

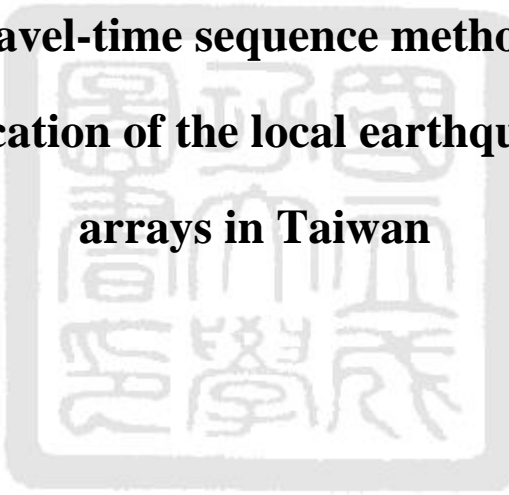
國立成功大學

地球科學系

碩士論文

即時走時序列地震定位法及台灣小區域地震預警陣列應用

**The rapid travel-time sequence method for earthquake
locating and application of the local earthquake early warning
arrays in Taiwan**



研究生：蔡承勇

指導教授：樂錯·祿璞峻岸

中華民國一百零四年六月

國立成功大學

碩士論文

即時走時序列地震定位法及台灣小區域地震預警陣列應用

The rapid travel-time sequence method for earthquake locating and application of the local earthquake early warning arrays in Taiwan

研究生：蔡承勇

本論文業經審查及口試合格特此證明

論文考試委員：

饒瑞鈞

葉正興

指導教授：樂錫標(璞峻)

系(所)主管：饒瑞鈞

中華民國 104 年 6 月 26 日

論文說明

本論文由兩篇已投稿文章構成，分別為：

第一部分

Title: Application of waveform stacking to low-cost local earthquake early warning arrays in Taiwan

題目：波形疊加法應用在台灣低價位小區域預警陣列

第二部分

Title: The arrival sequence method for rapid earthquake locating in Taiwan

題目：台灣即時走時序列地震定位法

除緒論（第一章）、地震預警原理（第二章）及結論（第六章）外，各章節將分成兩部分：小區域預警陣列及即時走時序列定位法。

摘要

台灣地震活動頻繁，再加上地狹人稠的地理特性，面對未來可能發生的災害性地震，如何有效降低地震災害是一件刻不容緩的工作。然而在現今地震災害防救科技中，仍無有效的地震預測技術，反觀地震預警系統已發展到實際應用的階段，為目前地震減災最有效的方法之一。地震規模及震源位置為地震災害評估最主要的兩個參數，因此如何快速決定此兩參數也成為地震預警中最重要的課題。由於 *Palert* 為低價位之加速度型感測器且安裝於建築物牆壁上，不同於一般傳統地震儀安裝於自由表面，因此有較低之訊噪比且建築物效應必須去除，因此本研究在台南及宜蘭各選五個測站建立小區域地震預警陣列進行測試實驗，利用波形訊號疊加法提升訊噪比，並去除建築物效應，得到適用於台灣地震預警陣列的 Pd 規模預估公式，且有著良好的標準差，公式如下：

$$M_{Pd} = 3.479 + 1.370 \times \log(Pd) + 1.883 \times \log(R) \pm 0.28。$$

在地震定位方面，為了預警目的，假設速度構造不具有側向不均勻性，因此僅以一維速度模型計算地震波走時，使地震定位有較大的誤差，因此本研究將台灣地區切成密集的三維網格點，每一格點皆為假設震源，利用台灣地區三維速度構造模型及虛擬曲折波線追跡法計算每點假設震源之中央氣象局地震速報觀測網 (RTD) 測站走時排序並存成資料庫。當真實地震發生，搜尋震源時僅以其觀測之前十名測站排序比對資料庫，找到測站排序差最小之格點，即為計算震源，計算過程快速又簡單。模擬過去發生之 48 個島內及沿海規模大於 4 之地震，本研究計算震央及深度相較於中央氣象局地震目錄及地震速報系統之定位結果，震央平均差值為 5.6 公里，而深度平均差值為 6.1 公里。

關鍵字：地震預警、地震減災、地震預警陣列、即時地震定位。

Extended Abstract

The rapid travel-time sequence method for earthquake locating and application of the local earthquake early warning arrays in Taiwan

Cheng-Yung Tsai

Ting-Li Lin

Department of Earth Sciences, NCKU

SUMMARY

How to determine the magnitude and the hypocenter in few seconds after an earthquake occurring are two of the most important issues in seismic hazard mitigation. Based on the on-site process, we installed two local early warning arrays in Ilan and Tainan City of the newly established *Palert* EEW network and adopted the waveform stacking method to enhance the coherent part of early arrivals. The M_{Pd} method is used to estimate the earthquake magnitude. By modifying the present Pd attenuation relationships, we show that the accuracy (S.D.V. = 0.28) of magnitude estimation for the on-site EEW mode can be significantly improved since the sensors of the nearly built *Palert* network are installed inside the building.

The earthquake location for EEW purpose is always a tough problem due to the complicated process and long reporting time. Therefore, we developed a new method to determine the hypocenter in a simple-calculating process. Different events will have different ranking list of the triggered stations due to the geographical distribution if the point source is assumed. We divided Taiwan region into many grids. Each grid is the preset hypocenter and has its own station ranking list as the pre-calculated database computed by the velocity model and 3-D ray tracing method. When an earthquake occurs, we use the real station ranking list to compare the database, and find the least difference grid as the hypocenter. Our results show comparable or better performing than the current operating rapid reporting and EEW systems in Taiwan.

INTRODUCTION

To determine the magnitude and the hypocenter in few seconds after an earthquake occurring are two of the most important issue in EEW. An on-line EEW system consisting of low-cost of MEMS-type accelerometer, named as the “*Palert*” sensor, which is less than 1/10 of the cost of traditional strong-motion instruments has installed more than 500 *Palert* stations all over Taiwan since June 2012. The *Palert* accelerometer has a relatively low signal-to-noise ratio (S/N), we apply waveform stacking method of the array records to enhance the S/N ratio and improve the accuracy of the on-site magnitude estimate (M_{Pd}) by treating each array as a single on-site EEW set. Two local EEW arrays, located in Tainan and Ilan, which consists of five *Palert* stations, respectively, are used in this study. Since the *Palert* EEW system is just newly built and the *Palert* sensor devices were installed on the wall inside the building, instead of free surface, we modify the three existing *Pd* attenuation equations to account for the building effect.

The current earthquake locating method for the rapid reporting and EEW in Taiwan are originally based on the traditional method with 1-D velocity model. In this study, we develop a new rapid earthquake locating method using 3-D velocity model and 3-D ray tracing technique. In order to reduce the computation time of locating, we have pre-calculated the travel time from each grid point (*i.e.* hypocenter) of the dense 3-D grid volume covering the whole Taiwan region to the all Taiwan Rapid Earthquake Information Release System stations. Therefore, each grid point has its specific arrival-time sequence to the RTD stations based on the pre-calculated the travel times. In this study, we search the best-fit arrival-time sequence to rapidly determine the hypocentral location by simple addition/subtraction. We find that hypocenters can be determined rapidly and accurately by using the only first ten arrivals.

Method and Data Analysis

(1) The local EEW arrays

We selected the damage events occurring after the end of 2012 when the *Palert* EEW system has operated stably. In addition, we carefully removed the waveform with the low S/N ratio to maintain the waveform quality. In order to find the time lag between stations, we apply cross-correlation method to the array and shift waveforms accordingly to get the most consistent waveform. Then, the lagged waveforms are stacked to compute one Pd value for the array. Finally, the M_{Pd} method is used in this study to estimate earthquake magnitude.

(2) The arrival sequence method for rapid earthquake locating

The RTD network at present consists of 109 telemetered seismic stations covering the entire Taiwan region with an average station-spacing of 30 km. We divided Taiwan region into $2 \times 2 \times 1$ km grid points (2270,295 grid points). Each grid is the preset hypocenter and has its own station ranking list as the pre-calculate database computed by the velocity model and pseudo-bending method. The grid point, which has the 109 arrival-time sequence to the RTD stations, is searched by Eq. 2. When an event occurs, the best-fit hypocenter is the grid point with the minimum P_j .

$$P_j = \sum_{i=1}^n |i - T_{ij}| \quad (\text{Eq. 2}),$$

where

i : order of arrival (1 to n , $n \leq$ no. of the RTD stations)

j : grid point no.

P_j : score of the j^{th} grid point

T_{ij} : theoretical order for the observed i^{th} arrival station at the j^{th} grid point

Result and Discussion

(1) The local EEW arrays

The resulting M_{Pd} determined by the waveform amplitude are systematically overestimated due to the building amplification effect when compared to the CWB cataloged (M_L). We revise the coefficient a in (Eq.1) of three existing equations in order to remove the building effect. The form of the regression equation assumed a linear regression model is as followed:

$$M_{Pd} = a + b \times \log(Pd) + c \times \log(R), \quad (\text{Eq. 1})$$

where R is the hypocentral distance, b is the coefficient related to the magnitude, c is the coefficient related to the geometric spreading. The wave propagation for co-located instruments installed in the free surface and in the build, respectively, does not register on the coefficients b and c , so we only have to revise the coefficient a . Then, we got three Pd attenuation equations with SDV between 0.28 and 0.42 magnitude unit.

$$M_{Pd} = 3.479 + 1.370 \times \log(Pd) + 1.883 \times \log(R) \pm 0.28 \quad (\text{Eq. 3})$$

$$M_{Pd} = 2.852 + 2.198 \times \log(Pd) + 2.703 \times \log(R) \pm 0.42 \quad (\text{Eq. 4})$$

$$M_{Pd} = 3.452 + 1.102 \times \log(Pd) + 1.737 \times \log(R) \pm 0.31 \quad (\text{Eq. 5})$$

(2) The arrival sequence method for rapid earthquake locating

It is not practical to contrast the pre-calculated arrival sequence with the observed one for the whole RTD stations. Therefore, we do the self-simulate of the database to deciding how many stations would be used to determine the hypocenter. As the result, using the first ten stations is effective acceptable to do earthquake locating.

Selecting events in 2013&2014 with the criteria followed: magnitude ≥ 4.5 and focal depth ≤ 45 km, inland and offshore. This study show comparable result of hypocenter locating to the off-line CWB catalog and real-time earthquake rapid report system.

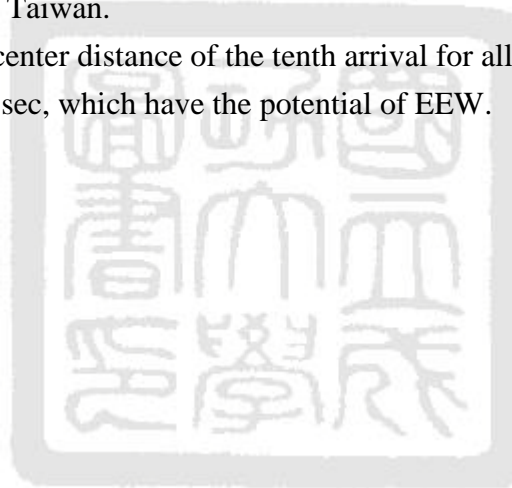
Conclusion

(1) The local EEW arrays

1. We propose a new type of earthquake early warning, named local EEW array.
2. After doing the waveform stacking process of the array records, it shows great improvement in waveform quality (S/N ratio).
3. When the building amplification effect is considered, we modified three existing equation and they show the accuracy of M_{Pd} estimation.

(2) The arrival sequence method for rapid earthquake locating

1. We propose a new rapid earthquake locating method using pre-calculate grid point travel-time database search.
2. By using the arrival sequence of only first ten station, our results show comparable or better performing than the current operating rapid reporting and EEW systems in Taiwan.
3. The average epicenter distance of the tenth arrival for all events is 45 km with the travel time of 7.5 sec, which have the potential of EEW.



致謝

2015年夏天，走了18年，學業這條路終於走到了終點。這條路決定了我的人生方向，路途中有許多人加油指引，也有批評障礙，不過，都謝謝你們為我的人生添增了催化劑。首先，能完成碩士學位當然要先感謝我的父母，尊重我做的一切決定並全力支持，你們是我最強大的後盾，有了你們的支持才能讓我毫無後顧之憂的完成學業！接著是我的指導教授：樂錯·祿璞峻岸老師，能完成這份論文，最感謝的就是您，從大三就踏進了地震預警研究室開啟我的研究之路，您給予我明確的研究方向以及建議，並放膽讓我出國去闖，就像個船長指引著掌舵手，並適時的穩住了船舵，接著我會靠我自己度過未來的各種大風大浪；謝謝饒瑞均老師，我是因為修了您的課才開始對地震學、地球物理學有興趣才一腳跨進這個領域，否則我可能不會念研究所，也謝謝當我有研究上的問題請教您時，您願意傾囊相授；謝謝中央氣象局簡任技正蕭乃祺老師，在本研究上的寶貴建議及明確地給予改進方向；謝謝台大地質系吳逸民老師，在研究上的指導及建議；謝謝中央氣象局技佐達毅學長，提供我研究所需的資料，也解決我許多的疑難雜症；謝謝台大地質系趙韋安學長以及劉庭佑學長給予研究上的協助；謝謝我的女友王姿懿，陪我度過了這難熬的兩年，也提供我很多程式撰寫上的訓練，這對我的研究有很大的幫助；謝謝好友，台大土木所賴柏元給予程式技術上的協助；謝謝我的最佳戰友Allen，我們一起征戰了歐美亞，不諱言，真的太爽了；謝謝地震預警研究室的夥伴們：Ricky學長、雅婷助理、秀秀助理、瑞樺學弟、伶榕學妹、阿正學弟、翊群學弟，在苦悶的研究生生活有你們的歡笑陪伴；謝謝中華東路幸福居的各位：慶雄、香腸、翊哲、羿輝（按身高排序），家裡很亂但這段日子的回憶很美。謝謝成大地科系籃，給我難忘的學生籃球，這種一起朝共同目標努力地感覺很棒；要感謝的人還有很多，

不能一一點名，不過真的很謝謝這段時間給予我歡笑、陪我運動、吃飯、聊Line、玩樂的各路好友們，你們豐富了我的學生生涯，未來也希望有你們陪伴，再次謝謝！另外，特別感謝交通部中央氣象局以及台灣大學地質系地震預警研究團隊在本研究所需之地震資料上無私的奉獻，使本研究得以順利完成。

最後謝謝自己這段時間的努力，回想起來，還真佩服，值得驕傲一分鐘。未來的路很長很崎嶇，加油，對自己的人生負責，不做會讓自己後悔的事。



目錄

論文說明.....	I
摘要	II
Extended Abstract	III
致謝	VIII
目錄	X
圖目錄	XIV
表目錄	XVII
第一章、緒論	
1.1 前言.....	1
1.2 地震預警歷史沿革及各國發展	5
1.3 台灣地震預警發展回顧	14
1.4 台灣 Palert 地震預警系統.....	18
1.4.1 系統發展沿革	18
1.4.2 設備介紹.....	18

1.4.3	系統運作流程	19
1.5	研究動機及目的	25
第二章、地震預警原理		
2.1	地震預警基本概念	27
2.2	地震預警模式	30
2.3	地震預警之規模預估	32
2.4	地震預警之震源位置推估	36
第三章、研究方法		
3.1	第一部分—小區域地震預警陣列	41
3.1.1	地震事件選取	41
3.1.2	P 波到時判定 (<i>P</i> -phase Picking)	42
3.1.3	波形交互相關 (Cross-correlation)	42
3.1.4	波形疊加法	42
3.1.5	規模預估	43
3.2	第二部分—即時走時序列地震定位法	53

3.2.1	台灣即時強地動地震速報觀測網(RTD)簡介.....	53
3.2.2	測站走時資料庫建立	54
3.2.3	格點搜尋法	56
第四章、研究成果		
4.1	第一部分—小區域地震預警陣列	62
4.1.1	規模預估結果	62
4.2	第二部分—即時走時序列地震定位法	64
4.2.1	資料庫自身模擬測試 (Self-simulation test)	64
4.2.2	地震定位結果	64
第五章、討論		
5.1	第一部分—小區域預警陣列結果討論	71
5.1.1	建築物放大效應	71
5.1.2	波形疊加法對於波形品質改善討論	72
5.2	第二部分—即時走時序列地震定位法結果討論	75
5.2.1	自身模擬結果分析	75

5.2.2 定位結果分析	76
5.2.3 地震定位時效討論	77
第六章、結論	82
參考文獻	83
附錄一 Palert 地預警系統測站分布	95
附錄二 各地震事件之陣列五測站波形及疊加波形	111
附錄三 各地震事件之陣列式波形處理參數表	128
附錄四 中央氣象局地震速報系統 (RTD) 測站列表	132
附錄五 各地震事件定位結果	136
附錄六 陣列式波形處理 SAC 指令集	138
附錄七 建立測站走時排序資料庫程式碼 (FORTRAN 95)	140
附錄八 震源格點搜尋程式碼 (FORTRAN 95)	162

圖目錄

圖 1-1 近十年之地震數目統計	3
圖 1-2 台灣歷史災害性地震震央分布與活動斷層及都會區關係.....	4
圖 1-3 由美國地震學家 Cooper 提出之最早地震預警概念示意圖.....	9
圖 1-4 日本 UrEDAS 測站分布	9
圖 1-5 日本 REIS 測站分布	10
圖 1-6 美國第一個地震預警系統雛形.....	11
圖 1-7 美國 ElarmS 測站分布.....	12
圖 1-9 墨西哥 SAS 預警系統測站分布	13
圖 1-10 台灣第一個地震預警測試系統.....	16
圖 1-11 虛擬子網地震預警系統.....	17
圖 1-12 Palert 預警系統設備	21
圖 1-13 Palert 預警系統測站分布	22
圖 1-14 Palert 預警系統資料傳輸路徑	23
圖 1-15 Palert 即時震度資訊.....	24

圖 2-1 地振動歷時波形示意圖.....	29
圖 2-2 現地型地震預警及區域型地震預警示意圖.....	31
圖 2-3 規模大小不同之地震在近場的垂直向位移記.....	35
圖 2-4 B 值與震央距之關係.....	39
圖 2-5 Palert 預警系統之 Voronoi Diagram.....	40
圖 3-1 小區域預警陣列分布.....	46
圖 3-2 陣列式波形訊號處理流程.....	47
圖 3-3 用於波形疊加之地震事件分布.....	48
圖 3-4 波行交互相關示意圖.....	49
圖 3-5 各事件之初達波疊加波形及陣列五測站之初達波波形.....	52
圖 3-6 中央氣象局地震速報系統 (RTD) 測站分布.....	58
圖 3-7 虛擬曲折波線追跡法 (Pseudo-bending method) 運算邏輯.....	59
圖 3-8 虛擬曲折波線追跡法波徑修正示意圖.....	60
圖 3-9 資料庫格式範例圖.....	60
圖 3-10 格點搜尋法示意圖.....	61

圖 4-1 陣列式波形處理後之 M_{Pd} 與中央氣象局地震目錄之比較圖	63
圖 4-2 資料庫自身模擬測試 (Self-simulate test)	67
圖 4-3 各地震觀測網分布	68
圖 4-4 定位結果比較 (RTD)	69
圖 4-5 定位結果比較 (Catalog)	70
圖 5-1 修正常數項去除建築物放大效應造成之影響	73
圖 5-2 去除建築物效應後之 M_{Pd} 與中央氣象局地震目錄之比較圖	74
圖 5-3 波譜分析示意圖	75
圖 5-4 RTD 測站之 Voronoi cell 幾何分布	78
圖 5-5、經度及緯度定位差值比較	79
圖 5-6 前十名觸發測站分布圖	80
圖 5-7 各地震事件到時第十名之測站震央距	81

表目錄

表 3-1、台南及宜蘭小區域地震預警陣列	43
表 3-2、用於波形疊加之地震事件列表	44
表 4-1、定位結果比較表	65
表 5-1、各事件訊噪比 (S/N ratio) 比較表	72
表 5-2、定位差值比較表	77



第一章、緒論

1.1 前言

臺灣位於歐亞大陸板塊及菲律賓海板塊之碰撞縫合帶，為典型板塊碰撞下所產生之大陸邊緣島，構成複雜的地質構造及孕震環境，因此，臺灣長年來地震發生頻繁，每年平均發生規模大於 4 地震超過 150 次（圖 1-1），根據歷史記載，其中不乏發生過許多造成大量人員傷亡以及財產損失之災害性地震，例如 1906 年梅山地震（ M_L 7.1）、1935 年新竹—台中地震（ M_L 7.1）、1941 年嘉義中埔地震（ M_L 7.1）、1946 年新化地震（ M_L 6.1）、1951 年花東縱谷系列地震（其中最大 M_L 7.3）、1964 年白河地震（ M_L 6.3）、1986 年花蓮地震（ M_L 6.8）以及 1999 年的九二一集集大地震（ M_L 7.3）等（圖 1-2）。然而，臺灣現今仍為板塊活動非常劇烈的造山帶，在未來，災害性地震一定仍會持續的發生，再加上都市化的高度發展，各大都會區不僅人口密度不斷提高、高樓大廈林立，地狹人稠的地理特性使地震對於台灣人民生命財產形成巨大的威脅，因此，地震防災及減災為台灣現今天然災害防治中之當務之急。

地震前兆研究至 70 年代以來一直是相當熱門的話題，岩層電磁場異常、大地測量、電離層離子濃度異常、地下水的化學及水位變化甚至動物行為等研究，使我們對於地震預測有深入的探討，然而，由於造成這些地震前兆或異常的來源不確定性，加上地震發生機制不一及複雜的斷層幾何，目前各國仍無法有效的預測地震發生時間、地點及規模大小，科學理論是可以被重複印證，假如僅幾次成功的實例，只能視為單一例子，而無法成為科學理論。

另外，在 1986 年發生在花蓮外海地（圖 1-2），對於距離最近之花蓮市區並無造成嚴重災害，卻對遠在 120 公里外之台北地區造成較嚴重的生命財產損失，係因台北都會區主要坐落於台北盆地沖積層之上，鬆軟的沉積物造成地震

波放大效應，使台北地區要較大的地振動，而在1985年墨西哥城地震(M_w 8.3)也有相同之地震災害模式，假如當初有完善之地震預警系統，提供數十秒至分鐘之預警時間，能大大的減少當時生命財產損失。

因此，地震預測的不確定性加上此兩例地震之災害特性，使地震預警 (Earthquake Early Warning, EEW) 在現今地震防災、減災科技中成為不可或缺之技術之一 (Kanamori, 1996)。而地震預警研究中，如何在地震發生後用最快速的時間決定該地震大小 (規模預估) 及震源位置 (定位)，最重要的課題。

在地震預警研究中，規模預估主要是當地震發生後，僅利用測站或觀測網偵測到之初達波中所包含的資訊 (如加速度、速度、位移或週期等)，進行此地震事件規模大小初步估計；震源位置定位是經由前幾名測站所接收到之 P 波 S 波到時差及方位角進行地震發生位置粗估。由於大地震破裂時間長，初達波可能無法涵蓋通充足之破裂特性，使規模預估會有飽和的現象；而地震定位過程是需要複雜且重複地運算，在時間壓力或伺服器荷重 (loading) 考量下，過於簡化的計算及速度模型對於地震定位結果有較大誤差。

因此透過本研究所新架設之小區域預警陣列，藉由陣列式波形處理，可在相同之初達波視窗長度下 (time window) 提升規模預估精準度；透過本研究所提出之即時走時序列地震定位法，可快速、簡單並精準地計算出震源位置。

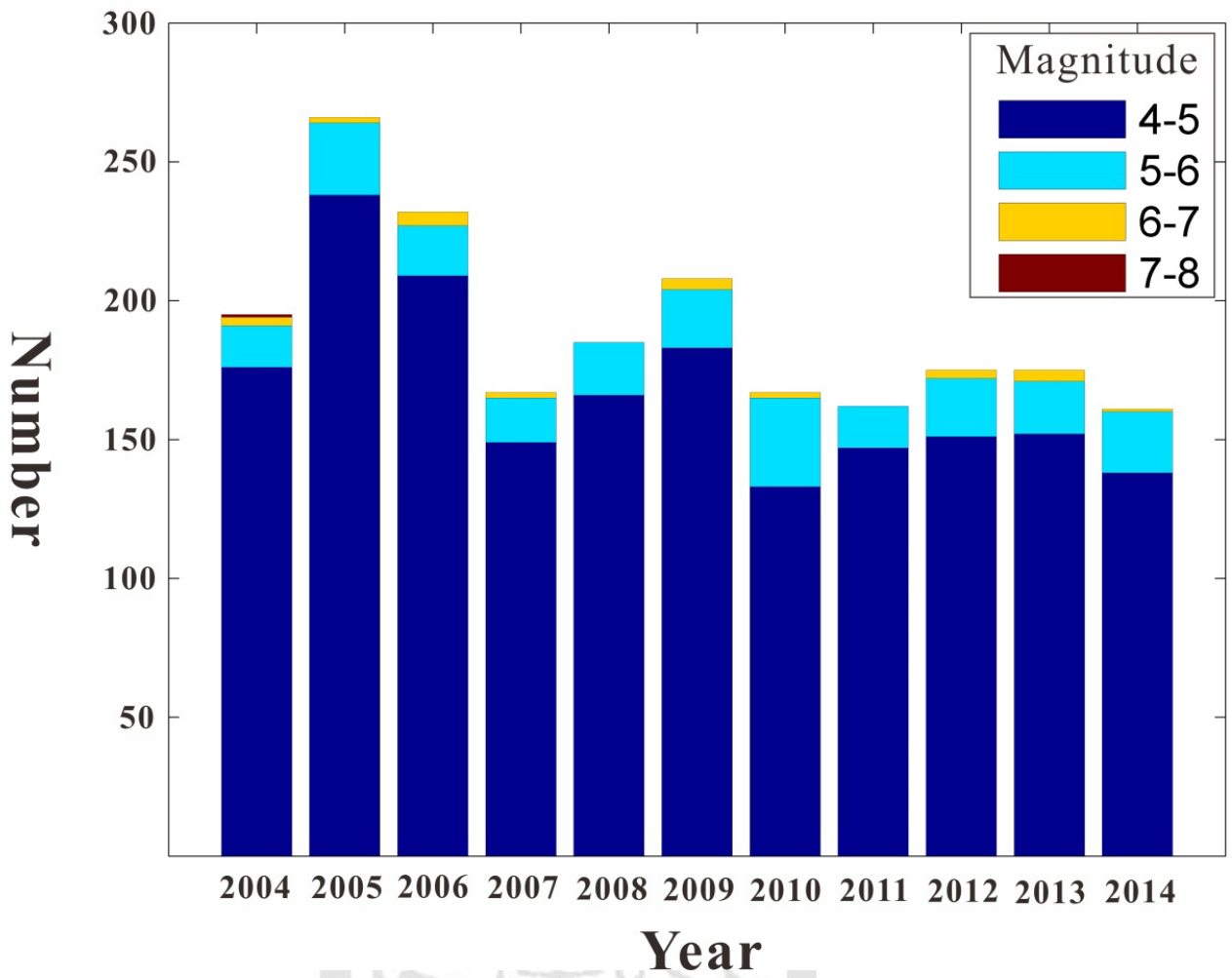


圖 1-1 近十年之地震數目統計



圖 1-2 台灣歷史災害性地震震央分布與活動斷層及都會區關係

(擷取至陳文山地球科學教室網頁 <http://ashan.gl.ntu.edu.tw/index.htm>)

1.2 地震預警歷史沿革及各國發展

地震預警系統是目前經評估有效的地震減災方法，美國、日本、墨西哥及台灣都投入這項工作（Kanamori, 1996）。而早在約 140 年前，地震預警的基本觀念就已經由美國科學家 Cooper（1968）提出（Nakamura and Tucker, 1988）（圖 1-3）。

在 Cooper 的構想中，認為電磁波傳遞的速度遠快於地震波在地殼中傳遞的速度，因此在地震發生後，利用電磁波的形式（如：無線電、電話）將地震警報迅速通知給較遠的地區，該區再以廣播的方式警告當地的居民，使居民做好強震來襲準備，即可達到地震預警的效果，不過因為當時地震儀器以及通訊設備的不發達，使他的構想在當時並未實現（Nakamura and Tucker, 1988）。

1980 年以後即時地震觀測技術的迅速發展（Heaton, 1985），包括強震儀和寬頻地震儀的發明、通訊及傳輸技術的快速發展、資料處理技術的進步（Kanamori, 1999）以及電腦軟硬體的持續升級，地震預警的構想再度被地震學家所提起，並開始有國家積極投入開發以及應用的行列，其中，除了台灣外，日本、美國及墨西哥是目前地震預警研究發展較早也較完善的國家，接下來將對這些國家做介紹。

（一）日本

日本是地震預警研究的先驅，並最早將地震預警系統及技術實際應用的國家。自 1964 年規模 7.5 Niigata 地震發生以後，日本國道鐵路公司（Japanese Railway, JR）開始在鐵道的沿線裝置地震警報器，當警報器偵測到地振動加速度大於 40 gal ($\text{gal} = \text{cm/s}^2$) 以上時，立即對行駛在新幹線或是一般鐵道的列車發出警告並將列車停止，以避免行駛至遭到破壞的路段時發生出軌的危險。1982 年開始，日本國道鐵路公司將沿海的地震儀訊號也一起併入自動停車的監

控系統中，目標對日本外海發生之地震事件進行預警監測。因此，當震源區（日本外海隱沒帶）發生地震，沿海之地震儀快速接收地震資訊，如達到觸發標準，可以在震波尚未到達鐵道前，迅速對於行駛中的列車發出警告，而這也是第一個將Cooper 的構想付諸實現的地震預警系統（Nakamura, 2004）。由於該系統自動停車的判斷標準僅使用地震儀所記錄到之地振動加速度值，而在實際的運作時發現，儘管是規模小的地震，如地震儀離震央很近時，常產生非常大的地振動加速度值，雖然這些小規模地震不可能造成損壞，但是根據系統的設定，列車還是必須停車，等待檢查確定沒有翻車危險後才能恢復通車，因此常會造成旅客的困擾；另外，在大地震發生時，由於破裂時間長，使地震儀在初始的波形訊號中沒有偵測到大於 40gal 的加速度值，但是當真正偵測到破壞性地震波來臨時，已經沒有足夠的預警時間供列車反應。為了改善上述狀況，日本國道鐵路公司開始著重開發名為UrEDAS（Urgent Earthquake Detection and Alarm System）的新型地震預警系統（Nakamura, 1988, 1989; Nakamura and Tucker, 1988）（圖 1-4），此系統僅使用單一地震站所接收到之初達波（P波）的訊號來計算地震發生的位置及大小，可以在S波到達前即能夠發布警報，且發布警報標準是以地震規模為門檻值，提高警報可信度。除了應用在日本鐵路外，該系統也被引進於美國及墨西哥進行一般地震活動的監測（Nakamura, 2005a）。

日本也是近年來進行地震預警研究與測試最為積極的國家，在該國文部科學省（The Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Disaster Technology）的主導下，結合防災科學技術研究所（National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, NIED）、日本氣象廳（Japan Meteorological Agency, JMA）、即時地震情報利用協議會（Real-time Earthquake Information Consortium, REIC）以及日本氣象學會（Japan Weather Agency, JWA）等單位，

從 2003 年開始執行地震預警的測試計畫發展建立即時地震資訊系統(Real-time Earthquake Information System, REIS)，希望透過產官學的聯合努力，將地震預警實際運用於日本之地震防災。整體計畫中，NIED 負責預警方法的研究、驗證與程式開發，並發展觀測網即時資料傳輸與預警資訊發布之系統，JMA 負責整個預警雛形系統的安裝、地震監測與警報發布，REIC 負責預警資訊應用的開發與推廣，JWA 則負責調查地震預警對於社會衝擊與效益的評估。該計畫所使用儀器包括 JMA 的加速度型地震儀、速度型地震儀、寬頻地震儀，以及 NIED 的高解析速度型地震儀，總數接近 1000 個，測站間距平均約 25 公里(圖 1-5)。預警雛形系統從 2004 年 2 月開始運轉測試，並在 2006 年 8 月日本氣象廳正式針對合作單位發布預警訊息且在 2011 年 311 大地震及其他許多地震期間成功地發揮功能，透過各種傳播媒體向社會大眾發布即時地震預警訊。

(二) 美國

在 1989 年 10 月 17 日，發生了規模 7.1 的 Loma Prieta 地震以後，美國地質調查所 (United States Geological Survey, USGS) 在舊金山灣區裝設一個偵測餘震活動的預警系統 (Bakun *et al.*, 1994) (圖 1-6)，能對遠在 100 公里外的奧克蘭地區，正在修建倒塌高速公路的工作人員提出警告。該系統使用北加州原有之地震觀測網 CALNET 測站為架構，偵測到地震發生後，使用無線電傳送地震警報消息，可以提供約 20 秒的預警時間提供搶救人員反應，此系統也是以現有之地震觀測網作為地震預警應用的典型範例。

Allen and Kanamori (2003) 為測試地震預警在加州地區實施的可行性，蒐集了 53 個發生在南加州、規模大於 5 的地震，然後參考 Nakamura (1988) 的方法，將 P 波 2 至 4 秒長度的主要頻率 (predominant frequency) 與地震規模做迴歸分析，得到 P 波頻率與規模的關係式；根據他的研究結果，僅利用單

站所得到之規模值，其誤差平均為 0.7 個規模單位，而若將測站的數目增加到 3 個站時，則誤差則可以降低到 0.5 個規模單位以下，因此其研究建議在預警時間容許的情形下，使用觀測網中較多測站的 P 波頻率來計算規模，可以提高警報發布的可信度，同時也可預防因雜訊突波而發布錯誤警報的情形（Allen, 2004），Allen 將其研究的方法與成果，以美國南加州 TriNet 地震觀測網為架構，發展一個專為地震預警的警報系統，名為 ElarmS(Earthquake Alarm System)（圖 1-7），以實際進行地震預警的測試。

（三）墨西哥

在 1985 年 9 月 19 日，發生了規模 8.1 之 Michoacan 地震（圖 1-8）。然而，Michoacan 地震震央位在距離墨西哥市約 250 公里的外海隱沒帶，卻對墨西哥市造成萬人死傷之嚴重災害，係因墨西哥市特殊鬆軟的湖積土壤構造，導致地震波局部放大效應，使墨西哥市有較大的地振動。在這個地震例子後，墨西哥開始重視地震預警的必要性，因此，墨西哥政府開始與國際學術單位合作，在墨西哥建置地震預警系統 SAS（Seismic Alarm System）（圖 1-9）。該系統與日本鐵道公司概念相同，在隱沒帶鄰近的海岸線裝置地震儀，在偵測到地震以後，藉由專屬的無線電頻道快速地將地震的訊息傳送至墨西哥市，然後針對學校、大眾交通系統、防救災單位以及廣播電台發布警報（Espinosa-Aranda *et al.*, 1995）。該系統從 1991 年開始實際運作，並成功偵測 1995 年 9 月 14 日規模 7.3 的 Copala 地震，在 S 波到達墨西哥市的 72 秒前發布警報。SAS 也是第一個對於公共設施提供預警服務的系統，為避免造成不必要的恐慌與誤解，墨西哥市政府編有完善的宣導以及演練計畫，每年都會針對學生以及相關單位進行演練（Espinosa-Aranda *et al.*, 2003）。



圖 1-3 由美國地震學家 Cooper 提出之最早地震預警概念示意圖
(Nakamura and Tucker, 1988)

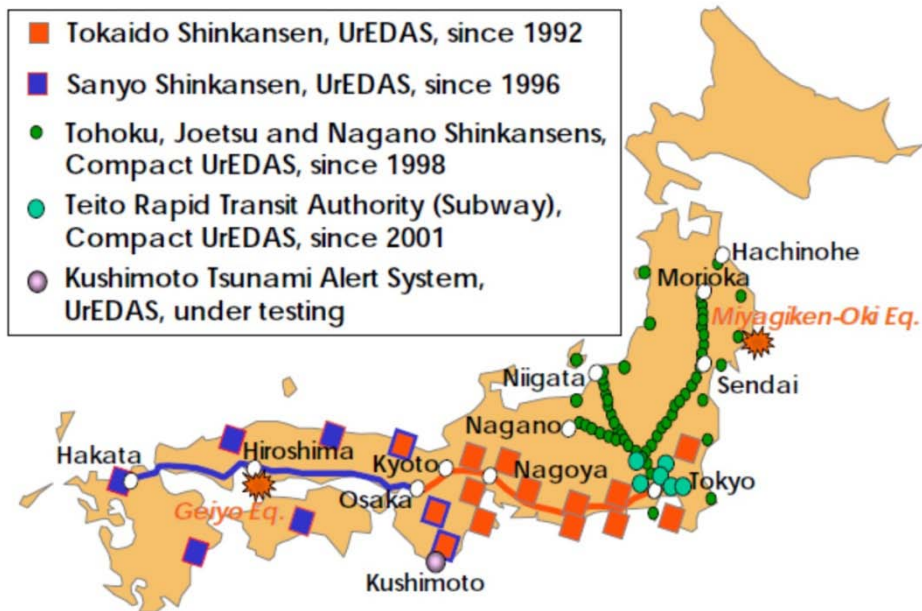


圖 1-4 日本 UrEDAS 測站分布 (Nakamura, 2004)

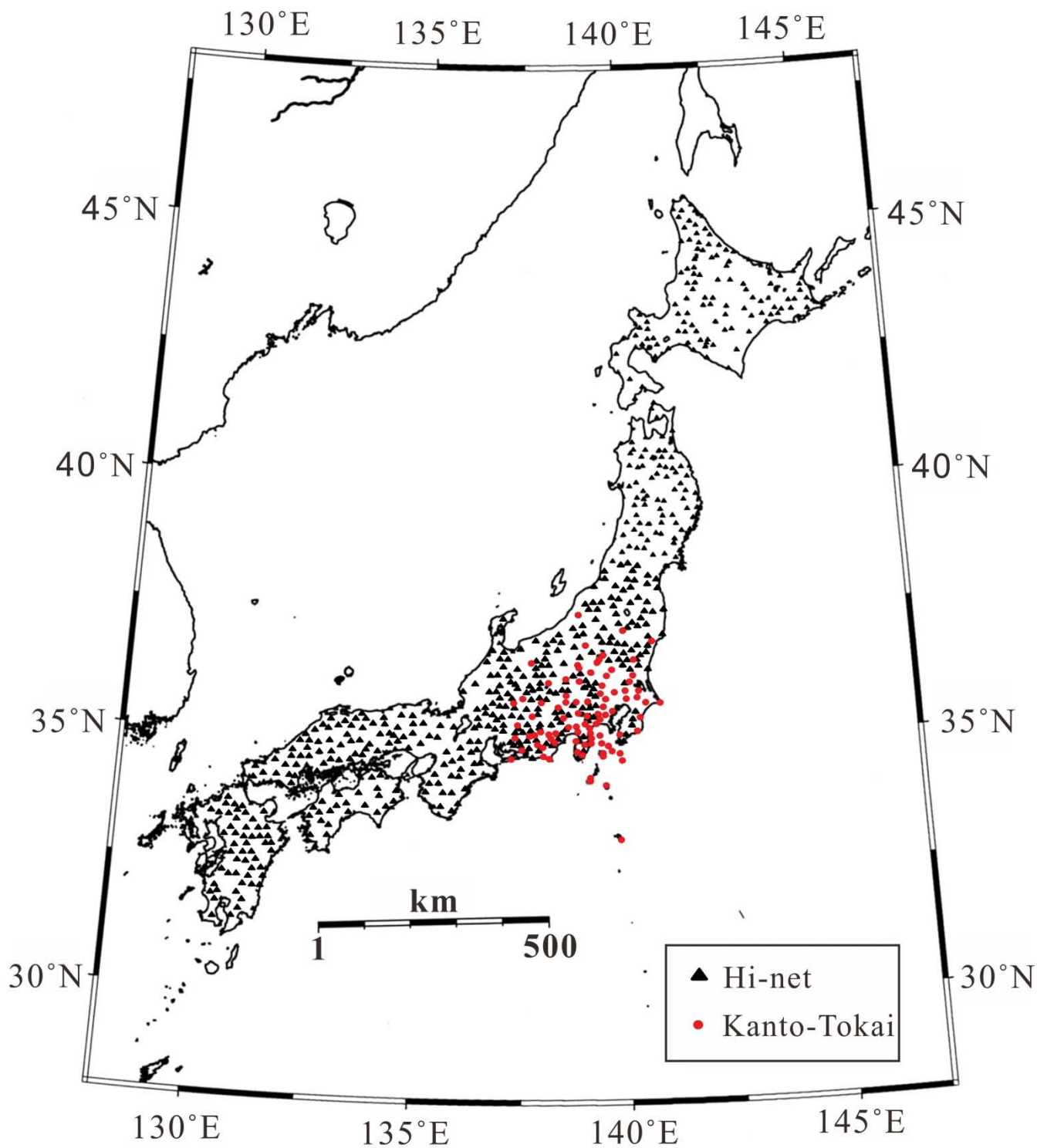


圖 1-5 日本 REIS 測站分布

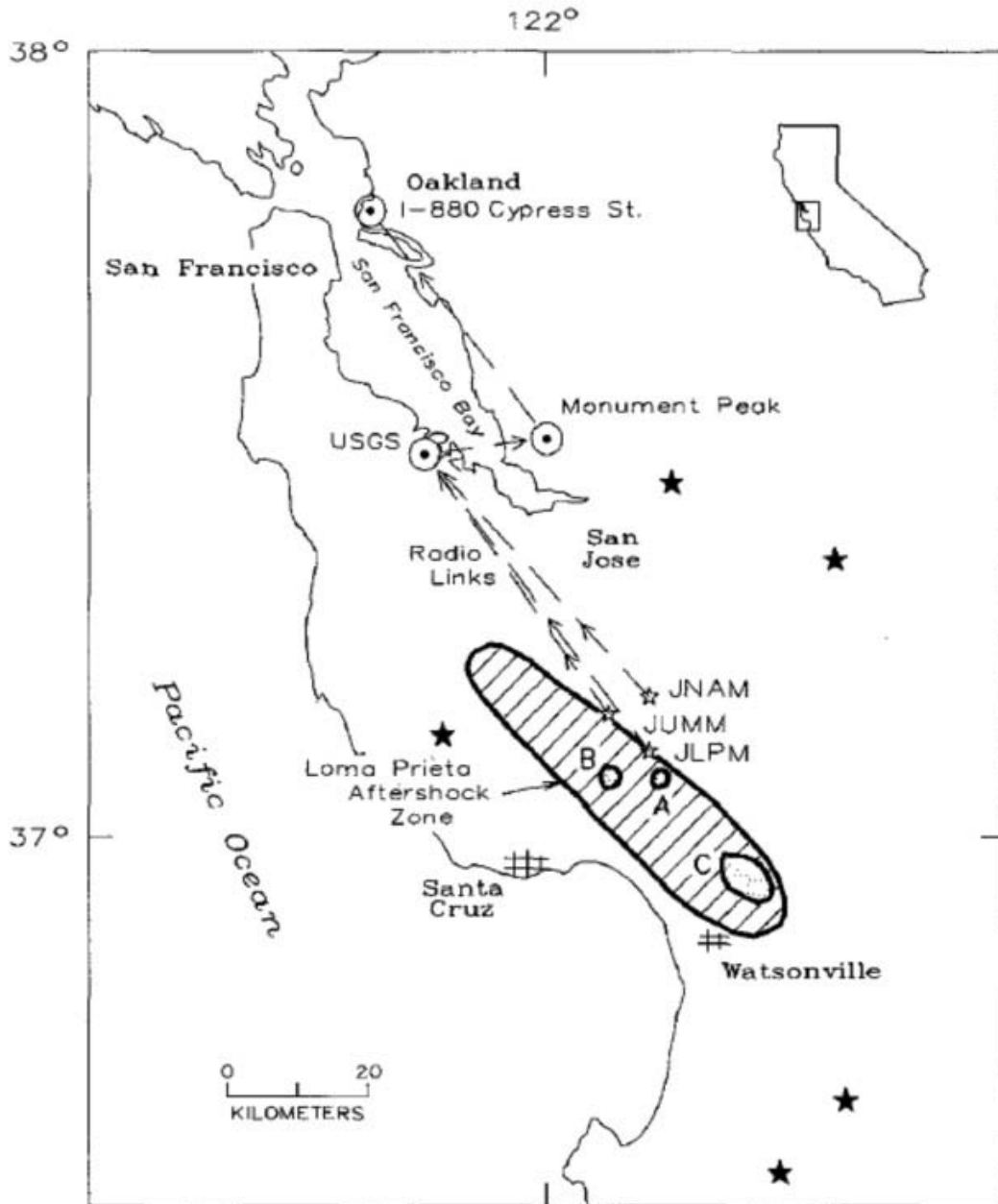


圖 1-6 美國第一個地震預警系統雛形

該系統在 Loma Prieta 地震之餘震區（斜線處，A、B、C 表示已發生之餘震震央）使用北加州原有之 CALNET 測站（實心星號及空心星號），進行地震預警測試實驗（Bakun *et al.*, 1994）。

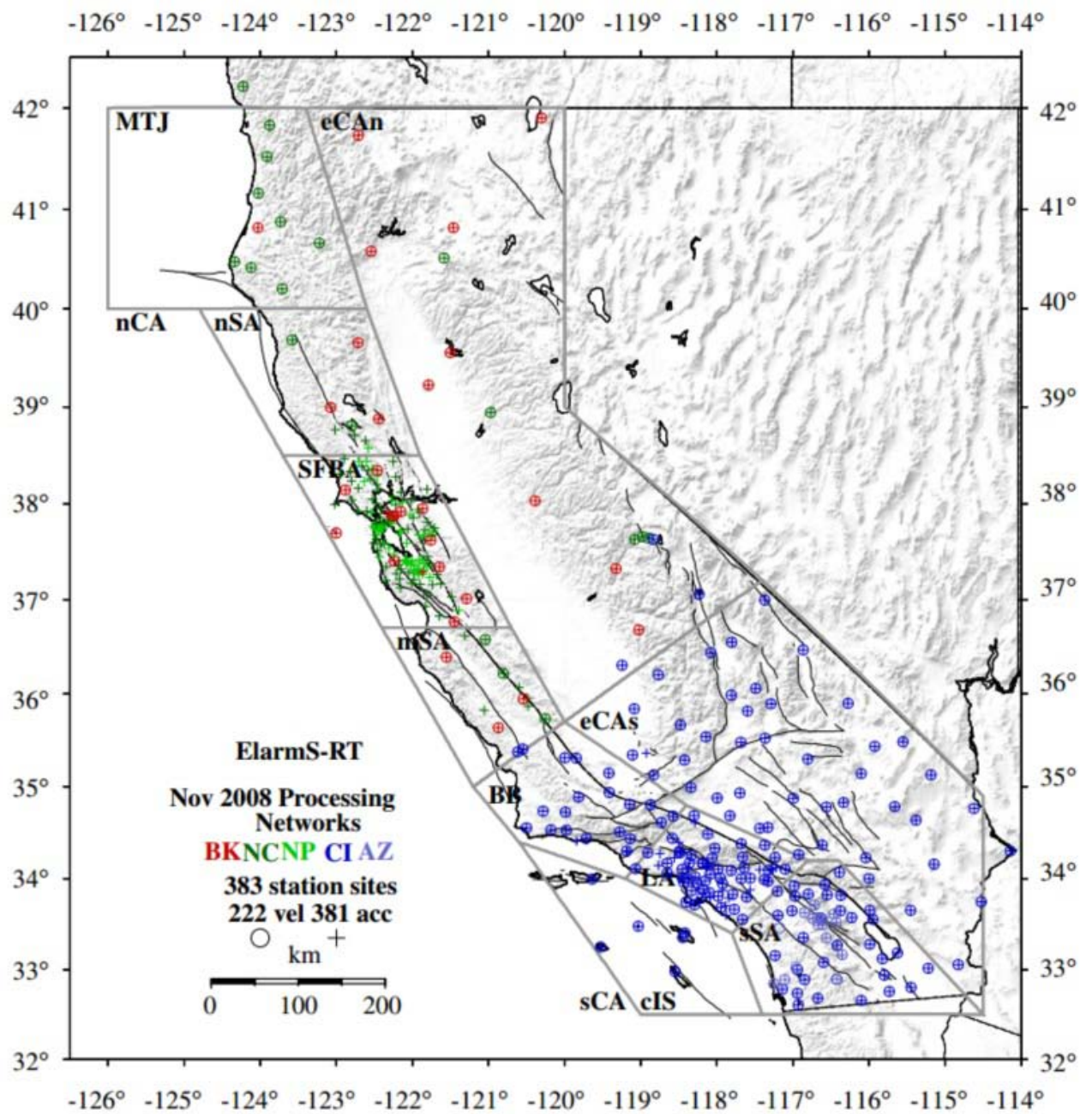


圖 1-7 美國 ElarmS 測站分布 (Allen *et al.*, 2009)

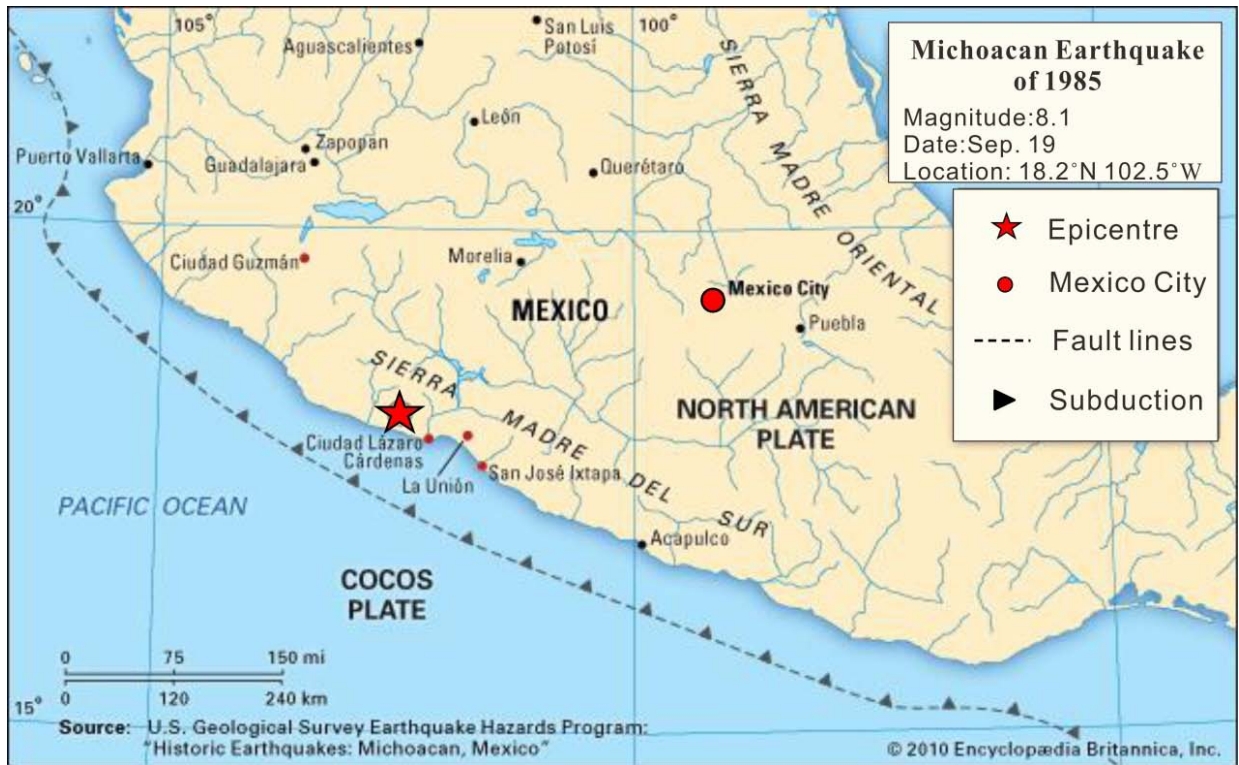


圖 1-8 1985 年墨西哥 Michoacan 地震(擷取至 Encyclopædia Britannica, Inc.)



圖 1-9 墨西哥 SAS 預警系統測站分布
 (修改自 UC Berkeley Seismological Laboratory)

1.3 台灣地震預警發展回顧

在台灣，中央氣象局從 1990 年代初開始致力於發展強地動觀測網。其中地震預警的實驗也是當時規劃的一項重要工作。台灣最早地震預警設計的動機與墨西哥市的情形類似，主要是基於 1986 年 11 月 15 日 M_L 6.8 (M_W 7.8) 花蓮地震所帶來的經驗，該地震發生地點雖然位於花蓮外海，然而主要的震災卻發生在 120 公里外的台北盆地，而根據地震波走時資料，剪力波由花蓮地區傳遞至台北地區約需 30 秒的時間，因此為能對台北都會區提供預警，30 秒內的強震處理時間也成為當時發展預警系統首要達到的目標。台灣第一個地震預警的實驗開始於 1994 年，中央氣象局在花蓮地區裝設一個地震預警的雛形 (prototype) 系統 (Wu *et al.*, 1999) (圖 1-10)，目的為花蓮地區大地震的快速偵測，並在地震發生後，強烈地動振幅到達台北盆地前提供訊息；該系統包含了 10 個裝置強震儀的觀測站，測站間距約 20 公里，資料透過數據專線匯集至花蓮氣象站做即時的處理，並將處理結果傳至台北中央氣象局局本部做展示與分析。該雛形系統已於 1998 年停止監測，而根據當時實驗測試結果，對於花蓮地區的地震，平均可在地震發生後 20 秒得到地震的參數，包括地震的位置與規模，不過由於測站的分布大都侷限在花蓮狹長的海岸線地帶，地震定位的準確度並不理想，震央位置的平均誤差為 22 公里，因此相對規模的誤差也很大，達到 0.7 個規模單位 (Wu *et al.*, 1999)。1997 年起，有鑑於台灣即時強地動觀測系統在地震速報上成功發展之經驗，中央氣象局另外以台灣即時強地動觀測系統為骨幹，建立虛擬子網 (Virtual Sub Network, VSN) 地震預警系統 (Wu and Teng, 2002) (圖 1-11)，透過近震源區之測站快速推估地震資訊，可把計算時間縮短至 20 秒內，對 70 公里以外區域發出有效地預警訊息，並隨震央距漸遠爭取更多的預警時間，達到速報預警的目的。

虛擬子網地震預警系統的成功，增加了台灣地震預警的可行性及可靠性，

不過該系統仍然有兩項缺失，其一，虛擬子網建立是以島內地震為主，對於外海的地震其定位結果不盡理想（Chen *et al.*, 2015）；其二，在虛擬子網中規模的估算是採用 M_{L10} 法（Wu and Teng, 2002），然而為了爭取更長的預警時間，使用 10 秒之波形視窗長度（time window）在不影響規模預估精準度前提下顯然需減短。中央氣象局為了提升台灣地區地震測站密度及覆蓋率（Coverage），整合了不同的觀測網建立中央氣象局地震觀測網（CWB Seismic Network, CWBSN; Chen *et al.*, 2015），CWBSN 包含了氣象局六頻道地震儀觀測站（CWB 6-channel Station）、氣象局寬頻地震儀觀測站（CWB Broad Band Station）、中研院台灣寬頻地震觀測網（IES BATS）、氣象局井下地震儀觀測站（CWB Downhole Station）及氣象局海底地震儀觀測站（CWB OBS Station），另外也加入了美國地震聯合研究機構全球地震監視系統（Incorporated Research Institutions for Seismology, IRIS）之測站（YOJ）可改善台灣東部外海之測站覆蓋率。氣象局在CWBSN架構下，結合美國地質調查所（U.S Geological Survey, USGS）發展之Earthworm即時地震處理平台（Johnson *et al.*, 1995），建立一嶄新名叫eBEAR（The Earthworm Based Earthquake Alarm Reporting System; Chen *et al.*, 2015）的地震預警系統。

另外，中央氣象局在 2013 年與教育部和行政院災害防救辦公室共同合作成立「全國中小學強震即時警報系統」，以全國各縣市國民中小學為主要推動對象，透過跨部會合作，在學校內裝設交通部中央氣象局開發的強震即時警報系統與接收端軟體，目前已於全台 3,344 所中小學安裝完成，將學校警報軟體與廣播系統之接搭，確保師生能在第一時間收到警報訊息以利採取正確的應變措施，降低可能造成的災害損失。2013 年 9 月 13 日國家防災日進行強震即時警報系統的搭配演練，充分展現此系統的速報能力，有效進行災前避難疏散作業，當日參加學校包括新北市鶯歌區鳳鳴國小、臺中市樹義國小、臺南市大橋

國中，以模擬彰化斷層發生地震事件，透過交通部中央氣象局安裝在學校的強震即時警報系統發出警訊，即時提供師生地震資訊，進行避難掩護，達到預警防災的效果。有了上述之經驗，中央氣象局也在 2014 年進行全國性演練，台灣所有國中小學皆參與了地震防災演習，不同地區及不同樓層因應不同的避難措施，將地震造成的傷害降到最小。

Prototype EEW system in Taiwan

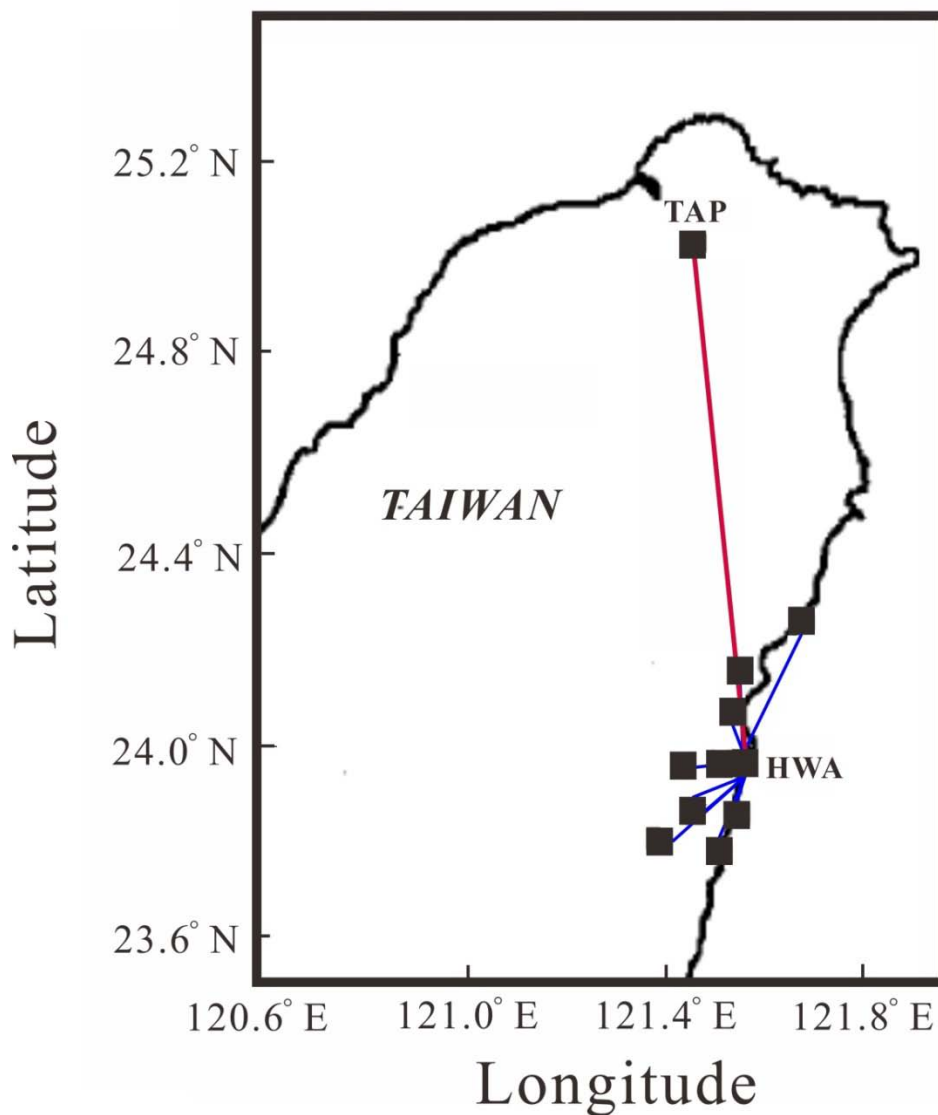
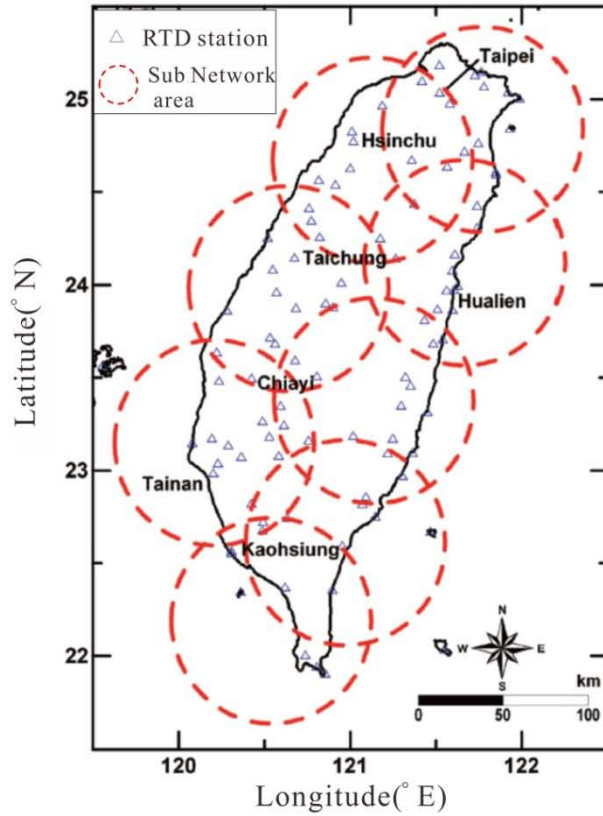


圖 1-10 台灣第一個地震預警測試系統（修改自 Wu et al., 1999）

(A) VSN station and Sub network distribution



(b) VSN Configuration

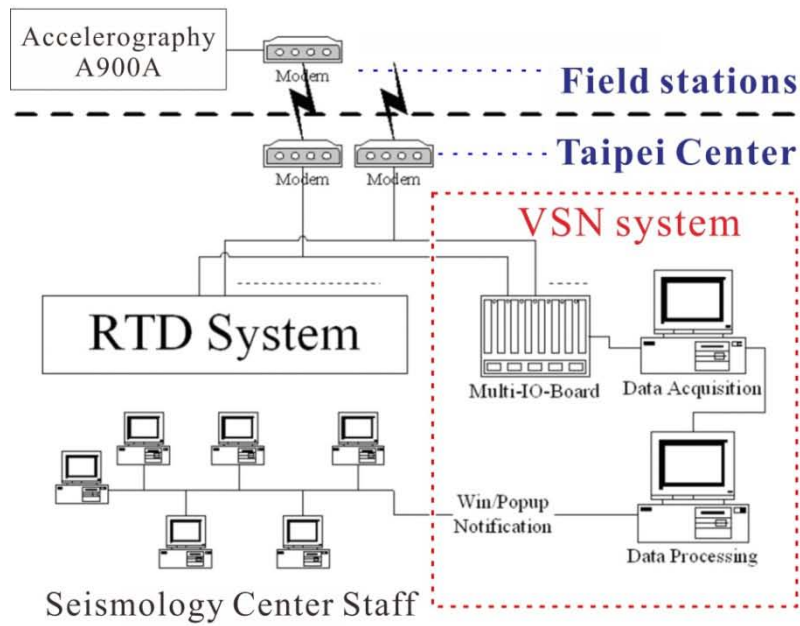


圖 1-11 虛擬子網地震預警系統 (修改自 Wu and Teng, 2002)

(a) 測站分布 (b) 系統架構

1.4 台灣 Palert 地震預警系統

臺灣上述系統皆是以現有之地震觀測網從事地震預警運作，然而除此之外，臺灣也有一個已上線之地震預警系統，名叫「Palert 地震預警系統」。Palert 地震預警系統為台灣第一個以地震預警為目的所設置的地震觀測網，本研究亦是在此觀測網架構下建立小區域地震預警陣列，以下將對此系統作詳細介紹。

1.4.1 系統發展沿革

自 2010 年以來，在臺灣大學地質系吳逸民教授所主持的地震預警研究團隊與台灣三聯公司合作努力下成功設計出以地震預警為目的所設計之微機電系統（Micro Electro Mechanical Systems, MEMS）感測器，名叫”Palert”地震預警感測器（如圖 1-12（a）），而自 90 年代以來，微機電系統的加速度感測器已被廣泛運用於各國之即時地震觀測系統，該型感測器具備價格便宜、體積小、高頻訊號記錄能力以及近場不易飽和的特性，是相當具有經濟效益的地震預警。截至 2014 年底，在科技部資助下，已在全台國中小安裝超過 500 台感測器（如圖 1-13，附錄一），每台感測器配備一台顯示器 i-touch（如圖 1-12（b）），均安裝於學校建築物內，並利用校內網路傳送訊號，形成台灣最密集的即時地振動監測網。不只在台灣，此感測器更得到國際的重視，美國、日本及印度之地震預警相關單位亦曾使用此感測器。

1.4.2 設備介紹

Palert 內含三軸向微機電（MEMS）加速度計、兩組固態繼電器可連接控制外界設備、10/100MHz 網路與 RS-232/RS-485 通訊能力、並內嵌小型資訊顯示 LED，是一體積小、功能強之 All-in-one 設計之地震儀器。備有三軸向感應器，能同時記錄東西南北垂直向之地動加速度訊號，其解析度為 16 bit，取樣

率每秒 100 點，記錄加速度範圍為 $\pm 2g$ ，亦可利用內建程式即時的將加速度訊號積分成速度及位移相，供後續計算參數 (PGV 、 Pd 、 τ_c) 用。

地震判別技術是 *Palert* 之主要特點，總共提供多種機制來判斷地震觸發，分別是垂直向最大地動位移值 Pd 、垂直向地動加速度峰值 PGA 與 STA/LTA (短週期加速度平均值 / 長週期加速度平均值)。濾波器方面，備有 10 Hz 與 20 Hz 兩種低通濾波 (low-pass) 及 0.075 Hz 之高通濾波 (high-pass)，以濾除非地震所造成之訊號。

Palert 內建即時時鐘 (RTC) 並提供 NTP 網路校時功能，可即時顯示目前之精確時間，並可記錄最近一筆地震事件之正確發生時間、震度與三軸向最大加速度，可即時顯示中央氣象局頒佈之七級地震震度，或中國大陸 GB/T 地震烈度，地震之最大震度、三軸合成向量加速度、瞬時三軸向最大加速度等。

Palert 也提供 Modbus RTU 與 Modbus TCP 之工業標準通訊協定，可同時支援 TCP/IP Client 與 TCP/IP Server 之功能，故可直接連接電腦、PLC 與人機界面，使用 Modbus TCP 協定時，最多可同時連接三部電腦或主機，故可與廣播與防災系統直接連接，進而達到廠區、大樓安全自動監控。另外也配有 i-touch 觸控式人機界面，可即時顯示 *Palert* 計算出之地震參數，並可透過 i-touch 調整初始設定。

1.4.3 系統運作流程

Palert 預警系統是結合現地型預警及區域型預警之複合式 (Hybrid) 預警系統 (圖 1-14) (預警模式於 2.1 節介紹)。分布於全台各地之 *Palert* 透過網路即時並連續地將監測訊號送至中研院網中心 (The Grid Center of the Academia Sinica) 以及國家高速網路中心 (原伺服器為國立臺灣大學 (NTU)) 兩個資料處理中心伺服器，網格中心會再將統整資料傳輸至國立成功大學

(NCKU)、臺灣科技大學 (NTUST) 及中央氣象局 (CWB) 供研究使用 (如圖 1-14)。

當感測器即時且連續接收地動訊號，其接收到之加速度地動訊號會先經由內建程式積分成速度相及位移相，並對STA/LTA、PGA與Pd三項條件進行監測，一旦偵測到P波，自動取得P波到站後三秒內之PGA及Pd值，一旦PGA大於 80 gal 或是Pd大於 0.35 公分，現地預警系統即開始運作，i-touch也會發出警報聲。區域預警部分，Palert傳輸之即時訊號包含三軸向加速度訊號以及垂直向位移訊號，以每秒發送封包方式連續傳回伺服器中心，之後利用美國地質調查所

(USGS) 所開發之Earthworm地震資料處理平台即時接收並處理，Earthworm是一個專門為即時處理地震資料所設計之免費平台，其除了備有基本資料處理模組，例如接收模組、儲存模組、P波到時判定模組等等，也可以自行撰寫所需之模組並套用。一旦達到 8 個測站觸發地震事件後，即利用臺灣地區半空間線性遞增一維速度構造模型 (Wu and Lin, 2014) 進行逆推法之標準地震定位 (Geiger, 1912)；接著透過Pv與Pd對規模的迴歸關係式 (Wu et al., 2013) 進行規模 (M_p) 估算 (若計算出之Pv規模小於 6.0 則使用Pv規模；Pv規模大於 6.0 則使用Pd規模)，一旦達到災害性地震標準，即發布警報，平均可於地震事件發生後 16 秒提出警報。

本系統也會利用各測站所記錄之地動參數 (如地振動加速度) 即時繪製震度圖 (Shaking map)，提供救災評估與參考，並可透過中研院網格中心所架設之 Palert 即時震度資訊網站 (<http://palert.earth.sinica.edu.tw/>) 觀看 (如圖 1-15)。

(a)



(b)



圖 1-12 Palert 預警系統設備

(a) 微機電加速度型地震預警感測器 Palert (b) 配合 Palert 感測器使用之顯示器及警報器 *i-touch*

Palert distribution (2014)

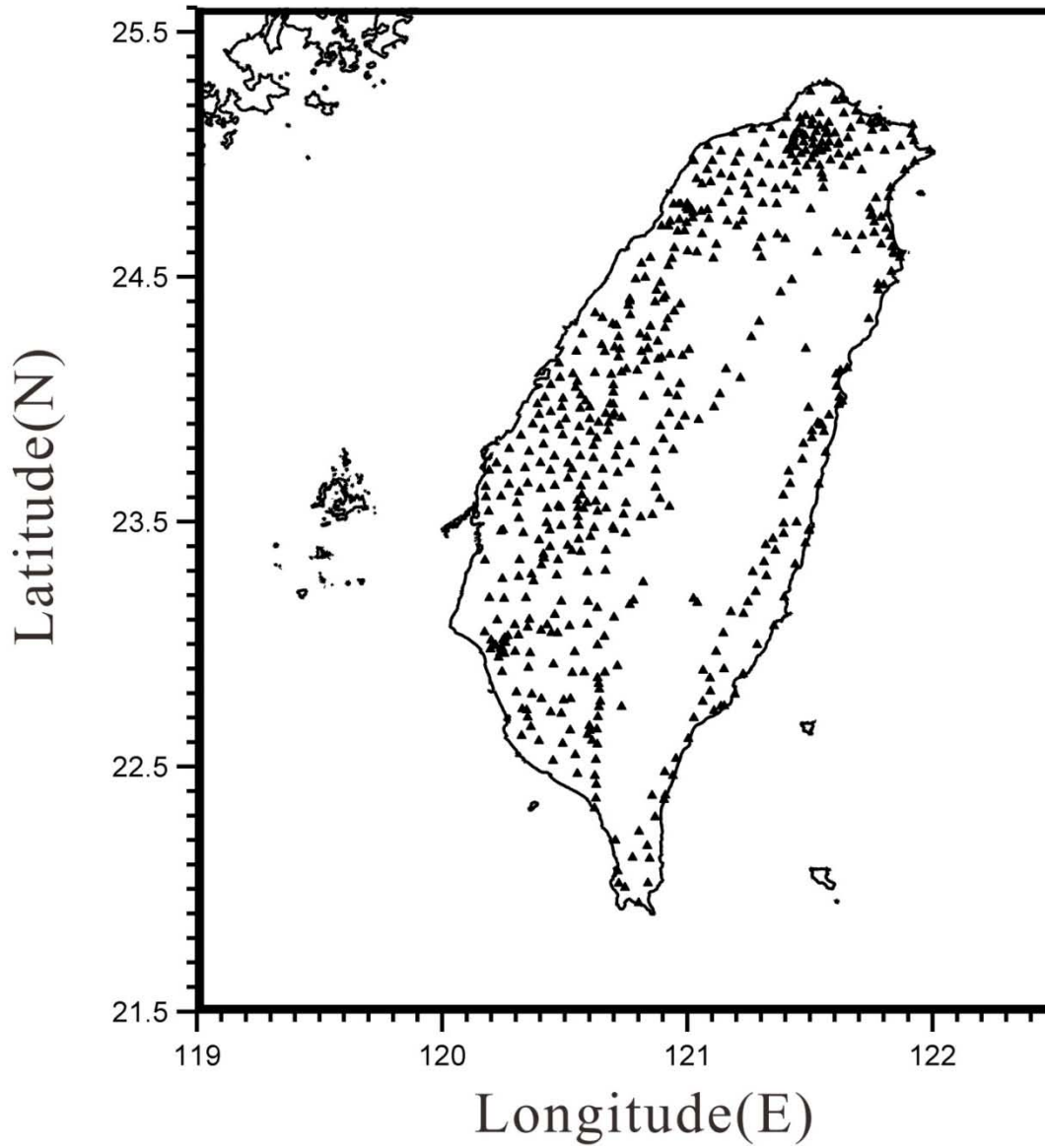


圖 1-13 Palert 預警系統測站分布

Palert System Configuration

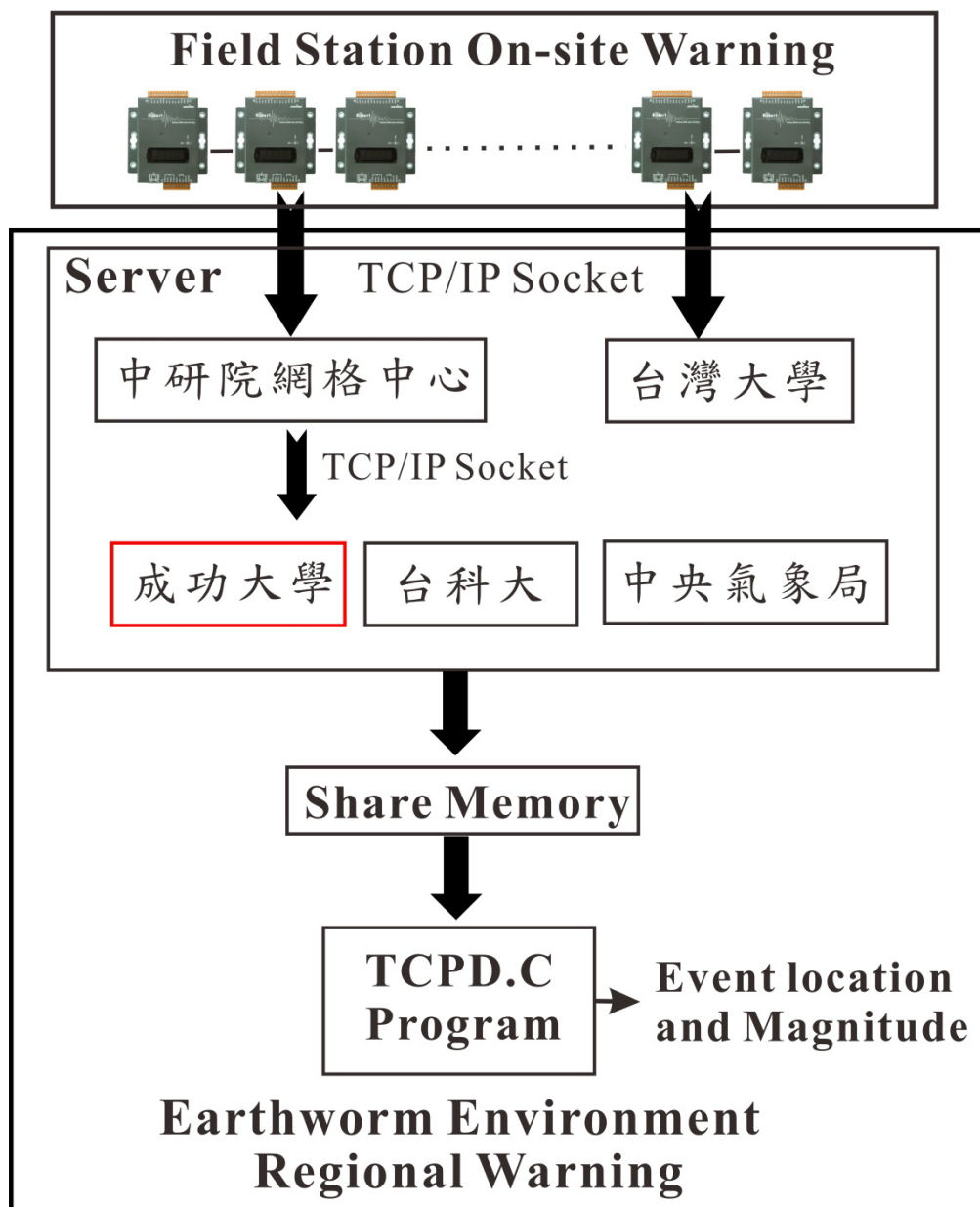
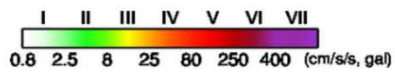
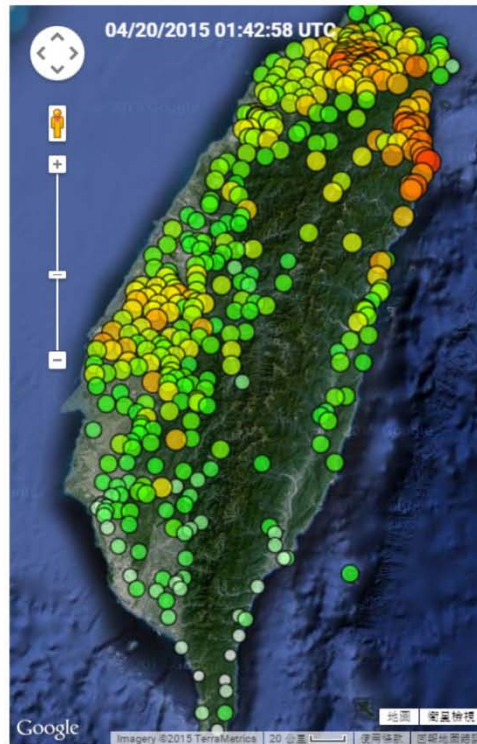


圖 1-14 Palert 預警系統資料傳輸路徑

Palert 即時震度資訊

即時資訊時間 : 05/06/2015 01:46:11 UTC



預警設定: 3 個測站 的PGA 大於 5 cm/s/s

套上震度圖 色標 1 色標 2

- 4.0 [2015-04-29 08:19:16](#) ▶
- 5.6 [2015-04-25 20:01:38](#) ▶
- 5.7 [2015-04-20 12:00:01](#) ▶
- 5.8 [2015-04-20 11:45:15](#) ▶
- 5.5 [2015-04-20 11:20:46](#) ▶
- 6.3 [2015-04-20 01:42:58](#) ▶
- 4.6 [2015-04-18 23:21:50](#) ▶
- 4.4 [2015-04-15 19:48:37](#) ▶
- 4.6 [2015-04-13 17:13:57](#) ▶
- 4.2 [2015-04-07 07:19:23](#) ▶
- 5.1 [2015-04-06 11:37:31](#) ▶
- 4.3 [2015-04-05 20:50:27](#) ▶
- 6.0 [2015-03-23 10:13:50](#) ▶
- 4.4 [2015-03-14 14:45:15](#) ▶
- 4.6 [2015-03-11 23:02:33](#) ▶
- 5.2 [2015-02-26 16:50:03](#) ▶
- 6.1 [2015-02-13 20:06:30](#) ▶
- 4.5 [2015-02-12 07:35:36](#) ▶
- 4.1 [2015-02-06 18:27:45](#) ▶

圖 1-15 Palert 即時震度資訊 (<http://palert.earth.sinica.edu.tw/>)

1.5 研究動機及目的

地震預警是地震速報朝向地震防災的延伸，是地震測報發展最主要的目標之一。即時資料處理的工作加上透過地震預警研究方法或模式，將處理的時間縮短至地震發生後十數秒、甚至數秒內時，則可以在破壞性的地震波（通常指 S 波或表面波）到達前，對於某些特定的都會區提前數秒至數十秒提出警告。雖然在這段短短的預警時間內，可能無法使人民有足夠時間疏散到絕對安全的區域，但只要透過平常有計畫的演習訓練，仍然可以有效降低相關人員的傷亡，例如：學校中的學生可以依照老師指示疏散或找遮蔽物、高空作業的工人或是工廠員工可以迅速移動至安全的位置。不過這前幾秒的預警對於地震造成的附加災害有顯著的幫助，減少相關傷亡及財產損失，例如瓦斯或是燃料管線能夠自動關閉避免火災、捷運列車或是高速火車能夠即時減速避免出軌車禍、工廠或公司行號的昂貴設備可以及時停止運轉避免儀器損害等。

基於地震預警基礎，本研究在地震規模及地震定位皆有著墨，而地震規模及震源位置為地震預警研究中最重要兩個參數，因此在地震發生後快速決定此兩個參數將可以在地震減災上提供大大的幫助。

在第一部分，本研究在現有之 *Palert* 系統中建置小區域地震預警陣列預估規模，*Palert* 為低價位之加速度型感測器，體積小、安裝簡易，在吳逸民教授所主持的台灣大學地震預警團隊推動及科技部之補助下已經在全台灣安裝超過 500 個測站，為高密度的地震預警監測網。然而因 *Palert* 之低價位且安裝於建築物之牆壁上，不同於一般高精度之傳統地震儀安裝於自由表面，因此有較低之訊噪比且會受建築物造成之放大效應影響，目前並無法以單站所接收到之地震訊號作地震大小及位置之預估，對此本研究利用陣列式波形處理及波形訊號疊加法提升訊噪比，並利用 Kanamori (2005) 年提出之 P_d 法預估規模，修正建築物效應後得到適用於台灣地震預警陣列的 P_d 規模預估公式。

在第二部分，地震定位方面，目前台灣地震測報所使用之方式為參考自 Hypo 程式 (Lee and Lahr, 1972)，其假設速度構造不具有側向不均勻性，僅利用一維之臺灣地區速度模型計算地震波走時，且發震時間及震源位置變化之間為非線性關係，若以線性反演將造成定位誤差，又因 *Palert* 儀器本身敏感度問題及建築物效應會使初達波的到時判定不精確，因此目前 *Palert* 系統在地震定位的表現上仍有待改善。本研究地震網選用中央氣象局地震速報觀測網 (RTD)，雖然 RTD 地震網測站數目較少，但其儀器敏感度佳及且擁有較高的穩定度，對於初達波到時的判定會有較好的結果；我們將台灣地區 (經度：119~123° E、緯度：21~23° N、深度：45 km) 切成 $2 \times 2 \times 1$ km 之三維網格點，每個網格點皆為假設震源，結合黃信樺 (2014) 年所提出之臺灣地區三維速度模型及 Koketsu and Sekine (1997) 提出之波線追跡法 (Ray tracing) 計算每個假設震源之 RTD 測站走時排序並存成資料庫，當地震發生，將觀測之前十名測站排序比對資料庫，找到測站排序差最小的格點定義為真實震源。

本研究在規模地預估以及即時地震定位結果皆有良好地表現，可望提升目前臺灣地震預警之預報水準。

第二章、地震預警原理

2.1 地震預警基本概念

何謂「地震預警」？地震預警的原理主要是藉由地震參數的快速決定、地振動預估，以及現代電訊傳遞之運用，對震央較遠的地區達到地震預報之效果。因此在考慮如果預警區域與震源區域存在足夠的空間距離，我們可以在震源區附近，架設密集的地震觀測站進行觀測，當地震發生後，迅速將地震參數及地振動預估計算出來，並利用電子通訊，在破壞性的震波尚未傳遞至預警區域前，迅速通知預警區域進行地震防護的措施，以減少人員生命危險及財產損失。主要依靠之物理原理是當地震發生時，是由 S 波（剪力波）及表面波造成地表強烈的振動，而初達波（通常為 P 波）傳遞速度較 S 波及表面波快（圖 2-1），且地震波傳遞速度又遠小於電話或無線電等電磁波之傳遞速度，因此透過地震測站連續地監測並即時傳輸資料至處理中心，當有地震事件發生，資料處理中心可透過分析 P 波前幾秒波形紀錄來預估接下來破壞性地震波可能造成之地振動大小，一旦認定為災害性地震，即利用電磁波形式對外廣播（手機 APP 或簡訊、電視跑馬燈等），對使用端（學校、公司行號、工廠、鐵路局或一般人民），發出強震警訊，爭取數秒至數十秒之預警時間，使其能有所因應，以降低震災。其中物理性的假設為地震規模的大小或多或少可由地震破裂前幾秒內的資訊求得（Kanamori, 2005），然而，越大規模的地震會有越大的破裂長度、面積及時間，此假設越趨向不成立，一般認為，飽和值約為規模 6.5~7.0（Wu *et al.*, 2006）。

然而預警時間的長短依地震發生地點至預警地區之距離遠近而定，是以空間換取時間的概念（圖 2-1 及圖 2-2），並利用地震波中 P 波與 S 波的速度差，爭取預警的時間。考慮一個震源深度 H 的地震，對於距離地震 R 的位置而言，在忽略掉以光速傳遞警報所需之時間後，其針對 S 波的預警時間 t 為

$$t = \frac{\sqrt{R^2+H^2}}{v_s} - \frac{H}{v_p} - \Delta t \quad (2-1)$$

其中 v_s 、 v_p 分別為S波與P波的平均速度。式中等號右邊第1項為S波走時，代表破壞性震波傳遞所需之時間，第2項為P波走時，可視為地震發生後一直到觸發觀測儀器所需之時間，第3項 Δt 則是資料處理所需花費時間，由於P波的速度約為S波的1.73倍，因此隨著震央距離的增加，其地震預警的時間也逐漸拉長；以台灣地區為例，地殼內P波的速度平均為6.53 km/sec，S波為3.67 km/sec，因此距離震央50公里的地區P波傳遞約需7.7秒，S波則在P波到達後5-6秒後到達，距離100公里時P波傳遞約需15.7秒，S波到達的時間差則拉大至11-12秒。



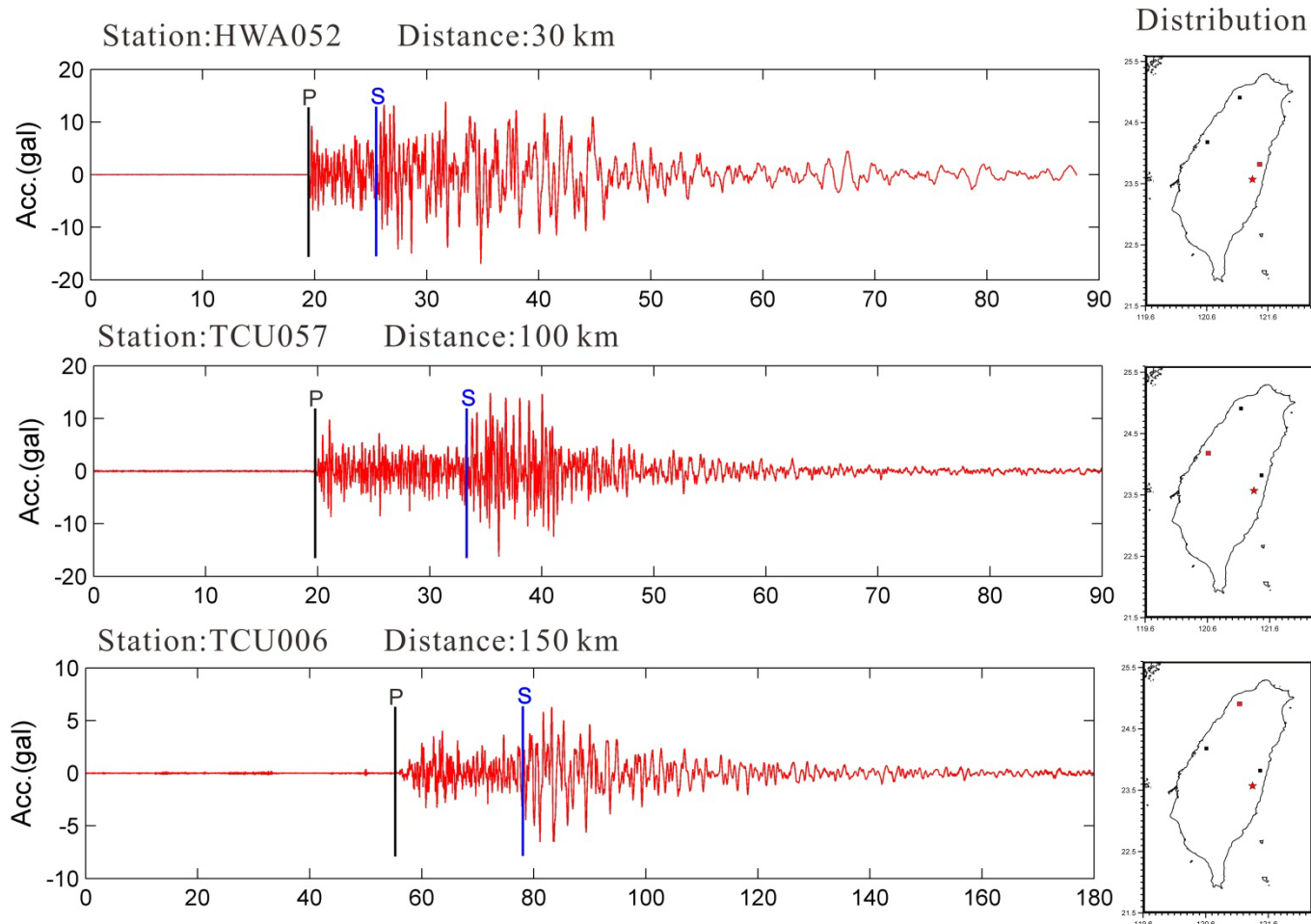


圖 2-1 地振動歷時波形示意圖

以 2013 年 10 月 31 日規模 6.4 之花蓮地震為例，震央距 30km 處 P - S 波走時差約 5 秒；100km 處 P - S 波走時差約 14 秒；150km 處 P - S 波走時差約 22 秒。

2.2 地震預警模式

根據地震監測的方式不同，地震預警主要可分為兩種模式（Kanamori, 2005）：（1）區域型地震預警（Regional warning）或稱前端偵測型（Front-detection）以及（2）現地型地震預警（On-site warning）（圖 2-2）。

區域型地震預警是透過在地震發生較頻繁的區域架設密集的地震監測網，在地震發生後，先對距離震央較近的甲地測站觀測到的震波進行分析判別，並透過多個測站的到達時間差定位，推估地震規模、距離等震源參數，提供震央距較遠的乙地地震警訊息。也就是說，區域型地震預警是利用震波到達甲地與乙地的時間差，達到地震預警的目的。現地型則僅利用單一或數個地震測站，在觀測到 P 波時，快速推估 S 波抵達時可能造成的地振動大小，進而對現地位置發出地震預警訊息。

針對這兩種預警系統各有其優缺點，區域型地震預警有密度較高的地震觀測網，除了提升觸發準確率外也擁有較多的地震資訊可用來預估震源參數（震央、震源深度、規模），因此有較準確的結果，較少誤報產生，但資料處理時間較長對於離震央較近的區域無法提供足夠的預警時間；而現地型預警所需之資料處理時間較短，相較於區域型地震預警可對震央距較小的區域提供警告，但是僅使用單站所記錄的 P 波資訊容易受現地場址及地質構造影響，降低其預報準確性。而目前最新的模式為複合式（Hybrid）的地震預警模式，為結合區域型及現地型之預警模式，如台灣的 *e*BEAR 預警系統及 *Palert* 預警系統，目的的不僅是對較遠地區甚至連近震源區皆有足夠的預警時間。

Warning Types

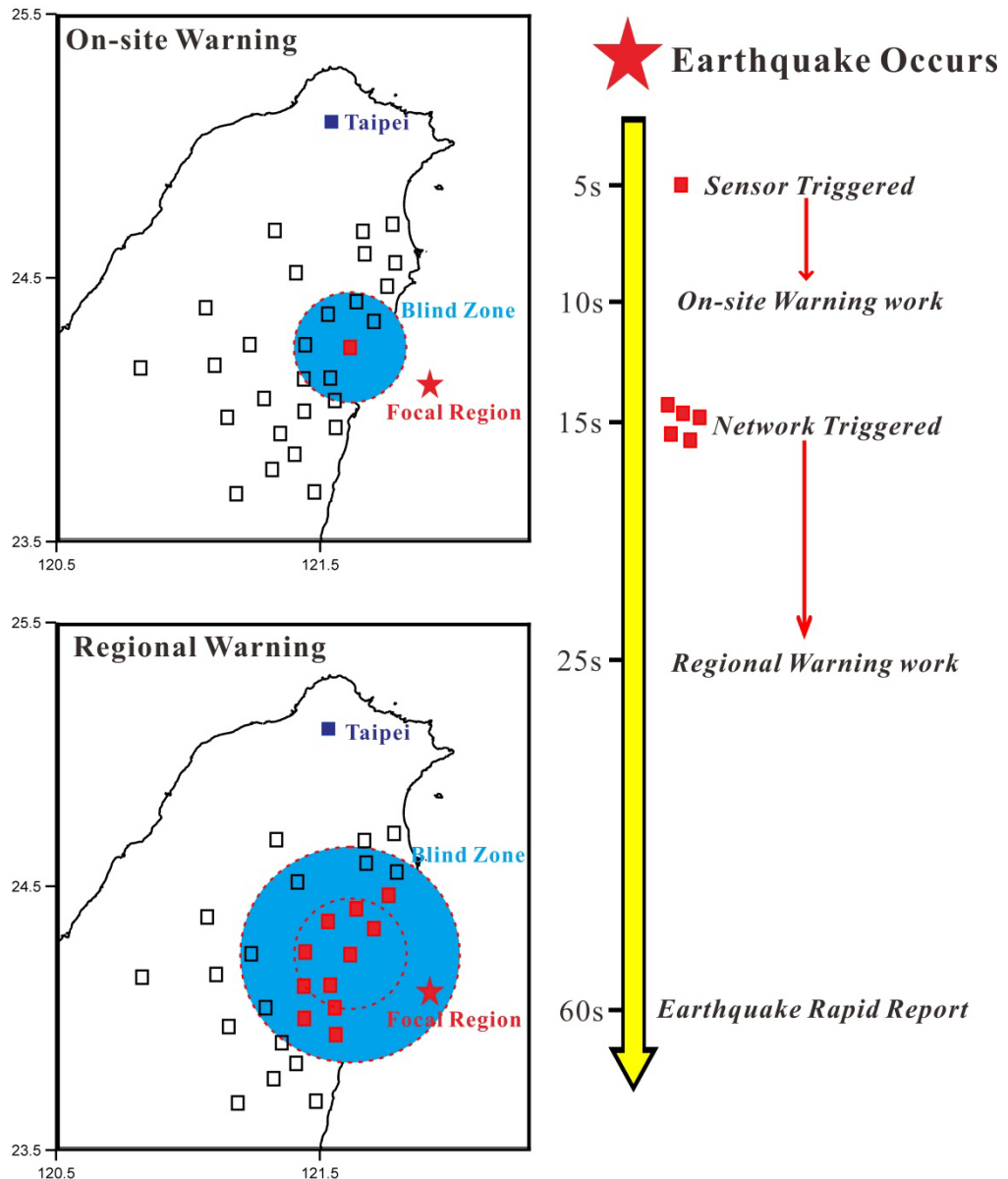


圖 2-2 現地型 (On-site) 地震預警及區域型 (Regional) 地震預警示意圖
以台灣為例，在較常發生地震的東部地區架設密集地震觀測網，當事件發生並
有 1 測站觸發，即進行現地型地震預警運作；隨著越來越多測站收集到地震資
訊，即進行區域型地震預警運作。如資料處理時間越長，會使預警盲區越大，
預警效益越差。

2.3 地震預警之規模預估

如何快速且精準的預估規模是地震預警領域中最大的課題。基於地震預警目的，規模估算的方法主要包含了 M_{L10} 法 (Wu et al., 1998)、 τ_c 法 (Kanamori, 2005)、 τ_p^{max} 法 (Nakamura, 1988; Allen and Kanamori, 2003; Olson and Allen, 2005)、Pd法 (Wu and Kanamori, 2005a, 2005b) 以及 M_{PGA} 法 (Lin and Wu, 2010)。而 P 波為地震波發生後最快到達每個測站的地震波相，其所蘊含的資訊中振幅及振動週期值可反映出震源特性 (Kanamori, 2005)，對於地震預警研究有極大的貢獻 (Nakamura, 1988; Allen and Kanamori, 2003; Odaka et al., 2003; Kanamori, 2005; Wu and Kanamori, 2005)。

(1) M_{L10} 法

為台灣中央氣象局虛擬子網預警系統所使用之規模估算方法。為了縮短地震波資料處理時間，僅利用離震央最近測站所偵測到初達波 (P 波) 到時後十秒內之波形資訊，對事件進行規模的預估。而震央距太遠之測站所接收到十秒訊號內可能無法包含 S 波之地動資訊，導致會有規模低估的現象，因此，Wu et al. (1998) 分析了 23 震源位於台灣島內 (因測站覆蓋率佳) 且規模大於 5 之地震事件，修正了 M_{L10} 規模預估公式：

$$M_L = 1.28 \times M_{L10} - 0.85 \pm 0.13 \quad (2-2)$$

其中 M_{L10} 為利用 P 波到時後 10 秒記錄長度所計算出之芮氏規模， M_L 為經修正後之區域地震規模 (芮氏規模)，其規模值會更接近實際規模。經過測試，中央氣象局可在地震發生後約 30 秒，即可計算出該事件規模。

(2) P 波週期預估法 (τ_p^{max} 法、 τ_c 法)

隨著地震規模變大，除了 P 波振幅明顯變大外，其振動週期有也有明顯的

改變。一般來說，規模越大的地震其振動週期也越長，頻率越低。此現象反映出不同地震大小之震源破裂特性：規模較小之地震，在斷層面產生較小的錯動，且破裂時間較短，因此產生較高頻、短週期的訊號；而大地震在斷層面上產生較長時間之大規模錯動，導致有低頻、長週期的地震波訊號產生（圖 2-3），在頻譜分析中，低頻部分將有較高的能量，因此我們可以利用 P 波週期隨規模變化的特性，快速推估地震規模。藉由此特性， P 波週期規模預估法在地震預警研究上之應用最初是由 Nakamura (1988) 所提出，而其所利用的是 P 波主要週期。後來，Allen and Kanamori (2003) 依 P 波主要週期概念，提出了 τ_p^{max} 法（其文中為 T_p^{max} ）， τ_p 可由速度型地震儀之地震紀錄做遞迴積分求得，其定義式為：

$$\tau_i^p = 2\pi \sqrt{\frac{X_i}{D_i}} \quad (2-3)$$

$$\text{其中 } X_i = \alpha X_{i-1} + X_i^2 \text{ 且 } D_i = \alpha D_{i-1} + \left(\frac{dx}{dt}\right)_i^2$$

上述式子中， τ_i^p 為當時間 i 秒時的主要週期， x_i 為當時間 i 秒時的速度紀錄值， α 為平滑常數（通常為 0.99）， X_i 為經平滑後之速度平方值， D_i 為平滑後之速度導數之平方值，而 τ_p^{max} 即為索取時間段內，利用上述公式所計算出之最大 τ_p 值。在 Allen and Kanamori (2003) 研究中，利用南加州之地震事件，分別對小地震及大地震將 τ_p^{max} 與規模做迴歸分析，發現在 P 波到站後四秒內之 τ_p^{max} 與規模有較吻合的關係，如式 2-4。

$$m_h = 7.01 \times \log(\tau_{max}^p) + 5.9 \quad (2-4)$$

另一種 P 波週期預估方法與 τ_p^{max} 法類似，是由 Kanamori (2005a) 將其 τ_p^{max} 法改良，並取名為 τ_c 法，為波形紀錄 3 秒時間段內之平均週期。於地震紀錄的 3 個方向中取垂直向的位移相和速度相時間序列，將 P 波到時後三秒內波形訊號積分並依照公式 (2-5) 計算出比值 r ：

$$r = \frac{\int_0^{\tau_0} \dot{u}^2(t) dt}{\int_0^{\tau_0} u^2(t) dt} \quad (2-5)$$

由於地震波時間序列上之總能量與頻率域上之總能量相同，因可再經由 Parseval 定理換算公式成公式 (2-6)：

$$r = \frac{4\pi^2 \int_0^{\infty} f^2 |\hat{u}(f)|^2 df}{\int_0^{\infty} |\hat{u}(f)|^2 df} = 4\pi^2 \langle f^2 \rangle \quad (2-6)$$

式中 f 代表頻率， $\hat{u}(f)$ 是 $u(t)$ (位移項) 的頻率域函數，而 $\langle f^2 \rangle$ 則為平均頻率，最後經由整理推算得到式 (2-7)，將 τ_c 定義為 P 波振動 3 秒內的平均振動週期參數。

$$\tau_c = \frac{1}{\langle f^2 \rangle} = \frac{2\pi}{\sqrt{r}} \quad (2-7)$$

Wu and Kanamori (2005a) 利用台灣的地震事件將 τ_c 和規模做迴歸分析，提出關係式 2-8：

$$\log(\tau_c) = 0.221M - 0.113 \quad (2-8)$$

另外，在研究結果也顯示，在台灣地區，當地震事件之 τ_c 值大於 2.1 秒時，就可能為 $M_w > 6.5$ 的地震發生。即使只用一個測站也有相當好之成果 (Wu *et al.*, 2006b)，若僅依此特性為災害性地震觸發門檻，將可將地震大小的判定縮短至 10 秒以內。

(3) P 波振幅預估法 (Pd 法)

地震波之波形紀錄中，振幅為反映地震大小最直接的證據，振幅越大的波形代表其所蘊含的能量越高，而 Wu and Kanamori (2005a) 中定義 Pd 為 P 波到站後 3 秒內地震紀錄位移相中垂直向所記錄之最大振幅值。 Pd 對 PGV (Peak Ground Velocity) 及規模皆有良好的關係存在：Wu and Kanamori (2005b) 發現 Pd 與 PGV 有著正向的線性關係，其利用台灣 26 個規模大於 5 的地震事件回歸出式 2-9

$$\log(\text{PGV}) = 0.832 \times \log(\text{Pd}) + 1.481 \quad (2-9)$$

另一方面 Pd 也可藉由地震波衰減公式 (式 2-9) 來預估地震規模：

$$\log(R) = a \times M + b \times \log(\text{Pd}) + c \quad (2-10)$$

式中 R 為震源距離， a 、 b 、 c 為迴歸係數。藉此關係，Wu and Zhao (2006)

(式 2-11) 及 Hsiao *et al.* (2011) (式 2-12) 皆提出了 Pd 規模預估公式：

$$\log(\text{Pd}) = 3.463 + 0.729 M - 1.374 \log(R), S.D.V. = 0.305 \quad (2-11)$$

$$\log(\text{Pd}) = -1.777 + 0.455 M - 1.230 \log(R), S.D.V. = 0.362 \quad (2-12)$$

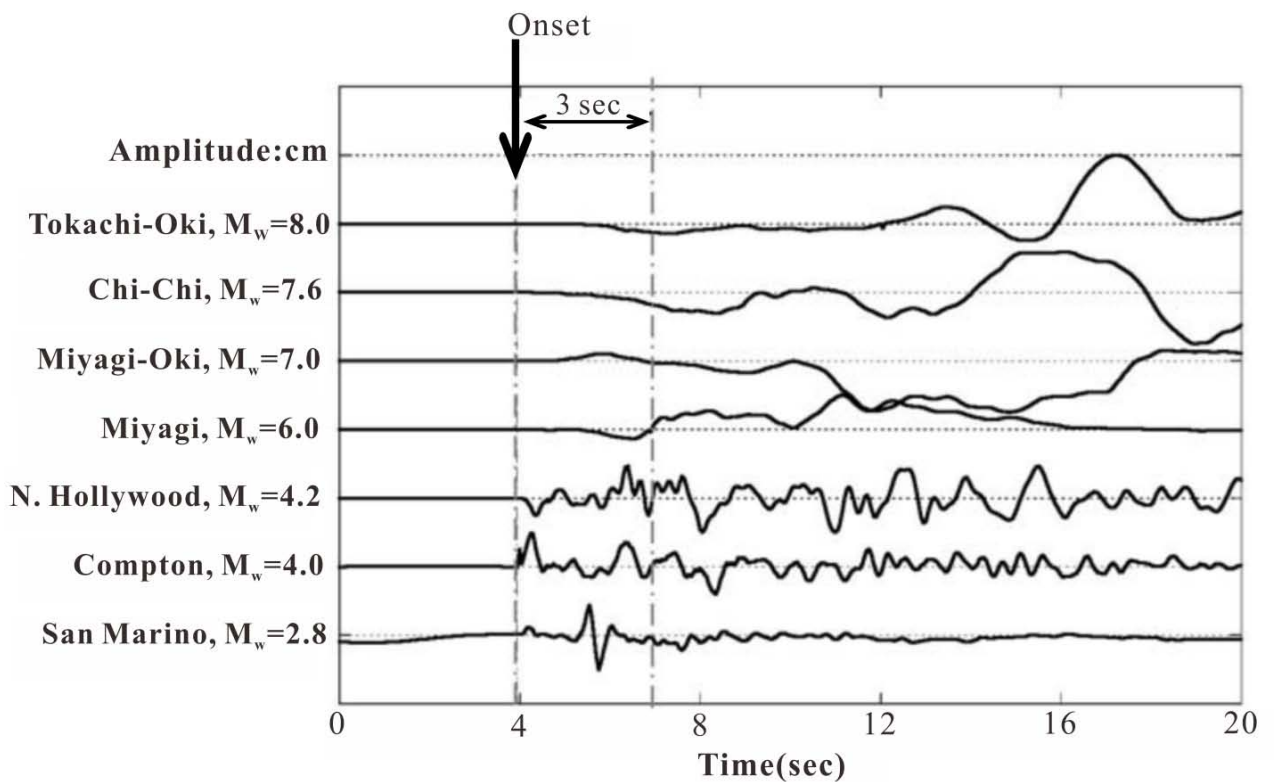


圖 2-3 規模大小不同之地震在近場的垂直向位移記錄

圖中顯示不同規模地震的 P 波除了振幅有所變化外，週期也明顯不同 (修

改自 Kanamori, 2005)。

2.4 地震預警之震源位置推估

地震定位，顧名思義，就是將地震發生的位置（震源）和時間（發震時間）決定出來。如何快速決定災害性地震的位置也是地震減災中非常重要的一環，雖然離震央太近的地區也就是所謂的地震預警盲區，我們無法給予足夠的預警時間做防準備，不過我們可以透過快速的地震定位，給予救災單位（如消防隊及搜救組織等）更充足的時間派遣調度，尤其是當地震發生候常常有通訊不良或網路不通的狀況，使災區人民與外界失聯，快速地震定位更派得上用場。以下幾個為地震預警領域上常用的即時定位方法：

(1) 傳統地震定位

傳統地震定位利用震波到達各地震站之時間 t_i 推算地震發生的時間 t_0 以及震源位置 (x_0, y_0, z_0) ，其方程式基本上建構在震波傳遞時間 $(t_i - t_0)$ 等於震源距離 (D_i) 除以震波速度 (V) 的計算，如式 2-13：

$$t_i - t_0 = \frac{\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2}}{V(x, y, z)} \quad (2-13)$$

式中不變量為震源位置 (x_0, y_0, z_0) 、發震時間 t_0 ；變量為測站位置 (x_i, y_i, z_i) 、 P 波到達該站之時間 t_i ；應變量為各測站與發震時間之時間差 $(t_i - t_0)$ 。而由於地震波速度 $V(x, y, z)$ 是一項複雜的空間函數，導致震波在非均質、非均向之地殼中傳遞時，距離與地震波走時為複雜之非線性關係，無法直接藉由觀測資料求解，因此地震學家Geiger在1912年提出先定義一假設性的震源，再逐續修正得到最佳解的概念，將其方法簡化呈線性關係，並以最小平方法逆推求最佳震源位置。關係式如下：

$$R_i = dt + \frac{\partial(t_i - t)}{\partial x} dx + \frac{\partial(t_i - t)}{\partial y} dy + \frac{\partial(t_i - t)}{\partial z} dz + e_i \quad (2-14)$$

設 $\frac{\partial(t_i - t)}{\partial x} = a_i$ ； $\frac{\partial(t_i - t)}{\partial y} = b_i$ ； $\frac{\partial(t_i - t)}{\partial z} = c_i$ ；將式 2-14 移項可得

$$e_i^2 = (R_i - a_i dx - b_i dy - c_i dz - dt)^2 \quad (2-15)$$

經過 n 個測站的反覆疊代，可再將式 2-15 改寫為：

$$\sum_{i=1}^n e^2 = f(\varepsilon) = \sum_{i=1}^n (R_i - a_i dx - b_i dy - c_i dz - dt)^2 \quad (2-16)$$

在 Geiger 計算流程中，設定假設震源位置及發震時間 (x^*, y^*, z^*, t^*) 後，透過將一測站觀測走時與理論走時之差值 (R_i) 極小化方式，會得到一誤差量 e_i ，經過多個測站資料反覆疊代運算，將誤差量收斂到最小，即可得到最佳震源位置 $\varepsilon(x, y, z, t)$ 。由於此傳統定位方法會用到觀測網中數個測站以上的觀測資料，因此主要應用在區域地震預警。

(2) 單站定位

而在現地預警模式中，Nakamura (1988) 提出如何利用單站 P 波地動訊號，藉由地震波的傳遞方向及距離估計地震位置，可縮短地震定位時間。其方法為利用地動紀錄中垂直及水平分量的交互相關 (cross-correlation) 函數，求取地震波入射方位角 θ ，其方程式結合即時的遞迴計算 (recursive)，公式如下：

$$(R_{ud,ew})_i = \alpha(R_{ud,ew})_{i-1} + (X_{ud})_i (X_{ew})_i \quad (2-17)$$

$$(R_{ud,ns})_i = \alpha(R_{ud,ns})_{i-1} + (X_{ud})_i (X_{ns})_i \quad (2-18)$$

其中 $(R_{ud,ew})_i$ 為第 i 點垂直與東西分量的交相關函數， $(R_{ud,ns})_i$ 為垂直項與南北分量的交相關函數， $(X_{ud})_i$ 、 $(X_{ew})_i$ 、 $(X_{ns})_i$ 則分別是垂直、東西、南北分量的振幅、 α 為平滑常數 (介於 0 到 1 之間)。由此兩式 (式 2-17、式 2-18) 求得交相關函數後，再代入下式，即可求得地震波入射方位角 θ ：

$$\theta_i = \tan^{-1} \frac{(R_{ud,ew})_i}{(R_{ud,ns})_i} \quad (2-19)$$

而震源距離可由地震波振幅 (A_p) 隨震源距離衰減關係式推算求得，衰減式中，震波振幅的對數與地震規模 (M) 呈正相關，震源距離對數呈反向關係，我們可藉由觀測到之地震波振幅以及計算規模推測其震源距離：

$$\log(R) = a \times M + b \times \log(A_p) + c \quad (2-20)$$

經由式 2-19 得到之方位角及式 2-20 得到之震源距，便可僅藉由單站訊號初步估算地震發生位置。

除 Nakamura (1988) 提出之方法之外，Odaka *et al.* (2003) 也提出新的單站定位方法。其將地震波到站後 3 秒內之垂直向 *P* 波紀錄取絕對值後展繪在半對數的座標軸上，並利用曲線函數 (式 2-20) 做擬合計算：

$$Acc(t) = Bt \cdot exp(-At) \quad (2-20)$$

其中 *t* 為 *P* 波到站後的時間，*Acc(t)* 則為加速度振幅值，*A* 與振幅隨時間的變化情形有關，*B* 為 *P* 波初始振幅的斜率，*A* 和 *B* 為擬合曲線的參數，可由最小平方方法求得。根據 Odaka *et al.* (2003) 分系日本 K-net 的資料發現，*B* 值的大小與測站的震央距有關，若 *B* 值越大，代表離震央越近，反之則代表離震央越遠，呈現負相關，若將 *B* 值依震央距展繪在雙對數的座標圖上，則可利用線性方程式來表示 *B* 值與震央距的關係 (圖 2-4)。

(3) 測站幾何分布定位

透過觸發測站的幾何分布，也可以快速初步判定地震的位置。由 Sambridge (1999) 年提出之 Voronoi cells 概念，其依據地震網測站分布的幾何型態及假設的地震波波速固定，將每個測站的周圍劃分一個多邊形的領域 (Voronoi cell)，當地震發生後，最先收到地震波的測站，地震一定是發生在該測站的領域內，至於邊界上發生的地震則兩邊的測站同時會收到震波，因此我們在第一個測站觸發以後，即可以大略推估地震的位置，而隨著測站設置的密度越密，領域的面積就會越小，對於地震位置的約束也就越強。圖 2-5 為以 Palert 預警系統之測站分布所匯出之 Voronoi cell 幾何形貌，圖上可觀察到，島內除了中央山脈外，因測站覆蓋率及密度較佳 Voronoi cell 會收斂成較小的範圍，震央估計相對較為準確，然而外海定位誤差較大。此方法只能求得震央的粗略位置，對於震源深度仍無法得知。

(4) 格點搜尋定位

格點搜尋定位是一種計算負擔較大的定位方式，不同於傳統地震定位使用逆推的方法，格點收尋定位是以直推的方式推估地震的位置(Kamigaichi, 2004)，一地震發生後，有相當數量的測站觸發時，依照前幾名觸發之測站分布可以粗略得知震源可能區域，並於此區域劃分數量有限的格點及定義格點大小(經緯度及深度間距)，接著計算每一個格點各測站 P 波理論到時與實際到時的差值，以有著最小 P 波到時差值的格點為震源位置，

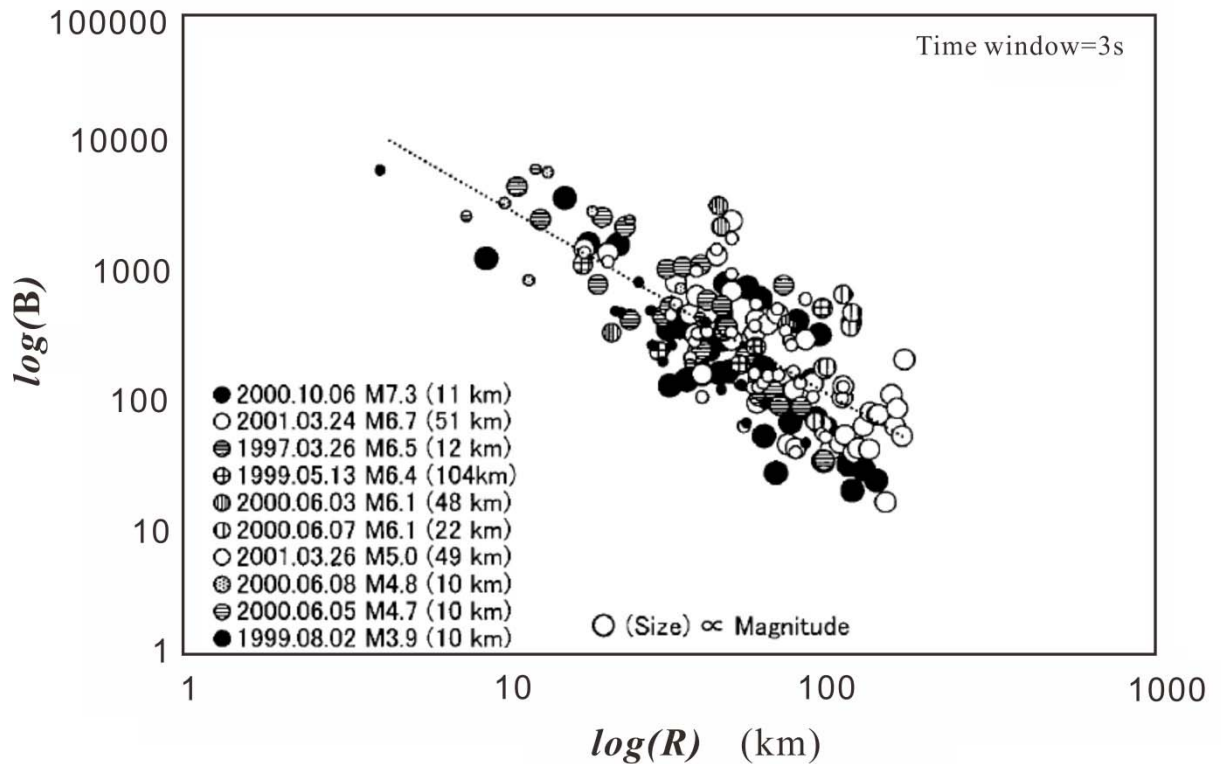


圖 2-4 B 值與震央距之關係 (Odaka et al., 2003)

Voronoi Diagram of *Palert* System

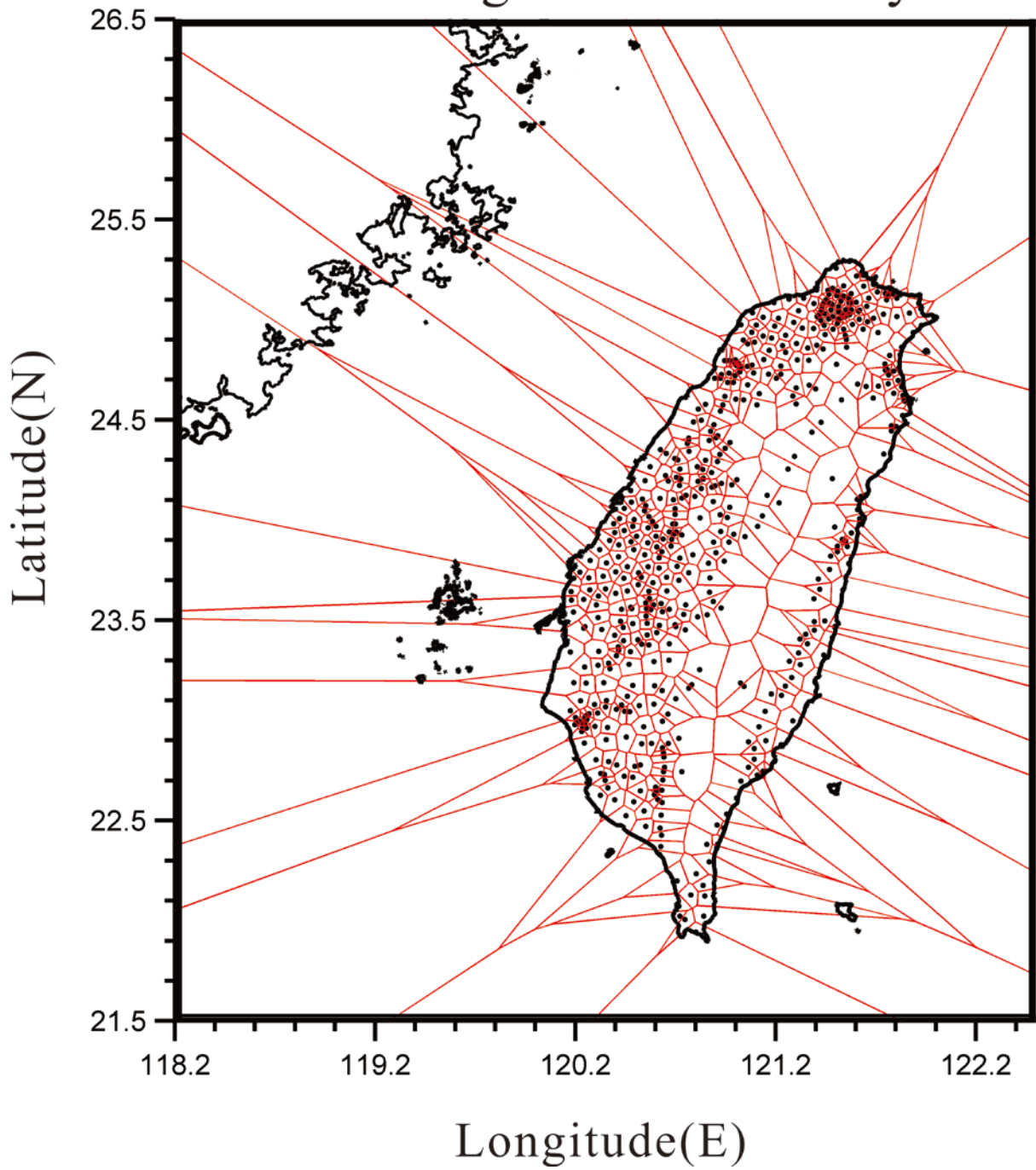


圖 2-5 *Palert* 預警系統之 Voronoi Diagram

第三章、研究方法

本研究基於地震預警基礎，在地震規模及地震定位皆提出新方法。規模預估方面，以 *Palert* 預警系統為架構，建立小區域預警陣列，以陣列式訊號處理增加規模預估精準度；而地震定位方面提出即時走時序列地震定位法，結合台灣地區三維速度構造模型及格點搜尋法進行快速及即時震源推估。

3.1 第一部分—小區域地震預警陣列

由於台灣國幅狹小，現地型地震預警模式較能符合需求，然而現地預警運行模式中僅利用單站之地震波訊號，加上 *Palert* 感測器訊噪比過大且有建築物效應，使 *Palert* 預警系統在現地預警上無法提供有效之規模預估。因此，本研究以 *Palert* 預警系統為架構，在台南市以及宜蘭市建立小區域預警陣列(表 3-1、圖 3-1)，選擇此兩地區的原因是其地質條件類似(台南平原及蘭陽平原區)，且宜蘭小區域預警陣列可針對大台北地區提供預警，而台南小區域預警陣列則可對台南及高雄都會區給予警報，可在台灣人口密集區建立現地預警機制，將預警效果發揮極致。一個陣列由五個測站構成，當地震事件發生，透過 SAC (Seismic Analysis Code ; Tapley, W. C., and J. E. Tull, 1992) 進行陣列式波形處理(陣列式波形處理流程如圖 3-2，SAC 指令如附錄六)可望降低上述缺失所造成之影響，下面將對每步驟做詳細介紹。

3.1.1 地震事件選取

本研究選取 2013 年且規模大於 4.5、震源深度小於 80km、震源距小於 150 km 的 15 個地震事件(如表 3-2、圖 3-3)。

3.1.2 P 波到時判定 (*P*-phase Picking)

判斷 *P* 波到時之前首先進行初步的波形品質人工檢驗 (Preliminary Quality Control)，品質較差的地震事件將不以採用，接著做波形基本處理，如 0.075 Hz~2 Hz 之寬帶濾波 (Band-pass filter)、移除趨勢 (Remove the trend) 和移除平均 (Remove the mean)。

P 波到時判定法使用自 Allen (1978) 所提出之自動判定方法，再以人工檢查判定結果並修正。*P* 波到時判斷無誤後將波形剪切成 *P* 波三秒形式 (各地震事件中各測站之 *P* 波到時如附錄三)，接著做下面之波形處理。

3.1.3 波形交互相關 (Cross-correlation)

將陣列五測站所接收到之波形進行交互相關比對 (式 3-4)，可校準每個波形之 *P* 波到時，去除因測站地理分布及地質條件不同所造成的延遲時間 (time-lag)，如圖 3-4。去除延遲時間後使五個波形之起始時間一致，確保隨後的波形疊加工作不會抵銷掉了原本的地震波訊號 (各地震事件中各測站之 time-lag 如附錄三)。

$$c(t) = f(t) \otimes g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau)g(t+\tau)d\tau \quad (3-4)$$

3.1.4 波形疊加法

使用陣列五測站的波形中各資料點 (sample rate 每秒 100 點) 的算術平均數進行波形疊加，波形疊加後會減弱因測站所處之地質條件以及傳遞路徑不同而造成的隨機噪聲訊號，因此提高波形之訊噪比 (圖 3-5)。各地震事件之陣列五測站波形及其疊加波形如圖 3-5 所示，詳細波形紀錄如附錄二，陣列參數如附錄三。

3.1.5 規模預估

收集過去發生的 15 件地震事件，經陣列式波形處理後，以疊加波形進行 Pd 法之地震規模預估，然而小區域地震預警陣列設置完成不到兩年的時間，堪用之歷史地震事件數量不足，以至於無法做精確之統計分析，因此，本研究採用三篇前人研究所提出之 Pd 衰減經驗公式（式 3-1（Wu *et al.*, 2007）；式 3-2（Hsiao *et al.*, 2011）；式 3-3（Chen, 2015））進行規模預估。

$$M_{Pd} = 4.478 + 1.370 \times \log(Pd) + 1.883 \times \log(R) \pm 0.18 \quad (3-1)$$

$$M_{Pd} = 3.905 + 2.198 \times \log(Pd) + 2.703 \times \log(R) \pm 0.43 \quad (3-2)$$

$$M_{Pd} = 5.000 + 1.102 \times \log(Pd) + 1.737 \times \log(R) \quad (3-3)$$

表 3-1、台南及宜蘭小區域地震預警陣列

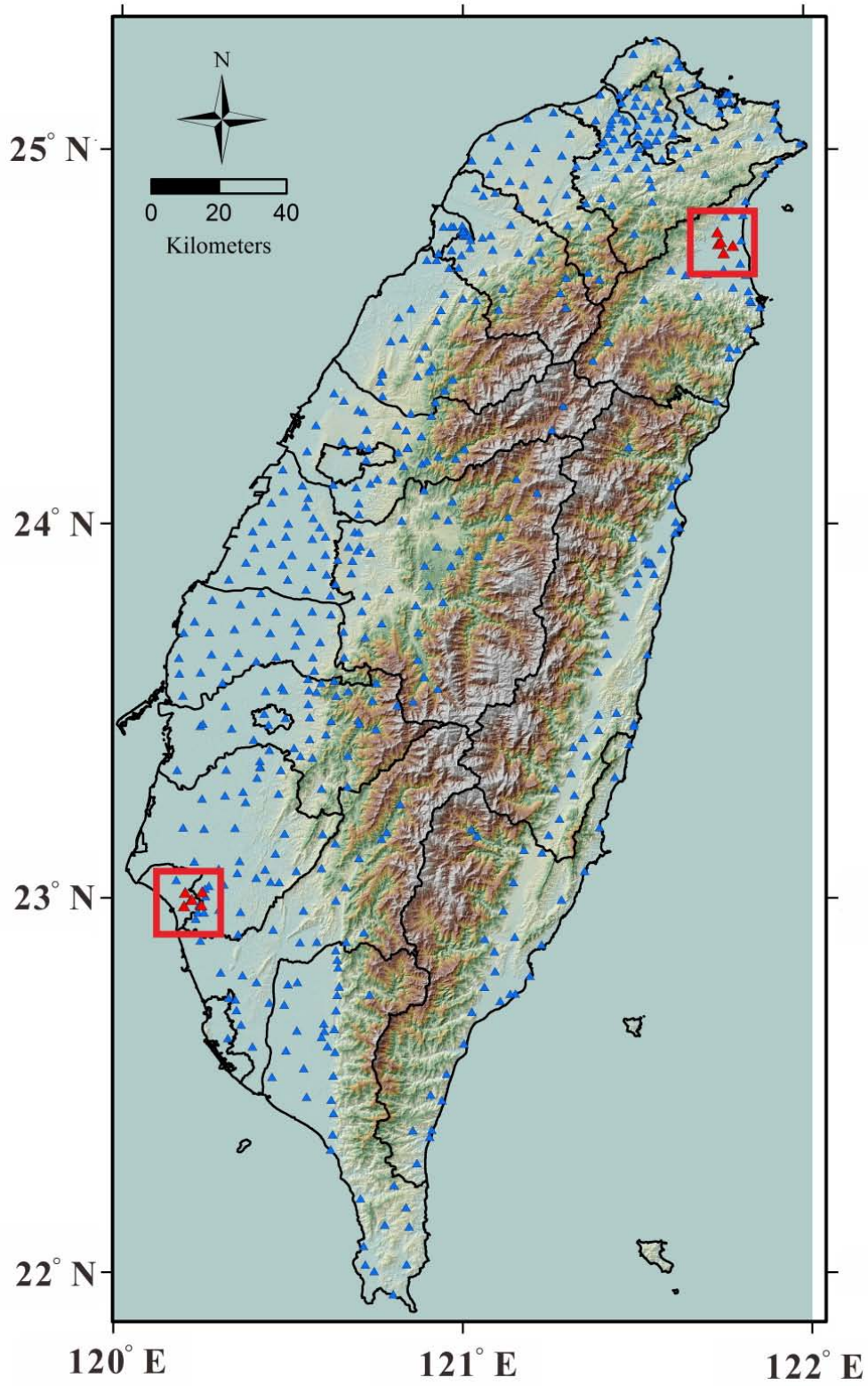
台南市小區域地震預警陣列					
測站編號	測站名	位置			
		經度(°E)	緯度(°N)	高程(m)	樓層
L001	裕文國小	120.359	23.125	31.0	1F
L002	永信國小	120.384	23.021	41.0	1F
L003	文元國小	120.349	23.158	39.0	1F
L004	新興國小	120.313	23.01	31.0	1F
L005	成功大學	120.218	23.996	31.0	1F
宜蘭市小區域地震預警陣列					
W042	復興國中	121.747	24.749	24.0	1F
W046	龍潭國小	121.744	24.780	13.0	1F
W049	凱旋國小	121.763	24.724	15.0	1F
W04C	壯圍國小	121.790	24.743	13.0	1F
W04D	中山國小	121.754	24.754	19.0	1F

表 3-2、用於波形疊加之地震事件列表

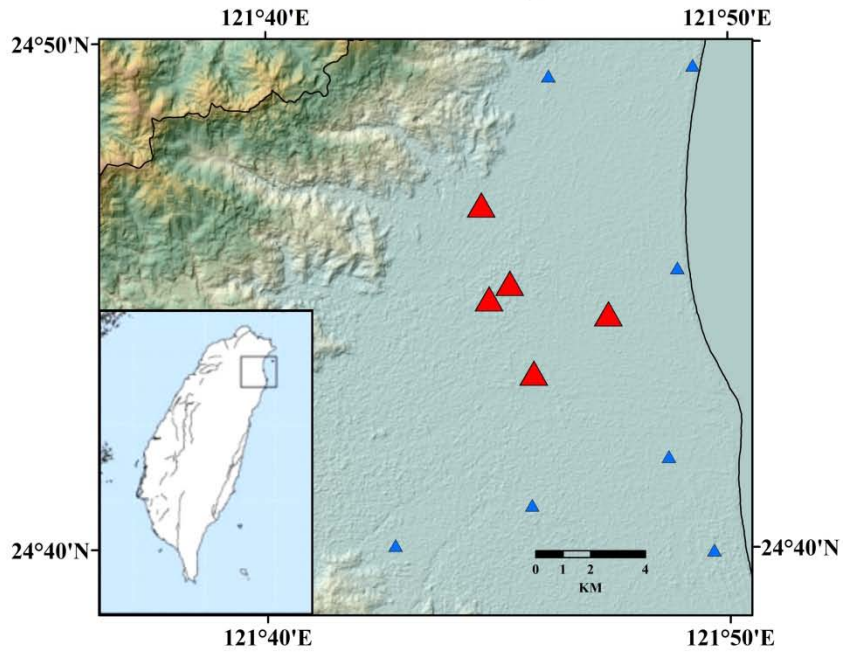
Origin time	Lat. (N)	Lon. (E)	Depth (km)	Hypocentral Dis. (km)	M_L
2013/02/02 03:38	23.75	121.98	35.0	118.7	5.6
2013/02/21 18:34	24.31	121.44	6.4	59.0	4.8
2013/03/06 22:36	24.61	122.10	69.8	79.4	4.7
2013/03/07 03:35	24.30	121.46	5.6	58.8	5.9
2013/03/07 08:06	24.34	121.45	6.0	55.7	4.6
2013/03/20 07:21	24.45	121.95	12.1	40.4	4.6
2013/03/27 02:02	23.90	121.05	19.4	120.6	6.1
2013/04/21 03:06	24.41	122.34	70.6	99.1	5.0
2013/05/21 04:24	24.28	121.77	14.5	55.0	4.9
2013/06/02 05:42	23.86	120.97	14.5	128.1 (124.1)	6.5
2013/06/07 16:37	23.98	122.65	35.3	100.0	6.2
2013/06/28 23:50	24.03	122.24	19.8	61.8	5.7
2013/07/16 10:10	24.28	121.50	4.9	35.9	5.5
2013/09/18 03:32	24.64	122.09	15.1	39.7	4.5
2013/10/31 12:00	23.57	121.35	15.0	138.5 (132.4)	6.4

*掛號內為台南小區域地震預警陣列之震源距離

(a) *Palert* distribution



(b) Ilan Array



(c) Tainan Array

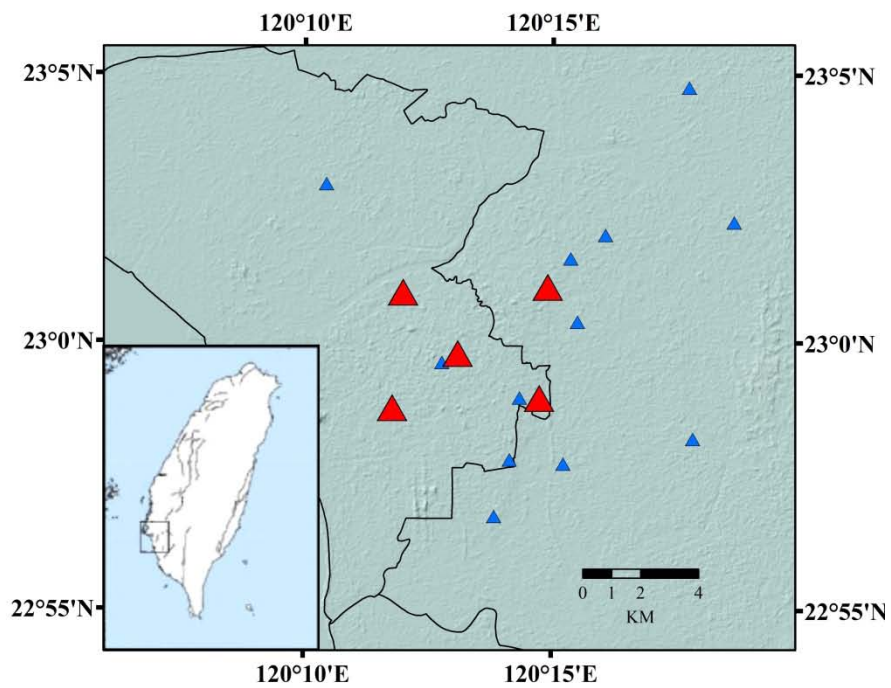


圖 3-1 小區域預警陣列分布

(a) Palert 測站分布 (b) 宜蘭小區域預警陣列 (c) 台南小區域預警陣列

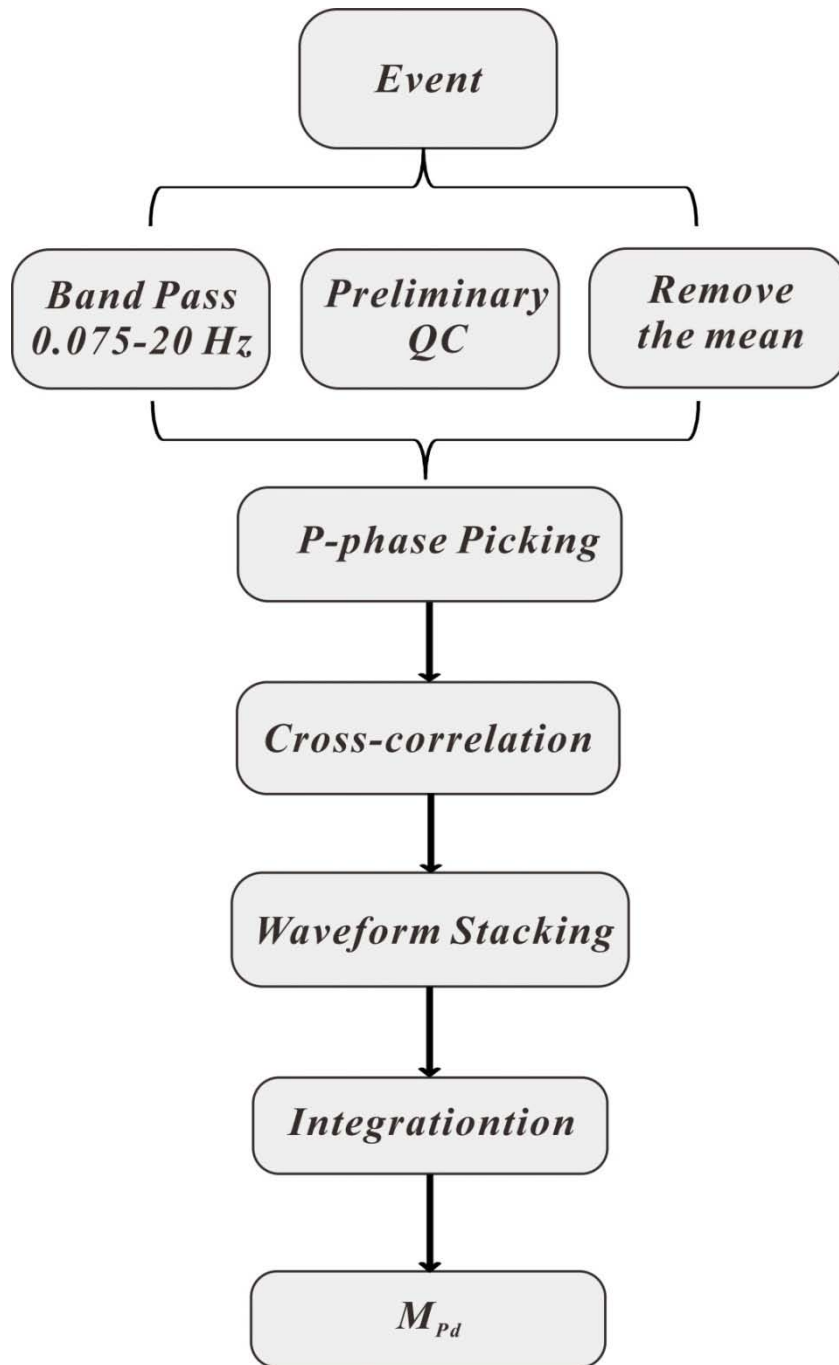


圖 3-2 陣列式波形訊號處理流程

2013 Events for EEW arrays

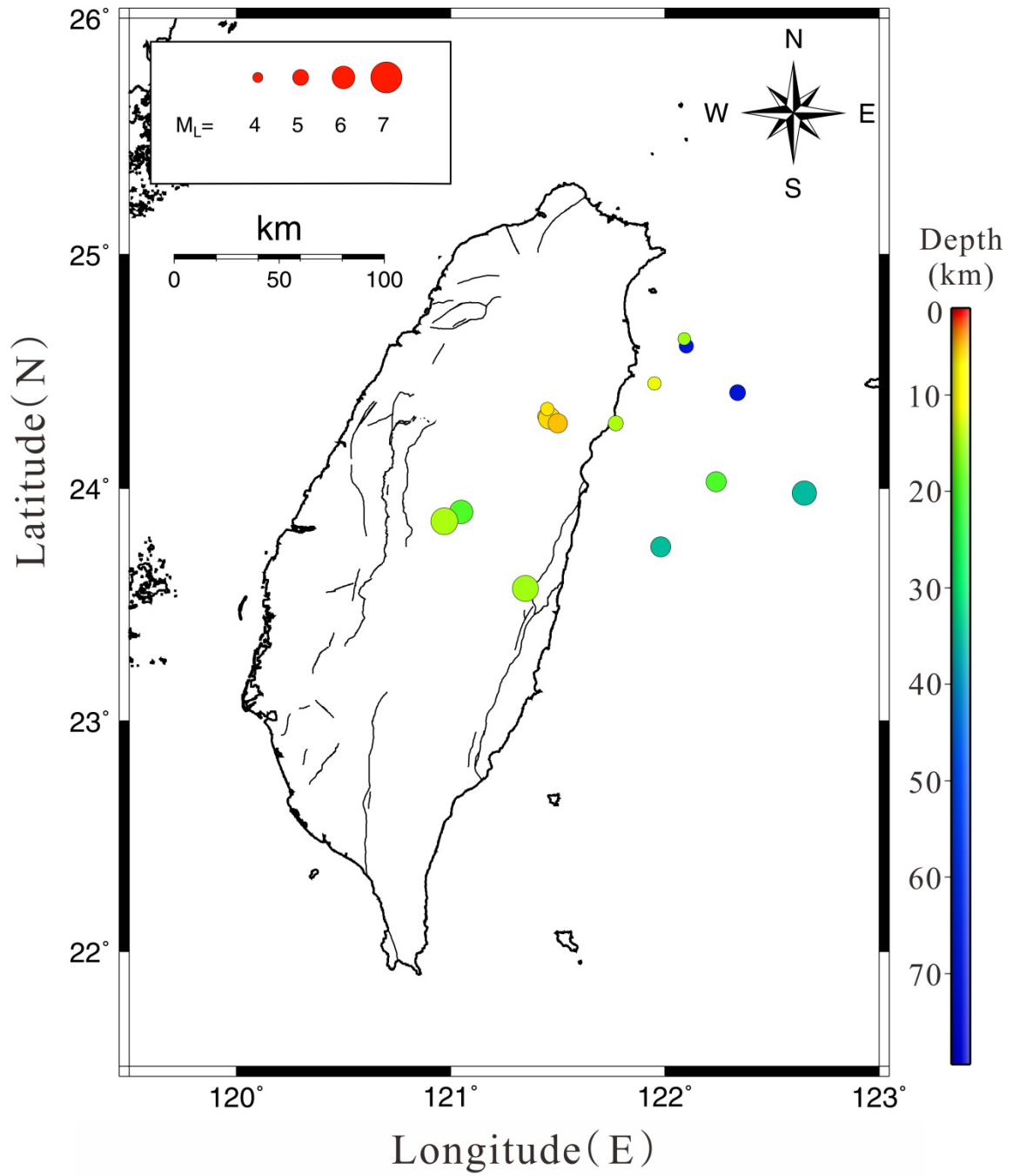


圖 3-3 用於波形疊加之地震事件分布

Cross-Correlation

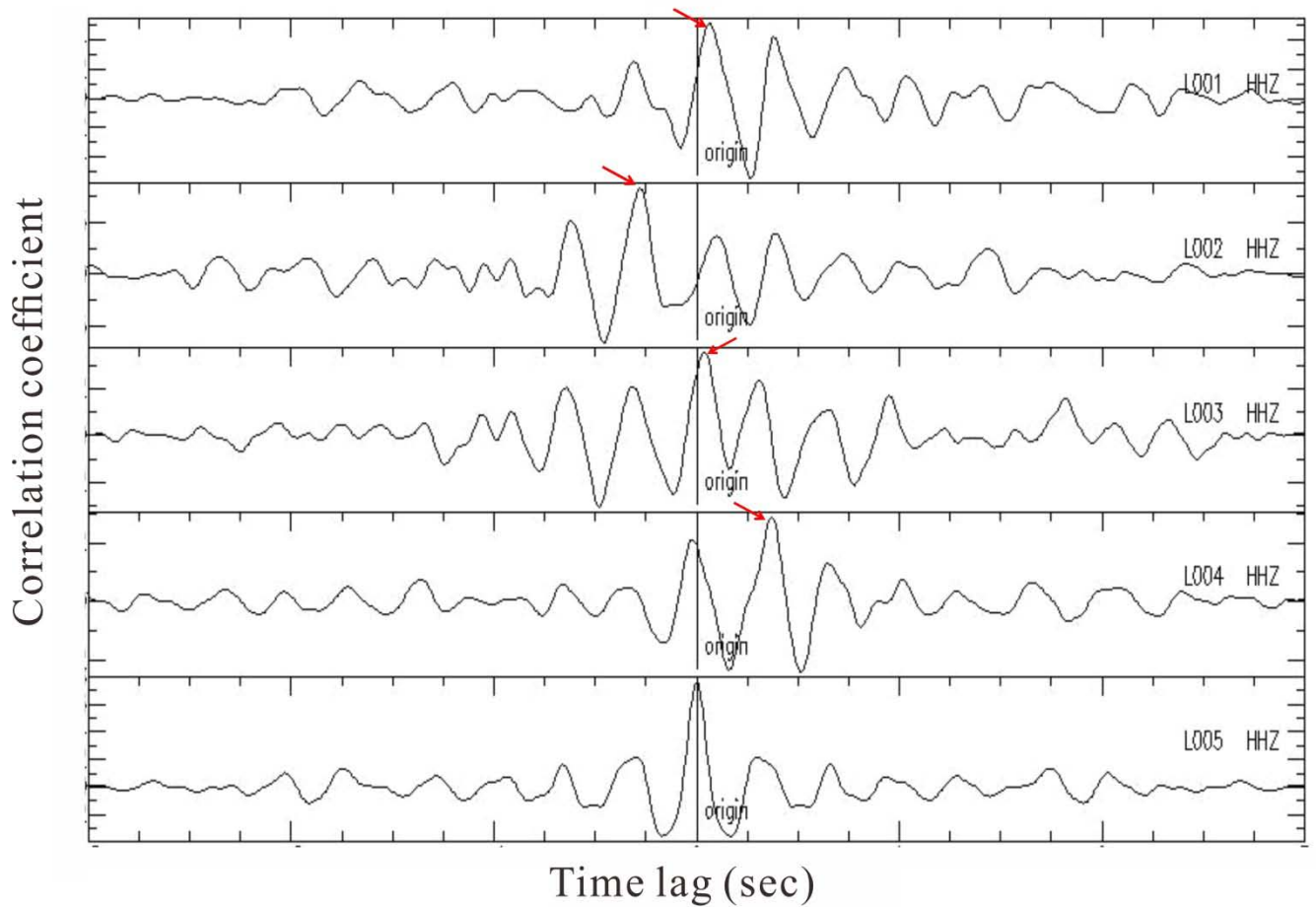
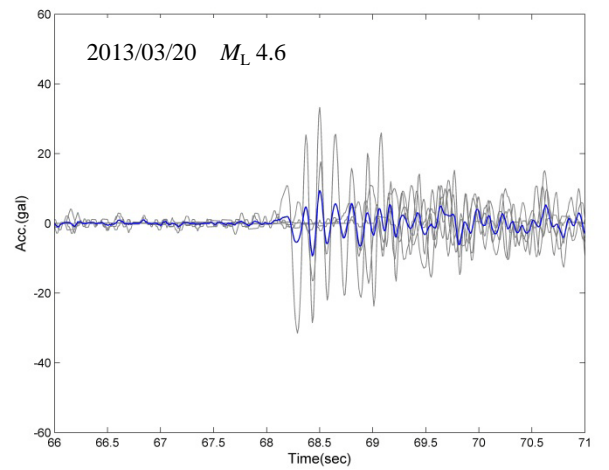
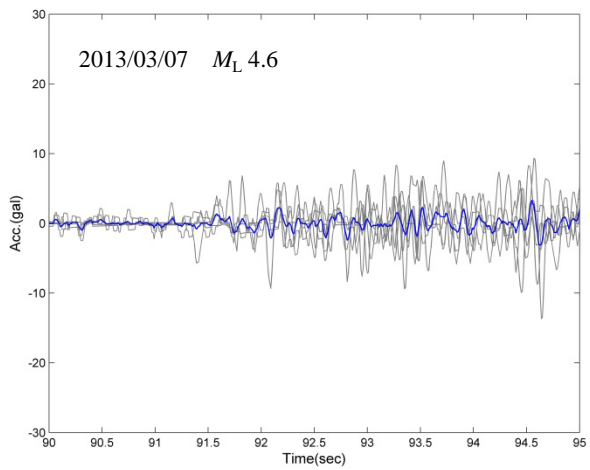
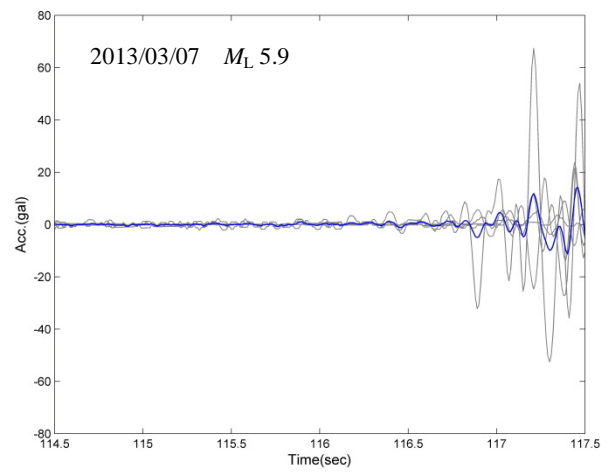
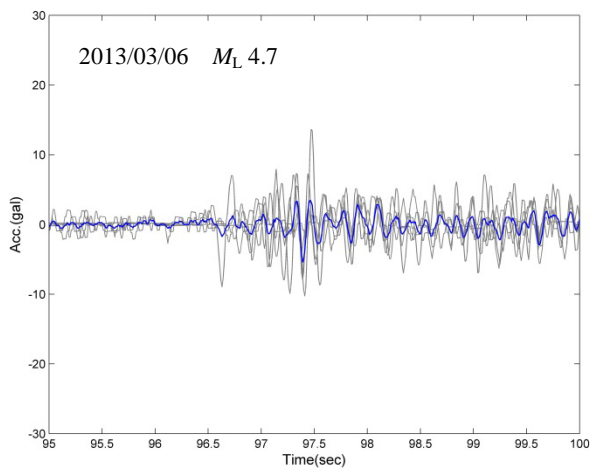
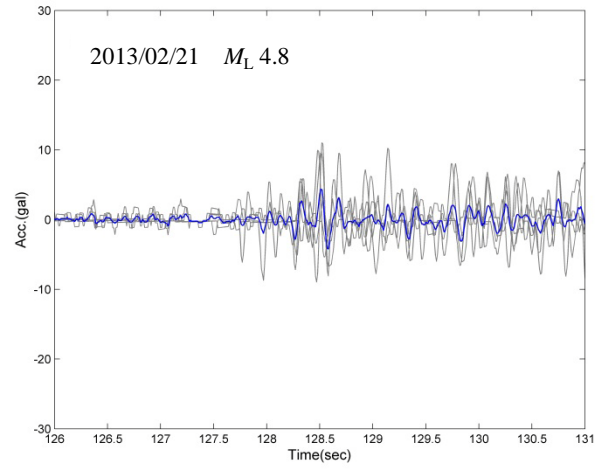
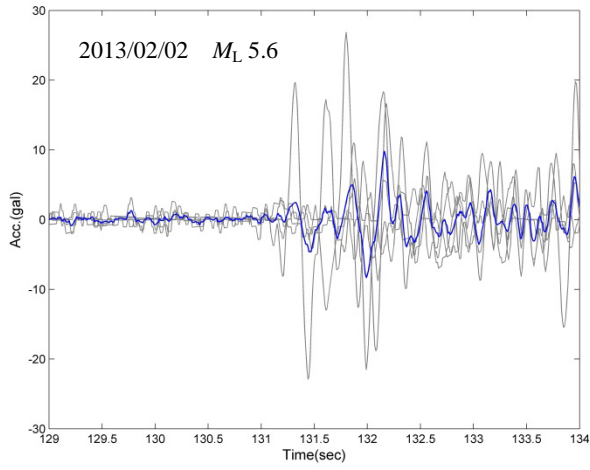
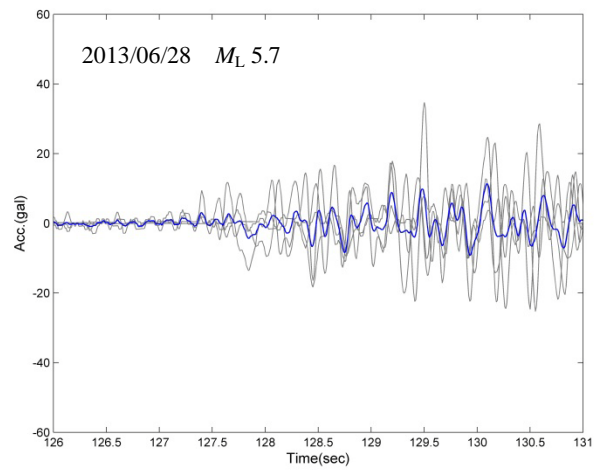
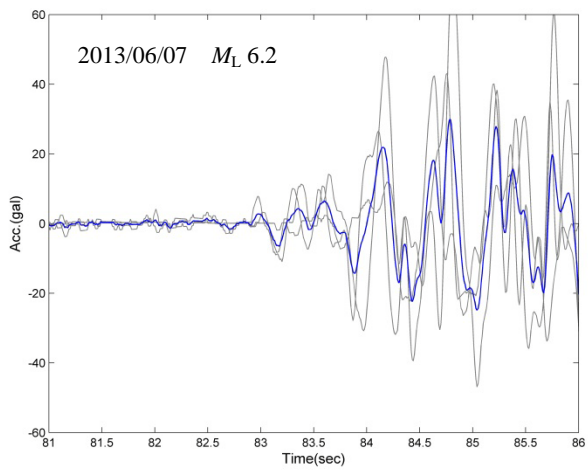
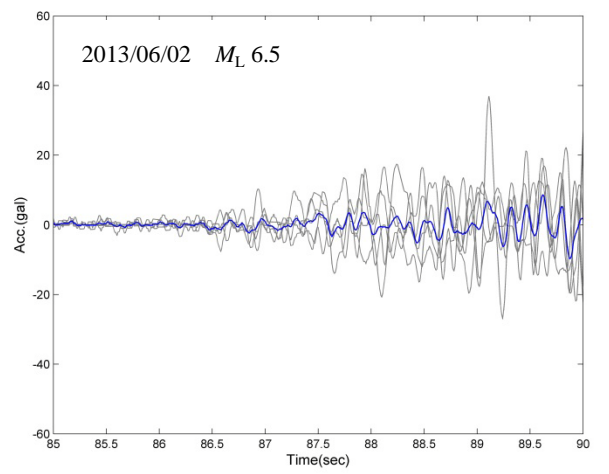
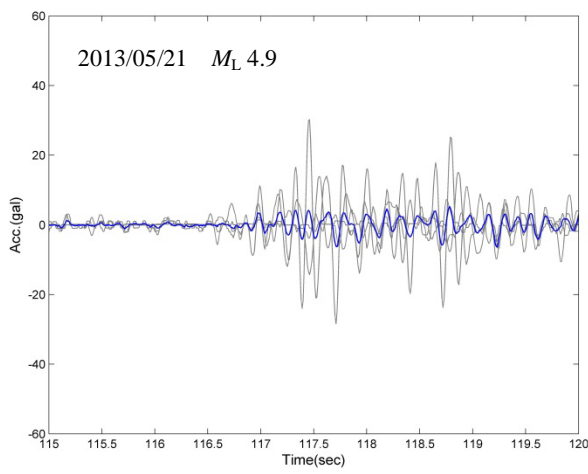
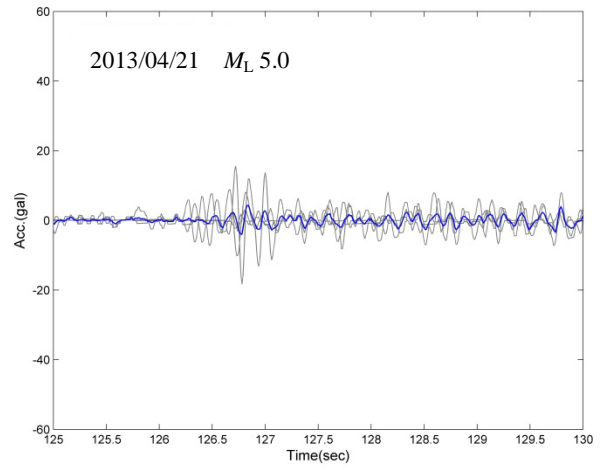
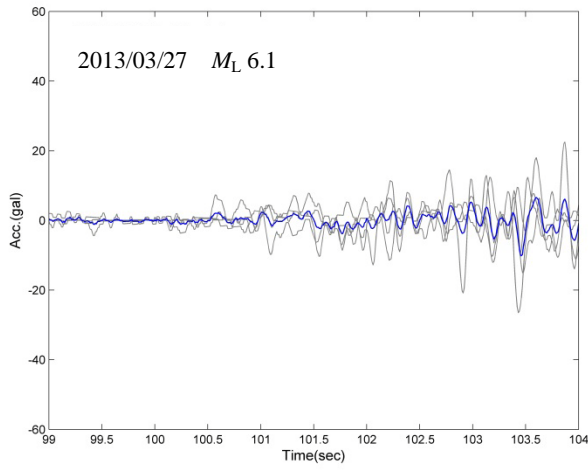


圖 3-4 波行交互相關示意圖

透過波型形交互相關比對後可找出兩測站波形相關係數最高之時間點（如紅色箭頭指示處），此圖以 L005 測站波形紀錄為基準波形，其餘四測站與其做波形相關比對），修正延遲時間，隨後將五個波形予以疊加





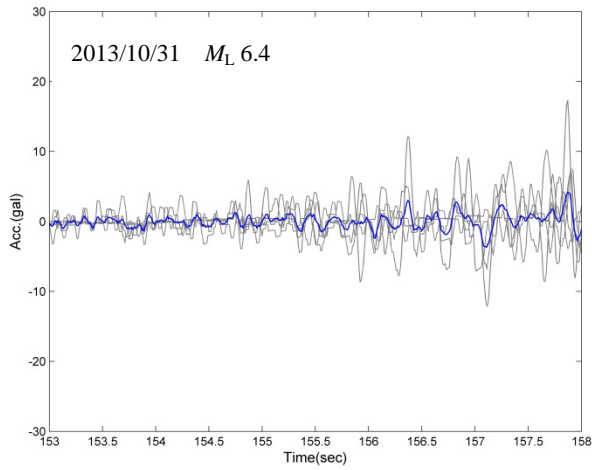
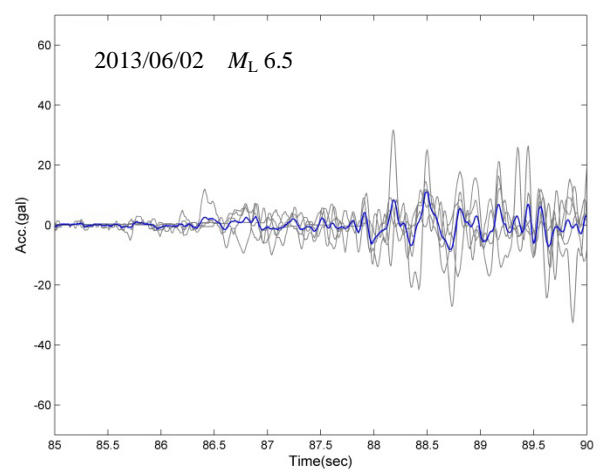
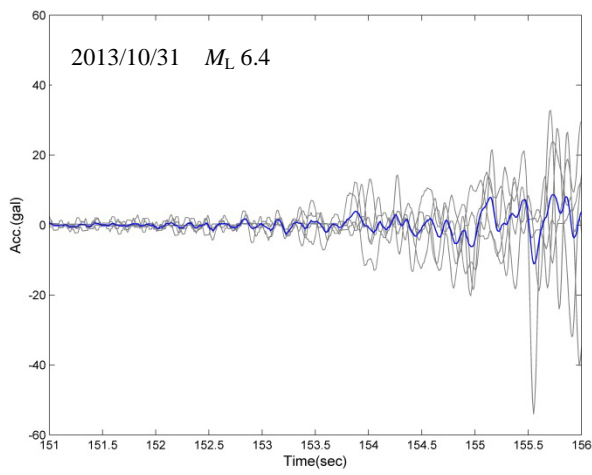
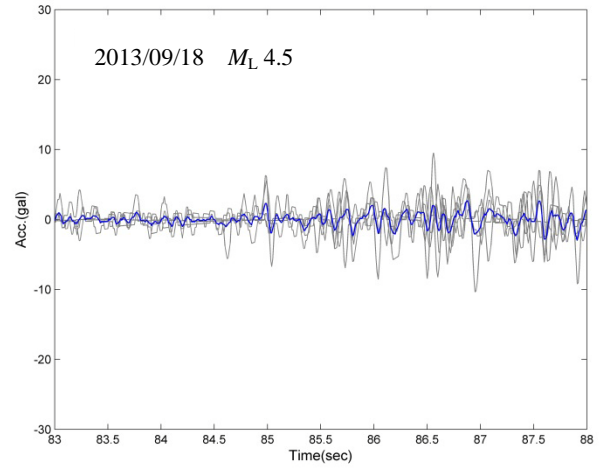
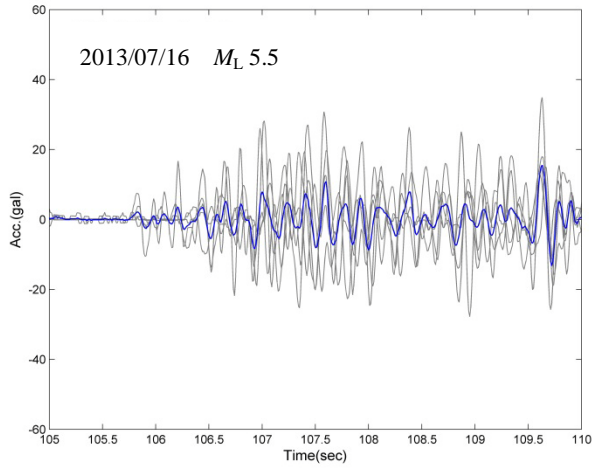


圖 3-5 各事件之初達波疊加
 波形（藍線）及陣列五測站之初達
 波波形（灰線）
 由各圖皆可觀察出經波形疊加步
 驟後，大大提升了波形品質。

3.2 第二部分—即時走時序列地震定位法

基於地震預警基礎，本研究在快速且即時的地震定位有良好的成果，而在地震發生後快速決定震源位置將可以在地震減災上提供大大的幫助。在目前地震預警研究中，在定位方面所使用之方法為參考自 Hypo71 程式 (Lee and Lahr, 1972)，其中，僅利用一維之臺灣地區速度模型計算地震波走時，逆推求最佳震源位置 (Geiger, 1912)，計算複雜。為了提升地震預警之定位效益，以降低計算複雜度及改善定位精準度為目的，本研究以中央氣象局地震速報系統觀測網 (RTD) (圖 3-6) 為架構，提出一個名為測站即時走時序列地震定位法，模擬過去發生過之 48 起地震事件，有著良好的定位表現。

本研究將臺灣地區經度範圍：119~123° E；緯度範圍：21~26° N；深度範圍：0-45 km，切成尺寸大小為 2x2x1 km 之三維網格點，每一層有 50541 個格點，45 層，則一共有 2274345 個網格點。每個網格點皆為假設震源，結合臺灣地區三維速度模型及波線追跡法 (Ray tracing) 計算每個假設震源之 RTD 測站走時排序 (109 名) 並存成資料庫，將最複雜的走時計算事先存成測站走時排序資料庫，當地震發生時，將真實之測站排序比對資料庫 (格點搜尋)，僅利用搜尋比對的方式估算震源，找到測站排序差最小的格點即定義為計算震源。

3.2.1 台灣即時強地動地震速報觀測網 (RTD) 簡介

台灣長年來地震頻繁，基於防災考量，中央氣象局於民國 83 年建置一即時地震觀測網，測站分布除了台灣本島外，也包含金門、澎湖、蘭嶼、彭佳嶼等離島地區，共 109 個強震測站 (圖 3-6)，使地震監測網更完善。

其強震儀不同於一般觸發型強震儀，可即時且連續地傳輸數位地震資料，透過中華電信公司數據專線，將地動訊號全天候傳回至中央氣象局資料處理中

心。資料處理中心有兩套作業流程，其一，其作業系統完全採自動化處理，當地動訊號達觸發標準，即進行自動地震定位及地震規模估算，並產生初步地震報告；而另一套作業流程採連續記錄方式，將地動訊號以每分鐘為單位存成連續紀錄，除了將地震資料建檔外，也可提供人工定位及規模估算，確認地震報告之用。產生之地震報告會透過網路、行動電話簡訊、電子郵件、電話語音 166/167 和電子報將訊息傳遞給相關防救災單位、交通運輸單位、政府相關機構以及學術單位，而一般民眾可藉由氣象局網站及新聞媒體快速取得地震資訊。

3.2.2 測站走時資料庫建立

單一震源到單一測站之走時計算需要用到速度構造模型以及波線追跡法。本研究所使用的速度構造模型為黃信樺（2014）所提出之最新臺灣地區三維速度構造模型；而在傳統地震學上常以波線（Ray）觀點看待波（Wave）來計算一點震源之地震波走時。從波的觀點，任一波相的走時由其波前（Wave front）到達的時間決定；而從波線之觀點，則以震源到測站間虛擬的曲線表示震波所行走的路徑，其路徑為連結各瞬間波前法線方向之軌跡。然而由震源到測站，波所走的路徑有無限多種可能，根據費馬定理（Fermat's principle），波是走兩點之間費時最短的路徑。更精確地說，所有路徑中費時最短的路徑大致決定了測站所接收到的物理量，故不需計算所有的路徑，做法上直接以費馬定理求得的路徑來近似，而此路徑與速度構造有關。由於由波線的觀點可快速且方便計算兩點間之地震波走時，地震學上的走時理論多立足以此基礎之上。

本研究所使用之波線追跡法是參考至Koketsu and Sekine（1997）年提出之虛擬曲折波線追跡法（Pseudo-bending method），為邊界條件波線追跡法（Boundary value ray tracing）的一種。此方法的邏輯如圖 3-7，是先假設兩點

之間可能的路徑 L_0 (通常選取直線)，再利用已知的速度構造求取區域 (local) 的速度梯度，以得到修正後的新路徑 L_1 。若波走 L_1 的費時小於 L_0 (即 $T(L_1) < T(L_0)$)，再繼續用相同的方法將 L_1 修正成 L_2 ，直到 $T(L_n) - T(n-1)$ 收斂到某範圍 (P)，則 L_n 是最後我們欲求的路徑；若其中一步驟 $T(L_n) - T(n-1) > 0$ ，則增加 L_{m-1} 波徑上修正的點，重複修正的步驟 (圖 3-7)。此方法之所以可行，是因為速度梯度指向速度變化最多的方向，故波徑上的點朝速度梯度方向修正，會使走時縮短，進而找到符合費馬定理走時最短的路徑。

計算過程表示如圖 3-8，假設 q_{k-1} 、 q_k 、 q_{k+1} 是波徑上相鄰的三個點，我們的目的是將 q_k 的位置修正到垂直於 q_{mid} (q_{k-1} 、 q_{k+1} 的中間點) 之速度梯度的方向，在圖 3-8 中以 \hat{m} (單位向量) 表示，該方向與當點波線曲率的單位向量 \hat{n} 方向相反，即 $\hat{m} = -\hat{n}$ 。以球座標為例，速度梯度可寫成：

$$\nabla v = \left(\frac{\partial q}{\partial r}, \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta}, \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial v}{\partial \phi} \right) \quad (3-4)$$

在波徑上任一點單位切向量 (tangential unit vector) 為：

$$\hat{t} = \frac{dq}{dl} = \left(\frac{dr}{dl}, \frac{rd\theta}{dl}, \frac{r \sin \theta d\phi}{dl} \right) \quad (3-5)$$

其中 $dl=2L$ ， $dr=r_{r+1}-r_{r-1}$ ， $d\theta=\theta_{k+1}-\theta_{k-1}$ ， $d\phi=\phi_{k+1}-\phi_{k-1}$ 。

固垂直波徑單位向量 (anti-normal vector)，即波徑修正的方向，可由式 3-4 和式 3-5 求得：

$$\begin{aligned} \hat{m} &= \frac{\nabla v_{mid} - (\nabla v_{mid} \cdot \hat{t})\hat{t}}{|\nabla v_{mid} - (\nabla v_{mid} \cdot \hat{t})\hat{t}|} \\ &= (dr', r_{mid} d\theta', r_{mid} \sin \theta_{mid} d\phi') \end{aligned} \quad (3-6)$$

至於新的波徑位置所修正的距離 (R) 是根據費馬定理，最小化 q_{k-1} 至 q_{k+1} 間的走時 $T(R)$ 所決定：

$$T(R) = \frac{(L^2 + R^2)^{\frac{1}{2}} \left[\left(\frac{1}{v_{k-1}} + \frac{1}{v_{new}} \right) + \left(\frac{1}{v_{k+1}} + \frac{1}{v_{new}} \right) \right]}{2}, \quad (3-7)$$

其中 $v_{new} = v_{mid} + (\hat{m} \cdot \nabla v_{mid})R$ 。其解為

$$\hat{m} = \frac{-cv_{mid+1}}{4c\hat{m} \cdot \nabla v_{mid}} + \left[\frac{-cv_{mid+1}^2}{4c\hat{m} \cdot \nabla v_{mid}} + \frac{L^2}{2cv_{mid}} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (3-8)$$

其中 $c = \left(\frac{1}{v_{k-1}} + \frac{1}{v_{k+1}} \right) / 2$ 。

因此修正位置的三個分量為：

$$q_k^{new} = \begin{pmatrix} r \\ \theta \\ \varphi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{mid} \\ \theta_{mid} \\ \varphi_{mid} \end{pmatrix} + R \begin{pmatrix} dr' \\ d\theta' \\ d\varphi' \end{pmatrix}. \quad (3-9)$$

最後引入 F 值 (enhancing factor)，將式 3-9 改寫成

$$q_k^{new} = \begin{pmatrix} r \\ \theta \\ \varphi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{mid} \\ \theta_{mid} \\ \varphi_{mid} \end{pmatrix} + FR \begin{pmatrix} dr' \\ d\theta' \\ d\varphi' \end{pmatrix}, \quad (3-10)$$

以減少疊代的次數，快速求得修正後的路徑。

單一震源到單一測站之地震波走時得以計算後，接著需計算每個網格點 (2274345 點) 至 RTD 測站 (109 站) 之走時並排序形成測站走時排序資料庫，詳細程式碼如附錄七。圖 3-9 為資料庫中其中一個網格點之儲存的資料格式範例。

3.2.3 格點搜尋法

當一真實地震事件發生會有一組真實的 RTD 測站排序，我們將此測站排序以最簡單的的加減法概念比對資料庫中之測站排序，排序誤差最小的網格點，即為計算震源，每個網格點之排序誤差計算公式如下：

$$P_j = \sum_{i=1}^n |D_{ij} - R_i| \quad (3-11)$$

其中 i 為測站編號 (每個測站有一對應的編號，1 號~109 號)； j 為網格點數 (共 2274345 點)； R_i 為真實排序中 i 測站之到時排名； D_{ij} 為資料庫 j 點中 i 測站之到

時排名；因此由此公式計算出之 P_j 為資料庫中網格點 j 之排序誤差，以圖 3-10 為例，真實排序中第 1 名為D測站，在第一個網格點中D為第 4 名，因此其誤差為 3（相減）；真實排序中第 2 名為A測站，而在第一個網格點中A為第 1 名，誤差為 1，以此類推，進而計算出每個網格點的誤差值，找到排序誤差最小的網格點，即為計算震源，若找出多點，則取其幾何平均為計算震源。詳細程式碼如附錄八。



Station distribution

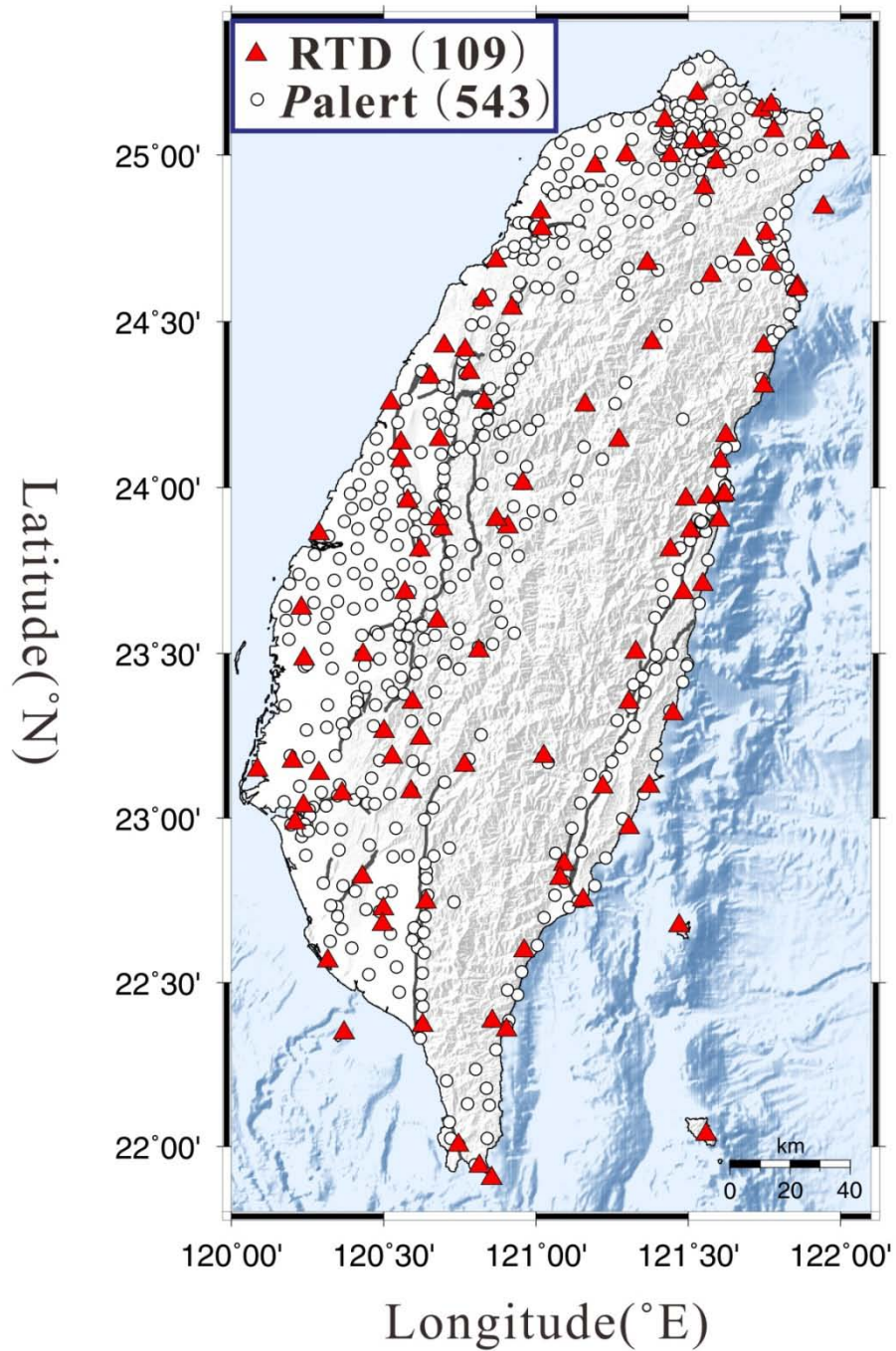


圖 3-6 中央氣象局地震速報系統 (RTD) 測站分布

(圖中紅色三角形，共 109 站)，圖中空白圓圈為 *Palert* 地震預警系統測站 (共 543 站)。

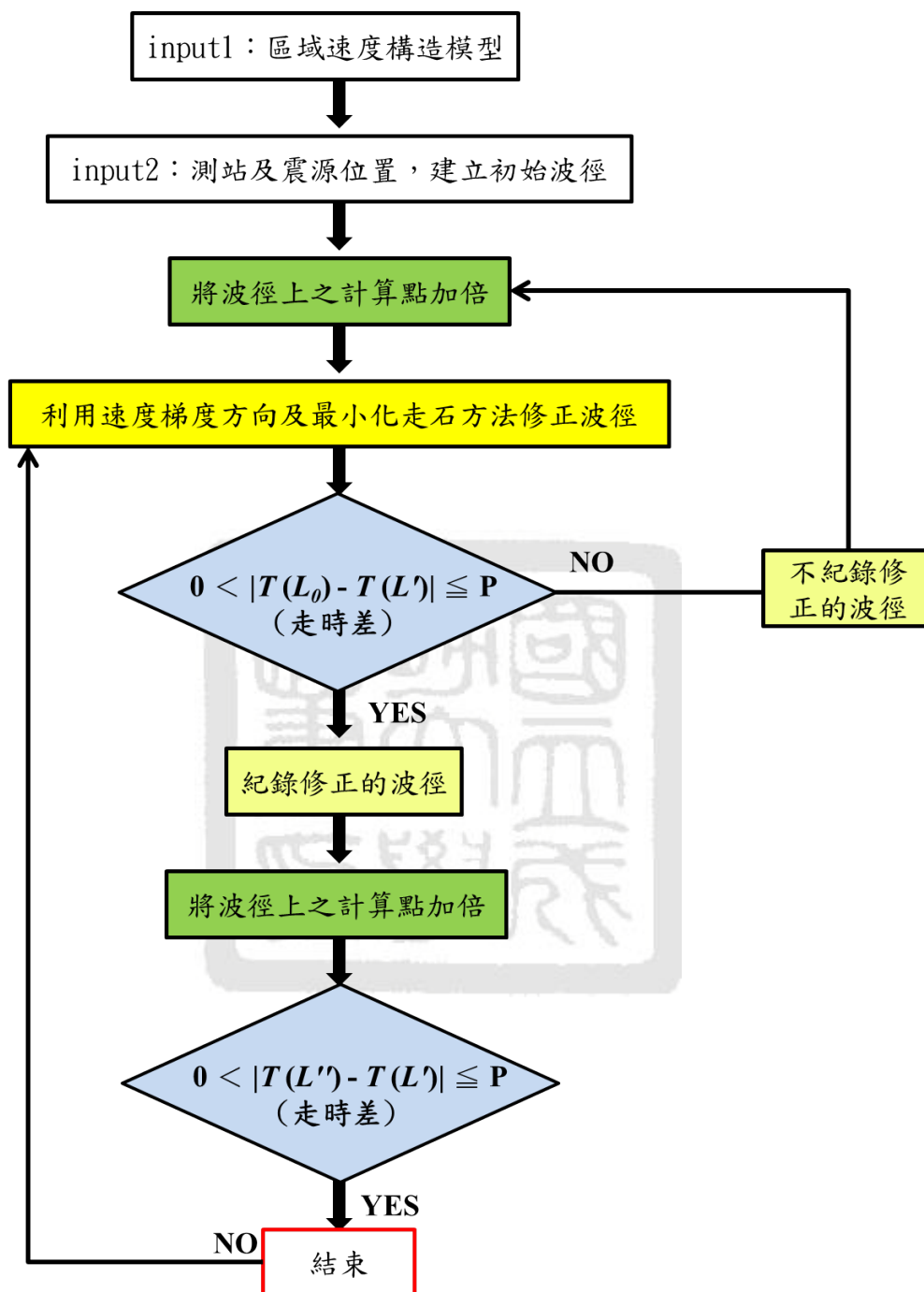


圖 3-7 虛擬曲折波線追跡法 (Pseudo-bending method) 運算邏輯

(修改自 Um and Thurber, 1987)

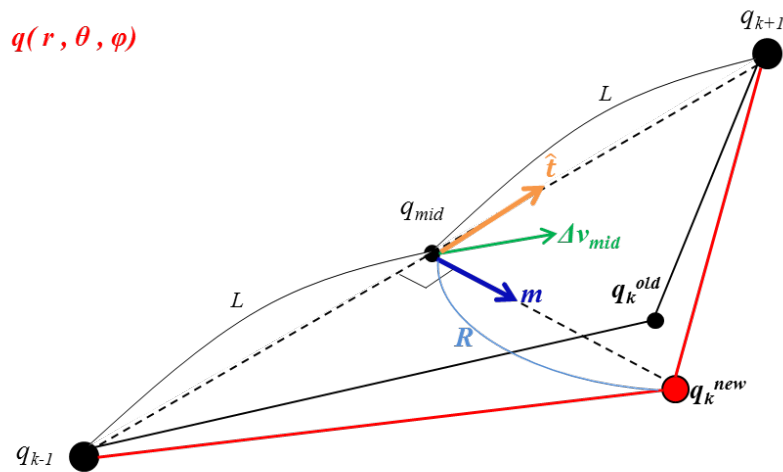


圖 3-8 虛擬曲折波線追跡法波徑修正示意圖 (Koketsu and Sekine, 1997)

Source location: 119.00 21.00 15.0000				
Order	Lon.	Lat.	elv(m)	tt
1	120.74	22.01	20.0000	33.148426
2	120.31	22.57	20.0000	34.188713
3	120.90	22.36	8.0000	37.626863
4	120.20	23.00	14.0000	38.379166
5	121.55	22.04	324.0000	42.868443
6	119.56	23.57	11.0000	43.036629
7	121.15	22.75	9.0000	43.659008
8	120.43	23.50	20.0000	45.969227
9	121.36	23.10	34.0000	48.973957
10	120.81	23.51	2413.0001	49.016243

圖 3-9 資料庫格式範例圖

紅框內表示網格點位置（經度、緯度、深度）；綠框內表示測站排名；藍框內表示測站資訊（經度、緯度、高程）；灰框內表示 P 波走時。

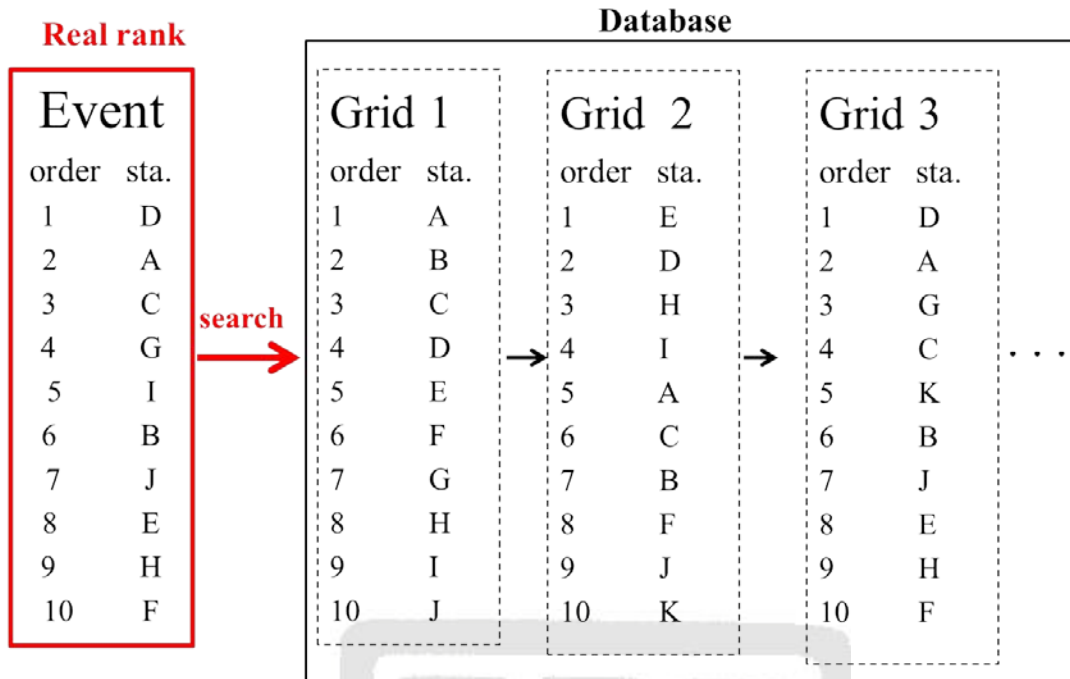


圖 3-10 格點搜尋法示意圖

紅框假設為真實地震事件之測站排序；黑框為事先計算好之測站走時排序資料庫，搜尋過程僅以測站排名差值定義誤差大小，計算簡單且快速。

第四章、研究成果

4.1 第一部分—小區域地震預警陣列

4.1.1 規模預估結果

由於新型的地震預警陣列安置完整至今不到兩年的時間，良好波形紀錄的不足會使統計回歸公式失去可信度，因此本計劃參考三篇前人研究分別在台灣以不同觀測網，所提出來適用於台灣的Pd衰減公式（Wu *et al.*, 2007（式 3-1）；Hsiao *et al.*, 2010（式 3-2）；Chen, 2014（式 3-3））。圖 4-1 為利用經過陣列式波形處理後之疊加波形Pd值並套用上述三個Pd衰減公式所計算出來的規模值 (M_{Pd})與中央氣象局地震目錄做比較，然而三個公式所計算出之規模值都有明顯高估的現象，造成此誤差的原因為的建築物效應，由於Palert安裝於建築物的牆壁上而非地表自由面，因此建築物會有放大效應，使預估出來的規模值會有明顯偏大的現象，因此建築物的效應必須去除。

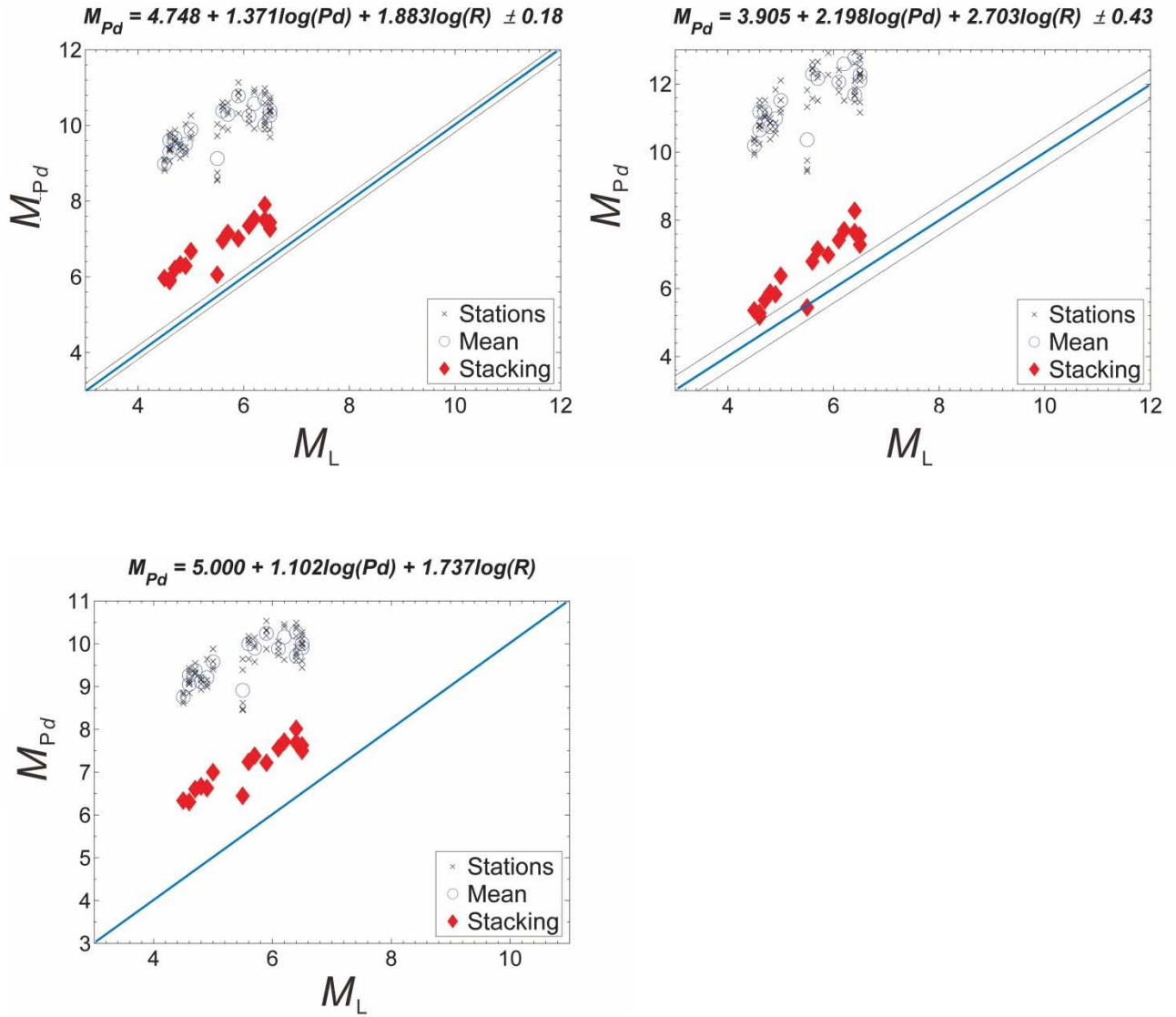


圖 4-1 陣列式波形處理後之 M_{Pd} 與中央氣象局地震目錄之比較圖

(A) 套用Wu et al. (2007) (B) 套用Hsiao et al. (2010) (C) 套用Chen (2014)所提出之 M_{Pd} 經驗公式；圖中藍線為 1:1 線，灰線為標準差範圍；叉叉及圓圈符號表示未經陣列式波形處理之各測站 M_{Pd} 值以及其陣列平均 M_{Pd} 值。

4.2 第二部分—即時走時序列地震定位法

4.2.1 資料庫自身模擬測試 (Self-simulation test)

若所有測站排序 (109 站) 皆列入格點搜尋比對並不符合地震預警目的，將因此本研究透過資料庫自身模擬測試 (Self-simulate test) 決定使用前幾名測站數才符合最大利益及最小損害原則。其基本概念是將資料庫中的 1 點假設為真實地震，並以該點之排序為真實地震排序，並利用上述之格點搜尋法比對資料庫，以找出的網格點代表誤差值，誤差值越大表示以該點排序搜尋找出的網格點越多，定位之誤差範圍則越大。本研究進行前 5 名、前 10 名、前 15 名以及前 20 名測站排序之自身模擬測試 (圖 4-2) 發現，當地震事件發生後只需利用前 10 名之測站排序，即可有良好的成果。

4.2.2 地震定位結果

挑選 2013 以及 2014 年規模大於 4.5，震源深度小於 45 km，島內或近海之 48 個地震事件 (表 4.1)。將本研究提出之即時走時序列定位法之定位結果分別與中央氣象局即時地震速報系統 (RTD) 及中央氣象局地震目錄 (catalog) 比較。氣象局地震目錄是使用一維之台灣地區速度模型並由人工進行地震定位，所使用的地震觀測網包括 RTD 系統、短週期測站及中研院寬頻觀測網等 (圖 4-3)。而地震速報系統 (RTD) 之定位是先以即時 (real-time) 及自動化進行地震定位，若定位殘餘值過大則進行人工波形檢查並重新定位 (Wu *et al.*, 1997, 2000)。

本研究提出之即時走時序列定位法之定位結果與中央氣象局地震速報系統比較如表 4-1 及圖 4-4，震央平均差值為 6.9 km、深度差值為 7.5 km。相同地震事件下，與中央氣象局人工定位之地震目錄比較 (表 4-1 及圖 4-5)，其震央平均差值為 5.6 km、深度平均差值為 6.1 km (詳細之定位資訊如附錄五)。

表 4-1、 定位結果比較表

No.	V.S. CATALOG				V.S. RTD			
	震央差值	深度差值	經度差值	緯度差值	震央差值	深度差值	經度差值	緯度差值
1	2.47	8.16	0.00	2.22	1.68	10.15	0.22	1.67
2	4.37	0.67	4.05	2.22	9.09	1.77	8.17	3.97
3	2.41	4.14	1.43	2.00	3.00	1.65	2.67	1.37
4	3.98	13.39	3.07	2.22	3.84	16.54	3.47	1.65
5	9.17	5.00	9.20	1.11	4.88	0.32	4.28	2.35
6	0.29	0.00	0.00	0.00	3.75	2.00	3.29	1.80
7	1.44	8.04	2.36	0.74	4.96	5.88	4.83	1.13
8	8.75	3.57	1.02	8.90	9.59	17.37	3.59	8.90
9	10.44	1.98	2.03	10.01	9.61	9.52	1.10	9.54
10	5.93	0.54	2.03	5.56	9.02	13.61	6.53	6.23
11	7.45	14.62	7.17	3.34	3.09	16.68	2.54	1.76
12	1.93	17.08	0.00	2.22	0.79	10.23	0.12	0.78
13	2.17	12.09	1.11	2.22	5.53	18.52	4.03	3.78
14	1.93	5.90	2.03	0.00	4.75	11.20	4.32	1.96
15	7.05	3.02	6.12	3.34	12.78	3.94	12.13	4.04
16	6.54	7.13	2.04	6.62	7.22	1.85	4.14	5.91
17	5.25	5.97	0.00	5.56	12.14	6.00	10.41	6.25
18	4.73	5.08	5.09	1.11	6.92	0.75	6.91	0.30
19	3.56	7.14	2.04	2.22	12.55	8.19	12.33	2.80
20	6.56	7.07	6.11	3.34	11.51	6.81	0.33	0.35
21	9.43	9.70	9.16	2.22	3.90	7.31	11.50	0.85
22	14.81	10.92	15.24	1.11	17.70	4.33	17.63	1.16
23*	6.59	8.87	6.45	2.12	9.45	10.50	9.41	0.88
24*	8.79	3.18	5.08	6.67	9.16	6.87	2.18	8.90
25*	0.68	1.77	0.15	0.50	2.89	2.70	1.35	2.55
26*	5.92	8.35	6.05	0.00	4.32	15.59	0.03	4.32
27*	2.45	0.67	1.02	2.22	6.02	3.09	5.54	2.34
28*	1.98	2.46	2.03	0.00	0.62	2.88	0.47	0.41
29*	1.46	6.02	1.01	1.11	1.22	8.54	0.19	1.21
30*	7.65	3.73	8.12	0.00	6.72	3.64	6.31	2.32
31*	3.59	3.44	3.25	0.89	4.10	1.74	4.10	0.24
32	3.46	2.98	0.00	3.34	4.84	5.03	3.25	3.58
33	3.16	7.79	1.02	3.34	6.51	7.33	4.88	4.30

34	2.15	0.43	2.05	0.00	6.16	2.23	4.70	3.98
35	1.64	0.67	0.00	1.11	1.23	0.04	0.96	0.78
36	10.89	7.16	10.17	3.34	12.58	10.87	12.58	0.28
37	8.29	1.64	6.12	5.56	11.12	2.79	9.97	4.93
38	3.35	3.45	3.05	0.00	7.78	3.70	7.50	2.08
39	1.86	5.74	2.05	0.00	1.38	4.33	0.51	1.28
40	1.53	-0.96	1.02	1.11	3.08	0.91	2.17	2.19
41*	2.88	9.98	0.00	3.34	8.73	9.66	8.67	1.00
42*	3.42	18.58	3.09	1.11	4.72	7.85	2.95	3.69
43*	28.38	1.49	27.56	4.89	26.36	12.24	26.27	2.19
44*	1.79	5.46	2.31	1.11	7.39	12.72	7.17	1.80
45*	13.69	18.00	10.66	8.12	6.09	28.39	5.56	2.50
46*	3.86	3.39	1.02	3.56	7.58	2.81	5.42	5.30
47*	14.94	13.36	15.13	1.11	8.91	3.11	8.86	0.98
48*	3.63	3.98	3.58	0.73	6.77	14.70	2.25	6.39
平均	5.60	6.10	4.23	2.57	6.94	7.48	5.58	2.89

*星號表示為近海之地震，其餘為島內之地震事件；單位皆為公里。詳細之定位資訊如附錄五。

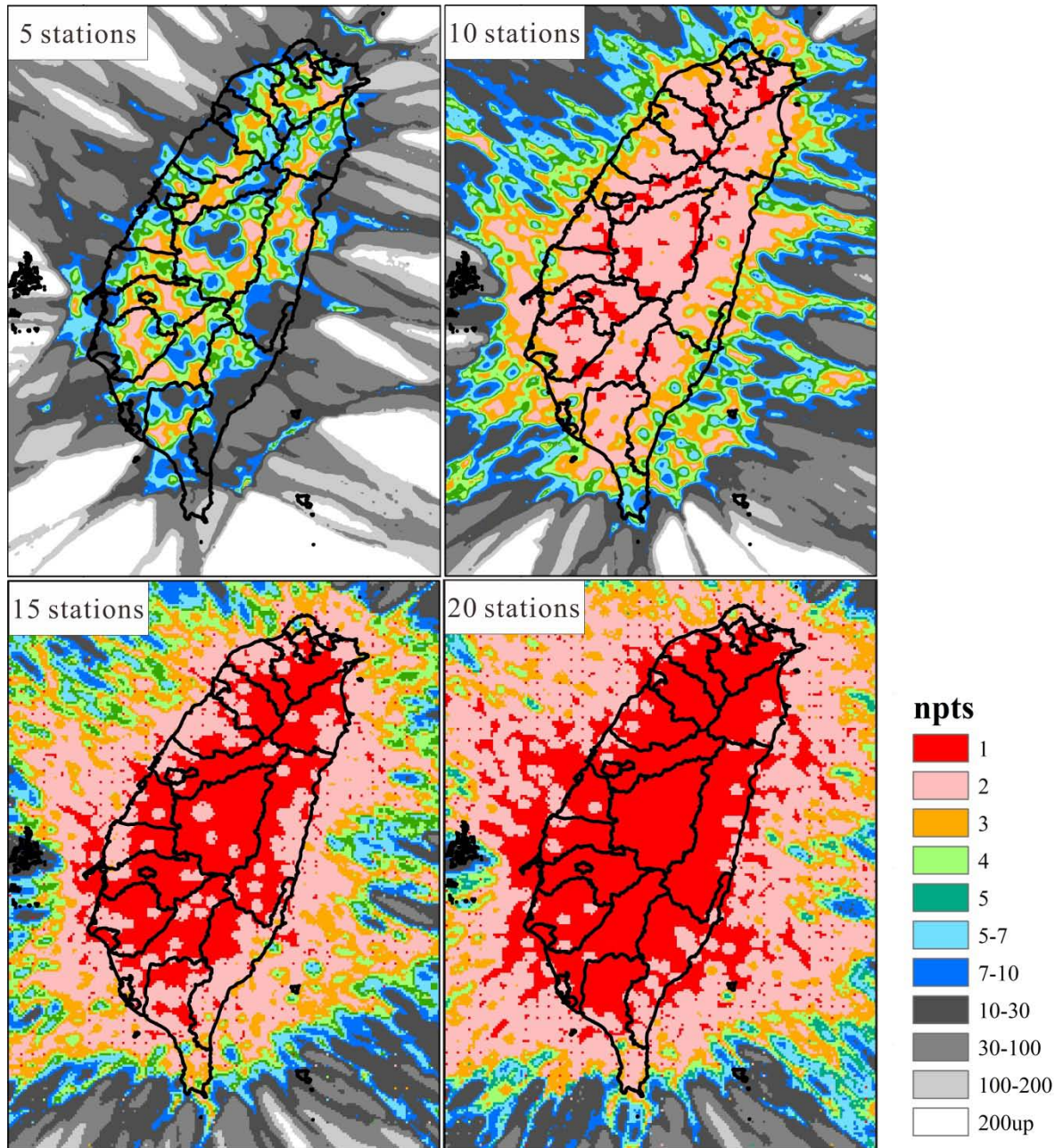


圖 4-2 資料庫自身模擬測試 (Self-simulate test)

該點顏色表示利用該點前 n 名之測站排序 (n = 5、10、15、20)，所找出的網格點數，找出之網格點數越多表示模擬誤差值越大，針對台灣島內之定位誤差而言，選用前 10 名之測站排序即可有良好之地震定位表現。

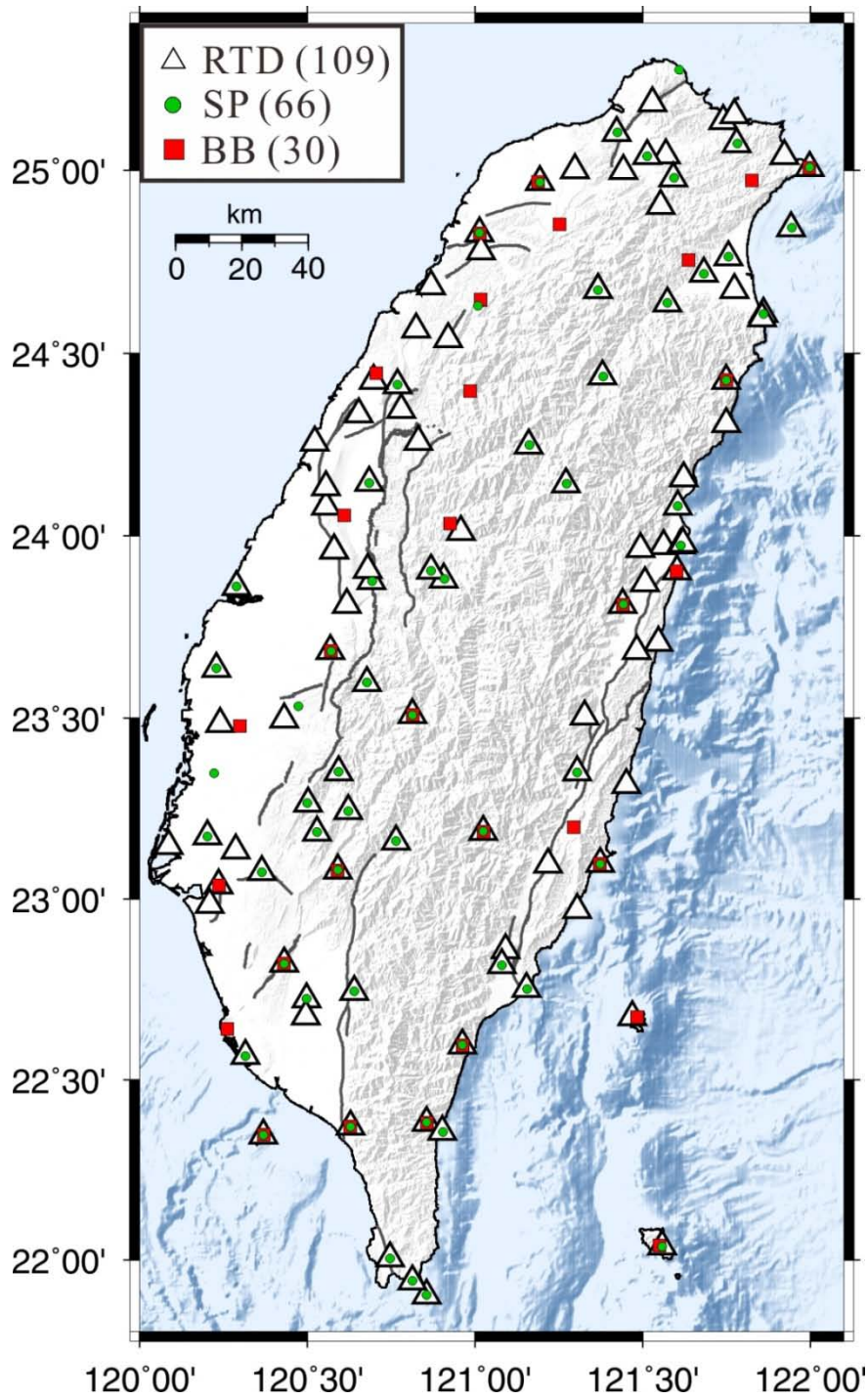


圖 4-3 各地震觀測網分布

圖中空心三角形為 RTD 測站，紅色方形為中研院寬頻地震站 (BATS)，綠色圓形為中央氣象局短週期地震站 (S13)。

This study V.S. RTD

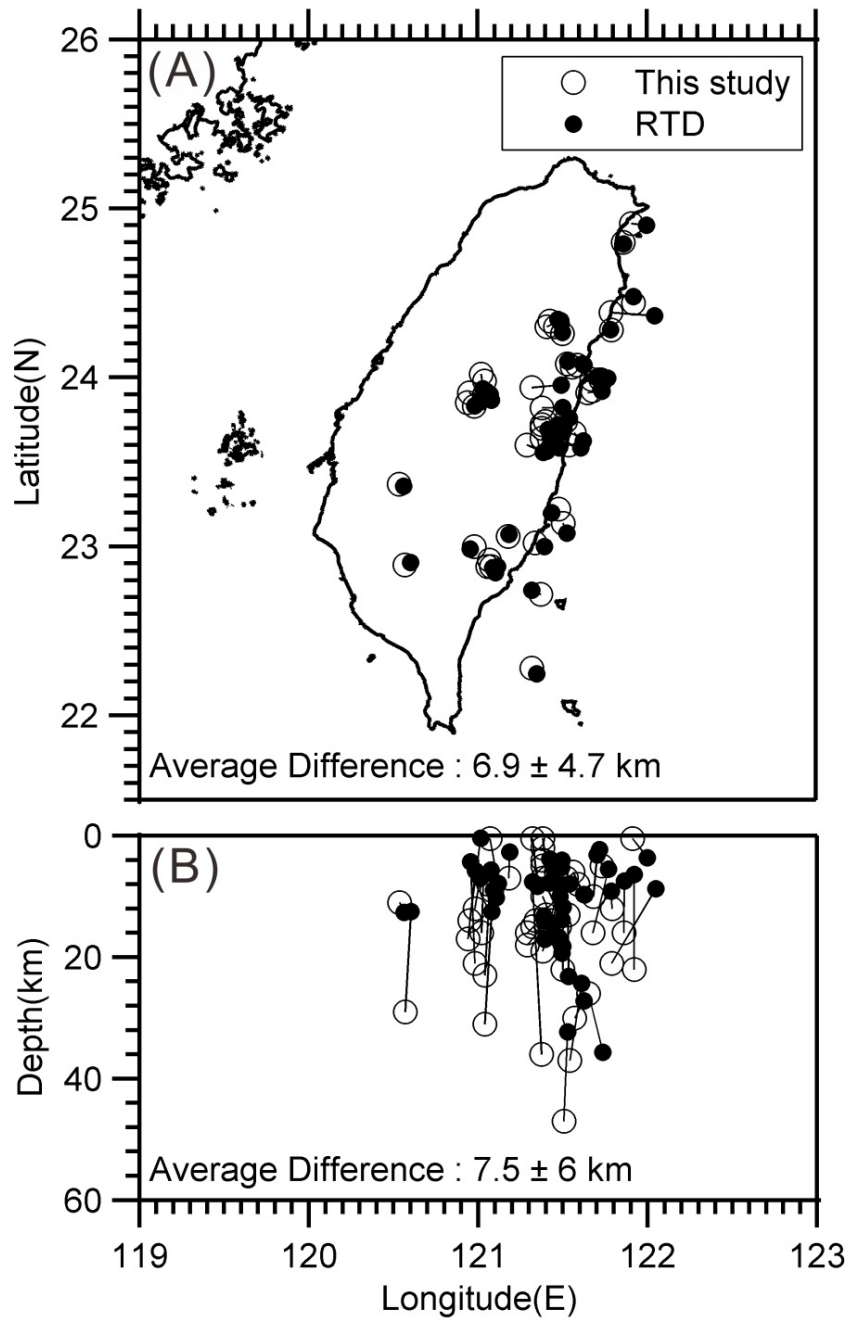


圖 4-4 定位結果比較 (RTD)

(A) 定位結果與地震速報系統之震央差值為 6.9 km (± 4.7 km)

(B) 定位結果與地震速報系統之深度差值為 7.5 km (± 6.0 km)

This study V.S. CWB

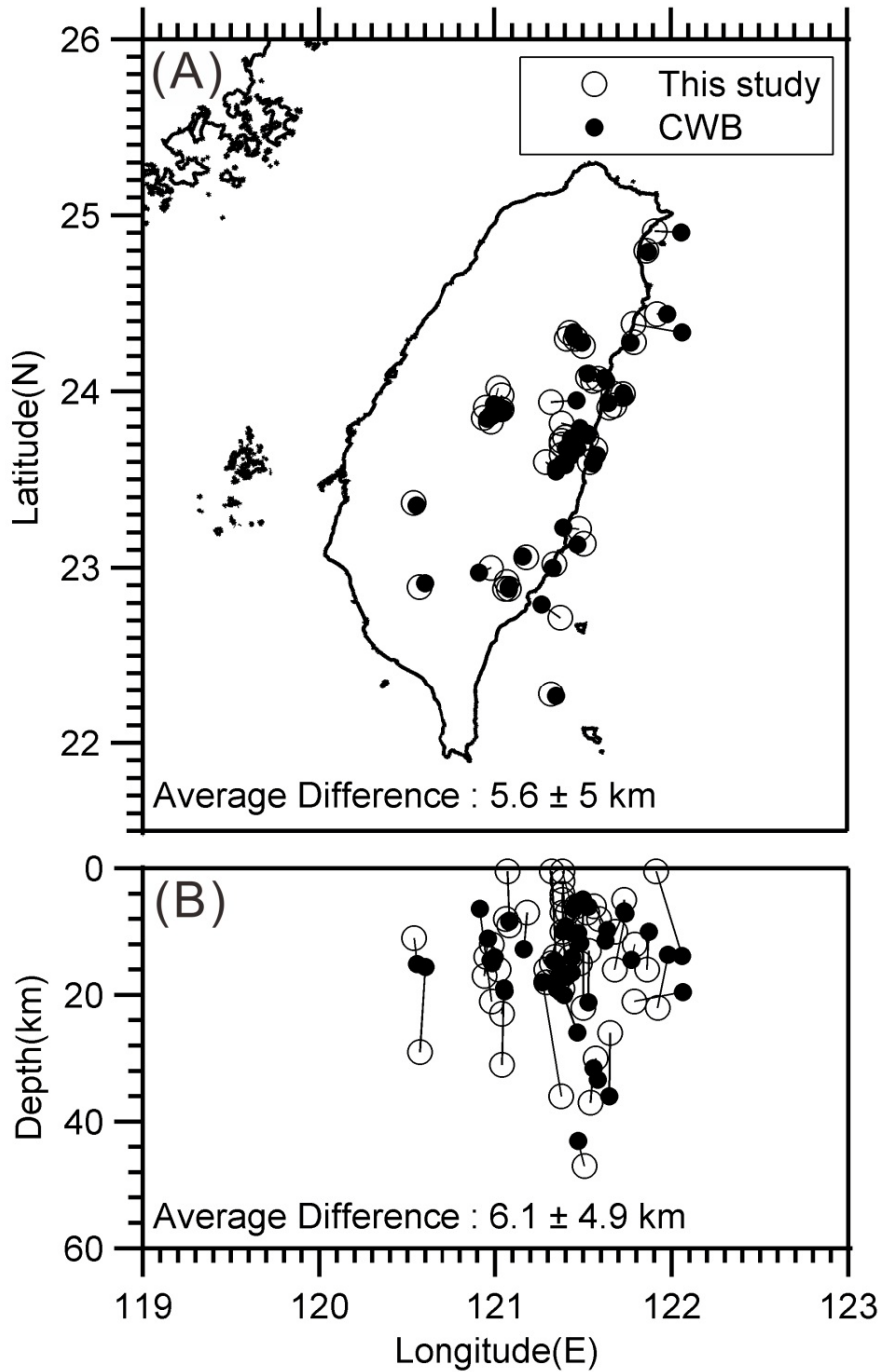


圖 4-5 定位結果比較 (Catalog)

(A) 定位結果與中央氣象局地震目錄之震央差值為 5.6 km (± 5.0 km)

(B) 定位結果與中央氣象局地震目錄之深度差值為 6.1 km (± 4.9 km)

第五章、討論

5.1 第一部分—小區域預警陣列結果討論

5.1.1 建築物放大效應

觀察圖 4-1 可發現，斜率值極接近 1：1 比較線，造成規模高估差異決定性影響為縱軸之截距，進而從 Pd 衰減標準公式（式 5-1）得知：

$$M_{Pd} = a + b \times \log(Pd) + c \times \log(R) \quad (5-1)$$

係數 b 為規模項，與震源效應較有相關；係數 c 為衰減項，與地震波的傳遞距離有關，因此係數 b 、 c 跟測站安置的場址沒有關聯性，所以我們透過修正前人研究之常數項也就是係數 a 來去除建築物效應。

將常數項值逐漸修正，使預估規模之標準差達到最小（圖 5-1），修正值結果如圖 5-3，修正後的公式如式 5-2（修正自式 3-1）、式 5-3（修正自式 3-2）、式 5-4（修正自式 3-3），其標準差（SDV）範圍座落在 0.28 到 0.42 之間，對於地震預警目的來說已經是非常好的結果。

$$M_{Pd} = 3.479 + 1.370 \times \log(Pd) + 1.883 \times \log(R) \pm 0.28 \quad (5-2)$$

$$M_{Pd} = 2.852 + 2.198 \times \log(Pd) + 2.703 \times \log(R) \pm 0.42 \quad (5-3)$$

$$M_{Pd} = 3.452 + 1.102 \times \log(Pd) + 1.737 \times \log(R) \pm 0.31 \quad (5-4)$$

去除建築物放大效應後，套用修正後的三個 Pd 衰減公式值所計算出來的 M_{Pd} 值與中央氣象局地震目錄之比較圖（圖 5-2），圖中除了疊加波形的 M_{Pd} 值外，也包含陣列中未經陣列式波形處理前各站之 M_{Pd} 值、平均的 M_{Pd} 值。如圖所示，疊加的波形更能精準的預測地震大小，且都有良好的標準差（分別為 0.28、0.42 及 0.31 個規模單位），而其中又以修正自 Wu *et al.* (2007) 之公式（式 5-2）有著最小的標準差值。

5.1.2 波形疊加法對於波形品質改善討論

由表 5-1 可以觀察到，疊加之後的波形訊噪比（Signal to Noise Ratio）皆優於疊加前各站波形訊噪比及其平均值。且經由波譜分析（以 2013 年 02 月 21 日，規模 4.8 地震為例）發現，疊加後的訊號強度皆約大於各測站疊加前的強度，且各波形有著相同趨勢（圖 5-3），這表示經波形疊加後，消弱了原本存在於各站之雜訊，提高波形訊噪比。

表 5-1、各事件訊噪比（S/N ratio）比較表

Station 1	Station 2	Station 3	Station 4	Station 5	Mean	Stack
18.97	9.73	19.68	16.49	16.32	16.24	20.70
9.65	4.75	8.07	8.68	12.72	8.77	10.33
11.07	12.59	12.09	7.11	10.81	10.73	15.82
33.86	23.86	32.65	34.76	35.52	32.13	35.63
9.56	5.64	10.65	10.01	13.12	9.80	13.02
17.23	15.34	19.60	18.31	16.94	17.48	19.71
12.25	17.43	13.20	12.77	0.00	13.91	18.17
13.86	6.11	10.16	11.35	0.00	10.37	11.38
17.01	13.48	13.83	15.34	21.05	16.14	23.16
19.67	18.18	23.25	19.22	22.25	20.52	20.42
27.90	25.14	28.58	0.00	0.00	27.21	29.28
13.70	18.33	21.16	22.18	0.00	18.84	25.03
20.40	17.43	20.41	19.05	22.64	19.99	22.83
10.25	7.09	11.14	8.26	10.45	9.44	11.21
20.35	10.26	22.44	20.05	20.25	18.67	23.68
19.16	26.68	22.71	12.74	18.05	19.87	20.16
12.21	18.43	10.20	8.13	8.69	11.53	12.82

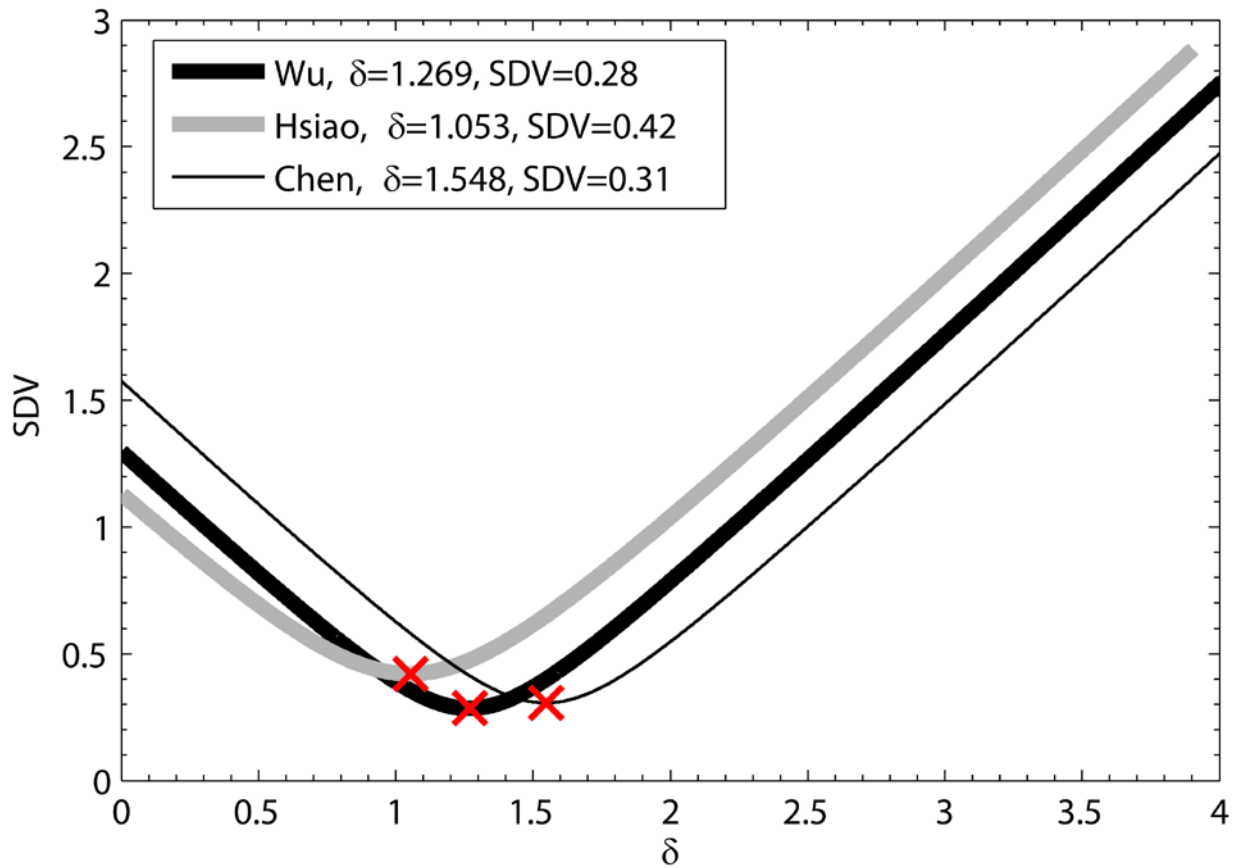


圖 5-1 修正常數項去除建築物放大效應造成之影響

將三篇前人所提出之 Pd 衰減公式常數項值逐漸修正 (δ 為修正值)，使預估規模之標準差達到最小，即可得到新的常數項值及新的 Pd 衰減公式。

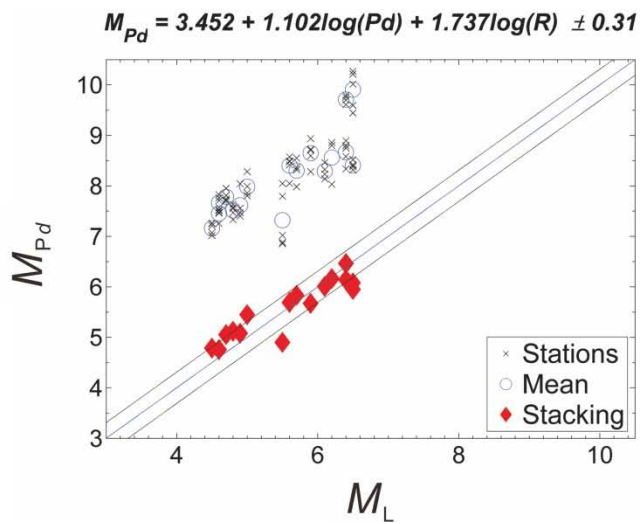
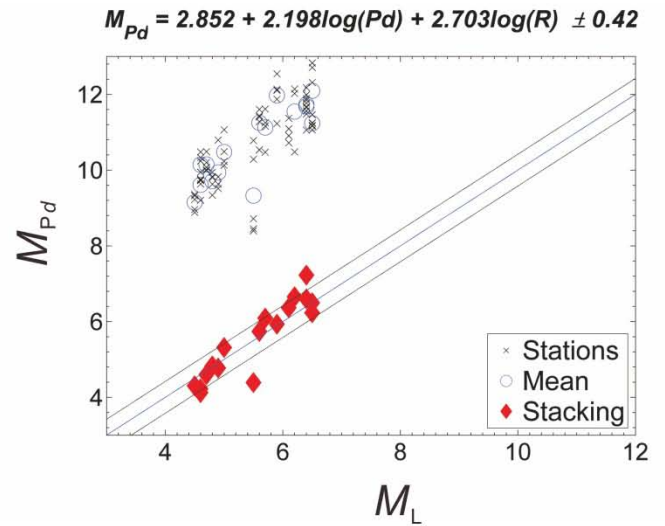
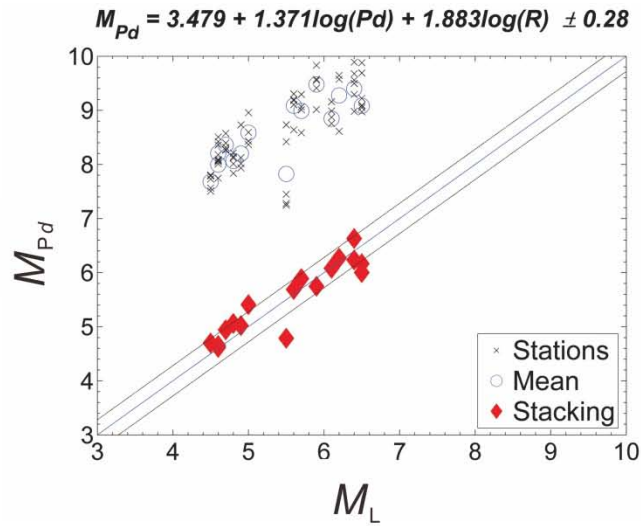


圖 5-2 去除建築物效應後之 M_{Pd} 與中央氣象局地震目錄之比較圖

(A) 修改自 Wu *et al.* (2007) (B) 修改自 Hsiao *et al.* (2010) (C) 修改自 Chen (2014)所提出之 M_{Pd} 經驗公式；圖中藍線為 1:1 線，灰線為標準差範圍；叉叉及圓圈符號表示未經陣列式波形處理之各測站 M_{Pd} 值以及其陣列平均 M_{Pd} 值。

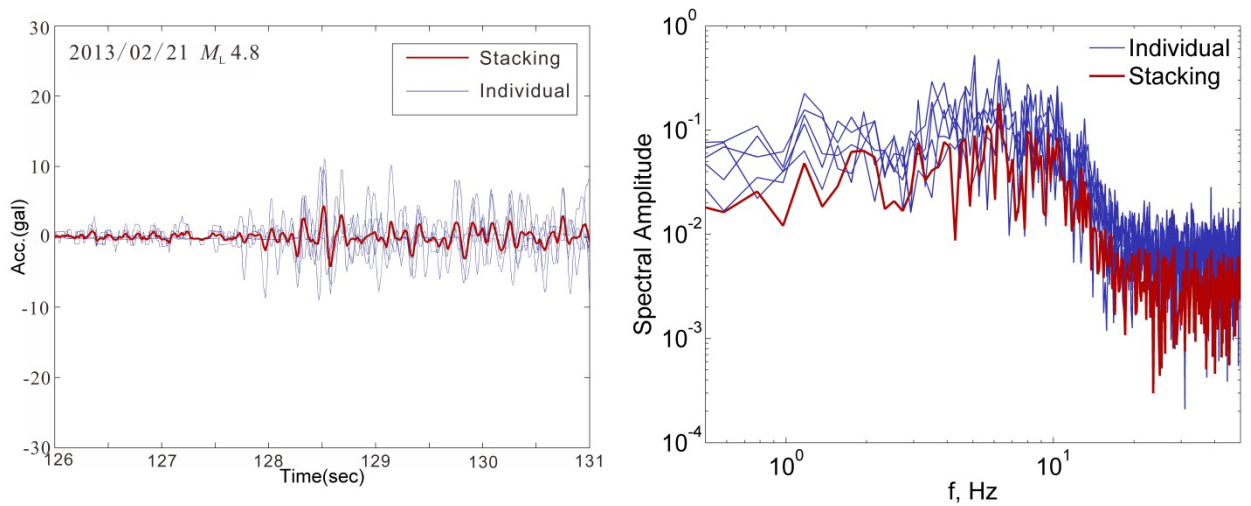


圖 5-3 波譜分析示意圖

以 2013 年 02 月 21 日，規模 4.8，發生在花蓮外海的地震為例，圖中紅線為疊加波形之波譜分析結果，藍線為疊加疊加前五個測站波形之波譜分析結果。明顯看到疊加後的訊號強度在相同趨勢下皆約小於各測站疊加前的波形強度，表示各站雜訊經波形疊加後有消弱的現象。

5.2 第二部分—即時走時序列地震定位法結果討論

5.2.1 自身模擬結果分析

在資料庫自身模擬測試（圖 4-2）中可以發現，在外海的定位誤差呈現帶狀分布，最大的原因為受到測站分布所影響，可由 Voronoi cells（Sambridge, 1999）之概念來驗證，其依據地震網測站分布的幾何型態及假設的地震波波速固定，將每個測站的周圍劃分一個多邊形的領域（即 Voronoi cell），而在該領域發生的地震將由該測站最先偵測到，圖 5-4 為利用 RTD 測站分布所繪製之 Voronoi cells 幾何樣貌，可以看到在外海地區有一樣的帶狀 Voronoi cell 幾何出現。

5.2.2 定位結果分析

由表 5-2 及圖 5-5 可以發現，本研究與兩系統分別和經度及緯度定位差值比較，在緯度的定位差值明顯小於經度之定位差值，且緯度差值分布範圍較為集中，不論地震事件發生在近海皆有一樣的情況。係因於台灣島為南北狹長形，加上中央山脈座落其中，使測站分布呈現南北縱向分布。因此，當地震事件發生於花東或外海地區時，其前十名觸發之測站將呈現南北走向分布，使測站覆蓋率不佳，而此限制也造成在緯度的定位差值會明顯小於經度之定位差值的現象發生。如圖 5-6（A）為本研究與中央氣象局地震目錄比較下，經度差值及緯度差值差異最大之地震事件前十名觸發測站分布圖（經度差值：24.6 km、緯度差值：4.9 km；表 4-1，編號 43、2014/09/10、規模 4.7、發生於宜蘭近海），而圖 5-6（B）則為差異最小之地震事件前十名觸發測站分布圖（經度差值：0.0 km、緯度差值：0.0 km；表 4-1，編號 6、2013/03/07、規模 5.9、花蓮秀林鄉），可以發現因測站分布及覆蓋率限制所造成在經度及緯度定位上之影響。

另外，由表 5-2，發生在近海之地震事件在震央及震源深度之定位差值略大於島內之地震事件，係因為發生在外海之地震事件測站覆蓋率不佳，其前十名排名僅靠沿海測站接收，而發生在更外海的地震，定位差值也會越大。

5.2.3 地震定位時效討論

本研究僅以簡單之加減法運算搜尋震源，在即時監測地震過程中，當前十個地震測站觸發，即進行震源搜尋，定位結果將馬上算出，搜尋過程花費不到一秒之時間，運算時間極短。因此，影響即時走時序列地震定位法之預警盲區的關鍵為第十名測站之震源距，而本研究選用之地震事件中，第十名測站之平均震央距為 45 公里（圖 5-7）。Palert 預警系統測站分布密度約為 RTD 測站分布密度 5 倍（圖 3-6），Palert 預警系統擁有良好之測站密度及覆蓋率，未來若將即時走時序列地震定位法加入 Palert 地震定位系統，以 Palert 地震預警觀測網為架構，不僅可以增加定位精準度，也可縮小地震預警盲區！

表 5-2、定位差值比較表

平均差值	比較系統	Inland (km)	Offershore (km)
震央	Catalog	5.06	6.57
	RTD	6.87	7.12
深度	Catalog	5.87	6.63
	RTD	6.83	8.65
經度	Catalog	3.44	5.68
	RTD	5.52	5.69
緯度	Catalog	2.78	2.21
	RTD	2.97	2.76

*單位皆為公里。

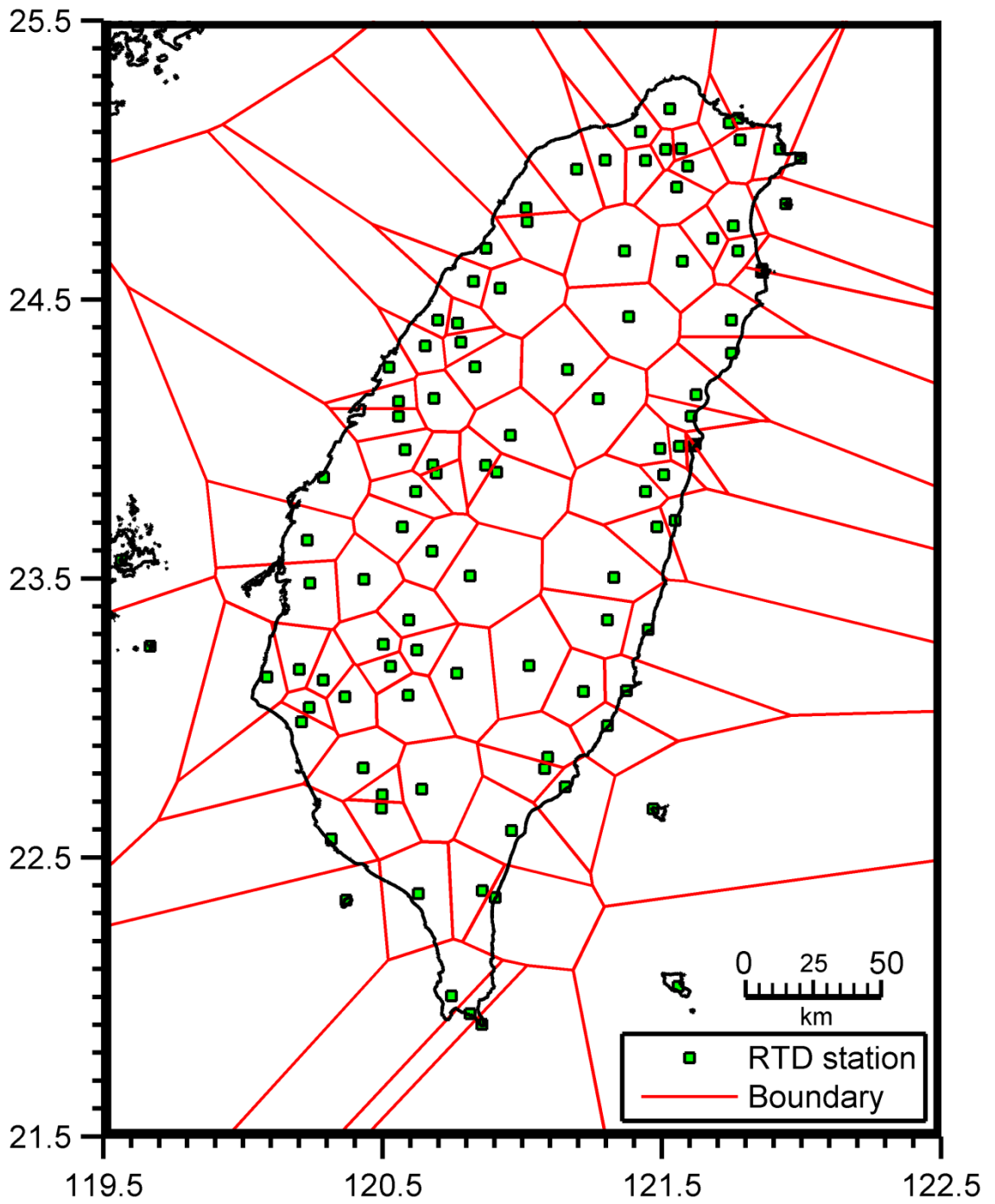


圖 5-4 RTD 測站之 Voronoi cell 幾何分布

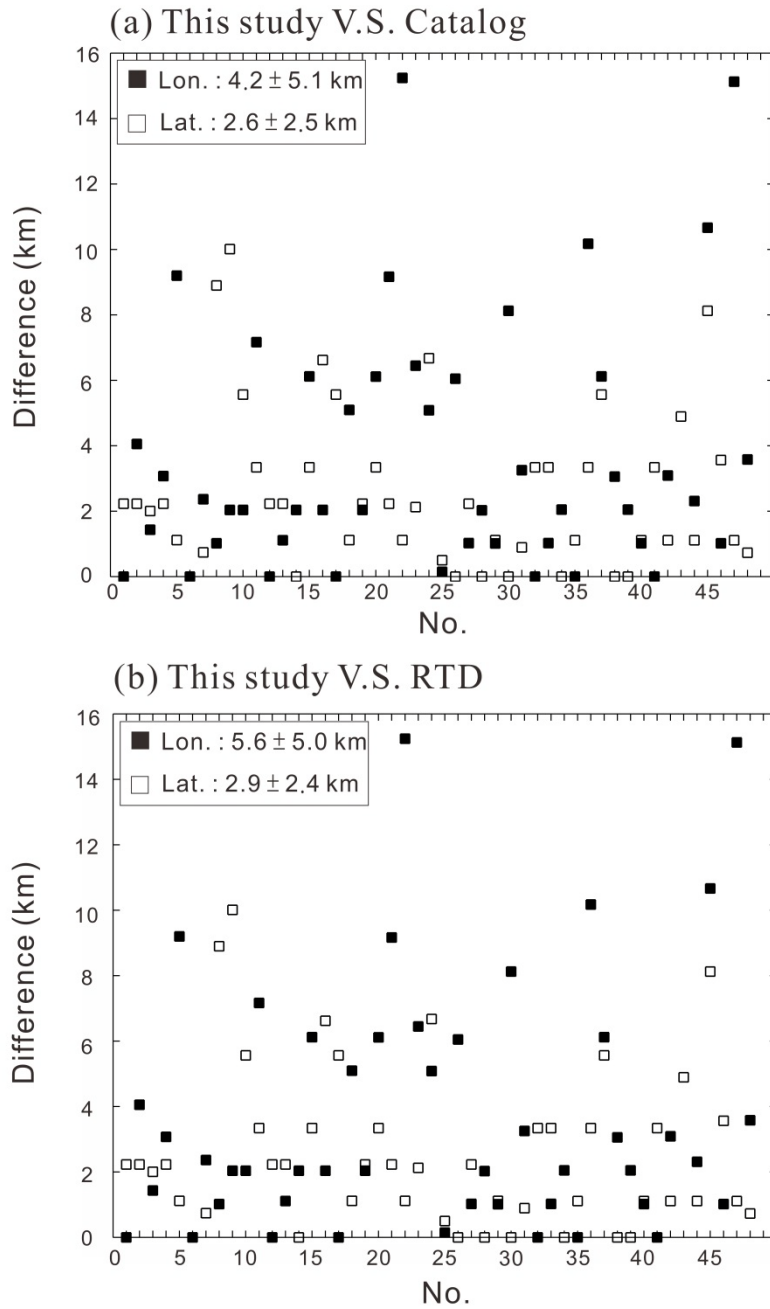


圖 5-5、經度及緯度定位差值比較

分別比較經度及緯度定位差值，(a) 本研究與中央氣象局地震目錄之經度平均差值為 4.2 ± 5.1 km、緯度平均差值為 2.6 ± 2.5 km (b) 本研究與 RTD 系統之經度平均差值為 5.6 ± 5.0 km、緯度平均差值為 2.9 ± 2.4 km

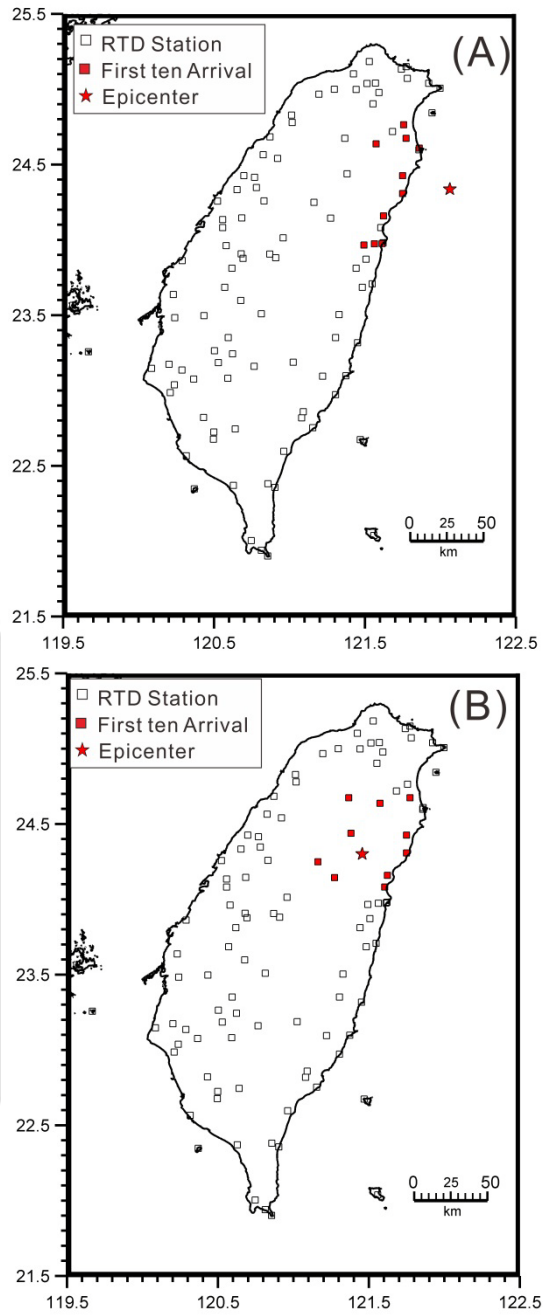


圖 5-6 前十名觸發測站分布圖

(A) 經度差值和緯度差值，差異最大之地震事件前十名觸發測站分布圖

(表 4-1，編號 43、2014/09/10、規模 4.7、發生於宜蘭近海)

(B) 經度差值和緯度差值，差異最小之地震事件前十名觸發測站分布圖

(表 4-1，編號 6、2014/03/07、規模 5.9、發生於花蓮秀林鄉)

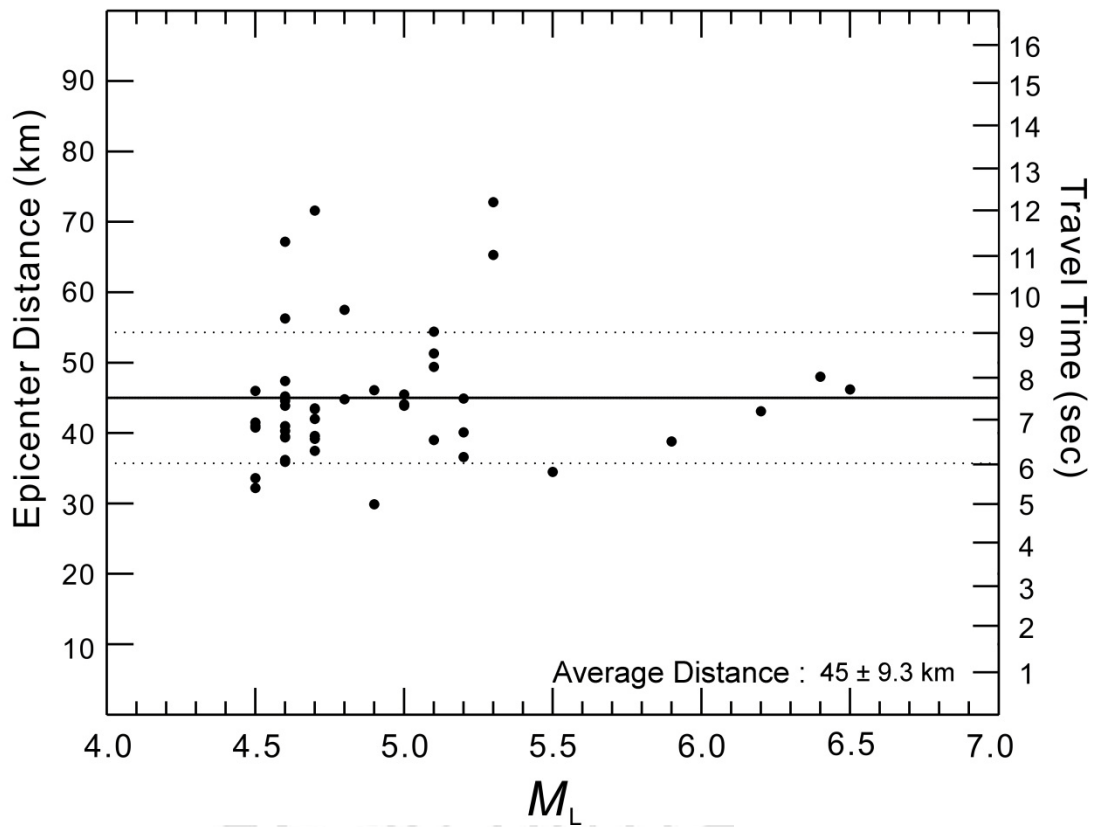


圖 5-7 各地震事件到時第十名之測站震央距

各事件到時第十名之測站平均震央距為 45 公里，相當於 P 波走 7.5 秒（假設 P 波在淺層地殼之波速為 6.0 km/s）

第六章、結論

由於台灣國幅狹小，現地預警模式資料處理時間短，較能符合台灣地震減災之效益，然而該模式採用地震資訊較少，導致規模預估不精準。在第一部分，本研究基於現地預警基礎，於台南及宜蘭建立小區域地震預警陣列，透過陣列式波形處理有效提升波形品質；並去除建築物放大效應後，統計回歸出適用於台灣小區域地震預警陣列之 Pd 衰減公式，使現地預警模式在規模的預估上有良好的進步。

本研究基於現地型地震預警模式，在台南及宜蘭建立小區域地震預警陣列，可對較鄰近之台南、高雄、台北等都會區提供警報消息，此為區域型地震預警所無法達成，未來如有更密集的地震預警警報器測站，將可在全台灣各都市區設置其所屬之小區域地震預警陣列，每個陣列為獨立運作之現地預警單位，利用本研究之成果，可望提升台灣地震預警警報之準確性。

在第二部分，本研究提出了一個嶄新的快速且即時的地震定位法「即時走時序列地震定位法」，結合了台灣地區三維速度構造模型及虛擬曲折波線追蹤法（Pseudo-bending method），使走時計算更精確，地震定位結果更精準。

本方法將地震定位中最複雜的地震波走時預先計算，並建立走時資料庫，當一真實地震發生，搜尋震源過程不需複雜計算，可降低伺服器負荷及提升定位速度。透過本研究之方法，僅利用前十名測站即可有良好之定位結果。

參考文獻

- Alcik, Hakan, Ozel, Oguz, Wu, Yih-Min, Ozel, Nurcan M., and Erdik, Mustafa (2011). An alternative approach for the Istanbul earthquake early warning system. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31, pp. 181-187.
- Allen, Rex V (1978). Automatic earthquake recognition and timing from single traces. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 68, pp. 1521-1532.
- Allen, Richard M (2004). Rapid magnitude determination for earthquake early warning. *The many facets of seismic risk*, pp. 15-24.
- Allen, R. M., P. Gasparini , O. Kamigaichi, and M. Böse (2009), The status of earthquake early warning around the world: an introductory overview, *Seismological Research Letters*, 80, 682–693, doi:10.1785/gssrl.80.5.682.
- Allen, Richard M, and Kanamori, Hiroo (2003). The potential for earthquake early warning in southern California. *Science*, 300, pp. 786-789.
- Aoi, Shin, Kunugi, Takashi, Nakamura, H, and Fujiwara, Hiroyuki (2011). Deployment of New Strong Motion Seismographs of K-NETK-NET and KiK-net. *Earthquake Data in Engineering Seismology*. Springer, pp. 167-186.
- Bakun, William H, Fischer, Fg, Jensen, Eg, and Vanschaack, J (1994). Early warning system for aftershocks. *Bulletin of the Seismological Society of*

America, 84, pp. 359-365.

Brune, James N (1979). Implications of earthquake triggering and rupture propagation for earthquake prediction based on premonitory phenomena. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978 - 2012)*, 84, pp. 2195-2198.

Chen, D. Y., Hsiao, N. C., & Wu, Y. M. (2015). The Earthworm Based Earthquake Alarm Reporting System in Taiwan. *Bulletin of the Seismological Society of America*, doi:10.1785/0120140147.

Chung, Jk, Lee, Whk, and Shin, Tc (1995). A prototype earthquake warning system in Taiwan: Operation and results. *IUGG, IASPEI XXI General Assembly, Abstract Week A*, 406.

Cooper, Jd, 1868, San Francisco Daily Evening Bulletin. *November*, 3, p. 1868.

Ellsworth, William L, and Beroza, Gregory C (1998). Observation of the seismic nucleation phase in the Ridgecrest, California, earthquake sequence. *Geophysical Research Letters*, 25, pp. 401-404.

Ellsworth, Wl, and Beroza, Gc (1995). Seismic evidence for an earthquake nucleation phase. *Science*, 268, pp. 851-855.

Espinosa-Aranda, Juan Manuel, Jimenez, A, Ibarrola, G, Alcantar, F, Aguilar, A,

Inostroza, M, and Maldonado, S (1995). Mexico City seismic alert system.

Seismological Research Letters, 66, pp. 42-53.

Espinosa-Aranda, Juan Manuel, Jimenez, A, Ibarrola, G, Alcantar, F, Aguilar, A,

Inostroza, M, Maldonado, S, and Higareda, R (2003). The seismic alert system in Mexico City and the school prevention program. *Early Warning Systems for Natural Disaster Reduction*. Springer, pp. 441-446.

Geiger, L. (1912). Probability method for the determination of earthquake epicenters

from the arrival time only (translated from Geiger's 1910 German article),

Bulletin of St. Louis University, 8(1), 56-71.

Heaton, Thomas H (1985). A model for a seismic computerized alert network.

Science, 228, pp. 987-990.

Hisada, Yoshiaki, and Bielak, Jacobo (2003). A theoretical method for computing

near-fault ground motions in layered half-spaces considering static offset due

to surface faulting, with a physical interpretation of fling step and rupture

directivity. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93, pp. 86

1154-1168.

Horiuchi, Shigeki, Negishi, Hiroaki, Abe, Kana, Kamimura, Aya, and Fujinawa,

Yukio (2005). An automatic processing system for broadcasting earthquake

- alarms. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95, pp. 708-718.
- Holland, A. (2003), Earthquake Data Recorded by the MEMS Accelerometer, *Seismological Research Letters*, 74, 20–26, doi:10.1785/gssrl.74.1.20.
- Hsiao, N. C., Y. M. Wu, T. C. Shin, L. Zhao, and T. L. Teng (2009), Development of earthquake early warning system in Taiwan, *Geophysical research letters*, 36, doi:10.1029/2008GL036596.
- Hsiao, N. C., Y. M. Wu, L. Zhao, D. Y. Chen, W. T. Huang, K. H. Kuo, and P. L. Leu (2011), A new prototype system for earthquake early warning in Taiwan, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31, 201–208, doi:10.1016/j.soildyn.2010.01.008.
- Huang, H. H., Wu, Y. M., Song, X., Chang, C. H., Lee, S. J., Chang, T. M., & Hsieh, H. H. (2014). Joint Vp and Vs tomography of Taiwan: Implications for subduction-collision orogeny. *Earth and Planetary Science Letters*, 392, 177-191, doi:10.1016/j.epsl.2014.02.026.
- Johnson C.E., Bittenbinder A., Bogaert B., Dietz L., Kohler W. (1995), EW: a flexible approach to seismic network processing, *IRIS Newslett*, 14 (2) ,pp. 1 – 4.
- Kanamori, Hiroo, Hauksson, Egill, and Heaton, Thomas (1997). Real-time

seismology and earthquake hazard mitigation. *Nature*, 390, pp. 461-464.

Kanamori, H., Maechling, P., & Hauksson, E. (1999). Continuous monitoring of ground-motion parameters. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 89(1), 311-316.

Kamigaichi, Osamu (2004). JMA earthquake early warning. *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, 4, pp. 134-137.

Kanamori, Hiroo (2005). Real-time seismology and earthquake damage mitigation. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 33, pp. 195-214.

Kilb, D, and Gomberg, J (1999). The initial subevent of the 1994 Northridge, California, earthquake: Is earthquake size predictable? *Journal of seismology*, 3, pp. 409-420.

Koketsu, K., & Sekine, S. (1998). Pseudo-bending method for three-dimensional seismic ray tracing in a spherical earth with discontinuities. *Geophysical Journal International*, 132(2), 339-346,
doi: 10.1046/j.1365-246x.1998.00427.x

Lee, W. H. K. and J. C. Lahr (1972). HYP071: A computer program for determining hypocenter, magnitude, and first motion pattern of local earthquakes, Open File Report, U. S. Geological Survey, 100 pp.

- Lee, W. H. K. and J. C. Lahr (1975). HYP071 (Revised): A computer program for determining hypocenter, magnitude, and first motion pattern of local earthquakes, U. S. Geological Survey Open File Report 75-311, 113 pp.
- Lee, Whk, Shin, Tc, and Teng, Tl (1996). Design and implementation of earthquake early warning systems in Taiwan. *Proc*
- Lee, W. H. K. and Y. M. Wu (2009), Earthquake monitoring and early warning systems, in *Encyclopedia of complexity and systems science*, R. A. Meyers (Editor), 11 volumes, Springer, New York, 10370 pp.
- Lin, T. L. and Y. M. Wu (2010a), Magnitude determination using strong ground-motion attenuation in earthquake early warning, *Geophysical Research Letters*, 37, doi:10.1029/2010GL042502.
- Lin, T. L. and Y. M. Wu (2010b), Magnitude estimation using the covered areas of strong ground motion in earthquake early warning, *Geophysical Research Letters*, 37, doi:10.1029/2010GL042797.
- Lin, T. L., Y. M. Wu, D. Y. Chen, N. C. Hsiao, and C. H. Chang (2011), Magnitude estimations in earthquake early warning for the 2010 JiaSian, Taiwan, earthquake, *Seismological Research Letters*, v. 82, no. 2, pp. 201–206, doi:10.1785/0120100153.

- Nakamura, Y (1989). Earthquake alarm system for Japan railways. *Japanese Railway Engineering*, pp. 1-7.
- Nakamura, Y, and Tucker, Brian E (1988). *Japan's Earthquake Warning System: Should it be Imported to California?*, National Emergency Training Center.
- Nakamura, Yutaka (1988). On the urgent earthquake detection and alarm system (UrEDAS). *Proc. of the 9th World Conference on Earthquake Engineering*. pp. 673-678.
- Nakamura, Yutaka (2004). UrEDAS, urgent earthquake detection and alarm system, now and future. *Proceedings of the 13th world conference on earthquake engineering*.
- Nakamura, Yutaka, Saita, Jun, and Sato, Tsutomu (2011). On an earthquake early warning system (EEW) and its applications. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31, pp. 127-136.
- Odaka, Toshikazu, Ashiya, Kimitoshi, Tsukada, Shin'ya, Sato, Shinji, Ohtake, Kazuo, and Nozaka, Daisuke (2003). A new method of quickly estimating epicentral distance and magnitude from a single seismic record. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93, pp. 526-532.
- Olson, Erik L, and Allen, Richard M (2005). The deterministic nature of earthquake

rupture. *Nature*, 438, pp. 212-215.

Sato, Tamao, and Hirasawa, Tomowo (1973). Body wave spectra from propagating shear cracks. *Journal of Physics of the Earth*, 21, pp. 415-431.

Sambridge, Malcolm (1999). Geophysical inversion with a neighbourhood algorithm—I. Searching a parameter space. *Geophysical Journal International*, 138, pp. 479-494.

Satriano, C., Y. M. Wu, A. Zollo, and H. Kanamori (2011), Earthquake early warning: Concepts, methods and physical grounds, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31, 106–118, doi:10.1016/j.soildyn.2010.07.007.

Shieh, Jang-Tian, Wu, Yih-Min, and Allen, Richard M. (2008). A comparison of τ_c and τ_p for magnitude estimation in earthquake early warning. *Geophysical Research Letters*, 35.

Shin, Tc, Tsai, Yb, and Wu, Ym (1996). Rapid response of large earthquakes in Taiwan using a real-time telemetered network of digital accelerographs. *Proc. 11th World Conf. Earthq. Eng., Paper.*

Um, J., & Thurber, C. (1987). A fast algorithm for two-point seismic ray tracing. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 77(3), 972-986.

Teng, Ta-Liang, Wu, Ludan, Shin, Tzay-Chyn, Tsai, Yi-Ben, and Lee, William Hk

(1997). One minute after: strong-motion map, effective epicenter, and effective magnitude. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 87, pp. 1209-1219.

Tsukada, S, Odaka, T, Ashiya, K, Ohtake, K, and Zozaka, D (2004). Analysis of the envelope waveform of the initial part of P-waves and its application to quickly estimating the epicentral distance and magnitude. *Zisin*, 56, pp. 89 351-361.

Wald, David J, Quitoriano, Vincent, Heaton, Thomas H, and Kanamori, Hiroo (1999). Relationships between peak ground acceleration, peak ground velocity, and modified Mercalli intensity in California. *Earthquake spectra*, 15, pp. 557-564.

Wu, Y. M., T. C. Shin, C. C. Chen, Y. B. Tsai, W. H. K. Lee, and T. L. Teng (1997), Taiwan rapid earthquake information release system, *Seismological Research Letters*, 68, 931–943, doi:10.1785/gssrl.68.6.931.

Wessel, P. and W. H. F. Smith (1998), New improved version of Generic Mapping Tools released, *Eos Trans. AGU*, 79, 579, doi:10.1029/98EO00426.

Wu, Y. M., W. H. K. Lee, C. C. Chen, T. C. Shin, T. L. Teng, and Y. B. Tsai (2000), Performance of the Taiwan rapid earthquake information release system (RTD) during the 1999 Chi-Chi (Taiwan) earthquake, *Seismological Research*

Letters, 71, 338–343, doi:10.1785/gssrl.71.3.338.

Wu, Y. M. and T. L. Teng (2002), A virtual subnetwork approach to earthquake early warning, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92, 2008–2018, doi:10.1785/0120010217.

Wu, Y. M. and H. Kanamori (2005a), Experiment on an onsite early warning method for the Taiwan early warning system, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95, 347–353, doi:10.1785/0120040097

Wu, Y. M. and H. Kanamori (2005b), Rapid assessment of damage potential of earthquakes in Taiwan from the beginning of P-waves, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95, 1181–1185, doi:10.1785/0120040193.

Wu, Y. M. and L. Zhao (2006), Magnitude estimation using the first three seconds P-wave amplitude in earthquake early warning, *Geophysical Research Letters*, 33, doi:10.1029/2006GL026871.

Wu, Y. M., H. Kanamori, R. M. Allen, and E. Hauksson (2007), Determination of earthquake early warning parameters, τ_c and P_d , for southern California, *Geophysical Journal International*, 170, 711–717, doi:10.1111/j.1365-246X.2007.03430.x.

Wu, Y. M. and H. Kanamori (2008a), Development of an earthquake early warning

system using real-time strong motion signals, *Sensors*, 8, 1–9,

doi:10.3390/s8010001.

Wu, Y. M. and H. Kanamori (2008b), Exploring the feasibility of on-site earthquake early warning using close-in records of the 2007 Noto Hanto earthquake, *Earth Planets and Space*, 60, 155.

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, *Seismological Research Letters*, 84, no. 6, 1048–1054, doi:10.1785/0220130085.

Wu, Y. M. and T. L. Lin (2014), A test of earthquake early warning system using low cost accelerometer in Hualien, Taiwan, *Early Warning for Geological Disasters* (pp. 253–261). Springer Berlin Heidelberg.

Yamada, Masumi, and Mori, Jim (2009). Using τ_c to estimate magnitude for earthquake early warning and effects of near - field terms. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978 – 2012), 114.

Zollo, Aldo, Amoroso, Ortensia, Lancieri, Maria, Wu, Yih-Min, and Kanamori, Hiroo (2010). A threshold-based earthquake early warning using dense accelerometer networks. *Geophysical Journal International*, 183, pp. 963-974.

吳逸民，1999：地震速報與預警系統之發展－台灣經驗，中央大學地球物理研究所博士論文，共 152 頁。

郭冠宏，2013：以低價位 P 波警報器建置即時強地震觀測系統及其餘地震預警之運用，國立臺灣大學地質科學研究所學位論文，共 107 頁。

蕭乃祺，2007：台灣即時強地動觀測於地震預警之應用，中央大學地球物理研究所學位論文，共 178 頁。

蕭乃祺、吳逸民、辛在勤，2005：台灣地區地震速報系統之發展，氣象學報第 45 卷，第 4 期，1-15 頁。



附錄一 Palert 地預警系統測站分布

站碼	安裝地點	樓層	緯度 (°N)	經度 (°E)	高程 (m)	安裝時間
L001	裕文國小	1	22.98	120.25	31	2012/8/31
L002	永信國小	1	23.02	120.25	41	2012/8/31
L003	文元國小	1	23.02	120.20	39	2012/8/31
L004	新興國小	1	22.98	120.20	31	2012/8/31
L005	成功大學	1	23.00	120.22	31	2012/8/31
L010	麟洛國小	3	22.65	120.52	26	2014/3/25
L011	四維國小	2	22.59	120.49	16	2014/3/25
L012	泰武國小	2	22.61	120.61	87	2014/4/8
L013	楓林國小	1	22.20	120.71	55.8	2014/4/1
L014	新埤國小	1	22.47	120.55	8.2	2014/4/1
L015	載興國小	2	22.78	120.52	43.2	2014/4/1
L016	霧台國小	1	22.74	120.73	841	2014/4/3
L017	新園國小	1	22.52	120.45	5.5	2014/4/3
L020	溪埔國小	1	22.72	120.44	46	2014/3/25
L021	小林國小	1	23.15	120.63	438.6	2014/4/2
L022	師範高中	1	22.63	120.32	8	2014/4/2
L023	大湖國小	1	22.89	120.24	13.4	2014/4/8
L024	竹圍國小	1	22.80	120.30	8	2014/4/7
L025	永芳國小	1	22.61	120.40	35.3	2014/4/7
W001	三民國小	1	23.43	121.35	96	2011/4/7
W002	明恥國小	2	23.99	121.63	44	2011/3/29
W003	豐裡國小	2	23.84	121.51	70	2011/3/31
W004	太平國小	1	23.41	121.32	134	2011/4/7
W005	大進國小	2	23.66	121.42	131	2011/4/6
W006	志學國小	2	23.90	121.53	67	2011/3/30
W007	三棧國小	2	24.10	121.61	26	2011/3/28
W008	光華國小	1	23.94	121.58	47	2011/3/30
W009	瑞美國小	1	23.49	121.39	85	2011/4/7

W00A	大榮國小	2	23.75	121.47	99	2011/3/31
W00B	康樂國小	1	24.05	121.61	35	2011/3/29
W00C	壽豐國小	2	23.87	121.51	63	2011/3/30
W00D	溪口國小	1	23.82	121.47	116	2011/3/31
W00E	復興國小	2	24.01	121.62	30	2011/3/29
W00F	北濱國小	1	23.98	121.62	23	2011/3/29
W010	玉里國中	1	23.34	121.31	213	2011/4/7
W011	新城國小	1	24.13	121.65	54	2011/3/28
W012	西寶國小	1	24.21	121.48	955	2011/3/28
W013	銅門國小	1	23.97	121.49	180	2011/3/30
W014	秀林國小	2	24.12	121.62	62	2011/4/13
W015	明利國小	1	23.71	121.41	111	2011/4/6
W016	大富國小	1	23.61	121.39	185	2011/4/6
W017	奇美國小	1	23.50	121.45	150	2011/4/12
W018	港口國小	2	23.47	121.50	26	2011/4/12
W019	卓樂國小	1	23.30	121.27	213	2011/4/8
W01A	東竹國小	1	23.21	121.28	248	2011/4/8
W01B	靜浦國小	1	23.46	121.50	86	2011/4/12
W01C	高寮國小	1	23.38	121.36	240	2011/4/12
W01D	水璉國小	2	23.78	121.56	41	2011/4/13
W01E	春日國小	1	23.45	121.39	121	2011/4/12
W01F	富里國小	1	23.17	121.25	253	2011/4/8
W020	吳江國小	1	23.28	121.32	194	2011/4/12
W021	新社國小	1	23.65	121.54	26	2011/4/13
W022	月眉國小	1	23.87	121.56	33	2011/4/13
W031	澳花國小	2	24.33	121.74	56	2012/1/9
W032	金岳國小	1	24.47	121.78	46	2012/1/9
W033	樂水分校	2	24.60	121.53	336	2012/1/16
W034	大溪國小	1	24.94	121.89	14	2012/1/19
W035	大同國小	1	24.68	121.61	111	2012/1/13
W036	礁溪國小	2	24.82	121.77	28	2012/1/18
W037	三星國小	1	24.67	121.65	110	2012/1/13
W038	東澳國小	1	24.52	121.83	26	2012/1/10
W039	頭城國小	1	24.86	121.83	80	2012/1/19
W03A	利澤國小	1	24.67	121.83	12	2012/1/11

W03B	孝威國小	1	24.70	121.81	7	2012/1/11
W03C	冬山國小	1	24.63	121.79	4	2012/1/12
W03D	武塔國小	1	24.45	121.78	41	2012/1/9
W03E	南澳國小	1	24.47	121.80	50	2012/1/10
W040	寒溪國小	2	24.61	121.69	159	2012/1/12
W041	羅東高中	1	24.68	121.76	41	2011/4/19
W042	復興國中	1	24.75	121.75	24	2011/4/19
W043	四季國小	1	24.49	121.43	875	2012/1/16
W044	過嶺國小	1	24.76	121.81	5	2012/1/18
W045	竹安國小	1	24.83	121.82	23	2012/1/19
W046	龍潭國小	1	24.78	121.74	13	2012/1/17
W047	南山國小	2	24.44	121.38	1151	2012/1/16
W048	南安國小	1	24.58	121.87	50	2012/1/10
W049	凱旋國小	1	24.72	121.76	15	2012/1/17
W04A	大隱國小	1	24.67	121.71	52	2012/1/12
W04B	大里國小	1	24.97	121.93	98	2012/1/19
W04C	壯圍國小	1	24.74	121.79	6	2012/1/18
W04D	中山國小	1	24.75	121.75	19	2012/1/17
W04E	馬賽國小	2	24.62	121.83	21	2012/1/11
W04F	蘇澳海事	1	24.59	121.84	13	2012/3/21-30
W051	茂林國中	1	22.88	120.66	269	2011/3/7
W052	杉林國中	2	22.97	120.54	189	2011/3/10
W053	桃源國中	1	23.18	120.78	622	2011/3/9
W054	甲仙國中	1	23.08	120.59	603	2011/3/10
W055	中壇國小	1	22.88	120.53	141	2011/3/7
W056	桃源國小	1	23.16	120.77	620	2011/3/9
W057	多納國小	1	22.91	120.72	267	2011/3/7
W059	六龜國小	1	23.00	120.63	267	2011/3/8
W05A	新發國小	1	23.03	120.66	297	2011/3/8
W05B	龍肚國小	1	22.89	120.58	141	2011/3/7
W05C	寶來國小	1	23.11	120.70	368	2013/7/30
W05D	樟山國小	1	23.25	120.82	780	2011/3/9
W05E	深水國小	1	22.78	120.41	89	2013/8/6
W05F	大社國小	1	22.73	120.35	43	2011/11/2
W060	烏松國小	B1	22.66	120.36	31	2011/11/2

W061	觀亭國小	1	22.92	120.45	70	2013/7/31
W062	楠梓國中	1	22.74	120.33	43	2011/11/2
W063	燕巢國小	1	22.80	120.37	56	2011/11/2
W064	仁武國小	1	22.70	120.35	46	2011/11/2
W071	草屯國小	1	23.98	120.69	205	2011/5/6
W072	麒麟國小	1	23.93	120.99	927	2011/5/3
W073	新鄉國小	2	23.64	120.87	780	2011/5/10
W074	頭社國小	1	23.84	120.90	745	2011/5/4
W075	東埔國小	1	23.56	120.93	1152	2011/5/10
W076	親愛國小	2	23.97	121.11	930	2011/5/3
W077	延平國小	1	23.77	120.71	188	2011/5/11
W078	地利國小	1	23.79	120.94	393	2011/5/4
W079	五城國小	2	23.89	120.89	189	2011/5/12
W07A	廣興國小	2	23.74	120.77	552	2011/5/11
W07B	永興國小	1	23.78	120.86	392	2011/5/5
W07C	桃源國小	2	23.94	120.93	491	2011/5/4
W07D	發祥國小	1	24.12	121.16	983	2011/5/2
W07E	光復國小	2	23.94	120.70	182	2011/5/6
W07F	法治國小	2	23.92	121.05	728	2011/5/3
W080	桶頭國小	1	23.65	120.66	243	2011/5/9
W081	鯉魚國小	2	23.71	120.65	119	2011/5/9
W082	忠信國小	2	23.71	120.87	731	2011/5/10
W083	合作國小	2	24.09	121.22	1466	2011/5/2
W084	東光國小	1	23.89	120.97	663	2011/5/4
W085	中興國中	1	23.93	120.69	106	2011/5/12
W086	神木國小	2	23.53	120.86	1197	2011/5/11
W087	同富國小	1	23.59	120.89	780	2011/5/10
W088	仁愛國小	2	24.02	121.13	1141	2011/5/2
W089	集集國小	1	23.83	120.79	236	2011/5/5
W08A	田豐國小	2	23.87	120.68	206	2011/5/5
W08B	大鞍國小	1	23.70	120.72	734	2011/5/9
W08C	文山國小	1	23.91	120.64	415	2011/4/26
W08D	永和國小	1	23.93	120.73	150	2011/4/26
W08E	社寮國小	2	23.81	120.72	210	2011/4/27
W08F	縣消防局	2	23.90	120.68	211	2011/4/27

W090	太平國小	1	24.03	120.92	682	2011/4/29
W091	福龜國小	1	24.01	120.82	262	2011/4/28
W092	史港國小	1	24.01	120.96	468	2011/4/29
W093	互助國小	1	24.06	120.97	478	2011/4/29
W094	富功國小	2	23.98	120.70	177	2011/4/28
W095	弓鞋國小	1	23.84	120.63	416	2011/4/27
W096	長福國小	1	24.09	120.89	381	2011/4/28
W097	僑建國小	1	23.94	120.67	102	2011/4/26
W102	新竹大平地	1	24.73	121.16	229	2011/3/24
W103	台東池上	1	23.12	121.23	270	2011/7/3
W104	屏東科大	1	22.65	120.60	52	2011
W105	雲林古坑	1	23.61	120.57	184	2011
W106	蘇澳國小	1	24.60	121.84	22	2011
W107	嘉義楊燦堯	1	23.38	120.57	362	2011
W108	中央大學	2	24.97	121.20	31	2011/2/22
W109	台北中研院	2	25.04	121.61	24	2011/3/31
W10A	海洋大學	1	25.15	121.77	53	2011/3/9
W10B	地質系館	1	25.01	121.54	17	2012/7/1
W10C	地質全變	3	25.02	121.54	78	2010
W10D	地質調查所	1	24.98	121.51	18	2012/9/21
W10E	北一女中	1	25.04	121.51	18	2012/10/26
W10F	東華大學	4	23.90	121.55	58	2013/5/1
W111	賓朗國小	1	22.81	121.09	121	2011/10/27
W112	新化國小	1	22.38	120.86	483	2011/10/25
W113	武陵國小	1	22.97	121.12	284	2011/10/28
W114	泰源國小	1	23.00	121.29	92	2011/11/3
W115	大王國小	1	22.61	121.00	24	2011/10/26
W116	都蘭國小	1	22.88	121.23	89	2011/11/2
W117	樟原國小	1	23.41	121.48	40	2011/11/2
W118	紅葉國小	1	22.89	121.06	241	2011/10/28
W119	大鳥國小	1	22.38	120.91	49	2011/10/25
W11A	忠勇國小	1	23.33	121.44	151	2011/11/3
W11B	大武國小	1	22.36	120.91	30	2011/10/25
W11C	安朔國小	1	22.29	120.87	40	2011/10/25
W11D	溫泉國小	1	22.70	121.03	62	2011/10/27

W11E	大溪國小	1	22.46	120.94	12	2011/10/25
W11F	賓茂國小	1	22.53	120.95	31	2011/10/26
W120	和平國小	1	23.08	121.35	69	2011/11/3
W121	博愛國小	1	23.19	121.40	25	2011/11/3
W122	富岡國小	1	22.80	121.19	38	2011/11/2
W123	復興國小	1	22.75	121.15	32	2011/11/2
W124	崁頂國小	1	23.04	121.15	302	2011/10/28
W125	鸞山國小	1	22.90	121.15	162	2011/10/27
W126	新園國小	1	22.77	121.06	105	2011/10/27
W127	初鹿國小	1	22.86	121.09	169	2011/10/27
W128	豐榮國小	B1	22.75	121.14	33	2011/11/2
W129	台板國小	1	22.48	120.91	236	2011/10/26
W12A	錦屏國小	2	23.13	121.18	351	2012/3/30
W12B	豐源國小	1	22.73	121.11	21	2012/3/30
W12C	霧鹿國小	1	23.17	121.04	911	2012/3/30
W12D	利稻國小	1	23.19	121.02	1037	2012/3/30
W131	泰武國中	1	22.59	120.63	53	2012/12/16
W132	力里國小	1	22.43	120.63	33	2012/12/16
W133	隘寮國小	2	22.70	120.64	135	2012/12/16
W134	里港國中	1	22.77	120.50	55	2012/12/16
W135	崇文國小	1	22.67	120.60	74	2012/12/16
W136	望嘉國小	2	22.46	120.62	33	2012/12/16
W137	墾丁國小	2	21.94	120.80	20	2012/12/16
W138	青葉國小	2	22.84	120.64	214	2012/12/16
W139	新豐國小	2	22.86	120.63	122	2012/12/16
W13A	光華國小	2	22.55	120.54	32	2012/12/16
W13B	古樓國小	2	22.53	120.63	99	2012/12/16
W13C	賽嘉國小	2	22.74	120.64	134	2012/12/16
W13D	牡丹國中	2	22.13	120.78	303	2012/12/16
W13E	滿州國中	3	22.02	120.84	42	2012/12/16
W13F	大平國小	1	22.02	120.72	29	2012/12/16
W140	青山國小	2	22.82	120.64	163	2012/12/16
W141	泰安國小	1	22.63	120.59	50	2012/12/16
W142	加祿國小	2	22.33	120.62	10	2012/12/16
W143	恆春國小	2	22.01	120.75	46	2012/12/16

W144	九如國中	1	22.72	120.49	57	2012/12/16
W145	口社國小	2	22.77	120.64	134	2012/12/16
W146	牡丹國小	1	22.18	120.84	302	2012/12/16
W147	車城國中	1	22.07	120.72	14	2012/12/16
W148	佳義國小	2	22.65	120.63	70	2012/12/16
W149	春日國小	2	22.37	120.63	61	2012/12/16
W14A	高士國小	1	22.12	120.85	184	2012/12/16
W14B	草埔國小	2	22.24	120.80	270	2012/3/30
W151	華興國小	2	24.44	120.87	254	2012/2/16
W152	永興國小	1	24.57	120.94	136	2012/2/15
W153	頭屋國中	1	24.58	120.85	38	2012/2/20
W154	公館國中	1	24.50	120.83	131	2012/2/20
W155	鯉魚國小	1	24.34	120.77	374	2012/2/22
W156	泰安國中	1	24.42	120.91	625	2012/2/16
W157	文林國中	1	24.49	120.79	169	2012/2/21
W158	頂埔國小	1	24.71	120.92	105	2012/2/13
W159	內灣國小	1	24.30	120.85	358	2012/2/22
W15A	大南國小	1	24.41	120.90	374	2012/2/16
W15B	苗栗國中	1	24.55	120.81	96	2012/2/20
W15C	梅園國小	2	24.39	120.97	827	2012/2/17
W15D	豐林國小	1	24.48	120.89	132	2012/2/15
W15E	信德國小	1	24.69	120.96	105	2012/2/14
W15F	三義國中	2	24.41	120.77	337	2012/2/21
W160	獅潭國中	1	24.54	120.92	132	2012/2/15
W161	大河國小	1	24.62	120.95	104	2012/2/13
W162	育英國小	1	24.38	120.76	391	2012/2/22
W163	南湖國中	1	24.40	120.87	381	2012/2/17
W164	東河國小	1	24.60	121.04	271	2012/2/14
W165	僑成國小	1	24.40	120.77	340	2012/2/21
W166	南庄國中	1	24.60	121.00	278	2012/2/14
W167	大同國中	1	24.71	120.90	52	2012/2/13
W168	象鼻國小	1	24.36	120.95	831	2012/2/17
W16A	大甲國小	1	24.35	120.63	58	2014/1/9
W16B	七星國小	2	24.30	120.71	213	2013/12/27
W16C	(潭子)新興國小	1	24.20	120.66	128	2013/12/27

W16D	龍泉國小	B1	24.20	120.55	48	2014/1/9
W16E	烏日國小	1	24.11	120.62	39	2014/1/9
W16F	(北屯)新興國小	1	24.20	120.73	197	2013/12/27
W170	成功國小	1	24.21	120.84	420	2012/7/17
W171	潭子國小	1	24.21	120.70	420	2012/7/17
W172	軍功國小	1	24.17	120.72	140	2012/7/17
W173	中和國小	1	24.16	120.83	500	2012/7/17
W174	梨山國小	1	24.25	121.26	2000	2012/7/17
W175	土牛國小	1	24.27	120.81	328	2012/7/17
W176	外埔國小	1	24.33	120.65	143	2012/7/17
W177	自由國小	1	24.29	120.91	500	2012/7/17
W178	清水國小	1	24.27	120.57	50	2012/7/17
W179	豐原國小	2	24.25	120.72	250	2012/7/17
W17A	大元國小	2	24.10	120.69	55	2012/7/17
W17B	平等國小	2	24.32	121.29	1601	2012/7/17
W17C	車籠埔國小	1	24.11	120.73	110	2012/7/17
W17D	萬豐國小	2	24.03	120.70	100	2012/7/17
W17E	白冷國小	1	24.18	120.93	600	2012/7/17
W17F	霧峰國小	2	24.06	120.70	100	2012/7/17
W180	后里國中	1	24.31	120.70	210	2012/7/17
W181	東汴國小	1	24.12	120.80	278	2012/7/17
W182	協成國小	1	24.19	120.81	500	2012/7/17
W183	博愛國小	2	24.18	120.98	700	2012/7/17
W184	大雅國小	1	24.22	120.65	139	2012/7/17
W185	達觀國小	1	24.33	120.92	568	2012/7/17
W186	中坑國小	1	24.24	120.88	500	2012/7/17
W187	東華國中	1	24.21	120.84	450	2012/7/17
W188	中山國小	1	24.25	120.83	370	2012/7/17
W189	福民國小	1	24.16	120.88	600	2012/7/17
W18A	谷關分校	1	24.20	121.01	800	2012/7/17
W18B	和平國小	1	24.17	120.90	600	2012/7/17
W18C	頭汴國小	1	24.12	120.75	190	2012/7/17
W18D	中正大學	4	23.57	120.48	76.2	2014/3/19
W18E	安和國小	1	23.51	120.31	13	2014/3/18
W18F	新岑國小		23.34	120.17	5.6	2014/3/18

W190	大湖國小	1	23.48	120.62	728	2012/8/31
W191	大埔國小	1	23.29	120.59	251	2012/8/31
W192	三興國小	1	23.56	120.48	110	2012/8/31
W193	大南國小	1	23.56	120.55	174	2012/8/31
W194	大同國小	1	23.46	120.24	10	2012/8/31
W195	同仁國小	1	23.40	120.51	112	2012/8/31
W196	太保國小	1	23.45	120.33	18	2012/8/31
W197	太興國小	1	23.54	120.63	773	2012/8/31
W198	民雄國小	1	23.56	120.43	31	2012/8/31
W199	來吉國小	1	23.53	120.74	820	2012/8/31
W19A	梅圳國小	2	23.58	120.59	382	2012/8/31
W19B	朴子國小	1	23.47	120.25	10	2012/8/31
W19C	汧水國小	1	23.38	120.53	179	2012/8/31
W19D	竹崎國小	1	23.52	120.55	141	2012/8/31
W19E	豐山國小	1	23.58	120.75	777	2012/8/31
W19F	香林國小	1	23.52	120.81	2203	2012/8/31
W200	茶山國小	1	23.30	120.67	419	2012/8/31
W201	梅北國小	1	23.59	120.55	140	2012/8/31
W202	光華國小	1	23.48	120.70	1393	2012/8/31
W203	瑞峰國小	1	23.56	120.67	1526	2012/8/31
W204	山美國小	1	23.38	120.67	504	2012/8/31
W205	黎明國小	1	23.44	120.60	245	2012/8/31
W206	灣潭國小	1	23.43	120.56	177	2012/8/31
W207	水上國中	1	23.42	120.40	28	2012/8/31
W208	阿里山中小	2	23.47	120.70	1181	2012/8/31
W209	安靖國小	1	23.55	120.58	390	2012/8/31
W20A	龍眼分校	1	23.58	120.63	1057	2012/8/31
W20B	昇平國中	1	23.49	120.56	132	2012/8/31
W20C	達邦國小	2	23.45	120.75	969.6	2014/3/19
W20D	北園國小		23.49	120.43	36.9	2014/3/19
W20E	興嘉國小	1	23.47	120.44	39	2014/3/18
W20F	文雅國小	1	23.48	120.49	124	2014/3/18
W210	仙草國小	1	23.34	120.47	139	2012/11/30
W211	竹門國小	1	23.35	120.42	42	2012/11/30
W212	大竹國小	1	23.37	120.41	39	2012/11/30

W213	白河國小	1	23.35	120.41	39	2012/11/30
W214	重溪國小	1	23.29	120.36	23	2012/11/30
W215	內角國小	1	23.40	120.44	35	2012/11/30
W216	果毅國小	1	23.26	120.37	26	2012/11/30
W217	東山國小	1	23.32	120.41	56.2	2012/11/30
W218	官田國小	1	23.19	120.34	20.3	2012/11/30
W219	新市國小	1	23.08	120.30	15.3	2012/11/30
W21A	山上國小	1	23.10	120.36	33.4	2012/11/30
W21B	新化國小	1	23.04	120.31	65.7	2012/11/30
W21C	那拔國小	1	23.07	120.35	110	2012/11/30
W21D	歸仁國小	1	22.97	120.30	62.6	2012/11/30
W21E	龍崎國小	1	22.96	120.36	93.2	2012/11/30
W21F	崇和國小	1	22.90	120.35	43	2012/11/30
W220	龍潭國小	1	23.03	120.27	8.4	2012/11/30
W221	永康國小	1	23.03	120.26	26.2	2012/11/30
W222	崑山國小	1	23.01	120.26	15.4	2012/11/30
W223	博愛國小	1	22.99	120.21	39.6	2012/11/30
W224	復興國小	1	22.98	120.24	27.7	2012/11/30
W225	虎山國小	1	22.95	120.23	30	2012/11/30
W226	麻豆國小	1	23.19	120.25	1.4	2012/11/30
W227	佳興國小	1	23.19	120.19	4.4	2012/11/30
W228	海東國小	1	23.05	120.17	15.4	2012/11/30
W229	竹埔國中小	1	23.27	120.25	0	2012/11/30
W22A	德高國小	1	22.96	120.24	36.2	2012/11/30
W22B	新東國小	1	23.34	120.32	23.8	2012/11/30
W22C	左鎮國小	1	23.06	120.40	73.1	2012/11/30
W22D	柳營國小	2	23.28	120.31	14.3	2012/11/30
W22E	仁德國小	1	22.96	120.25	29.6	2012/11/30
W22F	南安國小	1	23.10	120.23	9.4	2012/11/30
W230	層林國小	1	23.08	120.43	73.3	2012/11/30
W231	西埔國小	2	23.05	120.45	79	2012/11/30
W232	南化國小	1	23.04	120.47	100.2	2012/11/30
W233	玉山國小	1	23.07	120.52	71.9	2012/11/30
W234	玉井國小	1	23.12	120.46	71.3	2012/11/30
W235	瑞峰國小	1	23.17	120.60	233.1	2012/11/30

W236	楠西國小	1	23.17	120.49	98.9	2012/11/30
W237	青山國小	1	23.28	120.47	130.2	2012/11/30
W240	大坪國小	1	24.68	121.06	208.7	2012/12/24
W241	五峰國小	1	24.63	121.12	429	2012/12/24
W242	三峰國小	1	24.72	121.00	169.7	2012/12/20
W243	二重國小	1	24.77	121.06	153.2	2012/12/21
W244	寶山國小	1	24.74	121.02	82	2012/12/21
W245	富興國小	1	24.69	120.99	104.7	2012/12/21
W246	竹東國小	1	24.74	121.09	131.5	2012/12/24
W247	桃山國小	1	24.58	121.11	523.5	2012/12/24
W248	芎林國小	1	24.77	121.08	139	2012/12/21
W249	建功國小	1	24.80	121.00	51	2012/12/29
W24A	信勢國小	1	24.90	121.04	74.4	2013/1/2
W24B	尖石國中	1	24.71	121.20	335.2	2013/1/7
W24C	尖石國小	1	24.73	121.23	354.7	2013/1/7
W24D	秀巒國小	1	24.62	121.29	841.4	2013/1/9
W24E	錦山國小	1	24.77	121.22	210.1	2013/1/8
W24F	玉峰國小	2	24.66	121.30	728.6	2013/1/8
W250	新光國小	1	24.58	121.30	1600	2013/1/9
W251	竹蓮國小	1	24.80	120.97	41.9	2013/1/3
W252	坪林國小	1	24.80	121.14	134.5	2013/1/3
W253	香山國小	1	24.80	120.94	24.4	2013/1/3
W254	新竹國小	1	24.80	120.97	21.4	2013/1/4
W255	新城國小	1	24.73	120.97	29.7	2012/12/20
W256	長安國小	1	24.89	121.09	169.5	2013/1/2
W257	湖口國小	1	24.88	121.06	102.5	2013/1/2
W258	科園國小	1	24.78	121.01	99.6	2013/1/2
W259	南隘國小	1	24.73	120.93	14.3	2013/1/2
W260	五寮國小	1	24.86	121.36	171.5	2013/4/1
W261	插角國小	1	24.87	121.40	169.7	2013/4/1
W262	有木國小	1	24.85	121.44	244.5	2013/4/1
W263	永吉國小	2	24.96	121.33	128.5	2013/4/1
W264	柑園國小	3	24.96	121.39	38	2013/4/1
W265	土城國小	1	24.97	121.44	23	2013/4/1
W266	建安國小	1	24.93	121.45	94	2013/4/1

W267	文林國小	2	25.00	121.42	38.2	2013/4/1
W268	三多國小	1	25.02	121.41	105	2013/4/1
W269	丹鳳國小	3	25.02	121.41	21	2013/4/1
W26A	豐年國小	1	25.03	121.44	29.5	2013/4/1
W26B	明志國小	1	25.04	121.43	12	2013/4/1
W26C	泰山國小	2	25.06	121.43	22	2013/4/1
W26D	德音國小	1	25.07	121.43	27	2013/4/1
W26E	五股國小	2	25.08	121.44	40	2013/4/1
W26F	林口國小	1	25.08	121.39	279.6	2013/4/1
W270	嘉寶國小	2	25.11	121.34	182.8	2013/4/1
W271	八里國小	1	25.15	121.40	22.2	2013/4/1
W272	成州國小	2	25.10	121.45	7.7	2013/4/1
W273	蘆洲國小	1	25.08	121.47	15.6	2013/4/1
W274	永福國小	1	25.08	121.48	17	2013/4/1
W275	興穀國小	2	25.05	121.48	13.8	2013/4/1
W276	光復國小	1	25.02	121.48	53	2013/4/1
W277	後埔國小	1	25.00	121.46	28	2013/4/1
W278	永和國小	1	25.00	121.52	39.5	2013/4/1
W279	雙城國小	2	24.95	121.49	99.3	2013/4/1
W27A	屈尺國小	2	24.92	121.55	59.8	2013/4/1
W27B	龜山國小	2	24.90	121.55	66.7	2013/4/1
W27C	烏來國小	2	24.86	121.55	163	2013/4/1
W27D	竹圍國小	1	25.15	121.46	22	2013/4/1
W27E	坪頂國小	1	25.16	121.48	280	2013/4/1
W27F	三芝國小	2	25.26	121.50	63	2013/4/1
W280	石門國小	1	25.29	121.57	1.9	2013/4/1
W281	中角國小	1	25.24	121.63	73	2013/4/1
W282	金山國小	2	25.22	121.64	18	2013/4/1
W283	三和國小	1	25.22	121.60	70	2013/4/1
W284	大坪國小	1	25.17	121.64	354	2013/4/1
W285	萬里國小	2	25.18	121.69	29	2013/4/1
W286	瑞芳國小	1	25.11	121.80	120	2013/4/1
W287	鼻頭國小	1	25.12	121.92	34	2013/4/1
W288	和美國小	2	25.08	121.91	25	2013/4/1
W289	澳底國小	2	25.05	121.92	5	2013/4/1

W28A	福連國小	1	25.02	121.99	28	2013/4/1
W28B	雙溪國小	2	25.03	121.87	54	2013/4/1
W28C	柑林國小	1	25.02	121.80	112	2013/4/1
W28D	平溪國小	2	25.03	121.74	228	2013/4/1
W28E	永定國小	1	25.01	121.69	145	2013/4/1
W28F	石碇國小	1	24.99	121.66	134	2013/4/1
W290	白雲國小	2	25.05	121.62	60	2013/4/1
W291	汐止國小	1	25.07	121.66	18	2013/4/1
W292	雲海國小	2	24.95	121.64	569	2013/4/1
W293	坪林國小	3	24.94	121.71	217	2013/4/1
W294	深坑國小	1	25.00	121.62	18	2013/4/1
W295	新店國小	1	24.95	121.54	60	2013/4/1
W296	福山國小	1	24.78	121.50	425	2013/4/1
T001	台科大	2	25.01	121.54	19	2013/10/3
T002	台大生技	3	25.02	121.55	18	2013/10/3
T003	台大電機	B1	25.02	121.54	19	2013/10/17
D001	東華人社院	2	23.89	121.54	41	2013/11/28
D002	東華教育學院	1	23.90	121.54	40	2013/11/28
D003	東華圖書館	1	23.90	121.54	46	2013/11/28
D004	東華環境解說	1	23.89	121.55	37	2013/11/28
D005	東華學生活動 中心	1	23.90	121.54	45	2013/11/28
W300	基隆消防局	2	25.13	121.75	19	2014/1/9
W301	海大河工	5	25.15	121.78	13	2014/1/9
W302	復興國小	2	25.11	121.67	33	2014/1/23
W303	武崙國小	1	25.14	121.71	76	2014/1/22
W304	碇內國小	2	25.10	121.75	39	2014/1/23
W305	深澳國小	2	25.13	121.78	79	2014/1/23
W306	月眉國小	1	25.12	121.76	35	2014/1/23
W310	指南國小	2	24.98	121.58	87	2014/4/22
W311	吳興國小	2	25.03	121.57	16	2014/4/23
W312	信義國中	1	25.03	121.57	19	2014/4/23
W313	敦化國小	1	25.05	121.55	14	2014/4/22
W314	松山國小	1	25.05	121.58	13	2014/4/23
W315	大湖國小	1	25.09	121.60	29	2014/4/23

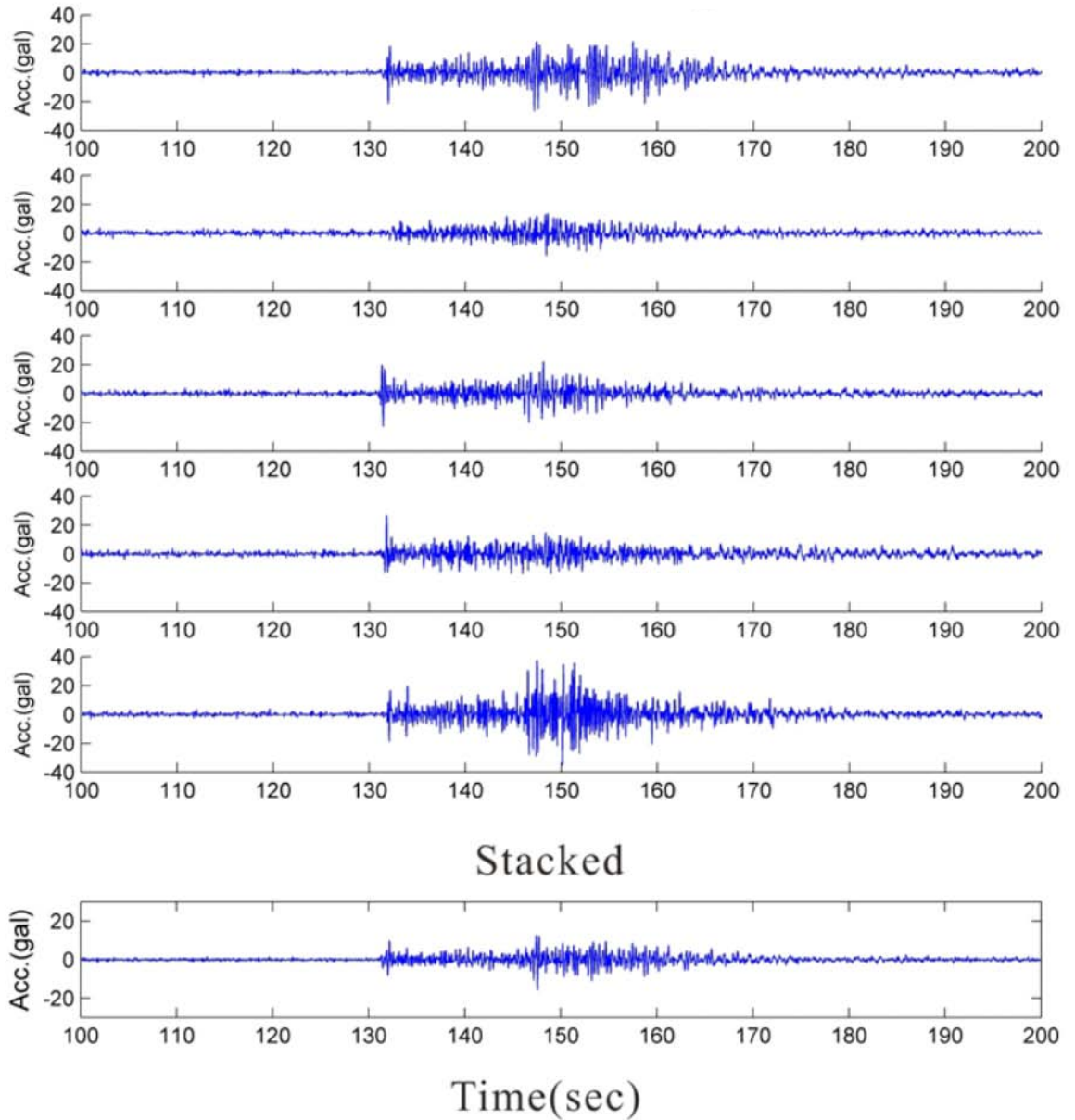
W316	西湖國小	1	25.08	121.57	12	2014/4/22
W317	雙溪國小	1	25.11	121.56	224	2014/4/22
W318	平等國小	1	25.13	121.58	405	2014/4/22
W319	湖田國小	1	25.17	121.54	656	2014/4/22
W31A	天母國中	1	25.12	121.54	31	2014/4/22
W31B	士林國小	1	25.09	121.53	10	2014/4/22
W31C	延平國小	1	25.07	121.51	8	2014/4/22
W31D	立農國小	1	25.12	121.51	10	2014/4/22
W31E	義方國小	1	25.14	121.51	67	2014/4/22
W31F	關渡國小	1	25.13	121.47	18	2014/4/22
W320	麗山國小	1	25.08	121.57	14.00	2014/7/30
W330	青埔國小	1	25.01	121.21	108.00	2014/7/30
W331	新坡國小	1	25.01	121.14	75.20	2014/7/30
W332	新屋國小	1	24.97	121.10	92.70	2014/7/30
W333	觀音國小	1	25.04	121.08	36.00	2014/7/30
W334	笨港國小	1	24.97	121.03	20.00	2014/7/30
W335	內海國小	1	25.09	121.19	22.10	2014/7/30
W336	水美國小	1	24.92	121.14	150.80	2014/7/30
W337	忠貞國小	1	24.92	121.25	196.00	2014/7/30
W338	海湖國小	1	25.10	121.27	23.80	2014/7/30
W339	光華國小	2	24.66	121.40	880.00	2014/7/30
W33A	富岡國小	2	24.94	121.08	118.00	2014/7/30
W33B	美華國小	2	24.88	121.30	189.20	2014/7/30
W33C	三和國小	1	24.85	121.17	184.90	2014/7/30
W33D	武漢國小	1	24.87	121.23	227.00	2014/7/30
W33E	三坑國小	3	24.84	121.25	169.40	2014/7/30
W33F	長興國小	1	24.80	121.31	351.00	2014/7/30
W340	羅浮國小	1	24.80	121.36	317.50	2014/7/30
W341	瑞塘國小	2	24.91	121.18	208.70	2014/7/30
W342	中山國小	1	24.99	121.29	132.90	2014/7/30
W343	大坑國小	1	25.05	121.31	112.00	2014/7/30
W344	三光國小	1	24.67	121.37	697.70	2014/7/30
W350	大城國小	1	23.85	120.32	6.5	2014/10/28
W351	伸仁國小	1	24.15	120.48	7.7	2014/10/30
W352	頂番國小	1	24.09	120.48	16.7	2014/10/21

W353	鹿東國小	1	24.06	120.44	3.6	2014/10/21
W354	文昌國小	1	24.01	120.42	10	2014/10/21
W355	建新國小	1	23.98	120.39	16	2014/10/14
W356	新生國小	1	23.94	120.40	12.6	2014/10/14
W357	中正國小	2	23.90	120.37	16	2014/10/29
W358	民靖國小	1	23.88	120.42	13.3	2014/10/22
W359	南州國小	1	23.85	120.49	37.3	2014/10/24
W35A	埤頭國小	1	23.89	120.48	23.3	2014/10/22
W35B	陸豐國小	1	23.92	120.50	34.6	2014/10/27
W35C	中興國小	1	23.95	120.44	7.9	2014/10/22
W35D	溪湖高中	1	23.97	120.49	22.1	2014/10/27
W35E	明正國小	1	24.00	120.49	7.7	2014/10/29
W35F	新庄國小	1	24.10	120.53	20	2014/10/21
W360	彰化高中	1	24.07	120.55	43	2014/10/15
W361	白沙國小	1	24.05	120.54	28	2014/10/15
W362	三春國小	1	24.02	120.57	31	2014/10/15
W363	村東國小	1	23.99	120.59	45.3	2014/10/21
W364	東山國小	2	23.97	120.60	41	2014/10/15
W365	員林高中	1	23.96	120.56	24.6	2014/10/20
W366	湳雅國小	1	23.92	120.60	34.7	2014/10/16
W367	東和國小	1	23.87	120.61	50.4	2014/10/24
W368	二水國小	1	23.81	120.62	85	2014/10/16
W369	成功國小	1	23.83	120.55	42.4	2014/10/20
W36A	南鎮國小	1	23.89	120.56	37	2014/10/20
H001	國網中心	B1	24.78	121.00	115	2014/11/6
H002	竹園分隊	1	24.78	121.01	95	2014/11/6
H003	竹苑樓	B1	24.78	121.01	97	2014/11/6
H004	竹村分隊	1	24.77	121.00	108	2014/11/6
H005	消防局	1	24.77	121.01	103	2014/11/6
H006	矽導中心	1	24.77	121.02	103	2014/11/6
H007	清潔隊	1	24.76	121.02	131	2014/11/6
H008	廠房 9 樓	9	24.78	121.00	100	2014/12/15
H009	廠房 5 樓	5	24.78	121.00	100	2014/12/15
H010	廠房地下室	B1	24.78	121.00	100	2014/12/15
W370	北港高中	1	23.58	120.30	9.3	2014/12/9

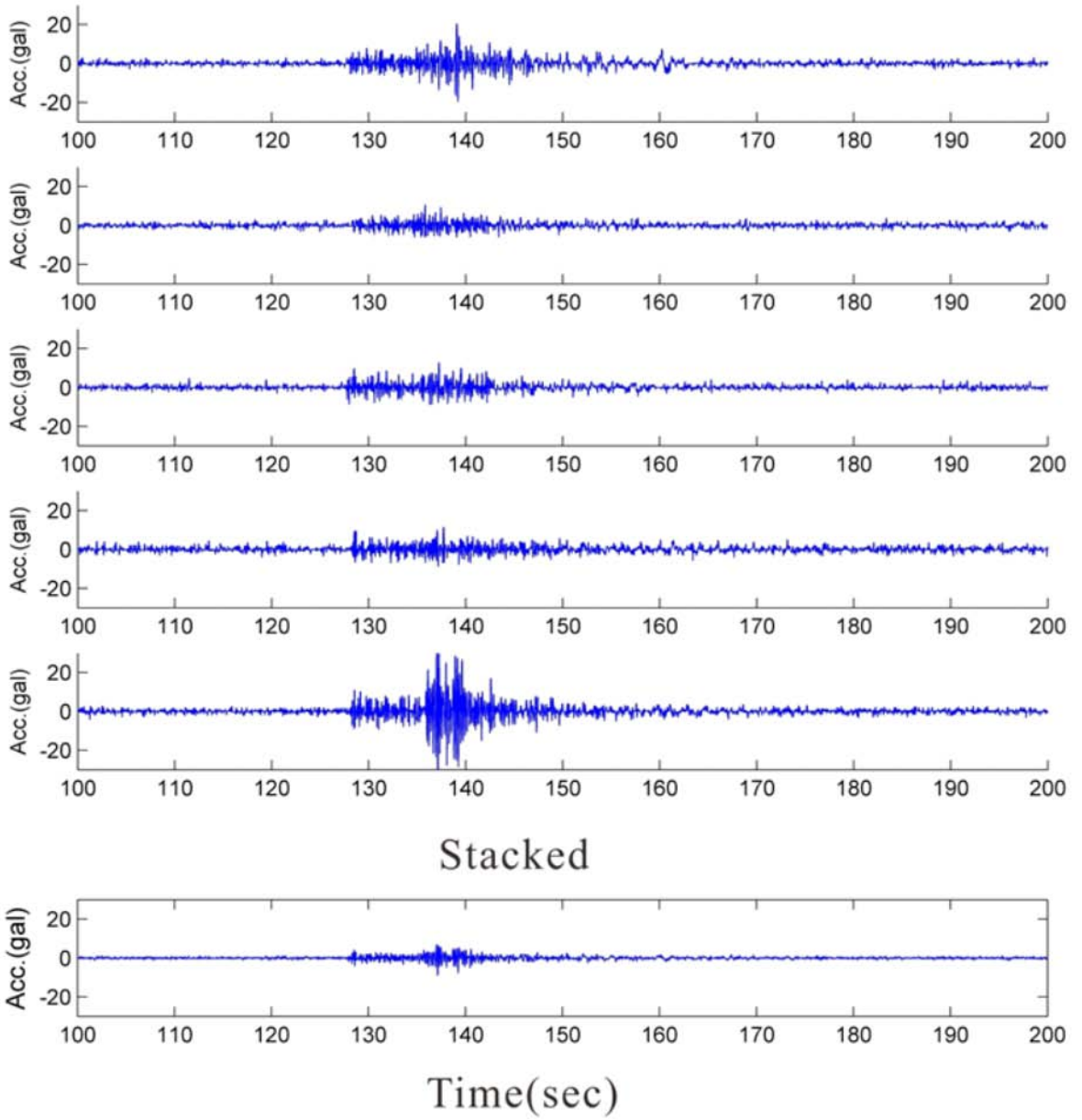
W371	同安國小	1	23.71	120.27	16.1	2014/12/5
W372	文光國小	1	23.54	120.19	1.1	2014/12/5
W373	台西國中	1	23.71	120.19	7.7	2014/12/2
W374	新興國小	1	23.74	120.22	3	2014/12/2
W375	頂湖國小	1	23.60	120.18	3	2014/12/2
W376	飛沙國小	1	23.64	120.18	5	2014/12/2
W377	廣興國小	1	23.77	120.46	32.9	2014/11/27
W378	義賢國小	1	23.82	120.41	17.9	2014/11/27
W379	陽明國小	1	23.79	120.36	15.6	2014/11/27
W37A	橋頭國小	1	23.80	120.27	10	2014/11/27
W37B	秀潭國小	1	23.66	120.35	17	2014/11/26
W37C	忠孝國小	1	23.62	120.32	11	2014/11/26
W37D	東光國小	1	23.65	120.27	11.5	2014/11/26
W37E	潮厝國小	1	23.72	120.34	12.5	2014/11/26
W37F	正心中學	1	23.72	120.53	53.3	2014/11/25
W380	久安國小	1	23.68	120.51	47.4	2014/11/25
W381	大美國小	1	23.74	120.51	44.5	2014/11/25
W382	古坑國小	1	23.65	120.57	112.4	2014/11/21
W383	新光國小	1	23.69	120.59	84	2014/11/21
W384	林內國小	1	23.76	120.62	90	2014/11/21
W385	六合國小	1	23.77	120.56	52.4	2014/11/21
W386	光復國小	1	23.74	120.40	25.2	2014/11/24
W387	虎尾高中	1	23.71	120.44	38.7	2014/11/24
W388	嘉興國小	2	23.65	120.46	39.1	2014/11/21
W389	舊庄國小	1	23.63	120.40	20	2014/11/24
W38A	宏仁國小	1	23.60	120.24	8	2014/12/10

附錄二 各地震事件之陣列五測站波形及疊加波形

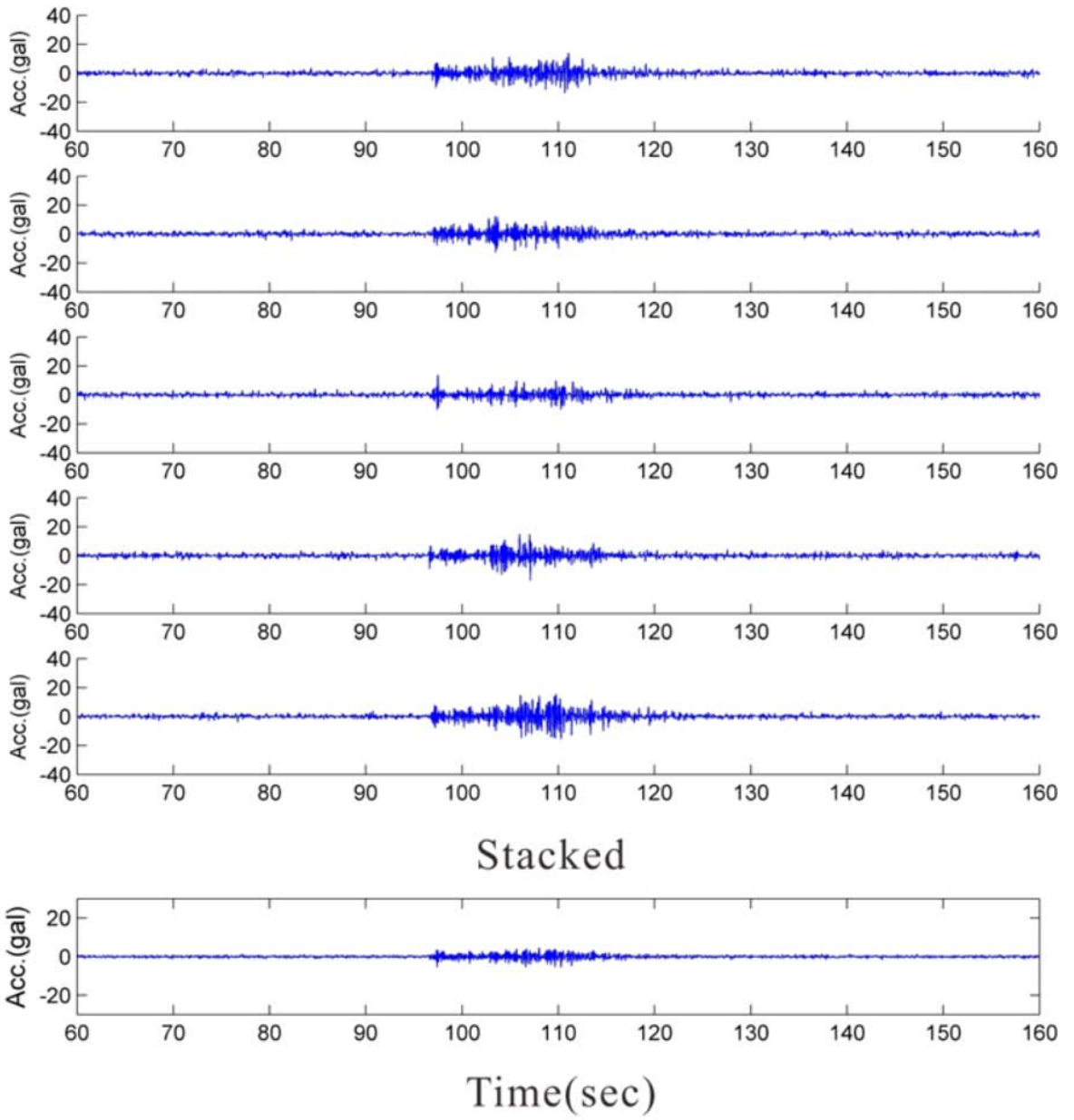
2013/02/02 M_L 5.6



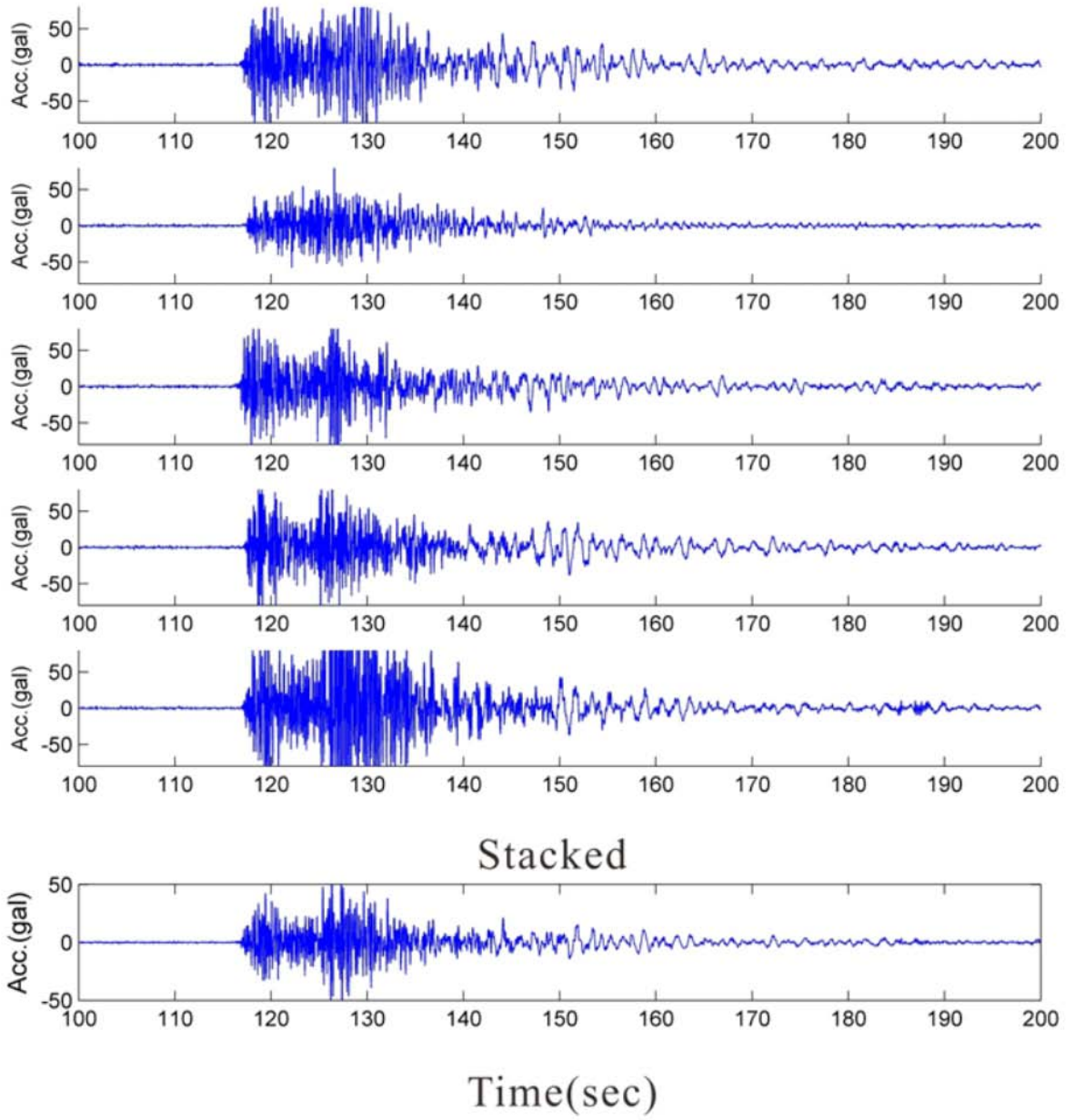
2013/02/21 M_L 4.8



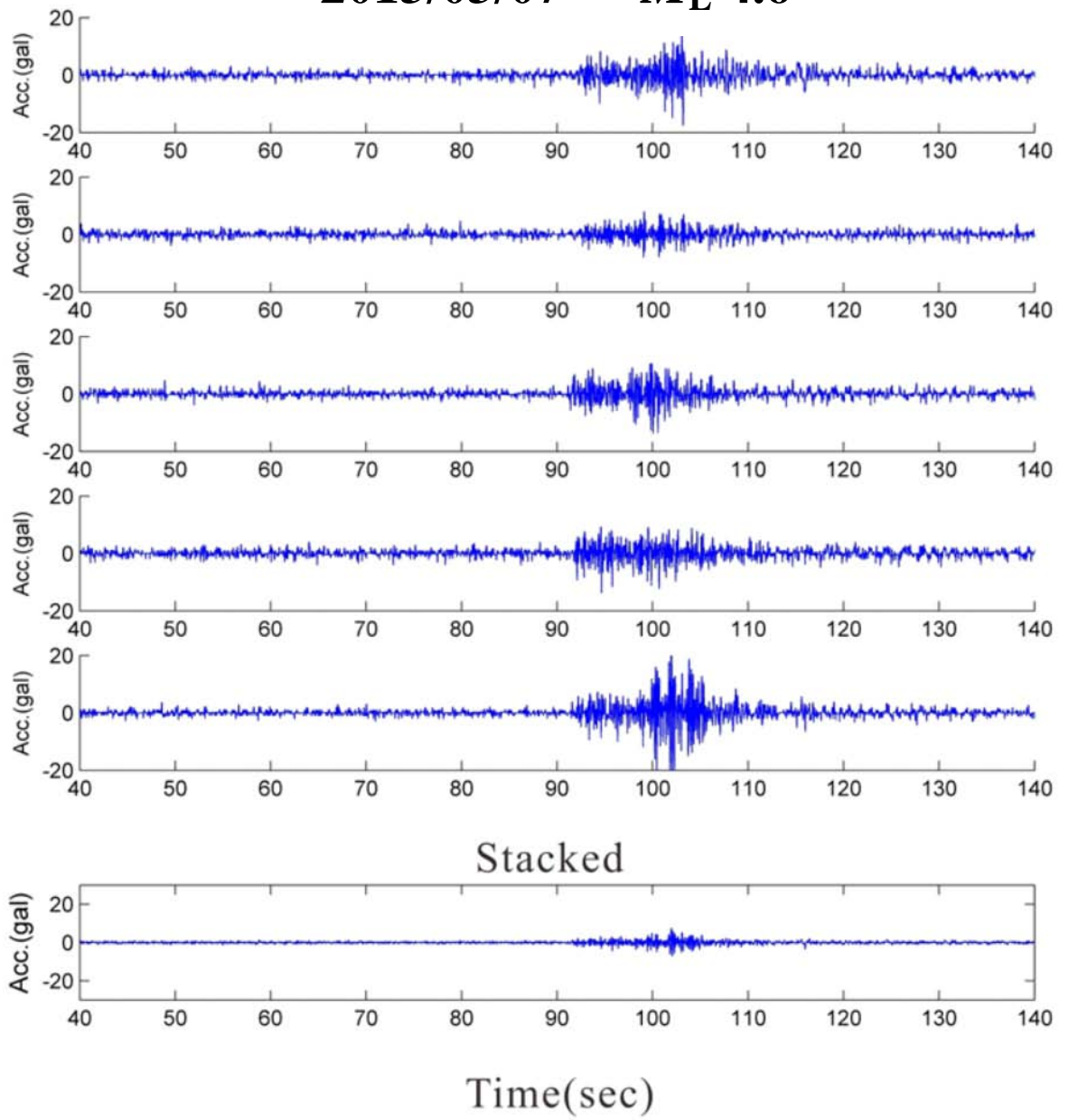
2013/03/06 M_L 4.7



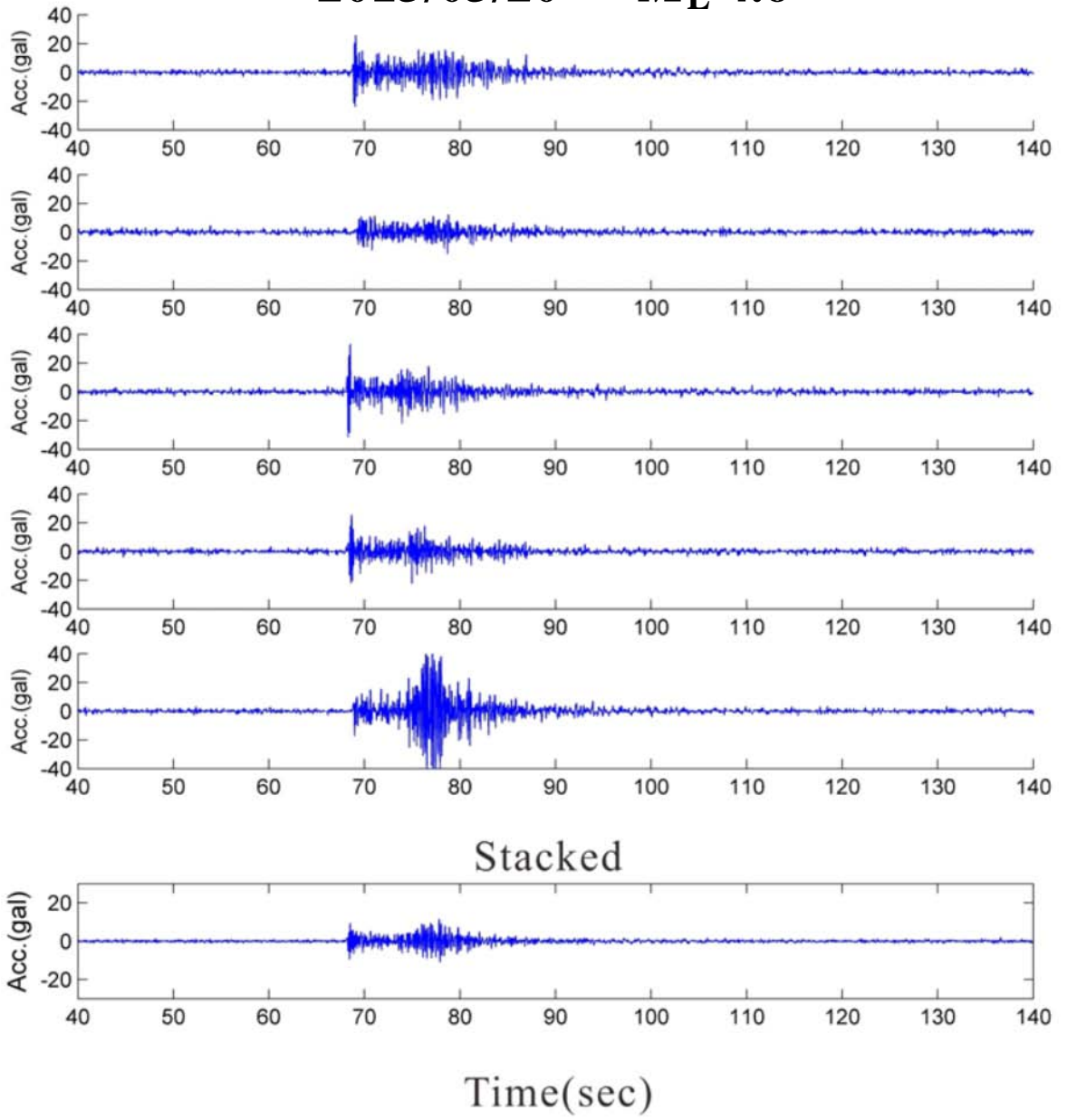
2013/03/07 M_L 5.9



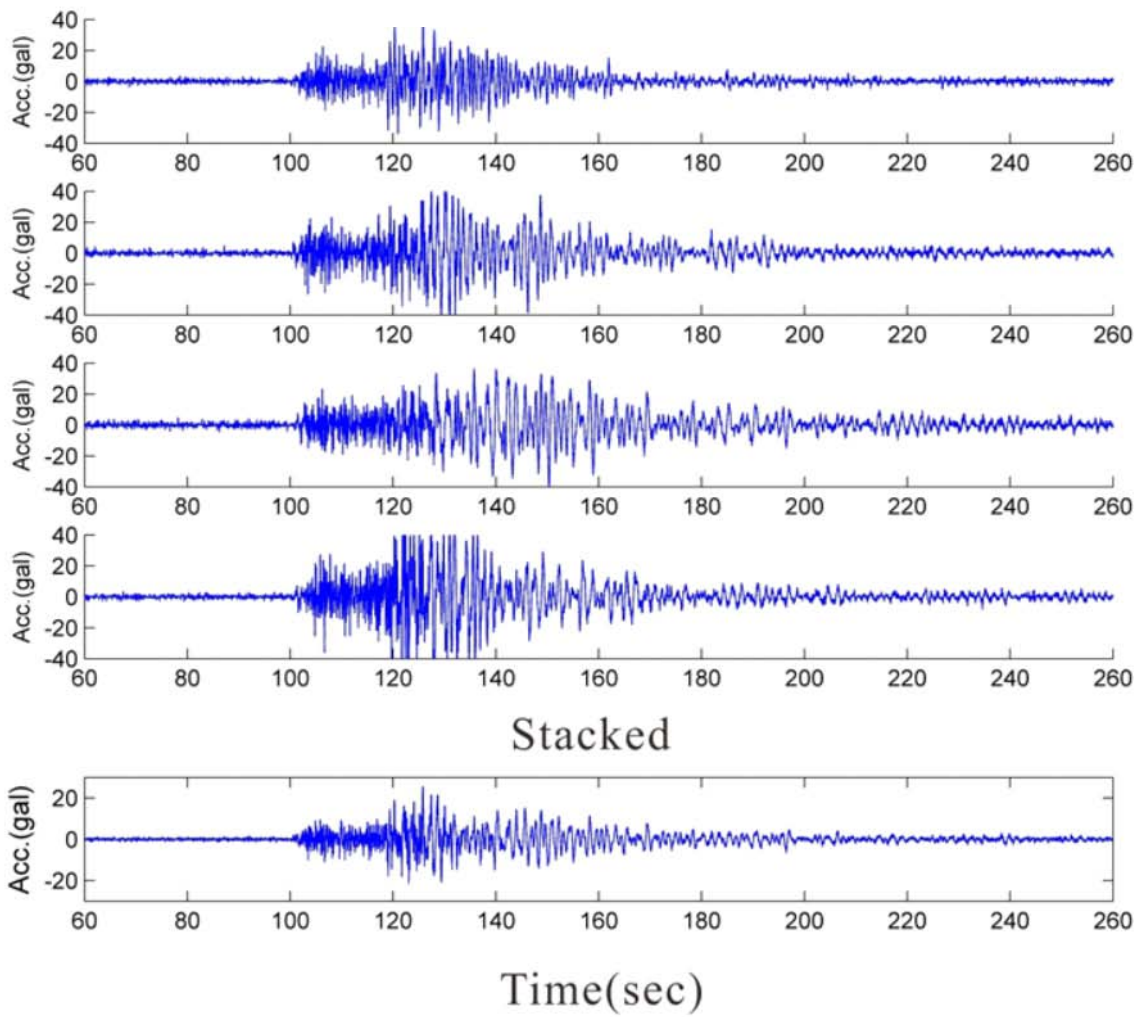
2013/03/07 M_L 4.6



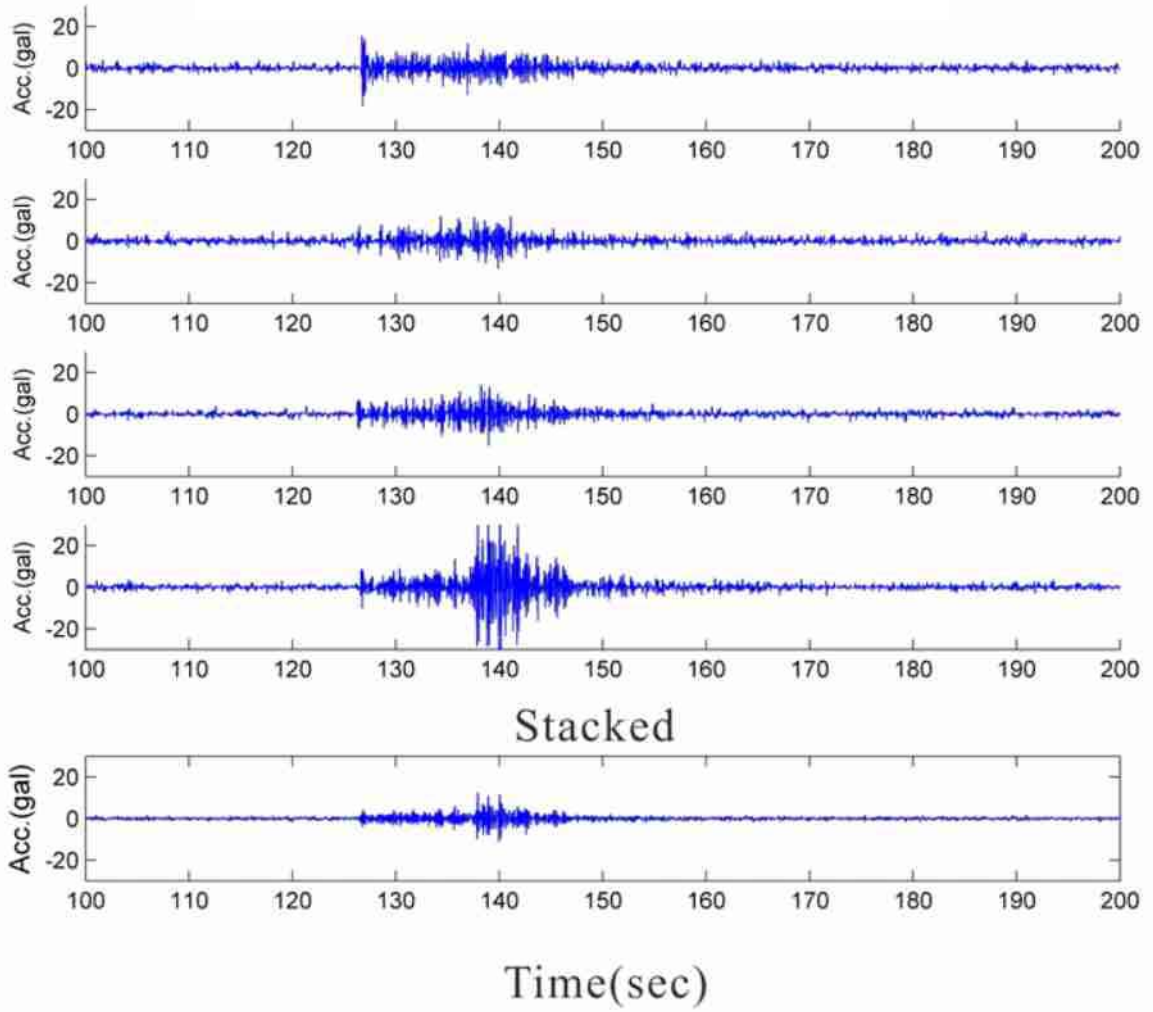
2013/03/20 M_L 4.6



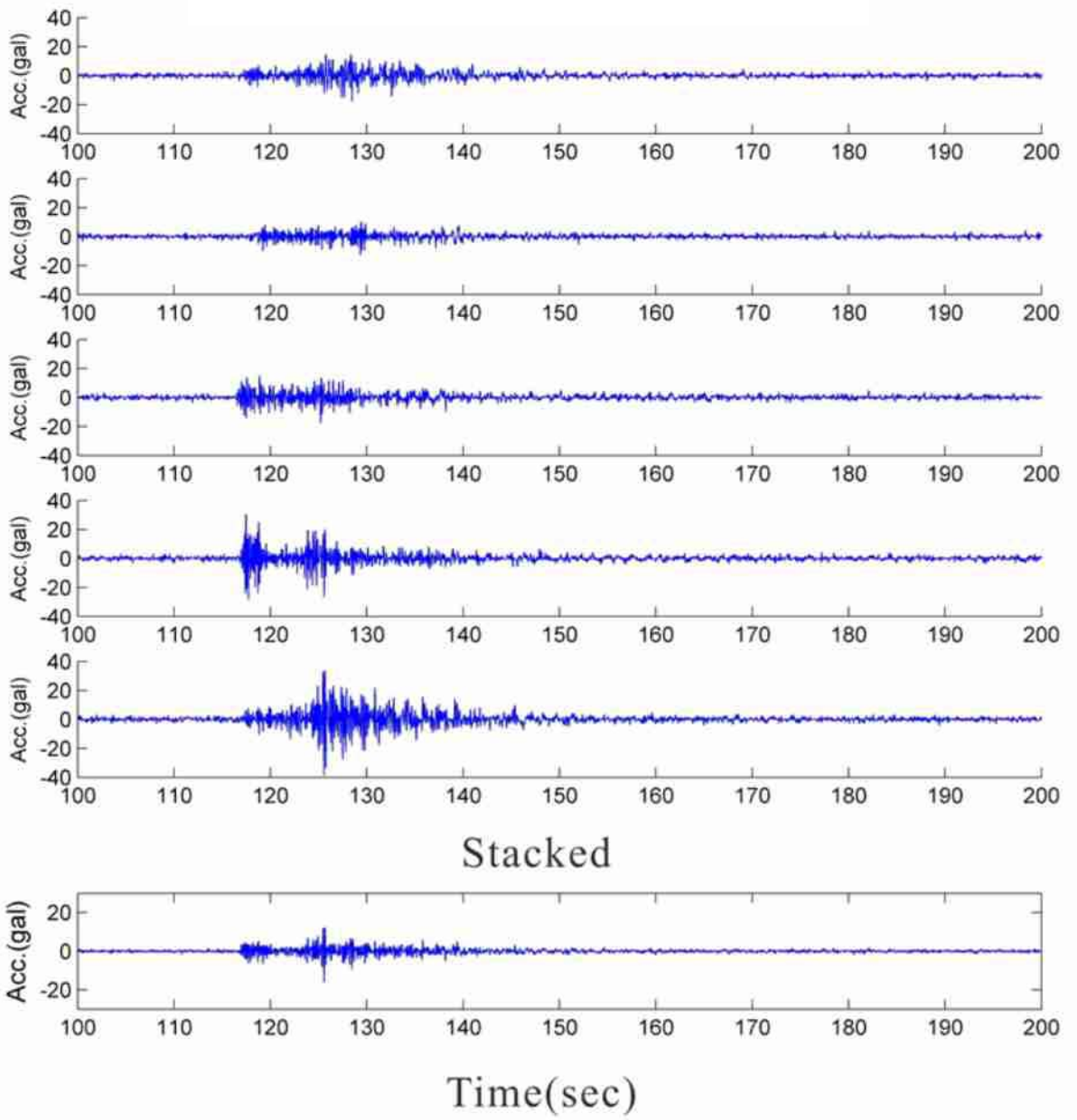
2013/03/27 M_L 6.1



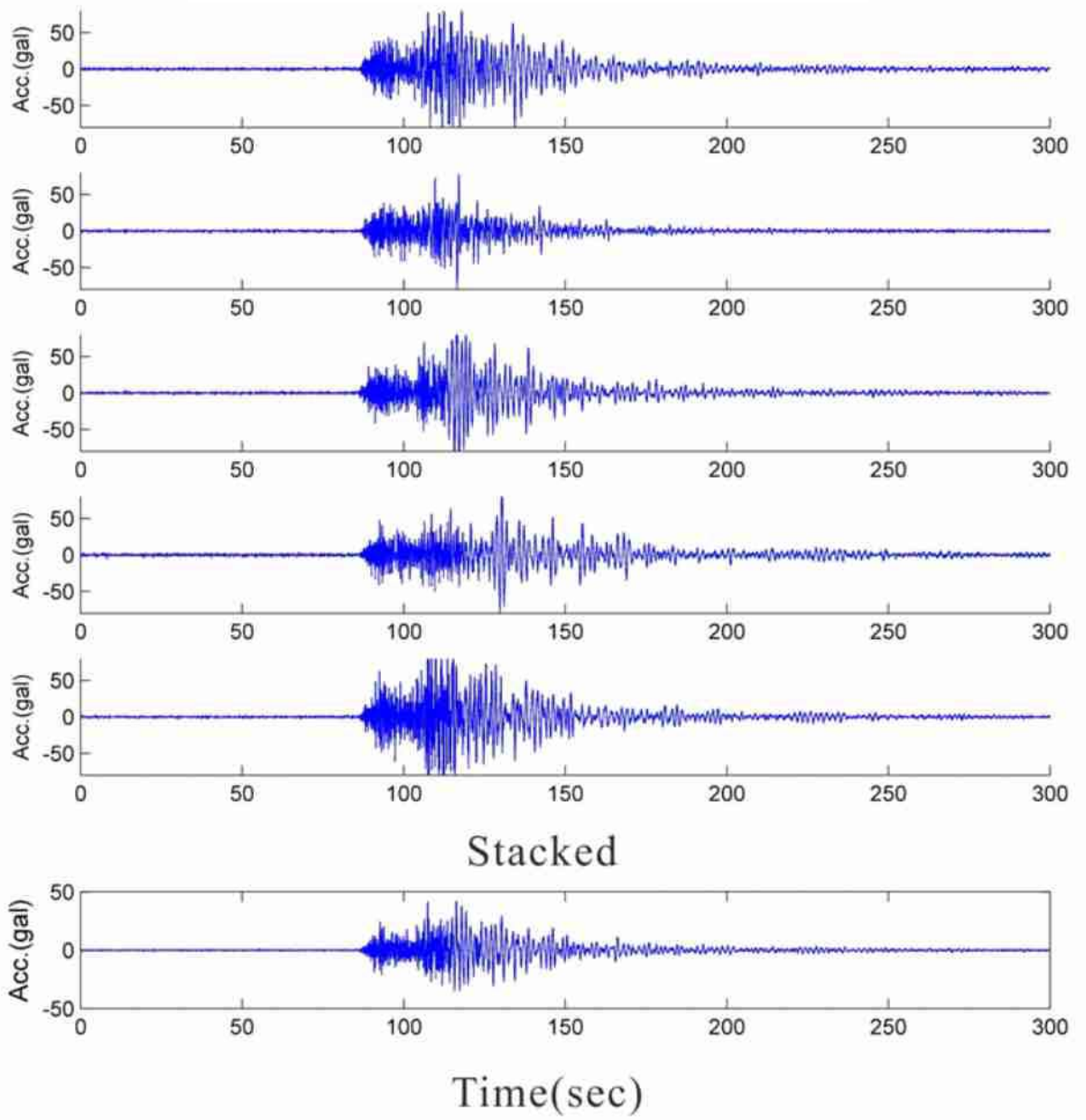
2013/04/21 M_L 5.0



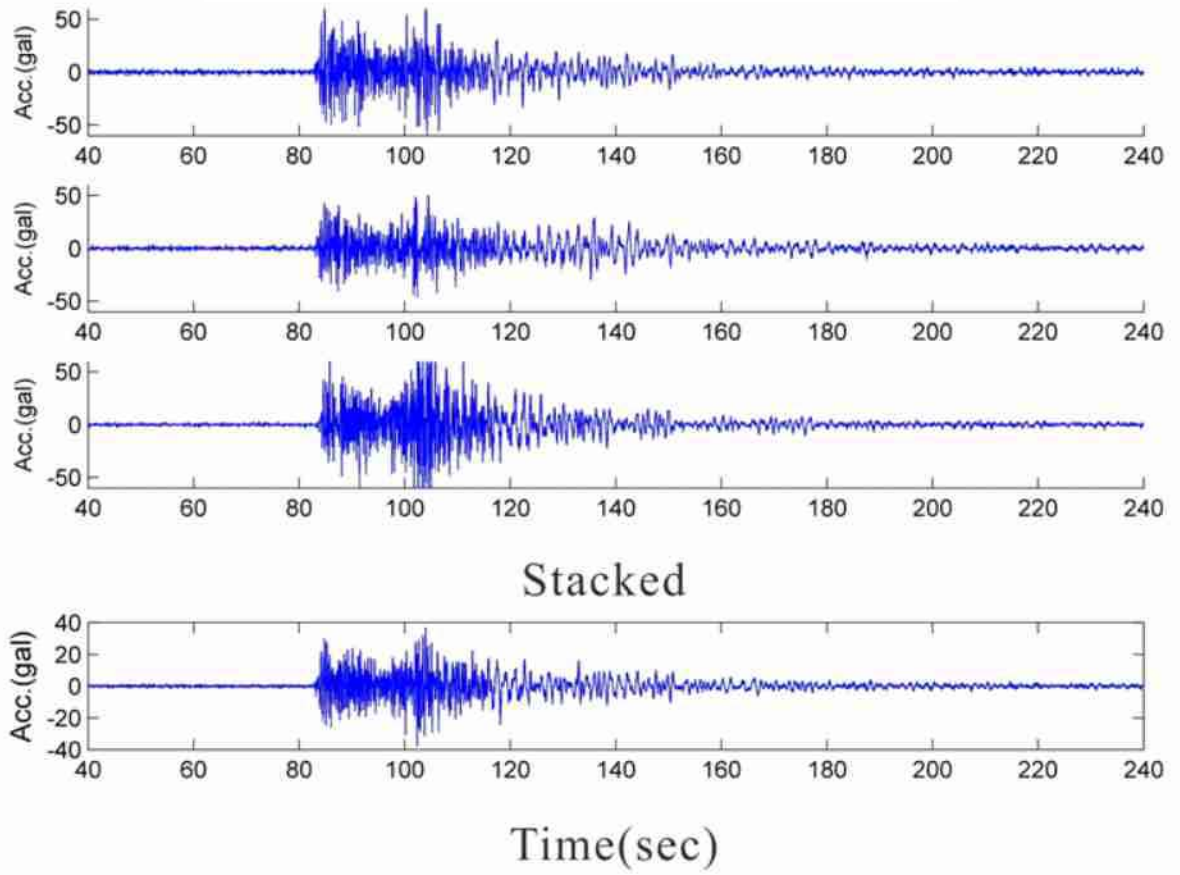
2013/05/21 M_L 4.9



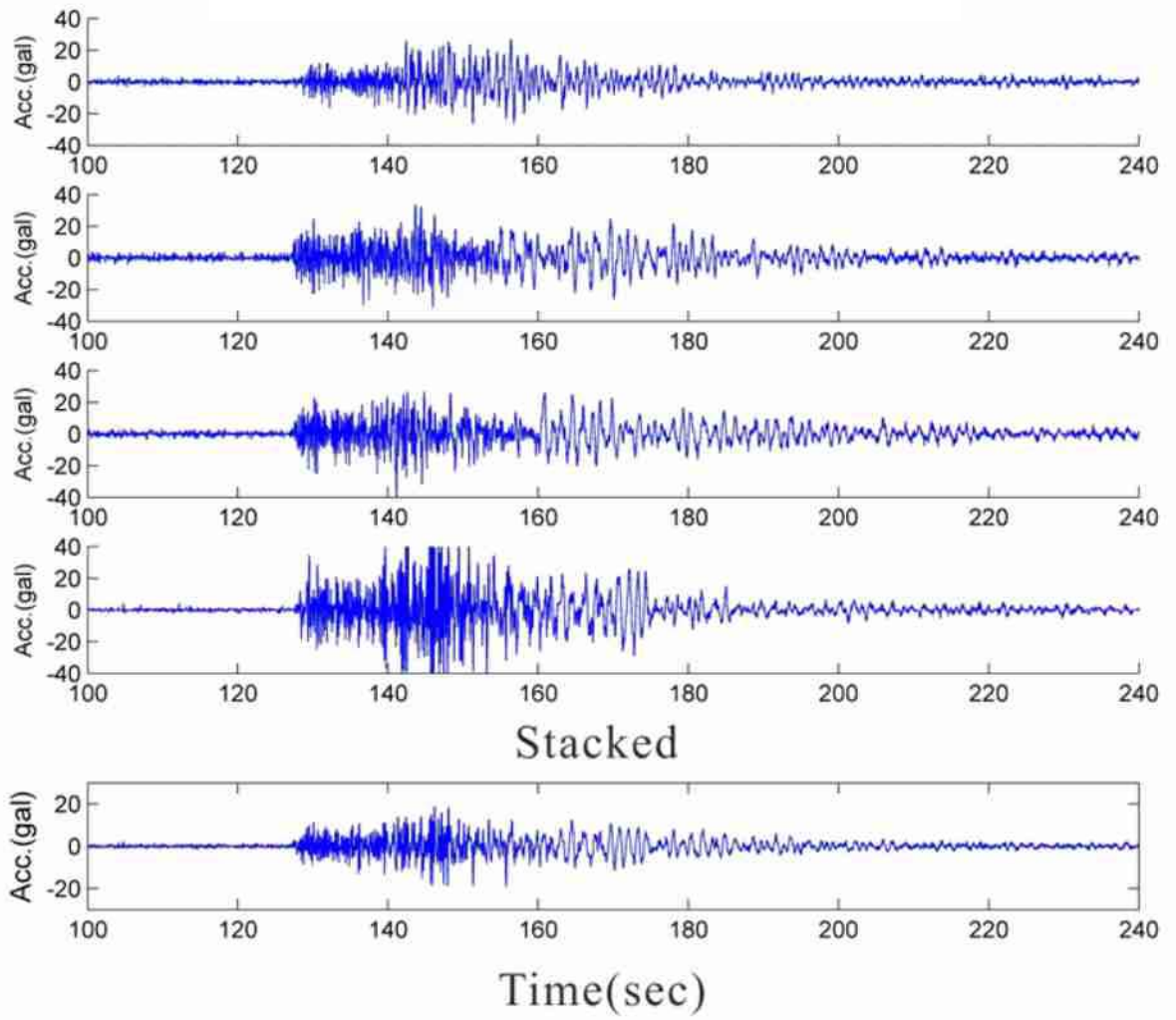
2013/06/02 M_L 6.5



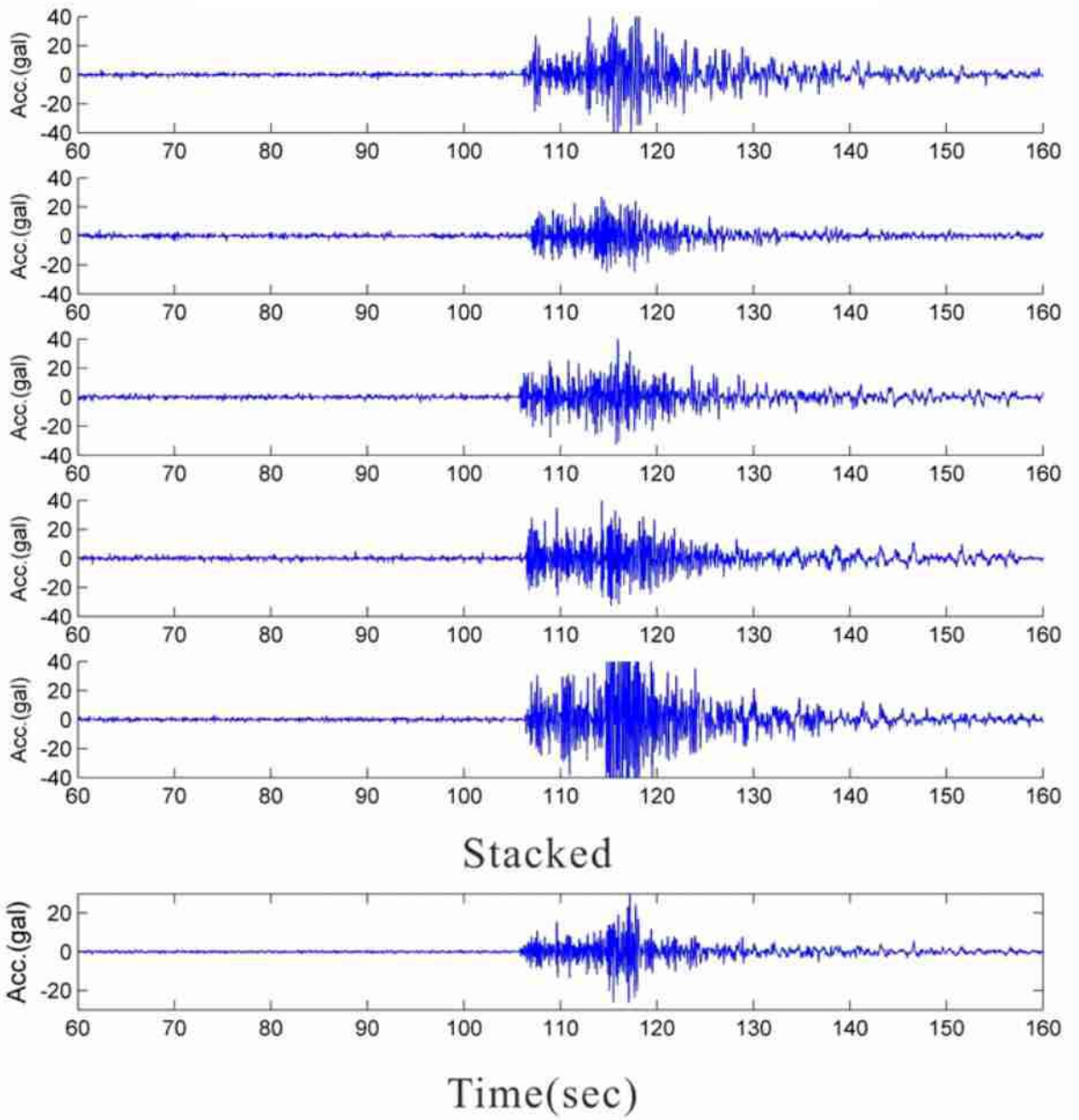
2013/06/07 M_L 6.2



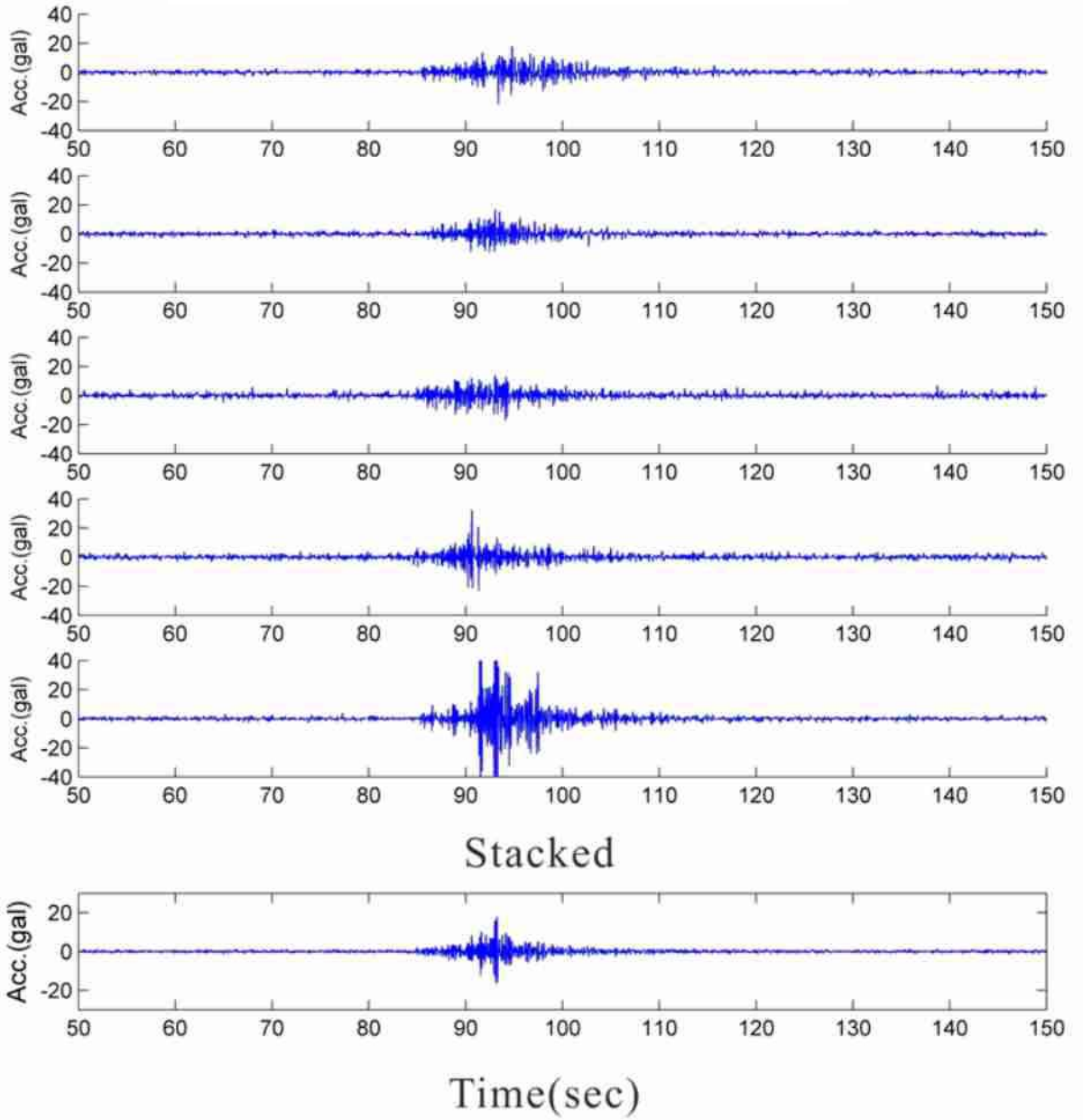
2013/06/28 M_L 5.7



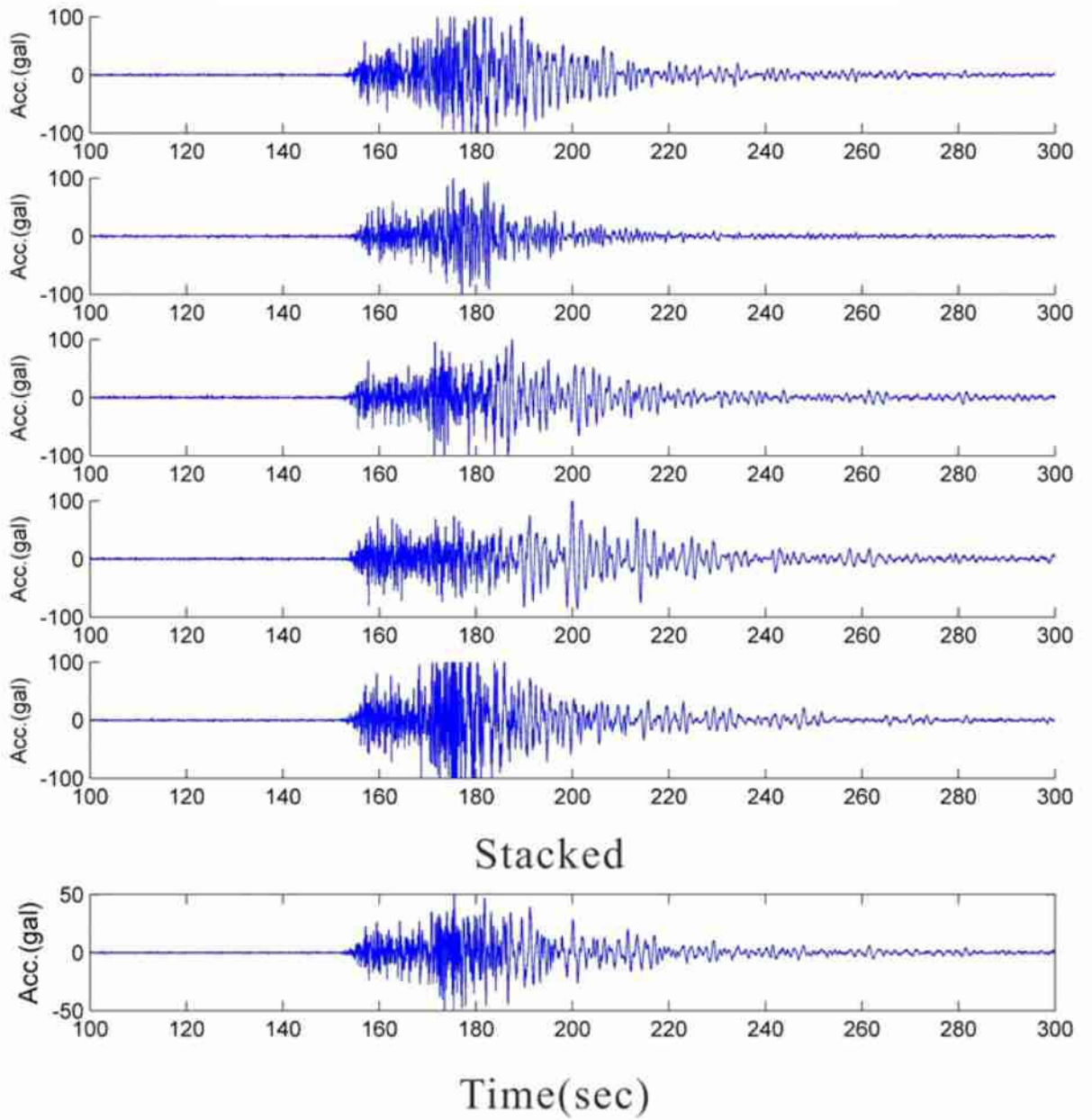
2013/07/16 M_L 5.5



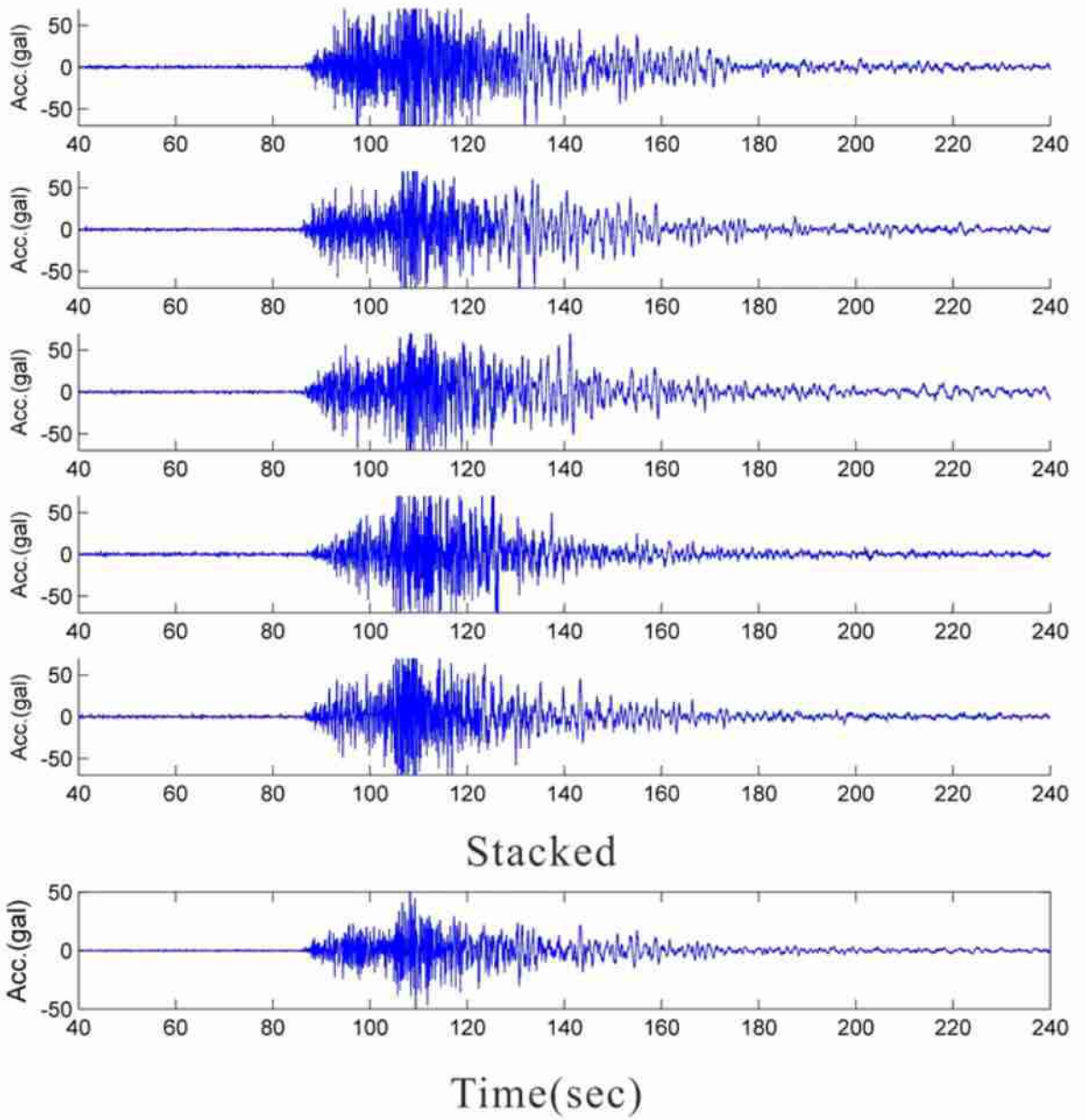
2013/09/18 M_L 4.5



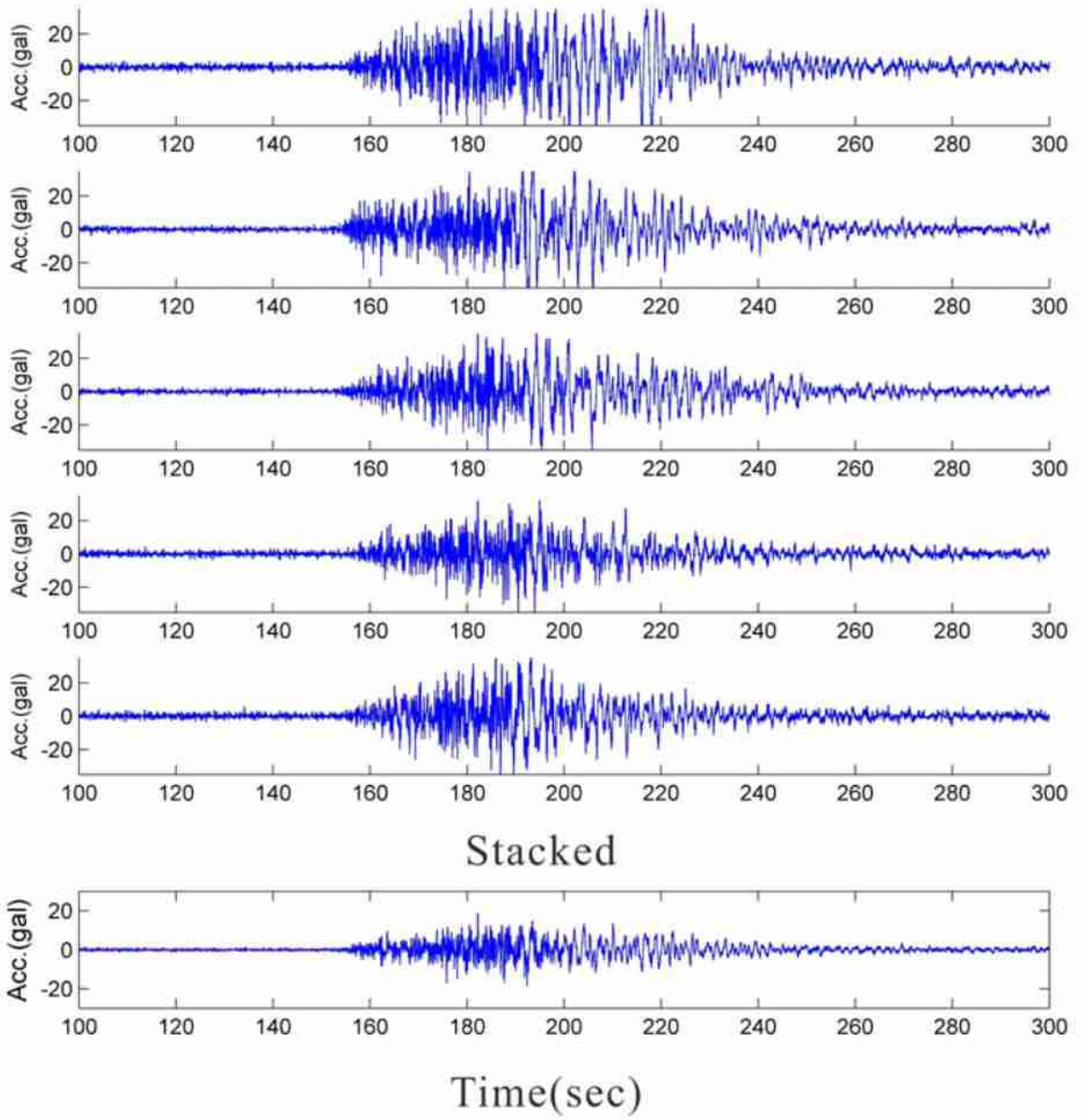
2013/10/31 M_L 6.4



2013/06/02 M_L 6.5



2013/10/31 M_L 6.4



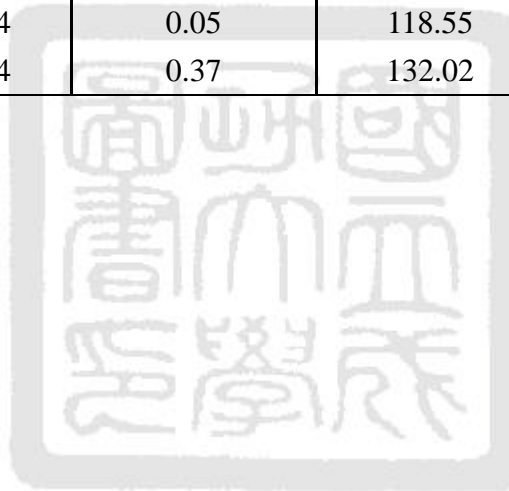
附錄三 各地震事件之陣列式波形處理參數表

2013/2/2 Lat. : 23.75 Lon. : 121.98 Depth(km): 35 Magnitude: 5.6				
Station	Pick time	Delay time(sec)	Distance(km)	Pd(cm)
W042	130.29	0.72	118.83	21.56
W046	131.39	0.46	122.10	8.37
W049	130.29	0	115.96	22.91
W04C	130.29	1.04	117.36	26.91
W04D	130.29	0.63	119.21	18.83
2013/2/21 Lat. : 24.31 Lon. : 121.44 Depth(km): 6.4 Magnitude: 4.8				
Station	Pick time	Delay time(sec)	Distance(km)	Pd(cm)
W042	126.98	0.33	58.20	8.05
W046	128.45	0.07	60.97	5.61
W049	127.71	0.65	56.84	9.96
W04C	128.45	0	60.09	9.57
W04D	128.45	0.15	59.07	11.04
2013/3/6 Lat. : 24.61 Lon. : 122.1 Depth(km): 69.8 Magnitude: 4.7				
Station	Pick time	Delay time(sec)	Distance(km)	Pd(cm)
W042	96.12	0.01	79.90	9.91
W046	95.75	0.17	80.75	7.98
W049	96.12	0	78.70	13.67
W04C	96.12	0.6	77.89	8.97
W04D	96.48	0.33	79.67	7.97
2013/3/7 Lat. : 24.3 Lon. : 121.46 Depth(km): 5.6 Magnitude: 5.9				
Station	Pick time	Delay time(sec)	Distance(km)	Pd(cm)
W042	116.32	0.29	58.02	84.85
W046	115.96	0	60.87	40.82
W049	116.69	0.08	56.54	111.89
W04C	117.06	0.35	59.75	165.24
W04D	115.96	0.13	58.88	109.25
2013/3/7 Lat. : 24.34 Lon. : 121.45 Depth(km): 6 Magnitude: 4.6				
Station	Pick time	Delay time(sec)	Distance(km)	Pd(cm)

W042	92.08	0.15	54.82	9.93
W046	92.08	0.25	57.57	5.24
W049	91.34	0.52	53.52	8.99
W04C	90.24	0.34	56.79	9.37
W04D	91.34	0	55.71	9.41
2013/3/20 Lat. : 24.45 Lon. : 121.95 Depth(km): 12.1 Magnitude: 4.6				
Station	Pick time	Delay time(sec)	Distance(km)	Pd(cm)
W042	67.83	0.34	40.90	26.01
W046	68.56	0	43.87	12.65
W049	66.36	0.93	37.88	33.34
W04C	67.09	0.49	38.27	25.62
W04D	67.46	0.42	40.99	17.30
2013/3/27 Lat. : 23.9 Lon. : 121.05 Depth(km): 19.4 Magnitude: 6.1				
Station	Pick time	Delay time(sec)	Distance(km)	Pd(cm)
W042	Failed			
W046	100.53	0	122.04	12.38
W049	100.16	0.26	118.31	20.88
W04C	100.89	0.27	121.57	15.08
W04D	100.859	0.02	120.36	10.35
2013/4/21 Lat. : 24.41 Lon. : 122.34 Depth(km): 70.6 Magnitude: 5				
Station	Pick time	Delay time(sec)	Distance(km)	Pd(cm)
W042	Failed			
W046	125.88	0	101.51	18.32
W049	126.25	0.37	98.04	7.97
W04C	125.88	0.31	97.15	7.22
W04D	125.88	0.05	99.76	10.21
2013/5/21 Lat. : 24.28 Lon. : 121.77 Depth(km): 14.5 Magnitude: 4.9				
Station	Pick time	Delay time(sec)	Distance(km)	Pd(cm)
W042	118.16	0	54.17	7.80
W046	119.26	0.53	57.50	8.20
W049	Failed			
W04C	117.06	0.17	53.47	30.30
W04D	116.69	0.14	54.68	10.63
2013/6/2 Lat. : 23.86 Lon. : 120.97 Depth(km): 14.5 Magnitude: 6.5				
Station	Pick time	Delay time(sec)	Distance(km)	Pd(cm)

W042	86.28	0.55	127.19	16.66
W046	86.28	0.66	129.72	16.48
W049	85.54	0	126.11	13.97
W04C	86.28	0.23	129.43	15.34
W04D	86.28	0.39	128.10	20.81
L001	86.28	0.3	102.79	27.17
L002	85.54	0.65	110.86	31.81
L003	84.07	0.34	100.55	7.11
L004	85.54	0	108.66	5.2
L005	86.13	0.37	122.89	17.84
2013/0607 Lat. : 23.98 Lon. : 122.65 Depth(km): 35.3 Magnitude: 6.2				
Station	Pick time	Delay time(sec)	Distance(km)	Pd(cm)
W042	Failed			
W046	Failed			
W049	81.14	0.18	127.17	37.93
W04C	81.87	0.08	126.54	43.09
W04D	81.14	0	129.92	7.32
2013/6/28 Lat. : 24.03 Lon. : 122.24 Depth(km): 19.8 Magnitude: 5.7				
Station	Pick time	Delay time(sec)	Distance(km)	Pd(cm)
W042	Failed			
W046	126.62	0.46	99.32	10.12
W049	127.36	0.62	93.21	24.74
W04C	126.62	0.6	93.49	22.43
W04D	126.62	0	96.39	34.68
2013/7/16 Lat. : 24.28 Lon. : 121.5 Depth(km): 4.9 Magnitude: 5.5				
Station	Pick time	Delay time(sec)	Distance(km)	Pd(cm)
W042	105.35	0.37	58.03	27.07
W046	103.15	0	61.02	2.92
W049	103.88	0.79	56.33	16.71
W04C	102.41	0.2	59.43	2.16
W04D	103.15	0.21	58.86	2.31
2013/9/18 Lat. : 24.64 Lon. : 122.09 Depth(km): 15.1 Magnitude: 4.5				
Station	Pick time	Delay time(sec)	Distance(km)	Pd(cm)
W042	84.73	0	39.70	6.408
W046	86.56	0.35	41.10	8.0986

W049	85.46	0.02	37.52	10.3661
W04C	83.27	0.12	35.69	6.7418
W04D	84.36	0.01	39.21	9.5185
2013/10/31	Lat. : 23.57	Lon. : 121.35	Depth(km): 15	Magnitude: 6.4
Station	Pick time	Delay time(sec)	Distance(km)	Pd(cm)
W042	153.77	0.44	137.95	40.3167
W046	153.04	0	141.15	12.1138
W049	152.3	0.86	135.85	21.5942
W04C	153.047	0.28	138.63	32.8485
W04D	153.04	0.3	138.71	29.6381
L001	155.24	0.42	112.65	10.21
L002	153.04	0	116.07	8.66
L003	156.7	0.3	112.02	9.2
L004	157.44	0.05	118.55	7.99
L005	155.24	0.37	132.02	6.85



附錄四 中央氣象局地震速報系統 (RTD) 測站列表

測站代碼	測站名稱	縣市	鄉鎮	經度	緯度	測站高程
ALS	阿里山	嘉義縣	阿里山鄉	120.8134	23.50828	2413
ANP	鞍部	臺北市	北投區	121.5292	25.18265	826
BAC	板橋	新北市	板橋區	121.4418	24.99747	5
CHK	成功	臺東縣	成功鎮	121.3728	23.09775	34
CHN1	楠西	臺南市	楠西區	120.5285	23.18503	360
CHN3	新化	臺南市	山上區	120.3647	23.07558	50
CHN4	草山	嘉義縣	番路鄉	120.594	23.35128	205
CHN5	草嶺	雲林縣	古坑鄉	120.6773	23.59728	840
CHN7	六腳	嘉義縣	六腳鄉	120.2395	23.48342	6
CHY	嘉義市	嘉義市	西區	120.4326	23.49606	27
EAS	安朔	臺東縣	達仁鄉	120.8568	22.38143	445
ECB	長濱	臺東縣	長濱鄉	121.4511	23.31636	63
ECL	太麻里	臺東縣	金峰鄉	120.9619	22.59606	70
ECS	池上	臺東縣	池上鄉	121.2192	23.09528	278
ECU	初鹿	臺東縣	卑南鄉	121.0916	22.85969	229
EDH	東河	臺東縣	東河鄉	121.3047	22.97161	42
EGA	吉安	花蓮縣	吉安鄉	121.5626	23.97304	37
EGC	磯崎	花蓮縣	豐濱鄉	121.5475	23.70792	5
EGF	光復	花蓮縣	光復鄉	121.4826	23.68458	110
EGS	龜山島	宜蘭縣	頭城鎮	121.9437	24.84204	2
EHP	和平	花蓮縣	秀林鄉	121.7489	24.3075	24
EHY	紅葉	花蓮縣	萬榮鄉	121.3279	23.50383	237
ELD	利稻	臺東縣	海端鄉	121.0251	23.187	1040
ENA	南澳	宜蘭縣	南澳鄉	121.749	24.42589	113
ENT	牛鬥	宜蘭縣	三星鄉	121.5736	24.63728	280
ESF	壽豐	花蓮縣	壽豐鄉	121.5073	23.87069	28
ESL	西林	花蓮縣	萬榮鄉	121.4415	23.81181	178
ETL	太魯閣	花蓮縣	秀林鄉	121.623	24.15819	415
ETM	銅門	花蓮縣	秀林鄉	121.4928	23.96556	190
EYL	鹽寮	花蓮縣	壽豐鄉	121.602	23.9036	71
HEN	恆春	屏東縣	恆春鎮	120.746	22.00367	22
HSN	竹北	新竹縣	竹北市	121.0142	24.82814	34

HSN1	新竹市	新竹市	東區	121.0183	24.7785	102
HWA	花蓮市	花蓮縣	花蓮市	121.6135	23.97523	16
HWAP	花蓮港	花蓮縣	花蓮市	121.6198	23.97966	60
ILA	宜蘭市	宜蘭縣	宜蘭市	121.7561	24.76356	7
KAU	高雄市	高雄市	前鎮區	120.3158	22.56625	2
KLUP	基隆港	基隆市	仁愛區	121.7406	25.13286	36
KNM	金門	金門縣	金城鎮	118.2893	24.40739	44
LAY	蘭嶼	臺東縣	蘭嶼鄉	121.5581	22.0373	324
LDU	綠島	臺東縣	綠島鄉	121.4693	22.6733	9
MSU	馬祖	連江縣	南竿鄉	119.9231	26.1695	85
NCU	中壢	桃園市	中壢區	121.1944	24.96728	134
NGL	貢寮	新北市	貢寮區	121.9228	25.03831	12
NHD	新店	新北市	新店區	121.5534	24.90231	60
NHY	信義區	臺北市	信義區	121.5692	25.04084	37
NLD	羅東	宜蘭縣	羅東鎮	121.7728	24.67336	3
NML	苗栗市	苗栗縣	苗栗市	120.8257	24.56497	45
NNS	南山	宜蘭縣	大同鄉	121.3814	24.43747	1140
NOU	基隆市	基隆市	中正區	121.7731	25.14931	50
NSD	獅潭	苗栗縣	獅潭鄉	120.9206	24.53997	210
NSK	三光	桃園市	復興區	121.3666	24.67378	682
NST	獅頭山	苗栗縣	南庄鄉	121.0086	24.62942	164
NSY	三義	苗栗縣	三義鄉	120.7688	24.4144	311
NWF	五分山	新北市	瑞芳區	121.7806	25.07171	765
PNG	馬公	澎湖縣	馬公市	119.5636	23.56502	11
SCK	七股	臺南市	七股區	120.0861	23.14681	13
SCL	佳里	臺南市	佳里區	120.2018	23.17344	7
SCZ	枋寮	屏東縣	春日鄉	120.6282	22.37031	74
SEB	鵝鑾鼻	屏東縣	恆春鎮	120.8552	21.90094	33
SGL	九如	屏東縣	九如鄉	120.4986	22.72376	30
SGS	甲仙	高雄市	甲仙區	120.5906	23.08042	278
SML	日月潭	南投縣	魚池鄉	120.9082	23.88144	1015
SPT	屏東市	屏東縣	屏東市	120.4959	22.67676	25
SSD	三地門	屏東縣	三地門鄉	120.6402	22.7443	148
SSH	善化	臺南市	善化區	120.2882	23.13614	13
STY	桃源	高雄市	桃源區	120.7658	23.16074	640

TAI1	永康	臺南市	永康區	120.2367	23.03803	8
TAI2	台南市	臺南市	中西區	120.2097	22.98603	20
TAP	台北市	臺北市	中正區	121.5138	25.03765	6
TAW	大武	臺東縣	大武鄉	120.9036	22.35579	8
TCU	台中市	臺中市	北區	120.684	24.14562	84
TCUP	台中港	臺中市	梧棲區	120.5234	24.25647	28
TTN	台東市	臺東縣	臺東市	121.1547	22.75222	9
TWA	指南宮	臺北市	文山區	121.5921	24.97781	260
TWB1	三貂角	新北市	貢寮區	121.9971	25.00689	130
TWC	蘇澳	宜蘭縣	蘇澳鎮	121.8594	24.60811	20
TWCP	蘇澳港	宜蘭縣	蘇澳鎮	121.8571	24.59715	1147
TWD	秀林	花蓮縣	新城鄉	121.6048	24.08106	30
TWE	內城	宜蘭縣	員山鄉	121.6829	24.71808	20
TWF1	玉里	花蓮縣	玉里鎮	121.3053	23.35103	260
TWG	卑南	臺東縣	卑南鄉	121.0799	22.81764	195
TWK1	墾丁	屏東縣	恆春鎮	120.8138	21.94006	90
TWL	東山	臺南市	東山區	120.5023	23.26381	590
TWM1	旗山	高雄市	旗山區	120.4306	22.8215	340
TWQ1	鯉魚潭	苗栗縣	大湖鄉	120.7808	24.34647	260
TWS1	五股	新北市	五股區	121.4234	25.1015	60
TWT	德基	臺中市	和平區	121.1615	24.24897	1500
TYC	魚池	南投縣	魚池鄉	120.8697	23.90508	20
WCH	彰化市	彰化縣	彰化市	120.5569	24.08164	17
WDD	大肚	臺中市	大肚區	120.5568	24.13458	30
WDG	東吉島	澎湖縣	望安鄉	119.6678	23.25718	33
WDS	東勢	臺中市	東勢區	120.8305	24.25853	357
WGK	古坑	雲林縣	古坑鄉	120.5704	23.68452	75
WHF	合歡山	南投縣	仁愛鄉	121.2724	24.14344	3395
WLC	小琉球	屏東縣	琉球鄉	120.3692	22.34672	38
WNT	名間	南投縣	名間鄉	120.6925	23.87664	110
WNT1	南投市	南投縣	南投市	120.6799	23.90681	115
WPL	埔里	南投縣	埔里鎮	120.9572	24.01242	190
WSF	四湖	雲林縣	四湖鄉	120.2298	23.63636	6
WTC	大城	彰化縣	大城鄉	120.2891	23.86147	4
WTP	大埔	嘉義縣	大埔鄉	120.6223	23.24369	560

WYL	員林	彰化縣	員林鎮	120.5799	23.9605	25
WYP	外埔	臺中市	外埔區	120.6533	24.33314	106
WWF	霧峰	臺中市	霧峰區	120.6982	24.04267	116
WES	二水	彰化縣	二水鄉	120.618	23.81197	75
NTY	桃園市	桃園市	桃園區	121.2976	24.99973	94
NJN	竹南	苗栗縣	竹南鎮	120.8703	24.68361	5



附錄五 各地震事件定位結果

編號	日期	規模	CATALOG			RTD 定位			本研究定位		
			經度(E)	緯度(N)	深度(km)	經度(E)	緯度(N)	深度(km)	經度(E)	緯度(N)	深度(km)
1	2013/2/6	4.5	121.527	24.102	21.160	121.532	24.095	23.154	121.530	24.080	13.000
2	2013/2/17	4.6	121.449	24.317	6.330	121.491	24.336	5.230	121.410	24.300	7.000
3	2013/2/19	4.6	120.553	23.353	15.140	120.562	23.356	12.650	120.536	23.368	11.000
4	2013/2/19	4.7	120.600	22.913	15.610	120.604	22.905	12.460	120.570	22.890	29.000
5	2013/2/22	4.8	121.391	23.228	20.000	121.438	23.199	14.680	121.480	23.220	15.000
6	2013/3/7	5.9	121.457	24.301	5.550	121.493	24.316	4.000	121.460	24.300	6.000
7	2013/3/7	4.6	121.449	24.336	5.960	121.474	24.344	8.120	121.427	24.333	14.000
8	2013/3/27	6.2	121.053	23.902	19.430	121.075	23.900	5.630	121.040	23.980	23.000
9	2013/3/27	4.5	120.997	23.929	14.020	121.031	23.934	6.480	121.020	24.020	16.000
10	2013/6/2	6.5	120.974	23.862	14.540	121.014	23.854	0.390	120.950	23.910	14.000
11	2013/5/17	4.6	120.913	22.973	6.380	120.955	22.984	4.320	120.980	23.000	21.000
12	2013/7/16	5.5	121.497	24.277	4.920	121.501	24.267	11.770	121.500	24.260	22.000
13	2013/8/24	4.7	121.050	23.883	18.910	121.080	23.866	12.480	121.040	23.900	31.000
14	2013/9/30	4.7	120.959	23.847	11.100	120.983	23.832	5.800	120.940	23.850	17.000
15	2013/10/31	6.4	121.349	23.566	14.980	121.409	23.564	14.060	121.290	23.600	18.000
16	2013/10/31	4.6	121.401	23.584	9.130	121.421	23.587	3.850	121.380	23.640	2.000
17	2013/10/31	4.6	121.383	23.593	9.970	121.482	23.584	10.000	121.380	23.640	4.000
18	2013/10/31	5.1	121.426	23.631	10.080	121.448	23.637	5.750	121.380	23.640	5.000
19*	2013/11/1	4.5	121.405	23.677	17.140	121.500	23.675	18.190	121.380	23.700	10.000
20*	2013/11/1	4.8	121.437	23.693	14.070	121.493	23.717	13.810	121.380	23.720	7.000
21*	2013/11/3	4.6	121.469	23.678	10.200	121.417	23.692	7.810	121.380	23.700	0.500
22*	2013/11/4	4.9	121.465	23.950	25.920	121.494	23.955	19.330	121.320	23.940	15.000
23*	2013/1/2	4.7	121.738	23.970	7.130	121.769	23.997	5.500	121.676	23.989	16.000
24*	2013/1/4	4.5	121.731	23.984	6.820	121.702	24.000	3.130	121.680	23.920	10.000
25*	2013/1/4	4.7	121.730	23.992	6.770	121.715	24.009	2.300	121.729	23.986	5.000
26*	2013/1/17	5.1	121.979	24.439	13.650	121.920	24.479	6.410	121.920	24.440	22.000
27*	2013/3/4	4.6	121.330	23.000	14.670	121.394	22.999	17.090	121.340	23.020	14.000
28*	2013/5/21	4.9	121.771	24.279	14.460	121.785	24.284	9.120	121.790	24.280	12.000
29*	2013/6/26	4.5	121.871	24.791	9.980	121.862	24.789	7.460	121.860	24.800	16.000
30*	2013/11/7	4.6	121.635	24.061	9.730	121.622	24.081	9.640	121.560	24.060	6.000
31*	2013/11/7	4.5	121.623	24.078	11.440	121.628	24.074	9.740	121.588	24.072	8.000

32	2014/1/15	5	120.984	23.861	14.980	121.012	23.862	6.970	120.980	23.830	12.000
33	2014/1/15	5.1	121.081	22.894	8.290	121.118	22.881	7.830	121.070	22.920	0.500
34	2014/1/15	5.1	121.081	22.882	8.430	121.106	22.844	10.230	121.060	22.880	8.000
35	2014/1/15	4.5	121.083	22.895	8.330	121.089	22.873	8.960	121.080	22.880	9.000
36	2014/1/25	4.7	121.483	23.794	11.840	121.504	23.823	8.130	121.380	23.820	19.000
37	2014/4/26	4.6	121.348	23.548	17.640	121.388	23.556	13.210	121.290	23.600	16.000
38	2014/5/21	4.7	121.433	23.735	16.450	121.474	23.721	16.700	121.400	23.740	13.000
39	2014/5/25	5	121.162	23.064	12.740	121.185	23.072	2.670	121.180	23.060	7.000
40	2014/6/15	4.6	121.529	23.751	6.040	121.541	23.760	7.910	121.520	23.740	7.000
41*	2014/5/4	5.2	121.645	23.936	35.980	121.735	23.919	35.660	121.650	23.910	26.000
42*	2014/7/17	5.3	121.350	22.267	19.080	121.349	22.247	8.350	121.320	22.280	0.500
43*	2014/9/10	4.7	122.063	24.336	19.510	122.047	24.364	8.760	121.788	24.384	21.000
44*	2014/9/21	5	121.556	23.593	31.540	121.610	23.584	24.280	121.540	23.600	37.000
45*	2014/9/25	5.3	121.268	22.792	18.000	121.320	22.740	7.610	121.374	22.717	36.000
46*	2014/10/8	5.2	121.580	23.639	33.390	121.623	23.624	27.190	121.570	23.672	30.000
47*	2014/11/20	5.2	122.058	24.904	13.860	121.998	24.901	3.610	121.910	24.910	0.500
48*	2014/12/14	4.6	121.470	23.132	43.020	121.527	23.079	32.300	121.505	23.137	47.000

*表示為發生在近海之地震事件



附錄六 陣列式波形處理 SAC 指令集

(1) Waveforms cross-correlation

```
r*HHZ.TW.--      % read the files.
p1               % pbt he waveform.
rtr             % remove the trend.
rmean          % remove the mean.
bp             % bad-pass filtered
cut t1 t2       % cut the waveform time window between t1 & t2.
apk           % auto p-phase picking.
ppk           % manual p-phase picking.
wh            % add the pick value into the header file.
W over        % rewrite the file.
lh           % list the header file.
cut of       % turn the time window off.
w append .pick % Save as filename.pick.
correlate Master n % Do the cross-correlation among the files.
xlim x -x     % zoom in
xlim off
```

(2) Waveforms stacking

```
sss           % Signal Stacking Subprocess in SAC
addstack file1.*sac be 0.0 end 600.0 de 0.12 di 0.0
addstack file2.*sac be 0.0 end 600.0 de 0.01 di 0.0
addstack file3.*sac be 0.0 end 600.0 de 0.17 di 0.0
```



```
addstack file4.*sac be 0.0 end 600.0 de 0.08 di 0.0
addstack file5.*sac be 0.0 end 600.0 de 0.00 di 0.0
( be : begin time; end : end time; de : delay time; di : distance )
timewindow 0.0 60.0      % set the time window
liststack                % list the file that have been stacked.
sumstack no on          % no normalize
writestack filename.STACK % Save as filename.STACK
```



附錄七 建立測站走時排序資料庫程式碼 (FORTRAN 95)

!Travel time database

Module ray

```
parameter(maxnlat=100)
parameter(maxnlon=100)
parameter(maxndep=50)
! 20150130_Let the matrix be allocatable to save the memory.
real*8, ALLOCATABLE :: lat_c(:), lon_c(:), dep_c(:)
real*8, ALLOCATABLE :: vel_p(:, :, :), vel_s(:, :, :)
real*8 bld3, bld4, ro
integer nlat_c, nlon_c, ndep_c, nxyz_c, nxy_c, nx_c, ips
parameter(ilatdeg=1000000)
parameter(ilondeg=1000000)
parameter(idepkm=1000000)
real*8 lat1_c, lon1_c, dep1_c
integer ilonloc_c(ilondeg), ilatloc_c(ilatdeg), ideploc_c(idepkm)
```

End Module ray

module observ

```
parameter (maxsta=3000)
parameter (maxobs=3000)
character*4 stn(maxsta)
integer ltds(maxsta), lnds(maxsta)
real sltm(maxsta), slnm(maxsta), stc(3, maxsta)
real pcor(maxsta), scor(maxsta), spcor(maxsta)
integer isto(maxobs), ifm(maxobs), inten(maxobs), isp(maxobs)
real secp(maxobs, 2), epdis(maxobs), azimuth(maxobs), takeoff(maxobs)
real wa(maxobs), xpga(maxobs), xweio(maxobs, 2), res(maxobs, 2), xmls(maxobs)
real wa1(maxobs), xmls1(maxobs)
```

end module observ

program main

```
use ray
implicit real*8 (a-h, o-z)
```

```

parameter (msg=16384)
real*8 w(3,msg+1)
integer np
real*8 tt
REAL                :: tempo(3), temp
REAL(8),ALLOCATABLE :: evlo(:), evla(:), evdp(:)
REAL(8),ALLOCATABLE :: stlo(:), stla(:), stel(:)
REAL(8),ALLOCATABLE :: afs_stlo(:,,:), afs_stla(:,,:), afs_stel(:,,:)
REAL(8),ALLOCATABLE :: evt_la(:), sta_la(:)
REAL(8),ALLOCATABLE :: ptt(:,,:)
INTEGER              :: num_sta, num_sou

```

```
call input_vel
```

```
! Read input data
```

```
num_sta = 0
```

```
num_sou = 0
```

```
OPEN(11,status="old",file="sou_location.txt")
```

```
OPEN(12,status="old",file="sta_location.txt")
```

```
DO WHILE ( .NOT. eof(11) )
```

```
    READ(11,*) tempo(:)
```

```
    num_sou = num_sou + 1
```

```
END DO
```

```
REWIND(11)
```

```
DO WHILE ( .NOT. eof(12) )
```

```
    READ(12,*) tempo(:)
```

```
    num_sta = num_sta + 1
```

```
END DO
```

```
REWIND(12)
```

```
ALLOCATE( evlo(num_sou), evla(num_sou), evdp(num_sou) )
```

```
ALLOCATE( stlo(num_sta), stla(num_sta), stel(num_sta) )
```

```
ALLOCATE( afs_stlo(num_sou,num_sta), afs_stla(num_sou,num_sta),
afs_stel(num_sou,num_sta) )
```

```
ALLOCATE( evt_la(num_sou), sta_la(num_sta) )
```

```
ALLOCATE( ptt(num_sou,num_sta) )
```



```

DO i = 1,num_sou
  READ(11,*) evlo(i), evla(i), evdp(i)
  evt_la(i) = geog_to_geoc(evla(i))
END DO

```

```

DO i = 1,num_sta
  READ(12,*) stlo(i), stla(i), stel(i)
  stel(i) = -1.d0*stel(i)/1000.d0
  sta_la(i) = geog_to_geoc(stla(i))
END DO

```

```

ips=1
DO i = 1,num_sou
  DO j = 1,num_sta
    call pbr(evt_la(i),evlo(i),evdp(i),sta_la(j),stlo(j),stel(j),w,np,tt)
    write(*,'(a,f10.4)' ) ' P wave travel time: ',tt
    ptt(i,j) = tt
  END DO
END DO

```

```

ips=2
DO i = 1,num_sou
  DO j = 1,num_sta
    call pbr(evt_la(i),evlo(i),evdp(i),sta_la(j),stlo(j),stel(j),w,np,tt)
    write(*,'(a,f10.4)' ) ' S wave travel time: ',tt
  END DO
END DO

```

! Bubble sorting and output

```

DO i = 1,num_sou
  afs_stlo(i,:) = stlo(:)
  afs_stla(i,:) = stla(:)
  afs_stel(i,:) = stel(:)
  DO j = num_sta-1,1,-1
    DO k = 1,j

```

```

IF ( ptt(i,k) > ptt(i,k+1) ) THEN
    temp = ptt(i,k)
    tempo(1) = afs_stlo(i,k)
    tempo(2) = afs_stla(i,k)
    tempo(3) = afs_stel(i,k)
    ptt(i,k) = ptt(i,k+1)
    afs_stlo(i,k) = afs_stlo(i,k+1)
    afs_stla(i,k) = afs_stla(i,k+1)
    afs_stel(i,k) = afs_stel(i,k+1)
    ptt(i,k+1) = temp
    afs_stlo(i,k+1) = tempo(1)
    afs_stla(i,k+1) = tempo(2)
    afs_stel(i,k+1) = tempo(3)
END IF
END DO
END DO
END DO

OPEN(21,file="RESULTS.txt")

DO i = 1,num_sou
    WRITE(21,"(A4,2F10.4,F11.4,A13)") "0", evlo(i), evla(i), evdp(i), "10.00"
    DO j = 1,num_sta
        WRITE(21,"(I4,2F10.4,F11.4,F13.6)") j, afs_stlo(i,j), afs_stla(i,j),
afs_stel(i,j)*(-1000.d0), ptt(i,j)
    END DO
END DO

end program main

real*8 function geog_to_geoc(xla)
implicit none
real*8 xla,RAD_PER_DEG,B2A_SQ
RAD_PER_DEG=0.0174532925199432955
B2A_SQ=0.993305521
geog_to_geoc = atan(B2A_SQ*tan(RAD_PER_DEG*xla)) / RAD_PER_DEG

```

```

return
end function geog_to_geoc

```

```

real*8 function geoc_to_geog(xla)
  implicit none
  real*8 xla,RAD_PER_DEG,B2A_SQ
  RAD_PER_DEG=0.0174532925199432955
  B2A_SQ=0.993305521
  geoc_to_geog = atan(tan(RAD_PER_DEG*xla)/B2A_SQ) / RAD_PER_DEG
  return
end function geoc_to_geog

```

```

subroutine input_vel
  use ray
  implicit real*8 (a-h,o-z)
  open(1,file="MOD_H13",status='old')
  read(1,*)bld3,bld4,nlon_c,nlat_c,ndep_c
  ! 20150130_Allocate the matirx size.

  ALLOCATE(lat_c(nlat_c),lon_c(nlon_c),dep_c(ndep_c),vel_p(nlon_c,nlat_c,ndep_c),vel_s(
nlon_c,nlat_c,ndep_c))
  read(1,*)(lon_c(i),i=1,nlon_c)
  read(1,*)(lat_c(i),i=1,nlat_c)
  read(1,*)(dep_c(i),i=1,ndep_c)

!-- read P velocity model
do k=1,ndep_c
  do j=1,nlat_c
    read(1,*)(vel_p(i,j,k),i=1,nlon_c)
  enddo
enddo
!-- read S velocity model
do k=1,ndep_c
  do j=1,nlat_c
    read(1,*)(vel_s(i,j,k),i=1,nlon_c)
  enddo
enddo

```



```

enddo

close(1)
call bldmap
nxyz_c=nlon_c*nlat_c*ndep_c
nxy_c=nlon_c*nlat_c
nx_c=nlon_c
nxyz2_c=(nlon_c-2)*(nlat_c-2)*(ndep_c-2)
nxy2_c=(nlon_c-2)*(nlat_c-2)
nx2_c=nlon_c-2
ave=0.0
do i=1,nlat_c
    ave=ave+lat_c(i)
enddo
ave=ave/real(nlat_c)
ro=earthr(ave)
end subroutine input_vel

subroutine bldmap
use ray
implicit real*8 (a-h,o-z)
real*8 lon_now,lat_now,dep_now

!-- for crustal velocity
lon1_c=bld3-lon_c(1)
ilonmax=(1e-10)+(lon_c(nlon_c)+lon1_c)/bld3
lat1_c=bld3-lat_c(1)
ilatmax=(1e-10)+(lat_c(nlat_c)+lat1_c)/bld3
dep1_c=bld4-dep_c(1)
idepmax=(1e-10)+(dep_c(ndep_c)+dep1_c)/bld4
if ((ilonmax.gt.ilondeg).or.(ilatmax.gt.ilatdeg).or.(idepmax.gt.idepkm)) then
    print*,"Error, model dimension out of range!"
    stop
endif
ilon=1
do i=1,ilonmax

```



```

    ilon1=ilon+1
    lon_now=float(i)*bld3-lon1_c
    if (lon_now.ge.lon_c(ilon1)) ilon=ilon1
    ilonloc_c(i)=ilon
enddo
do i=ilonmax+1,ilondeg
    ilonloc_c(i)=0
enddo
ilat=1
do i=1,ilatmax
    ilat1=ilat+1
    lat_now=float(i)*bld3-lat1_c
    if (lat_now.ge.lat_c(ilat1)) ilat=ilat1
    ilatloc_c(i)=ilat
enddo
do i=ilatmax+1,ilatdeg
    ilatloc_c(i)=0
enddo
idep=1
do i=1,idepmax
    idep1=idep+1
    dep_now=float(i)*bld4-dep1_c
    if (dep_now.ge.dep_c(idep1)) idep=idep1
    ideploc_c(i)=idep
enddo
do i=idepmax+1,idepkm
    ideploc_c(i)=0
enddo
end subroutine bldmap

subroutine intmap_3d(lon,lat,dep,ip,jp,kp)
    use ray
    implicit real*8 (a-h,o-z)
    real*8 lon,lat,dep
    ip=int(1e-10+(lon+lon1_c)/bld3)
    jp=int(1e-10+(lat+lat1_c)/bld3)

```



```

kp=int(1e-10+(dep+dep1_c)/bld4)
if ((ip.le.0).or.(jp.le.0).or.(kp.le.0)) then
  print*,"Error,lon,lat,dep out of range!"
  print*,"lon=",lon,"lat=",lat,"dep=",dep
  print*,"ip,jp,kp",ip,jp,kp
  ! 20150130_Take "stop" away and skip the calculation.
  GOTO 130
endif
ip=ilonloc_c(ip)
jp=ilatloc_c(jp)
kp=ideploc_c(kp)
if ((ip.eq.0).or.(jp.eq.0).or.(kp.eq.0)) then
  print*,"Error,crust lon,lat out of range!"
  print*,"lon=",lon,"lat=",lat,"dep=",dep
  print*,"ip,jp,kp",ip,jp,kp
  ! 20150130 Take "stop" away.
endif
130 return
end subroutine intmap_3d

function velocity(r,pa,ra)
  use ray
  implicit real*8 (a-h,o-z)
  real*8 lat,lon,dep,shiftlo
  real*8 r,pa,ra,r2d
  real*8 v,velocity
  common /coord/ shiftlo
  r2d = 90./asin(1.)
  lat=geoc_to_geog(90.0-pa*r2d)
  lon=ra*r2d+shiftlo
  dep=ro-r
  call vel3(lon,lat,dep,v)
  velocity=v
  return
end function velocity

```



```

subroutine vel3(lon,lat,dep,v)
  use ray
  implicit real*8 (a-h,o-z)
  real*8 lon,lat,dep,v
  real*8 lonf,lonf1,latf,latf1,depf,depf1
  real*8 wv(2,2,2)
  common /weight/ wv,ip,jp,kp
  call intmap_3d(lon,lat,dep,ip,jp,kp)
  ip1=ip+1
  jp1=jp+1
  kp1=kp+1
  if((ip1.gt.nlon_c).or.(jp1.gt.nlat_c).or.(kp1.gt.ndep_c))then
    print*,"Error, ip1,jp1,kp1 out of range!"
    print*,"ip1=",ip1,"jp1=",jp1,"kp1=",kp1
    ! 20150130_Take "stop" away and skip the calculation.
    GOTO 140
  endif
  ! 20150130_Add judgement to avoid "out of range".
  if ((ip.le.0).or.(jp.le.0).or.(kp.le.0)) then
    GOTO 140
  end if
  lonf=(lon-lon_c(ip))/(lon_c(ip1)-lon_c(ip))
  latf=(lat-lat_c(jp))/(lat_c(jp1)-lat_c(jp))
  depf=(dep-dep_c(kp))/(dep_c(kp1)-dep_c(kp))
  lonf1=1.0-lonf
  latf1=1.0-latf
  depf1=1.0-depf
  wv(1,1,1)=lonf1*latf1*depf1
  wv(2,1,1)=lonf*latf1*depf1
  wv(1,2,1)=lonf1*latf*depf1
  wv(2,2,1)=lonf*latf*depf1
  wv(1,1,2)=lonf1*latf1*depf
  wv(2,1,2)=lonf*latf1*depf
  wv(1,2,2)=lonf1*latf*depf
  wv(2,2,2)=lonf*latf*depf
  if(ips.eq.2)then

```

```

v= wv(1,1,1)*vel_s(ip,jp,kp)+wv(2,1,1)*vel_s(ip1,jp,kp) &
+wv(1,2,1)*vel_s(ip,jp1,kp) +wv(2,2,1)*vel_s(ip1,jp1,kp) &
+wv(1,1,2)*vel_s(ip,jp,kp1) +wv(2,1,2)*vel_s(ip1,jp,kp1) &
+wv(1,2,2)*vel_s(ip,jp1,kp1)+wv(2,2,2)*vel_s(ip1,jp1,kp1)
else
v= wv(1,1,1)*vel_p(ip,jp,kp)+wv(2,1,1)*vel_p(ip1,jp,kp) &
+wv(1,2,1)*vel_p(ip,jp1,kp) +wv(2,2,1)*vel_p(ip1,jp1,kp) &
+wv(1,1,2)*vel_p(ip,jp,kp1) +wv(2,1,2)*vel_p(ip1,jp,kp1) &
+wv(1,2,2)*vel_p(ip,jp1,kp1)+wv(2,2,2)*vel_p(ip1,jp1,kp1)
endif
140 return
end subroutine vel3

```

```

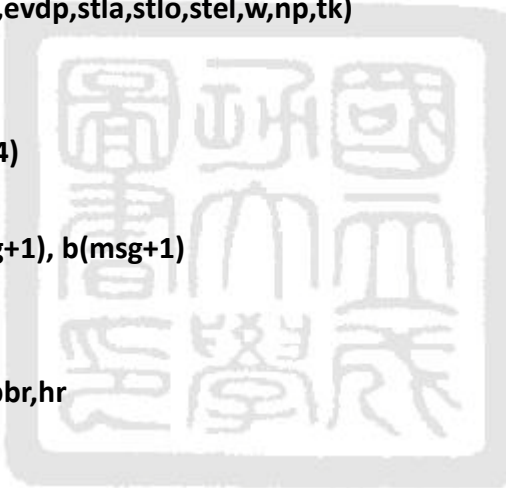
subroutine pbr(evla,evlo,evdp,stla,stlo,stel,w,np,tk)

```

```

use ray
implicit real*8(a-h,o-z)
parameter (msg=16384)
real*8 w(3,msg+1)
real*8 r(msg+1), a(msg+1), b(msg+1)
integer ni,i
real*8 shiftlo
real*8 aas,bbs,hs,aar,bbr,hr
real*8 xfac,flim,mins
real*8 dpi,r2d
real*8 velocity,rtim
real*8 tk
real*8 as,ar
real*8 bre,bso,dlo
real*8 ad,rs,rr
real*8 x1,y1,z1,x2,y2,z2,x3,y3,z3,dx,dy,dz
real*8 r1,a1,b1,r2,a2,b2,r3,a3,b3
real*8 x,y,z,acosa,sina,cosa,to,tp
real*8 dn,ddn,dr,da,db
real*8 dseg,ddseg
real*8 v1,v2,v3
real*8 upz,dwz

```



```

real*8 vr1,vr2,vr,vb1,vb2,vb,va1,va2,va
real*8 pr,pa,pb
real*8 vrd,rvr,rva,rvb,rvs
real*8 cc,rcur,rdr,rda,rdb,rpr,ap,bp
real*8 adV,bdV,rdV
real*8 RNULL

```

```

common /coord/ shiftlo
data RNULL /0.0e10/

```

! right now force the receiver at elevation of 0

```

aas=evla
bbs=evlo
hs=evdp
aar=stla
bbr=stlo
hr=stel
ni      = msg+1
xfac    = 1.5
n1      = 2
n2      = msg
nloop   = 12800
flim    = 1.e-4/100.
mins    = 2.
dpi     = asin(1.)/ 90.
r2d     = 90./asin(1.)

```



!-- Check coordinates

```

if(aas.LT.-90.OR.aas.GT.90.)then
  write(*,*)'Latitude of source is out of range'
  stop
endif
if(aar.LT.-90.OR.aar.GT.90.)then
  write(*,*)'Latitude of station is out of range'
  stop
endif

```



```

if(bbs.LT.-180.OR.bbs.GT.180.)then
  write(*,*)'Longitude of source is out of range'
  stop
endif
if(bbr.LT.-180.OR.bbr.GT.180.)then
  write(*,*)'Longitude of station is out of range'
  stop
endif

```

!-- longitude and latitude range from 0 to 180.

!-- This program does not work with angles

!-- greater than 180.

!-- Pass from latitude to colatitude

```

as = (90.00-aas) * dpi
ar = (90.00-aar) * dpi

```

```

if(bbr.LT.0.0)then
  bre=360.+bbr
else
  bre=bbr
endif

```

```

if(bbs.LT.0.0)then
  bso=360.+bbs
else
  bso=bbs
endif
dlo=abs(bso-bre)

```

```

if(dlo.LT.180.)then
  shiftlo=0.0e10
  if(bso.LT.bre)then
    shiftlo=bso-(180.-dlo)/2.
    bbs=(180.-dlo)/2.
  
```



```

    bbr=bbs+dlo
else
    shiftlo=bre-(180.-dlo)/2.
    bbr=(180.-dlo)/2.
    bbs=bbr+dlo
endif
else
    dlo=360.0000-dlo
    shiftlo=0.0e10
    if(bso.LT.bre)then
        shiftlo=bso-(dlo+(180.-dlo)/2.)
        bbs=(180.-dlo)/2.+dlo
        bbr=bbs-dlo
    else
        shiftlo=bre-(dlo+(180.-dlo)/2.)
        bbr=(180.-dlo)/2.+dlo
        bbs=bbr-dlo
    endif
endif

bs = bbs * dpi
br = bbr * dpi
ad = (as + ar) / 2.
rs = ro - hs
rr = ro - hr

```



! *** initial straight ray ***

! ni : number of ray segments

```

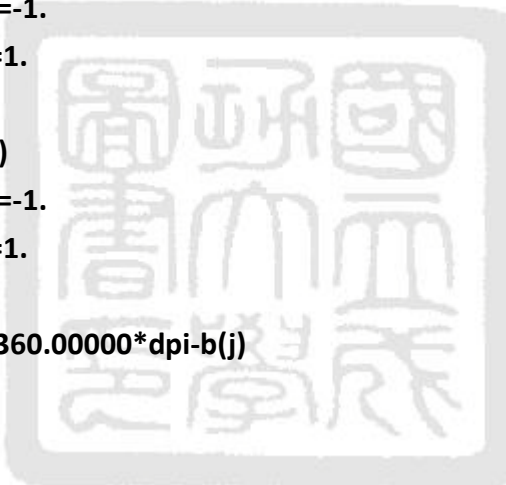
ni = n1
x1 = rs*sin(as)*cos(bs)
y1 = rs*sin(as)*sin(bs)
z1 = rs*cos(as)
x2 = rr*sin(ar)*cos(br)
y2 = rr*sin(ar)*sin(br)
z2 = rr*cos(ar)
dx = x2-x1

```

```

dy = y2-y1
dz = z2-z1
dlen=sqrt(dx*dx+dy*dy+dz*dz)
if (ni.lt.2) ni=2
dx = (x2-x1) / ni
dy = (y2-y1) / ni
dz = (z2-z1) / ni
do j=1,ni+1
  x = x1 + dx*(j-1)
  y = y1 + dy*(j-1)
  z = z1 + dz*(j-1)
  r(j) = sqrt(x**2 + y**2 + z**2)
  acosa=z/r(j)
  if(acosa.LT.-1.)acosa=-1.
  if(acosa.GT.1)acosa=1.
  a(j) = acos(acosa)
  acosa=x/r(j)/sin(a(j))
  if(acosa.LT.-1.)acosa=-1.
  if(acosa.GT.1)acosa=1.
  b(j) = acos(acosa)
  if(y.LT.0.00000)b(j)=360.00000*dpi-b(j)
enddo
to = rtim(ni+1,r,a,b)
tp = to
do i=1,ni+1
  w(1,i) = r(i)
  w(2,i) = a(i)
  w(3,i) = b(i)
enddo
! *** number of points loop ***
loops = 0
do while(ni .le. n2)
! *** interation loop ***
  do l=1,nloop
    loops = loops + 1
    do kk=2,ni

```



!-- see um & thurber (1987) p.974.

```
if(mod(kk,2) .eq. 0) then
  k = kk/2 + 1
else
  k = ni+1 - (kk-1)/2
endif
r1 = r(k-1)
a1 = a(k-1)
b1 = b(k-1)
x1 = r1*sin(a1)*cos(b1)
y1 = r1*sin(a1)*sin(b1)
z1 = r1*cos(a1)
r3 = r(k+1)
a3 = a(k+1)
b3 = b(k+1)
x3 = r3*sin(a3)*cos(b3)
y3 = r3*sin(a3)*sin(b3)
z3 = r3*cos(a3)
dx = x3 - x1
dy = y3 - y1
dz = z3 - z1
x2 = x1 + dx/2
y2 = y1 + dy/2
z2 = z1 + dz/2
r2 = sqrt(x2**2 + y2**2 + z2**2)
acosa=z2/r2
if(acosa.LT.-1.)acosa=-1.
if(acosa.GT.1)acosa=1.
a2 = acos(acosa)
sina = sin(a2)
cosa = cos(a2)
acosa=x2/r2/sina
if(acosa.LT.-1.)acosa=-1.
if(acosa.GT.1)acosa=1.
b2 = acos(acosa)
if(y.LT.0.00000)b2=360.00000*dpi-b2
```



```

dn = dx**2 + dy**2 + dz**2
ddn = sqrt(dn)
dr = (r3-r1) / ddn
da = (a3-a1) / ddn
db = (b3-b1) / ddn
!-- Begin find the gradients and velocities
!-- first find the length of segment
dseg=sqrt((dx/2)**2+(dy/2)**2+(dz/2)**2)
ddseg=dseg/2.
! Now ddseg will be a distance to find dV
! along the coordinates
! Determine velocity at 3 points
v1 = velocity(r1,a1,b1)
v2 = velocity(r2,a2,b2)
v3 = velocity(r3,a3,b3)
!-- Begin to determine coordinates
!-- of points surrounding point a2,b2,r2
!-- at the distance ddseg
upz = r2+ddseg
dwz = r2-ddseg
if(upz.gt.(ro+10.0))then !--- I guess it should be ro+10.0
    upz=ro+10.0
    dwz=upz-dseg
endif

if(dwz.le.0.)then
    dwz=0.00000001
    !-- set to ro, mistake?
    upz=ro
endif
!-- The following if-endif is just for P & S, thus comment out for SKS & PKP !!!
!-- This gives the lowermost mantle Vp in the outer core
vr1 = velocity(upz,a2,b2)
vr2 = velocity(dwz,a2,b2)
vr=(vr1-vr2)/dseg
call km2deg(a2,b2,r2,ddseg,RNULL,adV,bdV,rdV)

```

```

vb2 = velocity(rdV,adV,bdV)
call km2deg(a2,b2,r2,-1.*ddseg,RNULL,adV,bdV,rdV)
vb1 = velocity(rdV,adV,bdV)
vb=-1.*(vb1-vb2)/dseg
call km2deg(a2,b2,r2,RNULL,ddseg,adV,bdV,rdV)
va2 = velocity(rdV,adV,bdV)
call km2deg(a2,b2,r2,RNULL,-1.*ddseg,adV,bdV,rdV)
va1 = velocity(rdV,adV,bdV)
va=-1.*(va1-va2)/dseg
!-- spherical
!-- velocity gradient
!-- va = va / r2
!-- vb = vb / r2 / sina
!-- (tangential vector) = (slowness vector) / s
pr = dr
pa = r2 * da
pb = r2 * sina * db
vrd = pr*vr + pa*va + pb*vb
rvr = vr - vrd*pr
rva = va - vrd*pa
rvb = vb - vrd*pb
rvs = sqrt(rvr*rvr + rva*rva + rvb*rvb)
if(rvs .eq. 0.) then
  r(k) = r2
  a(k) = a2
  b(k) = b2
else
  rvr = rvr / rvs
  rva = rva / rvs
  rvb = rvb / rvs
  cc = (1./v1+1./v3)/2.
  rcur = vr*rvr + va*rva + vb*rvb
  ! Tut esli rcur < 0.0 proishodit hernia
  ! potomu postavljen abs. Ne yasno mozno li eto delat
  ! ili net no rabotaet. Obichno oshibka poyavliaetsia
  ! ochen redko v nekotarih tochkah

```


! v etom sluchae abs prosto ne daet oshibki y posledniaya iteraciya
 ! uzhe ne imeet rcur negativnim y podgoniaet normalno reshenie
 ! (mozhet bit)

```

if(rcur.LE.0.0)then
  write(*,*)'Negative'
  rcur=abs(rcur)
endif
rcur = (cc*v2+1.) / (4.*cc*rcur)
rcur = -rcur + sqrt(rcur**2+dn/(8.*cc*v2))
rdr = rvr * rcur
rda = rva * rcur
rdb = rvb * rcur
rpr = r2 + rdr
ap = a2 + rda/r2
bp = b2 + rdb/(r2*sina)
r(k) = (rpr-r(k))*xfac + r(k)
! if r(k)>6371 then force it to the surface.
if (r(k).gt.(ro+10.0)) r(k)=ro+10.0
a(k) = (ap-a(k))*xfac + a(k)
b(k) = (bp-b(k))*xfac + b(k)

```

```

endif
enddo
idstn=ni
do j=1,ni+1
  w(1,j) = r(j)
  w(2,j) = a(j)
  w(3,j) = b(j)
enddo
ni=idstn
tk = rtim(ni+1,r,a,b)
if(abs(to-tk) .le. to*flim) go to 310
to = tk

```

```

enddo
310 continue
to=tk

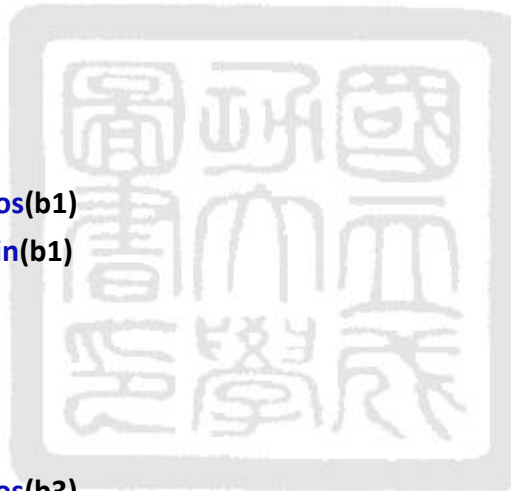
```

!-- skip increasing of segment number if minimum length

```

!-- of segment is exceed or maximum number of segments
!-- was reached
if(dseg.lt.mins.or.ni.ge.n2) then
  igood=1
  go to 66666
endif
!-- double the number of points.
ni = ni * 2
do i=1,ni/2+1
  r(i*2-1) = w(1,i)
  a(i*2-1) = w(2,i)
  b(i*2-1) = w(3,i)
enddo
do k=2,ni,2
  r1 = r(k-1)
  a1 = a(k-1)
  b1 = b(k-1)
  x1 = r1*sin(a1)*cos(b1)
  y1 = r1*sin(a1)*sin(b1)
  z1 = r1*cos(a1)
  r3 = r(k+1)
  a3 = a(k+1)
  b3 = b(k+1)
  x3 = r3*sin(a3)*cos(b3)
  y3 = r3*sin(a3)*sin(b3)
  z3 = r3*cos(a3)
  dx = x3 - x1
  dy = y3 - y1
  dz = z3 - z1
  x2 = x1 + dx/2
  y2 = y1 + dy/2
  z2 = z1 + dz/2
  r2 = sqrt(x2**2 + y2**2 + z2**2)
  acosa=z2/r2
  if(acosa.LT.-1.)acosa=-1.
  if(acosa.GT.1)acosa=1.

```



```

a2 = acos(acos)
sina = sin(a2)
acosa=x2/r2/sina
if(acos>.1)acosa=-1.
if(acos<-1)acosa=1.
b2 = acos(acosa)
if(y.LT.0.00000)b2=360.00000*dpi-b2
r(k) = r2
a(k) = a2
b(k) = b2
enddo
tk = rtim(ni+1,r,a,b)
!-- here i change tp and put to
if(abs(to-tk) .le. to*flim) then
  igood=1
  go to 99999
endif
to = tk
enddo
99999 continue
idstn=ni
do i=1,ni+1
  w(1,i) = r(i)
  w(2,i) = a(i)
  w(3,i) = b(i)
enddo
ni=idstn
66666 continue
!-- Return coordinates to the origin
idstn=ni
do k=1,ni+1
  w(1,k) = ro-w(1,k)
  w(2,k) = w(2,k)*r2d
  w(2,k) = geoc_to_geog(90.0-w(2,k))
  w(3,k) = w(3,k)*r2d+shiftlo
  if(w(3,k).lt.0.)w(3,k)=360.+w(3,k)

```



```

enddo
ni=idstn
np=ni+1
!-- convert ray point to cartesian coord.
return
end subroutine pbr
subroutine km2deg(ala,alo,adp,dx,dy,bla,blo,bdp)
  implicit real*8(a-h,o-z)
  real*8 ala,alo,adp,dx,dy,bla,blo,bdp
  real*8 dpi,dps
  !-- This subroutine calculate position of new point
  !-- in polar coordinates basing on the coordinates
  !-- of main point in radians ( la is colatitude) and dx and dy in kilometers
  dpi = asin(1.)/ 90.
  dps=adp*SIN(ala)
  blo=alo+atan2(dx,dps)
  bla=ala+atan2(dy,adp)
  if(bla.gt.(180.*dpi))then
    bla=360.*dpi-bla
    blo=blo+180.*dpi
  endif
  if(bla.lt.0.)then
    bla=abs(bla)
    blo=blo+180.*dpi
  endif
  if(blo.lt.0.)blo=360.*dpi+blo
  if(blo.gt.(360.*dpi))blo=blo-(360.*dpi)
  bdp=sqrt(adp**2+dx**2+dy**2)
  return
end subroutine km2deg

function rtim(m, r, a, b)
  implicit real*8(a-h,o-z)
  real*8 x1,y1,z1,x2,y2,z2,dl
  real*8 rv2,sm,rv1,rtim
  parameter (msg = 16384)

```



```

real*8 r(msg+1), a(msg+1), b(msg+1)
integer m
if(m.GT.(msg+1))write(*,*)'*'
rtim = 0.
rv1 = 1./velocity(r(1),a(1),b(1))
do j=1,m-1
  x1 = r(j)*sin(a(j))*cos(b(j))
  y1 = r(j)*sin(a(j))*sin(b(j))
  z1 = r(j)*cos(a(j))
  x2 = r(j+1)*sin(a(j+1))*cos(b(j+1))
  y2 = r(j+1)*sin(a(j+1))*sin(b(j+1))
  z2 = r(j+1)*cos(a(j+1))
  dl = (x1-x2)**2 + (y1-y2)**2 + (z1-z2)**2
  rv2 = 1./velocity(r(j+1),a(j+1),b(j+1))
  sm = (rv1 + rv2) / 2.
  rtim = rtim + sqrt(dl)*sm
  rv1 = rv2
enddo
end function rtim

real*8 function earthr(xlat)
! this routine establishes the short distance conversion factors
! given the origin of coordinates
! the rotation angle is converted to radians also
! common block variables:
! local variables:
double precision dlt1,dxlt,drad,drlt,xlat
data re/6378.163/, ell/298.26/
drad=1.7453292d-2
drlt=9.9330647d-1
dxlt=dbl(xlat*60.0)
! conversion factor for latitude
dlt1=datan(drlt*dtan(dxlt*drad/60.d0))
earthr=re*(1.0-sngl(dsin(dlt1)**2)/ell)
end function earthr

```

附錄八 震源格點搜尋程式碼 (FORTRAN 95)

! search the best fit grid

integer i,ii,ip,posit,rank_diff

real f

integer:: minv(1)

integer,parameter::n=5549610 **!source numbers**

integer,parameter::m=10 **!station numbers**

real(8)::database(n,4) , **real**_rank(m,5),rank_diff(m,n/110) ,source(n/110,3)

integer :: diff_sum(1,50451)

!!!!read database

OPEN(10,status="old",file="database.txt")

do i=1,n

read(10,*)(database(i,j),j=1,4)

end do

!read real sta. rank

OPEN(11,status="old",file="real.txt")

do i=1,m

read(11,*)(real_rank(i,j),j=1,4)

end do

!find the rank difference of each source

do ii = 1, m

do ip = 1, n

if (database(ip,3)==real_rank(ii,3)) **then**

f=ip/110.0

! find source point

k=ceiling(f)

! returns the least integer greater than or equal to f

posit = mod(ip,110)-1

! find position

if (posit==1) **then**

posit=109

end if

rank_diff(ii,k)=abs(posit-ii)

end if




```

end do
end do

! compute the sum of the different of each sources
do id=1,n/110
    diff_sum(1,id)=sum(rank_diff(:,id))
end do

!find the index(source location)
OPEN(21,status="old",file="sou_location.txt")
do i=1,n/110
    read(21,*)(source(i,j),j=1,3)
end do

minv=minval(diff_sum(1,:))
write(*,*) 'the minima value is: '
write(*,*) minv
write(*,*) 'and their source are:'
do i=1,n/110
    if(diff_sum(1,i)==minv(1)) then
        write(*,*) i
        write(*,*) source(i,:)
    end if
end do
end

```

