

海底堆積物から明らかになった古地磁気強度変動像

地球システムの変動の一部としての視点

山崎 俊 嗣*

Geomagnetic Paleointensity Fluctuation Revealed from Marine Sediment Cores: A Perspective as the Part of Earth System

Toshitsugu YAMAZAKI *

Abstract

Geomagnetic paleointensity variations can continuously be estimated using marine sediment cores having relatively uniform magnetic properties. The occurrence of large paleointensity fluctuations with periods on the order of 10^3 to 10^4 years has been recently established. The ages of paleointensity lows often correspond to those of geomagnetic excursions that have been reported so far. These results have changed our view of the geomagnetic field: it is rather unstable even within periods of constant polarity. Arguments have begun based on paleointensity records as to whether the Earth's orbital parameters and/or paleoclimate modulates the geomagnetic field. Discoveries of the Milankovitch orbital frequencies in paleomagnetic records have been reported, whereas some researchers have postulated that such frequencies are artifact caused by magnetic-property changes in sediments induced by paleoclimatic changes. It is necessary to evaluate the effect of magnetic property changes with a detailed comparison between paleointensity and magnetic properties using sediments that responded differently to paleoclimate changes: for example, between sediments with a magnetic grain-size increase in glacial periods and those with a grain-size decrease during the same period of time. The geomagnetic field produces a shielding effect in the influx of high-energy galactic cosmic rays, and a change in field intensity causes a corresponding change in the production rate of cosmogenic radionuclides. The major part of the variations in the atmospheric $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratio during the past 50 kyrs is explained by the paleointensity changes. Studies on high-resolution paleointensity estimation are hence useful for calibration of radiocarbon timescales and a better understanding of global carbon-cycle changes. Recently, a relationship among Solar activity, influx of cosmic-rays, and climatic changes in the order of 10^1 to 10^2 years has been discussed intensively. The geomagnetic field might have modulated climatic changes over a longer timescale because its large fluctuation in the order of 10^3 to 10^4 years should have caused significant variations in the influx of cosmic rays.

* 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

Key words : geomagnetic field, paleointensity, marine sediments, paleoclimate, orbital modulation, cosmic ray, radiocarbon age

キーワード : 地磁気, 古地磁気強度, 海底堆積物, 気候変動, 地球軌道要素, 宇宙線, 放射性炭素年代

I. はじめに

地磁気には永年変動として知られるゆらぎが絶えず起きていて、過去1万年間程度の永年変動は、湖沼堆積物や考古学試料を用いた古地磁気研究から明らかになっていた。一方、地磁気逆転という劇的な現象が数十万年に1回程度の割合で起きてきたことが1960年代に明らかとなり、地磁気極性タイムスケールが作られ、古地磁気極性層序は地質年代決定手法として広く用いられてきた。しかし、その間の数万年オーダーの地磁気変動の実態は最近まで不明であった。非逆転時の地磁気変動は過去1万年間の永年変動の延長としてイメージされることも多かった。正磁極期と逆磁極期を示す黒と白で塗られた地磁気極性タイムスケールからは、地磁気逆転時以外の極性一定の間は地磁気は安定したものという印象を受ける人も多いであろう。地磁気は方位と強度からなるベクトルであるが、従来の古地磁気層序は方位（極性）のみを対象としていた。地磁気永年変動についても、方位についてのみ議論されることが多かった。これは、古地磁気方位が強度よりもはるかに容易かつ高い精度で求められるためである。古地磁気方位は、テクトニクス研究へも広く応用されてきた。

本総説では、近年急速に進歩した、海底堆積物を用いた数千年～数万年オーダーの古地磁気強度（paleointensity）変動の研究を紹介する。地磁気は非逆転時にも大きな変動を繰り返してきたことが明らかとなり、古地磁気変動のイメージが大きく変わった。地球の外核における流体運動で生成・維持されている地磁気は、磁気圏として宇宙空間にまで広がっていて、その変動は地球システム全体の中でとらえる必要がある。その一つとして、地磁気変動と気候変動のリンクの可能性に関

する最近の議論についても紹介する。

II. 堆積物を用いた古地磁気強度の復元

1) 手法

過去の地磁気変動を求めるための材料は、火山岩と堆積物に大別される。火山岩からは、古地磁気強度の絶対値を求めることができる。これは、火山岩の初生的残留磁化を担う熱残留磁化（TRM）の獲得機構がすでに解明されていて、実験室で再現できることによる。しかし、火山岩に記録される古地磁気は、溶岩が固結する時の地質学的には瞬間的な値であり、時間軸上では離散値である。過去数万年間以前では、地磁気変動の波長に比べて火山岩の年代決定の誤差が大きくなってしまい、連続的に地磁気変動を求めるのは不可能である。一方、堆積物の最大の特徴は、時間的に連続して過去の地磁気変動を記録している可能性があることである。しかし、堆積物の残留磁化（DRM）の獲得機構については、いまだに不明の点が多く残されていることと、磁化獲得が地質学的時間で起きることから、実験室では再現できず、このため堆積物から古地磁気強度を求めることは不可能であると以前は考えられていた。

堆積物の自然残留磁化（NRM）強度は、当時の地球磁場強度の他、堆積物に含まれる強磁性鉱物の量、粒子サイズ（磁区構造）、種類、磁性鉱物間の相互作用などの磁気的特性に支配され、さらに粘土鉱物など強磁性鉱物以外の物性にも影響されると考えられている。これらの因子が堆積物の磁化獲得能率を決めているが、強磁性鉱物量以外の影響は定量化できていないことが、堆積物から古地磁気強度を求めることを困難にしていた。しかし、磁性鉱物量以外の磁気的特性が変化しない均質な堆積物を用いれば、強磁性鉱物量の変化を補正することにより、相対的な古地磁気強度変

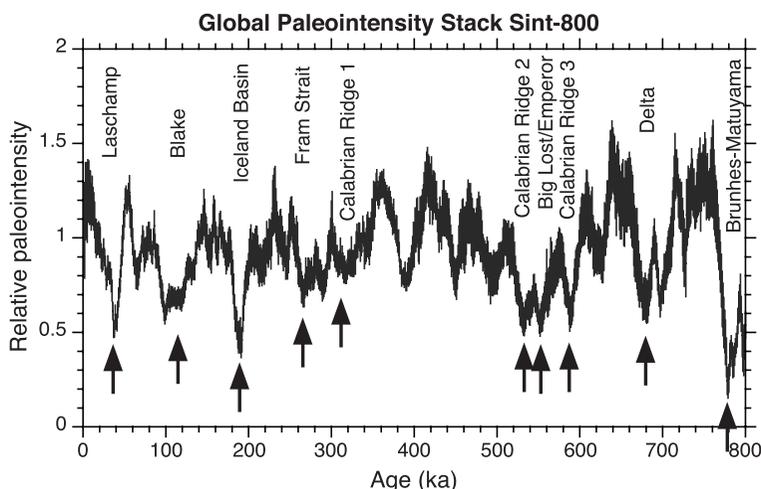


図 1 最大 33 地点の記録のスタックにより得られた過去 80 万年間の古地磁気強度変動曲線 Sint-800 および、強度極小と報告されている地磁気エクスカージョンとの対応。Guyodo and Valet (1999) をもとに一部改変。

Fig. 1 Relative paleointensity variations during the last 800 kyrs (Sint-800) derived from stacking a maximum of 33 sedimentary records, and correspondence of paleointensity lows to geomagnetic excursions reported. Partly modified from Guyodo and Valet (1999).

化を堆積物から求められると考えられる。磁性鉱物量の変動による磁化獲得能の変動を除く（規格化する）ために、実験室で着磁させた人工的残留磁化（等温残留磁化：IRM、非履歴性残留磁化：ARM）を用い、NRM/ARM または NRM/IRM を相対的古地磁気強度とする。IRM または ARM は、磁性鉱物粒径等の磁気的特性変化に伴う堆積物の磁化獲得能率の変化もある程度反映するので、完全に均質な堆積物でなくとも磁気的特性の変化が小さければ、古地磁気強度の変化を推定できる。磁気特性の均質性、つまり磁性鉱物粒径や鉱物種の変化の程度は、種々の岩石磁気パラメータから推定できる（本号鳥居論文を参照：鳥居, 2005）。堆積物から相対古地磁気強度を求めることに関する詳しいレビューは、Tauxe (1993) を参照されたい。

2) 過去 300 万年間の古地磁気強度変動

90 年代に入って、磁気的特性の変化の小さい外洋域の海底堆積物コアを用いて、前述の方法により相対的古地磁気強度変動を求める試みが相

次いで発表されるようになった。データが蓄積されるにつれ、世界各地から得られた記録に共通した変動パターンが見られることが明らかとなり、グローバルな古地磁気強度変動を求める手法として確立した。90 年代末には、それまでに得られていた記録をスタッキングすることにより、ブルン期（過去約 80 万年間）について Sint-800 と呼ばれるグローバル変動曲線が完成した（図 1）（Guyodo and Valet, 1999）。これにより、地磁気は現在の数分の 1 から 150% 程度の範囲の大きな変動を、数万年程度の時間スケールで繰り返してきたことが明らかになった。この振幅は最小見積もりと考える必要がある。それは、年代軸の誤差が避けられないために、スタッキングを行うことにより短波長の変動が失われていること及び、この曲線の構築に用いた堆積物コアは外洋域の堆積速度の遅いものが多いため、DRM 獲得機構がもたらすフィルター効果により元々短波長成分が記録されていないことによる。もう一つ重要なことは、古地磁気強度極小の年代が、これまで報告さ

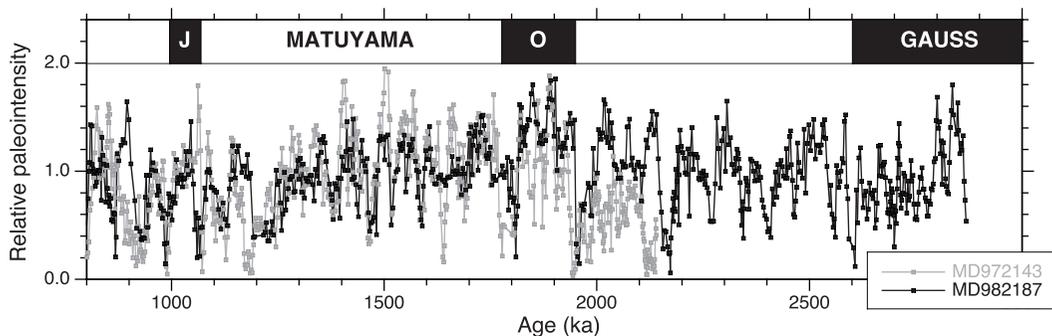


図 2 西部太平洋低緯度域の海底堆積物コアから得られた、過去約 300 万年の相対古地磁気強度変動。MD972143：フィリピン海西部 (Horng *et al.*, 2003), MD982187：西カロリン海盆 (Yamazaki and Oda, submitted)。

Fig. 2 Relative paleointensity variations during the last 3 m.y. obtained from two sediment cores in the low latitudes of the western Pacific.

MD972143: western Philippine Sea (Horng *et al.*, 2003), MD982187: West Caroline Basin (Yamazaki and Oda, submitted)。

れている地磁気エクスカージョンの年代に近いことである (図 1)。地磁気エクスカージョンとは、見かけの地磁気極 (VGP) が北極から大きくはずれる現象で、ブルン期にもいくつも報告されているが (本号小田論文を参照: 小田, 2005)、地質学的には極めて短期間の現象のため、その実態は明らかでない。古地磁気強度極小と地磁気エクスカージョンが対応するとすれば、地磁気強度が小さい時には双極子磁場の強度が小さいため相対的に非双極子磁場の寄与が大きくなり、異常に大きな永年変動を生じてそれがエクスカージョンとして観察されるという可能性が考えられる。エクスカージョンの実態としては、この他に短期間の地磁気逆転や途中で中断された逆転が提案されている。

Sint-800 の確立以降は、より古い年代に遡る努力と、より高解像度の記録を得る努力が続けられている。前者については、標準曲線の構築には至っていないが、過去約 300 万年までの相対古地磁気強度変動記録がいくつか得られている (図 2)。ブルン期に見られた変動と同様の大きな変動が見られることから、ブルン期の変動は特別ではなく、地磁気変動の普遍的な姿であると考えられる。

高分解能化については、まず、北大西洋の堆積速度の大きなドリフト堆積物から得られた記録をスタックして、過去 7 万 5 千年間の古地磁気強度曲線 (NAPIS-75: Laj *et al.*, 2000) が構築された (図 3)。西部赤道太平洋海域や北西太平洋海域においても同様の試みが現在進行中である。Sint-800 と比べてはるかに解像度が向上し、古地磁気強度は短波長大振幅の変動をしてきたことがわかる (図 3)。数千年以下のオーダーの変動では、双極子磁場に起因するグローバルな変動に、非双極子磁場に起因するローカルな変動が重なっていると考えられるため、各地域で構築された変動曲線を比較することにより、グローバルな変動とローカルな変動を区別することが可能になると期待される。

堆積物を用いた古地磁気強度復元の、現状における問題点も指摘しておく。図 2 および図 3 から明らかなように、近接する堆積物コアから得られた記録において、古地磁気強度の極大、極小の繰り返しは互いによく一致しているが、その振幅は必ずしも一致していない。細かい時間スケールでの堆積速度の変化や岩相の変化が、相対古地磁気強度に影響している可能性があり、堆積物の磁気特性、磁化獲得機構のさらに詳しい検討が必要

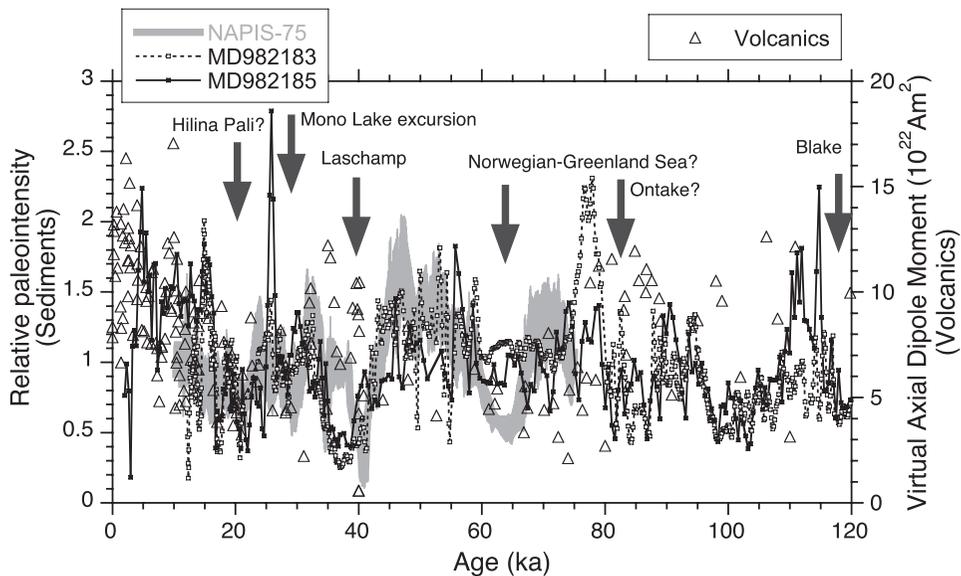


図 3 過去 12 万年間の高解像度古地磁気強度変動および、強度極小と地磁気エクスカージョンとの対応。

存在および年代の確立していない地磁気エクスカージョンも含むことに注意。NAPIS-75: 北大西洋スタック (Laj *et al.*, 2000), MD982183, MD982185: 西カロリン海盆の堆積物コア (Yamazaki and Oda, 2004)。火山岩のデータ (△) は IAGA paleointensity データベース (Perrin and Schnepf, 2004) による。

Fig. 3 High-resolution paleointensity records during the last 120 kyrs, and correspondence of paleointensity lows to geomagnetic excursions.

Note that occurrence and ages for some excursions have not yet been established. NAPIS-75: North Atlantic paleointensity stack (Laj *et al.*, 2000), MD982183, MD982185: sediment cores from the West Caroline Basin (Yamazaki and Oda, 2004). Absolute paleointensity data of volcanic rocks (triangles) are from the IAGA database (Perrin and Schnepf, 2004).

である。

3) 精密年代決定手法としての応用

古地磁気強度変動の標準曲線が構築されたことにより、第四紀の海底堆積物の年代決定手法として広く用いられている酸素同位体比による方法と同様に、標準曲線と対比することにより堆積物コアの高分解能年代決定が可能となった。前述のように古地磁気強度変動カーブの高分解能化が進んでいて、現状でも条件が良ければ、過去 10 万年程度については数千年以下の分解能で年代決定が可能である。これは、従来の古地磁気極性だけを用いた古地磁気層序に対して、「古地磁気強度層序」と呼ぶことができる。地磁気変動はグローバルな現象であるため、グローバルに同時間面を提

供できる点において、極めて重要である。北大西洋で発見された、ダンスガード・エシュガーサイクルとして知られる突然かつ急激な気候変動が現在注目されており、何がトリガーで何が結果であるかを整理するためには、世界各地の堆積物に記録された気候変動の時間的な前後関係を知ることが重要となっているが、古地磁気強度はこれを可能とする (例えば, Stoner *et al.*, 2000)。2004 年秋および 2005 年春には、北大西洋において、古地磁気強度変動を年代決定手法として用いて高分解能で古海洋学研究を行うことを目的として、統合深海掘削計画 (IODP) による掘削航海が実施された。また、北西太平洋のように CCD (炭酸カルシウム補償深度) 以深の大水深の海底が広

がっている海域では、酸素同位体比による年代推定が不可能であるため、古地磁気強度は重要な年代推定手段である。ただし、相対古地磁気強度を求める前提として、磁気特性がかなり均質である堆積物という条件があること、生物生産量が大きい海域の還元的な堆積物では、磁性鉱物の溶解が起きやすいことに注意が必要である。そのため、堆積物の磁気特性の詳細な検討が欠かせない。

III. 地球システムの一部としての古地磁気強度変動

1) 地球軌道要素あるいは気候変動が地磁気変動を引き起こす可能性

地球軌道要素変動あるいは氷期・間氷期変動が地磁気変動と関係している可能性については、以前からアイデアやモデルが出されていた(例えば, Rampino, 1979; 浜野, 1992)(図4)。地磁気ダイナモは核の冷却に伴う重力・熱エネルギーで駆動されていると一般には考えられているが、もし地球軌道要素や気候変動が地磁気変動に影響しているとすれば核外にもエネルギー源があることになり、ダイナモの機構を考える上で極めて重要である。しかし当時は、数万年オーダーの地磁気変動を具体的に議論できるだけの古地磁気データが存在しなかった。

ブロン期の古地磁気強度変動が明らかになるに伴い、地磁気変動にミランコビッチ周期が存在するかどうかについて、90年代末より議論が始まった。古地磁気強度変動記録の時系列解析により、4万年周期(Channell *et al.*, 1998)や10万年周期(Yamazaki, 1999; Yokoyama and Yamazaki, 2000)の存在が主張された。ここで問題になるのは、古地磁気強度変動記録に堆積物の物性変化が引き起こす見かけの変動が含まれていないかどうかである(図5)。古地磁気強度変動の解析に用いる堆積物は、完全に均質な磁気特性であることが理想であるが、堆積物は一般に過去の環境変動を記録していて、均質ではあり得ない。手法で述べたように、現在用いられている ARM または IRM で堆積物の磁化獲得能の違いを規格化する方法では、磁性鉱物粒径等の磁気特性がある程

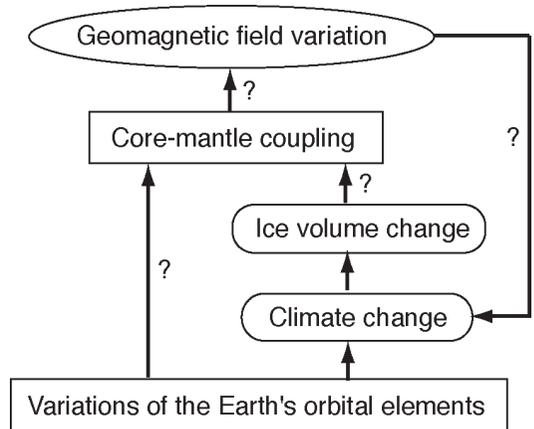


図4 気候変動・地球軌道要素変動と地磁気変動との関連についての概念。
Fig. 4 Possible connections among the geomagnetic field, orbital parameters, and climate.

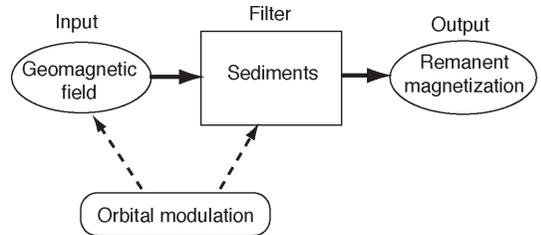


図5 地磁気と堆積物の磁気特性の両方が地球軌道要素の影響を受けていて、残留磁気記録にはそれが重なっている可能性がある。
Fig. 5 Both the geomagnetic field and magnetic properties of sediments may be modulated by orbital parameters, and remanent magnetization may be their composite.

度以上変化するとその影響を規格化できず、相対古地磁気強度に偽の信号として混入する可能性がある。もし地磁気変動にミランコビッチ周期が存在し、堆積物も古気候変動を反映して物性変化にミランコビッチ周期が存在する場合、堆積物に記録された古地磁気強度記録においてこれらを分離することは容易ではない(図5)。つまり、堆積物の物性変化にミランコビッチ周期があるから

といって、古地磁気強度記録に見られるミランコピッチ周期がすべて偽のものということにはならないが、真に地球磁場変動を反映しているという証明も難しい。前述の Channell *et al.* (1998) および Yamazaki (1999) では、堆積物の物性変化によるものではないという根拠として、スペクトル解析において相対古地磁気強度 (NRM/ARM または NRM/IRM) には 4 万年または 10 万年の周期が存在するが、磁化獲得能の規格化に用いたパラメータ (ARM, IRM) には当該周期は存在せず、両者に相関がないことを用いている (図 6)。しかし、Guyodo *et al.* (2000) では、Channell *et al.* (1998) と同じデータセットにウェーブレット解析を適用して、磁性鉱物粒径などの堆積物の磁気特性と相対古地磁気強度の両方に共通してミランコピッチ周期付近にパワーがあることを理由に、古地磁気強度変動におけるミランコピッチ周期は偽物としている。

この問題を解決するためには、根本的には、磁性鉱物粒径や鉱物種等の磁気特性の変動が堆積残留磁化獲得に与える影響を定量的に評価できるように、基礎的な岩石磁気研究を進めなければならない。一方、異なる環境下で形成された堆積物を用いて、岩石磁気特性の変動と相対古地磁気強度変動について相関の有無だけでなく位相を検討することにより、岩石磁気特性の変動の影響を評価する方法も考えられる。古気候変動に対する堆積物の変化はさまざまであって、例えば、大西洋およびインド洋南部と太平洋とは、氷期 間氷期変動に伴う炭酸カルシウム含有量の変動が逆位相であることが知られている (Archer *et al.*, 2000)。磁気特性についても、氷期に磁性鉱物粒径が増加する場合もあれば、逆に減少する場合もあると考えられる。我々は、過去 1000 万年に遡って古地磁気強度変動を復元し、地球軌道要素や気候変動との関連を解明することを目的として、IODP に掘削提案を行っている。堆積物の磁気特性変動の影響を評価するため、グローバルに分布する堆積環境の異なる地点を掘削候補地点として提案している。

地磁気はベクトルであるから、地球軌道要素の

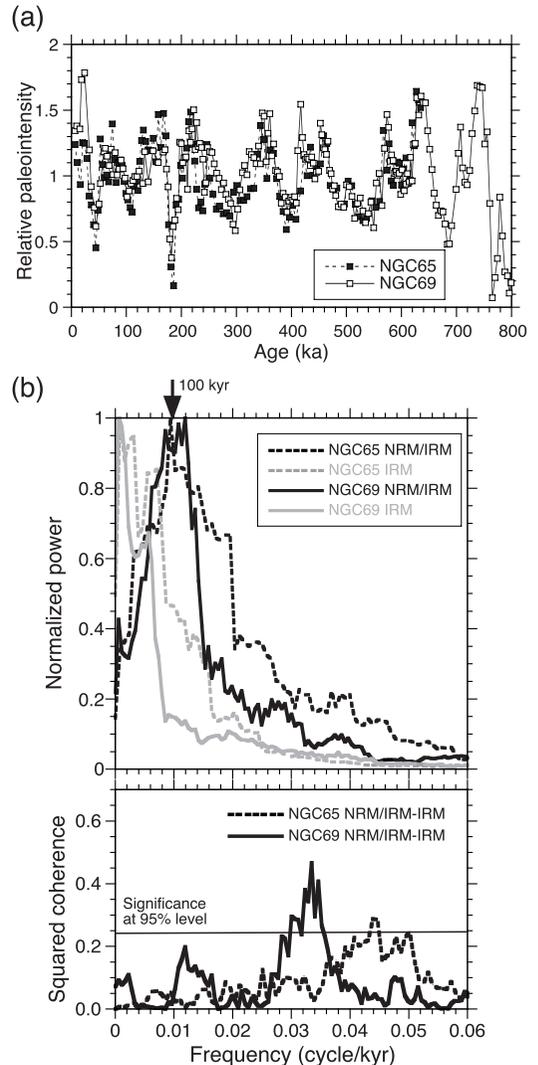


図 6 北太平洋の堆積物コアから得られた古地磁気強度変動記録に見られる 10 万年周期の変動 (Yamazaki, 1999)。
 (a) 2 本のコアの相対古地磁気強度変動記録。
 (b) パワースペクトルと相互相関。古地磁気強度変動 (NRM/IRM) では 10 万年付近にピークが存在するが、堆積物の磁化獲得能の指標である等温残留磁化 (IRM) には存在せず、NRM/IRM と IRM と間に相関がない。

Fig. 6 Paleointensity variations with ~ 100 kyr periodicity obtained from North Pacific sediment cores (Yamazaki, 1999).

(a) Relative paleointensity from two sediment cores.
 (b) Power spectra of NRM/IRM and IRM, and squared coherence of NRM/IRM vs. IRM. These two records show peaks in power spectra at about 100 kyr period for the paleointensity proxy (NRM/IRM), but not for the magnetizability proxy IRM. There is no significant correlation between NRM/IRM and IRM.

影響を受けているとすれば、強度だけでなく方位にもミランコビッチ周期が存在することが期待される。Yamazaki and Oda (2002) は、西部赤道太平洋の堆積物から求めた伏角の長周期永年変動記録にも 10 万年周期が存在することを指摘した。方位は強度に比べて堆積物の磁気特性に影響されにくいという利点があるが、方位の長周期永年変動は振幅が小さく S/N 比が低い。Roberts *et al.* (2003) は、統計的には有意ではないと反論している。これを決着させるためには、まずデータの質を上げ、グローバルにデータを蓄積することが必要である。また、時系列解析では通常、時間軸の誤差はないと扱われるが、地質学的問題には必ず時間軸には誤差がある。従って、現在の時系列解析手法で信頼限界をめぐって細かな議論をしてもそれほど意味があるとは思われず、時間軸の誤差を考慮した解析手法を考案する必要がある。

2) 高エネルギー宇宙線入射を支配する古地磁気強度変動

地球核内で作られる地磁気は、地球をとりまく磁気圏として宇宙空間に広がっていて、高エネルギー銀河宇宙線や太陽風プラズマの入射を妨げるバリアーとして働いている。そのため、地磁気強度が変動すると、高エネルギー宇宙線の入射量が変動する。大気圏に突入した宇宙線は、大気分子と相互作用の結果、 ^{10}Be 、 ^{14}C 、 ^{36}Cl のような宇宙線生成核種を生産する。従って、図 7 のように、地磁気強度が小さくなると宇宙線生成核種の生成率が増加するという関係にある。さらに、太陽の活動が活発で太陽風が強い時は、太陽風が伴う磁場により高エネルギー宇宙線の入射が妨げられるため、太陽活動度と宇宙線生成核種の生成率の間にも、反比例的な関係がある。

過去数万年の年代決定手法として最も広く使われている放射性炭素 (^{14}C) 年代測定法では、 ^{14}C の生成率は変化しない、つまり大気中の $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比は一定と仮定して ^{14}C 年代を求める。 $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ の変動 ($\Delta^{14}\text{C}$ と表す) の影響を除いた暦年代に補正するためには、年輪、年縞、U/Th 年代などの別の手法で求めた年代と ^{14}C 年代との関係を用いる。 ^{14}C 年代と暦年代の差は年代を遡につれ

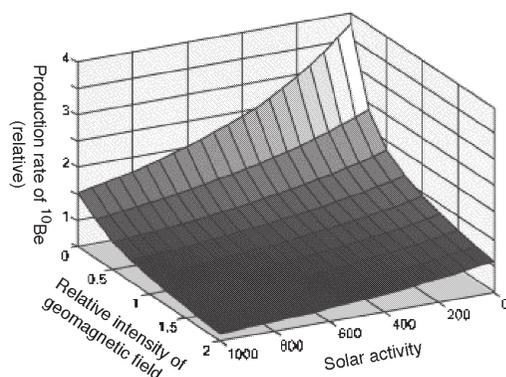


図 7 宇宙線生成核種の一つである ^{10}Be の生成率と、地磁気強度および、太陽活動との関係 (Beer *et al.*, 2002)。

Fig. 7 Relationship among geomagnetic field intensity, production rate of ^{10}Be (one of cosmogenic nuclides), and Solar activity (Beer *et al.*, 2002)

大きくなり、4 万年前では暦年代より ^{14}C 年代の方が 5000 年以上若くなる (図 8)。これは年代を遡につれ ^{14}C の生成率が増加したことを示していて、地磁気強度が約 4 万年前の極小に向かって現在から過去へ小さくなっていること (図 3) と調和的である。過去約 5 万年間の ^{14}C の生成率の変動は、大局的には古地磁気強度変動で説明できる (Hughen *et al.*, 2004)。従って、古地磁気強度変動を高精度・高分解能で求めることは、 ^{14}C 年代の暦年補正の高精度化に役立つ。海洋は炭素のリザーバであるため、 $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ の変動は海洋大循環の変動にも影響されている。古地磁気強度変動に起因する $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ の変動を明らかにすることは、過去の海洋大循環の復元にも役立つ。

近年、太陽の活動度の変動と数十年～数百年スケールの気候変動との関連がさかんに議論されていて (例えば, Rind, 2002; Pap and Fox, 2003), 黒点数の変動から推定される太陽照射強度変動と地表気温とが相関しているという説が提案されている。その説では、黒点がほとんどなかったマウンダー極小期と中世のヨーロッパが寒冷だった時

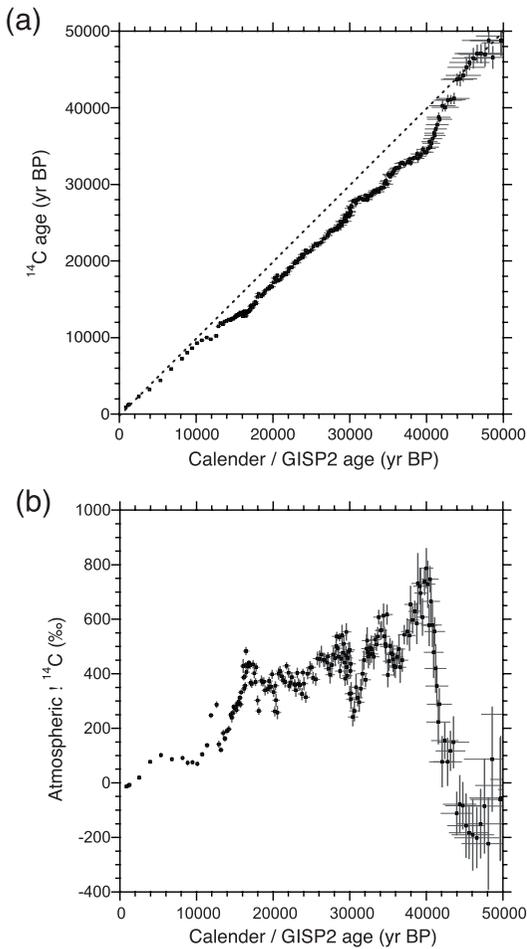


図 8 (a) 放射性炭素 (^{14}C) 年代と暦年代の関係, (b) 大気中の $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比の変動 ($\Delta^{14}\text{C}$) (Hughen *et al.*, 2004)。

図 3 の古地磁気強度変動をほぼ裏返しにしたパターンであることに注意。 $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ の変動の原因は古地磁気強度変動でほぼ説明が可能である。

Fig. 8 (a) Radiocarbon age vs. calendar/GISP2 age, and (b) variations of atmospheric $\Delta^{14}\text{C}$ (an expression of $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ changes) for the past 50 cal. kyBP (Hughen *et al.*, 2004).

Note that the variations of $\Delta^{14}\text{C}$ are similar to the mirror image of the paleointensity variation pattern in Fig. 3. The major part of the $\Delta^{14}\text{C}$ changes can be explained by paleointensity variations.

期と一致することもその一部とされる。そして、過去数十年は太陽活動が活発であることが気温上昇の一因であるとして、人為起源の二酸化炭素放出による地球温暖化の見積もりの議論にも言及している。もしこれが事実とした場合、次に問題になるのがそのメカニズムである。太陽照射強度の変化はマウンダー極小期でも 0.2 ~ 0.3% 程度であり、地表平均気温の変化 (約 0.5 度) を説明するには小さすぎると考えられている。そこで、別のメカニズムとして、太陽活動度が低い時には高エネルギー宇宙線の入射量が増加するので、それが大気分子のイオン化を促進することにより、雲の凝結核が増えて雲量が増加し、結果として気温を低下させる、というアイデアが提案されている (Carslow *et al.*, 2002)。各々のプロセスはまだ定量化されていないが、低高度の雲量と高エネルギー宇宙線入射量、太陽活動度の間に相関があるという観測データも出されている。もしこのメカニズムが働くのであれば、高エネルギー宇宙線入射量と地磁気強度は関係するため、地磁気と気候の間に関連が生じることになる。数十年オーダーでは地磁気の変動は小さいので、太陽活動・高エネルギー宇宙線と気温との関係の議論では無視されているが、数万年のオーダーでは図 3 に示したように大きな変動を繰り返してきたことが明らかになっているため、地磁気変動は重要である。つまり、前節で議論したのとは逆に、地磁気変動が気候変動に影響している可能性がある。

以上に紹介してきたように、古地磁気強度変動は地球システムの色々な部分と相互作用をしている可能性があり、地球惑星科学のさまざまな分野を応用範囲に含む。地磁気変動を地球システム全体の中でとらえることが重要である。

謝辞

河野 長教授には、筆者が海底堆積物を用いた古地磁気強度推定の研究をはじめた時から常に建設的ご意見と激励をいただいた。本稿の内容は、小田啓邦、横山由紀子、金松敏也、山本裕二の各博士をはじめとする多くの方々との共同研究や議論の上に成り立っている。

文 献

- Archer, D., Winguth, A., Lea, D. and Mahowald, N. (2000) What caused the glacial/interglacial atmospheric $p\text{CO}_2$ cycles? *Rev. Geophys.*, **38**, 159–189.
- 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.
- Carslaw, K.S., Harrison, R.G. and Kirkby, J. (2002) Cosmic rays, clouds, and climate. *Science*, **298**, 1732–1737.
- Channell, J.E.T., Hodell, D.A., McManus, J. and Lehman, B. (1998) Orbital modulation of the Earth's magnetic field intensity. *Nature*, **394**, 464–468.
- 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.
- Guyodo, Y., Gaillot, P. and Channell, J.E.T. (2000) Wavelet analysis of relative geomagnetic paleointensity at ODP Site 983. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **184**, 109–123.
- 浜野洋三 (1992) ダイナモを揺るがす氷床. *科学*, **62**, 14–18.
- Horng, C.-H., Roberts, A.P. and Liang, W.-T. (2003) A 2.14-Myr astronomically tuned record of relative geomagnetic paleointensity from the western Philippine Sea. *J. Geophys. Res.*, **108**, doi:10.1029/2001JB001698.
- Hughen, K., Lehman, S., Southon, J., Overpeck, J., Marchal, O., Herring, C. and Turnbell, J. (2004) ^{14}C activity and global carbon cycle changes over the past 50,000 years. *Science*, **303**, 202–207.
- Laj, C., Kissel, C., Mazaud, A., Channell, J.E.T. and Beer, J. (2000) North Atlantic paleointensity stack since 75 ka (NAPIS-75) and the duration of the Laschamp event. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, **358**, 1009–1025.
- 小田啓邦 (2005) 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. *地学雑誌*, **114**, 174–193.
- Pap, J.M. and Fox, P. (2003) *Solar Variability and Its Effect on Climate*. AGU Monograph 141.
- Perrin, M. and Schnepp, M. (2004) IAGA paleointensity database: distribution and quality of the data set. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **147**, 255–267.
- Rampino, M.R. (1979) Possible relationships between changes in global ice volume, geomagnetic excursions, and the eccentricity of the Earth's orbit. *Geology*, **7**, 584–587.
- Rind, D. (2002) The Sun's role in climate variations. *Science*, **296**, 673–677.
- Roberts, A.P., Winklhofer, M., Liang, W.-T. and Horng, C.-S. (2003) Testing the hypothesis of orbital (eccentricity) influence on Earth's magnetic field. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **216**, 187–192.
- Stoner, J.S., Channell, J.E.T., Hillaire-Marcel, C. and Kissel, C. (2000) Geomagnetic paleointensity and environmental record from Labrador Sea core MD95-2024: global marine sediment and ice core chronostratigraphy for the last 110 kyr. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **183**, 161–177.
- Tauxe, L. (1993) Sedimentary records of relative paleointensity of the geomagnetic field: Theory and practice. *Rev. Geophys.*, **31**, 319–354.
- 鳥居雅之 (2005) 環境磁気学 レビュー. *地学雑誌*, **114**, 284–295.
- Yamazaki, T. (1999) Relative paleointensity of the geomagnetic field during Brunhes Chron recorded in North Pacific deep-sea sediment cores: Orbital influence? *Earth Planet. Sci. Lett.*, **169**, 23–35.
- Yamazaki, T. and Oda, H. (2002) Orbital influence on Earth's magnetic field: 100,000-year periodicity in inclination. *Science*, **295**, 2435–2438.
- Yamazaki, T. and Oda, H. (2004) *Intensity-inclination Correlation for Long-term Secular Variation of the Geomagnetic Field and Its Relevance to Persistent Non-dipole Components*. AGU Monograph, 145.
- Yokoyama, Y. and Yamazaki, T. (2000) Geomagnetic paleointensity variation with a 100 kyr quasi-period. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **181**, 7–14.

(2004年12月6日受付, 2005年2月3日受理)