集集地震前異常地震活動現象之回顧

中央大學地球物理研究所　陳建志
台灣大學地質研究所　　吳逸民

摘　要

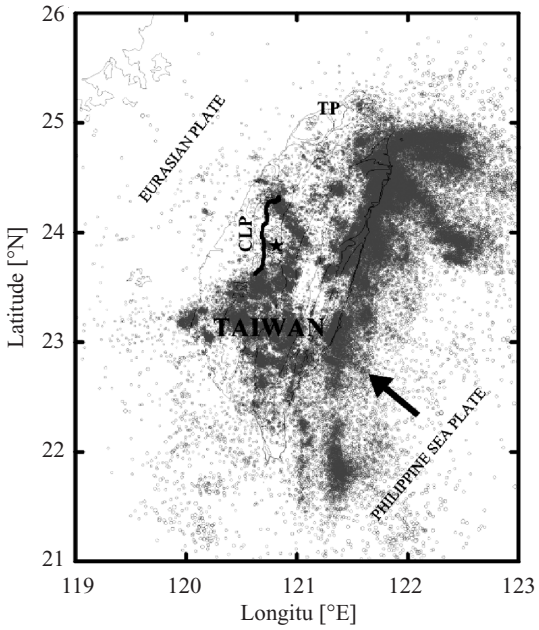
發生在 1999 年 9 月 21 日的集集地震，規模達到 7.6，是台灣從 20 世紀以來最大的陸上地震。本文從地震活動度異常，包括所謂的地震活化 (seismic activation)、地震寧靜 (seismic quiescence)和活動度反轉(seismic reversal)等行爲，回顧了集集地震可能的前兆現象。根據 Region-Time-Length 和 Pattern Informatics 兩種演算法，在震前 6 年左右，集集主震的震央區域有極不規律的地震活動度。而從統計學的標準計分值(standard normal deviate *Z*-value)變化圖來看，整體台灣區域的地震顯示出東部外海寧靜與中部集集震央區域活化的特徵。一些地震前兆現象的觀測，可以根據自組織相變(self-organizing spinodal)模型予以理解。從臨界地震理論(critical point theory for earthquakes)的角度思索，前震、主震和餘震有著密不可分的相關性，它們代表著地震循環裡一種空間中高應力區域協同(cooperative)作用的結果。

引言

在板塊構造學說的框架下，台灣島位於菲律賓海板塊和歐亞大陸板塊的碰撞邊界，屬於西太平洋地震帶上的一個小島。歐亞大陸板塊沿著馬尼拉海溝往東隱沒到菲律賓海板塊之下，而菲律賓海板塊在台灣東北沿著琉球海溝方向隱沒到歐亞大陸板塊之下。在台灣附近，菲律賓板塊和歐亞板塊的相對聚合速率大約爲每百萬年 82 公里，方向約爲北偏西 50 度。台灣島的大部分範圍，普遍受到一個西北東南方向的擠壓力量。快速的板塊碰撞結果，造就了島上複雜的地質構造與崎嶇的地形，更使台灣成了地震頻繁的地區，在過去有許多重大的地震災害，陸續發生在這塊土地上。

1999 年 9 月 21 日規模 7.6 的集集大地震重創了中台灣，也是台灣 20 世紀以來規模最大的陸上地震。地震震央在北緯 23.853 度，東經 120.816 度，靠近南投的集集鎮，震源深度約 8 公里。除了對中台灣帶來嚴重的災害外，集集地震產生的地震波，也使遠在 150 公里外的臺北盆地傳出嚴重的災情。集集地震主要因車籠埔斷層錯動所致，在地表上車籠埔斷層破裂總長約達 100 公里。從全球定位系統資料（Global Position System）、地震波資料和野外調查結果顯示，主要的位移量在北段達到 9 公尺之多，而南段也有 3 公尺的位移。圖一中的星號顯示集集地震震央和車籠埔斷層地表破裂線。

地震活動反映著地殼應力、應變場在時間、空間上的複雜變化。從許多岩石實驗顯示，地震的發生涉及到斷層面上高應力條件。偵測一個主要地震前相關的地震活動度異常，乃因此很常在



圖一　集集地震發生前台灣區域地震震央分布圖。黑色星號為集集主震的震央位置；CLP 表示車籠埔斷層；TP 表示台北盆地；粗箭頭指出歐亞板塊與菲律賓板塊的相對運動方向

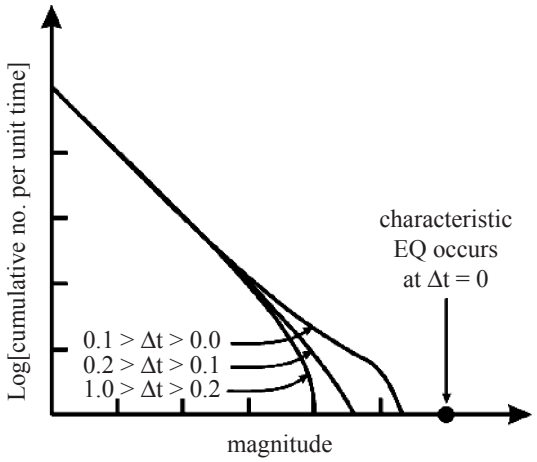
文獻裡被提出討論。其中地震活化（地震活動增加）和寧靜（地震活動減小），是兩個主要被廣泛討論的異常現象。以 Keilis-Borok 教授爲首的俄國團隊，主要便基於地震活化的前兆現象，根據一系列的統計演算進行震前約五至十年的中程地震預測。另一個寧靜的假說，主要認爲地震活動度的下降是大地震將要發生的前兆。一個逐漸被採用的地震分析軟體 ZMAP，便是被設計來偵測地震寧靜的。

透過研究一給定的時間區間內地震活動度的變化，我們可以調查與即將來臨的大地震有關的異常地震活動模式。本文即以集集大地震爲例，回顧一些可能與集集地震有關的前兆異常現象。

集集地震前台灣地區的地震活動度演化

有關地震現象的各種冪律(scaling law)（例如地震規模與頻率的 Gutenberg-Richter 定律、餘震次數衰減的 Omori 定律、震央和震源的碎型分佈等等），暗示了地震現象與一些統計物理中常見的臨界現象有很大的關聯性。在一個強烈地震前，文獻常報導有中規模地震次數變得頻繁的現象，而這些中規模地震發生的區域又遠比即將發生之破裂的線性尺度還要大出三至五倍，這種現象是很難用傳統的破裂理論予以解釋的。「臨界地震」的概念乃應運而生。

Rundle 等人基於標準的旋節相變(spinodal nucleation)理論，建議了一個自組織相變(self-organizing spinodal, SOS)模型，來解釋地震活動度的演化（圖二）。SOS 模型是一種一級相變過程的描述。有關一級相變過程的例子像是水的沸騰。在平衡熱力學系統中，水到了沸點會開始沸騰，直到全部的液態水轉化成水蒸氣。但是，如果謹慎地微調溫度上升過程，一種亞穩態過熱的液態水則能存在於高於沸點的溫度下，如此構成了一種相變中的旋節條件。隨機的熱或壓力漲落，在亞穩態體系中扮演著至關緊要的角色，它們可以使液態水在轉瞬間集結成水蒸氣，造成亞穩態的液態水突然沸騰。研究顯示，旋節相變行爲也像臨界現象一樣，存在著諸多熱力學量間的冪律。進一步地，對地震斷層系統，可以採取同處理一級相變一樣的熱力學手段，得到斷層滑移虧損量(slip deficit)的旋節方程式。而地震的頻率規模統計關係隨時間的變化，也可以在



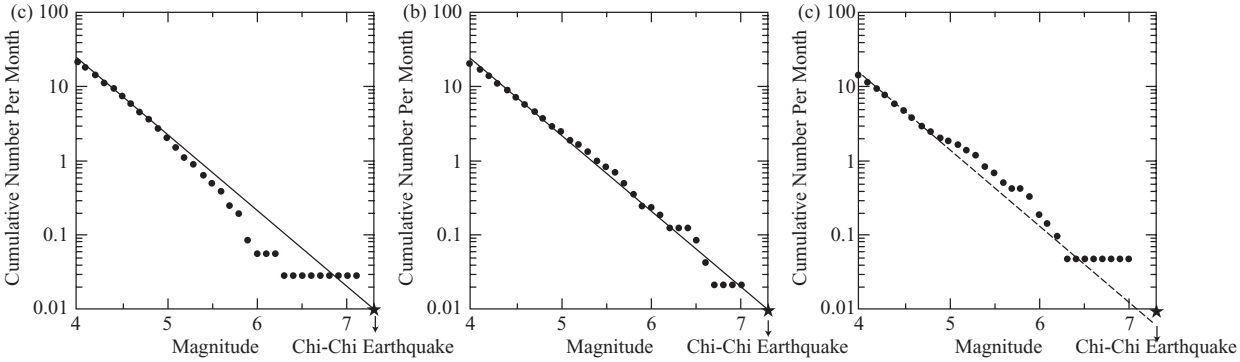
圖二　地震發生頻率與地震規模關係圖。圖中三條黑線，分別為 SOS 模型描述地震循環之早期（1.0 > Δ*t* > 0.2）、中期（0.2 > Δ*t* > 0.1）與晚期（0.1 > Δ*t* > 0.0）過程的分佈。這裡已將一個地震循環的時間長度化約為一個單位長

SOS 模型下獲得理解，同時象徵著斷層系統內關聯長度(correlation length)的改變。

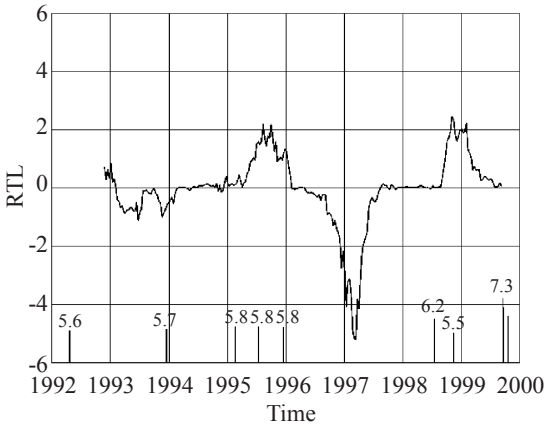
以前述自組織相變模型來描述地震系統，可以說一個強烈主震就像是系統達到了旋節相變點，而伴隨達到此相變前的氣泡集結過程，則彷彿如中規模地震異常的活化過程。於是，一個地震循環可因此分成三個階段。前期是缺乏中規模地震活動的時期，這使得 Gutenberg-Richter 關係曲線在中、強地震端有下垂趨勢。中期陸續有中規模地震發生，弭補前期的相對不足，於是 Gutenberg-Richter 曲線可以得到漂亮的冪律關係。到了晚期，中規模地震更顯頻繁，而 Gutenberg-Richter 關係曲線在中、強地震端則有上隆的行爲。集集地震前，台灣地區地震的頻率－規模分佈，正可以上述過程描述之。其中，前期與中期的時間分野點約在 1994 年，而中期與晚期的分野點則在 1998 年（圖三）。

集集震央區的 RTL 函數

根據之前對整個台灣大範圍區域地震活動度隨時間變化的研究結果，我們更進一步地使用改良的 Region-Time-Length（RTL）演算法，調查集集震央區的地震變化情形。RTL 演算法的基本概念，是從一特定距離和時間域內所發生的地震，來計算某指定時空點(x_i, y_i, t_i)的 RTL 函數



圖三　圖 a 至 c 分別為 1991~1993 年、1994~1997 年、1998~1999 年集集震前之地震頻率－規模分佈圖。台灣地區在集集震前的地震活動行為，恰如 SOS 模型所描述一般



圖四　集集震央區之 RTL 函數隨時間變化圖。圖中同時畫出地震規模大於 5.5，且距離集集主震震央約 110 公里的地震發生時間，長條上的數字為地震的規模

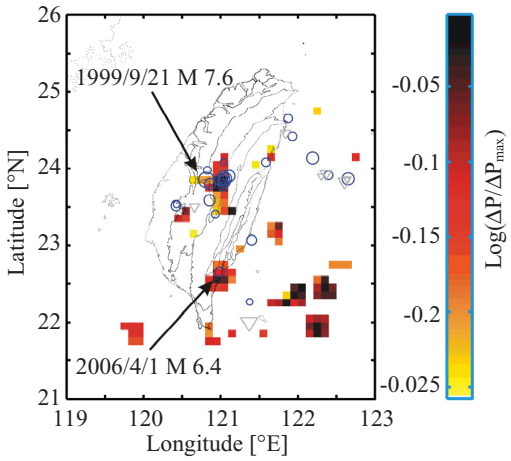
值。就函數而論，當一地震規模越大且越靠近調查的時空點(x_i, y_i, t_i)（即空間座標接近(x_i, y_i)，時間上靠近 t_i）時，該事件對(x_i, y_i, t_i)貢獻的 RTL 值就越大。RTL 值的改變，也因此反映涉及點(x_i, y_i, t_i)鄰近區域的活化與寧靜之地震活動度變化。

圖四顯示集集震央區從 1992 年到 1999 年 9 月集集地震發生前 RTL 值的變化。可以被發現明顯的地震活化峰期出現在 1999 年，由於每一時間點的 RTL 值實際上是取自該時間前約兩年內的所有地震資料來計算，所以表示地震活化現象可能從 1997 年就開始了。而在此活化峰前，RTL 函數尚出現一個明顯的地震活動低潮期，其主要的歷經過程約自 1995 年到 1997 年間。綜觀 RTL 函數的改變，說明了集集震央區在集集地震發生前，可能先經歷了強烈的地震寧靜過程，而後隨之有中規模地震之活化現象。

集集震前台灣地區的 PI 圖

集集震央區所觀察到的 RTL 函數波動引發了一個很有趣的議題。我們緊接著想更有系統地探討整個台灣地區，集集震前空間各處的重要異常活動。Pattern Informatics（PI）演算法，是一個能夠辨認空間各處地震活動異常的計算方法，也是一個能從背景地震活動中揭露強關聯漲落(correlated fluctuations)）區的技巧。PI 方法的哲學是將地震在時空上的演化，藉由相動力系統中狀態向量的旋轉來描述。這裡的狀態向量，是以地震活動度的關聯矩陣分解之特徵向量爲基底展開表述的。顯然地，地殼應力的累積與釋放，構成了地震活動度的變異，也就使得這些高維度 Hilbert 空間中的狀態向量不斷改變。但是，基於相動力系統來理解這些狀態向量的優勢在於，我們可以將所有狀態向量的長度化約爲單位長度，於是所有變化的資訊，便只隱含在一個角度旋轉量裡。

計算上，PI 法嘗試由過去的地震資料推估某段變化區間內相動力學的平均旋轉角度量，這些角度變化量可再轉化成一個機率振幅量，反應空間網格中各處所經歷的地震變異強度。圖五顯示的是台灣地區的粗視化（coarse-grained）PI 圖。我們將整區切割成 0.1 度見方的 2000 個網格，變化的區間則設定爲 1993 年 11 月到 1999 年 6 月。可以很清楚地從圖中看到，集集主震的震央確切地位於一整塊地震活動高變異叢集區內。我們相信這整段連通的叢集，反映著地殼高應力區域的協同作用，這正是前文提及的主震發生條件。



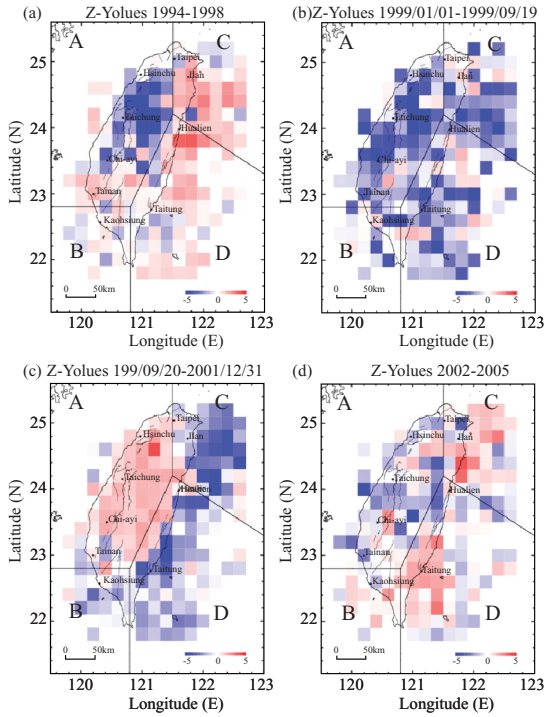
圖五　台灣地震根據集集震前的地震資料計算所得的 PI 圖。藍色空心圓圈表 1999 年 7 月以後發生的規模大於 6 之地震震央，灰色倒三角形則為 1993 年 11 月到 1999 年 6 月間大於 6 之地震。顏色色階代表 PI 振幅強弱，本圖僅畫出前百分之十的高 PI 振幅區塊

集集震前的「反轉」現象

計算標準偏離值（或稱爲 Z 值），也是一種常被用來度量地震活動異常的統計手段。計算上，Z 值顯示了地震活動速率從背景值偏離的程度。正的 Z 值暗示地震活動度的增加，負值則代表減小。圖六顯示台灣區域在集集地震前後，四個時間區間內所計算獲得的 Z 值變化情形。從 1994 年到 1998 年，大部分的地震都分佈在台灣東部（圖六 a），代表台灣地區「典型的」地震空間分佈模式。圖六 b 則暗示集集震前的一種異常階段，可能涉及所謂的地震反轉(seismic reversal)現象，其特徵主要是原地震頻繁的東台灣突然寧靜，而原寧靜的西部地區則有地震增加之勢。基本上，地震反轉是地震活化與寧靜在不同時空尺度上的表現。集集主震後的 2 年（圖六 c），台灣地區的地殼應力似乎在大量的餘震過程中，不停地調整、緩解，然後從中台灣擴散開來。地震發震點最終也恢復成原來的空間分佈模式（圖六 d）。

結論

關於集集震前異常地震活動的前兆現象，本文已做了簡單的回顧。我們歸納出集集地震是個很典型表現出震前活化與寧靜的例子。偵測大地震前的異常活動，至今仍被視爲很有挑戰性的課題之一，更直接成爲科學家能否成功地預測地震的指標。



圖六　集集地震前後四段時期對應的 Z 值圖。正的 Z 值表示地震越益頻繁，負值則表示地震發生率減緩

地震現象可以視爲斷層系統的一種自組織、協同作用的過程。從地震的「臨界點理論」來看，地震斷層系統中，高應力關聯區域的形成是產生大地震不可或缺的條件，而辨識系統時空上的漲落，更可能成爲推導未來演化的關鍵因素。此類的理解，無疑地提供了科學社群一個重要的方向，去思索未來地震預測的研究。我們無疑地仍需改進對地震物理的了解，以發展令人滿意的地震預測理論。對集集地震的後驗式預測(retrodiction)，代表這過程中不可或缺的一環，儘管必須對後驗式分析(retrospective analysis)的結果抱以最大的懷疑心態，但其畢竟也是人類至今在地震預測這場聖杯爭奪戰中唯一能學的。

參考文獻

[1] J.B. Rundle, W. Klein, D.L. Turcotte and B.D. Malamud, *Pure Appl. Geophys.*, **157**, 2165 (2000a).

[2] C.C. Chen, *Geophys. J. Int.*, **155**, F1-F5 (2003).

[3] C.C. Chen and Y.X. Wu, *Geophys. J. Int.*, **166**, 1144 (2006).

[4] C.C. Chen, J.B. Rundle, J.R. Holliday, K.Z. Nanjo, D.L. Turcotte, S.C. Li and K.F. Tiampo, *Geophys. Res. Letts.*, **32**, doi: 10.1029/2005GL023991 (2005).

[5] C.C. Chen, J.B. Rundle, H.C. Li, J.R. Holliday, D.L. Turcotte and K.F. Tiampo, *Geophys. Res. Lett.*, **33**, doi: 10.1029/2006GL027323 (2006).

[6] Y.M. Wu and C.C. Chen, *Tectonophysics*, **429**, 125 (2007).