

地磁気極性年代表の現状と将来の発展

兵 頭 政 幸*

Geomagnetic Polarity Time Scale: Its Present State and Future Improvements

Masayuki HYODO *

Abstract

Geomagnetic polarity time scales for the late Cretaceous and Cenozoic were evaluated, mainly from a viewpoint of their applications to geomagnetochronology. A composite geomagnetic polarity sequence, which was derived primarily on data from the South Atlantic with fine-scale information from the Pacific and Indian Oceans (Cande and Kent, 1992), is nearly complete with high quality and precision. However, a time scale generated by using a spline function to fit calibration points to the composite polarity sequence is not stout, but actually highly vulnerable to the calibration points. Three time scales with different calibration points were compared, resulting in a difference of 1.3 Myr (8%) at maximum during the Miocene time. Such a large difference signals a warning to geomagnetochronology. The tiny wiggles corresponding to polarity events of less than 30 kyr (defined as a cryptochron) take an important role in examining the long-term nature of the dynamo. We need to clarify whether they are reversal phenomena. A time scale covering the last 5.23 Myr constructed using polarity sequences from marine sediments dated by astronomical tuning is nearly complete. A fairly constant spreading rate in the South Atlantic since 5.23 Ma, that has been verified by the time scale, may suggest a principle for future revisions of the time scale. Further improvements can be achieved by more detailed dating with astronomical tuning, and construction of high-resolution magnetostratigraphy incorporating excursions.

Key words : geomagnetic polarity time scale, reversal, paleomagnetism, marine magnetic anomaly

キーワード : 地磁気極性年代表, 地磁気逆転, 古地磁気学, 海洋磁気異常

I. はじめに

地磁気逆転の歴史は、鮮新世・更新世については火山岩や堆積物（堆積岩）の古地磁気から明らかにされ、それ以前については海洋磁気異常、いわゆる地磁気縞模様から過去 1 億 6000 万年前ま

で明らかにされている。これらのデータは地磁気極性年代表としてまとめられ、地磁気ダイナモの性質としての逆転頻度の統計解析（例えば、McFadden and Merrill, 1997; Gallet and Hulot, 1997; Seki and Ito, 1999）や、海底地殻の年代決定（例えば、Yamazaki *et al.*, 2003; Iwamoto

* 神戸大学内海域環境教育研究センター

* Research Center for Inland Seas, Kobe University

et al., 2002) など, さまざまな分野で使われている。特に応用面では, 磁気層序年代法として, 地質学 (例えば, 星・高橋, 1996; Biswas *et al.*, 1999; 加藤ほか, 2004) 古生物学 (Takahashi *et al.*, 1999; 須藤ほか, 2002) 人類学 (Hyodo, 2001; Hyodo *et al.*, 2002) 考古学 (Zhu *et al.*, 2004) など幅広い分野で用いられており, 古地磁気学の他分野への重要な貢献の一つであるといえる。

本小論では, 多くの分野でよく引用されている Cande and Kent (1995) の後期白亜紀および新生代の地磁気極性年代表を中心に年代表の信頼度などの評価を行い, 磁気層序年代学への応用を見すえた将来の発展性について議論する。中期白亜紀以前の年代表 (Larson and Pitman, 1972; Larson and Hilde, 1975) については, 最近の進展がないことと, 適切な評価方法もないので, ここでは議論しない。さらに, 海洋磁気異常データが存在しないジュラ紀, 三畳紀, 古生代の地磁気極性層序は主に陸上の古地磁気学研究から出されているので, これらについて情報を得たい方は Opdyke and Channell (1996) の本を参照されたい。

なお, ここでは Geomagnetic polarity time scale を“地磁気極性年代表”と和訳した。実質的に地磁気極性反転の年代表であり, 年代尺度以外の使われ方も多いことを考慮した上で, 地質年代表 (Geologic time scale) という認知された和訳に倣った (他に“地磁気極性タイムスケール”や, “地磁気極性逆転表”“地磁気極性年代尺度”なども使われており, いずれ用語の統一が必要であろう)。

II. 完成度の高い地磁気極性シーケンス

古地磁気学研究によって出された現在から鮮新世までの地磁気逆転連続データは, 海洋地磁気全磁力異常の観測によって 10 Ma まで延長された (Vine, 1966; Pitman and Heirtzler, 1966)。さらに後期白亜紀 (~ 80 Ma) まで延長され, 71 個の逆転すなわち地磁気極性境界が年代決定された (Heirtzler *et al.*, 1968)。地磁気異常に付けら

れた 1 番 (Brunhes chron と Matuyama chron の後半) から 32 番 (後期白亜紀) までの番号は, 今でも地磁気極性年代表の極性時代区分名として使われている。1970 年代に入ると, 地磁気異常 33 と 34 が加えられ (Larson and Pitman, 1972) その後, 地磁気異常 30 から 34 の区間幅の変更 (Cande and Kristoffersen, 1977) や, 地磁気異常 14 の抹消 (LaBrecque *et al.*, 1977) など部分的な変更が行われた。しかし, その後の後期白亜紀 ~ 新生代の年代表 (Berggren *et al.*, 1985; Harland *et al.*, 1990) は基本的に Heirtzler *et al.* (1968) の地磁気極性シーケンスに基づいており, 本格的な見直しは 1990 年代に入るまで行われていない。

Cande and Kent (1992) の地磁気極性シーケンスは, 南大西洋を模式地域として選んで作られ, 地磁気極性区間は南大西洋での中央海嶺からの距離で表された。南大西洋は, 1) 長く連続したデータが得られる, 2) 豊富な観測データが存在する, 3) 中央海嶺を挟んで両側にペアでデータが存在する, という 3 つの長所を理由に模式地域に選ばれた。そして, 海底拡大速度が速い太平洋とインド洋のデータも取り込んで, より詳細な地磁気異常のデータを得ている。この地磁気極性シーケンスは, 数本のデータをスタックした合成地磁気プロファイルから有限なプレート回転極を使って中央海嶺からの距離を出した点に特徴がある。1 本の測線では非対称拡大, ridge jump, propagating rift などの不規則性があるので, 標準になる完全な地磁気プロファイルを得ることは難しい。南大西洋では, フラクチャーゾーンと地磁気プロファイルを使って 43 個のプレート回転極が求められており (Cande *et al.*, 1988) そのうちの 9 個を使って鍵異常 (key anomaly) までの平均距離を求めている。距離は南緯 30 付近の合成測線 (flow line) の値として表している。9 個の鍵異常 (4A, 5C, 7, 13, 20, 24, 30, 33, 34) までの距離はカテゴリー に分類し, 鍵異常間の 5 ~ 9 本のプロファイルを合成したものから求めた極性境界までの距離をカテゴリー に分類した。さらに拡大速度が速い太平洋, イ

表 1 キャリブレーション年代 .

Table 1 Age calibrations.

Cande and Kent(1992, 1995)			Wei(1995)		
年代(Ma)	Chron	距離(km)	年代(Ma)	Chron	距離(km)
* 2.6	C2An(0.0)	41.75			
# 5.23	C3r(0.0)	84.68	5.23	C3r(0.0)	84.68
14.8	C5Br(0.0)	290.17	9.67	C5n(0.0)	174.47
23.8	C6Cn. 2r(0.0)	501.55	16.3	C5Br(0.0)	298.45
33.7	C13r(.14)	759.49	28.1	C9r(0.0)	607.96
46.8	C21r(.33)	1071.62	35.2	C15r(0.0)	791.78
55.0	C24r(.66)	1221.20	52.8	C24n.2r(0.0)	1184.03
* 66.0, #65.0	C29r(.3)	1364.37	65.0	C29r(.3)	1364.37
74.5	C33r(.15)	1575.56			
83.0	C34r(0.0)	1862.32			

* Cande and Kent(1992) 固有, # Cande and Kent (1995) 固有, 無印は共通
 カッコ内数値は Chron 内の上限からの位置を表す。0.0 が上限, .33 は上限から 1/3, 66 は 2/3 .
 距離はどちらも中央磁気異常オフセット 1.29 km を差し引いている .

ンド洋の地磁気プロファイルに現れている細かい異常の距離をカテゴリー に分類した。ただし、年代が 3 万年未満の極性区間は正規の年代表には含めず、クリプトクロンとして別扱いにした。

Cande and Kent(1992)の地磁気極性シーケンスは、これまでに蓄積された海洋磁気異常データを最大限に生かし、現時点では最も質の高いデータであるといえる。

III . 見直しが必要なキャリブレーション

Cande and Kent(1992)の合成地磁気極性シーケンスの距離軸を年代軸に変換することで年代表は完成する。Cande and Kent(1992)は、拡大速度はスムーズに変化すると仮定し、約 10 Myr ごとのキャリブレーション年代 9 個(表 1)と年代ゼロの中央海嶺軸を 3 次スプライン近似して年代を決めた。Cande and Kent(1995)は、鮮新世の C3n.4n(Thvera subchron)の下限 = 5.23 Ma から Brunhes/Matuyama 境界 = 0.78 Ma までの 21 極性境界については、天文学的年代調節(Astronomical tuning)された年代値(Shackleton *et al.*, 1990; Hilgen, 1991)を用い、C3n.4n 以前についてのみ 3 次スプライン近似を適用した。キャリブレーション年代

は、C2An 上限(Matuyama/Gauss 境界)に代えて C3n.4n を、K/P 境界の年代を 66 Ma から 65 Ma に変えた以外は Cande and Kent(1992)と同じである(表 1)。Wei(1995)は、Cande and Kent(1992, 1995)が用いたキャリブレーション年代について、クロン C5Bn 上限の年代とした 14.8 Ma の根拠となるデータの間違いをはじめ多くの問題点を指摘し、異なるデータ(全て $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代)(表 1)によるキャリブレーションを行った。鮮新世以降の極性境界については、Cande and Kent(1995)と同じく、天文年代(Shackleton *et al.*, 1990; Hilgen, 1991)を用いている。Cande and Kent(1995)の年代表の値は CK95 として、Wei(1995)の年代表の値は W95 として、表 2 に載せた。

IV . 考 察

1) 後期白亜紀～鮮新世

距離に対する各モデルの極性境界年代を図 1 に示した。Cande and Kent(1992)の年代表 CK92 と CK95 はほとんど差がない。W95 と CK95 も非常に似ているが、Wei(1995)がすでに指摘しているように 20 Ma 付近に最大で 130 万年のずれが見られる。CK95 を基準に、それ

表 2 地磁気極性年代表の比較 .

Table 2 Comparison of the geomagnetic polarity time scales by Cande and Kent (1995) and by Wei (1995)

Chron	L(km)	CK95	W95	Chron	L(km)	CK95	W95	Chron	L(km)	CK95	W95
C1n	0.00	0.00	0.000	C5A.Bn	255.19	13.302	14.050	C12n	674.28	30.479	30.576
	12.14	0.780	0.780		260.03	13.510	14.312		686.50	30.939	31.103
C1r.1n	15.37	0.990	0.990	C5A.Cn	264.53	13.703	14.555	C13n	742.63	33.058	33.313
	16.39	1.070	1.070		273.28	14.076	15.021		755.44	33.545	33.828
C2n	27.80	1.770	1.770	C5ADn	275.86	14.178	15.147	C15n	784.40	34.655	34.922
	31.51	1.950	1.950		285.80	14.612	15.677		791.78	34.940	35.200
C2r.1n	35.04	2.140	2.140	C5Bn.1n	290.17	14.800	15.901	C16.1n	802.15	35.343	35.586
	35.57	2.150	2.150		292.24	14.888	16.007		808.87	35.526	35.760
C2An.1n	41.75	2.581	2.580	C5Bn.2n	295.63	15.034	16.178	C16n.2n	810.93	35.685	35.909
	49.44	3.040	3.040		298.45	15.155	16.320		827.67	38.341	36.518
C2An.2n	50.70	3.110	3.110	C5Vn.1n	318.39	16.014	17.289	C17n.1n	834.68	36.618	36.771
	52.31	3.220	3.220		324.87	16.293	17.592		858.19	37.473	37.543
C2An.3n	54.10	3.330	3.330	C5Cn.2n	325.65	16.327	17.628	C17n.2n	859.46	37.604	37.660
	58.08	3.580	3.580		329.38	16.488	17.800		865.54	37.848	37.877
C3n.1n	66.44	4.180	4.180	C5Cn.3n	330.95	16.556	17.872	C17n.3n	867.33	37.920	37.941
	68.23	4.290	4.290		334.88	16.726	18.051		872.10	38.113	38.112
C3n.2n	70.56	4.480	4.480	C5Dn	347.64	17.277	18.617	C18n.1n	879.83	38.426	38.389
	73.56	4.620	4.620		355.45	17.615	18.955		907.31	39.552	39.382
C3n.3n	76.76	4.800	4.800	C5En	370.87	18.281	19.603	C18n.2n	909.21	39.631	39.451
	78.26	4.890	4.890		382.45	18.781	20.074		921.21	40.130	39.892
C3n.4n	80.40	4.980	4.980	C6n	388.64	19.048	20.321	C19n	947.96	41.257	40.898
	84.68	5.230	5.230		413.88	20.131	21.295		954.12	41.521	41.135
C3An.1n	98.87	5.894	5.829	C6An.1n	422.93	20.518	21.633	C20n	977.65	42.536	42.064
	101.42	6.137	6.051		427.81	20.725	21.814		1008.10	43.789	43.245
C3An.2n	103.92	6.269	6.173	C6An.2n	434.18	20.996	22.047	C21n	1060.20	46.264	45.731
	109.60	6.567	6.450		441.85	21.320	22.324		1094.70	47.906	47.511
C3Bn	116.70	6.935	8.795	C6A.An	452.46	21.768	22.703	C22n	1117.60	49.037	48.778
	119.74	7.091	6.943		454.63	21.859	22.780		1130.80	49.714	49.540
C3Br.1n	120.62	7.135	6.986	C6A.Ar.	461.59	22.151	23.025	C23n.1n	1150.80	50.778	50.734
	121.30	7.170	7.019		463.92	22.248	23.107		1153.90	50.946	50.921
C3Br.2n	124.68	7.341	7.183	C6A.Ar.	468.97	22.459	23.284	C23n.2n	1155.80	51.047	51.034
	125.35	7.375	7.216		469.79	22.493	23.312		1168.20	51.743	51.802
C4n.1n	126.48	7.432	7.271	C6Bn.1n	472.08	22.588	23.392	C24n.1n	1179.00	52.364	52.478
	129.08	7.562	7.398		475.99	22.750	23.527		1184.00	52.663	52.800
C4n.2n	130.83	7.650	7.483	C6Bn.2n	477.29	22.804	23.572	C24n.2n	1185.60	52.757	52.897
	139.37	8.072	7.902		483.70	23.069	23.794		1186.30	52.801	52.947
C4r.1n	142.49	8.225	8.055	C6Cn.1n	490.61	23.353	24.031	C24n.3n	1188.10	52.903	53.057
	143.15	8.257	8.088		495.05	23.535	24.183		1195.30	53.347	53.527
C4An.	152.32	8.699	8.543	C6Cn.2n	498.54	23.677	24.302	C25n	1234.50	55.904	56.113
	159.16	9.025	8.887		501.55	23.800	24.405		1241.50	56.391	56.584
C4Ar.1n	163.49	9.230	9.106	C6Cn.3n	508.47	23.999	24.573	C26n	1257.80	57.554	57.691
	165.16	9.308	9.191		508.41	24.118	24.673		1262.70	57.911	58.027
C4Ar.2n	171.00	9.580	9.490	C7n.1n	524.64	24.730	25.191	C27n	1303.80	60.920	60.850
	172.34	9.642	9.560		525.92	24.781	25.235		1308.70	61.276	61.188
C5n.1n	174.47	9.740	9.670	C7n.2n	527.29	24.835	25.281	C28n	1325.70	62.499	62.359
	177.49	9.880	9.827		536.04	25.183	25.579		1342.00	63.643	63.479
C5n.2n	178.38	9.920	9.874	C7An	543.97	25.496	25.850	C29n	1347.00	63.976	63.821
	201.13	10.949	11.089		547.82	25.648	25.982		1358.70	64.745	64.613
C5r.1n	203.44	11.052	11.214	C8n.1n	552.30	25.823	26.136	C30n	1371.80	65.578	
	204.51	11.099	11.273		555.55	25.951	26.247		1407.20	67.610	
C5r.2n	213.04	11.476	11.738	C8n.2n	556.60	25.992	26.284	C31n	1409.60	67.735	
	214.28	11.531	11.806		571.04	26.554	26.784		1429.10	68.737	
C5An.1n	223.52	11.935	12.314	C9n	583.30	27.027	27.214	C32n.1n	1481.10	71.071	
	226.81	12.078	12.495		607.96	27.972	28.100		1487.70	71.338	
C5An.2n	229.23	12.184	12.628	C10n.1n	616.12	28.283	28.400	C32n.2n	1493.90	71.587	
	234.25	12.401	12.904		622.16	28.512	28.625		1531.80	73.004	
C5Ar.1n	240.65	12.678	13.256	C10n.2n	623.90	28.578	28.690	C32r.1n	1539.90	73.291	
	241.35	12.708	13.294		628.29	28.745	28.854		1542.30	73.374	
C5Ar.2n	242.90	12.775	13.379	C11n.1n	645.65	29.401	29.514	C33n	1549.40	73.619	
	243.94	12.819	13.436		652.56	29.662	29.779		1723.80	79.075	
C5A.An	247.92	12.991	13.654	C11n.2n	655.31	29.765	29.886	C34n	1862.30	83.000	
	251.38	13.139	13.834		664.15	30.098	30.228			118.000	

Chron: Chron 名ありは正極性クロンの上限, その下の Chron 名なしは下限 .

L: 中央海嶺からの距離 (1.29 km のオフセットを差し引いた値) CK95: Cande and Kent (1995) W95: Wei (1995)

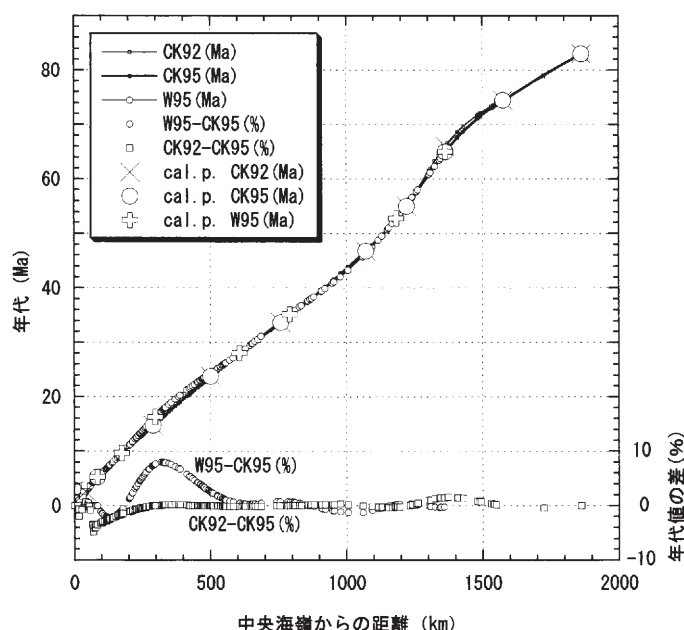


図 1 3つの地磁気極性年代表の距離-年代関係。縦軸は極性境界の年代 (Ma)、横軸は Cande and Kent (1992) の地磁気極性シーケンスデータにおける中央海嶺から極性境界までの距離 (km $\times$ 1.29 km のオフセットを差し引いた値)。Cande and Kent (1992) の年代表は CK92、Cande and Kent (1995) は CK95、Wei (1995) は W95 と略した。CK92-CK95 および W95-CK95 は CK95 からの年代差を % で表した。cal. p. はキャリブレーション年代 (表 1) を表す。

Fig. 1 Distance-age curves for the three geomagnetic polarity time scales (GPTS). The vertical axis shows polarity boundary ages for the GPTS's by Cande and Kent (1992) (CK92), Cande and Kent (1995) (CK95), and Wei (1995) (W95). The horizontal axis shows distances from the spreading center, corrected for a 1.29 km Central Anomaly offset (Cande and Kent, 1992). W95-CK95 and CK92-CK95 represent differences (%) in polarity boundary age. Large symbols represent calibration points.

との差を CK95 の年代値に対する割合で表した (図 1)。差は CK92 が最大 1.6%, W95 が最大 8% である。W95 の大きな差は、主に、上述した CK95 のキャリブレーション年代 14.8 Ma と W95 においてそれに代えて使った年代 16.3 Ma (クロン C5Br 上限 = C5Bn.2n の下限) の差によって生じている (表 1, 図 1)。

Wei (1995) も述べているように全体的には CK95 と W95 の差は小さい。これらのデータを逆転頻度の統計解析に使った場合、解析結果に違いはほとんど出ないであろう。しかし、両者を磁気層序年代測定に使うとその違いが無視できないことがわかる。図 2 に 5 Ma から 35 Ma までの

地磁気極性層序を比較した。ここで、同じ極性区分が年代的に重なるゾーンをハッチで示した。このゾーンは二つの年代表を磁気層序年代表に利用した場合同じ結果を導き出してくれることを意味する。逆に、重ならない部分は、磁気層序年代決定をする際に異なる年代対比を行ってしまうことを示唆する。例えば、7.0 Ma と年代決定された層準が正常磁なら、年代表 CK95 では C3Bn に、W95 では C3Br.1n に対比されることになる。片方が正しければ、もう片方は間違いということになる。この対比の不一致はハッチがない部分で起こる。11.9 Ma から 24.7 Ma までまったく一致しない状態が続く、26.3 Ma ころから再び一致し

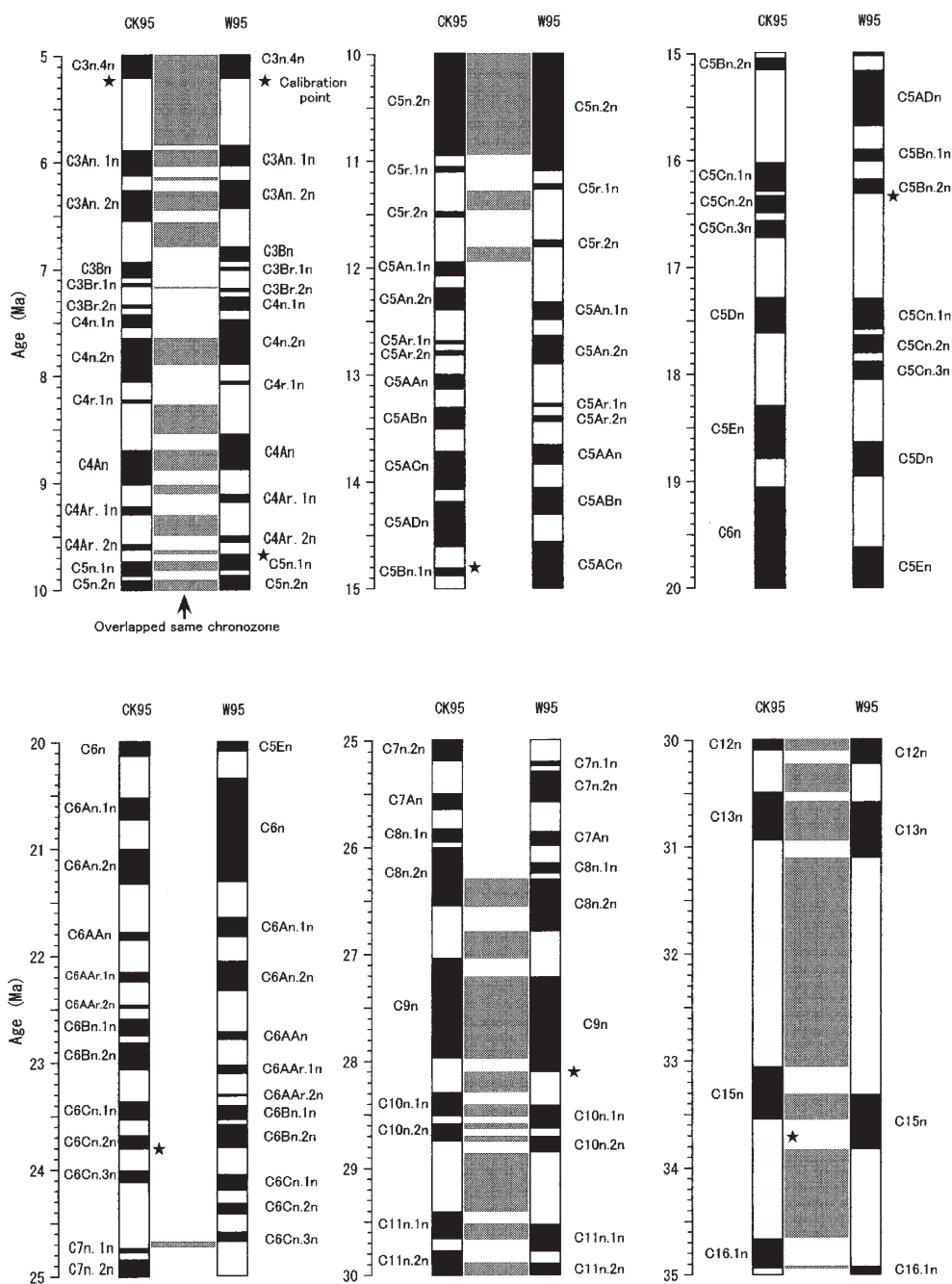


図 2 5 Ma から 35 Ma までの地磁気極性年代表比較。
黒は正極性、白は逆極性を表し、灰色のハッチは二つの年代表で同じクロンの年代が重なる部分を表す。
印はキャリブレーション年代の位置を表す。CK95 と W95 の説明は図 1 に同じ。

Fig. 2 Comparison of geomagnetic polarity time scales from 5–35 Ma by Cande and Kent (1995) (CK95) and Wei (1995) (W95).

Black/white colors show normal/reverse polarity. The hatched zones represent where the two time scales agree, and the blank (absence of hatched zone) shows where the two time scales disagree.

た対比を示すようになる。

このような問題点はすでにユーザーの立場からも指摘されている。星・高橋 (1996) は中新世火山岩類の古地磁気研究において、CK95 と W95 のデータに大きな開きがあることを指摘し、慎重な磁気層序対比を行っている。また、微化石層序に基づいて中新世の地磁気極性年代表の妥当性を評価する試みも行われている (Takahashi *et al.*, 1999; 須藤ほか, 2002)。

近年、中新統の磁気層序研究が行われ始め、人類や生物の進化に重要な年代制約を与えるようになってきた (例えば, Sawada *et al.*, 2002; 菅沼ほか, 2002; Benammi *et al.*, 2004)。しかし、これらの研究で地磁気極性年代表の妥当性について触れることは、一部 (Sawada *et al.*, 2002) を除いて、皆無である。中新世やそれ以前の時代については、地磁気極性年代表の信頼度を考慮して慎重に研究を進める必要がある。

このように他分野からの需要が増えてきた中新世やそれ以前の時代の地磁気極性年代表は、新たなキャリブレーション年代を使って早急に更新する必要がある。

2) クリプトクロン

Cande and Kent (1992) がクリプトクロンと定義した 54 個の磁気異常イベントのうち、Cobb Mountain を除く 53 個は地球規模の逆転かどうか未確認である。もし、全て逆転であるならこれらが集中する磁気異常 24, 25, 26 (約 50–60 Ma) 付近の逆転頻度が、百万年あたり 1–2 回から 3–10 回へと大きく増加し、地磁気ダイナモの長期的性質の見直しが迫られることになる。クリプトクロンの研究も今後の課題であろう。

3) 鮮新世～現在

鮮新世以降の地磁気逆転は古地磁気学的によく研究され、極性境界は K-Ar 法で詳しく年代決定されていた (Mankinen and Dalrymple, 1979)。しかし 1990 年代に入り、ミランコビッチ理論に基づいて、地球軌道変化による日射量変動を使って深海底コアの酸素同位体比変動が年代調節された。その結果、Brunhes/Matuyama 境界、Jaramillo 上下限、Cobb Mountain、Olduvai 上

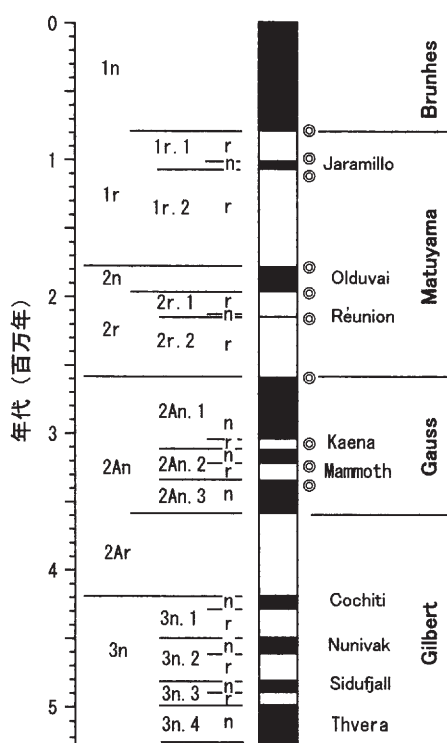


図 3 5.23 Ma 以降の地磁気極性年代表。各極性境界の年代は、天文学年代調節されたもの (本文参照)。は火山岩の $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年法によって確認 (支持) された極性境界をさす。

Fig. 3 The geomagnetic polarity time scale for a duration of 0–5.23 Ma.

The polarity boundaries are dated by astronomical tuning (see text). The double circles show polarity boundaries with ages that are also confirmed by Ar/Ar dating.

下限, Matuyama/Gauss 境界の年代が従来の値より 5–7% 古くなることがわかった (Shackleton *et al.*, 1990)。気候変化の影響を強く受けている地中海の堆積物にも同じ方法が適用され、さらに Gauss/Gilbert 境界と、Kaena, Mammoth, Cochiti, Nunivak, Sidufjall, Thvera の各上下限についても天文学的年代決定が行われた (Hilgen, 1991)。これら極性境界の新しい年代の評価は、火山岩の $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代決定によってなされ、これらを支持する年代が次々と報告されている (図 3) [Brunhes/Matuyama 境界 (Baksi, 1992;

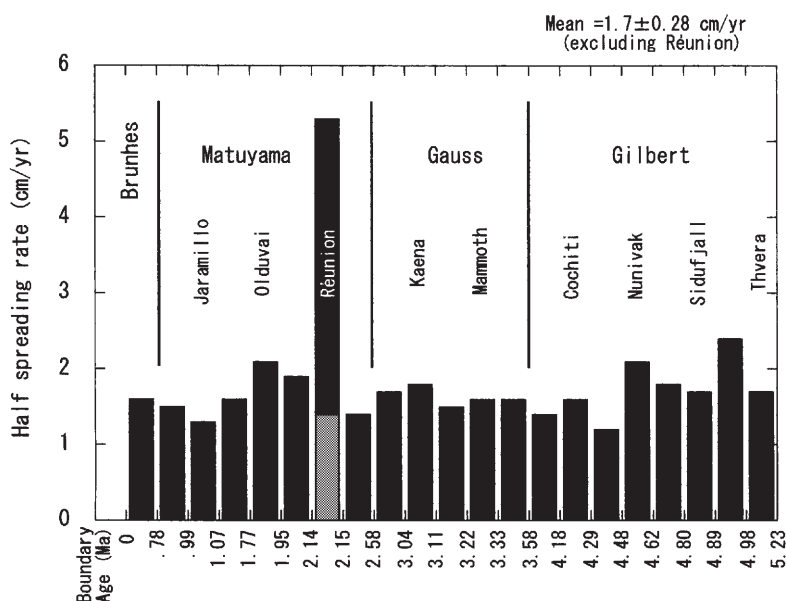


図 4 南大西洋模式地域の各極性境界間のプレート拡大速度。極性境界年代は天文年代を主とする Cande and Kent (1995) の年代を使用。Réunion subchron の間の灰色で示したバーは、Channell *et al.* (2003) の年代幅 (38 kyr) で計算した拡大速度を表す。

Fig. 4 Spreading rates within each polarity interval in the South Atlantic. Rates are calculated using the distance from the spreading center (Cande and Kent, 1992) and ages (Cande and Kent, 1995). The rate shown by the grey bar is calculated using the time span (38 kyr) for the Réunion subchron (Channell *et al.*, 2003).

Singer and Pringle, 1996; Coe *et al.*, 2004), Jaramillo 上下限 (Glass *et al.*, 1991; Spell and McDougal, 1992; Singer *et al.*, 1999), Cobb Mountain (Turrin *et al.*, 1994), Olduvai 上下限 (Walter *et al.*, 1991; Baksi, 1994), Réunion (Baksi, 1993), Kaena と Mammoth (Renné *et al.*, 1993; Walter, 1994; Walter and Aronson, 1993)] したがって、5.23 Ma 以降の地磁気極性年代の完成度はきわめて高いといえる。

これらの天文年代を使って、拡大速度の変化を調べてみた。図 4 に示すように、Réunion subchron を除けば、平均 1.7 cm/yr、標準偏差 = 0.28 cm/yr と非常に一定であることがわかる。複数プロファイルの合成により拡大の不均質が平滑化された効果が現れているのかもしれない。Réunion subchron の期間が 5.3 cm/yr と異

常に速いのは、同 subchron の期間の見積もり 0.01 Myr が実際より短すぎるためと考えられる。最近、北大西洋の ODP site 981 の深海底堆積物コアから Réunion subchron は海洋酸素同位体ステージ 81/82 から 79 まで、年代にして 2.115 Ma から 2.153 Ma まで (年代幅 38 kyr) と見積もられた (Channell *et al.*, 2003)。この年代幅を使うと拡大速度は 1.4 cm/yr (図 4 の灰色のバー) に減少し前後の速度とほぼ一致する。Réunion subchron の期間としてはこの 38kyr の方が正しいことを示唆しているのかもしれない。Thvera 下限 5.23 Ma と原点を結ぶ直線で極性境界年代を求めると、誤差はおおむね 0.08 Myr 以下、最大でも 0.12 Myr と非常に小さい。5 Myr 程度の短い区間なら拡大速度一定の仮定がほぼ成り立つと考えられる。Cande and Kent (1992, 1995)

の海底拡大速度はスムーズに変化するという仮定の見直しが必要かもしれない。

4) 年代表の高精度化

キャリブレーションの問題とは独立な発展性も考えられる。日射量変動に対する地球の応答が気候変動(氷体量変動)として現れる限り、海洋酸素同位体比変動を介してミランコビッチの才差周期(2.3万年, 1.9万年)きざみで海底コアの年代決定が可能である。堆積速度の速い海底堆積物を使えば、地磁気逆転年代を才差周期以下の誤差範囲に押えることができ、年代精度はより一層上がるはずである。また、磁気層序の視点に立てば、他にも発展性が考えられる。近年、非常に多くの地磁気エクスカージョンが発見されている。それは、Brunhes chron のエクスカージョン(Lund *et al.*, 2001; Oda *et al.*, 2002)だけでなく、Matuyama chron にも約 0.89 Ma の Kamikatsura や約 0.92 Ma の Santa Rosa(Takatsugi and Hyodo, 1995; Yang *et al.*, 2004)、約 1.1 Ma の Punaruu(Singer *et al.*, 1999; Yang *et al.*, 2005)など数多く報告されている。極性変化に加えこれら地磁気エクスカージョンも年代指標に取り入れることで、より高精度の磁気層序年代法に発展させることができる。

V. ま と め

Cande and Kent(1992)が世界の8つの海嶺系における多数の海洋磁気異常データを合成して作った地磁気極性シーケンスは、現時点では最も情報が集約されており完成度が高い。しかし、同シーケンスの時間スケールは、キャリブレーション年代によって大きく変わる可能性があり、将来大いに改良の余地が残されている。異なるキャリブレーション年代を使って求められた3つの年代表(Cande and Kent, 1992, 1995; Wei, 1995)の間には、中新世に最大で約130万年(8%)の誤差が存在することから、磁気層序年代学への応用には要注意であることがわかった。クリプトクロンと定義した54個の磁気異常は、1個(Cobb Mountain)を除き地球規模の逆転かどうか未確認のままである。逆転頻度など地磁気ダイナモの

長期的性質を正確に把握するためにもこれらの確認は重要である。天文学的年代調節によって年代決定された5.23 Ma以降の地磁気極性年代表はきわめて完成度が高い。さらなる発展として、天文年代法を使ったミランコビッチの才差周期以下の誤差精度の年代決定と、エクスカージョンを含めた高精度の磁気層序の作成が考えられる。

謝 辞

産業技術総合研究所の高橋雅紀博士と匿名査読者には、査読を通じて有益な助言をいただいた。

文 献

- Baksi, A.K. (1992) $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the Brunhes-Matuyama geomagnetic field reversal. *Science*, **256**, 356–357.
- Baksi, A.K. (1993) A geomagnetic polarity time scale for the period 0–17 Ma, based on $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ plateau ages for selected field reversals. *Geophys. Res. Lett.*, **17**, 1117–1120.
- Baksi, A.K. (1994) Concordant sea-floor spreading rates obtained from geochronology, astrochronology and space geodesy. *Geophys. Res. Lett.*, **21**, 133–136.
- Benammi, M., Chaimanee, Y., Urrutia-Fucugauchi, J. and Jaeger, J.J. (2004) Magnetostratigraphic study of the continental sedimentary sequence of the Chiang Muan Basin, Northern Thailand: Implications for the age of the first Miocene hominoids from Thailand. *Int. Geol. Rev.*, **46**, 616–654.
- Berggren, W.A., Kent, D.V., Flynn, J.J. and Van Couvering, J.A. (1985) Cenozoic geochronology. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **96**, 1407–1418.
- Biswas, D.K., Hyodo, M., Taniguchi, Y., Kaneko, M., Katoh, S., Sato, H., Kinugasa, Y. and Mizuno, K. (1999) Magnetostratigraphy of Plio-Pleistocene sediments in a 1700-m core from Osaka Bay, southwestern Japan and short geomagnetic events in the middle Matuyama and early Brunhes chron. *Paleogeogr. Paleoclimatol. Paleoecol.*, **148**, 233–248.
- Cande, S.C., LaBrecque, J.L. and Haxby, W.F. (1988) Plate kinematics of the South Atlantic: Chron C34 to present. *J. Geophys. Res.*, **93**, 13479–13492.
- Cande, S.C. and Kent, D.V. (1992) A new geomagnetic polarity time scale. *J. Geophys. Res.*, **97**, 13917–13951.
- Cande, S.C. and Kent, D.V. (1995) Revised calibration of the geomagnetic polarity time scale for the Late Cretaceous and Cenozoic. *J. Geophys. Res.*, **100**, 6093–6095.
- Cande, S.C. and Kristoffersen, Y. (1977) Late Cretaceous anomalies in the North Atlantic. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **35**, 215–224.
- Channell, J.E.T., Laj, C. and Raymo, M.E. (2003)

- The R union Subchronozone at ODP Site 981 (Feri Drift, North Atlantic) *Earth Planet. Sci. Lett.*, **215**, 1–12.
- Coe, R.S., Singer, B.S., Pringle, M.S. and Zhao, X.X. (2004) Matuyama-Brunhes and Kamikatsura event on Maui: Paleomagnetic directions, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Ages and implications. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **222**, 667–684.
- Gallet, Y. and Hulot, G. (1997) Stationary and non-stationary behavior within the geomagnetic polarity time scale. *Geophys. Res. Lett.*, **24**, 1875–1878.
- Glass, B.P., Kent, D.V., Schneider, D.V. and Tauxe, L. (1991) Ivory Coast microtectite strewn field: Description and relation to the Jaramillo geomagnetic event. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **107**, 182–196.
- Harland, W.B., Armstrong, R.L., Cox, A., Craig, L.E., Smith, A.G. and Smith, D.G. (1990) *A Geologic Time Scale 1989*. Cambridge Univ. Press.
- Heirtzler, J.R., Dickson, G.O., Herron, E.M., Pitman, W.C. and LePichon, X. (1968) Marine magnetic anomalies, geomagnetic field reversals, and motions of the ocean floor and continents. *J. Geophys. Res.*, **73**, 2119–2136.
- Hilgen, F.J. (1991) Extension of the astronomically calibrated (polarity) time scale to the Miocene/Pliocene boundary. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **107**, 349–368.
- Hyodo, M. (2001) The Sangiran geomagnetic excursion and its chronological contribution to the Quaternary geology of Java. In Sumanjuntak, T. *et al.* eds.: *Sangiran: Man, Culture, and Environment in Pleistocene Times*. Yayasan Obor Indonesia, Jakarta, 320–335.
- Hyodo, M., Nakaya, H., Urabe, A., Saegusa, H., Xue, S., Yin, J. and Ji, X. (2002) Paleomagnetic dates of hominid remains from Yuanmou, China, and other Asian sites. *J. Human Evolution*, **43**, 27–41.
- 星 博幸・高橋雅紀 (1996) 茂木地域に分布する前・中期中新世火山岩類の古地磁気層序と火山活動の時期. *地質学雑誌*, **102**, 573–590.
- Iwamoto, H., Yamamoto, M., Seama, N., Kitada, K., Matsuno, T., Nogi, Y., Goto, T., Fujiwara, T., Suyehiro, K. and Yamazaki, T. (2002) Tectonic evolution of the central Mariana Trough. *EOS, Trans. AGU*, **83**(47), Fall Meet. Suppl., abstract T72A–1235.
- 加藤茂弘・壇原 徹・兵頭政幸 (2004) 火山灰のフィッシュン・トラック年代と古地磁気層序に基づく淡路島中部の鮮新 更新統境界の再検討. *第四紀研究*, **43**, 213–224.
- LaBrecque, J.L., Kent, D.V. and Cande, S.C. (1977) Revised magnetic polarity time-scale for the Late Cretaceous and Cenozoic time. *Geology*, **5**, 330–335.
- Larson, R.L. and Hilde, T.W.C. (1975) A revised time scale of magnetic reversals for the Early Cretaceous and Late Jurassic. *J. Geophys. Res.*, **80**, 2586–2594.
- Larson, R.L. and Pitman, W.C., (1972) World wide correlation of Mesozoic magnetic anomalies and its implications. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **83**, 3645–3662.
- Lund, S.P., Williams, T., Acton, G.D., Clement, B. and Okada, M. (2001) Brunhes chron magnetic field excursions recovered from Leg 172 sediments. *Proc. ODP, Sci. Results*, **172**, 1–18.
- Mankinen, E.A. and Dalrymple, G.B. (1979) Revised geomagnetic polarity time scale for the interval 0–5 m.y.b.p. *J. Geophys. Res.*, **84**, 615–626.
- McFadden, P.L. and Merrill, R.T. (1997) Asymmetry in the reversal rate before and after the Cretaceous Normal Superchron. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **149**, 43–47.
- Oda, H., Nakamura, K., Ikehara, K., Nakano, T., Nishimura, M. and Khlystov, O. (2002) Paleomagnetic record from Academician ridge, Lake Baikal: A reversal excursion at the base of marine oxygen isotope stage 6. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **202**, 117–132.
- Opdyke, N.D. and Channell, J.E.T. (1996) *Magnetic Stratigraphy*. Academic press.
- Pitman, W.C. and Heirtzler, J.R. (1966) Magnetic anomalies over the Pacific-Antarctic ridge. *Science*, **154**, 1164–1171.
- Renné, P.R., Walter, R., Verosub, K., Sweitzer, M. and Aronson, J. (1993) New data from Hadar, (Ethiopia) support orbitally tuned time scale to 3.3 Ma. *Geophys. Res. Lett.*, **20**, 1067–1070.
- Sawada, Y., Pickford, M., Senut, B., Itaya, T., Hyodo, M., Miura, T., Kashine, C., Chujo, T., and Fujii, H. (2002) The age of Orrorin tugenensis, an early hominid from the Tugen Hills, Kenya. *C. V. Paleovol.*, **1**, 293–303.
- Shackleton, N.J., Berger, A. and Peltier, W.R. (1990) An alternative astronomical calibration of the lower Pleistocene timescale based on ODP Site 677. *Trans. R. Soc. Edinburgh*, **81**, 251–261.
- Seki, M. and Ito, K. (1999) A coupled map lattice model for geomagnetic polarity reversals that exhibits realistic scaling. *Earth Planets Space*, **51**, 395–402.
- Singer, B.S. and Pringle, M.S. (1996) Age and duration of the Matuyama-Brunhes geomagnetic polarity reversal from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ incremental heating analyses. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **139**, 47–61.
- Singer, B.S., Hoffman, K.A., Chauvin, A., Coe, R.S. and Pringle, M.S. (1999) Dating transitionally magnetized lavas of the late Matuyama Chron: Toward a new $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ timescale of reversals and events. *J. Geophys. Res.*, **104**, 679–693.
- Spell, T.L. and McDougall, I. (1992) Revision as to the ages of the Brunhes/Matuyama boundary and the Pleistocene geomagnetic polarity time scale. *Geophys. Res. Lett.*, **19**, 1182–1184.
- 菅沼悠介・長岡信治・岡田 誠 (2002) タイ北部 Chiang Muan に分布する中新統堆積岩の古地磁気学的研究 (予察). *霊長類研究*, **18**, 165–173.

- 須藤 斎・高橋雅紀・柳沢幸夫 (2002) 群馬県藤岡市
鮎川セクションの中部中新統珪藻化石層序—とくに
珪藻生層準 D55 と ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代との対応—. 地質
学雑誌, **108**, 746-760.
- Takahashi, M., Tanaka, Y. and Okada, M. (1999) Chronostratigraphy of the middle Miocene marine sequence in the Karasuyama area, central Japan: With special reference to the CN5a/CN5b boundary. *J. Japanese Assoc. Petrol. Technol.*, **64**, 454-461.
- Takatsugi, K.O. and Hyodo, M. (1995) A geomagnetic excursion during the late Matuyama Chron, the Osaka group, southwest Japan. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **136**, 511-524.
- Turrin, B.D., Donnelly-Nolan, J.M. and Hearn, B.C., Jr. (1994) $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages from the rhyolite of Alder Creek, California: Age of the Cobb Mountain normal polarity subchron revisited. *Geology*, **22**, 251-254.
- Vine, F.J. (1966) Spreading of the ocean floor: New evidence. *Science*, **154**, 1405-1415.
- Walter, R.C. (1994) Age of Lucy and First Family: Single crystal $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the Denen Dora and lower Kada Hadar members of the Hadar Formation, Ethiopia. *Geology*, **22**, 6-10.
- Walter, R.C. and Aronson, J.L. (1993) Age and source of the sidi Hakoma tuff, Hadar Formation, Ethiopia. *J. Hum. Evol.*, **25**, 229-240.
- Walter, R.C., Manega, P.C., Hay, R.L., Drake, R.E. and Curtis, G.H. (1991) Laser fusion $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of Bed 1, Olduvai Gorge, Tanzania. *Nature*, **354**, 145-149.
- Wei, W. (1995) Revised calibration points for the geomagnetic polarity time scale. *Geophys. Res. Lett.*, **22**, 957-960.
- Yamazaki, T., Seama, N., Okino, K., Kitada, K., Joshi, M., Oda, H. and Naka, J. (2003) Spreading process of the northern Mariana Trough: Rifting-spreading transition at 22°N. *Geochem. Geophys. Geosys.*, **4**, doi:10.1029/2002GC000492.
- Yang, T.S., Hyodo, M., Yang, Z.N. and Fu, J.L. (2004) Evidence for the Kamikatsura and Santa Rosa excursions recorded in aeolian deposits from the southern Chinese Loess Plateau. *J. Geophys. Res.*, **109**, B12105, doi:10.1029/2004JB002966.
- Yang, T.S., Hyodo, M., Yang, Z.N. and Sun, Z.N. (2005) A first paleomagnetic and rock magnetic investigation of calcareous nodules from the Chinese Loess Plateau. *Earth Planets Space*, **57**, 29-34.
- Zhu, R.X., Potts, R., Xie, F., Hoffman, K.A., Deng, C.L., Shi, C.D., Pan, Y.X., Wang, H.Q., Shi, R.P., Wang, Y.C., Shi, G.H. and Wu, N.Q. (2004) New evidence on the earliest human presence at high northern latitudes in northeast Asia. *Nature*, **431**, 559-562.

(2004 年 11 月 11 日受付, 2005 年 1 月 5 日受理)