

出國報告(出國類別：研習)

赴加拿大地質調查所  
研習自動地震定位相關技術

服務機關：交通部中央氣象局

姓名職稱：竹子湖氣象站 陳燕玲 主任、

地震測報中心 賴姿心 技佐

派赴國家：加拿大

出國期間：108 年 10 月 27 日至 11 月 11 日

報告日期：109 年 1 月 6 日

## 摘要

臺灣地區的地震活動頻繁且複雜，目前中央氣象局地震測報中心例行微震觀測資料觸發與定位模式中，仍然需要大量人力介入地震事件擷取與波相挑選，又因為波相辨識需要經驗累積，缺乏時效性且資料品質因人而異，無法科學化處理，因此仍有改進的空間。

本次研習地點為加拿大自然资源部(Natural Resources Canada, NRCan)加拿大地質調查所(Geological Survey of Canada)之太平洋地球科學中心(Pacific Geoscience Centre, PGC)，其編制人數少，在處理地震資料的策略上以自動偵測及自動定位的目標為主，此次研習主要任務為參考與學習該所高弘教授所領導建立的地震活動自動監測掃描定位系統(Seismicity-Scanning based on Navigated Automatic Phase-picking ,S-SNAP)，以 2017 年 11 月 11 日規模 4.6 的中埔地震序列，選取臺灣時間 19 時至 20 時，15 個寬頻地震儀監測資料應用 S-SNAP 系統測試，1 小時資料能在 5 分鐘內偵測處理完，透過全自動地震定位得出 60 個地震，在各項參數初步調整下已經有合理的結果，可以提供未來系統進階發展非常好的起始模型。

期望未來能運用此次研習所測試的地震活動自動監測掃描定位系統，在臺灣地區逐步以小區域的子網方式發展，經測試能穩定偵測地震後，再將此系統運用到臺灣地區的觀測網。

## 目次

一、研習目的	4
二、研習行程	11
三、研習重點	14
四、研習成果	18
五、心得及建議	20
六、參考文獻	22

## 一、研習目的

臺灣地震網隨著測站密度逐漸提高，地震觀測範圍與效能亦逐步提升，2017 年 1 月 26 日於臺灣東北外海新增 3 座海纜式海底地震站，地震觀測網的有效觀測範圍更由陸上與近海向外延伸至東北外海，對於地震監測提供了更詳細且即時的觀測資料。

分析與評估臺灣地震觀測網自 1900 年至今的地震觀測資料，透由可完整觀測之最小完整規模隨時間之分布顯示，1935 年因地震站增加而最小完整規模由 5 進步到 4，1973 年臺灣遙記式地震監測網 (Taiwan Telemetered Seismograph Network, TTSN) 建置後，最小完整規模明顯由 4 進步到 3，且約 1980 年期間發生大量地震活動，最小完整規模幾近乎 2，但隨地震活動降低後，最小完整規模回復到 3。1991 年氣象局整合 TTSN 建置地震觀測網後，最小完整規模進步到 3 以下，1994 年將資料接收由觸發改為連續記錄模式後，最小完整規模進步到約 2；2004 年將資料取樣率由每秒 50 點增加到 100 點，提高在時序與頻率上的解析度，最小完整規模進步到 2 以下 (圖 1)，1991 年至 2011 年一共收錄 401,482 起地震，平均 1 年約 2 萬起地震 (圖 2)。

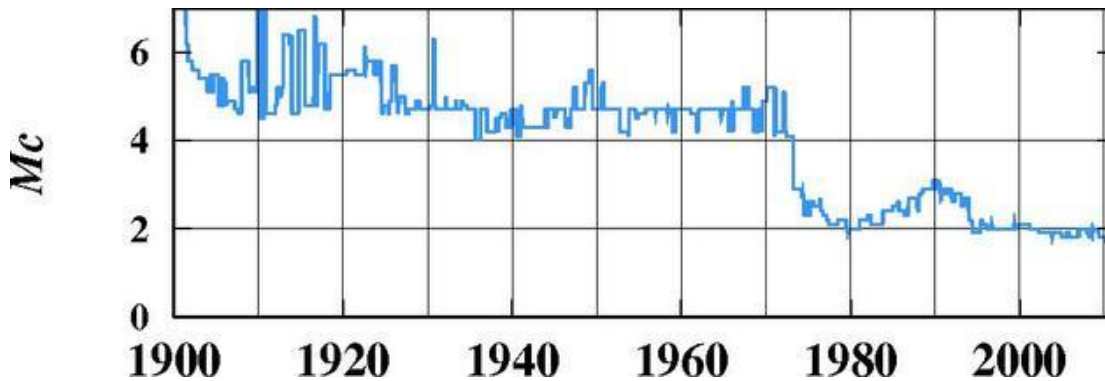


圖 1：地震觀測網之最小完整規模逐年精細。

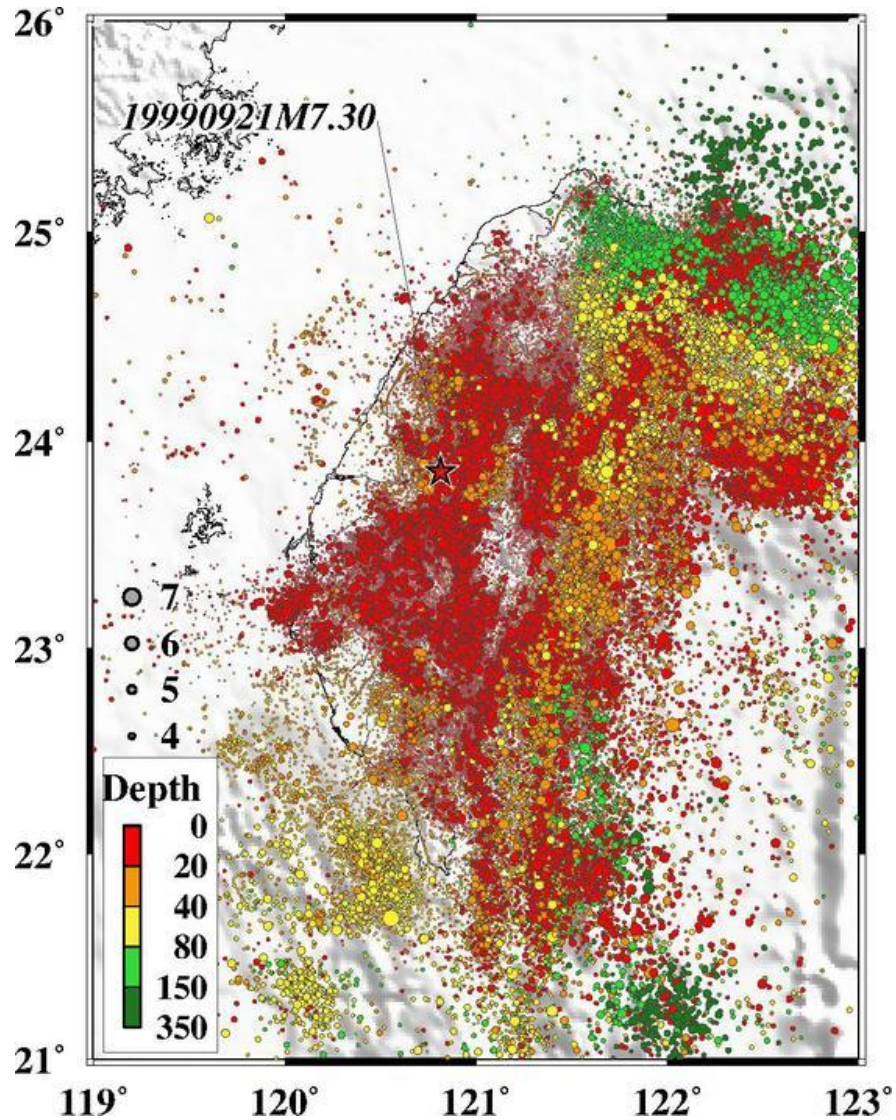


圖 2：1991 年至 2011 年一共收錄 401,482 起地震，平均 1 年約 2 萬起地震。

2012 年氣象局將地震波動震幅之動態範圍由 12 位元提升為 24 位元，避免了波形滿格問題，並兼具觀測強震與微震，同時提高在地震波動震幅的解析度，使得最小完整規模進步到約 1.5 以下，顯著提升地震觀測效能。2012 年後 24 位元地震觀測網至 2017 年共觀測到 241,980 起地震，平均每年 40,293 起地震，每日約 110 起地震，觀測效能提升可監測到更多且更細緻的地震活動分布(圖 3)，臺灣地震觀測網觀測每月偵測到更小的地震，效能也逐年提升(圖 4)。24 位元地震觀測網整合原有短周期地震觀測網，強震即時地震觀測網及寬頻地震觀測網，即時地震站整合後約 220 個站，且許多觀測儀器共站，約

整合了 434 套地震觀測儀器。所以相對於地震監測效能，每起地震的測站觸發數亦大幅提升，資料處理量亦是倍數成長(圖 5)。

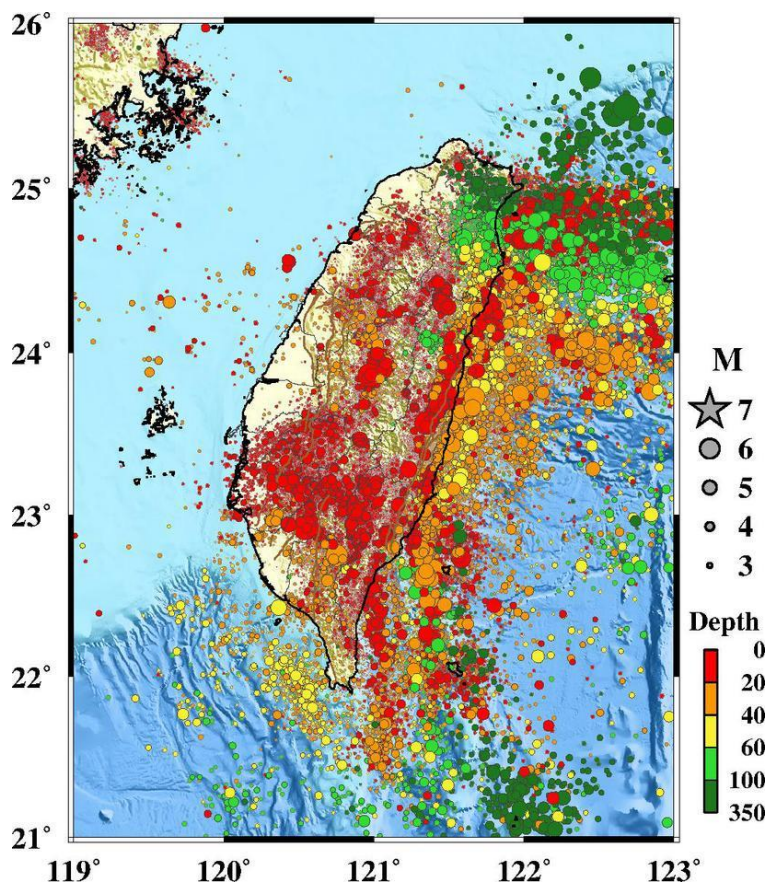


圖 3：2012 年至 2017 年一共收錄 241,980 起地震，平均一年 40,293 起地震，每日約 110 起地震。

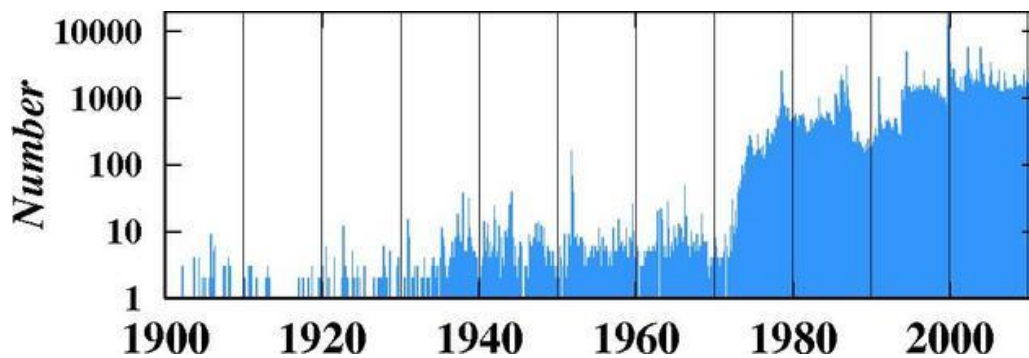


圖 4：臺灣地震觀測網觀測效能逐年提升。



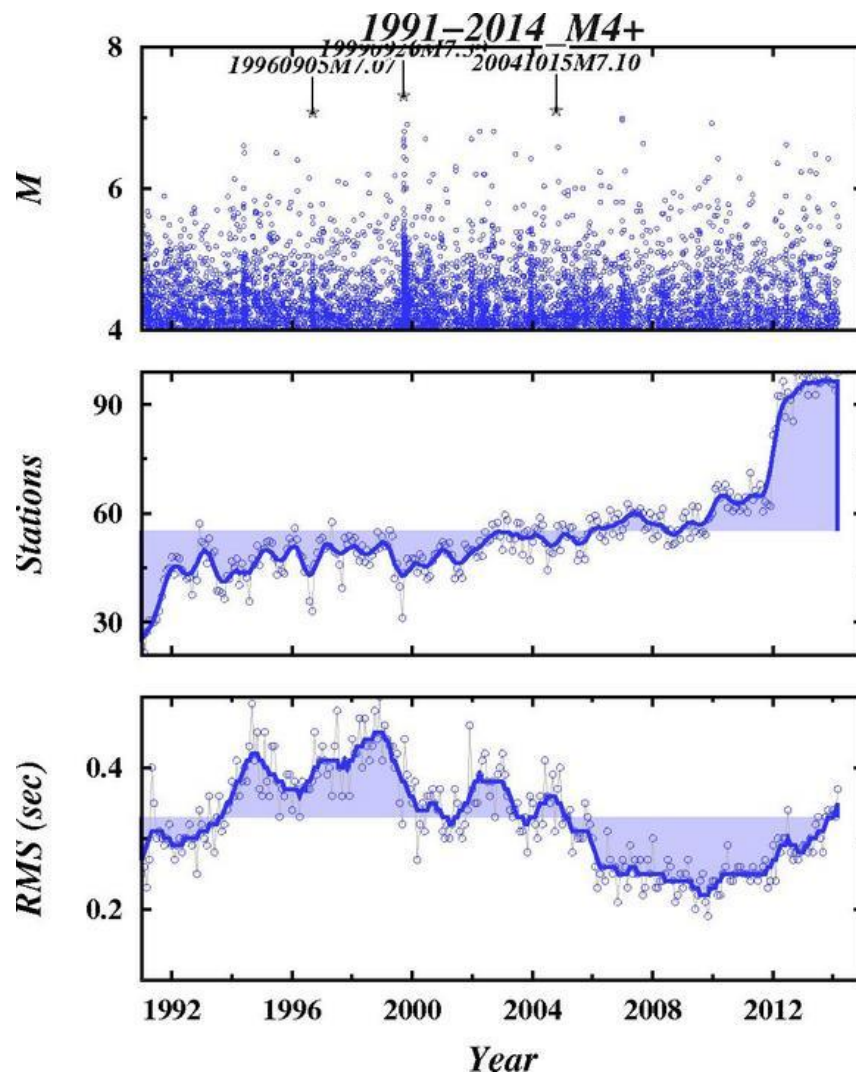


圖 5：1994 年至 2014 年觀測規模 4 以上地震，規模(上圖)、平均測站數(中圖)及最小均方根(RMS)(下圖)之時序分析圖。

由於目前氣象局地震測報中心例行微震觀測資料觸發與定位模式中，仍然需要大量人力介入地震事件擷取與波相挑選，因為波相辨識需要經驗累積，缺乏時效性且資料品質因人而異，無法科學化處理，因此仍有很大的進步空間。

本次研習地點為加拿大自然资源部(Natural Resources Canada, NRCan)加拿大地質調查所(Geological Survey of Canada)之太平洋地球科學中心(Pacific Geoscience Centre, PGC)，

主要任務為參考與學習該所高弘教授所領導建立的地震活動自動監測掃描定位系統 (Seismicity-Scanning based on Navigated Automatic Phase-picking ,S-SNAP)，該方法曾經應用在加拿大不列顛哥倫比亞省(British Columbia, BC)之地震序列，由於石油工業水壓裂解油頁岩，操作期間局部且密集觸發地震，高弘教授研究團隊以陣列式地震觀測網記錄資料進行測試，研究證明其較傳統方法更有效偵測地震。總體而言 S-SNAP 可偵測到的地震事件數量是原有地震目錄的 3.5 倍，並且比對地震目錄，地震參數正確無誤且定位品質穩定性高(圖 6)。

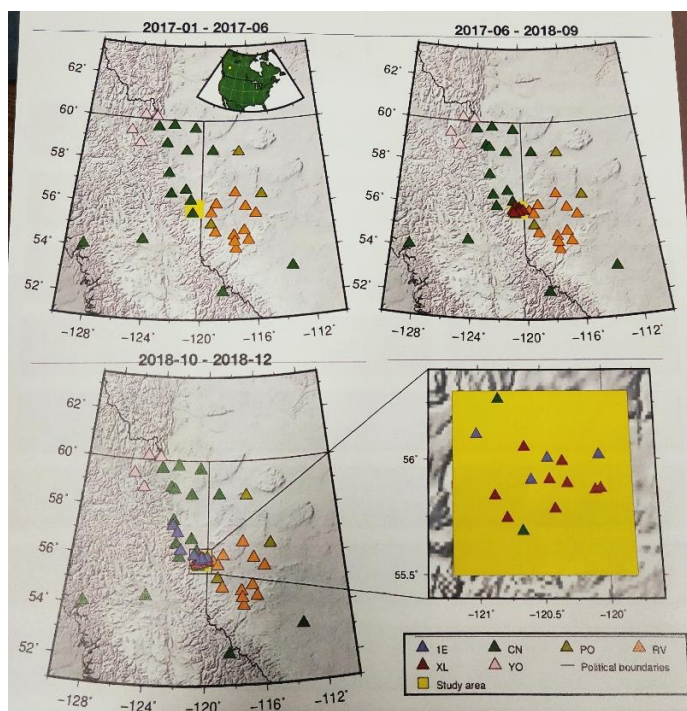


圖 6：加拿大不列顛哥倫比亞省(British Columbia, BC)石油工業水壓裂解油頁岩，操作範圍與密集觸發地震區域陣列式地震觀測網測站分布圖。

本次研習第 1 階段希望可以運用 S-SNAP 的震源掃描演算法(Surce-Scanning Algorithm, SSA)自動化的作業(圖 7)，取代原有作業中以人工目視截取地震事件的方式，並評估對比資料庫偵測率。第 2 階段參考 2 個系統波相辨識方法，S-SNAP 系統使用峰態係數波形選擇(kurtosis-based phase picking)，氣象局地震測報中心微震觀測系統使用赤池信息量準則(Akaike information criteria, AIC)，本階段將比較兩者效能的優劣性。第 3 階段參考兩個系統波相檢視後篩選相關波相進行震源參數的比較，並評估各項參數的誤差範圍。



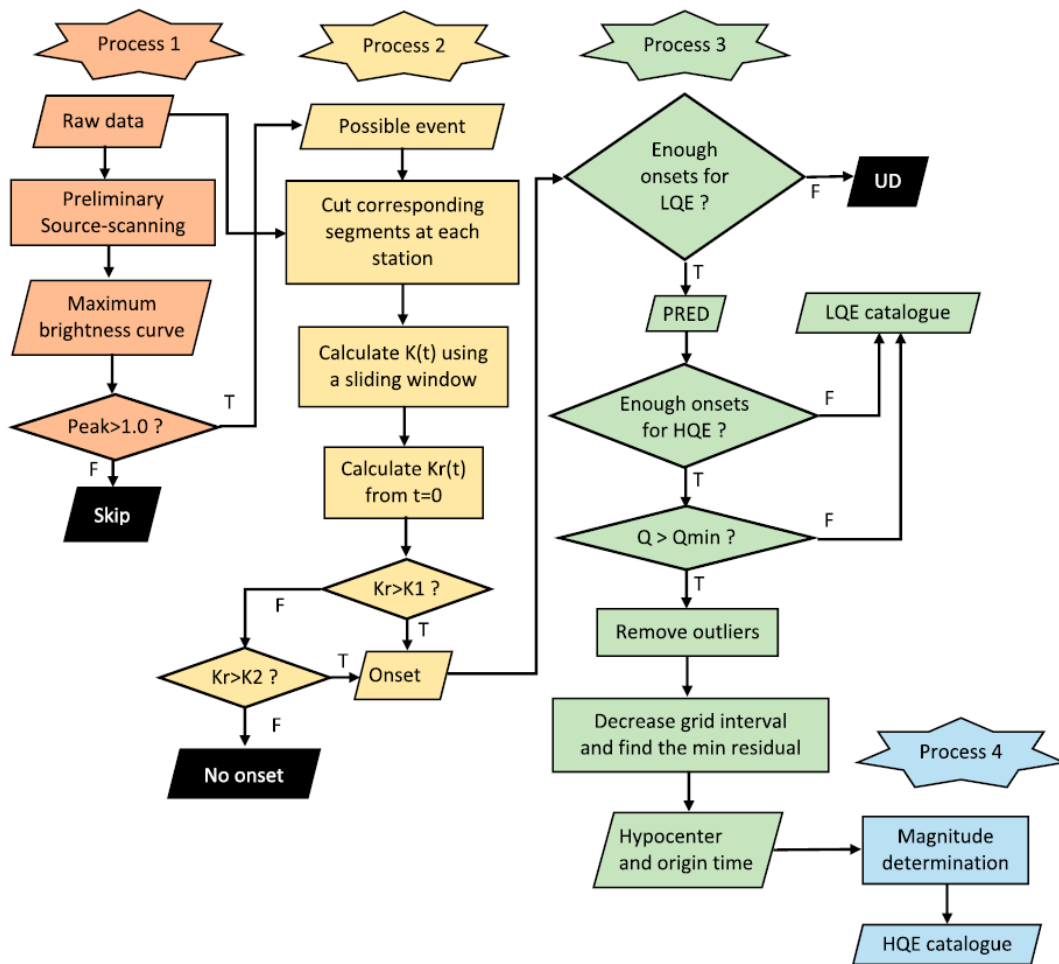


圖 7：地震活動自動監測掃描定位系統(Seismicity-Scanning based on Navigated Automatic Phase-picking (S-SNAP))流程圖(Tan et al., 2019)。

本研習另外一大重點是觀摩加拿大地質調查所高弘教授團隊研發中的系統，運用人工智能(Artificial Intelligence, AI)方法，使用卷積神經網路(Convolutional Neural Network, CNN)和時頻分析法(Time-Frequency Representation)檢測波相與偵測地震事件(圖 8)，希望能觀摩與學習關鍵技術，提供氣象局同仁做為自行研發的重要起點。

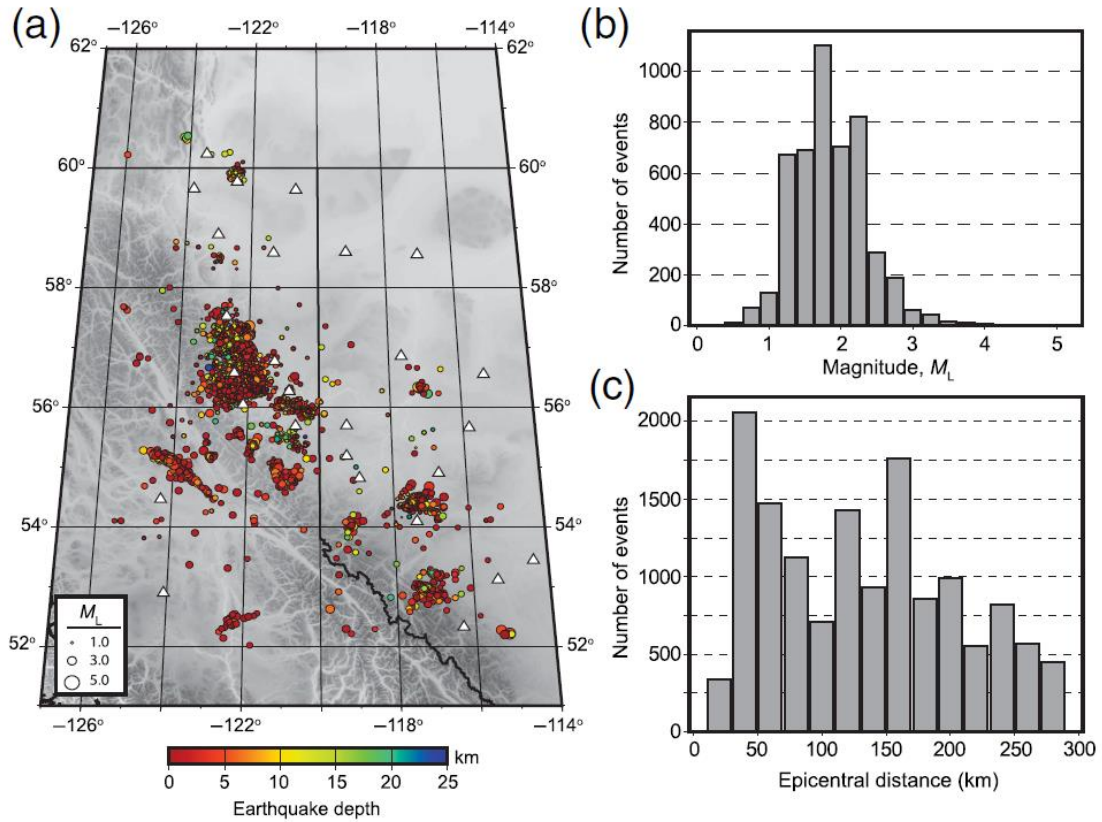


圖 8：運用卷積神經網路(Convolutional Neural Network, CNN)和時頻分析法(Time-Frequency Representation)檢測波相與偵測地震事件。(a)震央分布圖(圓)與地震測站分布圖(白色三角形)，(b)規模個數常態分布圖，(c)震央距與地震個數分布圖。(Dokht et al, 2019)。

## 二、研習行程

10/27(日)

- 啟程赴加拿大，臺灣時間 10 月 27 日 18:00 於臺灣桃園國際機場出發。
- 當地時間 16:45 抵達維多利亞機場。

10/28(一)

- 前往加拿大地質調查所太平洋地球科學中心(PGC)。
- 與高弘老師討論研究規劃與行程。
- 認識高弘老師研究室團隊成員及同事。
- 參加 PGC 同仁聚會。

10/29(二)

- 由 Ryan Visser 介紹 ISR 地震定位過程。
- 由 Ryan Visser 介紹不同地震定位方式(S-Snap, SeisComP3, PickAI)。
- 閱讀 S-Snap 與使用 AI 地震挑波及定位相關文獻。

10/30(三)

- 參與 PGC 中心邀請演講，由 Koichiro Obana 主講。
- 由文獻了解 S-Snap 地震偵測與地震定位流程。
- 準備臺灣地震資料(miniseed)、測站表(station list) 及一維速度模型。

10/31(四)

- 由 Ryan Visser 詳細解釋 S-Snap 程式碼架構與原理。
- 安裝 S-Snap 程式於筆記型電腦。
- 使用 S-Snap 程式測試加州地震產生全自動地震定位與地震目錄。
- 使用臺灣一維速度模型建立波傳時間表(travel-time table)。

11/1(五)

- 修改 S-Snap 程式供臺灣資料使用。
- 修改地震測站表。
- 嘗試使用 S-Snap 程式於臺灣 20171111 中埔地震序列。
- 發現 python numba 程式問題並排除。
- 初步得到臺灣 20171111 12:00-13:00 全自動地震定位與地震目錄結果。

11/4(一)

- 準備測站儀器響應檔(resp)供 AI 程式使用。
- 準備上週進度簡報檔。
- 參與高弘老師研究室會議。
- 與 Ramin Dokht 討論 AI 地震挑波所需資料。
- 討論小波轉換方法(Synchrosqueezing Wavelet Transform)。
- 提供臺灣地震資料(miniseed)、測站表(station list)及儀器響應檔給 Ramin Dokht 做測試。

11/5(二)

- 修改 S-Snap 程式格點參數及濾波範圍。
- 使用 S-Snap 程式於臺灣 20171111 主震 20:00-21:00 地震序列。
- 與 Ryan Visser 討論目前地震定位目錄成果。
- 改寫 S-Snap 程式讀井下寬頻地震儀資料。
- 使用 S-Snap 程式於臺灣寬頻地震儀資料偵測 20171111 地震序列。

11/6(三)

- 與 Ramin Dokht 討論使用 AI 地震定位的方法。
- 繪製地震定位與測站分布圖。
- 整理目前研究成果。
- 與高弘老師展示 S-Snap 定位成果。

11/7(四)

- 調整 S-Snap 程式濾波頻段。
- 修改 S-Snap 程式加入地表寬頻地震儀資料。
- 製作成果簡報。
- 調整 S-Snap 程式觸發門檻、格點大小。
- Ramin Dokht 使用臺灣 20171111 連續波型資料測試 AI 地震挑波與定位。

11/8(五)

- 參與 PGC coffee time，與會人員: Earl Davis、Tan Sun、Roy Hyndman、Andrew Schaefer、Garry Rogers、Honn Kao、John Cassidy、陳燕玲及賴姿心。
- 參觀 PGC 測站。
- 與 Ramin Dokht 討論門檻設定與初步 AI 地震定位結果。

11/10(日)

- 當地時間 09:00 於加拿大維多利亞國際機場出發，於臺灣時間 11/11 下午 16:20 抵達臺灣桃園國際機場。



### 三、研習重點

加拿大傳統地震的處理方法也需要人工檢視波相，與氣象局目前處理方式類似，其作業流程與 S-SNAP 的差異如圖 9，資料處理流程差異如圖 10。

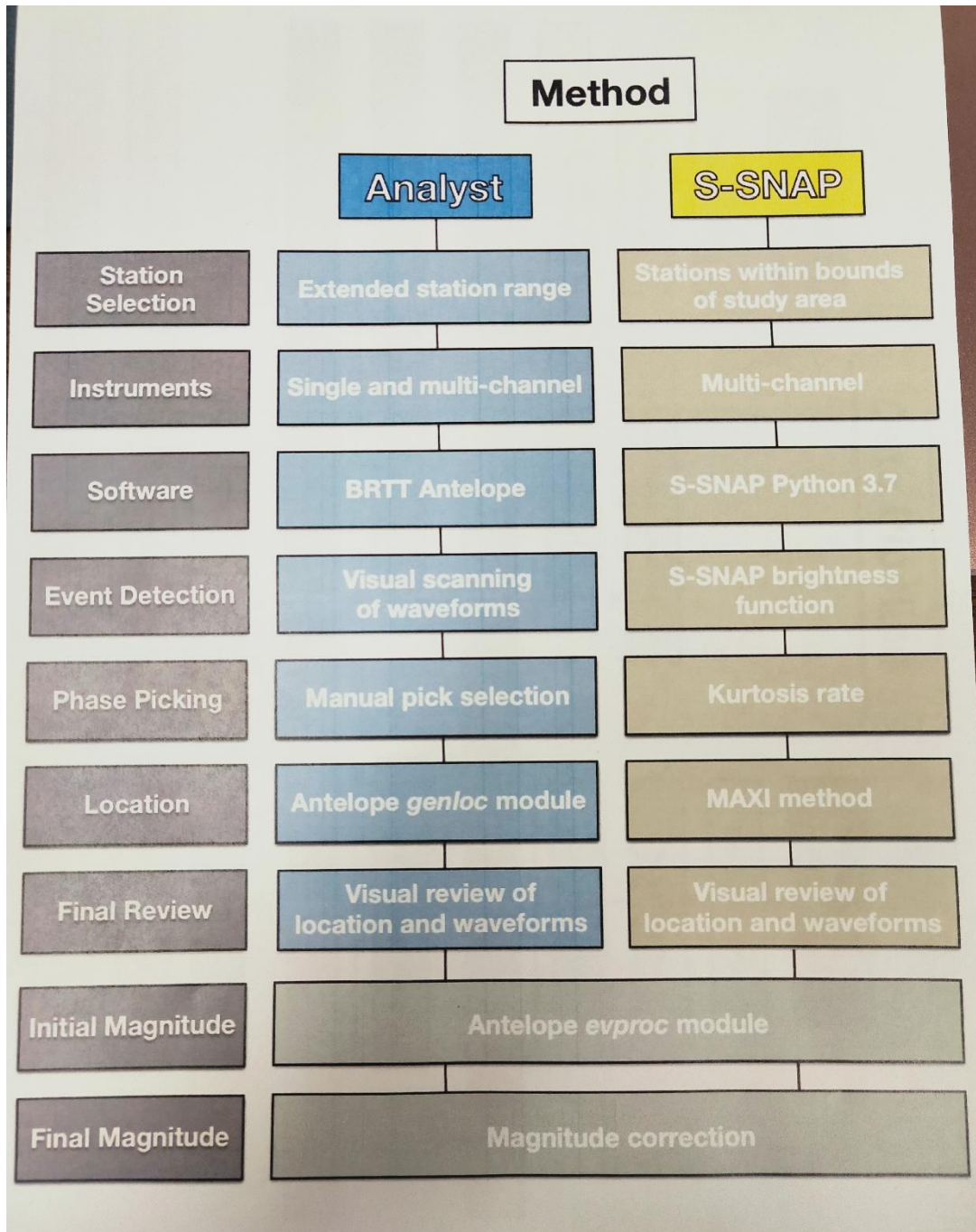


圖 9：加拿大傳統地震的處理方法(Analyst)與 S-SNAP 的流程差異 (資料來源:PGC)。

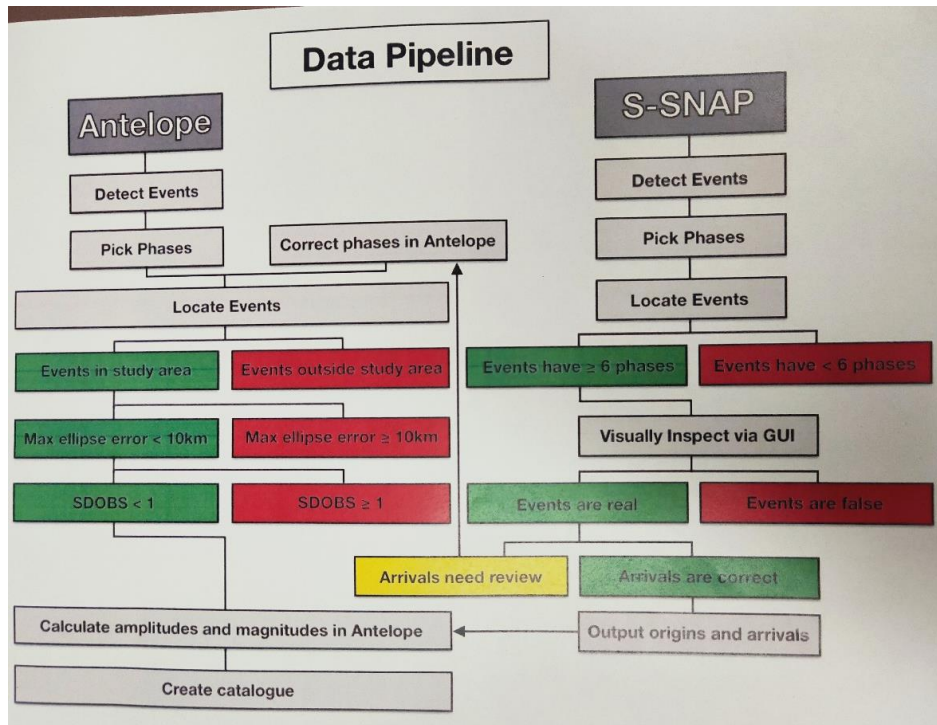


圖 10：加拿大傳統地震的處理方法 Analyst 與 S-SNAP 的流程處理流程差異(資料來源 PGC)。

高弘教授團隊目前地震定位流程有 3 套系統並行，分別為 SeisComp3、S-SNAP 及 PickAI，再分階段進行資料品質控制，最後計算地震規模，進入資料庫(圖 11)。

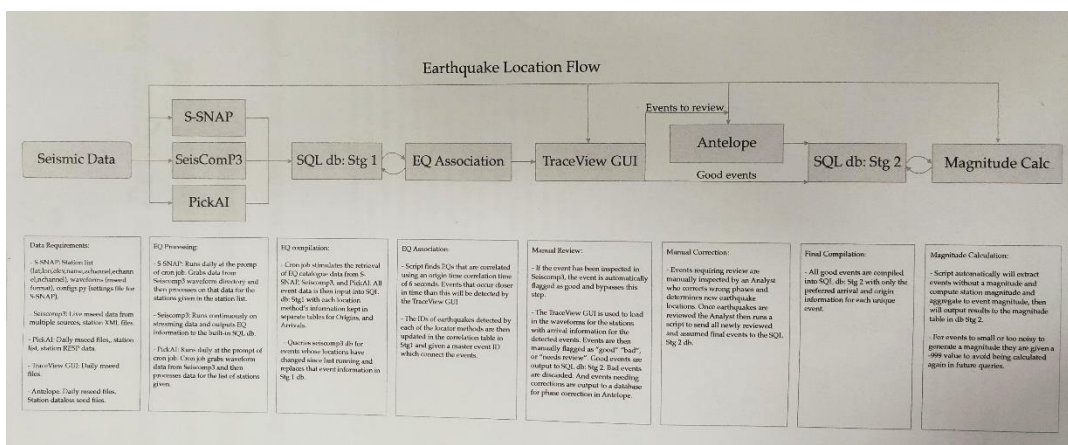


圖 11：高弘教授團隊地震定位流程(資料來源 PGC)。

(1) 地震活動自動監測掃描定位系統(Seismicity-Scanning based on Navigated Automatic Phase-picking ,S-SNAP) :

S-SNAP 包含 4 個主要過程(圖 7)。第 1 個是初步的震源掃描，改進自 SSA(Liao et al., 2012)，該方法考慮所有位置和時間組合可能的因素搜尋地震，然後使用此初步結果計算理論到時，在此有限的地震波段內進行 P 波和 S 波波相檢拾。第 2 個階段使用峰態係數挑選 P 波及 S 波(kurtosis-based P and S phase pickers)方法 (Baillard et al., 2014)，精確檢拾各波的到達時間。第 3 階段中使用 MAXI method(Font et al., 2004)定位地震。最後從各測站記錄波形的距離修正之傅立葉頻中，計算震矩規模  $M_w$ (Atkinson et al., 2008)，流程整理如下 4 點:

1. 初步的震源掃描(Preliminary Source Scanning)。
2. Kurtosis-Based 波相檢拾(Kurtosis-Based Phase Picking)。
3. 地震定位與到時殘差(Locating the Source via EDT Layers and Travel Time Residuals by MAXI method)。
4. 計算規模(Magnitude Determination)。

(2)卷積神經網路(Convolutional Neural Network, CNN)和時頻分析法(Time-Frequency Representation)檢測波相與偵測地震事件：

該研究使用豐富的地震記錄運用深度學習的模式，發展識別地震波相與分類，主要使用深度卷積神經網路(ConvNet)設計一個廣義模型，改善地震和噪音記錄之間的信噪比比率，經過多層 ConvNet 訓練，可以了解背景噪音和地震在時頻域信號的特徵(圖 12)。第 2 步驟使用小波轉換技術訓練學習，達到辨識地震波相，萃取出 P 波與 S 波到時並進行定位，結果證明平均能達到 99%準確率。深度學習的方法在偵測的震事件的資料處理時間上較傳統技術節省了非常大量的人力成本。

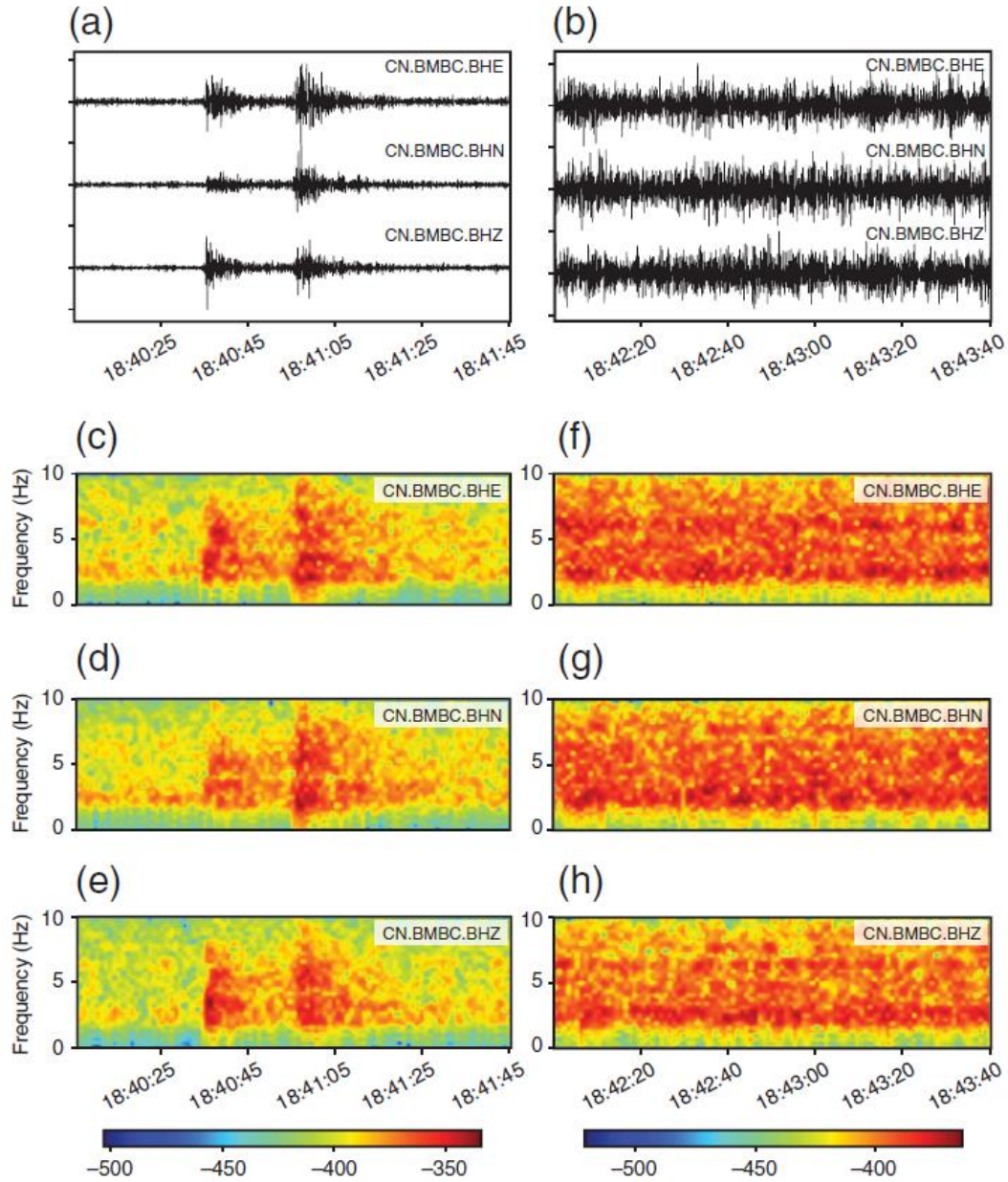


圖 12：2014 年 2 月 25 日規模 2.4 級地震，測站 CN.BMBC 在震央距 164 公里處記錄到的三分量波形(a)及同一地震儀記錄的測噪音視窗(b)。 (c 至 e) 為將(a)中三分量的地震紀錄分別做傅立葉轉換。(f 至 h)為將(b)中三分量的背景雜訊紀錄分別做傅立葉轉換。(Dokht et al, 2019)



#### 四、研習成果

主要研習目標為地震活動自動監測掃描定位系統(Seismicity-Scanning based on Navigated Automatic Phase-picking ,S-SNAP)，其在研究加拿大不列顛哥倫比亞省(British Columbia, BC)石油工業水壓裂解油頁岩密集觸發地震時，區域陣列式地震觀測網操作範圍，約東西向 100 公里及南北向 80 公里，所以本次研習設定的範圍與選擇地震事件，亦希望在臺灣找到相似初始條件，爰選定 2017 年 11 月 11 日 19 時 14 分 39 秒規模 4.6 中埔地震序列，其在地震資料庫中臺灣時間 19 時至 20 時(世界標準時間 11 至 12 時)，在 1 小時內共透過人工定位的地震事件 109 起，相關觀測站位置與震央分布如圖 13。

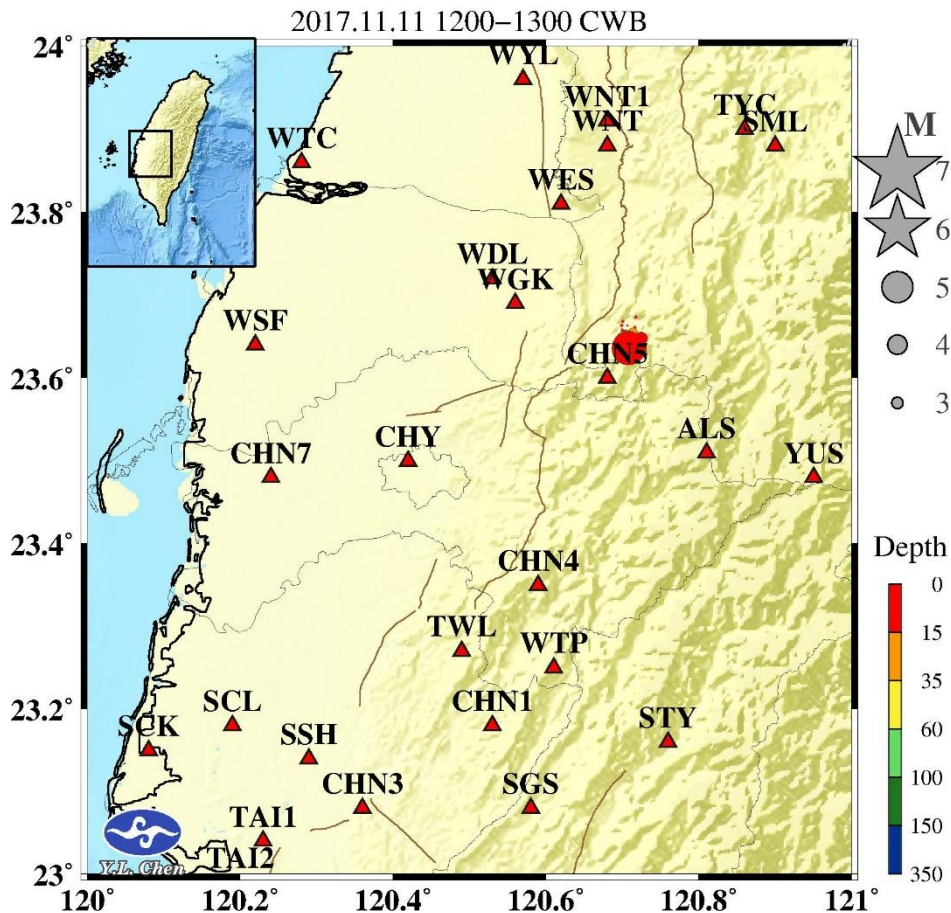


圖 13：2017 年 11 月 11 日 19 時 14 分 39 秒規模 4.6 中埔地震序列，主震後 1 小時餘震分布與觀測站位置。



測試中埔地震序列範圍(東經 120 至 121 度，北緯 23 至 24 度)，由於 24 位元系統整合了各種地震儀聯合觀測，在測試範圍內共有 27 個站，分別以短週期地震儀與寬頻地震儀測試，調整各種參數，包括水平格點、深度格點、濾波頻帶及測站篩選等，最後以寬頻地震儀最能測試出較佳的結果，使用測站個數 15 個。使用 S-SNAP 系統，1 小時資料能在 5 分鐘內偵測處理完地震，得出 60 個地震，其震央分布與測站位置如圖 14。震央位置雖然不如人工定位收斂，但是因為在筆記型電腦測試，使用測站個數亦不如人工定位多，在各項參數初步調整下已經有合理的結果，可以提供未來系統進階發展非常好的起始模型與經驗。

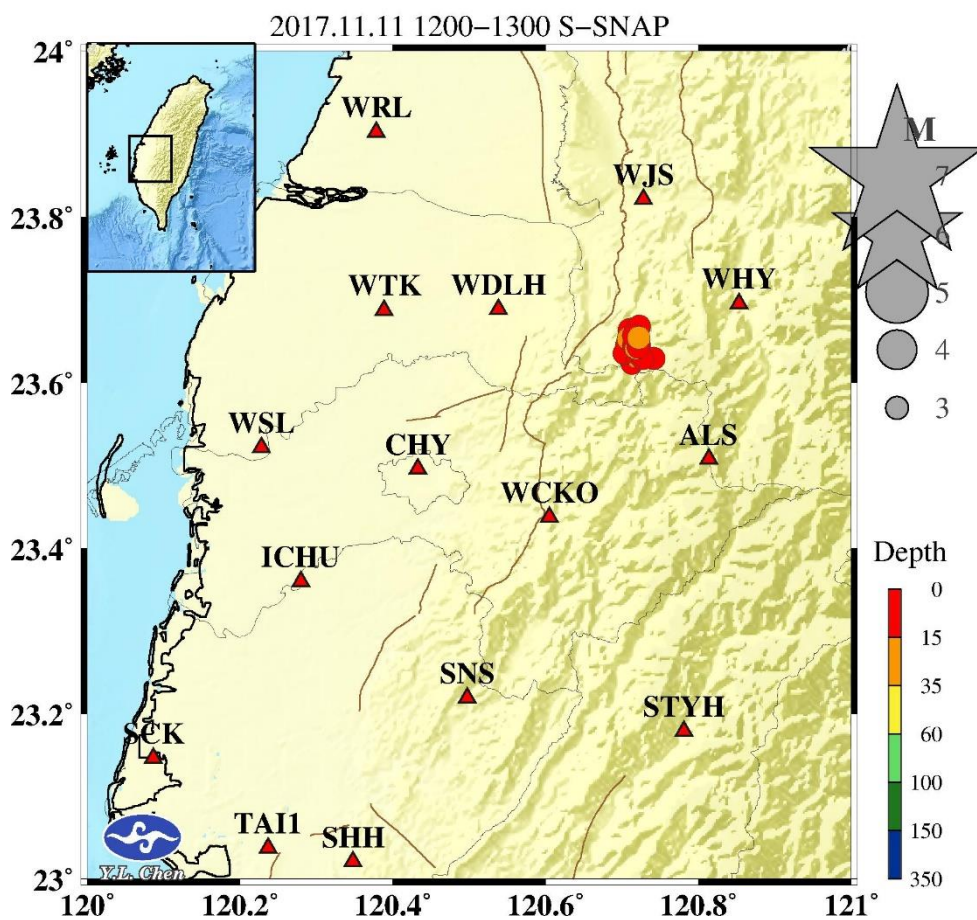


圖 14：2017 年 11 月 11 日 19 時 14 分 39 秒規模 4.6 中埔地震序列，使用 S-SNAP 系統快速解算，主震後 1 小時餘震分布與觀測站位置。

## 五、心得及建議

加拿大國土面積是臺灣約 104 倍，地震活動不頻繁，而人口僅有臺灣約 1.6 倍，地廣人稀。在加拿大不列顛哥倫比亞省(British Columbia, BC)，由於石油工業水壓裂解油頁岩，操作期間局部且密集觸發地震，誘發的地震規模介於 1-2 之間(圖 8)。而由高弘教授所領導建立的地震活動自動監測掃描定位系統(Seismicity-Scanning based on Navigated Automatic Phase-picking, S-SNAP)，解決了人力與效率的問題。

臺灣地區的地震活動相較於加拿大的地震更為頻繁且複雜，目前氣象局地震測報中心資料處理的過程中，由近年資料處理課研發的微震自動定位系統，規模 2 以上地震已經能有 77%偵測率(圖 15)，能滿足大地震序列後了解餘震趨勢與對大眾發布餘震活動情形的任務，但是相較於 S-SNAP，氣象局地震測報中心的系統仍有許多需要人力介入的過程。

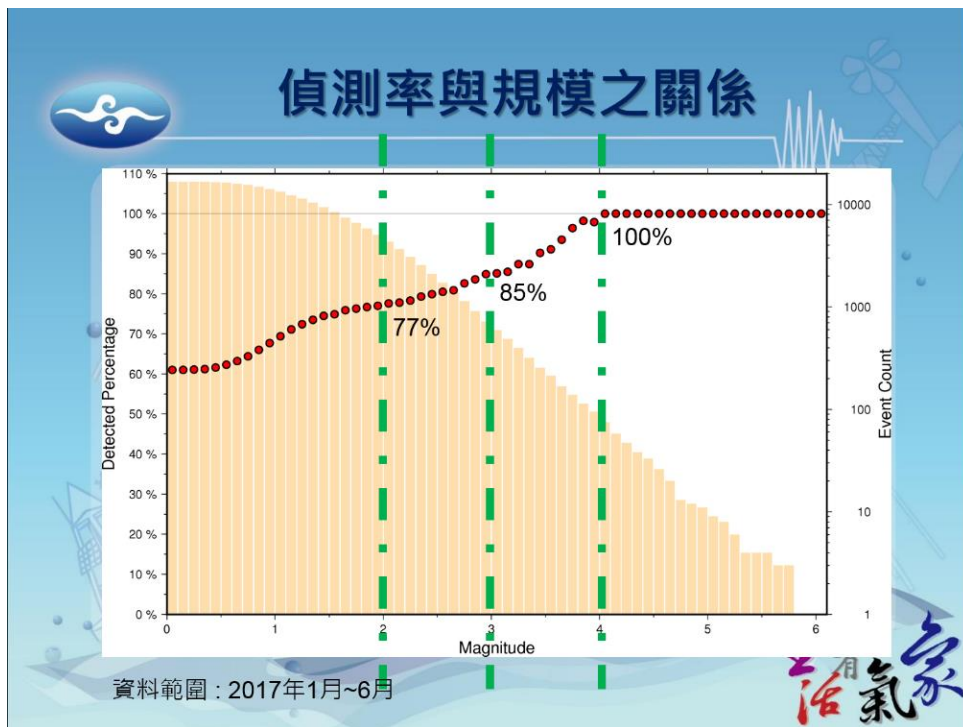


圖 15：2017 年 1 至 6 月微震自動定位系統偵測率分析。(Chang et al., 2019)

經過本次研習經驗與學習，對於氣象局地震測報中心目前作業流程有幾點建議：

1. 目前由值班人員人工檢視截取波相的方式，可以逐步參考 S-SNAP 中第 1 步驟震源掃描演算法(Source-Scanning Algorithm, SSA)自動化的作業方式，發展並研究不同地區地震與測站組合可以偵測地震的亮點(brightness)特性，與目前系統平行化測試，達到可以自動偵測擷取地震事件的目的。
2. 運用研習所測試的 S-SNAP 程式，在臺灣地區逐步以小區域的子網方式發展，了解不同區域的地震特性，篩選測站分布的組合，將測站等級分類，逐步發展，並調校的程式參數與濾波頻段，期望達到超越人工檢視的地震偵測率。
3. 在小區域測試能穩定偵測地震後，將臺灣地區視為 1 個大的觀測網並使用 S-SNAP 系統，由於臺灣地區地震較為複雜，需要在經度、緯度及深度上使用更精細的格點，因此未來在硬體的效能也需要一併提升，逐步達到自動觀測化的第 1 步。
4. 持續與高弘教授合作，發展卷積神經網路(Convolutional Neural Network, CNN)與時頻分析法(Time-Frequency Representation)檢測波相及偵測地震事件的技術，由於人工智能(Artificial Intelligence, AI)是一直在進步發展中的技術，持續往對的方向發展，善用氣象局地震測報中心多年來維護的豐富地震資料庫，運用大數據深度學習，期望能發展出關鍵技術，讓未來地震資料偵測與處理都能更自動化與智慧化。

## 六、參考文獻

Atkinson, G. M., Kaka, S. I., Eaton, D., Bent, A., Peci, V., and Halchuk, S. (2008). A very close look at a moderate earthquake near Sudbury, Ontario. *Seismological Research Letters*, 79(1), 119–131.

Baillard, C., Crawford, W. C., Ballu, V., Hibert, C., and Mangeney, A. (2014). An automatic kurtosis-based P- and S-phase picker designed for local seismic networks. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 104, 394–409.

Chang, Y. H., Hung, S. H., and Chen, Y. L. (2019). A fast algorithm for automatic phase picker and event location: Application to the 2018 Hualien earthquake sequences. *Terr. Atmos. Ocean. Sci*, 30, 435-448.

Dokht, R. M., Kao, H., Visser, R., and Smith, B. (2019). Seismic Event and Phase Detection Using Time–Frequency Representation and Convolutional Neural Networks. *Seismological Research Letters*, 90(2A), 481-490.

Font, Y., Kao, H., Lallemand, S., Liu, C.-S., and Chiao, L.-Y. (2004). Hypocentre determination offshore of eastern Taiwan using the maximum intersection method. *Geophysical Journal International*, 158(2), 655–675.

Kao, H., and Shan, S. J. (2004). The source-scanning algorithm: Mapping the distribution of seismic sources in time and space. *Geophysical Journal International*, 157(2), 589-594.

Liao, Y. C., Kao, H., Rosenberger, A., Hsu, S. K., and Huang, B. S. (2012). Delineating complex spatiotemporal distribution of earthquake aftershocks: An improved source-scanning algorithm. *Geophysical Journal International*, 189(3), 1753-1770.

Tan, F., Kao, H., Nissen, E., and Eaton, D. (2019). Seismicity-Scanning Based on Navigated Automatic Phase-Picking. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124.