

出國報告（出國類別：實習）

研習快速鑑別地震破裂面 與地層微動觀測及技術轉移

服務機關：交通部中央氣象局地震測報中心

姓名職稱：甘志文技佐

派赴國家：加拿大

出國期間：98年3月4日至98年8月7日

報告日期：98年9月11日

摘要

在地震、地質或地球科學相關的科學領域中，求解地震破裂面一直是相當重要的課題，因此發展出許多的理論或方法。這些方法的共同缺點為耗時且需以試誤法求得最佳解。本次研習之震源掃描法(Source Scanning Algorithm；SSA)即可有效改善這些缺點。經由理想的測站排列實驗，證明此方法適用於台灣地區，並實際應用於 921 餘震個案。

地層微動活動監測系統(Tremor Activity Monitoring System；TAMS)的發展，使得地層微動(tremor)自動觀測得以實現。台灣地區目前僅有 2001 年 11 月 14 日的觸發型 tremor 被發現。我們利用此一事件做基礎，並經適當的參數調整，建立台灣地區專屬的 TAMS 監測系統，經測試後，TAMS 確實能判斷此觸發型 tremor。

本次出國研習主要目的乃向加拿大地質調查所太平洋地球科學中心(Pacific Geoscience Centre, Geological Survey of Canada；PGC)研究員高弘博士學習此兩套技術，並建立適合於台灣的參數，以提升本局地震測報效能。

目次

	頁次
摘要.....	I
目次.....	II
一、目的.....	1
二、過程.....	5
三、心得及建議.....	14
附錄.....	19

一、目的

台灣位處歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊碰撞擠壓構造帶上，因此地震活動特別活躍。由過去的統計資料來看，台灣地區二十世紀總計有 91 個災害性地震(圖 1.1)。雖然這些地震大部分發生在東部外海，但若震央位於島內，則地震往往會造成較嚴重的災害。又根據數據顯示，發生在台灣西部地區的地震所造成的災害通常最為嚴重(如圖 1.1、1.2)，特別是在嘉南地區。主要原因為西部地區所發生的地震震源通常較淺，故在地表感受的震度相對較為巨烈，是故造成的破壞當然也較為嚴重；又此區人口甚為密集，因此一但有地震災情傳出，不但會造成難以估計的經濟方面損失，且會更直接造成生命上的威脅，例如 1935 年新竹—台中裂震與 1999 年集集大地震為最(表 1.1)。

1999 年 9 月 21 日位處於中台灣西部麓山帶發生規模(Mw)7.6 之強烈地震，震央位置接近南投縣集集鎮。該斷層破裂長度約 80 公里，最大錯動距離達 10 公尺，因此斷層沿線及以東的上盤地區因斷層錯動及激烈地動而造成嚴重破壞。加上餘震不斷發生，其中不乏規模大於 6 之餘震，因此災情更是不斷擴大，這是一次慘痛又寶貴的經驗。除西半部外，東半部其實也有不少災害性地震發生，只是因多數震央位於外海，地震能量經幾何擴散效應傳至本島時，其破壞力已降低至相當程度，且東半部人口相對疏散，於是災害損失通常比起西半部小了許多。話雖如此，但並不代表東半部的地震是不足以關注的。

在地震學或地球科學上，台灣地區是一個最為活躍的天然實驗室之一，且島上設置了各類的地震觀測記錄儀器，如此可幫助我們替大地把脈以了解地震背後的成因，乃至觀測地震活動與減災、防災等工作。如今台灣有得天獨厚的先天條件及高密度的地震站，因此地震速報系統得以在氣象局實現，可有效提升地震防災及減災之效能。

鑑別地震破裂面能更明瞭區域應力或構造等特性。從震源機制了解地震斷層面是最直接的方法之一，但由於雙力偶的原因，因此我們無法從兩組斷層面解中直接判斷何者為真實破裂解？為解決此問題，許多方法或理論被提出；發展至今已有數套穩定的理論或方法可達到我們預期的目標，如 Doppler effect produced by directivity、Finite dimension source method 與 dislocation on

rupture plane...等。這些理論或是方法中，各自擁有著自己的特色與優點，但它們皆存在著幾個共通的缺點：

1. 它們都需要其它資訊（如震源機制解）的輔助，才得以決定地震的真實解破裂面。
2. 他們都需要假設一些參數並且需要多次的嘗試並調整這些參數，以求得最佳解。
3. 這些方法的資料前處理與電腦計算都相當的冗長且耗時。

震源掃描法(Source Scanning Algorithm；SSA)是一套新穎而且不同於上述的一套新方法。起初被設計來解決地層微動(tremor)定位的問題，在經過改良後便能滿足我們對地震破裂面的鑑別問題，且此方法並無上述的缺點。更明白的說，此方法不需其它額外的資訊協助(如震源機制解)便能完成鑑別地震破裂面的工作，此乃最大特色之一，且此方法僅需地震波形紀錄便能完成演算，進而鑑別地震破裂面，不像其它方法需假設眾多參數並調整其值才能得之。

地震預測是地震學的終極目標之一，而 tremor 的活動目前被認為與大地震之間彼此存在著某種關係，但它的地動訊號通常太過於微弱，以至於早期都被當成背景雜訊。近年來寬頻地震儀的蓬勃發展，以至於能完整的紀錄寬廣的頻帶及微弱的訊號。圖 1.3 說明了前述特性，tremor 訊號夾於背景訊號內，但由於太過微弱以致無法直接顯示出來(如圖 1.3a)，經過濾波後的波形(圖 1.3b)，tremor 訊號即被突顯出。為了有系統的連續觀察 tremor 活動，於是發展出地層微動活動監測系統(Tremor Activity Monitoring System；TAMS)。

此行目的，旨在習得 SSA 與 TAMS 的原理、方法及技術，並應用於台灣地區的地震活動，希望能更深入的了解台灣地震活動機制及與大地震的相關性，以提升本局的地震測報效能。

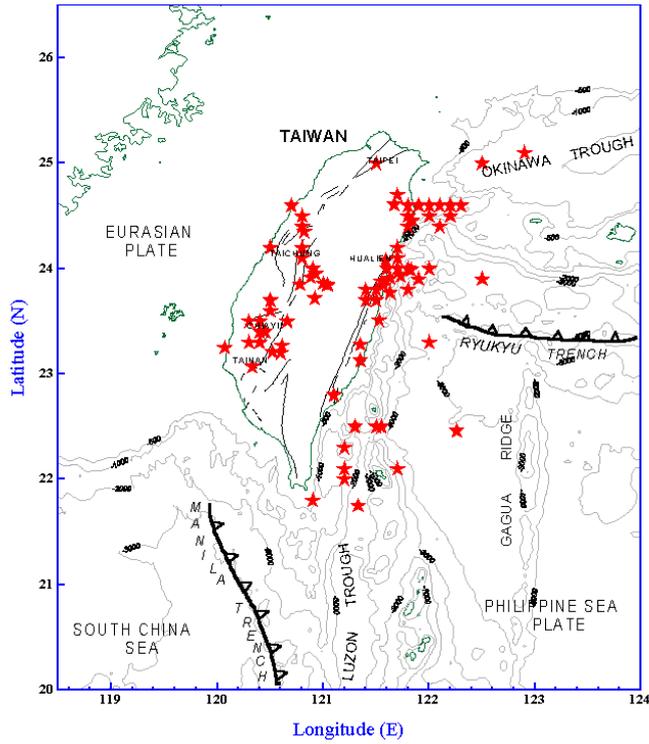


圖1.1、二十世紀(1901-2000)台灣地區災害性地震分布圖。



圖1.2、台灣十大災害地震震央分布圖。

No	年	月	日	時	分	緯度	經度	地點	震深 源度	規模	人口 死亡	房屋 全毀	備註
1	1935	4	21	6	02	24.4	120.8	竹縣關刀山附近	5	7.1	3276	17907	新竹-台中烈震。獅潭、屯子腳斷層。
2	1999	9	21	1	47	23.9	120.8	日月潭西方9公里	8	7.3	2413*		二十世紀台灣島內規模最大地震,車籠埔斷層活動,錯動長達80公里。南投、台中縣災情慘重。(集集大地震)。

表1.1、新竹烈震及集集大地震地震參數及災害統計。

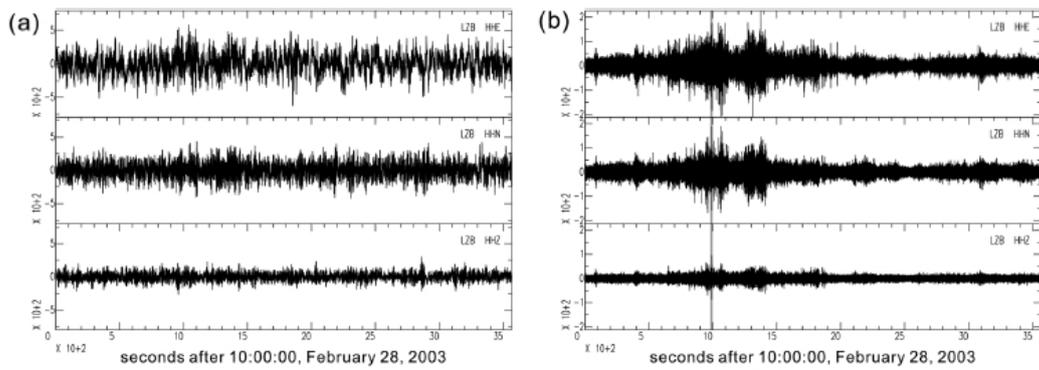


圖1.3、(a)圖為原始紀錄波形；(b)圖為濾波後波形圖，tremor訊號因而被突顯出。

二、過程

本次研習乃向加拿大地質調查所太平洋地球科學中心(Pacific Geoscience Centre, Geological Survey of Canada ; PGC)的 SSA 及 TAMS 原創者高弘博士取經。PGC 位於加拿大西岸卑斯省的溫哥華島上(圖 2.1)，隸屬加拿大國家資源部地球科學局(Earth Science Sector of Nature Resource Canada)，主要被賦予地震監測及研究、海洋科學研究及板塊力學研究，並負責對相關知識的解釋及宣導工作。

高弘博士於 1990 年代初期服務於中研院地球所，從事台灣寬頻地震網(Broadband Array in Taiwan for Seismology ; BATS)之建置及相關研究工作，於 2000 年初期受聘於 PGC 擔任地球科學研究員，主要的研究領域為：Tremor 觀測研究、構造逆推、震矩張量逆推、構造解釋及地震軟體開發…等(近期相關文獻請參見附錄)。

研習期間共分兩個階段進行：第 1 階段進行 SSA 學理探討及資料處理，約 4 個月完成。第 2 階段則致力於建立台灣專屬的 TAMS 觀測系統，約 1 個月完成，分項說明如下：

(一)、震源掃描法(Source Scanning Algorithm)

從理論上來看 SSA，數學式如下：

$$br(\eta, \tau) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |u_n(\tau + t_m)| \quad (1)$$

其中， η 為地震發生位置、 τ 為地震發生時間，假設此地震共被 N 個測站所記錄， t_m 為測站 n 至震源位置 η 之走時。於是在震源位置為 η 、時間為 τ 時，第 n 個測站的記錄值 u_n 為 $u_n(\tau + t_m)$ 。將 N 個測站的記錄值 u_n 取絕對值相加後平均值稱為 brightness ($br(\eta, \tau)$)。在物理上，它所表達意義為：當地震發生時，震源區各個子地震依其所發生的位置釋放其大小不等的能量強度，當震波傳遞至測站便產生不同強度的地動震幅而被紀錄之。(1)式即利用此概念，有系統的搜尋可能的發震時間與空間位置，當 SSA 找到發震的時空時，也意味著各個測站的到時對應著區域震幅最大值，這就是 SSA 的精神所在。

雖然方程式看似簡易但在資料處理時卻會經常性的引入人造震源

(Artifacts)，圖 2.2 清楚的說明人造震源所帶來的影響。我們假設震源在水平面上呈現東北-西南走向的破裂分布，在剖面上呈現向東傾(圖 2.2b)，經過 SSA 計算後得到的震源位置在水平面上則呈現西北-東南走向分布(圖 2.2a)，這與假設結果是完全背道而馳，此一問亦即是資料處理時的最關鍵所在。所幸，在高弘博士不厭其煩也毫不保留的把關鍵點一一點出並詳加說明，經過不斷的揣摩與反覆的測試，最後終於能克服此問題。

圖 2.3 為一純假想測試，假設在震源區中有 9 個點震源在同一時間不同位置(假設每個點震源的間距為 3 公里)發生了挫動(如圖 2.3b)，經過路徑傳遞後到達測站而被紀錄之。於是將理論地震波經 SSA 有系統的對時間與空間掃描後，正確無誤的求得最大 brightness 的時間即為發震時間，並將其所得之空間分布畫於圖 2.3a，圖中在水平面上完美的呈現正確的震源分布，而在垂直面上雖有較大的誤差但仍可鑑別斷層破裂傾角。

為了解 SSA 應用於實際地震時的特性，我們假設地震站成方形陣列排列，且假設地震的發震位置在此陣列的中央(圖 2.4a)；圖 2.4b 為震源區的震源分布圖，假設震源依序由西南至東北破裂且傾角為向東傾斜以模擬真實地震破裂過程。經過 SSA 計算後得到的震源影像如圖 2.4c，3 個震源皆能被還原至理論假設的位置上。

事實上，地震站不會分布的如此完美，且台灣為一狹長狀島嶼，通常在近海所發生的地震其測站覆蓋率約僅包覆一半的方位分布，於是我們需事先了解 SSA 是否適合在台灣使用。因此我們假設當測站只分布在上半部的情況下(圖 2.5a)，經 SSA 計算後的成像結果如圖 2.5b。圖中依然可輕易的判別地震破裂走向，雖然解析度不如先前的實驗(圖 2.4c)，特別是在深度上，但尚不影響鑑別破裂面的能力。我們也同時測試過不同的地震破裂走向、傾角以及不同的測站分布，大抵而言，其結果皆能穩定且能正確的反應出震源相對位置。

我們經由理論模擬證明 SSA 在台灣的環境條件下仍可適用，如此便能步入實際應用階段。1999 年 9 月 21 日發生 20 世紀台灣地區最大的地震(簡稱 921 地震)，主震發生後不斷的產生餘震，其中不乏規模大於 6.0 以上的餘震。我們選取其中之一規模 6.6，發震時間為 1999 年 9 月 22 日凌晨 02:03:41.0 來做分析。此地震的震央位置如圖 2.6a，其震矩張量(Central Moment Tensor; CMT)解為南北走向之逆斷層，經由先前的理論測試得知，測站選取時應儘可能的使測站

包覆角度越寬廣，如此越能提高解析度，為儘可能滿足此條件，於是選用台灣強地動觀測計劃 (Taiwan Strong Motion Instrumentation Program; TSMIP) 測站以增加包覆角度，使更趨於完整。經 SSA 計算後得到的影像如圖 2.6b，圖中同時把幾個區域亮點(地栓)用星號表示其位置，從圖中我們可得知幾個地栓位置呈現由南往北移動，且為傾角為向東傾斜。此結果與主震及斷層傾角的結果相吻合。

(二)、地層微動活動監測系統(Tremor Activity Monitoring System)

圖 1.3 已經說明 tremor 的訊號形態，因此必需設計一邏輯判斷式判定 tremor 訊號。圖 2.7 為 TAMS 邏輯判斷圖表，它是以 SIR 與 μ_{MA} 所組成，其中 SIR 的表示式如下：

$$SIR = \frac{SI_{\max}}{\mu_{si}} \quad (2)$$

$$SI_i = \sqrt{\frac{i\mu_{|y|}^2 - i\mu^2_{|y|}}{i\mu^2_{|y|}}} \quad (3)$$

$$\mu_{si} = \frac{\sum_{i=1}^k SI_i}{k} \quad (4)$$

其中 k 為測站數量、 y 為震幅值， $i\mu_{|y|}^2$ 與 $i\mu^2_{|y|}$ 分別代表絕對震幅與絕對震幅平方的移動視窗平均值，整個數學式所表達意義為訊號強度的變化； μ_{MA} 的數學式如下：

$$\mu_{MA} = \frac{\sum_{i=1}^k i\mu_{|y|}}{k} \quad (5)$$

所表達的物理為移動視窗內的訊號平均值。當此兩函數值交落在綠色區塊時代表著此筆地震訊號為雜訊，若落於粉紅色區塊則代表為地震訊號，但若落於黃色區塊時則代表為 tremor 訊號。圖中的邏輯判斷臨界值只適用於加拿大地區，因此我們必需求得適合台灣地區的邏輯圖。

截至目前為止的相關文獻，台灣地區僅有 2001 年 11 月 14 日的觸發型 tremor 被發現。我們利用此一事件做基礎，建立台灣地區專屬的 TAMS 觀測系統。圖 2.8 為經過參數調整後的 TAMS 計算結果，圖中顯示在當天的 9 點 40 分時

有多筆地動紀錄被判斷為 tremor 訊號，經高頻濾波展示波形後，判斷確實為該觸發型 tremor 事件。

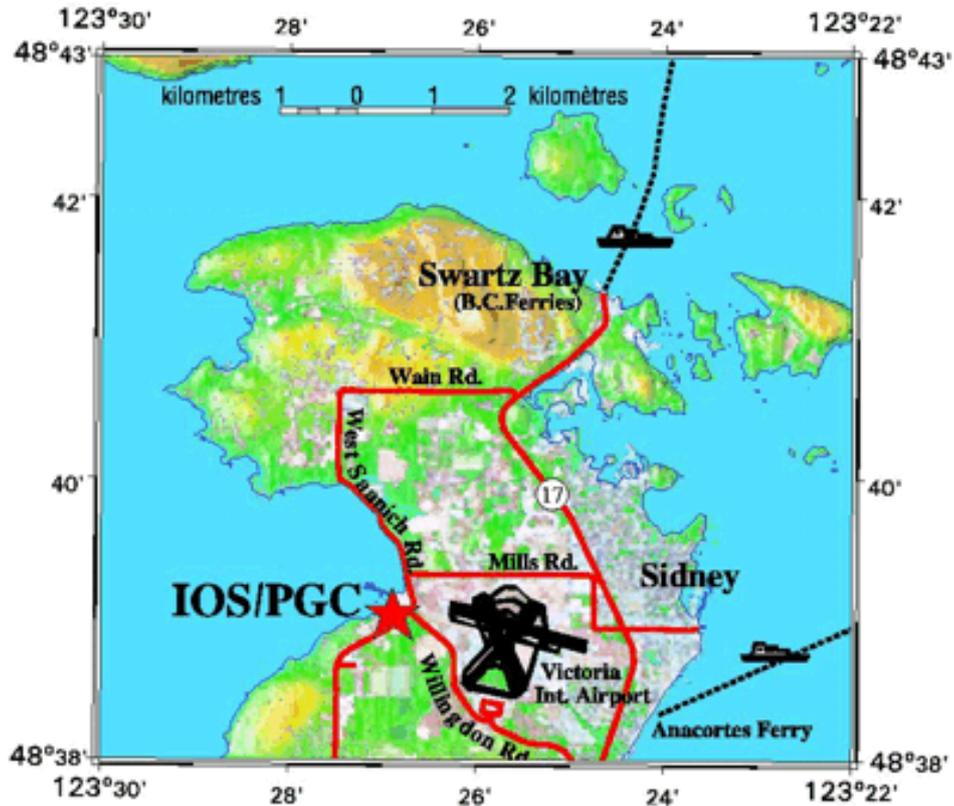


圖 2.1、PGC 位置圖。

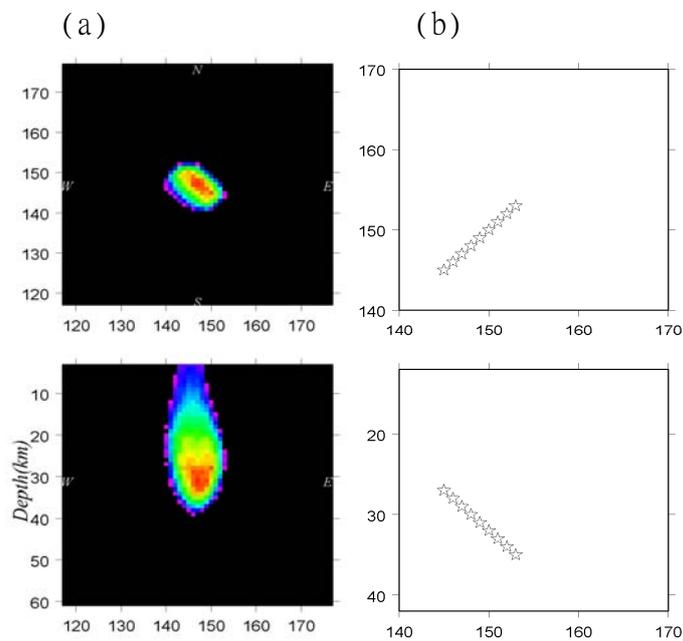


圖 2.2、SSA 理論測試。假設震源在水平面上呈現東北-西南走向，在剖面上呈現向東傾，如(a)圖所示；(b)圖為經 SSA 計算後得到的震源位置分布圖。

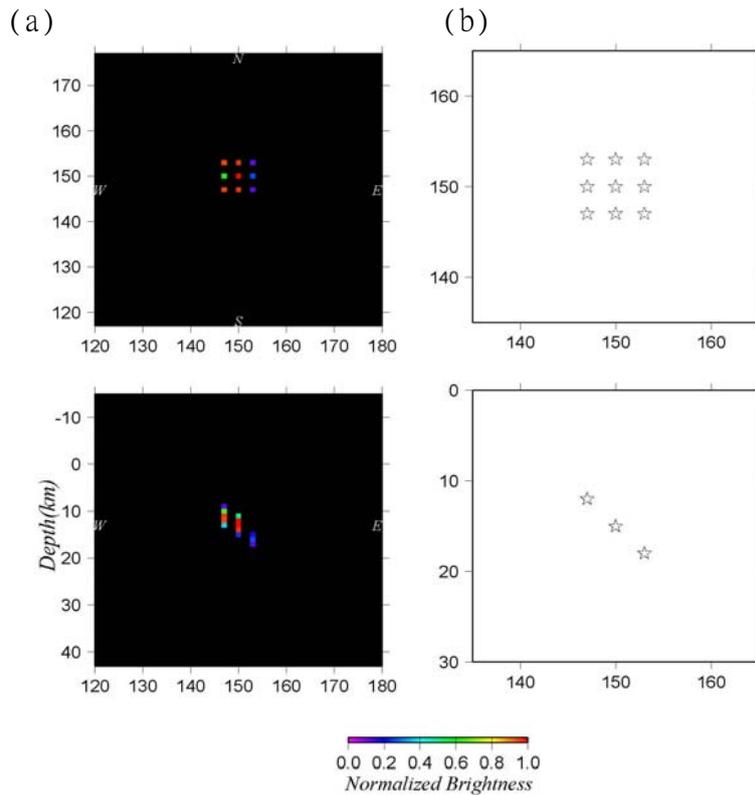


圖 2.3、理論模擬斷層破裂測試圖。假設 9 個震源在水平面上呈現方格狀，每個間格為 3 公里，而剖面上呈現向東傾，如(b)圖所示；(a)圖為經 SSA 計算後得到的震源位置分布圖。

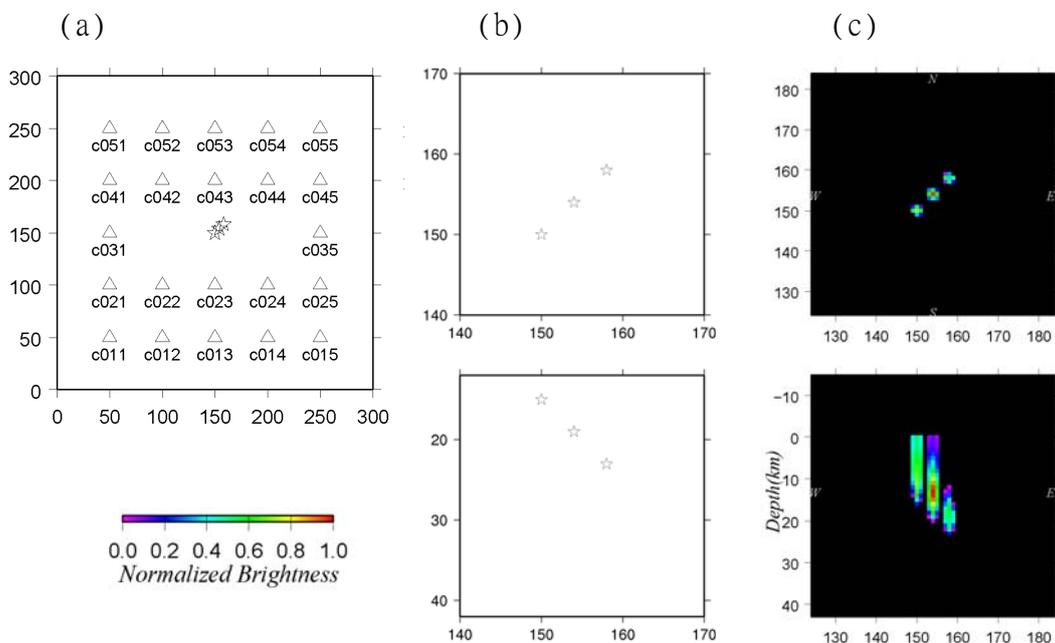


圖 2.4、(a)測站與震源分布圖、(b)模擬震源為西南-東北走向且傾角為向東傾斜；(c)為經 SSA 掃描後得到的影像，可清楚的得到震源為西南-東北走向且傾角為向東傾斜。

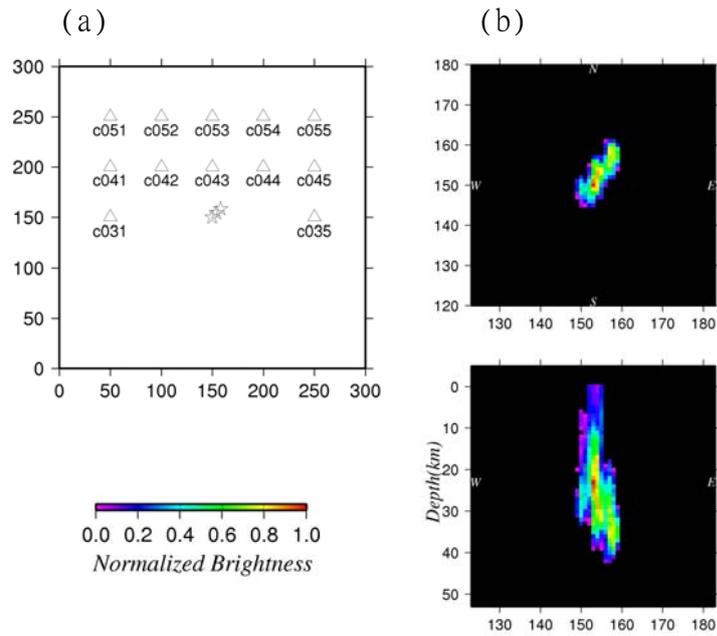


圖 2.5、(a)圖為測站分布僅在震源的上半部時，其 SSA 的結果如(b)圖，雖然仍可辨別破裂面的方向，但解析度已不如測站覆蓋良好的狀態。

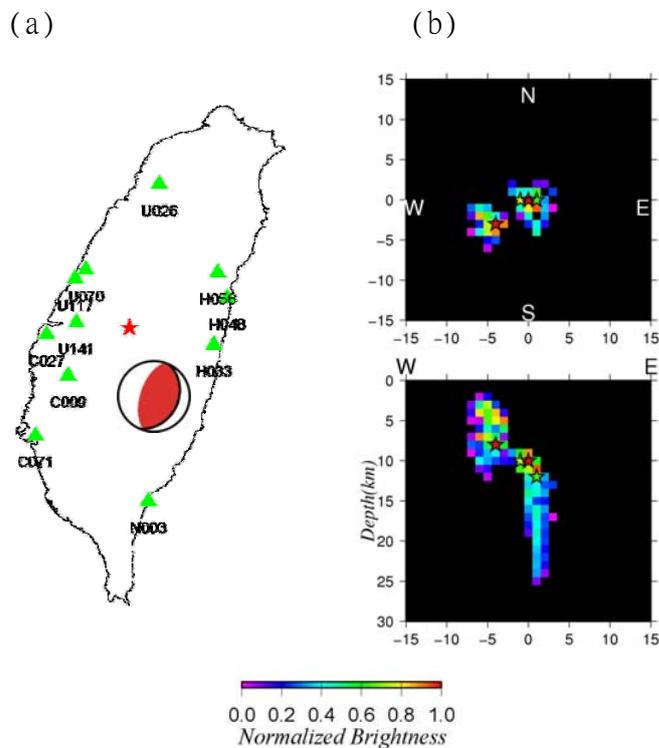


圖 2.6、(a)圖紅星為震央位置，其 CMT 震源機制為近南北走向之逆斷層，綠三角形為選用的地震動紀錄資料；(b)圖為經 SSA 計算後所得的影像圖，其中星號為最亮點的位置。

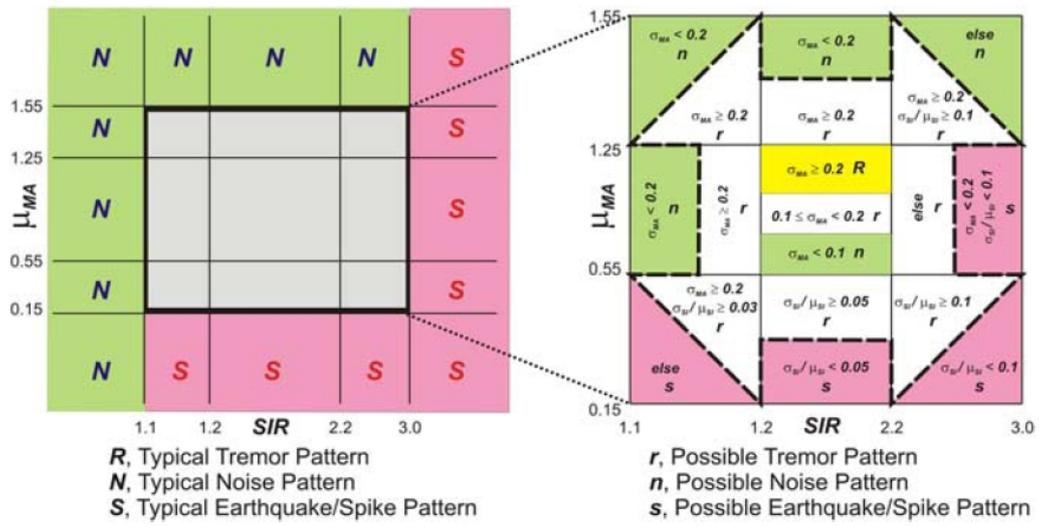


圖 2.7、TAMS判斷 tremor 訊號邏輯圖。綠色、粉紅色與黃色區塊分別代表雜訊區、地震與 tremor 區域，以此判斷 SIR 與 μ_{MA} 落點所對應的訊號形態。

Seismic Activity on 20011114_40

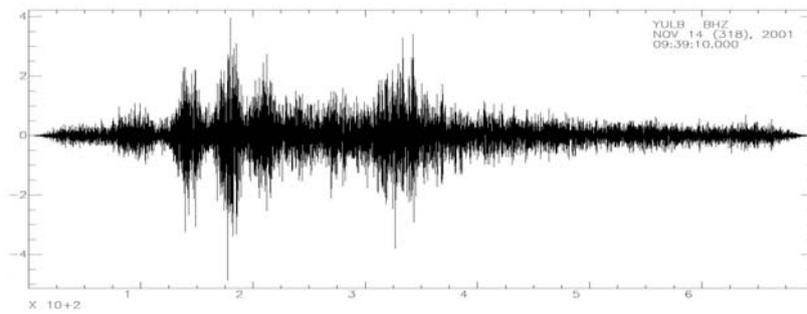
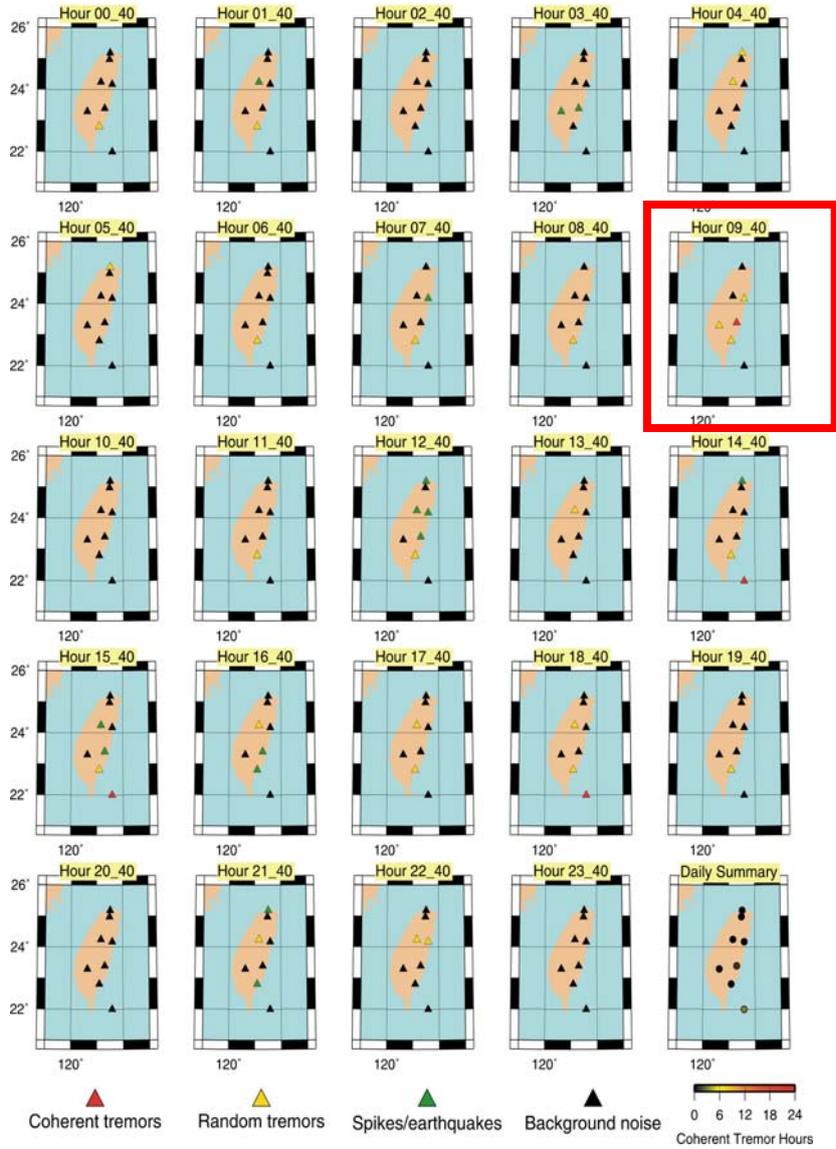


圖 2.8、TAMS 計算結果。紅框中表示 TAMS 精準的發現 tremor 活動。下圖為玉里站的 tremor 波形。

三、心得及建議

(一)、心得

在出國研習的 5 個月中，除了研習觀測技術所得的收獲外，對 PGC 的地震觀測系統及其它方面亦有所收獲，乃將心得整理如下：

1. SSA 方面：SSA 的理論基礎不同於傳統的模擬地震波形以求得最小的不吻合度(misfit)為最佳解，它基於同調性的地震動強度訊號疊加，以求得地栓所對應的時空分布。且因不需如傳統的方式假設眾多參數，此為 SSA 最大的優點及特色。除此之外，傳統的方法需給定震源機制的兩組輔助面參數後，經由最小不吻合度來判定何者為最佳解，但經常有兩組面解的不吻合度值差異過小發生，以致於無法判定何者為最佳斷層面解。然而 SSA 並無此困擾，且不像傳統方法計算耗時，故在判定破裂面的課題中可算是較有效率且能力更為強大的工具。雖然我們也成功的應用於真實的例子，但由於 SSA 是相當新穎的理論，因此仍需累積更多的實例經驗來幫助了解在應用上時可能到的盲點，如此便能使 SSA 在應用上更趨完備，且能更進一步提升台灣的地震觀測能力。
2. Tremor 方面：非火山引起的 tremor 是一項相當新穎的發現，它具有很微小且緩慢的釋放能量特性，活動時間可長達數分鐘至數天。因此它經常在人們無所感覺的狀態下釋放應力累積的能量，這從防災的觀點來看或許是一件好事。目前我們已經擁有適合台灣地區的 TAMS 軟體，且已經在運行、追溯歷史資料中；但距離穩定觀測仍有一段漫長且辛苦的路要走。
3. 學習與討論：PGC 這機構有點類似氣象局地震中心，他們一部分的人員負責地震觀測的運作，另一部分則從事地震研究。在他們的工作時間中，每天在上下午各有一個所謂的 coffee break，有問題的人就會在此時段聚在一起討論所遇到的各種困難或瓶頸。當然，他們也樂於把自己專業領域上的經驗或想法表達出來，使對方直接或間接的取得解決問題的方法或方向。事實上，他們都已經是頂尖的專業或研究人員了，不過他們願意整合各自擁有的專長，試著解決彼此間所遭遇的科學問題並時常激發無可限量的靈感。故在此的思想是多元且較完整的，這是在台灣較少見的一種模式。

4. 進修方面：在 PGC 每個星期幾乎都有精彩的演講，講述的題目更是包羅萬象，並且亦常有來自世界各地的研究人員到此單位訪問，所以經常可聽到來訪學者的精采又新穎的演講內容，圖 3.1 為 Makolm Sambridge 於講述逆推原理的演講照片。他們借由這種模式充實自己，使得對地震觀測的能力不斷提升並與世界潮流併行。

(二)、建議

1. 備份機制：圖 3.2 為加拿大西岸的地震訊號即時接收系統，此套系統皆由 sun 主機組成（因 sun 主機相對而言較為穩定），即時收錄所有地震資料並儲存於儲存設備中，且儲存設備為兩套同步收入以避免機器故障導致系統停止運作。此外，即時資料也同時透過網路傳送一份資料至渥太華總部，以達到異地備份機制。在此值得我們學習的是異地備源機制，我們可以以較低成本的方式透過網路將資料即時傳送至其它指定處所，有效降低風險。
2. 地震防災演練：在 PGC 的地震報告發布流程採用時自動化處理，並把處理結果同步展示於展示屏上(圖 3.3)，展示著地震波形及自動定位後的地震位置。此流程與氣象局相似。但有一最大不同的地方在於他們相當重視防災演習，因此有時他們會無預警的發布假的大地震訊息，相關單位收到訊息後便會立刻啟動防救災機制。我想這應該是台灣民眾目前仍無法接受的模式，但或許我們可以有計畫的透過模擬或演習的方式，將地震防災機制不完整的地方補齊，也同時教導民眾地震來時該如何反應？相信如此可有效提升減災效能。
3. Cluster(叢集)：在電腦設備上，我對圖 3.4 的兩套 cluster 特別感到有興趣。有鑑於個人電腦快速的發展，以至於效能及穩定性已與 sun 等級相去不遠，但價格卻相對較低，且 cluster 是利用一般的 PC 串接起來，例如串接 10 台 PC(node)成一套 cluster，並利用平行計算的概念，讓此 cluster 的執行效率遠高於 1 台 sun 主機的效能，且一樣達到多人多工的需求。不但如此，當其中某幾個 node 硬體故障時，只需把故障的機器直接置換即可復原，且故障期間整座 cluster 仍然可以繼續運作，故在近幾年來，此產品迅速蓬勃發展。舉例來說，若有一計算量須 10 小時才能計算完成的地震資料，利用此套叢集，將計算分給 10 台 PC 同步處理，且每台電腦又是雙核

心，故相當於有 20 台電腦在做同步計算，故僅需花費半小時便能把 10 小時的工作量完成。更令人振奮的是，架設叢集的軟體為免費公開軟體，且較無維護上的困擾，且它可忍受 client 端電腦故障而不影響整套系統的運作，這是一套相當值得用於地震學上大量計算的工具之一。在氣象局，有些機器便能利用 cluster 概念提高機器效能，也能減少機器的運作數量、節能減碳，且維護費用也可降低。



圖 3.1、演講實況。Makolm Sambridge 講述地震學上的逆推問題。



圖 3.2、地震訊號即時接收系統。



圖 3.3、地震即時展示系統。



圖 3.4、叢集系統。

附錄

2009

Mapping the sedimentary rocks and crustal structure of the Nechako Basin, British Columbia (NTS 092N, O, 093B, C, F, G), using teleseismic receiver functions; Kim, H S; Cassidy, J F; Dosso, S E; Kao, H; in, **Geoscience BC Summary of Activities 2008;** . Geoscience BC, Report 2009-1, 2009; pages 163-170(ESS Cont.# 20080438)

Mapping the sedimentary rocks and crustal structure of the Nechako Basin, British Columbia (NTS 092N, O, 093B, C, F, G), using teleseismic receiver functions; Kim, H S; Cassidy, J F; Dosso, S E; Kao, H; in, **Geoscience BC Summary of Activities 2008;** . Geoscience BC, Report 2009-1, 2009; pages 163-170(ESS Cont.# 20080706)

Mapping sedimentary basins across Canada using receiver function analysis; Cassidy, J F; Kao, H; Al-Khoubbi, I; Halliday, J; Kim, H; Dosso, S; Dehler, S. *Seismological Research Letters* vol. 80, no. 2, 2009; pages 372(ESS Cont.# 20080579)

2008

Identifying the rupture plane of the 2001 Nisqually, Washington, earthquake; Kao, H; Wang, K; Chen, R -Y; Wada, I; He, J; Malone, S D. *Bulletin of the Seismological Society of America* vol. 98, no. 3, 2008; pages 1546-1558(ESS Cont.# 20070438)

Tremor activity monitoring in northern Cascadia; Kao, H; Thompson, P J; Shan, S -J; Rogers, G; Dragert, H; Spence, G. *Eos, Transactions of the American Geophysical Union* vol. 89, no. 42, 2008; pages 405-406(ESS Cont.# 20080016)

Mapping crustal structures of the Nechako Basin using teleseismic receiver functions; Kim, H; Cassidy, J F; Dosso, S E; Kao, H. *Eos, Transactions of the American Geophysical Union* vol. 89, no. 53, 2008; 1 pages(ESS Cont.# 20080383)

Mapping sedimentary basins across Canada using receiver function analysis; Cassidy, J F; Kao, H; Kim, H; Dehler, S; Dosso, S; Halliday, J. *Eos, Transactions of the American Geophysical Union* vol. 89, no. 53, 2008; 1 pages(ESS Cont.# 20080390)

Characterizing an "uncharacteristic" ETS event in northern Cascadia; Wang, K; Dragert, H; Kao, H; Roeloffs, E. *Geophysical Research Letters* vol. 35, L15303, 2008; 5 pages(ESS Cont.# 20080079)

The Upper Baezaeko River, British Columbia, earthquake sequence: Unusual seismic activity in the Anahim Volcanic Belt; Cassidy, J F; Balfour, N; Hickson, C; Kao, H; Mazzotti, S; Rogers, G C; Bird, A; Bentkowski, W; Al-Khoubbi, I; Esteban, L; White, R; Caplan-Auerbach, J; Kelman, M. *Seismological Research Letters* vol.

79, no. 2, 2008; pages 334(ESS Cont.# 20070487)

January 2008 Revere-Dellwood Fault earthquake sequence offshore British Columbia; Bird, A L; Rogers, G C; Cassidy, J F; Kao, H; Dragert, H; Bentkowski, W. *Seismological Research Letters* vol. 79, no. 2, 2008; pages 295(ESS Cont.# 20080028)

2007

Evidence for underthrusting beneath the Queen Charlotte Margin, British Columbia, from teleseismic receiver function analysis; Bustin, A M M; Hyndman, R D; Kao, H; Cassidy, J F. *Geophysical Journal International* vol. 171, no. 3, 2007; pages 1198-1211(ESS Cont.# 20060650)

2006

Spatial-temporal patterns of seismic tremors in northern Cascadia; Kao, H; Shan, S-J; Dragert, H; Rogers, G; Cassidy, J F; Wang, K; James, T; Ramachandran, K. *Journal of Geophysical Research* vol. 111, no. B3, B03309, 2006; 17 pages(GSC Cont.# 2005506)

2005

Investigating the relationship of episodic tremor and slip to seismic activity along the Cascadia Margin; Dragert, H; Kao, H; Rogers, G C; Cassidy, J F; in, **American Geophysical Union Fall Meeting 2005: abstracts;** . *Eos, Transactions of the American Geophysical Union* vol. 86, no. 52, 2005; 1 (G43A-03) pages(ESS Cont.# 2005511)

A wide depth distribution of seismic tremors along the northern Cascadia margin; Kao, H; Shan, S -J; Dragert, H; Rogers, G; Cassidy, J F; Ramachandran, K. *Nature (London)* vol. 436, no. 7052, 2005; pages 841-844(ESS Cont.# 2004447)

2004

The Source-Scanning Algorithm: mapping the distribution of seismic sources in time and space; Kao, H; Shan, S-J. *Geophysical Journal International* vol. 157, no. 2, 2004; pages 589-594(GSC Cont.# 2003248)