

出國報告（出國類別：研習）

赴美國夏威夷太平洋海嘯警報中心
研習相關預警技術及觀測作業之應用

服務機關：交通部中央氣象局

姓名職稱：李巧盈 技士

派赴國家：美國

出國期間：民國 106 年 6 月 28 日至 7 月 14 日

報告日期：民國 106 年 9 月 6 日

摘要

隸屬於美國國家海洋及大氣總署之太平洋海嘯警報中心主要任務為即時監測太平洋海域地震，快速演算海嘯事件，評估是否有海嘯威脅，並通報太平洋海域的國家，其海嘯預警技術成熟且具豐富的維運經驗。臺灣地區海嘯監測作業為中央氣象局地震測報中心所負責，為強化氣象局地震海嘯監測作業，本次研習主要學習該機構即時潮位資料展示、處理與分析等技術，及觀摩其地震海嘯監測作業模式。相關成果的落實應用可以提昇臺灣地區海嘯預警與觀測技術，也藉此檢視氣象局海嘯監測作業待改進之處。

目次

壹、目的.....	1
貳、過程.....	2
一、行程.....	2
二、研習重點.....	4
參、心得與建議.....	19
肆、參考文獻.....	21

壹、目的

太平洋海嘯警報中心(Pacific Tsunami Warning Center, PTWC)隸屬於美國國家海洋及大氣總署(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)，主要任務為透過監測太平洋海域的大規模地震為依據，快速模擬海嘯波高並判斷是否造成海嘯威脅，即時提供夏威夷當地與環太平洋國家海嘯預警與觀測資訊。而臺灣地區海嘯監測為中央氣象局(簡稱氣象局)地震測報中心所負責，由於臺灣地震觀測網分布的限制，氣象局海嘯預警作業分為兩個部分辦理：近海海嘯與遠地海嘯。其中，近海海嘯警報作業與氣象局地震速報系統結合，一旦臺灣近海發生大型淺層海底地震，氣象局將從預先建立的臺灣地區單位海嘯資料庫提取海嘯到時資訊，快速估算海嘯波高並發布海嘯警報；然而，太平洋海域之遠地海嘯則需仰賴太平洋海嘯警報中心公告的地震海嘯資訊，據以辦理發布作業。

過去氣象局尚未建立海嘯速算系統時，必須完全倚賴 PTWC 提供的海嘯電報研判海嘯是否衝擊臺灣，並視海嘯影響程度發布臺灣地區的海嘯預警。近幾年，在中央大學吳祚任教授與 PTWC 王代林博士的協助之下，氣象局已建置兩套海嘯模擬速算系統：Cornell Multi-grid Coupled Tsunami Model(COMCOT)與 real-time tsunami forecast model(RIFT)，一旦收到 PTWC 地震海嘯電報，在取得電報內容的地震資訊後，依據氣象局海嘯預警之需求快速計算海嘯波傳模式，取得臺灣沿岸完整的海嘯到時與波高等預報數據，再透過氣象局海嘯發布系統發布臺灣地區海嘯資訊。

目前，氣象局已擁有海嘯模擬速算技術、穩定的海嘯發布系統，惟仍需加強海嘯觀測作業，以及強化完整的即時潮位接收、展示與分析技術。一旦發生海嘯事件，氣象局透過即時監控全球潮位站的觀測數據可以了解海嘯能量主要傳遞方向與衰減情況，評估海嘯威脅程度與範圍，並據以發布海嘯資訊供防救災單位單位應用。此外，因應氣象局海嘯預警浮標建置計劃，未來氣象局所自行建置之浮標，將併同全球深海海嘯計(Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis, DART) 觀測資料納入氣象局海嘯測報作業，觀測數據經處理後將可用來修正模擬數據，提升海嘯預報的準確性。本次派員出國研習之主要目的即為學習潮位資料處理與分析之

技術，建置全球潮位資料展示平臺和觀摩 PTWC 地震海嘯監測作業模式，並汲取 PTWC 海嘯預警與觀測作業之實務經驗，以強化我國海嘯監測作業。

貳、過程

氣象局派職赴 PTWC 研習地震海嘯相關技術，研習期間為 2017 年 6 月 28 日至 7 月 14 日。此行有賴 PTWC 王代林博士的幫忙，從行前相關授權文件的準備，研習行程的安排，到當地工作與生活上的協助，讓職很順利的完成這一次研習，並獲得很多寶貴的經驗。

PTWC 於 2015 年從夏威夷歐胡島西南部 EWA Beach 遷址至珍珠港軍事基地 Ford Island 內的 Inouye Regional Center(IRC)大樓，進入基地管制區的外國人需先取得通行授權文件，且進出 IRC 大樓亦需 PTWC 人員陪同，人員控管上相當嚴謹。此次為期約兩周的研習除了觀摩 PTWC 作業環境與模式，主要著重於技術層面，大部分時間向 PTWC 副主任 Stuart Weinstein 與王代林顧問學習海嘯模擬與觀測技術，此外，也參與兩次 PTWC 內部會議，以期對該中心其他同仁有更多的認識。

本次研習行程概要與重點成果彙整如下：

一、行程

06/28 (三)

- 臺灣時間 23:00 由桃園國際機場搭乘中華航空至美國夏威夷州丹尼爾-井上國際機場(原為檀香山國際機場，於 2017 年 4 月 27 日改名)
- 當地時間下午抵達丹尼爾-井上國際機場
- 前往 Joint Base Pearl Harbor-Hickam 領取 Ford Island 基地通行證

06/29 (四)

- 閱讀潮位分析文獻
- 安裝 Octave 軟體

06/30 (五)

- 參觀 PTWC 作業室，王代林博士介紹作業概況

07/03 (一)

- 王代林博士指導如何分析全球潮位站資料

07/04 (二)

- 整理潮位資料分析流程

07/05 (三)

- 參與 PTWC staff meeting
- 副主任 Stuart Weinstein 介紹 TideTool 軟體的特色與操作方式

07/06 (四)

- 閱讀 TideTool 說明手冊
- 王代林博士說明 RIFT 海嘯速算系統更新內容

07/07 (五)

- 副主任 Stuart Weinstein 協助安裝與設定 TideTool 軟體
- Tammy Fukuji 協助安裝與設定 TTT 軟體

07/10 (一)

- 王代林博士指導如何分析 DART 測站與 CWB 測站的潮位資料
- 副主任 Stuart Weinstein 協助修正 TideTool 程式

07/11 (二)

- 王代林博士協助更新 RIFT 海嘯速算程式
- 更新 TideTool 軟體至最新版本 V10.55 並測試

07/12 (三)

- 參與 PTWC staff meeting，向 PTWC 人員介紹氣象局海嘯監測作業，同時 National Tsunami Warning Center(NTWC)人員也透過遠距離通訊方式一同討論
- 王代林博士協助更新 RIFT 海嘯速算程式
- Nathan Becker 協助更新 Generic Mapping Tools(GMT)的 dbase 資料庫，以利 RIFT 相關程式更新

07/13 (四) 當地時間搭乘凌晨 01:15 中華航空班機返臺

07/14 (五) 臺灣時間上午抵臺

二、研習重點

本次研習重點為海嘯模擬技術更新與觀測資料分析技術，後者包括分析潮位站歷史潮位資料以提供潮汐預報、分析海嘯訊號、以及使用 TideTool 軟體即時監控全球潮位資料收錄情況與海水位變化。若有海嘯事件，原始觀測數據與理論潮位之水位差值可以協助判斷海嘯到時與海嘯波高，此觀測數據也可以用來調整海嘯模擬數值，提升海嘯預報資訊的準確度。以下逐一說明各項研習成果：

(一)海嘯速算模式更新

王代林博士是氣象局顧問之一，曾於來氣象局指導期間協助建置 RIFT 海嘯速算系統，模擬一筆地震引發的海嘯事件需要震源參數(包含震央經緯度、震源深度、地震規模與震源機制)、斷層參數(包含斷層面長度、寬度與斷層位移量)與海底地形資料等資訊。然而，地震發生第一時間僅知道地震初始破裂位置與規模，震源機制與斷層參數都是需待收錄到完整的地震波形經分析計算後得到，通常約於地震發生後數小時至數天的時間才可取得。

震源機制是影響海嘯能量傳遞方向的主要因素之一，為了提供海嘯災防快速應變，RIFT 速算系統採用(1)發震位置附近的歷史震源機制資料或是(2)美國地質調查局(United States Geological Survey, USGS)全球板塊構造線資料庫 (tectonic plate boundaries, 圖 1) 設定震源機制預設值，評估可能的震源機制以快速計算出可靠的海嘯模擬結果。若採用後者，震源機制的走向預設值為距離震央位置最近之構造線的走向，傾角預設值為 15 度，滑移角預設值為 90 度。

當地震發生於聚合型板塊邊界時，由於板塊構造在不同深度下有不同的隱沒角度，為了提升隱沒帶地震海嘯模擬結果的可靠性，此次新增第三種震源機制預設值設定的方式，加入 USGS 的全球隱沒帶板塊模型資料庫(slab models for subduction zones)，若地震發生在隱沒帶上，可以從該資料庫提取更接近實際構造的數據設定震源機制走向(圖 2)與傾角(圖 3)預設值，滑移角預設值為 90 度，此外，也可依據隱沒板塊資料庫調整震源深度(圖 4)。



圖 1 USGS 全球板塊構造線資料庫。綠線為張裂型板塊邊界，紅線為錯動型板塊邊界，藍線為聚合型板塊邊界，白線為不明確的板塊邊界型態。(取自 <https://earthquake.usgs.gov/learn/plate-boundaries.kmz>)

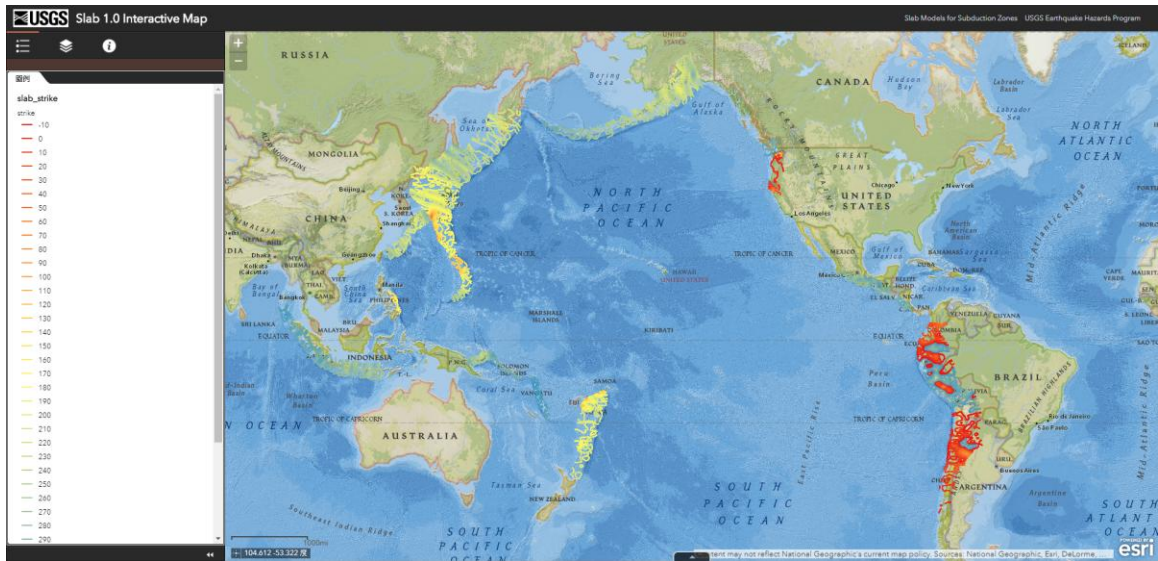


圖 2 USGS 全球隱沒帶板塊模型資料庫之板塊隱沒走向分布。(取自 <http://usgs.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=de81616029224bf699813ef7941a2ee0>)

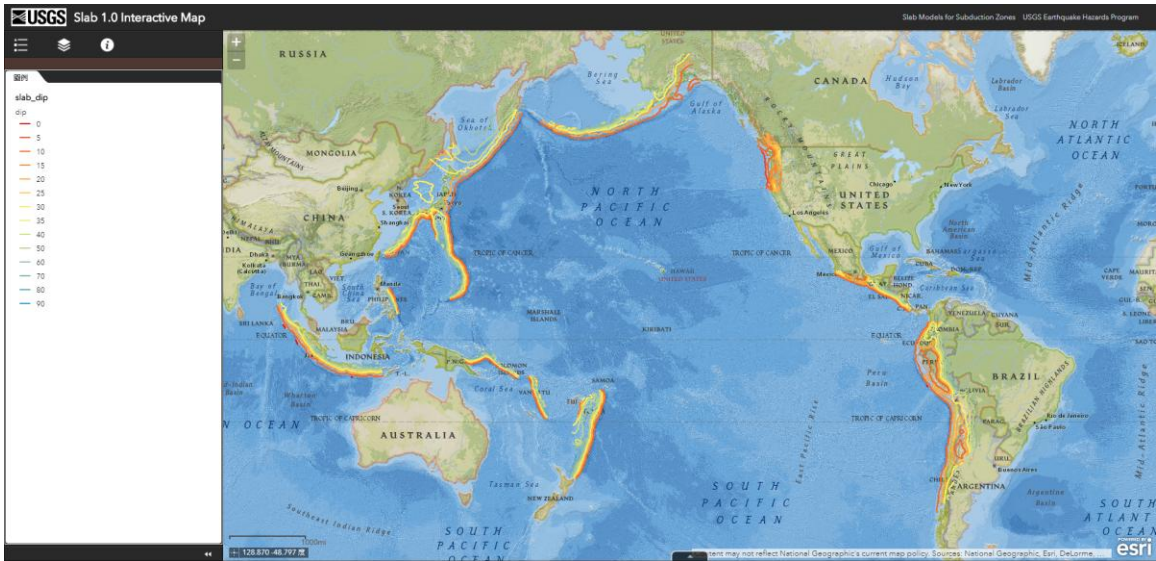


圖 3 USGS 全球隱沒帶板塊模型資料庫之板塊隱沒角度分布。(取自 <http://usgs.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=de81616029224bf699813ef7941a2ee0>)

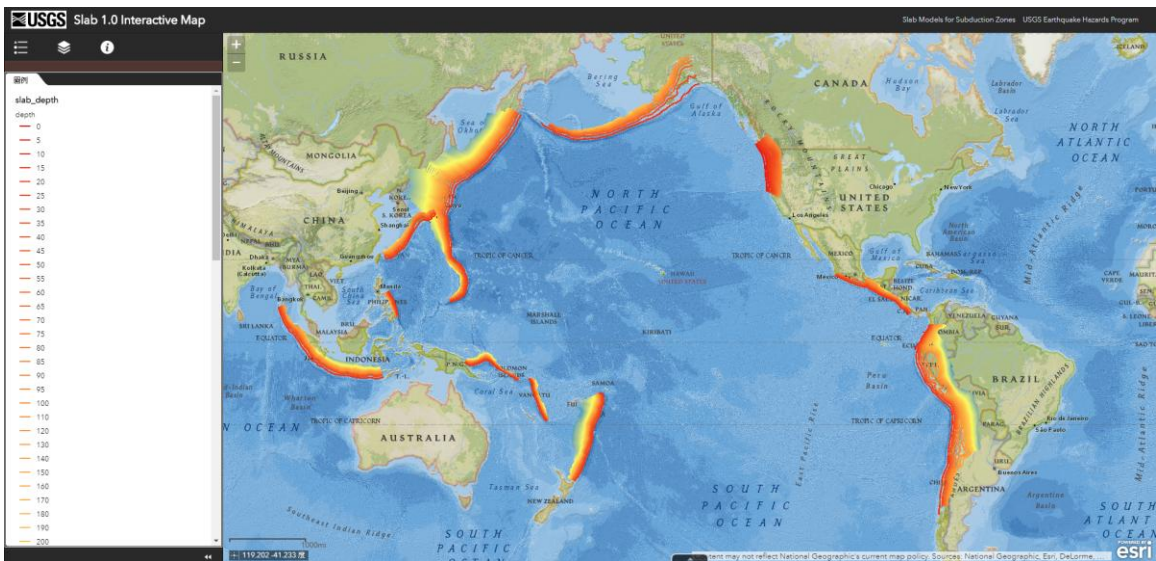


圖 4 USGS 全球隱沒帶板塊模型資料庫之板塊隱沒深度分布。(取自 <http://usgs.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=de81616029224bf699813ef7941a2ee0>)

(二)潮位資料即時接收、展示與分析

PTWC 使用 TideTool 軟體接收全球潮位站即時資料，同時將潮位資料解碼與展示以監控全球海水位情況，並於發生海嘯事件時使用此軟體進行潮位分析，協助其海嘯觀測作業。此軟體收錄的測站包含全球潮位站(測站列表詳 <http://www.ioc-sealevelmonitoring.org/list.php>) 與 全球 DART 測站 (測站分布詳 <http://www.ndbc.noaa.gov/dart.shtml>)，截至目前為止，已收錄約 700 個測站。該軟體之安裝、設定與相關操作由 PTWC 副主任 Stuart Weinstein 指導。

TideTool 軟體每隔 200 秒會偵測是否有最新潮位資料，偵測間隔時間可視使用者端網路速度調整，而其展示介面主要有兩個部分：測站列表與 Client Maps。Client Maps 主要顯示不同海域的潮位資料接收狀態。使用該軟體需先開啟測站列表 (圖 5)，開啟過程中會同時解碼即時收錄的潮位資料，後續若有新資料也會自動解碼，再依據使用者的需求開啟所需的 Client Maps，目前該軟體可以顯示四個監控海域：Pacific(圖 6)、Indian、Atlantic 與 Caribbean。該軟體的展示介面主要使用 Tcl/Tk 程式語言撰寫，此語言具跨平臺的特性，在不同作業系統上程式碼的設計只需些微調整，因此，此套軟體可以安裝於 Windows、Linux、Unix 多種作業系統。

為方便快捷分析海嘯訊號，此軟體除了展示即時觀測資料之外，同時也展示理論潮位，觀測資料與理論潮位之差值可用來分析海嘯波到時與波高，而各測站的理論潮位分潮係數之計算採用王代林博士的潮位分析程序(詳(三)潮位資料分析一節)，使用測站過去一至兩年的觀測資料計算其分潮係數，並用來預報未來六個月至一年，若測站位在開放式海域且資料收錄品質佳，則可以提供更長時間的潮汐預報。

由於該軟體接收全球潮位站與 DART 測站即時潮位資料，若有新增或異動的測站，則須更新測站參數檔與理論潮汐用的分潮係數數值。此外，當海水面未受到其他因素干擾時，若理論潮汐已有一段時間無法完整描述觀測潮汐，則須考慮更新分潮係數資料，以免影響海嘯訊號之分析。

除了展示即時觀測資料，該軟體也提供歷史資料展示的功能，惟無論是即時資料或歷史資料，展示時間長度最長約為 48 小時，雖然無法展示更長時間範圍的資料，但已足以完整監控海嘯事件之傳遞情況。

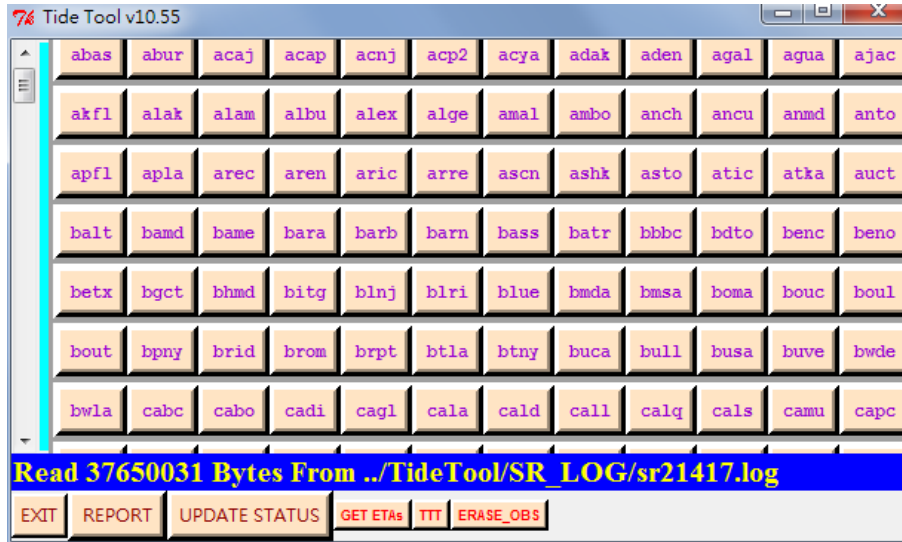


圖 5 TideTool 軟體之測站列表介面。

TideTool 軟體自 V10 版本加入海嘯走時估算的功能，若欲使用此功能則需另外安裝 Tsunami Travel Time(TTT)軟體，為一計算海嘯理論走時的軟體。此功能的應用可以在地震發生之後快速計算海嘯預估到時，協助判斷海嘯訊號。使用 TTT 軟體僅需提供發震位置(地震經緯度)，並利用全球海底地形網格資料與應用惠更斯原理(Huygen's principle)計算海域所有格點的海嘯走時。為了可以與 TideTool 軟體有更好的結合，使用者需提供發震時間以評估各測站之海嘯預估到時(Estimated Time of Arrival, ETA)，如圖 7。

由於氣象局地震與海嘯發布系統多建立 Windows 作業系統上，本次研習以安裝 Windows 版 TideTool 軟體為主，版本為 10.55。依據氣象局海嘯監測作業之需求，臺灣地區海嘯潛勢主要為太平洋海域的海嘯，因此，氣象局將主要使用 Pacific Client Map 介面監控太平洋海域潮位資料接收狀況，若太平洋海域發生大型淺層海底地震，可以利用 TTT 軟體快速計算海嘯預估到時，並依據觀測到的海嘯訊號(即觀測潮位與理論潮位之殘差)調整海嘯模擬數據，提升海嘯預報準確度。

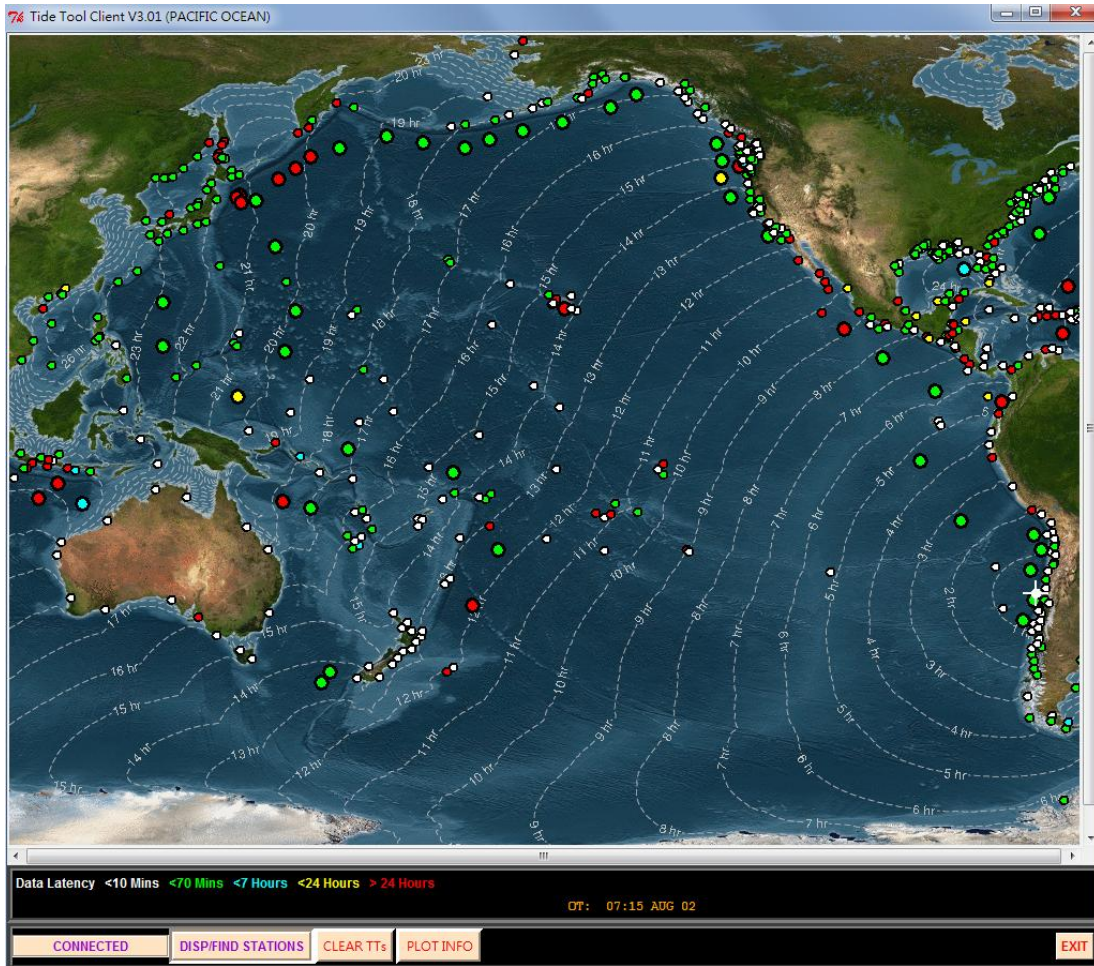


圖 6 TideTool 軟體之 Pacific Client 介面，並結合海嘯走時展示功能。大圓圈代表 DART 測站，小圓代表潮位站。顏色代表資料即時接收狀況：白色表示即時資料延遲 10 分鐘以內；綠色表示即時資料延遲 70 分鐘以內；藍色表示即時資料延遲 7 小時以內；黃色表示即時資料延遲 7 至 24 小時；紅色表示即時資料延遲超過一天。等值線分布為海嘯預估走時，線間距代表一小時，此走時分布為假設地震位置(白色十字符號)位於南緯 31 度、西經 73 度，並採用地形解析度為 15 弧分計算，以此例，海嘯在地震發生後約一天抵達臺灣沿岸。

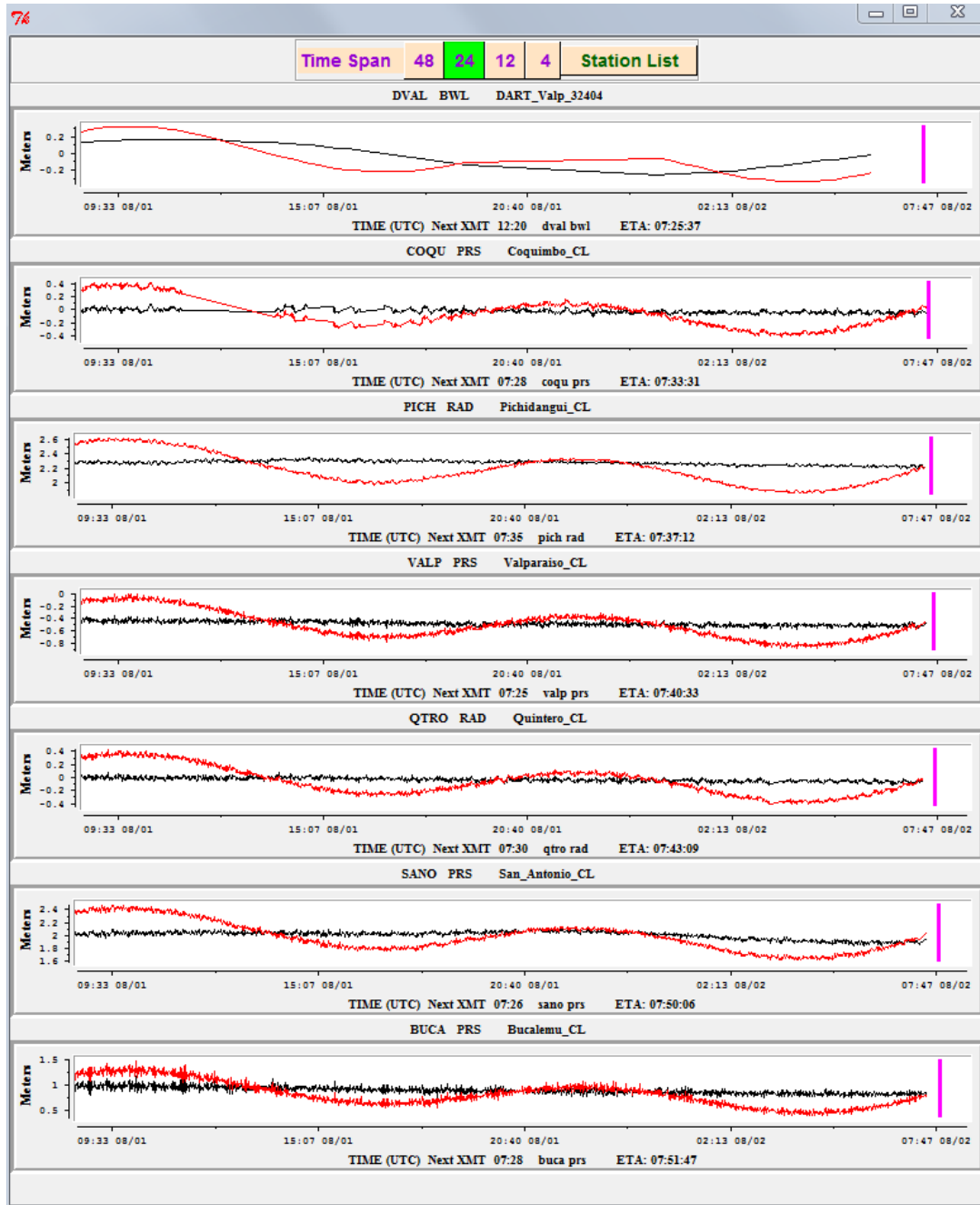


圖 7 承圖 6 走時分布範例，地震位置附近 DART 測站與潮位站資料展示。紅線為理論潮位，黑線為觀測值減去理論潮位之差值，桃紅色直線為海嘯預估到時。

(三)潮位資料分析

受到地球與其他天體的萬有引力的作用，地球海水面具週期性升降變化的現象，即潮汐，而主要引力來自於月球，其次為太陽，其他行星與恆星相較則小很多。潮汐變化可以週期函數(式 1)表示，可以分解成多個不同週期與振幅的時間序列，每個時間序列可視為不同天體與地球的引力作用下的水位變化，又稱為分潮(tide constituent)，每個分潮具有其特定的週期，透過歷史潮位資料可以計算各個分潮的振幅與相位角，再使用各分潮的週期與前述係數疊加組合後即可應用至潮汐預報。

$$y(t) = A_0 + \sum_{j=1}^M A_j \cos 2\pi(\sigma_j t - \varphi_j) \quad \text{式 1}$$

$y(t)$ 為潮位數值， A_0 為平均海水面， M 為分潮數量， A_j 為分潮振幅， σ_j 為分潮頻率， φ_j 為分潮相位角。

潮位資料分析由王代林博士指導，其核心原理取自 Foreman and Henry (1979)，主要使用最小平方法 (least square method) 擬合觀測數據以求得各分潮的振幅與相位差。王博士提供的潮位分析程序主要使用付費軟體 Matlab 撰寫，此程序也可於 Octave 環境下執行，Octave 是一個開放原始碼的軟體，也是主要用於科學計算與數值分析，其語法與 Matlab 兼容，雖該程序有部分函式無法於 Octave 上使用，但並不影響潮位資料之分析。在潮位分析過程中，使用者依據資料時間長度設定欲使用的分潮數量進行潮位分析，此程序不受資料採樣率不固定、資料不連續或突跳的限制，也可以順利求得分潮係數，然而，資料品質若嚴重不佳仍無法有效分析。

本次研習王代林博士提供數筆實際觀測資料，指導如何使用該程序進行潮位分析，以下逐一分析不同潮位站類型(包含全球潮位站、DART 測站與臺灣潮位站)的連續性與事件性資料：

1. 分析全球潮位站連續資料

以代碼為 wuda 潮位站為例(位置為東經 57.52 度、北緯 23.82 度)，分析 2015 年的連續資料，雖然原始資料(圖 8)有部分突跳且缺少數十天觀測資料的情況，然而

該程序具有自動去除明顯突跳訊號的處理流程，可以將突跳訊號有效地去除。圖 9 為使用 66 個分潮的擬合結果，主要的三個分潮汐係數詳表 1。圖 9 的觀測與理論擬合結果甚佳，唯少數微小突跳無法完全去除，該潮位分析程序也具有人工設定門檻值去除微弱突跳的步驟，然而，使用者須謹慎設定門檻值，門檻值若設定太低，有可能將部分真實潮位訊號一同去除，導致觀測數據失真，影響分析的結果。

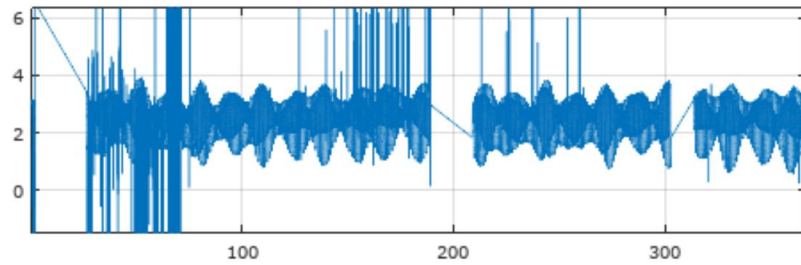


圖 8 wuda 潮位站 2015 年原始潮位紀錄。橫軸為時間(單位為太陽日)，縱軸為潮位數據(單位為公尺)。

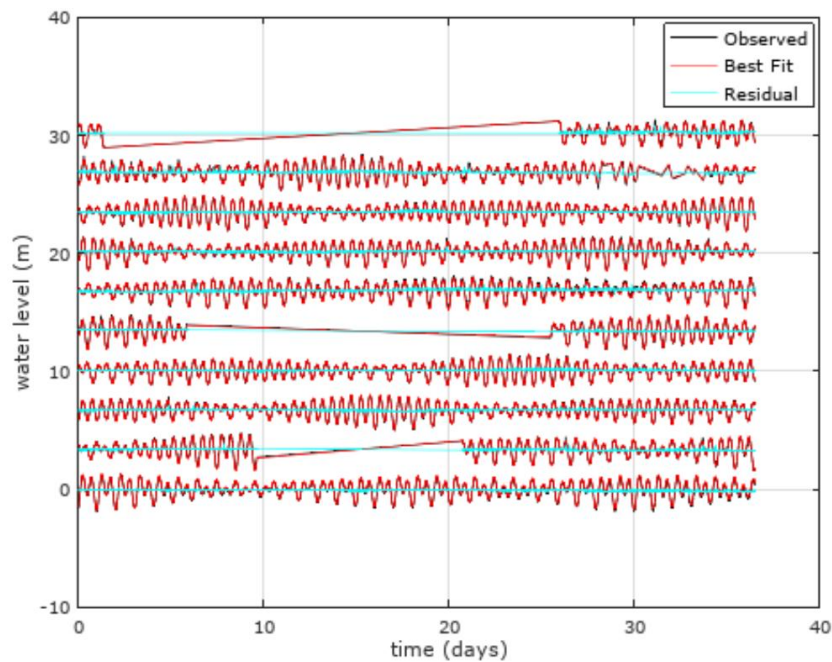


圖 9 wuda 潮位站 2015 年資料經分析後的結果。黑線為原始觀測數據，紅線為擬合結果，青線為殘差。大部分黑線被紅線覆蓋表示觀測與理論擬合結果甚佳。

分潮種類(代號)	分潮角頻率	分潮振幅	分潮相位角
主太陰半日週潮(M2)	12.14083320	7.03607824e-001	336.361323
日月合成日週潮(K1)	6.30038810	3.40470656e-001	31.254428
主太陽半日週潮(S2)	12.56637061	2.61757266e-001	171.178026

表 1 wuda 潮位站三個主要分潮的係數。分潮角頻率單位為徑度/日 (radians/day)，分潮振幅單位為公尺，分潮相位角單位為度(degree)。

2. 分析 DART 測站連續資料

以代碼 dgum 測站(位置為東經 132.184 度、北緯 12.985 度)為例，分析 2017 年上半年(1 月至 6 月)的連續資料，原始資料(圖 10)除有數天資料中斷，整體收錄狀況良好，無明顯突跳。圖 11 為使用 36 個分潮擬合的結果，觀測與理論潮汐擬合結果佳，主要的三個分潮汐係數詳表 2。分潮係數經過式 1 計算後可以用來預報潮位(圖 12)，提供未來即時觀測潮位之分析。

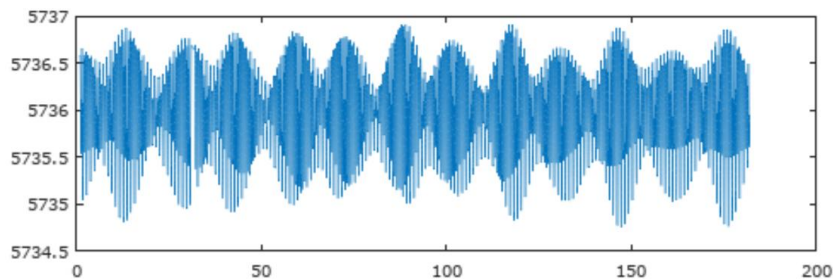


圖 10 dgum 測站收錄 2017 年 1 月至 6 月的原始潮位紀錄。橫軸為時間(單位為太陽日)，縱軸為潮位數據(單位為公尺)。

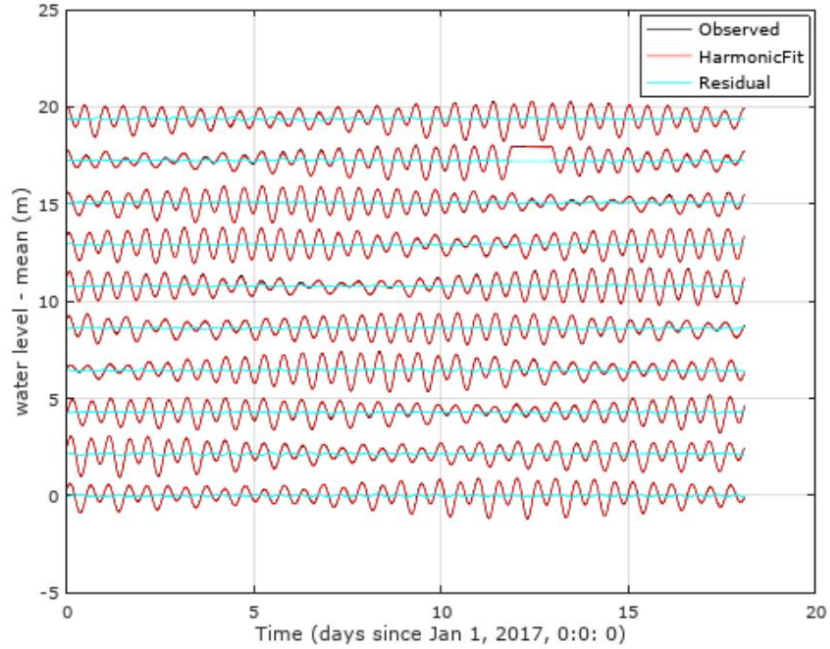


圖 11 同圖 10，惟為 dgum 測站收錄 2017 年 1 月至 6 月潮位資料經分析後的結果。黑線為原始觀測數據，紅線為擬合結果，青線為殘差。

分潮種類(代號)	分潮角頻率	分潮振幅	分潮相位角
主太陰半日週潮(M2)	12.14083319	5.43124090e-001	20.162167
主太陽半日週潮(S2)	12.56637061	2.20209500e-001	40.046134
日月合成日週潮(K1)	6.30038810	1.40524024e-001	299.039743

表 2 dgum 測站三個主要分潮的係數。分潮角頻率單位為徑度/日 (radians/day)，分潮振幅單位為公尺，分潮相位角單位為度(degree)。

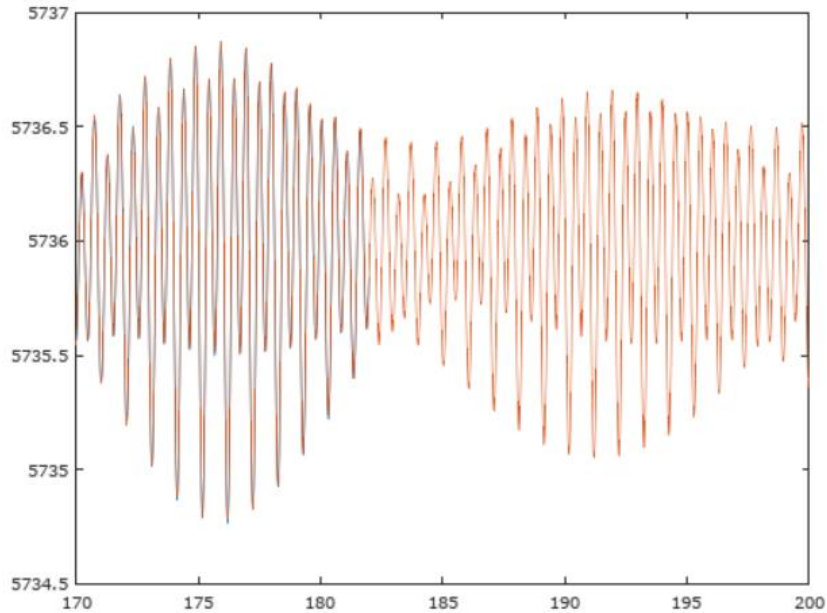


圖 12 dgum 測站預報潮汐。黑線為原始觀測數據，紅線為理論潮位。

3. 分析 DART 測站事件資料

以代碼為 dgum 測站(位置為東經 132.184 度、北緯 12.985 度)為例，分析 2011 年 3 月 11 日日本地震海嘯紀錄，潮位資料時間長度約半天。DART 測站在一般模式下約每六小時傳送採樣率為 15 分鐘的觀測數據，當事件模式被觸發時，即觀測數據超過系統設定之門檻值，除了加密觀測數據、提升採樣率至 1 分鐘外，同時也加密資料傳輸次數，視發震時間從每隔數分鐘至數十分鐘陸續透過衛星將即時觀測數據傳回至 NOAA 國家資料浮標中心(National Data Buoy Center, NDBC)，以提供相關單位監測海嘯事件，此潮位分析程序也能有效處理採樣率不同的觀測資料。

從原始資料(圖 13)可以明顯觀察在約 70.25 個太陽日處有較高頻水位變化，此為地震波傳遞至該測站時所產生的海水變化，而約於 70.4 個太陽日處記錄到海嘯訊號，經潮位分析(圖 14)後，可以觀察到該測站位置經歷數次水位進退，最大波高發生在第一波海嘯，波高將近 10 公分。此觀測波高可以用來調整海嘯預報數據，根據 dgum 測站模擬數據與觀測數據之比例調整所有潮位站的模擬數值，提升海嘯預報的準確性。

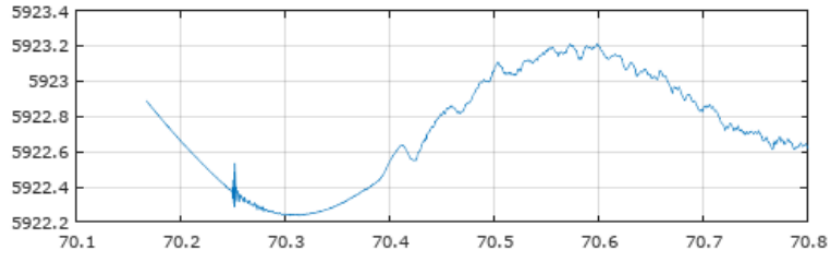


圖 13 dgum 測站收錄 2011 年 3 月 11 日日本地震海嘯的原始潮位紀錄。橫軸為時間(單位為太陽日)，縱軸為潮位數據(單位為公尺)。

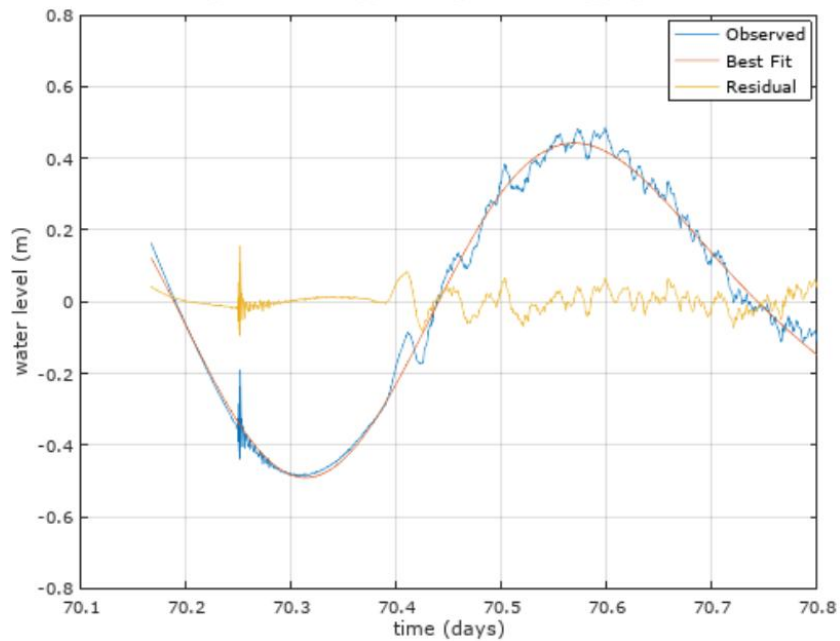


圖 14 dgum 測站收錄 2011 年 3 月 11 日日本地震海嘯潮位紀錄經分析後的結果。藍線為原始觀測數據，紅線為擬合結果，黃線為殘差。

4. 分析臺灣潮位站連續資料

以臺灣南部後壁湖潮位站(位置為東經 $120^{\circ}44'43''$ 、北緯 $21^{\circ}56'45''$)為例，分析 2012 年一年份的連續資料，資料採樣率為 6 分鐘，圖 16 為使用 67 個分潮擬合的結果，主要的三個分潮汐係數詳表 3。位於海灣或淺海處的測站，其水位變化除了受天文引力作用，也可能會受到氣象或港灣構造(如港口大小、深度與形狀)等因素影響，潮位規律性不如位於深海的 DART 測站，並反應於潮位分析擬合殘差上。

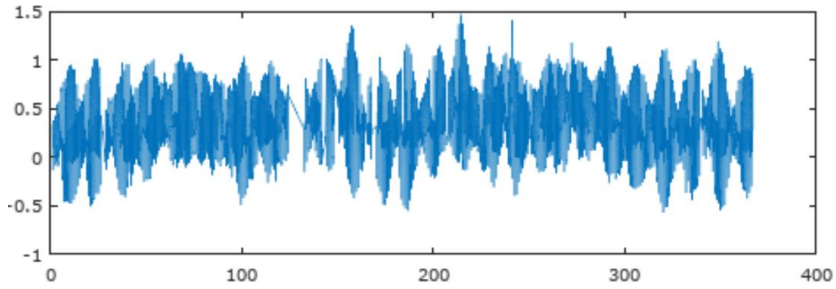


圖 15 後壁湖潮位站收錄 2012 年的原始潮位紀錄。橫軸為時間(單位為太陽日)，縱軸為潮位數據(單位為公尺)。

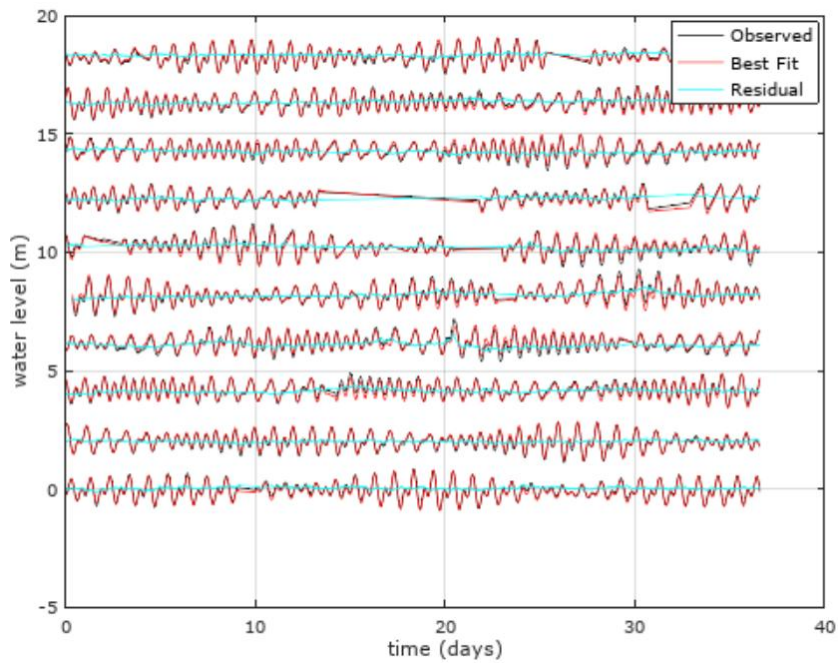


圖 16 後壁湖潮位站 2012 年原始潮位紀錄經分析後的結果。黑線為原始觀測數據，紅線為擬合結果，青線為殘差。

分潮種類(代號)	分潮角頻率	分潮振幅	分潮相位角
主太陰半日週潮(M2)	12.14083320	2.70517906e-001	27.038389
日月合成日週潮(K1)	6.30038810	2.19888365e-001	120.272815
主太陰日週潮(O1)	5.84044509	1.90543984e-001	335.867206

表 3 後壁湖測站三個主要分潮的係數。分潮角角頻率單位為徑度/日 (radians/day)，分潮振幅單位為公尺，分潮相位角單位為度(degree)。

5. 分析臺灣潮位站資料收錄事件資料

以臺灣南部後壁湖潮位站(位置為東經 120°44'43"、北緯 21°56'45")為例，分析 2011 年 3 月 11 日日本地震海嘯紀錄，資料採樣率為 15 秒，原始數據詳圖 17，海嘯訊號約於 70.75 個太陽日時間點出現。經潮位分析後(圖 18)，最大海嘯波高近 50 公分。

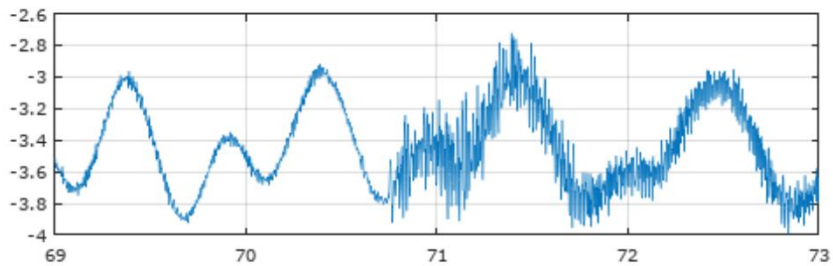


圖 17 後壁湖潮位站收錄 2011 年 3 月 11 日日本地震海嘯之原始潮位紀錄。橫軸為時間(單位為太陽日)，縱軸為潮位數據(單位為公尺)。

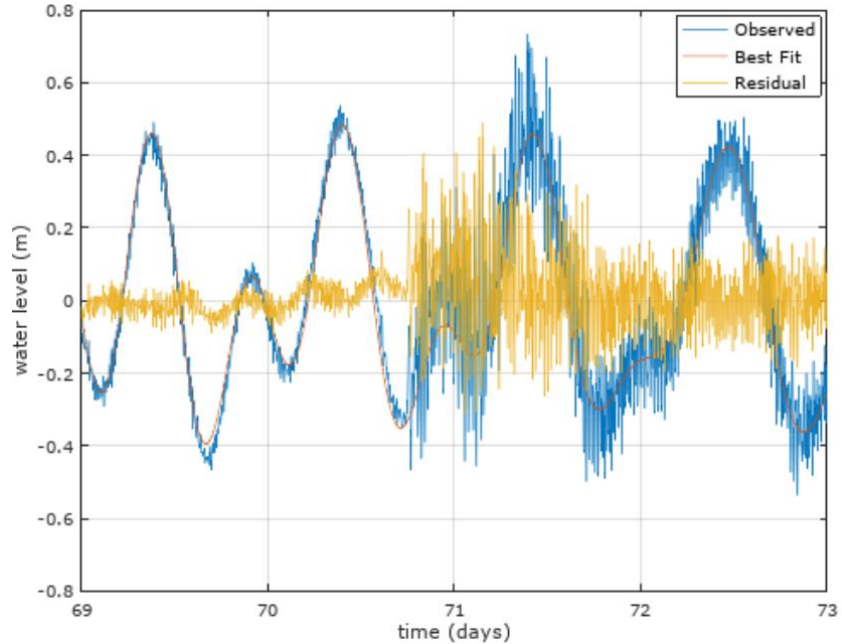


圖 18 後壁湖潮位站收錄 2011 年 3 月 11 日日本地震海嘯原始潮位紀錄經分析後的結果。黑線為原始觀測數據，紅線為擬合結果，黃線為殘差。

參、心得與建議

夏威夷太平洋海嘯警報中心(PTWC)每天 24 小時皆有人員值班與待命，即時監測大型地震海嘯事件並快速通報相關應變單位，一旦發生地震，值班人員須快速檢視地震訊號，決定地震位置與規模，解算震源機制，演算海嘯事件，並對夏威夷當地或太平洋海域國家發布地震海嘯資訊，其肩負的責任與工作量相當大。PTWC 是一個編制人數約 12 人的機構，面對責任重大的監測業務，無論是一般職員或是主管皆須輪值。該機構一半以上的人員具有博士學位，專業素質很高，除了有地震領域與海洋物理領域的專家，也有資訊技術專業人員，於地震海嘯監測與資訊通報上都有相關領域的人員提供專業的判斷與處理。

此次研習成果中，RIFT 海嘯模擬演算系統加入美國地質調查局(USGS)隱沒帶板塊資料庫，若地震發生在隱沒帶上，可以在尚未有震源機制解算結果之前，提供更可靠的海嘯模擬結果。而在海嘯觀測方面，TideTool 軟體與潮位分析程序都可以協助分析海嘯訊號，可以用來調整海嘯預報數值，以提升海嘯預報準確性。其中，TideTool 軟體更適合用於即時海嘯測報作業，未來若能將臺灣潮位資料展示於該介

面上，將對臺灣潮位站資料即時監控與海嘯事件即時分析有很大的助益；而潮位分析程序則更適合用於深入研究海嘯事件，藉由詳細地分析潮位資料，探討海嘯事件之影響，也可以檢驗模擬數據的準確性，進一步改善海嘯模擬系統。

本次職赴太平洋海嘯警報中心研習收穫甚豐，汲取該機構於地震海嘯監測作業實務經驗，學習其海嘯模擬與觀測技術，相關研習成果的落實應用將可提昇我國海嘯警報與觀測作業。此次研習經驗提供以下建議：

- 一、PTWC 地震海嘯監測與發布系統皆建立於 Linux 作業系統上，相較於 Windows 作業系統，Linux 作業系統有較高的穩定性，不須頻繁重新啟動作業主機，幾乎無監測作業空窗期，且支援多種程式開發工具，非常適合做為監測作業之平臺。此外，其系統操作介面多使用具跨平臺開發特性的 Tcl/Tk 與 Qt 程式語言設計，介面不受只能於特定作業系統使用的限制，本次研習中的 TideTool 軟體即為一例。目前，氣象局地震與海嘯的監測及發布作業主要以 Windows 作業系統搭配 Visual Basic 介面為主。為提升監測與發布作業之穩定性與介面之應用性，未來系統建置建議採用 Linux 作業系統與具跨平臺特性等工具。
- 二、氣象局近海海嘯模擬所需的地震資訊取自於氣象局之地震速報地震報告，地震報告約於地震發生後 5 至 10 分鐘發布，而近海海嘯通常於地震發生後約數分鐘至數十分鐘抵達最近的海岸，可能有應變不及的風險，未來可以考慮採用地震預警系統的地震資訊(約地震發生後 15 至 25 秒得知地震大略位置)快速模擬海嘯，以爭取較多的應變時間。然而，目前地震預警系統之外海地震定位準確度仍有加強的空間，若能提升地震預警系統外海地震定位技術，建立海底地震觀測網擴展臺灣區域地震監測範圍，將對近海海嘯預警有很大的幫助。
- 三、近海海嘯模擬採用地震速報報告的芮氏規模(Local magnitude, M_L)演算，然而，芮氏規模約於 7 左右即達到飽和，無法準確描述更大規模地震所釋放的能量，將會導致海嘯預報低估。Wphase 震源反演法(Kanamori and Rivera, 2008) 是一種可以快速求得震源機制與震矩規模(Moment magnitude, M_w)的方法，震矩規模沒有規模飽和的問題，可以完整描述地震釋放的能量，PTWC 採用此方法解

算更詳細的震源參數以模擬海嘯，若能建立一套臺灣地區區域型 Wphase 解算系統，將可有效解決規模飽和問題。

四、氣象局目前有 COMCOT 與 RIFT 兩套海嘯速算系統，由於臺灣海嘯觀測數據少，難以評估哪一套方法較適用於臺灣地區海嘯預警，National Tsunami Warning Center(NTWC)的 Paul Huang 研究員提到現今 NTWC 有兩套海嘯模擬系統：Short-term Inundation Forecasting for Tsunamis (SIFT) 與 Alaska Tsunami Forecast Model(ATFM)，並採用兩套模擬結果之平均數值發布其責任區域(包含美國本土東西岸與加拿大沿岸)的海嘯預報，此建議可以做為氣象局未來發布海嘯預報之參考。

五、未來仍應持續雙方技術交流，維持雙方長期研究合作，以提昇我國地震海嘯監測相關技能，雙方在地震海嘯預警與災防之共同任務上也可以達到互惠的成效。

肆、參考文獻

- Foreman, M. G. G., & Henry, R. F. (1979). *Tidal analysis based on high and low water observations*. Institute of Ocean Sciences, Patricia Bay.
- Kanamori, H., & Rivera, L. (2008). Source inversion of Wphase: Speeding up seismic tsunami warning. *Geophysical Journal International*, 175(1), 222-238.
- Wang, D., Becker, N. C., Walsh, D., Fryer, G. J., Weinstein, S. A., McCreery, C. S., ... & Duputel, Z. (2012). Real-time forecasting of the April 11, 2012 Sumatra tsunami. *Geophysical Research Letters*, 39(19).
- Weinstein, S.A., and D. Wang (2009). *TIDE TOOL: Software to analyze GTS sea-level data*, 24th International Tsunami Symposium of the IUGG Tsunami Commission, July 14-17, 2009, Novosibirsk, Russia.
- Wessel, P. (2009). Analysis of observed and predicted tsunami travel times for the Pacific and Indian Oceans. *Tsunami Science Four Years after the 2004 Indian Ocean Tsunami*, 301-324.