

融合多元感測成果精進臺灣高程基準

郭重言¹ 藍文浩² 高煥欽³

¹國立成功大學測量及空間資訊學系

²國立高雄科技大學土木工程系

³正修科技大學土木與空間資訊系

國立成功大學測量及空間資訊學系 經緯廳

113年4月9日（星期二）



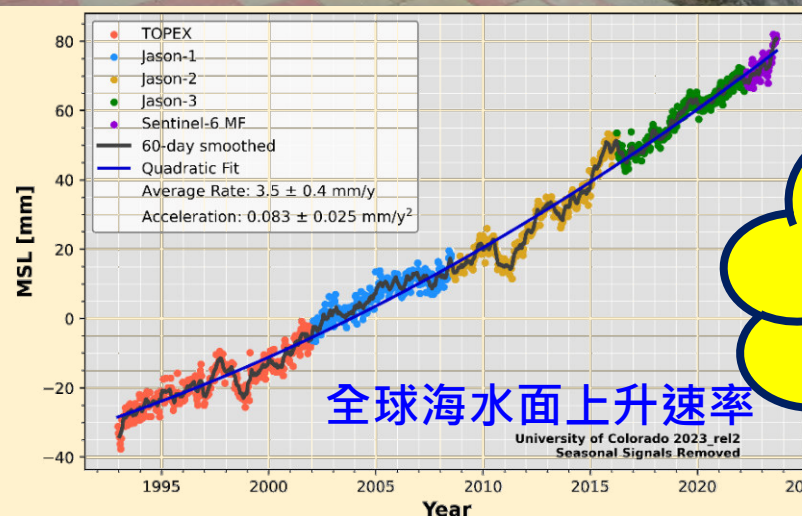
研究動機與目的

2

舊水準原點(主點：K999, 副點：K998)

新水準原點(主點：K997, 副點：K996)

國家高程控制系統



基隆潮位站水準零點
是否有顯著變動?
長潭里潮位站是否可
提供精確水準零點?

全球海面上升速率

University of Colorado 2023_rel2
Seasonal Signals Removed

[Figure Credit: 國土測繪中心; University of Colorado]

■ 潮位站觀測資料

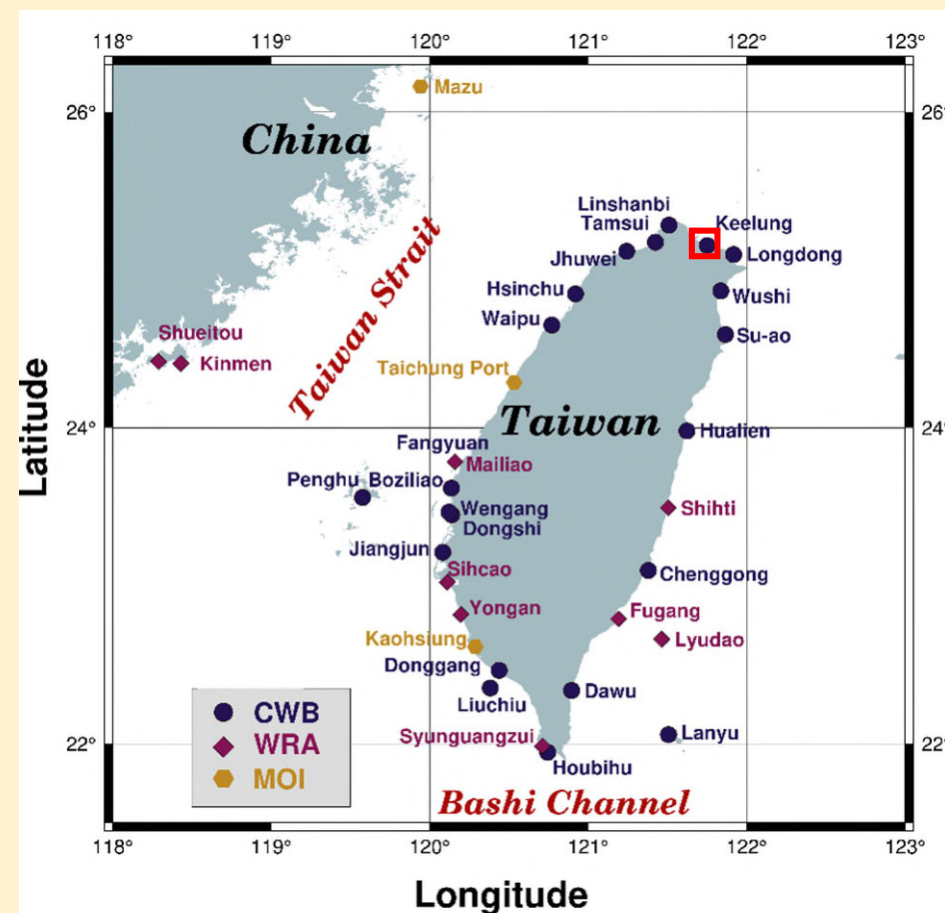
- 基隆潮位站: 1991/01~2022/12
- 長潭里潮位站: 2015/04~2022/12

■ 基隆和長潭里附近氣象觀測站之溫度、氣壓和降水量等資料(1947~2022)

■ 歷年水準檢測資料測量結果(1998~2022)

■ 長潭里GNSS觀測資料(2015~2023)

臺灣深度基準及深度系統使用之33個潮位站位置分佈圖



[內政部，2021]

■ 衛星測高近岸資料

➤ AVISO X-TRACK資料

- 時間涵蓋範圍: 1993/03-2022/07
- 空間取樣頻率: 1 Hz (約6~7 km)
- 衛星任務: TOPEX/Poseidon (TP)、Jason-1/-2/-3 (J1/2/3)

➤ AVISO 0.25° x 0.25° 網格資料

- 時間涵蓋範圍: 1993/01-2022/07
- 衛星任務: ERS-1/2、TP、Geosat Follow on (GFO)、J1/2/3、Envisat、Cryosat-2、SARAL/AltiKa、Sentinel-3

■ European Centre for Medium-range Weather Forecasts (ECMWF)

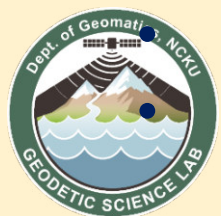
➤ ECMWF Reanalysis v5 (ERA5) 全球海表面壓力資料

時間涵蓋範圍: 1959-至今
時間取樣頻率: 1小時

➤ ESA 近岸資料

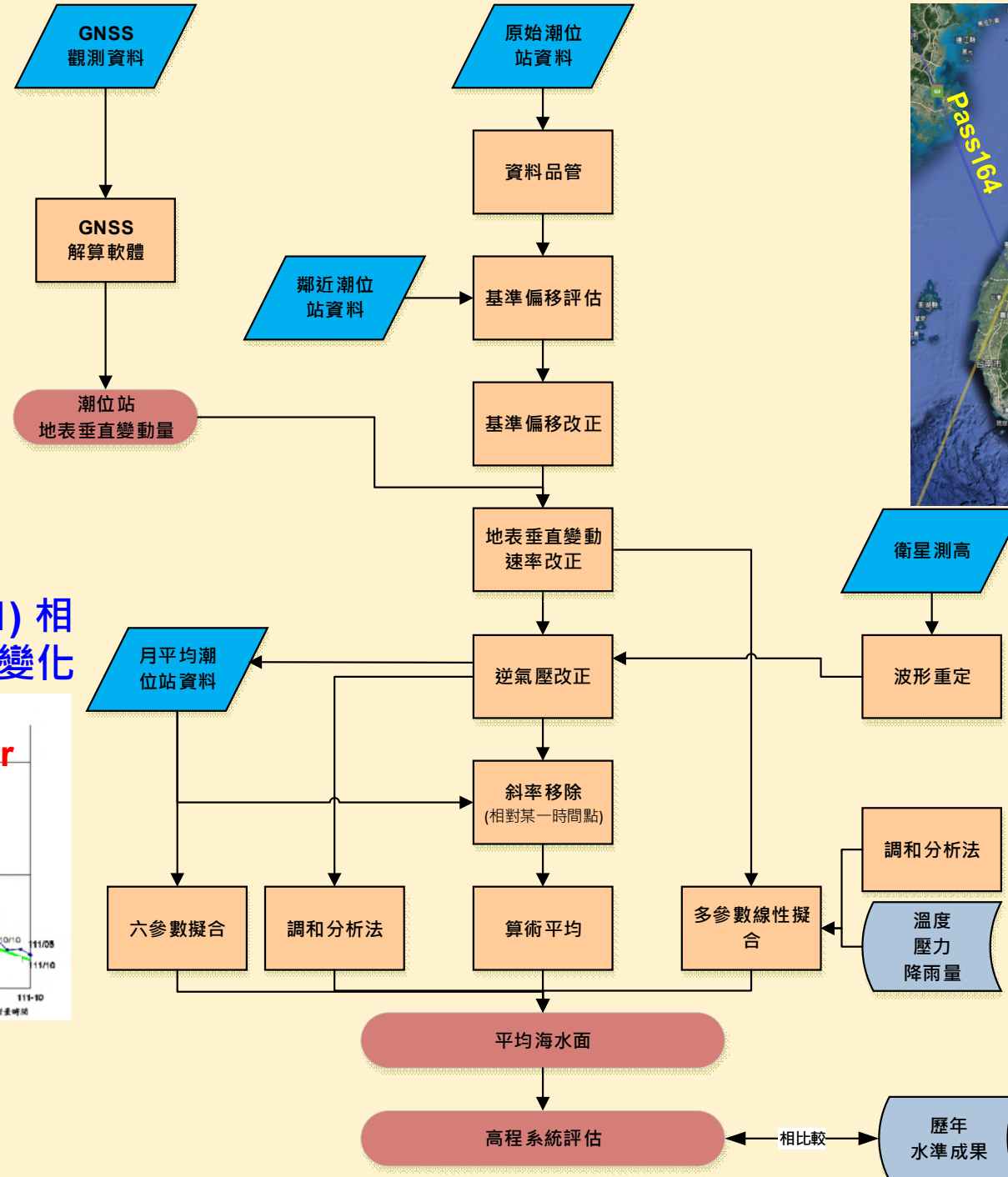
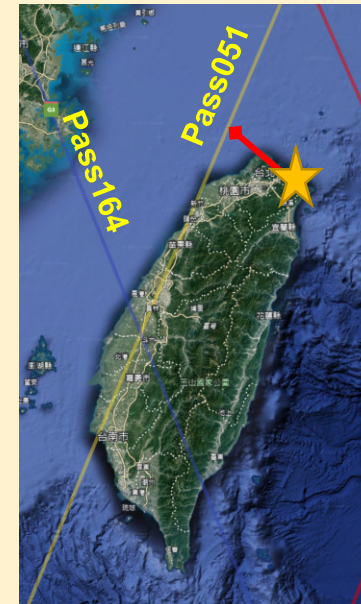
- 結合高取樣率、自適應前緣子波形算法及 X-TRACK
- 時間涵蓋範圍: 2002/01-2018/05
- 空間取樣頻率: 20 Hz (約300 m)
- 衛星任務: J1/2/3

- 空間解析度: 0.25° x 0.25° 全球網格資料



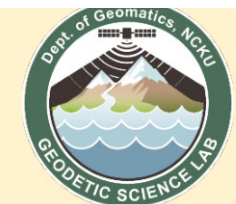
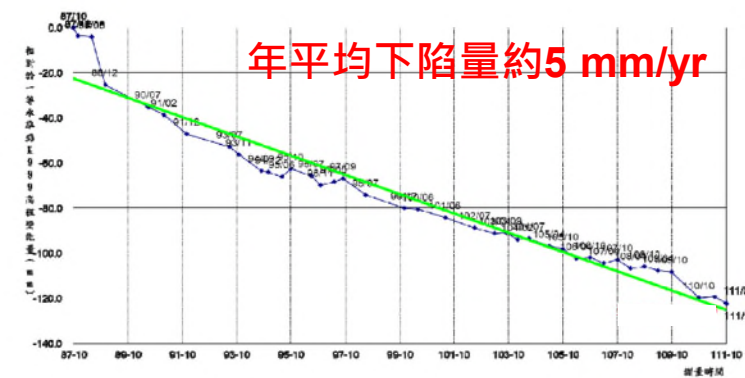
研究 流程圖

- 距離基隆潮位站最近測高觀測點當作基準點
- 分別將基準點周圍半徑25 km、50 km和100 km內測高觀測量分別取平均值作為當地海水位變化



基隆潮位站鄰近水準點(K021) 相對於水準原點K999之高程差變化

年平均下陷量約5 mm/yr



- 平均海水位(mean sea level, MSL)定義為潮位站在一段時間內，所有有效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
- (法I) 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，

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

TG_m : 潮位站月平均時間序列

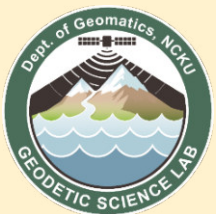
a : 某一參考時刻的平均海水位高

b : 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 : 時間



- (法II) 以原始潮位站資料計算平均海水位，可利用調和分析法進行計算，並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如下：

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

TG : 潮位站水位高度資料

t_i : 觀測時間

a : 某一參考時刻的平均海水位高

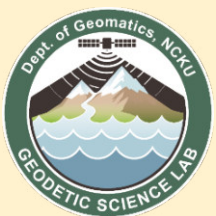
b : 斜率

f_k 和 u_k : 對應分潮 k 的振幅和相位之節點潮改正參數

C_k 、 g_k 、 ω_k : 各分潮之振幅、相位、角頻率

V_k : 各分潮的時間引數(argument) [張憲國和史天元，2022]

- (法III) 利用算術平均法計算潮位站資料之平均海水位高，在計算前需要依據某一參考時刻(本研究採時間序列中點時刻)移除斜率。

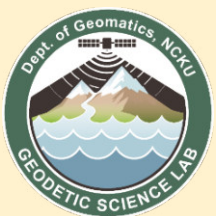


- (法IV) TWVD2001的平均海水位高是結合調和分析法並加入溫度 T 、壓力 P 和降水量 R 等多項參數同時進行多參數線性擬合，公式如下[劉啟清，1998]，

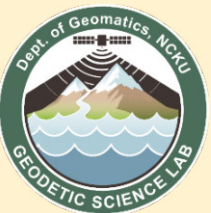
$$TG(t) = a + b(t) + c_1T(t) + c_2P(t) + c_3R(t) + \sum_{i=1}^m \left[A_i \sin(\omega_i(t)) + B_i \cos(\omega_i(t)) \right]$$

c_1 、 c_2 、 c_3 : 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 : 分潮個數 ($m = 5$)

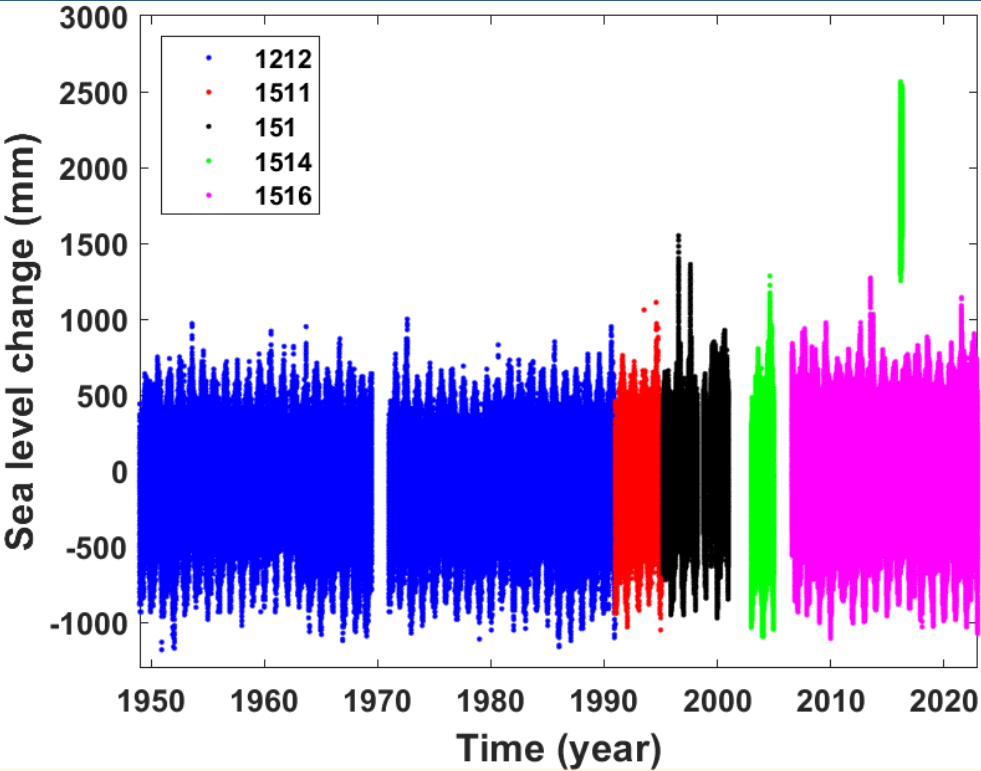
本研究依照劉啟清[1998]採用5個天文潮汐之分潮，分別為 M_f (13.6612天)、 M_m (27.5533天)、 S_a (364.9635天)、 S_{sa} (182.7040天)以及 M_N (18.6672年)。



基隆潮位站資料處理

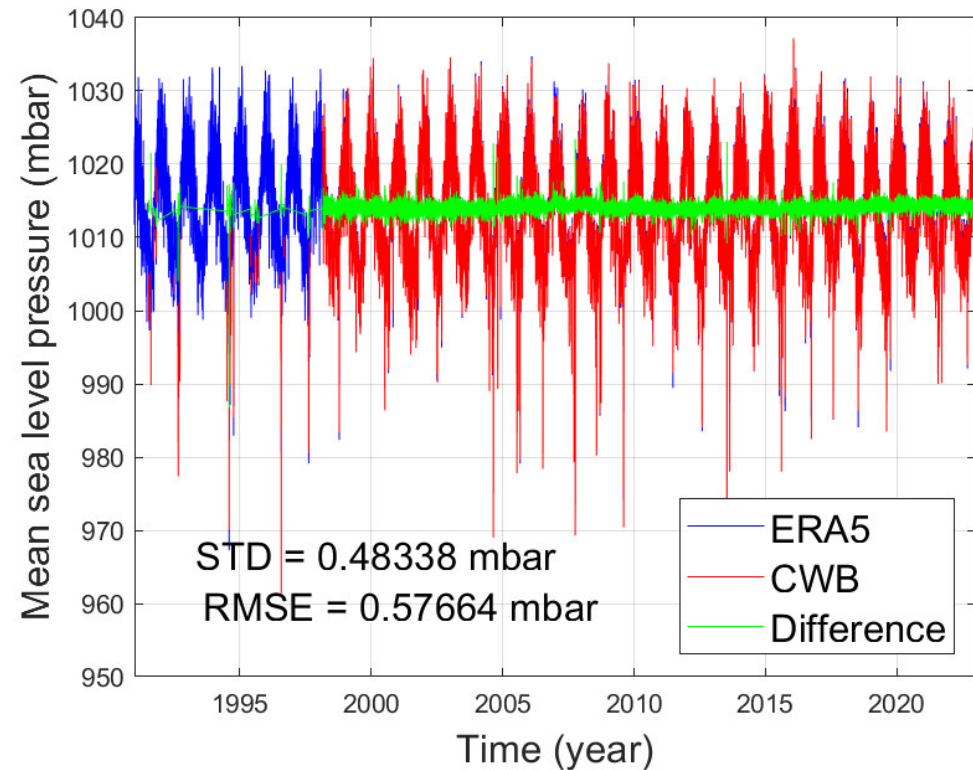


基隆潮位站原始觀測紀錄

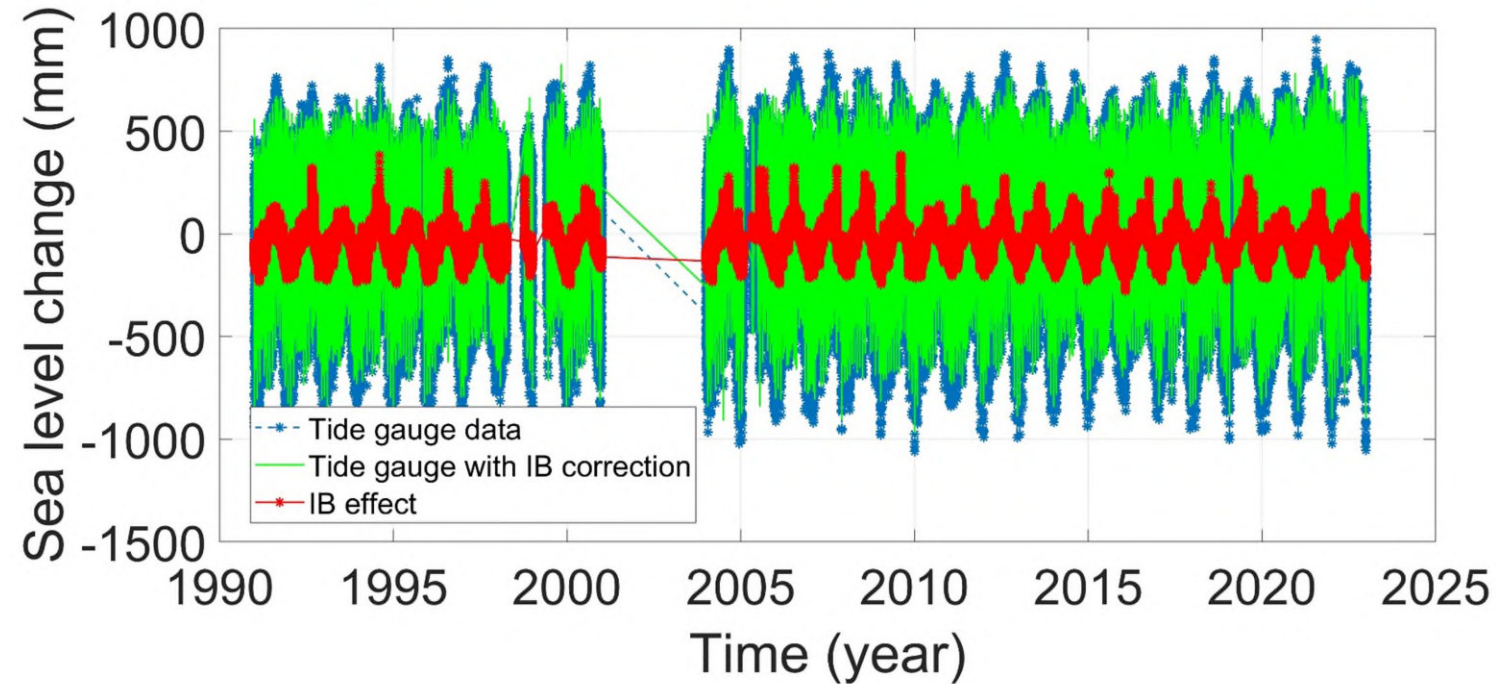


站號	取樣時間 間隔	緯度	精度	觀測時間	水位觀測儀器	管理單位
1212	60分鐘	25°08'49"N	121°44'41"E	1946/05-1990/12	本研究計算1991~2022基隆平均海水位	
1511	60分鐘	25°09'26"N	121°44'39"E	1991/01-1995/03	Sutron Aquatrak Accoustic 超音波式	臺灣港務股份有限公司
151	6分鐘	25°09'26"N	121°44'39"E	1995/03-2000/12		中央氣象局/基隆港務局
1514	6分鐘			2003/01-2016/05	Aquatrak 4100 series 超音波式	港灣技術研究中心
1516	6分鐘	25°09'18"N	121°45'08"E	2006/08-至今		中央氣象局

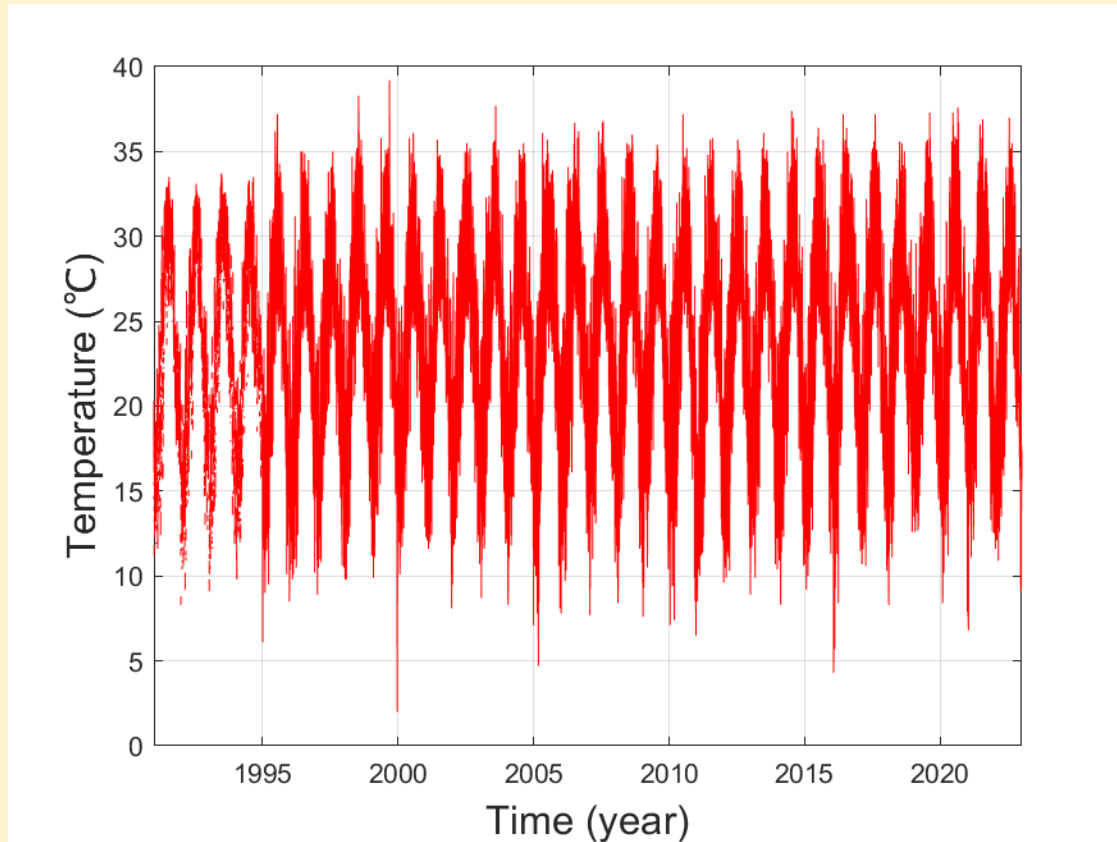
■ 基隆氣壓觀測站實測資料和 ERA5 模型比較



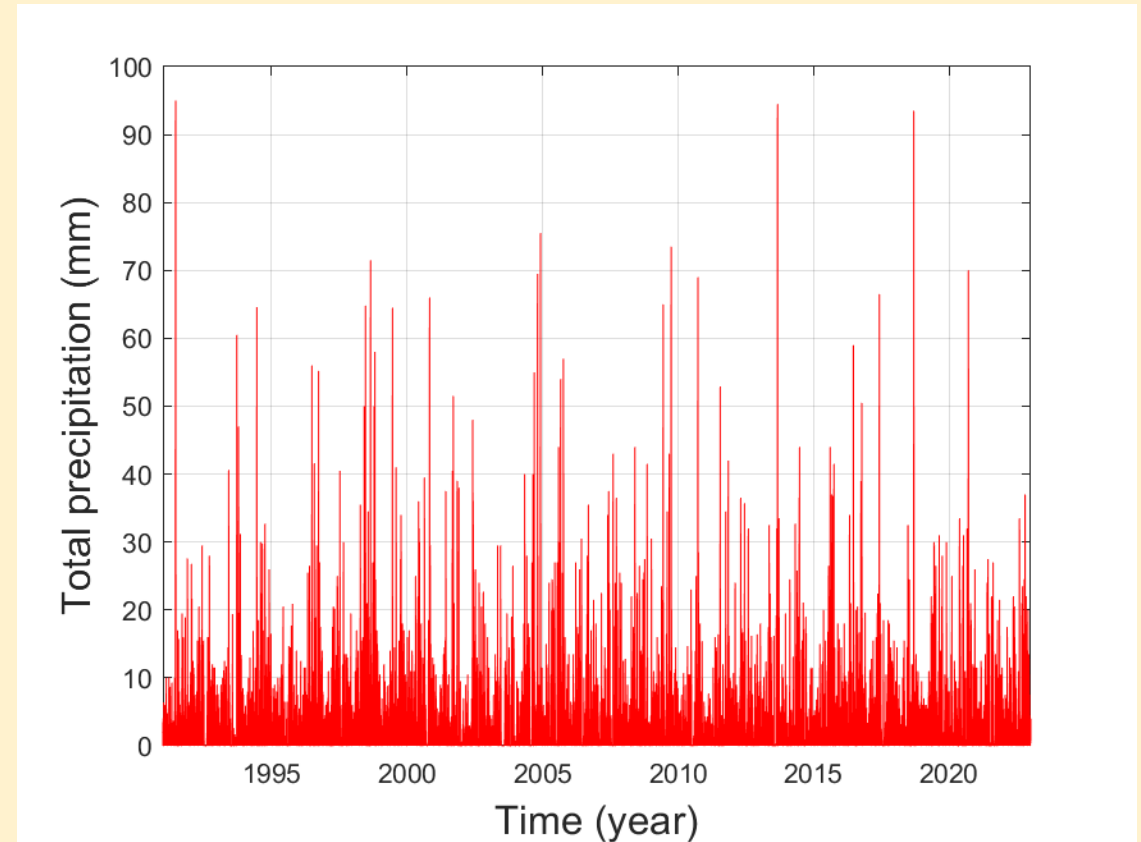
■ 基隆潮位站之逆氣壓效應改正



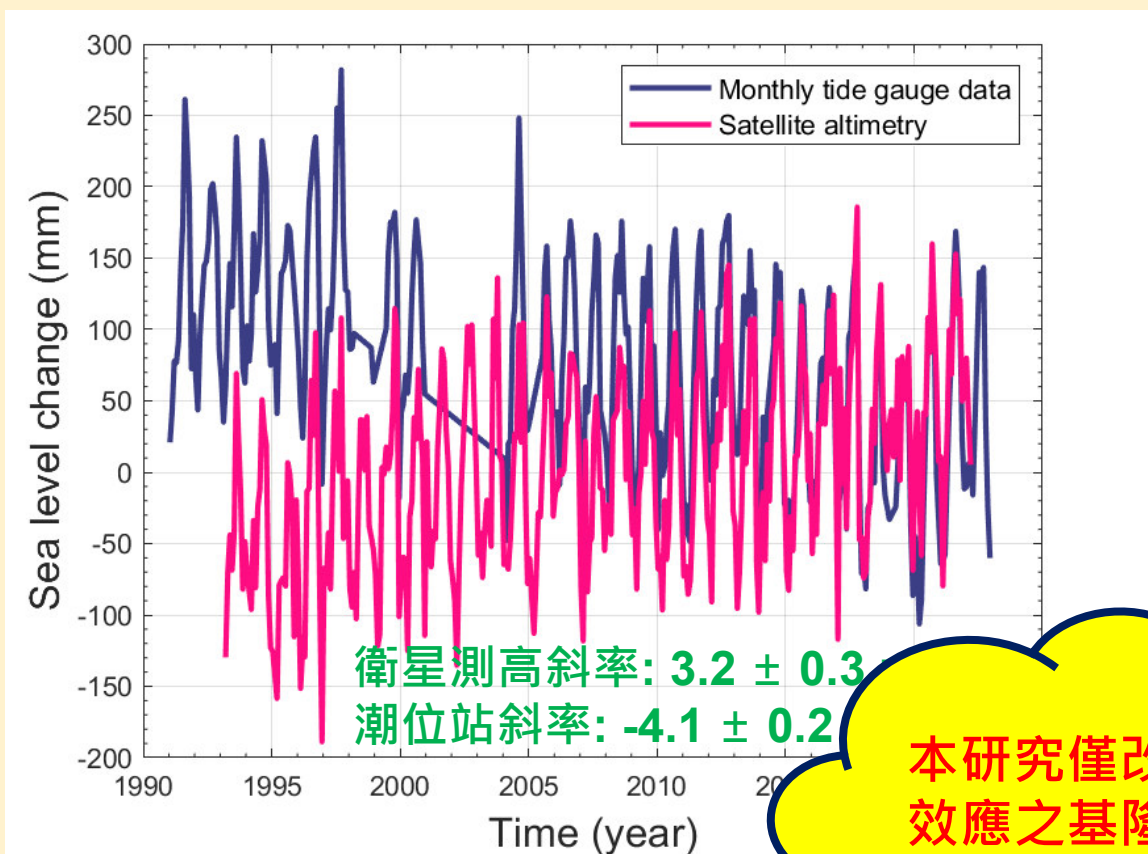
■ 逐時氣溫



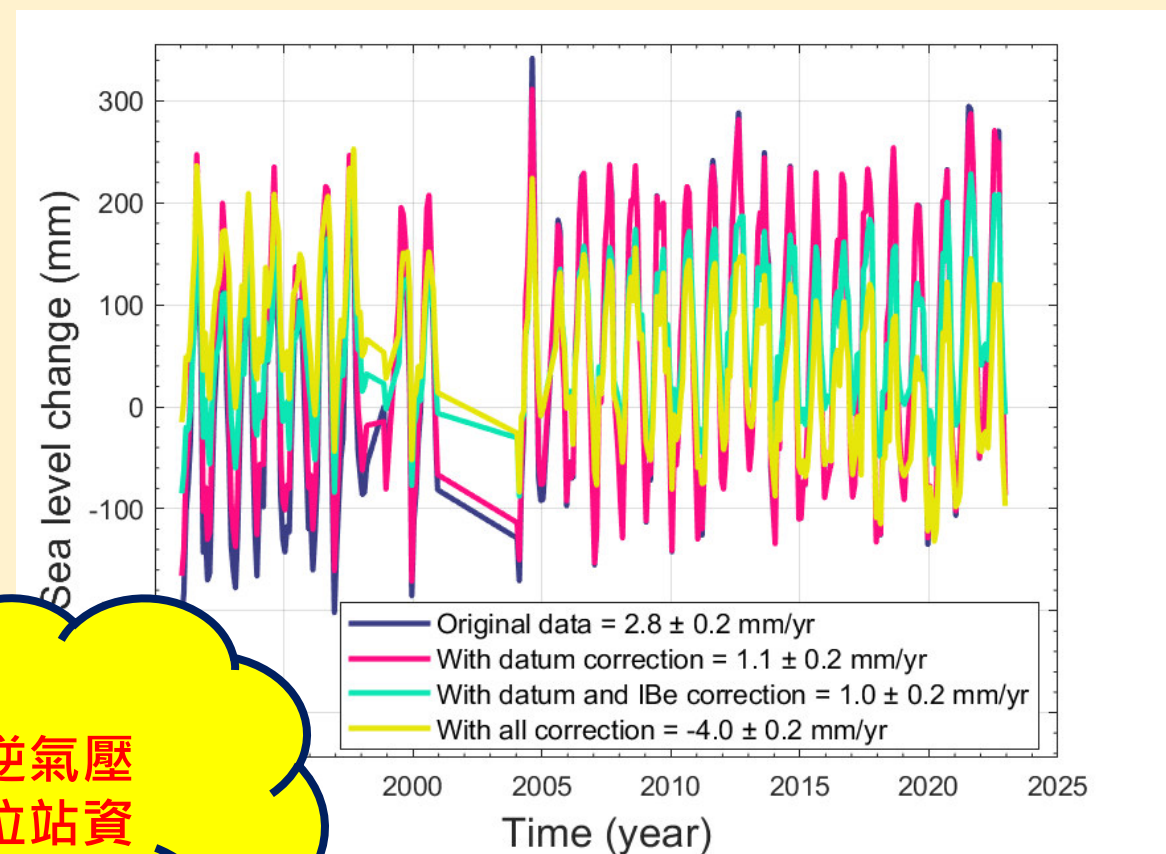
■ 逐時降水量



■ 基隆潮位站(經所有改正)和衛星測高資料比較

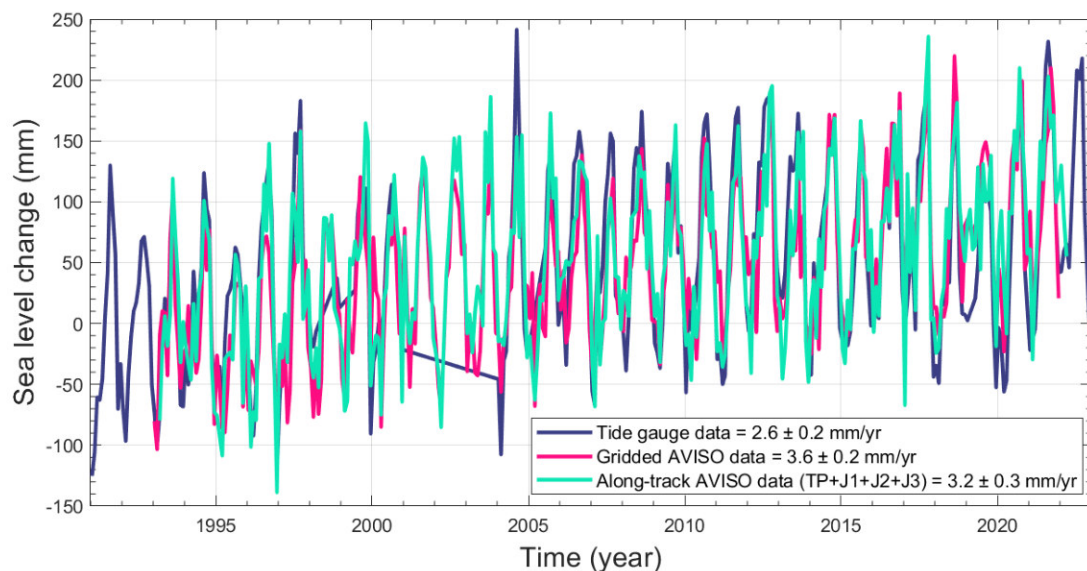


■ 改正前、後之基隆潮位站月平均海水位變化



本研究僅改正逆氣壓
效應之基隆潮位站資
料來計算平均海水位

■ 改正逆氣壓基隆潮位站資料和衛星測高比較

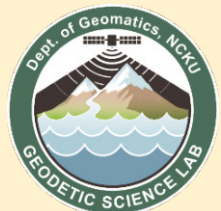


*綠線為TP+J1/2/3沿軌跡點AVISO資料(100 km測高資料平均)

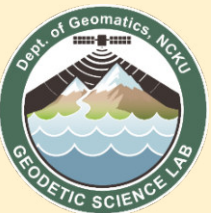
**X無參數。

***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。

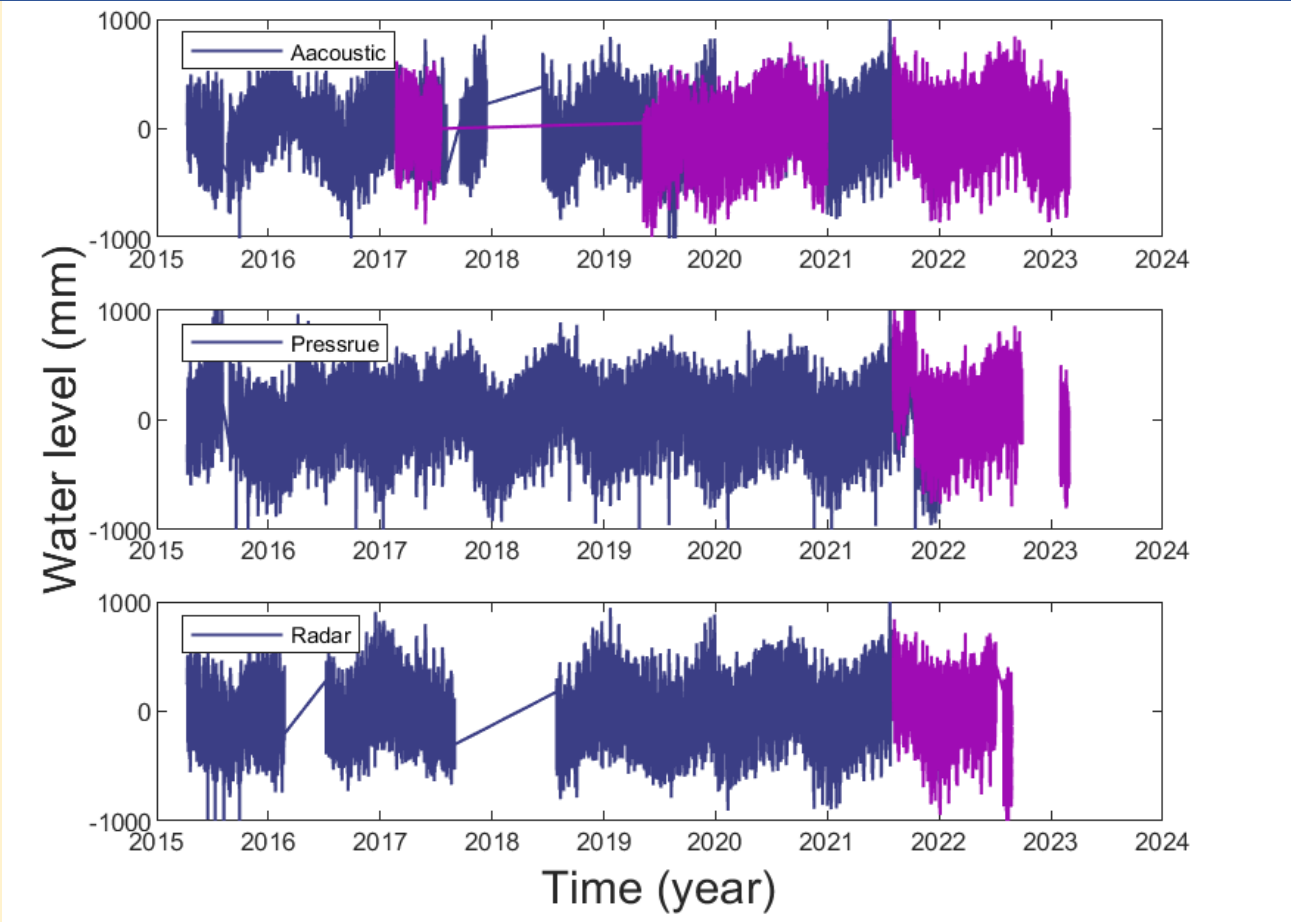
資料來源	測高資料時間段	測高與潮位站最近距離(km)	半徑(km)	相關係數	差值標準偏差 (mm)
ESA	2002-2018	62.8	25	0.79	48
ESA	2002-2018	62.8	50	0.80	44
ESA	2002-2018	62.8	100	0.82	41
AVISO沿軌跡點資料 (TP+J1+J2+J3)	1993-2022	62.8	25	0.82	47
AVISO沿軌跡點資料 (TP+J1+J2+J3)	1993-2022	62.8	50	0.84	43
AVISO沿軌跡點資料 (TP+J1+J2+J3)	1993-2022	62.8	100	0.86	38
AVISO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



長潭里潮位站資料處理



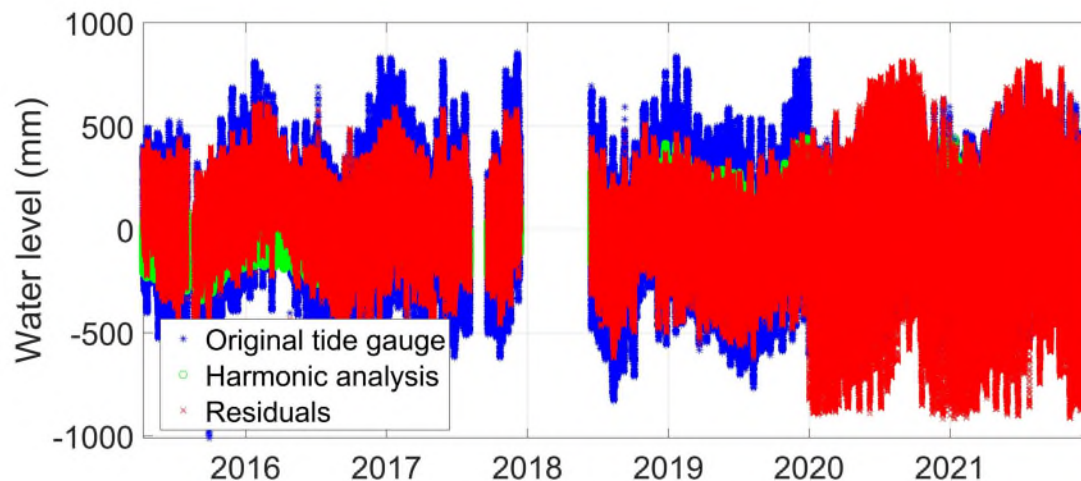
長潭里潮位站原始觀測紀錄



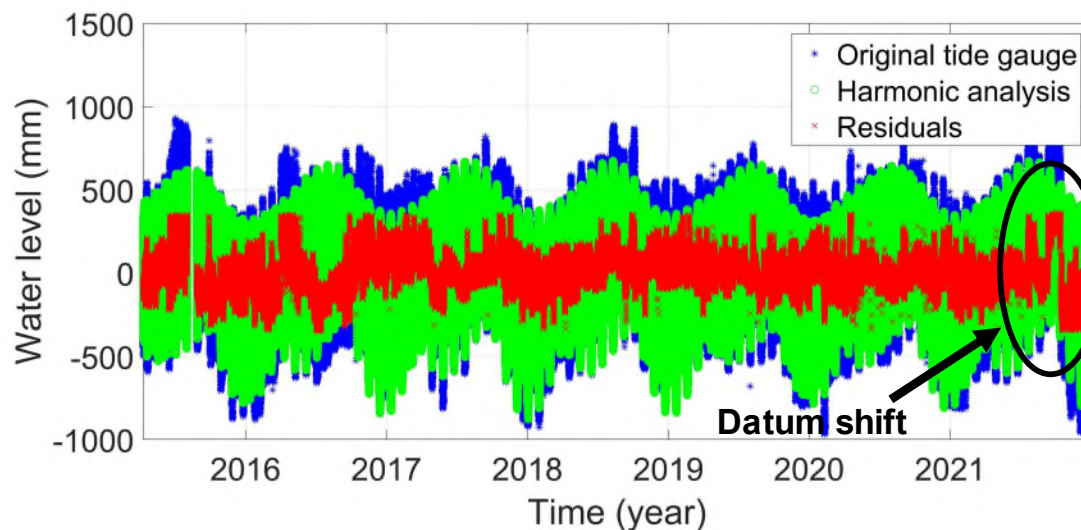
站號	取樣時間 間隔	緯度	精度	觀測時間	水位觀測儀器	管理單位
12191	6分鐘	25°08'26"N	121°47'59"E	2015/04-2023/02	Aquatrak 音波式	中央氣象局
12195	6分鐘	25°08'26"N	121°47'59"E	2015/04-2023/02	Druck PTX 1830 壓力式	中央氣象局
12197	6分鐘	25°09'18"N	121°45'08"E	2015/04-2022/08	雷達式	中央氣象局

長潭里音波式和壓力式潮位站資料 之調和分析結果

音波式



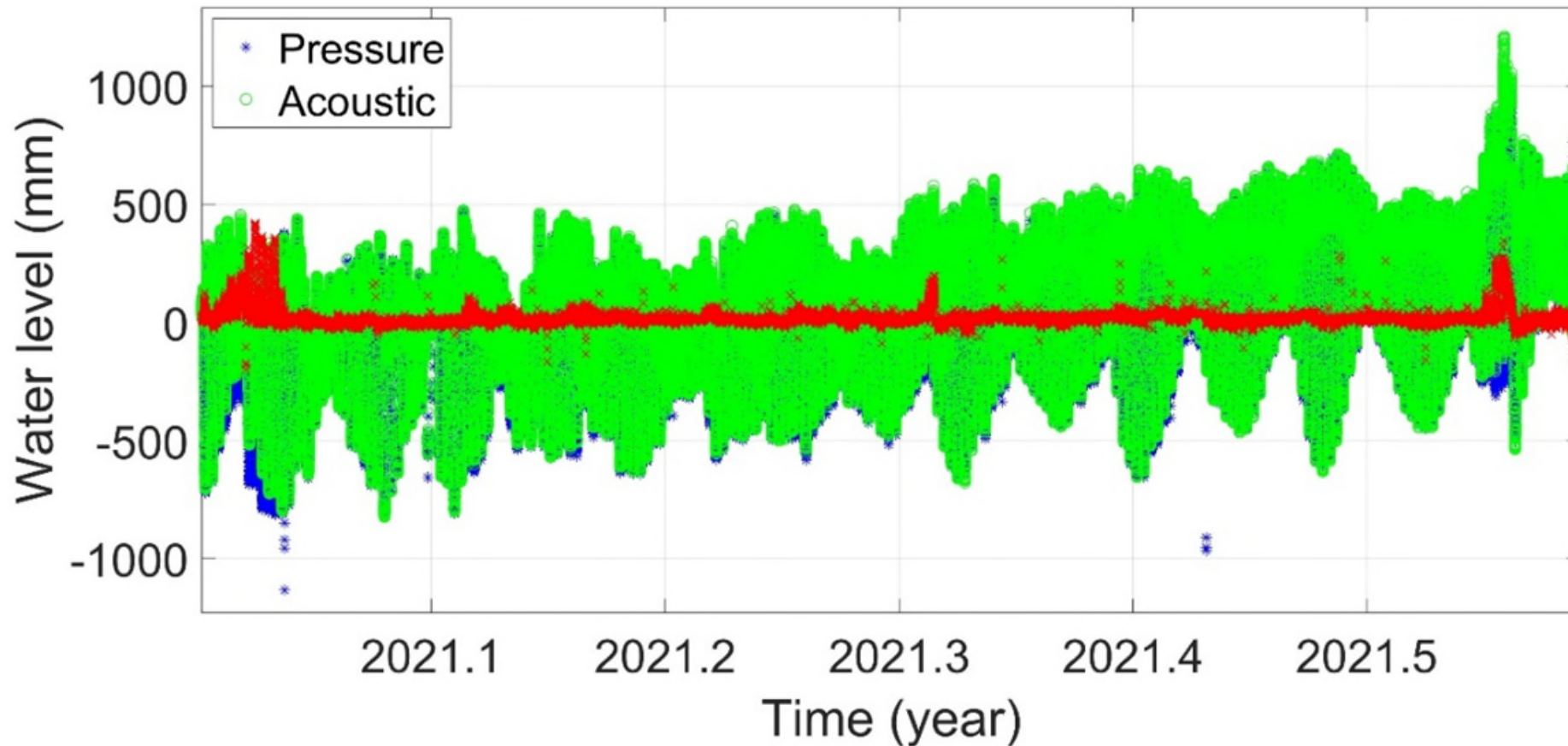
壓力式



將2015/04-2021/08之壓力式資料和2021/08-2023/02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高計算。兩儀器觀測資料基準是否一致，需進行比較評估。

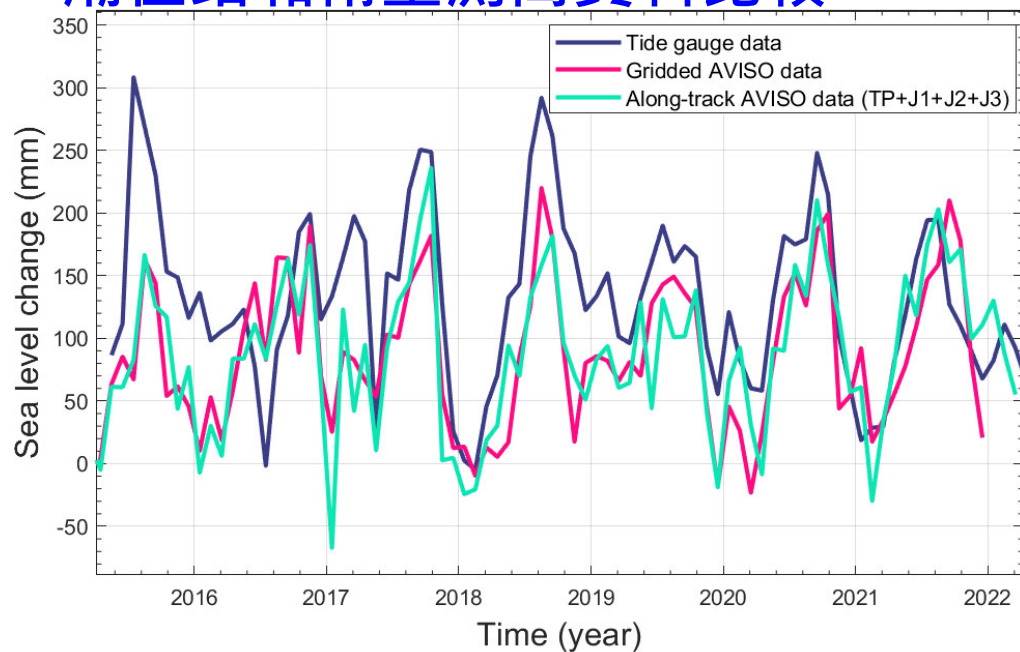
長潭里壓力式和音波式潮位站資料差值比較

18



兩資料差值基本在0 mm上下震盪，雖然有部分差值較大，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 (音波式-壓力式)，因此將壓力式資料基準往上調整19 mm。

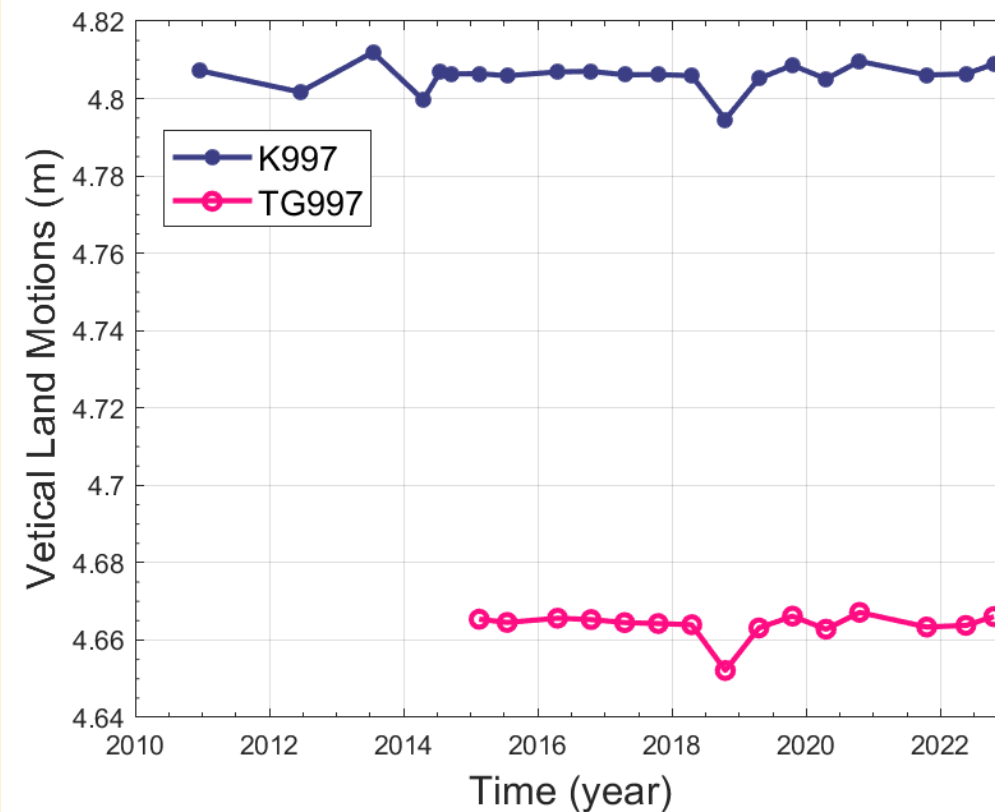
■ 改正基準偏移和逆氣壓效應之長潭里潮位站和衛星測高資料比較



和長潭里潮位站之相關係數和差值標準偏差

- TP+J1/2/3沿軌跡點AVISO: 0.64和54 mm (2015~2022)
- AVISO網格: 0.65和55 mm (2015~2022)
- TP+J1/2/3沿軌跡點AVISO: 0.72和42 mm (2019~2022)
- AVISO網格: 0.78和39 mm (2019~2022)

■ 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(相對於原水準原點K999)



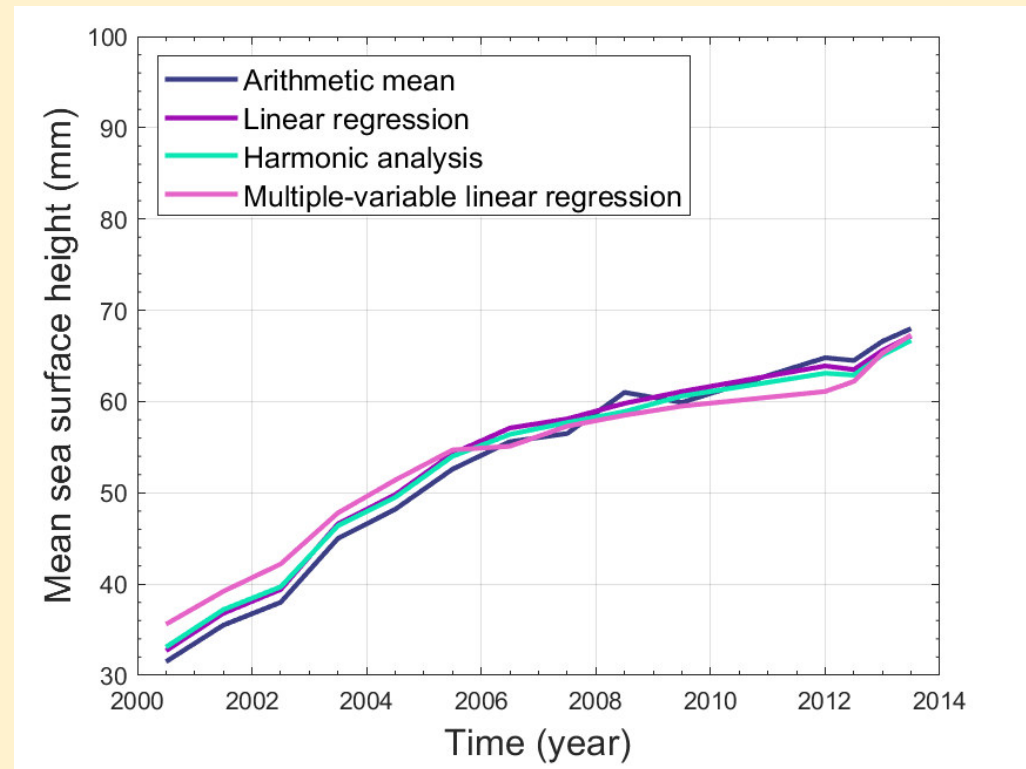
基隆平均海水位計算



四種方法計算之基隆潮位站平均海水位高

21

時間中點	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
2000.5	31.5	32.7±2.5	33.1±0.2	35.6±1.0	33.2
2001.5	35.5	36.8±2.5	37.2±0.2	39.2±1.0	37.2
2002.5	38.0	39.4±2.5	39.7±0.2	42.2±1.0	39.8
2003.5	45.0	46.6±2.6	46.4±0.2	47.8±1.0	46.5
2004.5	48.2	49.8±2.6	49.5±0.2	51.4±1.1	49.7
2005.5	52.6	54.3±2.7	54.0±0.2	54.7±1.1	53.9
2006.5	55.6	57.1±2.7	56.4±0.2	55.1±1.1	56.1
2007.5	56.5	58.1±2.7	57.7±0.2	57.3±1.1	57.4
2008.5	61.0	59.8±2.7	58.9±0.2	58.5±1.0	59.6
2009.5	59.9	61.1±2.7	60.6±0.2	59.5±1.0	60.3
2012.0	64.8	63.9±2.7	63.1±0.2	61.1±1.0	63.2
2012.5	64.5	63.5±2.6	62.9±0.2	62.2±1.0	63.3
2013.0	66.6	65.6±2.6	65.1±0.2	65.3±1.0	65.7
2013.5	68.0	67.2±2.5	66.7±0.2	67.3±0.9	67.3



不同時段基隆平均海水位和TWVD2001水準零點有33.2-67.3 mm之差異性變化，且差異性有逐年變大趨勢，四種方法計算2004-2022年(時間中點2013.5)之基隆平均海水位平均值高於TWVD2001水準零點67.3 mm。



多參數擬合法計算之基隆潮位站參數與顯著性測試 ²²

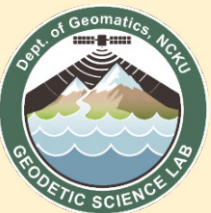
參數	2000.5	2001.5	2002.5	2003.5	2004.5	2005.5	2006.5	2007.5	2008.5	2009.5	2010.5	2011.5	2012.5	2013.5
截距 (mm)	35.6±1.0	39.2±1.0	42.2±1.0	47.8±1.0	51.4±1.1	54.7±1.1	55.1±1.1	57.3±1.1	58.5±1.0	59.5±1.0	61.1±1.0	62.2±1.0	65.3±1.0	67.3±0.9
斜率 (mm/yr)	4.6±0.2	4.0±0.2	3.5±0.2	4.0±0.2	4.4±0.2	3.2±0.2	0.7±0.2	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*						
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*						
M _f (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*						
M _m (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*						
S _{sa} (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						
S _a (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						
M _N (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						

- 各時段平均海水位高參數皆為顯著，且標準偏差皆在1.1 mm以下
- 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中尺度因子-9.948
- 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，其中分潮M_f和M_m為週期訊號對於平均海水位高影響較小，而雖有部分時間段之降水量和溫度變化對於基隆海水位的影響為顯著，但其量值亦非常小

*未通過95%信心水準之顯著性測試



長潭里平均海水位計算



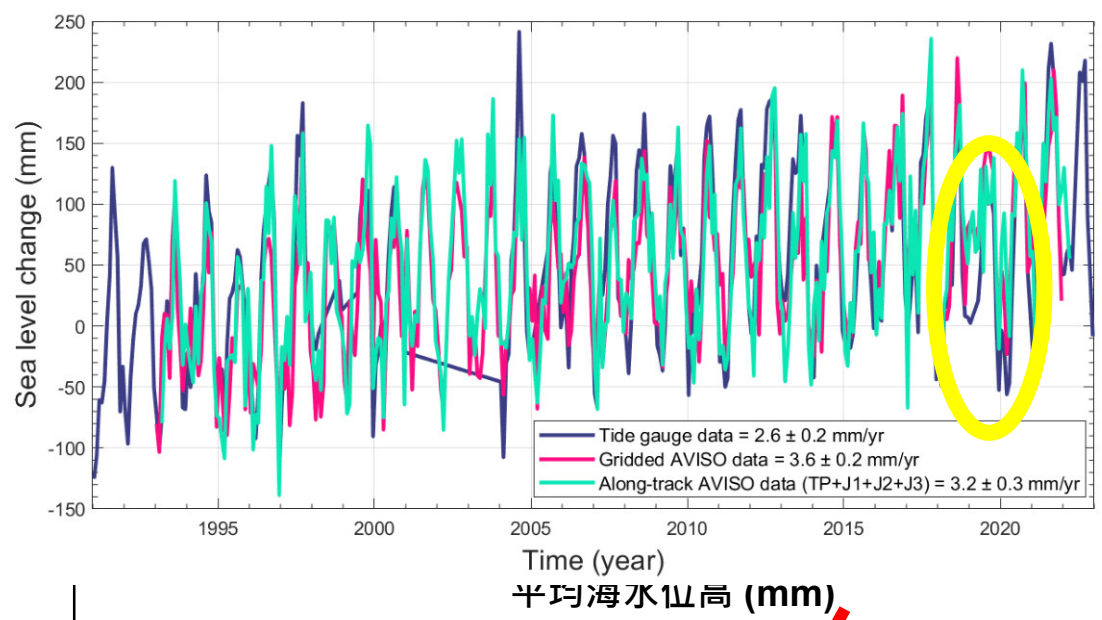
四種方法計算之長潭里潮位站平均海水位高

■ 長潭里

時間中點	時間段
2019.15	201
2019.15	201

■ 基隆潮

時間中點	時間段
2019.15	2019-2022
2019.15	2015-2022
2019.15	2004-2022
2019.15	1991-2022
2022.0	1991-2022



■ 多參數擬合法計算之長潭里潮位站參數

參數	2019.15	2019.15
截距(mm)	99.1 ± 5.1	120.4 ± 1.8
斜率(mm/year)	$-9.5 \pm 8.1^*$	-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)	$-0.3 \pm 0.8^*$	$0.0 \pm 0.8^*$
M_f (mm)	$3.6 \pm 2.0^*$	$3.5 \pm 2.0^*$
M_m (mm)	$3.7 \pm 2.0^*$	$3.6 \pm 2.0^*$
S_{sa} (mm)	19.8 ± 2.1	20.6 ± 2.1
S_a (mm)	64.2 ± 4.8	62.2 ± 4.7
M_N (mm)	35.6 ± 17.7	X**

比較大，
比較大

時間中點	時間段	算術平均法	六參數擬合法	調和分析法	多參數擬合法	平均值
2019.15	2019-2022	34.6	34.7 ± 10.5	37.3 ± 0.8	$39.4 \pm 3.6^{**}$	36.5
2019.15	2015-2022	70.9	68.9 ± 4.0	70.7 ± 0.4	$68.2 \pm 1.6^{**}$	69.7
2019.15	2004-2022	77.6	74.2 ± 2.5	73.9 ± 0.2	$84.0 \pm 1.6 / 75.4 \pm 1.3^{**}$	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

長潭里平均海水位高於TWVD2001水準零點約121.0 mm；同時間，本案也分別利用1991-2022和2004-2022年基隆潮位站資料計算(時間中點2019.15)基隆平均海水位高為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、兩潮位站海水位地形不一樣、基隆潮位站參考基準未釐清等所導致。

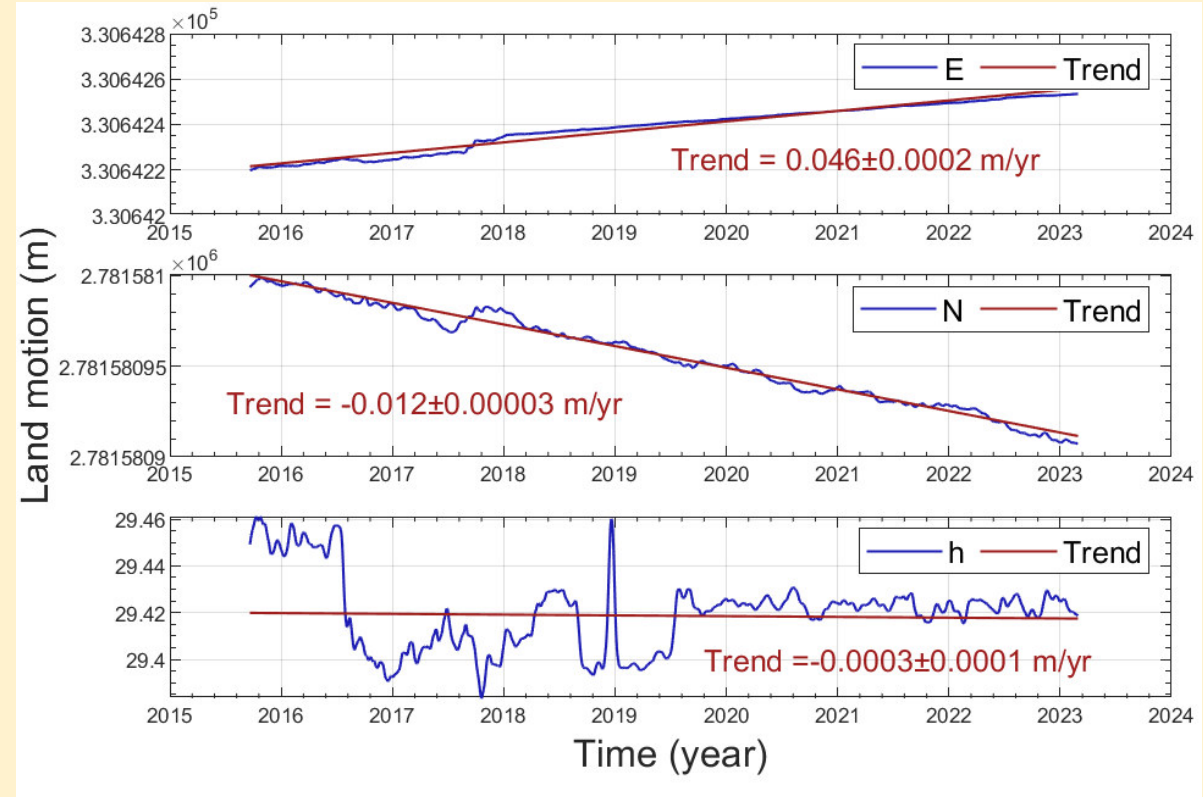


以K997研訂臺灣高程系統可行性之討論



■ 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：

由GNSS高程解可知，長潭里GNSS高程方向變化速率為 $+0.3 \pm 0.1$ 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，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。結合上述成果可推論，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。

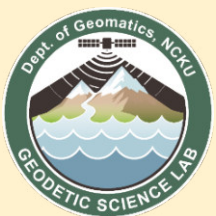


■ 潮位站資料品質和長度是否可以計算穩定之水準零點:

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。

■ 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。



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，**建議邀請國內專家學者針對水準零點進行研析討論**。
3. 計算之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，本案亦分別利用1991-2022和2004-2022年基隆潮位站資料計算時間中點2019.15之平均海水位為82.0和75.3 mm，與長潭里平均海水位分別相差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等所導致。若要以長潭里潮位站資料計算精確之水準零點，需要能持續收集穩定之海水位觀測資料。



4. 自民國87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，約5 mm/year，然而基隆潮位站資料並無明顯受地表下陷量影響。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，可在潮位站水準點和鄰近水準點上進行GNSS觀測，來釐清觀測資料之差異性。根據美國海洋作業圖資產品服務中心和澳洲政府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，每次至少觀測12小時。
5. 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 ± 0.1 mm/yr，與國土測繪中心提供GNSS高程解之變化速率(0.2 ± 0.03 mm/yr)相符合，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，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。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。

