

從古地磁學的研究 看地球磁場長期的變化

Take Home Message

- 火山岩及沉積岩於生成時所含的磁性礦物，會記錄當時地球磁場的性質，這兩類岩石是研究古地磁的良好材料。
- 地磁場的強度與方向在過去的地球歷史中是變動不拘的，尤其曾發生多次的磁極倒轉，倒轉發生的時間不定，而倒轉發生時地球磁場的強度會減弱至相對的低值，且完成一次倒轉需要千年至萬年的時間。
- 最近一次的地磁場倒轉發生在 77 ~ 78 萬年前，人類祖先曾經歷過，而未來磁極倒轉勢必對人類的科技文明產生重大衝擊。



洪崇勝

曾任職於中央研究院地球科學研究所，從事古地磁、磁性礦物、環境磁學的研究。

古地磁是什麼？

人類自古就懂得利用磁針辨識方位，隨著科學興起，現代人類已經知道地球是一個具南北磁極的巨大磁體，而地球所形成的地磁場 (geomagnetism)，也造成地球周邊有著不同的磁場強度與方向。例如在近磁極處，磁場強度最強、磁傾角最陡；在磁赤道則強度最弱、磁傾角最平緩。然而地磁場最初是如何形成的？地球什麼時候開始有磁場？在渺遠的地球歷史中，地磁的方向與強度是否曾有變化？這些問題一直引起地球科學家的興趣。只是過去的地球磁場已經消失，那麼我們要如何覓得過去地磁場的性質與行為呢？涉及這些問題的研究稱之為古地磁學 (paleomagnetism)，它興起於 1960 年代，並對當時剛萌芽的「大陸漂移」、「板塊運動」學說起了一錘定音的作用。

自岩石中揭開古地磁的神秘面紗

想揭開古地磁的神秘面紗須從岩石中尋找，這就好比岩石中的化石可以讓我們一窺古生物當時所在地球的氣候與生態。岩石是由不同的礦物所組成，雖然其中大部分的造岩礦物，如長石、石英、鐵鎂礦物、黏土等並不會記錄地磁，但卻有一類礦物會對地磁的作用產生感應，稱之為磁性礦物 (magnetic minerals)。最常見的磁性礦物是磁鐵礦 (magnetite, Fe_3O_4)，由自然界含量豐富的鐵 (iron, Fe) 及氧 (oxygen, O) 化合而成，雖然它在岩石中含量較少 (低於 1%)，卻廣布於火成岩、沉積岩、變質岩三大岩類中。

回溯岩石生成之初，若以岩漿噴至地表的火山岩為例，高溫熾熱的熔岩於冷卻時，會逐步結晶出不同

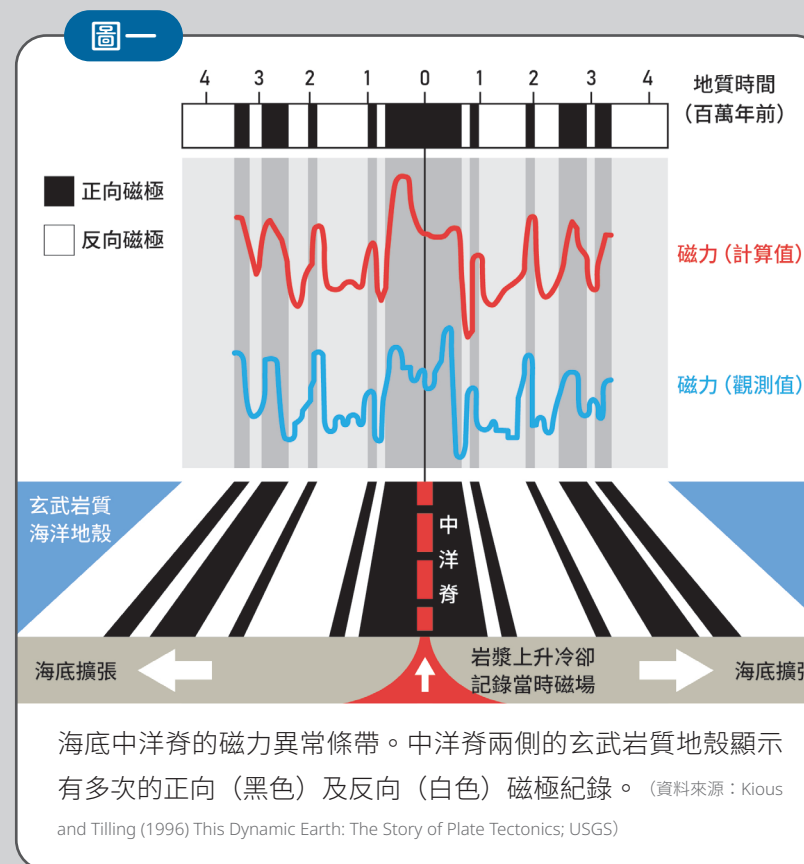
的造岩礦物，其中常伴有磁鐵礦的生成。一旦熔岩溫度降至磁鐵礦的居禮溫度 (Curie temperature, T_c , $575^\circ C$) 之下，磁鐵礦顆粒就會被當時的地球磁場感應而順向磁化，獲得磁化量 (magnetization)。即使當時的磁場消失，並且被繼起的磁場取代，此原始磁化量仍舊會被保留下來，稱之為殘 (剩) 磁 (remanent magnetization)。

由於火山岩中的磁鐵礦像個記憶體，會記錄下當時的磁場性質，因此如玄武岩或安山岩就成為古地磁很好的研究材料。暴露於地表的火山岩終究會被風化、侵蝕，岩石中的磁鐵礦顆粒將伴隨泥沙被河流、風、冰川帶入海洋 (湖泊) 而沉降、堆積。在此過程中，原先散亂無序的磁鐵礦小顆粒會如磁針般，在安定的沉積環境中順著當時地球磁場的方向排列，最後被壓密鎖住，並且再次記錄下當時磁場的性質。雖然海洋 (湖泊) 沉積物或沉積岩中的磁性礦物含量會因搬運稀釋而遠比在火山岩中少，造成殘磁強度也較弱，但仍是研究古地磁很好的材料。至於變質岩，雖然也含有磁性礦物，但因這類岩石在形成過程中，常受到比地球磁力更強的大地應力作用 (tectonic stress)，使得磁性礦物最初所記錄的方向常被更動，所以無法從變質岩中分析出原先古磁場的性質。

出發探尋地球磁場歷史

古地磁學家最早是從大洋下的玄武岩質洋殼及深海沉積物，獲取寶貴的古

地磁紀錄。在 1960 年代，科學家從事海洋磁力測量時，發現海洋底下的中洋脊玄武岩質地殼在洋脊的兩側具有對稱的正、負磁力值。除了證實玄武岩質岩漿的上升使得海洋地殼向洋脊兩側擴張外，更重要的是發現了地磁極在過去曾發生多次的倒轉 (圖一)。實際上，地磁極會倒轉的看法早在之前即曾被提出，1906 年法國地球物理學家布倫尼斯 (Bernard Brunhes) 在研究古老玄武質的熔岩時，就發現該岩石磁化的方向幾乎與現今磁場的方向相反，因此大膽推論該岩石生成時的磁北極是位在現今的南極，地磁極應該曾經倒轉過。接著在 1920 年代，日本地球物理學家松山基範，開始系統性地分析日本、韓國、中國東北地區的玄武岩古地磁，他主張在更新世 (Pleistocene) 早期時所形成的



這些岩石，其磁極紀錄與當今的磁極相反，換言之，地磁場的磁極曾經倒轉，才會成為現今狀態。後來有更多研究益加證實了兩人的看法，為了表彰他們兩人的重大發現，後人將最近一次地磁場為倒轉的時期稱為松山反向世代 (Matuyama reversed epoch)，而倒轉後與現今磁極相同的時期稱為布倫尼斯正向世代 (Brunhes normal epoch)。最近的定年研究顯示，由松山反向世代轉變至布倫尼斯正向世代的時間發生在 77 ~ 78 萬年以前，也就是 77 ~ 78 萬年前以來，磁極一直維持著與現今相同的狀態而未曾再倒轉過。

既然地球磁場會倒轉、變動，人們接著想問：是什麼原因造成地磁場的倒轉？在過去的地球歷史中，地磁倒轉的頻率是快是慢？有無週期性？倒轉時地磁場的性質為何、需花多久的時間完成一次倒轉？下次地磁場倒轉會在何時？這一連串的問題古地磁學者也深感好奇，想一探究竟。這裡就以下列的研究案例做一闡述，或許可為這些問題提供一些解答。

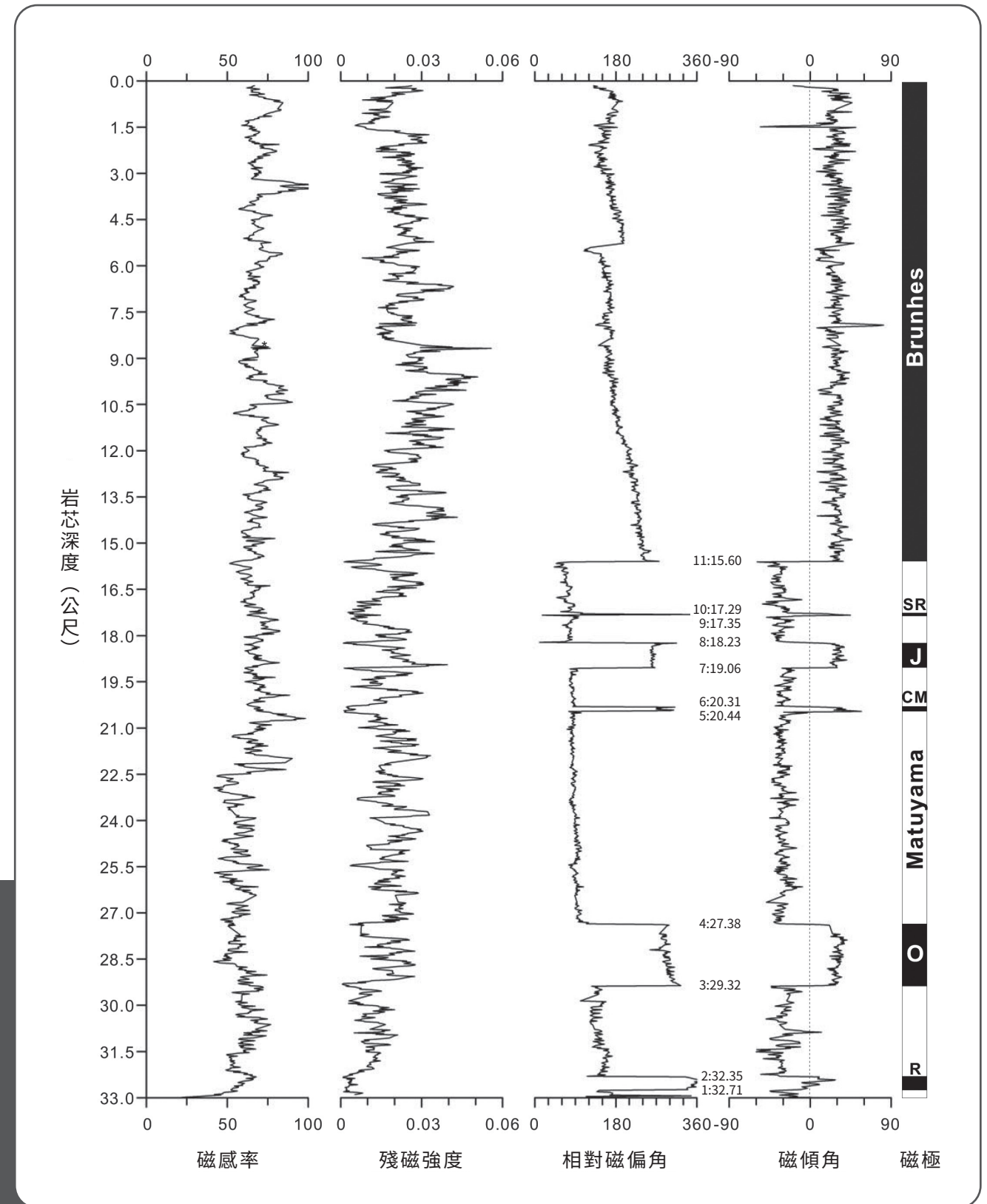
深海沉積物的磁極倒轉證據

由於大洋可以在較安定的環境下持續接受沉積物的

堆積，因此深海沉積物常能記錄下較為完整的地球歷史。在此情況下，科學家常利用海洋研究船從大洋中鑽取深海沉積物來研究地球的古地磁紀錄。在 1997 年，臺灣科研團隊租用了法國海洋研究船瑪麗恩·杜帆妮號 (Marion Dufresne)，在呂宋島東方的菲律賓海盆中取得了一根長 38 公尺的岩芯。由於這根岩芯在 32.91 ~ 33.95 公尺處有一層白色有孔蟲砂，造成沉積層不連續，所以只能針對 32.91 公尺之上的沉積物進行古地磁的量測與分析。經採樣後由儀器可測得磁感率、殘磁強度、磁偏角及磁傾角 (註 1)，並從中觀察到岩芯深度在六個區段，其磁偏角與磁傾角較相鄰的上下區段有顯著的差異 (圖二)。磁偏角與相鄰的區段大致相差了 180°，且所對應的磁傾角由正值變至負值，或反之亦然。具體來說，這六個區段的古地磁皆為正向磁極，而其他區段為反向磁極，代表那些時期的南北磁極位置與現今相反。此一岩芯位於最上段 (0 ~ 15.6 公尺) 的沉積物是最晚堆積的，具正向磁極的紀錄，因此歸屬於布倫尼斯正向世代，而在 15.6 公尺之下的沉積物大部分為反向磁極，歸屬於松山反向世代。在松山反向世代中，部分區段為正向磁極，顯示仍有短期的正向磁極事件發生。

取自呂宋島東方海盆的 MD97-2143 岩芯 (北緯 15.87°、東經 124.65°，水深 2989 公尺處)，在深度 0 ~ 32.91 公尺的區段，沉積物的磁感率、殘磁強度、相對磁偏角以及磁傾角的測值，顯示出六個正向區段 (黑色)，共有 11 次地磁極倒轉的紀錄。岩芯位於最上段 (0 ~ 15.6 公尺) 的沉積物是最晚堆積的，具正向磁極的紀錄，因此歸屬於布倫尼斯正向世代，而在 15.6 公尺之下的沉積物大部分為反向磁極 (白色)，歸屬於松山反向世代，但仍有短期的正向磁極事件發生。

Brunhes：布倫尼斯正向世代 (0 ~ 15.6 公尺)
 Matuyama：松山反向世代 (15.6 公尺之下)
 SR：聖塔羅莎 (Santa Rosa, 17.29 ~ 17.35 公尺)
 J：哈拉米諾 (Jaramillo, 18.23 ~ 19.06 公尺)
 CM：科布山 (Cobb Mountain, 20.31 ~ 20.44 公尺)
 O：奧都威 (Olduvai, 27.38 ~ 29.32 公尺)
 R：留尼旺 (Reunion, 32.35 ~ 32.71 公尺)



(作者提供)

今假設整根岩芯的沉積速率上下差異不大，則可以從沉積物厚度推斷：這些正向磁極事件的持續時間長短不一，而且岩芯在 32.91 公尺的沉積物中一共記錄了 11 次地磁場倒轉，倒轉的頻率無週期規律可言。再觀察每次的地磁倒轉，可以發現磁極由正變反或由反變正的磁極過渡帶 (magnetic polarity transition)，僅記錄在岩芯極薄層的沉積物中，厚度僅數公分，顯示完成一次磁極倒轉所花的時間十分短暫。除了磁極的位置與方向會改變外，圖二中殘磁強度的忽高忽低也隱含著即便地磁場在某一段一直維持著正向 (或反向)，但地磁場的強度仍有高低變動，使得沉積物中的磁性礦物所感應到的殘磁強度也有了變化。

為了進一步了解地磁場長期以來的強度變化以及上述磁極倒轉發生的時間，遂針對岩芯做了精準的年代測定 (註 2)，我們可以將岩芯深度轉換成地質時間，同時藉由磁感率測值將沉積物的殘磁強度標準化，以便計算出古磁場的相對強度 (註 3)。古磁場強度隨時間的變化顯示 (圖三)，此根岩芯在深度 32.91 公尺處的年代相當於 2.14 百萬年前，同時也界定出 11 次磁極倒轉的時間。以最近一次的磁極倒轉為例，也就是松山反向世代與布倫尼斯正向世代的界面，是發生在 78.1 ± 0.3 萬年前。將岩芯深度除以對應的年代，可以算出這根大洋岩芯平均的沉積速率為每千年 1 ~ 2 公分。此外，磁場強度也透露出兩個重要的信息：(1) 每當磁極發生倒轉時，古磁場的強度並非為零，而是降至相對的極低值，然而一旦磁極倒轉完成，磁場強度又會復原；(2) 就過去 78 萬年看來，地磁場雖然一直維持著現今看似穩定的南北磁極，但在此期間磁場強度實

圖三

MD97-2143 岩芯古磁場強度隨時間的變化，除了顯示 11 次地磁極倒轉的地質時間之外，也可觀察出磁極於倒轉時的磁場強度為極低值，且可能的地磁游移事件也具有此性質。紅色曲線為 MD97-2143 岩芯所反應的磁場強度；藍色曲線為 80 萬年以來全球代表性的磁場強度 (註 4)；箭頭則是可能的地磁游移事件。

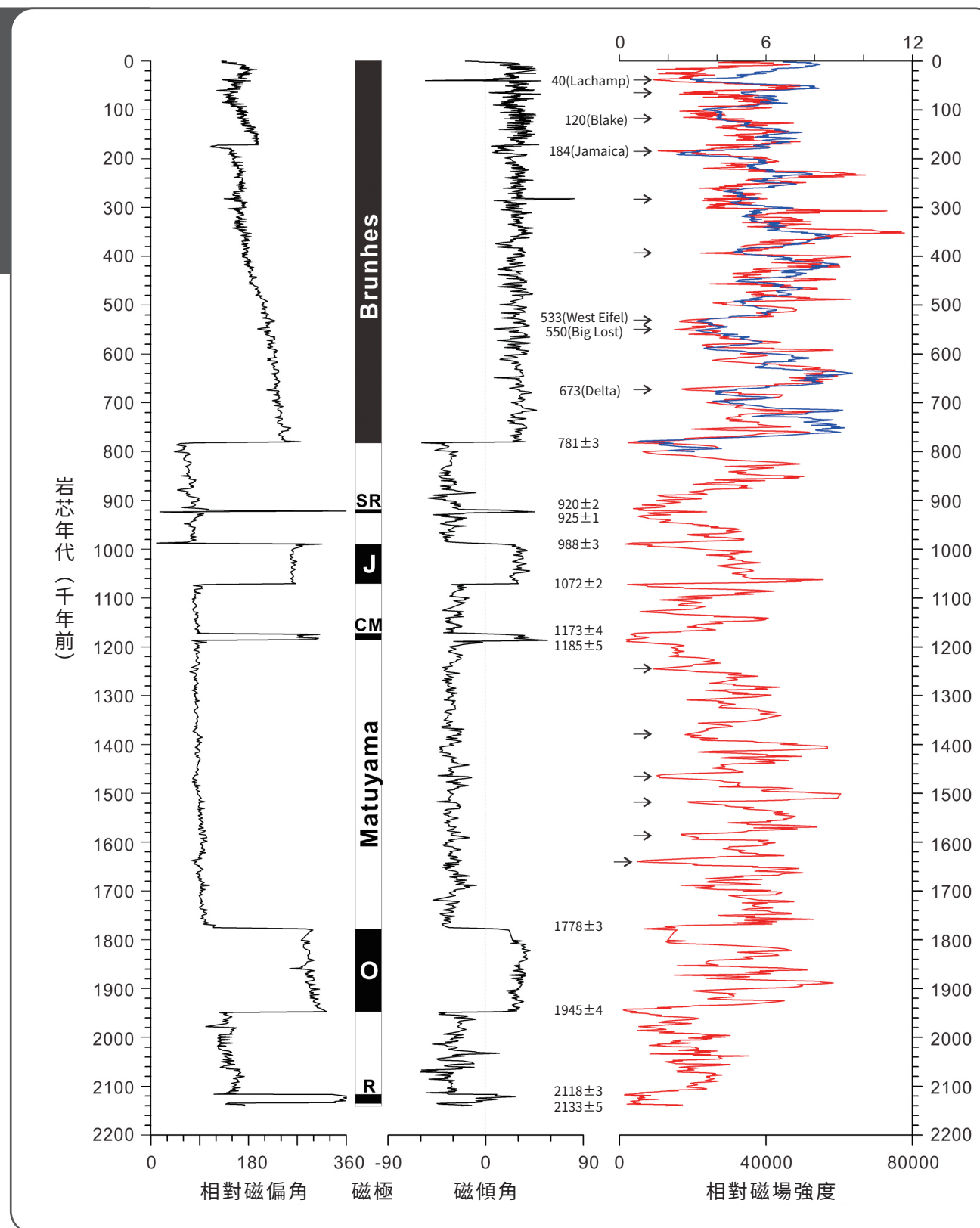
有多次的低值，有學者認為這些低值應屬不穩定短暫的地磁游移事件 (geomagnetic excursions)，或是磁極倒轉失敗的案例，例如在約四萬年前及 12 萬年前，已分別被指認命名為拉尚 (Laschamp) 及布萊克 (Blake) 地磁游移事件，甚至更早的松山反向世代期間也有類似的紀錄。

地磁倒轉沒有影響嗎？

古地磁學的研究讓我們了解到地磁場在地球歷史中是變動不拘的，它最大的特性是會倒轉，而倒轉發生的時間並無週期性。當磁場發生倒轉時，強度會減弱至極低值，而完成一次倒轉所需的時間很短。從上述沉積速率可估算，磁極過渡帶僅有千年或萬年的時間，然而地球磁場倒轉的原因目前仍是懸而未決。過去多次的地磁倒轉似乎對生物界並未產生巨大影響，78 萬年前最近一次的地磁倒轉，人類的祖先也曾經歷過，而下一次地磁倒轉何時將發生，它對人類所建立的科技文明會造成多大的衝擊，皆有待我們持續的研究與關注。

[註 1~4] 參閱補充資料

1. 古地磁的採樣及儀器量測
2. 岩芯的年代測定
3. 古磁場的相對強度
4. 80 萬年以來全球代表性的磁場強度



(作者提供)