

地球磁場逆転にともなう環境および生物量変化の解析

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2008-01-25 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 新妻, 信明, 藤井, 昇 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.14945/00000240

地球磁場逆転にともなう環境および生物量変化の解析

新妻信明*・藤井 昇*

Analysis on the Changes in the Paleoenvironment
and Biomass during Geomagnetic Reversal
by Means of Oxygen and Carbon Isotope

Nobuaki NIITSUMA* and Noboru FUJII*

Geomagnetic reversal is one of the basic characters of the earth and the reversal have been repeated during geologic time. So we can say that it is a basic problem in the history of the earth what happened during geomagnetic reversal. Because the geomagnetic field is controlling the magnetosphere of the earth, the geomagnetic reversal should affect the paleomagnetosphere. The magnetosphere is controlling the input of the solar particle into the upper atmosphere, specially troposphere and stratosphere. Because the duration of the reversal is thought less than 1000 years, we should use the high resolutional record in time to document what happened on the earth during the geomagnetic reversal. We selected the upper bathyal sediments with higher rate of sedimentation than 3m/ka in Boso Peninsula, central Japan, which is located to the northwest of trench-trench-trench type triple junction. The sediments record the geomagnetic reversal between the Brunhes Normal Geomagnetic Polarity Epoch and the Matuyama Reversed Geomagnetic Polarity Epoch of 0.73Ma. We made analysis of paleomagnetism of sediments, carbon and oxygen isotope of benthic foraminiferal tests, and foraminiferal fauna of the sediments and got the following results:

1) The Brunhes-Matuyama reversal can be located on a small depression in oxygen isotopic ratio curve at the boundary between stage 19 and stage 20 of oxygen isotope stratigraphy (EMILIANI, 1978).

2) The carbon isotopic ratio of the ocean reduced by 1‰ during the reversal. The change in the isotopic ratio corresponds to the 40% reduction of the biomass on the earth. A large amount of CO₂ gas flows into the ocean and atmosphere from biosphere can be estimated, and a small depression in the oxygen isotopic ratio can be explained as the green house effect by the flowin of CO₂ gas.

3) The big changes in planktonic foraminiferal fauna were detected during the reversal. More damage can be found in the planktonic foraminiferas with shallower (depth habitats in the ocean water column. The damage in the planktonic foraminiferas shows that it was caused by the harmful ultraviolet ray which is usually

absorbed by the ozone layer in the upper atmosphere. It means that the changes in the carbon isotope and foraminiferal fauna are records of the changes in the ozone layer. The ozone can be destroyed by the high energy particle from the sun and the particle with change cannot flow into the upper atmosphere by the shield effect of geomagnetic field. The paleomagnetic data shows that most of dipole parts of the geomagnetic field were lost and the non dipole parts remained during the geomagnetic reversal. Such a geomagnetic field should induce the unstable magnetosphere with diurnal change and the earth lost the shield effect from charged solar particles.

はじめに

地球磁場の過去における変化は岩石の保持している微弱な磁気を測定することにより知ることができる。この古地磁気学的方法により、地球磁場はその磁極が地球の自転の極とほぼ一致しており、その

極性が定期的に逆転する性質を持っていることが分かっている。このような性質は地球磁場が自転のエネルギーにより誘起されており、正逆の極性は地球磁場がとりうる2つの安定な状態を示しているものと考えられる。従って、地球磁場の逆転は地球の持つ基本的な性質の1つといえる。

地球磁場は地球周囲に磁気圏を形成し、太陽系空

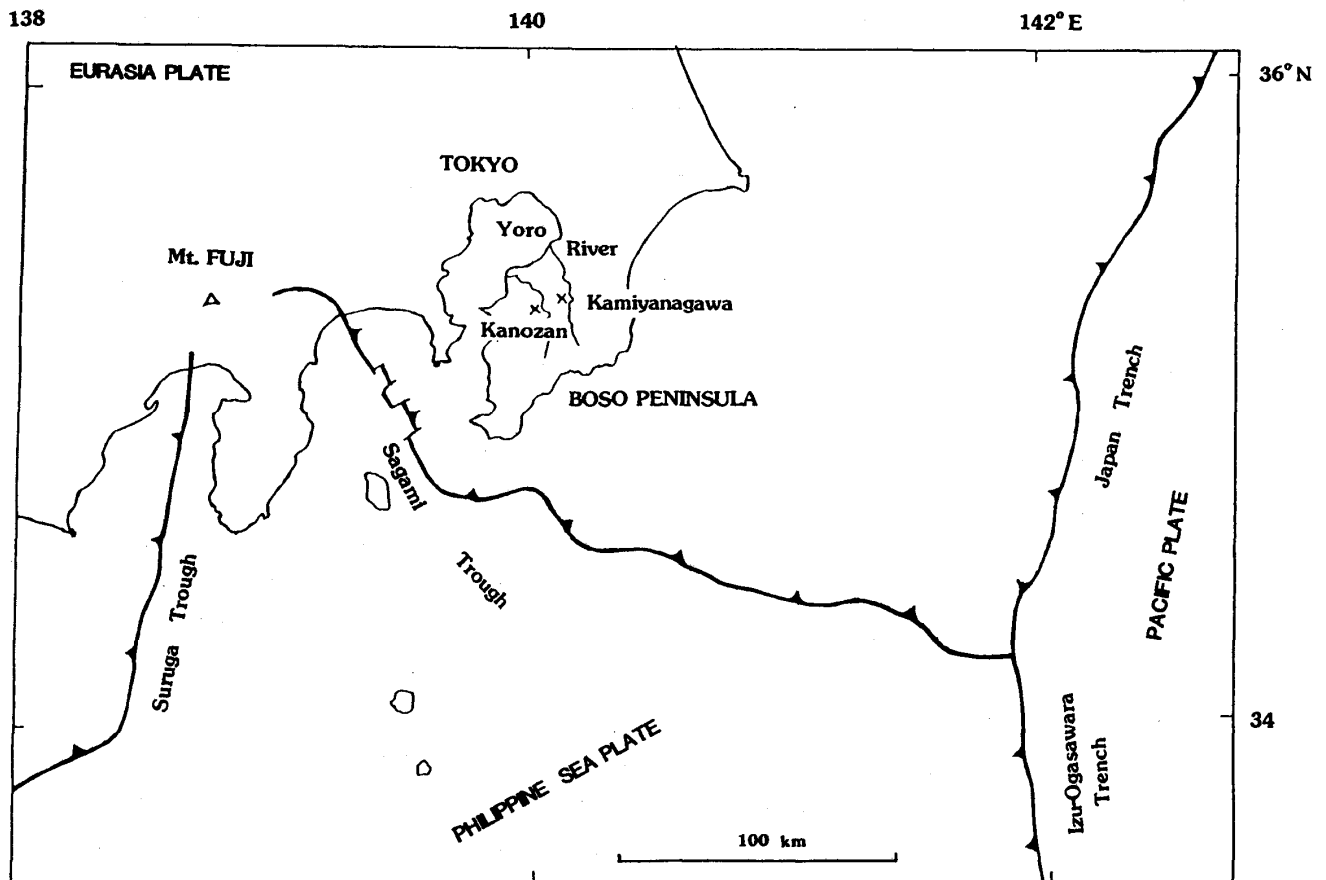


Fig. 1. Locality map of studied area.

間の地球物理学的な性質を支配しているのも、もし地球磁場が逆転すると地球上層大気に大きな変化をもたらすものと考えられ、この変化もまた地球の持つ基本的な性質と言える。過去に起こった地球磁場逆転にともなう磁気圏や上層大気の変化そのものの記録は残されておらず、知ることはできないが、その変化にともなう地上の環境変化は地質学的記録として地層中に残されている。

地球磁場逆転に要する時間は1000年以下、数100年のオーダーであり、その間の環境変化を知るためには、それだけの解像力のある地質学的記録を読み出さなければならない。幸い房総半島には1000年に3mもの堆積速度を持つ半深海性堆積物が露出しており、この種の検討には最適である。本報告では房総半島中部に露出している国本層中部の73万年前の地球磁場逆転(Brunhes正磁極期と松山逆磁極期の境界)にともない、どのような環境変化や生物量の変化があったかを酸素と炭素の同位体比を用いて検討したので、その結果を報告する。

1. 房総半島の更新統

房総半島には層厚6000mにも及ぶ海成の新第三系、第四系が分布している。この海成堆積物中には層位学的鍵層として有効な火山灰層が多数挟在しており、詳細な層位学的調査がなされており、地質図、柱状図、火山灰鍵層の記載が報告されている(三梨・他, 1959; 新妻, 1976; 中嶋, 1972MS; 中嶋・他, 1981等)。この房総半島の海成堆積物は主に半深海性であるにもかかわらず、堆積速度が異常に大きく、しかも現在地上に露出している。これは、世界に1つしかない海溝・海溝・海溝型の三重会合点が房総半島沖に存在し(Fig. 1)、その位置や性格の変化にともない激しい構造運動が起こった結果である(新妻, 1983)。

この堆積物については、化石層位学、古地磁気層位学をはじめ堆積学、構造地質学、古生物学等、地質学全般についての研究がなされており、今後もこの理想的な堆積物について多くの分野での詳細な研究が発展して行くものと考えられる。このような将来行なわれる研究において混乱が生じないように木ノ根層から下総層群までの堆積物に下位から上位に

向かって連続したメーター数をふり、層準をそのメーター数でも表すことにする。メーター数を付す為に使用した柱状図は、新妻(1976)のFig. 9であり、その上部には、三梨・他(1959)の養老川沿いの柱状図がそのまま用いられている。その養老川沿いの柱状図の0mは今回の5310mの層準にあたり、1990mは3320mにあたる。火山灰鍵層Ku5が5000mで、Brunhes正磁極期と松山逆磁極期の境界は5133mであり、その上位2mの5135mには火山灰鍵層TNTTが挟在している(Fig. 2)。本報告ではBrunhes-松山境界の逆転を検討するので、4500m~5650mの層準範囲(梅ヶ瀬層から笠森層)を扱うことにする。

2. 古地磁気層位学

この層準範囲の中・下部は漸深海性泥岩とタービダイトの砂岩の互層からなり、漸深海性泥岩の古地磁気層位学についての検討は、養老川沿いに25m間隔に中川・他(1969)、上柳川周辺において5100~5150mの層準範囲を1m間隔に、5135~5191mの範囲を10cm間隔に、5132.5~5133.6mの範囲を3.5cm間隔にNIITSUMA(1971)が行っているほか、今回、4500~4900mの範囲を鹿野山林道沿いに10m間隔で試料を採取し測定を行った。測定は小山・新妻(1983)に従い、15mTの交番磁場消磁後、リングコア型フラックスゲート回転磁力計にて行った。これらの結果をもとに極性を示したのがFig. 2である。Fig. 2の最下部の正磁極の層準は化石層位学の資料から松山逆磁極期のJaramillo Eventに対比でき、上半部の正磁極の層準はBrunhes正磁極期の前期に対比できる(新妻, 1976)。Jaramillo Eventより上位の松山期には4つの正磁極の層準があるが、これは中川・他(1969)においても認められていたものであり、今回鹿野山の試料によっても認められた。この正磁極の層準は銚子半島(SAKAI, 1970)においても認められる他、新潟(NITOBE, 1977)、南海トラフ(NIITSUMA, in press)、海:中米海溝(NIITSUMA, 1981)、Nazca海嶺上の深海堆積物B21-2(新妻・顧, 1977)等にひろく認められている。

Brunhes-松山境界の年代は73万年前、Jaramillo Eventの上限の年代は92万年前とされてい

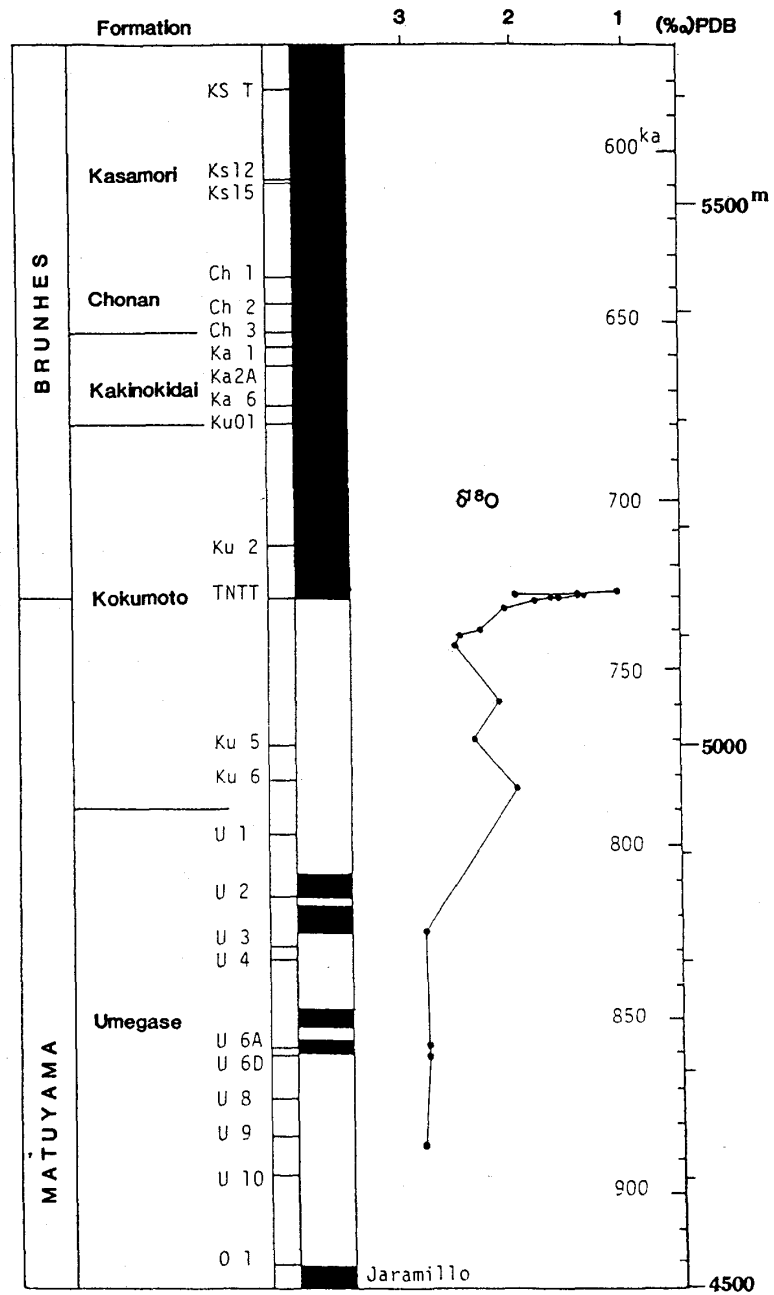


Fig. 2. Magnetostratigraphic division, lithostratigraphic division, key tuff, geomagnetic polarity, oxygen isotopic stratigraphy of benthic foraminifera *Bulimina aculeata* (top of the measured points made on *Rectobolivina bifrons*), age based on magnetostratigraphy, and horizon in Neogene and Quaternary marine sequence of Boso Peninsula in meters.

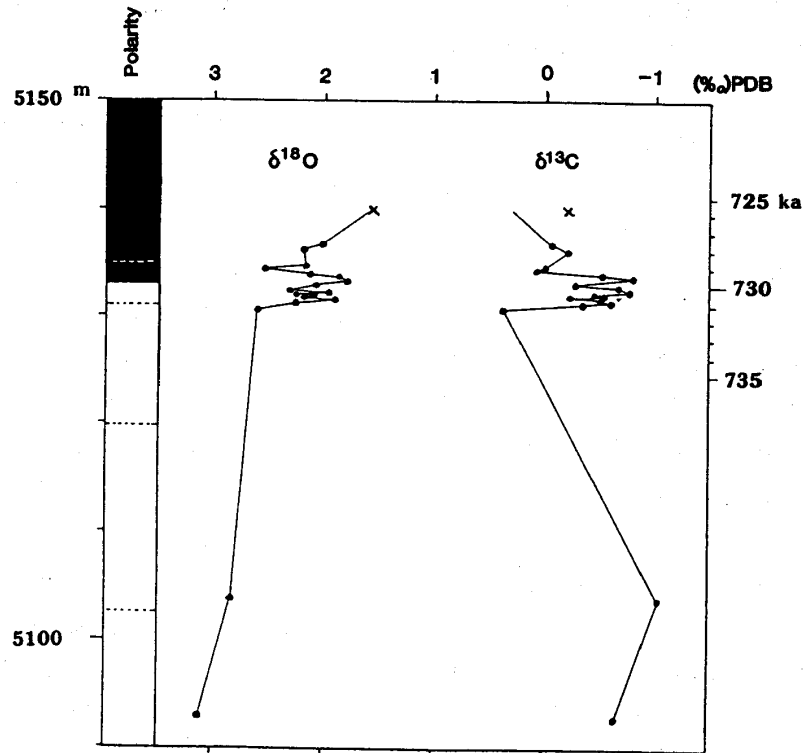


Fig. 3. Oxygen and carbon isotopic results of benthic foraminifera *B. aculeata* (·) and *R. bifrons* (×) around geomagnetic reversal between Brunhes Normal Geomagnetic Polarity Epoch and Matuyama Reversed Geomagnetic Polarity Epoch.

るので(HARLAND *et al.*, 1982), この間の堆積速度は3.23m/千年と算出される。この堆積速度を用いて求められた年代も Fig. 2 に示す。

3. 酸素同位体比層位学

酸素同位体比層位学は深海堆積物中の有孔虫化石殻の酸素同位体比を測定すると1~2‰の振幅で変動するが、その変動の様子は汎世界的に対比できる。この変動は極地域の氷床量の消長を表しており、氷期には $\delta^{18}\text{O}$ に乏しい氷床が増大するため、海水の $\delta^{18}\text{O}$ は大きくなり、間氷期には逆に氷床量が減少するため $\delta^{18}\text{O}$ は小さくなる。EMILIANI (1978)はカリブ海から採取した深海底堆積物の $\delta^{18}\text{O}$ を測定し、1から20までのstage区分を行っている。

この酸素同位体比層位区分と古地磁気層位区分との対応付けは、同一の深海底堆積物について両者の測定を行えばよいのであるが、酸素同位体比測定用

の有孔虫殻は海底表面に堆積するのに対し、その時の地球磁場は残留磁気として海底表面から30~40cm下位に記録されるので、直接的な対応を得ることはできない(新妻・顧, 1977)。特に堆積速度の小さい深海底堆積物の場合にはその年代差が大きくなるため対応付けは困難である。また酸素同位体比層位区分は増減する $\delta^{18}\text{O}$ の曲線に対応させて行うので、stage 12 くらいまでは対応のさせかたに任意性が少ないのに対しそれ以前のstageへの対応には任意性が存在する。従って、現在この対応関係を正確に決定することが重要な課題となっている。対応関係を確立するためには、充分大きな堆積速度を持つ堆積物について両者の測定をおこなえばよい。残留磁気固定のための深度を40cmとすると、房総の堆積物を使った場合には124年の差が出ることになるが、酸素同位体比の変動周期は3~4万年であるので無視できよう。

古地磁気測定用試料を有孔虫化石群集解析用に処理し、底生有孔虫 *Bulimina aculeata* D'ORBIGNY を拾い出し同位体比測定用試料とした。この有孔虫化石殻の大きさが $400\mu\text{m}$ 以上あれば1個体で測定し、それ以下のものは2~3個体で測定した。測定法は和田・他(1984)に従い、測定精度は 0.05‰ よりも良い。*B. aculeata* は堆積物表面に生息しており、海水の変化を知るためには最も適した種である。最上部の *B. aculeata* の見出せない試料については底生有孔虫 *Rectobolivina bifrons* (BRADY) を使用した。この種は堆積物表面から多少はいった堆積物中に生息しているので、炭素同位体比は *B. aculeata* より 0.5‰ 小さいが、酸素同位体比は変わらない(新妻・他, 1984)。Fig. 2 に酸素同位体比の測定結果を示す。

この図から Brunhes-松山境界は酸素同位体比が急激に減少する時期に当っており、海進期あるいは温暖化期であることが分かる。この境界部を拡大して示したのが Fig. 3 である。酸素同位体比は一様に減少するのではなく、境界部で一時的に減少した後、本格的に減少することが分かる。この特徴的な酸素同位体比の減少は EMILIANI (1978) の stage 19 と 20 の境界に見出されるとともに、この付近に Brunhes-松山境界が予想されていることから、Brun-

hes-松山境界は stage 19 と 20 の境界に対比できる。

4. 炭素同位体比と生物量の変化

植物は空気中の炭酸ガスを摂取して有機物を光合成し、植物体を作る。その植物を動物が食糧とし、エネルギー源として利用するとともに自己の体を作り成長する。その動物も他の動物の食糧となることもあり、一連の食物連鎖を構成することになる。この食物連鎖のなかで無機炭素を有機炭素に固定するのは光合成の段階だけである。植物が光合成する時には、 ^{12}C をもつ炭酸ガスを ^{13}C をもつ炭酸ガスよりも選択的に多く取り込むため、空気中の炭酸ガスの $\delta^{13}\text{C}$ が -7‰ なのに、有機物の $\delta^{13}\text{C}$ は $-20\sim-25\text{‰}$ と著しく小さい。海水中の全炭酸と空気中の炭酸ガスとの間における交換反応の際に同位体比分離が起こるため海水の $\delta^{13}\text{C}$ はほぼ 0‰ である。もし、地球上の生物生産量が増加して、固定される有機炭素が増加すれば海水の炭素同位体比は大きくなる。逆に生物が死亡して生物量が減少すれば炭素同位体比は小さくなる。

酸素同位体比と同時に測定した炭素同位体比の結果を Fig. 3 に示す。最上部の測定点は *R. bifrons* を使用したので、堆積物表面に生息する *B. aculeata* の

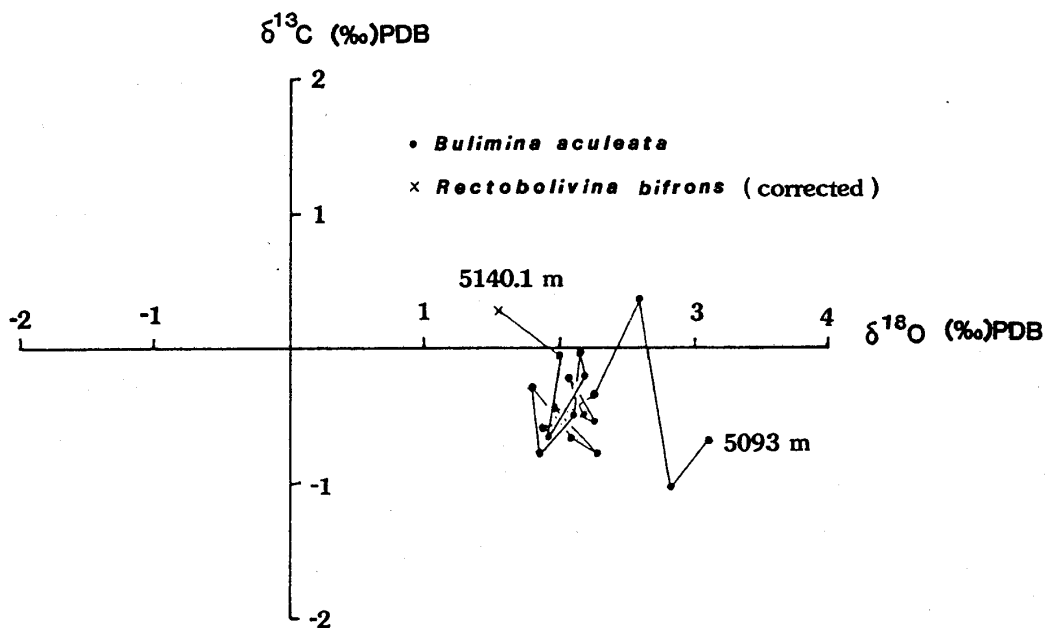


Fig. 4. Relation of oxygen isotopic ratio and carbon isotopic ratio of benthic foraminifera around Brunhes-Matuyama Geomagnetic Reversal

値に換算してある。炭素同位体比は全体的には酸素同位体比と逆相関しているが、Brunhes-松山境界部では正相関している(Fig. 4)。この境界部における同位体比の変化は、酸素同位体比が小さくなることから水温の上昇あるいは氷床の融解が起こるとともに、炭素同位体比が1‰小さくなるので、有機炭素が大気あるいは海洋の無機炭素中に放出されたことを意味している。炭素同位体比1‰の変化は現在の生物量の40%の変化にあたる。また、この変化量は完新世の氷床の融解に伴う海水準の上昇により、有機炭素が大陸棚や河川・平野に蓄積されるとともに(新妻・顧, 1977)、生物量の増加によって起こった炭素同位体比の変化(SHACKLETON, 1978)に相当する。すなわち、完新世に地球上に貯えられたり増加した量の有機炭素が地磁気逆転の際に放出されたことになる。このような放出は海退時に認められるが、この境界においては酸素同位体比が小さくなっており、むしろ逆に海進か温暖化が起こっており気候変動では説明できない。従って、この逆転時の状

況は大量の生物量が失われ、その有機炭素から炭酸ガスが放出されたため温室効果により温暖化したと考えなければならない。この温暖化は酸素同位体比の変化量が0.8‰であるので、完新世の氷床減少量の約1/3、あるいは水温3°Cの上昇に相当する。この堆積物の堆積水深は数100mであるので、3°Cの水温上昇は考えにくいので、地球全体の気候の温暖化のため氷床量が減少したものと考えられる。

Brunhes-松山境界の地球磁場逆転層準付近のこのような変化は3回起こっているが(Fig. 3)、この境界の上位と下位にも中間の極性を持つ層準があることから、その時にも逆転と同様な状況が起こったことを示唆している。

5. 有孔虫化石群集の変化

Brunhes-松山境界部において地球上では非常に大きな変化が起こったことが同位体比の測定により明らかになったが、その当時生息していた生物自身にはどのような変化があったのであろうか。この境

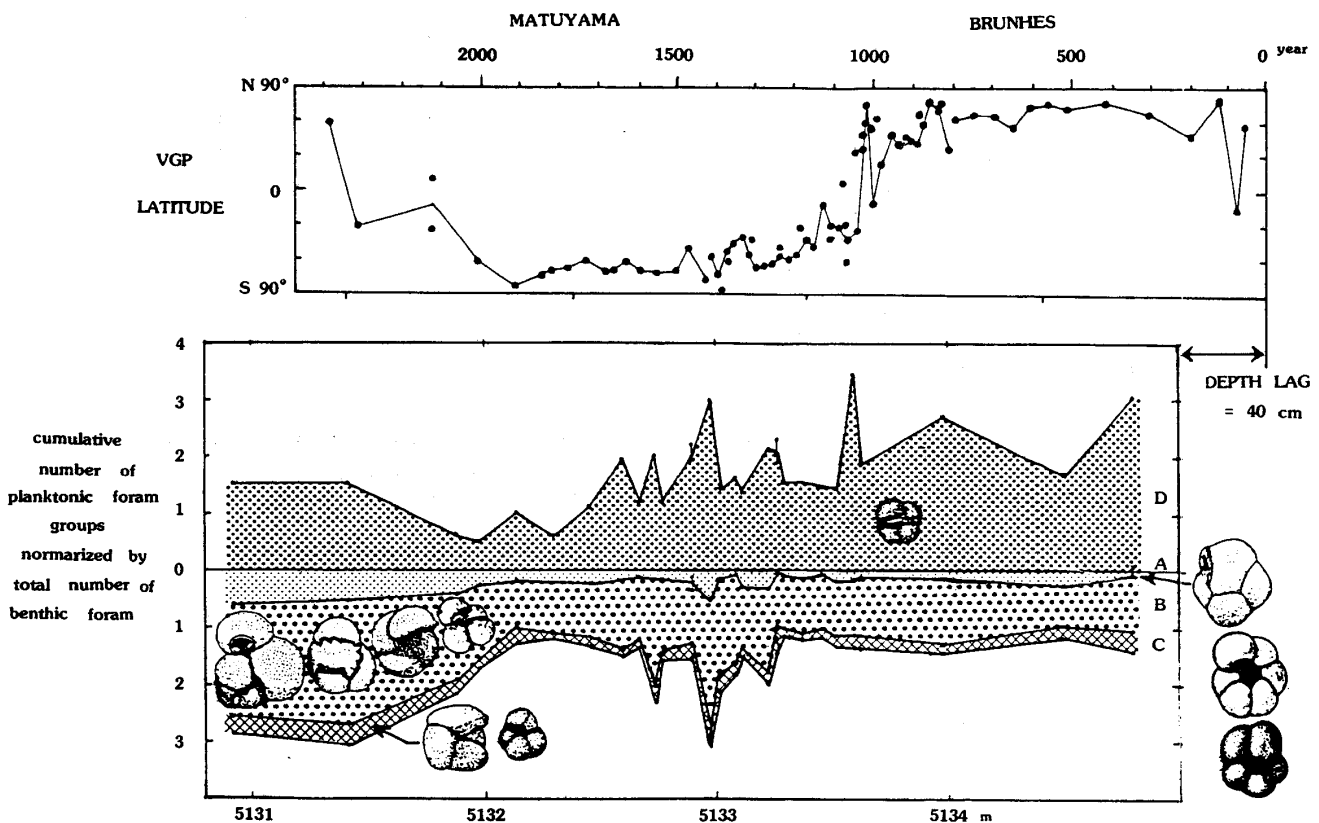


Fig. 5. Change in the numbers of planktonic foraminiferal group A, B, C, and D, normalized by the total number of benthic foraminifera, and the latitude of virtual geomagnetic pole around Brunhes-Matuyama Geomagnetic Reversal.

界を含む 5131m から 5135m の層準範囲の有孔虫化石群集については既に報告したが(NIITSUMA, 1971), 今回は異なった解析を行ったのでその結果を述べる。

底生有孔虫化石群集には周期的変化が認められるが, 群集組成そのものを変化させるほどのものではない(NIITSUMA, 1971). そこで底生有孔虫の個体数が一定と仮定して浮遊性有孔虫の個体数変化を検討してみる. この層準範囲では浮遊性有孔虫の個体数は底生有孔虫の 2 倍から 5 倍と大きく変化し, その群集組成も大きく変化する(Fig. 5). 最も減少の激しいのは 5132m 付近で全ての種が減少している. 次に減少しているのが 5133.4m 付近であり, これらの層準はいずれも地球磁場の磁極が赤道付近にあるときに一致している. また, 種により変化の様相は異なっており, 変化の様相から浮遊性有孔虫の種

を A, B, C, D の 4 つに区分できる. ここで A はその個体数が 5 分の 1 以下になるもの, B は 2 分の 1 から 5 分の 1 になるもの, C は殆んど変化しないもの, D は逆に増加するものである. A には *Pulleniatina obliquiloculata* (PARKER and JONES), *Globiquadrina dutertrie* (D'ORBIGNY), *Globigerina quinqueloba* NATLAND が含まれる. B には *Globigerinoides ruber* (D'ORBIGNY), *Globigerinoides immaturus* LEROY, *Globigerinita glutinata* EGGER, *Globigerina falconensis* BLOW, *Globigerina incompta* CIFELLI, *Globorotalia inflata* (D'ORBIGNY), *Globorotalia crassula* CUSHMAN and STEWART が, C には *Globorotalia crassaformis* (GALLOWAY and WISSLER), *Globigerina rubescens* HOFKER が, D には右巻の *Globigerina pachyderma* (EHERENBERG) が含まれる. 現生の浮遊性有孔虫のプランク

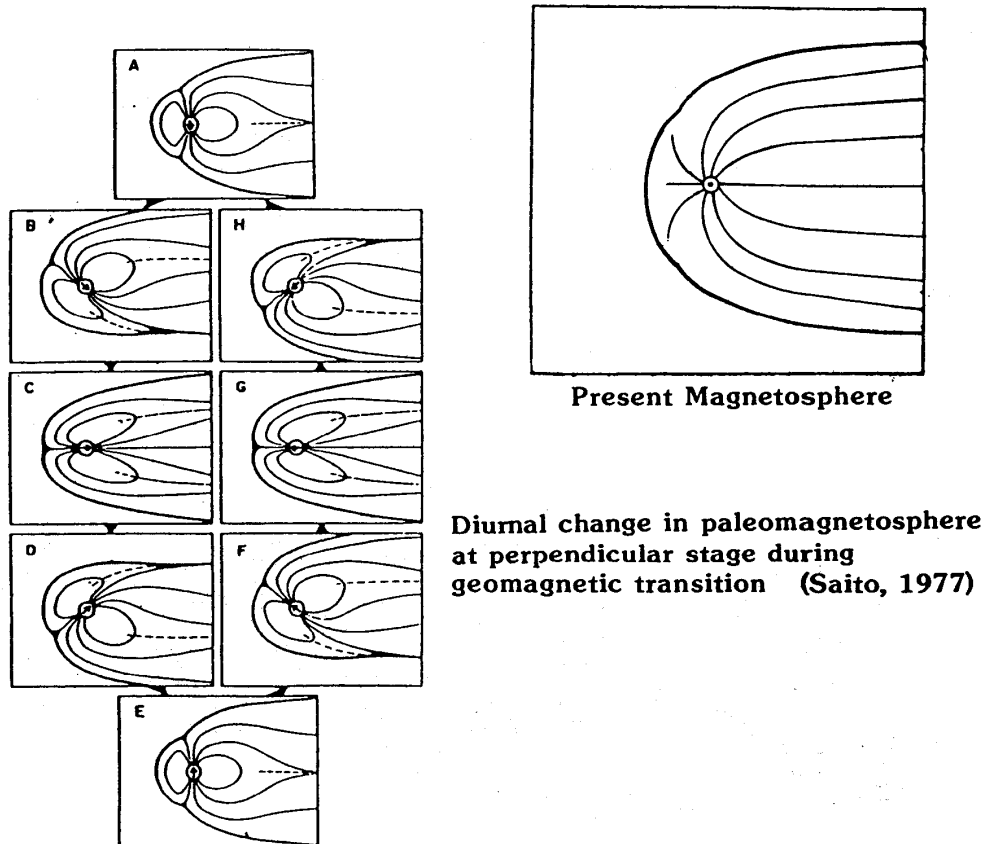


Fig. 6. Diurnal change in the shape of magnetosphere of the earth during geomagnetic reversal (Saito, 1977) and the present magnetosphere. The shapes are views from north pole direction, and geomagnetic pole locates on the equator and the intensity of geomagnetic field is reduced to one fifth of the present field in the case of the reversal.

トンネット観察によると、Aが最も海洋表層に生息しており、次いでBが、そしてCが最も深く生息している(JONES, 1967, 1979)。この生息深度から地球磁場逆転の時には表層に生息している種ほど個体数の減少が激しかったと言える。Dの増加は逆転にともない表層に生息していた種の減少によって空いた生態的位置を埋めたためと考えられる。

6. 生物量減少の機構

炭素同位体比により示された生物量の減少は、浮遊性有孔虫個体数の減少とも対応しており、しかもその時の地球磁場の磁極の位置が赤道付近にあることは、地球磁場の影響で生物量が減少したことを示唆している。

ではどのような機構が考えられるのであろうか。地球磁場は地球の周りの太陽系空間に磁気圏を形成し、太陽からのプラズマ粒子が入り込めないようにシールドしている。現在のように地球の自転軸と磁極の位置がほぼ一致している場合には自転にともない磁気圏の状態は余り変化しないが、磁極が赤道付近にある場合には磁気圏の状態が自転とともに1日周期で変化することになる(Fig. 6)。また、地球磁場逆転時には非双極磁場成分が卓越しており(HOFFMAN, 1983)不規則で自転とともに変動する磁気圏が形成されていたことが予想され、シールド効果が著しく小さかったと考えられる。このような状態では太陽からの荷電粒子が地球の上層大気に突入する機会が増加する。特に太陽の爆発にともなって放出される高エネルギー粒子は上層大気でオゾン層を分解することが知られており、1959年、1972年、1982年の太陽の爆発時にもオゾン層が破壊されている(SOLOMON *et al.*, 1983)。地球磁場逆転時のシールド効果が衰えた時には観測されたよりもはるかに著しいオゾン層の破壊が行われたに違いない。

オゾン層は地球に降り注ぐ有害紫外線を吸収して地上での生物活動を保護する役割を果たしている。従って、オゾン層が破壊されれば地上に於ける有害紫外線量が増加し生物量、特に光合成をして生物界を支えている植物の量が著しく減少するであろう。この予想は炭素同位体比による生物量の変化と調和

的であり、しかも海洋に浮遊生活している浮遊性有孔虫においては表層に生息している種ほど減少が著しいことは、この減少が有害紫外線に因るものであることを強く示唆している。

7. 結 論

地球の持つ基本的性質である地球磁場逆転現象は地質時代を通じて何回も繰り返されて起こってきたが、その際どのようなことが地上で起こったかを検討するため、房総半島に露出している漸深海性堆積物の解析を行った。この堆積物の堆積速度は千年に3m以上と異常に大きく、数百年間に終了してしまう地球磁場逆転を詳細に解析するためには理想的な堆積物である。Brunhes正磁極期と松山逆磁極期との境界(73万年前)の堆積物の古地磁気の測定、堆積物中の底生有孔虫化石殻の酸素・炭素同位体比の測定、有孔虫化石群集の解析を行った結果、次のようなことが明らかになった。

- 1) Brunhes—松山境界は酸素同位体比層位学区分のstage 19とstage 20の境界部において一時的に同位体比が減少する層準に対比でき、逆転時に温暖化したことが明らかになった。
- 2) 逆転時には生物量の40%にも及ぶ有機炭素が炭酸ガスとして放出され、海洋水中の炭素同位体比が約1%小さくなった。この大量に放出された炭酸ガスの温室効果により、一時的温暖化が起こったものと考えられる。
- 3) この生物量の減少は浮遊性有孔虫化石群集にも見出され、表層に生息するものほどその減少量が大きい。これは地球磁場逆転にともない地球磁気圏が不安定になり、太陽からの荷電粒子が上層大気に突入し、オゾン層を破壊したため有害紫外線の地上への到達量が増加し、地上の生物や海洋表層の生物が大量に死滅したためと考えられる。

謝 辞

本研究は文部省科学研究費補助金一般研究A「酸素・炭素同位体比測定による地球磁場逆転にともなう環境および生物量変化の解析」(課題番号56420018)により実施したものである。本研究を行うにあたり静岡大学地球科学教室の和田秀樹博士および北里 洋博士には討論や助言をいただくととも

に校閲をしていただいた。南カリフォルニア大学の T. L. KU 教授, コロンビア大学の W. BROECKER 教授, ケンブリッジ大学の N. J. SHACKLETON 博士, コロラド大学の G. C. REID 博士には討論していただいた。山形大学の斎藤常正教授には討論していただくとともに論文の校閲をしていただいた。静岡大学の山本哲之氏には論文作成に協力いただいた。以上の方々に心から御礼申し上げる。

文 献

- EMILIANI, C. (1978), The cause of the Ice Ages. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **37**, 349-352.
- HARLAND, W. B., COX, A. V., LLEWELLYN, P. G., PICKTON, C. A. G., SMITH, A. G. and WALTER, R. (1982), *A geologic time scale*. Cambridge Univ. Press, 131p, London.
- HOFFMAN, K. A. (1983), Geomagnetic reversals and excursions: their paleomagnetic record and implications for the geodynamo. *Reviews Geophys. Space Phys.*, **21**, 614-620.
- 小山真人・新妻信明(1983), リングコア型フラックスゲート回転磁力計および電流制御式3軸交番磁場消磁装置について。静大地球科学研報, **8**, 1-7.
- 三梨 晃・安国 昇・品田芳二郎(1959), 千葉県養老川・小櫃川の上総層群の層序—養老川・小櫃川流域地質調査報告—, 地調月報, **10**, 83-98.
- 中川久夫・新妻信明・早坂 功(1969), 房総半島新生代地磁気編年。地質雑, **75**, 267-280.
- 中嶋輝充(1972MS), 千葉県房総半島中部安野層の堆積学的研究。東北大博論。
- ・牧本 博・平山次郎・徳橋秀一(1981), 鴨川地域の地質。5万分ノ1図幅地域地質研報, 107p.
- NIITSUMA, N. (1971), Detailed study of the sediments recording the Matuyama-Brunhes Geomagnetic Reversal. *Tohoku Univ., Sci. Rep. 2nd Ser. (Geol.)* **43**, 1-39.
- 新妻信明(1976), 房総半島における古地磁気層位学。地質雑, **82**, 163-181.
- NIITSUMA, N. (1981), Paleomagnetic results, Middle America Trench off Mexico, Deep Sea Drilling Project Leg 66. *DSDP Init. Rep.* **66**, 737-770.
- 新妻信明(1983), 南部フォッサマグナープレートテクトニクスの試金石。月刊地球, **4**, 326-333.
- NIITSUMA, N. Paleomagnetic results, Nankai Trough and Japan Trench, DSDP IPOD Leg 87. *DSDP Init. Rep.* **87**. (in press)
- 新妻信明・顧 徳隆(1977), 地球磁場逆転時に何かあったか。科学, **47**, 671-678.
- ・藤井 昇・北里 洋(1984), 炭素・酸素同位体比による有孔虫の古生態の推定。静大地球科学研報, **10**, 113-122.
- NITOBÉ, T. (1977), Magnetic and pollen stratigraphy of the Uonuma Group in Niigata Prefecture, North Central Japan. *Quaternary Res.*, **7**, 302-315.
- 斎藤尚生(1977), 第四紀研究と古地磁気圏学との境界領域における諸問題。第四紀研究, **16**, 169-186.
- SAKAI, T. and NIITSUMA, N. (1970), Some geomagnetic stratigraphical problems in Japan and Italy. *Jour. Marine Geol.*, **6**, 99-112.
- SOLOMON, S., REID, G. C., RUSCH, D. W. and THOMAS, R. J. (1983), Mesospheric ozone depletion during the Solar Proton Event of July 13, 1982 part II, Comparison between theory and measurements. *Geophys. Res. Lett.*, **10**, 257-260.
- 和田秀樹・藤井 昇・新妻信明(1984), MAT 250 による超微量炭酸ガス試料の安定同位体比測定法。静大地球科学研報, **10**, 103-112