

堆積物中の磁性鉱物と環境変動

井岡 昇¹⁾・山崎 俊嗣²⁾

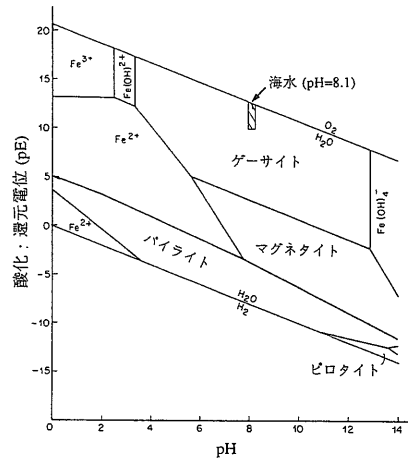
1. はじめに

堆積物に含まれる微細な磁性鉱物は、他の堆積粒子と同様に堆積物の起源や堆積環境を反映している。近年、堆積物に含まれる磁性鉱物の種類、量、粒径などの岩石磁気学的性質から古環境を研究する“Environmental Magnetism” (Thompson and Oldfield, 1986等)と呼ばれる分野が発展しつつある。その適用範囲は地質試料ばかりでなく、磁性鉱物をトレーサーとして、工場煤煙や排水の広がりへの評価といったことにまで及んでいる。

本稿では、自然環境研究における古環境解析手段の一つとして、最近注目されつつある帯磁率をはじめとする岩石磁気学的特徴を用いて、堆積物の形成と古気候変化の関係等の古環境を推定する試みについて紹介する。

2. 岩石磁気学的背景

海底堆積物、特に本稿で扱うような半遠洋性～遠洋性の堆積物に含まれる磁性鉱物としては、(チタノ)マグネタイト(磁鉄鉱, Fe_3O_4)又はそれが低温酸化したマグヘマイイト(磁赤鉄鉱, $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$)が一般的である。特に酸化的な環境ではヘマタイト(赤鉄鉱, Fe_2O_3)やゲーサイト(針鉄鉱, $\alpha\text{-FeOOH}$)の寄与も重要となる。堆積速度が著しく大きく、かつ有機物含有量の多い強還元的な堆積物では、磁性鉱物としてピロタイト(磁硫鉄鉱, Fe_{1-x}S)やグレイジャイト(Fe_3S_4)のような硫化鉱物が重要となる。Fe-S-H₂O系の磁性鉱物の酸化・還元電位とpHによる化学的安定領域の例を第1図に示す。堆積物に含まれる磁性鉱物の種類は、熱磁気分析(キュリ



第1図 Fe-S-H₂O系磁性鉱物の酸化・還元電位とpHによる化学的安定領域(Henshaw & Merrill, 1980)。

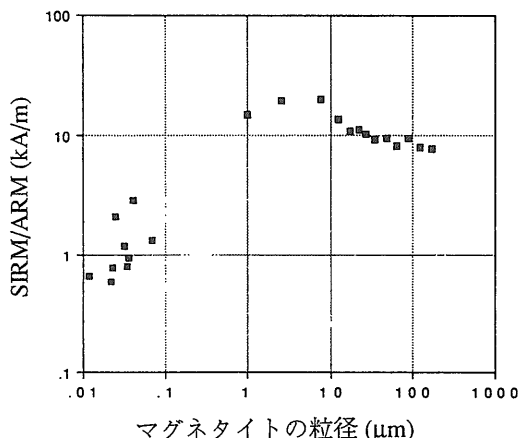
ー温度)や等温残留磁化獲得実験などから推定することができる。

帯磁率(又は磁化率)(χ)は、印加磁場(H)により誘導される磁化(J)の係数($J=\chi H$)である。近年、高精度かつ安価な帯磁率計が開発され、迅速かつ容易に測定できるようになった。また、ループ型のセンサーを用いることによりコアのままでも測定可能なことから、深海掘削計画(ODP)をはじめ海底堆積物コアにおいて広く帯磁率測定が行なわれるようになった。堆積物の帯磁率は、含まれる磁性鉱物の種類および含有量により変化する。さらに、磁性鉱物の粒径にも依存し、例えば微小な超常磁性粒子(磁性鉱物がマグネタイトの場合、粒径約0.03 μm 以下)では帯磁率は大きくなる。帯磁率と他の岩石磁気パラメータの組み合わせにより、磁性鉱物の粒径変化を容易に知ることができる。一例として、非

1) 関西総合環境センター 海洋炭素研究プロジェクト室：
〒530 大阪市北区中崎西2-3-39

2) 地質調査所 海洋地質部

キーワード：磁性鉱物, 岩石磁気学, Environmental Magnetism, 帯磁率, 古気候変化



第2図 非履歴性残留磁化(ARM)と飽和等温残留磁化(SIRM)の比とマグネタイトの粒径の関係 (Bloemendal et al., 1993).

履歴性残留磁化(ARM)と飽和等温残留磁化(SIRM)の比とマグネタイトの粒径の関係を第2図に示す。

海底堆積物に含まれる磁性鉱物の起源としては、河川や海流によって運ばれる陸源性粒子、乾燥地域から大気中を運搬される風成粒子(エオリアンダスト)、海底熱水活動起源の粒子、堆積物表層で走磁性細菌等の生物によって作られる生物起源粒子、続成作用の過程で生成する自生鉱物がある。それらについて、磁性鉱物の組成、粒径分布、結晶形態等の特徴から推定することが試みられている。特に、生物起源マグネタイトは自形性の高い八面体や涙滴状等の形をした特徴的な形態から識別可能であり(写真1)、海底堆積物の残留磁化の担い手としての重要性が最近注目されている。

3. 古気候変化と堆積物

第四紀は、氷期—間氷期の繰り返す特徴的な気候変化を示す。気候変動は、大気循環や降水量、生物生産や海洋底層水の化学的性質の変化等の様々な環境変化をもたらす。その変遷は、海洋や陸上の堆積物に様々な形で記録されている。最近では、酸素同位体層序、微化石や地球化学的手法により、古環境の解析が進められている。また、第四紀気候変動やそれに至る過程が、帯磁率をはじめとする岩石磁気学的特徴にも認められている。

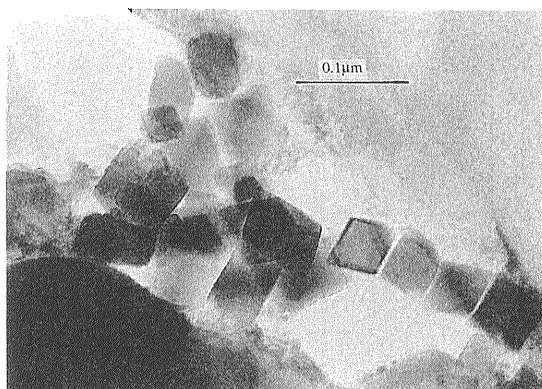


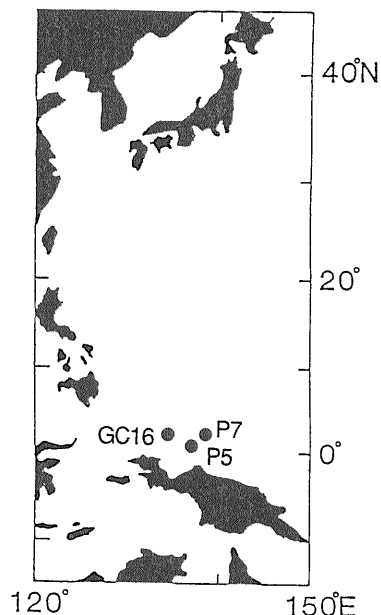
写真1 走磁性バクテリアにより作られたマグネタイトの例(Yamazaki et al., 1991)。自形性の高い八面体の特徴的な形態が明瞭に認められる。

3.1 希釈効果による帯磁率変化

(a) 太平洋・西カロリン海盆

西部赤道太平洋の西カロリン海盆より採取された堆積物コアからは、古気候変化を示す SPECMAP の酸素同位体比カーブ(Imbrie et al., 1984)に酷似した帯磁率変化を見いだした(井岡・山崎, 1992)。両者の間に時間的ずれはほとんどなく、帯磁率の小さい部分は氷期、大きい部分は間氷期に対応している(第3図)。その変化は乾燥密度と相関関係にあるが、氷期と間氷期ではその比例係数が異なっており、間氷期で比例係数が大きい。つまり、乾燥密度の変化だけでは帯磁率変化を説明できない。磁性鉱物の供給量を間接的に示す単位時間・単位面積あたりの帯磁率(帯磁率フラックス: 帯磁率に堆積速度を乗じることによって求められる)は、氷期—間氷期の差が小さくなることから、古気候変化にあまり影響されない。一方、堆積物の石灰質成分含有量は、氷期—間氷期変化に伴って変化し、帯磁率変化と逆相関的である。

これらのことから、この帯磁率変化は、大局的には古気候変化に伴った堆積物の生物起源粒子(石灰質成分)含有量の変化、すなわち希釈効果により生じていると考えられる。また、陸源粒子供給量を反映していると考えられる花粉化石含有量の変化とも逆相関的な傾向を示し、陸源粒子も希釈側に働いているようである(西村ほか, 1993)。さらに、磁性鉱物の粒径変化は、堆積物の色及び生物擾乱より判断した堆積物の酸化・還元環境と密接に関連して変化している(井岡・山崎, 1992)。これらは、古気



第3図a
西カロリン海盆
の調査測点(井岡
・山崎, 1992).

候変化に伴う一連の現象と考えられる。

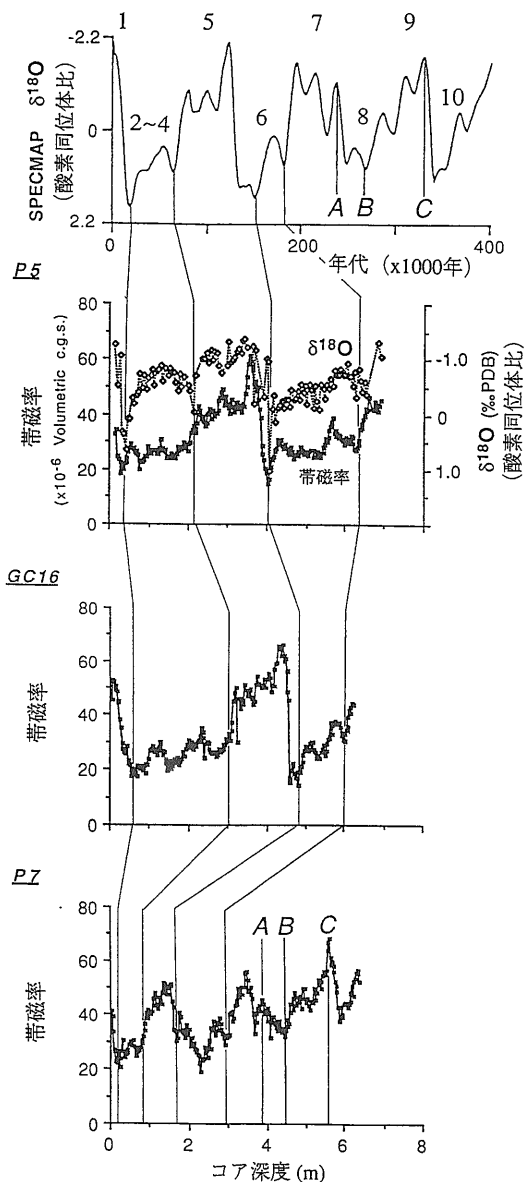
(b) インド洋南部

希釈効果に起因する酸素同位体比カーブと相関する帯磁率変化は、インド洋南部の堆積物コアでも報告されている(Kent, 1982)。その変化は、石灰質成分含有量の少ない氷期に帯磁率が大きく、石灰質成分含有量の多い間氷期に帯磁率が小さくなっている。氷期・間氷期における石灰質成分の生産量またはその堆積物への保存が、先に述べた太平洋とインド洋南部で逆のセンスになっている。

(c) 大西洋

Robinson(1986)は、北大西洋(北緯41~43度, 西経20~23.5度)で採取した堆積物コアの帯磁率等の測定を行い、それらの変化が岩相と調和的な変化を示すことを発見した。この変化は、氷期にはポーラー・フロントがコア採取地点の3度北にまで南下したことに伴って、コリスによる石灰質成分の生産量が減少かつ氷河性碎屑物の供給が増加することによって磁性鉱物の含有量が多くなり、反対に間氷期にはポーラー・フロントの後退に伴って、石灰質成分生産量の増加かつ氷河性碎屑物の供給量が減少することによって磁性鉱物の含有量が少なくなることを示すと説明している。

一方, Bloemendal et al.(1988)は、東部赤道大西洋から採取された堆積物コアの岩石磁気学的特徴



第3図b 西カロリン海盆堆積物の帯磁率・酸素同位体比と古気候変化を示す SPECMAP の酸素同位体比カーブ(Imbrie et al., 1984)の関係(井岡・山崎, 1992)。SPECMAP の酸素同位体比カーブ中の数字は酸素同位体ステージで、奇数は間氷期, 偶数は氷期を示す。SPECMAP の酸素同位体比カーブ中の A, B, C は, P7 の A, B, C と対応する。

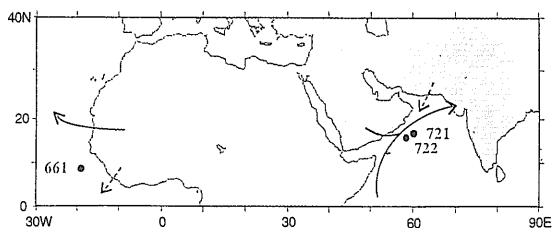
と、石灰質成分含有量及び SPECMAP の酸素同位体比カーブ(Imbrie et al., 1984)との間に強い相関関係があることを見いだした。この帯磁率変化は、非石灰質成分の含有量と正相関的で、石灰質成分含

有量と逆相関の関係にあり、石灰質成分による希釈効果により生じると説明している。さらに、氷期—間氷期の岩石磁気学的特徴は異なっており、氷期は磁性鉱物の高い濃集(堆積量)、粗い磁性鉱物の粒径、異なる磁性鉱物種の比率が低いことで特徴付けられ、氷期と間氷期で堆積粒子の起源や供給量が異なっていることを示唆している。

3.2 モンスーンと磁性鉱物の運搬：インド洋・アラビア海における研究

Bloemendal & deMenocal (1989)及び deMenocal et al. (1991)は、深海掘削計画によるインド洋北部・アラビア海の掘削コアにおける3.2 Ma(Ma:百万年前)から現在にわたる顕著な帯磁率変化を報告した。その変化は、地球の気候変動の大きな要因となっているミランコビッチ周期を持っている(第4図: Site 721)。この帯磁率は陸源粒子供給量と正相関の関係にある。陸源粒子および生物源粒子の供給量の変動との比較から、この帯磁率変化は生物源粒子による希釈効果ではなく、陸源粒子の供給量変化によって生じていると考えられている。この海域の陸源粒子は主にエオリアンダスト起源と考えられている。その供給量は、起源地域の乾燥の程度を反映する。従って、氷期にはアジアのエオリアンダストの起源地域の乾燥化に伴い磁性鉱物を含むエオリアンダストの運搬量が増加し、間氷期にはその逆の現象が生じると結論している。また、この帯磁率変化の周期は、2.4 Maを境に、いわゆるミランコビッチ周期のうち、北(南)半球の夏の日射量に影響する歳差運動(Precession)の変化周期(約1万9千年と約2万3千年)から、季節較差に影響の大きい地軸の傾き(Oblquity)の変化周期(約4万1千年)が次第に優勢になってくる。この2.4 Maという時期には、北半球氷床の発達に伴って、アジアのエオリアンダストの起源地域が乾燥化し、アジアのモンスーン気候が急速に形成されたことが知られている。帯磁率変化の卓越周期の変化は、これと関連していると考えられている。また、同様の帯磁率変化及び卓越周期の変化は、東部赤道大西洋(Site 661)でも認められている(第4図)(Bloemendal & deMenocal, 1989)。2.4 Maの北半球氷床の発達の成因については諸説あるが、その一例を挙げておくと、Ruddiman & Raymo (1988)では、約2.4 Maからヒマラヤ・チベットが急速に高地化したことにより、

1994年3月号



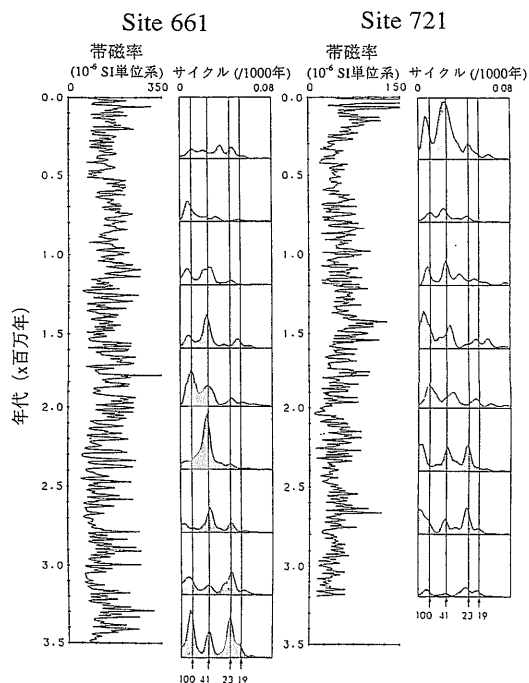
第4図a アラビア海と東部赤道大西洋の調査測点 (Bloemendal & deMenocal, 1989)。

北半球の気候循環の様式が変わったことに起因するとしている。

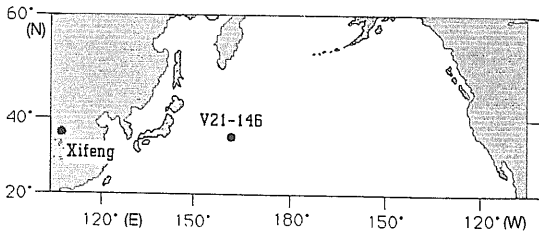
3.3 黄土(Loess)の岩石磁気

北太平洋の遠洋性堆積物は、主にエオリアンダストが堆積したと考えられている。それらに記録された環境変遷は、黄土地域の環境変化と密接な関連を持っている(Hovan et al., 1989)(第5図)。

黄土地域では、約2.5 Maから現在にわたって粒度の比較的粗い黄土と細かい古土壌(Paleosol)が交互に堆積した互層を形成しており、その形成に古気候変化が強く影響していたことは広く知られている。



第4図b アラビア海(Site 721)と東部赤道大西洋(Site 661)の帯磁率変化とその変化周期(Bloemendal & deMenocal, 1989)。Site 661と Site 721のサイクルのコラム下の数字は、ミランコビッチ周期を示す(単位は千年)。



第5図a 北太平洋の調査測点と黄土地域の位置関係 (Hovan et al., 1989).

る。この互層は、風化を受けにくい氷期の乾燥環境下に黄土、植物や水による風化を受けやすい間氷期の温暖湿润環境下に古土壌が堆積し、繰り返す氷期-間氷期変化に伴って形成された。帯磁率は、黄土で小さく、古土壌で大きい。その時間的変遷は、酸素同位体比カーブと対応する(第5図)。

Kukla et al. (1988)はこの帯磁率変化を古気候変化に伴うエオリアンダスト供給量の変化と説明したが、Kukla & An (1989)は古気候変化に伴う土壌化の程度の変化によって起こる磁性鉱物の濃集度の変化と説明した。一方、Heller et al. (1991)は、相対的に温暖(湿润)な環境下では、土壌化により帯磁率の大きい超常磁性粒子が生成されることによると説明している。さらに、福間・鳥居(1993)は、土壌化により、氷期には帯磁率の小さいゲーサイト、間氷期には帯磁率の大きいマグヘマイトが生成し、磁性鉱物の種構成が変わるためとしている。

このように、黄土地域の古気候変化を反映する帯磁率変化の成因は、幾つかのメカニズムが提案されており、磁性鉱物の含有量ばかりでなく、その粒度や種類も古気候変化に密接に関連して変化している

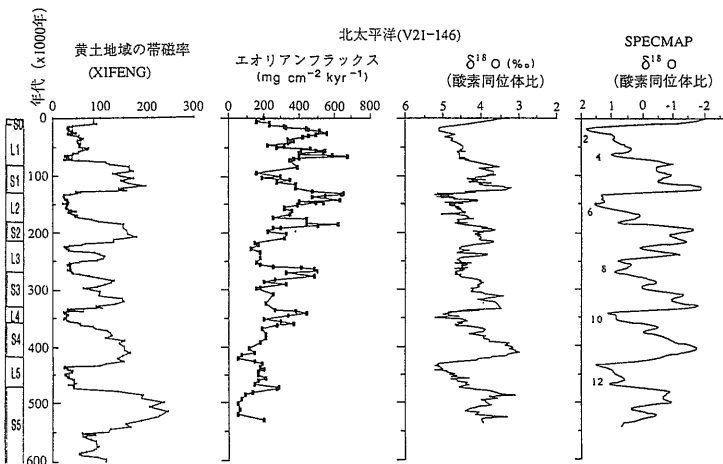
のであろう。また、Heller et al. (1993)では、自生の磁性鉱物の形成が降水量と相関していることから、過去13万年間の主な層準形成時の平均降水量の概算がなされるなど、黄土地域の古気候に関連する古環境のさらに詳細な定量的復元も試みられている。

4. おわりに

以上のような堆積物の岩石磁気学的特徴の変化を簡単にまとめてみると、次の様になる。

西カロリン海盆やインド洋南部の帯磁率変化は石灰質成分等の磁性鉱物以外の粒子による希釈効果で説明されるが、氷期-間氷期サイクルに対する両海域間のセンスは逆になっている。このことは、氷期-間氷期変化に伴う海洋表層での生物生産量または底層水の化学的性質等の海底環境の変化が、海域によって異なっていることを示す。また、アラビア海や大西洋の様に、帯磁率や他の岩石磁気学的特徴が磁性鉱物の運搬量やその経路・起源を反映する場合もある。これらは、モンスーンによる起源地域の乾燥化やその変遷、ポーラー・フロントの移動といった気候変化に伴う大気循環や気候帯の変遷を反映している。さらに、黄土地域に見られる様な磁性鉱物の種類や粒度が土壌化の程度で異なる場合もある。これには、古気候変化に伴った降水量変化が大きな役割を果たしている。

この様な帯磁率や岩石磁気学的特徴は、古気候変化やそれに関連する現象等の古環境の変遷を記録したものである。磁性鉱物はほとんどの堆積物に例外



第5図b 黄土地域の層序・帯磁率(Kukla et al., 1988)と北太平洋のコアに見られる古気候変化の記録(Hovan et al., 1989)の比較。一番左のコラムは黄土地域の層序で、Sは古土壌、Lは黄土を示す。SPECMAPの酸素同位体比カーブ中の数字は酸素同位体ステージを示す。北太平洋のエオリアン・フラックス(エオリアンダスト供給量)は氷期に多い傾向を示し、黄土地域の帯磁率変化と同様に古気候変化に大きく影響されている。

なく含まれているため、その岩石磁気学的特徴から古環境変遷を読み取れる可能性がある。本稿で述べた様な、堆積物の岩石磁気学的特徴を用いて古環境を推定する“Environmental Magnetism”は、古環境解析に非常に有効な方法の一つといえる。

謝辞：地質調査所海洋地質部・西村 昭博士、同・川幡穂高博士には、本原稿を読んでいただき、議論していただいた。お礼申し上げます。

引用文献

- Bloemendal, J. and deMenocal, P. (1989) : Evidence for a change in the periodicity of tropical climate cycles at 2.4 Myr from whole-core magnetic susceptibility measurement. *Nature*, **342**, 897-900.
- Bloemendal, J., King, J., Hunt, A., deMenocal, P. B. and Hayashida, A. (1993) : Origin of sedimentary magnetic record at Ocean Drilling Program sites on the Owen Ridge, Western Arabian Sea. *J. Geophys. Res.*, **98**, no. B3, 4199-4219.
- Bloemendal, J., Lamb, B. and King, J. (1988) : Paleoenvironmental implications of rock-magnetic properties of late Quaternary sediment cores from the eastern equatorial Atlantic. *Paleoceanography*, **3**, 61-87.
- deMenocal, P., Bloemendal, J. and King, J. (1991) : A rock-magnetic record of monsoonal dust deposition to the Arabian Sea: Evidence for a shift in the mode of deposition at 2.4 Ma. In Prell, W.L., Niitsuma, N. et al., *Proc. ODP, Sci. Results*, **117**, College Station, TX (Ocean Drilling Program), 389-407.
- 福岡浩司・鳥居雅之 (1993) : 古気候が支配する黄土中の磁性鉱物の変化。第94回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会講演予稿集, C12-P1-07
- Heller, F., Liu, X., Liu, T. and Xu, T. (1991) : Magnetic susceptibility of loess in China. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **103**, 301-310.
- Heller, F., Shen, C. D., Beer, J., Liu, X. M., Liu, T. S., Bronger, A., Suter, M. and Bonani, G. (1993) : Quantitative estimates of pedogenic ferromagnetic mineral formation in Chinese loess and palaeoclimatic implications. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **114**, 385-390.
- Henshaw, Jr., P. C. and Merrill, R. T. (1980) : Magnetic and chemical changes in marine sediments. *Rev. Geophys. Space Phys.*, **18**, 483-504.
- Hovan, S. A., Rea, D. A., Pisias, N. G. and Shackleton, N. J. (1989) : A direct link between the China loess and marine $\delta^{18}\text{O}$ records: aeolian flux to the north Pacific. *Nature*, **340**, 296-298
- 井岡 昇・山崎俊嗣(1992) : 古気候変化を反映する帯磁率及び磁性鉱物粒径の変化：西部赤道太平洋，西カロリン海盆の後期更新世堆積物コアにおける研究。地調月報, **43**, 781-797
- Imbrie, J., Hays, J. D., Martinson, D. G., McIntyre, A., Mix, A. C., Morley, J. J., Pisias, N. G., Prell, W. L. and Shackleton, N. J. (1984) : The orbital theory of Pleistocene climate: Support from a revised chronology of the marine $\delta^{18}\text{O}$ record. In *Milankovitch and Climate, Part 1*, edited by A. L. Berger et al., D. Reidel Pub. Co., Dordrecht, 269-305.
- Kent, D. V. (1982) : Apparent correlation of palaeomagnetic intensity and climatic records in deep-sea sediments. *Nature*, **299**, 538-539.
- Kukla, G., Heller, F., Liu, X. M., Xu, T. C., Liu, T. S. and An, Z. S. (1988) : Pliocene climates in China dated by magnetic susceptibility. *Geology*, **16**, 811-814.
- Kukla, G. and An, Z. S. (1989) : Loess stratigraphy in central China. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, **72**, 203-225
- 西村 昭・池原 研・井岡 昇・山崎俊嗣(1993) : 西カロリン海盆の堆積史と海洋大循環。月刊海洋, **25**, 350-355
- Robinson, S. G. (1986) : The Late Pleistocene palaeoclimatic record of North Atlantic deep-sea sediments revealed by mineral-magnetic measurements. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **42**, 22-47
- Ruddiman, W. F. and Raymo, M. E. (1988) : Northern Hemisphere climate regimes during the past 3 Ma: possible tectonic connections. In *The past three million years*, edited by N. J. Shackleton et al., Phil. Trans. R. Soc. Lond., **B 318**, 411-430
- Thompson, R. and Oldfield, F. (1986) : *Environmental magnetism*. Allen & Unwin, London, 227pp.
- Yamazaki, T., Katsura, I. and Marumo, K. (1991) : Origin of stable remanent magnetization of siliceous sediments in the central equatorial Pacific. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **105**, 81-93.

IOKA Noboru and YAMAZAKI Toshitsugu (1994) : Magnetic properties of sediments and paleoenvironmental changes.

〈受付：1993年11月30日〉