

中華民國地籍測量學會期刊

國土測繪與空間資訊

Taiwan Journal of Geoinformatics

第十卷 第一期

中華民國一一一年一月



VOLUME 10, NO. 1

January 2022

Published by Chinese Society of Cadastral Survey &
National Land Surveying and Mapping Center



內政部國土測繪中心共同發行

中華民國地籍測量學會第21屆組織表

一、理監事會：

理事長：洪本善

副理事長：江渾欽

常務理事：蕭輔導、高書屏、劉正倫

理事：紀聰吉、王定平、周天穎、楊名、崔國強、王啟鋒、吳宗寶、謝福勝、吳相忠、邱仲銘、張元旭、朱上岸、陳鶴欽、梁崇智、駱旭琛、徐百輝

常務監事：容承明

監事：史天元、白敏思、蕭正宏、陳國華

秘書長：曾耀賢（兼任）

副秘書長：梁旭文（兼任）

秘書：黃華尉（兼任）、何依屏（兼任）、謝博丞（兼任）

幹事：何美娟（兼任）

二、各種委員會：

(一)服務委員會：

主任委員：王啟鋒

委員：王定平、黃仰澤、賴澄標、鄭宏達、朱上岸、黃建華、李文聖、吳智維

幹事：陳俊德

(二)編輯委員會：

主任委員：史天元

委員：楊名、甯方璽、周天穎、蔡慧萍、韓仁毓、曾國欣、張智安、饒瑞鈞

總編輯：周天穎

編輯：葉美伶、陳鶴欽、黃筱晴

(三)研究發展委員會：

主任委員：高書屏

委員：王宏仁、林登建、吳宗寶、吳聲鴻、黃文華、賴偉君、駱旭琛、蕭萬禧、謝福勝

總幹事：謝博丞

幹事：董荔偉、李孟娟

(四)獎章委員會：

主任委員：蕭輔導

委員：張元旭、曾清涼、曾國鈞、謝福來、劉正倫

幹事：由本會秘書處兼任

(五)教育訓練委員會：

主任委員：崔國強

委員：李文聖、朱上岸、陳俊達、黃建華、蕭介峰、葉文凱

總幹事：蕭泰中

幹事：林以恆

(六)國際事務委員會：

主任委員：周天穎

委員：盧鄂生、王聖鐸、陳惠玲、朱上岸、黃建華、高書屏

總幹事：葉美伶

幹事：邱明全、湯美華、陳家卉

(七)界址鑑定及諮詢委員會：

主任委員：盧鄂生

委員：邱仲銘、崔國強、謝福勝、駱旭琛、吳宗寶、吳相忠、蕭萬禧、王啟鋒、黃玉鐘

幹事：謝博丞

學會地址：408台中市南屯區黎明路二段335巷28號

網址：<http://www.cadastralsurvey.org.tw>

電子郵件：cscs.editor@gmail.com

特刊引言

水深測量與海圖基準特刊

承蒙地籍測量學會編輯委員會主任委員暨國立陽明交通大學史天元教授的看重，指定我擔任國土測繪與空間資訊期刊「水深測量及海圖基準」特刊的客座編輯。由於水深測量及海圖製作在國土測繪領域中是比較特殊的專業，和一般陸域測量製圖有顯著的不同，因此本期特刊在論文審查過程中，特地邀請了國內海洋測量、近海水文、海象測報、海洋環境、地球科學、土木工程、水利工程、通訊與導航工程等領域十餘位知名的學者專家一同參與匿名審稿工作。之後並在論文作者針對審查意見的積極回應和反覆修改下，順利地完成此特刊。在此我要向所有的審查委員以及論文作者致上最誠摯的謝意！

本特刊共包含六篇論文，內容完整涵蓋我國水深測量與海圖製作的最新趨勢，期盼能藉此帶動國內相關技術的發展與應用。

客座編輯 楊名 教授

於 國立成功大學測量及空間資訊學系

序

水深測量與海圖基準

內政部為國家測繪中央主管機關，掌管國家測繪政策及法規，制定國土測繪法及相關子法，訂定國家四大測量基準為國土測繪之基本準據。本人有幸參與執行訂頒大地基準(TWD97)、高程基準(TWVD2001)及重力基準(GS2009)等國家測量基準，提供國內產官學研各界使用，測繪資訊也得以互相轉換與共享，提升國家測繪技術與應用領域。尚未訂頒的深度基準就一直放在腦海裡，讓我念茲在茲，因為水深測量作業規範及海圖編繪之航安需求必須統一深度基準，本部 107 年 11 月 15 日成立「臺灣電子航行圖中心」，專責電子航行圖編製及更新維護並透過國際專責機構發行，本部更必須加快訂定深度基準及水深資料處理標準程序。為此邀集國內專家學者團隊投入研究，四年來我們的努力幾近完成，最後一哩路——「正式訂頒深度基準」。

隨著「全球導航衛星系統」(GNSS)定位技術與精度之演進，透過橢球高之量測進行高程現代化測量，已是國際普遍通用之方法。陸域可透過大地起伏模型進行高程系統轉換，海域則可透過離距模型轉換至海圖深度，最後藉由平均海水面橢球高模型可將四大測量基準連結，並建立垂直基準轉換模式，作為海陸域地形無縫整合之轉換工具。

半年前史天元老師提議要在「國土測繪與空間資訊期刊」出版「水深測量與海圖基準特刊」，感謝史老師邀集張憲國、薛憲文老師無私的加入研究，也感謝研究團隊黃金維、郭重言、藍文浩、林勝豐及張淑淨老師的努力；我亦請「臺灣電子航行圖中心」同仁投稿，共同討論分配論文撰寫主題，經由大家每次會議的腦力激盪，共同為臺灣深度基準催生，奠定臺灣海域測繪技術與應用之基石，謹以此序文向大家致謝。

地政司司長 王成機

最低天文潮位計算標準作業程序探討

張憲國¹ 史天元²

論文收件日期：110.10.18

論文修改日期：110.11.15

論文接受日期：110.11.22

摘 要

「最低天文潮位」(LAT)是國際海洋測量組織決議所建議採用之「海圖基準」參考潮位面，雖然其定義十分明確，但是並沒有國際規範明確地描述解算過程。本文利用澎湖與新竹驗潮站經基準偏移修正後的長期逐時潮位紀錄資料，進行 LAT 分析，並判定取樣年份、資料長度、分潮選擇及節點潮修正等作業，皆是顯著影響 LAT 結果的主要因子，進而提出 LAT 之計算程序。期待未來可以本研究結果為基礎，建制國內 LAT 之標準作業程序，並作為訂定海圖基準之參考。

關鍵詞：資料補遺、節點潮修正、調和分析、潮位面

¹ 教授，土木工程學系，國立陽明交通大學。

² 教授，土木工程學系，國立陽明交通大學。

On the Standard Operation Procedures of LAT Computations

Hsien-Kuo Chang¹, Tian-Yuan Shih²

Abstract

The Lowest Astronomical Tide (LAT) is the reference tide surface to be applied for the establishment of chart datum based on IHO resolution. Although the definition of LAT is very clear, the detailed derivation procedures are not documented yet. In this study, the factors which are related to the derivation of LAT are studied for establishing a Standard Operation Procedure (SOP). Using the long-term tide data from Penghu Station and Hsinchu Station after tidal abnormal being corrected, it is analyzed that the sampling data year, data length, selection of tidal constituents, and nodal correction are the main factors that affect the LAT results. Due to the limitations of existing data, there are still issues that need to be clarified. In the future, the results of this research can be used as the basis for the establishment of Taiwan Chart Datum.

Keywords: Data Supplement, Harmonic Analysis, Nodal correction, Tidal Surface

¹ Professor, Department of Civil Engineering, National Yang Ming Chiao Tung University

² Professor, Department of Civil Engineering National Yang Ming Chiao Tung University

一、前言

「國際海洋測量組織」(IHO, International Hydrographic Organization)為具有悠久歷史的國際組織，成立於 1921 年，為以海洋測量技術與事務推動為主軸之組織，並且在標準化作業程序與圖資規格、釐清各項疑點與爭議、推動技術現代化等面向，擁有良好功能與績效。在 IHO 建立的多項文件中，針對各項議題的決策，皆曾以決議(IHO Resolution)方式記述，而後根據決議，再由各個相關委員會(Committee)與工作群組(Working Group)訂定標準，據以落實推動。IHO 決議記載於其出版刊物 M-3 (IHO, 2017)，該刊物列定為 IHO 之基本文件(IHO Basic Documents, <https://iho.int/en/iho-basic-documents>)。

在決議 A 2.5 (IHO Resolution A 2.5)，針對「基準與水準點」(Datums and Bench Marks)提出問題因應的技術決議，編號 3/1919，第 6 條明確訂定應優先以 LAT(The Lowest Astronomical Tide)為海圖基準，其文字中譯為：

「本決議為以最低天文潮位(LAT)，或海洋測量機構認為實際可行且可接受的與 LAT 高度等效的潮位面為海圖基準。或者，如果特定區域的低水位經常偏離 LAT，或者國家政策已建立不同的基準，則可以使用另一個類似的基準。」

第 8 條規範：

「建議 LAT 和 HAT(The Highest Astronomical Tide) 採用最短 19 年的時間內，使用從至少一年的觀測中得出的調和分析分潮常數計算，或以其他已知可提供可靠結果、經過驗證的方法。如果可能，潮位面值應包含其獲得過程中之不確定性值。」在另一項 IHO 決議，編號 1/2008 海圖垂直基準命名方式(Naming Convention for the Vertical Datum of Charts)，第 2 條中規定，名稱中應標定年代，如 CD(2006) 或 LAT-UK (2000)。

IHO 的工作群組中，「海洋測量服務與標準委員會」(The Hydrographic Services and Standards Committee, HSSC)架構下的 TWCWG (Tide, Water Level and Current Working Group，潮、水位、流工作群組)的工作項目中包含了潮位與海圖基準的相關事務。TWCWG 將與其相關之 IHO 決議彙編於 TWCWG (2017)中，以利查找。

目前內政部正推動以最低海水面的基準，及其與原基準轉換的計畫。本文澎湖與新竹驗潮站位案例，利用長期逐時潮汐資料，先探討影響 LAT 計算的因子，評估其影響幅度，再擬定建議之作業程序，藉以作為「海圖基準」建置工作中，相關標準擬定時之參考。

二、LAT 計算之影響因子

LAT為天文潮在19年期間的最低水位(IHO, 2017)，而天文潮乃由太陽及月亮與地球間的天體運動所產生的潮引力所致。Darwin and Adams (1883)除提出理論探討平衡潮(equilibrium tide)外，並利用調和分析(tidal harmonic analysis)探討平衡潮(即天文潮)的分潮特性。

在特定時間 t 之瞬時實際海水位(又可稱潮汐)， $hm(t)$ ，除主要天文潮 $ha(t)$ 外，尚包括有氣象及溫度等次要因素的影響量， $e(t)$ 。若假設天文潮是 m 個分潮以正弦(sine)及餘弦(cosine)調和項的線性組合時，則可表為下式

$$\begin{aligned} h_a(t) &= z_0 + \sum_{j=1}^m A_j \cos(\omega_j t - \kappa_j) \\ &= z_0 + \sum_{j=1}^m A_j(t) H_j \cos(\omega_j t - (V_0 + u(t))_j - \kappa_j) \end{aligned} \quad (1)$$

其中， z_0 為潮位長期的平均高程； m 為選擇分潮數，通常小於等於60； A_j 、 ω_j 及 κ_j 分別為選擇分潮的振幅、角頻率及相位(phase)。如果考慮節點潮(nodal tide)影響，原本的調和常數的表示式可改為式(1)下行的另一種形式，其中， H_j 及 V_0 為平衡潮的分潮振幅及其時間引數(argument)， f_j 及 u_j 為節點潮修正的振幅因數(amplitude factor)及相位因數(phase factor)。

依據式(1)計算任何時間的天文潮，由於選擇的分潮角頻率為已知，所以，式(1)中實際仍有 z_0 、 A_j 及 κ_j 等 $2m+1$ 個未知分潮參數，需要以實測潮位資料決定。另外，由於實測潮位係為某一固定取樣間距的離散數據，若以式(1)描述實測潮位時，會因為非天文潮成分的影響，而無法完全滿足，因此，可選擇超過 $2m+1$ 個離散潮位資料，應用最小二乘法(least squares method)，解算此 $2m+1$ 個分潮參數。至於式(1)中潮位平均值的處理，CGS (1940)建議可不先移除，但是Emery and Thomson (2001)等調和分析操作手冊建議，輸入的潮位資料須先扣除其平均值，且以資料時間中間點當為計算時間 $t=0$ ，此作法免除潮位平均值的推估，因此式(1)的未知數為 $2m$ 個。

實際的潮位測量資料可能因為儀器更新，或地殼下陷等因素導致潮位基準改變，或因儀器故障或外力干擾而無法獲得，而產生資料缺漏現象。若潮位資料有上述品質問題，此系統性偏移是否影響調和常數及進而影響LAT是值得探討的。在此節探討影響LAT計算的因子，分類上以調和分析獲得參數前及後的演算法及條件來說明。

參數獲得前的因素，包括(1)時間 $t=0$ 的原點位置，(2)潮位資料的品質及基準，(3)調和分析的分潮選擇，(4)取樣資料，如資料總長度，選用年份及取樣時距。參數獲得後的因素獲得包括(1)節點潮(nodal tide)的修正方式，(2)19年天文潮的計算時段，及(3)計算時距。本研究選擇澎湖及新竹兩驗潮站當為案例，說明上述因素影響LAT的程度。

(一)時間原點位置

目前潮位調和分析的公開軟體，如 t_tide (Pawlowicz et al., 200)及Utide (Codiga, 2011)等，以資料啓終時間的中間點當為計算時間 $t=0$ 的位置。在調和分析上，此處理是否會影響天文潮計算結果，本文以學理及數據驗證說明之。若平移時間原點至

中間點，即 $t'=t-t_m$ ，以式(1)則改寫為，

$$h_a(t') = z_0 + \sum_{j=1}^m A_j \cos(\omega_j t' - \kappa_j'), \kappa_j' = \kappa_j - \omega_j t_m \quad (2)$$

比較式(1)及式(2)，可知以相同資料進行調和分析，獲得參數僅相位不同外，平均水位及各分潮振幅都是一樣的。以澎湖驗潮站2016年逐時資料，以資料第一筆及中央點位置分別當位時間原點，進行調和分析後，再反算所有時間點的天文潮，二者相差的標準差約為 1.2×10^{-10} cm，二者所得LAT的差異亦為 1.2×10^{-10} cm，由此可知現代程式軟體的變數精度已相當高情況下(約為 10^{-14})，設定計算時間原點於資料位置並不影響LAT的計算結果。

(二) 潮位資料的品質及基準偏移的影響

通常，驗潮站潮位觀測量為相對於岸邊固定基準點(BM)之水位變動值，若基準點有偏移，資料會含有瞬間或趨勢偏移，以致分析上，會因為不連續的跳動(jump)及趨勢(trend)而影響調和參數的正確性。郭重言等人(2015)提出驗潮站資料因基準偏移的修正方法及操作步驟，建議以低頻訊號的相鄰時間海平面變化差值的門檻值為100 mm，當為可能因人為或自然因素所造成的基準偏移，且基準偏移的修正與否對評估海平面上升有很大的影響。若潮位資料涵蓋瞬間基準偏移時，獲得調和分析的參數結果，影響最大的當然是 z_0 ，其次是 A_j ，至於基準偏移的影響程度，則與偏移量及其型態有關。因此本文使用的潮位資料已經郭重言等人(2015)的基準點偏移的修正，此部分的因子影響，就不用再探討。

另外最常見的潮位資料品質問題是資料缺漏。在台灣傳統上常用之缺漏資料補遺方法HAS(Harmonic Analysis Supplements)，係先將缺漏時間的資料補0值，以進行全時間的調和分析，獲得初始天文分潮參數，再透過回朔預報(hindcast)，反算並修訂該缺漏時間的天文潮位，然後，透過重複疊代數次之調和分析後，即可獲得收斂的分潮參數(黃瓊珠等人，2006)。本研究應用此方法，曾採用10次疊代以獲得天文分潮參數。其他不同的資料補遺方式，莊文傑等人(2006)曾發展HIS (Harmonic Interpolation Supplements)模式，並藉不等時距的調和分析及回朔預報(hindcast)，直接進行缺漏資料之補遺。

實際上，依照調和分析的最小二乘法理論，直接使用有效的觀測潮位，並不需要補足那些缺漏時間的水位，就可獲得調和分析的參數，本文稱以僅用有效資料的方式為HARD (Harmonic Analysis with Real Data)方法。為了解有無資料補遺的計算天文潮的差異。本研究使用郭重言等人(2015)經基準偏差修正的澎湖驗潮站1993年至2018年逐時資料。此資料每年都有缺漏數據，1995年的3388筆最多，最少為30筆，平均為799筆。分別應用HAS及HARD進行天文潮分析，因而可得60分潮及年水位平均值 z_0 之對照比較結果，如圖1所示。

由圖1觀察可知，除1995、2006及2007年 z_0 有明顯的差異外，其他年份都差異極微。檢視2006及2007年資料，可發現缺漏資料分別有1844及661筆，前者缺漏筆數較多，2007年缺漏筆數算不多，但查此段時序資料約在7000至8000小時，其低潮水位約在-50cm，並不似其他時間約在-120 cm至-100 cm之間變化，此段數據是否有異常的，需要進一步釐清是自然現象或者是儀器問題所造成的。若扣除2007年不良資料品質因素，HARD求出 z_0 與資料平均值的差異最大值為2.02cm，最小值為0.01cm，平均值為0.41cm，標準差為0.49cm。圖1同時顯示，每年平均水位的最高值與最低值差為25.3 cm，標準差為5.83 cm，說明每年平均水位的變動頗大約有20 cm左右。

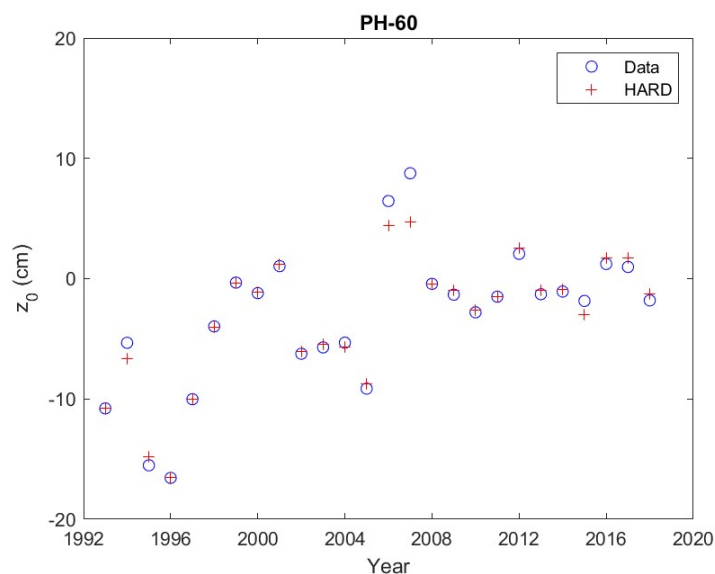


圖1 澎湖驗潮站每年潮位資料平均值與調和分析常數項之比較

資料是否先扣除平均值，若僅用有效資料所獲得的分潮振幅及相位會是完全一樣的。但是，若HAS的累加誤差計算是包括資料補遺的全部時域，即包括缺漏資料時間，此比僅考慮有效資料的HARD者，增加資料補遺時段而會影響分潮參數，因此就與HARD所得分潮參數有所差異。

為表現二者分潮參數的差異，將二者方法所得分潮參數後，反算分潮組合的該年逐時水位，計算每年的最低潮位ALAT (annual lowest astronomical tide)，成果如圖2所示，為避免ALAT受每年平均水位不同的影響，圖2的ALAT已扣除該年水位資料的平均值。由圖2顯示，即使缺漏資料最多的1995年，二者的差異少，反而2006及2007年的二者差異較其它年明顯。計算圖2的統計特性，最大差異絕對值為1.31cm，平均值為0.11cm，標準差為0.27cm。然而，圖2雖然已不考慮各年資料平均值的差異，卻顯示每年ALAT有28.51 cm的變動，標準差為6.40 cm。此可能的原因為每年的最低潮位受非天文潮因素影響而有高低差異，調和分析乃盡量調整分潮參數去吻合觀測資料，或者分潮參數受到更長期影響，如節點潮，而改變。由上述討論可知，資料補遺的調和分析對估算每年水位平均值的差異在 0.11 ± 0.27 cm。

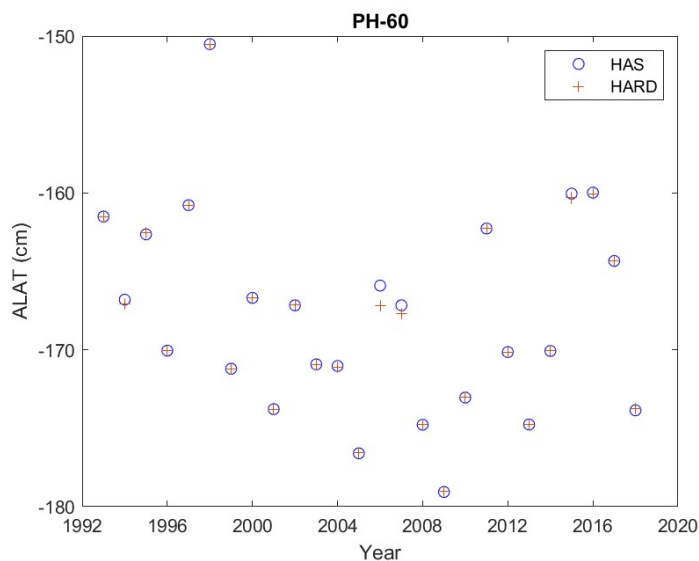


圖2 澎湖驗潮站扣除該年平均值的每年最低天文潮位

至於新竹驗潮站部分，資料從1993年1月1日0時起至2018年12月31日23時。每年潮位資料平均值與調和分析常數項之比較及扣除該年平均值的每年最低天文潮位，分別示如圖3及圖4。新竹驗潮站的資料每年缺漏數據的筆數大多低於1000個，但超過1000個有5年，以1997年的1870個最多，其他為2013、2015、2016及2018年，分別為1351、1405、1514及1043個。

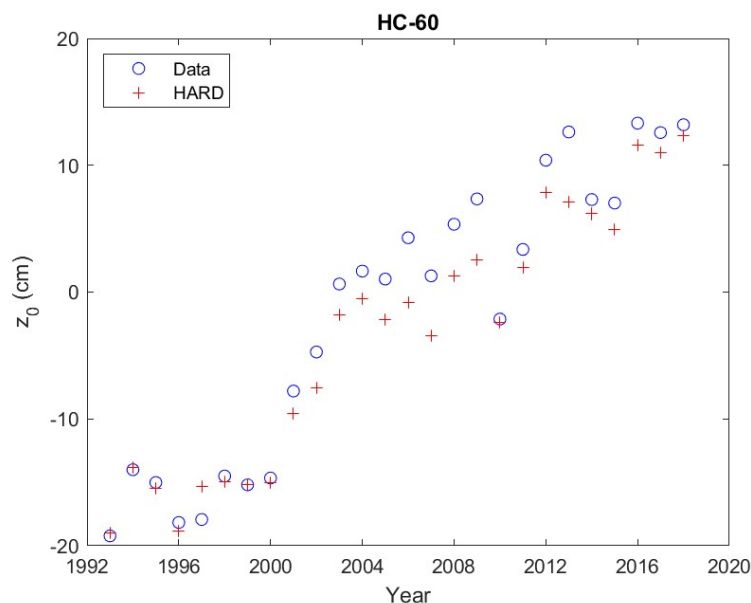


圖3 如圖1(新竹驗潮站)

由圖3可知，新竹驗潮站資料平均值與調和分析常數項間之差異，均呈現逐漸增加的現象，且前者的高程比後者高。資料平均值最大值與最小值分別為13.32 cm及-19.22 cm，即範圍為32.54cm，平均值及標準差分別為-1.61cm及11.17 cm。調和分析常數項的最大值與最小值分別為12.28 cm及-18.95 cm，即範圍為31.23 cm，平均值及

標準差分別為-3.49 cm及10.00 cm。二者的相差絕對值最大與最小分別為5.97 cm及0.02 cm，平均值及標準差分別為2.01 cm及1.67 cm。若比較圖3及圖1的結果，新竹驗潮站的二種平均值的差異在2000年之後明顯高於2000年前，且與缺漏數據的筆數沒有明顯關係，此平均值差異不受缺漏數據影響的結果與圖1的澎湖驗潮站不同。

圖4顯示HAS及HARD所獲得的ALAT的趨勢相似，但前者高於後者。HARD所得ALAT的最大值與最小值分別為-246.50 cm及-295.70 cm，即範圍為49.20 cm，平均值及標準差分別為-277.16 cm及15.18 cm。其二者相差絕對值的最大與最小分別為13.33 cm及0.00 cm，平均值及標準差分別為2.30 cm及3.40 cm。ALAT比較特別的現象為2013年前約在-271.49 cm及-295.70 cm之間變動，但是2013年後的ALAT形成上凸趨勢，上升高度約25 cm，此特別現象需另外進一步探討之。從圖1至圖4的探討可知，單選特定一年潮位作調和分析及預報，以取得19年期的LAT應格外慎重!

由前述分析可知，當潮位缺漏資料數量不多且不是一段長期時，有無資料補遺的調和分析對計算結果的影響是低的。從理論來看，資料補遺的調和分析並非單純的數學內插，如多項式內插(polynomial interpolation)或三次樣條插值(cubic spline)，而是建立在天文潮理論基礎及吻合多點實測數據的最小誤差，進行資料補遺只是本文建議而非必要的步驟。

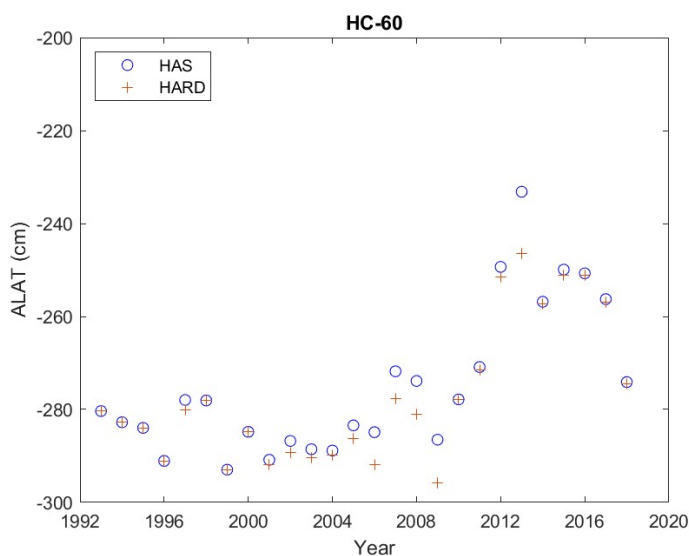


圖4 如圖2(新竹驗潮站)

(三) 選擇分潮的影響

Emery and Thomson (2001)提出以資料長度、取樣間隔(sampling interval)及分潮頻率差等三個原則決定分潮之選定。第一為選取的分潮最低頻率的週期必須小於或等於資料長度，為 $T_{max} \leq N \Delta t$ ，其中 T_{max} 為分潮的最長週期， N 為資料個數， Δt 為取樣間隔。第二為選用的分潮最高頻率的週期必須大於或等於兩倍的時間間隔，即 $T_{min} \geq 2 \Delta t$ ，第三為兩分潮相臨的頻率差的倒數必須小於或等於資料長度 $1/\Delta$

$f \leq N \Delta t$ 。以Sa分潮為最長週期為例，根據上述第一個原則計算資料長度需至少365.24天。

調和分析所選用的分潮須包括平衡潮的重要分潮，而其他次要的分潮則須考慮局部區域的地形效應而不同，以能吻合實測資料。在台灣常用Doodson (1941)提出的60個分潮組合，其名稱及角頻率可見郭一羽(2001)的第六章。另外，還有Parker (2007)、姜介中(2009)使用的37個分潮，及內政部發展潮位模式(2018)的25個分潮調和分析。在此針對澎湖驗潮站，採用相同的HARD分析方法，比較25及60個分潮所得 z_0 及ALAT之差異絕對值可得， z_0 的最大值為0.21cm，平均值為0.04 cm，標準差為0.04 cm。ALAT的最大值為0.750cm，平均值為4.27 cm，標準差為1.89 cm。

比較新竹驗潮站25及60個分潮對 z_0 及ALAT差異絕對值的統計值。每年平均水位的最大值為0.42cm，平均值為0.07 cm，標準差為0.09 cm。ALAT的最大值為26.68 cm，平均值為9.08 cm，標準差為7.03 cm。由上述分析結果可知，選用不同分潮數的調和分析對平均水位影響極微，但對反算逐時的天文水位影響頗大，在澎湖驗潮站約 4.27 ± 1.89 cm，在新竹驗潮站約 9.08 ± 7.03 cm。

史天元等人(2021)選擇25、37及60個分潮的調和分析，分析台灣34個驗潮站2016年逐時資料，計算各驗潮站的三者約「約最低低潮位」(ISLW)，其定義為平均海水面扣除四個主要分潮， M_2 ， S_2 ， O_1 及 K_1 ，並比較前兩者與60個分潮的差異，34個平均值為0.17 cm及 0.14cm，而其標準差分別為1.47 cm及0.93cm，此結果說明不同分潮的調和分析影響「約最低低潮位」是不顯著的。此結論可能因為「約最低低潮位」只相關於四個主要分潮，但從調和分析的理論而言，只要選擇要主要分潮相同，其他次要分潮差異越多，潮水位特性才會有些微的差異。史天元等人(2021)指出37及60個的分潮的次要分潮是大致相同的，但25與60個分潮的次要分潮卻差異較大。本文雖然無計算37及60個分潮的差異，但從前述25及60個分潮的澎湖及新竹驗潮站的 z_0 及ALAT比較差異，37及60個分潮的 z_0 及ALAT差異必定比25及60個分潮的差異更低。本文為凸顯調和分析的分潮選擇影響潮位特性差異，故而只選擇25及60個調和分析的比較。

(四) 資料年份的影響

調和分析的取樣資料長度(最前與最後的時間差)，與上述Emery and Thomson (2001)提出方法與最低分潮頻率及鄰近分潮頻率差有關。若特定驗潮站已有一年以上的資料，選擇60個分潮都是符合取樣標準，且逐時資料也符合分潮最短週期的限制。中央氣象局供應的潮位資料時間距有6分鐘及1小時的格式，林明憲(2012) 探討台灣6個驗潮的6分鐘及逐時資料對四個主要分潮振幅影響，最大差異僅為0.03 cm。

如圖2所示，以不同年份計算該年ALAT約有30 cm的變動，此變動原因可能與缺漏資料多寡有關外，亦與整體資料的變動差異有關，如高低氣壓影響的氣壓潮或氣溫改變的水位影響。若以圖1及圖2來看，選取不同年份一年長度資料的調和分析

反推水位應會有10-30cm的差異。接下來，使用澎湖及新竹驗潮站的每年資料經HARD調和分析後，探討以相同的樣資料長度，但不同資料取樣的年份對有無節點潮修正的LAT影響，其中LAT是以使用資料的該年往後19年天文潮最低點。圖5及圖6分別為分析澎湖及新竹驗潮站後的結果，圖中LAT₀及LAT_n分別代表無節點潮修正及有節點潮修正的LAT。

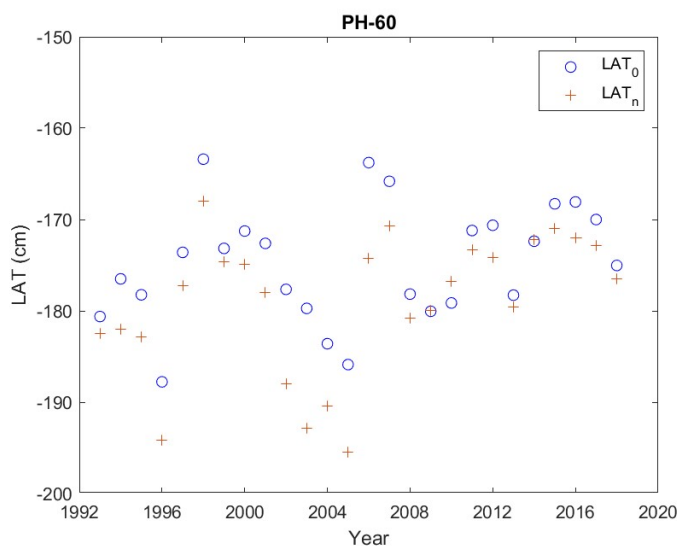


圖5 以每年資料輸入HARD推算澎湖驗潮站LAT

由圖5及圖6可知以每年資料計算19年期間的LAT的確有明顯的變動，有無節點潮修正的變動趨勢是相同的，但考慮節點潮修正的LAT比無節點潮修正的LAT低。以圖5的澎湖驗潮站LAT_n為例說明，LAT_n的變動在-195.47 cm及-167.97 cm之間，其範圍為27.50 cm，平均值為-179.04 cm，標準差為7.65 cm。而LAT₀及LAT_n相差絕對值的最大值為13.16 cm，平均值為4.44 cm，標準差為3.35 cm。由此結果可知，以每年資料獲得19年的LAT變動相當大，其變動特性與圖2的ALAT變動趨勢雖然不同，但是變動的範圍接近。因為每年的潮位有所差異，如ALAT，以調和分析修正其參數盡量吻合所有的資料的原理，為讓觀測值與計算值的誤差達到最小，因此每年潮位不同，解算的調和參數就不同，所以所得的LAT也就有變動。

至於新竹驗潮站的LAT₀及LAT_n變動也有相同趨勢，且LAT_n比LAT₀低，但LAT₀及LAT_n整體變動卻與圖5的澎湖驗潮站不同。LAT_n的變動在-317.53 cm及-255.15 cm之間，其範圍為62.38 cm，平均值為-291.39 cm，標準差為20.75 cm。而LAT₀及LAT_n相差絕對值的最大值為13.43 cm，平均值為4.99 cm，標準差為3.90 cm。

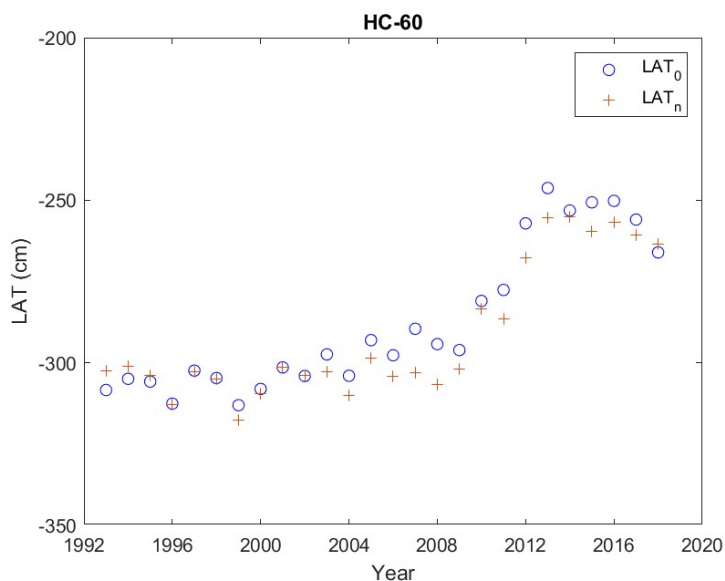


圖6 以每年資料輸入HARD推估新竹驗潮站LAT

(五) 資料長度的影響

由上述分析可知，使用每年資料的調和分析後，計算的LAT會因為不同年份資料有明顯的變動，在此節探討逐年增加資料長對LAT變動是否會趨於收斂穩定性。分析澎湖及新竹驗潮站的結果分別示如圖7及圖8，其中橫坐標為使用資料的長度，單位為年，左邊縱座標為LAT，包括前述的 LAT_0 及 LAT_n ，右邊縱座標為HARD所獲得的平均水位 z_0 。考慮主要因為節點潮的修正與時間原點有關，因此圖7及圖8的LAT結果都以1993年1月1日0時為啟點時間，往後推算19年的天文潮位最低點，不隨使用資料長度不同而改變啟點時間。

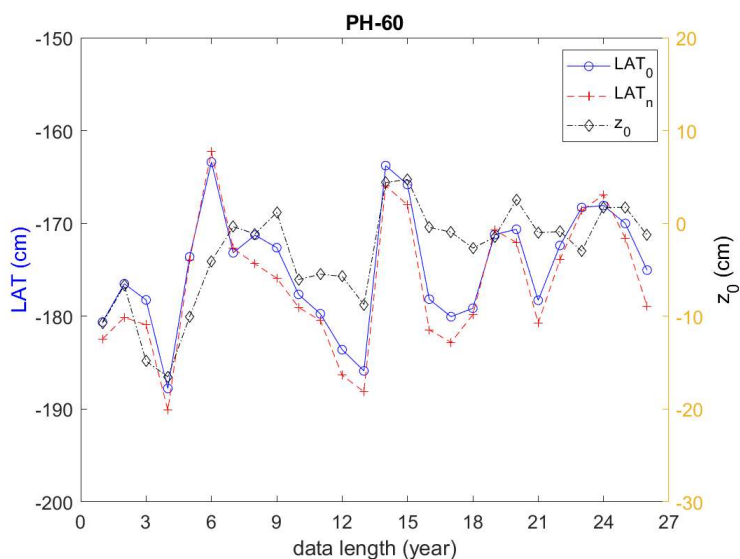


圖7 逐年增加資料長度的HARD調和分析推算澎湖驗潮站LAT及平均水位

由圖7顯示 LAT_0 在資料長度短時有明顯4個上下起伏的變動，其幅度隨資料長度增加而降低，且 LAT_0 的變動趨勢與 z_0 者類似，二者的相關係數為0.6731，屬於中高的相關性。 LAT_0 及 z_0 的4個變動幅度分別為24.38、22.11、9.42、10.21cm及17.70、13.48、5.23、4.73 cm。 LAT_0 的後兩者震盪幅度並未如 z_0 是逐漸收斂的，大約維持10 cm。從圖7可知當資料長度增加後，調和分析所得的參數及 z_0 的變動遂逐漸減低，因此 LAT_0 的後兩個幅度平均值與前兩個平均值比值，大約降低58%，而 z_0 大約降低70%。另外， LAT_n 的上下起伏的變動與 LAT_0 類似，但幅度更大，4個變動幅度分別為27.84、22.16、12.10、13.83cm，且 LAT_n 與 z_0 的相關係數可達0.6230。

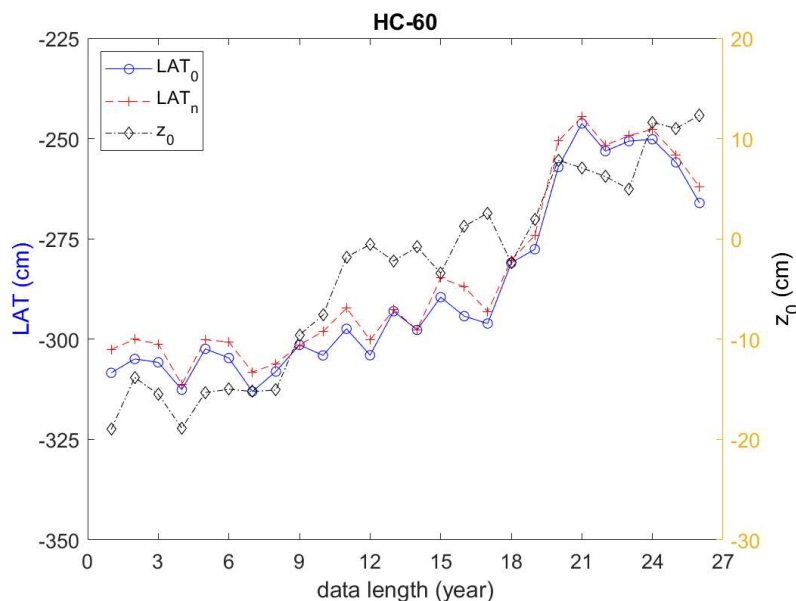


圖8 如圖7(新竹驗潮站)

圖8顯示 LAT_0 、 LAT_n 及 z_0 隨資料長度增加都有明顯的增大趨勢，此與圖7有週期震盪的特性是不同的。 LAT_0 及 LAT_n 與 z_0 的相關係數分別為0.8585及0.8611，屬於高的相關。為分析資料增加長度一年對 LAT_0 、 LAT_n 及 z_0 的影響，將圖8某資料長度所得 LAT_0 、 LAT_n 及 z_0 減去前一年資料長度者，即圖8後一筆資料減去前一筆資料，再取絕對值。所得 LAT_0 逐年變動量的最大值為20.47 cm，平均值及標準差分別為6.61 cm及4.60 cm。 z_0 的變動量最大值為6.64 cm，平均值及標準差分別為2.69 cm及2.08 cm。 LAT_n 的逐年變動量最大值為23.52 cm，平均值及標準差分別為6.57 cm及4.94 cm。

至於圖7澎湖驗潮站的 z_0 隨資料長度增加而逐漸收斂，但圖8新竹驗潮站的 z_0 卻隨資料程度增加而逐漸增加，為探討新竹驗潮站海水位上升的原因是來自於當地海域特性或儀器偏移因素。仿圖7做法，再選擇新竹驗潮站北方的桃園竹圍驗潮站，分析結果示如圖9。由圖9顯示，竹圍驗潮站的 z_0 在2005至2010間，也有突然增加約25 cm的現象，且 LAT_0 及 LAT_n 與 z_0 有相似的變動趨勢，此特性與圖8者是一致的。圖9的 LAT_0 及 LAT_n 與 z_0 的相關係數分別為0.9658及0.9523，也是具有高度的相關性。 LAT_0 逐年的變動量最大值為11.32 cm，平均值及標準差分別為4.63 cm及2.96 cm。而

z_0 的變動量最大值為12.89 cm，平均值及標準差分別為3.90 cm及3.52 cm。而 LAT_n 的逐年變動量最大值為16.42 cm，平均值及標準差分別為4.90 cm及4.06 cm。

郭重言等人(2015)以雷達測高資料收集 (Radar Altimeter Data Acquisition, RADs) 與法國衛星海洋數據資料中心 (Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic, AVISO)的衛星測高網格資料分析台灣氣象局驗潮站的地表垂直變動速率，在新竹驗潮站分別為 -1.44 ± 0.89 mm/yr及 -2.45 ± 0.92 mm/yr。郭重言等人(2015)引用內政部水準成果[內政部國土測繪中心，2014] 的全球衛星定位系統(GPS)，在新竹的地表垂直變動速率為 -3.31 ± 0.05 mm/yr。由此結果顯示新竹及竹圍驗潮站的潮位基準是緩慢的逐漸下沉，而增加平均海水位的上升率。但是比較圖8及圖9後，確定兩驗潮站的 z_0 隨資料程度增加而增加，應屬於北區海域的潮位特性，其增加率已達約10mm/yr，並而只有地表垂直變動速率因素，尚有非地表垂直變動，如氣候變遷或其他自然因素所造成的，是值得探討的有趣課題。

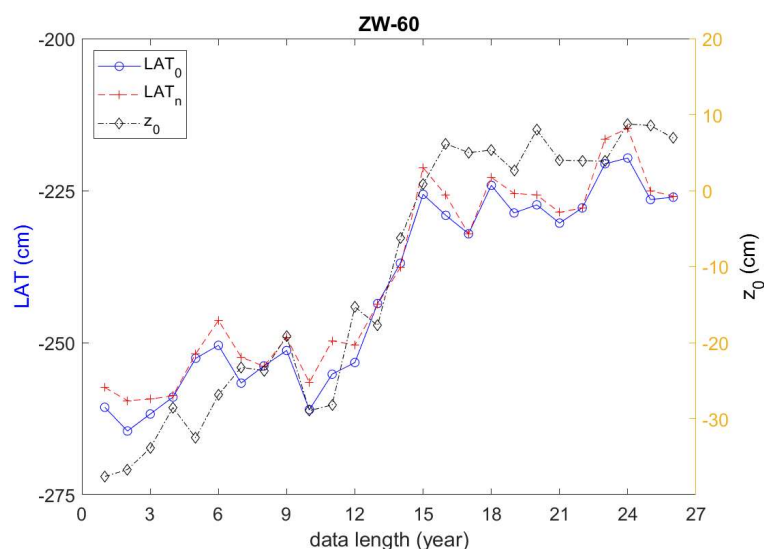


圖9 如圖7(竹圍驗潮站)

就上述澎湖及新竹驗潮站的 LAT_n 分析結果， LAT_n 可能隨資料長度有週期性的震盪或者逐漸增加，無法獲得逐漸收斂結果，而無法可建議出合適的資料長度。但比較圖7及圖8與圖5及圖6的 LAT_n 特性可知，使用一年資料所得 LAT_n 的上下變動幅度還是比使用多年資料的 LAT_n 大。因此，若有多年的觀測資料，建議盡量使用較多的觀測資料所得的 LAT_n 是比較可信的。

(六) 節點潮修正量對 ALAT 的影響

過去文獻指出天文潮會因為18.61年週期的節點潮影響，因此LAT需計算19年的最低天文潮位，而節點潮的修正即為式(1)中的 f 及 u 值，此二值計算方法已可見 Darwin and Adams (1883)及Doodson (1941) 的推導理論及演算法。Doodson (1941)詳列14個受節點潮影響的振幅因數及相位因數的公式，其皆為節點角度(N值)的函數，

N值為儒略世(Julian century)的函數。Doodson (1941)所列每個 f 及 u 公式包括兩項或三項，若考慮完整項者，本文稱為三階量(third order)修正，若僅以主要單一項的 f 及 u 公式稱為一階量(first order)。

使用澎湖驗潮站2016年的逐時資料，以無資料補遺的HARD法獲得分潮參數後，並考慮不同階量節點潮計算1997至2043年的逐時水位後，再取每年最低水位天文(ALAT)，如圖10所示。因共同使用2016年所得的 z_0 ，故ALAT沒有每年不同平均潮位的影響。圖10的計算條件與圖2考慮每年資料因有不同 z_0 的結果是不同的。圖10顯示二者差異微小，變動範圍在-170.46 cm及-154.25 cm之間，平均值為-163.72 cm，標準差為4.45 cm。二者相差絕對值最大為0.87cm，平均值為0.34 cm，標準差為0.22 cm。

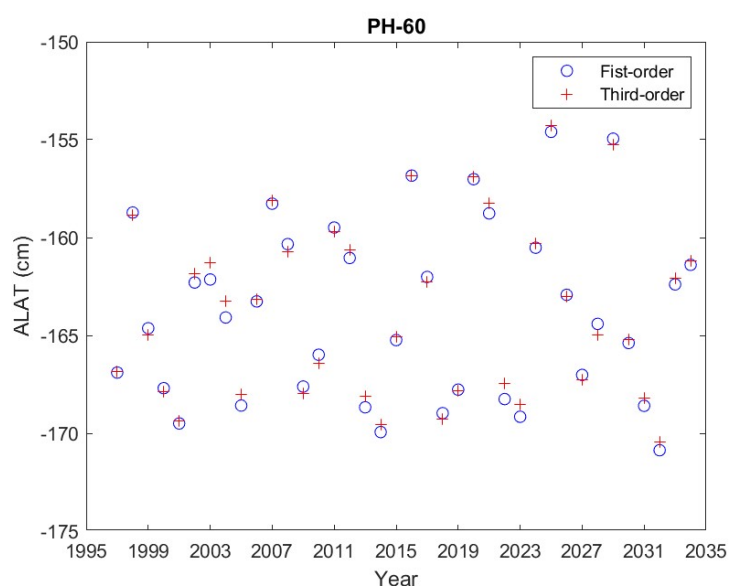


圖10 以兩種節點潮修正公式計算1997至2043年澎湖驗潮站每年最低水位天文潮

新竹驗潮站結果示如圖11。圖11顯示推算新竹驗潮站的兩種ALAT差異亦相當微小，變動範圍在-256.37 cm及-232.71 cm之間，平均值為-246.38 cm，標準差為5.86 cm。二者相差絕對值最大為0.76 cm，平均值為0.27 cm，標準差為0.22 cm。由圖10及圖11顯示不同階量的節點潮修正對計算ALAT及LAT影響不大。Feng et al. (2014)及Woodworth and Hibbert (2018)只考慮幾個主要分潮及主要階量的節點潮修正分析節點潮特性，但是現代電腦已具快速計算能力，本文還是建議使用Doodson (1941)的完整公式。

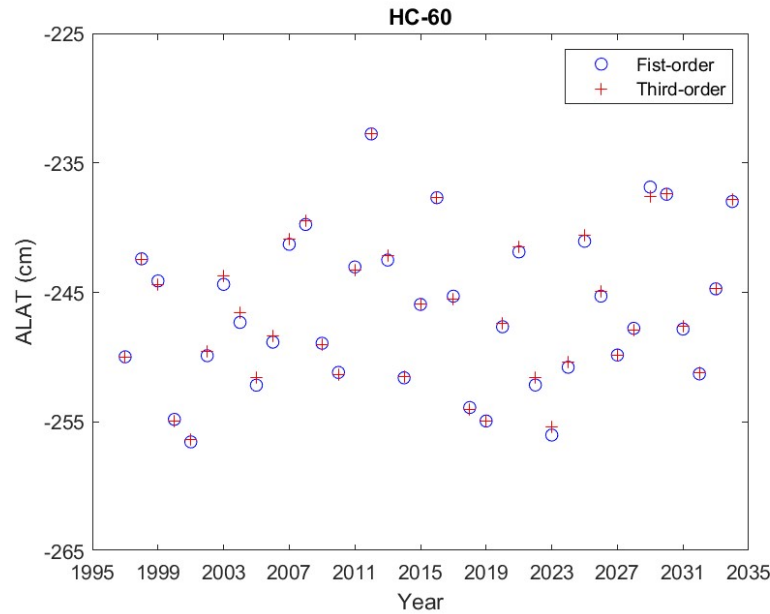


圖11 如圖10(新竹驗潮站)

(七) 計算LAT的時段

本小節上述分析結果，為避免不同年份的潮位有平均值及氣象潮的差異，使用2016年逐時資料，以高階節點潮修正的60個分潮的HARD調和分析，計算2016年往前後19年的逐時天文潮位，共38年的每年最低天文潮(ALAT)，再取1997-2015年間、2016-2034年間及2006-2024年間的最低ALAT，即為此三個段時期的LAT，探討計算19年時段對LAT的影響。所得的結果分別為-169.54cm、-169.54 cm及-170.47 cm。由此可知以特定年期資料計算不同時段的19年的LAT，約有0.93cm左右的差異。

如同上述澎湖驗潮站的計算方式，新竹驗潮站的三個時段LAT結果分別為-256.37cm、-255.40 cm及-255.40 cm。三者之間差異為0.97cm。

(八) 計算時距

上述計算LAT乃基於計算逐時的水位，本研究接續探討，若計算水位的時距加密，是否會獲得比逐時水位更低的LAT。若以3, 6, 12及24分鐘及1小時的計算時距，所得2016-2024年的19年間LAT，分別為-170.50 cm, -170.49 cm, -170.47 cm, -170.47 cm及-170.47 cm，且這些值都發生在同一年份。由此結果發現，不同計算時距影響LAT極微，且隨時距增加而LAT的差異越少，甚至幾乎相同。以此為例，3分鐘與1小時的LAT僅差0.03 cm。

如上述澎湖驗潮站的分析結果，計算新竹驗潮站2016-2024年間不同時距天文潮的LAT，分別為-256.66 cm, -256.63 cm, -256.55 cm, -256.55 cm及-256.40 cm，且這些值亦發生在同一年份。計算3分鐘與1小時的LAT差異僅為0.26 cm。由兩驗潮站的分析可知，當獲得分潮參數後，以不同時距(3分鐘或1小時)的計算天文潮，其LAT差異

不大，約0.3cm以內。

三、建議程序

根據上述影響LAT的各項因子討論，統整澎湖及新竹驗潮站各因子的影響幅度如表1，幅度欄有兩個數字者，前者為平均值，括弧內為標準偏差。平均值代表的是系統性偏移，其傳播為相加。

表 1 影響因子及其影響幅度(單位: cm)

參數獲得前的因子	澎湖驗潮站	新竹驗潮站
資料的平均潮位	0.41 (0.49)	0.34 (10.00)
資料補遺	0.11 (0.27)	2.01 (1.67)
分潮選擇(25 vs 60)	4.27 (1.86)	9.08 (7.03)
取樣資料年份	27.50 (7.65)	62.38 (20.75)
取樣資料長度	6.57 (4.94)	4.90 (4.06)
參數獲得後的因子		
有無節點潮修正	4.44 (3.35)	4.99 (3.90)
節點潮修正階量	0.34 (0.22)	0.27 (0.22)
計算 LAT 的時段	0.93	0.97
計算時距(3 min vs 60 min)	0.03	0.26

雖然上述分析僅以澎湖驗潮站及新竹驗潮站為例，表1內的兩驗潮站數據不同，所以不同地點因為區域海氣象及潮型等會影響調和分析的因子評估結果，且一定與表1內數據的不同。表1的分析結果只是凸顯影響計算LAT的比較重要因子及次要因子，且概估各項因子影響LAT的幅度。由表1顯示影響計算LAT的重要性依序為取樣資料年份，資料長度，分潮的選擇及節點潮修正四項，其他是否扣除平均值，資料補遺，節點潮修正公式，計算天文潮的時距及19年時段的影響LAT幅度相對是次要的。

分析LAT所需調和分析的建議項目，條述如下。

1. 調和分析的潮位資料需經基準偏差修正，以正確估算平均值及分潮參數。資料長度及分潮選擇應符合 Emery and Thomson (2001)的建議，若實測長度為至少一年可以使用 Doodson (1941) 60 個分潮。
2. 以最小二乘法為基礎的調和分析不受資料缺漏數量及位置影響參數推算。若補以 0 於缺漏資料的調和分析，並經多次疊代達到誤差收斂條件的資料補移會增加計算時間，且與無資料補遺者所獲得天文潮水位的差異約為 0.5-2 cm 差異。

3. 選用不同年份資料進行調和分析，會受原始資料平均值約有 10-30 公分左右的影響，且計算 LAT 的變動可達 20cm 以上，年份資料為計算 LAT 的重要因素。若實測資料足夠，建議儘量使用較長資料進行分析 LAT 是越可信的。
4. 19 年 LAT 之計算需考慮節點潮的影響，節點潮理論及演算法可參考 Doodson (1941)。計算天文潮的 19 年時段影響 LAT 微小，建議可使用潮位資料年起，往後計算 19 年的天文潮最低值。
5. 計算 19 年細時距水位的 LAT 比粗時距更低，但是計算時距的 LAT 影響差異極微，約 0.3cm。計算時距建議使用原本潮位資料格式的 6 分鐘或 1 小時。

四、結語

由理論面論述，「最低天文潮位面」(LAT)是最理想的「海圖基準」參考潮位面，也是國際海洋測量組織(IHO)所建議者。統整澎湖驗潮站及新竹驗潮站各影響因子的影響幅度分析，對於LAT值影響最大的主要因子為取樣資料年份，資料長度，分潮的選擇及節點潮修正四項，次要因子為是否扣除平均值，資料補遺，節點潮修正公式，計算天文潮的時距及19年時段因子。上述的程序僅為根據澎湖驗潮站及新竹驗潮站逐時資料的分析所獲成果，潮位特性受到地域影響，各驗潮站特性不一，各項分析指標的數值必然會有差異。同時，尚未探討的因子尚未考慮6分鐘格式資料、潮位資料的逆氣壓修正、短時段資料長度及其演算法、外海無驗潮站觀測資料等問題，需更多嚴謹的探討，方可建立適合台灣海域的計算LAT操作手冊。

五、致謝

本研究所使用之驗潮站數據，為由中央氣象局蒐集建立、經由國立成功大學測量及空間資訊學系郭重言教授整理、校正與品質控管，是本研究能夠進行之關鍵支持。敬此向郭重言教授、中央氣象局、與內政部致謝。

參考文獻

- 內政部，2018，《106年度「潮位模式精進工作案」期末報告》。
- 林明憲，2012，《新的潮汐型態指標》，國立交通大學土木工程研究所碩士論文。
- 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。
- 莊文傑、曾相茂、江中權，2006，潮汐資料之補遺及其在暴潮位萃取之應用，《第28屆海洋工程研討會論文集》，第201-206頁。
- 郭一羽，2001，《海岸工程學》，文山書局。

- 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》，台北市，交通部運輸研究所出版。
- 黃瓊珠、李汴軍、高家俊，2006，天文潮位資料補遺之探討，《氣象學報季刊》，
第四十六卷第二期，第15~28頁。
- 史天元、張憲國、鄭景中，2021，約最低低潮位解算探討，《第49屆測繪及空間資
訊學術發表會論文》。
- CGS, 1940. Manual of Harmonic Analysis and Prediction of Tides, Special publication
No. 98, Coast and Geodetic Survey, U.S. Department of Commerce.
<https://tidesandcurrents.noaa.gov/publications/SpecialPubNo98.pdf>, last accessed
on 2021/05/17.
- Codiga, D.L., 2011. Unified Tidal Analysis and Prediction Using the UTide Matlab
Functions. Technical Report 2011-01. Graduate School of Oceanography, University
of Rhode Island, Narragansett, RI. 59pp.
- Darwin G.H., and J.C. Adams, 1883. The Harmonic Analysis of Tidal Observations,
Report of a Committee, consisting of Professors G. H. Darwin and J. C. Adams, for
the Harmonic Analysis of Tidal Observations. British Association Report for 1883,
pp. 49-118.
- Doodson, A.T., and H.D. Warburg (1941) Admiralty Manual of Tides, Published by the
Hydrographic Department, Admiralty, London, Her Majesty's Stationery Office.
- Emery, William J., Richard E. Thomson, 2001. Data Analysis Methods in Physical
Oceanography, Elsevier Science, [https://doi.org/10.1016/B978-0-444-50756-
3.X5000-X](https://doi.org/10.1016/B978-0-444-50756-3.X5000-X).
- Feng, X., N. Tsimplis, and P. Woodworth (2014) Nodal Variations and long-term
changes in the main tides on the coasts of China, *J. of Geophys. Res. Oceans*, 120,
1215-1232.
- IHO, 2017. Resolutions of International Hydrographic Organization, Publication M-3,
2nd edition-2010, updated to Aug 2018, [https://iho.int/iho_pubs/misc/M3-E-
AUGUST18.pdf](https://iho.int/iho_pubs/misc/M3-E-AUGUST18.pdf), last accessed on 2021/05/17.
- Parker, Bruce B., 2007, Tidal Analysis and Prediction, NOAA Special Publication, NOS
CO-OPS 3, U.S. Department of Commerce, 378pp.
https://tidesandcurrents.noaa.gov/publications/Tidal_Analysis_and_Predictions.pdf
, last accessed on 2021/05/15.
- Pawlowicz, R., B. Beardsley, S. Lentz. 2002. Classical tidal harmonic analysis including
error estimates in MATLAB using T-TIDE. *Computers & Geosciences* 28, 929-937.
[https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(02\)00013-4](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(02)00013-4)
- TWCWG, 2017. Resolutions of the IHO – Repertory of Resolutions (M-3),
[https://iho.int/mtg_docs/com_wg/IHOTC/TWCWG2/TWCWG2-7.1a-
IHO_Resolutions.pdf](https://iho.int/mtg_docs/com_wg/IHOTC/TWCWG2/TWCWG2-7.1a-IHO_Resolutions.pdf), last accessed on 2021/07/05.

Woodworth, Philip L. and Hibbert, Angela. (2018) The nodal dependence of long-period ocean tides in the Drake Passage. *Ocean Science*, 14 (4). 711-730. <https://doi.org/10.5194/os-14-711-2018>.

高程現代化於海洋測量之實踐

史天元¹ 薛憲文²

論文收件日期：110.10.18

論文修改日期：110.11.19

論文接受日期：110.11.29

摘要

「全球導航衛星系統」的發展與成熟，是近代人類文明的重要資源與產業，對於空間的量度，引發完全不同既往的思維。「高程現代化」即為因應而生的一項空間資訊的基礎架構更迭，由過去以物理方式建構之基準與作業，成為以幾何定義之基準架構。在陸域，銜接幾何高度與物理高程的是「大地起伏」；在海域，聯接幾何高度與水體深度的是「離距模型」。本文探討以「高程現代化」精神在海洋測量之實踐，包含「海圖基準」之深度基準建立方式，以及「以橢球面為參考之測深」作業。本文由國際共識之發展方向與文件，說明「海洋測量高程現代化」之實踐，並釐清遭到誤用之名詞並探討其原因。

關鍵字：平均海水位、平均海水面、最低天文潮位、離距模型

¹ 教授，土木工程學系，國立陽明交通大學。

² 教授，海洋環境及工程學系，國立中山大學。

The Realization of Height Modernization in Hydrographic Surveying

Tian-Yuan Shih¹, Shiahn-Wern Shyue²

Abstract

The development and realization of Global Navigation Satellite System (GNSS) is an important asset for the civilization of today. GNSS changed the fundamental concept in the establishment of spatial information infrastructure. Height modernization is one of the evolution raised accordingly. The conventional height reference system and surveying method based on physical measures, has been replaced with one based on geometry. In the land area, geoid undulation model is used to converting geometric height to physical height. In the sea, the separation model is the one connecting ellipsoid referenced height to the depth required. This note addresses the realization of height modernization in the practice of hydrographic surveying. The implementation scheme is introduced with internationally recognized documents. A miss-used terminology is also discussed.

Keyword: Lowest Astronomical Tide, Mean Sea Level, Mean Sea Surface, Separation model

¹ Professor, Department of Civil Engineering, National Yang Ming Chiao Tung University

² Professor, Department of Marine Environment and Engineering, National Sun Yat-sen University

一、前言

在空間意涵的「上下四方」中，無論是「前後左右」，或是「東南西北」，這「四方」的量度，是幾何性的。但是在垂直維度的「上下」，卻複雜地同時兼具有幾何與物理的意涵。因此，垂直維度的參考系統有多種，包含「橢球高」(Ellipsoid Height)系統，是一個純幾何量的系統；以及「正高」(Orthometric Height)、「正常高」(Normal Height)系統；這兩個系統具有物理的意涵，一般應用於陸域。在海域，則因應用的差異，通常採用與當地潮位相關的另一個垂直維度的系統。

依照陸域與海域的區分，陸域使用的是「高度」，而海域使用的是「深度」。在陸域使用的「正高」與「正常高」，分別以「大地水準面」(Geoid)與「準大地水準面」(Quasi Geoid)為零位面；在海域則使用不同的潮位面作為基準。在陸域，由參考面向上為正值；在海域，由參考面向下為正值。這些差異是因使用目的不同而引發的，在陸域，無論河流、渠道、及其他相關的土木設施，使用的高程量度需要滿足「力」、「位能」的表達，亦即，滿足「水由高往低流」的條件。在海域，就航行應用而言，需要達成評估水深是否足夠行船安全的需求。

相對上，海域的垂直維度量測，又較陸域多樣化，這與海面受到潮汐影響相關。以上述行船為要求的應用為例，基於航行安全的基本要件，使用低潮位系統的基準。依照國際海洋測量組織(International Hydrographic Organization, IHO)的決議(Resolution)(IHO, 2018)，應採用「最低天文潮位」(Lowest Astronomical Tide, LAT)或與 LAT 相等實務上可行者，為基準(It is resolved that the Lowest Astronomical Tide (LAT), or a datum as closely equivalent to this level as is practical and acceptable to Hydrographic Offices, be adopted as chart datum.)。而在海岸管理的面向，則需要採用高潮位系統，如以「最高天文潮位」(Highest Astronomical Tide, HAT)為基準。除此之外，因應不同法令與應用的考量，會產生使用不同潮位的需求。

基於「高程現代化」的基本精神，本文著重於現代化海洋測量之實踐，探討其概念與作為。

二、高程現代化

在 Global Navigation Satellite System (GNSS)發展之前，橢球面是一個純粹概念性的物件，看不到、摸不著，幾乎無法量度。相反的，潮汐的觀測是在人類文明的發育中相當早期即已形成的。因此，「正高」、「正常高」，以「平均海水位」做為「大地水準面」與「準大地水準面」的定義，具有實務上的可行性。「逐差水準」(Differential Levelling)測量配合重力測量，讓兩點之間高程的差值可以量測。同樣，藉由在海岸岸際同步的潮汐量測，可以聯繫海域中觀測到的瞬時水深與岸上設定的基準。GNSS 讓這一切，有了一個新的可能：直接觀測橢球高。不僅可以觀測，而且可以穩定的觀測，可以脫離許多物理影響因子地達成量測。

「高程現代化」(Height Modernization)之基本精神是「妥善應用衛星科技，亦即應用 GNSS 技術，結合傳統的水準測量、重力和遙感探測建立準確、可靠的高程」。美國國家大地測量局(NGS, National Geodetic Survey)描述其定義為：

Height Modernization is the establishment of accurate, reliable heights using GPS Technology in conjunction with traditional leveling, gravity, and remote sensing information.

由上所述，可以明白了解，GNSS 雖然有其卓越的優點，但並不是在所有的應用場景，均能滿足設定的確定度要求。傳統的水準測量，以及海洋測量中的測深技術，依然是建構系統的重要一環。

實務上，GNSS 的空間位置量測是建築在幾何量上，直接獲得的定位坐標在三維地心地固(ECEF, Earth-Centered, Earth-Fixed)坐標系中，轉換為經緯度時，其高程為對應該 GNSS 所選擇之橢球體的橢球高。橢球高是幾何量，目前易於精確量測。因此，在「高程現代化」作業中，原始垂直維度測量建立於橢球，亦即是「以橢球體為參考面」之測量。在某些應用，如形變監測，「以橢球體為參考面」之測量是可以滿足需求的。但是在基本陸域與海域應用的面向，是無法直接滿足的。因此，「高程現代化」為從「以橢球體為參考面」之測量所獲得之「幾何高」開始，經由「化算」之過程，獲得合於應用需求的相應高度系統。以「高程現代化」的實現(Realization)著眼，於陸域，橢球高測量經由「大地起伏模型」(Geoid Undulation Model)之化算，得到正高或正常高。於海域，橢球高測深，經由「離距模型」(Separation Model, SEP)之化算，得到相對於「海圖基準」(Chart Datum)之深度。「離距模型」為應用潮位模型(Tide Model)產出之一種深度基準面，因為應用於海圖，稱為「海圖基準」。

「大地起伏模型」又稱為「大地水準面高模型」(Geoid Height Model)，其值為該位置大地水準面相應於橢球面的高程，亦即為大地水準面之橢球高。如同「大地起伏模型」一般，「海圖基準」是一個面，其內涵為相對於橢球體之該位置基準高度，如果使用 LAT 為參考基準，「離距模型」中的值，是該位置 LAT 面之橢球高，亦即圖 1 中所標示的 SEP。SEP 值在各處均低於大地水準面的橢球高，因為大地水準面約略與平均海面(Mean Sea Surface)相合，而 LAT 是最低天文潮位，當然低於平均。由於橢球體定義時，是最貼合於平均海面的數學面，SEP 在多數的情況下，是低於橢球面的。但是在臺灣周遭海域是高於橢球面的。圖一中，WL 為 GNSS 天線相位中心至水面之高差。本文描述為概要，細節可參考 Mills and Dodd (2014)。

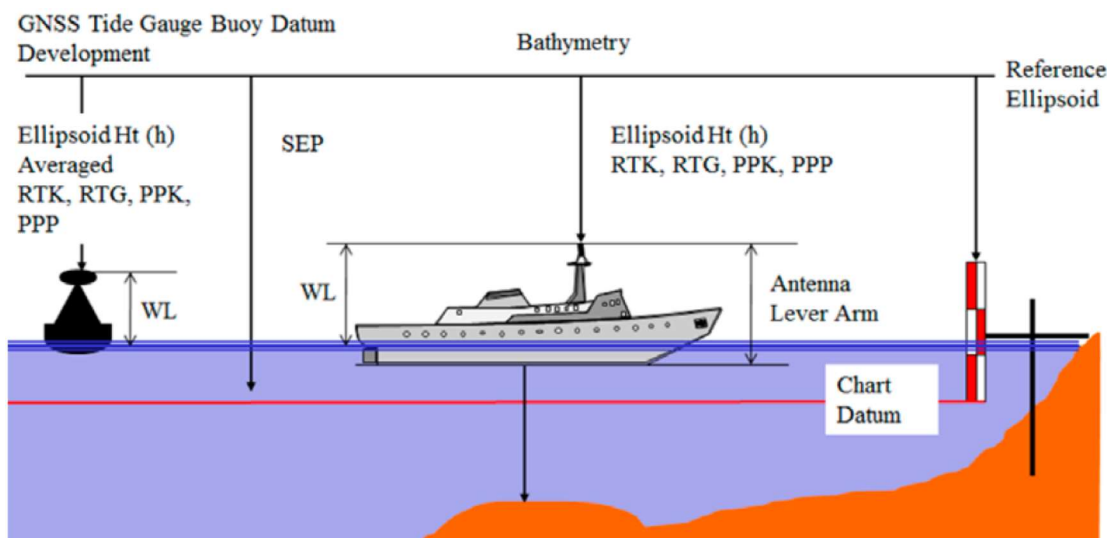


圖 1 離距模型與相關的面 (Mills and Dodd, 2014)

三、海洋測量

「水深測量」，是以量度水深為目的之測量。使用的量測工具包含水尺、測深桿、測深錘、單音束測深儀(Single beam echo sounder)、多音束測深儀(Multi-beam echo sounder)、測深光達(Hydrographic Lidar)等等。「海洋測量」可以包含各種不同物理、幾何量有關於海洋之測量，但是此處以測量海水深度為探討內涵。如此定義的「海洋測量」，當然是「水深測量」之一種，但是不同於一般，「海洋測量」中的「水深測量」，其觀測值往往受到潮位變化之影響。也並非所有的海域，均有明顯的潮汐，如波羅的海(Baltic Sea)即為無明顯潮汐的一個案例。本文所討論之「海洋測量」，為在有潮區所進行之「水深測量」。

海域「水深測量」的一個主要目的，在產製海域的圖資，以型態區分，包含「海域地形圖」與「海圖」。兩者之區分，在於「海域地形圖」以描述地形為目的，因此通常使用「高度」，「海圖」(Chart)以航行為應用目的，多使用「深度」；「海圖」是英文名詞「Chart」之對應名詞。嚴格說，應為「航圖」，因為在內陸水域的「航圖」仍稱為「Chart」，而該時「Chart」的製圖基準多為內陸所使用之高程系統，而非「海圖基準」。

由「水深測量」的參考面區分，「海洋測量」可分為「以瞬時海水位為參考」測深，與「以橢球面為參考」測深。前者為在 GNSS 發展前即已廣泛使用之測深方式，亦可視之為傳統配合潮位觀測的測深方式。其執行方式為測量相對於瞬間海水位之當地深度，配合岸際潮位站，進行潮位改正，化算到基準面，相關量之間的關係如圖 2。以測深儀量測到的是由測深儀參考點到水底之垂距， $Depth_{ES}$ ，為測深儀獲得之水深。水面對應到基準的垂直距離，WL，需要經由潮位改正獲得。由測深儀參考點到水面之距離與船隻吃水(draught)有關，需要藉由率定獲取。在這個作業過程中，可能使用 GNSS 獲得水平(Horizontal)位置資訊，但是不會使用到橢球面或橢球高；因此，本質上是「非高程現代化」的測深方式。

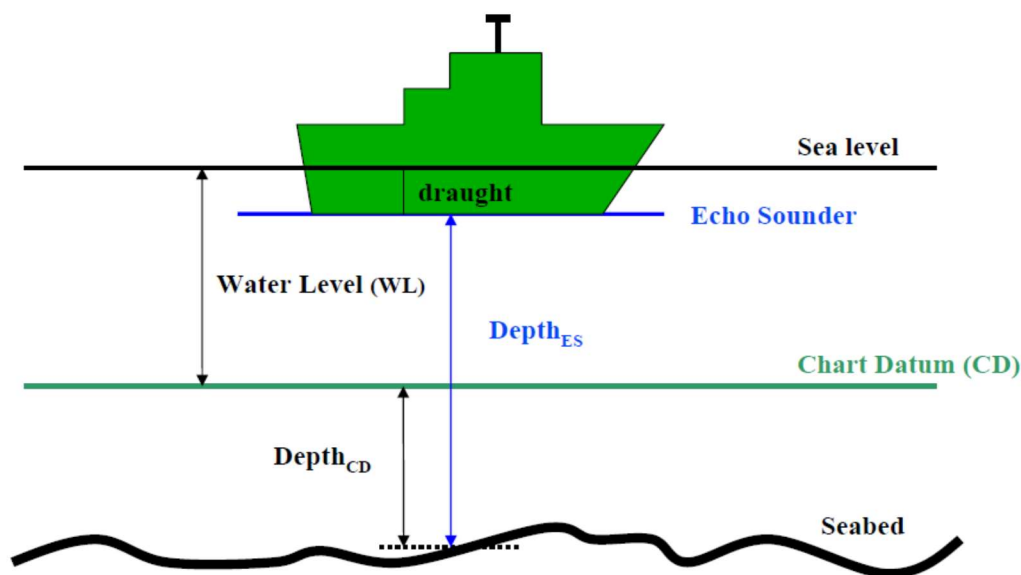


圖 2 以瞬時海水位為參考測深 (Hodnesdal et al., 2006)

除上所述的基本關係外，「以瞬時海水位為參考」測深，所得到的觀測量需經過多項改正，包含(1)聲速剖面修正；(2)船隻姿態修正；(3)潮位修正；等。謹探討如下：

水深資料計算須做姿態(含載具姿態及儀器安裝偏移量)改正、聲速改正、潮位改正及資料篩選。

其他動態改正，如動態吃水(dynamic draft)改正等。

若調查區域水深超過 200 公尺，得免做潮位觀測及改正。但是，通常仍做船隻姿態改正。

測深誤差因子(error budgets)包含：船速效應(settlement and squat)、定位中心偏心效應(offsets)，以及測深儀發射聲波延遲效應(林瑋等，2005)等測量環境效應引起的測量誤差。定位中心偏心效應也包含旋轉軸之偏軸(角度)誤差,此為姿態儀 IMU、電羅經 Gyro 或多天線盤基線(船艙向)、測深儀、與船隻姿態之旋轉軸不平行所造成的。延遲效應(time latency)也包含測深系統各項儀器訊號傳遞之延遲。測深作業之資料處理過程中，需要多項修正，完整的描述可參考 NOS(2019)。

在實務上，「以瞬時海水位為參考」測深的操作考量，就「潮位改正」是否需要同步驗潮，分為兩大類。

同步驗潮：

在測區為離岸近處，最簡單的作業方式為在岸際設立一潮位站，且潮位站與測區的等潮區相同，然後聯測水準點，同步驗潮，以相同時間的觀測潮位，進行測量點水深之改正。在此情形下，觀測所得潮位是與高程系統相連接的，因此「潮位改正」與「基準化算」可以為同時進行。在「潮位改正」時，同時傳遞基準。只是這時的基準，整個測區均與該潮位站相同。

若測區距離潮位站較遠時，需考量處於不同「潮汐分區」的潮汐特性。「潮汐分區」是以「潮時」、「潮差」之特性劃分之區域，使用時由測量船隻所在位置與測量時間，與岸際潮位站的潮時差及潮位差，由潮位站觀測潮位求得測量位置之潮位，進行「潮位改正」。如同前一作業方式，如果潮位站具有高程資訊，「潮位改正」與「基準化算」為同時進行。通常測深時應不僅採用單一潮位站，會儘量採用雙潮位站；潮位修正會配合潮汐分區的潮位模式成果加上雙潮位站的觀測潮位進行「潮位改正」。

使用潮位站為「潮位改正」時，不管船到哪一個位置，所用的基準，不論是平均海水位(Mean Sea Level, MSL)、約最低低潮位(Approximate Lowest Low Water, ALLW)、最低天文潮位或其他，都會是潮位站位置的基準面，而不是船所在位置的。也因此之故，過去業界依據傳統方式描述某一測深作業是「正高」測深，或「橢球高」測深，其所測各點之相對深度均為一樣，只是所對應潮位站之高程值是「正高」或者是「橢球高」。與該深度所在處之「正高」，並無關聯。

不同步驗潮：

「潮汐分區」之產出，傳統上為根據「潮位分區模型」，由「潮位模型」亦可經衍生得到，在「潮汐分區」中，所包含的是相對的潮位資訊。「潮位模型」亦可直接使用於「潮位改正」，而不使用同步觀測的潮位資料(李建鋒、王成機，2022)。

除作業上不需同步驗潮外，有兩點不同處。一是由「潮位模型」計算出的潮位，不包含氣象引發之水位升降，若要考量，須依測深處氣壓等資訊加入考量；二是通常「潮位模型」後續應用程式中主要定義數據，為涵蓋區域內各個節點之調和分潮參數，如此計算出之潮位，其基準為當地平均海水位(MSL, Mean Sea Level)。由於MSL為中潮位系統，在海圖中所使用之基準為低潮位系統，如「天文最低潮位」(LAT)等，因此需另行進行「基準化算」。

相對的，「以橢球面為參考」測深之作業方式如圖 3，所有的量測以橢球面為參考面，最基礎的觀測量是 GNSS 天線相位中心至橢球面之距離， H 。測深的觀測量如前不變，由測深儀的參考面到水底 D_{ES} 。天線相位中心至測深儀參考面之垂距， v ，須經由率定獲得，概念上 v 與船隻吃水深度無關。當獲得 H 與 v 後，海底地形面之橢球高便已經獲得，可參閱公式(1)。由橢球高經由描述「海圖基準」與橢球面關係的「離距模型」化算，便得到「海圖」所需之深度。以計算式表達：

$$\text{海底橢球高 } D_{Ellipsoid} = \text{觀測天線高 } H - \text{天線之距 } v - \text{觀測水深 } D_{ES} \quad (1)$$

獲得海底橢球高之後，化算到「海圖基準」，即得海圖深度，以圖 3 為例，計算式如(2)：

$$\text{海圖深度 } D_{K0} = \text{離距} - \text{海底橢球高 } D_{Ellipsoid} \quad (2)$$

離距是「海圖基準」的橢球高(即圖中所加入的朱色箭頭，由 Ellipsoid 到 Chart Datum 的垂直距離)，如果以 LAT 為「海圖基準」，則 Z_0 為 LAT：

$$\text{離距} = \text{平均海水位高 } MSSH - Z_0$$

(

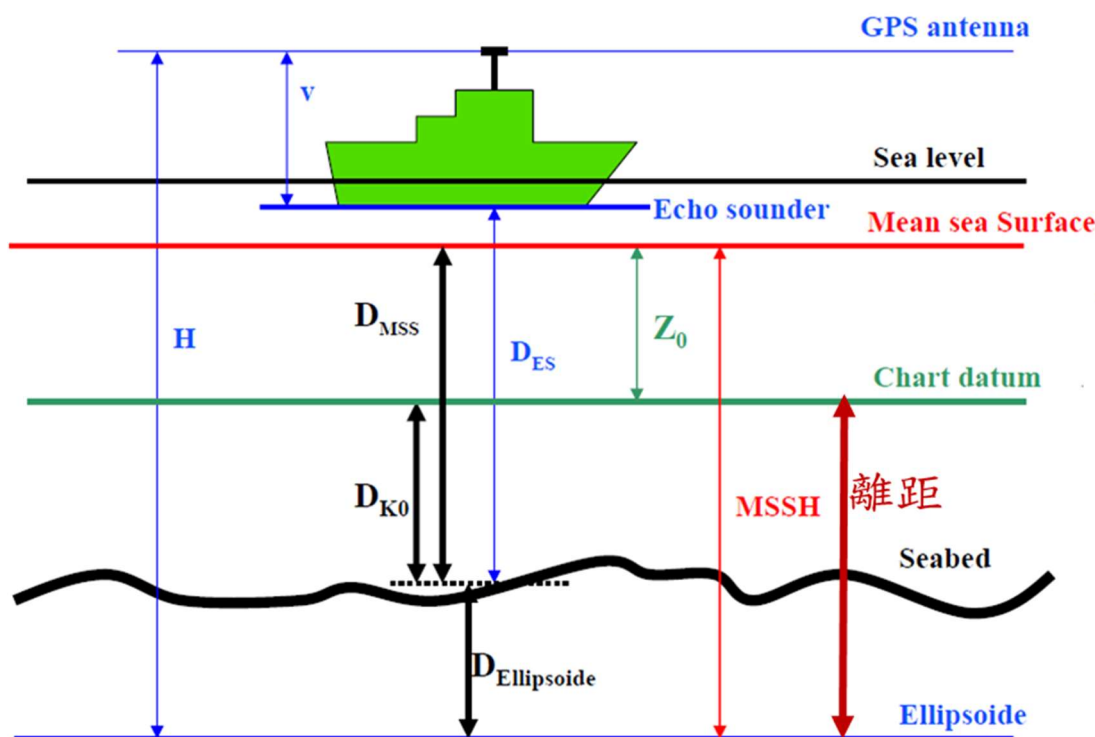


圖 3 以橢球面為參考測深 (Hodnesdal et al., 2006)

將此作業方式測深之特性，條列討論如下：

1. 「高程現代化」測深方式，測取海底地形之橢球高，無須潮位改正。
2. 直接以「離距模型」化算到「海圖基準」，在「離距模型」中，依據 IHO 決議，為以 LAT 為參考，在現代化連續式海圖基準中，通常離岸(Offshore)區域為由潮位模型產出 LAT。
3. 潮位對於水面的影響，在作業中即已經消除。故無須潮位改正，直接由橢球高化算至垂直基準，如「海圖基準」。這由圖 4 可以看到，觀測的 GNSS 高度時序中，含有潮位(Tide)、起伏(Heave)、動態吃水(Dynamic Draft)、靜吃水(Loading)等因子，由於固著於同一船體，如果船體為剛性，則與測深儀之垂直維度變化影響因子相同。由於觀測水面高與觀測水深均含有相同之水位影響分量，故在計算相減過程中自動消除。所以，「高程現代化」之橢球體測深作業為「與潮位無關」(Tide-Independent)。因此，「以橢球面為參考」測深無須同步驗潮，亦因此故有稱為「無驗潮測深」者，但是該名詞易生誤會，如前所敘述，建議不要使用，後續將再討論。

如上所述，理論上因波浪影響而產生的船隻動態因子，在垂直方向的分量已經包含在 GNSS 之觀測中，但是因為 GNSS 高程定位資料中可能包含許多粗差、雜訊與缺漏，實務上須做資料過濾與化算。同時，另有船體姿態等因子需要化算。故操作上目前將 GNSS 天線高化算至海水面。此一由 GNSS 觀測為主所得之橢球高，作業軟體中稱為 GNSS Tide，因為其中包含 Tide(潮位)分量(Mills & Dodd, 2014)。

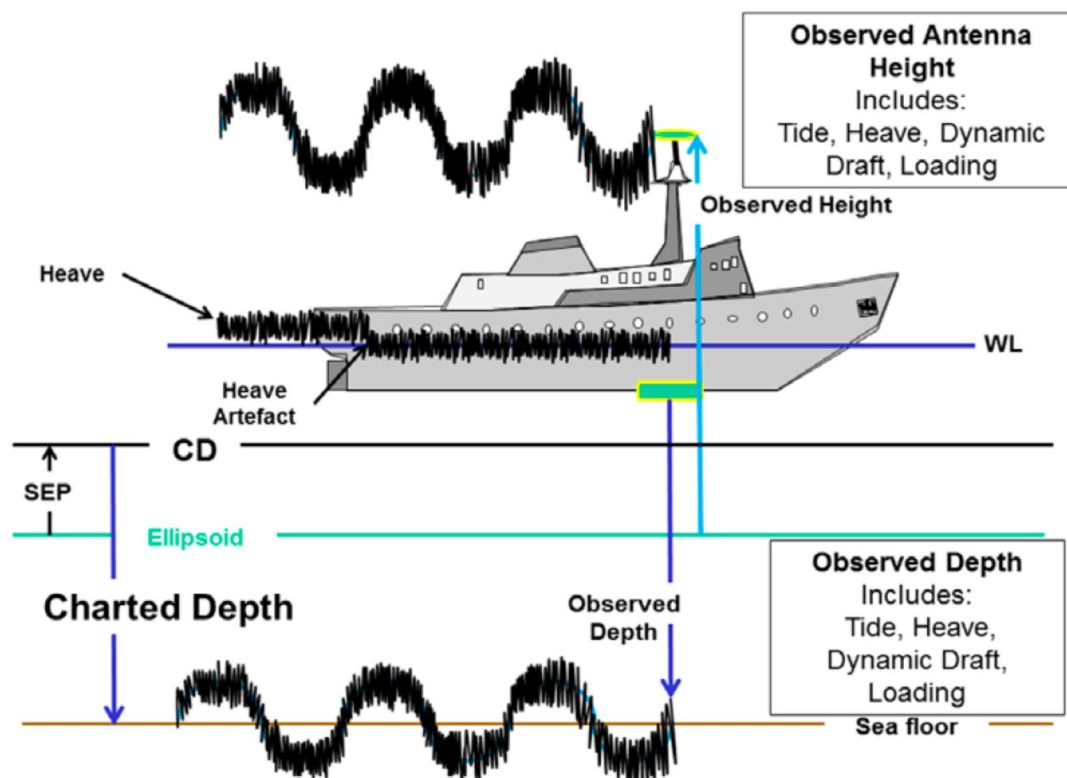


圖 4 船上測深垂直方向影響因子 (Mills and Dodd, 2014)

綜合上述，「高程現代化」測深方式，為以橢球為參考面，不受包含潮位之水位影響。測深品質除最重要的 GNSS 定位精度外，另一個重要因素是船體姿態仍須改正。因船體晃動影響，需要船體姿態改正，以由測量之深度得到垂直方向之深度；傳統上使用慣性觀測儀器，以獲得姿態元素。此部分在現代化測深中依然十分重要。近代作業實務，多使用 GNSS 與 IMU 融合技術，降低船體姿態估值之不確定度。同時，因應慣性系統方位角飄移問題，目前發展為使用多 GNSS 天線協助求定方位角，以克服慣性系統飄移問題。因為載台大小限制，多 GNSS 天線之基線受到約制，因基線短，傾角估值不確定度高。最後，「高程現代化」測深依然是測深，依然於船隻上進行。以橢球為參考面，不受水位影響，但是依然受海況影響，海況不佳時，船體姿態改正與測深系統的資料品質仍需要特別注意。

四、基準

就「海域地形圖」而言，視海域深度為陸域高程系統之延伸，多以某一參考潮位站的平均海水位為參考基準。如 TWVD2001 之參考潮位站為基隆港潮位站，因此零點為該站平均海水位。實際上，因為圖資中包含正負高程，所謂的深度，僅是負的高程值。而就「海圖」而言，傳統上以低潮位如最低天文潮位 LAT、約最低低潮位 ALLW (Approximate Lowest Low Water) 為參考基準，是以航海應用為標的。圖 5 中展示多個不同以天文潮分析衍生的潮位，其中 MSL (Mean Sea Level) 是一般陸域高程基準的參考面，LAT 是國際組織 IHO 建議的「海圖基準」，ALLW 是 MLWS

(Mean Lower Water Springs)的一個近似值，僅使用四個分潮振幅加總，是喬治·達爾文首創應用於印度海域的潮位分析，故其名稱為「(ISLW, Indian Spring Low Water)

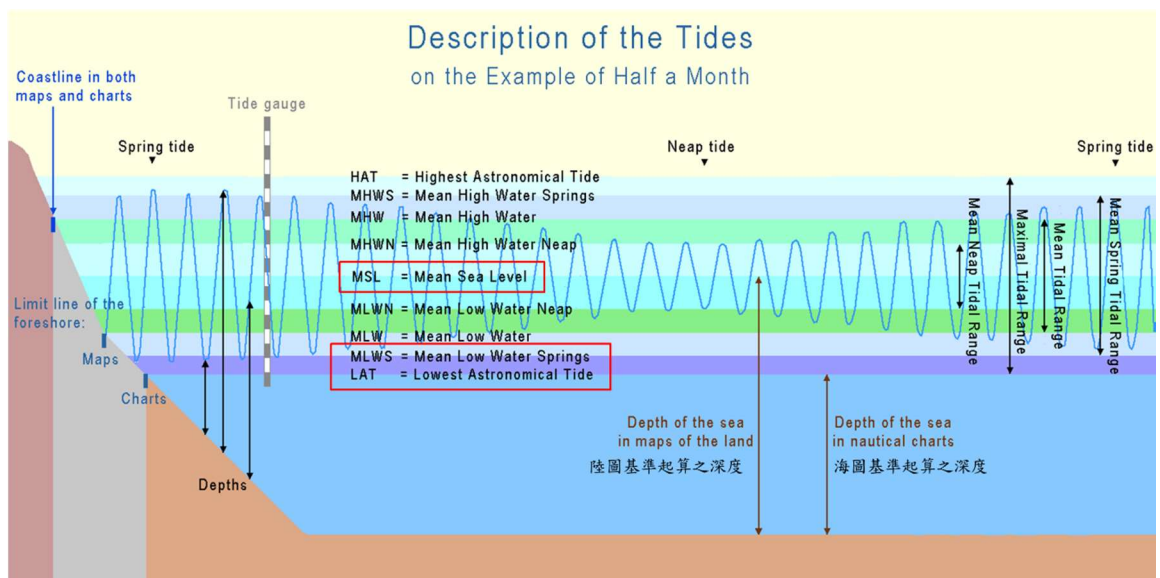


圖 5：15 日潮位與潮位面(Wikipedia, 2021b)

海圖基準在高程現代化(橢球高測深)中，原則上為以 LAT 面之橢球高建置出一個支距面，稱為「離距模型」，化算時由「海圖基準」值減除海底地形橢球高，即得相應之深度，可參閱公式(2)。LAT 面為由潮位資訊導出，通常各國「海圖基準」建置作業，使用岸際與離岸之潮位觀測量、衛星測高的水面高度、以及潮位模型計算出以當地平均海水位為參考之 LAT 值，再經由平均海面(Mean Sea Surface, MSS)模型中萃取出之當地平均海水位之橢球高扣減，即得以橢球面為參考之 LAT。如圖 3 中之 MSSH，即為當地平均海水位之橢球高。如果以 LAT 為「海圖基準」，則 Z_0 為 LAT。

在傳統的測量行業中，甚少區分「平均海水位 MSL (Level)」與「平均海面 MSS(Surface)」。在國家教育研究院所建立之「雙語詞彙、學術名詞暨辭書資訊網」(<https://terms.naer.edu.tw/>)中，於 2021 年 7 月此刻，49 筆「mean sea level」的中譯有 46 筆為「平均海面」、「平均海平面」、「平均海面」，3 筆將「level」對應到「水位」。實際上，「平均海面」為由空間中各個位置之「平均海水位」(Mean Sea Level, MSL)組成，而且不是一個「平面」。「平均海水位」是一個單純的概念，但是至少有兩個不同意涵(https://www.psmis.org/train_and_info/faqs/)。於「海圖基準」中所使用的是指該處海水表面在某一時期中，如 19 年，對應於橢球面的平均高度，而不是在大地測量中與位能有關係的 MSL 意涵。

LAT 是「在各種天文條件組合中最低之水位」，所以若只考量天文引力所形成之潮位變化，LAT 是水位的最低值。另一個影響水位的因子是氣象，如果有非常態氣象條件時，如高氣壓狀態，則水位高有可能相對於 LAT 為負值。此外，水體溫度亦會對水位高低有影響，熱脹冷縮的效應，會產生水位的變化。氣象與水溫以及其他因子，並非選擇「海圖基準」參考潮位面時所需考量的，但是在定義「海圖基準」

時，應充分納入考量，以決定是否要藉由增加「安全餘裕」(Safety margin)的方式，保障航行的安全。

五、潮位改正

如前所述，由「水深測量」的參考面區分，「海洋測量」可分為「以瞬時海水位為參考」測深，與「以橢球面為參考」測深。「以橢球面為參考」測深不需要潮位改正，「以瞬時海水位為參考」測深則需要潮位改正。傳統上，使用岸際潮位站同步觀測潮位資料，如果距離近，認為測區與潮位站所在位置之潮位為相同，則直接使用該單一潮位站。如果距離較遠，可配合潮汐分區(Tidal Zone)，加上潮時差、潮位差的考量，獲得測區之水位(王韋樺，2009)。圖 6 為顏沛華(2009)依據 NAO99b 所繪製的「臺灣海域等潮區圖」，等潮區是依照潮汐區域特性，由等潮時線與等潮差線組成，在每一個等潮區中潮位是視為相同的。李孟霖(2007)、王韋樺(2009)、顏沛華(2009)均為使用潮位模型建構潮位分區。

潮位改正亦可以直接使用潮位模型計算出潮高，以網格的方式產出觀測瞬時之計算潮位，以為改正。此一操作方式，特別適合於使用「電子海圖顯示與資訊系統」(ECDIS, Electronic Chart Display and Information System)導航者。在海底地形複雜，潮時、潮差變化大的區域，如圖 6 中臺灣北部新北、宜蘭之外海，南部高雄之外海，均屬於潮時、潮差變化大，等潮區範圍甚小之處，網格式的潮位模型可以提供高空間、高時間解析度之估值。MOI18 潮位模型在構建產製階段，水平空間採用三層巢狀網格結構，配合海底地形資料，使用 POM(Princeton Ocean Model)模型，最外層大範圍的海洋開口邊界值彙整自 TPX08-ATLAS 全球潮位模式(Egbert and Erofeeva, 2002)，以及 NAO.99b 與 NAO.99L 全球潮位模式(Matsumoto et al., 2000)，中範圍和小範圍的潮位模式除邊界條件取自大範圍潮位模式，於模擬計算過程中融入了該中小範圍模式區域內經品管後之天文潮位資料，反覆進行模式校正。最後採用資料同化程序，反向回饋至大範圍的潮位模式(林勝豐、等，2006)。在 MOI18 潮位模型之應用程式中，水平空間網格網解析度為 0.01° ，經由雙線性內插(Bilinear Interpolation)獲得潮位估值。

廖音瑄、等(2021)新竹外海驗證六種「潮位改正」方式，包含兩種潮位模型與兩個潮位站的單站改正，成果顯現，以潮位模型進行之改正優於直接使用任一潮位站之觀測潮位。雖然有關改正方式的優劣，有多項影響因素，但是在「以瞬間海水面為基準」之測深中，無論採用潮位站觀測潮位配合等潮區推算潮位，或直接使用潮位模型之計算潮位，皆可以提供優質的潮位改正，達成水深化算的需要。

臺灣海域等潮區圖

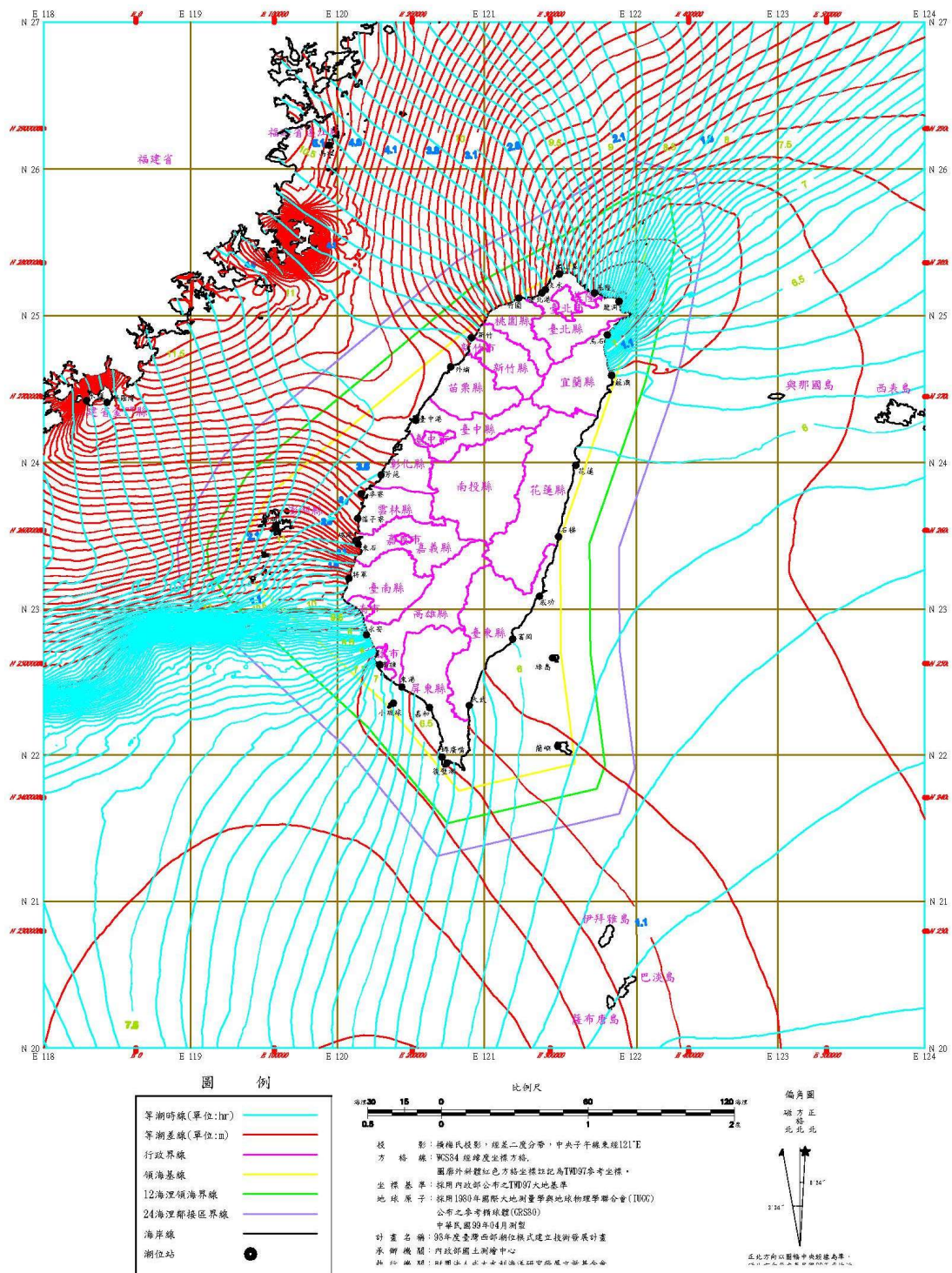


圖 6：臺灣海域等潮區圖(顏沛華，2009)

名詞討論

「以瞬時海水位為參考」測深，與「以橢球面為參考」測深，是十分明確的名詞。但是為了強調其特性，以便於人們了解，文獻中有以其部分性質為命名的。諸如：以「無驗潮水深測量」稱呼「以橢球面為參考」測深。但是此一名詞是不適當的，本文謹就此探討說明，為何國際測量師聯盟(FIG, International Federation of Surveyors)未建議使用此一名詞。

首先，在沒有潮汐的水體如內陸湖泊、水庫，亦往往無需驗潮，所以確實為「無驗潮水深測量」。但是，不一定就是「以橢球面為參考面之水底地形測量」。其次，在「以瞬間海水面為參考」測深作業中，以潮位模型直接計算出之潮位，從事潮位改正，亦無須於該時同步驗潮，因此也是「無驗潮水深測量」。其三，以橢球高測深，獲取橢球高海底地形，亦無需要驗潮，因此也是「無驗潮水深測量」。因此，「無驗潮水深測量」包含無潮水域測深、以瞬間水面為參考測深時採用潮位模型為潮位改正、以橢球高測深，語意包含寬廣，使得這個名詞的模糊性甚大，無法成為一個精準的名詞。

因此之故，FIG 建議使用「以橢球為參考之海洋測量」(Ellipsoidally Referenced Surveying for Hydrography)一辭 (Mills and Dodd, 2014)。如果以通俗中文表達，就是水域的「橢球高測量」，再配合後續之基準化算，就可以達到「水深測量」。此外，「無驗潮水深測量」常給予讀者驗潮可淘汰之錯誤印象。實際上，測深時同步驗潮，可以與「以橢球面為參考」測深方式的成果比較，增加測量的多餘觀測。同時，潮位模型之建立仍需要真實的潮位觀測，「驗潮」仍然是十分重要的。

以「無驗潮水深測量」描述「以橢球為參考之海洋測量」的特性，並沒有錯誤，只是如以此稱呼此類測量技術不精準。基於「避免使用易生誤會之俚語」(Avoid using misleading slang)之原則，不建議使用。

另一項名詞是「海道測量」與「海洋測量」，兩者對應之英文名詞均為「Hydrography」。早年的相關測量，應用目的為行船航道的水深，故稱為「海道測量」，隸屬國防部海軍的測量單位，即為「海道測量局」。但是隨同科技的發展，測量之標的已經不限於航道，而是廣泛之海域，故而已非「海道測量」所能涵括，實為「海洋測量」。因而，海軍「海道測量局」更名為「海洋測量局」(後整併為大氣海洋局)，內政部國土測繪中心之相關單位名稱亦為「地形及海洋測量課」(原為海洋測量課，經整併為現今單位)。在相關名詞之討論中，「水文測量」亦為另一個選項。但是「水文」之對應英文為「Hydrology」，其內涵十分明確，與「Hydrography」迥然有異，故而排除。有關「Hydrography」之施測場域包含內水，不限於海洋，由於內水可視為「海洋」之延伸或特例，故無礙於使用「海洋測量」名詞。

六、結語

在「海圖」中，除了「海圖基準」，還會使用到其他的「垂直基準」。由「海圖圖例」(大氣海洋局，2010)：「高度自平均海水面起算，間或採用原始資料之基準

面」。「水道燈表」(海洋測量局, 2010):「燈高為約最高高潮面至燈火中心之高度, 單位為公尺」, 但是「海圖基準」為重要的「深度基準」。

依據國際自 1980 年代開始凝聚的共識, 以「最低天文潮位(LAT)」作為海圖基準的參考潮位現在已經列入「IHO 技術決議」(IHO Technical Resolution)。隨同對於「經濟效益」與「精準測量」的需求, 「高程現代化」的海洋測量將會更加普及。但是, 就海洋測量而言, 傳統「以瞬時海水位為參考」測深, 並不會消失。所以, 在建立「離距模型」以完成現代化「海圖基準」的同時, 提供「以瞬時海水位為參考」測深方式的作業, 可以應用的「潮位模型」, 仍是很有價值的。同時, 縱然使用「以橢球面為參考」測深, 或以「潮位模型」進行「以瞬時海水位為參考」測深的潮位改正, 同步的潮位觀測仍然是極有重要的; 因為, 「海圖」在航行安全的重要性, 值得以多方驗證的方式確保其確定度, 達成品質控管。最後, 「海圖」之目的在航行時判斷船隻龍骨下的餘裕水深(under keel clearance), 以維安全, 因此, 以航行為目的之潮位預報, 應與海圖為相同基準。如基準不同, 需有完善之告知作為。目前中央氣象局所出版的潮汐表(中央氣象局, 2020), 提供潮高時有兩個數值, 「前者為相對當地平均海平面(以當地平均潮位為零)。後者為當地最大比例尺海圖基準面起算(以當地最低低潮位為零)」。

七、致謝

本文書寫過程中, 承蒙國立陽明交通大學土木工程學系張憲國教授、鄭景中教授多次提供資訊與意見, 在反覆討論中, 第一作者受益良多, 敬此致謝。本文成稿後承蒙國立成功大學測量及空間資訊學系郭重言教授、內政部地政司陳彥欉、李建鋒先生、國立臺灣海洋大學通訊與導航工程學系藍文浩教授之補充與指正, 亦敬此致謝。

參考文獻

- 大氣海洋局, 2010, 中華民國海軍水道圖海圖圖例, 中華民國九十九年十二月編訂, <https://navy.mnd.gov.tw/Files/Policy/海圖圖例.pdf>, 前次訪查: 2021/06/23。
- 中央氣象局, 2020, 《潮汐表》, 中華民國 110 年, 年刊第 24 期, 中華民國 (臺灣) 交通部中央氣象局, 中華民國 109 年 8 月出版, ISSN: 1812-1535。 https://www.cwb.gov.tw/Data/service/notice/download/publish_20200825095226.pdf, 前次訪查: 2021/05/23。
- 王韋樺, 2009。《潮時及潮位特性之研究—以高雄港及臺灣海峽中部為例》, 國立中山大學海洋環境及工程學系研究所碩士論文。
- 史天元, 2017。臺灣周邊海域深度基準探討, 《地籍測量》, 第 36 卷, 第 4 期, 頁 1-14。
- 李孟霖, 2007。《運用潮位模式進行水深測量之潮位修正研究》, 國立中山大學海洋環境及工程學系研究所碩士論文。

- 李建鋒、王成機，2022，《水深測量之潮位修正方法》。
- 林瑋、吳立新、方兆寶、劉基余、李紅兵，2005，水深測量的誤差因數分析，《海洋測繪》，第25，第2期。
- 林勝豐、王成機、呂建興，2006。內政部臺灣周邊海域潮位模式準確度探討，《第28屆(2006)海洋工程研討會》，<http://www.tsoe.org.tw/downloads/thesis/2020A013.pdf>，前次訪查：2021/10/05。
- 海洋測量局，2010。水道燈表，九十九年修訂版，<https://www.mnd.gov.tw/NewUpload/userfiles/File/大氣海洋局/99水道燈表.pdf>，前次訪查：2021/06/23。
- 廖音瑄、許鶴瀚、陳姿婷、謝獻祥、謝宗霖、劉紹勇，2021。遠岸水深量測之潮位修正技術應用及比較，《海洋及水下科技季刊》，投稿中，文件獲得自作者。
- 顏沛華，2009。《98年度臺灣西部潮位模式建立技術發展計畫工作總報告書》，內政部國土測繪中心委辦。
<https://ws.moi.gov.tw/Download.ashx?u=LzAwMS9VcGxvYWQvT2xkRmlsZV9OTFN3VwbG9hZGZpbGUvNDM1NDE3NC5wZGY%3d&n=NDM1NDE3NC5wZGY%3d&icon=..pdf>，前次訪查：2021/07/11。
- Egbert, B., Erofeeva, S., (2002) Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides, *J. Atmos. Ocean. Technol.* 19, 183-204.
- Hodnesdal, Hanne, Herman Iversen, Birgit K. Lynge, Lars K. Nesheim, Arne E. Ofstad, Stig Øvstedal, 2006. Using Ellipsoid as Vertical Reference for Seabed Mapping Why? How?
https://legacy.iho.int/mtg_docs/com_wg/IHOTC/IHOTC7/Vertical_Reference_for_Seabed_Mapping.pdf, last accessed on 2021/10/24.
- IHO, 2018. Resolutions of International Hydrographic Organization, Publication M-3, 2nd edition-2010, updated to Aug 2018, https://iho.int/iho_pubs/misc/M3-E-AUGUST18.pdf, last accessed on 2021/05/17.
- Matsumoto, K., T. Takanezawa, and M. Ooe, 2000, Ocean Tide Models Developed by Assimilating TOPEX/POSEIDON Altimeter Data into Hydrodynamical Model: A Global Model and a Regional Model Around Japan, *Journal of Oceanography*, 56, 567-581.
- Mills, Jerry, David Dodd, 2014. Ellipsoidally Referenced Surveying for Hydrography, International Federation of Surveyors (FIG), FIG publication 62. <https://www.fig.net/resources/publications/figpub/pub62/Figpub62.pdf>, last accessed on 2021/07/07.
- NOS, 2019. Hydrographic Surveys Specifications and Deliverables, National Ocean Service, National Oceanic and Atmospheric Administration, USA. <https://nauticalcharts.noaa.gov/publications/docs/standards-and-requirements/specs/hssd-2019.pdf>, last accessed on 2021/09/22.

NGS, 2005. Height Modernization,

http://cascadiageo.org/humbayvert/references/TheHeightModernizationProgram_poster.pdf, last accessed on 2021/07/07.

建置我國垂直基準轉換模式

呂建興¹ 黃金維² 藍文浩³ 王成機⁴ 郭重言⁵

論文收件日期：110.10.18

論文修改日期：110.11.11

論文接受日期：110.11.19

摘要

我國迄今尚未訂定統一之深度基準，導致在銜接各機關不同海域或陸海界面處水深資料時容易產生不連續問題。近年來隨著海岸管理、海域規劃與海洋劃界等各項議題的發展，以及內政部電子航行圖測製與發行之工作需要，內政部已完成垂直基準轉換模式建置，轉換模式包含內政部108年潮位模式(MOI.18v1)計算之臺灣海域無縫各潮位面(最低天文潮位面(Lowest Astronomical Tide, LAT)、最高天文潮位面(Highest Astronomical Tide, HAT)、平均高潮位面(Mean High Water, MHW)、平均低潮位面(Mean Low Water, MLW)及約最低低潮位面(Indian Spring Low Water, ISLW))、新版大地起伏模型(Geoid)以及平均海水面(Mean Sea Surface, MSS)網格模型，提供使用者進行不同垂直基準面間之轉換。此外，本研究亦產出多項附加產品，包含33個潮位站之各基準面關係、潮位模式加值應用工具(可輸出相對於Geoid、ISLW、LAT及WGS84橢球等基準之潮位資料)和潮位分區圖，可用於傳統水深測量之潮汐修正，提高傳統水深測量之效率及資料一致性。隨測繪科技進步，多元化技術可觀測得不同基準之海域測繪資料，故此轉換模式可協助各部會及學術機構整合各項既有之海洋資料。

關鍵詞：大地水準面、平均海水面、垂直基準、約最低低潮位面、最低天文潮位面、潮位模式

¹ 科員，內政部地政司。

² 教授，國立陽明交通大學土木工程學系。

³ 專案助理教授，國立臺灣海洋大學通訊與導航工程學系。

⁴ 司長，內政部地政司。

⁵ 教授，國立成功大學測量及空間資訊學系。

Establishment of vertical datum transformation model for Taiwan

Jian-Sing Lyu¹, Chein-way Hwang², Wen-Hau Lan³,
Cheng-Gi Wang⁴, Chung-Yen Kuo⁵

Abstract

Taiwan has not yet established a unified depth datum, resulting in discontinuity on data in land-ocean or frame boundaries. In recent years, in order to fulfil the requirement of the development of coastal management, marine spatial planning and boundary delimitation, and the demand of the Ministry of Interior (MOI) for the survey and publication of electronic navigational charts, MOI has established a vertical datum transformation model, including five gridded tidal surfaces derived from MOI.18v1 ocean tide model (Lowest Astronomical Tide (LAT), Highest Astronomical Tide (HAT), Mean High Water (MHW), Mean Low Water, (MLW) and Indian Spring Low Water (ISLW)), an updated geoid undulation model of Taiwan and a gridded mean sea surface (MSS) model, enabling users to convert their data from different vertical references into a common system. Furthermore, several products are also produced, including the relationships between the depth datum and other vertical reference surfaces at 33 tide gauge stations, a value-added ocean tide model, producing ocean tide data relative to Geoid, ISLW, LAT and WGS84 ellipsoid, and tidal zones around Taiwan, which can be used for tidal correction in traditional hydrographic survey to improve efficiency and data consistency. With the advancement of surveying and mapping technology, diversified technologies can be applied to measure marine data in different datums. Therefore, this transformation model could assist various ministries and academic institutions in integrating various existing marine data.

Keyword: Geoid, ISLW, LAT, MSS, Ocean tide model, Vertical datum

¹ Officer, Department of Land Administration, MOI.

² Professor, Department of Civil Engineering, National Yang Ming Chiao Tung University.

³ Project Assistant Professor, Department of Communications, Navigation and Control Engineering, National Taiwan Ocean University.

⁴ Director, Department of Land Administration, MOI.

⁵ Professor, National Cheng Kung University.

一、研究動機與目的

我國陸域地形測量基準採用正高系統，高程基準定義為1990年1月1日標準大氣環境情況下，採用基隆潮位站(tide gauge) 1957-1991年間之潮汐資料計算而得，命名為2001臺灣高程基準(TaiWan Vertical Datum 2001, TWVD2001)；而海洋水深測量基準是相對於約最低低潮位面(Indian Spring Low Water, ISLW)，又稱為海圖基準(chart datum)，兩基準面不同造成陸海交界處之基準面不連續。迄今我國水深基準(深度基準; depth datum)尚未統一，故各機關辦理海域水深測量時，若採用不同水深基準，在銜接資料容易產生問題。此外，傳統水深測量需利用觀測區域附近潮位站或架設臨時潮位站獲取海水面變化，結合潮汐分區資訊進行潮位修正。潮位資料也可用來提供正高和ISLW基準[薛憲文等，2016]，然而短期潮位站資料計算之ISLW不確定性大，因此不同時間辦理同一區域海域測量，可能產生資料基準問題，故此修正方式不能獲得一致之改正成果。

近年來海岸和海洋規劃、海域多元使用與國土劃界等各項議題的多元發展，以及船測水深測量資料處理和電子航行圖測製工作之需求，除傳統水深測量外，亦可利用光達或高解析度衛星影像等技術獲得海域測繪資料，然而不同技術獲取之資料並非皆以ISLW為基準。內政部為整合各單位資料和資源，解決陸、海交界處不連續現象、不同海域觀測資料銜接以及水深測量之潮汐修正等問題，並發展臺灣「高程現代化」技術，近年積極推動建置我國垂直基準轉換模式。轉換模式包含臺灣周圍海域無縫各基準面資訊與高精度潮位模式(ocean tide model)，此轉換模式對於沿海區域之國土規劃和多元資料整合極為重要，可供各種測繪海域資料間基準轉換使用，使我國海域歷史多元數據能轉換至相同基準，以利後續應用。此外，若觀測載具上放置高精度全球導航系統(Global Navigation Satellite System, GNSS)接收儀和測深儀，即可求得相對於橢球面之海底地形，經過轉換模式可得相對於各潮位面和Geoid水深，此方法能省去架設臨時潮位站的人力與時間，提高水深測量作業效率與精度，並將觀測數據轉換成至不同基準面。

目前內政部已完成垂直基準轉換模式建置，轉換模式包含內政部108年潮位模式(後續簡稱MOI.18v1)計算之臺灣海域無縫各潮位面(最低天文潮位面(Lowest Astronomical Tide, LAT)、最高天文潮位面(Highest Astronomical Tide, HAT)、平均高潮位面(Mean High Water, MHW)、平均低潮位面(Mean Low Water, MLW)、約最低低潮位面(Indian Spring Low Water, ISLW))、新版大地起伏模型(Geoid)及平均海水面(Mean Sea Surface, MSS)網格模型，提供使用者進行不同垂直基準面間轉換。除產製轉換模式外，亦產出附加產品，包含33個潮位站之各基準面間關係、潮位模式加值應用工具(可產製相對於Geoid、ISLW、LAT以及WGS84橢球等基準之潮位資料)和潮位分區圖，可用於輔助傳統水深測量之潮汐修正方法，有助於提高傳統水深測量之效率及資料一致性。本文將對垂直基準轉換模式中各基準面進行說明，此外，也將評估MOI.18v1潮位模式、Geoid、MSS以及MOI.18v1產製各潮位面網格模型之精度，並利用潮位站及船測資料對潮位模式加值應用工具以及垂直基準轉換模式進行測試與整體精度評估。

二、垂直基準轉換模式說明

(一)、 MOI.18v1 潮位模式

內政部108年建置之臺灣周邊海域潮位模式(MOI.18v1)，源自於美國普林斯頓大學Princeton Ocean Model (簡稱POM) [Blumberg and Mellor, 1987]。MOI.18v1適用於北緯21 度至27 度及東經118 度至125 度所形成之矩形範圍，空間解析度為1/24度，採用之大地參考系統為World Geodetic System 1984 (WGS84)。MOI.18v1潮位模式藉由內政部提供準確之水深地形數值資料、整合全球潮位模式提供適當的海洋開口邊界條件，並融入品管後之潮位資料[Lan et al., 2017]進行模式同化程序[內政部，2018]，以達模式精進之目的。精進過程中各階段之潮位模式模擬結果，將與潮位站資料進行驗證比對，計算出臺灣周邊海域高精度、高解析度之各潮位面以及潮位分區圖等成果，提供給垂直基準轉換模式建置使用，其產製流程如圖1。

MOI.18v1潮位模式包含26個分潮(M2、S2、N2、K2、2N2、Mu2、Nu2、L2、T2、K1、O1、P1、Q1、S1、J1、NO1、OO1、M4、MS4、MN4、Mm、Mf、MSf、MSm、Ssa、Sa)，主要使用潮位站資料與水深地形數值資料，並融入15個潮位站資料，分別為基隆、麥寮、箔子寮、澎湖馬公、東石、塹港、將軍、水頭、料羅灣、馬祖、安平、永安、高雄、東港以及小琉球等潮位站，最後使用34個潮位站進行驗證(如表1)，由於各潮位站量測時間長短不一，故僅使用2010年至2014年間之潮位站資料。潮位模式使用之水深資料，主要取自科技部海洋學門水深資料庫200 m網格水深資料，以及美國NOAA/NGDC之ETOPO1，部分近岸地區水深資料則根據海軍大氣海洋局近年成果而略有編修，最後再以内政部提供臺灣地區0 m海岸線[李建鋒等，2012]編修各層潮位模式之海岸水深，使潮位模式網格之海岸地形更接近實際之0 m海岸線。

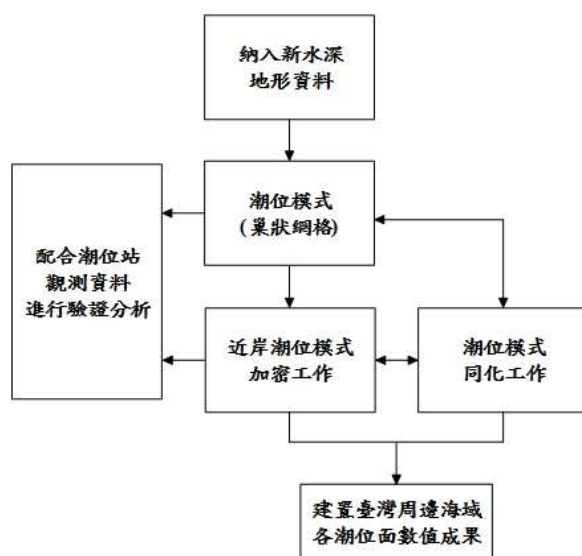


圖 1 工作流程圖

表 1 潮位站之測站代碼與測站名稱

測站代碼	站名	測站代碼	站名	測站代碼	站名	測站代碼	站名
1552	和平港	113	外埔	1786	永安	1586	富岡
1246	蘇澳	1436	臺中港	1486	高雄	1276	成功
1236	烏石	1456	麥寮	1186	東港	1566	石梯
1226	龍洞	1156	箔子寮	1386	小琉球	1256	花蓮
1516	基隆	1356	澎湖馬公	1496	蟬廣嘴	1926	馬祖
1206	麟山鼻	1366	塭港	1196	後壁湖	1956	料羅灣
140	淡水河口	1166	東石	1596	大武	1966	水頭
1116	竹圍	1176	將軍	1396	蘭嶼		
112	新竹	1473	安平	1676	綠島		

(二)、 33 個潮位站各潮位與正高、橢球高的關係

本研究33個潮位站之基本資訊及分布圖如表2及圖2所示，利用國土測繪中心提供潮位站參考水準點正高和GNSS橢球高[內政部國土測繪中心，2018; 2021]，將潮位站正高系統轉換至橢球高。使用潮位站觀測資料前須先進行資料整理與品管(如圖3)。潮位站觀測海水面變動量為水位相對於岸邊固定基準點之觀測量，而基準點可能受到該區域地殼變動與地層下陷等影響，使潮位資料中包含海水面變化與地表垂直變動訊號。此外，觀測資料還受到天體運行造成引潮力、大氣變動之逆氣壓效應(inverted barometer effect)和人為因素之資料偏移等影響。基準偏移可藉由結合調和分析[Parker, 2005]與步階函數擬合進行改正之；逆氣壓效應則利用動態大氣壓力改正 (Dynamic Atmospheric Corrections, DAC) 模型資料 [<https://www.aviso.altimetry.fr/en/home.html>]進行改正。建立各潮位計算流程如圖3。

表 2 臺灣附近海域 33 個潮位站資訊

站號	站名		經度(°)	緯度(°)	時間長度
	中文	英文			
1516	基隆	Keelung	25° 09'18"N	121° 45'08"E	1993/01-2020/12
1206	麟山鼻	Linshanbi	25° 17'02"N	121° 30'37"E	2003/11-2020/12
1102	淡水	Tamsui	25° 10'33"N	121° 25'29"E	2000/01-2020/12
1116	竹圍	Zhuwei	25° 07'05"N	121° 14'36"E	1993/01-2020/12
112	新竹	Hsinchu	24° 50'55"N	120° 55'14"E	1993/01-2020/12
113	外埔	Waipu	24° 39'05"N	120° 46'17"E	2003/07-2020/12
1436	臺中港	Taichung Port	24° 17'16"N	120° 31'59"E	1994/01-2020/12
1456	麥寮	Mailiao	23°47'10"N	120°09'37"E	2006/01-2020/12
1156	箔子寮	Boziliao	23° 37'07"N	120° 08'15"E	1995/04-2020/12
1366	塭港	Wengang	23° 28'00"N	120° 07'21"E	1993/02-2020/12
1166	東石	Dongshi	23° 27'00"N	120° 8'22"E	1993/01-2020/12
1176	將軍	Jiangjun	23° 12'45"N	120° 04'59"E	2002/01-2020/12
11781	四草	Sicao	23° 01'25"N	120° 6'43"E	2011/09-2020/12
1786	永安	Yong-an	22° 49'08"N	120° 11'51"E	2003/10-2020/12
1486	高雄	Kaohsiung	22° 36'52"N	120° 17'18"E	1993/01-2020/12
1186	東港	Donggang	22° 27'54"N	120° 26'18"E	1998/03-2020/12

1496	蟬廣嘴	Xunguangzui	21°59'08"N	120°42'43"E	2001/01-2020/12
1196	後壁湖	Houbihu	21°56'45"N	120°44'43"E	1998/05-2020/12
1596	大武	Dawu	22°20'15"N	120°53'50"E	2003/09-2020/10
1586	富岡	Fugang	22°47'27"N	121°11'35"E	2001/01-2020/12
1276	成功	Chenggong	23°05'50"N	121°22'49"E	1993/03-2020/12
1566	石梯	Shiti	23°29'41"N	121°30'22"E	2001/11-2020/12
1256	花蓮	Hualien	23°58'50"N	121°37'25"E	1997/11-2020/12
1246	蘇澳	Su-ao	24°35'33"N	121°52'01"E	1997/03-2020/12
1236	烏石	Wushi	24°52'02"N	121°50'15"E	2006/01-2020/12
1226	龍洞	Longdong	25°05'51"N	121°55'05"E	2001/05-2020/12
1926	馬祖	Matsu	26°09'42"N	119°56'34"E	2004/01-2020/12
1966	水頭	Shuitou	24°25'16"N	118°17'21"E	2004/01-2020/12
1956	料羅灣	Liaoluowan	24°24'31"N	118°25'48"E	2001/05-2020/12
1356	澎湖馬公	Penghu	23°33'37"N	119°34'37"E	1993/01-2020/12
1386	小琉球	XiaoLiuqiu	22°21'12"N	120°23'00"E	2002/01-2020/12
1396	蘭嶼	Lanyu	22°03'29"N	121°30'25"E	2001/01-2020/12
1676	綠島	Lyudao	22°39'44"N	121°27'53"E	2001/10-2020/12

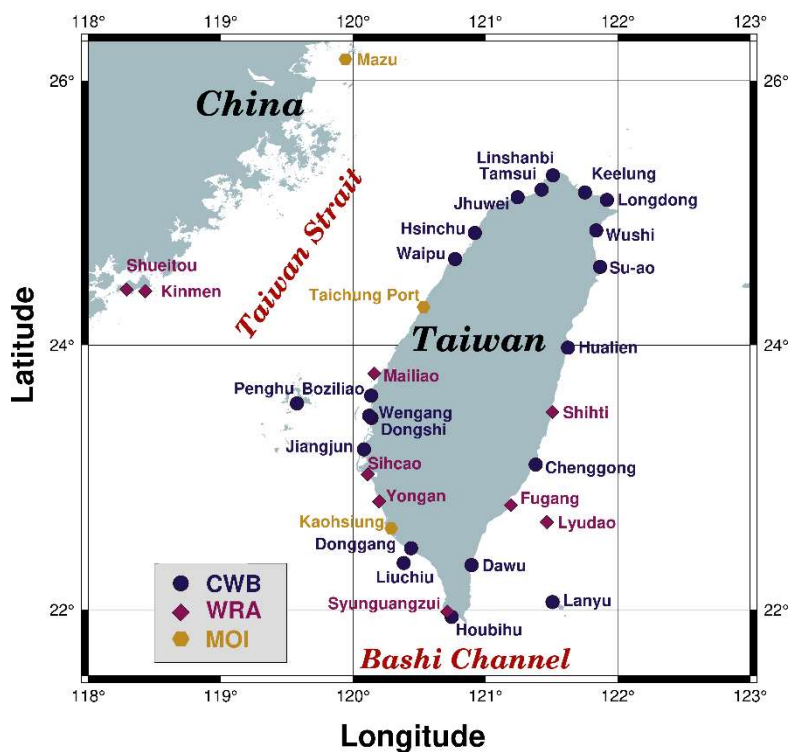


圖 2 臺灣潮位站位置分佈圖

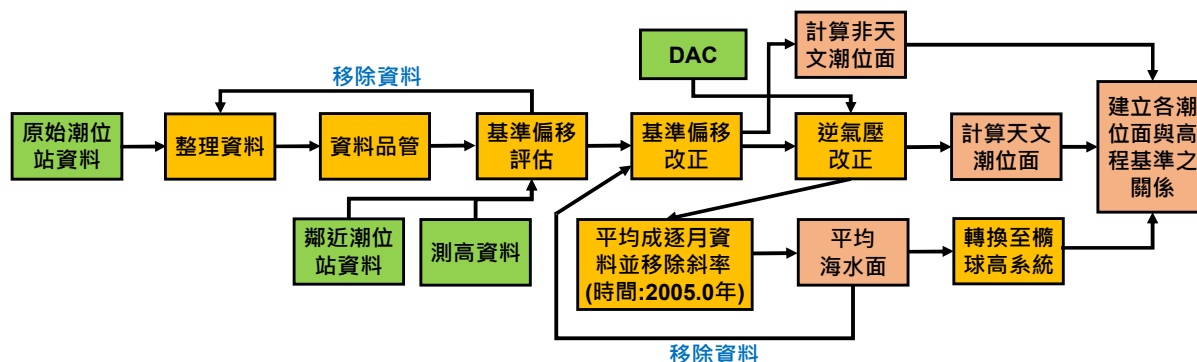


圖 3 建立潮位站各潮位相對關係之流程圖

本研究計算 33 個潮位站之平均海水位(Mean Sea Level, MSL)以及各潮位(表 3)，其中 MSL 相對於 2012.0 時間點(後續簡稱 MSL 2012)，基準包含正高與橢球高系統。圖 4 是以基隆潮位站為範例所計算各潮位與高程基準之關係圖。計算之潮位包含 MSL、LAT、HAT、MHW、LLW、ISLW、SR、NR、大潮差、小潮差、MHWS、MLWS、MHWN 以及 MLWN 等，其中 LAT 與 HAT 是利用調和分析[Parker, 2005]並選取 60 個分潮，再利用計算之 60 分潮重建 2003-2021 天文潮位，最後選出最低與最高水位值，其他潮位則使用 1993-2020 時間段資料來計算。各潮位定義如下：

- (1). 平均海水位(Mean Sea Level, MSL)：潮位站在一段時間內，所有有效之潮位觀測紀錄之平均值，稱為 MSL。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，使用 1993-2020 求得相對於 2005 年之 MSL 高，並結合衛星測高海面上升速率，推估相對於 2012 年之 MSL 高，作為高程計算之依據。
- (2). 最低天文潮位(Lowest Astronomical Tide, LAT)：僅受天體引力影響時，所推估出的最低的天文潮位，即將 MSL 扣除受天體引力影響的分潮，所組合的最大振幅潮位。本文中潮位站實測資料的計算方式，是利用調和分析計算出 60 個分潮的調和常數，並進行 2003-2021 天文潮位重建，最後選出最低水位值。
- (3). 最高天文潮位(Highest Astronomical Tide, HAT)：僅受天體引力影響時，所推估出的最高的天文潮位，即將 MSL 加上受天體引力影響的分潮，所組合的最大振幅潮位。本文中潮位站實測資料的計算方式，是利用調和分析計算出 60 個分潮的調和常數，並進行 2003-2021 天文潮位重建，最後選出最高水位值。
- (4). 平均高潮位(Mean High Water, MHW)：某一地點於潮汐週期間，所有有效高潮位觀測值的平均值。
- (5). 平均低潮位(Mean Low Water, MLW)：某一地點於潮汐週期間，所有低潮位觀測值的平均值。
- (6). 約最低低潮位(Indian Spring Low Water, ISLW)：此定義源自於 Professor G. H. Darwin 調查印度洋時以此面作為潮汐基準，故有稱為 Indian Spring Low Water (ISLW)。其定義為 MSL 減去結合調和分析後之 M2、S2、K1 與 O1 分潮振幅稱之。此潮位為海軍水道圖之海圖基準。
- (7). 大潮升(Spring Rise, SR)：是指海圖基準至平均大潮高潮位之差值。

- (8). 小潮升(Neap Rise, NR): 是指海圖基準至平均小潮高潮位之差值。
- (9). 大潮差(Spring Range): 是指大潮高潮面與大潮低潮面之差。
- (10).小潮差(Neap Range): 是指小潮高潮面與小潮低潮面之差。
- (11).平均大潮高潮(Mean High Water Springs, MHWS): 大潮一個月約發生兩次，平均大潮高潮是指所有大潮高潮位之平均值。此計算方式為參考澳洲測繪局[POTMSL, 2017]，MSL 加上結合調和分析後之 M_2 與 S_2 分潮振幅稱之。
- (12).平均大潮低潮(Mean Low Water Springs, MLWS): 大潮一個月約發生兩次，平均大潮低潮是指所有大潮低潮位之平均值。此計算方式為參考澳洲測繪局[POTMSL, 2017]，MSL 減去結合調和分析後之 M_2 與 S_2 分潮振幅稱之。
- (13).平均小潮高潮(Mean High Water Neaps, MHWN): 小潮通常發生於大潮後 7 天，一個月發生兩次，平均小潮高潮是指所有小潮高潮位之平均。此計算方式為參考澳洲測繪局[POTMSL, 2017]，MSL 加上 M_2 與 S_2 分潮振幅之差值稱之。
- (14).平均小潮低潮(Mean Low Water Neaps, MLWN): 小潮通常發生於大潮後 7 天，一個月約發生兩次，平均小潮低潮是指所有小潮低潮位之平均值。此計算方式為參考澳洲測繪局[POTMSL, 2017]，MSL 減去 M_2 與 S_2 分潮振幅之差值稱之。

表 3 潮位站之 MSL 以及各潮位高。MSL 為相對於 2012.0 時間點。

測站	MSL (m) relative to 2012		相對於 MSL (m)													
	正高	橢球高 (TWD97[2010])	LAT	HAT	MHW	MLW	LLW	ISLW	MHWS	MLWS	MHWN	MLWN	Spring Range	Neap Range	SR	NR
基隆	0.121	20.557	-0.950	0.590	0.272	-0.253	-1.123	-0.631	0.289	-0.289	0.174	-0.174	0.578	0.348	0.920	0.805
麟山鼻	-0.058	19.664	-1.519	1.378	0.878	-0.714	-1.756	-1.367	0.971	-0.971	0.558	-0.558	1.942	1.116	2.338	1.925
淡水	-0.055	19.565	-1.702	1.644	1.040	-0.934	-2.098	-1.571	1.227	-1.227	0.689	-0.689	2.454	1.378	2.798	2.260
竹圍	-0.069	19.166	-2.248	1.978	1.276	-1.230	-2.476	-1.958	1.553	-1.553	0.860	-0.860	3.106	1.720	3.511	2.819
新竹	0.024	18.972	-2.765	2.539	1.682	-1.650	-2.765	-2.489	2.072	-2.072	1.146	-1.146	4.144	2.292	4.561	3.635
外埔	0.222	19.222	-2.779	2.693	1.779	-1.679	-2.939	-2.607	2.199	-2.199	1.223	-1.223	4.398	2.446	4.806	3.830
臺中港	0.190	18.901	-3.191	2.801	1.861	-1.870	-3.252	-2.769	2.315	-2.315	1.279	-1.279	4.630	2.558	5.084	4.048
麥寮	0.197	19.403	-2.344	2.116	1.409	-1.302	-2.410	-2.108	1.671	-1.671	0.955	-0.955	3.341	1.910	3.779	3.063
箔子寮	-0.042	19.481	-1.841	1.766	1.143	-1.013	-2.166	-1.732	1.312	-1.312	0.770	-0.770	2.625	1.540	3.044	2.502
塭港	-0.074	19.654	-1.515	1.304	0.796	-0.734	-1.727	-1.286	0.883	-0.883	0.539	-0.539	1.766	1.078	2.168	1.824
東石	0.003	19.711	-1.404	1.226	0.753	-0.700	-1.613	-1.222	0.832	-0.832	0.515	-0.515	1.664	1.030	2.054	1.737
將軍	0.197	19.837	-1.241	0.935	0.561	-0.506	-1.349	-1.007	0.619	-0.619	0.398	-0.398	1.239	0.795	1.627	1.405
四草	0.342	20.009	-0.711	0.710	0.271	-0.270	-0.827	-0.605	0.288	-0.288	0.191	-0.191	0.576	0.381	0.893	0.796
永安	0.419	20.476	-0.754	0.734	0.257	-0.266	-0.890	-0.605	0.261	-0.261	0.144	-0.144	0.523	0.288	0.867	0.749
高雄	0.203	20.443	-0.634	0.748	0.236	-0.241	-0.791	-0.582	0.249	-0.249	0.112	-0.112	0.499	0.224	0.832	0.694
東港	0.229	20.984	-0.679	0.841	0.277	-0.279	-0.769	-0.663	0.294	-0.294	0.150	-0.150	0.588	0.301	0.957	0.813

罴廣嘴	0.338	22.219	-0.681	0.876	0.284	-0.289	-0.867	-0.707	0.295	-0.295	0.111	-0.111	0.590	0.221	1.002	0.818
後壁湖	0.294	22.271	-0.902	0.929	0.333	-0.338	-1.070	-0.807	0.382	-0.382	0.149	-0.149	0.764	0.298	1.189	0.956
大武	0.115	23.494	-1.002	1.010	0.434	-0.411	-1.087	-0.896	0.553	-0.553	0.224	-0.224	1.107	0.447	1.449	1.119
富岡	0.051	24.787	-1.096	1.010	0.472	-0.467	-1.229	-0.951	0.622	-0.622	0.255	-0.255	1.243	0.509	1.573	1.206
成功	0.217	25.576	-1.191	1.049	0.525	-0.518	-1.287	-1.010	0.690	-0.690	0.288	-0.288	1.380	0.577	1.700	1.298
石梯	0.158	23.484	-1.131	0.994	0.496	-0.489	-1.300	-0.965	0.658	-0.658	0.264	-0.264	1.315	0.527	1.622	1.228
花蓮	-0.105	20.744	-1.122	0.981	0.473	-0.477	-1.310	-0.937	0.639	-0.639	0.249	-0.249	1.279	0.499	1.576	1.187
蘇澳	0.116	20.127	-1.159	1.016	0.457	-0.453	-1.275	-0.963	0.597	-0.597	0.239	-0.239	1.195	0.478	1.561	1.202
烏石	0.151	20.667	-1.178	0.908	0.423	-0.406	-1.287	-0.904	0.540	-0.540	0.227	-0.227	1.080	0.453	1.444	1.131
龍洞	0.060	20.803	-1.041	0.651	0.289	-0.276	-1.138	-0.696	0.334	-0.334	0.121	-0.121	0.667	0.243	1.030	0.818
馬祖	-0.188	13.860	-3.770	3.423	2.123	-2.174	-4.135	-3.303	2.756	-2.756	1.431	-1.431	5.512	2.862	6.058	4.734
水頭	-0.018	11.170	-3.281	3.250	2.004	-1.844	-3.357	-2.933	2.335	-2.335	1.281	-1.281	4.669	2.562	5.268	4.214
料羅灣	0.017	11.868	-3.268	3.070	1.913	-1.817	-3.433	-2.879	2.281	-2.281	1.255	-1.255	4.562	2.510	5.160	4.134
澎湖馬公	0.006	18.477	-1.691	1.592	1.046	-0.859	-1.793	-1.602	1.144	-1.144	0.679	-0.679	2.288	1.358	2.746	2.280
小琉球	0.042	20.888	-0.670	0.821	0.271	-0.278	-0.789	-0.664	0.293	-0.293	0.144	-0.144	0.586	0.287	0.957	0.808
蘭嶼	0.085	25.200	-1.051	1.047	0.480	-0.476	-1.239	-0.906	0.647	-0.647	0.260	-0.260	1.293	0.521	1.553	1.167
綠島	0.052	24.842	-1.065	0.993	0.469	-0.461	-1.284	-0.904	0.621	-0.621	0.250	-0.250	1.242	0.500	1.525	1.154

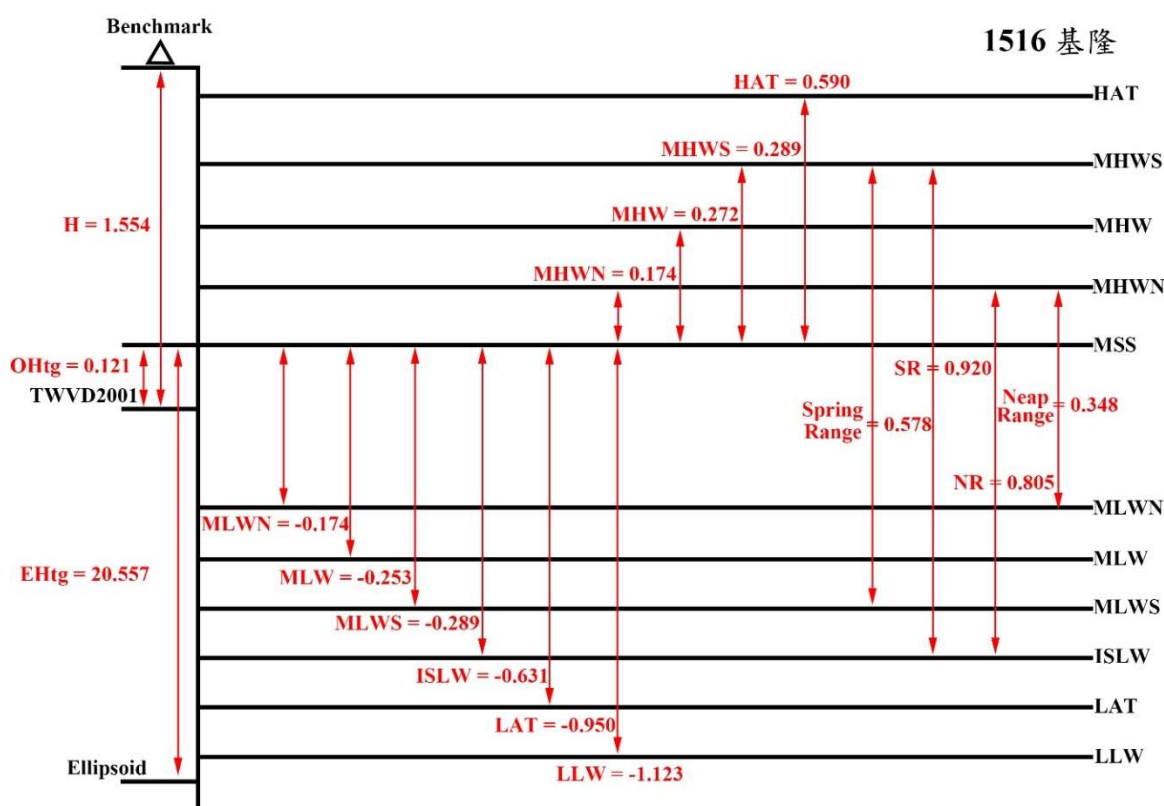


圖 4 基隆潮位站各潮位與高程基準關係。OH_{tg} 與 EH_{tg} 為 MSS (亦為 MSL) 分別相對於 TWVD2001 與 GRS80 參考橢球之高度。

(三)、 潮位模式加值應用工具

潮位模式加值應用工具是基於MOI.18v1潮位模式，結合MOI.18v1潮位模式計算之LAT、ISLW以及新版Geoid和MSS等網格模型[內政部，2020a;內政部，2020b]，可輸出相對於Geoid、ISLW、LAT或WGS84橢球等基準面之瞬時潮位資料，以便於使用者進行水深測量之潮位修正。其中Geoid為靜止海水面向陸地延伸，並包圍整個地球所形成的封閉曲面，其概念為一重力等位面，為高程基準中正高(Orthometric height)之起算面，Geoid和MSS網格模型建置方式將於後續2.4小節中敘述。加值應用工具之大地參考系統為WGS84，適用範圍為北緯21 度至27 度，東經118 度至125 度所形成之矩形範圍。

(四)、 垂直基準轉換模式

圖5為垂直基準轉換介面 [內政部，2020a]，使用者可自行輸入現有水深資料及其基準面資訊並選擇欲轉換之基準面，可轉換之基準面包含MSS、HAT、MHW、LAT、MLW、ISLW以及Geoid，經由垂直基準轉換介面即可得到相對於欲轉換基準之水深值，此外，使用者亦可依據需求輸入單點或多點水深資料。轉換模式空間解析度為30'' × 30''，適用範圍為北緯21度至27度、東經118至125度，大地參考系統為GRS80/ITRF94。

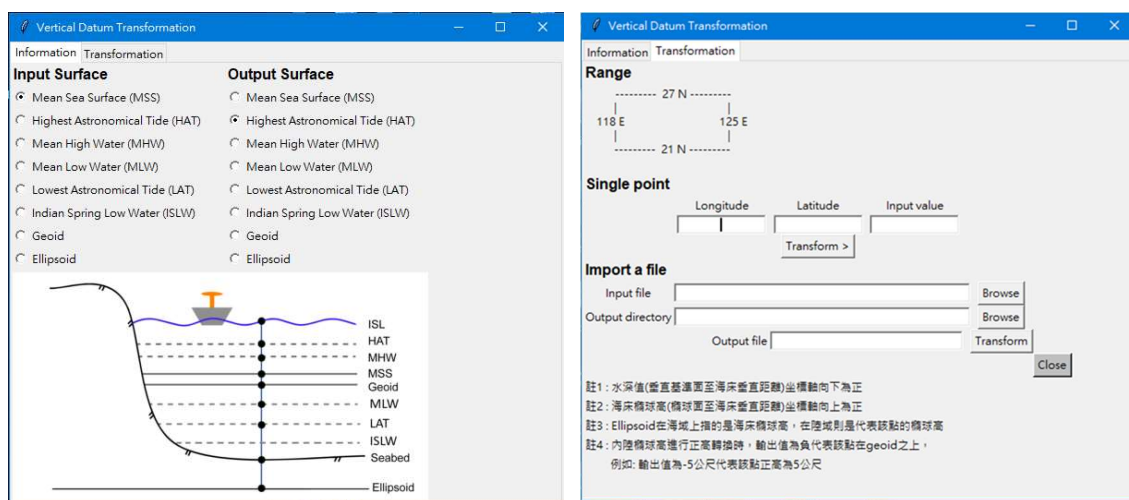


圖 5 垂直基準轉換模式介面。左圖為輸入基準面與欲轉換基準面、右圖為單點資料轉換或批次轉換介面

1. 大地起伏模型

本文Geoid模型係基於許宏銳[2014]建置混合法大地起伏模型(hybrid geoid model)，其即為103年內政部公告臺灣地區大地起伏模型(TWHYGEO2014)所採用之

計算方式。建置方法將結合重力法大地起伏模型和幾何法大地起伏值，即利用107年大地起伏中，離島水準點上重力計算成果為基礎，結合離島數值地形模型與周圍海水深度資料，計算一精進之重力法離島大地起伏模型，再透過國土測繪中心提供之離島水準點上橢球高與正高相減計算所得之幾何法大地起伏與重力法大地起伏差值組一修正面，建置一新的大地起伏模型(圖6)，以利傳統高程系統量測之正高與GPS量測的橢球高系統進行轉換。此大地起伏模型適用範圍為北緯21度至27度，東經118至125度，包含臺灣本島與離島(金門、澎湖、小琉球、馬祖、綠島、蘭嶼)。

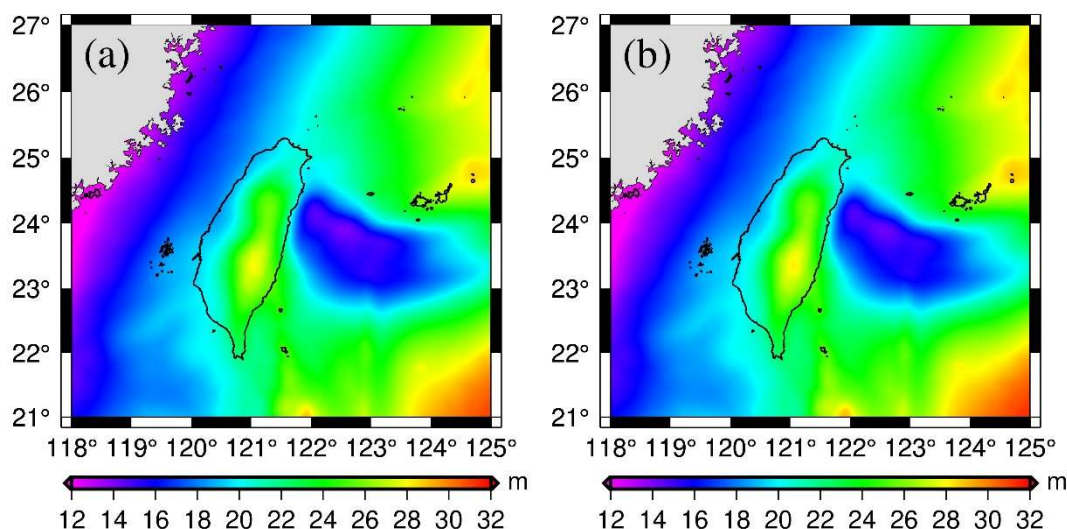


圖 6 (a)109 年重力法大地起伏模型 (b)109 年混合法大地起伏模型

2. 平均海水面(MSS)模型

MSS 2012(圖7)產製時結合前述之混合法大地起伏(Hybrid Geoid)模型、潮位站資料與衛星測高資料，潮位站資料分布與資料時間段如圖2與表3所示，衛星測高資料依照衛星軌道類型可分為重複軌道任務測高衛星與大地任務測高衛星，重複軌道測高衛星資料包含 TOPEX/Poseidon、Jason-1、Jason-2、Jason-3、Envisat、SARAL/AltiKa、Sentinel-3，大地任務測高衛星資料包含 Jason-1/GM、Jason-2/GM與 Cryosat-2，時間段為1992年到2019年，測高資料處理的步驟如圖8所示，將重複軌道衛星與大地任務衛星分開處理，整合成測高平均海水面。MSS模型係使用最小曲率法整合去除沿岸5公里之測高MSS及挖除沿岸5公里之更新後Hybrid Geoid(在沿岸加入29個潮位站MSL 2012進行約制)，藉由扣除DTU 18後使用5公里的高斯濾波罩窗去除高頻訊號後，再加回DTU 18所產製(圖9)。詳細處理方法可參考內政部[2020b]。

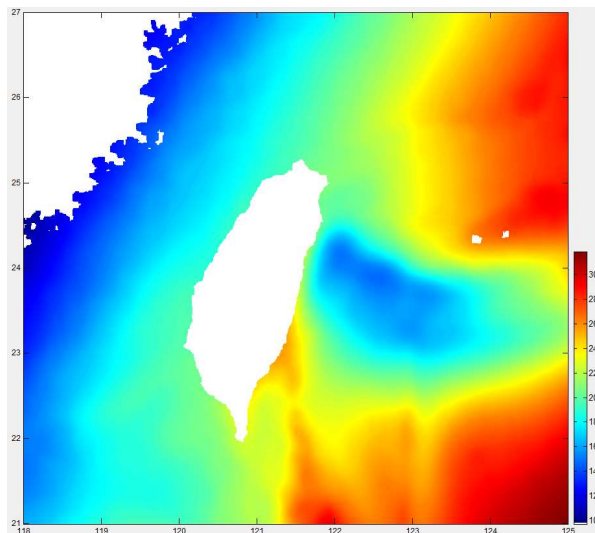


圖 7 MSS 2012 數值模型圖

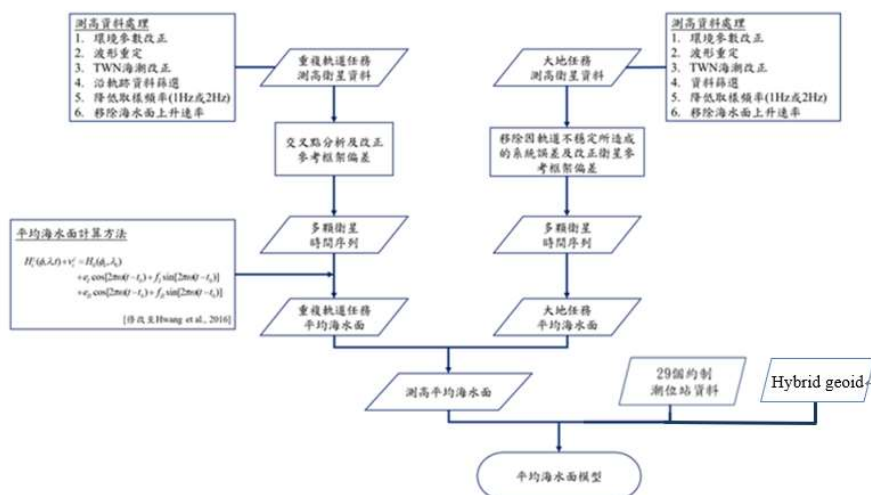


圖 8 衛星測高建置平均海水面(MSS)流程圖

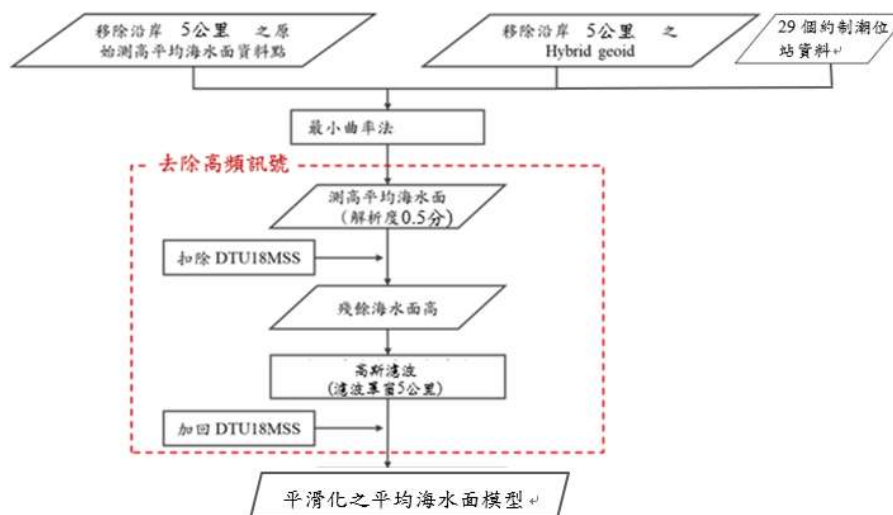


圖 9 平均海面(MSS)流程圖

3. 各潮位面模型

垂直基準轉換模型中HAT、MHW、MLW、LAT、ISLW是由MOI.18v1潮位模式所產製，可提供臺灣周邊海域相對於MSS 2012的各潮位面數值成果計算。MOI.18v1產生之各潮位面模型空間解析度為0.01度，利用最小曲率法內插成30”解析度，作為本研究之潮位面模型。

(五)、潮位分區圖

潮位分區圖係利用MOI.18v1潮位模式 [內政部，2020b]產製之等潮時圖和等潮差圖(空間解析度為0.01度)所製作，然而於過程中發現潮位分區圖於岸邊會與海岸邊界線產生空隙，因此本研究利用雙線性內插法進行內插或外插，使成果於岸邊不會與海岸邊界線產生空隙，最後進行部分線條編修，清圖後即為潮位分區圖如圖10。

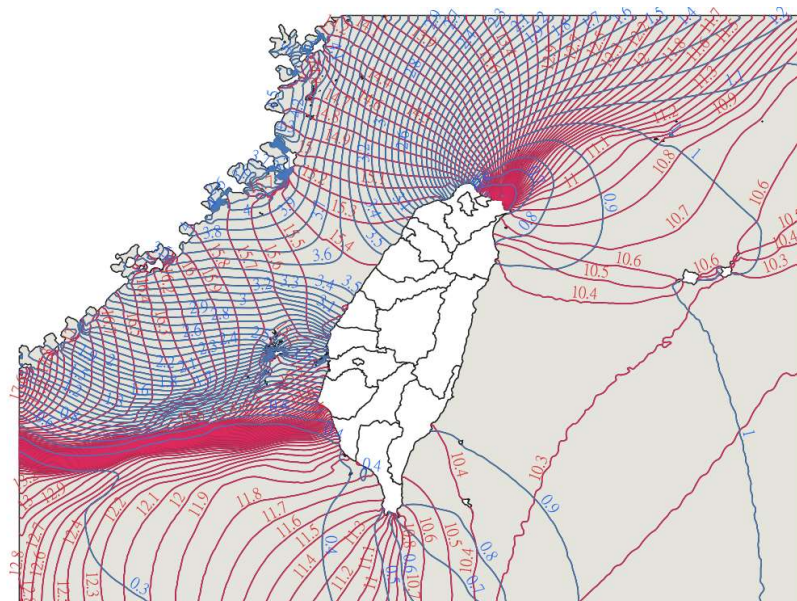


圖 10 潮位分區成果圖，其中藍線為等潮時線、紅線為等潮差線、黑線為縣市界。

三、垂直基準轉換模式精度評估

(一)、MOI.18v1 潮位模式精度評估

MOI.18v1 潮位模式與國內 34 個潮位站資料進行潮高時序比較。潮位站資料經氣壓修正後，利用調和分析重建天文潮位時序資料，成果如表 5 和圖 11 所示。MOI.18v1 潮位模式與 34 個潮位資料之差值均方根誤差(Root-Mean-Square Error, RMSE)皆小於 0.15 m，RMSE 平均值為 0.083 m，為各潮位模式中最佳(圖 11)。此外，MOI.18v1 潮位模式在非近岸海域亦與測高資料比較來評估精度，其差值 RMSE 介於 13.2~15.8 cm 之間。不同衛星測高資料之起迄日期詳列於表 6，比較成果如表 7 所示。

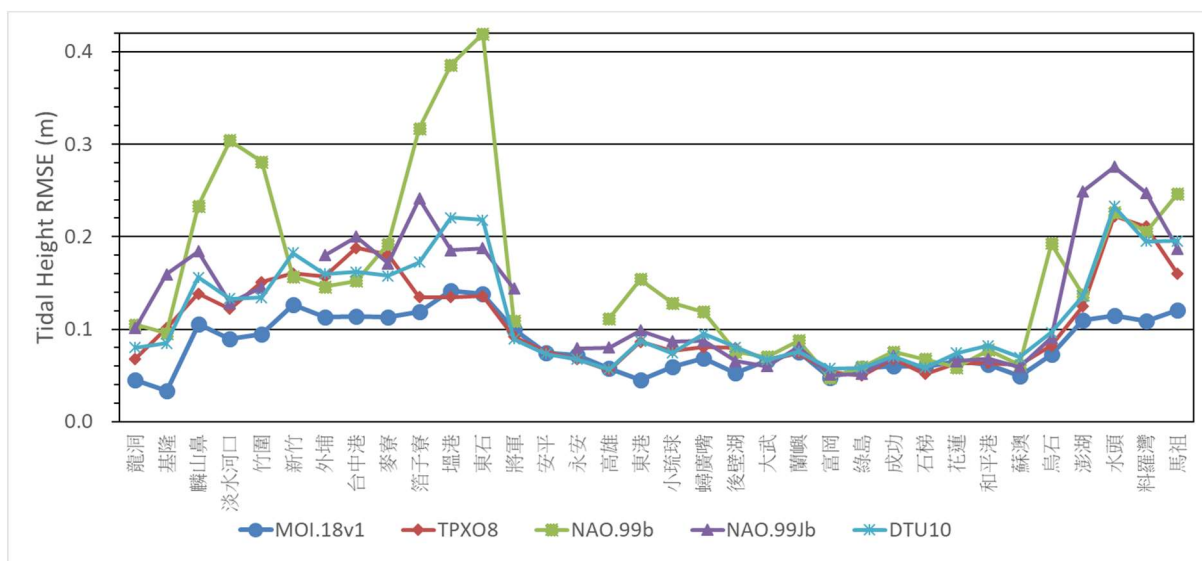


圖 11 MOI.18v1 和其他潮位模式與潮位站資料比對之均方根誤差

表 5 MOI.18v1 潮位模式於 34 個潮位站潮高時序比對之均方根誤差

站號	站名	MOI.18v1
1516	基隆	0.034
1206	麟山鼻	0.105
140	淡水河口	0.089
1116	竹圍	0.095
112	新竹	0.126
113	外埔	0.113
1436	臺中港	0.114
1456	麥寮	0.113
1156	箔子寮	0.119
1366	塭港	0.142
1166	東石	0.138
1176	將軍	0.100
1473	安平	0.075
1786	永安	0.072
1486	高雄	0.058
1186	東港	0.045
1496	蟬廣嘴	0.068
1196	後壁湖	0.052
1596	大武	0.066
1586	富岡	0.048
1276	成功	0.060
1566	石梯	0.059
1256	花蓮	0.065
1552	和平港	0.062
1246	蘇澳	0.049
1236	烏石	0.073
1226	龍洞	0.045
1926	馬祖	0.120
1956	料羅灣	0.109

1966	水頭	0.114
1356	澎湖馬公	0.110
1386	小琉球	0.059
1396	蘭嶼	0.075
1676	綠島	0.058
	平均值	0.083

表 6 收集之衛星測高資料日期

衛星	起迄日期
Jason-3	2016/02/12 ~ 2019/04/06
Jason-2	2008/07/04 ~ 2017/05/17
Jason-1	2002/01/15 ~ 2013/06/20
TOPEX	1992/09/25 ~ 2002/08/10
ERS-2	1995/05/05 ~ 2011/04/26
ERS-1	1991/08/03 ~ 1996/05/30
Envisat	2002/05/26 ~ 2012/04/06
CryoSat-2	2010/07/16 ~ 2019/04/21

表 7 MOI.18v1 潮高與衛星測高差異分析統計表

ID	Data No.	Min.	Max	Mean	S.D.	RMSE
Jason-3	39327	-0.601	0.648	0.050	0.133	0.142
Jason-2	135169	-0.550	0.786	0.024	0.139	0.141
Jason-1	225040	-0.625	1.125	0.014	0.135	0.135
TOPEX	138150	-0.653	0.650	-0.012	0.132	0.133
ERS-2	124844	-1.360	0.750	-0.024	0.136	0.138
ERS-1	55955	-0.772	1.877	-0.054	0.149	0.158
Envisat	122204	-0.791	0.704	0.001	0.132	0.132
Cryosat-2	165793	-1.165	3.319	0.016	0.143	0.144

(二)、大地起伏模型精度評估

本研究利用 GPS 和水準資料評估 109 年臺灣重力法及混合法大地起伏模型(本島與離島)之精度。本島使用觀測時間 12 及 24 小時之精度較高的 14 條 GPS 觀測資料，離島則採用 3 小時 GPS 觀測資料來評估，其中澎湖包含七美與望安，金門包含小金門。比較成果如表 8 與表 9。

由表 8 得知，重力法大地起伏模型與特選 14 條路線和各離島驗證點進行精度評估，其差值(ΔN)最大值 41.40 公分、最小值-12.90 公分、平均值 17.70 公分、標準差 9.99 公分。由數據可知，重力法大地起伏存在一系統性偏差，因此加入幾何法大地起伏約制。表 9 為混合法大地起伏模型與驗證點精度評估， ΔN 最大值 5.70 公分、最小值-22.70 公分、平均值-0.85 公分、標準差 3.36 公分，可知混合法大地起伏模型已移除系統性偏差。

表 8 重力法大地起伏模型與 GNSS/水準量測觀測大地起伏精度評估統計（單位：公分）

路線/區域	平均值 (ΔN)	標準差 (STD)	最大值	最小值
12hr Tai3	26.50	3.00	32.30	21.20
12hr Tai8	16.25	6.61	25.30	4.80
12hr Tai20	18.45	8.14	31.90	7.00
North	12.57	1.99	15.10	9.40
Central	2.70	6.63	13.90	-7.20
South	33.60	5.93	41.40	26.20
East	22.73	4.01	29.70	16.00
24hr Mountain	9.46	7.88	20.40	-3.70
24hr Ecoast	11.44	6.55	24.10	-2.50
NW	13.05	4.25	19.50	0.80
SW	17.26	5.56	21.70	7.20
Tai3	24.15	2.34	28.20	18.90
Tai9	20.25	4.45	24.60	6.60
Tai18	15.06	5.14	22.10	6.10
Matzu	32.68	0.73	33.70	32.00
Kinmen	-8.20	2.26	-6.20	-12.90
Liuqiu	36.93	0.32	37.30	36.70
Lyudao	17.63	0.67	18.20	16.90
Lanyu	34.64	1.90	37.40	32.70
Penghu	26.68	1.56	29.20	23.40
All	17.70	9.99	41.40	-12.90

表 9 混合法大地起伏模型與 GNSS/水準量測觀測大地起伏精度評估統計表（單位：公分）

路線/區域	平均值 (ΔN)	標準差 (STD)	最大值	最小值
12hr Tai3	-0.77	1.22	2.40	-3.50
12hr Tai8	0.04	2.77	4.70	-5.50
12hr Tai20	-0.24	1.65	3.50	-2.40
North	-0.39	1.74	3.40	-2.20
Central	-5.10	6.62	-0.30	-22.70
South	3.94	1.03	5.70	2.30
East	-2.27	1.84	0.00	-5.80
24hr Mountain	-5.10	6.62	-0.30	-22.70
24hr Ecoast	-0.66	2.36	2.50	-8.10
NW	-0.68	2.13	2.80	-6.50
SW	-0.32	1.85	3.40	-4.50
Tai3	1.28	1.19	5.10	-0.10
Tai9	0.83	1.90	4.10	-3.40
Tai18	-3.81	2.09	-0.10	-8.60
Matzu	0.13	0.26	0.50	-0.10
Kinmen	-0.50	0.49	0.10	-1.30
Liuqiu	0.07	0.74	0.90	-0.50
Lyudao	-0.20	0.26	0.00	-0.50
Lanyu	0.06	0.30	0.40	-0.40
Penghu	0.01	0.28	0.80	-0.30
All	-0.85	3.36	5.70	-22.70

(三)、 3.3 平均海水面(MSS)模型精度評估

表10為潮位站資料計算之MSL 2012與MSS 2012模型差值比較，各潮位站差值平均值為0.004公尺、RMSE為0.028公尺、標準差為0.028公尺，差值最大值與最小值分別為0.108公尺與-0.042公尺。

表 10 利用潮位站資料計算之 MSL 2012 成果與 MSS 2012 模型的差值

潮位站	差值(m)	潮位站	差值(m)
基隆	0	富岡	-0.009
麟山鼻	-0.013	成功	0.008
淡水	-0.016	石梯	0.108
竹圍	-0.017	花蓮	-0.018
新竹	-0.014	蘇澳	-0.009
外埔	0.007	烏石	-0.003
臺中港	0.08	龍洞	-0.042
麥寮	0.024	馬祖	-0.005
箔子寮	-0.013	水頭	-0.021
塭港	-0.005	料羅灣	-0.019
東石	0.003	澎湖馬公	-0.006
將軍	0.017	小琉球	-0.008
四草	0.018	蘭嶼	0.023
永安	0.017	綠島	0.01
高雄	0.007	MEAN	0.004
東港	-0.007	STD	0.028
蟳窟嘴	0.019	RMSE	0.028
後壁湖	0.017	MAX	0.108
大武	0.014	MIN	-0.042

(四)、 各潮位面模型精度評估

MOI.18v1潮位模型之各潮位面(包含LAT、HAT、MHW、MLW和ISLW)與33個潮位站的差值(觀測值-模式值)相比較，模型中各潮位面係相對於平均海水面，同化前與同化後成果如表11與表12所示，其中同化是將潮位站所在的潮位面網格值轉換成與潮位站計算成果相同，因此先結合MOI.18v1潮位模型以及潮位站潮位面成果，利用最小曲率法產製成網格面。

同化前LAT潮位面差值平均值為0.023±0.078 m，差值最大值與最小值為0.188 m與-0.088 m; HAT潮位面差值平均值為-0.022±0.051 m，差值最大值與最小值為0.104 m與-0.116 m; MHW潮位面差值平均值為-0.010±0.030 m，差值最大值與最小值為0.048 m與-0.067 m; MLW潮位面差值平均值為0.016±0.032 m，差值最大值與最小值為0.103 m與-0.046 m; ISLW潮位面差值平均值為0.042±0.037 m，差值最大值與最小值為0.142 m與-0.027 m。同化後精度有顯著提升，所有潮位面差值最大值與最小值皆低於6公分，標準差皆小於2公分。

表 11 各潮位面同化前 33 個潮位站潮位面差異值比較(單位：公尺)

測站	HAT	MHW	MLW	LAT	ISLW
基隆	0.018	-0.013	-0.002	-0.07	0.03
麟山鼻	-0.058	0.019	-0.02	-0.04	-0.027
淡水	-0.088	-0.017	0.057	0.127	0.076
竹圍	-0.116	-0.06	0.019	-0.076	0.029
新竹	-0.071	0.005	0.013	0.026	0.018
外埔	-0.055	-0.002	0.103	0.188	0.047
臺中港	-0.023	0.006	-0.007	-0.078	-0.007
麥寮	-0.073	-0.048	0.067	0.091	0.082
箔子寮	-0.02	0.002	0.028	0.112	0.023
塭港	0.041	0.04	-0.046	-0.041	-0.019
東石	-0.027	0.003	-0.018	0.063	0.037
將軍	-0.089	-0.019	0.024	-0.05	0.036
四草	-0.071	-0.062	0.066	0.109	0.142
永安	-0.058	-0.007	0.013	-0.069	0.064
高雄	-0.067	-0.012	0.023	-0.03	0.06
東港	-0.035	0.005	0.009	0.001	0.041
蟬廣嘴	-0.057	-0.026	0.038	0.116	0.088
後壁湖	-0.026	-0.01	0.032	0.035	0.06
大武	-0.013	-0.041	0.048	0.099	0.098
富岡	-0.002	-0.027	0.015	0.041	0.06
成功	0.048	0.015	-0.028	-0.041	0.006
石梯	0.002	-0.017	0.004	0.024	0.051
花蓮	-0.006	-0.038	0.012	0.033	0.077
蘇澳	0.031	-0.036	-0.004	-0.037	0.017
烏石	-0.003	-0.03	-0.004	-0.088	0.021
龍洞	-0.029	-0.025	0.043	-0.018	0.061
馬祖	-0.093	-0.067	0.033	0.085	0.029
水頭	0.104	0.027	-0.027	0.044	0.042
料羅灣	0.064	0.048	0.003	0.13	0.032
澎湖馬公	0.008	0.046	0.046	0.138	-0.001
小琉球	-0.015	0.02	-0.012	-0.083	-0.009
蘭嶼	0.068	0.029	-0.028	-0.043	0.021
綠島	-0.011	-0.025	0.021	0.05	0.091
MEAN	-0.022	-0.01	0.016	0.023	0.042
STD	0.051	0.03	0.032	0.078	0.037
RMSE	0.055	0.031	0.035	0.08	0.055
MAX	0.104	0.048	0.103	0.188	0.142
MIN	-0.116	-0.067	-0.046	-0.088	-0.027

表 12 各潮位面同化後 33 個潮位站潮位面差異值比較(單位：公尺)

測站	HAT	MHW	MLW	LAT	ISLW
基隆	-0.013	-0.014	0.011	0.004	0.022
麟山鼻	0.006	0.006	-0.004	-0.007	-0.006
淡水	-0.001	0	0	0.001	0.001
竹圍	-0.005	-0.002	-0.001	-0.009	-0.001
新竹	-0.006	0.006	-0.003	-0.002	-0.003
外埔	-0.015	-0.001	0.027	0.049	0.013
臺中港	0.008	0.009	-0.009	-0.023	-0.012
麥寮	-0.016	-0.01	0.013	0.019	0.016
箔子寮	-0.007	0	0.009	0.031	0.008
塭港	0.007	0.006	-0.008	-0.007	-0.003
東石	-0.003	0.002	-0.004	0.009	0.005
將軍	-0.032	-0.008	0.009	-0.012	0.014

四草	-0.015	-0.012	0.012	0.02	0.025
永安	-0.008	-0.002	0.003	-0.008	0.01
高雄	-0.016	-0.004	0.006	-0.005	0.015
東港	-0.011	0.001	0.003	0	0.011
蟳窟嘴	-0.017	-0.009	0.012	0.035	0.026
後壁湖	-0.017	-0.006	0.02	0.02	0.037
大武	-0.007	-0.023	0.027	0.055	0.056
富岡	0	-0.003	0.002	0.005	0.007
成功	0.007	0.002	-0.004	-0.006	0.001
石梯	-0.001	-0.005	0.002	0.007	0.013
花蓮	-0.002	-0.005	0.002	0.005	0.01
蘇澳	0.001	-0.001	-0.001	-0.002	0
烏石	-0.004	-0.008	0.003	-0.009	0.008
龍洞	-0.01	-0.005	0.008	-0.002	0.012
馬祖	-0.03	-0.019	0.011	0.032	0.011
水頭	0.037	0.012	-0.009	0.016	0.012
料羅灣	0.006	0.005	0	0.014	0.004
澎湖馬公	-0.007	0	0.011	0.024	0.007
小琉球	-0.002	0.005	-0.003	-0.019	-0.003
蘭嶼	0.007	0.003	-0.003	-0.006	0.001
綠島	-0.003	-0.007	0.006	0.014	0.025
MEAN	-0.005	-0.003	0.004	0.007	0.01
STD	0.012	0.008	0.009	0.018	0.013
RMSE	0.013	0.008	0.01	0.02	0.017
MAX	0.037	0.012	0.027	0.055	0.056
MIN	-0.032	-0.023	-0.009	-0.023	-0.012

(五)、評估加值應用工具以及垂直基準轉換模式之精度

1. 利用潮位站資料評估加值應用工具之精度

本研究利用33個潮位站資料(表2)，結合國土測繪中心提供潮位站參考基準點正高和GNSS橢球高[內政部國土測繪中心，2018; 2021]，可得到相對於Geoid、ISLW、LAT以及WGS84橢球等基準之潮位資料，來評估潮位模式加值應用工具於近岸之精度。

表13為1993-2020潮位站資料與潮位模式於正高、ISLW、LAT及WGS84橢球等基準之差值平均值及標準偏差。正高差值平均值最大值為17.6公分、最小值為-15.7公分、平均值為2.0公分、標準偏差為6.8公分; ISLW差值平均值最大值為7.7公分、最小值為-10.1公分、平均值為-0.3公分、標準偏差為3.9公分; LAT差值平均值最大值為7.1公分、最小值為-15.3公分、平均值為0.3公分、標準偏差為4.5公分; 橢球高差值平均值最大值為15.6公分、最小值為-7.6公分、平均值為1.7公分、標準偏差為4.8公分。另表13中，差值標準偏差可代表潮位模式之近岸精度，33個測站差值標準偏差平均值為13.6 cm，精度與MOI.18v1潮位模式相符(~10 cm)[內政部，2020b]。

表 13 1993-2020 潮位站資料與潮位模式於正高、ISLW、LAT 及 WGS84 橢球等基準之差值平均值及標準偏差。

站名	站號	潮位站與潮位模式之差值 (m)			
		正高	ISLW	LAT	橢球高

		平均值	標準差	平均值	標準差	平均值	標準差	平均值	標準差
基隆	1516	0.083	0.072	-0.054	0.072	-0.023	0.072	-0.026	0.072
麟山鼻	1206	-0.011	0.132	0.062	0.132	0.064	0.132	0.035	0.132
淡水	1102	0.030	0.210	0.002	0.210	-0.002	0.210	-0.012	0.210
竹圍	1116	-0.002	0.188	0.016	0.188	0.037	0.188	-0.002	0.188
新竹	112	-0.032	0.168	-0.016	0.168	-0.017	0.168	-0.033	0.168
外埔	113	-0.092	0.158	-0.101	0.158	-0.153	0.158	-0.076	0.158
臺中港	1436	0.117	0.155	0.008	0.155	0.025	0.155	0.074	0.155
麥寮	1456	0.089	0.145	0.047	0.145	0.043	0.145	0.104	0.145
箔子寮	1156	-0.008	0.285	0.077	0.285	0.042	0.285	0.072	0.285
塭港	1366	-0.157	0.241	0.039	0.241	0.046	0.241	0.029	0.241
東石	1166	-0.069	0.273	0.027	0.273	0.021	0.273	0.039	0.273
將軍	1176	0.031	0.129	0.040	0.129	0.071	0.129	0.075	0.129
四草	11781	0.161	0.124	-0.020	0.124	-0.010	0.124	0.049	0.124
永安	1786	0.074	0.089	-0.042	0.089	0.003	0.089	0.000	0.089
高雄	1486	0.042	0.098	-0.030	0.098	-0.005	0.098	-0.003	0.098
東港	1186	0.079	0.105	0.021	0.105	0.040	0.105	0.032	0.105
蟬廣嘴	1496	-0.005	0.091	-0.061	0.091	-0.073	0.091	-0.008	0.091
後壁湖	1196	0.000	0.105	-0.038	0.105	-0.022	0.105	0.014	0.105
大武	1596	-0.028	0.100	-0.012	0.100	-0.011	0.100	0.055	0.100
富岡	1586	-0.048	0.107	0.036	0.107	0.041	0.107	0.041	0.107
成功	1276	0.035	0.082	-0.026	0.082	-0.007	0.082	-0.013	0.082
石梯	1566	0.176	0.109	0.024	0.109	0.035	0.109	0.156	0.109
花蓮	1256	0.092	0.104	0.001	0.104	0.013	0.104	0.003	0.104
蘇澳	1246	-0.044	0.075	-0.011	0.075	-0.005	0.075	-0.018	0.075
烏石	1236	-0.008	0.082	-0.021	0.082	0.012	0.082	-0.012	0.082
龍洞	1226	0.024	0.075	-0.015	0.075	0.011	0.075	-0.036	0.075
馬祖	1926	0.053	0.197	0.048	0.197	0.026	0.197	0.053	0.197
水頭	1966	0.016	0.193	0.019	0.193	0.013	0.193	0.016	0.193
料羅灣	1956	-0.020	0.170	-0.055	0.170	-0.081	0.170	-0.067	0.170
澎湖馬公	1356	0.021	0.127	-0.023	0.127	-0.056	0.127	-0.022	0.127
小琉球	1386	0.026	0.085	0.011	0.085	0.034	0.085	-0.001	0.085
蘭嶼	1396	0.037	0.100	-0.014	0.100	0.004	0.100	0.038	0.100
綠島	1676	0.003	0.110	-0.037	0.110	-0.025	0.110	-0.009	0.110
統計值	平均值	0.020	0.136	-0.003	0.136	0.003	0.136	0.017	0.136
	標準差	0.068	0.057	0.039	0.057	0.045	0.057	0.048	0.057
	最大值	0.176	0.285	0.077	0.285	0.071	0.285	0.156	0.285
	最小值	-0.157	0.072	-0.101	0.072	-0.153	0.072	-0.076	0.072

2.潮位模式加值工具應用於船測之海域水深資料之測試及精度評估

潮位模式加值工具應用之測試及精度評估係利用內政部地政司方域科(之後簡稱方域科)提供船載測深儀水深資料(表14與圖12)驗證，資料包含未進行潮位修正的水深值以及潮位修正後之水深值，並相對於Geoid、ISLW、LAT及WGS84橢球等基準。本研究利用潮位模式加值應用工具對於水深資料進行潮位修正，並與方域科提供各基準面(Geoid、ISLW、LAT及WGS84橢球)之水深資料進行差異分析。

表15為潮位模式加值工具修正後之水深資料與方域科提供之水深值之差值平均值與其標準偏差，其中差值標準偏差可代表潮位模式與原潮位修正成果之差異(不含系統誤差)。在移除有疑慮數據後，橢球高水深差值平均值最大值為38公分、最小值為-18公分、平均值為14公分、標準偏差為14公分; ISLW差值平均值最大值為26公分、最小值為-36公分、平均值為-5公分、標準偏差為15公分; LAT差值平均值最大

值為0公分、最小值為-50公分、平均值為-20公分、標準偏差為14公分;正高差值平均值最大值為32公分、最小值為-31公分、平均值為-8公分、標準偏差為16公分。另表15中，差值標準偏差可表示潮位模式與原潮位修正成果之差異，各基準差值標準偏差平均值為6~10 cm，符合MOI.18v1潮位模式之精度(~10 cm)[內政部，2020b]。此外，本文亦統計各基準水深值差值符合特等測深比例與符合1a測深比例，符合IHO特等測深與1a測深[IHO, 2020]平均比例皆大於85.4%與99.8%。

表 14 水深資料檢核區域之資訊

年度	區域	測量公司	圖號
105-1	西南部	詮華	93192040
105-1	西南部	詮華	93192069
105-1	西南部	詮華	94193021
105-1	西南部	詮華	94194082
105-3	金門	自強	90211055
105-3	金門	自強	90214047
105-3	金門	自強	90214080
105-3	金門	自強	91214031
106-1	馬祖	自強	94251059
106-1	馬祖	自強	94251066
106-1	馬祖	自強	94251081
106-1	馬祖	自強	94253031
107-1	西部	詮華	95214011
107-1	西部	詮華	95223045
107-2	西部	自強	94211037
107-2	西部	自強	94211075
107-2	西部	自強	94212023
107-2	西部	自強	94212052
107-2	西部	自強	94213058
108-1	西部	自強	94213045
108-3	東北	詮華	97222020
108-3	東北	詮華	97222036
108-3	東北	詮華	97222048
108-3	東北	詮華	97222059
108-3	東北	詮華	97222069
108-3	東北	詮華	97222079
108-3	東北	詮華	97222085
108-3	東北	詮華	97222087
108-3	東北	詮華	97222089
108-3	東北	詮華	97222095
108-3	東北	詮華	97222097

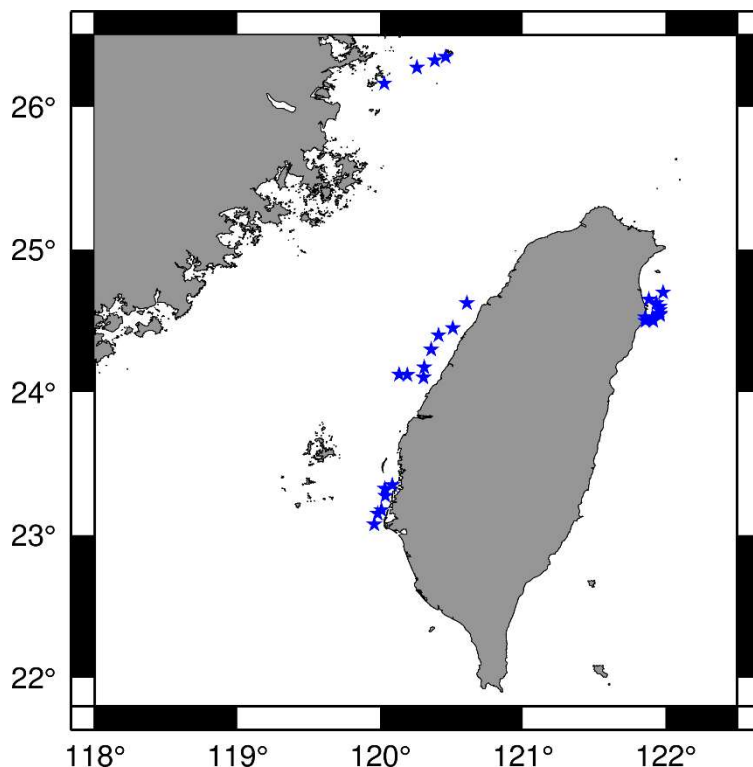


圖 12 水深資料檢核區域分布圖

表 15 利用加值應用工具修正船測水深資料並與原潮位修正之水深值於不同基準下之差值平均值及其標準偏差

年度	區域	圖號	橢球高 (m)		ISLW (m)		LAT (m)		正高 (m)	
			平均值	標準偏差	平均值	標準偏差	平均值	標準偏差	平均值	標準偏差
105	西南部	93192040	x	x	-0.04	0.03	x	x	-0.20	0.03
105	西南部	93192069	x	x	0.08	0.02	x	x	-0.03	0.02
105	西南部	94193021	x	x	0.06	0.02	-0.23	0.02	-0.14	0.02
105	西南部	94194082	x	x	-0.01	0.02	-0.27	0.02	-0.21	0.03
105	金門	90211055	0.07	0.11	-0.26	0.08	x	x	x	x
105	金門	90214047	-0.18	0.12	-0.36	0.12	x	x	x	x
105	金門	90214080	0.20	0.13	-0.22	0.11	x	x	x	x
105	金門	91214031	0.17	0.14	-0.14	0.14	x	x	x	x
106	馬祖	94251059	0.19	0.16	-0.11	0.15	x	x	0.25	0.15
106	馬祖	94251066	0.09	0.08	-0.21	0.06	x	x	0.32	0.05
106	馬祖	94251081	0.28	0.19	0.02	0.18	x	x	x	x
106	馬祖	94253031	0.37	0.11	0.17	0.07	x	x	x	x
107	西部	95214011	0.02	0.04	0.07	0.16	-0.10	0.16	-0.07	0.16
107	西部	95223045	0.37	0.11	0.10	0.04	-0.13	0.05	-0.18	0.05
107	西部	94211037	0.35	0.16	0.26	0.12	-0.01	0.12	0.15	0.11
107	西部	94211075	0.21	0.06	0.16	0.05	-0.10	0.06	0.06	0.05
107	西部	94212023	0.04	0.10	-0.24	0.09	-0.50	0.09	-0.31	0.09
107	西部	94212052	0.01	0.06	-0.24	0.05	-0.50	0.06	-0.25	0.05
107	西部	94213058	0.00	0.10	-0.22	0.08	-0.48	0.08	-0.14	0.02
108	西部	94213045	0.17	0.08	-0.01	0.07	-0.20	0.07	-0.19	0.07
108	東北	97222020	0.38	0.30	0.14	0.02	0.00	0.02	0.10	0.02
108	東北	97222036	0.18	0.07	0.00	0.04	-0.12	0.03	0.02	0.03
108	東北	97222048	0.17	0.04	0.03	0.04	-0.09	0.04	0.04	0.05

年度	區域	圖號	橢球高 (m)		ISLW (m)		LAT (m)		正高 (m)		
			平均值	標準偏差	平均值	標準偏差	平均值	標準偏差	平均值	標準偏差	
108	東北	97222059	0.19	0.05	0.01	0.02	-0.11	0.02	-0.05	0.02	
108	東北	97222069	0.03	0.08	-0.08	0.05	-0.19	0.05	-0.14	0.04	
108	東北	97222079	0.04	0.07	-0.13	0.08	-0.25	0.08	-0.20	0.08	
108	東北	97222085	0.04	0.07	-0.02	0.05	-0.15	0.05	-0.14	0.05	
108	東北	97222087	0.14	0.06	-0.07	0.03	-0.19	0.03	-0.12	0.03	
108	東北	97222089	0.06	0.07	-0.13	0.09	-0.25	0.09	-0.22	0.08	
108	東北	97222095	-0.04	0.06	-0.14	0.06	-0.27	0.06	-0.28	0.06	
108	東北	97222097	0.14	0.05	-0.04	0.02	-0.16	0.02	-0.12	0.03	
統計值			平均值	0.14	0.10	-0.05	0.07	-0.20	0.06	-0.08	0.06
(移除表中 x 數據)			標準偏差	0.14	0.06	0.15	0.05	0.14	0.04	0.16	0.04
			最大值	0.38	0.30	0.26	0.18	0.00	0.16	0.32	0.16
			最小值	-0.18	0.04	-0.36	0.02	-0.50	0.02	-0.31	0.02

x 表示資料產製單位沒有提供資料或該區域水深資料尚有疑慮，需要重新分析或產製，統計時已移除該區域之數據。

3.垂直基準模式應用於船測水深資料之測試及精度評估報告

本研究利用垂直基準轉換界面工具測試以下項目: 1. 分別將船測正高、ISLW和LAT基準之水深資料轉換為橢球高基準，並進行差異分析與精度評估; 2. 分別將船測橢球高、ISLW和LAT基準之水深資料轉換為正高基準，並進行差異分析與精度評估; 3. 分別將船測橢球高、正高和LAT基準之水深資料轉換為ISLW基準，並進行差異分析與精度評估; 4. 分別將船測橢球高、正高和ISLW基準之資料轉換為LAT基準，並進行差異分析與精度評估。由於不同基準之水深資料點位坐標不一定相同，因此比較時選擇距離最近的點位進行比較，然而部分位於圖幅邊緣附近之點位可能會選擇到較遠距離的點位，因此計算各圖幅最近點位距離平均值與標準偏差，會將最近點位距離超過三倍標準偏差的點位水深差值移除。另外，因部分測區資料品質尚有疑慮，因此在評估時已移除表中有疑慮之區域。

在移除疑慮區域後，利用垂直基準轉換界面工具將水深資料基準轉換至橢球高、ISLW、LAT和正高等，並與方域科提供成果相比較(如表16~19)。將水深資料由正高、ISLW和LAT基準轉換至橢球高，並與方域科提供橢球高成果相比較，差值平均值之平均及標準偏差為22.2±16.0 cm (正高)、21.4±10.6 cm (ISLW)和34.7±11.8 cm (LAT); 由橢球高、ISLW和LAT基準轉換至正高，並與方域科提供正高成果相比較，差值平均值之平均及其標準偏差為-22.5±16.0 cm (橢球高)、-5.7±16.9 cm (ISLW)和7.7±7.5 cm (LAT); 由橢球高、正高和LAT基準轉換至ISLW，並與方域科提供ISLW成果相比較，差值平均值之平均及其標準偏差為-21.4±10.3 cm (橢球高)、6.1±18.1 cm (正高)和18.8±8.9 cm (LAT); 由橢球高、正高和ISLW基準轉換至LAT，並與方域科提供LAT成果相比較，其差值平均值之平均及其標準偏差為-35.2±11.6 cm (橢球高)、-7.8±7.4 cm (正高)和-18.0±6.9 cm (LAT)。各基準間轉換差值最大值為56.1 cm，而符合IHO特等測深與1a測深[IHO, 2020]平均比例皆大於66.4%與95.3%。

表 16 利用垂直基準轉換模式將船測正高、ISLW 和 LAT 等基準水深資料轉換至橢球高基準，並與方域科提供水深成果計算差值平均值及其標準偏差

基準間轉換	正高轉換至橢球高	ISLW 轉換至橢球高	LAT 轉換至橢球高
差值平均值範圍	-20.9~55.4 cm	-7.3~42.5 cm	10.3~56.1 cm
差值平均值之平均值	22.2±16.0 cm	21.4±10.6 cm	34.7±11.8 cm
差值 STD 之平均值	10.7 cm	9.8 cm	10.7 cm
符合特等測深比例 (平均值)	5%~100% (81.3%)	5%~100% (82.0%)	0%~100% (66.4%)
符合 1a 測深比例(平 均值)	98%~100% (99.8%)	77%~100% (99.1%)	83%~100% (97.9%)

表 17 利用垂直基準轉換模式將船測橢球高、ISLW 和 LAT 等基準水深資料轉換至正高基準，並與方域科提供水深成果計算差值平均值及其標準偏差

基準間轉換	橢球高轉換至正高	ISLW 轉換至正高	LAT 轉換至正高
差值平均值範圍	-20.2~58.1 cm	-27.6~52.2 cm	-4.5~25.2 cm
差值平均值之平均值	-22.5±16.0 cm	-5.7±16.9 cm	7.7±7.5 cm
差值 STD 之平均值	10.7 cm	1.7 cm	1.0 cm
符合特等測深比例 (平均值)	13%~100% (90.9%)	0%~100% (93.6%)	100% (100%)
符合 1a 測深比例(平 均值)	100% (100%)	100% (100%)	100% (100%)

表 18 利用垂直基準轉換模式將船測橢球高、正高和 LAT 等基準水深資料轉換至 ISLW 基準，並與方域科提供水深成果計算差值平均值及其標準偏差

基準間轉換	橢球高轉換至 ISLW	正高轉換至 ISLW	LAT 轉換至 ISLW
差值平均值範圍	-41.8~4.7 cm	-53.2~37.0 cm	11.3~45.8 cm
差值平均值之平均值	-21.4±10.3 cm	6.1±18.1 cm	18.8±8.9 cm
差值 STD 之平均值	9.8 cm	3.0 cm	1.8 cm
符合特等測深比例 (平均值)	9%~100% (88.3%)	0%~100% (91.8%)	27%~100% (96.5%)
符合 1a 測深比例(平 均值)	85%~100% (99.4%)	75%~100% (98.9%)	72%~100% (98.7%)

表 19 利用垂直基準轉換模式將船測橢球高、正高和 ISLW 等基準水深資料轉換至 LAT 基準，並與方域科提供水深成果計算差值平均值及其標準偏差

基準間轉換	橢球高轉換至 LAT	正高轉換至 LAT	ISLW 轉換至 LAT
差值平均值範圍	-56.1~-12.9 cm	-25.5~4.5 cm	-28.5~11.3 cm
差值平均值之平均值	-35.2±11.6 cm	-7.8±7.4 cm	-18.0±6.9 cm
差值 STD 之平均值	13.8 cm	1.2 cm	0.4 cm
符合特等測深比例 (平均值)	2%~100% (69.3%)	99%~100% (99.9%)	31%~100% (96.6%)
符合 1a 測深比例(平 均值)	33%~100% (95.3%)	100% (100%)	100% (100%)

四、結論

本研究已完成垂直基準轉換模式建置，包含建置MOI.18v1潮位模式，並利用MOI.18v1模式計算之臺灣海域無縫各潮位面(LAT、HAT、MHW、MLW及ISLW)、MSS 2012和新版Geoid網格模型，提供使用者進行垂直基準間轉換，並產出附加產品，包含33個潮位站之各基準面關係、潮位模式加值應用工具(可輸出相對於Geoid、ISLW、LAT以及WGS84橢球等基準之潮位資料)和潮位分區圖。此外，本研究評估MOI.18v1潮位模式、Geoid、MSS以及MOI.18v1產製各潮位面網格模型之精度，並利用潮位站及船測資料對潮位模式加值應用工具及垂直基準轉換模式進行測試與整體精度評估。以下說明各基準面、加值應用工具以及垂直基準轉換模式之精度評估成果:

- (1). MOI.18v1潮位模式與國內34個潮位站資料進行潮高時序比較，各潮位站差值RMSE皆小於0.15 m，RMSE平均值為0.083 m，精度較其他潮位模式佳(TPX08、NAO.99b、NAO.99Jb、DTU10)。此外，MOI.18v1潮位模式在離岸海域亦與測高資料相比較以評估精度，差值RMSE介於13.2~15.8 cm之間。
- (2). 完成109年大地起伏重力法與混合法大地起伏模型更新，成果顯示實測資料與109年大地起伏成果相近。混合法大地起伏模型與檢核點進行比較，差值最大值5.70公分、最小值-22.70公分、平均值-0.85公分、標準差3.36公分; MSS 2012與潮位站計算之MSL成果相比較，差值平均值為0.004公尺、均方根為0.028公尺、標準差為0.028公尺，最大值為0.108公尺，最小值為-0.042公尺。
- (3). MOI.18v1潮位模式與潮位站分別計算之各潮位面進行比較。同化前之差異平均值約-0.022~-0.042公尺、標準差約0.03~0.078公尺。同化後之各潮位站差值皆低於6公分，顯示同化後成功提高模型精度。
- (4). 利用加值應用工具產製之潮位資料與33個潮位站資料(1993-2020)相比較，由成果可知，潮位模式與潮位站差值標準偏差為13.6 cm，符合MOI.18v1潮位模式之精度(~10 cm)[內政部，2020b]。而於正高、ISLW、LAT與橢球高等基準之差值平均值及其標準偏差為 0.020 ± 0.068 m、 -0.003 ± 0.039 m與 0.003 ± 0.045 m與0.017

±0.048 m。

- (5). 利用加值應用工具進行潮位修正之水深資料與方域科提供之資料相比較。橢球高、ISLW、LAT與正高等基準的差值平均值之平均及其標準偏差分別為0.14±0.14 m (橢球高)、-0.05±0.15 m (ISLW)、-0.20±0.14 m (LAT) 與-0.08±0.16 m (正高)。各基準水深值差值符合特等測深與1a測深平均比例皆大於85.4%與99.8%。
- (6). 利用垂直基準轉換界面工具將水深資料基準轉換至橢球高、ISLW、LAT和正高等，並與方域科提供之成果相比，各海域差值平均值之平均值範圍為-35.2~34.7 cm，標準偏差平均範圍約為6.9 cm~16.9 cm。各海域在基準間轉換差值最大值為56.1 cm。符合特等測深與1a測深平均比例皆大於66.4%與95.3%。利用垂直基準轉換模式對於水深資料進行基準轉換成果並不佳，其誤差並非全部來自於垂直基準轉換模式，因為用來測試之船測水深資料亦包含誤差，例如傳統潮位修正僅採用潮位站處水深基準、船與潮位站海水面變化不同、不同潮位站或相同潮位站但不同時間提供之水深基準不一致等造成水深資料品質不一。另外，當GPS觀測精度較差時，造成GPS tide改正不理想，導致水深橢球高資料品質較差(表15)。因此，未來如果有更好品質的水深資料，將可再重新進行垂直基準轉換模式精度評估。

參考文獻

- 內政部，2018，106年度潮位模式精進工作案報告。
- 內政部，2020a，我國垂直基準轉換模式精進工作案第四期成果報告。
- 內政部，2020b，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，2020c，水深測量作業規範。
- 內政部國土測繪中心，2018，106年度高程基準檢測工作報告。
- 內政部國土測繪中心，2021，109年度高程基準檢測工作報告。
- 許宏銳，2014，《最佳化重力資料處理及整合以建構公分級台灣大地起伏模式》，國立交通大學土木工程學系博士論文。
- 薛憲文、于嘉順、黃明哲、王韋樺、江朕榮，2008，港灣及海岸之潮汐特性對水深測量影響之研究，《第30屆海洋工程研討會論文集》，第757-761頁。
- Blumberg, A.F., and G.L. Mellor, 1987, A Description of A Three-Dimensional Coastal Ocean Circulation Model, in Three-Dimensional Coastal Ocean Models, Vol. 4, edited by N. Heaps, pp. 208, American Geophysical Union, Washington, D.C..
- IHO, 2020, IHO Standards for Hydrographic Surveys, 6th edition, March 2020, https://iho.int/uploads/user/pubs/Drafts/S-44_Edition_6.0.0-Final.pdf
- 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, doi:10.3390/w9070480.
- Parker, B, 2005, Tides, In *Encyclopedia of Coastal Science*, Schwartz, M.L., Ed., Springer:

Dordrecht, The Netherlands, 987 - 996.

POTMSL, 2017, Australian Tides Manual Special Publication No. 9 Version 5.0.

水深測量之潮位修正方法

李建鋒^{1*} 王成機²

論文收件日期：110.10.18

論文修改日期：110.11.19

論文接受日期：110.11.29

摘要

臺灣周邊海域受到潮汐影響，海平面會有周期性高低起伏的現象，在以海平面為參考之測深作業中，由於水深測量的船體是在浮動海平面上測量海床地形，即使是在相同「位置」，於不同「時間」所測量到的海平面深度也會有不同的情形，所以需要將浮動的海平面深度，藉由隨「時間」紀錄的潮位資料，改算至固定的基準面深度，此處理程序稱為「潮位修正」。藉由潮位模式分析，劃分成不同的等潮區，以協助了解測區與潮位站之間的差異，並做為選用潮位修正方法之參考依據。潮位修正可以就是否使用觀測潮位資料，分為兩大類：同步驗潮、非同步驗潮，本文將簡要說明各方法之處理步驟、適用情況與特徵。以橢球面為參考之測深作業中，衛星定位技術的橢球高成果還需要透過垂直基準轉換模型，才能跟不同基準的資料進行整合或差異分析。

關鍵詞：水深測量、潮位修正、潮位模式

^{1*} 科員，內政部地政司，TEL：(02)27565471#24，E-mail：9217moi@gmail.com

² 司長，內政部地政司

Tide Correction methods for Bathymetry Survey

Chien-Feng Lee^{1*}, Cheng-Gi Wang²

Abstract

In the waters surrounding Taiwan, the sea level rises and falls periodically due to tides. The bathymetric survey uses vessels to measure the depth of underwater terrain relative to sea level. Even at the same location, the depth measured at different times will not be the same. Therefore, it is necessary to use a tide table to convert the depth over time into a sounding based on a vertical datum. It is called tide correction. Through tide model analysis, it could be divided into number of tide zones to help understand the difference between the survey area and the tide gauge station, as a basis for selecting tide correction methods. According to the needs of observed tide table, tide correction methods are divided into two classes: simultaneous tidal observations and non-simultaneous tidal observations. This article will briefly explain the steps of tide correction, applicable situations and characteristics of each method. The ellipsoid height result of GNSS technology also needs to perform with a vertical datum transformation model in order to integrate or difference analyze with the data of different datum.

Keywords: Bathymetric Survey, Tide Correction, Tide Model

^{1*} Officer, Dept. of Land Administration, Ministry of the Interior, TEL : +886-2-27565471#24, E-mail : 9217moi@gmail.com

² Director, Dept. of Land Administration, Ministry of the Interior

一、前言

臺灣周邊海域受到潮汐影響，海平面會有周期性高低起伏的現象，由於水深測量是測量海平面下的地形或特徵物之深度，因此常使用測量船搭配回音式聲納測深系統進行測量。在以海平面為參考之測深作業中，船體是在浮動的海平面上測量海床地形，即使是在相同「位置」，於不同「時間」所測量到的海平面深度也會有不同的情形，如圖 1，所以需要將浮動的海平面深度(藍色箭頭長度會隨著時間變化)，藉由隨「時間」紀錄的潮位資料，改算至固定的基準面深度(紅色箭頭)，在資料處理軟體中，此程序稱為「潮位修正」。

透過自記式潮位儀(短期、位置非固定且通常沒有靜水池或靜水井)或潮位站(長期、位置固定且具有靜水池或靜水井)可以取得觀測潮位資料，而臺灣周邊固定且長期觀測的潮位站皆設置在陸地沿岸，並大多數位於港區範圍內，大面積海域基本上欠缺觀測潮位資料，所以需要以沿岸觀測潮位資料配合海潮模式的方式，分析臺灣周邊海域的潮汐傳播特性，並依區域選用適合的潮位修正方法，修正相鄰測線因施測時間不同所產生的潮位高差，以得到正常海床地形起伏之深度成果。

本文將說明臺灣周邊海域的潮汐傳播特性，並依性質將海域劃分成不同的等潮時區、等潮差區或等潮區；再依是否需要觀測潮位資料，將潮位修正方法分為兩大類：同步驗潮、非同步驗潮，並簡要說明各方法之處理步驟、適用情況與特徵。

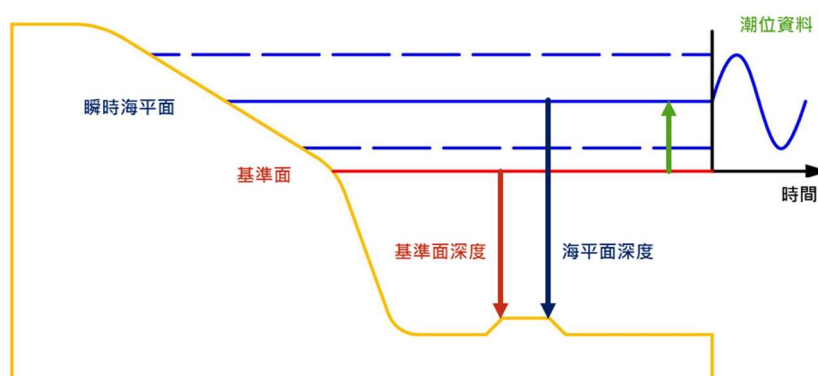


圖 1. 深度測量示意圖

二、潮汐傳播

地球受到星體(主要是月亮與太陽等)引潮力的作用，會造成自轉軸的指向在歲差過程中呈現輕微不規則的運動，其中較長周期是章動所引起，周期為 18.6 年，因此，會以超過章動周期之觀測潮位資料進行潮位模式分析，臺灣潮位站分布與潮位資料時間起訖如圖 2，目前仍約有半數潮位資料未滿 19 年。潮位站隨時間的紀錄，除了包含星體引潮力的作用，還包含當時的氣象(氣壓、降雨、颱風等)、地質活動(地震、海嘯等)與人為因素(設置或維護失誤、意外碰撞)的影響，所以觀測潮位資料經基準修正、氣壓修正後，將潮位資料視為分潮(基本波)疊加的結果，藉由調和分析(Harmonic analysis)將基於平均海平面(Mean Sea Level)的分潮一一分離出來後，再

選用主要的分潮重新進行疊加合成調和潮位資料，以移除氣象與地質活動的影響，並可作為預報使用(郭重言等，2019)。

基於衛星測高資料之全球潮位模式作為臺灣周邊海域之開口邊界值，透過海洋動力數值模型(Princeton Ocean Model (POM) [Blumberg and Mellor, 1987])、全球水深地形模型、實測水深地形資料、與上述陸地沿岸潮位站之調和潮位資料進行同化，以獲得臺灣周邊海域潮汐傳播之潮時推移與潮差變化情形(林勝豐等，2018)，並依此劃分潮時與潮差成若干小區域，藉由比對測區與鄰近潮位站之相對關係，做為測區選用潮位修正方法之參考。

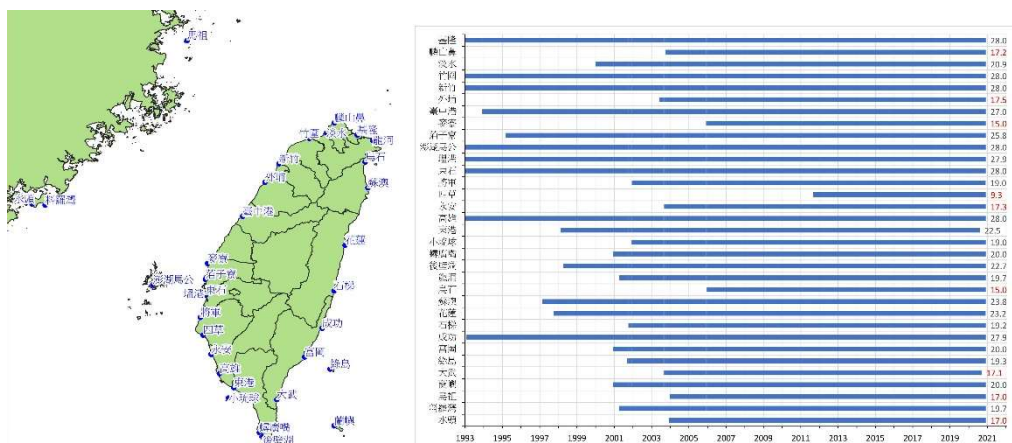


圖 2. 潮位站分布與潮位資料時間起訖

(一) 等潮時

等潮時(cotidal hour)，月球通過基準子午線(常用格林威治子午線)中天時，與某地點位發生高潮或低潮之時間間隔，依各地點時間間隔之趨勢，可以了解潮汐傳播推移之情形。等潮時線(cotidal line)，同一線上，漲潮或退潮的時間會相同。等潮時線愈密之區域，潮汐傳播速度愈慢，等潮時線愈疏之區域，潮汐傳播速度愈快。等潮時區(cotidal zone)相鄰兩條等潮時線之間的區域，大致會有相同的漲潮或退潮時間，如圖 3。

臺灣東部海域：三貂角至鵝鑾鼻，等潮時線分布較疏，潮汐基本是同時漲潮或退潮之情形，也因如此，外海曲折的線形可以用平滑化處理；東北海域：三貂角以逆時針方向至富貴角，等潮時線分布較密，潮汐傳播速度緩慢，類似於駐波形式；西部海域北段：富貴角以逆時針方向至雲林，等潮時線分布愈疏，潮汐傳播速度愈快；墾丁南灣海域：鵝鑾鼻以順時針方向至貓鼻頭，等潮時線分布較密，潮汐傳播速度緩慢，類似於駐波形式；屏東沿岸海域：貓鼻頭以順時針方向至高雄，中段等潮時線分布稍微變疏，潮汐傳播速度有短暫加快之情形；西部海域南段：高雄以順時針方向至嘉義，潮時線分布較密，潮汐傳播速度緩慢，但非呈現駐波形式；澎湖西部海域：由東向西，等潮時線分布略成等距，潮汐傳播略成等速行進波；臺灣灘與南海海盆交界處，潮時線分布因地形變化影響呈現駐波形式，可能需要再研究如何簡化等潮時之密度。

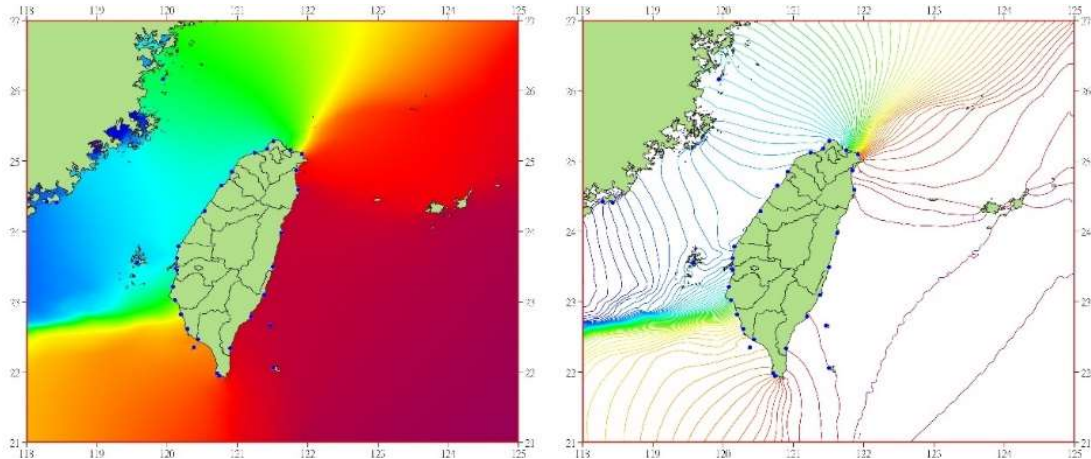


圖 3. 等潮時

(二) 等潮差

等潮差(co-range)，各地點高潮與低潮的落差之趨勢，可以了解潮汐傳播所造成振幅變化之情形。等潮差線(co-range line)，同一線上，高潮與低潮的落差會相同。等潮差線愈密之區域，落差變化程度愈大，等潮差線愈疏之區域，落差變化程度愈小。等潮差區(co-range zone)：相鄰兩條等潮差線之間的區域，大致會有相同的高潮與低潮落差，如圖 4。

臺灣西南海域：高雄至墾丁，等潮差線分布較疏，因南海海盆深度較深，潮差相對最小；臺灣東北與東部海域：富貴角至墾丁，等潮差線分布較疏，因深度較南海海盆淺，潮差次小；西部海域：北段從富貴角以逆時針方向至臺中，南段從臺南以順時針方向至臺中，等潮差線分布較密，使臺灣陸地沿海在臺中有最大的潮差。

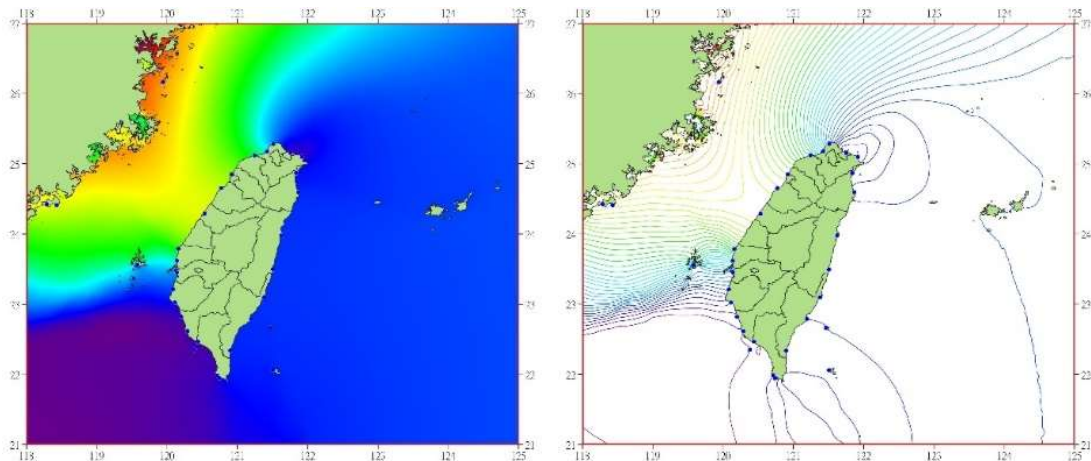


圖 4. 等潮差

(三) 等潮區

等潮區(tide zone)，相鄰兩條等潮時線與等潮差線之間的區域，大致會有相同的漲潮或退潮時間，與相同的高潮與低潮落差，如圖 5。

藉由測區所涵蓋的等潮區數量，可以協助了解測區內潮時與潮差變化之情形，於施測前，進一步劃分較小的施測區域於同一等潮區內，避免測線過長落入數個不

同的等潮區，增加潮位修正的困難度；等潮區亦可以協助了解測區與鄰近潮位站之間的潮時與潮差變化之情形，或者評估是否需另外設置合適的潮位儀，以及選用適合的潮位修正方法，以降低資料處理與檢查的成本。

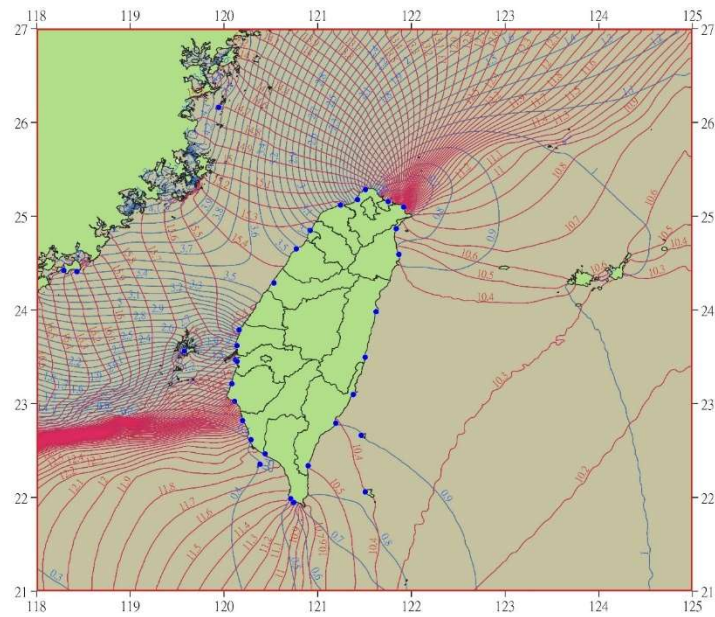


圖 5. 等潮區(紅線：等潮時線、藍線：等潮差線)

三、潮位修正—同步驗潮

傳統潮位修正是利用隨時間紀錄的觀測潮位資料來進行，於水庫或湖泊測量時，由於進出水量穩定且水面平靜，以人工紀錄水位尺讀數的方式，通常不會有太大的影響，但於海域測量時，人工紀錄不管是精度或取樣間隔都明顯不足，並含有人為觀測誤差的不確定性，因此觀測潮位資料主要是透過自記式潮位儀或潮位站取得。

固定且長期觀測的公設潮位站來源包括：中央氣象局、水利署、港灣技術研究中心等，除了潮位站之間分布不均之外，在資料取用上可能會有以下的問題：資料無法取得、取樣間隔不足或斷訊無紀錄；測區距離潮位站有相當一段距離；鄰近潮位站資料與測區潮位之潮時或潮差不一致；地表垂直變動造成潮位站基準有問題或未知等，因此，有時需要自行架設自記式潮位儀，並由附近臺灣高程基準 TWVD2001 水準點引測做為起算基準。以下三種方法皆需使用觀測潮位資料，且垂直基準需已知且相同，才能正確的進行潮位修正，而地形成果之垂直基準視為與觀測潮位資料(來源潮位儀或潮位站)相同，不能完全代表測區所在位置。

(一) 單潮位修正

此方法適用情形為測區位在同一等潮區、港區、湖泊與水庫內，且鄰近此區域內之單一潮位站，該潮位站之觀測潮位資料，如圖 6，即可反應此區域內各時間點之潮位變化，但此方法無法處理測區與潮位站有潮時或潮差差異之情形。

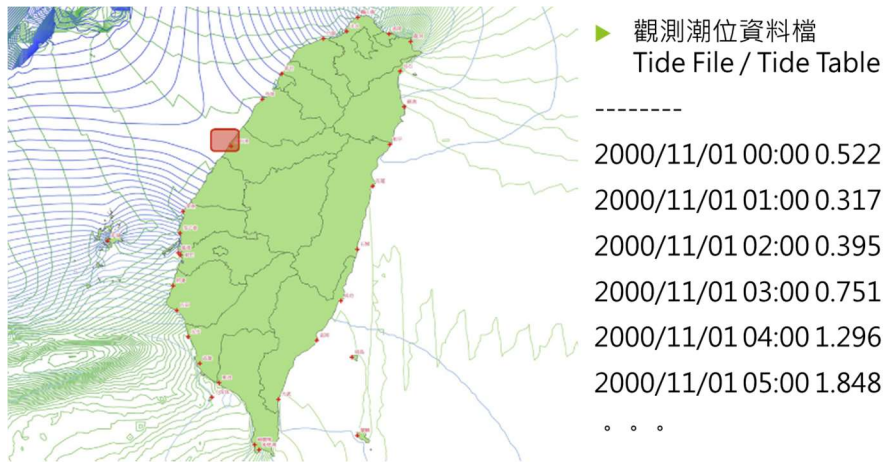


圖 6. 單潮位修正示意圖

(二) 雙潮位修正

此方法適用情形為測區位在相鄰等潮差區之內，沒有跨等潮時區，且介於兩個潮位站之間。由於潮位站之間漲潮或退潮的時間大致相同，僅有潮差的變化，因此，測點之潮位值為分別取兩觀測潮位資料於該測點測量時間的潮位值，以距離反比權重法 IDW 計算而得；相同測量時間，不同位置測點之潮位值會有阿波羅尼奧斯圓 (Circles of Apollonius) 的特徵，如圖 7。此方法無法處理跨等潮時區的變化，且每一測點，除了需先比對兩觀測潮位資料於測量時間的潮位值，還要再計算與兩潮位站的距離反比權重，測點數愈多，計算負擔愈大愈耗時。

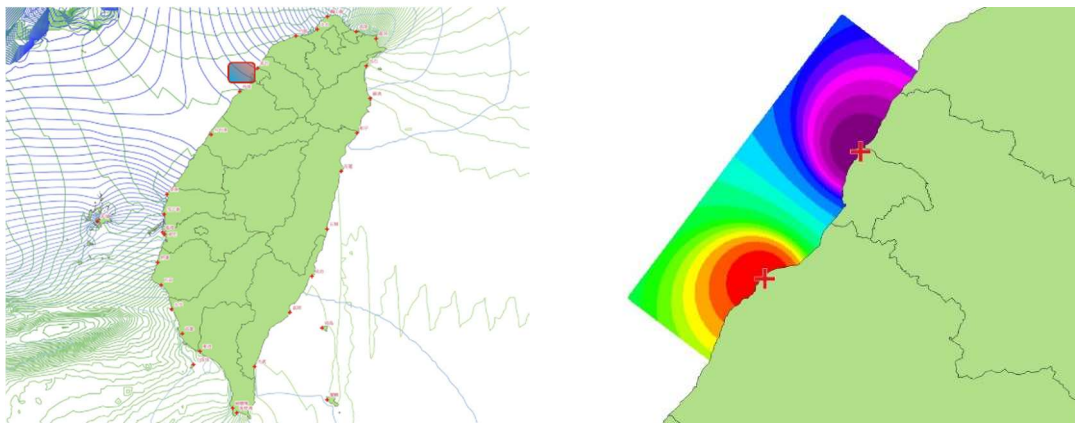


圖 7. 雙潮位修正示意圖

(三) 等潮區修正

此方法適用情形為測區跨等潮時區或跨多個等潮區。需先定義每個等潮區空間範圍、對應的潮位站的潮時偏移量、振幅縮放乘數(權重)、潮差偏移量、位置等，如圖 8，每一等潮區最多參考三個潮位站(水深資料處理軟體之限制)，由測點落在的等潮區，以及上述的參數，取用對應的觀測潮位資料進行計算潮位值進行修正(薛憲文等，2019)。此方法如果等潮區切分的愈粗，成果愈易出現階梯狀落差，切分的愈細，計算負擔愈大愈耗時。

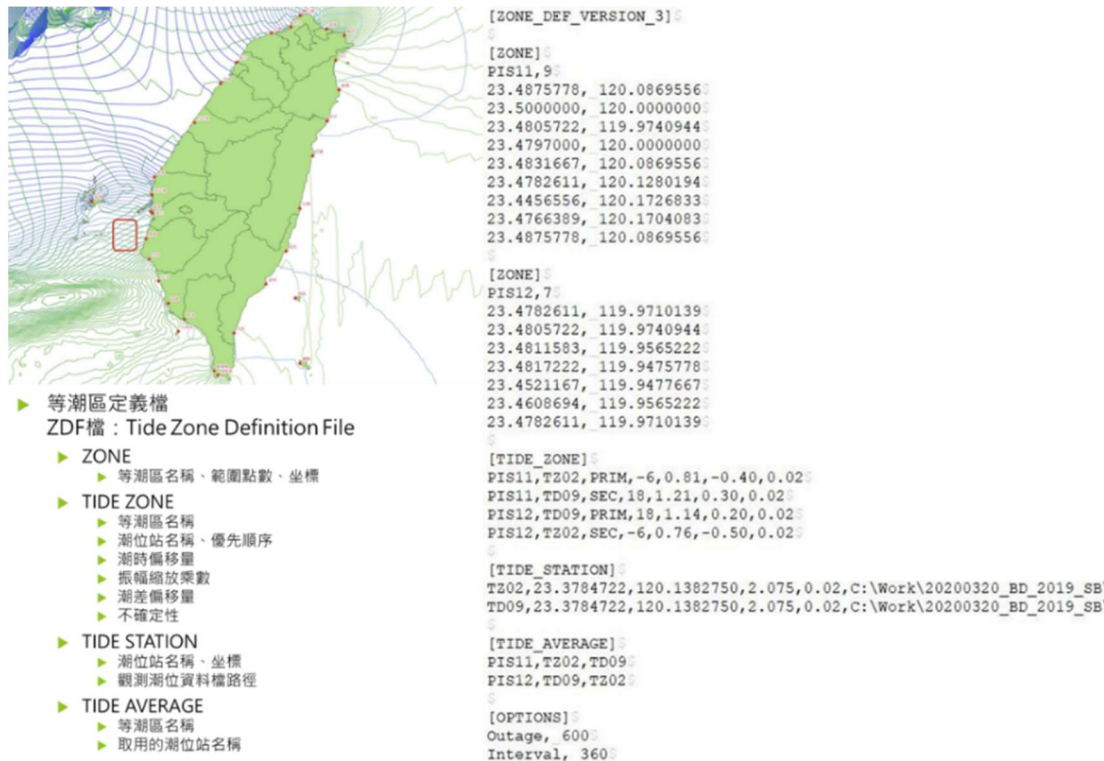


圖 8. 等潮區修正示意圖

四、潮位修正—非同步驗潮

相較於傳統潮位修正需要潮位站的觀測潮位資料，近期亦發展出於測量時，不需要同步觀測潮位資料的修正方式，尤其是離岸測量且距離潮位站有相當距離之測區，也因為非使用觀測潮位資料進行修正，成果基準也非臺灣高程基準 TWVD2001，後續需要經過垂直基準轉換，才能與不同垂直基準之成果整合或差異分析。

(一) 潮位模式修正

將臺灣周邊海域劃分成小網格，利用全球水深地形模型、實測水深地形資料、潮汐傳播動量模型，並與潮位站觀測潮位資料進行同化，在反向回饋離岸較遠的網格，使每一網格都有其對應的調和潮位資料(包含各分潮的時序資料)，藉由測量航跡的時間與位置，調取相對應網格的調和潮位值，依時間整合成一潮位資料檔，以此進行潮位修正，如圖 9(類似單潮位修正，林勝豐等，2018)，也因為是基於調和潮位資料，其成果基準為當地平均海平面，亦無法反應測量當時的氣象與地質活動(暴風雨、鋒面、強風、地震或陸坡崩塌所造成的長浪、湧浪)所造成的高差影響。

- ▶ 各網格有其對應的調和潮位資料。

流程：

- ▶ 1. 輸入航跡資料檔 T_i, X_i, Y_i
- ▶ 2. 以航跡位置 X_i, Y_i 定位潮位模式的網格點 $Grid(j)$
- ▶ 3. 取 $Grid(j)$ 的調和潮位 $Tide(j)$
- ▶ 4. 以航跡時間 T_i 取調和潮位值 $Tide(j)(T_i)$
- ▶ 5. 隨時間整合的潮位資料檔 $T_i, Tide(j)(T_i)$

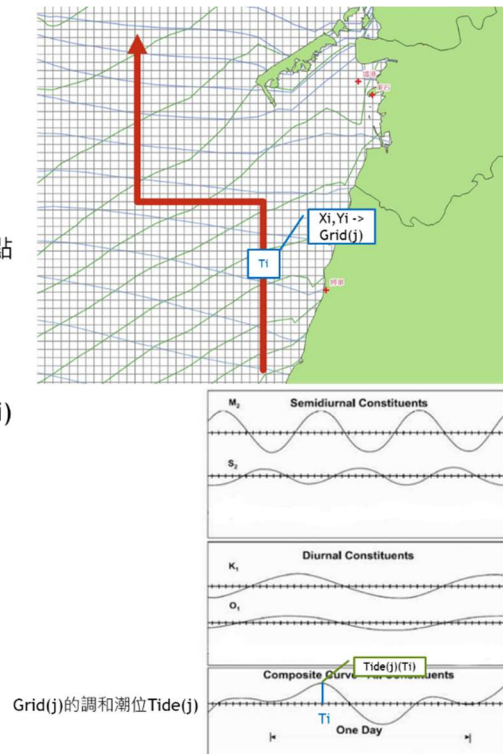


圖 9. 潮位模式修正示意圖

潮位模式修正的特點：

- 沿著航跡，可以依時間順序取得所在網格的潮位模式值。
- 同一網格，可以取得時間區段內的調和潮位資料。
- 同一時間，可以取得需求網格內的潮位模式值。
- 不受潮位站有無與數量的限制。
- 不受單潮位、雙潮位、等潮區修正方法的限制。
- 無法反應測量當時的氣象與地質活動所造成的高差影響。

(二) 衛星定位潮位修正

衛星定位潮位(GNSS Tide)，基於衛星定位之天線盤所紀錄的橢球高，並使用船隻姿態與起伏(Heave)之紀錄，依儀器設置參數，將天線盤橢球高改算至吃水線(海平面)位置，並隨時間紀錄吃水線(海平面)的橢球高變化，如圖 10，並以此資料進行潮位修正(類似單潮位修正)。另外，大地型衛星接收儀之坐標系統通常為地心地固(Earth Center Earth fixed, ECEF)坐標系統之 XYZ 值，需後處理化算成地理坐標系統(Geographic Coordinate System)，以取得天線盤經緯度與橢球高 $\lambda \ \varphi \ h$ 值。(薛憲文等，2015)

► GPS Tide 向上為正=

GPS Height 天線盤橢球高，向上為正

- Datum Height 深度基準面橢球高，向上為正

+ Antenna Offset 天線盤安裝位置，向下為正

- Heave 姿態起伏值，向上為正

+ Dynamic Draft 動態吃水，向下為正

- Waterline Offset 吃水線位置，向下為正

+ Height Offset

► 當Datum Height與Height Offset為0時，GPS Tide為橢球高，向上為正。

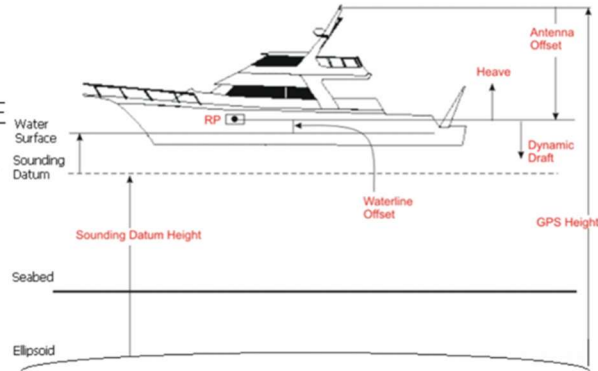


圖 10. 衛星定位潮位修正示意圖

由於此修正方法需要有較好的衛星定位高度精度，因此有以下幾種提高精度的方式：

- 即時動態定位(Real Time Kinematic, RTK)：需要基站與無線電收發設備。
- 後處理動態定位(Post-Processed Kinematic, PPK)：需要基站觀測資料進行後處理(林承毅等，2019)。
- 後處理精密單點定位(Post-Processed Precise Point Positioning, PPP)：需要衛星精密星曆與精密衛星時鐘差等進行後處理(林承毅等，2019)。
- 近即時精密單點定位(near real-time Precise Point Positioning, PPP)：需要購買精密衛星軌道與精密衛星時鐘差訊號。
- 廣域差分定位(Wide Area DGNSS, WADGNSS)：需要購買衛星差分訊號。

五、結 論

臺灣周邊海域藉由潮位模式成果，依潮汐傳播快慢與潮差變化程度，有潮型多變的特徵，而固定且長期觀測的公設潮位站多位於港區之內，實際上會受港形(包括港嘴與港內設施)及港內位外地形差異之影響，即使暫不討論港內觀測潮位資料是否足以反應港外潮汐變化程度，大面積海域仍欠缺觀測潮位資料，尤以西部海域民生與經濟活動熱絡、離岸風電積極建設，似愈來愈有必要考慮如何取得海域觀測潮位資料，以反應真實的潮位變化情形，於離岸風電基座架設潮位儀，布放 GNSS/IMU 浮標或海底壓力儀(Ocean Bottom Pressure, OBP)等，都是技術上可行之方法。

兩大類的潮位修正方法，最大的區別在於有無使用潮位站之觀測潮位資料。傳統使用觀測潮位資料的修正方法，觀測潮位資料必須要能反應真實的潮位變化情形，且修正過後的成果基準與觀測潮位資料一致，並以此作為測量前提；實際執行上仍會面臨以下情況：需事先評估測區與潮位站的潮汐特性(潮時與潮差)差異來做測量規劃，另外架設潮位儀以取得觀測潮位資料所增加的人力與設備成本，又以距離潮位站有相當距離之測區，除了不同測線之地形是否能依觀測潮位資料合理銜接，需回到陸地上進行資料處理後才能夠知道之外，測量成果之垂直基準是否與觀測潮位資料一致就有相當的不確定性，當不同時期重複測量相同區域之成果出現差異，究

竟是地形變化所造成的，還是基準不一致所造成的，常常無法合理解釋。

國際上現代化測量的發展趨勢，是先藉由高精度的全星系衛星定位技術(GNSS)，取得基於參考橢球體之幾何測量成果(橢球高)，再透過垂直基準轉換模式，轉換至不同定義的基準面上，如臺灣高程基準 TWVD2001 之正高(大地水準面，物理定義之基準)，平均海平面(衛星測高或潮位站長期觀測資料，統計學定義之基準)，天文潮位面(Astronomical Tide，星體引潮力之現象，基於調和潮位模式之基準)，海圖基準(Chart datum，基於航行安全所訂定之基準)(史天元，2017)。

目前的測深技術，正由「以海水面為參考」改變為「以橢球面為參考」之進程中。以海水面為參考之測深作業，使用潮位模式做潮位修正，像是介於傳統與現代化測深間的過渡期技術，需要沿測線之調和潮位資料檔，卻不需要潮位站，同時可以使用測區位置之基準，而非潮位站之基準。以橢球面為參考之測深作業，是符合高程現代化測量的發展趨勢，但為了有較好的高度精度成果，除了需要姿態感測器(IMU)、湧浪補償器、動態吃水感測器(Dynamic Draft)、聲速剖面儀(SVP)、測深儀等，及相對應的資料收集與處理軟體，還要具有高精度的衛星定位設備與服務，合計是為數不少的建置成本。

就算跟上國際上現代化測量的發展趨勢，取得基於參考橢球體之幾何測量成果(橢球高)，臺灣周邊海域地形成果，為了與陸地地形銜接或為了符合航行安全等需求，都需要一致的垂直基準轉換模式(黃金維等，2019)，才能將不同時期、不同區域、不同技術之測量成果，基於相同基準進行銜接或差異比較。也因如此，才能加速整合官產學研不同機關單位之測量成果，完善三維國家底圖，做為確保國家安全及利益、保護海洋生態環境與資源、海洋產業永續經營與發展、海洋研究與科學育才等，相關事務與決策制定之基礎三維空間參考資料。

參考文獻

- 黃金維等，2019，《我國垂直基準轉換模式精進工作案成果報告》，內政部。
- 郭重言等，2019，《我國近岸平均海水面與海潮模式精進工作案成果報告》，內政部。
- 林承毅、楊枝安、蔡季欣，2019，《精進水深測量作業定位方法之研究-以精密單點定位為例》，內政部國土測繪中心。
- 薛憲文、吳泓毅、王韋樺、許明蒨、蔡季欣、林承毅、康寧凱，2019，以精密單點定位探討台灣潮汐模式精度，《第 39 屆海洋工程研討會論文集》，國立成功大學，395-399 頁。
- 林勝豐等，2018，《潮位模式精進工作案成果報告》，內政部。
- 史天元，2017，臺灣周邊海域深度基準探討，《地籍測量》，第 36 卷，第 4 期，1-14 頁。
- 薛憲文、林佳緯，2015，以橢球高進行水深測量之探討，《第 37 屆海洋工程研討會論文集》，國立中興大學，529-534 頁。

我國電子航行圖測製發行流程

江繼元^{1*} 陳彥欷² 張淑淨³ 王成機⁴

論文收件日期：110.10.15

論文修改日期：110.11.19

論文接受日期：110.11.29

摘要

為善盡沿海國維護船舶航行安全之責任與義務，內政部於107年11月15日成立「臺灣電子航行圖中心」，專職負責電子航行圖之測製、發行、更新及維運，並於108年2月14日起正式透過由挪威國家測繪局運作的區域電子航行圖協調中心(PRIMAR)對國內外發行我國電子航行圖。臺灣電子航行圖中心依循國際海道測量組織(International Hydrographic Organization, IHO)訂定之國際規範，透過資料庫管理模式，系統性處理水深測量成果、整合各項圖資基礎資料，建立標準化電子航行圖製圖與檢核程序。本文將簡要說明我國電子航行圖基礎資料來源及其檢核評估原則、水深資料處理、圖徵物件編輯及圖資產品檢核等測製發行流程。截至110年10月25日止，我國總計已出版100幅電子航行圖，除持續提供圖資更新服務，後續將產製符合國際S-100系列最新標準電子航行圖及多元資料產品，推進下世代電子航行圖的發展。

關鍵詞：電子航行圖、臺灣電子航行圖中心、國際海道測量組織

關鍵詞：國際海道測量組織、電子航行圖、臺灣電子航行圖中心

^{1*} 科員，內政部地政司。

² 視察，內政部地政司。

³ 特聘教授，國立臺灣海洋大學通訊與導航工程學系。

⁴ 司長，內政部地政司。

*通訊作者，TEL：(02) 27565471#34，E-mail：moi1909@moi.gov.tw。

Procedures for Taiwan Electronic Navigational Charts

Chi-Yuan Chiang^{1*} Yan-Di Chen² Shwu-Jing Chang³ Cheng-Gi Wang⁴

Abstract

Taiwan ENC Center (TENCC), established by the Ministry of the Interior (MOI) on November 15th, 2018, is the authorized hydrographic office responsible for the production, publication and maintenance of Electronic Navigational Charts (ENCs). ENC data of MOI is formally distributed via the Regional ENC Coordination Center (RENC), PRIMAR, operated by the Norwegian Hydrographic Service. Following international standards, TENCC has established a database-based standard procedure to systematically process hydrographic survey data and integrate data from various sources. This article will briefly explain the procedure from source data collection and verification, bathymetry processing, feature encoding and compilation, to ENC product verification, etc. As of October 25 2021, TENCC has published 100 ENC cells and has been continuously providing prompt ENC updating services. The next focus will be the development of S-100 based data products including digital nautical publications to be used together with the next generation ENCs.

Keyword: Electronic Navigational Charts (ENC) , International Hydrographic Organization, Taiwan ENC Center

^{1*} Officer, Department of Land Administration, Ministry of the Interior

² Senior Specialist, Department of Land Administration, Ministry of the Interior

³ Distinguished Professor, Department of Communications, Navigation and Control Engineering. National Taiwan Ocean University

⁴ Director, Department of Land Administration, Ministry of the Interior

* Corresponding Author, TEL : +886-2-27565471#34 , E-mail : moi1909@moi.gov.tw ◦

一、前言

臺灣位處亞太航運樞紐，海上交通繁忙，且因夏季颱風與冬季東北季風盛行之影響，海氣象因素常成為海事事故之主要或間接原因。依據交通部航港局近來統計資料(交通部航港局，2020)顯示，我國海域每年有逾 200 件之海事事故發生，導致人員傷亡、船舶及其他財產的損失，甚至伴隨船舶載運物質、油料外洩造成汙染，衝擊海洋生態環境。其中，103 年 10 月，我國研究船海研五號於澎湖水域觸礁沉沒事件，其海事評議報告指出：船上裝載電子圖資未經認(驗)證，亦未使用合宜比例尺之紙海圖輔助航行判釋，成為災難主要肇因之一。

海上人命安全國際公約(Safety of Life At Sea Convention, SOLAS)第五章即要求沿岸國海測服務責任包含應盡可能執行其國家水域海道測量，及發布有關安全航行所需之最新航海訊息例如：編製與發行海圖、助導航設施列表、航行指南及潮信表等航海刊物及其更新維護之航船布告，以符合海上安全航行需求，因此，若無官方產製發行、更新維護之電子圖資與航海刊物提供正確海域資訊，即便船舶搭載先進之航儀設備，亦無法發揮其減少人為判斷疏失、增進航行安全之功能。此外，SOLAS 第五章亦要求船舶攜帶其航程所需足夠的航海圖與航海刊物，且必須維持於最新。若船舶上搭載符合國際海事組織(International Maritime Organization, IMO)的「電子海圖顯示與資訊系統(Electronic Chart Display and Information System, ECDIS)設備性能標準之 ECDIS，且使用「電子航行圖(Electronic Navigational Chart, ENC)」者，則可視為符合此要求。另根據 ECDIS 設備性能標準的定義：「ENC 是內容結構與格式都符合 IHO 規範的資料庫，由政府授權海測主管機關或其他相關政府機構發行，供 ECDIS 使用」。「ECDIS 是一種導航資訊系統，此系統藉由顯示從系統電子航行圖(System ENC, SENC)篩選的資訊、從導航感測裝置取得的位置資訊、以及依需求顯示的其他航海相關資訊，來輔助航海人員執行航路計劃與航路監視」，可減輕航海人員工作負荷、降低人為疏失導致觸礁擱淺或碰撞之風險。

總括而言，其意涵如下：

- 唯有政府授權發行且符合 IHO 規範的資料產品才是 ENC
- 發行 ENC 必須同時提供更新機制，使其維持正確與最新狀態
- ECDIS 只有在使用各國政府授權出版，且資料結構、定義與格式符合 IHO S-57 國際標準 ENC 電子海圖產品規格的最新版電子航行圖資料庫時才能合法取代紙海圖用於航行，具有等同於紙質海圖的法律效力。

以往我國官方電子航行圖遲未對外發行，致行經我國周邊海域之船舶無相關圖資可供使用，或僅能使用中國大陸或英國等未經我國政府授權，而數化我國紙海圖所製作之電子航行圖。內政部以提供涵蓋我國管轄海域範圍最優質之電子航行圖及服務為要務，建構我國海域航行及管理資訊化之基礎，落實我國政府維護周邊海域航安之國際責任，進一步邁向智慧化航行的政策目標。復為因應我國官方版電子航行圖正式發行及更新維運等需求，內政部於 107 年 11 月 15 日成立「臺

灣電子航行圖中心」。主要任務包含制定我國電子航行圖發展策略及技術規範；製圖規劃、編製、品質控制與檢核管理；國內外圖資發行銷售及資料更新服務；國際技術交流，以及相關應用之開發與推廣。服務對象為來自全球各地行經我國管轄海域之船舶及海上航行作業人員，也協助各政府機關在海域事務管理、海難搜救、水下文資保存、海事工程、漁業捕撈及環境監測等面向之評估與應用，以及為民眾從事觀光遊憩、休閒漁業、海洋運動及遊艇駕駛等海域活動提供海域圖資加值應用之服務。

二、製圖資料來源蒐集與評估檢核

世界各國電子航行圖發展之初多以紙海圖為主要源資料 (Source)，而我國電子航行圖最初發展亦以海軍大氣海洋局刊行之紙海圖為基礎資料源，但以往的製圖檢核經驗發現紙海圖受限於更新頻率不足 (各圖幅 1~10 年不等)，其舊有資料不少因海域環境變化及海洋工程後已不適用，另有部分燈標或礙航物圖徵，其屬性資訊、來源、設置目的、現況狀態皆不明，部分圖徵資訊，例如位置坐標甚至存在與否，於不同比例尺紙海圖中亦有不一致情形，顯示僅使用紙海圖資訊尚不足以產製電子航行圖。

(一)、 製圖資料來源蒐集

常見的源資料可大致分類為：圖形/非圖形、官方/非官方，圖形類的源資料包括：測量報告/文件、紙海圖、地圖、影像等，非圖形的有文字報告、書籍、網站等；來自官方之源資料可能包括：船舶報告、航行指南、港口指南、潮汐表、燈表、無線電信號表、沉船列表、期刊、網路資料、當地航行資訊等；非官方資料的來源則包括：商業出版的指南、航海人員、網路群眾等。對於官方資料應辨識哪些是可靠的資料來源，官方資料的提供者可能是：國家測繪主管機關、國家航標主管機關、港埠、政府各部門。於非官方資料的使用，應評估其與現有資訊的一致性、正確性、可信度，以過濾篩選出可信賴的部分，引用時可加註適當的警語指出其可靠性之侷限。

電子航行圖攸關航行安全，其圖資內容涉及海域測繪、底質資訊、港埠管理、船舶運輸、航標設置與潮位資訊等不同資料，因此，臺灣電子航行圖除以海軍大氣海洋局刊行之紙海圖轉製為 S-57 格式檔案作為最初的基礎資料源外，輔以新版水道燈表、航行指南、航船布告等相關刊物之最新資訊，此外，持續蒐整公私部門及學術單位等不同來源之新測水深成果，產製更新我國電子航行圖。此外，更新維運 ENC 過程中，使用者回饋意見建議除逐步更新水深外，希望再補強部分區域的重要航行資訊如海床底質、潮流海流等，因此，進一步盤點電子航行圖所需重要航行資訊，包括海床底質、潮流海流、陸域導航圖資、港口設施、無線電服務及船舶交通服務等資訊製圖資料來源及其圖資應用目的，茲彙整列表如表 1。

表 1 製圖資料源列表

製圖資料	來源單位	圖資應用目的
紙圖	海軍大氣海洋局	電子航行圖最初的基礎源資料
水道燈表	海軍大氣海洋局	維護助導航設施圖徵物件（位置幾何及燈質屬性）
航行指南	海軍大氣海洋局	
航政主管機關之助導航設施資訊	交通部航港局	
臺灣通用電子地圖成果資料（含影像）	內政部 國土測繪中心	岸線的變化（自然岸線、人工岸線）及其細部類別之判釋、有助地文航海辨識定位之岸際地形地物
正射影像（空照圖或衛星影像）	公私部門各方資料	
Google 地圖與街景	私部門	
水深測量成果	公私部門及學術單位等不同來源	更新可航行水域水深資訊、礙航物偵測
港埠設施資訊	臺灣港務公司及其各地分公司	新建工程（例如突堤、碼頭等）圖說、港埠發展圖、港埠發展規劃書： 船渠、碼頭、泊位、繫纜樁、油電水、廢棄物回收、消防應變設施等
海床底質	水利署、臺灣港務公司、科技部海洋學門、地質調查所	海床底質主要用於輔助選擇下錨點
潮流海流	沿岸航路：海洋學門、海科中心 進出港航道：港務公司、港研中心 中央氣象局	表面流資訊可輔助沿岸航路、進出港航道之航行需求
船舶交通服務 (Vessel Traffic Service, VTS)	航港局 港公司 風場海事協調中心 引水人辦公室	VTS 區域、無線電報到點、雷達監控範圍、各組織聯絡區、航行風險集中區域、引水服務範圍與登輪處、船舶報告服務區、軍事演習區、航行相關限制區、法規相關限制區、航道或航路措施區域、警戒區、港埠服務區等

製圖資料		來源單位	圖資應用目的
無線電服務	全球海上遇險與安全系統 (Global Maritime Distress and Safety System, GMDSS)、航行警告電傳 (NAVTEX)、各頻段海事無線電通訊服務	航港局/中華電信海岸電台	通訊頻道資訊，以利船舶通訊聯繫與應變，可提升航運安全與效率的加值效益
	DGNSS 站、AIS 岸台基站	航港局、港公司	
	漁業電台	漁業署	
	領港通訊	引水人辦公室	
	海難通報、搜救通訊、岸際雷達	海巡署	
	氣象廣播與警報	中央氣象局	

(二)、 源資料檢核評估

源資料評估作業前，獲取其詮釋資訊係為重要關鍵，詮釋資訊主要是說明各源資料之範圍、品質、時間等資訊，倘若任何地理資料坐標系統、深度或高程垂直基準不明或存在不一致，則必須向原始提供單位取得與確認，初步確認無誤者，可先行按來源、時間、格式種類、應用目的予以分類，並依各源資料之詮釋資訊建置詮釋資料表，逐筆建檔以利後續過程中追蹤其檢核結果及修訂狀態。後續實際檢視源資料內容，檢核作業項目應包括：

- 是否為最新資料、成果檔案是否完整
- 確認坐標系統及垂直基準是否缺漏及正確性
- 不同來源資料是否一致，檢驗其有無異常情況（例如定位、垂直偏差）

三、水深資料處理流程

(一)、 測量詮釋資訊建置、品質分析與品質控制

向主管或測製機關(單位)申請取得水深資料後，描述其測量特性的詮釋資訊，通常散布於測量成果報告的文字敘述中，未免反覆確認相同的測量資訊，所以需要將詮釋資訊一一條列建置，並加以確認是否與成果內容相符，其測量詮釋資訊包含：主管或測製機關(單位)、測量日期起訖、平面坐標系統、垂直基準系統、測量技術與精度、系統性控制測量資訊等，接著再依水深資料內容本身進行品質分析與品質控制。

品質分析 (Quality Assurance, QA) 是指評估水深資料內容是否符合電子航行圖需求的一系列檢查項目、包含檢核空間與屬性資料之正確性與合理性、錯誤態樣的

原因與能否修正、評定水深資料等級等；品質控制（Quality Control, QC）係指為滿足電子航行圖需求與錯誤態樣修正，而採取的後續作為。

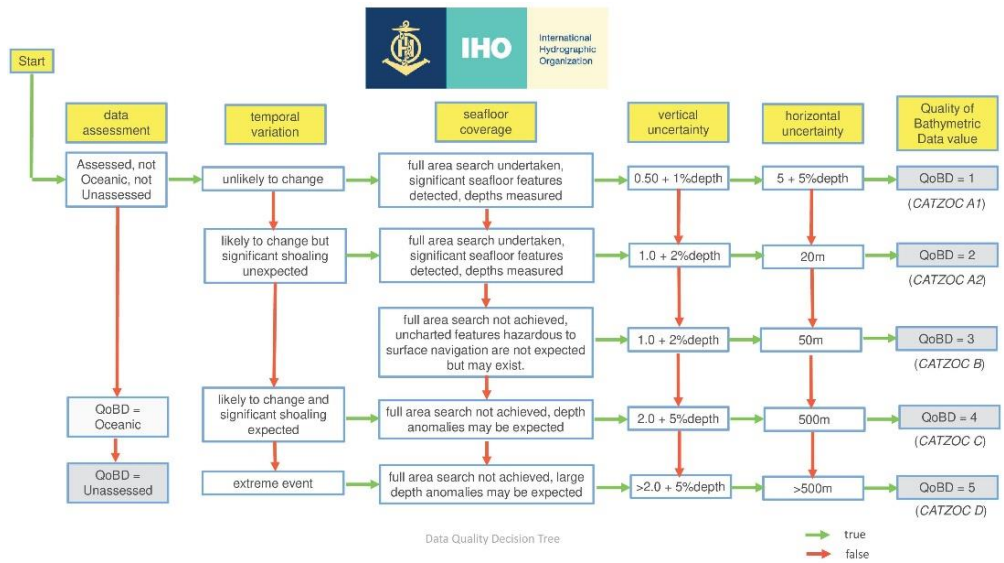


圖 1 IHO 評定水深資料等級流程圖

(二)、 水深資料處理

水深資料處理過程可區分為測量點雲（Point Cloud）、水深面模型（Bathymetric Surface）及水深物件（Bathymetric Objects）等三類資料層次，其中，測量點雲的成果最為重要，資料密度最高也最完整，為另外兩類資料層次之基礎，在品質管理的過程中，要盡可能的發現問題並進行處理，以符合製圖需求，最後仍有問題且有可能造成航安疑慮的測量點雲成果，寧可不用。

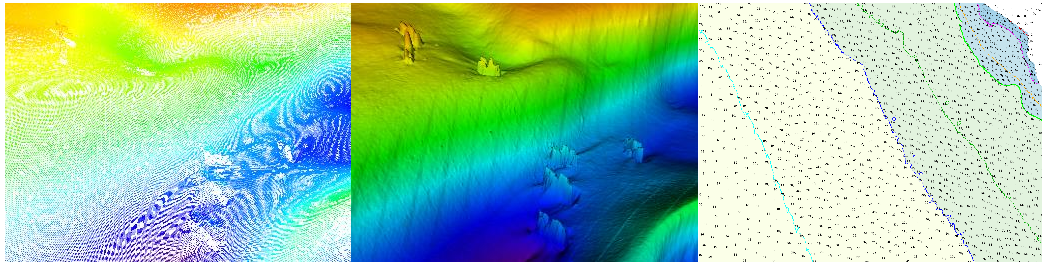


圖 2 水深資料層次示意圖，(左) 測量點雲、(中) 水深面模型、(右) 水深物件

1. 水深面模型

測量點雲會依照製圖比例尺，產製不同解析度之水深面模型，除了提供後續產製水深物件使用之外，還能輔助檢視測量點雲品質，以及對兩個重疊的資料成果，進行差異分析。另於產製小比例尺、低解析度之水深面模型時，會進一步進行概略化(Generalize)，所使用演算法如同在原資料面上滾動 1 顆球(3D double buffering)，當該球移動至坡度變化處(類似球接觸至海底地形)，則以球面取代該處原資料面(如圖 3)，使概略化資料面仍可保留原資料面淺水資訊，確保航行安全之前提下進行概略化。

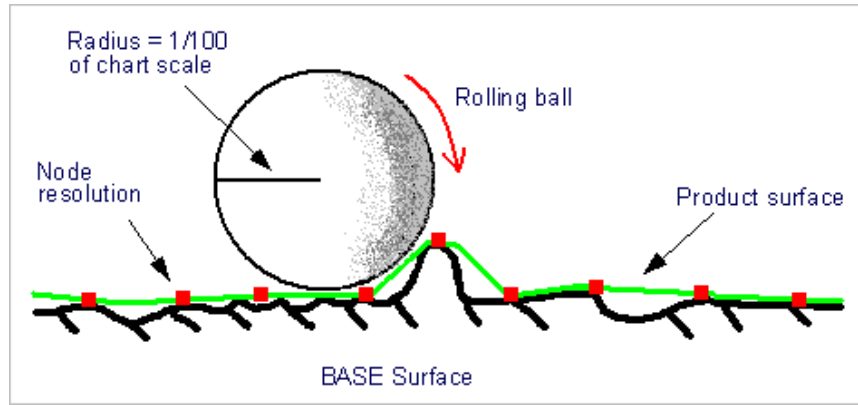


圖 3 Generalize Surface

透過計算每一網格內測量點雲的標準差，可以了解測量點雲離散程度，離散程度愈小的，測量精度愈高，反之愈差；計算每一網格間的坡度（Slope），除了可以了解網格間地形落差的程度，亦可協助判示有無系統性偏差；兩個重疊資料的差異分析，除了可以了解地形的侵淤變化情形，亦可協助判示有無系統性偏差。

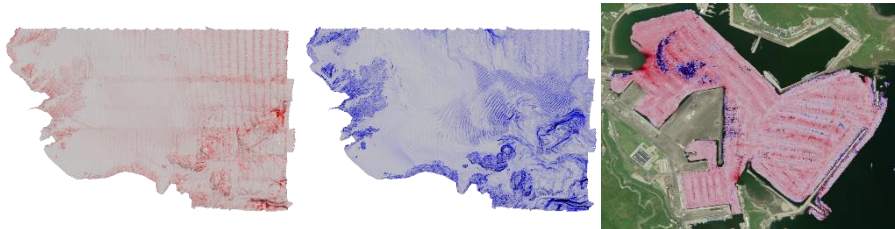


圖 4 標準差、坡度、差異分析

2. 水深物件

電子航行圖之應用目的係為幫助航海員船底餘裕水深（Under Keel Clearances）管理，判斷其駕駛船舶之可安全航行水域，因此所產製的水深物件：水深點、等深線與水深區、特徵物，有其相關之製圖原則需遵從，以產製符合 IHO 國際規範之水深物件。

(1). 水深點（Sounding）

標示於圖上的水深值，其位置為實際測量之測點坐標，其產製係從測量點雲選用適合的測點，深度值有效位數至小數點以下第一位，作為水深點標示於圖上，依據 IHO S-4 國際海圖規範標準（2021），必須符合「shoal-biased」原則：

- a. 在任 3 個鄰近水深點組成之三角形網格內，不存在任何實測水深值淺於此 3 個水深點之最淺水深。
- b. 在任 3 個鄰近水深點組成之三角形網格，其邊上不存在任何實測水深值淺於邊上 2 水深點之水深變化。

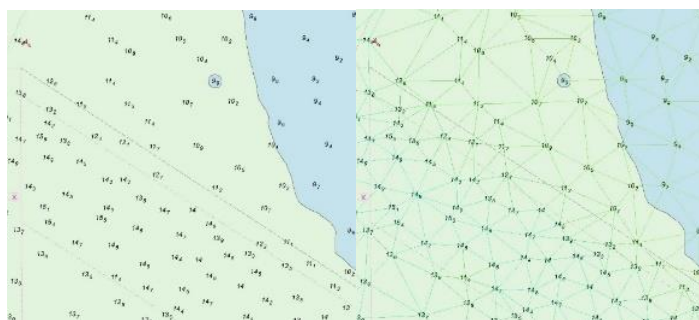


圖 5 shoal-biased 原則

有關水深點產製作業，實務上可透過程式進行自動化篩選水深點，目前製圖軟體提供水深點間距表（Radius Table）及均勻間隔（Overplot）等 2 種水深點選用模式，Radius Table 選用模式可依照製圖比例尺與水深區間，而有不同程度的選用間隔（表 2），因此可彈性調整其參數快速產製不同密度之水深點物件；Overplot 選用模式可依照特定密度，使受選用水深點之顯示圖徵可於特定比例尺下均勻排列，屬於較密集的水深點模式，兩種選用模式各其特點優勢。

然而，自動化篩選作業僅依照等深區間及其所設定相應間距參數或特定密度篩選水深點，故其自動化選點結果可能未能反映出關鍵水深資訊或根據地形趨勢調整選點位置，亦未能針對重要航行區域增加水深點密度，而未能符合船舶導航與 ECDIS 航路安全監視需求，因此，實際產製水深點作業時，係混合使用前揭兩種選用模式，首先以 Radius Table 選用水深點為基礎，另以 Overplot 選用模式額外產製更高密度水深點參考圖層，接續增加關鍵水深（Critical Sounding）、控制水深（Control Sounding）、輔助用加密水深點等，此外，檢視等深線、沉船、障礙物、水下礁岩、航路、助導航設施等圖徵，考量不同圖徵符號重疊影響產品資訊可視性，重新調整選用之水深點，調整選用過程仍須符合前揭「shoal-biased」原則，水深點的選擇係為迭代重複逐次優化之過程。

表 2 水深點間距表

水深區間（公尺）		製圖比例尺圖上間距（公釐）	Ex.比例尺 2000 分之 1 對應真實空間間距（公尺）
最淺值	最深值		
-10	0	5	10
0	5	5	10
5	10	7	14
10	20	10	20
20	30.5	12.5	25
30.5	50	15	30
50	200	20	40
200	8000	25	50

(2). 等深線（Depth Contour）與水深區（Depth Area）

使用 ECDIS 輔助導航優勢之一，在於航海人員可於該系統設置安全等深線，以此區分安全和不安全水域，以輔助航海人員執行其航路規劃與監視，但只有當 ECDIS 所使用圖資（即 ENC）所含等深線間隔較傳統紙海圖等深線間隔密度更高時，方能體現此項優勢。依據 IHO S-4 國際海圖規範標準列舉的

標準等深線組為：水深 0、2、5、10、20、30、50、100、200、500、1000 公尺，再每深 1000 公尺增加 1 條，而臺灣電子航行圖，在 UB4 近岸圖增加 15 公尺等深線，在 UB5 港區圖與 UB6 靠泊圖，進一步增加 8 與 15 公尺等深線，其目的在進一步細分水深區，提供不同吃水深度船舶使用，以提高其實用性。舉例而言，當船舶安全水深為 13 公尺時，若只有標準等深線組，ECDIS 需以 20 公尺為安全等深線，反之，若增加 15 公尺等深線，則可設置 15 公尺為安全等深線。

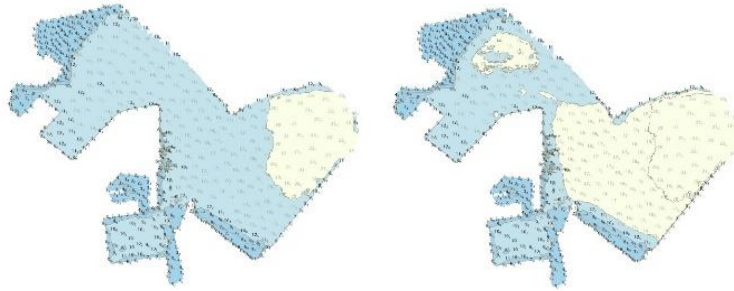


圖 6 不同安全等深線設定示意圖

使用前揭水深面模型成果，按指定之水深值產製等深線與水深區，其等深線成果可能過於曲折，或於等深線周圍產生過多細碎的等深線圈 (Tiny)，所以需要依照製圖比例尺，將等深線概略化 (Generalize)，且概略化之成果不能造成航行安全的危害，因此需滿足以下幾點：等深線簡化需往深區偏移 (Smooth by Direction Bias)，影響航安的細碎等深線圈 (凸起地形) 需要誇張化，不影響航安的細碎等深線圈 (凹陷地形) 需要移除。

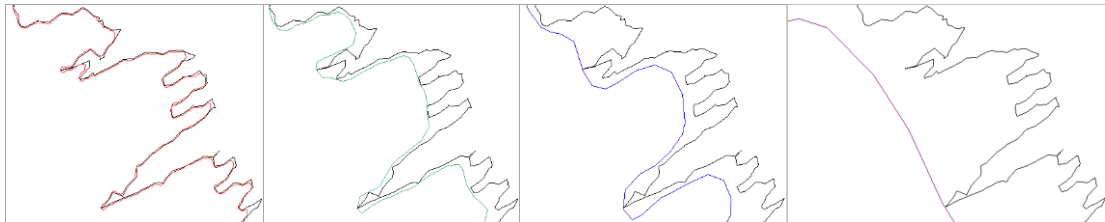


圖 7 Smooth by Direction Bias (由左到右，製圖比例尺由大到小)

(3). 特徵物

依水深資料可辨識之自然與人工物中，需特別標示會影響航行安全之物件類型、位置或範圍、最淺水深，如礙航物 (Obstruction)、沉船 (Wreck)、水下獨立礁岩 (Underwater/awash rock)、自然岸線或人工岸線於水下延伸之坡腳等。此類攸關海上航行安全之礙航物對應 S-57 標準圖徵物件分別為 "WRECKS"、"UWTROC"、"OBSTRN"，此類物件依照 S-57 標準定義具有相同之必要屬性：最淺深度值 (Value of sounding, VALSOU)、水位效應 (Water level effect, WATLEV)，其中，特徵物最淺深度值至關重要，其表示該特徵物形體最淺突起處深度，而非該處地形深度，該值將直接影響不同吃水深度船舶是否可安全通行之判斷；而 WATLEV 則直接影響礙航物於對應之顯示圖徵樣式。

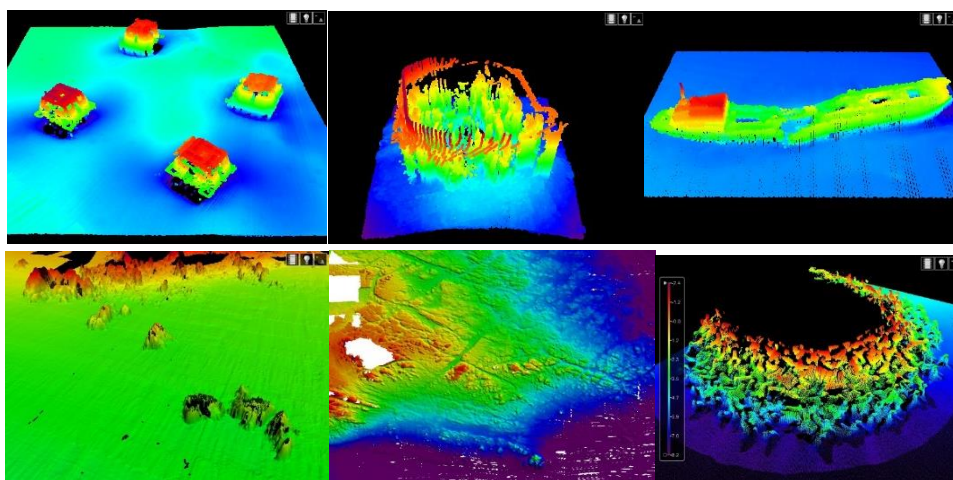


圖 8 特徵物三維展示圖

四、標準化製圖、檢核程序與資料庫管理模式

為確保我國電子航行圖符合國際標準，本部電子航行圖中心依據國際海道測量組織（IHO）所規範電子航行圖物件類別與屬性定義及其它相關標準規範產製電子航行圖，並訂定電子航行圖標準製圖、檢核程序，包括：資料來源蒐集分析與檢核、圖幅基本資訊設定、水深資料處理、電子航行圖物件編輯（含空間幾何、屬性及詮釋資料處理）與圖資檢核作業等關鍵階段，以確保圖資品質一致性，並導入資料庫管理模式提升電子航行圖產製與維護更新效率，茲分項說明如下：

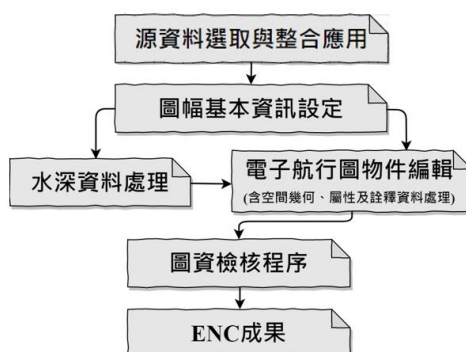


圖 9 電子航行圖製圖作業程序

(一)、 標準化製圖程序

1. 源資料選取與整合應用

實際啟動製圖作業前，首先盤點製圖範圍內可供製圖使用之源資料是否已整備完竣，包括前述：1. 新測資料：海域水深測量或岸線地形測量成果 2. 通用版電子地圖資料 3. 正射影像 4. 最新版紙海圖 5. 水道燈表 6. 航船布告¹ 7. 其他相關資料：例如陸域工程圖說、港口規劃圖說等，製圖過程若有資料持續更新者，則儘

¹ S-4 B-601.7 指出：「航船布告（Notice to Mariner, NM）」是用以及時發布安全相關或需要立即告知航海人員的資訊」

量契合原訂製圖期程納入製圖使用，若否，則依據已取得之資料進行電子航行圖編修，且製圖設計上的考量因素除了用途和該區域的地理特徵以外，所有可得之資料源與測量成果是否匹配製圖比例尺。

前述圖資整合過程中常遇有資料間彼此不一致情形，除可得的相關原始資料進行比對以外，對於存疑或現況不明確的圖資內容，需實際聯繫詢問相關海域或設施的管理或使用單位，透過訪查或實地勘查等予以釐清，後續更可反饋來源單位，期建立良好合作關係；源資料是否可用於製作航海圖，其條件包括：來自可信賴的來源、正確性夠、海床覆蓋度充分、位於有航行意義的區域、是當前的資料，此評估作業中製圖人員應具備能力如下：

- (1). 辨識並分類常用於航海圖生產和維護（編輯過程）的適當來源資訊
- (2). 分析既有海圖與報告
- (3). 從比例尺、密度、正確性、時間、不同基準、技術等面向，解釋資料品質的意涵
- (4). 辨識並解釋航海出版品的內容以及其如何與航海圖互補

2. 圖幅基本資訊設定

電子航行圖產品資料集（Dataset）基本資訊設定內容包括：大地基準、深度基準及陸域高程基準、圖幅經、緯度範圍、製圖比例尺、製圖單位代碼等。其中，電子航行圖大地基準必須採用 1984 年世界大地基準 WGS84，位置以地理坐標經緯度表示，不使用地圖投影（Map projection），深度基準為低潮位系統²，現行採用當地約最低低潮位面。陸域高程基準以基隆平均海水面為基準。圖幅範圍基本原則為不同航行目的圖資各自按地理範圍劃分 ENC 圖幅單元（稱為 cell），cell 的範圍必須是由兩條緯線與兩條經線定義之球面矩形，我國 ENC 圖幅規劃於沿岸圖及近岸圖採規則式圖框，港區圖及靠泊圖則採圖幅式圖框，其主要依各港區及其航道、錨泊區範圍規劃，我國 ENC 圖幅規劃如下：

航行目的	圖框範圍	比例尺
沿岸圖（Coastal，UB3）	規則式圖框:1°	180,000
近岸圖（Approach，UB4）	規則式圖框:30'	45,000
港區圖（Harbour，UB5）	圖幅式圖框	8,000、12,000
靠泊圖（Berthing，UB6）	圖幅式圖框	2,000、2,500

3. 電子航行圖物件編輯

ENC 採用 S-57 的理論資料模型（圖 10），分為圖徵物件與向量式空間物件，每一物件都有其識別碼與屬性，圖徵物件的位置幾何由空間物件描述。S-57 圖徵物件分為：詮釋（META）、製圖（CARTO）、地理（GEO）與集合（COLLECTION）等四大類，但 ENC 不得使用製圖物件，空間物件必須以 Chain-Node Topology 的資

² IHO 技術決議（Technical Resolution）建議採最低天文潮位面（The Lowest Astronomical Tide, LAT）為海圖基準

料結構編碼，以 Edge, Connected Node, Isolated Node 描述空間幾何。

將各式蒐整到與航海相關設施及測量成果等資料，依 IHO S-57 規範之資料模型結構，按其空間幾何建立點線面（geometry type）空間物件，並建立其間的位相關係，可依序對應圖徵物件類別分群批次建立空間幾何資料，以利後續圖徵物件之產生。

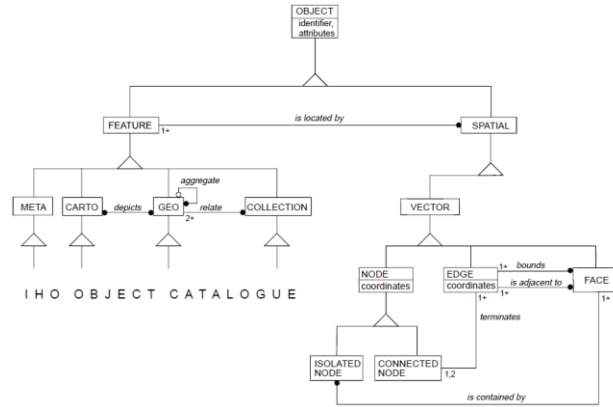


圖 10 IHO S-57 的理論資料模型

依據 IHO 所規範電子航行圖物件類別與屬性定義與格式，從空間物件增填屬性資料編碼產生圖徵物件，茲選取各類重點圖徵物件說明如下：

(1). 詮釋物件 (Meta)

詮釋物件所描述資訊類別可包含資料範圍、品質及航標系統類別等，其中，有關於資料範圍、品質描述之詮釋物件例如：M_COVR (Coverage)、M_QUAL (Quality of data) 及 M_SREL (Survey reliability) 至為重要，M_COVR 詮釋物件之屬性欄位：涵蓋類別 (Category of coverage, CATCOV) 係依據測量成果實際資料範圍建立³。此外，對航海人員而言，M_QUAL 提供了最有用的資料品質資訊，因此所有水深資料都必須以 M_QUAL 詮釋物件覆蓋，且不同資料 M_QUAL 物件彼此間不得重疊。分析海域水深測量成果資料，確保電子航行圖水深資料的詮釋物件 M_QUAL 及其屬性資料之完整描述及宣告，依照 S-57 標準定義之信任區類別評估表(表 3)，評估水深資料之品質資訊，分區域建立 M_QUAL 詮釋物件並給予對應之信任區類別 (Category of zone of confidence in data, CATZOC)，M_SREL 詮釋物件則用以補充描述關於測量的額外資訊，屬於非必要的詮釋物件。其中，信任區類別評估重點項目除水深測量之定位、深度精度外，亦側重水深測量成果是否達到海床全覆蓋、是否探測重要海床特徵物⁴及是否為經控制之系統性測量，且信任區類別係採各評估重點項目之評級方式，舉例而言，若某一水深測量成果並未探測重要海床特徵物，即使其定位、深度精度符合 A1 等級標準，至多仍僅評估為 B 等級。此外，M_QUAL 詮釋物件可以"星等" 圖像式向航海人員呈現 CATZOC 信任區類別之評級(圖 11)。

³ 具實際資料涵蓋區域 CATCOV=1(coverage available)，反之，CATCOV=2(no coverage available)

⁴ 所謂重要海床特徵物係指大於 2 公尺立方體 (深度 40 公尺以內) 或 10%深度立方體 (深度 40 公尺以上)

表 3 信任區類別評估表

ZOC	定位精度	深度精度	海床覆蓋			典型測量特徵		
			全區搜測	海床特徵	異常水深	特徵	定位方法	測深方法
A1	±5m +5%depth	0.50 +1%depth	全區搜測	重要海床特徵已探測	深度已測量	受控制的系統性測量 高定位與深度精度	DGPS 或最少 3 條高品質定位線	多音束、變頻聲納、 或機械式掃測系統
A2	±20m	1.00 +2%depth	全區搜測	重要海床特徵已探測	深度已測量	受控的系統性測量 定位與深度精度比 A1 差	定位精度較 A1 等級差	現代測深儀 搭配聲納系統或機械式掃測系統
B	±50m	1.00 +2%depth	非全區搜測	可能存在無法預期但會影響航行的未標記特徵或障礙物		受控的系統性測量 深度精度與 A2 相似 但定位精度比 A2 差	定位精度較 A2 等級差	現代測深儀 但未搭配聲納系統或機械式掃測系統
C	±500m	2.00 +5%depth	非全區搜測		可預期存在異常水深	低精度測量 或隨機的收集資料 如航行途中的測深		
D	比 C 差	比 C 差	非全區搜測		可預期存在大量異常水深	低品質資料或 缺乏相關資訊無法評估		

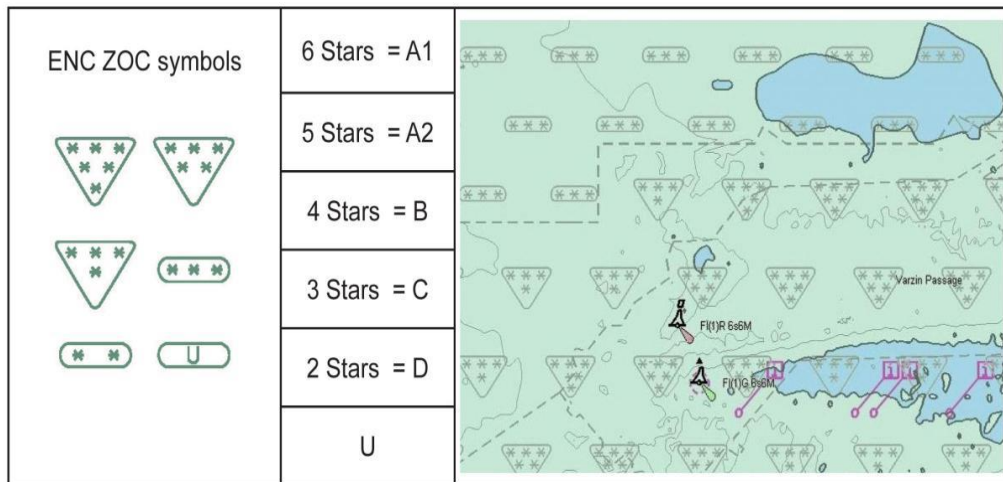


圖 11 信任區類別評級圖像

(2). 地理物件 (Geographic)

地理物件分為兩大群組：第 1 群組是地表群組 (Skin of the Earth)，其所包含物件類別如表 4，其他地理圖徵物件則屬於第 2 群組。其中，ENC 針對第 1 群組物件採嚴格之空間位相檢核標準，每一個 M_COVR/CATCOV=1 詮釋物件涵蓋的區域都必須以互不重疊的面型態地表群組物件完整覆蓋，又其所謂互不重疊係指相鄰面型態地表群組物件必須共用同一 Edge，以此為 ECDIS 執行航路安全監視偵測之基礎。

表 4 地表群組物件類別

物件類別代碼	物件類別說明
DEPARE	水深區 (Depth Area)
DRGARE	浚深區 (Dredge Area)
FLODOC	浮塢 (Floating Dock)
HULKS	船殼 (Hulk)
LNDARE	陸地 (Land Area)
PONTON	浮橋 (Pontoon)
UNSARE	未測區 (Unsurveyed Area)

電子航行圖製圖編修處理是個密集互動編輯空間與圖徵物件之階段，編輯是個互動的程序，且涉及多項電子航行圖圖徵組成元素，需要不斷重複一系列步驟，逐次優化成果，並沒有所謂正確或錯誤的編輯順序，依實務編修經驗而言，地表群組物件為優先，建議編輯順序為：岸線（岸海交界線）、水深物件（含詮釋物件）、助導航設施、礙航物（沉船、礁岩、障礙物）、陸域地形地物，茲分別說明如下：

a. 岸線：

岸線可從高解析度航空照片或衛星影像描繪其位置幾何，並判斷其係屬人工岸線 (Shoreline construction) 或是自然岸線 (Coastline)，此外，若源資料解析度足夠或搭配本地知識、街景影像，可進一步分別以人工岸線類別、自然岸線類別細部描述其係屬防波堤、碼頭泊埠或岩岸、沙岸等，深化圖資內容。

b. 水深物件：

電子航行圖之應用目的係為幫助航海員船底餘裕水深 (Under Keel Clearances) 管理，判斷其駕駛船舶之可安全航行水域，因此，此部分物件之編輯至關重要，主要使用水深資料處理階段中所產製水深物件，包括等深線、水深區、Radius Table 基礎水深點及更高密度水深點參考層，首先，等深線、水深區需根據電子航行圖產品比例尺進行概略化 (generalization)，其概略化編輯核心原則：任何之編輯必須是往安全的方向調整，此外，應避免重要的海底特徵資訊於概略化過程中消失，然而，在概略化測深資料時可能會有下列問題：

- 以淺點優先 (Shoal Bias) 可能使資料偏離真實的表面到偏淺的表面
- 等深線過度擴張可能使可航行水域過度縮減甚至形成封閉航道之情形
- 誇張的淺灘－地形中小突起和淺灘在海圖上呈現不成比例的大小

此外，由於海域廣闊，水深測量作業難以一次性完成大範圍施測，故電子航行圖可航行水域大多採拼圖式組合圖料，即同一圖幅內可能需要整合多種不同來源、年代、測繪技術與精度品質之測深資料，且不同資料所測繪水深地形資料彼此間可能有系統性偏差，甚至有所不一致，此差異即以不同水深資料所產製之等深線、水深區無法自然連續銜接，因此，此階段有一重大編輯程序：等深線、水深區之接邊處理程序，編輯核心原則：任何之編輯必須是往安全的方向調整，換言之，以擴大淺區的方式，且該過程不應損害準確性，調整時依據原始資料進行判

斷。

c. 助導航設施:

助導航設施係指供船舶航行於水域時，定位導航之助航設施，例如：燈塔、燈杆、燈浮、雷達訊標等，此類設施依照 S-57 標準定義，依其功能、性質等分別對應多種圖徵物件，其中，一般常人所述燈杆或燈浮可能大多為單數物件概念，但於 S-57 標準定義係區分為主結構物及乘載於其上之燈光、設備，為複數物件之概念，若同一位置同時設置導燈、頂標、雷達標杆或霧號等航標，依源資料所述主結構物、設備及燈質資訊，依照 S-57 標準定義分別建立圖徵物件。

而我國「航路標識條例」公布於民國 23 年 05 月 15 日，直至民國 107 年 11 月 21 日才首度修正，確立主管機關為交通部，其業務由航政機關主責辦理，然而先前法規久未更新且長期欠缺明確主管機關與標準規範的情況下，使得我國航標資訊現況難以掌握，因此，實際產製維護我國 ENC 產品內助導航設施資訊過程，涉及大量不同機關部門間之資料交換及其資訊不一致性之比對，未來將與航標主管機關航港局合作，建立航標資料庫與管理系統，並引進海事資源名稱 (Maritime Resource Name, MRN) 編號管理，建立助航設施建立助航設施資料庫管理服務，供臺灣各港口航標管理單位使用，由航標管理單位修改航標資料，俾利於更新維護我國助導航設施資訊資料庫。

d. 礙航物:

礙航物圖徵物件之屬性編碼及其編修須遵循嚴謹科學化之程序，其中，有關最淺深度之量測應儘量回歸原始密度測量成果，避免特徵物重要資訊不經意於資料處理過程中遺漏，例如過往處理實例曾遇一沉船特徵物之船隻桅杆，於水深資料處理過程中遭誤認為錯誤點，導致該沉船特徵物編碼錯誤之最淺水深屬性值而影響航行安全。

目前 ENC 堆疊許多源自紙海圖或過往各方通報所未經測量、驗證之礙航物資訊，隨著新測水深資料的持續積累產出，於 ENC 更新維護過程中對應修正其屬性，包括圖徵物件屬性與空間幾何屬性，例如原位置存疑或最淺水深值未知之礙航物，應特別調查其真實坐標位置及完備最淺水深資訊，然而，礙航物往往需透過詳盡的搜查作業才能發現，可透過組合多音束測深、側掃聲納及磁力調查等方式系統性進行特徵物搜查作業。

e. 陸域地形地物:

ENC 主要供海上航行使用，故有關陸域地形地物部分，主要選擇具航行意義之地形地物圖徵，例如：(a) 地形等高線與高程點 (b) 靠近海岸及港埠之建物區、單一建築物與道路 (c) 岸際陸標 (Land Mark)、湖泊、河川等，除地形等高線與高程點可自數值地形模型資料加值應用外，其餘地物亦可從高解析度航空照片或衛星影像描繪其位置幾何，或搭配本地知識、街景影像檢視其實際位置與外觀樣式，使其確具幫助航行辨識之效用。

(3). 集合關係 (Collection)

地理圖徵物件間的集合關係有兩種定義方式：一是以指定主結構物件並指向設備物件的方式定義物件之間的結構-設備關係；另一是利用聚合物件類別 (Aggregation) 或組合物件類別 (Association) 等「集合關係」描述其他物件之間的對等聚合或組合關係。聚合物件類別用於編碼不同物件間功能用途之連結，進而描述更高層次之系統架構，例如：分道航行系統即是由助導航設施 (包含主結構與設備) 及其所定義建議航線 (recommended track) 等不同類別物件聚合而成的集合物件；組合物件類別則用於編碼不同物件間之相關性，例如：沉船及其孤立危險燈浮標。

(二)、 電子航行圖檢核作業

我國電子航行圖皆依據 IHO S-65 準則:ENC 製作維護與發行指引 (ENC Production Guidance)、S-58 標準:電子航行圖產品之驗證檢查 (Recommended ENC Validation Checks) 及電子航行圖物件編碼使用指引 (S-57 Use Of Object Catalogue) /Encoding Bulletin 等規範進行檢核作業，以確保我國電子航行圖資品質且符合國際標準，其中，IHO S-65 準則係為提供各國有關製作、維護更新與發行電子航行圖關鍵程序參考資訊，而 S-65 將 ENC 的製作維護與發行流程分為十個關鍵階段，有關圖資檢核部分，階段 7:接邊處理係闡述包括本國 ENC 之間以及與相鄰國家的 ENC 之間的一致性；階段 8:圖資確認與驗證，則建議除確認資料正確且無缺漏，還必須以檢核軟體驗證製作的電子航行圖確實符合 S-57 ENC 產品規格，其檢核項目至少須包含 IHO S-58 標準所列項目，包括：S-57 空間資料結構、各類別圖徵物件允許之屬性值、Use of Object Catalogue for ENC、電子航行圖詮釋資料物件編碼等，其中，IHO S-58 的檢核過程使用的軟體，應包括與製圖系統不同供應商的軟體，即應使用兩套以上不同廠牌之 S-58 檢核軟體。

而電子航行圖之產製發行，最主要係提供終端使用者於其 ECDIS 使用。因此，我國電子航行圖除使用兩套以上不同廠牌之 IHO S-58 檢核軟體檢核通過外，並將電子航行圖載入 ECDIS 以人工實際操作系統，檢視 ENC 圖資載入時有無異常情況，及其於 IHO S-52 標準之 (電子航行圖於 ECDIS 之顯示應用標準) 顯示效果與品質之適用性，此外，以終端使用者實際使用之觀點，試驗其與相鄰、重疊圖資之間的水平、垂直一致性或相互干擾情形，與航路安全檢核之效果，唯有通過層層檢驗後才可將圖資進行終端國際發行動作。

(三)、 資料庫管理模式

為有效整合公私部門及學術單位等不同來源、不同年代之水深成果及各項電子航行圖基礎資料，本部建立水深空間資料庫，儲存及分析處理巨量水深資料；另依據 IHO S-57 國際標準建置電子航行圖圖徵物件資料庫，有效維護及管理導航所需各項資訊。此外，依據 IHO 所訂電子航行圖產品規格，按不同航行目的建置電子航行圖產品資料庫，運用專案管理工具進行產品版次管理，並使不同航行目

的產品可與圖徵資料庫同步更新，以期透過資料庫管理模式，系統性處理水深成果，整合各項圖資基礎資料，有效提升電子航行圖產製與更新效率。

1. 水深資料庫

為整合各部會、學術單位、私部門等不同來源、不同年代之水深成果資料，本部透過建立水深資料庫（CARIS Bathy DataBASE，BDB）以分析處理及儲存巨量的水深資料，該資料庫之資料架構規劃測量密度點雲（SURVEY）及水深地形模型（SURFACE）二類資料層次，分別儲存測量密度點雲水深數值資料及其不規則三角網（TIN）內插產製之水深地形模型成果，並各別建立空間索引與詮釋資料表存儲至水深資料庫，另可依據使用者分析及視覺的需求，進行顏色、影像、圖例等客製化顯示設定，更支援三維視角瀏覽海底地形切面，輔助海底地形資料移除、整合、區隔及粹取資料處理、地形變遷分析，以便後續管理臺灣周遭海域水深地形模型。此外，配合專屬程式工具可自水深地形模型資料層產製符合 IHO S-57 標準之水深物件產品（PRODUCT），提供後續產製電子航行圖之加值應用服務。

2. 電子航行圖圖徵物件與產品資料庫

為執行我國官方電子航行圖產製、維護與更新作業，本部蒐整各項電子航行圖基礎資料，依據 IHO S-57 國際標準建置電子航行圖圖徵物件資料庫，該資料庫係採用無縫式資料管理方式，可有效消除冗餘資料，配合引入符合 IHO 國際標準規範之專業圖徵物件編輯工具，有效運用其優異空間資料處理能力與支援物件關聯式資料庫架構之優點，以系統性維護管理臺灣周邊海域繁複多元之圖徵物件資料，包括：助導航設施（燈杆、浮標、燈光、無線電信號、雷達標杆及 AIS 航標等）、沉船、水下礁岩、障礙物、海底電纜與管道等，並藉由資料庫管理者介面，指派人員角色（製圖員、初校、覆核）與權限控管，分階層進行資料品管檢核，可有效控管資料品質與追蹤資料編輯歷程。此外，本部依據 IHO 所訂電子航行圖產品規格（ENC PS），按不同航行目的（Navigational Purpose）⁵建置電子航行圖產品資料庫，其中，不同航行目的產品皆係單向同步自圖徵物件資料庫中經品管檢核通過之圖徵物件，並運用專案管理工具控管電子航行圖產製工作流程與產品版次管理，有效提升電子航行圖產製品質及維護與更新效率。電子航行圖資料庫環境架構如圖 12 所示。

⁵ 電子航行圖產品規格將 ENC 分為：overview, general, coastal, approach, harbour, berthing 等六種航行目的

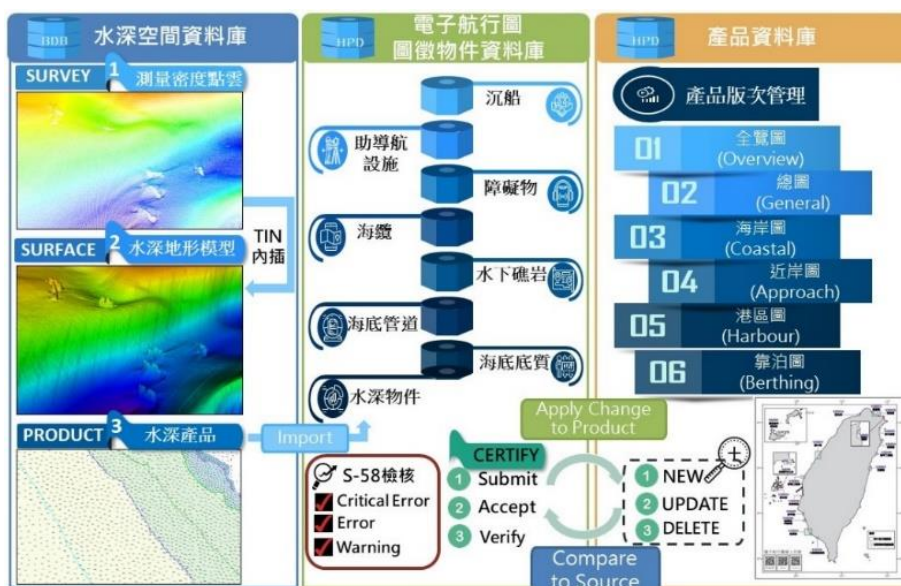


圖 12 電子航行圖資料庫環境架構

五、國際發行、更新維運情形與未來展望

(一)、 國際發行、更新維運情形

我國官方電子航行圖之發行係依 IHO 全球電子航行圖資料庫原則⁶，透過挪威國家測繪局海測部門運作的區域電子航行圖協調中心（Regional ENC Coordinating Center, RENC）PRIMAR 及其全球經銷商網絡銷售體系（圖 13），以 IHO S-63 資料保護格式提供國際使用，藉由 PRIMAR 提供之檢核與加密機制，避免各國相鄰海域圖幅重疊或顯示水深不連續之情形，更重要的是可確認 ENC 的製作發行單位，並驗證圖資未被偽造竄改，防止盜拷及非授權使用等情形發生，確保圖資即時、可靠、正確地提供海上航行之船舶使用，不僅有效加速國際發行時程，也降低自行建置供應服務之成本，更讓各個使用者在全球暢通的供應體系下，快捷便利地取得所需圖資。



圖 13 區域電子航行圖協調中心運作模式

⁶ 全球電子航行圖資料庫原則之概念係由區域內兩國以上共同協議建構的區域電子海圖協調中心，做為用戶與各國製圖機構之間的仲介

而臺灣電子航行圖中心成立後，肩負我國電子航行圖測製、發行及維運工作之角色，除致力於產製、發行新版圖幅外，即時、持續的更新機制，確保圖資內容之正確性，亦是電子航行圖長久維運不可缺少的一環，每一幅發行的 ENC 都必須隨時保持其於正確與最新狀態，本中心持續辦理海域測繪工作與整合公、私部門水深成果，對於新取得之水深測量資料，將先就新發現之礙航危險資訊發布更新檔，接續以新版本 ENC 的方式更新替換大範圍水深資訊。

此外，我國海域之紙海圖、水道燈表及海圖圖例等航海刊物係由海軍大氣海洋局編繪刊行，前揭航海刊物相關維護訂正之航船布告亦由該局發布，但隨著我國「航路標識條例」於 2018 年修訂與離岸風電發展，我國航船布告之主管機關已實質改為交通部航港局，有關航船布告更新部分，本中心建置「航船布告查詢系統」以輔助電子航行圖航船布告更新作業程序，該系統及其布告資訊資料庫係自行系統化存檔控管，定期由程式自動從來源機關網站抓取資料建檔，可不受來源機關網站變動、資料刪除或重新編號等影響，且能提供時間空間與關鍵字等多重條件彈性化查詢功能，可查詢布告包括交通部航港局及海軍大氣海洋局正式發布的航船布告，航船布告資訊包括海域資訊或航標之改正，相關預告或暫時性改正皆依 IHO S-57 相關國際標準依序製作成 ENC 更新檔，並經完整檢核後上傳至 PRIMAR，再經其檢核確認程序後釋出，分銷傳遞給使用者。

(二)、 未來展望

自 108 年 2 月至 110 年 10 月底止，我國總計已出版 100 幅電子航行圖(圖 14)，累積更新與再版數高達 558 次，提供包含我國船舶及來自國際逾 1 萬 9,000 艘船舶使用，創造美元計 208 萬元(約新臺幣 5,841 萬元)之實質收益。隨著國內外船舶購置我國電子航行圖數量穩定成長，足見本部推動電子航行圖測製、維運及國際發行工作已獲階段性成果，然而，目前我國所發行之電子航行圖係符合 IHO S-57 國際標準圖資產品，隨著海事科技的演進，以及空間資訊的多樣化與網路服務需求，IHO 新制定 S-100 系列標準產品已不再限縮於傳統導航使用，更擴充至水文、海事及地理資訊系統相關服務。本部未來將推動國際 S-100 系列最新標準，以支援各種海域相關的數位資料源、產品及客群，推進下世代電子航行圖的發展，並與 ISO-19100 系列地理標準及開放地理空間聯盟(OGC)所推動國際標準開發計畫共同結合，增加海、陸域各資料標準的相容性。

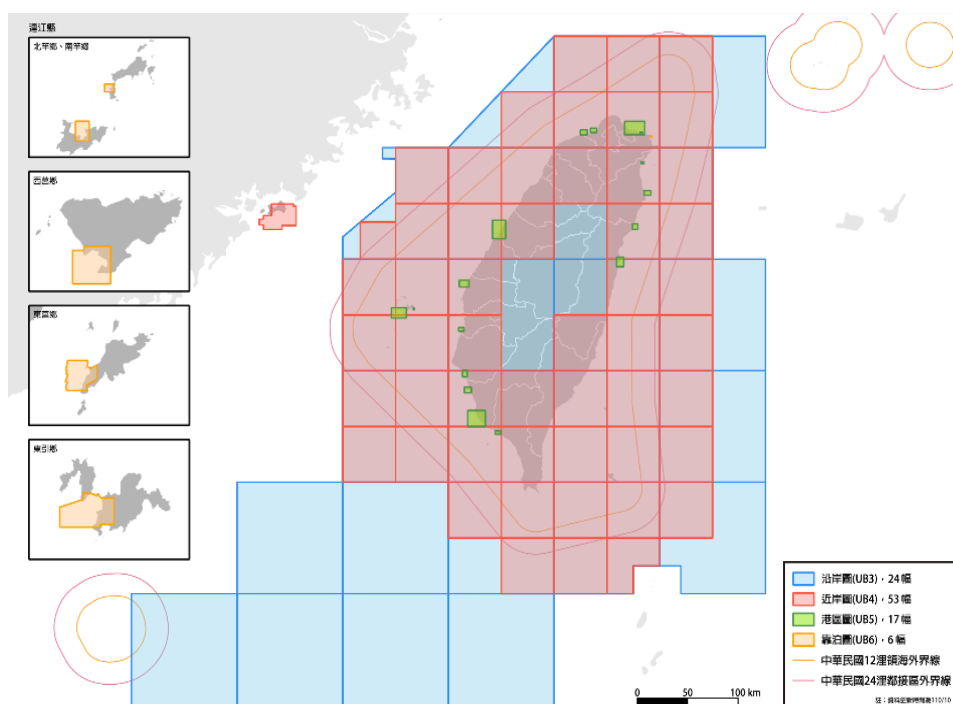


圖 14 我國電子航行圖國際發行情形

參考文獻

- 張淑淨，2021，《電子航行圖資檢核與資料庫維護管理服務工作案》，內政部。
- 張淑淨，2020，《電子航行圖資檢核與資料庫維護管理服務工作案》，內政部。
- 張淑淨，2019，《電子航行圖資檢核更新與管理服務工作案》，內政部。
- 張淑淨，2018，《電子航行圖資檢核及資訊服務平臺建置工作案》，內政部。
- 交通部航港局，2020，海事統計資料，網址：

<https://www.motcmpb.gov.tw/Information?siteId=1&nodeId=406>，最近檢索時間
2021年，11月。

海水面變化對水深測量之影響

藍文浩^{1*} 郭重言² 林勝豐³

論文收件日期：110.10.15

論文修改日期：101.11.11

論文接受日期：101.11.19

摘 要

本研究利用臺灣 33 個潮位站與 Jason-2 衛星測高資料對於 MOI.18v1、NAO.99b 以及 DTU10 潮位模式(ocean tide model)進行精度評估。與潮位站資料相比，MOI.18v1 表現為最佳，差值 RMSE 的平均值為 0.090 m (0.047~0.153 m);而三個潮位模式改正測高資料之資料改善率(improvement percentage, IMP)為 68.2% (A 點)與 88.2~89.2% (B 點)，並無顯著差異。利用潮位站、衛星測高以及 MOI.18v1 潮位模式分析在不同離岸距離或海底地形情況下，分別計算潮位變化與海水面變化之差異。成果顯示，臺灣周圍潮差變化非常顯著，潮差變化大的區域主要分布於淺海(≤ 200 m)，臺灣西岸潮差可達到 4 m，越往臺灣海峽潮差變化越大，最高可達 5 m 以上，但臺灣東岸與南岸約小於 1 m，因此在淺海區域進行水深測量必須進行潮位修正，才能提升水深測量之精度。此外，各海域潮位變化與距離最近潮位站資料相比較，差值標準偏差(standard deviation)在臺灣北部海域與台灣海峽等地區相對較大，部分區域差值標準偏差超過 50 cm，表示這些區域進行水深測量時必須結合潮位站以及潮位分區圖進行潮位修正，才可降低水深測量誤差量。

潮位模式僅包含潮位變化，無法反應實際海水面變化以及氣象造成的逆氣壓效應。臺灣周遭海域逆氣壓效應之年週期振幅為 6~10 cm，由南往北逐漸增大，馬祖可達 10 cm 以上；臺灣周遭海水面年週期振幅為 3~15 cm，於中國大陸沿岸為最大，因此使用潮位模式修正水深資料時需考慮逆氣壓效應與海水面之季節性變化。此外，利用衛星測高計算 1993-2019 臺灣周圍海域的海水面速率，成果指出海水面呈現平均 3.04 ± 0.22 mm/yr 的上升速率，與全球海水面平均值(~ 3 mm/yr)相近。

關鍵字：水深測量、季節性訊號、海水面變化、潮位模式、潮位站、衛星測高

¹ 專案助理教授，國立臺灣海洋大學通訊與導航工程學系。

* 通訊作者，TEL: (02)24622192#7203，E-mail: whlan@mail.ntou.edu.tw。

² 教授，國立成功大學測量及空間資訊學系。

³ 研究員，國立高雄科技大學海洋環境工程系。

Impact of sea level variations on hydrographic survey

Wen-Hau Lan^{1*}, Chung-Yen Kuo², Sheng-Fong Lin³

Abstract

In the study, the accuracies of the ocean tide models, including MOI.18v, NAO.99b, and DTU10, are investigated by using 33 tide gauges and Jason-2 satellite altimetry around Taiwan. MOI.18v1 has the highest accuracy in near-shore by comparing to 33 tide gauge records, with the mean of difference RMSE of 0.090 *m* (0.047~0.153 *m*); and the improvement percentages (IMPs) of each ocean tide model correcting Jason-2 altimetry data are 68.2% (point A) and 88.2~89.2% (point B), with no significant difference between ocean tide models in offshore Taiwan. The differences of variations in ocean tide and sea level at different offshore distances or ocean bottom topography are analyzed using tide gauge records, satellite altimeter data and ocean tide models around Taiwan. Results show that the significant variations in tidal range around Taiwan are found and large tide range are mainly located in shallow waters (≤ 200 *m*), with the tidal range varying from less than 1 *m* in the eastern of Taiwan to 4 *m* in the west coast of Taiwan and larger than 5 *m* along the coast of China. Therefore, ocean tidal correction is necessary for bathymetry measurements in shallow waters to improve the accuracy of bathymetry data. In addition, the standard deviations (STD) of the difference between tide changes in height derived from MOI.18v1 and the nearest tide gauge records are relatively large in northern and western of Taiwan and could be even larger than 50 *cm* in some areas. The result indicates that the bathymetry measurements in these areas need to be corrected for the ocean tide using a combination of tidal gauges and tidal zones to reduce the uncertainty of bathymetry measurements.

Ocean tide model only includes tidal change in height and cannot reflect the actual sea level change and inverted barometer effect caused by meteorological forcing. The annual amplitude of inverted barometer effect around Taiwan ranges from 6 to 10 *cm*, gradually increased from south of Taiwan to north of Taiwan, reaching more than 10 *cm* in Mazu; the annual amplitude of sea level change around Taiwan ranges from 3 to 15 *cm*, with the largest along the coast of China. Therefore, the seasonal effect in inverted barometer effect and sea level change have to be consider when only ocean tide model is

¹ Project Assistant Professor, Department of Communications, Navigation and Control Engineering, National Taiwan Ocean University.

* Corresponding Author, TEL: +886-2-24622192#7203, E-mail: whlan@mail.ntou.edu.tw.

² Professor, Department of Geomatics, National Cheng Kung University.

³ Research Fellow, Department of marine environmental engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology.

used to correct bathymetry data. In addition, we investigate the sea level rise around Taiwan during the period 1993–2019 using satellite altimetry. The average sea level rise trend is 3.04 ± 0.22 mm/yr, which is similar to global average trend of ~ 3 mm/yr.

Keywords : Hydrographic survey, Seasonal signals, Sea level change, Ocean tide model, Tide gauge, Satellite altimetry

一、研究動機與目的

近年來，內政部努力推動電子海圖技術與應用發展，其中海底地形為電子海圖中相當重要的資料之一，提醒船隻避免闖進淺水或礁石區。一般可利用光學測深和音響測深獲取海底地形資料，光學測深主要是以光達(LiDAR)與遙測衛星光學影像推估水深，由於光子能量在水中易衰減特性，造成光學測深目前僅適合應用於近岸水深 50 公尺範圍內區域[Guenther, 2007]，應用範圍有其限制。音響測深是經由測深音鼓(transducer)產生音波，向水底發射音波，並經水底反射後，最後被感測器接收反射後之音波，計算音波發射至接收的傳遞時間，利用音波在水中傳波速度以及傳遞時間可得到感測器至海底表面之深度，即為水深測量之觀測量。利用聲納進行水深測量時，誤差包含儀器架設偏移誤差、載具姿態誤差、聲速誤差、船速誤差以及潮汐修正誤差等，其中大部分誤差皆能利用儀器率定、載具姿態角觀測值、海水溫度、鹽度與壓力之觀測值以及增加觀測次數等方式大幅度降低誤差量。然而水深測量是測量瞬時海水面高至水底間的距離值，瞬時海水面高會隨著潮位(或稱海潮; ocean tide)變化及海水面變化而不同，須將不同時刻所測得的水深資料化算到一個深度基準面(目前臺灣海圖基準為約最低低潮位面)上，此一轉換過程稱為潮位修正。

一般近岸水深測量可利用鄰近同時觀測水位變化之潮位站進行潮位修正；若測區範圍較大，則可結合測區內潮位站與潮位分區圖進行修正，然而觀測地點與潮位站的海水面變化並不相同，可能會造成水深資料品質不一；若施測地點距離海岸較遠，由於海水深度較深、潮位效應較小，一般不一定會進行潮位修正，但是 Wu 等人[2018]計算外海的潮位變化仍有數十公分以上振幅變化。此外，內政部近年積極推動我國垂直基準轉換模式建置，其中包含臺灣周圍海域無縫基準面與 MOI.18v1 潮位模式，此轉換模式能應用於水深測量潮位修正，可省去架設臨時潮位站所需之人力與時間，然而潮位模式僅包含潮位變化，無法反應當時氣象影響與海水面變化。

海水面變化中包含海水面上升速率及季節性變化之訊號，臺灣附近海水面季節性訊號約有 10-20 公分振幅[Lan, 2018]，且各區域變化不一致，若潮位修正不考慮

海水面變化可能會影響水深測量之精度。本研究利用潮位站、衛星測高以及潮位模式計算潮位變化與海水面變化(海面上升速率與季節性訊號)，並在不同離岸距離或海底地形情況下，分別計算潮位變化與海水面變化之差異。另外，本研究亦利用臺灣周圍潮位站與衛星測高資料對於 MOI.18v1、NAO.99b 以及 DTU10 (Technical University of Denmark)等潮位模式進行精度評估。

二、研究資料

(一)、潮位站資料

臺灣政府為了監測海水面變化，建造相當完整的潮位監測系統(圖 1)。臺灣環島潮位站分別是由中央氣象局(Central Weather Bureau, CWB)、交通部水利署(Water Resources Agency, WRA)、內政部(Ministry of Interior, MOI)以及交通部港灣技術研究中心等單位設立，多數潮位站是由中央氣象局管理。潮位站原始觀測數據取樣頻率並不一致，包含 6 分鐘、10 分鐘或 1 小時取樣一筆，為使研究成果一致，後續皆使用 1 小時一筆潮位站數據。本研究使 1993-2018 潮位站資料，由於資料時間較短將影響計算精度[kuo *et al.*, 2008; Ray *et al.*, 2010]，因此使用記錄時間超過 10 年以上的潮位站資料(表 1)，符合時間範圍的潮位站有 33 個，測站均勻分佈於臺灣沿岸，離島潮位站包含金門料羅灣、水頭、馬祖、澎湖馬公、小琉球、綠島與蘭嶼(圖 1)。本研究使用的潮位站基本資訊及佈圖如表 1 與圖 1 所示。

本研究利用潮位站資料計算潮位變化與季節性訊號，而潮位站的海水面觀測量為相對於岸邊的基準點，且受大氣壓力變化影響，因此估算潮位變化與海水面季節性訊號時，還需考慮氣壓變化導致水位升降變動(亦稱為逆氣壓效應(Inverted barometer effect)、風場與資料基準偏移(datum shift)等因素[Proshutinsky *et al.*, 2001;2004]，後續說明本研究改正方法。

表 1: 臺灣附近海域 33 個潮位站資訊

站號	站名		經度(°)	緯度(°)	時間長度
	中文	英文			
1516	基隆	Keelung	25°09'18"N	121°45'08"E	1993/01-2018/01
1226	龍洞	Longdong	25°05'51"N	121°55'05"E	2001/05-2018/01
1236	烏石	Wushi	24°52'02"N	121°50'15"E	2006/01-2018/01
1246	蘇澳	Su-ao	24°35'33"N	121°52'01"E	1997/03-2018/01
1256	花蓮	Hualien	23°58'50"N	121°37'25"E	1997/11-2018/01
1566	石梯	Shiti	23°29'41"N	121°30'22"E	2001/11-2018/01
1276	成功	Chenggong	23°05'50"N	121°22'49"E	1993/03-2018/01
1586	富岡	Fugang	22°47'27"N	121°11'35"E	2001/01-2018/01
1676	綠島	Lyudao	22°39'44"N	121°27'53"E	2001/10-2018/01
1596	大武	Dawu	22°20'15"N	120°53'50"E	2003/09-2017/10

1396	蘭嶼	Lanyu	22°03'29"N	121°30'25"E	2001/01-2018/01
1196	後壁湖	Houbihu	21°56'45"N	120°44'43"E	1998/05-2018/01
1496	罈廣嘴	Xunguangzui	21°59'08"N	120°42'43"E	2001/01-2018/01
1386	小琉球	Xiao Liuqiu	22°21'12"N	120°23'00"E	2002/01-2018/01
1186	東港	Donggang	22°27'54"N	120°26'18"E	1998/03-2018/01
1486	高雄	Kaohsiung	22°36'52"N	120°17'18"E	1993/01-2018/01
1786	永安	Yong-an	22°49'08"N	120°11'51"E	2003/10-2018/01
11781	四草	Sicao	23°01'25"N	120°6'43"E	2011/09-2018/01
1176	將軍	Jiangjun	23°12'45"N	120°04'59"E	2002/01-2018/01
1166	東石	Dongshi	23°27'00"N	120°8'22"E	1993/01-2018/01
1366	塭港	Wengang	23°28'00"N	120°07'21"E	1993/02-2018/01
1356	澎湖馬公	Penghu	23°33'37"N	119°34'37"E	1993/01-2018/01
1156	箔子寮	Boziliao	23°37'07"N	120°08'15"E	1995/04-2018/01
1456	麥寮	Mailiao	23°47'10"N	120°09'37"E	2006/01-2018/01
1436	臺中港	Taichung Port	24°17'16"N	120°31'59"E	1994/01-2018/01
1956	料羅灣	Liaoluowan	24°24'31"N	118°25'48"E	2001/05-2018/01
1966	水頭	Shuitou	24°25'16"N	118°17'21"E	2004/01-2018/01
113	外埔	Waipu	24°39'05"N	120°46'17"E	2003/07-2018/01
112	新竹	Hsinchu	24°50'55"N	120°55'14"E	1993/01-2018/01
1116	竹圍	Zhuwei	25°07'05"N	121°14'36"E	1993/01-2018/01
1102	淡水	Tamsui	25°10'33"N	121°25'29"E	2000/01-2018/01
1206	麟山鼻	Linshanbi	25°17'02"N	121°30'37"E	2003/11-2018/01
1926	馬祖	Matsu	26°09'42"N	119°56'34"E	2004/01-2018/01

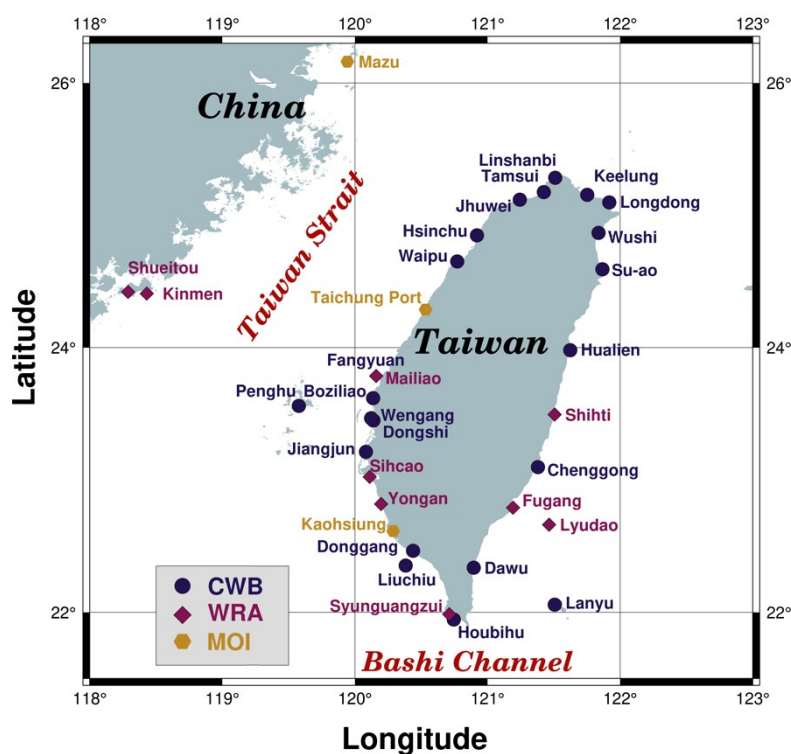


圖 1: 臺灣潮位站分佈圖

(二)、衛星測高資料

測高衛星設計於觀測全球海水面高，用來進行海洋科學研究，其優點為觀測量涵蓋近乎全球，且觀測之海水面高為相對於參考橢球的絕對量，因此觀測值不會受

到固體地球變動影響，例如地表垂直變動。衛星測高觀測原理為測高儀朝海水面發射微波(microwave)訊號，訊號經由海水面反射後傳回衛星，求得雷達波行走時間，將時間乘以光速除以二即可計算衛星至海水面高度 (H)，而衛星至參考橢球的距離 (h)可由精密軌道定軌計算取得，結合此兩項距離即可得到海水面高度($SSH=h-H$)。本研究將分別使用兩種測高資料-網格(grid)資料與沿軌跡點(along-track)資料，沿軌跡點衛星測高資料僅用於潮位模式精度分析，而網格資料用於分析每個網格上水位變化特性。沿軌跡點僅使用 Jason-2 測高衛星 2008-2016 資料，可由雷達測高資料收集 (Radar Altimeter Data Acquisition, RADs) [<http://rads.tudelft.nl/rads/rads.shtml>]資料中心取得。網格資料可由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，該資料主要結合 Topex/Poseidon、Jason-1/2/3、ERS-1/2、Envisat、GFO、Crysat-2、SaralAltiKa 以及 HY-2A 等測高衛星資料，時間涵蓋範圍為 1993/01-2019/12。Topex/Poseidon 是第一顆專為量測海流及海水面變化所設計之衛星，能提供連續時間與空間之海水面監測，其量測海水面高度之精度約為 5 公分[Shum *et al.*, 1995]，而 Jason-1/2/3 衛星為接替後續任務之衛星，四顆測高衛星的設計相同，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]。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)。

(三)、潮位模式

本研究將評估潮位模式之精度，將分別與潮位站和衛星測高資料比對，分析潮位模式與實測資料之差異。以下為欲使用的三個國內、外知名潮位模式：

a. 臺灣 MOI.18v1 潮位模式

MOI.18v1 是一套三層巢狀網格的三維潮汐模式[林勝豐等，2010]，此模型的建置方式是以美國普林斯頓大學所發展之 Princeton Ocean Model (POM) [Blumberg and Mellor, 1987]為基礎的海洋動力數值模式。模式範圍涵蓋北緯 21° - 27° 、東經 118° - 125° ，水平空間解析度為 $1/24$ 。MOI.18v1 潮位模式主要包含 26 個分潮(M2、S2、N2、K2、2N2、Mu2、Nu2、L2、T2、K1、O1、P1、Q1、S1、J1、NO1、OO1、

M4、MS4、MN4、Mm、Mf、MSf、MSm、Ssa、Sa)。MOI.18v1 模式除了可模擬天文潮外，亦可計算出大氣變化與海洋環流等影響機制所產生的海水面變化。

b. 日本 NAO.99Jb 潮位模式

日本天文廳的 NAO.99b (National Astronomical Observatory) 為基於海洋動力模型並與 Topex/Poseidon 測高衛星資料(Cycle 9-198)同化所發展的全球潮位模式 [Matsumoto *et al.*, 2000]，可提供 16 個分潮的潮位調和常數(包含 M2、S2、N2、K2、K1、O1、P1、Q1、J1、M1、OO1、2N2、Mu2、Nu2、L2、T2)，其空間解析度為 0.5° 。在日本附近海域(有涵蓋到臺灣)，NAO.99Jb 結合衛星測高與 219 個日本潮位站資料進行同化，可提供更高精度的 16 個分潮的調和常數值，NAO.99Jb 區域潮位模式的範圍為北緯 $20^\circ - 65^\circ$ 、東經 $110^\circ - 165^\circ$ ，解析度為 $5'$ 。另外，由 NAO.99L 可提供無資料同化的全球潮位模式之 7 個長周期分潮的潮位調和常數，包含：Mtm、Mf、MSf、Mm、MSm、Ssa、Sa [Takanezawa *et al.*, 2001]，故 NAO.99Jb+NAO.99L 共可以提供 23 個分潮的潮位調和常數進行比較分析。本研究後續將使用 NAO.99Jb+NAO.99L(後續簡稱為 NAO.99Jb)模型進行精度評估。

c. DTU10 潮位模式

DTU10 使用 Topex/Poseidon 和 Janson-1/2 測高衛星資料同化所發展的全球潮位模式 [Cheng and Andersen, 2010]，其水平解析度為 $1/8^\circ$ 。DTU10 潮位模式提供 M2、S2、N2、K2、K1、O1、P1、Q1、S1、M4 等 10 個分潮的潮位調和常數，其中 S1、M4 取自於 GOT4.7 潮位模式 [Ray, 1999]。

三、研究方法與步驟

(一)、潮位站資料改正

潮位站的海水面觀測量為相對於岸邊的基準點，潮位站水位觀測資料包含海水面昇降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相鄰岸邊地表之觀測量。潮位模式中並不包含氣壓效應，若欲比較潮位站資料與潮位模式，則需改正潮位站資料中之基準偏移(datum shift)和逆氣壓效應。

在使用潮位站觀測資料前須先進行資料品管，品管項目包含資料完整度評估、基準偏移初步分析、觀測量粗差別除(大於三倍標準偏差)以及地表垂直方向的非線

性變化分析等[Lan *et al.*, 2017]。若資料有上述情形，嚴重時會造成資料處理困難，甚至導致成果精度變差，此時將剔除該測站資料。分析測站資料時一般利用調和分析法(Harmonic analysis) [Parker, 2005]與結合鄰近潮位站或衛星測高資料比較進行評估。

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。首先偵測測站資料中基準偏移發生的時間點，先利用調和分析法[Parker, 2005]逐兩年擬合，並移除該時間之潮位效應。對於可能存在偏移點位，計算時間點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 2)。另外，偵測時亦將結合衛星測高資料進行比較分析。偵測出的基準偏移將利用調和分析法加上步階函數 a_j (step function)進行改正。公式如下 [Parker, 2005]:

$$TG(t) = a + b(t - t_0) + \sum_{i=1}^n [A_i \sin(\omega_i(t - t_0)) + B_i \cos(\omega_i(t - t_0))] + \sum_{j=1}^m a_j \quad (1)$$

其中 TG 為潮位站逐時水位高度資料， t 與 t_0 為時間與參考時間， a 、 a_j 、 b 、 A_i 、 B_i 為未知參數，其中 a 為截距、 a_j 為步階函數(m 為基準偏移個數)、 b 為斜率(相對海水面變化速率)， A_i 與 B_i 分別為各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($n=37$ [Parker, 2007])、 ω_i 為各分潮之頻率。

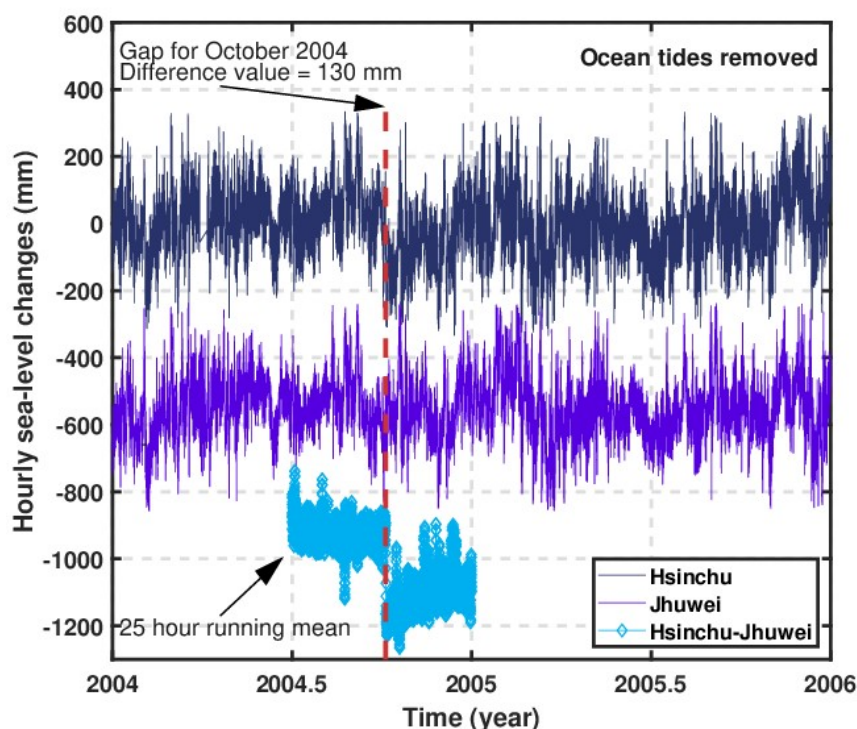


圖 2：逐時新竹(Hsinchu)潮位站資料之偏移量偵測。移除潮位效應之新竹(Hsinchu; 藍黑線)與竹圍(Jhuwei; 紫色)潮位資料、新竹(Hsinchu)與竹圍(Jhuwei)測站逐時資料相減並經 25 小時移動平均(青藍線)。

經上述改正後，潮位站資料仍包含逆氣壓效應。而前人研究發現，除了熱帶和西邊界流(western boundary current)等區域外，海洋各處海水面變化皆受到大氣壓力變化的影響[Wunsch and Stammer, 1997]，故潮位站資料需進行逆氣壓改正。動態大氣壓力改正(Dynamic Atmospheric Corrections, DAC)模型資料是自 AVISO 資料庫下載，該資料是由 Collecte Localisation Satellites (CLS) 結合 Mode`le aux Ondes de Gravité 2-Dimensions (Mog2D) 模型[Carrère and Lyard, 2003]之高頻訊號(< 20 天)與 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) [Dee *et al.*, 2011]計算的逆氣壓效應之低頻(> 20 天)訊號。DAC 資料時間涵蓋為 1993-至今，時間間隔為 6 小時，空間解析度為 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。計算時，將 DAC 資料以雙線性(bilinear)法內插成 1 小時 1 筆，前人研究[Patullo *et al.*, 1955; Ponte, 2006]指出逆氣壓效應主要影響海水面資料中的低頻訊號，其中以季節性訊號影響尤為顯著，因此可將 6 小時資料內插為 1 小時 1 筆。

(二)、潮位模式精度分析

利用潮位站與測高資料分別對於三個潮位模式進行精度評估，潮位站為近岸定點

觀測，將潮位站資料與利用潮位模式重建資料進行比較(圖 3)，計算差值平均值、差值標準偏差以及差值最大值和最小值等統計數據；從測高沿軌跡點資料中選擇最靠近臺灣四條軌跡(如 Pass 051、Pass 127、Pass 164、Pass 240)，利用潮位模式改正沿軌跡點 crossover point 的測高資料(圖 4 中 A、B 兩點)，分別計算潮位改正前、後的測高海面高度變化之標準偏差，進而求得資料 IMP[Hwang *et al.*, 2006]，其公式如下所示：

$$IMP = \frac{\sigma - \sigma_{otc}}{\sigma} \times 100\% \quad (2)$$

其中 σ 與 σ_{otc} 分別為潮位改正前、後的測高海面高度變化之標準偏差。一般而言，海水面觀測資料會受多項因子影響，當各項因子經過適當改正後，海水面變化將趨於平緩，其標準偏差應降低，因此可利用 IMP 評估何者潮位模式精度較佳。

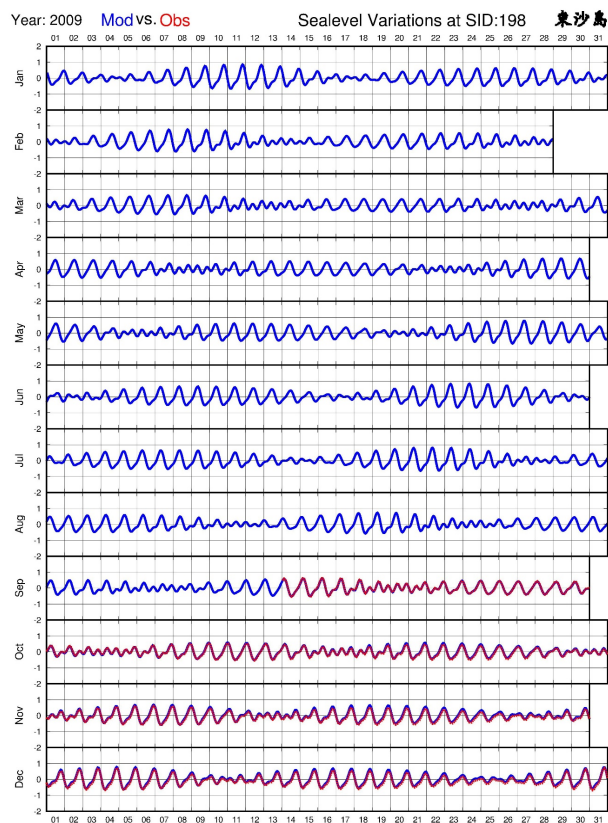


圖 3: MOL18v1 潮位模式於東沙島模擬結果並與潮位資料比較圖[內政部，2019]。

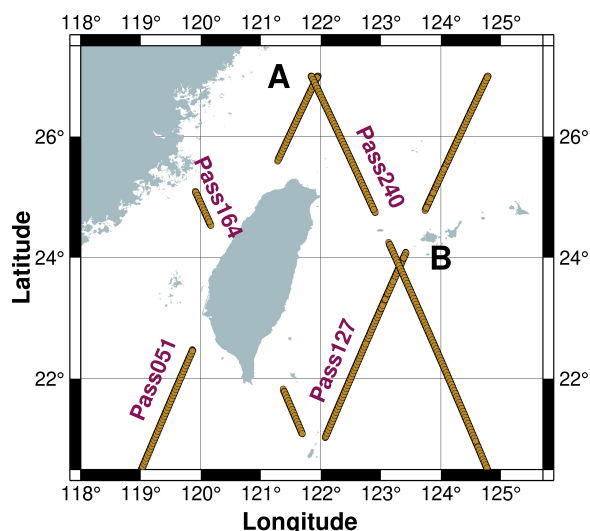


圖 4: 臺灣附近測高衛星 Jason-2 軌跡點，軌跡包含 Pass 051、Pass 127、Pass 164、Pass 240，圖中 A、B 點分別代表 Pass 051 和 Pass 240、Pass 127 和 Pass 240 軌跡之交點。

(三)、海水面上升速率與海水面季節性訊號之估算

本研究利用六參數線性擬合海水面變化，可計算出海水面上升速率與季節性變化(振幅與相位)，並以最小二乘法解算未知參數，為了避免如颱風或其他短時間劇烈變化的氣象因素影響速率之估算，因此解算過程中利用 3 倍中誤差，移除誤差量過大的數據，六參數線性擬合公式如下：

$$SL(t) = a + bt + c \sin(2\pi t) + d \cos(2\pi t) + e \sin(4\pi t) + f \cos(4\pi t) \quad (3)$$

其中 SL 為海水面高度變化之時間序列， a 為偏差， b 為海水面上升速率， 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。結合 c 與 d 以及 e 與 f 可分別計算出年週期振幅 Sa ($Sa = \sqrt{c^2 + d^2}$)

及半年週期振幅 Ssa ($Ssa = \sqrt{e^2 + f^2}$)。

四、研究成果

(一)、潮位模式精度評估

利用 33 個潮位站以及衛星測高 crossover point 資料分別評估潮位模式之精度。三個潮位模式與經氣壓修正後 33 個潮位站觀測資料進行潮高時序資料之比對。各潮位模式於 33 個潮位站之潮高均方根誤差(Root Mean Square Error, RMSE)顯示於表 2，其中 MOI.18v1 潮位模式的 RMSE 平均值最小(0.117 m)表現最好，其次為

DTU10，表現最差的為 NAO.99Jb，其 RMSE 平均值達 0.156 m。潮位站資料除了包含潮位效應，還受到資料本身品質、海面上升、海水面季節性變化以及地表垂直變動等環境因素影響，導致 RMSE 誤差量較大。因此將潮位模式與經 DAC 修正的潮位資料採調和分析所得之天文潮位相比較。各潮位模式於 33 個潮位站之潮高 RMSE 顯示於表 2，整體而言，MOI.18v1 潮位模式的 RMSE 平均值為最小(0.090 m)，且最大不超過 0.153 m，表現最好，代表 MOI.18v1 近岸平均精度低於 10 cm，其次依序為 DTU10、NAO.99Jb，表現最差的 NAO.99b 潮高 RMSE 平均值達 0.136 m。

潮位模式改正 Jason-2 測高資料前後之標準偏差與 IMP，如表 3。表中顯示改正前測高資料標準偏差為 0.44 m (A 點)與 0.93 m (B 點)，經各潮位模式改正後標準偏差降為 0.14 m (A 點) 與 0.10~0.11 m (B 點)，潮位模式改正測高資料之 IMP 為 68.2% (A 點)與 88.2~89.2% (B 點)，表示各潮位模式於此兩區域無顯著差異。

表 2: 各潮位模式與 33 個潮位站資料比對之 RMSE。潮位站資料皆已改正 DAC。

No.	Station Name	潮位模式與潮位站資料比較 (m)			潮位模式與潮位站資料調和分析成果比較 (m)		
		MOI.18v1	DTU10	NAO99Jb	MOI.18v1	DTU10	NAO99Jb
1102	淡水	0.204	0.245	X	0.151	0.202	X
1116	竹圍	0.127	0.162	0.175	0.100	0.140	0.155
112	新竹	0.141	0.182	X	0.117	0.162	X
1156	箔子寮	0.159	0.177	0.236	0.129	0.151	0.216
1166	東石	0.151	0.226	0.206	0.132	0.214	0.192
1186	東港	0.083	0.103	0.110	0.061	0.086	0.093
1196	後壁湖	0.104	0.113	0.106	0.065	0.075	0.063
1246	蘇澳	0.072	0.088	0.084	0.050	0.071	0.065
1256	花蓮	0.087	0.096	0.091	0.066	0.076	0.069
1276	成功	0.083	0.092	0.096	0.059	0.070	0.075
1356	澎湖馬公	0.122	0.161	0.259	0.089	0.137	0.243
1436	台中港	0.152	0.193	0.235	0.125	0.170	0.219
1486	高雄	0.086	0.082	0.095	0.065	0.060	0.077
1516	基隆	0.071	0.101	0.166	0.047	0.086	0.157
1366	塭港	0.164	0.236	0.198	0.142	0.221	0.181
113	外埔	0.163	0.195	0.221	0.123	0.161	0.194
1206	麟山鼻	0.121	0.168	0.199	0.101	0.153	0.186
1226	龍洞	0.071	0.093	0.112	0.054	0.080	0.101
1596	大武	0.090	0.087	0.082	0.069	0.064	0.057
1386	小琉球	0.082	0.090	0.098	0.064	0.075	0.084
1396	蘭嶼	0.106	0.102	0.110	0.081	0.076	0.085
1176	永安	0.106	0.104	0.152	0.090	0.088	0.143
1496	罈廣嘴	0.091	0.109	0.100	0.075	0.093	0.083
1586	富岡	0.086	0.090	0.087	0.054	0.059	0.055
1236	烏石	0.080	0.106	0.106	0.060	0.092	0.092
1566	石梯	0.090	0.090	X	0.069	0.069	X
1676	綠島	0.089	0.088	0.084	0.064	0.061	0.054
1926	馬祖	0.184	0.228	0.239	0.153	0.204	0.217
1456	麥寮	0.136	0.175	0.196	0.112	0.156	0.180
1786	永安	0.089	0.083	0.089	0.070	0.064	0.072
1956	料羅灣	0.174	0.236	0.291	0.120	0.199	0.262
1966	水頭	0.181	0.264	0.312	0.129	0.229	0.285

11781	四草	0.122	0.116	0.143	0.098	0.090	0.123
統計值	Mean	0.117	0.142	0.156	0.090	0.119	0.136
	STD	0.038	0.059	0.069	0.032	0.056	0.070
	Max	0.204	0.264	0.312	0.153	0.229	0.285
	Min	0.071	0.082	0.082	0.047	0.059	0.054

X 表示該模式無法計算出該地區之潮位。由於 NAO99Jb 模式網格解析度為 5'，在淡水、新竹、石梯等地附近網格為陸域，故無法推算出潮位值。

表 3: 潮位模式改正測高衛星 Jason-2 前後的海水面高度變化之標準偏差與 IMP。A 與 B 分別表示臺灣附近海域兩個測高軌跡之 crossover point。

Region	改正前	MOI.18v1		DTU10		NAO99Jb	
		改正後	IMP	改正後	IMP	改正後	IMP
A	0.44 m	0.14 m	68.2%	0.14 m	68.2%	0.14 m	68.2%
B	0.93 m	0.10 m	89.2%	0.10 m	89.2%	0.11 m	88.2%

(二)、潮位變化

本研究利用 MOI.18v1 潮位模式，模擬臺灣周圍 2010-2014 逐時潮位變化資料，並計算潮位變化之潮差與標準偏差，如圖 5 所示，其中潮差僅考慮 M2 分潮，潮差計算方法是根據 Doodson and Warburg [1941]。臺灣周圍潮差變化非常顯著，臺灣西岸可達到 4 公尺，又以台中附近為最大，而馬祖周圍更可達到 5 公尺以上；然而臺灣東岸與南岸約在 1 公尺以下(圖 5)。相似的空間分布可以由潮位變化標準偏差發現，標準偏差越大代表潮位效應越顯著，由圖可知，臺灣東岸與南岸潮位效應相對較小，臺灣西岸至中國大陸沿岸潮位效應相對較大。比較花蓮、台中港、馬祖以及金門料羅等地區之潮位變化，馬祖潮位變化最為顯著、振幅約為~4.2 m，台中港與金門料羅振幅為 3.5~3.6 m，而花蓮港潮位振幅僅約 0.9 m (圖 6)。由此可知，若在臺灣海峽進行水深測量必須進行潮位修正，才可降低潮位效應引起的誤差量。

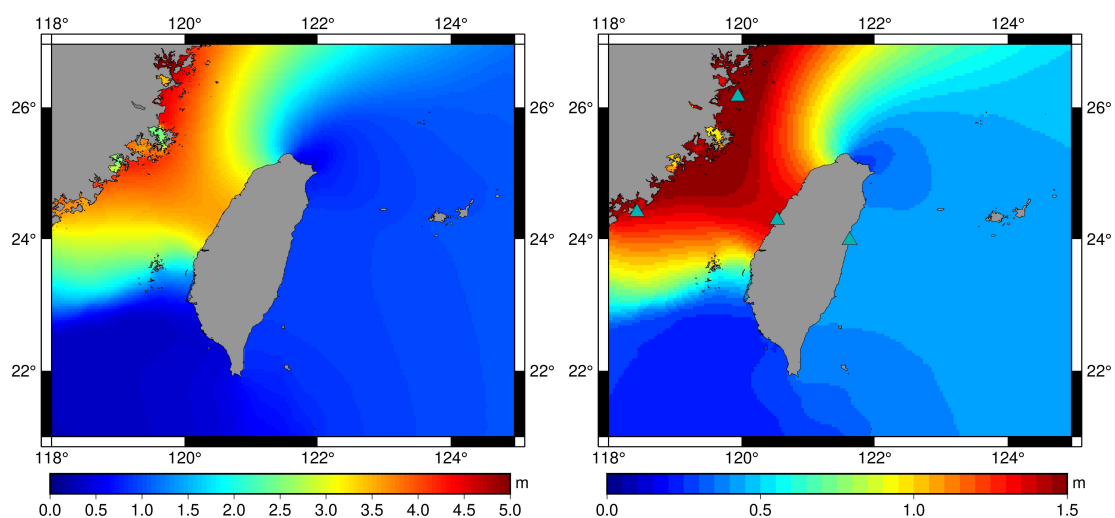


圖 5: 臺灣周圍潮位變化之潮差 (右圖)與標準偏差(左圖)。左圖中綠色三角點依序代

表位置為花蓮、台中港、馬祖以及金門料羅潮位站(由東向西)。

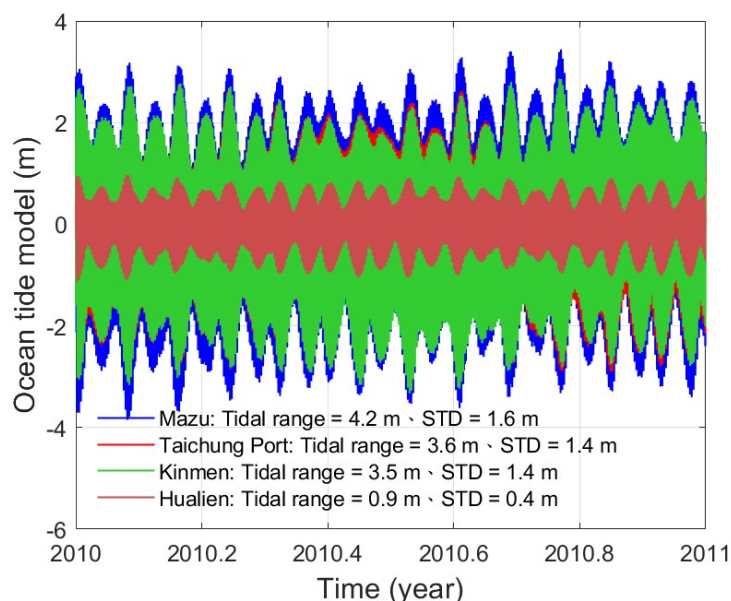


圖 6: 花蓮、台中港、馬祖以及金門料羅等地區之潮位變化(時間點為 2010 年)。

(三)、海水面變化

潮位模式僅包含日、月引力作用下形成的週期性水位升降變化，無法反應實際海水面變化以及氣象造成的逆氣壓效應。逆氣壓效應中以季節性週期訊號為主 [Ponte, 2006]，臺灣周遭海域逆氣壓效應之年週期振幅為 6~10 cm，由南往北逐漸增大，馬祖可達 10 cm 以上(圖 7)。

利用已移除氣壓與潮位效應的衛星測高資料分析臺灣周圍海水面變化，海水面變化(圖 8)與潮位變化(圖 5)之標準偏差的空間分布並不相似，由圖 8 可知，臺灣近岸海水面標準偏差偏小，約為 5~8 cm，而中國大陸沿岸以及臺灣東岸外海的海水面標準偏差可達 10 cm 以上，最大可達 16 cm。季節性訊號為海水面變化主要訊號之一 [Feng *et al.*, 2015]，利用式(3)擬合海水面季節性訊號，並估算季節性模式占海水面方差之比例，又稱為判定係數 R^2 (coefficient of determination)。臺灣周圍海域 R^2 平均值為 43%，其中又以台灣北部與台灣海峽為最大(圖 9)。圖 10 為臺灣周圍海域年週期振幅與相位變化之空間分布，約為 3~15 cm，由圖 10 可知，海水面年週期振幅於中國大陸沿岸為最大，可達 15 cm 以上。由上述成果可知，若使用潮位模式修正水深資料需考慮逆氣壓效應以及海水面之季節性變化，其中以台灣北部與台灣海峽為首要考慮之區域，才能降低誤差量。

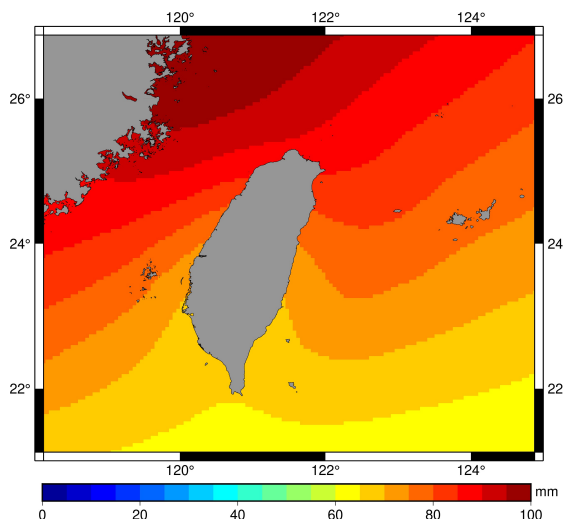


圖 7: 臺灣周圍逆氣壓效應之年週期振幅。

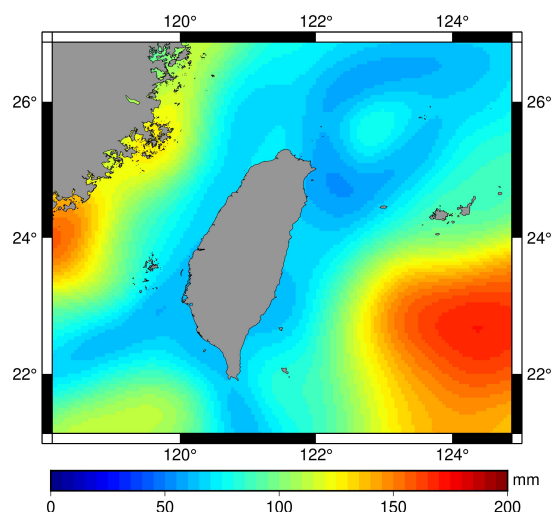


圖 8: 臺灣周圍海水面變化之標準偏差。

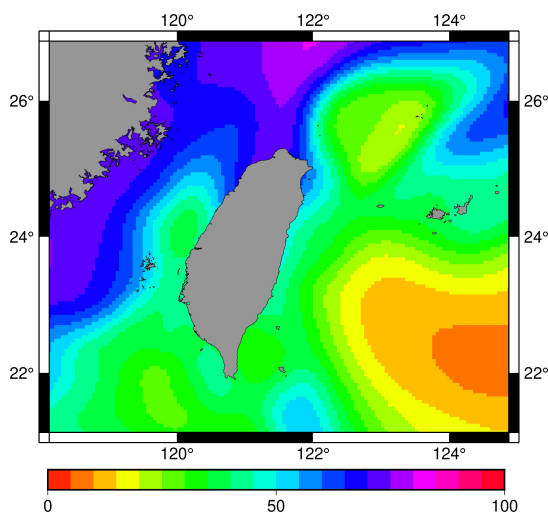


圖 9: 擬合之季節性模式占月平均海水面方差之比例。

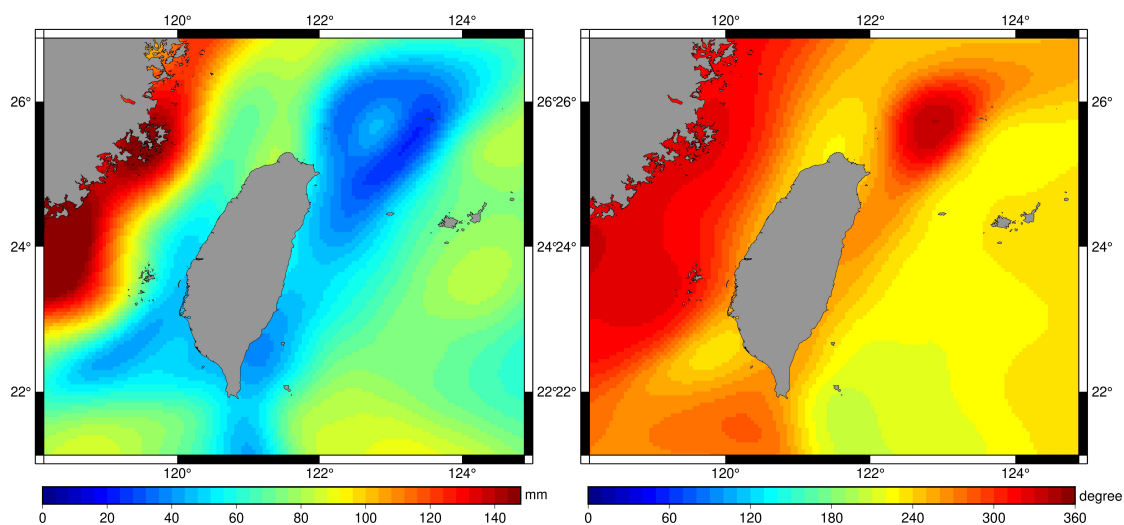


圖 10: 臺灣周圍海域年週期變化。左圖為年週期振幅、右圖為年週期相位。

(四)、海水面速率上升

以六參數線性擬合 1993-2019 測高衛星海水面資料估算出絕對海面上升速率，如圖 11 所示。由圖 11 可知，臺灣周圍海域的海水面變化主要呈現上升現象，臺灣近岸海水面速率約為 3 mm/yr，東岸外海速率相對而言較低，且越往外海速率越小，最小可低於 1 mm/yr；臺灣西岸向中國大陸的上升速率越大，最高可達 5 mm/yr (圖 11)。利用衛星測高資料估算臺灣四周海域(緯度: 21°N~26°N、經度: 119°E~123°E) 1993-2019 平均海面上升速率為 3.04±0.22 mm/yr (圖 12)，與 1993-2019 全球海面上升速率平均值(~3 mm/yr [Hamlington *et al.*, 2020])相近。整個區域海水面年週期振幅約為 5 cm (圖 12)。

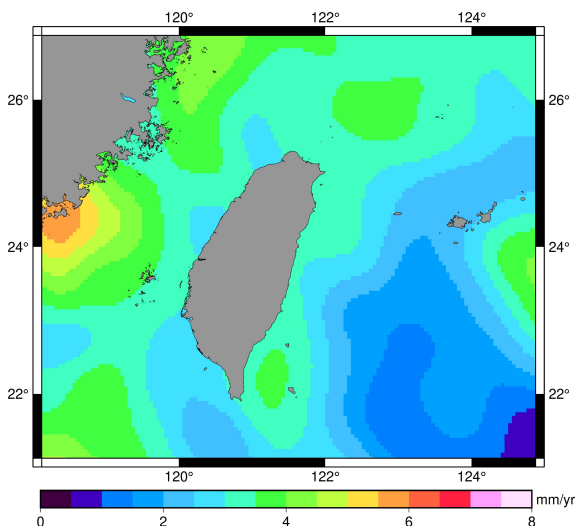


圖 11: 1993-2019 臺灣周圍海面上升速率。

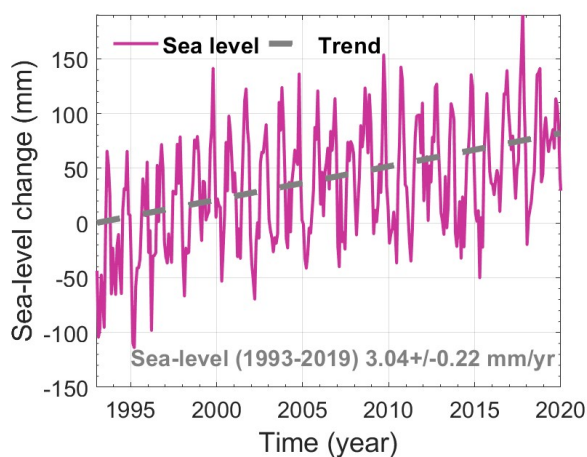


圖 12: 臺灣周圍平均(緯度: 21°N~26°N、經度: 119°E~123°E)海水面變化。1993-2019 臺灣海面上升平均速率為 3.04±0.22 mm/yr。

(五)、不同海底地形下潮位變化之差異

本研究將海底地形分為淺海(≤ 200 m)與深海(> 200 m) [Fu *et al.*, 2020]，地形資料來自於 ETOPO1 [Amante and Eakins, 2009]。潮位變化標準偏差(圖 5)依上述方式分類，成果如圖 13 所示，由圖可知，淺海潮位變化標準偏差非常大，平均標準偏差為 0.88 m (0.23~2.07 m)，較大標準偏差主要集中於臺灣海峽，由台中向西逐漸加大至中國大陸沿岸。而深海潮位變化標準偏差相對較小，平均標準偏差為 0.38 m (0.23~1.13 m)，其中西南部海域標準偏差為最低。由上述成果可知，淺海海域(如臺灣海峽)的潮位變化非常大，在此區域進行水深測量必須進行潮位修正，才能有效提高水深成果之精度。

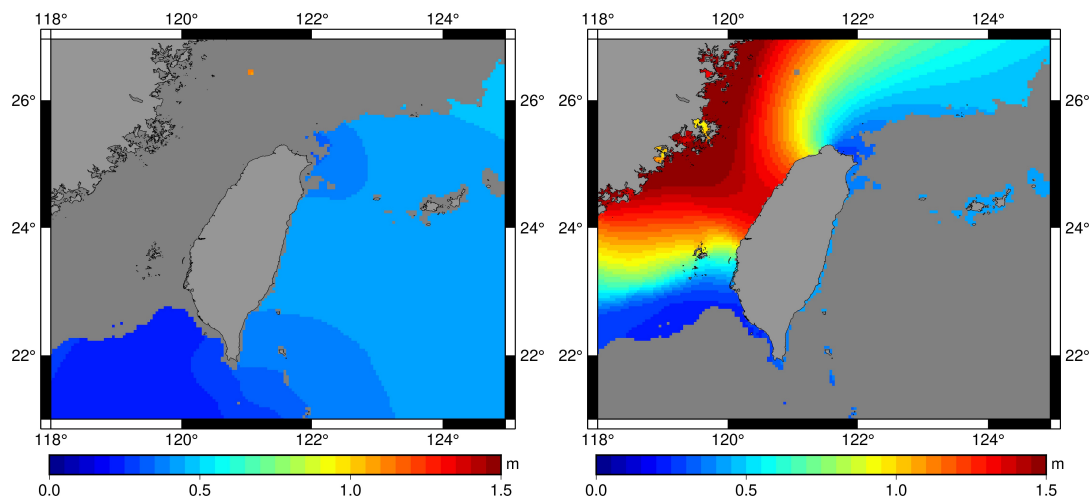


圖 13: 在深海($> 200\text{ m}$; 左圖)與淺海($\leq 200\text{ m}$; 右圖)的潮位變化之標準偏差。

(六)、不同離岸距離海水面與潮位變化之差異

利用潮位模式與衛星測高資料分別與距離最近潮位站資料(圖 1)計算差值之標準偏差，如圖 14 所示。標準偏差越大代表各海域潮位變化以及海水面變化與最鄰近潮位站差異越顯著。由圖 14 可知，臺灣東部與西南部潮位變化與最鄰近潮位站之差異相對較小，差值標準偏差約 $50\sim 100\text{ mm}$ ；而臺灣北部與西部的潮位差值標準偏差差異較大，多個海域標準偏差超過 50 cm ，表示該區域進行水深測量時須結合潮位站以及潮位分區圖進行潮位修正，才可降低水深測量誤差量。海水面差值標準偏差相對較小，但仍有部分海域差值標準偏差可達 20 cm ，如臺灣西北部、西部以及東部外海，但是近岸差異量並非皆由位置不同所導致，因為測高儀回波受到陸地影響，導致測高資料於近岸精度較低 [Iliffe *et al.*, 2013]，此部分未來可加入測高波形重定進行後續研究。

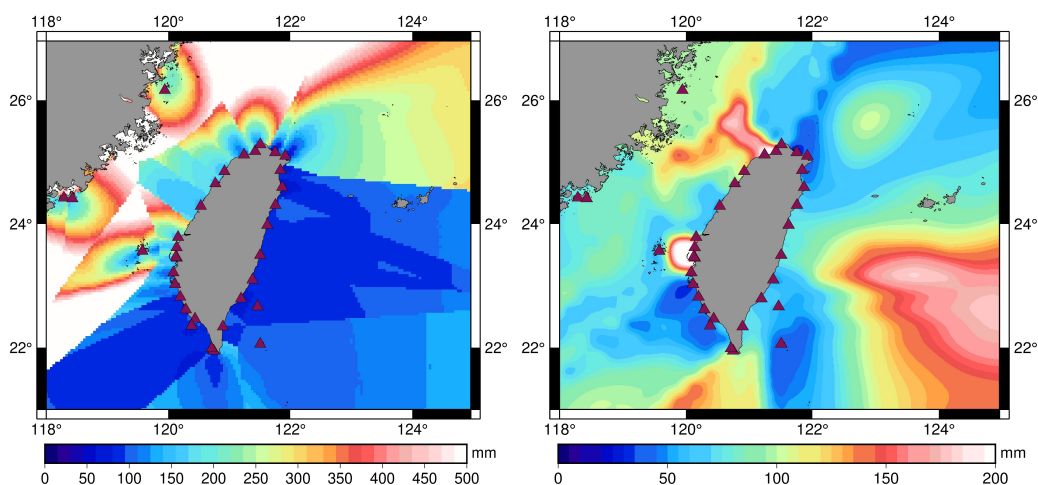


圖 14: 各海域潮位變化(左圖)以及海水面變化(右圖)與距離最近潮位站(紅色三角形)

之差值標準偏差。紅色三角形代表潮位站位置。

五、結論與建議

本研究利用臺灣周圍潮位站與衛星測高資料對於 MOI.18v1、NAO.99b 以及 DTU10 等潮位模式進行精度評估。MOI.18v1 潮位模式的 RMSE 平均值為 0.090 *m* (0.047~0.153 *m*)表現最佳; 而三個潮位模式改正 Jason-2 測高資料之 IMP 為 68.2% (A 點)與 88.2~89.2% (B 點), 表示各潮位模式於此兩區域無顯著差異, 若要更詳細比較各潮位模式於外海之優劣, 需要結合更多測高資料進行分析比較。由成果可知, 臺灣周圍海域以 MOI.18v1 潮位模式精度為最高, 近岸平均精度可低於 10 *cm*。

利用潮位站、衛星測高以及 MOI.18v1 潮位模式分析在不同離岸距離或海底地形情況下, 分別計算潮位變化與海水面變化之差異。臺灣周圍海水面變化與潮差變化之標準偏差的空間分布並不一致。臺灣附近潮差變化非常顯著, 西岸潮差可達到 4 公尺, 越往臺灣海峽潮差變化越大, 至馬祖可達到 5 公尺以上, 但東岸與南岸約在 1 公尺以下。潮差變化大的區域主要分布於淺海(≤ 200 *m*), 如臺灣海峽, 因此在淺海區域進行水深測量必須進行潮位修正, 才能有效提升水深測量成果之精度。各海域潮位變化與距離最近潮位站資料相比較, 差值標準偏差在臺灣北部與西部海域相對較大, 部分區域標準偏差可超過 50 *cm*, 表示這些區域進行水深測量時必須結合潮位站以及潮位分區圖進行潮位修正, 才可降低水深測量誤差量。

潮位模式僅包含潮位變化, 無法反應實際海水面變化以及氣象造成的逆氣壓效應。臺灣周遭海域逆氣壓效應之年週期振幅為 6~10 *cm*, 由南往北逐漸增大, 馬祖可達 10 *cm* 以上。臺灣海水面年週期振幅為 3~15 *cm*, 於中國大陸沿岸為最大, 表示若使用潮位模式修正水深資料需考慮逆氣壓效應與海水面之季節性變化。此外, 由 1993-2019 測高衛星海水面資料計算之絕對海面上升速率, 臺灣近岸海水面速率約為 3 *mm/yr*, 東岸外海海水面相對偏低; 臺灣西岸至中國大陸的海水面速率較高, 最高可達 5 *mm/yr* (圖 11)。臺灣四周海域(緯度: 21°N~26°N、經度: 119°E~123°E) 1993-2019 平均海面上升速率為 3.04±0.22 *mm/yr*, 與全球海水面速率平均值(~3 *mm/yr* [Hamlington *et al.*, 2020])相近。

誌謝

本研究成果承蒙科技部專題研究計畫-「海水面變化對臺灣水深測量之影響 (MOST 109-2222-E-019-001-)」經費補助之支持, 方能順利進行且完成, 以

及中央氣象局和水利署之潮位站觀測資料之提供。感謝 AVISO 和 RADs 研究中心提供衛星測高資料。

參考文獻

- 內政部，2019，我國近岸平均海水面與海潮模式精進工作案。
- 林勝豐、胡哲魁、顏志偉，2010，臺灣四週上層海域海流能量計算，《第 32 屆海洋工程研討會論文集》，基隆市，803 - 807。
- 薛憲文、史天元、徐佳筠，2012，水域測深方法暨原理探討，《航測及遙測學刊》，16(3)，203 - 217。
- Amante, C., and B.W. Eakins, 2009, ETOPO1 1 Arc Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis, NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24.
- AVISO and PODAAC User Handbook, 2001, IGDR and GDR Jason Products.
- Blumberg, A.F., and G.L. Mellor, 1987, A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model, in Three-Dimensional Coastal Ocean Models, Vol. 4, edited by N. Heaps, pp. 208, American Geophysical Union, Washington, D.C..
- Carrère, L., and F. Lyard, 2003, Modeling the barotropic response of the global ocean to atmospheric wind and pressure forcing—Comparisons with observations, *Geophys. Res. Lett.*, 30(6), 1275, doi:10.1029/2002GL016473.
- Cheng, Y., and O.B. Andersen, 2010, Improvement in global ocean tide model in shallow water regions, Poster, SV.1-68 45, OSTST, Lisbon, Oct.18-22.
- Dee, D.P., S.M. Uppala, A.J. Simmons, P. Berrisford, P. Poli, S. Kobayashi, U. Andrae, M.A. Balmaseda, G. Balsamo, P. Bauer et al., 2011, The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 137(656), pp.553–597.
- Doodson, A.T., and H.O. Warburg, 1941, Admiralty Manual of Tides, 270 pp., H.M. Stationery Office, London.
- Feng, X., M.N. Tsimplis, M. Marcos, F.M. Calafat, J. Zheng, G. Jorda, and P. Cipollini, 2015, Spatial and temporal variations of the seasonal sea level cycle in the northwest Pacific, *J. Geophys. Res. Oceans*, 120, pp.7091–7112.
- Fu, Y., Y. Feng, Do. Zhou, X. Zhou, J. Li, and Q. Tang, 2020, Accuracy assessment of global ocean tide models in the South China Sea using satellite altimeter and tide gauge data, *Acta Oceanol. Sin.*, 39(12), pp.1–10.
- Guenther, G.C., 2007, Airborne LiDAR Bathymetry, Digital Elevation Model Technologies and Applications: The DEM Users Manual, 2nd edition, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, Maryland.
- Hamlington, B.D., C.G. Piecuch, J.T. Reager, H. Chandanpurkar, T. Frederikse, R.S. Nerem, J.T. Fasullod, and S.H. Cheon, 2020, Origin of interannual variability in

- global mean sea level, *P. Natl. Acad. Sci. USA*, 117(25), pp.13983–13990.
- 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, *J. Geodesy*, 80, pp.204-216.
- Kuo, C.Y., C.K. Shum, A. Braun, K.C. Cheng, and Y. Yi, 2008, Vertical Motion determined using Satellite Altimetry and tide Gauges, *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 19, pp.21–35.
- 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, doi:10.3390/w9070480.
- Lan, W.H., 2018, Assessment of seasonal-to-decadal variability and trends of regional sea level in the North Pacific Ocean using satellite altimetry and tide gauges. Ph. D. Dissertation. Department of Geomatics, National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan.
- 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), pp.254-262.
- Matsumoto, K., T. Takanezawa, and M. Ooe, 2000, Ocean Tide Models Developed by Assimilating TOPEX/POSEIDON Altimeter Data into Hydrodynamical Model: A Global Model and a Regional Model Around Japan, *J. Oceanogr.*, 56, pp.567–581.
- Parker, B., 2005, Tides, In *Encyclopedia of Coastal Science*; Schwartz, M.L., Ed.; Springer: Dordrecht, The Netherlands; pp.987–996.
- Parker, B., 2007, *Tidal Analysis and Prediction*, NOAA Special Publication NOS COOPS 3. U.S. Department of Commerce, Silver Spring, pp.1–378.
- Patullo, J., W. Munk, R. Revelle, and E. Strong, 1955, The seasonal oscillation in sea level, *J. Mar. Res.*, 14, pp.88–155.
- Ponte, R.M., 2006, Low-frequency sea level variability and the inverted barometer effect, *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 23, pp.619–629.
- Proshutinsky, A., V. Pavlov, and R.H. Bourke, 2001, Sea level rise in the Arctic Ocean, *Geophys. Res. Lett.*, 28(11), pp.2237–2240.
- Proshutinsky, A., I.M. Ashik, E.N. Dvorkin, S. Hakkinen, R.A. Krishfield, and W. R. Peltier, 2004, Secular sea level change in the Russian sector of the Arctic Ocean, *J. geophys. Res. Oceans*, 109, doi:10.1029/2003jc002007.
- Ray, R.D., 1999, A global ocean tide model from TOPEX/Poseidon altimetry: GOT99.2, In *NASA Tech. Memo*, 58Greenbelt, MD: Goddard Space Flight Center.
- Ray, R.D., B.D. Beckley, and F.G. Lemoine, 2010, Vertical crustal motion derived from satellite altimetry and tide gauges, and comparisons with DORIS measurements, *Adv. Space Res.*, 45(12), pp.1510–1522.

- Shum, C.K., J.C. Ries, and B.D. Tapley, 1995, The accuracy and applications of satellite altimetry, *Geophys. J. Int.*, 121, pp.321–336.
- Takanezawa, T., K. Matsumoto, M. Ooe, and I. Naito, 2001, Effects of the Long-period Ocean Tide on Earth Rotation, Gravity and Crustal Deformation Predicted by Global Barotropic Model periods from Mtm to Sa, *J. Geod. Soc. Japan*, 47, pp.545–550.
- Wu, D., G.H. Fang, X.M. Cui, and F. Teng, 2018, An analytical study of M2 tidal waves in the Taiwan Strait using an extended Taylor method, *Ocean Sci.*, 14, pp.117–126.
- Wunsch, C., and D. Stammer, 1997, Atmospheric loading and the oceanic “inverted barometer” effect, *Rev. Geophys.*, 35(1), pp.79–107.

中華民國地籍測量學會「國土測繪與空間資訊」 期刊論文審查辦法

中華民國 101 年 09 月 25 日第 16 屆第 6 次理監事聯席會議通過

第一條 為規範「國土測繪與空間資訊」期刊論文審查辦法(以下簡稱本辦法)，得依本會編輯委員會組織簡則第二條規定訂定之。

第二條 來稿經登記後由總編輯就來稿性質，邀請相關專長之編輯委員推薦審查委員。編輯委員會負責對審查委員及投稿作者保持雙向匿名方式審查，審查作業程序如附圖。

第三條 審查委員應於接到論文後三週內審查完畢，並將論文審查表(如附表)，連同論文寄回編輯委員會，審查意見表中須明確勾選其中一項：

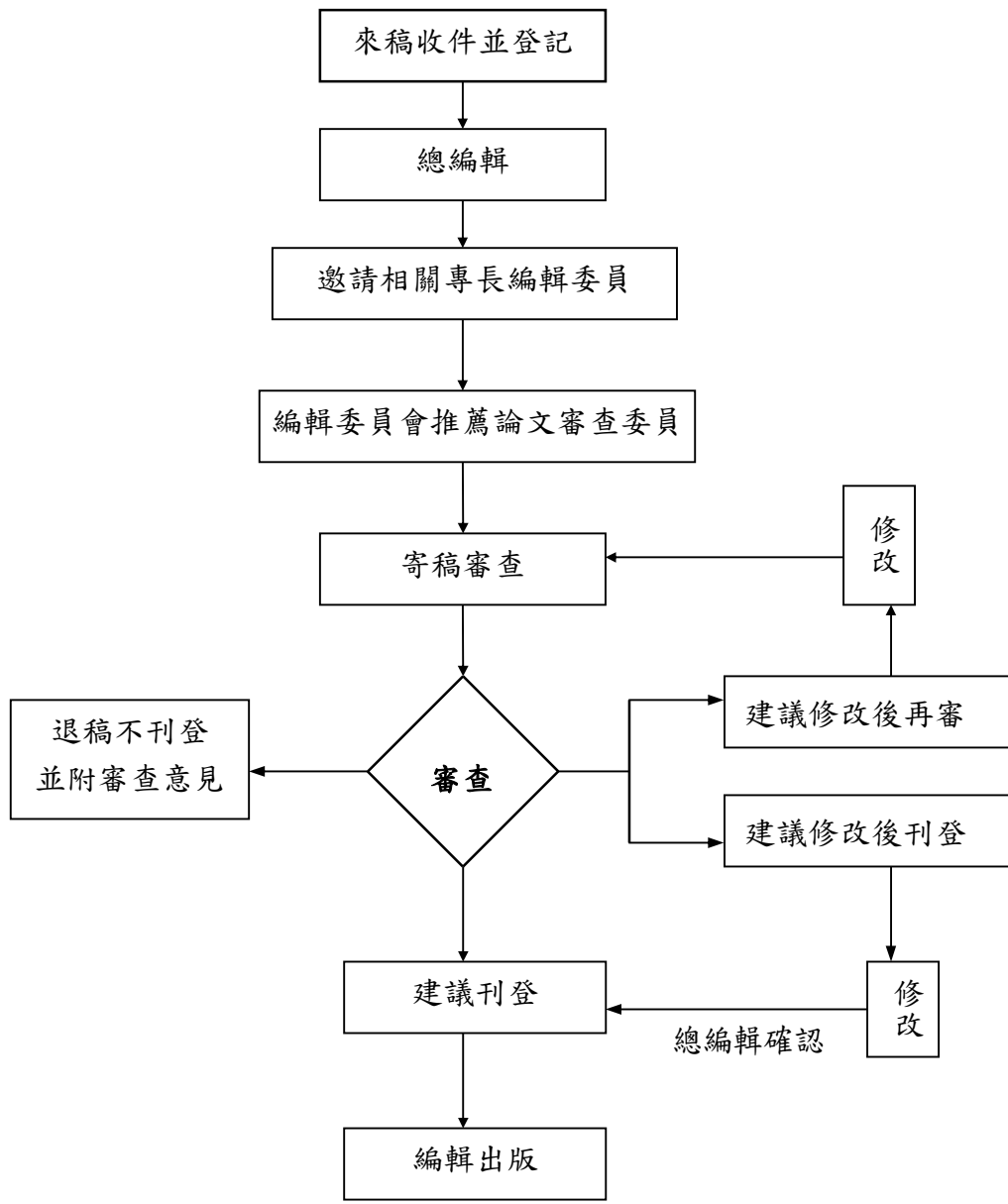
1. 刊登。
2. 修改後刊登(應列明審查意見及建議事項)。
3. 修改後再審(應列明審查意見及建議事項)。
4. 不適刊登(應列明審查意見)。

第四條 審查結果處理方式：

處理 方式 第一位 審查委員意見 第二位 審查委員意見	刊登	修改後刊登	修改後再審	不適刊登
刊登	刊登	寄回修改	寄回修改後再審	第三位審查
修改後刊登	寄回修改	寄回修改	寄回修改後再審	第三位審查
修改後再審	寄回修改後再審	寄回修改後再審	寄回修改後再審	不適刊登
不適刊登	第三位審查	第三位審查	不適刊登	不適刊登

附註：再審以一次為限。

第五條 本辦法經理監事會通過後實施，修改時亦同。



論文審查流程圖

投稿須知

所有稿件以未曾在國內、外以任何形式刊載為限，且稿件內容不得有侵犯他人著作權或商業宣傳行為，否則由作者自行負法律之責任。文體以中文或英文撰寫為原則，並附中文及英文摘要。稿件須加註標點、分段及編列頁碼。內容編排以下列順序為原則：（一）封面：包括中文及英文之論文名稱、作者姓名、作者所屬單位、聯絡地址、電話、傳真、電子郵件住址；（二）中、英文摘要及關鍵詞等；（三）內文；（四）註釋；（五）謝誌；（六）參考文獻；及（七）附錄與圖表。審查通過後，無法直接由電腦列印之圖、表，應另附完稿之圖、表（不超過A4紙張），以利編排。圖或照片應以黑白為原則，如需彩色印刷請作者自行負擔費用。內文所引用之文獻須列於參考文獻，參考文獻請以姓氏筆劃多寡，依序以中文列出，之後再依英文姓氏之英文字母，依序以英文列出。各項格式書寫方式，請參考下列說明：

各項格式說明如下：

壹、文書檔案採 A4 直式橫寫書格式，版面邊界分別為上（2.54cm）、下（2.54cm）、左（3cm）、右（2.8cm），字體以新細明體及英文 Times New Roman 等兩種字體排版。

貳、首頁（Title page），應包含下列內容：

一、標題（Article Title）：包括中、英文文章篇名。

二、作者（Author's Name）：

1. 包括中、英文作者姓名。
2. 分別以中、英文註腳載明作者的職稱、單位。若作者有數人，則以阿拉伯數字 1, 2, 3... 個別標示。
3. 須標示通訊作者(加註*)，註明連繫電話、E-mail，英文電話請以國際電話方式書寫。

三、摘要（Abstract）：包括中、英文摘要。

四、關鍵字（Keywords）：包括中文、英文關鍵字，分別列於中、英文摘要之下。

參、正文（Manuscript）

一、稿件標題章節編號層次及順序

中文請按「一，（一），1，（1），a」順序排列；英文則按「1，1.1，1.1.1...」順序排列。

二、引述用例

（一）直接引述：

中文請用單引號「」；英文請用雙引號“ ”，並以括弧標示引述文獻頁次。

（二）引述中復有引述，或特殊引用時：

中文單引號「」在外，雙引號『』在內。英文雙引號“ ”在外，單引號‘ ’在內。

三、文獻引述用例

(一) 文中註明引述文獻

1. 請以（作者，年份）方式表示。
2. 若有數篇文章以分號（；）區隔；中英文文獻分開，並各自以引述文獻之出版年份先後依序排列。
3. 若同一作者，有數篇文章同時引述，則以（作者，年份 1、年份 2）；若同一作者有同一年發表文章同時引述，則以（年份 a, b）表示。
4. 若一篇文章有 2 位作者，請全部列出。中文為（作者 A 與作者 B，年份）；英文為（作者 A and 作者 B, 年份）
5. 若一篇文章有 3 位以上作者（含 3 位），中文請用（第一位作者等，年份）；英文請（第一位作者 *et al.*, 年份）用。
6. 英文期刊第一作者姓在前，名在後，第二作者之後，名在前，姓在後。

(二) 文中已有作者姓名時

1. 請以作者（年份）方式表示
2. 若有數篇文章同時引述，則以作者 A（年份）、作者 B（年份）…表示
3. 若有必要加註說明時，請用註腳，內文註腳號碼使用上標

四、圖版、插圖及表用例

1. 圖名請置於圖之正下方，並以圖 1、圖 2……方式表示。
2. 表名請置於表格之正上方，並以表 1、表 2……方式表示。
3. 若引用他人圖表需註明資料來源。

五、公式寫法用例

以(1)、(2)、(3)…依序編號。例： $\hat{X} = (A^T P A)^{-1} A^T P L$ (1)

肆、參考文獻(References)

- 一、專書：作者，年份，《書名》，版次，出版地：出版者。
- 二、期刊論文：作者，年份，篇名，《期刊名》，卷期數，頁碼。
- 三、研討會論文：作者，出版年，論文名稱，《研討會名稱》。
- 四、博碩士論文：作者，年份，《論文名稱》，學校科系名稱(碩/博士論文)。
- 五、網路等電子化資料：作者（單位），年份，篇名，網站名稱，網址。
- 六、技術報告或研究報告：作者，年份，《報告名稱》，研究單位。

國土測繪與空間資訊期刊

TAIWAN JOURNAL OF GEOINFORMATICS

編輯委員會

主任委員 史天元 國立交通大學土木工程學系

編輯委員 (依姓氏筆劃順序排列)

周天穎 逢甲大學土地管理學系

甯方璽 國立政治大學地政學系

曾國欣 國立中央大學太空及遙測研究中心

張智安 國立交通大學土木工程學系

楊 名 國立成功大學測量及空間資訊學系

蔡慧萍 國立中興大學土木工程學系

韓仁毓 國立臺灣大學土木工程學系

饒瑞鈞 國立成功大學地球科學系

總 編 輯 周天穎 逢甲大學土地管理學系

編 輯 葉美伶 逢甲大學地理資訊系統研究中心

陳鶴欽 內政部國土測繪中心

黃筱晴 逢甲大學地理資訊系統研究中心

發 行 人 洪本善 理事長 逢甲大學土地管理學系

鄭彩堂 主 任 內政部國土測繪中心

出 版 所 中華民國地籍測量學會

內政部國土測繪中心

國土測繪與空間資訊
TAIWAN JOURNAL OF GEOINFORMATICS

第十卷第一期

民國一一一年一月

Vol. 10, No. 1

January 2022

目 錄

CONTENTS

最低天文潮位計算標準作業程序探討

張憲國、史天元.....1

On the Standard Operation Procedures of LAT Computations

Hsien-Kuo Chang, Tian-Yuan Shih

高程現代化於海洋測量之實踐

史天元、薛憲文.....21

The Realization of Height Modernization in Hydrographic Surveying

Tian-Yuan Shih, Shiahn-Wern Shyue

建置我國垂直基準轉換模式

呂建興、黃金維、藍文浩、王成機、郭重言.....37

Establishment of vertical datum transformation model for Taiwan

Jian-Sing Lyu, Chein-way Hwang, Wen-Hau Lan, Cheng-Gi Wang, Chung-Yen Kuo

水深測量之潮位修正方法

李建鋒、王成機.....65

Tide Correction methods for Bathymetry Survey

Chien-Feng Lee, Cheng-Gi Wang

我國電子航行圖測製發行流程

江繼元、陳彥欵、張淑淨、王成機.....77

Procedures for Taiwan Electronic Navigational Charts

Chi-Yuan Chiang, Yan-Di Chen, Shwu-Jing Chang, Cheng-Gi Wang

海水面變化對水深測量之影響

藍文浩、郭重言、林勝豐.....99

Impact of sea level variations on hydrographic survey

Wen-Hau Lan, Chung-Yen Kuo, Sheng-Fong Lin