





# 超微磁性礦物 是大自然拼圖遊戲 的見證者

---

如果說地球表面的板塊是一幅大自然的動態拼圖，  
那麼在深邃的海洋底下所顯示的磁性異常條帶，  
可以說是了解這幅動態拼圖最重要的線索。  
而這些磁性異常條帶，  
則是由海洋地殼中非常微小的磁性礦物所貢獻的。

蕭炎宏

二十世紀中葉之後，地球科學界出現了一個革命性的板塊運動學說（或稱板塊構造學說），主張地球表面是由一些巨大的板塊所組成，而這些板塊則是由地殼和最上部的地函所構成的，厚約70-125公里，稱為岩石圈。在堅實的岩石圈之下，是一層具有塑性、厚約250公里的軟流圈，這些板塊可以在軟流圈上緩慢移動，並且各自消長，使得地球表面變成一幅板塊大拼圖。

經歷幾十年的探究，板塊運動學說及相關論述，諸如大陸漂移與海底擴張，已廣為地質學界所接受，且已深植於一般大眾的心中。君不見每當台灣發生較大的地震，民眾也大都知那多半是菲律賓板塊和歐亞大陸板塊相互碰撞所引發的結果。

板塊運動學說的吸引人之處，主要是它能夠合理地解釋許多地質現象與特徵。例如，在海底下有綿延數萬公里的海底山脈——中洋脊，以及深海溝、火山鏈、地震帶與陸上狹長的山脈等。然而，科學家是根据什麼相信板塊確實會移動呢？首先讓我們回顧一下板塊運動學說發展的歷程。

### 早期的大陸漂移說

早在十七世紀初，英國哲學家培根（Francis Bacon, 1561-1626）就已注意到南美洲和非洲在大西洋沿岸輪廓的相似性。到了一八五八年，法國博物學家史奈德（Antonio Snider）進一步描繪了南美洲和非洲拼湊在一起的地圖，再度引發這兩個大陸曾經合併的聯想。一九一〇年代初，德國氣象學家韋格納（Alfred

Wegener）根據大陸邊緣的吻合、化石和岩層的對比、古冰川活動和古氣候的資料，提出大陸曾經漂移的看法，而且現今的各個大陸，在漂移前是一個併在一起的盤古大陸，這就是著名的大陸漂移說。

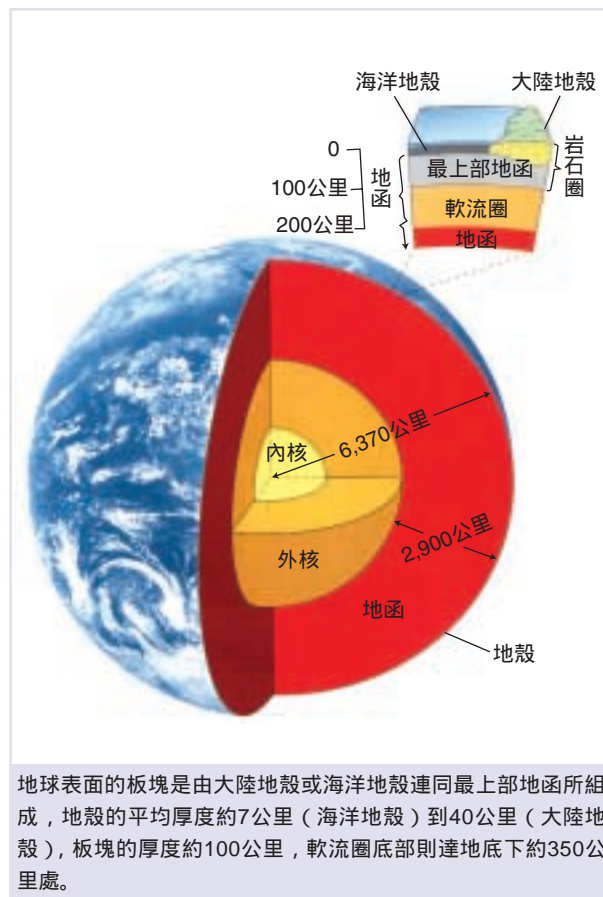
然而，韋格納的大陸漂移說，在當時並沒有被傳統的地質學家所接受，一方面是因他所提出來的證據並不十分堅實；另一方面，他所主張的大陸地殼在海洋地殼上移動劇刮的說法更遭人質疑。在那個時代，人們實在無法想像會有什麼樣的驅動力使大陸移動。

很顯然地，要讓地質學家相信大陸會移動這樣的看法，光是靠古生物、岩層及古氣候上的證據仍然不夠，我們需要更普遍且獨立的證據。就在那個時候，新的證據適時地自海底浮現出來。

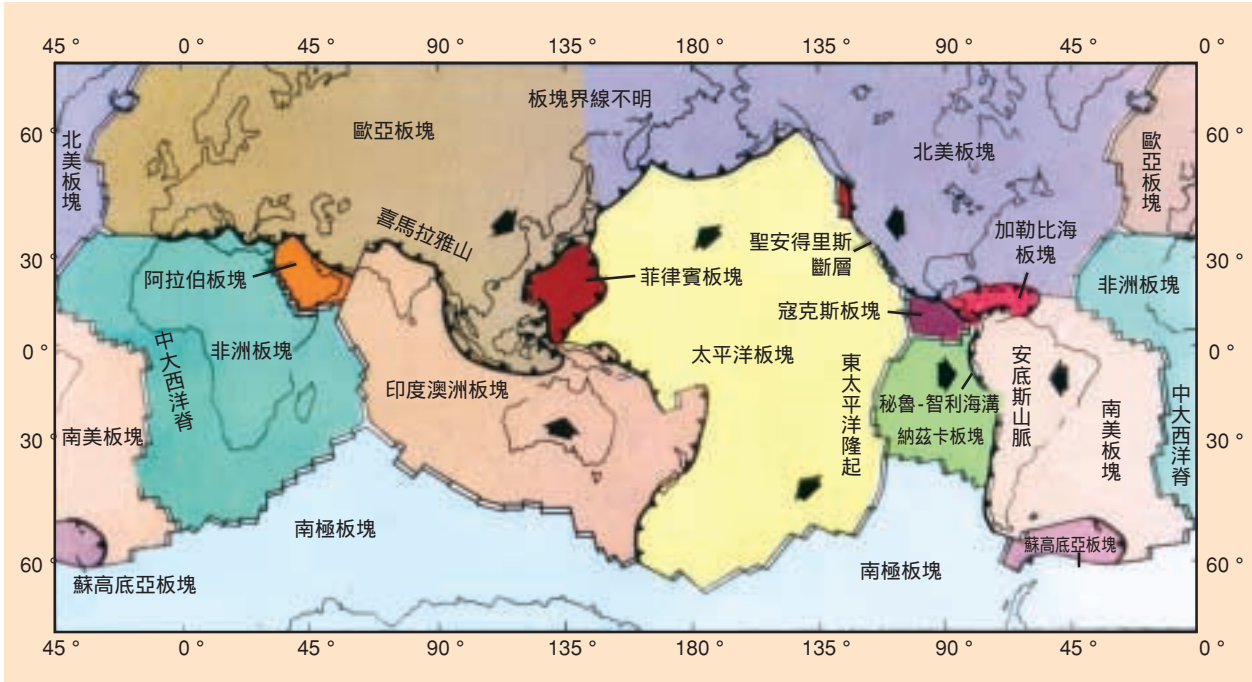
### 海底擴張說與海洋磁性異常條帶

由於第二次世界大戰的許多戰場是在海洋，各國對海底的探測也就不遺餘力，於是大洋底下許多有趣的地形特徵被發現了，包括海底火山、海桌山、海溝以及中洋脊與脊軸的裂谷等。這些特殊的洋底地形特徵隨即引發美國地質學家黑斯（Harry Hess）在一九六二年提出海底擴張說。他主張海底自中洋脊處往兩側拉開，拉開的動力來自下方地函的熱對流作用。此假說提出後不久，科學家發現了一個可以佐證海底擴張說的更關鍵性證據，那就是海洋磁性異常條帶。

一九五〇年代末，海上的磁力探測開始發現到海底有非常規則的



Plummer, C. and McGearty, D. (1991) *Physical Geology*, 5th Ed.

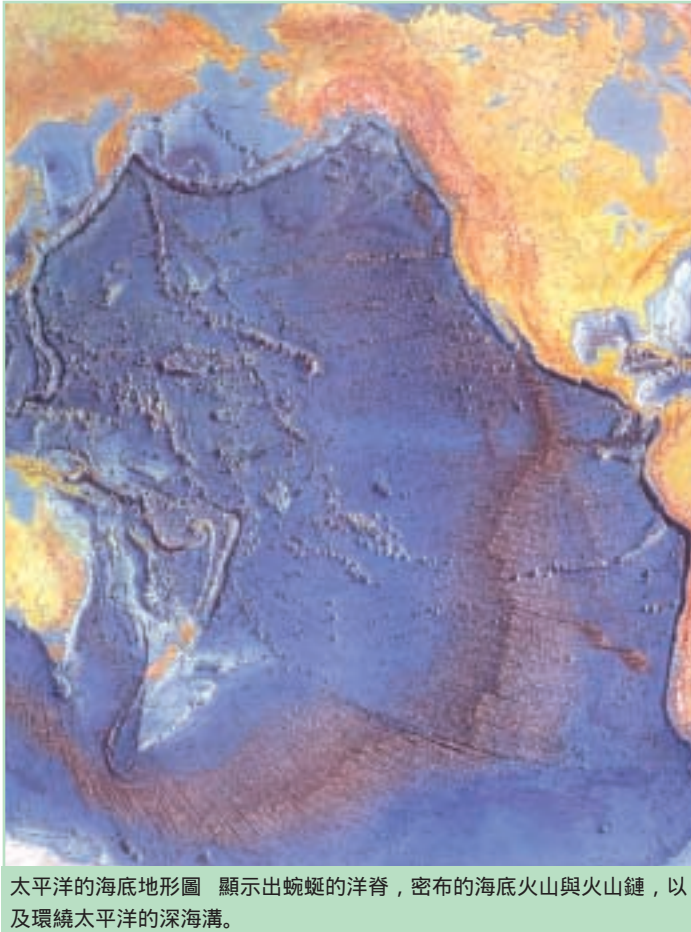


Plummer, C. and McGeary, D. (1991) *Physical Geology*, 5th Ed.

板塊拼圖 全球主要板塊分布圖。雙線段代表擴張中心（洋脊軸部），鋸齒粗線代表板塊聚合界線（海溝或山脈），細單線代表轉型斷層界線。

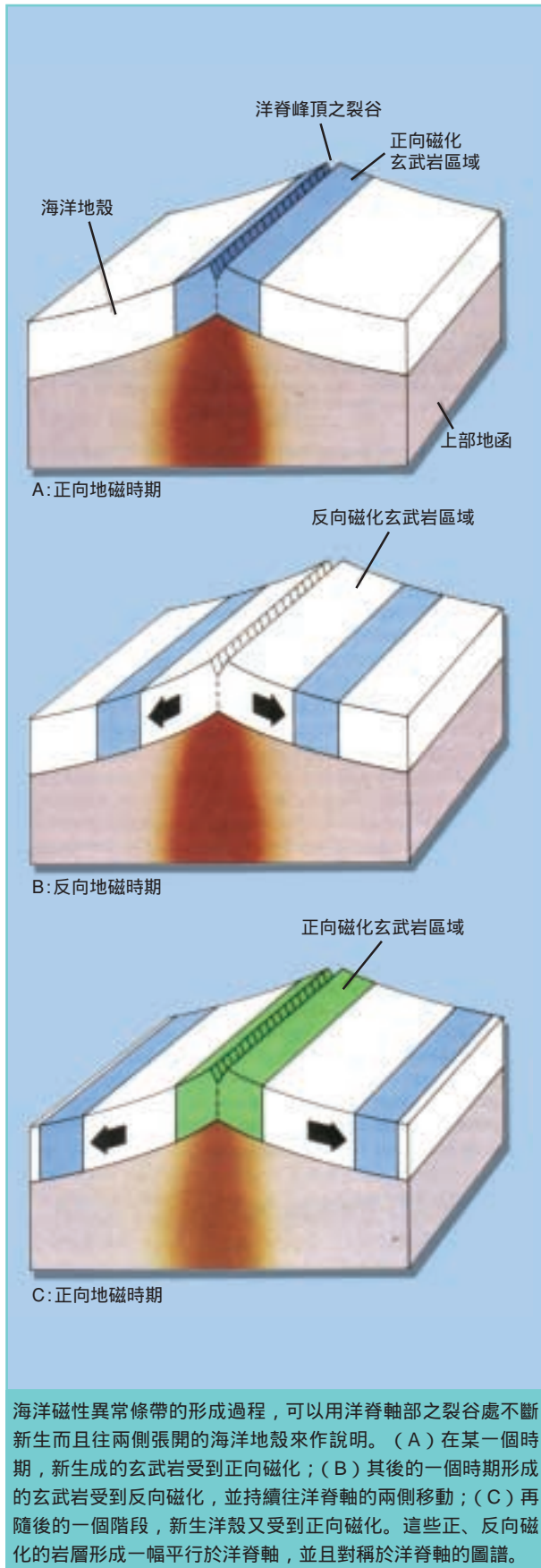
正向與反向磁性異常紀錄。利用磁力儀量測海面上的磁場強度，扣除當地地球磁場的背景值，其淨值即為海洋磁性異常值。這項資料顯示，海底岩石的磁性異常呈現正向（磁北極相同於當今的磁北極）和反向（磁北極朝向當今的磁南極）的條帶狀紀錄，這些條帶平行於洋脊的延伸方向，並且對稱於洋脊軸部的裂谷。

一九六三年，兩位英國劍橋大學的地球物理學家范恩（Fred Vine）和馬修斯（Drummond Matthews）以及一位加拿大地球物理學家摩利（Lawrence Morley），根據這些磁性條帶的特徵以及黑斯海底擴張說的啟發，提出他們的看法以解釋這個現象。他們認為在中洋脊的裂谷處，玄武岩岩漿不斷地冒出，冷卻後形成新的海洋地殼並往兩側移動。而在玄武岩形成時，岩石受到當時地球磁場的作用而磁化，正向的磁性條帶形成於地磁為正向的時代，反向的磁性條帶則形成於



太平洋的海底地形圖 顯示出蜿蜒的洋脊，密布的海底火山與火山鏈，以及環繞太平洋的深海溝。

Lamb, S. and Sington, D. (1988) *Earth Story- The Shaping of Our World* (original diagram from Tharp, M. (1997) *The World Ocean Floor*)



海洋磁性異常條帶的形成過程，可以用洋脊軸部之裂谷處不斷新生而且往兩側張開的海洋地殼來作說明。(A)在某一個時期，新生成的玄武岩受到正向磁化；(B)其後的一個時期形成的玄武岩受到反向磁化，並持續往洋脊軸的兩側移動；(C)再隨後的一個階段，新生洋殼又受到正向磁化。這些正、反向磁化的岩層形成一幅平行於洋脊軸，並且對稱於洋脊軸的圖譜。

Plummer, C. and McGeeary, D. (1991) *Physical Geology*, 5th Ed.

地磁為反向的時代。因此，在不同時代形成的玄武岩質海洋地殼，保存了正向和反向的地磁紀錄，並且像輸送帶一樣地往洋脊軸兩側移動，形成正、反向交替出現並且對稱於洋脊軸的磁性條帶。

范恩、馬修斯和摩利對於海洋磁性條帶還有一項很重要的觀察結果，那就是他們發現海洋磁性條帶從洋脊軸往兩側的正向與反向條帶紀錄，完全符合陸上地層中早已發現的古地磁正反向紀錄。這個海底與陸上磁性紀錄的完美對比關係，對於支持他們的主張而言，是一個很重要的註腳。

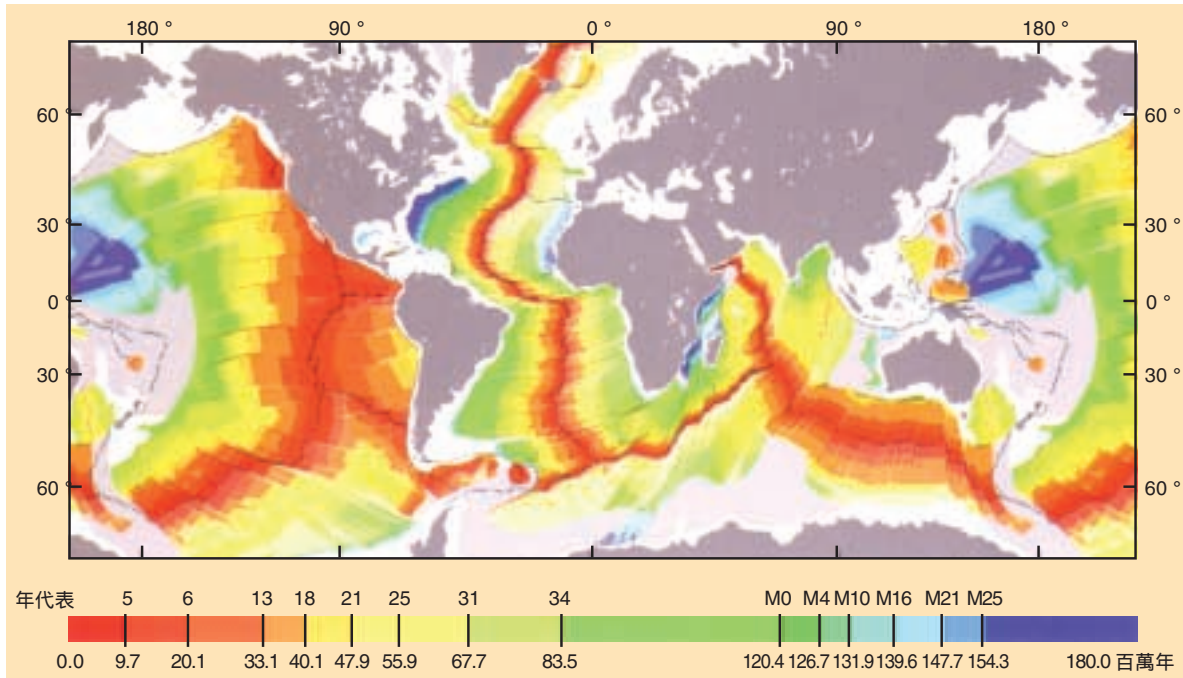
因此，在隨後的數年，當各大洋中更多的海洋磁性條帶陸續發現之後，地球科學界很快地了解到范恩-馬修斯-摩利假說的正確性，海洋磁性條帶紀錄也就成為黑斯的海底擴張說最堅強的證據。至此，科學家相信洋殼會移動、海底會擴張，昔日的大陸漂移說也就敗部復活。經由更多的觀察、驗證與修正，終於成就了二十世紀地球科學的革命性學說——板塊運動學說。

經由全球洋底磁性條帶的探測與彙整，配合陸上岩層的地磁反轉紀錄以及岩石的放射性同位素定年，使我們建立了準確度高的磁性地層年表。接下來，我們進一步要問，岩石怎麼會磁化？如何被磁化？深海底下這個見證板塊移動的忠實記錄者到底是什麼東西？

### 磁性礦物是洋殼演化的忠實見證者

指北針的運作乃是磁針受到地球磁場的作用，而順著磁場方向指向地球的磁北極。如果岩石中含有磁性礦物，這些磁性物質就能像磁針一般，把岩石形成當時的地球磁場方向記錄下來。

在中洋脊的軸部，新的海洋地殼是由熔融的玄武岩岩漿冷卻固化而成。玄武岩主要含有輝石、斜長石和較少量的橄欖石，另外還含有一種量雖少（通常15%）但卻普遍存在的礦物，那就是含鈦的磁鐵礦，稱為鈦磁鐵礦。鈦磁鐵礦的顆粒大小通常只有幾十個微米，它們和磁鐵礦一樣都屬於鐵磁性礦物，當它們自岩漿中結晶出來時，因地球磁場的作用而受到磁化並紀錄下當時地磁場的方向。因此，洋底磁性異常條帶是海洋地殼中的磁性礦物對過去地球磁場（古地磁）



這是全球各大洋的海底異常圖譜，對照磁性地層年代表，可以看出最老的海洋地殼的年齡約為一億八千萬年。

Mussett, A. and Khan, M. (2000) Looking Into the Earth-An Introduction to Geological Geophysics (original diagram from Müller et. al. (1997) Journal of Geophysical Research, 102, 3211-3214)

變化的一種紀錄。

接下來，讓我們再仔細探究一下鈦磁鐵礦如何紀錄古地磁的變化。經由實驗得知，磁性物質在升高至某一溫度時，會失去磁性，這個溫度稱為居里溫度。不含鈦的純磁鐵礦，其居里溫度為攝氏575度，而中洋脊玄武岩所含的鈦磁鐵礦，其居里溫度大約是攝氏150度。

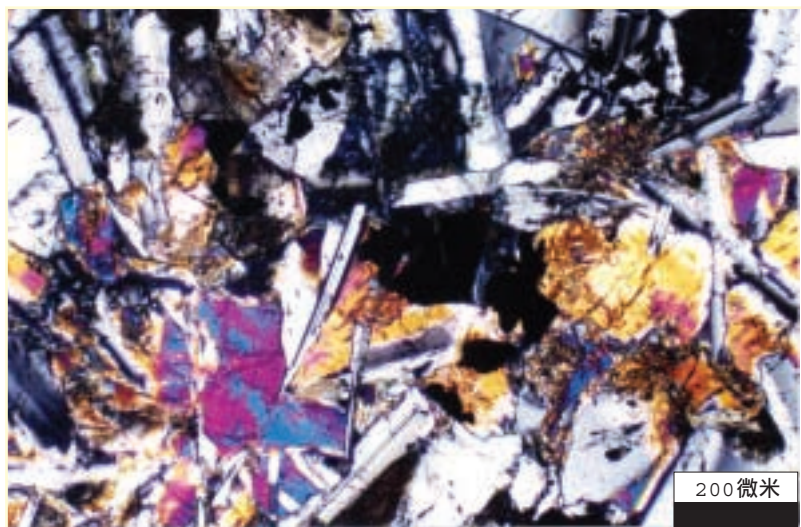
當玄武岩岩漿冷卻時，一旦溫度降至攝氏150度以下，玄武岩中的鈦磁鐵礦受到當時地球磁場的作用即產生磁化，使得岩石得到一個熱殘磁。

我們可以想像，當玄武岩岩漿的溫度仍高於居里溫度時，鈦磁鐵礦的原子磁矩方向是零亂的，因原子磁矩的相互抵消而使整個晶體不帶磁性。但是，到了居里溫度以下，鈦磁鐵礦中會產生很多很小的磁域（或稱磁疇），這些磁域中的原子磁矩都會順著當時地球磁場的方向排列並且固定下來。因此，整個鈦磁鐵礦顆粒的淨磁矩也就和地球磁場同方向，就好像變成一個個小小的磁針一樣。含有這些鈦磁鐵礦的玄武岩獲得了

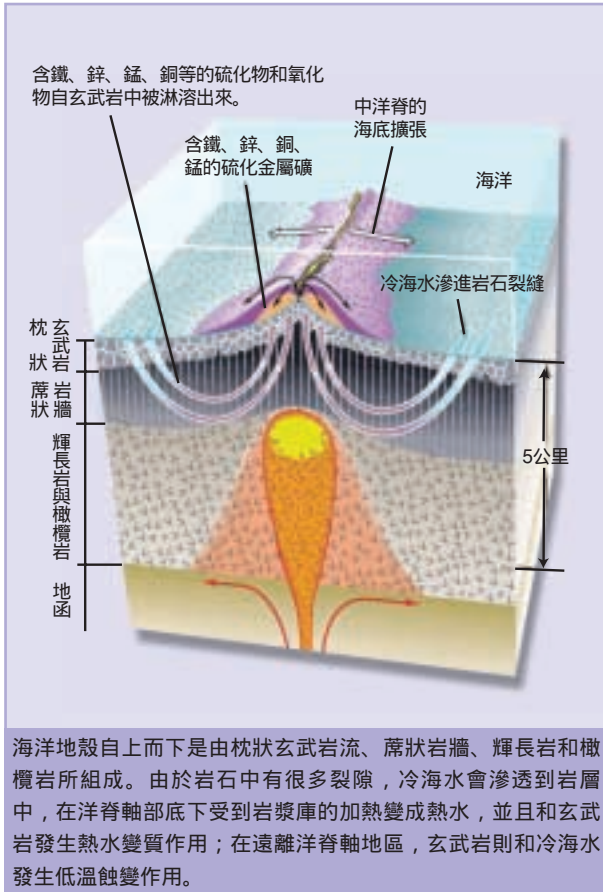
一個和當時地磁同方向的熱殘磁，即使後來地球磁場改變，這個熱殘磁仍然存在。因此，這些鈦磁鐵礦就成了地磁變化與洋殼演化的忠實見證者。

### 海洋磁性異常的來源地層

在范恩等人提出他們的解釋後不久，地球物理學



這是一個海洋地殼席狀岩牆玄武岩的岩心樣品在偏光顯微鏡下的顯微照片。照片中央及右上角黑色不透光礦物是鈦磁鐵礦，長條或板狀白色晶體是斜長石，彩色且形狀較不規則者是輝石。斜長石和輝石所呈現的顏色是礦物晶體在直交偏光下呈現的干涉色。



海洋地殼自上而下是由枕狀玄武岩流、蓆狀岩牆、輝長岩和橄欖岩所組成。由於岩石中有很多裂隙，冷海水會滲透到岩層中，在洋脊軸部底下受到岩漿庫的加熱變成熱水，並且和玄武岩發生熱水變質作用；在遠離洋脊軸地區，玄武岩則和冷海水發生低溫蝕變作用。

Prees, F. and Siever, R. (1998) *Understanding Earth*, 2nd Ed.

家一般都認為海底磁性異常條帶的紀錄，主要是源自海洋地殼的最上層 枕狀玄武岩流，厚約500公尺。由於岩漿是快速冷卻，這些枕狀玄武岩的結晶顆粒都很小，其所含的鈦磁鐵礦通常只有幾微米到一、二十微米的大小。這些鈦磁鐵礦在冷卻到攝氏一百多度時得到熱殘磁，但由於海洋地殼形成後，最上層的枕狀玄武岩會和流經岩石裂縫中的低溫含氧的海水發生反應，隨著時間的增長，玄武岩中的鈦磁鐵礦轉變成鈦磁赤鐵礦。這種低溫蝕變作用使玄武岩的殘磁強度降低，因此，現今我們所測到的岩石殘磁強度大致會隨著洋殼年代的增加而有減小的趨勢。

然而，隨著更多海洋磁性異常條帶資料的彙整，科學家們發現很多磁性異常強度的觀測值，與利用枕狀玄武岩層為主要貢獻者的模式計算值並不符合，因此，貢獻到海洋磁性異常條帶的來源地層及地層

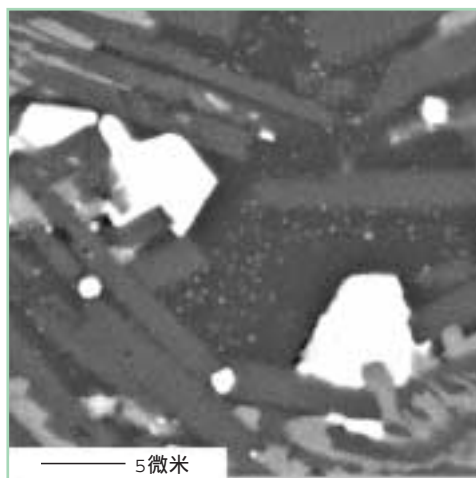
的深度就一直受到爭論。

一九六 年代末，隨著深海鑽探計畫的開展，使得海洋地殼的研究進入一個新的紀元。針對洋殼中不同層位樣品所作的磁學性質研究顯示，位於枕狀岩流下方厚約1 2公里的岩層——蓆狀岩牆，可能也是很重要的磁性異常貢獻者（蓆狀岩牆玄武岩的殘磁強度雖比枕狀岩流為小，但蓆狀岩牆的厚度是後者的兩、三倍）。另一方面，近十年來，利用高解析力的穿透式電子顯微鏡對洋脊玄武岩所作的磁性礦物觀察顯示，超微或次微米級的磁性物質是很重要的帶磁礦物，這使得洋殼磁化的解釋有了新的觀點。

### 超微磁性礦物

這些超微磁性礦物的顆粒，大小只有數十個奈米到數百個奈米，在枕狀岩流中發現的超微磁性礦物是含鈦量更低的鈦磁鐵礦，散布於玄武岩內的間質玻璃中，間質玻璃是冷卻過程最後殘留的岩漿，在急冷下固化的非晶態物質。這些超微鈦磁鐵礦，因受到間質玻璃的保護而未被氧化，可以想見它們對於枕狀玄武岩應該會有顯著的殘磁貢獻。但同時也增加了解釋枕狀岩流磁化過程的複雜性，因為枕狀岩流中還有很多微米級、含鈦量較高且較易被氧化的鈦磁鐵礦。

另外，在枕狀岩流之下的蓆狀岩牆玄武岩中，則發現有薄板狀、厚度僅數十個奈米的純磁鐵礦取代了原來的鈦磁鐵礦。在放大了數十萬倍的穿透式電子顯微鏡影像中，可以看出這些純磁鐵礦是以規則的柵欄

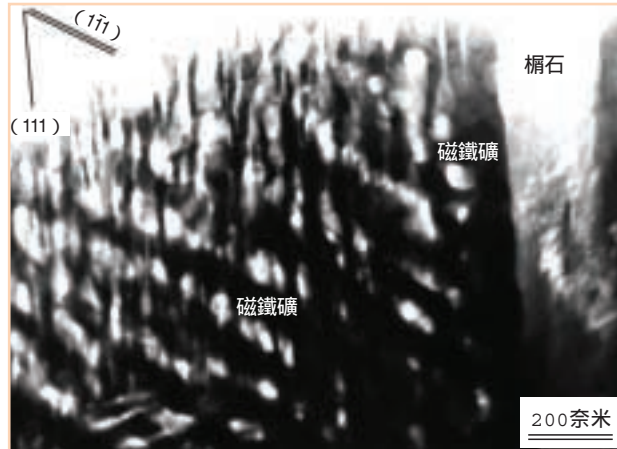


這是一個海洋地殼枕狀玄武岩岩心樣品在掃描式電子顯微鏡下所呈現的背反式電子影像，多邊形亮白色的顆粒是約5微米大小的鈦磁鐵礦，在影像中央部分最暗的區域是間質玻璃（生長於礦物顆粒的間隙中），其中含有很多非常細微的小亮點，那就是次微米大小的低鈦-鈦磁鐵礦。長條狀淺灰色和暗灰色晶體分別是輝石和斜長石。

狀組織和不具殘磁的鈦鐵礦以及其他次生礦物共生在一起。我們可以從這種微組織與共生礦物群的特徵明確地推斷，蓆狀岩牆中的原生鈦磁鐵礦在形成後的冷卻過程中，當降至攝氏五、六百度時即已發生了高溫氧化作用，產生四個方位的薄板狀磁鐵礦與鈦鐵礦相間的柵欄狀組織。由於這些磁鐵礦被鈦鐵礦分割成大小僅有數十個奈米的顆粒，這種次微米的磁鐵礦已接近單磁域的顆粒大小，其所攜帶的殘磁相較於多磁域的顆粒（大小在微米以上），是更為穩定的攜磁者。這意味著，蓆狀岩牆玄武岩對於海洋磁性異常條帶的貢獻可能比以前所想像的更具有重要性。

再者，由於磁鐵礦的居里溫度是攝氏575度，這項發現也顯示出蓆狀岩牆玄武岩的磁化，是由次生的磁鐵礦在攝氏575度或略低的溫度下完成，其磁化溫度遠高於枕狀岩流中鈦磁鐵礦的磁化溫度（攝氏150度）。

四十年前，一項很重要的海洋磁性異常觀測值，



海洋地殼蓆狀岩牆玄武岩岩心樣品在穿透式電子顯微鏡下的影像，此影像取自於一個粒徑100微米的鈦磁鐵礦顆粒內部一個很小的區域（只有1.5微米×2.0微米大小），可以看到有兩個方位排列的條紋，條紋寬度僅數十到一百奈米，暗色條紋部分是磁鐵礦，介於磁鐵礦之間的淺灰色部分原來是鈦鐵礦，但因熱水變質作用已轉變成榭石。因此，這個樣品中的攜磁礦物，實際上是次微米大小的磁鐵礦。

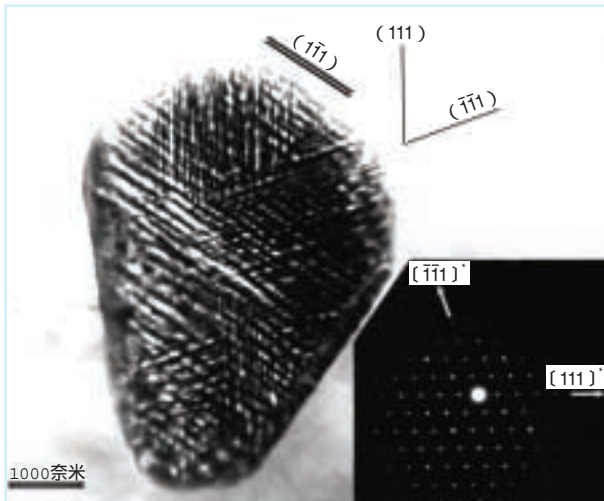
Shau, Y. H., Torii, M., Horng, C.S. and Peacor, D.R. (2000) *Journal of Geophysical Research*, 105, 23635-23649.

一個很簡單的洋殼形成與洋殼磁化模式，引領我們認真地思考海底擴張說，並且重回大陸漂移的觀點。

今天，在我們稱讚前人的先見之明時，更要感謝那些隱藏於岩石中的微小磁性礦物。畢竟，沒有它們的忠實紀錄，我們也無從驗證各個學說的對與錯。

然而，當我們看到了以往所看不到的更微小磁性礦物時，許多新的問題又產生了。例如，在過去簡單的以單一種鈦磁鐵礦為考量的洋殼磁化模式，已經不再是正確的了，因為枕狀玄武岩層的磁性礦物與磁化機制，顯然和位於其底下的蓆狀岩牆層是不同的。枕狀玄武岩間質玻璃中的超微鈦磁鐵礦，對整體海洋磁性異常值的貢獻程度如何？蓆狀岩牆中超微磁鐵礦的貢獻，是否也可和枕狀玄武岩的鈦磁鐵礦相比擬？如果洋殼中的磁性礦物受到後來的蝕變作用，則蝕變後的玄武岩，其殘磁是否能夠反映玄武岩形成當時之地磁紀錄？這些都是有待進一步深入探究的問題。

蕭炎宏  
中山大學海洋資源學系



這是一個長約5微米的鈦磁鐵礦顆粒在穿透式電子顯微鏡下的影像，可以看到鈦磁鐵礦內部已轉變成具有三個方位排列的條紋，條紋寬度僅約100奈米，暗色條紋部分是磁鐵礦，介於磁鐵礦之間的淺灰色或白色部分原來是鈦鐵礦，但因熱水變質作用已轉變成榭石。因此，這個樣品中的攜磁礦物，實際上是次微米大小的磁鐵礦。本樣品來自於海洋鑽探計畫在深海鑽探所取得之蓆狀岩牆玄武岩岩心樣品，樣品深度在海床下1,200公尺。右側附圖為電子繞射圖譜，可用來鑑定礦物與結晶面方位。

Shau, Y.H., Torii, M., Horng, C.S. and Peacor, D.R. (2000) *Journal of Geophysical Research*, 105, 23635-23649.