



前言

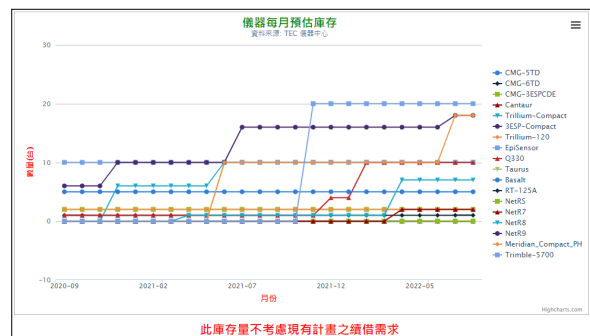
許雅儒 中央研究院地球科學研究所 研究員

本期台灣地震科學中心通訊共收錄 4 篇文章。第一篇文章為中研院地球所林欽仁技師評估四款用於密集陣列的儀器廠牌 Texan、Zland、SmartSolo、CUBE，與寬頻地震儀的比對測試，簡單的討論資料極性及評估效能，以作為各單位未來採購參考依據。第二篇文章由黃信樺研究員團隊利用地震噪訊干涉法探測 2018 年夏威夷 Kilauea 火山噴發前的地下岩漿活動，了解火山累積至噴發的演化過程。第三篇文章由中研院劉怡偉研究員利用硼同位素看海洋酸化對海水中造殼生物的影響，除了幫助我們了解地球的碳循環之外，還可以得知生物造殼機制，讓地球科學家可以更精準的解讀並重建地球環境氣候的歷史。最後一篇由師範大學地球科學系陳卉瑄教授利用人工智慧偵測及分類慢地震事件，以提供後續進一步研究之依據。

TEC 儀器中心

最新儀器預估庫存量查詢請參考下列網頁：<https://tec.earth.sinica.edu.tw/admin/instrumentconfirm/ipstockanalysis3.php> 最新地震儀器使用狀況如下表所示（統計至三月底止）。

TEC 支援各大專院校相關科系之地球物理實習課程。歡迎有需求的授課教師於線上系統提出申請，申請網頁為：<https://tec.earth.sinica.edu.tw/geoclass/>。



短周期陣列儀器測試報告

林欽仁 中央研究院地球科學研究所 研究助技師

近年來，密集地震儀陣列佈放有逐年熱門的趨勢，觀測目標包含人工震源、微震、餘震調查、山崩監測、風機影響...等，所需的儀器考量重點為快速佈放、省電以利長時間運作、大批資料快速下載與處理、運送便利性...等。本報告針對四款國內常見適合於密集佈放的儀器廠牌：Texan、Zland、SmartSolo、CUBE，與寬頻地震儀進行一周時間的比對測試(2020/2/28~3/2)，由於僅使用少量的儀器進行比對，加上測試環境及安裝方式並無嚴格管控，此報告僅討論資料極性問題及簡易效能評估，以作為各單位未來採購參考，並非儀器雜訊之測試以及操作介紹。

儀器測試場地在中央研究院地球科學研究所，環境變遷大樓地下 3 樓（如圖一），背景雜訊低，且配有 GPS 訊號轉發器，相當適合地震儀器測試。測試儀器包含 Texan 6 台（含兩種 geophone 規格）、Zland 4 台、SmartSolo 4 台、CUBE 2 台，挑選午夜 2 小時人文活動干擾較低的時間段進行功率頻譜(Power Spectral Density)分析(如圖三)，所有儀器皆修正儀器響應(如表一)。透過與共站寬頻地震儀的比對，發現 geophone 的低頻轉折頻率儘管為 4~5 Hz，但實際可用頻寬皆高於 0.2 Hz，當有更大能量的遠震發生則不受此限制。由於紀錄器之前置放大器倍率設定不盡相同，反應在長周期(< 0.2 Hz)的表現有所差異；此外，高頻(> 40 Hz)效能表現，尤其在水平向，結果不盡相同，應該與儀器未完全埋入沙子，以及木箱與水泥平台之耦和效應有關。實驗過程中也收錄一筆宜蘭地震(除了 Texan 提早撤除而無資料)，修正儀器響應後其波形如圖四，所有儀器資料之震幅與相位皆相當一致。

四款儀器的優缺點討論如表二，總結如下：

- 四款儀器的波形及資料時間皆與 Q330 搭配 T240 結果一致，唯資料極性需特別注意。以地動方向垂直朝上、朝東、朝北為正號來說：Texan 的極性相反，Zland 垂直軸極性相反、水平軸極性正常，SmartSolo 三軸極性相反，CUBE 三軸極性正常。
- 本報告的實驗場所為都會區結構物地下室，其背景雜訊並無法做為儀器雜訊。
- SmartSolo 在波形呈現、安裝便利性、資料處理等表現與 Zland 相當，如果單看長周期(< 0.2 Hz)的雜訊(此頻段多與紀錄器及前置放大器整體的雜訊有關)，SmartSolo 表現得更好。
- Texan 的 geophone 與其他儀器相比震幅較小(約 70%)，尤其是訊號頻率低於其轉折頻率 4.5 Hz，使用 4.9 Hz 的極零點參數修正反而較能得到一致的振幅，然而這與 geophone 在長時間使用下，彈簧因疲乏而頻率趨往較低頻率有所出入，或許是廠商製作時已考量彈簧疲乏效果而將頻率設計得較規格值高。
- CUBE 做為一款低耗電及輕便的資料紀錄器，其優點包含可搭配任何電壓輸出的感測器(如寬頻地震儀、次音波感測器)即時傳輸資料及使用外部電源以延長觀測時間並易於空運。儘管在高密度陣列佈放實驗不如 SmartSolo 與 Zland 來得便利，但在長時間觀測及國外實驗應用來說相當適合。



短周期陣列儀器測試報告

林欽仁 中央研究院地球科學研究所 研究助技師



圖一、儀器測試場地在中央研究院地球科學研究所，環境變遷大樓地下3樓



圖二、測試儀器之安裝方式

表一、儀器參數

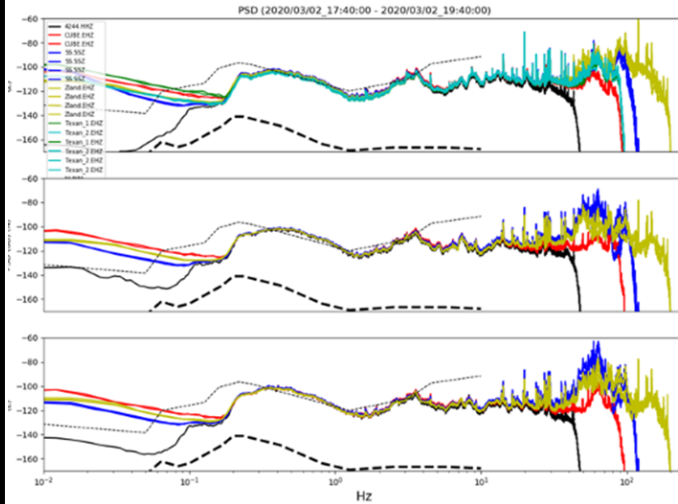
	preamp gain	Sensor sen. (V/m/s)	Sensor damping	Sensor freq. (Hz)	Sampling rate (Hz)	Instrument response
Quanterra Q330 + Nanometrics T240	1	1200	0.707	240 s ~ 223 Hz	100	
Texan_1 (#WO 開頭)	32	29.4	0.5	4.5	250	'zeros': [0j, 0j] 'poles': [(-14.137+24.486j), (-14.137-24.486j)] 'sensitivity': 29.4 * 32 * 5.243e+05 (垂直軸極性相反)
Texan_2 (#WO3 及#開頭)	32	82	0.707	4.5	250	'zeros': [0j, 0j] 'poles': [(-19.99+20.00j), (-19.99-20.00j)] 'sensitivity': 82 * 32 * 5.243e+05 (垂直軸極性相反)
Zland	36 dB (63.09)	76.7	0.707	5.0	500	'zeros': [0j, 0j] 'poles': [(-21.991+22.435j), (-21.991-22.435j)] 'sensitivity': 76.7 * 1000 (垂直軸極性相反，水平軸極性正常)
SmartSolo	30 dB (31.62)	76.7	0.707	5.0	250	'zeros': [0j, 0j] 'poles': [(-21.991+22.435j), (-21.991-22.435j)] 'sensitivity': 76.7 * 31.62 * 1000 (三軸極性相反)
CUBE (3C geophone)	16	16	0.707	4.5	200	'zeros': [0j, 0j] 'poles': [(-19.781+20.202j), (-19.781-20.202j)] 'sensitivity': 4096000 * 27.7 (極性正常)



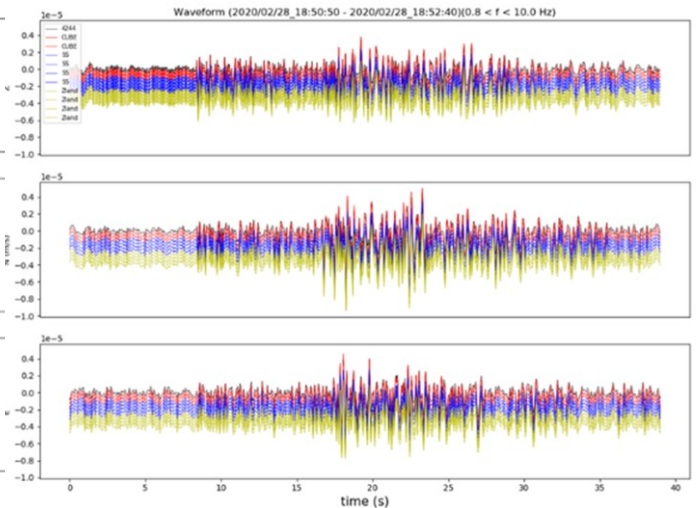
短周期陣列儀器測試報告

林欽仁 中央研究院地球科學研究所 研究助技師

圖三、背景雜訊功率頻譜(Power Spectral Density)分析



圖四、宜蘭地震波形圖



表二、優缺點討論

Instrument	優	缺	Note
Zland	<ul style="list-style-type: none"> 電池、三分量 geophone 及紀錄器一體設計，安裝方便 可同時充電與資料下載 	<ul style="list-style-type: none"> 無法傳輸即時資料 中心站需要 220V 電源 原始資料為單一檔案其容量較大 (數 10GB) 轉檔需要額外軟體 目前無法野外延長電池容量 	
SmartSolo	<ul style="list-style-type: none"> 電池、三分量 geophone 及紀錄器一體設計，安裝方便 中心站 110V/220V 電源 軟體可直接輸出 daily MSEED 可搭配外部電池來延長運作時間 (特殊型號) 	<ul style="list-style-type: none"> 無法傳輸即時資料。 	<ul style="list-style-type: none"> 價格較低 主體可分離之設計，讓充電與資料下載可獨立進行，此設計之優點包含方便維修及無外露接點，但需要多一步驟來分離亦是缺點。
Texan	<ul style="list-style-type: none"> 使用兩顆 1 號電池運作 亦可外部電源運作 中心站資料下載作業方便 	<ul style="list-style-type: none"> 單分量紀錄器 無法即時傳送資料 電力不足時資料會遺失 	
CUBE	<ul style="list-style-type: none"> 多功能低耗電池震資料紀錄器 可傳輸即時資料 外部電力可延長運作時間 	<ul style="list-style-type: none"> 資料轉檔需要時間較長 	<ul style="list-style-type: none"> 記錄器 sensor 及電池分離設計 可傳輸即時資料，亦可使用外部電力長時間運作，方便空運國外使用



以地震噪訊干涉法探測 2018 年夏威夷 Kilauea 火山噴發前的地下岩漿活動

馮冠美 國立臺灣大學地質科學系暨研究所博士生
黃信樺 中央研究院地球科學研究所 助研究員

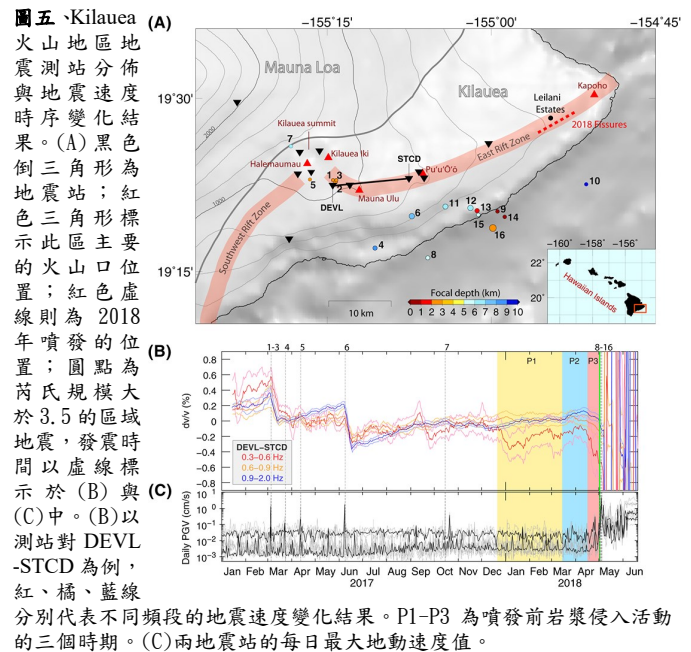
在 2018 年五月 Kilauea 火山東裂縫帶上鄰近利拉尼莊園 (Leilani estates) 的地方發生一系列的岩漿噴發 (圖五, 紅色虛線), 一路持續到九月, 對當地造成嚴重災損, 迫使居民撤離家園。為了解 Kilauea 火山東裂縫帶岩漿噴發前可能的岩漿侵入過程, 我們利用地震噪訊干涉法 (Brenugier et al., 2008; Obermann et al., 2013) 研究 2017 年一月至 2018 年六月期間, Kilauea 火山東裂縫帶噴發前的地震波速度變化。透過不同頻段的速度變化分析 (0.3-0.6、0.6-0.9 與 0.9-2.0 赫茲), 發現並分離出與地震相關的同震速度下降以及與岩漿侵入活動相關的速度變化異常。以測站對 DEVL-STCD 的結果為例 (圖五 B), 同震速度下降對應地震編號 1-3 和 6, 主要反映在 0.9-2.0 赫茲的頻段上, 且皆對應到每日最大地振動速度 (PGV) 的峰值 (圖五 C), 顯示速度的下降可能造因於地振動造成淺部 1 公里內地殼介質的改變。

相反地, 與岩漿侵入相關的速度變化約在 2017 年底開始, 僅在 0.3-0.6 赫茲出現, 代表變化深度在 1 公里以下。在分析與比對不同測站對的速度時空變化與夏威夷火山觀測站的地表觀測資料後 (詳見 Feng et al., 2020), 我們可將此噴發前兆活動分為三個時期 (圖六): P1 時期深部岩漿主要上侵至較深的 SC 岩漿庫 (Southern caldera reservoir) 和上東裂縫帶的脈狀岩漿通道, 因而速度變化僅反映在相應深度較深的 0.3-0.6 赫茲的結果中 (圖五 B); P2 時期岩漿侵入較淺的 H 岩漿庫 (Halemaumau reservoir), GPS 和傾斜儀開始紀錄到明顯的地表變形, 三個頻段的地震速度因變形同時緩慢增加; 到了 P3 時期, 明顯的地震速度下降同時出現在三個頻段中, 反應地殼因岩漿庫膨脹持續受壓一段時間後破壞累積超過臨界狀態而彈性係數陡降的介質弱化情形 (Olivier et al., 2019), 隨後下東裂縫帶即在 5 月 2 日噴發。

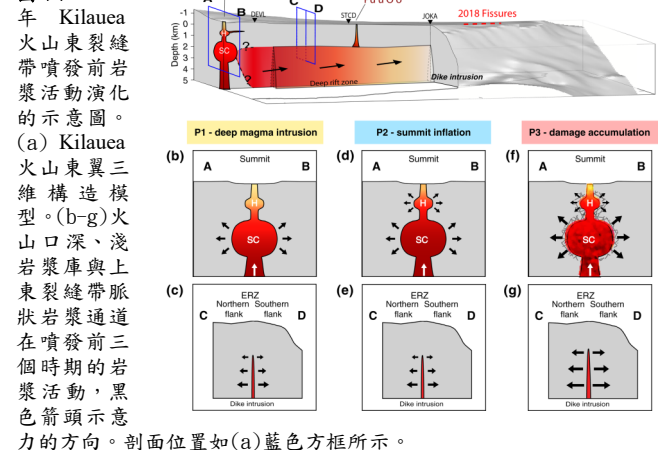
本研究利用地震噪訊干涉法探測出岩漿侵入活動自 Kilauea 主火山的深處上侵、在上東裂縫帶累積至移往下東裂縫帶噴發的演化過程, 並在噴發前六個月就已經開始。對於現行主要以地表觀測為主 (如 GPS、遙測影像) 的火山監測系統, 多頻段的地震噪訊干涉分析能求取不同深度上的地殼變化訊息, 提供另一種面向的重要觀測。

參考文獻

- Brenugier, F., Shapiro, N., Campillo, M., Ferrazzini, V., Duputel, Z., Coutant, O., & Nercessian, A. (2008). Towards forecasting volcanic eruptions using seismic noise. *Nat Geosci* 1:126-130.
- Feng, K. F., Huang, H. H., Wu, & Y. M. (2020). Detecting pre-eruptive magmatic processes of the 2018 eruption at Kilauea, Hawaii volcano with ambient noise interferometry. *Earth, Planets and Space*, 72(1), 1-15.
- Obermann, A., Planes T., Larose E., & Campillo M. (2013). Imaging preeruptive and coeruptive structural and mechanical changes of a volcano with ambient seismic noise. *J Geophys Res Solid Earth* 118:6285-6294.
- Olivier G, Brenugier F, Carey R, Okubo P, & Donaldson C (2019). Decrease in seismic velocity observed prior to the 2018 eruption of Kilauea Volcano with ambient seismic noise interferometry. *Geophys Res Lett* 46(7):3734-3744.



圖六、2018 年 Kilauea 火山東裂縫帶噴發前岩漿活動演化的示意圖。



(a) Kilauea 火山東翼三維構造模型。(b-g) 火山口深、淺岩漿庫與上東裂縫帶脈狀岩漿通道在噴發前三個時期的岩漿活動, 黑色箭頭示意力的方向。剖面位置如 (a) 藍色方框所示。



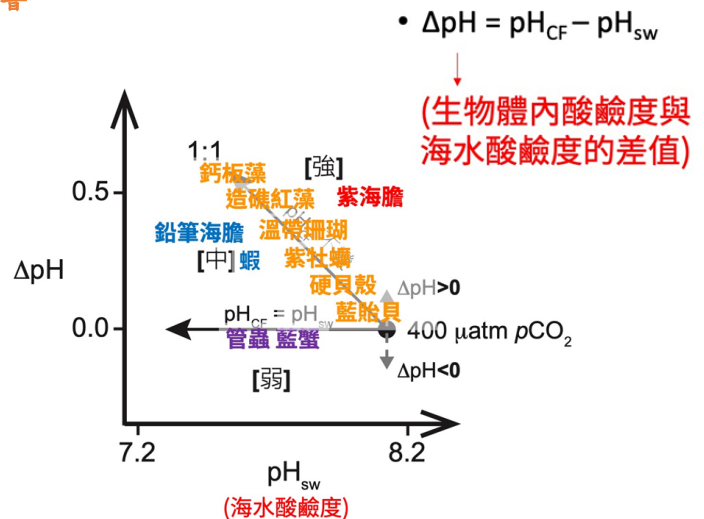
從硼同位素看海洋酸化對海水中造殼生物的影響

劉怡偉 中央研究院地球科學研究所 助研究員

進入 21 世紀以來，「全球變遷」已成為熱門的研究議題，因為這些現象和生活在地球上的人類息息相關。其中，海洋酸化也已在許多不同區域的觀測記錄中被發現，且被認為可能對海水中的造殼生物有直接的衝擊，進而對整個生態系、或是人類的經濟活動產生負面影響。然而，養殖實驗中卻發現，不同生物的殼體生長對海洋酸化的反應其實相當分歧，背後的控制機制還不完全清楚(Ries et al., 2009; Mayer & Riebesell, 2015)。其中一個可能的解釋是：生物間可能有不同的能力去調節體內酸鹼度，進而在不同酸化程度下，能維持不同量的殼體生長(Ries, 2011)。由於技術的限制，我們仍無法直接去測量大部分生物體內的酸鹼度。因此，利用硼同位素能反映水體酸鹼度的特性，我們能藉著測量海洋生物殼體的硼同位素組成，推估生物體內的酸鹼值，再進一步去檢驗過去的假說。目前的研究結果發現，不同生物門下的生物，大多的確有調節提升內部酸鹼度的能力(圖七)，以維持殼體的生長，然而調節的能力和最終生長的反應卻不是直接相關(Liu et al., 2018; Liu et al., 2020)。除了體內酸鹼度之外，碳酸鈣骨骼間的有機物間質(organic matrix)，也可能影響最終的殼體生長或保存狀況，確切的造殼機制還有賴更多的研究來幫助解開。這樣的研究除了能幫助我們更了解地球的碳循環外，了解生物造殼機制也能讓地球科學家可以更精準的解讀並重建地球環境氣候的歷史；另一方面，我們也能從中更了解什麼樣的生物在當代環境變遷下，受到的衝擊可能最大，進而可以提供無論是漁業養殖，或是政府保育政策制定上，更多科學依據。

參考文獻

- Liu, Y. W., Eagle, R. A., Aciego, S. M., Gilmore, R. E., & Ries, J. B. (2018). A coastal coccolithophore maintains pH homeostasis and switches carbon sources in response to ocean acidification. *Nature communications*, 9(1), 1-12.
- Liu, Y. W., Sutton, J. N., Ries, J. B., & Eagle, R. A. (2020). Regulation of calcification site pH is a polyphyletic but not always governing response to ocean acidification. *Science advances*, 6(5), eaax1314.
- Meyer, J., & Riebesell, U. (2015). Reviews and Syntheses: Responses of coccolithophores to ocean acidification: a meta-analysis. *Biogeosciences (BG)*, 12(6), 1671-1682.
- Ries, J. B., Cohen, A. L., & McCorkle, D. C. (2009). Marine calcifiers exhibit mixed responses to CO₂-induced ocean acidification. *Geology*, 37(12), 1131-1134.
- Ries, J. B. (2011). A physicochemical framework for interpreting the biological calcification response to CO₂-induced ocean acidification. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(14), 4053-4064.



圖七、從過去養殖實驗中，配合硼同位素測量得到，海水中不同生物門下各造殼生物在不同酸化程度下自我調節酸鹼度的能力分佈圖。利用硼同位素，我們可以推算出海洋造殼生物體內成鈣環境的酸鹼度(pH_{CF})。藉由比較生物體內和外界海水酸鹼度的差異(ΔpH)，我們可以評估各生物調節體內酸鹼度的能力，並且更進一步去討論這些生物在面對不同程度海洋酸化下，物種間調節能力的差異及變化。若計算結果落在 1:1 的輔助線上，表示生物體內的酸鹼度不會隨著環境變酸而降低；若結果沿水平輔助線分佈，表示生物體內的酸鹼度受到外在環境變動的影響較大，會一起變化。而藉著這兩條輔助線，我們可再將生物調節體內酸鹼度的能力分為「強」、「中」、「弱」，三個等級。本圖修改自(Liu et al., 2020)。

AI 偵測慢地震

陳卉瑄 國立臺灣師範大學地球科學系 教授

一、連續資料中不同事件類別能否被系統性的偵測和分類？

跟我們生活息息相關的環境震動，短至數秒的爆炸事件、飛機墜毀和重大車禍，長至長微震和土石流事件，對社會和經濟造成一定衝擊，尤其對微小震動高度敏感的半導體產業。埋藏的環境震動，包含天然地震與人造地震，其即時偵測、分類、定位與物理機制仍未有系統的收集和分類，主要原因在於地震儀的連續紀錄中，一般皆以天然地震為主要分析目標。如圖八所示，不同震央距的地震，能量的持續時間不同，P、S 波的

分辨度、振幅比亦不同(a-c)，而背景噪音(雜訊)在夜晚和白天，則有不同的振幅和波形特性表現(d-e)。在背景噪音中，近年來發現了大量的非火山長微震(non-volcanic tremor)活動，這種慢速滑移活動介於一般地震(快地震)數十秒的快速破裂、和數年的緩慢蠕變(creeping)之間，其錯動位移有限、錯動歷時長，以至於僅有非常弱的地震波輻射，難以從地震波分辨，特徵為貌似雜訊、主頻在 2 至 8 Hz 間、無明顯 P 波、S 波到時、能量持續時間長、數分鐘到數月不等、並能在相距數公里至數十公里不等的測站具近乎一致之到時。這樣類型的「雜訊」直至 2002 才被發現(Obara, 2002)，又被稱作慢地震。



AI 偵測慢地震

陳卉瑄 國立臺灣師範大學地球科學系 教授

記錄著環境背景震動的連續資料中，有多少訊號，對應著深部變形和近地表人為活動？他們能不能被系統性地偵測與分類？

二、事件偵測手段的演化

事件偵測是將有用訊號和背景噪音分離的手段，在這裡的有用訊號，泛指我們感興趣的訊號，在地震學裡的「模式辨識」(pattern recognition)淵源已久，主要分成三個步驟：第一、將微弱訊號由背景噪音中分離；第二、定義地震波相以做「到時」的自動判定；第三、釐清物理機制(天然地震或人為地震)。大量連續資料中的事件偵測，需要兼顧運算效能(computational efficiency)、偵測靈敏度(detection sensitivity)和應用廣度(general applicability)，過去有四大手段陸續被提出(Yoon et al., 2015)：最早提出的是計算訊號的長期平均(LTA)和短期平均(STA)比值，當比值大於特定門檻時，定義為有意義事件的 STA/LTA 法，具有最大的應用廣度，對任何型態的目標事件，可以用訊號的短、長期平均比值進行篩選，但是人工辨識耗時，適合用於中規模以上地震，或測站數目少的資料。為了克服 STA/LTA 利用「振幅」當門檻的缺點(僅適用似脈衝訊號)，另一種模版配對法(template matching)利用了全波形特徵，並考慮地震重複發生的特性，以波形的相關性在吵雜的資料裡尋找事件，此法具有最高的運算效率，適合已有大量波形模版(template)的事件搜尋(例如相似地震)，然而，若資料數目變大時，比對的時間將大幅增加，此外，比對之閾值也須經由嘗試錯誤法來調整，當測站數目增加時，閾值之調整將需要大量的時間，且不保證最佳化。為改善模版配對法必須把「波形模版」備齊的難處，自相關法(autocorrelation)對訊號進行了盲蔽搜尋(blind search)，亦即把資料切割成 N 個短時窗，每個時窗進行相關計算，當相關係數值大於特定門檻則留用，視為候選事件，此法具有最佳的偵測分辨率，適合訊號中有大量目標事件的資料(例如地震頻繁區)。目前為止最新最快的盲蔽式偵測法，稱作 FAST(Fingerprint And Similarity Thresholding)利用多維度的最近鄰居法搜尋(nearest-neighbor search)提供最高機率的相似事件對，避免不相似事件對的耗時比較。但是在訊號的特徵萃取，必須依目標事件量身訂做。(Yoon et al., 2015)

近幾年，利用機器學習(machine learning)進行地震資料分類的技術漸漸盛行，其中包含類神經網絡(Artificial Neuronal Network, ANN)、隱馬可夫模型(Hidden Markov Models, HMM)和支持向量機(Support Vector Machine, SVM)等等，目標皆為改善單一門檻分類的缺點，藉由標籤化的資料進行監督式學習(supervised learning)，讓電腦自行建立一個分類的模型，不同的特徵的資料點在多維模型的表現如圖九所示，資料點間呈現最小變異度的歸類成同一組，而最大變異度

的歸類成不同組，而以支持向量機(SVM)為例，這個線性分類器能定義在特徵空間上間隔最大的群組，以求最佳的分離超平面。本研究擬採用監督式學習的演算法，進行特徵抽取以有利分類率的表現，期能定義「多維特徵空間中的邊界」而非「門檻值」。

三、本研究使用之機器學習手段

自 2017 年開始，我們與台科大機械工程系的劉益宏老師合作，致力於利用機器學習演算法進行智能偵測和分類，期能避免樣板比對的高計算複雜度，並自動學習決策邊界(decision boundary)來進行偵測及分類(Liu et al., 2019)。我們想問，能否利用單站，對偵測有難度、和背景噪音振幅相仿、往往需要多站共同判釋的慢地震訊號進行分類和偵測？

準備地震、長微震和背景噪音三種類別的波形，將之標籤化以進行後續資料訓練，利用的三個測站和對應的波形如圖十所示。首先選用的分類器，是傳統而簡單的 kNN(k 近鄰分類法)，此法計算任一比未知資料「與不同類別在特徵空間的歐式距離」，找最相近的 k 個鄰居投票表決，來決定這個未知資料應該分到哪一類別。在訓練階段，所有的演算法參數皆須最佳化，我們採用廣泛使用的交叉驗證法(Leave-One-Out Cross Validation, LOO-CV)來進行，此方法容易實現，並且可以自動化執行。每個測站、每個類別均為 204 筆事件(每個事件為 60-s)經由 LOO-CV 得到的分類表現如表三所示，在較遠離長微震震源區的 YULB 有最差的分類率為 68%，而在較近的測站則介於 86-94% 間。

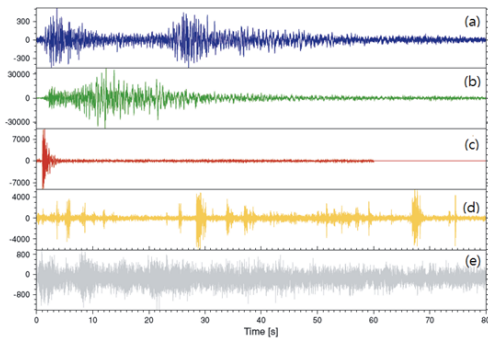
接著，我們選出時間域、頻率域、時頻域共 27 個特徵，利用 Fisher's class-separability criterion (Fang et al., 2015) 針對每一種初始特徵進行自動評估。每一種特徵，得到一個費雪分數(Fisher score) - 同組內和不同組間的分散量之比值，代表此特徵對於事件分類的優劣，分數越高，代表此特徵讓不同類別間的鑑別更容易。因此，在訓練階段將所有初始特徵依照費雪分數從高至低排序，挑出前 $N\%$ 的最佳的特徵當作後端的偵測及分類輸入。此方法之好處在於：(1)演算法自動快速選擇，免人為嘗試錯誤所造長的過長訓練時間；(2)所選出之最佳特徵子集合可達到較高之事件偵測及分類率。利用選過的特徵重新進行分類，得到的分類率有顯著的提升，利用訓練資料進行交叉驗證法(LOO-CV)得到顯著提升的分類率，為 87-99%，然利用測試資料，則為 71-96%。我們發現三類別中，背景噪音有顯著的時間變異，不同期間收集的訓練和測試資料，會有較差的分類表現。這說明未來在背景噪音的細緻分群有其必要。

要分開三類別的資料，哪些特徵最重要？在本研究中(Liu et al., 2019)我們發現，這些有效特徵在各站的表現均一制，說明費雪分數可以成為單一特徵篩選的重要指標。更重要的是，我們亦發現離散傅立葉轉換(時頻域)之中位數的波峰數量，能有效分離長微震和背景噪音，這是從未被使用在偵測門檻上、未來可納入即時偵測的重要特徵。



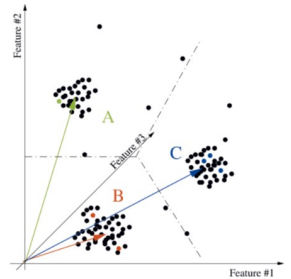
AI 偵測慢地震

陳卉瑄 國立臺灣師範大學地球科學系教授

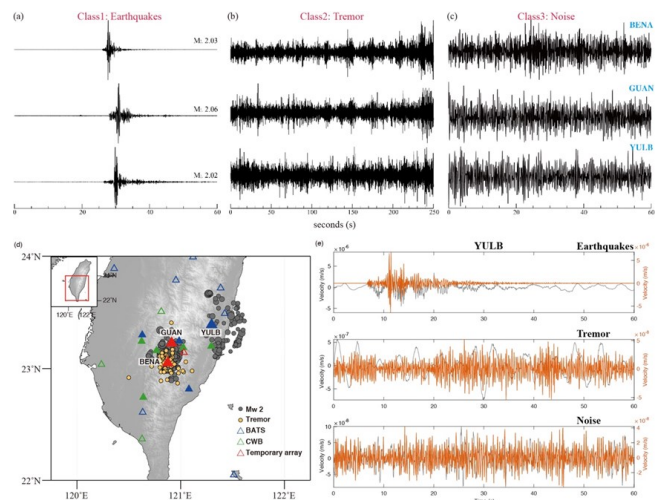


圖八 連續資料中的不同種類訊號。在此 Y 軸為速度 (cm/s)，X 軸為時間 (s)，在不同圖有不同的比例：(a-c) 3 秒至 50 秒不等，而 (d-e) 為 80 秒，請見以下說明。(a) 震央距 < 10 km 內的近距地震，有清楚的 P 波和 S 波初達波相，能量持續時間為 3 秒，主頻為 6-30 Hz。(b) 震央距在 10-100 km 內的地震，S 波初達波相不清楚，能量持續時間為 26 秒，主頻為 2-15 Hz。(c) 100-600 km 的區域型地震，有清楚的 P 波初達波相，能量持續時間為 50 秒，主頻為 0.5-8 Hz。(d) 夜間噪音，主頻範圍 0.3-30 Hz。(e) 白天噪音，主頻範圍 0.3-30 Hz。(圖取自 Beyreuther and Wassermann, 2008)

圖九、資料群在特徵空間的分布圖。由訓練資料(黑點)所決定的分界線如虛線所示，當新的資料(紅、藍、綠)進到系統時，會依貝氏分類法則計算新資料落於 A、B、C 的機率。(圖取自 Beyreuther and Wassermann, 2008)



圖十、(a-c)三種類別資料的波形示意圖 (d) 使用的地震(灰色圓圈)和長微震(黃色圓圈)及三個測站之分布圖。在此三種不同顏色的測站對應三種地震網。



表三、本研究使用的三類別資料在不同測站的分類表現 (事件數量和分類率)

		BENA				GUAN				YULB			
		Eq.	Tremor	Noise		Eq.	Tremor	Noise		Eq.	Tremor	Noise	
I	Earthquake	204	0	0	93.7	203	0	1	86.4	187	11	6	68.8
	Tremor	3	188	13		0	166	38		2	127	75	
	Noise	3	19	182		0	44	160		0	97	107	
II	Earthquake	204	0	0	98.8	203	1	0	89.4	195	7	2	86.6
	Tremor	0	200	4		0	168	36		1	164	40	
	Noise	0	7	197		0	34	170		0	45	159	
III	Earthquake	86	0	1	95.7	86	0	1	70.8	81	5	0	76.6
	Tremor	1	78	8		0	29	58		0	46	41	
	Noise	0	1	86		0	17	70		0	14	73	

Experiment I: Using Leave-One-Out Cross Validation (LOO-CV) on training data and all 27 features.

Experiment II: Using Leave-One-Out Cross Validation (LOO-CV) on training data and features selected using Fisher Score.

Experiment III: Using test data and features selected by Fisher Score.

參考文獻

Beyreuther, M. and Wassermann, J. (2008). Continuous earthquake detection and classification using discrete Hidden Markov Models, *Geophys. J. Int.*, **175**(3), 1055-1066.

Fang, L., Zhao, H., Wang, P., Yu, M., Yan, J., Cheng, W., and Chen, P. (2015). Feature selection method based on mutual information and class separability for dimension reduction in multidimensional time series for clinical data, *Biomedical Signal Processing and Control*, **21**, 82-89.

Liu, Y. H., Yen, T. C., Chen, K. H., Chen, Y., Yen, Y. Y., Yen, H. Y. (2019). Investigation of single-station classification for short tectonic tremor in Taiwan, *J. Geophys. Res.*, **124**, 8803-8822.

Obara, K. (2002). Nonvolcanic deep tremor associated with subduction in southwest Japan, *Science*, **296**(5573), 1679-81.

Yoon, C. E., O'Reilly, O., Bergen, K. J., Beroza, G. (2015). Earthquake detection through computational efficient similarity search, *Science Advances*, **1** (1T), e1501057, doi:10.1126/sciadv.1501057.



本季成員發表文章(2020/06~)

Published:

- Chao, B. F.**, & Yu, Y. (2020). Variation of the equatorial moments of inertia associated with a 6-year westward rotary motion in the Earth. *Earth and Planetary Science Letters*, 542, 116316.
- Fu, C. C.***, **Lee, L. C.**, Ouzounov, D., & Jan, J. C. (2020). Earth's outgoing longwave radiation variability prior to $M \geq 6.0$ earthquakes in the Taiwan area during 2009-2019. *Frontiers in Earth Science*, 8, 364.
- Hsu, T. Y., Wu, R. T., Liang, C. W., **Kuo, C. H.**, & **Lin, C. M.** (2020). Peak ground acceleration estimation using P-wave parameters and horizontal-to-vertical spectral ratios. *Terrestrial, Atmospheric & Oceanic Sciences*, 31(2).
- Hsu, Y. F., **Huang, H. H.**, Huang, M. H., Tsai, V. C., Chuang, R. Y., Feng, K. F., & Lin, S. H. (2020). Evidence for Fluid Migration During the 2016 Meinong Taiwan Aftershock Sequence. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, e2020JB019994.
- Hsu, Y. J.***, Fu, Y., Bürgmann, R., Hsu, S. Y., Lin, C. C., Tang, C. H., & **Wu, Y. M.** (2020). Assessing seasonal and interannual water storage variations in Taiwan using geodetic and hydrological data. *Earth and Planetary Science Letters*, 550, 116532.
- Huang, J. Y.**, V.B. Zaalishvili, D.A. Melkov, **C.H. Kuo**, **K.L. Wen**, & **C.T. Chen** (2020). Progress of Soil Nonlinearity Researches of Recent Years in Russia and Taiwan. *Geology and Geophysics of Russian South*, 10(2), 95-112.
- Jiao, L., **Chan, C. H.**, Scholtès, L., Hubert-Ferrari, A., Donzé, F. V., & Tapponnier, P. (2020). Discrete element modeling of a subduction zone with a seafloor irregularity and its impact on the seismic cycle. *Solid Earth Discussions*, 1-41.
- Kumar, A., Walia, V.* , Lin, S. J., & **Fu, C. C.** (2020). Real-time database for geochemical earthquake precursory research. *Natural Hazards*, 1-11.
- Legendre, C. P.* , **Tseng, T. L.**, & Zhao, L. (2020). Surface-wave phase-velocity maps of the Anatolia region (Turkey) from ambient noise tomography. *Journal of Asian Earth Sciences*, 104322.
- Li, S., Wdowinski, S., **Hsu, Y. J.**, & **Shyu, J. B. H.** (2020). Earthquake Interactions in Central Taiwan: Probing Coulomb stress effects due to $ML \geq 5.5$ earthquakes from 1900 to 2017. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(8), e2019JB019010.
- Lin, C. M., **Tseng, T. L.***, Meliksetian, K., Karakhanyan, A., **Huang, B. S.**, Babayan, H., ... & Levonyan, A. (2020). Locally Thin Crust and High Crustal VP/VS Ratio beneath the Armenian Volcanic Highland of the Lesser Caucasus: A Case for Recent Delamination. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(9), e2019JB019151.
- Lin, J. L., **Kuo, C. H.**, Chang, Y. W., Chao, S. H., Li, Y. A., Shen, W. C., ... & Chen, C. C. (2020). Reconnaissance and learning after the February 6, 2018, earthquake in Hualien, Taiwan. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 18, 4725-4754.
- Ornthammarath, T., Warnitchai, P., **Chan, C. H.**, Wang, Y., Shi, X., Nguyen, P. H., ... & Thant, M. (2020). Probabilistic seismic hazard assessments for Northern Southeast Asia (Indochina): Smooth seismicity approach. *Earthquake Spectra*, 8755293020942528.
- Tang, C. H., Barbot, S., **Hsu, Y. J.**, & **Wu, Y. M.** (2020). Heterogeneous power-law flow in the Salton Trough inferred from postseismic relaxation following the 2010 El Mayor-Cucapah earthquake. *J. Geophys. Res.* doi: 10.1002/2020JB019740.
- Wu, W. J., **Kuo, L. W.**, Ku, C. S., Chiang, C. Y., Sheu, H. S., Aprilniadi, T. D., & **Dong, J. J.** (2020). Mixed-mode formation of amorphous materials in the creeping zone of the Chihshang Fault, Taiwan, and implications for deformation style. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, e2020JB019862.
- Yu, W.***, Lin, J. T., Su, J., Song, T. R., & Kang, C. C. (2020). S-coda and Rayleigh waves from a decade of repeating earthquakes reveal discordant temporal velocity changes since the 2004 Sumatra Earthquake. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, e2020JB019794.

**本季成員發表文章(2020/06~)****Accepted:**

- Walia, V.*, Kumar, A., **Fu, C.C.**, Hong, W.L., & Yang, T.F., (2020) Study of Fault Traces in Taiwan Using Soil-Gas Geochemistry: An Overview. *Radon: Detection, Exposure and Control, NOVA SCIENCE PUBLISHERS*. 45-78.
- Yamada, M., I. Cho, **C.H. Kuo, C.M. Lin**, K. Miyakoshi, Y. Guo, T. Hayashida, Y. Matsumoto, J. Mori, Y.T. Yen, and K.C. Kuo (2020). Shallow subsurface structure in Hualien basin and the relevance to the damage pattern and fault rupture during the 2018 Hualien earthquake. *Bulletin of Seismological Society of America*.
- Chao, S.C., **C.M. Lin, C.H. Kuo, J.Y. Huang, K.L. Wen**, and Y.H. Chen (2020). Implementing Horizontal-to-Vertical Fourier Spectral Ratios and Spatial Correlation in a Ground Motion Prediction Equation to Predicting Site Effect. *Earthquake Spectra*.
- Chan, C. H., K. F. Ma**, J. Bruce H. Shyu, Y. T. Lee, Y. J. Wang, J. C. Gao, Y. T. Yen, and **R. J. Rau**. Probabilistic Seismic Hazard Assessment for Taiwan: TEM PSHA2020. *Earthquake Spectra*.
- Huang, T. C.* and **Wu, Y. M.** (2020) Generalized Orthonormal Moment Tensor Decomposition and Its Source-Type Diagram. *Journal of Seismology*.

致謝

本季刊由 TEC 辦公室成員饒瑞鈞主任、馬國鳳特聘研究員、許雅儒研究員、童忻博士、楊詠寧、黃淑真及陳昭邑協助編輯，第二十九期內容感謝中央研究院地球科學研究所林欽仁研究助技師、劉怡偉助研究員、黃信樺助研究員、國立臺灣大學地質科學系馮冠芙博士生及國立師範大學地球科學系陳卉瑄教授提供。