

頻繁に起こる地磁気エクスカージョン

— ブルネ正磁極期のレビュー —

小 田 啓 邦*

Recurrent Geomagnetic Excursions: A Review for the Brunhes Normal Polarity Chron

Hirokuni ODA *

Abstract

Until now, a large number of records of geomagnetic excursions have been reported both for volcanic rocks and sedimentary sequences. By straightening up the, extensive excursion records, 23 geomagnetic excursions were identified in total for the Brunhes. Eighteen out of 23 excursions are considered to be reliably determined and dated. Above all, Mono Lake (32-34 ka), Laschamp (39-41 ka), Blake (115-122 ka) and Iceland Basin (180-190 ka) are well-documented worldwide excursions. Others include Hilina Pali (18-23 ka), Norwegian-Greenland Sea (60-80 ka), Albuquerque (140-160 ka), Jamaica/Pringle Falls (210-220 ka), Fram Strait (255-265 ka), Kolbeinsey Ridge (280-290 ka), Calabrian Ridge 1 (310-320 ka), Agulhas Ridge (330-340 ka), Weinen (400-420 ka), West Eifel (500-510 ka), Calabrian Ridge 2 (535-545 ka), Emperor/Big Lost (550-570 ka), Calabrian Ridge 3 (580-605 ka), and Delta (665-690 ka). Most of these excursions can be correlated with minima in relative paleointensity records of Sint-800 and ODP Site 983, suggesting that excursions occur due to dominance of a non-dipole field at minima of the main dipole field intensity.

Key words : geomagnetic excursion, Brunhes normal polarity chron, relative paleointensity, Sint-800, ODP Site 983, glacial-interglacial cycle

キーワード : 地磁気エクスカージョン, ブルネ正磁極期, 相対磁場強度, Sint-800, ODP Site 983, 氷期 間氷期サイクル

I. はじめに

地磁気には様々な周期の変動があり、周期の長い方から短い方へ向かって地球磁場逆転、地磁気エクスカージョン、永年変動等があげられる。このうち、地磁気エクスカージョンは永年変動の範囲を超えて地球磁場が大きく変動するもの

である。エクスカージョンの定義にはいくつかあるが、一つの定義としては、仮想的地磁気極 (VGP) の緯度が安定磁極期 (Mat) の方向 (北極あるいは南極) から 45 度を超えて変動するものを指す。地磁気エクスカージョンは地球磁場逆転を用いたいわゆる古地磁気層序学が適用できる分解能を超えて、地球磁場逆転が存在しないブルネ正磁

* 産業技術総合研究所 地質情報研究部門

* Institute of Geology and Geoinformation, Geological Survey of Japan, AIST

極期 (0 780ka) の中などでの、詳細な年代の推定を可能にする。また、地磁気エクスカージョンと氷期 間氷期サイクルを相関づけ、エクスカージョンは氷期あるいは間氷期から氷期への移行期に起こったとする研究者もいる (例えば, Worm, 1997)。エクスカージョンによる年代の推定を可能にしたり、氷期 間氷期サイクルとの相関性について検証するためには、報告されている地磁気エクスカージョンの記録について整理をし、それぞれについて正確な年代の推定を行う必要がある。ブルネ期と松山期 (780 2600 ka) 後期のエクスカージョンについては Champion *et al.* (1988) がレビューしているが、彼らはブルネ期に 8 つのエクスカージョンを認めている。その後、Langereis *et al.* (1997) がブルネ期のエクスカージョンをまとめ、6 つの主要なエクスカージョンとその他 5 つのマイナーなエクスカージョンについてリストアップしている。レビューではないが、Lund *et al.* (2001b) は、北大西洋の西部の ODP Leg 172 の複数のコアから 13 にものぼる多数のエクスカージョンを報告しており、注目に値する。そして最近になって、Singer *et al.* (2002) がブルネ期と松山期後期のエクスカージョンについてとりまとめ、ブルネ期に 13 のエクスカージョンを認めた。このように、ブルネ期におけるエクスカージョンの数は研究の進展とともに増加の一途をたどってきたが、昨今の膨大な古地磁気研究を眺め渡すと、13 のエクスカージョンでも十分に網羅しきれているとは言えない状態である。また、報告されているエクスカージョンの年代値も基準がまちまちであり、今後の研究に混乱を引き起こす可能性がある。したがって、本総説では、現状で報告されているエクスカージョン記録のうち、データ数が多く客観的な対比が可能なブルネ正磁極期のものに限って整理を行い、全体の総括を行った。

II. ブルネ正磁極期の地磁気エクスカージョン

本セクションでは、最初に琵琶湖のエクスカージョンの研究史をまとめ、その後、年代の若い順にブルネ正磁極期のエクスカージョンについてレ

ビューを行うこととする。

1) 琵琶湖から得られたエクスカージョン記録

ブルネ期の地磁気エクスカージョンの研究においては、琵琶湖 200 m コアから発見されたエクスカージョン (琵琶 , 琵琶 , 琵琶 等) が、大きな影響力をもってきた (例えば, Nowaczyk *et al.*, 1994)。しかしながら、琵琶湖の古地磁気記録には問題点が多いことも指摘されている (Langereis *et al.*, 1997)。兵藤・峯本 (1996) が琵琶湖 200 m コアのエクスカージョンの年代値について整理を行っているが、ここであらためて琵琶湖のエクスカージョンの研究史について振り返ってみる。

琵琶湖の 200 m コアにおいて Kawai *et al.* (1972) は 5 つのエクスカージョン event A, B, C, D, E を発見したが、event C と event D をそれぞれ琵琶 , 琵琶 と名付けた。彼らは、炭素 14 年代を外挿することで event B を 110 ka とし、Blake event であると結論づけたが、琵琶 と琵琶 の年代値はそれぞれ 180 ka と 295 ka とされた。また、Kawai (1984) は event E を琵琶 としたが、この記録はコア端部にあたるため、残留磁化の信頼性に問題があることが指摘されている (兵藤・峯本, 1996)。Langereis *et al.* (1997) が琵琶湖 200 m コアの年代モデルの改訂の歴史をまとめたが、火山灰層の見直しにより、最新の年代モデルは著しく若返った (町田ほか, 1991)。最新の年代モデルによると、event B, event C (琵琶) そして event D (琵琶) はそれぞれ 56 ka, 116 ka, 194 ka となる (兵藤・峯本, 1996)。かくして、event C と event D は Blake event と Iceland Basin event に相当することになる。

琵琶湖 200 m コアについては、深度 13 m にエクスカージョンが存在することが明らかとなり、炭素 14 年代の外挿によって 18 ka の年代が推定されたが (Yaskawa *et al.*, 1973; Nakajima *et al.*, 1973)、町田ほか (1991) の改訂された年代モデルによると、この年代値はおよそ 10 ka となる。また、深度 26 m でもエクスカージョンが見つかったが、炭素 14 年代の外挿によって年代値

は 49ka とされた (Yaskawa *et al.*, 1973; Kawai *et al.*, 1975)。このエクスカージョンは AT 火山灰層の直上に位置し、町田ほか (1991) の改訂された火山灰層序によると年代値は 24ka と推定される (兵藤・峯本, 1996)。さらに, Kawai *et al.* (1975) は、琵琶湖 200 m コアの深度 34 m と 35 m に負の伏角を報告している。町田ほか (1991) の年代モデルに基づくと、これらエクスカージョンの年代値は 33 ka と 34 ka であり (兵藤・峯本, 1996) Mono Lake エクスカージョンと対応づけられる。

琵琶湖 200 m コアの一連の研究に続いて、すぐ近くで掘削された 1422 m コアについて古地磁気研究が行われたが、そこではいわゆる琵琶湖 event を含めてブルネ期のエクスカージョンは一つも発見されなかった (Torii *et al.*, 1983)。彼らは、エクスカージョンが発見されなかったのは、交流消磁が十分でなかったのと、ロータリーコアリングによる変形が原因ではないかとしている。しかしながら、1422 m コアでエクスカージョンが見つからなかったことは、琵琶湖で見つかった多くのエクスカージョンの存在そのものへの信頼性を揺るがせるものである。近い将来、過去の琵琶湖掘削サイトの近くで新たな掘削を行い古地磁気測定を行うことで、エクスカージョンの存否に決着をつけることが期待されるが、この後の議論では、琵琶湖から得られたエクスカージョン記録については除外することとする。

2) 5 ka のエクスカージョン

Zhu *et al.* (1994a) は中国北京南西の Changgou のトレンチサイトから逆帯磁を示すエクスカージョンを発見したが、推定年代は 4,780 5,053 年前であった。このエクスカージョンは北京北の Haidian の 3 つのトレンチサイトで再確認されたが、ここでの年代値は 4,860 5,060 年前であった (Zhu *et al.*, 1998a)。Gonzalez *et al.* (1997) は中央メキシコの溶岩から東振り偏角を見せるエクスカージョンを見つけたが、炭素 14 年代は 4.7 ± 0.2 ka を示した。似たような東振りの偏角は同地域の湖沼堆積物から見つかったが、この年代値はおおよそ 5 ka であった (Ortega-

Guerrero and Urrutia-Fucugauchi, 1997)。上記の 2 地域に近接する地域の古地磁気永年変化曲線にエクスカージョンが見られないことは、このエクスカージョンの実在を疑わせるが、北京近郊および中央メキシコのそれぞれで複数の記録が得られたことはエクスカージョンの存在をサポートする。

3) 12 14 ka のエクスカージョン

Gothenburg 地球磁場反転 (magnetic flip) は、南スウェーデンの Gothenburg 植物園から得られたコアの最下部の逆帯磁層として見つかったが、年代値は 12,350 年前よりも古いと推定された (Mörner *et al.*, 1971; Mörner and Lanser, 1974)。さらに、南スウェーデンの 5 本のコアについても測定が行われ、推定年代値が 12,350 12,400 年前を示す短いエクスカージョンが確認された (Mörner, 1977)。これに対して、Thompson and Berglund (1976) は、Gothenburg から 150 km の距離にある Björkeröds Mosse の 2 つのコアにおいて、逆帯磁した厚さ 2 cm の薄い暗色層を確認したが、彼らの記録および南スウェーデンの Gothenburg エクスカージョンの記録は真の地球磁場変動を示したものではなく、スランプや風化によるものだ結論づけた。いっぽう、Snowball (1997) は、同じく Björkeröds Moss の別のコアにおいて続成鉱物であるグレイガイト (Fe_3S_4) を同定し、特に薄い黒色のラミナに濃集していることを報告した。このことから、Snowball (1997) は、Gothenburg エクスカージョンは地球磁場変動を捉えたものではなく、グレイガイトの交流消磁の時に獲得されたジャイロ残留磁化が原因であると主張した。

Creer *et al.* (1976) はエリー湖の 2 つのコアから、14 ka から前期後氷期にかけて負の伏角を報告したが、彼らはこれを Erieau エクスカージョンと名付けた。これに対して、Banerjee *et al.* (1979) は、近接した湖での同時代の永年変化曲線とエリー湖の記録を比較して、Erieau エクスカージョンは実際の地球磁場変動を反映したものではないとした。後に、Morris and Carmichael (1993) は Erie 湖の別の 2 つのコアについ

て、9.5 ka よりも古い部分に、負の伏角を認めた。しかし彼らは、岩相境界と地球磁場逆転境界が一致することや、古地磁気記録のノイズが多いことから、これら負の伏角を氷河下部における堆積物の擾乱によるものと結論づけた。

中国北京の南西の Changgou (Zhu *et al.*, 1994a) および北方の Haidian (Zhu *et al.*, 1998a) の計 4 つのトレンチサイトで逆帯磁を示すエクスカーションが報告されているが、年代推定値はそれぞれ 13,700 14,000 年前および 14,230 13,690 年前である。また、Haag *et al.* (1999) は西アフリカのモーリタニアの西方から 12.0 13.1 ka のエクスカーションを報告している。南スウェーデンとエリー湖におけるエクスカーションの記録は後の研究により否定されたが、北京近郊で発見されたエクスカーションについては、4 つのサイトがよく一致する記録が得られていることから、実際の地球磁場変動である可能性が高い。

4) Hilina Pali, 18 23 ka

Coe *et al.* (1978) はハワイの Hilina Pali で浅い伏角を示すエクスカーションを見つけたが、その炭素 14 年代 (較正前) は $17,860 \pm 670$ 年前 (Rubin and Berthold, 1961) であった。この他に、ハワイの SOH-4 掘削サイト (Laj *et al.*, 2002) および SOH-1 掘削サイト (Teanby *et al.*, 2002) からエクスカーションが報告されているが、それぞれ 18 ka と 20 ka の年代値を示す。これらハワイの 3 つの古地磁気記録はそれぞれ別々に得られたものであるが、年代推定値は全て Rubin and Berthold (1961) が測定した炭素 14 年代に依存している。

アラスカの Imuruk 湖から得られたエクスカーションの記録は 17 18ka の炭素 14 年代 (較正前) を示す (Noltimier and Colinvaux, 1976)。また、北極海の 2 つのコアから得られたエクスカーションは、20 ka の炭素 14 年代 (較正前) を示すが (Nowaczyk and Baumann, 1992; Nowaczyk and Knies, 2000) 較正後の年代値では 23 ka を示す (Nowaczyk *et al.*, 2003)。さらに、米国カリフォルニア州の Tule 湖から得られたエクスカーションは、7.0 ka と 23.4 ka の火山灰の内挿によ

り、年代値は 17 18 ka と推定された (Rieck *et al.*, 1992)。それに加えて、バイカル湖の記録から浅い伏角を示すエクスカーションが 20 ka に見つかっている (Peck *et al.*, 1996)。

5) Mono Lake, 32 34 ka

Mono Lake エクスカーションは、Denham and Cox (1971) によって米国カリフォルニア州 Mono 湖の Wilson Creek 累層で東振りの偏角をとともなう深い伏角が発見された際に名付けられた。彼らは、2 つの炭素 14 年代を外挿することで、エクスカーションの年代値を 24 ka と推定した。最初の発見の後、Liddicoat and Coe (1979) は Wilson Creek 累層の他の 4 つの地点から、Denham and Cox (1971) の東振り偏角以前に負の伏角を発見した。この他にも、北アメリカ西部から Mono Lake エクスカーションが報告されているが、火山灰によって Mono 湖のエクスカーションと対応づけられている (Negrini *et al.*, 1984; Liddicoat, 1992, 1996)。これらの年代推定値は 28 ka (Liddicoat, 1992) あるいは 24.9 28.9 ka (Negrini *et al.*, 1984) である。また、カリフォルニア湾の DSDP Hole 480 でも 26 29ka のエクスカーションが見つかっている (Levi and Karlin, 1989)。

Kent *et al.* (2002) は Mono Lake エクスカーションが最初に見つかった Mono 湖の Wilson Creek において、炭酸塩の炭素 14 年代と火山灰のサニディンの $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代から、38 41 ka という年代値を得た。この事実から、Mono 湖で見つかったエクスカーションは、実は Laschamp エクスカーションではないかという指摘がなされた。この解釈に対して、Benson *et al.* (2003) は、Mono 湖の Mono Lake エクスカーションの最中に認められる火山灰層は、米国ネバダ州の Pyramid 湖では $28,620 \pm 300$ の炭素 14 年代 (補正前) を持つことを主張した。これから、Mono Lake エクスカーションの最も信頼できる年代推定値は 31,500 33,300 年前 (GISP2 年代モデル) とした。これは、米国カリフォルニア州の Santa Clara 溪谷で見つかったエクスカーションの $28,090 \pm 330$ 年前という炭素 14 年代 (較正後の年代値

は 32.8 ka) と調和的である (Mankinen and Wentworth, 2004)。

北アメリカ西部以外の地域では、北極海の堆積物から Mono Lake エクスカーションの多くの記録が得られているが、20–34 ka の間の年代値を示す (Bleil and Gard, 1989; Nowaczyk *et al.*, 1994; Nowaczyk and Antonow, 1997; Voelker *et al.*, 1998; Nowaczyk and Frederichs, 1999; Nowaczyk and Knies, 2000; Nowaczyk *et al.*, 2003)。また、Thouveny (1988) は、パフィン湾から 24 ka のエクスカーションを報告している。さらに、中国のレスからもエクスカーションが報告されており、Weinan から 26.0–27.1 ka の記録が (Zhu *et al.*, 1999)、Lingtai から 26.0–27.1 ka の記録が (Zhu *et al.*, 2000a)、それぞれ見つかった。それに加えて、Kotlia *et al.* (1997) は、北部インドの湖沼堆積物から 25,600 ± 780 年前の炭素 14 年代を示すエクスカーションを報告している。また、Marco (2002) は、イスラエルの Galilee 海から 24–29 ka の年代値を示すエクスカーションを報告している。

Laj *et al.* (2000) は、北大西洋の 6 つのコアの記録をとりまとめて NAPIS-75 相対磁場強度標準曲線を構築した。この年代モデルは、1 つのコアの酸素同位体比を GISP2 氷床コア (GISP2 年代モデル) と対応させ、ハインリッヒイベントと火山灰層をコア間で対比させることで得られている。NAPIS 75 によると、34 ka の相対磁場強度の極小値が Mono Lake エクスカーションに対応する。一方、Beer *et al.* (2002) は、GRIP 氷床コアの ^{36}Cl フラックスから磁場強度を推定しているが、32 ka (GRIP 年代モデル) に磁場強度の極小値を示した。これらの結果から、相対磁場強度から推定される Mono Lake エクスカーションの最も信頼できる年代値は 32–34 ka とすることができ、これは Benson *et al.* (2003) による Mono 湖の記録の最新年代値 (31.5–33.3 ka) とよく一致する。

火山岩から得られた Mono Lake エクスカーションの記録については以下の通りである。Tanaka and Tachibana (1981) は、溶結凝

灰岩から炭素 14 年代で約 30 ka を示すエクスカーションを報告している。また、Shibuya *et al.* (1992) は、ニュージーランドの Auckland 火山岩からエクスカーションを報告しているが、北下向きのエクスカーションを示す Wiri 火山は 27 ± 10 ka の K/Ar 年代を示すことがわかった (Mochizuki *et al.*, 2004)。ハワイの掘削コア SOH-4 (Laj *et al.*, 2002) と SOH-1 (Teanby *et al.*, 2002) からもエクスカーションが見つかり、34–35 ka の年代値を与えられたが、これらの年代値は NAPIS-75 (Laj *et al.*, 2000) の年代モデルに依存している。最近、Carvallo *et al.* (2003) はインド洋の Amsterdam 島からエクスカーションを報告しているが、この $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代は 26 ± 15 ka と 18 ± 9 ka を示す。

6) Laschamp, 39–40 ka

Laschamp エクスカーションは、フランス Chaine des Puys の Laschamp と Olby の 2 つの溶岩流で発見されたのにちなんで名付けられた (Bonhommet and Babkine, 1967; Bonhommet and Zähringer, 1969)。Laschamp エクスカーションの年代値を推定しようという試みは様々な手法によって多数なされてきたが (例えば、Levi *et al.*, 1990)、最近になって、Laschamp と Olby の 3 つの地点において、6 つの K/Ar 年代と 13 の $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代から平均で 40.4 ± 1.1 ka の年代値が得られている (Guillou *et al.*, 2004)。また、Kristijansson and Gudmundsson (1980) は、南西アイスランドの Reykjanes 半島から逆帯磁した溶岩を発見した。このエクスカーションは当初 Skalamaelifell エクスカーションと名付けられたが、 42.9 ± 7.8 ka を示す K/Ar 年代により、Laschamp エクスカーションに相当すると判明した (Levi *et al.*, 1990)。さらに、Holt *et al.* (1996) は、ハワイ科学掘削計画 (HSDP) の掘削コアから、炭素 14 年代で 38.6 ± 0.9 ka を示す溶岩の直上にエクスカーションを発見したが、これは同コアの熱消磁によって確認された (Laj and Kissel, 1999)。

堆積物の記録としては、北極海から多数の記録が得られており (Bleil and Gard, 1989; Nowac-

zyk and Baumann, 1992; Nowaczyk *et al.*, 1994; Nowaczyk and Antonow, 1997; Nowaczyk and Frederichs, 1999; Nowaczyk and Knies, 2000), 28–51 ka の間の年代値を示す。また、北大西洋からもエクスカージョンが報告されており、アイスランド南の ODP Site 983 から 40 ka の記録が (Channell *et al.*, 1997), 西部の ODP コアから 39–40 ka の記録が (Lund *et al.*, 2001a, b), ポルトガル沖から 40 ka の記録が (Thouveny *et al.*, 2004), それぞれ得られている。さらに、南大西洋からは、アマゾン川河口域の ODP Hole 932A から 40–45 ka の記録が (Cisowski and Hall, 1997), Agulhus Ridge から 40–41 ka の記録が (Channell *et al.*, 2000), それぞれ得られている。

それ以外の地域では、イオニア海の堆積物コアから 41–43 ka のエクスカージョンの記録が得られている (Oda *et al.*, 2004)。また、フランスの St. Front 湖のエクスカージョンの記録は、37 ka の年代値を示す (Vlag *et al.*, 1996)。さらに、Lisan 湖 (古死海) から 41 ka のエクスカージョンが報告されている (Marco *et al.*, 1998)。さらに離れたところでは、西赤道太平洋の西カリリン海盆から 40 ka のエクスカージョンが見つかった (Yamazaki and Ioka, 1994)。また、中国レスからエクスカージョンが報告されており、Weinan から 37.4–46.8 ka の記録が (Zhu *et al.*, 1999), Lingtai から 38.1–47.5 ka の記録が (Zhu *et al.*, 2000a), それぞれ得られている。

NAPIS-75 相対磁場強度標準曲線 (Laj *et al.*, 2000) に使われた 6 つのコアのうち 5 つについて 40 ka の年代値を示すエクスカージョンが認められたが、この年代値は GISP2 氷床コアに基づいている。この GISP2 年代モデルを GRIP の年代モデルに変換すると、Laschamp エクスカージョンの年代値は 39 ka と推定される。また、Beer *et al.* (2002) は GRIP 氷床コアの ^{36}Cl から推定された磁場強度を報告しているが、Laschamp エクスカージョンに相当する極小値は 39 ka の年代値を示す。さらに、Mazaud *et al.* (2002) は、南インド洋のコアからエクスカ

ージョンを報告したが、相対磁場強度を NAPIS-75 と対応させることで 41 ka の年代値を得ている。

7) 45–55 ka のエクスカージョン

Tanaka and Kobayashi (2003) は御嶽山から 48 ± 4 ka の年代値を示すエクスカージョンを報告している。また、Mochizuki *et al.* (2004) は、Shibuya *et al.* (1992) によってエクスカージョンを示すとされたニュージーランド Auckland の Hampton Park 火山について年代測定を行い、 55 ± 10 ka の年代値を得た。堆積物の記録としては、カリフォルニア湾の DSDP Hole 480 から 49–51 ka のエクスカージョンが報告されている (Levi and Karlin, 1989)。また、Haag *et al.* (1999) は西アフリカのモーリタニア西方から 46–50 ka のエクスカージョンを報告している。さらに、北西シベリアの El'gygytgyn 湖から得られた古地磁気記録は 52 ka にエクスカージョンが存在することを示す (Nowaczyk *et al.*, 2002)。

8) Norwegian-Greenland Sea, 60–80 ka

Bleil and Gard (1989) は Norwegian-Greenland Sea からエクスカージョンを報告しているが、その年代値は 70–76 ka を示す。エクスカージョンの記録は他にも北極海のコアから得られており、それぞれ 65–77 ka (Nowaczyk and Baumann, 1992), 72–86 ka (Nowaczyk *et al.*, 1994), 55–66 ka (Nowaczyk and Frederichs, 1999) の年代値を示す。中国 Huanxian のレスからもエクスカージョンが報告されており、これは 75 ka, 85 ka そして 89 ka の 3 つのエクスカージョンからなる (Hongbo *et al.*, 1995)。さらに、ポルトガル沖から 74 ka の年代値を示すエクスカージョンが (Thouveny *et al.*, 2004), モーリタニア西方から 62–65 ka および 78–79 ka の年代値を示すエクスカージョンが報告されている (Haag *et al.*, 1999)。いっぽう、Tanaka and Kobayashi (2003) は御嶽山からエクスカージョンを報告しており、K/Ar 年代は 80 ± 4 ka を示す。また、Oda *et al.* (2004) は、イオニア海から 77 ka のエクスカージョンを認めた。このエクスカージョンの比較的幅広い年代値、およびいくつかのサイトで認められた複数のエクスカージョ

ンの存在から、本エクスカージョンはさらに複数(23)のエクスカージョンに分割できる可能性を残している。

9) 95 105 ka のエクスカージョン

Thouveny *et al.* (1990) はフランスの Bouchet 湖から 95 ka と 104 ka に 2 つのエクスカージョンを報告している。また、Nowaczyk and Baumann (1992) は北極海の Fram Strait から 98 102 ka の年代値を示すエクスカージョンを報告している。さらに、Cisowski and Hall (1997) はアマゾン河口近くの ODP Hole 942A から 97ka の年代値を示すエクスカージョンを報告している。Nowaczyk and Frederichs (1999) はアイスランド海の Kolbeinsey Ridge からエクスカージョンを報告しているが、推定年代値は 105 110 ka である。Haag *et al.* (1999) は西アフリカのモーリタニア西方から 2 つのエクスカージョンを報告しているが、これらは 87 90 ka および 98 100 ka の年代値を示す。本エクスカージョンも Norwegian-Greenland Sea エクスカージョンと同じく、2 つのエクスカージョンに分割できる可能性を残す。

10) Blake, 115 122 ka

Blake エクスカージョンは Smith and Foster (1969) によってカリブ海、北西大西洋、インド洋の 7 つのコアで最初に発見され、108 114 ka の年代値を与えられた。カリブ海では、Blake event は V12 122 コアにも記録されており (Wollin *et al.*, 1971; Ryan, 1972), Langereis *et al.* (1997) によって、年代値は 105 130 ka に相当すると推定された。また、北極海の記録がいくつかあり、それぞれ 131 138 ka (Bleil and Gard, 1989), 125 ka (Nowaczyk and Baumann, 1992), 135 ka (Nowaczyk and Frederichs, 1999) の年代値が得られている。さらに、北大西洋からいくつかエクスカージョンの報告がされており、アイスランド南の ODP Site 983 からは 120 ka の記録が (Channell *et al.*, 1997), 西部の ODP コアから 125 ka の記録が (Lund *et al.*, 2001b), ポルトガル沖から 115 122 ka の記録が (Thouveny *et al.*, 2004) それぞれ得られている。

南大西洋では、アマゾン川河口近くの ODP Hole 946A で 122 ka のエクスカージョンが報告されている (Cisowski and Hall, 1997)。

地中海においては、Blake event は RC9-181 に記録されており (Wollin, *et al.*, 1971; Ryan, 1972), 浅い負の伏角がサブロベル S4 と S5 の間に見つかった (102 123 ka: Langereis *et al.*, 1997), Tucholka *et al.* (1987) は地中海の 5 つのコアからエクスカージョンを報告しており、東地中海の 3 つのコアでは S4 と S5 の間に認められたが、酸素同位体との対比から 111.9 117.2 ka の年代値が得られている。フランスの Bouchet 湖では Blake event の上端が記録されており、117 ka の年代値が得られている (Thouveny *et al.*, 1990)。Reinders and Hambach (1995) は、ドイツの Tonchesberg で Eemian の古土壌 (酸素同位体ステージ 5.5) にエクスカージョンを確認している。Nowaczyk *et al.* (2002) は、北東シベリアの El'gygytgyn 湖から 110 ka を示す浅い伏角の記録を報告している。中国のレスからは Blake event に相当するエクスカージョンの記録が多数報告されており、Xining で $111.8 \pm 1.0 \sim 117.1 \pm 1.2$ の記録が (Zhu *et al.*, 1994b), 中国中央部の Huanxian から 114 135 ka の記録が (Hongbo *et al.*, 1995), Jiuzhoutai から 114.5 120.0 ka の記録が (Fang *et al.*, 1997), Weinan から 118 ka の記録が (Zhu *et al.*, 1998b; Pan *et al.*, 2002), それぞれ見つかる。また、Rieck *et al.* (1992) は、北カリフォルニアの Tule 湖から 105 114 ka の年代値を示すエクスカージョンを報告している。

火山岩から得られた Blake event の記録も多く存在するが、これらは以下の通りである。Champion *et al.* (1988) は、米国ニューメキシコ州の Laguna 玄武岩から負の伏角を示す溶岩を報告しているが、これは 128 ± 33 ka の年代値を示す。さらに、Holt *et al.* (1996) は、HSDP のサイトから負の伏角をもつ溶岩を報告しているが、これは $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代が 132 ± 32 ka の値を示す溶岩の直上に位置する。インド洋の Reunion 島の溶岩からは 116 ± 5 ka の K/Ar 年代を示すエ

クスカーションが報告されている (Rais, *et al.*, 1996)。イタリアの Aeolian 諸島の Vulcano 島からエクスカーションが得られているが、この年代値は 110 ka よりも古い (Laj *et al.*, 1997)。同じく、Aeolian 諸島の Lipari 島からもエクスカーションの記録が得られているが、 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 全岩年代で 143 ± 17 ka の、グランドマスの $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代で 128 ± 23 ka の値が得られている (Zanella and Laurenzi, 1998)。また、Zhu *et al.* (2000b) は、北東中国の Jilin 地域の Tianchi 溶岩からエクスカーションを報告しており、これは 123 ± 7 ka の $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代を示す。

11) Albuquerque, 140 160 ka

広域テフラである Old Crow 火山灰の直下に位置するアラスカの堆積物からエクスカーションが見つかったが (Westgate *et al.*, 1985)、火山灰のフィッシュトラック年代は 140 ± 10 ka を示すことがわかった (Westgate *et al.*, 1990)。米国ニューメキシコ州の Albuquerque の火山から得られたエクスカーションは K/Ar 年代で 155 ± 47 ka を示すことがわかったが (Geissman *et al.*, 1989)、Peate *et al.* (1996) は ^{238}U - ^{230}Th 法により年代値を 156 ± 29 ka と更新した。また、米国カリフォルニア州 Tule 湖の掘削コアから、150 155 ka のエクスカーションが見つかった (Rieck *et al.*, 1992)。北極海からは、152 160 ka (Nowaczyk and Baumann, 1992) および 165 ka (Nowaczyk and Frederichs, 1999) にエクスカーションが見つかった。さらに、Haag *et al.* (1999) は西アフリカのモーリタニア西方からエクスカーションを報告しているが、151 153 ka の年代値を示す。また、赤道太平洋西部の西カリリン海盆から 160 ka を示すエクスカーションの記録が得られている (Yamazaki and Ioka, 1994)。さらに、九州の溶結火砕流 Aso-2 からエクスカーションの記録が得られている (Takai *et al.*, 2002)。同時に噴出した火山灰は 141 ± 5 ka の K/Ar 年代を示す。

12) Iceland Basin, 180 190 ka

Channell *et al.* (1997) は、アイスランド南方の ODP Site 983 から 186 189 ka の年代値を

示すエクスカーションを報告し、これを Iceland Basin event と名付けた。Iceland Basin event は、同じくアイスランド南方の ODP Site 984 (Channell, 1999) と ODP Site 980 (Channell and Raymo, 2003) でも発見されたが、これらの年代値は、それぞれ 179 184 ka と 190 193 ka である。Guyodo and Valet (1999) は、190 ka の相対磁場強度極小値を Jamaica/Pringle Falls エクスカーションと対応づけたが、Channell (1999) は、Iceland Basin event を Jamaica/Pringle Falls エクスカーションとは明確に区別しており、このことは Oda *et al.* (2002) によっても主張された。

このエクスカーションは北極海からも多数報告されており、Norwegian-Greenland Sea から 175 185 ka の記録 (Bleil and Gard, 1989)、Fram Strait から 171 181 ka の記録 (Nowaczyk and Baumann, 1992)、Greenland Sea から 179 189 ka の記録 (Nowaczyk and Antonow, 1997)、そして Iceland Sea から 178 190 ka の記録 (Nowaczyk and Frederichs, 1999) それぞれ得られている。また、北大西洋中央部からも多数のエクスカーションの記録が得られており、それぞれ 180 190 ka (Weeks *et al.*, 1995)、180 200 ka (Lehman *et al.*, 1996)、そして 188 ka (Thouveny *et al.*, 2004) の年代値を示す。さらに、北大西洋西部の複数の ODP サイトから 194 ka のエクスカーションが報告されている (Lund *et al.*, 2001b)。

Stoner *et al.* (2003) は、亜南極南大西洋の Agulhas Ridge (ODP Site 1089) から 189 190 ka の年代値を示すエクスカーションを報告している。また、Oda *et al.* (2004) は、イオニア海から 193 194 ka のエクスカーションを見つけた。さらに、北太平洋から 190 ka の記録 (Roberts *et al.*, 1997)、西赤道太平洋から 190 ka の記録 (Yamazaki and Ioka, 1994; Yamazaki and Oda, 2002)、南シナ海から 191 ka の記録 (Kissel *et al.*, 2003) それぞれ得られている。それに加えて、Oda *et al.* (2002) はバイカル湖から 177 183 ka のエクスカーションを報告し、それ以前

に報告されていたバイカル湖の3つのエクスカーション記録を整理して、それぞれ180 ka程度の年代を与えることを示した。

13) Jamaica/Pringle Falls, 210–220 ka

Jamaica エクスカーションはカリブ海の Jamaica Ridge のコア V12-122 で見つかったエクスカーションに対して名付けられたが、これは地中海のコア RC9-181 でも確認できる (Wollin *et al.*, 1971; Ryan, 1972)。Langereis *et al.* (1997) は、コア V12-122 の酸素同位体記録の再較正を行い200 ka よりも少し古いエクスカーションの年代値を得たが、コア RC9-181 についてはサブロペル層を用いた較正により、217 ka より少し若い年代値を得た。いっぽう、米国オレゴン州の Pringle Falls からエクスカーションが見つかったが (Herrero-Bervera *et al.*, 1989)、直下に位置する火山灰の $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代が 218 ± 10 ka を示すことがわかった (Herrero-Bervera *et al.*, 1994)。米国カリフォルニア州の Long Valley で見つかったエクスカーション (Liddicoat and Bailey, 1989; Liddicoat, 1990; Liddicoat *et al.*, 1998, 1999)、および Summer Lake のエクスカーション (Negrini *et al.*, 1994, 1996) は、火山灰層の対比から Pringle Falls エクスカーションと対応づけられた (Herrero-Bervera *et al.*, 1994)。

Oda *et al.* (2002) はバイカル湖から得られた3つのエクスカーション記録をまとめたが、そのうち2つの記録は215 ka の年代値を示し、残り一つは223 ka の年代値を示す。また、北東シベリアの El'gygytgyn 湖から得られたエクスカーションは、210 ka の年代値を示す (Nowaczyk *et al.*, 2002)。さらに、北大西洋西部の ODP コアから235 ka のエクスカーションが (Lund *et al.*, 2001b)、北大西洋北部の ODP Site 980 から222 ka のエクスカーションが報告されている (Channell and Raymo, 2003)。それに加えて、イオニア海から212–213 ka のエクスカーションが見つかった (Oda *et al.*, 2004)。

火山岩の記録としては、Holt *et al.* (1996) がハワイの HSDP 掘削サイトから負の伏角を示す

エクスカーションを報告しているが、これは同じコアの熱消磁の結果でも確認された (Laj and Kissel, 1999)。このエクスカーションの年代値は 232 ± 4 ka と 200 ± 9 ka の2つの $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代値から内挿すると、226 ka となる。また、ニュージーランドの Mamaku イグニンプライトからエクスカーションが見つかった (Shane *et al.*, 1994)。 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代は 220 ± 10 ka を示す (Tanaka *et al.*, 1996)。

14) Fram Strait, 255–265 ka

Nowaczyk and Baumann (1992) は、北極海の Fram Strait の2つのコアからエクスカーションを報告したが、年代値は252–262 ka を示す。Langereis *et al.* (1997) によってイオニア海のコア KC01B から得られた Calabrian Ridge のエクスカーションの年代値は、Lourens (2004) による天文年代モデル改訂にともない、260 ka から261 ka に微修正された。Oda *et al.* (2004) は、KC01B 直近のコア KC01 について、258–263 ka にエクスカーションを確認した。また、Nowaczyk and Frederichs (1999) はアイスランド海の Kolbeinsey Ridge から250 ka のエクスカーションを報告している。さらに、北大西洋北部の ODP Site 983 から262 ka のエクスカーションが見つかった (Channell *et al.*, 1997)。ODP Site 980 においても240 ka のエクスカーションが確認された (Channell and Raymo, 2003)。また、Lund *et al.* (2001b) は北大西洋西部の ODP コアについて、260 ka のエクスカーションを認めた。Laj and Kissel (1999) は HSDP 掘削コアについて熱消磁を行い、265 ka (内挿による年代値) にエクスカーションを確認したが、同じコアの交流消磁による結果では確認されていない (Holt, *et al.*, 1996)。

15) Kolbeinsey Ridge, 280–290 ka

Nowaczyk and Frederichs (1999) はアイスランド海の Kolbeinsey 海嶺から272–283 ka の年代値を示すエクスカーションを報告している。また、北大西洋のポルトガル沖のコアでは、年代値が290 ka を示すエクスカーションが見つかった (Thouveny *et al.*, 2004)。さらに、南シナ

海の ODP Site 1146 からエクスカージョンが報告されており、年代値は 288 ka を示す (Kissel *et al.*, 2003)。いっぽう陸上では、中国 Weinan のレスから 280 ka の年代を示すエクスカージョンが報告されている (Pan *et al.*, 2002)。

16) Calabrian Ridge 1, 310–320 ka

イオニア海のコア KC01B においては、Calabrian Ridge 1 エクスカージョンは 318 ka の年代値を示したが (Langereis *et al.*, 1997)、Lourens (2004) による新しい年代モデルによって 319 ka に微修正された。これに加えて、Oda *et al.* (2004) は、KC01B 直近のコア KC01 から、313–319 ka のエクスカージョンを確認した。また、カリブ海の Jamaica Ridge のコア V12-122 から酸素同位体ステージ 9 に相当するエクスカージョンが見つかった (Ryan, 1972)。この年代値はおよそ 320 ka と推定されている (Langereis *et al.*, 1997)。さらに、Lund *et al.* (2001b) は酸素同位体ステージ 9.1 に相当する 310 ka の年代を示すエクスカージョンを北大西洋の西部から報告している。

17) Agulhas Ridge, 330–340 ka

Bleil and Gard (1989) は、Norwegian-Greenland Sea から 330–344 ka の年代値を示すエクスカージョンを報告している。また、酸素同位体ステージ 9.3 に相当する 330 ka の年代値を示すエクスカージョンが、北大西洋の西部から得られた複数の ODP コアにおいて確認された (Lund, 2001b)。さらに、亜南極南大西洋の Agulhas Ridge (ODP Site 1089) において詳細なエクスカージョン記録が得られたが、その推定年代値は 335 ka である (Stoner *et al.*, 2003)。また、最近になって、パタゴニアの Meseta del Lago Buenos Aires の溶岩からエクスカージョンが見つかっており、 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代値は 341 ± 33 ka を示す (Brown *et al.*, 2004)。

18) Levantine, 360–370 ka

Levantine event は Ryan (1972) によって地中海のコア RC9-181 から見つかったエクスカージョンに対して名付けられたが、Langereis *et al.* (1997) はその年代値を 360–370 ka とした。

また、HSDP 掘削サイトでの磁気検層で 372 ka に伏角の極小値が報告されたが (Steveling *et al.*, 2003) これは HSDP 掘削コアの古地磁気測定でも確認できる (Holt *et al.*, 1996; Laj and Kissel, 1999)。この年代値は上下に位置する 326 ± 23 ka と 400 ± 26 ka の年代値を示す溶岩の内挿によって求められたため、誤差は大きい。

19) Weinen, 400–420 ka

カリブ海のコア V12-122 において浅い伏角を示し、Ryan (1972) によって Levantine と対応づけられたエクスカージョンは、年代軸の再評価によって 400–420 ka の別のエクスカージョンであることが判明した (Langereis *et al.*, 1997)。また、米国ネバダ州のフンボルト川渓谷でエクスカージョンが見つかったが、外挿によって求められた年代値は 435 ka を示す (Negrini *et al.*, 1987)。さらに、HSDP 掘削サイトの磁気検層により 395 ka のエクスカージョンが報告されているが (Steveling *et al.*, 2003) これは HSDP 掘削コアの古地磁気結果からも確認できる (Holt *et al.*, 1996; Laj and Kissel, 1999)。この年代値は、 326 ± 23 ka と 400 ± 26 ka の年代値を示す上下の溶岩から内挿されたものである。

北大西洋西部の複数の ODP コアから 410 ka のエクスカージョンが報告されている (Lund, 2001b)。また、中国 Weinan のレスで見つかったエクスカージョン (Pan *et al.*, 2002) は、Heslop *et al.* (2000) の天文年代モデルにより年代値 422 ka を与えられた。さらに、南シナ海の ODP Site 1146 から 437 ka のエクスカージョンの記録が得られた (Kissel *et al.*, 2003)。最近、Tauxe *et al.* (2004) は米国アイダホ州の Snake River Plain 溶岩から 390 ± 40 ka の $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代を示すエクスカージョンを報告している。

20) West Eifel, 500–510 ka

Wilson and Hey (1981) は Galapagos 海嶺を挟む中央磁気異常に小さな変動 (tiny wiggle) を認めたが、これは Cande and Kent (1992) によってクリプトクロン C1n-1 と名付けられ、年代値はブルネ松山境界と現在との内挿により 493–504 ka と推定された。また、ドイツ West

Eifel の火山からエクスカージョンが見つかったが、この K/Ar 年代は 510 ± 30 ka の値を示す (Schnepp and Hradetzky, 1994)。さらに、Lund *et al.* (2001b) は、北大西洋の西部から 510 ka の年代値を示すエクスカージョンを報告している。Bleil and Gard (1989) は Norwegian-Greenland Sea から 474–483 ka の年代値を示すエクスカージョンを報告しているが、これは他の年代値と比べると幾分小さい。

21) Calabrian Ridge 2, 535–545 ka

Langereis *et al.* (1997) によって 515 ± 3 ka のエクスカージョンがイオニア海のコア KC01B から報告され、Calabrian Ridge 2 (CR2) と名付けられた。しかしながら、同コアに対する新しい天文年代モデルによると (Lourens, 2004)、CR2 の年代は 543 ka と、以前よりも有意に古い値を示す。これに加えて、Oda *et al.* (2004) は、KC01B 直近のコア KC01 から 541–542 ka の年代値を示すエクスカージョンを確認した。また、Lund *et al.* (2001b) は北大西洋の西部の ODP コアから年代値が 536 ka を示すエクスカージョンを報告している。さらに、Knudsen *et al.* (2003) は、Cape Verde 諸島の 2 つのセクションからエクスカージョンの記録を得た。彼らは、これらの記録をクリプトクロン C1n-1 (493–504 ka) と対応づけたが、1 つのセクションの年代値が 520 ± 10 ka より古く、別のセクションは 540 ± 90 ka よりも若いことを考えると、CR2 と対応づけるのが適当である。最近になって、Channell *et al.* (2004) は北大西洋北部の ODP Site 983 と 984 から 540 ka のエクスカージョンを報告している。彼らはこのエクスカージョンを Big Lost event と対応させたが、これも CR2 と対応させるのが適当である。

22) Emperor/Big Lost, 550–570 ka

Ryan (1972) はカリブ海のコア V12-122 に見られる 1 つの負の伏角値を Emperor event と名付けた。いっぽう、Champion *et al.* (1981) は、米国アイダホ州の溶岩流から 460 ± 50 ka の K/Ar 年代を示す負の伏角を報告し、これを Emperor event と対応づけた。後に、Cham-

pion *et al.* (1988) はこの溶岩の K/Ar 年代を 565 ± 14 ka に改訂し、新たに Big Lost event と名付けたが、この年代値は Lanphere (2000) による $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ブラト年代によって 550 ± 10 ka と更新された。Champion *et al.* (1988) は Ryan (1972) の Emperor event の年代値が 460 ka 程度であると主張したが、Langereis *et al.* (1997) は V12-122 の酸素同位体比を ODP Site 677 のと対応させることで、570 ka の年代値を得た。かくして、Big Lost event は再び Emperor event と対応づけられたことになる。この他には、北大西洋の西部の複数の ODP コアから 575 ka のエクスカージョンが報告されている (Lund *et al.*, 2001b)。さらに、南シナ海の ODP Site 1146 から 554 ka の年代値を示すエクスカージョンが得られている (Kissel *et al.*, 2003)。

23) Calabrian Ridge 3, 580–605 ka

Langereis *et al.* (1997) によってイオニア海のコア KC01B から見つかった 573 ± 3 ka のエクスカージョンは Calabrian Ridge 3 (CR3) と名付けられたが、その年代値は Lourens (2004) の新しい天文年代モデルにより 593 ka と修正された。これに加えて、Oda *et al.* (2004) は、KC01B 直近で採取されたコア KC01 から 592–594 ka のエクスカージョンを確認した。Lourens (2004) の新しい天文年代モデルによって明らかになったことは、Langereis *et al.* (1997) によって同一であるとされた CR3 と Emperor/Big Lost の 2 つのエクスカージョンは別のものであるということである。また、Lund *et al.* (2001b) は北大西洋西部の ODP Site 1061 と 1062 から 605 ka のエクスカージョンを、Channell *et al.* (2004) は北大西洋北部の ODP Site 983 と 984 から 590 ka のエクスカージョンを報告している。さらに、Quidelleur *et al.* (1999) はカナリア諸島の La Palma から K/Ar 年代で 602 ± 12 ka を示すエクスカージョンを発見したが、Singer *et al.* (2002) は 580.2 ± 7.8 ka の $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ アイソクロン年代を報告している。Singer *et al.* (2002) は、La Palma のエクスカージョンを Langereis

et al. (1997) の言うところの Big Lost (570 ka) と対応づけたが、新しく分類された CR3 と対応させる方が妥当である。最近、西メキシコの Ceboruco-San Pedro 火山地帯の 2 つの溶岩流が逆帯磁していることが判明したが、この $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代はそれぞれ 623 ± 91 ka と 614 ± 16 ka を示す (Petronille *et al.*, submitted)。

24) Delta, 665 690 ka

ブルネ期の早期におけるエクスカーションは Watkins (1968) によって南大洋のコア E17-11 におけるエクスカーションとして見つかったが、Champion *et al.* (1988) はこの年代値を 627 ka とした。ブルネ松山境界を 780 ka とし、堆積速度一定を仮定することで、このエクスカーションの年代値はおおよそ 670 ka と再計算できる。このエクスカーションは後に Creer *et al.* (1980) がイタリアの Gioia Tauro コアで浅い正の伏角を報告した時に、Delta event と名付けられた。Champion *et al.* (1988) は、Creer *et al.* (1980) の Delta event を再評価し、ブルネ松山境界を 730 ka とすることで 637 ka の年代値を導いた。ブルネ松山境界の年代値を 780 ka とし、Blake event の下部境界の年代を 120 ka とすることで、Delta event の年代は 680 ka と推定される。

中国 Xifeng 地域の Lishi レスの 6 番目の古土壌の上部に完全に逆帯磁した部分が見つかった (Liu *et al.*, 1988)。Champion *et al.* (1988) は古い年代軸に基づいて 630 640 ka の年代を当てはめたが、中国レス堆積物の新しい天文年代モデル (Heslop *et al.*, 2000) によると、Xifeng の 6 番目の古土壌に見られるエクスカーションの年代値は 690 ka と推定される。Biswas *et al.* (1999) は大阪湾の掘削コアから 690 ka 付近にエクスカーションを報告している。これは、酸素同位体ステージ 17.3 17.4 に堆積した海成粘土の下部境界付近に位置するが、前述のレスの記録の年代とほぼ一致する。また、Lund *et al.* (2001b) は北大西洋の西部の複数の ODP コアから年代値が 666 ka を示すエクスカーションを報告しているが、これは、酸素同位体ステージ 17.1 に相当する。さらに、北大西洋北部からエクスカーション

が報告されており、ODP Site 980 から 687 696 ka の記録が (Channell and Raymo, 2003)、ODP Sites 983 と 984 から 670 ka の記録が (Channell *et al.*, 2004)、それぞれ得られている。

III. 地磁気エクスカーションと相対磁場強度

前のセクションでリストアップした地磁気エクスカーションは全部で 23 個にのぼるが、これを縦に年代軸をつけて示すと図 1(a) のようになる。全 23 個のエクスカーションのうち 18 個については、十分多くの地域から信頼できる記録が得られている (図 1(a) に太字で名前を記入)。このうち、特に全球から多数の記録が報告されており、高い信頼性が確保されているものは、Mono Lake, Laschamp, Blake, Iceland Basin の 4 つであると言うことができる。

ブルネ期の相対磁場強度標準曲線 Sint 800 (Guyodo and Valet, 1999) などが発表され、地球磁場強度変動曲線を年代の推定に用いる試みも増えてきたが、これらの研究によって地磁気エクスカーションは地球磁場強度が低くなった時期に対応することがわかってきた。堆積物による相対磁場強度変動曲線は多数の地域から報告されているが、その中でも詳細な変動をとらえることのできる北大西洋北部から得られた ODP Site 983 の記録 (Channell *et al.*, 1998; Channell, 1999; Channell and Kleiven, 2000) を例にとり、本総説でリストアップした地磁気エクスカーションの記録と比較を行ってみた (図 1(c))。これによると、全部で 23 のエクスカーションのうち 20 のエクスカーションで相対磁場強度変動の極小値と一致することが確認された (年代軸の矢印)。Sint-800 と比較すると (図 1(b))、16 のエクスカーションにおいて極小値との一致が見られた (年代軸の矢印)。Sint-800 の方が極小値との一致が少ないのは、Sint-800 は標準曲線計算の際に多数のコアのデータをスタッキングしており、このために相対磁場強度の細かい変動が消えてしまったためと考えられる。以上の結果から、地磁気エクスカーションが発生する時には、地球磁場強度が小さくなっていることが、ほぼ確認

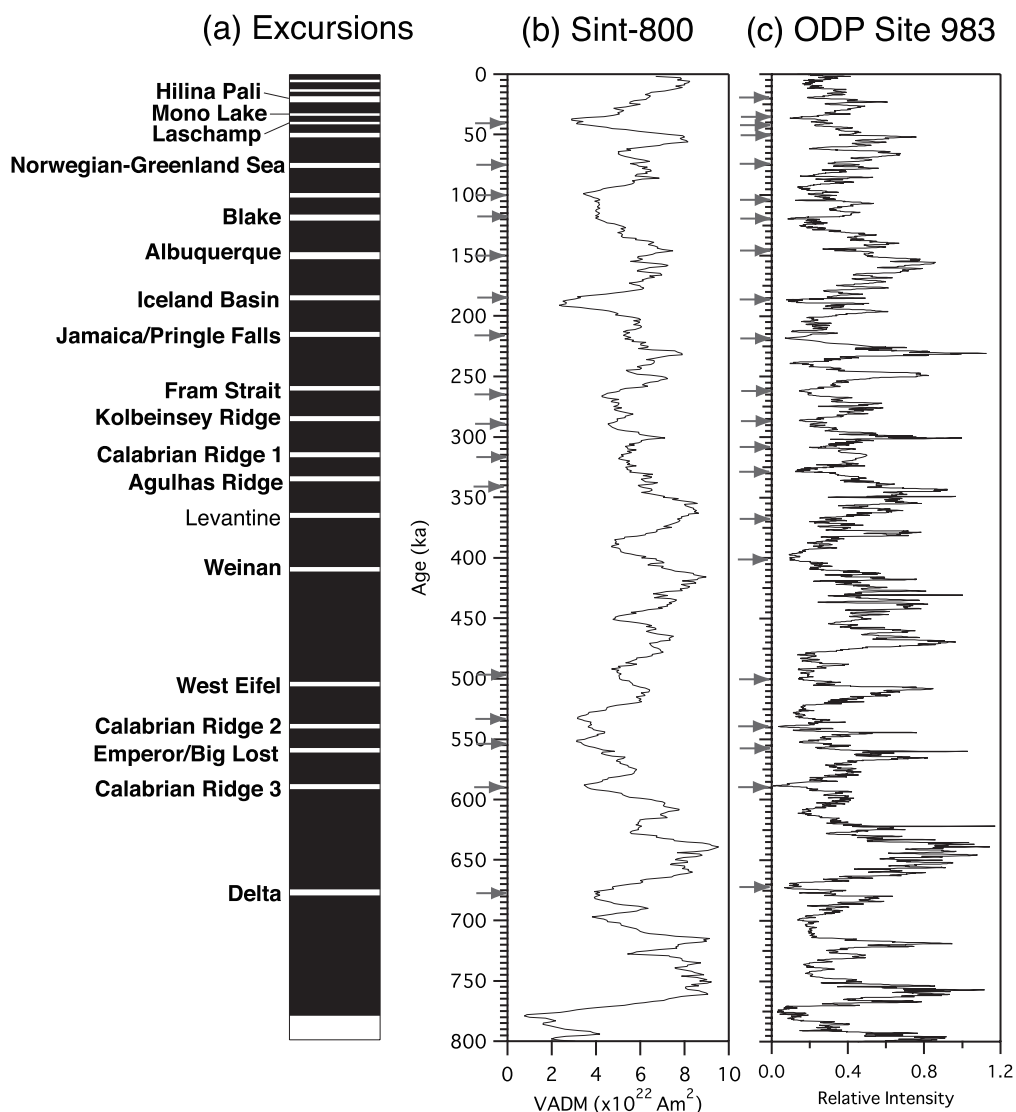


図 1 地磁気エクスカージョンと相対磁場強度 .

(a) 本研究によりリストアップされた地磁気エクスカージョンの記録を示すが、太字で名前を表示したエクスカージョンは信頼性が高いと考えられる。(b) Sint-800 相対磁場強度標準曲線(Guyodo and Valet, 1999). 横軸(VADM)は地球の軸方向の見かけの双極子磁気モーメントを表す . 年代軸上の矢印はエクスカージョンに対応する極小値 . (c) 北大西洋北部の ODP Site 983 から得られた相対磁場強度変動曲線 (Channell *et al.*, 1998; Channell, 1999; Channell and Kleiven, 2000). 相対磁場強度は、自然残留磁化を等温残留磁化で規格化して求められた . 年代軸上の矢印はエクスカージョンに対応する極小値 .

Fig. 1 Geomagnetic excursions and relative paleointensities.

(a) Geomagnetic excursion records listed in this study. Excursion names the bold face are reliable. (b) Relative paleointensity stack Sint-800 (Guyodo and Valet, 1999) VADM is virtual axial dipole moment. Arrows on the age scale are minima corresponding to excursions. (c) Relative paleointensity record from ODP Site 983 from northern part of the North Atlantic (Channell *et al.*, 1998; Channell, 1999; Channell and Kleiven, 2000) Relative paleointensity was calculated by normalizing natural remanent magnetization with isothermal remanent magnetization. Arrows on the age scale are minima corresponding to excursions.

できた。このことは、双極子磁場が弱くなることで地球磁場強度が弱くなり、同時に非双極子磁場成分が卓越することにより地磁気エクスカージョンが引き起こされる、といった説明で最もよく表現できる。非双極子磁場成分が卓越するということは、観測地点によって異なった仮想的な地磁気極 (VGP) のパスが描かれるということが期待される。地磁気エクスカージョン時の磁場の形を詳細に解析した例はそれほど多くないが、Iceland Basin エクスカージョンに関しては詳細な記録が複数のサイトで得られており、比較的簡単な構造の非双極子磁場で表現できることが示唆されている (Laj *et al.*, 2004; Roberts *et al.*, 2004)。

IV. ま と め

過去から最近にいたるまでの膨大な量のブルネ正磁極期の地磁気エクスカージョンの記録をレビューし、おおよそ 23 のエクスカージョンが存在すること、そのうち 18 については複数の地域で信頼できる記録が得られることが判明した。全部で 23 のエクスカージョンのうち 20 個に関して、ODP Site 983 の相対磁場強度変動曲線の極小値との対応が見られ、地磁気エクスカージョン発生時に地球磁場強度が小さくなっていることが確認された。Worm (1997) が指摘したエクスカージョンと氷期 間氷期サイクルとの相関については、エクスカージョンの数が氷期 間氷期サイクルの数を上回っていることから、特に明確な相関性はない可能性が高い。本総説でリストアップしたエクスカージョンの中には、1 つの記録の中に複数のエクスカージョン記録を含むと思われるものもあり、今後の研究の進展にともなってエクスカージョンの数はさらに増大する可能性を示唆する。このように多数のエクスカージョンが存在することは、地球磁場は今までに想像されてきたよりも不安定であることを示唆するものであり、さらに松山期以前のエクスカージョンについても整理をしていくことにより、その全貌が明らかになっていくものと思われる。

謝 辞

本研究のきっかけは、オランダのユトレヒト大学の Cor G. Langereis 教授のアイデアによるが、教授には終始研究への激励をいただいた。また、山崎俊嗣・山本裕二両博士には、議論をしていただき、貴重な意見をいただいた。本研究は、日本学術振興会の若手研究者海外派遣制度および科学研究費補助金 (課題番号 16540422) の支援で行われた。

文 献

- Banerjee, S.K., Lund, S.P. and Levi, S. (1979) Geomagnetic record in Minnesota lake sediments Absence of the Goehnborg and Erieau excursions. *Geology*, **7**, 588–591.
- Beer, J., Muscheler, R., Wagner, G., Laj, C., Kissel, C., Kubik, P.W. and Synal, H.-A. (2002) Cosmogenic nuclides during Isotope Stages 2 and 3. *Quat. Sci. Rev.*, **21**, 1129–1139.
- Benson, L., Liddicoat, J., Smoot, J., Sarna-Wojcicki, A., Negrini, R. and Lund, S. (2003) Age of the Mono Lake excursion and associated tephra. *Quat. Sci. Rev.*, **22**, 135–140.
- 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 chrons. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, **147**, 233–248.
- Bleil, U. and Gard, G. (1989) Chronology and correlation of Quaternary magnetostratigraphy and nannofossil biostratigraphy in Norwegian-Greenland Sea sediments. *Geol. Rundschau*, **78**, 1173–1187.
- Bonhommet, N. and Babkine, J. (1967) Sur la presence d'aimantations inversees dans la Chaîne des Puys. *C.R. Acad. Sci. Paris*, **264**, 92–94.
- Bonhommet, N. and Zähringer, J. (1969) Paleomagnetism and Potassium Argon age determinations of the Laschamp geomagnetic polarity event. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **6**, 43–46.
- Brown, L.L., Singer, B.S. and Gorrying, M.L. (2004) Paleomagnetism and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Chronology of Lavas from Meseta del Lago Buenos Aires, Patagonia. *Geochem. Geophys. Geosys.*, **5**, Q01H04, doi:10.1029/2003GC000526.
- Cande, S.C. and Kent, D.V. (1992) A new geomagnetic polarity time scale for the Late Cretaceous and Cenozoic. *J. Geophys. Res.*, **97**, 13917–13951.
- Carvalho, C., Camps, P., Ruffet, G., Henry, B. and Poidras, T. (2003) Mono Lake or Laschamp geomagnetic event recorded from lava flows in Amsterdam Island (southeastern Indian Ocean). *Geophys. J.*

- Int.*, **154**, 767–782.
- Champion, D.E., Dalrymple, G.B. and Kuntz, M.A. (1981) Radiometric and paleomagnetic evidence for the Emperor reversed polarity event at 0.46–0.05 m.y. in basalt lava flows from the eastern Snake River Plain, Idaho. *Geophys. Res. Lett.*, **8**, 1055–1058.
- Champion, D.E., Lanphere, M.A. and Kuntz, M.A. (1988) Evidence for a new geomagnetic reversal from lava flows in Idaho: Discussion of short polarity reversals in the Brunhes and Late Matuyama polarity chrons. *J. Geophys. Res.*, **93**, 11667–11680.
- Channell, J.E.T. (1999) Geomagnetic paleointensity and directional secular variation at Ocean Drilling Program (ODP) Site 984 (Bjorn Drift) since 500 ka: Comparisons with ODP Site 983 (Gardar Drift). *J. Geophys. Res.*, **104**, 22937–22951.
- Channell, J.E.T. and Kleiven, H.F. (2000) Geomagnetic paleointensities and astrochronological ages for the Matuyama-Brunhes boundary and the boundaries of the Jaramillo Subchron: Palaeomagnetic and oxygen isotope records from ODP Site 983. *Philos. Trans. R. Soc. London Ser. A*, **358**, 1027–1047.
- Channell, J.E.T. and Raymo, M.E. (2003) Paleomagnetic record at ODP Site 980 (Fni Drift, Rockall) for the past 1.2 Myrs. *Geochem. Geophys. Geosys.*, **4**, 1033, doi: 10.1029/2002GC000440.
- Channell, J.E.T., Hodell, D.A. and Lehman, B. (1997) Relative geomagnetic paleointensity and $\delta^{18}\text{O}$ at ODP Site 983 (Gardar Drift, North Atlantic) since 350 ka. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **153**, 103–118.
- Channell, J.E.T., Hodell, D.A., McManus, J. and Lehman, B. (1998) Orbital modulation of geomagnetic paleointensity. *Nature*, **394**, 464–468.
- Channell, J.E.T., Stoner, J.S., Hodell, D.A. and Charles, C.D. (2000) Geomagnetic paleointensity for the last 100 kyr from the sub-antarctic South Atlantic: A tool for inter-hemispheric correlation. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **175**, 145–160.
- Channell, J.E.T., Curtis, J.H. and Flower, B.P. (2004) The Matuyama-Brunhes boundary interval (500–900 ka) in North Atlantic drift sediments. *Geophys. J. Int.*, **158**, 489–505.
- Cisowski, S.M. and Hall, F.R. (1997) An examination of the paleointensity record and geomagnetic excursions recorded in Leg 155 cores. *Proc. ODP, Sci. Results*, **155**, 231–243.
- Coe, R.S., Gromm, S. and Mankinen, E.A. (1978) Geomagnetic paleointensities from radiocarbon-dated lava flows on Hawaii and the question of the Pacific nondipole low. *J. Geophys. Res.*, **83**, 1740–1756.
- Creer, K.M., Anderson, T.W. and Lewis, C.F.M. (1976) Late Quaternary geomagnetic stratigraphy recorded in Lake Erie sediments. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **31**, 37–47.
- Creer, K.M., Readman, P.W. and Jacobs, A.M. (1980) Palaeomagnetic and palaeontological dating of a section at Gioia Tauro, Italy: Identification of the Blake event. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **50**, 289–300.
- Denham, C.R. and Cox, A. (1971) Evidence that the Laschamps polarity event did not occur 13,300–39,400 years ago. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **13**, 181–190.
- Fang, X.-M., Li, J.-J., Van der Voo, R., MacNiocail, C., Dai, X.-R., Kemp, R.A., Derbyshire, E., Cao, J.-X., Wang, J.-M. and Wang, G. (1997) A record of the Blake Event during the last interglacial paleosol in the western Loess Plateau of China. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **146**, 73–82.
- Geissman, J.W., Harlan, S.S., Brown, L., Turrin, B. and McFadden, L.D. (1989) Brunhes Chron geomagnetic excursion recorded during the late Pleistocene, Albuquerque volcanoes, New Mexico, U.S.A. In Lowes, J.F., Collinson, D.W., Parry, J.H., Runcorn, S.K., Tozer, D.C. and Sorvard, A. eds.: *Geomagnetism and Paleomagnetism*. Kluwer, Dordrecht, 123–136.
- Gonzalez, S., Sherwood, G., Bohnel, H. and Schnepf, E. (1997) Paleosecular variation in Central Mexico over the last 30000 years: The record from lavas. *Geophys. J. Int.*, **130**, 201–219.
- Guillou, H., Singer, B.S., Laj, C., Kissel, C., Scaillet, S. and Jicha, B.R. (2004) On the age of the Laschamps geomagnetic excursion. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **227**, 331–343.
- Guyodo, Y. and Valet, J.P. (1999) Global changes in intensity of the Earth's magnetic field during the past 800 kyr. *Nature*, **399**, 249–252.
- Haag, M., Paterne, M. and Pujol, C. (1999) Anomalous directions of the natural remanent magnetization in Late Pleistocene marine sediments from the coast of Mauritania (West Africa). *Phys. Earth Planet. Inter.*, **115**, 81–100.
- Herrero-Bervera, E., Helsley, C.E., Hammond, S.R. and Chitwood, L.A. (1989) A possible lacustrine paleomagnetic record of the Blake episode from Pringle Falls, Oregon, U.S.A. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **56**, 112–123.
- Herrero-Bervera, E., Helsley, C.E., Sarna-Wojcicki, A.M., Lajoie, K.R., Meyer, C.E., McWilliams, M.O., Negrini, R.M., Turrin, B.D., Donnelly-Nolan, J.M. and Liddicoat, J.C. (1994) Age and correlation of a paleomagnetic episode in the western United States by $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating and tephrochronology: The Jamaica, Blake, or a new polarity episode? *J. Geophys. Res.*, **99**, 24091–24103.
- Heslop, D., Langereis, C.G. and Dekkers, M.J. (2000) A new astronomical timescale for the loess deposits of Northern China. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **184**, 125–139.
- Holt, J.W., Kirschvink, J. and Garnier, F. (1996) Geomagnetic field inclinations for the past 400 kyr

- from the 1-km core of the Hawaii Scientific Drilling Project. *J. Geophys. Res.*, **101**, 11655–11663.
- Hongbo, Z., Rolph, T., Shaw, J. and Zhisheng, A. (1995) A detailed paleomagnetic record for the last interglacial period. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **133**, 339–351.
- 兵藤正幸・峯本須美代 (1996) 日本の湖沼堆積物から得られた地磁気永年変化とエクスカージョンによる年代測定. 第四紀研究, **35**, 125–133.
- Kawai, N. (1984) Paleomagnetic study of the Lake Biwa sediments. In Horie, S. and Junk, W. eds.: *Lake Biwa*. Dordrecht, 399–416.
- Kawai, N., Yaskawa, K., Nakajima, K., Torii, M. and Horie, S. (1972) Oscillating geomagnetic field with a recurring reversal discovered from Lake Biwa. *Proc. Japan Acad.*, **48**, 186–190.
- Kawai, N., Yaskawa, K., Nakajima, T., Torii, M. and Natsuhara, N. (1975) Voice of geomagnetism from Lake Biwa. In Horie, S. ed.: *Paleolimnology of Lake Biwa and the Japanese Pleistocene*. Contribution on the Paleolimnology of Lake Biwa and the Japanese Pleistocene, **3** (85), Kyoto Univ., 143–161.
- Kent, D.V., Hemming, S.R. and Turrin, B.D. (2002) Laschamp Excursion at Mono Lake? *Earth Planet. Sci. Lett.*, **197**, 151–164.
- Kissel, C., Laj, C., Clemens, S. and Solheid, P. (2003) Magnetic signature of environmental changes in the last 1.2 Myr at ODP Site 1146, South China Sea. *Marine Geology*, **201**, 119–132.
- Knudsen, M.F., Abrahamsen, N. and Riisager, P. (2003) Paleomagnetic evidence from Cape Verde Islands basalts for fully reversed excursions in the Brunhes Chron. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **206**, 199–214.
- Kotlia, B.S., Bhalla, M.S., Sharma, C., Rajagopalan, G., Ramesh, R., Chauhan, M.S., Mathur, P.D., Bhandari, S. and Chacko, T. (1997) Palaeoclimatic conditions in the upper Pleistocene and Holocene Bhimtal-Naukuchiatal lake basin in south-central Kumaun, North India, *Palaeogeogr. Palaeoclim. Palaeoecol.*, **130**, 307–322.
- Kristiansson, L. and Gudmundsson, L. (1980) Geomagnetic excursion in late-glacial basalt outcrops in South-Western Iceland. *Geophys. Res. Lett.*, **7**, 337–340.
- Laj, C. and Kissel, C. (1999) Geomagnetic field intensity at Hawaii for the last 420 kyr from the Hawaii Scientific Drilling Project core, Big Island, Hawaii. *J. Geophys. Res.*, **104**, 15317–15338.
- Laj, C., Rais, A., Surmont, J., Gillot, P.-Y., Guillou, H., Kissel, C. and Zanella, E. (1997) Changes of the geomagnetic field vector obtained from lava sequences on the island of Vulcano (Aeolian Islands, Sicily) *Phys. Earth Planet. Inter.*, **99**, 161–177.
- Laj, C., Kissel, C., Mazaud, A., Channell, J.E.T. and Beer, J. (2000) North Atlantic palaeointensity stack since 75 ka (NAPIS-75) and the duration of the Laschamp event. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, **358**, 1009–1025.
- Laj, C., Kissel, C., Scao, V., Beer, J., Thomas, D.M., Guillou, H., Muscheler, R. and Wagner, G. (2002) Geomagnetic intensity and inclination variations at Hawaii for the past 98 kyr from core SOH-4 (Big Island) A new study and a comparison with existing contemporary data. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **129**, 205–243.
- Laj, C., Kissel, C., Roberts, A.P., Hillaire-Marcel, C. and Cortijo, E. (2004) Field Geometry During the Iceland Basin Event Observed from the North Atlantic Ocean, North Pacific Ocean and the South China Sea. *EOS, Trans. AGU*, **85**, Abstract GP41B-03.
- Langereis, C.G., Dekkers, M.J., de Lange, G.J., Paterne, M. and van Santvoort, P.J.M. (1997) Magnetostratigraphy and astronomical calibration of the last 1.1 Myr from an eastern Mediterranean piston core and dating of short events in the Brunhes. *Geophys. J. Int.*, **129**, 75–94.
- Lanphere, M.A. (2000) Comparison of conventional K-Ar and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of young mafic volcanic rocks. *Quat. Res.*, **53**, 294–301.
- Lehman, B., Laj, C., Kissel, C., Mazaud, A., Paterne, M. and Labeyrie, L. (1996) Relative changes of the geomagnetic field intensity during the last 280 kyear from piston cores in the Açores area. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **93**, 269–284.
- Levi, S. and Karlin, R. (1989) A sixty thousand year paleomagnetic record from Gulf of California sediments: Secular variation, late Quaternary excursions and geomagnetic implications. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **92**, 219–233.
- Levi, S., Audunsson, H., Duncan, R.A., Kristjansson, L., Gillot, P.-Y. and Jacobsson, S.P. (1990) Late Pleistocene geomagnetic excursion in Icelandic lavas: Confirmation of the Laschamp excursion. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **96**, 443–457.
- Liddicoat, J.C. (1990) Aborted reversal of the palaeomagnetic field in the Brunhes Normal Chron in east-central California. *Geophys. J. Int.*, **102**, 747–752.
- Liddicoat, J.C. (1992) Mono Lake excursion in Mono Basin, California and at Carson Sink and Pyramid Lake, Nevada. *Geophys. J. Int.*, **108**, 442–452.
- Liddicoat, J.C. (1996) Mono Lake excursion in the Lahontan Basin, Nevada. *Geophys. J. Int.*, **125**, 630–635.
- Liddicoat, J.C. and Bailey, R.A. (1989) Short reversal of the paleomagnetic field about 280,000 years ago at Long Valley, California. In Lowes, F.J., Collinson, D.W., Parry, J.H., Runcorn, S.K., Tozer, D.C. and Soward, A. eds.: *Geomagnetism and Paleomagnetism*. Kluwer, 137–153.
- Liddicoat, J.C. and Coe, R.S. (1979) Mono Lake geomagnetic excursion. *J. Geophys. Res.*, **84**, 261–271.

- Liddicoat, J.C., Coe, R.S. and Glen, J.M. (1998) Record of the younger part of the Pringle Falls excursion at Long Valley, California. *Geophys. J. Int.*, **135**, 663–670.
- Liddicoat, J.C., Coe, R.S. and Glen, J.M. (1999) Corrigendum 'Liddicoat, J.C., Coe, R.S. and Glen, J.M. (1998) Record of the younger part of the Pringle Falls excursion at Long Valley, California. *Geophys. J. Int.*, **135**, 663–670'. *Geophys. J. Int.*, **138**, 290.
- Liu, X., Liu, T., Xu, T., Liu, C. and Chen, M. (1988) The Chinese loess in Xifeng, I. The primary study on magnetostratigraphy of a loess profile in Xifeng area, Gansu province. *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, **92**, 345–348.
- Lourens, L. (2004) Revised tuning of Ocean Drilling Program Site 964 and KC01B (Mediterranean) and implications for the $\delta^{18}\text{O}$, tephra, calcareous nannofossil, and geomagnetic reversal chronologies of the past 1.1 Myr. *Paleoceanography*, **19**, PA3010, doi:10.1029/2003PA000997.
- Lund, S.P., Acton, G.D., Clement, B., Okada, M. and Williams, T. (2001a) Paleomagnetic records of Stage 3 excursions, Leg 172. In Keigwin, L.D., Rio, D., Acton, G.D. and Arnold, E. eds.: *Proc. ODP Sci. Results*, **172**. Chapter.
- Lund, S.P., Williams, T., Acton, G.D., Clement, B. and Okada, M. (2001b) Brunhes Chron magnetic field excursions recovered from Leg 172 sediments. In Keigwin, L.D., Rio, D., Acton, G.D. and Arnold, E. eds.: *Proc. ODP Sci. Results*, **172**. Chapter 10.
- 町田 洋・新井房夫・横山卓雄 (1991) 琵琶湖 200 m コアにおける指標テフラ層の再検討 . 第四期研究, **30**, 439–442.
- Mankinen, E.A. and Wentworth, C.M. (2004) Mono Lake excursion recorded in sediment of the Santa Clara Valley, California. *Geochem. Geophys. Geosys.*, **5**, Q02H5, doi:10.1029/2003GC000592.
- Marco, S. (2002) Late Pleistocene paleomagnetic secular variation from the Sea of Galilee, Israel. *Geophys. Res., Lett.*, **29**, 2015, doi:10.1029/2001GL014038.
- Marco, S., Ron, H., McWilliams, M.O. and Stein, M. (1998) High-resolution record of geomagnetic secular variation from Late Pleistocene Lake Lisan sediments (paleo Dead Sea) *Earth Planet. Sci. Lett.*, **161**, 145–160.
- Mazaud, A., Sicre, M.A., Ezat, U., Pichon, J.J., Duprat, J., Laj, C., Kissel, C., Beaufort, L., Michel, E. and Turon, J.L. (2002) Geomagnetic assisted stratigraphy and sea surface temperature changes in core MD94-103 (Southern Indian Ocean) Possible implications for North-South climatic relationships around H4. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **201**, 159–170.
- Mochizuki, N., Tsunakawa, H., Shibuya, H., Tagami, T., Ozawa, A., Cassidy, J. and Smith, E.M. (2004) K-Ar ages of the Auckland geomagnetic excursions. *Earth Planets Space*, **56**, 283–288.
- Mörner, N.-A. (1977) The Gothenburg magnetic excursion. *Quater. Res.*, **7**, 413–427.
- Mörner, N.-A. and Lanser, J.P. (1974) Gothenburg magnetic 'flip'. *Nature*, **251**, 408–409.
- Mörner, N.-A., Lanser, J.P. and Hospers, J. (1971) Late Weichselian Palaeomagnetic reversal. *Nature Phys. Sci.*, **234**, 173–174.
- Morris, W.A. and Carmichael, C.M. (1993) The Erieau Excursion revisited. *Can. J. Earth Sci.*, **30**, 1741–1748.
- Nakajima, T., Yaskawa, K., Natsuhara, N., Kawai, N. and Horie, S. (1973) Very short period geomagnetic excursion 18,000 yr BP. *Nature Phys. Sci.*, **244**, 8–10.
- Negrini, R.M., Davis, J.O. and Verosub, K.L. (1984) Mono Lake excursion found at Summer Lake, Oregon. *Geology*, **12**, 643–646.
- Negrini, R.M., Verosub, K.L. and Davis, J.O. (1987) Long-term nongeocentric axial dipole directions and a geomagnetic excursion from the Middle Pleistocene sediments of the Humboldt River Canyon, Pershing County, Nevada. *J. Geophys. Res.*, **92**, 10617–10627.
- Negrini, R.M., Erbes, D.B., Roberts, A.P., Verosub, K.L., Sarna-Wojcicki and Meyer, C.E. (1994) Repeating waveform initiated by a 180–190 ka geomagnetic excursion in western North America: Implications for field behavior during polarity transitions and subsequent secular variation. *J. Geophys. Res.*, **99**, 24105–24119.
- Negrini, R.M., Erbes, D.B., Roberts, A.P., Verosub, K.L., Sarna-Wojcicki and Meyer, C.E. (1996) Correction to 'Repeating waveform initiated by a 180–190 ka geomagnetic excursion in western North America: Implications for field behavior during polarity transitions and subsequent secular variation' by Robert M. Negrini *et al.* *J. Geophys. Res.*, **101**, 2971.
- Noltimier, H.C. and Colinvaux, P.A. (1976) Geomagnetic excursion from Imuruk, Alaska. *Nature*, **259**, 197–200.
- Nowaczyk, N.R. and Antonow, M. (1997) High-resolution magnetostratigraphy of four sediment cores from the Greenland Sea -I. Identification of the Mono Lake excursion, Laschamp and Biwa I/Jamaica geomagnetic polarity events. *Geophys. J. Int.*, **131**, 310–324.
- Nowaczyk, N.R. and Baumann, M. (1992) Combined high-resolution magnetostratigraphy and nannofossil biostratigraphy for late Quaternary Arctic Ocean sediments. *Deep-Sea Res.*, **39**, 567–601.
- Nowaczyk, N.R. and Frederichs, T.W. (1999) Geomagnetic events and relative palaeointensity variations during the past 300 ka as recorded in Kolbeinsey Ridge sediments, Iceland Sea: Indication for a strongly variable geomagnetic field. *Int. J. Earth Sci.*, **88**, 116–131.

- Nowaczyk, N.R. and Knies, J. (2000) Magnetostratigraphic results from the eastern Arctic Ocean: AMS ^{14}C ages and relative paleointensity data of the Mono Lake and Laschamp geomagnetic reversal excursions. *Geophys. J. Int.*, **140**, 185–197.
- Nowaczyk, N.R., Frederichs, T.W., Eisenhauer, A. and Gard, G. (1994) Magnetostratigraphic data from late Quaternary sediments from the Yermak Plateau, Arctic Ocean: Evidence for four geomagnetic polarity events within the last 170 ka of the Brunhes Chron. *Geophys. J. Int.*, **117**, 453–471.
- Nowaczyk, N.R., Minyuk, P., Melles, M., Brigham-Grette, J., Glushkova, O., Nolan, M., Lozhkin, A.V., Stetsenko, T.V., Andersen, P.M. and Forman, S.L. (2002) Magnetostratigraphic results from impact crater Lake El'gygytyn, northeastern Siberia: A 300 kyr long high-resolution terrestrial palaeoclimatic record from the Arctic. *Geophys. J. Int.*, **150**, 109–126.
- Nowaczyk, N.R., Antonow, M., Knies, J. and Spielhagen, R.F. (2003) Further rock magnetic and chronostratigraphic results on reversal excursions during the last 50 ka as derived from northern high latitudes and discrepancies in precise AMS ^{14}C dating. *Geophys. J. Int.*, **155**, 1065–1080.
- 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.
- Oda, H., Dekkers, M.J., Langereis, C.G., Lourens, L. and Heslop, D. (2004) A paleomagnetic record of the last 640 kyr from an eastern Mediterranean piston core and a review of geomagnetic excursions in the Brunhes. *EOS, Trans. AGU*, **85**, Abstract GP41B-08.
- Ortega-Guerrero, B. and Urrutia-Fucugauchi, J. (1997) A paleomagnetic secular variation record from late Pleistocene-Holocene lacustrine sediments from Chalco Lake, Basin of Mexico. *Quater. Int.*, **43/44**, 87–96.
- Pan, Y.X., Zhu, R.X., Liu, Q.S., Guo, B., Yue, L.P. and Wu, H.N. (2002) Geomagnetic episodes of the last 1.2 Myr recorded in Chinese loess. *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 1282, doi:10.1029/2001GL014024.
- Peate, D.W., Chen, J.H., Wasserburg, G.J., Papanastassiou, D.A. and Geissman, J.W. (1996) ^{238}U - ^{230}Th dating of a geomagnetic excursion in Quaternary basalts of the Albuquerque volcanoes field, New Mexico (USA) *Geophys. Res. Lett.*, **23**, 2271–2274.
- Peck, J.A., King, J.W., Colman, S.M. and Kravchinsky, V.A. (1996) An 84-kyr paleomagnetic record from the sediments of Lake Baikal, Siberia. *J. Geophys. Res.*, **101**, 11365–11385.
- Petronille, M., Goguitchaichvili, A., Henry, B., Alva-Valdivia, L.M., Rosas-Elguera, J., Urrutia-Fucugauchi, J., Ceja, M.R. and Calvo-Rathert, M. (submitted) Paleomagnetism of Ar-Ar Dated Lava Flows From the Ceboruco-San Pedro Volcanic Field (Western Mexico) Evidences for the Matuyama-Brunhes Transition Precursor and a Fully Reversed Geomagnetic Event in the Brunhes Chron. *J. Geophys. Res.*
- Quidelleur X., Gillot, P.-Y., Carlut, J. and Courtillot, V. (1999) Link between excursions and paleointensity inferred from abnormal field directions recorded at La Palma around 600 ka. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **168**, 233–242.
- Rais, A., Laj, C., Surmont, J., Gillot, P.-Y. and Guillou, H. (1996) Geomagnetic field intensity between 70000 and 130000 years B.P. from a volcanic sequence on La Reunion, Indian Ocean. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **140**, 173–189.
- Reinders, J. and Hambach, U. (1995) A geomagnetic event recorded in loess deposits of the Tonchesberg (Germany) Identification of the Blake magnetic polarity episode. *Geophys. J. Int.*, **122**, 407–418.
- Rieck, H.J., Sarna-Wojcicki, A.M., Meyer, C.E. and Adam, D.P. (1992) Magnetostratigraphy and tephrochronology of an upper Pliocene to Holocene record in lake sediments at Tulelake, northern California. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **104**, 409–428.
- Roberts, A.P., Lehman, B., Weeks, R.J., Verosub, K.L. and Laj, C. (1997) Relative paleointensity of the geomagnetic field over the last 200,000 years from ODP Site 883 and 884, North Pacific Ocean. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **152**, 11–23.
- Roberts, A.P., Kissel, C., Winkelhofer, M. and Laj, C. (2004) The Anatomy of a Geomagnetic Excursion: The Iceland Basin Excursion (188 ka) *EOS, Trans. AGU*, **85**, Abstract GP41B-04.
- Rubin, M. and Berthold, S.M. (1961) U.S. Geological Survey radiocarbon dates, VI. *Radiocarbon*, **3**, 86–98.
- Ryan, W.B.F. (1972) Stratigraphy of late Quaternary sediments in the Eastern Mediterranean. In Stanley, D.J. ed.: *The Mediterranean Sea: A Natural Sedimentation Laboratory*. 1, Dowden, Hutchinson and Ross, Stroudsburg, 149–169.
- Schnepp, E. and Hradetzky, H. (1994) Combined paleointensity and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age spectrum data from volcanic rocks of the West Eifel field (Germany) Evidence for an early Brunhes geomagnetic excursion. *J. Geophys. Res.*, **99**, 9061–9076.
- Shane, P., Black, T. and Westgate, J. (1994) Isothermal plateau fission-track age for a paleomagnetic excursion in the Mamaku Ignimbrite, New Zealand, and implications for late Quaternary stratigraphy. *Geophys. Res. Lett.*, **21**, 1695–1698.
- Shibuya, H., Cassidy, J., Smith, I.E.M. and Itaya, T. (1992) A geomagnetic excursion in the Brunhes epoch recorded in New Zealand basalts. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **111**, 41–48.

- Singer, B.S., Relle, M.K., Hoffman, K.A., Battle, A., Laj, C., Guillou, H. and Carracedo, J.C. (2002) Ar/Ar ages from transitionally magnetized lavas on La Palma, Canary Islands, and the geomagnetic instability timescale. *J. Geophys. Res.*, **107**, 2307, doi:10.1029/2001JB001613.
- Smith, J.D. and Foster, J.H. (1969) Geomagnetic reversal in Brunhes normal polarity epoch. *Science*, **163**, 565–567.
- Snowball, I.F. (1997) Gyromagnetic magnetization and the magnetic properties of greigite-bearing clays in southern Sweden. *Geophys. J. Int.*, **129**, 624–636.
- Steveling, E., Stoll, J.B. and Level, M. (2003) Quasi-continuous depth profiles of rock magnetization from magnetic logs in the HSDP-2 borehole, Island of Hawaii. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **4**, 8708, doi:10.1029/2002GC000330.
- Stoner, J.S., Channell, J.E.T., Hodell, D.A. and Charles, C.D. (2003) A ~ 580 kyr paleomagnetic record from the sub-Antarctic South Atlantic (Ocean Drilling Program Site 1089). *J. Geophys. Res.*, **108**, 2244, doi:10.1029/2001JB001390.
- Takai, A., Shibuya, H., Yoshihara, A. and Hamano, Y. (2002) Paleointensity measurements of pyroclastic flow deposits co-born with widespread tephra in Kyushu Island, Japan. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **133**, 159–179.
- Tanaka, H. and Kobayashi, T. (2003) Paleomagnetism of the late Quaternary Ontake Volcano, Japan: Directions, intensities, and excursions. *Earth Planets Space*, **55**, 189–202.
- Tanaka, H. and Tachibana, K. (1981) A geomagnetic reversal in the latest Brunhes epoch discovered at Shibutami, Japan. *J. Geomagn. Geoelect.*, **33**, 287–292.
- Tanaka, H., Turner, G.M., Houghton, B.F., Tachibana, T., Kono, M. and McWilliams, M.O. (1996) Paleomagnetism and chronology of the central Taupo Volcanic Zone, New Zealand. *Geophys. J. Int.*, **124**, 919–934.
- Tauxe, L., Lusk, C., Selkin, P., Gans, P. and Calvert, A. (2004) Paleomagnetic results from the Snake River Plain: Contribution to the time-averaged field global database. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **5**, Q08H13, doi:10.1029/2003GC000661.
- Teanby, N., Laj, C., Gubbins, D. and Pringle, M. (2002) A detailed palaeointensity and inclination record from drill core SOH1 on Hawaii. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **131**, 101–140.
- Thompson, R. and Berglund, B. (1976) Late Weichselian geomagnetic 'reversal' as a possible example of the reinforcement syndrome. *Nature*, **263**, 490–491.
- Thouveny, N. (1988) High-resolution palaeomagnetic study of Late Pleistocene sediments from Baffin Bay: First results. *Can. J. Earth Sci.*, **25**, 833–843.
- Thouveny, N., Creer, K.M. and Blunk, I. (1990) Extension of the Lac du Bouchet palaeomagnetic record over the last 120,000 years. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **97**, 140–161.
- Thouveny, N., Carcaillet, J., Moreno, E., Leduc, G. and Nerini, D. (2004) Geomagnetic moment variation and paleomagnetic excursions since 400 kyr BP: A stacked record from sedimentary sequences of the Portuguese margin. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **219**, 377–396.
- Torii, M., Shibuya, H., Hayashida, A., Katsura, I., Yoshida, S., Tagami, T., Otofujii, Y., Maeda, Y. and Sasajima, S. (1983) Paleomagnetic measurements of deep drilling core samples from Lake Biwa. *Rock Mag. Paleogeophys.*, **10**, 33–37.
- Tucholka, P., Fontugne, M., Guichard, F. and Paterne, M. (1987) The Blake magnetic polarity episode in cores from the Mediterranean Sea. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **86**, 320–326.
- Vlag, P., Thouveny, N., Williamson, D., Rochette, P. and Ben-Atig, F. (1996) Evidence for a geomagnetic excursion recorded in the sediments of Lac St. Front, France: A link with the Laschamp excursion? *J. Geophys. Res.*, **101**, 28211–28230.
- Voelker, A.H.L., Sarnthein, M., Grootes, P.M., Erlenkeuser, H., Laj, C., Mazaud, A., Nadeau, M.-J. and Schleicher, M. (1998) Correlation of marine ^{14}C ages from the Nordic seas with the GISP2 isotope record: Implications for ^{14}C calibration beyond 25 ka BP. *Radiocarbon*, **40**, 517–534.
- Watkins, N.D. (1968) Short geomagnetic polarity events in deep-sea sedimentary cores. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **4**, 341–349.
- Weeks, R.J., Laj, C., Endignoux, L., Mazaud, A., Lebre, L., Roberts, A.P., Kissel, C. and Blanchard, E. (1995) Normalised natural remanent magnetisation intensity during the last 240,000 years in piston cores from the central North Atlantic Ocean: Geomagnetic field intensity or environmental signal? *Phys. Earth Planet. Inter.*, **87**, 213–229.
- Westgate, J., Walter, R.C., Pearce, G.W. and Gorton, M.P. (1985) Distribution, stratigraphy, petrochemistry, and paleomagnetism of the late Pleistocene Old Crow tephra in Alaska and the Yukon. *Can. J. Earth Sci.*, **22**, 893–906.
- Westgate, J.A., Stemper, B.A. and Pewe, T.L. (1990) A 3 m.y. record of Pliocene-Pleistocene loess in interior Alaska. *Geology*, **18**, 858–861.
- Wilson, D.S. and Hey, R.N. (1981) The Galapagos axial magnetic anomaly: Evidence for the Emperor event within the Brunhes and for a two-layer magnetic source. *Geophys. Res. Lett.*, **8**, 1051–1054.
- Wollin, G., Ericson, D.B., Ryan, W.B.F. and Foster, J.H. (1971) Magnetism of the Earth and climatic changes. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **12**, 175–183.
- Worm, H.-U. (1997) A link between geomagnetic reversals and events and glaciations. *Earth Planet.*

- Sci. Lett.*, **147**, 55–67.
- Yamazaki, T. and Ioka, N. (1994) Long-term secular variation of the geomagnetic field during the last 200 kyr recorded in sediment cores from the western equatorial Pacific. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **128**, 527–544.
- Yamazaki, T. and Oda, H. (2002) Orbital influence on Earth's magnetic field: 100,000-year periodicity in inclination. *Science*, **295**, 2435–2438.
- Yaskawa, N., Nakajima, T., Kawai, N., Torii, M., Natsuhara, N. and Horie, S. (1973) Paleomagnetism of a core from Lake Biwa (I). *J. Geomagn. Geoelect.*, **25**, 447–474.
- Zanella, E. and Laurenzi, M. (1998) Evidence for the Blake event in volcanic rocks from Lipari (Aeolian Archipelago). *Geophys. J. Int.*, **132**, 149–158.
- Zhu, R.X., Gu Z.Y., Huang, B.C., Jin, Z.X., Wei, X.F. and Li, C.J. (1994a) Geomagnetic secular variations and climatic changes since 15,000 a B.P., Beijing region. *Sci. China, Ser. B*, **37**, 984–990.
- Zhu, R.X., Zhou, L.P., Laj, C., Mazaud, A. and Ding, Z.L. (1994b) The Blake geomagnetic polarity episode recorded in Chinese loess. *Geophys. Res. Lett.*, **21**, 697–700.
- Zhu, R.X., Coe, R.S. and Zhao, X.X. (1998a) Sedimentary record of two geomagnetic excursions within the last 15000 years in Beijing, China. *J. Geophys. Res.*, **103**, 30323–30333.
- Zhu, R., Coe, R.S., Guo, B., Anderson, R. and Zhao, X. (1998b) Inconsistent palaeomagnetic recording of the Blake event in Chinese loess related to sedimentary environment. *Geophys. J. Int.*, **134**, 867–875.
- Zhu, R., Pan, Y. and Liu, Q. (1999) Geomagnetic excursions recorded in Chinese loess in the last 70,000 years. *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 505–508.
- Zhu, R.X., Guo, B., Pan, Y.X., Liu, Q.S., Zeman, A. and Suchy, V. (2000a) Reliability of geomagnetic secular variations recorded in a loess section at Lingtai, north-central China. *Science in China, Ser. D*, **43**, 1–9.
- Zhu, R., Pan, Y. and Coe, R.S. (2000b) Paleointensity studies of a lava succession from Jilin Province, northeastern China: Evidence for the Blake event. *J. Geophys. Res.*, **105**, 8305–8317.

(2004年12月10日受付, 2005年1月25日受理)