

# 臺灣地區 114 年中大型地震震源資訊之快速彙整與提供

## 子計畫一

### 中大規模地震震源破裂特性近即時分析

李憲忠 劉庭佑 林姿綺

中華民國地球物理學會

#### 摘要

2025 年 1 月 21 日於臺灣西南部大埔地區發生芮氏規模 6.4 地震，其為今年規模最大地震。為了解此地震的破裂過程，本研究結合遠震波形、近場 GNSS 同震位移及強地動資料，進行聯合震源逆推分析。逆推過程中使用由即時地震矩張量系統(RMT)震源機制所測得的兩個斷層面解進行分析，結果顯示西傾斷層面在三組資料中皆能提供最佳的擬合結果。破裂起始深度約為 10 公里，並向西南方傳播，在震央西南方約 10 公里處形成一明顯的強錯動區 (asperity)，最大滑移量約為 30 公分，平均應力降為 1.0 MPa。此逆推結果顯示此次地震主要的發震構造為一條位於滑脫面下方，中深部地殼內的西傾盲斷層。此斷層未破裂至地表，且與淺層東傾構造之間無顯著相關性。這些發現顯示重新評估臺灣西南部滑脫面下方深部構造的重要性。

**關鍵字:** 2025 大埔地震、聯合震源逆推、震源破裂模型

#### Abstract

A joint source inversion analysis integrating teleseismic waveforms, near-field GNSS coseismic displacement, and strong ground motion data was performed to investigate the rupture process of the 2025  $M_L$  6.4 Dapu earthquake in southwest Taiwan. The inversion incorporated two nodal fault planes determined by the real-time moment tensor system, with results indicating that the west-dipping fault plane provided the best fit across all three datasets. Rupture initiated at approximately 10 km depth and propagated southwestward. A prominent asperity, about 10 km southwest of the epicenter, was characterized by a compact slip area with a maximum slip of ~30 cm and an estimated stress drop of 1.0 MPa. The inversion results suggest that the primary seismogenic structure is a west-dipping blind thrust fault in the middle-to-deep crust beneath the detachment. This fault does not reach the surface and shows limited interaction with the shallow east-dipping structures. These findings highlight the need to

reassess deep structures beneath the detachment in southwest Taiwan.

**Keywords: 2025 Dapu earthquake, joint source inversion, source rupture model**

## 壹、前言

西元 2025 年 1 月 21 日，臺灣西南部發生芮氏規模 6.4 的地震。中央氣象署 (CWA) 地震報告(初報)的震央位於北緯 23.23 度，東經 120.57 度，震源深度為 9.7 公里深。此次主震發生於臺南市東山區與嘉義縣大埔鄉交界處，位於嘉義市區東南方約 37.9 公里處，稱之為大埔地震。嘉義縣測得的最大震度為 6 級，對應的加速度峰值 (PGA) 為 250 到 440 gal。西南部許多區域地震度達到 5 級以上。其中臺南市、高雄市、嘉義市、雲林縣及嘉義縣共有約 50 人受傷，所幸無人死亡。

根據即時地震矩張量監測系統 (RMT; Lee *et al.*, 2013) 所偵測之震源機制顯示此次錯動為近南北走向的逆衝斷層型構造。該機制提供了東傾及西傾兩個可能的斷層面。地震矩中心位置約位於氣象署震央西南方 10 公里處 (圖一)。主震後一週內發生了多起有感餘震，規模介於 3.0 至 5.7，深度 9 至 18 公里之間。餘震主要分布於主震震央西南側。由震源區附近的西東向剖面觀察顯示餘震分布情形複雜，難以直接辨識主震破裂所涉及的特定斷層面 (圖一)。

臺灣西南部地區地震活動頻繁，歷史上發生過多次中大規模地震，包括 1906 年梅山地震 ( $M_L 7.1$ ; Liao *et al.*, 2018)、1941 年中埔地震 ( $M_L 7.1$ ; Lin and Xiao, 2004)、1964 年白河地震 ( $M_L 6.3$ ; Kao *et al.*, 2000) 及 1993 年大埔地震 ( $M_L 5.7$ ; Shin, 1995)。其中 1964 年地震與 1993 年地震的震央位置與 2025 年大埔地震相近，且均呈現逆斷層型機制。尤其 1993 年事件的餘震分布顯示出西傾斷層特徵 (Shin, 1995)，與本次大埔地震具有可比性。然而由於本次震源區內並無對應的已知活動斷層，使得主震與區域活動斷層的關聯仍不明確。本研究透過聯合震源逆推分析，針對兩個可能的破裂面進行滑移量分佈的逆推，並藉由比較滑移的型態與資料的擬合度，推論此次地震的實際破裂面。

## 貳、資料與方法

本研究之有限斷層震源逆推使用了寬頻的遠震波形、近場 GNSS 同震位移以及近場的強震波形三種資料。遠震的寬頻地震資料取自 IRIS 資料庫，為減少地殼構造的影響，僅選取震央距 30 度至 90 度間的測站使用。將波形資料去除儀器響應後重新取樣至 10 Hz，並套用 0.01–0.5 Hz 帶通濾波。每筆波形取 P 波到時前 10 秒至 P 波到後 40 秒，共 50 秒的時間窗。近場 GNSS 資料由氣象署彙整提供，共 44 個包含三分量資料的高品質測站。近場強震波形資料則來自臺灣強地動觀測網 (TSMIP, 2012) 與臺灣寬頻地震網 (BATS, 1996)，強震站在此次震源區附近有良好的包覆度。所有近場波形均積分至位移形式處理，濾波頻帶為 0.03–0.5 Hz，取發震時間後 35 秒時間窗。

逆推過程採用平行化的非負最小平方法 (NNLS) (Lee et al., 2006)，設定使用 8 個時間窗，每個時間窗長 0.4 秒、重疊 0.2 秒，並允許單一子斷層最大滑移持續 1.8 秒。破裂速度上限設定為 3.5 km/s。遠震波形的格林函數使用 Syngine 程式 (IRIS DMC, 2015) 根據一維地球模型 PREM (Dziewonski & Anderson, 1981) 產生；進場波形及 GNSS 資料的格林函數則以三維譜元素法 (SEM; Komatitsch et al., 2004) 計算。所有合成波形的處理流程與其對應的觀測資料處理流程相同。根據 RMT 的震源機制解，考慮走向 200 度、傾角 50 度、向西傾及走向 14 度、傾角 39 度向東傾，兩個近南北走向的逆斷層面，並分別以氣象署速報及重定位的震源為中心進行逆推 (參見圖一及表一)。

## 參、結果

### 資料擬合

四組斷層面的擬合結果有明顯差異 (圖二)。在遠震波形方面表現較相近，誤差 (misfit) 分別為 0.453 (西傾速報)、0.467 (東傾速報)、0.453 (西傾重定位) 與 0.464 (東傾重定位)。但在近場波形與 GNSS 同震位移上則有著較顯著的差異：近場波形的誤差分別為 0.324 (西傾速報)、0.440 (東傾速報)、0.379 (西傾重定位) 與 0.449 (東傾重定位)。GNSS 位移分別為 0.354 (西傾速報)、0.665 (東傾速報)、0.371 (西傾重定位) 與 0.464 (東傾重定位)。結果顯示，以速報震源位置為中心的西傾斷層面能更好地解釋觀測資料。特別是東傾斷層面的擬合波在某些測站的東西向分量中會出現極性相反的情況 (圖二 a)，水平與垂直位移的偏差亦較大 (圖 2b)。綜合以上各組資料判斷，2025 年大埔地震的破裂面應為西傾的斷層面。

### 滑移分佈

依據前段結果，後續以速報震源位置的西傾斷層面為討論重點。西傾斷層面上的滑移分佈呈現一個面積約 15×15 公里的緊湊滑移區，其中包含了單一的主要強錯動區 (圖三)。震源附近的滑移較小 (約 10 公分)，為逆衝斷層型錯動。主要的強錯動區位於震央西南約 10 公里，滑移量超過 20 公分。主要滑移位置較震源深度深，集中於 10 到 15 公里深，且滑移量隨深度增加逐漸加大。RMT 震矩中心位置正位於此強錯動區內。滑移區與餘震的水平分佈皆呈東北西南走向 (圖三)。大部分餘震集中於大的滑移區內，部分分布於其西側。平均滑移量為 13.6 公分，最大滑移量為 27.9 公分。若以滑移量大於最大滑移量的 10% (約 5 公分) 的區域定義破裂面積，可計算得有效破裂面積約為 288 km<sup>2</sup>。依圓形斷層模型估算，期平均應力降約為 1.0 MPa。

### 破裂過程

破裂過程如圖四(a)所示。初始滑移發生於震源附近，在 2 秒內向深部擴展；接著向西南方向傳播，在約 10 公里深處形成主要的強錯動區 (深度 10 到 15 公里)。破裂過程在 2 到 6 秒間主要向西南向發展，有著明顯的破裂方向性。錯動在 7 到 9

秒時延伸至主要滑移區的深處，之後逐漸減緩。圖四(b) 的震源破裂函數呈現兩個明顯的峰值：第一個峰值出現在 1 到 6 秒間，在 3 到 4 秒時達到最高，對應其主要能量的釋放與強錯動區的形成；第二個峰值於 7 到 10 秒間出現，在約第 8 秒達到高點，與深部的錯動有關。總地震矩約  $1.66 \times 10^{18}$  Nm，地震矩規模 Mw 6.08。初期破裂速度約為 2 km/s，往西南破裂過程中加速至約 3 km/s。

## 餘震群 RMT 紀錄

RMT 系統自主震時間起算的 2025 年 1 月 21 日到 2025 年 4 月 21 日之間，於此區紀錄到 59 筆地震事件。RMT 地震矩規模超過 5.0 的共有三起，其中最大者達到 5.23，發生於 UTC 時間 2025 年 1 月 25 日 23 時 38 分 55 秒（氣象署重定位紀錄為 UTC 時間 2025 年 01 月 25 日 23 時 38 分 53 秒，芮氏地震規模 5.84）。其餘餘震紀錄之 RMT 規模介於 3.0 到 5.0 之間，最小為 3.18。由圖五觀察，餘震分佈在以主震為中心，半徑約 20 公里內的範圍之內，深度主要介於 5 公里深到 20 公里深之間。整體而言，震源機制相當一致，多為南北走向的東傾或西傾破裂面。依同時間段的氣象署重定位紀錄及 RMT 紀錄來看，均可明顯區分為西方偏淺的小群與東方偏深的大群兩個群體。西方小群離主震較遠，且兩群間有明顯的餘震空缺，可能為主震後受觸發的斷層活動。在剖面圖中，無論是 RMT 紀錄或是氣象署重新定位之地震目錄，東西兩群均未有清晰的線形分布。其中西方一群深度較淺且接近口宵里斷層與觸口斷層的延伸線，東方一群在空間上則無法明顯觀察出與已知斷層的關聯。圖六為 RMT 餘震紀錄對氣象署重定位紀錄差值的統計結果。其中規模差值(dM)的平均為-0.52 個規模；時間差值(delay time)平均為 0.31 秒；震源深度差值(dDepth)平均為 1.8 公里；水平震央差值(dEpicenter)平均約為 3.4 公里。上述統計差異均大致呈現常態分佈，由於規模較小，時間上未呈現明顯偏向性。此次餘震群空間分布相對侷限且密集，因而位置上的差異主要受 RMT 系統格點經度的限制，未能反映出顯著的斷層幾何形態。

## 肆、結論

RMT 系統對本次大埔地震及餘震群的機制提供了良好的解析與參考(表二)。由主震的 RMT 機制解為基礎的聯合震源逆推的結果顯示，西傾的斷層面能最好的解釋使用的三種觀測資料，尤其是近場波形與 GNSS 同震位移的觀測結果。該斷層面傾角約為  $50^\circ$ ，主要錯動發生於震央西南方、深度超過 10 公里處。由於此西傾斷層面的位置與任何已知的東傾活動斷層或淺層滑脫構造 (Suppe, 1980) 均不符合，推測其為位於滑脫面下方、未被地質調查發現的中深部盲斷層。

表一、斷層面參數與擬合誤差

	斷層面積 (長 x 寬)	深度 (公里)	走向 (度)	傾角 (度)	滑移角 (度)	遠震 擬合誤差	近場 擬合誤差	GNSS 擬合誤差
西傾斷層面 *	45 x 45	0 - 33	200	50	94	0.453	0.324	0.332
東傾斷層面 *	45 x 45	1 - 29	14	39	85	0.467	0.440	0.665
西傾斷層面 **	45 x 45	6 - 39	200	50	94	0.453	0.379	0.371
東傾斷層面 **	45 x 45	7 - 35	14	39	85	0.464	0.449	0.354

\*以氣象署速報紀錄(東經 120.57 度、北緯 23.23 度、深度 9.7 公里)為中心決定的斷層面

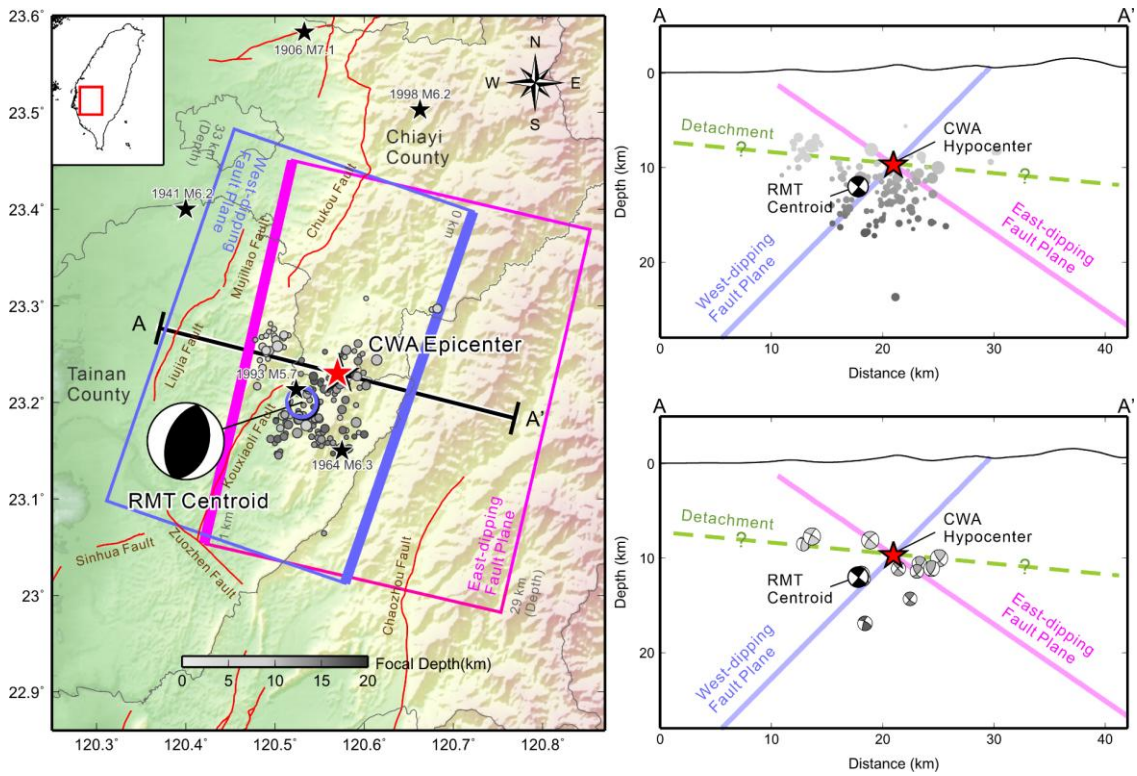
\*\*以氣象署重定位紀錄(東經 120.55 度、北緯 23.22 度、深度 15.8 公里)為中心決定的斷層面

表二、大埔地震及其餘震的 RMT 系統紀錄。

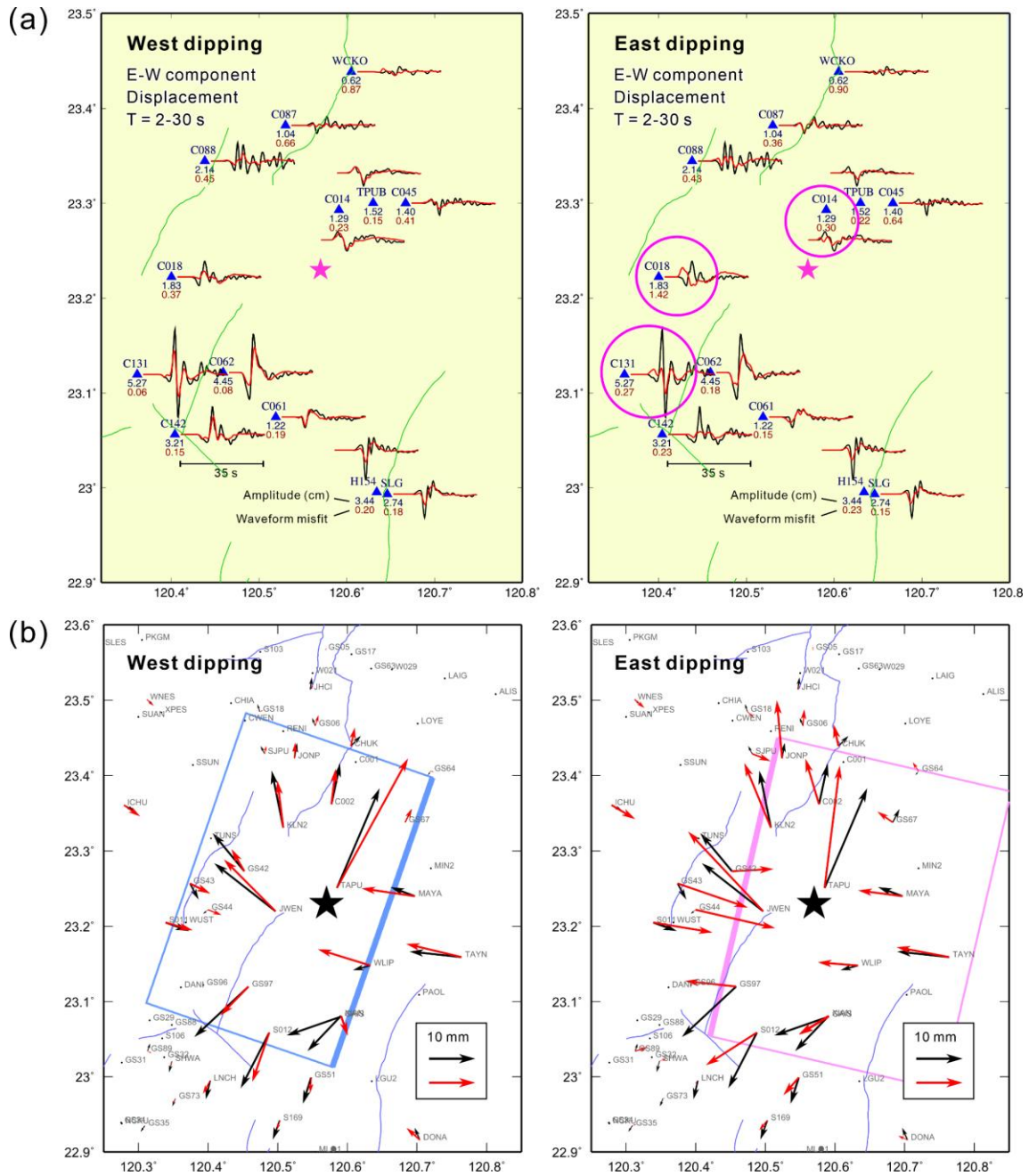
No.	Date	Time	Lon.	Lat.	Dep.	Mw	strike1	dip1	rake1	strike2	dip2	rake2
1	2025/1/20	16:17:29	120.53	23.20	12.0	6.09	13.9	40.0	85.2	200.1	50.1	94.0
2	2025/1/20	17:42:32	120.57	23.16	16.0	4.76	222.8	65.6	159.4	321.6	71.3	25.8
3	2025/1/20	19:29:01	120.57	23.25	12.0	3.88	353.6	53.7	33.4	242.4	63.7	138.7
4	2025/1/20	20:06:00	120.57	23.25	16.0	4.29	185.6	48.2	87.3	9.6	41.8	93.0
5	2025/1/20	20:28:40	120.57	23.20	16.0	3.70	54.1	43.5	143.9	172.0	66.1	52.6
6	2025/1/21	03:00:46	120.53	23.16	14.0	3.53	332.4	69.0	54.1	216.0	40.8	146.7
7	2025/1/21	04:48:19	120.53	23.16	12.0	3.42	218.5	60.4	152.1	323.1	66.0	32.7
8	2025/1/21	16:27:56	120.57	23.20	14.0	3.67	204.1	53.3	111.0	351.5	41.5	64.4
9	2025/1/21	21:30:15	120.57	23.20	16.0	4.06	196.4	50.5	105.2	353.3	41.9	72.4
10	2025/1/21	22:06:57	120.53	23.20	12.0	3.59	178.2	60.5	88.8	0.5	29.5	92.1
11	2025/1/22	00:14:16	120.57	23.20	12.0	4.09	227.5	48.8	137.0	349.1	59.1	50.1
12	2025/1/22	00:41:40	120.53	23.25	20.0	3.77	324.4	31.2	35.5	203.0	72.5	116.2
13	2025/1/22	04:00:54	120.53	23.20	14.0	3.55	328.1	49.9	44.6	205.7	57.5	130.3
14	2025/1/22	19:24:17	120.53	23.16	12.0	3.54	213.5	36.4	132.0	345.2	63.8	63.7
15	2025/1/22	21:31:57	120.61	23.16	16.0	3.65	42.3	44.8	118.3	185.1	51.7	64.8
16	2025/1/23	07:46:22	120.57	23.20	14.0	3.55	349.1	37.5	65.8	198.7	56.2	107.5
17	2025/1/23	10:12:30	120.71	23.30	2.0	3.18	46.4	82.0	-85.4	196.3	9.2	240.2
18	2025/1/23	17:00:19	120.53	23.25	16.0	3.60	46.7	36.4	121.1	189.9	59.4	69.1
19	2025/1/24	09:16:48	120.53	23.20	10.0	3.40	18.0	48.0	58.7	240.2	50.5	120.0
20	2025/1/24	11:18:41	120.43	23.16	18.0	4.84	176.1	54.5	104.4	332.2	37.9	70.8
21	2025/1/24	12:59:10	120.53	23.16	14.0	3.42	158.1	54.4	82.5	350.9	36.3	100.4
22	2025/1/24	13:28:19	120.48	23.16	12.0	3.43	184.5	40.0	109.4	339.9	52.7	74.5
23	2025/1/24	22:01:57	120.48	23.16	14.0	4.46	171.2	53.1	95.0	342.9	37.2	83.4
24	2025/1/25	11:49:18	120.48	23.30	10.0	5.13	34.1	30.5	118.7	181.7	63.6	74.2
25	2025/1/25	13:00:29	120.43	23.30	12.0	3.96	15.2	43.7	97.0	185.5	46.7	83.3
26	2025/1/25	15:57:20	120.48	23.30	6.0	3.47	29.0	46.7	89.6	209.6	43.3	90.4
27	2025/1/25	16:07:29	120.53	23.20	10.0	3.65	11.1	41.7	78.7	206.1	49.2	99.9
28	2025/1/25	23:38:55	120.53	23.20	16.0	5.23	168.9	50.8	72.3	15.7	42.4	110.4

29	2025/1/26	11:48:44	120.48	23.16	16.0	3.44	274.9	75.2	115.0	33.7	28.8	32.0
30	2025/1/26	18:06:13	120.43	23.30	12.0	4.11	76.9	69.7	168.8	170.8	79.5	20.6
31	2025/1/27	01:58:43	120.57	23.25	12.0	4.18	48.6	39.6	121.2	190.4	57.0	66.8
32	2025/1/27	14:59:56	120.53	23.25	20.0	4.36	53.3	32.1	142.4	176.4	71.1	63.6
33	2025/1/28	14:12:41	120.48	23.20	16.0	3.46	41.3	51.5	74.0	246.0	41.2	109.1
34	2025/1/29	22:01:35	120.48	23.25	10.0	3.69	335.5	45.8	26.7	226.1	71.2	132.5
35	2025/1/30	02:11:56	120.61	23.25	14.0	5.12	356.5	55.4	54.6	227.9	47.9	130.1
36	2025/1/30	06:49:40	120.48	23.25	8.0	3.49	34.6	38.2	119.2	179.2	57.3	69.0
37	2025/1/30	07:16:18	120.57	23.20	8.0	4.48	341.4	67.1	47.4	228.5	47.3	148.0
38	2025/1/30	07:54:41	120.57	23.20	12.0	3.32	358.6	64.7	88.1	183.0	25.3	94.0
39	2025/1/30	17:44:58	120.48	23.16	22.0	3.63	195.9	39.8	114.2	345.5	54.3	71.1
40	2025/1/30	20:05:27	120.53	23.25	4.0	3.84	153.4	77.3	64.3	38.9	28.5	152.6
41	2025/2/02	19:32:20	120.48	23.25	10.0	3.54	176.2	58.6	87.3	1.5	31.5	94.5
42	2025/2/02	22:02:44	120.48	23.25	12.0	3.66	63.2	31.9	147.6	181.5	73.6	62.3
43	2025/2/05	23:38:39	120.53	23.25	18.0	3.55	50.0	29.3	125.1	191.2	66.4	72.1
44	2025/2/07	16:46:58	120.61	23.30	14.0	4.53	6.7	33.8	59.4	222.1	61.4	108.8
45	2025/2/09	17:39:06	120.57	23.25	18.0	3.93	24.2	35.5	86.7	208.3	54.6	92.3
46	2025/2/11	07:52:45	120.48	23.25	8.0	3.58	35.2	36.8	121.2	178.1	59.2	68.8
47	2025/2/25	10:14:00	120.71	23.25	12.0	3.45	233.1	63.1	133.4	348.7	49.6	36.4
48	2025/2/27	05:01:46	120.57	23.07	16.0	3.68	323.4	54.4	38.9	208.2	59.3	137.3
49	2025/3/05	13:27:40	120.48	23.16	16.0	4.68	172.4	43.2	96.3	343.8	47.1	84.1
50	2025/3/11	18:14:56	120.48	23.16	14.0	3.22	166.0	44.1	100.0	332.2	46.7	80.5
51	2025/3/14	05:07:32	120.61	23.43	8.0	3.58	40.7	50.3	84.1	230.0	40.1	97.1
52	2025/3/21	08:29:19	120.48	23.07	14.0	4.23	352.6	24.6	72.7	191.4	66.6	97.7
53	2025/3/22	12:02:44	120.48	23.25	8.0	3.32	163.7	68.2	49.2	50.4	45.4	148.5
54	2025/3/22	12:36:04	120.48	23.25	6.0	3.41	181.1	60.5	66.8	42.2	36.9	124.9
55	2025/3/23	04:23:38	120.71	23.16	14.0	3.64	37.4	40.5	96.9	208.4	49.8	84.2
56	2025/4/03	03:47:00	120.35	23.20	12.0	4.60	206.5	70.7	144.0	310.1	56.3	23.4
57	2025/4/03	22:55:06	120.39	23.25	14.0	3.60	245.2	71.7	160.9	341.4	71.9	19.3
58	2025/4/05	12:09:04	120.39	23.25	10.0	3.51	332.9	30.3	45.4	201.7	68.9	112.3

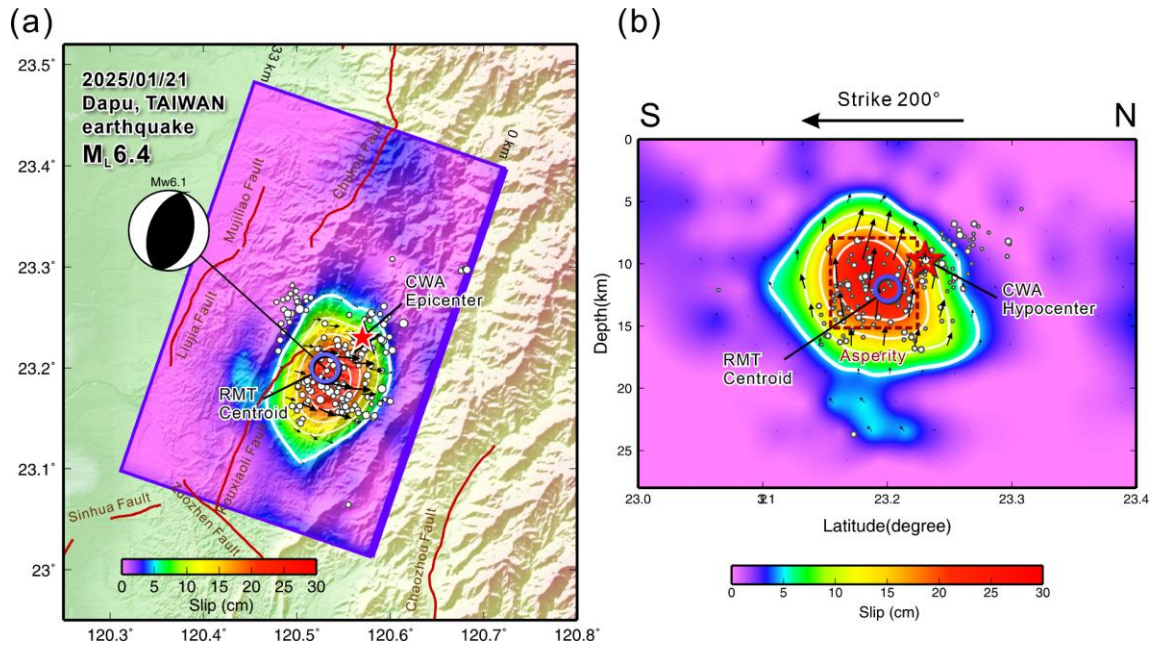
59	2025/4/19	14:40:00	120.43	23.25	10.0	3.25	48.4	51.8	131.6	173.3	54.0	49.8
----	-----------	----------	--------	-------	------	------	------	------	-------	-------	------	------



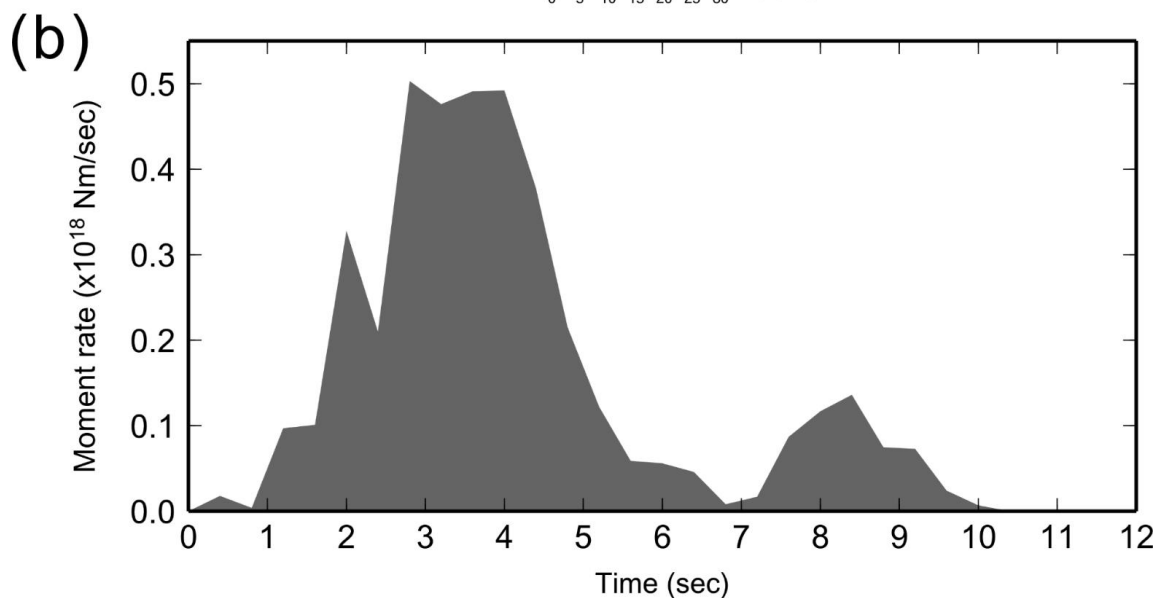
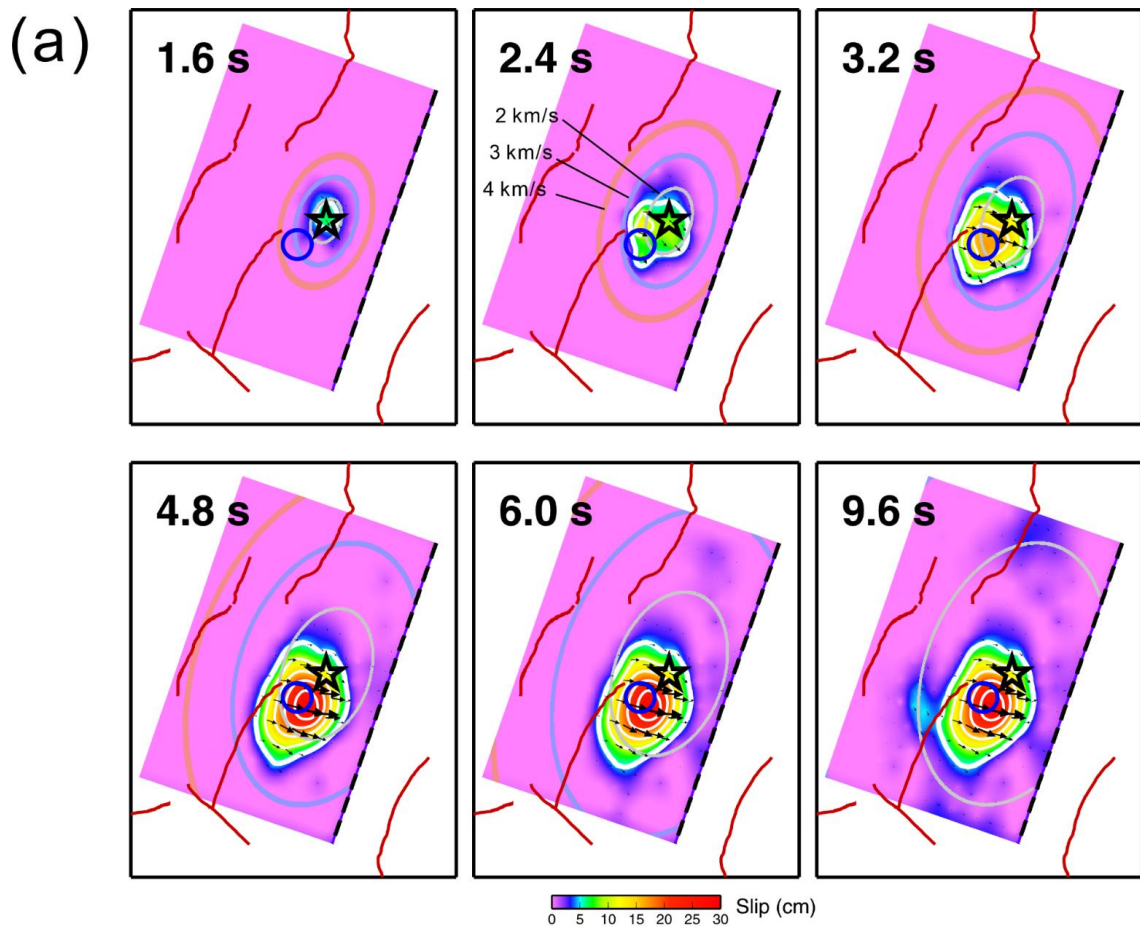
圖一、2025 年大埔地震的地圖與剖面示意圖。紅星為主震震源位置 ( $M_L 6.4$ )，藍色空心圓為 RMT 報告的震矩中心。藍色與粉紅色矩形分別代表西傾與東傾斷層面。灰色圓點為 2025 年 1 月 21 至 28 日期間  $M_L > 3.0$  之餘震。右側剖面顯示主震與餘震的分布及其 RMT 震源機制。藍色與粉紅色線分別對應西傾與東傾斷層面，綠色虛線為滑脫面。



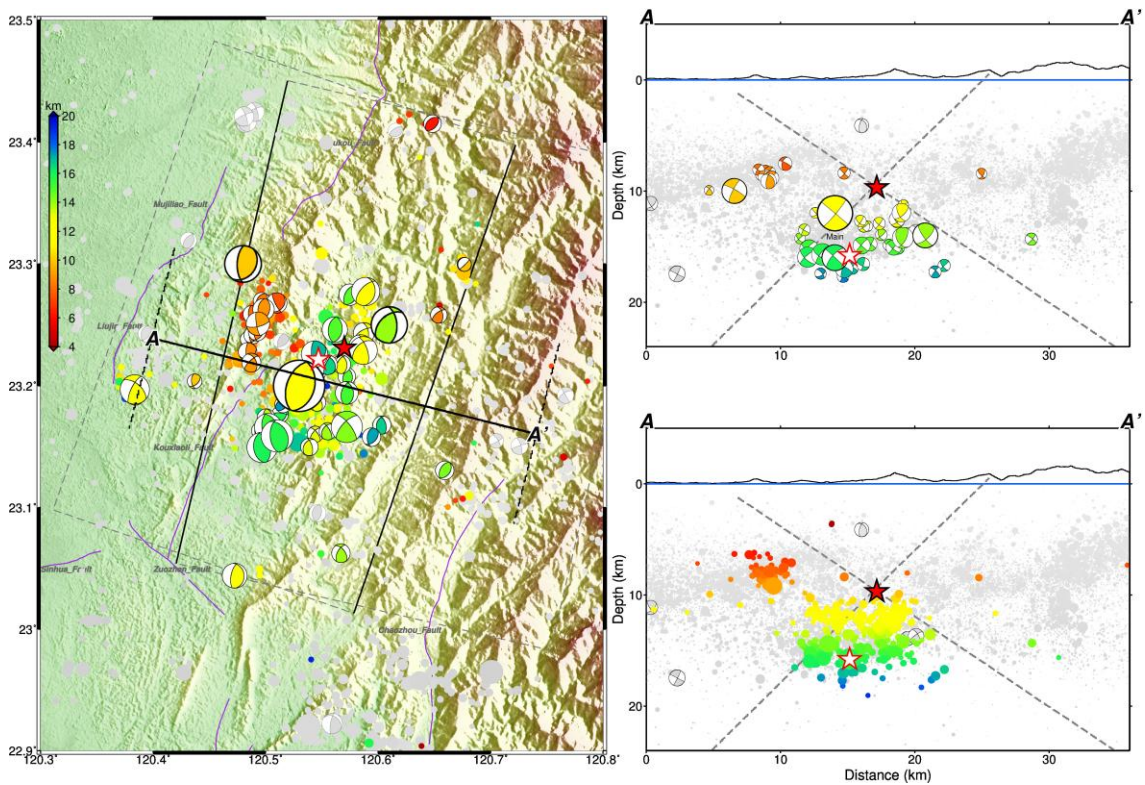
圖二、(a)東西向分量的觀測與擬合的近場強震波形比較。黑線為觀測波，紅線為擬合波。每站下方的藍色與紅色數字分別為最大振幅與擬合誤差。(b) GNSS 水平同震位移觀測值與擬合值比較。黑色箭頭為觀測值，紅色箭頭為擬合值。黑星為震央，粉紅色與藍色矩形分別代表東傾與西傾斷層面。



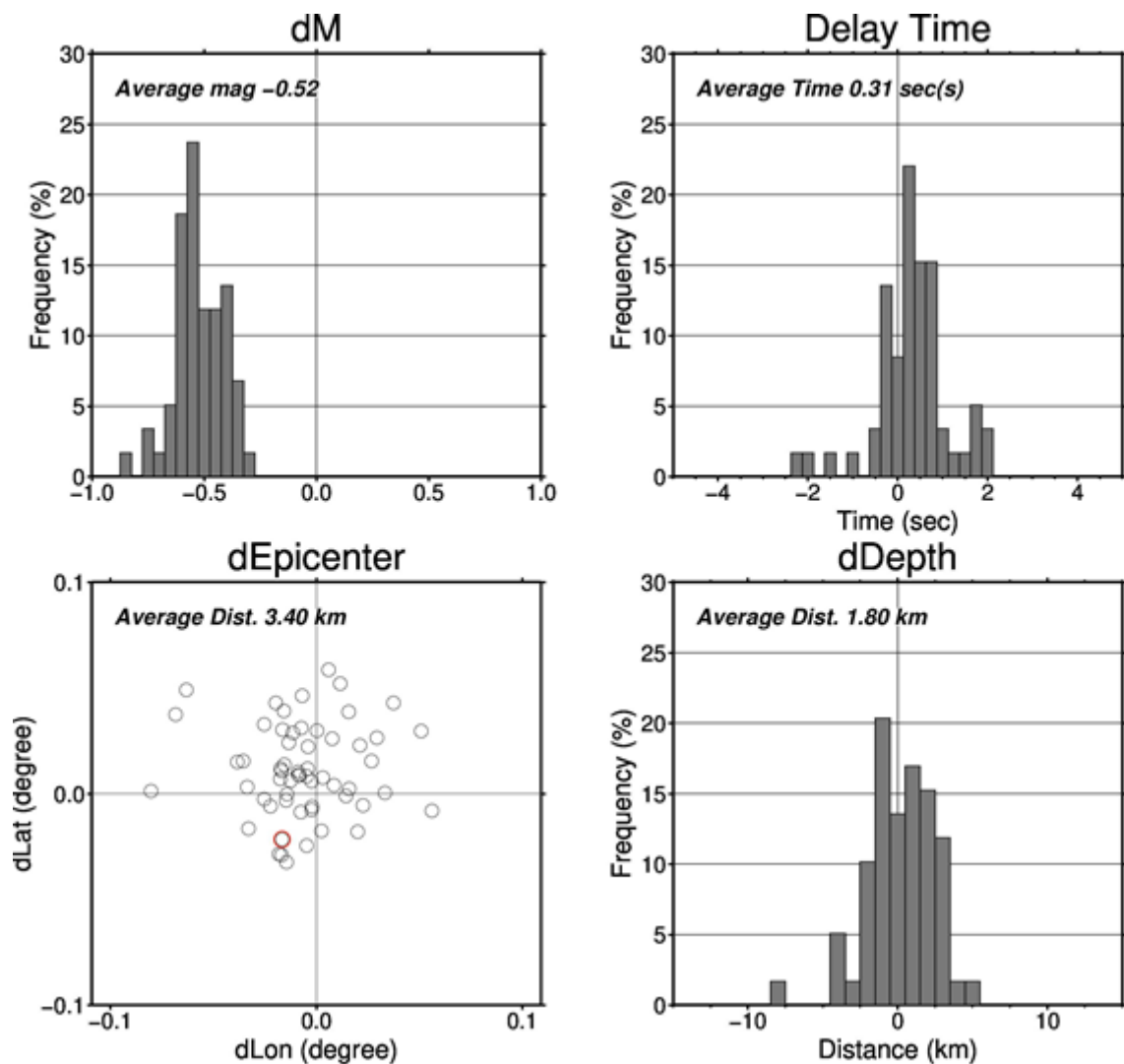
圖三、西傾斷層面的錯動量分布。(a)平面圖；(b)剖面圖。紅星為主震速報震源位置，藍色空心圓為 RMT 震矩中心。平面圖中，粗線表示斷層上緣，白色圓點為 1 月 21 至 28 日芮氏規模大於 3.0 的餘震。剖面圖中紅色虛框標示主要的強錯動區。



圖四、2025 年大埔地震破裂過程。(a)時間上的破裂演化過程。黑色空心星為主震速報震源位置，藍色空心圓為 RMT 震矩中心。灰色、藍色及粉紅色曲線分別表示破裂速度 2.0、3.0、4.0 km/s 的等時面。(b) 震源破裂函數。



圖五、大埔地震及其餘震的 RMT 機制解分布圖。灰色虛線為兩個斷層面的位置，深灰色粗線表示斷層面上緣。灰色圓點及機制為 2010 年以來的氣象署背景地震及背景 RMT 機制。彩色圓點為 2025/01/21 至 2025/04/21 的氣象署重定位地震。紅色星號為氣象署速報主震震源位置，白色星號為重定位主震震源位置。彩色機制為 2025/01/21 至 2025/04/21 間，該區域的 RMT 機制解。其中粗框者為規模大於 5.0 的地震，位置為 RMT 座標，其餘位置為氣象署座標。



圖六、RMT 餘震紀錄對氣象署重定位紀錄的差值統計結果。圖中展示的時間區間為 2025 年 1 月 21 日至 2025 年 4 月 21 日。其中規模差值(dM)的平均為-0.52 個規模；時間差值(delay time)平均為 0.31 秒；震源深度差值(dDepth)平均為 1.8 公里；水平震央差值(dEpicenter)平均約為 3.4 公里。

## 參考資料

- Central Weather Administration (CWA, Taiwan) (2012) Central Weather Administration Seismographic Network [Data set]. International Federation of Digital Seismograph Networks. <https://doi.org/10.7914/SN/T5>
- Dziewonski AM, Anderson DL (1981) Preliminary reference Earth model. *Phys Earth Planet Inter* 25(4):297–356.
- Institute of Earth Sciences, Academia Sinica, Taiwan (1996) Broadband Array in Taiwan for Seismology. Institute of Earth Sciences, Academia Sinica, Taiwan. Other/Seismic Network. doi:10.7914/SN/TW
- IRIS DMC (2015) Data Services Products: Synthetics Engine. <https://doi.org/10.17611/DP/SYNGINE.1>
- Kanamori H, Anderson DL (1975) Theoretical basis for some empirical relations in seismology. *Bull Seismol Soc Am* 65:1073–1095.
- Kao H, Huang GC, Liu CS (2000) Transition from oblique subduction to collision in the northern Luzon arc-Taiwan region: Constraints from bathymetry and seismic observations. *J Geophys: Solid Earth* 105(B2): 3059–3079. <https://doi.org/10.1029/1999JB900357>
- Komatitsch D, Liu Q, Tromp J, Süß P, Stidham C, Shaw JH (2004) Simulations of ground motion in the Los Angeles basin based upon the spectral-element method. *Bull Seismol Soc Am* 94:187–206.
- Lee SJ, Liang WT, Cheng HW, Tu FS, Ma KF, Tsuruoka H, Kawakatsu H, Huang BS, Liu CC (2013) Toward real-time regional earthquake simulation I: Real-time Moment Tensor monitoring (RMT) for regional events in Taiwan. *Geophys J Int* 196(1):432–446.
- Lee SJ, Ma KF, Chen HW (2006) Three-dimensional dense strong motion waveform inversion for the rupture process of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake. *J Geophys Res: Solid Earth* (1978–2012) 111:B11.
- Liao YW, Ma KF, Hsieh MC, Cheng SN, Kuo-Chen H, Chang CP (2018) Resolving the 1906 Mw 7.1 Meishan, Taiwan, earthquake from historical seismic records. *Seismol Res Lett* 89(4):1385–1396.
- Lin M, Xiao Q (2004) Seismotectonic model of the Tainan basin, southwestern Taiwan. *Acta Seismol Sinica*, 17(4): 447–452. <https://doi.org/10.1007/s11589-004-0024-2>
- Suppe J (1980) Imbricated structure of western foothills belt, south-central Taiwan. *Petro. Geol. Taiwan* 17:1-16.
- Ye L, Lay T, Kanamori H, Rivera L (2016) Rupture characteristics of major and great (Mw  $\geq$  7.0) megathrust earthquakes from 1990 to 2015: 1. Source parameter scaling relationships. *J Geophys Res Solid Earth* 121:826–844.

# 臺灣地區 114 年中大型地震震源資訊之快速彙整與提供

## 子計畫二

### 評估最新地動預估式對台灣地震預警系統之適用性 (III)

林彥宇 高嘉謙 吳祖霆

中華民國地球物理學會

#### 摘要

地震預警系統的核心目標，是在具破壞性的剪力波(S波)抵達前，透過快速偵測初始的 P 波訊號，推算震源參數並發布警報，以爭取寶貴的反應時間，降低潛在災害。由於電子訊號傳遞速度遠快於地震波，當系統在震源區附近的測站偵測到 P 波後，可即時利用地動預估式(Ground Motion Prediction Equation, GMPE)估算各地震度，進而發布警報。此機制對於震央距離較遠的地區(如花蓮外海地震對臺北市的影響)尤為重要。目前中央氣象署地震預警系統主要採區域型與現地型之混合架構，並同時使用「幾何中心法」與「疊代法」定位震源(Chen et al., 2019)。其中，幾何中心法雖具有計算快速的優勢，常用於第一報，但由於假設固定震源深度且測站多設於陸地，當地震發生於外海或實際深度差異過大時，容易造成震央位置與震源參數之偏差，進而影響基於 GMPE 的地震動預估準確性。

為進一步提升區域地震預警之準確性與效能，本計畫依循前期計畫建議，將大臺北地區作為示範案例，針對特定區域波傳路徑建立更具區域適配性的地動加速度預估式。本計畫採用 1992 年至 2020 年臺灣強地動觀測計畫(Taiwan Strong Motion Instrumentation Program, 簡稱 TSMIP)臺北測站共 39 筆事件紀錄作為模型訓練數據，並以混合效應模型(mixed-effect model)建立兩組新的地動加速度預估式：Model1(全規模迴歸)與 Model2(規模分段迴歸)。其中 Model2 採用規模分段迴歸架構，期望能更佳反映不同地震規模下的非線性衰減特性。兩組預估式數學表達如下：

Model1：

$$\ln(PGA) = 7.70 - 0.45M_L - 0.15(M_L - 8.5)^2 - 0.005R_{hypo} - (3.2 - 0.25M_L) \ln(R_{hypo} + 45) + \ln(S_i)$$

Model2 :

$$M < 6.0: \ln(PGA) = 7.70 - 0.45M_L - 0.15(M_L - 8.5)^2 - 0.005R_{hypo} - (3.2 - 0.25M_L) \ln(R_{hypo} + 45) + \ln(S_i)$$

$$M \geq 6.0: \ln(PGA) = 4.05 - 0.40M_L - 0.18(M_L - 8.0)^2 - 0.0035R_{hypo} - (2.8 - 0.27M_L) \ln(R_{hypo} + 35) + \ln(S_i)$$

為確保預估式性能評估結果具客觀性與可靠性，避免單憑訓練數據檢視模型能力的侷限性，本計畫採用中央氣象署地震測報中心 2021 年至 2024 年規模達 5.5 以上且臺北測站震度達三級以上之事件作為外部檢驗，共計 14 筆觀測資料。

預估式性能評估均採用參數殘差分析與檢量線迴歸分析進行量化評估。在原始預估式評估階段，Model1 與 Model2 顯示出隨規模與距離增加而低估的趨勢。然而，經引入分區專屬係數後，所有模型的系統性偏差均得到有效修正，表示分區係數能顯著改善模型性能，Model2 更展現較佳的穩定性。最終，現行地動預估式搭配部分分區合併專屬係數展現出最佳的預估準確性，可作為現階段提升臺北地區預警準確性的第一階段優化方案。此外，Model2 具備更穩健的大規模之衰減趨勢，則可作為中長期模型優化參考。

**關鍵字：**地震預警、地動預估式、殘差分析、檢量線、分區專屬係數

## Abstract

Earthquake early warning (EEW) systems utilize seismological principles to notify critical institutions and the general public before the arrival of damaging shear waves (S-waves), thereby mitigating potential losses. Since electronic signal transmission speed is significantly faster than seismic wave propagation, once the P-wave is detected by stations near the epicenter, the system can immediately utilize Ground Motion Prediction Equations (GMPEs) to estimate ground motion intensity across affected areas. This mechanism is crucial for regions far from the epicenter, such as the impact of an offshore Hualien earthquake on Taipei City. Currently, the Central Weather Administration (CWA) utilizes a hybrid regional and on-site EEW architecture, simultaneously employing the "Geometric Center Method" and the "Iterative Method" for source localization (Chen et al., 2019). While the Geometric Center Method offers rapid computation, often used for the first alert, its assumption of a fixed focal depth and the predominance of onshore stations often lead to deviations in hypocenter location and source parameters when earthquakes occur offshore or at significantly different depths, consequently affecting the accuracy of GMPE-based ground motion prediction.

To further enhance the accuracy and performance of regional EEW, this project follows the recommendation of previous studies to use the greater Taipei area as a demonstration case, establishing a more regionally adapted Ground Motion Prediction Equation for acceleration (PGA) along specific wave propagation paths. The project utilized 39 event records from the Taiwan Strong Motion Instrumentation Program (TSMIP) Taipei stations spanning 1992 to 2020 as the model training data, and adopted a mixed-effect model approach to develop two new PGA GMPEs: Model 1 (full-scale regression) and Model 2 (magnitude-segmented regression). Model 2's segmented regression structure is specifically designed to better reflect the non-linear attenuation characteristics across different earthquake magnitudes. The mathematical expressions for the two prediction equations are as follows:

Model1:

$$\ln(PGA) = 7.70 - 0.45M_L - 0.15(M_L - 8.5)^2 - 0.005R_{hypo} \\ - (3.2 - 0.25M_L) \ln(R_{hypo} + 45) + \ln(Si)$$

Model2:

$$M < 6.0: \ln(PGA) = 7.70 - 0.45M_L - 0.15(M_L - 8.5)^2 - 0.005R_{hypo} \\ - (3.2 - 0.25M_L) \ln(R_{hypo} + 45) + \ln(Si)$$

$$M \geq 6.0: \ln(PGA) = 4.05 - 0.40M_L - 0.18(M_L - 8.0)^2 - 0.0035R_{hypo} \\ - (2.8 - 0.27M_L) \ln(R_{hypo} + 35) + \ln(Si)$$

To ensure the objectivity and reliability of the prediction equation performance evaluation, and to avoid the limitations of assessing model capability solely based on training data, this project utilized 14 observational records from the CWA Seismic Monitoring Center spanning 2021 to 2024. This dataset includes earthquakes with a magnitude greater than 5.5 and recorded intensity greater than 3 at Taipei stations, serving as the external validation dataset.

Prediction equation performance was quantified using parametric residual analysis and regression-line analysis (calibration analysis). During the initial model evaluation phase, Model 1 and Model 2 showed a trend of underestimation that increased with magnitude and distance. However, after introducing source-zone specific coefficients, the systematic biases of all models were effectively corrected, indicating that these coefficients significantly improve model performance, with Model 2 demonstrating superior stability. Ultimately, the existing CWA GMPE combined with partial merged source-zone specific coefficients achieved the best prediction accuracy, serving as the first-stage optimization plan for enhancing EEW accuracy in the Taipei area. Furthermore, Model 2's characteristic of having a more robust attenuation trend at large magnitudes positions it as a potential direction for long-term model optimization.

**Keywords: earthquake early warning, ground motion prediction equation, residual analysis, calibration curve, source-zone specific coefficients.**

## 一、研究目的

地震預警系統的核心目標，是在具破壞性的剪力波(S波)抵達前，透過快速偵測初始的 P 波訊號，推算震源參數並發布警報，以爭取寶貴的反應時間，降低潛在災害。由於電子訊號傳遞速度遠快於地震波，當系統在震源區附近的測站偵測到 P 波後，可即時利用地動預估式(Ground Motion Prediction Equation, GMPE)估算各地震度，進而發布警報。此機制對於震央距離較遠的地區(如花蓮外海地震對臺北市的影響)尤為重要。

目前中央氣象署地震預警系統主要採區域型與現地型之混合架構，並同時使用「幾何中心法」與「疊代法」定位震源(Chen et al., 2019)。其中，幾何中心法雖具有計算快速的優勢，常用於第一報，但由於假設固定震源深度且測站多設於陸地，當地震發生於外海或實際深度差異過大時，容易造成震央位置與震源參數之偏差，進而影響基於 GMPE 的地震動預估準確性。

本研究計畫將以臺灣強地動觀測計畫(Taiwan Strong Motion Instrumentation Program, 簡稱 TSMIP)為基礎，檢視中央氣象署現行地動加速度預估式在臺北地區的預估表現，並建立新之地動加速度預估式。同時為評估模型於實際預警情況下的適用性，本計畫將進行外部驗證，驗證資料為中央氣象署地震測報中心 2021 年至 2024 年間規模達 5.5 以上且臺北測站震度達三級以上之事件，以確保模型具實務應用價值。研究成果期望能有效提升臺北地區震動預測準確性，增進地震預警與公共警報系統(Public Warning System, PWS)之區域適用性，進而強化災害應變能力。

## 二、地震資料來源及分類

### 1. 地震資料來源與處理流程

本次計畫旨在建立區域性地動預估式，故需整合具備足夠資料量與高精度震源參數之資料庫。本計畫資料庫由兩部分構成：一為訓練資料，採用臺灣強地動觀測計畫(TSMIP)自 1992 年至 2020 年間的臺北測站強震紀錄，用於模型迴歸與參數建立；二為外部檢驗資料，採用中央氣象署地震測報中心 2021 年至 2024 年的臺北測站觀測紀錄，用以評估模型之實際預估能力。整合完成之資料庫包含震源參數(如發震時間、震央位置、規模、震源深度、震央距離)、地動參數(實測 PGA 與 PGV)與場址參數(參考點位置、場址放大因子 $S_i$ )等。

資料處理流程如下：

1. 基準確認：參考預警測站目錄以確認震源解與測站位置基準。

2. 資料引入與選用：引入 TSMIP 臺北測站資料(TAP、TAP001、TAP067)。經共站檢核後，僅採用 TSMIP 資料作為迴歸訓練資料庫。
3. 參數初始化：以現行地動預估式透過各測站平均殘差值推估初始場址放大因子( $S_i$ )，作為後續模型迭代與收斂更新之基礎，以完成最終預估式訓練研究資料庫之建置。
4. 引入外部檢驗資料：引入中央氣象署地震測報中心 2021 年至 2024 年之強震紀錄作為外部檢驗。

#### a. 訓練資料

本計畫初期參考中央氣象署 2006 至 2011 年之預警參考測站目錄，該資料庫提供經過精確修正之震源參數，適合作為地震預警系統與地動預估式分析之依據。然而，經資料剖析後發現，臺北地區僅木柵測站(TWA)具備有效 PGA 紀錄。考量建立具區域代表性之地動預估式，應涵蓋中央氣象署在臺北地區的指標測站(如 TAP)紀錄，單以 TWA 測站資料量不足以支撐區域性迴歸分析與模型建立。

為改善此限制，進一步引入臺灣強地動觀測計畫(TSMIP)自 1992 年至 2020 年間臺北地區測站(TAP、TAP001、TAP067)之強震紀錄，並與預警參考測站目錄進行共站檢核(表 2-1-1)，確認參考點位置近乎一致，參考點分布如圖 2-1-1。最終迴歸分析僅採用 TSMIP 資料庫作為主要資料來源，以確保 PGA 定義與震源參數的一致性，避免不同資料庫間定義差異對模型迴歸結果造成偏差。

由於中央氣象署所提供之預警參考測站目錄資料並未包含場址放大因子( $S_i$ )，因此本計畫於前期分析中暫以現行地動預估式進行迴歸，並根據各測站平均殘差值推估對應的 $S_i$ 值，作為初始估計。於後續地動預估式建置與迭代過程中，將以此 $S_i$ 值作為基礎，透過迴歸更新與收斂逐步修正。

#### b. 外部檢驗資料

由於模型性能無法僅憑訓練資料表現衡量，故本計畫收錄中央氣象署地震測報中心 2021 年至 2024 年間的觀測紀錄，作為獨立的外部檢驗。篩選地震規模達 5.5 以上且臺北測站達震度三級以上之事件，以確保檢驗數據具備足夠強度以及地區相關性，並客觀評估模型在面對未知強震事件的實務預測準確性，進而檢驗研究成果對地震預警系統具備實際應用價值。

## 2. TSMIP 與地震測報中心資料內容說明

本計畫最終整併之訓練資料內容為臺北測站地震資料庫涵蓋 1992 年至 2020 年間，共收錄 39 筆事件紀錄，芮氏規模介於 5.5 至 7.65 之間。其震央分布與震源

距離與規模分布如圖 2-2-1 與圖 2-2-2 所示，震源距離多集中於 50 至 200 公里。而外部檢驗資料內容則彙整中央氣象署地震測報中心 2021 年至 2024 年間，共收錄 14 筆事件紀錄，芮氏規模介於 5.7 至 7.3 之間。其震央分布與震源距離與規模分布如圖 2-2-3 與圖 2-2-4，震源距離多集中於 80 至 150 公里。

整併後的資料庫主要欄位內容說明如下：

欄位名稱	欄位中文名稱	單位	欄位說明
EQ_ID	地震事件編號		以發震時間(年月日時分秒)與參考點代號組成。
filename	P-file 檔案名稱		
EQ_lon	震源經度	度	
EQ_lat	震源緯度	度	
Magnitude	推估之 地震規模		推估之芮氏規模。
Depth	震源深度	km	
Countyname	參考點 所在縣市		詳見 2-1 節。
Station	參考點代碼		詳見 2-1 節。
Sta_lon	參考點經度	度	詳見 2-1 節。
Sta_lat	參考點緯度	度	詳見 2-1 節。
Si	參考點 場址放大因子		詳見 3-2 節。
record_PGA	實測最大地動 加速度	gal	
record_PGV	實測最大地動 速度	cm/s	

### 3. 地震分類

隱沒帶地震與淺層地殼地震在地震波的衰減特性上存在顯著差異。隱沒帶地震通常發生於較深的地殼或地函中，震源深度較深，傳遞至地表的高頻震動會受

到更多衰減，但也因此產生較廣泛的低頻地震動影響範圍。相較之下，地殼地震震源較淺，常伴隨較強的高頻震動，導致地表破壞範圍較集中。過去已有多項研究指出，隱沒帶地震與一般地殼地震的衰減特性不同(Crouse et al., 1988; Crouse, 1991; Molas and Yamazaki, 1995; Youngs et al., 1997)，因此在地震危害評估與地動預估式建立時，會針對地震類型進行區分。

#### **a. 淺部地殼地震**

淺部地殼地震發生在地震帶上淺部地殼，震源深度 35 公里以內的區域，且屬非隱沒帶震源。此類地震多數源自板塊內部或邊界的斷層活動，當地殼岩層因板塊運動所產生的應力超過岩石強度極限時，便會沿著斷層面發生破裂，釋放能量而形成地震。淺部地殼類型的地震通常規模較小，但由於震源深度淺，地震波在傳遞至地表的過程中能量衰減少，對於人類與地表上的建物影響較大。

#### **b. 隱沒帶介面型地震**

隱沒帶地震可依其發震位置與機制，進一步區分為介面型(interplate 或稱 interface)與內部型(intraplate 或稱 intraslab)地震。介面型地震的分布如圖 2-3-1 中 T 符號所在位置，內部型地震的分布則在 O、C 符號所在位置。介面型地震發生於隱沒板塊與上覆板塊之交介面，震源深度通常小於 50 公里，屬於低角度逆衝型斷層活動，常被稱為「大型逆衝地震」(megathrust earthquake)。此類地震因斷層面積廣大，累積能量龐大，釋放時可能引發強烈地震動與海嘯災害。內部型地震發生於隱沒板塊內部，震源深度通常大於 50 公里(Tichelaar et al., 1993)，機制較為複雜。目前學界對其成因尚未完全明瞭，可能與板塊下沉過程中產生的張力作用、板塊內部的脆弱帶或舊有斷層的再活動有關。本計畫所使用之第一報資料，因初始震源深度設定為 10 公里，無法準確反映實際震源深度，故在隱沒帶區域內的地震事件，將暫時歸類為介面型地震。

然而，在地震預警系統第一報階段，受限於時間要求及初步震源資訊有限，難以即時判別地震類型。為兼顧預警系統運作效率與時效性，本計畫所使用之 TSMIP 資料未區分地震類型，直接以全體地震事件進行分析。期望透過本計畫資料分析，建立即使未區分地震類型，亦能於各種震源條件下維持穩定且良好預估能力之地動預估式，以作為未來地震預警系統初步震度推估之參考依據。

表 2-1-1、預警參考測站目錄臺北測站與 TSMIP 臺北測站經緯度對照表。

測站代號	資料來源	緯度(°N)	經度(°E)
TAP	預警參考測站目錄	25.03770	121.51380
TAP	TSMIP	25.03765	121.51382
TAP001	TSMIP	25.03765	121.51382
TWA	預警參考測站目錄	24.97780	121.59230
TAP067	TSMIP	24.97781	121.59209

表 2-1-2、1992 年至 2020 年 TSMIP 臺北測站資料整合範例。

EQ_ID	filename	EQ_lon	EQ_lat	Depth	Magnitud	Rhypo	COUNTY	Station	record_P	record_P	Sta_lat	Sta_lon	Si	Vs30	year
2002_0331_0652_50	TSMIP	122.1717	24.1602	2.94	7.12	118.2039	臺北市	TAP001	93.43222	19.891	25.03765	121.5138	1.949	177.4249	2002
2001_0614_0235_26	TSMIP	121.9562	24.4113	13.49	5.89	83.89619	臺北市	TAP001	65.82562	7.7771	25.03765	121.5138	1.949	177.4249	2001
1995_0625_0659_07	TSMIP	121.6993	24.5392	48.86	5.97	76.25159	臺北市	TAP001	47.96218	3.4424	25.03765	121.5138	1.949	177.4249	1995
1999_0920_1747_16	TSMIP	120.82	23.85	8	7.65	149.8947	臺北市	TAP001	46.91652	11.807	25.03765	121.5138	1.949	177.4249	1999
2000_0910_0854_47	TSMIP	121.5525	24.0668	19.56	5.81	109.8533	臺北市	TAP001	30.2379	3.0932	25.03765	121.5138	1.949	177.4249	2000
2002_0515_0346_06	TSMIP	121.8532	24.654	11.63	6.15	55.96309	臺北市	TAP	23.32106	2.5481	25.03765	121.5138	1.949	177.4249	2002
2009_0713_1805_03	TSMIP	122.2195	24.0123	13.21	6.36	135.2626	臺北市	TAP	21.88634	3.2978	25.03765	121.5138	1.949	177.4249	2009
2004_1015_0408_50	TSMIP	122.7778	24.4708	88.02	6.59	167.4591	臺北市	TAP001	21.06118	2.0602	25.03765	121.5138	1.949	177.4249	2004
2005_0305_1908_00	TSMIP	121.8135	24.6573	10.17	5.77	53.01029	臺北市	TAP	17.08826	2.0407	25.03765	121.5138	1.949	177.4249	2005
1999_1101_1753_02	TSMIP	121.6925	23.3688	33.37	6.31	189.5421	臺北市	TAP001	15.61924	1.683	25.03765	121.5138	1.949	177.4249	1999
2013_1031_1202_10	TSMIP	121.3463	23.5679	9.85	6.32	164.7182	臺北市	TAP	18.56806	2.7201	25.03765	121.5138	1.949	177.4249	2013
2005_0305_1906_52	TSMIP	121.866	24.6542	9.04	5.78	56.2734	臺北市	TAP	13.51812	1.6522	25.03765	121.5138	1.949	177.4249	2005
2007_0906_1751_27	TSMIP	122.3272	24.2462	50.75	6.28	121.3839	臺北市	TWA	14.5236	1.1763	24.97781	121.5921	2.177	814.9959	2007
1994_0605_0109_30	TSMIP	121.7873	24.4681	4.14	6.35	60.19035	臺北市	TWA	15.141	2.9286	24.97781	121.5921	2.177	814.9959	1994

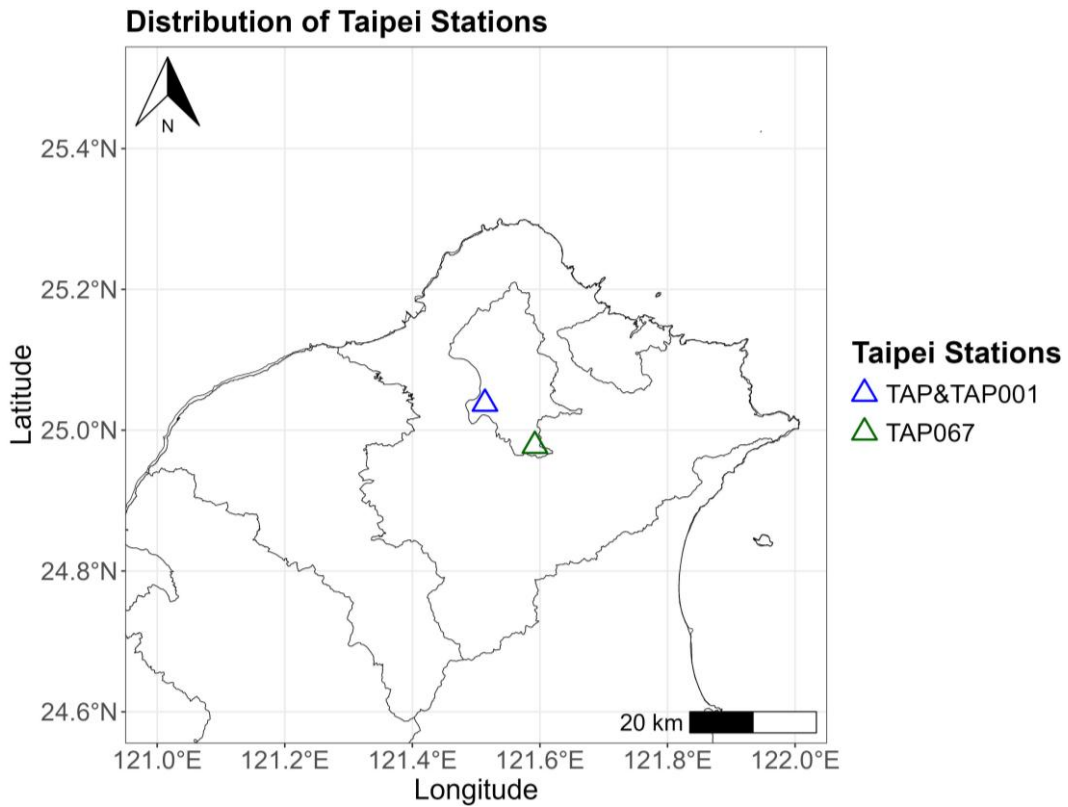


圖 2-1-1、本次計畫所收錄之 TSMIP 資料臺北參考點分布圖。TAP&TAP001 測站與 TAP067 測站後續將分別敘述為 TAP 測站與 TWA 測站。

Taipei Station Records (1992-2020) – EQ Distribution and Connection (Magnitude > 5.5)

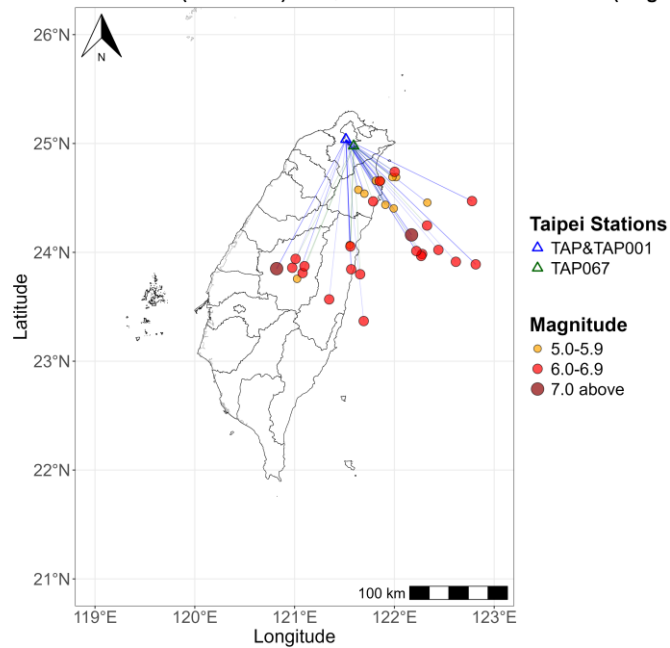


圖 2-2-1、本計畫使用於訓練資料之震央與其記錄測站之連線分布圖，僅採用規模 5.5 以上事件。

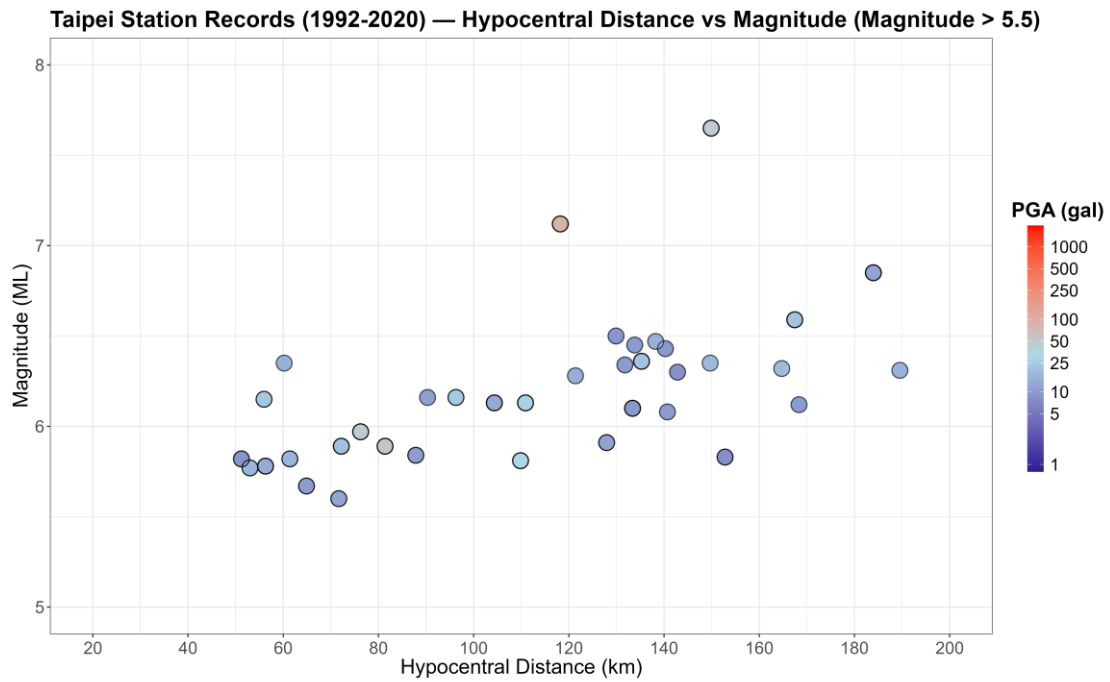


圖 2-2-2、本計畫使用於訓練資料於不同規模下震源距離分布圖，僅採用規模 5.5 以上事件。

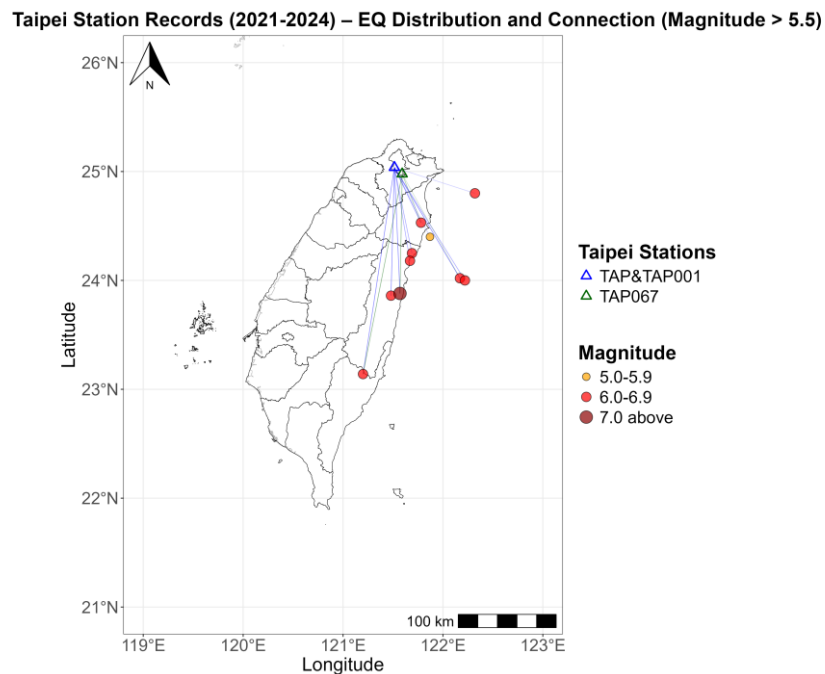


圖 2-2-3、本計畫使用於外部檢驗之震央與其紀錄測站連線分布圖，僅採用規模 5.5 以上事件。

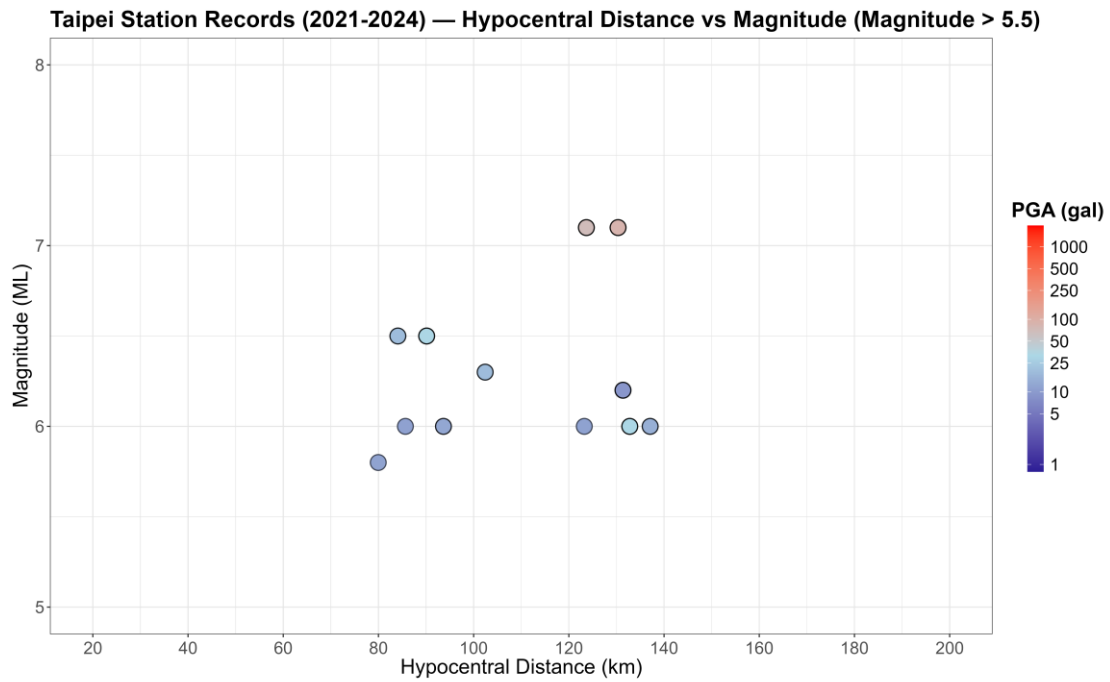


圖 2-2-4、本計畫使用於外部檢驗資料於不同規模下震源距離分布圖，僅採用規模 5.5 以上資料。

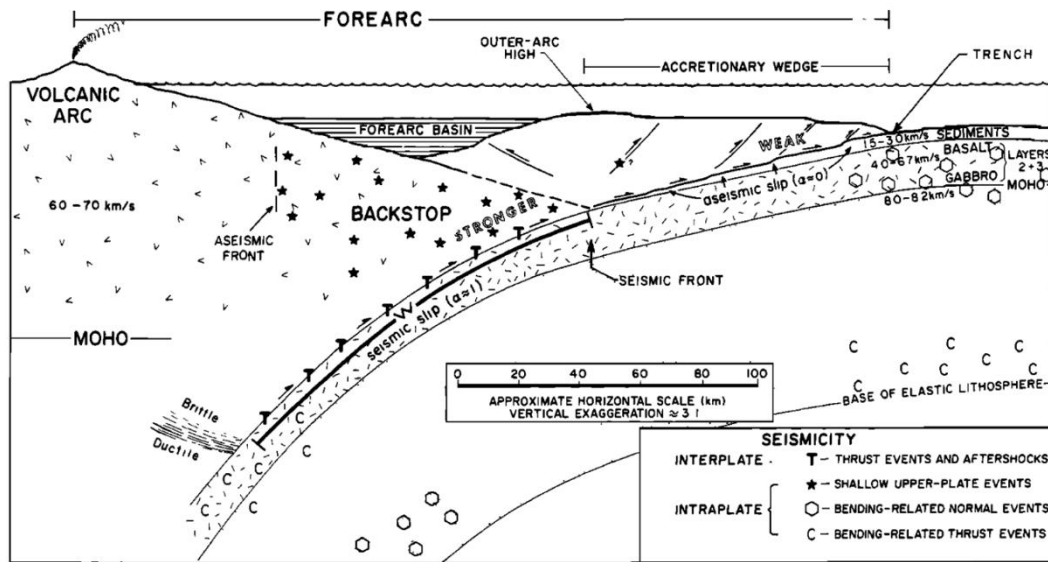


圖 2-3-1、隱沒帶構造及介面型地震與內部型地震發生位置示意圖。

### 三、研究方法

地動預估式為一種經驗性數學模型，藉由過去強震觀測紀錄並透過迴歸分析所建立。主要用途在於預估特定地震規模、震源距離以及場址條件下，某一地點可能發生的地動值(如 PGA 或 PGV 等)。

為全面評估模型預估表現，本計畫將利用參數殘差分析計算地動預估模型 PGA 預測誤差殘差值(residual)，並進行實際觀測資料與預測資料的對比繪製觀測與預測資料分布圖，再利用檢量線迴歸分析以逐一審視出各預估式的預測表現。

此外，前期計畫已指出大臺北地區可作為示範案例，針對特定參考點區域或波傳路徑建立更具區域適配性的地動預估式。因此，本研究採用混合效應模型(mixed-effect model)，以臺北地區測站資料為基礎建立新的 PGA 地動加速度預估式，期望進一步提升區域地震預警之準確性與效能，其詳細之參數架構將於後續章節進一步闡述。

#### 1. 模型評估方法

##### a. 參數殘差分析

殘差分析為迴歸分析中針對預測誤差(或稱作估計誤差)所進行的分析，可用來檢視是否滿足線性迴歸的假設。而在地動預估式中，殘差值(residual)為實際觀測值(observed value)與地動預估式的估計值(predicted value)之差值。差值愈接近零，表示殘差的變動是隨機的且沒有任何特殊趨勢(trend)或樣式(pattern)出現，模型具可信度；若模型不適當時，殘差值分布會有一趨勢或樣式。透過相關的殘差分布圖，可判斷迴歸分析的假定是否合理，供決定是否要採取其他補救或矯正措施，降低預測誤差。另外，標準差在地動預估式中，地動值之殘差的標準差不僅是地震危害度分析中的關鍵因子，亦可代表預估式的評估精準度，一般來說，殘差的標準差較小，代表殘差的離散程度小，模型品質良好。

##### b. 檢量線迴歸分析

迴歸分析為一種解釋自變量(影響因素)與因變量(被解釋之變量)關係的統計分析方法，透過迴歸模型的建立預測與推論欲研究之變數。在地動預估式中，可藉由迴歸分析計算地動參數觀測值與預估值迴歸方程式，再利用方程式得知觀測值與預估值之間的關係。

檢量線(Calibration curve)用以表示模型的預測精度，即預測值和觀測值之間的差異程度，可確認各振幅區間是否皆預估精準。預測值和觀測值之比值接近一，

表示該模型計算出的成果與實際情況有相當程度的符合。若檢量線斜率明顯小於一，在振幅較大之區域觀測值大於預估值，當災害性地震來臨時會造成低估，導致無法準確地進行地震預警。目前地震防救災業務以震度為主要參考依據(內政部，2023)，地震震度愈高愈容易造成災害，一般以震度三級或四級以上作為人員傷亡以及建築物毀損的標準。因此本計畫亦根據中央氣象署現行震度分級(圖 3-1-1)，將震度一到五的振幅使用 PGA 細分，震度五弱到七級的振幅則使用 PGV，透過細分區間可以得知模型在各震度下的表現。

本計畫以戴明迴歸(Deming regression)分析，此迴歸分析方式同時考慮到因變量 Y 與自變量 X 皆有誤差，另外還包含了因測量方式不同造成變異數不同的可能情況，當變異數比為 1(表示兩者變異數相同)時，戴明迴歸即等於正交迴歸(Total Least Squares)。相較於正交迴歸，戴明迴歸計算的是點到直線的斜距離總和最小值。

## 2. 震源分區

目前地震危害度分析中廣泛應用的地動預估式(Ground Motion Prediction Equation, GMPE)，多以全球或大區域地震資料為基礎建構。然而，因各地地殼構造、震源機制與孕震帶分布存在顯著差異，若直接套用全區性 GMPE，往往會在特定地區出現系統性高估或低估，造成預測偏差。為提升區域地震動預測之可靠度與準確性，需透過震源分區方法建立分區地動預估式，針對不同地區調整 GMPE 之迴歸係數。

本計畫參考 Cheng et al. (2015) 所劃分之淺層區域震源分區(圖 3-2-1)，其分區依據包含地體構造特徵、地震活動度、孕震帶分布、震源機制、活斷層分布、地形與重力資料(鄭錦桐，1997；2002)。該震源分區共包含 S01 至 S21 等 28 個子分區，以反映臺灣不同地體區塊之震源特性。而分區專屬係數方法引用高嘉謙(2022)之場址相依暨小震源分區地動預估式(式一)。其並非針對單一分區獨立建立 GMPE，而是透過下列步驟進行：

1. 先以訓練資料庫建立一組基礎地動預估式(式二)。
2. 再將該預估式應用至不同分區，進行殘差分析。
3. 將各分區的殘差平均值視為該分區的專屬修正係數，並引入邏輯數表示。

$$\ln(PGA) = C_1 + C_2 M + C_3 \ln(R + C_4 e^{C_5 M}) + C_{S01} Z_{S01} + C_{S02} Z_{S02} + \dots + C_{S21} Z_{S21} \quad (\text{式一})$$

$$\ln(PGA) = C_1 + C_2M + C_3(M + C_4)^2 + C_5R + (C_6 + C_7M) * \ln(R + C_8) + \ln(Si) \quad (\text{式二})$$

最終，本計畫建立之分區地動預估式數學形式可以(式三)表示：

$$\ln(PGA) = C_1 + C_2M + C_3(M + C_4)^2 + C_5R + (C_6 + C_7M) * \ln(R + C_8) + \ln(Si) + C_{S01}Z_{S01} + C_{S02}Z_{S02} + \dots + C_{S21}Z_{S21} \quad (\text{式三})$$

變數定義如下： $PGA$  為地震動參數( $m/s^2$ )， $M$  為芮氏規模， $R$  為距斷層破裂面最短距離(km)， $Z_{S01}=1$  時，代表地震位於  $S01$  區域震源中； $Z_{S01}=0$  時，則位於其他分區，以此類推。

### 3. 混和效應模型

地動預估式為使用過去強震記錄所迴歸出的經驗(empirical)公式，進行迴歸分析前須先選取合適之函式(form)擬合資料，且須考慮地動值大小與震源尺度的關係、與距離尺度的關係與場址特性造成的震波改變，一般常用的衰減模式包含震源項、距離項及場址項等等，基本模型可以(式四)表示。

$$\ln(PGA_{ij}) = f(M_i, r_{ij}, \theta) + \varepsilon_{ij} \quad (\text{式四})$$

本計畫參考高嘉謙(2022)地動預估式模型建置方法，迴歸理論採用混合效應模型(mixed-effect model)，同時考慮地震參數所產生之隨機效應及固定效應，其基本精神是以最大概似法(maximum likelihood estimation, MLE)對資料進行迴歸，即根據母體機率密度函數，求得一估計式使其聯合機率密度函數(即概似函數)之值為最大，而此估計值應非常接近母體參數，(式四)中 $\theta$ 即由最大概似法迴歸出來之係數。

表 3-1-1、TSMIP 臺北測站參考點列表。

縣市	縣市代碼	參考點	參考點代碼	參考點經度	參考點緯度
臺北市	TAP	臺北地震站	TAP	121.5138	25.0377
		木柵地震站	TWA	121.5923	24.9778

中央氣象局新制地震震度分級表(109年1月1日起)										
震度	0級	1級	2級	3級	4級	5弱	5強	6弱	6強	7級
加速度 cm/sec <sup>2</sup>	0.8	2.5	8.0	25	80					
速度 cm/sec					15	30	50	80	140	
	(速度劃分, 已考慮加速度實際之影響)									

圖 3-1-1、現行中央氣象署震度分級。(引用自中央氣象署)

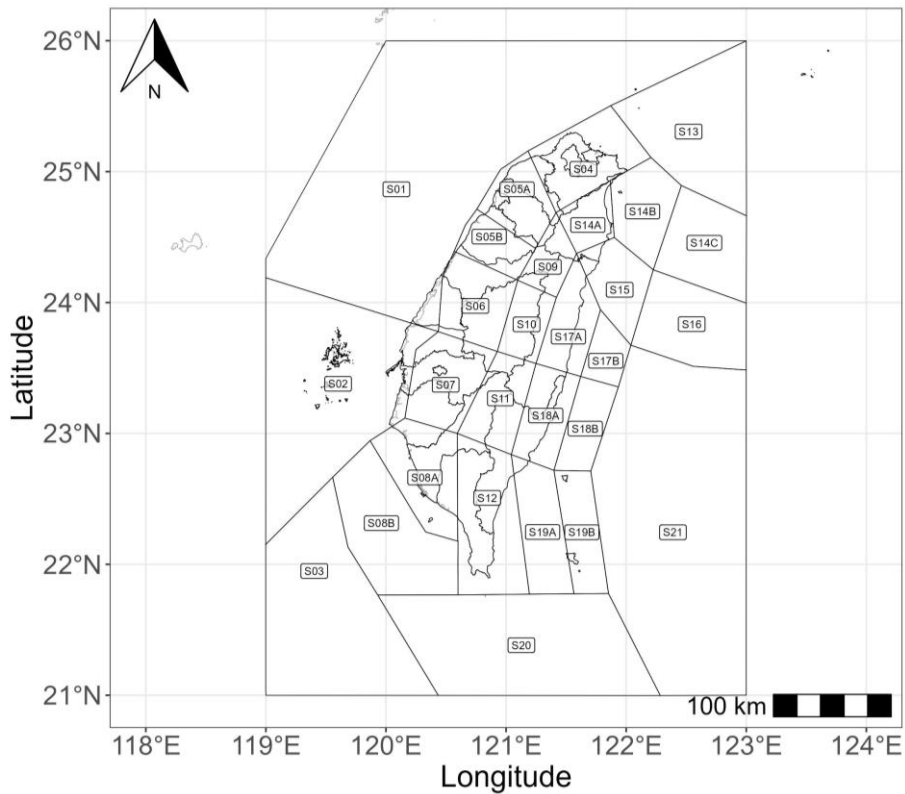


圖 3-2-1、淺層區域震源分區分布圖。(引用自 Cheng et al., 2015)

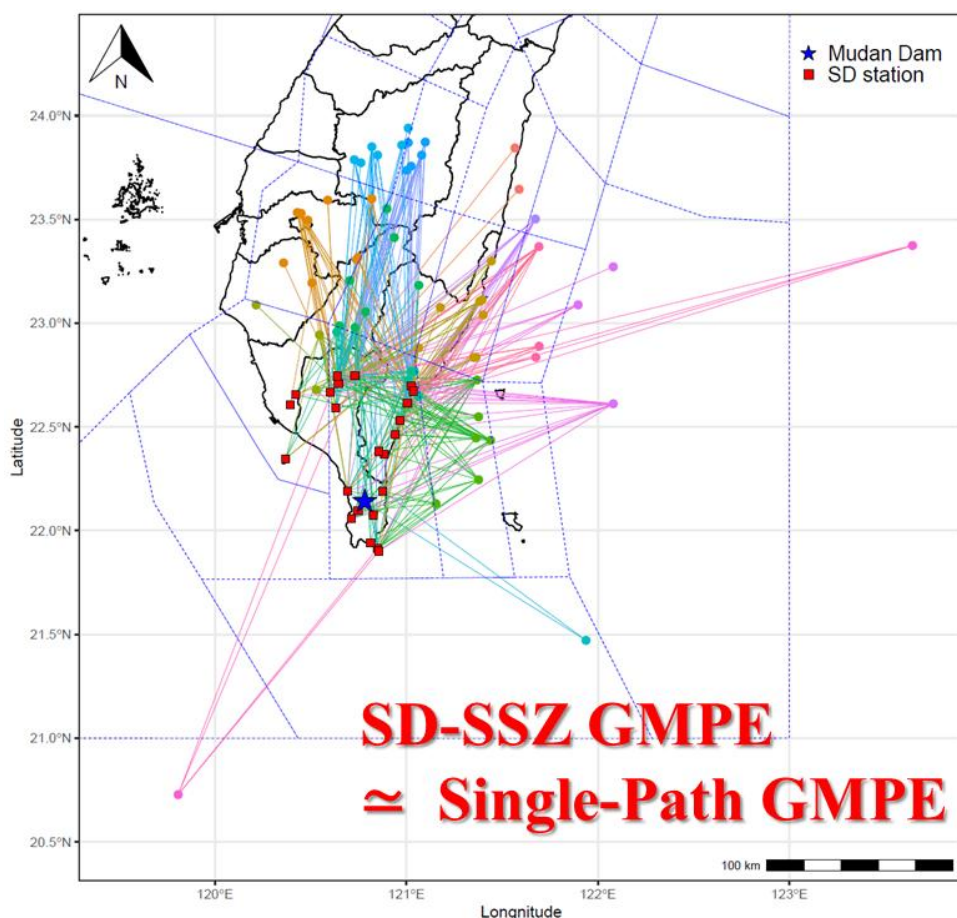


圖 3-3-1、特定路徑示意圖。(引用自高嘉謙，2022)

#### 四、地動預估式參數設定與處理

##### 1. 規模參數

本計畫在地震規模的選用上，與前期計畫有所不同。前期計畫於模型建立或檢驗過程中，以地震矩規模 ( $M_w$ ) 為主；然而，本次計畫無論在地動預估式建立或檢驗階段，均統一採用芮氏規模 ( $M_L$ )。此調整基於下列應用需求與即時性考量外，亦是依循委員之建議。

採用  $M_L$  主要是基於下列考量：

1. 即時應用與時效性考量：中央氣象署地震預警系統發布警報時，基於時效性需求，第一時間產出的規模參數為芮氏規模 ( $M_L$ )，而無法在極短時間內產出地震矩規模 ( $M_w$ )。為確保本研究建立之預估式能夠立即應用於中央氣象署現行的地震預警警報流程中，故統一採用系統實

際產出的( $M_L$ )作為規模參數。

2. 資料來源一致性：中央氣象署預警參考目錄以  $M_L$  為規模參數，直接採用  $M_L$  可避免不同規模轉換所引入的不確定性。

考量本計畫的資源與時程限制，並避免建立轉換式可能引入額外的轉換誤差，故本次計畫選擇階段性直接採用  $M_L$ ，以符合地震預警系統對即時性之需求。後續研究仍不排除重新建立  $M_L$ - $M_w$  經驗式，以供未來在  $M_w$  資料更加完善且有優化需求時，作為中長期研究可以努力的目標與方向。

## 2. 距離參數

一般地動預估式使用之距離參數有距斷層破裂面最短距離 ( $R_{rup}$ )、斷層面地表投影距離 ( $R_{jb}$ ) 以及震源距離 ( $R_{hypo}$ )，現行應用於地震危害度分析之地動預估模型多數採距斷層破裂面最短距離。由於在地震發生後反應時間有限，預警模式能夠發布之距離參數只有震源距離，若資料處理時採用距斷層破裂面最短距離，無法較為迅速地應用於現行地震預警作業。因此本計畫將地動預估式原先所使用之距斷層破裂面最短距離嘗試以震源距離取代，並於後續進行殘差分析。

## 五、地動預估式架構與比較

本章介紹本計畫所採用之三組地動預估模型，包括中央氣象署現行模型與本計畫透過混合效應模型所建立適用於大臺北地區之 Model1 與 Model2，並簡述其基本架構與差異特性。

### 1. 現行地動加速度預估式

為精進中央氣象署地震預警作業，本計畫將檢視現行地動預估式之預估表現。中央氣象署目前使用於地震預警 PGA 預估式為蕭乃祺於 2024 修訂(改自 Hsiao2007)，簡稱 Hsiao，預估公式如下(式五)。

$$\begin{aligned} M < 6.0 : PGA &= 12.44 \times e^{1.31M_L} \times R_{hypo}^{-1.837} \times Si \\ M \geq 6.5 : PGA &= 1.657 \times e^{1.533M_L} \times R_{hypo}^{-1.607} \times Si \end{aligned} \quad (\text{式五})$$

其中， $M_L$  為地震芮氏規模， $R_{hypo}$  為震源距離， $Si$  項為場址放大因子，每個縣市會有一至三個參考點，並依地震震源深度 40 公里分成淺部與深部場址放大因子，由於第一報資料震源深度初始值設定為 10 公里，因此預估式所使用之參考點場址放大因子為淺部  $Si$  值。

## 2. 新地動加速度預估式

針對臺北地區之地震預估需求，本計畫採用 TSMIP 臺北測站自 1992 年至 2020 年之強震觀測資料為基礎，著手建立新地動加速度預估式。而在確定最終採用的預估式前，進行多階段的模型結構篩選與優化工作，嘗試從眾多可能的參數組合中，找到最能反映臺北地區地震動衰減特性之預估式。

在建立模型前，本計畫首先對於迴歸所使用之地震資料分布進行分析。如圖 2-2-2 所示，迴歸資料主要集中於芮氏規模 5.5 至 6.5 之間，且涵蓋部分芮氏規模大於 6.5 之事件，故模型在大規模區間必須具備良好的擬合與衰減特性。特別值得注意的是，在震源距離約 120 公里之遠場處，仍觀測到 PGA 值大於 80gal 之事件。此類遠場且大振幅事件之存在，表示若模型僅採用單純的線性或單一對數衰減形式，將會嚴重低估大振幅之事件。根據以上所述之數據特性，本計畫持續嘗試並調整參數架構，以精確反映臺北盆地地質環境下之地動衰減的複雜行為。

因此，本計畫進行多階段的模型結構篩選與優化工作：

首先從較為簡易的經驗參數組合開始，系統性測試多種迴歸模型，其測試之參數架構如下：

$$\ln(PGA) = C_1 + C_2 * M + C_3 * \ln(R_{hypo}) + \ln(Si) \quad (式六)$$

$$\ln(PGA) = C_1 + C_2 * M + C_3 * (M + C_4)^2 + C_5 * \ln(R_{hypo}) + \ln(Si) \quad (式七)$$

$$\ln(PGA) = C_1 + C_2 * M + C_3 * (M + C_4)^2 + C_5 * \ln(R_{hypo} + C_6) + \ln(Si) \quad (式八)$$

$$\ln(PGA) = C_1 + C_2 * M + C_3 * (M + C_4)^2 + C_5 * R_{hypo} + (C_6 + C_7 * M) * \ln(R_{hypo} + C_8) + \ln(Si) \quad (式九)$$

本計畫以上述之參數架構的衰減形式為基礎，並觀察其在參數殘差分布圖上的趨勢。初期，參考現行地動預估式參數架構，採用式六之架構，該架構僅包含線性規模項與對數距離項。雖然架構簡單易於迴歸，但經殘差分析發現，其無法反映大規模事件下 PGA 飽和的物理現象，存在過估可能性，進而導致對大規模事

件下的預估準確性不足，以式六為例於不同規模距離尺度衰減圖如圖 5-2-1。為了解決大規模飽和問題，隨後嘗試引用式七之架構，增加規模平方項。此架構雖然能夠反映大規模下 PGA 飽和之現象，但其距離衰減項仍為線性，無法反映遠場衰減較慢之特性，以式七為例於不同規模距離尺度衰減圖如圖 5-2-2。進一步地，引用式八之參數架構，透過增加常數於距離衰減項，使其能夠同時反映大規模下 PGA 飽和之現象，並嘗試反映遠場衰減較慢之特性。然而，式八的預估表現仍有不足，尤其是在反映大規模事件下衰減速率隨距離變化的非線性特性上，仍存在明顯預估偏差，以式八為例於不同規模距離尺度衰減圖如圖 5-2-3。最終，為嘗試反映上述之物理特性，本計畫採用式九之參數架構，增加距離以及規模之交互作用項。此架構不僅能夠反映大規模下 PGA 飽和以及遠場衰減慢之特性，更能精確反映大規模事件衰減速率隨距離變化的非線性特性，以式九為例於不同規模距離尺度衰減圖如圖 5-2-4。從而能夠更靈活你合特殊數據點，使模型性能顯著優化。

值得一提的是，本計畫初期曾考量不同地震傳播路徑(圖 2-2-1)，並嘗試將其作為額外的分類參數進行預估式迴歸，期望修正因路徑效應而導致的預估偏差。然而，初步的迴歸結果顯示路徑分類的參數未能達到顯著的統計意義，且同時增加模型的複雜度以及預估的不穩定性。基於務實考量，本計畫最終並未將路徑參數納入預估式架構中。

在優化階段中，持續透過初步殘差分析，針對回歸線的斜率、殘差平均值以及標準差等指標進行大量的係數調整與迭代分析，以修正模型對特定規模或震源距離的系統性偏差。最終採用的地動預估式(式九)之參數架構，為參考上年度計畫建立之 ILA2TAP-PGA 預估式。ILA2TAP-PGA 混合效應模型結構對於區域性地動預估具備優勢潛力，使參數迴歸結果更為可靠。混合效應模型的架構有利於將地動值的總變異性，拆解為震源特性相關的事件間誤差以及事件內誤差，從而在統計上更精確反映和量化區域性震源特性的影響。

最終，經由殘差分布以及預估穩定性等綜合評估，本計畫從眾多測試模型中，基於式九之參數架構，篩選出表現最佳的兩組迴歸結果，分別命名為 Model1 與 Model2，作為本次計畫的最終預估式。此兩種新地動加速度預估式皆是基於本次計畫所採用之 1992 年至 2020 年間 TSMIP 臺北測站資料，考量區域性震源特性，透過上述混和效應模型迴歸建立，並使用規模、距離、場址放大因子三種參數。

Model1 採用全規模迴歸建立，Model2 則考慮不同規模範圍的震源特性，參考氣象署現行地動加速度預估式，依據不同的規模區間建立預估式。兩者參數架構均納入規模平方項，以及規模與距離的交互作用項，以更能反映震源近場大規模事件的非線性飽和特性以及大規模事件衰減趨勢，預估式分別如式十與式十一。

$$\ln(PGA) = 7.70 - 0.45M_L - 0.15(M_L - 8.5)^2 - 0.005R_{hypo} - (3.2 - 0.25M_L) \ln(R_{hypo} + 45) + \ln(Si)$$

(式十)

$$M < 6.0 : \ln(PGA) = 7.70 - 0.45M_L - 0.033(M_L - 8.5)^2 - 0.005R_{hypo} - (3.2 - 0.25M_L) \ln(R_{hypo} + 45) + \ln(Si)$$

$$M \geq 6.0 : \ln(PGA) = 4.05 - 0.40M_L - 0.18(M_L - 8.0)^2 - 0.0035R_{hypo} - (2.8 - 0.27) \ln(R_{hypo} + 35) + \ln(Si)$$

(式十一)

此外，為避免預估式迴歸結果被現行地動預估式的場址放大因子所限制，進而影響預估式的優化，故將 Model1 與 Model2 的  $Si$  視為獨立迭代與收斂之參數。各預估式於各場址放大因子如表 5-1-1，欄中初始  $Si$  即為現行地動加速度預估式所採用之場址放大因子。

表 5-1-1、中央氣象署測站以及木柵場址放大因子參照表。

測站名	位置	參考點經度	參考點緯度	初始 $Si$	Model1 之 $Si$	Model2 之 $Si$
TAP	氣象署	121.514	25.0377	1.949	2.864	2.894
TAP001						
TAP067	木柵	121.592	24.9778	2.177	1.482	1.466

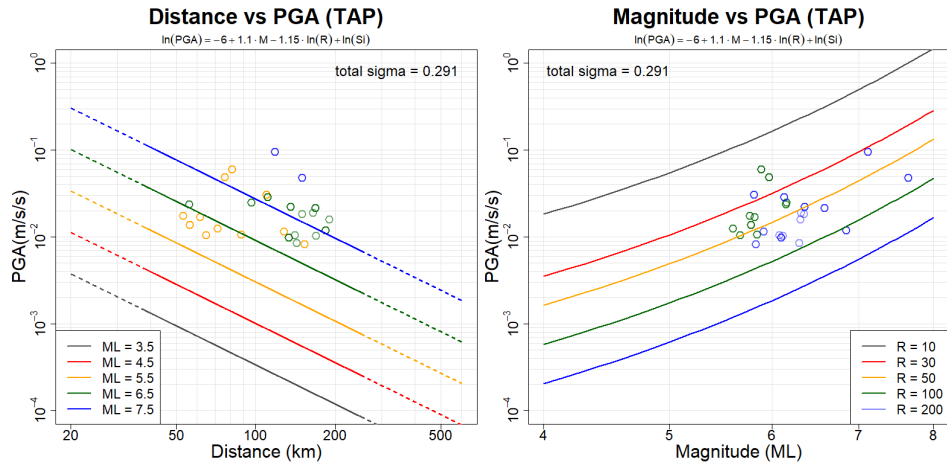


圖 5-2-1、式六於訓練資料之 TAP 測站不同規模距離尺度衰減情形。

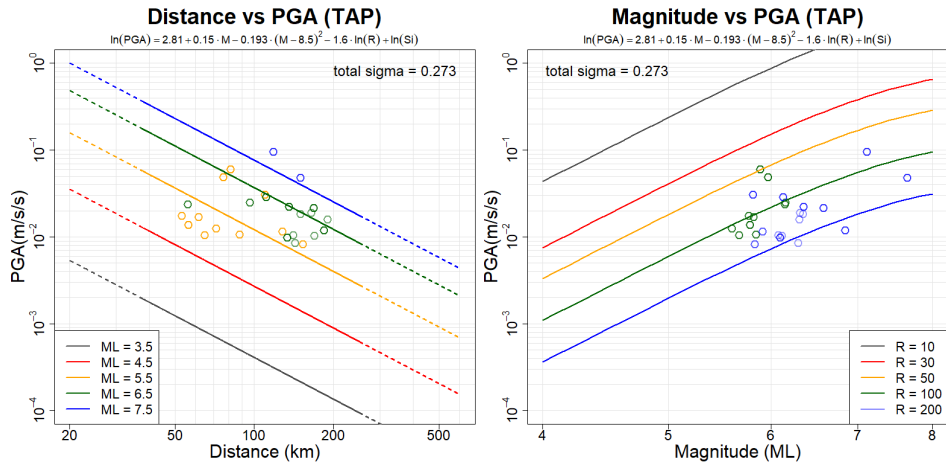


圖 5-2-2、式七於訓練資料之 TAP 測站不同規模距離尺度衰減情形。

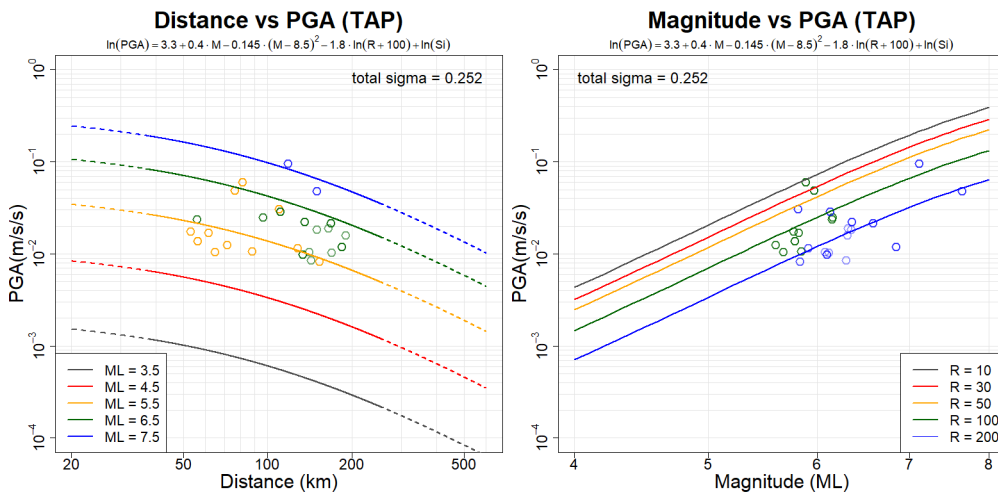


圖 5-2-3、式八於訓練資料之 TAP 測站不同規模距離尺度衰減情形。

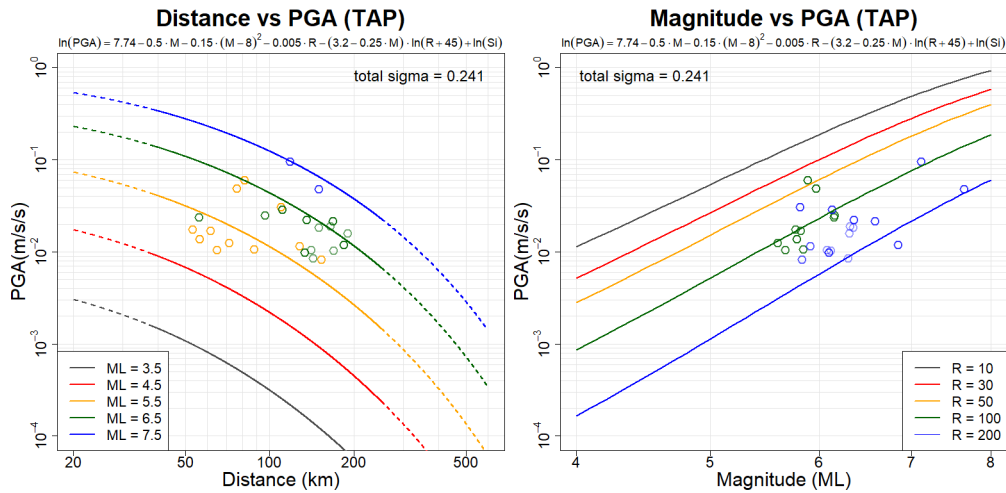


圖 5-2-4、式九於訓練資料之 TAP 測站不同規模距離尺度衰減情形。

## 六、研究結果及討論

本章節整合前述方法與模型，針對本計畫所收錄之 1992 年至 2020 年 TSMIP 臺北測站之地震資料，進行新地動加速度預估式與現行預估式比較分析。同時採用中央氣象署地震測報中心之 2021 年至 2024 年臺北測站資料作為外部檢驗，分別就現行預估模型與本次計畫建立之模型進行預測準確性探討，並透過殘差分析與檢量線迴歸分析量化預估誤差與趨勢。

參數殘差分布圖中，以現行地動預估式為例，如圖 6-1-1 之(a)與(b)，若是殘差分布無特殊趨勢且呈現隨機且水平分布的狀態，即可表示迴歸分析模型良好。藍色實線(Regression)表示全部資料的趨勢線，紅色虛線(Mean of Residual)則為對數殘差平均值，黑色實線表示殘差值為零，橫軸為分析之參數，縱軸為殘差值，對數殘差之標準差以 Sigma 表示。

檢量線迴歸分析中，本計畫著重於震度三級以上之強震資料，同以現行地動預估式(Hsiao, 2024)為例，如圖 6-1-1 之(c)。檢量線則為實際觀測值與地動預估式的估計值之比值，紅色虛線為不同震度區間，黑色實線為比值一之直線，藍色實線為該模型檢量線。其中，對數殘差值係由觀測值與預估值分別取 log10 後相減得出，對數殘差值對應 PGA 相差倍數可見表 6-1-1(後續文章內之對數殘差將以殘差二字論述)，單位為 g。各模型之參數殘差分析與檢量線相關統計數值資料整理於表 6-1-2。

## 1. 原始預估式(無分區)評估

### a. 參數殘差分析

在訓練資料中，中央氣象署現行地動加速度預估式中(圖 6-1-1 之(a)、(b))，殘差平均值為-0.057，標準差為 0.303，整體殘差趨近隨機分布，在規模項與距離向無明顯系統性趨勢。在規模項中，模型 Hsiao 的殘差值分布多集中於 0.5 至-0.5 之間，少數資料點分布於 $\pm 0.5$  區間以外，在規模 5.5 至 6.0 有低估的趨勢。在震源距離項方面，在中距離有部分資料低估較多。在外部檢驗方面(圖 6-1-1 之(d)、(e))，殘差平均值為-0.062，標準差 0.238。在規模項中，大規模表現良好，僅有少數資料點低估，在規模 6.0 中存在殘差值達 0.5 之情況。距離項部分，整體殘差無明顯趨勢，唯在中距離(約 120 公里處)呈現較多低估資料。現行地動加速度預估式於訓練資料中於不同規模尺度(Magnitude Scaling)以及距離尺度(Distance Scaling)之地動值衰減圖如圖 6-1-2。

在訓練資料中，Model1 全規模預估模型(圖 6-1-3 之(a)、(b))，殘差平均值為-0.067，標準差為 0.231。整體而言殘差分布無明顯趨勢，趨近隨機分布，且殘差整體分布相較現行地動預估式更貼近殘差為零之黑色實線。然在外部檢驗方面(圖 6-1-3 之(d)、(e))，殘差平均值為 0.007，表示 Model1 呈現平均輕微低估，標準差為 0.251。在規模項中，有隨規模增加而低估的趨勢，震源距離項也呈現隨震源距離增加而低估的趨勢。Model1 於訓練資料中於不同規模尺度(Magnitude Scaling)以及距離尺度(Distance Scaling)之地動值衰減圖如圖 6-1-4。

在訓練資料中，Model2 規模分段預估模型(圖 6-1-5 之(a)、(b))，殘差平均值為-0.034，標準差為 0.233。殘差分布與 Model1 相似，且在大規模的殘差相較 Model1 降低，更貼近殘差值為零的實線。但在外部檢驗中(圖 6-1-5 之(d)、(e))，殘差平均值為 0.063，相較 Model1 殘差值更高，表示其低估程度較 Model1 明顯；標準差為 0.224，為三組原始預估式中最低值。整體殘差分布趨勢與 Model1 相似，唯在規模 6.0 至 7.0 之間，其預估情況稍修正。Model2 於訓練資料中於不同規模尺度(Magnitude Scaling)以及距離尺度(Distance Scaling)之地動值衰減圖如圖 6-1-6。

### b. 檢量線迴歸分析

圖 6-1-1 之(c)與(f)分別為中央氣象署現行地動加速度預估式(Hsiao, 2024)於訓練資料與外部檢驗資料之檢量線，斜率分別為 1.187 與 1.050，整體而言預估表現良好，唯在震度達四以上時出現震度接近低估兩震度之情形。圖 6-1-3 之(c)與(f)為 Model1 之檢量線，斜率各為 0.891 與 0.841。在訓練資料中，觀測值達震度三之資料預估相較 Hsiao 更為貼近比值為一的黑色實線，然在外部檢驗中震度三出現部分低估情況，震度四以上資料則出現低估一震度之情形。圖 6-1-5 之(c)與(f)為 Model2 之檢量線，斜率分別為 0.895 與 0.743。在訓練資料中，震度三資料預

測表現相較 Model1 良好。然在外部檢驗中，震度四以上資料低估情況相較前兩者預估式明顯。

## 2. 引入全分區專屬係數之模型與評估

現有之地動預估式多以整個臺灣地區的強震資料建立，或依地區調整預估式係數，然而各震源區因構造、地形、地震活動度等因素影響，使得地動值系統性高估或低估。為此本次計畫嘗試引入分區專屬係數，針對每個原始預估式在特定震源區的平均預估偏差進行修正，藉此提升預估的精度。

圖 6-2-1、圖 6-2-4 與圖 6-2-7 分別為現行地動預估式、Model1 與 Model2 之分區專屬係數分布圖，共有八個分區得專屬係數，且每一分區數值分布相近。表 6-2-1 則為每個預估式之分區專屬係數。為必免出現資料量過少導致分區係數產生偏差，故僅採用落入某分區且地震事件達三筆以上之分區係數，而若是某分區資料不足抑或是無資料而無法計算分區專屬係數，則將該區域的係數預設為零。

### a. 參數殘差分析

訓練資料中，中央氣象署現行地動加速度預估式中(圖 6-2-2 之(a)、(b))，平均殘差值由原始預估式之-0.057 降至-0.026，標準差也由 0.303 降至 0.270。整體殘差分布相較原始預估式(圖 6-2-3 之(a)、(b))貼近分布在殘差值為零之實線上下，殘差與規模迴歸線斜率也由-0.168 修正為-0.142。在檢驗資料(圖 6-2-2 之(d)、(e))中，平均殘差由-0.062 降為-0.058，相較原始預估式其資料點有部分殘差上升趨勢，且在大規模處以及中距離處之低估情形有稍微提升。

圖 6-2-5 之(a)與(b)為 Model1 之參數殘差分布圖，在訓練資料中，平均殘差為由原本的-0.067 降為-0.038，標準差也從 0.251 降為 0.192。然在外部檢驗方面(圖 6-2-5 之(d)、(e))，其殘差趨勢同現行預估式，在大規模以及近距離資料有修正殘差之表現(圖 6-2-6 之(d)、(e))。

Model2 參數殘差分布如圖 6-2-8 之(a)與(b)，在訓練資料中，平均殘差由 0.034 降為-0.019，且標準差由 0.224 降為 0.195，使整體殘差分布更貼近實線為零的線，並且也修正大規模以及中距離的低估偏差(圖 6-2-9 之(a)、(b))。在外部檢驗方面(圖 6-2-8 之(d)、(e))，同前述兩預估式出現相同殘差上升趨勢，但修正大規模之預估偏差(圖 6-2-9 之(d))。

### b. 檢量線迴歸分析

圖 6-2-2 之(c)、(f)分別為中央氣象署現行地動加速度預估式於訓練資料與外部檢驗之檢量線，斜率分別為 1.020 與 1.106。訓練資料中，震度三與四資料有效下降預估偏差(圖 6-2-3 之(c))，資料點也更貼近比值為一的黑色實線。外部檢驗中，

震度三資料預估偏差修正明顯，且部分震度四以上資料有效降低預估偏差。圖 6-2-5 之(c)與(f)為 Model1 之檢量線，斜率為 0.810 與 0.872，在訓練資料中，斜率相較於原本預估式更稍偏離比值為一的黑色實線，而在外部檢驗中則有效提升檢量線斜率。同現行地動加速度預估式，整體而言震度達三以上之資料點有效修正其預估偏差(圖 6-2-6 之(c)、(f))。圖 6-2-8 之(c)與(f)為 Model2 之檢量線，斜率分別為 0.810 與 0.826，其結果也與 Model1 相似，在外部檢驗中，檢量線斜率由 0.743 提升至 0.826。震度四級接近五級以上之資料有效縮減預估偏差(圖 6-2-9 之(c)、(f))，整體而言資料點更為貼近比值為一之參考線。

### 3. 引入部分合併分區專屬係數之模型與評估

為克服部分震源分區地震資料稀少問題，本小節採用部分分區合併，將每個原始預估式引入三大分區專屬係數，以平衡模型預估精度。圖 6-3-1、圖 6-3-4 與圖 6-3-7 分別為現行地動預估式、Model1 與 Model2 之分區專屬係數分布圖，共有三個大分區得專屬係數。

#### a. 參數殘差分析

圖 6-3-2(a)與(b)為中央氣象署現行地動預估式於訓練資料之參數殘差分布，平均殘差值為-0.026，相較於原始預估式低；標準差為 0.285，相較於引入全分區專屬係數之預估式高。整體而言，其參數分布相較於原始預估式更為貼近殘差值為零的線上下方，有效降低殘差。

圖 6-3-5 之(a)與(b)為 Model1 之參數殘差分布圖，平均殘差值分別為-0.037 與 0.010，針對原始預估式而言，其於訓練資料中為降低，然在外部檢驗中(圖 6-3-5 之(d)、(e))，平均殘差值上升。標準差分別為 0.212 與 0.237。規模項與距離項之殘差分布皆呈現更為集中殘差值為零線上下方(圖 6-3-6 之(d)、(e))。

Model2 之參數殘差分布如圖 6-3-8 之(a)、(b)，平均殘差值分別為-0.018 與 0.053。其殘差變動趨勢也與 Model1 相似，針對原始預估式而言，其於訓練資料中為降低，然在外部檢驗中(圖 6-3-8 之(d)、(e))，平均殘差值上升。標準差分別為 0.214 與 0.214。在訓練資料中，規模項與距離項之殘差分布皆呈現更為集中殘差值為零線上下方(圖 6-3-9 之(a)、(b))，然在外部檢驗中之規模項中，規模 6.5 處，資料殘差上升(圖 6-3-9 之(d))。

#### b. 檢量線迴歸分析

圖 6-3-2 之(c)與(f)分別為中央氣象署現行地動加速度預估式(Hsiao, 2024)於訓練資料與外部檢驗資料之檢量線，斜率分別為 1.116 與 1.016。現行地動預估式預測表現良好，透過引入分區專屬係數有效降低預估偏差，使資料點更為貼近比

值為一的黑色實線(圖 6-3-3 之(c)、(f))。在訓練資料中，震度五以上資料預估準確，然在震度四中有一部分資料點低估，而在外部檢驗中，仍有一筆資料低估近兩級，表示其預估修正效果有限。圖 6-3-5 之(c)與(f)為 Model1 之檢量線，斜率為 0.862 與 0.803，其在震度三預估偏差修正較為明顯(圖 6-3-6 之(c)、(f))。在外部檢驗中，其在大震度方面同現行預估式修正有限，但仍有效縮減其殘差值(圖 6-3-6 之(f))。圖 6-3-8 之(c)與(f)為 Model2 之檢量線，斜率為 0.866 與 0.732，其在震度三預估偏差修正較為明顯(圖 6-3-9 之(c)、(f))。在外部檢驗中，在大震度方面同現行預估式修正有限，但仍有效縮減其殘差值。

## 4. 討論

本小節綜合討論原始預估式(Hsiao、Model1、Model2)以及引入兩種分區(完全分區與部分分區合併)專屬係數後，在參數殘差與檢量線上的表現差異，以評估具備最佳預估性能之組合，並探討其實務應用價值。

### a. 震度預估準確性綜合比較

在尚未引入分區專屬係數時，現行地動預估式在訓練資料以及外部檢驗檢量線斜率(分別為 1.187 與 1.050)最接近理想值 1。Model1 與 Model2 雖然在訓練資料中殘差分布更貼近零值線，但其外部檢驗斜率(分別為 0.841 與 0.743)皆有顯著的高震度低估傾向。

在引入完全分區專屬係數後，各模型在標準差方面普遍有顯著改善。以 Model1 為例，訓練資料標準差由 0.251 降至 0.192，表示分區係數能有效修正殘差值。尤其 Model2 在引入分區係數後，其外部檢驗檢量線斜率由 0.743 提升至 0.826，改善大振幅預估偏差之能力最為明顯。

採用部分分區合併方式時，Hsiao 搭配此方法在外部檢驗中檢量線斜率最為貼近 1。然而 Model1 與 Model2 在外部檢驗的斜率偏斜，表示 Hsiao 已具有較好的預估能力，以及引入部分分區合併專屬係數方法可能更為適合用於微調已成熟的現行模型。

### b. 研究貢獻與模型設計

本計畫研究結果顯示引入分區專屬係數為有效，其能夠修正因各震源區構造差異所導致的系統性偏差，而引入完全分區專屬係數在降低標準差方面效果最為顯著。

Model2 採用規模分段迴歸，在外部檢驗中，其標準差皆為三組模型中為優，且在大規模殘差的修正上優於 Model1。Model1 雖為全規模迴歸設計，整體表現略遜於 Model2，但其結構簡單、穩定性佳，仍可作為基準型分區模型之參考。

考量現行地動預估式引用部分分區合併在外部檢驗中檢量線斜率最為貼近 1，並且其震度預估表現良好，唯相較於 Model1 與 Model2，其在震度四仍有資料低估接近震度兩級，本研究所建構之 Model2，於修正高震度預估偏差上具有可觀潛力，未來若搭配更完整的訓練資料與測站紀錄，並進行細部參數優化，將有機會提升整體模型於強震預測之應用能力，亦可支援中長期預警系統之彈性擴展與更新。

表 6-1-1、殘差對應之 PGA 相差倍數。

殘差	PGA 相差倍數	殘差	PGA 相差倍數
-0.01	0.98	0.01	1.02
-0.02	0.95	0.02	1.05
-0.05	0.82	0.05	1.22
-0.1	0.79	0.1	1.26
-0.2	0.63	0.2	1.59
-0.3	0.50	0.3	1.99
-0.4	0.40	0.4	2.51
-0.5	0.32	0.5	3.16
-0.6	0.25	0.6	3.98
-0.7	0.20	0.7	5.01
-0.8	0.16	0.8	6.31
-0.9	0.13	0.9	7.94
-1	0.1	1	10

表 6-1-2、地動預估式之殘差標準差、殘差平均值及檢量線斜率比較表。(\*為引入完全分區專屬係數、\*\*為引入部分分區專屬係數)

Model	Sigma (Training)	Residual (Training)	Regression_b (Training)	Sigma (Validation)	Residual (Validation)	Regression_b (Validation)
Hsiao	0.303	-0.057	1.187	0.238	-0.062	1.050
Model1	0.231	-0.067	0.891	0.251	0.007	0.841
Model2	0.233	-0.034	0.895	0.224	0.063	0.743
Hsiao*	0.270	-0.026	<b>1.020</b>	0.241	-0.058	1.106
Model1*	<b>0.194</b>	-0.037	0.810	0.251	0.016	0.872
Model2*	0.196	-0.018	0.810	0.233	0.056	0.826
Hsiao**	0.285	-0.026	1.116	0.221	-0.061	<b>1.016</b>
Model1**	0.212	-0.037	0.862	0.237	0.010	0.803
Model2**	0.214	-0.018	0.866	<b>0.214</b>	0.053	0.732

表 6-1-3、地動預估式之殘差標準差以及檢量線斜率分布圖。(\*為引入完全分區專屬係數、\*\*為引入部分分區專屬係數)

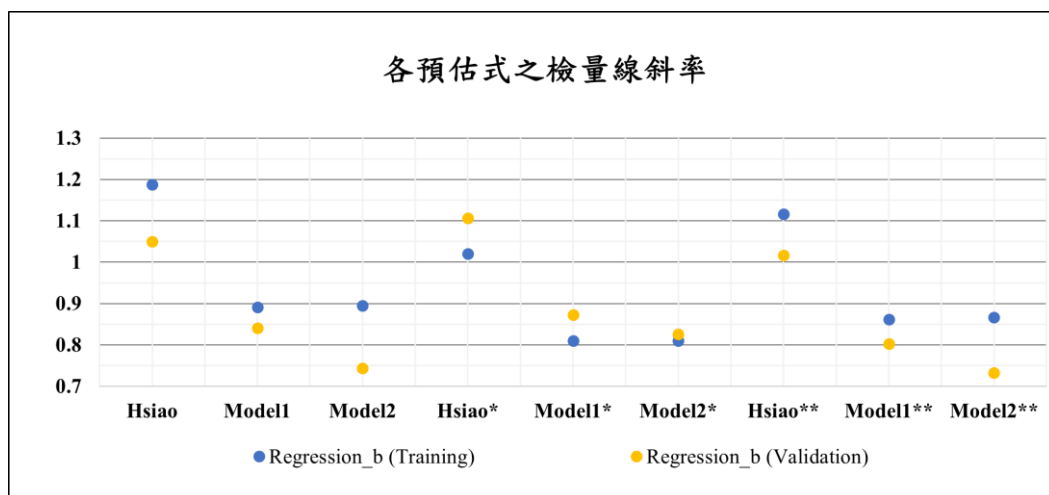
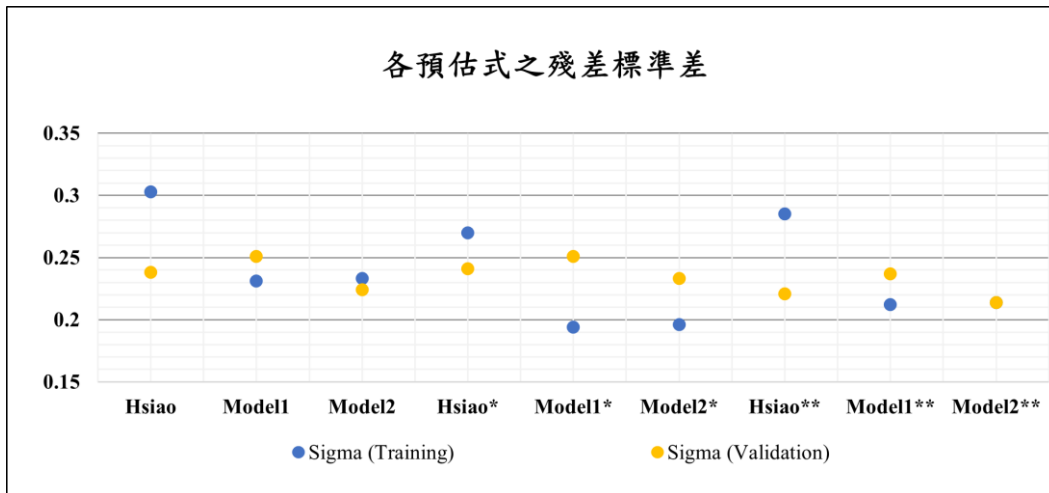


表 6-2-1、各地動預估式之完全分區專屬係數列表。

Cheng et al. (2015)	Hsiao 預估式分區係數	Model1 預估式分區係數	Model2 預估式分區係數	事件數量
S06	-0.411	-0.288	-0.269	3
S10	-0.053	-0.218	0.003	3
S14A	-0.154	-0.221	-0.175	6
S14B	-0.282	-0.267	-0.222	3
S14C	0.037	0.027	0.034	4
S15	0.126	0.113	0.130	3
S16	-0.077	-0.093	-0.077	6
S17A	0.111	0.086	0.152	5

表 6-3-1、各地動預估式之部分分區合併專屬係數列表。

Cheng et al. (2015)	Hsiao 預估式分區係數	Model1 預估式分區係數	Model2 預估式分區係數	事件數量
S06&S10	-0.252	-0.170	-0.149	6
S14A&S14B&S14C	-0.154	-0.183	-0.145	13
S15&S16&S17A	0.062	0.043	0.080	14

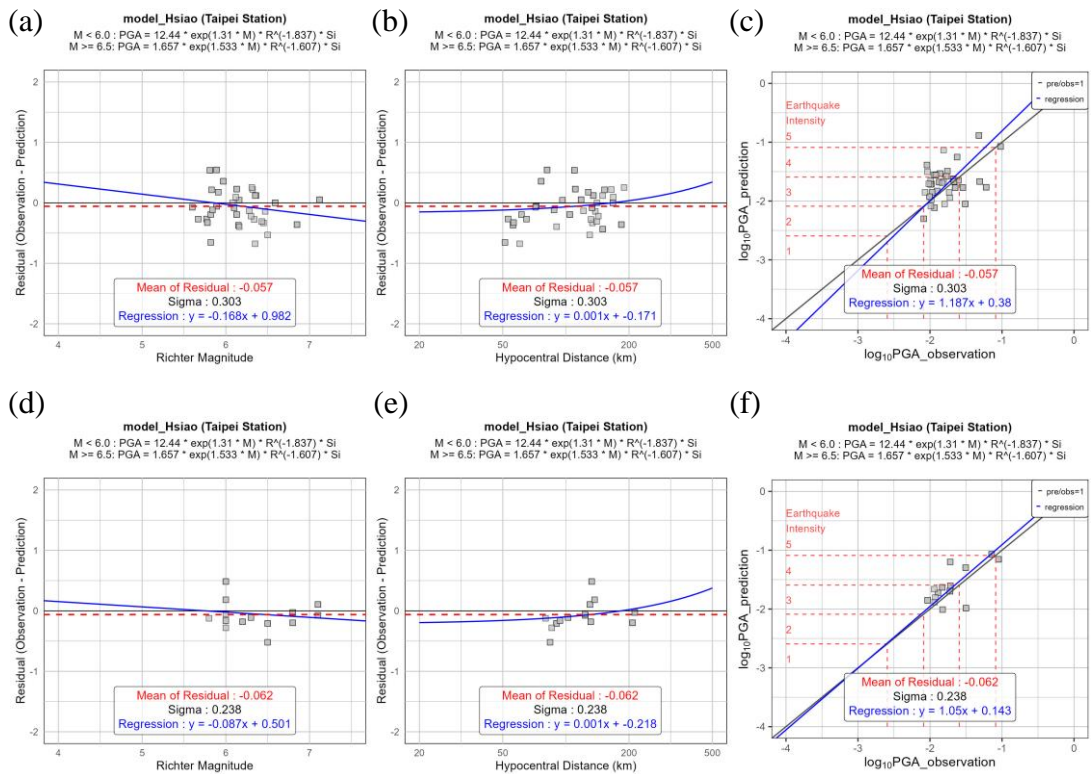


圖 6-1-1、Hsiao 之地動加速度殘差值於訓練資料(a)規模、(b)距離分布圖以及(c)檢量線圖與外部檢驗(d)規模、(e)距離分布圖以及(f)檢量線圖。

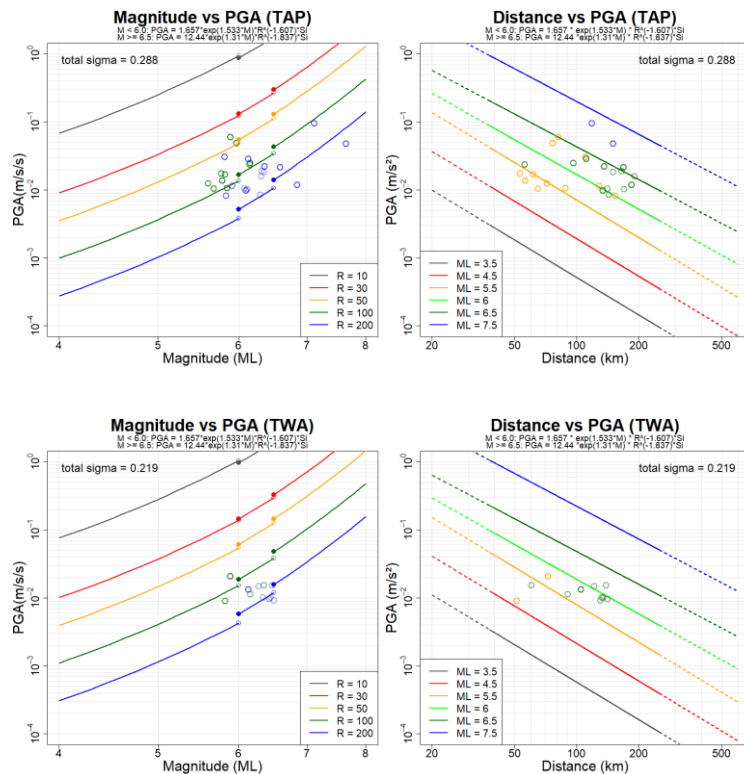


圖 6-1-2、Hsiao 於訓練資料之 TAP 測站與 TWA 測站不同規模距離尺度衰減情

形。

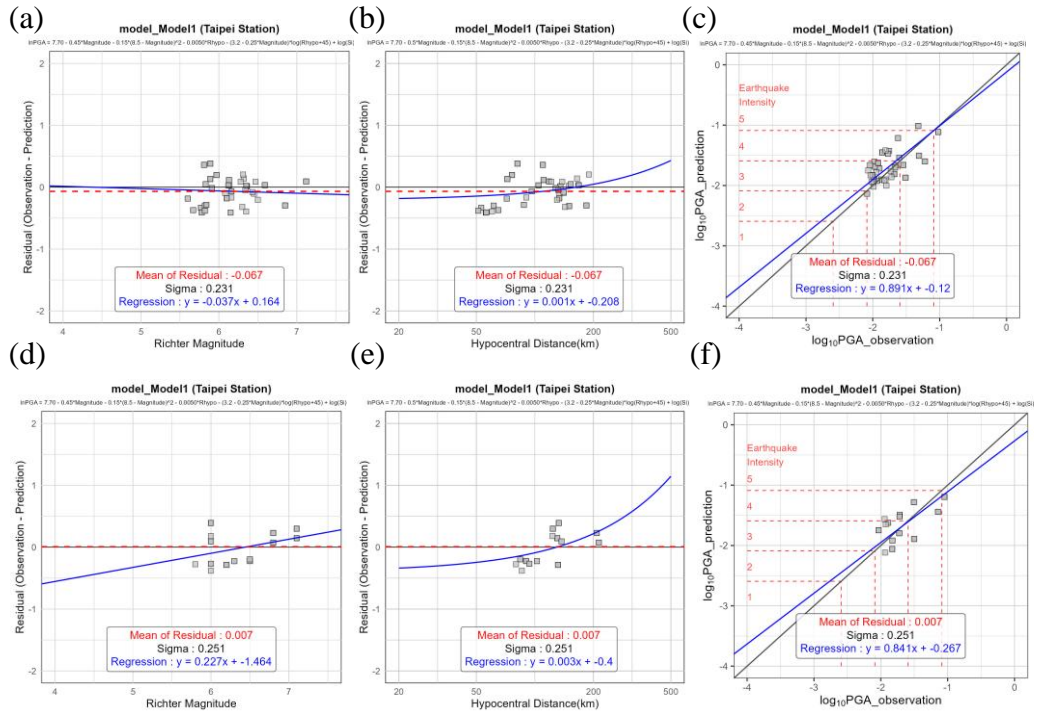


圖 6-1-3、Model1 之地動加速度殘差值於訓練資料(a)規模、(b)距離分布圖以及(c)檢量線圖與外部檢驗(d)規模、(e)距離分布圖以及(f)檢量線圖。

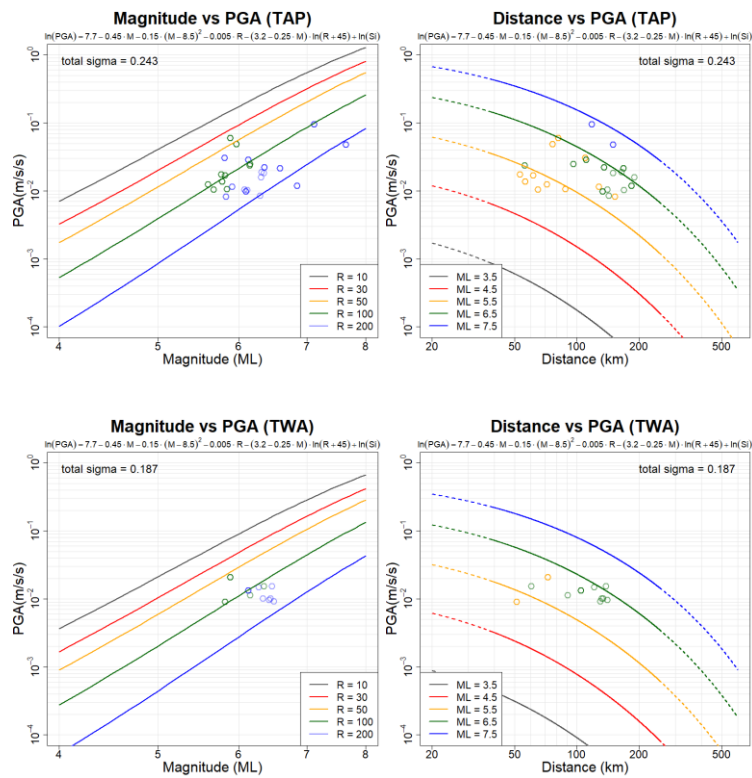


圖 6-1-4、Model1 於訓練資料之 TAP 測站與 TWA 測站不同規模距離尺度衰減情形。

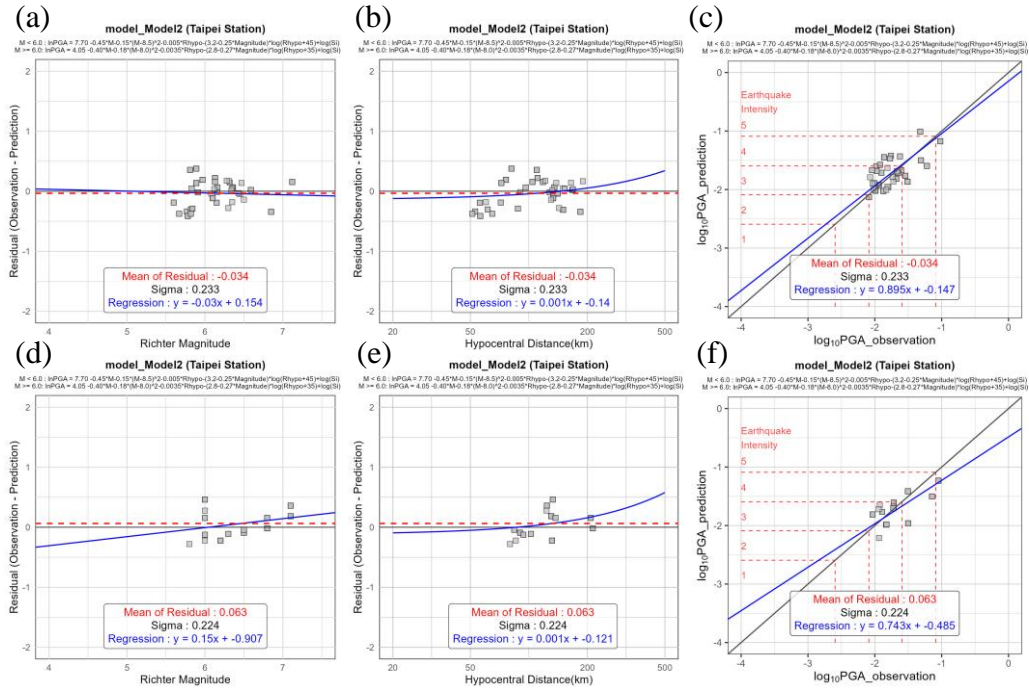


圖 6-1-5、Model2 之地動加速度殘差值於訓練資料(a)規模、(b)距離分布圖以及(c)檢量線圖與外部檢驗(d)規模、(e)距離分布圖以及(f)檢量線圖。

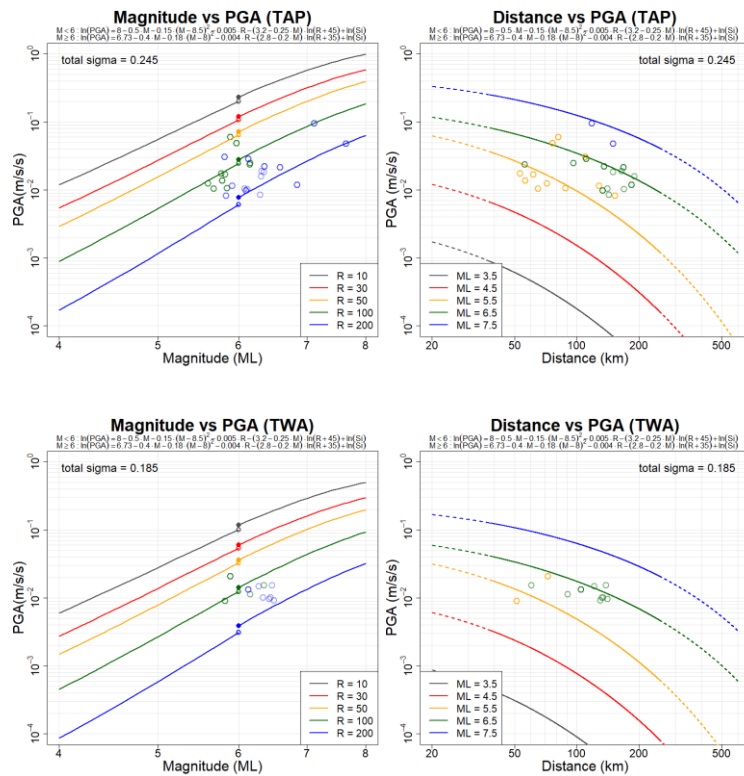


圖 6-1-6、Model2 於訓練資料之 TAP 測站與 TWA 測站不同規模距離尺度衰減情形。

Zone Coefficient Distribution Hsiao

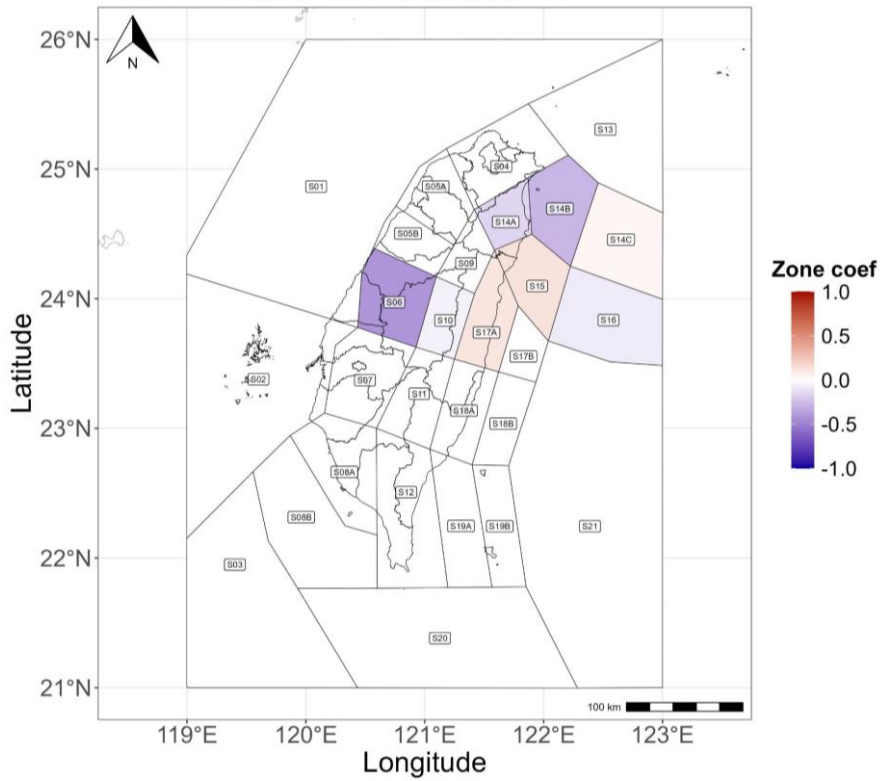


圖 6-2-1、Hsiao 之各分區專屬係數分布圖。

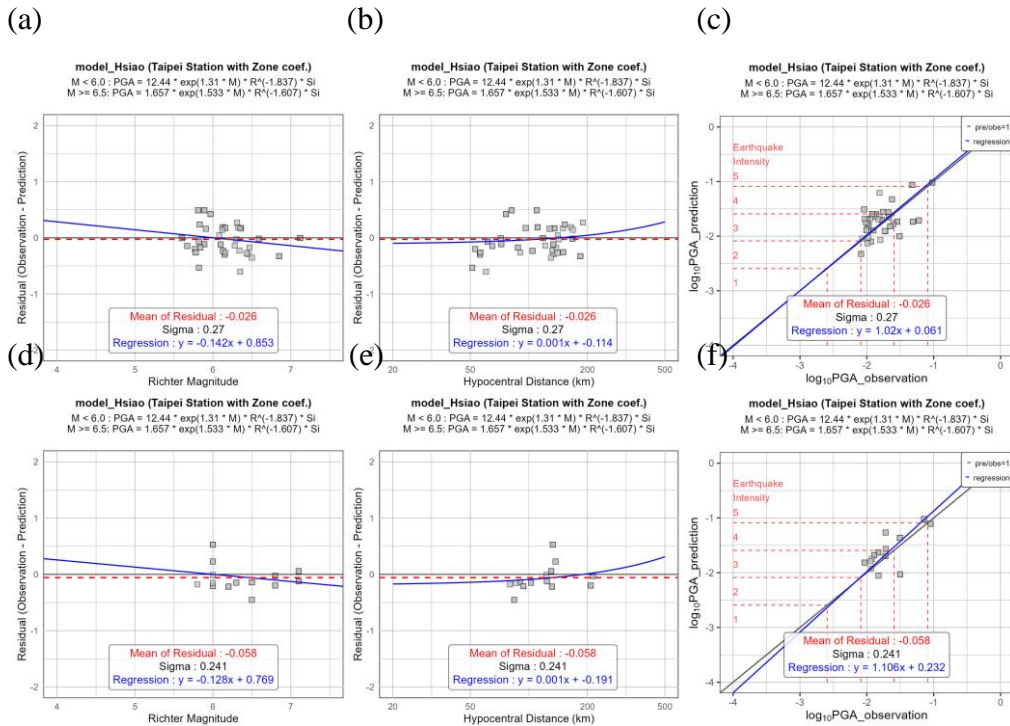


圖 6-2-2、Hsiao 引用全分區專屬係數之地動加速度殘差值於訓練資料(a)規模、(b)距離分布圖以及(c)檢量線圖與外部檢驗(d)規模、(e)距離分布圖以及(f)檢量線圖。

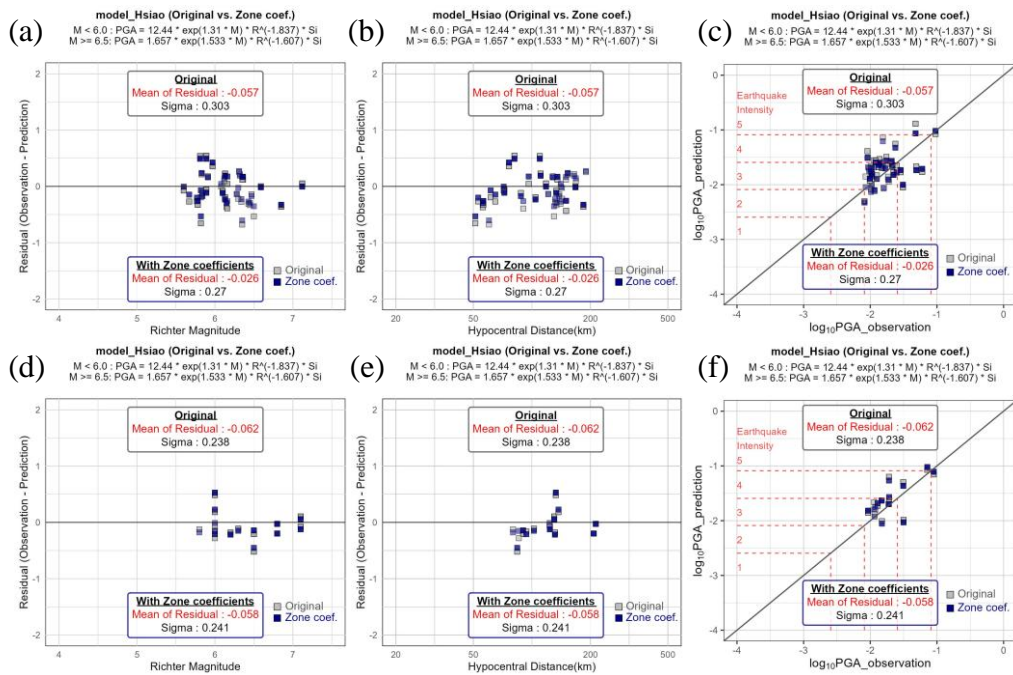


圖 6-2-3、Hsiao 引用全分區專屬係數前後之地動加速度殘差值對比於(a)訓練資料規模、(b)距離分布圖以及(c)檢量線圖與外部檢驗(d)規模、(e)距離分布圖以及(f)檢量線圖。

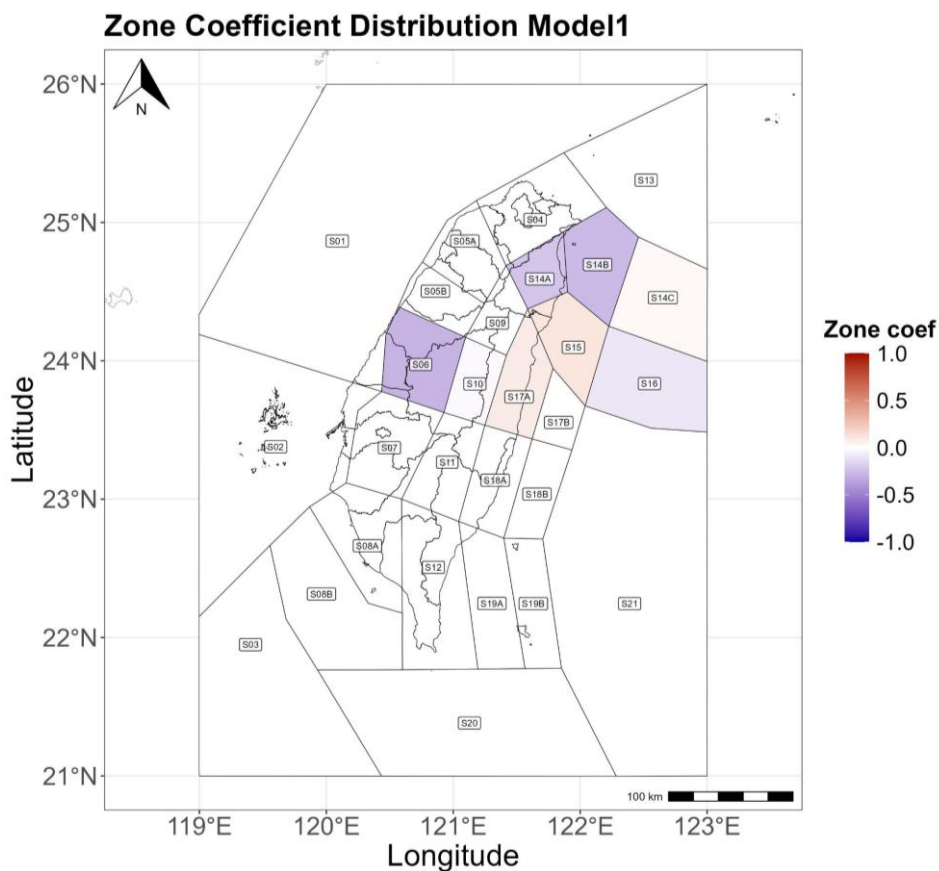


圖 6-2-4、Model1 各分區專屬係數分布圖。

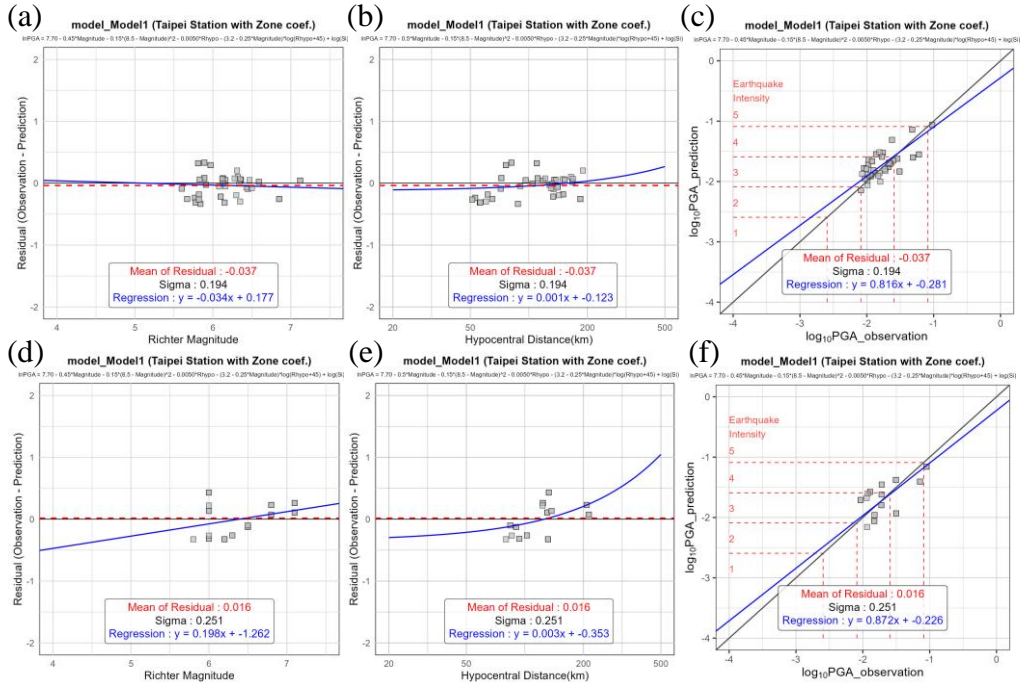


圖 6-2-5、Model1 引用全分區專屬係數之地動加速度殘差值於訓練資料(a)規模、(b)距離分布圖以及(c)檢量線圖與外部檢驗(d)規模、(e)距離分布圖以及(f)檢量線圖。

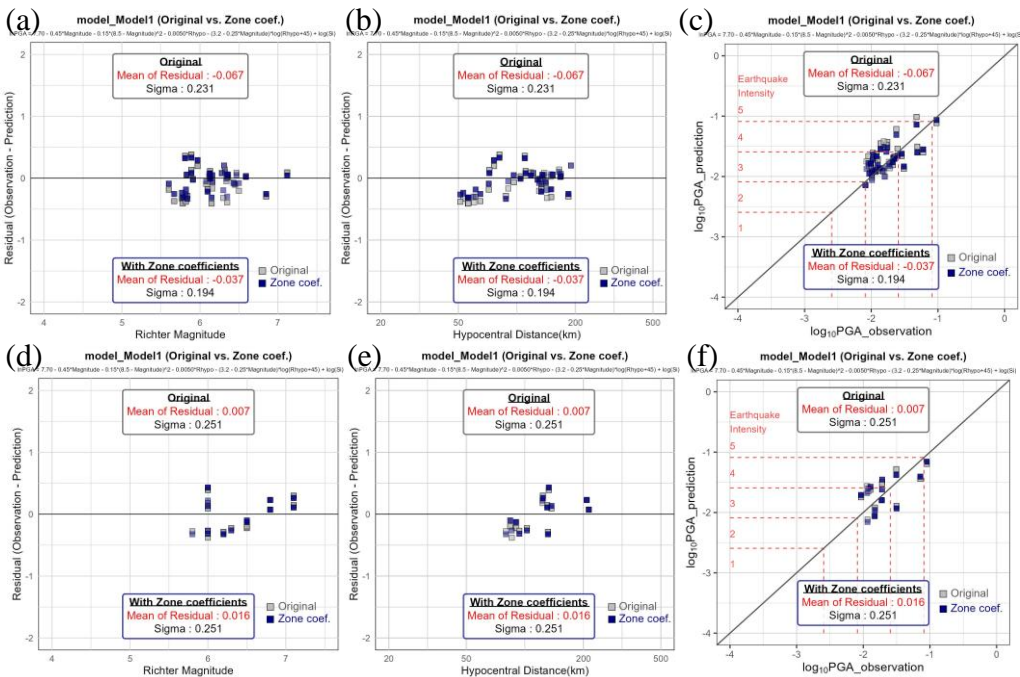


圖 6-2-6、Model1 引用全分區專屬係數前後之地動加速度殘差值對比於(a)訓練資料規模、(b)距離分布圖以及(c)檢量線圖與外部檢驗(d)規模、(e)距離分布圖以及(f)檢量線圖。

Zone Coefficient Distribution Model2

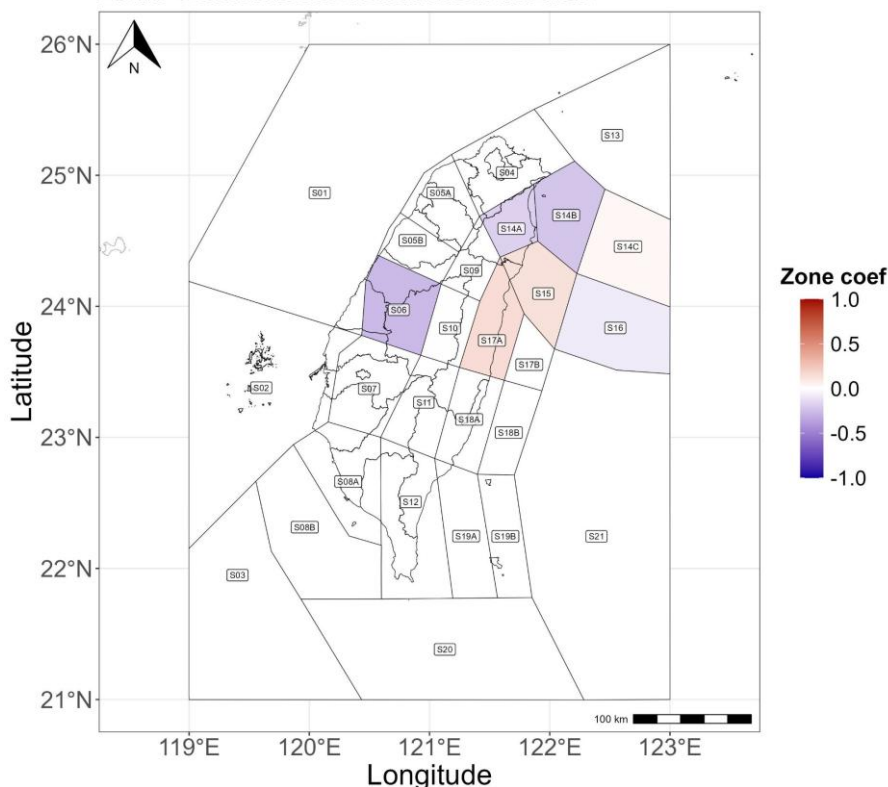


圖 6-2-7、Model2 之各分區專屬係數分布圖。

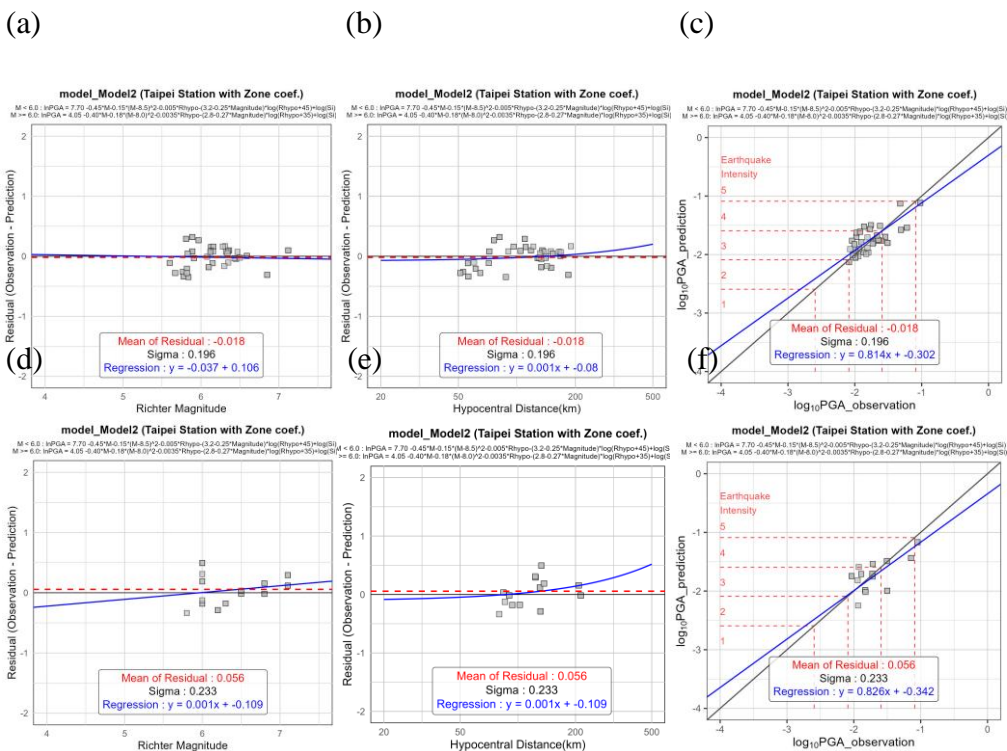


圖 6-2-8、Model2 引用全分區專屬係數之地動加速度殘差值於訓練資料(a)規模、(b)距離分布圖以及(c)檢量線圖與外部檢驗(d)規模、(e)距離分布圖以及(f)檢量線圖。

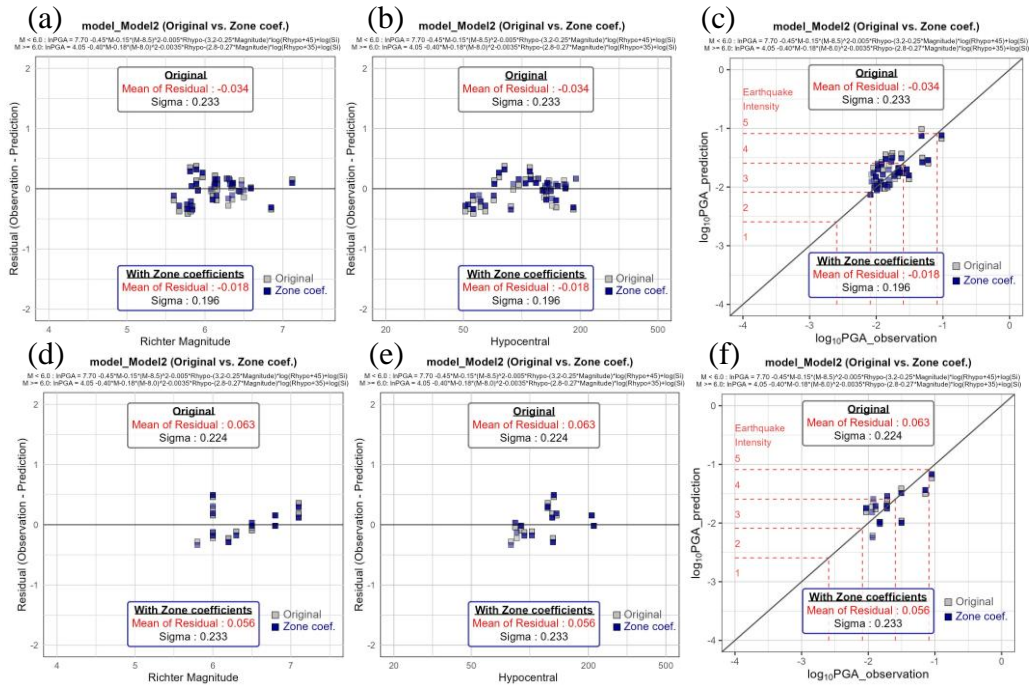


圖 6-2-9、Model2 引用全分區專屬係數前後之地動加速度殘差值對比於(a)訓練資料規模、(b)距離分布圖以及(c)檢量線圖與外部檢驗(d)規模、(e)距離分布圖以及(f)檢量線圖。

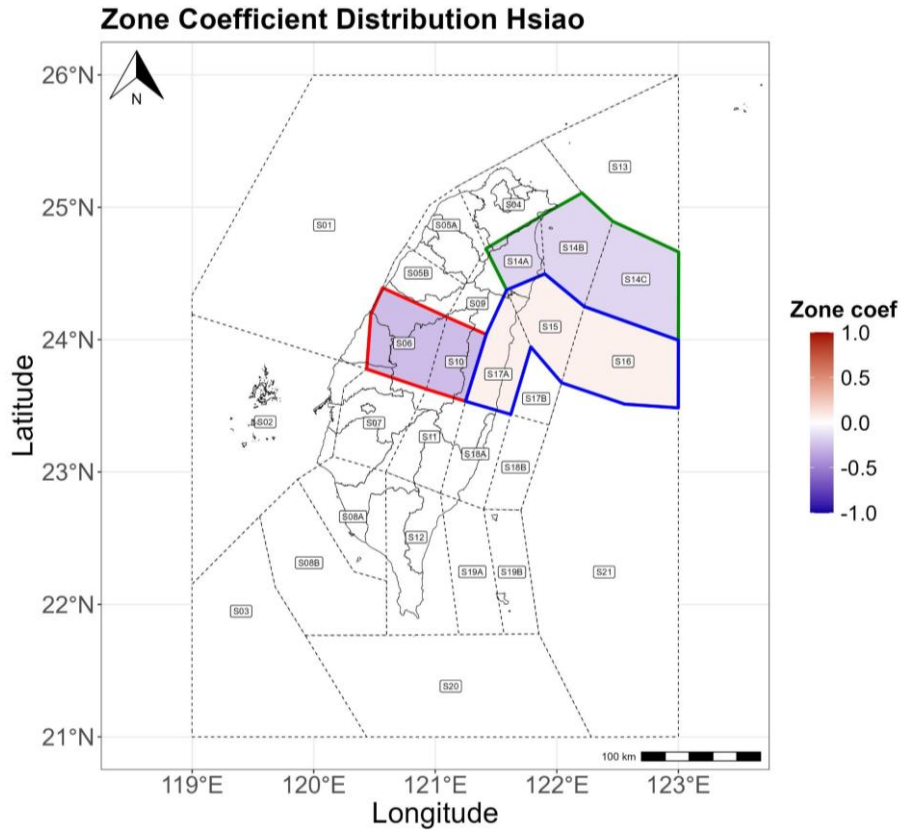


圖 6-3-1、Hsiao 部分分區合併專屬係數分布圖，同顏色視為同一分區。

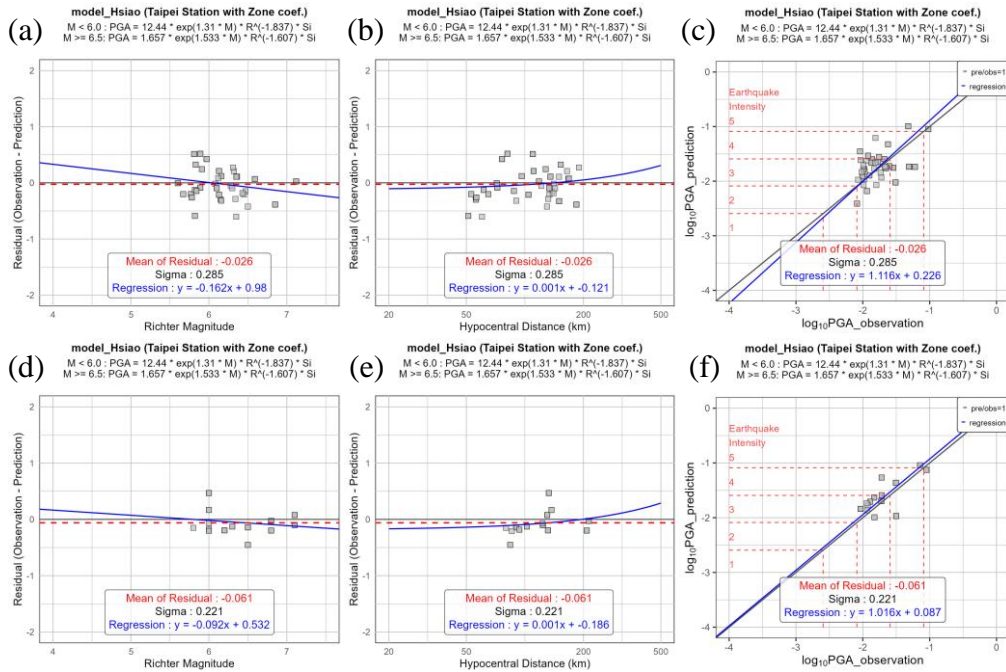


圖 6-3-2、Hsiao 引用部分分區合併專屬係數之地動加速度殘差值於訓練資料(a)規模、(b)距離分布圖以及(c)檢量線圖與外部檢驗(d)規模、(e)距離分布圖以及(f)檢量線圖。

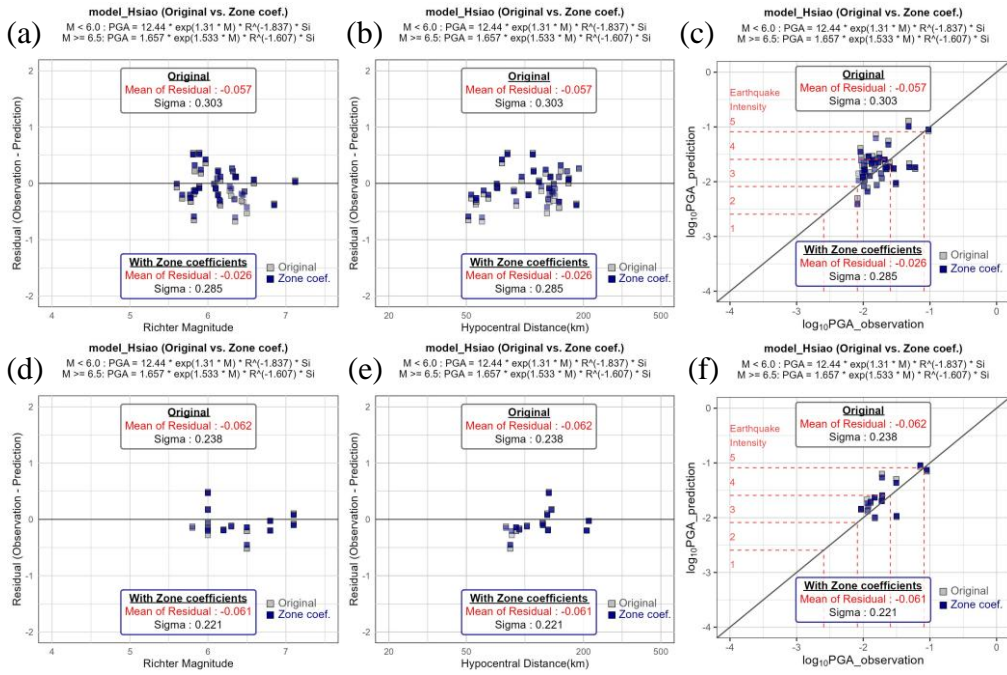


圖 6-3-3、Hsiao 引用部分分區合併專屬係數前後之地動加速度殘差值於(a)訓練資料規模、(b)距離分布圖以及(c)檢量線圖與外部檢驗(d)規模、(e)距離分布圖以及(f)檢量線圖。

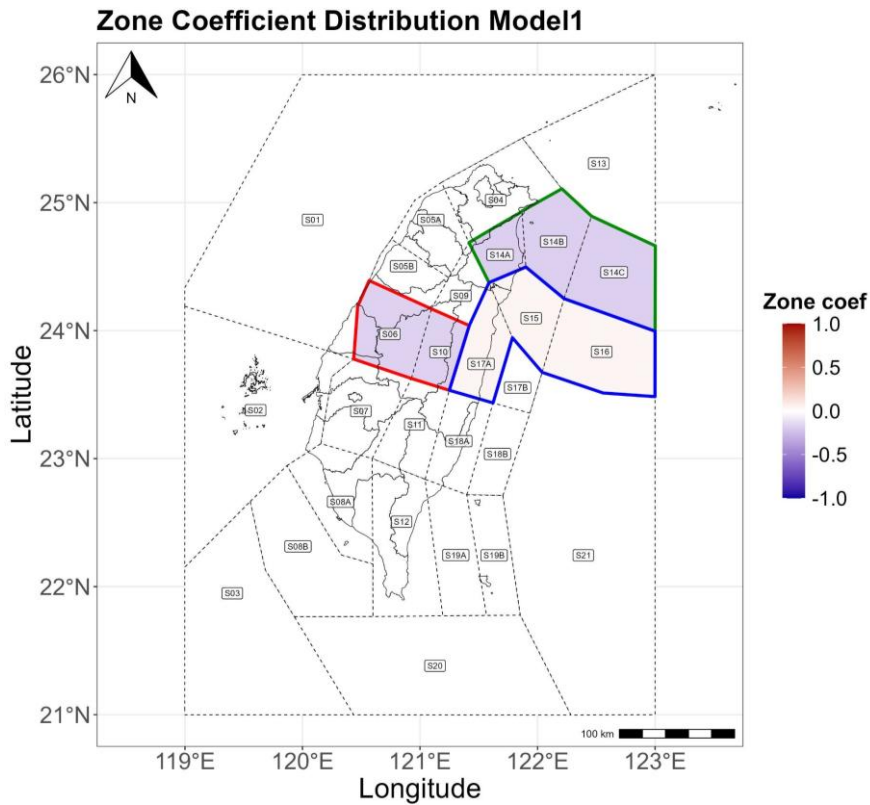


圖 6-3-4、Model1 部分分區合併專屬係數分布圖，同顏色視為同一分區。

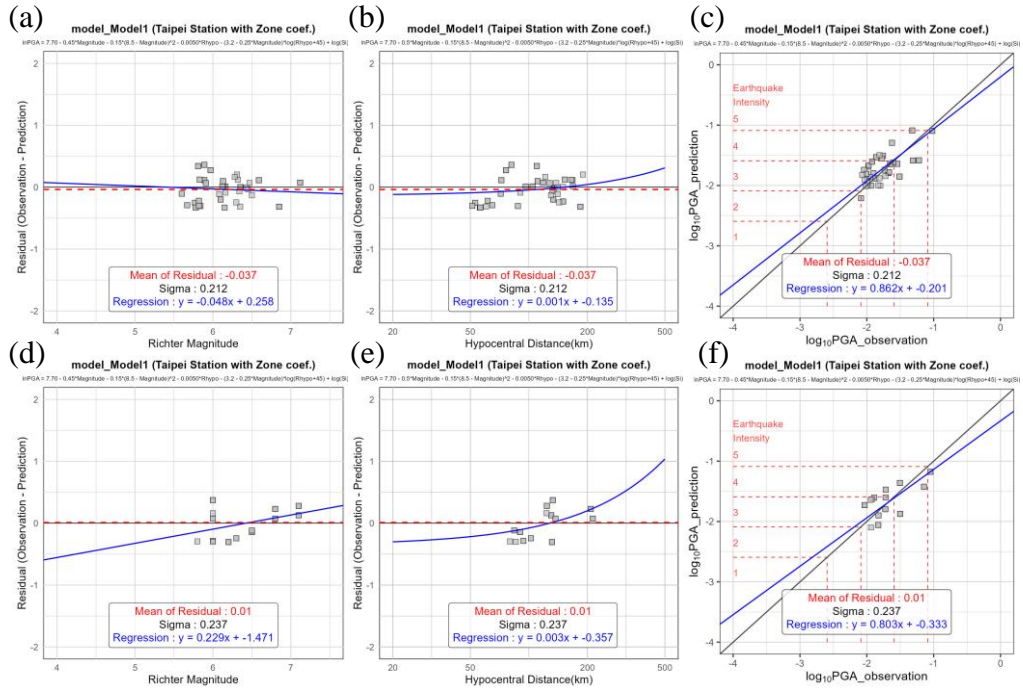


圖 6-3-5、Model1 引用部分分區合併專屬係數之地動加速度殘差值於訓練資料(a)規模、(b)距離分布圖以及(c)檢量線圖與外部檢驗(d)規模、(e)距離分布圖以及(f)檢量線圖。

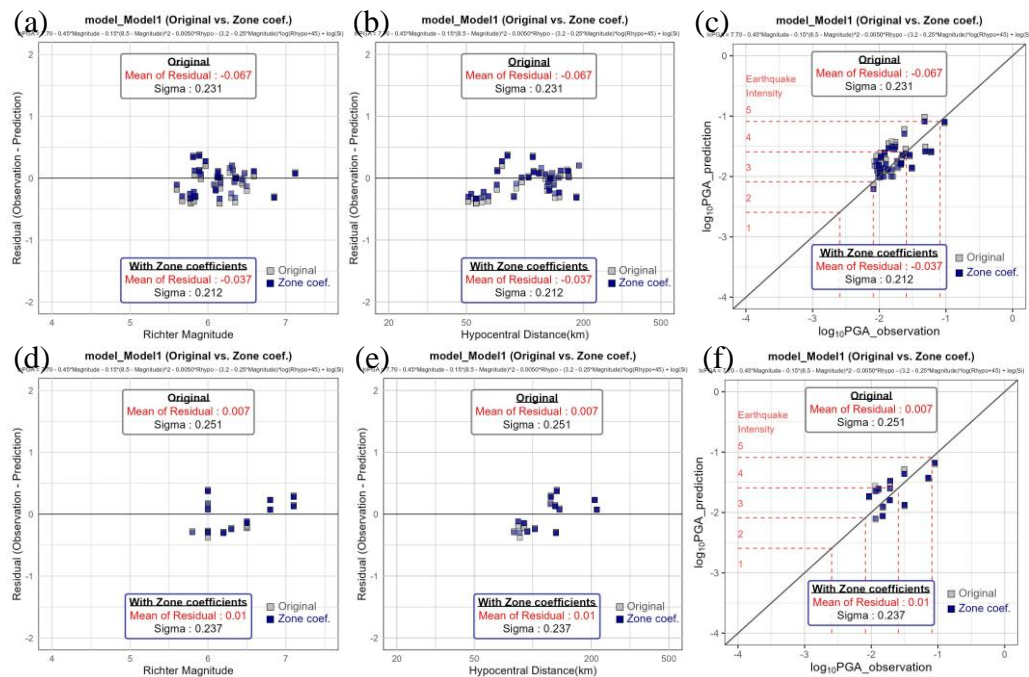


圖 6-3-6、Model1 引用部分分區合併專屬係數前後之地動加速度殘差值於(a)訓練資料規模、(b)距離分布圖以及(c)檢量線圖與外部檢驗(d)規模、(e)距離分布圖以及(f)檢量線圖。

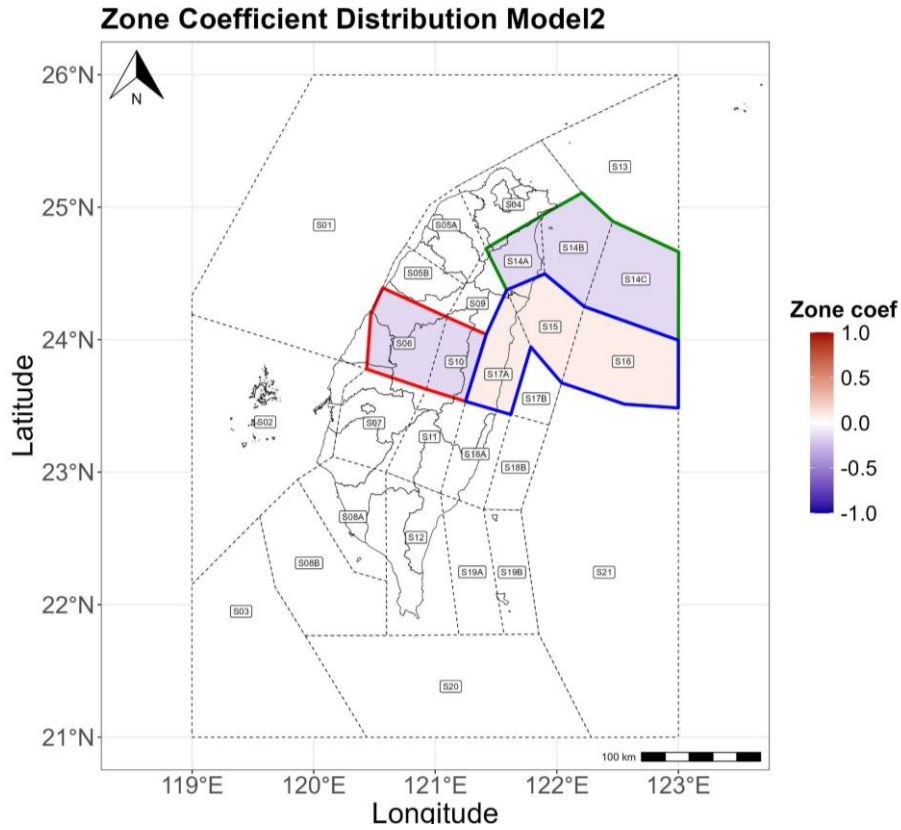


圖 6-3-7、Model2 部分分區合併專屬係數分布圖，同顏色視為同一分區。

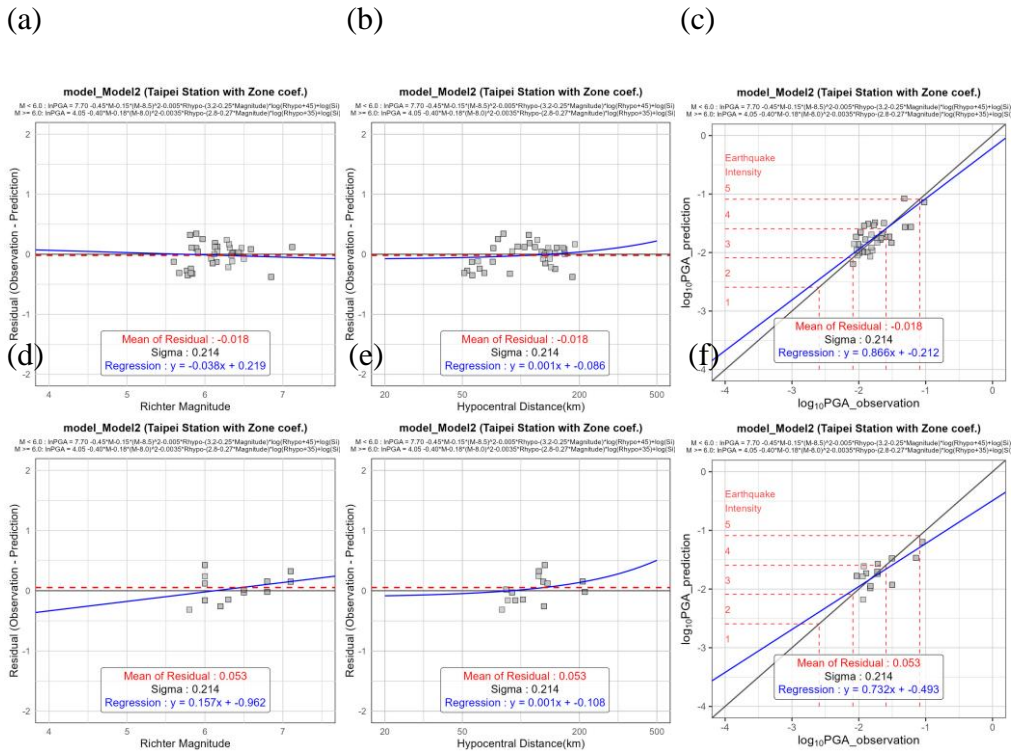


圖 6-3-8、Model2 引用部分分區合併專屬係數之地動加速度殘差值於訓練資料(a)規模、(b)距離分布圖以及(c)檢量線圖與外部檢驗(d)規模、(e)距離分布圖以及(f)檢量線圖。

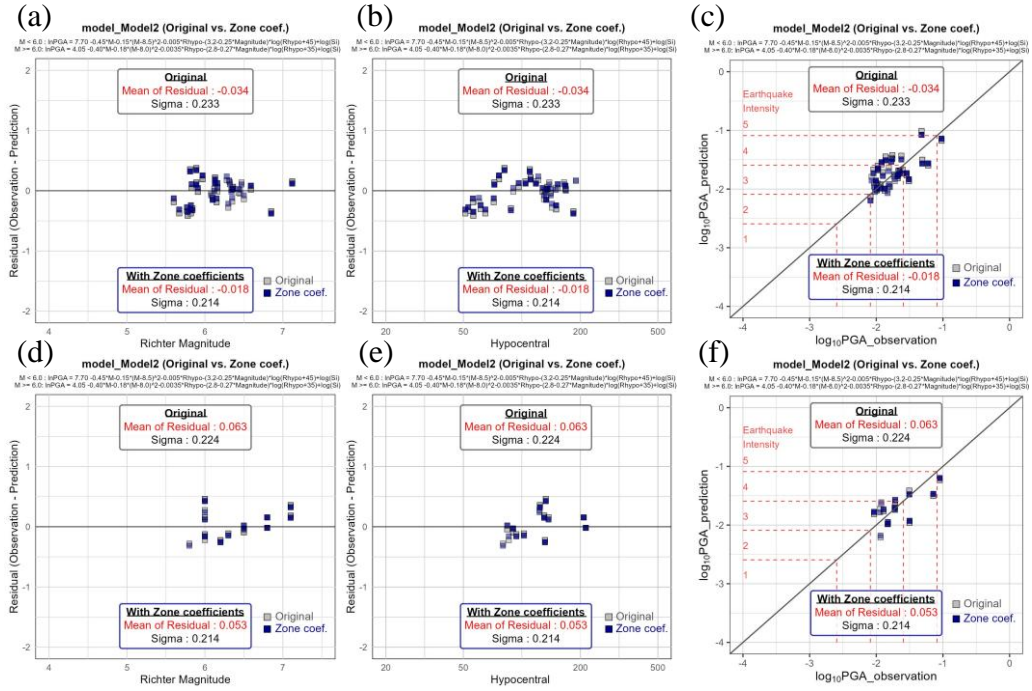


圖 6-3-9、Model2 引用部分分區合併專屬係數前後之地動加速度殘差值於(a)訓練資料規模、(b)距離分布圖以及(c)檢量線圖與外部檢驗(d)規模、(e)距離分布圖以及(f)檢量線圖。

## 七、結論與建議

### 1. 主要研究結論

本計畫針對中央氣象署現行地動加速度預估式及本計畫新建之兩組地動預估式(Model1 與 Model2)進行系統性預估性能比較，並透過引入不同類型之分區專屬係數，分析其對預估準確性的影響。所有模型之參數殘差、標準差與檢量線等統計數據，皆詳細彙整於研究成果與討論章節之表 6-1-2 中。經參數殘差檢驗，發現無論是針對中央氣象署現行地動加速度預估式，抑或是本次計畫所建立的新地動加速度預估式，引入分區專屬係數能有效改善模型的性能表現，尤其是完全分區專屬係數在降低殘差標準差方面最為顯著，故表示分區專屬係數能修正因區域地質構造差異所導致的系統性預估偏差。

在訓練與外部檢驗之綜合評估下，現行地動預估式引用部分分區合併專屬係數展現最優異的綜合性能。根據表 6-1-2 所示，該組合在外部檢驗中的檢量線斜率(1.016)最貼近理想值 1，且平均殘差值為-0.061，若參照表 6-1-1 所示的殘差值與 PGA 相差倍數關係，此殘差對應的 PGA 相差倍數約為 0.87，亦即預估的 PGA 值平均較實測值高估 15%。儘管現行預估式存在可校正之高估，但由於其外部檢驗的殘差標準差(0.221)較低，地動預估值與實測值的平均貼近程度與穩定性仍是所有模型中最佳。因此，可作為現階段地震預警系統之優化參考。相較之下，Model1 的平均殘差值為 0.010，其殘差值極為接近零，表示平均預估偏差極小且檢量線斜率(0.803)優於 Model2。然而，Model1 在外部檢驗中的殘差標準差為 0.237，高於現行預估式之標準差(0.221)，即使平均殘差最小，但其誤差分散程度較大，預估穩定性略遜於現行預估式。Model2 的平均殘差值為 0.053，其 PGA 相差倍數為 1.12，表示預估 PGA 值平均較實測值低估約 11%，存在較為明顯的低估傾向。此外，Model1 與 Model2 同引用部分分區合併專屬係數後，其外部檢量線斜率分別為 0.803 與 0.732，仍顯示在外部檢驗中存在明顯低估趨勢。

針對模型評價，本計畫強調應權衡模型的系統性準確性(檢量線斜率)、預估穩定性(殘差標準差)與平均殘差值。檢量線斜率接近一表示模型在特定樣本下平均準確性，殘差標準差則代表模型預測值與實測值之間的隨機誤差大小或分散程度，而平均殘差值則直接量化了模型的整體偏差，若其偏離零即表示模型存在高估或低估傾向。

在地震預警系統中，殘差標準差是衡量警報可靠性的關鍵指標之一，低殘差標準差表示模型具備較高的預估穩定性，能將每次預警的誤差範圍控制在極小範圍內，有效降低大規模誤報或漏報的機率。因此，本計畫認為一個具有低殘差標準差，即使平均殘差偏離零或檢量線斜率偏離一，此類可校正的系統性偏差仍是未來參數優化的重要空間，對追求長期穩定性之 EEW 系統而言同具有潛在價值。

因為系統性偏差可以透過調整模型截距項等方式進行統一校正，而高殘差標準差代表的隨機誤差則難以消除。

本計畫所建 Model2 採用規模分段迴歸架構，整體殘差分布表現平穩，並在大振幅條件下較 Model1 與原始預估式具備更佳之震度預估修正能力。Model1 與 Model2 於不同規模尺度以及距離尺度的衰減圖(如圖 6-1-4、圖 6-1-6)顯示其在大規模處的衰減更為穩健。值得注意的是，Model2 引用部分分區合併係數後在外部檢驗中的標準差為 0.214，為所有模型中最低值，表示其預估結果有較高的穩定性。相較之下，現行地動預估式(圖 6-1-2)存在潛在的過估問題，可能導致其在本次計畫收錄的外部檢驗資料中預估表現看似準確，故在評估現行地動預估式的長期穩定性時，須留意此特性。儘管目前用於迴歸之資料量有限，Model2 已顯示明顯潛力，未來在擴充訓練樣本與優化分區劃分後，有望成為因應高震度事件或區域預警精準化所倚重之模型架構，值得進一步研究與驗證。

## 2. 實務建議

綜合本研究之訓練與外部檢驗結果，建議現階段地震預警系統可採用現行預估式搭配部分分區合併專屬係數作為第一階段優化方案，藉此改善臺北地區預警模型之區域適用性並減少預估偏差，增進公共警報系統(PWS)的區域適用性。

然而，檢驗結果亦指出，現行預估式在震度四級以上仍可能出現預估低估情形，甚至偶有低估兩級震度之極端個案，反應現行模型於強地動條件下之預估能力尚有進一步優化的空間。本計畫所建立之 Model1 與 Model2 所採用之分區專屬係數與規模分段架構具有改善預估偏差的潛力，未來若能搭配更多事件資料與進一步優化模型架構，可望強化其於大震度條件下的應用價值，做為中長期模型優化之參考。

考量本計畫資料量仍有限(僅 39 筆訓練事件)，對於模型穩定性與分區係數泛化能力產生一定侷限，未來應優先擴充訓練資料庫與外部檢驗資料之涵蓋範圍。尤其為更為客觀驗證模型性能，建議優化現行的研究方法：從基於時間的分界方式(即 1992 年至 2020 年作為訓練資料集，2021 年至 2024 年作為外部檢驗資料集)，轉換為透過隨機取樣平均分配訓練資料與外部檢驗資料。此方法將有助於提高模型迴歸穩定性、減少特定時間段數據偏差的影響，並提供更為客觀的性能評估結果，藉此提升 Model1 與 Model2 模型參數的穩定性與可靠性。此外，同時建議持續擴大外部檢驗資料的時間範圍，以更全面且長期角度評估預估式在不同時空條件下之實務應用能力。

## 參考文獻

- Akkar, S., & Çağnan, Z. (2010). A local ground-motion predictive model for Turkey, and its comparison with other regional and global ground-motion models. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(6), 2978-2995.
- Akkar, S., Sandıkkaya, M. A., & Bommer, J. J. (2014). Empirical ground-motion models for point-and extended-source crustal earthquake scenarios in Europe and the Middle East. *Bulletin of earthquake engineering*, 12(1), 359-387.
- Bindi, D., Massa, M., Luzi, L., Ameri, G., Pacor, F., Puglia, R., & Augliera, P. (2014). Pan-European ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods up to 3.0 s using the RESORCE dataset. *Bulletin of earthquake engineering*, 12(1), 391-430.
- Boore, D. M., Stewart, J. P., Seyhan, E., & Atkinson, G. M. (2014). NGA-West2 equations for predicting PGA, PGV, and 5% damped PSA for shallow crustal earthquakes. *Earthquake Spectra*, 30(3), 1057-1085.
- Campbell, K. W., & Bozorgnia, Y. (2003). Updated near-source ground-motion (attenuation) relations for the horizontal and vertical components of peak ground acceleration and acceleration response spectra. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93(1), 314-331.
- Cheng, C. T., Hsieh, P. S., Lin, P. S., Yen, Y. T., Chan, C. H., Beer, M., ... & Au, I. S. K. (2015). Probability seismic hazard mapping of Taiwan. *Encyclopedia of Earthquake Engineering*, 10, 978-3.
- Idriss, I. (2014). An NGA-West2 empirical model for estimating the horizontal spectral values generated by shallow crustal earthquakes. *Earthquake Spectra*, 30(3), 1155-1177.
- Kale, Ö., Akkar, S., Ansari, A., & Hamzehloo, H. (2015). A ground-motion predictive model for Iran and Turkey for horizontal PGA, PGV, and 5% damped response spectrum: Investigation of possible regional effects. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105(2A), 963-980.
- Kanno, T., Narita, A., Morikawa, N., Fujiwara, H., & Fukushima, Y. (2006). A new attenuation relation for strong ground motion in Japan based on recorded data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(3), 879-897.

- Lin, P.-S. (2009). Ground-motion attenuation relationship and path-effect study using Taiwan data set Ph. D. Dissertation.
- Lin, P.-S., Lee, C.-T., Cheng, C.-T., & Sung, C.-H. (2011). Response spectral attenuation relations for shallow crustal earthquakes in Taiwan. *Engineering Geology*, 121(3-4), 150-164.
- Loh, J. S. (1996). The parameters about the strong motion characteristics and the evaluation of seismic hazards. *Criteria of Evaluating and Enhancing the Security from the Shockproof in the System of Telecommunication and Transportation, Ministry of Transportation and Communications, ROC*, 2-3.
- Phung, V.-B., Loh, C. H., Chao, S. H., Chiou, B. S., & Huang, B.-S. (2020). Ground motion prediction equation for crustal earthquakes in Taiwan. *Earthquake Spectra*, 36 (4): 2129–2164.
- Si, H., & Midorikawa, S. (2000, January). New attenuation relations for peak ground acceleration and velocity considering effects of fault type and site condition. In *Proceedings of 12th World Conference on Earthquake Engineering* (No. 0532).
- Stewart, J. P., Boore, D. M., Seyhan, E., & Atkinson, G. M. (2016). NGA-West2 equations for predicting vertical-component PGA, PGV, and 5%-damped PSA from shallow crustal earthquakes. *Earthquake Spectra*, 32(2), 1005-1031.
- Zhao, J. X., Zhang, J., Asano, A., Ohno, Y., Oouchi, T., Takahashi, T., Ogawa, H., Irikura, K., Thio, H. K., & Somerville, P. G. (2006). Attenuation relations of strong ground motion in Japan using site classification based on predominant period. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(3), 898-913.
- Zhao, J. X., Zhou, S., Zhou, J., Zhao, C., Zhang, H., Zhang, Y., Gao, P., Lan, X., Rhoades, D., & Fukushima, Y. (2016). Ground-motion prediction equations for shallow crustal and upper-mantle earthquakes in Japan using site class and simple geometric attenuation functions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 106(4), 1552-1569.
- 高嘉謙，2022。走向單一路徑地動預估式，中央大學應用地質研究所博士論文。
- 鄭錦桐，2002。台灣地區 PSHA 的不確定分析與參數拆解，中央大學地球物理研究所博士論文。
- 蕭乃祺，2007。台灣即時強地動觀測於地震預警之應用，國立中央大學博士論文。

# 臺灣地區 114 年中大型地震震源資訊之快速彙整與提供

## 子計畫三

### 提升地震預警系統通報即時性與巨量資料分析支持度之研究

王 超 蔡兩宸 賴勇典

國立臺灣師範大學

#### 摘要

此研究計畫延續前兩年的成果，針對地震預警系統的需求，探索一個即時、穩定可靠、且可支援大規模數據傳輸的聯網系統架構設計。此研究的成果，發展了符合需求的聯網軟體基礎設施，提升地震預警通報的時效性、容錯性，及軟體的資訊安全及可維護性。於實際重播歷史地震事件的實驗中，也發現了現行地震預警系統在測站參數配置與預警時效性上的一個奇特相關性。本期末報告彙整此計畫的研究成果及發現。

#### Abstract

This research work extends the achievements in its precursors. Targeting at further improving the earthquake early warning system to meet the requirements on timeliness, reliability, security, and scalability, this work explores and implements a Golang-based, fault-tolerant Kubernetes software infrastructure. Based on replays of earthquake events, the empirical system validation made in this work also reveals a peculiar behavior of the current early warning system, a somewhat strange interaction between the data publishing rate and the timeliness of earthquake early warning. This report summaries the project result and findings.

**關鍵字:** earthquake early warning, MQTT, Golang, software design.

## 壹、前言

本研究計畫分為兩大主題：(1) Kubernetes 運算叢集之搭建與佈署策略、(2) 地震預警系統程式碼升級與時間分析。此成果報告中，首先綜述研究目的及意義，接著研究方法與具體成果的部分，依前述兩大主題分述之。文末彙整此研究計畫的結論與建議。最後，相關系統設定配置的細節彙整於附錄 A。

## 貳、研究目的及意義

地震預警系統的盲區，定義為地震預警通報發佈到民眾手上時，地震 S 波已經到達的區域範圍。故在盲區範圍內的民眾，將較無法受惠於地震預警所能帶來的效益。盡可能縮減盲區的範圍大小，是此計畫應用面的終極目標。

延續前兩年的計畫研究，盲區的產生及其範圍大小，取決於 (1) 地震測站的地理覆蓋密度、(2) 地震相關資訊的各階段解算所需時間、(3) 地震測站數據及階段性解算數據透過網路傳遞的所需時間、(4) 針對各地理區域發佈區域預警所設定的解算結果門檻值、(5) 發佈預警之管道如電信業者等所需的資料發布費時。地震預警系統是否有效，除了上述五種原因，也取決於軟體系統的安全與可靠性。

近年氣象署地震中心已引入 Kubernetes (K8S) 等提供程式封裝管理的軟體服務，以及 MQTT 等便利且可供彈性佈署之資料通訊服務。然而 MQTT 及 K8S 等服務皆存在軟體複雜度及時間延遲方面的代價。本計畫的研究重點之一，在於如何整合這些服務帶來的便利性、量化所需付出的成本、以及發掘適合的系統配置方式。此外，基於軟體維護成本及資訊安全的考量，本計畫的第二研究重點為將 Earthworm 函式庫完全移出地震預警系統，並使用 Golang (Go) 程式語言來完全取代傳統的 C 語言程式實作，提升系統各模組之可維護性及可靠度。

## 參、研究方法與成果 (1): Fault-Tolerant EEW

現行臺灣的地震預警系統已從原先的共享記憶體通訊架構改進為 MQTT 通訊架構，但仍面臨以下挑戰：

1. 容錯能力有限：現行的單一 broker 架構存在單點故障風險，若 broker 發生故

障，系統通訊將中斷

2. 硬體資源綁定：雖然 MQTT 提供了網路通訊機制，但系統組件仍主要運行在本地端有限的硬體資源上
3. 佈署彈性受限：在本地端環境中，系統擴展與資源調配仍受限於實體設備

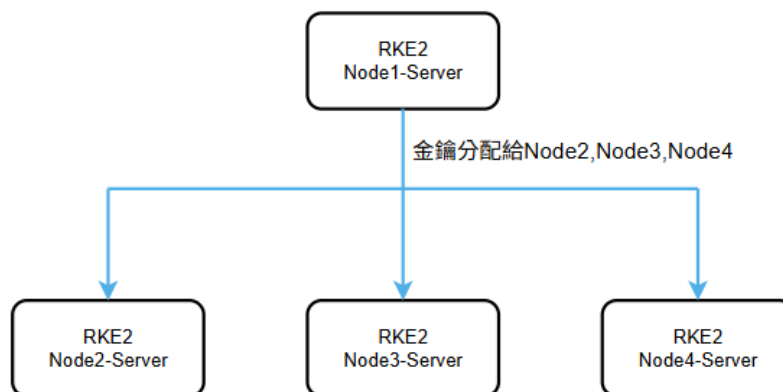
本研究的主要目的在於探索將現有地震預警系統從本地端 MQTT 架構移植至 Kubernetes (K8S) 容器編排平台，藉由容器化技術，提升系統的可靠性與彈性，並同時研究從單一 MQTT broker 架構提升至具備容錯能力的三節點 broker 分散式架構的效能與可靠性。此部分主要的研究成果為：(1) 提出針對地震預警系統特性的 K8s 最佳化部署建議；(2) 設計並實現具有容錯功能的三節點 broker 架構

### (a) 環境建置和資源物件介紹

#### 環境建置：

**硬體需求：** 最低配置需要四台具有 4 核心 CPU、8GB 記憶體和 64GB 硬碟容量的實體機，在 OS 方面為可以存取網際網路的 Linux Server，本研究採用 Ubuntu 22.04 LTS 並把每個實體機都設置固定 IP 跟不同的主機名稱。

**RKE2 安裝架構：** 建立一台 RKE2 Server 作為 Leader 管理創建的 Kubernetes Cluster，該 RKE2 Server 產生的金鑰分配給另外三台 Node Server，創建 RKE2 叢集之架構如圖所示。



**RKE2 與 Rancher 簡介：** 目前市面上有多種開源的 Kubernetes 發行版本，本系統採用 RKE2 進行 Kubernetes Cluster 與 Rancher 管理環境的建置。RKE2 (Rancher Kubernetes Engine 2) 是由 Rancher Labs 所開發的企業級 Kubernetes 發行版，具備高安全性、穩定性與易於部署的特性。

它在保留原生 Kubernetes 架構的同時，整合了安全強化設定（如 SELinux、CIS Benchmark），並支援高可用（High Availability, HA）叢集架構，適合政府及關鍵基礎系統環境使用。在本系統中，RKE2 主要負責建立三台節點的 Kubernetes Cluster，提供容器化應用（例如 EMQX 及地震資料處理模組）運行的基礎環境。配合 Rancher 管理介面，可透過圖形化方式進行服務部署、監控與權限管理，提升系統的可維運性與穩定性。

RKE2 Server Leader 之詳細安裝及設定請見附錄 A。

## Kubernetes 資源物件介紹:

在成功建立 Kubernetes 和 Rancher 環境後，需要將地震相關組件（tankplayer, pick, tcpd）和 MQTT Broker 部署到 Kubernetes 環境裡。在具體配置之前，先介紹本研究所使用的 Kubernetes 核心組件：

### ConfigMap:

ConfigMap 是 Kubernetes 用來儲存配置數據的資源對象，以鍵值對的形式儲存。使用 ConfigMap 的主要優勢在於可以將配置檔與容器映像分離，方便修改配置而無需重新封裝容器。

在本系統中，地震組件的.d 配置檔（如 tankplayer\_cwasn.d、earthworm.d、earthworm\_global.d）都會以 ConfigMap 的形式部署，這樣就可以直接在 YAML 裡修改配置，不需要每次修改就重新封裝容器。

### PersistentVolumeClaim (PVC):

PVC 是 Kubernetes 中用來向儲存系統申請磁碟空間的"申請單"。由於容器是臨時性的，如果有資料在容器裡重新啟動後資料會消失，所以需要創建 PVC 來儲存資料。

本系統實作的 PVC 使用 Longhorn 作為底層儲存提供者，Longhorn 是分散式儲存系統用來提供實際的儲存空間。每個地震組件和 EMQX Broker 都會有獨立的 PVC 來儲存：

- 日誌檔案（logs）
- 地震波形資料（waveform data）
- EMQX 的持久化數據（配置、內建資料庫 Mnesia 等）

### Deployment:

Deployment 是 Kubernetes 中用來管理無狀態或有狀態應用的控制器，它會確

保指定數量的 Pod 副本始終在運行。Deployment 定義了如何在 Kubernetes Cluster 中部署一個應用容器，包括：

- 使用哪個 Docker 映像
- 需要多少副本
- 如何掛載配置檔和儲存
- 資源限制
- 運行在哪個節點上

如果 Pod 崩潰或被刪除，Deployment 會自動創建新的 Pod 來維持指定的副本數量。本系統的地震組件（tankplayer、pick\_ew、tcpd）都使用 Deployment 來管理。

### Service:

Service 是 Kubernetes 提供的網路抽象層，用於將一組 Pod 暴露為網路服務。本系統使用兩種類型的 Service：

1. NodePort Service：對外提供服務的入口點，可以從 Cluster 外部透過節點 IP + Port 來存取服務。
2. Headless Service：設定 clusterIP 為 None 的特殊 Service，不會分配統一的 Cluster IP，而是直接傳回每個 Pod 的 IP 位址。這對於需要直接與特定 Pod 通訊的應用（如 StatefulSet）特別重要。

## StatefulSet:

StatefulSet 與 Deployment 類似，都是用來管理 Pod 的控制器，但 StatefulSet 專門用於需要穩定網路識別和持久化儲存的有狀態應用。StatefulSet 與 Deployment 的主要區別：

- Pod 名稱和 DNS 名稱：StatefulSet 創建的 Pod 名稱和 DNS 名稱會有固定的模式（例如：emqx-0, emqx-1, emqx-2），不會像 Deployment 創建後出現隨機後綴（例如：emqx-abc123）
- 順序性：Pod 會按順序創建和刪除
- 持久化儲存：每個 Pod 可以有自己獨立的 PVC

這對於 EMQX Cluster 需要知道其他節點的位址來說非常重要。如果每次故障轉移後讀取到的 EMQX Pod 名稱不一樣，會無法順利加回 Cluster 裡面，這就是為什麼 EMQX 使用 StatefulSet 而不是 Deployment 的原因。

## Dockerfile:

雖然不是 Kubernetes 組件，但 Dockerfile 是容器化的基礎。它定義了如何將應用程式及其依賴封裝成容器映像。本系統為每個地震組件（tankplayer、pick\_ew、tcpd）都建立了 Dockerfile，確保這些組件能在 Kubernetes 環境中正確運行。

### (b) YAML 跟 Dockerfile 配置探討

#### Dockerfile 實作:

以下以 tankplayer 組件為例說明如何實作 Dockerfile。首先封裝容器都需要為容器引用一個底層的 OS，此處使用 Ubuntu 22.04：

```
FROM ubuntu:22.04
```

接下來需要安裝一些必要的依賴跟工具：

```
RUN apt-get update && apt-get install -y \  
  build-essential \  
  libmosquitto-dev \  
  libjson-c-dev \  
  make \  
  gcc \  
  g++ \  
  gfortran \  
  libtirpc-dev \  
  hostname \  
  && rm -rf /var/lib/apt/lists/*
```

再來需要設定 earthworm 運行時所需的環境變數：

```
ENV EW_HOME=/opt/earthworm  
ENV EW_VERSION=earthworm_8.0  
ENV EW_PARAMS=/opt/earthworm/run/params  
ENV EW_LOG=/opt/earthworm/run/log  
ENV EW_DATA_DIR=/opt/earthworm/run/data  
ENV PATH=/opt/earthworm/earthworm_8.0/bin:${PATH}  
ENV SYS_NAME=tankplayer
```

設定好環境變數後需要為容器創建類似 earthworm 的檔案結構：

```
RUN mkdir -p ${EW_HOME}/${EW_VERSION}/bin \  
  ${EW_HOME}/run/params \  
  ${EW_HOME}/run/log \  
  ${EW_HOME}/run/data \  
  ${EW_HOME}/tanks
```

還需要將必要的檔案或程式複製到容器裡，例如可執行檔或 .d 檔：

```
COPY ./tank/earthworm/earthworm_8.0 ${EW_HOME}/${EW_VERSION}  
COPY ./tank/earthworm/run/params/* ${EW_HOME}/run/params/  
COPY ./r_EQ202505051053_cwasn.tank ${EW_HOME}/run/params/
```

最後實作一個獨立的啟動腳本方便未來運行，腳本內容包含編譯器設定、環境驗證、配置檔檢查以及啟動對應組件：

```
echo '# 設置編譯器相關變量' >> /entrypoint.sh && \  
echo 'export CC=gcc' >> /entrypoint.sh && \  
echo 'export CXX=g++' >> /entrypoint.sh && \  
echo 'export PLATFORM="LINUX"' >> /entrypoint.sh && \  
echo 'export EW_INSTALLATION="INST_UNKNOWN"' >> /entrypoint.sh && \  
echo '' >> /entrypoint.sh && \  
echo '# 驗證環境變量' >> /entrypoint.sh && \  
echo 'echo "EW_HOME: ${EW_HOME}"' >> /entrypoint.sh && \  
echo 'echo "EW_VERSION: ${EW_VERSION}"' >> /entrypoint.sh && \  
echo 'echo "PATH: ${PATH}"' >> /entrypoint.sh && \  
echo '' >> /entrypoint.sh && \  
echo '# 確認配置文件存在' >> /entrypoint.sh && \  
echo 'ls -la ${EW_HOME}/run/params/' >> /entrypoint.sh && \  
echo '' >> /entrypoint.sh && \  
echo '# 啟動 tankplayer' >> /entrypoint.sh && \  
echo 'cd ${EW_HOME}/run/params' >> /entrypoint.sh && \  
echo 'exec ${EW_HOME}/${EW_VERSION}/bin/tankplayer tankplayer_cwasn.d' >> /entrypoint.sh && \  
chmod +x /entrypoint.sh
```

## Earthworm 組件 YAML 配置：

成功建立三個組件的 Dockerfile 後需要為三個組件創建對應的 YAML 來部署進 Kubernetes 環境。以 tankplayer 的 YAML 來介紹，在 pick\_ew 跟 tcpd 也是以相同的邏輯跟架構來配置。

## ConfigMap 配置

為了方便修改配置檔，為每個會用到的 .d 檔創建 ConfigMap。以下是配置範例：

```
---
# ConfigMap for tankplayer_cwasn.d
apiVersion: v1
kind: ConfigMap
metadata:
  name: tank-config
  namespace: cwa-dev
data:
  tankplayer_cwasn.d: |
    # tankplayer config file for playing waveform files
    # tankplayer config file for playing waveform files

    RingName      WAVE_RING_CWASN      # play waveforms into this ring
    MyModuleId    MOD_TANKPLAYER      # as this module id
    PlayMsgType   TYPE_TRACEBUF2      # msg type to read from file
    LogFile       1                    # 0=no log; 1=keep log file
    HeartBeatInt  30                    # seconds between heartbeats
    Pause         10                    # seconds to pause between wavefiles
    StartUpDelay  10                    # seconds to wait before playing 1st file
    ScreenMsg     1                    # (optional) if non-zero, informational messages will be
    # written to the screen as data is played
    SendDate      0.0                  # (optional) if present, packets will be
    # timestamped this many seconds before
    # current time;
    # if absent, packets will have original time
    # stamps
    #
    InterMessageDelayMillisecs 0      # Number of ms to sleep between inserting tracebufs
    # regardless of header time stamp! Fastest possible
    # value is 1. This effectively makes tank player a tank
    # bulk loader.
    # Disabled if this is set to 0 -- then all other delay
    # settings apply
    Debug         1                    # for verbosity
```

## PVC 配置

創建持久化儲存來保存日誌和資料：

```
# PVC for earthworm logs
apiVersion: v1
kind: PersistentVolumeClaim
metadata:
  name: earthworm-logs-pvc
  namespace: cwa-dev
spec:
  accessModes:
    - ReadWriteOnce
  resources:
    requests:
      storage: 2Gi
  storageClassName: longhorn

---
# PVC for waveform data
apiVersion: v1
kind: PersistentVolumeClaim
metadata:
  name: waveform-data-pvc
  namespace: cwa-dev
spec:
  accessModes:
    - ReadWriteOnce
  resources:
    requests:
      storage: 3Gi
  storageClassName: longhorn
```

## Deployment 配置

一開始需要先創建基本訊息：

```
apiVersion: apps/v1
kind: Deployment
metadata:
  name: earthworm-tankplayer
  namespace: cwa-dev
  labels:
    app: earthworm
    component: tankplayer
```

這個 Deployment 的名字叫做 earthworm-tankplayer，它屬於 cwa-dev 這個 namespace。並給它兩個標籤：app: earthworm 和 component: tankplayer，這些標籤可以用來組織和查詢資源。

進入到 spec 的部分：

```
spec:
  replicas: 1
  selector:
    matchLabels:
      app: earthworm
      component: tankplayer
```

這個 Deployment 應該維持 1 個 Pod 副本始終運行，如果 Pod 崩潰或被刪除，Deployment 會自動創建新的 Pod，並透過匹配 app: earthworm 和 component: tankplayer 這兩個標籤來找到對應的 Pod。

定義 Pod 的模板：

```
template:
  metadata:
    labels:
      app: earthworm
      component: tankplayer
```

每個被創建的 Pod 都會被打上 app: earthworm 和 component: tankplayer 這兩個標籤，這樣 Deployment 才能透過上面定義的選擇器找到並管理這些 Pod。

節點選擇和容器配置：

```

spec:
  nodeName: ncl4
  containers:
  - name: earthworm
    image: thomast0922/tankplayer-mqtt:v9
    imagePullPolicy: IfNotPresent
    command: ["/bin/sh", "-c", "trap : TERM INT; sleep infinity & wait"] #手動啟動pod，為了方便測試運行，生產環境可以移除

```

這個 Pod 會運行在 ncl4 的節點上（此處可以自行選擇或讓系統自動負載），Pod 裡面有一個容器，名字叫 earthworm，使用的 Docker 鏡像是 thomast0922/tankplayer-mqtt:v9，鏡像拉取策略是"如果已有就不拉取"。容器啟動時會執行一個 shell 指令，這個指令會讓容器進入無限睡眠狀態，可以自行啟動並關閉，這個選擇是為了方便測試系統運行，在實際生產環境可以不用這樣。

環境變數跟資源設置：

```

env:
- name: EW_INSTALLATION
  value: "INST_UNKNOWN"
resources:
  requests:
    cpu: 100m
    memory: 200Mi
  limits:
    cpu: 300m
    memory: 500Mi

```

為容器設定一個環境變數 EW\_INSTALLATION，值是 INST\_UNKNOWN。這個環境變數會在容器內部可見，Earthworm 應用程式會用它來辨識安裝位置。容器啟動時至少需要 0.1 個 CPU 核心和 200 MiB 記憶體（這是請求值，Kubernetes 保證分配）。容器最多可以使用 0.3 個 CPU 核心和 500 MiB 記憶體（這是限制值，超過會被限流或殺掉）。

volumeMounts 配置：

```
volumeMounts:
- name: config-volume
  mountPath: /opt/earthworm/run/params/tankplayer_cwasn.d
  subPath: tankplayer_cwasn.d
- name: local-config
  mountPath: /opt/earthworm/run/params/earthworm.d
  subPath: earthworm.d
- name: global-config
  mountPath: /opt/earthworm/run/params/earthworm_global.d
  subPath: earthworm_global.d
- name: earthworm-data
  mountPath: /opt/earthworm/run/data
- name: earthworm-logs
  mountPath: /opt/earthworm/run/log
- name: waveform-data
  mountPath: /opt/earthworm/waveform-files
  subPath: params
```

容器需要掛載 6 個不同的儲存磁碟區到容器內的不同路徑。前 3 個是配置檔，從 ConfigMap 掛載；後 3 個是資料目錄，從 PVC 掛載。每個掛載都有自己的用途和目標路徑。

Volume 的定義：

```
volumes:
- name: config-volume
  configMap:
    name: tank-config
- name: local-config
  configMap:
    name: earthworm-local-config
- name: global-config
  configMap:
    name: earthworm-global-config
- name: earthworm-data
  persistentVolumeClaim:
    claimName: earthworm-data-pvc
- name: earthworm-logs
  persistentVolumeClaim:
    claimName: earthworm-logs-pvc
- name: waveform-data
  persistentVolumeClaim:
    claimName: waveform-data-pvc
```

在 Pod 層級聲明有 6 個儲存磁碟區可用。前 3 個來自 ConfigMap，提供配置檔；後 3 個來自 PVC，提供持久化儲存。每個 volume 都有一個名字，供上面的 volumeMounts 引用。

MQTT Broker YAML 配置：

接下來介紹如何把 MQTT Broker 部署進 Kubernetes 環境裡，這裡選用的 MQTT Broker 為 EMQX。配置包含：

1. 1 個 Headless Service（用於 StatefulSet 內部通訊）
2. 1 個負載平衡 Service（對外提供統一入口）
3. 3 個獨立 Service（為每個 EMQX 實例提供獨立存取）
4. 1 個 StatefulSet（管理 3 個 EMQX Pod）

Headless Service 配置：

創建一個名 emqx-headless 的 Headless Service，它在 cwa-dev 這個 namespace 中：

```
# EMQX Headless Service for StatefulSet
apiVersion: v1
kind: Service
metadata:
  name: emqx-headless
  namespace: cwa-dev
spec:
  type: ClusterIP
  clusterIP: None
  selector:
    app: emqx
  ports:
    - name: mqtt
      port: 1883
      targetPort: 1883
    - name: dashboard
      port: 18083
      targetPort: 18083
    - name: ws
      port: 8083
      targetPort: 8083
```

這個 Service 的 clusterIP 被設定為 None，這意味著它不會分配統一的 Cluster IP，而是直接傳回每個 Pod 的 IP 位址。它會選擇所有帶有 app: emqx 標籤的 Pod，並暴露三個連接埠:1883 (MQTT)、18083 (Dashboard) 和 8083 (WebSocket)。

StatefulSet 需要 Headless Service 來為每個 Pod 提供穩定的 DNS 名稱，類似於 "emqx-0.emqx-headless.cwa-dev.svc.cluster.local"、"emqx-1.emqx-headless.cwa-dev.svc.cluster.local"、"emqx-2.emqx-headless.cwa-dev.svc.cluster.local"。此外 EMQX Cluster 裡的節點可以透過 Headless Service 的 DNS，讓每個節點都可以找到其他節點，彼此可以直接通信。

## LoadBalance Service 配置

配置一個 Service 提供給外部的 Client 連接：

```
# EMQX Load Balanced Service
apiVersion: v1
kind: Service
metadata:
  name: emqx-service
  namespace: cwa-dev
spec:
  type: NodePort
  selector:
    app: emqx
  ports:
    - name: mqtt
      port: 1883
      targetPort: 1883
      nodePort: 31883
    - name: dashboard
      port: 18083
      targetPort: 18083
      nodePort: 31080
    - name: ws
      port: 8083
      targetPort: 8083
      nodePort: 31093
```

建立一個名為 emqx-service NodePort 類型的服務，用於對外提供 EMQX Cluster 的統一存取入口。它會自動將流量負載平衡到所有標記 app: emqx 標籤的 Pod 上。透過 NodePort，可以從 Cluster 外部透過任意節點的 IP + Port 來存取 EMQX。

## Individual Service 配置

直接為三個 Broker 創建各自獨立的 Service IP 給外部連接。因為使用 LoadBalance Service 時可能會發生黑盒子的問題，也就是說無法明確知道 Client 連接到的 Broker 是哪一個，所以在實作分散式架構時可能無法讓 Client 有效地分散到不同的 Broker 上面。

會有三個如圖中所示的配置分別為 EMQX-0, EMQX-1, EMQX-2：

```
# EMQX-0 Individual Service
apiVersion: v1
kind: Service
metadata:
  name: emqx-0
  namespace: cwa-dev
  labels:
    app: emqx
    broker-id: "0"
spec:
  type: NodePort
  selector:
    app: emqx
    statefulset.kubernetes.io/pod-name: emqx-0
  ports:
    - name: mqtt
      port: 1883
      targetPort: 1883
      nodePort: 31884
    - name: dashboard
      port: 18083
      targetPort: 18083
      nodePort: 31081
    - name: ws
      port: 8083
      targetPort: 8083
      nodePort: 31094
```

## StatefulSet 配置

建立一個名為 emqx 的 StatefulSet，它會管理 3 個 EMQX Pod 副本：

```
apiVersion: apps/v1
kind: StatefulSet
metadata:
  name: emqx
  namespace: cwa-dev
spec:
  serviceName: emqx-headless
  replicas: 3
  selector:
    matchLabels:
      app: emqx
```

StatefulSet 會使用 emqx-headless 這個 Headless Service 來為每個 Pod 提供穩定的網路識別。StatefulSet 透過標籤選擇器 app: emqx 來識別並管理哪些 Pod。

定義 Pod 的模板：

```
template:
  metadata:
    labels:
      app: emqx
  spec:
    containers:
      - name: emqx
        image: emqx/emqx:5.8.0
        imagePullPolicy: IfNotPresent
        ports:
          - containerPort: 1883
            name: mqtt
          - containerPort: 18083
            name: dashboard
          - containerPort: 8083
            name: ws
```

每個 Pod 都會有一個名為 emqx 的容器，使用 emqx/emqx:5.8.0 鏡像。容器暴露三個 Port：1883 (MQTT 協定)、18083 (管理介面) 和 8083 (WebSocket)。鏡像拉取策略是"如果本地有就不拉取"。

環境變數設定：

```
env:
# 基本節點配置
- name: EMQX_NODE_NAME
  value: "emqx@$(POD_NAME).emqx-headless.cwa-dev.svc.cluster.local"
- name: POD_NAME
  valueFrom:
    fieldRef:
      fieldPath: metadata.name
# 簡單的靜態集群配置
- name: EMQX_CLUSTER_DISCOVERY_STRATEGY
  value: "static"
- name: EMQX_CLUSTER_STATIC_SEEDS
  value: "emqx@emqx-0.emqx-headless.cwa-dev.svc.cluster.local,emqx@emqx-1.emqx-headless.cwa-dev.svc.cluster.local,emqx@emqx-2.emqx-headless.cwa-dev.svc.cl
# 基本集群設定
- name: EMQX_NODE_COOKIE
  value: "emqxsecretcookie"
# Dashboard 配置
- name: EMQX_DASHBOARD_DEFAULT_USERNAME
  value: "admin"
- name: EMQX_DASHBOARD_DEFAULT_PASSWORD
  value: "public"
```

設定 EMQX 節點名稱為 `emqx@<Podname>.emqx-headless.cwa-dev.svc.cluster.local`。Pod 透過 Kubernetes 的 Downward API 動態取得，這樣每個 Pod 都會有不同的節點名稱。Cluster 發現策略採用靜態 Cluster 配置，預先指定所有 Cluster 節點的位置清單（種子），每個新啟動的節點都會嘗試連接這個清單中的節點來加入 Cluster。Cookie 設為 `emqxsecretcookie`，這是 Erlang Cluster 的安全機制，只有相同 Cookie 的節點才能互相連線。EMQX Dashboard 的預設管理員帳號使用者名稱是 `admin`，密碼是 `public`。

資源配置：

```
# 基本資源配置
resources:
  requests:
    memory: "1Gi"
    cpu: "500m"
  limits:
    memory: "2Gi"
    cpu: "1000m"
```

為每個 EMQX 容器請求至少 1 GiB 記憶體和 0.5 個 CPU 核心。

健康檢查探針：

```
# 基本健康檢查
livenessProbe:
  httpGet:
    path: /status
    port: 18083
  initialDelaySeconds: 60
  periodSeconds: 30
readinessProbe:
  httpGet:
    path: /status
    port: 18083
  initialDelaySeconds: 10
  periodSeconds: 10
volumeMounts:
- name: emqx-data
  mountPath: /opt/emqx/data
```

配置兩種健康檢查探針。存活探針(livenessProbe)在容器啟動 60 秒後開始，每 30 秒檢查一次 /status 接口，如果失敗會重啟容器。就緒探針(readinessProbe)在容器啟動 10 秒後開始，每 10 秒檢查一次，如果失敗會將 Pod 從 Service 的負載平衡中移除。

volumeMounts：

將名為 emqx-data 的磁碟區掛載到容器的 /opt/emqx/data 路徑。此目錄用於儲存 EMQX 的持久化數據，包括配置、日誌、內建資料庫 (Mnesia) 等。

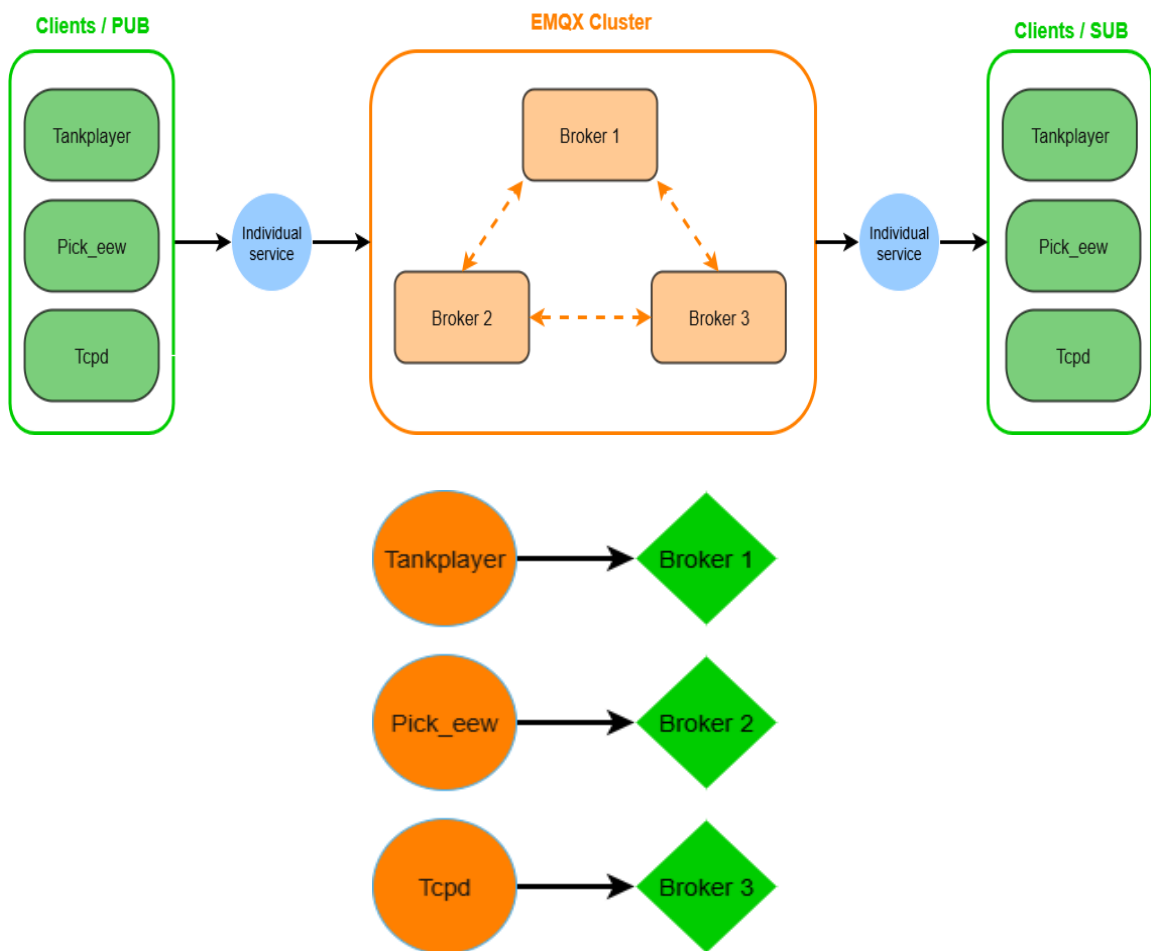
持久化儲存範本：

```
volumeClaimTemplates:
- metadata:
  name: emqx-data
  spec:
    accessModes: ["ReadWriteOnce"]
    resources:
      requests:
        storage: 5Gi
    storageClassName: longhorn
```

為 StatefulSet 定義持久化儲存範本。每建立一個 Pod，就會自動建立一個對應的 PVC。每個 PVC 申請 5 GiB 的儲存空間，使用 Longhorn 儲存類，存取模式為 ReadWriteOnce。因為有 3 個副本，會自動建立 3 個獨立的 PVC：emqx-data-emqx-0、emqx-data-emqx-1、emqx-data-emqx-2。

### (c) 具有容錯功能的三節點 Broker 架構

本研究設計的具有容錯功能的三節點 Broker 架構框架如圖中所示：



Clients 端會透過 Broker 的獨立 IP 去分別連到不同 Broker，例如：Tankplayer 會連接到 Broker1，Pick\_eww 會連到 Broker2，Tcpd 會連到 Broker3，這樣確保了系統是分散式的框架。如果發生故障最多只會有一個 Broker 跟 Client 斷線，不會影響到另外兩個。

另外三個 Broker 各自會組成一個 EMQX 集群，集群裡的 Broker 會共用訂閱和路由資訊還有會話狀態等等。

資料流向說明：

1. 資料輸入階段 (Tankplayer → Broker1)：Tankplayer 作為發布者 (Publisher)，透過 Individual Service 連接到 Broker1，將原始地震波形資料發佈到 Topic:tank 上。
2. 內部路由 (Broker1 → Broker2)：由於三個 Broker 已經形成集群，Broker1 會根據集群的路由表知道有其他 client 在 Broker2 上訂閱該 Topic，所以會自動將 Topic:tank 的訊息轉發給 Broker2 (如果沒有其他 clients 在其他 broker 訂閱這個 Topic 那就不會進行轉發)。這個轉發過程是透明且自動的，利用了 EMQX 的訊息路由機制。
3. P 波偵測階段 (Broker2 → Pick\_eew)：Pick\_eew 作為訂閱者，透過 Individual Service 連接到 Broker2，訂閱 Topic:tank 取得原始波形資料。經過程式針對 P 波詳細運算後，Pick\_eew 將處理過的震相資料作為新的發布者，發佈到 Topic:pick 上。
4. 內部路由 (Broker2 → Broker3)：同樣地，Broker2 會透過集群機制轉送 Topic:pick 的訊息給 Broker3。
5. 報告產生階段 (Broker3 → Tcpd)：Tcpd 程式透過 Individual Service 連接到 Broker3，訂閱 Topic:pick 取得震相資料。經過地震定位和震級計算後，Tcpd 產生最終的地震預警報告 (EEW Report)。

在這樣的設計中如果發生像是 Pod crash 或 Node crash 導致 Client 跟 Broker 斷線會是一個重大的問題，所以設計了一個三層容錯架構，分別在 Kubernetes 基礎設施層、EMQX 集群層和 MQTT Cache 應用層去探討容錯機制，確保地震預警系統在故障情況仍能維持穩定運行。

### 三層容錯架構：

#### 1. Kubernetes 基礎設施層

- 利用 Kubernetes 的自動重啟機制
- Pod 故障時自動重新創建
- Node 故障時自動遷移 Pod

#### 2. EMQX 集群層

- 三節點 EMQX Cluster 提供冗餘
- 節點間自動同步訂閱和會話資訊
- 支援動態加入和退出 Cluster

#### 3. MQTT Cache 應用層

- Client 端實作訊息緩存機制
- 斷線期間暫存訊息
- 重連後自動補發

## (D) 實驗結果:

### 系統部署驗證:

現已成功部署並建立 Kubernetes 環境並可以透過 Rancher 介面操作,如圖中所示在 cwa-dev 這個 namespace 裡有三個地震組件 (tankplayer, pick, tcpd) 以及有三個 Broker 分別部署在不同實體機上。

```
root@nc11:~# kubectl get pods -n cwa-dev
```

NAME	READY	STATUS	RESTARTS	AGE
earthworm-pick-f4788cd54-7xkxp	1/1	Running	0	71d
earthworm-tankplayer-54b6bdc55d-wltwb	1/1	Running	0	29d
earthworm-tcpd-7f4b68d49c-ms7gd	1/1	Running	0	6d21h
emqx-0	1/1	Running	1 (6d20h ago)	6d21h
emqx-1	1/1	Running	0	17d
emqx-2	1/1	Running	1 (3d21h ago)	3d21h

運行方式為分別使用 kubectl exec 進入地震組件的 Pod 並執行設置的啟動腳本 /entrypoint.sh, 執行完後就會開始透過 MQTT 傳送訊息。

```
-rw-r--r-- 1 root root 17584 Jun 4 08:53 sta_cwb24_Z
-rw-rw-r-- 1 root root 25906 Jun 4 08:53 sta_tsmip_Z
-rwxr-xr-x 1 root root 231096 Jun 4 08:46 startstop
-rw-r--r-- 1 root root 2392 Jul 7 16:11 startstop_unix.d
-rwxr-xr-x 1 root root 187808 Jun 4 08:45 statmgr
-rwxr-xr-x 1 root root 155088 Jun 4 08:46 statrigfilter
-rwxr-xr-x 1 root root 145584 Jun 4 08:45 status
-rwxr-xr-x 1 root root 140232 Jun 4 08:46 stopmodule
-rwxr-xr-x 1 root root 103208 Jun 4 08:45 tankcut
-rwxrwxr-x 1 root root 184960 Jul 9 17:35 tankplayer
-rw-r--r-- 1 root root 3017 Aug 11 13:55 tankplayer_cwasn-bac.d
-rw-r--r-- 1 root root 5017 Sep 30 16:22 tankplayer_cwasn.d
-rw-r--r-- 1 root root 4512 Sep 30 15:59 tankplayer_cwasn_bac.d
-rw-r--r-- 1 root root 2768 Jun 4 08:53 tankplayer_tsmip.d
-rwxr-xr-x 1 root root 83672 Jun 4 08:45 tanksniff
-rw-r--r-- 1 root root 167424 Jun 4 08:46 tar.exe
-rwxr-xr-x 1 root root 426776 Jun 4 08:46 tbuf2mseed
-rwxrwxr-x 1 root root 245416 Jul 22 06:44 tcpd
-rw-r--r-- 1 root root 3325 Jul 12 06:12 tcpd.d
-rwxrwxr-x 1 root root 257640 Jun 4 08:45 tcpd_fast
-rw-r--r-- 1 root root 3637 Jun 4 08:53 tcpd_fast.d
-rw-r--r-- 1 root root 3012 Jun 4 08:53 tcpd_new.d
-rwxr-xr-x 1 root root 151512 Jun 4 08:46 template
-rwxr-xr-x 1 root root 175928 Jun 4 08:45 thresh2trig
-rwxr-xr-x 1 root root 198080 Jun 4 08:46 tideweb2ew
-rwxr-xr-x 1 root root 39904 Jun 4 08:46 time_converter
-rw-r--r-- 1 root root 18480 Jun 4 08:46 tlist.exe
-rwxr-xr-x 1 root root 88792 Jun 4 08:46 tr2dump
-rwxr-xr-x 1 root root 237992 Jun 4 08:46 trig2arc
-rwxr-xr-x 1 root root 843672 Jun 4 08:46 trig2disk
-rw-r--r-- 1 root root 336 Jun 4 08:45 update_params.bash
-rwxr-xr-x 1 root root 1998576 Jun 4 08:46 wave_serverV
-rwxr-xr-x 1 root root 770272 Jun 4 08:46 waveman2disk
-rwxr-xr-x 1 root root 109568 Jun 4 08:46 webgif
-rwxr-xr-x 1 root root 507416 Jun 4 08:46 webswave
-rwxr-xr-x 1 root root 165520 Jun 4 08:46 wftimefilter
-rwxr-xr-x 1 root root 158936 Jun 4 08:46 wftimeshifter
-rwxr-xr-x 1 root root 83296 Jun 4 08:46 wsvtank2tb
tankplayer: startup. Waiting 10 seconds
tankplayer: starting tank </opt/earthworm/waveform-files/r_EQ202505051053_cwasn.tank>
tankplayer: Reading type: 19 mod: 0 from </opt/earthworm/waveform-files/r_EQ202505051053_cwasn.tank>
Playing as type: 19 mod:135 inst:255
20251030_UTC_07:11:13 time shifted by 15365867.469969 seconds from original
20251030_UTC_07:11:13 1st header time-stamp: UTC Thu Oct 30 07:11:13 2025
.....|
```

使用 2025 年 5 月 5 號 10 點 53 分歷史地震的資料集測試

(r\_EQ202505051053\_cwasn.tank)，最終產生的 REP 經緯度及 Mpd 與運行在本地端的 EARTHWORM 產生的結果完全一致。

本地端：

```
Reporting time 2025/07/22 06:47:00.24 averr=0.6 Q=-1 Gap=256 Avg_wei=0.6 n=9 n_c=8, n_m=7, Padj=0.3 no_eq=385
year month day hour min sec lat lon dep Mall Mpd_s Mpv Mpd Mtc process_time first_ptime
2025 7 22 6 46 40.36 23.9054 121.9054 30.00 6.91 0.00 0.00 6.87 6.94 19.87
Sta C N L lat lon pa pv pd tc Mtc MPv MPd Perr Dis H_Wei Parr Pk_wei Upd_sec P_S usd_sec
ESA HNZ TW 00 24.57570 121.84390 405.017471 100.604820 49.621482 3.975130 8.69 0.00 10.59 -0.5200 80 0.43 2025/07/22 06:46:52.78 1 07 9.92 07
WCS HHZ TW 00 24.05710 120.91160 0.306640 0.029489 0.009376 2.051431 7.48 0.00 6.29 -0.1465 107 0.68 2025/07/22 06:46:57.02 0 02 12.91 02
EGS EHZ TW 10 24.84270 121.94370 0.521845 0.074844 0.007442 1.070268 6.29 0.00 6.19 -0.1467 108 0.66 2025/07/22 06:46:57.25 1 02 13.09 02
NSK HLZ TW 10 24.67350 121.36640 0.568403 0.123637 0.566248 0.000000 0.00 0.00 8.31 -0.1382 106 0.70 2025/07/22 06:46:56.88 1 02 12.80 02
ESL EHZ TW 10 23.81210 121.44150 11.884681 0.829850 0.076691 0.917070 6.01 0.00 6.82 -1.0019 57 0.25 2025/07/22 06:46:48.64 1 09 7.10 07
NDS HHZ TW 00 24.63400 121.71680 0.539833 0.051550 0.015386 2.664070 7.96 0.00 6.38 -0.8563 88 0.29 2025/07/22 06:46:53.63 1 05 10.83 05
SML EHZ TW 10 23.88130 120.90830 1.378730 0.075768 0.006921 0.630323 5.32 0.00 6.14 -0.0262 106 0.86 2025/07/22 06:46:57.00 0 02 12.80 02
EWT HNZ TW 10 24.44530 121.77830 7.373511 1.810092 3.556132 0.000000 0.00 0.00 9.00 -0.8478 68 0.29 2025/07/22 06:46:50.58 1 09 8.47 08
```

Kubernetes 環境：

```
Reporting time 2025/07/13 09:12:33.59 averr=0.6 Q=-1 Gap=256 Avg_wei=0.6 n=9 n_c=8, n_m=7, Padj=0.3 no_eq=385
year month day hour min sec lat lon dep Mall Mpd_s Mpv Mpd Mtc process_time first_ptime
2025 7 13 9 12 13.77 23.9054 121.9054 30.00 6.91 0.00 0.00 6.87 6.94 19.82
Sta C N L lat lon pa pv pd tc Mtc MPv MPd Perr Dis H_Wei Parr Pk_wei Upd_sec P_S usd_sec
ESA HNZ TW 00 24.57570 121.84390 405.017471 100.604820 49.621482 3.975130 8.69 0.00 10.59 -0.5200 80 0.43 2025/07/13 09:12:26.19 1 07 9.92 07
WCS HHZ TW 00 24.05710 120.91160 0.306640 0.029489 0.009376 2.051431 7.48 0.00 6.29 -0.1465 107 0.68 2025/07/13 09:12:30.43 0 02 12.91 02
EGS EHZ TW 10 24.84270 121.94370 0.521845 0.074844 0.007442 1.070268 6.29 0.00 6.19 -0.1467 108 0.66 2025/07/13 09:12:30.66 1 02 13.09 02
NSK HLZ TW 10 24.67350 121.36640 0.568403 0.123637 0.566248 0.000000 0.00 0.00 8.31 -0.1382 106 0.70 2025/07/13 09:12:30.29 1 02 12.80 02
ESL EHZ TW 10 23.81210 121.44150 11.884681 0.829850 0.076691 0.917070 6.01 0.00 6.82 -1.0019 57 0.25 2025/07/13 09:12:22.05 1 09 7.10 07
NDS HHZ TW 00 24.63400 121.71680 0.539833 0.051550 0.015386 2.664070 7.96 0.00 6.38 -0.8563 88 0.29 2025/07/13 09:12:27.04 1 05 10.83 05
SML EHZ TW 10 23.88130 120.90830 1.378730 0.075768 0.006921 0.630323 5.32 0.00 6.14 -0.0262 106 0.86 2025/07/13 09:12:30.41 0 02 12.80 02
EWT HNZ TW 10 24.44530 121.77830 7.373511 1.810092 3.556132 0.000000 0.00 0.00 9.00 -0.8478 68 0.29 2025/07/13 09:12:23.99 1 09 8.47 08
```

Pod Crash 容錯測試：

用 Pod crash 來模擬系統的 Broker 故障並測試系統是否可以正常運行並輸出 Report。模擬 Pod crash 的方法為：先讓系統運作並在運作途中用 force delete 強制移除某個 Broker Pod。

由於三個 clients 分別連接不同 Broker(tankplayer -> emqx-0,pick\_ew -> emqx-1,tcpd->emqx-2)，這裡的實驗採取模擬 emqx-0 崩潰，並觀察 emqx-0 後續恢復以及 tankplayer 是否轉移連接並繼續發送資料，最終觀察 Failover time 為多少時間以及 report 是否正確。

原先正常運作:

```
root@nc11:~# kubectl get pods -n cwa-dev
NAME                                READY   STATUS    RESTARTS   AGE
earthworm-pick-f4788cd54-7xkxp     1/1    Running   0           77d
earthworm-tankplayer-54b6bdc55d-wltwb 1/1    Running   0           35d
earthworm-tcpd-7f4b68d49c-ms7gd    1/1    Running   0           12d
emqx-0                              1/1    Running   0           5d22h
emqx-1                              1/1    Running   0           47h
emqx-2                              1/1    Running   0           46h
```

用 force delete 模擬崩潰:

```
root@nc11:~# kubectl delete pods emqx-0 -n cwa-dev --force --grace-period=0
Warning: Immediate deletion does not wait for confirmation that the running resource has been terminated. The resource may continue to run on the cluster in
definitely.
pod "emqx-0" force deleted
```

可以從下面的圖看到 emqx-0 被移除並正在原本的節點上重啟:

```
root@nc11:~# kubectl get pods -n cwa-dev
NAME                                READY   STATUS    RESTARTS   AGE
earthworm-pick-f4788cd54-7xkxp     1/1    Running   0           77d
earthworm-tankplayer-54b6bdc55d-wltwb 1/1    Running   0           35d
earthworm-tcpd-7f4b68d49c-ms7gd    1/1    Running   0           12d
emqx-0                              0/1    Init:0/1   0           2s
emqx-1                              1/1    Running   0           47h
emqx-2                              1/1    Running   0           46h
```

原先 tankplayer 會連接到 emqx-0 上也因為 Pod Crash 轉移連接到 emqx-2 上

查看原先在 emqx-0 上面的 clients:

```
root@nc11:~# kubectl exec -it emqx-0 -n cwa-dev -- emqx_ctl clients list
Defaulted container "emqx" out of: emqx, mnesia-cleanup (init)
Client(tankplayer_1762325644_4054634, username=undefined, peername=10.42.0.0:47906, clean_start=true, keepalive=60, session_expiry_interval=0, s
ubscriptions=0, inflight=0, awaiting_rel=0, delivered_msgs=0, enqueued_msgs=0, dropped_msgs=0, connected=true, created_at=1762325644104, connect
ed_at=1762325644105)
command terminated with exit code 1
```

模擬 Pod Crash 後再次查看，可以看到 tankplayer 已經不在原本的 Broker 上面

```
root@nc11:~# kubectl delete pods emqx-0 -n cwa-dev --force --grace-period=0
Warning: Immediate deletion does not wait for confirmation that the running resource has been terminated. The resource may continue to run on th
e cluster indefinitely.
pod "emqx-0" force deleted
root@nc11:~# kubectl exec -it emqx-0 -n cwa-dev -- emqx_ctl clients list
Defaulted container "emqx" out of: emqx, mnesia-cleanup (init)
command terminated with exit code 1
```

查看 emqx-1 上的 client，tankplayer 成功轉移到 emqx-1 上並繼續執行

```
root@ncl1:~# kubectl exec -it emqx-1 -n cwa-dev -- emqx_ctl clients list
Defaulted container "emqx" out of: emqx, mnesia-cleanup (init)
Client(tankplayer_1762325644_4054634, username=undefined, peername=10.42.0.0:8594, clean_start=true, keepalive=60, session_expiry_interval=0, subscriptions=0, inflight=0, awaiting_rel=0, delivered_msgs=0, enqueued_msgs=0, dropped_msgs=0, connected=true, created_at=1762325658884, connected_at=1762325658885)
command terminated with exit code 1
```

在下圖 tankplayer 的介面可以看到原本正在執行，遇到 Pod Crash 後會進入緩存模式將斷線期間的訊息緩存起來等重新連接後依序發送，接著會顯示重連時間跟時間分析，可以在圖中看到最終重連成功並只花 2.519ms

```
Startstop's Log Dir: /home/ncl/Desktop/docker_tank/docker_tank/tank/e
Startstop's Params Dir: /home/ncl/Desktop/docker_tank/docker_tank/tank/e
Startstop's Bin Dir: /home/ncl/Desktop/docker_tank/docker_tank/tank/e
Startstop Version: v8.0b1 2024-12-09 (64 bit)

Process Process Class/ CPU
Name Id Status Priority Used Argument
-----
startstop 4054633 Alive ??/ 0 00:00:00 -
tankplayer 4054634 Alive ??/ 0 00:00:00 tankplayer_cwasn.d

Press return to print Earthworm status, or
type restart nnn where nnn is proc id or name to restart, or
type quit<cr> to stop Earthworm.

tankplayer: starting tank </home/ncl/Desktop/docker_tank/docker_tank/tank/earthworm/run/params/r_EQ202505051053_cwasn.tank>

tankplayer: Reading type: 19 mod: 0 from </home/ncl/Desktop/docker_tank/docker_tank/tank/earthworm/run/params/r_EQ202505051053_cwasn.tank>
Playing as type: 19 mod:135 inst:255
20251105 UTC_06:54:14 time shifted by 15883248.089743 seconds from original
20251105 UTC_06:54:14 1st header time-stamp: UTC Wed Nov 5 06:54:14 2025
....=== DISCONNECT TIMESTAMP: 5011323.502663 ===
tankplayer: MQTT disconnected unexpectedly: EOF. Entering cache mode.
=== RECONNECT TIMESTAMP: 5011323.505182 ===
=== UNIFIED FAILOVER TIME: 2.489 ms ===

--- MQTT Failover Analysis ---
Summary: Failover sequence completed in 2.519 ms from DISCONNECT to RECONNECT_SUCCESS.

[ 0.000 ms | + 0.000 ms ] Event: DISCONNECT
- Details: reason: EOF
[ 0.000 ms | + 0.000 ms ] Event: CACHE_MODE_ENTER
- Details: entering cache mode due to connection loss
[ 0.079 ms | + 0.079 ms ] Event: FAILOVER_START
- Details: searching for next available broker
[ 0.080 ms | + 0.001 ms ] Event: BROKER_SWITCH
- Details: from broker[0] to broker[1]: 192.168.50.160:31884
[ 0.080 ms | + 0.000 ms ] Event: CONNECT_ATTEMPT
- Details: broker[1]: 192.168.50.160:31884 attempt 1
[ 2.489 ms | + 2.409 ms ] Event: RECONNECT_SUCCESS
- Details: broker[1]: 192.168.50.160:31884
--- Total Failover Time: 2.519 ms ---
--- End of Analysis ---

.....quit.
```

## 最後觀察 report

原本正常情況:

year	month	day	hour	min	sec	lat	lon	dep	Mall	Mpd_s	Mpv	Mpd	Mtc	process_time	first_ptime					
2025	8	19	8	33	40.32	23.9054	121.9054	30.00	6.91	0.00	0.00	6.87	6.94	19.85						
Sta	C	N	L	lat	lon	pa	pv	pd	tc	Mtc	MPv	MPd	Perr	Dis	H_Wei	Parr	PK_wei	Upd_sec	P_S	usd_sec
ESA	HNZ	TW	00	24.57570	121.84390	405.017471	100.604820	49.621482	3.975130	8.69	0.00	10.59	-0.5200	80	0.43	2025/08/19 08:33:52.74	1	07	9.92	07
WCS	HHZ	TW	00	24.05710	120.91160	0.306640	0.029489	0.009376	2.051431	7.48	0.00	6.29	-0.1465	107	0.68	2025/08/19 08:33:56.98	0	02	12.91	02
EGS	EHZ	TW	10	24.04270	121.94370	0.521845	0.074044	0.007442	1.070268	6.29	0.00	6.19	-0.1467	108	0.66	2025/08/19 08:33:57.21	1	02	13.09	02
NSK	HLZ	TW	10	24.67350	121.36640	0.568403	0.123637	0.566248	0.000000	0.00	0.00	8.31	-0.1382	106	0.70	2025/08/19 08:33:56.84	1	02	12.80	02
ESL	EHZ	TW	10	23.81210	121.44150	11.884681	0.829850	0.076691	0.917070	6.01	0.00	6.82	-1.0019	57	0.25	2025/08/19 08:33:48.60	1	09	7.10	07
NDS	HHZ	TW	00	24.63400	121.71680	0.539833	0.051550	0.015386	2.664070	7.96	0.00	6.38	-0.8563	88	0.29	2025/08/19 08:33:53.59	1	05	10.83	05
SML	EHZ	TW	10	23.88130	120.90830	1.378730	0.075768	0.006921	0.630323	5.32	0.00	6.14	-0.0262	106	0.86	2025/08/19 08:33:56.96	0	02	12.80	02
EWT	HNZ	TW	10	24.44530	121.77830	7.373511	1.810092	3.556132	0.000000	0.00	0.00	9.00	-0.8478	68	0.29	2025/08/19 08:33:50.54	1	09	8.47	08

Pod crash:

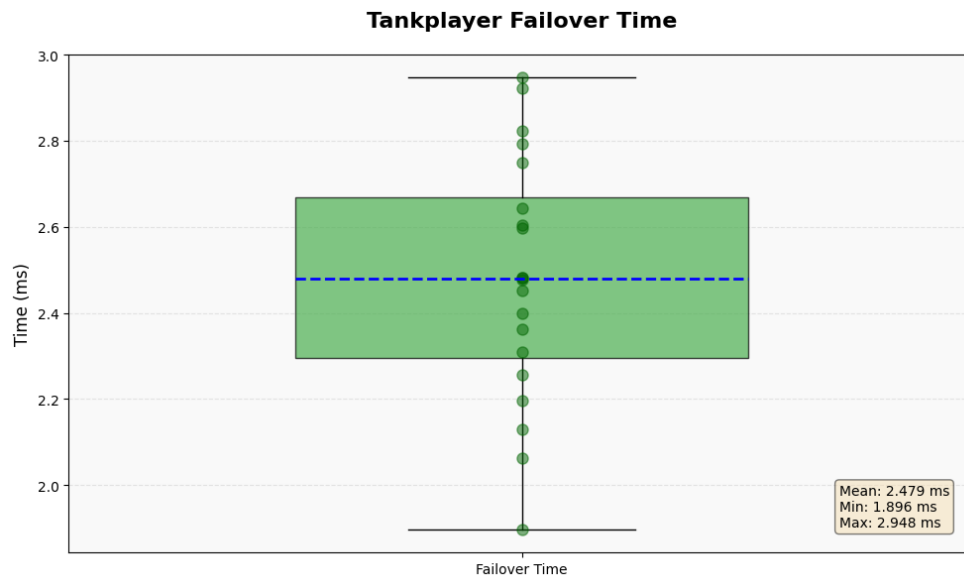
year	month	day	hour	min	sec	lat	lon	dep	Mall	Mpd_s	Mpv	Mpd	Mtc	process_time	first_ptime					
2025	8	19	2	57	18.40	23.9054	121.9054	30.00	6.91	0.00	0.00	6.87	6.94	19.92						
Sta	C	N	L	lat	lon	pa	pv	pd	tc	Mtc	MPv	MPd	Perr	Dis	H_Wei	Parr	PK_wei	Upd_sec	P_S	usd_sec
ESA	HNZ	TW	00	24.57570	121.84390	405.017471	100.604820	49.621482	3.975130	8.69	0.00	10.59	-0.5201	80	0.43	2025/08/19 02:57:30.82	1	07	9.92	07
WCS	HHZ	TW	00	24.05710	120.91160	0.306640	0.029489	0.009376	2.051431	7.48	0.00	6.29	-0.1465	107	0.68	2025/08/19 02:57:35.06	0	02	12.91	02
EGS	EHZ	TW	10	24.04270	121.94370	0.521845	0.074044	0.007442	1.070268	6.29	0.00	6.19	-0.1468	108	0.66	2025/08/19 02:57:35.29	1	02	13.09	02
NSK	HLZ	TW	10	24.67350	121.36640	0.568403	0.123637	0.566248	0.000000	0.00	0.00	8.31	-0.1383	106	0.70	2025/08/19 02:57:34.92	1	02	12.80	02
ESL	EHZ	TW	10	23.81210	121.44150	11.884681	0.829850	0.076691	0.917070	6.01	0.00	6.82	-1.0019	57	0.25	2025/08/19 02:57:26.68	1	09	7.10	07
NDS	HHZ	TW	00	24.63400	121.71680	0.539833	0.051550	0.015386	2.664070	7.96	0.00	6.38	-0.8563	88	0.29	2025/08/19 02:57:31.67	1	05	10.83	05
SML	EHZ	TW	10	23.88130	120.90830	1.378730	0.075768	0.006921	0.630323	5.32	0.00	6.14	-0.0263	106	0.86	2025/08/19 02:57:35.04	0	02	12.80	02
EWT	HNZ	TW	10	24.44530	121.77830	7.373511	1.810092	3.556132	0.000000	0.00	0.00	9.00	-0.8479	68	0.29	2025/08/19 02:57:28.62	1	09	8.47	08

在模擬 Pod crash 的實驗中表明 Client 可以順利地轉移到健康的 Broker 上並繼續通訊，而且最終產生的 REP 經緯度也是正確的。

## Clients Failover Time 分析:

這項實驗主要探討三個 earthworm 組件 ( tankplayer , pick\_ew , tcpd ) 在遇到崩潰後轉移到新的 Broker 所花的時間為多少，實驗步驟為會對每個 clients 測試 20 次並記錄 failover time 最終會算出平均以及分布以 Box plot 的方式呈現。

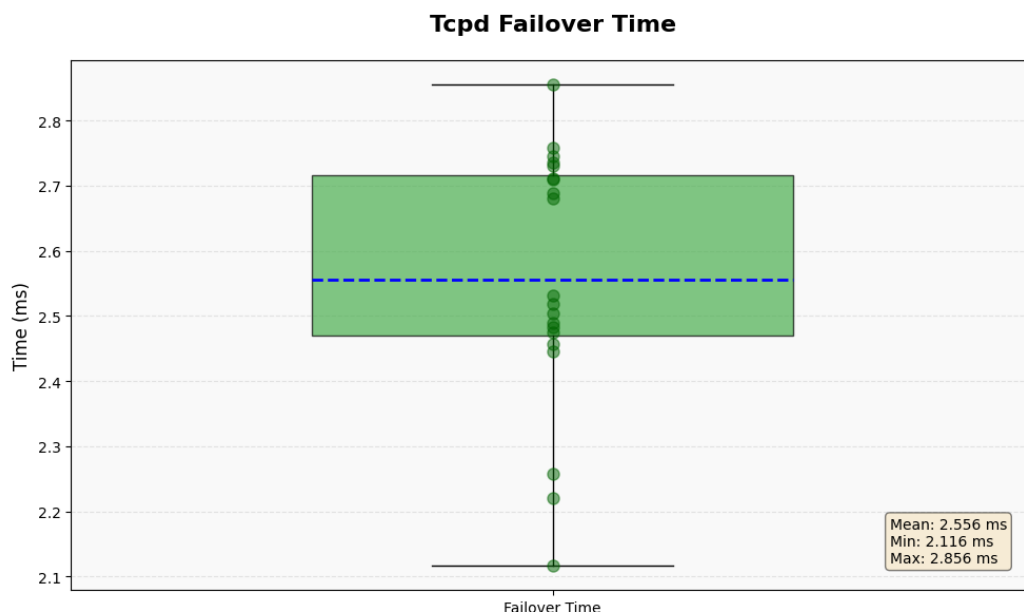
### Tankplayer Failover Time:



### Pick\_ew Failover Time:



Tcpd Failover Time:



實驗數據顯示確實有達到地震預警系統低延遲的要求，而且重連時間平均只花 2-3ms。接下來預計會完成針對不只 Pod crash 情況的故障轉移，也會驗證面臨 Node crash 時系統是否也可以順利地運行並維持穩定的狀態。

## 肆、研究方法與成果 (2): Golang-based PICK\_EEW

### 實作流程

此部分研究計畫的實作流程為：(a) 脫離 Earthworm、將共同函式庫重構、(b) 將主程式重構、(c) 將剩餘函式與資料結構重構、(d) 編譯除錯與最佳化。

第一步先脫離 Earthworm 是因其為此部分之主要目標，且觀察程式碼發現地震測報程式 pick\_ew、tcpd 所依賴之 Earthworm 函式高度雷同，以這些函式建立出共同函式庫後，不僅可以達成階段目標，也可簡化後續的重構工作。在 2024 年的研究計畫成果中，pick\_ew 與 tcpd 已經先以 CGo 功能將主程式改寫成 Go，故實際上在完成共同函式庫後，理論上僅需將 CGo 替換成 Go 即完成改寫工作。然而，氣象署現行之 pick\_ew 有過更新，且在改寫過程中有發現冗餘函式與效率低下之程式碼，故最後還有一步最佳化。

實作之原始碼請見：<https://gitlab.com/mine3744734/EAR> 以下分述各實作流程。

### (a)：脫離 Earthworm，建立共同函式庫

為求 pick\_ew 之行為於重構前後相同且符合氣象署現行版本 (C 語言)，先將氣象署現行 pick\_ew (與 tcpd) 單獨存放於一資料夾，在沒有 Earthworm 的情況下連結時會報出未定義 (實作) 之函式名稱，依此基礎將 Earthworm 之函式 (與結構體) 定義與實作複製至一程式檔與一標頭檔，即為共同函式庫，命名為 need，包含 need.c 與 need.h。共同函式庫使得現行 C 語言版本與 2024 年 CGo 版本之 pick\_ew 與 tcpd 得以獨立編譯。

### (b)：改寫共同函式庫

初版 C 語言共同函式庫有二千五百餘行程式，改寫以函式為單位進行。在 Go 語言裡具有 hashmap，且字串可用運算子比較，故將小結構體 (如僅包含字串與整數) 改成 hashmap，讀取設定檔之程式 (大量字串比較) 與多分支邏輯 (大量 if else) 用運算子與 switch (Go 語言保證分支僅單次比較) 簡化。在 C 語言版本中 int 型別在 x86-64 平台編譯時大多是 32 bit，但在 Go 語言中會是 64 bit，故在 Go 語言版本中皆用精確的 int32 型別取代 int。此版共同函式庫檔案為 need.go，為使其得以被 pick\_ew 與未來改寫之 tcpd 使用，將其包裝成 Go Module，命名為 need。

### (c)：替換 CGo

此步驟將 2024 年的 CGo 版本中所有運用 CGo 呼叫 Earthworm C 語言函式與結構體之部份徹底替換成 need.go 中的實作。在此步驟完成之時，即完成將 pick\_ew 完全以 Go 語言重構之目標。但此初版 Go 語言 pick\_ew 之 EEW (Earthquake Early Warning) 演算法為 2024 年的版本，且其餘部份具有許多冗餘或效率不彰的程式碼。故我們在此秉持盡可能提昇程式速度、爭取縮小地震盲區之原則，在不改動輸出結果的情況下進行最佳化。

### (d)：最佳化

此研究案目標為完整脫離 Earthworm，但前一步所得之 Go 語言 pick\_ew 卻需要讀取 Earthworm 之基礎設定檔 earthworm.d 與 earthworm\_global.d，此二檔案定義共享記憶體 (Shared Memory) 之名稱與代號、Earthworm 模組程式之名稱與代號、資料類別名稱與代號，以及機構名稱與代號。所需之設定僅資料類別名稱與代號，且在目前的地震資料中，類別皆為 TYPE\_TRACEBUF2，故將所有此部份之程式刪除。若未來有更多資料類別，則另於程式中定義即可。現在 Go 語

言 pick\_ew 僅需要一個設定檔。

在 C 語言版本中，資料交換依舊使用共享記憶體，而 Go 語言 pick\_ew 則移除所有共享記憶體相關的程式，全面採用 MQTT。在讀取設定檔時，C 語言版本採用 Earthworm 開發的 KOM 函式庫，雖然可以開啟並讀取多個檔案，但需要大量分支判斷與字串比較，須花費大量時間。Go 語言有標準函式能讀取並分割字串，加上 switch 功能，可快速完成讀檔，因此廢棄 KOM 函式庫。

在 C 語言版本中，有許多記憶體上限常數 (如陣列元素上限) 以及索取記憶體空間，在 Go 語言中有動態的陣列 (Go 語言稱為 slice) 可使用。除非是固定大小的結構體，需要索取記憶體的部份皆改成動態陣列。

在接收資料時，第一步是確認資料是來自關注的測站清單中，在 C 語言版本中，是利用排序測站屬性後進行字串比對，需要花費大量時間。在 Go 語言中，測站屬性自成一結構體，作為 hashmap 中的金鑰，如此可快速比對與修改資料，且 hashmap 也能動態調整記憶體空間，免去記憶體管理的責任與風險。

最後一步，由於 CGo 版 pick\_ew 是以 2024 年的程式為範本撰寫的，挑選資料的演算法與如今的 C 語言版本完全不同。在修改完演算法後，重構便告一段落。

## 測試驗證

※ 本節之附圖中，紅色標記為氣象署公告之震央位置，其右側為日期與規模



我們以 C 語言版本作為標準，檢驗 Go 語言 pick\_ew 是否行為一致。C 語言版本來自 Docker container，除執行所需之環境變數外皆未變動。Go 語言 pick\_ew 與加入 MQTT 通訊功能的 tankplayer 與 tcpd 協作。取 UTC 2025/08/27 13:11:00.43 ML 6.05、UTC 2025/06/11 11:00:29.82 ML 6.42 與 UTC 2025/01/20 16:17:26.98 ML 6.44 三次強震，於 GDMS 上取 CWASN 全部測站，地震發生前後各 30 秒，每次地震 60 秒的資料，每 100、500 筆數據為一封包，共 6 份資料，以 Earthworm 中的 tankplayer 重播。所有測試皆於同一台電腦完成。

首先，在兩種版本的 pick\_ew 加入將輸出資料同時寫入另一檔案，比對 C 語言版本與 Go 語言版本的輸出是否相同（忽略時間戳）：

2025/01/20, 每 100 筆數據為一封包：

## 標準 (C 語言版)

```
CHY HLZ TW 10 120.432500 23.496300 0.244422 0.080514 0.094786 0.000000 1762415064.58170 3 1 2
CHY HLZ TW 10 120.432500 23.496300 0.244422 0.080514 0.094786 0.000000 1762415064.58170 3 1 3
CHY HLZ TW 10 120.432500 23.496300 0.244422 0.080514 0.094786 0.000000 1762415064.58170 3 1 4
CHY HLZ TW 10 120.432500 23.496300 0.244422 0.080514 0.094786 0.000000 1762415064.58170 3 1 5
CHY HLZ TW 10 120.432500 23.496300 0.244422 0.080514 0.094786 0.000000 1762415064.58170 3 1 6
CHY HLZ TW 10 120.432500 23.496300 0.244422 0.080514 0.094786 0.000000 1762415064.58170 3 1 7
CHY HLZ TW 10 120.432500 23.496300 0.244422 0.080514 0.094786 0.000000 1762415064.58170 3 1 8
CHY HLZ TW 10 120.432500 23.496300 0.244422 0.080514 0.094786 0.000000 1762415064.58170 3 1 9
WTP EHZ TW 10 120.622300 23.243800 53.601320 1.646657 0.062660 0.300932 1762415092.70170 3 2 2
WTP EHZ TW 10 120.622300 23.243800 68.892866 1.906573 0.108546 0.356668 1762415092.70170 3 2 3
WTP HLZ TW 10 120.622300 23.243800 61.313319 1.712840 0.124823 0.000000 1762415093.76170 0 1 2
SGS HLZ TW 10 120.590800 23.080400 20.948626 0.682799 0.056234 0.000000 1762415093.80170 3 1 2
WTP EHZ TW 10 120.622300 23.243800 315.404709 6.477064 0.135972 0.325964 1762415092.70170 3 2 4
WTP HLZ TW 10 120.622300 23.243800 378.271671 6.294043 0.484735 0.000000 1762415093.76170 0 1 3
STYH HNZ TW 10 120.781100 23.179400 66.606460 1.523737 0.271083 0.000000 1762415095.07170 2 1 2
SGS HLZ TW 10 120.590800 23.080400 49.851106 2.326381 0.173817 0.000000 1762415093.80170 3 1 3
WCKO HHZ TW 00 120.604700 23.438500 6.232092 0.278439 0.034758 0.834868 1762415095.78170 1 2 2
WCKO HNZ TW 10 120.604700 23.438500 34.114343 1.512604 0.089592 0.000000 1762415095.93170 1 1 2
STYH HNZ TW 00 120.781100 23.179400 15.496461 1.025417 0.119897 0.000000 1762415095.81170 0 1 2
STYH HNZ TW 10 120.781100 23.179400 96.797573 3.153878 0.271083 0.000000 1762415095.07170 2 1 3
WCKO HNZ TW 00 120.604700 23.438500 9.334240 0.517593 0.034019 0.000000 1762415095.90170 1 1 2
WTP EHZ TW 10 120.622300 23.243800 1004.265246 7.347056 1.292337 1.348287 1762415092.70170 3 2 5
WTP HLZ TW 10 120.622300 23.243800 378.271671 6.894540 1.044318 0.000000 1762415093.76170 0 1 4
```

## Go 語言版

```
Subscribed to topic: receive
Will publish to topic test
mqtt initialized.
CHY HLZ TW 10 120.432500 23.496300 0.244422 0.080514 0.094786 0.000000 1762414769.79720 3 1 2
CHY HLZ TW 10 120.432500 23.496300 0.244422 0.080514 0.094786 0.000000 1762414769.79720 3 1 3
CHY HLZ TW 10 120.432500 23.496300 0.244422 0.080514 0.094786 0.000000 1762414769.79720 3 1 4
CHY HLZ TW 10 120.432500 23.496300 0.244422 0.080514 0.094786 0.000000 1762414769.79720 3 1 5
CHY HLZ TW 10 120.432500 23.496300 0.244422 0.080514 0.094786 0.000000 1762414769.79720 3 1 6
CHY HLZ TW 10 120.432500 23.496300 0.244422 0.080514 0.094786 0.000000 1762414769.79720 3 1 7
CHY HLZ TW 10 120.432500 23.496300 0.244422 0.080514 0.094786 0.000000 1762414769.79720 3 1 8
CHY HLZ TW 10 120.432500 23.496300 0.244422 0.080514 0.094786 0.000000 1762414769.79720 3 1 9
WTP EHZ TW 10 120.622300 23.243800 53.601320 1.646657 0.062660 0.300932 1762414797.91720 3 2 2
WTP EHZ TW 10 120.622300 23.243800 68.892866 1.906573 0.108546 0.356668 1762414797.91720 3 2 3
WTP HLZ TW 10 120.622300 23.243800 61.313319 1.712840 0.124823 0.000000 1762414798.97720 0 1 2
SGS HLZ TW 10 120.590800 23.080400 20.948626 0.682799 0.056234 0.000000 1762414799.01720 3 1 2
WTP EHZ TW 10 120.622300 23.243800 315.404709 6.477064 0.135972 0.325964 1762414797.91720 3 2 4
WTP HLZ TW 10 120.622300 23.243800 378.271671 6.294043 0.484735 0.000000 1762414798.97720 0 1 3
STYH HNZ TW 10 120.781100 23.179400 66.606460 1.523737 0.271083 0.000000 1762414800.28720 2 1 2
SGS HLZ TW 10 120.590800 23.080400 49.851106 2.326381 0.173817 0.000000 1762414799.01720 3 1 3
WCKO HHZ TW 00 120.604700 23.438500 6.232092 0.278439 0.034758 0.834868 1762414800.99720 1 2 2
WCKO HNZ TW 10 120.604700 23.438500 34.114343 1.512604 0.089592 0.000000 1762414801.14720 1 1 2
STYH HNZ TW 00 120.781100 23.179400 15.496461 1.025417 0.119897 0.000000 1762414801.02720 0 1 2
STYH HNZ TW 10 120.781100 23.179400 96.797573 3.153878 0.271083 0.000000 1762414800.28720 2 1 3
WCKO HNZ TW 00 120.604700 23.438500 9.334240 0.517593 0.034019 0.000000 1762414801.11720 1 1 2
WTP EHZ TW 10 120.622300 23.243800 1004.265246 7.347056 1.292337 1.348287 1762414797.91720 3 2 5
WTP HLZ TW 10 120.622300 23.243800 378.271671 6.894540 1.044318 0.000000 1762414798.97720 0 1 4
```

## 比較結果

```
laiyongdian@NCL-composer:~/pickResult$ diff <(awk '{ $11 = ""; print }' standard) <(awk '{ $11 = ""; print }' mygo)
0a1,3
> Subscribed to topic: receive
> Will publish to topic test
> mqtt initialized.
laiyongdian@NCL-composer:~/pickResult$
```

(除 Go 語言初始訊息外，完全相同)

2025/01/20, 每 500 筆數據為一封包：

## 標準 (C 語言版)

```
WTP EHZ TW 10 120.622300 23.243800 53.601320 1.646657 0.062660 0.300930 1762417006.13980 3 2 2
WTP HLZ TW 10 120.622300 23.243800 43.226195 1.574356 0.172656 0.000000 1762417006.21980 3 1 2
SGS HLZ TW 10 120.590800 23.080400 20.948665 0.682890 0.049357 0.000000 1762417007.22980 3 1 2
WTP EHZ TW 10 120.622300 23.243800 68.892866 1.906573 0.108545 0.356667 1762417006.13980 3 2 3
WTP EHZ TW 10 120.622300 23.243800 315.404709 6.477064 0.135972 0.325963 1762417006.13980 3 2 4
WTP HLZ TW 10 120.622300 23.243800 61.312477 1.711913 0.172656 0.000000 1762417006.21980 3 1 3
WTP HLZ TW 10 120.622300 23.243800 378.271795 6.293546 0.513432 0.000000 1762417006.21980 3 1 4
STYH HNZ TW 10 120.781100 23.179400 66.606378 1.522675 0.211328 0.000000 1762417008.50980 2 1 2
STYH HNZ TW 10 120.781100 23.179400 96.797859 3.154901 0.211328 0.000000 1762417008.50980 2 1 3
STYH HNZ TW 10 120.781100 23.179400 164.559825 5.845648 0.661714 0.000000 1762417008.50980 2 1 4
CHY HHZ TW 00 120.432500 23.496300 13.262197 0.386176 0.041273 0.932263 1762417010.71980 1 2 2
SGS HLZ TW 10 120.590800 23.080400 49.851174 2.326540 0.177754 0.000000 1762417007.22980 3 1 3
SGS HLZ TW 10 120.590800 23.080400 51.822611 3.098114 0.366896 0.000000 1762417007.22980 3 1 4
SGS HLZ TW 10 120.590800 23.080400 83.583037 5.228773 0.820060 0.000000 1762417007.22980 3 1 5
SGS HLZ TW 10 120.590800 23.080400 124.827964 6.503193 1.208582 0.000000 1762417007.22980 3 1 6
WCKO HNZ TW 00 120.604700 23.438500 9.334481 0.519708 0.154699 0.000000 1762417009.33980 1 1 2
WCKO HNZ TW 00 120.604700 23.438500 15.918061 0.549226 0.154699 0.000000 1762417009.33980 1 1 3
WCKO HNZ TW 00 120.604700 23.438500 15.918061 0.596204 0.154699 0.000000 1762417009.33980 1 1 4
```

## Go 語言版

```
Subscribed to topic: receive
Will publish to topic test
mqtt initialized.
WTP EHZ TW 10 120.622300 23.243800 53.601320 1.646657 0.062660 0.300932 1762416756.85661 3 2 2
WTP HLZ TW 10 120.622300 23.243800 43.226195 1.574356 0.172656 0.000000 1762416756.93661 3 1 2
SGS HLZ TW 10 120.590800 23.080400 20.948665 0.682890 0.049357 0.000000 1762416757.94661 3 1 2
WTP EHZ TW 10 120.622300 23.243800 68.892866 1.906573 0.108546 0.356668 1762416756.85661 3 2 3
WTP EHZ TW 10 120.622300 23.243800 315.404709 6.477064 0.135972 0.325964 1762416756.85661 3 2 4
WTP HLZ TW 10 120.622300 23.243800 61.312477 1.711913 0.172656 0.000000 1762416756.93661 3 1 3
WTP HLZ TW 10 120.622300 23.243800 378.271795 6.293546 0.513432 0.000000 1762416756.93661 3 1 4
STYH HNZ TW 10 120.781100 23.179400 66.606378 1.522675 0.211328 0.000000 1762416759.22661 2 1 2
STYH HNZ TW 10 120.781100 23.179400 96.797859 3.154901 0.211328 0.000000 1762416759.22661 2 1 3
STYH HNZ TW 10 120.781100 23.179400 164.559825 5.845648 0.661714 0.000000 1762416759.22661 2 1 4
CHY HHZ TW 00 120.432500 23.496300 13.262197 0.386176 0.041275 0.932332 1762416761.43661 1 2 2
SGS HLZ TW 10 120.590800 23.080400 49.851174 2.326540 0.177754 0.000000 1762416757.94661 3 1 3
SGS HLZ TW 10 120.590800 23.080400 51.822611 3.098114 0.366896 0.000000 1762416757.94661 3 1 4
SGS HLZ TW 10 120.590800 23.080400 83.583037 5.228773 0.820060 0.000000 1762416757.94661 3 1 5
SGS HLZ TW 10 120.590800 23.080400 124.827964 6.503193 1.208582 0.000000 1762416757.94661 3 1 6
WCKO HNZ TW 00 120.604700 23.438500 9.334481 0.519708 0.154699 0.000000 1762416760.05661 1 1 2
WCKO HNZ TW 00 120.604700 23.438500 15.918061 0.549226 0.154699 0.000000 1762416760.05661 1 1 3
WCKO HNZ TW 00 120.604700 23.438500 15.918061 0.596204 0.154699 0.000000 1762416760.05661 1 1 4
```

## 比較結果

```
laiyongdian@NCL-composer:~/pickResult$ diff <(awk '{ $11 = ""; print }' standard) <(awk '{ $11 = ""; print }' mygo)
1c1,4
< WTP EHZ TW 10 120.622300 23.243800 53.601320 1.646657 0.062660 0.300930 3 2 2
---
> Subscribed to topic: receive
> Will publish to topic test
> mqtt initialized.
> WTP EHZ TW 10 120.622300 23.243800 53.601320 1.646657 0.062660 0.300932 3 2 2
4,5c7,8
< WTP EHZ TW 10 120.622300 23.243800 68.892866 1.906573 0.108545 0.356667 3 2 3
< WTP EHZ TW 10 120.622300 23.243800 315.404709 6.477064 0.135972 0.325963 3 2 4
---
> WTP EHZ TW 10 120.622300 23.243800 68.892866 1.906573 0.108546 0.356668 3 2 3
> WTP EHZ TW 10 120.622300 23.243800 315.404709 6.477064 0.135972 0.325964 3 2 4
11c14
< CHY HHZ TW 00 120.432500 23.496300 13.262197 0.386176 0.041273 0.932263 1 2 2
---
> CHY HHZ TW 00 120.432500 23.496300 13.262197 0.386176 0.041275 0.932332 1 2 2
```

(測站完全相同，但計算出的結果有些許不同)

2025/06/11, 每 100 筆數據為一封包：

## 標準 (C 語言版)

```
EHYH HNZ TW 10 121.345100 23.493800 74.751749 2.635736 0.203679 0.000000 1762418910.78989 0 1 2
ECB HLZ TW 10 121.451200 23.316300 30.541928 2.576445 0.294301 0.000000 1762418910.47989 0 1 2
CHKH HNZ TW 10 121.395700 23.191700 17.364746 0.603592 0.088276 0.000000 1762418911.29989 2 1 2
CHKH HNZ TW 00 121.395700 23.191700 2.944323 0.274283 0.051352 0.000000 1762418911.13989 0 1 2
EHYH HNZ TW 10 121.345100 23.493800 74.751749 2.635736 0.203679 0.000000 1762418910.78989 0 1 3
EGC HLZ TW 10 121.547500 23.707800 26.310139 1.128825 0.163128 0.000000 1762418911.87989 0 1 2
ECB HLZ TW 10 121.451200 23.316300 30.541928 2.576445 0.294301 0.000000 1762418910.47989 0 1 3
EGFH HNZ TW 00 121.427400 23.668800 13.953347 1.251536 0.175422 0.000000 1762418911.42989 0 1 2
EGFH HNZ TW 10 121.427400 23.668800 29.077904 1.567096 0.172950 0.000000 1762418911.57989 0 1 2
CHKH HNZ TW 10 121.395700 23.191700 18.497097 0.603592 0.088276 0.000000 1762418911.29989 2 1 3
EHD HHZ TW 00 121.206100 23.148800 2.592122 0.112336 0.019135 1.830970 1762418912.54989 0 2 2
ESL EHZ TW 10 121.441500 23.812100 22.380158 2.365720 0.295050 0.788952 1762418912.71989 0 2 2
SHUL HNZ TW 00 121.562700 23.787500 2.358242 0.241158 0.039446 0.000000 1762418912.78989 0 1 2
YUS HLZ TW 10 120.950000 23.483300 26.484427 1.469714 0.294548 0.000000 1762418912.81989 0 1 2
CHKH HNZ TW 00 121.395700 23.191700 3.415912 0.274283 0.051352 0.000000 1762418911.13989 0 1 3
EHD HHZ TW 00 121.206100 23.148800 2.568907 0.117955 0.024927 0.000000 1762418912.56989 0 1 2
ESL HLZ TW 10 121.441500 23.812100 11.179673 0.586785 0.060817 0.000000 1762418912.71989 1 1 2
YUS EHZ TW 10 120.950000 23.483300 27.630293 1.006145 0.077865 0.405295 1762418912.80989 0 2 2
EHYH HNZ TW 10 121.345100 23.493800 74.751749 2.635736 0.203679 0.000000 1762418910.78989 0 1 4
CHK HLZ TW 10 121.373000 23.097800 8.558548 0.306512 0.023417 0.000000 1762418912.25989 1 1 2
EGC HLZ TW 10 121.547500 23.707800 26.310139 1.128825 0.163128 0.000000 1762418911.87989 0 1 3
ECB HLZ TW 10 121.451200 23.316300 30.541928 2.576445 0.294301 0.000000 1762418910.47989 0 1 4
```

## Go 語言版

```
Subscribed to topic: receive
Will publish to topic test
mqtt initialized.
EHYH HNZ TW 10 121.345100 23.493800 74.751749 2.635736 0.203679 0.000000 1762418454.47774 0 1 2
ECB HLZ TW 10 121.451200 23.316300 30.541928 2.576445 0.294301 0.000000 1762418454.16774 0 1 2
CHKH HNZ TW 10 121.395700 23.191700 17.364746 0.603592 0.088276 0.000000 1762418454.98774 2 1 2
CHKH HNZ TW 00 121.395700 23.191700 2.944323 0.274283 0.051352 0.000000 1762418454.82774 0 1 2
EHYH HNZ TW 10 121.345100 23.493800 74.751749 2.635736 0.203679 0.000000 1762418454.47774 0 1 3
EGC HLZ TW 10 121.547500 23.707800 26.310139 1.128825 0.163128 0.000000 1762418455.56774 0 1 2
ECB HLZ TW 10 121.451200 23.316300 30.541928 2.576445 0.294301 0.000000 1762418454.16774 0 1 3
EGFH HNZ TW 00 121.427400 23.668800 13.953347 1.251536 0.175422 0.000000 1762418455.11774 0 1 2
EGFH HNZ TW 10 121.427400 23.668800 29.077904 1.567096 0.172950 0.000000 1762418455.26774 0 1 2
CHKH HNZ TW 10 121.395700 23.191700 18.497097 0.603592 0.088276 0.000000 1762418454.98774 2 1 3
EHD HHZ TW 00 121.206100 23.148800 2.592122 0.112336 0.019135 1.830970 1762418456.23774 0 2 2
ESL EHZ TW 10 121.441500 23.812100 22.380158 2.365720 0.295050 0.788952 1762418456.40774 0 2 2
SHUL HNZ TW 00 121.562700 23.787500 2.358242 0.241158 0.039446 0.000000 1762418456.47774 0 1 2
YUS HLZ TW 10 120.950000 23.483300 26.484427 1.469714 0.294548 0.000000 1762418456.50774 0 1 2
CHKH HNZ TW 00 121.395700 23.191700 3.415912 0.274283 0.051352 0.000000 1762418454.82774 0 1 3
EHD HNZ TW 00 121.206100 23.148800 2.568907 0.117955 0.024927 0.000000 1762418456.25774 0 1 2
ESL HLZ TW 10 121.441500 23.812100 11.179673 0.586785 0.060817 0.000000 1762418456.40774 1 1 2
YUS EHZ TW 10 120.950000 23.483300 27.630293 1.006145 0.077865 0.405295 1762418456.49774 0 2 2
EHYH HNZ TW 10 121.345100 23.493800 74.751749 2.635736 0.203679 0.000000 1762418454.47774 0 1 4
CHK HLZ TW 10 121.373000 23.097800 8.558548 0.306512 0.023417 0.000000 1762418455.94774 1 1 2
EGC HLZ TW 10 121.547500 23.707800 26.310139 1.128825 0.163128 0.000000 1762418455.56774 0 1 3
ECB HLZ TW 10 121.451200 23.316300 30.541928 2.576445 0.294301 0.000000 1762418454.16774 0 1 4
```

## 比較結果

```
laiyongdian@NCL-composer:~/pickResult$ diff <(awk '{\$11 = ""; print}' standard) <(awk '{\$11 = ""; print}' mygo)
0a1,3
> Subscribed to topic: receive
> Will publish to topic test
> mqtt initialized.
laiyongdian@NCL-composer:~/pickResult$
```

(除 Go 語言初始訊息外，完全相同)

2025/06/11, 每 500 筆數據為一封包：

## 標準 (C 語言版)

```

CHK HLZ TW 10 121.373000 23.097800 0.340022 0.698458 0.733224 0.000000 1762420083.10426 3 1 2
CHK HLZ TW 10 121.373000 23.097800 0.340022 0.698458 1.067866 0.000000 1762420083.10426 3 1 3
CHK HLZ TW 10 121.373000 23.097800 0.340022 0.698458 1.163687 0.000000 1762420083.10426 3 1 4
CHK HLZ TW 10 121.373000 23.097800 0.340022 0.698458 1.163687 0.000000 1762420083.10426 3 1 5
CHK HLZ TW 10 121.373000 23.097800 0.340022 0.698458 1.163687 0.000000 1762420083.10426 3 1 6
CHK HLZ TW 10 121.373000 23.097800 0.340022 0.698458 1.163687 0.000000 1762420083.10426 3 1 7
CHK HLZ TW 10 121.373000 23.097800 0.340022 0.698458 1.163687 0.000000 1762420083.10426 3 1 8
CHK HLZ TW 10 121.373000 23.097800 0.340022 0.698458 1.163687 0.000000 1762420083.10426 3 1 9
EHYH HNZ TW 10 121.345100 23.493800 74.751434 2.636825 0.229105 0.000000 1762420100.66426 0 1 2
EHYH HNZ TW 10 121.345100 23.493800 74.751434 2.636825 0.229105 0.000000 1762420100.66426 0 1 3
YUS EHZ TW 10 120.950000 23.483300 27.630293 1.006145 0.077865 0.405295 1762420102.68426 0 2 2
EHD HHZ TW 00 121.206100 23.148800 2.592122 0.112336 0.019135 1.830962 1762420102.42426 0 2 2
SHUL HNZ TW 00 121.562700 23.787500 2.358251 0.241259 0.039588 0.000000 1762420102.66426 0 1 2
SHUL HNZ TW 00 121.562700 23.787500 2.358251 0.241259 0.039588 0.000000 1762420102.66426 0 1 3
CHKH HNZ TW 00 121.395700 23.191700 2.942434 0.280456 0.261286 0.000000 1762420101.01426 0 1 2
CHKH HNZ TW 00 121.395700 23.191700 3.413695 0.280456 0.261286 0.000000 1762420101.01426 0 1 3
CHKH HNZ TW 00 121.395700 23.191700 3.413695 0.280456 0.261286 0.000000 1762420101.01426 0 1 4
EHD HNZ TW 00 121.206100 23.148800 2.568163 0.123065 0.052231 0.000000 1762420102.43426 0 1 2
EHD HNZ TW 00 121.206100 23.148800 2.568163 0.179898 0.052231 0.000000 1762420102.43426 0 1 3
EDH HHZ TW 00 121.303900 22.972500 1.608581 0.084916 0.017886 1.754630 1762420103.80426 0 2 2
EGC HLZ TW 10 121.547500 23.707800 26.310502 1.127680 0.137528 0.000000 1762420101.75426 0 1 2

```

## Go 語言版

```

Subscribed to topic: receive
Will publish to topic test
mqtt initialized.
CHK HLZ TW 10 121.373000 23.097800 0.340022 0.698458 0.733224 0.000000 1762419898.09048 3 1 2
CHK HLZ TW 10 121.373000 23.097800 0.340022 0.698458 1.067866 0.000000 1762419898.09048 3 1 3
CHK HLZ TW 10 121.373000 23.097800 0.340022 0.698458 1.163687 0.000000 1762419898.09048 3 1 4
CHK HLZ TW 10 121.373000 23.097800 0.340022 0.698458 1.163687 0.000000 1762419898.09048 3 1 5
CHK HLZ TW 10 121.373000 23.097800 0.340022 0.698458 1.163687 0.000000 1762419898.09048 3 1 6
CHK HLZ TW 10 121.373000 23.097800 0.340022 0.698458 1.163687 0.000000 1762419898.09048 3 1 7
CHK HLZ TW 10 121.373000 23.097800 0.340022 0.698458 1.163687 0.000000 1762419898.09048 3 1 8
CHK HLZ TW 10 121.373000 23.097800 0.340022 0.698458 1.163687 0.000000 1762419898.09048 3 1 9
EHYH HNZ TW 10 121.345100 23.493800 74.751434 2.636825 0.229105 0.000000 1762419915.65048 0 1 2
EHYH HNZ TW 10 121.345100 23.493800 74.751434 2.636825 0.229105 0.000000 1762419915.65048 0 1 3
YUS EHZ TW 10 120.950000 23.483300 27.630293 1.006145 0.077865 0.405295 1762419917.67048 0 2 2
EHD HHZ TW 00 121.206100 23.148800 2.592122 0.112336 0.019135 1.830962 1762419917.41048 0 2 2
SHUL HNZ TW 00 121.562700 23.787500 2.358251 0.241259 0.039588 0.000000 1762419917.65048 0 1 2
SHUL HNZ TW 00 121.562700 23.787500 2.358251 0.241259 0.039588 0.000000 1762419917.65048 0 1 3
CHKH HNZ TW 00 121.395700 23.191700 2.942434 0.280456 0.261286 0.000000 1762419916.00048 0 1 2
CHKH HNZ TW 00 121.395700 23.191700 3.413695 0.280456 0.261286 0.000000 1762419916.00048 0 1 3
CHKH HNZ TW 00 121.395700 23.191700 3.413695 0.280456 0.261286 0.000000 1762419916.00048 0 1 4
EHD HNZ TW 00 121.206100 23.148800 2.568163 0.123065 0.052231 0.000000 1762419917.42048 0 1 2
EHD HNZ TW 00 121.206100 23.148800 2.568163 0.179898 0.052231 0.000000 1762419917.42048 0 1 3
EDH HHZ TW 00 121.303900 22.972500 1.608581 0.084917 0.017886 1.754636 1762419918.79048 0 2 2
EGC HLZ TW 10 121.547500 23.707800 26.310502 1.127680 0.137528 0.000000 1762419916.74048 0 1 2

```

## 比較結果

```

laiyongdian@NCL-composer:~/pickResult$ diff <(awk '{ $11 = ""; print }' standard) <(awk '{ $11 = ""; print }' mygo)
0a1,3
> Subscribed to topic: receive
> Will publish to topic test
> mqtt initialized.
20c23
< EDH HHZ TW 00 121.303900 22.972500 1.608581 0.084916 0.017886 1.754630 0 2 2
---
> EDH HHZ TW 00 121.303900 22.972500 1.608581 0.084917 0.017886 1.754636 0 2 2

```

(測站完全相同，但計算出的結果有些許不同)

2025/08/27, 每 100 筆數據為一封包：

標準 (C 語言版)

```

EGS EHZ TW 10 121.943700 24.842700 0.740735 0.033735 0.004457 1.116262 1762422067.21578 0 2 2
TIPB HHZ TW 10 121.825600 24.971900 0.765767 0.022320 0.003479 1.585754 1762422067.21578 0 2 2
ILA HNZ TW 00 121.756300 24.763800 5.579298 0.266012 0.045938 0.000000 1762422067.62578 1 1 2
NOU HLZ TW 10 121.766000 25.151300 0.727499 0.026983 0.006506 0.000000 1762422067.58578 1 1 2
ILA HHZ TW 00 121.756300 24.763800 1.563439 0.069340 0.014428 2.173693 1762422067.63578 2 2 2
NHDH HNZ TW 00 121.525222 24.959572 4.014582 0.195080 0.023543 0.000000 1762422068.09578 0 1 2
ILA EHZ TW 10 121.756300 24.763800 4.761888 0.089103 0.006159 0.659167 1762422067.70578 2 2 2
EGS EHZ TW 10 121.943700 24.842700 0.740735 0.033735 0.004457 1.104784 1762422067.23578 1 2 3
ZUZH HNZ TW 00 121.544700 25.162100 1.105929 0.064775 0.009520 0.000000 1762422068.25578 1 1 2
ESA HNZ TW 00 121.843900 24.575700 465.233093 98.487670 29.131753 1.929550 1762422068.31578 1 1 2
TIPB HHZ TW 10 121.825600 24.971900 0.765767 0.022320 0.003479 1.601618 1762422067.21578 0 2 3
ILA HNZ TW 00 121.756300 24.763800 5.579298 0.266012 0.045938 0.000000 1762422067.62578 1 1 3
EWT HNZ TW 10 121.778300 24.445300 23.757783 0.395718 0.039818 0.000000 1762422068.89578 1 1 2
NOU HLZ TW 10 121.766000 25.151300 1.030858 0.026983 0.006506 0.000000 1762422067.58578 1 1 3
ENA EHZ TW 10 121.749000 24.426300 11.699201 0.259924 0.026395 0.902771 1762422068.77578 1 2 2
ILA HHZ TW 00 121.756300 24.763800 1.563439 0.069340 0.014428 2.001426 1762422067.63578 2 2 3
ZUZH HNZ TW 00 121.544700 25.162100 3.187616 0.083303 0.008421 0.000000 1762422068.43578 1 1 2
NDS HHZ TW 00 121.716800 24.634000 2.767782 0.266346 0.039473 1.363796 1762422068.27578 0 2 2
ESA HNZ TW 10 121.843900 24.575700 10.661889 0.161999 0.020631 0.000000 1762422068.41578 3 1 2
EWT HNZ TW 00 121.778300 24.445300 1.328362 0.077143 0.015829 0.000000 1762422068.75578 1 1 2
NSK HLZ TW 10 121.366400 24.673500 1.651948 0.041416 0.008734 0.000000 1762422068.79578 1 1 2
NHDH HNZ TW 00 121.525222 24.959572 4.014582 0.195080 0.023543 0.000000 1762422068.09578 0 1 3
ILA EHZ TW 10 121.756300 24.763800 4.761888 0.089103 0.006159 0.610499 1762422067.70578 2 2 3

```

## Go 語言版

```

Subscribed to topic: receive
Will publish to topic test
mqtt initialized.
EGS EHZ TW 10 121.943700 24.842700 0.740735 0.033735 0.004457 1.116262 1762421959.24230 1 2 2
TIPB HHZ TW 10 121.825600 24.971900 0.765767 0.022320 0.003479 1.585754 1762421959.22230 0 2 2
ILA HNZ TW 00 121.756300 24.763800 5.579298 0.266012 0.045938 0.000000 1762421959.63230 1 1 2
NOU HLZ TW 10 121.766000 25.151300 0.727499 0.026983 0.006506 0.000000 1762421959.59230 1 1 2
ILA HHZ TW 00 121.756300 24.763800 1.563439 0.069340 0.014428 2.173693 1762421959.64230 2 2 2
NHDH HNZ TW 00 121.525222 24.959572 4.014582 0.195080 0.023543 0.000000 1762421960.10230 0 1 2
ILA EHZ TW 10 121.756300 24.763800 4.761888 0.089103 0.006159 0.659167 1762421959.71230 2 2 2
EGS EHZ TW 10 121.943700 24.842700 0.740735 0.033735 0.004457 1.104784 1762421959.24230 1 2 3
ZUZH HNZ TW 00 121.544700 25.162100 1.105929 0.064775 0.009520 0.000000 1762421960.26230 1 1 2
ESA HNZ TW 00 121.843900 24.575700 465.233093 98.487670 29.131753 1.929550 1762421960.32229 1 1 2
TIPB HHZ TW 10 121.825600 24.971900 0.765767 0.022320 0.003479 1.601618 1762421959.22230 0 2 3
ILA HNZ TW 00 121.756300 24.763800 5.579298 0.266012 0.045938 0.000000 1762421959.63230 1 1 3
EWT HNZ TW 10 121.778300 24.445300 23.757783 0.395718 0.039818 0.000000 1762421960.90230 1 1 2
NOU HLZ TW 10 121.766000 25.151300 1.030858 0.026983 0.006506 0.000000 1762421959.59230 1 1 3
ENA EHZ TW 10 121.749000 24.426300 11.699201 0.259924 0.026395 0.902771 1762421960.78230 1 2 2
ILA HHZ TW 00 121.756300 24.763800 1.563439 0.069340 0.014428 2.001426 1762421959.64230 2 2 3
ZUZH HNZ TW 10 121.544700 25.162100 3.187616 0.083303 0.008421 0.000000 1762421960.44230 1 1 2
NDS HHZ TW 00 121.716800 24.634000 2.767782 0.266346 0.039473 1.363796 1762421960.28229 0 2 2
ESA HNZ TW 10 121.843900 24.575700 10.661889 0.161999 0.020631 0.000000 1762421960.42230 3 1 2
EWT HNZ TW 00 121.778300 24.445300 1.328362 0.077143 0.015829 0.000000 1762421960.76230 1 1 2
NSK HLZ TW 10 121.366400 24.673500 1.651948 0.041416 0.008734 0.000000 1762421960.80230 1 1 2
NHDH HNZ TW 00 121.525222 24.959572 4.014582 0.195080 0.023543 0.000000 1762421960.10230 0 1 3
ILA EHZ TW 10 121.756300 24.763800 4.761888 0.089103 0.006159 0.610499 1762421959.71230 2 2 3

```

## 比較結果

```

laiyongdian@NCL-composer:~/pickResult$ diff <(awk '{ $11 = ""; print }' standard) <(awk '{ $11 = ""; print }' mygo)
0a1,3
> Subscribed to topic: receive
> Will publish to topic test
> mqtt initialized.
laiyongdian@NCL-composer:~/pickResult$

```

(除 Go 語言初始訊息外，完全相同)

2025/08/27, 每 500 筆數據為一封包：

標準 (C 語言版)

```

TIPB HHZ TW 10 121.825600 24.971900 0.765767 0.022320 0.003479 1.585749 1762423879.10856 0 2 2
EWT HHZ TW 10 121.778300 24.445300 23.757256 0.392736 0.042100 0.000000 1762423880.78856 1 1 2
EGS EHZ TW 10 121.943700 24.842700 0.740735 0.033735 0.004457 1.116247 1762423879.12856 1 2 2
EGS EHZ TW 10 121.943700 24.842700 0.740735 0.033735 0.004457 1.104772 1762423879.12856 1 2 3
ILA HHZ TW 00 121.756300 24.763800 5.581525 0.280211 0.040937 0.000000 1762423879.51856 1 1 2
ILA HHZ TW 00 121.756300 24.763800 5.581525 0.280211 0.040937 0.000000 1762423879.51856 1 1 3
ILA HHZ TW 00 121.756300 24.763800 5.581525 0.280211 0.042038 0.000000 1762423879.51856 1 1 4
ENA EHZ TW 10 121.749000 24.426300 11.699201 0.259924 0.026395 0.900170 1762423880.67856 1 2 2
ENA EHZ TW 10 121.749000 24.426300 11.699201 0.265846 0.030946 0.924956 1762423880.67856 1 2 3
ILA HHZ TW 00 121.756300 24.763800 1.563439 0.069340 0.014428 2.173712 1762423879.52856 2 2 2
ILA HHZ TW 00 121.756300 24.763800 1.563439 0.069340 0.014428 2.001439 1762423879.52856 2 2 3
ILA HHZ TW 00 121.756300 24.763800 1.563439 0.069340 0.014428 1.944698 1762423879.52856 2 2 4
ZUZH HHZ TW 10 121.544700 25.162100 3.187717 0.083881 0.008079 0.000000 1762423880.32856 1 1 2
ZUZH HHZ TW 10 121.544700 25.162100 3.187717 0.083881 0.008079 0.000000 1762423880.32856 1 1 3
EWT HHZ TW 00 121.778300 24.445300 1.327443 0.082176 0.017730 0.000000 1762423880.64856 1 1 2
EWT HHZ TW 00 121.778300 24.445300 1.327443 0.082176 0.017730 0.000000 1762423880.64856 1 1 3
NHDH HHZ TW 00 121.525222 24.959572 4.014582 0.195080 0.023543 0.000000 1762423879.98856 0 1 2
NHDH HHZ TW 00 121.525222 24.959572 4.014582 0.195080 0.023543 0.000000 1762423879.98856 0 1 3
NHDH HHZ TW 00 121.525222 24.959572 4.014582 0.195080 0.023543 0.000000 1762423879.98856 0 1 4
ESA HHZ TW 00 121.843900 24.575700 465.233093 98.487669 29.131753 1.929550 1762423880.20856 1 1 2

```

## Go 語言版

```

Subscribed to topic: receive
Will publish to topic test
mqtt initialized.
TIPB HHZ TW 10 121.825600 24.971900 0.765767 0.022320 0.003479 1.585749 1762423781.62650 0 2 2
EWT HHZ TW 10 121.778300 24.445300 23.757256 0.392736 0.042100 0.000000 1762423783.30650 1 1 2
EGS EHZ TW 10 121.943700 24.842700 0.740735 0.033735 0.004457 1.116271 1762423781.64650 1 2 2
EGS EHZ TW 10 121.943700 24.842700 0.740735 0.033735 0.004457 1.104789 1762423781.64650 1 2 3
ILA HHZ TW 00 121.756300 24.763800 5.581525 0.280211 0.040937 0.000000 1762423782.03650 1 1 2
ILA HHZ TW 00 121.756300 24.763800 5.581525 0.280211 0.040937 0.000000 1762423782.03650 1 1 3
ILA HHZ TW 00 121.756300 24.763800 5.581525 0.280211 0.042038 0.000000 1762423782.03650 1 1 4
ENA EHZ TW 10 121.749000 24.426300 11.699201 0.259924 0.026395 0.900170 1762423783.19650 1 2 2
ENA EHZ TW 10 121.749000 24.426300 11.699201 0.265846 0.030946 0.924956 1762423783.19650 1 2 3
ILA HHZ TW 00 121.756300 24.763800 1.563439 0.069340 0.014428 2.173706 1762423782.04650 2 2 2
ILA HHZ TW 00 121.756300 24.763800 1.563439 0.069340 0.014428 2.001435 1762423782.04650 2 2 3
ILA HHZ TW 00 121.756300 24.763800 1.563439 0.069340 0.014428 1.944694 1762423782.04650 2 2 4
ZUZH HHZ TW 10 121.544700 25.162100 3.187717 0.083881 0.008079 0.000000 1762423782.84650 1 1 2
ZUZH HHZ TW 10 121.544700 25.162100 3.187717 0.083881 0.008079 0.000000 1762423782.84650 1 1 3
EWT HHZ TW 00 121.778300 24.445300 1.327443 0.082176 0.017730 0.000000 1762423783.16650 1 1 2
EWT HHZ TW 00 121.778300 24.445300 1.327443 0.082176 0.017730 0.000000 1762423783.16650 1 1 3
NHDH HHZ TW 00 121.525222 24.959572 4.014582 0.195080 0.023543 0.000000 1762423782.50650 0 1 2
NHDH HHZ TW 00 121.525222 24.959572 4.014582 0.195080 0.023543 0.000000 1762423782.50650 0 1 3
NHDH HHZ TW 00 121.525222 24.959572 4.014582 0.195080 0.023543 0.000000 1762423782.50650 0 1 4
ESA HHZ TW 00 121.843900 24.575700 465.233093 98.487669 29.131753 1.929550 1762423782.72650 1 1 2

```

## 比較結果

```

laiyongdian@NCL-composer:~/pickResult$ diff <(awk '{ $11 = ""; print }' standard) <(awk '{ $11 = ""; print }' mygo)
0a1,3
> Subscribed to topic: receive
> Will publish to topic test
> mqtt initialized.
3,4c6,7
< EGS EHZ TW 10 121.943700 24.842700 0.740735 0.033735 0.004457 1.116247 1 2 2
< EGS EHZ TW 10 121.943700 24.842700 0.740735 0.033735 0.004457 1.104772 1 2 3
---
> EGS EHZ TW 10 121.943700 24.842700 0.740735 0.033735 0.004457 1.116271 1 2 2
> EGS EHZ TW 10 121.943700 24.842700 0.740735 0.033735 0.004457 1.104789 1 2 3

```

(測站完全相同，但計算出的結果有些許不同)

每 100 筆數據為一封包的結果完全吻合，每 500 筆數據為一封包的結果僅在數據上有些微差異。

接著，比對 tcpd 產生的報告：

2025/01/20, 每 100 筆數據為一封包：

標準 (C 語言版)

```
laiyongdian@NCL-composer:~/earthworm/run_working/params$ cat 20251106074501_n3.rep
Reporting time 2025/11/06 07:45:01.82 averr=0.7 Q=-4 Gap=72 Avg_wei=0.5 n=17 n_c=11, n_m=5, Padj=1.4 no_eq=8
year month day hour min sec lat lon dep Mall Mpd_s Mpv Mpd Mtc process_time f
2025 11 6 7 44 51.92 23.2632 120.5297 10.00 6.03 0.00 0.00 6.62 5.45 9.90
```

Go 語言版

```
laiyongdian@NCL-composer:~/tcpd/earthworm/run/params$ cat 20251106074008_n3.rep
Reporting time 2025/11/06 07:40:08.63 averr=0.7 Q=-3 Gap=69 Avg_wei=0.5 n=26 n_c=15, n_m=10, Padj=1.4 no_eq=40
year month day hour min sec lat lon dep Mall Mpd_s Mpv Mpd Mtc process_time f
2025 11 6 7 39 56.62 23.2793 120.5440 20.00 6.14 0.00 0.00 6.73 5.55 12.01
```

震央位置比較



2025/01/20, 每 500 筆數據為一封包：

標準 (C 語言版)

```
laiyongdian@NCL-composer:~/earthworm/run_working/params$ cat 20251106081656_n3.rep
Reporting time 2025/11/06 08:16:56.16 averr=0.8 Q=-6 Gap=112 Avg_wei=0.6 n=16 n_c=10, n_m=6, Padj=0.7 no_ed
year month day hour min sec lat lon dep Mall Mpd_s Mpv Mpd Mtc process_time
2025 11 6 8 16 45.10 23.3078 120.5630 20.00 6.14 0.00 0.00 6.95 5.34 11.06
```

Go 語言版

```
laiyongdian@NCL-composer:~/tcpd/earthworm/run/params$ cat 20251106081256_n3.rep
Reporting time 2025/11/06 08:12:56.78 averr=0.5 Q=-3 Gap=58 Avg_wei=0.6 n=38 n_c=24, n_m=18, Padj=1.9 no_ed
year month day hour min sec lat lon dep Mall Mpd_s Mpv Mpd Mtc process_time
2025 11 6 8 12 35.30 23.2463 120.5396 20.00 6.60 0.00 0.00 6.66 6.54 21.47
```

震央位置比較



2025/06/11, 每 100 筆數據為一封包：

標準 (C 語言版)

```
laiyongdian@NCL-composer:~/earthworm/run_working/params$ cat 20251106084840_n3.rep
Reporting time 2025/11/06 08:48:40.23 averr=0.7 Q=-3 Gap=183 Avg_wei=0.6 n=20 n_c=10, n_m=7, Padj=0.8 no_e
year month day hour min sec lat lon dep Ma|l Mpd_s Mpv Mpd Mtc process_time
2025 11 6 8 48 25.33 23.3822 121.4625 20.00 6.59 0.00 0.00 6.52 6.66 14.90
```

Go 語言版

```
laiyongdian@NCL-composer:~/tcpd/earthworm/run/params$ cat 20251106084109_n3.rep
Reporting time 2025/11/06 08:41:09.01 averr=0.8 Q=-3 Gap=190 Avg_wei=0.5 n=28 n_c=18, n_m=11, Padj=1.6 no_e
year month day hour min sec lat lon dep Ma|l Mpd_s Mpv Mpd Mtc process_time
2025 11 6 8 40 48.96 23.4101 121.4902 20.00 6.48 0.00 0.00 6.85 6.11 20.05
```

震央位置比較



2025/06/11, 每 500 筆數據為一封包：

標準 (C 語言版)

```
laiyongdian@NCL-composer:~/earthworm/run_working/params$ cat 20251106090827_n3.rep
Reporting time 2025/11/06 09:08:27.88 averr=0.8 Q=-6 Gap=141 Avg_wei=0.5 n=15 n_c=11, n_m=6, Padj=0.7 no_e
year month day hour min sec lat lon dep Mall Mpd_s Mpv Mpd Mtc process_time
2025 11 6 9 8 15.15 23.4734 121.4221 30.00 6.97 0.00 0.00 6.92 7.01 12.73
```

Go 語言版

```
laiyongdian@NCL-composer:~/tcpd/earthworm/run/params$ cat 20251106090523_n3.rep
Reporting time 2025/11/06 09:05:23.22 averr=0.7 Q=-6 Gap=165 Avg_wei=0.6 n=11 n_c=8, n_m=4, Padj=0.9 no_e
year month day hour min sec lat lon dep Mall Mpd_s Mpv Mpd Mtc process_time
2025 11 6 9 5 10.93 23.5583 121.4121 40.00 6.98 0.00 0.00 6.98 0.00 12.29
```

震央位置比較



2025/08/27, 每 100 筆數據為一封包：

標準 (C 語言版)

```
laiyongdian@NCL-composer:~/earthworm/run_working/params$ cat 20251106094120_n3.rep
Reporting time 2025/11/06 09:41:20.00 averr=0.7 Q=-6 Gap=117 Avg_wei=0.5 n=13 n_c=8, n_m=7, Padj=2.0 no_eq=
year month day hour min sec lat lon dep Mall Mpd_s Mpv Mpd Mtc process_time
2025 11 6 9 41 2.09 24.7520 121.6716 20.00 5.75 0.00 0.00 5.68 5.82 17.90
```

Go 語言版

```
laiyongdian@NCL-composer:~/tcpd/earthworm/run/params$ cat 20251106093939_n3.rep
Reporting time 2025/11/06 09:39:39.69 averr=0.8 Q=-6 Gap=119 Avg_wei=0.5 n=30 n_c=21, n_m=20, Padj=3.4 no_eq=
year month day hour min sec lat lon dep Mall Mpd_s Mpv Mpd Mtc process_time
2025 11 6 9 39 10.61 24.8029 121.6256 70.00 6.16 0.00 0.00 6.24 6.09 29.08
```

震央位置比較



2025/08/27, 每 500 筆數據為一封包：

標準 (C 語言版)

```
laiyongdian@NCL-composer:~/earthworm/run_working/params$ cat 20251106101133_n3.rep
Reporting time 2025/11/06 10:11:33.08 averr=0.5 Q=-8 Gap=118 Avg_wei=0.7 n=23 n_c=13, n_m=12, Padj=2.9 no_e
year month day hour min sec lat lon dep Mall Mpd_s Mpv Mpd Mtc process_time
2025 11 6 10 11 11.12 24.6589 121.6609 70.00 6.79 0.00 0.00 6.10 7.48 21.96
```

Go 語言版

```
laiyongdian@NCL-composer:~/tcpd/earthworm/run/params$ cat 20251106101001_n3.rep
Reporting time 2025/11/06 10:10:01.11 averr=0.4 Q=-4 Gap=196 Avg_wei=0.5 n=29 n_c=20, n_m=19, Padj=3.4 no_e
year month day hour min sec lat lon dep Mall Mpd_s Mpv Mpd Mtc process_time
2025 11 6 10 9 30.63 24.8787 121.8498 90.00 6.52 0.00 0.00 6.39 6.65 30.48
```

震央位置比較



對比標準版本與氣象署之公告，結果在可接受範圍內。至此，確認 pick\_eww 已經成功以 Go 語言改寫。

## 伍、奇特現象：測站數據打包與地震發報時效性之關聯

在上一章節，2025/06/11 的地震，從 tcpd 報告的 process time (從推估的地震發生時間起，至報告產生經過的時間) 中，發現每 500 筆數據為一封包的情況下，產生報告所花時間卻比每 100 筆數據為一封包要來得短。對於採樣率固定為 100 Hz 的事實來說，這樣的情況不合常理。於是，我們重播了更多地震，又發現兩個地震有此種現象，分別是 UTC 2025/01/22 11:55:43.92 ML 4.95 與 UTC 2025/01/02 01:51:33.62 ML 4.08 的地震。

2025/01/22, 每 100 筆數據為一封包：

```
laiyongdian@NCL-composer:~/earthworm/run_working/params$ cat 20251107051400_n3.rep
Reporting time 2025/11/07 05:14:00.70 averr=0.8 Q=-2 Gap=164 Avg_wei=0.4 n=19 n_c=14, n_m=10, Padj=1.1 no ec
year month day hour min sec lat lon dep Mall Mpd_s Mpv Mpd Mtc process_time
2025 11 7 5 13 41.49 23.8011 121.4742 20.00 4.99 0.00 0.00 5.23 4.74 19.21
```

2025/01/22, 每 500 筆數據為一封包：

```
laiyongdian@NCL-composer:~/earthworm/run_working/params$ cat 20251107052314_n3.rep
Reporting time 2025/11/07 05:23:14.04 averr=0.2 Q=-2 Gap=204 Avg_wei=0.8 n=10 n_c=7, n_m=4, Padj=0.3 no ec
year month day hour min sec lat lon dep Mall Mpd_s Mpv Mpd Mtc process_time
2025 11 7 5 23 3.76 23.7797 121.3816 10.00 6.17 0.00 0.00 6.17 0.00 10.28
```

2025/01/02, 每 100 筆數據為一封包：

```
laiyongdian@NCL-composer:~/earthworm/run_working/params$ cat 20251106110601_n3.rep
Reporting time 2025/11/06 11:06:01.72 averr=0.5 Q=-4 Gap=216 Avg_wei=0.7 n=19 n_c=14, n_m=10, Padj=2.1 no ec
year month day hour min sec lat lon dep Mall Mpd_s Mpv Mpd Mtc process_time
2025 11 6 11 5 41.92 23.6222 121.6074 30.00 4.96 0.00 0.00 5.00 4.92 19.80
```

2025/01/02, 每 500 筆數據為一封包：

```
laiyongdian@NCL-composer:~/earthworm/run_working/params$ cat 20251106111534_n3.rep
Reporting time 2025/11/06 11:15:34.87 averr=0.8 Q=-6 Gap=120 Avg_wei=0.6 n=13 n_c=10, n_m=7, Padj=0.7 no ec
year month day hour min sec lat lon dep Mall Mpd_s Mpv Mpd Mtc process_time
2025 11 6 11 15 18.22 23.6940 121.5049 30.00 4.59 0.00 0.00 5.82 3.36 16.65
```

對此，我們展開更多的研究，比如於另一台規格全然不同的電腦中實驗，發現

情況依舊存在；而這三個地震規模有相當大的落差 (6.42、4.95、4.08) ，顯然此現象與地震規模無關；但這三個地震的震央十分接近 (如下圖) ，於是以緯度 23.4 至 23.8，經度 121.4 至 121.6 為界，重播幾個震央在此範圍內的地震，但並未觀察到此現象，顯示震央位置並不會直接導致此現象發生。最後，我們在最佳化 pick\_eww 最後一步之前 (也就是 pick\_eww 還保持著 2024 年的演算法) ，發現在重播這三個地震時，此現象消失了 (也就是每 100 筆數據為一封包的情況下，產生報告所花時間比每 500 筆數據為一封包短)，不同之處僅為 pick\_eww 輸出的測站資料。也就是說，對於相同的地震資料，經由 pick\_eww 挑選出不同的資料傳送給 tcpd 程式計算後，不僅會影響報告的結果，還可能大幅增加或減少產生報告所需時間，這種處理時間的巨大落差不應該出現。而 pick\_eww 的演算法與 tcpd 的報告內容具特別目的，為了消除這個現象而改動它們等於放棄原本的目標，因此我們後續的研究對象便鎖定在 tcpd 的資料接收與運作機制。



我們未來會繼續研究 tcpd 程式，力求找出問題癥結點與消除此現象。

## 陸、結論、建議、與成果價值:

本研究計畫的主要成果有二。其一為針對佈署在單一主機上的地震預警系統提出了一套分散式多機的架構，實現了地震預警系統從本地端 MQTT/Shared Memory 架構向 Kubernetes 容器編排平台的遷移，並建立了具備容錯能力的三節點 EMQX Broker 分散式架構。此外透過 RKE2 與 Rancher 的部署，系統獲得了更高的可靠性與彈性，同時解決了原有架構中單點故障的風險。

研究成果顯示，容器化後的系統在功能正確性上與本地端 EARTHWORM 完全一致，使用 2025 年 5 月 5 日歷史地震資料測試，產生的 REP 經緯度及 Mpd 數值完全吻合。更重要的是，在容錯能力測試中，系統展現出優異的故障恢復能力。未來研究可以進一步驗證不同故障場景下的系統穩定性，以完善整體容錯機制的評估。此研究為關鍵基礎設施系統的雲原生化轉型提供了重要參考，證明了 Kubernetes 容器編排技術在高可靠性、低延遲要求的即時系統中的適用性與優勢。

本研究計畫的第二項主要成果，在於實現了完全基於 Golang 語言實作的 pick\_ew 地震預警系統模組。此外，我們也觀察到現行系統中一項奇特的系統行為，就是在測站產生數據頻率維持一樣的條件下，在某些地震事件中，測站打包發送資料數據的頻率愈高（每 100 筆數據傳送一次 vs. 每 500 筆數據傳送一次），地震預警的時效性反而愈差，且差距可能達到好幾秒鐘。我們認為必須認真看待此現象，敝實驗室也會持續分析造成此現象的原因，以其改善地震預警系統的時效性。

本研究計畫的成果價值，除了提供氣象署地震中心實質有用的程式碼與系統配置建議以外，參與執行本計畫的敝實驗室研究團隊也從中得益，不只累積了系統層級的實務經驗，也達到了研發人才訓練的目的。於此，特別感謝氣象署地震中心提供此研究合作機會。

## 附錄 A

### RKE2 Server Leader 安裝及設定：

首先需要先關閉防火牆：

```
sudo systemctl disable --now ufw
```

接著進入管理者角色：

```
sudo su -
```

安裝 rke2 並指定啟動 Server 角色：

```
curl-sfL https://get.rke2.io | INSTALL_RKE2_CHANNEL=v1.28  
INSTALL_RKE2_TYPE=server sh -
```

這個操作的意思是下載 RKE2 的安裝腳本，並且在下載的同時，立即將該腳本內容傳送給 sh 執行。在執行時，指定 `INSTALL_RKE2_CHANNEL` 為 `v1.28` 且 `INSTALL_RKE2_TYPE` 為 `server`，以便腳本安裝 `v1.28` 版本的 RKE2 伺服器元件。

接著啟動服務並設定自動重啟，確認連線狀態：

```
systemctl enable --now rke2-server.service  
systemctl status rke2-server
```

接下來要取得 Token 金鑰：

```
cat /var/lib/rancher/rke2/server/node-token
```

新增 `/etc/rancher/rke2/config.yaml` 設定檔案：

```
mkdir /etc/rancher/rke2/
```

```
vim config.yaml
```

config.yaml 內容如下:

```
token: K10c75528e3b1ec31e2c30aa025e9fa744bbd846ca0be502a6d8f9f83c14e49a1aa::server:5286386f05fdb7be2541d07802a33dd1
tls-san:
- ncl1      #換成實體機名稱
```

再來需要建立符號連結:

```
ln -s $(find /var/lib/rancher/rke2/data/ -name kubect1) /usr/local/bin/kubect1
```

這個指令的意思是在 /var/lib/rancher/rke2/data/ 目錄下自動找出 kubect1 執行檔的實際位置,然後在 /usr/local/bin/ 目錄下建立一個名為 kubect1 的捷徑(符號連結)指向它,這樣做的主要目的是,讓使用者不需要記住或輸入 RKE2 安裝 kubect1 的完整複雜路徑,就能在終端機的任何地方直接輸入 kubect1 來操作 Kubernetes Cluster。

為了讓 kubect1 指令能正確找到 RKE2 叢集的設定檔,需要設定環境變數指向 rke2.yaml:

```
export KUBECONFIG=/etc/rancher/rke2/rke2.yaml
```

#注意: export 指令的效果只在當前的終端機視窗有效。如果關閉視窗或重新登入,這個變數會失效,需要重新執行

最後可以確認 nodes 狀態:

```
kubect1 get nodes
```

```
root@ncl1:~# kubect1 get nodes
NAME      STATUS    ROLES    AGE     VERSION
ncl1     Ready    control-plane,etcd,master  149d    v1.28.15+rke2r1
```

RKE2 Server 叢集安裝及設定:

步驟都跟前面一樣,執行到新增/etc/rancher/rke2/config.yaml 設定檔案這個步驟後,config.yaml 的設定要如下表示:

```
server: https://192.168.50.160:9345      #前面ip用leader的ip後面port固定9345
#token用leader的token
token: K10c75528e3b1ec31e2c30aa025e9fa744bbd846ca0be502a6d8f9f83c14e49a1aa::server:5286386f05fdb7be2541d07802a33dd1
tls-san:
- ncl1      #用leader的名稱
```

接著一樣跟前面執行步驟一樣最後確認部署狀態:

```

root@nc11:~# kubectl get nodes
NAME      STATUS   ROLES                                AGE    VERSION
nc11     Ready    control-plane,etcd,master           149d   v1.28.15+rke2r1
nc12     Ready    control-plane,etcd,high-memory,mas 148d   v1.28.15+rke2r1

```

Rancher 管理工具安裝：

安裝 Helm 套件：

```
curl -#L https://raw.githubusercontent.com/helm/helm/main/scripts/get-helm-3 | bash
```

建立 Helm 所需要的套件包：

```
helm repo add rancher-latest https://releases.rancher.com/server-charts/latest
helm repo add jetstack https://charts.jetstack.io
```

cert-manager 是一個用來自動管理和簽發 TLS/SSL 憑證的工具。Rancher 需要使用 HTTPS 加密連線，而 cert-manager 能在 Kubernetes 叢集中自動處理這些憑證問題。所以需要先安裝 cert-manager：

```
helm upgrade -i cert-manager jetstack/cert-manager -n certmanager --create-namespace
--set installCRDs=true
```

建立 Rancher：

```
helm upgrade -i rancher rancher-latest/rancher --create-namespace --namespace cattle-
system --set hostname=nc11 \--set bootstrapPassword=bootStrapAllTheThings --set
replicas=1
```

這邊需要注意的是 hostname 必須是 Node1-Server 所鍵入的 hostname。接下來即可在網頁輸入 hostname 網址來開啟 Rancher 畫面。