113 年度地震資料之分析應用

子計畫一

臺灣自由場連續觀測強震資料應用於精確定位地震之 探討

黄柏壽 古進上 楊麗珍 劉奎志

中華民國地球物理學會

摘要

本計書目標將定位為開發新方法用於分析臺灣地區的群震及個別地震之資料, 精確定位及分析其震源參數。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。本計劃今年度完成兩分析案例,第一例以地震學陣列 方法追蹤 2023 年 9 月 22 日屏東工廠化學品爆炸發生歷程,分析確認爆炸的地點、 時間與當量並用以核實後續之再爆事件。研究顯示臺灣地震監測網資料適用於探 究屏東爆炸歷程,所獲事證提供朔源事件發展過程並可為爆炸事件爭議的鑑識調 查提供重要佐證。針對能夠達成通報與快速反應臺灣重大爆炸事件之目標,本研究 建議簡易升級地震網功能,透過增建少量次聲波測站及優化地震網資料的處理流 程,臺灣地震網或可對未來再發生的重大爆炸事件提供即時、精確的訊息,支援救 災並緩解目前災害爆炸事件尚無明確公部門進行監測、科學數據收集及快速回應 大眾的需求。第二例目標為分析基隆外海地震,探查地震活動與火山活動的可能關 聯。本計劃以北臺灣之高密度寬頻與 TSMIP 強地動連續觀測資料,進行地震重定 位、震源機制分析,檢驗地震活動、應力機制與地熱徵兆,探討地震與火山活動的 可能關聯。分析選定一起發生於基隆近海,鄰近海底火山之中等規模地震。分析結 果顯示此地震為淺震,震源機制為走向滑移斷層並證實中央氣象署地震網對外海 近岸地震定位的準確性。本地震之震央鄰近基隆外海一座顯著海底火山,周邊分佈 雁行排列地熱噴氣孔,檢視其分佈走向與發震構造之東北-西南向斷層一致。本研 究綜整推論此基隆外海地震機制與海底火山活動特徵具有關聯性。為因應可能之 海底火山噴發及其引致之地震、海嘯等防災議題,本研究建議氣象署宜妥善規劃並 加強監測與地震群之研究分析。

關鍵詞: 陣列分析、工安事件、爆炸當量、海底火山、地震活動、震源機制

Abstract

The objective of this project is to develop new methods for analyzing data from both earthquake swarms and individual earthquakes in Taiwan, aiming to accurately determine their locations and analyze their source parameters. Another task of the project involves creating innovative methods to analyze continuous data collected by the TSMIP network to optimize seismic network performance and enhance the added value of continuous seismic data. We completed two case studies: First, tracking the chemical explosion event in Pingtung. Using seismic array methods, this case analyzed and confirmed the explosion's location, time, and magnitude, providing critical evidence to validate subsequent events. The study demonstrated the applicability of Taiwan's seismic monitoring network for investigating the Pingtung explosion incident. To achieve the goal of rapid reporting and response to major explosion events in Taiwan, the study recommends simple upgrades to the seismic network by installing a small number of infrasound monitoring stations and optimizing data processing procedures. These measures could enable Taiwan's seismic network to provide timely and accurate information for future significant explosion events, supporting disaster response and addressing the public's current unmet needs for monitoring, scientific data collection, and rapid response. Second, analyzing the offshore Keelung earthquake. This study explored the potential relationship between seismic and volcanic activities. By utilizing the dense broadband and TSMIP strong-motion continuous observation data in northern Taiwan, the study conducted earthquake relocation, focal mechanism analysis, and stress mechanism examinations, along with geothermal anomaly assessments. The selected case involved a moderate earthquake occurring near an offshore submarine volcano close to Keelung. The results indicated that the earthquake was shallow, with a strike-slip fault mechanism, confirming the Central Weather Bureau Seismic Network's accuracy in locating offshore near-coast earthquakes. The epicenter was located near a prominent submarine volcano off the coast of Keelung, surrounded by en-echelon geothermal fumaroles aligned with the northeast-southwest fault structure responsible for the earthquake. This research concludes that the offshore Keelung earthquake mechanism is correlated with the characteristics of submarine volcanic activity. To address potential disaster risks associated with submarine volcanic eruptions and the resulting earthquakes and tsunamis, the study recommends that the Central Weather Bureau appropriately plan and strengthen monitoring and earthquake swarm research and analysis.

Key words: Array analysis, Industrial safety incident, Explosive yield, Submarine volcano, Seismic activity, Focal mechanism

一、2023年9月屏東地區爆炸工安事件之地震陣列分析探討

摘要

本研究綜整臺灣即時地震網資料,以地震學陣列分析方法確認 2023 年 9 月 22 日屏東工廠化學品爆炸發生的地點、時間與當量並用以追蹤、核實後續之再爆事件。 研究顯示臺灣地震監測網資料適用於探究屏東爆炸歷程,所獲事證提供朔源事件 發展過程並可為爆炸事件爭議的鑑識調查提供重要佐證。為達成通報與快速反應 臺灣重大爆炸事件之目標,本研究建議簡易升級地震網功能,透過增建少量次聲波 測站及優化地震網資料的處理流程,臺灣地震網或可對未來再發生的重大爆炸事 件提供即時、精確的訊息,支援救災並緩解目前災害爆炸事件尚無明確公部門進行 監測、科學數據收集及快速回應大眾的需求。

壹、前言

2023年9月22日傍晚,屏東科技園區一間生產高爾夫球的大型工廠驚傳火 災意外,消防人員進行搶救期間,廠區發生強烈爆炸並引發大火、造成廠房坍塌 (圖一)。火場內外有多人傷亡,最終統計共有消防員及員工10名不幸身亡,111名 員工輕重傷(https://www.setn.com/News.aspx?NewsID=1421186)。本次工廠化學品爆 炸的意外事件,造成嚴重人命、財產損失與社會衝擊。警方查證爆炸原因為現場儲 存的大量有機過氧化物所引發。此爆炸案為國內近期發生之重大工安事件,事件發 生初期,對於強烈爆炸發生的確切時間及過程(例如是否有連續的爆炸)皆無具體 傳 達 , 致 媒 體 報 導 有 多 種 版 本 (https://udn.com/news/story /12375/7463640;https://www.setn.com/news.aspx?newsid=1357365;https://www.cna.co m. tw/news/asoc/202309250173.aspx)。雖然事件發生後對本爆炸事件過程的偵查鑑 識與還原重建,可經由現場人員的回報、工廠內建及鄰近地點所收集到的多點監視 器資料進行分析。然而,僅依據監視器定性觀測結果,預估此化學品大型爆炸事件 之宏觀過程,包括時間序列及釋放當量追蹤,仍有不足之處。

地震觀測網設計的原始目的為監測地球內部發生的地震,經證實對於地表及 大氣的爆炸事件具有監測能力。全球地震網當年建造的任務之一即為監測全球大 型核試爆 (Barker et al., 1998; Ammon et al., 2010) 。科學報告已經證實了地震儀器 可記錄微弱的聲波和次聲波信號,這些信號已被應用於研究火球隕石穿越大氣的 現象(Ishihara 等, 2003 年; Langstone, 2004 年),研究雷聲衝擊波引起的地面震 動(Lin 和 Langstone, 2007 年),超音速飛行器引起的音爆現象(Kanamori 等, 1991 年; Qamar, 1995 年)及地表爆炸事件(Holzer et al., 1996; Koper et al., 1999; Ghalib et al., 2021)。過往,臺灣的地震研究鮮少回應關於災難性爆炸事件調查或 進行觀測與科學分析。近年,源於防災與地震研究的需求,臺灣島已大幅設立地震 監測站及開始建立次聲波觀測站。雖然所收集數據主要用於地震行為的探究,然而 善用這些地震學觀測資料,協助探查臺灣地區災難爆炸事件始末或將成為可能並 可充分善盡其社會功能。 本研究當前目標將以現有臺灣即時地震網為例,展示如何從地震網篩選數據、 分析確認爆炸的位置、時間及估算釋放能量並用以追蹤、核實後續之再暴炸事件。 本研究指出,使用陣列方法分析地震網所記錄爆炸信號數據,所獲致訊息可提供於 還原事件發展過程,提供檢警單位調查參考。本研究另提出構想,強化觀測、增加 地震網對爆炸事件之監測流程,企求以即時收集、自動分析地震網數據,對地表重 大爆炸事件進行快速定位及評估規模,期望對於爆炸工安事件之救災及爆炸事件 朔源作出具體貢獻。

貳、觀測資料

臺灣位於菲律賓海板塊與歐亞板塊的碰撞邊界。這種構造環境使該地區產生 了顯著的地震活動。臺灣地區之地震監測網,如中央氣象署地震網(CWASN)、 臺灣地震寬頻陣列(BATS)和臺灣強地動觀測網(Taiwan Strong Motion Instrumentation Program network, TSMIP),皆強調其對臺灣地區獨特的觀測功能, 多面向監測臺灣地震活動,並提供有關地震檢測、定位和規模估算的即時信息。這 些地震網在了解該地區的地體構造、地震活動及評估基礎設施的地震危害方面發 揮了至關重要的作用。在本研究中,我們將重點關注於本次屏東地區大型高爾夫球 工廠火災爆炸意外事件,檢視了南臺灣地區所有地震記錄,廣泛收集地震數據及媒 體報導資訊,以探索事件發生過程。

由中研院地球所建置維護的臺灣寬頻地震網(BATS),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 動態範圍之精密地震儀。部分地震站另配備次聲波觀測儀及大氣壓力計用以監測 地震引發之大氣擾動。本研究首從此地震網位於屏東泰武屏東縣泰武鄉馬仕部落 的地震站(MASB)檢視本次爆炸事件(圖二)。依據報導之爆炸發生時間,本研究擷 取適當時間窗資料進行檢視。MASB 測站提供包括次聲波、氣壓計、寬頻速度及低 感度強震儀等多頻道資料(圖三)。經由本測站資料可以觀測到由爆炸源所產生之多 個對應震相(Koketsu et al., 2002). 首先為經由地球內部傳播之彈性體波地動,隨後 為經由地表介面傳播的表面波,最後才為以音波形式經由大氣傳播的聲學波動 (acoustic wave) 震相。地動體波及表面波分別為寬頻地震儀及強震儀所記錄,寬頻 地震儀所記錄表面波相對明顯。爆炸之聲波訊號經地表轉換為地震動亦為地震儀 所記錄,其中強震儀原始記錄之訊號不明顯,經過濾波處理後,其加速度訊號顯現 比寬頻地震儀記錄之速度波形更為明顯的聲波到時(圖三b)。由三分量紀錄顯示此 爆炸波的 S 波發展不完整。單分量次聲波及氣壓計明顯記錄氣爆的聲波訊號,兩 儀器所紀錄之地震圖訊息比地震儀紀錄簡單,次聲波記錄比氣壓計記錄擁有更佳 解析能力(圖三 a)。對於爆炸事件所產生的高頻暫態氣壓變化能以次聲波形式長距 離傳播,提供震源特性與位置訊息(Brachet et al., 2009)。由 MASB 地震站所記錄的 地震資料顯示,主要用於觀測地震的儀器,對於此次地表爆炸事件具有感知能力, 可以紀錄事件發生過程動現象,協助深度探索爆炸事件。唯 BATS 地震網的測站 數量有限,對於本次爆炸事件之分析,無法由 BATS 地震網的觀測單獨完成。

CWASN 地震觀測網為一整合型觀測網,地震儀器配置包括短週期地震儀、 強震儀與寬頻地震儀。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)。在屏東地區 CWASN 可以提 供多個測站資料共同解析本爆炸事件(圖二)。 本研究檢視 CWASN 測站的波形資 料,經過適當濾波分析,顯現臨近震源區域的多個測站出現明顯地動徵兆,其中地 震儀的三分量紀錄以垂直向記錄最明顯(圖四),確認 CWASN 地震儀對地於本爆炸 事件的偵測能力。本研究以 CWASN 標準地震定位步驟進行分析,共摘讀 16 個可 辨識的體波波相並限定深度為地表(深度 0 公里),進行定位並獲得之震源參數為發 震時間(2023/09/22 10:00:11, UTC),震源位置(緯度:22.67°,經度:120.51°),規模 1.95 (圖二)。定位結果與實際爆炸地點略有差距。檢視波形資料,對比於天然地震, 本事件產生的地動訊號頻率高,地表爆炸產生震波主要沿淺地層傳播,衰減快速, 雖然少量近震源資料顯現高清訊號,然而對於距震央較遠(例如,40 公里外)的 多數測站,其地震圖震相仍可辨識,但是震波初始訊號已模糊(圖四),摘讀震相到 時誤差大,應為定位誤差主要來源。另地震儀紀錄顯現之明確聲波訊號並未實際應 用於此震源定位。本研究認為,直接摘讀 CWASN 可辨識地動震相,採用傳統定 位地震方法進行爆炸事件定位,因缺乏近震觀測資料,定位結果仍有明顯誤差(圖 二)。

在屏東地區中央氣象署另維護了諸多 TSMIP 強震站用以觀測地表強地動。 通常微地動及地表爆炸事件無法為低感度之強震儀所觸發,因此傳統強地動觀測 其少應用於地表爆炸分析。中央氣象署因應全省均勻分佈之即時地震震度測報需 求,自 2018 年度初起,開啟強地動觀測的即時收錄系統並將所有測站訊號進行連 續紀錄,完整保存地動訊息。未觸發地震事件仍保有完整紀錄,不會漏失任何可用 資料。本研究依據 CWASN 地震觀測定位之爆炸發生時間,透過 TSMIP 地震網資 料庫(https://gdms.cwa.gov.tw),擷取適當時間窗資料進行檢視。TSMIP 地震站在屏 東地區分佈密集,具有諸多鄰近爆炸源測站(圖二)。本研究以最接近炸點的測站(編 號:D067,距離 3.2 公里)三分量紀錄為例(圖五),體波、面波與聲波訊息可以 在地震圖上鑑別。然而 TSMIP 測站安裝地震儀皆為低感度強震儀,檢視測站的原 始紀錄,只少數近震源地震站顯現可視訊號,其餘測站的波形訊號皆不明顯。經嘗 試以適當濾波處理,多數測站資料皆顯現可辨識震相(圖六)。這些資料彌補 CWASN 近震源資料之不足,對於定位爆炸震源提供重要幫助。另外,本研究遍尋 屏東地區同時段之安裝地震儀,另篩選國家地震工程研究中心與臺灣大學臨時網 提供的記錄(各一站可用)。共同彙整為近震源密集陣列數據,將提供為本研究進 一步分析使用。

參、分析與結果

本研究分析嘗試獨立以所採集的臺灣即時地震網地震紀錄,應用於確認屏東 爆炸事件的位置、時間及估算釋放能量並據以追蹤、核實主爆炸後續之再爆炸事件。 展示如何從地震網篩選數據、逐步分析爆炸信號,紀錄事件發展過程並與媒體報導 資訊進行比對,確認分析結果正確性與地震學分析方法可行性。

(一)、爆炸事件重定位:

依據前述 CWASN 摘讀震相經驗顯示,爆炸源的清晰震波到時震相,易受地 殼淺層震波快速衰減的影響,不易摘讀高頻震相到,影響定位準確。本研究將不依 賴分析震相到時資訊,改採用透過疊加震波能量的反向投射法(Back-projection method, BP)進行定位分析。本方法簡化地球物理探勘領域採用的逆時移棲法(McMechan, 1982),將震波振幅依波傳路徑(走時)回推至震源,特點為不需先行摘讀地震波到時,只需透過搜尋的步驟,重複地震波能量的移棲與疊加動作,找出 震央最佳位置。本方法需要使用陣列形式分佈的測站所紀錄之波型資料,分析過程 需經過格點搜尋,將模型內之所有格點視為可能的震源位置,利用適當的速度模型 計算各格點至所有測站的地震波走時差(Ishii et al. 2005)。模型所有格點經由移動 各測站之地震紀錄之計算到時,連線地震波能量,經過波形疊加過程以獲得對應峰 值。透過評估將獲得最大峰值的格點視為震源,其對應時間則為發震時刻。其重要 計算步驟可以下列的公式表示:

 $\operatorname{Stack}_{i}(t) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N} S_{k} \left(t - t_{ik} \right)$ (1)

其中 Stack_i(t)為地震波形疊加能量總和後的時間序列,N 為測站之個數,k 為測站 之編號,S_k(t)為第 k 測站之地震波振幅時間序列,t_{ik} 為模型格點 i 至第 k 測站計算 之理論走時 (Ishii et al. 2007)。疊加採用之理論走時可以為 P 波,S 波或聲波之走 時。

使用反向投射法來定位地震,我們需要將地球模型離散化成三維(3-D)網格 並假設地震源的真實位置位於 3-D 網格內。作為樣本,我們計算從模型內所選擇 的網格點到每個地震台站的預測旅行時間。然後,我們根據預測的走時對地震記錄 進行時間偏移,並將該網格點的所有地震記錄疊加起來。模型內的每個網格點都被 認為是一個潛在的地震源,並且相同的計算被重複用於模型的每個點。如果網格點 是真正的震源,則在時間偏移後到達時間將會對齊,從而在地震記錄上因能量疊加 顯出極值震幅。對於其他非源網格點,它們將不會對齊,在地震記錄上因能量疊加 顯出極值震幅。對於其他非源網格點,它們將不會對齊,在地震記錄上只顯出較小 震幅。這種處理過程重複在所有三維網格點做計算,形成每一個格點皆為堆疊後地 震圖所組成的三維網格模型,或為具時間軸的三維疊加振幅值圖像(4-DBP圖像)。 最終,地震震中位置和起源時間將由相應 4-D BP 圖像中的最大振幅值所在的時間、 位置點選定。本研究根據上述概念開發出一個適用的程序以進行重定位。BP 方法 的獨特特點是在地震定位過程中無需分辨地震記錄的到達時間,只通過疊加陣列 地震記錄來達成。適用於本研究的走時計算可以是一個適用的P、S 和聲波速度的 1-D 區域模型,加上一個側向均質射線追蹤方法(Huang, 1996)完成。

依據公式(1)的疊加計算方法,反向投射定位爆炸震源,需預先準備近震源之 陣列波形資料。本研究檢視氣象署與中研院地球所地震資料庫的連續記錄數據,針 對爆炸事件發生時段,採集高雄與屏東地區地震站之紀錄資料,進行彙初步整理與 篩選。所收集資料經過濾波,依據爆炸工廠地點座標繪製成隨距離開展的地震剖面 圖(圖六 a)。圖六(b)為經過 1HZ 低通濾波的剖面圖,在近震源 20 公里內,記錄 圖出現明顯持續地動,其傳播速度相當於淺層介質表面波,記錄圖在表面波地動之 後所出現的明顯高頻振動為隨爆炸擴散的氣壓變動,以聲波速度傳遞。圖六(c)為 地震紀錄經過 1HZ 至 5HZ 帶通濾波後繪製的剖面圖,更凸顯現在地殼內傳播之 P 波與空氣傳播之爆炸聲波。圖六中的訊號雖然可識別,但是能量相當接近背景雜訊, 振相到時之辨識誤差大,不適合使用震相到時定位。反向投射定位法,透過地震圖 震波能量疊加過程,探詢能量集中釋放點確認震源,無需摘讀振相到時,有效簡化 定位過程。本研究採用振幅正規化及波形轉化為包絡線等步驟預處理圖六(c)地震 剖面圖內的個別地震圖,並將爆炸源設定於地表,經過公式(1)的反向投射計算進 行爆炸源重定位。本研究曾分別採用 P 波,S 波及聲波當為介質傳播速度進行反向 投射定位,所得結果以聲波為介質速度效果最好,其震源成像如圖七所示。依據 BP 反向投射定位,推估爆炸時間為 2023/09/22 10:00:10 (UTC),臺灣時間 18:00:10。 定位爆炸點於爆炸場址東北方約一公里。利用檢驗地震網最接近爆炸地點的 D067 測站 P 波到時為 2023/09/22 10:00:11 及 CWASN 地震定位推估的發震時間為 2023/09/22 10:00:11。三者推論差距甚微,本研究認定本次爆炸的發生時間應在當 日下午六點整過後第十秒 (2023/09/22 06:00:10)的前後數秒之內。推估的爆炸時 間差異,可能源於採用簡化之聲波速度模型或定位方法差異造成。此推估爆炸時間 點比媒體報導(分佈在 17:59 至 18:10 之間)的發生時間更為明確與一致 (https://udn.com/news/story/12375/7463640;https://www.setn.com/news.aspx?newsid= 1357365;https://www.cna.com.tw/news/asoc/20230925017 3.aspx)。

(二)、爆炸釋放能量預估:

利用地震資料推估爆炸源能量是爆炸監測的重要組成部分,對於高當量的核 試爆監測已經是具悠久歷史的研究課題 (Barker et al., 1998; Richards and Wu, 2011)。 對於低當量的爆炸源推估,近年常被應用於意外爆炸事件的鑑定與朔源 (Golden, 2012; Nemer, 2021; Takazawa et al., 2023)。近期研究顯示次聲波信號可以在不同的 距離被紀錄,適用以預估化學品爆炸的當量 (Blom et al., 2018; Kim and Rodgers, 2016)。使用地震數據估算爆炸的能量有兩種主要方法 (Pilger et al., 2021),分別為 地震矩法與地震体波量測法。地震矩法通過檢視剪切應變,應用剪切模量與應變能 降 (stress drop)推論地震矩。本方法提供了釋放能量的下限估計,適用於評估近場 損傷狀態轉換成對等的地震數據再進行評估,近場損傷可經由衛星影像,如 InSAR 損傷圖或現場建物倒塌狀態獲取。地震体波量測法則依據地震体波規模 (mb) 量測 值與爆炸的能量之間的相關性,將爆炸當量通過 $m_b = A + B \log(Y)$ 型態之經驗公 式進行評估。其中 Y 是等效 TNT 的地震釋放能量, A 和 B 分別為常數。使用這類 公式尚需針對地區的不同,進行常數校準。本案例為工廠化學品爆炸事件,應歸類 為具有共通特徵的地表意外爆炸案例。本研究首先依據搜集地震觀測資料,採用地 震体波量測法以地震學量測對於本事件進行爆炸釋放能量估算。依據氣象署標準 定位地震方法,量測本爆炸事件的地震規模(ML)為1.95,再依據 Wang et al. (1989) 適用於臺灣地區之規模轉換公式 M_L = (1.268 0.094) m_b - (0.604 0.485) , 推 論本事件規模(m,)為2.01。由於臺灣地區過去無爆炸當量相關分析報告,本研究將參 考國外分析報告之參數對本事件進行評估。依據 Song et al. (2022) 等人的分析經 驗,沿用 Ringdal et al. (1992) 提出的經驗公式, mb =4.45 + 0.75 log(Y)並將推估範 圍延伸至更小規模。估算出本案例 2023 年 9 月 22 日下午六點鐘的爆炸釋放當量, 約等量於 TNT 558 公斤(圖八)。

次聲波接收儀所記錄爆炸能量主要來自大氣傳播路徑,地震站(MASB)紀錄高 信噪比的次聲波訊號(代表大氣路徑之爆炸氣壓變動,如圖三)。次聲波應用於 爆炸當量估計已具悠久歷史。 多種經驗公式曾被建立用於大氣爆炸事件分析 (Stevens et al., 2002)。其中 Whitaker (1995)的經驗公式被認定最適用於當量小於 2kt 的化學和核爆炸(Green and Bowers, 2010)。在本研究中,我們將採用 Whitaker (1995)的關係式, $\log P = 3.37 + 0.68 \log W - 1.36 \log R$,以 MASB 地震站次聲波資 料用於當量估計。其中 P 是以 pascal 為單位的大氣壓力變化的觀測峰值,W 是以 kt 為單位的爆炸當量, R 是以公里為單位的距離。本爆炸事件無相關風速觀測數 據,平流層風速修正僅參考 Song et al. (2022) 之爆炸例。依上述公式,引用 MASB 次聲波觀測資料,估算出本案例的爆炸當量,約等量於 TNT 889 公斤。

(三)、現場後續爆炸事件的辨識與核實:

地表爆炸產生的震波,可以通過不同路徑傳播為地震儀及次聲波觀測儀所記 錄。地震儀接收由地球內部及大氣傳播的訊息,次聲波觀測儀主要接收沿大氣路徑 傳播的訊號,受地震動影響微弱(Koketsu et al., 2002)。由實際觀測紀錄顯示,本爆 炸案例之次聲波紀錄波形資料明顯比地震儀所紀錄簡單。地震儀紀錄在最慢的耦 合聲波信號抵達前,詳細記錄爆炸能量轉換成地球內部傳播之地震波,添加紀錄訊 號的複雜性(圖三)。爆炸現場為一間生產高爾夫球的大型工廠,當日下午六點鐘 的主爆炸後,引發大火持續至次日,期間仍有數次顯著爆炸發生的報導 (https://udn.com/news/story/123754/7460523)。由於後續爆炸規模減弱,檢視多處地 震紀錄皆無明顯訊號可以提供辨識。相對於地震儀,次聲波觀測儀具有較佳的氣壓 變動檢驗能力。本研究透過檢視 MASB 地震站連續八小時次聲波紀錄,共辨識出 多起現場後續再爆炸事件(圖九)。檢出爆炸事件皆顯現出不同於背景訊號的頻率 特徵(如,圖九B,C and D 圖幅)。由於本序列爆炸地點相同,推估本爆炸序列之後 續事件發生時間只需採用單站資料即可完成。比對 MASB 次聲波紀錄爆炸訊號到 時與定位確認之爆炸時間延遲時間約53秒。經過振幅校對後,次聲波紀錄可以準 確還原後續爆炸之時間與規模(爆炸時間序)。比對現場報導與較大爆炸大致吻合 (https://udn.com/news/story/123754

/7460523;https://news.ltn.com.tw/news/society/breakingnews/4439200;https://www.cna .com.tw/news/asoc/202309235004.aspx)。介於爆炸事件之間的次聲波紀錄顯現有別 於爆炸音頻的訊號 ,如圖九標示與說明,是否為現場的猛烈燃燒,如圖一(a),產 生的訊號仍待確認。

肆、討論

本研究地震觀測資料顯示屏東高爾夫球製造工廠爆炸的瞬間,大氣在地表膨 脹產生巨大的空氣衝擊波向外傳播,爆炸的部分能量衝擊地面轉換成地震波於地 層中傳播。這些震波信號連同大氣路徑傳播的壓力波在地震站先後為地震觀測儀 器所紀錄,如圖三,證實地震資料對於大氣爆炸事件具有良好解析能力,可用於定 位震源及提供爆炸過程訊息。本研究分析顯示,以目前臺灣地區地震站分佈,欲以 地震波分析地表爆炸事件,應已足夠,如圖七。唯爆炸能量因同時轉換成多種地震 波相,造成震波能量分散、初動波相模糊,不適於長距離觀測。針對上述特點,本 研究建議採用近源地震紀錄以反向投射法疊加震波能量取代走時摘讀進行定位。 本研究目前分析只針對地震圖之聲波訊號,未來欲提升精度,尚可加入疊加地震體 波訊號進行共同定位或引進近期快速發展的人工智慧機械學習法(Sun et al., 2024) 定位震源的改進方案。

本研究針對爆炸源三項參數進行分析,相對於爆炸地點與時間的明確性,爆 炸當量預估差異大。爆炸工廠內據聞存放約三公頓 TNT 炸藥當量的易燃化學品, 然而在本爆炸事件的官方調查報告,檢方依據可燃性粉體燃燒特性分析爆炸現象, 援引近似於地震矩估算法,根據現場磚牆破壞狀況,推估爆炸相當於154公斤TNT 炸藥當量(https://www.youtube.com/watch?v=BgloxnWOAAk)。此預估當量相當程 度度低於本研究以地震体波量測法所推估的558公斤TNT炸藥當量及採用次聲波 振幅經驗公式的估算值,約等量於TNT 889公斤炸藥當量。爆炸準確當量及三種 方法推論的差異值得進一步深究。

以傳統地震學方法分析地表爆炸事件,因炸波訊號缺乏明顯初動到時,不易 於地震網進行自動監測。反之,爆炸事件所產生的高頻暫態氣壓變化,能以次聲波 形式傳播,次聲波紀錄對大氣爆炸事件具有高鑑別率,合適於辨認爆炸事件,提供 爆炸資訊。本次爆炸事件所觀測的近距離次聲波(MASB站),其波形簡潔、到時明 確易於辨認與分析即為具體實例。將來臺灣地震網宜強化次聲波觀測以獲取更廣 泛科學訊息,提供地震學研究與大氣監測應用。但是次聲波於大氣長距離傳播,受 大氣聲速分佈差異及眾多環境因素影響,具有複雜的傳播路徑與波形(Hedlin et al., 2012),深入分析將增加挑戰性。唯近期有多項研究提出以數值模擬方法分析次聲波 的波傳路徑與地震圖特性,深度解析次聲波研究地表爆炸事件,雖然研究難度提高, 可預期未來運用數值模擬次聲波訊號,對提升分析精度進具有潛力,值得關注。

回顧我國尚無法定之權責單位代表政府對於重大爆炸事件進行監測與回應。 目前事件發生後均由地方消防單位做反應及回應大眾,唯地方消防單位通常無具 體的常規監測系統,因此對於整個事件的資訊掌握常顯不足(紀錄及分析都缺乏具 體)。政府機構具有監測潛力的單位應為氣象署,其佈署地震站與氣象站分佈全國 各地,對於災害監測與速報具豐富經驗。氣象觀測對於空中爆炸事件之大氣壓力變 化具有低度感知能力,唯氣象觀測目前只採用低取樣率記錄大氣壓力變化,對於瞬 間大氣膨脹的爆炸事件並無實質解析能力。為提升對於爆炸事件的快速反應,當務 之急應針對突發爆炸事件擬定可行偵測方式與速報機制。依據本研究的分析經驗, 本文最後將針對臺灣地區爆炸事件的自動偵測流程提出具體可行建議。

由於地震儀所紀錄地動紀錄不易於辨認爆炸事件,偵測及確認重大爆炸事件 應藉由次聲波資料完成。為了降低誤判,需經由多站驗證,比對不同測站共同監測 所獲得的次聲波訊號特性,確認重大爆炸事件發生。本研究建議宜適當加密現有地 震網的次聲波觀測數目。確認爆炸事件後,只需將次聲波最早偵測到炸波的地震站 位置視為初估爆炸源位置,搜索 TSMIP 地震網輔以其他地震網資料,選取預設震 央距之近震源測站波形資料(為減少資料量,提高處理效率),配合預設帶寬的濾 波處理後,不需再篩選資料及辨認震波到時,以所有選取的測站資料逕行 BP 收尋 定位,流程可自動化,即時完成爆炸事件定位,提供速報及災害評估應用。氣象署 將來若能全面提高氣象觀測站氣壓計的取樣率,感知大氣環境暫態變動,將可援引 地震學分析方法,全面監測大氣變動,包括火流星觀測、雷鳴、多樣性化學品爆炸 與不明音爆等多項自然現象或人為事件,具體貢獻於自然災害與國安事件的快速 反應。

伍、結論

本研究嘗試以地震網資料獨立驗證 2023 年 9 月 22 日屏東工廠化學品爆炸事件發生的時間、地點及當量。本研究利用 MASB 地震站的次聲波資料核實後續的

爆炸事件,具體還原本爆炸事件序列的發生時間序。經過測試評估,本研究提出地 震網升級建議,未來透過增加少量次聲波測站及優化地震網的處理流程,臺灣地震 網或可對重大爆炸事件經由地震學的監測進行精確定位、速報及預為災害性爆炸 事件的爭議調查提供佐證,並具體貢獻於解決災害爆炸事件尚無公部門進行監測、 收集科學數據與快速回應大眾的需求。

陸、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-113-E-02)。

柒、參考文獻

- Ammon, C. J., T. Lay, D. W. Simpson, 2010, Great Earthquakes and Global Seismic Networks. Seismological Research Letters, 81 (6): 965–971. doi: <u>https://doi.org/10.1785/gssrl.81.6.965</u>
- Barker, B., Clark M., Davis P., Fisk M., Hedlin M., Israelsson H., Khalturin V., Kim W.-Y., McLaughlin K., Meade C., Murphy J., North, R., Orcutt J., Powell C., Richards P., Stead R., Stevens J., Vernon F., & Wallace T. (1998). Monitoring Nuclear Tests, Science, 281, 1967-1968. <u>https://doi.org/10.1126/science.281.5385.1967</u>
- Blom, P. S., Dannemann, F. K., and Marcillo, O. E. (2018). "Bayesian char- acterization of explosive sources using infrasonic signals," Geophys. J. Int. 215(1), 240–251.
- Brachet, N., Brown, D., Le Bras, R., Cansi, Y., Mialle, P., and Coyne, J. (2009). "Monitoring the Earth's atmosphere with the global IMS infrasound network," in Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies, edited by A. Le Pichon, E. Blanc, and A. Hauchecorne (Springer Netherlands, Dordrecht), pp. 77–118.
- Ghalib, H. A. A., G. Kraft, A. Alchalbi, and R. Wagner (2021). Seismic Location of the 4 August 2020 Beirut Port Chemical Explosion, Seismol. Res. Lett. 93, 33–44, doi: 10.1785/0220210123.
- Golden, P., P. Negraru, J. Howard, 2012, Infrasound Studies for Yield Estimation of HE Explosions. Technical Report, Southern Methodist University, Dallas.
- Green, D. N., and Bowers, D. 2010, Estimating the detection capability of the International Monitoring System infrasound network, J. Geophys. Res.: Atmos. 115, D18116, https://doi.org/10.1029/2010JD014017.
- Hamama, Masa-yuki Yamamoto, Mohamed N. ElGabry, Noha Islam Ismail Medhat, Hany S. Elbehiri, Adel Sami Othman, Mona Abdelazim, Ahmed Lethy, Sherif M. El-hady, Hesham Hussein; Investigation of near-surface chemical explosions effects using seismo-acoustic and synthetic aperture radar analyses. J. Acoust. Soc. *Am.* 1 March 2022; 151 (3): 1575 -1592. https://doi.org/10.1121/10.0009406

- Hedlin, M. A. H., K. T. Walker, D. P. Drob and C. D. de Groot-Hedlin, 2012, Infrasound: Connecting the Solid Earth, Oceans, and Atmosphere, Annual Review of Earth and Plane-tary Sciences, Vol. 40, 2012, pp. 327-254. http://dx.doi.org/10.1146/annurevearth-042711-105508
- Holzer, T. L., Fletcher, J. B., Fuis, G. S., <u>Ryberg, T.</u>, Brocher, T. M., Dietel, C. M. (1996): Seismograms Offer Insight Into Oklahoma City Bombing. - Eos, Transactions American Geophysical Union, 77, 41, 393, 398-399. https://doi.org/10.1029/96EO00269
- Huang, B. S., 1996, A Fortran 77 Program to compute seismic rays travelling inside a radially inhomogeneous earth, Computers & Geosciences, 22, 287-303.
- Huang B. S., C. S. Ku, C. J. Lin, Y. J. Hsu, T. C. Liu, J. Y. Liu, Y. L. E. Chen, D. Y. Chen, T. S. Huang and J. S. Jiang, 2024, Significant Earth's responses of the 2022 Tonga eruption across Taiwan from multiple sensor observations. Front. Earth Sci. 12:1285173, doi: 10.3389/feart.2024.1285173.
- Ishihara, Y., S. Tsukada, S. Sakai, Y. Hiramatsu, and M. Furumoto (2003). The 1998 Miyako fireball's trajectory determined from shock wave records of a dense seismic array, Earth, Planets and Space 55, e9–e12.
- 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.
- Kanamori, H., J. Mori, D. L. Anderson, and T. Heaton (1991), Seismic excitation by the space shuttle Columbia, Nature, 349, 781–782.
- Kao, H., P. R. Jian, K. F. Ma, B. S. Huang and C. C. Liu, 1998, Moment-tensor inversion for offshore earthquakes east of Taiwan and their implications to regional collision, Geophys. Res. Lett., 25, 3619-3622.
- Kim, K., and Rodgers, A. (2016). "Waveform inversion of acoustic waves for explosion yield estimation," Geophys. Res. Lett. 43(13), 6883–6890, https://doi.org/10.1002/2016GL069624.
- Kim, K., A. R. Rodgers, M. A. Garces, S. C. Myers, 2021, Empirical Acoustic Source Model for Chemical Explosions in Air. Bulletin of the Seismological Society of America; 111 (5): 2862–2880. doi: <u>https://doi.org/10.1785/0120210030</u>
- Kim, K., M. E. Pasyanos, 2022, Yield estimation of the August 2020 Beirut explosion by using physics-based propagation simulations of regional infrasound. Geophys. Res. Lett., 49, e2022GL101118. https://doi.org/10.1029/2022GL101118
- Kim, K., and J. M. Lees (2011), Finite-difference time-domain modeling of transient infrasonic wavefields excited by volcanic explosions, Geophys. Res. Lett., 38, L06804, doi:10.1029/2010GL046615.

- Koketsu, K., M. Takahashi, S. Sakai, 2002. Accidental Explosions Observed by Seismometers. *Seismological Research Letters*, 73 (2): 136–143. doi: <u>https://doi.org/10.1785/gssrl.73.2.136</u>
- Koper K. D., T. C. Wallace, D. Hollnack, 1990, Seismic Analysis of the 7 August 1998 Truck-bomb Blast at the American Embassy in Nairobi, Kenya. *Seismological Research Letters*; 70 (5): 512–521. doi: <u>https://doi.org/10.1785/gssrl.70.5.512</u>
- Langston, C. A. (2004). Seismic ground motions from a bolide shock wave, J. Geophys. Res., 109, B12309, doi:10.1029/2004JB003167.
- Lin, T. L. and C. A. Langstone (2007). Infrasound from Thunder: A Natural Seismic Source, Geophys. Res. Lett., 34: L14304
- McMechan, G. A., 1982, Determination of source parameters by wavefield extrapolation: Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 71, 613- 628.
- Nemer, T.S. (2021). The Beirut Port Explosion: A Geoscience Perspective. Seismological Society of America. 92, 2093–2098. DOI: 10.1785/ 0220210051
- Pilger, C., Gaebler, P., Hupe, P., Kalia, A. C., Schneider, F. M., Steinberg, A., et al. (2021). Yield estimation of the 2020 Beirut explosion using open access waveform and remote sensing data. Scientific Reports, 11(1), 14144. https://doi.org/10.1038/s41598-021-93690-y
- Qamar, A. (1995). Space shuttle and meteroid—Tracking supersonic objects in the atmosphere with seismographs, Seismol. Res. Lett., **66**(5), 6-12. <u>https://doi.org/10.1785/gssrl.66.5.6</u>
- Richards P. G., Z. L., Wu, Seismic monitoring of nuclear explosions, Encyclopedia of Solid Earth Geophysics. Dordrecht: Springer Netherlands, 2011: 1144-1156. ISBN : 978-90-481-8701-0
- Ringdal, F., P. D. Marshall, R. W. Alewine, 1992, Seismic yield determination of Soviet underground nuclear explosions at the Shagan River test site, Geophys. J. Int., 109, 65–77.
- Setn_News, 2023, https://www.setn.com/News.aspx?NewsID=1421186.
- Song, Y., L. F. Zhao, X. B. Xie, X. Ma, G. Du, X. Tian, Z. X. Yao, 2022, Seismological observations on the 2019 March 21 accidental explosion at Xiangshui chemical plant in Jiangsu, China, Geophys. J. Int., Volume 228, Issue 1, 538– 550, https://doi.org/10.1093/gji/ggab356
- Sun, WF., Pan, SY., Huang, CM. et al. Deep learning-based earthquake catalog reveals the seismogenic structures of the 2022 M_W 6.9 Chihshang earthquake sequence. Terr Atmos Ocean Sci 35, 5 (2024). <u>https://doi.org/10.1007/s44195-024-00063-9</u>
- Takazawa, K., S., K. Kim, and M. Garcés (2023). Chemical Blast Standard (1 kg), Seismol. Res. Lett. XX, 1–11, doi: 10.1785/0220230071.

Whitaker, R. W., 1995, Infrasonic Monitoring, Proceedings of the 17th annual Seismic Research Symposium in Scottsdale, AZ, September 12-155, 1995, 997-1000. available at https://www.osti.gov/biblio/760050 (Last viewed 11/11/2020).



(a)



(b)

圖一、(a)、工廠爆炸引發大火 (攝影:劉學聖/聯合報)。(b)、爆炸後殘留災害現 場照 (攝影:陳焯煇/端傳媒)。



圖二、屏東爆炸震源位置與臺灣地震網測站分佈圖。紫色星形符號為標定爆炸工廠 位置,紫色球形符號為 CWASN 地震紀錄定位之爆炸點。紅色與藍色小球 形符號皆為 TSMIP 測站位置,其中藍色符號為本研究選用於定位分析的測 站。天藍色符號為 CWASN 選用測站,灰色符號代表 NCREE 與 TCU 地震 網的選用測站。黃色球形符號為 BATS 測站,其中測站 MASB 另安裝次聲 波接收儀,紀錄資料為本研究選用分析。



圖三、測站 MASB 所收錄發生於 2023 年 9 月 22 日當日下午六點鐘過後,屏東爆 炸事故之主爆炸事件的震波訊號。地震圖排序由上至下分別為次聲波、三分 量寬頻速度與三分量加速度地震圖。各紀錄的振幅值代表紀錄資料的採樣 數值計數(digital counts)。紀錄的共同起始時間為 2023/09/22 09:59:10 UTC。



圖四、中央氣象署地震網紀錄屏東爆炸事故的多測站之速度地動資料。選取的地震 資料依地震網定位震央距,繪製成距離-時間剖面圖。右側字碼為紀錄資料 測站名。紀錄的零時刻設定為2023/09/2210:00:10。圖中紅色與藍色線分別 代表 P 波(7.5 km/sec)與聲波(0.34km/sec)到時。



圖五、TSMIP 測震網最接近爆炸源的測站(測站名:D067,距離 3.2 公里)所紀錄 的加速度地動資料。上與下的三分量地震圖分別為經過 5hz 高頻與低頻的 濾波紀錄。地震圖垂直振幅值分別表示為資料採樣數值計數(digital counts)。 紀錄的共同起始時間為 2023/09/22 10:00:00 UTC。



圖六、本研究收集用於爆炸源重定位的所有可用地震資料(測站分佈如圖二所示), 所選取的地震資料依爆炸源震央距繪製成距離-時間剖面圖。圖(a)剖面紀錄 已通過 lhz 低頻的濾波,圖(b)剖面紀錄經 1 至 5hz 帶通濾波。圖中紅色、 綠色與藍色線分別標示 P 波(2.76 km/sec),S 波(1.04 km/sec)與聲波(0.34 km/sec)走時。



圖七、本研究選取圖六(b)資料,經過反向投射震波疊加能量的定位成果。圖中紅色 十字符號為反向投射法所定位的爆炸源位置,藍色小圈符號為爆炸工廠確 認座標。顯示定位準確度的疊加能量極值分佈如圖中所示,最終定位點在爆 炸工廠東北方約一公里位置。



圖八、地震体波規模對應爆炸當量關係圖。本圖的繪製沿用 Ringdal et al. (1992) 提 出的經驗公式並將推估範圍延伸至更小規模。本研究推估屏東爆炸例(標註 為 TW_2024/09/22)的當量約等量於 TNT 558 公斤。圖中 CE_2011/01/26 與 XE_2014/10/21 分別為 Song et al. (2022)所列中國大陸爆炸例的當量估算, BL_2020/08/04 為 2020 年黎巴嫩首都貝魯特爆炸例 (Hamama et al., 2022) 的當量估算。



圖九、測站 MASB 紀錄屏東爆炸案連續八小時的次聲波訊號(上圖)及其經確認 為獨立爆炸事件的短時段擷取波形紀錄(五分鐘,時間分別始於 10:00, 10:23, 14:14 UTC)與其時頻圖(下列三圖)。

二、分析臺灣基隆外海地震特徵及其與火山活動的可能關聯

摘要

依據新近設置於北臺灣之高密度寬頻與強地動連續觀測資料,本研究提出以 陣列分析方法進行地震重定位、求解震源機制、檢驗地震活動度及推論其與火山活 動的可能關聯。分析選定近期發生於基隆近海,鄰近海底火山之一起中等規模地震, 輔以另起規模、震深相當的大屯山地區地震,對比兩地區地震孕育環境、地震活動 度差異。分析結果確認兩起地震皆為淺震並證實中央氣象署地震網在兩地區對中 等規模地震定位的準確性。震源機制顯示兩起地震皆為走向滑移斷層,基隆外海地 震鄰近一座海底火山,其周邊分佈雁行排列地熱噴氣孔,分佈走向與發震構造之東 北-西南向斷層一致,大屯山地震顯示張應力方向近似山腳斷層伸張方向。檢視地 震活動度,證實臺灣北部海域確實低於大屯山地區。本研究綜整推論此基隆外海地 震機制與海底火山活動特徵具有關聯性,建議加強監測與研究分析。因應可能之海 底火山噴發及其引致之地震、海嘯等防災議題,宜妥善規劃,及早綢繆。另針對近 岸基隆之海底熱液活動所蘊藏之地熱能源,應予重視並對開發之可行性與量能進 行評估。

壹、前言

臺灣坐落於歐亞與菲律賓海板塊的碰撞與隱沒邊界,板塊聚合作用使得地殼 經歷多樣態變形。自中期更新世(約 100 萬年前)以來,北部臺灣地區經歷了由 造山擠壓轉為後造山拉張的作用,北臺灣的構造環境從碰撞造山轉為拉張沉陷。這 轉變導致原本的逆斷層反轉為正斷層的作用,同時拉張作用導致軟流圈地函上湧, 伴隨著火山活動與張裂盆地的形成(陳文山,2016)。根據地球化學分析,大屯火 山群、基隆火山群與北方三島,都是這個時期形成的,大地構造都屬張裂環境 (Chung et al., 2001; Wang et al., 1999, 2002, 2004)。此外, 東北海域也發育許多 與拉張有關的半地塹盆地(蕭力元等,1998)。目前,拉張現象持續,整個臺灣北 部地殼仍處張裂環境,地震活動度相對低於位處碰撞板塊擠壓應力環境的其他地 區。本地區連結張裂帶構造及火山活動的明顯地震帶只集中於大屯山地區 (圖一), 其分佈通常淺於 10 公里,大多數地震規模小於 M_L 1.0,地震成因可能與熱液作 用產生的氣爆有關 (Lin et al., 2016; Huang et al., 2021), 偶有規模大於 3 的地震發 生於火山地震帶內。大屯山地區的火山地震活動已為眾多研究關注,探討其地震型 熊及孕震機制等(Konstantinou et al, 2009; Pu et al., 2017)。歷年地科界僅有少量臺 灣北部海域的地質調查(Song et al., 1997),對於海底火山之存在鮮少為人所知,近 期因北部核電廠安全評估的嚴格需求,得以對臺灣北部鄰近海域的斷層活動、地質 海嘯紀錄及火山活動徵兆進行詳細調查與分析(經濟部, 2013)。臺灣北部海域海底 火山的分佈與基隆海底火山具體樣貌得以確認。經過調查發現基隆海底火山附近 的多處海床具熱液噴氣構造(Tsai et al., 2017)及多重活躍火山的特性,顯示基隆海 底火山仍具有活動性。

臺灣北部鄰近海域沒有明顯地震活動,臺灣地震所網捕獲的地震事件分佈稀 疏(圖一)。過往,源於資料缺乏,對於本地區大地應力特徵與發震構造的了解相對 不足,近年,則因於防災與地震研究的需求,已在臺灣北部設置高密度寬頻與強地 動地震網,提供高精度地震資料,支援多樣化地震分析。新資料對於了解地殼區域 應力、發震構造及區域火山活動具有重要價值。中央氣象署對北部海域長期地震監 測顯示其地震活動度相較於大屯火山地區低許多,如圖一。然而基隆海底火山位於 北方海域,中央氣象署陸域地震站缺乏近距離監測功能,是否致使小規模地震缺漏 於地震目錄。近期安裝的高密度地震觀測資料或可提供檢驗。本研究探索目標選定 近期發生於基隆海域,擁有高密度地震觀測資料的一起中等規模地震,對其進行地 震重定位與震源機制求解。輔以分析另起規模、震深相當的大屯山地區地震(圖一), 用以對比兩地震孕育環境、地震活動度差異。本研究最終檢視現今基隆外海地震活 動特性及其與海底火山的關聯性並評估現有地震觀測量能在偵測海底火山活動的 能力。

貳、觀測資料

臺灣地區現今部署有多種類型的地震監測網,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。其中自 2018 年起加入觀測的 Formosa Array 及在同年完 成大量的自由場強震站連續紀錄設定及即時傳輸之 TSMIP,對於臺灣地震觀測的 貢獻最多。臺灣北部地區受益於這些資料開放使用的地震站(圖二)所收集的遠震、 近震資料在了解地球深部構造、區域地體構造、地震活動及評估基礎設施的地震危 害方面發揮了至關重要的作用。本研究對這些整合後具備陣列功能的北臺灣地震 站將統稱為臺灣北部整合地震儀陣列或簡稱為北部地震儀陣列,用於區別專職地 震監測作業的中央氣象署地震網(CWASN)。

在本研究中,我們將重點關注近期發生在臺灣北部地區,規模及深度相近之 兩個中等規模地震。將收集的陣列資料以新方法進行地震重定位、求解震源機制、 檢驗地震活動特性並討論與火山活動的可能關聯。本研究選取地震的資訊及已收 集的資料分述如下:

(一)、2022 年基隆近海地震:

基隆近海地區近期曾於 2022 年 10 月 25 日發生一起中等規模地震(圖一), CWASN 以它的地震網觀測資料,採用標準定位處理步驟定位本地震,其出版地震 目錄刊載本地震資訊為發震時間(2022/10/25 05:47:17 UTC),震央(北緯 25.2 度, 東經 121.73 度),規模(M_L) 3.2,地震深度約 2.3 公里。查證地震資料庫,由於 地震規模過小,BATS 並未對其震源機制進行分析及 CWASN 未檢出相關餘震。本 地震的發生地點與近期發現的基隆海底火山位置相近(Tsai et al., 2017)。本研究查 閱臺灣北部地區所有地震站(圖二)資料,去除不良紀錄(高雜訊或資料不連續) 最終選取區域內垂直向高感度地震資料,共 121 筆完整波形資料,如圖三,提供震 源重定位使用。 本研究檢視臺灣北部地震站(圖二)記錄此地震資料,顯示紀錄的垂直向具 有明顯 P 波極化差異,地震圖選例如圖四(a)所示。經由人工摘讀、檢視近震源測 站的 P 波極化方向,顯示這些地表極化方向具有明顯系統性分佈,如圖四(b)。本 研究共取得 185 筆(測站) P 波極化方向資料(部分波形斷續資料或失漏共同對時資 料,仍可取得紀錄極化資訊)。有別於 CWASN 稀疏的測站分佈,本研究選用密集 分佈於臺灣北部的地震儀陣列所取得的地表 P 波極化方向分佈,直接提供可視的 樣態用於辨識地震斷層機制。然而,地表 P 波極化方向分佈並不能夠直接對應於 地震初動解圖(first-motion map)。仍需透過將地表觀測的初動方向投影至下半球面 位置,經由其分佈於球面的樣態,方可精確求解斷層面之節面及其他震源參數。

(二)、2020年士林地震:

CWASN 地震監測顯示,大屯山地區的地震活動度比基隆外海地區高許多(圖一)。本研究由 CWASN 地震目錄中篩選出一起發生於 2020 年臺北士林(陽明山地區)的中等規模地震,其規模、震深與 2022 年基隆近海地震相近,將用以進行對比研究。本地震刊載於地震目錄的資訊為發震時間(2020/02/03 00:19:57 UTC), 震央(北緯 25.15 度,東經 121.56 度),規模(M_L) 3.2,深度 5.1 公里。 同樣因 地震規模過小,BATS 未對其震源機制進行分析。相對於 2022 年基隆近海地震, 本地震震央位於島內,地震儀陣列於震央附近具有高密度測站分佈,提供近震資料 分析並為基隆近海地震對比參照。本研究依據前述相同的資料處理程序,獲得本地 震之完整波形資料(圖五 a)及測站 P 波極化方向資料(圖五 b)。依據摘讀的 P 波極 化方向分佈(圖五 b)顯示,本地震斷層應為走滑斷層,錯動的兩個節面分別近似於 東西與南北兩個方向。

參、分析與結果

臺灣北部地區地殼現今位處張裂應力環境,地震活動度低。著眼於全島地震 監測的 CWASN,對於臺灣北部海域海出現的小規模地震的定位能力相對不足,另 BATS 對於地震距規模(Mw)小於 4.0 的地震,不例行提供震源機制分析。因此,除 外具火山活動特徵的大屯山區,地震學界對本地區的大地應力特徵與發震構造的 了解有限。考量北部地區近期已安裝高密度地震站並支援高解析資料,如何改善本 地區的地震定位及震源機制推求應可重新思考。然而,面對此新議題,尚需考量如 何快速分析新增的巨量資料及選取合適方法用以解析本區地震之定位與應力分析, 推論北部地區地體構造及其孕震機制。

本研究嘗試提出新構想,以反向投影法(Back-projection method, BP)定位地震 及以震波極性疊加法推球震源機制,期待未來能持續發展出自動及快速的分析方 法,有效應用於分析北部地區地殼內微地震。本節將以分析近期發生的兩起中等規 模地震為例,說明分析方法與呈現分析結果。相關內容分述如下:

(一)、地震重定位:

BP 法的原理乃透過執行陣列波形紀錄在時間域進行震波能量疊加,成像地震源的空間位置與發震時間(Kiser and Ishii, 2017)。本方法簡化地物勘探常用的逆時移棲法(McMechan, 1982),僅將震波振幅依波傳路徑(計算走時)回推至震源,特點

為不需先行摘讀地震波到時,只需透過搜尋的步驟,重複地震波能量的移棲與疊加 動作,找出震央最佳位置。反向投影法最先為 Ishii et al. (2005)所提出並應用於 2004 年南亞海嘯地震的大型俯衝帶震源破裂過程重建。此外,反向投影法還應用 於逆衝帶的大型地震 (Xu et al., 2009; Huang et al., 2012)、正斷層地震 (D'Amico et al., 2010)及走滑斷層地震 (Walker and Shearer, 2009)的震源重建。Huang et al. (2024)曾結合自動增益法用以分析臺灣 2022年關山地震的短期震後餘震群活動。 反向投影法經過多方驗證,確認合宜應用於各種規模及型態的地震源分析。

本研究震源重定位沿用 Huang et al. (2024)所建構的 BP 處理步驟定位地震。 首先截選 2022 年基隆近海地震震央距 100 公里範圍內之高感度垂直向速度型地震 紀錄,經過剔除高雜訊及紀錄不完整資料進行分析,共選用 121 筆紀錄(圖三)。 反向投射定位地震源,需預先準備近震源之陣列波形資料,透過地震圖震波能量疊 加過程及搜詢能量集中釋放點以確認震源,過程無需摘讀振相到時,有效簡化定位 流程。本研究採用振幅正規化及波形轉化為包絡線等步驟預處理地震剖面圖(圖三) 內的個別地震圖,並將震源設定於模型內部,採用 P 波為介質傳播速度進行反向 投射定位,所得震源成像如圖六所示。依據 BP 反向投射定位,推估發震時間為 2022/10/25 05:47:20 (UTC),震源位置(緯度: 25.21°,經度: 121.75°,地震深度為 1.0 公里)。重定位震源約於 CWASN 震央東方約一公里,震深變淺,基本上兩者 定位無大差異。

(二)、震源機制解析:

考量臺灣北部地區具有空間密集的 P 波極性資料,如圖四,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,將以先前完成摘讀的 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:

$$S(\emptyset, \delta, \lambda) = \sum_{k=1}^{n} P_k(\emptyset, \delta, \lambda, \emptyset_s, i_{\xi}) * UD_k(\emptyset_s, i_{\xi})$$
(1)

其中

$$\begin{split} P_{k}(\emptyset, \delta, \lambda, \emptyset_{s}, i_{\xi}) &= \cos\lambda \sin\delta \sin^{2}i_{\xi}\sin2(\emptyset - \emptyset_{s}) \\ &-\cos\lambda \cos\delta \sin2i_{\xi}\cos(\emptyset - \emptyset_{s}) \\ &+\sin\lambda \sin2\delta(\cos^{2}i_{\xi} - \sin^{2}i_{\xi}\sin^{2}(\emptyset - \emptyset_{s}) \\ &+\sin\lambda \cos2\delta \sin2i_{\xi}\sin(\emptyset - \emptyset_{s}) \end{split}$$

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, $Ø_s$ 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 Ø,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。 $P_k(\emptyset, \delta, \lambda)$ 代表方位角、傾角 及滑移角分別為 λ , Ø 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 Ø、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。本研究依據上述震波極性疊加概念,採用網格搜尋方法進行震源機制解算, 經過與 Snoke (2003)之震源機制解算程式集(FOCMEC)內含案例的試算比對,所得 結果一致。

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,如圖四(b),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 ($Ø_s \approx i_{\xi}$)。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 (圖七 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,如圖七 b 所示。由圖四(b)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。

本研究以同樣的處理方法應用於分析 2020 年士林地震的地震重定位與震源 機制推求。2020 年士林地震的震源區為密集的地震站所包覆,地震剖面顯示震央 距近乎由震源上方開始分佈,P 波極化資料顯示觀測點環繞震源位置,極化分佈形 成四格極性群聚(圖五)。經過本研究重定位及震源機制分析,結果顯示,重定位 震源結果重合於 CWASN 震央位置,震深為2公里,如圖八,所示。震源機制分 析結果顯示 2020 年士林地震為一近似東西或南北向之垂直滑移錯動,如圖九 a。 對比採用 CWASN 資料處理結果,如圖九 b 所示。

(三)、微地震活動檢驗:

自動增益控制(Automatic Gain Control, AGC)是地球物理探勘的信號處理 中常用的增益恢復方法之一。本研究沿用 AGC 的概念來處理具多重地震事件的地 震圖,增強弱震信號的強度,以確定捕捉小振幅地震及進一步執行重定位。AGC 是 一種限幅輸出型態的調控,利用線性放大和壓縮的組合來調整原始信號的輸出。當 輸入一個弱信號時,地震信號會被線性放大以確保輸出信號的強度。當輸入信號達 到一定強度時,地震信號將被進行壓縮,導致輸出幅度減小。在本研究中,我們引 用均方根振幅(root-mean square amplitude)自動增益控制(也稱為 rms 振幅 AGC) 來增強信號。這種方法是反射震測處理資料最常用的增益控制類型之一(Gadallah and Fisher, 2005; Gadallah and Fisher, 2009)。在地震學領域,此信號增益功能近 期被應用於顯現隱藏於大地震尾波及其後短時段的小振幅餘震分析(Huang et al., 2024)。本研究將依循 Huang et al. (2024)增益地震信號的處理方法,強化小震偵 測,推廣應用於評估臺灣北部海域地震的活動度。

本研究首以 2020 年士林地震為例,選用臺灣北部地區地震儀陣列紀錄進行信號增益處理。2020 年士林地震的規模、震深與 2022 年基隆近海地震相近,觀測的 地震站均勻且密集的分佈於震央區(圖二),具偵測震源區微地震能力。本研究收 集此地震的完備資料,將應用於對照觀測條件相對不如的 2022 年基隆近海地震(缺近震源觀測),進行地震活動性比對評估。

檢視士林地震前後五分鐘內鄰近震央的多個地震記錄,所繪製的地震距離-時 間剖面 (圖十 a) 沒有顯示出明顯的餘震信號。然而,應用本研究採用自動增益控 制(AGC)方法在短時段增強地震圖信號,獲得的結果,如圖十b,所示。對比兩 個圖像,很明顯,在士林地震發震後的五分鐘時間內出現了多個小振幅、短持續時 間的餘震。這些小震的走時趨勢 (Moveout) 與士林地震相同,代表發生位置相近。 經確認,這些小震皆沒有為 CWASN 所辨識及刊登於地震目錄(中央氣象局的地 震目錄在這段時間窗只列出一個定位的餘震,如圖十b所示)。通過相同的處理程 序,2022 年基隆近海地震的分析對照結果如圖十 c 與 d 所示。檢視原始地震圖及 自動增益控制圖像,在震後五分鐘內並無發現如 2020 年士林地震顯現的微地震。 經過對比於 2020 年的士林地震,此基隆近海地震缺乏近震源測站紀錄(最鄰近測 站震央距約為5公里)。本研究特別將檢驗時段延展至震後三十分鐘,目標為檢視 較長時段內是否出現較大餘震,這餘震可為震央距超過5公里以外的測站所紀錄。 圖十一分別展示挑選兩地震資料經過自動增益控制處理後的地震距離-時間剖面。 仔細的檢驗 2022 年基隆近海地震的紀錄 (圖十一 a),仍然未發現有顯著多測站 共同檢出的地震觸發訊號。代表這些近期安裝地震站,確實未具體檢出此發生於基 隆近海,規模(M_L)3.2 地震之明確餘震。對比於 2020 年士林地震的餘震的觀測, 兩地震規模、震深相似,用於觀測的地震站多數重疊,使用相同的分析流程與步驟, 對比分析結果如,圖十一b展示。對比兩地震,士林地震仍有相當數量的微小地震 檢出,顯示大屯火山地區的微震活動確實比基隆近海地區活躍。檢視士林地震的增 益控制圖像(圖十b)震央距小於5公里以內的測站,皆具有極高訊噪比,顯現震 央距小於5公里以內的測站對於偵測微小地震具重要貢獻。

肆、討論

依據中央氣象署地震網對北部海域長期地震監測顯示其地震活動度相較於大 屯火山地區低許多,如圖一。然而基隆海底火山位於北方海域,是否因中央氣象署 陸域地震站包覆性不足,致使發生的地震定位精度降低並缺漏於地震目錄。本項議 題通過本研究分析兩起中等規模地震,比較中央氣象署地震網與北部陣列定位結 果,基本上兩者定位無大差異,肯定中央氣象署地震網在兩地區對中等規模地震定 位的準確性。唯通過近震源的觀察,本研究發現微地震的可視性隨著震央距增加振 幅快速減弱(圖十),CWASN 缺乏近震源測站將難以檢測出兩地區振幅小、短持 續時間的微地震。本研究的探查凸顯臺灣北部新設立的高密度地震站對於偵測微 地震的功能及 BP 與 AGC 方法在檢測近距離小震的應用潛力。

相對於應用 CWASN 震波極化資料解析地震源機制,北部陣列高密度地震站 之震波極化資料用於中等規模地震源分析將比 CWASN 更具優勢(圖四 b)。通過本 研究採用的疊加震波極值方法(公式一)確認震源參數,獲得約束完整的地震斷層 面解,如圖七與圖九。分析解果顯示兩起地震震源機制皆為走向滑移斷層,唯斷層 方位稍有差異。大屯山地區地震的震源機制解的張應力方向近似山腳斷層的正斷 層伸張方向(Shyu et al., 2020)。近期基隆北方海域地球物理調查顯示,基隆近岸 海底火山呈現高磁力異常(許樹坤, 2016), 鄰近海床具多處熱液噴氣構造及多重活 躍火山的特性 (Tsai et al., 2017),顯示基隆海域仍具有海底火山活動特性。本研究 定位之 2022 年基隆近海地震震央與近期海洋地質勘探所描繪之基隆外海海底火山 位置相近,海床探勘結果顯示本地區雖然沒有具體海底斷層出露,唯鄰近海底火山, 發現諸多具有雁行排列特徵的地熱噴氣孔與噴氣柱,排列方位與本研究分析基隆 近海地震所確認發震構造之東北-西南向斷層一致(圖十二)。表明本地地震活動 及其顯現斷層特徵與海底熱液活動具關聯性。

基於地質構造和板塊運動的觀察,基隆北方海域位於菲律賓海板塊和歐亞板 塊的交界處,不在主要的板塊碰撞帶,地質活動相對較少。反觀大屯火山地區位於 臺北盆地北緣,屬於火山活動區。大屯火山群位於沖繩海槽的延伸帶上,這是菲律 賓海板塊向北隱沒於歐亞板塊之下的一部分,因此地質活動更為顯著(陳文山, 2016)。上述推論與本研究分析顯示基隆北方海域的地震活動度比大屯火山地區為 低的觀察一致。然而 2022 年發生的基隆近海地震與 Tsai et al. (2017)報導的本 地區長期的微震活動,皆表明臺灣北部外海海底火山仍持續活動。由於基隆海底火 山非常靠近陸地,未來如發生大量噴發並引發海嘯對於臺灣北部核電廠造成的危 害風險將不亞於大屯火山並嚴重威脅北部海岸地區的居民生命財產安全。為求達 成速報與減災目標,優化北部陣列的地震活動監測功能及增設近震源海底地震儀 皆為可行辦法。

再生能源的開發近年廣受重視,地熱能被公認為純淨綠能並可提供基載發電, 對於臺灣電網穩定供電具重要價值。基隆外海之海底熱液活動區富含地熱資源,可 持續供給陸域乾淨能源,唯海底火山之溢氣路徑、活動特性及發震機制及未來開採 灌注是否引發微地震群聚等皆宜先行探究,另其儲集量與開發之可行性亦應予關 注及評估,對於此地熱田是否存在一個仍然活耀的岩漿庫,可以提供地熱永續開發 亦為眾所關心,直得深究。

伍、結論

本研究依據新近設置於北臺灣之高密度寬頻與強地動連續觀測資料,對臺灣 基隆外海一個中等規模淺層地震進行詳細檢驗,結果顯示此基隆外海地震之震源 機制為走向滑移斷層,受控於近似南北向區域張應力並顯示東北-西南向發震斷層 走向。鄰近震央位置,近期的地物探查發現一座海底火山,其周邊分佈雁行排列的 地熱噴氣孔,走向與發震斷層方位一致。本研究綜整推論基隆外海地震活動與海底 火山活動具關聯性,建議深入分析並加強監測。因應可能之海底火山噴發及其引致 之地震、海嘯等防災議題宜妥善規劃與宣導防範。另針對近岸基隆之海底熱液活動 所蘊藏之地熱能源應予重視並對開發之可行性與儲量進行評估。

陸、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-113-E-02)、中央研究 院(編號 AS-TP-110-M02)以及臺灣國家科學技術委員會資助(編號 NSTC 111-2116-M-001-011; NSTC 112-2116-M-001-012)。

柒、參考文獻

Aki, K. and P. G. Richards, 2002, *Quantitative Seismology*. University Science Books.

- Chung, S.L., K.L. Wang, A. J. Crawford, V.S. Kamenetsky, C. H. Chen, C. Y. Lan and C. H. Chen, 2001, High-Mg potassic rocks from Taiwan: implications for the genesis of orogenic potassic lavas. *Lithos*, 59, 4, 153–170.
- D'Amico, S., Koper, K.D., Herrmann, R.B., Akinci, A. & Malagnini, L., 2010, Imaging the rupture of the M_W 6.3 April 6, 2009. L'Aquila, Italy earthquake using backprojection of teleseismic P-waves, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L03301, doi:10.1029/2009GL042156.
- Gadallah, M and R. Fisher, 2005, Applied Seismology: A Comprehensive Guide to Seismic Theory and Application, PennWell, ISBN: 1593700229 / 9781593700225, 600 pages.
- Gadallah, M and R. Fisher, 2009, Exploration Geophysics, Springer, ISBN: 3540851593 Pages: 274.
- Huang, B. S., J. H. Chen, Q. Y. Liu, Y. G. Chen, X. W. Xu, C. Y. Wang, S. J. Lee and Z. X. Yao, 2012, Estimation of rupture processes of the 2008 Wenchuan Earthquake from joint analyses of two regional seismic arrays, Tectonophysics, 578, 87-97, doi: 10.1016/j.tecto.2011.12.026.
- Huang, B. S., C. S. Ku, C. J. Lin, S. J. Lee, Y. L. Chen, J. S. Jiang and W. F. Sun, 2024, The first 30 minutes hidden aftershocks of the 2022 Guanshan, Taiwan earthquake and its seismological implications, Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences, 35:1 https://doi.org/10.1007/s44195-023-00059-x
- Huang, H.H., E. S. Wu, C. H. Lin, J.Y.T. Ko, M.H. Shih and I. Koulakov, 2021, Unveiling Tatun volcanic plumbing structure induced by post-collisional extension of Taiwan mountain belt. Scientific Reposrts, 11, 5286.
- 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.
- 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.
- Kiser, E. and M. Ishii, 2017, Back-projection imaging of earthquakes, *Ann. Rev. Earth planet. Sci.*, 45, 271–299. <u>10.1146/annurev-earth-063016-015801</u>
- Konstantinou, K., C. H. Lin, W. T. Liang and Y. C. Chan, 2009. Seismogenic stress field beneath the Tatun Volcano Group, northern Taiwan. J. Volcanol. Geoth. Res. 187, 261–271.

- Lin, C.H., 2016, Evidence for a magma reservoir beneath the Taipei metropolis of Taiwan from both S-wave shadows and P-wave delays. *Sci. Rep.* 6, 39500.
- McMechan, G. A., 1982, Determination of source parameters by wavefield extrapolation: Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 71, 613- 628.
- Pu, H. C., C. H. Lin, L. C. Chang, C. W. Kan, C. M. Lin, Y. H. Li, Y. C. Lai, M. H. Shih, 2017, Geological implications of 0212 earthquake in 2014 at the Tatun Volcanic Group of Taiwan: synergistic effect of volcanic and faulting activities, J. Asian Earth Sci., 149 (2017), pp. 93-102, 10.1016/j.jseaes.2017.08.021.
- Shyu, J. B. H., Y. H. Yin, C. H. Chen, Y. R. Chuang, and S. C. Liu, 2020, Updates to the on-land seismogenic structure source database by the Taiwan Earthquake Model (TEM) project for seismic hazard analysis of Taiwan, Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences, 31(4), 469-478, doi:10.3319/tao.2020.06.08.01.
- Snoke, A., 2003, Focal mechanism determination software (FOCMEC package), http://www.geol.vt.edu/outreach/vtso/focmec.
- Song, G. S., Y. C. Change, and C. P. Ma, 1997, Characteristics of submarine topography off northern Taiwan, TAO,8,461-480.
- Tsai, C. H., S. K. Hsu, S. S. Lin, T. F. Yang, S. Y. Wang, W. B. Doo, H. F. Lee, T. Lan, J. C. Huang and C. W. Liang, 2017, The Keelung Submarine Volcano in the near-shore area of northern Taiwan and its tectonic implication, J. Asian Earth Sci., 149, 86-92, doi.org/10.1016/j.jseaes.2017.01.022.
- Xu, X., X. Wen, G. Yu, G. Chen, Y. Klinger, J. Hubbard and J. Shaw, 2009, Coseismic reverse- and oblique-slip surface faulting generated by the 2008 M_W 7.9 Wenchuan earthquake, China, *Geology*, **37**(6), 515–518.
- Walker, K. T. and P. M. Shearer, 2009, Illuminating the near-sonic rupture velocities of the intracontinental Kokoxili M_W 7.8 and Denali fault M_W 7.9 strike-slip earthquakes with global *P* wave backprojection imaging, *J. geophys. Res.*, **114**, B02304, doi:10.1029/2008JB005738.
- Wang, K. L., S. L. Chung, C. H. Chen, R. Shinjo, T. F. Yang and C. H. Chen, 1999, Postcollisional magmatism around northern Taiwan and its relation with opening of the Okinawa Trough. Tectonophys. 308, 363-376.
- Wang, K.L., S. L. Chung, C.H. Chen, and C.H. Chen, 2002, Geochemical constraints on the petrogenesis of high-Mg basaltic andesites from the Northern Taiwan Volcanic Zone, *Chem. Geol.*, 182, 2–4, 513–528.
- Wang, K.L., S. L. Chung, S. Y. O'Reilly, S. S. Sun, R. Shinjo, and C.H. Chen, 2004, Geochemical constraints for the genesis of post-collisional magmatism and the geodynamic evolution in the northern Taiwan region. J. Petrol., 45, 975–1011.
- 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.
- 陳文山, 2016, 臺灣地質概論, 中華民國地質學會.
- 蕭力元、黃旭燦、鄧屬予、林國安(1998)臺灣新畿褶皺帶南段的構造 特徵。臺灣石

油地質,第 32 號,第 133-153 頁。

經濟部,2013,核四地質調查安全評估報告,183頁。

許樹坤,2016,基隆海底火山重複觀測,科技部補助專題研究計畫成果報告期, MOST 104-2119-M-008-003-.



圖一、臺灣北部地區地殼地震活動分布與本文分析兩地震震央(依據 CWASN 地 震目錄,自 1991 年至 2023 年)。黃色星號代表 2020 年士林地震,藍色 星號代表 2022 年基隆外海地震。紅色粗實線為活動斷層地表繪線。



圖二、本研究所整合的臺灣北部整合地震儀陣列的測站(圓形符號)分佈圖。不同 的顏色及代號表明原有臺灣北部地區各自具備不同功能的獨立觀測網(說 明祥參內文)。本研究分析的兩地震之震央標示為星形符號。



圖三、本研究挑選用於 2022 年基隆近海地震重定位的北部地震儀陣列垂直向的波 形紀錄並依震央距繪製成距離-時間剖面圖(測站分佈如圖二所示)。圖中 記錄已通過 0.1hz 至 5hz 帶通濾波。圖右註釋為測站名。



圖四、(a).例舉垂直向地震紀錄的極化方向。測站位置及對應地震站名稱標示,如 圖(b)所示。(b).2022 年基隆外海地震的 P 波初動極性分佈圖(地震網資訊如 圖二所示)。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。



(a)



(b)

圖五、(a).本研究挑選用於 2020 年士林地震重定位的北部地震儀陣列筆垂直向的波 形紀錄並依震央距繪製成距離-時間剖面圖(測站分佈如圖二所示)。圖中 記錄已通過 0.1hz 至 5hz 帶通濾波。圖右註釋為測站名。(b).2020 年士林地

震的 P 波初動極性分佈圖(地震網資訊如圖二所示)。藍色圓圈符號表示上動極性,紫色圓圈符號表示下動極性。



圖六、本研究選取圖三資料,經過反向投射震波疊加能量的定位成果。圖中紅色十 字符號為反向投射法所定位的震央位置(地震深度為 1.0 公里),灰色圓圈 符號為 CWASN 的定位震央(地震深度為 5.0 公里)。顯示定位準確度的 疊加能量極值分佈及標尺,如圖中所示。紫色小圈為選用測站位置,其置頂 藍色文字為其測站名。



圖七、(a).本研究選取圖四(b)資料,通過震波極性疊加處理(公式一)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)。



圖八、本研究選取 2020 年士林地震資料,圖五(a),其中的垂直向加速度波形資料, 進行反向投射震波疊加能量的定位成果。圖中紅色十字符號為反向投射法 所定位的震央位置(地震深度為 2.0 公里),灰色圓圈符號為 CWASN 的 定位震央(地震深度為 5.0 公里)。顯示定位準確度的疊加能量極值分佈及 標尺,如圖中所示。紫色小圈為選用測站位置,其置頂藍色文字為其測站名。



圖九、(a).本研究選取圖四(b)資料,通過震波極性疊加處理(公式一)所估算之 2020 年士林地震的震源機制。(b).選用 CWASN 資料及依據其標準處理程序估算 結果。(相關說明同圖七)


圖十、(a).本研究選取北部地震儀陣列所記錄的 2020 年士林地震垂直向的波形紀錄 (震央距小於 30 公里,持續時間為 5 分鐘)並依震央距繪製成距離-時間剖 面圖。(b).圖(a)相同資料經過 AGC 處理後所繪製成的距離-時間剖面圖。紅 色實線標示主震走時曲線,紅色及黃色點線分別標示為 CWASN 及本研究 所確認的餘震。(c).對比於圖(a),本研究選取北部地震儀陣列所記錄的 2022 年基隆近海地震垂直向的波形紀錄並依震央距繪製成距離-時間剖面圖。(d). 圖(c)相同資料經過 AGC 處理後所繪製成的距離-時間剖面圖。

EV2022



(a)

EV2020



(b)

圖十一、(a).本研究選取北部地震儀陣列所記錄的 2022 年基隆近海地震垂直向的波 形紀錄(震央距5至40公里,持續時間為30分鐘),經過AGC處理後 所繪製成之的距離-時間剖面圖。(b).同圖(a)的震央距與持續時間,本研 究選取北部地震儀陣列所記錄的 2020 年士林地震垂直向的波形紀錄,經 過AGC處理後所繪製成的距離-時間剖面圖。



圖十二、近期海洋地質勘探所描繪之基隆外海海底火山及其鄰近具有雁行排列特 徵的地熱噴氣孔與噴氣柱(圓型符號表示海底熱液發現位置,白色點線 為小區域之分佈連線)。 黃色點線為崁腳斷層外延的線性構造,紅色星 形符號為本研究定位 2022 年基隆近海地震的震央位置,震源機制如圖右 上角所示。(修改自 Hsu et al., 2016 及 Tsai et al., 2017)

113 年度地震資料之分析應用

子計畫二

台灣東部縱谷斷層地殼變形及斷層活動特性

許雅儒 吳帥賢 蔡宜純

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,沿著臺灣東部 海岸由南往北GNSS速度之變化顯示豐濱(23.6°N)以北速度明顯減小,橫跨縱谷 斷層的縮短量也由南邊的30mm/yr遞減為10mm/yr,顯示主要的壓縮變形由外海 斷層釋放,與花蓮外海地震密集的區域相符。2022年9月池上地震序列包括Mw 6.5的前震及Mw7.0的主震,地震發生在向西傾的中央山脈斷層,前震的同震位 移約為150-200mm主要集中在池上與臺東之間,主震的同震位移約為500-900mm, 分布在瑞穗與關山之間。研究中使用線性回歸、主成份分析及獨立成份分析等不同 方法拆解GNSS時間序列訊號,並成功分離測站共同誤差及已知的震後變形訊號。 本研究也發現地表應變和地震波波速都有顯著的季節變化,夏季地下水位高時,雷 利波波速下降,地表呈現伸張變形,面膨脹量和剪切應變的變化趨勢大致相同,地 下水位與面膨脹量和雷利波波速變化呈負相關。移除季節變化後,發現在2010及 2016前後GNSS應變量有異常之變化,伴隨較高的地震活動度。為了尋找潛在的 地震前兆現象,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, 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。

關鍵字:GNSS、池上地震、地震震源機制、主成份分析、獨立成份分析

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. The GNSS velocities with respect to Penghu station (S01R) along the east coast of Taiwan decrease northward from Taitung to Hualien, with a notable decline observed north of Fengbin. Correspondingly, the shortening rate across the Longitudinal Valley fault exhibits a similar spatial trend, implying that a significant portion of the accumulated strain north of Fengbin is likely accommodated by offshore structures. This inference is supported by the elevated seismic activity offshore Hualien.

The 2022 Chihshang earthquake sequence, which occurred in the middle to southern sections of the Longitudinal Valley, is not related to the LVF but rather took place along the west-dipping Central Range fault. GNSS observations reveal significant coseismic deformation of 150-200 mm from Chihsang to Taitung during foreshock. The coseismic displacements of mainshock ranging from 500 mm to 900 mm, predominantly occurred between Ruisui and Guanshan. To mitigate common-mode errors and isolate known postseismic deformation from GNSS time series data, we have applied different approaches, including linear regression, principal analysis, independent component analysis. This study also found an increase of groundwater level in summer (wet months) results in shear wave velocity drop and an increase of extensional strain. The time series of groundwater levels are negatively correlated with shear wave velocity changes and annual crustal strain. Abnormal GNSS strain measurements were observed around 2010 and 2016, accompanied by higher seismic activity. Since seasonal hydrological cycle affects surface strain and seismic wave velocity, analyzing multiple data sets over a long time period is critical to reveal the role of hydrological changes on various geophysical parameters. Additionally, a comprehensive analysis of different geophysical observations is necessary to eliminate the interference of surface environmental changes on the data and help to identify potential precursory signals prior to earthquakes.

壹、 研究目的

臺灣位於菲律賓海板塊和歐亞板塊邊界,板塊聚合速度每年約為 85 到 90 mm/yr (Hsu et al., 2016; Yu et al., 1997),其中花東縱谷地區及外海斷層就吸收了近二分之一的變形量(圖一),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 (Shin et al., 2013)。2022 年有兩次嚴重的災害型地震發生在北邊的玉里與南邊的關山池上地區,2024 年 4 月 3 日則有規模 7.2 的花蓮地震,頻繁的地震都顯示研究臺灣東部斷層活動的重要性。

花東縱谷北起花蓮南至臺東,全長約150公里,寬約2~7公里,西與中央山 脈東麓相接,東鄰海岸山脈。兩個主要的活動斷層,分別為中央山脈斷層和縱谷 斷層系統(Biq. 1965; Shyu et al., 2020)。先前的地質資料和大地測量分析結果顯 示, 位於西側的中央山脈斷層為一西傾左移逆衝斷層, 長期滑動速率約為 7.3 mm/yr (Shyu et al., 2016); 而東側向東傾斜的縱谷斷層為一向西逆衝兼左移的斷 層,全長約150公里,其滑移速率為30mm/yr。陳文山等(2010)依地質特性、 大地觀測以及古地震等資料重新探討縱谷斷層的分段,建議將此縱谷斷層劃分為 四個區段,由北而南依次為嶺頂斷層、瑞穗斷層、池上斷層與利吉斷層(圖 一)。各區段斷層特性,嶺頂斷層為左移的走向滑移斷層,瑞穗斷層、池上斷層 與利吉斷層則屬於朝西北西向運動的逆衝斷層。根據過去觀測結果,瑞穗斷層淺 部為鎖定狀態,只有大地震時才會滑動。而池上斷層則是以快速潛移的方式以每 年大約 20-30 mm/yr 的速度移動 (Lee et al., 2005; Yu et al. 1999)。 縱谷斷層雖為 一斷層系統,各段之變形行為卻截然不同。除此之外,2022 年池上地震序列更顯 示兩條主要斷層系統之間似乎有相互的影響(Tang et al., 2023)。因此為了解此區 域內斷層的活動特性,本計畫分析臺灣東部 GNSS 測站座標時間序列、地震活動 及地震震源機制並研究斷層滑移行為,進而提供評估花東縱谷斷層地震危害度之 參考依據。



圖一、GNSS 水平速度場(2008-2023), 黑色箭頭為相對澎湖白沙站 (S01R)的速度。

貳、 研究資料及方法

(一) GNSS 資料及處理方法

收集臺灣東部的 GNSS 連續觀測站資料,並採用由美國國家航空暨太空總署 (NASA)噴射推進實驗室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)開發的 GipsyX 高精 度地球觀測軟體進行精密測站座標計算(Bertiger et al., 2020)。GipsyX 是 GIPSY-OASIS 軟體的更新版,專為分析來自全球導航衛星系統(GNSS)如 GPS、 GLONASS、Galileo 等數據而設計。相比於需要多個測站的相對定位方法,如 GAMIT/GLOBK 或 BERNESE,GipsyX 僅需單一測站便可進行高精度定位,計算 速度快約數十倍,且每個測站的計算結果相互獨立,不會受到其他測站資料品質的 影響。此外,GipsyX 在其定位和衛星軌道分析中採用了 JPL 的 Gerald Bierman 改進的卡爾曼濾波算法,這種算法不僅計算迅速,而且數據穩定且精確。然而,儘 管 GipsyX 的單點精密定位方法有諸多優勢,但在處理如衛星鐘差、軌道偏差及大 氟延遲等共同誤差源時仍有侷限。為了克服這些限制,GipsyX 引入了 Ambizap 工 具,通過這種工具,用戶可以結合雙差方法的策略來增強 PPP 的處理效果,消除 一些共同誤差源,從而在保持全球定位的靈活性和簡便性的同時,提升定位的精度 和可靠性。

我們將定位結果解算在 IGS14 參考框架下,進行後續的時間序列資料分析,通 常考慮間震期地殼運動速度、年周期、半年周期、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。此類時間序列可表示如下式:

$$y(t_i) = a + bt_i + c\cos(2\pi t_i) + d\sin(2\pi t_i) + e\cos(4\pi t_i) + f\sin(4\pi t_i)$$

$$+\sum_{j=1}^{n_g} g_j \cdot H(t_i - T_{gj}) + \sum_{j=1}^{n_k} h_j \cdot H(t_i - T_{gj}) t_i + \sum_{j=1}^{n_k} k_j \cdot (1 - e^{-\frac{t_i - T_{kj}}{\tau_j}}) H(t_i - T_{kj}) \cdot + v_i$$
(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,可以由震後位移隨時間之演變估算(修正同震的地震事件列於 表一),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 vi,模型的最佳解為使殘差符合常態分布。圖二為氣象署東竹站(DCHU) 時間序列擬合範例,池上地震造成東竹站的同震位移在東西向有 339 mm、南北向 655 mm,高程也有 283 mm 之下陷量,而本站的震後變形較不明顯,東西向有 1 mm、南北向有 14 mm,高程為 14 mm 下陷。

Time	Lon. (°)	Lat. (°)	Depth	ML	Location
2009/12/19	121.66	23.79	43.8	6.9	Offshore Hualien
2012/06/15	121.54	23.71	6.5	5.3	Hualien
2013/03/27	121.05	23.90	19.4	6.2	Nantou
2013/06/02	120.97	23.86	14.5	6.5	Nantou
2013/10/31	121.35	23.57	15.0	6.4	Hualien
2018/02/06	121.73	24.10	6.3	6.2	Offshore Hualien
2019/04/18	121.56	24.05	20.3	6.3	Hualien
2021/04/18	121.48	23.86	14.4	6.2	Hualien
2021/07/08	121.57	23.89	8.2	5.5	Hualien
2022/03/23	121.61	23.40	25.7	6.7	Offshore Hualien
2022/06/20	121.45	23.69	7.0	6.0	Hualien
2022/09/18	121.20	23.14	7.8	6.8	Taitung
2024/04/03	121.58	23.86	22.5	7.2	Hualien
2024/04/22	121.54	23.85	5.5	6.3	Hualien

表一、本研究用於修正同震和震後變形的地震事件。



圖二、東竹站(DCHU)時間序列圖,圖上黑點為每日解,紅線為模型預測值,綠線為 2022 年池上地震發生時間。

(二) 地震及震源機制解

本研究選擇 1994-2020 氣象署地震目錄(GDMS),以最大曲率法(Wiemer and Wyss,2000)計算最小完整規模地震(Mc)隨時間的變化,2012 年起因氣象署提升地震測站訊號的取樣率至每秒 100 點並採用 24 位元動態記錄範圍,因此偵測更多規模 2 以下的地震,導致 2012 以後 Mc 明顯下降 (Hsu et al., 2021)。本研究因探討長時期的地震活動度變化因此仍選取規模大於 2.5 的地震來做分析並使用最近鄰居去叢集方法 (Nearest Neighbor Approach, NNA) (Zaliapin et al., 2016; Zaliapin et al., 2013)將所有地震區分為背景地震和地震序列。NNA 和其他常見的地震去叢集方法相比,保留較多地震事件並符合時間分佈的隨機性,是較適用於臺灣地區的去叢集方法(許毓芳,2020)。另外,我們也採用中央研究院地球科學研究所管理的臺灣寬頻地震網(Broadband Array in Taiwan for Seismology, BATS)當中的自動化 BATS 地震矩張 量 (AutoBATS MT) 震源機制解算系統

(https://tecdc.earth.sinica.edu.tw/FM/AutoBATS/),獲取臺灣地區即時且完整的震源 機制資訊。這組資料有典藏(Archived)解和接收氣象署地震速報結果所求得的即時(Real-time)解,研究中選取這組資料 1996-2023 的典藏解,震源機制解可以反 映區域的地震地體構造及應力方向,且Jian et al. (2018)發表的方法對深度 10 公 里以上及 140 公里以下的地震的解析能力有顯著的提升(台灣地震科學中心通訊 2019 年第四季)。本研究藉由分析地震震源機制 P 軸的方向來了解臺灣東部花東 縱谷地殼變形特性。

(三) 主成份分析及獨立成份分析方法

地表應變的計算和分析可以提供地殼變形的初步訊息,主成分分析法 (Principal Component Analysis, PCA)是一種多變量統計方法,主要用於降低資料 維度並識別資料中的趨勢。主成分分析透過線性變換將原始資料轉換到一個新的 座標系統,新座標系的基底函數由資料的協方差矩陣的特徵向量組成,這些特徵向 量被稱為主成分,在這些方向上的協方差變異性最大,所以可以協助識別資料的趨 勢。在提取主成份時需針對資料進行初步處理,減去其平均值並除以標準差,並考 慮每筆資料的貢獻度。隨後計算協方差矩陣,了解資料中特徵值和特徵向量之間的 相互變動關係。特徵向量決定了 PCA 變換的方向,而特徵值則決定了每個特徵向 量的重要性。根據特徵值的大小及能解釋資料的程度來選擇最重要的幾個特徵向 量作為主成分,通常只要少數幾個主成份即可解釋 95%以上的資料變化。

獨立成分分析法(Independent Component Analysis, ICA)是從多個統計上相互 獨立的信號源中分離出混合的信號。這種方法通常用於信號處理領域中盲源分離, 意味著在不了解來源信號特性和混合過程的情況下分離出原始信號。ICA 假設資 料的統計獨立性,不同於主成分分析法依賴資料的協方差來找出主成份,ICA 是通 過最大化非高斯性來尋找信號獨立的成分。

PCA 的目標是尋找資料中協方差最大的方向,並將數據投影到這些方向上以 降低維度,它著重於捕捉資料中的主要變異量,以最大化保留數據的信息。ICA 則 是著重發現隱藏在多維數據背後的獨立信號源,將數據表示為統計上獨立成份的 線性組合,這些成份盡可能相互獨立。我們將二種方法應用於 2022 池上關山地震 後的 GNSS 時間序列分析,拆解出幾個主成份在時間及空間域上的變化,並尋找 和這些主成份相關的機制。

(四) 地表應變率

地表密集的 GNSS 測站可以提供精確的數據進行地殼應變場的計算與分析, 識別由於斷層或地震活動引起的訊號。本研究選取鄰近 GNSS 測站來組成多邊形 觀測網,並假設每個測網內的變形是均勻的,同時考慮測站誤差、測站分布來計算 網內的面膨脹率以及剪切應變(Hsu et al., 2009)。距離為計算應變時最敏感的因子, 各測點的貢獻度使用距離的指數函數來計算,距離愈近,貢獻愈大,反之則愈小。 選取距離指數衰減常數時考慮全部測站之平均間距及計算應變所需最小測站數 目,我們將衰減常數訂為與觀測網中心點第三個最接近 GNSS 測站之距離,再由 速度梯度求取應變率。本研究選取以花蓮市為中心、向外延伸約20公里範圍內(崇 德至壽豐)的8個連續GNSS測站(圖三),移除GNSS時間序列中的長期速率以及 同震和震後變形,獲得各測站的殘差資料,由GNSS時間序列計算應變量,以辨識 微小、短期的異常變動。並比較地震活動度,探索地震發生前的潛在異常現象或變 動趨勢,為地震前兆判斷提供可行性依據。



圖三、花東縱谷北部連續 GNSS 測站(三角形)與地震活動度分佈圖。紫色、橘色 及綠色圓點代表規模3、4及5以上的地震。紅色星星代表規模6以上的地震,玫 瑰紅線為斷層、灰線為臺灣區域地質分區,多邊形為本研究選取之測網。

參、研究成果

(一) GNSS 速度場

本研究計算 2008-2023 年間相對位於澎湖白沙 S01R 站的水平速度場(圖一), 綠島及蘭嶼的速度約為 81 mm/yr, 到花東海岸則遞減為 68 mm/yr, 在豐濱以南約 維持在 67-68 mm/yr 左右,但速度場在豐濱以北沿著海岸則快速遞減,在磯崎-水 連約 35-38 mm/yr,花蓮市只剩 18~26 mm/yr,顯示主要的板塊壓縮應變發生在海 岸山脈北段到花蓮外海區域之間,和地震活動頻繁的區域相符。沿著花東縱谷的 GNSS 速度場也有由南往北遞減的趨勢,在縱谷斷層西側,臺東附近速度約 35-45 mm/yr,池上為 36~38 mm/yr,玉里-光復約為 35-37 mm/yr,而花蓮地區約為 20-30 mm/yr, 縱谷西緣中央山脈速度在南段約為 35 mm/yr 向北遞減為 27 mm/yr。若將 縱谷東西兩側分成南、中、北段來看,南段的臺東成功(CHEN)和池上(SHAN) 速度分別為 69、38 mm/yr,方位角為 310°、301°,中段的臺東贊坪 (JPIN)、花蓮 玉里 (YULI) 速度分別為 62、37 mm/yr,方位角為 316°、307°, 縱谷北段的花蓮 水璉國中(SHUL)及萬榮(WARO)速度分別為38、30mm/yr,方位角為320°、 308°。GNSS 水平速度由東部海岸向縱谷方向遞減,橫跨縱谷斷層的縮短率由南往 北為 30 mm/yr、25 mm/yr、10 mm/yr 也有同樣向北減小的趨勢, 部份變形以無震 滑移的方式釋放,另外跨過縱谷的速度差異量在光復和豐濱以北已經不顯著,表明 主要的壓縮變形可能並不是在縱谷斷層及中央山脈斷層釋放,而是在花蓮外海斷 層,這也說明為何花蓮外海地震非常頻繁(圖四)。

(一) 池上關山地震震後地表位移

2022年的池上地震序列包括9月17日發生的 Mw 6.5 的前震,隨後在7公里 以北,17小時後的9月18日發生了 Mw 7.0 的主震,二次地震的破裂發生在向西 傾的中央山脈斷層。根據連續 GNSS 觀測站的結果,前震的同震變形主要集中在 池上與臺東之間,其中水平位移最大約為200 mm,垂直位移最大約為160 mm, 這些最大位移發生在鹿野的二層坪地區(圖五а)。主震同震變形的範圍更為廣泛, 分布在瑞穗與關山之間。在這些地區中,位於玉里的水平和垂直同震位移最為顯著, 分別達到930 mm 和860 mm。為了解震後位移的影響範圍,我們扣除間震期的地 殼運動速度,計算2022年9月池上地震後至2024年3月這段期間共二年六個月 的地表位移(圖五 b)。整體而言,震後測站運動方向大致和同震位移相同,且震 後位移在震後一個月有明顯趨緩的現象。在水平運動方面:上盤測站(中央山脈) 往西南方向,下盤測站(花東縱谷東緣及海岸山脈)往西北方向運動,最大震後水 平位移位在池上和鹿野之間,可達60-70 mm;在垂直運動方面:近斷層的上盤測 站持續抬昇,可達50 mm,離震央20公里以西抬昇已不顯著,下盤的測站多為沉 陷,可達20-50 mm。



圖四、1990-2019 期間臺灣東部地震分佈,黑色箭頭為相對澎湖白沙站(S01R)的 GNSS 水平速度場(2008-2023)。



圖五、 (a) 2022/09/17 關山地震和 2022/09/18 池上地震的同震位移量。紫色星號為 震央位置,綠色曲線為斷層線。洋紅色和黑色箭頭分別指示出關山和池上地震的水 平位移向量。各站圓框中數值為關山地震同震垂直位移量,背景色階分布則為池上 地震同震垂直位移量(紅色抬升,藍色下沉)。(b)關山地震和池上地震的震後變形 量。紫色星號為震央位置,綠色曲線為斷層線。黑色箭頭為水平位移向量,背景色 階分布為垂直變形量。

圖六為臺灣東部地區自1900以來及近年來地震造成顯著地表同震位移所在之 區域,可以發現近年來規模 6 以上的地震慢慢填補了過去地震空缺的區域,除了 在豐濱到鹽寮之間目前還沒有較大規模地震發生。

(三) 花東縱谷之構造應力狀態

花東縱谷為菲律賓海板塊與歐亞板塊的縫合帶,分析地震震源機制 P 軸方向 沿著花東縱谷由南到北的變化可以了解板塊構造應力之轉變,由圖七可以發現在 23.5°N 以南 P 軸和板塊聚合方向 310°大致相同,往北到花蓮有順時針旋轉 20°的 趨勢,Wu et al. (2008)和 Jian et al. (2022)也有類似的成果。 Jian et al. (2022) 發現花東縱谷深度小於 20 公里的地震之最大水平壓縮方向(S_H)由南往北呈現 10° 至 30°的順時針旋轉,伴隨著 S_H的旋轉,最大壓縮 P 軸也以約 20°的角度傾斜。S_H 在空間及深度方向的變化可能是呂宋島弧北段在花蓮地區的隱沒有關,而且上部 地殼可能已部份隱沒,下部地殼則還是主要受到東西向壓縮應力的影響。圖七沿著 東部海岸由南往北測站速度之變化顯示豐濱(23.6°N)以北速度明顯減小,表明主 要的壓縮應力由外海斷層釋放,與花蓮外海地震頻繁的區域相符(圖四、六)。



(a)

(b)

圖六、 (a) 臺灣東部地區自 1900 以來規模大於 6 且深度小於 30 公里之地震,紅色及藍色分別為在中央山脈斷層及縱谷斷層之地震(摘自圖六 Tang et al., 2023)。 (b) 2000-2022 期間地震同震滑移投影到地表之區域,圓點為 1990-2020 背景地震, 星號為規模大於 6 的地震及 1951 地震序列。



圖七、 (a) 臺灣東部 1996-2022 期間深度小於 50 km 之地震震源機制 P 軸方向在 空間之分布及(b、c)沿著東部海岸由南往北測站運動方向及相對 S01R 速度之變化。

(四) PCA 及 ICA 分析結果與線性回歸的比較

為了瞭解池上關山震後滑移的行為以及後續細微的地表位移變化,本研究使用 2022年1月到2024年3月GNSS資料進行分析,並使用線性回歸公式(1)估算 出各測站的間震期速度、同震位移、震後位移等結果,測站估算出的震後位移如表 二所示,並和PCA及ICA估算的成果做比較。

$\tau = 0.075$	經度	緯度	震後滑移 E-W (mm)	震後滑 移N-S	震後滑移 Vertical	PCA E-W (mm)	PCA N-S
CHEN	121.3736	23.0974	-16.6	24.5	-20.5	-13.1	19.5
CHGO	121.3745	23.0983	-14.8	22.8	-14.0	-11.6	18.3
CHIU	120.8289	23.9454	8.2	-7.6	-1.4	6.3	-6.0
CHUN	121.3931	23.4529	-6.4	21.7	5.0	-5.1	17.5
CMRS	121.4455	23.4969	10.7	2.9	12.2	8.4	2.1
DAHU	120.8718	24.4229	4.5	-7.1	1.1	3.6	-5.6
DCHU	121.2806	23.2132	0.6	13.5	-14.1	0.4	10.8
DOSH	120.8269	24.2627	5.6	-4.9	-0.5	4.4	-3.8
DPIN	120.9328	24.0431	6.9	-10.7	3.0	5.6	-8.4
ERPN	121.1661	22.9422	-22.1	-9.4	-15.0	-17.7	-7.3
FKD2	120.8620	23.6884	11.6	-9.9	-2.9	8.6	-7.3
FLNM	121.4534	23.7463	12.4	-7.9	7.0	9.7	-6.3
FUDN	121.3293	23.2507	-6.7	19.4	-23.5	-5.2	15.4
FUQE	120.8233	24.0112	7.2	-7.3	1.1	5.7	-5.7
GUK2	121.0069	24.2030	3.6	-4.7	-5.3	2.9	-3.7
HNSN	121.3081	24.3377	6.4	-4.3	0.6	5.0	-3.3
HUAN	121.2726	24.1435	2.4	-3.9	2.8	1.9	-3.1
HUYS	121.0294	24.0923	1.9	-8.1	1.4	1.5	-6.6
HYRS	121.3454	23.4946	28.9	-6.9	0.9	22.7	-5.7
JPEI	121.3714	23.5316	25.2	-9.7	-7.8	19.8	-7.6
JPIN	121.3589	23.3411	-14.3	13.5	-33.2	-11.2	10.8
JULI	121.3182	23.3417	-27.5	-57.2	79.3	-21.6	-45.4
JYAN	121.2263	24.2425	5.8	-6.3	9.3	4.6	-4.9
KFN2	121.1168	23.9877	5.1	-8.2	15.4	4.1	-6.6
LONT	23.3417	22.9063	-1.3	-33.0	3.9	-1.2	-26.2

表二、由線性回歸及 PCA 估算出的震後滑移量

LSAN	121.1822	24.0294	7.8	-9.3	2.6	6.1	-7.3
LUDO	121.4684	22.6693	-6.5	15.7	-1.2	-5.1	12.5
MFEN	121.1725	24.0822	6.1	-8.5	-3.8	4.9	-6.8
MOTN	121.0269	23.2005	-30.3	-26.4	29.3	-23.9	-20.9
NAAO	121.8102	24.4493	2.7	-1.4	-8.5	2.0	-1.1
NDHU	121.5508	23.8972	-3.0	-13.8	30.4	-2.7	-11.3
NIPU	121.4121	23.2433	-10.4	21.1	-22.4	-8.2	16.8
NSAN	121.3828	24.4282	6.5	-4.3	-2.0	5.4	-3.6
NSHE	120.8009	24.2258	9.3	-3.2	0.4	7.3	-2.6
S016	120.8029	24.1796	6.0	-2.4	-1.1	4.7	-1.9
S104	121.1894	22.8208	-18.8	27.6	-15.3	-14.8	22.0
S105	121.1129	22.9063	-7.3	-66.5	50.8	-5.8	-52.9
S167	120.9341	23.9544	8.7	-5.2	-1.8	6.7	-4.1
SCHN	121.6516	24.1278	9.4	-4.5	-11.0	7.4	-3.4
SHAN	121.1129	23.1089	2.3	-54.1	16.1	1.9	-42.9
SHUL	121.5627	23.7876	20.0	-7.7	-39.5	15.6	-6.2
SICH	121.6544	24.1257	8.5	-5.0	-3.1	6.6	-3.9
SINY	120.8532	23.6965	10.3	-9.9	0.1	8.0	-7.8
SOFN	121.5982	23.8703	11.9	-2.0	1.1	9.4	-1.6
SONA	120.9858	24.3978	1.5	0.6	-6.0	0.9	0.4
SPAO	121.4849	24.2050	5.3	-3.6	2.5	4.0	-2.8
SUC2	120.9091	24.2915	5.8	-12.3	5.1	5.3	-10.1
SUN1	120.9084	23.8812	9.7	-8.9	-2.8	7.7	-7.0
TAPE	121.2309	23.1089	-2.6	-91.0	8.2	-2.1	-72.2
TAPO	121.2374	23.1271	15.0	41.4	40.8	12.1	33.0
TMAM	121.0075	22.6161	-3.2	-9.7	-5.8	-2.6	-7.7
TTSH	121.1476	22.7471	-2.0	-1.2	-12.0	-1.6	-0.9
TTUN	121.0807	22.7646	-5.8	-11.5	-11.5	-4.6	-9.1
TUNH	121.3002	23.0752	-24.3	31.0	-33.2	-19.2	24.6
TUNM	121.4936	23.9652	10.6	-12.5	5.6	8.4	-9.8

WARO	121.4409	23.8120	8.2	-10.7	1.2	6.4	-8.5
YENL	121.6018	23.9035	11.2	-5.5	-4.5	8.8	-4.3
YUL1	121.3002	23.3214	-27.1	-53.4	60.6	Х	Х
ZCRS	121.2726	23.2782	3.9	-27.5	13.6	3.1	-21.8

利用 PCA 或 ICA 可將測站共有的時空變化拆解出來,其中包含 GNSS 資料解 算時由衛星時鐘差、軌道偏差及大氣延遲等造成的共同誤差及其它未知訊號,測站 共同誤差常會被誤判為地震前兆,必須要先將這些訊號移除。研究中利用公式(1) 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,將殘差進 行 PCA 及 ICA 拆解,即可分離出共同誤差及未知訊號。圖八及圖九為利用各測站 殘差值進行 PCA 及 ICA 拆解的 3 個主要空間及時間成份,圖八上排為 ICA 的結 果,其中 IC1 為共同誤差,大部份的測站量值落在-6~-10 mm 間,下排為 PCA 的 結果,其中 PC1 為共同誤差,其量值落在 3~6 mm 間。由 PC1~PC3 的時間序列可 知,PC1 可解釋 88%的資料變化 (圖九),相較於 ICA 的 77%似乎較佳,但二者的 時間變化非常類似。從 PCA 得到共同誤差後,再將原始資料減去共同誤差及拿掉 長期速度及季節項後,再進行 PCA 及 ICA 分析。圖十及圖十一分別為各測站 E 分 量減去共同誤差後由 ICA 與 PCA 拆解的 3 個主要成份的空間及時間分布情形,從 圖十可知 PC1 為震後變形,其空間分布(圖十一)在中央山脈斷層西側皆向東移 動,而中央山脈斷層東側則向西位移。N 分量同樣進行相同步驟求出減去共同誤差 後在 ICA 與 PCA 的時間(圖十二)及空間(圖十三)分布情形,其結果在中央山 脈斷層西側皆向南移動,而東側則向北位移。



圖八、各測站 E 分量殘差值使用 ICA 與 PCA 分析得到的 3 個主要成份的空間分佈。



圖九、E分量殘差值使用 ICA 與 PCA 分析得到 3 個主要成份的時間序列,百分比 代表解釋資料的變異量。



圖十、E分量減去共同誤差後使用 ICA 與 PCA 分析得到的 3 個主要成份的時間序列,百分比代表解釋資料的變異量。



圖十一、各測站 E 分量減去共同誤差後使用 ICA 與 PCA 分析得到的 3 個主要成份的空間分佈。



圖十二、N 分量減去共同誤差後 ICA 與 PCA 分析得到的 3 個主要成份的時間序列,百分比代表解釋資料的變異量。



圖十三、各測站 N 分量減去共同誤差後由 ICA 與 PCA 分析得到的 3 個主要成份 的空間分佈。

比較 ICA 與 PCA 拆解的結果,兩種方式皆可以拆解出共同誤差(圖八、圖九)及 震後變形(圖十~圖十三)。圖十四為線性回歸及 PCA 估算出的震後滑移量,黑色 向量為線性回歸所估算出來的水平震後位移,顏色表示垂直方向的震後位移量,暖 色系為抬升,冷色系為下陷;洋紅色向量表示由 PCA 估算所得出的震後位移,由 圖上可知兩者在方向上相當一致,唯在數值上有些許差異,其原因可能是線性回歸 所估算的震後位移隱含了部分的共同誤差。



(五) 花蓮地區之地殼應變場

本研究利用觀測時間較長、資料品質較佳的 GNSS 連續觀測站組成多邊形測 網(圖三),並移除測站長期線性速度、同震和震後地表位移,找尋地殼應變的潛在 異常現象或斷層暫態滑移訊號。圖十五為花蓮地區 GNSS 速度場移去長期及地震 同震及震後位移訊號所剩下的地表位移時間序列,紅色線標示修正地震同震位移 的時刻,顏色長條為氣象署 GDMS 目錄在花蓮地區不同地震規模的地震活動度, 圖十六為利用圖十五 GNSS 水平資料計算出的地表面膨脹量(壓縮及伸張變形分別 為負值及正值)及剪切應變,比對經濟部水利署在花東縱谷北段的水位資料以及地 震寬頻測站 NACB(圖三)記錄的地震波波速變化(Feng et al., 2021),可以發現地表 應變及雷利波波速變化(dv/v)受季節水文荷重的變化影響甚巨。雷利波的頻散特性 使得不同頻段的波傳速度對不同深度範圍的應力、構造或材料變化有不同的敏感 度。一般而言,越低頻的雷利波對越深處的構造變化越敏感,高頻則反之。地震波 的速度變化會受岩石密度、彈性係數以及孔隙度等因素影響,此外,當土壤的濕度 增加時,波速通常會降低,因為水的存在會使得介質的彈性降低,減少波的傳播速 度。另外岩石材料在地震過後產生破壞或降雨導致岩體孔隙水壓上升,也會造成岩 石的有效應力下降,波速降低。

研究發現夏季地下水位高時,波速下降,地表呈現伸張變形,面膨脹量和剪切 應變的變化趨勢大致相同,地下水位和面膨脹量和 dv/v 變化呈負相關,不過在 2015 年末到 2016 年初期間 dv/v 和面膨脹量的關係轉為正相關。另外,在中型地震前後 二者的關係有時為正相關有時為負相關,可能是因為地震發生過後造成地殼應力 改變,在部份區域產生壓縮,部份為伸張,未來將使用斷層破裂模型計算地殼應力 改變量以釐清 dv/v 及面膨脹量在地震前後的差異。另一個可能原因為進行時間序 列擬合時在修正同震和震後位移不夠精準造成殘餘誤差。





圖十五、花蓮地區的 GNSS 速度場移去長期及地震同震及震後位移訊號所剩下的 地表位移時間序列,由上而下分別為東西、南北、及垂直分量,右側文字為測站名 稱。紅色直線標示有修正地震同震位移的時刻,藍色、橘色及灰色長條為氣象署 GDMS 目錄在花蓮地區地震規模大於三、四及五的地震活動度。



圖十六、花蓮地區的地下水位變化(藍線)、NACB站的雷利波波速變化(dv/v,紫線)、 花蓮地區 GNSS 測網計算的地表面膨脹量(黑線)和剪切應變(紅線)、及 GNSS 測網 平均垂直位移時間序列(綠線)。紅色直線標示修正地震同震位移的時刻,藍色、橘 色及灰色長條為氣象署 GDMS 目錄在花蓮地區地震規模大於三、四及五的地震活 動度。

由於季節性訊號和斷層暫態滑移的訊號有時可能會互相重疊,所以我們移除 地下水、dv/v 以及 GNSS 應變中的年周期訊號 (圖十七、十八),由殘餘的訊號找 尋異常,可以發現 dv/v 和水位仍然有很好的負相關,在 2010 及 2016 前後 GNSS 應變量有異常之變化,伴隨較高的地震活動度,但確切原因仍需比對更多資料。由 於季節水文變化同時影響地表應變和地震波波速,若要尋找潛在的地震前兆現象 需要分析長期觀測數據,了解季節水文變動對不同地球物理觀測的影響。此外,藉 由組成不同測網計算應變量可以找出異常發生的區域,未來將進行更細部的分析 研究。





圖十七、花蓮地區的 GNSS 速度場移去長期、季節性、地震同震及震後位移訊號所 剩下的地表位移時間序列,由上而下分別為東西、南北、及垂直分量,右側文字為 測站名稱。紅色直線標示修正地震同震位移的時刻,藍色、橘色及灰色長條為氣象 署 GDMS 目錄在花蓮地區地震規模大於三、四及五的地震活動度。



圖十八、 花蓮地區的地下水位變化(藍線)、NACB 站的雷利波波速變化(dv/v,紫線)、花蓮地區 GNSS 測網計算的地表面膨脹量(黑線)和剪切應變(紅線)、及 GNSS

測網平均垂直位移時間序列(綠線)。紅色直線標示修正地震同震位移的時刻,藍色、 橘色及灰色長條為氣象署 GDMS 目錄在花蓮地區地震規模大於三、四及五的地震 活動度。

參考文獻

- Bertiger, W., Y. Bar-Sever, A. Dorsey, B. Haines, N. Harvey, D. Hemberger, M. Heflin, W. Lu, M. Miller, A. W. Moore, D. Murphy, P. Ries, L. Romans, A. Sibois, A. Sibthorpe, B. Szilagyi, M. Vallisneri and P. Willis (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.
- Biq, C., 1965, The East Taiwan Rift: Petroleum Geology of Taiwan, v. 4, p. 93–106.
- Feng, K. F., H. H. Huang, Y. J. Hsu, Y. M. Wu (2021), Controls on seasonal variations of crustal seismic velocity in Taiwan using single-station cross-component analysis of ambient noise interferometry, J. Geophys. Res., doi:10.1029/2021JB022650.
- Hsu, Y.-J., Yu, S.-B., Simons, M., Kuo, L.-C., Chen, H.-Y., 2009. Interseismic crustal deformation in the Taiwan plate boundary zone revealed by GPS observations, seismicity, and earthquake focal mechanisms. Tectonophysics 479, 4-18. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2008.11.016.
- Hsu, Y. J. *, S. B. Yu, J. Loveless, T. Bacolcol, R. Solidum, A. Luis Jr, A. Pelicano, and J. Woessner. (2016), Interseismic deformation and moment deficit along the Manila subduction zone and the Philippine fault system, *J. Geophys. Res.*, 121, 7639–7665, doi:10.1002/2016JB013082.
- Hsu, Y. J., H. Kao, R. Bürgmann, Y. T. Lee, H. H. Huang, Y. F. Hsu, Y. M. Wu, and J. Zhuang (2021), Synchronized and asynchronous modulation of seismicity by hydrological loading: A case study in Taiwan, *Sci. Adv.*, *16*, eabf7282, doi:10.1126/sciadv.abf7282.
- Jian, P. R., T. L. Tseng, W. T. Liang, and P. H. Huang (2018), A new automatic fullwaveform regional moment tensor inversion algorithm and its applications in the Taiwan area, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, *108*, 573-587, doi:510.1785/0120170231.
- Jian, P. R., Liang, W. T., & Kuo, B. Y. (2022). Three-Dimensional Stress Model of the Collision-Subduction Junction East of Taiwan: Implications for the Decoupling of the Luzon Arc During Subduction. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127(9), e2022JB024054, doi:10.1029/2022JB024054.
- Lee, J. C., Angelier, J., Chu, H. T., Hu, J. C., & Jeng, F. S. (2005). Monitoring active fault creep as a tool in seismic hazard mitigation. Insights from creepmeter study at Chihshang, Taiwan. *Comptes Rendus Geoscience*, 337(13), 1200-1207, doi:10.1016/j.crte.2005.04.018.
- Shin, T. C., Chang, C. H., Pu, H. C., Hsiao-Wei, L., & Leu, P. L. (2013). The geophysical database management system in Taiwan. *TAO: Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 24(1), 11, doi:10.3319/TAO.2012.09.20.01(T).

- Shyu, J. B. H., Chuang, Y. R., Chen, Y. L., Lee, Y. R., & Cheng, C. T. (2016). A New On-Land Seismogenic Structure Source Database from the Taiwan Earthquake Model (TEM) Project for Seismic Hazard Analysis of Taiwan. *Terrestrial, Atmospheric & Oceanic Sciences*, 27(3), doi:10.3319/TAO.2015.11.27.02(TEM).
- Shyu, J. B. H., Yin, Y. H., Chen, C. H., Chuang, Y. R., & Liu, S. C. (2020). Updates to the on-land seismogenic structure source database by the Taiwan Earthquake Model (TEM) project for seismic hazard analysis of Taiwan. *Terr Atmos Ocean Sci*, 31(4), 469, doi:10.3319/TAO.2020.06.08.01.
- Tang, C. H., Lin, Y. N., Tung, H., Wang, Y., Lee, S. J., Hsu, Y. J., ... & Chen, H. Y. (2023). Nearby fault interaction within the double-vergence suture in eastern Taiwan during the 2022 Chihshang earthquake sequence. *Communications Earth & Environment*, 4(1), 333, doi:10.1038/s43247-023-00994-0.
- Wiemer, S., & Wyss, M. (2000). Minimum magnitude of completeness in earthquake catalogs: Examples from Alaska, the western United States, and Japan. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 90, 859-869, doi: 10.1785/0119990114.
- Wu, Y. M., L. Zhao, C. H. Chang, and Y. J. Hsu (2008) Focal-mechanism determination in Taiwan by genetic algorithm, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 98, 651-661, doi:10.1785/0120070115.
- Yu, S. B., Chen, H. Y., & Kuo, L. C. (1997). Velocity field of GPS stations in the Taiwan area. *Tectonophysics*, 274(1-3), 41-59, doi:10.1016/S0040-1951(96)00297-
 - 1.
- Zaliapin, I., & Ben-Zion, Y. (2013). Earthquake clusters in southern California I: Identification and stability. J. Geophys. Res., 118, 2847-2864, doi:10.1002/jgrb.50179.
- Zaliapin, I., & Ben-Zion, Y. (2016). A global classification and characterization of earthquake clusters. *Geophys. J. Int.*, 207, 608-634, doi:10.1093/gji/ggw300.
- 許毓芳 (2020),利用最近鄰居去叢集方法探索台灣地區地震序列特性,國立臺灣 大學地理環境資源學研究所碩士班論文。
- 陳文山、游能悌、松多信尚、楊小青(2010)地震地質與地變動潛勢分析計畫斷層長 期滑移速率與再現週期研究 (4/4)—期末報告書。經濟部中央地質調查所研究 報告第 99-9 號。

113 年度地震資料之分析應用

子計畫三

中央氣象署歷史地震相關資料彙整與研究

鄭世楠 王子賓 張毓軒

中華民國地球科學學會

摘要

本年度整理大武氣象站收錄的微縮影片波形紀錄,微縮影片編號 087 至 104-1 共 19卷,共計 10,535 片微縮影片,20,959 張地震波形紀錄。根據整理的波形資料 建立大武氣象站威赫式地震儀波形目錄,自 1954 年 1 月 11 日至 1983 年 6 月 30 日,共 20,864 張波形紀錄。建立中央氣象台式二倍強震儀波形目錄,自 1955 年 4 月 4 日至 1983 年 6 月 22 日,共 95 張波形紀錄。建立資料包括儀器種類、紀錄的 時間等。對於較顯著或較具有意義的地震波形進行掃描,儲存成數位波形影像檔。 完成 1900 年至 1972 年歷史地震重新定位,計畫執行期間在氣象署地下室 B205 找 獲臺灣地震調查原簿,登錄資料自 1925 年 6 月至 1976 年(欠缺 1975 年),其中 1925 年 6 月至 1937 年部分已加入今年成果,未來仍會持續針對臺灣地震調查原簿進行 處理,並進行重新定位。

關鍵詞:地震波形記錄、地震儀、歷史地震

Abstract

This project organizes the microfilm waveform records collected by Tawu Station. There are 19 volumes of microfilm No.087 to No.104-1, totaling 10,535 microfilms and 20,959 seismograms. Based on the compiled seismogram data, a seismogram catalog of the Wiechert seismograph of Tawu Station was established. From 1954 to 1983, a total of 20,864 seismograms were recorded. A waveform catalog of the CMO 2-time strong motion seismograph was established. From 1955 to 1983, a total of 95 seismograms were recorded. Creation data includes instrument type, recording time, etc. Scan the more significant or meaningful seismograms and store them into digital image files. Completed the relocation of historical earthquakes from 1900 to 1972. During the implementation of the project, the Taiwan earthquake survey book was found in B205, basement of the CWA. The registration data was from June 1925 to 1976 (1975 was missing). In the future, we will continue to process and reposition the Taiwan earthquake survey book.

Keyword: seismogram, seismograph, historical earthquake

壹、前言

在地震觀測上,地震構造會重複發生大規模災害地震,因此研究古地震或是 歷史地震,都是為探討構造地震之重現週期,並進一步瞭解該構造引發的強烈地 震動特性,以作為防救災因應的參考。對於過去地震史料的蒐集與研究,已成為 必要課題。臺灣位於環太平洋地震帶上,在歐亞大陸與菲律賓海板塊的碰撞與擠 壓作用下,自有文獻記載以來,已發生多次破壞性地震(徐明同,1983;Tsai,1985; 鄭世楠和葉永田,1989;鄭世楠等,1999;鄭世楠,2014;鄭世楠和張建興,2014; 鄭世楠等,2017,2018,2019)。而人類使用地震儀器進行觀測的歷史相當短,有地 震波形紀錄的地震僅一百多年,限制了地震學的研究,更顯得歷史地震波形與紀 錄的重要性(Kanamori et al.,2010)。

臺灣地區自 1897 年 12 月在臺北測候所裝設格雷—米爾恩(Gray-Milne)型地 震儀以後,開啟了儀器觀測地震地時代,1928 年開始陸續增設威赫式地震儀 (Wiechert seismograph),大為提升地震偵測能力。至1985 年機械式地震儀陸續退 役,此段時期記錄了相當大量的地震波形紀錄,不僅是臺灣地區發生的地震,同 時也記錄到世界上其他區域發生的大規模地震傳播至臺灣之震波。2011 年 2 月 25 日於中央大學舉行 Taiwan Historical Earthquake Workshop 的會議中,與會學者 均認為臺灣有豐富且重要的歷史地震波形與紀錄,宜進行有系統的整理,以做為 臺灣及國際地震學研究擴增素材。鄭世楠等(2013, 2014)共整理 1900-1972 年 歷史地震波形共 1,565 張,在中央氣象署地球物理資料管理系統中建置臺灣歷史 地震波形資料庫。鄭世楠和呂佩玲(2017, 2018)分別整理臺北站、新竹站、宜蘭站 臺中站、臺南站、高雄站、恆春站等地震波形微縮影片,同時建立地震波形目錄 文字檔;110年度計畫整理花蓮站共31.973張地震波形紀錄,同時建立威赫式地 震儀與樋口式一倍強震儀波形目錄。111 年度計畫整理成功站共 20,137 張地震波 形紀錄,同時建立威赫式地震儀與中央氣象台式簡單地震儀波形目錄。112 年度 計畫整理臺東與蘭嶼站共 24.457 張地震波形紀錄,同時建立威赫式地震儀、強震 儀與中央氣象台式簡單地震儀波形目錄。目前尚有大武站共約12,563 張地震波形 紀錄微縮影片尚未進一步整理。

由於歷史地震波形微縮影片製作至今已超過35年,經過多次搬遷,且欠缺專 屬的儲存空間,造成微縮影片已呈現酸化情形,甚至部分底片已模糊不清無法進 一步判讀,急需進一步處理。有鑑於此,本計畫擬以四年時間重新整理臺灣地區 歷史地震波形紀錄相關資料,所得結果將以網頁方式呈現。本年計畫將以整理大 武站收錄的12,563張微縮影片波形紀錄為主,更新「歷史地震波形資料庫」網頁, 增加歷史地震波形目錄選項,以恆春站與大武站的資料為主。並針對1900-1972 年間地震進行重新定位,所得結果將以網頁方式呈現,除了提供相關地震研究 與防救災使用外,並增加中央氣象署地震災害資料庫的資料。

測站	地震儀種類	波形紀錄	微缩片狀態	起訖時間
臺北站	威赫式地震儀	8,679	平片	1958/07/13-1970/06/30
16,180	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	中央氣象台式簡單地震儀	11,230	022-038,	1952/02/13-1983/06/30
11,230			155-156	
宜蘭站	威赫式地震儀	5,996	202-207	1947/07/09-1983/10/01
6,268	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	威赫式地震儀	23,875	067-085	1954/01/07-1983/12/31
24,013	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	威赫式地震儀	23,404	001-020	1954/01/11-1983/07/01
23,572	大森式二倍強震儀	168	021-1	1954/04/06-1983/06/25
高雄站	大森式二倍強震儀	137	157	1977/07/21-1984/12/29
2,618	荻原式簡單地震儀	2,481	158,160-163	1977/07/01-1983/12/31
恆春站	威赫式地震儀	37,159	123-153	1935/01/30-1983/12/31
37,273	強震儀	114	154	1935/07/16-1981/03/03
花蓮站	威赫式地震儀	21,480	164-182	1957/01/02-1983/07/01
31,973	59 型電磁式地震儀	9,052	183-197	1970/06/16-1983/07/01
	RV320型地震儀	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	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型地震儀	742	122	1981/05/23-1983/07/01

表1、中央氣象署地震波形紀錄微縮影片統計表

臺東站	59 型電磁式地震儀	7,996	039-051	1972/12/10-1983/07/01			
23,255	RV320 型地震儀	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			
尚未整理(約12,563張)							
大武站	地震儀	12,563		1954-1983			

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記錄與相關資料包括以下四部分(鄭世楠 等, 2013, 2014),分述如下:

 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,為類比式的記錄。這時期的地震儀包括格雷-米爾恩型 (Gray-Mine seismograph)、大森水平地震儀(Omori horizontal seismograph)、強 震儀(strong motion seismograph)、簡單型地震儀(portable seismograph)與威赫式 地震儀(Wiechert seismograph)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。最早可追溯至 1902 年 3 月 1 日臺南測候所大森式水平地震儀收錄的記錄。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。這 889 張煙燻 記錄紙波形完成平整、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,原始煙燻記錄紙大部分存放在建南辦公室, 少部分存放於地下室 B302。但仍有大量的煙燻記錄紙尚未整理,以及大量受 損尚未修復的歷史地震波形紀錄紙,目前存放於 B302 室(圖 2)。



圖 1、臺南測候所大森式水平地震儀收錄 1902/11/21 地震(ML=6.7, Ms=6.8)煙燻紀

錄波形。



(a)

(b)

- 圖 2、尚未整理的歷史地震波形紀錄:(a).尚未攤平的歷史地震波形紀錄紙;(b). 受損的歷史地震波形紀錄紙。
- 2. 複製地震紀錄:包括各類報告附錄波形紀錄相片與手描繪波形紀錄等,如圖 3 顯示「臺灣地震調查一班」(大森房吉,1906)報告中附錄之臺南測候所格雷-米 爾恩(Gray-Milne)型地震儀收錄 1904 年 11 月 6 日斗六地震波。此類型紀錄大 部分皆是較大災害地震,例如 1904 年斗六地震、1935 年新竹臺中地震、1941 年中埔地震、1964 年白河地震、1959 年恆春地震、1964 年白河地震、1972 年瑞穗地震等,都是在當時出版的災害地震報告中,只有少部分是手繪波形 紀錄夾雜在散落的書寫資料中。目前整理的複製地震紀錄共 132 張,經編號 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。



圖3、臺南測候所格雷-米爾恩(Gray-Milne)型地震儀收錄1904年11月6日斗六地 震三分量波形紀錄(根據大森房吉, 1906)。
3. 微縮影片地震紀錄:早期儲存歷史地震波形紀錄大都採用微縮影片方式,如2012年中央大學研究團隊從日本東京大學帶回1906-1908年格雷-米爾恩型地震儀與大森式水平地震儀微縮影片36張,以及中央氣象署自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(圖4)。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(圖4),目前儲存於地下室B302,中央氣象署地球物理資料管理系統網頁整理的微縮影片地震紀錄共491張,經編號後,掃描為數位影像檔並展示。鄭世楠和呂佩玲(2017,2018)整理臺北站、新竹站、宜蘭站、臺中站、臺南站、高雄站、恆春站等7站的微縮影片,建立目錄(表2、3)並掃描較大地震的波形紀錄(圖5)。但大武站之微縮影片尚未進一步整理,粗步統計共有181,435張歷史地震波形紀錄(表3)。由於由於歷史地震波形微縮影片製作至今已超過35年,經過多次搬遷,且欠缺專屬的儲存空間,造成微縮影片已呈現酸化情形,甚至部分底片已模糊不清無法進一步判讀,尤其是臺北站之平片式微縮影片(圖5),急需進一步處理。



(a)

(b)

圖 4、歷史地震波形紀錄微縮影片:(a).平片式微縮影片;(b).卷狀式微所影片。



(b)



(a)

圖 5、臺北站歷史地震波形平片式微縮影片呈現酸化情形:(a).酸化造成底片模糊、 扭曲變形情形;(b).19601008_TAP_WH_1 微縮片,左半部因酸化而無法判 讀。

表 2、平片式微縮影片目錄範例:臺北站威赫式地震 1958 年微縮影片波形紀錄

波形編碼	紀錄起始與結束時間	波形編碼	紀錄起始與結束時間
1958/07_070		19580801_TAP_WH_1	07:56-1958/08/01 15:10
19580713_TAP_WH_1	07:54-1958/07/13 19:56	1958/08_077	
19580713_TAP_WH_2	19:59-1958/07/14 08:17	19580801_TAP_WH_2	15:31-1958/08/02 8:00
19580714_TAP_WH_1	08:19-1958/07/14 16:37	19580802_TAP_WH_1	08:02-1958/08/02 14:57
19580714_TAP_WH_2	16:39-1958/07/15 07:35	19580802_TAP_WH_2	14:59-1958/08/03 06:39
19580715_TAP_WH_1	07:37-1958/07/15 16:15	19580803_TAP_WH_1	06:41-1958/08/03 15:32
19580715_TAP_WH_2	16:17-1958/07/16 08:00	19580803_TAP_WH_2	15:34-1958/08/04 08:09
1958/07_071		19580804_TAP_WH_1	08:11-1958/08/04 15:52
19580716_TAP_WH_1	08:02-1958/07/16 16:25	1958/08_078	
19580716_TAP_WH_2	16:26-1958/07/17 07:37	19580804_TAP_WH_2	15:54-1958/08/05 07:34
19580717_TAP_WH_1	07:39-1958/07/17 14:37	19580805_TAP_WH_1	07:36-1958/08/05 15:41
19580717_TAP_WV_1	07:40-1958/07/17 14:37	19580805_TAP_WH_2	15:43-1958/08/06 07:43
19580717_TAP_WH_2	14:39	19580806_TAP_WH_1	07:45-1958/08/06 15:12
19580718_TAP_WH_1	07:43	19580806_TAP_WH_2	15:17-1958/08/07 07:43
1958/07_072		19580807_TAP_WH_1	07:45-1958/08/07 16:45
19580718_TAP_WH_2	16:03-1958/07/19 07:53	1958/08_079	
19580718_TAP_WH_2	16:04	19580807_TAP_WV_2	16:47-1958/08/08 07:59
19580719_TAP_WH_1	07:55-1958/07/19 16:09	19580808_TAP_WH_1	08:01-1958/08/08 15:17
19580719_TAP_WH_2	16:18-1958/07/20 07:26	19580808_TAP_WH_2	15:21-1958/08/09 07:51
19580720_TAP_WH_1	07:31-1958/07/20 15:40	19580809_TAP_WH_1	07:53-1958/08/09 15:32
19580720_TAP_WH_2	15:43-1958/07/21 08:27	19580809_TAP_WH_2	15:34-1958/08/10 06:40
1958/07_073		19580810_TAP_WH_1	06:42-1958/08/10 17:07
19580721_TAP_WH_1	08:29-1958/07/21 16:20	1958/08_080	
19580721_TAP_WH_2	16:22-1958/07/22 07:49	19580810_TAP_WH_2	17:10-1958/08/11 08:07
19580722_TAP_WH_1	07:50-1958/07/22 16:22	19580811_TAP_WH_1	08:15-1958/08/11 15:48
19580722_TAP_WH_2	16:27-1958/07/23 08:09	19580811_TAP_WH_2	15:51-1958/08/12 08:15
19580723_TAP_WH_1	08:12-1958/07/23 15:46	19580812_TAP_WH_1	08:17-1958/08/12 15:52
19580723_TAP_WH_2	15:48-1958/07/24 07:42	19580812_TAP_WH_2	15:54-1958/08/13 07:51
1958/07_074		19580813_TAP_WH_1	07:54-1958/08/13 15:36
19580724_TAP_WH_1	07:45-1958/07/24 15:50	1958/08_081	
19580724_TAP_WH_2	15:55-1958/07/25 07:40	19580813_TAP_WH_2	15:40-1958/08/14 07:43

19580725_TAP_WH_1	07:42-1958/07/25 16:20	19580814_TAP_WH_2	16:53-1958/08/15 07:48
19580725_TAP_WH_2	16:22	19580815_TAP_WH_1	07:51-1958/08/15 16:14
19580726_TAP_WH_1	08:23-1958/07/26 15:48	19580815_TAP_WH_2	16:15-1958/08/16 08:14
19580726_TAP_WH_2	15:50-1958/07/27 08:54	19580815_TAP_WV_2	16:16
1959/07_075 (酸化嚴重))	19580816_TAP_WH_1	08:17-1958/08/16 15:39
19580727_TAP_WH_1	08:57-1958/07/27 15:58	1958/08_082	
19580727_TAP_WH_2	16:02-1958/07/28 07:39	19580816_TAP_WH_2	15:43-1958/08/17 07:43
19580728_TAP_WH_1	07:43-1958/07/28 16:37	19580817_TAP_WH_1	07:45-1958/08/17 19:30
19580728_TAP_WH_2	16:39-1958/07/29 07:41	19580817_TAP_WH_2	19:33-1958/08/18 07:51
19580729_TAP_WH_1	07:43-1958/07/29 16:00	19580818_TAP_WH_1	07:35-1958/08/18 15:20
19580729_TAP_WH_2	16:03-1958/07/30 07:35	19580818_TAP_WH_2	15:23-1958/08/19 07:27
1958/07/08_076 (只有 5	張)	19580819_TAP_WH_1	07:39-1958/08/19 16:00
19580730_TAP_WH_1	07:37-1958/07/30 15:20	1958/08_083	
19580730_TAP_WH_2	15:23-1958/07/31 08:20	19580819_TAP_WH_2	16:02-1958/08/20 07:46
19580731_TAP_WH_1	08:22-1958/07/31 15:51	19580820_TAP_WH_1	07:48-1958/08/20 15:55
19580731_TAP_WH_2	15:53-1958/08/01 07:54		

表 3、卷狀式微縮影片目錄範例:編號 No.209 宜蘭站大森式二倍強震儀收錄波形 紀錄

編號	波形代碼	起始時間	結束時間	備註
001 19	9360822_ILA_S2_1	1936/08/22 08	1936/08/22 15	恆春東方地震 M7.0
002 19	9360822_ILA_S2_2	1936/08/22 15	1936/08/23	恆春東方地震 M6.0
003 19	9360912_ILA_S2_2	1936/09/12	1936/09/13	關刀山地震 M5.7
004 19	9770715_ILA_S2_1	1977/07/15	1977/07/15	花蓮東方地震 M5.4
005 19	9771225_ILA_S2_2	1977/12/25	1977/12/26	花蓮東北地震 M5.3
006 19	9780207_ILA_S2_2	1978/02/07	1978/02/08	花蓮東方地震 M6.0
007 19	9780314_ILA_S2_2	1978/03/14	1978/03/15	花蓮東方地震 M5.7
008 19	9780408_ILA_S2_1	1978/04/08	1978/04/08	臺東南方地震 M5.8
009 19	9780411_ILA_S2_2	1978/04/11	1978/04/12	龜山島深震 92km,M4.9
010 19	9780429_ILA_S2_2	1978/04/29	1978/04/30	宜蘭東方地震 M5.9
011 19	9780530_ILA_S2_2	1978/05/30	1978/05/30	基隆北方地震 M5.4
012 19	9780601_ILA_S2_2	1978/06/01	1978/06/02	南澳地震 M4.9
013 19	9780723_ILA_S2_2	1978/07/23	1978/07/23	蘭嶼地震 M7.1
014 19	9780730_ILA_S2_2	1978/07/30	1978/07/31	南澳地震 M5.3
015 19	9780809_ILA_S2_2	1978/08/09	1978/08/10	豐濱南方地震 M5.3
016 19	9780814_ILA_S2_2	1978/08/14	1978/08/15	南澳地震 M5.2
017 19	9780902_ILA_S2_1	1978/09/02	1978/09/02	龜山島深震 87km,M5.8
018 19	9780905_ILA_S2_1	1978/09/05	1978/09/05	花蓮東方地震 M4.5
019 19	9780908_ILA_S2_1	1978/09/08	1978/09/08	花蓮東北地震 M5.0
020 19	9780910_ILA_S2_2	1978/09/10 20	1978/09/11 00	花蓮東北地震 M5.3
021 19	9780911_ILA_S2_2	1978/09/11	1978/09/12	花蓮東北地震 M5.4
022 19	9781223_ILA_S2_1	1978/12/23	1978/12/23	長濱東方地震 M6.9(D)
023 19	9791203_ILA_S2_1	1979/12/03 08	1979/12/03 20	新港東方地震 M5.2

024 19800229_ILA_S2_1	1980/02/29 08	1980/02/29 20	
025 19800529_ILA_S2_1	1980/05/29 08	1980/05/29 20	蘇澳東方地震 M5.1
026 19801017_ILA_S2_2	1980/10/17 20	1980/10/18 08	花蓮東北地震 M5.6
027 19801107_ILA_S2_2	1980/11/07 20	1980/11/08 08	花蓮東方地震 M5.5
028 19801114_ILA_S2_2	1980/11/14 20	1980/11/15	蘇澳地震 M5.5
029 19810302_ILA_S2_2	1981/03/02 20	1981/03/03 08	成功地震 M5.8
030 19810820_ILA_S2_2	1981/08/20 20	1981/08/21 08	宜蘭地震 M4.2
031 19810830_ILA_S2_2	1981/08/30 20	1981/08/31 08	蘇澳南方地震 M4.3
032 19820123_ILA_S2_2	1982/01/23 22	1982/01/23 07	花蓮地震 M5.8
033 19820227_ILA_S2_2	1982/02/27 20	1982/02/28	
034 19820914_ILA_S2_2	1982/09/14 20	1982/09/15 08	宜蘭太平地震 M4.5
035 19821020_ILA_S2_2	1982/10/20 20	1982/10/21 08	花蓮東南地震 M6.0
036 19821207_ILA_S2_1	1982/12/07 08	1982/12/07 11	宜蘭地震 M4.0
037 19830426_ILA_S2_2	1983/04/26 20	1983/04/27 08 宜	蘭東方深震 97km, M6.2



 圖 6、卷狀式微縮影片地震波形範例:恆春站今村式二倍強震儀收錄 1935 年 9月4日綠島地震(22.50°N,121.55°E,震源深度 20 km, M_L7.0, M_W7.3, M_H7.2)波形紀錄之微縮影片,地震波形編碼為 19350904_HEN_S1_1

4. 歷史地震相關文字記錄:自臺北測候所設立後累積相當多的文字敘述的地震 觀測記錄,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記錄,如圖7顯示臺北 測候所對於1906 年美國舊金山大地震之文字敘述觀測記錄。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 B302,如圖8顯示1909年臺北地震相關報告與文件。此外,地下室B205存 放相當大量相關地震的文件尚未進行處理。



圖 7、臺北測候所對於 1906 年美國舊金山大地震的文字敘述觀測記錄(收錄於 鄭世楠等, 1997)。



圖 8、1909 年 4 月 15 日臺北地震相關報告與資料(收錄於鄭世楠等, 1997)

2021 年 12 月已將卷片式微縮影片波形紀錄掃描為數位影像檔,包括新竹、 宜蘭、臺中、臺南、高雄、恆春、花蓮、成功、臺東、大武、蘭嶼等氣象站,210 卷約 12 萬張微縮片的歷史地震波形,但對於酸化嚴重的臺北站平片式微縮影片尚 未進一步處理。本年度計畫擬整理大武站所收錄的微縮影片波形紀錄為主,建立 大武站歷史地震波形目錄。參考鄭世楠等(2013,2014)處理歷史地震波形煙燻紀錄 紙流程如圖 9 所示,數化掃描後的資料以 300 dpi 解析度儲存為 TIFF 與 JPG 格式, 再進行日期確認、儀器辨別與方向辨識後重新編號,整理好的原始波形紀錄與數 化波形資料建置於資料庫中。將傳統以類比式的微縮影片儲存歷史地震資料的方 式,改以高解析度掃描儀數化後的數化式檔案儲存。微縮影片歷史地震資料的方 式儲存為 TIFF 與 JPG 格式。數化後的影像檔再透過螢幕顯示進行日期確認、 儀器辨別與方向辨識後重新編號,整理好的數化波形資料建置於資料庫中。



圖 9、歷史地震波形紀錄處理程序(鄭世楠等, 2014)。

數化後的影像檔再透過螢幕顯示進行日期確認、儀器辦別與方向辨識後重新 编號,整理好的數化波形資料建置於資料庫中。為利於後續使用將蒐集整理的波 形紀錄進行分類與編號。波形編碼參考鄭世楠等(2013, 2014)的方法,採用「年月 日_测站_儀器」作為編號依據,其中年、月、日為地震波形紀錄的日期,測站為 收錄之觀,測站名稱(如表4所示),包括臺北、臺南、澎湖、臺中、臺東、恆春、花 蓮、高雄、阿里山、宜蘭、新竹、彭佳嶼、新港、大武、玉山、嘉義、蘭嶼等測 震站。地震儀器包括格雷-米爾恩型地震儀、大森式水平向地震儀(東西向)、大森 式水平向地震儀(南北向)、大森式微動儀、大森式強震儀、今村式二倍強震儀、大 森式二倍強震儀、樋口式一倍強震儀、中央氣象台式一倍強震儀、中央氣象台式 二倍強震儀、大森式簡單地震儀、簡單型地震儀、中央氣象台式簡單地震儀、三 分量簡單型地震儀、樋口式簡單型地震儀、荻原式簡單型地震儀、衛赫式地震儀(垂 直向)、衛赫式地震儀(水平向)、石本式加速度地震儀、樋口式加速度地震儀、59 型 短週期電磁式地震儀、61型(VD)長週期電磁式地震儀、文件檔(欠缺地震波形紀錄) 等。本年度的工作將主要為大武站收錄的 12,563 張微縮影片波形紀錄,建立大武 站的微縮影片目錄,包括儀器種類、紀錄的時間。對於較顯著或較具有意義的地 震波形進行掃描,儲存成位數位波形影像檔。更新「歷史地震波形資料庫」網頁, 增加歷史地震波形目錄選項,以臺南站、高雄站與臺東站的資料為主。補強歷史 地震儀部分,包括實體狀況調查、各時期儀器參數等。同時探討不同時期,臺灣 地震觀測網對於世界上大地震的偵測能力

測站	1945 年	1946 年後	中文	緯度	經度	高度	地震儀
代碼	英文名稱	英文名稱	名稱	(N)	(E)	(m)	時間
ТАР	Taihoku	TAIPEI	臺北	25.04	121.52	5.5	1897/12
TAI	Tainan	TAINAN	臺南	23.00	120.20	13.8	1900/01
PNG	Hoko	PENGHU	澎湖	23.567	119.555	10.7	1900/02
TCU	Taityu	TAICHUNG	臺中	24.148	120.676	84.0	1902/01
TTN	Taito	TAITUNG	臺東	22.754	121.147	8.9	1903/12
HEN	Kosyun	HENGCHUN	恆春	22.006	120.738	22.1	1907/10
HWA	Karenko	HWALIEN	花蓮	23.977	121.605	16.1	1914/01
KAU	Takao	KAOHSIUNG	高雄	22.567	120.308	2.3	1931/06
ALS	Arisan	ALISHAN	阿里山	23.510	120.805	2413.4	1933/07
ILA	Giran	ILAN	宜蘭	24.766	121.748	7.2	1936/06
HSN	Sintiku	HSINCHU	新竹	24.802	120.970	34.0	1938/08
PCY	Hokasyo	PENGJIA	彭佳嶼	25.633	122.067	99.0	1937/01
HSI	Sinko	HSINKONG	新港	23.099	121.365	33.5	1941/02
TAW	Daibu	TAWU	大武	22.358	120.895	8.1	1942/11
YUS	新高山	YUSSHAN	玉山	23.483	120.950	3844.8	1944/01
ANP		ANPU	鞍部	25.187	121.520	825.7	1963/03
CHY		CHIAYI	嘉義	23.498	120.475	26.9	1968/09
LAN	Kotosyo	LANYU	蘭嶼	22.0333	121.5500	21.5	1961/05

表4、歷史地震波形紀錄測站代碼一覽表

今年度計畫另一重點是針對 1900-1972 年間地震進行重定位, 1957-1972 年 主要採用地震季報登載的地震觀測資料,以及各歷史地震報告以及文獻中登錄的 資料,再輔以前三年與本年度計畫整理歷史地震波形中彙整的震波到達時間資料 等。由於早期年各測候所的時間系統並不一致,若直接採用初達 P 波與 S 波的到 時進行定位,將會造成相當大的誤差。本計畫參考 Cheng et al.(1996)、鄭世楠和黃 歆宜(2016)等,採用格點搜尋法(Grid search method)來進行 1941 年中埔地震及其餘 震的重新定位。定位程序中欲推求的震源參數為經度(Lon.)、緯度(Lat.)與深度 (Dep.),參考前人研究結果、等震度圖與災害分佈等先設定參數的可能分佈範圍:

Lat _{low}	\leq Lat.	\leq Lat _{high}	
Lonlow	\leq Lon.	\leq Lon _{high}	(1)
Dep _{shall}	≤ Dep.	\leq Dep _{dep}	

在計算程序中,水平向(經度與緯度)的單元距設定為 0.025 度, 垂直向(深度) 為 1 公里,則每個地震有 68,921 個單元進行測試,採用中央氣象署之一維地殼模 型(陳燕玲, 1985)計算每一個單元至各測震站的 S-P 時間(dcal),並與觀測之 S-P 時 間(dobs)進行比對。由計算與觀測之 S-P 時間殘差的均方根(root-mean-square error, RMS)做為定位的誤差涵數(misfit function),並藉由 RMS 的極小化推求得最佳的震 源參數:

$$RMS_{i} = \sqrt{\frac{\sum (d_{cal(i,j)} - d_{obs(i,j)})^{2}}{N}}$$
(2)

上式中 dcal(i,j)與 dobs(i,j)分別表示第 i 個單元至第 j 個測站之計算與觀測的 S-P 時間; RMSi 是第 i 單元之 S-P 時間殘差均方根; N 表示所使用的測震 站個數。表 5 與圖 10 顯示 1908 年 1 月 11 日璞石閣地震觀測資料與重定位結 果。

臺灣早期以有感半徑做為描述地震大小的依據,分為顯著地震(有感半徑 大於 300 公里)、稍顯著地震(有感半徑大於 200 公里,小於 300 公里)、小 區域地震(有感半徑大於 100 公里,小於 200 公里)、局發地震(有感半徑小 於 100 公里)與無感地震等。 Hsu(1971)針對臺灣早期機械式地震觀測系統推 導出地震規模的經驗式:

$$M_{\rm H} = \log(A) + 1.09 \log(\Delta) + 0.5 \tag{3}$$

上式中 A 為最水平動振幅,單位為微米, Δ為震央距離,單位為公里。推算 所得之地震規模與現今使用地震規模不同,故稱之為徐氏地震規模(M_H)。為 了與目前中央氣象局使用的近震規模(local magnitude, M_L;又稱為芮氏地震規 模)有一致性,參考 M_L-M_H轉換經驗式(鄭世楠等, 2010, 2011)推估近震規模:

$$M_L = 0.988 M_H - 0.129$$

(4)

對於欠缺震幅觀測但有震度描述的地震,則採用有感半徑與近震規模關係式:

$$M_{\rm L} = 2.113 \log(\Delta) + 0.997 \ (h \le 35 \ \rm km) \tag{5}$$

$$M_{\rm L} = 1.698 \log(\Delta) + 1.658 \text{ (h} > 35 \text{ km}) \tag{6}$$

上式中∆為震央距離, h 為震源深度,單位為公里。即震源深度小於或等於 35 公里的地震採用(5)式,震源深度大於 35 公里的地震則採用(6)式。

 $M_{\rm L} = 2.113 \log(\Delta) + 0.997 \ (h \le 35 \ \rm km) \tag{5}$

$$M_{L} = 1.698 \log(\Delta) + 1.658 \text{ (h>35km)}$$
(6)

上式中∆為震央距離, h 為震源深度,單位為公里。即震源深度小於或等於 35 公里的地震採用(5)式,震源深度大於 35 公里的地震則採用(6)式。

近年來,許多地震危害度評估考慮到斷層滑移問題,欲推算較長週期的斷層活動迴歸情形,採用震矩規模(moment magnitude, MW)做為進一步計算分析的須求。本文除了以近震規模描述中埔地震與其餘震外,亦嘗試採用近震規模 與震矩規模的轉換經驗式(鄭世楠等, 2010, 2011),建置以震矩規模做為描述地 震大小的參考參數:

$$M_L{=}0.961 M_W{+}0.338 \pm 0.256 \qquad (M_L{\leq}6.0) \tag{7}$$

 $M_L {=} 5.115 \ln(M_W) - 3.131 \pm 0.379 \qquad (M_L {\geq} 5.5) \tag{8}$

其中(7)式與(8)式在 $M_L=5.5-6.0$ 處有一致的結果,當 $M_L\geq 6.0$ 的地震採用(8) 式經驗式,當 $M_L\geq 5.5$ 時採用(7)式。

地名	發震時間	初期微動時間	最大振幅	震度	備註
基隆	11:36 00.0			弱震(弱)	
臺北	11:35 14.0	18.8	7.2	強震(強)	
臺中	11:32 57.0		21.8	弱震(弱)	
臺南	11:36 14.0	18.9/	-	強震(強)	
臺東	11:36 46.0	13.9	20.8	強震(強)	
澎湖島	11:36 08.0	23.2		弱震(弱)	
恆春	11:38 30.0	25.9		弱震(強)	
花蓮港	11:36 00.0			強震	(沒有地震儀)

表 5、1908 年 1 月 11 日璞石閣地震觀測資料(根據 Omori, 1908)



圖 10、1908 年 1 月 11 日璞石閣地震計算與觀測之 S-P 時間殘差的均方根等值分 布圖: (a).深度為 4 公里處平面分布; (b).23.650°N 之東西剖面分布; (c).121.475°E 之南北剖面分布。

叁、結果與討論

3.1 歷史地震波形目錄

本年度計畫將著重於整理大武氣象站收錄的微縮影片波形紀錄為主,即微縮 影片編號 087 至 104-1 共 19 卷。

大武站微縮影片包括威赫式地震儀 18 卷(卷號 087-104), 1954-1983 年收錄的約 10,440 片 20,869 張波形紀錄(一片微縮底片包含二張波形紀錄)、中央氣象台式 二倍強震儀 1 卷(卷號 104-1), 1955-1983 年共 95 張波形紀錄(表 5)。

编號	紀錄時間	微縮片編號	備註	
大武站威赫式地震儀 18 卷 10,440 片共 20,864 張波形紀錄				
087	1954/01/11-1957/08/21	001-613	613 片 1,226 張波形紀錄	
088	1957/08/21-1959/09/01	001-612	612 片 1,223 張波形紀錄	
089	1959/09/01-1961/07/01	001-564	564 片 1,125 張波形紀錄	
090	1961/07/01-1963/02/01	001-619	619 片 1,236 張波形紀錄	

表 5、大武站地震波形微縮影片統計表

091	1963/01/31-1964/08/01	001-602	602 片 1,201 張波形紀錄		
092	1964/08/01-1966/02/01	001-585	585 片 1,170 張波形紀錄		
093	1966/02/01-1967/08/01	001-580	580 片 1,159 張波形紀錄		
094	1967/08/01-1969/02/01	001-580	580 片 1,160 張波形紀錄		
095	1969/02/01-1970/08/01	001-562	562 片 1,123 張波形紀錄		
096	1970/08/01-1972/02/01	001-580	580 片 1,159 張波形紀錄		
097	1972/02/01-1973/08/01	001-578	578 片 1,156 張波形紀錄		
098	1973/08/01-1975/02/01	001-585	585 片 1,170 張波形紀錄		
099	1975/02/01-1976/08/01	001-623	623 片 1,245 張波形紀錄		
100	1976/08/01-1978/02/01	001-636	636 片 1,272 張波形紀錄		
101	1978/02/01-1979/08/01	001-601	601 片 1,201 張波形紀錄		
102	1979/08/01-1981/02/01	001-587	587 片 1,173 張波形紀錄		
103	1981/02/01-1982/08/01	001-578	578 片 1,156 張波形紀錄		
104	1982/08/01-1983/06/30	001-355	355 片 709 張波形紀錄		
大武站中央氣象台式二倍強震儀強震儀1卷95張波形紀錄					
104-1	1955/04/04-1983/06/22	001-095	95 張波形紀錄		
計	19 卷	10,535 片	20,959 張波形紀錄		

3.1.1 大武氣象站威赫式地震儀波形微縮影片

1942年11月大武氣象站裝設威赫式地震儀水平向與垂直向二台地震儀,1983 年6月終止觀測後擺設在大武氣象站,2006年拆卸運送至921教育園區重新組裝, 目前存放於921地震園區(圖11)。目前已建立大武站威赫式地震儀波形目錄,包括 微縮影片編號087-104 計 18 卷 10,440 片共 20,864 張波形紀錄,時間範圍自 1954/01/11 至 1983/06/30。表6為大武站威赫式地震儀編號No.087 微縮影片波形 目錄的範例,紀錄時間自1954年1月1日至1957年8月21日。波形目錄建置的 資料包括編號、波形編號、紀錄起始與結束時間等。由於威赫式地震儀波形紙長 度較長,寬度較窄,故一片微縮影片包含二張波形紀錄紙。

圖 12 為大武站水平向威赫式地震儀收錄 1957 年 10 月 20 日 02:28 花蓮南方 海上地震 (23.600°N, 121.550°E, 震源深度 15 公里, 地震規模 M_L =6.3, M_H =6.6) 波形紀錄之微縮影片, 地震波形編碼為 19571019_TAW_WH_2。波形紀錄之微縮 影片, 由波形記錄圖摘讀 P 波到時為 10/20 02:29 20.5, S-P 時間為 23.3 秒。圖 13 為大武氣象站水平向威赫式地震儀收錄 1957 年 4 月 16 日 04:04(GMT)雅加達附近 深震 (-4.51°N, 107.27°E, 震源深度 602 公里, 地震規模 m_B =7.2)波形紀錄之微縮影 片, P 波到時為 19:25 16.1, S-P 時間為 1m33.3s, 地震波形編碼為 19570416_TAW_WH_1。圖 14 為大武氣象站水平向威赫式地震儀收錄 1968 年 10 月 7 日 19:20(GMT)小笠原群島深震 (26.29°N, 140.68°E, 震源深度 519 公里, 地震 規模 m_B =7.2, M_W =7.3)波形紀錄之微縮影片, P 波到時為 03:25 16.1, S-P 時間為 2m51.6s, 地震波形編碼為 19681007_TAW_WH_2。



圖 11、原大武氣象站使用之威赫氏地震儀(垂直象與水平向),現存放於 921 地震園 區。

波形編碼 紀錄起始與結束	.時間 波形:	编碼 紀錄起始與結束時間	
001 19540111_TAW_WV_2 19 1954/01/1	2 07 026 19540	310_TAW_WH_1 07 1954/03/10 20	
001 19540111_TAW_WH_2 19 1954/01/1	2 07 026 19540	0310_TAW_WH_2 20 1954/03/11 07	
002 19540114_TAW_WV_2 19 1954/01/1	027 19540	0311_TAW_WH_1 07 1954/03/11 20	
002 19540114_TAW_WH_2 19 1954/01/1	027 19540	0311_TAW_WH_2 21 1954/03/12 07	
003 19540115_TAW_WH_2 19 1954/01/1	028 19540	0312_TAW_WH_1 07 1954/03/12 20	
003 19540115_TAW_WV_2 19 1954/01/1	028 19540	0312_TAW_WH_2 20 1954/03/13 07	
004 19540118_TAW_WH_2 20 1954/01/1	029 19540	0313_TAW_WH_1 07 1954/03/13 20	
004 19540122_TAW_WH_1 07 1954/01/2	029 19540	0313_TAW_WH_2 20 1954/03/14 06	
005 19540122_TAW_WV_1 07 1954/01/2	030 19540	0314_TAW_WH_1 07 1954/03/14 21	
005 19540201_TAW_WH_1 08 1954/02/0	01 10 030 19540	0314_TAW_WH_2 21 1954/03/15 09	
006 19540201_TAW_WV_1 09 1954/02/0	01 09 031 19540	0315_TAW_WH_1 09 1954/03/15 20	
006 19540206_TAW_WH_1 07 1954/02/0	06 19 031 19540	0315_TAW_WH_2 20 1954/03/16 07	
007 19540206_TAW_WV_1 07 1954/02/0	06 19 032 19540	0316_TAW_WH_1 07 1954/03/16 20	
007 19540213_TAW_WH_2 19 1954/02/1	032 19540	0316_TAW_WH_2 21 1954/03/17 07	
008 19540213_TAW_WV_2 19 1954/02/1	033 19540	0317_TAW_WH_1 07 1954/03/17 20	
008 19540215_TAW_WH_2 19 1954/02/2	033 19540	0317_TAW_WH_2 20 1954/03/18 07	
009 19540220_TAW_WH_1 07 1954/02/2	034 19540	0318_TAW_WH_1 07 1954/03/18 20	
009 19540220_TAW_WH_2 21 1954/02/2	034 19540	0318_TAW_WH_2 20 1954/03/19 07	
010 19540221_TAW_WH_1 07 1954/02/2	035 19540	0319_TAW_WH_1 07 1954/03/19 21	
010 19540221_TAW_WV_2 20 1954/02/2	035 19540	0319_TAW_WH_2 21 1954/03/	
011 19540221_TAW_WH_2 20 1954/02/2	036 19540	0320_TAW_WH_1 07 1954/03/20 18	
011 19540222_TAW_WH_1 07 1954/02/2	036 19540	0320_TAW_WH_2 19 1954/03/21 07	
012 19540222_TAW_WH_2 19 1954/02/2	23 07 037 19540	321_TAW_WH_1 07 1954/03/21 20	
012 19540223_TAW_WH_1 07 1954/02/2	23 20 037 19540	0322_TAW_WH_1 07 1954/03/22 19	
013 19540222_TAW_WH_2 19 1954/02/2	038 19540	0322_TAW_WV_1 08 1954/03/22 19	
013 19540223_TAW_WH_1 07 1954/02/2	038 19540	0323_TAW_WH_2 20 1954/03/24 07	
014 19540223_TAW_WH_2 20 1954/02/2	24 07 039 19540	323_TAW_WH_1 07 1954/03/23 19	
014 19540224_TAW_WH_1 07 1954/02/2	24 20 039 19540	0324_TAW_WH_1 07 1954/03/24 20	
015 19540225_TAW_WV_1 09 1954/02/2	25 19 040 19540	0324_TAW_WH_2 20 1954/03/25 07	
015 19540225_TAW_WH_2 19 1954/02/2	26 07 040 19540	325_TAW_WH_1 07 1954/03/25 20	
016 19540226_TAW_WH_1 07 1954/02/2	26 20 041 19540	325_TAW_WH_2 20 1954/03/26 07	

表 6、大武站威赫式地震儀編號 No.087 微縮影片波形紀錄目錄

016 19540226_TAW_WH_2 20 1954/02/27 07	041 19540326_TAW_WH_1 14 1954/03/26 20
017 19540227_TAW_WH_1 07 1954/02/27 20	042 19540326_TAW_WH_2 20 1954/03/27 05
017 19540227_TAW_WH_2 20 1954/02/28 08	042 19540327_TAW_WH_2 21 1954/03/28 05
018 19540228_TAW_WH_1 08 1954/02/28 19	043 19540328_TAW_WH_1 08 1954/03/28 20
018 19540228_TAW_WH_2 19 1954/03/01 06	043 19540328_TAW_WH_2 21 1954/03/29 14
019 19540301_TAW_WH_2 20 1954/03/02 07	044 19540329_TAW_WH_2 19 1954/03/30 07
019 19540302_TAW_WH_1 07 1954/03/02 20	044 19540330_TAW_WH_1 07 1954/03/30 19
020 19540304_TAW_WV_2 19 1954/03/05 07	045 19540330_TAW_WH_2 19 1954/03/31 07
020 19540305_TAW_WH_1 07 1954/03/05 21	045 19540402_TAW_WH_1 07 1954/04/02 19
021 19540305_TAW_WH_2 21 1954/03/06 07	046 19540402_TAW_WH_2 19 1954/04/03 05
021 19540306_TAW_WH_1 07 1954/03/06 19	046 19540403_TAW_WH_1 07 1954/04/03 20
022 19540306_TAW_WH_2 19 1954/03/07 06	047 19540403_TAW_WH_2 20 1954/04/04 07
022 19540307_TAW_WH_1 07 1954/03/07 19	047 19540404_TAW_WH_1 07 1954/04/04 20
023 19540307_TAW_WH_2 19 1954/03/08 07	048 19540405_TAW_WH_2 19 1954/04/06 07
023 19540308_TAW_WH_1 07 1954/03/08 20	048 19540406_TAW_WH_2 19 1954/04/07 07
024 19540308_TAW_WH_2 20 1954/03/09 06	049 19540407_TAW_WH_2 19 1954/04/08 06
024 19540309_TAW_WH_1 07 1954/03/09 20	049 19540408_TAW_WH_1 07 1954/04/08 19
025 19540309_TAW_WV_1 07 1954/03/09 20	050 19540408_TAW_WH_2 19 1954/04/09 08
025 19540309_TAW_WH_2 20 1954/03/10 07	050 19540409_TAW_WH_1 08 1954/04/09 19

波形編碼 紀錄起始與結束時間	波形編碼 紀錄起始與結束時間
051 19540409_TAW_WH_2 20 1954/04/10 07	076 19540504_TAW_WH_2 21 1954/05/04
051 19540410_TAW_WV_1 07 1954/04/10 20	076 19540505_TAW_WH_1 07 1954/05/05 19
052 19540410_TAW_WH_1 07 1954/04/10 20	077 19540505_TAW_WH_2 19 1954/05/06 07
052 19540411_TAW_WH_1 07 1954/04/11 20	077 19540506_TAW_WV_1 07 1954/05/06 19
053 19540411_TAW_WH_2 20 1954/04/12 07	078 19540506_TAW_WH_1 07 1954/05/06 20
053 19540412_TAW_WH_1 07 1954/04/12 20	078 19540506_TAW_WH_2 20 1954/05/07 07
054 19540412_TAW_WH_2 20 1954/04/13 07	079 19540507_TAW_WH_1 07 1954/05/07 19
054 19540413_TAW_WH_2 20 1954/04/14 07	079 19540507_TAW_WH_2 19 1954/05/08 07
055 19540412_TAW_WV_2 20 1954/04/13 07	080 19540508_TAW_WH_1 07 1954/05/08 20
055 19540414_TAW_WV_1 07 1954/04/14 20	080 19540508_TAW_WH_2 20 1954/05/09 07
056 19540414_TAW_WH_2 20 1954/04/15 07	081 19540509_TAW_WH_1 07 1954/05/09 21
056 19540415_TAW_WH_2 19 1954/04/16 07	081 19540509_TAW_WH_2 21 1954/05/10 07
057 19540416_TAW_WH_1 07 1954/04/16 19	082 19540510_TAW_WH_1 07 1954/05/10 19
057 19540416_TAW_WH_2 19 1954/04/17 07	082 19540510_TAW_WH_2 19 1954/05/11 07
058 19540417_TAW_WH_1 07 1954/04/17 20	083 19540511_TAW_WH_1 07 1954/05/11 20
058 19540417_TAW_WH_2 20 1954/04/18 07	083 19540511_TAW_WH_2 20 1954/05/12 06
059 19540418_TAW_WH_1 07 1954/04/18 20	084 19540512_TAW_WH_1 07 1954/05/12 20
059 19540418_TAW_WV_2 20 1954/04/19	084 19540512_TAW_WH_2 20 1954/05/13 07
060 19540419_TAW_WH_1 08 1954/04/19 20	085 19540513_TAW_WH_1 07 1954/05/13 19
060 19540419_TAW_WH_2 20 1954/04/20 07	085 19540513_TAW_WH_2 19 1954/05/14 07
061 19540420_TAW_WH_1 07 1954/04/20 19	086 19540514_TAW_WH_1 07 1954/05/14 19
061 19540420_TAW_WH_2 19 1954/04/21 07	086 19540515_TAW_WH_1 07 1954/05/15 19
062 19540421_TAW_WH_1 07 1954/04/21 21	087 19540515_TAW_WH_2 20 1954/05/16 08
062 19540421_TAW_WH_2 21 1954/04/22 07	087 19540516_TAW_WH_1 08 1954/05/16 20
063 19540422_TAW_WH_1 07 1954/04/2219	088 19540516_TAW_WH_2 20 1954/05/17 07
063 19540422_TAW_WH_2 19 1954/04/23 07	088 19540517_TAW_WH_1 07 1954/05/17 20
064 19540423_TAW_WH_1 07 1954/04/2319	089 19540517_TAW_WH_2 21 1954/05/18 07
064 19540423_TAW_WH_2 19 1954/04/24 07	089 19540518_TAW_WH_1 07 1954/05/18 19
065 19540424_TAW_WH_1 07 1954/04/24 20	090 19540518_TAW_WH_2 19 1954/05/19 06
065 19540424_TAW_WH_2 20 1954/04/25 07	090 19540519_TAW_WH_1 07 1954/05/19 20
066 19540425_TAW_WH_1 07 1954/04/25 19	091 19540519_TAW_WH_2 20 1954/05/20 07

表 6、大武站威赫式地震儀編號 No.087 微縮影片波形紀錄目錄(續 1)

	066 19540425_TAW_WV_2 19 1954/04/	091 19540520_TAW_WH_1 07 1954/05/20 20
	067 19540425_TAW_WH_2 19 1954/04/26 04	092 19540520_TAW_WH_2 20 1954/05/21 08
	067 19540426_TAW_WH_1 07 1954/04/26 20	092 19540521_TAW_WH_1 08 1954/05/21 19
	068 19540426_TAW_WH_2 20 1954/04/27 07	093 19540521_TAW_WH_2 19 1954/05/22 07
	068 19540427_TAW_WH_1 07 1954/04/27 20	093 19540522_TAW_WH_1 07 1954/05/22 19
	069 19540427_TAW_WH_2 20 1954/04/28 07	094 19540522_TAW_WH_2 19 1954/05/23 07
	069 19540428_TAW_WH_1 07 1954/04/28 19	094 19540523_TAW_WH_2 19 1954/05/24 06
	070 19540428_TAW_WH_2 19 1954/04/29 07	095 19540524_TAW_WH_1 07 1954/05/24 19
	070 19540429_TAW_WH_1 07 1954/04/29 21	095 19540524_TAW_WH_2 19 1954/05/25 07
	071 19540429_TAW_WH_2 21 1954/04/30 07	096 19540525_TAW_WH_1 07 1954/05/25 19
	071 19540430_TAW_WH_1 07 1954/04/30 20	096 19540525_TAW_WV_2 20 1954/05/
	072 19540430_TAW_WH_2 21 1954/05/01 07	097 19540526_TAW_WH_1 07 1954/05/26 20
	072 19540501_TAW_WH_1 07 1954/05/01 19	097 19540526_TAW_WH_2 20 1954/05/27 07
	073 19540501_TAW_WH_2 19 1954/05/02 08	098 19540527_TAW_WH_1 07 1954/05/27 20
	073 19540502_TAW_WV_1 08 1954/05/02 19	098 19540527_TAW_WH_2 20 1954/05/28 05
	074 19540502_TAW_WH_2 19 1954/05/03 07	099 19540528_TAW_WH_1 07 1954/05/28 19
	074 19540503_TAW_WH_1 07 1954/05/03 19	099 19540529_TAW_WH_1 07 1954/05/29 20
	075 19540503_TAW_WH_2 19 1954/05/04 07	100 19540529_TAW_WH_2 20 1954/05/30 07
	075 19540504_TAW_WH_1 07 1954/05/04 20	100 19540530_TAW_WH_1 07 1954/05/30 20
1		



圖 12、大武氣象站水平向威赫式地震儀收錄 1957 年 10 月 20 日 02:28 花蓮南方 海上地震 (23.600°N, 121.550°E,震源深度 15 公里,地震規模 M_L=6.3, M_H=6.6)波形紀錄之微縮影片,地震波形編碼為 19571019_TAW_WH_2。



圖 13、大武氣象站水平向威赫式地震儀收錄 1957 年 4 月 16 日 04:04(GMT)雅加 達附近深震 (-4.51°N, 107.27°E, 震源深度 602 公里, 地震規模 m_B=7.2) 波形紀錄之微縮影片, 地震波形編碼為 19570416_TAW_WH_1。







圖 14、大武氣象站水平向威赫式地震儀收錄 1968 年 10 月 7 日 19:20(GMT)小笠 原群島深震 (26.29°N, 140.68°E, 震源深度 519 公里, 地震規模 m_B=7.2, M_w=7.3)波形紀錄之微縮影片, 地震波形編碼為 19681007_TAW_WH_2。

3.1.2 大武氣象站強震儀波形微縮影片

1942 年 11 月大武氣象站裝設大森式二倍強震儀,後更換為中央氣象台式二 倍強震儀,1983 年 6 月終止觀測後擺設在大武氣象站,2006 年拆卸運送至 921 教 育園區重新組裝,目前存放於 921 地震園區。目前已建立大武站二倍強震儀波形 目錄,微縮影片全收錄在 1 卷:編號 104-1 共 95 張波形紀錄,時間範圍自 1955/04/04 至 1983/06/21。表 7 為大武站威赫式地震儀編號 No. 087 微縮影片波形目錄的範例, 紀錄時間自 1954 年 1 月 1 日至 1957 年 8 月 21 日,全部都是中央氣象台式二倍強 震儀所收錄的波形紀錄。波形目錄建置的資料包括編號、波形編號、紀錄起始與 結束時間等。

圖 15 為大武氣象站中央氣象台式二倍強震儀收錄 1955 年 4 月 4 日 19:11(GMT)恆春南方有災害地震 (21.775°N, 120.975°E, 震源深度 0 公里, 地震 規模 M_L=6.5, M_H=6.7)波形紀錄之微縮影片, 地震波形編碼為 19550404_TAW_S2。

圖 16 為大武氣象站中央氣象台式二倍強震儀收錄 1978 年 7 月 23 日 14:22(GMT)蘭嶼有災害地震 (23.352°N, 121.329°E, 震源深度 6 公里, 地震規模 M_L=7.1, M_H=7.2)波形紀錄之微縮影片, 地震波形編碼為 19780723_TAW_S2。

編號	波形代碼	起始時間	結束時間	備註
001	19550404_TAW_S	52 1955/04/04	07 1954/04/04 21	恆春南方 ML=6.5
002	19550413_TAW_S	52 1955/04/13	18 1954/04/14	綠島東方 ML=5.1
003	19550414_TAW_S	52 1955/04/14	06 1954/04/18 07	四川康定 MW=7.5
004	19551005_TAW_S	52 1955/10/05	08	
005	19590904_TAW_S	52 1959/09/04	06	有波形
006	19610204_TAW_S	52 1961/02/04	07 1961/02/05	
007	19611012_TAW_S	52 1961/10/12	06 1961/10/13 05	大武東南方 ML=4.8
008	19611105_TAW_S	52 1961/11/05	06 1961/11/06	大武東南方 ML=4.7
009	19611118_TAW_S	32 1961/11/18	07 1961/11/19	花蓮東南方地震 ML=5.6
010	19621108_TAW_S	52 1962/11/08	07 1962/11/09	有波形
011	19630213_TAW_S	52 1963/02/13	07 1963/02/14	蘇澳地震 ML=7.1
012	19630304_TAW_S	52 1963/03/04	07 1963/03/05	蘇澳地震 ML=5.9
013	19630310_TAW_S	52 1963/03/10	07 1963/03/11	宜蘭北方 ML=5.8
014	19630315_TAW_S	52 1963/03/15	06	有波形
015	19640619_TAW_S	52 1964/06/19	07 1964/06/20	綠島地震 ML=5.4
016	19640803_TAW_S	52 1964/08/03	07 1964/08/04	大武地震 ML=5.5
017	19640916_TAW_S	52 1964/09/16	05 1964/09/17	南投地震 ML=4.1
018	19650517_TAW_S	52 1965/05/17	06 1965/05/18 01	臺東南方 ML=6.1
019	19660312_TAW_S	52 1966/03/12	06 1966/03/13 01	花蓮外海地震 ML=7.3
020	19660323_TAW_S	52 1966/03/23	06 1966/03/23	花蓮東南方 ML=6.1
021	19660608_TAW_S	52 1966/06/08	06 1966/06/09	臺東西北方 ML=5.2
022	19660915_TAW_S	52 1966/09/15	06 1966/09/16 06	臺東東北方 ML=5.6
023	19671025_TAW_S	52 1967/10/25	06 1967/10/26 06	蘇澳外海 ML=6.6
024	19671026_TAW_S	52 1967/10/26	06 1967/10/27	花蓮東北 ML=5.9

表7、大武氣象站編號 No.104-1 強震儀微縮影片波形紀錄目錄

025 19680226_TAW_S2 1968/02/26 06 1968/02/27 06 臺東東北方 ML=6.9 026 19680522 TAW S2 1968/05/22 06 027 19700916 TAW S2 1970/09/16 06 大武東方 ML=5.2 028 19701115 TAW S2 1970/11/15 1970/11/16 有波形 029 19701128_TAW_S2 1970/11/28 06 1970/11/29 06 有波形 030 19710511 TAW S2 1971/05/11 06 1971/05/12 06 臺東南方 ML=5.6 031 19711020 TAW S2 1971/10/20 06 1971/10/21 06 恆春東方 ML=5.7(不清楚) 032 19711030 TAW S2 1971/10/30 06 1971/10/31 06 成功西南方 ML=5.3 033 19711224_TAW_S2 1971/12/24 06 1971/12/25 06 034 19720104_TAW_S2 1972/01/04 06 1972/01/05 06 臺東東南 ML=6.5 035 19720108 TAW S2 1972/01/08 06 1972/01/09 06 恆春西南方 ML=5.4 036 19720922 TAW S2 1972/09/22 06 1972/09/23 06 恆春東北方 ML=6.2 037 19720923 TAW S2 1972/09/23 06 1972/09/23 10 恆春東方 ML=6.3 038 19720927_TAW_S2 1972/09/27 06 1972/09/28 06 恆春東方 ML=5.5 039 19721021 TAW S2 1972/10/21 06 1972/10/22 06 大武南方 ML=5.0 040 19721107_TAW_S2 1972/11/07 06 1972/11/08 06 屏東地震 ML=5.2 041 19721109 TAW S2 1972/11/09 06 1972/11/10 06 花蓮西方 ML=6.1 042 19730214 TAW S2 1973/02/14 06 1973/02/15 06 臺東西南 ML=6.0 043 19730728_TAW S2 1973/07/28 06 1973/07/29 06 蘭嶼西北方 ML=5.7 044 19730608_TAW_S2 1973/06/08 06 1973/06/09 06 臺東南方 ML=4.8 045 19740206_TAW_S2 1974/02/06 06 1974/02/07 06 臺東西南方 ML=5.1 046 19740505_TAW_S2 1974/05/05 06 1974/05/06 06 綠島南方 ML=5.1 047 19740808 TAW S2 1974/08/08 06 1974/08/09 07 宜蘭東南東 ML=5.7 1975/03/23 08 1975/03/24 06 048 19750323 TAW S2 臺東東方 ML=5.9 1975/06/14 08 1975/06/15 08 049 19750614 TAW S2 050 19750523_TAW_S2 1975/05/23 08 1975/05/24 08 臺東東方 ML=5.3

表 7、大武氣象站編號 No.104-1 強震儀微縮影片波形紀錄目錄(續 1)

编號	波形代碼	起始時間	結束時間	備註
051 19	9750626_TAW_S2	1975/06/26 08 19	975/06/27	
052 19	9751031_TAW_S2	1975/10/31 07 19	975/11/01	菲律賓地震 MW=7.5
053 19	9760223_TAW_S2	1976/02/23 07 19	976/02/24	成功東南 ML=5.7
054 19	9760320_TAW_S2	1976/03/20 08 19	976/03/21 08	
055 19	9760529_TAW_S2	1976/05/29 07 19	976/05/30 08	
056 19	9760609_TAW_S2	1976/06/09 07 19	976/06/10 08	臺東西方 ML=5.1
057 19	9760701_TAW_S2	1976/07/01 08 19	976/07/02 08	
058 19	9760727_TAW_S2	1976/07/27 08 19	976/07/28 08	唐山大地震 MW=7.6
059 19	9760728_TAW_S2	1976/07/28 08 19	976/07/29 08	
060 19	9760816_TAW_S2	1976/08/16 07 19	976/08/17 08	菲律賓地震 MW=8.0
061 19	9761115_TAW_S2	1976/11/15 08 19	76/11/16 08	河北地震 MS=6.3
062 19	9770120_TAW_S2	1977/01/20 08 19	977/01/21	
063 19	9770121_TAW_S2	1977/01/21 08 19	977/01/22	
064 19	9770721_TAW_S2	1977/07/21 08 19	977/07/22 07	菲律賓地震 MS=6.9
065 19	9770715_TAW_S2	1977/07/15 08 19	977/07/16 07	
066 19	9770819_TAW_S2	1977/08/19 08 19	977/08/20 07	
067 19	9771007_TAW_S2	1977/10/07 07 19	977/10/08 18	
068 19	9771019_TAW_S2	1977/10/19 07 19	977/10/20 07	綠島地震 ML=5.3
069 19	9771028_TAW_S2	1977/10/28 08 19	977/10/29 07	
070 19	9771206_TAW_S2	1977/12/06 08 19	977/12/07 07	
071 19	9771212_TAW_S2	1977/12/12 08 19	977/12/13 07	臺東東北方海上 ML=5.4
072 19	9771228_TAW_S2	1977/12/28 07 19	977/12/29	
073 19	9780114_TAW_S2	1978/01/14 07 19	978/01/15 07	
074 19	9780307_TAW_S2	1978/03/07 08 19	978/03/08 08	
075 19	9780314_TAW_S2	1978/03/14 08 19	978/03/15	

076 19780408_TAW_S2	1978/04/08 07 1978/08/09 07	太麻里地震 ML=5.8
077 19780723_TAW_S2	1978/07/23 08 1978/07/23 23	蘭嶼地震 ML=7.1
078 19780723_TAW_S2	1978/07/23 23 1978/07/24 07	
079 19780724_TAW_S2	1978/07/24 07 1978/07/25 07	蘭嶼地震餘震 ML=5.6
080 19780725_TAW_S2	1978/07/25 07 1978/07/26 07	
081 19780813_TAW_S2	1978/08/13 08 1978/08/14 08	蘭嶼北部 ML=5.4
082 19780826_TAW_S2	1978/08/26 07 1978/08/27 08	蘭嶼北部 ML=5.3
083 19780902_TAW_S2	1978/09/02 08 1978/09/02 11	宜蘭東方 ML=5.8
084 19781223_TAW_S2	1978/12/23 08 1978/12/23 20	玉里東方地震 ML=6.9
085 19790826_TAW_S2	1979/08/26 07 1979/08/27 07	菲律賓 MS=7.1
086 19810129_TAW_S2	1981/01/29 08 1981/01/30 07	
087 19810302_TAW_S2	1981/03/02 07 1981/03/03	臺東東北方地震 ML=5.8
088 19810220_TAW_S2	1981/02/20 07 1981/02/21	臺東東北 ML=5.5
089 19810321_TAW_S2	1981/03/21 08 1981/03/22	
090 19820114_TAW_S2	1982/01/14 08 1982/01/15	
091 19820123_TAW_S2	1982/01/23 07 1982/01/24	花蓮南方地震 ML=5.8
092 19821217_TAW_S2	1982/12/17 08 1982/12/18	與那國島西方 ML=6.0
093 19830226_TAW_S2	1983/02/26 08 1983/02/26 10	臺東南方地震 ML=5.3
094 19830226_TAW_S2	1983/02/26 08 1983/02/26 10	(重複)
095 19830621_TAW_S2	1983/06/21 08 1983/06/22	花蓮東方地震 ML=6.3





圖 15、大武氣象站中央氣象台式二倍強震儀收錄 1955 年 4 月 4 日 19:11(GMT)恆 春南方有災害地震 (21.775°N, 120.975°E,震源深度 0 公里,地震規模 ML=6.5, MH=6.7) 波 形 紀 錄 之 微 縮 影 片 , 地 震 波 形 編 碼 為 19550404_TAW_S2。





圖 16、大武氣象站中央氣象台式二倍強震儀收錄 1978 年 7 月 23 日 14:22(GMT) 蘭嶼有災害地震 (23.352°N, 121.329°E,震源深度 6 公里,地震規模 M_L=7.1, M_H=7.2) 波形紀錄之微縮影片,地震波形編碼為 19780723_TAW_S2。

3.2 1900-1972 年地震重定位

本計畫另一重點是針對 1900-1972 年間地震進行重定位,首要工作是建置波時到達時間資料庫。資料來源包括地震觀測報告、地震氣象報告、臺灣地震調查 原簿、地震季報與地震波形資料等。

- 地震觀測報告:主要為臺北測候所在地震發生後手寫的地震觀測報告,如圖 17(a).所示1908年1月11日璞石閣地震報告(臺北測候所,1908);臺灣總督府 府報刊列的地震觀測報告,如圖17(b).所示1922年9月2日蘇澳地震報告(府 報);在各期刊中刊登的地震觀測報告,如圖17(c).所示1904年4月24日臺灣 南部地震報告(臺北測候所,1905);以及各災害地震後出版的地震觀測報告, 如圖12(d).所示1941年中埔地震報告等。
- 臺灣氣象報告:主要是臺灣總督府臺北觀測所(後改名為臺灣總督府氣象臺)自 1934 年至 1940 年每三個月出版的臺灣氣象報告(昭和九年第一號至昭和十五 年第三號),其中第四部地震報告詳細列載地震觀測資料,目前欠缺 1937 年 10-12 月與 1939 年 10-12 月資料,如圖 18(a)所示。
- 3. 臺灣地震調查原簿:此部分是以以手寫的原稿,記載當時個測站地震觀測資料,包括觀測站、發震時間、S-P時間、初動情形、最大振幅、總震動時間、使用地震儀、各地震度等等。在計畫執行前只找到 1934 年至 1937 年的臺灣地震調查原簿,其後陸續找出 1925 年 6 月至 1933 年較為粗略的紀錄,以及 1938-1976 年間(其中欠缺 1975 年)的記載。目前存放在中央氣象署地下室 B205 庫房,保存狀況不佳,如圖 18(b)所示。
- 地震季報:自1954年開始每三個月定時出版的地震季報,摘錄1954-1972年 間地震觀測資料(第一卷第一號至第十九卷第四號),如圖13(b)所示。
- 地震波形資料:主要以前三年與本年度計畫整理歷史地震波形中彙整的震波到 達時間資料等,如圖 14 所示 1957 年 10 月 20 日 02:28 花蓮南方海上地震 (23.600°N, 121.550°E,震源深度 15 公里,地震規模 ML=6.3, MH=6.6)各站所 收錄之波形紀錄之微縮影片。

圖 17 顯示重定位後震央分布圖,圖 17(a)為 1900-1925 年 5 月震央分布情形, 由於此期間地震測站較少,觀測使用的地震儀主力為大森式水平地震儀,倍率較 低(臺北站 20 倍、恆春站 10 倍、其他測震站 6 倍),故能偵測到的地震較少,且 欠缺原始觀測資料,只有較大災害地震報告有詳細觀測資料能夠進行重定位,其 餘主要參考徐明同(1989)資料,故地震少且大都呈現網格狀。圖 17(b)為 1925 年 6 月-1933 年震央分布情形,此段時間有詳細的 S-P 波資料,故定位明顯改善許多, 也能推算相對的震源深度,雖然 1928 年開始裝設威赫氏地震儀,至 1933 年底才 普及各測站,故此時間規模推估主要還是依據經驗式(5)與(6),由震度推求。圖 17(c)為 1934 年-1937 年震央分布情形,資料來源主要根據臺灣氣象報告,但臺灣 氣象報告中仍缺漏許多,就由臺灣地震調查原薄補齊,此時期地震觀測的主力為 威赫式地震儀,故地震資料相當完整。圖 17(d)為 1938 年-1953 年震央分布情形, 其中 1938 年至 1940 年資料參考臺灣氣象報告,缺漏部分則參考徐明同(1980)登

錄的地震,另外補入1941年中埔地震與1951年花東縱谷地震登錄的餘震,故部 分震央仍呈現網格狀。圖 17(e)為 1954 年-1972 年震央分布情形,此段時期主要參 考地震季報,地震季報登錄的資料相當齊全,重定位的結果相當理想,但仍遺漏 許多地震,部分由微縮影片地震波形資料讀取,其餘則參考徐明同(1980)登錄的 地震資料。圖 17(f)為 1900 年-1972 年震央分布情形。由於計畫執行期間陸續從中 央氣象署地下室 B205 與南區氣象中心找到許多臺灣地震調查原簿,最早可追溯 至 1925 年 6 月, 直至 1976 年(欠缺 1975 年)。雖然當初規畫重新定位僅包含 1934 年至 1937 年的臺灣地震調查原簿,且已執行完成。因資料珍貴,故目前針對 1925 年 6 月至 1933 年間地震亦進行重定位,且成果非常理想(圖 17(b))。雖然計畫結 束,未來仍會持續針對臺灣地震調查原簿進行處理,並進行重新定位。



圖 17、地震觀測報告資料來源是意圖(a). 1908 年 1 月 11 日璞石閣地震報告(臺北 測候所, 1908);.(b). 1922年9月2日蘇澳地震報告(府報); (c). 1904年 4月24日臺灣南部地震報告(臺北測候所, 1905); (d). 1941年12月17日 中埔地震報告(臺灣總督府氣象臺, 1942)。



(a)

圖 18、地震重訂位資料來源是意圖(a).臺灣氣象報告;.(b).臺灣地震調查原簿; (c).

臺灣季報。



圖 19、1957 年 10 月 20 日 02:28 花蓮南方海上地震 (23.600°N, 121.550°E, 震源 深度 15 公里, 地震規模 M_L=6.3, M_H=6.6)各站所收錄之波形紀錄之微縮影 片; (a).花蓮站; .(b).臺南站; (c).大武站; (d).臺中站; (e).恆春站。





圖 17、重定位後震央分布圖: (a). 1900 年-1925 年 5 月震央分布圖; (b). 1925 年 6 月-1933 年震央分布圖; (c). 1934-1937 年震央分布圖; (d). 1938-1953 年 震央分布圖; (e).1954-1972 年震央分布圖; (f).1900-1972 年震央分布圖。
肆、結論

- 本年度整理大武氣象站收錄的微縮影片波形紀錄,微縮影片編號087至104-1 共19卷,共計10,535片微縮影片,20,959張波形紀錄。
- 建立大武氣象站威赫式地震儀波形目錄,自1954年1月11日至1983年6月30日,共20,864張波形紀錄。建立中央氣象台式二倍強震儀波形目錄,自1955年4月4日至1983年6月22日,共95張波形紀錄。建立資料包括儀器種類、紀錄的時間等。對於較顯著或較具有意義的地震波形進行掃描,儲存成數位波形影像檔
- 3. 完成1900年至1972年地震重新定位,計畫執行期間在氣象署地下室 B205找獲 臺灣地震調查原簿,登錄資料自1925年6月至1976年(欠缺1975年),其中1925 年6月至1937年部分已加入今年成果,未來仍會持續針對臺灣地震調查原簿進 行處理,並進行重新定位。

参考文獻

- 中央氣象局,1988:臺灣地震紀錄目錄表,第一冊,357頁。
- 台灣省氣象所,1952,1951年地震報告,83頁。
- 台灣總督府氣象台,1942,昭和16年12月17日嘉義地方烈震報告,台北,227頁(日 文)。
- 台灣總督府台北觀測所,台灣氣象報告,昭和9年第1號—昭和15年第3號,台北(日 文)。
- 地震季報,中央氣象局,第1卷第2號至第44卷第4號。
- 李白華,1985:臺北地震紀錄微縮影,行政院國家科學委員會防災科技研究報告 73-54,NSC 74-0414-P052-05,54頁。
- 徐明同,1980:台灣地震目錄(西元1644年至1979年),國立台灣大學地震工程研究 中心,CEER S 69-01,77頁。
- 徐明同,1989:台灣地區1900-1935年間地震規模之推算,中興工程科技研究發展 基金會,30頁。
- 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。
- Kanamori, H., L. Rivera, and W. H. K. Lee, 2010: Historical seismograms for unravelling a mysterious earthquake: The 1907 Sumatra Earthquake. Geophys. J. Int., 183, 358-374.
- Lee, P. H, 1987: Historical seismograms and earthquakes of the world/ edited byW.H. Lee, H. Meyers, K. Shimazaki, 241-252.