

地磁反轉持續時間隨著緯度而異

四十年前，海洋磁性異常(marine magnetic anomaly)紀錄曾經是板塊構造運動學說的最重要證據之一(圖一)，海洋磁性異常所呈現出的地磁反轉紀錄反映出板塊在洋脊處新生且向兩側擴張的持續運動，同時也顯示出地球磁場在地質年代中已經發生過數百次磁極反轉的現象。近年來科學家更進一步地想瞭解磁極反轉時地球磁場到底發生了什麼事以及磁極反轉所需的時間。在地球表面磁場發生變異的時間尺度可以從幾毫秒到幾億年，而最引人注目的地磁變化就是在地質年代中不斷發生的地磁反轉事件。地磁反轉在時間上似乎是隨機的發生，而磁極反轉過程所持續的時間最短約二到三萬年，最長則可達到五千萬年；距離現今最近的反轉大約發生在七十九萬年前。

地球磁場的產生主要是因為地球的外核(深度 2,891~5,150 公里)中富鐵的液體流動形成一個類似發電機(dynamo)的作用而產生磁場，在磁極反轉期間地球磁場的強度會降低，且在磁場微弱時，其方向開始作 180 度的反轉。以 Brunhes-Matuyama 磁極反轉為例，根據利用 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年對 Brunhes-Matuyama 反轉過渡帶上的岩流所做的分析，顯示此反轉持續約一萬四千年到兩萬八千年，這個結果和傳統用沈積物的定年與磁性礦物分析所得的數千年反轉時間並不符合。

Clement (2004) 分析可取得的沈積物紀錄與資料中最近四次的磁極反轉事件，得到地磁反轉所需的時間為平均大約七千年，而且個別反轉時間和平均值的差異並不是隨機變異，而是隨著緯度而有規律性的不同，亦即低緯度所需的反轉時間較短，中、高緯度則有較長的反轉時間(圖二)。此次分析的資料來源是 TRANS00 的資料庫(加上更新過的資料)，他選擇完整且合適的資料進行統計分析(表一)。

分析過程主要利用 circular standard deviation (CSD) 和 virtual geomagnetic pole (VGP) 兩種方法來估計過渡帶的厚度(圖三)。過渡帶定義為：當磁場方向超過平均全磁極(full-polarity)方向的 CSD 是為過渡帶的開始，而方向改變直到穩定也就是達到平均反向磁極(opposite-polarity)方向的 CSD 是為過渡帶的結束。但此方法在低沉積速度的地方會造成高估過渡帶厚度，因而高估過渡帶的持續時間，因此 CSD 的方法提供了磁極改變時間的上限。而 VGP 的方法是直接定義一個角度來代表過渡帶的起始和結束，實驗以與地理兩極夾三十度和四十五度當作過渡帶的定義。

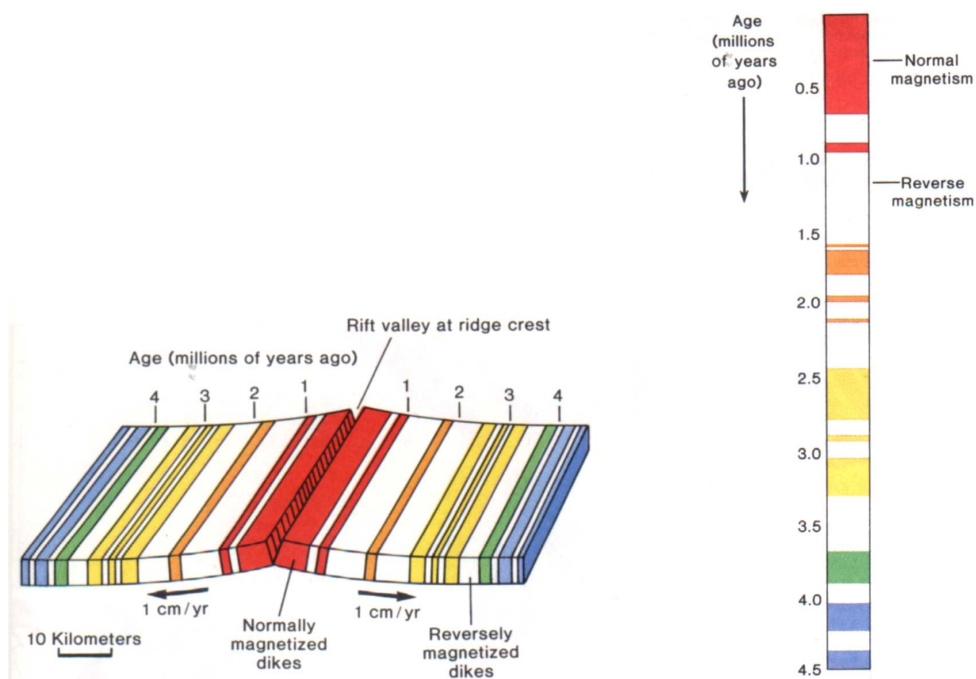
一旦地磁反轉過渡帶的沈積物厚度被決定了以後，估計沈積物的沉積速率就可以用來決定磁場方向改變的持續時間(同樣厚度，沈積速率越慢，反轉持續時間越長)。但在一些紀錄中，沉積速率的不明確常是造成估計反轉持續時間最大的誤差來源。在不同地區同一期地磁反轉過渡帶的沈積物厚度增加隨當地沉積速率的增加而增加的線

性關係，表示沈積物速率是可以合理作為地磁反轉持續時間的初步判斷依據。

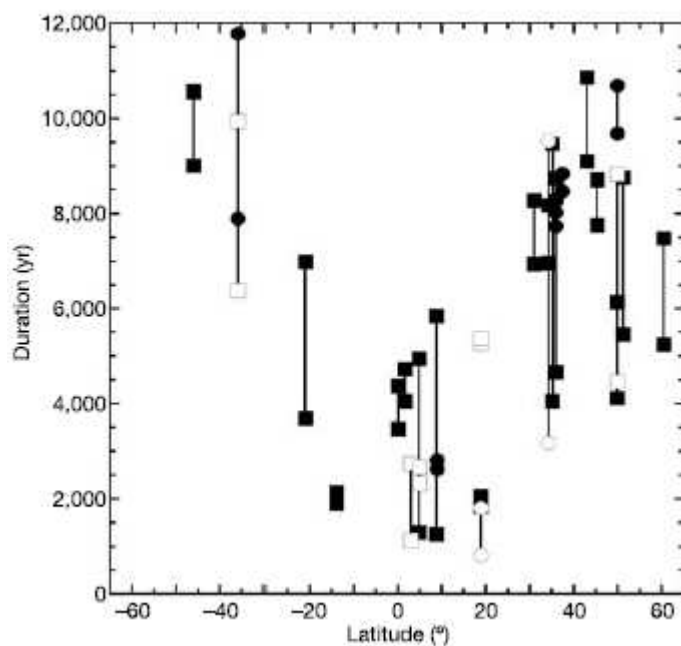
從表一可看出在 Clement (2004) 的研究中沈積速率和站位的緯度並沒有明顯關係，而且沈積速率和反轉持續時間也沒有相關 (圖四)，因此，反轉持續時間隨著緯度的變化，應該不是因為在高緯度常有比較高的沈積速率所造成的結果。

隨著位置緯度而改變的反轉持續時間可以用簡單的反轉模式來預測 (圖五)，於此模式中，當軸偶極 (axial dipole) 衰退到零，再以反向偶極增大的過程中，非偶極的磁場是被允許存留的；以現今的磁場為基礎，這樣的模式所展現出來隨著緯度而改變的反轉持續時間是和研究觀察的結果相似；在以軸四極 (axial quadrupole) 為主的地磁反轉模式中，中緯度和低緯度之間的反轉持續時間差異只佔整個反轉持續時間的一個很小比例 (略小於圖五的一個時間單位)；由於實際觀察到的中緯度與低緯度持續時間差異平均為 4,000 年，如果將軸四極模式的時間差異按比例對應到實際觀察結果，每一個時間單位將大約是 4,000 年，則依此軸四極模式模擬的整個反轉持續時間將長達約 40,000 年以上 (10 個時間單位，見圖五)。而八極 (octupole) 模式展現出從低緯度到中緯度有比較大的反轉持續時間的差異，而且和實際觀察的持續時間變化比較吻合。從四極和八極模式模擬結果的不同，可以推測在地磁反轉的過程，相對於赤道在幾何上是反對稱 (antisymmetric) 的磁場將會是特別的重要。

本研究顯示地磁反轉持續時間和緯度的關係可以用一個簡單的幾何反轉模式來預測，根據這個模式，在軸偶極 (axial dipole) 磁場強度衰減至零然後產生一個反向磁場的過程中，非偶極 (non-dipole) 磁場可以持續存留。此反轉持續時間和緯度的關係可以提供地磁發電機數值模式的一個制約。



圖一、過去四千五百萬年以來的磁性異常記錄。左圖為沿著中洋脊裂谷 (rift valley) 向兩側移動的洋殼所紀錄的海洋磁性異常圖譜 (彩色條帶代表正向磁極, 白色條帶代表反向磁極); 右圖地層柱狀圖顯示在大陸上所噴發的熔岩流中之磁極方向的記錄, 與海底的玄武岩質洋殼中之記錄完全相符, 因此海洋磁性異常可以用來判斷洋殼的年齡, 也可以用來估算海底擴張的速率 (即板塊移動的速率)。(本圖出自 Plummer, C. and McGeary, D (1991) *Physical Geology*, 5th edition, Chapter 19, Figure 19.19 and Figure 19.21)

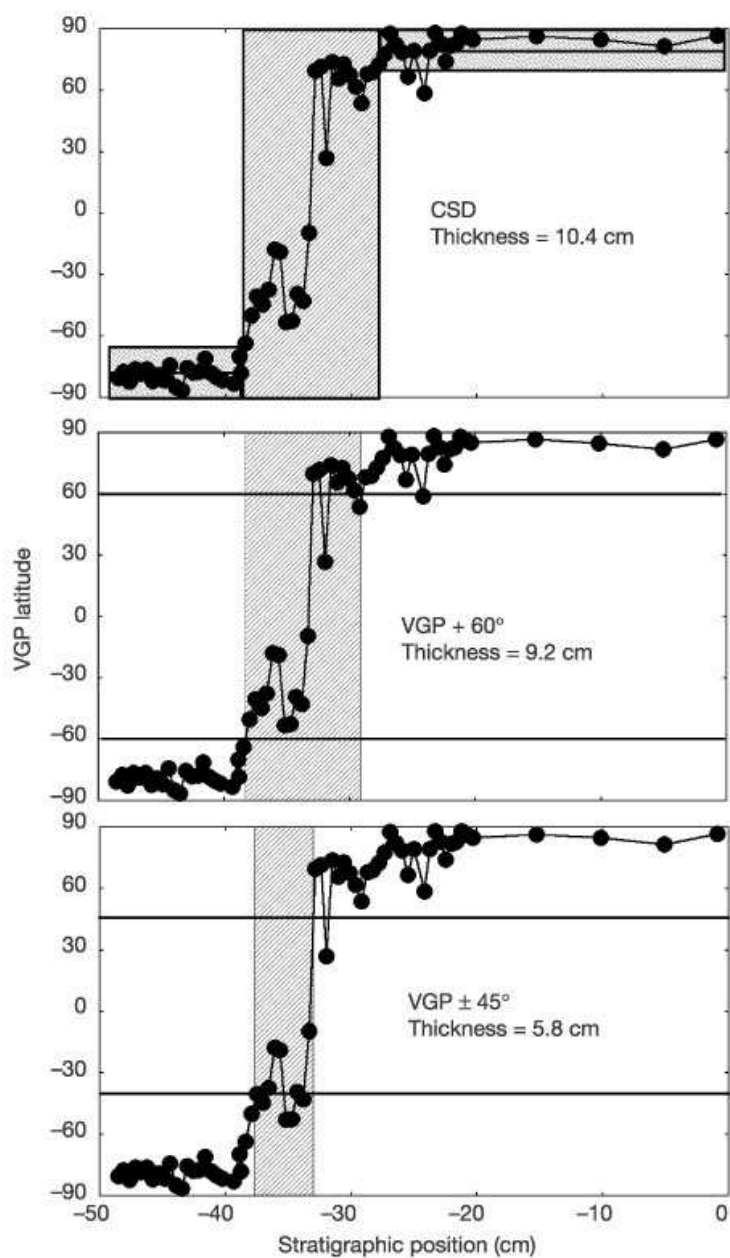


圖二、磁極反轉持續的時間對應位置的緯度關係圖。以利用 CSD method 取得的數據為主，但因為在一些低沉積速率的環境此方法會高估反轉所需時間，因此加上以 $\pm 45^\circ$ VGP cut-off method 當成最低限度。黑色方形代表 Brunhes-Matuyama 反轉，白色圓圈代表 Upper Jaramillo 反轉，白色方形代表 Lower Jaramillo 反轉，黑色圓圈代表 Upper Olduvai 反轉。(本圖出自 Clement, B.M., 2004, http://www.nature.com/nature/journal/v428/n6983/fig_tab/nature02459_F2.html)

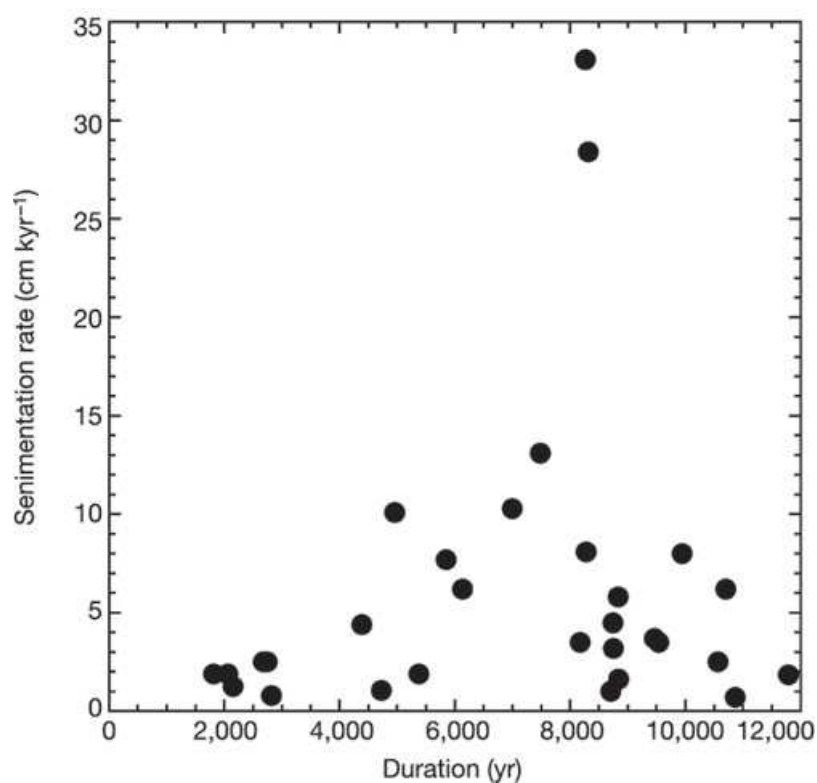
Reversal	Locality	Ref.	Latitude (°)	Longitude (°)	Thickness ($\pm 45^\circ$ VGP) (cm)	Thickness (CSD) (cm)	Sedimentation rate (cm kyr^{-1})	Lower duration (yr)	Upper duration (yr)
Brunhes-Matuyama	V16-58	15	-46.0	30.0	22.50	26.40	2.5	9,000	10,560
	ODP 1082	5	-21.0	11.8	38.00	72.00	10.3	3,689	6,990
	K820305	16	-14.0	174.0	2.40	2.70	1.3	1,905	2,143
	ODP 664	17	0.1	-23.3	15.30	19.26	4.4	3,477	4,377
	RC15-21	18	1.6	-133.0	4.30	5.00	1.1	4,057	4,717
	ODP 767	6	4.8	123.5	13.10	50.00	10.1	1,297	4,950
	ODP 769	6	8.8	121.3	9.63	45.00	7.7	1,250	5,844
	K781030	16	18.9	-160.4	3.50	3.90	1.9	1,842	2,053
	ODP 792A	19	31.0	140.0	56.20	67.00	8.1	6,938	8,272
	Weinan	20	34.2	109.2	24.36	29.60	3.5	6,960	8,171
	Bloso Chonan	21	35.2	140.2	15.00	35.00	3.7	4,054	9,459
	Tecopa	22	35.9	-117.0	21.00	39.33	4.5	4,667	8,740
	V20-107	18	43.0	-178.2	6.37	7.60	0.7	9,100	10,857
	V20-108	18	45.4	-179.2	7.91	8.88	1.0	7,755	8,706
	DSDP 609B	23	49.9	-24.2	25.50	38.00	6.2	4,113	6,129
ODP 883B	24	51.2	-167.8	17.50	28.00	3.2	5,469	8,750	
ODP 983	4	60.5	-23.6	68.75	98.00	13.1	5,248	7,481	
Mean duration 2σ							4,754	6,953	
Upper Jaramillo	K781030	25	18.9	-160.4	1.55	3.44	1.9	1,220	1,285
	Weinan	20	34.2	109.2	11.11	33.36	3.5	816	9,531
Mean duration 2σ							1,995	5,671	
Lower Jaramillo	RC14-14	26	-35.9	60.0	51.11	79.50	8.0	6,389	9,938
	665A	17	2.9	-19.0	2.83	6.84	2.5	1,132	2,736
	ODP 759A	27	5.0	90.0	5.80	6.67	2.5	2,320	2,668
	K781030	25	18.9	-160.4	10.00	10.20	1.9	5,263	5,368
	DSDP 609B	23	49.9	-24.2	25.90	51.20	5.8	4,466	8,828
Mean duration 2σ							3,913	5,907	
Upper Olduvai	RC14-14	28	-35.9	60.0	14.60	21.80	1.9	1,925	3,020
	K78019	29	9.0	-170.2	2.10	2.25	0.8	7,892	11,794
	Confusion Canyon	10	35.9	-116.6	228.00	236.00	28.4	2,625	2,813
	Death March Canyon	10	35.9	-116.6	256.00	273.30	33.1	8,028	8,310
	K7501	25	37.4	-179.2	13.80	14.40	1.6	7,734	8,257
	DSDP 609	28	49.9	-24.2	60.00	66.30	6.2	8,466	8,834
Mean duration 2σ							9,677	10,894	
Mean duration 2σ							7,404	8,448	
Overall mean duration 2σ							1,995	2,533	
Overall mean duration 2σ							4,960	6,992	
Overall mean duration 2σ							988	1,089	

表一、反轉過渡時期紀錄表。利用 $\pm 45^\circ$ VGP cut-off 和 CSD method 決定過渡帶的沉積物厚度，並產生對應的時間上界和下界。每一個反轉都計算出平均所需時間，並計算出所有反轉的平均所需時間 (overall mean duration)。 2σ 代表平均標準差的兩倍。(本表出自 Clement, B.M., 2004,

http://www.nature.com/nature/journal/v428/n6983/fig_tab/nature02459_T1.html)

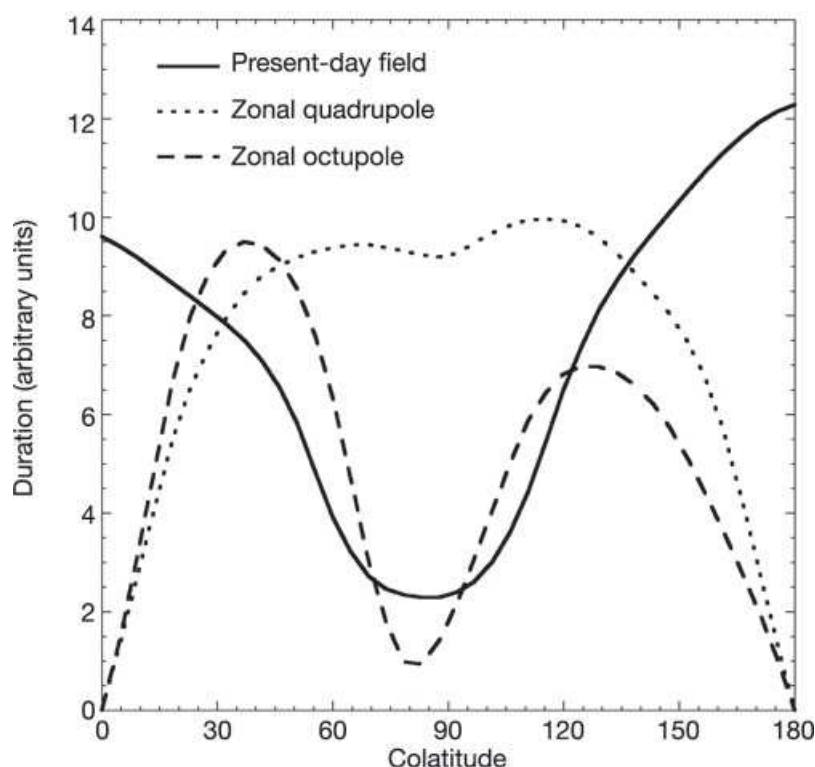


圖三、過渡帶的地層厚度和緯度的關係圖。由 ODP Hole 758A 取得的 lower Jaramillo 樣品透過三種不同方式推斷的結果，而過渡帶的厚度估計主要受到「過渡帶的定義」影響。(本圖出自 Clement, B.M., 2004, http://www.nature.com/nature/journal/v428/n6983/fig_tab/nature02459_F1.html)



圖四、沉積速率與反轉持續時間關係圖。反轉所需時間和沉積速率並沒有相關性，因此可以推測所觀察到反轉持續時間隨著緯度的改變並不是因為在不同緯度的沉積速率不同所造成。(本圖出自 Clement, B.M., 2004,

http://www.nature.com/nature/journal/v428/n6983/fig_tab/nature02459_F3.html)



圖五、反轉持續時間與餘緯度 (colatitude) 的關係圖。簡單的幾何學模式可以計算出反轉過渡時間會隨著緯度而有系統性的變化，在這樣的模式中，當軸偶極 (axial dipole) 磁場衰退到零並逐漸增強為反向磁場的同時，常駐的非偶極 (non-dipole) 磁場可以持續存在。現今非偶極 (present-day non-dipole) 磁場的持續時間是利用沿著經度 180° 的站位資料計算所得。縱軸之反轉持續時間的計算是從偶極開始減少一直到到反向偶極的增加結束 (任意時間單位)。可看出八極 (octupole) 模式和現今 (present-day) 模式在中、低緯度範圍相當吻合。(本圖出自 Clement, B.M., 2004, http://www.nature.com/nature/journal/v428/n6983/fig_tab/nature02459_F4.html)

參考資料：

Merrill, R. T. (2004) Time of reversal. *Nature*, 428, 608-609. (doi:10.1038/428608a)

<http://www.nature.com/nature/journal/v428/n6983/full/428608a.html>

Clement, B. M. (2004) Dependence of the duration of geomagnetic polarity reversals on site latitude. *Nature*, 428, 637-640. (doi:10.1038/nature02459)

<http://www.nature.com/nature/journal/v428/n6983/full/nature02459.html>

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

編譯：王奕量