

統合国際深海掘削計画(IODP)第 330 次研究航海の 船上古地磁気学研究的紹介

A brief introduction to the shipboard paleomagnetic study of
Integrated Ocean Drilling Program (IODP) Expedition 330

星 博幸
Hiroyuki HOSHI

愛知教育大学
Aichi University of Education, Kariya, Aichi 448-8542, Japan
(hoshi@auecc.aichi-edu.ac.jp)

Key words: 統合国際深海掘削計画(IODP), ルイビル海山列, ルイビル・ホットスポット,
マントル・プルーム, プレート運動, 古地磁気学

1. はじめに

現在の地球は、約 46 億年前の誕生から今後数 10 億年にわたって続くであろう、およそ 100 億年にもわたる長大な一生のスナップショットである。地球の歴史は、誕生時に生じた熱とその後発生した熱をゆっくりと宇宙空間に放出してゆく歴史であるといえる(例えば、島津, 1967)。その放熱の過程で、地球をつくる物質の移動や変化が起こり、それに伴い地球の内部や表層部、大気の様子が大きく変化してきた。そうした変化の途中で地球上に生命が誕生し、進化し、いまの私たちがいる。地球と生命を真に理解するには、地球誕生から現在まで、地球がどのように変化してきたかを調べ上げる必要がある(例えば、熊澤・丸山, 2002 編)。

筆者は、地球表層を覆っているプレートの移動や、プレートとプレートの境界部で起こる地震やマグマ活動、地殻変形、地殻の隆起・沈降などの地学現象に興味を持ち、これまで主に「フィールド地質調査」と「堆積

物や岩石の古地磁気調査」を研究手段として研究してきた。地質調査とは、堆積物や岩石を野外で詳しく観察・記載し、ルートマップや地質図、地質断面図などを描き、調査地域の堆積物(地層)・岩石の形成や形成後に受けた様々な作用を明らかにすることである(例えば、天野・秋山, 2004)。古地磁気調査とは、過去の地磁気(古地磁気)の方向や強さを、堆積物や岩石に記録されている残留磁化(厳密に言えば、堆積物や岩石に含まれる強磁性鉱物によって担われている)の測定から明らかにすることである(例えば、小玉, 1999)。地質と古地磁気の調査を組み合わせると、プレートの移動や地殻上部の 3 次元的な動きを復元したり、堆積物や岩石の年代を特定したりすることができる。

ここでは、筆者が古地磁気学研究者の一人として参加した統合国際深海掘削計画第 330 次研究航海(IODP Expedition 330)の船上古地磁気学研究(掘削船乗船時に実施した古地磁気調査の結果と成果)について簡単

に紹介する。IODP は日米欧が主導的に進めている海洋掘削船を用いた国際研究プロジェクトである(Integrated Ocean Drilling Program website; <http://www.iodp.org/>)。地球の表面積の約 7 割は海洋で占められているため、陸上の調査研究だけでは地球の活動の全体像を理解することができない。海底はどのような物質からできているのか、海底は過去にどのような動きをしたのか、海洋環境はどのように移り変わってきたのか... こうした問題を探るには、掘削(ボーリング)によって海底から地層や岩石のコア(円柱状の試料)を採取し、それを観察・分析する必要がある。この航海はニュージーランド沖の南太平洋で行われた(IODP Exp. 330 website; http://iodp.tamu.edu/scienceops/expeditions/louisville_seamounts.html)。2010年12月から2011年2月まで、各国から集まった約30名の研究者が米国の掘削船 *JOIDES Resolution* (写真1)に乗り込み、船内の実験室にて24時間態勢で研究を行った。採取された試料の分析は航海後研究(ポストクルーズ・ワーク)として現在も進められているが、船上分析で判明した主要な成果は公表済みである(Koppers et al., 2012)。

2. 研究の背景とねらい

このプロジェクトは、ニュージーランド沖の海底に存在するルイビル海山列(海底火山噴火によって生じた海山の列)を形成した「ルイビル・ホットスポット」の移動の有無を探ることが大きなテーマの一つになっている。ホットスポットとは、地球深部のマントルからプルーム(煙柱)状に上昇してくる高温の岩石やマグマが地表に達し、プレート境界と関係なく火山活動が起こっている場所のことである。ルイビル・ホットスポットは、太平洋域の主要な(マントル深部に源をもつと考えられる)ホットスポットの一つとされている。ホットスポットと言えばハワイ・ホットスポットが世界的に有名だが、ハワイとルイビル、それにイースター・ホットスポットの3つが、太平洋の主要なホットスポットとされている(Courtillot



写真1. ニュージーランド北島のオークランド港に停泊中の海洋掘削船 *JOIDES Resolution*。掘削のために備えられた高いやぐら(高さ約 60 m)がシンボル。船内には居室や実験室のほか、食堂、シアター、ジム、医務室、売店などもある。今航海では約2ヶ月間、約100名(研究者、テクニシャン、クルーなど)を乗せて無寄港で航行・掘削作業を行った。

et al., 2003)。

多くの教科書では、ホットスポットはしばしばマントル(あるいは自転軸)に固定された不動点として扱われている。この定説(Wilson, 1963; Morgan, 1971)に従うと、ホットスポットの火山活動によって形成された火山島や海山の配列方向や年代を調べることによって、ホットスポット上を移動するプレートの過去の移動方向や速度を知ることができる。よく知られているように、ハワイ・ホットスポットの活動によって形成されたハワイ火山列-天皇海山列は L 字型に屈曲している。この事実から、太平洋プレートの移動方向が 5000 万年前頃(Sharp and Clague, 2006)に大きく変化したと広く信じられている。ところが、天皇海山列の火山岩が記録している古地磁気の情報には、そのような単純な話ではないことを強く疑わせる。古地磁気というのは、その名のとおり過去の地磁気のことである。火山岩には熱残留磁化という形で岩石形成時の地磁気の向きや強

さの情報記録されている。古地磁気データを解析することで、火山岩形成時のその場所の緯度(古緯度)を知ることができる。掘削研究が明らかにした天皇海山列の古地磁気記録は、ハワイ・ホットスポットが約5000万年前よりも前の時代に大規模に南下していた(不動ではなかった)可能性を示唆している(Kono, 1980; Tarduno and Cottrell, 1997; Tarduno et al., 2003; タルドゥーノ, 2008)。これはたいへん大きな発見である。太平洋プレートの過去の運動方向の定説は真実ではないかもしれない。この発見はマンタルの動きに対する考え方にも大きな影響を与えている(Steinberger et al., 2004)。また、我が国を含む環太平洋地域の地質学や岩石学の研究にも今後大きな影響が及ぶ可能性がある。

天皇海山列の古緯度がわかってきたことで、次のような興味深い問題が議論されるようになった。それは、太平洋の3つの主要ホットスポットのなかで、ハワイ・ホットスポットだけが移動したのか、それとも3つのホットスポットがすべて移動したのか、ということである(Koppers et al., 2010)。前者、後者とも、それを支持する研究結果(モデル計算など)が報告されており、意見の一致には至っていない。これを解明するには、掘削研究によって他のホットスポットについても古緯度の情報を得る必要がある。そこで、形成年代や海底地形などのデータが比較的良好にそろっているルイビル海山列について、その古緯度を古地磁気の手法を使って決定しようというプロジェクトがオレゴン州立大のAnthony Koppers博士(本航海の共同主席研究者の一人)らによって提案された。それが今回のルイビル海山列航海である。

3. 船上古地磁気測定の結果

船内実験室の一角には古地磁気測定用の装置類が設置されており(最近の深海掘削やJOIDES Resolutionについては須藤, 2011が詳しい)、ルイビル海山列形成時の古緯度を推定するために、筆者は他の古地磁気研究者と共同して毎日(航海中、休日はない！)



写真 2. 船内実験室のパススルー型超電導磁力計(2G Enterprises model 760-R)。半割コアの残留磁化測定と交流消磁が可能。

岩石試料の古地磁気測定とデータ解析を行った。古地磁気研究者は筆者の他に米国カリフォルニア州立大学サンディエゴ校スクリップス海洋研究所(Scripps Institution of Oceanography, UC San Diego)のJeffrey Gee教授、英国サウサンプトン大学海洋研究所(National Oceanography Centre, University of Southampton)のNicola Pressling博士(現所属はRoyal Holloway, University of London)が乗船し、筆者とPressling博士がペアを組んで夜シフト(夜0時～昼12時)を担当し、Gee教授が昼シフト(昼12時～夜24時)を担当した。なお、共同主席研究者の一人である山崎俊嗣博士(産業技術総合研究所; 現在は東京大学大気海洋研究所教授)も専門が古地磁気学である。超電導磁力計(写真2)は主に保管用半割コアの残留磁化測定で使用された。スピナー磁力計と消磁装置(写真3)は個別岩石試料の残留磁化測定で使用された。本航海では作業用半割コアから切り出された個別試料の測定も精力的に行われた。船内実験室で出された測定データは直ちに解析され、ルイビル海山列形成時の古緯度が推定された。誰よりも早くこのビッグ・サイエンスの重要データを目にするワクワク感を抱きながら、私たち古地磁気研究者は測定三昧の日々を過ごした。

掘削の結果、5つの海山から堆積岩及び火山岩からなるコアが採取された。掘削した海山のうち、最も古い海山はCanopus Guyot



写真 3. 船内実験室のスピナー磁力計(AGICO JR-6A)と消磁装置(交流消磁, 熱消磁)。



写真 4. 分析用試料の採取のために並べられた作業用半割コア。研究者が試料採取を希望する箇所に丸いシールが貼られている。

(guyot = 平頂海山)で約 7400 万年前, 最も若い海山は Hadar Guyot で約 5000 万年前と推定される(Koppers et al., 2012)。掘削長の合計は 1114 m, うち採取できたコアの合計長は 806 m に達し, 平均回収率は 72.4 %, いわゆるハードロック (hard rock) 主体の深海掘削としては非常に良好な結果を得た(写真 4)。Rigil Guyot (推定年代約 7000 万年前)では 1 つの掘削孔で 500 m を超える掘削を行い, 火山岩主体の深海掘削としては驚異的な回収率(88 %)を達成した。5 つの海山から得られた堆積岩及び火山岩は概ね安定な残留磁化を保持していた。火山岩のうち火砕岩(ハイアロクラスタイトなど)の占める割合が高かったが, 火砕岩も溶岩同様に安定した残留磁化を保持しているものが多かった。水底で堆積した火砕岩がどのような機構で安定残留磁化を獲得したかという問題は興味深く, それを明らかにするために航海後研究として詳細な岩石磁気分析を行っているところである。船上では主に溶岩と岩脈の古地磁気データを用いて海山形成時の古緯度推定を試みた。

船上測定で得られた古地磁気データは, ルイビル・ホットスポットの緯度が約 7000 万年前からほとんど変化していないことを強く示唆していた。Site U1373 と U1374 (いずれも Rigil Guyot, 約 7000 万年前), Site U1376 (Burton Guyot, 約 6400 万年前), Site U1377 (Hadar Guyot, 約 5000 万年前)ではいずれも南緯 50°前後の古緯度が決定され, 現

在のルイビル・ホットスポットの緯度(南緯 51°)と有意な違いが認められなかった(誤差を考慮すると異なるとは言えない)。この結果はハワイ・ホットスポットが約 5000 万年前よりも前に南方移動していたという結果(Tarduno et al., 2003)と大きく異なるものである。すなわち, ルイビル・ホットスポットとハワイ・ホットスポットはいずれも太平洋域にある主要なホットスポットであるが, 5000 万年前より前にそれぞれ個別に振舞っていたらしい。私たち(Koppers et al., 2012)はホットスポットが個別に振舞うことを初めて実証した。ホットスポットが個別に振舞うということは, ホットスポットの高温の岩石やマグマのプルームがマントル中で個別に振舞うことを意味する。マントルは高温の岩石からできており, ゆっくり対流していると広く信じられている。このマントルの動きを風に見立てれば, 場所によって違う向きに吹いている風によって煙が流されながら上昇しているようなもので, マントル・プルームもマントルの「風」(動き)の影響を受けながら上昇しているのであろう。「無風」のところでは, プルームはほぼ真つすぐ上昇するのであろう。

ルイビル海山列にはハワイ火山列-天皇海山列に見られるような大きな L 字型屈曲が見られない。西経 169°付近と西経 161°付近でわずかに屈曲し(Lonsdale, 1988), 海山列全体としては緩やかに弓なりに湾曲して

いるように見える。古地磁気測定からはホットスポットの東西方向の移動がわからないが、約7000万年前から東西方向の移動もほとんどなかったと仮定すると、ルイビル海山列の連なっている方向が太平洋プレートの移動方向を近似しているとみなせるはずである。上記のように太平洋プレートの移動方向は5000万年前頃に大きく変化したと広く信じられているが、今回の発見はこの定説の見直しを強く迫るものと言える。

掘削した海山の中でもっとも古い Canopus Guyot の Site U1372A では、現在のホットスポットの緯度よりも有意に低い古緯度(南緯 40~43°程度)が決定された(Koppers et al., 2012)。単純に解釈すれば、この海山形成時(約7400万年前)にルイビル・ホットスポットは現在よりも10°ほど低緯度に位置していた、すなわち約7000万年前よりも前にはルイビル・ホットスポットもハワイと同様に南に移動していたということになる。ただし、このサイトでは単一の古地磁気極性(正極性)しか得られていないため、地磁気永年変化を十分にサンプリングできているかどうかについて航海後研究で慎重に検討する必要がある。

ホットスポットおよびその地下のマントル・プルームの振舞いを定量的に調べる研究はまだ始まったばかりである。今後、太平洋だけでなく他の大洋のホットスポットについても深海掘削研究を計画・実行する必要がある。地球の営みを探るために、深海掘削研究は今後も世界の海で続く。

4. 謝辞

本研究を進めるにあたり、Exp. 330 乗船研究者とテクニシャンおよび JOIDES Resolution のクルーには大変お世話になった。本研究は日本地球掘削科学コンソーシアム(J-DESC)サポートの Exp. 330 乗船支援、ポストクルーズミーティング支援およびアフタークルーズワーク支援を受けて実施されたものである。本研究の一部は高知大学海洋コア総合研究センター共同利用研究(11A009, 11B009, 12A003, 12B002)のもつで

実施された。

5. 文献

- 天野一男・秋山雅彦, 2004, フィールドジオロジー入門. 共立出版, 154p.
- Courtillot, V., Davaille, A., Besse, J. and Stock, J., 2003, Three distinct types of hotspots in the Earth's mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, **205**, 295–308.
- 小玉一人, 1999, 古地磁気学. 東京大学出版会, 248p.
- Kono, M., 1980, Paleomagnetism of DSDP Leg 55 basalts and implications for the tectonics of the Pacific plate. *Initial reports of the Deep Sea Drilling Project*, **55**, 737–752.
- Koppers, A. A. P., Yamazaki, T. and Geldmacher, J., 2010, Louisville seamount trail: implications for geodynamic mantle flow models and the geochemical evolution of primary hotspots. *IODP Scientific Prospectus*, **330**. doi:10.2204/iodp.sp.330.2010.
- Koppers, A. A. P., Yamazaki, T., Geldmacher, J., Gee, J. S., Pressling, N., Hoshi, H., et al., 2012, Limited latitudinal mantle plume motion for the Louisville hotspot. *Nature Geoscience*, **5**, 911–917.
- 熊澤峰夫・丸山茂徳, 2002 編, プルームテクトニクスと全地球史解説. 岩波書店, 407p.
- Lonsdale, P., 1988, Geography and history of the Louisville hotspot chain in the southwest Pacific. *Journal of Geophysical Research*, **93**, 3078–3104.
- Morgan, W. J., 1971, Convection plumes in the lower mantle. *Nature*, **230**, 42–43.
- Sharp, W. D. and Clague, D. A., 2006, 50-Ma initiation of Hawaiian-Emperor bend records major change in Pacific plate motion. *Science*, **313**, 1281–1284.
- 島津康男, 1967, 地球の進化. 岩波書店, 359p.
- Steinberger, B., Sutherland, R. and O'Connell, R. J., 2004, Prediction of Emperor-Hawaii seamount locations from a revised model of global plate motion and mantle flow. *Nature*, **430**, 167–173.
- 須藤 斎, 2011, 海底ごりごり地球史発掘. PHP 研究所, 240p.

- タルドゥーノ, J. A., 2008, ホットスポットは動いていた. 日経サイエンス, 2008年4月号, 64-71.
- Tarduno, J. A. and Cottrell, R. D., 1997, Paleomagnetic evidence for motion of the Hawaiian hotspot during formation of the Emperor seamounts. *Earth and Planetary Science Letters*, **153**, 171-180.
- Tarduno, J. A., Duncan, R. A., Scholl, D. W., Cottrell, R. D., Steinberger, B., Thordarson, T., et al., 2003, The Emperor Seamounts: southward motion of the Hawaiian hotspot plume in Earth's mantle. *Science*, **301**, 1064-1069.
- Wilson, J. T., 1963, A possible origin of the Hawaiian islands. *Canadian Journal of Physics*, **41**, 863-870.