

112 年度臺灣海域地震與海嘯觀測之相關研究

子計畫一

發展 COMCOT 火山型海嘯速算系統

吳祚任 曾淑華 楊博元

中華民國地球物理學會

一、中文計畫摘要

臺灣之海嘯威脅，除了來自於近海斷層與遠域海溝型海嘯外，尚有山崩型海嘯與火山型海嘯。其中山崩型海嘯與火山型海嘯疑似為 1867 基隆海嘯之成因。此外，2022 年 1 月發生於東加群島之火山型海嘯、2018 年 12 月發生於印尼克拉克托之子火山型海嘯、2018 年 9 月發生於印尼之蘇拉威西地震所誘發之山崩海嘯，皆再再指出非地震型海嘯預警之重要性，以及龜山島可能造成之火山型海嘯威脅。

然而，全球至今尚無一海嘯速算系統，可有效預測非地震型海嘯之傳播。目前中央氣象署已建立 COMCOT 海嘯速算系統，其可以有效預警地震型海嘯，本計畫為進一步將地震型海嘯速算系統拓展至非地震型海嘯速算系統，發展全球第一套可預報火山型海嘯之速算系統。火山型海嘯速算系統為使用點源型海嘯源並搭配線性修正，使用者可透過地圖介面點選或自行給定海嘯事件之經緯度及點源之直徑與高度，速算系統即進行初步模擬，隨海嘯傳遞之時間發展，初步模擬利用線性修正法給定係數，進一步準確預測海嘯之波高。

本研究已完成建立火山型海嘯速算系統之使用者操作介面，此操作介面包含使用者輸入欄位以及地圖介面，其中地圖介面可供使用者直接點選事件位置，亦可選用火山選單之按鈕以快速帶入特定火山之經緯度，如臺灣龜山島、東加火山等等。本速算系統包含四種區域之地圖：臺灣地區、西北太平洋地區、半太平洋地區、全太平洋，供使用者選擇。系統依據火山經緯度自動判斷選用合適之地圖，可縮短模擬時間，達到速算之目的。此使用者操作介面結合參數設置、地圖介面、自動執行海嘯模擬程式、成果展示以及線性係數修正，操作簡單明瞭，已可供預報員使用。

關鍵詞：火山型海嘯、COMCOT 海嘯速算系統、點源型海嘯源、線性修正法

二、英文計畫摘要

Taiwan is at risk of tsunamis triggered by landslides, volcanic eruptions, offshore faults, and distant trench tsunamis. Keelung's 1867 tsunami is believed to result from landslides and volcanic eruptions. In addition, the 2022 volcanic tsunamis in Tonga, the 2022 volcanic tsunami in Anak Krakatoa, and the 2018 tsunami in Sulawesi highlight the importance of non-seismic tsunami warnings. One of the possible volcanic tsunami threats in Taiwan comes from Guishandao. Yet, there is no fast tsunami calculation system capable of accurately predicting non-seismic tsunamis. Using the COMCOT tsunami fast calculation system, the Central Weather Bureau can predict earthquake-type tsunamis speedily. The purpose of this project is to develop the first fast calculation system in the world that can predict volcanic tsunamis by focusing our efforts on predicting landslide tsunamis. The volcanic tsunami fast calculation system uses a cylinder-shaped unit source tsunami source and linear correction. Users can select or provide the latitude and longitude of the tsunami event and the diameter and height of the point source through a map interface. The fast calculation system then performs an initial simulation, and as the tsunami develops over time, the initial simulation utilizes linear correction coefficients to predict the tsunami wave height accurately. In this project, the user interface of the volcanic tsunami fast calculation system has been established. The user interface includes user input fields and a map interface. The map interface allows the user to click on the event location directly. The user can also use the volcano menu button to quickly enter a specific volcano's longitude and latitude, such as Taiwan's Guishan Island, Tonga HTHH Volcano, etc. The volcanic tsunami fast calculation system includes maps of four regions: Taiwan, Northwest Pacific, Semi-Pacific, and Pacific, for users to choose from. The system selects an appropriate map by the volcano's longitude and latitude, which can shorten the simulation time and achieve quick calculations. This user interface combines parameter setting, map interface, automatic execution of tsunami simulation program, result display, and linear coefficient correction. The operation is simple and clear and can be used by forecasters.

KEY WORDS : Volcanic tsunami , COMCOT tsunami fast calculation system , Cylinder-shaped unit source , Linear correction coefficients

三、背景分析

海嘯之成因除了常見的海底地震外，尚有海底山崩、火山爆發、隕石撞擊等。自 1600 年以來，世界各地已紀錄到 130 起火山海嘯事件 (Necmioglu et al., 2023)。火山海嘯發生最頻繁的區域被認為是於中美洲西印度群島之蒙特塞拉特島，島上之蘇弗里耶爾火山自 1997 年之記錄以來，1997 年、1999 年、2003 年、2006 年共發生了 4 次火山海嘯。1997 年主要為火山塊體崩落產生了最高 3 公尺之海嘯，淹沒了距離火山源 10 公里之淺灣區域；1999 年的火山海嘯達到 2 公尺且立即減弱；2003 年為火山碎屑流進入海中，於島之東海岸引發 8.5 公尺之海嘯；2006 年為熔岩穹丘崩塌引發海嘯，據潮位計觀測波高為 1 公尺 (Mutaqin et al., 2019)。歷史上顯著的大型火山海嘯為 1610 年的聖托里尼火山海嘯，以及 1741 年 8 月 29 日於日本北海道西方的渡島大島火山海嘯，兩次的海嘯事件其最高溯升高度都有至 90 公尺 (Mutaqin et al., 2019)。發生於近年之兩次大型火山海嘯事件為 2018 年 12 月 22 日於印尼蘇門答臘島與爪哇島之間之喀拉喀托火山爆發引發之海嘯，以及 2022 年 1 月 15 日於東加群島海底火山爆發引發之火山海嘯。前者喀拉喀托火山海嘯導致了 437 人死亡以及一千多餘人受傷 (Necmioglu et al., 2023)，其中約 50 人於海岸舉辦之演唱會中罹難 (Heidarzadeh et al., 2020)。此次海嘯事件於巽他海峽南部海岸最大溯升高度為 13 公尺；後者的東加火山海嘯造成了 5 人死亡 (Heidarzadeh et al., 2022)，且東加政府稱位於東加島西北方有 15 公尺的最高水位紀錄 (Pakoksung et al., 2022)。據有記錄以來，火山海嘯共導致了五萬餘人之死亡，佔火山活動所導致之死亡人數之 25%。雖然火山與山崩型海嘯相對於地震海嘯較少發生，佔總海嘯記錄之 8%，後者之地震海嘯為 81% (Shen et al., 2021)，但仍有幾次火山海嘯事件引起眾多死傷，例如 1792 年於日本九州雲仙岳地區之眉山穹丘崩落導致共 15030 人死亡；1741 年於北海道渡島大島火山海嘯導致 1607 人死亡；1883 年於印度洋之喀拉喀托火山海嘯共 36000 人死亡 (Mutaqin et al., 2019)。

火山海嘯可由多種來源引起，圖 1 為火山海嘯的六種成因，a 為水下火山爆發；b 為爆炸產生的氣壓波；c 為火山碎屑流進入海洋；d 為水下火山口崩塌；e 及 f 各為陸源或水下地邊坡滑落。(Mutaqin et al., 2019)。

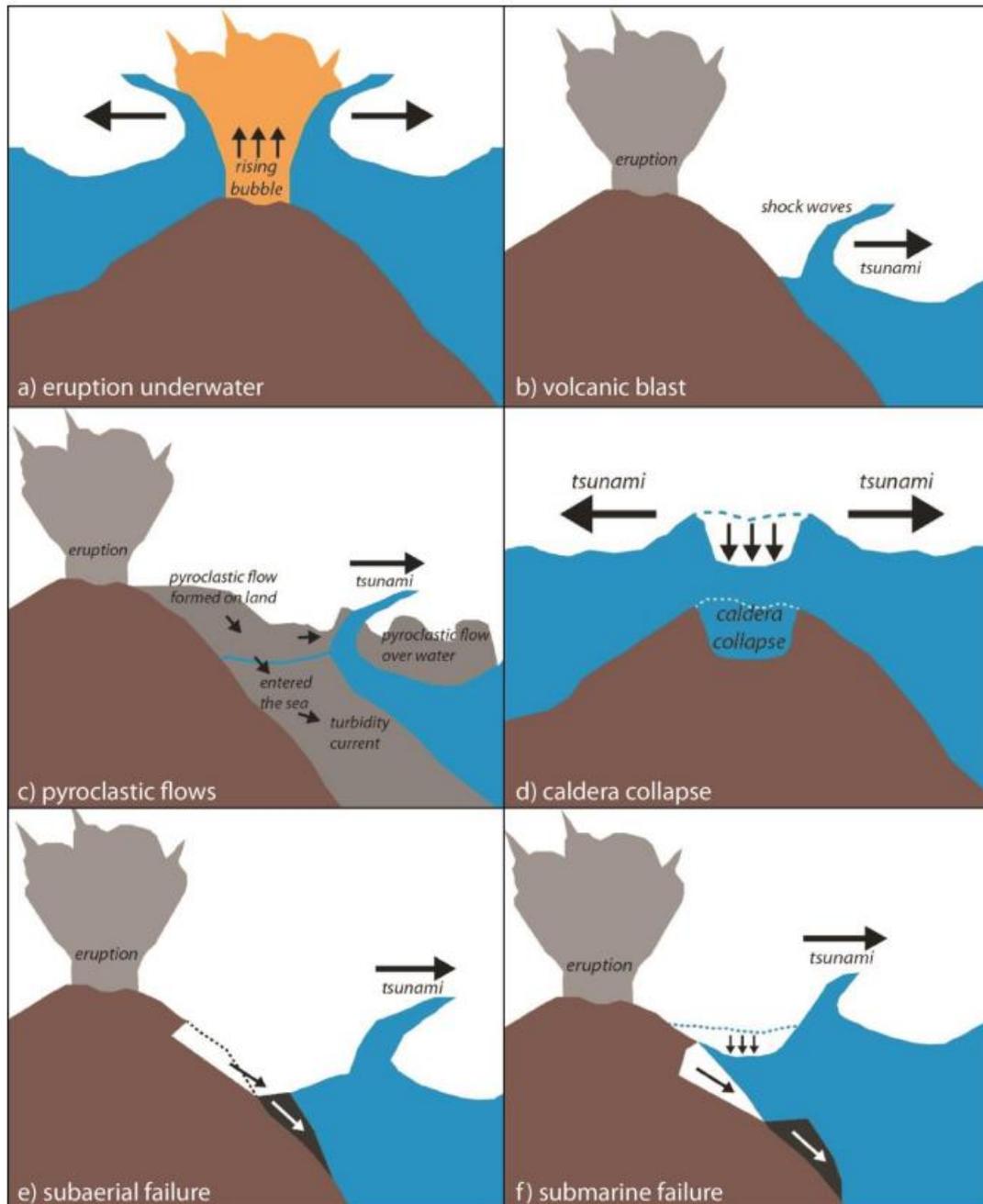


圖 1，火山海嘯的六種成因（擷自 Mutaqin et al., 2019）

Paris 等人（2015）之文獻詳細針對火山海嘯成因進行敘述。水下火山爆發產生之海嘯與地震海嘯相比之下，通常產生週期較短且頻散較強之海嘯波，因此對遠場之影響有限。並且於 20 世紀之紀錄來看，除了 1996 年於俄羅斯堪察加半島 Karymsky 湖之例子外，水下火山爆發所產生之海嘯其振幅非常小，如 1952 年日本伊豆諸島之明神礁海底火山爆發，於距離火山源 130 公里處產生了不到 1.5 公尺高之海嘯波高。值得注意的是，許多水下火山爆發並不會引起海嘯，例如 Surtseyan 型火山爆發，因其岩漿與水之交互作用非常複雜，其物理過程受到水深、噴孔之幾何形狀以及岩漿與水之間之界面的影響，因此火山爆發的種類也是能否產生海嘯

的因素之一。然而水下火山爆發有關之危害是相當不可預測的，如 1996 年 Karymsky 湖之例，受海嘯影響引發之土石流。圖 2 為 1996 年堪察加半島 Karymsky 湖水下爆炸所產生初始波之時間序列，圖中 a 為爆炸後並立即在水面上形成一個坑洞狀波型；b 為當第一個波從源點向外傳播，水面向上升起；c 及 d 為水之重力坍塌及第二個與後續之波浪。

氣象海嘯為透過與大氣重力波或衝擊波相耦合而產生，火山爆發之爆炸壓力必須足夠高才能於大氣中引起自由波。能量從空氣轉移至水中僅適用於深海或長距離之海域，如 1883 年的印度洋喀拉喀托火山爆發引起之氣象海嘯。

火山碎屑流為火山噴發時，尤其是當火山錐塌陷時，產生由氣體及顆粒組成之高溫混合物。最近觀察到由火山碎屑流產生之海嘯為中美洲西印度群島之蘇弗里耶爾火山分別於 1997 年與 2003 年之噴發，2003 年之海嘯事件於瓜德羅普島達到最高 1 公尺之波高；1994 年巴布亞紐幾內亞之拉包爾火山的爆發中，於拉包爾灣觀測到了最高 8 公尺之海嘯。有地質證據表明，火山碎屑流能夠進入水中並傳播至少 20 公里。然而火山碎屑流與水體之間之互動機制以及產生海嘯所需之條件至今有部分仍難以解釋，因科學界目前缺乏對這種複雜現象之觀察，對此類之實驗及理論研究也很少。關於海嘯波之成因，前人之研究表明最具能量之海嘯波是由火山碎屑流緻密的底部所產生的，其他現象如蒸汽爆炸、壓力脈衝等，理論上會產生較小之波浪。火山碎屑流和水體之間相互作用之重要因素主要為碎屑流之體積與密度，以及其在水下之入射角、傳輸距離等，有理論證明，無論其溫度如何具有接近水的體積及密度之流體會產生波浪。1883 年的印度洋喀拉喀托火山爆發之海嘯事件有豐富之紀錄，因為於災難發生期間和之後的數百個觀測紀錄以及目擊者之描述。基於觀測、近場火山碎屑沉積物分析、潮汐記錄與壓力紀錄、以及數值模擬，其海嘯之生成過程、來源及傳播過程於過往一直受到爭論。目前普遍被認為，從 8 月 26 日下午到 8 月 27 日早上，火山碎屑流為海嘯之成因。

大型爆發之火山噴發通常會導致火山中心部分的坍塌，形成火山口。火山口坍塌之持續時間目前仍尚未明確（持續時間從幾分鐘到幾小時不等），現場和實驗研究表明存在著多種形態以及坍塌機制。在水下火山噴發的情況下，坍塌會導致水面下沉，進而引發前導波谷之傳播，其前導波谷的振幅大小主要取決於兩種因素：坍塌的幾何形態、以及持續時間。於理論上，持續時間僅幾分鐘之大型坍塌可能會引發海嘯，但現實世界上可能不會發生。例如，加拉巴哥群島之費爾南迪納玄武岩火山（Fernandina basaltic volcano）為於 12 天內一系列地逐步坍塌。岩漿性質亦能影響坍塌時間，如矽質岩漿性質之火山爆發形成的火山口坍塌為更加迅速且整體坍塌性質較強，例如菲律賓皮納圖博火山於 1991 年坍塌形成的火山口，可能在 34 分鐘內坍塌了大部分之體積。關於坍塌時間與海嘯之形成，前人研究表明，於愛琴海的 Kolumbo 海底火山若坍塌時間少於 10 分鐘，就會在聖托里尼島的海岸線上產生超過 1 公尺之顯著的波高。圖 3 為聖托里尼海岸記錄之最大海嘯振幅，與愛琴海的 Kolumbo 海底火山火山口坍塌持續時間之關係。

火山邊坡之不穩定性從岩石墜落和小型山體滑坡到大型山壁崩塌，其不穩定性並不總是與火山噴發有直接相關，可能是由於其結構之不連續性、熱液蝕變、岩漿侵入和高熔岩堆積率。雖然火山邊坡崩塌所產生的海嘯發生頻率較低（佔過去四個世紀觀測到的海嘯約 1%），但其在局部地區內具有高危害之潛在性。邊坡坍塌

產生海嘯之成因取決於幾種因素，包括邊坡的體積、其來源為陸上或水下、和動力（例如初始加速度、最大速度、形變等）。理論上，邊坡滑落引發之海嘯於能量方面可能與地震引發的海嘯相等，或甚超過，但徑向擴散限制了其傳播範圍。邊坡滑落之快速地加速或減速會產生較短波長之海嘯，而此種海嘯於遠場傳播受到頻散關係之限制。火山源之水深亦為影響此種海嘯之一重要因素，尤其是於開放海域中前導海嘯波為受水深之限制。

歷史上於 1792 年，日本九州雲仙岳地區之眉山穹丘之崩落可能是由強烈地震所引起，孔隙流體增壓之結果導致坍塌前結構之發展，此次山崩海嘯傳遞於九州有明海，其溯升高度為 8 至 24 公尺，共導致 15030 人之罹難。最近一次與火山邊坡不穩定之破壞性海嘯發生於 2002 年 12 月之義大利斯特龍伯利火山 (Stromboli volcano)，共發生兩次坍塌，第一次坍塌亦是該事件最大體積之崩落，崩落體積為 17×10^6 立方公尺，同時涉及陸源與水下山崩，隨之而來之第二次較小規模坍塌 (崩落體積為 5×10^6 立方公尺) 為陸源山崩，此兩次崩落事件於斯特龍伯利海岸引發了溯升最大 8 公尺之海嘯，但該海嘯僅影響局部範圍，對於距離火山源 200 餘公里之海岸之影響十分有限。義大利斯特龍伯利火山為世界上最容易引發海嘯的火山之一，並於二十世紀共觀測到五次海嘯事件 (1916 年、1919 年、1930 年、1944 年、1954 年)。發生於 1930 年之海嘯成因為劇烈火山噴發與山崩，共造成兩人死亡，並於義大利卡拉布里亞之梵蒂岡角海岸觀測到 2 至 3 公尺之海嘯。地質與地球物理數據研究亦證實斯特龍伯利火山反覆出現之不穩定性，過去之四次大規模崩落事件影響了該火山的西北側，促使於近海形成 12 立方公里之山崩沖積扇。除了斯特龍伯利火山外，埃特納火山 (Etna)、維蘇威火山 (Vesuvius) 及伊斯基亞火山 (Ischia) 等位於義大利之火山需十分注意，可能為海底山崩引發海嘯之源頭。

火山不穩定引發之海嘯亦常見於東南亞地區，因鄰近海洋之火山的密度十分高。以下舉兩次事件為例，說明中規模之山崩可能具有局部破壞性及致命性。第一例為 1979 年於印尼龍布陵島 (Lembata Island)，引發了共造成約 900 人死亡之海嘯，此海嘯源為島南端之伊利沃龍火山 (Iliwerung volcano) 的東側引發山崩，共崩落了 50×10^6 立方公尺，崩落體積的三分之一流入海洋引發海嘯，於鄰近之 Labala 海灣及 Waiteba 海灣觀察到溯升高達 7 至 9 公尺之海嘯。第二例為 1928 年於印尼弗洛勒斯島北部海岸之山崩事件，引發之海嘯於帕盧威島 (Paluweh Island) 及弗洛勒斯島海岸共造成 128 人死亡，此次事件中共觀察到三個 5 至 10 公尺高之海嘯波，同時該山崩源之火山正處於類似蒙特塞拉特式 (Montserrat-like eruption) 之爆炸性噴發，火山碎屑流同時於西南海岸形成碎屑流沖積扇，因此若僅以山崩作為 1928 年之海嘯源並不完整，應一併將火山碎屑流的因素考慮進去。

以下介紹之山崩海嘯為與歷史上最大火山山崩海嘯事件相比，崩落體積數量級少一個位數。例如，1980 年美國華盛頓州聖海倫火山之崩落體積為 2.8 立方公里；1888 年巴布亞紐幾內亞里特島火山 (Ritter Island) 之崩落體積為 5 立方公里；1741 年日本北海道西方的渡島大島之崩落體積 2.4 立方公里。其中里特島火山山崩海嘯傳遞於整個俾斯麥海，海嘯波週期為 3 至 4 分鐘，並於周圍島嶼，如 Umboi 及 Sakar 溯升高達 10 至 15 公尺；距海嘯源 330 公里之 Hatzfeldhafen 之溯升為 10 公尺；距海嘯源 500 公里之 Rabaul 之溯升為 5 公尺。火山型態也與崩塌規模有關，如大洋盾狀火山可引發體積為數十至數百立方公里之崩塌。然而，若沒有觀測或儀器之數據，山崩體積實際上很難被推斷出來，其流變形態也難以推估，從而影響海

嘯危害評估。

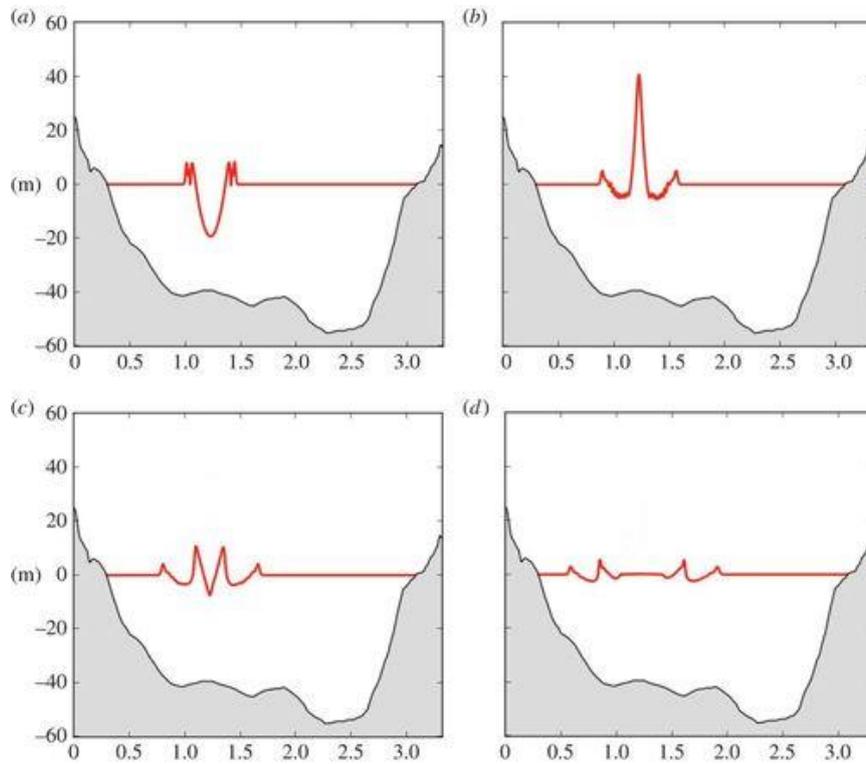


圖 2，堪察加半島 Karymsky 湖水下爆炸所產生初始波之時間序列（擷自 Paris et al., 2015）

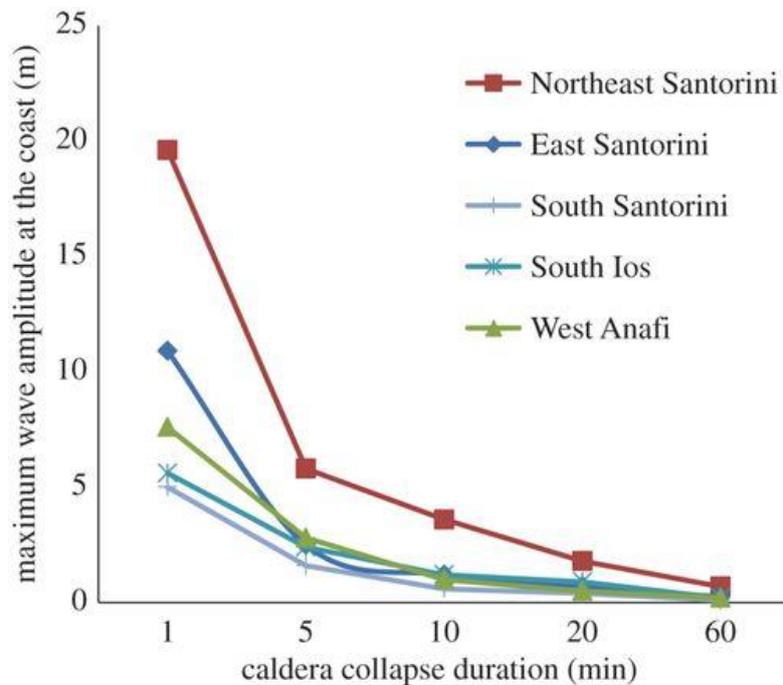


圖 3，聖托里尼海岸記錄之最大海嘯振幅，與愛琴海的 Kolumbo 海底火山火山口坍塌持續時間之關係。（擷自 Paris et al., 2015）

最近一次跨洋型態之火山海嘯為 2022 年之東加火山海嘯，此事件不單僅是傳統之火山海嘯，其成因主要為兩個物理機制，其一為火山爆發之氣壓衝擊波引起的氣象海嘯，為非典型壓力型海嘯，特點為涵蓋範圍廣，但破壞力較低；其二為火山爆發本身引起的火山型海嘯，傳播範圍較為侷限但破壞力強大。歷史上，1883 年的印度洋喀拉喀托火山爆發引發之海嘯也與東加火山海嘯相似，為一跨洋海嘯，印度洋側主要受火山型海嘯影響，根據觀測海嘯最大高度為 15 公尺，位於雅加達潮位站記錄之最大振幅至少 1 公尺，印度洋周邊之國家如印度、澳洲、南非等則有數十公分之記錄；而太平洋側潮位站之紀錄由於到時過早無法被解釋為海洋長波，因此被認為是氣象海嘯之影響，如舊金山與檀香山之潮位站記錄了最大振幅 10 公分之氣象海嘯 (Satake et al., 2020)。

位於東加首都 Nuku'alofa 西北方約 70 公里之 Hunga Tonga-Hunga Ha'apai 火山 (以下簡稱東加火山)，於 2022 年 1 月 15 日 4:15 UTC 發生大規模噴發，此處之板塊構造為太平洋板塊向西隱沒至印澳板塊之下，圖 4 為東加火山之位置。東加火山海嘯事件後，許多針對此事件之海嘯模擬研究隨即展開。

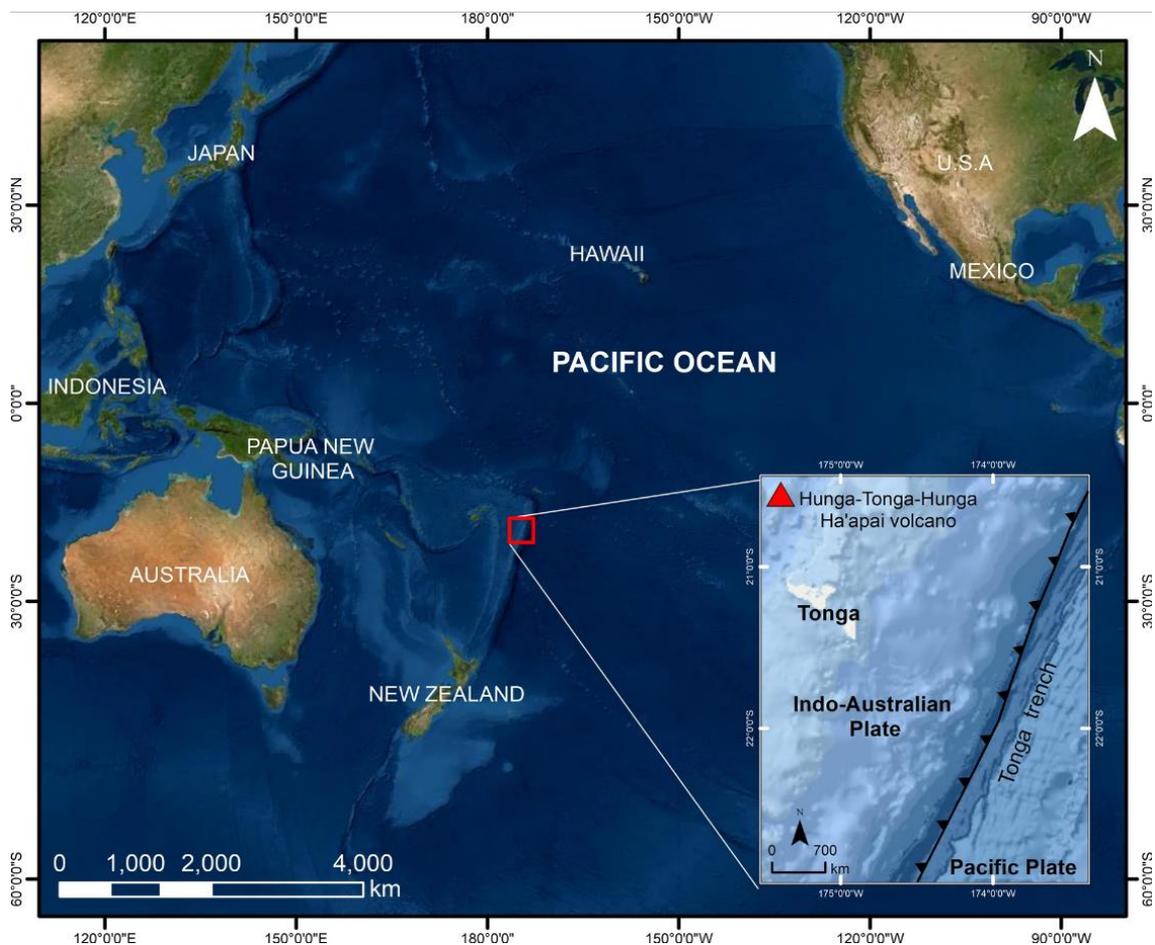


圖 4，紅色三角形為東加火山之位置。(擷自 Ramírez-Herrera et al., 2022)

Pakoksung 等人 (2022) 基於水下爆炸情景之假設，並從爆炸能量之角度推估東加火山爆發時的能量，再運用海嘯數值模式模擬。根據電離層觀測分析之結果，另有研究估計此次噴發之能量為 9 至 37 兆噸三硝基甲苯 (megatons of trinitrotoluene, 以下簡稱 Mt)。水下爆炸由多種物理參數所控制，包括水深、噴發口大小、爆炸能量和岩漿相互作用，初始爆炸坑為在水面上形成一個類似圓柱形坑洞之空腔，接下來沿圓柱徑向方向膨脹形成前導波，隨後為波谷。水下爆炸所產生之初始水面位移可以透過爆炸能量函數之經驗公式估計，該經驗公式為估計距爆炸源一定距離處之水面變化，使得初始水面位移模型為初始最大水位高、爆炸半徑、距爆炸源徑向距離之函數。此經驗公式於前人研究中已被用來作為模擬 1996 年 Karymsky 火山噴發之非線性波模型之初始條件。於 Pakoksung 等人之研究中，作者簡單修改前述提到之經驗公式，改成僅為爆炸能量與水深之函數，使用日本東北大學之 TUNAMI 海嘯數值模型作為海嘯模擬程式，與近場數據驗證其模擬成果。該模擬僅考慮主要爆炸，並不考慮氣象海嘯之因素。作者考量從 1Mt 至 90Mt 之不同爆炸能量，與爆炸直徑從 875 至 3920 公尺，對應之初始水位從 40 至 120 公尺高，初始水位剖面為拋物線之形狀，共提出 20 種爆炸情景。圖 5 為該研究 20 種情景之初始水位剖面。經過模型結果與現地觀測數據驗證，作者認為爆炸直徑為 2558.744 公尺、最大初始水位為 86.895 公尺之 25Mt 的初始水位條件最為吻合。圖 6 為作者使用 25Mt 之條件模擬海嘯所得出之東加島海嘯最大波高圖，東加政府稱東加島西北方最大水位為 15 公尺，其模擬結果與東加政府的說法一致，15 公尺之值對應圖 6 上方之剖面圖。

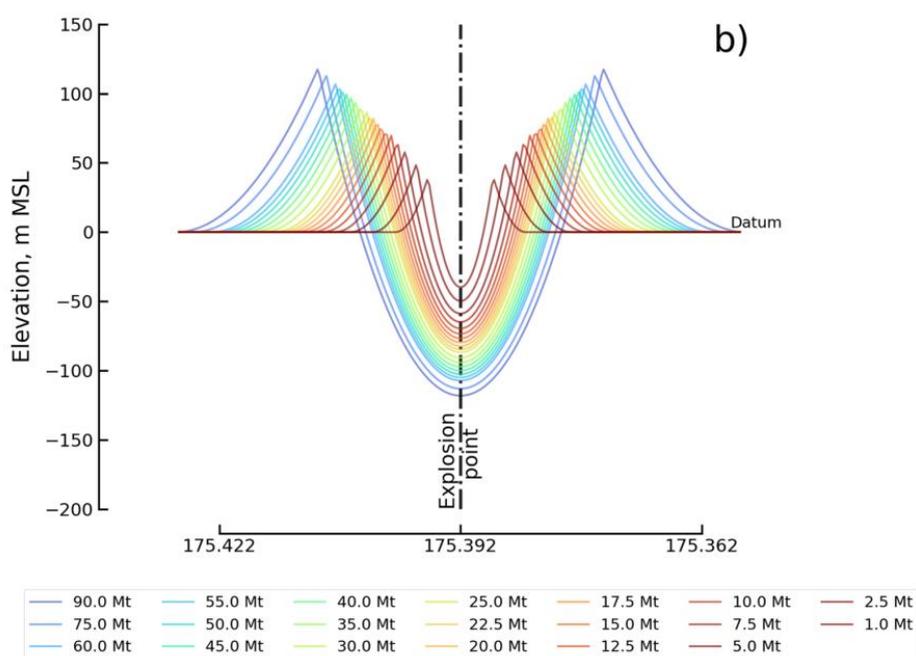


圖 5，20 種情景拋物線形狀之初始水位剖面，根據爆炸能量計算得來。(擷自 Pakoksung et al., 2022)

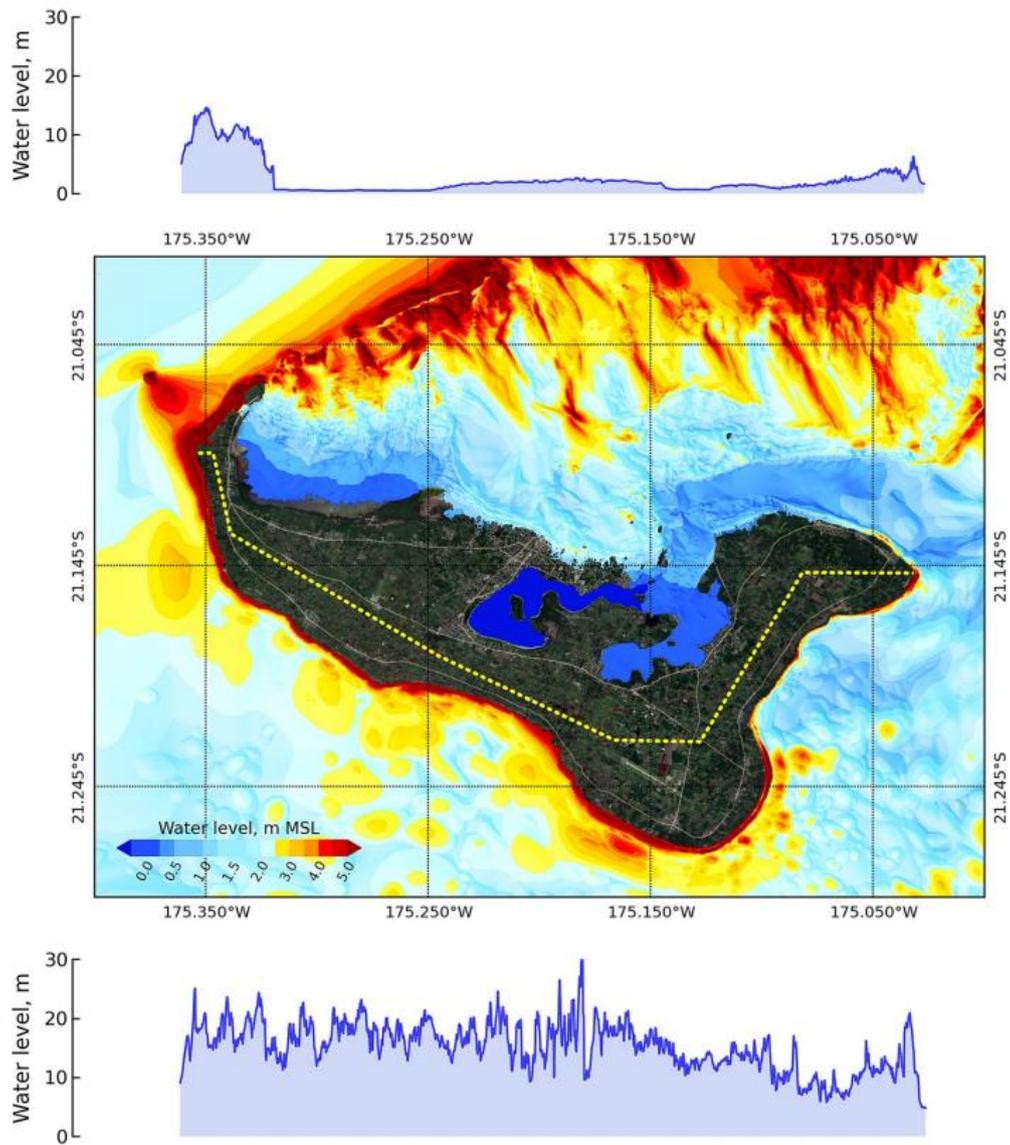


圖 6，東加島海嘯最大波高圖，15 公尺之值對應上方之剖面圖。(擷自 Pakoksung et al., 2022)

Heidarzadeh 等人 (2022) 透過調查近場 (距離最遠約 1,500 公里) 記錄之海嘯波形, 表徵海嘯波形之頻譜內容, 並應用此表徵結果作為針對此次海嘯源開發之模型。此研究中使用之海嘯模型為 COMCOT 海嘯數值模式, 且使用線性淺水波方程式於球面座標上求解。作者於研究中僅考慮傳統之火山海嘯, 並無考慮氣象海嘯之因素。作者使用沿海潮位站之海平面數據、深海海嘯浮標 NOAA 之 DART 紀錄以及大氣壓力數據, 利用傅立葉分析與小波分析針對潮位站與 DART 紀錄做頻譜分析, 提取出氣象海嘯之週期大約為 30 至 60 分鐘、傳統火山海嘯之週期約為 4 至 7 分鐘以及 10 至 17 分鐘, 因此作者不考慮氣象海嘯之因素, 將傳統火山海嘯之週期套用於 Heidarzadeh 等人於 2015 年提出之公式, 利用海嘯週期估計出海嘯源特徵長度, 該公式僅為海嘯週期、海嘯源區域水深之函數。經公式計算, 估計出海嘯源特徵長度為 6.6 至 22.6 公里, 並假設海底火山活動引發之海嘯初始波為一高斯形狀之曲線, 圖 7 為高斯形狀之初始波假設, L 為海嘯源特徵長度, a_m 為初始最大水位高。作者考量 6、12、20 公里三種海嘯源特徵長度以及 30、60、90 公尺之初始最大水位高, 共 9 種候選情景。利用 DART 之波形紀錄與模擬波形做比對, 作者認為東加火山之傳統型火山海嘯的特徵長度為 12 公里、初始最大水位高為 90 公尺, 其水之體積為 6.6×10^9 立方公尺。圖 8 為該研究之海嘯最大振幅圖。

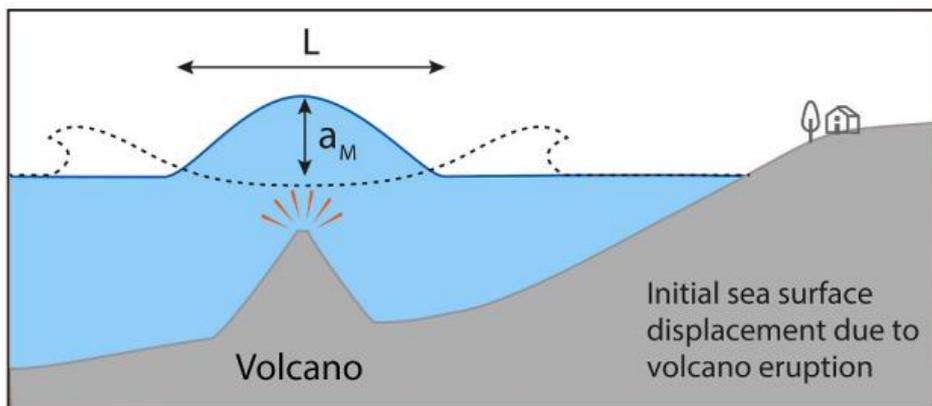


圖 7, 高斯形狀之初始波假設。(擷自 Heidarzadeh et al., 2022)

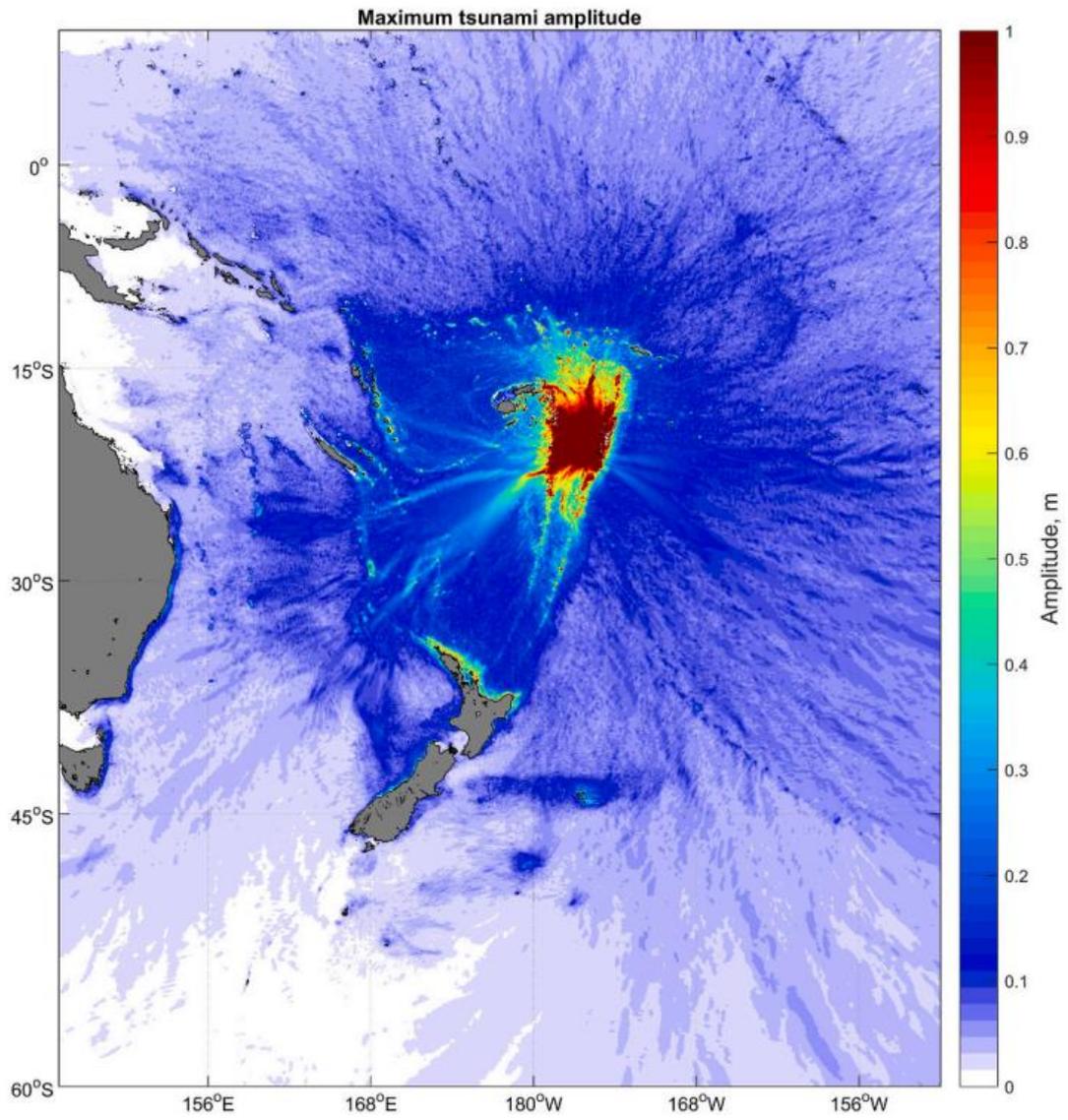


圖 8，Heidarzadeh 等人之研究，東加海嘯最大振幅圖。(擷自 Heidarzadeh et al., 2022)

2022 年之東加火山海嘯引起國內海嘯學者們之關注，臺灣本身亦有可能面臨火山型海嘯之威脅。宜蘭外海之龜山島目前仍為一座活火山，丁禕（2016）提及，過去 7000 年以來，龜山島至少發生過 4 次火山活動。若火山活動造成地震，可能使得島上火成岩體不穩定而引發山崩，當大量塊體快速滑入海中時，有可能引起山崩型海嘯。依據現今之龜山島地形研判，過去龜山島可能曾經發生過山崩，觀察龜山島地形圖可知，龜山島東側存在一個大型碗狀凹陷地形，如圖 9 所示，紅色虛線之區域。此地形為山崩造成山體圓弧型滑動之結果，其滑動方向朝向東北方，但至今可找尋到之相關文獻、史料中，並未發現崩塌或海嘯紀錄，因此判斷崩塌事件可能遠早於人類有文字紀錄之時代。此次崩塌量體估計可能會造成 4 至 5 公尺高之海嘯，因崩塌朝向東北方，因此海嘯主要往東進入太平洋，而距離龜山島北側約 15.5 公里之三貂角一帶也有可能在海嘯波及範圍內，如圖 10 所示。而位於龜山島西側之宜蘭地區因位於向東傳播之海嘯之相反方向，故應不致於直接受到該次海嘯直接襲擊。

龜山島呈現中央高四面低之陡峭地形，未來每個方向之龜山島都有可能引發山崩。蘭陽平原地勢平坦，海嘯引起之海嘯上溯 (runup)，若以海嘯浪高為 5 公尺來推估，蘭陽平原受海嘯溢淹之影響範圍如圖 11 所示，宜蘭沿岸之頭城、壯圍、五結等地區首當其衝，而人口密集處如宜蘭、羅東、礁溪等地亦位於溢淹範圍內容。

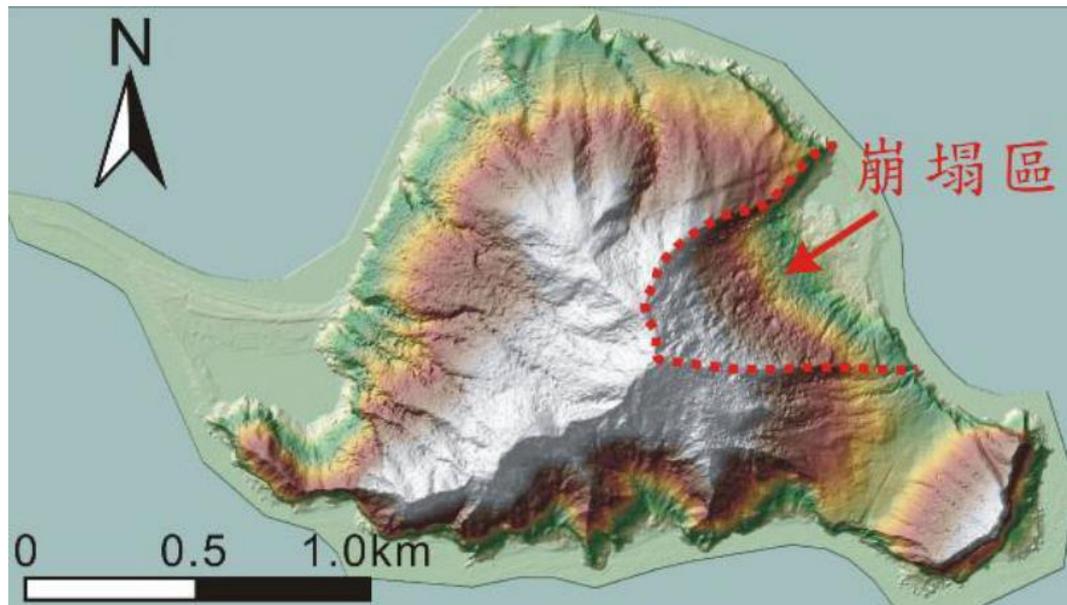


圖 9，龜山島東側存在一個大型碗狀凹陷地形。

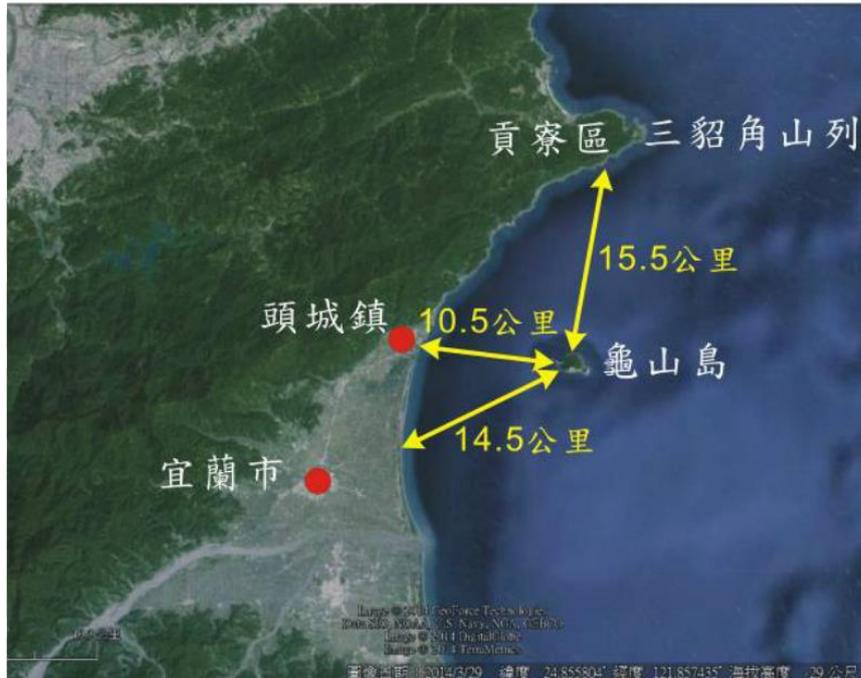


圖 10，龜山島與宜蘭、東北角之距離。

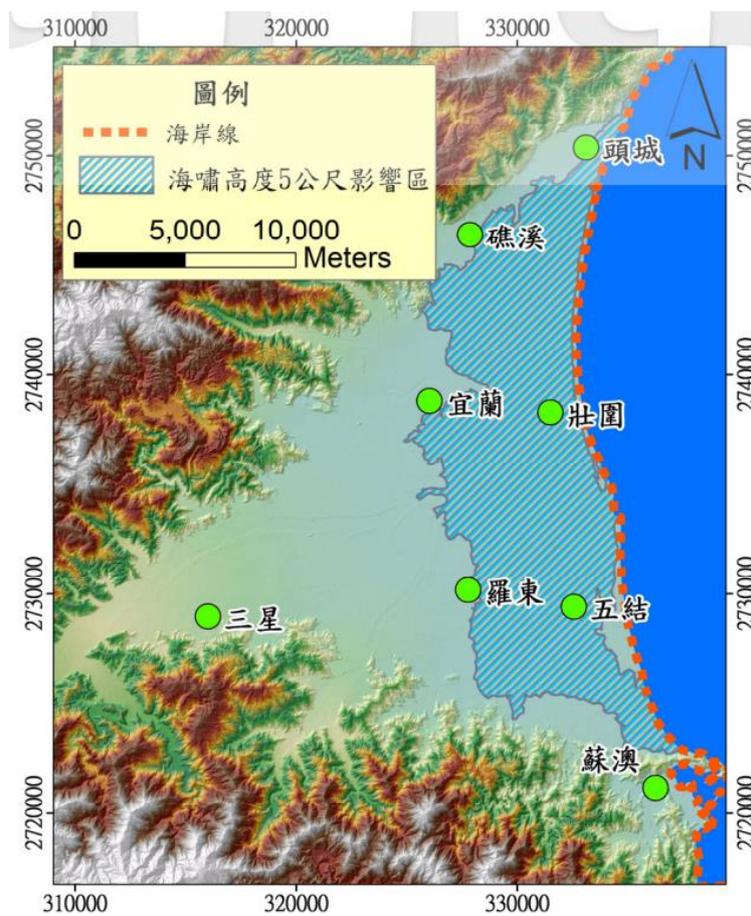


圖 11，蘭陽平原受海嘯浪高 5 公尺之溢淹範圍圖。

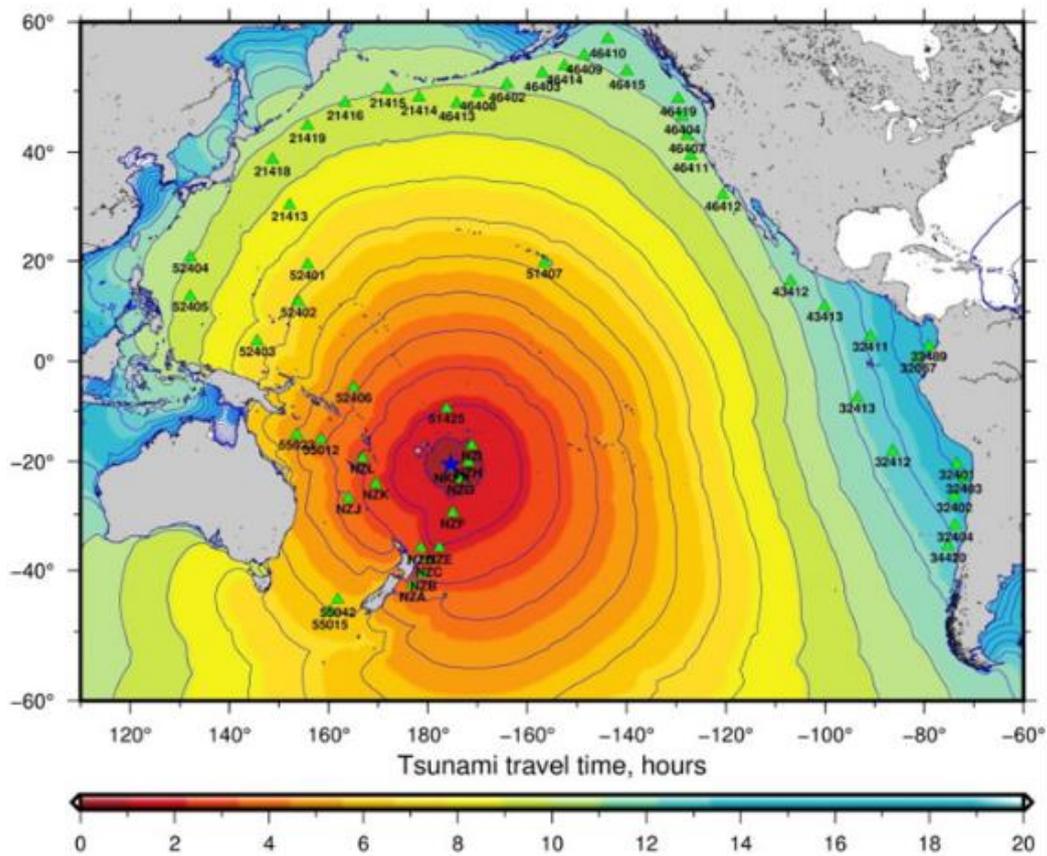
現今世界上存在著多種海嘯數值模式。MOST 模型 (Method of Splitting Tsunami) 由 PMEL (NOAA Pacific Marine Environmental Laboratory) 的海嘯科學家 Vasily Titov 與南加州大學的 Costas Synolakis 開發，能模擬地震海嘯、跨洋海嘯與陸地溢淹情形，應用於海嘯災害評估。該模型已被許多個實驗室進行了廣泛的測試，並成功用於模擬許多歷史海嘯事件。如 Lynett 等人 (2014) 使用 MOST 模型模擬 2010 年智利海嘯、2011 年東日本大海嘯以及於阿留申群島之假想海嘯，為北加州海岸之港口評估海嘯風險；Martin 等人 (2008) 使用 MOST 模型模擬 1969 年與 1971 年於白令海及堪察加半島之海嘯事件，探討海嘯沉積物可能分布之區域。

TUNAMI 模型 (Tohoku University's Numerical Analysis Model for Investigation) 由日本東北大學國際災害科學研究所之今村文彥教授開發，使用線性波理論可於球座標系或恆定網格上求解。如 Pakoksung 等人 (2022) 使用 TUNAMI 模型針對 2022 年東加海嘯進行模擬；Oishi 等人 (2015) 為了進一步改進海嘯預報系統，開發了 TUNAMI-N2 之平行版本，並使用 2011 年東日本大海嘯之例進行測試，僅需不到 10 分鐘時間就能針對仙台地區做出溢淹預報。

然而目前全球之海嘯速算系統皆針對地震型海嘯為目標，對於火山型海嘯尚無法進行預測。如 2022 年東加火山海嘯之大規模的火山型海嘯以火山壁崩塌進而引發海嘯為主，為山崩型之一支，因難以預測火山壁何時崩落以及崩落的體積，所以其特點為不如地震型海嘯有明顯的啟動訊號，因此難以給定海嘯的初始條件。也因此，東加火山海嘯即無立即且有效之預警。

在東加火山海嘯事件中，吳祚任老師結合海嘯點源速算，以及線性修正法，成功於 30 分鐘內完成太平洋之東加火山型海嘯模擬，其 30 分鐘所完成之模擬結果與 NOAA 於一週後依據海嘯浮標所推算之海嘯結果有高度之一致性，圖 12 及圖 13 分別為 NOAA 與吳祚任老師對東加海嘯模擬之到時圖。模擬結果亦顯示海嘯波將傳抵臺灣、日本、與美國。根據吳老師之模擬結果，東加火山型海嘯將於日本與美國產生大約 1.0~1.5 公尺之海嘯。事後根據美國與日本之觀測結果，東加海嘯於美日等國確實引發約一公尺以上之海嘯。由此可見，結合海嘯點源速算與線性修正法之火山型海嘯速算系統準確預測海嘯之分布，圖 14 為東加海嘯之最大波高圖。因此本計畫將以上述方法，為臺灣建立全球首套火山型海嘯速算系統。與此同時，亦對現有之地震型海嘯速算系統進行維護，以其發揮完整速算功能。

此火山型海嘯速算系統，包含一個供預報員操作之使用者介面，使用者介面內又分為使用者可自行輸入參數，或於地圖介面點選火山 (海嘯源) 之地點。本速算系統使用之海嘯模擬程式為 COMCOT 海嘯數值模擬系統，模擬範圍包含臺灣地區、西北太平洋地區、半太平洋地區、全太平洋區域，使用者將點源型海嘯源相關參數輸入後，模式即進行速算，使用者可參考各地新聞、潮位站水位高度及深海海嘯浮標 (如 NOAA 之 DART 浮標系統) 之紀錄 (DART : <https://nctr.pmel.noaa.gov/Dart/> ; National Data Bouy Center : <https://www.ndbc.noaa.gov/obs.shtml?lat=13&lon=-173&zoom=2&pgm=tsunami>)，給予速算系統進行係數修正，最終產品包括六種圖：初始波高圖、海嘯傳遞動畫、海嘯最大波高圖、海嘯到時圖、臺灣沿海港口海嘯時序歷線、臺灣沿海港口最大水位圖。



DART stations (green triangles) and theoretical tsunami (long wave) travel time (TTT) map. The contour intervals for the TTT is 1 hour. Blue star represents the location of Hunga Tonga - Hunga Ha'apai volcano.

圖 12，2022 東加火山型海嘯模擬，NOAA 於事件發生一週後，利用數據所調整出之海嘯到時圖。

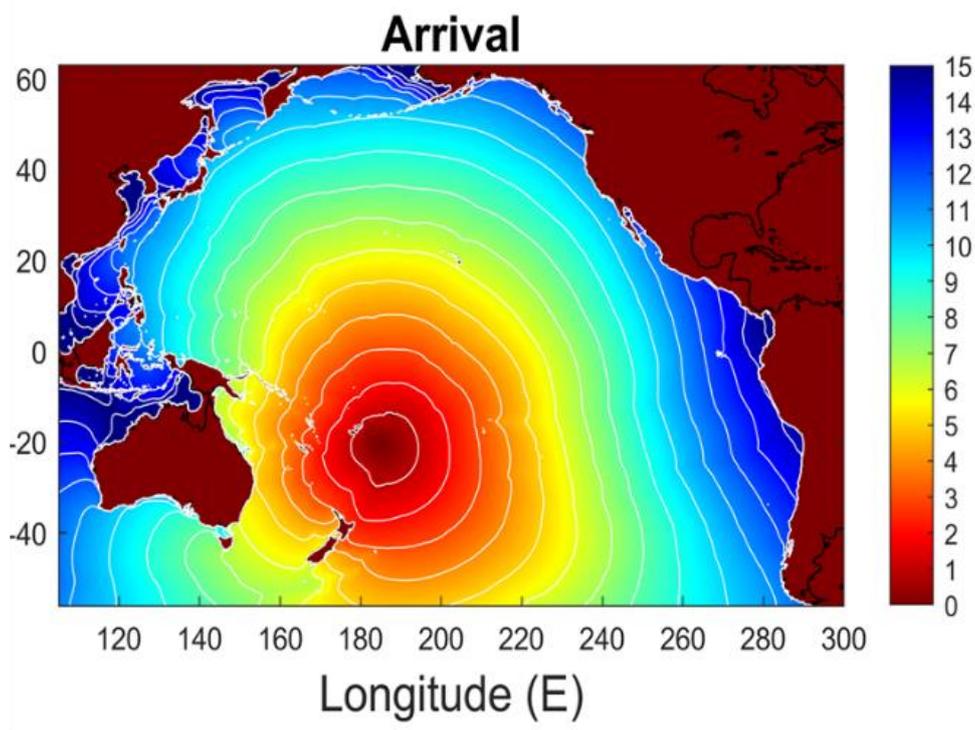


圖 13，吳祚任老師於 30 分鐘內，利用海嘯點源速算與線性修正法所得之結果。

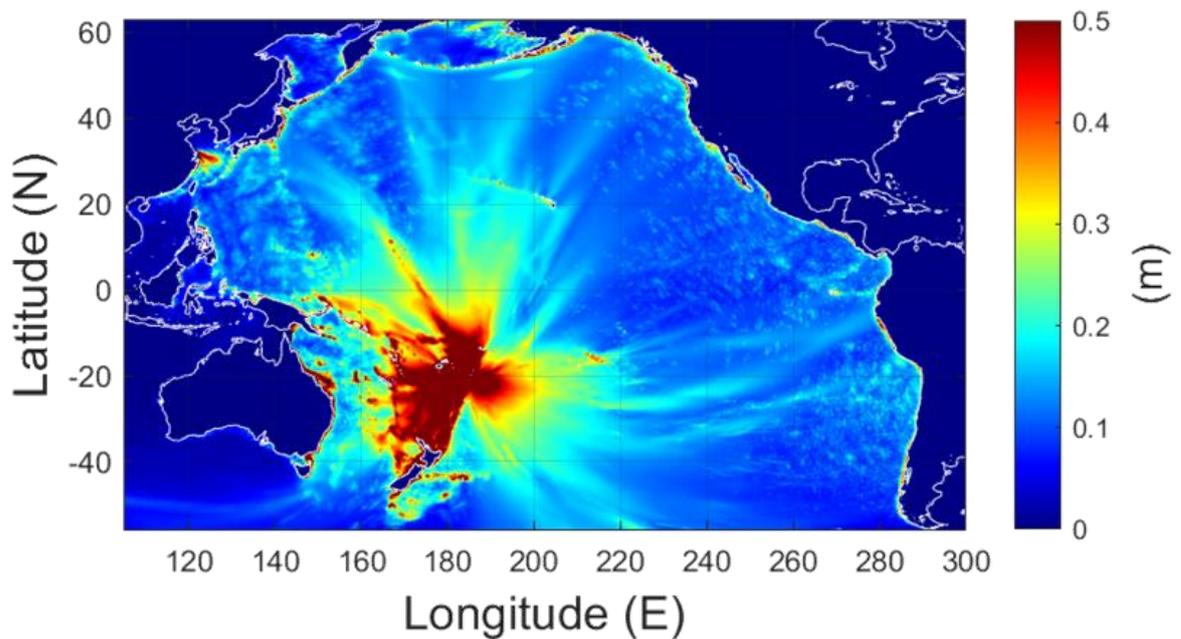


圖 14，2022 東加火山海嘯以 COMCOT 海嘯模式搭配點源速算與線性修正法所得之太平洋海嘯最大波高圖。該圖為 COMCOT CPU 版本於 30 分鐘速算所得之結果。結果顯示，日本與美國沿岸之最大波高約在 1.0~1.5 公尺。與事件後觀測結果相吻合。

四、預定進度甘梯圖 (Gantt Chart)

工作項目	年 月												第 (期末) 月	備註
	第 1 月	第 2 月	第 3 月	第 4 月	第 5 月	第 6 月	第 7 月	第 8 月	第 9 月	第 10 月	第 11 月			
歷史火山型海嘯文獻蒐集	■	■												
火山型海嘯點源模式建立		■	■	■	■									
撰寫期中報告書			■	■	■	■								
火山型海嘯速算系統建立				■	■	■	■	■	■	■	■			
地震型海嘯速算系統維護								■	■	■	■			
撰寫期末報告書										■	■	■		
工作進度估計百分比 (累積數)	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	85%	90%	95%	100%		
預定查核點	第 1 期:歷史火山型海嘯文獻蒐集 第 2 期:火山型海嘯點源模式建立 第 3 期:撰寫期中報告書 第 4 期:火山型海嘯速算系統建立 第 5 期:地震型海嘯速算系統維護 第 6 期:撰寫期末報告書													
說明：(1)工作項目請視計畫性質及需要自行訂定。預定進度以粗線表示其起訖日期。 (2)「工作進度百分比」欄係為配合管考作業所需，累積百分比請視工作性質就以下因素擇一估計訂定： 1.工作天數 2.經費之分配 3.工作量之比重 4.擬達成目標之具體數字。 (3)每季之「預定查核點」，請在條形圖上標明※號，並在「預定查核點」欄具體註明關鍵性工作要項。														

五、研究方法及進行步驟

本研究所採用之基礎海嘯數值模式為 COMCOT (COrnell Multi-grid Coupled Tsunami Model)，其為美國康乃爾大學 Prof. Philip L.-F. Liu 團隊所發展。此模式有多項特色，適用於海嘯速算模式之發展，首先該模式可於卡式座標和球座標下同時求解線性與非線性淺水波方程式 (Shallow Water Equation)，可完整呈現海嘯於深海地區之傳遞和近岸區域之高非線性強度之行為；COMCOT 模式具備多重巢狀網格功能 (Multi-Grid Nested System)，可計算多重尺度之波浪傳播現象，此外該模式之移動邊界法 (Moving Boundary Scheme) 可用於模擬海嘯波上溯後之溢淹情形，有利於預測海嘯對內陸之破壞範圍，此外，模式透過與中研院網格中心合作，已完成平行化之程序，效能大幅提升 (Lin et al., 2015)。

本研究將以 COMCOT 海嘯速算系統為基礎，發展點源型火山海嘯速算系統。其方法為使用者指定火山海嘯發生位置以及點源相關參數，火山海嘯速算系統即產生海嘯點源，並進行海嘯波高傳遞之速算。當海嘯傳遞至深海海嘯浮標 (如 NOAA 之 DART 浮標系統)，或使用者可參考各地新聞、潮位站水位高度，可依據所記錄之波高進行線性海嘯速算結果之線性修正。隨時間之發展，若有更進一步之火山型海嘯訊息，如火山山壁崩落體積、火山山壁崩落方位等，速算系統即可依此資訊，重新建構火山型海嘯源，並進行海嘯速算。

火山型海嘯速算系統所產製之資訊包括海嘯初始波高圖、海嘯傳遞動畫、海嘯最大波高圖、海嘯到時圖、臺灣沿海港口海嘯時序歷線、及臺灣沿海港口最大水位圖。

除此之外，本系統亦將對 COMCOT 地震型海嘯速算系統進行維護，在 COMCOT 海嘯速算系統中，使用 Okada (1985) 模型來計算初始自由液面變化，此計算方法之理論依據為在地震發生瞬間，剛體海床之錯動與海水面變動同步產生，此模型之斷層依具彈性錯移理論 (Elastic Dislocation Theory)，利用地下斷層面之錯動資料來計算地表之位移量。此模型計算需要九種參數執行，分別為：震央經度、震央緯度、震源深度、斷層破裂長度、斷層破裂寬度、斷層錯動量 (Dislocation)、斷層走向 (Strike)、斷層傾角 (Dip) 和斷層滑移角 (Slip)。

歷史案例之重現將與歷史紀錄及文獻做比對以判斷其真實性，然而因地震與海嘯之重現可能與前一次之參數略有不同。情境分析無法評估未來在海嘯源位置與強度改變之情況下，在沿海地區產生之可能不同於分析案例之災情，因此需要一個分析方式全面地評估所有潛在之區域及情境。

5.1 控制方程式

COMCOT 海嘯速算系統主要求解淺水波方程式。其基礎假設為海嘯波於深海傳遞時波長 (l) 遠大於水深 (h)，因此在計算海嘯波傳遞時可以淺水波方程式來進行計算，可由頻散係數來定義淺水波，其中 μ 為頻散係數 (Dean and Dalrymple, 1991)，如式 1。

$$\frac{h}{l} = \mu < \frac{1}{20} \dots\dots\dots \text{式 1}$$

COMCOT 模式結合線性與非線性淺水波方程式，其中深海地區適用線性淺水波方程式，而近海或上岸後之海嘯波則適用非線性淺水波方程式。本模式結合球座標與卡式座標之計算，可同時求解全球尺度與地方尺度之海嘯；當海嘯波振幅 a 遠小於水深 h 時，其非線性項 $\varepsilon=a/h$ 很小，可用微小振幅波逼近法 (Small Amplitude Approximation) 忽略非線性項，其卡式座標線性淺水波之連續方程式與動量方程式如式 2 至式 4：

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots \text{式 2}$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + gH \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0 \dots\dots\dots \text{式 3}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gH \frac{\partial \eta}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots \text{式 4}$$

其中， η 為自由液面高程， $H=\eta+h$ 為總水深， h 為靜水深， $P=Hu$ 、 $Q=Hv$ 為水平方向體積通量，其中， u 、 v 為兩個方向之流速， g 為重力加速度， t 為時間。

而在大尺度海嘯模擬中，將使用球座標系統描述淺水波方程式，並因緯度影響而加入柯氏力 (Coriolis force)，所採用之公式如式 5 至式 7：

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \phi} \left\{ \frac{\partial P}{\partial \psi} + \frac{\partial}{\partial \phi} \cos \phi Q \right\} = 0 \dots\dots\dots \text{式 5}$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{gH}{R \cos \phi} \frac{\partial \eta}{\partial \psi} - fQ = 0 \dots\dots\dots \text{式 6}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{gH}{R} \frac{\partial \eta}{\partial \phi} - fP = 0 \dots\dots\dots \text{式 7}$$

此處， ϕ 、 ψ 為緯度和經度， R 為地球半徑， f 為柯氏力係數 (Coriolis Force Coefficient)， $f=2\omega \sin \phi$ ，其中 ω 為地球轉動之角速度 (Rotation Rate)。

而當海嘯到達近岸時，水深變淺，波高變高，非線性強度增強，必須考慮底床摩擦等非線性項，其卡式座標之非線性方程式如式 8 至式 10：

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots \text{式 8}$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{P^2}{H} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{PQ}{H} \right\} + gH \frac{\partial \eta}{\partial x} + \tau_x H = 0 \dots\dots\dots \text{式 9}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{PQ}{H} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{Q^2}{H} \right\} + gH \frac{\partial \eta}{\partial y} + \tau_y H = 0 \dots\dots\dots \text{式 10}$$

考慮海嘯於球座標系統下之傳遞，球座標系統非線性方程式如式 11 至式 13：

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \phi} \left\{ \frac{\partial P}{\partial \psi} + \frac{\partial}{\partial \phi} (\cos \phi Q) \right\} = 0 \dots\dots\dots \text{式 11}$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \psi} \left\{ \frac{P^2}{H} \right\} + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \phi} \left\{ \frac{PQ}{H} \right\} + \frac{gH}{R \cos \phi} \frac{\partial \eta}{\partial \psi} - fQ + \tau_x H = 0 \dots\dots\dots \text{式 12}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \psi} \left\{ \frac{PQ}{H} \right\} + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \phi} \left\{ \frac{P^2}{H} \right\} + \frac{gH}{R} \frac{\partial \eta}{\partial \phi} + fP + \tau_y H = 0 \dots\dots\dots \text{式 13}$$

τ_x 、 τ_y 為底床摩擦項中之剪應力，以曼寧公式假設， n 為曼寧相對粗糙係數 (Manning's Coefficient)，為依流體條件決定之經驗常數，如式 14 及式 15：

$$\tau_x = \frac{gn^2}{H^{10/3}} P(P^2 + Q^2)^{1/2} \dots\dots\dots \text{式 14}$$

$$\tau_y = \frac{gn^2}{H^{10/3}} Q(P^2 + Q^2)^{1/2} \dots\dots\dots \text{式 15}$$

5.2 多層套疊巢狀網格系統

海嘯波之傳遞為一複雜過程，在外海範圍屬於大尺度之運動行為，用較粗之網格即可描述，然而一旦海嘯進入近岸地區，其即轉換為小尺度之運動，此時即需以小網格加以分析。

因此，欲完整計算海嘯之生命歷程，數值模式需要具備能同時處理大小尺度之巢狀網格功能，本研究將於遠洋處安排較大網格，並於近岸處安排較小網格，而大小網格間為動態連結，可有更精確之計算結果。

兩個不同網格尺度間之計算方法說明如下：圖 15 為一個較小網格系統套疊在一個較大網格系統中之範例，其網格大小比為 1:3，圖中箭頭代表通過各網格之體積通量 P 和 Q ，黑色方點和圓點分別代表大網格及小網格的水深及波高資訊。其體積通量之計算，除了位於大網格和小網格邊界上之小網格由相鄰之大網格的體積通量內插而得以外，在大網格及小網格系統中的體積通量皆由動量方程式來計算。

小網格系統之下一時間步波高則以連續方程式計算。為求數值上之穩定，小網格系統使用的時間步需滿足 CFL (Courant-Friedrichs-Lewy) 條件，即 $C \times dt/dx < 1$ (Liu et al., 1998)， C 為波浪的相速度 (Phase Speed)，為一時間步內不可跨越超過一個網格之意思，因此其時間步要比大網格系統使用的時間步來得小；當小網格系統中之下一時間步波高計算完成後，大網格系統中之波高亦會隨之更新。

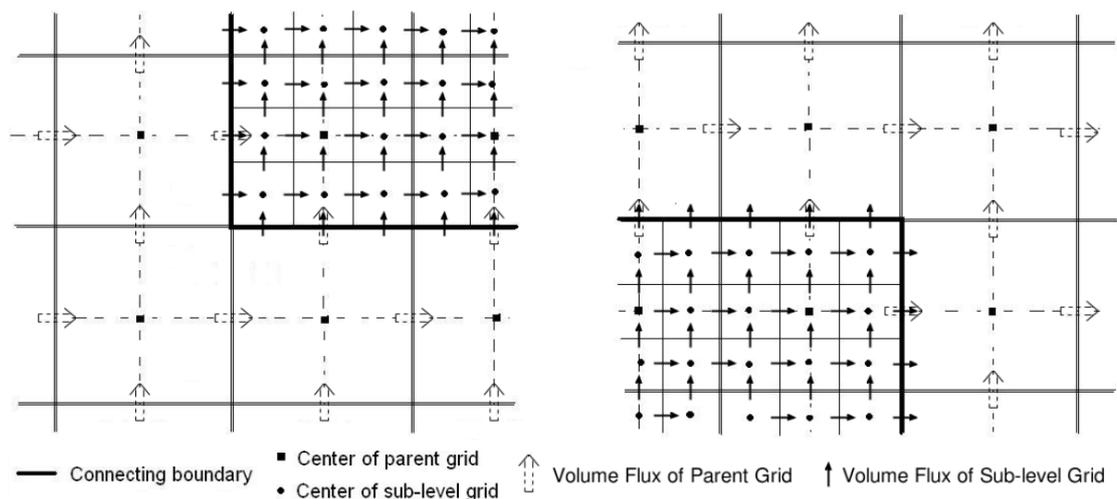


圖 15，多層套疊網格系統 (Wang, 2009)

5.3 移動邊界法

COMCOT 具有移動邊界之功能，可處理海嘯波上溯時之乾濕邊界問題。一般海嘯模式僅可計算線性淺水波方程式，對於邊界上則僅可處理固定邊界。換言之，一般海嘯波模式無法模擬海嘯溢淹範圍(inundation)。而本模式具備移動邊界功能，可準確計算海嘯波上溯(runup)後，於內陸所造成之溢淹範圍。

COMCOT 模式中以判斷乾溼網格邊界來開始使用移動邊界法計算。當網格點位於陸地上，為乾網格，其靜水深 h 是為平均海面 (mean water level, MWL) 到陸地之高度，以負值表示， η 為波高，總水深 $H = h + \eta$ 亦為負值，反之若有水溢淹之濕網格中總水深則以正值表示，位於乾網格與溼網格之間之交界則定義為海岸線 (shoreline)。圖 16 以一維階梯代替真實地形來描述移動邊界條件的運算，圖中 MWL 表示平均海面， H_f 為洪氾高度 (Flooding Depth)。波由外海計算到近陸地區，當遇到定義的海岸線 (Shoreline)，即 $H_i > 0$ 及 $H_{i+1} \leq 0$ 的條件成立，則開始使用移動邊界計算。

計算方法說明如下，在圖 16 中，總水深資料被記錄於第 $i-1$ 、 i 和 $i+1$ 位置中，體積通量則計算於 $i-1/2$ 、 $i+1/2$ 和 $i+3/2$ 位置上，起始體積通量在各網格皆為零，並利用連續方程配合移動邊界來計算下個時間步的波高，波高在乾網格中的值為 0；當第 i 個網格為濕網格，且第 $(i+1)$ 個網格為乾網格同時其通量為 0 時，海岸線位於第 i 個網格和第 $(i+1)$ 個網格之間，此時位於第 $(i-1/2)$ 網格之體積通量則指定為 0，海岸線並不會往陸地方向移動，如圖 16 上半部所示。

而當第 i 個網格水面升高時， $(i+1)$ 個網格之通量不再為 0，原本在第 i 個網格點的總水深需更新到第 $(i+1/2)$ 個網格點，經由數值計算來決定總水深是否夠高足以溢淹到相鄰的乾網格，並改變定義的海岸線位置，如圖 16 下半部所示，總水深將由連續方程中被更新。

5.4 點源型海嘯源

常用於預警及分析海嘯表現及災害評估之數值模擬方式為情境分析 (Scenario Analysis)，指針對指定事件及區域設置相應之海嘯源。如地震型海嘯可以 Okada (1985) 模型改變液面波高做為初始條件，山崩型海嘯則可以 Watts et al. (2003) 之數學模型改變液面波高做為初始條件。情境分析其優點為可以精確還原事件之結果，例如對於近岸及陸域地區之海嘯溢淹及上溯，其波浪表現為高度非線性，採用情境分析將可以得到較精確之結果。

然而情境分析產生之海嘯源雖能反映個別事件之初使情境，但也同時代表著其強度及範圍受地質參數之影響。為解決此問題，單元海嘯訊號被廣泛使用於海嘯研究之中。

點源型海嘯指在離散後的研究地區中設置圓柱形之海嘯源，採用圓柱形海嘯源主要避免海嘯出現人為方向性。而海嘯之方向性則由海底地形來決定。本研究所需之圓柱形海嘯源主要參數為海嘯源中心經緯度座標、圓柱形半徑、及圓柱形高度 (如圖 17 所示)。

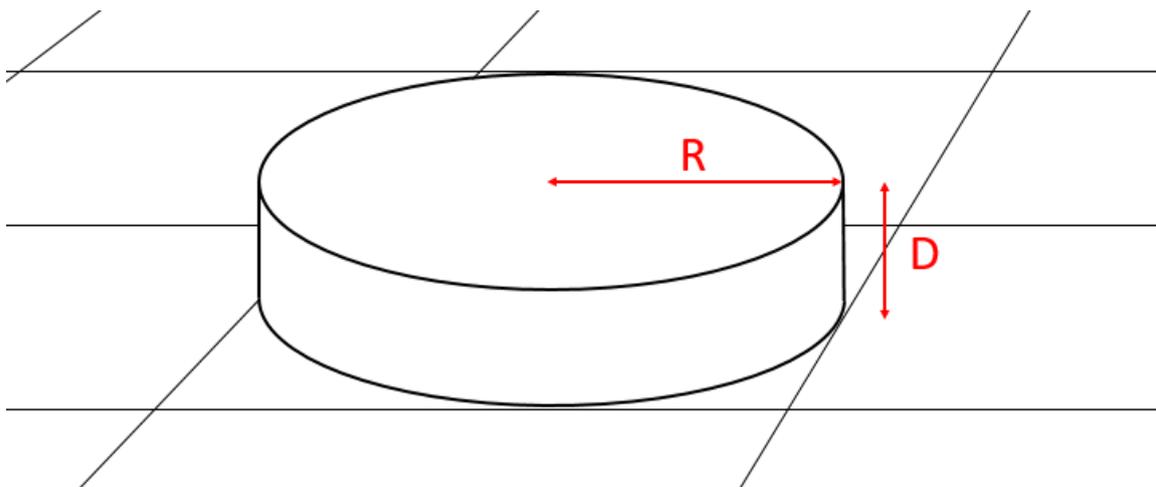


圖 17，本研究使用之圓柱形海嘯源之設置。

然而本模式求解淺水波方程式，故其波長 (l) 必須遠大於水深 (h)， $\frac{h}{l} = \mu < \frac{1}{20}$ (Dean and Dalrymple, 1991)。

點源形海嘯源除了可用於計算火山型海嘯之外，李珮瑜 (2015) 亦完成單元海嘯其符合疊加理論 (Kramers, 1957) 及點源離散理論之驗證。其基礎及為方程式之線性解可進行線性調整與線性跌加。即在相同條件之下，由多個追蹤單元所產生之合成反應相當於各追蹤單元單獨產生之反應之代數和。本研究之單元海嘯之疊加理論可藉由惠更斯-菲涅耳原理 (Huygens-Fresnel principle) 加以說明 (Fresnel and Chim, 1816)。惠更斯首先提出「波前之每一點可視為是產生球面次波之點波源，而後任何時刻之波前則可看作是這些次波之包絡」(Born & Wolf, 2011)。惠更斯原理可解釋波之直線傳播與球面傳播，並推導出反射定律與折射定律，然而此原理卻

無法解釋波之繞射效應。因此菲涅耳根據惠更斯原理為基礎，並假設波彼此之間會發生干涉現象，故惠更斯-菲涅耳原理綜合了惠更斯原理與干涉原理，可解釋波之繞射效應並完整描述波之傳播行為。代表單元海嘯之運動表現足以代表真實之案例情境海嘯源。

利用此線性調整之特性，火山型海嘯速算系統所求得之波高分布，可與觀測數據進行比對，進而調整。透過局部單點之調整，即可修正海嘯波高場之分布，並進而達成全域速報之調整。

圓柱型點源亦可用於海嘯影響強度分析法 (IIA)。IIA 對研究區域海域之可能潛在海嘯威脅程度進行量化分析。影響強度分析法為將計算域離散，並分別計算每個離散區域之單元海嘯傳抵研究地點之波高，並將該波高標註於該離散區域上。透過此方法，各區域對研究地點之影響強度隨即呈現。此方法較為耗時，然而卻可忠實還原單元海嘯可造成之實際結果，可清楚分辨各區域對研究地點之敏感性。

5.5 海嘯影響強度分析法

由李俊叡 (2014) 開發之海嘯源之影響強度分析法 (Impact Intensity Analysis, IIA)，對研究區域海域之可能潛在海嘯威脅程度進行量化分析。影響強度分析法為將計算域離散，並分別計算每個離散區域之單元海嘯傳抵研究地點之波高，並將該波高標註於該離散區域上。透過此方法，各區域對研究地點之影響強度隨即呈現。此方法較為耗時，然而卻可忠實還原單元海嘯可造成之實際結果，可清楚分辨各區域對研究地點之敏感性。

李俊叡 (2014) 以 IIA 作為了解各研究範圍對指定研究區域之敏感性，分析結果最有可能造成 1867 基隆海嘯之發源地分別位於基隆海谷、基隆陸棚和棉花峽谷，其成果可得知 1867 年之基隆海嘯該事件之可能海嘯源發源地。李珮瑜 (2015) 根據 IIA 分析結果得知，臺灣東部外海、馬尼拉海溝北端及 1771 年八重山海嘯事件較不可能為蘭嶼海嘯石之來源。而綠島南方之海嘯源，其最大波高符合海嘯石之分布情形。

為量化近岸潛在海嘯源之威脅程度，影響強度分析法將計算範圍離散成數個均一大小之海嘯源，稱之為單元海嘯。再使用 COMCOT 求解線性或非線性淺水波方程式，並求得研究位置之最大波高。最後將所求得之最大波高繪製於該單元海嘯上，即可量化該海嘯源之威脅程度。

然而於球面座標中隨著緯度增加，每一緯度之長度會隨之減少。因此本研究為使每個單元海嘯有相同之大小，故於計算區域中本研究離散之區間採用經緯度做為分界，而單元海嘯則使用公里做為大小之單位。根據上述方法繪製之海嘯源於投影後會有大小不同之觀感，因此圖像化時以根據經緯度離散區間做為繪圖之間格。IIA 之其執行步驟如下：

1. 將數值計算域離散為數個均一尺寸之微小海嘯源，每個海嘯源稱作單元海嘯，其單元海嘯尺寸依網格解析度和計算域範圍而定 (圖 18)。
2. 為記錄模擬結果之最大波高圖，其模擬時間需使每一單元海嘯皆能於計算

域中完整傳播。

3. 選擇一研究地點，擷取每個單元海嘯傳遞至此研究地點之最大波高值。
4. 將研究地點所記錄到之最大波高值，對應回其單元海嘯位置，並以最大波高值大小著色，以色階代表其海嘯之相對衝擊程度。

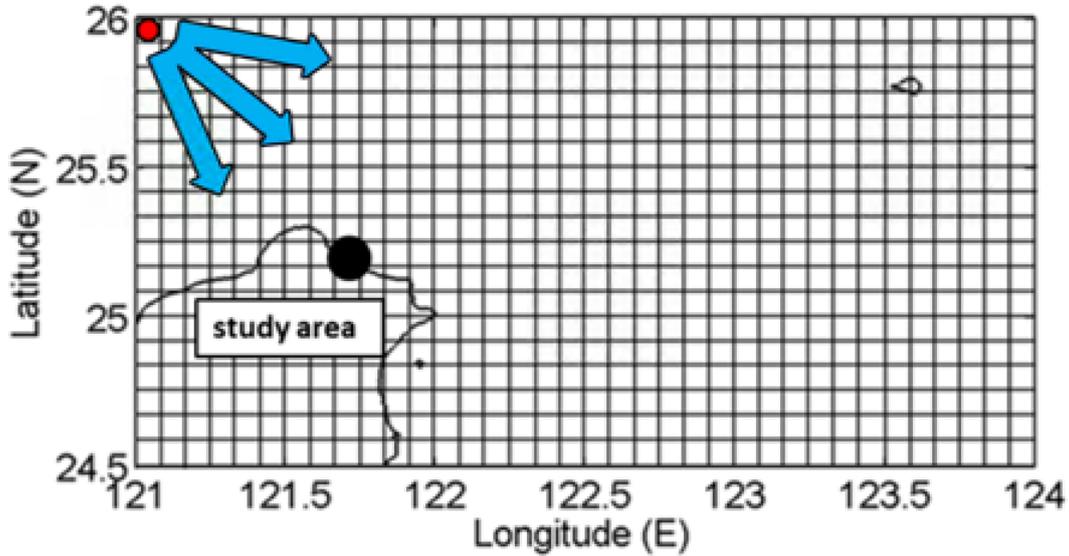


圖 18，影響強度分析法流程示意圖。

黑色網格將數值計算域離散為數個均一尺寸之計算區，並於各計算區設置單元海嘯源。紅色圓點表示單元海嘯源，藍色箭頭表示以 COMCOT 計算海嘯波傳遞，黑色圓型為選定之研究地點。

本計畫於第二期研究中，將採用康乃爾大學開發之多重網格海嘯模式 (Cornel Multi-grid Coupled of Tsunami Model, COMCOT) 進行臺灣火山型海嘯潛勢分析。分析方法包括海嘯情境分析法 (Tsunami Scenario Analysis)、海嘯影響強度分析法 (Impact Intensity Analysis, IIA)，及海嘯到時分析法 (Tsunami Arrival-Time Analysis, TATA)，以分析可能之海嘯源及評估潛在海嘯強度。期待未來可為臺灣火山型海嘯進行全面性潛勢分析。

5.6 模式驗證

COMCOT 海嘯數值模式因結合線性與非線性淺水波方程式，且可於球座標與卡式座標上求解，其準確之特點使得 COMCOT 應用於許多研究中，例如海嘯災害模擬與評估、歷史事件之驗證等。

Lin 等人(2015)應用 COMCOT 提出一種高效且低成本之海嘯預警速算系統，其想法為將現有之地震預警系統與海嘯速算系統結合，為南中國海建置無需部署海上浮標之海嘯預警系統。因傳統之海嘯監測系統依賴於海嘯傳感器，例如 NOAA 之 DART 浮標。然而部署於南中國海之海嘯預警浮標遠少於太平洋，且與太平洋

相比，南中國海為一相對封閉之海域，能夠於海嘯抵達前預警之時間較短。南中國海周邊如馬尼拉市及高雄市這些人口密集之大都市，其距離馬尼拉海溝非常近，海嘯預警時間僅不到 30 分鐘。為了應對預警時間相對少之都市，海嘯速算系統為至關重要的。臺灣與菲律賓、越南等南中國海之周邊於過去部署之密集地震監測網絡，可於 5 分鐘內快速提供震源位置、深度與地震矩規模，此地震監測網絡也為該研究之構成要素之一。該研究應用 Okada (1985) 之模型以生成初始海嘯波高，並以 2011 年之東日本大海嘯為例進行模型驗證。研究使用 OpenMP 技術及多核 CPU，修改 COMCOT 之版本，運行於雲端，名為 iCOMCOT，其執行速度比原始版本快至少 10 倍，可用於智慧型手機等移動設備，其介面簡單且清晰，使用者可輕鬆設定參數，於遠端進行海嘯模擬，並將結果視覺化。

Wang 等人 (2006) 應用 COMCOT 針對 2004 年之印度洋大海嘯，基於幾種被提出之斷層面模型，對孟加拉灣的海嘯之產生和傳遞進行了數值模擬。使用衛星數據進行進一步之校準，驗證海嘯傳遞模型。數據結果表明，經作者改良之斷層模型與海嘯模擬結果，與衛星之海平面測量值及馬爾地夫潮位站紀錄有非常匹配之結果。

Feng 等人 (2017) 應用 COMCOT 評估海嘯對中國山東省造成之潛在危險，並透過與三次歷史海嘯事件之比較來驗證其有效性。雖然歷史上於山東省發生之海嘯事件十分稀少，據調查僅有一次真實海嘯事件，但沿岸如青島等城市面臨黃海，易受跨洋海嘯或黃海地震引起之海嘯影響，因此該研究為針對山東省沿海地區執行海嘯災害研究，無論是對海嘯相關災害之防範，抑或是對部分沿海工程之安全性評估，都具重要意義。該研究之結論表明模擬之海嘯最大波高與觀測數據吻合良好，山東省沿岸海嘯最大波高可達 1.39 公尺，並提及雖山東省沿海地區海嘯危害不大，但海嘯致災之潛力為不容忽視的。

Rasyif 等人 (2019) 應用 COMCOT 並修改，結合沉積物模組 COMCOT-SED，於 2006 年利用實地勘察之資料，針對 2004 年印度大海嘯於印尼蘇門答臘島班達亞齊沿海地區發生巨大之地貌變化進行驗證。模型之結果顯示與實地數據吻合良好。其結論表明模型可以預測由海嘯波引起之沉積和侵蝕區域。

5.7 參數敏感性分析

參數敏感性分析主要是調整與教驗點源型海嘯源參數的部分，點源型海嘯源為一圓柱，需要圓柱直徑與高度兩項因素控制。此部分為探討固定高度之不同直徑的圓柱體之比較，與固定直徑之不同高度的圓柱體之比較。前者例如，圓柱體高 30 公尺，直徑為 50 公里、100 公里、150 公里、200 公里共四種圓柱體產生之差異。後者例如，同為直徑 100 公里，高度分別為 15 公尺與 30 公尺之差異。此部分於第六章「敏感性分析」展示與說明。

5.8 火山海嘯速算系統之架構

此火山型海嘯速算系統最終為建立使用者可操作之介面，該介面包含太平洋區域地圖、使用者輸入欄位等。系統所需參數主要為以下三項：

- 海嘯發生位置經緯度
- 點源圓柱體之直徑及高度
- 模擬系統之地形解析度

系統之運作流程圖展示於圖 19。

第一項：海嘯發生位置之經緯度，使用者可於輸入欄位中自行輸入，或於太平洋區域地圖上點擊滑鼠，程式即自動選定海嘯點源位置。

第二項：圓柱體之參數，可依使用者需求於輸入欄位中自行輸入圓柱之直徑值、高度值，或套用程式預設之值。

第三項：地形解析度，本速算系統將提供多種不同地形解析度，配合使用者之需求可作變更，或套用程式預設之解析度。

關於地形資料來源，使用 NOAA 之 ETOPO 測深數據 (<https://www.ncei.noaa.gov/products/etopo-global-relief-model>)。於 ETOPO 下載之原始地形資料包有兩種範圍：全太平洋及臺灣區域，全太平洋範圍為網站提供之 1 弧分之解析度，臺灣區域為網站提供之 15 弧秒（即 0.25 弧分）之解析度。於海嘯數值程式 COMCOT 中，程式內部使用原始地形資料包重新製作成不同解析度之網格，因 COMCOT 使用巢狀網格，本系統將包含兩層，最大範圍之第一層為全太平洋，網格解析度提供 2 弧分、4 弧分、8 弧分；第二層為臺灣區域，涵蓋臺灣本島及臺灣海峽，網格解析度提供 0.25 弧分、0.5 弧分、1 弧分。考慮到隨著解析度愈精細，模擬所花費之時間愈長，系統預設為第一層為 4 弧分、第二層為 0.5 弧分，使用者也可自行搭配系統提供之不同地形解析度。

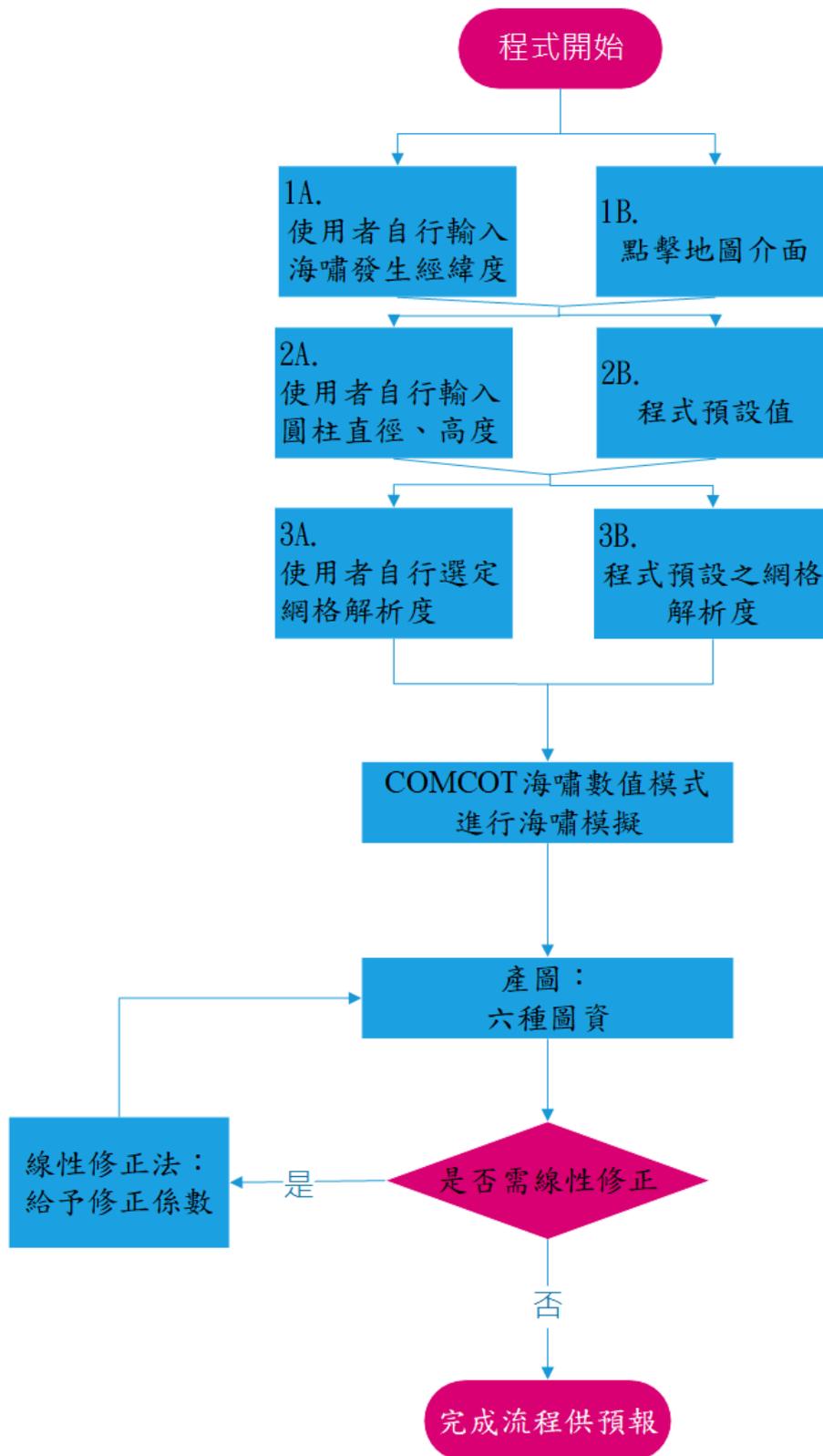


圖 19，火山海嘯速算系統之運作流程圖。

以上三項參數設定完成後，系統即自動生成點源初始檔，並自動將點源初始檔放至 COMCOT 內進行海嘯模擬。模擬階段完成後即生成初步成果圖，即海嘯到時圖等六種圖資。隨著時間之發展，海嘯傳遞至 NOAA 之 DART 浮標、海嘯途經其他國家之新聞或潮位站紀錄，使用者可依據所記錄之波高進行線性修正，系統將繪出最終產品，最終產品即為經線性修正過之六種圖資，海嘯初始波高圖、海嘯傳遞動畫、海嘯最大波高圖、海嘯到時圖、臺灣沿海港口海嘯時序歷線、及臺灣沿海港口最大水位圖。臺灣沿海港口為環繞臺灣一周與綠島、蘭嶼、澎湖、金門、馬祖、東沙島等外島，共計 34 處地點。

若有更進一步之火山型海嘯訊息，如火山山壁崩落體積、火山山壁崩落方位等，速算系統即可依此資訊，重新建構火山型海嘯源，並進行海嘯速算。

此速算系統所使用之程式(海嘯數值程式 COMCOT 除外)，包括使用者介面、與 COMCOT 進行自動化串接之溝通管道、線性係數之修正、產品繪圖，皆使用 python 進行編寫。

速算系統之詳細運作及介紹請參考第八章「火山海嘯速算系統之操作說明」。

六、敏感性分析

對於預報而言，海嘯到時與海嘯最大波高是十分重要的，因此以下之參數敏感性分析與地形解析度分析，將針對到時與最大波高討論。

於兩種分析中，都使用假想之點源，點源設置於西北太平洋小笠原群島之福德岡之場，此處海底火山活動也十分活躍，曾於 2021 年 8 月有過大規模噴發，因此假想點源設置於此藉以進行模擬。圖 20 為福德岡之場之位置，擷取自 Google Map。

COMCOT 內模擬之區域分為第一層網格(大範圍，粗網格)及第二層網格(小範圍，細網格)，第一層為西北太平洋，第二層為臺灣區域。

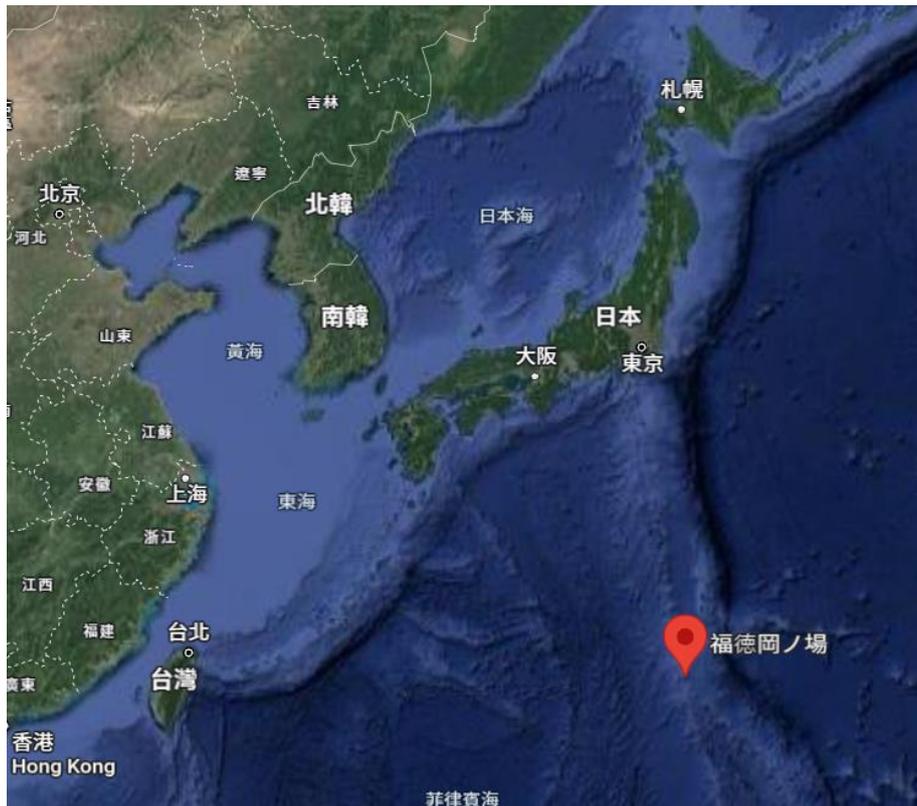


圖 20，福德岡之場之位置，擷取自 Google Map。

6.1 參數敏感性分析 – 固定高度、不同直徑之圓柱體

四種大小之點源，分別為直徑 50 公里、100 公里、150 公里、及 200 公里之圓柱，圓柱體之高度都為 30 公尺。第一層網格解析度為 2 弧分，第二層網格解析度為 0.25 弧分。總模擬時長為 8 小時。

圖 21 至圖 24 分別為直徑 50 公里至 200 公里的海嘯初始波高圖，圖 25 至圖 28 分別為直徑 50 公里至 200 公里第一層網格之每 30 分鐘之海嘯傳遞圖快照。圖 29 至圖 32 分別為直徑 50 公里至 200 公里第二層網格之每 30 分鐘之海嘯傳遞圖快照。圖 33 至圖 40 分別為第一層網格與第二層網格之海嘯最大波高圖。圖 41，直徑 50 公里點源，第一層網格之海嘯到時圖。至圖 48 為第一層網格與第二層網格之海嘯到時圖。圖 49 至圖 64 為臺灣沿海港口海嘯時序歷線圖，以頭城、臺東、嵵廣嘴、安平，此四處海嘯訊號相對明顯之處為例。圖 65，直徑 50 公里，臺灣沿海港口最大水位圖。至圖 68 為臺灣沿海港口最大水位圖。

圖 42、44、46、48 之臺灣區域海嘯到時圖中，顯示出對於臺灣東部海岸，直徑 50 公里之到時約為 2 小時 40 分鐘，直徑 200 公里之到時不到 2 小時 30 分鐘。圖 65 至圖 68 之臺灣沿海港口最大水位圖中，顯示出臺灣東部與南部之頭城、成功、大武、南灣等地有有明顯波高。

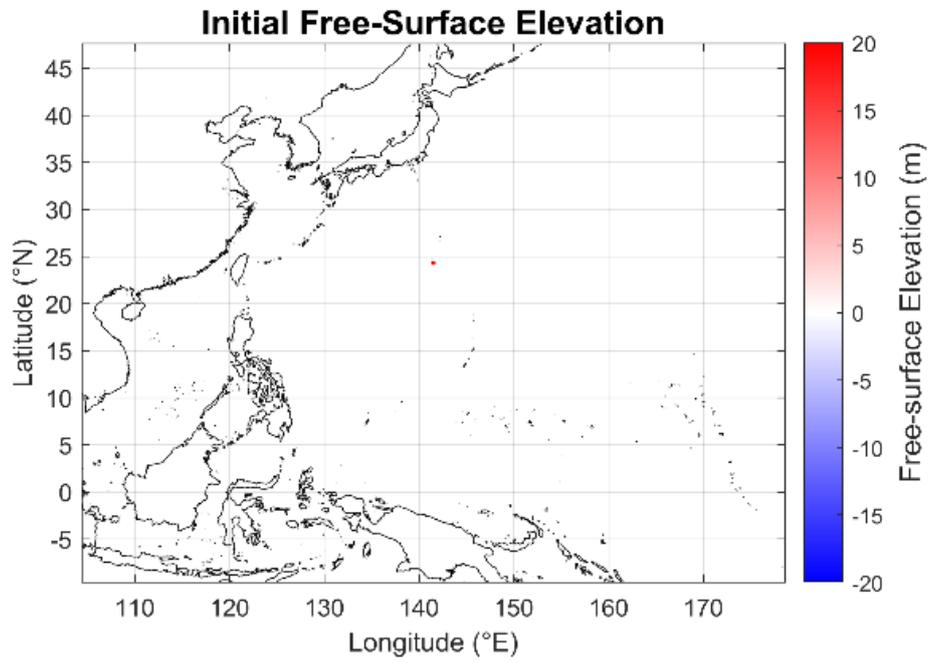


圖 21，直徑 50 公里點源之海嘯初始波高圖。

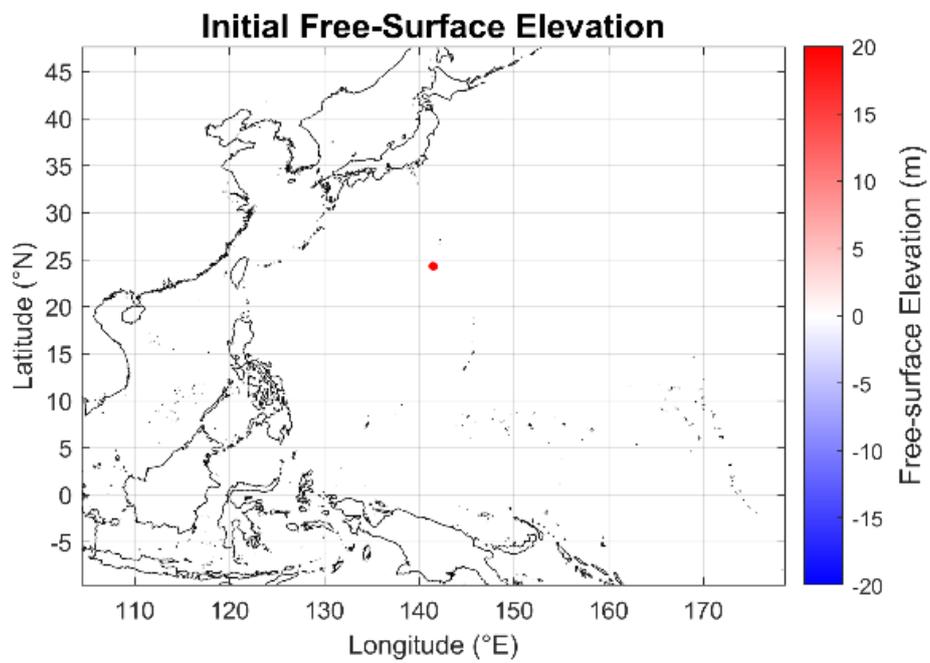


圖 22，直徑 100 公里點源之海嘯初始波高圖。

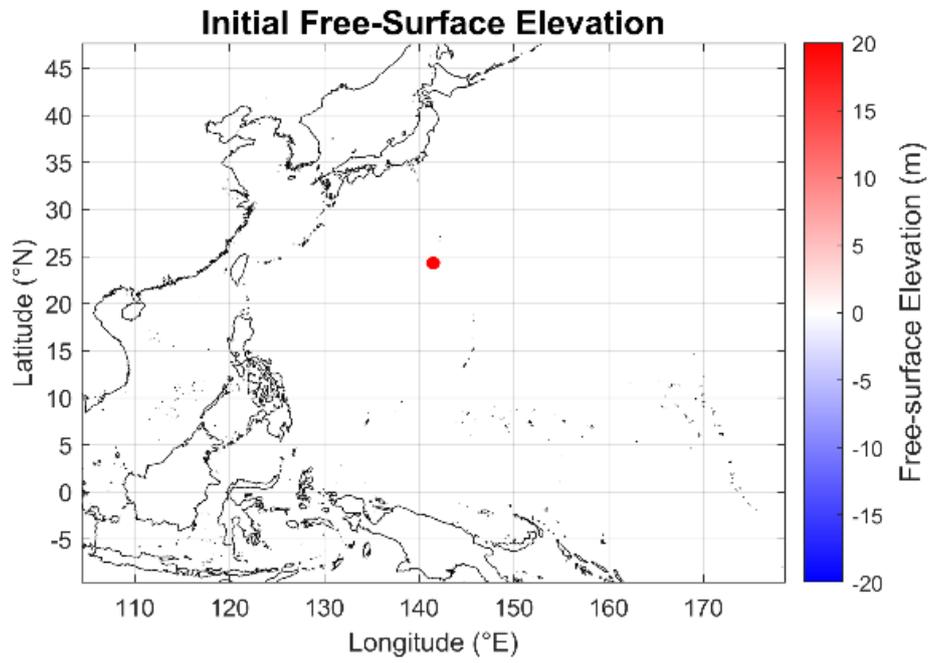


圖 23，直徑 150 公里點源之海嘯初始波高圖。

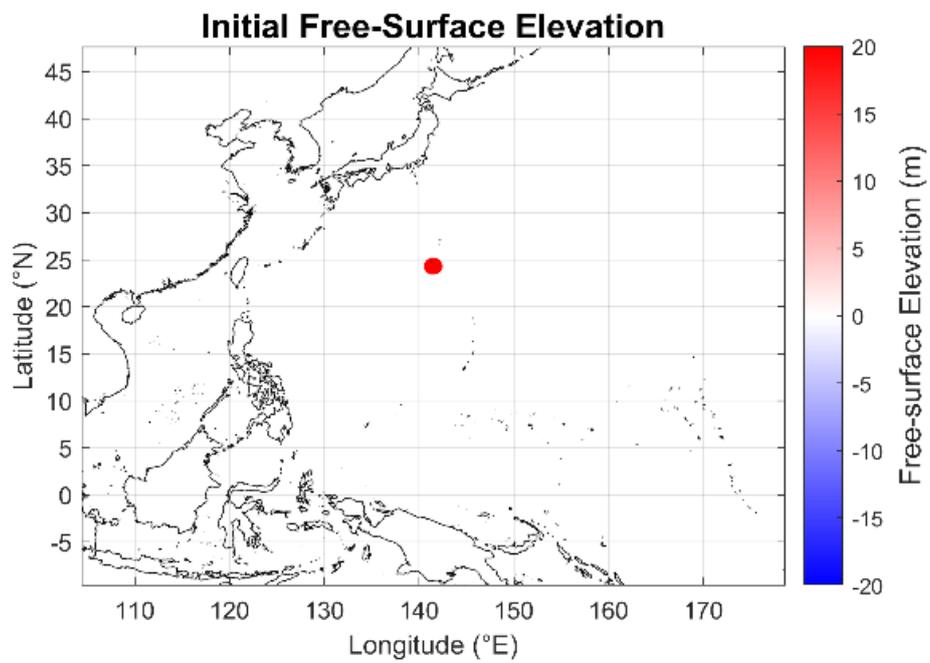


圖 24，直徑 200 公里點源之海嘯初始波高圖。

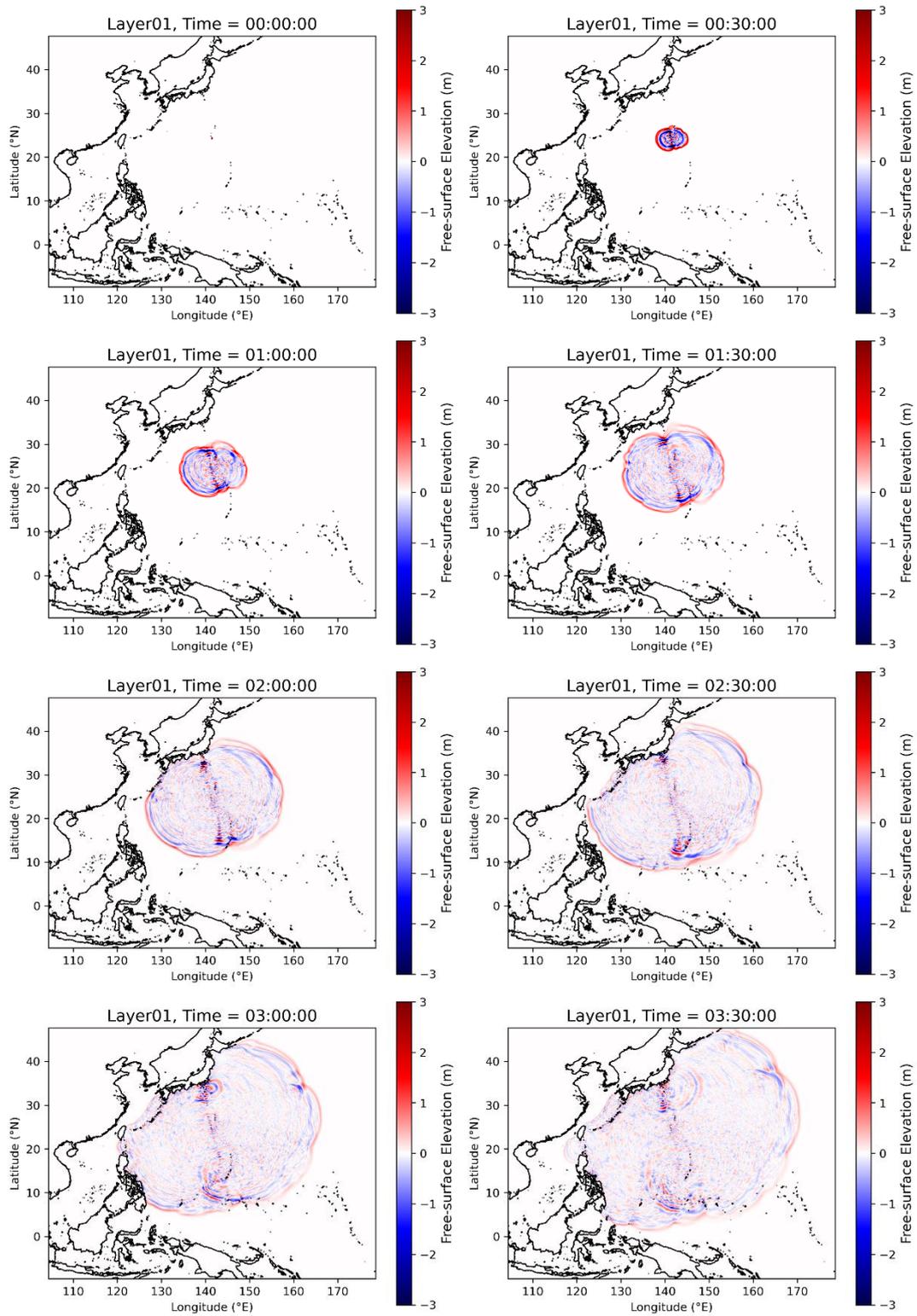


圖 25，直徑 50 公里點源，第一層網格之每 30 分鐘之海嘯傳遞圖快照。

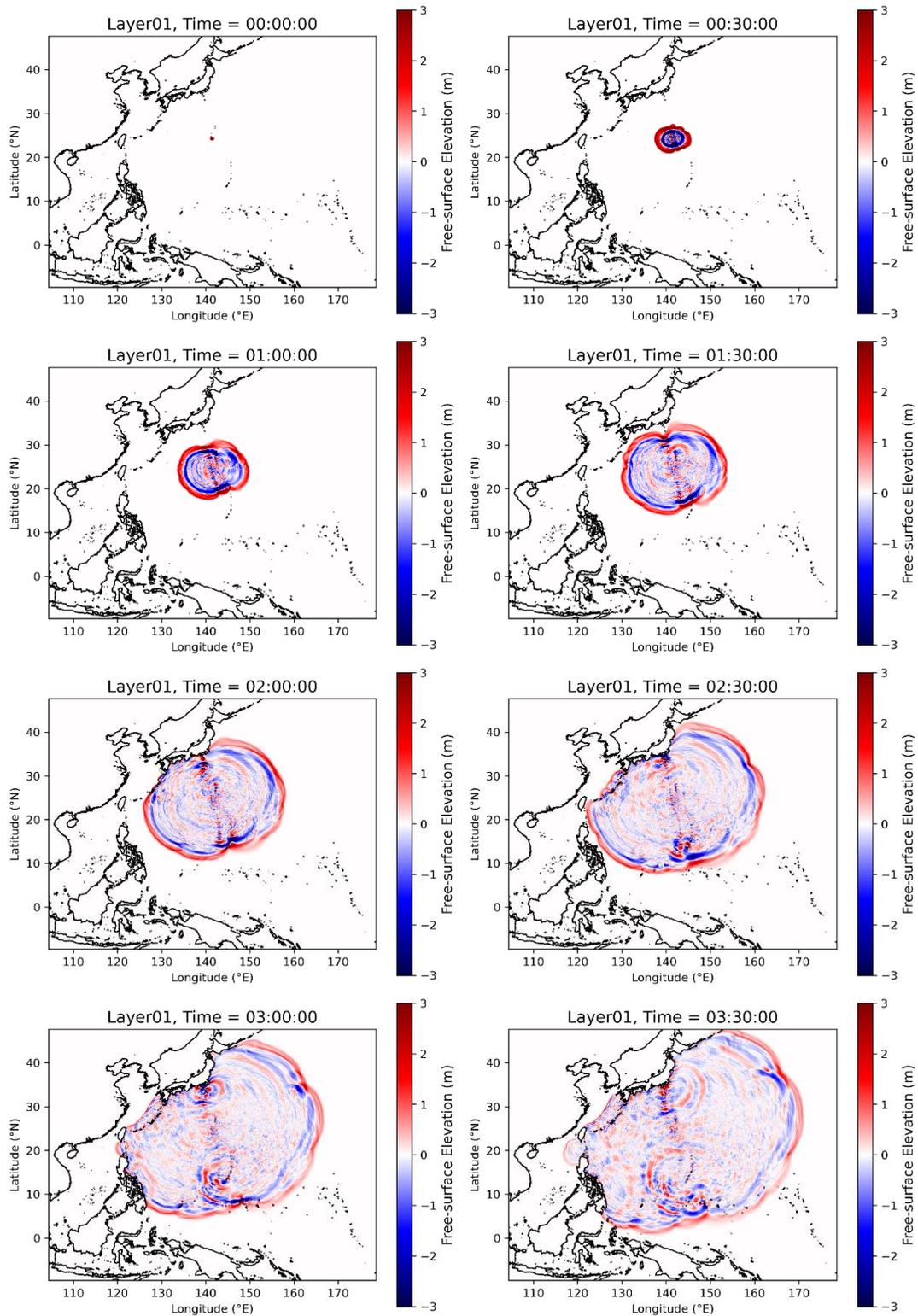


圖 26，直徑 100 公里點源，第一層網格之每 30 分鐘之海嘯傳遞圖快照。

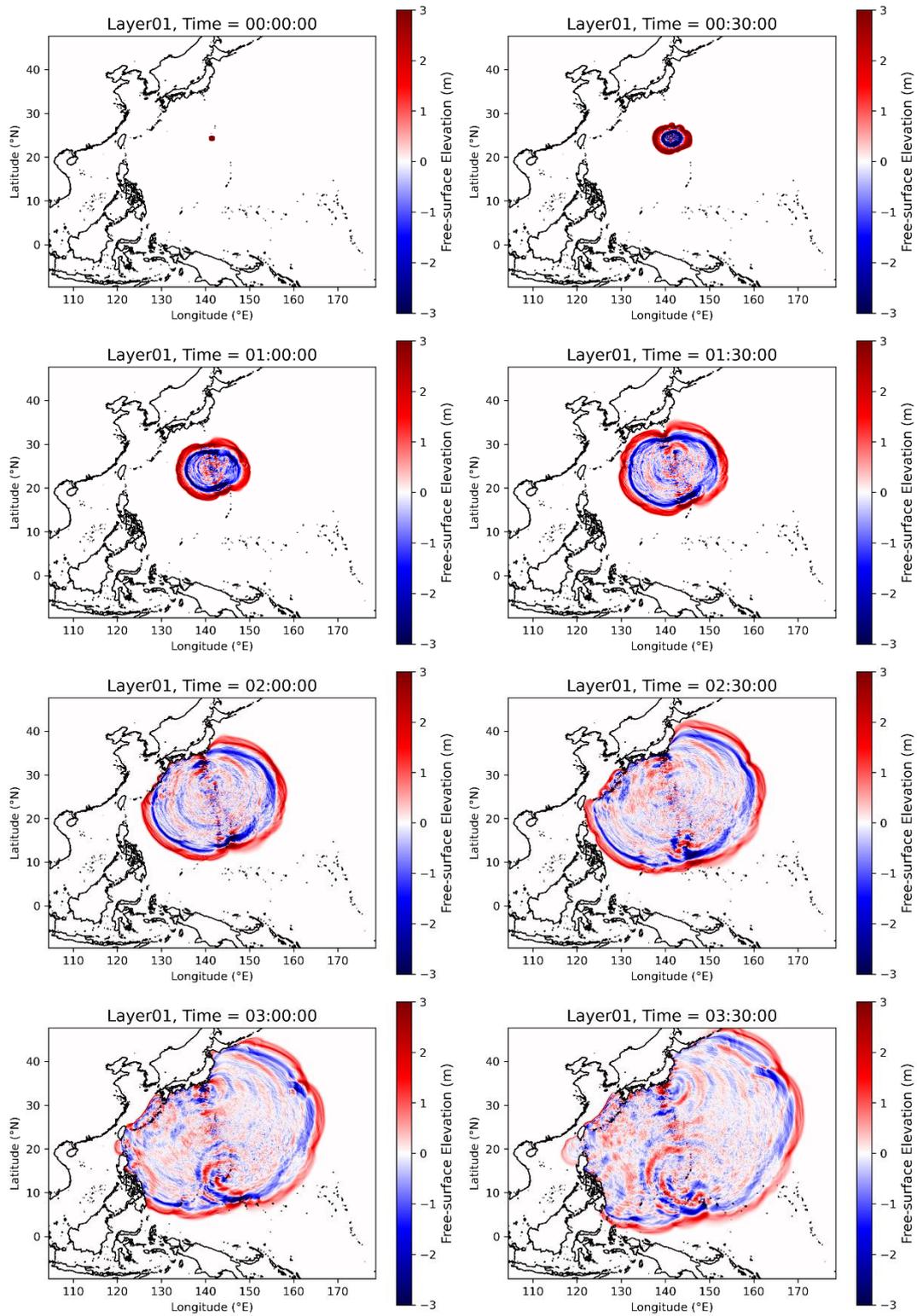


圖 27，直徑 150 公里點源，第一層網格之每 30 分鐘之海嘯傳遞圖快照。

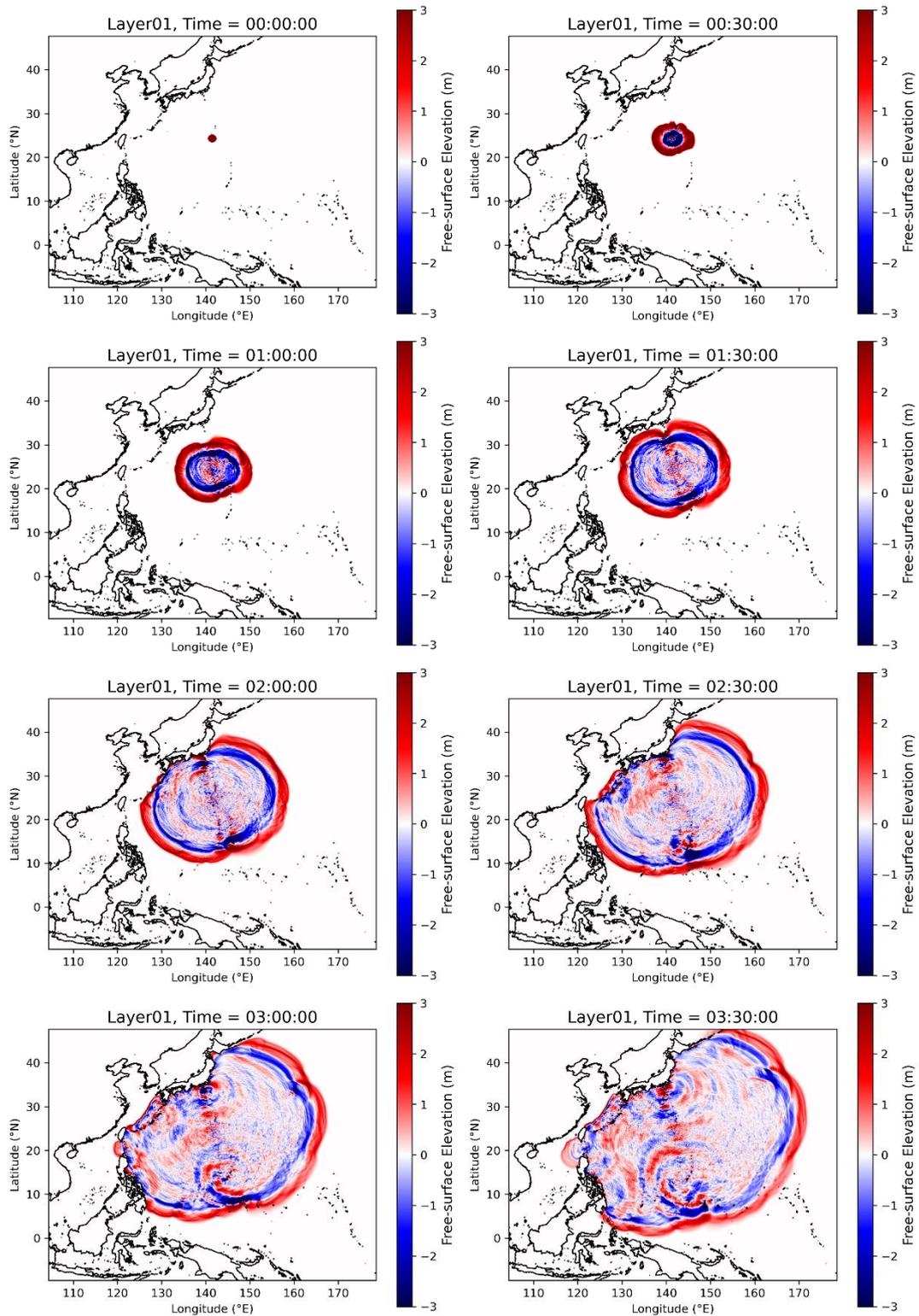


圖 28，直徑 200 公里點源，第一層網格之每 30 分鐘之海嘯傳遞圖快照。

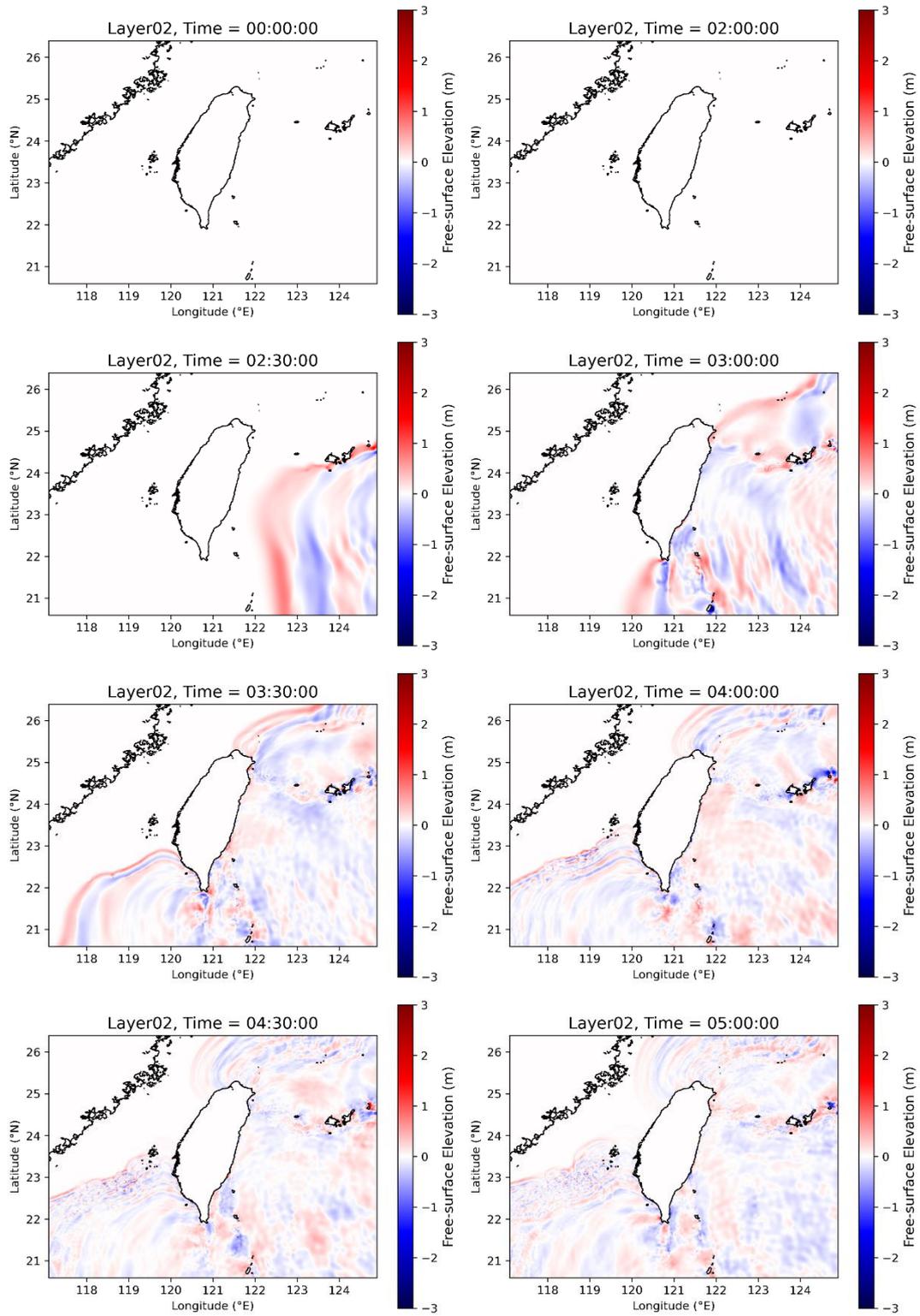


圖 29，直徑 50 公里點源，第二層網格之每 30 分鐘之海嘯傳遞圖快照。

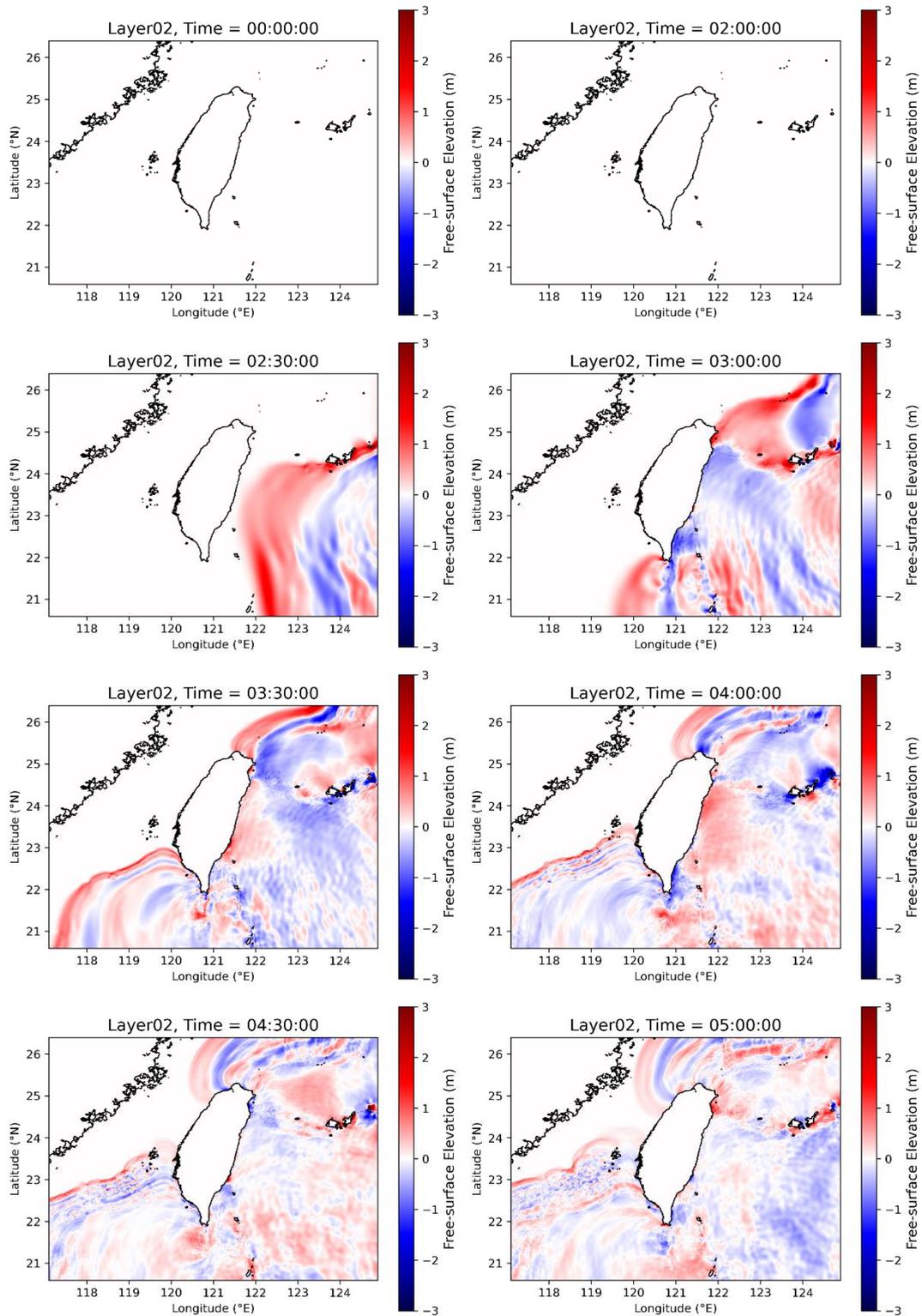


圖 30，直徑 100 公里點源，第二層網格之每 30 分鐘之海嘯傳遞圖快照。

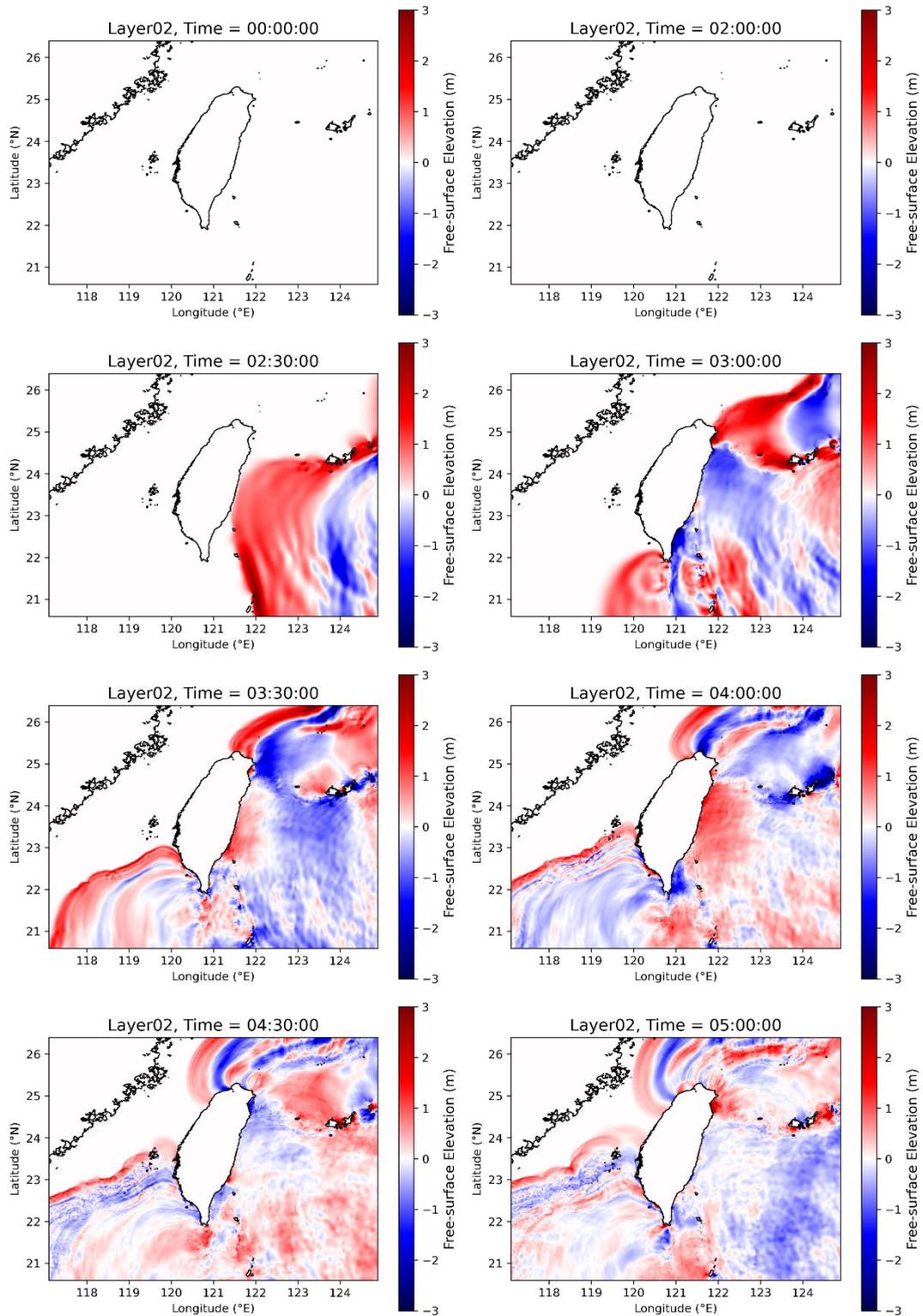


圖 31，直徑 150 公里點源，第二層網格之每 30 分鐘之海嘯傳遞圖快照。

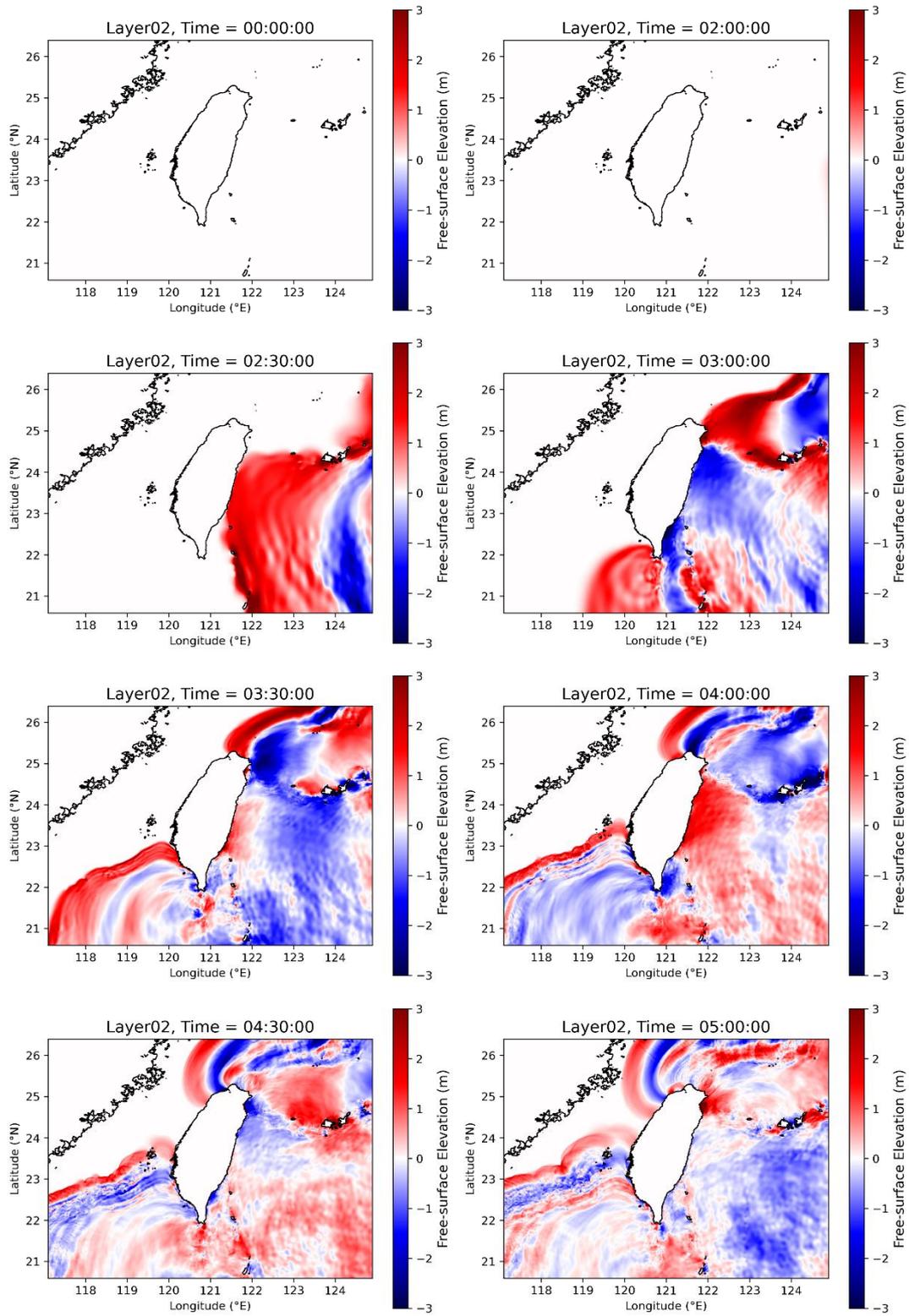


圖 32，直徑 200 公里點源，第二層網格之每 30 分鐘之海嘯傳遞圖快照。

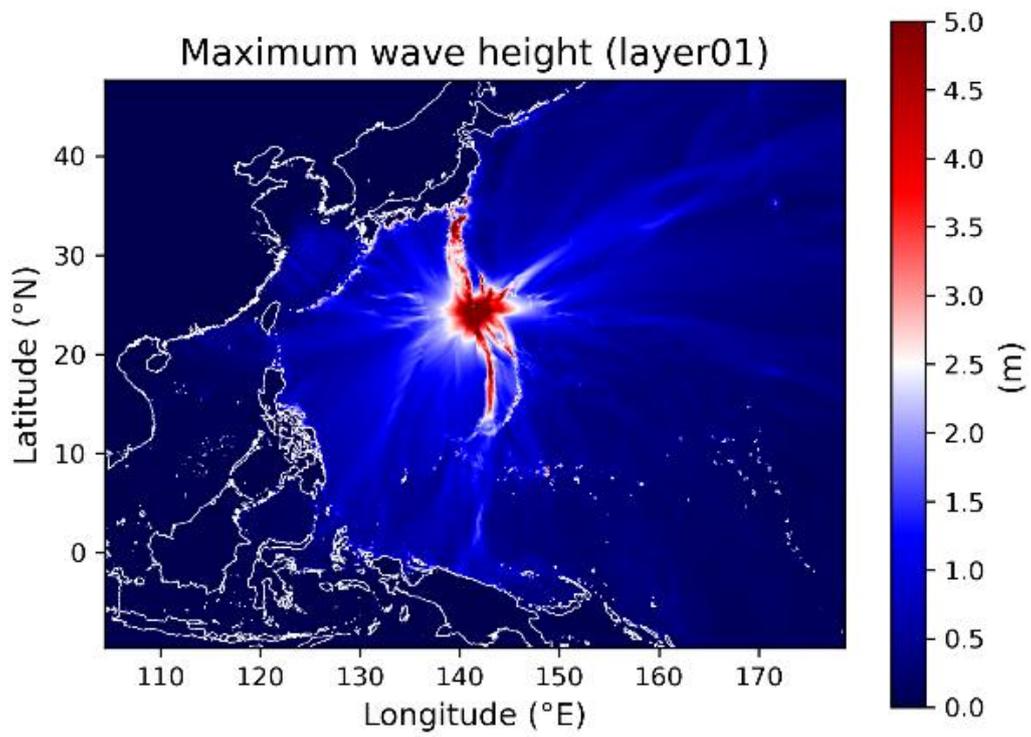


圖 33，直徑 50 公里點源，第一層網格之海嘯最大波高圖。

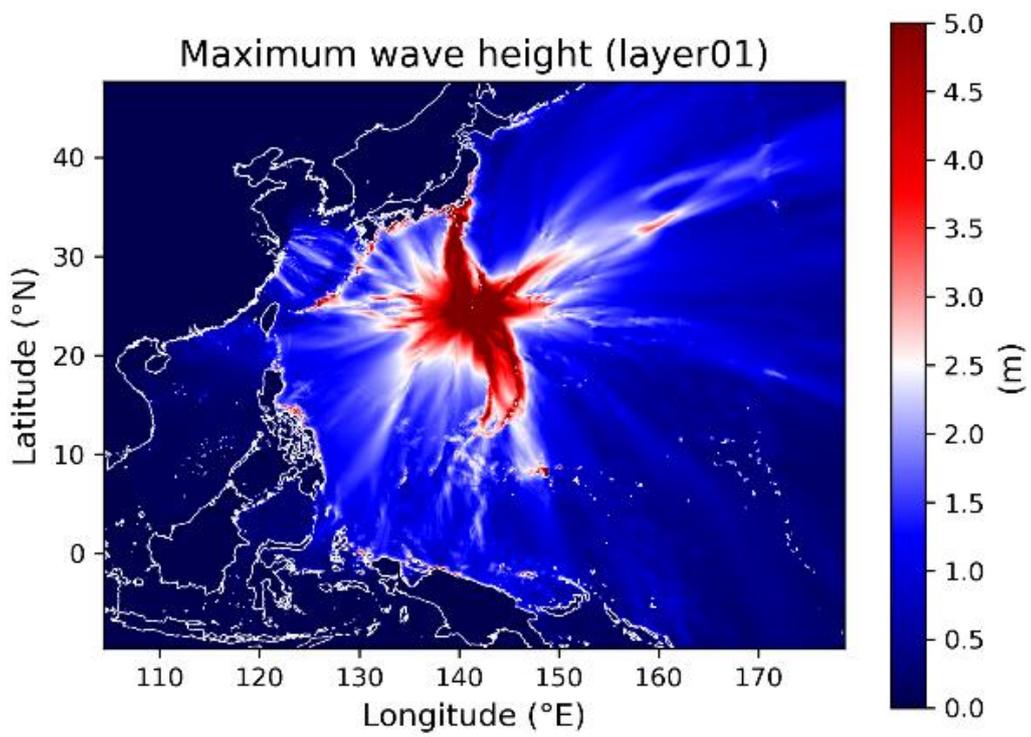


圖 34，直徑 100 公里點源，第一層網格之海嘯最大波高圖。

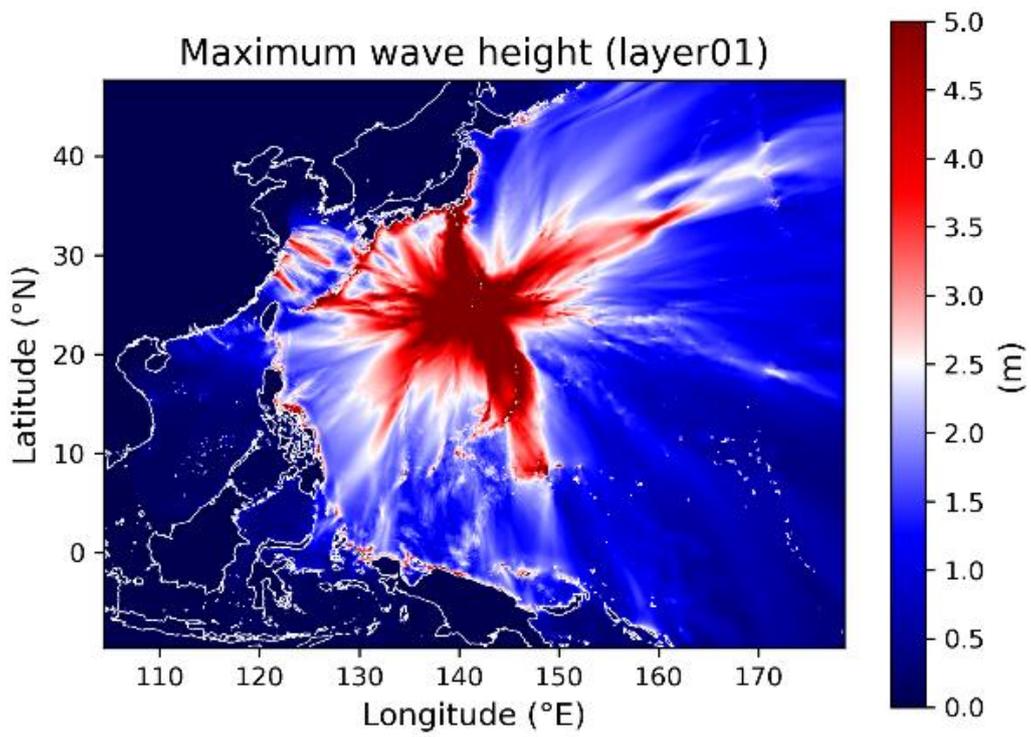


圖 35，直徑 150 公里點源，第一層網格之海嘯最大波高圖。

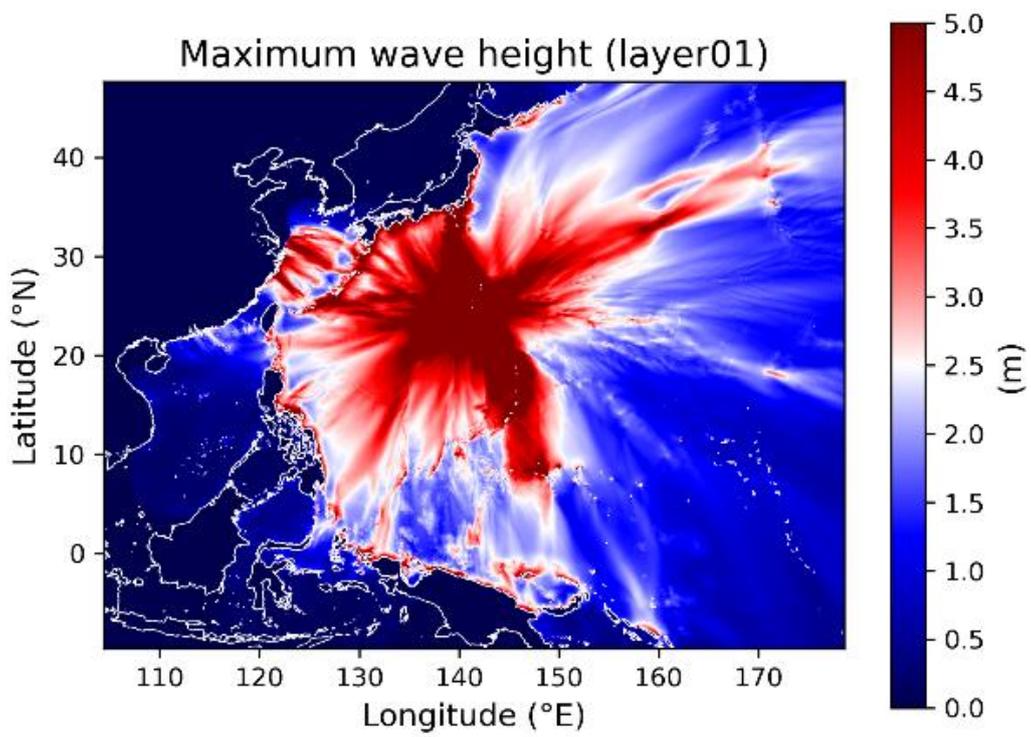


圖 36，直徑 200 公里點源，第一層網格之海嘯最大波高圖。

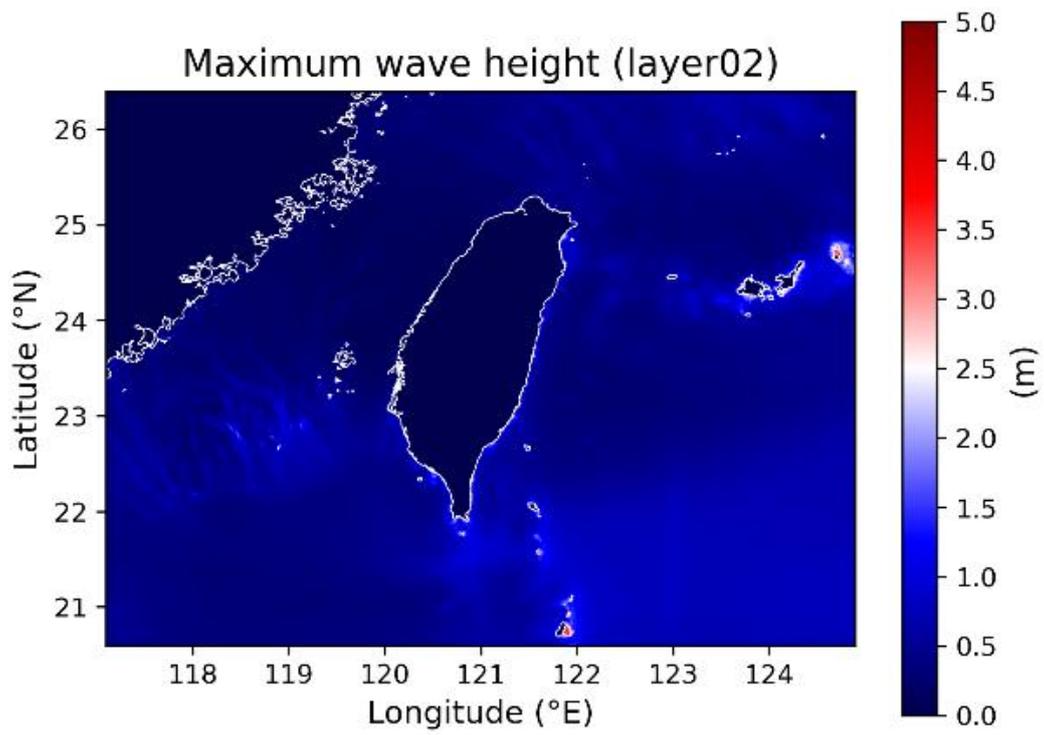


圖 37，直徑 50 公里點源，第二層網格之海嘯最大波高圖。

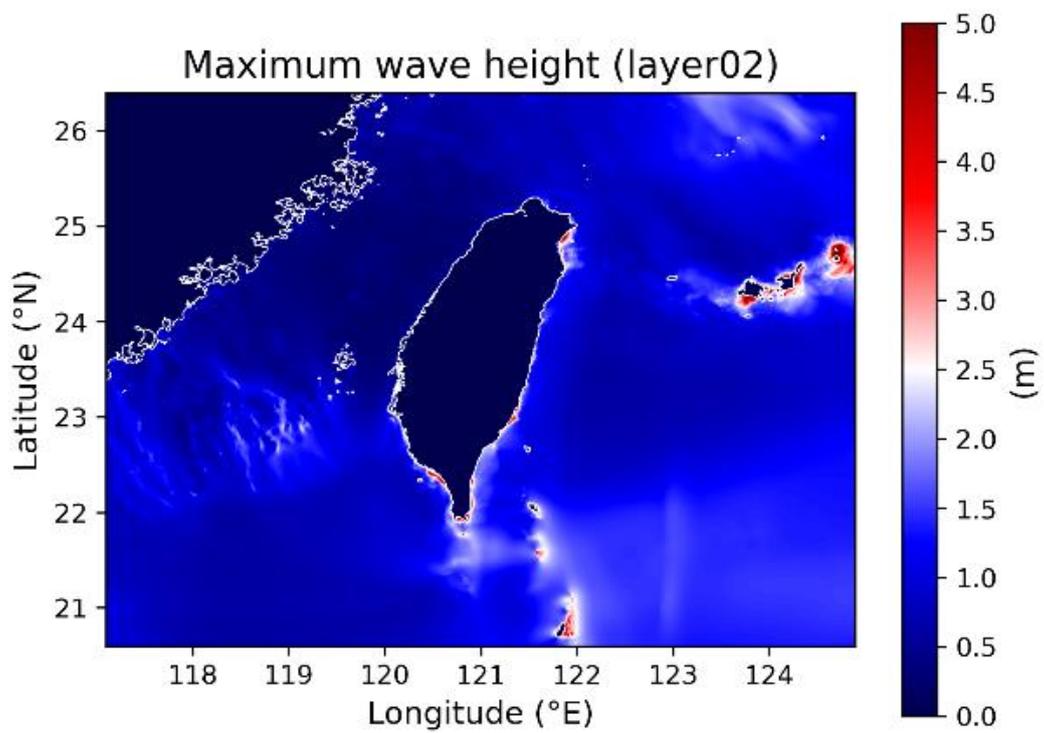


圖 38，直徑 100 公里點源，第二層網格之海嘯最大波高圖。

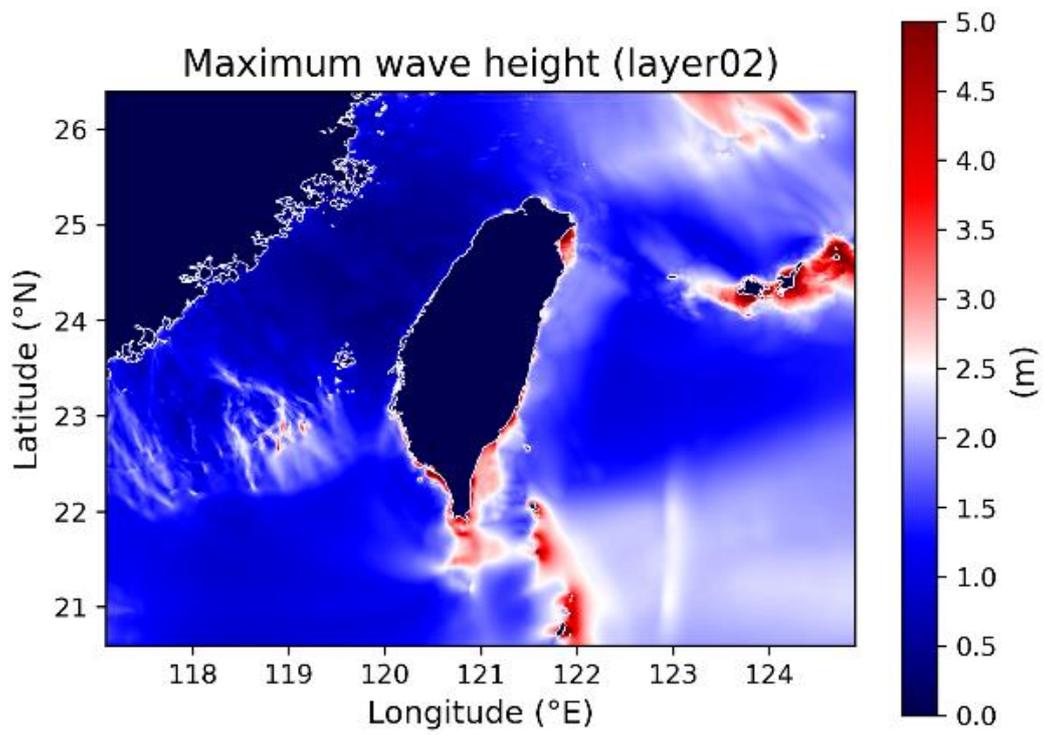


圖 39，直徑 150 公里點源，第二層網格之海嘯最大波高圖。

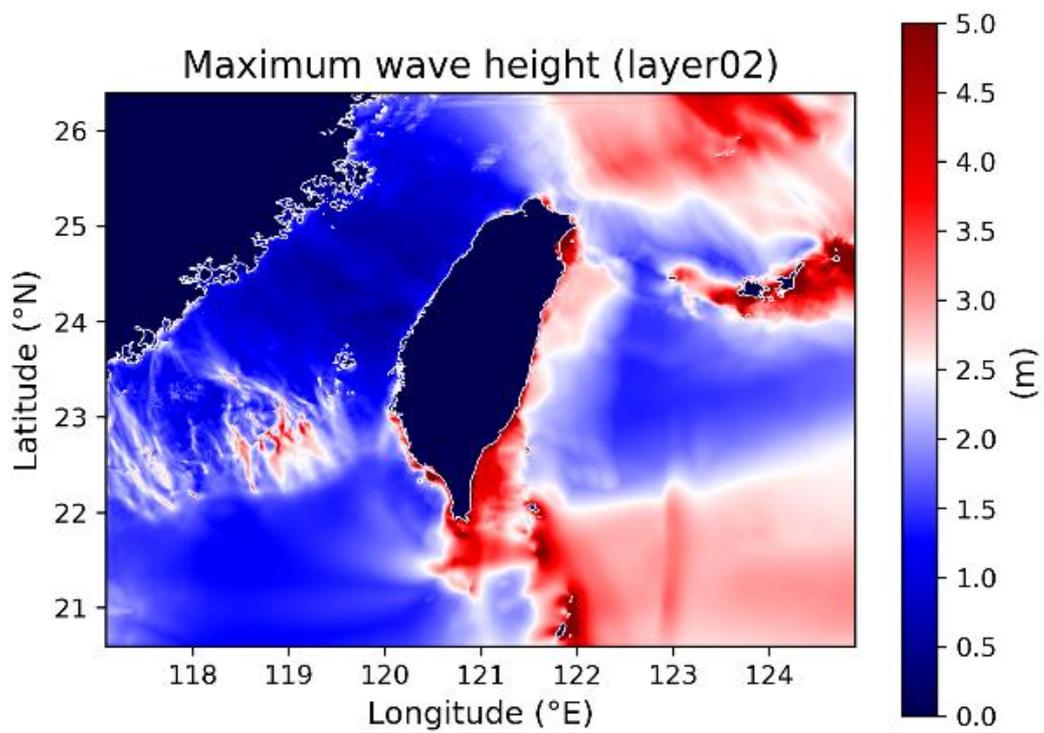


圖 40，直徑 200 公里點源，第二層網格之海嘯最大波高圖。

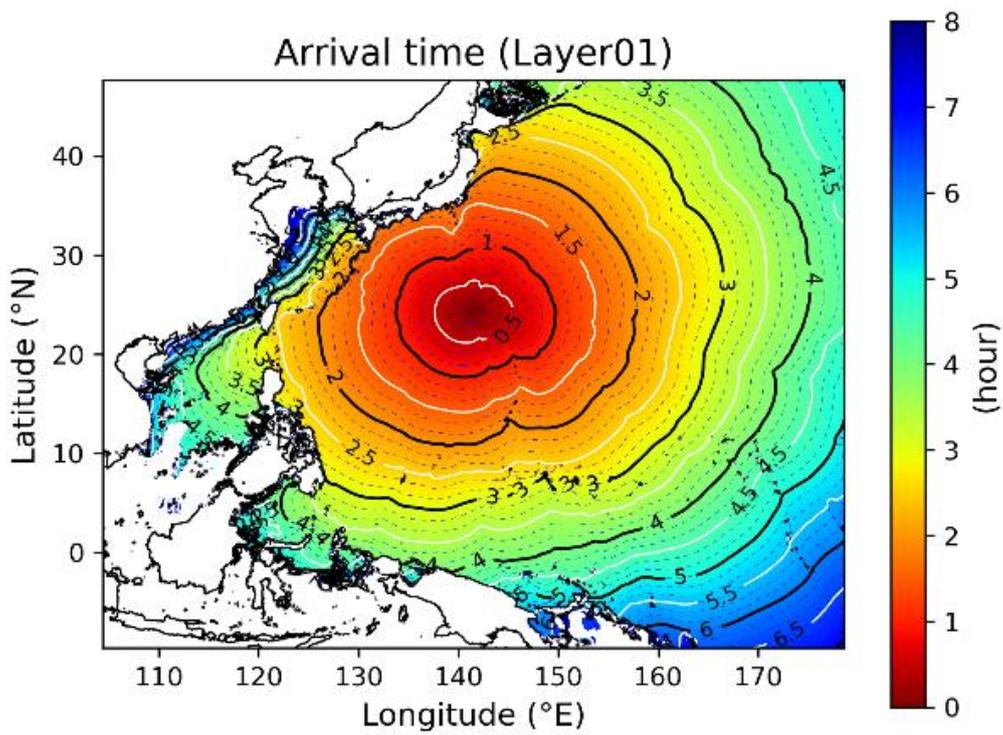


圖 41，直徑 50 公里點源，第一層網格之海嘯到時圖。

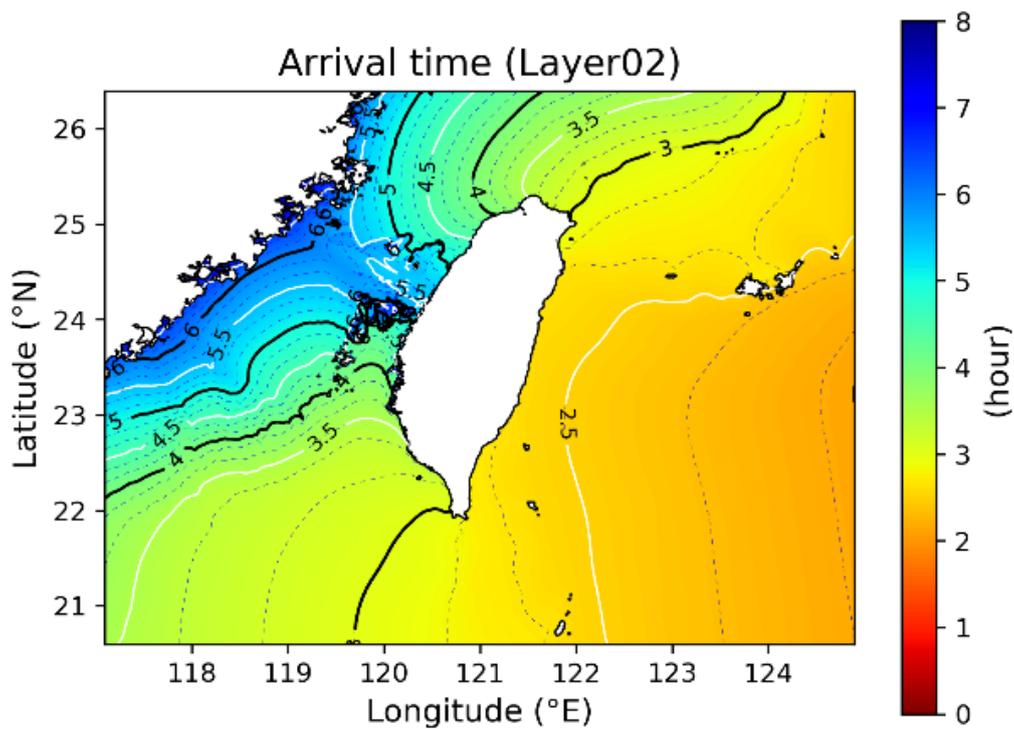


圖 42，直徑 50 公里點源，第二層網格之海嘯到時圖。

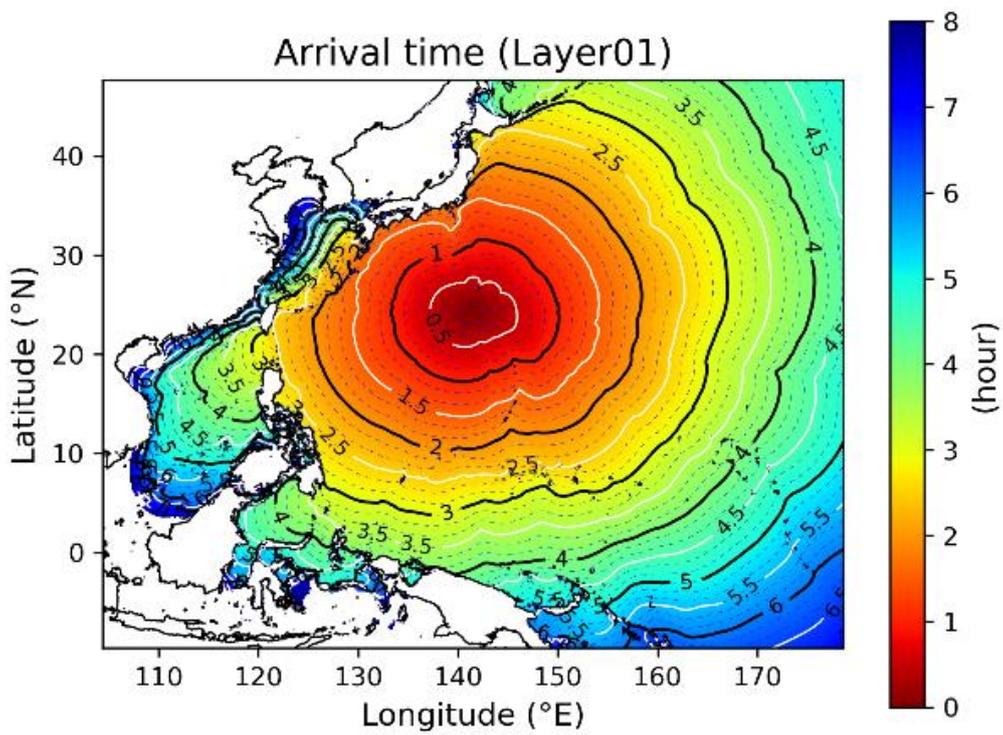


圖 43，直徑 100 公里點源，第一層網格之海嘯到時圖。

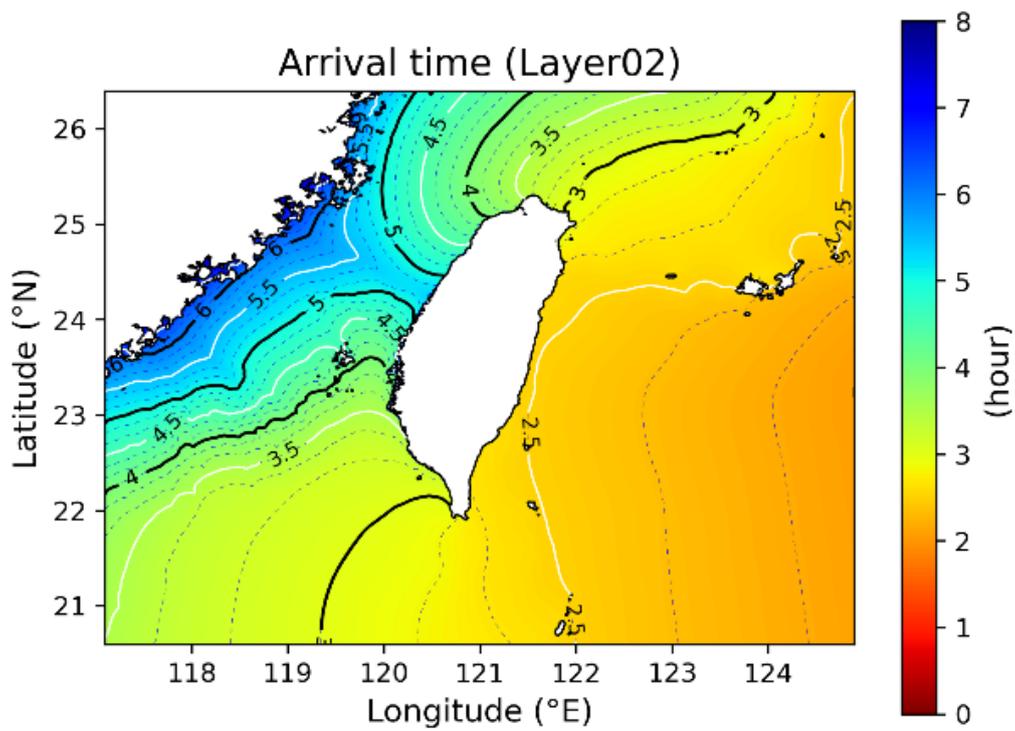


圖 44，直徑 100 公里點源，第二層網格之海嘯到時圖。

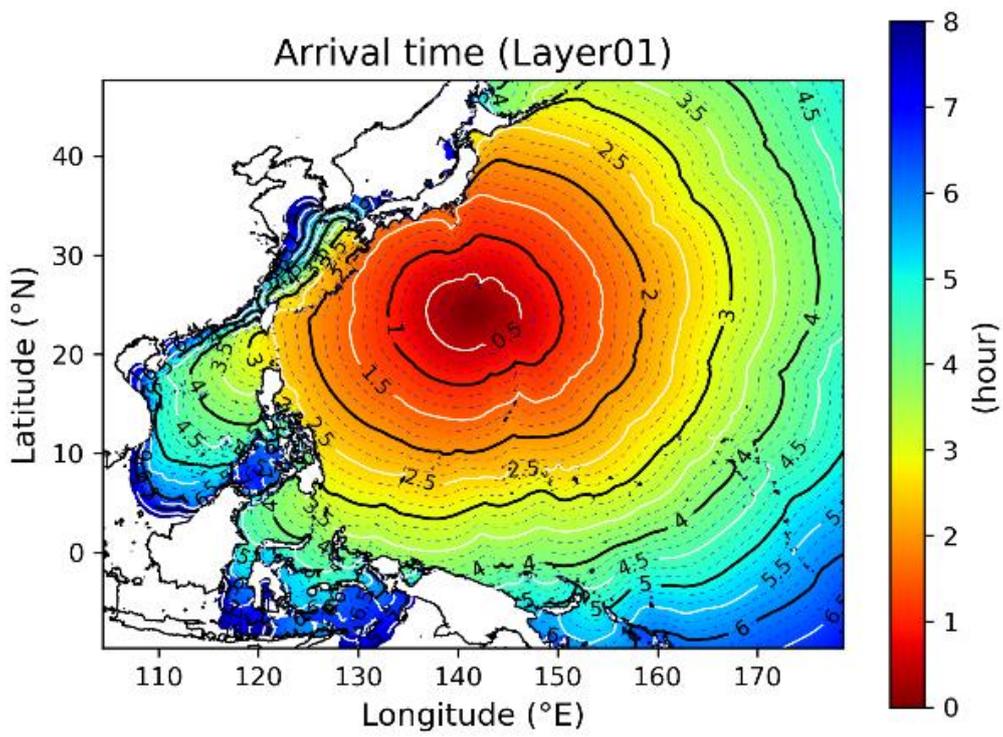


圖 45，直徑 150 公里點源，第一層網格之海嘯到時圖。

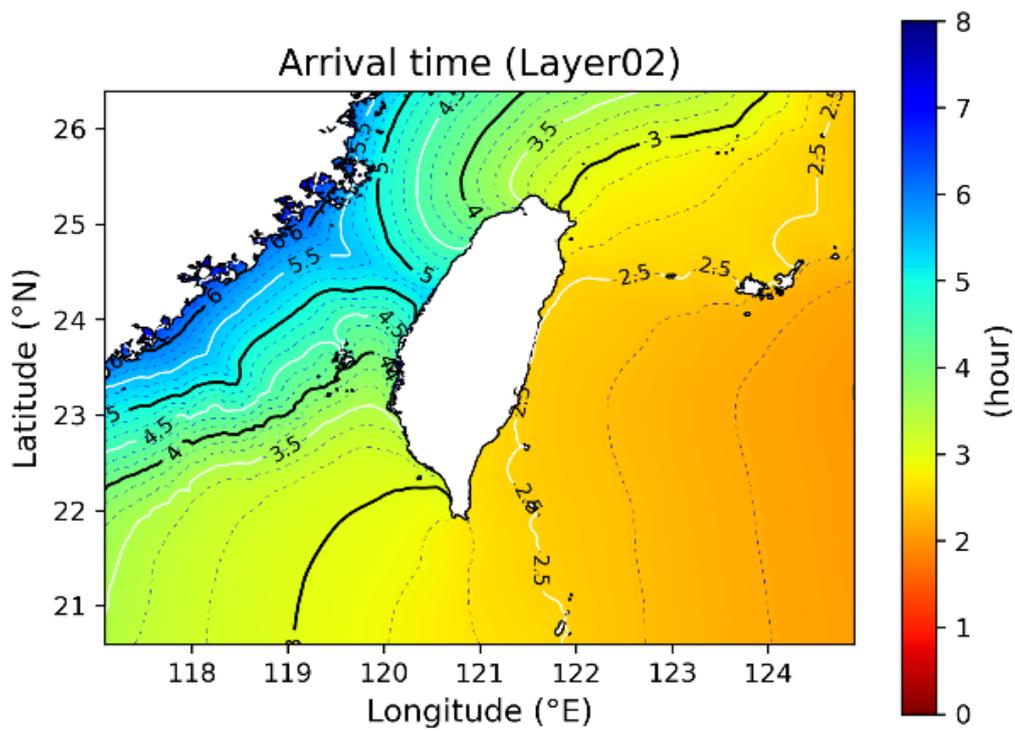


圖 46，直徑 150 公里點源，第二層網格之海嘯到時圖。

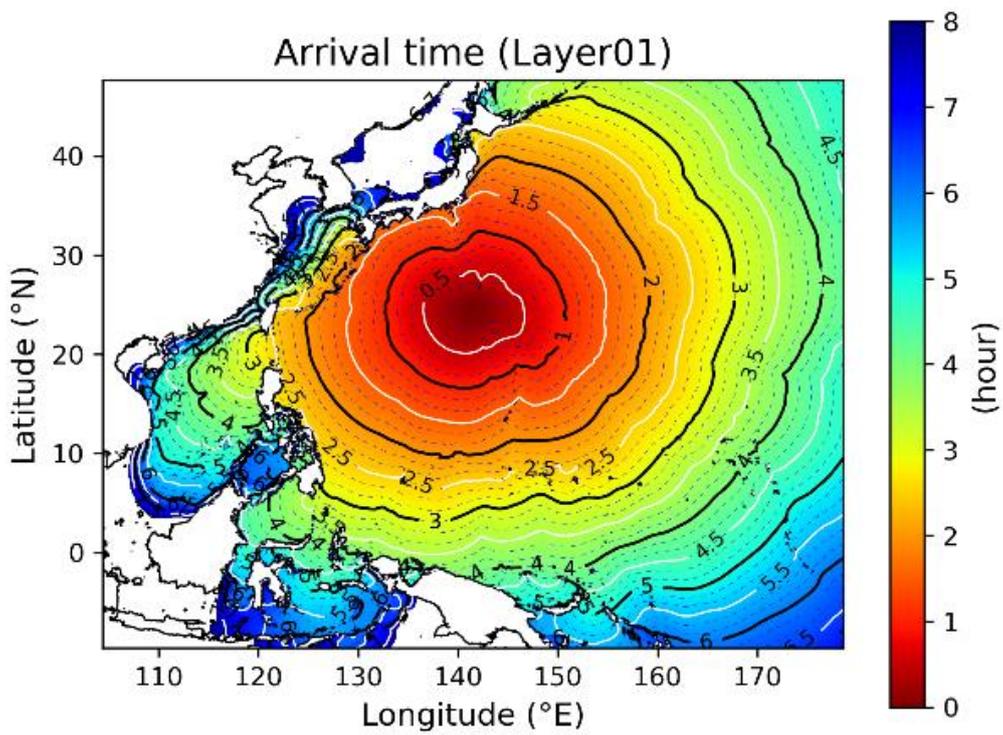


圖 47，直徑 200 公里點源，第一層網格之海嘯到時圖。

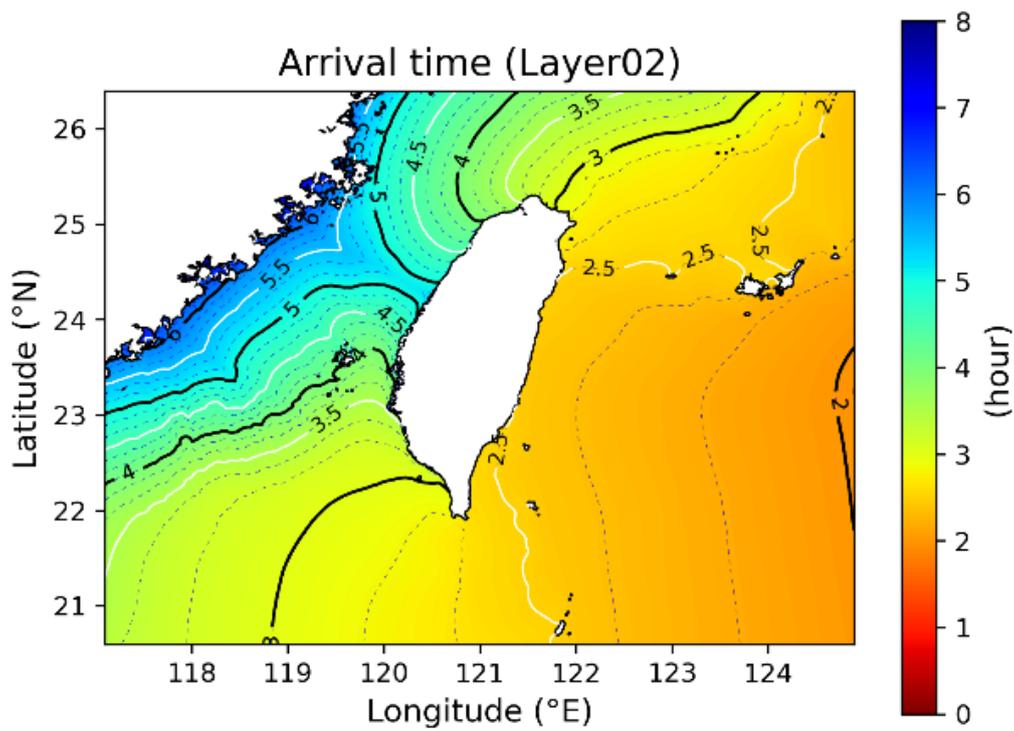


圖 48，直徑 200 公里點源，第二層網格之海嘯到時圖。

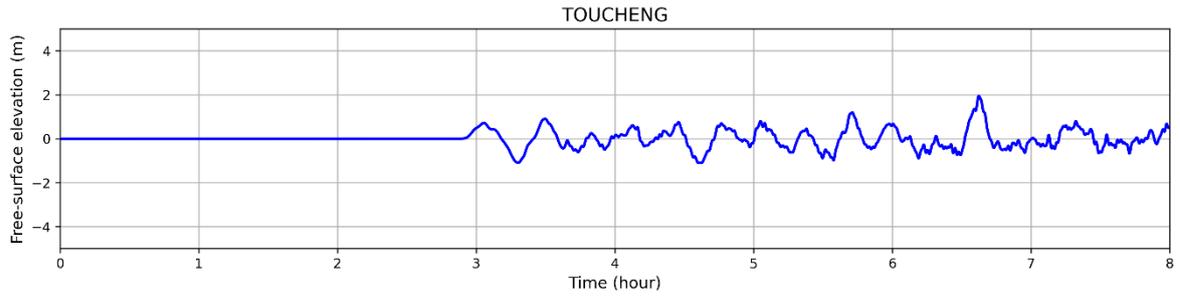


圖 49，直徑 50 公里點源，臺灣沿海港口 – 頭城之海嘯時序歷線。

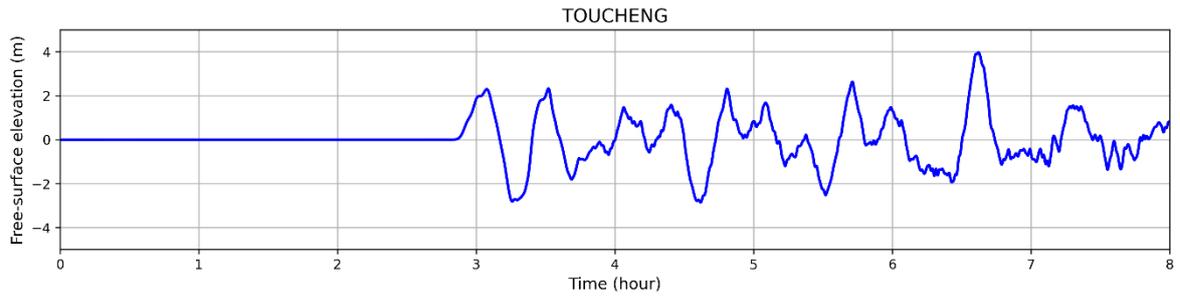


圖 50，直徑 100 公里點源，臺灣沿海港口 – 頭城之海嘯時序歷線。

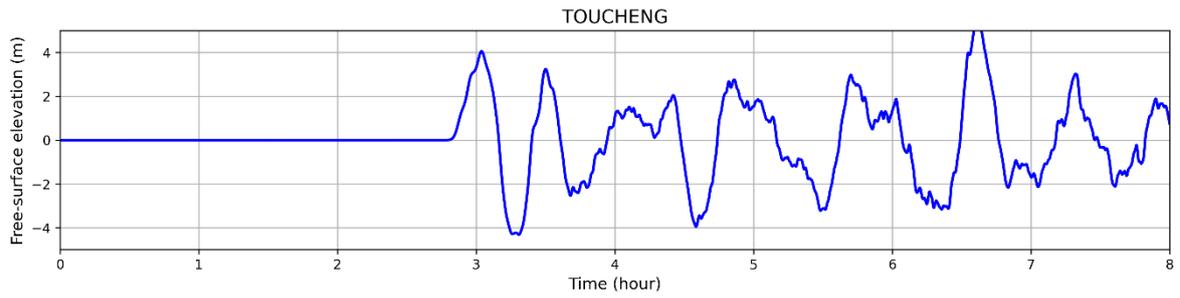


圖 51，直徑 150 公里點源，臺灣沿海港口 – 頭城之海嘯時序歷線。

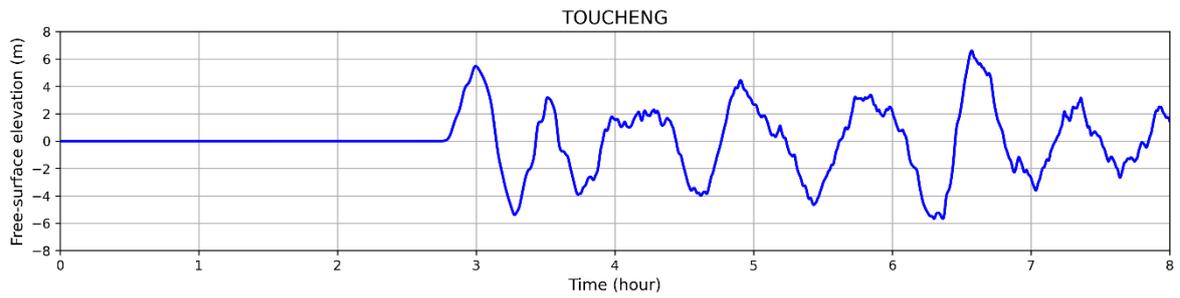


圖 52，直徑 200 公里點源，臺灣沿海港口 – 頭城之海嘯時序歷線。

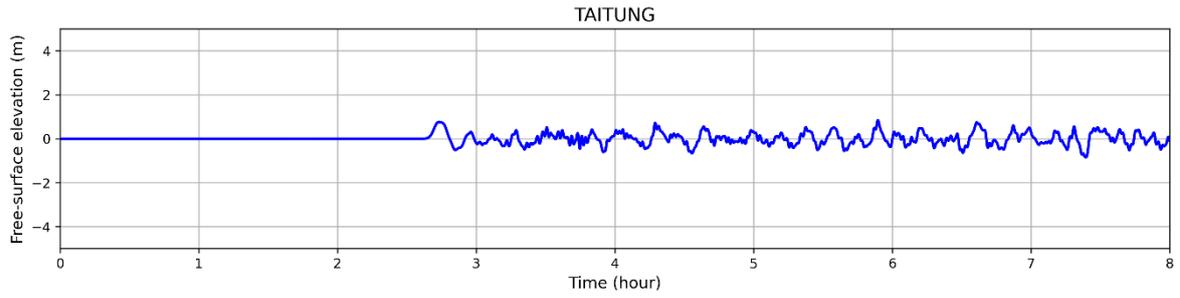


圖 53，直徑 50 公里點源，臺灣沿海港口 – 臺東之海嘯時序歷線。

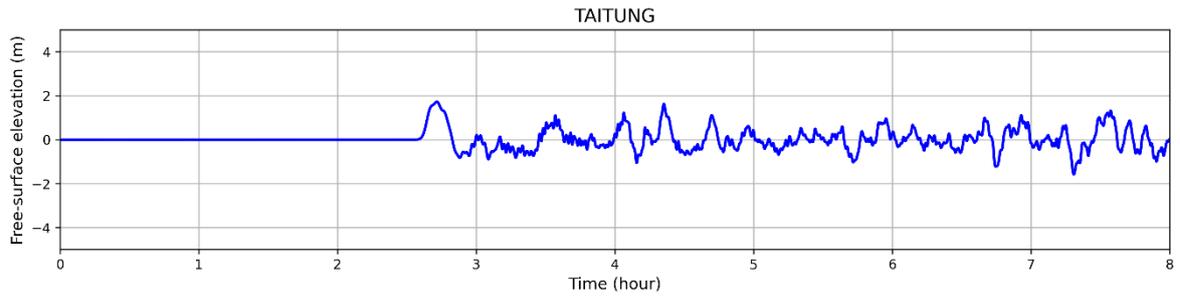


圖 54，直徑 100 公里點源，臺灣沿海港口 – 臺東之海嘯時序歷線。



圖 55，直徑 150 公里點源，臺灣沿海港口 – 臺東之海嘯時序歷線。

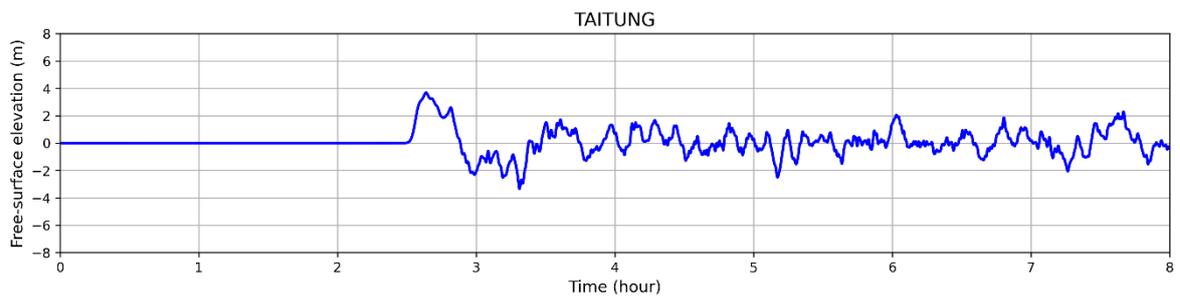


圖 56，直徑 200 公里點源，臺灣沿海港口 – 臺東之海嘯時序歷線。

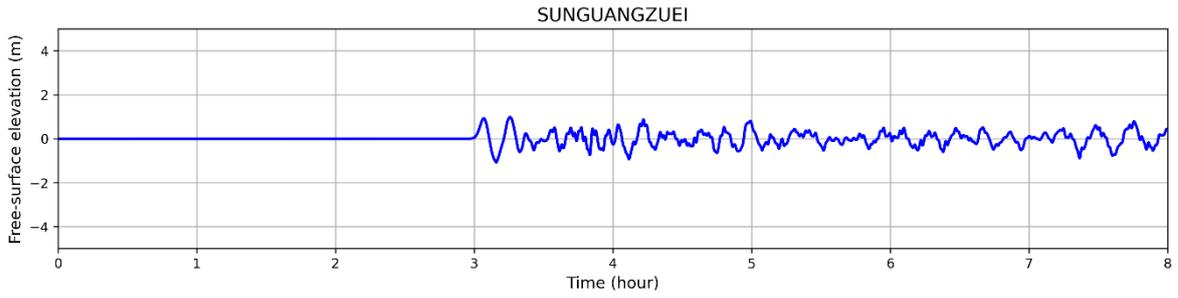


圖 57，直徑 50 公里點源，臺灣沿海港口 – 蟬廣嘴之海嘯時序歷線。

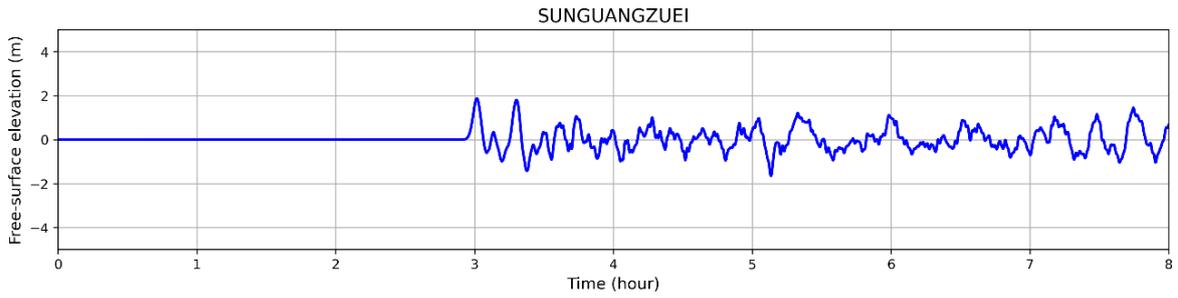


圖 58，直徑 100 公里點源，臺灣沿海港口 – 蟬廣嘴之海嘯時序歷線。

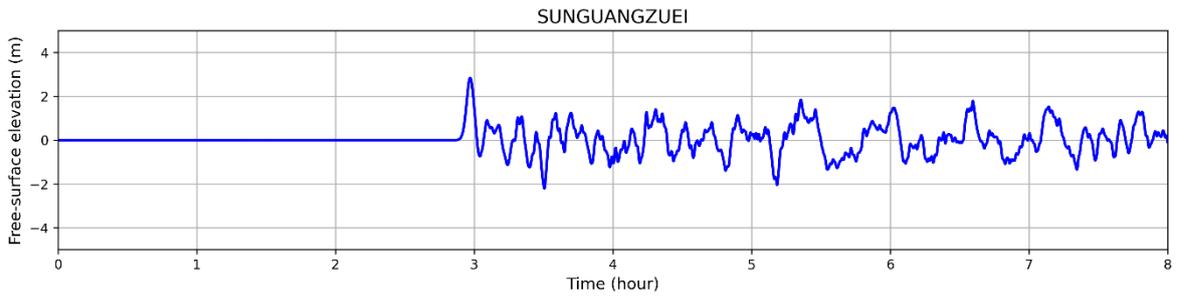


圖 59，直徑 150 公里點源，臺灣沿海港口 – 蟬廣嘴之海嘯時序歷線。

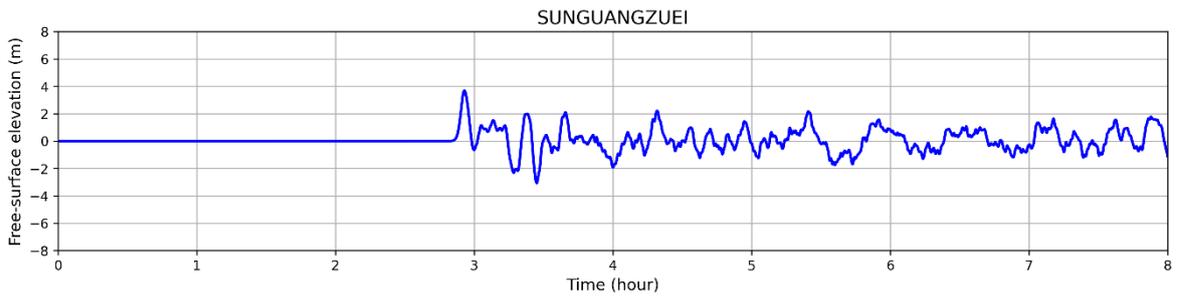


圖 60，直徑 200 公里點源，臺灣沿海港口 – 蟬廣嘴之海嘯時序歷線。

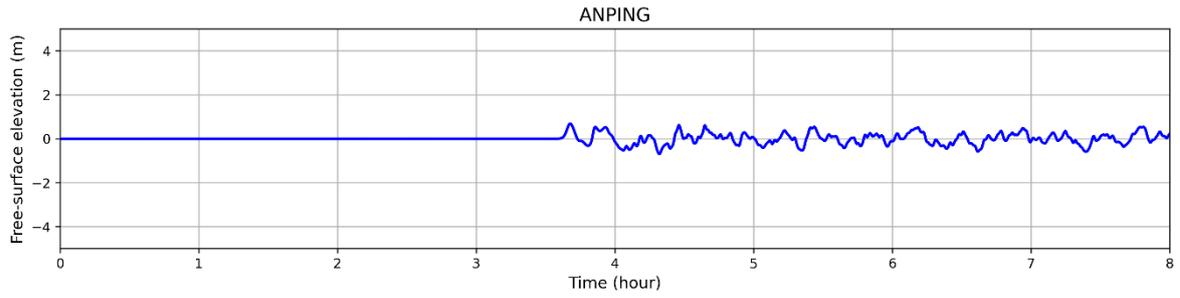


圖 61，直徑 50 公里點源，臺灣沿海港口 – 安平之海嘯時序歷線。

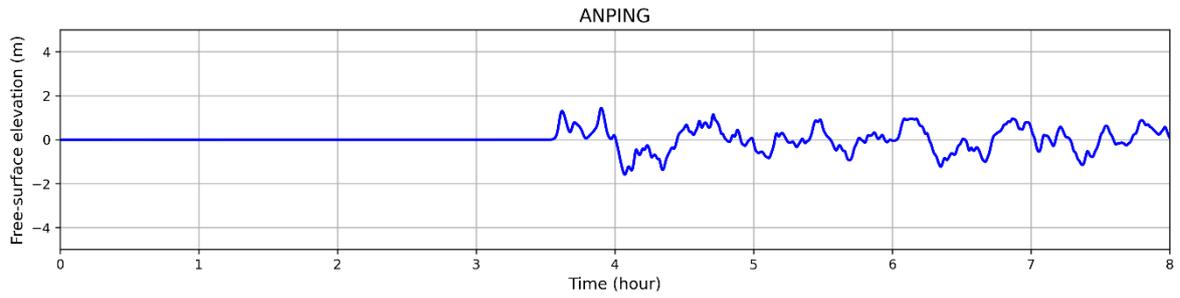


圖 62，直徑 100 公里點源，臺灣沿海港口 – 安平之海嘯時序歷線。

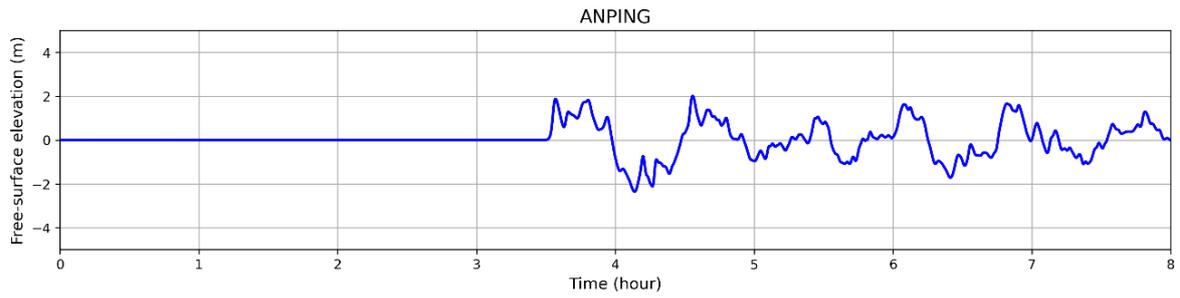


圖 63，直徑 150 公里點源，臺灣沿海港口 – 安平之海嘯時序歷線。

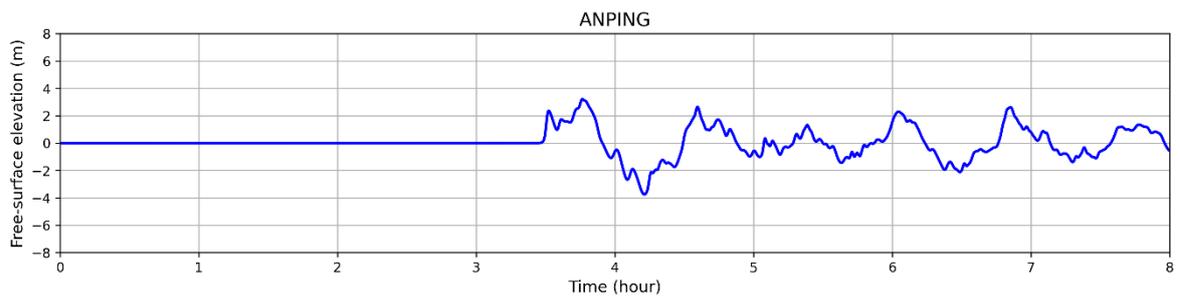


圖 64，直徑 200 公里點源，臺灣沿海港口 – 安平之海嘯時序歷線。

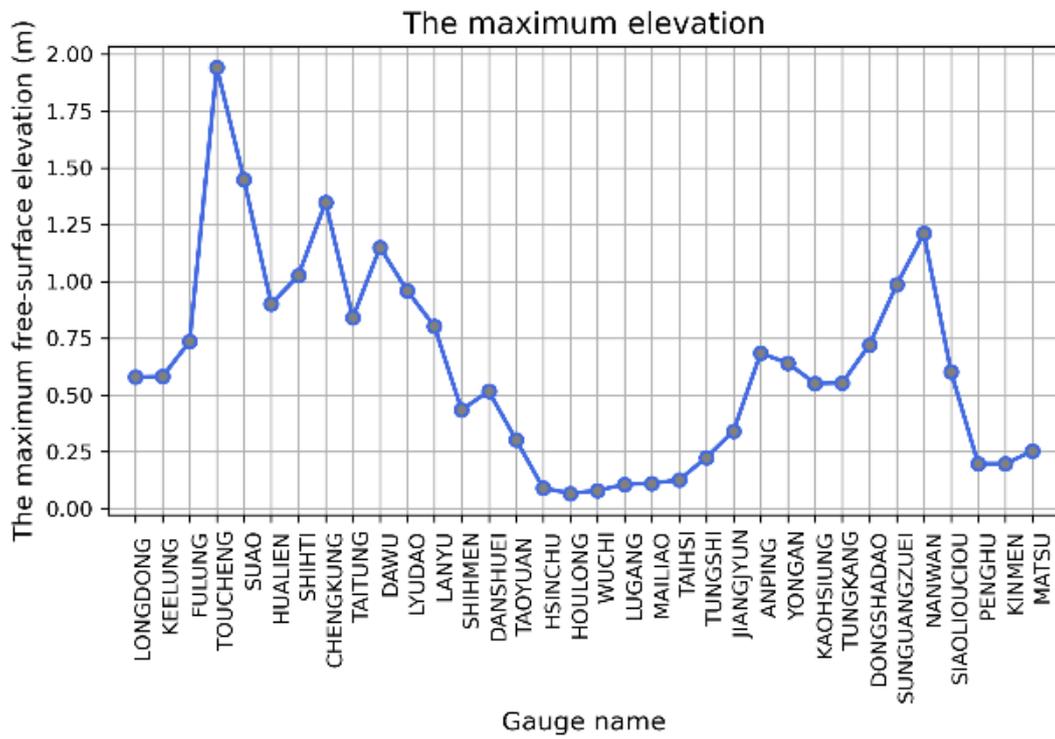


圖 65，直徑 50 公里，臺灣沿海港口最大水位圖。

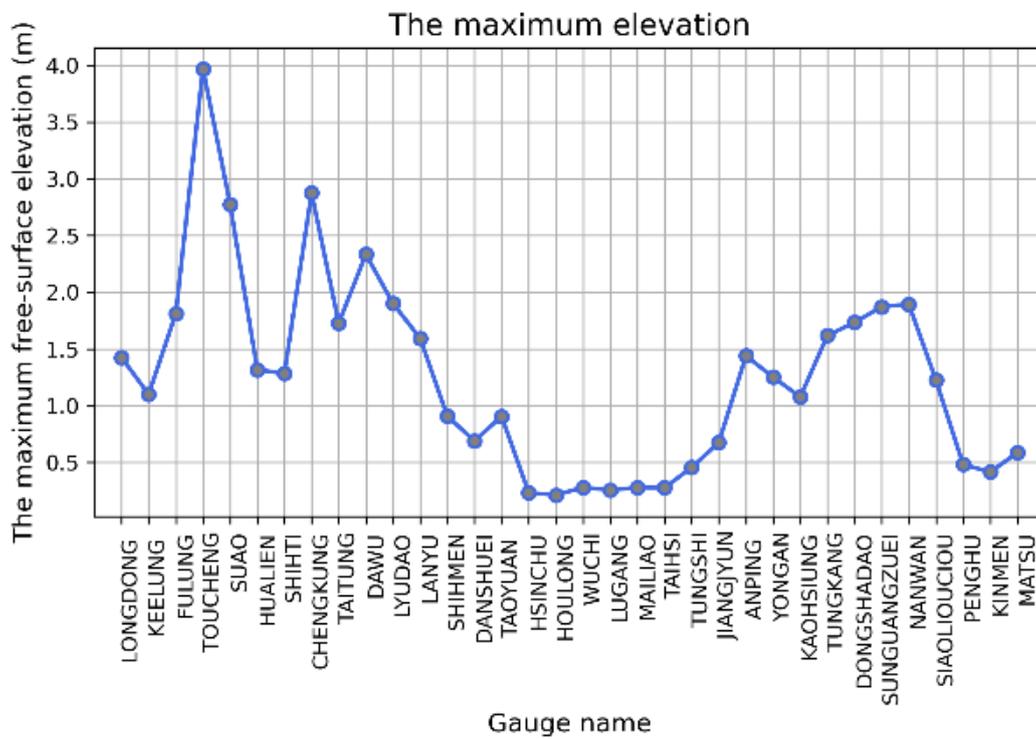


圖 66，直徑 100 公里，臺灣沿海港口最大水位圖。

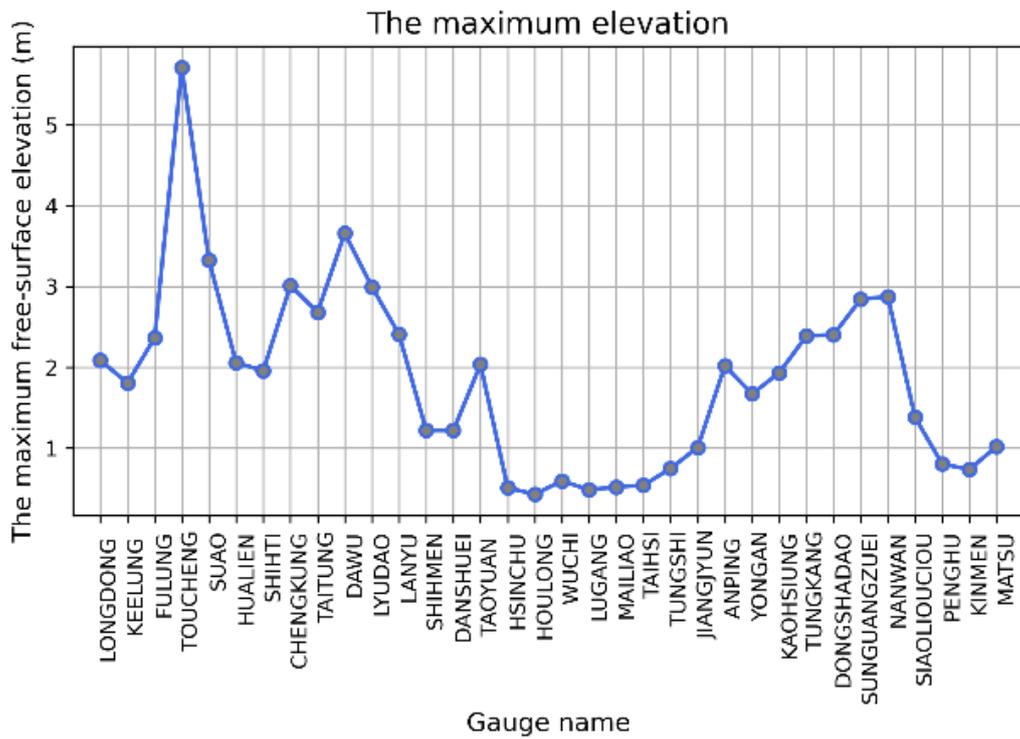


圖 67，直徑 150 公里，臺灣沿海港口最大水位圖。

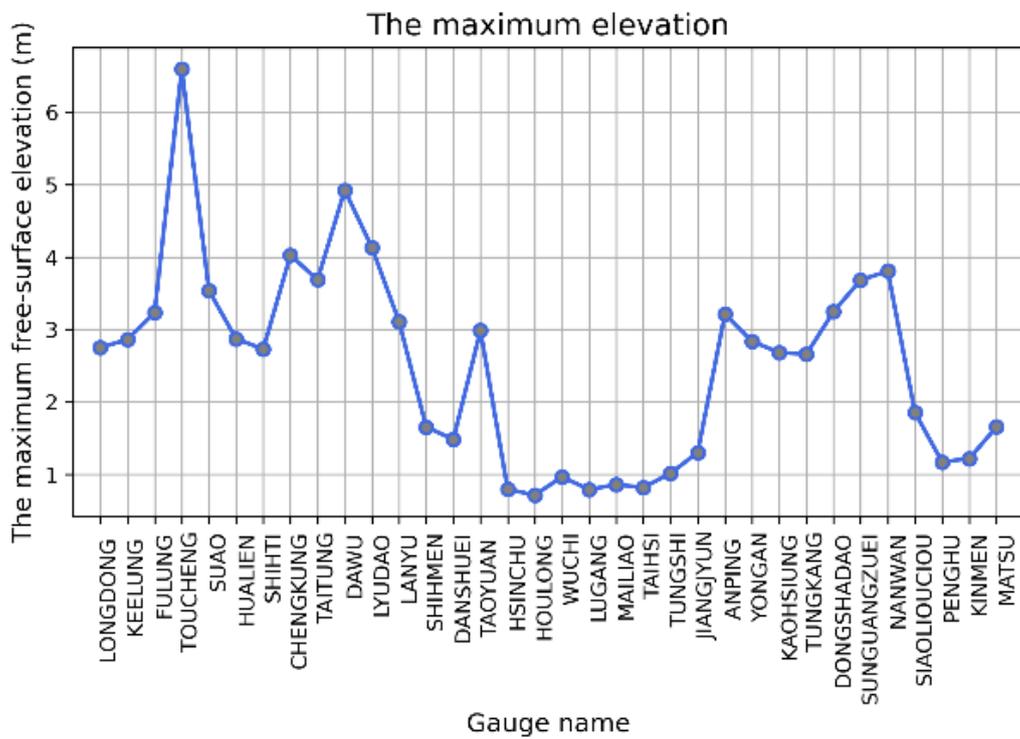


圖 68，直徑 200 公里，臺灣沿海港口最大水位圖。

6.2 參數係數敏感性分析 – 固定直徑、不同高度之圓柱體

假想直徑為 100 公里之點源，圓柱體之高度分別為 15 公尺與 30 公尺。同樣，第一層網格解析度為 2 弧分，第二層網格解析度為 0.25 弧分。總模擬時長為 8 小時。

圖 69，高度 15 公尺點源之海嘯初始波高圖。、圖 70，高度 30 公尺點源之海嘯初始波高圖。分別為高度 15 公尺與 30 公尺之海嘯初始波高圖，圖 71 及圖 72 為第一層網格之每 30 分鐘之海嘯傳遞圖快照。圖 73 及圖 74 為第二層網格之每 30 分鐘之海嘯傳遞圖快照。圖 75 至圖 78 分別為第一層網格與第二層網格之海嘯最大波高圖。圖 79 至圖 82 為第一層網格與第二層網格之海嘯到時圖。圖 83 至圖 90 為臺灣沿海港口海嘯時序歷線圖，以頭城、臺東、嵵廣嘴、安平，此四處海嘯訊號相對明顯之處為例。圖 91、圖 92 為臺灣沿海港口最大水位圖。

圖 80 及圖 82 之臺灣區域海嘯到時圖中，顯示出到時幾乎一樣。與上一段「固定高度之不同直徑圓柱體」之結果做整合，可以認為，到時快慢與火山點源直徑較相關，高度影響到時的成分較低。圖 91、圖 92 之臺灣沿海港口最大水位圖中，高度 30 公尺圓柱之大部分地點之波高為高度 15 公尺之兩倍。

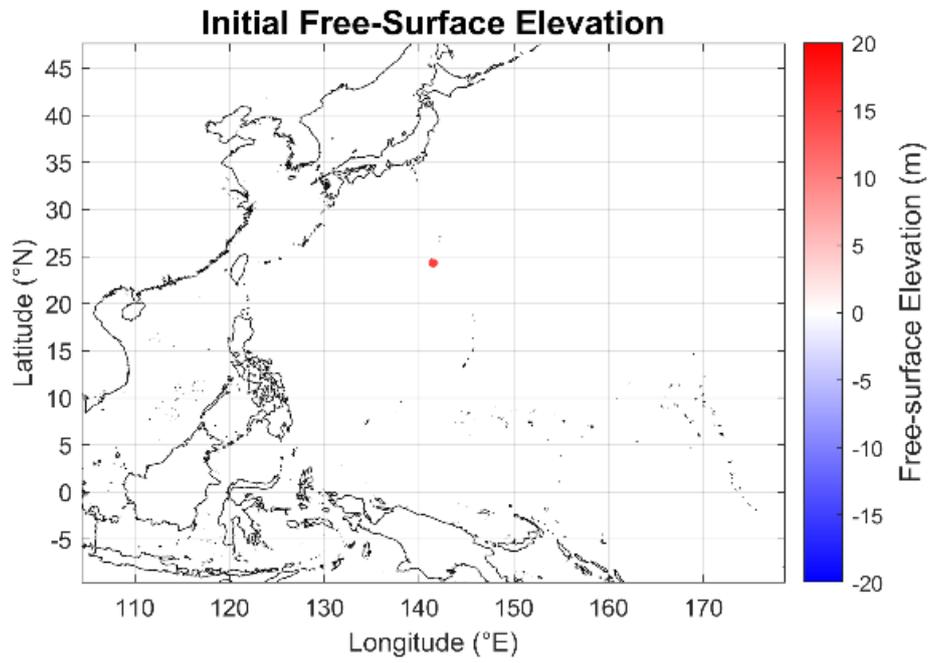


圖 69，高度 15 公尺點源之海嘯初始波高圖。

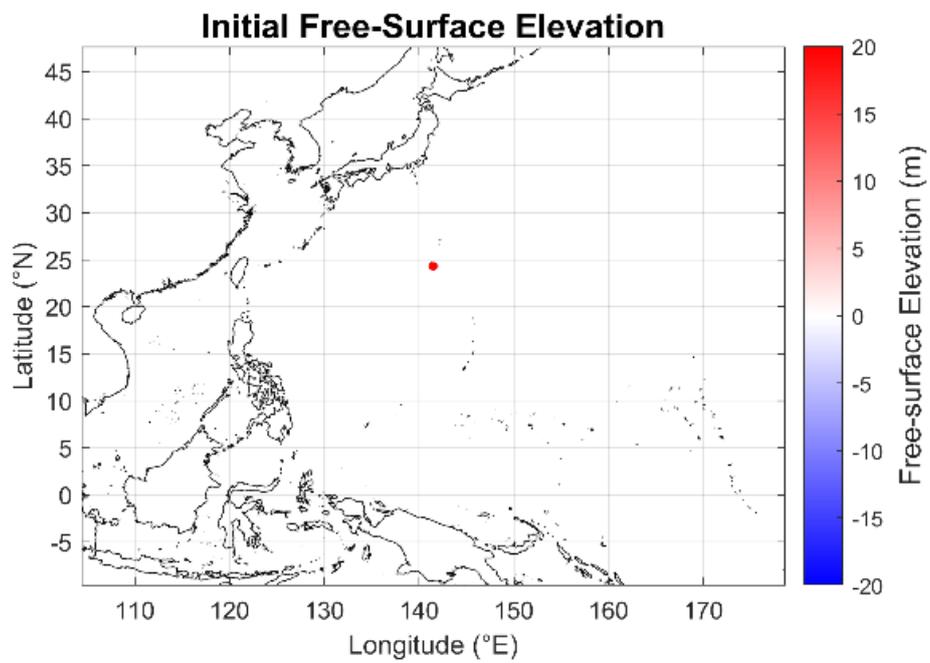


圖 70，高度 30 公尺點源之海嘯初始波高圖。

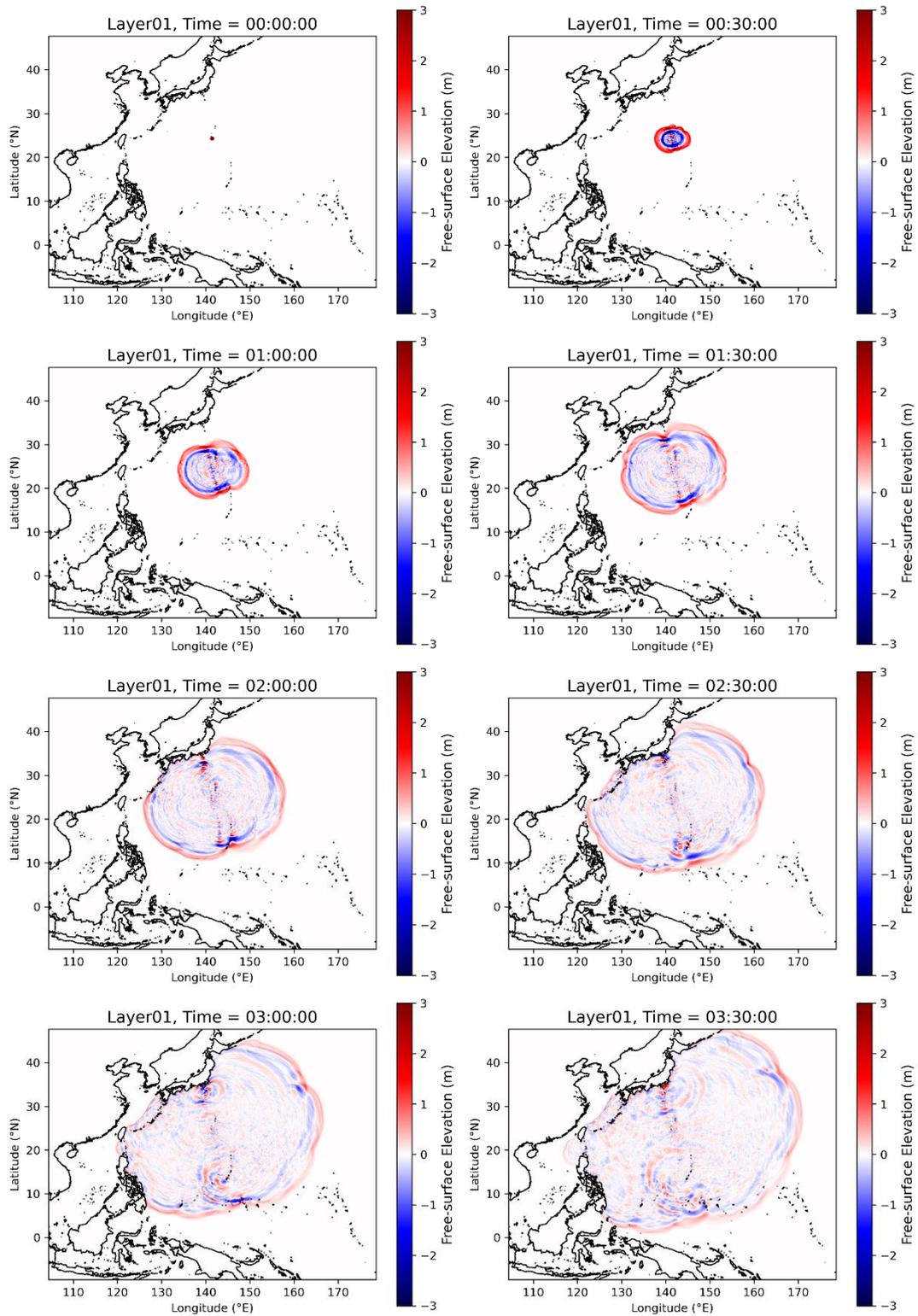


圖 71，高 15 公尺點源，第一層網格之每 30 分鐘之海嘯傳遞圖快照。

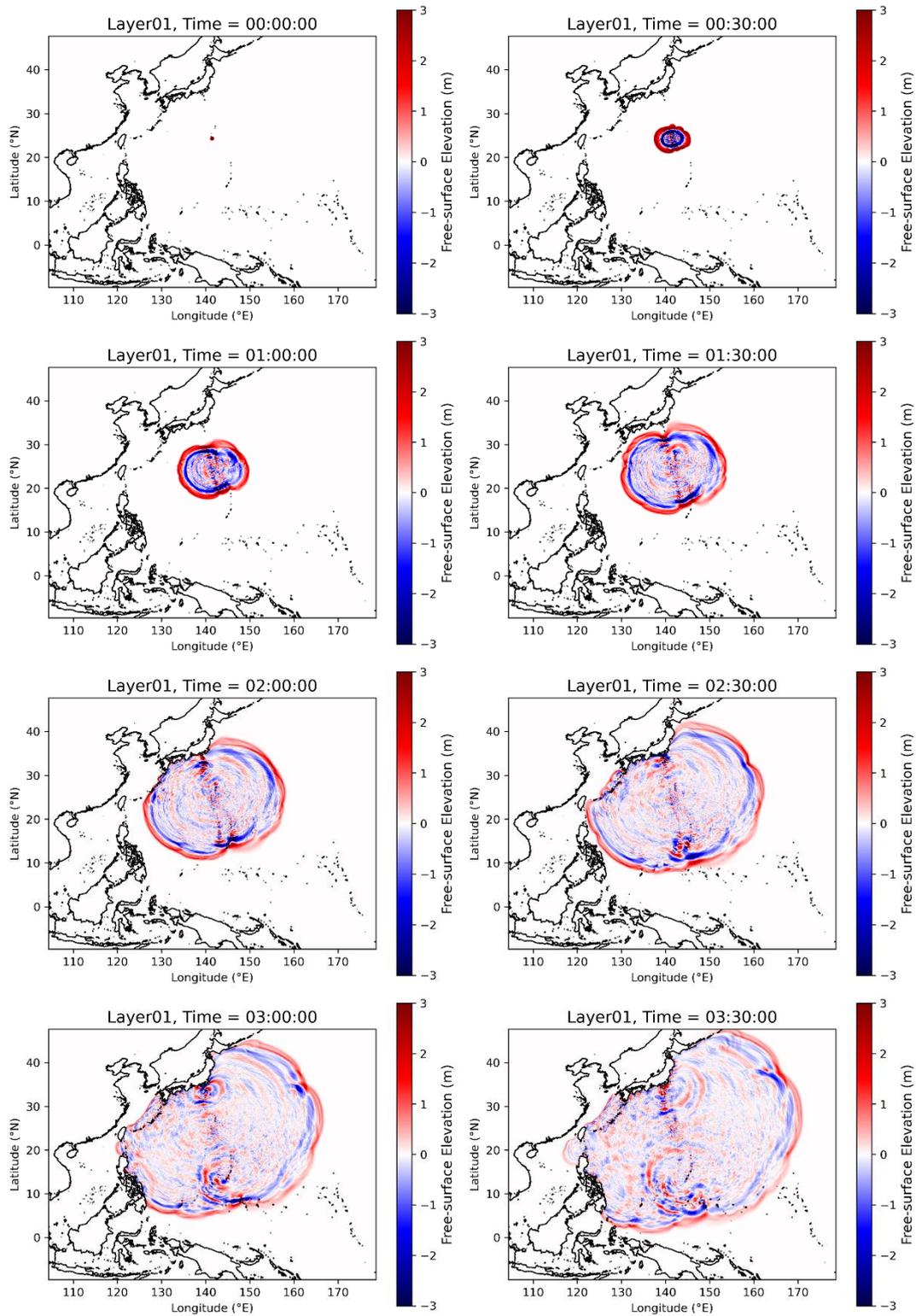


圖 72，高 30 公尺點源，第一層網格之每 30 分鐘之海嘯傳遞圖快照。

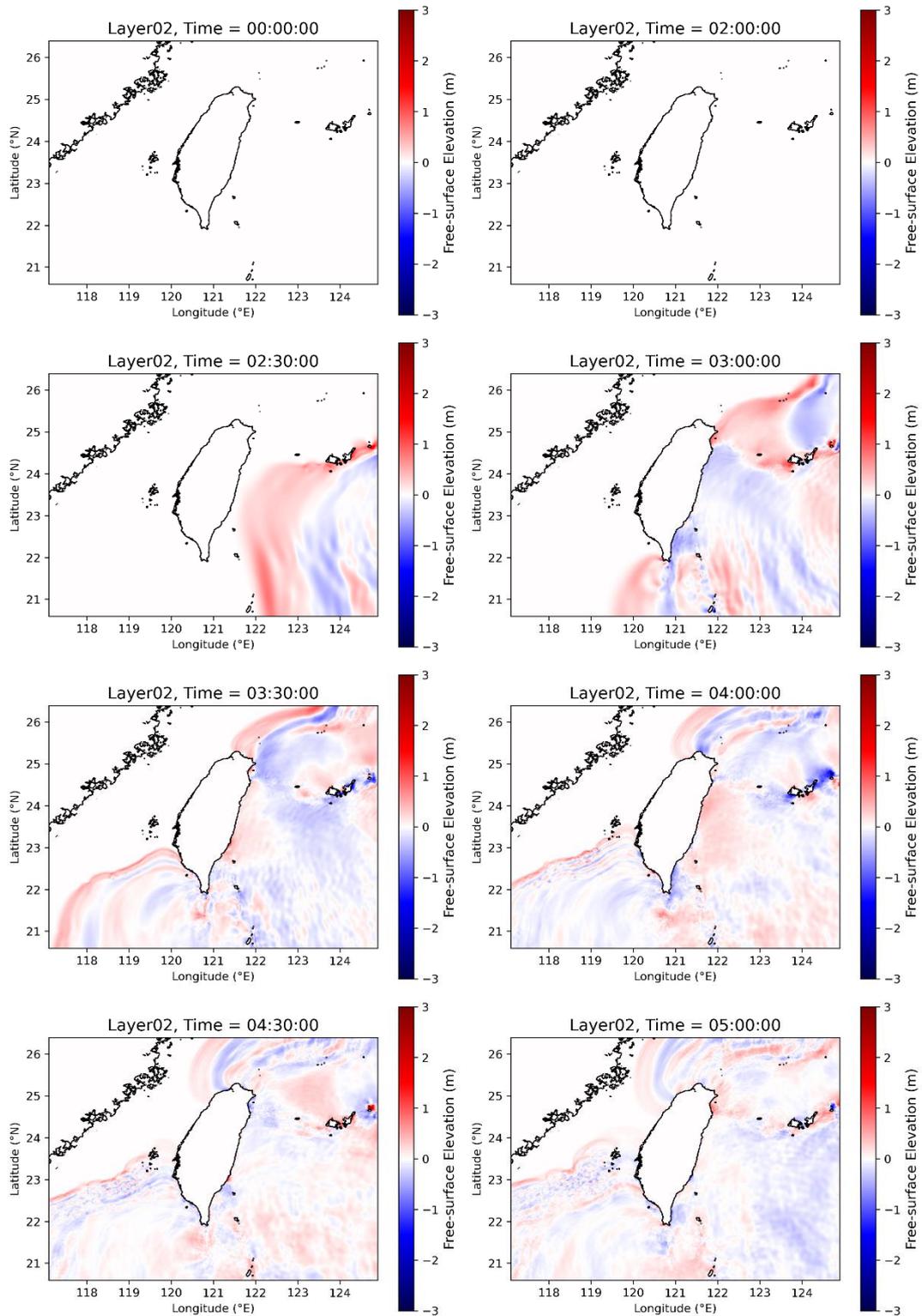


圖 73，高 15 公尺點源，第二層網格之每 30 分鐘之海嘯傳遞圖快照。

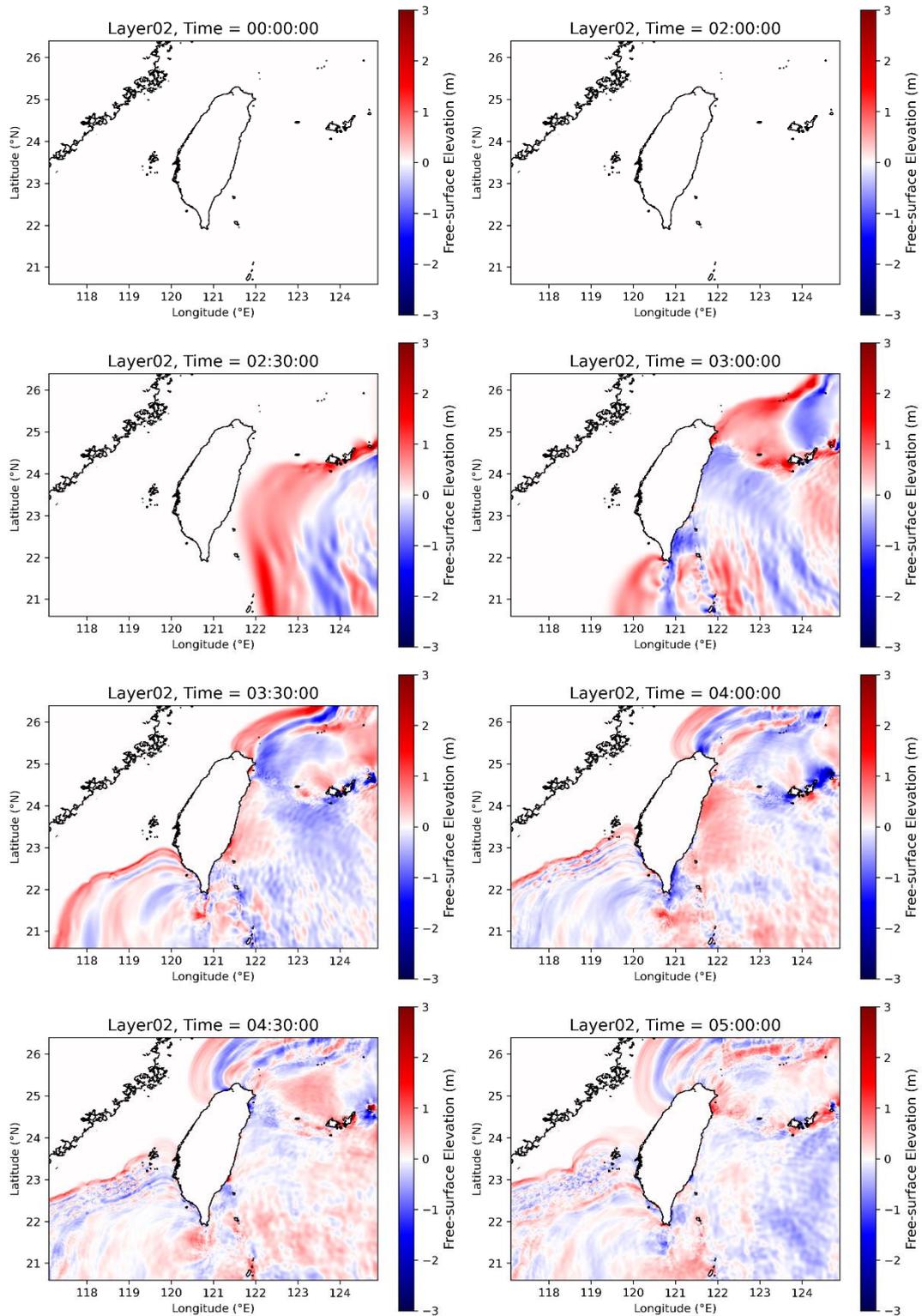


圖 74，高 30 公尺點源，第二層網格之每 30 分鐘之海嘯傳遞圖快照。

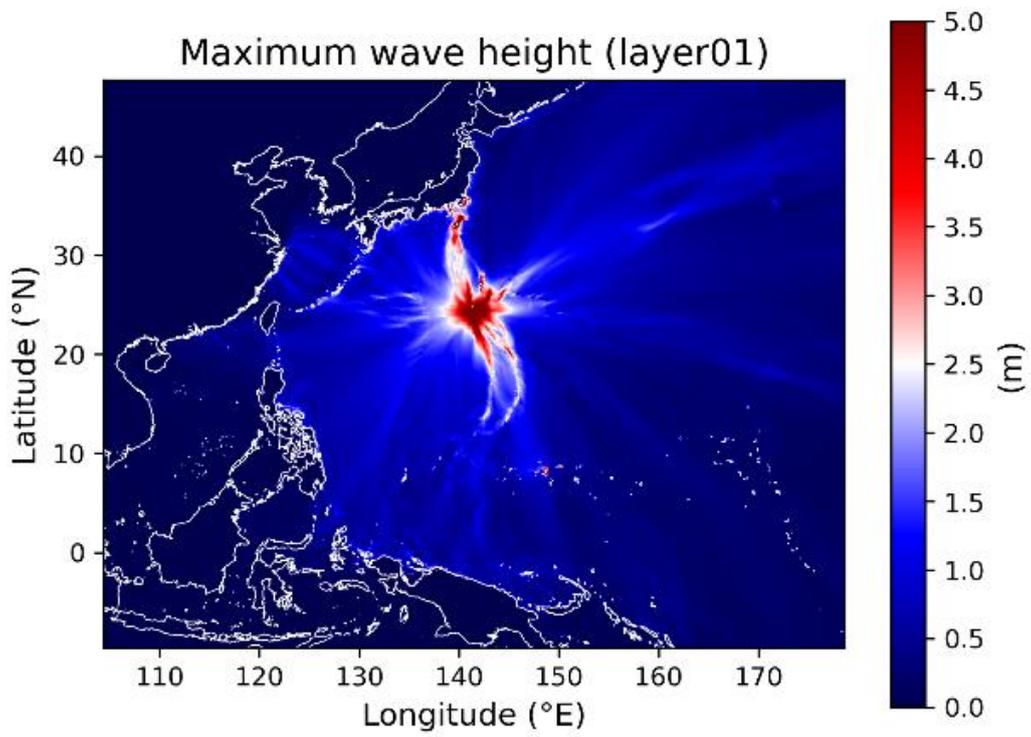


圖 75，高 15 公尺點源，第一層網格之海嘯最大波高圖。

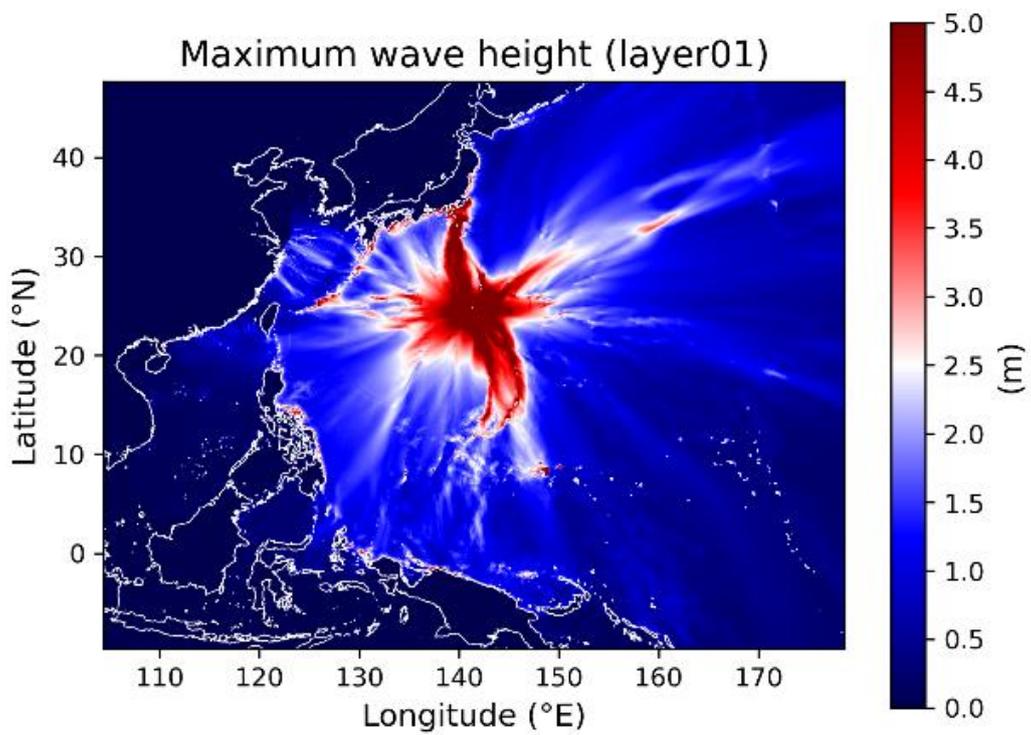


圖 76，高 30 公尺點源，第一層網格之海嘯最大波高圖。

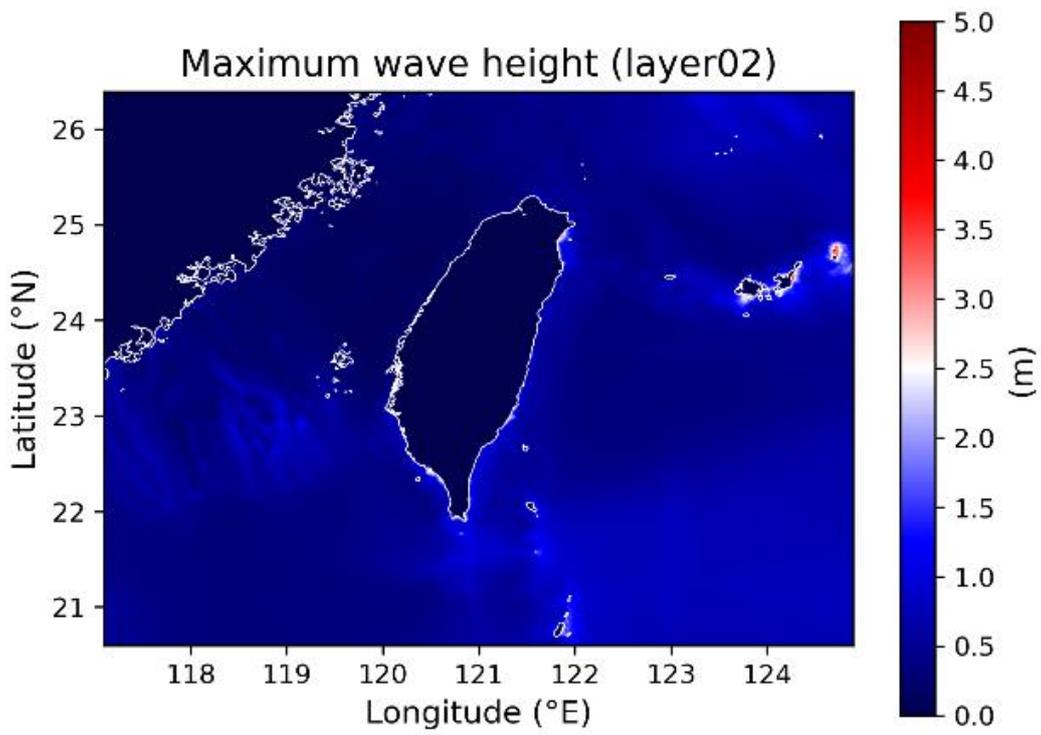


圖 77，高 15 公尺點源，第二層網格之海嘯最大波高圖。

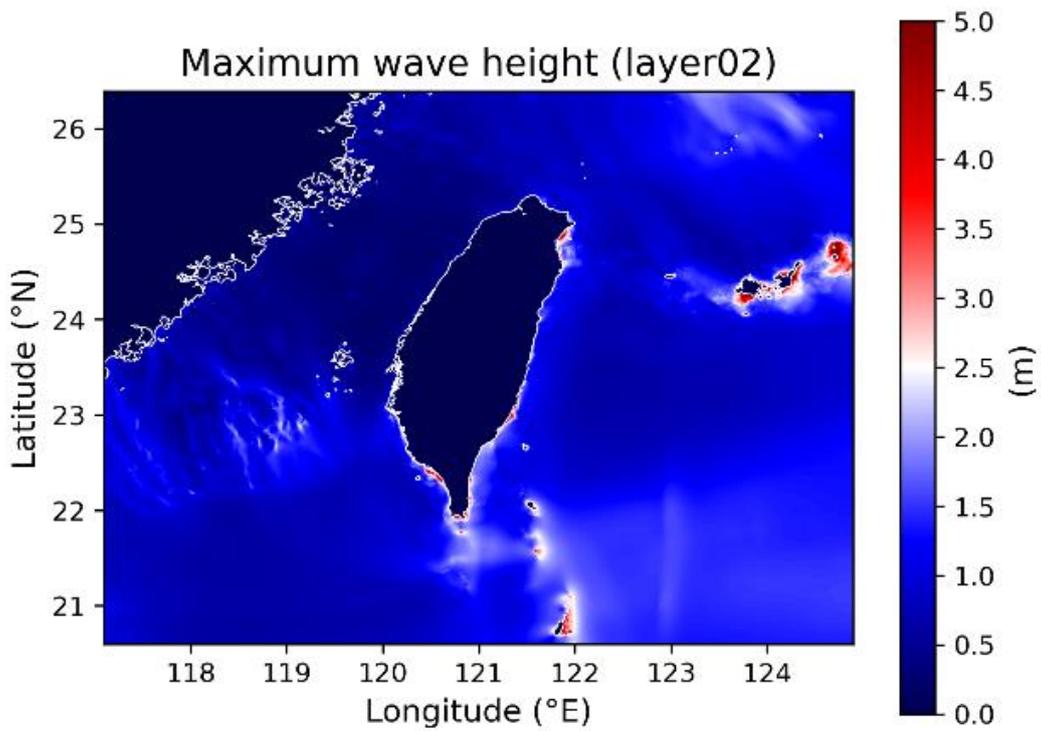


圖 78，高 30 公尺點源，第二層網格之海嘯最大波高圖。

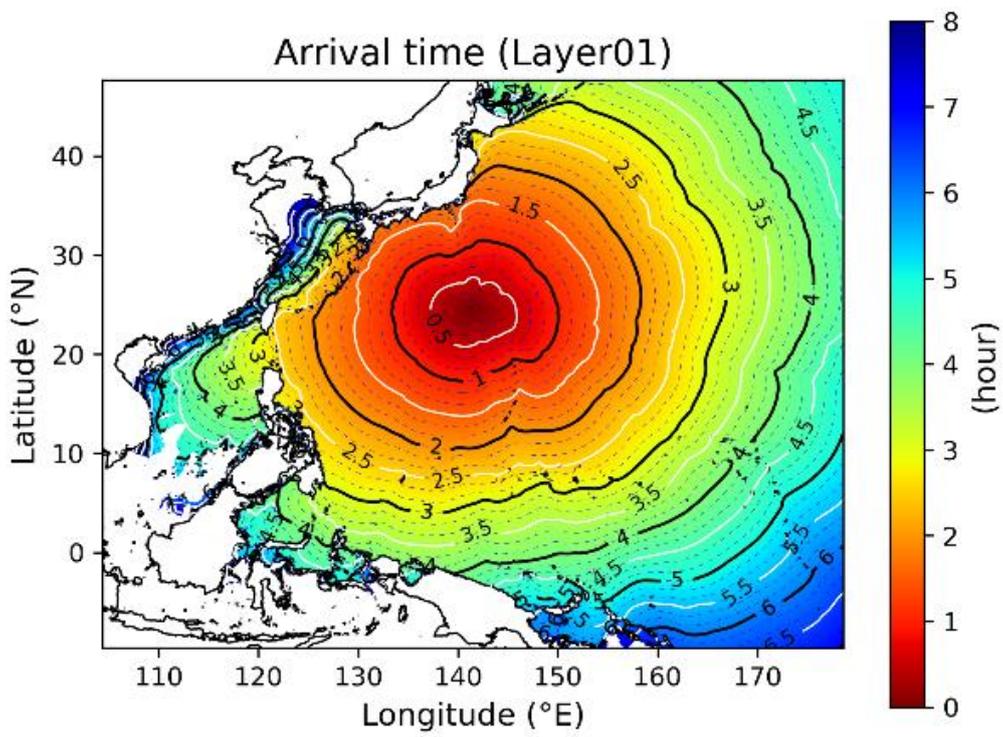


圖 79，高 15 公尺點源，第一層網格之海嘯到時圖。

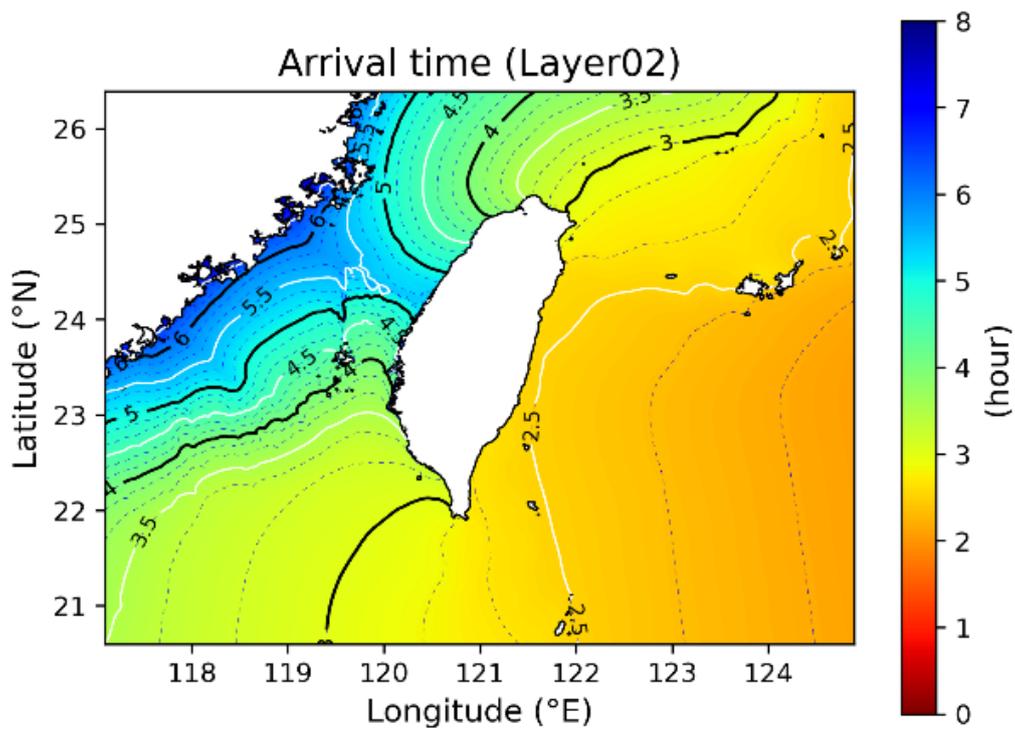


圖 80，高 15 公尺點源，第二層網格之海嘯到時圖。

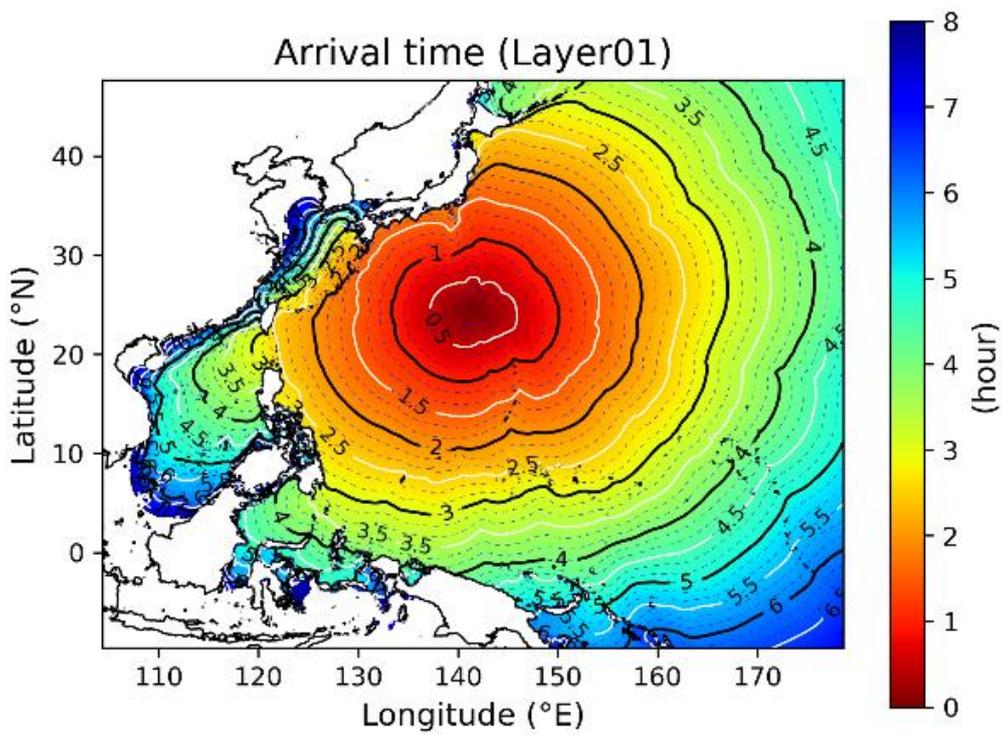


圖 81，高 30 公尺點源，第一層網格之海嘯到時圖。

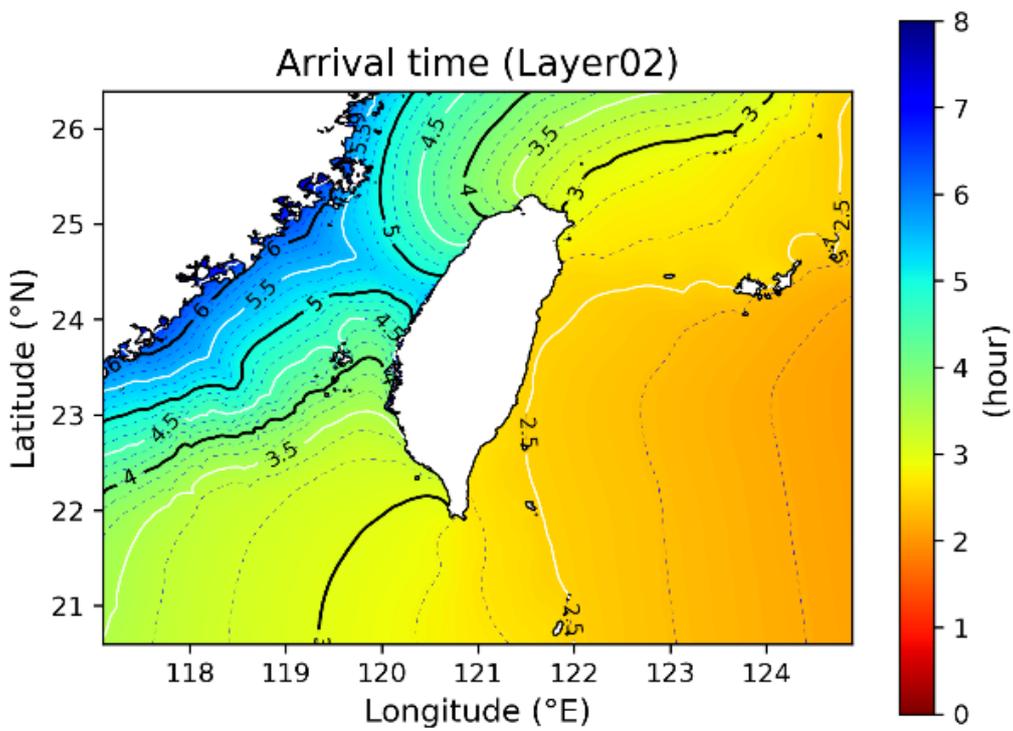


圖 82，高 30 公尺點源，第二層網格之海嘯到時圖。

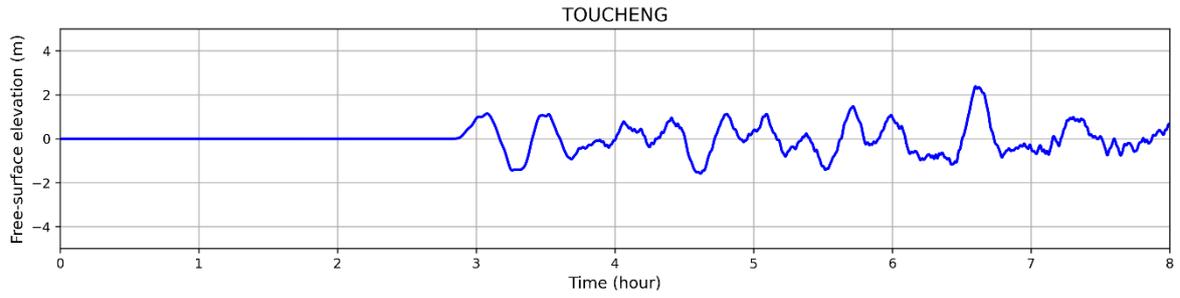


圖 83，高 15 公尺點源，臺灣沿海港口 – 頭城之海嘯時序歷線。

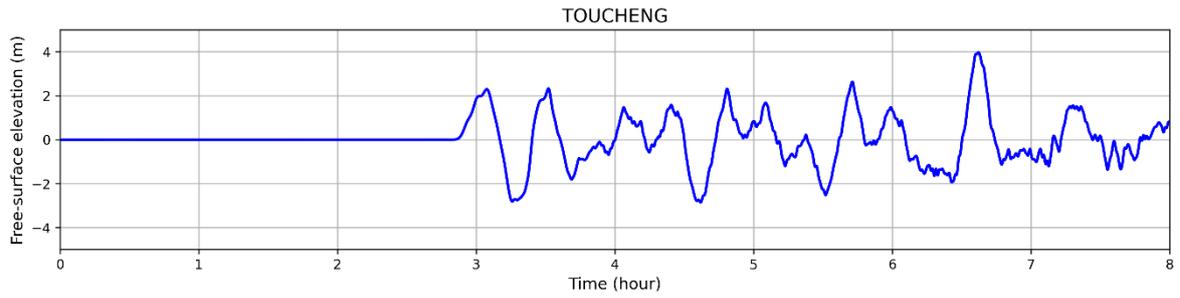


圖 84，高 30 公尺點源，臺灣沿海港口 – 頭城之海嘯時序歷線。

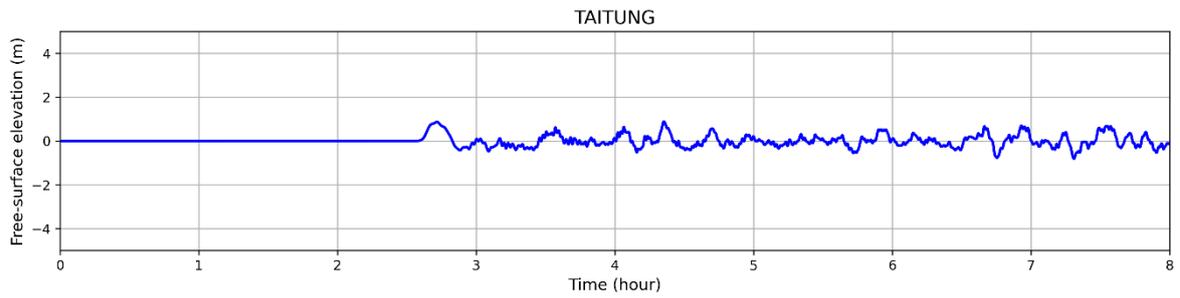


圖 85，高 15 公尺點源，臺灣沿海港口 – 臺東之海嘯時序歷線。

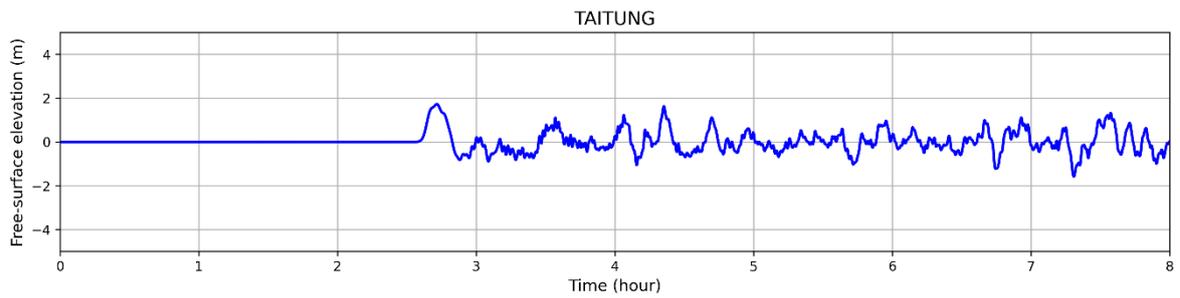


圖 86，高 30 公尺點源，臺灣沿海港口 – 臺東之海嘯時序歷線。

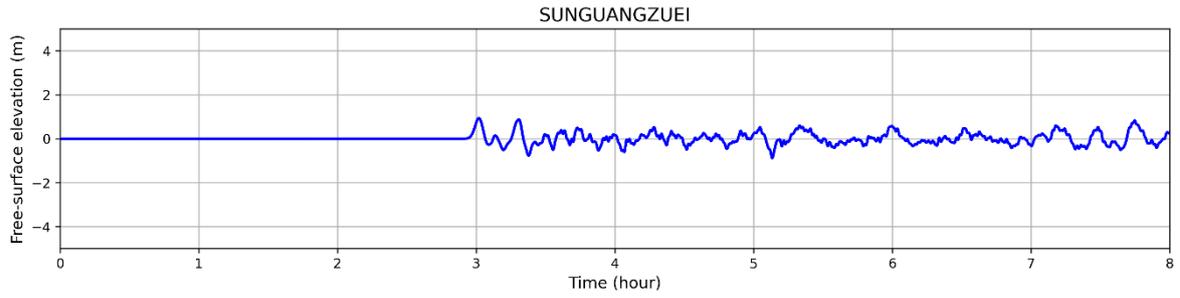


圖 87，高 15 公尺點源，臺灣沿海港口 – 蟬廣嘴之海嘯時序歷線。

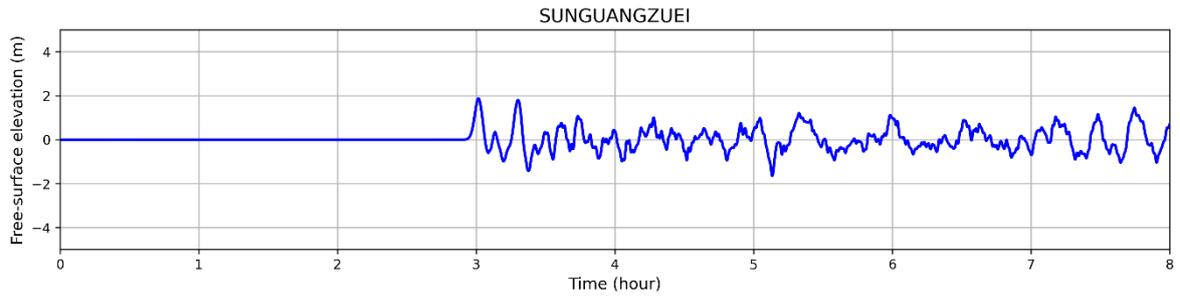


圖 88，高 30 公尺點源，臺灣沿海港口 – 蟬廣嘴之海嘯時序歷線。

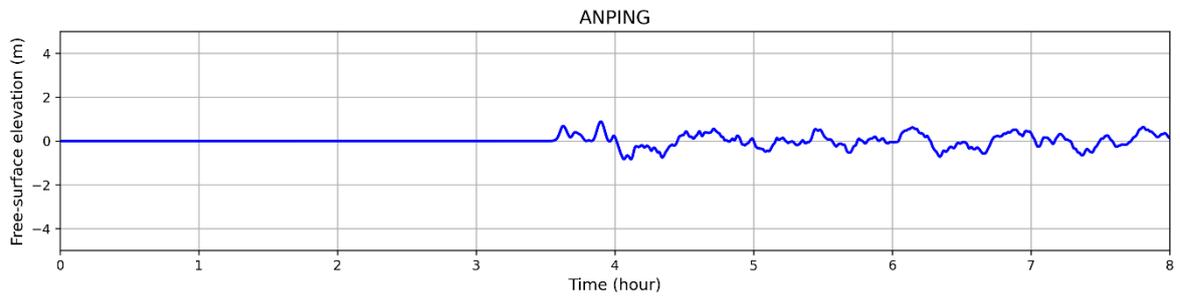


圖 89，高 15 公尺點源，臺灣沿海港口 – 安平之海嘯時序歷線。

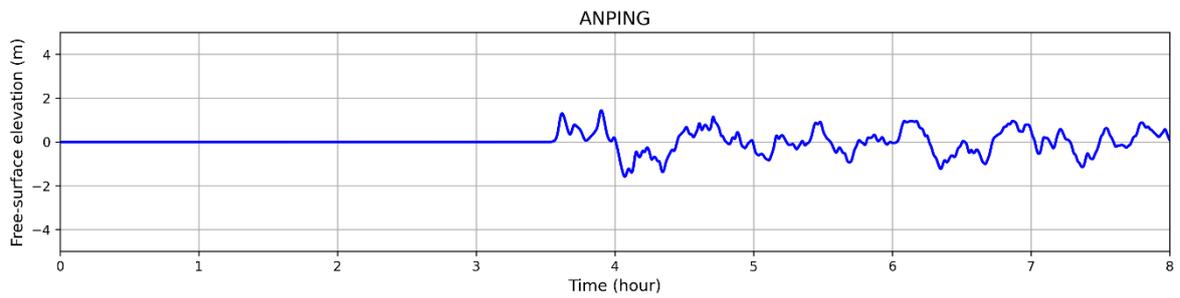


圖 90，高 30 公尺點源，臺灣沿海港口 – 安平之海嘯時序歷線。

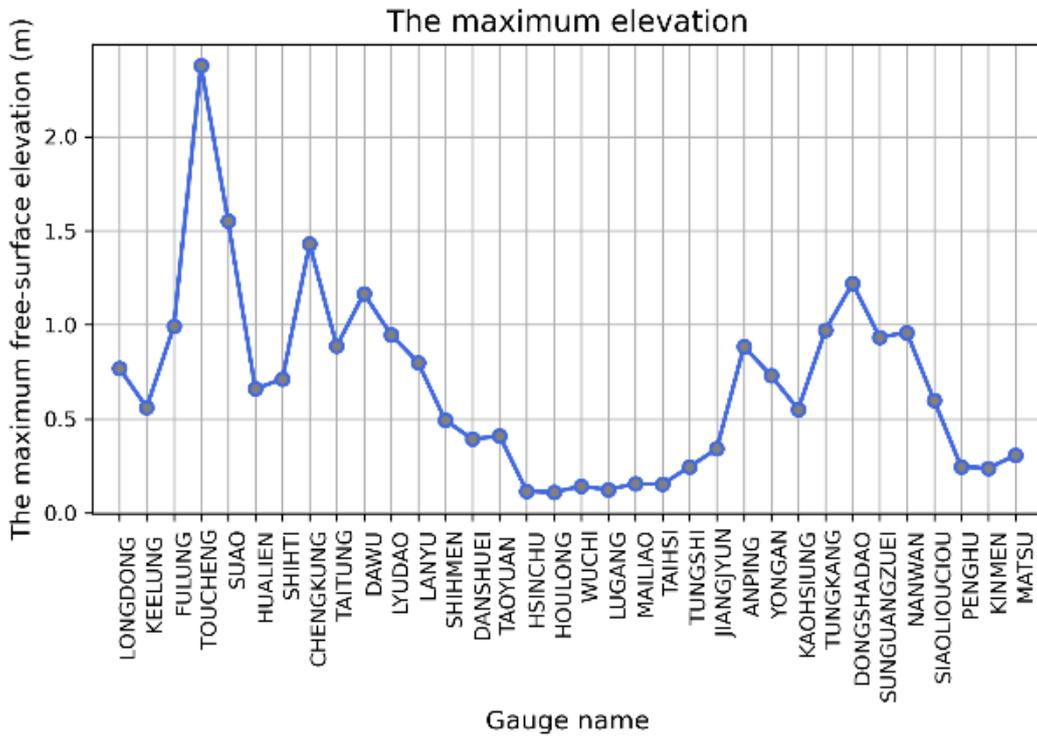


圖 91，高 15 公尺，臺灣沿海港口最大水位圖。

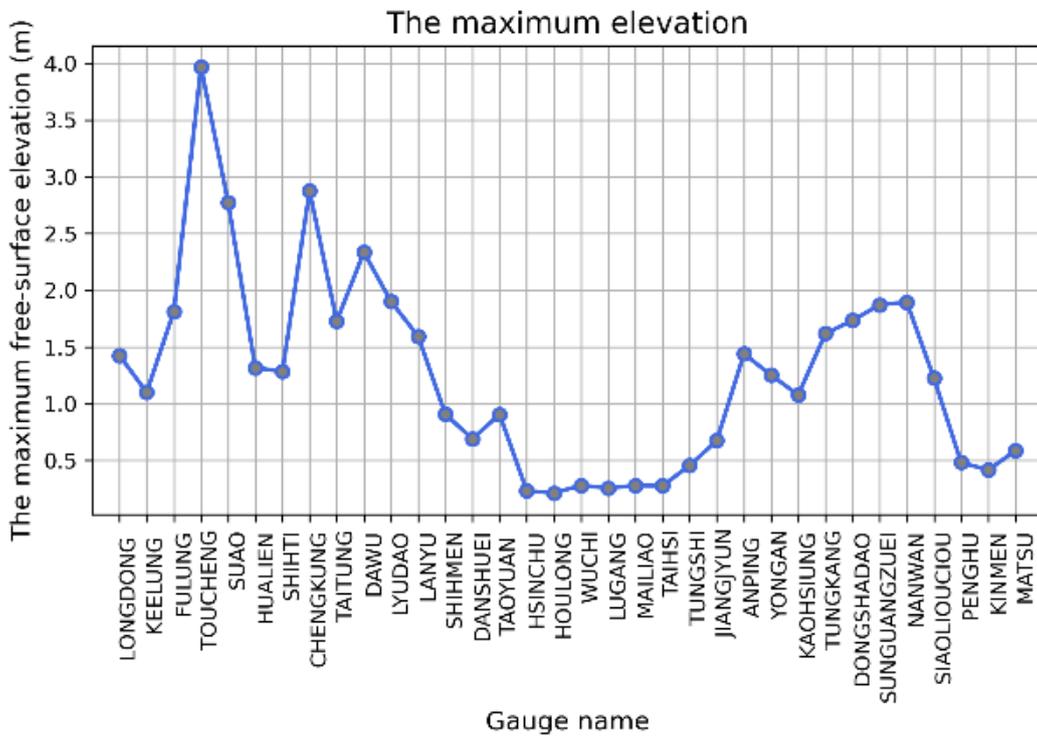


圖 92，高 30 公尺，臺灣沿海港口最大水位圖。

6.3 地形解析度分析

此分析為測試不同地形解析度模擬之所花費時間。此分析同樣，模擬區域第一層為西北太平洋，第二層為臺灣區域。共測試三種解析度搭配（以下使用 A、B、C 來代表）：A，第一層為 8 弧分、第二層為 1 弧分；B，第一層為 4 弧分、第二層為 0.5 弧分；C，第一層為 2 弧分、第二層為 0.25 弧分。海嘯模式內總模擬時長皆為 8 小時，海嘯傳遞之步長為 15 分鐘。

測試之結果：

A，模式總運算時間為約 40 分鐘，總繪圖時間約為 10 分鐘。

B，模式總運算時間為約 6 分鐘，總繪圖時間約為 2 分鐘。

C，模式總運算時間為約 2 分鐘，總繪圖時間約為 1 分 10 秒。

以假想點源設置於福德岡之場此例，海嘯抵達臺灣之到時約為 2 小時 30 分鐘，三種解析度之運算時間均具時效性。但本系統最終為模擬全太平洋區域，為西北太平洋之四倍大，考慮到預報時效，將以 B，第一層為 4 弧分、第二層為 0.5 弧分，作為系統預設。使用者亦可自行決定搭配何種地形解析度。

七、火山海嘯之研究

本章節為使用已開發完成之火山海嘯速算系統，進行點源型海嘯源之模擬。本章分為兩次事件之模擬，首先 7.1 章為臺灣近海之火山海嘯威脅，為以臺灣龜山島為例做情境探討，因龜山島至今仍存在海底火山之活動，一旦發生火山型海嘯將嚴重衝擊宜蘭地區，因此使用本模擬系統快速執行火山型海嘯之情境模擬。

接著 7.2 章為 2022 年東加火山海嘯之案例模擬，並分為初步模擬及修正係數之應用，初步模擬即套用系統預設之值進行 COMCOT 海嘯模擬，接著搭配去潮之水位紀錄執行修正係數之取得以及應用。

7.1 臺灣龜山島之火山海嘯情境探討

位於臺灣宜蘭縣外海之龜山島，為一座火山島，僅距離宜蘭頭城鎮海岸約 10 公里，位於北緯 24.842972，東經 121.951723，其面積為 2.841 平方公里，東西寬約 3.1 公里，南北長約 1.6 公里。

本情境探討之點源初始值為一直徑 10 公里、高 30 公尺之圓柱，於 COMCOT 內僅使用一層之非線性解來模擬，網格解析度為 0.5 弧分，總模擬時長為 5 小時。

圖 93 為海嘯初始波高圖，圖 94 為臺灣地區之每 5 分鐘之海嘯傳遞圖快照。圖 95 為海嘯最大波高圖。圖 96 為海嘯到時圖。圖 97 至圖 104 為臺灣沿海港口海嘯時序歷線圖，以頭城、蘇澳、福隆、龍洞、花蓮、基隆、成功、南灣為例。圖 105 為臺灣沿海港口最大水位圖。

圖 95 之最大波高圖中，顯示宜蘭平原有海嘯溢淹的情況，溢淹狀況延伸至平原內陸有一段距離。大致從臺東以北之沿岸至北海岸這一段臺灣東部、北部沿海都有 1 公尺以上之波高。

由於龜山島距離宜蘭沿岸非常近，圖 94 之每 5 分鐘海嘯傳遞圖快照中顯示，僅僅不到 5 分鐘首波海嘯波已抵達宜蘭沿岸並造成些許溢淹。圖 96 到時圖中之藍色虛線為 10 分鐘之時間間隔，同樣也顯示僅 10 分鐘海嘯已抵達蘇澳及三貂角。由於海嘯波於臺灣東部較北部傳播快，因此觀察一小時到時之黑色粗線，向南傳播之海嘯波已經過東部沿岸，抵達恆春半島西部之貓鼻頭；而向北傳播之海嘯波則剛繞過北海岸經過淡水、八里地區。到時圖中左下角，也就是臺灣海峽內與南海北部區域，有些零星或甚至一大片之空白，會產生此現象是因為雖然這些地區仍為海域，但模擬系統判斷海嘯波傳播至此已過小，不足以稱之為海嘯波，因此即判斷為無到時，即顯示空白。

圖 97 至圖 104 之海嘯時序歷線圖為依照到時之先後順序排列，大部分之波型皆為首波最大，後續波漸緩；然而花蓮、成功以及南灣之波型較為特殊，後續波有持續震盪或放大之特殊現象。

圖 105 之沿海港口最大水位圖中，海嘯波首當其衝之頭城之最大水位為 10 公尺，接下來依序為龍洞及蘇澳 3 公尺多，福隆約 3 公尺，基隆不滿 2 公尺，花蓮約 1 公尺多一點，成功、南灣、安平等等之臺灣東南部、南部、西部皆不滿 1 公尺或

不到 50 公分，呈現最大水位高度隨距海嘯源愈遠則愈小之關係。

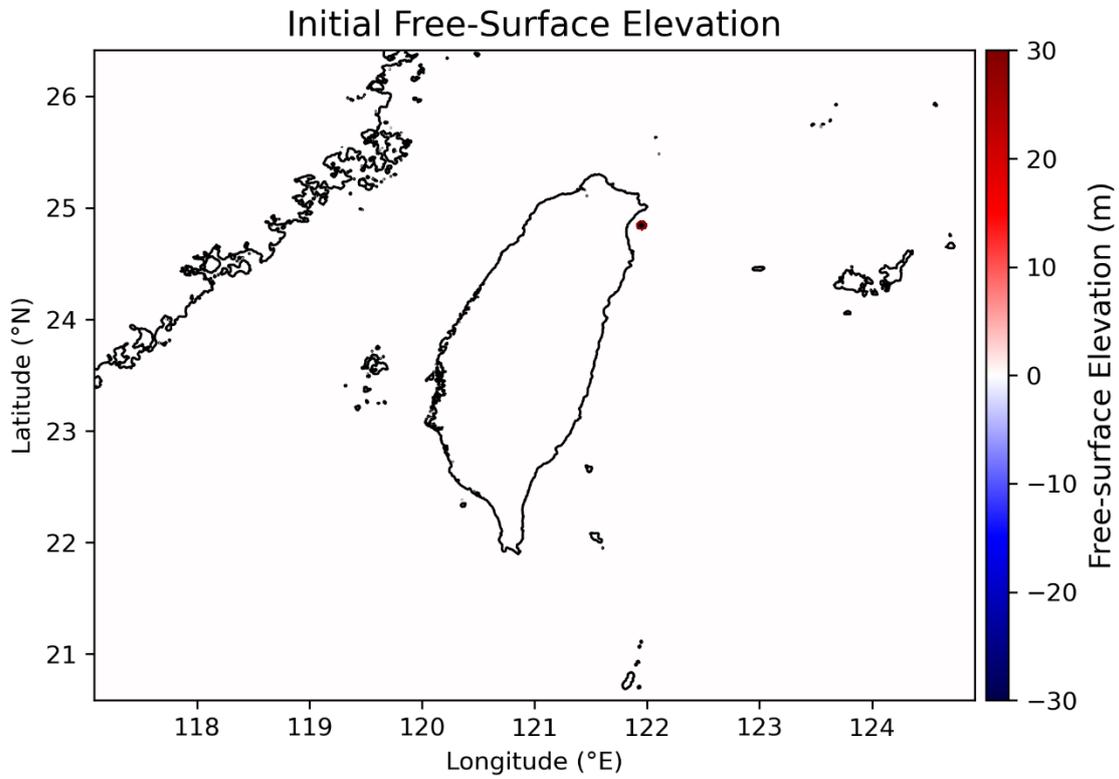
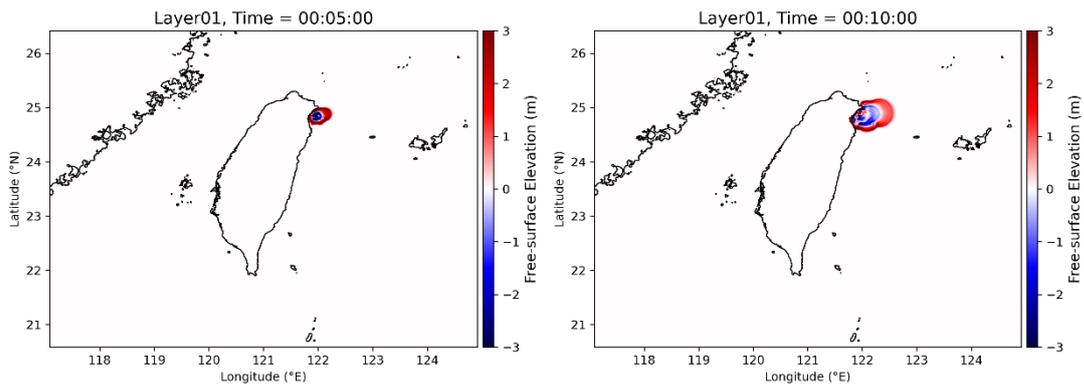
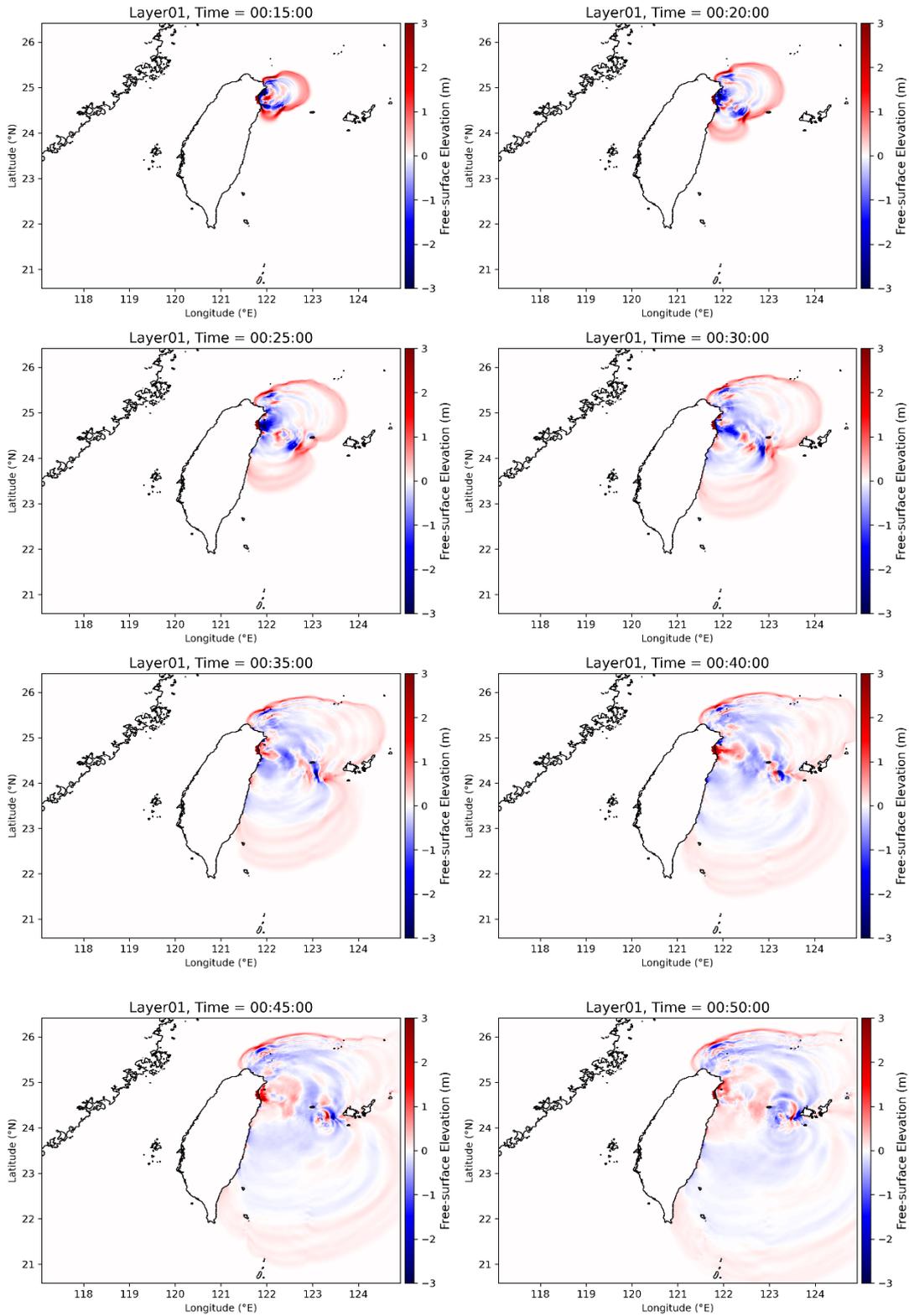


圖 93，直徑 10 公里、高 30 公尺點源之海嘯初始波高圖。





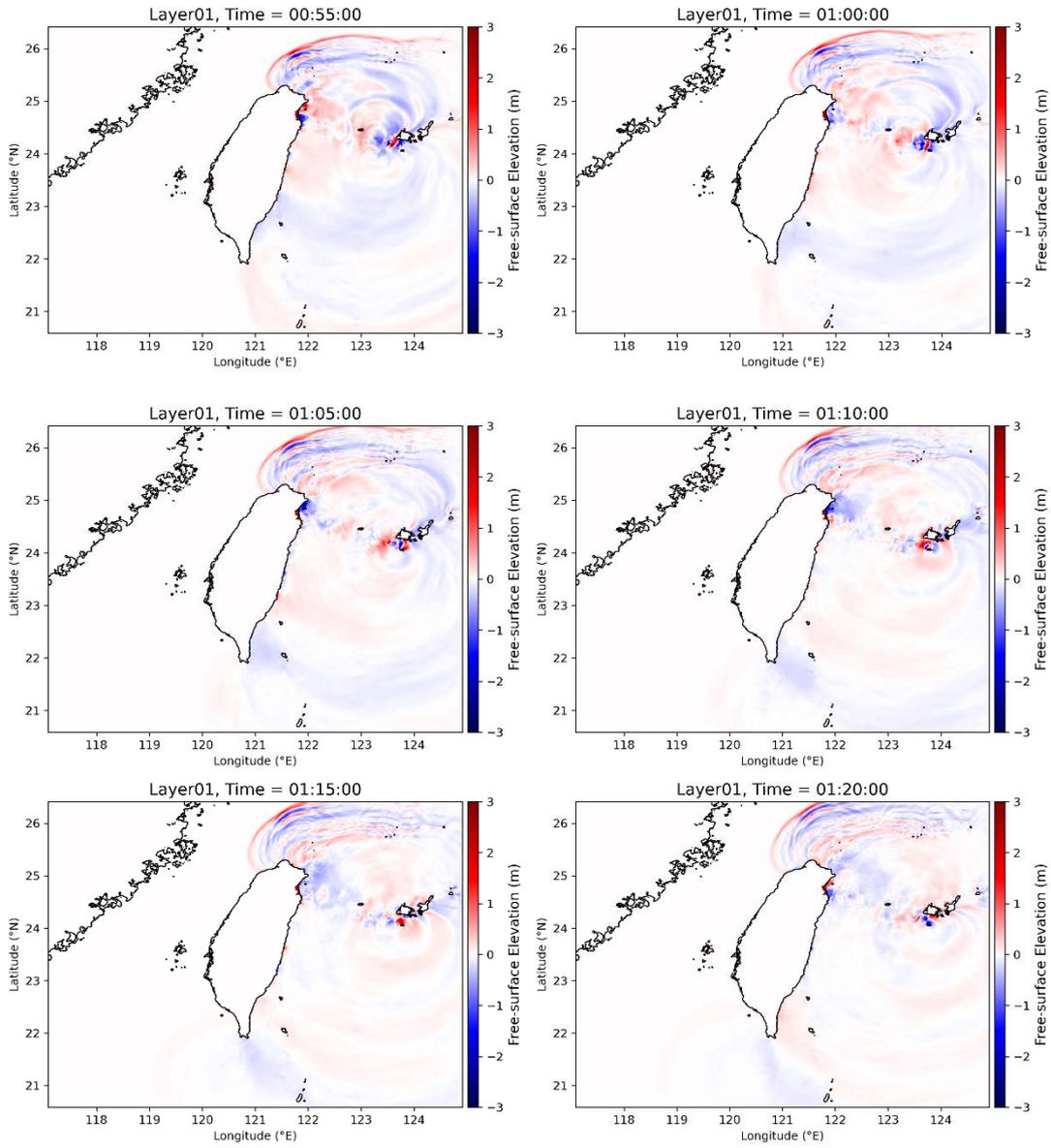


圖 94，臺灣地區之每 5 分鐘之海嘯傳遞圖快照。

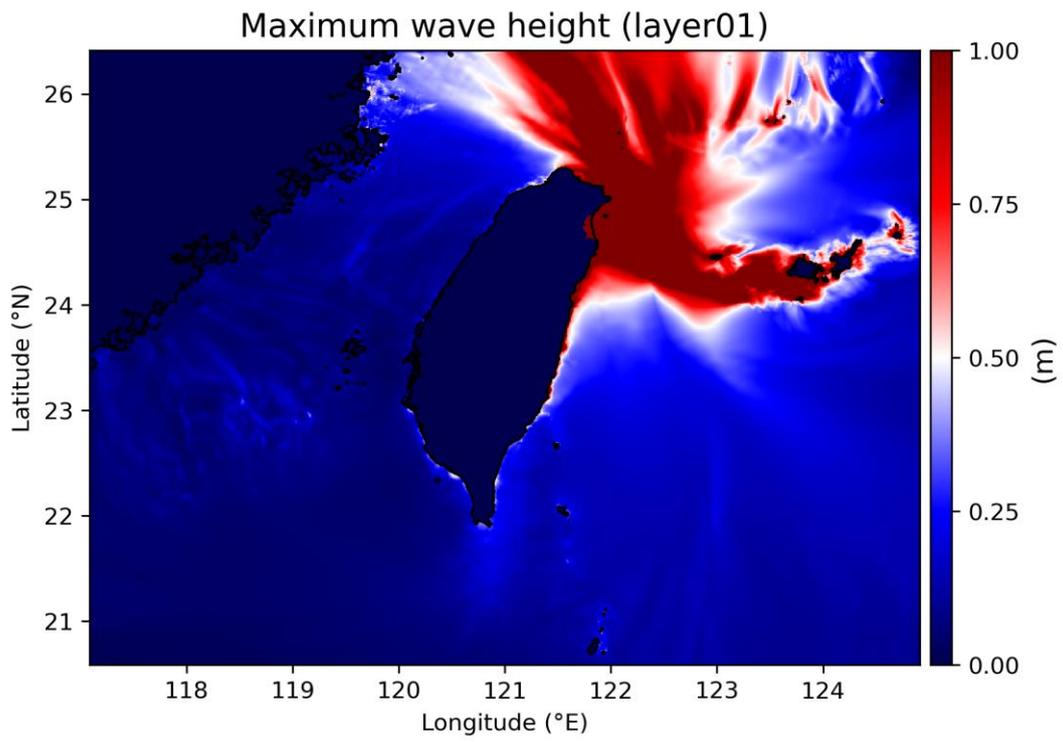


圖 95，海嘯最大波高圖。

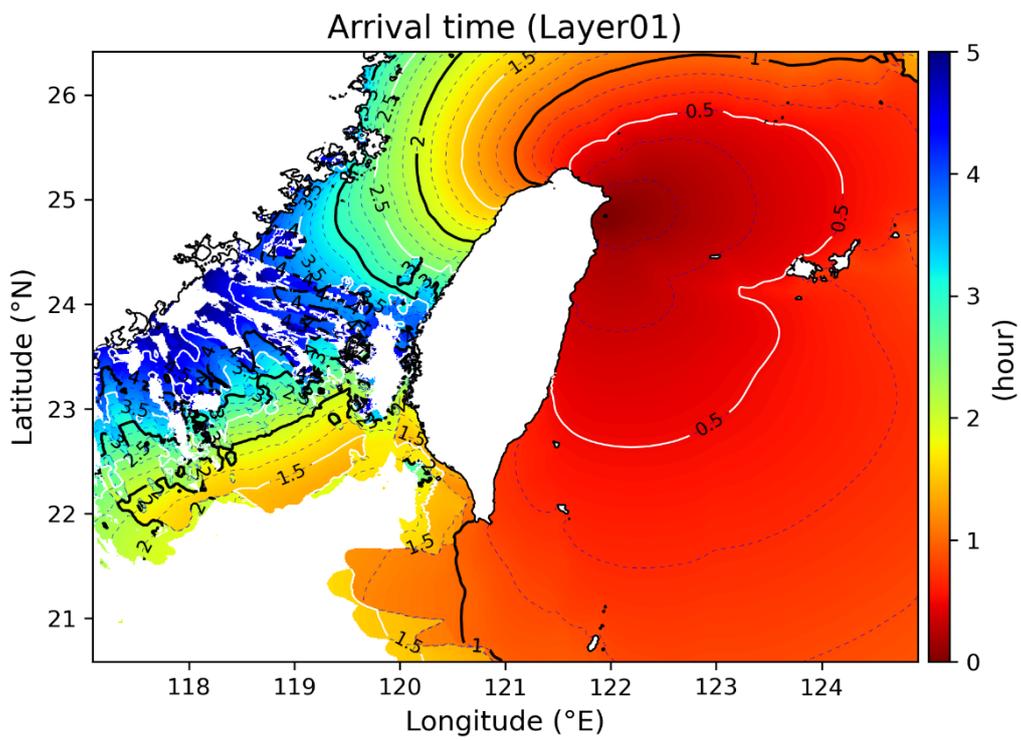


圖 96，海嘯到時圖。

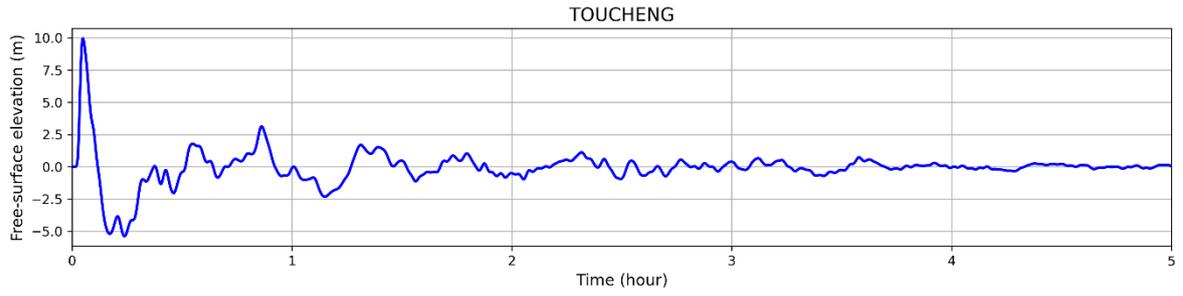


圖 97，臺灣沿海港口 – 頭城之海嘯時序歷線。

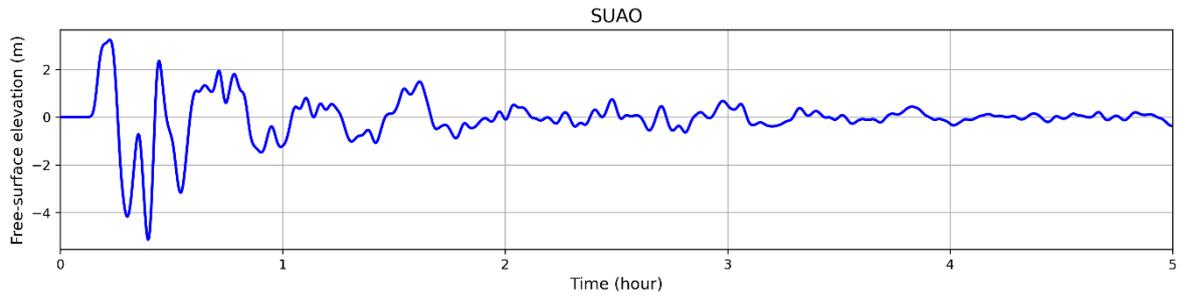


圖 98，臺灣沿海港口 – 蘇澳之海嘯時序歷線。

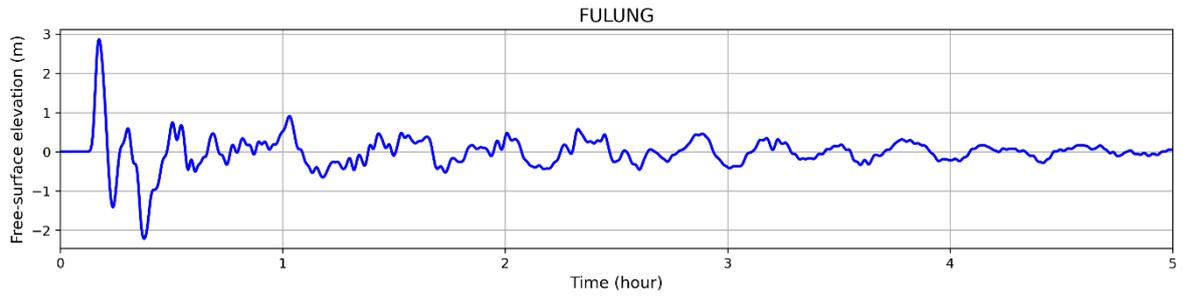


圖 99，臺灣沿海港口 – 福隆之海嘯時序歷線。

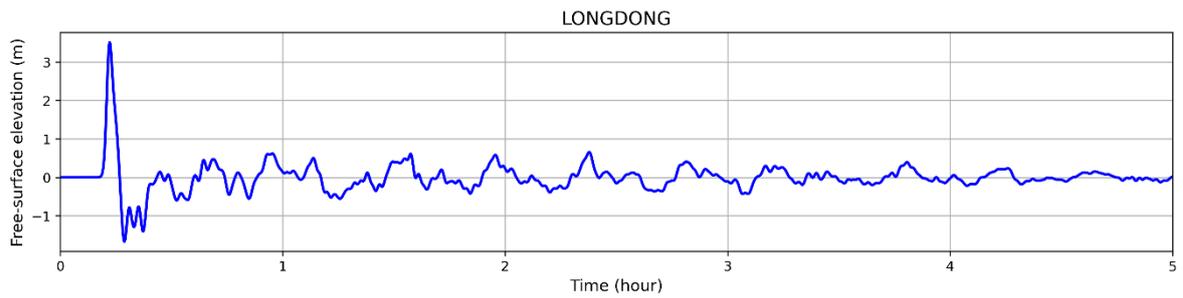


圖 100，臺灣沿海港口 – 龍洞之海嘯時序歷線。



圖 101，臺灣沿海港口 – 花蓮之海嘯時序歷線。

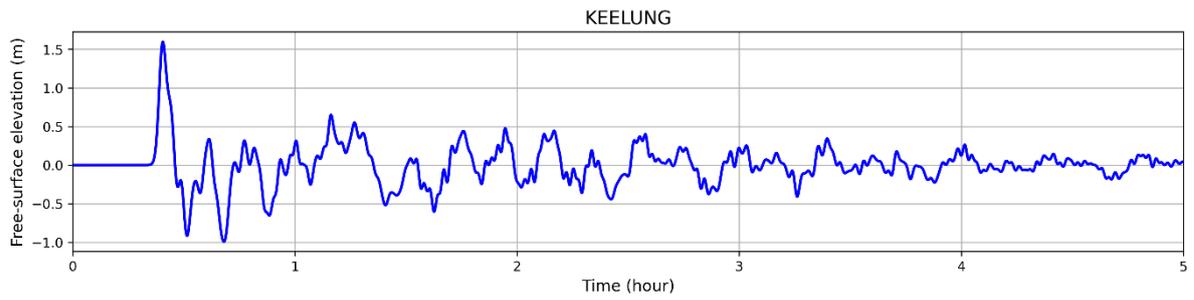


圖 102，臺灣沿海港口 – 基隆之海嘯時序歷線。

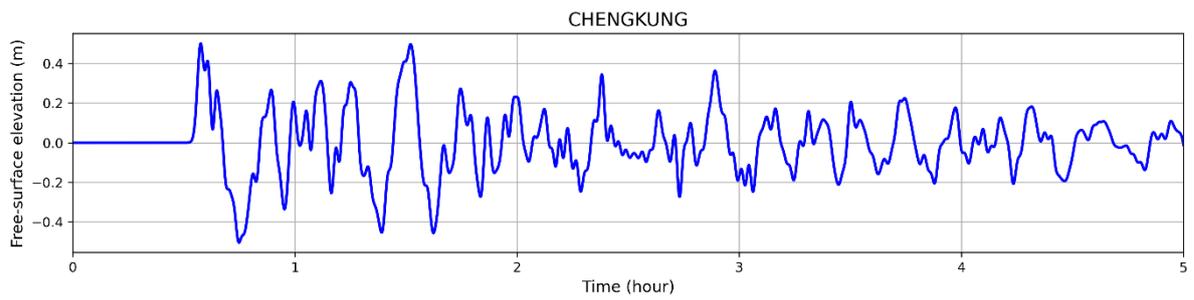


圖 103，臺灣沿海港口 – 成功之海嘯時序歷線。

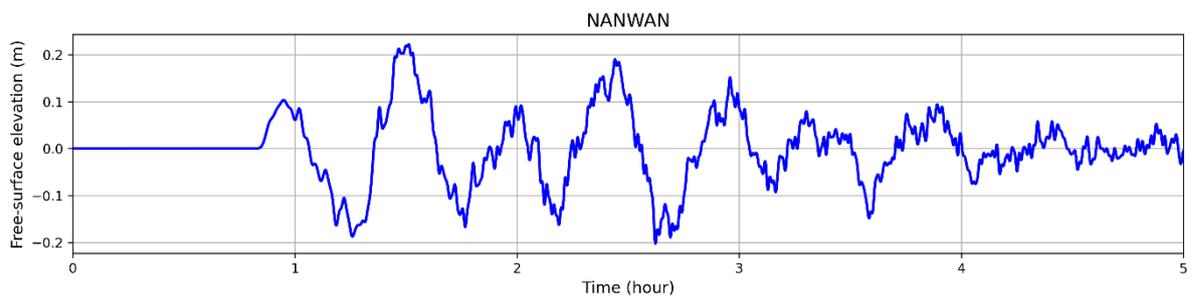


圖 104，臺灣沿海港口 – 南灣之海嘯時序歷線。

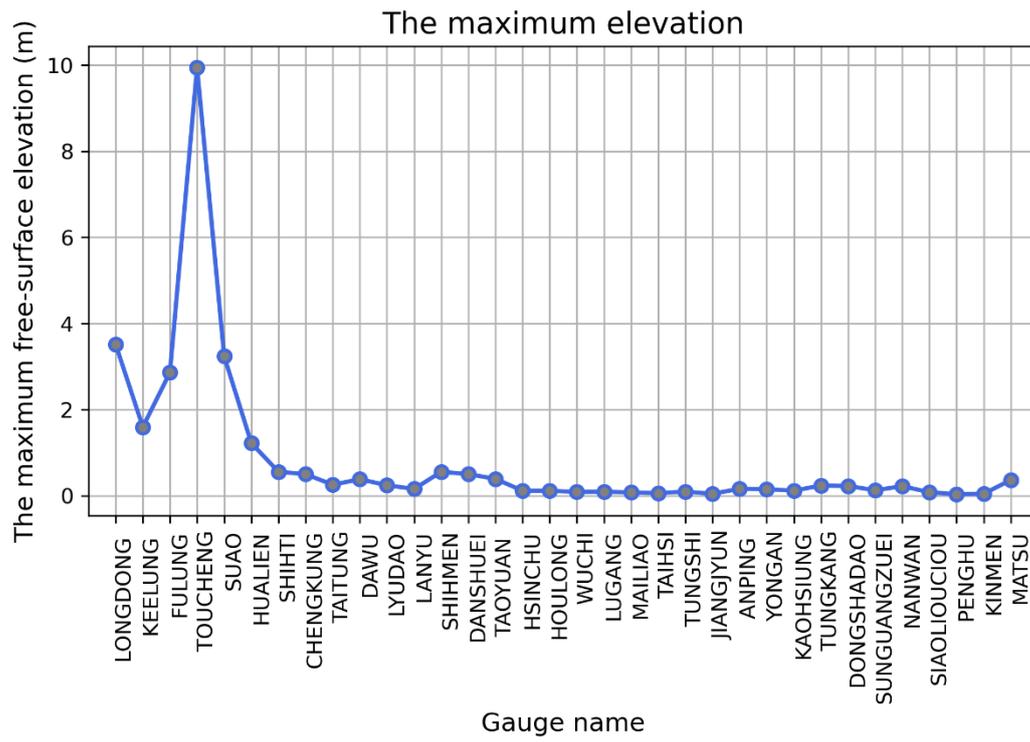


圖 105，臺灣沿海港口最大水位圖。

7.2 東加火山海嘯案例模擬

東加王國位於西南太平洋紐西蘭北方約 1800 公里，東加王國之東加島西北方約 70 公里之東加火山 (Hunga Tonga-Hunga Ha'apai)，於 2022 年 1 月 15 日 4:15 UTC 發生大規模噴發。東加火山位於南緯 20.55，西經 175.385 (於模式內使用過國際換日線將東經經度繼續累加，為 184.615)。

本案例模擬之點源初始值為一直徑 100 公里、高 30 公尺之圓柱，於 COMCOT 內使用兩層網格，第一層為半個太平洋之區域，使用線性解；第二層為臺灣地區，使用非線性解。第一層網格解析度為 4 弧分，第二層網格解析度為 0.5 弧分，總模擬時長為 18 小時。

因點源初始值為依照歷史火山海嘯經驗給定之約略數字，本事件臺灣各地潮位站亦有潮位紀錄，因此本案例模擬分為兩步驟，首先為「初步模擬」，先進行模式之模擬，再來為「應用線性修正」，使用臺灣各地潮位站之紀錄進行去潮之動作，並將去潮後觀測資料與模擬結果之最高水位做比對，取得調整係數，最後將係數應用於全部之初步模擬結果，繪製已線性修正後之最後產品圖。

7.2.1 初步模擬

圖 106 為海嘯初始波高圖，圖 107 為半太平洋區域之每 2 小時之海嘯傳遞圖快照，圖 108 為臺灣地區之每 30 分鐘之海嘯傳遞圖快照。圖 109、圖 110 分別為第一層與第二層之海嘯最大波高圖。圖 111、圖 112 分別為第一層與第二層之海嘯到時圖。圖 113 至圖 120 為臺灣沿海港口海嘯時序歷線圖，以頭城、蘇澳、福隆、龍洞、南灣、東港、永安 (高雄市永安區)、安平為例。圖 121 為臺灣沿海港口最大水位圖。

圖 109 之海嘯最大波高圖中顯示，西北太平洋地區，北從阿留申群島起，千島群島、日本、琉球群島，南至菲律賓、印尼沿岸均呈現紅色，臺灣沿岸於圖 109 不太明顯，因此觀察圖 110，顯示宜蘭沿海地區及臺南、高雄沿海地區均呈現紅色，花蓮、臺東等沿岸則零星有較高的波高出現，臺灣海峽中北部則相對無明顯波高。圖 111 到時圖顯示，由於東加火山距臺灣較遠，因此傳至臺灣約需 12 小時，圖 112 則有臺灣地區更為詳細之到時分布，臺灣東部沿岸之到時約在 11.5 至 12 小時之間，接著海嘯波沿恆春半島及東北角繞行，約 12.5 至 15 小時抵達臺灣海峽沿岸各地。

圖 113 至圖 120 海嘯時序歷線圖中，各地均顯示首波海嘯波並非為最大波，以頭城為例，最大波高出現在首波抵達後約 2.5 小時後。東港、永安及安平等臺灣西南部則有波高漸漸變高之趨勢。圖 121 之臺灣沿海港口最大水位圖中顯示，臺灣各地最大水位均未超過 1 公尺，最高水位出現在頭城，約為 0.75 公尺，其次為福隆約 0.65 公尺，值得注意的是，如安平及永安有約 0.5 公尺之最大水位。

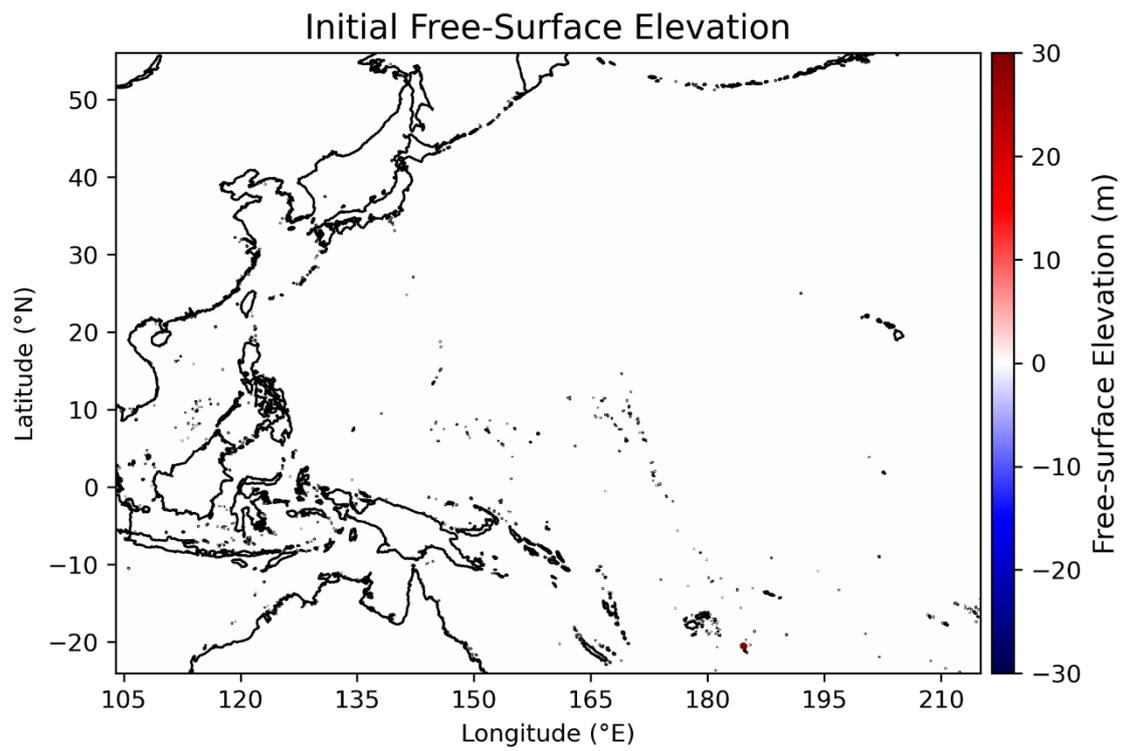


圖 106，直徑 100 公里、高 30 公尺點源之海嘯初始波高圖。

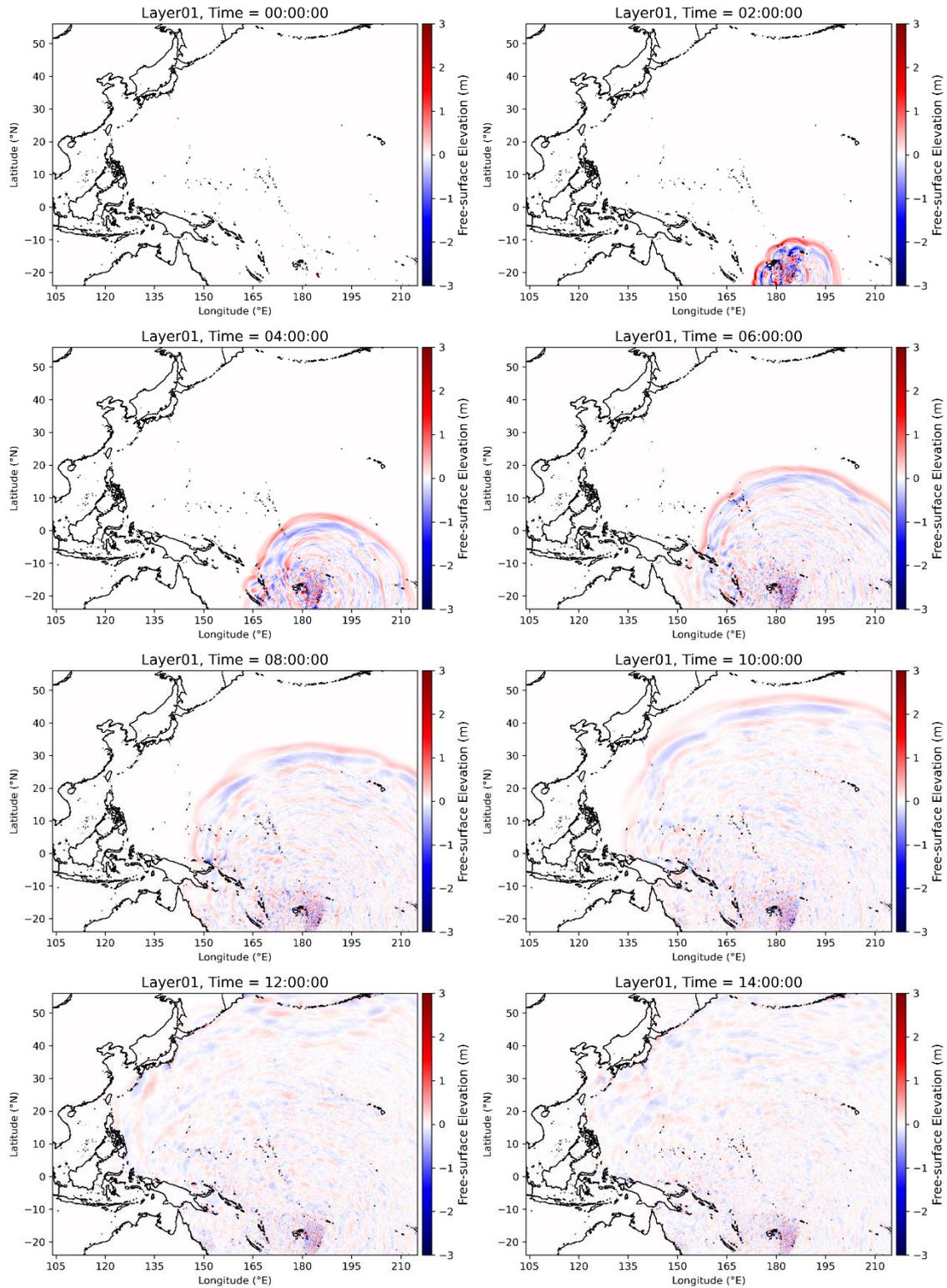


圖 107，半太平洋區域之每 2 小時之海嘯傳遞圖快照。

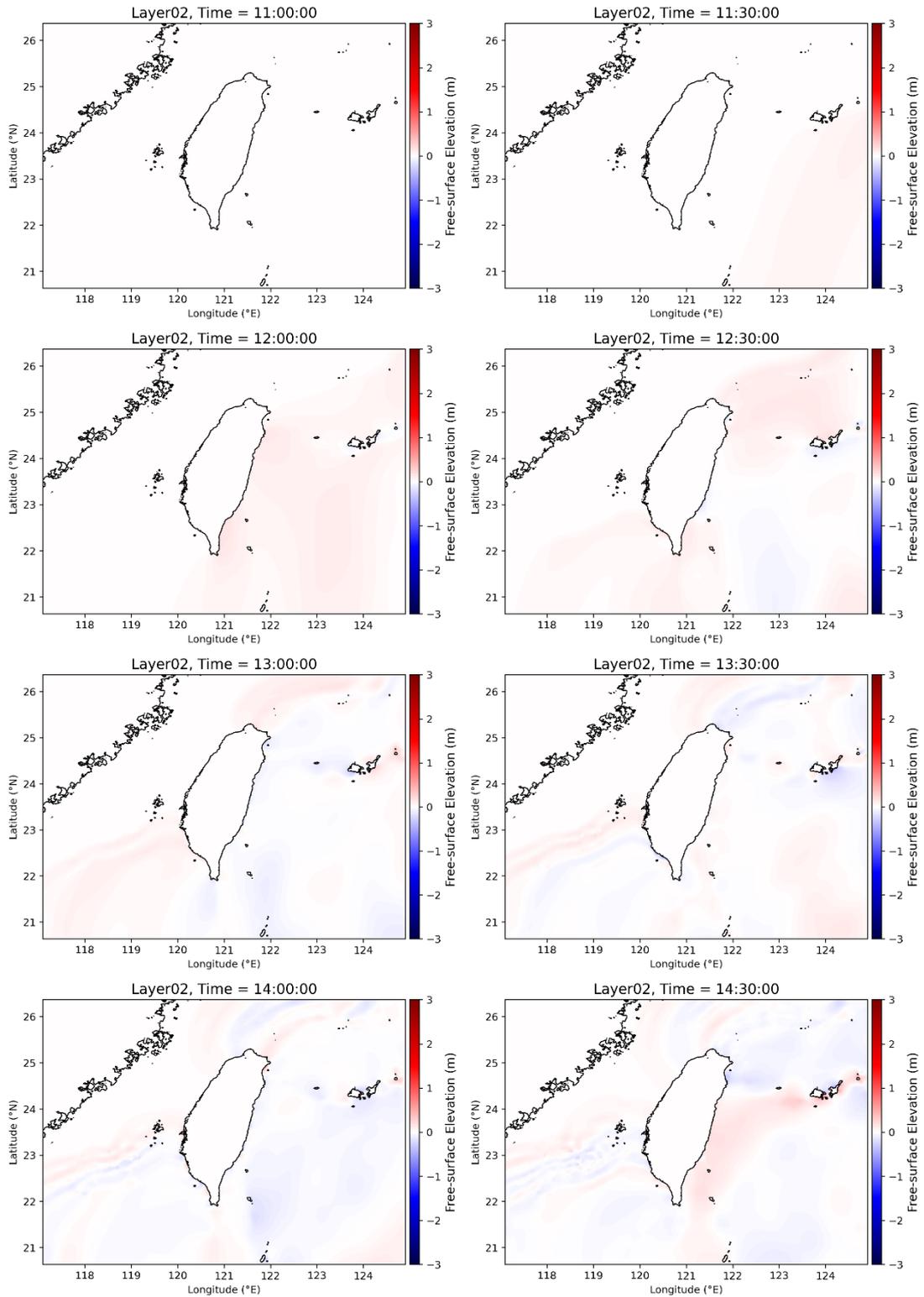


圖 108，臺灣地區之每 30 分鐘之海嘯傳遞圖快照。

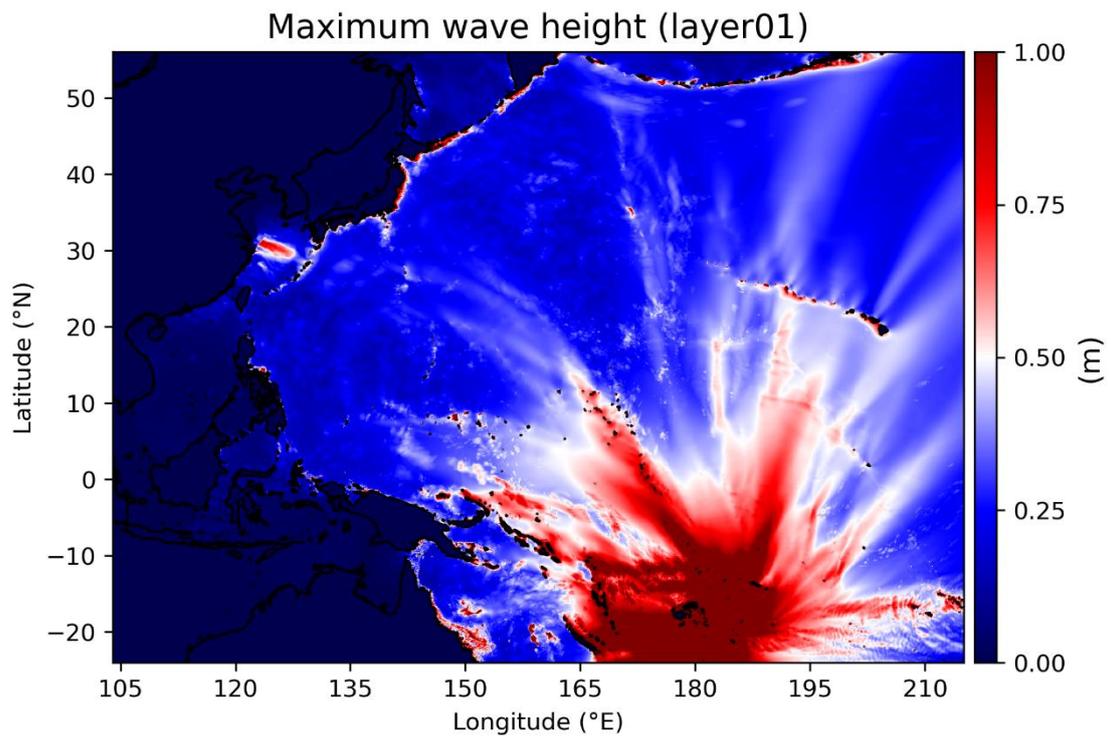


圖 109，第一層（半太平洋）海嘯最大波高圖。

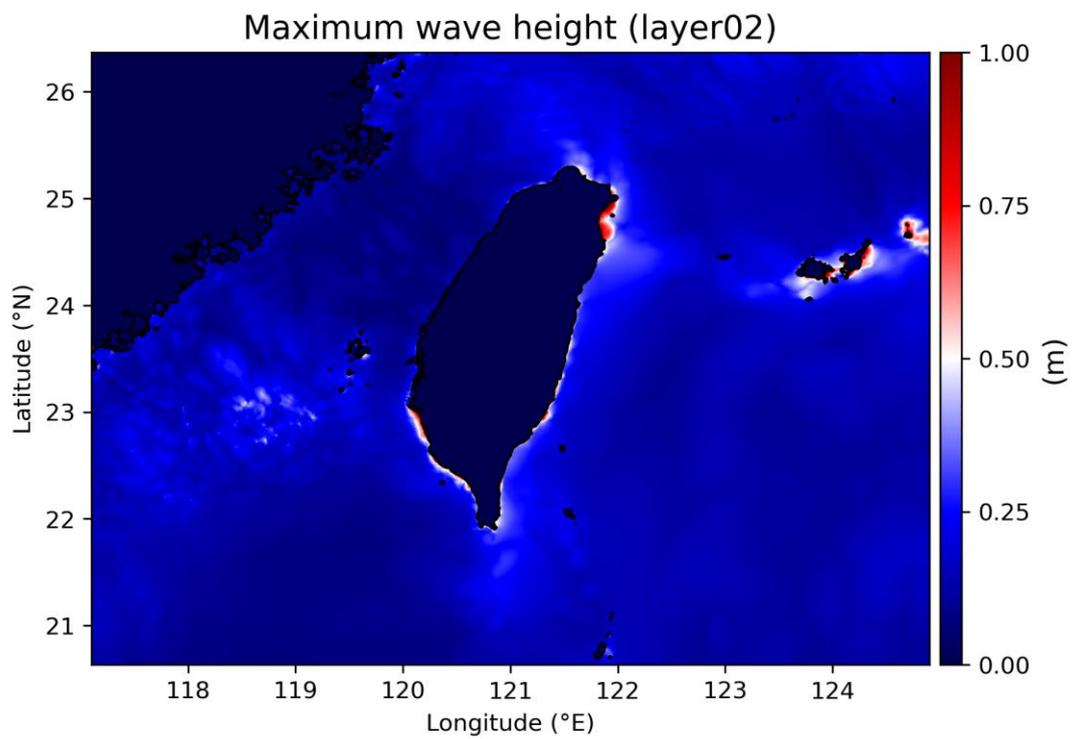


圖 110，第二層（臺灣地區）海嘯最大波高圖。

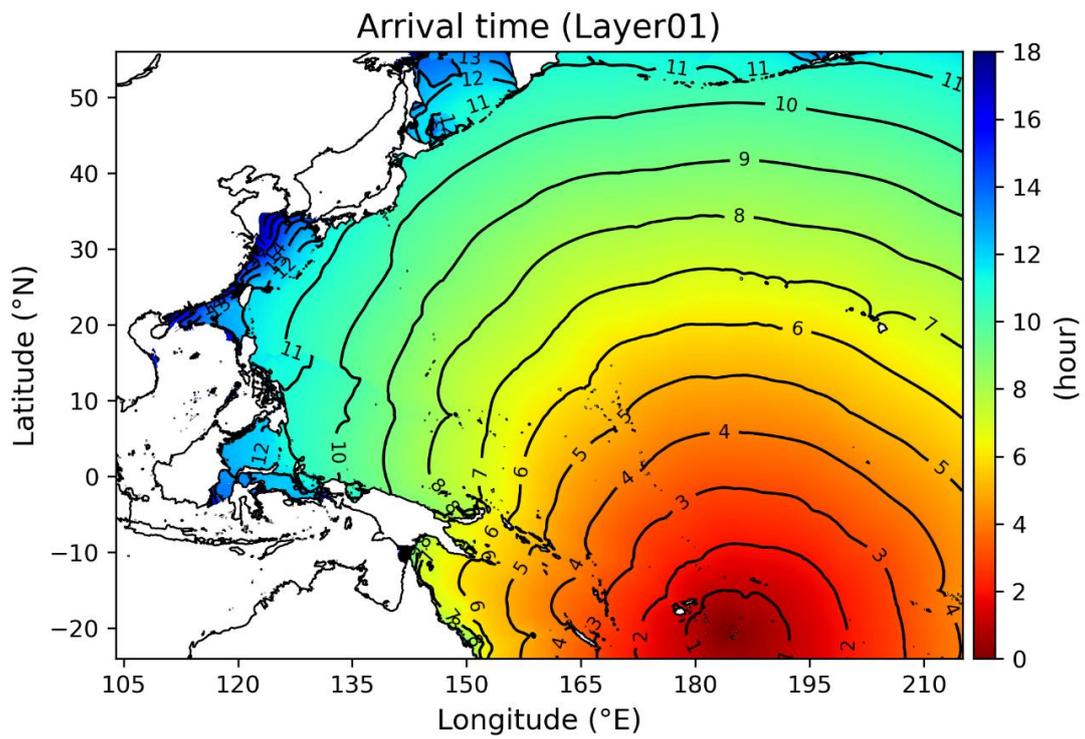


圖 111，第一層（半太平洋）海嘯到時圖。

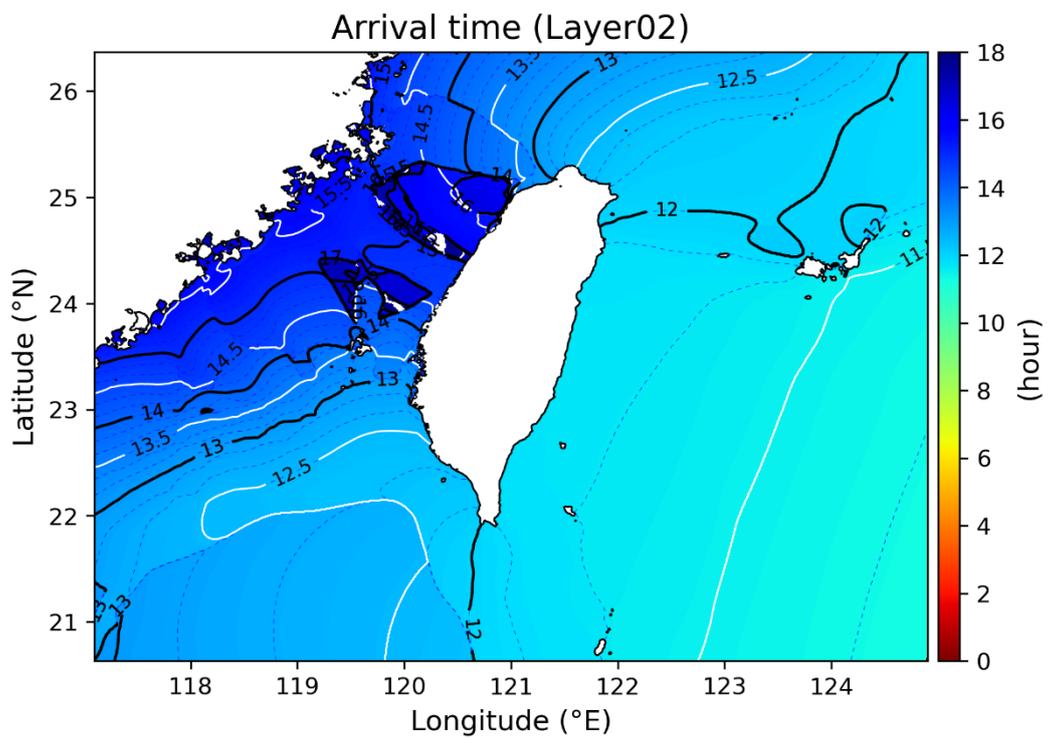


圖 112，第二層（臺灣地區）海嘯到時圖。

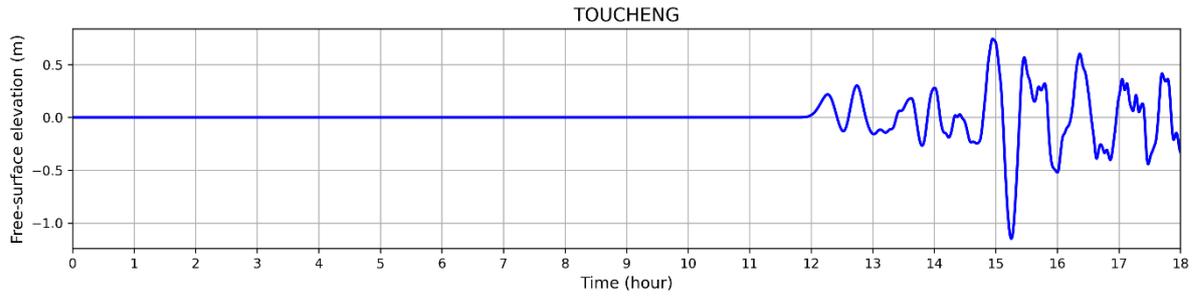


圖 113，臺灣沿海港口 – 頭城之海嘯時序歷線。

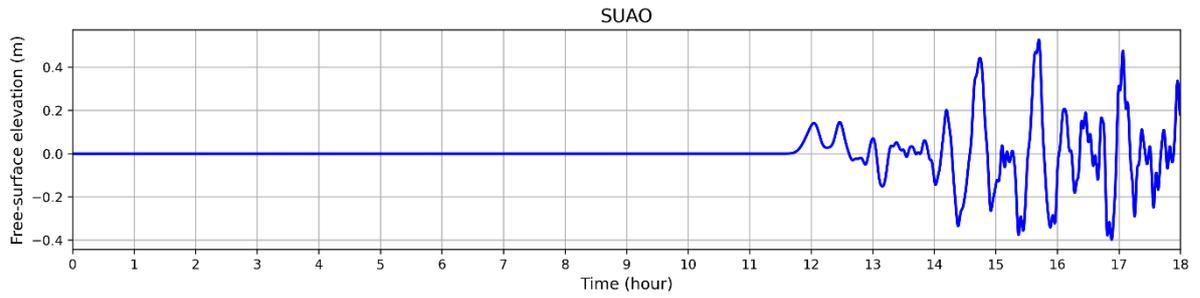


圖 114，臺灣沿海港口 – 蘇澳之海嘯時序歷線。

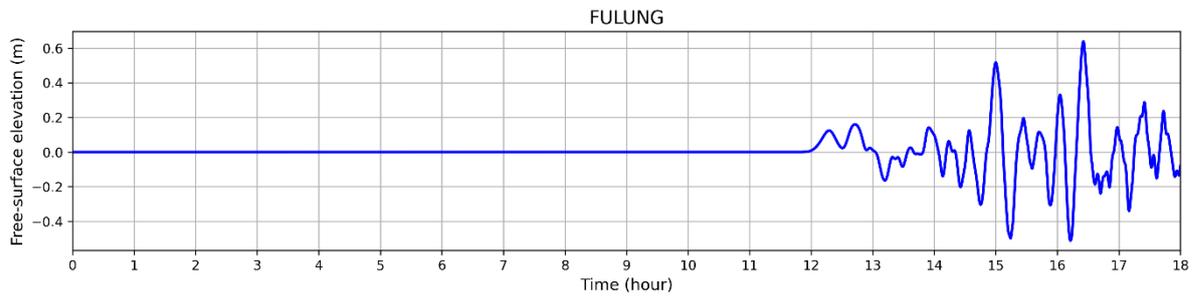


圖 115，臺灣沿海港口 – 福隆之海嘯時序歷線。

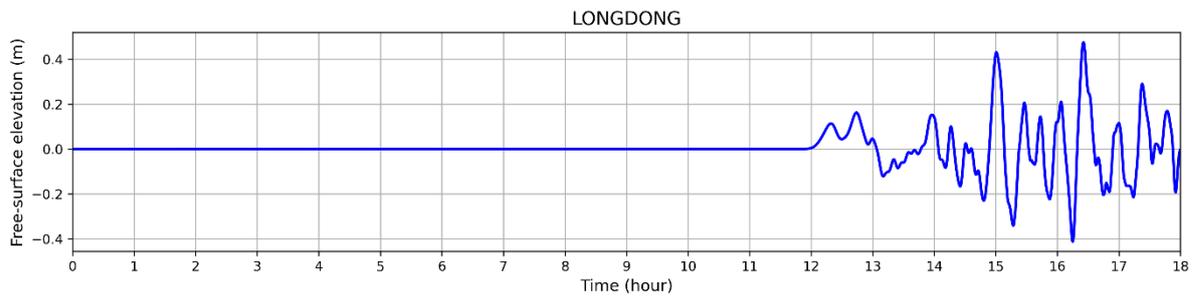


圖 116，臺灣沿海港口 – 龍洞之海嘯時序歷線。

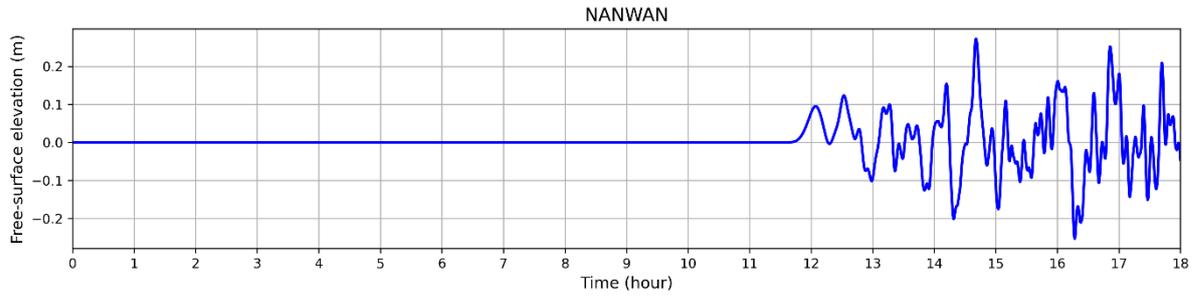


圖 117，臺灣沿海港口 – 南灣之海嘯時序歷線。

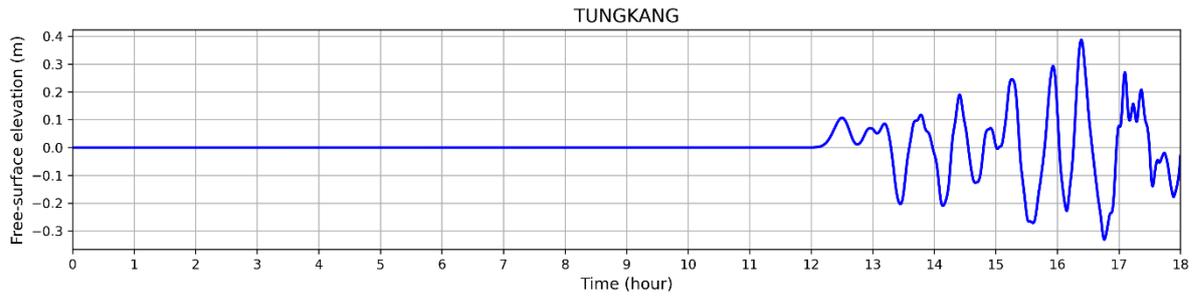


圖 118，臺灣沿海港口 – 東港之海嘯時序歷線。

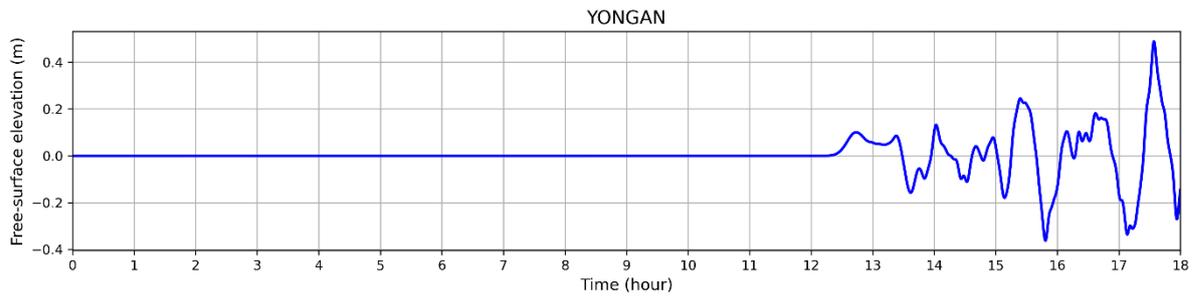


圖 119，臺灣沿海港口 – 永安（高雄市永安區）之海嘯時序歷線。

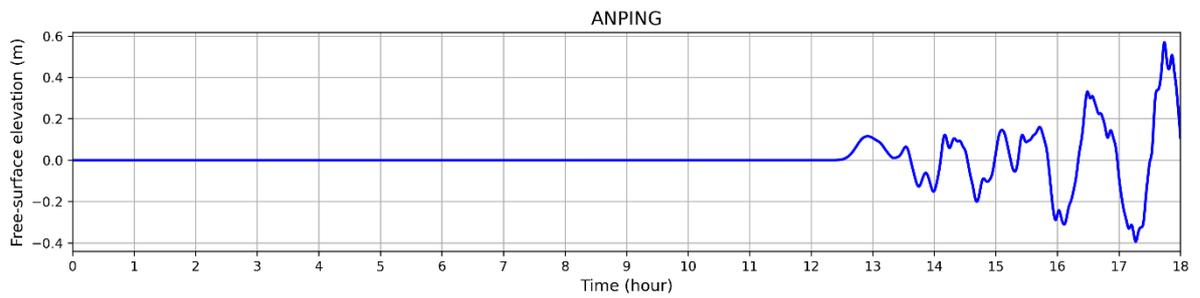


圖 120，臺灣沿海港口 – 安平之海嘯時序歷線。

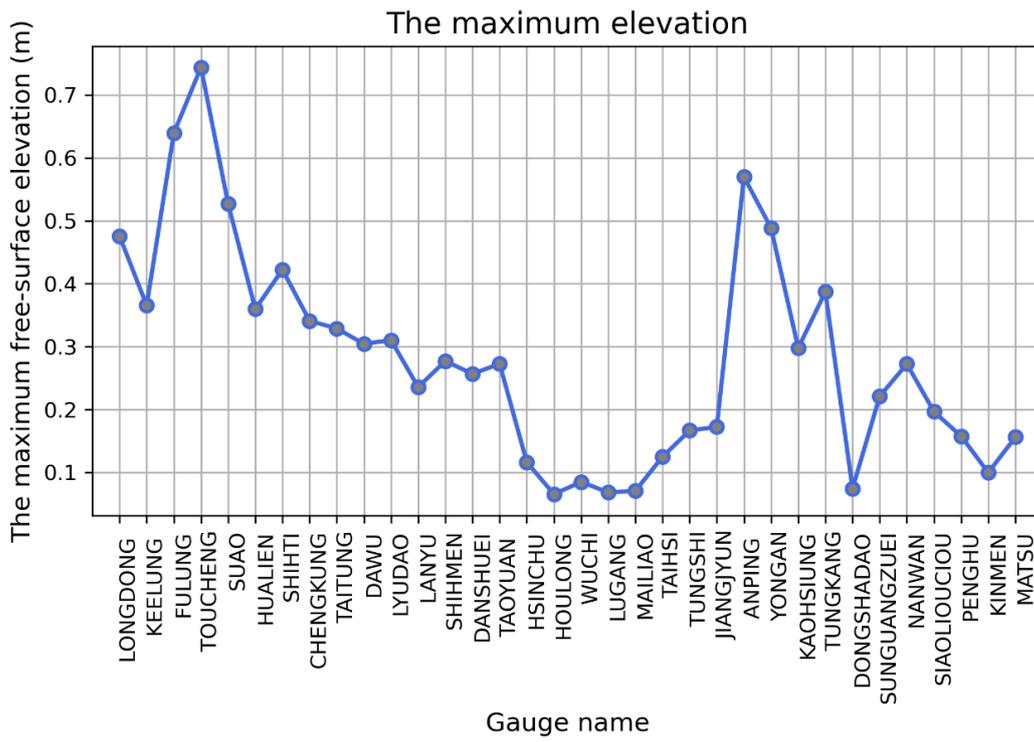


圖 121，臺灣沿海港口最大水位圖。

7.2.2 線性修正之應用

上一章 7.2.1 為初步模擬之結果，本章將針對 7.2.1 之成果進行線性修正。修正方法為，使用臺灣各地潮位站之原始紀錄資料，進行去潮汐之動作。將去潮完之水位變動資料與初步模擬之時序歷線圖做比對，取出各自之最大水位數字並相除（初步模擬之值為分母），如此就取得修正係數。因 2022 年東加火山事件其複雜之爆發與海嘯產生機制，比對時僅考慮最大水位之數值，不考慮最大水位之到時。最後再將初步模擬之海嘯最大波高圖、臺灣沿海港口海嘯時序歷線圖、臺灣沿海港口最大水位圖等三種圖資給予修正係數並繪製新產品圖，完成線性修正。

去潮汐之模組，使用 Python 之 4 階 Butterworth 濾波器，取 1 至 2 小時之高通濾波。潮位紀錄資料來源為「海象環境資訊平台」（網址：https://ocean.cwb.gov.tw/V2/data_interface/datasets）。

首先取兩個潮位站：臺灣東北之烏石潮位站與臺灣東南之成功潮位站，為計算修正係數之依據，此兩潮位站分別對應於 COMCOT 初步模擬中時序歷線圖之頭城以及成功兩地。圖 122 及圖 123 分別為烏石潮位站（Toucheng）及成功潮位站（Chengkung）之原始未去潮汐之潮位紀錄。圖中 X 軸之時間戳記始自 UTC 4:00（臺灣時間中午 12:00），對應 2022 年東加火山於 UTC 4:15 噴發之時間。

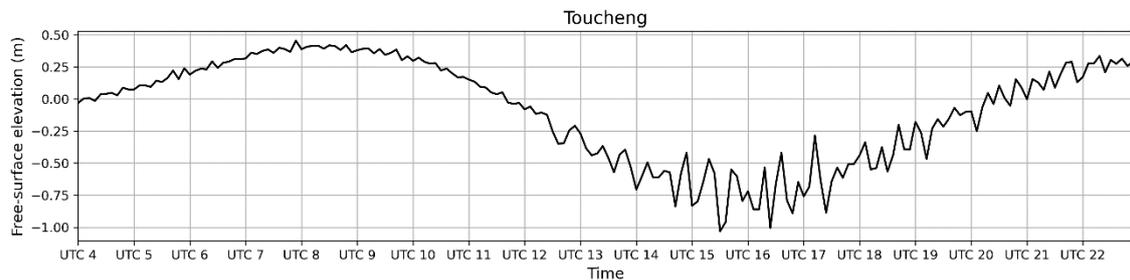


圖 122，烏石潮位站之原始未去潮汐之潮位紀錄。

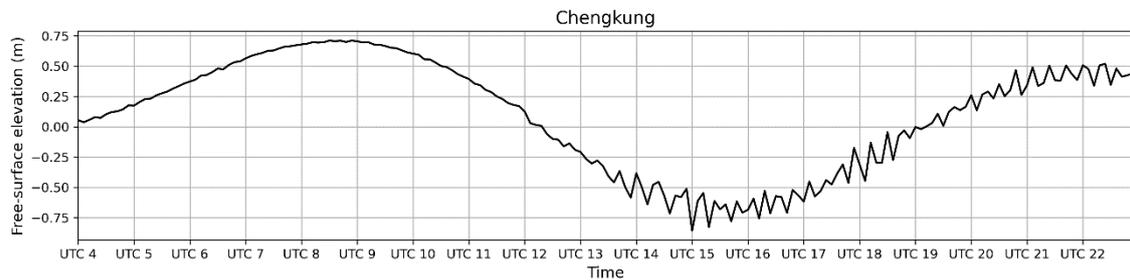


圖 123，成功潮位站之原始未去潮汐之潮位紀錄。

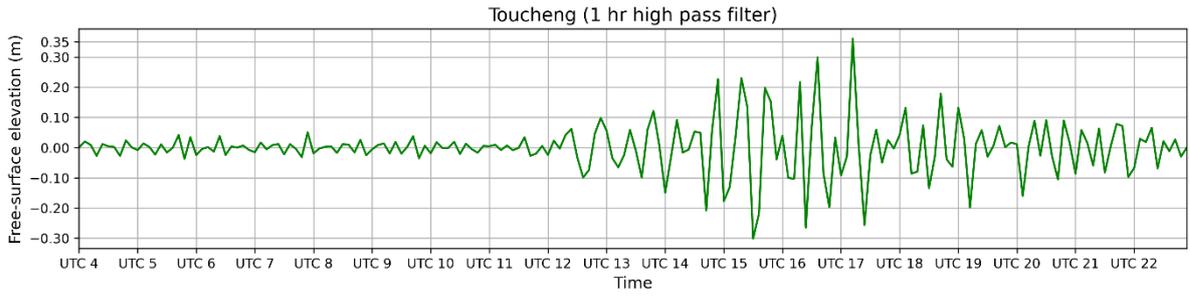


圖 124，烏石潮位站之已去潮水位變動時序歷線圖。

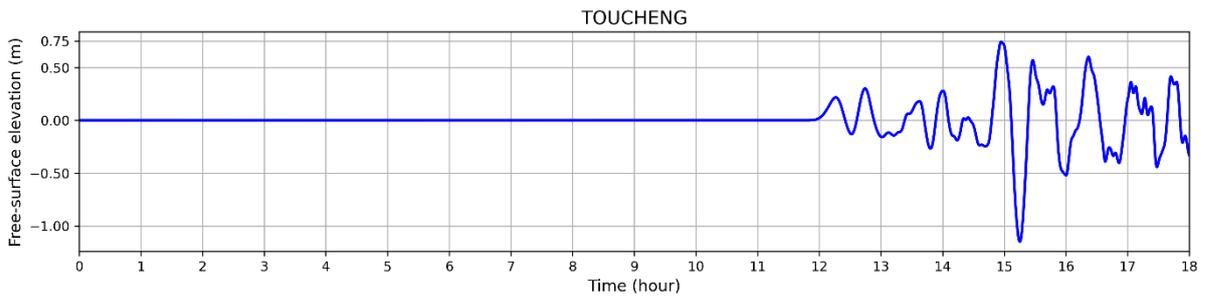


圖 125，COMCOT 模擬中頭城之時序歷線圖。

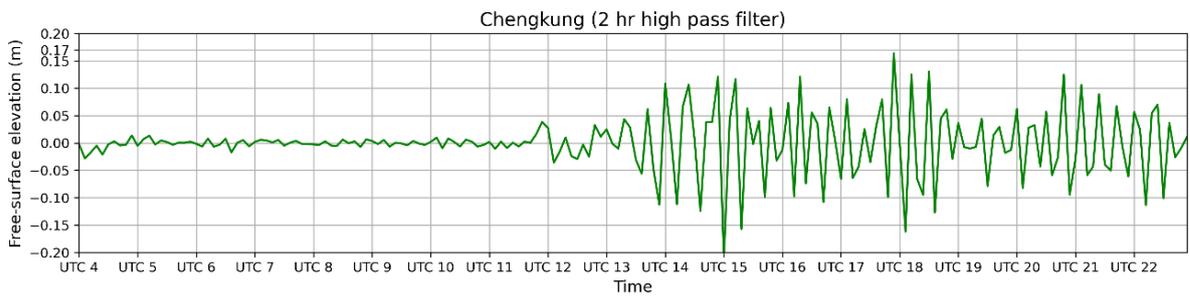


圖 126，成功潮位站之已去潮水位變動時序歷線圖。

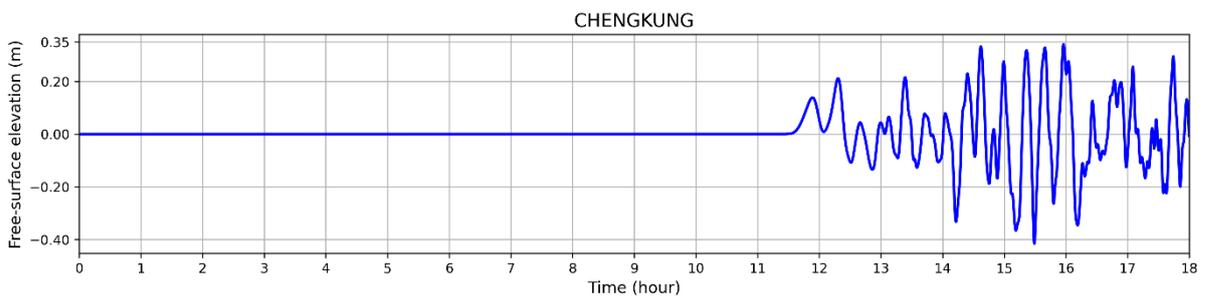


圖 127，COMCOT 模擬中成功之時序歷線圖。

圖 124 及圖 126 為經過去潮汐處理之水位變動資料，圖 125 及圖 127 為 COMCOT 初步模擬中頭城及成功之時序歷線，此四圖分別於 Y 軸各自標上最大水位之值。

接下來為觀察圖中數值以取得修正係數。圖 124 之烏石潮位站之最大水位約

為 0.35 公尺，圖 125 之 COMCOT 初步模擬中頭城之最大水位約為 0.75 公尺；圖 126 之成功潮位站之最大水位約為 0.17 公尺，圖 127 之 COMCOT 初步模擬中成功之最大水位約為 0.35 公尺。

- 頭城之修正係數為： $0.35 / 0.75 = 0.4666 \approx 0.5$
- 成功之修正係數為： $0.17 / 0.35 = 0.4857 \approx 0.5$

兩地之修正係數經計算結果，大約為 0.5，因此將此修正係數放入火山海嘯速算系統內經過修改，產出之海嘯最大波高圖、臺灣沿海港口海嘯時序歷線圖、臺灣沿海港口最大水位圖，如以下所示。

圖 128 為 COMCOT 初步模擬之第一層（半太平洋）海嘯最大波高圖，圖 129 為經過線性修正後之第一層海嘯最大波高圖。圖 130 為 COMCOT 初步模擬之第二層（臺灣）海嘯最大波高圖，圖 131 為經過線性修正後之第二層海嘯最大波高圖。圖 132 至圖 139 分別為 COMCOT 初步模擬及經過線性修正之沿海港口海嘯時序歷線圖，以頭城、成功、南灣、安平等四地為例。圖 140 及圖 141 分別為 COMCOT 初步模擬及經過線性修正之沿海港口最大水位圖。

海嘯最大波高圖經修正後，紅色區域明顯縮小許多。因為是線性修正，因此沿海港口海嘯時序歷線圖之波型不改變，沿海港口最大水位圖之各站變化曲線不改變，兩圖有改變的僅有 Y 軸數值上之變化。經修改後，臺灣各地之最大水位均未超過 0.5 公尺。

本次線性係數修正範例為針對歷史案例，因此修正係數之取得方式為使用臺灣潮位站紀錄，未來若太平洋遠地發生火山型海嘯，修正係數之取得方式建議利用 DART 浮標紀錄，或是各國之新聞報導，使得針對臺灣地區進行預報。

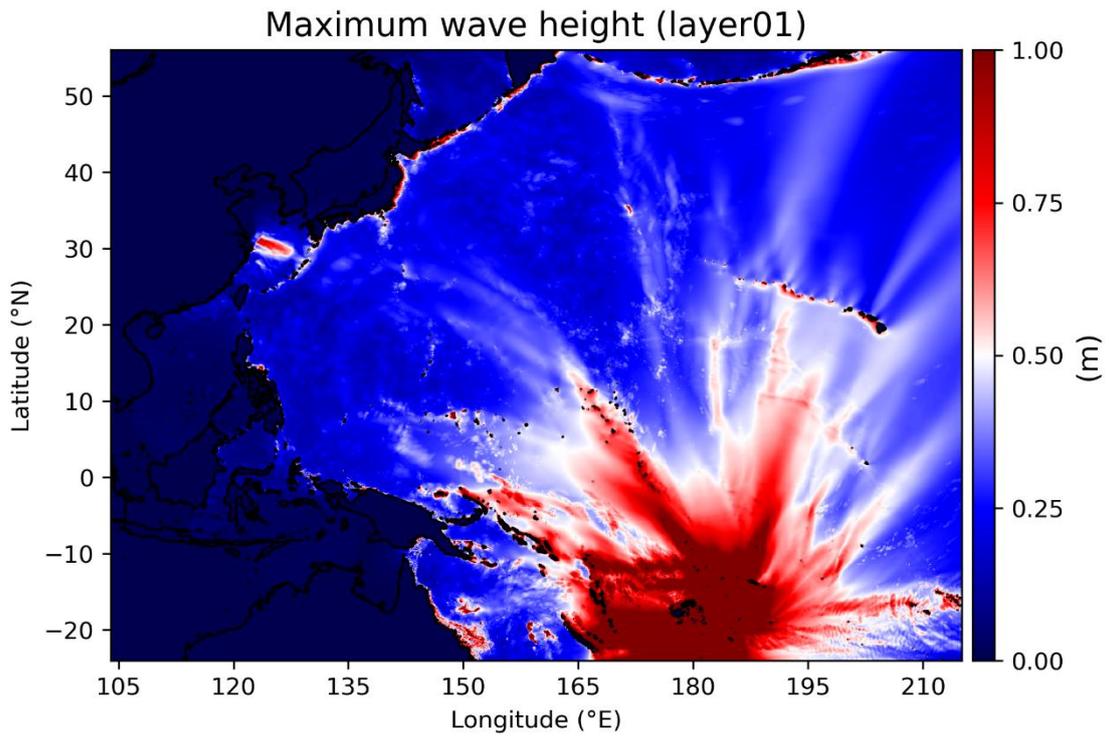


圖 128，COMCOT 初步模擬，第一層之海嘯最大波高圖。

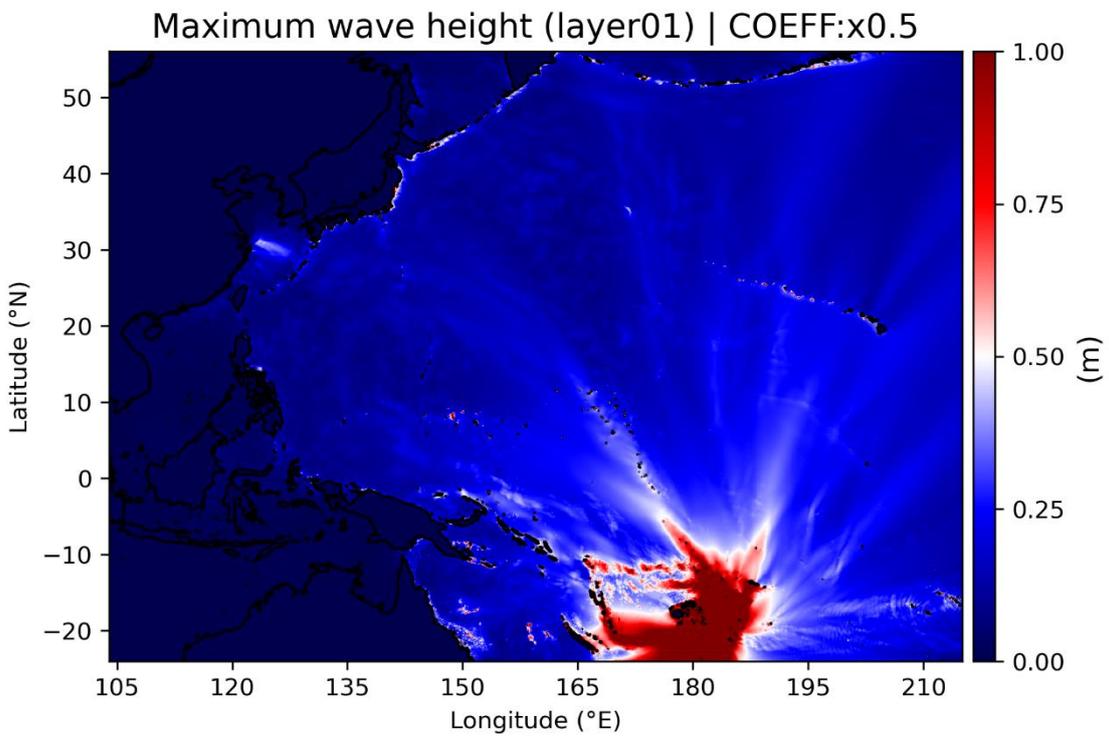


圖 129，經過線性修正，第一層之海嘯最大波高圖。

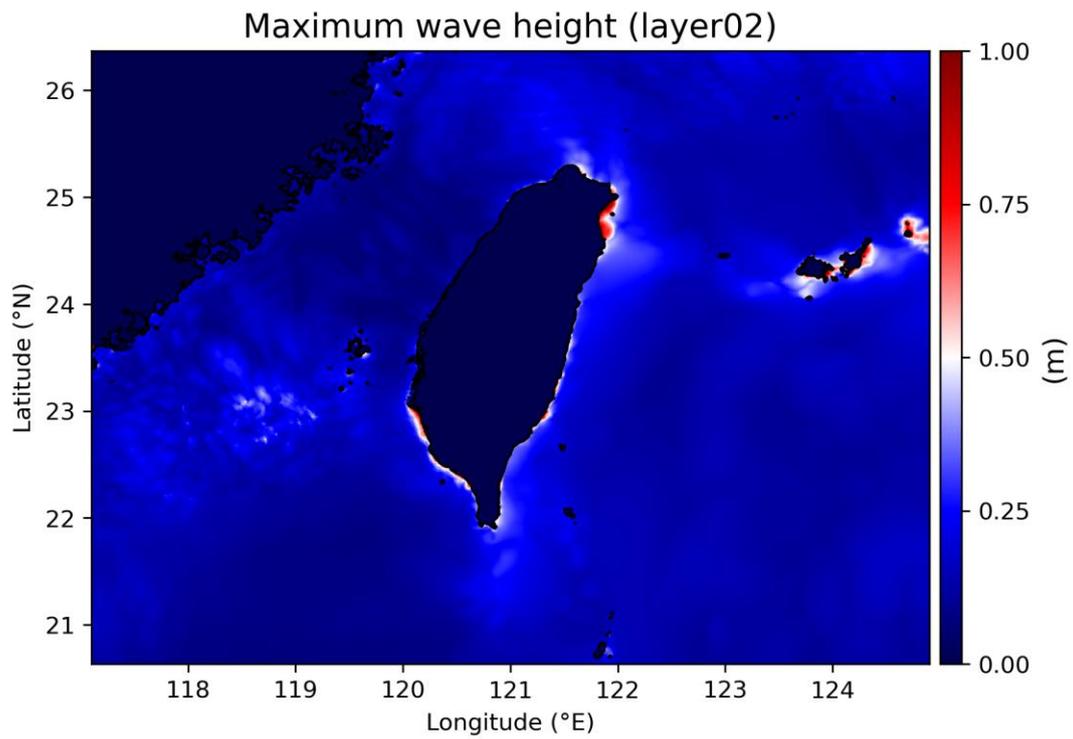


圖 130，COMCOT 初步模擬，第二層之海嘯最大波高圖。

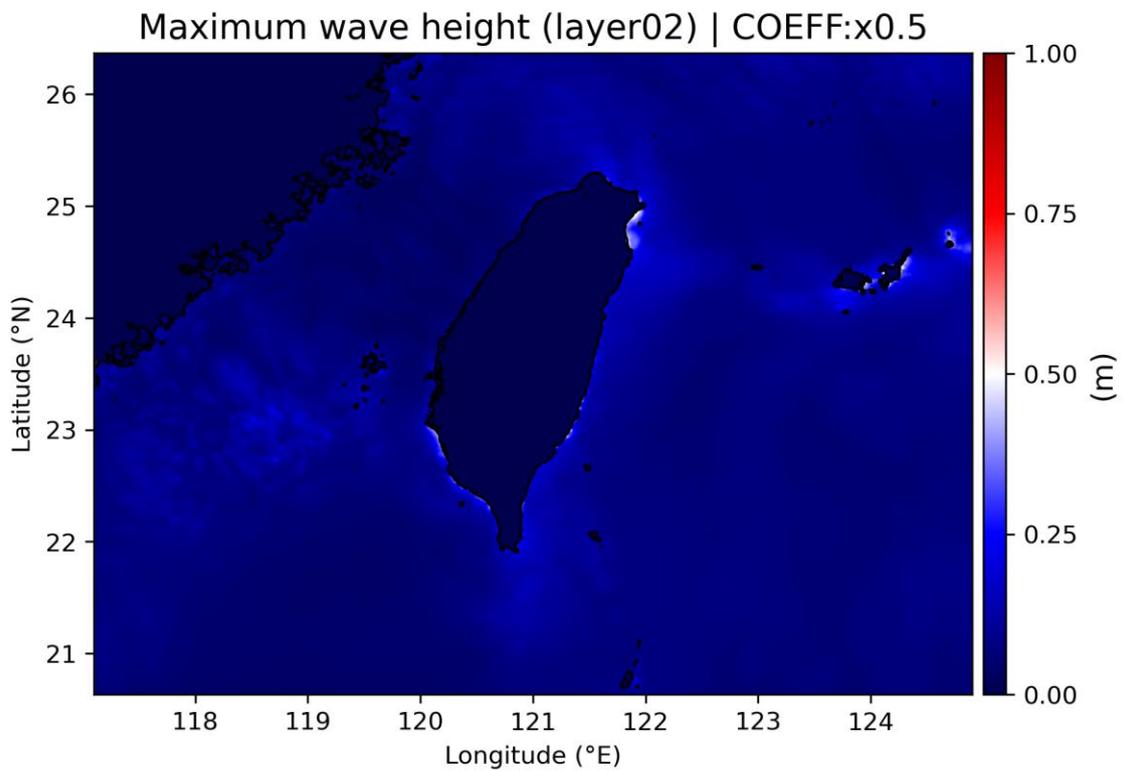


圖 131，經過線性修正，第二層之海嘯最大波高圖。

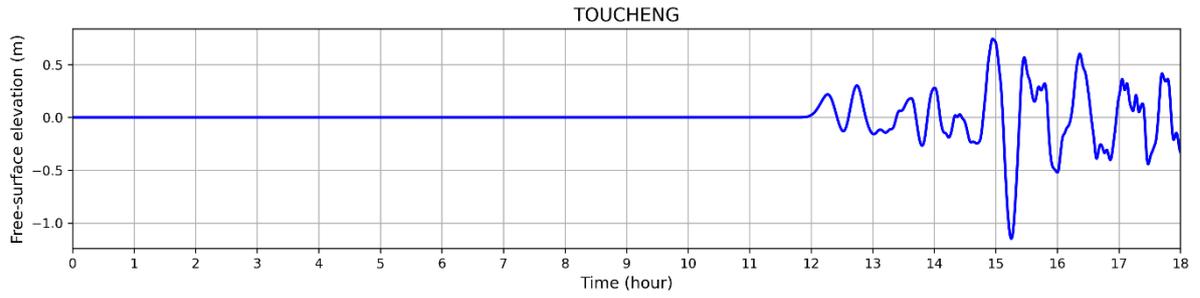


圖 132，COMCOT 初步模擬 – 頭城之海嘯時序歷線。

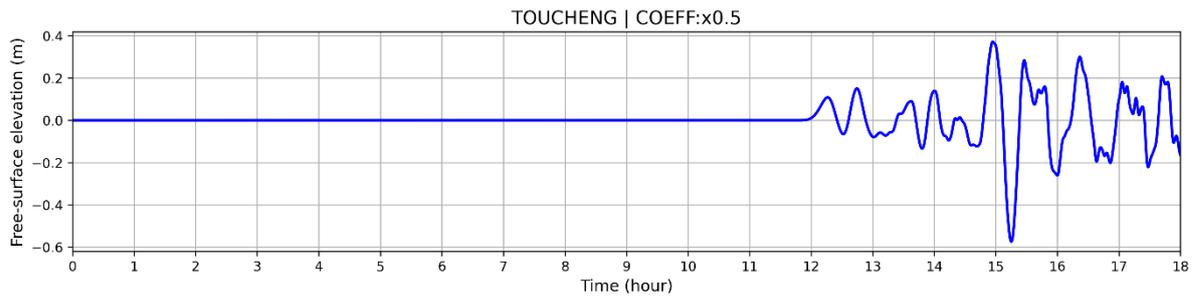


圖 133，經過線性修正 – 頭城之海嘯時序歷線。

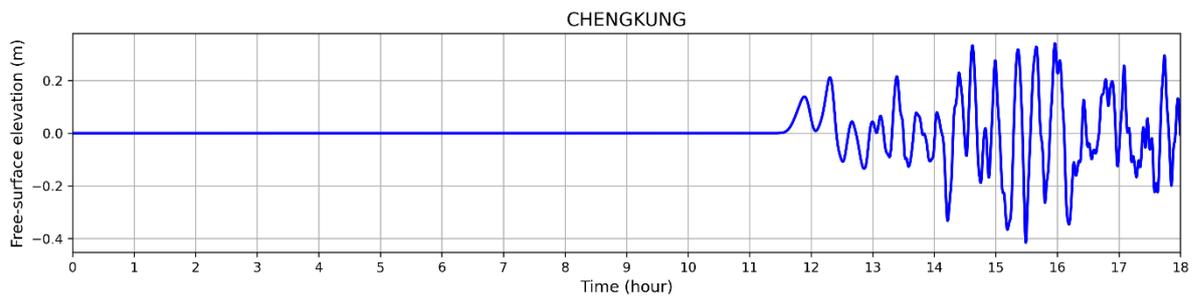


圖 134，COMCOT 初步模擬 – 成功之海嘯時序歷線。

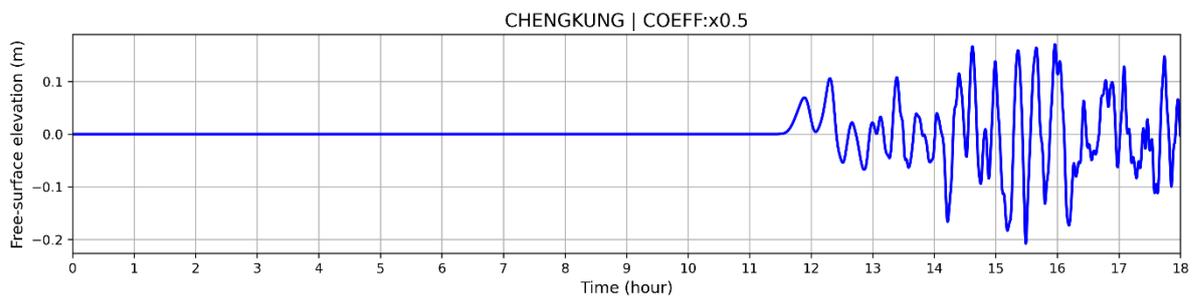


圖 135，經過線性修正 – 成功之海嘯時序歷線。

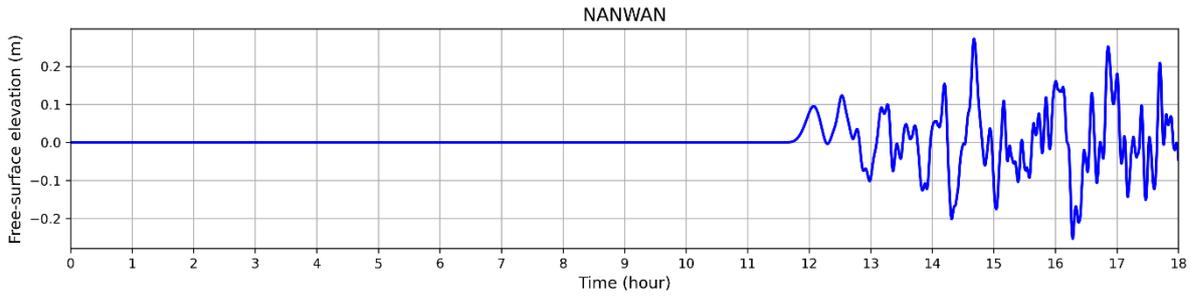


圖 136，COMCOT 初步模擬 – 南灣之海嘯時序歷線。

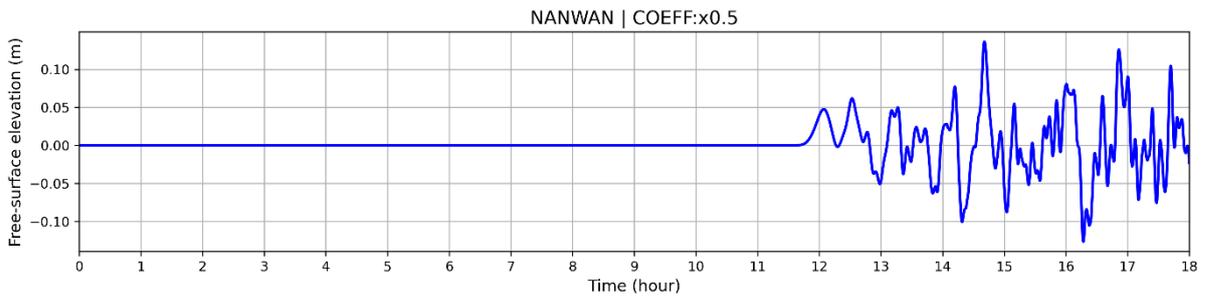


圖 137，經過線性修正 – 南灣之海嘯時序歷線。

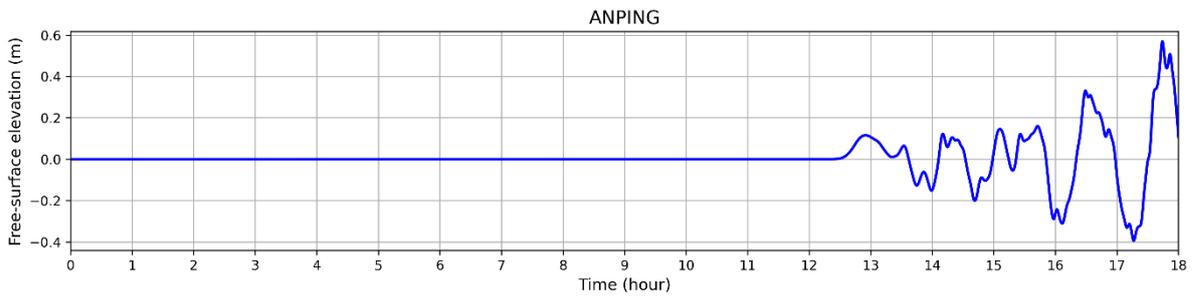


圖 138，COMCOT 初步模擬 – 安平之海嘯時序歷線。

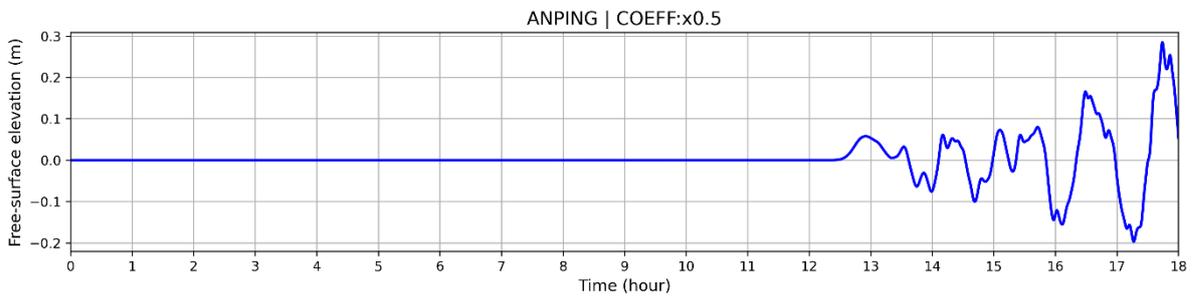


圖 139，經過線性修正 – 安平之海嘯時序歷線。

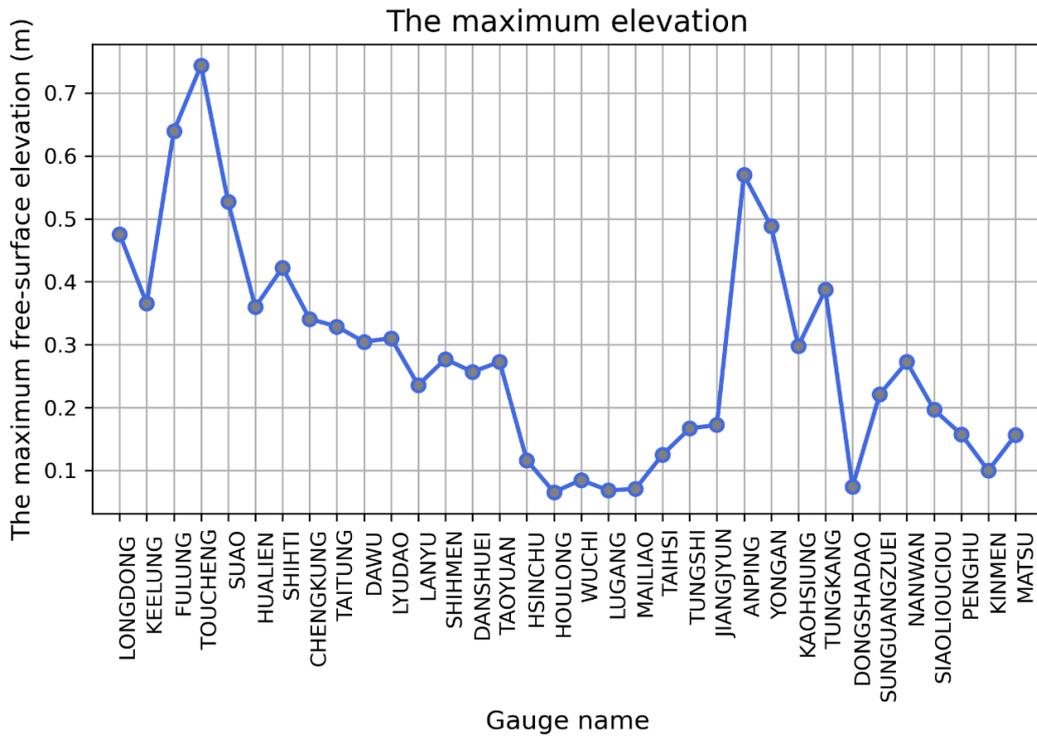


圖 140，COMCOT 初步模擬 - 臺灣沿海港口最大水位圖。

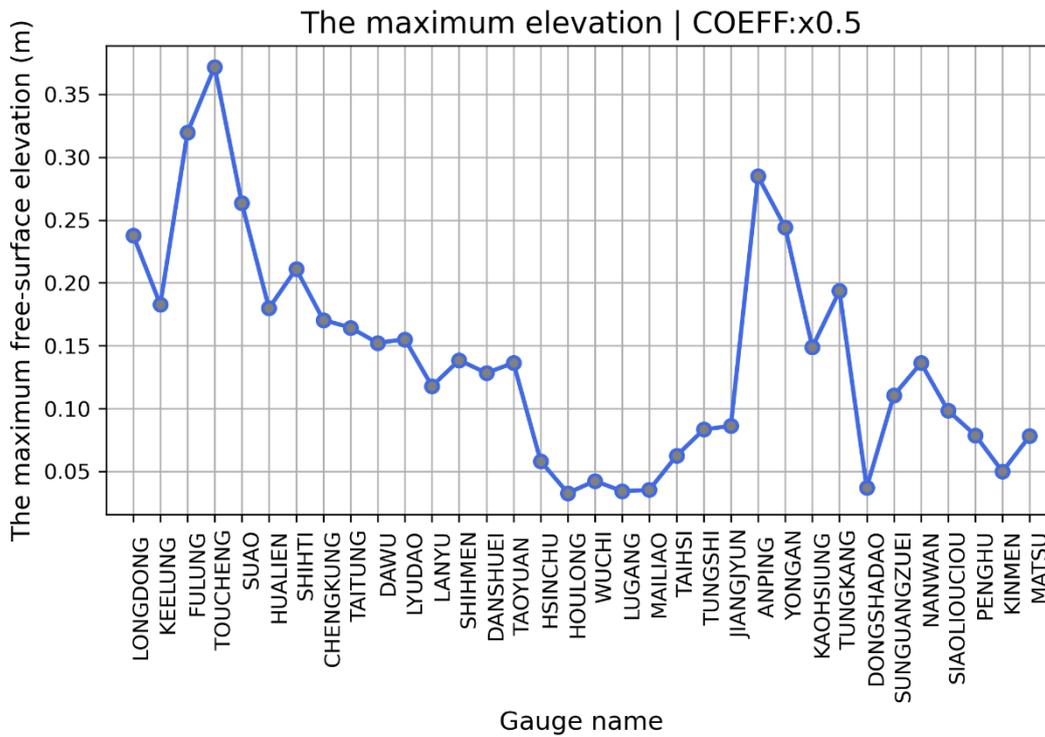


圖 141，經過線性修正 - 臺灣沿海港口最大水位圖。

八、火山海嘯速算系統之操作說明

本章為詳細介紹火山海嘯速算系統之操作流程。首先 8.1 章介紹此速算系統之程式環境需求；8.2 章詳細介紹速算系統內各資料夾、檔案之功能；8.3 章為逐步敘述速算系統使用者介面之各項功能及操作流程。

火山型海嘯速算系統使用者介面之功能、特色介紹：

- 供使用者輸入火山（海嘯源）之經緯度
- 經緯度欄位包含十進位制、度分秒之兩種形式
- 供使用者調整點源型海嘯源（圓柱）之參數設定
- 供使用者選擇 COMCOT 內不同網格之解析度
- 地圖介面供使用者點選火山（海嘯源）之地點
- 地圖介面包含四種不同大小之區域：
臺灣、西北太平洋、半太平洋、全太平洋
- 地圖介面含有火山地點選單，供使用者針對特定火山快速選定地點，不須一一輸入其經緯度、圓柱大小
火山地點選單包含：龜山島、彭佳嶼、基隆外海無名火山、日本小笠原群島福德岡之場、東加火山
- 使用者可於投入 COMCOT 模擬前無限次更動點源型海嘯源之設定參數，無須關閉及重啟系統
- 點源型海嘯源設置完成後，投入 COMCOT 模擬前之初始圖可直接於地圖介面上看到
- 系統自動判斷經緯度，給予使用者適當大小之模擬區域
- COMCOT 模擬完成後，畫面上即自動跳出產品成果圖展示
- 供使用者執行線性係數之調整與應用
- 使用者可針對不同次之模擬結果執行線性修正法，無須重新投入 COMCOT 模擬新案例
- 使用者可執行線性係數之不同數值間之調整，系統不會將前次調整之結果刪除
- 系統開啟時即套用初始值，為龜山島之地點及相應之圓柱參數，初次之使用者可直接完成點源之設置並立即進行 COMCOT 模擬

此火山型海嘯速算系統之使用者操作介面，包含左側之使用者輸入欄位、右側

之地圖介面，系統開啟時即套用龜山島之經緯度、點源型海嘯源參數。

系統需以下三項參數，方可建立點源型海嘯源以進行海嘯模擬：

- 火山（海嘯源）發生位置經緯度
- 點源型海嘯源（圓柱）之直徑及高度
- COMCOT 模擬系統之地形解析度選擇

第一項：火山（海嘯源）位置之經緯度，使用者可於輸入欄位中自行輸入，或於地圖介面上點擊滑鼠右鍵、火山選單快捷鈕，程式即自動選定海嘯點源位置。經緯度可填入十進位制，或度分秒之形式。系統初始值為龜山島之經緯度。

第二項：點源型海嘯源（圓柱）之參數，可依使用者需求於輸入欄位中自行輸入圓柱之直徑值、高度值，或使用火山選單快捷鈕，根據不同火山有對應之初始值。系統初始值為龜山島情境之直徑 10 公里、高 30 公尺。

第三項：COMCOT 模擬系統地形解析度，本速算系統提供多種不同地形解析度，配合使用者之需求可作變更，或套用系統預設之解析度。系統初始值為單一層之 0.5 弧分，僅模擬臺灣地區。當經緯度遠離臺灣地區時，系統模擬兩層，第一層為對應之太平洋區域，第二層為臺灣區域。

以上三項參數設定完成後，系統即自動生成點源型海嘯源初始檔。點源型海嘯源之初始水位圖將直接顯示於地圖介面上。使用者確認無須再更動參數後，系統自動將點源初始檔放至 COMCOT 內進行海嘯模擬。

模擬階段完成後即生成初步成果圖，分別為以下六種圖資（七個資料夾）：

- 海嘯初始波高圖
- 海嘯傳遞動畫、海嘯傳遞圖快照（分別存於兩個資料夾）
- 海嘯最大波高圖
- 海嘯到時圖
- 臺灣沿海港口海嘯時序歷線

臺灣沿海港口為環繞臺灣一周與綠島、蘭嶼、澎湖、金門、馬祖、東沙島等外島，共計 34 處地點。

- 臺灣沿海港口最大水位圖

隨著時間之發展，海嘯傳遞至 NOAA 之 DART 浮標、海嘯途經其他國家之新聞或潮位站紀錄，使用者可依據所記錄之波高進行線性修正，系統將繪出線性修正後之產品，線性修正為修正以下三種圖：

- 海嘯最大波高圖
- 臺灣沿海港口海嘯時序歷線
- 臺灣沿海港口最大水位圖

整個使用者介面之系統運作流程圖於圖 142 所示。

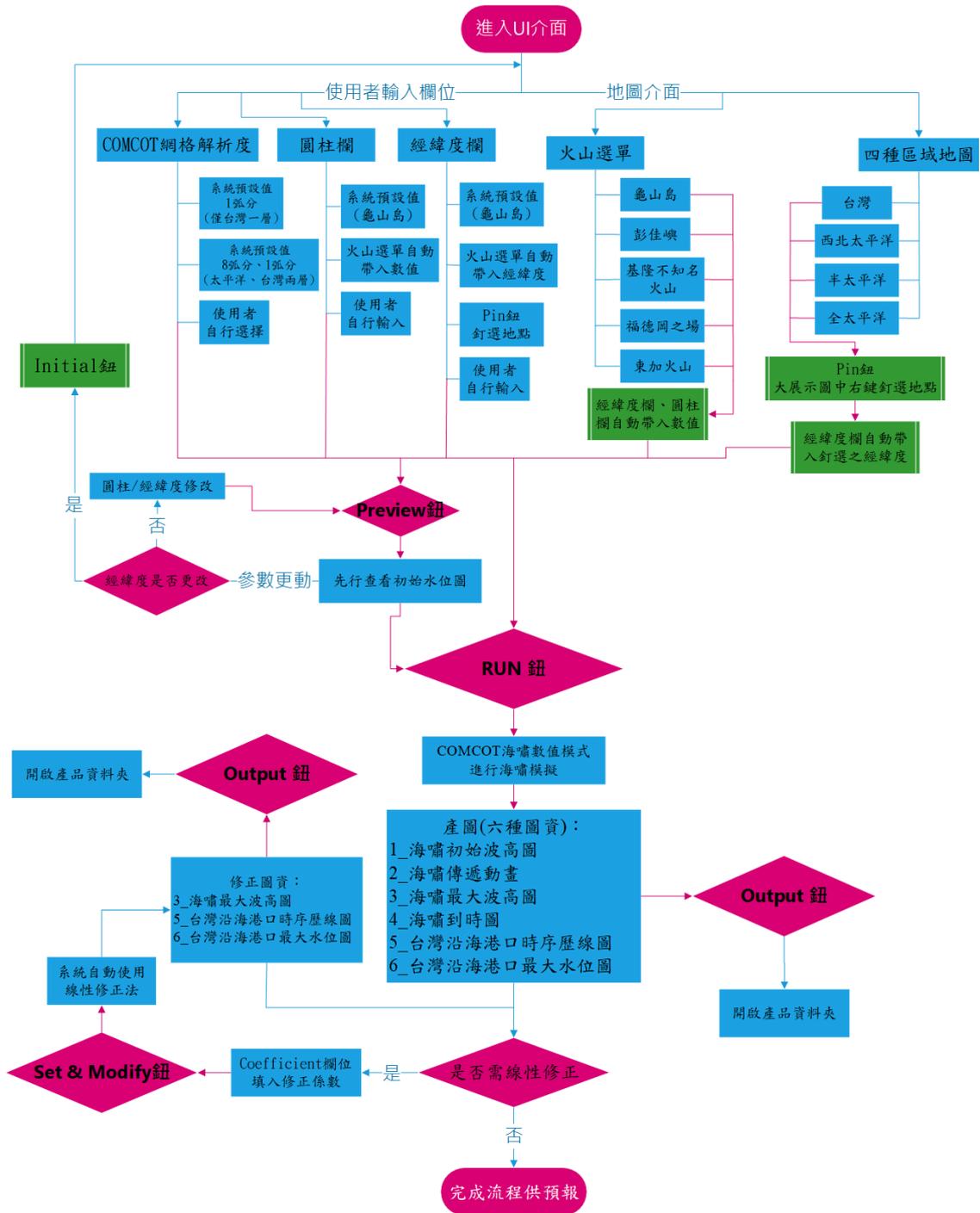


圖 142，使用者介面之系統運作流程圖。

8.1 Python 環境需求

本系統皆使用 Python 進行編寫，因此使用者之電腦環境需安裝 Python 3 以上之版本，如尚未安裝 Python，可至 Anaconda 官網進行下載安裝 (<https://www.anaconda.com/download>)。

另外，本速算系統之使用者操作介面 (UI，下文有時以「UI」代替使用者操作介面之詞) 透過 Python 之 tkinter 模組進行編寫，且 Python 繪圖、計算等皆須使用模組，因此使用者需先將模組下載建立於 Python 環境中方可使用。Python 模組通常使用內建之 pip 下載，如遇上 pip 版本太過老舊，於命令提示字元內執行：

「python -m pip install --upgrade pip」，即開始自動升級 pip。

安裝模組方式：點擊「命令提示字元」→ 輸入「pip install <module name>」

(pip、install、<module name>之間須加一個空白鍵。<module name>為模組之名稱，輸入時不需加<>。)

即開始自動安裝。例如下載 numpy 模組：輸入「pip install numpy」

以下列出本系統所需之模組。

速算系統需要之模組：

- tkinter ----- 因需要 tk 較完整之模組，請於 ActiveState 網站內 (網址；<https://www.activestate.com/products/tcl/>) 下載 ActiveTcl，下載前須先 email 或 Github 註冊。
- glob ----- 「pip install glob2」
- numpy ----- 「pip install numpy」
- matplotlib
- shutil
- Pillow ----- 「pip install Pillow」
- imageio.v2 ----- 「pip install imageio」

(如於 Python 環境中執行 import imageio.v2 有問題時，則於命令提示字元內執行「pip install -U imageio --user」即可解決。)

- alive_progress ----- 「pip install alive_progress」

8.2 速算系統內檔案介紹

本速算系統資料夾 (預設 CWA_Volcanic_Tsunami_System，使用者可自行更名) 可放置於任何硬碟中，因系統內程式編寫皆使用相對路徑，因此不用擔心需要手動改路徑之問題。圖 143 為速算系統資料夾，以下將此資料夾路徑簡稱為 HOME。

速算系統資料夾總大小約為 10.8GB。接下來將一一介紹各檔案。

名稱	修改日期	類型	大小
__pycache__	2023/12/25 下午 03:...	檔案資料夾	
comcot_ctl_clean	2023/12/25 下午 03:...	檔案資料夾	
COMCOT1.806_win_clean	2023/12/25 下午 03:...	檔案資料夾	
COMCOT1.806_win_volcanic_tsu_system	2023/12/25 下午 03:...	檔案資料夾	
maps	2023/12/25 下午 03:...	檔案資料夾	
UI_module	2023/12/25 下午 03:...	檔案資料夾	
COMCOT1.806_win_clean	2023/12/17 下午 05:...	壓縮的 (zipped) ...	925,635 KB
CWB_COMCOT_Volcanic_Tsunami_Fast_Calculation_System	2023/10/25 上午 03:...	Windows 批次檔...	1 KB
Vol_Tsu_FC_System_UI	2023/11/29 上午 11:...	PY 檔案	69 KB
Vol_Tsu_FC_System_UI_support	2023/10/25 上午 03:...	PY 檔案	1 KB
volcano_list	2023/11/2 下午 06:34	文字文件	2 KB

圖 143，速算系統資料夾。

- **__pycache__**：此檔案夾為 Python 模組應用時自動生成，此資料夾無須理會，即使不小心刪除了亦無妨，執行速算系統時即自動生成。

__pycache__ 2023/11/11 下午 07:... 檔案資料夾

- **comcot_ctl_clean**：此資料夾內僅存放一個乾淨之 comcot.ctl 檔，請勿刪除此資料夾。如對 COMCOT 不熟悉之使用者，亦請勿更動此乾淨 comcot.ctl 檔內之內容。

comcot_ctl_clean 2023/11/11 下午 07:... 檔案資料夾

- **COMCOT1.806_win_clean**：此資料夾內為乾淨之 COMCOT1.806，供使用者可自行複製。底下亦有此資料夾之壓縮檔。

COMCOT1.806_win_clean 2023/11/11 下午 07:... 檔案資料夾

- **COMCOT1.806_win_volcanic_tsu_system**：本系統之預設 COMCOT 模擬資料夾。如模擬完後想儲存事件，使用者可自行更改資料夾之名稱，記得再複製一份乾淨之 COMCOT1.806 即可繼續使用。

COMCOT1.806_win_volcanic_tsu_system 2023/11/11 下午 07:... 檔案資料夾

- **maps**：此資料夾內存放本系統所使用之地圖檔，請勿刪除此資料夾。

- maps 2023/11/11 下午 07:... 檔案資料夾
- UI_module : 此資料夾內存放本系統所使用之 py 檔，請勿刪除此資料夾。
- UI_module 2023/11/11 下午 07:... 檔案資料夾
- COMCOT1.806_win_clean.zip : 此為乾淨 COMCOT1.806 之壓縮檔，供使用者自行解壓縮使用。
- COMCOT1.806_win_clean 2023/11/11 下午 06:... 壓縮的 (zipped) ... 925,633 KB
- CWB_COMCOT_Volcanic_Tsunami_Fast_Calculation_System.bat : 此批次檔為進入本系統使用者操作介面 (UI) 之檔案，左鍵雙擊即立即跳出 UI 畫面。(如遇上雙擊後畫面立即消失、UI 啟動不了之情形，請於 HOME 之路徑欄上執行 cmd，輸入「python Vol_Tsu_FC_System_UI.py」執行，並查看跳出之 Error 敘述。)
- CWB_COMCOT_Volcanic_Tsunami_Fast_Calculation_System 2023/10/25 上午 03:... Windows 批次檔... 1 KB
- Vol_Tsu_FC_System_UI.py : 此 py 檔為本系統 UI 之檔案，使用者無須操作本檔案，亦請勿刪除。
- Vol_Tsu_FC_System_UI 2023/11/2 下午 11:41 PY 檔案 119 KB
- Vol_Tsu_FC_System_UI_support.py : 此 py 檔為本系統 UI 之檔案，使用者無須操作本檔案，亦請勿刪除。
- Vol_Tsu_FC_System_UI_support 2023/10/25 上午 03:... PY 檔案 1 KB
- volcano_list.txt : 此文字檔內紀錄臺灣周圍及太平洋上之海底火山地點，使用者可根據檔案裡面之內容輸入經緯度座標。
- volcano_list 2023/11/2 下午 06:34 文字文件 2 KB

8.2.1 資料夾 comcot_ctl_clean

此資料夾內僅一個檔案：乾淨之 comcot.ctl 檔。此 ctl 檔為 COMCOT 模擬之控制檔，使用者於 UI 操作火山經緯度.....等等設定後，速算系統會複製此乾淨 ctl 檔至 HOME，因此此 ctl 檔請勿刪除。

本機磁碟 (D:) > CWA_Volcanic_Tsunami_System > comcot_ctl_clean

名稱	修改日期	類型	大小
 comcot	2023/11/1 下午 03:44	CTL 檔案	20 KB

圖 144，資料夾 comcot_ctl_clean 內容。

8.2.2 資料夾 / 壓縮檔 COMCOT1.806_win_clean

此資料夾存放乾淨之 COMCOT1.806 windows 版。HOME 內亦有此資料夾之壓縮檔，此資料夾與壓縮檔內檔案資料皆相同。

圖 145 僅截此資料夾之一小部分。

「0_1_plot_Initial_free_surface.py」、「0_2_plot_Tsunami_propagation.py」……等等之 py 檔皆為繪圖之檔案。

「ts_location.rec」及「ts_name.rec」為臺灣沿海港口之位置及名稱，應用於臺灣沿海港口時序歷線圖中，如需新增 DART 站點等等位置，使用者可於模擬前自行新增。

「XYZ_」開頭之 xyz 檔為 COMCOT 內所使用之地形檔。

名稱	修改日期	類型	大小
dll	2023/12/17 下午 05:41	檔案資料夾	
Scaling_Law_V2.0_with_DLL	2023/12/17 下午 05:41	檔案資料夾	
00_clean	2023/11/26 下午 09:37	Windows 批次檔...	1 KB
00_RUN_COEFF_MODIFY	2023/11/26 下午 08:35	Windows 批次檔...	1 KB
00_RUN_COMCOT_PY	2023/11/25 下午 10:33	Windows 批次檔...	1 KB
0_1_plot_Initial_free_surface.ipynb	2023/11/26 上午 12:35	IPYNB 檔案	5 KB
0_1_plot_Initial_free_surface	2023/12/6 上午 11:25	PY 檔案	4 KB
0_2_plot_Tsunami_propagation.ipynb	2023/11/2 上午 04:12	IPYNB 檔案	19 KB
0_2_plot_Tsunami_propagation	2023/11/26 上午 01:43	PY 檔案	8 KB
0_3_plot_Maximum_wave_height.ipynb	2023/11/2 上午 04:12	IPYNB 檔案	6 KB
0_3_plot_Maximum_wave_height	2023/11/26 上午 01:50	PY 檔案	5 KB
0_3_plot_Maximum_wave_height_COEFF	2023/11/26 下午 08:55	PY 檔案	5 KB
0_4_plot_Arrival_time.ipynb	2023/11/2 上午 04:13	IPYNB 檔案	8 KB
0_4_plot_Arrival_time	2023/11/26 上午 01:56	PY 檔案	7 KB
0_5_plot_Time_history_free_surface_elevation.ipynb	2023/10/31 下午 09:32	IPYNB 檔案	3 KB
0_5_plot_Time_history_free_surface_elevation	2023/11/26 上午 01:57	PY 檔案	2 KB
0_5_plot_Time_history_free_surface_elevation_COEFF	2023/11/26 下午 08:56	PY 檔案	2 KB
0_6_plot_Gauge_maximum.ipynb	2023/10/31 下午 09:32	IPYNB 檔案	3 KB
0_6_plot_Gauge_maximum	2023/11/26 上午 02:09	PY 檔案	2 KB

圖 145，資料夾 COMCOT1.806_win_clean 內容。

8.2.3 資料夾 COMCOT1.806_win_volcanic_tsu_system

此資料夾為 UI 經過火山條件初始設定後執行 COMCOT 模擬系統、執行線性係數修正之預設資料夾。使用者可於模擬前或模擬後自行更改資料夾名稱，若於模擬前更改，請於 HOME 中之 UI_module 資料夾內之 comcot_system_folder_name.txt 檔案內修改為更改後之資料夾名稱；若於模擬後更改，如需進行線性修正的話，請於 HOME 中之 UI_module 資料夾內之 coefficient_comcot_folder_name.txt 檔案內修改為更改後之資料夾名稱。更改上述 txt 檔之詳細操作，請參照「8.2.5 資料夾 UI_module」章節。

圖 146 為已執行 COMCOT 模擬完後之樣貌，有 01_、02_、03_..... 等等之產品圖資料夾，這些資料夾將於下章節部分詳細敘述。

名稱	修改日期	類型	大小
📁 _pycache_	2023/11/8 下午 01:56	檔案資料夾	
📁 01_Initial_free-surface_elevation_py	2023/11/10 下午 04:...	檔案資料夾	
📁 02_Tsunami_propagation_gifs_py	2023/11/10 下午 04:...	檔案資料夾	
📁 02_Tsunami_propagation_pngs_py	2023/11/10 下午 04:...	檔案資料夾	
📁 03_The_maximum_wave_height_py	2023/11/10 下午 04:...	檔案資料夾	
📁 04_Arrival_time_py	2023/11/10 下午 04:...	檔案資料夾	
📁 05_Time_history_free_surface_elevation_py	2023/11/10 下午 04:...	檔案資料夾	
📁 06_Gauge_Maximum_py	2023/11/10 下午 04:...	檔案資料夾	
📁 Coefficient_modified	2023/11/11 下午 04:...	檔案資料夾	
📁 dll	2023/11/7 下午 09:55	檔案資料夾	
📁 Scaling_Law_V2.0_with_DLL	2023/11/7 下午 09:55	檔案資料夾	
📁 System_Initial_Simulation_files	2023/11/10 下午 06:...	檔案資料夾	
📄 00_RUN_COMCOT_PY	2023/10/25 下午 03:...	Windows 批次檔...	1 KB
📄 0_1_plot_Initial_free_surface.ipynb	2023/11/2 上午 04:10	IPYNB 檔案	5 KB
📄 0_1_plot_Initial_free_surface	2023/11/2 上午 04:11	PY 檔案	3 KB

圖 146，資料夾 COMCOT1.806_win_volcanic_tsu_system 內容（已經過 COMCOT 模擬後之樣貌）

8.2.4 資料夾 maps

此資料夾存放本系統 UI 所使用之地圖檔，請勿刪除此資料夾。有分為臺灣地區、西北太平洋、半太平洋、全太平洋四種地圖。

本機磁碟 (D:) > CWA_Volcanic_Tsunami_System > maps

名稱	修改日期	類型
📁 Half_Pacific	2023/11/11 下午 07:...	檔案資料夾
📁 NWPacific_map	2023/11/11 下午 07:...	檔案資料夾
📁 Pacific_map	2023/11/11 下午 07:...	檔案資料夾
📁 Taiwan_map	2023/11/11 下午 07:...	檔案資料夾
📁 UI_map_pic	2023/11/11 下午 07:...	檔案資料夾

圖 147，資料夾 maps 內容。

8.2.5 資料夾 UI_module

此資料夾存放本系統所使用之 py 檔，請勿刪除此資料夾。除了 py 檔，亦有三個 txt 文字檔。

- 0_total_run_tim : 此文字檔供使用者可自行更動 COMCOT 模擬中總模擬時間及傳遞動畫輸出檔案之時間間距。使用者可根據不同範圍之地區作模擬時間之調整。
- coefficient_comcot_folder_name.txt : 此文字檔內如圖 149 所示，為執行線性修正之預設資料夾名稱。預設文字為「COMCOT1.806_win_volcanic_tsu_system」。

如使用者需執行不同事件之線性修正，則進入此 txt 檔中修改成目標資料夾名稱。例如：COMCOT 初步模擬完東加火山海嘯事件後，使用者將「COMCOT1.806_win_volcanic_tsu_system」資料夾名稱改為「COMCOT1.806_win_2022Tonga」後，日後如需針對此事件進行線性修正，就進入此 txt 檔內將文字修改為「COMCOT1.806_win_2022Tonga」後存檔，即可利用 UI 介面執行線性修正。

- comcot_system_folder_nam.txt : 此文字檔內如圖 150 所示，為執行 COMCOT 之預設資料夾名稱。預設文字為「COMCOT1.806_win_volcanic_tsu_system」。

如使用者將乾淨之 COMCOT1.806_win_clean 解壓縮後更名為「COMCOT1.806_test_example」後，請於此檔案內將文字修改為「COMCOT1.806_test_example」後，執行 UI 介面並按下 RUN_COMCOT 鍵，系統即使用該名稱之資料夾來執行 COMCOT。

上述為一例子，建議使用者不需如此麻煩來更改此 txt 之內容，僅需於 COMCOT1.806_win_clean 解壓縮後來複製此 txt 之文字後，將解壓縮後之資料夾更名成預設之「COMCOT1.806_win_volcanic_tsu_system」即可。

本機 > 本機磁碟 (D:) > CWA_Volcanic_Tsunami_System > UI_module >

排序 檢視

名稱	修改日期	類型	大小
__pycache__	2023/12/17 下午 05:...	檔案資料夾	
pic	2023/12/25 下午 03:...	檔案資料夾	
__init__	2023/10/21 下午 04:...	PY 檔案	0 KB
0_total_run_time	2023/11/28 上午 02:...	文字文件	1 KB
COE_Folder_code	2023/11/26 上午 12:...	PY 檔案	2 KB
coefficient_comcot_folder_name	2023/11/25 下午 08:...	文字文件	1 KB
COMCOT_Folder_code	2023/11/26 上午 12:...	PY 檔案	1 KB
comcot_system_folder_name	2023/10/25 下午 01:...	文字文件	1 KB
initial_code	2023/11/28 下午 06:...	PY 檔案	6 KB
initial_map_code	2023/11/25 下午 07:...	PY 檔案	8 KB
map_Fukutoku_code	2023/11/29 上午 02:...	PY 檔案	7 KB

圖 148，資料夾 UI_module 內容。(僅截此資料夾之一小部分)



圖 149，coefficient_comcot_folder_name.txt 內容。

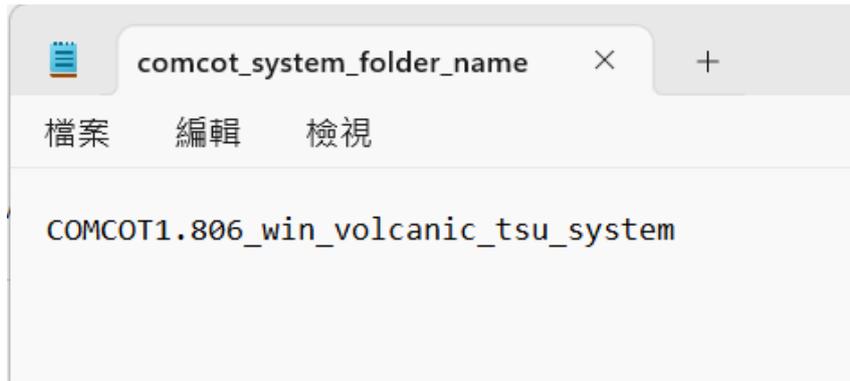


圖 150，comcot_system_folder_name.txt 內容。

8.2.6 文字檔 volcano_list

此文字檔內紀錄臺灣周圍及太平洋上之海底火山地點，如圖 151 所示，有 2022 年東加火山、1888 年巴布亞紐幾內亞之火山海嘯事件、2021 年日本小笠原群島福德岡之場之海底火山爆發事件、臺灣龜山島、基隆海底不知名火山……等等，其中，基隆海底不知名火山為李俊叡（2014）提及之不知名火山 V2。使用者可根據檔案裡面之內容輸入經緯度座標。

```
volcano_list
檔案 編輯 檢視

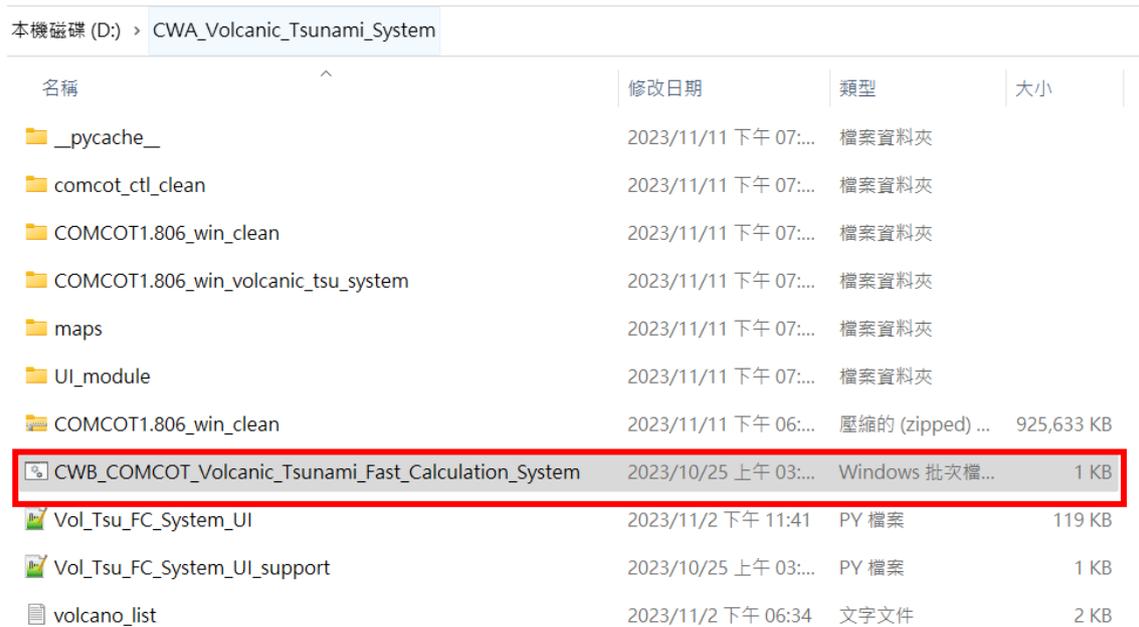
2022/01/15 Hunga Tonga-Hunga Ha'apai, Tonga :
lon : 184.615
lat : -20.55
-----
1888/03/13 Ritter Island, Papua New Guinea :
lon : 148.115
lat : -5.52
-----
Fukutoku-Okanoba, Japan 日本小笠原群島 福德岡ノ場 :
lon : 141.46666
lat : 24.28333
-----
Guishan Island, Taiwan 台灣 龜山島 :
lon : 121.951723
lat : 24.842972
-----
Pengjia Islet, Taiwan 台灣 彭佳嶼 :
lon : 122.079296
lat : 25.628749
-----
Mianhua Islet, Taiwan 台灣 棉花嶼 :
lon : 122.105526
lat : 25.484892
-----
Huaping Islet, Taiwan 台灣 花瓶嶼 :
lon : 121.946353
lat : 25.424102
-----
Keenlong Submarine volcano, Taiwan 台灣 基隆外海海底不知名火山 :
lon : 121.79
lat : 25.36
diameter : 8km
height : 5m
```

圖 151，volcano_list.txt 內容。

8.3 火山海嘯速算系統使用者介面 (UI) 之操作

8.3.1 開啟系統

左鍵雙擊「CWB_COMCOT_Volcanic_Tsunami_Fast_Calculation_System.bat」以執行火山海嘯速算系統使用者介面，應會跳出如圖 153 所示，背景執行一個黑底之 command line，正面顯示 UI，並請將此 UI 介面放至最大。



本機磁碟 (D:) > CWA_Volcanic_Tsunami_System

名稱	修改日期	類型	大小
^			
__pycache__	2023/11/11 下午 07:...	檔案資料夾	
comcot_ctl_clean	2023/11/11 下午 07:...	檔案資料夾	
COMCOT1.806_win_clean	2023/11/11 下午 07:...	檔案資料夾	
COMCOT1.806_win_volcanic_tsu_system	2023/11/11 下午 07:...	檔案資料夾	
maps	2023/11/11 下午 07:...	檔案資料夾	
UI_module	2023/11/11 下午 07:...	檔案資料夾	
COMCOT1.806_win_clean	2023/11/11 下午 06:...	壓縮的 (zipped) ...	925,633 KB
CWB_COMCOT_Volcanic_Tsunami_Fast_Calculation_System	2023/10/25 上午 03:...	Windows 批次檔...	1 KB
Vol_Tsu_FC_System_UI	2023/11/2 下午 11:41	PY 檔案	119 KB
Vol_Tsu_FC_System_UI_support	2023/10/25 上午 03:...	PY 檔案	1 KB
volcano_list	2023/11/2 下午 06:34	文字文件	2 KB

圖 152，執行火山海嘯速算系統使用者介面。

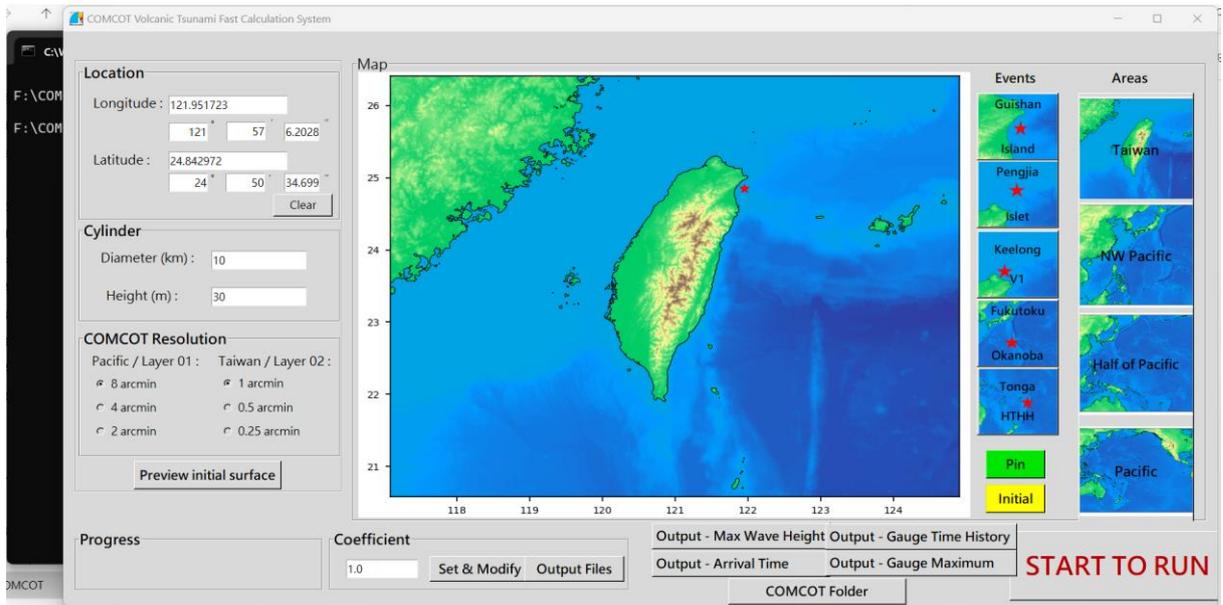


圖 153，跳出之畫面。

將 UI 畫面打開至最大後，如圖 154 所示，為擁有地圖介面之使用者操作介面。
圖 155 及圖 156 為 UI 之左側「使用者輸入欄位」及右側「地圖介面」。

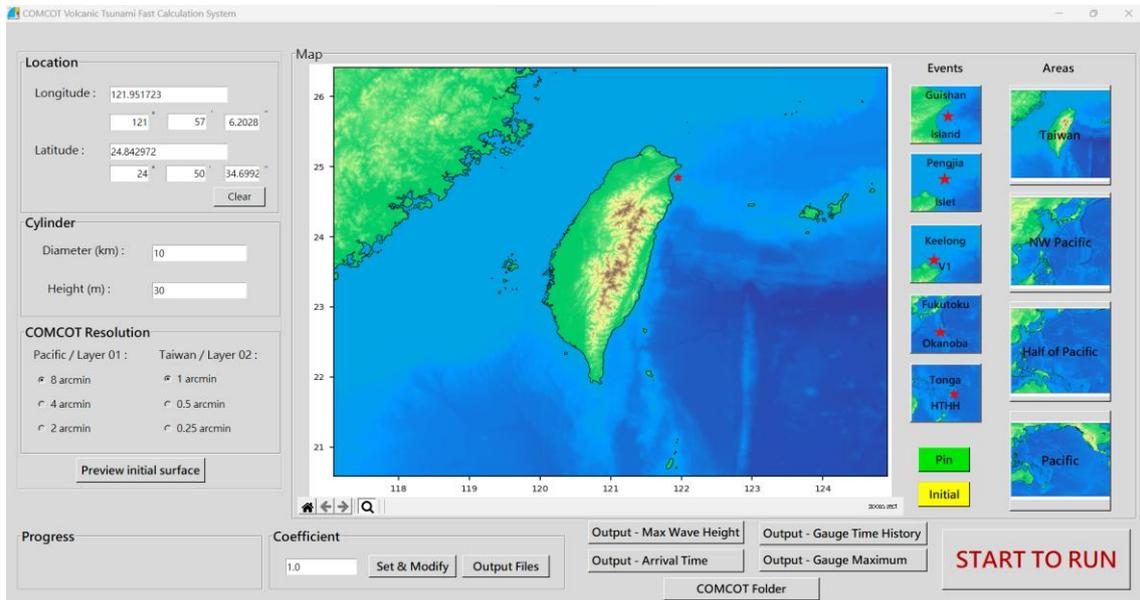


圖 154，UI 整體介面。

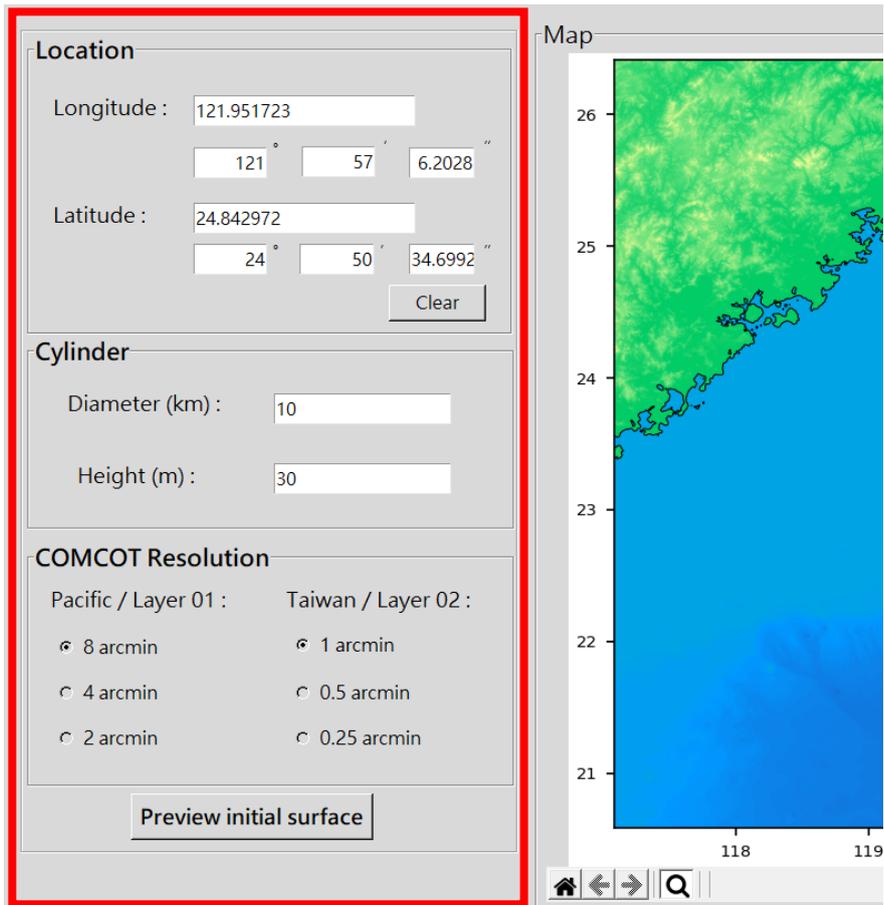


圖 155，紅色框框為 UI 左側之使用者輸入欄位。

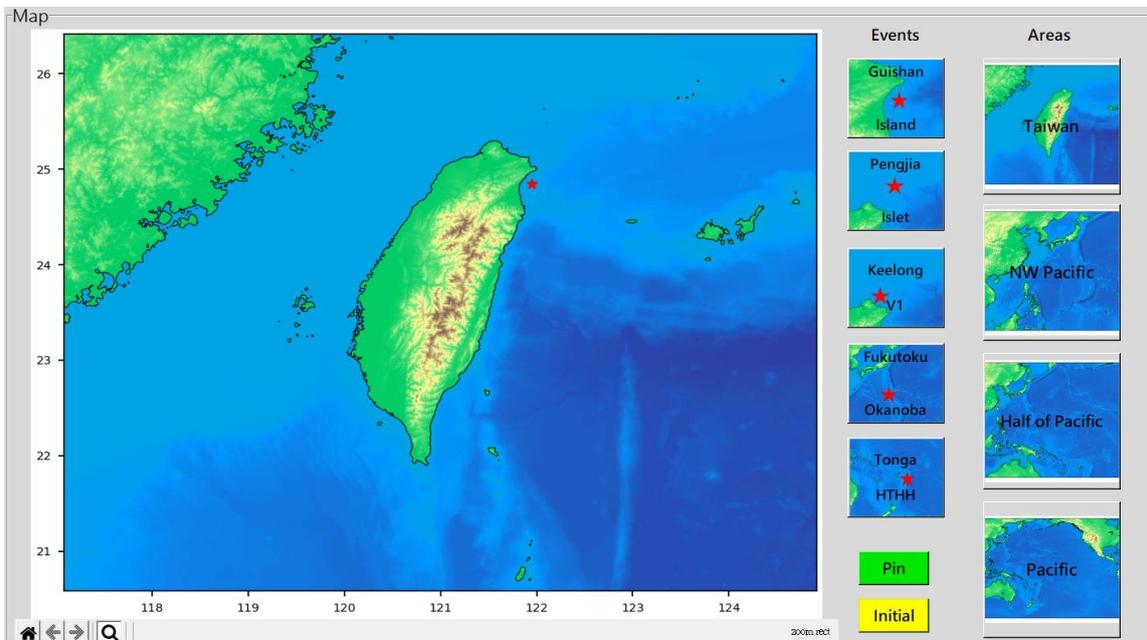


圖 156，UI 右側之地圖介面。

UI 之初始畫面為，右側之地圖介面放置臺灣地圖，此臺灣地圖中以紅色星星標示出龜山島之位置；左側之使用者輸入欄位內已填入初始值，經緯度為龜山島之經緯度，點源型圓柱之預設值為直徑 10 公里、高度 30 公尺，COMCOT 模擬內使用之網格解析度預設為太平洋區域 4 弧分、臺灣區域 0.5 弧分。線性修正之係數預設為 1.0。

8.3.2 使用者輸入欄位：經緯度

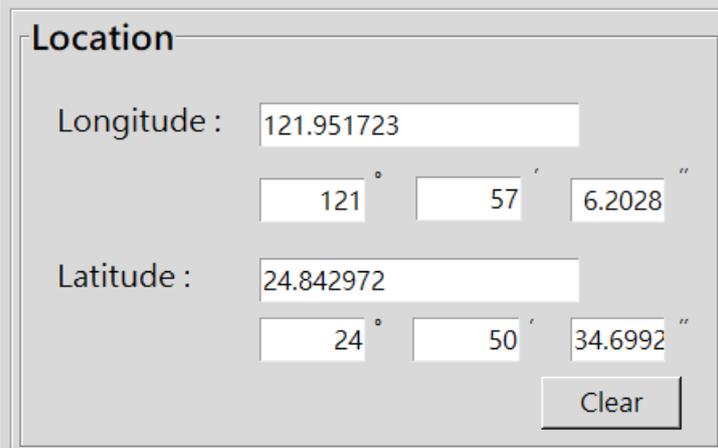
經緯度之輸入欄位預設為龜山島之經緯度，使用者可自行輸入目標地點之經緯度。輸入時可僅輸入十進位之經緯度，度分秒欄位可空白；或者度分秒欄位填入數值，十進位之欄位空白亦可。

度分秒欄位亦可「分」或「秒」欄位空白，或兩者皆空白，僅輸入「度」時，系統亦能接受。

經度部分，可輸入範圍為 101~299，如果目標地點有過國際換日線（東經 180 度），請自行將該數值加 360。例如東加火山為西經 175.385(-175.385)，則-175.385 + 360，輸入值為 184.615。

緯度部分，可輸入範圍為-59~64，緯度部分則無負號之問題。

右下角之 Clear 鈕，為全數清除經緯度欄位內之數值。



The screenshot shows a 'Location' input form with the following fields and values:

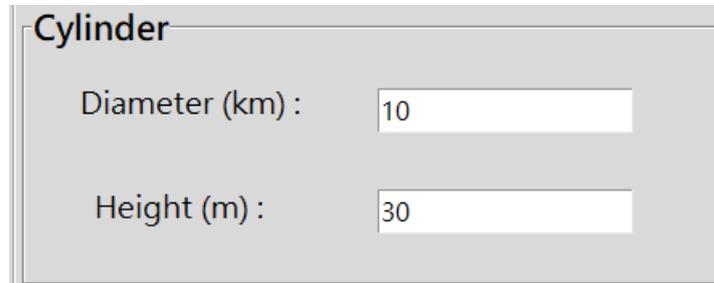
Field	Value
Longitude (Decimal)	121.951723
Longitude (Degrees)	121
Longitude (Minutes)	57
Longitude (Seconds)	6.2028
Latitude (Decimal)	24.842972
Latitude (Degrees)	24
Latitude (Minutes)	50
Latitude (Seconds)	34.6992

A 'Clear' button is located at the bottom right of the form.

圖 157，使用者輸入欄位：經緯度之初始值。

8.3.3 使用者輸入欄位：圓柱

圓柱之輸入欄位預設為龜山島情境模擬之直徑 10 公里、高度 30 公尺，使用者可自行輸入直徑與高度。



The image shows a dialog box titled 'Cylinder'. It contains two input fields: 'Diameter (km):' with the value '10' and 'Height (m):' with the value '30'.

圖 158，使用者輸入欄位：圓柱之初始值。

8.3.4 使用者輸入欄位：COMCOT 網格解析度

COMCOT 網格解析度分為兩部分：

1. Pacific / Layer 01
2. Taiwan / Layer 02

若使用者之目標地點為臺灣附近，則僅需選「Taiwan / Layer 02」內之解析度選項，因模擬臺灣區域時系統僅會模擬一層，因此「Pacific / Layer 01」此解析度選項即使選擇後系統仍會無視。

若使用者之目標地點為西北太平洋或更遠之區域時，系統會模擬兩層，則需使用「Pacific / Layer 01」此按鈕選項，並搭配「Taiwan / Layer 02」。



The image shows a dialog box titled 'COMCOT Resolution'. It has two columns of radio button options. The left column is labeled 'Pacific / Layer 01:' and has three options: 8 arcmin (selected), 4 arcmin, and 2 arcmin. The right column is labeled 'Taiwan / Layer 02:' and has three options: 1 arcmin (selected), 0.5 arcmin, and 0.25 arcmin.

圖 159，使用者輸入欄位：COMCOT 網格解析度之初始值。

8.3.5 地圖介面

地圖介面分為中間之大展示圖及右側之按鈕欄，圖 160 所示，最右側之「Areas」提供四種不同區域之地圖展示：臺灣、西北太平洋、半太平洋、全太平洋。點選 NW Pacific 後，如圖 161 所示。點選 Half of Pacific 後，如圖 162 所示。點選 Pacific 後，如圖 163 所示。

「Volcanos」為使用者提供火山地點之快捷鍵，由上至下依序為：龜山島、彭佳嶼、基隆海底無名火山、日本小笠原群島福德岡之場、東加火山，其中，基隆海底無名火山為李俊叡（2014）提及之不知名火山 V2。點選後，使用者輸入欄位之經緯度亦會改變，該火山地點之經緯度。點選 Guishan Island 後，如圖 164 所示。點選 Pengjia Islet 後，如圖 165 所示。點選 Keelung V1 後，如圖 166 所示。點選 Fukutoku Okanoba 後，如圖 167 所示。點選 Tonga HTHH 後，如圖 168 所示。

「Pin」、「Initial」為功能鍵。如圖 169 及圖 170 所示。

- Pin：點擊 Pin 按鈕後，於大展示圖中，按下「右鍵」釘選目標地點，目標地點會出現一紅色星星標示，同時經緯度欄位會自動填入數值。
- Initial：回歸系統剛開啟之初始地圖及使用者欄位狀態。

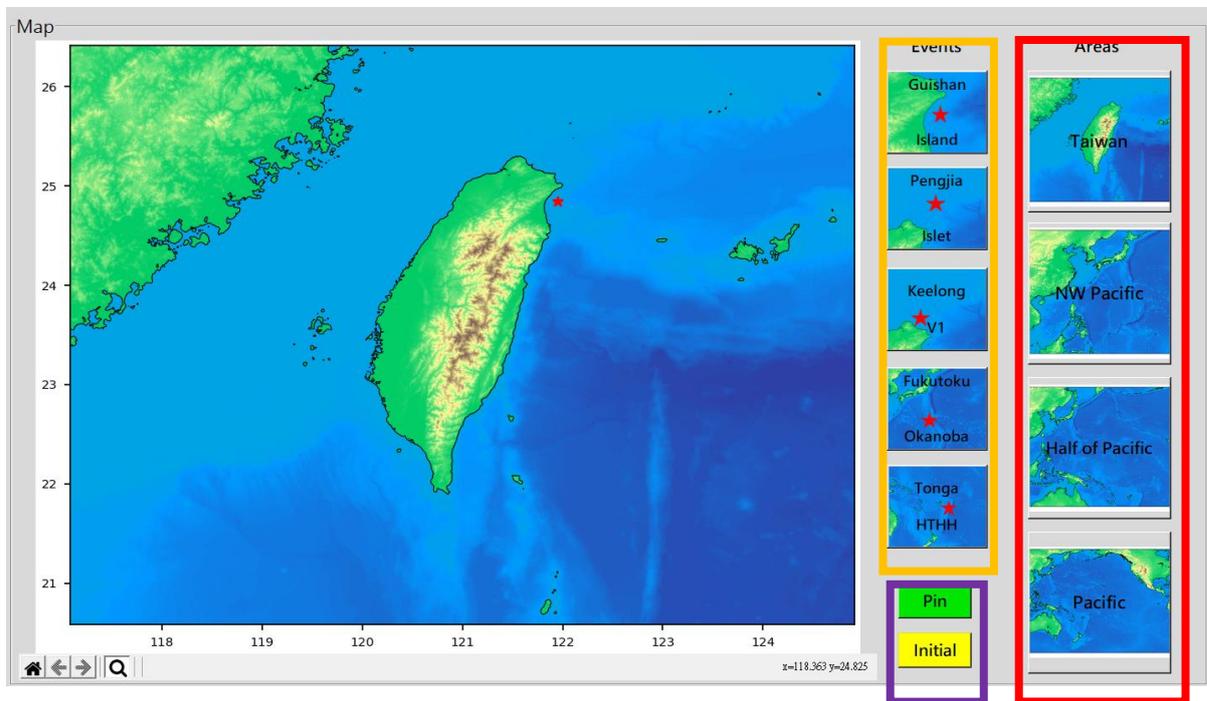


圖 160，地圖介面右側之區域選項，紅框為四種不同區域之地圖展示，黃框為火山地點之快捷鍵，紫框為功能鍵。

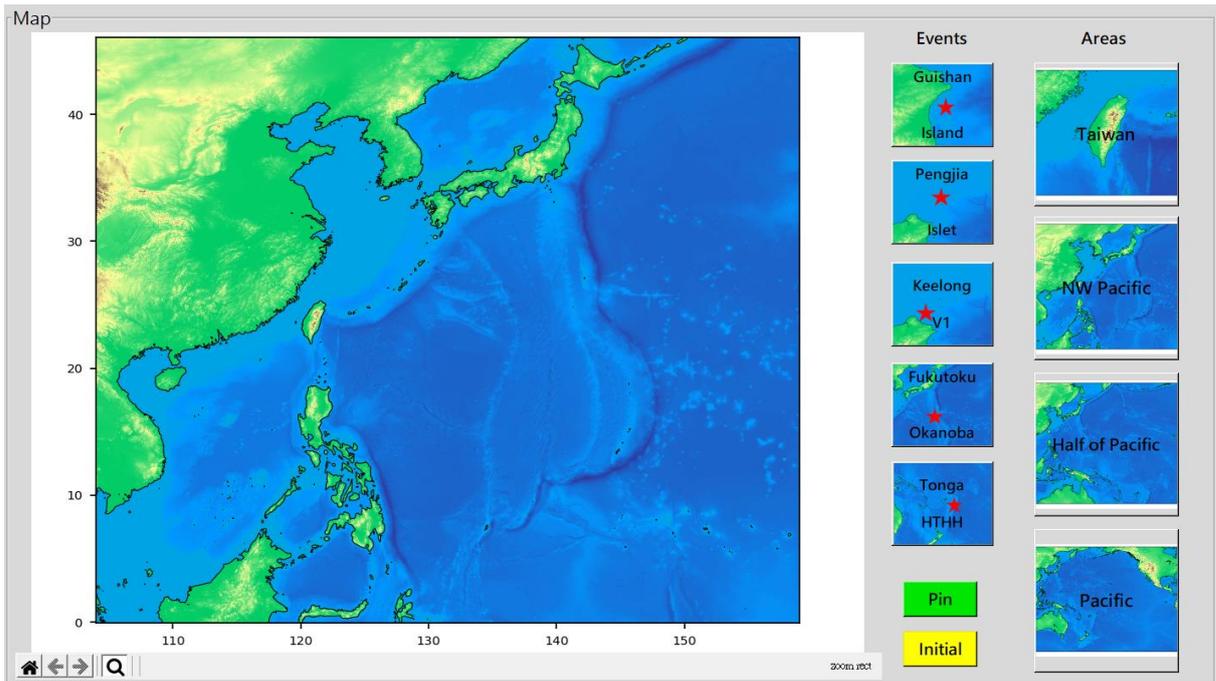


圖 161，點選 NW Pacific 按鈕後。

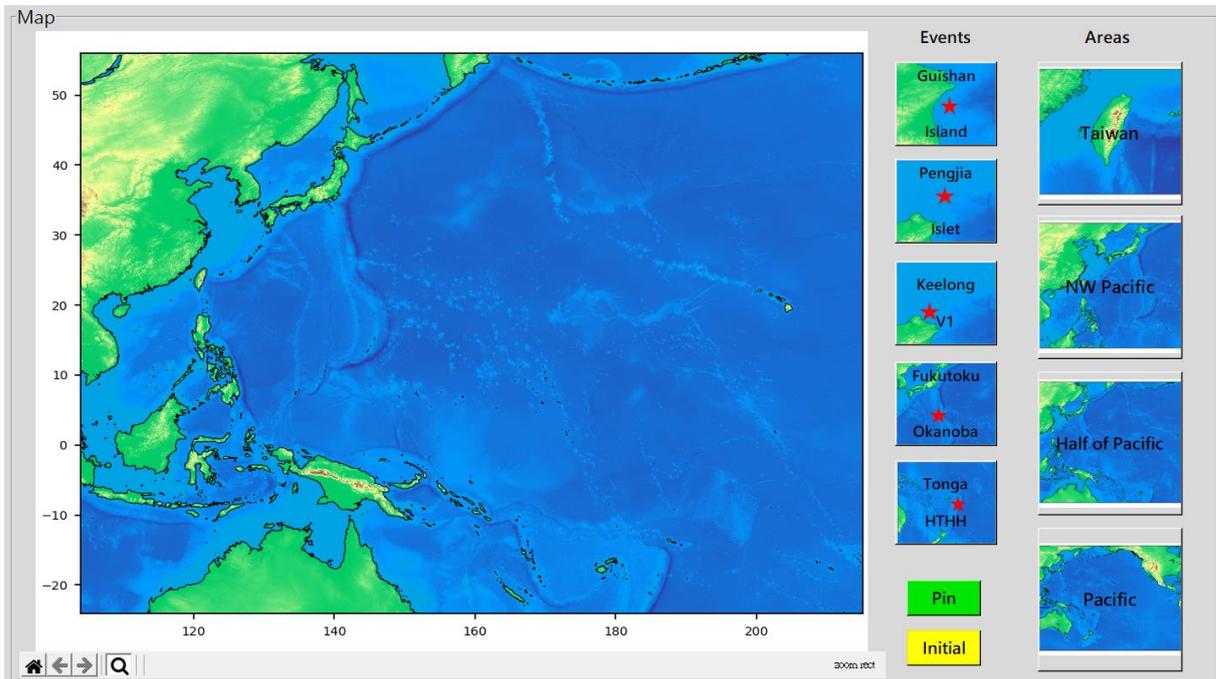


圖 162，點選 Half of Pacific 按鈕後。

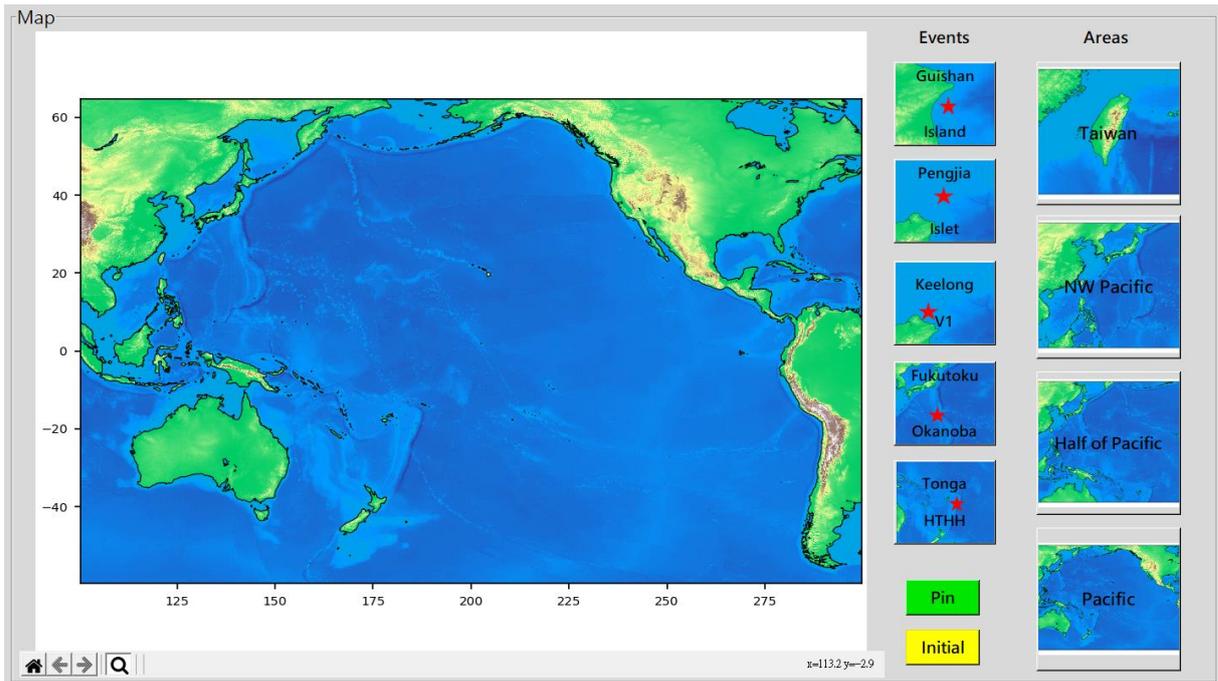


圖 163，點選 Pacific 按鈕後。

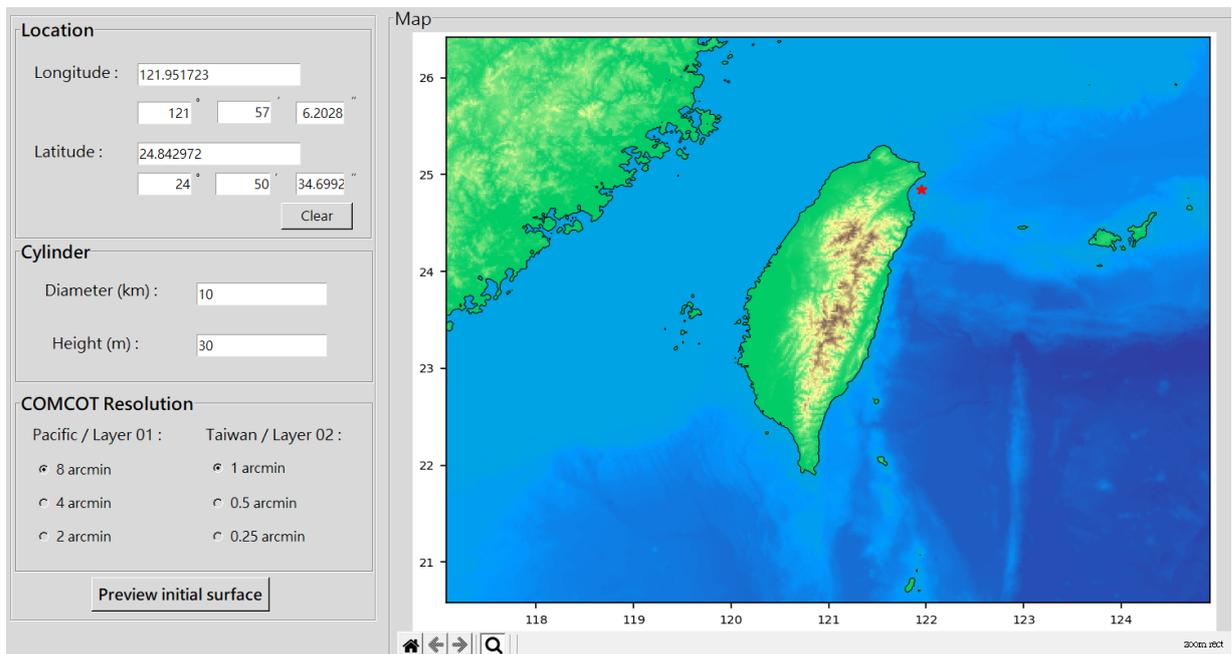


圖 164，點選 Guishan Island 按鈕後。

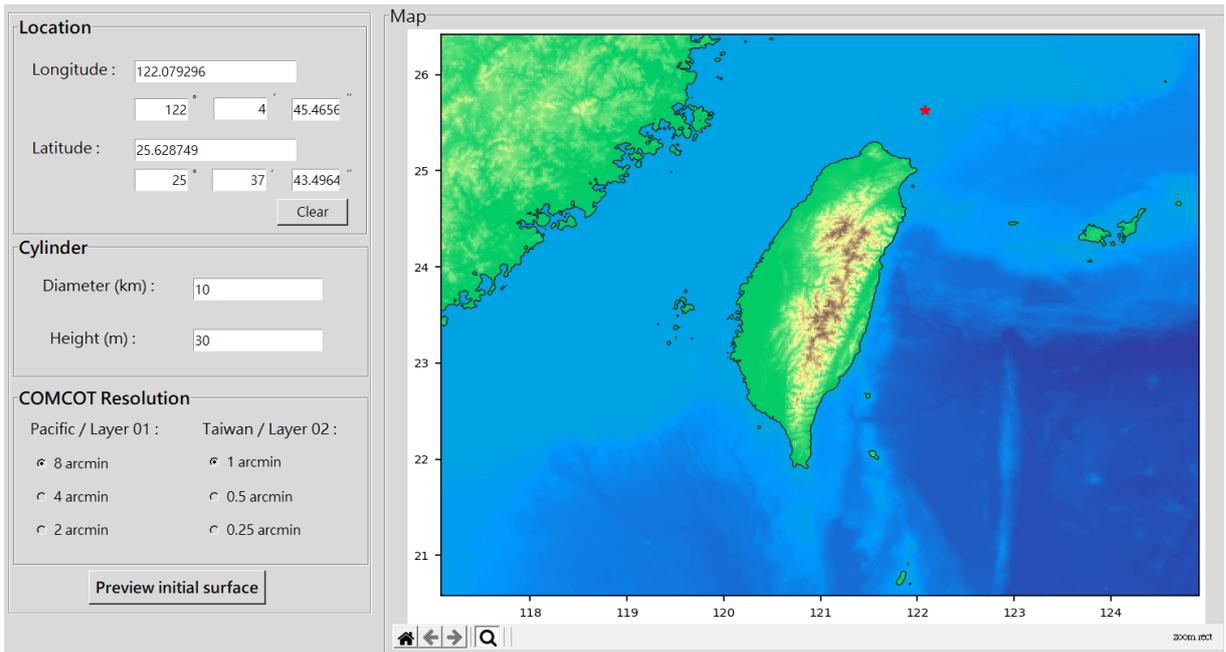


圖 165，點選 Pengjia Islet 按鈕後。

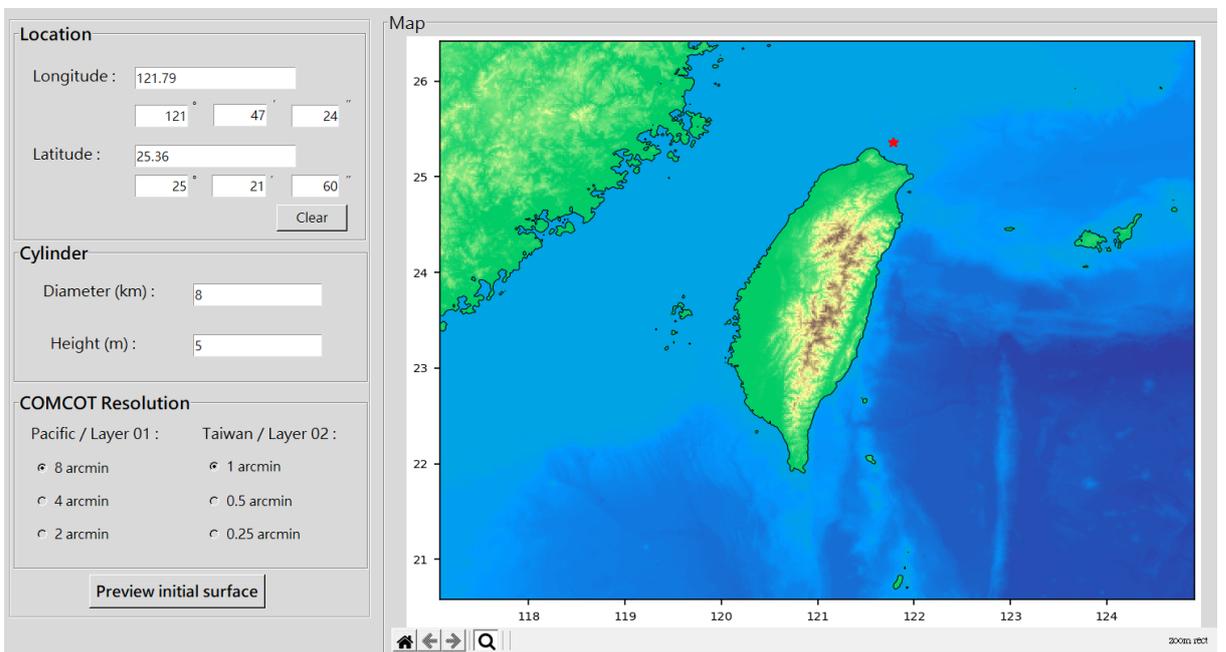


圖 166，點選 Keelung V1 按鈕後。

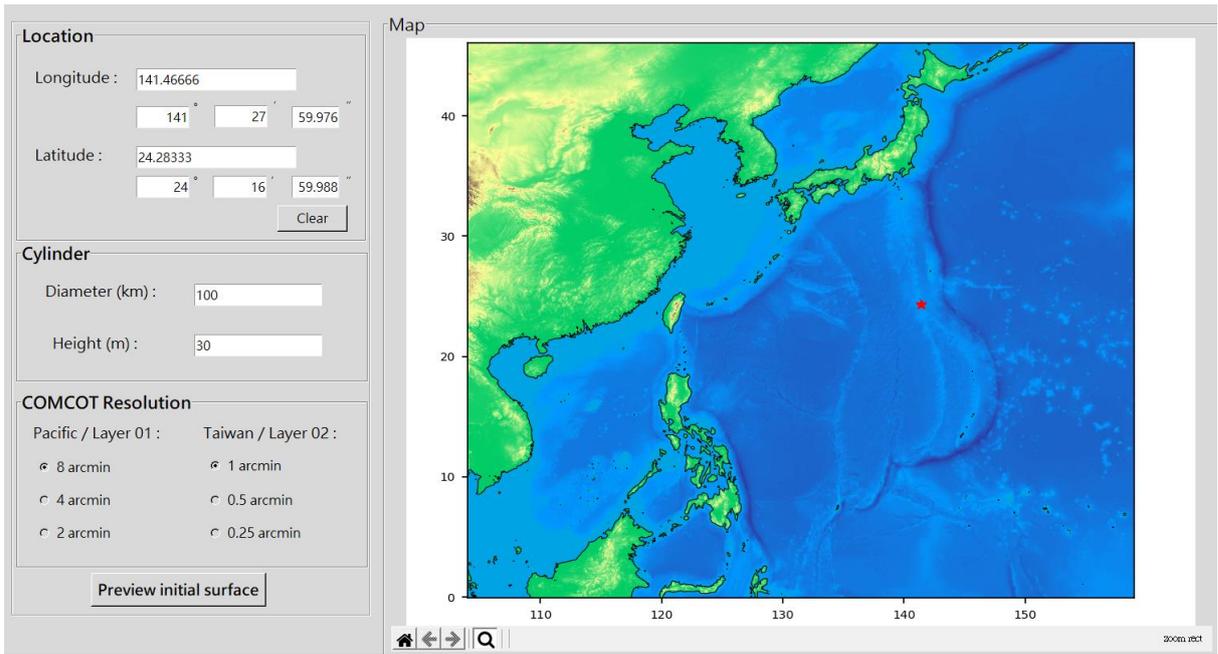


圖 167，點選 Fukutoku Okanoba 按鈕後。

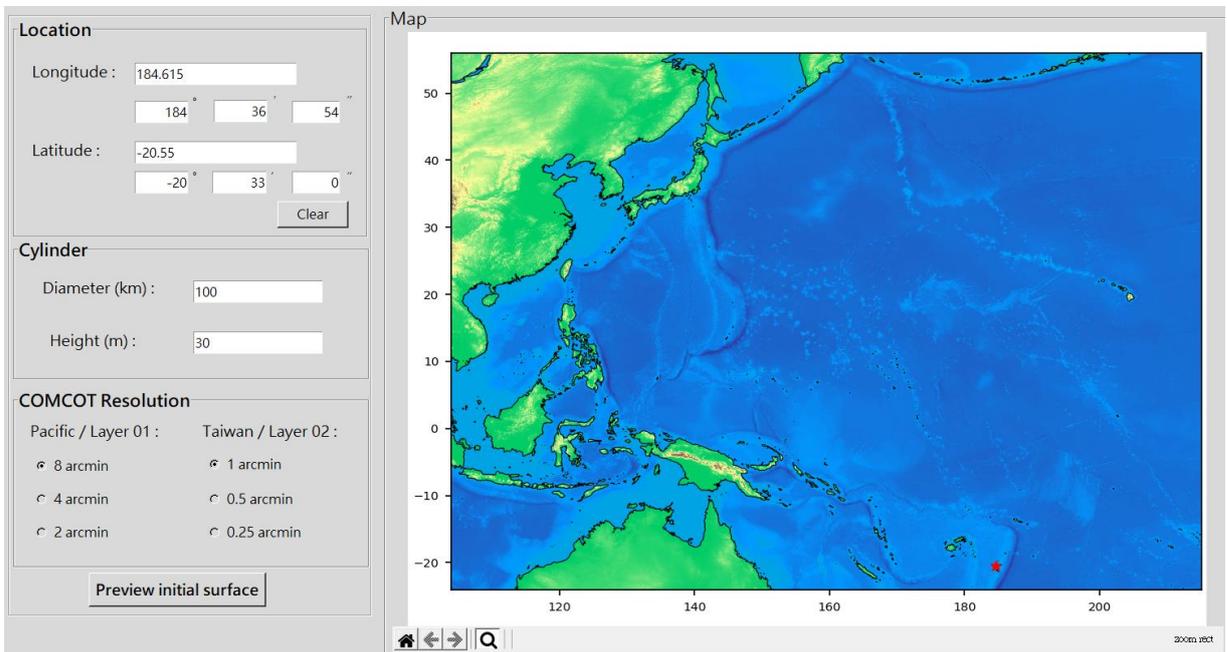


圖 168，點選 Tonga HTHH 按鈕後。

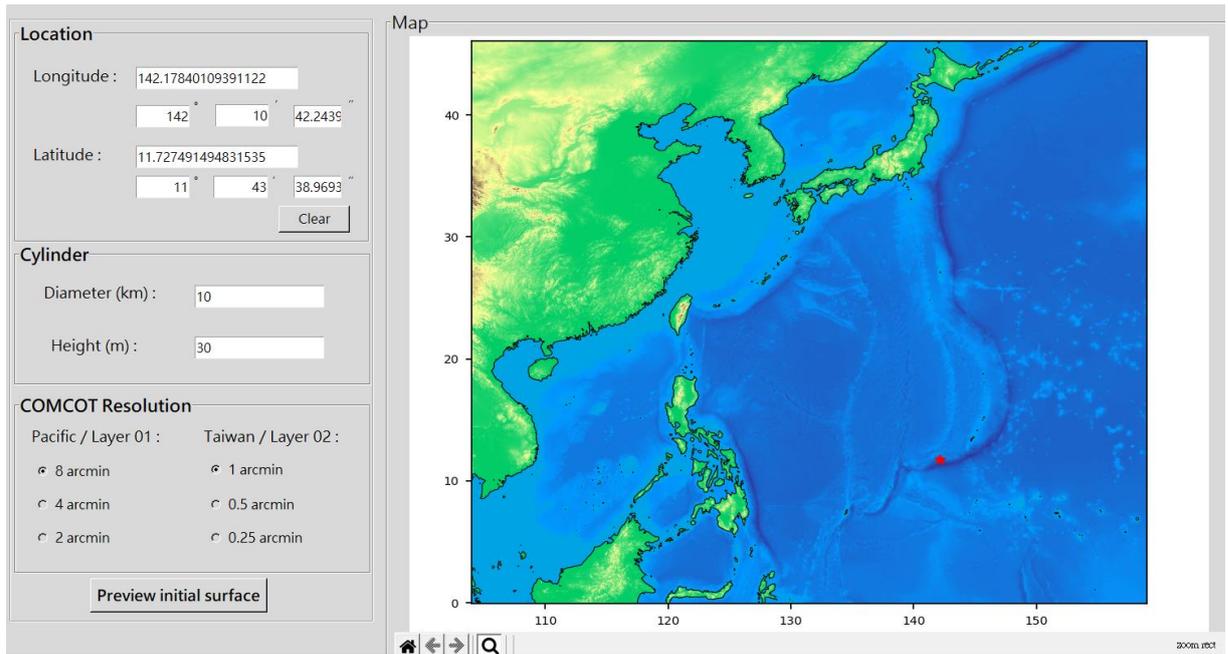


圖 169，點擊 Pin 按鈕後，於展示圖中按下右鍵釘選地點後，即出現紅色星星，經緯度欄位中系統亦自動填入數值。

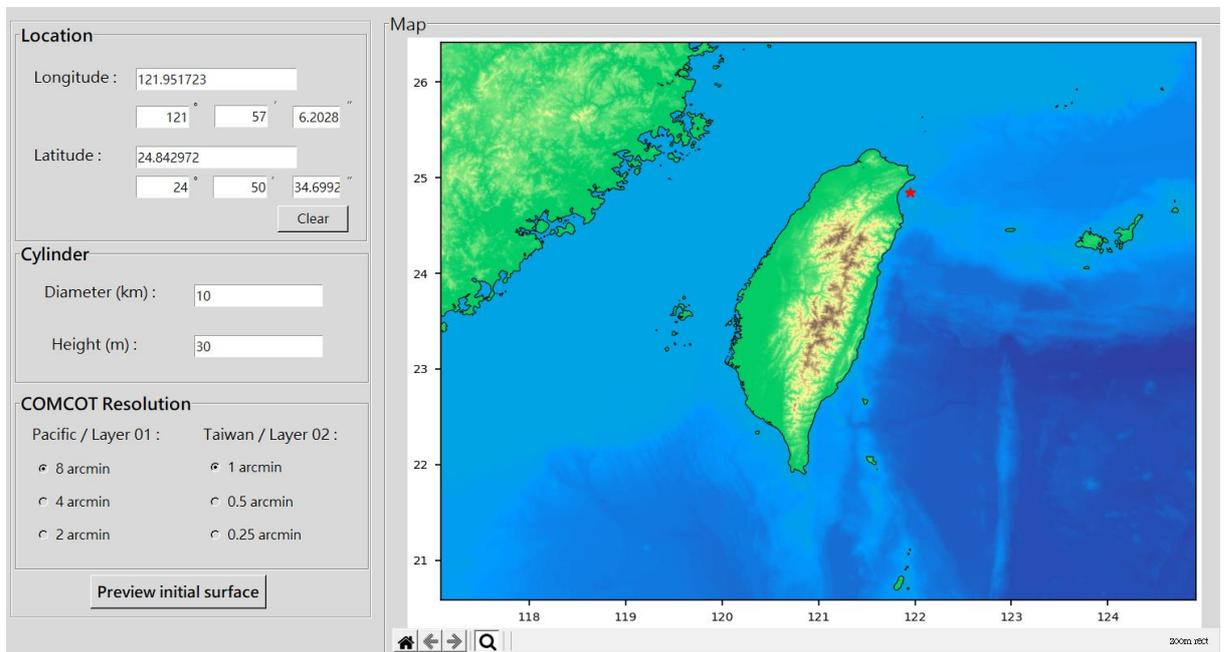


圖 170，點擊 Initial 按鈕後，系統即回復至初始狀態。

圖 171 中，紅框之「」平時為開啟狀態，為放大圖中區域之功能，於展示圖中按下左鍵拖曳出放大區域。點擊「」即回復至原始圖之大小。

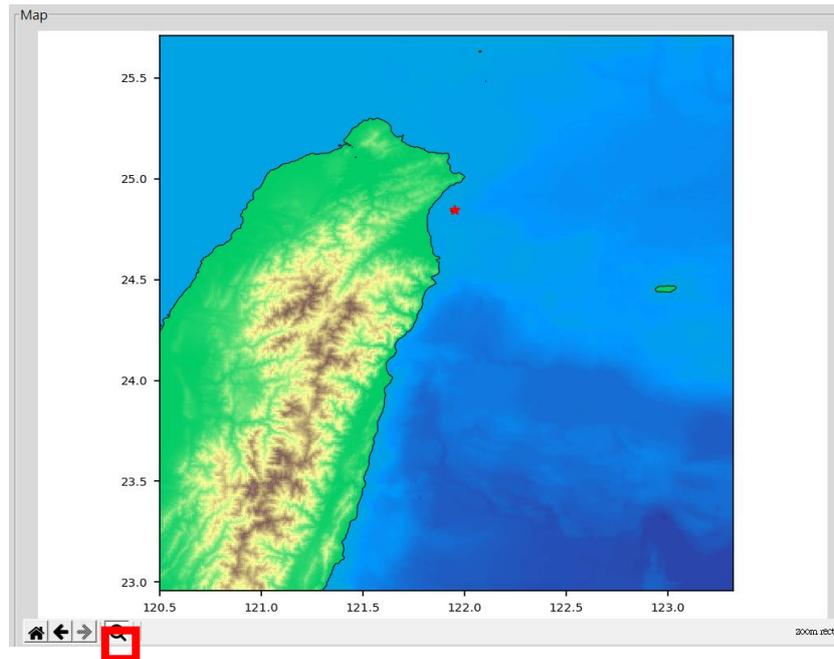


圖 171，放大鏡功能鍵可放大圖中區域。

8.3.6 Preview 鍵：完成參數設定後

當使用者輸入完經緯度、圓柱參數，並設定好 COMCOT 網格解析度後，即可按下 Preview 鍵，鍵先行查看點源型海嘯源之設定是否符合使用者之需求。

系統會根據經緯度欄位自行判斷地圖之區域，例如緯度輸入 123.0，經度輸入 22.0，系統即生成臺灣地區之圖，不會生成西北太平洋區域之圖。同理，若輸入東加火山之經緯度，系統即生成半太平洋之圖，不會生成全太平洋圖。

按下 Preview 鍵後，需等待幾秒鐘，系統會將使用者即將放入 COMCOT 模擬程式之點源型海嘯源之位置，繪圖展示於地圖介面上，如圖 173 所示。同時 Pin 及 Clear 鈕皆變為不能點擊之狀態，此時使用者僅能更動圓柱參數及 COMCOT 網格解析度，更動完需再按 Preview 鍵來更新，例如 10 公里直徑變更成 25 公里，高度 30 公尺變為 60 公尺，網格解析度 1 弧分變為 0.25 弧分，如圖 174 所示。如使用者需變換經緯度，則需按 Initial 鈕來回復成系統初始狀態。

按下 Preview 鍵後，系統於 HOME 生成 1 個檔案，「position_圓柱參數.png」，此為給使用者留存之圖檔。

一切都準備就緒，使用者確認目標圓柱沒問題後，即可按下 START TORUN 鍵，此部分於 8.3.7 詳述。



圖 172，點擊 Preview。

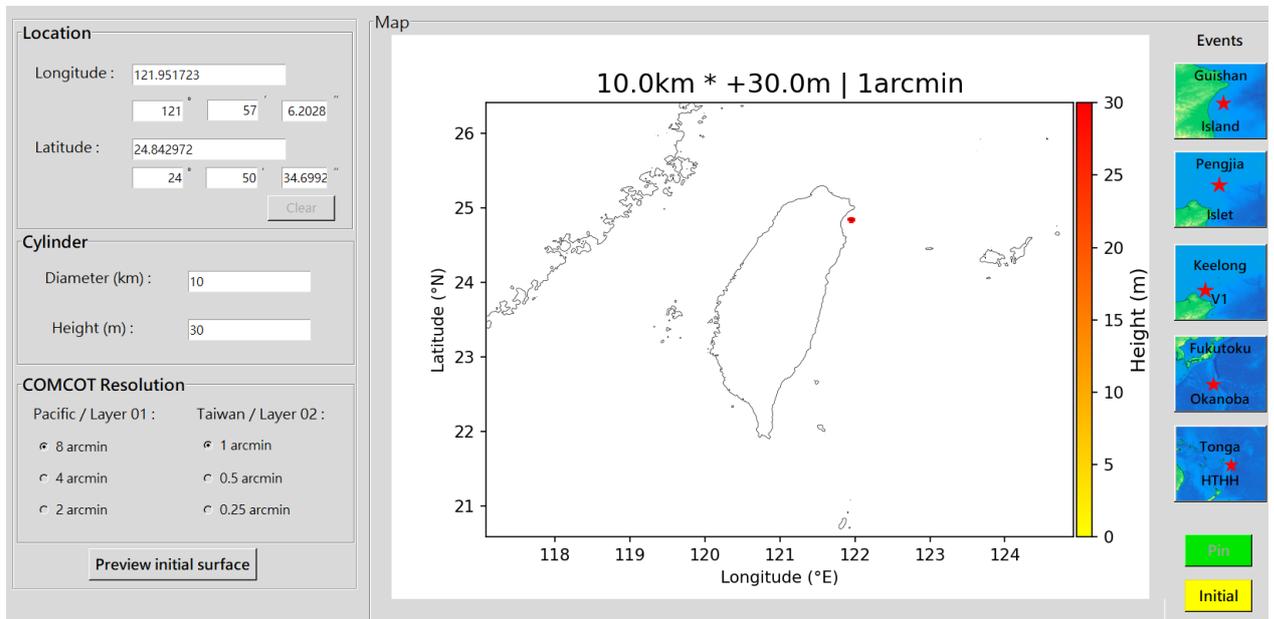


圖 173，點擊 Preview 後，地圖介面更新成點源海嘯初始圖，同時 Pin 及 Clear 鈕皆變為不能點擊之狀態，此時使用者僅能更動圓柱參數，如使用者需變換經緯度，則需按 Initial 鈕來回復成系統初始狀態。

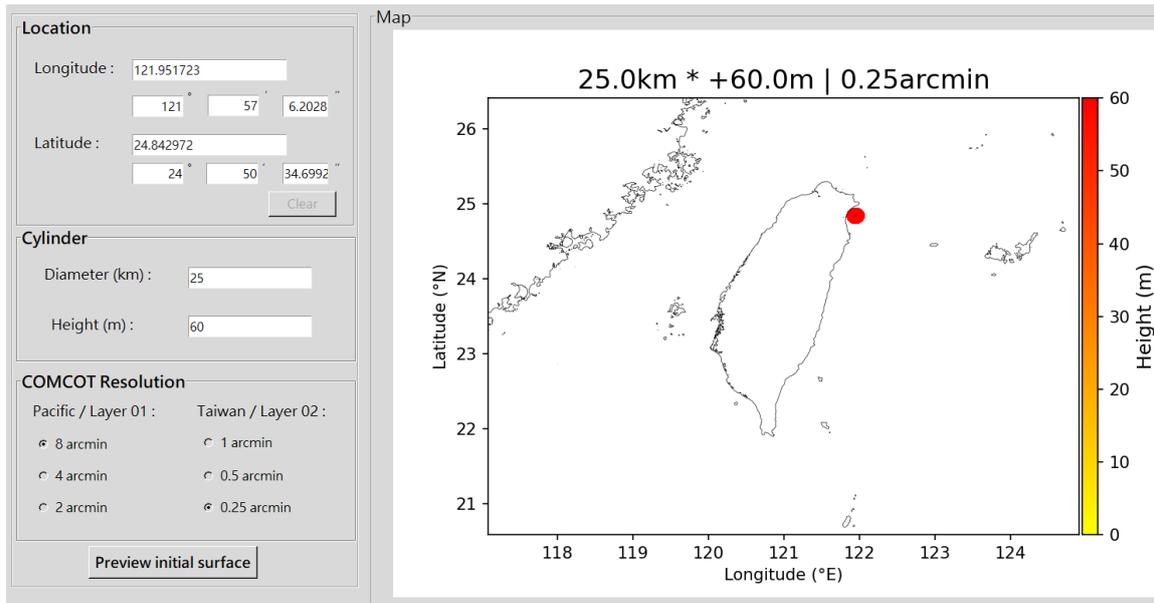


圖 174，點擊 Preview 後，使用者可更動圓柱參數及 COMCOT 網格解析度。

8.3.7 START TO RUN 鍵：執行 COMCOT 模擬

Preview 完後確認沒問題，即點擊 START TO RUN 鍵。此時螢幕會自動跳出一個 command line，表示已進入 COMCOT 海嘯模擬程式，如圖 176 所示之樣貌，此時系統正在執行 COMCOT 模擬系統。接下來出現如圖 177 所示之一連串數字之跑動，表示模式成功運算中，請稍待片刻。

模式運算完後，接著出現如圖 178 所示，系統正自動繪圖中。

總共六種圖資，其中系統於執行 python 0_2_plot_Tsunami_propagation.py 此行時需時較久。

全部六種圖資繪圖完後，螢幕中隨即自動開啟一個視窗，展示此次之模擬成果，如圖 179 所示，包含視窗左上角之海嘯最大波高圖，右上角之海嘯到時圖，左下角之臺灣沿海港口最大水位圖，右下角之沿海港口時序歷線圖，舉頭城及南灣為例。

完整圖資皆儲存於 COMCOT 模式之資料夾中，使用者如需查看完整圖資，可回到 HOME 資料夾頁面中點擊進入「COMCOT1.806_win_volcanic_tsu_system」資料夾，如圖 180 所示。

如需查看特定資料夾，如到時圖或最大波高圖等等，使用者可直接於 UI 介面上點選 Output 資料夾鈕，螢幕即自動跳出及開啟資料夾，資料夾內如圖 180 所示。完整圖資有六種：海嘯初始波高圖、海嘯傳遞動畫、海嘯最大波高圖、海嘯到時圖、臺灣沿海港口海嘯時序歷線、及臺灣沿海港口最大水位圖。各資料夾內樣貌於圖 182 至圖 188 所示。

而使用者操作介面所生成之 COMCOT 模擬初始條件的四種檔案，如圖 189 所示，收納於 System_Initial_Simulation_files 此資料夾內容。

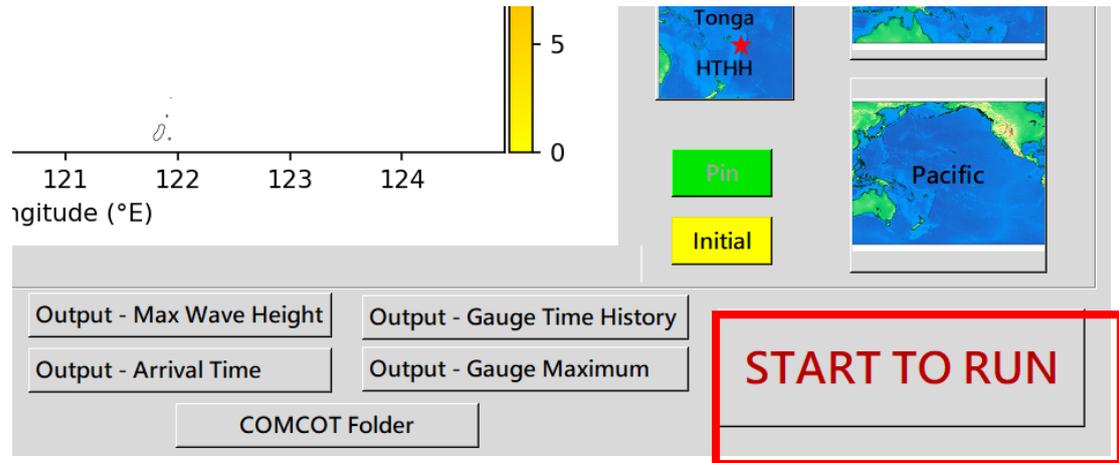


圖 175，點擊 START TO RUN。

```

C:\Windows\system32\cmd
D:\CWA_Volcanic_Tsunami_System\COMCOT1.806_win_volcanic_tsu_system>rem by Po_Yuan,Yang 2023/05/29
D:\CWA_Volcanic_Tsunami_System\COMCOT1.806_win_volcanic_tsu_system>set OMP_NUM_THREADS=16
D:\CWA_Volcanic_Tsunami_System\COMCOT1.806_win_volcanic_tsu_system>comcot.exe

***** COMCOT *****
*                               *
*      VERSION = 1.806          *
*                               *
*      OpenMP Enabled          *
*      Edited by Prof. Tso-Ren Wu *
*                               *
*****
RUNNING COMCOT AT (20220710 Prof. Wu Tso-Ren) ...
D:\CWA_Volcanic_Tsunami_System\COMCOT1.806_win_volcanic_tsu_system

READING PARAMETERS FOR SIMULATION ...
  READING GENERAL INFORMATION.....
  READING PARAMETERS FOR GRID LAYER.....
  READING PARAMETERS FOR GRID LAYER ID          1
  READING BATHYMETRY DATA...
  READING ETOPO BATHMETRY DATA FOR LAYER ID    1
  
```

圖 176，系統正開始執行 COMCOT。

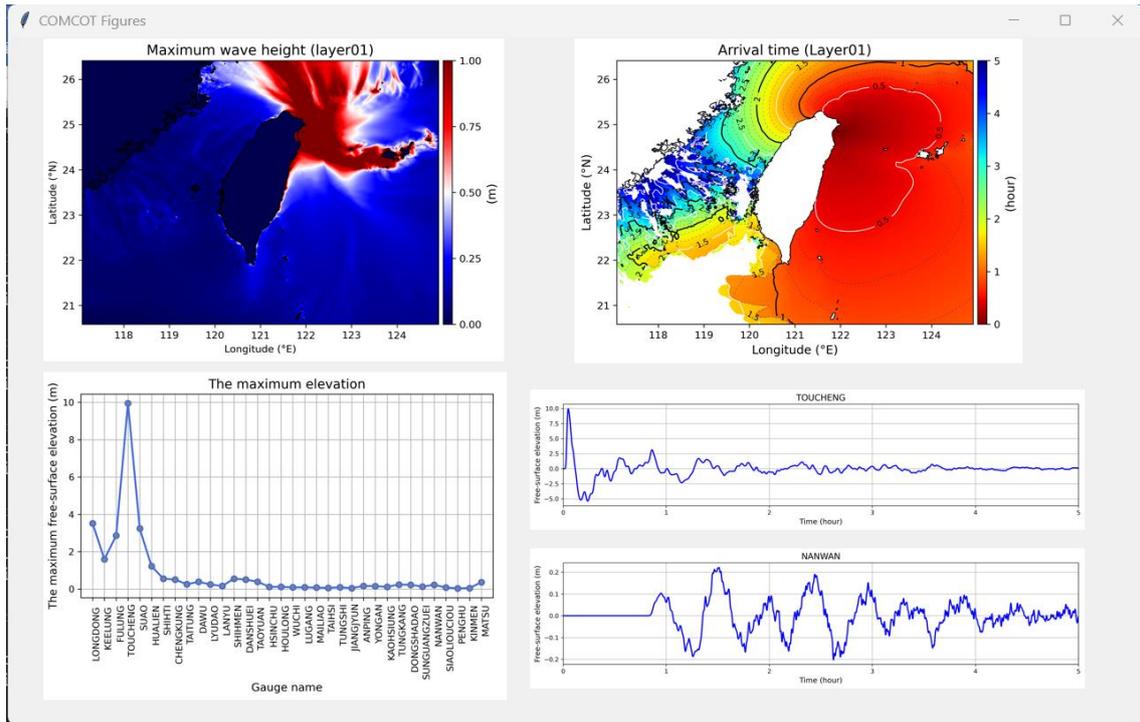


圖 179，系統自動開啟新視窗，展示成果。

📁 _pycache_	2023/11/12 上午 01:...	檔案資料夾
📁 01_Initial_free-surface_elevation_py	2023/11/12 上午 01:...	檔案資料夾
📁 02_Tsunami_propagation_gifs_py	2023/11/12 上午 01:...	檔案資料夾
📁 02_Tsunami_propagation_pngs_py	2023/11/12 上午 01:...	檔案資料夾
📁 03_The_maximum_wave_height_py	2023/11/12 上午 01:...	檔案資料夾
📁 04_Arrival_time_py	2023/11/12 上午 01:...	檔案資料夾
📁 05_Time_history_free_surface_elevation_py	2023/11/12 上午 01:...	檔案資料夾
📁 06_Gauge_Maximum_py	2023/11/12 上午 01:...	檔案資料夾
📁 dll	2023/11/11 下午 07:...	檔案資料夾
📁 Scaling_Law_V2.0_with_DLL	2023/11/11 下午 07:...	檔案資料夾
📁 System_Initial_Simulation_files	2023/11/12 上午 01:...	檔案資料夾

圖 180，COMCOT1.806_win_volcanic_tsu_system 資料夾內之六種完整圖資資料夾，以及 System_Initial_Simulation_files 資料夾。

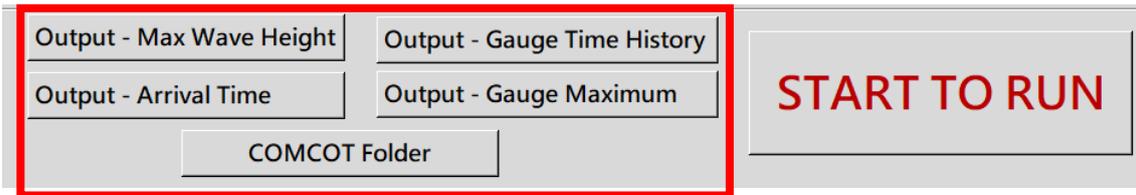


圖 181，UI 中查看圖資資料夾點選鈕。

本機磁碟 (D:) > CWA_Volcanic_Tsunami_System > COMCOT1.806_win_volcanic_tsu_system > 01_Initial_free-surface_elevation_py

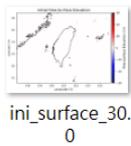


圖 182，01_Initial_free-surface_elevation_py，海嘯初始波高圖資料夾內容。

本機磁碟 (D:) > CWA_Volcanic_Tsunami_System > COMCOT1.806_win_volcanic_tsu_system > 02_Tsunami_propagation_gifs_py

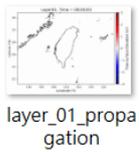


圖 183，02_Tsunami_propagation_gifs_py，海嘯傳遞動畫資料夾內容。

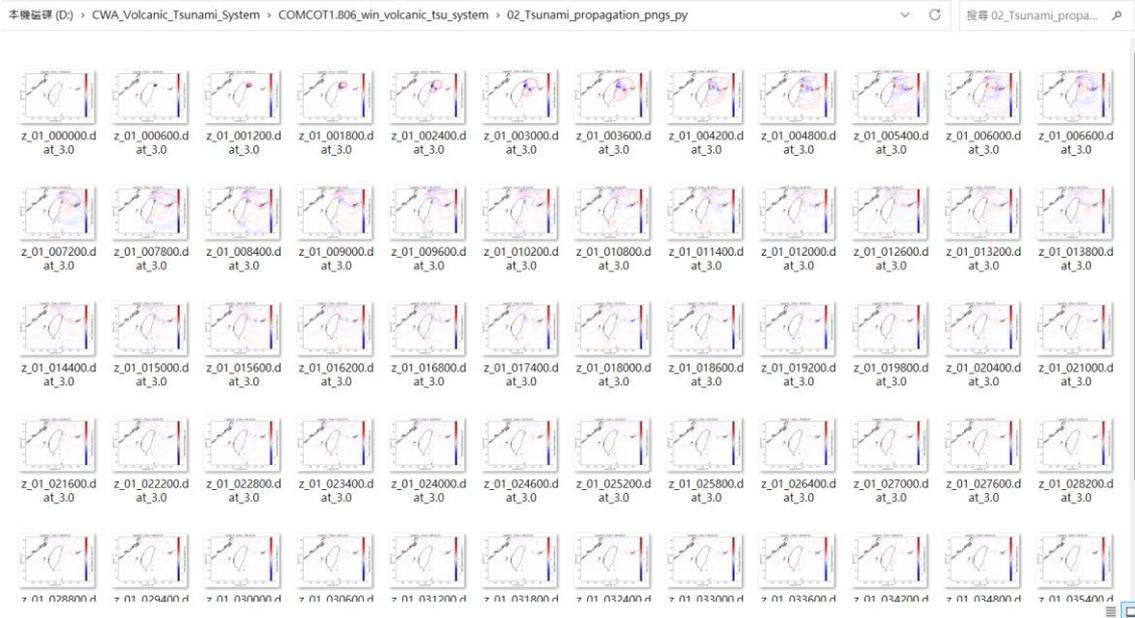


圖 184，02_Tsunami_propagation_pngs_py，海嘯傳遞圖快照資料夾內容。

本機磁碟 (D:) > CWA_Volcanic_Tsunami_System > COMCOT1.806_win_volcanic_tsu_system > 03_The_maximum_wave_height_py

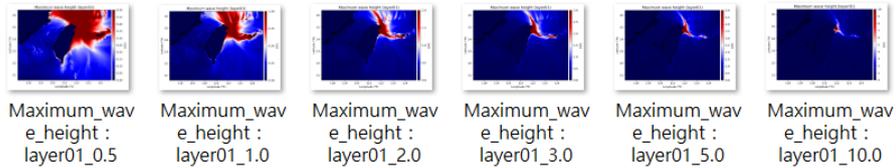


圖 185，03_The_maximum_wave_height_py，海嘯最大波高圖資料夾內容。

本機磁碟 (D:) > CWA_Volcanic_Tsunami_System > COMCOT1.806_win_volcanic_tsu_system > 04_Arrival_time_py

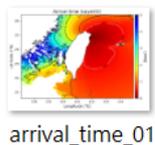


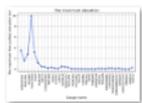
圖 186，04_Arrival_time_py，海嘯到時圖資料夾內容。

本機磁碟 (D:) > CWA_Volcanic_Tsunami_System > COMCOT1.806_win_volcanic_tsu_system > 05_Time_history_free_surface_elevation_py



圖 187，05_Time_history_free_surface_elevation_py，臺灣沿海港口海嘯時序歷線資料夾內容。

本機磁碟 (D:) > CWA_Volcanic_Tsunami_System > COMCOT1.806_win_volcanic_tsu_system > 06_Gauge_Maximum_py



Gauge_maximum_elevation

圖 188，06_Gauge_Maximum_py，臺灣沿海港口最大水位圖資料夾內容。

本機磁碟 (D:) > CWA_Volcanic_Tsunami_System > COMCOT1.806_win_volcanic_tsu_system > System_Initial_Simulation_files

名稱	修改日期	類型	大小
 comcot	2023/11/12 上午 01:...	CTL 檔案	19 KB
 ini_10km.dat	2023/11/12 上午 01:...	DAT 檔案	5,214 KB
 position_10.0km_30.0m_0.5arcmin	2023/11/12 上午 01:...	PNG 檔案	173 KB
 Volcanic_tsunami_Simulation_info	2023/11/12 上午 01:...	文字文件	1 KB

圖 189，System_Initial_Simulation_files 資料夾內之四種檔案。

8.3.8 Coefficient 欄：線性修正

若 COMCOT 初步模擬完需進行線性修正，則於此欄位更改數值。預設為 1.0。

輸入數值後，按下「Set & Modify」按鈕後，螢幕會自動跳出一個 command line，即會出現如圖 191 所示，表示已進入線性修正階段。完成線性修正後，螢幕上即會跳出線性修正完畢後之目標資料夾，為一個新資料夾名為「Coefficient_modified」，儲存於 COMCOT 模擬程式資料夾中，如圖 192 所示。Coefficient_modified 資料夾內包含三種修正係數產品圖資料夾：海嘯最大波高圖、臺灣沿海港口時序歷線圖、臺灣沿海港口最大水位圖。產品圖資料夾名稱皆有標示係數之數值，如圖 193 所示。

使用者可執行多次線性修正之嘗試，不同係數之修正產品資料夾將被保留於 Coefficient_modified 資料夾內，系統不會自動移除，如圖 195 所示。

使用者亦可直接於 UI 介面中開啟線性修正資料夾，點選 Coefficient 欄位內之 Output Files 鈕即可，螢幕隨即跳出並開啟該資料夾。

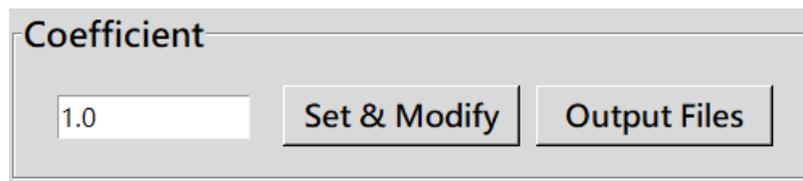


圖 190，Coefficient 欄。

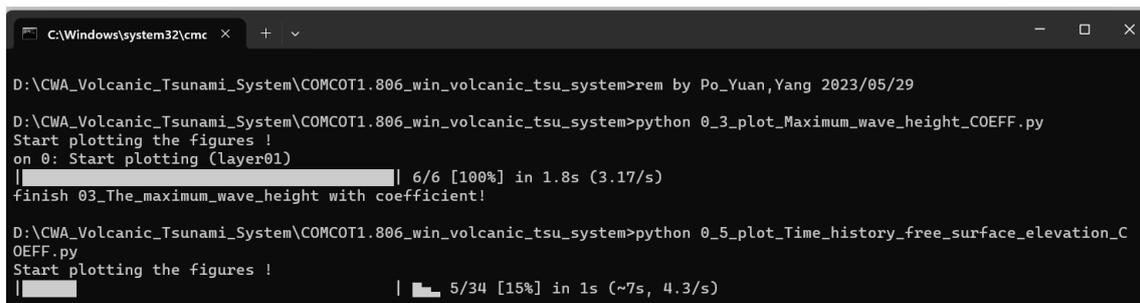


圖 191，開始執行線性修正。



圖 192，Coefficient_modified 資料夾。

本機磁碟 (D:) > CWA_Volcanic_Tsunami_System > COMCOT1.806_win_volcanic_tsu_system > Coefficient_modified

名稱	修改日期	類型	大小
03_Max_wave_height_COEFF_3.0	2023/11/12 上午 03:...	檔案資料夾	
05_Time_history_COEFF_3.0	2023/11/12 上午 03:...	檔案資料夾	
06_Gauge_Maximum_COEFF_3.0	2023/11/12 上午 03:...	檔案資料夾	

圖 193，Coefficient_modified 資料夾內之修正係數產品圖資料夾。

本機磁碟 (D:) > CWA_Volcanic_Tsunami_System > COMCOT1.806_win_volcanic_tsu_system > Coefficient_modified > 03_Max_wave_height_COEFF_3.0

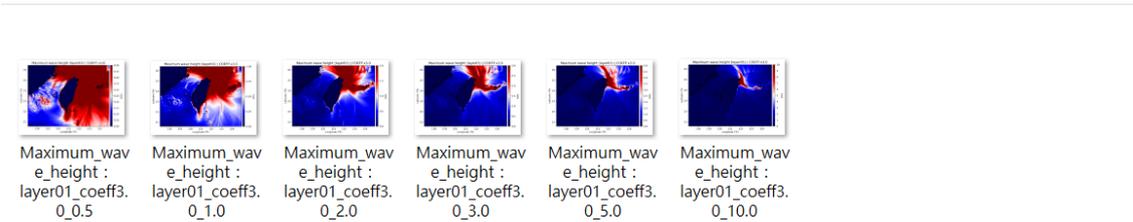


圖 194，Coefficient_modified 資料夾內最大波高圖資料夾，產品圖之名稱皆有標示出修正係數之數值。

本機磁碟 (D:) > CWA_Volcanic_Tsunami_System > COMCOT1.806_win_volcanic_tsu_system > Coefficient_modified

名稱	修改日期	類型	大小
03_Max_wave_height_COEFF_0.5	2023/11/12 上午 03:...	檔案資料夾	
03_Max_wave_height_COEFF_3.0	2023/11/12 上午 03:...	檔案資料夾	
03_Max_wave_height_COEFF_6.0	2023/11/12 上午 03:...	檔案資料夾	
05_Time_history_COEFF_0.5	2023/11/12 上午 03:...	檔案資料夾	
05_Time_history_COEFF_3.0	2023/11/12 上午 03:...	檔案資料夾	
05_Time_history_COEFF_6.0	2023/11/12 上午 03:...	檔案資料夾	
06_Gauge_Maximum_COEFF_0.5	2023/11/12 上午 03:...	檔案資料夾	
06_Gauge_Maximum_COEFF_3.0	2023/11/12 上午 03:...	檔案資料夾	
06_Gauge_Maximum_COEFF_6.0	2023/11/12 上午 03:...	檔案資料夾	

圖 195，使用者可執行多次線性修正之嘗試，系統不會自動移除前一次之修正。

九、参考文献

1. Necmioglu, O., Heidarzadeh, M., Vougioukalakis, G. E., & Selva, J. Landslide Induced Tsunami Hazard at Volcanoes: The Case of Santorini. *Pure and Applied Geophysics*, 1-24. (2023).
2. Mutaqin, B. W., Lavigne, F., Hadmoko, D. S., & Ngalawani, M. N. Volcanic eruption-induced tsunami in Indonesia: A review. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 256, No. 1, p. 012023). IOP Publishing. (2019).
3. Heidarzadeh, M., Putra, P. S., Nugroho, S. H., & Rashid, D. B. Z. Field survey of tsunami heights and runups following the 22 December 2018 Anak Krakatau volcano tsunami, Indonesia. *Pure and Applied Geophysics*, 177(10), 4577-4595. (2020).
4. Heidarzadeh, M., Gusman, A. R., Ishibe, T., Sabeti, R., & Šepić, J. Estimating the eruption-induced water displacement source of the 15 January 2022 Tonga volcanic tsunami from tsunami spectra and numerical modelling. *Ocean Engineering*, 261, 112165. (2022).
5. Pakoksung, K., Suppasri, A., & Imamura, F. The near-field tsunami generated by the 15 January 2022 eruption of the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcano and its impact on Tongatapu, Tonga. *Scientific reports*, 12(1), 15187. (2022).
6. Shen, Y., Whittaker, C. N., Lane, E. M., White, J. D., Power, W., & Melville, B. W. Waves generated by discrete and sustained gas eruptions with implications for submarine volcanic tsunamis. *Geophysical Research Letters*, 48(21), e2021GL094539. (2021).
7. Paris, R. Source mechanisms of volcanic tsunamis. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 373(2053), 20140380. (2015).
8. Satake, K., Heidarzadeh, M., Quiroz, M., & Cienfuegos, R. History and features of trans-oceanic tsunamis and implications for paleo-tsunami studies. *Earth-Science Reviews*, 202, 103112. (2020).
9. Ramírez-Herrera, M. T., Coca, O., & Vargas-Espinosa, V. Tsunami effects on the Coast of Mexico by the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcano eruption, Tonga. *Pure and applied geophysics*, 179(4), 1117-1137. (2022).
10. Lynett, P. J., Borrero, J., Son, S., Wilson, R., & Miller, K. Assessment of the tsunami-induced current hazard. *Geophysical Research Letters*, 41(6), 2048-2055. (2014).

11. Martin, M. E., Weiss, R., Bourgeois, J., Pinegina, T. K., Houston, H., & Titov, V. V. Combining constraints from tsunamis modeling and sedimentology to untangle the 1969 Ozernoi and 1971 Kamchatskii tsunamis. *Geophysical Research Letters*, 35(1). (2008).
12. Oishi, Y., Imamura, F., & Sugawara, D. Near-field tsunami inundation forecast using the parallel TUNAMI-N2 model: Application to the 2011 Tohoku-Oki earthquake combined with source inversions. *Geophysical research letters*, 42(4), 1083-1091. (2015).
13. Wilkinson, C., Souter, D., and Goldberg, J., Status of coral reefs in tsunami-affected countries: 2005., Australian Institute of Marine Science; Global Coral Reef Monitoring Network, Townsville (2005).
14. Mori, N., Takahashi, T., Yasuda, T., and Yanagisawa, H. "Survey of 2011 Tohoku earthquake tsunami inundation and run-up," *Geophysical research letters*, Vol. 38, Issue. 7 (2011).
15. 王郁如、馬國鳳，「環太平洋地震帶」，地質知識服務網地質百科，2014。
16. Lin, S.C., Wu, T.-R., Yen, E., Chen, H.-Y., Hsu, J., Tsai, Y.-L., Lee, C.-J., and Liu, P.L.-F., "Development of a tsunami early warning system for the South China Sea," *Ocean Engineering*, Vol. 100, pp. 1-18 (2015).
17. Okada, Y., "Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space," *Bulletin of the seismological society of America*, Vol. 75(4), pp. 1135-1154 (1985).
18. Watts, P., Grilli, S. T., Kirby, J. T., Fryer, G. J., & Tappin, D. R. Landslide tsunami case studies using a Boussinesq model and a fully nonlinear tsunami generation model. *Natural Hazards And Earth System Science*, 3(5), 391-402. (2003).
19. 陳伯飛，「利用 W 波相逆推震源參數與單位海嘯建立南中國海海嘯預警系統」，財團法人國家實驗研究院科技政策研究與資訊中心，2011。
20. 陳冠宇，「海嘯預警與溢淹潛勢圖數值模擬之回顧與探討」，*海洋工程學刊*，13 卷期 1 期，臺中 (2013)。
21. 李珮瑜，「蘭嶼海嘯石與 1867 年基隆海嘯之動力分析」，*水文與海洋科學研究所*，碩士論文，2015。
22. Wang, X., & Liu, P. L. F. An analysis of 2004 Sumatra earthquake fault plane mechanisms and Indian Ocean tsunami. *Journal of Hydraulic Research*, 44(2), 147-154. (2006).
23. Feng, X., Yin, B., Gao, S., Wang, P., Bai, T., & Yang, D. Assessment of tsunami hazard for coastal areas of Shandong Province, China. *Applied Ocean Research*, 62, 37-48. (2017).

24. Rasyif, T. M., Kato, S., & Okabe, T. Numerical simulation of morphological changes due to the 2004 tsunami wave around banda aceh, indonesia. *Geosciences*, 9(3), 125. (2019).
25. Kramers. H. A. "Quantum Mechanics", publisher Dover, 1957, pp. 62 ISBN 978-0-486-66772-0. (1957).
26. Born, M., & Wolf, E. (1999). Principles of Optics, seventh expanded edition. Cambridge, England.
27. 李俊叡,「臺灣海嘯速算系統建置暨 1867 年基隆海嘯事件之還原與分析」,碩士論文,國立中央大學水文與海洋科學研究所,2014。
28. 丁禕,「反思龜山島火山引發海嘯災害可能性-以日本雲仙岳為鑑」,中興工程,2016。

112 年度臺灣海域地震與海嘯觀測之相關研究

子計畫二

壓力計資料分析：資料漂移與修正

王秀雅 許樹坤 簡芯蓓 溫立佳 蔡宛玲

中華民國地球物理學會

摘要

根據氣象署海纜傾斜儀所收集的資料發現，在 2018 年 2 月上旬後，各測站的位態變化並不大（傾斜角與旋轉角變化皆小於 0.1° ），顯示儀器並未受明顯外力影響（如海底濁流）。但同時壓力計長期觀測資料顯示，各站皆呈現不同程度上升或下降的趨勢，其原因可能為海床溫度變化、海底地形變化或是儀器本身紀錄漂移。由於海纜觀測系統中的壓力計其中最主要任務是用於快速準確地偵測海嘯，若資料有異常，勢必會影響海嘯偵測的準確性。在本計畫中，我們將主要分析氣象署海纜 EOS2—EOSA 共 9 個測站所收集的壓力計、溫度計、傾斜儀等資料以了解壓力計資料偏移的原因，這將有助於未來強化海嘯預警技術及其他應用。

關鍵字：海嘯預警、海底地震儀、壓力計

Abstract

The tiltmeter data collect by CWB inline submarine cable system shows the rotation motion of cabled ocean-bottom seismic stations (EOS2-EOSA) is very small after March 2018 (both pitch and roll variations are smaller than 0.1°). This result suggests the submarine cable on the seafloor is relative steadily. However, each pressure gauge shows a long-term drift over time. This temporal variation may be related to the deformation of sea-floor, temperature of seawater, and/or instrument drift. The ocean bottom pressure gauge is design to track seafloor pressure change and plays a key role on tsunami forecasting. Once the record is

contaminated by bias, it will decrease the accuracy of tsunami detection.

In order to clarify what reasons that causes the temporal variation in pressure gauge, we will mainly analyze pressure, temperature, and tiltmeter data which collect by CWB inline submarine cable system. These results will help us to improve its further application in resolving problems of early tsunami warning.

Keywords: Tsunami Warning, Ocean Bottom Seismometer, Pressure gauge

1、前言與研究目的

進入千禧年以來，2004 年南亞與 2011 年日本兩次嚴重的海嘯事件重創當地，這也促使世界各國投入更多資源建立地震與海嘯預警的系統，同時也更為重視相關研究。臺灣座落在菲律賓海板塊與歐亞大陸板塊交界處，地震活動相當的頻繁，其中較大規模的地震多集中於東部及其周圍海域區域。此外，多個研究指出，臺灣東北外海的琉球隱沒系統與西南外海的馬尼拉隱沒系統被視為是極有可能發生地震海嘯的區域 (Hsu et al., 2013; Li et al., 2015)。臺灣島上雖有著相當高密度的地震觀測網，但受限於測站的包覆度，一定程度的影響了海域地震的偵測能力與定位精確度，因此要如何即時並準確的發布地震與海嘯警報以達減災之目的，是我國極為重要的課題之一。

中央氣象署自 2006 年起執行「東部海域電纜式海底地震儀及海洋物理觀測系統建置計畫」，目的即是為了加強海域地震觀測能力與發生地震及海嘯預警系統 (Hsiao et al., 2014)。海纜系統第一期於 2011 年完工，其纜線自宜蘭頭城往東部外海延伸 45 公里長。目前系統經 2017 年與 2020 年的擴建後，現今已完成 9 座即時觀測站的架設，纜線由東部外海延伸至花東海盆，再跨過恆春半島外海，最終在屏東枋山登陸，總長達 735 公里長 (圖 1-1)。各觀測站皆設有加速度儀、速度儀、傾斜儀、溫度計、壓力計、水聽計等，並即時地將資料傳送至陸上監測站。其中壓力用於記錄海床的壓力變化，協助海嘯偵測的任務，因此在海纜觀測系統中扮演著舉足輕重的角色。

Doo et al. (2021) 的研究指出 EOS4 之壓力計在 2018 年 2 月上旬產生了永久性的壓力變化 (圖 1-2，約增加 3.5×10^4 Pa，等同增加 3.5 公尺左右的水深)，同時段的儀器位態紀錄顯示，事件前後儀器旋轉了約 30° ，推測當時 2 月上旬花蓮地震序列可能觸發海底山崩事件，造成該測站因邊坡崩塌而滾落至較深的水域或是受到土石掩埋。在該事件後至今約四年的壓力計觀測記錄中，可看出各測站之壓力隨

時間有不同程度偏移（圖 1-2），又以 EOS2、EOS3 與 EOS4 站較為明顯。過去研究指出壓力計放至海床後，儀器到達到平衡狀態大約要數週至一個月的時間 (Fox, 1990, 1993)，EOS2-EOS4 三個測站已運作多年，而 EOS5-EOSA 則啟用於 2020 年底，預期應已達到穩定的狀態，因此壓力計觀測到的變化趨勢可能來自於儀器未態改變、儀器漂移 (instrument drift)、儀器本身性能、外在的溫壓等環境有微小的變化或是季節性的變化等。因此若能了解可能的雜訊來源，並進一步修正，這可幫助我們從觀測資料中獲取更多資訊。

為了解可能造成壓力計資料偏移的原因，我們希望藉由分析海纜觀測系統的壓力計、傾斜儀與溫度計等觀測紀錄，並輔以其他相關資料彙整探討。在此之前，已有相關研究對東北外海的 EOS2-EOS4 測站之壓力計進行分析 (許雅儒等人，2020)。本計畫將加入第三期的測站，進一步追蹤新架設測站之壓力計數據，同時比較各測站間的數據，了解不同站位的差異，期望成果能強化海嘯預報技術與幫助幫我們監測構造活動概況，並作為未來海纜擴建之參考依據。

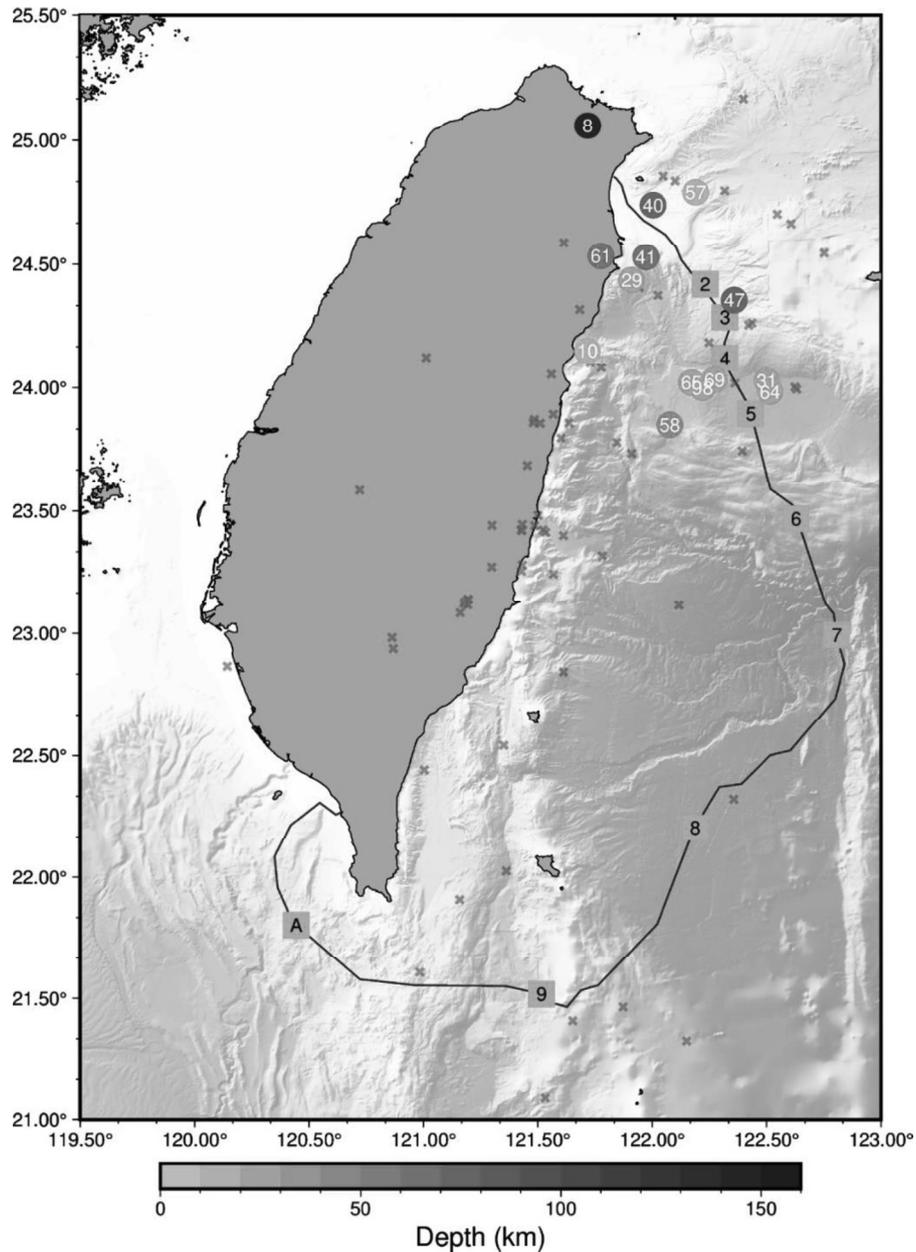


圖 1-1、海纜觀測站與地震分布圖。橘色方框為測站位置，分別對應 EOS2 至 EOSA 共 9 站。彩色圓圈與紅色 X 則標記自 2017 年至 2022 年間規模大於 5.5 的地震。彩色圓圈內數字對應到附錄之地震編號。本圖中地震資料取自中央氣象署之臺灣地震與地球物理資料管理系統 (GDMS)。

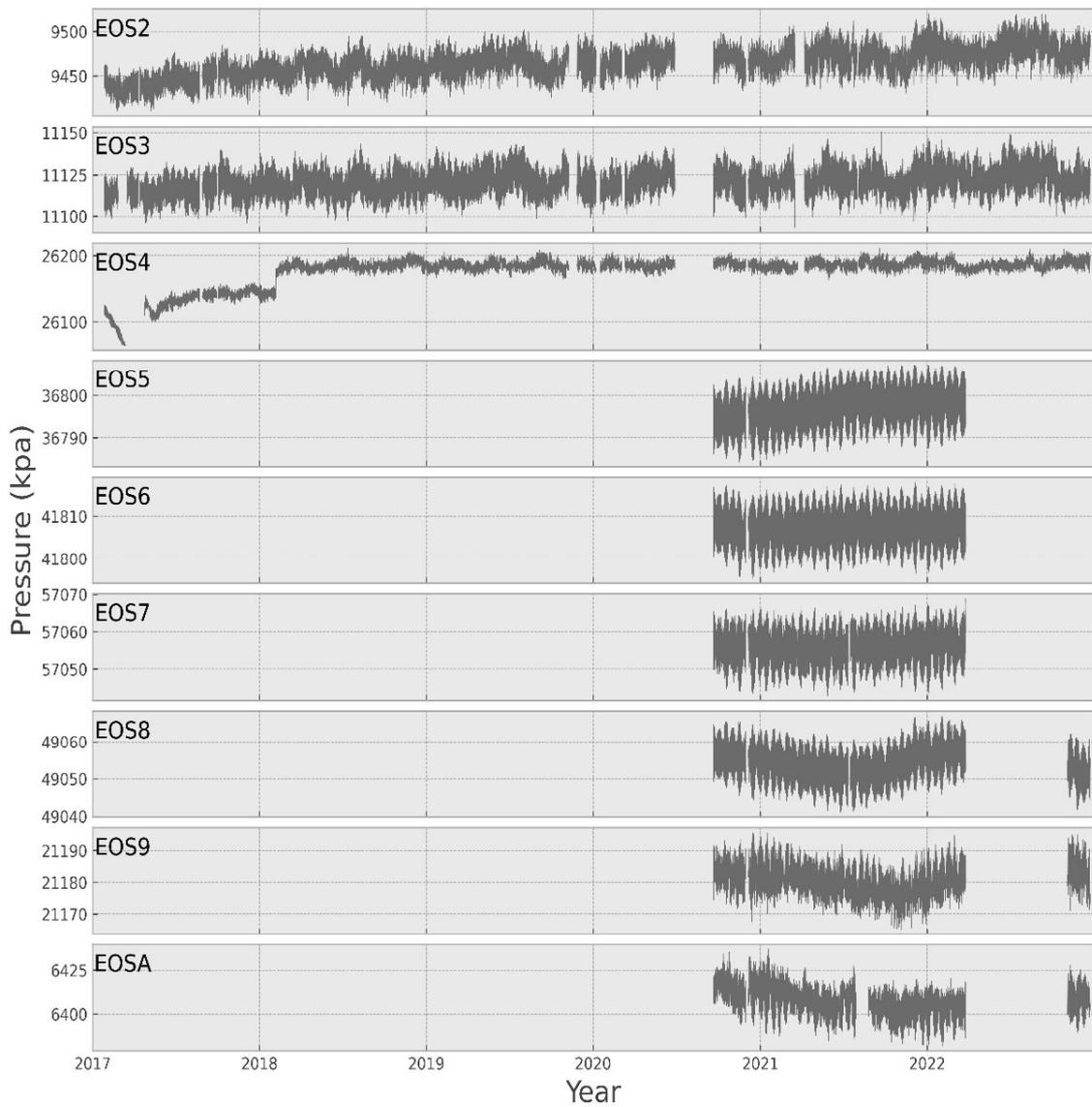


圖 1-2、2017 至 2022 年海纜壓力計資料。藍線為各測站的觀測資料，取樣週期為一個小時。除 EOS4 曾在 2018 年 2 月上旬產生約 3.5×10^4 Pa 的永久壓力變化，其餘測站未觀測到壓力有急遽變化的情況。

2、進度甘特圖

預定進度甘梯圖 (Gantt Chart)												
月 工作項目	第 1 月	第 2 月	第 3 月	第 4 月	第 5 月	第 6 月	第 7 月	第 8 月	第 9 月	第 10 月	第 11 月	第 12 月
統整相關文獻研究	■											
壓力計相關資料檢視	■	■	■	■								
期中報告 (第一查核點)					※							
分析壓力計與相關儀器相關性						■	■	■	■			
分析儀器漂移原因								■	■			
結果討論與分析									■	■		
撰寫期末報告										■	■	
期末報告 (第二查核點)											※	
期末簡報及修改 期末報告												■
工作進度估計 百分比 (累積數)	5	10	20	30	35	45	55	65	75	85	95	100
預定查核點	112年5月15日前提送期中報告。 112年11月13日前提送期末報告。(紙本須於12月31日前繳交)											

3、研究方法

3.1. 儀器位態

海纜地震儀設置於電纜中，投放後無法像陸地上的地震儀可再調整其方位，且因為儀器未固定在海床上，因此需透過傾斜儀的紀錄求取儀器的位態，了解觀測值是否可能受到影響。海纜觀測系統的配置如（圖 3-1）所示，儀器的三軸方向為右手坐標系，傾斜角 (tilt angle) 為 X 軸與地面夾角，朝上為負；旋轉角 (rotate angle) 為沿著 X 軸旋轉角度，逆時鐘方向為正；方位角 (Azimuth) 為 X 軸與正北之夾角，順時針方向為正。資料處理上，我們使用氣象署地震測報中心所提供的測站方位角資訊（圖 4-14），再加上傾斜儀數據紀錄可求得傾斜角 ψ 值與旋轉角 ϕ （式 3-1 與式 3-2）：

$$\phi = \tan^{-1}(Y/Z) \dots (\text{式 3-1})$$

$$\psi = \tan^{-1}(Y/\sqrt{Y^2 + Z^2}) \dots (\text{式 3-2})$$

其中 X、Y 與 Z 分別為對應氣象署傾斜儀之 HA3、HA2 與 HA1 軸。

最後將式 3-2 及式 3-3 結果帶入旋轉矩陣公式（式 3-3），即可將 X、Y 與 Z 分量的記錄修正為 E、N 與 Z 方向的記錄，

$$\begin{bmatrix} D_E \\ D_N \\ D_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta - 90^\circ) & \sin(\theta - 90^\circ) & 0 \\ -\sin(\theta - 90^\circ) & \cos(\theta - 90^\circ) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(-\phi) & 0 & -\sin(-\phi) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(-\phi) & 0 & \cos(-\phi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(-\phi) & \sin(-\phi) \\ 0 & -\sin(-\phi) & \cos(-\phi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{bmatrix} \quad (\text{式 3-3})$$

其中上述 θ 為方位角，而 D_x 、 D_y 、 D_z 為原始觀測資料三軸向振幅， D_E 、 D_N 、 D_Z 為修正後的東西、南北和垂直向振幅。

3.2. 壓力計資料蒐集與初步處理

海床的壓力 p 可用式 3-4 表示：

$$p = \rho gh \dots (\text{式 3-4})$$

其中 ρ 為海水密度， g 為重力加速度， h 為測站的深度。上式也說明了影響海床壓力的環境因子包含了地潮、海平面高度變化、海水溫度、密度與地形變化等，因此本計畫將針對海纜觀測系統的絕對壓力計(BDO)與壓力計的溫度資料(BKO)資料進行分析，並輔以海床傾斜儀的重力(HA1、HA2與HA3)與傾斜儀溫度資料(BK1、BK2與BK3)一併探討。

目前海纜觀測系統的資料共有 9 座即時觀測站，其中 EOS2、EOS3 與 EOS4 坐落於東北琉球島弧與鄰接的弧前盆地，這三個測站的自 2017 年初即有資料紀錄。而 EOS5 至 EOS9 與 EOSA 共 6 個為後續增設的測站，則是自 2020 年 9 月底開始記錄。本計畫將蒐集 2017 年 1 月 26 日起至 2022 年底的資料進行後續分析。由於資料量龐大，因此首要工作為整理各測站資料，檢查各項資料品質。

本計畫目的在於觀測中長期的資料變化，因此我們將取樣率為 100 Hz 與 10 Hz 的原始資料重新採樣為一小時一筆資料，以降低後續資料分析的耗時。由於記錄期間偶有極端異常值的出現，因此我們以三十天資料之作為為基準，若某點的偏差超過三倍標準差，則將該點視為異常值移除，並使用內插補齊資料；此外，若是資料中斷的時間大於數小時，則將該時段的資料以缺失值處理而不進行內插。上述前置作業所得到的數值再除於各自的放大倍率，即可得到實際的數值變化。

由於第三期新增的各站之壓力計皆設有共站，我們進一步比較兩個共站的資料(位置標記為 20 與 21)，其做法為計算每日平均壓力，並去除各自線性均勢後相減，最終得到共站的壓力差大多落在 0.1-2.5 pa 間(約等同於 0.001 - 0.025 公分高度差，如圖 3-2)，由於此數據相當的小幾乎可忽略不計，因此後續我們皆使用位置編號為 20 的測站進行分析。

3.3. 壓力計資料修正

本計畫中利用 Baytap08 程式 (Tamura & Agnew, 2008)進行壓力計的分析與修正。Baytap08 可分析包含潮汐和其他變化的時間序列：這包括潮汐重力、海洋潮汐以及應變和傾斜數據。透過估算理論地潮及各種環境因子變化對於觀測資料的影響，並進一步推算資料長期趨勢。該程式可視為 Baytap-G (Tamura et al., 1991)改良版本，提供的功能大致相同，但更為容易操作使用。程式將觀測值 y_i 拆解為式 3-5:

$$y_i = v_i + s_i + d_i + c_i + r_i \dots \quad (\text{式 3-5})$$

其中 i 為時間序列的資料點， v_i 為潮汐變化， s_i 、 d_i 與 c_i 為非潮汐造成的變化，分別為已知時間但來源未知的偏移量、長期漂移與環境修正， r_i 為殘差值。其模式可以忽略缺漏的數據資料，透過赤池貝葉斯信息準則(Akaike Bayesian Information

Criterion, ABIC)尋找最佳的擬合結果，以得到最小的 r_i 。

透過 Baytap08，我們可以得到扣除理論潮汐、溫度響應及殘差值的結果，而一般儀器的穩定度會隨運作時間產生系統誤差，其量測值會產生連續性的增減變化，因此我們進一步使用 Watts and Kontoyiannis (1990)提出的儀器漂移行為模型加以修正：

$$P(t) = A_1 \exp(-A_2 t) + A_3 t + A_4 \dots \quad (\text{式 3-6})$$

上式之 P 代表觀測資料， t 為和儀器紀錄起始時間之差，以小時為單位， A_1 為模型中指數項的振幅， A_2 為衰減時間， A_3 線性漂移速率， A_4 為初始壓力。式 3-6 主要包含指數衰減與線性模式，並修正壓力資料，以獲得測站的壓力變化趨勢。

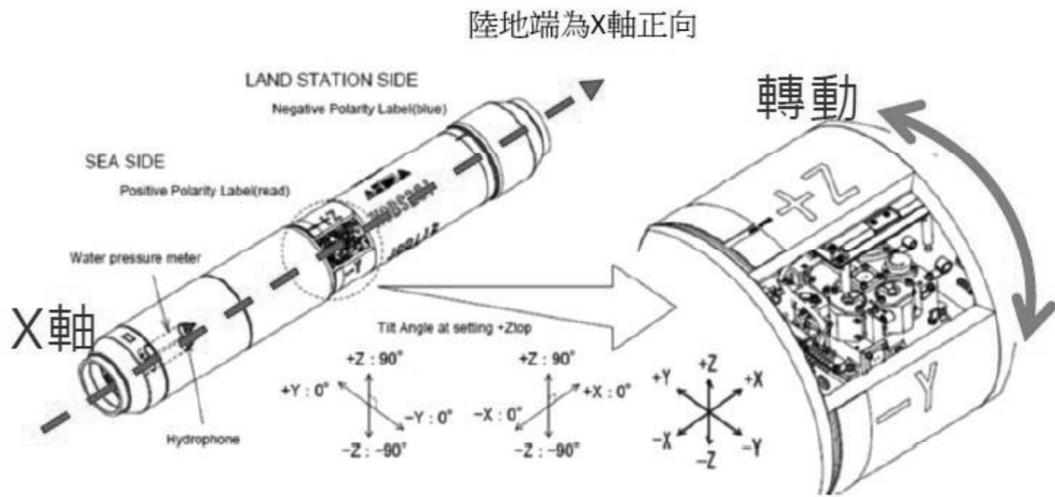


圖 3-1、海纜測站之角度式意圖。其 X、Y、Z 方向分別為海纜軸線方向及其兩個垂直方向，本圖由氣象署地震測報中心提供。

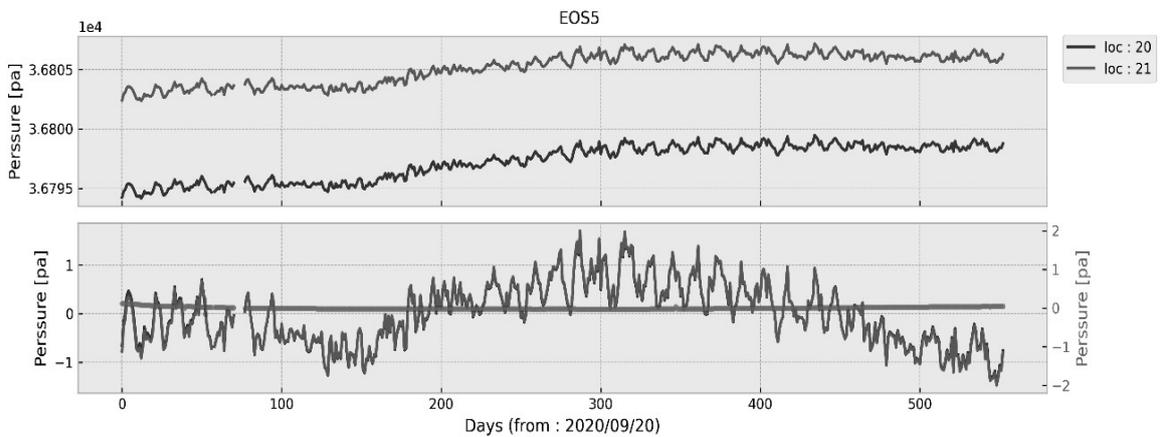


圖 3-2、EOS5 壓力計共站之記錄。上圖為實際壓力值，藍色與綠色分別代表位置 20 與 21 之記錄。下圖為去除線性均勢後之結果，紅線為共站相減之差值，其數值大小參考右軸刻度。

4、結果與討論

4.1. 資料概況

整體來看，位於東北部的 EOS2、EOS3 與 EOS4 之自 2017 年起至 2022 年底的資料覆蓋率大致超過 90%，部分期間有因擴建測試而有紀錄中斷的現象，如 2019 年 11 月 8 日至同年 12 月 9 日。EOS5 至 EOSA 自 2019 年末開始紀錄後資料品質大致穩定（圖 4-1），相較於 EOS2-EOS4 三站，資料記錄短暫中斷的狀況較少出現。但後續擴建的測站在 2022 年 3 月底至 11 月上旬，因纜線問題暫時中斷紀錄，而目前 EOS8 至 EOSA 已在 2022 年底回復資料的傳輸。

不論是早期架設的 3 個測站，亦或是後期擴建的 6 個測站，壓力計與傾斜儀之溫度感測器之變化趨勢類似（圖 4-2 (a) 至圖 4-10 (a)），但數值明顯不同，各測站之壓力計與傾斜儀中的感測器溫度分別約落在 1.5~5.5°C (BKO) 與 14°C ~18°C (BK1、BK2 與 BK3) 之間。其中，EOS2、EOS3 與 EOS4 壓力計溫度感測器在 2019 年 9 月 20 日起數值驟增至 300 °C 以上，並持續到 2020 年 7 月 8 日才回復（圖 4-12），由於該數值明顯過高，且其餘儀器並未有觀測到異常的數據，因此我們推測該現象可能是壓力計溫度感測器或纜線傳輸異常所導致。在許雅儒等人（2020）的研究中已提出 EOS2、EOS3 與 EOS4 海床壓力數值呈高度相關的現象（圖 4-2 (b) 至圖 4-4 (b)），他進一步推測應是儀器在運作中升溫導致影響到海床傾斜計的資料。我們初步分析發現，相似的反應在 EOSA 也有觀測到，而 EOS7 與 EOS9 相關係數則約略落在 0.3~0.4 左右，其餘 EOS5、EOS6 與 EOS8 相關係數則不到 0.16。透過比較各測站的深度（圖 4-11），我們發現壓力計與溫度感測器間的相關性大致隨深度降低，並且當深度超過 3000 米，其壓力與溫度間相關係數迅速下降。但 EOS7 則是例外，該站是所有海纜測站最深的一個測站（5554 米），其相關係數約為 0.3，高於相對較淺的 EOS5（3622 米）、EOS6（4072 米）、與 EOS8（4802 米）。截至目前，EOS7 尚有連線問題，因此暫無法肯定是否有其他環境或是儀器因素影響。

此外，傾斜儀的重力加速度的原始資料（HA1、HA2 與 HA3）在協助建置海纜系統的 NEC 公司在 2019 年底更新軟體版本後，噪訊的明顯降低許多（圖 4-13）。

4.2. 傾斜計資料（HA1、HA2 與 HA3）與儀器位態分析

藉由儀器的傾斜角以及旋轉角的數值可幫助我們了解儀器在海底的穩定程度。從分析的結果來看，僅 EOS4 在 2018 年 2 月上旬其旋轉角有較明顯的變化（圖

4-14)，其餘測站之位態於 2017 年至 2022 年期間幾乎沒有明顯的變動 ($< 0.1^\circ$)，這也說明所有的測站在海底大致是處於穩定的狀態，並未受明顯外力影響 (圖 4-14)。而這樣的觀測結果也與 4.1 小節中的壓力數值變化大致吻合。

上述是透過長期的觀測去了解儀器姿態的變化，但若我們放大檢視各測站的傾斜角與旋轉角，我們發現測站多少仍會受中大規模的地震事件影響，使其位態有微小的變化，其中又以位於東北部地震活動度較高的 EOS2-EOS5 四個測站較為明顯。我們篩選 2017 年起地震規模大於 5.5，並將發震時間與儀器位態變化進行比較 (圖 1-1 與圖 4-15)。圖 4-15 中綠線為地震發生後，相對應的測站其傾斜角與旋轉角有較明顯的變化，而這些地震幾乎都坐落於琉球島弧與弧前盆地區域，但資料也顯示並非所有鄰近區域的地震皆會造成儀器的姿態改變，此外，儀器傾斜角與旋轉角的標準差顯示變化量皆遠小於 1° (除 EOS4 測站受 2018 年極端事件影響，而使旋轉角標準差較大)，整體來說，儀器在海床上相對穩定，因此我們觀測到的壓力計變化主要不會來自儀器的位態改變。但值得注意的是，在 2022 年 11 月底 EOS8 與 EOSA 兩個測站在資料重新傳輸後，其傾斜角與旋轉角有相對明顯的變動，我們建議可關注後續的紀錄狀況。

4.3. 壓力計資料 (BDO)

為了解壓力計運作是否有受到潮汐外的訊號干擾，我們以連續小波變化 (continue wavelet transform) 與譜密度 (power spectral density) 以得到壓力計長時間的時空變化。

圖 4-16 至圖 4-18 為各站 (a)、(b) 與 (c) 子圖中分別為之壓力值數據 (取樣週期為一個小時)、小波分析與譜密度，分析結果顯示壓力計的振幅變化主要來自於 23.93、25.82、12.42 與 12 小時這四個週期，而這四個週期可分別對應到潮汐分潮 K_1 、 O_1 、 M_2 與 S_2 ，這與台灣周圍潮汐為混和潮之特性相同，且越深的測站，其雜訊越低。目前的觀測資料量僅有數年的時間，但在 EOS2-EOS4 站中，已可見微弱的季與年週期訊號能量，除上述潮汐的影響之外，並未見其他較明顯的週期性雜訊。

進一步觀察壓力計的波形紀錄，除 EOS4 曾於 2018 年 2 月受地震觸發海底山崩事件而使轉角有較大的變動 (Doo et al., 2021)，並使該站增加 $3-4 \times 10^4$ Pa 永久性的壓力變化，其餘測站並未在短期間內觀測到明顯的數據變化。後續四年的觀測記錄中，可看出各測站之壓力隨時間有連續性變化趨勢，其中又以 EOS2-EOS4 站的變化趨勢較為明顯。過去研究 (Fox, 1990, 1993) 指出壓力計放至海床後，儀器達到平衡狀態大約要數週至一個月的時間，現階段 EOS2-EOS4 已運作多年，而 EOS5-EOSA 啟用於 2020 年底，預期應已達到穩定的狀態 (Fox, 1990, 1993; Hino et al., 2013)，因此我們認為測站之壓力數據的變化可能來自於外在的環境的變化

(如溫壓、地形)或是儀器漂移。整體來看,在2018年花蓮地震序列後,所有測站並未觀察到有單一事件造成明顯的永久性變化,但存在不同程度的漂移現象,因此我們需進一步進行修正與移除。

4.4. 壓力計資料和溫度變化之關聯性與修正

上述小節我們已知幾個基本資訊:(1)所有測站位大致處於穩定的狀態(2)運作溫度可能影響觀測資料(3)時序分析中並未觀測到潮汐外的週期雜訊。在4.1小節中提到,許雅儒等人(2020)的研究中指出電子儀器在記錄過程升溫,並進而影響到海床壓力讀數,上述計畫僅使用EOS2、EOS3與EOS4進行研究,本計畫納入新增的測站,而4.2節中提到測站之壓力計觀測值和溫度的相關性隨測站深度增加而下降,因此本計畫進一步使用Baytap08推估理論潮汐與溫度變化對於海床壓力資料的影響,圖4-19-圖4-27展示其結果。各圖之(a)與(b)展示各站之壓力值與溫度值,(c)-(e)則為Baytap08所推算之理論地潮、溫度效應與殘差值。從溫度計顯示當儀器深度越深其溫度越小,同時我們得到溫度效應之影響明顯增高,甚至會高出理論地潮的影響,也就是海床壓力資料對於溫度變化的反應明顯比理論潮汐影響大。(例如EOS2推估地潮變化小於100 hpa,但其相對的溫度效應卻高達近500 hpa),這也顯示儀器運作溫度的變化明顯會影響壓力計的紀錄數值。

圖4-19-圖4-27子圖(a)之紅線為各站壓力值扣除理論潮汐、溫度效應與殘差值,透過去除潮汐與環境因子的影響,其時間序列之趨勢應主要來自儀器漂移的影響。因此我們進一步使用式3-6去除儀器漂移的效應(圖4-28)。在此階段中,我們使用2018年3月後至2021年的資料進行分析。各站壓力修正結果如圖4-29。我們獲得測站的壓力趨勢變化,斜率為正值代表壓力增大,儀器可能有下陷的現象。反之則為壓力減小,海床可能有上升的行為。結果顯示長期各站之變化大約落至正負25 hpa間。EOS2、EOS3與EOS4在2020年7月前之變化則大於50 hpa。短期內有如此高的波動變化並非正常,許雅儒等人(2020)提出外在的海洋洋流變化所影響的約小於4 hpa,該值遠小於觀測到的波動量,因此推測如此高的變動量可能因海纜觀測系統之儀器未固定於海床上,導致儀器穩定度不夠高,使其間接影響觀測品質,但本計畫透過傾斜儀求得儀器位態顯示變化量不大,我們認為應非儀器於海床不穩定所造成。上述結果去除外在的環境因素與儀器飄移,但仍無法明確判斷為何觀測值呈現如此大的波動量,因此尚須更多的相關資料進行分析探討。

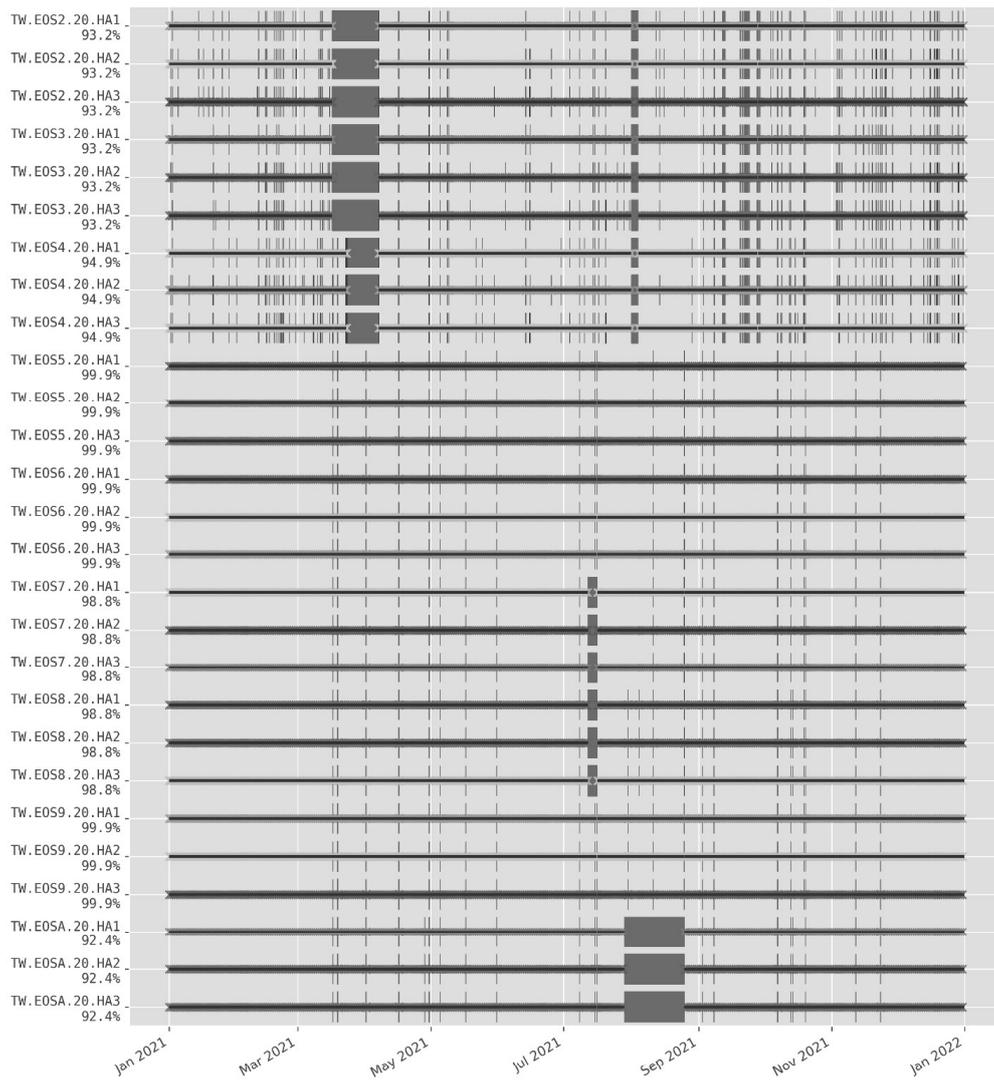


圖 4-1、各測站傾斜儀在 2021 年資料覆蓋情況。其中紅色虛線標記資料有中斷的時間點。整體來看，後期增設的 6 站較少出現紀錄短暫中斷的情況。

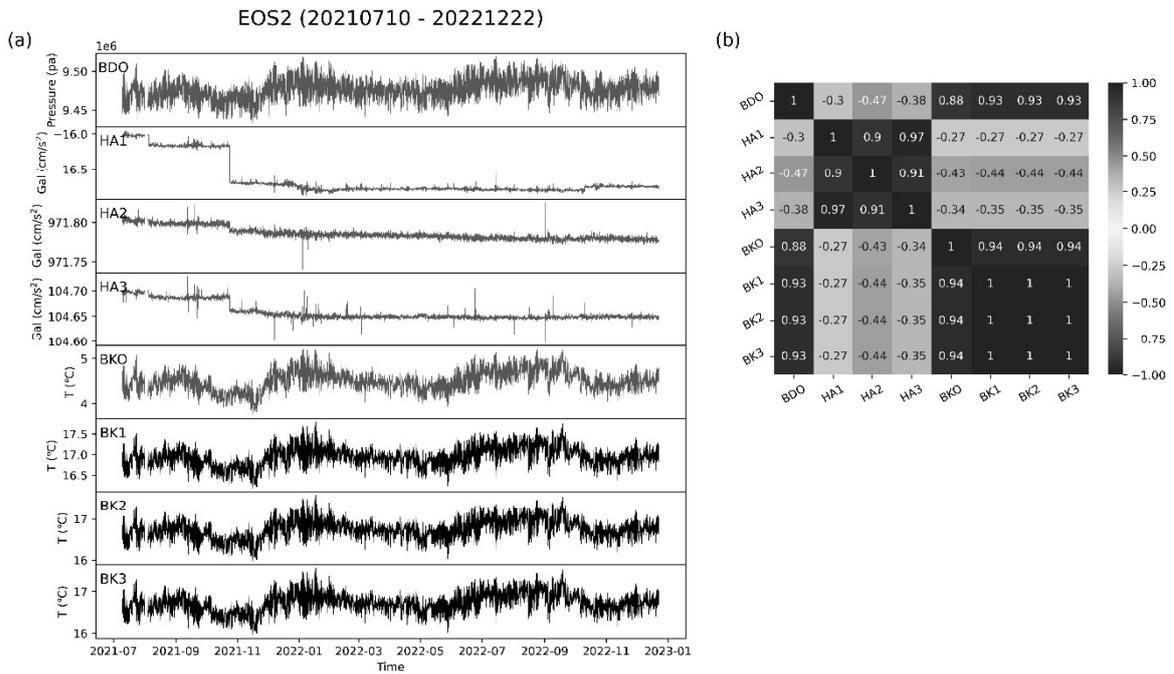


圖 4-2、EOS2 壓力計與傾斜儀資料。由於 EOS2、EOS3 與 EOS4 三站在 2019 年 9 月 20 日至 2020 年 7 月 8 日間 BKO 資料有異常，因此僅擷取 2021 年 7 月 10 日後後的資料。圖 4-3 與圖 4-4 亦同。(a) 各項資料的波形資料，採樣週期為一個小時。(b) 各分量的相關係數矩陣。

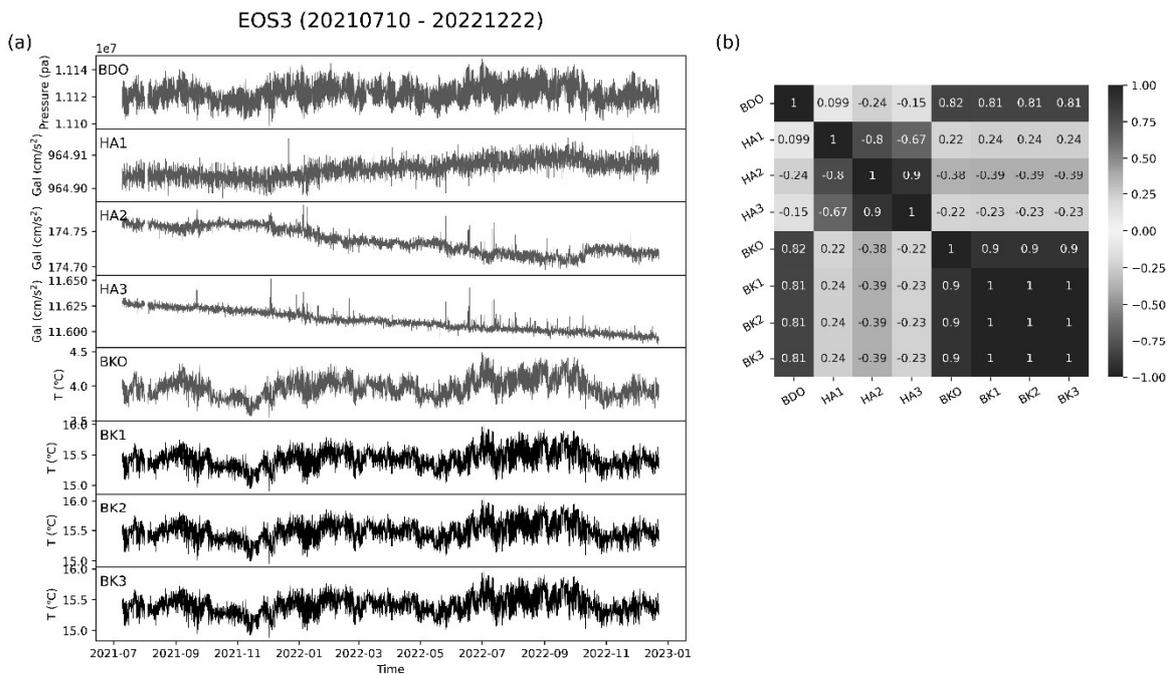


圖 4-3、EOS3 壓力計與傾斜儀資料。(a) 各項資料的波形資料，採樣週期為一個小時。(b) 各分量的相關係數矩陣。

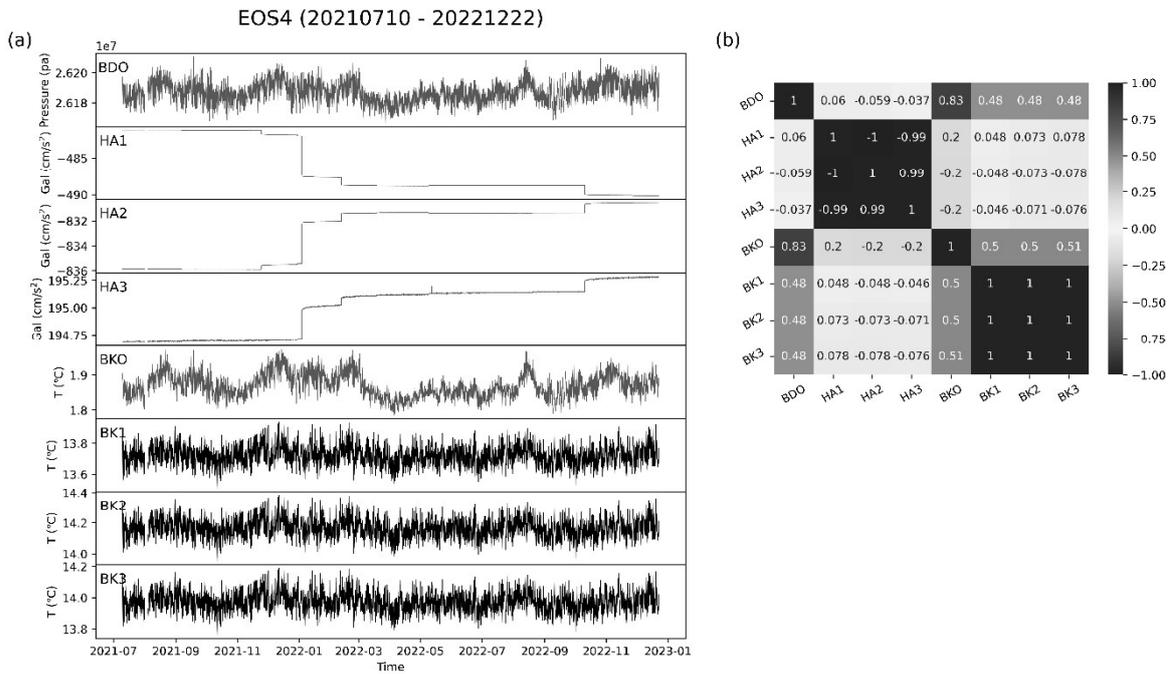


圖 4-4、EOS4 壓力計與傾斜儀資料。(a) 各項資料的波形資料，採樣週期為一個小時。(b) 各分量的相關係數矩陣。

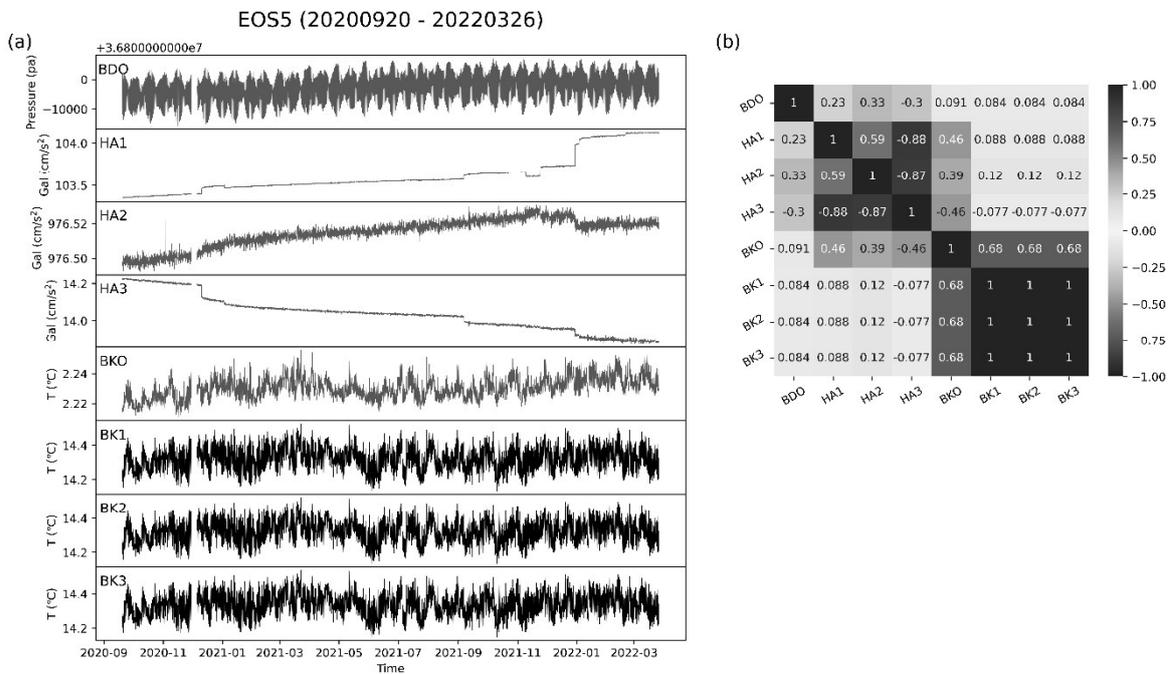


圖 4-5、EOS5 壓力計與傾斜儀資料。(a) 2021 年 9 月 20 日至 2022 年 3 月 26 日之波形資料，採樣週期為一個小時。(b) 各分量的相關係數矩陣。

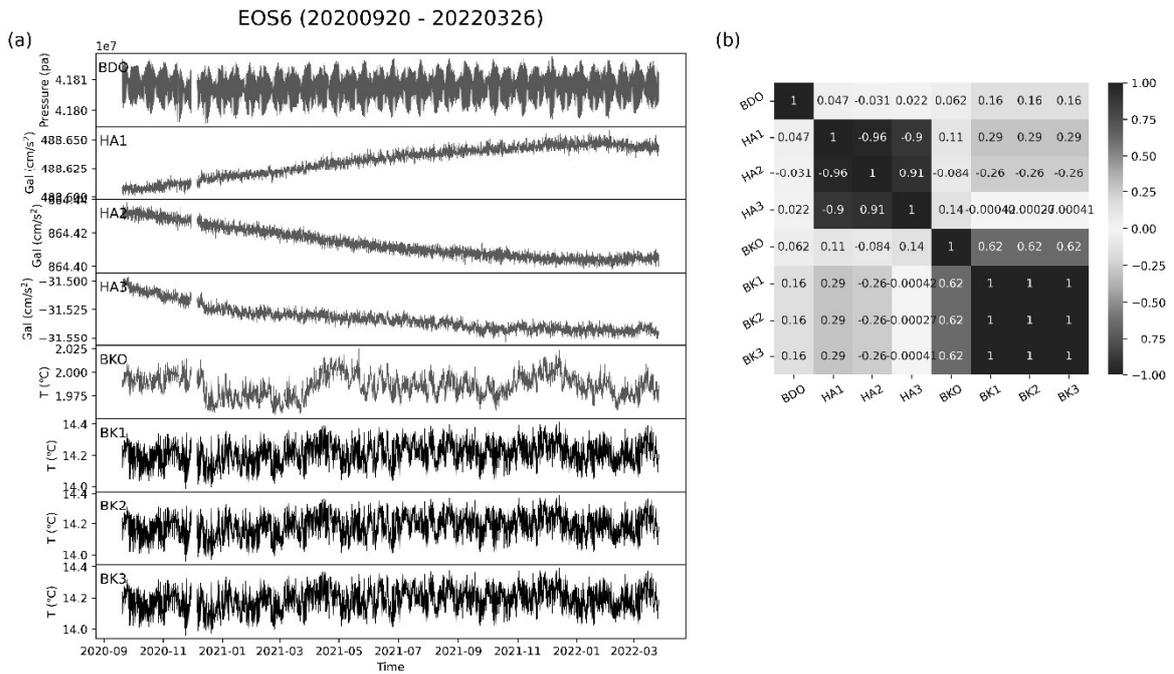


圖 4-6、EOS6 壓力計與傾斜儀資料。(a) 2021 年 9 月 20 日至 2022 年 3 月 26 日之波形資料，採樣週期為一個小時。(b) 各分量的相關係數矩陣。

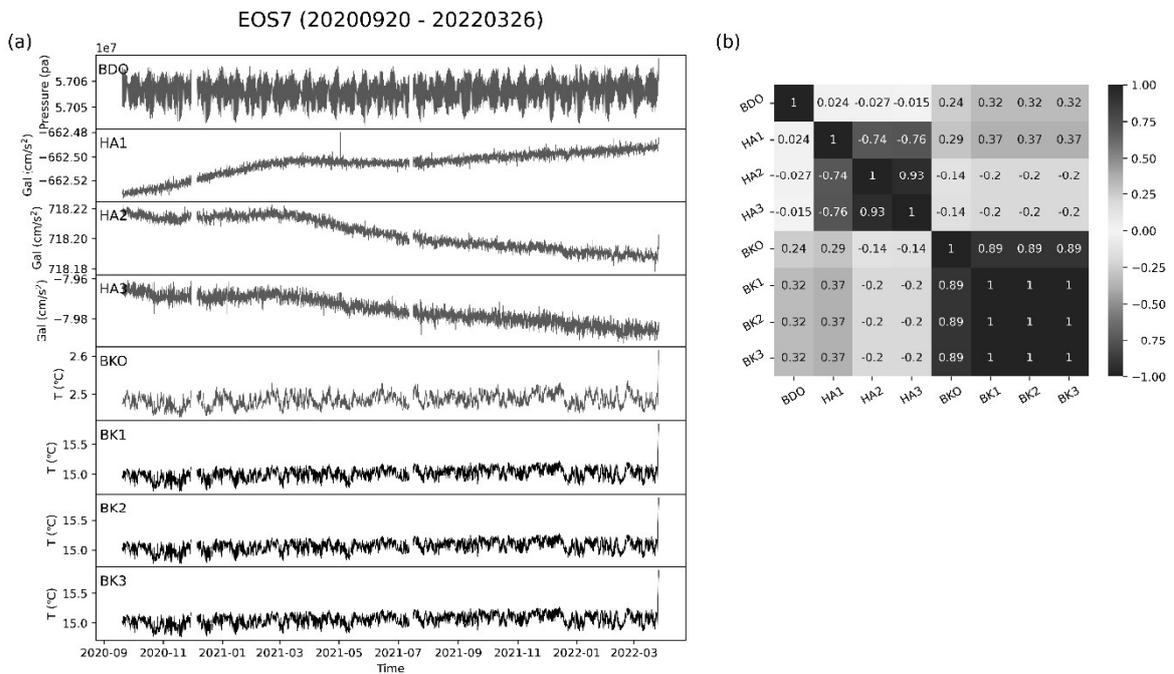


圖 4-7、EOS7 壓力計與傾斜儀資料。(a) 2021 年 9 月 20 日至 2022 年 3 月 26 日之波形資料，採樣週期為一個小時。(b) 各分量的相關係數矩陣。

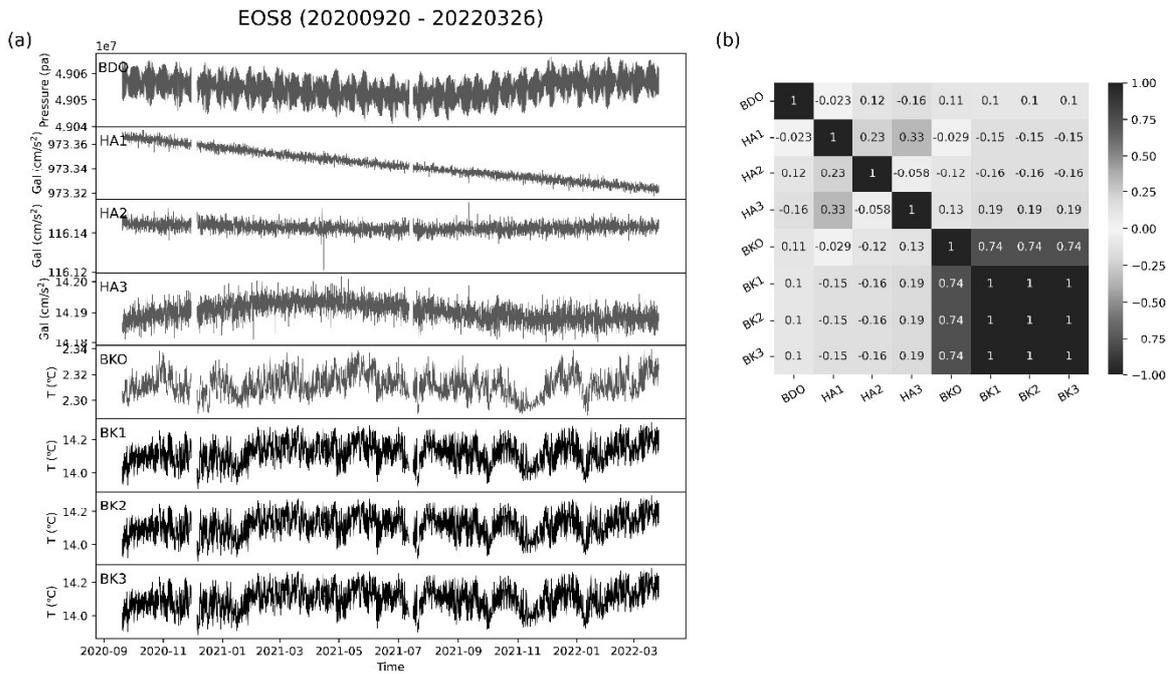


圖 4-8、EOS8 壓力計與傾斜儀資料。(a) 2021 年 9 月 20 日至 2022 年 3 月 26 日之波形資料，採樣週期為一個小時。(b) 各分量的相關係數矩陣。

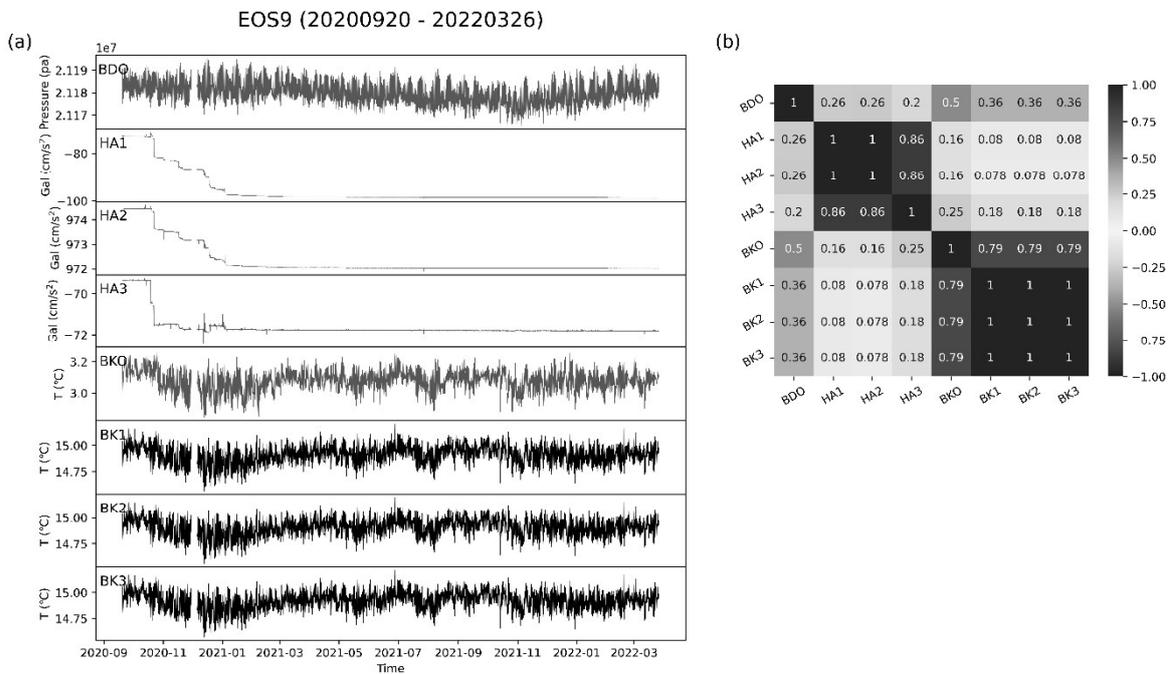


圖 4-9、EOS9 壓力計與傾斜儀資料。(a) 2021 年 9 月 20 日至 2022 年 3 月 26 日之波形資料，採樣週期為一個小時。(b) 各分量的相關係數矩陣。

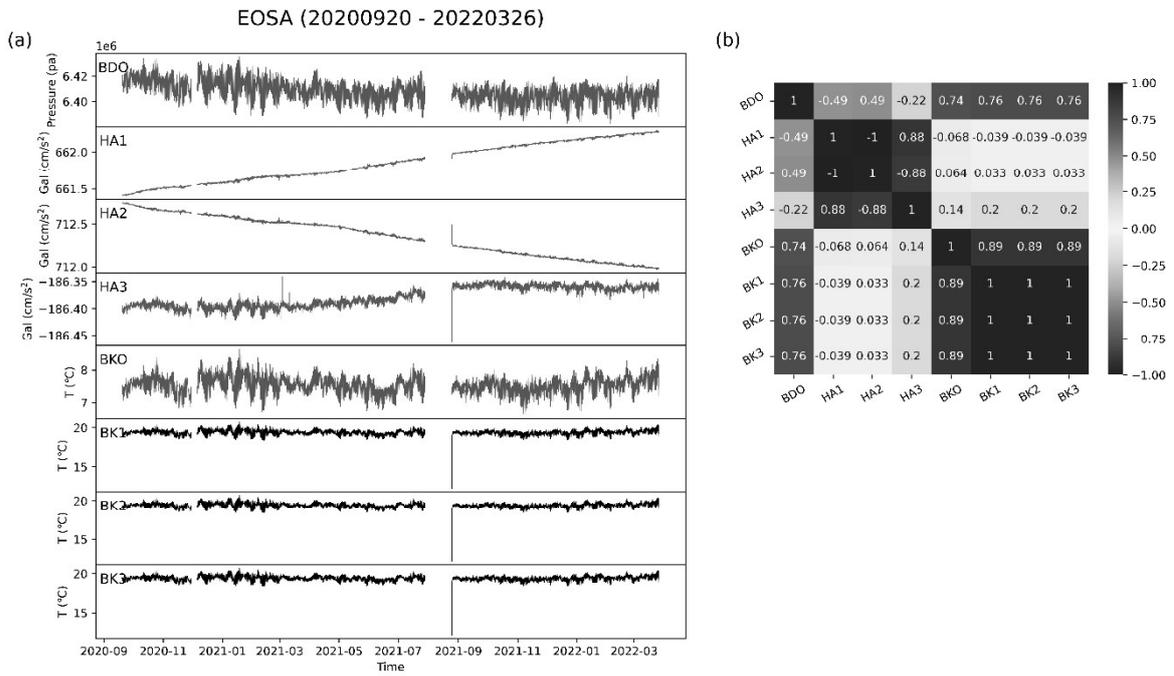


圖 4-10、EOSA 壓力計與傾斜儀資料。(a) 2021 年 9 月 20 日至 2022 年 3 月 26 日之波形資料，採樣週期為一個小時。(b) 各分量的相關係數矩陣。

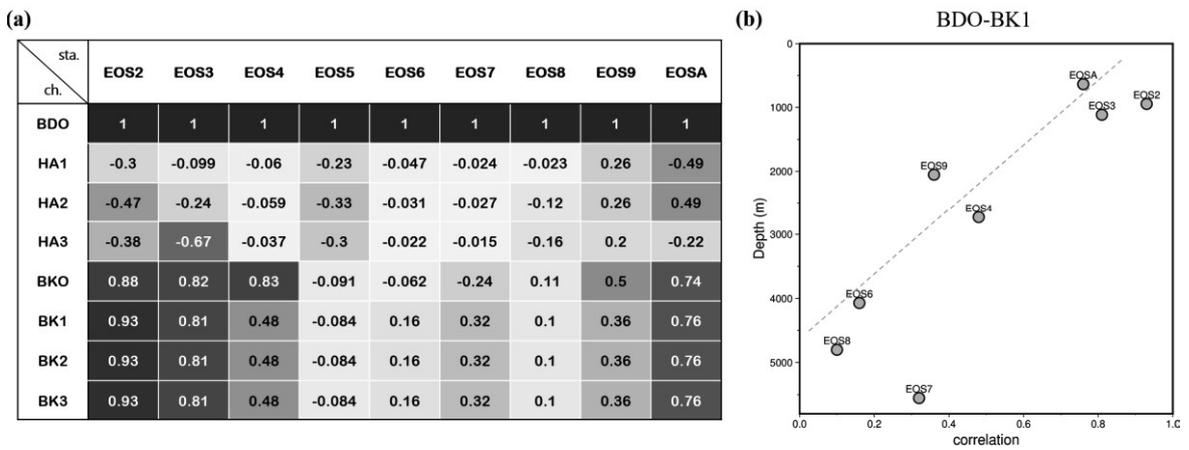


圖 4-11、各測站分量間之相關性。(a) 各測站相關係數圖表。(b) 壓力計與傾斜儀之相關性。

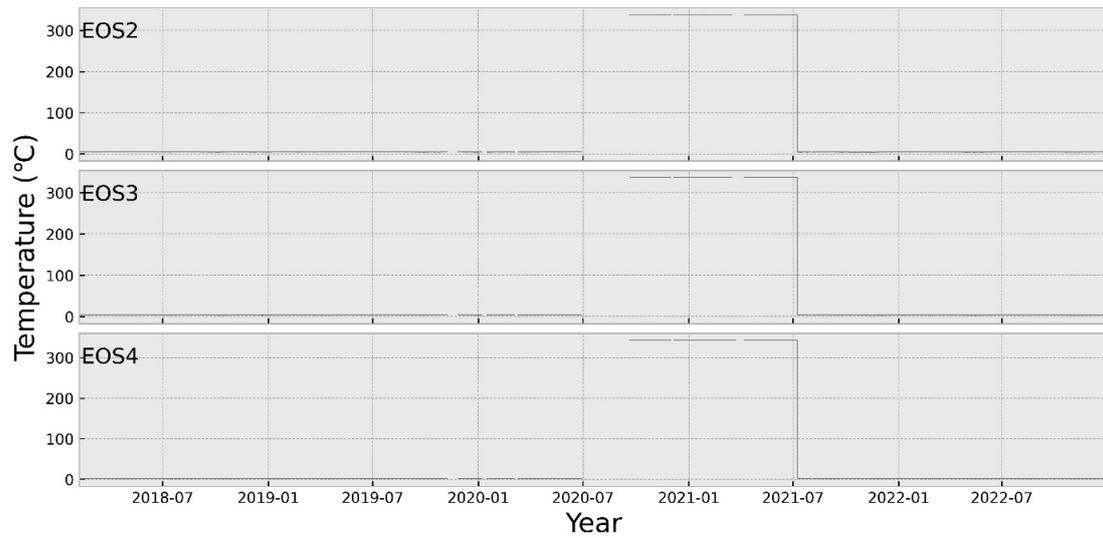


圖 4-12、EOS2、EOS3 與 EOS4 壓力計溫度感測器(BKO)資料。EOS2、EOS3 與 EOS4 壓力計溫度感測器在 2019 年 9 月 20 日與 2020 年 7 月 8 日區間其數值圖驟增至 300 °C。

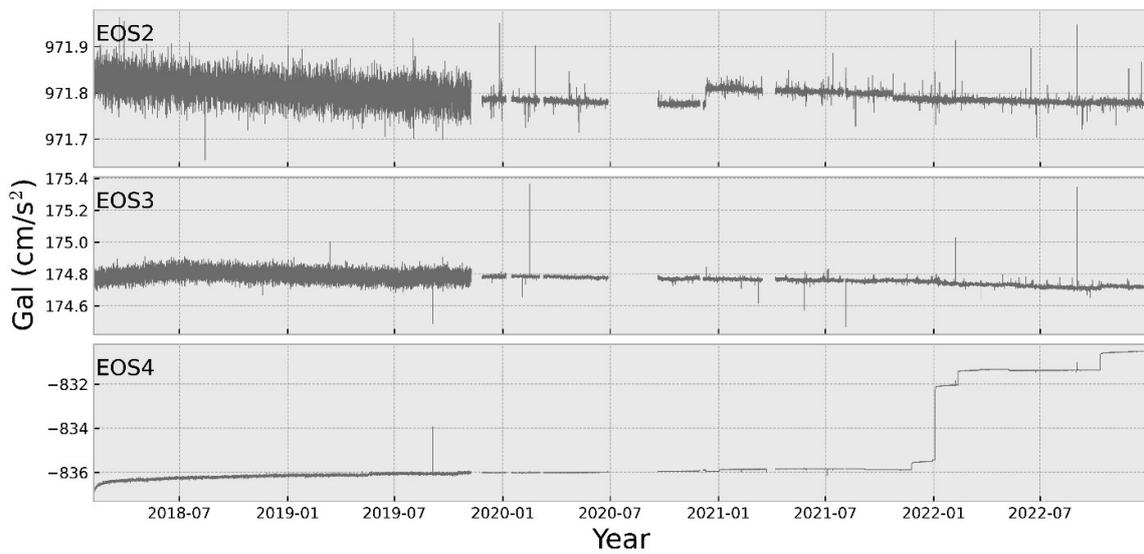


圖 4-13、EOS2、EOS3 與 EOS4 之傾斜儀重力加速度之 HA2 分量資料。2019 年底，在日本 NEC 進行軟體更新後，傾斜儀的重力加速度資料震盪情況明顯減小。

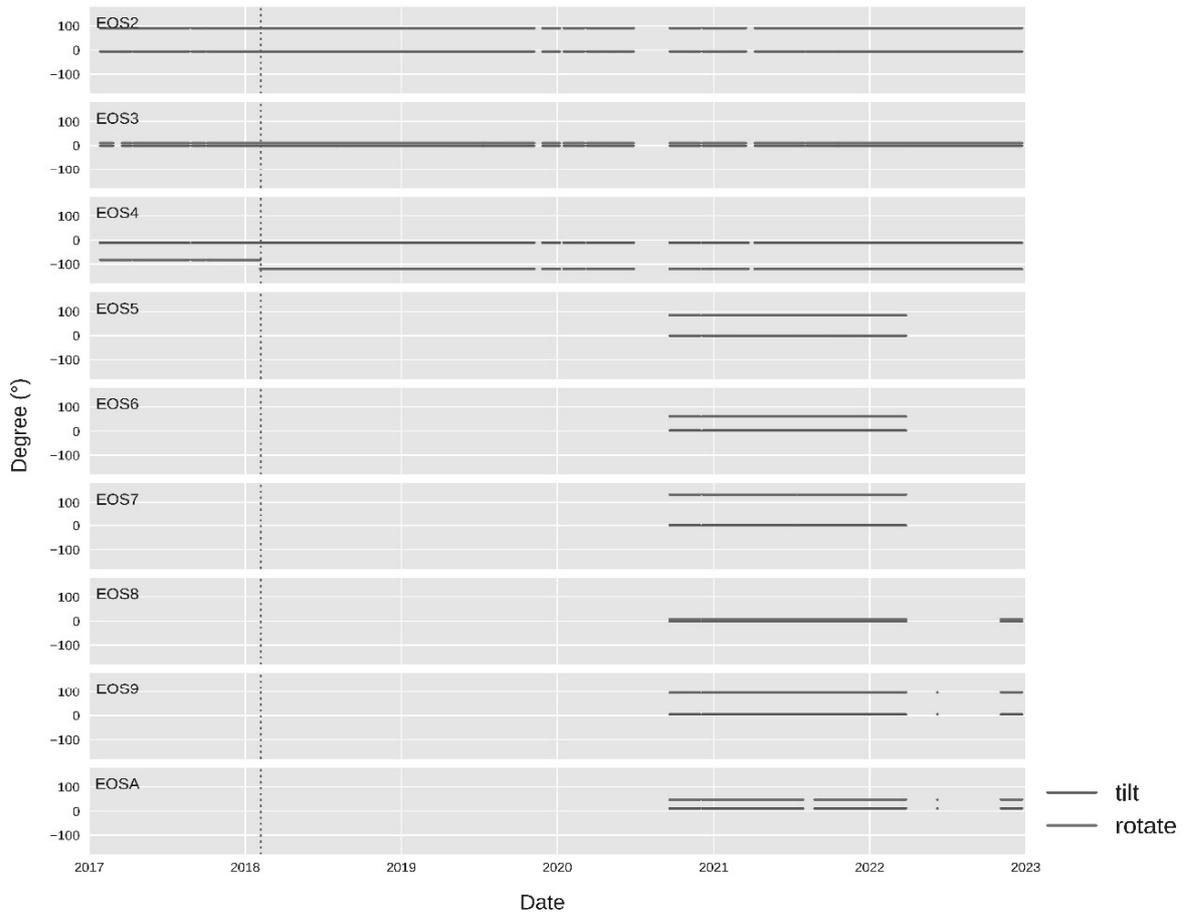


圖 4-14、海纜觀測站之角度變化。藍色虛線標記 2018 年 0206 花蓮地震發震時間，在此地震後 EOS04 測站之轉角（紅線）有明顯的變化，其餘測站在 2017 年至 2022 年 3 月記錄期間並未有明顯變動。

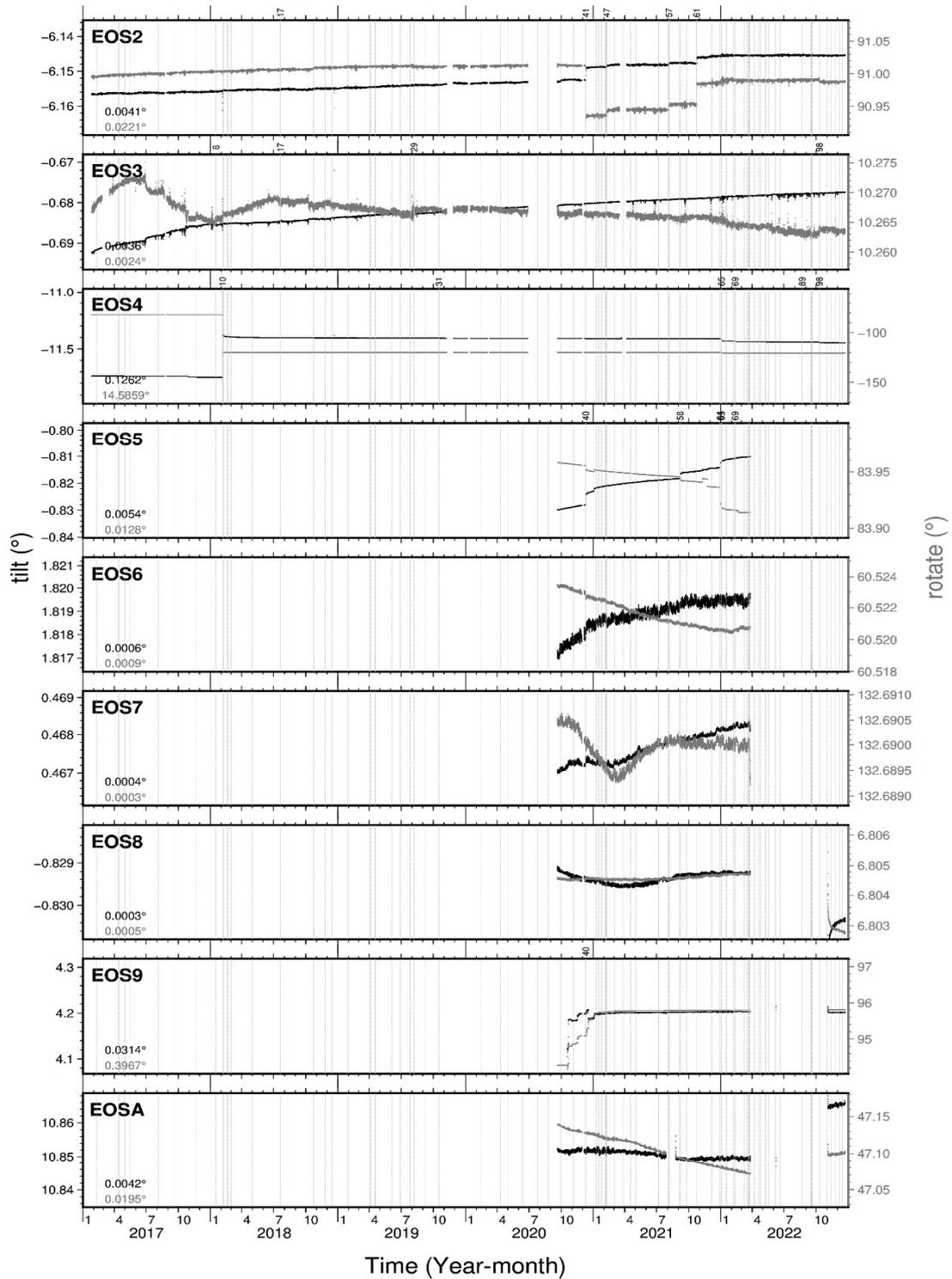


圖 4-15、傾斜儀之傾斜角與旋轉角變化與地震發震時間比對圖。黑色與紅色實心圓分別表示傾斜角與旋轉角。2017 至 2022 年間規模大於 5.5 的地震發震時間以灰線與綠線標記，其中綠線標記儀器位態有較明顯變化的時間點，相對應的地震編號標示於上方，地震位置與詳細資訊可見圖 1-1 與附錄。各子圖左下之數值為傾斜角與旋轉角之表準差。

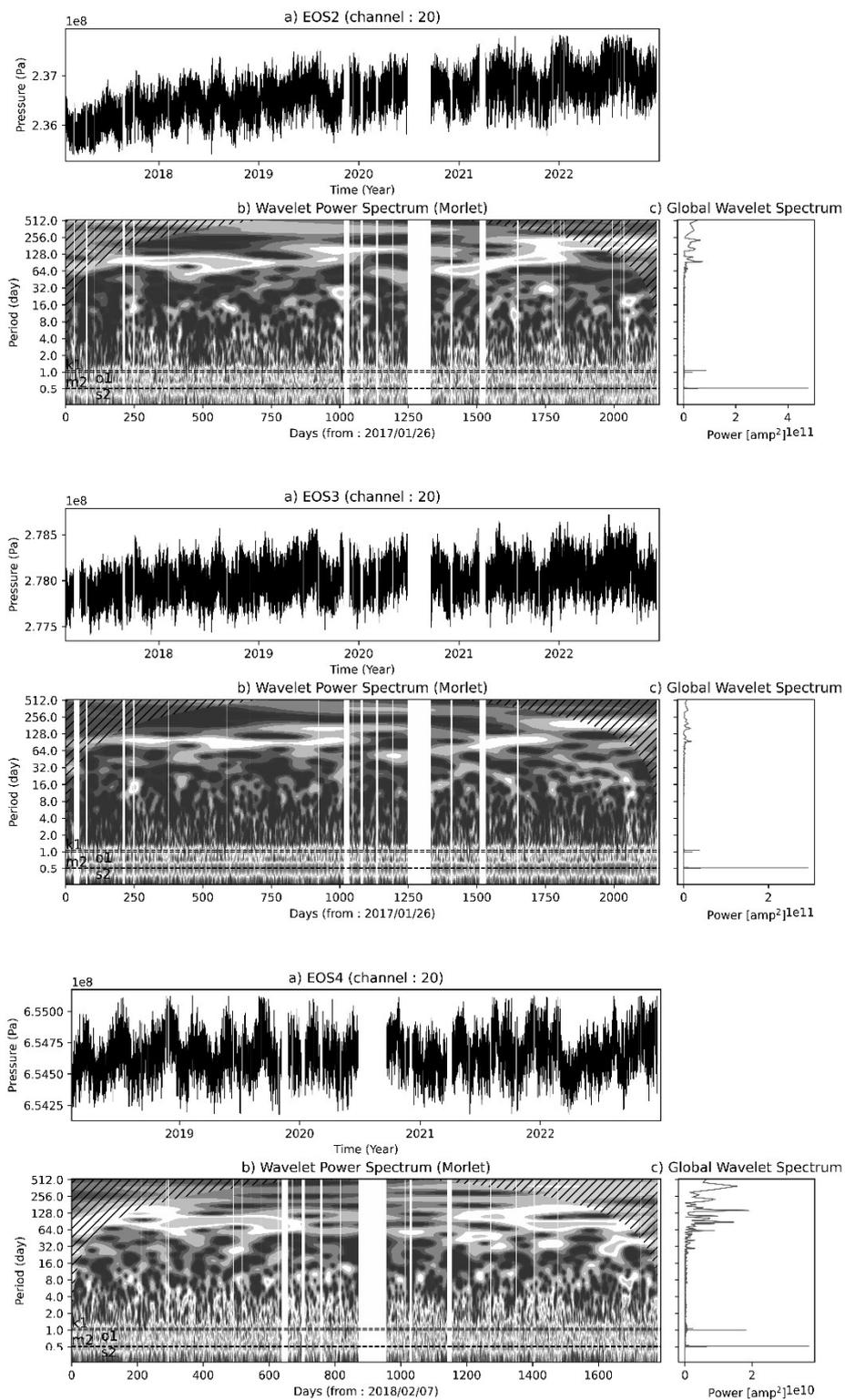


圖 4-16、EOS2 至 EOS4 壓力計波形紀錄、小波分析及譜密度。各測站三個子圖：
 (a) 壓力計波形紀錄。(b) 小波分析，其中半日潮與全日潮分量以白虛線表示。
 (c) 譜密度。EOS4 展示 2018~2022 年的資料，其餘兩個測站則從 2017 年開始。

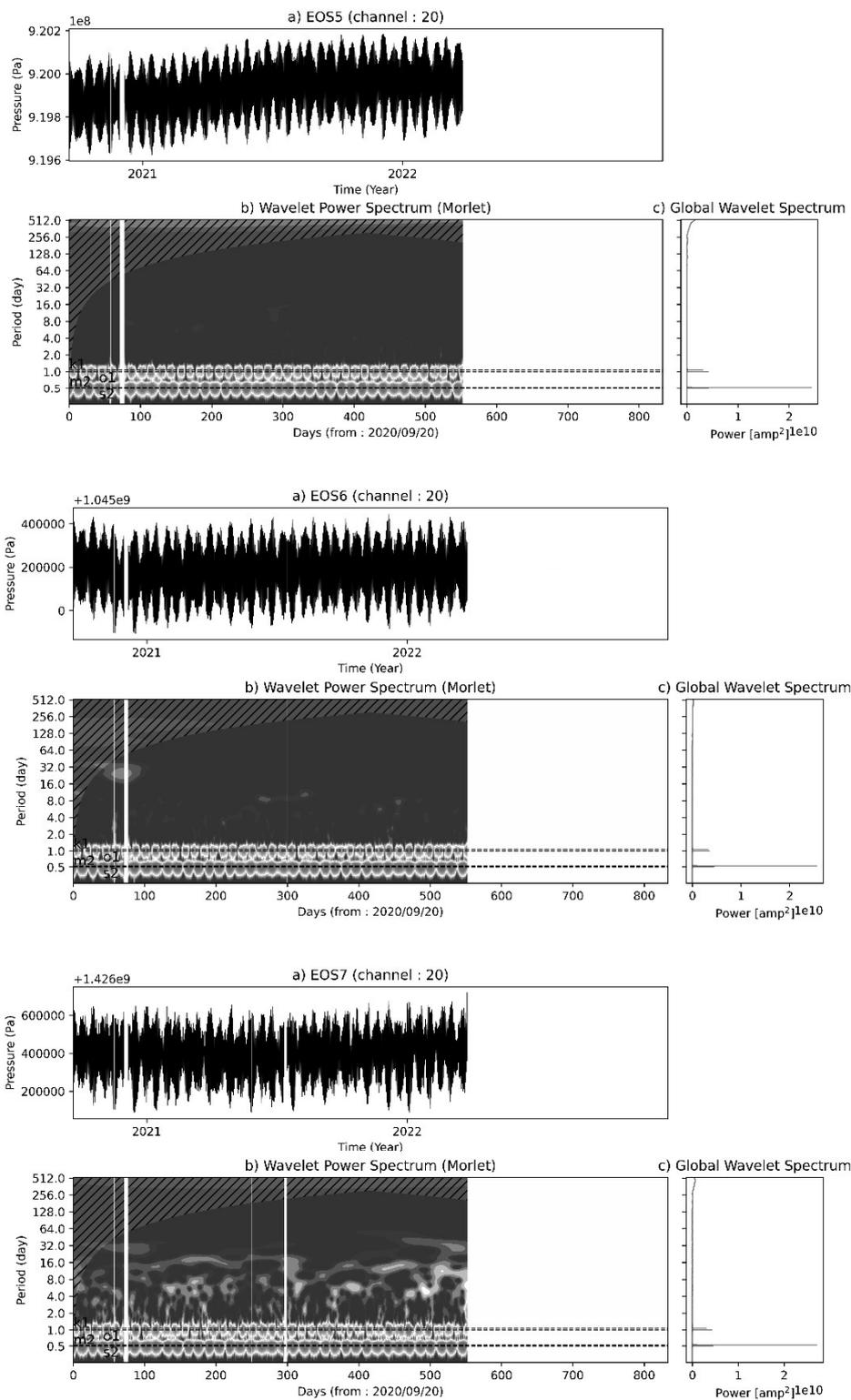


圖 4-17、EOS5 至 EOS7 壓力計波形紀錄、小波分析及譜密度。各測站三個子圖：
 (a) 壓力計波形紀錄。(b) 小波分析，其中半日潮與全日潮分量以白虛線表示。
 (c) 譜密度。EOS5 至 EOS7 三站在 3 月底後因纜線問題暫停紀錄。

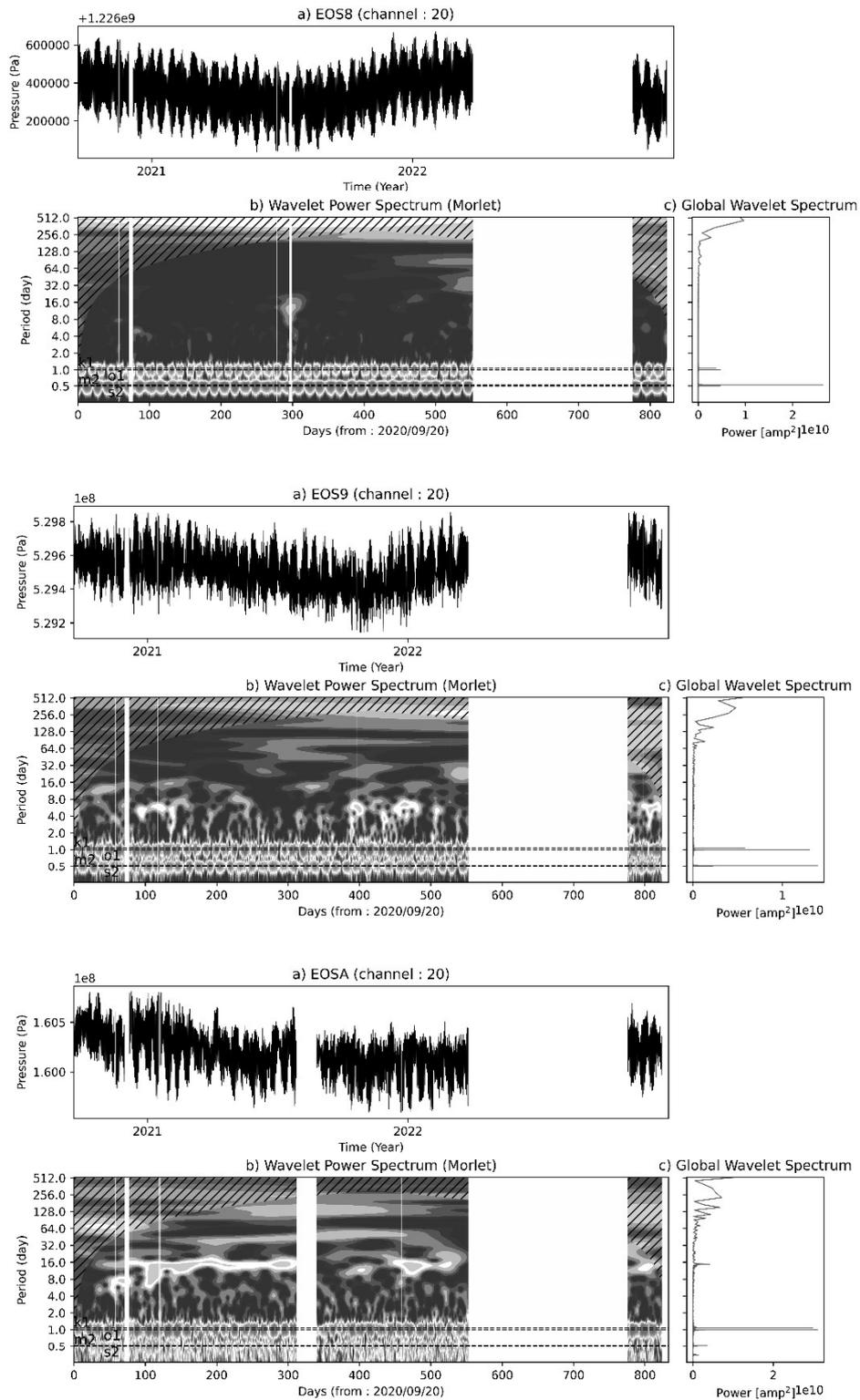


圖 4-18、EOS8 至 EOSA 壓力計波形紀錄、小波分析及譜密度。各測站三個子圖：
 (a) 壓力計波形紀錄。(b) 小波分析，其中半日潮與全日潮分量以白虛線表示。
 (c) 譜密度。EOS8 至 EOSA 站在 2022 年 3 月底至 11 月上旬因纜線問題暫停紀錄。

EOS2

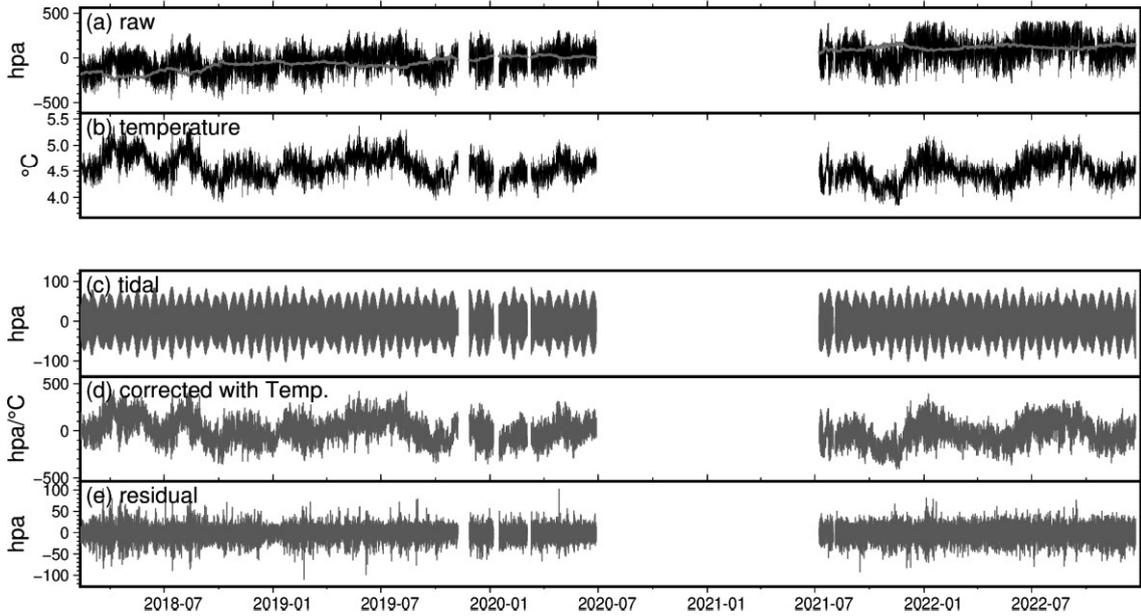


圖 4-19、Baytap08 推估 EOS2 壓力計受理論地潮與溫度之影響。(a) 黑線為壓力計觀測值，紅色線為扣除理論地潮、溫度及殘差值之結果。(b) 壓力計之溫度計數值。(c)-(e) 分別為 Baytap08 推估之理論地潮、溫度影響與殘差值。

EOS3

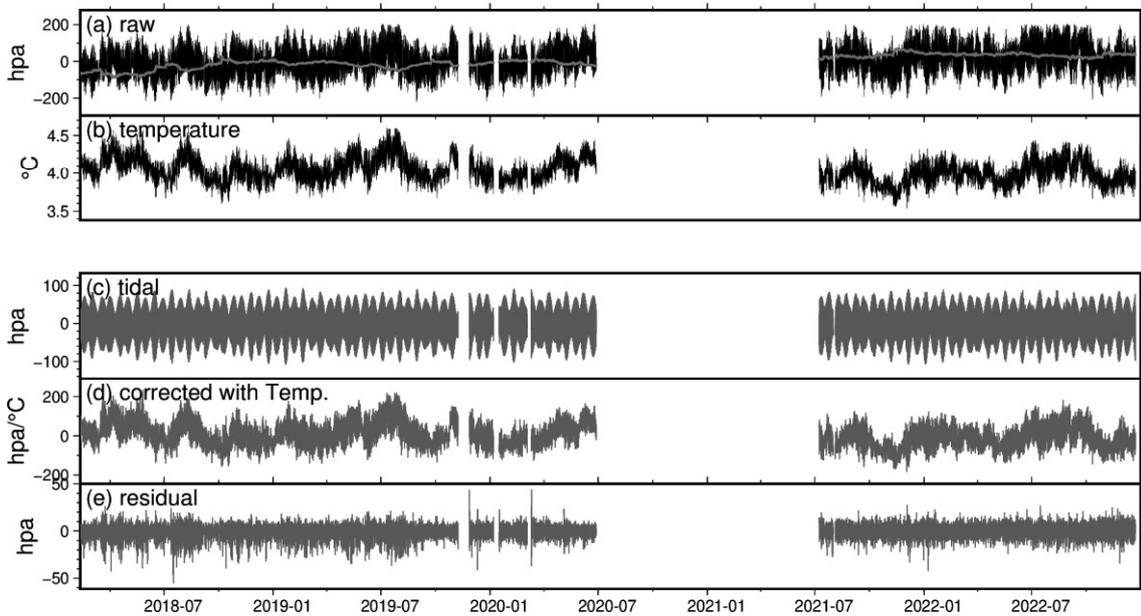


圖 4-20、Baytap08 推估 EOS3 壓力計受理論地潮與溫度之影響。說明同圖 4-19。

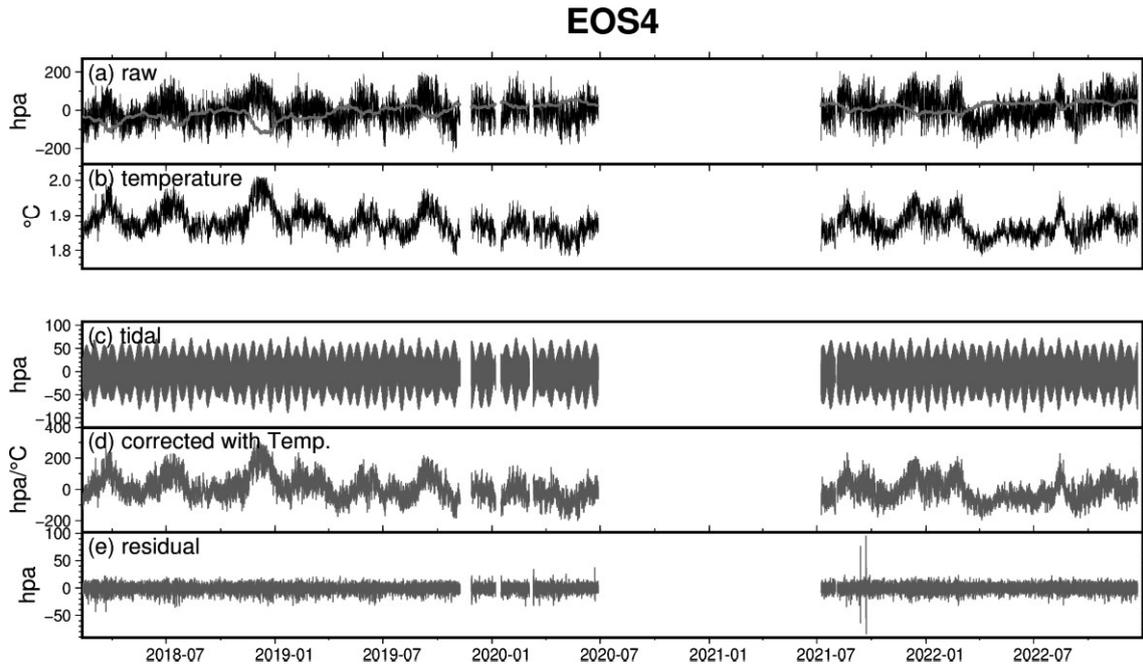


圖 4-21、Baytap08 推估 EOS4 壓力計受理論地潮與溫度之影響。說明同圖 4-19。

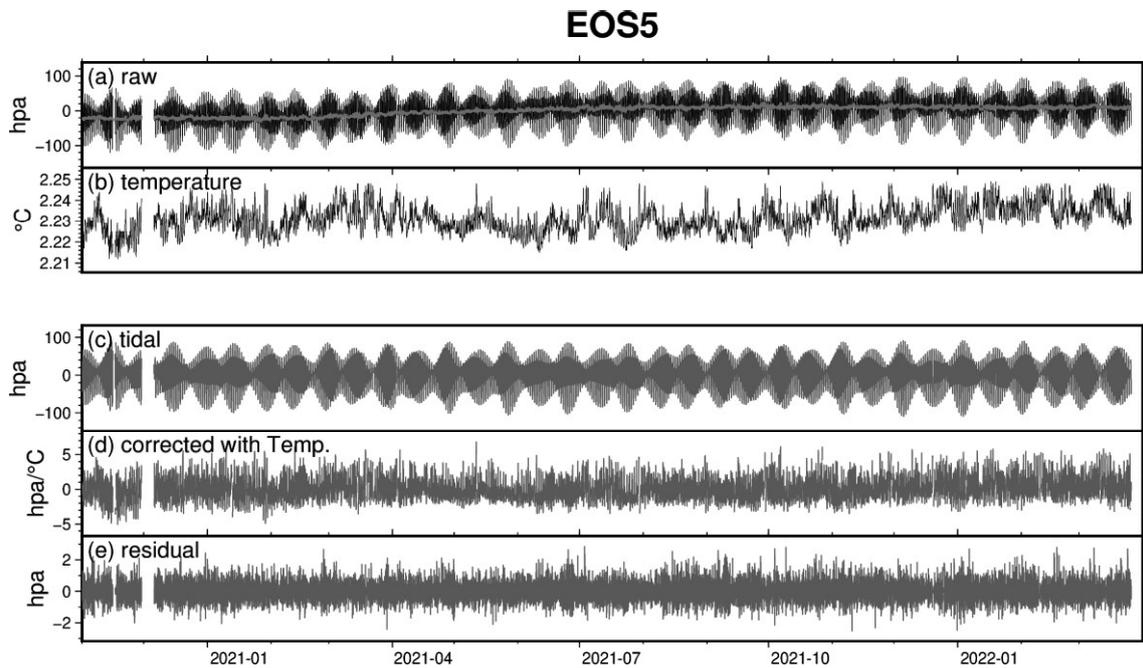


圖 4-22、Baytap08 推估 EOS5 壓力計受理論地潮與溫度之影響。說明同圖 4-19。

EOS6

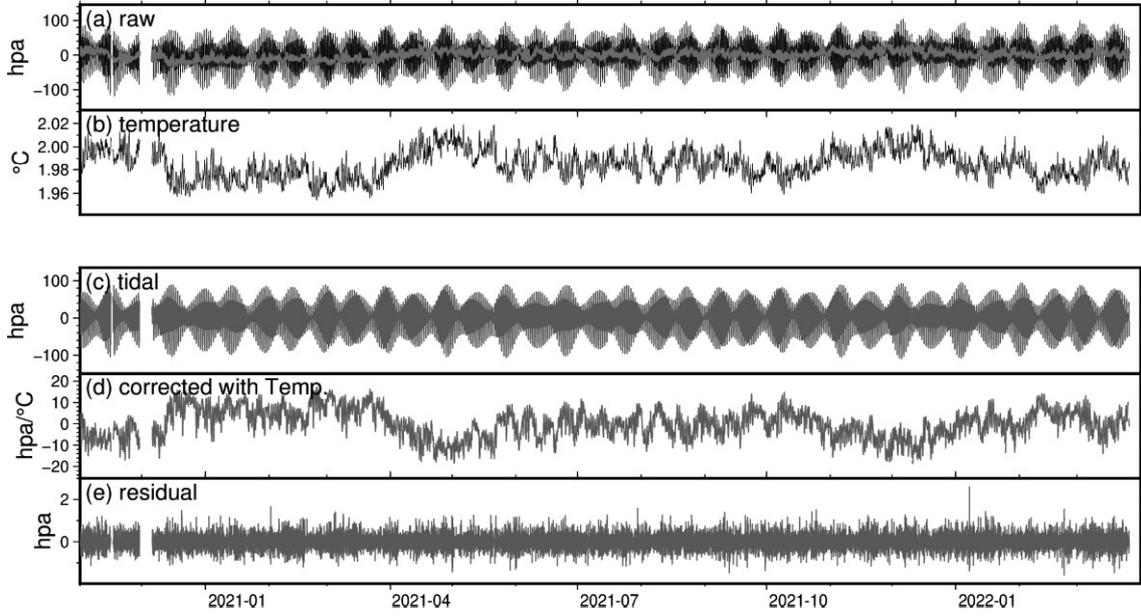


圖 4-23、Baytap08 推估 EOS6 壓力計受理論地潮與溫度之影響。說明同圖 4-19。

EOS7

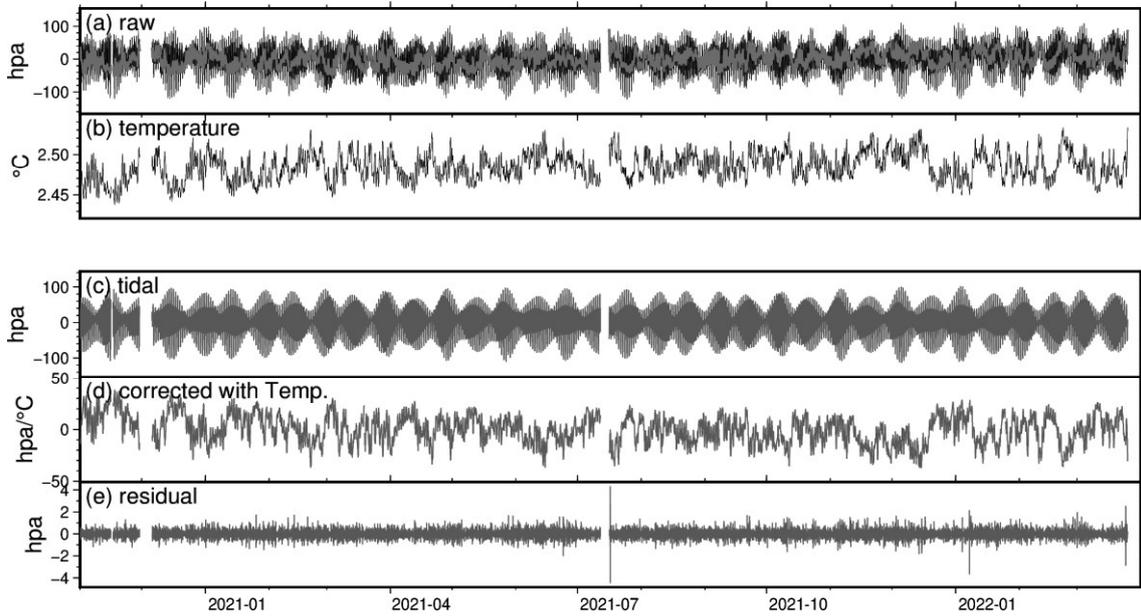


圖 4-24、Baytap08 推估 EOS7 壓力計受理論地潮與溫度之影響。說明同圖 4-19。

EOS8

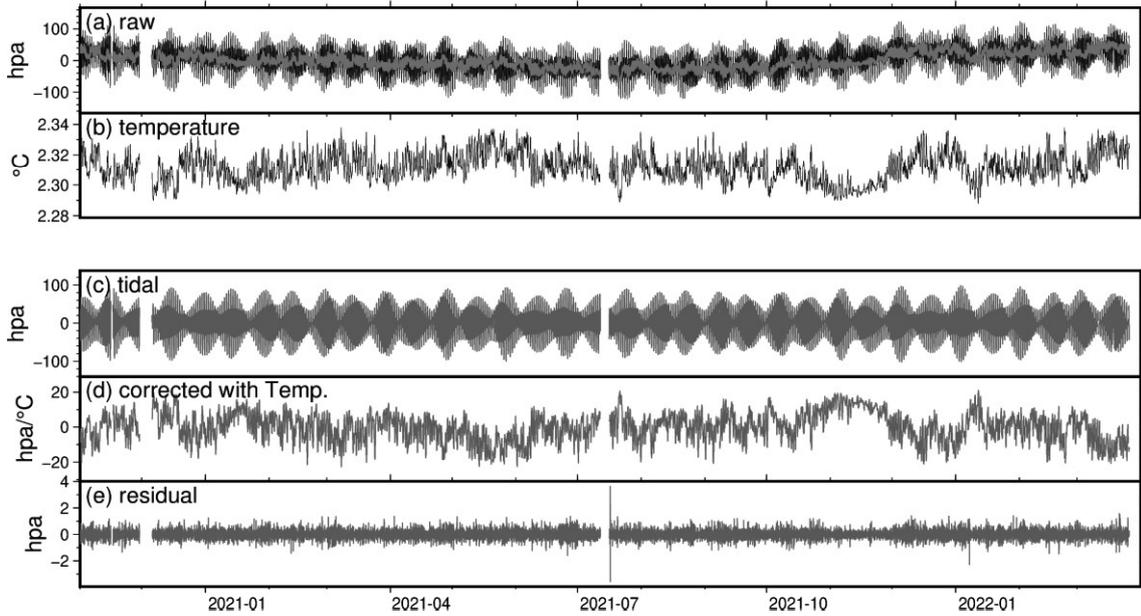


圖 4-25、Baytap08 推估 EOS8 壓力計受理論地潮與溫度之影響。說明同圖 4-19。

EOS9

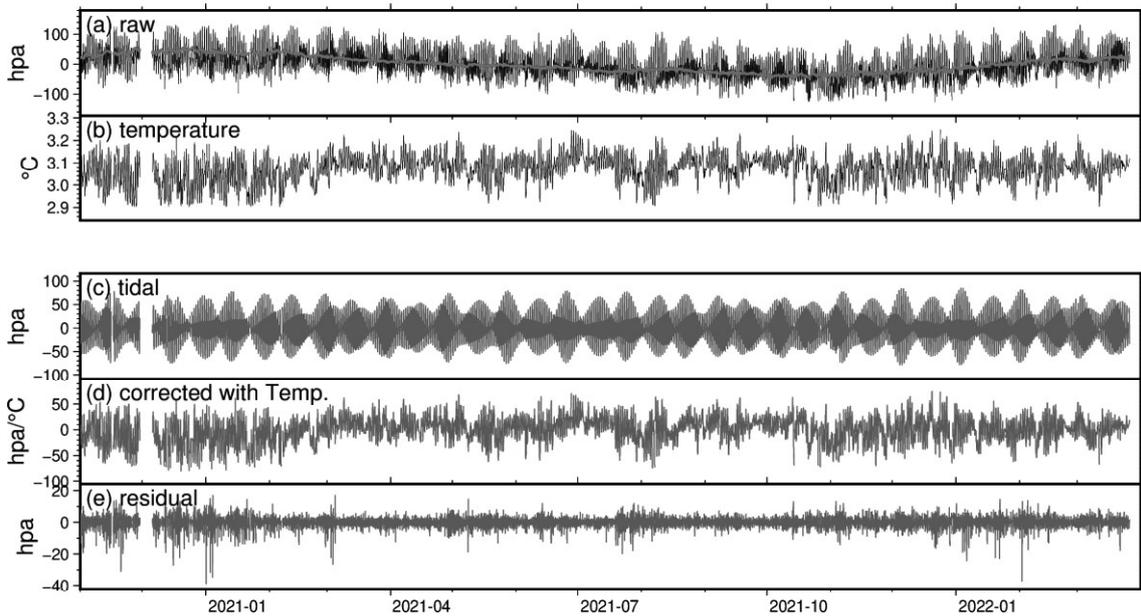


圖 4-26、Baytap08 推估 EOS9 壓力計受理論地潮與溫度之影響。說明同圖 4-19。

EOSA

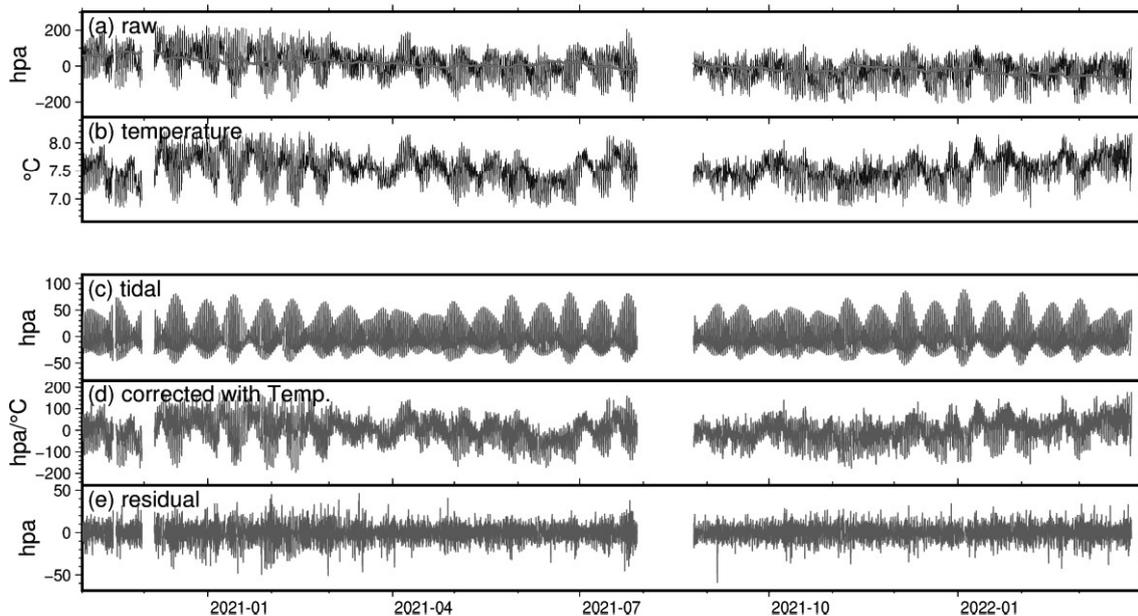


圖 4-27、Baytap08 推估 EOSA 壓力計受理論地潮與溫度之影響。說明同圖 4-19。

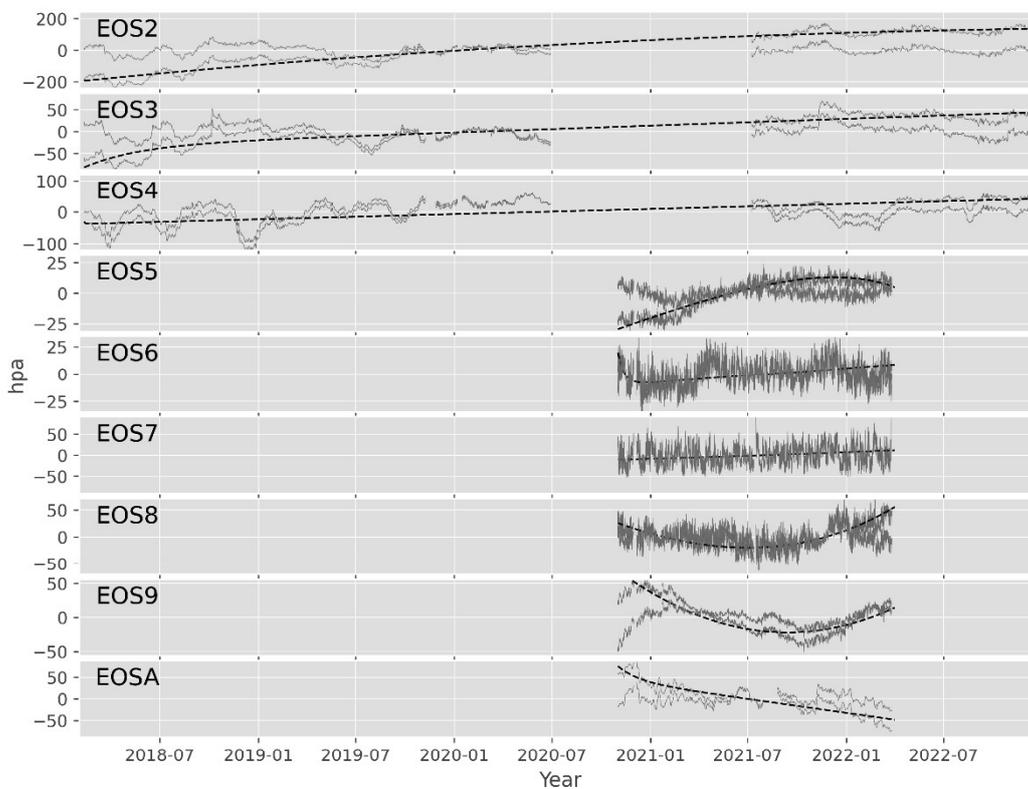


圖 4-28、儀器漂移之修正。虛線為式 3-6 之擬和結果，灰線為原壓力計之資料，紅線為修正潮汐及溫度效應之壓力資料。

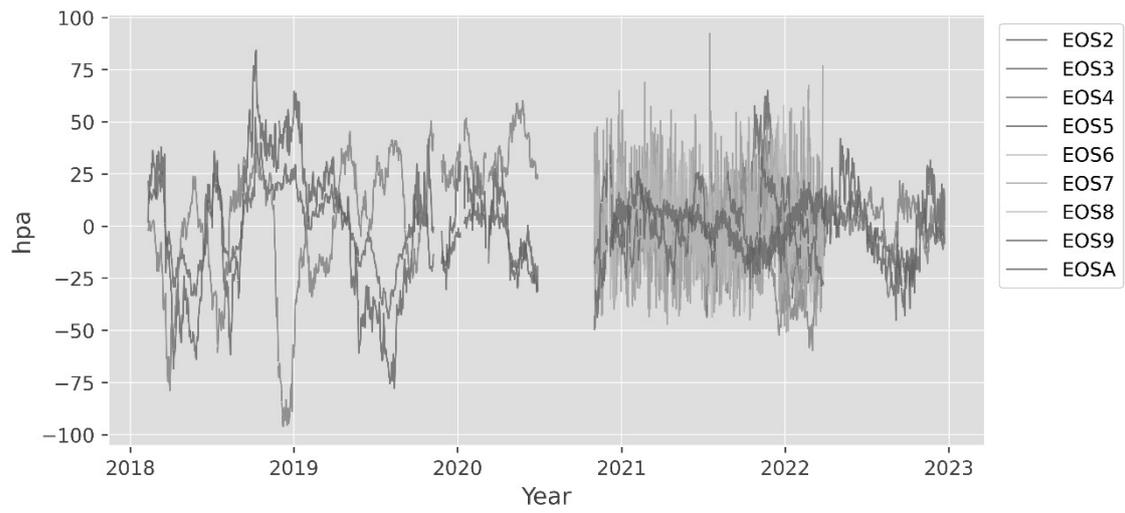


圖 4-29、各站儀器漂移之修正結果。結果顯示各站變化介於正負 100 hpa 間。

5、結論與建議

1. EOS2、EOS3 與 EOS4 站相較於第三期擴建的測站資料較易有短暫中斷的情況，除部分期間因擴建有中斷紀錄外，整體來說資料覆蓋率仍有超過 9 成。
2. 根據儀器位態的分析，部分中大規模地震部分雖會影響到儀器位態，但其變動非常的微小 ($<0.1^\circ$)。在 2018 年 2 月後，所有測站並未觀測到有明顯的位移或轉動的情況。
3. 壓力計與溫度感測器間的相關性大致隨測站深度呈負相關，當深度超過 3000 米，其壓力與溫度間相關係數迅速下降，EOS7 則是例外。該站是所有海纜測站最深的一個測站 (5554 米)，其相關係數約為 0.3，高於相對較淺的 EOS5 (3622 米)、EOS6 (4072 米)、與 EOS8 (4802 米)，由於目前該站尚未回復紀錄，因此尚無法肯定是否有其他環境或是儀器因素影響。
4. 壓力與溫度相關應性越高時，Baytap08 推估出的溫度影響明顯增高，甚至會高出理論地潮的影響，這也顯示儀器運作溫度的變化明顯會影響壓力計的紀錄數值。
5. 本計畫修正壓力計資料，其結果顯示海床壓力波動量仍達 25 hpa (> 25 cm)以上，而外在海洋洋流所造成的影響遠小於該值，位態分析也顯示儀器在海床上大致穩定不動，推測應非造成觀測值變化的主因。在去除外在環境與儀器飄移因素，仍無法明確判斷為何壓力計觀測值呈現如此大的波動量，未來尚須更多的相關資料進行分析探討其原因。

參考文獻

- Doo, W. B., Huang, Y. S., Yen, Y. T., Wang, H. F., Wang, S. Y., & Lo, C. L. (2021). A Significant Change in Ocean Bottom Pressure Off Eastern Taiwan, Southwestern Ryukyu Subduction Zone. *Pure and Applied Geophysics*, 178(3), 907-917. <https://doi.org/10.1007/s00024-021-02689-z>
- Fox, C. G. (1990). Evidence of active ground deformation on the mid-ocean ridge: Axial Seamount, Juan de Fuca Ridge, April-June 1988. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 95(B8), 12813-12822.
- Fox, C. G. (1993). Five years of ground deformation monitoring on Axial Seamount using a bottom pressure recorder. *Geophysical Research Letters*, 20(17), 1859-1862.
- Hino, R., Inazu, D., Ohta, Y., Ito, Y., Suzuki, S., Inuma, T., Osada, Y., Kido, M., Fujimoto, H., & Kaneda, Y. (2013). Was the 2011 Tohoku-Oki earthquake preceded by aseismic preslip? Examination of seafloor vertical deformation data near the epicenter. *Marine Geophysical Research*, 35(3), 181-190. <https://doi.org/10.1007/s11001-013-9208-2>
- Hsiao, N.-C., Lin, T.-W., Hsu, S.-K., Kuo, K.-W., Shin, T.-C., & Leu, P.-L. (2014). Improvement of earthquake locations with the Marine Cable Hosted Observatory (MACHO) offshore NE Taiwan. *Marine Geophysical Researches*, 35(3), 327-336.
- Hsu, S.-K., Yeh, Y.-C., Sibuet, J.-C., Doo, W.-B., & Tsai, C.-H. (2013). A mega-splay fault system and tsunami hazard in the southern Ryukyu subduction zone. *Earth and Planetary Science Letters*, 362, 99-107. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.11.053>
- Li, L., Switzer, A. D., Wang, Y., Weiss, R., Qiu, Q., Chan, C. H., & Tapponnier, P. (2015). What caused the mysterious eighteenth century tsunami that struck the southwest Taiwan coast? *Geophysical Research Letters*, 42(20), 8498-8506.
- Tamura, Y., & Agnew, D. (2008). Baytap08 user's manual.
- Tamura, Y., Sato, T., Ooe, M., & Ishiguro, M. (1991). A procedure for tidal analysis with a Bayesian information criterion. *Geophysical Journal International*, 104(3), 507-516.
- Watts, D. R., & Kontoyiannis, H. (1990). Deep-ocean bottom pressure measurement: Drift removal and performance. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 7(2), 296-306.
- 許雅儒、李炘旻、蔡宜純、余美君 (2020)。地震密集帶(盲斷層)之相關研究 III：子計畫一 琉球隱沒帶南段孕震潛能 III。

附錄

*圖 1-1 與圖 4-15 中的重點地震以橘色標記。

編號	日期	時間	緯度 (°)	經度 (°)	深度 (km)	規模 (M _L)
1	2017-02-10	12:52.6	22.8657	120.1432	16.15	5.71
2	2017-04-13	41:11.7	25.1670	122.3985	171.26	5.55
3	2017-04-30	57:22.6	21.4075	121.6530	122.28	6.07
4	2017-05-15	12:54.5	23.2797	121.4328	24.91	5.75
5	2017-08-04	19:45.8	24.4387	123.543	69.79	5.71
6	2017-09-20	29:57.0	23.3162	121.7813	28.98	5.85
7	2017-11-22	20:09.4	23.5842	120.7217	15.24	5.66
8	2018-01-17	59:11.0	25.0588	121.7182	140.19	5.53
9	2018-02-04	56:40.6	24.1507	121.7437	10.61	5.89
10	2018-02-04	13:12.4	24.1505	121.7165	10.34	5.58
11	2018-02-06	50:41.6	24.1007	121.7297	6.31	6.26
12	2018-02-07	21:30.4	24.0818	121.777	7.75	5.85
13	2018-02-19	47:01.3	24.5878	121.6137	52.68	5.53
14	2018-02-21	10:41.4	23.4130	121.5337	35.57	5.66
15	2018-03-01	42:26.2	24.4227	123.915	68.27	5.88
16	2018-05-01	47:04.9	24.0180	122.3617	24.75	5.59
17	2018-07-20	39:15.6	20.7808	121.5078	99.83	5.68
18	2018-10-23	34:58.2	24.0025	122.624	31.19	6.11
19	2018-10-23	04:04.2	23.9932	122.6308	30.1	5.9
20	2018-11-25	57:23.4	23.3840	118.5237	12.31	6.21
21	2018-12-15	21:05.5	23.7340	121.9102	32.87	5.8
22	2019-01-30	21:35.8	23.7442	122.3928	39.68	5.96
23	2019-04-03	52:55.4	22.9373	120.8683	4.87	5.95
24	2019-04-04	56:55.1	22.9827	120.863	3.48	5.51
25	2019-04-18	01:07.1	24.0543	121.5592	20.33	6.32
26	2019-06-04	46:19.0	22.8423	121.6117	14.68	5.93
27	2019-06-29	44:12.7	22.3208	122.3563	46.56	5.84
28	2019-07-27	24:43.5	20.7580	121.8568	75.39	5.8
29	2019-08-07	28:03.6	24.4363	121.9097	24.15	6.24
30	2019-09-09	07:48.4	21.0908	121.5323	97.95	5.5
31	2019-10-17	44:33.4	24.0275	122.5007	29.62	5.64

32	2020-02-15	00:06.5	23.8563	121.5107	8.32	5.73
33	2020-04-10	44:57.5	20.5410	122.1688	179.35	6.58
34	2020-05-03	24:40.9	23.2423	121.568	40.25	5.97
35	2020-06-13	19:00.0	24.2632	122.435	55.55	6.09
36	2020-07-26	52:29.8	24.2552	122.4215	53.59	6.24
37	2020-08-26	15:08.6	24.9733	123.1832	139.99	5.58
38	2020-09-30	37:20.3	24.8355	122.1005	105.95	6.02
39	2020-11-06	40:18.3	23.1147	122.1172	37.1	5.66
40	2020-12-10	19:58.7	24.7395	122.0035	75.71	6.64
41	2020-12-10	15:08.6	24.5285	121.972	62.74	5.75
42	2021-01-09	35:53.0	24.7330	122.0175	72	5.84
43	2021-01-16	10:59.3	22.5413	121.3513	21.1	5.51
44	2021-01-25	25:38.0	23.4185	123.6348	35.88	5.81
45	2021-02-04	14:02.2	21.4650	121.8725	50.36	5.77
46	2021-02-06	36:03.0	24.6632	122.6068	111.27	6.21
47	2021-02-08	56:31.4	24.3552	122.3582	70.04	5.58
48	2021-02-08	58:02.9	24.3743	122.0247	24.67	5.67
49	2021-03-02	23:00.8	21.9077	121.158	27.63	5.89
50	2021-03-26	02:15.1	25.7897	125.2905	194.51	6.53
51	2021-03-28	41:18.5	24.5448	122.752	94.66	5.54
52	2021-04-18	11:39.6	23.8712	121.4847	16.3	5.8
53	2021-04-18	14:37.8	23.8592	121.48	14.42	6.26
54	2021-05-03	07:29.6	25.4485	124.0618	209.18	6.63
55	2021-07-07	11:55.6	23.8923	121.5672	8.24	5.51
56	2021-08-04	50:45.4	24.7963	122.3165	6.97	6.08
57	2021-08-06	11:04.7	24.7907	122.1895	13.28	5.68
58	2021-09-06	00:26.1	23.8500	122.0765	41.09	5.94
59	2021-09-13	41:27.7	24.1233	121.0128	46.1	5.61
60	2021-09-25	21:19.6	24.3170	121.6832	46.13	5.78
61	2021-10-24	11:34.7	24.5333	121.7752	65.6	6.54
62	2021-10-24	12:42.7	24.5677	121.7768	64.13	5.58
63	2021-12-06	05:51.9	24.8557	122.0475	105.43	5.51
64	2021-12-30	47:09.7	23.9833	122.5145	29.65	5.52
65	2022-01-03	46:37.3	24.0203	122.1710	22.35	6.06
66	2022-01-16	15:41.7	24.1843	122.248	55.47	5.65
67	2022-01-18	10:06.6	21.3248	122.1502	190.43	5.64

68	2022-02-07	58:25.1	24.4053	121.9435	34.59	5.62
69	2022-02-11	43:13.2	24.0317	122.2715	26.36	5.65
70	2022-03-09	22:14.0	23.2552	121.428	33.37	5.71
71	2022-03-18	04:20.5	25.5202	123.9597	192.6	6.47
72	2022-03-22	06:55.2	22.025	121.3625	25.95	5.55
73	2022-03-22	41:38.9	23.3985	121.6118	25.73	6.7
74	2022-03-22	42:38.9	23.4397	121.487	28.41	5.79
75	2022-03-22	43:25.4	23.4230	121.4277	22.63	6.21
76	2022-03-22	37:50.8	23.4223	121.5225	35.71	5.51
77	2022-03-22	35:03.9	23.4812	121.5007	28.88	5.87
78	2022-03-22	29:59.1	23.4190	121.4300	22.57	6.04
79	2022-03-24	38:26.1	23.4442	121.4320	25	5.71
80	2022-03-26	53:23.2	20.9178	122.0525	38.44	5.85
81	2022-04-07	36:10.1	21.6078	120.9848	39.42	5.86
82	2022-04-19	06:06.5	25.3243	123.5117	189.66	5.92
83	2022-04-24	23:50.4	23.4945	123.1950	50.46	5.76
84	2022-05-09	23:03.2	23.9702	122.5257	16.76	6.27
85	2022-05-09	24:11.6	24.0625	122.4957	27.73	5.5
86	2022-05-18	52:48.0	23.3870	123.5742	42.88	5.55
87	2022-06-07	57:54.2	25.5265	123.5672	229.74	6.34
88	2022-06-20	05:07.8	23.6855	121.4543	7	6.09
89	2022-08-22	53:03.8	25.0822	123.4938	155.37	5.93
90	2022-09-17	41:19.1	23.0840	121.1608	8.61	6.6
91	2022-09-17	45:28.2	23.1167	121.1937	5.84	5.84
92	2022-09-18	19:19.4	23.1305	121.1817	12.13	6.15
93	2022-09-18	32:03.3	23.1408	121.1950	7.81	5.7
94	2022-09-18	44:15.2	23.1370	121.1958	7.81	6.83
95	2022-09-18	46:31.9	23.1213	121.1768	13.94	5.64
96	2022-09-18	39:55.9	23.2713	121.2985	11.49	5.85
97	2022-09-19	07:45.1	23.4410	121.2995	13.38	6.02
98	2022-10-10	24:42.6	23.9990	122.2195	20.95	6.06
99	2022-11-01	30:11.5	24.7022	122.5462	109.75	5.81
100	2022-11-13	47:44.9	22.4408	121.0037	10.67	5.52
101	2022-11-26	38:04.2	23.8575	121.6365	35.96	5.64
102	2022-12-07	54:28.2	23.7967	121.6013	29.72	5.67
103	2022-12-15	03:16.4	23.7787	121.8450	16.3	6.51

112 年度臺灣海域地震與海嘯觀測之相關研究

子計畫三

海底電纜式地震與海嘯觀測系統架構功能與效率研究

陳彥宏 陳芸仟
中華民國地球物理學會

壹、前言

在地震海嘯等防災建置上，歐美及日本等先進國家皆已有相當之監測網，並由陸地擴建至海底，例如同處環太平洋地震帶的日本已在其周圍海域建立多條海底感測纜線及數十座地震與海嘯觀測站，達成嚴密的監測網。歐美則個別有 ESONET 海域網狀式大規模跨越歐洲的海底電纜式觀測計畫及觀測美加西部板塊隱沒帶之海神計畫 (NEPTUNE)，此外，中國亦已於上海完成「東海海底觀測小衢山試驗站」之首座海底綜合觀測試驗與示範系統，並規劃於南海興建更大型的海底觀測網。臺灣地處環太平洋地震帶，四面環海，處於菲律賓海板塊和歐亞板塊之間的潛沒帶。這些交互作用導致臺灣周邊地區地震活動頻繁，使臺灣周邊成為研究地震學的最佳實驗室，但代價是嚴重威脅民眾的生命財產，因此，本計畫投入海底電纜式地震與海嘯觀測系統架構功能與效率研究，除期能為保障民眾的生命財產盡一份心力，也可望為地震與海嘯觀測研究做出貢獻[1]。

貳、摘要

為改善東部海域的地震定位、提升該區域的強震即時警報效能，以及即時監測該海域的海嘯，我國氣象署已建置完成之海底電纜式地震與海嘯觀測系統，包含陸上站的饋電、海纜終端、網路設備、資料處理設備、監控系統設備、時間系統等設備，以及海底感測設備如地震儀、海嘯壓力計、傾斜儀、光信號放大、資料傳送與電力單元等模組與各類型感測器。系統相當複雜，為有利於後續進行資料維護、系統保養、資料升級、資訊判讀等目的，本計畫擬就系統架構如海底地震儀之結構、與相關光電感測器單元、海纜等子模組，以及資料擷取與處理流程等功能進行研究分析，並就持續維護所可能遭遇到的困難進行研究分析，以供進行問題排除時之參考[2]。

關鍵詞：海底電纜式地震與海嘯觀測系統、海底地震儀、光電感測器

Abstract

To improve the positioning of earthquakes occurring in the eastern sea area of Taiwan and to enhance the real-time warning efficacy of strong earthquakes in this area, as well as to monitor the tsunami in this area in real time, the Central Weather Administration (CWA), Taiwan has built a submarine cable-type seismic and tsunami observation system with a paving route, comprising equipment on land including the power feed, submarine cable terminal, internet, data processors, monitoring system, and timing system, as well as submarine sensing equipment such as seismometers, tsunami pressure gauges, inclinometers, optical signal amplifiers, data transmission and power units, and other modules and various types of sensors. For the understanding of such a complex system, we propose in this project the study and analysis of the system architecture, such as the structures of the submarine seismograph, related photoelectric sensor units, and submarine cables, and the system operating functions such as the data acquisition and processing procedures to facilitate its subsequent maintenance including the data maintenance, data update, and information interpretation. The study is expected to benefit the resolution of the problems that may be encountered in the system operation and provide an important reference for troubleshooting [2].

Keywords: submarine cable-type seismic and tsunami observation system, submarine seismograph, photoelectric sensor units

參、研究目的

本研究期中成果已就海纜觀測系統相關設備與感測單元進行其規格與原理分析，將有利於評估並強化國內相關零組件產業的開發可行性，提升我國相關設備之自製力與供應力，並降低氣象署建置相關設施成本。本研究期末的目的在於進一步瞭解該海纜觀測系統其資料擷取與分析處理的流程，以及在維護過程中可能遭遇的困難點。此階段研究聚焦在如何有效地從系統中擷取所需的原始資料，並運用適當的分析方法處理這些資料以產生有意義的結果，同時研究也將探討維護人員在進行系統維護時可能面臨的各種技術困境，例如硬體故障、線路中斷、軟體錯誤等等，針對這些潛在問題，研究將提出可行的疑難排解方案，作為未來維護工作的參考。

因此，本階段研究的目標是要分析資料處理流程，從擷取原始資料、分析處理到維護過程中問題的預防與解決，透過這項研究所獲得的資料可提升未來系統資料利用效率並確保系統可靠度與穩定性，使觀測工作能更順利及高效率地完成。

肆、研究方法

一、設備架構與組成分析

海底觀測設備會透過各種感測器持續不斷地記錄海底環境的資料，如水壓、水溫、水流速度等，這些原始資料會經由海底電纜即時傳送到岸上控制中心進行處理，控制中心會定期排程資料擷取任務，自動從觀測設備中擷取指定時間區間的原始

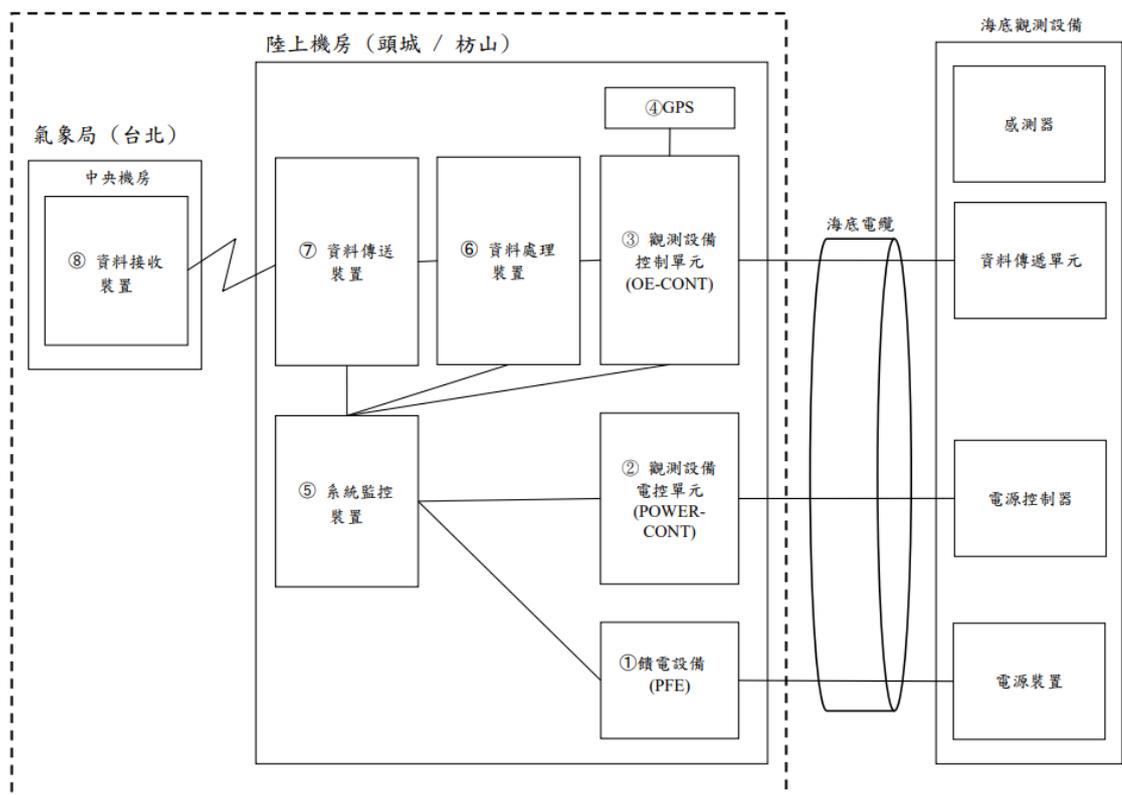
資料。

擷取到的原始資料接下來會進入預處理階段進行格式轉換、數值計算、時間標記等處理將資料轉換為分析模型可以直接利用的格式，預處理完成後資料會輸入到分析模型進行趨勢預測、異常偵測等計算分析以產生有意義的研究結果。

在整個流程中可能遭遇的困難點包括資料傳輸中斷、儲存空間不足導致資料遺失、分析模型精準度不佳等，需要建立完善的備份機制、監控系統，並持續優化分析模型才能獲得高品質、可靠的觀測資料，透過詳細分析資料流程可以找出系統的薄弱環節並提出改善方案，以提高海底觀測的效能。

圖一展示海底觀測設備結構及功能，說明如下：

1. 饋電系統：供應海底觀測設備的電力。
2. 觀測設備電控單元：傳送控制訊號至海底地震儀的電控單元，可控制開關並透過序列介面或區網介面操控。
3. 觀測設備控制單元(OE-CONT)：資料轉換裝置，將觀測裝置資料轉換成IP訊號，使用D-Sub 9pin Plug和RJ-45接頭。
4. 衛星訊號同步單元：進行訊號同步校正，使用D-Sub 9pin Plug和RJ-45接頭。
5. 系統監控裝置：監控通訊與控制，包括電流、電壓、海底系統元件警示、資料處理裝置警示和電力元件警示，控制海底地震儀、感測器、系統切換和增益。
6. 資料處理裝置：處理觀測資料並重新取樣，傳送至資料傳送裝置。
7. 資料傳送裝置：接收觀測資料，傳送給資料接收裝置。
8. 資料接收裝置：接收觀測資料，傳送至氣象署中心站。
9. 軟體：通訊與控制，從感測器中擷取必要資訊。



圖(一) 設備架構與組成[3]

觀測設備需要穩定的饋電系統供電，終端機房的系統監控裝置透過光纖電纜傳送控制訊號給海底觀測設備的電控單元以控制電源和操作模式。觀測設備在海底透過各種感測器不斷監測周圍環境，將收集到的原始觀測資料傳送到觀測設備控制單元。控制單元將資料轉換為IP訊號，再傳送到終端機房的資料處理裝置。資料處理裝置對資料進行處理和重新取樣，然後傳送給資料傳送裝置。資料傳送裝置透過海底電纜將處理後的觀測資料傳送到岸上的資料接收裝置，最終將資料傳輸給氣象署中心站進行儲存和後續應用。軟體在整個過程中監控通訊狀況，可以直接從感測器擷取所需資訊。各項設備和模組的協調運作是海底觀測系統正常運作的關鍵。

二、資料處理流程分析

根據前節對海底觀測系統資料處理流程的探討，可以發現以下可能的幾個薄弱環節：

1. 海底電纜傳輸不穩定，海底電纜承擔了原始觀測資料由海底設備傳送至岸上控制中心的重要工作，然而海底電纜容易受到外力破壞或腐蝕，導致傳輸不穩定或中斷使系統無法獲取完整的觀測資料，這可能是因為電纜埋設不深、鋪設位置遭遇錨繩破壞或電纜材質抗腐蝕力不足，當傳輸中斷時，不但會遺失寶貴的觀測資料也會對後續的分析造成困擾。
2. 儲存設備容量不足，由於海底觀測持續不斷產出大量資料，若儲存設備容量不足，可能會發生資料遺失的情形。此外資料備份機制也需加強，目前備份可能只在本地端執行，一次同步備份的方式並未規劃遠端備份或雲端備份，如果發

生設備毀損或災害，依然存在可能遺失大量資料的風險。

3. 資料處理速度跟不上，如果資料處理速度跟不上觀測設備的採集速率會導致暫存資料累積而延遲後續的分析作業，系統所配置的計算資源可能不足或資料處理演算法仍待提升才會造成處理瓶頸的發生。
4. 分析模型精度不足，現有的分析模型可能無法充分擷取資料中的特徵導致分析結果偏差，模型需要持續優化與更新以提升精度，資料的特性或環境條件變動可能導致模型偏差必須透過新增訓練資料、調整模型參數等方式進行優化。
5. 監控與問題通報機制不完善，缺乏即時的監控與問題通報機制將延緩故障的發現與處理，系統可能沒有設定足夠的監控點或通報系統，反應速度不夠快才會產生滯後發現問題的情形。

因系統為專業設備不應出現這些情況，故2~4項應該有機會可以排除，而第5項由於氣象署為24小時派員監控，故應有即時通報狀況，予以排除，最後僅剩的薄弱環節為海底電纜的部份，後續將對海底電纜傳輸進行分析。

三、海底電纜傳輸不穩定原因分析

經前章節分析，海底電纜傳輸不穩定是目前系統運作的最大薄弱環節，電纜傳輸中斷會直接導致系統無法獲取海底觀測資料進而影響後續的監測與預警功能。因此找到海底電纜傳輸不穩定的根本原因並提出有效的對策是目前當務之急。經檢視歷年海底電纜發生問題的狀況其原因可能包括：

1. 電纜埋設不夠深容易受到外力破壞，部分路徑的埋深可能不符規範，很容易就會遭到船隻錨繩、底拖網具等外力破壞。
2. 電纜位置遭遇重物砸損或錨繩纏繞，部分電纜路徑會通過繁忙航道或停泊區，容易被掉落重物砸毀或遭大型船隻錨繩纏繞拉扯而損壞。
3. 電纜材質抗腐蝕力不足導致線路腐蝕短路，使用的電纜可能抗腐蝕塗層不佳，在海水長期侵蝕下產生孔蝕造成絕緣破壞而短路。
4. 電纜接頭接線質量不佳接觸不良引起斷線，接頭的設計或施工可能有瑕疵導致接觸不良，長期腐蝕後使接點加速惡化至斷線。
5. 電纜鋪設路線設計不當沿途環境惡劣，部分路線會通過地質活動頻繁區域或具侵蝕性的土壤與水質環境增加電纜損壞風險。

後續需要針對上述各個可能原因進行詳細的查驗、資料收集與實驗分析，例如確認電纜埋設深度、檢視電纜路線海域狀況、測試電纜材質抗腐蝕性能等才能找出真正的根源所在，一旦確定主要問題後，即可提出對應的解決方案，例如選擇更優良的電纜材質、調整電纜埋設深度、設定電纜路線迴避危險區域等以獲得更高的電纜傳輸穩定性確保系統的正常運作。

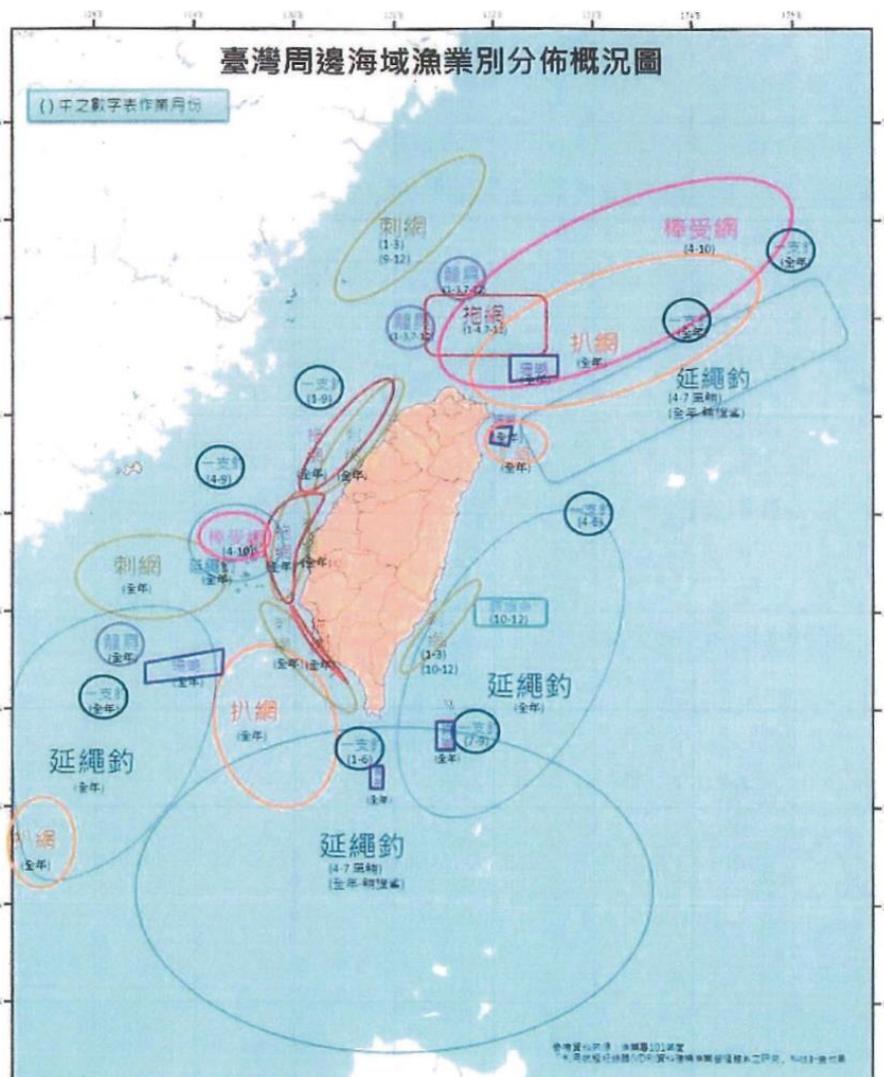
四、斷纜事件分析

本次海底電纜斷纜事件，依過去經驗，初步分析斷纜的可能原因為遭遇外部船隻重物撞擊或損壞，例如船錨、底拖網具等設備等影響，甚至有可能是附近施工或鑽探活動不慎碰觸海底電纜，這些外力對電纜的機械損傷，可能導致其內部光纖或

金屬線切斷。且值得注意的是斷纜事件前三天該海域曾發生一起芮氏規模 6.7 地震，強烈的地震震動可能對海底電纜造成拉扯或擠壓影響，進而造成傳輸功能中斷。

1. 臺灣東部海域航行船隻稠密包含近海漁船、遠洋漁船、商船等(如圖二)。其中近海漁船活動範圍廣且人數眾多，包括拖網、圍網、刺網等不同漁法，而區內主要漁獲物有鮪魚、鰹魚等大型魚類，如果這些船舶活動若未按規定路線航行，其釣具設備及船錨可能會碰觸或纏繞海底電纜造成電纜外皮損傷，漁獲物拖網等活動也可能使電纜受到拉扯，如果區內頻繁的海底施工作業無正確管制也易威脅電纜安全。

總而言之，東部海域豐富的漁業資源吸引大量漁船作業，使電纜受到外力破壞的風險較高，相關單位需要加強對海域活動的管制並確保電纜埋設深度充足。同時電纜自身抗拉強度也需要提高以降低遭破壞的可能性。



圖(二) 臺灣周邊海域漁業別分布概況圖。圖片來源：漁業署簡報[4]

2. 本次海底電纜斷裂事件前三天，該海域發生了芮氏規模6.7的地震(如圖三、圖四)，這次地震的規模大且伴隨頻繁的餘震(如圖五)，可能對海床地質結構造成了影響，進而對海底電纜的穩定性產生不利影響，地震期間的強震動可能超出

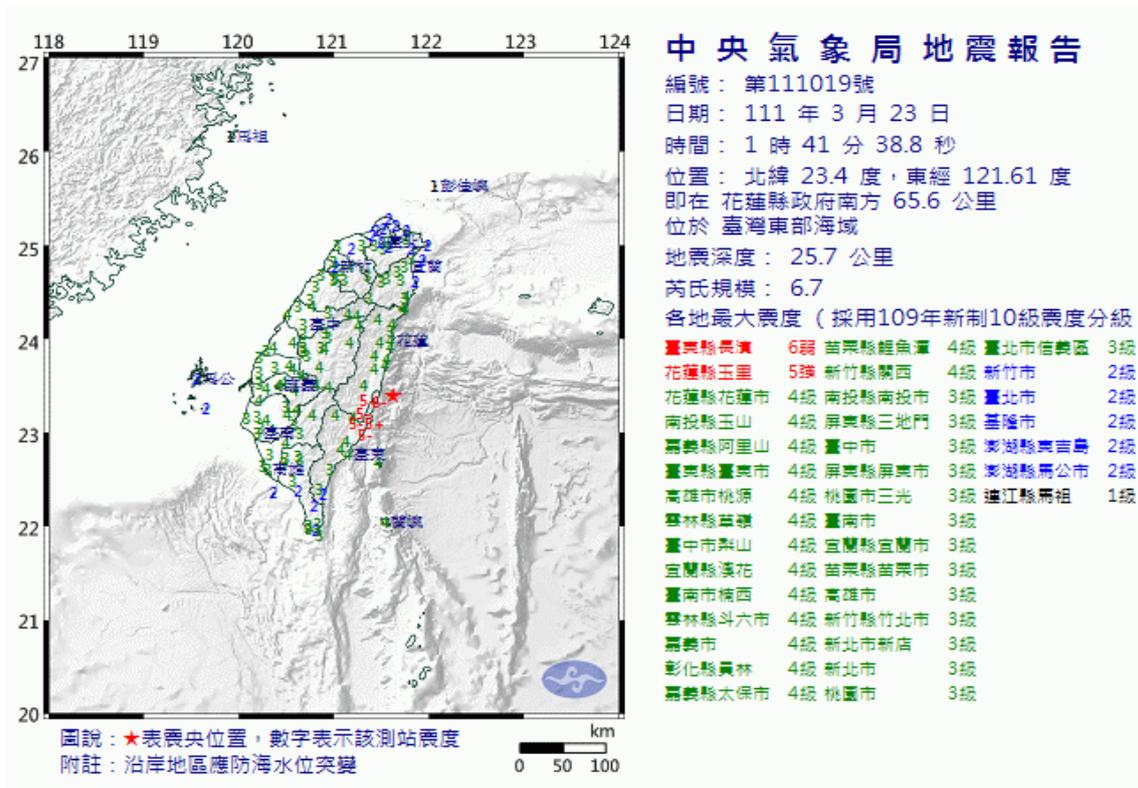
電纜所能承受的拉扯力導致電纜斷裂，此外如果海床原本存在斜坡或裂縫，地震可能引發山崩或滑坡，增加電纜被掩埋或損壞的風險，長期的餘震效應也可能導致海床變得不穩定，進一步增加電纜被掩埋的風險損壞。圖六顯示該地震後三天，即2022/03/26，電纜觀測資料呈現傳輸中斷。

3. 在臺灣東部海域(如圖七)，花蓮峽谷和臺東峽谷是兩個重要的海底地形特徵，這些地形特點不僅影響著地震活動，還與海纜系統的運作和穩定性密切相關。

花蓮峽谷位於臺灣東部海域，是一個深刻的海底峽谷，擁有寬廣的底部和陡峭的斜坡。這個峽谷的深度超過5500公尺，是臺灣海域最深的地方之一，該地區經常發生地震活動，特別是在菲律賓海板塊和歐亞板塊交界處。芮氏規模6.7地震和其後的餘震可能對花蓮峽谷的地下地質和地形構造造成變化，尤其是對於坡度和地下層的穩定性。

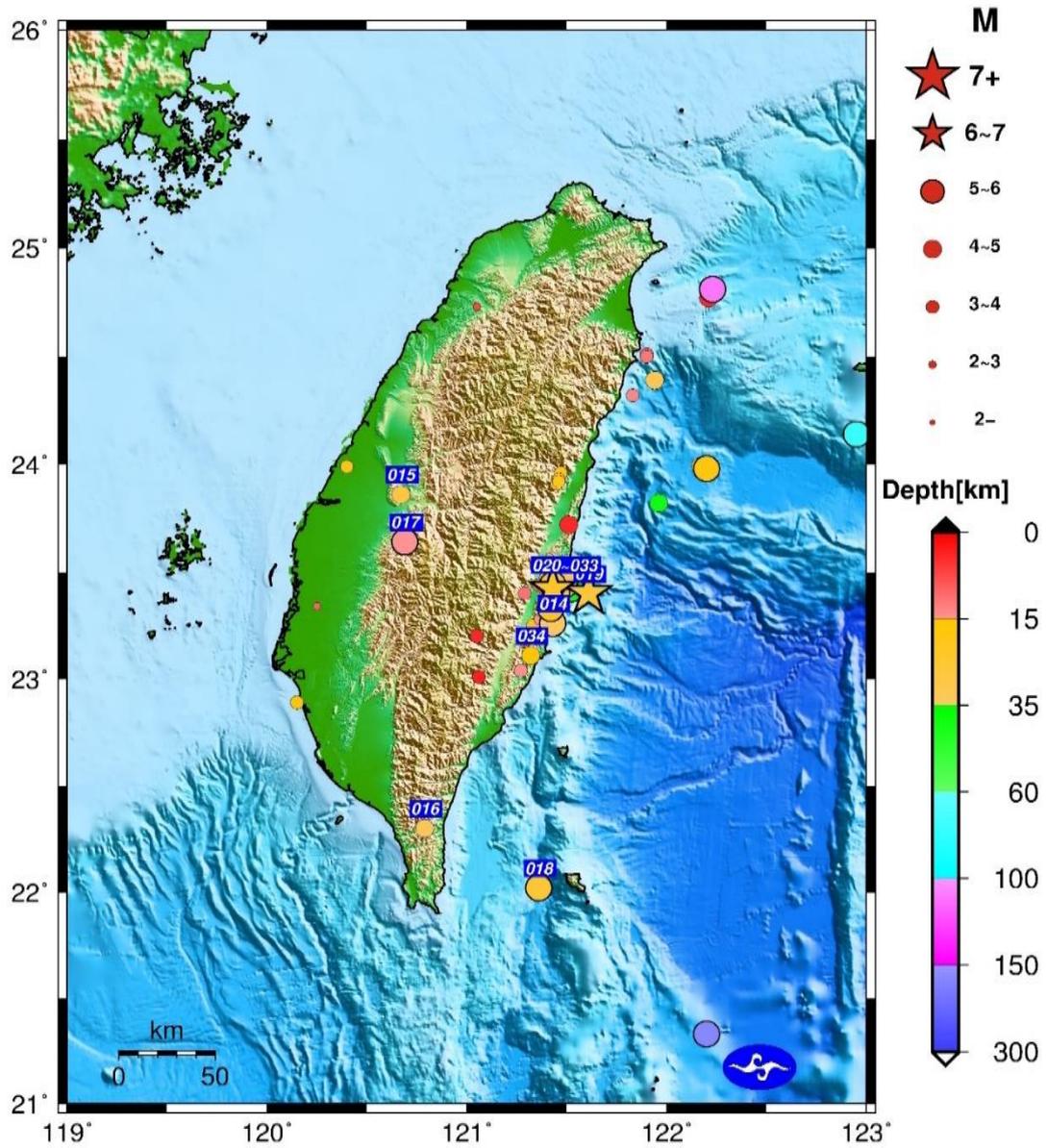
臺東峽谷也位於臺灣東部海域，它是一個複雜的海底地形，包括坡度、斜坡和海山。臺東峽谷的深度也相當大，並且對於地下地質和地形構造有著明顯的影響，地震活動類似於花蓮峽谷，臺東峽谷也處於地震活躍區域，特別是在地板板塊交界處。芮氏規模6.7地震及其後的餘震可能對臺東峽谷的地下環境和地形穩定性產生影響。

由於這些地形特點位於海纜系統的路徑上，地震活動和地形變化可能對海纜系統的運作和穩定性產生重大影響，因此，對於這些峽谷地區的地形和地震活動進行深入研究是理解斷訊事件及其與地震之間關聯性的重要一步。

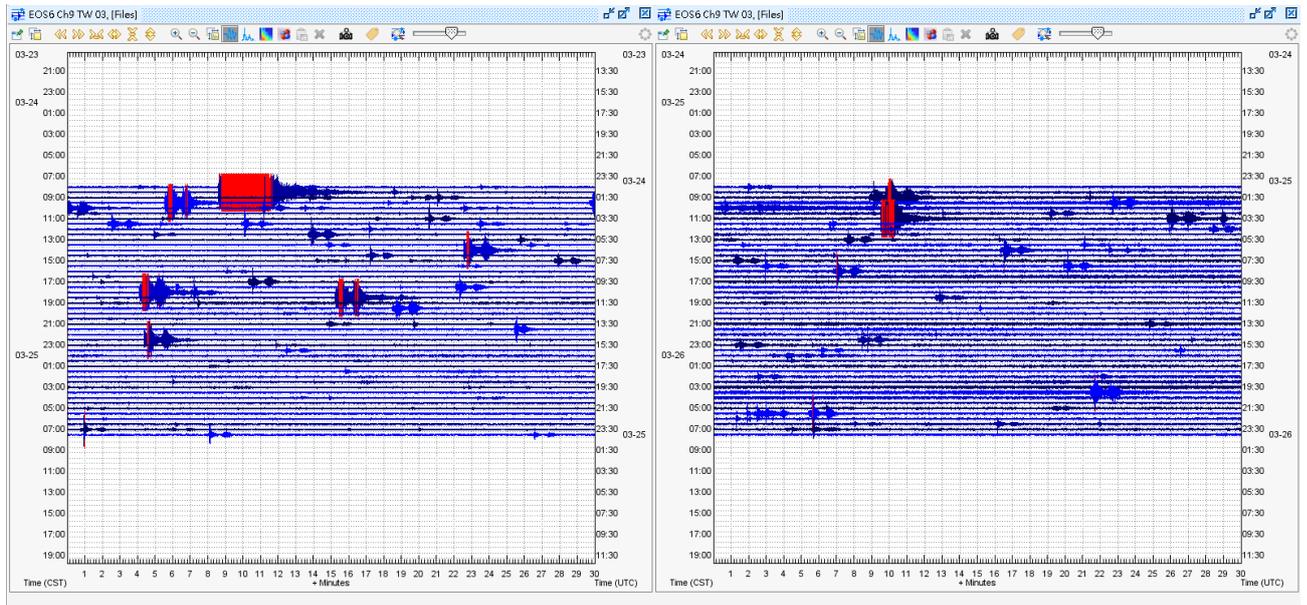


圖(三) 第019號地震位於臺灣東部海域。圖片來源：交通部中央氣象署[5]

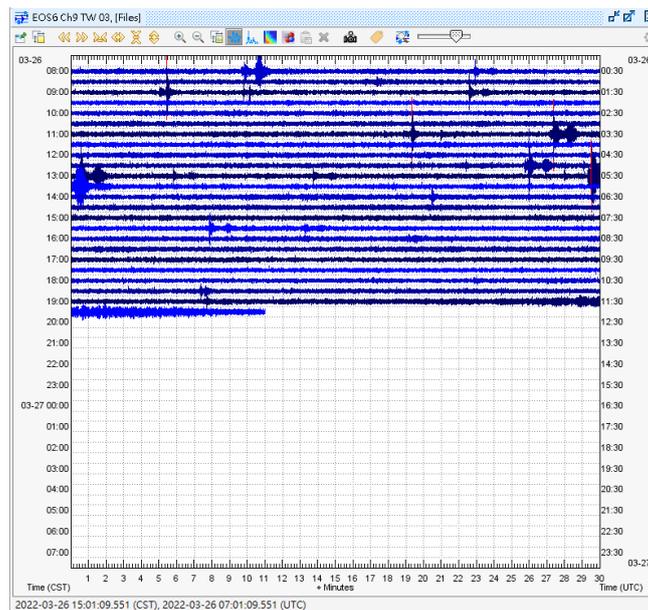
2022/03



圖(四) 111年3月份有感地震震央分布圖。圖片來源：交通部中央氣象署[5]



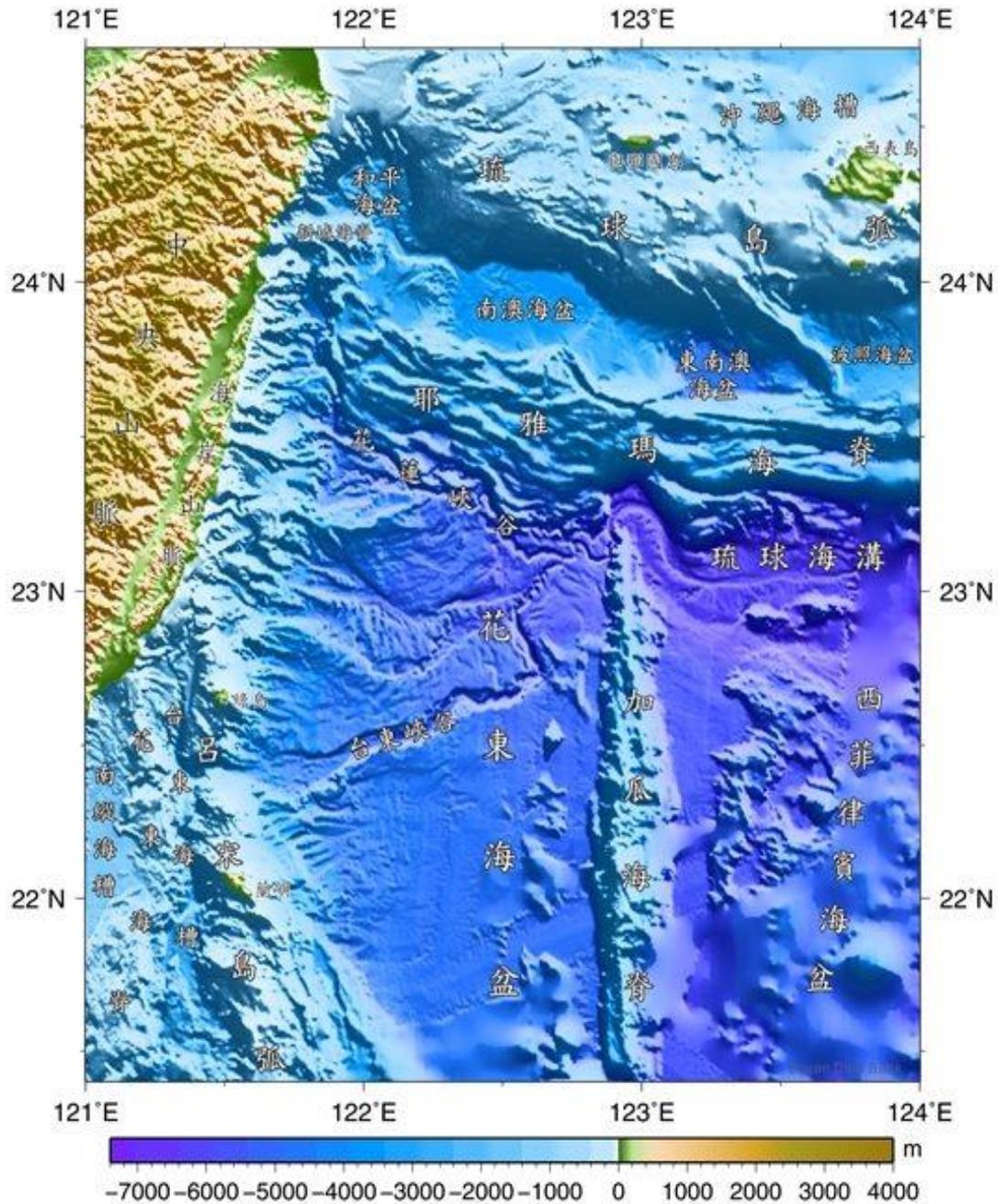
圖(五) 地震後觀測系統紀錄大小餘震。圖片來源：交通部中央氣象署



圖(六) 2022/03/26至此無資料傳回。圖片來源：交通部中央氣象署

4. 同時期在鄰近區域國際也有海纜損壞情形，在芮氏規模6.7地震後，位於MACHO3系統鄰近區域的多條國際海纜系統，紛紛發生海纜損壞的情況。這些斷纜事件的發生時間與MACHO3系統的斷訊事件在時間上具有顯著的重疊，這些國際海纜系統的斷纜情況顯示，地震事件對海底地形和海底環境可能造成了不穩定性，進而對海纜系統的運作產生了直接的影響。

臺灣東部海域海底地形圖



圖(七) 臺灣東部海域海底地形圖。圖片來源：科技部海洋學門資料庫[6]

5. 天然災害導致海底電纜損壞實例，2009年8月，莫拉克颱風(如圖八)襲臺期間高屏溪大量泥沙沖刷入海，加上颱風負氣壓引發海底土石流，導致中華電信多條海底電纜斷裂，包括 SMW3、APCN、APCN2、EAC 及 FNAL/RNAL 等，這些電纜主要連接臺灣與中國大陸、菲律賓、香港、新加坡等地，電纜斷裂導致企業專線中斷，網際網路速度下降，國際電話接通困難等影響[8]。

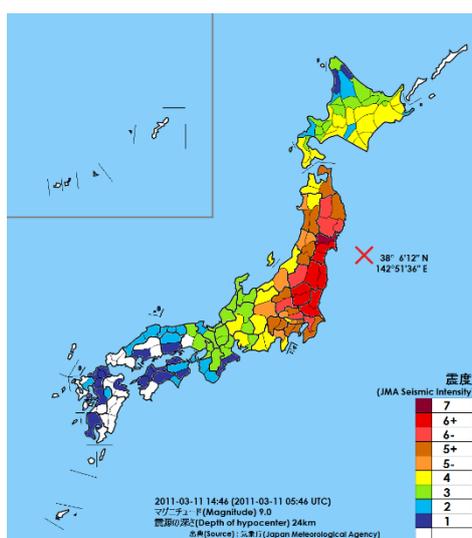
在 2016 年 12 月，印度南部泰米爾納德邦的清奈地區受颱風 Vardah 襲擊(如圖九)，強風暴雨對陸上通信基礎設施構成嚴重破壞，還導致連接清奈和新加坡的 FALCON 海底光纜中斷，該電纜設計傳輸容量為每秒 1.2Tbps，這條電纜的具體中斷位置和維修時間沒有公開披露，但颱風過後網路服務恢復相對緩慢顯示電纜損壞嚴重，電纜系統中斷事件嚴重影響了當地的網際網路與行動通信服務。在 2011 年 3 月日本東北發生 9 級地震(如圖十)，包括伴隨而來的巨大海嘯以及餘震所引發的大規模災害，許多沿海城市與設施都被摧毀，經濟損失更是難以估量，其中 APCN-2 電纜多處斷裂，Japan-US CN 電纜、PC-1 電纜多處中斷和 EAC 電纜受損，這些電纜主要連接日本、中國、韓國、臺灣和美國，這次地震海嘯共導致跨太平洋電纜系統傳輸容量減少 75%。

這些例子說明，颱風、海嘯以及地震等強烈的天然災害都可能對海底電纜系統造成嚴重破壞，從而中斷某地區或某條國際線路的通信服務，面對風險，電信企業需要提高電纜抗災能力並且增設冗餘備援，方能最大程度地避免或減少災害所造成的電纜系統中斷影響。



圖(八) 中度颱風莫拉克路徑圖[9]

圖(九) 特強氣旋風暴瓦達路徑圖[10]

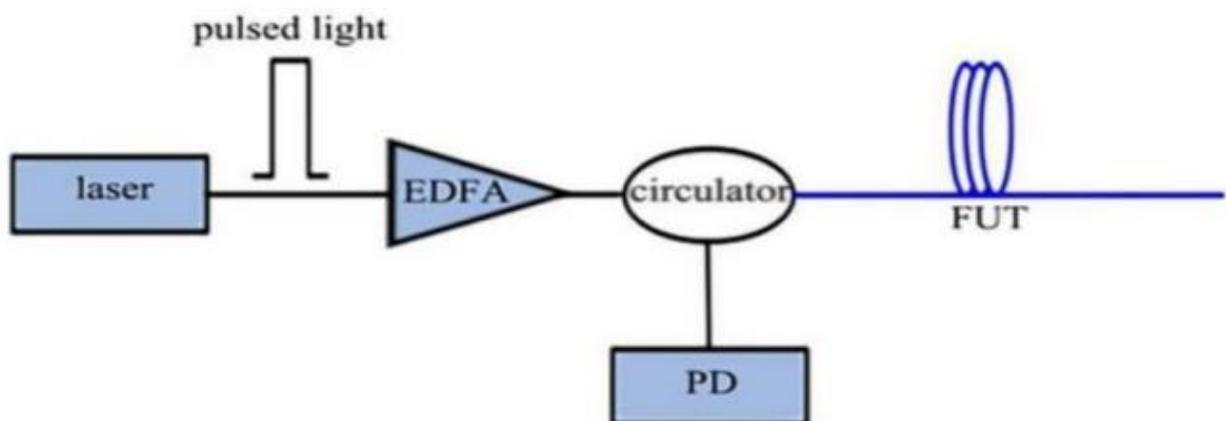


圖(十) 東日本大地震在日本各地之震度圖[11]

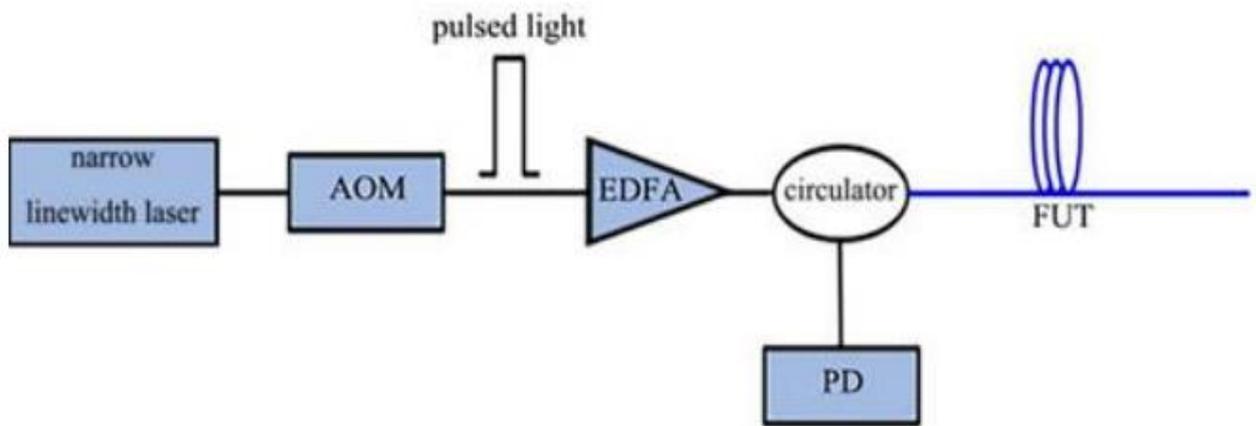
五、海底電纜檢測

保障電纜運行穩定性和可靠性是相當關鍵的步驟，這裡將檢測方法[12]整理如下列幾種：

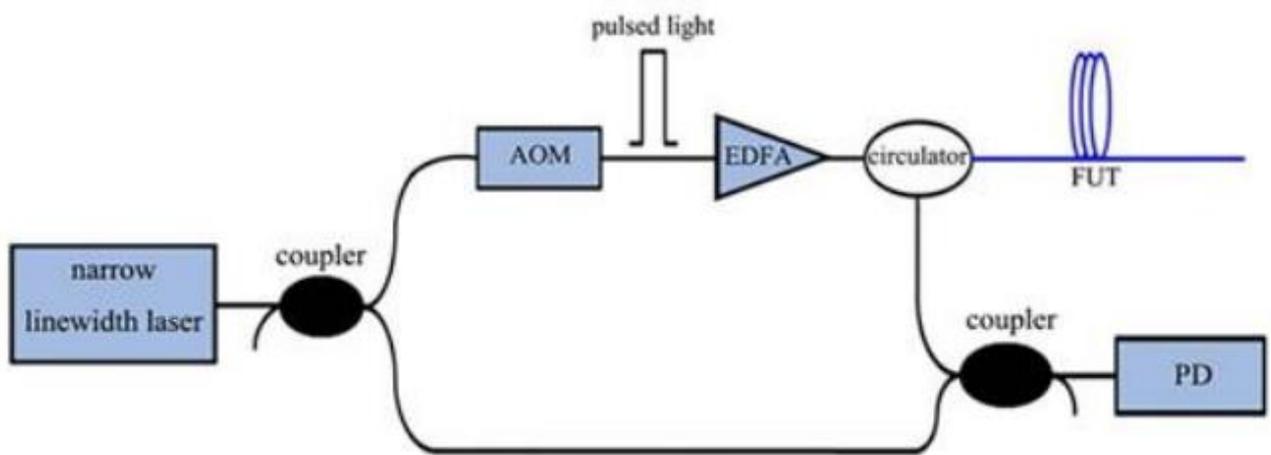
1. IR（絕緣阻抗）測試，在電纜上施加一定的直流電壓，通過測量電流和電壓的關係，計算絕緣阻抗。絕緣阻抗是指電纜絕緣材料對電流的阻礙程度。高絕緣阻抗表示良好的絕緣性能，目的在於確保電纜絕緣的品質，防止絕緣問題，如漏電或絕緣損壞。
2. 電壓測試，施加預定電壓，並監測電纜的反應。這可以確保電纜在實際應用中能夠承受正常的電壓，並防止因電壓過高而損壞，目的在於測試電纜在正常運行電壓下的性能。
3. 電流測試，通過電纜通過預定電流，監測其升溫和電阻。這有助於確保電纜能夠安全、有效地傳輸電流，同時防止過度發熱，測試電纜在預期電流下的性能。
4. 電容測試，通過測量電纜的電容值，確保電纜在正常工作條件下擁有穩定的電氣性能。電容測試有助於檢測可能影響通信性能的問題，檢測是否存在電容不良或其他電氣問題。
5. Coherent optical time domain reflectometer (COTDR)，OTDR(如圖十一)原理為當一個光脈衝被入射被測試的光纖中時，Rayleigh backscattering signal (RBS)在不同位置產生不同的往返時間，這些時間被光探測器 (PD) 接收，通過分析從 PD 輸出的電信號，可以得到光纖每個位置的 RBS 強度。 Φ -OTDR 解決 OTDR 技術無法應對外部干擾的問題，在 OTDR 架構上做修改， Φ -OTDR(如圖十二)使用 narrow linewidth laser (NLL) 作為光源，發射高度相干光，並採用聲光調制器 (AOM) 將連續光轉換成一個探測脈衝， Φ -OTDR 和傳統 OTDR 的主要區別在於雷射的選擇。在 Φ -OTDR 中，雷射的寬非常窄，通常小於 100 kHz，因此相干長度比脈衝寬度長得多。而 COTDR 是建立在 Φ -OTDR 的基礎上，其原理可以參考圖十三。



圖(十一) OTDR 示意圖。圖片來源：[12]



圖(十二) Φ -OTDR 示意圖。圖片來源：[12]



圖(十三) COTDR 示意圖。圖片來源：[12]

六、參考方案

臺灣周遭海域經常發生海底電纜斷裂事件，可能影響通信連接和數據傳輸，對國家通信和網路基礎設施造成損害，參考方案提供應對海底電纜斷裂事件相關資訊：

1. 定期巡查和維護海底電纜是維持通信連接的關鍵步驟。應當建立一套嚴格的檢查流程，包括使用遠程操作的深海潛水器和定期巡查船隻，以檢查電纜是否受到損害或外部壓力。這些檢查應該涵蓋電纜的全長，特別關注潛在的斷裂點。此外，定期檢查也可以用於檢測任何環境因素對電纜造成的損害，例如海洋生物附著或腐蝕，並及早進行修復。
2. 當發生斷裂事件，後續的風險評估是關鍵的，這包括評估斷裂的原因，最好是能連周圍發生的斷纜事件一起調查原因，例如是遭遇船錨或網具的破壞或其他因素，這種評估有助於了解事件背後的根本原因以便採取預防措施。此外風險評估也應考慮可能的環境變化，如氣象條件和海洋活動，以確保未來的防護和

應對計劃更具彈性。

3. 在設計和製造階段，納入光纜監測系統是一種前瞻性的方法，可提供實時的監控和預警功能。這種系統可以包括各種傳感器，用於監測電纜的拉伸、壓力、溫度和其他關鍵參數。當損害發生時，這些系統能夠立即檢測到異常情況，幫助識別損害位置。進一步，這些系統應與中央監控中心連接，以提供營運商實時數據，以便迅速採取行動，減少修復時間，維持通信連接的穩定性。此外這些系統的數據也可供風險評估使用，以改進整體的防護計劃。

伍、結論

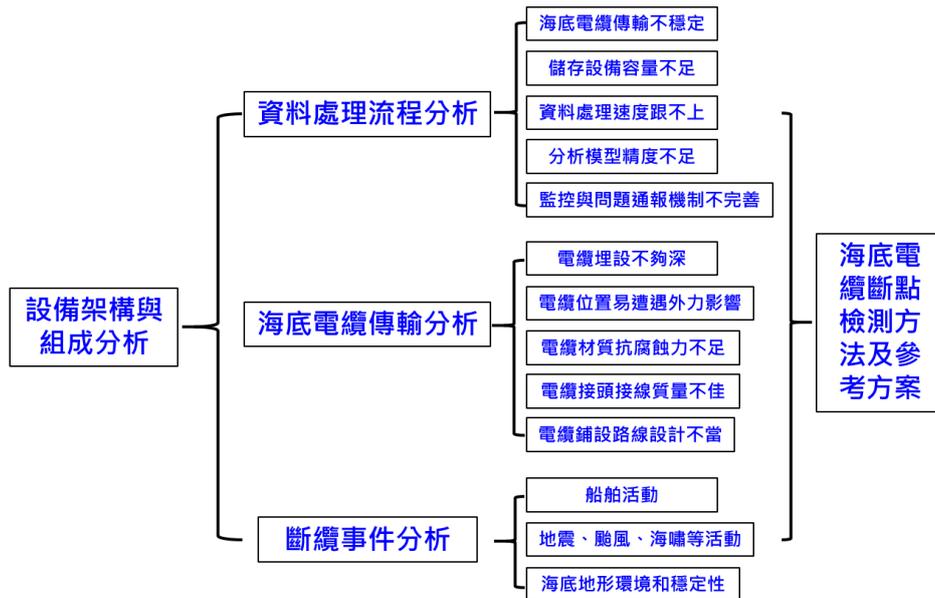
海底電纜在現代通信和數據傳輸中扮演了至關重要的角色。然而臺灣周圍海域經常發生海底電纜斷裂事件，這些事件可能對國家通信和網路基礎設施造成嚴重損害，為了應對這一挑戰，對海底電纜斷裂事件的根本原因以及如何有效地檢測斷點、進行修復和減少未來發生的可能性進行探討分析。

首先，海底電纜斷裂的可能原因包括外力損害、地震活動和海底地形特徵，外力損害可以由船隻的錨、漁具或其他重物造成，對海底電纜斷點的形成起關鍵作用。地震活動是另一個重要的原因，地震可能對海床地質結構造成影響，從而影響海底電纜的穩定性。臺灣東部海域的海底地形特點，如花蓮峽谷和臺東峽谷，對斷裂事件有顯著影響。這些地形特點位於海纜系統的路徑上，地震活動和地形變化可能對海纜系統的運作和穩定性產生重大影響。

為了應對海底電纜斷裂事件，可以進行一些預防措施，如定期巡查和維護，以及海底電纜的設計和安裝，這些措施可以降低斷裂事件的發生機率，國際合作也是應對這一挑戰的關鍵，國際合作機制可以促進信息共享和共同應對斷纜事件。

在面對海底電纜斷裂事件時，綜合運用這些方法和建議，有助於降低海底電纜斷裂事件對通信和網路連接的影響，確保通信基礎設施的可靠性。臺灣和其他國家可以通過制定有效的政策和採取積極的措施，保護關鍵的通信設施，確保通信連接的可靠性和持久性。這一工作需要政府、行業和國際社會的緊密合作，以確保海底電纜的安全和可持續性。

本研究方法與分析結果簡要整理如下圖所示。



圖(十四) 研究方法與分析結果流程圖

然而對於未來的技術發展和創新也需要關注，確保海底電纜系統的可靠性和安全性，其中光纖陀螺儀（Fiber Optic Gyroscope，簡稱 FOG）感測技術是一個具前瞻性的領域，FOG 已應用在各式航空航太(如客機、無人機、衛星等)、航海(如各型船艦)、國防(如導彈、魚雷導引、潛艦等)、探勘(如石油勘察、隧道定向)、防災(如直升機航拍、大樓結構變異、地震地殼變動等)、自動化(如機器人、雷射準直加工等)及學術研究(如天文觀測、通訊、大地量測)等需要高精準姿態控制、定位及導航之民生、科學及軍事用途上，此 FOG 技術有望在未來幫助提高海底電纜系統的監測和維護效率，FOG 技術基於光學原理，用於測量旋轉速度，其優勢包括高精度、即時監測、遠程監測和高可靠性，有助於我們加深對周邊地體構造及地震活動的了解，這些特點賦予了 FOG 技術在海底電纜系統監測中的重要地位，對於四面環海的臺灣，將 FOG 置入海底進行海底地殼運動監測，除了海底地殼形變量測，未來也可擴及海流觀測、波浪監測、海底海象記錄等用途。

首先 FOG 技術的高精度使其能夠檢測微小的旋轉變化，可提供旋轉位移之量測資訊進行波型及分量的修正，這對於確定斷點位置或其他潛在問題至關重要，即使是微小的擾動也可以被 FOG 系統及時識別，從而促使迅速的應對措施，其次 FOG 技術具有即時監測的能力，這對於迅速應對斷裂事件或其他潛在問題非常重要，當任何異常情況發生時，FOG 系統可以即時檢測到並發出警報，有助於及時採取行動，再者 FOG 技術的遠程監測特點，這在深海環境中具有極高的實用價值，遠程 FOG 系統可透過遠程連接提供即時也實時的數據，同時提高工作效率和安全性，降低了對潛水或海上巡查的依賴，最後 FOG 技術的高穩固性是它成為一個可靠工具的關鍵因素，不受環境因素的干擾，如水壓、溫度和鹽度，這使其在深海和海底環境中能夠長期穩定運行。

因此，FOG 技術具有相當的潛力，可以輔助改進海底電纜系統的監測和維護，並在未來提供更高的可靠性和安全性，確保通信連接的穩定性和持久性，在接續的計畫裡，我們將持續與氣象署緊密合作來研發合適的海底地震儀。

陸、成果的價值與貢獻及落實應用情形

臺灣地處環太平洋地震帶，處於菲律賓海板塊和歐亞板塊之間的潛沒帶，這些交互作用導致臺灣周邊地區地震活動頻繁，嚴重威脅民眾的生命財產，因此，本計畫投入海底電纜式地震與海嘯觀測系統架構功能與效率研究，後續將持續與氣象署緊密合作，透過自製的感測器掌握海纜觀測系統的維護與監控之技術能力，發掘我國海嘯觀測系統自我開發的可能性及強化國內相關零組件產業的技術能力，同時提升我國相關設備之自製力與供應力，並降低氣象署建置相關設施成本，亦進一步瞭解該海纜觀測系統其資料擷取與分析處理的流程，提升未來系統資料利用效率並確保系統可靠度與穩定性。本研究成果除期能為保障民眾的生命財產盡一份心力，也可望為地震與海嘯觀測研究做出貢獻。

本計畫研究成果將可望提供相關廠商之技術諮詢及推廣，相關獲取的感測器及光電元件技術與資料處理等資訊亦可應用至光通訊、無人車、太空、土木建築、防災、國防等產業。

柒、參考文獻

- [1] 「地震及海嘯防災海纜觀測系統擴建」計畫書，交通部中央氣象局
- [2] 「海底電纜式地震與海嘯觀測系統架構功能與效率研究計畫」申請書 交通部中央氣象局 p.2
- [3] 臺灣東部海域地震與海嘯海纜觀測系統_建置計畫書中文最終版
- [4] 環境資訊中心 離岸風電區塊開發 經濟部預計5月中公告 漁業署：選址應離岸15公里 <https://e-info.org.tw/node/230720>
- [5] 交通部中央氣象局 中央氣象局 地震測報中心
- [6] 海洋學門資料庫 海底地形圖 - 水深 <https://www.odt.ntu.edu.tw/bathy/colorimages/>
- [7] MACHO3障礙調查及修復計畫建議書第2次修改版
- [8] 自由時報 颱風引發海底土石流6海纜中斷(2009-8-13)
- [9] 由 Cyclonebiskit - Created by Cyclonebiskit using Wikipedia:WikiProject Tropical cyclones/Tracks. The background image is from NASA. Tracking data is from the Joint Typhoon Warning Center[1]., 公有領域, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=7468654>
- [10] 由 Meow - Created by Meow using Wikipedia:WikiProject Tropical cyclones/Tracks. The background image is from NASA. Tracking data is from the Joint Typhoon Warning Center[1]., 公有領域, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=54010695>
- [11] 由 own work - blank map:File:Japan template large.svg, area:JMA1,JMA2, Intensity scale(Shindo):JMA3,JMA4, Earthquake data:JMA5, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=14641958>
- [12] Shang, Y.; Sun, M.; Wang, C.; Yang, J.; Du, Y.; Yi, J.; Zhao, W.; Wang, Y.; Zhao, Y.; Ni, J. Research Progress in Distributed Acoustic Sensing Techniques. Sensors 2022, 22, 6060. <https://doi.org/10.3390/s22166060>
- [13] EAC cable map <https://www.submarinecablemap.com/submarine-cable/eac-c2c>
- [14] PC-1 cable map <https://www.submarinecablemap.com/submarine-cable/pacific-crossing-1-pc-1>
- [15] APCN-2 cable map <https://www.submarinecablemap.com/submarine-cable/apcn-2>

