959 to present, Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), doi:10.24381/cds.adbb2d47.
- Hwang, C., J. Guo, X. Deng, H.Y. Hsu, and Y. Liu, 2006, Coastal gravity anomalies from retracked Geosat/GM altimetry: improvement, limitation and the role of airborne gravity data, *Journal of Geodesy*, 80(4), 204–216.
- Iliffe, J.C., M.K. Ziebart, J.F. Turner, A.J. Talbot, and A. P. Lessnoff, 2013, Accuracy of vertical datum surfaces in coastal and offshore zones, *Survey Review*, 45(331), 254–262, doi:10.1179/1752270613Y.0000000040.
- Lan, W.H., C.Y. Kuo, H.C. Kao, L.C. Lin, C.K. Shum, K.H. Tseng, and J.C. Chang, 2017, Impact of Geophysical and Datum Corrections on Absolute Sea-Level Trends from Tide Gauges around Taiwan, 1993–2015, *Water*, 9.
- Lee, H., C.K. Shum, W. Emery, S. Calmant, X. Deng, C.Y. Kuo, and Y.C. Yi, 2010, Validation of Jason-2 altimeter data by waveform retracking over California coastal ocean, *Marine Geodesy*, 304–316.

- Mercier F., V. Rosmorduc, L. Carrere, and P. Thibaut, 2010, Coastal and Hydrology Altimetry Product (PISTACH) Handbook; CLS-DOS-NT-10-246. Paris, France: CNES.
- Parker, B., 2005, Tides, In Encyclopedia of Coastal Science; Schwartz, M.L., Ed.; Springer: Dordrecht, The Netherlands; 987–996.
- Parker, B., 2007, Tidal Analysis and Prediction, NOAA Special Publication NOS COOPS 3. U.S. Department of Commerce, Silver Spring, 1-378.
- Peng, D., H. Palanisamy, A. Cazenave, and 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.
- POTMSL, 2018, Australian Tides Manual Special Publication No. 9 Version 5.0.
- Pugh, D., 1987, Tides, Surges, and Mean Sea Level, John Wiley, New York.
- Shum, C.K., J.C. Ries, and B. D. Tapley, 1995, The accuracy and applications of satellite altimetry, *Geophys. J. Int.*, 121, 321-336.
- SROCC, 2019, IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate (eds H-O Pörtner et al.). In press.
- 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.
- Way Point Product Group, 2016, GrafNav/GrafNet 8.70 User Manual, Canada.
- Yang, L., M. Lin, Q. Liu, and D. Pan., 2012, A coastal altimetry retracking strategy based on waveform classification and sub waveform extraction, *International Journal of Remote Sensing*, 33, 7816–7819.
- Zhang, 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).

## 附錄一、機關需求

本案於 112 年 2 月 23 日於國土測繪中心召開需求訪談會議，其相關討論事項及結論如下，本案後續會依照以下結論辦理，其相關執行方法及步驟則於第三章說明：

1. 長潭里潮位站同時採用音波式、壓力式及雷達式 3 種水位計量測潮位變化，本案請團隊評估歷年觀測資料品質，並與交大史天元教授(內政部委託建置)討論後，採用最可信的量測資料來進行後續計算。
2. 長潭里潮位站之資料分析請團隊比照基隆潮位站，採用算術平均法、調和分析法、六參數擬合及多參數線性擬合等 4 種方式計算平均海水位並分析比較其差異。
3. 本案計畫以長潭里潮位站資料計算水準零點，結合水準高程差資料，重新計算 K997 高程值，並與 K999 引測之 K997 高程比較。最後分析以 K997 訂定臺灣高程系統之可行性，後續請團隊於報告內容提出相關具體建議及解決方法。
4. 本案請團隊於期程內新增兩查核點，分別為期中報告前(112 年 6 月)及期末報告前(112 年 9 月)，以利研究進度管制。

本案於 112 年 5 月 22 日於國土測繪中心召開工作會議，其討論事項及結論如下，本案後續會依照以下結論辦理：

1. 期中報告將加入由多參數擬合法計算之基隆潮位站平均海水位高，並和其他

方法成果相比較。

2. 測繪中心將重新提供 K999、K021、K997、TG01 和 TG997 等水準點歷年成果。



## 附錄二、期中報告審查意見及意見回覆

### 「112年度融合多元感測成果精進臺灣高程基準委託研究

(NLSC-112-35)」

#### 期中報告審查意見

審查意見	團隊回覆
1. 摘要及 P2提及使用4種方法計算，請補充說明哪4種方法。	1. 已補充。
2. 本案將評估由K997研訂臺灣高程系統的可行性，是否能在適當處補充說明由哪些資訊加以判斷其可行性?作為臺灣高程系統須具備那些條件?	2. 臺灣高程基準應具備條件如: (1)潮位站、水準原點和附近水準點之周圍地質呈現穩定平穩狀態、(2)潮位站應有較佳資料品質(如長期記錄之潮位資料、資料缺漏短、基準偏移處少)可計算穩定之水準零點、(3) 原水準原點、歷年水準檢測成果和新水準原點間高程差應一致。上述已補充至第四章(三)研究步驟。
3. P12及P34等處多次提及「海水面速率」，如何表示上升或下降，請統一修正。	3. 全文已將「海水面速率」改為「海水位變化速率」，+和-分別表示海水位上升和下降。
4. P14機關需求章節建議移至附錄，並補充工作會議紀錄相關內容。	4. 已改正。
5. P23 提及利用龍洞及麟山鼻潮位站輔助進行基隆潮位站基準偏移評估，請補充說明相關評估結果。	5. 已補充於相關說明和比較圖(圖4-8)於第四章(二)研究方法。
6. P34提及以經過各項改正後的潮位站資料與衛星測高資料相比較，此處所指衛星測高資料斜率 $3.2\pm 0.3\text{mm/yr}$ ，資料來源為何?請補充說明。	6. 此處衛星測高資料來源為TP+J1/2/3沿軌跡點AVISO資料(100 km測高資料平均)，並已補充說明於期末報告。
7. P40提及基於基隆潮位站與衛星測高資料比較結果，長潭里潮位站僅改正逆氣壓效應和基準偏移，惟 P35敘明本研究僅改正逆氣壓效應之資料計算平均海水位?請補充說明。	7. 已補充說明於第五章(一)基隆潮位站資料處理結果評估和第五章(二)長潭里潮位站資料處理結果。
8. 有關 P40長潭里潮位資料2015-2023資料與衛星測高資料相較，其相關係數和標準	8. 原則上應該使用資料品質較佳的時間段進行平均海水位計算，但是長潭里潮位站

<p>偏差為0.68與52mm，如以2019-2023之資料比較，則相關係數與標準偏差則提升為0.82及36mm，未來計算平均海水位時會以哪一時間段資料計算?是否有差異?</p>	<p>於2019年以後資料品質較為穩定，2019~2023觀測時間僅有5年之久，時間長度偏短，因此期末報告已分別計算2015-2023和2019-2023之長潭里平均海水位高，並比較是否有顯著差異。</p>
<p>9. P40提及利用差值標準偏差(32mm)將差值超過兩倍標準偏差之數據移除，請補充說明為何是兩倍標準偏差?</p>	<p>9. 文章中已改成”利用差值標準偏差(32 mm)將差值超過三倍標準偏差之數據移除，並計算2021/01~2021/08差值平均值為19 mm”。</p>
<p>10. P48建議本中心進行潮位站高程基準檢測時可在潮位站水準點與鄰近水準點進行GNSS觀測，是否有建議點位、觀測頻率及觀測時間?</p>	<p>10. 基隆潮位站周圍水準網每年皆有檢測，因此只要從水準網中選擇一點進行GNSS觀測，結合水準檢測成果，即可獲得周圍水準點之絕對地表垂直變動量。另外，根據美國海洋作業圖資產品服務中心 (Center for Operational Oceanographic Products and Services ) [CO-OPS, 2013] 和澳洲政府 [POTMSL, 2018] 建置國家潮位站之標準規範，建議GNSS觀測頻率為至少每年一次，澳洲規範中建議每次至少觀測12小時。</p> <p>i. CO-OPS, 2013, CO-OPS Specifications and Deliverables for the Installation, Operation and Removal of Water level Stations, NOAA/NOS, updated March 2013.</p> <p>ii. POTMSL, 2018, Australian Tides Manual Special Publication No. 9 Version 5.0.</p>
<p>11. 文字修正:  (1)P1 提及 91 年副點 K998 滅失，經查應為 99 年，請查明修正。  (2)圖 5-4 中圖例與圖標題說明不一致，請修正。  (3)圖 6-5 中圖例文字有誤，請修正。</p>	<p>11. 已修正。</p>

## 附錄三、期末報告審查意見及意見回覆

### 「112年度融合多元感測成果精進臺灣高程基準委託研究 (NLSC-112-35)」

#### 期末報告審查意見

審查意見	團隊回覆
1. P22說明本計畫為評估基準偏移問題，選擇基隆潮位站附近之龍洞和麟山鼻潮位站相比較，但圖4-8又顯示原始基隆潮位站水位觀測資料和龍洞及麟山鼻資料不一致，差值變化已遠大於基準偏移?因此如何評估?	1. 基隆潮位站資料和龍洞及麟山鼻潮位站資料並不一致，差值變化已遠大於基準偏移值，因此本計畫不使用龍洞和麟山鼻潮位站資料對基隆和長潭里潮位站資料進行比較分析。
2. 圖4-8之分析結果，建議於 P22文章中增加量化數值說明。	2. 修改為”原始基隆潮位站水位觀測資料和龍洞及麟山鼻潮位站資料並不一致，差值振幅皆超過 20 公分，因此龍洞和麟山鼻潮位站並不適合做為基隆和長潭里潮位站之輔助站”。
3. 長潭里2021以前壓力式的資料品質較不穩定，P36提及將壓力式及音波式資料整合時有將音波式資料基準上調19mm，試問如果是將壓力式資料下調19mm，如此一來 P51的結論所述差異24.6mm 是否會有改善?	3. 修改為”...，因此將壓力式資料基準往上調整 19 mm。”。對於差值並不會改善，因為在潮位站資料進行基準偏移改正後，會將潮位站資料基準調整至和氣象署提供該潮位站最新資料基準一致。
4. P52係利用長潭里潮位站資料解算平均海水面，進而推估 K997高程，再與由水準原點 K999以水準測量方式獲得成果比較，請問重新計算 K997之高程4.70694公尺如何算得?建議以圖示說明各點位間關係。	4. 已增加圖示(圖 5-12)說明各點位間關係。
5. P53提及長潭里平均海水面與基隆海水面相差24.6mm，其原因可能為涵蓋時間較短且前期資料品質較差、兩潮位站海水面地形不同、基隆潮位站參考基準未釐清所	5. 基隆潮位站參考基準未釐清部分是指基隆潮位站資料無法反映出每年 5 mm 之地表下沉量。已經將上述敘述增加於報告中。

致，其中基隆潮位站參考基準未釐清所指為何？	
6. 長潭里資料經氣象局品管項目為何？是否會有重複改正情形？	6. 品管單位主要為剔除錯誤紀錄以及基準偏移修正，因此應無重複改正情形。
7. 本案結論說明基隆潮位站水準零點已有變化，並建議邀請專家學者針對水準零點是否修正進行研商，建議說明此一變動對應用方面的影響。	7. 理論上，基隆平均海水位高於 TWVD2001 水準零點並不影響高程測量的實務工作；但因海水面持續上升，目前基隆平均海水位(時間中點 2022)比 TWVD2001 水準零點高 89.9 mm，對於港口、海堤或河堤等需考慮海水位來設計和竣工的工程，則有影響。上述說明已補充於成果結論和建議事項。
8. 由本計畫之分析，我們面臨一個重要問題就是平均海水面可能不是那麼穩定，未來應該如何因應？	8. 已補充於成果結論和建議事項。
9. 本案用以分析比較之資料來源包含衛星測高、GNSS、潮位資料及水準資料等，分析時是否考量資料精度差異？	9. 衛星測高單點海水面高度觀測資料之精度為 4~5 公分，但本計畫是將周圍數公里海水面高取平均值，精度可提高。測高資料離潮位站有一定距離，因此無法相兩者資料計算之平均海水位相比較，但計畫中假設相鄰海域海水面變化差異不大，故測高資料僅作為輔助資料，來與潮位站月平均資料比較。而 GNSS、潮位資料及水準等資料若為長期觀測、觀測品質佳，且使用各自合適解算方式，則三者資料估算參數之精度皆可達到公分級，甚至是公釐等級。
10. 文字及格式修正： (1)封面格式請配合修正。 (2)文中提及中央氣象局部分請統一修正為中央氣象署。 (3)文中表標題不應該有參考文獻及句號，請修正。 (4)P4 及 P9 提及臺灣水準原點遷移至國立海洋科技博物館，時間有差異，請查明修正。 (5)P48 表 5-4 欄位跨頁，請調整格式。 (6)P52 文中 K997 高程應為 4.80894 公尺，請查明修正。	10. 已修改。

內政部國土測繪中心



地址：臺中市南屯區黎明路 2 段 497 號 4 樓

網址：[www.nlsc.gov.tw](http://www.nlsc.gov.tw)

總機：(04)22522966

傳真：(04)22592533