

# 産総研の海外卓越研究員招聘制度による FORCaist プロジェクト

## — 地層の磁気記録機械学習から気候変動の解明へ —

森田澄人<sup>1)</sup>・小田啓邦<sup>2)</sup>・田中裕一郎<sup>2)</sup>・赤穂昭太郎<sup>3)</sup>

### 1. はじめに

2017年度、産総研は関係する学術界のトップリーダーを海外から一定期間招聘し、新たな研究体制に基づく共同研究プロジェクトを実施することを決定した。この一環として、地質調査総合センターと情報・人間工学領域では、岩石の磁気ヒステリシス高度解析の権威であるオーストラリア国立大学(ANU)物理数学科学部の前学部長 Prof. Andrew P. Roberts を招聘し、同教授をリーダーとする研究体制を構築して、岩石磁気学による緻密な分析と機械学習による高度解析を用いた高精度な地球環境変遷解析手法を開発する研究プロジェクト「FORCaist」を開始した。

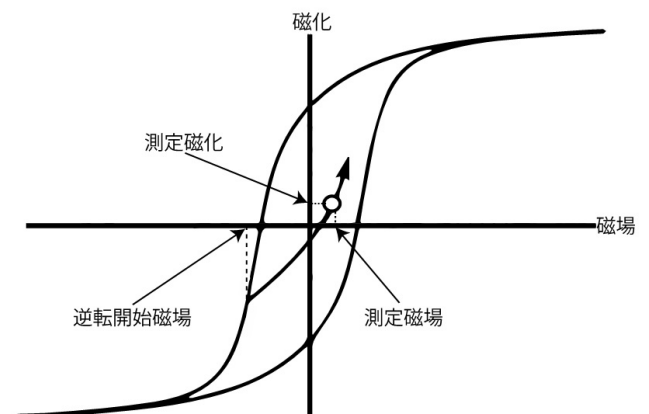
### 2. 磁気ヒステリシスと FORC 法

岩石及び地層の磁性物質に残された磁気記録については、過去50年来地球科学の様々な場面で適用され、主にテクトニクスや古環境変動において地球史における多様な事実を明らかにしてきた。その中でも、ANUの Prof. Roberts は、磁性物質の磁気ヒステリシスの高度測定・解析手法である FORC (First Order Reversal Curve) 法 (Roberts *et al.*, 2000 ; 2014, Zhao *et al.*, 2017 ほか) の開発者として著名であり、古地磁気学・岩石磁気学をはじめとし、層序学・古環境学や掘削科学の研究における第一人者である (e.g. Grant *et al.*, 2012, Marino *et al.*, 2015, Rohling *et al.*, 2009 ; 2014)。

地層を構成する堆積物や岩石には多かれ少なかれ磁性鉱物が含まれている。その磁性鉱物の種類・粒子形状・粒径・集合状態(磁気相互作用)は、磁気ヒステリシスを測定することによって調べることができ、その結果これら磁性鉱物がもたらされた当時の地球環境の推定が可能となる。磁気ヒステリシスとは、磁性物質に磁場を与えた時に過去の磁化状態の影響を残したかたちで再磁化するという性質で

ある。これは、たとえば針など鉄でできた細長い棒を一方方向に磁石のN極で擦ると、擦った方向がS極に磁化するが、逆方向に擦ると逆方向がS極に磁化するという現象からも伺い知ることができる。つまり、磁性物質の周囲から磁場を取り除いても磁化が残り、その方向や強さがその物質がそれまでに経験した磁場履歴に依存するという性質である。この磁気ヒステリシスを測定する場合は、試料に磁場をかけながら磁化の測定を行うが、このときプラスの最大磁場からマイナスの最大磁場まで変化させて、さらにプラスの最大磁場まで戻して完了する。このようにして得られた結果を横軸磁場、縦軸磁化として作図したものを磁気ヒステリシスループという(第1図)。

FORC法の詳細は前述の文献を参考にさせていただきたいが、簡単に説明すると、上記磁気ヒステリシスループ測定の途中で磁場を止めて(第1図; 逆転開始磁場)、磁場を逆向きに变化させつつ(第1図; 測定磁場)、そのときの磁化を測定する(第1図; 測定磁化)、という作業を繰り返し行い、こうして得られた一連の逆転開始磁場と測定磁場をX軸とY軸にとって、磁化をX方向Y方向にそれぞれ微分することで得られる作図法のことである。このよう



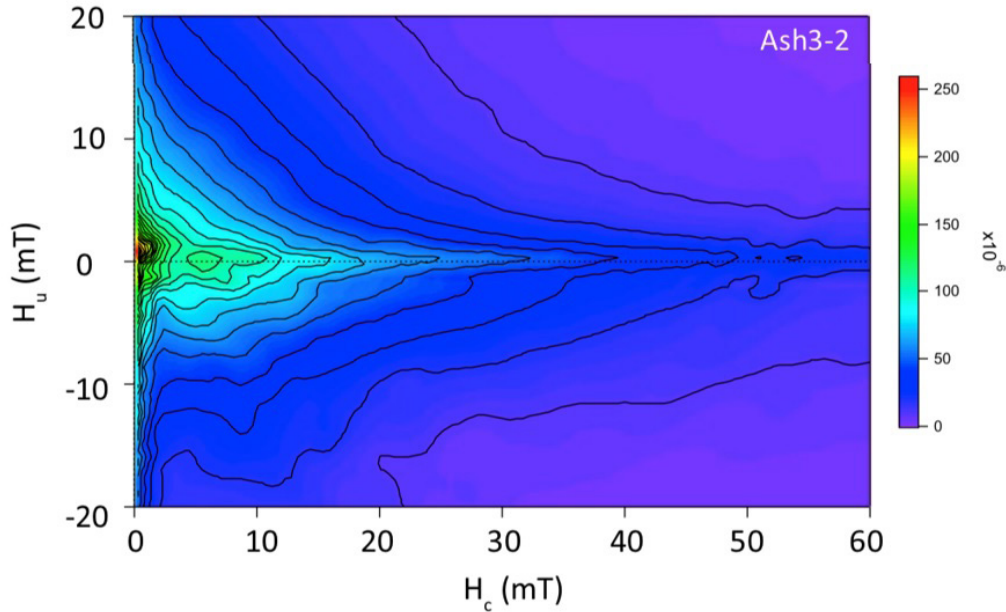
第1図 磁気ヒステリシスと FORC 測定の概略。図中の“逆転開始磁場”、“測定磁場”、“測定磁化”については本文を参照のこと。

1) 産総研 地質調査総合センター 研究戦略部研究企画室

2) 産総研 地質調査総合センター 地質情報研究部門

3) 産総研 情報・人間工学領域人間情報研究部門

キーワード：卓越研究員、古地磁気、磁気記録、磁気ヒステリシス、FORC、FORCaist、機械学習、環境変動



第2図 FORC図の一例 (Fig. 5f; Oda *et al.*, 2016). 南極で発見された火山灰試料の測定結果. 解釈の方法については Roberts *et al.* (2014)などを参照のこと.

にして得られるダイアグラム (FORC 図; 第2図) の解析から, 試料に含まれる磁性物質の保磁力分布と磁気相互作用を定量的に表現することができる手法として注目されている. FORC 法の日本語での詳細な解説は白井 (2016) を参照いただきたい. 磁性物質の FORC データは, 磁化の状態に応じてそれぞれ特徴的なパターンを示すことが知られているが, ダイアグラムの解析に機械学習を導入することによって, 人間の認識能力を超えた新たな知見が得られることが期待される.

### 3. FORCaist プロジェクト始動

プロジェクト名は「磁気記録と気候変動研究における機械学習手法の開発: Development of machine learning approaches in magnetic recording and climate research (ニックネーム: FORCaist)」とした. 本プロジェクトでは, 地層を構成する岩石試料中の微弱な磁気シグナル解析から各地層の供給起源を探るなど, 気候及び堆積環境の変遷史を FORC 法を用いて明らかにする. さらに, 岩石試料の磁気ヒステリシスデータを蓄積し, 機械学習を適用することで, 古環境変動高度解析手法を開発する.

Prof. Roberts の他にも同プロジェクトの参加メンバーを ANU から招聘し, 他研究機関とも協力する体制を整備した. 構成メンバーを以下に示す.

#### 招聘研究員メンバー

Prof. Andrew P. Roberts (ANU: プロジェクトリーダー)

Dr. David Heslop (ANU)

Dr. Xiang Zhao (ANU)

Dr. Pengxiang Hu (ANU)

#### 在外共同研究メンバー

Prof. Richard J. Harrison (ケンブリッジ大学)

Dr. Adrian R. Muxworthy (インペリアル・カレッジ・ロンドン)

#### 産総研メンバー

小田啓邦 (地質情報研究部門 上席主任研究員)

赤穂昭太郎 (情報人間研究部門 研究グループ長)

佐藤哲郎 (地質情報研究部門 ポスドク研究員)

ほか, 契約職員を含む

プロジェクトは幾度かの事前打ち合わせを経たのち, 2018年4月, 英国からの共同研究者らも迎えて合同でのキックオフミーティングを産総研つくばセンターで行った (写真). 研究遂行に必要な建設的アイデアが各メンバーから次々と出され, 盤石なかたちでプロジェクトはスタートを切った. 既に, プロジェクトの初期目標として設定された理論計算に基づく FORC データの生成及び過去の FORC データのノイズ解析, 日本の地質試料の FORC 測定などが同時並行的に進行中である. 標準となる磁性鉱物試料のリスタップもほぼ完了しており, これらの実測定も近日中



写真 2018年4月のキックオフミーティングの様子。一番左が Prof. Roberts。産総研つくばセンターにて。

に開始予定である。

今後、解析手法の確立と機械学習の習熟を重ね、将来的にはソフトウェア開発や若手研究者の育成への展開を図る。まず2018年度終了時には一定の成果を提示する予定である。

## 文 献

Grant, K. M., E. J. Rohling, M. Bar-Matthews, A. Ayalon, M. Medina-Elizalde, C. Bronk Ramsey, C. Satow and A. P. Roberts (2012) Rapid coupling between ice volume and polar temperature over the past 150,000 years, *Nature*, **491**, 744–747.

Marino, G., E. J. Rohling, L. Rodríguez-Sanz, K. M. Grant, D. Heslop, A. P. Roberts, J.D. Stanford and J. Yu (2015) Bipolar seesaw control on last interglacial sea level, *Nature*, **522**, 197–201.

Oda, H., I. Miyagi, J. Kawai, Y. Suganuma, M. Funaki, N. Imae, T. Mikouchi, T. Matsuzaki and Y. Yamamoto (2016) Volcanic ash in bare ice south of Sor Rondane Mountains, Antarctica: geochemistry, rock magnetism and nondestructive magnetic detection with SQUID gradiometer, *Earth Planets Space*, **68**, 39, doi:10.1186/s40623-016-0415-3.

Roberts, A. P., C. R. Pike and K. L. Verosub (2000) First-order reversal curve (FORC) diagrams: A new tool for characterizing the magnetic properties of natural

samples, *J. Geophys. Res.* **105**, 28,461–28,475.

Roberts, A. P., D. Heslop, X. Zhao and C. R. Pike (2014) Understanding fine magnetic particle systems through use of first-order reversal curve diagrams, *Rev. Geophys.*, **52**, 557–602.

Rohling, E. J., K. Grant, M. Bolshaw, A. P. Roberts, M. Siddall, C. Hemleben and M. Kucera (2009) Antarctic temperature and global sea level closely coupled over the past five glacial cycles, *Nature Geosci.*, **2**, 500–504.

Rohling, E. J., G. L. Foster, K. M. Grant, G. Marino, A. P. Roberts, M. Tamisiea and F. Williams (2014) Sea-level and deep-sea-temperature variability over the past 5.3 million years, *Nature*, **508**, 477–482.

白井洋一 (2016) VSMによる測定と解析：磁気ヒステリシスと寄与分解, <http://peach.center.ous.ac.jp/cswiki/index.php?VSMによる測定と解析：磁気ヒステリシスと寄与分解#yc49255f>. (2018年5月16日 確認)

Zhao, X., A. P. Roberts, D. Heslop, G. A. Paterson, Y. L. Li and J. H. Li (2017) Magnetic domain state diagnosis using hysteresis reversal curves, *J. Geophys. Res.*, **122**, 4767–4789.

MORITA Sumito, ODA Hirokuni, TANAKA Yuichiro and AKAHO Shotaro (2018) FORCaist project by AIST's overseas excellence researcher invitation program: From machine learning of geological magnetic records to an elucidation of climate change.

(受付：2018年5月16日)