

114 年度地震資料之分析應用

子計畫一

臺灣地震網資料應用於微地震之定位及推估其震源機制之探討

黃柏壽 古進上 楊麗珍 鄭佳烜

中華民國地球物理學會

摘要

本計畫年度工作項目為協助進行臺灣山區之強震站之地震資料收集及儀器檢測，並將所收集資料納入 TSMIP 地震網測資料庫。本計畫持續分析 TSMIP 連續觀測網即時及其已紀錄資料，探討發生於臺灣地區的地震源特性、地震成因及震波行為，尤其關注發生於較少地震活動的西部臺灣地區。TSMIP 高密度的測站分布，可以提供全臺較小規模的地區地震之完整記錄。然強震儀資料有別於傳統寬頻地震資料，合宜應用仍有待開發新分析方法。本計畫將收集及深入分析多個地震網連續收錄資料，應用於精確定位微地震及推估其震源機制，瞭解臺灣地區活動斷層特性，深究各種紀錄訊號，探討複雜構造引致之波傳效應，提升地震網效能及地震資料之附加價值。本計畫另項工作為開發新方法分析 TSMIP 連續收錄資料以優化地震網效能並提升連續地震資料之附加價值，並持續致力於推廣 TSMIP 資料的地震學應用。

關鍵詞: TSMIP、精確定位、震源機制、震源特性、波傳效應

Abstract

The annual work plan of this project is to assist in the collection of earthquake data and instrument testing at strong-motion stations in the mountainous areas of Taiwan, and to incorporate the collected data into the TSMIP earthquake network database. The project continues to analyze real-time and recorded data from the TSMIP continuous observation network, exploring the seismic source characteristics, earthquake causes, and seismic wave behavior in the Taiwan region, with a particular focus on the less seismically active western Taiwan region. The high-density distribution of TSMIP stations provides a comprehensive record of smaller magnitude earthquakes throughout Taiwan. However, the data from strong-motion instruments differ from traditional broadband seismic data, and suitable applications still require the development of new analysis methods. This project will collect and deeply analyze continuous data from multiple seismic networks, applying it to the precise localization of micro-earthquakes and the estimation of their source mechanisms. It aims to understand the characteristics of active faults in Taiwan, explore the wave propagation effects caused by complex

structures through various recorded. Another aspect of the project is the development of new methods to analyze continuously recorded TSMIP data to optimize the performance of the earthquake network and enhance the additional value of continuous earthquake data. The project also continues to promote the seismic applications of TSMIP data.

Keywords: TSMIP, precise event location, source mechanism, source characteristics, wave propagation effects

壹、前言

臺灣處於歐亞大陸板塊和菲律賓海板塊擠壓帶上，地殼活動激烈，地震活動相當頻繁，而時有破壞性的地震發生(鄧屬予，2016)。中央氣象署被國家賦予監測與發布臺灣地區地震活動的法定任務，進行地震速報與預警作業。臺灣的交通部中央氣象署自 79 年起積極推動臺灣地區的強地動觀測計畫，並在臺灣各都會區設立強地動觀測站。這個計畫的目標是建立一個高密度的強地動觀測網，收集各種地震相關的資料，不僅為國家建設提供依據，也為全球的強震研究建立一個完整的資料庫。中央氣象署地震測報中心，因應需求委託中央研究院地球科學研究所共同合作執行「臺灣山區自由場強震網建置、資料收集與分析」計畫，目的是在臺灣山區廣泛的進行場址勘察與設置自由場強震站，作為分析山區強地動特性的依據。中央研究院在臺灣山區設立了 70 個自由場強震站，設置的地點主要是分佈在大臺北、新竹、宜蘭、花蓮、臺中、南投與南部山區，彌補了 TSMIP 在山區域觀測資料的不足(黃柏壽等人，2013)。其後，中央氣象署於 104 年度完成增建高品質深井地震站及更新強震站儀器設備，使地震測報作業在品質與精確度皆得以提升。復自 105 年起執行強地動觀測第 5 期計畫—強震即時警報於防災之應用，延續前期計畫的成果，持續更新地震即時站的儀器及傳輸方式。一方面提升測站訊號的取樣率至每秒 100 點及 24 位元動態記錄範圍，同時藉由建置之井下地震觀測網，降低地表雜訊干擾，提升訊號品質。另一方面發展資料整合作業，結合短週期、地震速報、寬頻、井下地震觀測網及國外資料交換中心所提供的全球即時地震觀測資料，以增加地震觀測站的密度並擴大偵測範圍，此一新地震觀測系統改稱為「24 位元地震觀測系統」。

目前，中央氣象署於臺灣地區佈設有多種類型的地震監測站，包括寬頻地震儀、短週期地震儀及強地動觀測站。另有其他機構因應研究需求佈設之固定站或臨時地震站。這些地震站均勻覆蓋整個臺灣地區並具備即時傳輸的功能，多面向監測各地地震活動及支援地震學研究。這些整合地震資料對於微小地震具有高解析能力，此項特性尚未具體應用於對微小地震之精確定位及震源機制研究。對於地震活動度較低的臺灣西部平原及北部海域，這些整合資料，對於了解區域地震源與地質精細構造具有重要功能。源於前期研究了解 TSMIP 地震網測站連續紀錄特性易於聯合現有短週期及寬頻地震站資料組成高密度網，對於了解區域地震源與地質精細構造具有重要功能。另由於山區強震測站興建的工作已告一段落，本計畫的野外工作重點逐漸轉型為協助中央氣象署地震測報中心進行臺灣山區之強震觀測站之地震資料收集及儀器檢測，並確保儀器正常運轉。目前，本計畫的研究重點之一為利用 TSMIP 已收集資料分析探討發生於臺灣地區的地震源特性、地震成因及地震震波行經中央山脈地區之特殊傳遞演化過程。本計畫將收集及深入分析多個地震網連續收錄資料，應用於精確定位微地震及推估其震源機制，瞭解臺灣地區活動斷層特性，深究各種紀錄訊號探討複雜構造引致之波傳效應，提升地震網效能及地震資

料之附加價值。

貳、研究方法

自 2018 年度起，中央氣象署為提供全臺各鄉鎮之強地動震度速報並規劃因應未來大地震震後緊急救災應變需求，進行自由場強震站連續紀錄及即時傳輸之升級。建立傳輸網路，起動強震儀網路傳輸功能，建構完成臺灣強地動觀測網，進行連續紀錄。依據提供一鄉一地震站的基本需求，初期目標以升級部分強震站功能進行網路連線強震儀，以達成提供全臺均勻分佈之即時地震震度測報。臺灣強地動觀測網參與臺灣地區的地震即時監測，對於提升臺灣地震觀測密度及強化地震速報與預警作業具重要意義及發展潛能。

臺灣強地動觀測網具有空間高密度分佈，有別於當今各式地震速報網架構，應用於速報大地震與預警災害任務，應視其為非典型地震速報網，欲發揮其相應功能須以新視角、新開發方法應對。本計畫擬以臺灣強地動觀測網紀錄的觀測資料為樣本，提出新地震定位方法進行實驗並評估新方法應用於現有地震速報與預警作業之可行性，期能為精進臺灣地區強震偵測與速報作業，提供具體建議。

本計畫年度工作重點將加重分析 TSMIP 連續收錄資料，開發新分析方法以協助及建議優化 TSMIP 地震網效能並提升連續地震資料之附加價值。本計畫將引進 TSMIP 資料針對現有的強震即時警報作業系統提出參考測試及建議，工作項目分述如下：

1. 建立格點搜尋法進行地震定位並評估其實用性：

地震網的定位方法，通常於摘讀各測站的地震波到時後，採用線性方程組逆推震波到時資訊，透過尋找最小走時殘差，決定其震央位置，例如 HYPO71 (Lee and Lahr, 1975; Lee et al., 2003)。優點為計算量少，可以較小計算量進行地震定位。缺點為線性逆推法易受測站分佈不均、資料品質差異影響，所逆推之最小殘差震央點並不保證為真實震央位置。本計畫將著眼於分析高密度地震網紀錄進行地震定位，採用方法稱為反向投射法(back-projection method)。概念為利用進行反向投射地震波能量至震源位置，經由評估疊加地震波能量峰值定位地震源。此方法的有效性取決於地震資料的可靠性與速度模型的精確性。特點為本方法不需先行摘讀地震波到時，只需透過格點搜尋的步驟，重複地震波能量疊加動作，找出震央最佳位置。此方法對於短時間發生的多個相近地震的震央亦可以有效分辨出來，將來對於地震網速報具有潛在應用價值。

2. 開發近震源資料應用於地震斷層面解的推球方法：

目前地震學上對於區域地震斷層面解的推求，通常採用矩張量的方法。此方法只需少量的地震波形資料，透過波型反演可以快速獲得斷層面解。唯矩張量法對於較小地震將因其低頻波形成分不明顯，採用此方法效果不彰。臺灣地區小型地震因有 TSMIP 高空間分辨率資料，可以有效利用震波極化方向確定地震斷層面解。本計畫將開發相關合宜現況之計算程式，利用密集近震源資料推球地震斷層面解。建立有效執行步驟並考量以波行疊加概念計算地震斷層面解。

本計畫將持續開發計算程式，用於格點搜尋震央與發震時間並引用相同於地震重定位分析所採用的震波疊加概念，通過疊加震波極性資料的處理方式估算震源機制，提供氣象署速報作業參考。

參、分析與結果

有關本研究開發應用於地震定位的方法已趨於成熟，本年度將應用於分析新近發生之地震序列進行地震定位。另開發應用於震央斷層面解的應用程序，唯目前仍在開發測試階段，將就現有成果進行報告。

一、2025-01-21 嘉義大埔地震序列重定位分析：

臺灣位處歐亞板塊和菲律賓海板塊聚合處，菲律賓海板塊以每年約 7-8 公分的速度向西北方擠壓歐亞板塊，在臺灣西部麓山帶形成一系列北北東走向的褶皺與逆衝斷層帶。114 年 1 月 21 日 00 時 17 分，於嘉義縣大埔鄉境內發生芮氏規模 6.4 地震，震源深度 9.7 公里 (中央氣象署網頁資料，其後修正為 15.8 公里)。本次地震即發生於臺灣西南部的褶皺逆衝斷層帶內。地震發生後鄰近震央的臺南市楠西與玉井區傳出災情，多處房屋、道路與橋樑破損，近震源區尚可見零星地表破裂與噴砂現象，多處山區因地震致土石鬆動，持續大規模崩塌。根據中央研究院地球科學研究所(RMT 網頁資料; AutoBATS 網頁資料)與美國地質調查局(USGS 網頁資料)公布的地震參數與震源機制，顯示本次地震約為北北東走向的逆斷層，斷層面向西北或東南傾斜等兩種可能。進一步彙整中央氣象署提供地震資料顯示此一系地震主要發生在嘉義縣大埔鄉、臺南市楠西、玉井與東山區(圖一)，餘震事件百餘起，多起規模大於 5。地震深度分布在地下 5.6 至 23.7 公里。主震後 24 小時內發生規模 3.0 以上的地震事件達 63 起，其後發生數目驟減。

在嘉義與臺南一帶的麓山帶，過去曾發生 1941 中埔地震、1964 白河地震與 1998 瑞里地震等芮氏規模 6 以上的致災性地震，近期自 2023 年以來也陸續發生嘉義大埔地震、嘉義中埔群震、臺南麻豆佳里群震、嘉義朴子太保群震與嘉義布袋等群震事件，顯見嘉義臺南一帶的孕震構造相當活躍。發生這些地震的臺灣西南部麓山帶具多條活動斷層，本研究旨於嘗試以反向投影法分析臺灣地震網具近震源密集測站的地震資料，建議另類快速自動定位方法，採疊加波形的方式資料處理，進行地震定位。

觀測資料：

臺灣地區現今部署有多種類型的地震網用以監測地震發生及提供地震分析資料，如中央氣象署地震網(CWASN)、臺灣地震寬頻陣列(BATS)、臺灣強地動觀測網(TSMIP)、臺灣陣列(Formosa Array)、P 波警報器強震網(P-Alert)及國家地震工程研究中心地震網(NCREE network)，另有少量由中研院地球所(IES)與國內各大學因應研究需求佈設之固定站或臨時地震站。這些地震網均勻覆蓋整個臺灣地區並具備即時傳輸的功能，多面向監測各地地震活動及支援地震學研究。其中 CWASN 為一整合型長期監測網，地震儀器配置包括短週期地震儀、強震儀與寬頻地震儀，目

前數目為 110 站。本地震網設置主要任務為監測臺灣區域地震活動，測站均勻分佈全臺，對於地表微地動具高感知能力，網內規模 2 以下之微小地震仍具良好監測能力(https://gdms.cwa.gov.tw/network_cwasn.php)。

BATS 由中研院地球所建置與維護，設置目標為建立區域地震之震源機制目錄、探索地球深部構造及支援地震學前緣研究，測站具備記錄高動態範圍之精密寬頻地震儀，對於遠震及區域微震皆可有效感知。雖測站均勻分佈全島，唯測站數目相對有限。1999 年集集地震後，氣象署開始強化地震紀錄的品質並擴展地震的監測範圍，部分測站增設寬頻地震儀，自 2006 年起再次執行觀測網升級，增建平均深度 300 公尺的多座井下寬頻地震儀觀測站。目前氣象署與 BATS 所收集地震資料皆已同步相互提供，整合臺灣地區所有的速度型寬頻地震儀可以建立由全寬頻地震儀組成的臺灣寬頻地震網(TBSN)進行地震監測與研究應用，其資料對於地震測報作業參數的計算有相當大的助益。

另氣象署為了掌握大型地震的區域性地震特性，自 1990 年代初期起，便持續在臺灣人口稠密的平原地區架設 7 百多個自由場強震儀，並命名為 TSMIP。TSMIP 設立之初採用觸發模式感測地震，只針對震度較大的地動進行記錄，震後人工採集資料。自 2018 年度初起，TSMIP 開啟強地動觀測的即時觀測系統，為全臺各鄉鎮提供顯著地震的即時震度量測並將所有測站訊號進行連續紀錄完整保存，即便是原地震網未能觸發地震事件仍保有完整紀錄，不會漏失任何可用資料。目前 TSMIP 連續站分佈全島（超過 400 個），尤以平原區為密集（<https://gdms.cwa.gov.tw>）。

研究方法：

本研究提出以反向投影法(Back-Projection, BP)，選用區域地震網之波形紀錄，透過地震紀錄之波形疊加徑行地震定位。

反向投影法：

BP 是一種格點搜尋 (grid search) 策略，將模型中的所有格點視為潛在的地震震源位置。透過合適的速度模型 (Ishii et al., 2005)，計算每個格點與所有地震站之間的地震波走時差。藉由將所有格點的波形依照走時差進行時間平移並重疊，可以疊加出對應的能量峰值。產生最大峰值的格點即被評估為地震震源位置。其計算步驟可表示如下公式：

$$\text{Stack}_i(t) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N S_k(t - t_{ik}) \quad (1)$$

其中， $\text{Stack}_i(t)$ 表示來自所有地震站的地震波能量在時間上的總和， N 為地震站總數； k 為第 k 個地震站的索引； $S_k(t)$ 為第 k 個地震站的地震波振幅時間序列， t_{ik} 為模型中第 i 號格點與第 k 個地震站間的理論走時 (Ishii et al., 2007)。計算時可使用 P 波或 S 波的走時作為基準。

為了使用 BP 方法定位地震，需先將地球模型離散化為三維格點(3-D grid)。假設地震真實震源位置落在這些格點內，則可計算每一格點至各地震站的預測走時，並根據這些預測走時對地震紀錄進行時間平移與疊加。模型中每一個格點都視為潛在震源，並重複上述計算流程。如果某格點即為實際震源，則所有波形在時間

平移後將會對齊，進而產生建設性的波形疊加；反之，非震源位置的波形將無法對齊，疊加效果不佳。透過此重複程序，能夠建立出一個四維（4-D）的 BP 影像，顯示每個潛在震源格點的時間與能量疊加歷程。最終，地震震源位置與起始時間由疊加能量峰值所對應的格點與時間所決定。BP 方法的一大特色，是在定位過程中無需進行地震波的到達時間摘讀（arrival time picking）。本研究基於上述程序，開發了一套適用程式，透過疊加來自 TSMIP 地震網的密集地震站資料進行地震定位。我們選用 Roecker 等人（1987）提出的臺灣一維區域速度及 Huang (1996) 的路徑走時估算。

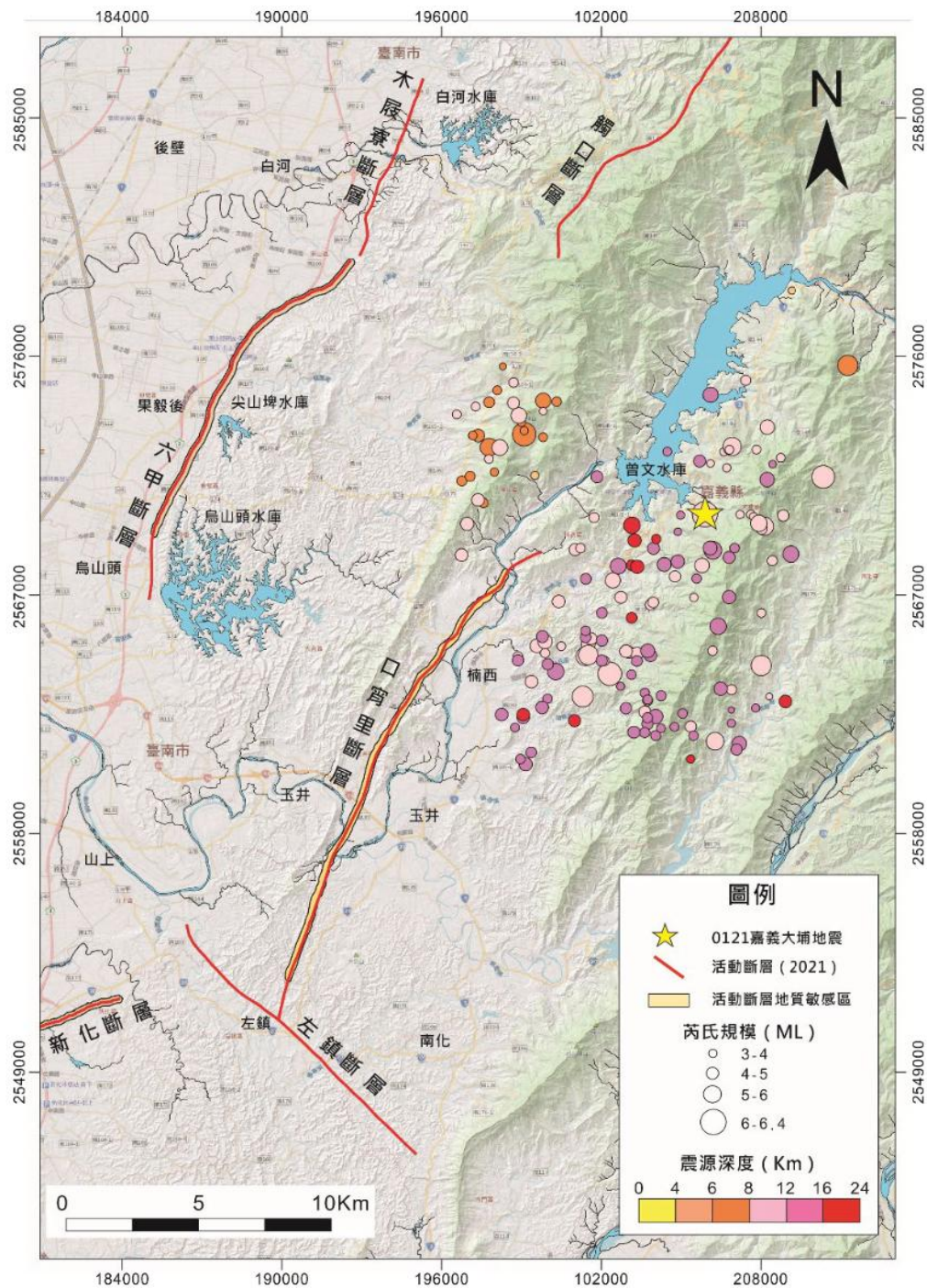
分析與結果：

本研究提出以反向投影法(Back-Projection, BP)，選用區域地震網之波形紀錄，透過地震紀錄之波形疊加徑行地震定位。本研究完整收集大埔地震期間的主餘震序列資料，分別針對氣象署監測網(CWASN)、整合氣象署與中研院測站的寬頻地震網(TBSN)及氣象署強地動觀測網(TSMIP)等三個不同地震監測特質的臺灣區域地震網，選取其地動資料，進行 BP 法地震網定位效能評估並據以探討大埔地震的震源過程、可能的致災活斷層及其孕震構造。為了測試以 BP 法自動定位臺灣地震的可行性，本研究將通過即時收集的地震資料庫數據樣本，進行各自地震網的自動定位測試及評估其效能。由於個別地震站的資料品質，可隨個別觀測儀器妥善率及其測站鄰近周邊環境噪訊隨時間出現變異，無固定規律，本研究將透過對連續資料之多重自動評選流程，去除問題測站資料及選用高訊噪比地震資料，作為進行 BP 法自動定位地震的預處理。BP 法自動定位地震過程採用兩階段方式，先以粗格點為預選震央，搜尋全臺灣的地震資料以獲得初定震央。再以初定震央為搜尋中心，採精細格點進行預選震央的網格搜尋，最終確認震央及地震深度。

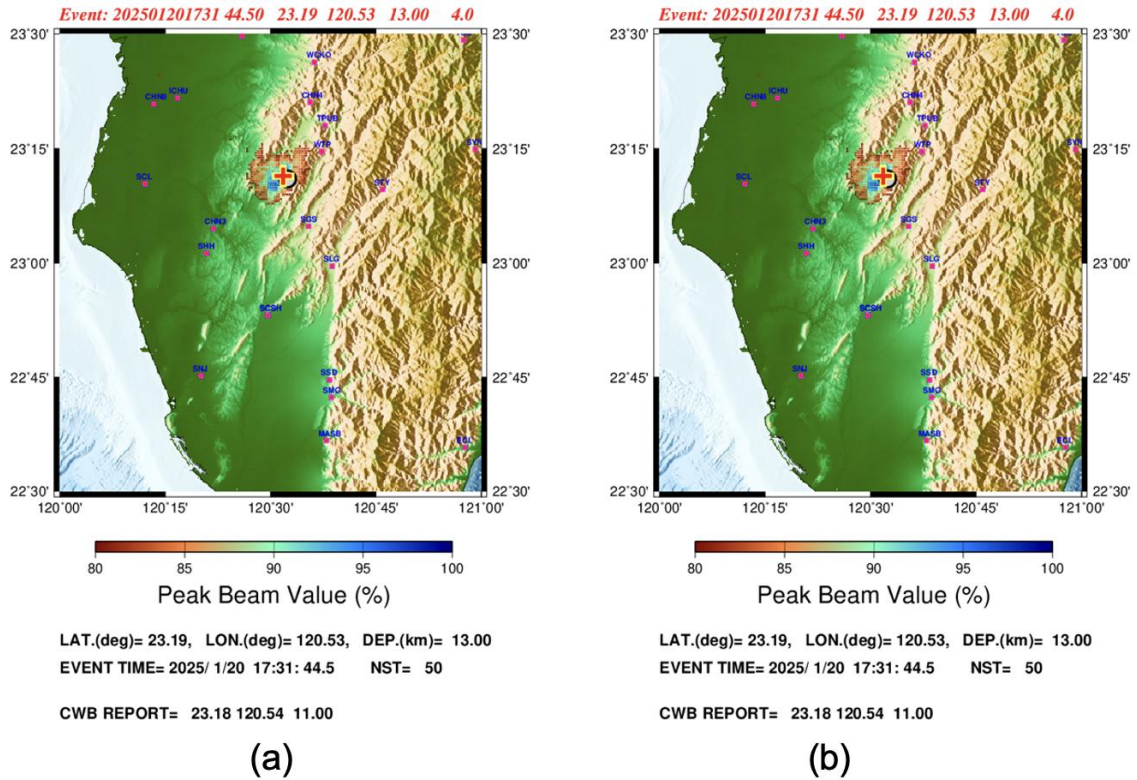
本研究以選取的一個大埔地震之早期餘震（發震時間(UTC)：2025/01/20 17:31）為例，首先取用臺灣寬頻地震網垂直向資料進行地震定位，寬頻地震站雖然數量較少，但地震儀可記錄高動態範圍之精密資料，定位結果如圖二(a)所示。接續改選用氣象署地震監測網資料進行地震定位，此地震網平均分佈全臺並具較高測站密度，地震站有多種地震儀共站進行監測。本研究只取用地震網低感度垂直向資料進行地震定位，結果如圖二(b)所示。由定位結果評估，兩地震網皆可有效自動定位發生於臺灣西南部地區之地震。通過 BP 法對多個大埔地震之餘震進行定位測試，顯示分別選用臺灣寬頻地震網或氣象署地震監測網資料進行定位皆可獲得與氣象署地震速報網發布震央相近結果。本研究針對氣象署地震速報網發布的大埔地震序列事件，選用氣象署地震監測網資料，採用 BP 法進行快速自動定位，其定位結果與速報網發布震央位置的對比，如圖三所示。雖然採用定位方法不同，結果仍有些許差異需進一步探討，對於地震速報而言，此結果具有高度參考價值。由於本研究提出的方法將全臺的地震資料都納入搜尋，因此可對全臺各地地震進行相同的快速定位。

為了測試 TSMIP 連續地震資料用於地震定位的效能，本研究選取了靠近大埔地震震央、具有高訊噪比的地震站資料（如圖四所示）進行分析。此次分析中，我們篩選震央距離 30 公里、50 公里內以內具有高噪訊比的 TSMIP 垂直向地震記錄（分別為 34 筆及 87 筆），進行地震定位。希望透過比較兩者的差異，探尋兼具

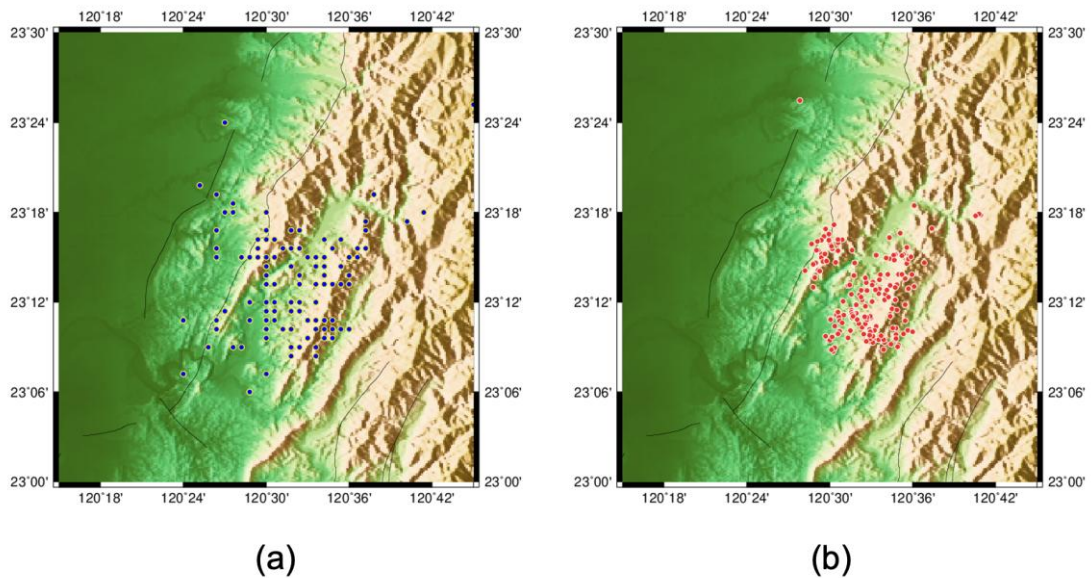
精確與快速的最合宜定位的資料分布與測站數目。通過個別地震的檢驗，發現兩者的震央差別不大，如圖五，唯空間分佈較為寬廣的測站對於地震深度有較佳的約束能力。比起區域地震網資料的定位結果顯示，採用 TSMIP 近震密集測站的波形資料，其定位結果與地震署的速報分布具有更佳的一致性，如圖六。



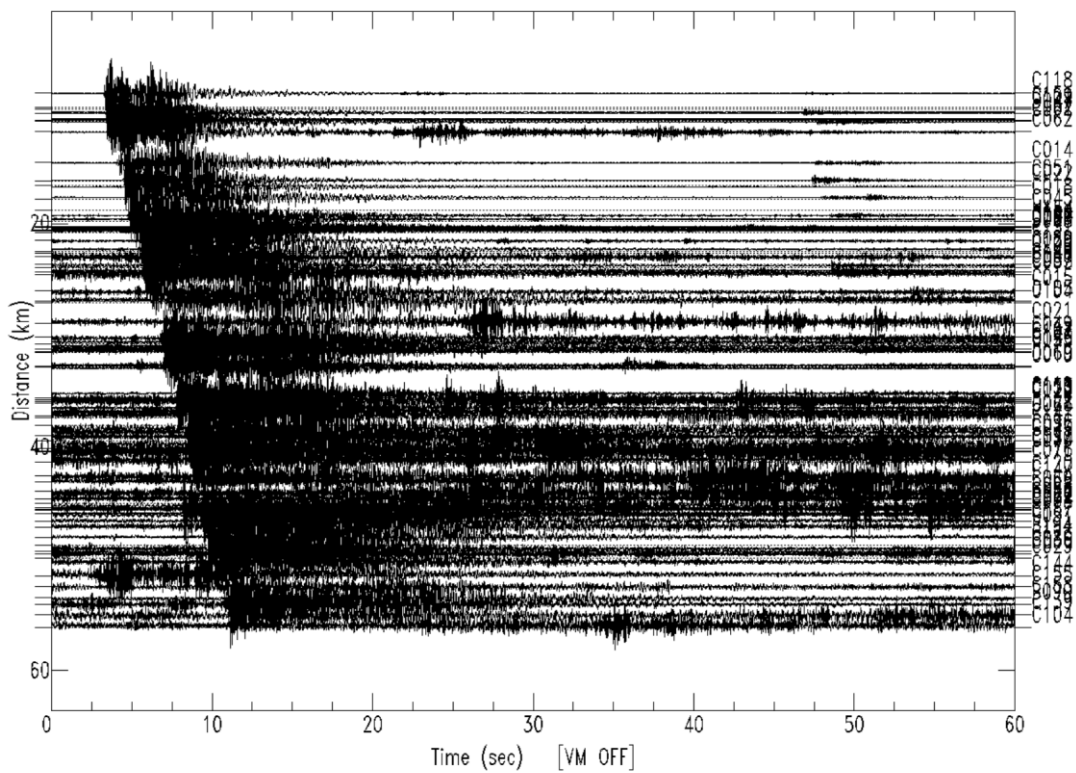
圖一、1 月 21 日至 2 月 10 日大埔地震主餘震分布圖(依據經濟部地質調查及礦業管理中心(2025),嘉義大埔地震地質調查報告)。



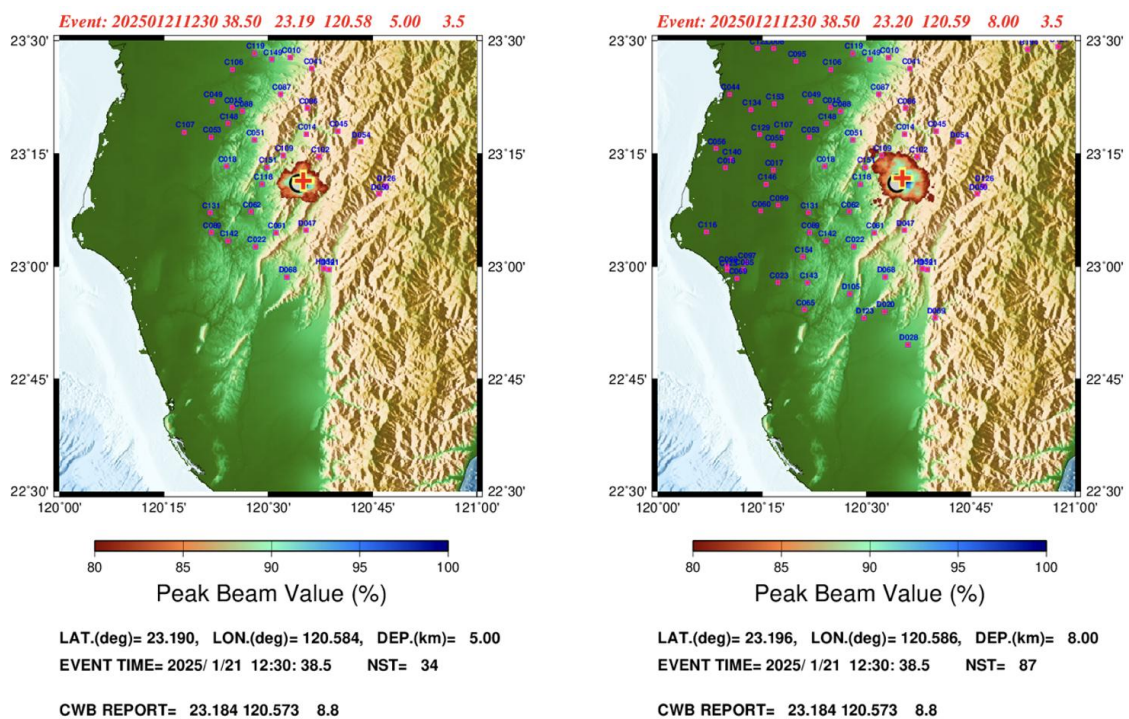
圖二、(a) 臺灣寬頻地震站 HHZ 資料定位結果，(b) CWA 地震網 HLZ 頻道資料定位結果。



圖三、(a) 本研究以反向投射地震定位法對氣象署發佈速報之地震序列 (2025/01/21-2025/03/05) 進行重新定位結果，(b) 氣象署發佈速報之地震序列 (2025/01/21-2025/03/05)。



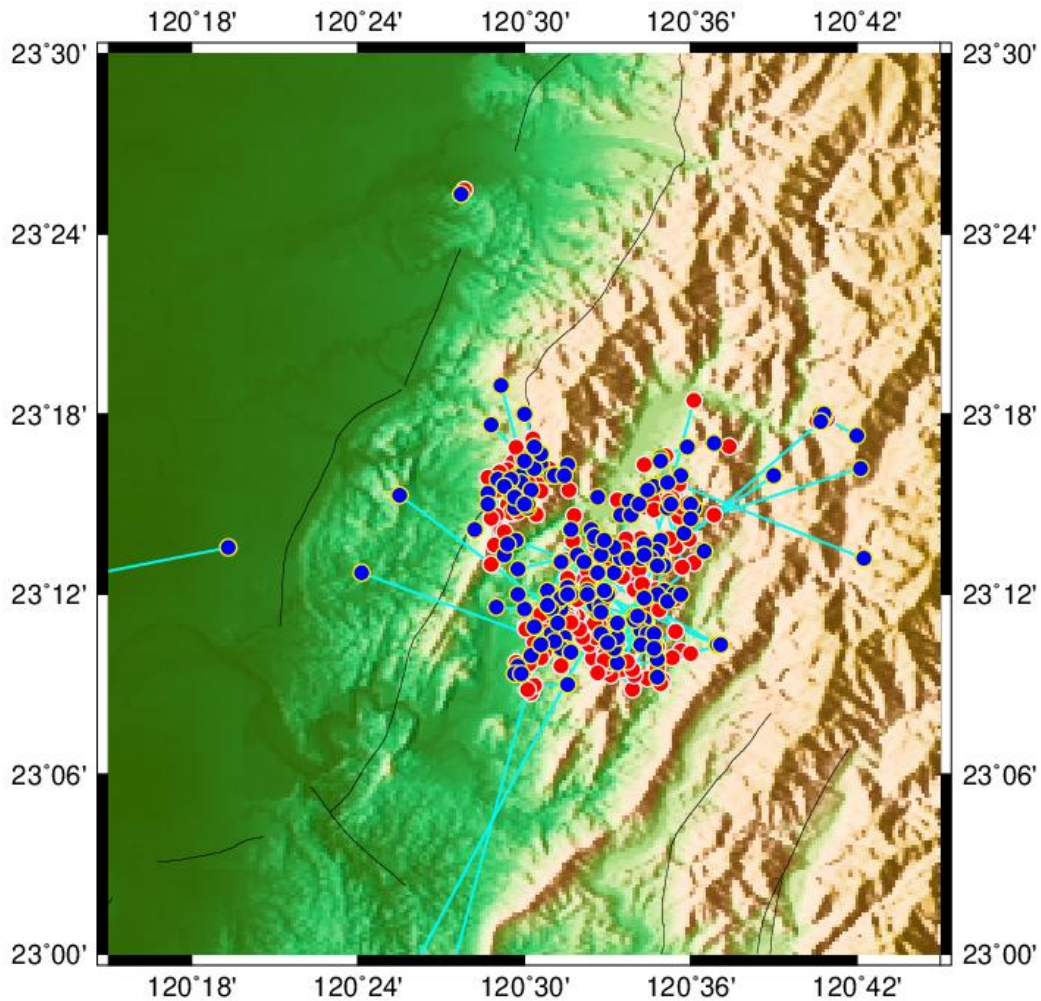
圖四、用於定位之 TSMIP 地震網 HLZ 資料，震央距為五十公里內。



(a)

(b)

圖五、單獨採用 TSMIP 地震資料定位的結果。(a) 採用震央距 30 公里以內地震資料定位結果，(b) 採用震央距 50 公里以內地震資料定位結果。



圖六、本研究採用震央距 50 公里以內 TSMIP 地震資料定位結果（藍色符號）與氣象署發佈速報之地震目錄（紅色符號）比較，淡藍色線為單一地震之兩種地震目錄的震央位置連結。

二、開發近震源資料應用於地震斷層面解的推球方法：

考量臺灣地區發生的地震通常具有空間密集的 P 波極性資料，本研究擬引用相同於地震重定位分析所採用的震波疊加概念，通過疊加震波極性資料的處理方式估算震源機制。不同於地震重定位的疊加方法，將地震紀錄在時間域進行時間偏移的處理方式，本研究將採用特訂修改的簡化堆疊分析方法，推求震源機制。首先提出經前處理完成摘讀的 P 波極性資料為輸入，經由比對理論地震圖 P 波極化方向，修訂資料權重與極性後再進行疊加處理。此疊加過程將對斷層震源面的方位、傾角及滑移參數值進行格點收尋，透過檢視所有可能參數值，最終以疊加極值來評估、確認震源參數。

本研究經由分析震波極性，推求震源機制的疊加方法描述如下：

$$S(\varnothing, \delta, \lambda) = \sum_{k=1}^n P_k(\varnothing, \delta, \lambda, \varnothing_s, i_\xi) * UD_k(\varnothing_s, i_\xi) \quad (2)$$

其中

$$\begin{aligned} P_k(\varnothing, \delta, \lambda, \varnothing_s, i_\xi) = & \cos\lambda \sin\delta \sin^2 i_\xi \sin 2(\varnothing - \varnothing_s) \\ & - \cos\lambda \cos\delta \sin 2i_\xi \cos(\varnothing - \varnothing_s) \\ & + \sin\lambda \sin 2\delta (\cos^2 i_\xi - \sin^2 i_\xi \sin^2(\varnothing - \varnothing_s)) \\ & + \sin\lambda \cos 2\delta \sin 2i_\xi \sin(\varnothing - \varnothing_s) \end{aligned}$$

此公式中的 P_k 是經由理論輻射模式(radiation pattern)所預估的第 k 個地震站的理論 P 波振幅值，而 UD_k 是第 k 個地震記錄的垂直分量極性， \varnothing_s 和 i_ξ 分別代表地震站相對於震源的方位角與射線出射角。疊加值變量 S 代表一個先行選定的錯動斷層面（方位角為 \varnothing ，傾角為 δ ，滑移角為 λ ），將所有紀錄（ n 個地震站）的垂直分量極性 UD_k ，經過公式(1)右方計算後的結果。 $P_k(\varnothing, \delta, \lambda)$ 代表方位角、傾角及滑移角分別為 λ ， \varnothing 與 δ 的破裂斷層面的理論 P 波輻射模式 (Aki and Richards, 2002)。因此，為了計算出最佳震源機制，本研究將針對錯動斷層的三個參數（方位角 \varnothing 、傾角 δ 及滑移角 λ ）分別以每 1° 為間隔進行三維空間的網格搜尋計算，最終選定在所有測試組合中，變量 S 具有最大疊加值的角度組合為錯動斷層的震源機制。

本研究選用 2022 年基隆近海地震之近震源測站所紀錄的 P 波極化資訊，如圖七，依據本研究重定位的震源位置及區域速度模型計算出地震紀錄所在地震站相對於震源的方位角與射線出射角（ \varnothing_s 和 i_ξ ）。再經由格點搜尋方式，評估疊加值變量 S 的極值，確認斷層面參數及繪出地震初動解圖（圖八 a）。結果顯示 2022 年基隆近海地震斷層機制為一近似東北-西南或西北-東南向之垂直滑移錯動。對比於只選用 CWASN 資料，以其標準處理程序(Kan et al., 2015)，通過 Wu et al. (2008) 演算法估算結果，如圖八 b 所示。由圖七的 P 波極化資料分佈觀察，測站分佈於廣大方位角與震央距，對比於 CWASN 地震初動解，本研究所用資料有更良好的約束。

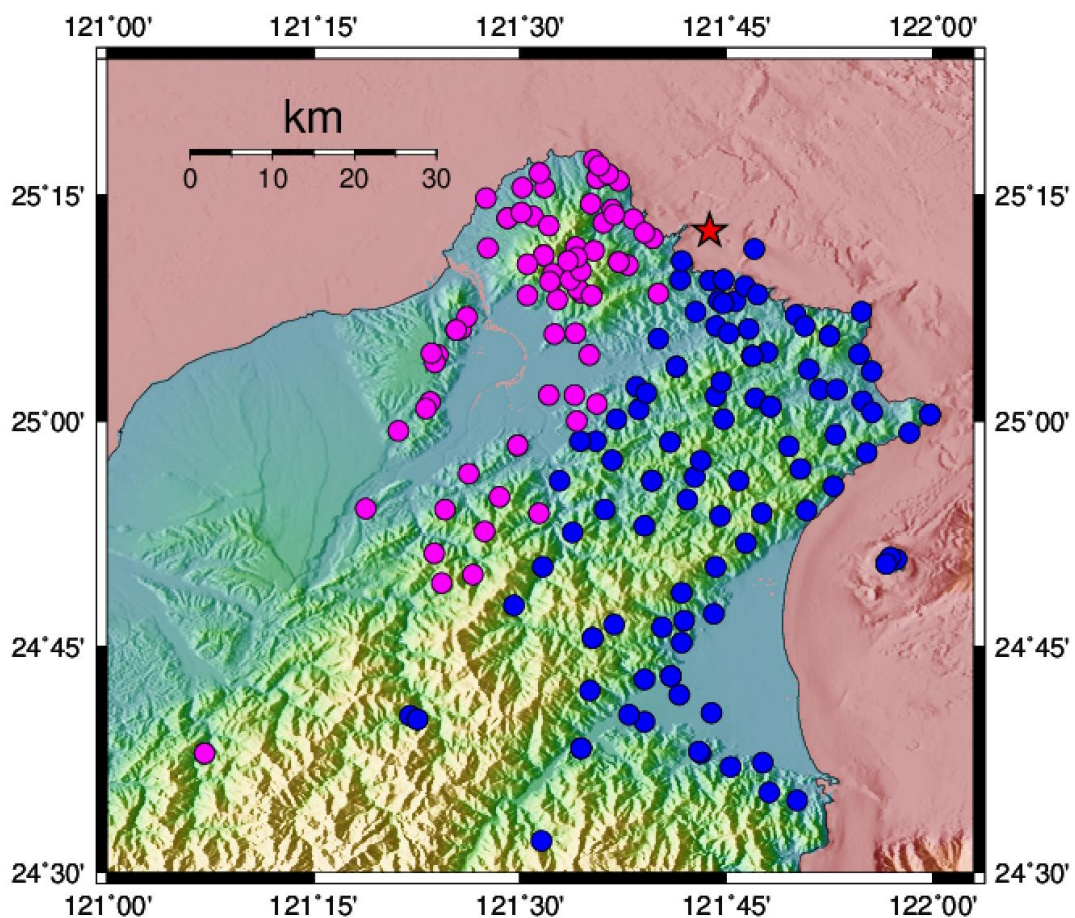
依據方程式(2)的計算，推求震源機制必須先要確定各記錄測站的 P 波極化，再依據摘讀到達地震站的震波波極化，得以推求震源機制解。為了追求更直接的方式進行震源機制的推求，不需先進行各測站的 P 波極化摘讀，直接以測站紀錄的波形資料進行疊加推求震源機制。本研究嘗試將方程式(2)之 S 加以推廣為方程式(3)，

$$S(\varnothing, \delta, \lambda, x_0, y_0, z_0, t_0) = \sum_{k=1}^n \text{sgn}[P_k(\varnothing, \delta, \lambda, \varnothing_s, i_\xi)] * T_k(\varnothing_s, i_\xi, x_0, y_0, z_0, t_0) \quad (3)$$

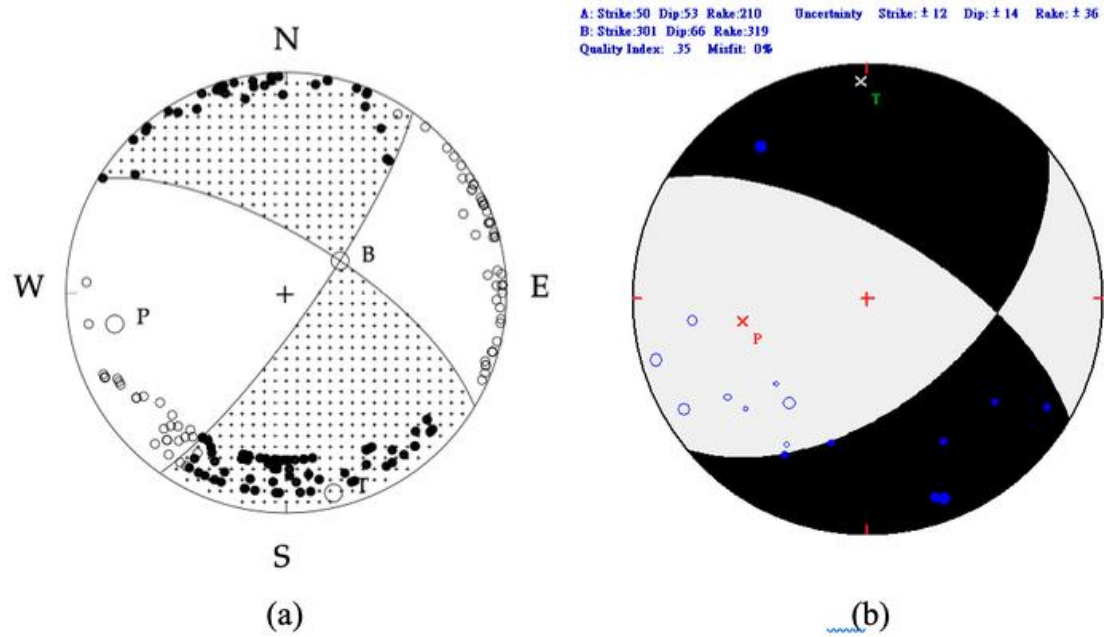
與方程式(2) 對比， T_k （方程式(3)）則推廣為依據 BP 定位所計算之正確震源位置及發震時間（ x_0, y_0, z_0, t_0 ）進行時間項修正後連線的地震圖。變數 S （方程式(3)）代表校正後地震紀錄的疊加訊號，為具時間序列之地震圖。此推廣方法的最佳震源機制仍依循利用走向 \varnothing 、傾角 δ 與滑移角 λ 的座標空間進行網格搜尋來求得，以理論 P 波輻射模式的極性（Aki and Richards 2002）來校正陣列上到達 P 波的

極性。最終的震源機制選擇方式是在所有角度組合中選取具有疊加訊號 S (方程式 (3)) 的最大值。

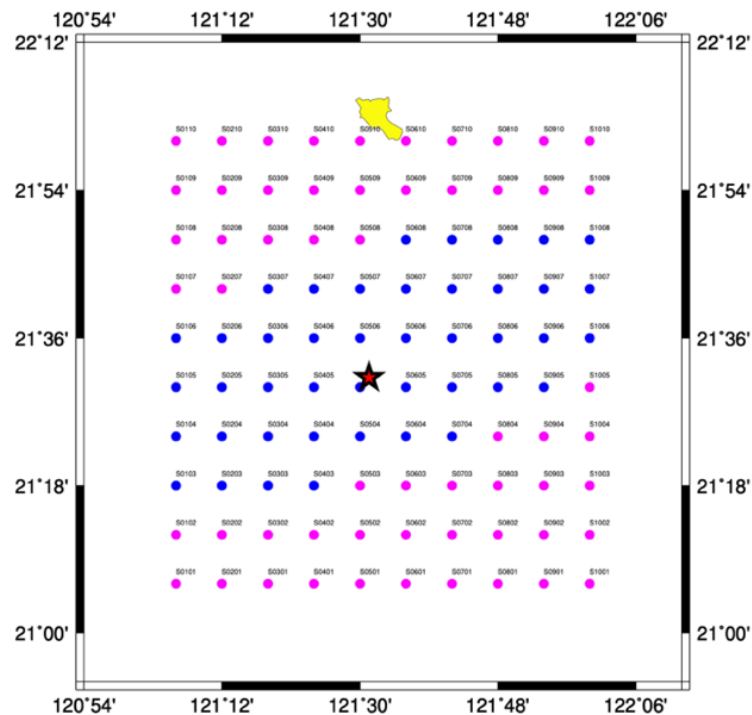
本研究對此推廣方法仍在研發階段，今年度已完成初步之理論測試。本研究利用假設之地震儀陣列及理論地震圖用以測試方法的可行性及研發計算程式。用以測試的理論模型首先選定一組位於臺灣東部區域，均勻測站分布的陣列，震央位於陣列的中間，如圖九所示。經由 FK 法計算理論地震圖作為測試資料，如圖十所示。本研究完成初步程式開發，透過方程式 (3) 的關係式，對走向 ϕ 、傾角 δ 與滑移角 λ 的座標空間格點搜尋，找尋最佳斷層面解。本研究將理論地震圖 (圖十) 視為觀測資料，依據方程式 (3) 關係式進行格點搜尋，所得最佳解如圖十一所示。證實本方法確能偵測出理論震源模型的最佳斷層面解。



圖七、2022 年基隆外海地震的 P 波初動極性分佈圖。藍色圓圈符號表示 P 波初動之上動極性，紫色圓圈符號表示下動極性。星號顯示經本研究重新定位的震央位置。

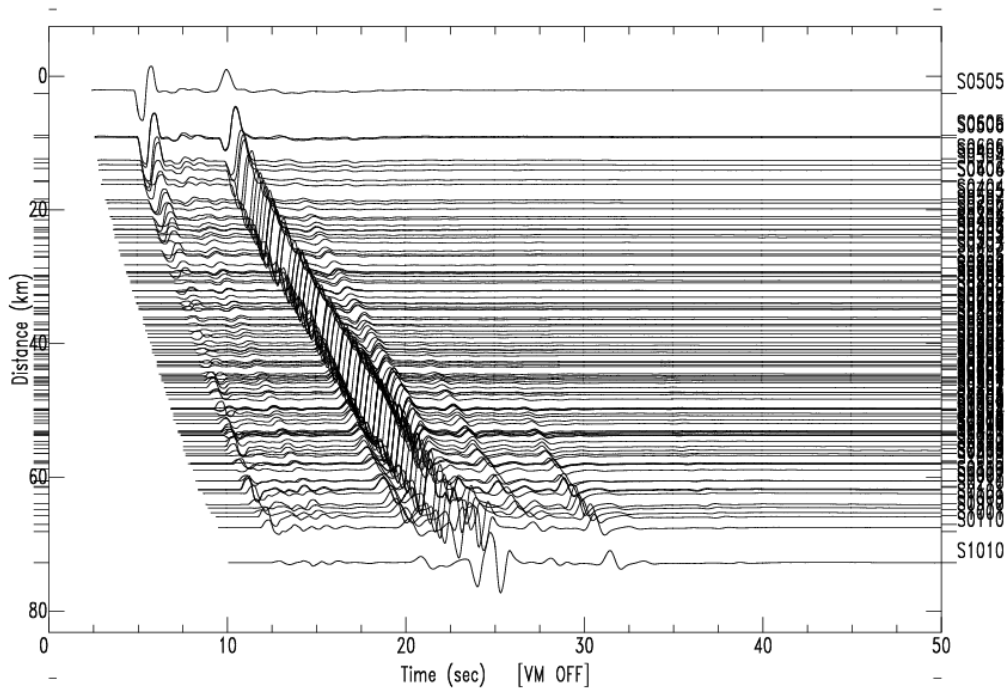


圖八、(a).本研究選取圖七資料，通過震波極性疊加處理（公式二）所估算之2022年基隆近海地震的震源機制（下半球投影，陰影部位為伸張區，白色部位為壓縮區，圖中P、T及B分別代表壓縮、伸張及零軸）。黑色圓圈符號表示測站P波初動之上動極性，白色圓圈符號表示下動極性。(b).選用CWASN資料，以其標準處理程序(Kan et al., 2015)，通過Wu et al. (2008)演算法估算結果（下半球投影，黑色部位為伸張區，灰色部位為壓縮區）。

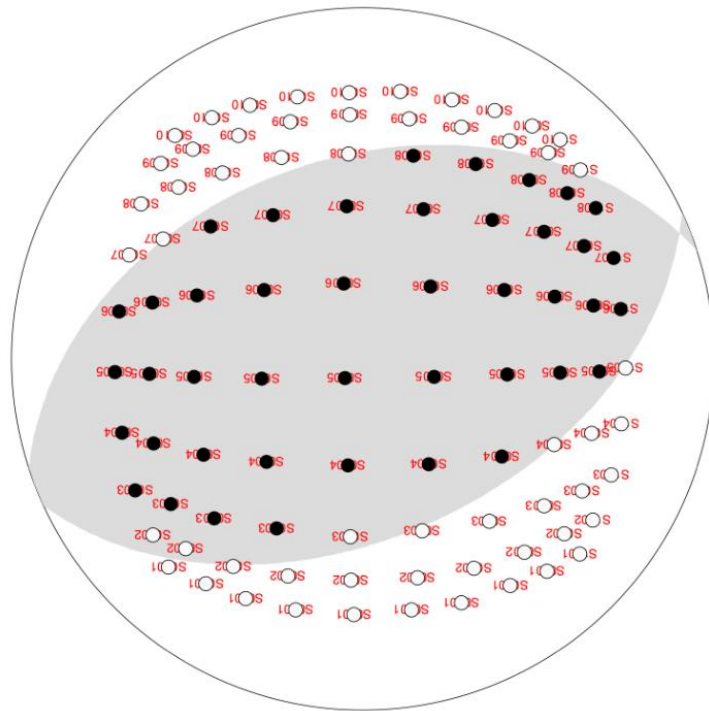


圖九、本研究用於理論分析推廣方法所選定之一組位於臺灣東部區域之假想地震儀陣列。此陣列的分佈測站將用於計算理論地震圖提供格點收尋使用。測站

設定為均勻分布，震央位於陣列的中間（紅色星號）。藍色符號代表選用之震源模型計算後測站顯現極化方向為上動，紅色符號代表測站極化方向為下動。



圖十、以圖九震央位置與震源參數，經由 FK 法計算之所有測站之地震圖並以距離遠近排列繪製。



圖十一、本研究經過公式三的關係式格點收尋圖九之地震源模型之的最佳震源機制並與測站極化方向比對。

肆、討論與結論

本計畫執行標的將是收集及深入分析多個地震網連續收錄資料，應用於精確定位微地震及推估其震源機制，瞭解臺灣地區活動斷層特性，深究各種紀錄訊號，探討複雜構造引致之波傳效應，提升地震網效能及地震資料之附加價值。對於地震定位及其震源機制求解，本研究力求自動化，減少人為調控。本計畫另項工作為開發新方法分析 TSMIP 連續收錄資料以優化地震網效能並提升連續地震資料之附加價值，並持續致力於推廣 TSMIP 資料的地震學應用。本研究結果凸顯利用 BP 方法成像技術，在深化餘震序列理解及提升地震危害評估上的重要性。這些成果有助於增進對震後過程的認識，並能協助未來大型地震的地震監測策略優化。

伍、致謝

作者們感謝 CWASN、TSMIP，NCREE，NTU 和 BATS 地震網提供本研究所使用的資料。本研究得到中央氣象署（編號 MOTC-CWA-114-E-02）。

參考文獻

- 鄧屬予 (2016). 台北盆地之地質研究。西太平洋地質科學, 第 6 卷, 第 1-28 頁。
- 黃柏壽、黃文紀、葉仁傑、史閔弘、郭鎧紋、陳國昌、卓彥宇、王亞男 (2013). 臺灣地區 102 年度自由場強震網資料收集及分析-臺灣山區自由場強震網儀器安裝及資料收集分析。中央氣象局地震技術報告彙編, MOTC-CWB-102-E-01, 63, 97-119。
- Aki, K. and P. G. Richards, 2002, *Quantitative Seismology*. University Science Books.
- Huang, B. S., 1996, A Fortran 77 Program to compute seismic rays travelling inside a radially inhomogeneous earth, *Computers & Geosciences*, 22, 287-303.
- Ishii, M., P. M. Shearer, H. Houston, and J. E. Vidale, 2005: Extent, duration and speed of the 2004 Sumatra-Andaman earthquake imaged by the Hi-Net array, *Nature*, 435, 933–936.
- Ishii, M., P. M. Shearer, H. Houston, and J. E. Vidale, 2007: Teleseismic P wave imaging of the 26 December 2004 Sumatra-Andaman and 28 March 2005 Sumatra earthquake ruptures using the Hi-net array, *J. Geophys. Res.*, 122, B11307, doi:10.1029/2006JB004700.
- Kan, C. W., H. C. Pu, C. Y. Lee, H. C. Hsu and N. C. Hsiao, 2015, Automatic Solution of Focal Mechanism Provided by Central Weather Bureau, *Meteorological Bulletin Central Weather Bureau, Taiwan*, 52, 69-86.
- Lee, W. H. K., and Lahr, J. C. (1975). HYPO71 (revised): A computer program for determining hypocenter, magnitude and first motion pattern of local earthquakes. U.S. Geological Survey Open-File Report 75-311, 116 pp.
- Lee, W. H. K., Lahr, J. C., and Valdes, C. M. (2003). The HYPO71 earthquake location program. In: Lee, W. H. K., Kanamori, H., Jennings, P. C., and Kisslinger, C. (Eds.) (2003), 1641-1642.
- Roecker, S. W., Y. H. Yeh, Y. B. Tsai, Three-dimensional *P* and *S* wave velocity structures beneath Taiwan: deep structure beneath an arc-continent collision, *J. Geophys. Res.*, **92**, 10547–10570, 1987.
- Wu, Y. M., L. Zhao, C. H. Chang, and Y. J. Hsu, 2008, Focal Mechanism Determination in Taiwan by Genetic Algorithm, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **98**, 651-661.

114 年度地震資料之分析應用

子計畫二

臺灣 GNSS 連續站品質檢核及資料分析方法開發

許雅儒 吳帥賢 蔡宜純 陳彥宏

中華民國地球物理學會

摘要

臺灣花東縱谷為歐亞板塊和菲律賓海板塊的聚合帶，地震頻繁，目前已架設多個 GNSS 連續觀測站進行長期地表變形觀測。本研究針對臺灣東部地區的連續 GNSS 觀測資料進行品質管控，運用 TEQC 軟體進行多項量化參數分析，包括衛星透空度、資料筆數、週波脫落數量、訊噪比與多路徑效應等，評估資料品質對解算成果的影響。結果顯示，觀測站周遭環境（如樹木遮蔽）對資料品質與接收率有顯著影響，當遮蔽嚴重時，會造成訊號接收率與資料穩定度下降，顯示環境維護對於資料觀測品質的重要性。GNSS 地表位移場可幫助了解區域內地殼應變的分佈和演化，利用線性回歸法和 M-SSA 法可從原始資料中萃取出與地震相關的地表位移訊號，有效降低水文與其他環境因子的干擾。本研究以 2024 年 4 月 3 日規模 7.3 地震為例，線性回歸法和 M-SSA 法皆顯示在地震後約 220 天內持續有震後變形並呈指數衰減之滑移，且計算結果相近。此外分析東部外海地震活動度變化與地表位移之間發現當地震頻率上升時，地表位移速率亦隨之增加，代表區域應力累積速率同步提升。此結果顯示，整合地震活動與 GNSS 時間序列之分析，將有助於提升地震前兆辨識能力。

關鍵字：GNSS、花蓮地震、多通道奇異譜分析法 (M-SSA)、線性回歸法、主成分分析法 (PCA)、TEQC

Abstract

The Longitudinal Valley in eastern Taiwan, which runs along the western margin of the Coastal Range, is considered to be the plate suture zone between the Eurasian and Philippine Sea plates, characterized by frequent seismic activity. To monitor surface deformation, a dense network of continuous GNSS stations has been established. This study focuses on assessing the quality of GNSS observations by using the TEQC software to analyze multiple quantitative parameters, including satellite elevation mask, number of data, cycle slips, signal-to-noise ratio, and multipath effects. The analysis reveals that

the surrounding environment of GNSS stations has a significant impact on data quality, highlighting the importance of regular site maintenance to ensure reliable data collection. GNSS surface displacement provide critical constraints on monitoring fault slip behaviors. By applying linear regression and Multichannel Singular Spectrum Analysis, we successfully extract earthquake-related deformation signals from the raw data, effectively reducing noise from hydrological and environmental factors. In addition, this study integrates seismicity and GNSS data to investigate the relationship between seismic activity and crustal deformation. The results reveal a significant correlation between seismicity rate and crustal deformation. An increase in seismic activity observed in mid-2022 coincides with a period of accelerated surface displacement. These results demonstrate that integrating seismic and GNSS time-series analyses provides valuable insights for identifying potential earthquake precursors.

關鍵字：GNSS、花蓮地震、多通道奇異譜分析法 (M-SSA)、線性回歸法、主成分分析法 (PCA)、TEQC

壹、研究目的

臺灣位於菲律賓海板塊和歐亞板塊邊界，板塊聚合速度約為 85~90 mm/yr，其中花東縱谷地區及外海斷層累積可觀的地殼應變，也造成頻繁的地震活動，每年約有 1 到 2 次規模 6 以上的地震在臺灣發生，並在 2024 年 4 月 3 日發生了規模 7.3 的花蓮地震，頻繁的地震活動突顯了研究臺灣東部斷層滑移行為的重要性。

為了深入瞭解花東縱谷地區斷層的活動特性，中央氣象署已於該區域設置多個全球衛星導航系統 (GNSS) 連續觀測站。這些觀測站能提供快速且完整的同震位移與地殼應變資訊，對於精確評估東部地區的地震災害風險具有關鍵性作用。因此，提升 GNSS 解算座標的品質與精度，對後續資料分析與科學研究至關重要。本計畫針對使用不同 GNSS 解算軟體與方法所計算的測站座標時間序列進行比較分析，評估其差異性與應用成果。此外，探討觀測站周遭環境對資料品質的影響，進一步探求可以反應測站環境變化的參數。

對於 GNSS 解算後如何萃取原始訊號中的地震位移，本研究以 2024 年 4 月 3 日花蓮地震為案例，分別採用線性回歸法與多通道奇異譜分析法擷取與地震相關的訊號成分，提供有效的訊號分析方法。此外，Peng et al. (2025) 的研究揭示於 2024 年花蓮地震的孕震過程中，深部無震滑移 (aseismic slip) 為關鍵因素。該研究在 2021 年花蓮壽豐地區發現持續約四個月的群震活動，GNSS 觀測同時記錄到期間內地表約 1 至 2 公分的位移。透過整合地震與大地測量資料，結果顯示群震事件與更深層無震滑移之間存在連動關係，進而促進應力快速累積，最終導致花蓮主震發生。本次報告亦探討地震活動度與地表位移的時間變化，了解潛在的斷層活動對應的地震訊號，以提升可能地震前兆辨識能力。

貳、研究方法

利用 GNSS 測量地殼的長期變形可以提供地殼應變的積累訊息、計算斷層的

鎖住狀態和滑動速率，了解區域內地殼應變的分佈和演化和地震活動的關係。透過測量地震發生時的同震地表位移，可分析斷層的運動特性，包括滑移量、滑移速率及斷層的幾何構造，從而深入瞭解地震機制與斷層動力學行為；震後變形的觀測與分析亦可用來評估地震發生後潛在的地震風險，對提升地震風險評估準確性具有重要意義，並有助於強化防災規劃與災害應對策略。本研究聚焦於臺灣東部 GNSS 測站資料解算及分析，並找尋與斷層及地震活動相關的訊號。

(一) GNSS 資料蒐集及解算

針對臺灣東部地區的 GNSS 連續觀測站資料，分別使用美國 NASA 噴射推進實驗室 (JPL) 開發的 GIPSY-OASIS 解算軟體 (Bertiger et al., 2020) 以及由麻省理工學院與加州大學聖地牙哥分校海洋研究所共同開發的 GAMIT 10.71 / GLOBK 5.34 軟體 (Herring et al., 2002) 進行座標解算。GIPSY 採用精密單點定位 (PPP, Precise Point Positioning) 技術，其優點為解算過程中不需建立小網絡，能以更快速的方式 (約為 GAMIT/GLOBK 的數十倍) 獨立計算各個測站位置，且不易受到資料品質較差的測站干擾。然而，PPP 技術在消除共同誤差方面明顯落後雙差法，為克服此一缺點，可使用 Ambizap (Blewitt, 2008) 利用雙差方法的優點，消除共同誤差，Ambizap 是一種專為處理大規模 GNSS 網絡資料而設計的快速模糊度解算演算法，其主要用途是將 PPP (精密單點定位) 結果進一步提升到更高精度的網絡解，其成果甚至略優於 GAMIT 或 BERNESE 等傳統解算方法。

GAMIT 以雙差分載波相位觀測作為定位基礎，透過 L1 和 L2 載波的線性組合來消除電離層影響，其定位精度可達 2 mm。資料處理流程首先透過自動偵錯與清理程序，剔除觀測資料中的離群點、週波脫落與錯誤標記；隨後與精密軌道資料整合，進行時間與軌道誤差修正；接著再以加權最小平方法進行二次差分處理，解算測站座標與週波未定值，並產出各觀測時段的協變數矩陣。最終將這些協變矩陣輸入至 GLOBK 或其他後處理軟體 (如 QOCA、FONDA)，以進行多時段資料整合，並求解測站的最終座標與速度場。

本研究使用 UNAVCO 發展的 TEQC (Translation, Editing, and Quality Check) 針對臺灣連續 GNSS 觀測站資料進行品管工作。RINEX 資料透過 TEQC 可得到許多量化的 QC 參數，如 GPS 衛星的透空度 (sky plot)、應有與真實觀測資料量筆數、週波脫落量 (cycle slips)、訊噪比 (signal-to-noise ratio) 及多路徑效應 (multipath effects) 等，將這些量化參數與解算後的座標進行比對，即可得知資料品質好壞對於解算成果的影響。

(二) 萃取 GNSS 同震與震後變形訊號

為了尋找潛在的斷層活動訊號，需要分析長期觀測數據，了解水文變化對各種地球物理參數的影響，並排除地表環境變化對資料的干擾才有機會找到可靠的斷層暫態滑移訊號。本次報告以 2024 年 4 月 3 日發生於臺灣花蓮之地震事件 (以下簡稱 0403 地震) 為例，展示應用線性回歸法 (linear regression) 和多通道奇異譜

分析法（以下簡稱 M-SSA, Multichannel Singular Spectrum Analysis）（Ghil et al., 2002；Walwer et al., 2016）於震後地表位移場之訊號特徵拆解。相對於 Singular Spectrum Analysis (SSA) 只能分解單一時間序列的訊號，M-SSA 則分析整個區域所有測站時間序列，藉此找出區域性的變化模式，以確定偵測到的異常現象不是由單一測站的離群值造成。本研究分析範圍涵蓋東部 19 個 GNSS 測站，以 GAMIT 計算之東西向、南北向及垂直向三分量座標時間序列，萃取出各測站記錄到的地表位移量。拆解後之特徵向量再投影於地理空間上，解析其於空間分布之特性，探討不同訊號特徵所代表之地表運動方向及其可能的物理意涵。

(1) 線性回歸法

針對 GNSS 時間序列進行線性回歸計算時，通常會考慮間震期地殼運動速度、年週期、半年週期、地震及更換儀器在時間序列上造成在的不連續及震後變形，可表示如下式 (1)：

$$y(t_i) = a + bt_i + c \cos(2\pi t_i) + d \sin(2\pi t_i) + e \cos(4\pi t_i) + f \sin(4\pi t_i) + \sum_{j=1}^{n_g} g_j \cdot H(t_i - T_{gj}) + \sum_{j=1}^{n_k} h_j \cdot H(t_i - T_{gj}) t_i + \sum_{j=1}^{n_k} k_j \cdot (1 - e^{-\frac{t_i - T_{kj}}{\tau_j}}) H(t_i - T_{kj}) + v_i \quad (1)$$

係數 a 代表起始位置，係數 b 代表線性變化，可視為間震期地殼運動速率；係數 c 、 d 、 e 、 f 代表年週期及半年週期變化；係數 g 代表更換儀器及地震造成的位移；係數 h 為震後地殼運動速率的改變量；係數 k 描述震後變形呈指數衰減之現象。其中 $H(t)$ 為階梯函數 (Heaviside step function)， τ 為鬆弛時間，描述震後變形呈指數衰減之現象，可由震後位移隨時間之演變估算滑動所需趨緩時間，經由逆推可求得模型中各參數值並計算模式預測值，而其與觀測值之差即為殘差 v_i ，模型的最佳解為使殘差符合常態分布。對於震後變形的鬆弛時間 τ ，我們進行迴圈計算，尋找符合實際震後滑移時間的最佳擬合常數 τ 。

本次報告以 0403 地震之位移場資料作為範例。根據東部多個 GNSS 觀測站每日解資料，對於式 (1) 震後變形的鬆弛時間 τ ，進行迴圈計算，尋找符合實際震後滑移時間的最佳擬合 τ ，結果顯示震後滑移的趨緩時間約為 220 天。

(2) M-SSA 法

M-SSA 法能同時運用地球物理場中的空間與時間相關性，萃取出 GNSS 觀測網之共同成分訊號與其時空結構分布。此方法無需事先假設其水文或歷史地震造成的位移特徵也能進行運算，可揭示出原始訊號裡共同隱含的季節性波動與地表變形趨勢。

M-SSA 為將每組時間序列 X_l ($l = 1, 2, \dots, L$, L 為時序資料總數) 排列在設定長度為 M 的滑動視窗內，考慮其時間延遲 (time-lag) 所形成的訊號間之共變異 (covariance) 資訊 (Ghil et al., 2002；Walwer et al., 2016)。首先對原始時間序列 $X_l(t)$ 建立一個延遲矩陣 \tilde{X}_l ，該矩陣包含了該時間序列在不同時間延遲下的 M 個副本，

如下：

$$\tilde{X}_l = \begin{bmatrix} X_l(t_1) & X_l(t_2) & \cdots & X_l(t_M) \\ X_l(t_2) & X_l(t_3) & \cdots & X_l(t_{M+1}) \\ \cdot & \cdot & \cdots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdots & \cdot \\ X_l(t_{N'}) & X_l(t_{N'+1}) & \cdots & X_l(t_N) \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中 t 為時間， N 為資料點個數， $N' = N - M + 1$ ； M 為用於嵌入原始時間序列的滑動視窗長度。將每組時間序列各自編排於不同矩陣內後，接下來進行共變異數計算，兩組不同時間序列 X_l 與 $X_{l'}$ 之間的共變異數矩陣 $T_{l,l'}$ 表示如下：

$$(T_{l,l'})_{j,j'} = \frac{1}{\tilde{N}} \sum_{n=\max(1,1+j-j')}^{\min(N,N+j-j')} X_l(t) X_{l'}(t+j') \quad (3)$$

其中 $\tilde{N} = \min(N, N + j - j') - \max(1, 1 + j - j' + 1)$ 。 j 為延遲維度的索引 ($j, j' \in \{1, 2, \dots, M\}$)。這些矩陣構成了一個總體共變異數矩陣 \tilde{T} 的各個區塊，如下：

$$\tilde{T} = \begin{bmatrix} T_{1,1} & T_{1,2} & \cdots & T_{1,L} \\ T_{2,1} & T_{2,2} & \cdots & T_{2,L} \\ \cdot & \cdot & \cdots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdots & \cdot \\ T_{L,1} & T_{L,2} & \cdots & T_{L,L} \end{bmatrix} \quad (4)$$

對總體共變異數矩陣進行特徵值分解後：

$$\tilde{T}E^k = \lambda_k E^k \quad (5)$$

可得到 $L \times M$ 個特徵值 λ_k 與其 \tilde{T} 對應的特徵向量 E^k 。 k 為特徵值、特徵向量的索引，即標記第 k 個主成分。每個特徵向量 E^k 可視為由 L 個長度為 M 的區段所組成，因此可以將每個區段 E_l^k 對應到相應的時間序列 $X_l(t)$ 。每一個特徵值對應一個時間及空間特徵向量，特徵值愈大代表訊號愈強。利用時間及空間特徵向量的變化可以找尋可能的物理機制。

本次 M-SSA 使用東部 19 個 GNSS 測站的東西、南北及垂直向 3 個分量，共 57 組時間序列，先以線性回歸計算同震位移和間震期速率並剔除，減少對於萃取震後變形或震前斷層滑移訊號上的影響，並將空缺的資料進行內插補點，使不同測站的資料點數相同，並以公式 (2) 滑動視窗 $M=50$ 天做為範例，萃取出各測站的共有訊號。

(3) 主成分分析法

主成分分析法 (Principal Component Analysis, PCA) 是一種多變量統計分析方法，主要用於降低資料維度並辨識其中的主要模式與趨勢。PCA 透過線性轉換將原始資料投影至新的座標系統，其座標軸由資料協方差矩陣的特徵向量所構成，這些特徵向量即為主成分，對應於資料中變異量最大的方向，能有效辨認主要的變化特徵與結構。

在進行主成分分析前，需先對資料進行標準化處理，即減去各變數的平均值並除以其標準差，確保各資料維度在相同尺度下具有可比性。接著，計算協方差矩陣以了解不同變數間的相關性，再進行特徵值與特徵向量分解。特徵向量決定主成分的方向，而特徵值則反映該方向對整體變異的貢獻度。根據特徵值大小選取主要主成分，通常只需保留少數幾個主成分即可解釋超過 95 % 的總變異量。透過 PCA 可有效萃取各 GNSS 測站間的共通地表變形特徵，作為探討地殼應變與地震活動相關性的方法。

參、研究討論與結果

(一) GNSS 資料品質檢測

本研究以氣象署花蓮和平站為例說明環境的變化和資料品質對於解算成果的影響（圖一）。圖一左和右分別為樹木修剪前後情形，測站環境維護時間為 2024 年 6 月初；由透空圖（圖二左）可以看到當測站附近有許多樹木遮蔽時，就會屏蔽衛星訊號的接收，HUAP 於 4 月 19 日方位角 $120^{\circ}\sim 165^{\circ}$ 仰角 $15^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 衛星軌跡就有斷斷續續的情形發生，樹木修剪後（圖二右）軌跡訊號明顯改善，且 L2 訊號接收率從 94% 提高至 96%（圖二最下方文字），其整體資料的接收率也從 81% 提升至 84%。我們利用 TEQC 得到 HUAP 從 2016 年至今的 QC 參數（圖三），其中灰點為 E、N、U 座標三分量，綠色點為應有觀測資料量（posobs），藍色點為真實觀測資料量（comobs），紅色點為資料接收率，黃線為觀測與週波脫落數的比值（Observation/cycle slips, oslps），其數字越低表示資料品質越差，粉紅色線標示測站環境維護時間。2021 年到 2024 年期間 HUAP 的 oslps 的值越來越低，資料接收率也從 80% 慢慢掉到 70%，在此同時 E、N、U 資料的散亂程度提高，直至樹木修剪後資料品質與接收率才回升，由此可知環境對於資料品質的重要性。

為了客觀比較 QC 參數與 E、N、U 座標資料的關係（圖四），我們將應有觀測資料量減去真實觀測資料量得到資料缺失量（Missing data），並換算為資料缺失率，再加入週波脫落與觀測比值，將三個參數分別做 5 天的移動平均並將其正規

花蓮和平(HUAP)



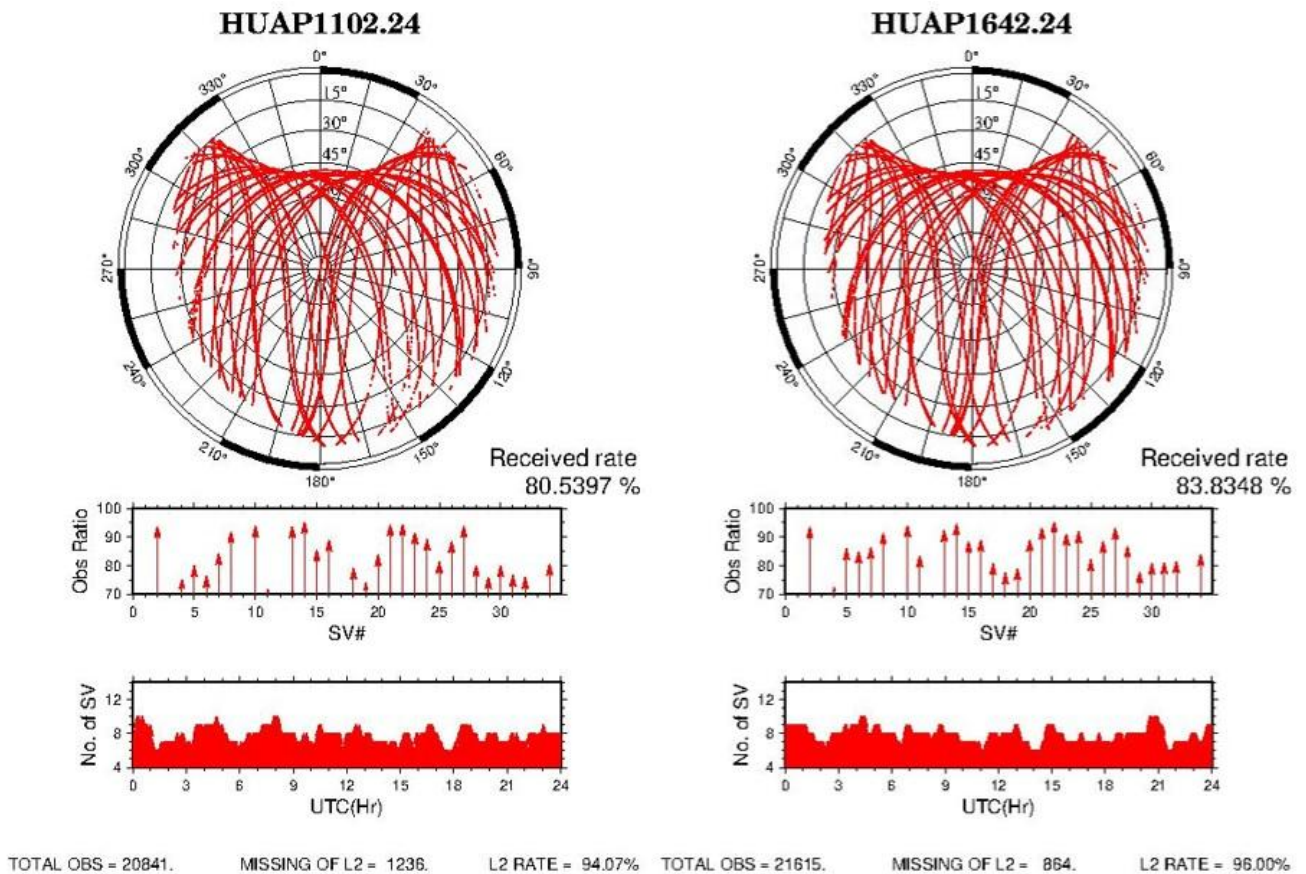
改善前



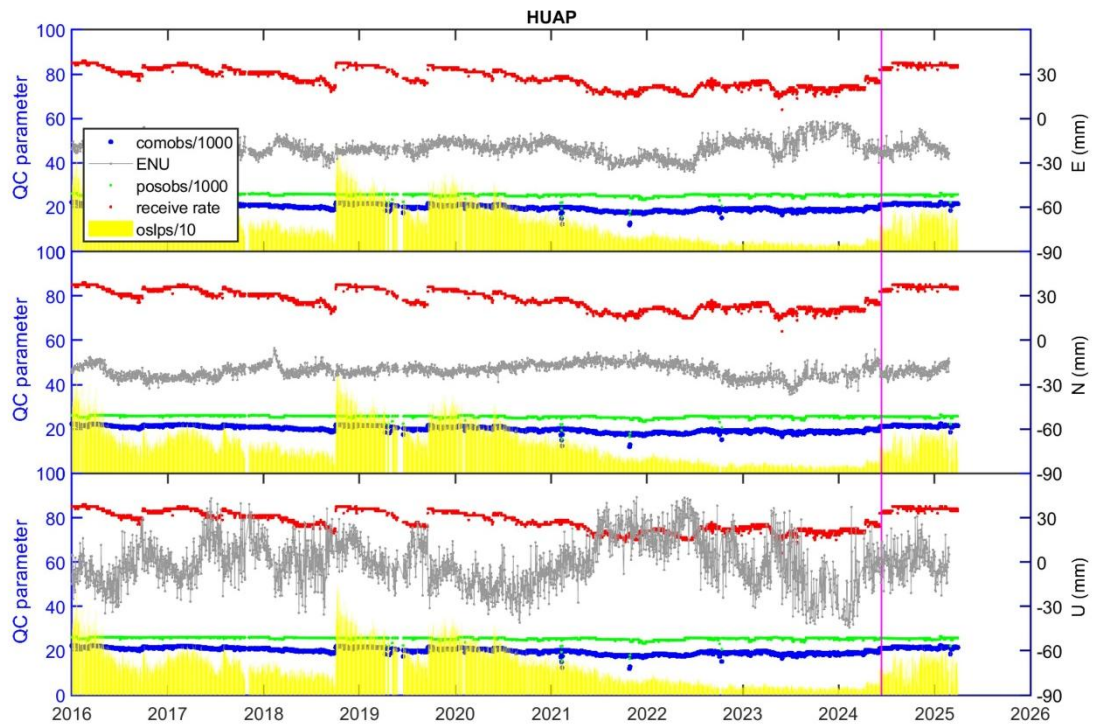
改善後

化(圖四),比較資料缺失(Missing data: posobs-comobs, 藍線)、資料缺失率(Missing rate: 1-receive rate, 紅線)、週波脫落與觀測比值(1/ oslps, 綠線)及 E、N、U 座標資料(灰線),研究發現當週波脫落與觀測比值越大時,觀測資料缺失越多,資料缺失率越高,且解算後的座標散亂程度越大,表示這三個 QC 參數和資料品質呈反比關係。

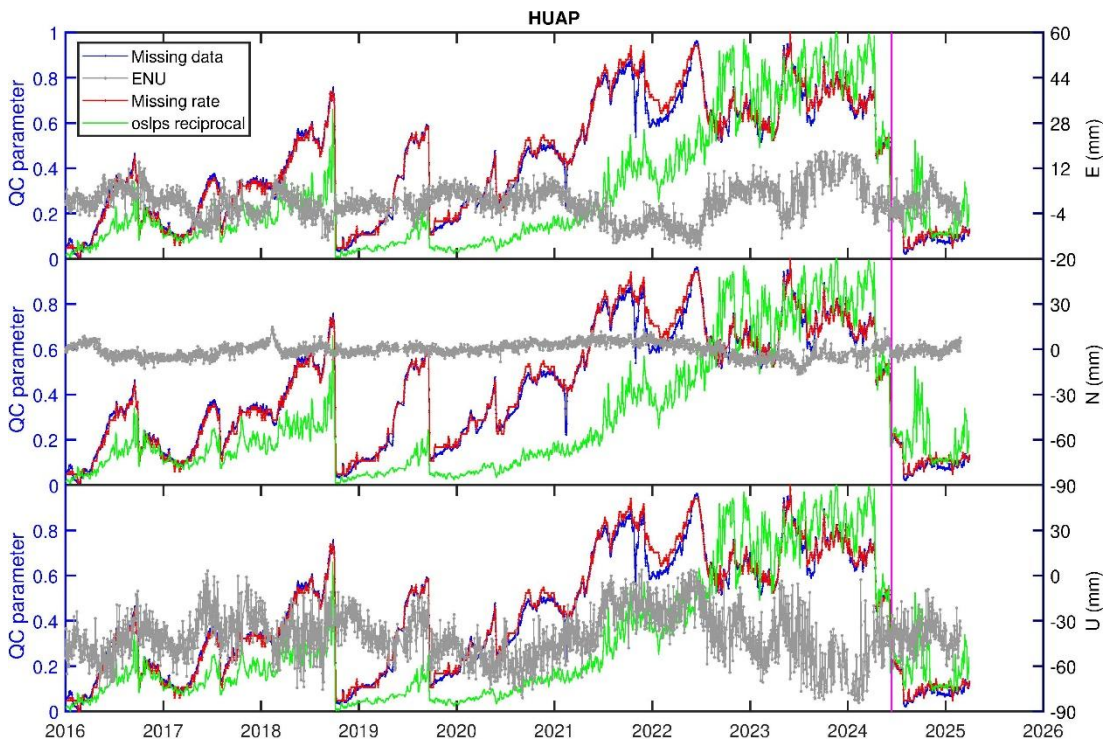
圖一、花蓮和平環境照,左圖為樹木修剪前,右圖為樹木修剪後環境。



圖二、花蓮和平透空圖,左圖為樹木修剪前,右圖為樹木修剪後。

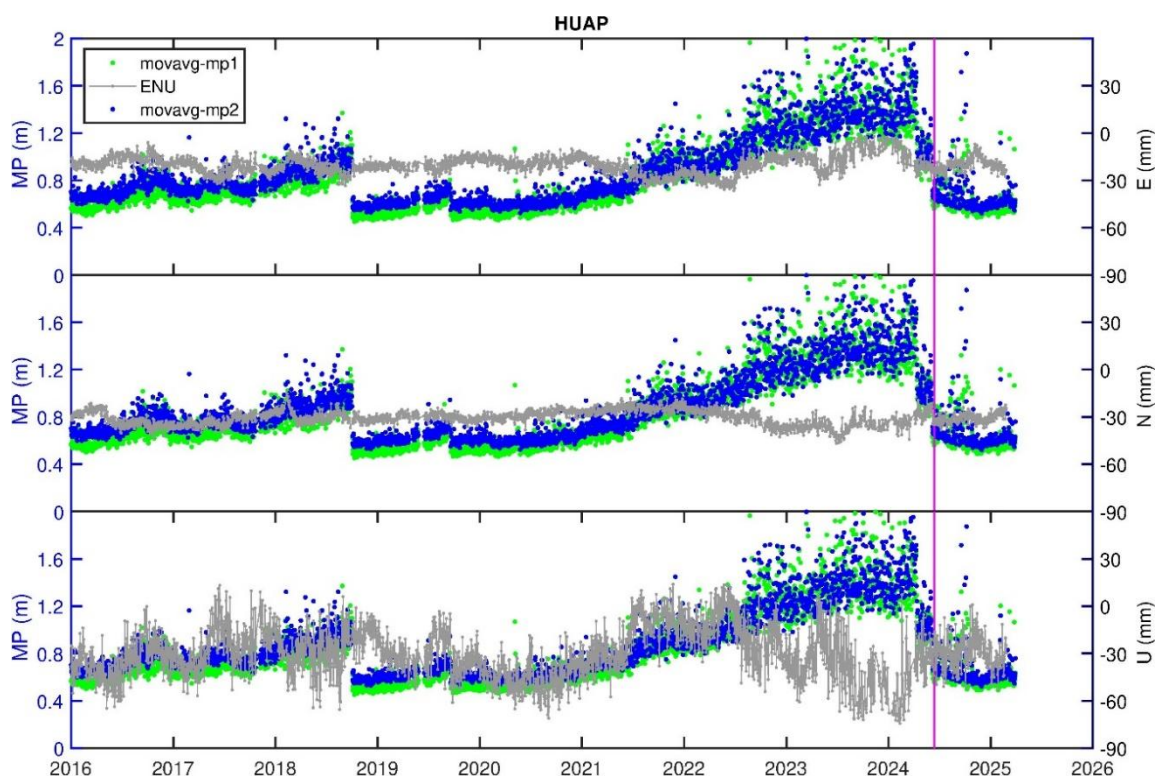


圖三、花蓮和平站 QC 時間序列圖，灰點為 E、N、U 座標三分量，綠色點為應觀測資料量，藍色點為真實觀測資料量，紅色點為資料接收率，黃線為觀測與週波脫落數的比值 Observation/cycle slips，其數字越低表示資料品質越差，粉紅色線為測站環境維護時間。



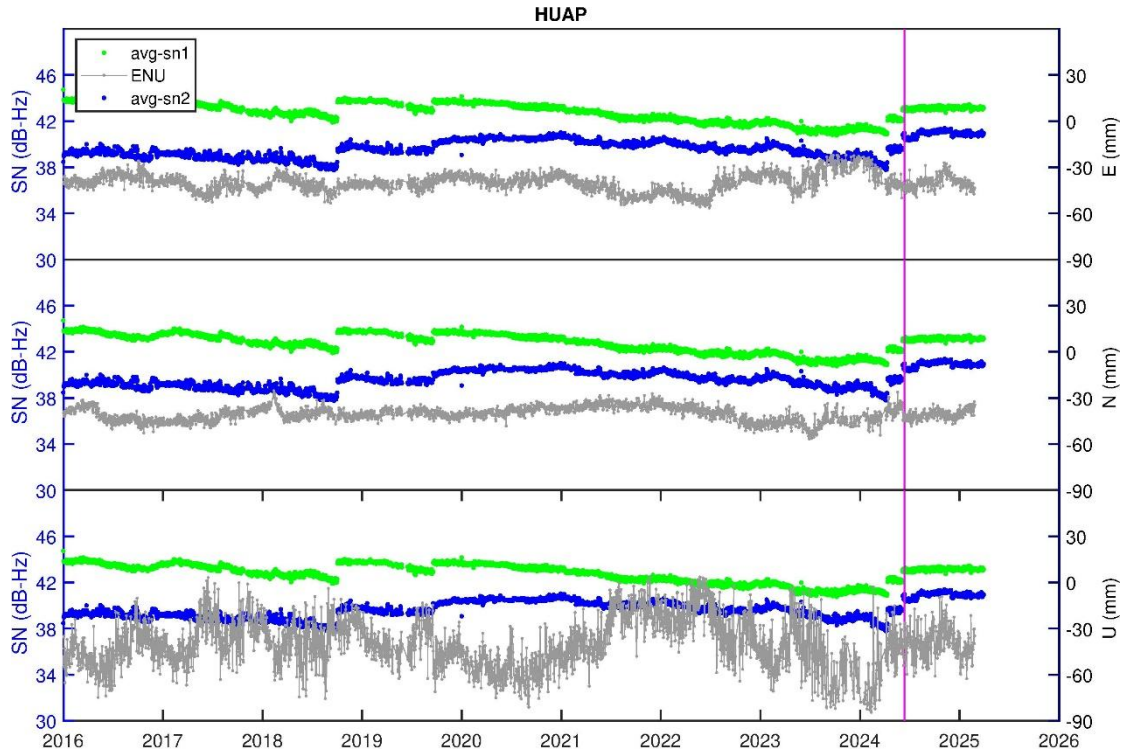
圖四、花蓮和平站 QC 參數與座標關係圖

MP1 和 MP2 是 TEQC 計算出的「多路徑組合」指標，表示其均方根 (RMS) 移動平均值，單位為 m。這兩個指標是由偽距 (Pseudorange) 與載波相位觀測值線性組合而得，其中 MP1 代表 C/A 或 P 碼觀測值的 L1 偽距多路徑效應，而 MP2 則對應於 P 碼觀測值的 L2 偽距多路徑效應。這些數值反映了 MP1 和 MP2 所對應多路徑效應的平均程度 (RMS)，用以評估觀測品質，數值越高表示多路徑效應越明顯，資料品質越差。從圖五可以觀察到 MP1 和 MP2 從 2021 年到 2024 年由 0.6 m 增加至 1.2~2 m，且越來越散亂，表示測站環境受到樹木遮蔽的影響越來愈大，直至 2024 年 6 月砍完樹後 MP1 和 MP2 才下降至 0.5 m。



圖五、和平站 L1 (MP1 綠點) 及 L2 (MP2 藍點) 的多路徑效應 (multipath)，灰點為 E、N、U 座標三分量。

比較 HUAP 的訊噪比 (圖六)，也可以看到 2024 年 6 月砍樹前後的差異，2021 年到 2024 年訊噪比有逐漸往下的趨勢，直到環境清理後訊噪比才又升高。根據蔡福利(2024)碩士論文中提到各廠牌型號接收器有不同的訊噪比及 MP1、MP2、o/slps (圖七)，因此訊噪比 MP1、MP2、o/slps 的高低也和更換天線儀器有關，更換天線儀器也會造成訊噪比改變，若是在 QC 參數的時間序列發現有不連續的現象，大多是更換天線儀器所致。



圖六、和平站 L1 (綠色點) 和 L2 (藍色點) 訊噪比

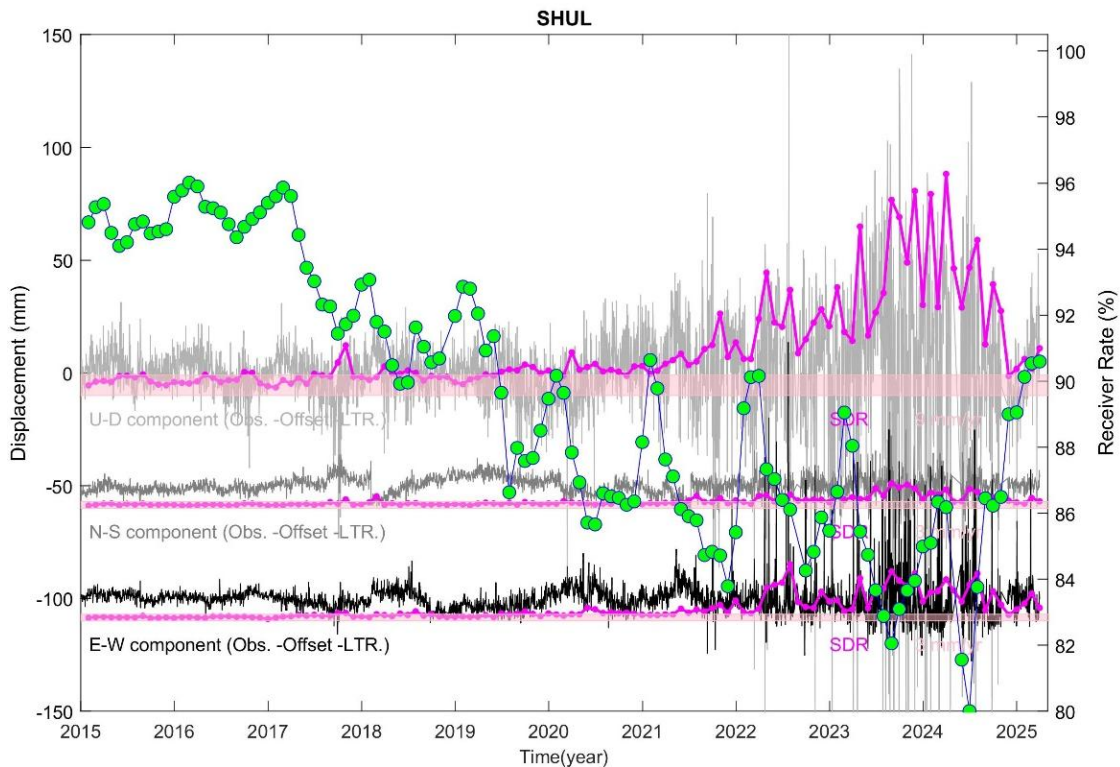
廠牌型號	MP1(m)	MP2(m)	o/slps
AOA BenchMark	0.33	0.35	96
Javad Odyssey	0.49	0.49	3112
Leica SR530	0.05	0.09	2888
Leica SR9500	0.19	0.23	3234
NovAtel 502	0.89	0.62	80
Ashtech Z-Surveyor	0.18	0.20	1144

圖七、各種廠牌型號接收器之 MP1、MP2、o/slps 蔡福利 (2004)，GPS 接收儀檢定指標及觀測資料品質之研究，國立交通大學

根據以上的分析可知，TEQC 所得到的 QC 參數無論是從資料接收率、週波脫落量 (cycle slips)，訊噪比 (signal-to-noise ratio)，多路徑效應 (MP1、MP2) 等都可以明顯看到因環境改變對資料品質所造成的影響，表現行為類似，因此我們可

以直接利用資料接收率與 E、N、U 座標三分量進行比對（圖八），以最有效率的方式對資料品質進行長期監控。圖八為水璉國中近 10 年時間序列，黑色、灰色為東西、南北、垂直三分量，綠色點為資料接收率，粉紅色線為殘差值（觀測資料減去線性回歸模型值），從圖上可知 2018 年之後接收率有逐漸下滑的趨勢（93%→80%），在此同時東西、南北、垂直三分量散亂程度隨著接收率下降而變大，直到 2024 年 8 月氣象署進行透空度改善工程後，接收率從 80% 回升至 91%。

利用 TEQC 得到各項連續 QC 參數，可以看出測站環境何時開始變差，若有以下四種情形：（1）接收率持續下降；（2）O/slps 越變越小；（3）訊噪比持續下降；（4）MP1、MP2 持續變大時，則需要對測站環境進行維護工作，以維持資料品質。經過驗證，若要長期有效率的監控站資料品質，可以直接採用資料接收率這項參數，因為不同參數在時間序列上的表現大同小異。



圖八、水璉國中接收率時間序列，黑色、灰色為 E、N、U 三分量，綠色點為資料接收率，粉紅色線為殘差值（觀測資料減去線性回歸模型值）
<https://tgm.earth.sinica.edu.tw/>

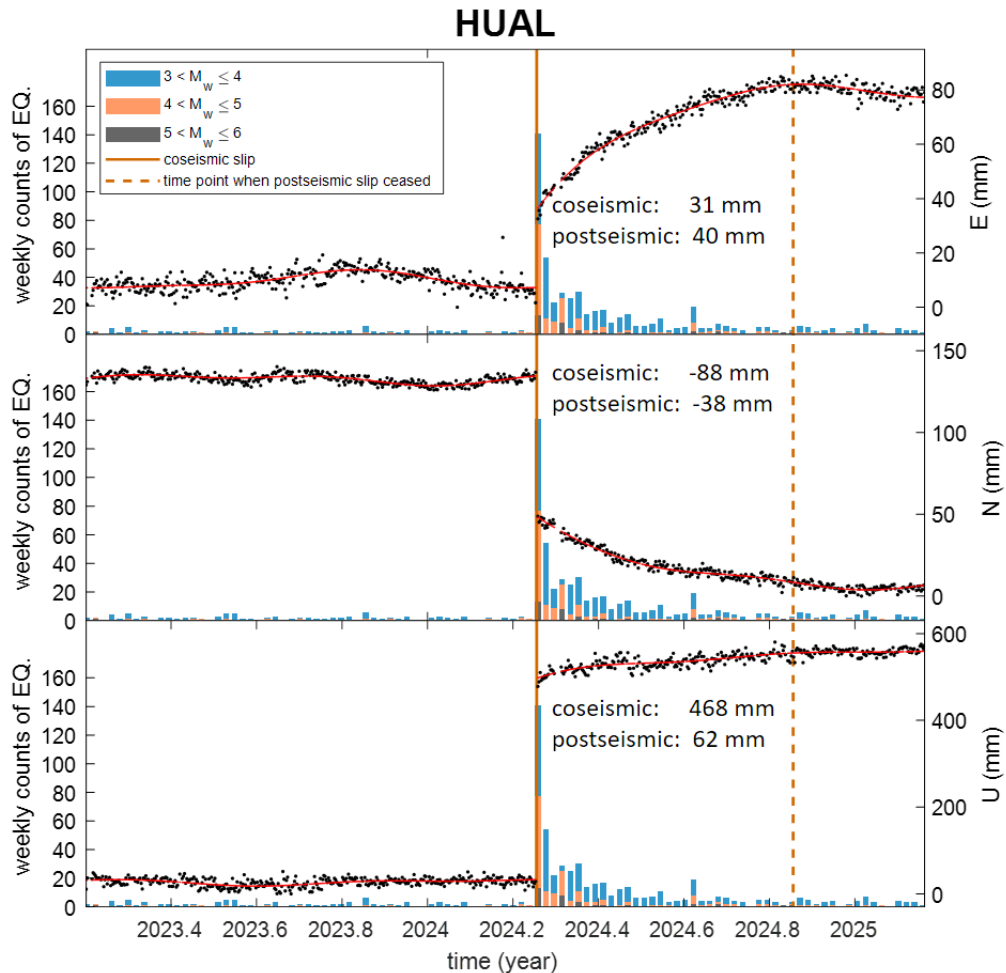
（二）萃取時間序列同震與震後位移訊號

（1）線性回歸法

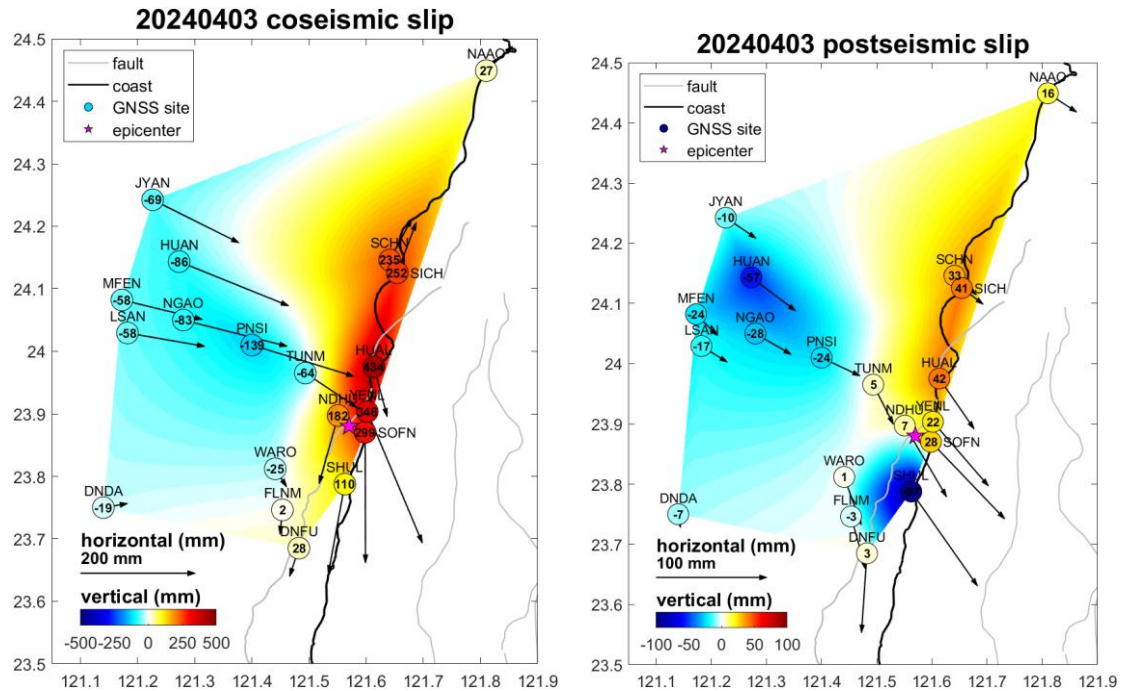
圖九為氣象署 GNSS 花蓮站（HUAL）時間序列擬合結果，0403 地震造成花蓮站的同震位移在東西向有 31 mm、南北向 -88 mm，高程也有 468 mm 之抬升量。震後約 220 天內，變形已累積約 95% 的總震後位移量（根據式（1）中三倍 τ 值為

0.6 年，對應指數衰減剩餘 5% 推算而得)，本研究亦將此期間視為震後變形持續時間。在此期間內，地表東西向位移量達 40 mm，南北向位移為 -38 mm，而高程則出現 62 mm 的抬升。

圖十展示利用線性回歸所擬合的 0403 同震與震後位移空間分布向量圖。根據連續 GNSS 觀測結果，最大同震位移出現在花蓮 (HUAL) 站，水平位移約達 90 毫米，垂直位移則高達 470 毫米。在該圖範圍內的 GNSS 站點皆可觀測到因 0403 地震所引發的同震位移。從花蓮站沿嶺頂斷層至東富 (DNFU) 站之間，地表主要呈向南與垂直抬升運動；新城 (SCHN) 至南澳 (NAAO) 一側則朝東北並伴隨抬升運動；位於中央山脈地區的測站位移則朝東南向並下陷。此外，各測站於震後 220 天變形期間的位移方向以朝東南方向為主；在南澳至壽豐一帶，可觀測垂直抬升現象，而位於水璉國中 (SHUL) 及中央山脈的測站則呈現垂直下陷。



圖九、GNSS 花蓮站 (HUAL) 時間序列圖，已事先將間震期運動速率、2024 年 04 月 03 日地震同震位移移除。圖上黑點為 GAMIT 每日解，紅線為模型預測值，棕色實線為 2024 年花蓮地震發生時間，棕色虛線為震後變形趨緩接近停止的時間點，長條圖為研究範圍 (圖十) 內之每週地震數量，並以中研院臺灣寬頻地震觀測網 (BATS) 紀錄之 M_w 大小進行規模分類。



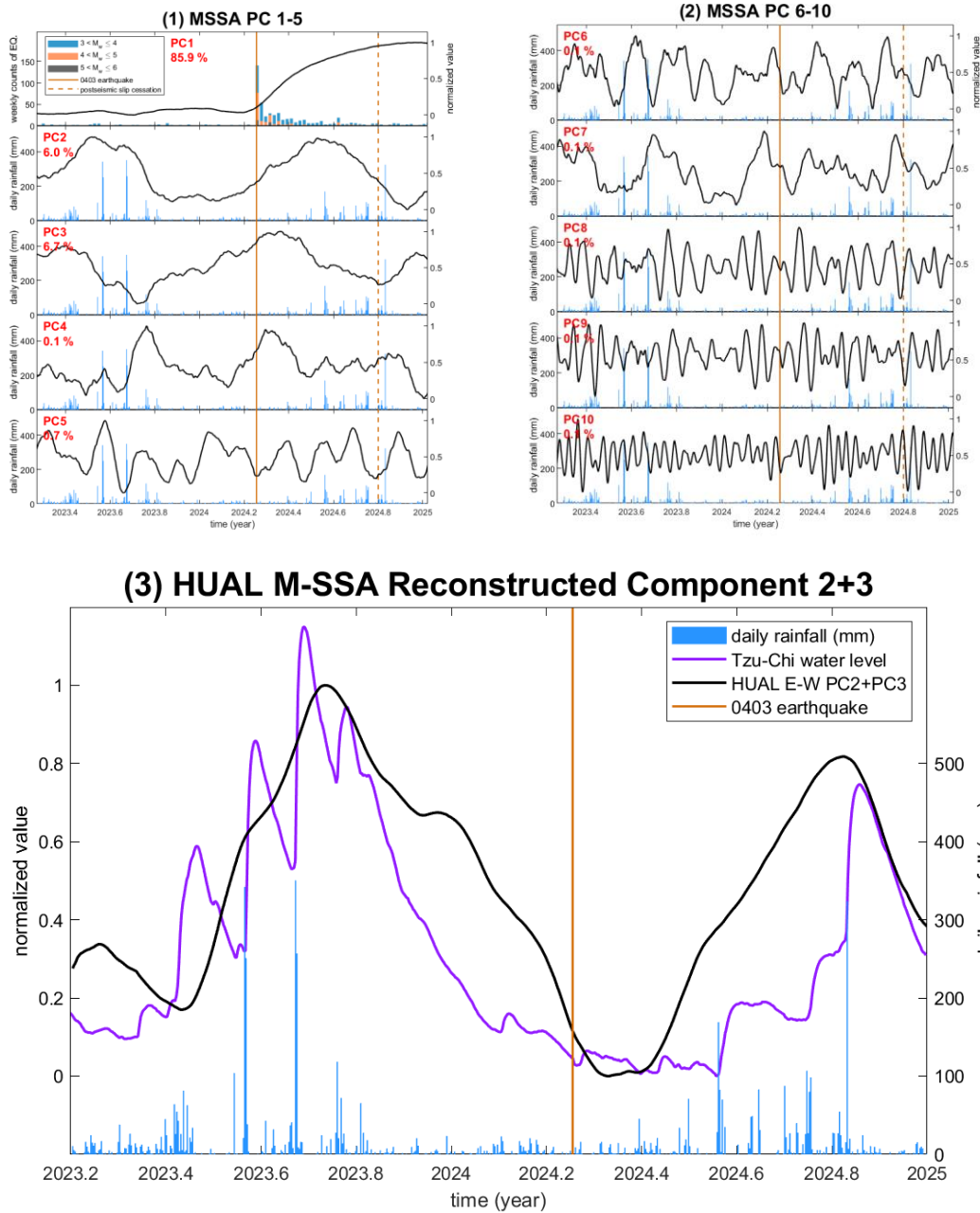
圖十、線性回歸計算同震與震後位移向量圖。(左圖) 0403 花蓮地震同震位移量。紫色星號為震央位置，黑色曲線為海岸線，灰色曲線為斷層線。黑色箭頭為 0403 地震的水平位移向量。各站圓框中數值及背景色階分布則為垂直位移量（紅色抬升，藍色下陷）。(右圖) 地震結束後的 220 天 (0.6 年) 內之震後變形累積位移量。

(2) M-SSA 法

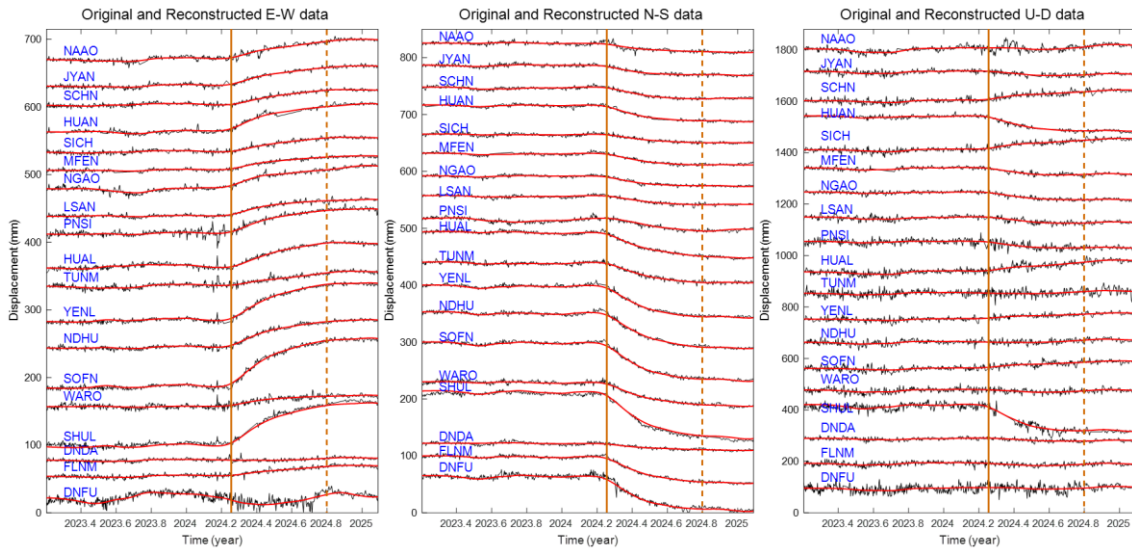
本次報告使用東部 19 個 GNSS 測站，共 57 組時間序列，利用 M-SSA 萃取出各測站的共有訊號。圖十一 (1)、(2) 為使用 M-SSA 分析得到前十項主成分時間序列 (PC 1 -10) (Principle Component, PC)，PC 1 為 0403 地震之震後變形訊號，能解釋的平均變異量超過 90%，為震後變形趨緩的時間點 (震後累積位移量達 95% 處)，與線性回歸擬合結果相近，於當年十月 (2024.8 年) 時趨緩；在篩選出與震後地表變形相關之主成分後，PC2 與 PC3 呈現具相位差的波形，與雨量等水文變化具有一定相關性。將這兩組波形分別乘上各測站空間特徵訊號並相加後，可大致推估各站地表因雨水及地下水等水文變化所產生的季節性振幅，合成後的訊號於每年約五月與十月分別對應波峰與波谷 (圖十一 (3))，反映出乾濕季之間的轉換。從主成分所解釋的變異量來看，PC1 至 PC3 與各站空間特徵向量相乘加總後，能有效描述 57 組時間序列的整體趨勢變化。圖十二顯示各 GNSS 站的原始輸入時間序列與 M-SSA 重組後的 PC1-3 擬合結果。

圖十三分別呈現 M-SSA 分析所得的 PC1 與 PC2+PC3 之空間分布圖。其中，PC1 代表經 M-SSA 分解後所萃取出之震後位移量，與圖十以線性回歸擬合所估算之震後變形結果一致，兩者間的計算上誤差在 3 mm 以內。PC2+PC3 則反映出與水文變化相關的訊號，各測站呈現方向一致的垂直運動，顯示出區域內因降雨所引發的地表變形程度。至於 PC4 以下的主成分，其解釋的變異量顯著下降，都低於 1%，可能為各測站特有的環境雜訊。以上結果顯示，M-SSA 能有效擷取出各測站

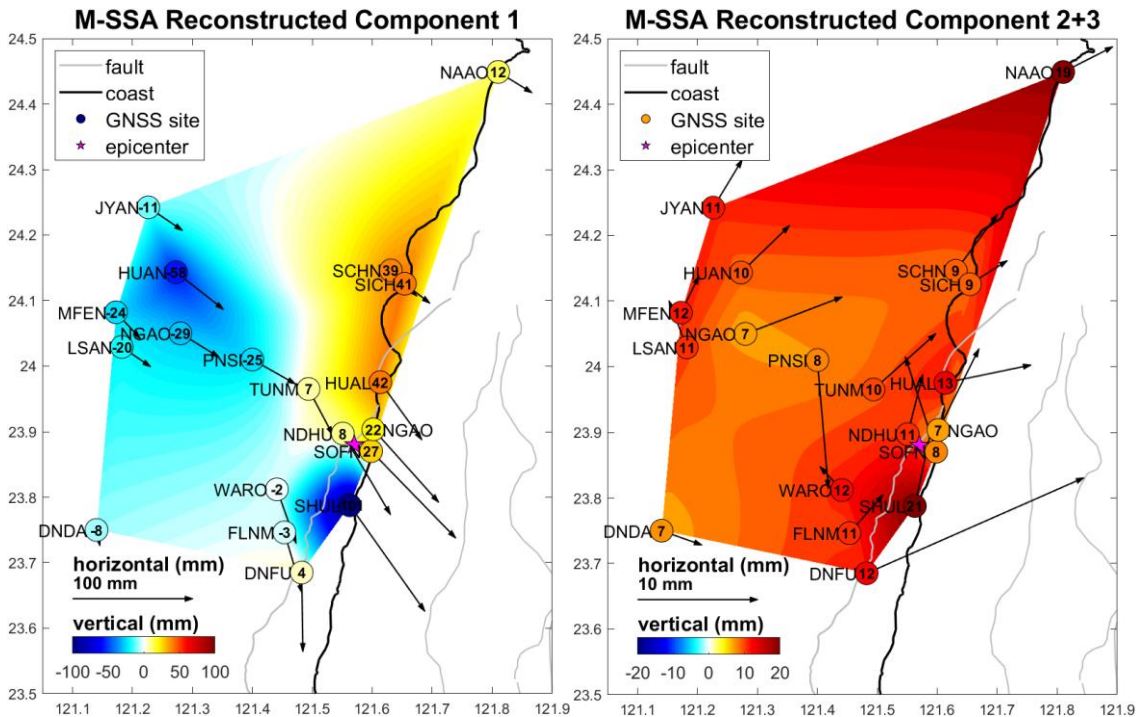
間一致的震後變形及水文特徵，對於後續進行資料去趨勢化 (de-trending) 與背景訊號分析具有顯著助益。



圖十一、(1)、(2) 使用 M-SSA 分析得到前十項主成分時間序列 PC1-10，並進行正規化處理 (normalize)，百分比代表解釋的平均變異量。黑色曲線為 M-SSA 所提取之特徵訊號；在 PC1 圖框中，棕色實線標示 0403 花蓮地震發生時間，棕色虛線則表示震後地表變形趨緩的時間。PC1 的長條圖為研究範圍內每週地震事件的計數；而 PC2 至 PC10 藍色長條圖則為之水源自動氣象站 (C0T9B0) 的日雨量，作為降雨變化的參考。(3) M-SSA 分析與水文訊號之比較，包括 GNSS 花蓮站 M-SSA PC2+PC3 重組訊號 (黑色曲線)，以及經濟部水利署設置之慈濟地下水位高度資料 (紫色曲線)，兩者皆進行正規化處理 (normalize)。藍色長條圖為水源站日雨量。



圖十二、各 GNSS 站輸入之原始時間序列（黑線）及將 M-SSA PC 1-3 主成分波形乘上空間特徵訊號疊加後產生的重組訊號（reconstructed component，紅線），棕色實線標示 0403 花蓮地震發生時間，棕色虛線則表示由 M-SSA PC1 計算的震後地表變形趨緩時間。



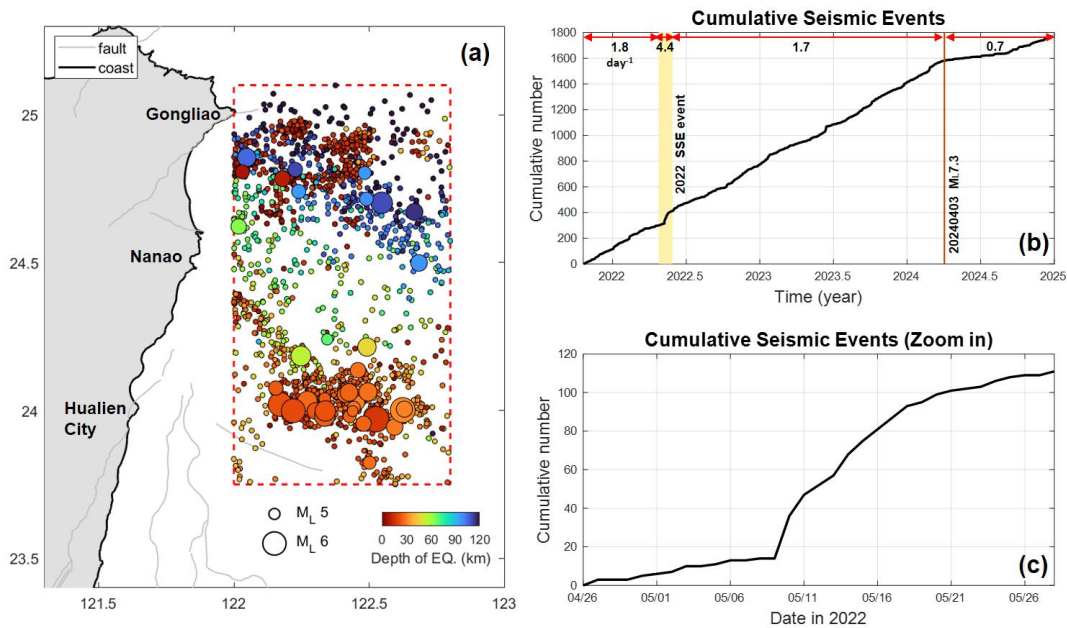
圖十三、M-SSA 的主成份空間分布。左圖為 PC 1 震後變形紫色星號為震央位置，黑色曲線為海岸線，灰色曲線為斷層線。黑色箭頭為 0403 地震的震後水平位移向量。各站圓框中數值及背景色階分布則為震後垂直位移量（紅色抬升，藍色下陷）。PC1 的三分量振幅大小計算方式為：將 PC1 波形乘上對應的空間向量後，再取其最大值與最小值之差，並乘以 0.95，與線性回歸所採用的震後變形趨緩評估標準一致。正負值則對應原始輸入 GNSS 訊號與圖十一（1）PC1 訊號的極性方向。右圖

為與水文相關的訊號，即 PC2 與 PC3 的合成結果。其振幅大小則為 PC2 與 PC3 波形分別乘上對應空間向量後相加，再取該合成波形的最大值與最小值之差。

(三)、東部外海地震發生頻率變化與地表變形速率之關聯性

本研究採用氣象署地震目錄資料，選取近年位於地震活動頻繁的宜蘭-花蓮外海區域 $M_L \geq 3.0$ 之地震事件（選取範圍如圖十四 (a) 所示），接著透過計算累計地震數量隨時間的變化，建立能反映地震活動度變化的曲線，並進一步分析其與 GNSS 地表位移時間序列之間的相關性。

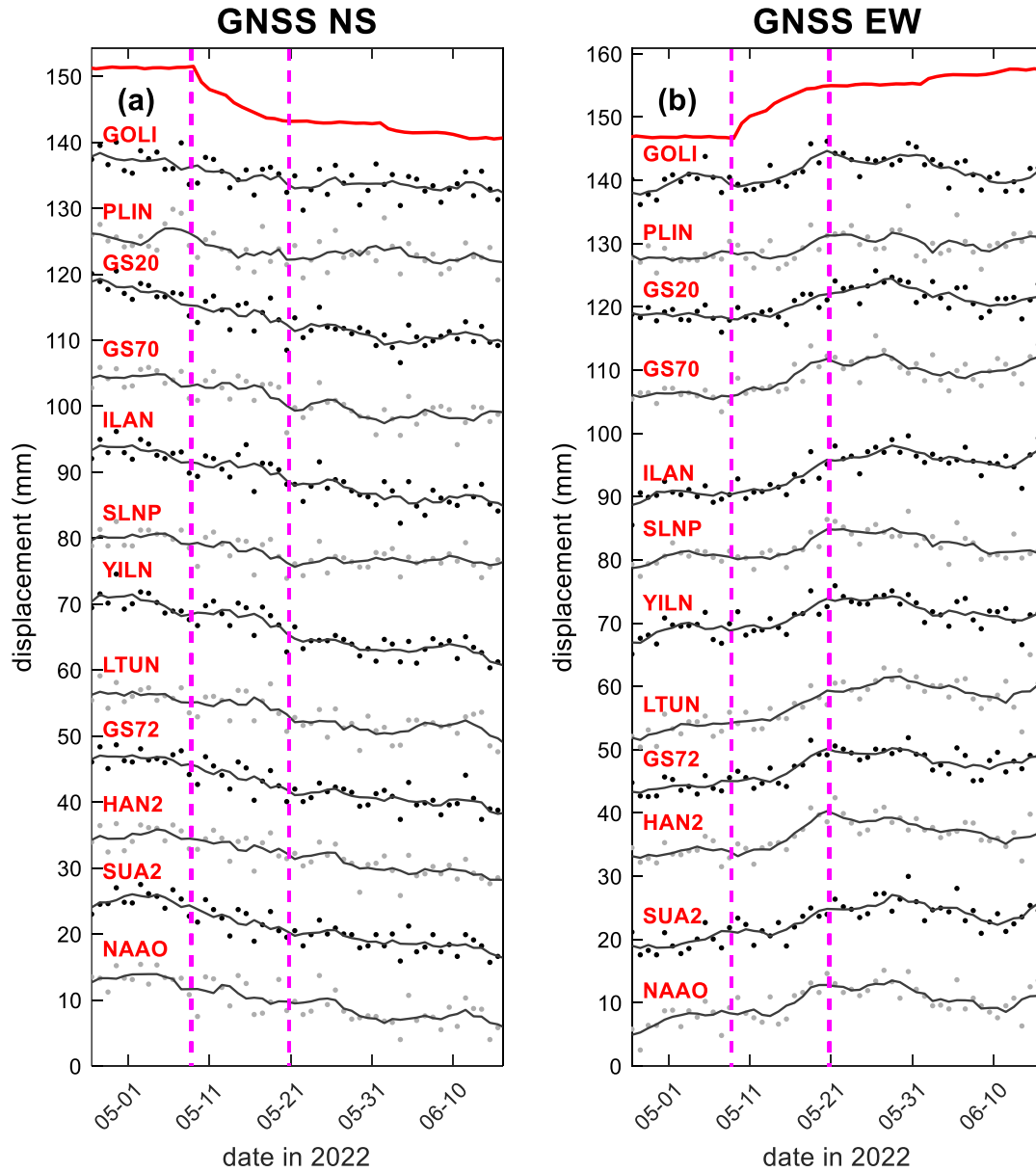
分析 2022- 2024 年初在宜花外海的地震活動度，2022 年 5 月活動度較高，在 2024 年 4 月 3 日花蓮地震 ($M_L 7.1$) 發生後出現明顯下降情形。圖十四 (b) 顯示東部外海地區的累計地震數量變化情形。從 2022-2024 年初，該區域 $M_L \geq 3.0$ 的地震發生頻率約為 1.7 次/天。至 2024 年 4 月 3 日花蓮地震發生後，地震頻率下降至 0.7 次/天，顯示先前的地震活動可能與地殼應力逐步累積過程相關。此外，也在 2022 年 5 月（圖十四 (b)、(c)）期間觀測到地震活動度異常上升的情形。



圖十四、東部外海區域 $M_L \geq 3$ 的地震事件累計數目。(a) 地震事件的選取範圍，時間區段 2022-2025 年。各色階圓點代表該區域內 $M_L \geq 3$ 之地震震央位置，其色階對應震源深度；較大圓點為 $M_L \geq 5$ 事件，圓圈大小與地震規模成正比。(b) 2022-2025 年地震累計數目，棕線為 2024 年 4 月花蓮地震發生的時間。圖框上方的黑色數值和紅色雙箭頭為該期間每日平均地震次數和所採用的時間範圍。(c) 2022 年 5 月地震發生頻率上升期間時間段，對應到 b 的黃色區塊。

圖十五為在 2022 年 5 月地震頻率上升時間段前後，貢寮(GOLI)至南澳(NAAO)一帶 GNSS 測站之 N 與 E 分量原始時間序列。可明顯觀察到，當地震頻率開始上

升時，地表向東南方向運動的速率亦隨之增加；反之，當地震頻率趨緩時，地表位移速率亦同步減緩。基於此觀察，本研究將進一步分析地震發生頻率與地表位移之間的相關性，並確立地震觸發明顯地表位移的主要範圍。

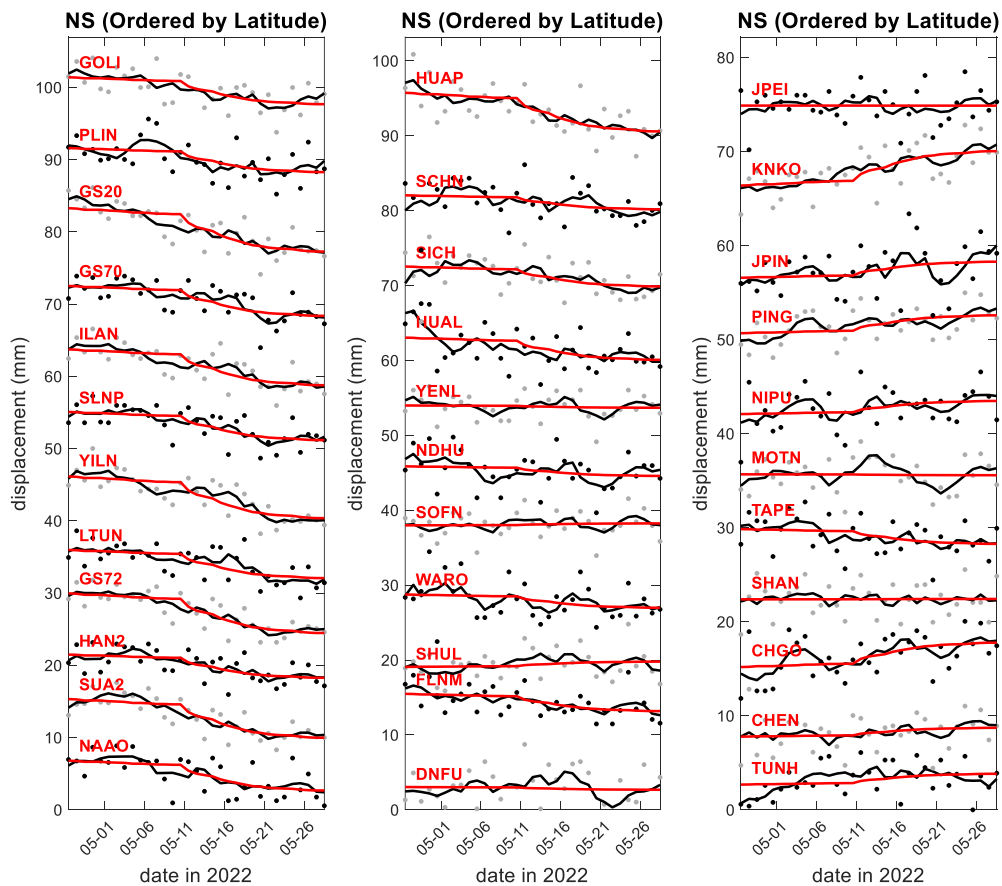


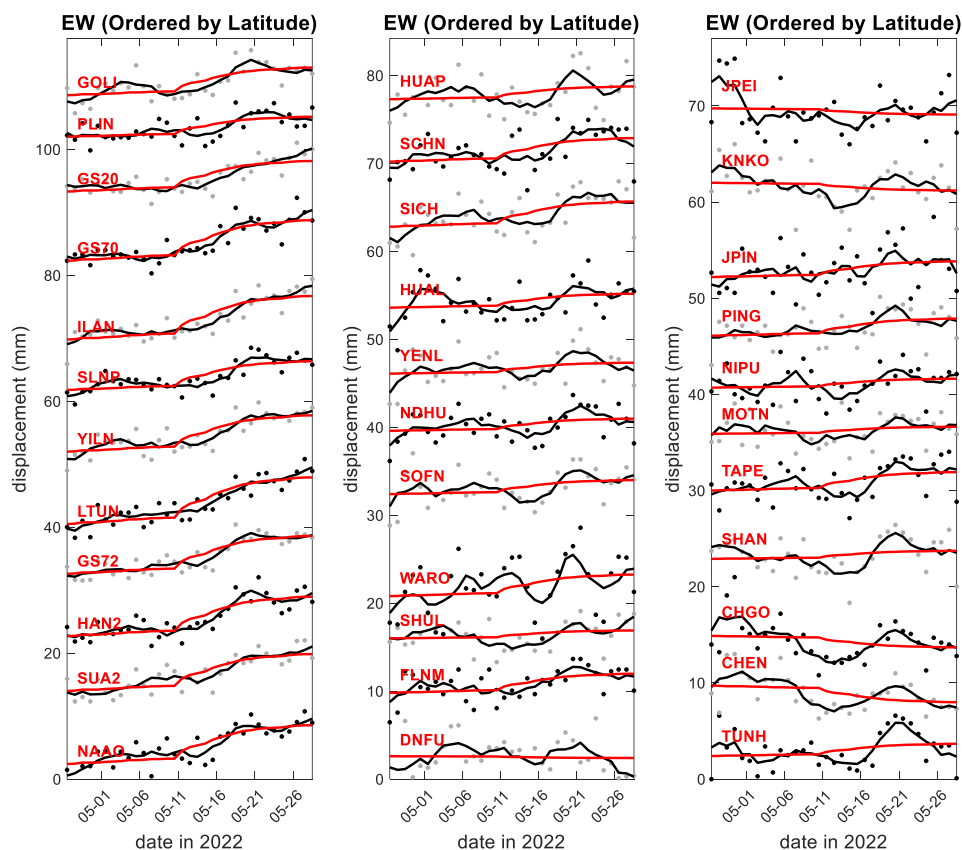
圖十五、GNSS 原始時間序列與地震活動度變化比較。黑點與灰點分別代表各 GNSS 測站未經資料前處理 (no de-trending) 之 N 與 E 分量原始資料，由北至南排列。黑線為 5 日移動平均線。紅線表示地震累積數目時間序列，已剔除背景地震頻率並進行正規化 (normalize)，以利與 GNSS 變形趨勢比較。桃紅色虛線則標示地震活動度出現明顯變化之時間點。

(1) 2022 年 5 月地震活動異常事件之地表變形響應

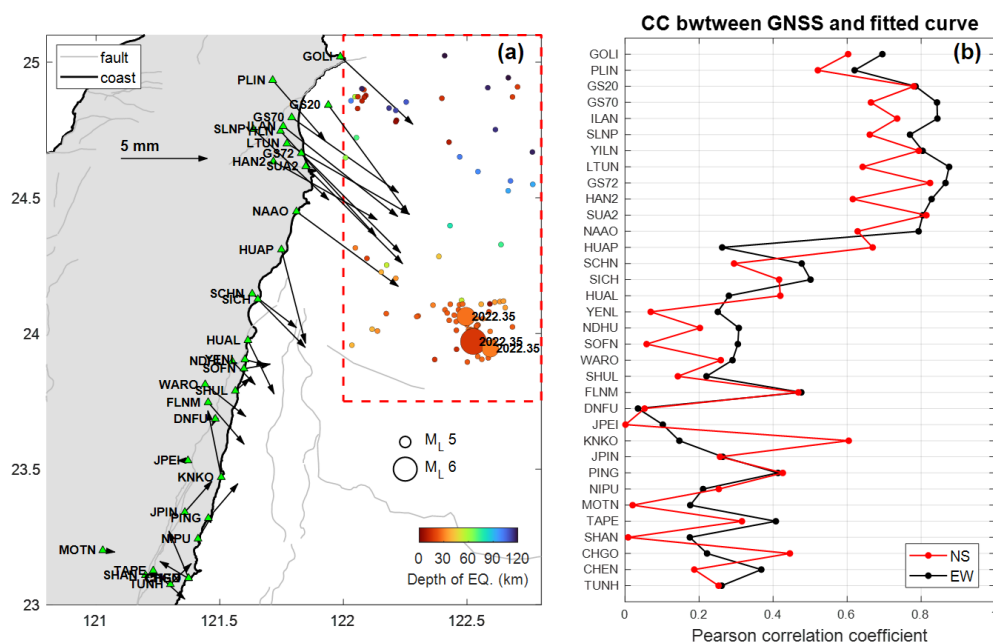
將研究範圍時間放大至 2022 年 5 月期間 (圖十四 (c))，分析沿海 GNSS 站 GAMIT 每日解計算之地表位移。我們使用線性回歸法，因時間僅一個月，計算上先忽略長期速率及水文變化，且為探討與地震活動度的相關性，將地震累計數目的變化曲線加入線性回歸其中進行擬合，計算殘差最小之最佳擬合曲線，並以地震曲線與 GNSS 資料的擬合程度來分析期間內地表位移與地震活動度的關係。

圖十六為 2022 年 5 月期間內 GNSS 南北和東西分量的原始時間序列，共 34 個測站，從與地震事件具相關性擬合線和 GNSS 的移動平均線可得知，地表位移在 5 月 9 日隨著地震發生頻率上升而加速，並在約 10 天後，地震活動度回歸原先頻率時地表加速也逐漸趨緩。圖十七 a 為線性回歸法計算地震事件期間地表位移量的結果。結果顯示南澳 (NAAO) 以北的測站位移較明顯，且運動方向一致。在地震活動頻繁的期間，貢寮至南澳地區的地表位移量約為 5–10 mm，推測可能與斷層深部的慢滑移 (Slow Slip Event, SSE) 有關。圖十七 (b) 以皮爾森相關係數 (Pearson Correlation Coefficient) 分析各測站原始 GNSS 資料與地震變化曲線之相關性，南澳以北測站的相關係數介於 0.60–0.85，為中至高度相關，此結果顯示該區域的地表位移受地震活動影響甚巨。因此，後續分析將聚焦於貢寮至南澳一帶，並進一步針對更長期時間進行主成分分析 (PCA) 與線性回歸分析，以探討地震活動度變化是否可反映於地表位移時間序列。





圖十六、GNSS 時間序列和地震曲線擬合結果。黑點和灰點為 GNSS 站（由北到南排列，貢寮 GOLJ-東河 TUNH）之南北和東西分量原始時間序列，黑線為原始時間序列的 5 日移動平均線。紅線為將東部外海區域地震累積數目時間序列（即圖十四（b）曲線）加入線性回歸後所得之擬合曲線。



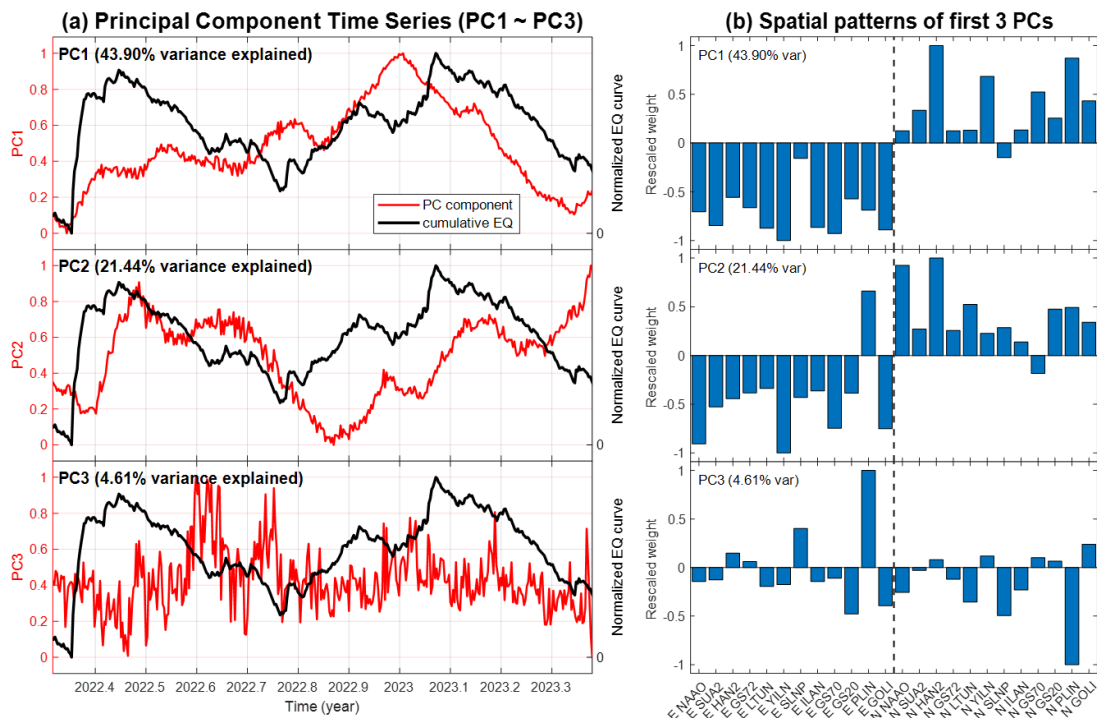
圖十七、(a) 2022 年 5 月地震頻繁活動期間，依線性回歸擬合曲線估算之地表總

位移量。綠色三角形表示 GNSS 測站位置，黑色箭頭為水平位移分量，紅色虛線框為地震事件的選取範圍。各色階圓點代表該區域內 $M_L \geq 3$ 之地震震央位置，色階對應震源深度；較大圓點為 $M_L \geq 5$ 事件，圓圈大小與地震規模成正比。(b) 各測站 GNSS 原始時間序列與地震活動度變化曲線的皮爾森相關係數分析結果，測站順序由緯度高低排列。

(2) 2022 年 5 月至 2023 年 5 月地震活動度與地表變形之相關性

為了釐清地震活動度與地表位移的關連，除了利用線性回歸法比對擬合度，也採用 PCA 法拆解測站共有的行為，並與地震活動度進一步比對。從上述分析可得知南澳以北一帶能有明顯的地表位移，並考量花蓮市以南 GNSS 站受 2022 年 3 月 3 日 $M_L 6.7$ 長濱、6 月 20 日 $M_L 6.0$ 光復、9 月 17、18 日 $M_L 6.6$ 、6.8 關山池上及 2023 年 7 月 10 日 $M_L 5.3$ 秀林地震等強震事件影響而出現顯著的同震與震後變形，干擾相關性分析。因此，本研究先選取 2022 年 5 月至 2023 年 5 月期間位於南澳至貢寮一帶的 GNSS 測站，共 12 站進行分析。

在進行 PCA 分析前，因 GNSS 資料有明顯高頻噪訊，先以 MATLAB 工具箱 Butterworth 濾波器函數濾除高頻振盪，並以線性回歸法移除測站長期線性速率。圖十八為將 GNSS 南北和東西分量加入同一矩陣進行 PCA 分析的結果，根據 PCA 的解釋變異量，前 2 個主成分就能解釋約 65% 的時間序列變化，將 PC1 與 PC2 相加，並與特徵值及比重相乘後投影於時間序列上。

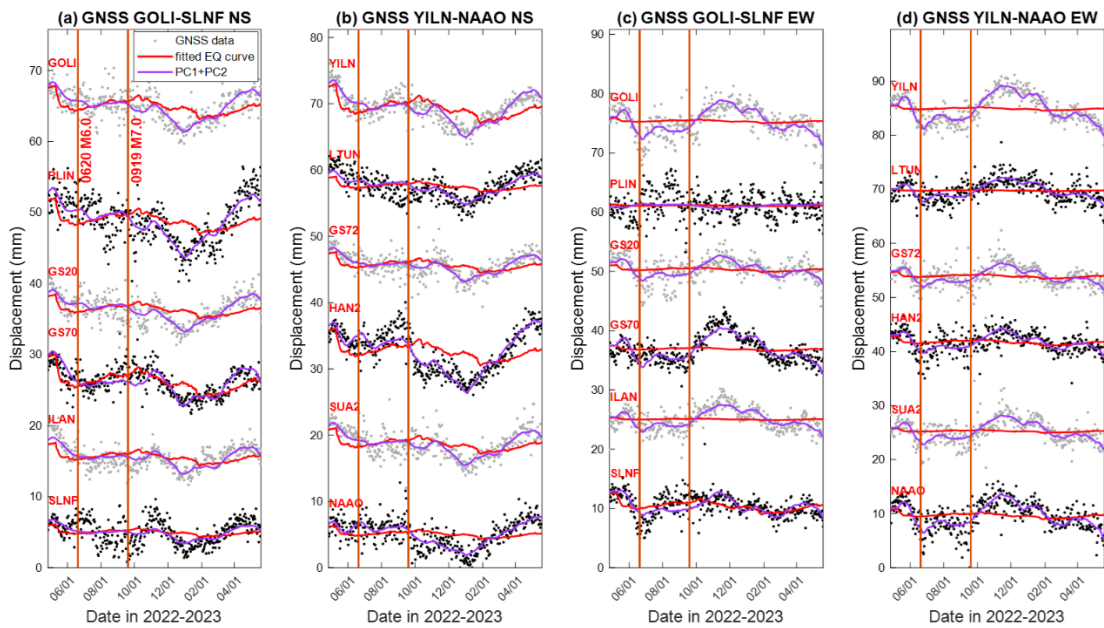


圖十八、(a) PCA 分析所得前三個主成分特徵訊號之時間序列，與地震活動曲線的比較。紅線為 PCA 結果，黑線為扣除長期線性趨勢後的累積地震數目。(b) 各

個主成分於各測站的權重分布及在空間上的正負相關特徵，左半側為 GNSS 東西分量，右半側為南北分量。

圖十九為 GNSS 的時間序列與加入地震變化的線性回歸擬合曲線以 PC1+PC2 比較結果，於南北分量上 (圖十九 (a)、(b))，PC1+PC2 能追蹤時間序列的趨勢變化，並與地震變化曲線的趨勢有高度相關性，GNSS 東西分量 (圖十九 (c)、(d)) 則可能因為光復和關山池上的震後變形較明顯，與地震變化曲線的擬合程度相對較差。若將時間範圍放大至無其他強震影響的期間 (如圖十五)，可更清楚觀察地震頻率與地表位移變化之間的關聯性。由於在長期尺度下，地殼孕震過程所造成的變形量大小相較於水文效應及震後變形並不明顯，後續研究在資料前處理時應先扣除震後變形與長期水文季節變化造成的地表位移，以減少其他非相關訊號的干擾。

以上結果可推論宜蘭花蓮外海較顯著的地震活動有可能造成地表位移，這也代表了東部外海的板塊活動活躍時可能觸發慢滑移或地震。2024 年 4 月 3 日花蓮地震 (圖十四 (b)) 釋放能量後該區域地震活動度明顯降低 (假設地震資料目錄 $M_L \geq 3$ 之地震完整)，未來若持續分析地震活動和 GNSS 時間序列之關聯，將有助於提升地震前兆辨識能力。



圖十九、GNSS 與線性回歸、PCA 比較結果。黑和灰點為 GNSS 南北 (a)、(b) 和東西 (c)、(d) 分量時間序列，紅線為東部外海區域地震累積數目時間序列 (即圖十四 (b) 的黑色曲線) 加入線性回歸後所得之擬合線，紫線為將 PC1、PC2 波形乘上對應的空間向量後相加後的結果，棕線為發生強震的時間點。

參考文獻

- Bertiger, W., Bar-Sever, Y., Dorsey, A., Haines, B., Harvey, N., Hemberger, D., ... & Willis, P. (2020). GipsyX/RTGx, a new tool set for space geodetic operations and research. *Advances in space research*, 66(3), 469-489.
doi: 10.1016/j.asr.2020.04.015
- Blewitt, G. (2008). Fixed point theorems of GPS carrier phase ambiguity resolution and their application to massive network processing: Ambizap. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 113(B12). doi: 10.1029/2008JB005736
- Ghil, M., Allen, M. R., Dettinger, M. D., Ide, K., Kondrashov, D., Mann, M. E., Robertson, A. W., Saunders, A., Tian, Y., Varadi, F., & Yiou, P. (2002). Advanced spectral methods for climatic time series. *Reviews of Geophysics*, 40(1), 3-1-3-41.
doi: 10.1029/2000RG000092
- Herring, T. A., R. W. King, and S. C. McClusky (2002), *Documentation for the GAMIT Analysis Software*, release 10.0 ed., Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.
- Peng, W., Chen, K. H., Bürgmann, R., et al. (2025). Aseismic slip and seismic swarms leading up to the 2024 M7.3 Hualien earthquake. *Nature Communications*, 16, 9066. doi: 10.1038/s41467-025-64117-3
- Walwer, D., Calais, E., & Ghil, M. (2016). Data-adaptive detection of transient deformation in geodetic networks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(3), 2129-2152. doi: 10.1002/2015JB012424
- 蔡福利(2004)，GPS 接收儀檢定指標及觀測資料品質之研究，國立交通大學。

114 年度地震資料之分析應用

子計畫三

中央氣象署歷史大地震波形與全球走時曲線之建置

鄭世楠 王子賓 楊子億
中華民國地球科學學會

摘要

1897年12月19日臺北測候所落成，並裝置了臺灣地區第一部地震儀：格雷—米爾恩型地震儀，正式開啟臺灣地區地震觀測科學化的時代，同時亦留下許多豐富且寶貴的地震波形記錄與相關地震觀測資料。由於經歷了二次大戰轟炸、政府接收，加上臺灣特有天然災害與潮濕氣候，喪失了許多寶貴的資料與地震儀器。近年來已陸續收錄整理了1900-1983年間機械式地震儀收錄的歷史地震波形目錄，並修復多部機械式地震儀。本計畫嘗試由已建置的歷史地震波形目錄中，篩選全球規模大於或等於7.0的地震波形紀錄，建置臺灣地震觀測網收錄全球大地震波形紀錄資料庫，應用這些波形摘讀的波相到時，繪製以臺灣為中心點的全球波相走時曲線圖，所得結果將建置在氣象署的地震資料庫中，以供後續研究使用的基本資料。此外，本計畫持續進行機械式地震儀的復原與修復，主要針對二部大森式水平地震儀的修復，並完成田中站威赫式垂直向與水平向地震儀的修復。

關鍵詞：地震波形紀錄、走時曲線、大森式水平地震儀。

Abstract

On December 19, 1897, the TMO was completed and installed the first seismograph in Taiwan: the Gray-Milne seismograph, which officially opened the era of scientific earthquake observation in Taiwan and also left a legacy. There are many rich and valuable seismograms and related seismic observation data. Due to World War II bombings, government takeover, and Taiwan's unique natural disasters and humid climate, many valuable data and seismographs were lost. In recent years, the catalog of historical seismograms recorded by mechanical seismographs from 1900 to 1983 has been successively collected and compiled, and many mechanical seismographs have been repaired. This project attempts to screen out seismograms records with global scales greater than or equal to 7.0 from the established historical seismogram catalog, build a database of global earthquake waveform records collected by the Taiwan

Earthquake Observation Network, and use the wave phases extracted from these waveforms. At that time, a global travel time curve with Taiwan as the center point will be drawn, and the results will be built into the CWA's seismic database to provide basic data for subsequent research. In addition, the project continues the restoration and repair of mechanical seismographs, mainly focusing on the repair of two Omori-type horizontal seismographs, and completing the repair of the Wiechert vertical and horizontal seismographs at Tianzhong Weather Station.

Keyword: seismogram, travel time curve, Omori horizontal seismograph

壹、前言

1897年12月19日臺北測候所落成，並裝置了臺灣地區第一部地震儀：格雷—米爾恩型地震儀，正式開啟臺灣地區地震觀測科學化的時代，同時亦留下許多豐富且寶貴的地震波形紀錄與相關地震觀測資料。由於經歷了二次大戰轟炸、政府接收，加上臺灣特有天然災害與潮濕氣候，喪失了許多寶貴的資料與地震儀器。近年來鄭世楠等(2013, 2014, 2022, 2023)、鄭世楠和呂佩玲(2017, 2018)已陸續收錄整理了1900-1983年間機械式地震儀收錄的歷史地震微縮影片波形218,680張(表1)，並建立臺北站、新竹站、臺中站、臺南站、高雄站、恆春站、宜蘭站、花蓮站、成功站、臺東站與大武站之威赫式地震儀、強震儀與簡單地震儀的微縮影片波形目錄。本計畫嘗試由已建置的歷史地震波形目錄中，篩選全球規模大於或等於7.0的地震波形紀錄，建置臺灣地震觀測網收錄全球大地震波形紀錄資料庫，應用這些波形摘讀的波相到時，繪製以臺灣為中心點的全球波相走時曲線圖，所得結果將建置在氣象署的地震資料庫中，以供後續研究使用的基本資料。

此外，自2014年暑假期間在車籠埔斷層保存園區開始修復歷史地震儀，包括二部大森式水平地震儀、威赫式水平向地震儀、威赫式垂直向地震儀、二倍強震儀、簡單地震儀、石本式加速度地震儀、59型短週期電磁式地震儀。修復完成的歷史地震儀在車籠埔斷層保存園區、國立臺灣科學教育館、蘭陽博物館、花蓮進行展示，目前轉移至國立科學工藝博物館與921地震園區展示。由於仍有許多歷史地震儀尚未修復，故本計畫持續進行機械式地震儀的復原與修復，主要是針對二部大森式水平地震儀的修復，期能在計畫結束時完成大森式水平地震儀的修復與復原。

表 1、中央氣象署地震波形紀錄微縮影片統計表

測站	地震儀種類	波形紀錄	微縮片狀態	起訖時間
臺北站 16,180	威赫式地震儀	8,679	平片	1958/07/13-1970/06/30
	石本式加速度地震儀	168	平片	1954/08/19-1981/03/02
	59 型短週期電磁式地震儀	7,333	平片	1970/04/23-1980/12/31
新竹站 11,230	中央氣象台式簡單地震儀	11,230	022-038, 155-156	1952/02/13-1983/06/30
宜蘭站 6,268	威赫式地震儀	5,996	202-207	1947/07/09-1983/10/01
	中央氣象台式簡單地震儀	228	208	1936/08/22-1983/09/26
	大森式二倍強震儀	44	209	1936/08/22-1982/06/25
臺中站 24,013	威赫式地震儀	23,875	067-085	1954/01/07-1983/12/31
	樋口式一倍強震儀	56	086	1954/09/17-1983/06/24
	中央氣象台式簡單地震儀	82	086-1	1954/09/17-1978/12/24
臺南站 23,572	威赫式地震儀	23,404	001-020	1954/01/11-1983/07/01
	大森式二倍強震儀	168	021-1	1954/04/06-1983/06/25
高雄站 2,618	大森式二倍強震儀	137	157	1977/07/21-1984/12/29
	荻原式簡單地震儀	2,481	158,160-163	1977/07/01-1983/12/31
恆春站 37,273	威赫式地震儀	37,159	123-153	1935/01/30-1983/12/31
	強震儀	114	154	1935/07/16-1981/03/03
花蓮站 31,973	威赫式地震儀	21,480	164-182	1957/01/02-1983/07/01
	59 型電磁式地震儀	9,052	183-197	1970/06/16-1983/07/01
	RV320(S-13)速度地震儀	780	198-199	1981/06/05-1983/07/01
	中央氣象台式簡單地震儀	445	200	1957/01/08-1969/09/06
	樋口式一倍強震儀	216	201	1957/02/07-1983/06/24
成功站 20,137	威赫式地震儀	18,927	105-120	1941/12/14-1983/07/01
	中央氣象台式簡單地震儀	468	121	1954/08/03-1982/06/20
	RV320(S-13)速度地震儀	742	122	1981/05/23-1983/07/01
臺東站	59 型電磁式地震儀	7,996	039-051	1972/12/10-1983/07/01

23,255	RV320(S-13)速度地震儀	479	052	1982/03/10-1983/07/01
	威赫式地震儀	14,665	055-066	1940/07/04-1983/07/01
	大森式(樋口式)強震儀	97	066-1	1937/05/08-1983/06/22
蘭嶼站	中央氣象台式簡單地震儀	1,202	053-054	1980/07/31-1984/01/01
大武站	威赫式地震儀	20,864	087-104	1954/01/11-1983/06/30
20,959	中央氣象台式二倍強震儀	95	104-1	1955/04/04-1983/06/22
合計		218,680		

貳、研究方法及進行步驟

自1897年12月19日設置地震儀後，收錄的波形紀錄統稱為歷史地震波形，目前已整理與尚未整理的歷史地震波形紀錄與相關資料中，採用三部分進行走時曲線的建立：

1. 原始波形歷時紀錄：地震儀所收錄之歷史地震波形歷時資料直接記錄在滾筒之煙燻紀錄紙上，為類比式的紀錄。這時期的地震儀包括格雷—米爾恩型、大森式水平地震儀、強震儀、簡單型地震儀與威赫式地震儀等。目前已整理的原始波形共889張，其中679張為臺南測候所收錄，210張為宜蘭測候所收錄(鄭世楠等, 2013, 2014)。圖1顯示臺南測候所大森式水平地震儀(東西向)收錄1902/11/21地震($M_L=6.7$, $M_S=6.8$)波形，初達P波時間為10:13 53.2 s、S-P時間為3m 38.5s。這889張煙燻紀錄紙波形完成平整、補強、編號後，掃描為數位影像檔並展示在中央氣象署地球物理資料管理系統網頁，原始煙燻紀錄紙大部分存放在建南辦公室。但仍有大量的煙燻紀錄紙尚未整理。

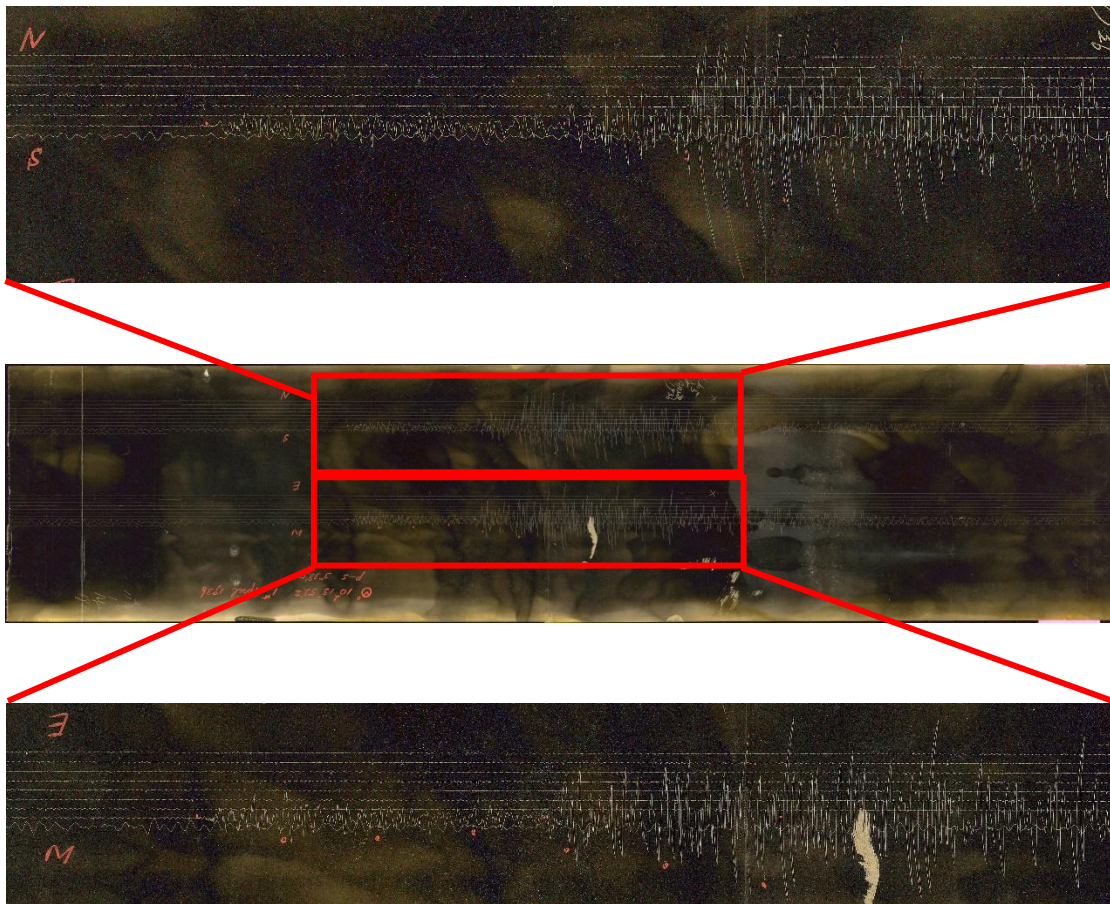


圖1、臺南測候所威赫式水平向地震儀收錄1936年4月1日02:09印尼地震(4.16°N, 126.52°E, 震源深度35公里, 地震規模 $M_W=7.7$, $M_S=7.8$)煙燻紀錄波形, 地震波形編碼為19360401_TAW_WH_1。

2. 微縮影片地震紀錄：中央氣象局自1985年開始有系統的拍攝臺北測候所收錄的歷史地震波形紀錄，製作成平片微縮影片方式儲存。其後陸續將其他測候所收錄的地震波形紀錄製作成卷狀微縮影片，共212卷，目前儲存於建南辦公室。鄭世楠等(2013, 2014, 2022, 2023)、鄭世楠和呂佩玲(2017, 2018)已陸續收錄整理了1900-1983年間機械式地震儀收錄的歷史地震微縮影片波形218,680張(表1)，並建立臺北站、新竹站、臺中站、臺南站、高雄站、恆春站、宜蘭站、花蓮站、成功站、臺東站與大武站之威赫式地震儀、強震儀與簡單地震儀的微縮影片波形目錄。圖2顯示臺中測候所威赫式水平向地震儀收錄1969年2月28日02:40葡萄牙西南方地震(35.92°N, 10.58°W, 震源深度21公里, 地震規模MW=7.8, MS=7.8)微縮影片紀錄波形, 地震波形編碼為19690228_TCU_WH_1, 初達P波時間為10:58 59.4 s、S-P時間為9m 03.1s。

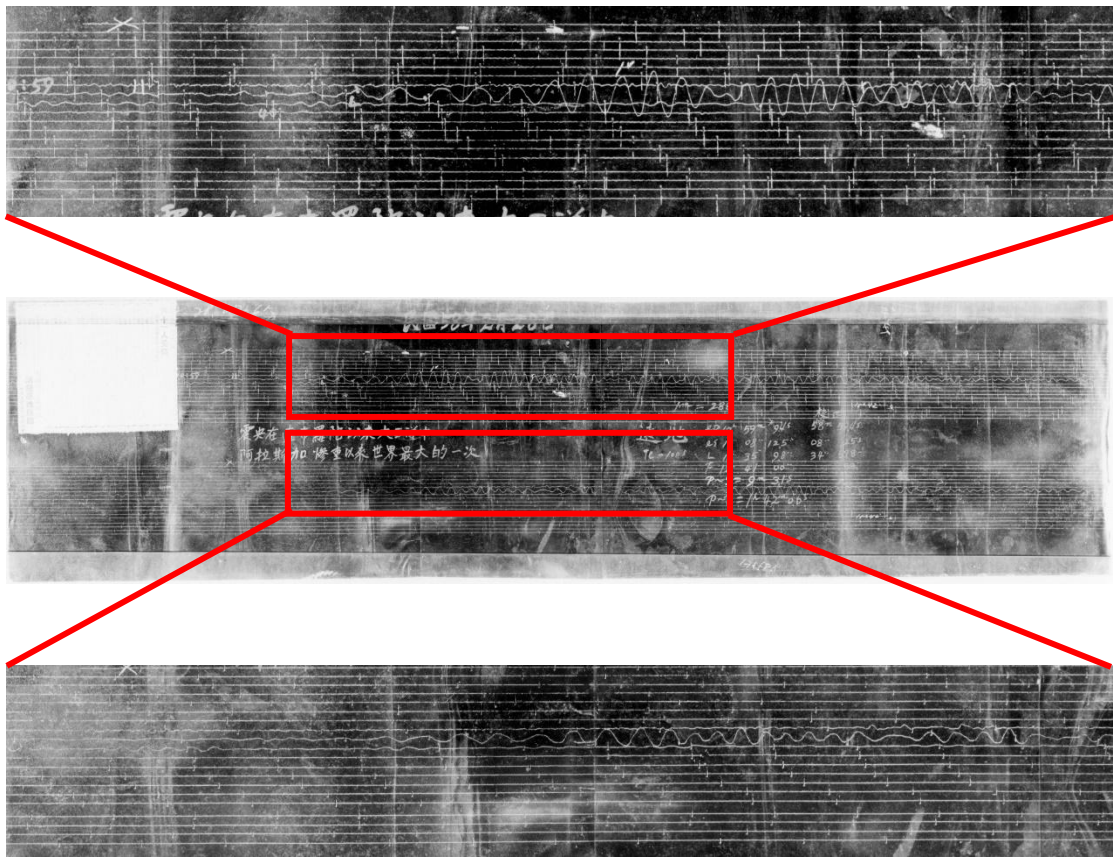


圖2、臺中測候所威赫式水平向地震儀收錄1969年2月28日02:40葡萄牙西南方地震(35.92°N, 10.58°W, 震源深度21公里, 地震規模MW=7.8, MS=7.8)微縮影片紀錄波形, 地震波形編碼為19690228_TCU_WH_1。

3. 歷史地震相關文字紀錄：自臺北測候所設立後累積相當多的文字敘述的地震觀測紀錄，包括各測候所地震報告、地震年報月報等。這類資料雖欠缺地動歷時波形紀錄，但仍為珍貴的資料。目前在「歷史地震波形資料庫」網頁中整理臺北測候所對於53筆世界各地大地震的文字觀測紀錄主要都是大森式水平地震儀觀測資料，如圖3顯示臺北測候所對於1906年4月18日 13:12美國舊金山大地震(38.00°N, 123.00°E，地震規模 MW=7.9，MS=8.3)的文字敘述觀測紀錄(收錄於鄭世楠等, 1997)，文件檔案編碼為19060418_TAP_D1，初達 P 波時間為21:34 15.0 s、S-P 時間為22 m 23.0 s。鄭世楠等(1997)整理日據時期有關地震的報告與文件387分1,312頁，目前存放於地下室 B205。

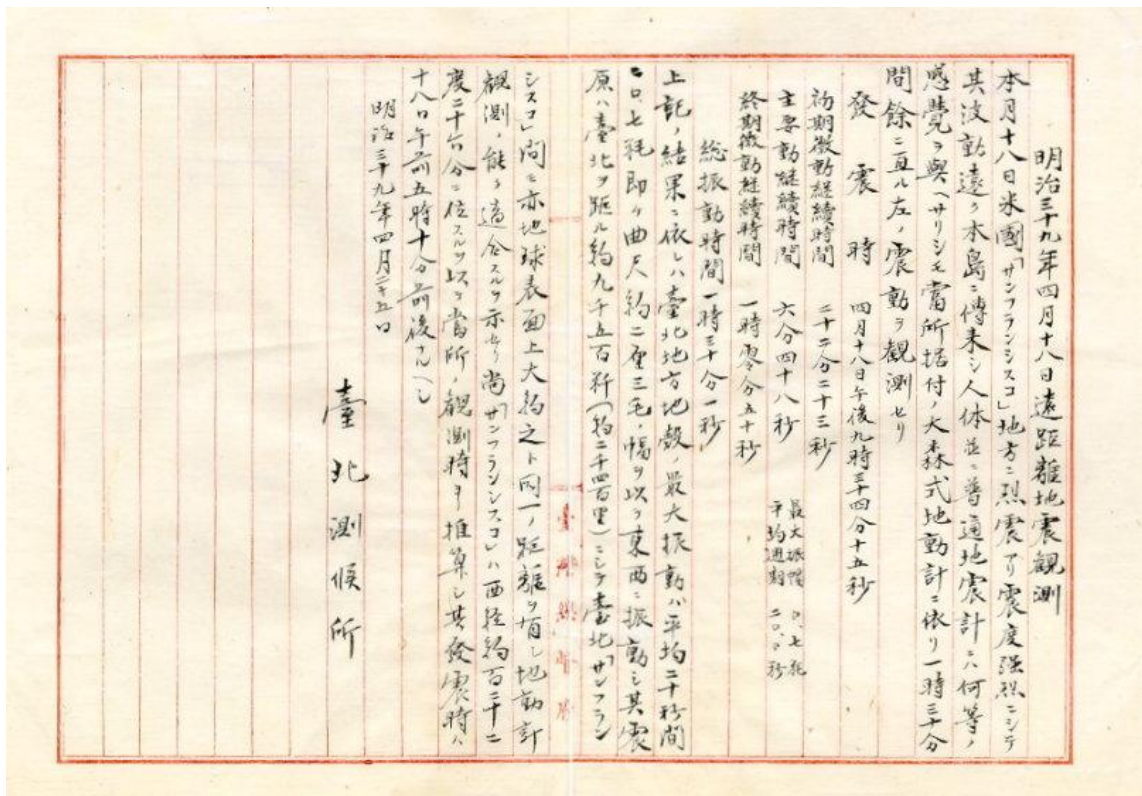


圖3、臺北測候所對於1906年4月18日 13:12美國舊金山大地震(38.00°N, 123.00°E，地震規模 MW=7.9，MS=8.3)的文字敘述觀測紀錄(收錄於鄭世楠等, 1997)，文件檔案編碼為19060418_TAP_D1。

依據前三項地震波形資料，參考 Abe(1981)登錄1904-1980全球大地震目錄與 Engdahl, and Villasenor (2002)登錄1900-1999全球規模 M_w 大於等於7.0地震目錄，篩選1900-1983年臺灣機械式地震儀收錄全球地震規模大於或等於7.0地震(圖4)，圖中紫色、紅色、藍色星型符號分別對應規模 $M \geq 9.0$ 、 ≥ 8.0 、 ≥ 7.0 的地震，紅色曲線顯示以臺北站為中心，距離分別為30、60、90、120、150度的震央距離等曲線。將整理完成的波形紀錄以網頁的方式展現。應用鄭世楠等(2022)已整理的有波形紀錄的遠距離地震，依震央位置與測震站位置計算震央距離，震央距離依大圓距離經驗式先計算震央與測站間二點的圓心角($\Delta\sigma$)，由球面餘弦定律推導得：

$$\Delta\sigma = \arccos(\sin\varphi_s \sin\varphi_f + \cos\varphi_s \cos\varphi_f \cos\Delta\lambda)$$

式中 $\varphi_s, \lambda_s, \varphi_f, \lambda_f$ 分別為震央與測站的緯度和經度，(s 為震央, f 為測站)， $\Delta\varphi, \Delta\lambda$ 是緯度與經度兩者差的絕對值。再參考 Kennett and Engdahl(1991)建立的理論全球走時曲線圖，進行各測站的各個波相，進而建立以臺灣為中心的走時曲線圖。

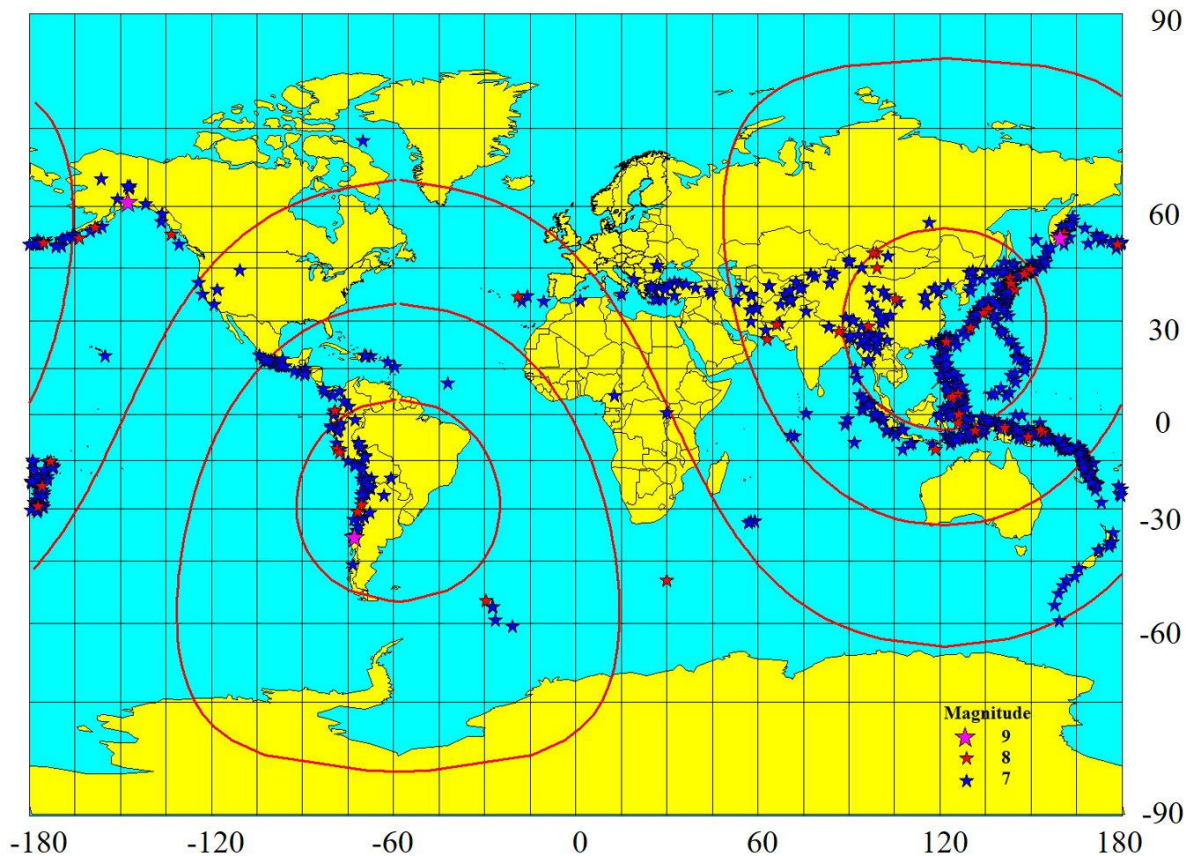
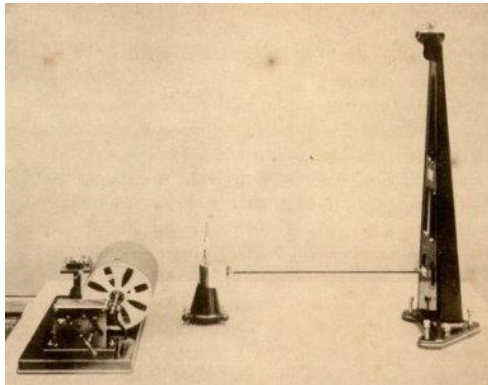
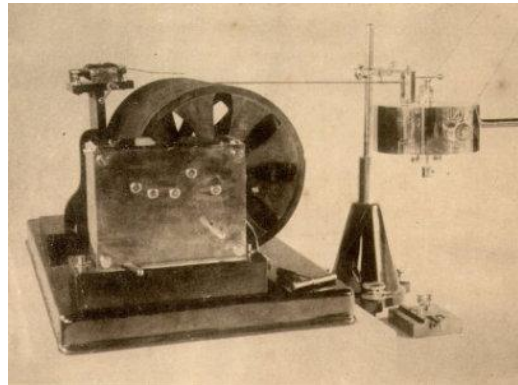


圖 4、臺灣地震觀測網收錄 1900-1983 全球規模大於或等於 7.0 的地震(有搭配波形紀錄)震央分布圖，紫色、紅色、藍色星型符號分別對應地震規模 $M \geq 9.0$ 、 ≥ 8.0 、 ≥ 7.0 的地震，紅色曲線顯示以臺北站為中心，距離分別為 30、60、90、120、150 度的震央距離等曲線。

本計畫將持續進行歷史地震儀的復原與修復，主要是針對二部大森式水平地震儀的修復，期能在計畫結束時完成大森式水平地震儀的修復與復原。大森式水平地震儀(Omori horizontal seismograph)，又稱為大森式水平振子地動計(Omori horizontal pendulum seismograph)、大森式水平地動計、大森式地動計、大森式地動儀等。日本東京神田(Tokyo Kanda) ARES & Co.製造、1900年6月裝設於臺北測候所，開始加入地震觀測行列，1983年退役，是臺灣地區服役最長的地震儀(圖5)。



(a)



(b)



(c)

圖 5、大森式水平地震儀外觀圖：(a).1930 年以前無阻尼器；(b).記錄系統放大圖；(c).中央氣象局臺北地震台上東西向與南北向之大森式水平地震儀(電磁阻尼器)。

目前在中央氣象署地下室 B205 存放二部大森式水平地震儀的零件，本計畫將持續進行歷史地震儀的復原與修復，主要是針對二部大森式水平地震儀的修復，期能在計畫結束時完成大森式水平地震儀的修復與復原。大森式水平地震儀 (Omori horizontal seismograph)，又稱為大森式水平振子地動計 (Omori horizontal pendulum seismograph)、大森式水平地動計、大森式地動計、大森式地動儀等。日本東京神田 (Tokyo Kanda) ARES & Co. 製造、1900 年 6 月裝設於臺北測候所，開始加入地震觀測行列，1983 年退役，是臺灣地區服役最長的地震儀，圖 5 為大森式水平地震儀主要零件示意圖。目前二部大森式水平地震儀欠缺 110 公分的支架 (包含頂部結構與二根高碳鋼絲)，重錘與擺臂損害嚴重，欠缺描針與支持具，其他部分多少都有些損壞。由於大森式水平地震儀已超過百年歲月，對於臺灣地震觀測史上有重大意義，故本計畫優先將大森式水平地震儀修復回原貌。

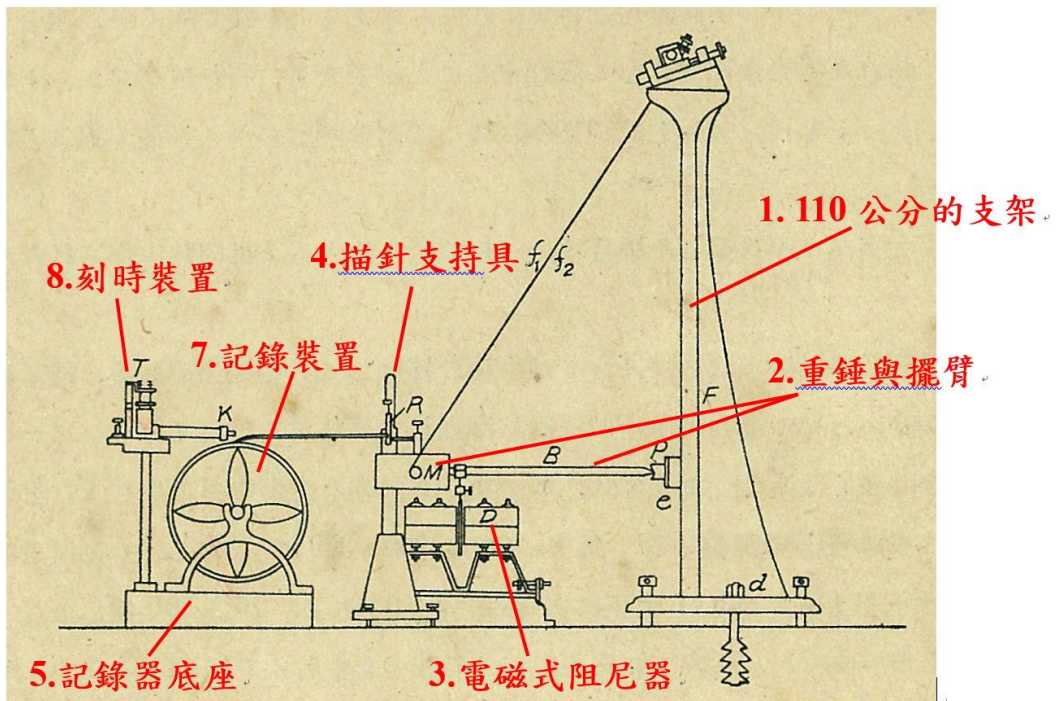


圖 5、大森式水平地震儀主要零件示意圖。

參、結果與討論

本年度計畫將著重於整理臺灣地區地震觀測網收錄到 1900-1985 年全球大規模地震($M \geq 7.0$)，建立有波形紀錄或是有記載波形到達時間的資料，進而繪製以臺灣為中心點的全球走時曲線圖。

首先參考 Abe(1981)登錄 1904-1980 全球大地震目錄、Engdahl and Villasenor (2002)登錄 1900-1999 全球規模 M_w 大於或等於 7.0 地震目錄與 PDE Monthly Listing 1973 以後全球地震目錄，篩選 1900-1983 年規模大於或等於 7.0 地震目錄，如圖 4 所示，圖中紫色、紅色、藍色星型符號分別對應規模 $M \geq 9.0$ 、 ≥ 8.0 、 ≥ 7.0 的地震，紅色曲線顯示以臺北站為中心，距離分別為 30、60、90、120、150 度的震央距離等曲線。考量對於資料庫的充實，加上 1973 年以後有較完整的全球地震目錄，1973-1983 年加入地震規模 ≥ 6.0 的地震波形記錄，如圖 6 所示，圖中紫色、紅色、藍色、綠色星型符號分別對應地震規模為 $M \geq 9.0$ 、 ≥ 8.0 、 ≥ 7.0 、 ≥ 6.0 ，紅色曲線依次顯示距離臺北氣象站距離 30° 、 60° 、 90° 、 120° 、 150° 的等曲線。很明顯， 90 - 120° 間的地震資料相對較少，地震規模大於 6.0 且小於 7.0 的地震主要都侷限在 60° 以內。

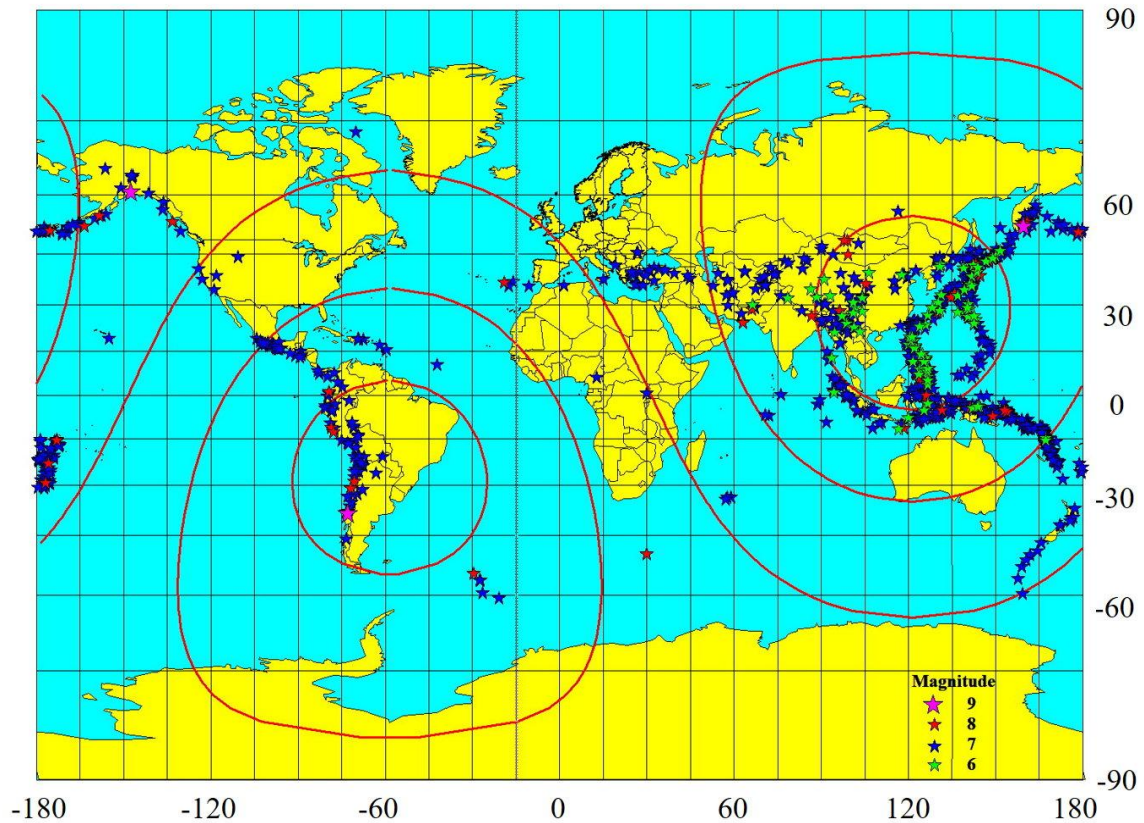


圖 6、本計畫使用的地震震央分布圖，其中 1900-1972 年為地震規模 ≥ 7.0 ，1973-1983 年為地震規模 ≥ 6.0 。紫色、紅色、藍色、綠色星型符號分別對應地震規模為 $M \geq 9.0$ 、 ≥ 8.0 、 ≥ 7.0 、 ≥ 6.0 。圖中紅色曲線依次顯示距離臺北氣象站距離 30° 、 60° 、 90° 、 120° 、 150° 的等曲線。

表 2 顯示 1906 年 4 月 18 日舊金山大地震在臺灣地震觀測網收錄情形，震源參數分別為 Abe(1981) 與 Engdahl and Villaseñor (2002)。波形編碼 19060418_TAP_D1 與 19060418_TAP_D2 顯示為文件檔；表 3 顯示 1964 年 3 月 28 日阿拉斯加地震臺灣地震觀測網微縮影片收錄情形，波形編碼中 19640328_TTN_WH_1 顯示臺東氣象站威赫式水平向地震儀收錄的波形微縮影片，微縮影片編碼 TTN057_183 顯示微縮影片編號 057 卷第 183 張。圖 7 為 1905 年 04 月 04 日印度地震、1905 年 07 月 09 日蒙古地震、1906 年 04 月 18 日加州地震、1964 年 03 月 28 日阿拉斯加地震摘讀的波時在走時曲線的範例，清楚顯示早期主要依靠大森式水平地震儀的觀測，由於放大倍率較低且只有東西向，波相摘讀的誤差相當大，1928 年以後裝設的威赫式地震儀，放大倍率 80 倍，且具有垂直與水平向，對於遠震波相的摘讀明顯的有較佳的結果。

圖 8 顯示 1900-1983 年資料庫摘讀的波相在走時曲線分布情形，圖中藍色與紅色圓型符號分別為 P 波與 S 波的摘讀，紅色與藍色曲線為 Kennett and Engdahl(1991) 震源深度 0 公里之理論走時曲線。由於涵蓋了所有深度的地震，所以資料顯示較為離散，尤其是較遠距離的地震更是明顯。圖 9(a). 顯示震源深度 0-70 公里、圖 9(b). 顯示震源深度 70-300 公里、圖 9(c). 顯示震源深度大於 300 公里。區分深度後的結果明顯改善，但因地震帶的特殊分布情形，對於某些距離的資料又稍嫌不足。雖然加入 1973-1983 年地震規模 ≥ 6.0 的地震波形摘讀資料，僅侷限在 60° 以內的地震 (圖 6)，顯示氣象署機械式地震儀觀測網對於規模 6.0 的地震偵測範圍約為 60° 。

表 2、1906 年 4 月 18 日舊金山地震臺灣地震觀測網收錄情形

編號	年月日	時分秒	緯度	經度	深度	地震規模	備註
005	19060418	13:12 00.0	38.00	-123.00		MW=7.9	Engdahl, and Villaseñor (2002)
	19060418	13:12 00.0	38.00	-123.00		MS=8.3 mB=7.4	Abe(1981)
	波形編碼		初達 P 波		S-P 波時間		備註
	19060418_TAP_D1		0418 21:34 15.0		22m23.0		文字檔
	19060418_TAP_D2		0418 21:34 15.0(TAP)		22m23.0		文字檔(府報)
			0418 21:27 51.0(TAI)		28m04.0		
			0418 21:23 15.0(TTN)		27m05.0		
			0418 21:30 43.0(TCU)		24m07.0		

表 3、1964 年 3 月 28 日阿拉斯加地震臺灣地震觀測網微縮影片收錄情形

編號	年月日	時分秒	緯度	經度	深度	地震規模	備註
003	19640328	03:36 12.7	61.02	-147.63	6	MW=9.2	Engdahl, and Villaseñor (2002)
	19640328	03:36 14.0	61.10	-147.50	23	MS=8.4 mB=7.9	Abe(1981)
	波形編碼		初達 P 波		S-P 波時間		微縮影片編碼
	19640328_TAP_WH_1		0328 11:36				
	19640328_TAP_WV_1		0328 11:36				
	19640328_HSI_WH_1		0328 11:47				HSI107_581
	19640328_HSI_WV_1		0328 11:47				HSI107_582
	19640328_HSI_P1						HSI121_141
	19640328_HWA_WV_1		0328 11:47				HWA169_046
	19640328_TTN_WH_1		0328 11:48 00.0		9m48.4		TTN057_183
	19640328_TCU_WV_1		0328 11:47				TCU073_252
	19640328_TCU_WH_1		0328 11:47 35.4				TCU073_252
	19640328_TAW_WH_1		0328 11:47 29.5		10m55.2		TAW091_464)
	19640328_TAW_WV_1						TAW091_465
	19640328_HEN_WV_1						HEN132_102
	19640328_HEN_WH_1		0328 11:47 37.0		11m18.6		HEN132_103
	19640327_HSN_P1		0327 11:47 31.5				HSN155_087

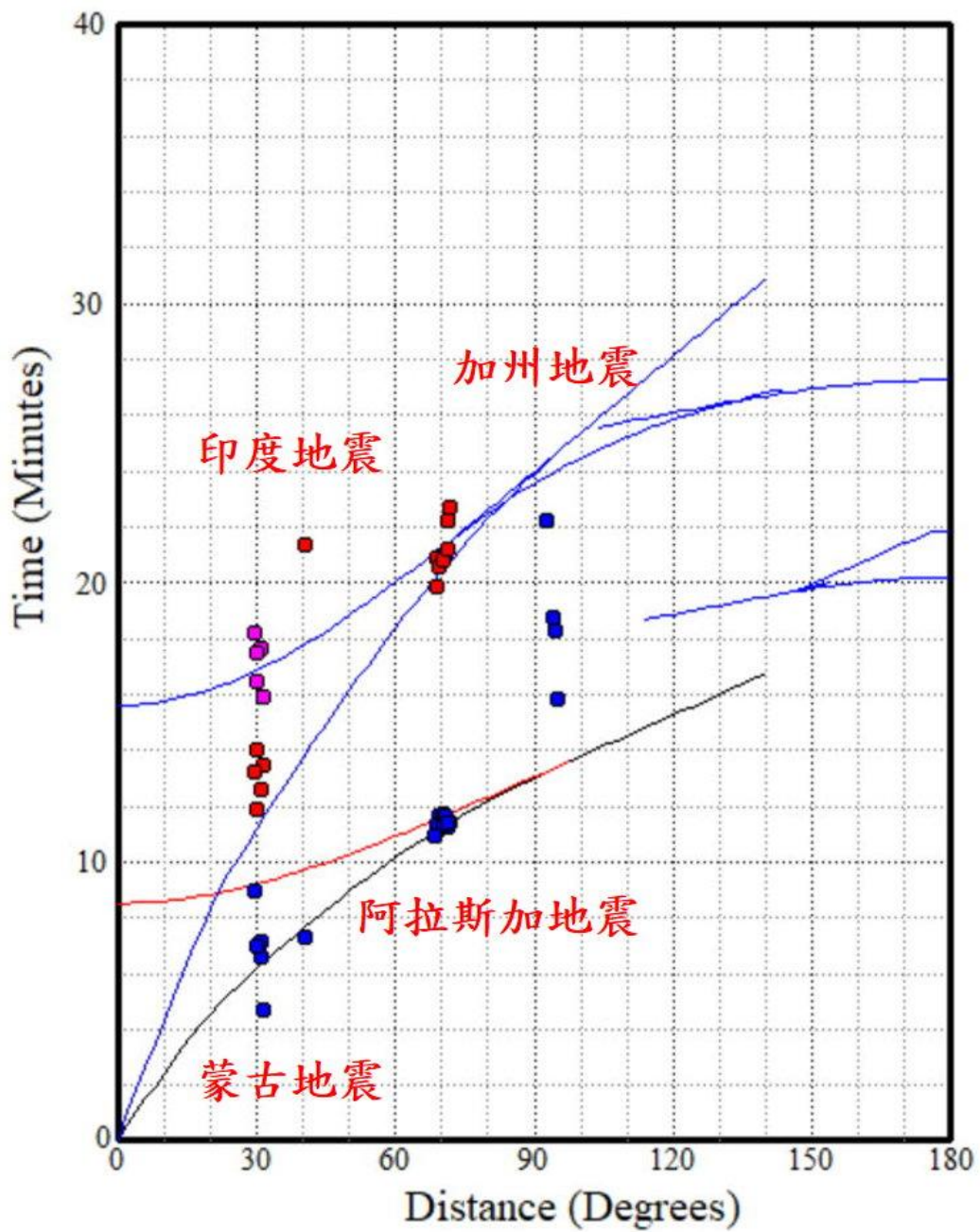


圖 7、1905 年 04 月 04 日印度地震、1905 年 07 月 09 日蒙古地震、1906 年 04 月 18 日加州地震、1964 年 03 月 28 日阿拉斯加地震摘讀的波時在走時曲線的顯示。

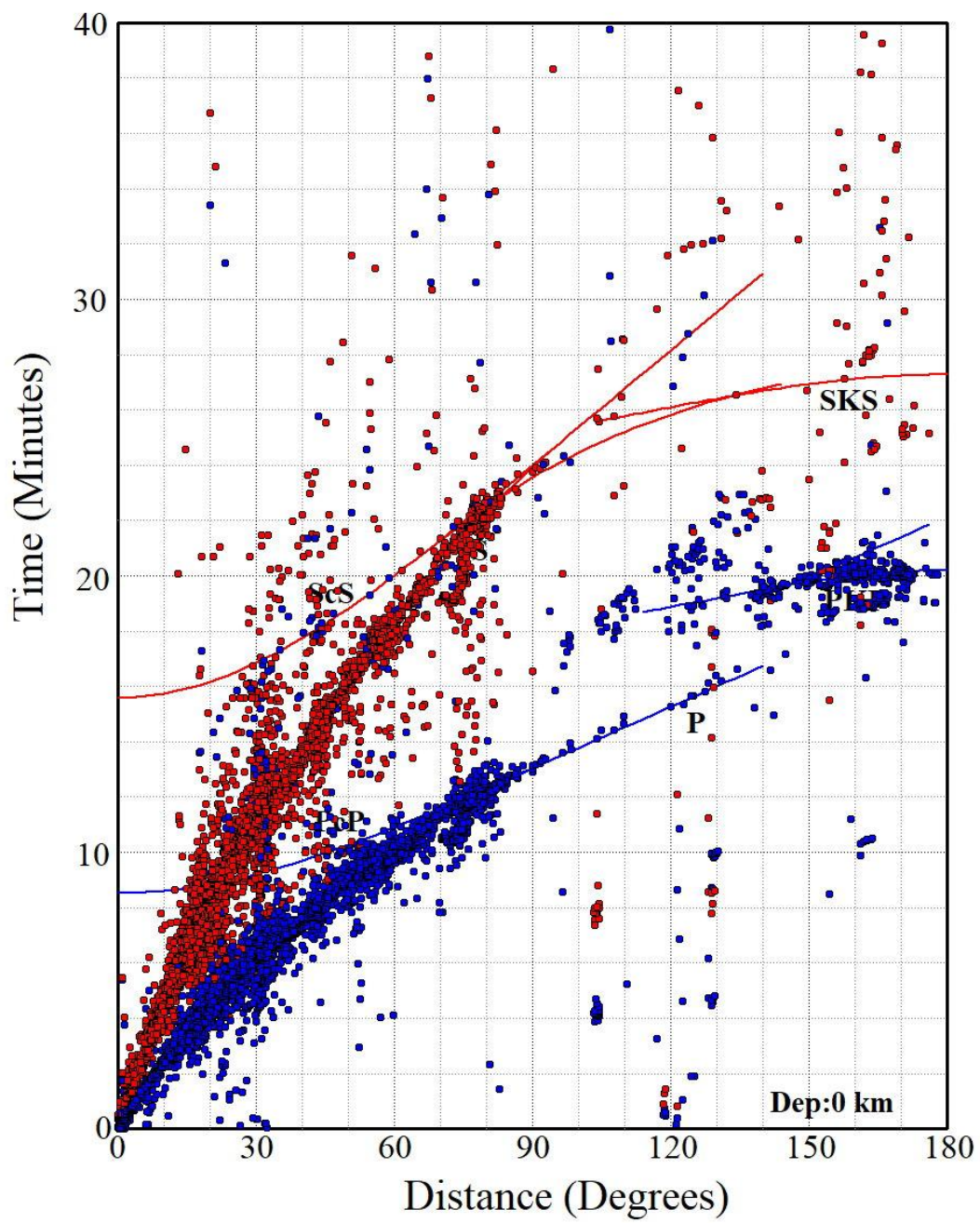
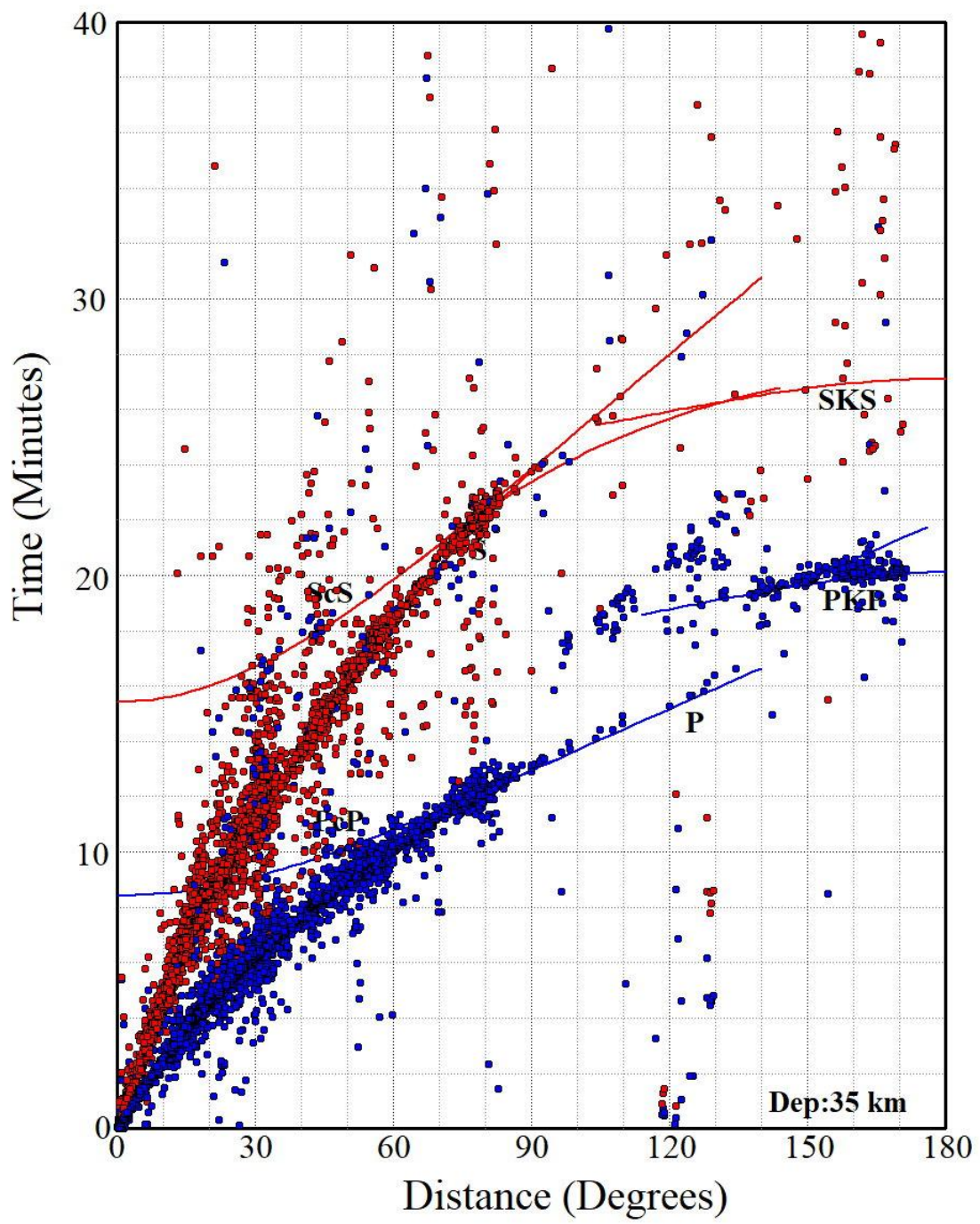
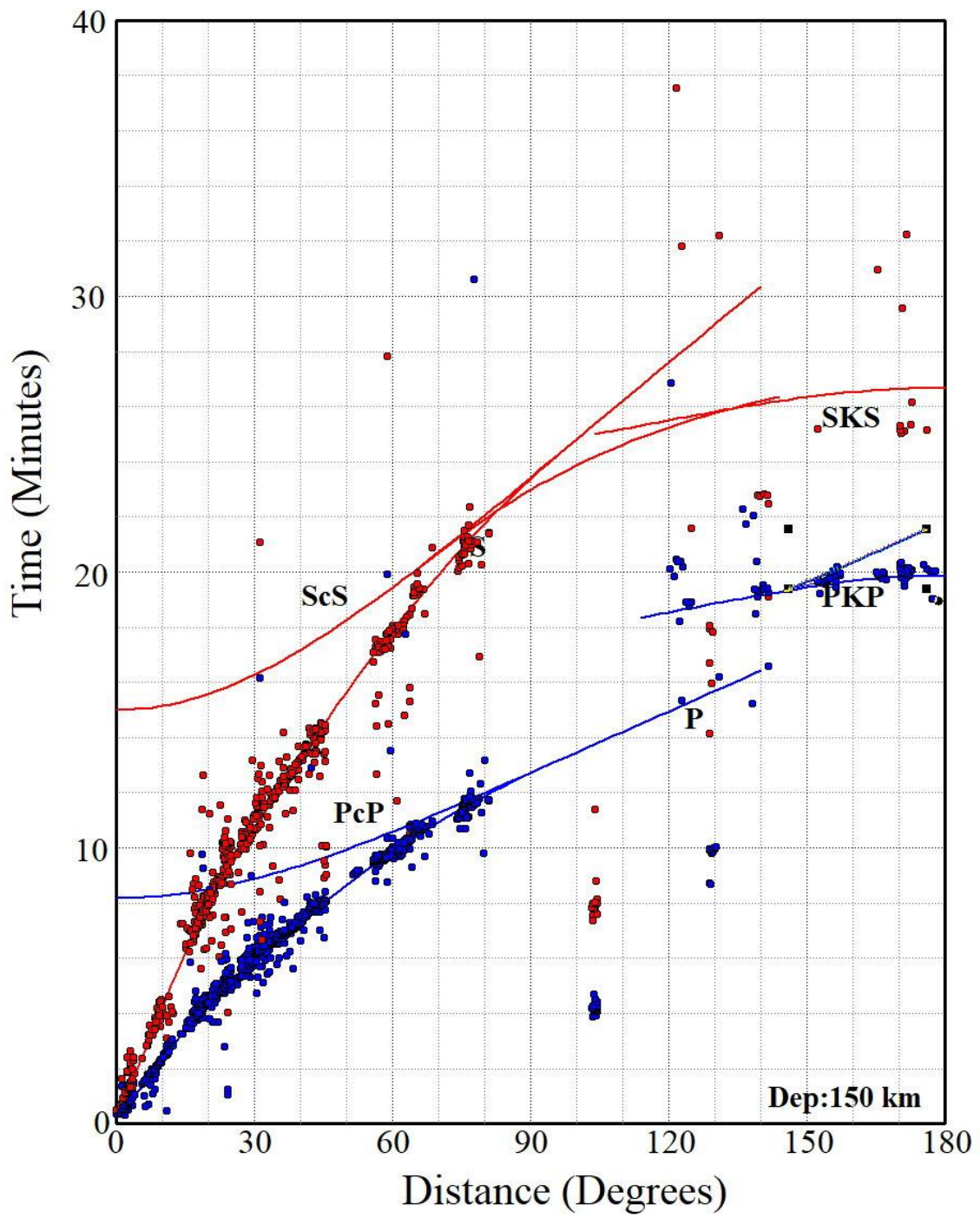


圖 8、1900-1983 年所有地震摘讀的波時在走時曲線的顯示。

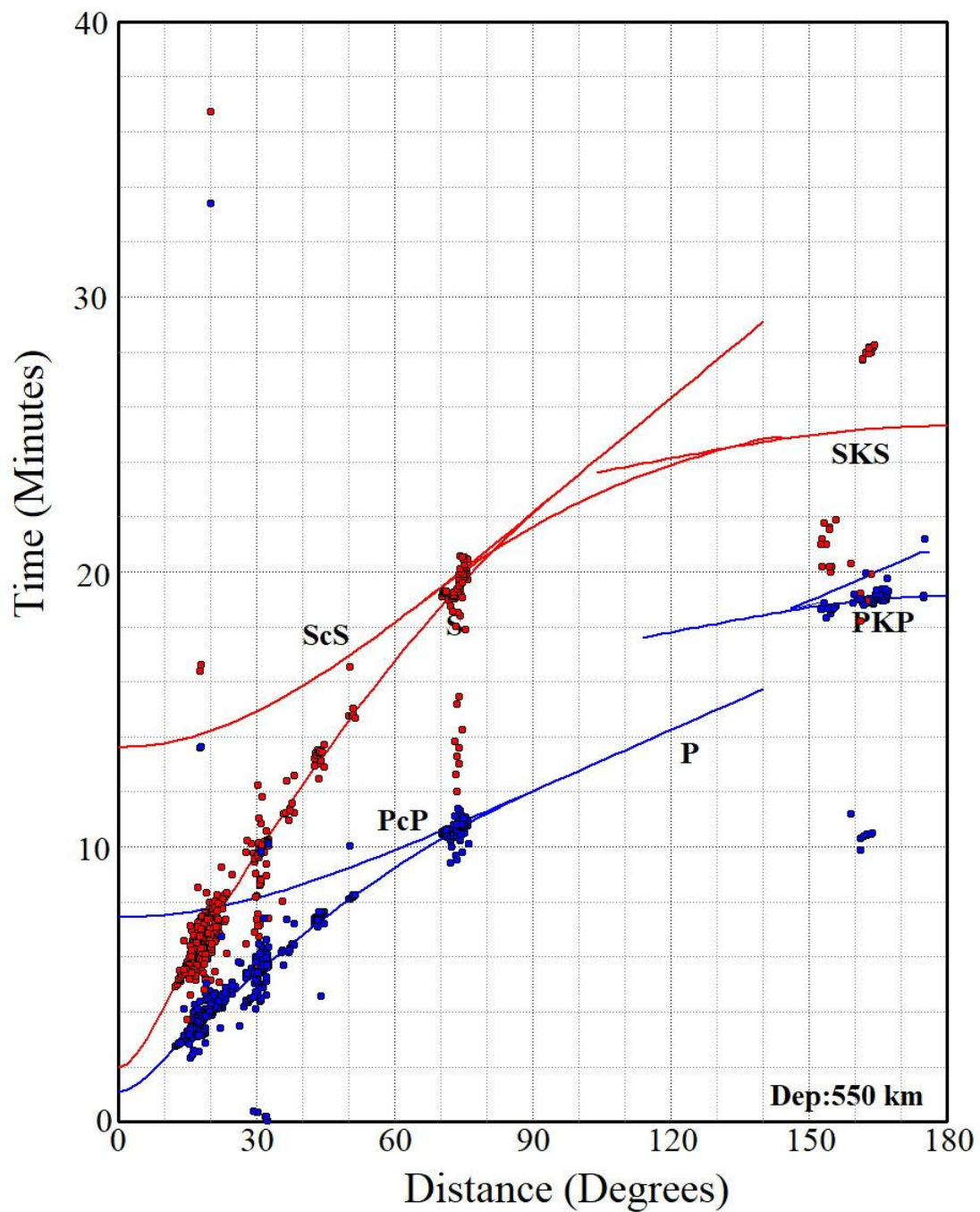


(a)

(b)

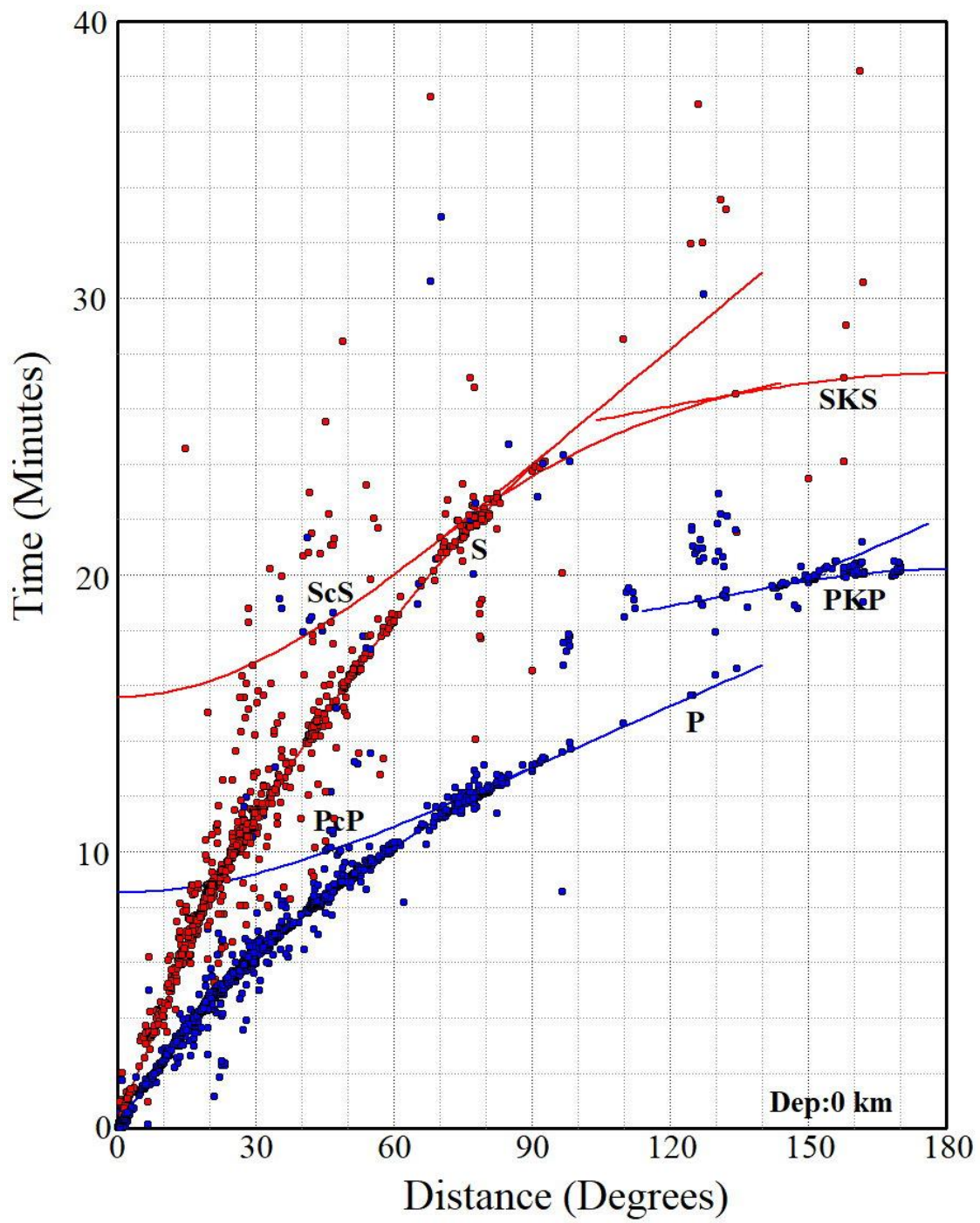


(b)

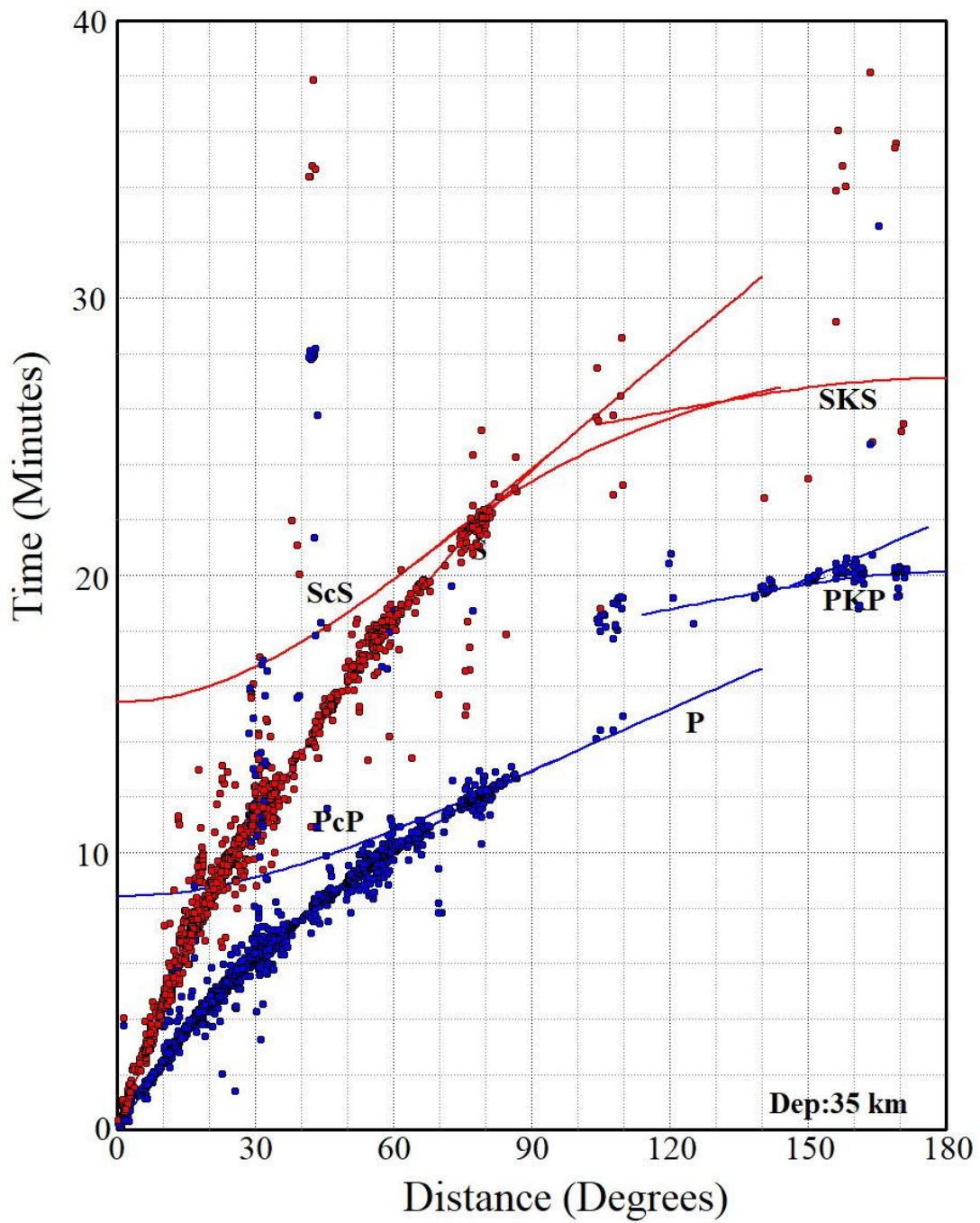


(c)

圖 9、1900-1983 年所有地震摘讀的波時在走時曲線的顯示：(a).1900-1983 年震源深度 0-70 公里地震，(b).1900-1983 年震源深度 70-300 公里地震，(c). 1900-1983 年震源深度大於 300 公里地震。



(a)



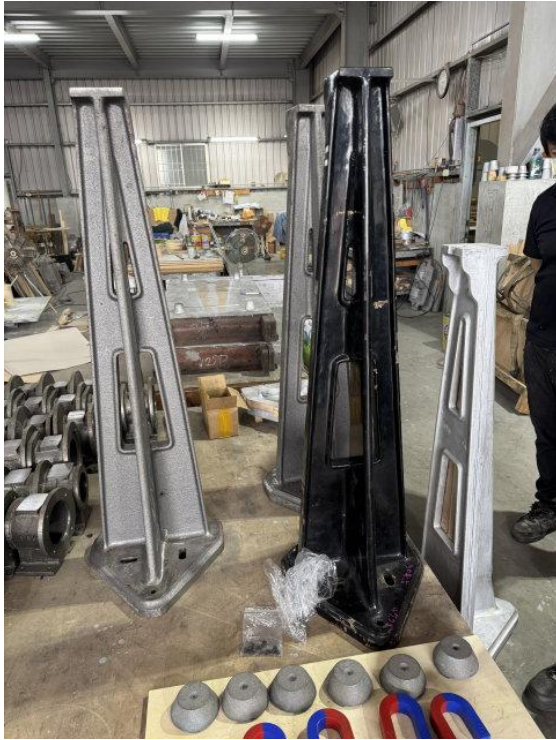
(b)

圖 10、1946-1983 年地震摘讀的波時在走時曲線的顯示：(a).1946-1983 年震源深度 0-20 公里地震，(b).1946-1983 年震源深度 20-40 公里地震。

本計畫另一工作重點為歷史地震儀的復原與修復，主要是針對二部大森式水平地震儀的修復，期能在計畫結束時完成大森式水平地震儀的修復與復原。目前在中央氣象署地下室 B205 存放二部大森式水平地震儀的零件(圖 11)，二部大森式水平地震儀均欠缺 110 公分的支架(包含頂部結構與二根高碳鋼絲)，重錘與擺臂損害嚴重，欠缺描針、支持具、阻尼器，欠缺一組時刻零件，同時其他部分多少都有些損壞。由於欠缺 110 公分的支架與阻尼器，目前調借 921 地震園區陳設的大森式水平地震儀，委託嘉義民雄億鴻鑄造股份有限公司進行開模重鑄(圖 12(a))，欠缺與損壞的零件委託高雄大社佑禎工業有限公司進行復刻(圖 12(b))，完成修復的大森式水平地震儀於 12 月 12 日臺灣歷史地震儀與觀測資料研討會中進行展示(圖 13)。



圖 11、中央氣象署 B205 大森式水平地震儀零件。



(a)



(b)

圖 11、大森式水平地震儀欠缺零件進行重鑄與復刻情形：(a). 110 公分的支架重鑄情形；(b). 欠缺與損壞零件復刻情形。



(a)



(b)

圖 12、完成修復的大森式水平地震儀參與 12 月 12 日臺灣歷史地震儀與觀測資料研討會中進行展示：(a). 歷史地震儀展示現場；(b). 大森式水平地震儀展示情形。

田中氣象站威赫式地震儀修復工作

田中氣象站目前展示的威赫式垂直與水平向地震儀，是原宜蘭氣象站借展至蘭陽博物館，2020 年再轉移至興建中的田中氣象站，由於保存狀況相當不理想，許多配件皆損壞。其中威赫式水平向地震儀水平擺呈現突出不穩情形、固定水平擺的鐵箍欠缺而用鐵線暫時穩固、重錘對應擺的外殼破碎、阻尼器支柱斷裂、描針損毀(圖 13(a))，垂直向地震儀重錘滾動軸損壞、紀錄滾筒破損、阻尼器支柱損壞斷裂、菱形台座與描針底座嚴重受損(圖 13(b))。本計畫共計三次至田中氣象站修復威赫式垂直與水平向地震儀，由於欠缺零配件，較大零件從臺北、高雄科工館與恆春站調用多餘的零件進行修復，較小的零件則採自製。圖 13 顯示田中氣象站威式式地震儀修復與完工情形。

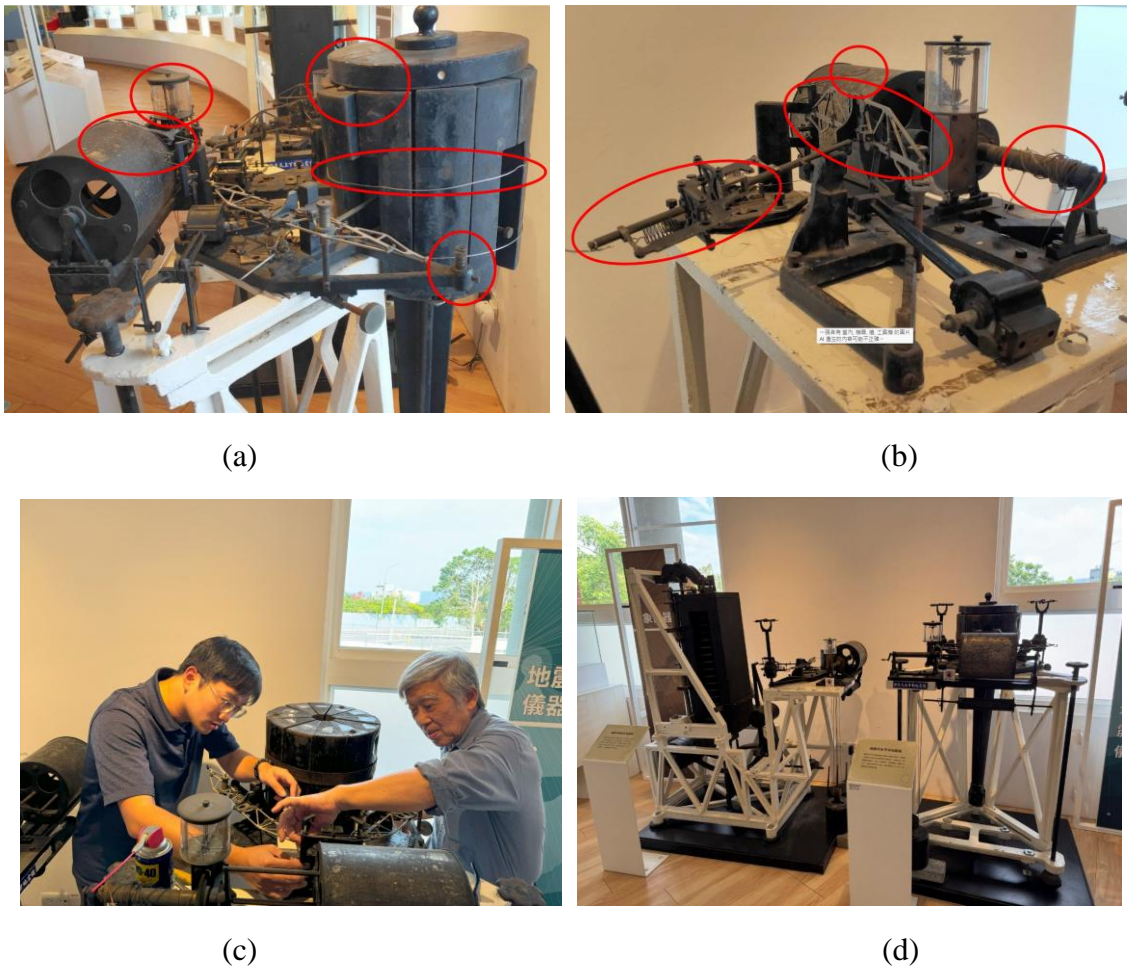


圖 13、田中氣象站威式式地震儀損壞與修復情形，(a). 田中氣象站威赫式水平向地震儀；(b). 田中氣象站威赫式垂直向地震儀；(c). 田中氣象站威赫式水平向地震儀修復情形；(d). 田中氣象站威赫式地震儀修復完成情形。

肆、結論

本計畫完成機械式地震儀地震儀 1900-1983 年全球地震規模大於 7.0 地震摘讀資料庫的建置，同時加入 1973-1983 年規模大於 6.0 地震摘讀資料。根據建置完成的摘讀資料庫，描繪出以臺灣為中心的走時曲線圖。由於早期使用的地震儀—大森式水平向地震儀倍率較小，且僅有東西向，故對於較遠距離的地震摘讀較為不理想，自威赫式地震儀設置後即大為改善。地震規模 ≥ 6.0 的地震波形摘讀資料，僅侷限在 60° 以內的地震，顯示氣象署機械式地震儀觀測網對於規模 6.0 的地震偵測範圍約為 60° 。計畫執行期間完成田中氣象站威赫式垂直向與水平向地震儀的修復，二部大森式水平地震儀因欠缺 110 公分的支架、阻尼器進行開模重鑄，損壞與欠缺零件進行復刻，完成修復的大森式水平地震儀於 12 月 12 日臺灣歷史地震儀與觀測資料研討會中進行展示。

參考文獻

- 鄭世楠、王子賓、江嘉豪、蔡宜宏、潘昌志，2013：臺灣地區歷史地震波形與紀錄之整理，中央氣象局地震技術報報彙編，第62卷，369-384。
- 鄭世楠、王子賓、許麗雯、林子翔，2014：臺灣地區歷史地震波形與紀錄之整理(II)，中央氣象局地震技術報報彙編，第63卷，553-565。
- 鄭世楠，2014：台灣歷史地震資料庫的建置與境況重建，自然科學簡訊，第26卷，第2期，50-54。
- 鄭世楠和呂佩玲，2017：臺灣歷史震波紀錄數化分析與研究，科技部補助專題研究計畫成果報告，MOST 105-2116-M-231-002，332頁。
- 鄭世楠和呂佩玲，2018：臺灣歷史震波紀錄數化分析與研究(2/3)，科技部補助專題研究計畫成果報告，MOST 106-2116-M-231-002，62頁。
- 鄭世楠、王子賓、陳國昌、廖哲緯、吳郁柔，2022：臺灣歷史地震波型紀錄彙整，2022臺灣地球科學聯合學術研討會，PP312 PP-GS-S-011。
- Abe, Katsuyuki (1981) Magnitudes of large shallow earthquakes from 1904 to 1980. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 27, 72-79.
- Engdahl, E.R. and Villasenor, A. (2002) Global Seismicity: 1900-1999. In: Lee, H.K., Kanamori, H., Jennings, P.C., et al., Eds., *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology, Part A*, Academic Press, Amsterdam.
- Kennett, B. L.N. and Engdahl, E.R. (1991) Traveltimes for global earthquake location and phase identification. *Geophys. J. Int.*, 105, 429-465.