

[研究成果報導]

深成地震能量釋放特性及其在震源破裂力學的含意

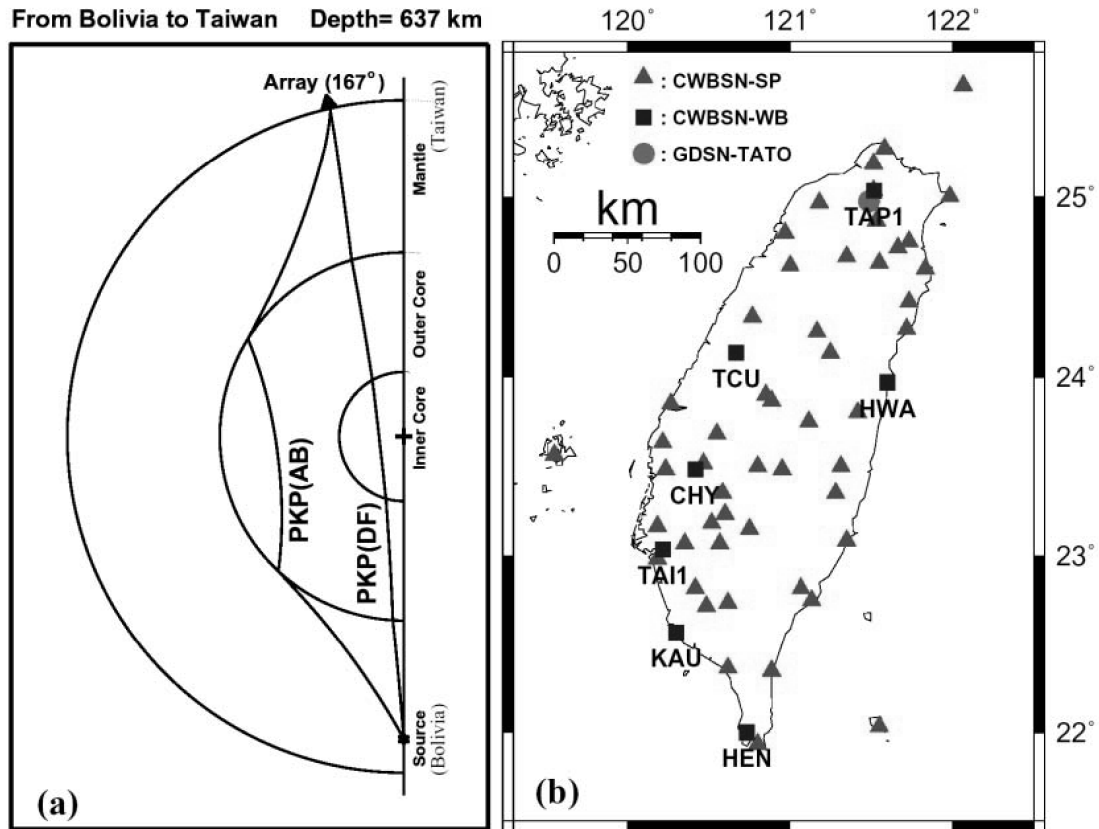
中央研究院地球科學研究所 黃柏壽

發生深成地震的原因至今仍是個謎。其地震源的物理特性，雖經過無數學者多年的研究，目前仍有相當大的爭議。依目前地球物理知識的理解，地函物質在深達數百公里處，應不具備發生如板塊內的脆性物質破裂因而產生地震的條件。為了解這些地震發生的原因，在過去二十多年間已有數種的理論被提出，以解釋地震學所觀測到的各種現象。由於深成地震發生地點通常遠離地震觀測網不易於觀測且發生數量相對的少，因此觀測與研究深成的大地震則成為了解此類地震發生之謎的重要關鍵。1994年6月9日發生於南美洲玻利維亞的深成大地震規模達8.3(M_w)為有地震觀測以來所紀錄規模最大者。其振動的有感範圍甚至可達數千公里外的北美西雅圖地區。由於全球寬頻地震網已於九零年代初期完成，因此這個地震的紀錄比其他更早期發生的深震更為完整。藉由分析這個地震網所紀錄的高品質地震資料，使得吾人對於深成地震的破裂特性及其能量釋放過程有了更進一步的了解，地震學家發現這個地震的應力降(Stress drop)相當大而其破裂速度則偏低且應變能轉換成地震波能量的比例與一般地震相比較有偏低的現象。但是全球地震網的地震站密度並不足以提供具一致性的高頻地震波以研究其破裂細部特徵。雖然在許多鄰近震源的地區分佈著多個短週期地震網，但因為這個地震規模過大，使得近乎所有的地震紀錄皆出格而無法加以分析。因此對於了解其震源破裂的特徵並沒有太大的幫助。

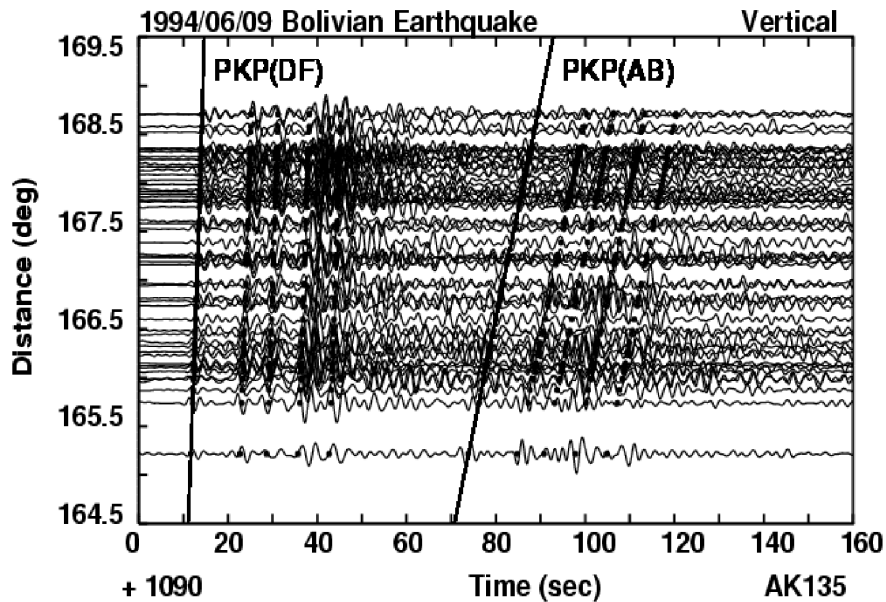
台灣的地震觀測已有數十年的歷史。從早期的中央氣象局類比型地震儀，到中央研究院地球科學所建立的遙記式地震網，到目前的中央氣象局全省數值紀錄地震網(一路傳承發展下來)累積了可觀的經驗與資料並建構完成世界上少有的密集地震網(如圖一)。雖然目前台灣地震網所支援的研究觀測仍然以台灣及鄰近地區

的地震為主要對象，但對世界其他地區發生的較大地震仍有很好的紀錄品質。台灣的面積雖然不大且遠離玻利維亞地震的震央，所紀錄的資料以地理條件而言並不合適於獨立研究此地震的震源參數。然台灣地區地震網具有很高的地震站密度，這些密集的地震站可視為類似天文研究所採用的望遠鏡陣列。通常陣列信號可藉由疊加的方式增加信號的解析能力。台灣地區所紀錄之玻利維亞地震的地震波信號因穿過了地球深部的地核才到達觀測地點(如圖一)，由於其傳播路徑的遙遠保持了這些地震信號的完整性(不出格)，因此具備了用以研究震源破裂細部特徵所需的高頻波成份。當然由於地震網分佈的範圍有限，台灣的地震資料對於震源的空間分佈不具解析能力，所幸利用全球地震網的資料所做的分析已經非常具體，可提供為吾人對此一地震的初步了解。兩相配合之後，台灣的地震觀測在了解此一深成地震的發生及其破裂特性確實發揮了相當重要且具體功能。

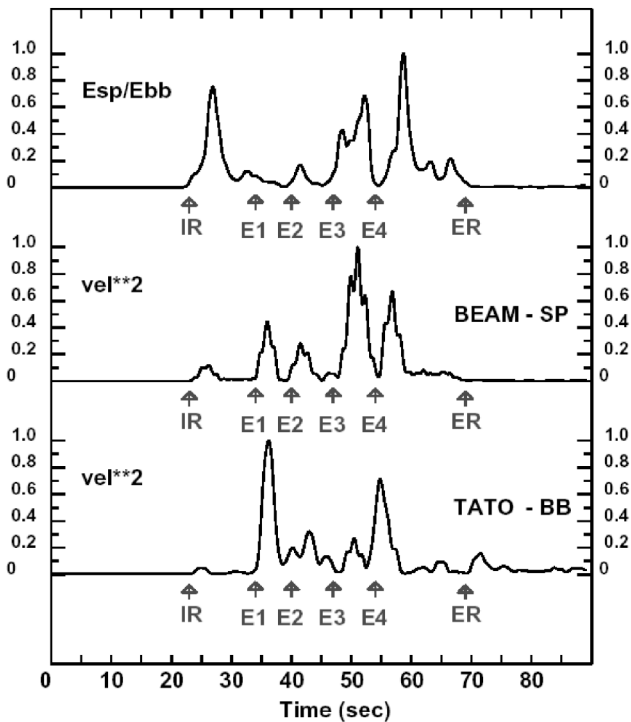
圖二為台灣地區短週期地震網所紀錄之玻利維亞地震之數值波形紀錄。由於震波到達各地震站的路徑相當一致，因此整個地震網的波形相似。透過波形的疊加處理可以降低非震源的地震波雜訊而增加其可靠性。然由於這些短週期地震儀所紀錄之地震波缺乏低頻成份，因此所獲得之震源訊號不易與其他的研究相比對。所幸台灣地區擁有一個世界網的寬頻站(名為TATO)，其資料已為許多研究者結合世界其他地方的紀錄用以研究玻利維亞地震破裂的低頻波特性和破裂空間分佈。利用TATO波形資料，吾人不但可用以比對台灣短週期地震網所紀錄地震波能量在震源面的空間分佈，並可用以比對地震源輻射低頻與高頻能量的相對比。利用這些未被研究過的資訊將可提供吾人了解深成地震破裂特性的細節及其震源破裂的物理行為。



圖一 圖左(a)為地震波在地球內部傳播路徑示意圖，PKP(DF)與 PKP(AB)分別表示穿過內外核與只穿過外核的波線。圖右(b)為台灣地區地震網測站分佈圖，CWBSN-SP 與 CWBSN-WB 分別表示中央氣象局地震網的短週期與井下地震站。GDSN-TATO 表示世界網在台灣的地震站。



圖二 中央氣象局短週期地震網所記錄之陣列地震波。圖中標示 PKP(DF)與 PKP(AB)的實線分別表示圖一所示之波線的 AK135 地球模型的理論震波到達時間。各地震圖中的黑點表示斷層面主要 asperity 的到時。



圖三 玻利維亞地震不同頻段能量釋放相對時間的分佈圖。圖中 IR, ER, E1...E4 分別表示地震斷層破裂的起始與結束時間點以及斷層面主要 asperity 破裂的時間。其他說明請參考內文。

圖三為經過處理後的玻利維亞地震不同頻段能量釋放相對時間(亦為空間分佈)的分佈圖。其中 TATO-BB 為其低頻能量的釋放過程，BEAM-SP 為其高頻能量的釋放情形，Esp/Ebb 為其兩者的比值。其中每一個峰值可視為單一個 asperity 所釋放之能量分佈。由所觀測的能量分佈特性可看出各別 asperity 所釋放之高低頻能量分佈不一致，在地震源破裂的起始與結束部份主要釋放高頻波的能量，而主要的震源破裂部份則以釋放低頻波能量為主。由於台灣地震網對高頻波觀測是疊加了所有地震站的信號，因此其觀測結果應相當可靠。合理的推論認為這樣的能量分佈差異隱含著震源破裂過程在震源的不同部位具有不同的破裂特性。

由台灣地區地震網所觀測到玻利維亞地震的這些震源特性，可藉由 Brodsky 與 Kanamori (2001)所提出的地震在破裂過程中可因斷層面受到破裂滑動所引起的作用而減少高頻波釋放的機制來解釋。他們認為大的 asperity 在破裂滑動時，斷層面的液 會因不同因素作用而明顯的增加，這些層面液 可以降低斷層的摩擦使得滑動易於發生且減少高頻波的釋放。

深成地震的發生過程中含有因摩擦引起之熔化現象的說法最早由 Kanamori 等人於 1998 年提出。他們在研究玻利維亞的破裂特性所獲得的結論認為一般的深成地震在地震發生時斷層破裂面會因摩擦生熱使得斷層面上形成一薄

層的融熔物質，這些液相物質可以減少斷層面摩擦及加速破裂面的擴展。Kanamori 等人提出上述說法時主要是依據地震釋放能量轉換成地震波能量比例來推論，並未考慮地震波釋放在不同頻段之特性。我們的觀測結果對於他們提出的看法是一種正面的佐證。話雖如此，然我們的觀察對其他數種深成地震的發生模型仍然無法完全排除，相關討論可參考 Huang(2002)的討論。本文報導仍無法對深成地震的成因有具體的呈現，所期望的是經由探討過程引發思考”通常為人所忽略的台灣地震網所收錄的遠域地震資料其實隱含有許多重要的科學議題值得我們深入探討與發掘”。

參考文獻

- Brodsky, E. E. and H. Kanamori, Elastohydrodynamic lubrication of faults, *J. Geophys. Res.* 106, 16,357-16,374, 2001.
- Huang, B. S., Characteristics of seismic radiation during the 1994 Bolivian Earthquake and implications for rupture mechanisms, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 29, no. 7, 10.1029/2001GL013538, 2002.
- Kanamori, H., D. L. Anderson and T. H. Heaton, Frictional melting during the rupture of the 1994 Bolivian earthquake, *Science*, 279,839-842, 1998.