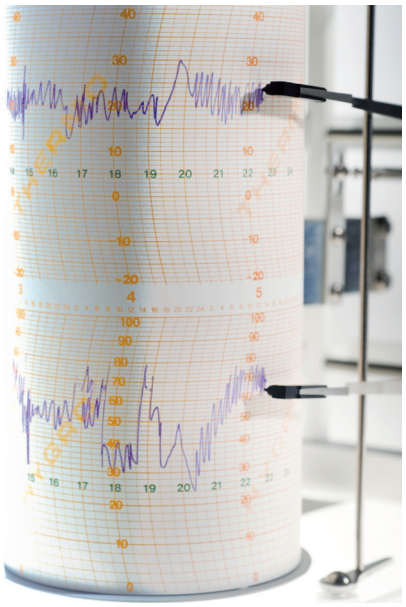
台灣板塊構造與地震

台灣為什麼有地震？地震為什麼有深有淺？台灣又是如何造山的？
如何成為大陸邊緣的島嶼？這些都與附近板塊的運動息息相關。
利用震波探測的方法可以揭露台灣地底下的世界。

■ 郭陳澔

科幻電影〈地心冒險〉（Journey to the Center of the Earth）中，描述地質學家如何經由岩漿隧道到達地球內部，展開一系列的奇幻旅程，最後安然無恙地返回地面。這應該是研究地球問題的科學家最高的夢想吧！就目前的技術，最直接的觀測方法是鑽井採取岩芯，以了解岩石隨深度的分布變化。然而受限於地球內部的溫度太高、壓力太大，只能探測到12公里左右的深度，還不到地球半徑的千分之二。



地震波夾帶有地震活動的祕密（圖片來源：種子發）

長期以來，科學家無不千方百計地尋找其他方法來探索地球更深的內部。但是，任何科學研究都要研究經費與政府的支持，拜美國與蘇聯在冷戰時期核武軍備競賽之賜，美國政府為了有效監測核彈試爆的時間與地點，投入了大量的經費補助在全球廣泛地設置地震儀，以快速且準確地監控各地的核爆測試。

這個世界地震監測網除了監視核爆外，也大量收錄了世界各地發生的地震，使得地震資料的品質與數量不斷提升，間接造成地震科學在理論與觀測技術上的迅速發展。現在已可以在地震發生的數分鐘內，就快速得知發生的地點與時間。

震波的傳遞速度會因穿越的地底下岩石特性不同而改變，因此地球內部震波速度的分布就反應了組成岩石的特性。

震波探測與層析成像

在介紹台灣地底下的世界前，先了解地震是如何發生的？科學家如何偵測地震的位置？又如何藉由地震波的傳遞得知地底下的物質？

地震的成因可以從彈性回彈學說來說明，當岩石受到外來應力作用時，隨著變形能量的累積，會逐漸變形彎曲，當變形能量超過所能承受的強度時，岩石會在應力集中處破裂或產生斷層滑動，累積的變形能量就以震波的形式釋放出來造成地震。地震波由震源向四面八方傳播，所經的地方引起地盤震動，這就是我們所感覺到的地震。

因此，在地震儀中記錄到的地震波就夾帶有地震活動的祕密，例如：地震規模與震度、地震深度、斷層錯動形式、震波所經過的地下岩石特性等。地震學家可經由地震波的分析把這些訊息揭露出來，扮演著解密者的角色。

地震定位是觀測地震最基礎的工作，震源位置也是地震最基本的參數，在測定震源位置之後，才能進一步計算地震的規模以及分析震源斷層錯動形式等，由此可見地震定位的重要性。因此，如何提升地震定位的精確度，一直是地震觀測相當重要的環節。

現代地震定位的過程，簡而言之，就是利用震波到達各地測震站的時間推算地震發生的時間，以及地震發生的空間位置，基本上建構在震波傳遞時間等於震源距離除以震波速度的計算。

雖然可藉著震波到達各測震站的時間，求得地震發生的時間和位置，但由於震波速度是一項複雜的空間函數，實際運算的方程式更是複雜。幸而，地震學者在 20 世紀初就已提出地震定位的計算流程，又拜計算機科技的發達，這項繁冗的計算過程在數秒鐘內就可完成。在震源位置確定後，接下來探測地底下岩石構造分布的工作才得以進行。

震波的傳遞速度會因穿越的地底下岩石特性不同而改變，因此地球內部震波速度的分布就反應了組成岩石的特性。由於無法直接取得地球深部的岩石變化，因此地震波速提供了間接探測地球內部地下岩層分布的方法。

若在地表架設很多個地震儀，當發生地震時，這些地震儀可以定出震源位置，然後推算出震波從震源傳到不同地震儀所經過岩石的各別速度。在累積來自四面八方的地震資料後，就可以描繪出地底的三維層析成像，有如電腦斷層掃描般把地層構造剖析得一清二楚。

由於地震位置的準確性也受制於地下的地層速度分布狀況，但其實我們對於震源與地層速度分布都不甚了解，因此實際在計算求取層析成像速度時，變得非常複雜且不確定。若能利用人工震源（如震盪車、乳膠炸藥、海上空氣槍等）提供確切的震源位置與時間，應可以減少可變參數，提高三維層析成像的解析度。惟社會大眾對爆炸性人工震源有所疑慮，造成這方法





左圖是在丹大林道野外布設地震觀測站，利用太陽能板供給地震記錄器電源。右圖是遠山與雲海，攝於南橫啞口。（圖片來源：郭炫佑）

施測的困難。其實在所有野外實驗進行前，應都已做過完整的安全性與環境的評估，把影響降到最低的程度。

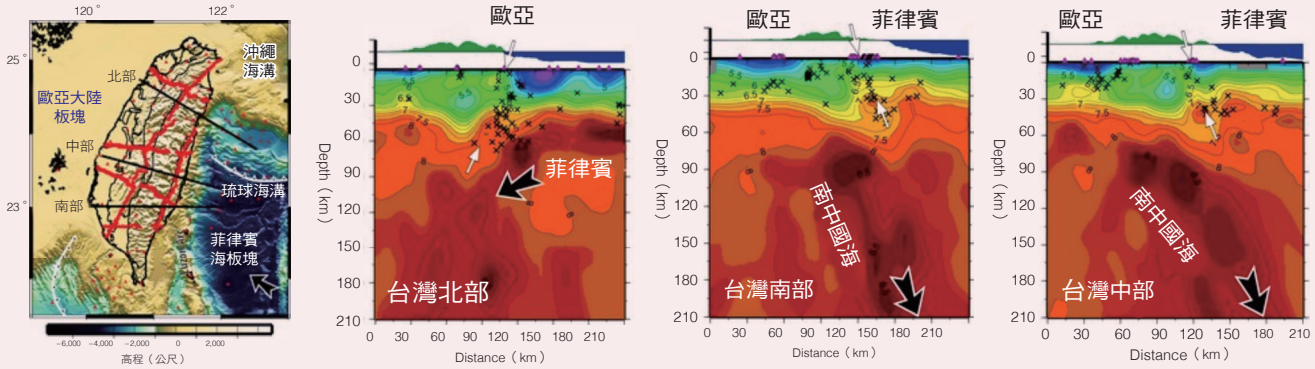
台灣的地體構造

地震在台灣似乎不是一個新鮮的話題，不過總保持著一定的熱度！為什麼台灣地震如此頻繁？這應該從台灣所處的地體構造說起。這十年來，台灣地體動力整合計畫（Taiwan Integrated Geodynamic Research）在科技部的補助與美國國家科學基金會的共同支持下，在台灣廣布了地震儀，記錄天然地震與人工震源的實驗分析後，清楚描繪出台灣地底下的三維震波層析成像。這也才發現台灣不僅處在變化非常劇烈的板塊交界處，從南到北的地體構造變化非常顯著，地震發生的位置與錯動形態也有所不同。

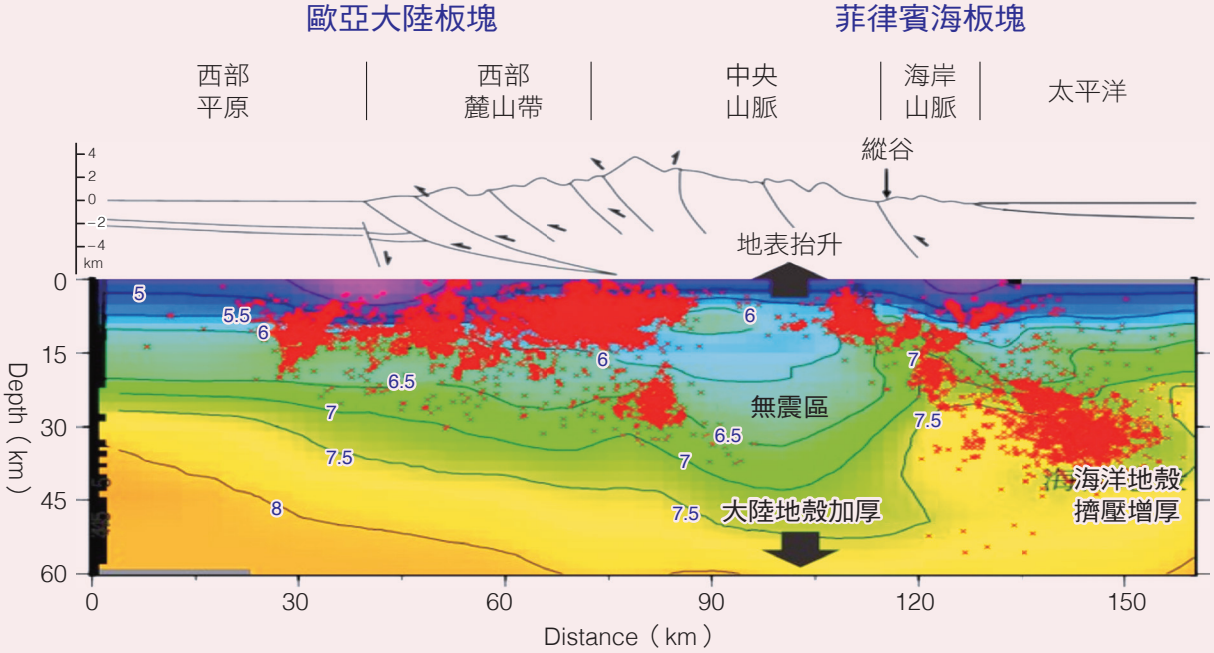
台灣島的形成主要是歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊碰撞後的產物。台灣島的年齡約 600 萬年，在人類的時間尺度上或許已十分長久，但相較於世界上其他山脈的年紀動輒六、七千萬年，台灣島只不過是一個剛出生的小寶寶，且正在迅速茁壯長大中。中央山脈目前每年約以 2 公分的速度長高，是世界上數一數二成長快速的山脈。由於碰撞劇烈而產生山脈快速的隆升，再加上颱風期短時間所挾帶的豪大雨，造成土石流的災害在台灣時有所聞。

台灣的造山過程相當有趣且變化多端，不僅包括了岩石之間相互擠壓的物理作用，同時因為在擠壓的過程中，溫度、壓力與水的改變而產生岩石礦物的化學反應，形成現在的台灣島。在岩石露頭，可以看到西部海岸沉積物的沉積，

相較於世界上其他山脈的年紀動輒六、七千萬年，台灣島只不過是一個正在迅速茁壯長大中的小寶寶。



從地震波 P 波層析成像看台灣北中南大區域的板塊三維地體架構。台灣南部是向東隱沒的南中國海板塊，在台灣北部則轉為向西北隱沒的菲律賓海板塊。黑色叉號是地震。



從地震波 P 波層析成像看台灣中部區域受擠壓後的地殼變形與地震分布。紅色叉號是地震。

西部麓山帶沉積岩的擠壓變形，雪山山脈與中央山脈的變質岩，以及東部海岸山脈的火成岩。地質學上的三大岩類都出現在我們的寶島，也難怪歷年來這麼多國際學者紛至沓來地來探索這麻雀雖小但五臟俱全的島嶼。

在三維的板塊架構上，台灣南部可以看到歐亞大陸板塊前緣連接的古南中國海板塊向東隱沒至菲律賓海板塊之下，兩個板塊的縫合線在地表上對應於花東縱谷地區。板塊的隱沒主要受制於兩板塊的密度不同，密度較大的板塊（通常年紀老且是海洋板塊）容易隱沒在密度較小的板塊下，例如年輕的海洋板塊或大陸板塊。因此，在台灣南部，古南中國海板塊向東隱沒在菲律賓海板塊下。隱沒的古南中國海板塊在西側則連接了歐亞大陸板塊，形成海陸板塊相連的現象。這是台灣造山前的初始板塊架構。

然而，在台灣中部，由於歐亞大陸板塊邊緣隨著古南中國海板塊的持續隱沒，而造成菲律賓海板塊向西北碰撞上陸板塊。雖然歐亞大陸板塊前緣拖著一古海板塊，但其大陸板塊的密度低於海洋板塊，因此陸板塊很難繼續向東隱沒至海板塊底下。而菲律賓海板塊卻亟欲向西北方隱沒，造成了激烈的碰撞，使地殼迅速加厚並抬升了地表，因而形成高聳的中央山脈。

最後，菲律賓海板塊終於在台灣北部如願地隱沒至歐亞大陸板塊下，造成板塊隱沒方向的反轉：從向東隱沒的古中國海板塊轉變為向西北隱沒的菲律賓海板塊。因此，在花蓮以北的地方，主要是受到隱沒作用所影響，清水斷崖也是因為這隱沒作用造成地塊容易陷落的形貌。

台灣地區地震的分布特性

台灣的地震構造由於受地體構造的影響，其分布特性十分複雜。由於地表下岩石分布的不均質，在板塊擠壓下容易沿著早期的脆弱面破裂，如在地表上所看到的活動斷層。這系列的地震斷層活動無法簡單地區分，因為這些早期的破裂面可能是台灣造山前就已形成，或因為岩石地層形成時本身的非均質性而產生，這些都必須經過詳細的野外地質調查，或者斷層槽溝的分析才能確認。然而，若以震源深度與地震斷層錯動機制分布，再就其岩石的物理特性來區分，就不會這麼複雜了。

斷層的錯動方式主要受控於該區域的地體構造，而反應出正、逆或滑移斷層的形態。台灣主要的應力是菲律賓海板塊斜向碰撞歐亞大陸板塊，因此大部分主要斷層的錯動是逆斷層。

以規模 7.3 的 921 集集大地震為例，主要錯動是逆斷層，其中帶有滑移的分量。目前的觀測紀錄顯示，在台灣西部麓山帶與東部海岸山脈地區主要以逆衝斷層伴隨滑移的分量居多，在中央山脈地區則是以正斷層為主，主要原因是造山時有大量的岩石由地殼深部向上拱起並推擠至地表，因產生的重力位能高於其他區域而發育成正斷層，因此台灣地區大約百分之九十較大規模（三級以上）的正斷層形態的地震都發生在中央山脈。

地震發生主要是岩石受擠壓而破裂，因此岩石是否具脆性決定了地震發生的難易度。



地震發生後岩石和上面的柏油鋪面都破裂了（圖片來源：種子發）

地震發生主要是岩石受擠壓而破裂，因此岩石是否具脆性決定了地震發生的難易度。由日常生活的經驗得知，薯片在輕輕地擠壓下很容易破裂。軟糖則不是如此，因軟糖有延展性，可承受外來巨大的壓力。地震活動的深度分布也是如此，越深的地方因溫度壓力增加，其岩石的狀態有如軟糖不易破裂，反而會以緩慢的塑性流動方式來調適外來的應力，因此在深部地區發生地震的頻率減少許多。

在西部平原與西部麓山帶地區，地震的深度分布約為由地表向下延伸 30 公里的深度，而以深度 10 公里以上的地震最為頻繁，主要是受到大陸地殼的組成所影響。在中央山脈地區，地震的分布約在地表至 10 ～ 15 公里深，與西部地區明顯不同，因為這地區 10 ～ 15 公里以下的岩石屬地殼深部，其溫度隨深度升高非常快，形成塑性流動，有如軟糖般不易破裂。

至於東部海岸山脈下與其鄰近的外海，地震可以達到 40 ～ 50 公里深度，岩石因位在碰撞的邊界區域，擠壓嚴重，十分破碎，因此地震頻率高且深度分布較其他區域廣。另外，位處於隱沒區域的南部與北部台灣，因受隱沒作用的影響，地震深度分布可到達一百多公里，這是我們所熟知的班尼霍夫地震帶。

地震預測一直是我們的夢想，但要實現這個夢想，還有一段非常長的路要走。其中最重要的基礎工作，還是要深入了解我們所處的地體構造環境，認識台灣不同區域的地震有何不同的活動形態，並充分掌握台灣地震的時空分布特性，才能往這個遠大的夢想邁進。

郭陳澔
中央大學地球科學系