

海洋掘削と今後の古地磁気研究

小 玉 一 人*

Integrated Ocean Drilling Program and Paleomagnetism Ongoing

Kazuto KODAMA *

Abstract

Paleomagnetism and rock magnetism have played roles of great importance in various aspects of the ocean drilling projects like IPOD, DSDP, and ODP for over 40 years. This article reviews the major contributions of paleomagnetism, and introduces what is anticipated for paleo- and rock magnetism in IODP, a new phase of international ocean drilling program begun in 2003.

Key words : IODP, paleomagnetism, rock magnetism

キーワード : 統合国際深海掘削計画, 古地磁気学, 岩石磁気学

I. はじめに

MoHole 計画の提案に始まり, IPOD-DSDP-ODP と名称を変えつつ 40 年近くの長きにわたって米国主導のもとに継続してきた深海掘削計画は, 2003 年 10 月から IODP (Integrated Ocean Drilling Program, 統合国際深海掘削計画) という日米主導の新たな枠組みで再出発した。この IODP では, 日本が科学掘削目的の深海掘削船「ちきゅう」を建造し, 来る 2006 年から IODP の現場へ投入することが予定されている。それまで国際掘削計画の一参加国に過ぎなかった日本が, 初めて主役としての役割を果たすことに対する期待と責任を鑑みると, 国内関連研究体制の確立や人材育成が急務であることは明らかだろう。すでに多くの取り組みがなされ着実に成果をあげつつあることは周知のとおりであるが, この機会にこれまでの国際深海掘削計画に対する我が国研究者の貢献や成果を総括しておくことも, 古地磁気岩石磁気研究コミュニティーだけでなく, 掘削

試料を扱う国内地球科学諸分野の研究者にとって意味のあることであろう。

小論ではこうした観点から, 古地磁気学岩石磁気学という一研究分野を例に, これまでの具体的な成果の解説を交えながら, 今後の国内研究体制作りや新たな科学掘削提案策定へ向けての材料を提供したい。

II. DSDP/ODP における古地磁気岩石磁気研究

これまで DSDP や ODP に乗船された方々には周知のことであろうが, 掘削コアの古地磁気測定は, 試料の岩石学的記載や密度・弾性波などの非破壊物性測定とともに, 必須のルーチン測定項目のひとつである。特に堆積物試料では, Brunhes/Matuyama 境界をはじめとする主要な地磁気逆転層準の同定が, 年代決定の決め手となる場合も多い。その際に活躍するのが, パススルー磁力計と称される横置き型の超伝導磁力計である。今では一般的となった超伝導磁力計も, ODP の開始時 (1985) にはその設置研究機関も

* 高知大学海洋コア総合研究センター

* Center for Advanced Marine Core Research, Kochi University

少なく、ましてそれを船上の実験室に設置するという試みは、当時としてもかなり先駆的であったことであろう。それまでスピナー磁力計でひとつずつ試料を置き換えながら、多量の試料をせまい船内の実験室で測定してきた先人の苦勞を考えると、半割コアをそのまま置くだけで連続的に測定できるパススルー磁力計の採用はまさに画期的な進歩であった。その後、さらに感度が向上し液体ヘリウム消費量も少ない DC 型超伝導センサーを採用したパススルー磁力計へと入れ替わり、データの質・量ともに格段に向上した。

この間、日本人古地磁気岩石磁気研究者は、ほぼ毎年ひとりずつの割合で研究航海に乗船し、多忙なルーチンワークをこなしつつ、個別研究に成果をあげていった。表 1 に、DSDP 以来これまでに乗船した研究者のリストをあげる。その中には、主席研究者として、あるいは主要研究者のひとりとして研究航海をリードし、古地磁気に限らず地球科学諸分野で活躍され幾多の成果をあげられた先達のお名前のあることは、我々の誇りとすべきことである。しかし、小論執筆時点（2004 年 12 月）で延べ 46 名（DSDP11 名、ODP34 名、IODP1 名）に及ぶ研究者の研究をここで個々に紹介する余裕はないので、以下ふたつの研究例を題材に、古地磁気学岩石磁気学が深海掘削計画で果たしてきた役割を述べよう。

1) ホットスポットの古地磁気

地球磁場は外核内の電磁流体運動によって生ずる。流体運動だから地球自転の影響を強く受けると考えられるが、事実、数十万年程度の長い時間で見ると、古地磁気学的研究によって求められる磁極（古地磁気極）の平均位置は地球自転の極と一致する。したがって、この古地磁気極を用いれば、プレートや大陸の地球自転極に対する運動を知ることができる。こうして世界の諸大陸の古地磁気学的研究から大陸移動説が実証されたのであるが、同様の原理を掘削コアに適用して海洋プレートの運動を検証する試みは、深海掘削計画の格好のテーマでもあった。

ハワイ 天皇海山列の折れ曲がりといえば、プレートテクトニクスの証拠のひとつとして、地球

科学の教科書に必ずといっていいほど取り上げられる実例である。海山列のほぼ中央部、ミッドウエー島の西側で見られる顕著な折れ曲がり構造は、マントル深部に固定されたホットスポットからの絶えざるマグマ供給のもと、太平洋プレートが約 4 千万年前にその運動方向を突然北向きに変えた結果であるとの碩学 Wilson (1963) の解釈は見事であった。その仮説を、海山を直接掘削し古地磁気学の手法をもって実証しようとの試みは、DSDP 以来複数の研究航海で実施されてきた。中でもとりわけ成果を収めたのは、DSDP Leg 55 による推古海山 (44.5 °N, 179 °E; 65Ma) の掘削であろう。全長 550 m、コア回収率 65% の基盤岩掘削は、現在と比較しても遜色のないものであり、そこから得られた古緯度 (27 °± 3.5 °; Kono, 1980a) は、同海山が現在よりも明らかに南方で形成されたことを示す。磁化伏角のみを利用する新たな統計処理法 (Kono, 1980b) にもとづく点でも信頼度の高いこの結果から、大方はホットスポット不動仮説と太平洋プレート運動急変モデルは実証されたものととらえた。しかし一方で、現在のハワイ・オアフ島の緯度 (19 °) よりも有意に差があることから、過去においてハワイホットスポットが現在よりも北方に位置していたのではないかと、つまり太平洋プレートの北上だけでなくハワイホットスポットの南方移動もあったのではないかと指摘がなされたのも事実である。

この小数派ではあるが地球ダイナミクスの根幹に関わる反論は、その後のさらなる深海掘削によって解明を試みられることとなる。その端緒となったのが、ODP Leg 145 によるデトロイト海山 (44.5 °N, 179 °E; 65 Ma) の掘削結果である (Tarduno and Cottrell, 1997)。その古緯度 (36 °± 7 °) は、かなり大きな誤差を考慮するにしても、なお現在のオアフ島の緯度よりも北方に位置し、ホットスポット不動モデルに対する反論の声は勢いを増したかに見えた。この議論に決着をつけるべく行われたのが、ODP Leg 197 によるデトロイト海山をはじめとする天皇海山列の再掘削である。その最終的な古地磁気の結果は、八

全体を理解するためには、プレート・マントル・自転軸の三者間の相対運動を論じなければならなくなる。

このように、全地球的な規模でホットスポットの古地磁気学を行うことは地球ダイナミクスにとってたいへん重要な意味をもち、実際にハワイ以外のホットスポット起源海山を掘削する試みがIODP に対して提案されている。

2) 古地磁気変動と気候変動

古地磁気の連続記録を得るという目的には、上記のような基盤岩掘削コアよりもむしろ、APC (Advanced Piston Coring) に代表される長寸の堆積物コア試料の方が適している。最長 200 m に及ぶ APC コアは、過去 1000 万年程度までさかのぼって地磁気記録を復元することのできる格好の試料であり、地磁気逆転タイムスケールの確立、逆転時の地磁気の振る舞い、さらには最近議論の高まっているミランコビッチ周期と地磁気の相関の問題など、さまざまな課題で古地磁気学の進展に貢献した。それらの多くは今後に残されたテーマでもあるが、以下では古地磁気変動と気候変動という観点から、掘削コアによる古地磁気研究の現場の姿を紹介しよう。

数万年～10 万年の周期で氷期・間氷期を繰り返す気候変動の原因を、地球軌道要素の周期的変化という外力による日射量の変化で説明したのがミランコビッチ (Milankovitch, 1941) である。地球は約 23 度傾いた自転軸をもって太陽の周りを公転しているので季節変化が生じるわけだが、この公転楕円軌道の離心率、近日点の位置、自転軸の傾きなどがそれぞれ周期的に変化する。代表的な周期は、短いものから順に、1.9 万年、2.3 万年、4.1 万年、10 万年、そして 41 万年である。最長の 41 万年を除けば、その他すべてが古気候変動の周期帯と重なるので、なんらかの方法で古気候変動を連続した時系列に変換し、スペクトル解析の手法でその中に含まれる周期成分を取り出そうという研究が 1970 年代から盛んになった。その材料として使われたのが掘削コアやピストンコアなどの堆積物試料である。代表的な古気候変動の指標である酸素同位体比を総合

した結果 (Imbrie *et al.*, 1993) は、上の 4 つの周期帯 (1.9 万年, 2.3 万年, 4.1 万年, 10 万年) に関して、気候変動と軌道要素変動のパワースペクトルは明瞭な一致を示した。こうして堆積物の中に明瞭な周期性をもった変動が内在していることがわかると、今度は逆にそれを利用して精密な年代決定が可能となる。仮に、あるコアの酸素同位体比に 1.9 万年の周期変動があるとすると、そのコアの最上部からある層準までの酸素同位体比変動のうち周期 1.9 万年の波形のピークの数をかぞえて、その数に 1.9 万年を乗ずれば、その層準の年代が求まることになる。すなわち、連続した堆積物コアであれば、特に放射年代測定などせずとも、酸素同位体比を連続的に計りさえすれば高分解能の年代測定ができるのである。こうした周期性を利用した年代測定を、天文学的年代補正 (astronomical calibration, または astronomical tuning) と呼ぶ。このような方法で主要な地磁気逆転境界年代を求めた結果、それまでの K/Ar 法による年代値が一様に数%若すぎる事が明らかとなり、Brunhes/Matuyama 境界 0.78Ma, Matuyama/Gauss 境界 2.60 Ma, Gauss/Gilbert 境界 3.58 Ma と修正された (Opdyke and Channell, 1996)。

一方、気候とともにグローバルな変動である地磁気に関しても、同様なミランコビッチ周期が見られるか否かの検証も行われてきた。地磁気変動と古気候変動とに相関がある可能性自体は 1970 年代から指摘されていたのだが (Kent and Opdyke, 1977)、客観的な判定に耐えるデータが集積するにはいささかの時間を要した。上記のパススルー型超伝導磁力計の普及と、U-channel (断面が 1 辺 1 インチ、長さ 1 ~ 1.5 m の細長い四角柱状の堆積物試料容器) の使用、さらには堆積物を対象とした種々の磁性測定法の開発などがあいまって、1990 年代になると海底堆積物から地磁気の相対的強度変動を求める研究が盛んに行われるようになった。それらを総合した結果、過去 78 万年間の Brunhes 正磁極期に関しては、Sint-800 と呼ばれる相対的古地磁気強度変動の標準曲線が確立され (Guyodo and Valet, 1999)、

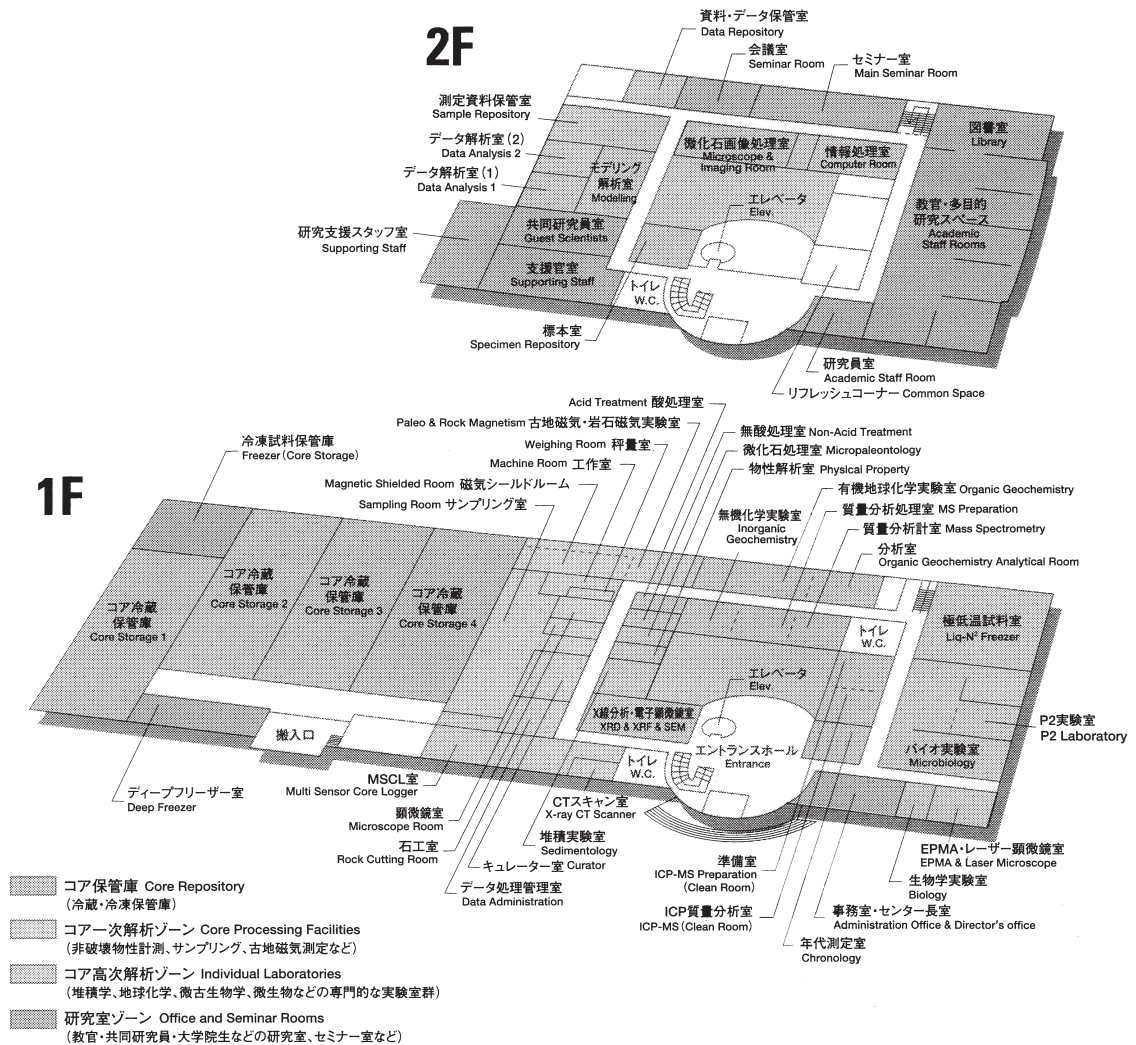


図 1 高知大学海洋コア総合研究センターの館内見取図。

Fig. 1 Floor guide of the Center for Advanced Marine Core Research, Kochi University, Japan.

地磁気逆転年代が利用できない Brunhes 磁極期でも、古地磁気強度変動のパターンを比較照合することによって年代推定が行えるようになった。

この Sint-800 には上のようなミランコピッチ周期が明瞭には見られなかったのだが、一方で特定のミランコピッチ周期が顕在するという報告もある。例えば、堆積速度が特に早く高分解能の環境変動を記録していると考えられる北大西洋のドリフト堆積体を対象とした ODP Leg 162 の結

果 (Channell *et al.*, 1998) からは 4.1 万年と 10 万年の周期が報告され、西太平洋のピストンコアからも 10 万年周期が得られている (Yokoyama and Yamazaki, 2000)。さらには、相対地磁気強度だけでなく、磁化伏角にも 10 万年周期が見られるという例も報告されている (Yamazaki and Oda, 2002)。しかし他方では、周期性は見られないという例もあり (Hornig *et al.*, 2003)、地磁気の周期性の問題は今もって決着がついていな

い。いずれにしても、グローバルな分布をもった高分解能の連続した地磁気記録を得ることが決め手になるので、この目的に特化した新たな形の海洋掘削がIODPで実現されることを期待しよう。

III. IODPにおける古地磁気岩石磁気学の役割と期待

IODPがそれまでの深海掘削計画と異なるのは、複数の掘削船をもつ国際計画であるという点だけではない。掘削コアの保管施設とそれに付随した研究施設が日米欧につくられ、それぞれ独自性をもちながらも互いに協力しながら研究をすすめる海陸総合した国際計画なのである。米国はODPから引き続いてテキサス農工大学、欧州はドイツのブレーメン大学、そして日本は高知大学にコア保管施設と付置研究施設が設置されている。米国と欧州はこれまでのODPの経験の蓄積があるが、IODPを新たに主導する我が国ではまったく新しいタイプの研究施設でもあるので、この機会にその概要を紹介しておこう。

1) 海洋コア総合研究センターの役割

高知大学の施設は、海洋コア総合研究センター (Center for Advanced Marine Core Research) という名称の全国共同利用施設として、平成15年4月に竣工した。総床面積約6千m²の施設の1階部分の約半分がコア冷蔵保管施設、残りが実験研究区画である。実験研究区画は、コアのサンプリングや非破壊物性測定、古地磁気測定などを行う一次解析ゾーンと、同位体比測定や地球化学分析などを行う二次解析ゾーンに分かれる(図1)。IODPで新たな科学研究目標のひとつとなった地下微生物圏研究のための先端機器類や遺伝子実験室も二次解析ゾーンに設置されている。一次解析ゾーンの主要機器は、掘削船「ちきゅう」の船内実験室に備えられているものと同じであり、乗船前のトレーニングや航海後の本格研究に役立てられるようになっている。全国共同利用施設としてこれまでに約30件の個別研究を受け入れ、今後年2回の割合で公募研究をつのりながら、2006年から本格的に始まる「ちきゅう」の掘削およびその関連研究のための国内研究拠点として

の体制作りをすすめている。

古地磁気岩石磁気研究分野に焦点を絞ると、これまで国内研究コミュニティで待望されていた共同利用施設がはじめて実現したことになる。米国では、ミネソタ大学のIRM (Institute for Rock Magnetism) が共同利用施設として長く利用され多に実績をあげてきた。我が国でも同様の施設が待望されていたのだが、さまざまな理由からこれまで実現に至らなかった。そこで、IODPのための研究施設としての役目に加えて、この日本版IRMとしての役割も備える本センターの古地磁気岩石磁気研究部門の詳細を最後に紹介しておこう。

2) 古地磁気岩石磁気実験室の機能

この実験室の特徴の第一は、大容量の磁気シールド室である。パーマロイ2層構造からなる全長12m、幅7m、高さ3mのシールド室内では地磁気は200nT以下に低減され、U-channelなどの長寸堆積物試料を測定する高分解能パススルー超伝導磁力計と、従来型の個別試料用超伝導磁力計が備えられている。そのほか、スピナー磁力計、交流・熱消磁装置、スピナー型帯磁率計などがあり、堆積物から火山岩まで、磁化強度や安定性に応じて適切な機器を使用することができる。なお、「ちきゅう」の古地磁気実験室も、海洋掘削船としては世界で初めてパーマロイ合金による磁気シールドが施されており、陸上実験室とほぼ同様の環境で測定ができることも付記しておく。シールド区画外には、磁気天秤 (Curie balance) 振動磁力計 (VSM) 極低温磁性測定装置 (MPMS) などが設置されており、さまざまな磁性測定や磁性鉱物の同定ができるようになっている。これらの機器を制御するPCはすべてLANで結ばれており、得られたデータは一括してサーバーに保管され、データベースとして利用できるようになっている。

これまでに、個人・グループあわせ10件以上の共同研究が進行中であり、今後のさらなる利用者増が見込まれる。このほか、研究だけでなく、院生・学生など将来を担う世代の育成のため、国内コミュニティ各位の協力のもと、年一回当実

験室を教育目的に解放している。日頃なじみのないコア試料に触れ、最先端の機器を操作する中で、古地磁気学岩石磁気学の面白さを実感できる場になればと思う。

文 献

- 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.
- Horng, C.-S., 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**, EPM8 1-15.
- Imbrie, J., Boyle, E.A., Clemens, S.C., Duffy, A., Howard, W.R., Kukla, G., Kutsbach, J., Martinson, D.G., McIntyre, A., Mix, A.C., Molfino, B., Morley, J.J., Peterson, L.C., Pisias, N.G., Prell, W.L., Raymo, M.E., Shackleton, N.J. and Toggweiler, J.R. (1993) On the structure and origin of major glaciation cycles. 2. The 100,000-year cycle. *Paleoceanography*, **8**, 699-735.
- Kent, D.V. and Opdyke, N.D. (1977) Paleomagnetic field intensity variation recorded in a Brunhes epoch deep sea sediment core. *Nature*, **266**, 156-159.
- Kono, M. (1980a) Paleomagnetism of DSDP Leg 55 basalts and implications for the tectonics of the Pacific plate. In Jackson, E.D., Koizumi, I. et al.: *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*, **55**. Washington, D.C. (U.S. Government Printing Office), 737-752.
- Kono, M. (1980b) Statistics of paleomagnetic inclination data. *J. Geophys. Res.*, **85**, 3878-3882.
- ミランコヴィッチ著、柏谷健二・山本淳之・大村 誠・福山 薫・安成哲三訳 柏谷ほか訳 (1992) 気候変動の天文学的理論と氷河時代. 古今書院. Milankovich, M. (1941) *Canon of Insolation and the Ice Age Problem (in Yugoslavian)*. K. Serb. Acad. Beogr., Spec. Publ., **132**.
- Opdyke, N.D. and Channell, J.E.T. (1996) *Magnetic Stratigraphy*. Academic Press.
- Tarduno, J.A. and Cottrell, R.D. (1997) Paleomagnetic evidence for motion of the Hawaiian hotspot during formation of the Emperor seamounts. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **153**, 171-180.
- Tarduno, J.A., Duncan, R.A., Scholl, D.W., Cottrell, R.D., Steinberger, B., Thordarson, T., Kerr, B.C., Neal, B.C., Frey, F.A., Torii, M. and Carvallo, C. (2003) The Emperor Seamounts: Southward motion of the Hawaiian hotspot plume in the Earth's mantle. *Science*, **301**, 1064-1069.
- Wilson, J.T. (1963) A possible origin of the Hawaiian Islands. *Can. J. Phys.*, **41**, 863-870.
- Yamazaki, T. and Oda, H. (2002) Orbital influence of Earth's magnetic field: 100,000-year periodicity in inclination. *Science*, **295**, 2435-2438.
- 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20日受付, 2005年3月16日受理)