

人工智慧技術建立微分區地震預警系統相關研究(II)

子計畫一

大數據機器學習進行現地預警分析有效減少盲區

馬國鳳 郭陳浩 莊永裕 謝銘哲

國立中央大學地球科學系

摘要

本計畫之研究目的即運用大數據深度學習法於地震預警系統中，期望能快速地解算各地區最大震度並提供較長的預警時間。上一年度(2021)以“轉換器地震警示模式”(Transformer Earthquake Alerting Model, 簡稱 TEAM)模型為架構，使用2012-2020年中央氣象局 TSMIP 的地震資料進行深度學習與測試。第一期研究成果顯示臺灣地區的 TEAM 模型僅需 4 秒的地震資料即可收斂得到一相對準確的 PGA 預估值。今年度將對目前使用的 TEAM 模型做更嚴謹的檢視與進一步的調整，例如：優化資料前處理、小地震事件下採樣及加入地震規模較大之地區的資料集等，以探討前處理對於地震度預測結果之影響及使得 TEAM 模型更加本地化。

關鍵詞：地震、深度學習、地震預警

Abstract

The research purpose of this project is to use deep learning method in earthquake early warning system for quickly estimating peak ground acceleration (PGA) in any site and also for providing a longer early warning time. In 2021, the CWB earthquake catalogs from 2012 to 2020 were trained and tested under the deep learning structure of Transformer Earthquake Alerting Model (TEAM). The first phase of the research results showed that the TEAM model in Taiwan only needs 4 sec of waveforms to get a relatively accurate value of predicted PGA. This year in 2022, we will focus on improving the currently used TEAM model by optimizing data pre-processing, undersampling of small earthquake events, and adding dataset from regions with larger earthquakes. This rigorous review and adjustment of TEAM model can help us understand how the attributes in pre-processing affect the predicted PGA intensity results and can make TEAM more suitable for Taiwan.

Keywords: Earthquake、deep-learning、earthquake early warning

一、研究動機與目的

大數據機器學習技術在資訊科學領域已是發展非常成熟之技術，近年來也成功且廣泛地應用於各個領域中。本計畫之研究目的即運用大數據機器學習方法於地震預警中，期望能夠快速地解算各地區震度並提供較長的預警時間與準確的震度分佈圖，預警時間與震度分佈圖為最重要的兩個預警參數。

二、研究方法

2-1 地震預警方法

地震預警系統目前在全世界有兩種對外發布方式，一個是對於所有對象發布，例如：墨西哥、日本、南韓與臺灣，另一個是針對特定群組進行發布，例如：土耳其、羅馬尼亞與美國（圖 2-1）。地震預警系統所使用的計算方式有三種：點震源模型(Point Source Model, 簡稱 PSM)、有限斷層模型(Finite Fault Model, 簡稱 FFM)以及地振動模型(Ground Motion Model, 簡稱 GMM)，這三種方法各有其優缺點（圖 2-2）。

Munchmeyer et al. (2021)將其發展的深度學習推算最大震度圖的地震預警系統稱之為“轉換器地震警示模式”(Transformer Earthquake Alerting Model, 簡稱 TEAM)。TEAM 為德國地球科學研究中心(Deutsches GeoForschungs Zentrum, 簡稱 GFZ)所主導之研究成果，其特點為經過深度學習模型訓練後，在即時資料處理上僅需分析原始強地動資料，即可獲得任意地點與測站之最大地振動加速度(PGA)。

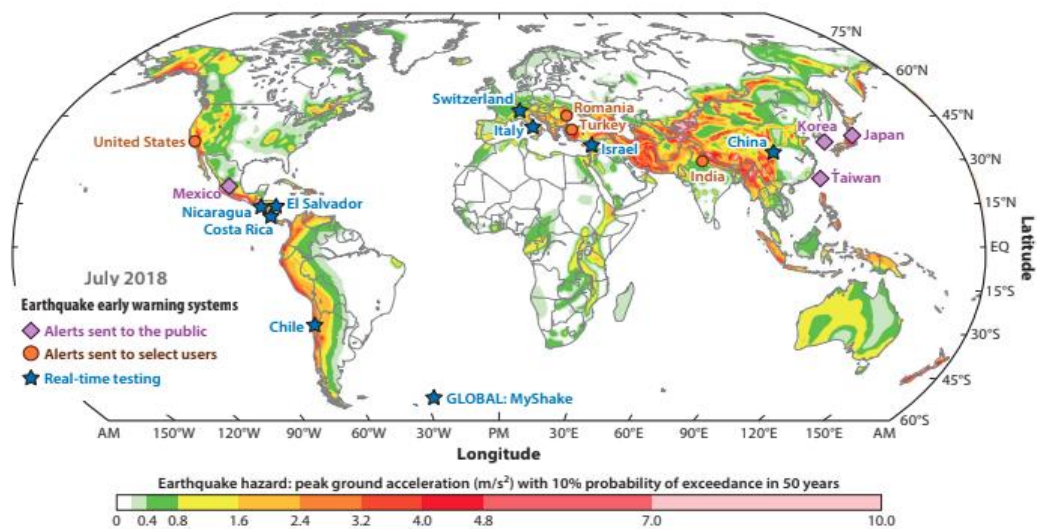


圖 2-1: 世界地震預警系統使用分佈圖(Allen and Melgar, 2019)。

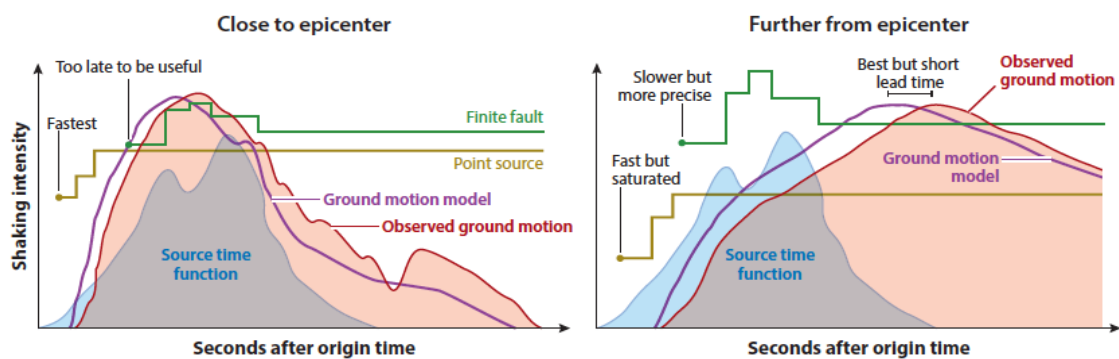


圖 2-2：現行三種地震預警方法的預警時間與預測最大震度比較圖(Allen and Melgar, 2019)。

2-2 TEAM 模型架構

TEAM 的地震預警系統主要分為三部分：地震偵測(event detection)、最大震度估算(PGA estimation)與震度門檻值警示值設定(Thresholding) (圖 2-3)。

TEAM 為利用深度學習中端對端(end-to-end)的特點，僅需要初始的地震波資料(raw waveforms)，輸出最終結果為最大震度機率密度(predicted PGA probability densities)，中間沒有任何的地球物理參數進行控制，此計畫也是利用深度學習的特點，將震源特性與地體構造等資訊內化於深度學習網絡中而進行 PGA 學習與估算(圖 2-4)。TEAM 共包含五層工作流程：資料準備與前處理(Input)、特徵訊號擷取(Feature Extraction)、特徵訊號結合(Feature Combination)、PGA 估算(PGA Estimation)與輸出結果(Output)。

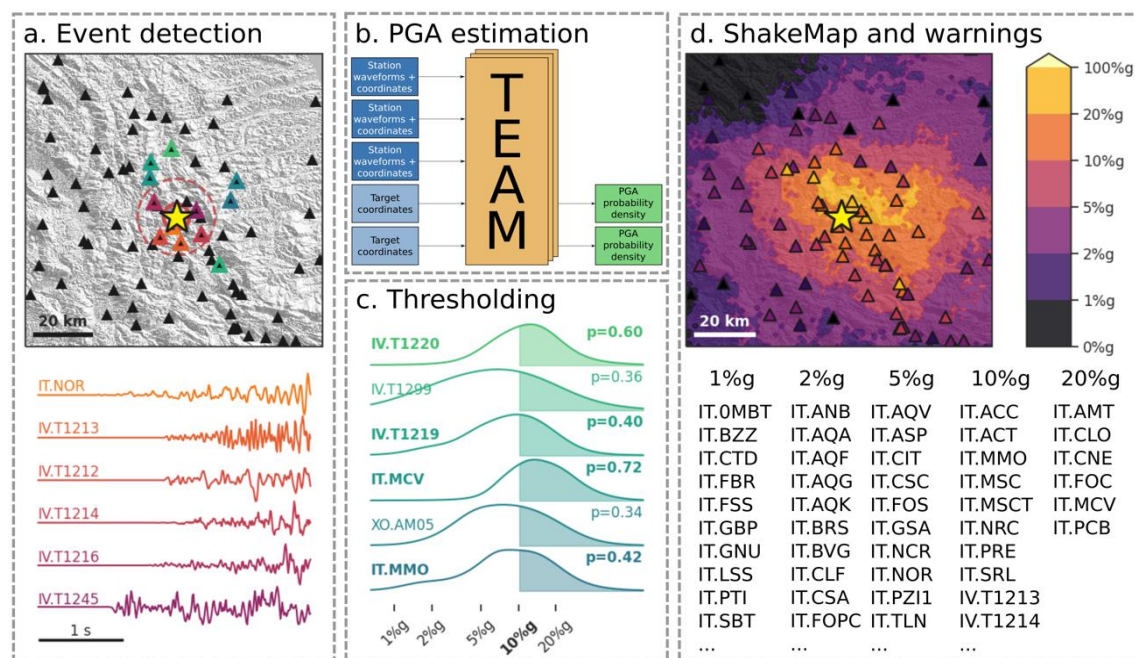


圖 2-3：TEAM 地震預警系統作業流程圖(Munchmeyer et al., 2021)。

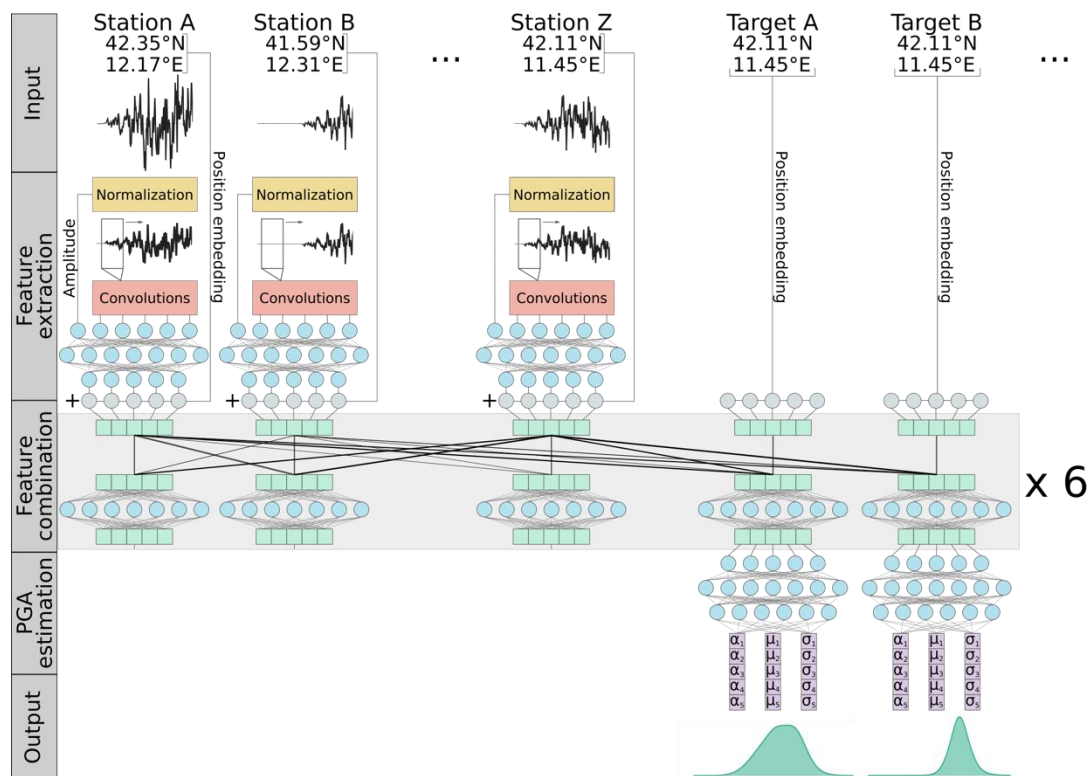


圖 2-4：TEAM 地震預警系統震度機率密度計算之概觀(Munchmeyer et al., 2021)。

三、上期成果

去年度(2021) 研究成果之價值在於確認 TEAM 模型最大的優勢就是解算時間快速。由於 TEAM 中間沒有任何的地球物理參數進行控制，只要提供訓練良好的模型一定長度的地震波資料。以臺灣地區 2012 年至 2020 年地震資料集來做機器學習的結果可得知，對於單一測站而言，TEAM 模型僅需 4 秒的地震資料即可收斂至穩定，得到一相對準確的 PGA 預估值(圖 3-1)；對於單一大地震事件而言，TEAM 模型只要有一定數量的測站有較大的 PGA 值，僅需 0.5 秒的資料就可以發布地震警報(圖 3-2)。

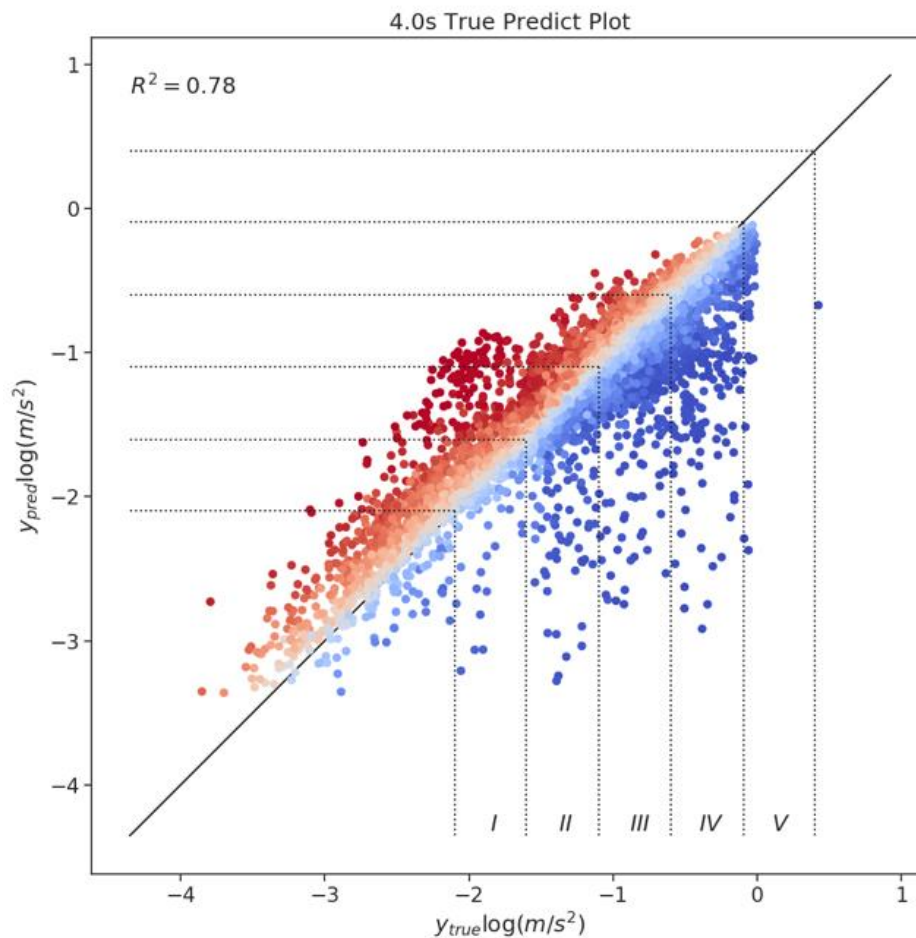


圖 3-1：2019-2020 測試集 PGA 預測結果比較圖。

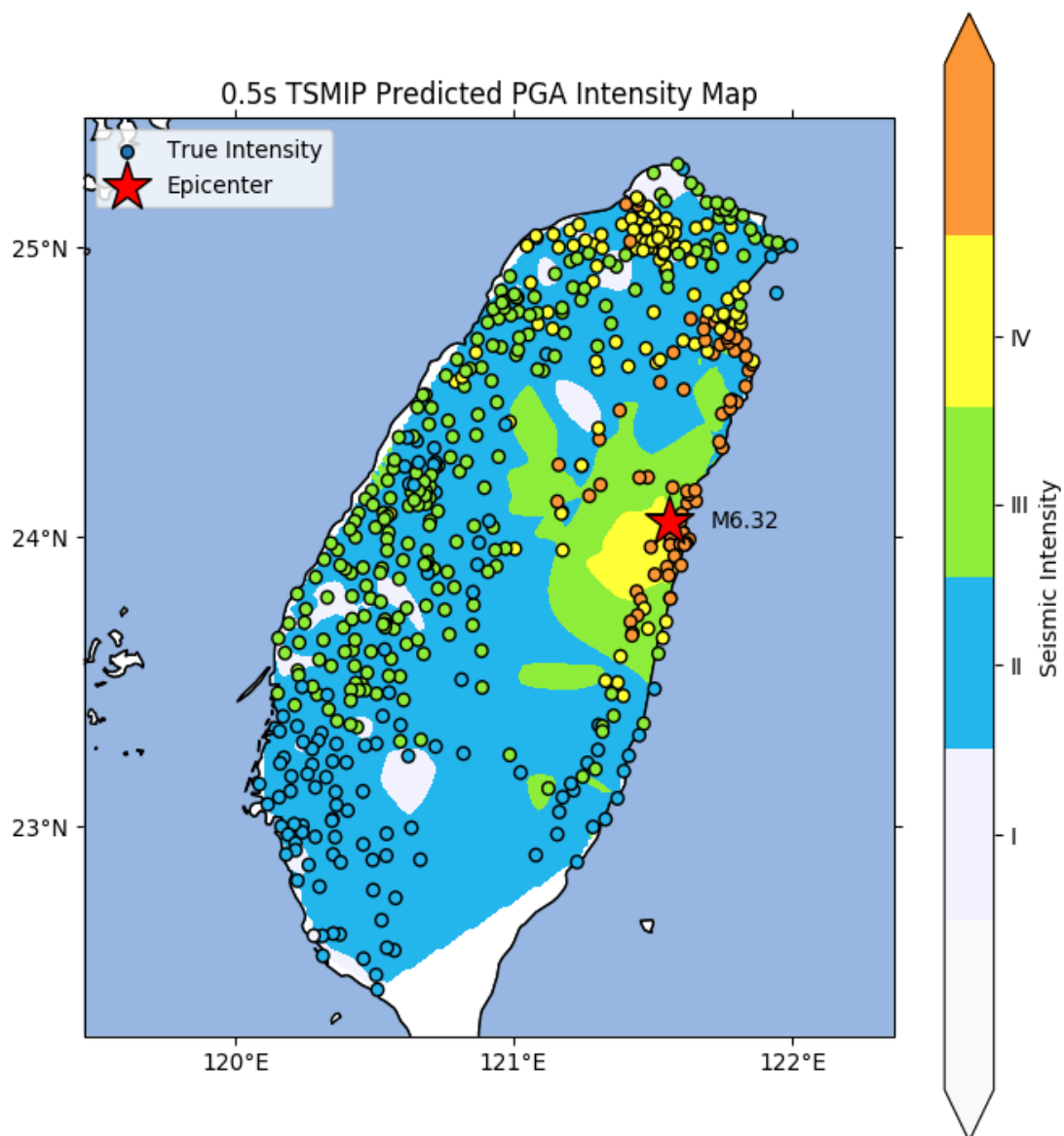


圖 3-2：20190418 地震事件預測震度分佈圖。星號為震央，圓點為該測站的實際震度。

四、資料集

4-1 資料下採樣

因為小震度波形資料數量太多，相比達到發布預警標準 4 級震度以上的波形資料比例懸殊(圖 4-1)，導致模型預估較大震度時有偏低的趨勢。為了進一步提高 4 級以上震度波形資料的比例，以 PGA 小於 0.8 gal 為標準，刪除震度不到 1 級的測站(圖 4-2)，並篩選掉剩餘測站不到三站的小規模地震事件。經過調整後波形資料量減少一半左右，可以大幅降低訓練模型所需的時間。

以下表 4-1 為刪除前與刪除後數量之比較：

表 4-1：資料前處理調整資料量對比。

2012-2020	地震事件	波形檔案
原資料	16,528	99,168
刪除後資料	5,110	40,800

4-2 新震度計算

依照新制十級震度分級如表 4-2 換算震度，4 級(含)以下由 PGA 決定，5 弱(含)以上由 PGV 決定。因計算新制震度需要考量 PGV，加速度波形資料需要先以帶通濾波過濾 0.075Hz - 10Hz，之後利用梯形積分法求得速度波形，最後計算三分量之和向量取最大值得到該測站之 PGV。

表 4-2：新制十級震度分級對照表。

震度階級	0	1	2	3	4	5-	5+	6-	6+	7
PGA(cm/sec ²)	<0.8	0.8-2.5	2.5-8.0	8.0-25	25-80	80-140	140-250	250-440	440-800	>800
PGV(cm/sec)	<0.2	0.2-0.7	0.7-1.9	1.9-5.7	5.7-15	15-30	30-50	50-80	80-140	>140

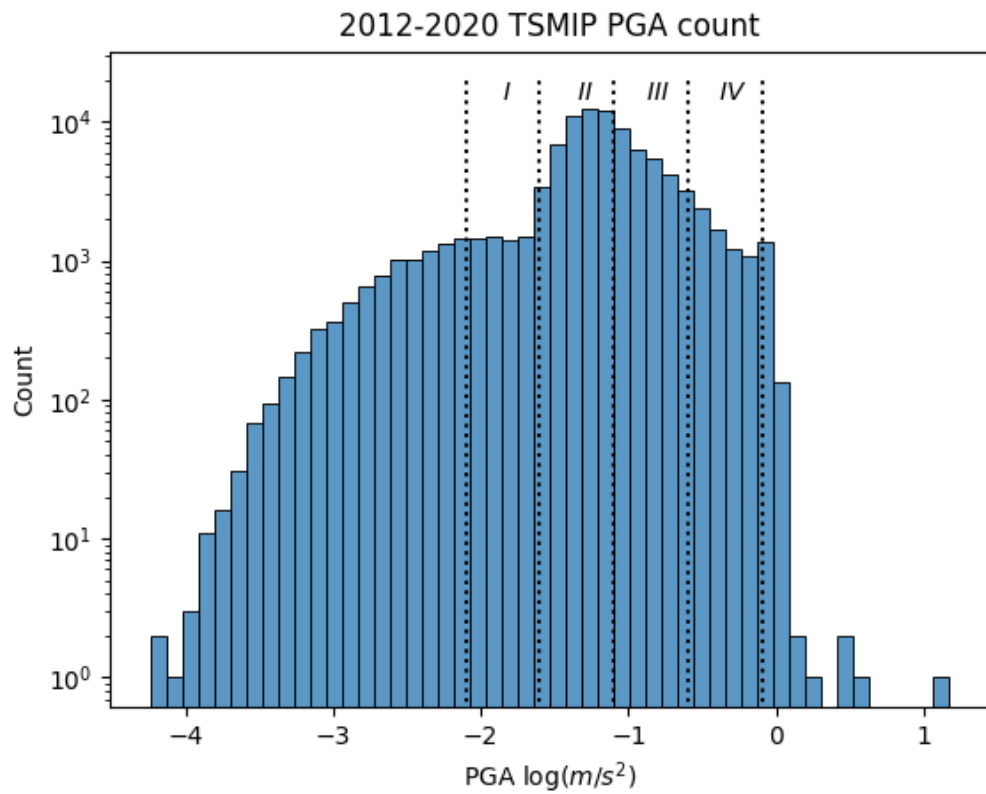


圖 4-1：改進前 PGA 分佈圖，共 99,168 筆波形資料。

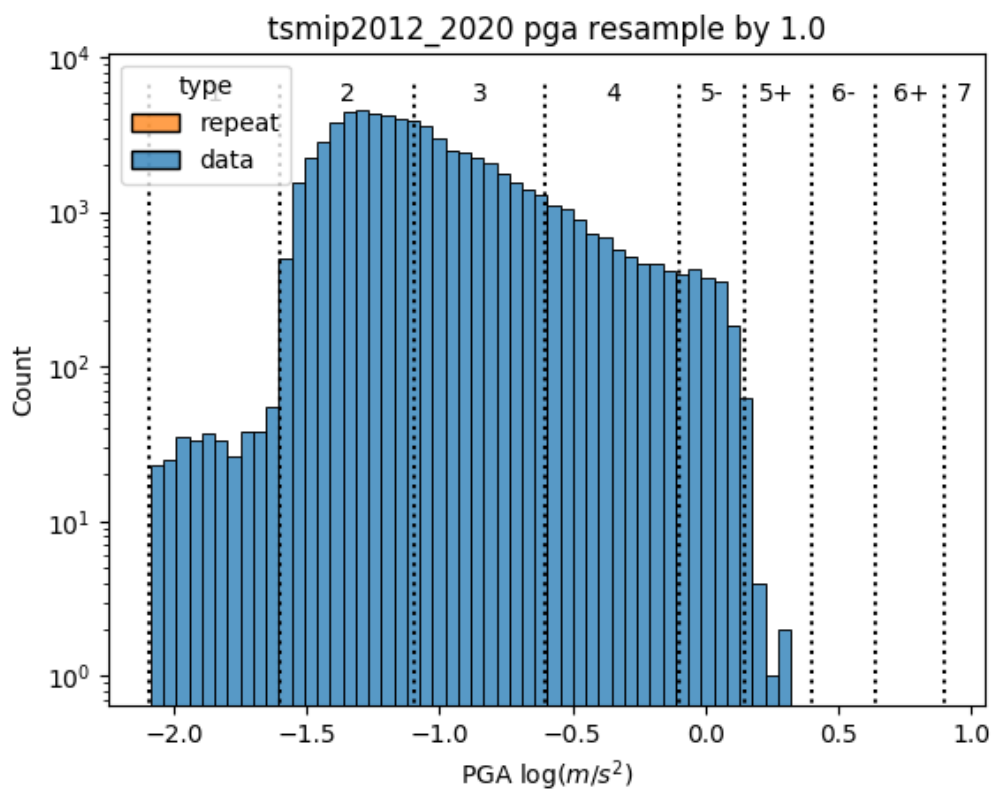


圖 4-2：改進後 PGA 分佈圖，共 40,800 筆波形資料。

4-3 資料統計

本年度計畫新增了 TSMIP 測網之 1991-2011 的資料進行訓練，其中新增 4,258 筆地震事件與 34,064 筆波形檔案。1991-2020 之所有資料的分佈圖如下(圖 4-3 至 4-5)。由於刪減了少於三個測站之地震事件，小規模地震數量明顯減少，另外由 PGA 估算出震度 1 之地震測站也跟著部分減少。

詳細資料統計如表 4-2 所示。

表 4-2：臺灣 1991 年至 2020 年資料集。

	年份	地震事件	波形檔案
新增資料 (45%)	1991-2011	4,258	34,064
訓練集 (71%)	1991-2017	6,612	52,896
驗證集 (18%)	2018	1,713	13,704
測試集 (11%)	2019-2020	1,403	8,344
加總	1991-2020	9,368	74,944

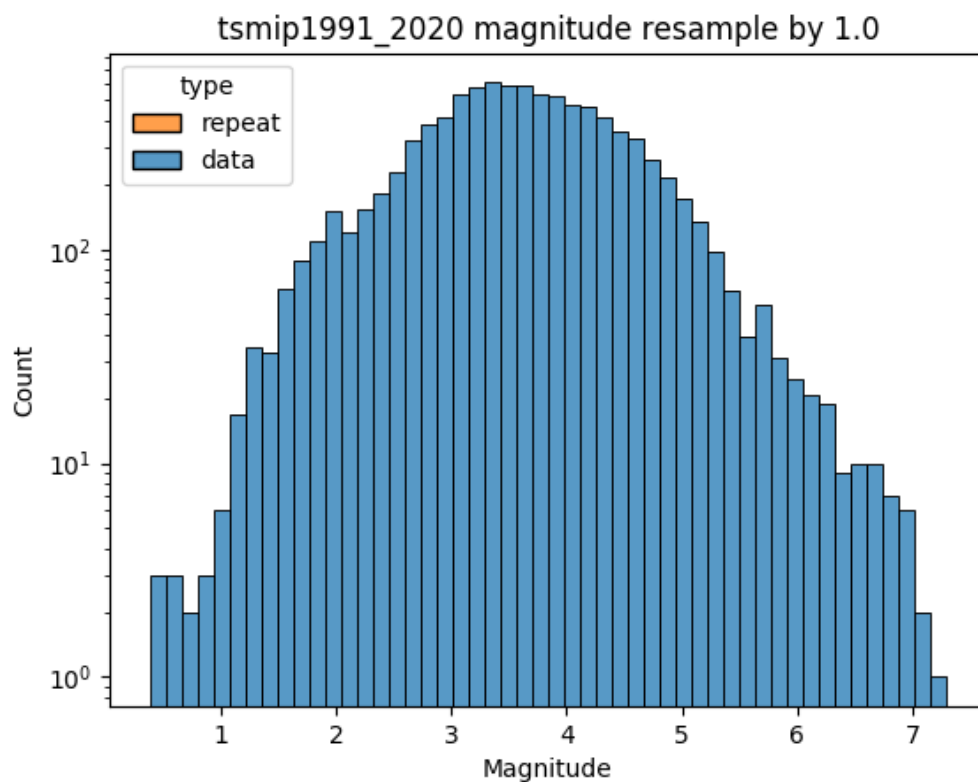


圖 4-3：TSMIP 1991-2020 地震規模分佈圖。

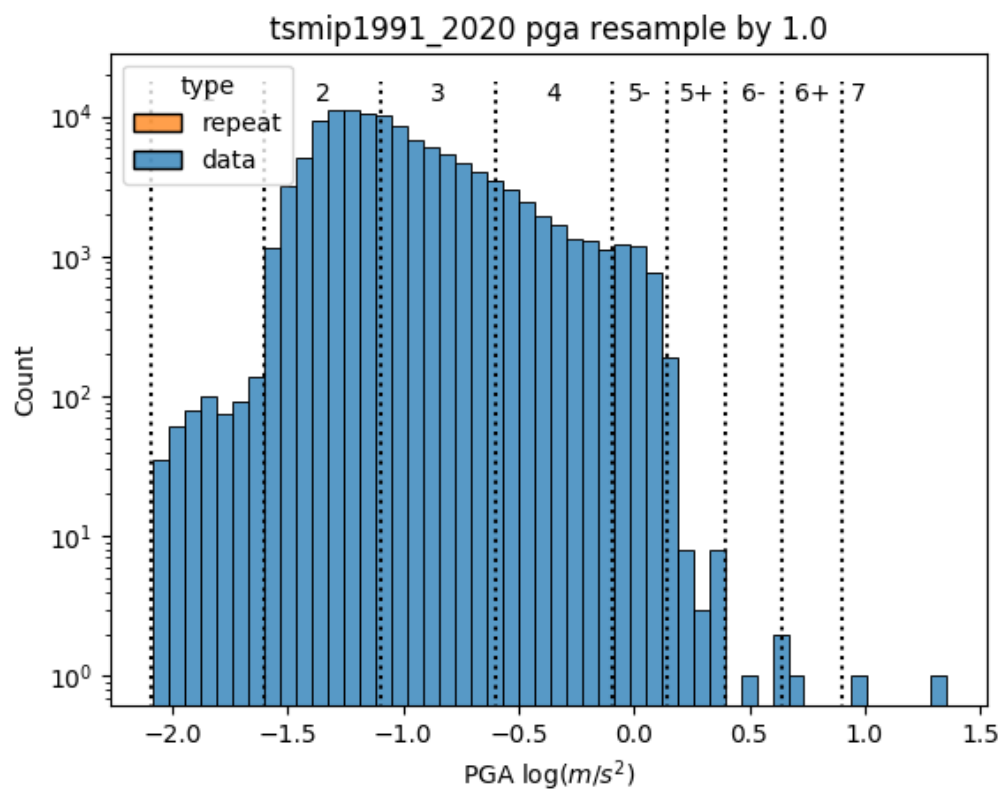


圖 4-4：TSMIP 1991-2020 PGA 分佈圖。

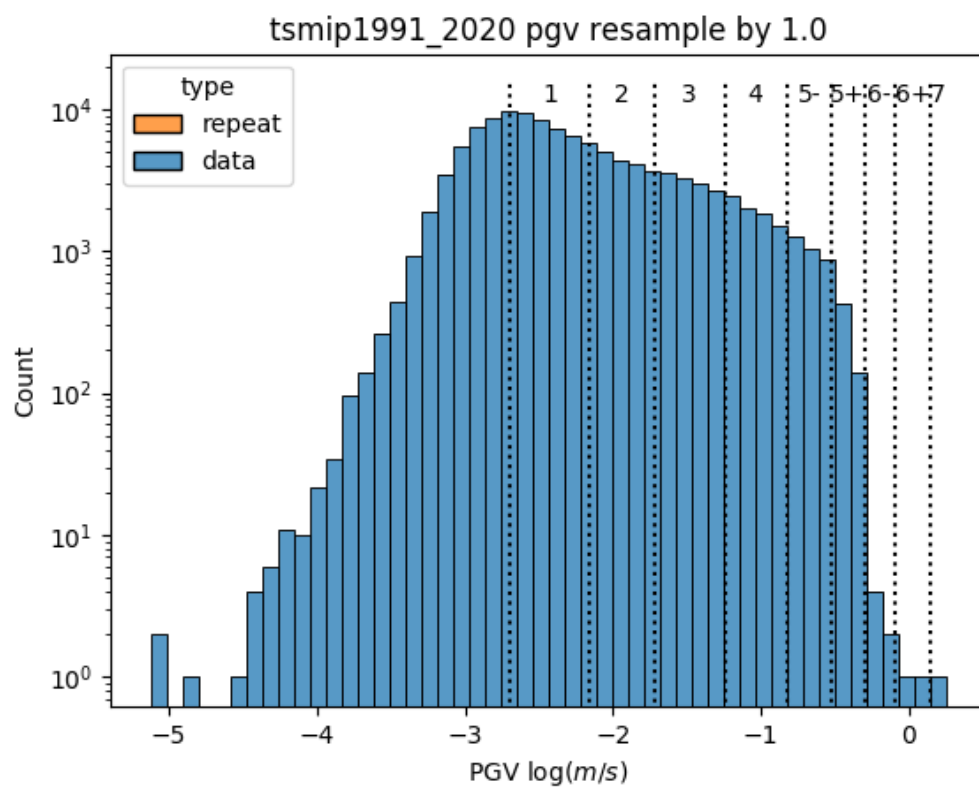


圖 4-5：TSMIP 1991-2020 PGV 分佈圖。

五、實驗結果

由 PGA 改為 PGV，我們同樣以 1991-2017 的資料訓練，得到 2019-2020 的 PGV 預測結果比較圖（圖 5-1）。延續前期實驗結果的經驗，模型到 4 秒後開始穩定，由實驗結果觀察可以看到模型收斂情況不佳（圖中以藍色圓圈標示），尤其地圖上顯示大多區域為白色與淺綠色（表示低震度），說明了模型預測存在不少低估的問題（圖 5-2 至圖 5-6）。

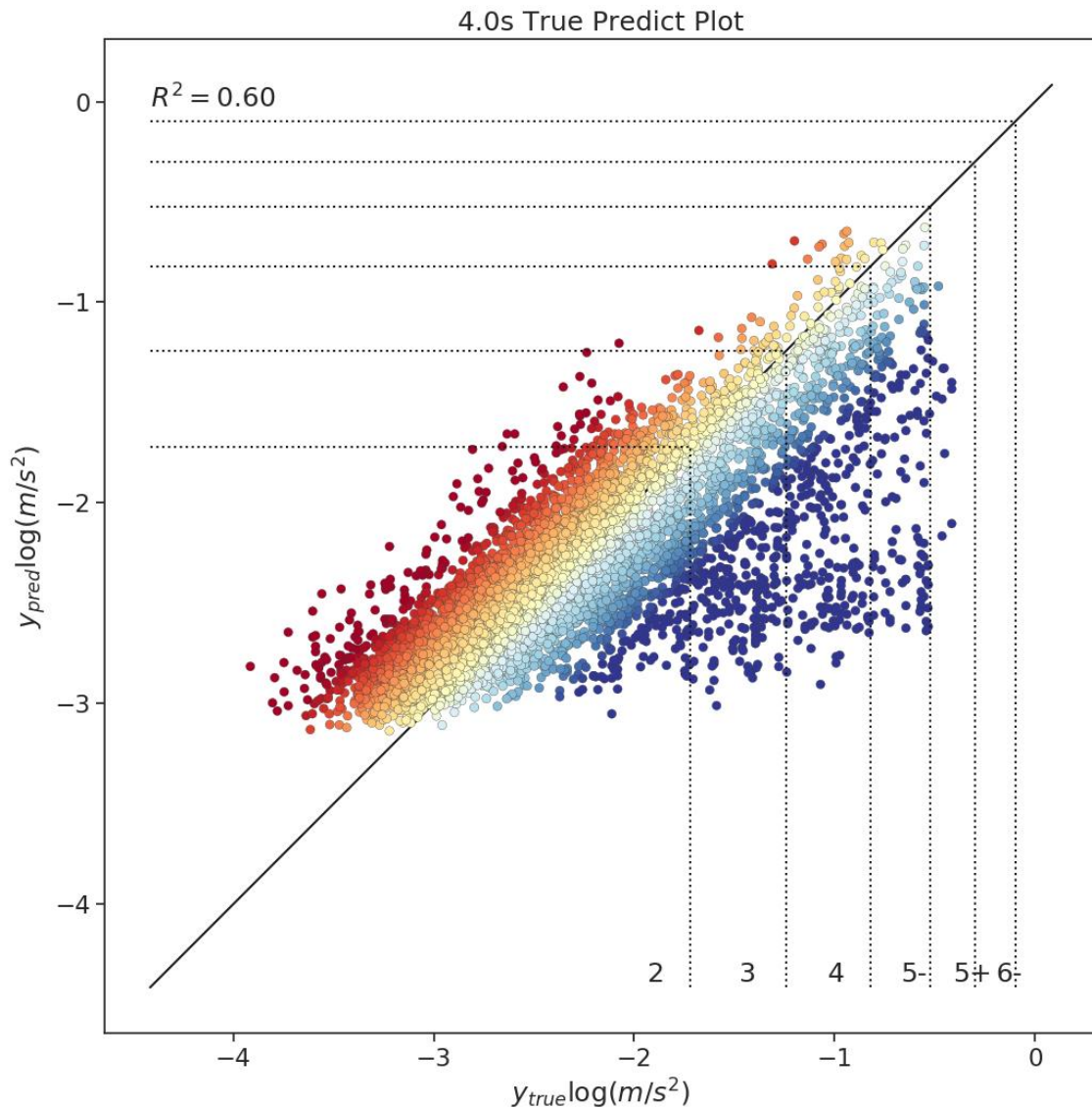


圖 5-1：PGV 預測結果比較圖。

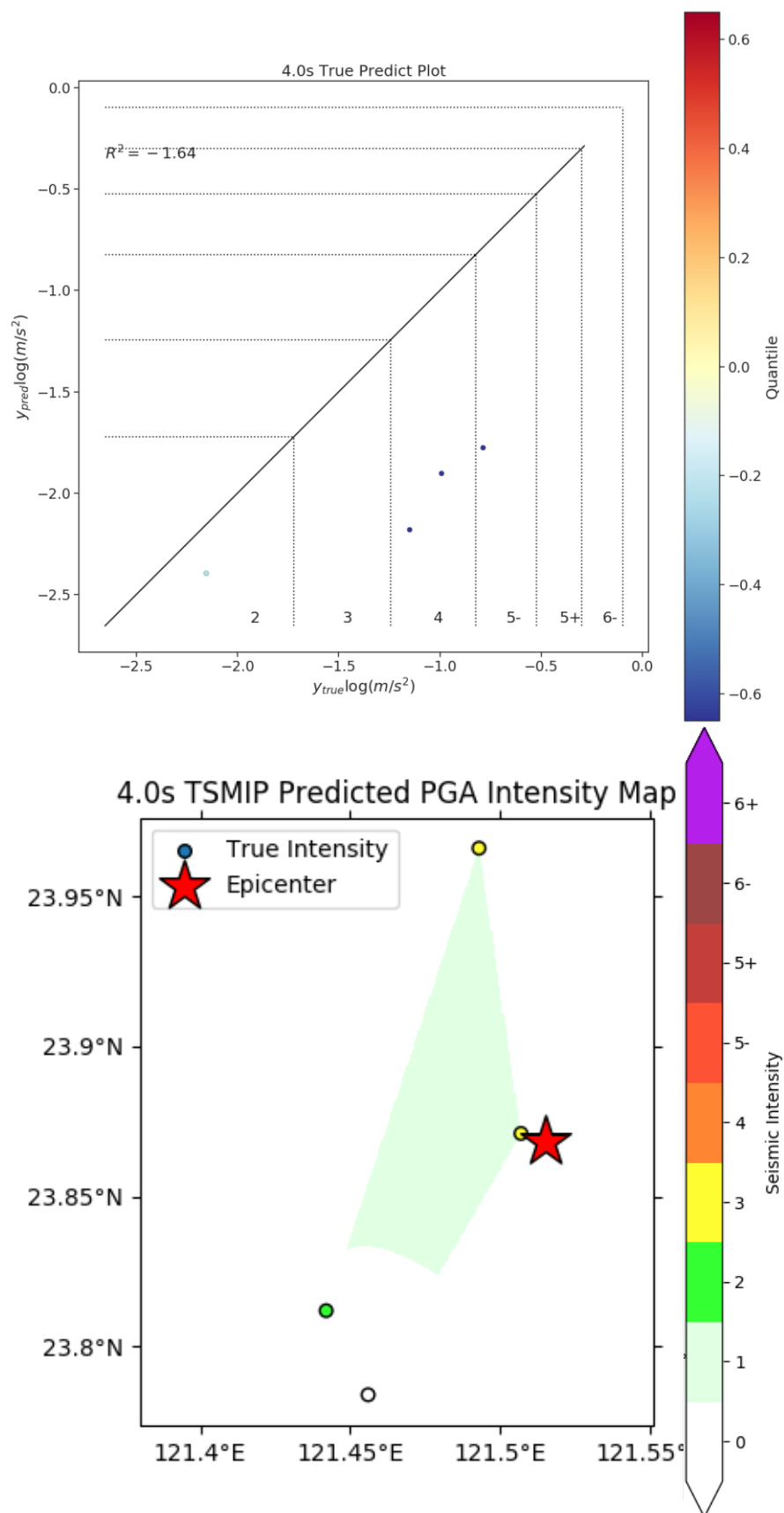


圖 5-2： PGV 預測結果比較圖（上）與 PGV 震度分佈預測圖（下）。

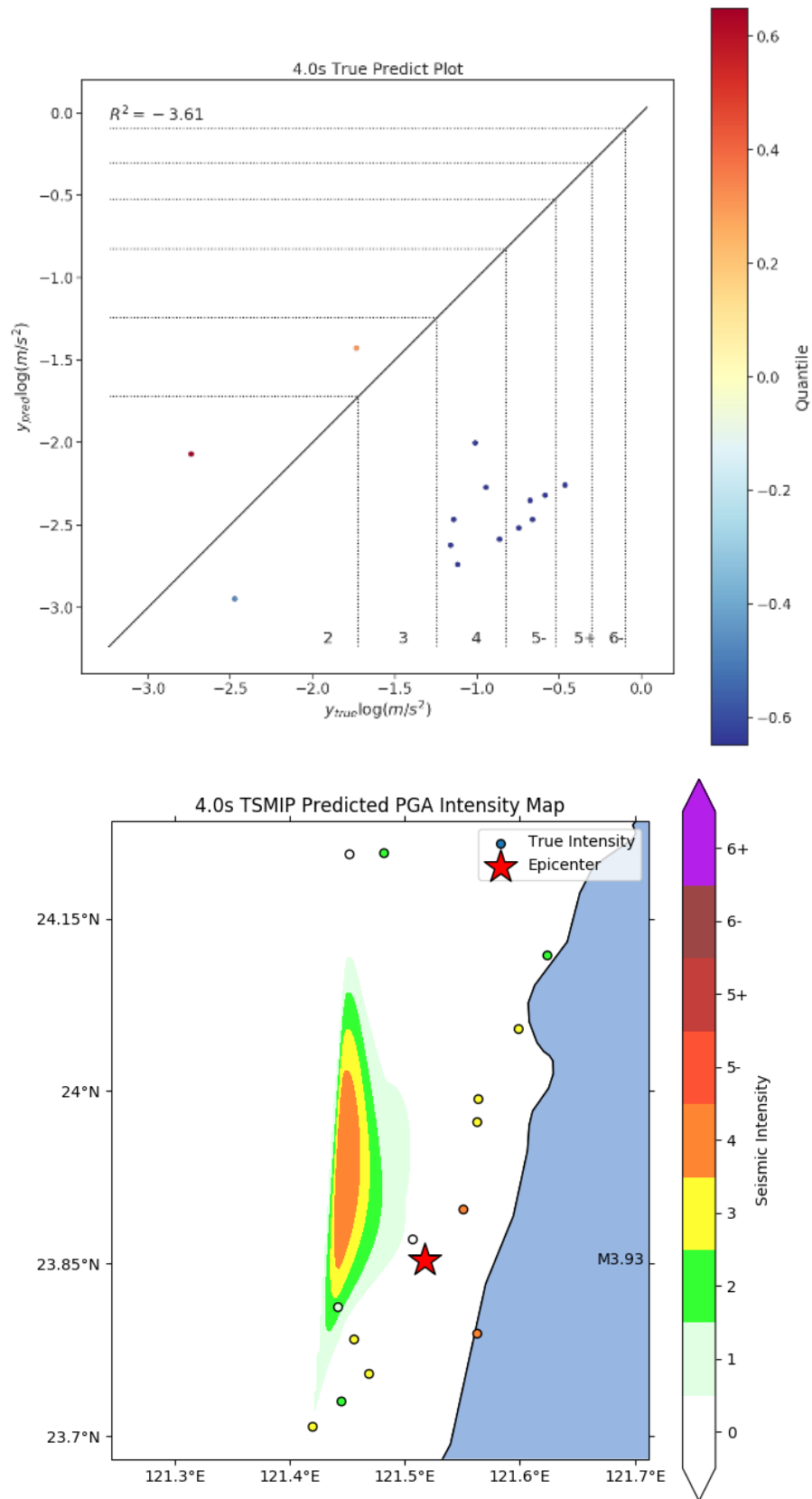


圖 5-3： PGV 預測結果比較圖（左）與 PGV 震度分佈預測圖（右）。

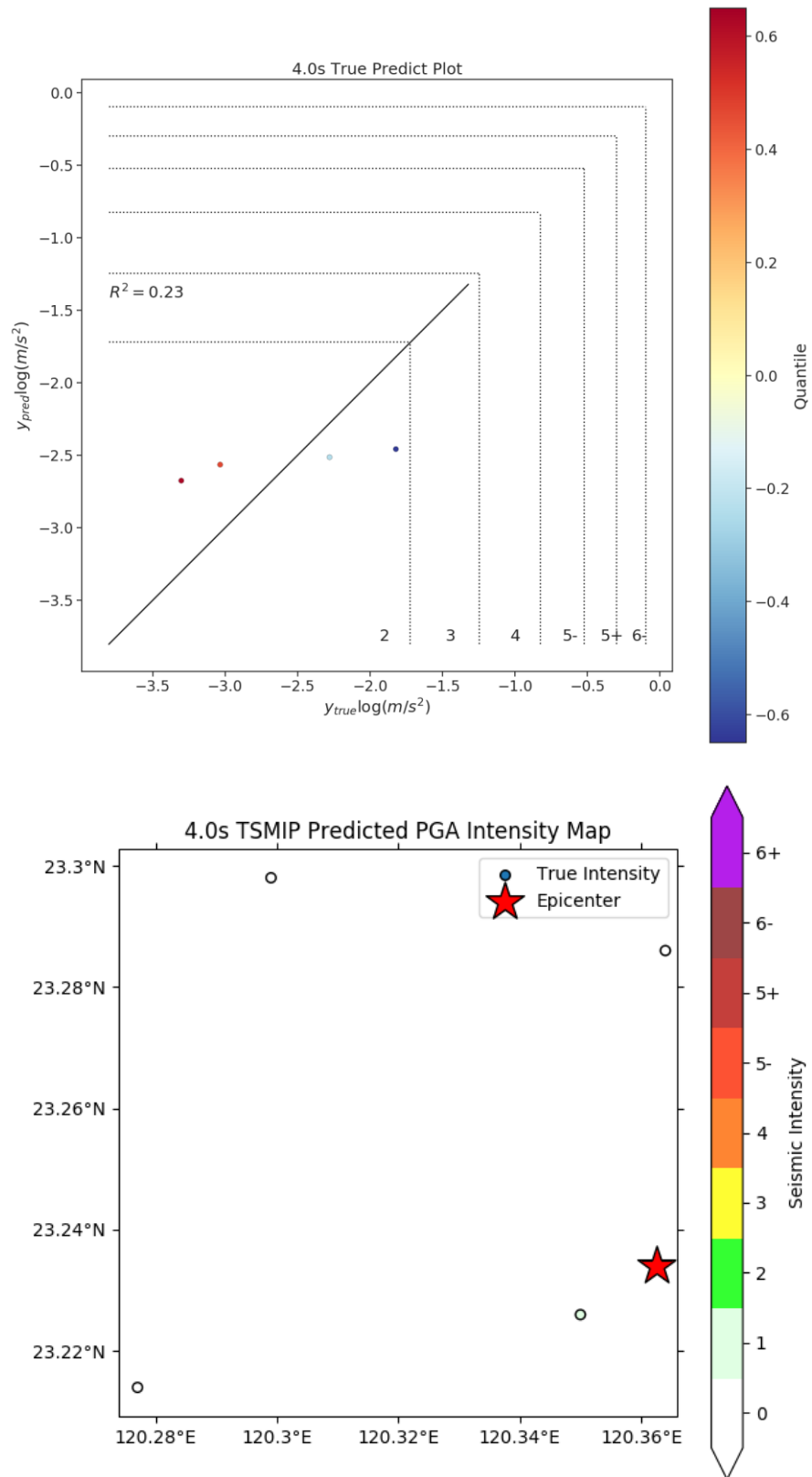


圖 5-4： PGV 預測結果比較圖（左）與 PGV 震度分佈預測圖（右）。

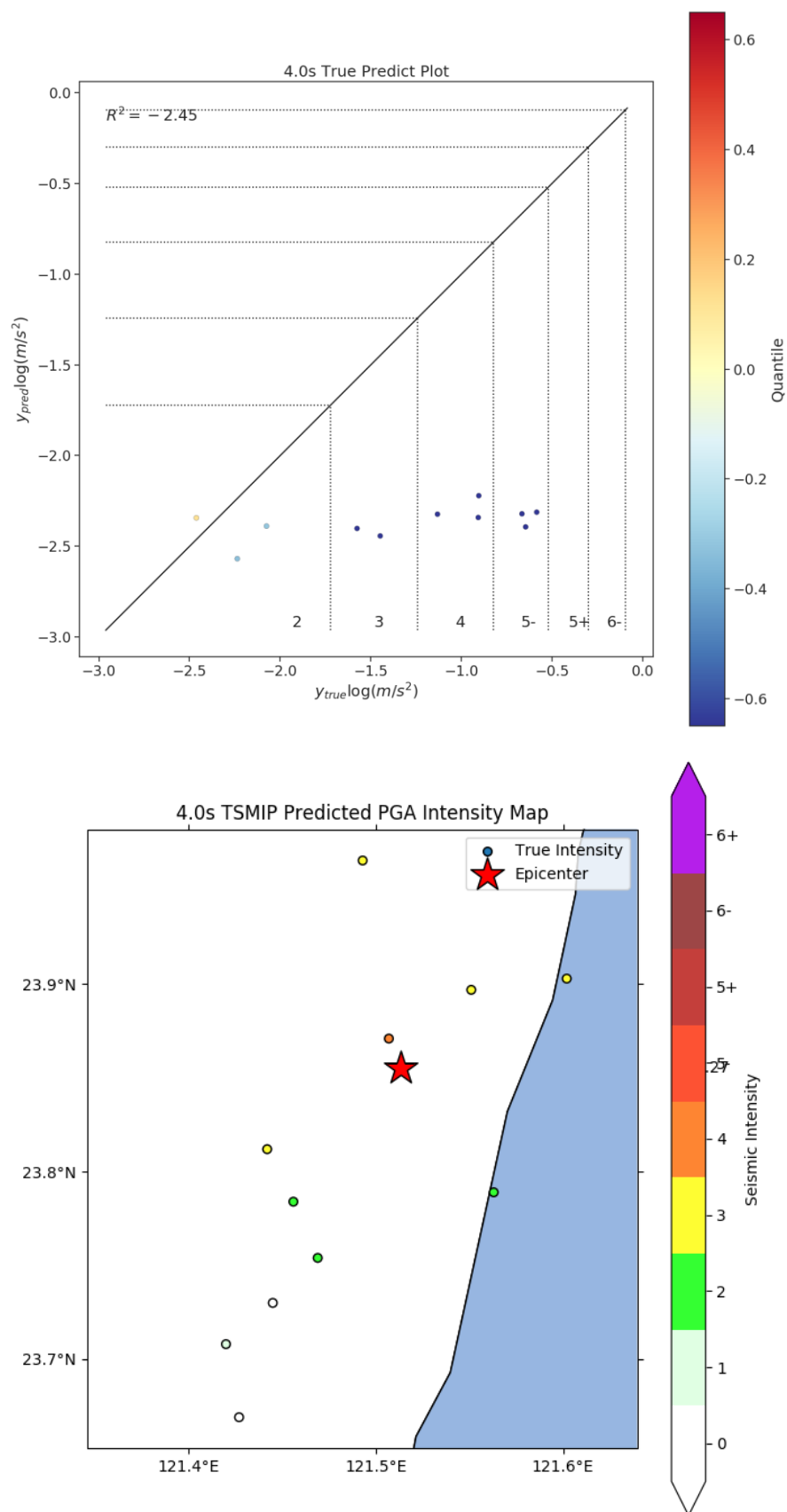


圖 5-5： PGV 預測結果比較圖（左）與 PGV 震度分佈預測圖（右）。

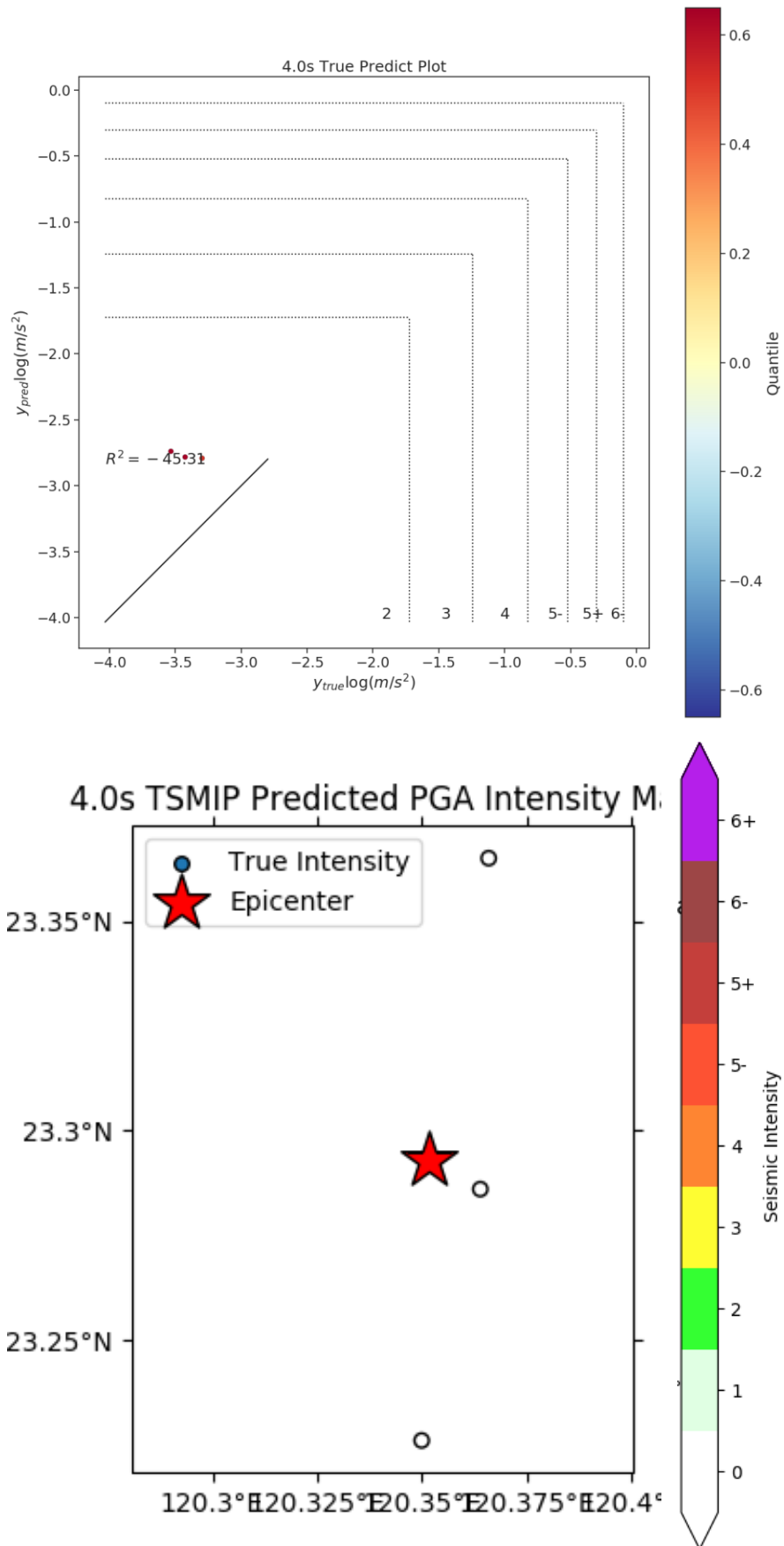


圖 5-6： PGV 預測結果比較圖（左）與 PGV 震度分佈預測圖（右）。

六、討論與結論

由於新制十級震度分級中震度 5 弱以上須由 PGV 做分級，因此本期 (111) 研究計畫將波形資料先經過帶通濾波，之後利用梯形積分法求得速度波形，最後計算三分量之和向量取最大值得到 PGV 值，並將 PGV 加入模型訓練，如同期中的實驗作法，使用 1991-2017 的資料進行訓練，2018 年的資料做驗證，最後以 2019-2020 的資料得 PGV 預測結果比較圖 (圖 6-1)。

目前實驗僅使用 PGV 做訓練、驗證及得結果，並沒有綜合 PGA 與 PGV，由於期中報告後才加入考量 PGV，程式碼若要達成能同時考慮 PGA 與 PGV 需做相當大幅的修改，因此目前實驗僅達成 PGA 轉換成 PGV 的小幅修改，氣象局新制十級震度分級中 5 弱以上由 PGV 做分級，而不是 PGA，因此兩者同時考量並不是最必要之元素，但是同時加入 PGA 與 PGV 仍會是本計畫接下來的規劃之一，其內容會在未來規劃中詳述。

實驗初步結果顯示 (圖 6-1 黃框) TEAM 對於 PGV 有收斂不佳的問題，我們探究此現象發生的原因可能有四種類，第一類是在一時間窗內有多於一個地震事件發生 (圖 6-2)，若後面的地震能量較大，會使得模型所得到的結果為低估；第二類是背景有較低頻的訊號存在 (圖 6-3) 或是雜訊影響過大 (圖 6-4)，使得模型結果同樣會低估，以上兩種可能的原因所造成的低估並非 TEAM 對 PGV 的預測錯誤，而是真值所給的答案並非正確值。第三類是 GPS 時間飄移 (圖 6-5)，使得挑選時間窗的位置錯誤造成模型低估，此因素本實驗已經透過判斷 GPS 是否鎖定來排除。

第四類是若 P 波振幅相對大的測站 (圖 6-6)，模型所得到的結果會高估，如受到輻射型 (radiation pattern) 影響，在某角度內之測站收到的 P 波能量大、S 波能量最小，我們探討此現象可能是訓練模型中此類型的波形訓練樣本過少所造成的，對於這個問題可利用波形特徵分類，來了解各類地震波形樣貌所佔之比例，再採取採樣方法使各類型的資料數量盡量平均。

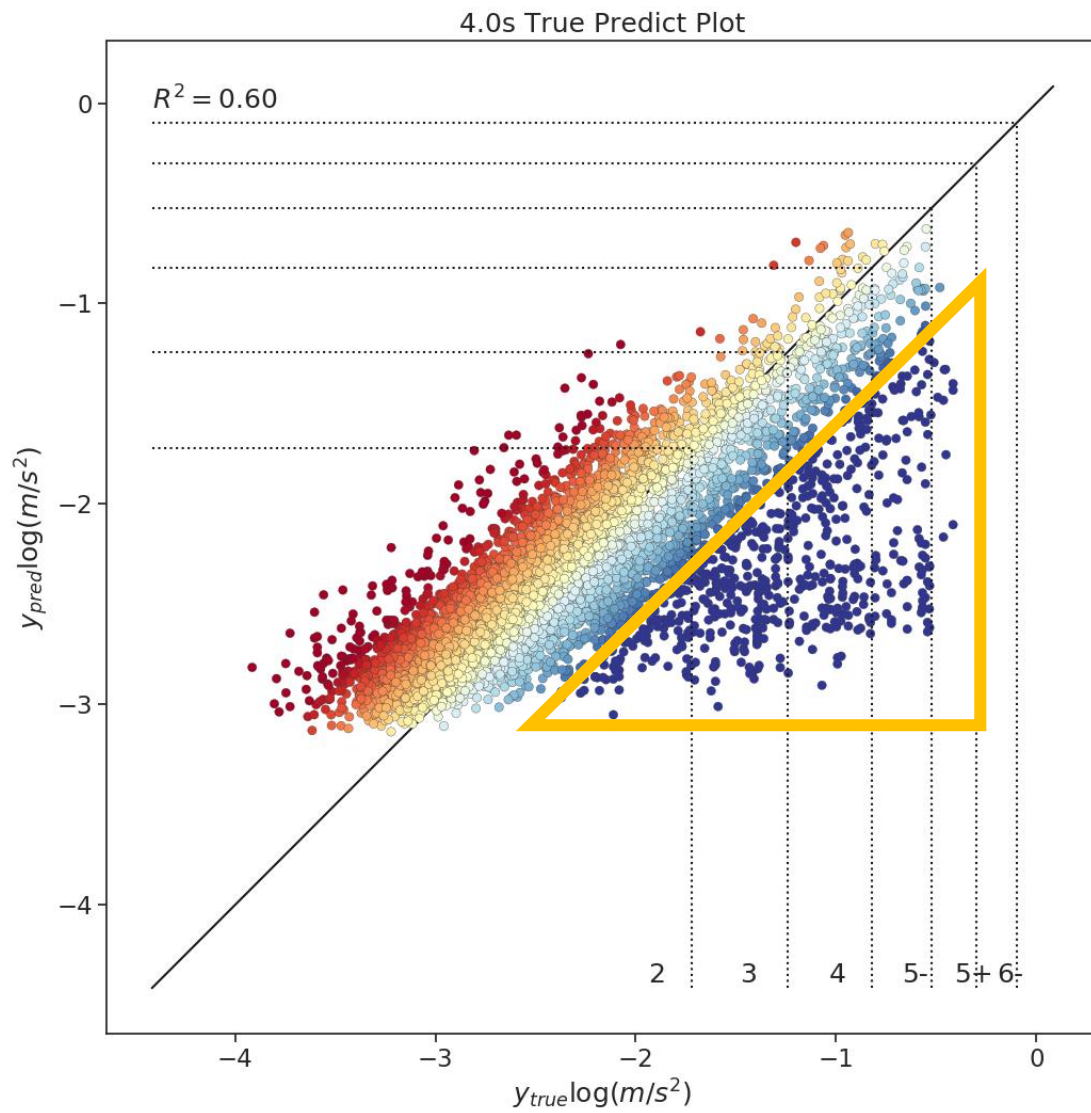
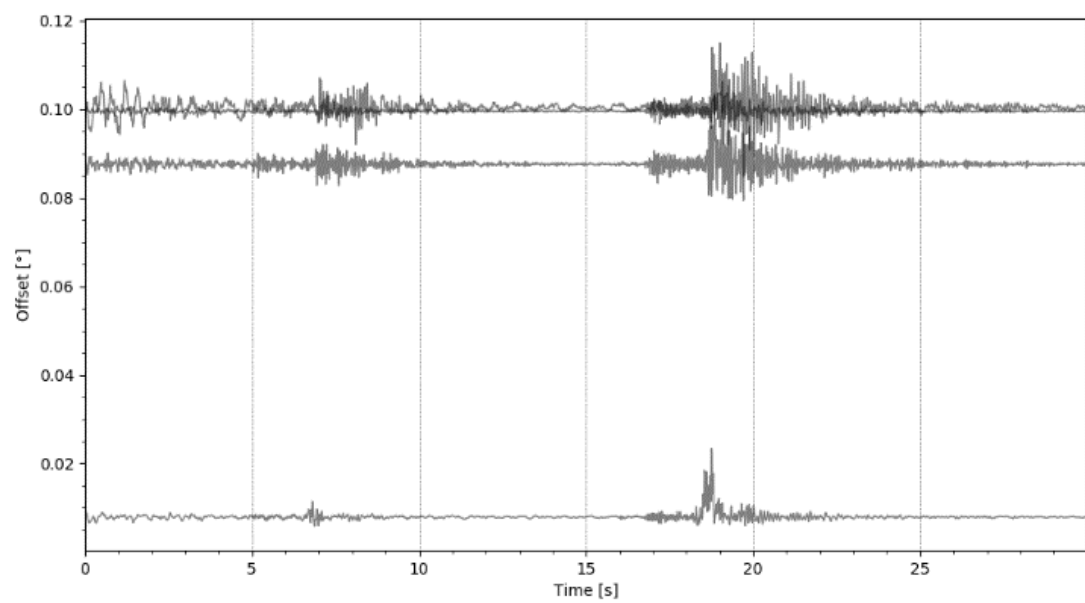
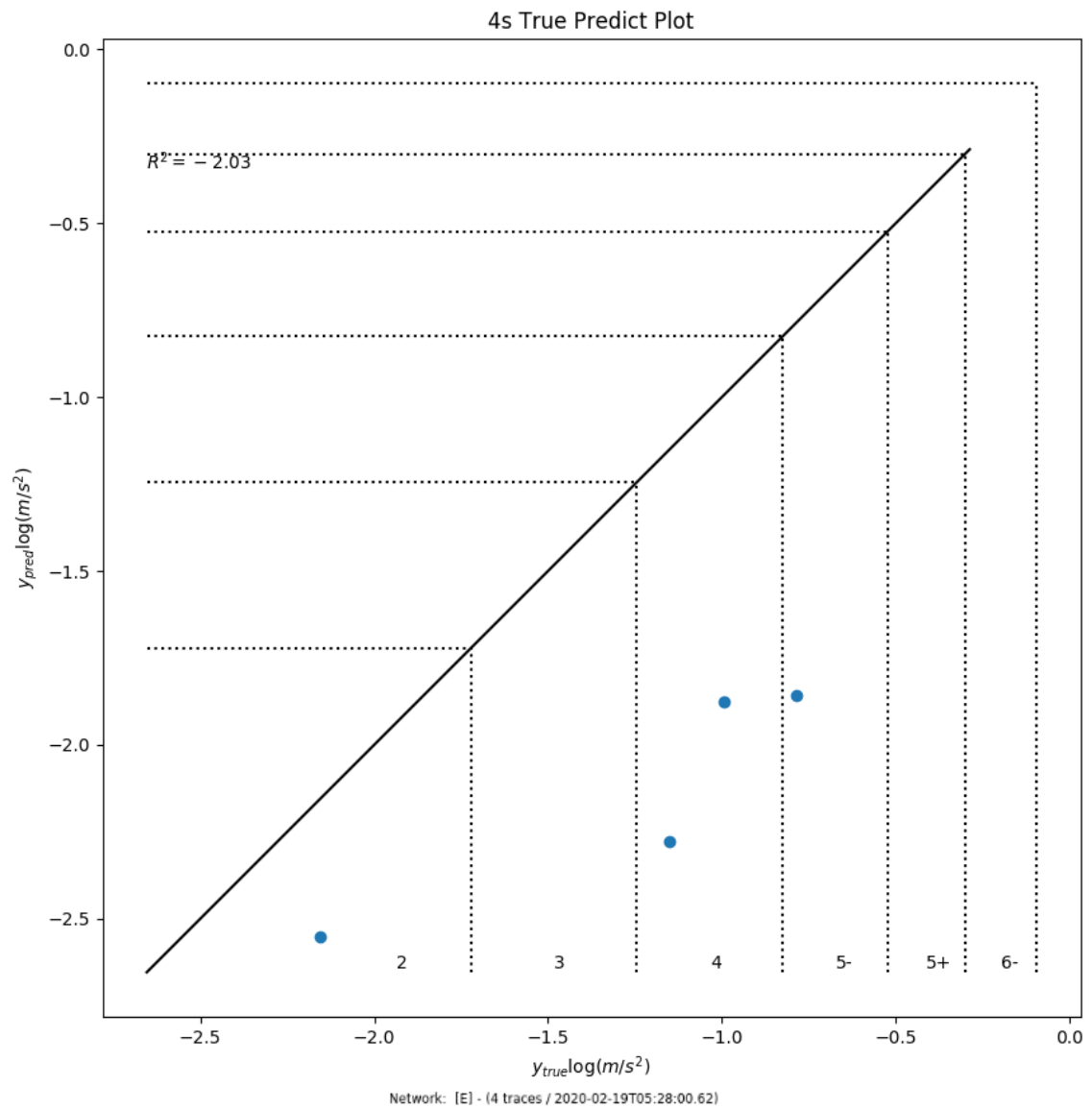


圖 6-1： PGV 預測結果比較圖。



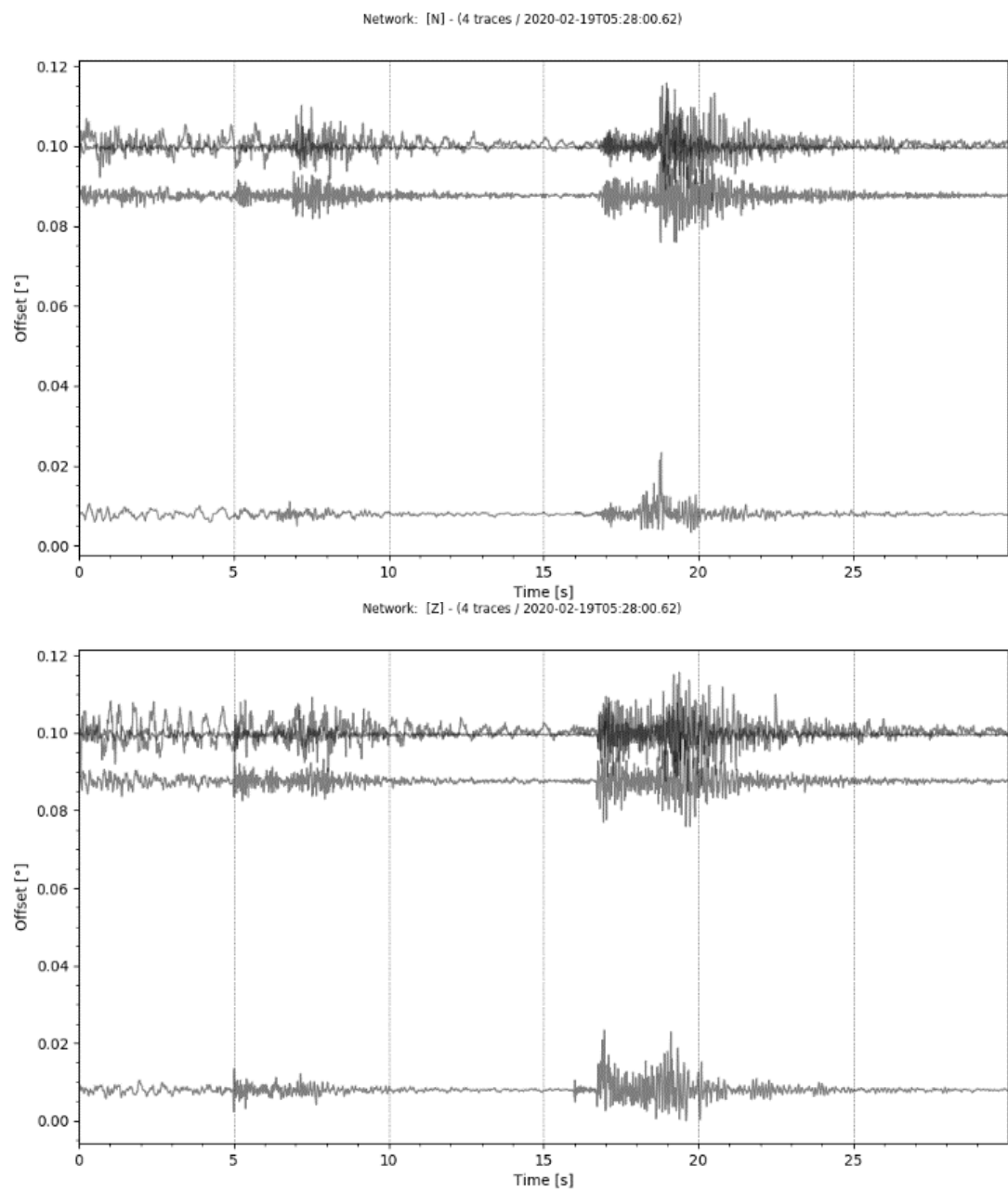


圖 6-2：單一事件 PGV 預測結果比較圖及波型資料圖，由上到下分別是 N、E、Z 分量資料。

七、未來規劃

本期研究計畫的成果為將 PGV 加入模型訓練並且得到 PGV 預測結果，所獲得結論為將 PGA 轉換成 PGV 後演算法能夠正確預測 PGV 結果，然而預測結果的收斂不佳，其原因來自於原始資料的品質問題與複雜度高，顯示目前本研究計畫還需要對輸入資料做調整與檢視。我們將在下一期計畫執行以下嘗試：

1. 綜合考慮 PGA 與 PGV 值

目前實驗僅使用 PGV 進行，然而地震目錄中包含了大規模與小規模的地震，對應到氣象局新制十級震度分級中仍須同時考量 PGA 與 PGV，因此下期計畫中我們將著手修改程式碼，已達成能夠綜合考慮 PGA 與 PGV 的模型。

2. 程式改用 PyTorch 新版本

目前實驗所使用的模型為舊版 Transformer，由於目前學界已有改良新版本，其效能更佳，另外，原程式碼的 TensorFlow 1.14 已不支援 NVIDIA 20 系列以上的顯卡，基於效能考量以及已經無法支援現在的硬體設備等因素，我們將在下期計畫中改使用 PyTorch 寫新版本的 Transformer 程式。

3. 測試連續資料

由於實際監測全臺地震為 CWBSN 測網之連續資料，目前實驗則是採用氣象局地震目錄做為輸入資料，若要更進一步達成及時地震預警，就必須要將模型改成輸入連續資料，因此下期計畫中我們將模型的輸入改為連續資料，並測試模型輸入連續資料的結果

4. 檢視輸入資料

本期研究所討論的幾類問題，除了 GPS 時間飄移已經排除外，其他幾類多屬於輸入資料的問題，因此下期計畫我們預計針對本期計畫所發現之問題進一步檢視並優化輸入資料，若能重新檢視輸入資料的品質與其產生的真值是否為正確值，對於本期結果所示的不收斂問題應能大幅度改善，同時間改善輸入資料的品質亦對於模型訓練有優化的效果。

参考文献

- Allen , R. M. and D. Melgar. Earthquake Early Warning: Advances, Scientific Challenges, and Societal Needs. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 47(1):361–388, 2019.
- Kriegerowski, M., G. M. Petersen, H. Vasyura-Bathke, and M. Ohrnberger. A Deep Convolutional Neural Network for Localization of Clustered Earthquakes Based on Multistation Full Waveforms. *Seismological Research Letters*, 90(2A):510–516, 2019.
- Lomax, A., A. Michelini, and D. Jozinovic. An Investigation of Rapid Earthquake Characterization Using Single-Station Waveforms and a Convolutional Neural Network. *Seismological Research Letters*, 90(2A):517–529, 2019.
- Mousavi, S. M. and G. C. Beroza. A Machine-Learning Approach for Earthquake Magnitude Estimation. *Geophysical Research Letters*, 47(1):e2019GL085976, 2020.
- Mousavi, S. M. and G. C. Beroza. Bayesian-Deep-Learning Estimation of Earthquake Location from Single-Station Observations. *arXiv:1912.01144 [physics]*, December 2019.
- Münchmeyer , J., D. Bindi, U. Leser, and F. Tilmann. The Transformer Earthquake Alerting Model: A New Versatile Approach To Earthquake Early Warning, *Geophysical Journal International*, *arXiv:2009.06316v4 [physics]* January 2021.
- Otake, R., J. Kurima, H. Goto, and S. Sawada. Deep Learning Model for Spatial Interpolation of Real-Time Seismic Intensity. *Seismological Research Letters*, 91(6):3433–3443, November 2020.

人工智慧技術建立微分區地震預警系統相關研究(II)

子計畫二

整合近即時地震參數解算提升區域型地震預警系統之 時效與準確度

黃信樺

中華民國地球物理學會

摘要

區域型地震預警系統—即利用最早收到地震 P 波訊號的少數測站對地震規模及後續較具災害性之 S 波震幅大小進行快速的預判—是現今地震防、減災最主要與唯一可行的方法。其過程包括震源參數的解算(如規模、位置)與震度(即地動程度)的預估兩部分。台灣現行區域型地震預警系統已然成效卓著。對於島內的地震平均發報時間約在 16 秒左右；島外的地震則約 23 秒。資料傳輸時間在現今資訊硬體設備的進步與更新下已壓縮到最低，主要耗費的時間仍在初期穩定的震源參數解算上。另一方面，近年數個中大型地震如 2016 年美濃地震與 2018 年花蓮地震皆展現強烈的破裂方向性，造成局部地區超出預期的震度與破壞。由於現行預警發報準則取決於震度的大小，此誤差將直接導致部分地區預警的盲區。因此，如何在最快的時間裡解算出地震的規模、位置與破裂方向性是能否讓地震預警系統在時效與準確度上進一步提升的關鍵。

本計畫在第一年改進與加強地震定位穩定性與時效，將接著進行即時地震破裂方向性的估算與整合。強地動的波形紀錄是震源、路徑和場址效應的卷積加總結果。過去的地震預警系統主要著重在路徑項與場址項的修正，因為在震前無法得知地震會怎麼破裂、震後也缺乏在數秒內迅速計算出破裂特性的方法。透過我們先期的研究(Jan et al., 2018)，發現可以利用近場(震央距 25 公里以內)強地動不同方向的強地動衰減特性在十幾秒內得到破裂方向性的估算。我們將利用氣象局新一代密集的即時地震測站網(CWBSN+TSMIP)進行全台灣近年中大型地震破裂方向性的分析，系統性優化此方法的參數與建立破裂方向性資料庫供後續強地動衰減式分析之用。從而將震源項加入新地震預警系統。提升方向性強地動的預估能力，減低預警誤差與盲區的發生。

關鍵字：地震預警、破裂方向性、地動放大效應

Abstract

Regional earthquake early warning system (EEWS), which utilizes P-wave signals recorded by first few stations to rapidly estimate the earthquake magnitude and upcoming large S-wave shaking, is the primary means to mitigate earthquake hazards nowadays. Two main components of the system are estimation of source parameters (e.g. magnitude and location) and prediction of intensity (i.e. shaking levels). Currently, Taiwan EEWS has made great achievements in the world and can issue reports within 16 s and 23 s for inland and offshore events, respectively. The report time takes mostly in estimating reliable source parameters rather than data transmission as the advance of hardware and telemetry techniques has reduced the transmission time at most. Moreover, a number of recent earthquakes with $M_L > 6$ produced directional strong shaking and unexpected damage. Since the current criteria of issuing EEWS report are based on intensity, this underestimation of the strong shaking has a direct effect on blind zone formation. To further improve the efficiency of reporting time and accuracy of intensity prediction, how fast to obtain the source parameters including rupture directivity is the key.

Following the development of a fast and robust earthquake early warning location algorithm in the first year, we plan to conduct rupture directivity analysis in the next. The ground shaking is a convolution results of the source, path, and site effects. Since the source information cannot be known beforehand and lack a rapid means to determine within seconds after earthquakes occur, the conventional EEWS mostly focus on the improvement of the path and site terms. However, our previous work has shown that utilizing the near-field (epicentral distance less than 25 km) ground motion characteristics, the rupture directivity information could be obtained within 20 s (Jan et al., 2018). Hence, using the data from the new-generation CWB real-time seismic network (CWBSN+TSMIP), we plan to conduct the rupture directivity analysis on recent moderate-to-large earthquakes to systematically optimize the parameters and establish a rupture directivity database for later regression analysis of directivity-based ground motion prediction equations. From that, we aim to incorporate the near-real-time source parameter estimation into new EEWS to capture directional ground motion complexity and reduce the uncertainty and blind zones of earthquake early warning.

Keywords : Earth Early Warning, Rupture directivity, Ground motion amplification

一、研究背景與目的

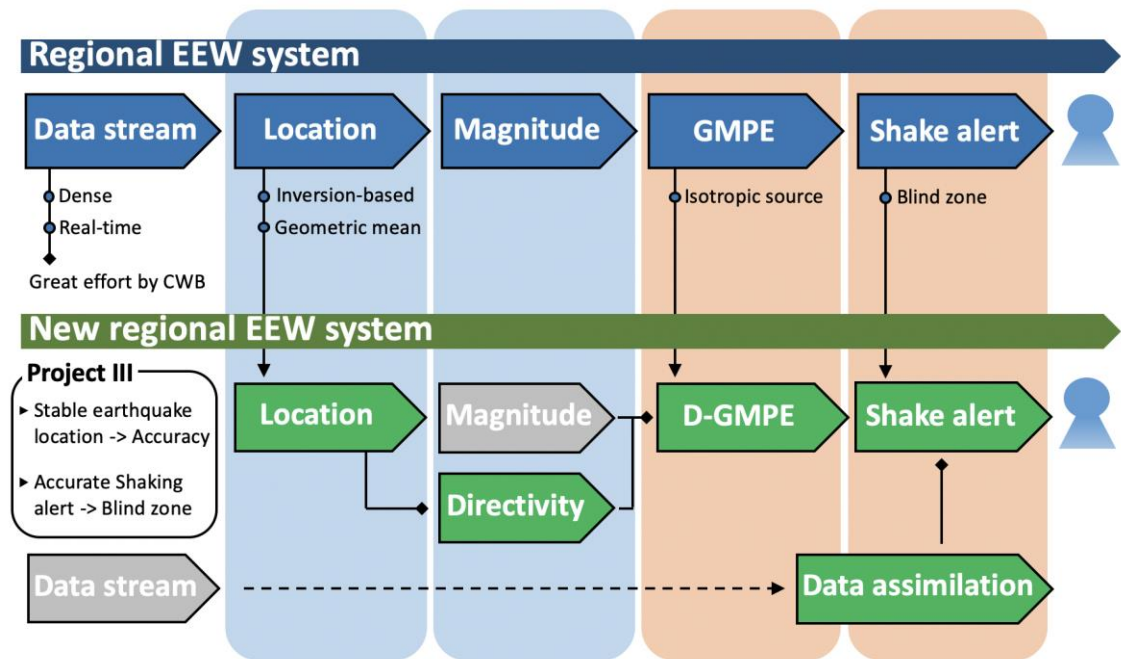
地震預警系統——即利用最早收到地震 P 波訊號的少數測站對地震規模及後續較具災害性之 S 波震幅大小進行快速的預判——是現今地震防、減災最主要與目前唯一可實行的方法，又分為現地型與區域型兩類(Allen et al., 2009)。臺灣的區域型地震預警系統對於發生在島內的地震平均發報時間約可在 16 秒左右；發生在島外的地震約 23 秒，成效良好。但基於新一代地震網 (CWBSN) 的建立、井下地震網的擴建、及強地動測站網資料傳輸逐步的即時化。大量的即時資料加上近期如機器學習 (Machine learning, Kong et al., 2019)、資料同化 (Data assimilation, Hoshiba et al., 2015; Furumura et al., 2019) 等新興演算法進入地球科學領域，讓我們有機會進一步提升地震預警的時效與準確度，協助建立新一代的地震預警系統。

在現行地震預警系統的時效上，我們可以分成三個部分來探討。一是傳輸時間，由於不論是前端的資料傳輸或後端對使用者發布訊息的傳輸時間主要取決於硬體設備與通訊協定，以現今成熟的資訊設備與技術，能改進的空間已經相當有限。二是反應時間，即自地震發生到第一個收到訊號的測站的時間，這部分只能依靠測站網的密度，現行除少部分山區與外海，氣象局升級與建立的新一代即時傳輸測站網 (Real time network)，其測站密度的提高預計將可幫助縮短這部分的時間。第三部分則是計算時間，預警系統的計算流程包括(1)地震定位、(2)地震規模估算、以及(3)以地動衰減式預估目標場址的最大地動加速度 (Peak Ground Acceleration, PGA) 或震度 (Intensity)，最後依據震度來發布不同程度的警報 (圖一)。由於預估規模與震度主要仰賴事先建立好的關係式，所以其中主要耗費的時間還是在初期的地震定位上。雖然利用最早觸發的四個站就能開始進行定位反演，但反演法在測站數少時較不容易穩定，因此地震預警系統的定位會隨著時間與觸發測站數的增加持續迭代更新，往往需要數秒 (或數報) 後，反演的地震位置才趨於穩定。為此，Chen et al. (2019) 提出幾何中心法來解決反演法較不穩定與費時的問題。但此法是以時效來換取定位的準確度，尤其對外海的地震容易有很大的誤差。而定位誤差直接的影響即是降低後續地動衰減預估的準確度，導致預警盲區的出現。上年度所執行的計畫即是發展並提出沃羅諾伊圖分區網格搜尋法來兼顧早期定位的時效與準確度。

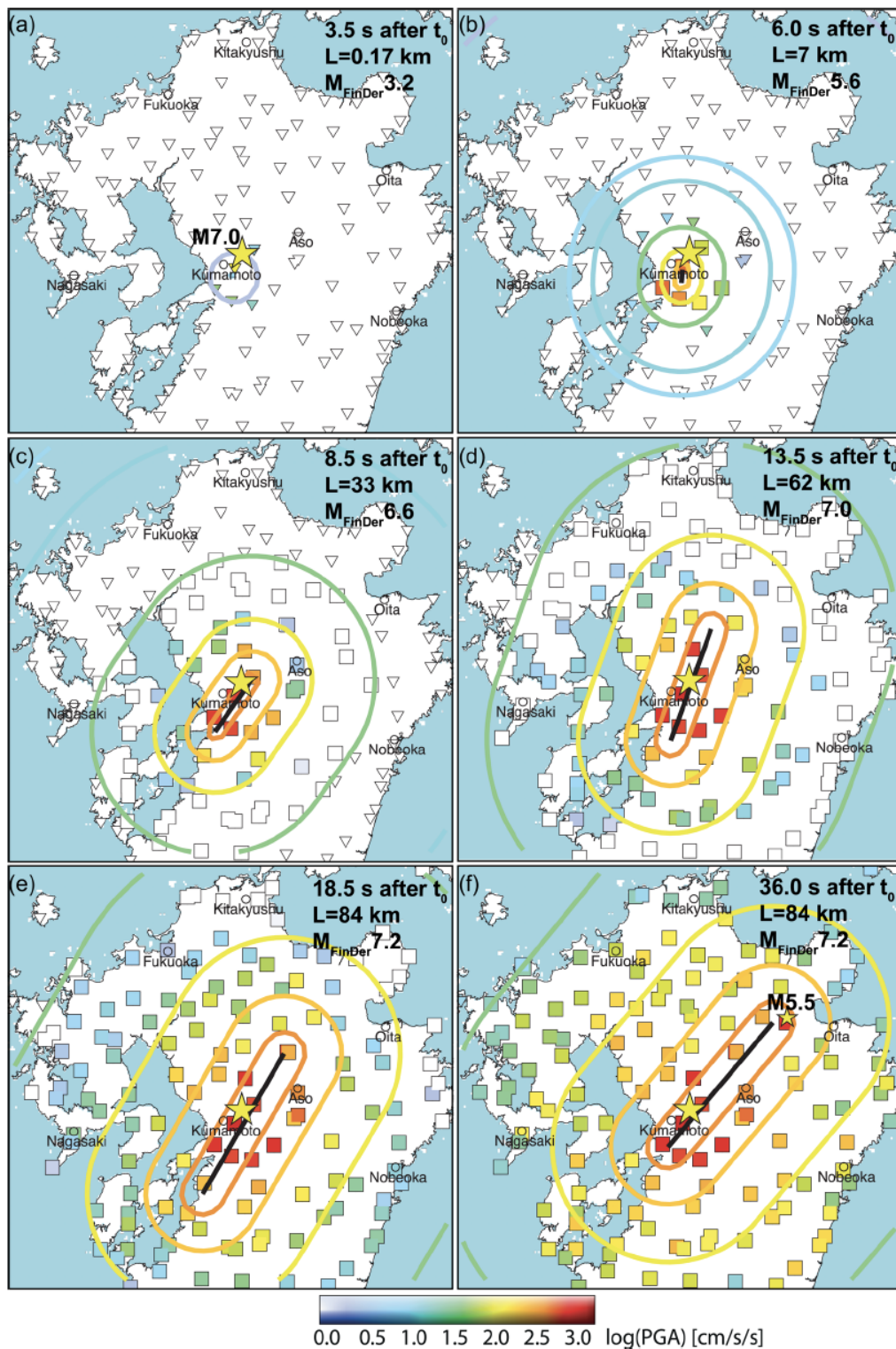
本年度計畫目標著眼於提升震度預估準確度的另一個重要課題——對非點源震源特性 (Finite source) 的考量與掌握，例如斷層破裂長度 (圖二。Bose et al., 2018; Xiao and Yamada, 2022) 與破裂方向性 (Jan et al., 2018; Yang et al., 2018)。近年數個中大型地震如 2016 年的美濃地震、2018 年的花蓮地震，以及今年 9 月 18 日甫在縱谷南段發生的池上地震，皆展現強烈的破裂方向性 (Jan et al., 2018; Huang and Huang, 2018)，放大特定方位或局部地區的地動程度，因而造成超出預期的震度與破壞 (Lee et al., 2016)。目前世界各地的地震預警系統所使用的地動衰減式大多仍建立在點震源的基礎上 (Kamigaichi et al., 2009; Chung et al., 2019)，當中大型地震發生時，如何近即時的納入斷層長度與破裂特性等進一步的震源參數，乃至速度構造的路徑效應等因素，是降低預警誤報與盲區需要努力的方向與挑戰 (圖三)。

針對破裂方向性的近即時估算，本計劃在前半年已完成方法上的校驗，對 2012 年至 2021 年芮氏規模大於等於 5.5 的 19 筆島內中大型地震事件進行近即時地震破裂方向性估算的可行性，並且多數事件皆可在約 15 秒內得到穩定的結果。後半年

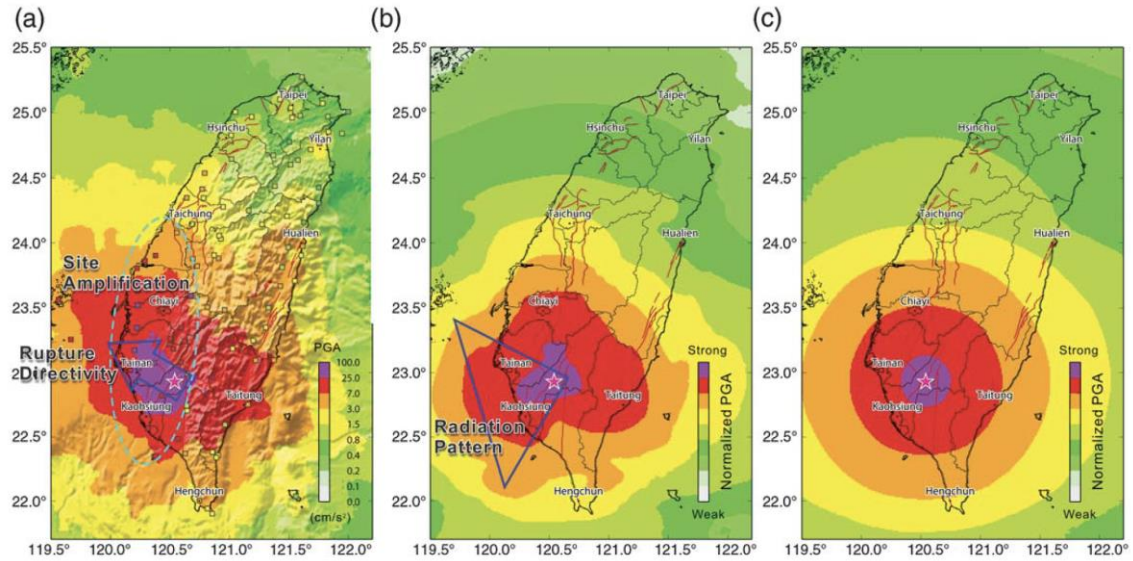
我們繼續分析 2022 年符合條件的 6 筆縱谷中大型地震事件，包括 0917 和 0918 的關山和池上地震，分別得到向南與向北的破裂方向，與多方結果吻合。並嘗試改以全空間近場地動反演的方式直接求取方向性地動放大倍率函數，配合現行的地動衰減式與場址修正項來進行遠場地動的預估。初步結果顯示加入破裂方向性震源參數的地動計算，確實能改進遠場的地動預估，減少預警盲區的發生。



圖一、新一代預警系統研究計畫規劃。(上) 現行地震預警系統流程。(下) 針對不同環節的研究規劃(綠色區塊)，前半部為上個年度與本年度已進行與正在進行的地震定位與破裂方向性分析(藍色區域)；後半部則是後續對地動衰減式與資料同化方法的規劃(橘色區塊)。



圖二、日本 M7.0 熊本地震的有限斷層強地動擬合分析。倒三角形為 220 個使用的 K-Net 和 KIK-net 的測站。正方形為經有限斷層模型預估地動值超過 $37 \text{ cm s}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 的測站。黑色實線為擬合之最佳斷層長度。彩色實線為預估之地動值分佈。(a-f) 呈現至發震後 3.5 秒到 36 秒的結果。



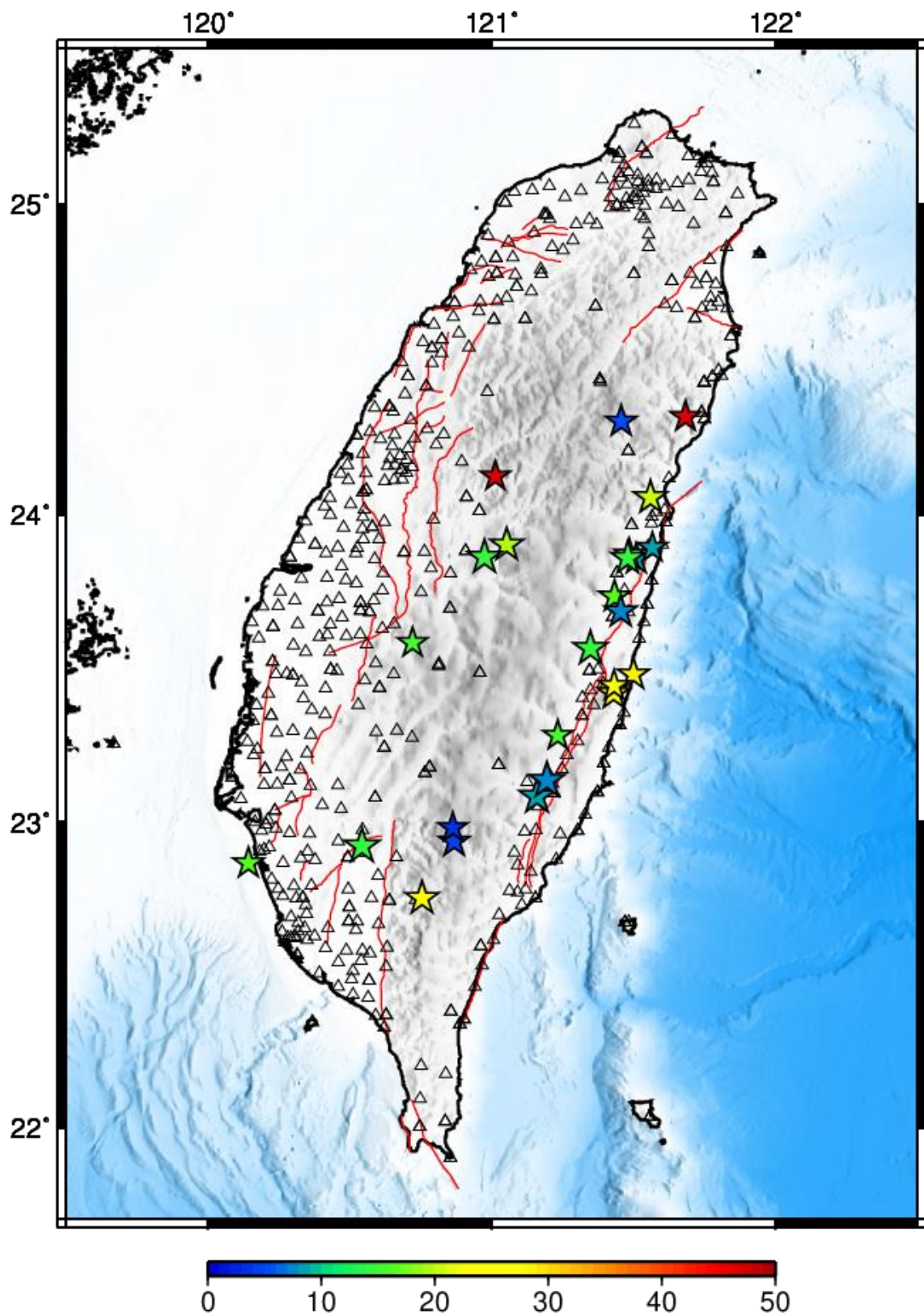
圖三、2016 Mw6.4 美濃地震最大地動加速度圖模擬。(a)考慮三維速度構造與震源破裂過程的模擬結果，(b)和(c)為考慮震源機制與僅視為點震源的模擬結果，使用半空間均質速度模型。

二、資料收集與處理

由於新一代的地震預警系統是建立在氣象局新一代整合不同觀測網的即時資料傳輸測站網，包括逐步更新即時傳輸的 TSMIP 強震網，我們以 2012 年後即時傳輸的測站資料為主，共 540 站。地震資料選取 2012 年到 2022 年島內及近海的中大型地震，根據 (1)芮氏規模大於等於 5.5、(2)震源深度淺於 50 公里、(3)至少兩個象限以上有夠多的測站紀錄的條件篩選後，共 25 筆地震進行即時破裂方向性的分析(圖一)。

所有測站資料皆轉換至速度，對三分量進行平方相加開根號(算數平方根)後取每次計算時窗內的最大地動速度值(PGV)來進行地振動的內插和分析。雖然此 PGV 與 25 公里的參數選擇是以 P-alert 的資料測試而得(Jan et al., 2018)，經期中測試顯示同樣能適用於 TSMIP 的資料與測站方布，使用最大地動加速度值(PGA)或 PGV 的結果相近，故維持採用 PGV 與 25 公里的參數。

由於此方法的原理是利用近場的地動資訊（震央距小於 25 公里）做不同方位角的迴歸分析，測站在四個象限的分佈密度越高越好，未來可視情形加入子計畫三的 P-alert 觀測網資料一起分析。



圖四、本計劃所選用 2012-2021 年芮氏規模 (M_L) 大於 5.5 以上的地震事件分佈，經條件篩選共 19 筆（星號）。顏色代表震源深度。黑色三角形為氣象局有即時資料傳輸的測站分佈。

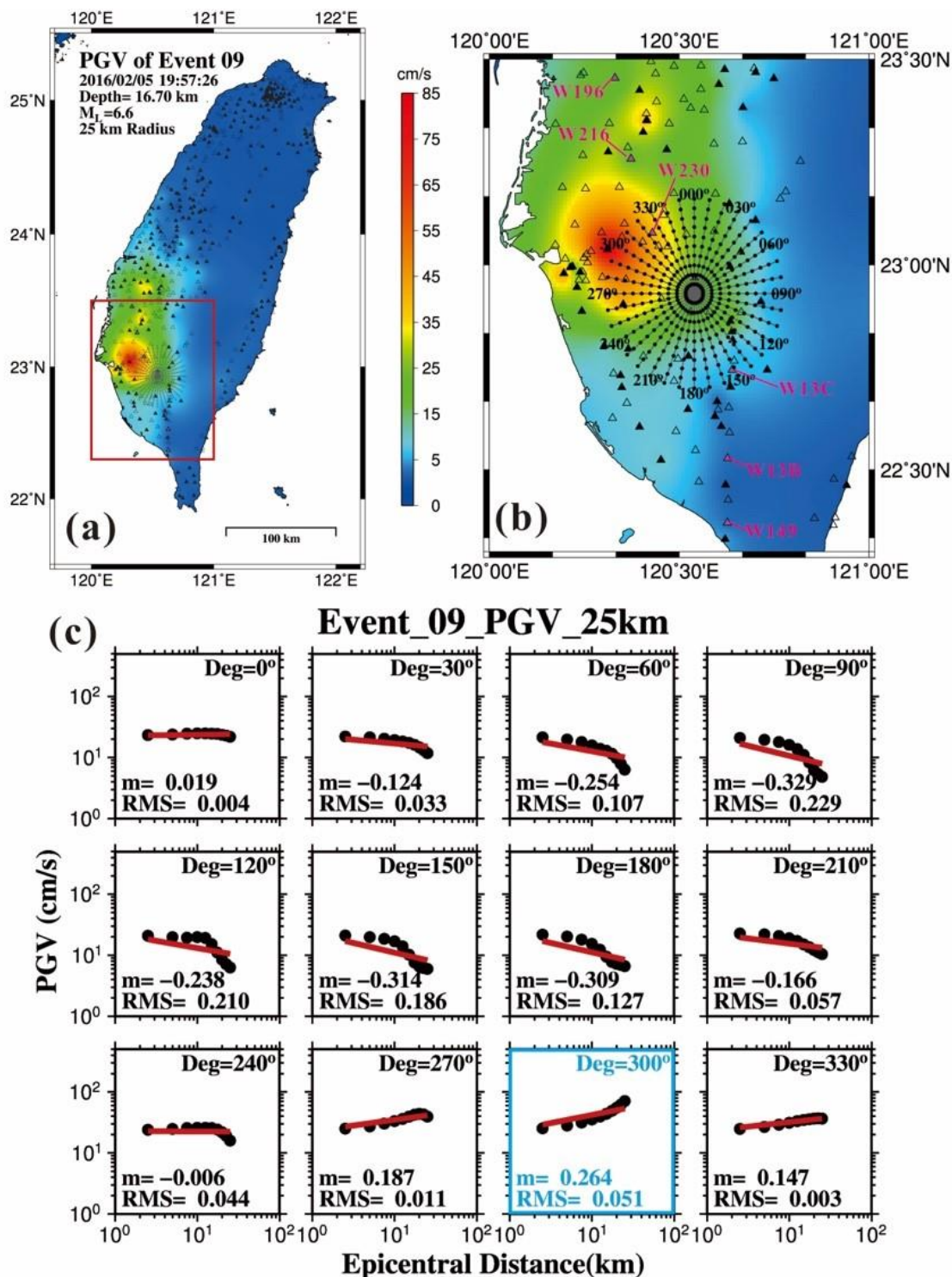
三、研究方法

3.1 非均向性衰減式回歸分析

為達到地震預警的時效，計算破裂方向性的方法也必須達到快速、穩定的需求。我們所發展的近即時破裂方向性方法原理非常簡單(Jan et al., 2018)。就如同地震預警的核心思想——利用先到達的訊號(P 波前三秒)預估後到達的訊號(破壞性 S 波的振幅，或者說震度)。我們希望利用近場(先到達)的地動訊號預估遠場(後到達)的地動訊號。透過實際近場強地動資料的觀察(如圖三)，近年有強烈破裂方向性的中大型地震皆在破裂前進方向上造成超過預期的地動值，也就是說超過了平均的區域地動衰減式。因此，我們就利用這個非均向的地動放大特性，採取不同方位角各自的衰減式回歸，將擁有最大的斜率(衰減最少)的方位角視為地震破裂的前進方向。

以非均向性衰減式回歸求取衰減最慢的方位角作為地震破裂的方向的方法固然簡單明瞭。但實際還受到許多因素的影響，例如震源輻射效應(Radiation pattern)和場址效應(Site effect)。因此，我們首先將資料作三分量平方相加開根號的處理，保留不管是 P 波還是 S 波不同極向(Polarization)的最大值，來降低震源輻射效應的影響。然後在我們利用不同震央距的近場地動資料的測試中，發現在 25-30 公里內的資料因為非常靠近震源，震源破裂的特性會高過場址效應的影響。若使用震央距更遠的資料，場址效應的影響或會逐漸高過震源破裂的效應。這在過去的數值模擬研究也有類似的發現(Ripperger et al., 2008; Imperatori and Mai, 2013)。因此，我們將分析限制在 25 公里內(Jan et al., 2018)。

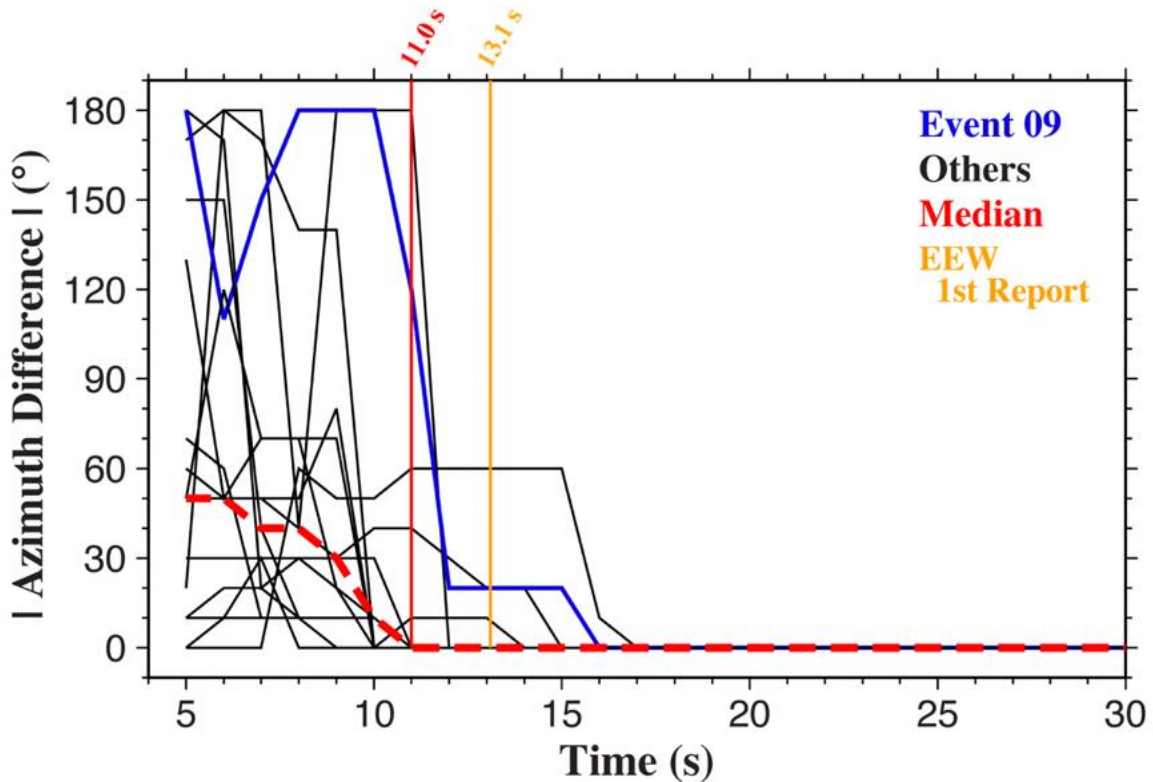
以 2016 年美濃地震的分析結果來看(圖五)，我們先對近場地動資料做內插的地動分佈圖(圖五 a)，然後對每 10 度的方向角向外 25 公里等間距取值取 10 個點(圖五 b)，進行衰減式回歸後，找最大斜率的方向(圖五 c 僅呈現每 30 度的回歸結果)，即 300 度的方向(藍色方框)，作為破裂方向性的方向。此方向經驗證與 Lee (2017) 和 Jian et al. (2017)利用不同方法得到的 305 度和 299 度的結果相近。



圖五、2016 年 $M_L 6.4$ 美濃地震的破裂方向性分析結果。(a)經內差之地動分佈圖 (Interpolated shaking map)。紅色方框放大於圖(b)。(b)對每 10 度方位角的方向向外 25 公里取值進行衰減式回歸分析(黑色圓點)。紅紫色三角形為地動時效比較之測站，討論於圖七。(c)非均向性衰減式回歸。黑色圓點為實際觀測經內插後之地動值，紅色實線為回歸的結果，藍色方框為最大斜率的方位角，即 300 度方向。

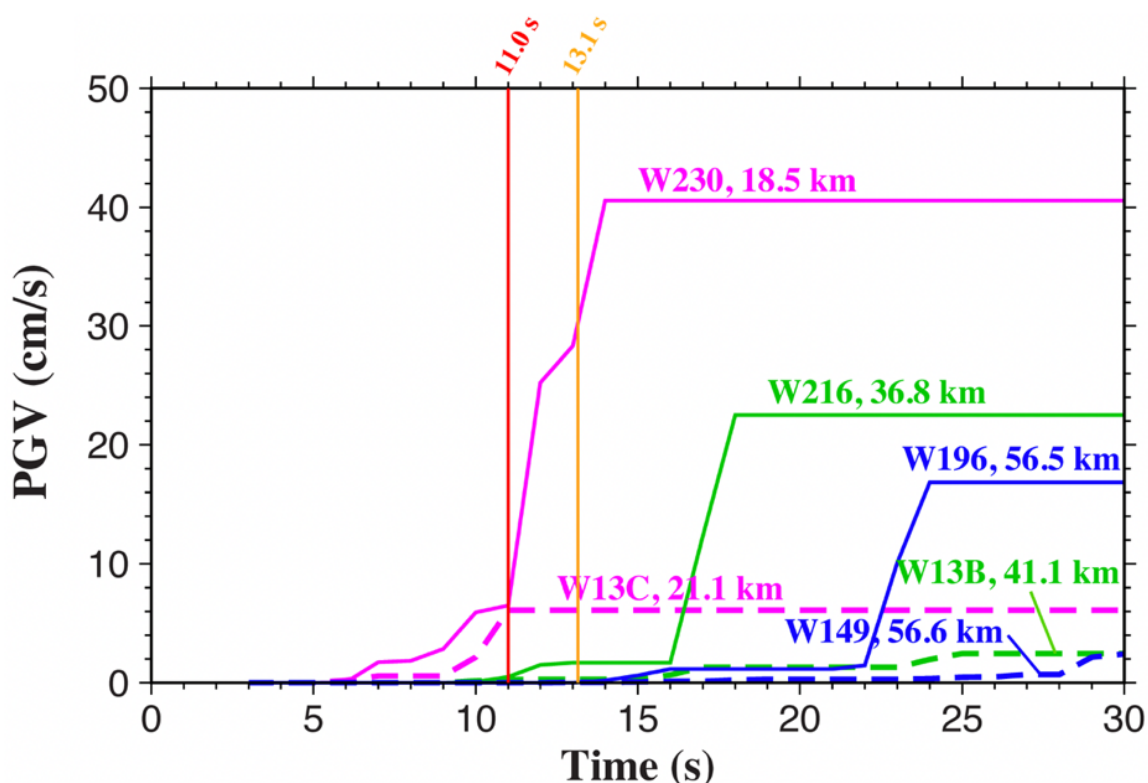
2.2 計算時效與預警時間

在 Jan et al. (2018)的工作中，我們分析了 15 筆自 2013 到 2019 的中大型地震。以發震時間為零秒，每秒進行一次破裂方向性分析，最後將 15 個地震每秒解算的破裂方向與最終的破裂方向相減，一起畫在圖六來比較。可以看到約在 17 秒之後的解算就趨於穩定(即與最終結果差值為零)。若以中位數(紅色虛線)來看約在 11 秒就能夠得到穩定的結果。約可跟上現行預警系統第一報平均的發布時間(13.1 秒。Chen et al., 2015)。



圖六、破裂方向性分析之時效圖。黑色實線為 15 個中大型地震每秒解算結果與最終結果之差值。藍色實線為美濃地震的結果，紅色虛線代表總體中位數的表現。橘色實現則標示了現行預警系統第一報平均的發佈時間。

以美濃地震為例，我們可以進一步在地震破裂方向的前方與後方各選取三個不同震央距離的測站來比較預警時間與實際當地地動值的變化情形(圖七)。可以發現在 11 到 13 秒左右的發佈時間，較近距離約 20 公里左右的測站(W13C 與 W230)已經接近最大地動值(桃紫色實虛線)，但對於較遠在 35 公里(綠色實虛線)和 55 公里(藍色實虛線)左右的測站，在最大地動值來臨前，能分別爭取到約 4 秒與 11 秒左右的時間。



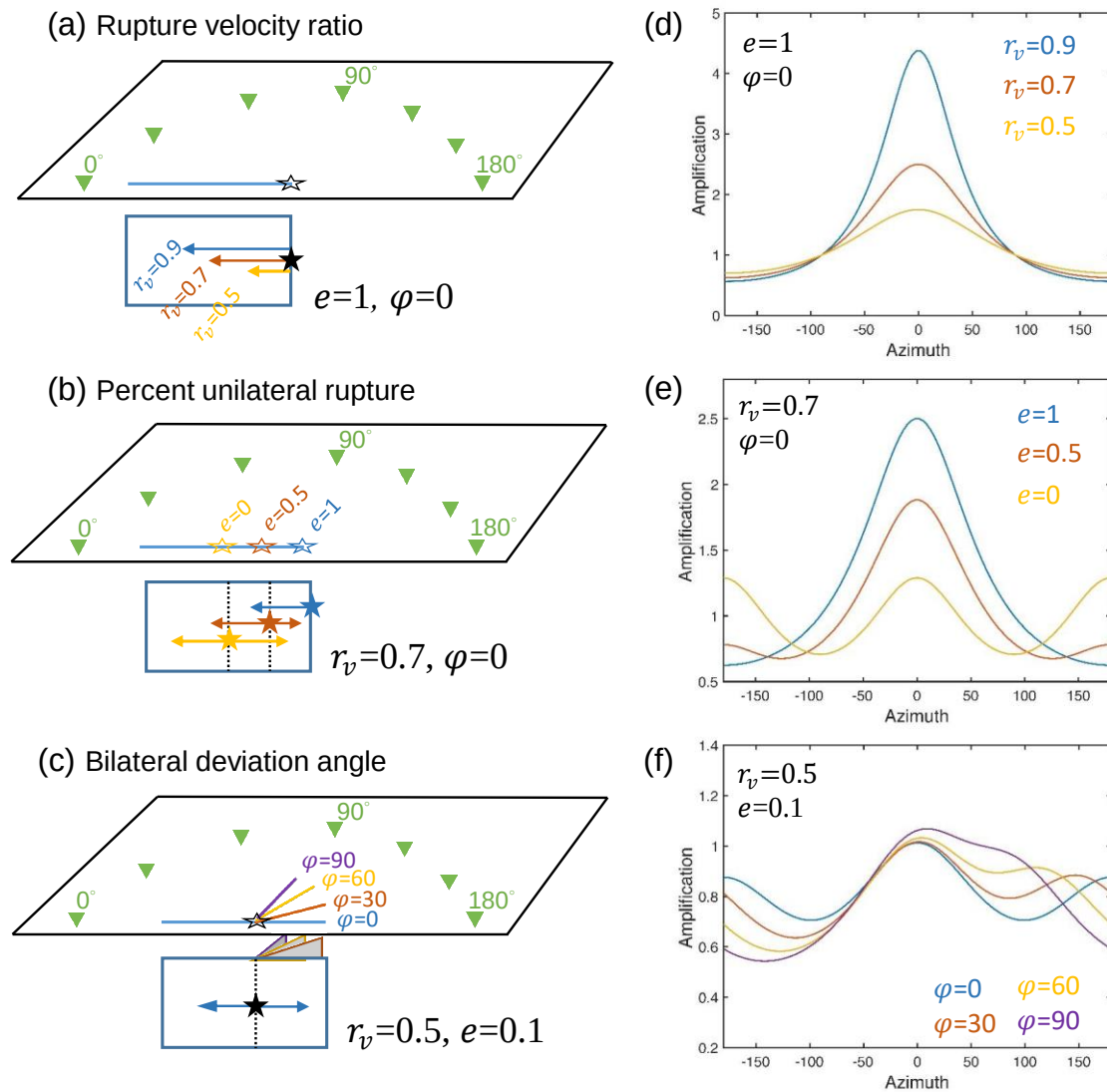
圖七、破裂方向性分析的預警時間。以圖五 b 之六個測站為例(桃紅色三角形)。我們分別以實線與虛線代表破裂方向前方與後方測站的時時最大地動值變化，水平代表最大地動值已抵達該站。

3.2 地動放大倍率函數與全空間近場地動反演

在 Boatwright(2007)與 Convertito et al. (2012)的研究中，提出放大倍率函數(C_d)來描述地動值在空間上放大程度的分佈：

$$C_d = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{(1+e)^2}{(1-r_v \cos(\theta))^2} + \frac{(1-e)^2}{(1+r_v \cos(\theta-\varphi))^2}}$$

其中 r_v 是破裂速度與 S 波速度之比值、 θ 是測站方位與破裂方向之夾角、 φ 為第二個面與主斷層面的夾角、 e 則是描述單向破裂程度的參數(圖八)。若為單向破裂則 $e=1$ ，地動的放大會呈現單一峰值(圖八 b 與 e)。地震破裂的速度越快，則造成的放大效應越強(圖八 a 與 d)。圖八 c 與 f 呈現的是當斷層有第二個面的的時候的地動放大情形，較為少見(即 φ 不為零時)。Jan et al. (2018)將解算的 15 個地震各方位角回歸之斜率相對於破裂方向繪出，發現多數地震的方向性衰減特性確實可以用地動放大倍率函數來描述，呈現如圖八 d 在 0 度(即破裂方向)的單一峰值，少數地震有第二個峰值(如圖八 e)。



圖八、地動放大倍率函數(Cd)的模擬。(a)、(b)和(c)分別為不同參數的測站與斷層破裂幾何示意圖。(d)、(e)和(f)則是測試不同參數值的模擬結果。

由於非均向性衰減式回歸分析雖可求得地震破裂的方向，但缺少一個倍率因子與放大函數來進行 GMPE 的地動預估計算。因此我們改利用全空間的近場地動分布來反演放大倍率函數(Cd)，再將 Cd 乘上現行 GMPE 公式與場址修正項(Hisao et al., 2006)即可進行遠場的地動預估計(圖九)。為提高反演的速度，我們將 e 設定為 1、 φ 設定為 0 度，僅搜尋破裂速度 r_v 與破裂方向(即決定 θ)。

四、結果與討論

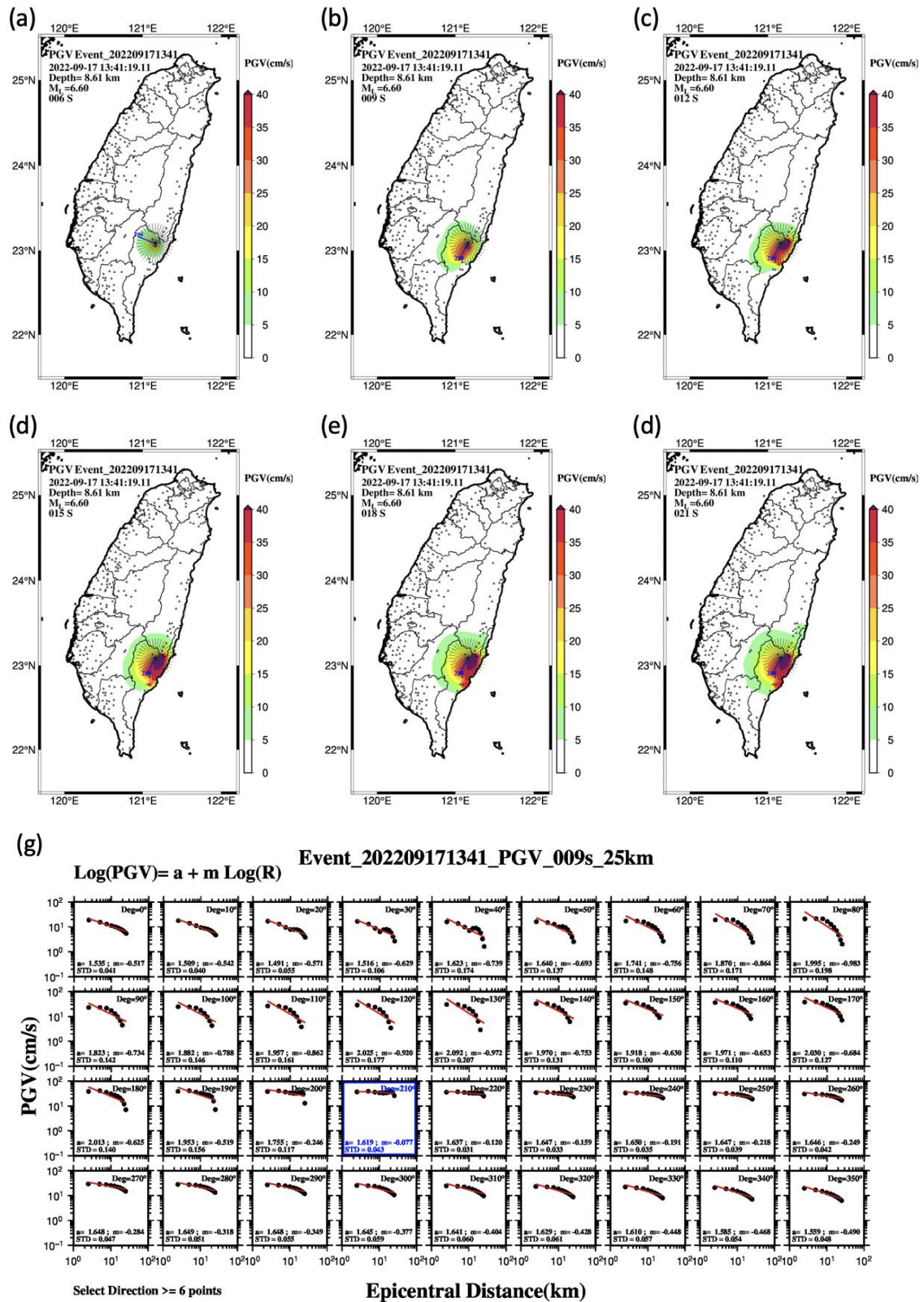
4.1 2022 年事件非均向性衰減式迴歸分析結果

接續期中以分析的 2012-2021 的 19 個事件，我們這邊以 2022 年新分析的 6 個事件為主，進行呈現與綜整。分析上，以發震時間為 0 秒(由地震預警速報決定)，模擬即時資料進來，每秒進行方向性衰減式迴歸分析一次，直到 30 秒為止。圖九和十為今年 9 月 17 和 18 日的關山和池上地震的分析結果。分別呈現三分量算數平均根的 PGV 在 6、9、12、15、18 與 21 秒內插的地動分布圖。可以看到兩起地震的地動值分布皆有明顯的方向性，池上地震北偏東 20 度的破裂方向性(藍色實線)也與有 10 月 18 日在氣象局舉辦的 0918 池上地震研討會的多方結果一致，符合有限斷層反演法的滑移量分佈與最大地動值和顯著地表破裂在北邊的觀察。關山地震的破裂方向則是北偏東 210 度朝南破裂。時效上，關山地震的破裂方向性約在 9 秒即達到穩定收斂，池上地震則是在 16 秒左右達到穩定。圖九 g 與圖十 g 展示了兩起地震在 9 秒與 16 秒時各方向性衰減式迴歸分析的結果。

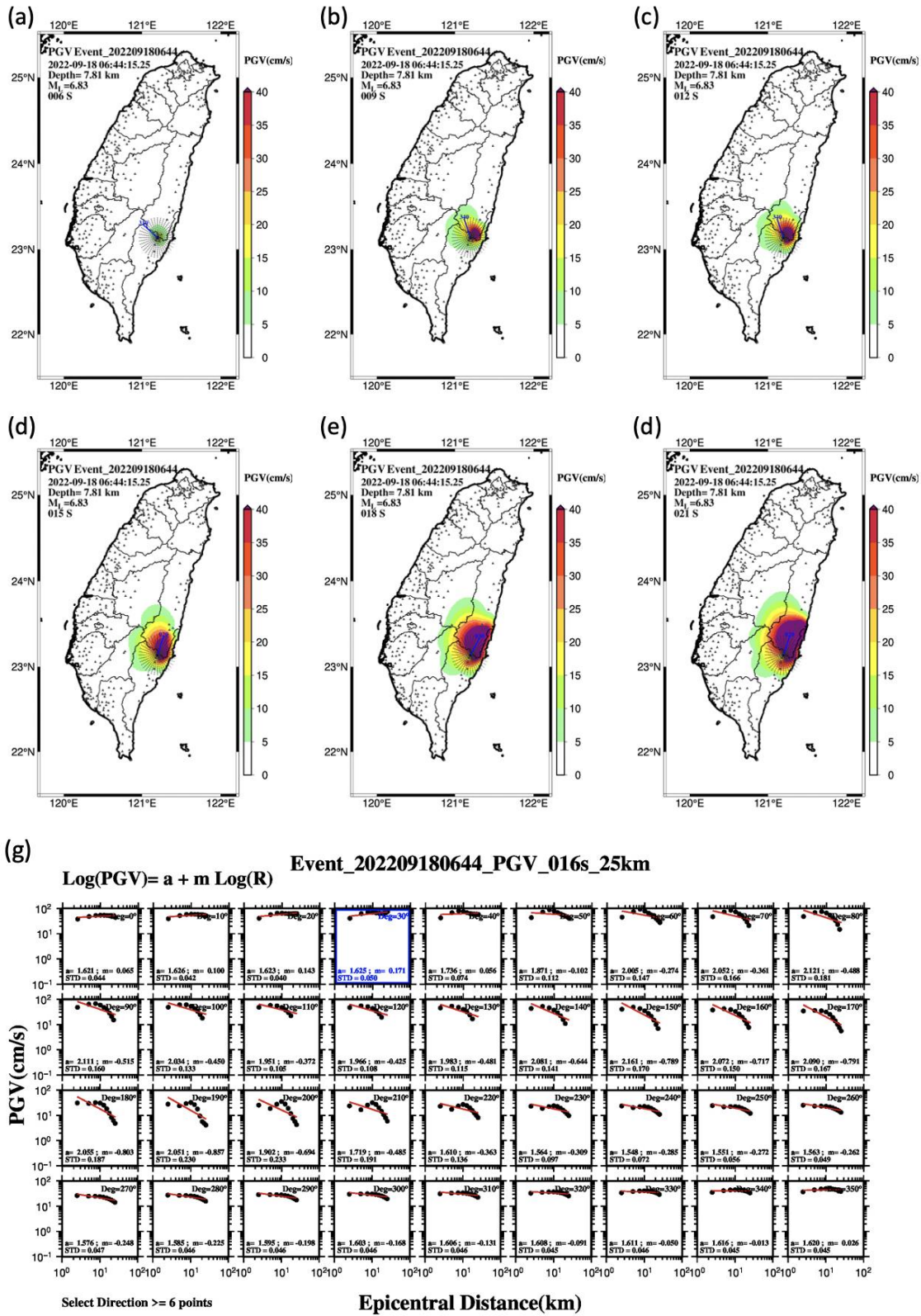
表一整理了自 2012 到今年 2022 年所分析的全部 25 個中大型地震的破裂方向性估算結果。在與 Jan et al. (2018)有重複分析的 9 個事件中，結果都非常相近，除了 2014/05/21 和 2016/04/27 的事件(表一藍底標示)。前者本來就是本研究較不穩定的事件，後者則同樣是規模偏小的事件。對於較大的地震事件，如 2013/03/27、2013/06/02、2013/10/31 和 2016/02/05，都有一致且穩定的結果，並且也都與前人研究使用不同方法所得到的破裂方向相近。而在 2022 年一系列的縱谷地震事件中，所得到的破裂方向性有的往北、有的往南，但都是平行縱谷走向的方向。

圖十一則整理了 25 個地震事件破裂方向性估算的時效性。我們將每秒算出的破裂方向減去最終的破裂方向性，探討計算何時趨於穩定，即變成 0 度的時間。與圖六相同，我們標示出美濃地震(藍色實線)、中位數表現(紅色虛線)，以及中位數的穩定時間(紅色實線)與平均現行預警系統的第三報時間(黃色實線)。從綜合結果上來看，多數約可在 10 秒左右收斂到破裂方向性的穩定解，而最慢收斂的地震事件也都能在 20 秒內達到。

接著，以今年 9 月 18 日的池上地震為例，我們在破裂方向的前、後方分別選取三個震央距相當的測站，評估破裂方向性對遠場強地動預估所能爭取到的時間(Lead time)。如圖十二所示，若我們其穩定收斂解在 16 秒左右為參考，雖然對 30 公里內的測站無法達到預警，但對 60 公里外的測站能爭取到 9 秒以上的時間。即雖然該地已經開始搖晃，但尚未到達最大的地動值。而透過我們的方向性分析有機會對該地提供更準的最大地動預估值，也就越有機會給出正確適當的國家級安全警報，減少盲區的發生。



圖九、2022/09/17 關山地震即時的最大地動速度(PGV)分布圖。(a)到(f)分別呈現 6 秒、9 秒、12 秒、15 秒、18 秒和 21 秒有紀錄之測站的 PGV 內插的結果。(g)為 9 秒時各方向的衰減式回歸結果。藍色框為 PGV 最小衰減方向，即破裂方向。

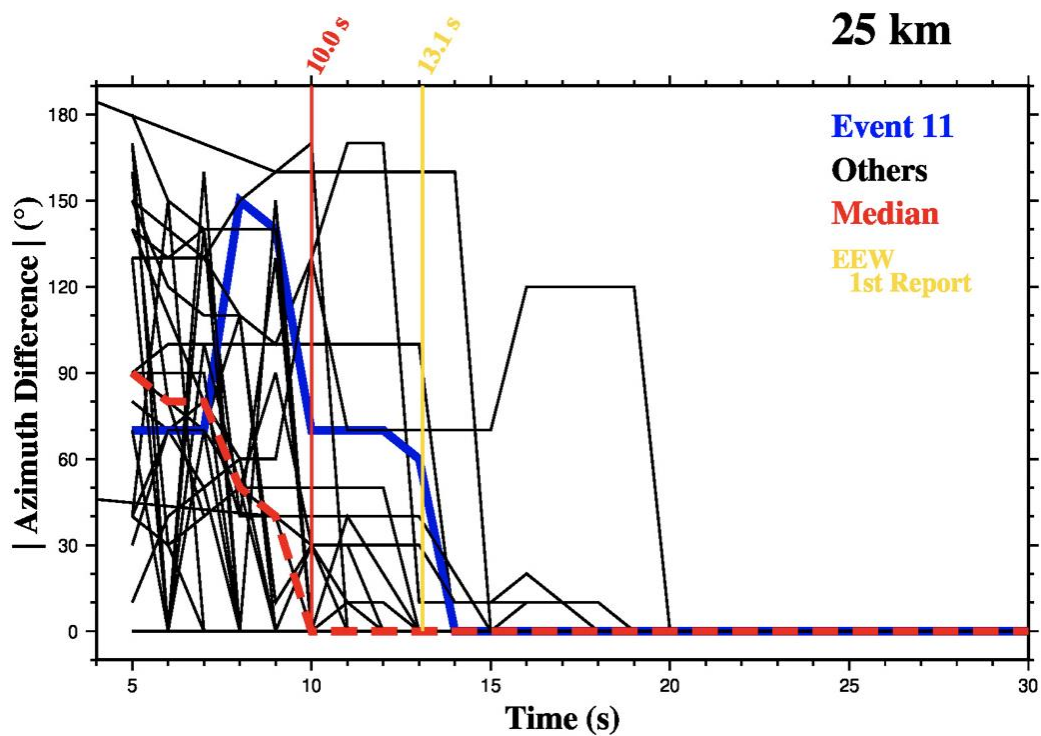


圖十、2022/09/18 池上地震即時的最大地動速度(PGV)分布圖。(a)到(f)分別呈現 6 秒、9 秒、12 秒、15 秒、18 秒和 21 秒有紀錄之測站的 PGV 內插的結果。(g)為 16 秒時各方向的衰減式回歸結果。藍色框為 PGV 最小衰減方向，即破裂方向。

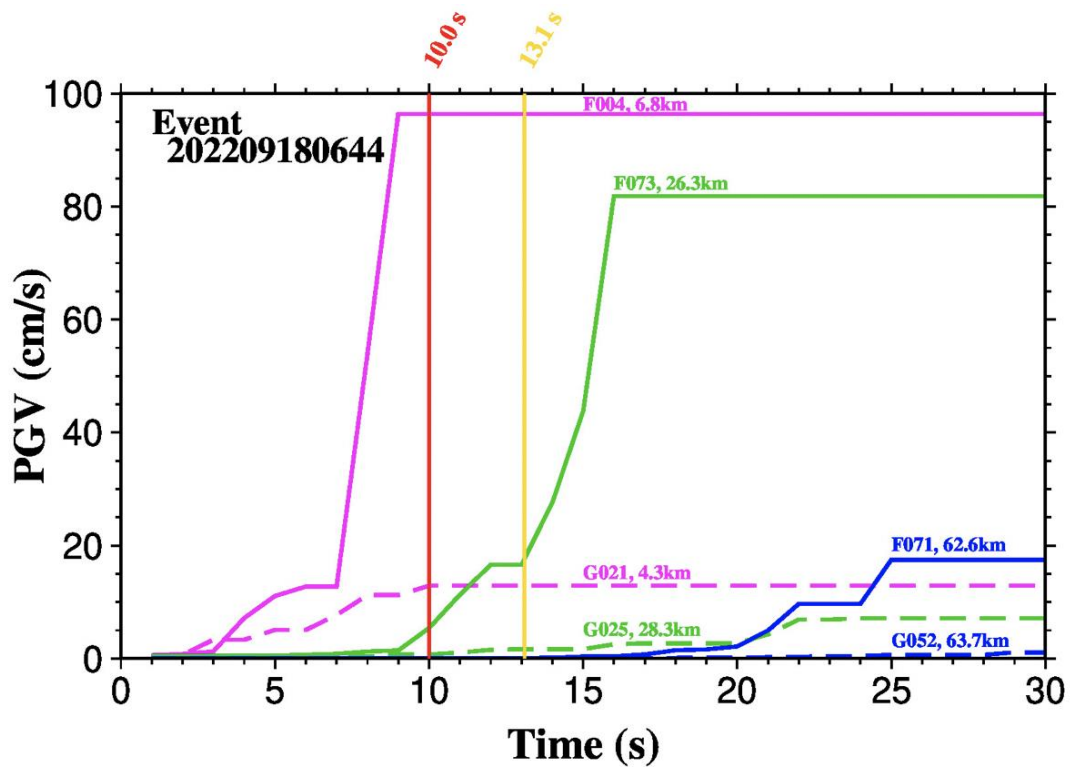
表一、本研究以方向性衰減式迴歸分析估算之地震破裂方向性與其他研究結果的比較。

Date	Time	Lon.	Lat.	Dep.	M _L	Dir.	J2018	Others*
2012/02/26	02:35:00.43	120.754	22.752	26.3	6.3	280		
2013/03/07	03:36:45.68	121.457	24.300	5.5	5.8	230	260	
2013/03/27	02:03:19.63	121.052	23.902	19.4	6.2	260	280	285/271
2013/06/02	05:43:03.21	120.974	23.861	14.5	6.4	250	240	219/235
2013/10/31	12:02:09.54	121.348	23.566	14.9	6.4	60	10	27
2014/05/21	00:21:13.95	121.432	23.735	16.4	5.9	130	70	
2016/02/05	19:57:26.08	120.543	22.922	14.6	6.6	310	300	305/299
2016/04/27	18:19:06.23	121.233	23.283	15.2	5.5	50	230	
2017/02/10	17:12:52.56	120.143	22.865	16.1	5.7	70	90	
2017/11/22	14:20:09.40	120.721	23.584	15.2	5.6	250	260	
2019/04/03	01:52:55.39	120.868	22.937	4.8	5.9	330		
2019/04/04	01:56:55.14	120.863	22.982	3.4	5.5	110		
2019/04/18	05:01:07.11	121.559	24.054	20.3	6.3	50		
2020/02/15	11:00:06.50	121.510	23.856	8.3	5.7	140		
2021/04/18	14:11:39.58	121.484	23.871	16.3	5.8	60		
2021/04/18	14:14:37.80	121.480	23.859	14.4	6.2	150		
2021/07/07	22:11:55.57	121.567	23.892	8.2	5.5	20		
2021/09/13	10:41:27.69	121.012	24.123	46.1	5.6	270		
2021/09/25	22:21:19.63	121.683	24.317	46.1	5.7	40		
2022/03/22	19:35:03.93	121.501	23.481	28.9	5.9	220		
2022/03/22	20:29:59.12	121.430	23.419	22.6	6.0	220		
2022/03/24	00:38:26.08	121.432	23.444	25.0	5.7	30		
2022/06/02	01:05:07.78	121.454	23.686	7.0	6.1	50		
2022/09/17	13:41:19.11	121.161	23.984	8.6	6.6	210		
2022/09/18	06:44:15.25	121.196	23.237	7.8	6.8	20		

*來自有限斷層反演等其他方法的破裂方向性資料(Lee, 2017; Wen et al., 2014; Jian et al., 2017)。



圖十一、破裂方向性分析之時效圖。黑色實線為本計畫 25 個中大型地震每秒解算結果與最終結果之差值。藍色實線為美濃地震的結果，紅色虛線代表總體中位數。橘色實現則標示了現行預警系統第一報平均的發佈時間。



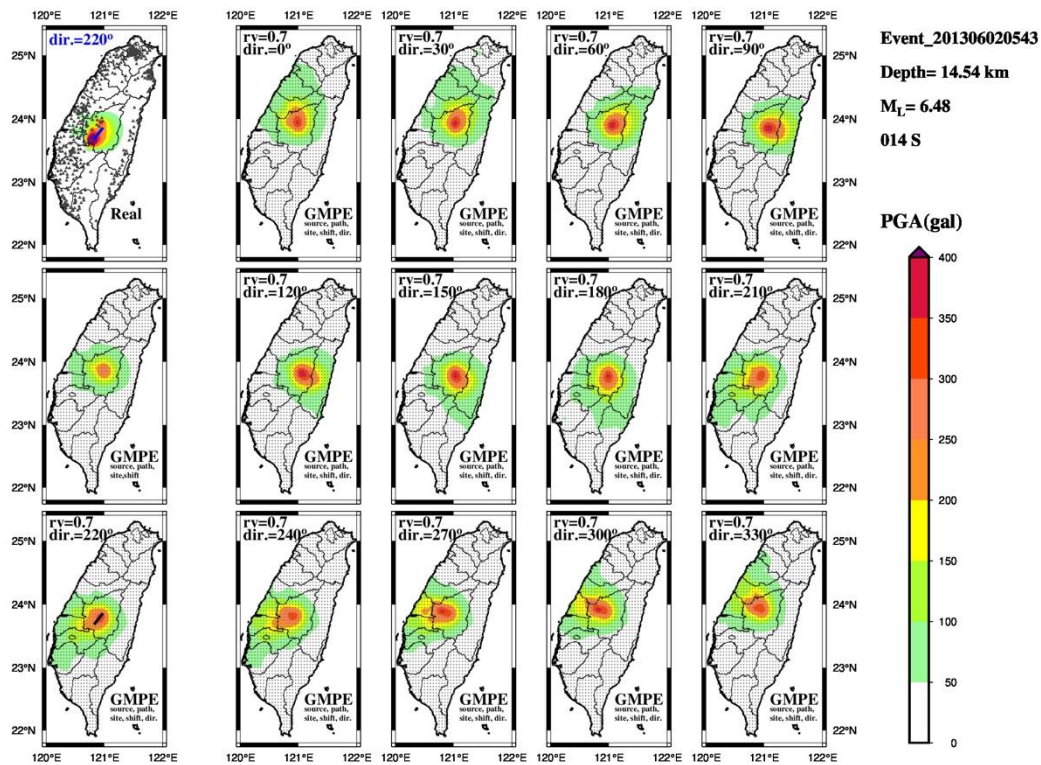
圖十二、破裂方向性分析的預警時間。選取破裂方向前方與後方各三個相近距離的測站為例。實線與虛線分別代表前方與後方不同距離的測站時時的最大地動速

度值變化，水平代表最大地動值已抵達該站。(a)與(b)為南投和瑞穗地震的結果。

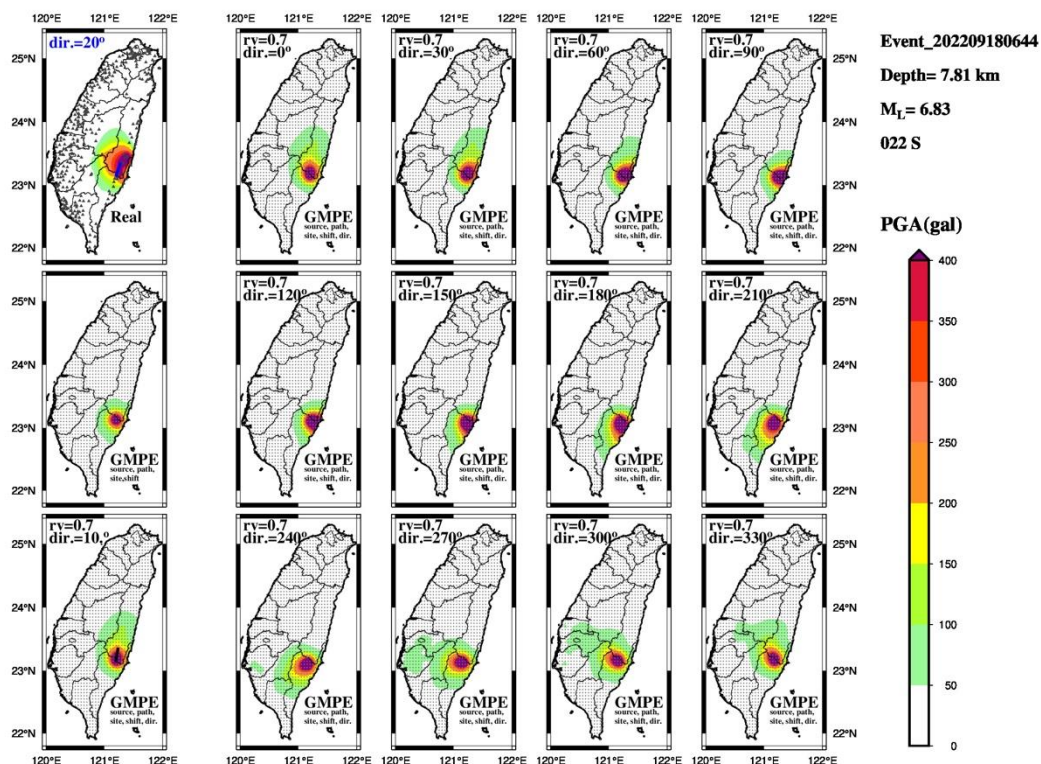
4.2 放大倍率函數近場地動反演與遠場地動預估

從預警的流程來看(圖一)，在得到破裂方向性之後，下一步即是套用地動衰減式(GMPE)來進行最大地動值的計算。但在我們前述的非均向性衰減迴歸分析中得到的只有破裂的方向，除非待收集夠多具破裂方向量測的地震資料重新迴歸建立新的 GMPE，否則無法直接套用到現行 GMPE 之中(Hsiao et al., 2006)。但透過 Jan et al. (2018)發現，Boatwright(2007)與 Convertito et al. (2012)等研究所提出的放大倍率函數 C_d 可以很好的描述我們近場迴歸分析的結果，因此，我們嘗試改以全空間近場地動值來直接反演出最適的放大倍率函數 $C_d(r_v, r_d)$ ， r_v 和 r_d 分別是破裂的速度和方向，代表放大函數的強度與方向。因此，同樣是使用震央距 25 公里內地動值，但我們並不分成每 10 度各自進行迴歸分析，而是將氣象局現行的 GMPE 乘上 $C_d(r_v, r_d)$ ，反演得出能擬合近場觀測地動值的 r_v 和 r_d ，接著代入遠場的震央距即能得到最大地動值的預估。此外，為了使用進一步使用臺灣全島的 PGA 場址修正項(Hsiao et al., 2006)，此反演我們改以 PGA 的資料進行。

圖十三和十四為利用近場 PGA 進行放大倍率函數反演並計算遠場 PGA 預估分布的初步結果。分別以 2013 年 6 月 2 日的南投地震與今年 9 月 18 日的池上地震為例。在南投地震的結果可以看到，在 14 秒左右我們即可預估出西部平原區大於 50 gal 以上 PGA 區域(左下)，此時該區實際的 PGA 還會到達(左上)。而若僅使用點源的 GMPE 預估並沒有辦法適當的預估到該區的放大(左中)。顯示近即時的解算與加入破裂方向性資訊到 GMPE 的最大地動值預估中是相當必要與可行的。另一方面，池上地震的分析結果中，同樣可以看到考慮往北破裂方向性的 GMPE 預估可以更好的計算出北邊的放大效應。這在 50 gal 的 PGA 分佈表現良好，但若看更大的 300 gal 的 PGA 分佈，會發現我們的 PGA 預估值還是相當程度地低估了北邊玉里附近實際地動值。考慮到 6.8 的規模，初步認為這可能與發震斷層面實際延伸到玉里附近的破裂長度有關，要更好的預估池上地震的 PGA 分佈，未來除了破裂方向性，也必須將破裂長度考慮進來(Bose et al., 2018; Xiao and Yamada, 2022)。



圖十三、2013 年 6 月 2 日南投地震的近場放大倍率函數反演與遠場地動預估。左欄上、中、下分別代表實際觀測 PGA 分佈、點源 PGA 預估分佈與考慮破裂方向性的 PGA 預估分佈。右四欄呈現不同破裂方向性的對應 PGA 分佈。結果皆含場址修正。



圖十四、2022 年 9 月 18 日池上地震的近場放大倍率函數反演與遠場地動預估。圖文敘述同圖十三。

五、計畫成果與未來規劃

本計劃對 2012 年至 2022 年的資料，篩選出芮氏規模大於 5.5 的 25 筆島內中大型地震事件，進行即時破裂方向性估算的分析與驗證。結果顯示多數事件皆可在 10 秒左右收斂到破裂方向性的穩定解，而最慢收斂的地震事件也都能在 20 秒內達到，這樣的時效對震央距 50、60 公里外的區域能爭取到 8 秒以上的反應時間 (Lead time)。所得到的破裂方向性多數與前人研究一致，包括今年 0917 和 0918 的關山和池上地震，分別得到向南與向北的破裂方向，也與多方結果吻合。

為了進一步直接與地動衰減式結合運用，我們嘗試將原方法改以全空間近場地動反演的方式直接求取方向性地動放大倍率函數，直接套用現行的地動衰減式與場址修正項來進行遠場地動的預估。初步結果顯示加入破裂方向性震源參數的地動計算，確實能改進遠場的地動預估，減少預警盲區的發生。惟在 0918 池上地震的分析中發現，雖然此新方法對 50 gal 以上的 PGA 預估良好，但卻相當程度地低估了 300 gal 以上近斷層的 PGA 分布，這可能暗示了當斷層長度隨著規模變大而變長時，需改採最近斷層距以非震源距為計算方式。這表示為因應未來芮氏規模 6.5-7.0 以上的大地震，除地震的破裂方向性，其斷層破裂長度也是需要近即時估算的震源參數之一。

參考文獻

- Allen, P. M., P. Gasparini, O. Kamigaichi, and M. Bose (2009). The Status of Earthquake Early Warning around the World: An Introductory Overview. *Seismol. Res. Lett.*, 80(5), doi:10.1785/gssrl.80.5.682.
- Boatwright, J. (2007). The persistence of directivity in small earthquakes. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 97, 1850-1861.
- Bose, M., D. E. Smith, C. Felizardo, M.-A. Meier, T. H. Heaton, and J. F. Clinton (2018). FinDer v.2: Improved real-time ground-motion predictions for M2–M9 with seismic finite-source characterization. *Geophys. J. Int.*, 212, 725-742.
- Chen, D.-Y., N.-C. Hsiao, and Y.-M. Wu (2015). The Earthworm based earthquake alarm reporting system in Taiwan. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 105, 568-579, doi:10.1785/0120140147.
- Chen, D.-Y., T.-L. Lin, H.-C. Hsu, Y.-C. Hsu, and N.-C. Hsiao (2019). An approach to improve the performance of the earthquake early warning system for the 2018 Hualien earthquake in Taiwan. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 30, 423-433, doi: 10.3319/TAO.2018.12.23.02
- Chung, A. I., I. Henson, and R. M. Allen (2019). Optimizing Earthquake Early Warning Performance: ElarmS-3. *Seismol. Res. Lett.*, 90(2A), doi:10.1785/0220180192.
- Convertito, V., M. Caccavale, R. De Matteis, A. Emolo, D. Wald, and A. Zollo (2012). Fault extent estimation for near-real-time ground-shaking map computation purposes. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 102(2), 661–679. <https://doi.org/10.1785/012010030>.
- Furumura, T., T. Maeda, and A. Oba (2019). Early forecast of long-period ground motions via data assimilation of observed ground motions and wave propagation simulations. *Geophys. Res. Lett.*, 46, 138–147. <https://doi.org/10.1029/2018GL081163>.
- Hoshiba, M. and S. Aoku (2015). Numerical Shake Prediction for Earthquake Early Warning: Data Assimilation, Real-Time Shake Mapping, and Simulation of Wave Propagation. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 105(3), 1324-1338.
- Hsiao, N.-C. (2006). The application of real-time strongmotion observations on the earthquake early warning in Taiwan. Ph.D. Thesis, National Central University, Taoyuan City, Taiwan, ROC, 178 pp.
- Huang, M.-H. and H.-H. Huang (2018). The complexity of the 2018 Mw 6.4 Hualien earthquake in east Taiwan. *Geophys. Res. Lett.*, 45, 13,249–13,257.
- Imperator, W. and P. M. Mai (2013). Broad-band near-field ground motion simulations in 3-dimensional scattering media. *Geophys. J. Int.*, 192(2), 725-744. <https://doi.org/10.1093/gji/ggs041>.
- Jan, J. C., Huang, H.-H., Wu, Y.-M., Chen, C.-C., and Lin, C.-H. (2018). Near-real-time estimates on earthquake rupture directivity using near-field ground motion data from a dense low-cost seismic network. *Geophys. Res. Lett.*, 45, 7496–7503.

- Jian, P.-R., S.-H. Hung, L. Meng, and D. Sun (2017). Rupture characteristics of the 2016 Meinong earthquake revealed by the back projection and directivity analysis of teleseismic broadband waveforms. *Geophys. Res. Lett.*, 44(8), 3545-3553. <https://doi.org/10.1002/2017GL072552>
- Kamigaichi, O., M. Saito, K. Doi, T. Matsumori, S. Tsukada, K. Takeda, T. Shimoyama, K. Nakamura, M. Kiyomoto, and Y. Watanabe (2009). Earthquake early warning in Japan: Warning the general public and future prospects, *Seismol. Res. Lett.*, 80(5), 717-726, doi: 10.1785/gssrl.80.5.717.
- Kong, Q., D. T. Trugman, Z. E. Ross, M. J. Bianco, B. J. Meade, and P. Gerstoft (2019). Machine Learning in Seismology: Turning Data into Insights. *Seismol. Res. Lett.*, 90(1), doi:10.1785/0220180259.
- Lee, S.-J., T.-Y. Yeh, and Y.-Y. Lin (2016). Anomalous Large Ground Motion in the 2016 ML 6.6 Meinong, Taiwan, Earthquake: A Synergy Effect of Source Rupture and Site Amplification. *Seismol. Res. Lett.*, 87(6), doi:10.1785/0220160082.
- Lee, S.-J. (2017). Lessons learned from source rupture to strong ground motion simulations: An example from Taiwan. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 107(5), 2106-2116. <https://doi.org/10.1785/012017003>.
- Ripperger, J., P. M. Mai, and J.-P. Ampuero (2008). Variability of near-field ground motion from dynamic earthquake rupture simulations. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 98(3), 1207-1228. <https://doi.org/10.1785/012007007>.
- Wen, Y.-Y., H. Miyake, Y.-Y. Yen, K. Irikura, and K.-E. Ching (2014). Rupture directivity effect and stress heterogeneity of the 2013 Nantou blind-thrust earthquakes, Taiwan. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 104(6), 2933-2942. <https://doi.org/10.1785/012014010>.
- Xiao, Y. and M. Yamada (2022). XYtracker: a new approach to estimate fault rupture extent in real time for large earthquakes. *Earth, Planets and Space*, 74:77, <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01650-1>.
- Yang, B. M., T.-C. Huang, and Y.-M. Wu (2018). ShakingAlarm: A Nontraditional Regional Earthquake Early Warning System Based on Time-Dependent Anisotropic Peak Ground-Motion Attenuation Relationships. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 108(3A), 1219-1230.

人工智慧技術建立微分區地震預警系統相關研究(II)

子計畫三

整合臺灣地區高密度地震網提升地震預警時效

吳逸民 楊民

國立臺灣大學地質科學系

摘要

時效性一直是地震預警系統運作中不可避免的重要環節，臺灣中央氣象局因應此課題，從 2015 年起為自由場強震站裝設即時傳輸功能，藉此提升即時觀測站的密度，進而讓系統在地震定位時能更加快速、準確。此外，臺灣亦有一個常設的高密度地震觀測網—P-Alert 觀測網。不同於其他地震觀測網，P-Alert 觀測網本身即整合了區域型預警、現地型預警、地震速報以及提供高品質地震紀錄等功能，不論是對地震防、減災抑或是地震科學研究都能有極大的貢獻。本計畫結合了這兩個地震網，並修改預警模組進行測試，結果顯示整合地震網在更多的測站參與下，約可縮短一至兩秒的地震偵測時間；不過在定位精準度方面，模組仍有改善空間。另外，為避免短時間多重地震造成地震偵測誤判的狀況，本計畫建立多重地震偵測流程，並完成相應定位模組。線下模擬測試結果顯示，新定位模組確實可以有效避免多重事件造成的誤報。

關鍵詞：地震預警系統、高密度地震網、多重事件偵測

Abstract

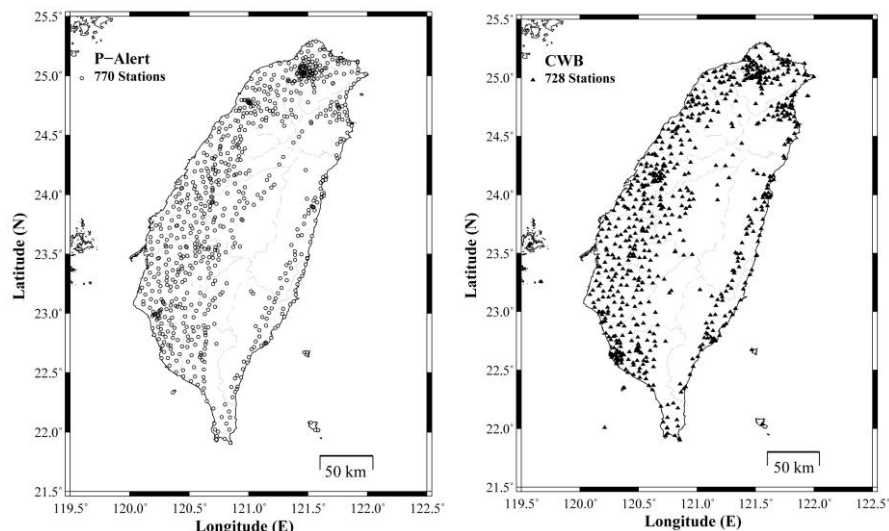
Timeliness has always been an inevitable subject in operating an earthquake early warning (EEW) systems. For this purpose, the Central Weather Bureau (CWB) has equipped real-time transmission functions for those stations of Taiwan Strong-Motion Instrument Program (TSMIP) since 2015, therefore increasing the density of real-time observation stations and making the earthquake locating process become faster and more accurate. There is another permanent high-density seismic network in Taiwan, that is P-Alert Network. Different from other seismic networks, the P-Alert network itself integrates functions such as regional early warning system, on-site early warning system, and providing real-time shakemaps. Whether it is for earthquake prevention, disaster mitigation or earthquake science research, it indeed made a great contribution. In this study, we modified the Earthworm module to integrate the CWB and P-Alert system for EEW testing. Based on the testing result, the EEW system reporting time could be

shortened about 1-2 seconds if there are more stations that could be used for location. However, the module still needs to be optimized for the accuracy of the location result. Multiple earthquakes occur in a very short period may cause the false alarm of the EEW system. In this study, we established the algorithm of multiple events detection and created the corresponding location module. And, in the simulation test, the new location module indeed can prevent the false alarm caused by multiple events.

Keywords: Earthquake Early Warning, High-density Seismic Network, Multiple Events Detection

壹、背景

臺灣是地震活動頻繁的地區，歷史上造成為數不少嚴重災害的大型地震(Shin and Teng, 2001; Wu et al., 2016)。近年來國家及學術單位積極推廣地震預警系統，使民眾生命財產能得到更多保障，許多地震研究機構在島上建立了各自獨立的地震觀測網，如：本研究團隊的高密度地震觀測網(P-Alert)、中央研究院的臺灣寬頻地震網(BATS)、國家地震工程研究中心(NCREE)的寬頻和強震觀測網以及中央氣象局(Central Weather Bureau, CWB)所管理的地震觀測站等。中央氣象局近幾年來，逐步將既有自由場強震站升級，使得總即時測站數也來到七百多座測站，其地震預警系統表現亦隨之提升。本研究團隊利用屬於微機電系統感應器的 P 波警報器(Wu et al., 2013; Wu, 2015)建置而成的 P-Alert 觀測網擁有最高密度的測站分布，由於團隊不斷地在提升測站妥善率以及最佳化核心程式，P-Alert 觀測網至今已是一套完整的地震觀測網，能在中、大型地震發生後立即計算出地震規模、震央位置及地動峰值分布(Chen et al., 2015)。另外，Yang 等人(Yang et al., 2021)已成功開發此觀測網即時產製地表最大加速度(Peak Ground Acceleration, PGA)、地表最大速度(Peak Ground Velocity, PGV)及不同週期之譜加速度(Spectral Acceleration, Sa)以及 CWB 震度階的分布圖的新系統，並提供給救災相關單位參考，使有限的救災資源能更有效且精確地被利用。本團隊已於前一年的相關研究計畫中，成功整併 P-Alert 與氣象局兩個地震觀測網，而整合後的總數量約為 1500 個測站(如圖一)，此整併工程不僅能補足雙方空缺的資料，還會有更多的測站資料相互對照，預期能有效縮小現有的預警盲區，讓地震定位快速且精準。



圖一、現行之 P-Alert 地震觀測網測站分布圖(左)與中央氣象局即時地震觀測站分布圖(右)。

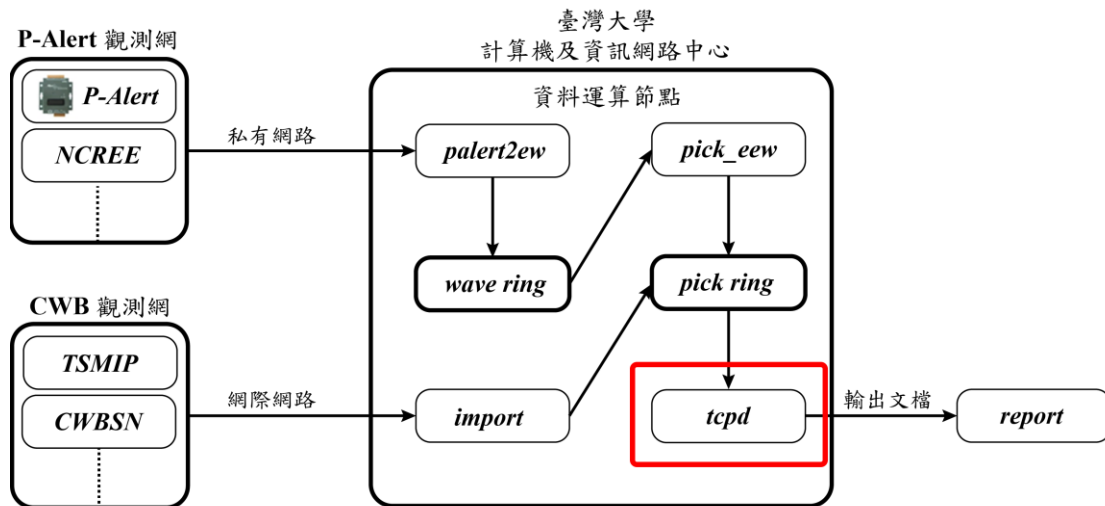
貳、研究方法及進行步驟

即時預警系統在去年整併研究過程中已經找到適合之伺服器，並盡可能強化周邊聯絡線路及網路連線品質，消弭硬體所造成的限制。研究團隊決定接收交換 CWB 經過處理的波形檢拾(Picking)資訊做為後續運算的資料，如此一來，除了能降低伺服器對資料接收與運算節點的處理負擔，也可以減少 CWB 對外波形資料傳輸品質的影響，使計畫得以在一個較為簡便且符合運作乘載量的環境下執行。由於 Earthworm 系統中所有資料皆有識別標籤(Data Logo)，但兩系統交換的檢拾資料則屬於自定義格式，起初接收資料時，便出現了兩端對此資料標籤定義不一致的狀況。所幸在本研究團隊重新定義系統之識別標籤後，獲得了預期中的整合定位報告。

整合預警系統(Integrated System)資料處理中心為一部虛擬伺服器，實體主機位於臺灣大學計算機及資訊網路中心。如同前述，整合系統伺服器除接收來自 P-Alert 觀測網的完整即時波形外，同時，亦透過網際網路接收來自 CWB 的檢拾資訊。

本次預計使用資料時間區間為 2022 年 1 月 1 日至 2022 年 10 月 31 日。而資料處理流程(圖二)如下：當即時波形進入伺服器後，檢拾模組便開始掃描，識別波形中是否有 P 波抵達的資訊。一旦偵測到 P 波抵達，便輸出檢拾資訊，內容包含 P 波到時、測站位置、檢拾品質等。再加上來自 CWB 觀測網的檢拾資訊，兩種檢拾資訊匯集至檢拾共享記憶體(Pick Ring)，再同時進入使用 Geiger 法的定位及規模決定模組(圖二紅框處的 tcpd 模組，以下簡稱為定位模組)中，進行定位程序，並產出報告。另外，比較基準(Benchmark)為既有的 CWB 預警系統，因此，還需定期(約一個月一次)向中央氣象局地震測報中心索取既有系統的報告文檔。最終，整合預警系統及 CWB 預警系統的定位報告即為本研究分析之重點。

另外，在離線測試中，發現有多起中、小型地震一起發生的情形。各測站間到時檢拾資料能否形成群集，此判別流程為多重地震事件即時監測重要的環節，可能會引起系統定位或事件誤判問題。過去，在日本也曾出現將多重地震事件誤判成大地震警報的案例，原因為多重事件定位錯誤及不當的距離修正。能想像未來整合系統正式上線時亦會面臨此狀況，故本計畫將會著重在整合以及修正與精進現行預警系統中的定位模組。另外，也在步驟中提出多重地震事件之即時監測構想，藉此消弭潛在的不穩定現象。



圖二、資料整合暨處理流程圖。紅框處為本期報告著重探討之模組。

參、結果與討論

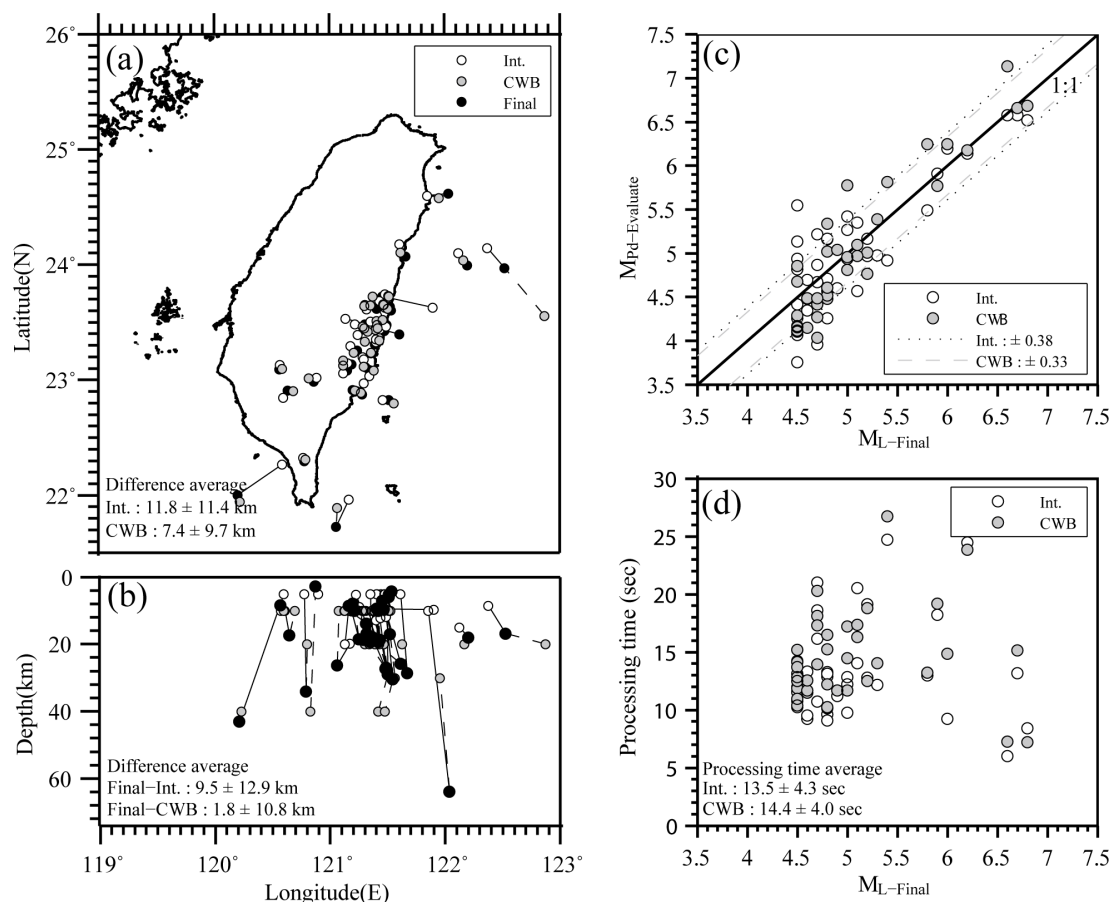
原預計使用資料時間區間為 2022 年 1 月 1 日至 2022 年 10 月 31 日。但其中 2022 年 1 月至 2 月中旬，因氣象局端進行系統調整；以及 8 月底至 9 月下旬，因發生大規模停電後虛擬機運作不正常，皆使整合系統伺服器無法正常接收來自 CWB 撿拾資訊，進而導致兩個時段內產出的報告僅使用了 P-Alert 觀測網之撿拾資訊。由於本研究欲探討整合地震觀測網是否能提升地震預警時效，因此非整合觀測網報告，暫不列入分析及討論。

一、現行整合系統與 CWB 預警系統之比較

由於本研究旨在探討時效性，並且為求一致的比較基準，分析皆以雙方 Geiger 方法最快發布的報告(簡稱第一報)為主。另外，從前期結果可知，當陸地上接收到的地震震度較小時，P-Alert 觀測網較難參與整合系統的地震定位過程。且小規模的地震通常不容易造成災害，非地震預警系統所關注之事件。因此，下列分析將聚焦於規模大於 4.5($M_L \geq 4.5$)的中、大型地震。

實際分析資料之時間區段為 2022 年 2 月 16 日至 2022 年 8 月 30 日，及 2022 年 9 月 28 日至 2022 年 10 月 31 日。根據中央氣象局地震測報中心網站所公布之地震報告，兩區段內共計有 498 筆地震事件，有 121 筆地震事件規模大於 4.5。121 筆中、大型地震事件中，CWB 預警系統共觸發 86 筆(71.1%)；整合預警系統則共觸發 82 筆(67.8%)；兩系統皆觸發的事件共計 74 筆(61.2%)。更深入來看，整合預警系統觸發的 82 筆事件中，P-Alert 觀測網實際參與了 53 筆(64.6%)；兩系統皆觸發的 74 筆事件中，P-Alert 觀測網則參與了 43 筆(58.1%)，如表一所示。其中 11 筆事件(編號 1、3、4、7、10、12、23、24、36、37、41)整合代表性不足，僅一個 P-Alert 觀測網測站參與，或完全由 P-Alert 觀測網主導(P-Alert 比率達 100%)，故暫不列入分析及討論。另外，編號 38、39 號事件分別為 2022 年 9 月 17 日 M_L 6.6 關山地震及 2022 年 9 月 18 日 M_L 6.8 池上地震。由於這兩個大型事件發生於整合系統無法接收 CWB 撿拾資訊的時間區段，因此，實際上並無即時產生的整合報

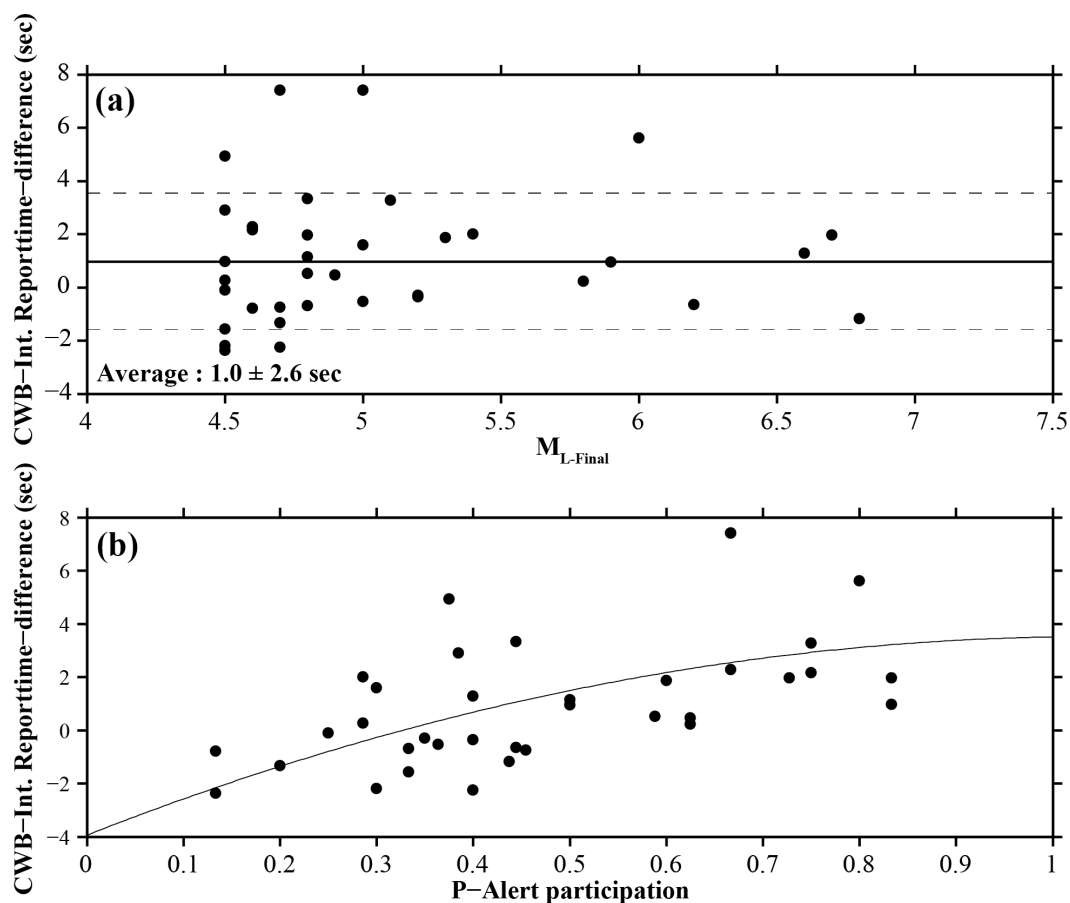
告，此處表列為線下模擬測試結果。



圖三、整合預警系統與 CWB 預警系統針對 34 筆事件之震央定位(a)、深度定位(b)、規模評估(c)及處理時間(d)比較圖。

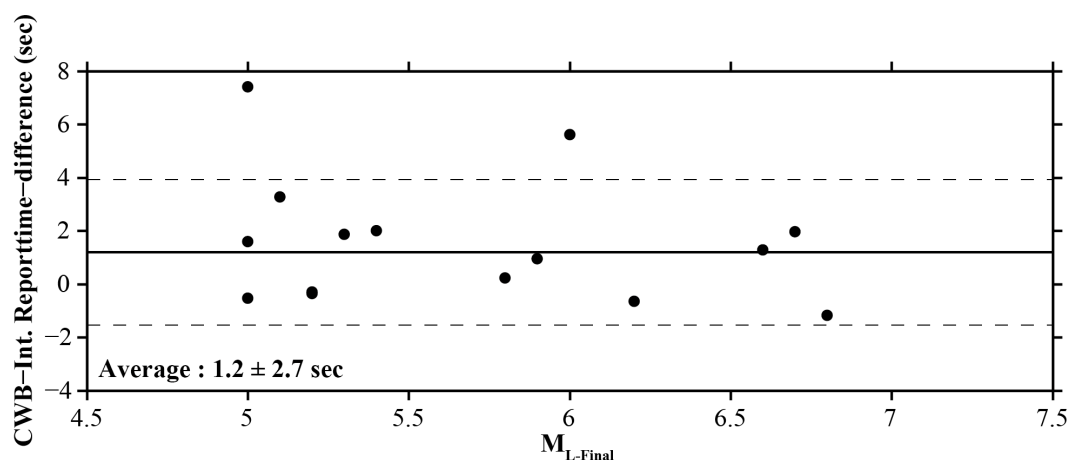
為分析整合預警系統的提升程度，本研究僅就兩系統皆觸發，且 P-Alert 觀測網實際參與的事件進行分析。剔除整合代表性不足的 11 筆事件，再加上 2 筆針對大型事件的模擬結果，本研究共分析 34 筆事件，結果如下：從震央位置來看，CWB 預警系統第一報的結果與最終地震報告的平均差距為 7.4 公里；而整合預警系統與地震報告的平均差距則為 11.8 公里，詳如圖三(a)。在深度方面，CWB 預警系統與地震報告的平均差距為 1.8 公里；整合預警系統與地震報告的平均差距則為 9.5 公里，詳如圖三(b)。在發震時間方面，CWB 預警系統與地震報告的平均差距為 1.3 秒；整合預警系統與地震報告的平均差距則為 2.4 秒。至於地震規模的評估，雖然系統採用了多種評估方法(如 T_c 法、 P_v 法、 P_d 法等)，但實際運作以 P_d 評估方法較為穩定，故在此皆以 M_{Pd} 作為比較基準。CWB 預警系統與地震報告的規模平均差距約 0.33；整合預警系統與地震報告的規模平均差距則為 0.38，詳如圖三(c)。最後，最為重要的時效性，在 34 筆事件中，兩系統第一報的平均處理時間差距(CWB 系統減去整合系統)為 1.0 秒，換言之，整合預警系統比 CWB 預警系統快 1 秒左右，詳如圖三(d)及圖四(a)。另外，從圖四(a)可見，多數整合預警系統明顯慢於 CWB 預警系統的事件落在規模 4.5 附近。因此，將篩選門檻提高至規模 5.0，針對可能

造成較嚴重災害的事件分析。結果如圖五，兩系統第一報的平均處理時間差距上升為 1.2 秒。



圖四、整合預警系統時效性提升示意圖。(a)為兩系統處理時間差距(CWB 系統減去整合系統)對最終規模的散布圖，圖中水平實線代表 1.0 秒的平均時間差距，虛線則表示一個標準差的範圍；(b)為兩系統處理時間差距對整合預警系統的 P-Alert 參與率的散布圖，圖中曲線為二次曲線擬合。

另外，如圖四(b)所示，橫軸為 P-Alert 觀測網的參與比率，縱軸為兩系統第一報的平均處理時間差距(CWB 系統減去整合系統)。圖中曲線為二次曲線擬合，可見隨著 P-Alert 觀測網的參與比率增加，平均處理時間差距跟著上升。換言之，時效性會隨著 P-Alert 觀測網的參與比率上升。但超過一定比率後，就無法再提升，達到飽和。這符合本研究對整合觀測網的預想，理論上，若不考慮 P-Alert 觀測網，兩端系統因為有相同的檢拾資訊，應會有一致的表現。隨著 P-Alert 觀測網的測站加入(參與比率增加)，整合系統的時效性持續上升。然而時效性不會無限制地提升，當測站數量或是密度增加至一個程度，時效性的提升應會達到飽和，也會是時效性最高的位置(平均處理時間差距最大)。因此，未來若能使定位模組的觸發更為穩定，再納入更多事件統計，或能藉此分析了解最佳的測站數量或密度。



圖五、兩系統處理時間差距(CWB 系統減去整合系統)對最終規模的散布圖，僅統計規模大於 5.0 事件。圖中水平實線代表 1.2 秒的平均時間差距，虛線則表示一個標準差的範圍。

整體而言，雖然尚未實際應用新的定位模組於即時系統，兩個觀測網間的系統性時間差異及定位模組自身的不穩定性等問題仍然存在，地震定位、發震時間及規模評估的誤差亦仍無法有效下降。僅就現有結果而言，在時效性方面，整合預警系統則確實能加快產出報告的速度，有效提升系統時效性。

表一、P-Alert 觀測網參與的 45 筆地震資料

編號	資料來源	發震時間 (UTC)	緯度 (°N)	經度 (°E)	深度 (km)	規模	發報時間 (UTC)	P-Alert 比率 (P-Alert/Total)
1*	地震報告	2022/03/09 12:22:14	23.25517	121.4280	33.4	5.7	X	X
	CWB 系統	2022/03/09 12:22:15.60	23.28970	121.2740	40.0	5.76	12:22:26.39	X
	整合系統	2022/03/09 12:22:09.81	22.49290	119.6954	5.0	7.19	12:22:25.18	5/5 (100.0%)
2	地震報告	2022/03/16 00:34:52	22.29633	120.7877	34.0	4.8	X	X
	CWB 系統	2022/03/16 00:34:55.13	22.31390	120.7993	20.0	4.48	00:35:07.29	X
	整合系統	2022/03/16 00:34:55.67	22.32470	120.7769	5.0	4.71	00:35:05.30	8/11 (72.7%)
3*	地震報告	2022/03/19 15:23:42	23.63700	120.6875	14.8	5.1	X	X
	CWB 系統	2022/03/19 15:23:43.56	23.65690	120.7173	10.0	5.49	15:23:52.20	X
	整合系統	2022/03/19 15:23:43.92	23.63800	120.6903	5.0	4.88	15:23:50.17	7/7 (100.0%)
4*	地震報告	2022/03/22 17:06:55	22.02500	121.3625	26.0	5.5	X	X
	CWB 系統	2022/03/22 17:06:55.15	22.06600	121.3707	20.0	5.13	17:07:11.78	X
	整合系統	2022/03/22 17:07:14.62	23.05220	120.7116	5.0	4.66	17:07:28.55	1/9 (11.1%)
5	地震報告	2022/03/22 17:41:38	23.39850	121.6118	25.7	6.7	X	X
	CWB 系統	2022/03/22 17:41:41.51	23.43530	121.4044	20.0	6.66	17:41:53.18	X
	整合系統	2022/03/22 17:41:42.07	23.44300	121.4445	5.0	6.58	17:41:51.19	5/6 (83.3%)
6	地震報告	2022/03/22 18:10:51	23.50033	121.4310	18.7	4.7	X	X
	CWB 系統	2022/03/22 18:10:52.81	23.51350	121.4130	10.0	4.27	18:11:09.16	X
	整合系統	2022/03/22 18:10:53.85	23.51070	121.3615	10.0	5.22	18:11:01.73	6/9 (66.7%)
7*	地震報告	2022/03/22 18:37:50	23.42233	121.5225	35.7	5.5	X	X
	CWB 系統	2022/03/22 18:37:37.93	23.33460	121.3997	20.0	3.68	18:37:54.20	X
	整合系統	2022/03/22 18:37:43.19	24.06440	121.2627	5.0	3.49	18:38:00.44	1/5 (20.0%)
8	地震報告	2022/03/22 19:14:56	23.46517	121.4965	27.5	4.7	X	X
	CWB 系統	2022/03/22 19:14:58.24	23.52400	121.4685	20.0	4.42	19:15:16.32	X
	整合系統	2022/03/22 19:15:01.04	23.70430	121.3972	12.76	4.67	19:15:17.06	5/11 (45.5%)
9	地震報告	2022/03/22 19:35:03	23.48117	121.5007	28.9	5.8	X	X
	CWB 系統	2022/03/22 19:35:04.99	23.47930	121.4191	40.0	6.25	19:35:16.25	X
	整合系統	2022/03/22 19:35:06.82	23.46540	121.4961	10.0	5.49	19:35:16.01	5/8 (62.5%)
10*	地震報告	2022/03/22 20:29:59	23.41900	121.4300	22.6	6.0	X	X
	CWB 系統	2022/03/22 20:29:59.84	23.42240	121.4058	10.0	6.08	20:30:15.89	X
	整合系統	2022/03/22 20:29:46.85	21.72630	121.9724	5.0	7.83	20:30:07.22	5/5 (100%)
11	地震報告	2022/03/22 21:41:08	23.33300	121.4178	19.3	5.0	X	X
	CWB 系統	2022/03/22 21:41:08.36	23.34460	121.4373	10.0	4.81	21:41:25.24	X
	整合系統	2022/03/22 21:41:09.45	23.33160	121.4087	5.0	4.94	21:41:17.81	6/9 (66.7%)
12*	地震報告	2022/03/23 00:09:58	23.34467	121.4212	19.1	4.5	X	X
	CWB 系統	2022/03/23 00:09:59.82	23.31410	121.4183	10.0	4.24	00:10:15.35	X
	整合系統	2022/03/23 00:10:02.86	23.34790	121.2057	5.92	4.77	00:10:21.74	1/7 (14.3%)
13	地震報告	2022/03/23 09:18:59	23.31050	121.4017	18.5	4.5	X	X
	CWB 系統	2022/03/23 09:19:01.41	23.33310	121.3127	10.0	4.17	09:19:10.90	X
	整合系統	2022/03/23 09:19:01.63	23.35370	121.4126	10.0	4.07	09:19:10.61	2/7 (28.6%)

14	地震報告	2022/03/23 20:45:29	23.45183	121.4865	26.9	4.8	X	X
	CWB 系統	2022/03/23 20:45:30.70	23.44900	121.4264	20.0	4.52	20:45:41.24	X
	整合系統	2022/03/23 20:45:31.36	23.44140	121.4033	5.0	4.26	20:45:41.92	2/6 (33.3%)
15	地震報告	2022/03/28 09:00:26	23.11083	121.3170	16.8	4.6	X	X
	CWB 系統	2022/03/28 09:00:26.51	23.11800	121.3042	20.0	4.49	09:00:37.54	X
	整合系統	2022/03/28 09:00:27.68	23.19860	121.2939	10.0	4.48	09:00:35.24	4/6 (66.7%)
16	地震報告	2022/04/01 21:26:52	23.42867	121.4803	27.2	4.7	X	X
	CWB 系統	2022/04/01 21:26:54.21	23.42390	121.3388	20.0	4.04	21:27:09.32	X
	整合系統	2022/04/01 21:26:55.99	23.39250	121.2520	8.93	3.96	21:27:10.64	2/10 (20.0%)
17	地震報告	2022/04/02 15:42:20	22.82800	121.5213	17.0	4.5	X	X
	CWB 系統	2022/04/02 15:42:19.53	22.80100	121.5649	30.0	4.68	15:42:34.16	X
	整合系統	2022/04/02 15:42:21.46	22.82940	121.4692	5.0	4.82	15:42:34.24	2/8 (25.0%)
18	地震報告	2022/04/04 01:50:46	23.09300	120.5687	8.4	4.8	X	X
	CWB 系統	2022/04/04 01:50:47.52	23.10080	120.5947	10.0	5.02	01:50:56.16	X
	整合系統	2022/04/04 01:50:46.88	23.13270	120.5735	10.0	5.16	01:50:55.63	10/17 (58.8%)
19	地震報告	2022/04/07 03:41:00	23.09000	121.3517	19.3	4.8	X	X
	CWB 系統	2022/04/07 03:41:00.81	23.08310	121.3891	20.0	5.34	03:41:10.28	X
	整合系統	2022/04/07 03:41:02.05	23.03740	121.3526	5.0	5.17	03:41:09.11	3/6 (50.0%)
20	地震報告	2022/04/11 13:47:31	21.72983	121.0625	26.2	5.2	X	X
	CWB 系統	2022/04/11 13:47:33.64	21.89240	121.0749	10.0	5.01	13:47:49.84	X
	整合系統	2022/04/11 13:47:33.86	21.96510	121.1735	19.71	4.97	13:47:50.18	2/5 (40.0%)
21	地震報告	2022/04/12 04:14:39	22.90817	120.6437	17.3	4.6	X	X
	CWB 系統	2022/04/12 04:14:40.13	22.90410	120.6939	10.0	4.49	04:14:50.73	X
	整合系統	2022/04/12 04:14:41.11	22.84990	120.6059	10.0	4.7	04:14:48.55	6/8 (75.0%)
22	地震報告	2022/04/14 19:06:58	23.72550	121.5122	5.2	4.8	X	X
	CWB 系統	2022/04/14 19:06:58.23	23.73160	121.5187	10.0	4.61	19:07:14.52	X
	整合系統	2022/04/14 19:06:58.20	23.74300	121.4856	8.86	4.57	19:07:11.17	4/9 (44.4%)
23*	地震報告	2022/04/23 07:31:36	23.96783	121.6050	39.3	4.7	X	X
	CWB 系統	2022/04/23 07:31:38.83	24.02320	121.6003	30.0	4.5	07:31:52.09	X
	整合系統	2022/04/23 07:31:39.45	23.95270	121.5425	5.0	4.42	07:31:51.89	1/5 (20.0%)
24*	地震報告	2022/04/23 17:53:48	24.63700	121.8200	68.8	4.9	X	X
	CWB 系統	2022/04/23 17:53:54.42	24.58400	121.8898	20.0	4.33	17:54:04.56	X
	整合系統	2022/04/23 17:53:46.50	26.01930	121.5275	5.0	6.1	17:54:03.47	1/5 (20.0%)
25	地震報告	2022/05/02 18:43:13	24.07250	121.6675	28.6	4.7	X	X
	CWB 系統	2022/05/02 18:43:26.95	24.10510	121.6247	20.0	4.49	18:43:26.95	X
	整合系統	2022/05/02 18:43:29.19	24.17660	121.6118	5.0	4.87	18:43:29.19	4/10 (40.0%)
26	地震報告	2022/05/09 06:23:03	23.97017	122.5257	16.8	6.2	X	X
	CWB 系統	2022/05/09 06:22:54.90	23.55550	122.8715	20.0	6.18	06:23:26.89	X
	整合系統	2022/05/09 06:23:07.73	24.14310	122.3756	8.5	6.14	06:23:27.52	4/9 (44.4%)

27	地震報告	2022/05/25 20:58:20	22.98667	120.8700	2.8	4.5	X	X
	CWB 系統	2022/05/25 20:58:19.99	23.01470	120.8287	40.0	4.86	20:58:30.42	X
	整合系統	2022/05/25 20:58:21.38	23.01980	120.8957	5.0	4.26	20:58:31.98	3/9 (33.3%)
28	地震報告	2022/06/18 02:57:31	23.23383	121.3663	17.8	4.5	X	X
	CWB 系統	2022/06/18 02:57:32.77	23.23660	121.3664	10.0	4.16	02:57:41.99	X
	整合系統	2022/06/18 02:57:33.45	23.17880	121.3064	10.0	3.76	02:57:44.16	3/10 (30.0%)
29	地震報告	2022/06/20 01:05:07	23.68550	121.4543	7.0	6.0	X	X
	CWB 系統	2022/06/20 01:05:07.94	23.72650	121.3830	10.0	6.25	01:05:21.88	X
	整合系統	2022/06/20 01:05:08.54	23.68790	121.4386	12.17	6.20	01:05:16.26	4/5 (80.0%)
30	地震報告	2022/06/20 01:39:42	23.72667	121.4645	9.5	5.1	X	X
	CWB 系統	2022/06/20 01:39:42.91	23.72480	121.5237	10.0	4.97	01:39:59.38	X
	整合系統	2022/06/20 01:39:42.09	23.63080	121.9031	9.7	5.35	01:39:56.09	6/8 (75.0%)
31	地震報告	2022/06/22 21:02:43	23.63700	121.5327	4.3	4.6	X	X
	CWB 系統	2022/06/22 21:02:44.17	23.65350	121.4735	10.0	4.15	21:02:55.59	X
	整合系統	2022/06/22 21:02:44.07	23.65750	121.4747	5.0	4.35	21:02:56.36	2/15 (13.3%)
32	地震報告	2022/06/23 20:21:21	23.62817	121.5120	5.9	4.5	X	X
	CWB 系統	2022/06/23 20:21:22.47	23.61880	121.5121	10.0	4.29	20:21:33.88	X
	整合系統	2022/06/23 20:21:22.26	23.64670	121.4756	8.69	4.42	20:21:36.23	2/15 (13.3%)
33	地震報告	2022/06/25 02:27:19	23.64150	121.4042	9.4	5.0	X	X
	CWB 系統	2022/06/25 02:27:20.20	23.64800	121.3599	10.0	4.96	02:27:30.72	X
	整合系統	2022/06/25 02:27:20.63	23.61620	121.3305	11.54	5.27	02:27:31.23	4/11 (36.4%)
34	地震報告	2022/06/25 13:34:35	23.62110	121.4170	10.0	5.2	X	X
	CWB 系統	2022/06/25 13:34:34.87	23.64430	121.3072	10.0	4.77	13:34:47.54	X
	整合系統	2022/06/25 13:34:35.02	23.65210	121.3124	12.15	5.17	13:34:47.83	7/20 (35.0%)
35	地震報告	2022/06/28 13:43:30	22.00500	120.2115	42.9	5.4	X	X
	CWB 系統	2022/06/28 13:43:33.85	21.94520	120.2281	40.0	5.82	13:43:56.78	X
	整合系統	2022/06/28 13:43:38.65	22.26670	120.5959	5.0	4.92	13:43:54.76	2/7 (28.6%)
36*	地震報告	2022/07/24 00:32:34	23.25400	121.4897	35.0	5.2	X	X
	CWB 系統	2022/07/24 00:32:36.99	23.27890	121.4509	20.0	5.04	00:32:48.25	X
	整合系統	2022/07/24 00:32:37.95	23.27590	121.4999	5.0	5.52	00:32:48.25	7/7 (100%)
37*	地震報告	2022/07/28 00:16:16	22.97950	121.3598	42.3	5.4	X	X
	CWB 系統	2022/07/28 00:16:18.32	22.95880	121.3385	40.0	5.6	00:16:29.29	X
	整合系統	2022/07/28 00:16:19.95	22.93990	121.2235	5.0	5.02	00:16:34.27	9/9 (100%)
38**	地震報告	2022/09/17 13:41:19	23.08400	121.1608	8.6	6.6	X	X
	CWB 系統	2022/09/17 13:41:18.70	23.12700	121.1243	10.0	7.14	13:41:26.31	X
	整合系統	2022/09/17 13:41:17.61	23.06170	121.1272	20.0	6.58	13:41:25.02	2/5 (40.0%)
39**	地震報告	2022/09/18 06:44:15	23.13700	121.1958	7.8	6.8	X	X
	CWB 系統	2022/09/18 06:44:15.36	23.16850	121.1280	10.0	6.69	06:44:22.25	X
	整合系統	2022/09/18 06:44:15.54	23.14780	121.1630	10.0	6.52	06:44:23.42	7/16 (43.8%)

40	地震報告	2022/09/30 14:37:20	22.87867	121.2877	18.6	4.9	X	X
	CWB 系統	2022/09/30 14:37:21.97	22.88950	121.2794	10.0	5.04	14:37:31.71	X
	整合系統	2022/09/30 14:37:22.67	22.97250	121.3039	10.0	4.6	14:37:31.23	5/8 (62.5%)
41*	地震報告	2022/10/02 20:25:22	23.47717	121.5000	23.5	5.3	X	X
	CWB 系統	2022/10/02 20:25:23.20	23.50250	121.3456	20.0	5.24	20:25:33.73	X
	整合系統	2022/10/02 20:25:24.74	23.47970	121.4706	10.0	4.69	20:25:31.25	9/9 (100%)
42	地震報告	2022/10/07 05:13:24	23.48483	121.3150	13.9	4.5	X	X
	CWB 系統	2022/10/07 05:13:25.64	23.46650	121.2928	10.0	4.17	05:13:39.22	X
	整合系統	2022/10/07 05:13:23.93	23.53350	121.1438	9.59	5.55	05:13:34.27	3/8 (37.5%)
43	地震報告	2022/10/07 14:06:55	23.44217	121.3133	13.8	4.5	X	X
	CWB 系統	2022/10/07 14:06:55.87	23.45220	121.3110	10.0	4.12	14:07:08.73	X
	整合系統	2022/10/07 14:06:55.79	23.48500	121.2248	5.2	4.94	14:07:05.82	5/13 (38.5%)
44	地震報告	2022/10/10 12:17:51	23.60417	121.5427	30.4	5.3	X	X
	CWB 系統	2022/10/10 12:17:53.10	23.65340	121.4782	40.0	5.39	12:18:05.06	X
	整合系統	2022/10/10 12:17:54.55	23.62910	121.4874	11.88	4.98	12:18:03.17	3/5 (60.0%)
45	地震報告	2022/10/10 19:24:42	23.99733	122.2025	17.9	5.9	X	X
	CWB 系統	2022/10/10 19:24:43.95	24.04090	122.1671	20.0	5.77	19:25:01.20	X
	整合系統	2022/10/10 19:24:45.24	24.10370	122.1240	14.94	5.91	19:25:00.23	5/10 (50.0%)
46	地震報告	2022/10/22 04:38:10	23.25617	121.2467	18.5	4.5	X	X
	CWB 系統	2022/10/22 04:38:12.33	23.23750	121.2173	10.0	4.11	04:38:22.53	X
	整合系統	2022/10/22 04:38:12.04	23.29820	121.1874	10.18	5.14	04:38:21.55	5/6 (83.3%)
47	地震報告	2022/10/28 15:30:43	24.61583	122.0352	63.9	5.1	X	X
	CWB 系統	2022/10/28 15:30:47.63	24.57930	121.9538	30.0	5.1	15:30:59.32	X
	整合系統	2022/10/28 15:30:51.20	24.59740	121.8543	10.0	4.57	15:31:03.56	2/14 (14.3%)
45	地震報告	2022/10/31 08:48:27	22.91417	121.2093	10.0	5.0	X	X
	CWB 系統	2022/10/31 08:48:28.69	22.90980	121.2262	10.0	5.78	08:48:41.48	X
	整合系統	2022/10/31 08:48:28.37	22.90390	121.2398	9.84	5.42	08:48:39.87	3/10 (30.0%)

*僅一個 P-Alert 測站參與，或完全由 P-Alert 測站主導，整合系統代表性不足，故暫不列入分析及討論。

**由於整合系統未能正常接收 CWB 檢拾資訊，無法產生線上整合報告，此結果來自線下模擬測試。

二、觀測網對於地震觸發的靈敏度

從兩系統整體觸發的比率來分析，期中報告的結果顯示，整合預警系統比起既有的 CWB 預警系統，有著更高的觸發比率(79.3% > 70.7%)。雖與時效性較無直接關係，但當時認為這樣的結果說明了，單純提高觀測網的測站密度，能提升整體觀測網對於地震的觸發靈敏度。然而，到了期末，整合預警系統的觸發比率大幅下降，結果變為 CWB 預警系統略高於整合預警系統(71.1% > 67.8%)，不過兩者實際數量差距並不大(86 筆>82 筆)。另外，分析資料時間區段內發生 2 到 3 次技術問題，造成實際分析資料並不完整。因此，本計畫認為如能再收集更多有效資料，

應可得到更為合理且穩固的結果，就不在此多做結論。

雖說觸發靈敏度並不完全等價於時效性，但以預警系統觀測前期 P 波的角度出發，較高的觸發靈敏度，表示整合預警系統對一部份的事件應能更早、更快觸發。

三、預警系統的時效性差異探討

歸納實際分析的 34 筆事件，單從整合預警系統與 CWB 預警系統第一報的處理時間差距的平均值(如圖四(a))，已可得到整合預警系統能有效提升時效的結論。不過，若細究所有 P-Alert 觀測網有參與的事件，仍可發現有幾筆事件，整合預警系統的表現並不如預期，甚至還能比 CWB 預警系統慢約 16 秒(如編號 7 事件)。細思整體處理流程，會發現這樣的結果並不合理。正常情況下，同一個事件中先觸發的 CWB 預警系統所參考的撿拾資訊，在整合預警系統這一端亦有納入。換言之，接收到相同撿拾資訊的整合預警系統，也應能在接近的時間產出類似的報告。就此觀點思考，整合預警系統的時效性大幅下降，顯然是一個十分不合理的現象。

造成上述現象的原因，推測有下面三點：一、定位模組本身的不穩定性；二、撿拾資訊的傳輸延遲；三、測站嚴重的時間偏差。

第一點並不是一個新遭遇的問題，在本研究的計劃書中就已提及，並希望於本研究中找出解決方法。過去是在離線測試的過程中發現此問題，多次輸入相同的撿拾資訊，卻無法取得相同的定位結果。同理，可以推測兩個同時運作的獨立定位模組，即便有相同的撿拾資訊輸入，仍有很大的機會產生不同的結果。且輸入的撿拾資訊越多，不穩定的情形越明顯。不同的結果，並不單指報告內容會有差異，也代表收斂與否不會一致，造成較為隨機性的觸發，甚或是不觸發。因此，待定位模組的穩定性提升，或許能得到更為合理結果，使現階段的結論更為穩固。

第二點是現階段的架構無可避免的困擾，與理論的實驗測試不同，在即時測試系統中，無法保證資訊能準時被處理。由於現行架構需透過網際網路接收來自中央氣象局的撿拾資訊，使得接收穩定性大幅下降，甚至有可能出現封包遺失。當地震事件發生，中央氣象局的撿拾資訊卻延遲數秒才傳送至整合系統伺服器，甚至遺失，就有可能造成前述晚 16 秒才觸發的情況。然而，這種隨機性的傳輸延遲目前很難有效消除，原因在於網際網路環境過於複雜，大部分的環境因素並無法被主動掌握。未來，若要正式整合觀測網時勢必再次面對這個問題。不過，到時可以建立兩端專用傳輸線路，成本雖高，但確實能大幅度降低傳輸延遲發生的機率。

第三點是較為隨機且少見的現象。一般而言，測站都存有校時機制，負責將時間校準至毫秒以下的誤差。並且能從系統端看出測站成功校時與否。因此，正常的情況下，無法校時且有較大時間偏差的測站應會被排除於定位流程之外。但是根據過去的經驗，發現有測站雖顯示校時成功，但實際上卻有數秒的時間偏差。只有一個測站如此時，還能用汰選機制剔除；但若有數個測站都是如此時，就有可能嚴重影響定位流程，甚至造成無法收斂的情況。此問題應能交由儀器廠商處理，盡可能從硬體層面改善，減少類似情況出現。

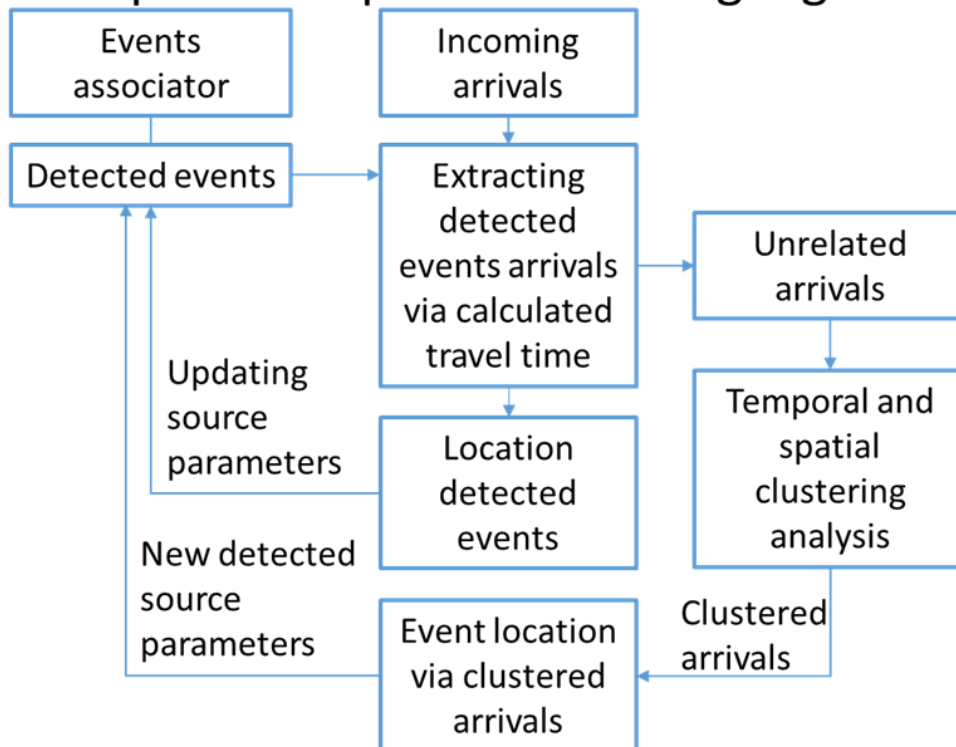
然而，整合大量的檢拾資訊本身有可能造成時效性大幅下降嗎？除去前述的資料傳輸問題，以及嚴重的時間偏差問題，依照現階段定位模組內部的機制，更多檢拾的資訊，並不會造成收斂時間大幅延後。目前定位流程如下：收集足夠的檢拾資訊，進入主要 Geiger 法定位流程，經過十次遞迴，得一初步結果。檢視初步結果是否合乎收斂條件，收斂即輸出結果；若否，則進入汰選機制。汰選機制中，會剔除走時殘差(Travel Time Residual)最大的檢拾資訊，再利用剩餘的檢拾資訊，執行 Geiger 法定位。此汰選機制會不斷遞迴重複，直到剩餘檢拾資訊不足以定位，或是達到收斂條件並輸出結果。一般而言，此遞迴過程耗費時間不超過 1 秒。因此，在既有檢拾資訊組合能夠收斂的情況下，即便新加入的 P-Alert 檢拾資訊造成第一時間無法收斂，但經過汰選機制除去後，理應能快速回到收斂條件下，並輸出結果。故合理推斷，在此機制作用下，整合大量的檢拾資訊有機會些微降低時效性(< 1 秒)，但不會造成時效性的大幅下降。

雖然如上文所述時效性確實有所提升，但如同結果所示，地震定位、發震時間及規模評估的誤差並沒有改善，事實上，定位的誤差甚至還明顯上升。首先，正如計劃書中所述，兩觀測網間的系統性時間差異及定位模組的不穩定性都是造成誤差的可能原因。除此之外，本次分析資料的時間區間，正好遭遇數個多重地震在短時間內發生的狀況，造成地震定位模組的誤判。短時間內，來自不同地震源的 P 波觸發檢拾模組，使檢拾共享記憶體中的資訊不再是單一時空群集，有可能是兩個甚至兩個以上的時空群集。現有的模組同時間僅能建立一個時空群集，並以此定位。除了可能會產出另一個地震(如編號 4 事件)，忽略原本關注的地震外。當屬於不同時空群集的檢拾資訊混雜在一起，會造成定位收斂困難，更有可能使得定位結果與實際情形偏差過大。因此，本期研究預計建立針對多重地震偵測的流程，以期能減小多重事件造成的誤差，關於運作流程的詳細內容於下一小節說明。

四、模組中多重地震事件之即時監測

圖六為多重地震事件之即時監測流程圖，在即時監測系統 P 波的到時會不斷地被偵測及存入共享記憶體中。當多重地震事件之即時監測啟用時會建立一個偵測地震表單，系統監測時會依據已經被偵測的地震，從 P 波到時共享記憶體中先取出已經被偵測的地震相符合的到時進行地震定位，定位完的資訊會更新到偵測地震表單。此監測系統中，仍會以半空間震波速度遞增的模型來計算走時及定位，如圖七為半空間震波速度遞增的模型及其波線示意圖，主要的考量為計算快速及在逆推的過程中沒有局部極小值，可以加速定位的效率，一般層狀的速度構造及三維速度構造都有局部極小值的問題，導致地震定位收斂的不穩定。

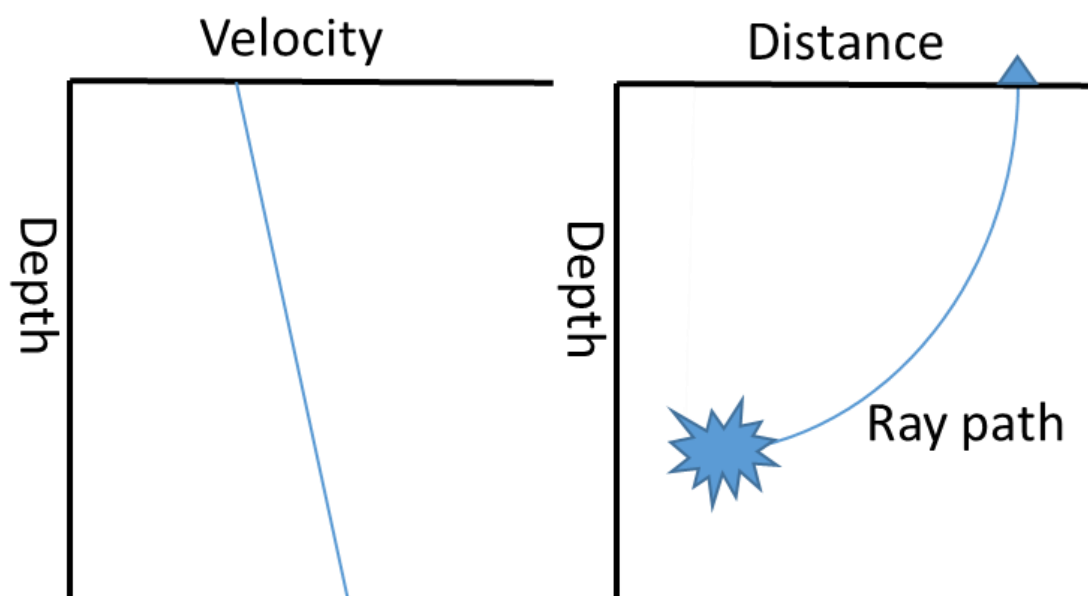
Multiple earthquakes detecting algorithm



圖六、多重地震事件之即時監測流程圖。

未與偵測的地震相符合的測站到時會以時空的叢集建立其他分群，時空的叢集分析中，在空間的關聯距離為以平均測站間距的 1.5 倍為連結單位，當然也能以該站最靠近的第 n 測站距離為連結單位， n 可以設定在 3 到 8 之間。對於時間的連結單位可以距離連結單位除以 P 波地表的視速度，假設距離連結單位為 30 公里，以 P 波地表的視速度 6.5 公里每秒來計算，時間的連結單位就約為 4.6 秒。以目前現有觀測站之分布情形，平均測站間距的 1.5 倍為連結單位較一般化，是相對穩定容易關聯，但是若在設站不密集與較偏僻的單站不容易被關聯，以該站最靠近的第 n 測站距離為連結單位，每一測站有不同的關聯參數，以及要以第幾個測站為連結，目前應該無人使用過，需進一步測試。

時空叢集的 P 波到時若大於 4 到 6 個測站，就可以進行地震定位，定位完的震源參數則更新到偵測地震表單，最後由事件關聯分析模組，進行分析，其主要的功能為整併時空相近的地震，因為叢集分析時，有可能將同一個地震由不同的時空叢集到時定位，需要事件關聯分析以整併時空相近的地震。



圖七、多重地震事件之即時監測所使用的半空間震波速度遞增的模型及其波線示意圖。

目前這樣的多重地震事件之即時監測流程應該是還沒有人嘗試過。因此，本計畫根據前述概念流程，過去半年投注資源改寫既有定位模組，嘗試實現多重地震的即時分辨及定位。目前已完成雛型，但礙於開發時間，未能將其部署於即時系統之上，僅能先透過線下模擬測試驗證其可行性。經過挑選，本計畫決定以中央氣象局目錄上第 134 號，發生在 2022 年 9 月 18 日 12 點 44 分 37 秒規模 4.3 的事件做為範例。挑選此事件的原因其一是可以確定短時間內有另一個地震發生；另一個更重要的原因是 CWB 預警系統在這個事件上發出了高估的誤報，此事件極具代表性，故選之。

首先，根據 CWB 預警系統針對上述事件發出的預警報告(第三報)，其定位結果為東經 120.4935°、北緯 23.3532°及深度 10 公里，位於台南市境內；但參考人工校閱過的地震目錄，相近時段內目前僅有一個地震，其位置為東經 121.19°、北緯 23.14°及深度 4.5 公里，與預警報告相去甚遠。顯然，若不是預警系統定位錯誤，就是短時間內有另一起事件發生。接著深入分析 CWB 預警系統的報告，在第三報中一共使用了 12 筆檢拾資訊。單就測站位置大致可以分為兩群：一群(4 筆)落在預警報告定位結果的位置附近(距離 10 公里左右)；另一群(8 筆)則明顯離地震目錄上的位置較近。其 P 波到時亦可前後分為兩群：前者在 12 點 44 分 28 秒左右；後者則在 12 點 44 分 39 秒左右，前後相差近 10 秒。至此，若對照地震目錄上的發震時間，已可將前一群檢拾資訊排除在 12 點 44 分 37 秒事件之外，畢竟 P 波到時不可能早於發震時間。再進一步分析其初始 P 波的強度，配合前面所述，前一群距離定位結果更近，理應有更高的 P 波初始強度；然而，事實上卻是後一群明顯高於前一群，甚至有 1 到 2 個級距的差別。顯見，後一群應不屬於此定位結果的群集，卻因到時相近，而被放入同一群集，進而產生高估的地震預警。

本計畫收集了 CWB 觀測網(CWBS+TSMIP)、P-Alert 觀測網、BATS 觀測網及

NCREE 觀測網的波形紀錄，並將之修剪為發震前 1 分鐘到發震後 2 分鐘，共 3 分鐘長度的紀錄。模擬測試平台為 Earthworm，使用 tankplayer 將前述紀錄以原始時間戳記及時序回放至共享記憶體內。接著使用既有的撿拾模組掃描所有波形紀錄，產生撿拾資訊予改寫後的定位模組分析，若有收斂結果即產製出定位報告。根據模擬測試所產生的定位報告(第一報)，該時間區段(12 秒左右)內，可能不只有 2 個地震，而是 3 個地震，詳列如表二。其中，根據發震時間以及震央位置相近的程度，可以推知編號 3 事件應是中央氣象局目錄上的第 134 號事件，而編號 2 則是預警系統所發布的事件。而讓人最感意外的是，該時段內還有編號 1 這起小事件，此事件的位置與編號 3 距離較近，相關性高，可能屬於同一斷層上的一系列活動。另外，表列 3 個事件皆有持續產生收斂結果，於第三報中，地震定位與第一報相比變化不大(< 1 公里)，預估規模則依序如下：2.28、2.29 及 4.71。

根據此測試結果，新定位模組確實能有效處理短時間內的多重事件，降低定位錯誤可能造成的地震規模誤判，進而減少誤報的可能。但目前僅通過一起事件的測試，未能確認新定位模組的穩定性，是否能在其他多重事件中維持一樣的表現？期能在未來挑選出更多多重事件，更深入地測試，並逐步調整及優化此新定位模組。

表二、新定位模組模擬測試結果多重事件列表

事件編號	發震時間 (UTC)	緯度 (°N)	經度 (°E)	深度 (km)	規模	採用撿拾數量
1	2022/09/18 12:44:24.18	23.10910	121.1742	15.0	1.85	5
2	2022/09/18 12:44:26.73	23.28270	120.3297	10.0	3.12	5
3	2022/09/18 12:44:36.86	23.19630	121.2753	15.0	4.68	12

肆、結論

- 一、從中、大型地震事件分析兩系統整體觸發的比率來看，現行整合預警系統與 CWB 預警系統相近。另外，就目前的統計結果而言，整合預警系統的發報時間大約可以快 CWB 預警系統 1 秒。
- 二、現行架構需透過網際網路接收來自中央氣象局的撿拾資訊，使得接收穩定性大幅下降，甚至有可能出現封包遺失，可以考慮建立兩端專用傳輸線路，藉此降低傳輸延遲發生的機率進而提升時效性。
- 三、加入剔除撿拾資訊走時殘差較大的汰選機制後，推斷在此機制作用下，整合大量的撿拾資訊有機會些微降低時效性(< 1 秒)，但不會造成時效性的大幅下降。
- 四、在短時間內發生多重地震的狀況，會造成定位收斂困難使地震定位模組誤判。因此，本計畫採理論的流程分析，並建立相應程式。經模擬測試驗證，新定位模組確實能有效分辨短時間內的多重地震。

參考文獻

- Chen, D. Y., N. C. Hsiao, and Y. M. Wu (2015). The Earthworm based earthquake alarm reporting system in Taiwan, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **105**, 568-579, doi: 10.1785/0120140147.
- Shin, T.C. and T. L. Teng (2001). An overview of the 1999 Chi-Chi, Taiwan Earthquake. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **95**, 895–913.
- Wu, Y. M. (2015). Progress on development of an earthquake early warning system using low cost sensors, *Pure and Applied Geophysics* **172**, 2343–2351, doi: 10.1007/s00024-014-0933-5.
- Wu, Y. M., D. Y. Chen, T. L. Lin, C. Y. Hsieh, T. L. Chin, W. Y. Chang, W. S. Li, and S. H. Ker (2013). A high density seismic network for earthquake early warning in Taiwan based on low cost sensors, *Seismo. Res. Let.* **84**, 1048-1054, doi: 10.1785/0220130085.
- Wu, Y. M., W. T. Liang, H. Mittal, W. A. Chao, C. H. Lin, B. S. Huang, and C. M. Lin (2016). Performance of a low-cost earthquake early warning system (P-alert) during the 2016 ML 6.4 Meinong (Taiwan) earthquake, *Seismo. Res. Let.*, **87**, 1050-1059, doi: 10.1785/0220160058.
- Yang, B. M., H. Mittal, and Y. M. Wu (2021). Real-time production of PGA, PGV, Intensity, and Sa Shakemaps using Dense MEMS-Based Sensors in Taiwan, *Sensors*, **21**, 943, doi: 10.3390/s21030943.

