岩石残留磁化を用いた掘削コア試料の定方位化: 半遠洋性堆積軟岩への適用例[†]

杉本 達洋* 山本 裕二**
山本 由弦*** 林 為人****

A Method for Core Reorientation Based on Rock Remanent Magnetization: Application to Hemipelagic Sedimentary Soft Rock

by

Tatsuhiro SUGIMOTO*, Yuhji YAMAMOTO**,
Yuzuru YAMAMOTO*** and Weiren LIN****

In-situ orientations of drilled core samples are valuable for a broad area of geological and geophysical researches (e.g. the determination of in-situ principal stress directions or the analyses of geological structures). In many cases, however, the information on in-situ orientation of core samples is not available. In this paper, a method for restoring the in-situ orientation of drilled whole-round core samples and its application to hemipelagic ocean sedimentary rocks are presented. The method is based on natural remanent magnetization (NRM) of rocks. As a case study, we applied this method to the 15 oceanic sedimentary soft rock samples collected at the toe of the Nankai trough, SW Japan, during International Ocean Discovery Program (IODP) Expedition 370. We developed a new sample preparation procedure which enabled us to get more data and then to evaluate the NRM measurement results well. Some samples were not able to be reoriented due to magnetic overprints associated with the drilling operations. In order to evaluate the magnetic overprints caused by drilling operation and to assess the data quality of the core reorientation by this method, we propose an evaluating system including three ranks defined for the different levels in which NRM results were affected by drilling operations. This evaluating system could be useful to assess the data quality of core reorientation by NRM method in the other similar applications.

Key words:

Paleomagnetism, Core reorientation, Natural remanent magnetization (NRM),
Hemipelagic ocean sedimentary rock, Drilled rock core sample

1 緒 言

地殻を安全かつ効率的に開発するためには、地殻物性、原位置応力、地下構造など、地殻に関する種々の情報が必須となる。それら情報を得るための方法の一つに、掘削コア試料(以下、掘削試料と略す)を用いた解析がある。掘削試料を用いた方法には、i) 地殻内物質を直接測定可能、ii) 実験室において種々の条件下で測定が可能、などの利点がある。掘削試料から地殻に関する情報(原位置応力の方位、透水性の異方性、小断層等の地質構造など)を最大限引き出すためには、その原位置における方位情報が必須となる。しかし、通常の掘削方法では掘削時に試料が回転し、その方位情報は失われてしまうため、なんらかの方法で方位を復元する必要がある。これを、試

料の定方位化と呼び、種々の方法が報告されている¹⁾⁻³⁾。

岩石残留磁化、特に自然残留磁化を用いた方法は、これまでにも様々な研究で用いられ多くの成果が得られている⁴⁾⁻⁷⁾。同じ岩石残留磁化を用いた方法でも試料成形方法の面でいくつかの種類がある。従来の方法は、円柱状の掘削試料からスポットコアリングにより、小試料を一つ切り出し、その岩石残留磁化を測定する方法である。しかし、これらの研究で実施された定方位化法では、定方位結果に対する客観的な品質評価が行えないという問題点が挙げられる。この問題を解消する方法として我々は、一つの試料から9つの小試料を切り出し、そのうちの8つに対し残留磁化の測定を行うことで測定結果の信頼性評価を行う方法を提案する。これまでにも、測定結

[†] 原稿受理 令和元年 8 月 15 日 Received Aug. 15, 2019

©2020 The Society of Materials Science, Japan

* 京都大学大学院 工学研究科 都市社会工学専攻 〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂

Department of Urban Management, Graduate School of Engineering, Kyoto University, Nishikyo-ku, Kyoto 615-8540.

** 高知大学 海洋コア総合研究センター 〒 783-8502 南国市物部

Center for Advanced Marine Core Research, Kochi University, Monobe, Nankoku, 783-8502.

*** 国立研究開発法人 海洋研究開発機構 数理科学先端技術研究開発センター 〒 236-0001 横浜市中区金沢区昭和町

Center for Mathematical Science and Advanced Technology, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Kanazawa-ku, Yokohama, 236-0001.

**** 正会員 京都大学大学院 工学研究科 都市社会工学専攻 〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂

Department of Urban Management, Graduate School of Engineering, Kyoto University, Nishikyo-ku, Kyoto 615-8540.

果の信頼性評価を行うために、一つの岩石試料から複数の小試料を切り出して岩石残留磁化測定を行った研究は多数存在する⁸⁾。しかし、本研究のように定方位化を目的として1つのコア試料から複数小試料を切り出し、定方位化の信頼性を評価した研究は見当たらない。

本論文では、はじめに岩石残留磁化を用いた定方位化の原理を説明し、試料の成形方法について詳述したのち、国際深海科学掘削計画 (International Ocean Discovery Program (IODP)) の第370次研究航海により、高知県室戸岬沖で採取された半遠洋性堆積物 (または半遠洋性堆積軟岩) 掘削試料に対して本手法を適用した結果を報告する。さらにコアの定方位化に対して、掘削による二次的残留磁化の影響を検討した上で、データ品質評価に関する取り組みを述べる。

2 測定原理

2.1 岩石の初生残留磁化ならびにそれを用いた定方位化

一般に岩石は鉄の酸化物や硫化物などの強磁性体からなる磁性鉱物を含んでおり、それにより岩石自体も磁性を持つ。物質の持つ磁性を表す物性値の一つとして磁化がある。岩石はその形成時に地球磁場と平行に残留磁化を獲得することが知られている。このように岩石形成と同時に獲得される磁化のことを初生残留磁化 (Primary NRM) と呼ぶ。本研究で用いる方法は、この初生残留磁化方向が真北を向くという仮定を用いてコアの方位付を行う。

2.2 二次的残留磁化の消磁

岩石はその形成後も、外部環境の変化にともない二次的な残留磁化を獲得することが多い。このような磁化を二次的残留磁化 (Secondary NRM) と呼ぶ。掘削直後のコア試料が持つ NRM は初生残留磁化と掘削等の影響により獲得された二次的残留磁化を合成したものである (Fig. 1)。よって、岩石の初生残留磁化を用いてコアを定方位化する際に、この二次的残留磁化を選択的に消去する必要がある。このように岩石が記憶している残留磁化を人工的に消去することを消磁 (Demagnetization) と呼ぶ。一般に、二次的残留磁化は初生残留磁化と比較して、保磁力が弱いので、選択的な消去が可能となる (Fig. 1)。

主な消磁方法として、試料を加熱することで消磁する熱消磁と、試料に交流磁場を印加することで消磁を行う交流消磁が存在する。本研究では、複数試料を同時に効率的に消磁できる交流消磁を用いて二次的残留磁化の消磁を実施した。岩石残留磁化は3次元ベクトルであり、本来ならば、消磁結果も3次元の図に表す必要がある。その3次元の消磁結果を分かりやすく表示する方法として、直交面投影 (または Ziderveld 投影) と呼ばれる方法がある⁹⁾ (Fig. 2)。

i) 測定される磁化ベクトルは初生残留磁化と二次的残留磁化の合成ベクトルである、ii) 二次的残留磁化が完全に消磁されてから初生残留磁化の消磁が開始されるとい

う2つの仮定を置くことで、初生残留磁化成分は、最終的に原点に向かって直線的に消磁される成分となる。従来の研究ではこの仮定を用いて、初生残留磁化成分を分類している。本研究においてもこの方法で初生残留磁化成分と二次的残留磁化成分の分類を行った。

2.3 定方位結果の品質決定手順

本節では定方位結果の品質の決定方法について述べる。本研究では、特に掘削による影響の評価を行うことを目的として、定方位化品質を以下のようにランク A, ランク B, ランク C の3段階に分類した。それぞれのランクへの分類は以下の手順で行われる。

Step1 ランク C の結果の決定

掘削の影響が最も少ないと考えられる中心試料 (Fig. 3(b) の試料番号 1) の測定結果を確認し、直交投影面図上で、最終的に原点に向かって直線的に消磁される成分として初生残留磁化成分が決定できているかどうかを確認する。この時点で初生残留磁化成分が確認できない試料はランク C へ分類する。

Step2 ランク A, B の結果の決定

結果がランク C に分類されなかった場合、すなわち、中心試料から初生残留磁化成分が決定できている場合、8つの小試料の測定結果を用いて、残留磁化方位に関する95%信頼限界角である α_{95} を計算する (α_{95} の定義に関しては¹⁰⁾)。この α_{95} が $\leq 5^\circ$ となる試料をランク A とし、それ以外の試料をランク B とする。

ランク B の結果の取り扱いに関しては、試料の個数やランク B の試料が得られた場所の重要度などを総合的に評価して測定結果に取り入れるかどうか判断することを想定している。

Fig. 1 Schematic graph showing demagnetization steps. Two-dot chain lines show primary natural remanent magnetization (NRM). One-dot chain lines show secondary NRM on each demagnetization steps, which are demagnetized in order to extract primary NRM. Black solid lines show sums of primary NRM and secondary NRM (resultant NRM) on each demagnetization steps. Broken lines show demagnetized secondary NRMs. Resultant NRMs are measured on each step and plotted on Ziderveld projection.

3 実験方法

本研究で適用した試料成形手順について以下に詳述する。まず円柱状掘削試料 (Fig. 3(a)) の上端もしくは下端から厚さ約 2 cm の円盤状の試料を切り出す。厚さを 2 cm としたのは使用した測定装置で測定可能な試料の高さが最大で約 2 cm であるためである。次に切り出した円盤試料を Fig. 3(b) に示すように 9 個の小試料に切り分ける。Fig. 3(b) 中に記載されている番号は Fig. 6(a)(b)(c) 中の番号と対応している。このように試料を切り分ける理由は、1) 測定機器による試料の大きさに対する制限、2) 円柱状試料の残りの部分を他の測定に用いることができる、3) 測定結果の品質を評価できることなどが挙げられる。小試料を切り出す際に岩石カッター周辺の磁場環境によって等温残留磁化が印加される可能性があるが、主に影響を受け得るのは切断面のみであり、約 8 cm^3 の体積を持つ試料に対して僅かな部分のみである。また、そのような磁化も二次的残留磁化の一部として扱われる。そのため、その影響は最終的な結果を見て判断する必要がある。切り出した小試料は乾燥を防ぐために、パラフィルム等で包む (Fig. 3(c))。測定機器の仕様により、同時に測定可能な小試料個数は 8 個なので、切り出された 9 個の小試料の中から中心小試料を含む 8 個の小試料を選び測定を行う。中心以外的小試料を選ぶ際は、体積が十分にある小試料を選ぶようにした。

本研究ではパススルー型超伝導岩石磁力計 (2G 社: Model 760R) を用いて消磁および磁化測定を行った。消磁は段階的交流消磁を用いて行った。この方法では 0 mT から 80 mT まで段階的 (本研究では 24 段階) に強くなる交流磁場を試料に印加することで、保磁力の弱い残留磁化から順に、段階的に消磁することができる。全段階の各強度の交流磁場を印加するごとに残留磁化測定を行うことで、残留磁化の消去過程を Ziderveld 投影図上にプロットし、初生残留磁化を抽出することができる^{11), 12)} (Fig. 2)。

各小試料に対して抽出された残留磁化は、伏角 (Inclination) および偏角 (Declination) の 2 つの角度を用いて表現される。本論文における伏角および偏角の定義を Fig. 4 に示す。一般的に偏角は真北からの角度を意味するが、本研究では試料表面に引いた任意の基準線 (図の reference line) と、得られる磁北間の角度として定義した。なお岩石残留磁化が記録している方位は、岩石形成時の地磁気方位が平均化されたものであり、数千年以上といった非常に長い期間にわたって形成している場合は地磁気永年変化が平均化されて真北と一致すると考えていい (地心軸双極子仮説)⁹⁾。本研究でも地心軸双極子仮説が成立するとする。Ziderveld 投影図上の測定結果に対して最小二乗法による直線フィッティングを行い、図から伏角と偏角を読み取ることで、岩石コア試料の残留磁化方位を決定する。

Fig. 3 Pictures of sample preparation. (a) A whole round core sample. Strain gages attached to the sample were used for another measurement. (b) A disc-shaped sample cut from a whole round core sample. The numbers show those of specimens used in Fig. 6. (c) Specimens wrapped by parafilms. White arrow show the direction of the reference line of the whole-round core sample.

4 実験試料

本研究で用いた掘削試料は国際深海科学掘削計画 (IODP) 第 370 次航海において掘削された試料である。本掘削孔 C0023A は鉛直掘削孔であり、高知県室戸岬沖から南東約 120 km に位置する南海トラフのプレート沈み込み帯先端部に位置している ($32^{\circ}22.00' \text{ N}$, $134^{\circ}57.98' \text{ E}$, 水深 4776 m)¹³⁾。本研究で定方位化を行った試料は第四紀から中新世の地層 (海底下深度 430~1123 m) から採取された軟質の堆積岩 (Table 1) であり、いずれの試料も空隙率は 25 – 45% であった¹³⁾。用いた掘削試料は全部で 15 個あり、上記試料成形手順で説明した方法により、それぞれの試料から 9 つの小試料を切り出した。

Fig. 4 The definitions of inclination and declination. Inclination is the angle from the horizontal plane and declination is the angle from an arbitrary determined reference line.

Fig. 2 (a) Projections of NRM onto the horizontal and vertical planes. (b) Schematic diagram of a Ziderveld projection. The numbers in the figures show the number of steps in demagnetization process. Solid black circles are projections of the end points of the NRM vector onto the horizontal plane and open circles are those onto a vertical plane oriented north-south.¹⁰⁾

Table 1 Results of core reorientation based on the Remanent Magnetization Measurements.

Sample ID	IODP core sample source	Core top depth (mbsf)	Inclination (°)	Declination (°)	α_{95} (°)	Rank
Core-1	C0023A-18R-1-WR 101.0-121.0 cm	429.01	54.4	286.7	3.8	A
Core-2	C0023A-23R-1-WR 98.0-109.0 cm	475.98	55.6	137.8	3.3	A
Core-3	C0023A-24R-7-WR 25.0-45.0 cm	491.17	45.5	317.1	2.2	A
Core-4	C0023A-33R-7-WR 70.0-85.0 cm	567.13	-52.0	214.5	7.8	C
Core-5	C0023A-43R-5-WR 60.0-81.0 cm	654.87	63.5	215.2	1.8	A
Core-6	C0023A-54R-2-WR 20.0-37.0 cm	713.80	-37.1	36.7	13.7	B
Core-7	C0023A-55R-1-WR 112.0-131.0 cm	718.62	63.4	180.5	4.1	A
Core-8	C0023A-61R-2-WR 0.0-19.0 cm	748.34	56.9	102.2	1.9	A
Core-9	C0023A-67R-1-WR 108.0-121.0 cm	776.08	-16.7	188.5	4.7	A
Core-10	C0023A-77R-2-WR 127.0-146.5 cm	822.02	-17.9	18.2	2.7	A
Core-11	C0023A-81R-4-WR 15.0-35.0 cm	846.48	56.4	290.7	2.4	A
Core-12	C0023A-86R-3-WR 131.0-151.0 cm	892.99	-54.4	117.5	3.8	A
Core-13	C0023A-92R-3-WR 70.0-96.0 cm	950.11	-73.8	156.6	18.4	C
Core-14	C0023A-99R-3-WR 20.0-40.0 cm	1023.11	71.9	116.7	5.3	C
Core-15	C0023A-110R-2-WR 46.0-65.0 cm	1122.74	80.2	71.5	2.5	A

5 実験結果

定方位化に成功した実験結果の一例を Fig. 5 に示す。これは Core-1 の中心小試料 (Fig. 3(b) 中の 1) から得られた NRM の段階交流消磁結果を Ziderveld 投影図上にプロットしたものである。図中の黒丸は、各消磁ステップで得られた残留磁化ベクトルの終点を水平面上に投影したものである。ベクトルの長さは磁化の強さを表す。同様に黒い輪郭の白丸は鉛直平面への投影を表す。灰色のプロット (黒丸および白丸) は二次的残留磁化成分を表している。また図中の直線は初生残留磁化に対して当てはめを行った回帰直線である。初生残留磁化成分に対してのみフィッティングを行うため、原点に向かって直線的に消磁されるデータに対してフィッティングを行っている。これらの直線と X 軸を挟む角から伏角および偏角を求める。

全試料に対する残留磁化測定から得られた伏角と偏角をまとめて Table 1 に示す。表中に伏角が負の値を示すものがあるが、これは測定試料の形成期間が逆磁極期であったためと考えられる。

地球中心に位置し自転軸と一致する磁気双極子 (地軸双極子) によって地磁気が形成されていると仮定することで、地表における各緯度での伏角値を以下の式 (1) を用いて計算することができる。

$$I = \tan^{-1}(2 \tan \lambda). \quad (1)$$

ここで I は伏角の値を表し、 λ は掘削地点の緯度を表す¹⁰⁾。式 (1) に掘削地点の緯度を代入すると伏角は約 52° という値が得られる。この理論値をもとに定方位化品質の評価を行うことが考えられるが、実際に得られる伏角の値は圧密による浅化や地層の回転により理論値から大

きく変化する場合があることが報告されている (Butler (1992)⁹⁾P. 52). したがって、伏角の値は品質評価の参考になるが、この値のみで品質評価を行うことは困難であると考えられる。

Fig. 5 The Ziderveld projection of the result of Core-1-1. Black solid circles are projections of the end points of the NRM vector onto the horizontal plane and black open circles are those onto a vertical plane oriented north-south. Gray circles (open and solid) are the secondary components of the NRM vector.

6 掘削による影響の評価

本研究で用いた定方位化法における最大の特徴は、掘削による磁化の影響の客観的な評価が可能なことである。本章では、測定結果の中から2・3節で定義した3つのランクを代表する試料を1つずつ選び出し、その測定結果を示すとともに、掘削が定方位化に与える影響について議論する。次ページに示すFig. 6は3つのランクを代表する試料から成形した各小試料の消磁結果をZiderveld投影図上へプロットしたものである。図中の番号(1-9)と小試料の対応関係はFig.3(b)に示されている通りである。Fig. 7は各小試料の持つ残留磁化ベクトルを等積投影したものである。プロットされるベクトルは単位ベクトルである。図中の黒丸は下半球投影を、黒い輪郭の白丸は上半球投影を、三角点については各小試料の平均方位をそれぞれ表す。灰色の点はZiderveld図上で直線成分が抽出できなかった小試料から得られた方位であり、平均計算に含めなかったことを表す。

6.1 ランク A

本ケースの代表例(Core-1)の測定結果をFig. 6(a), Fig. 7(a)に示す。このタイプの試料では、中心の小試料と周囲の小試料で、結果に大きな違いは見られない。このタイプの試料は、掘削による影響を受けていないと考えられ、正しく定方位化を行うことができたと判断される。ただし、Core-15の伏角は鉛直下向きの90°に近い値を示しているため、このコアについてののみ、掘削時に受けた鉛直下向きの二次的残留磁化に該当する可能性はないかどうか更なる検討が必要である。

6.2 ランク B

本ケースの代表例(Core-6)の測定結果をFig. 6(b), Fig. 7(b)に示す。このタイプの試料では中心から切り出された小試料(図中の1)の初生残留磁化は比較的明瞭に表れるが、周辺から切り出された小試料(図中の4, 5, 6)では掘削時に受けた鉛直下向きの二次的残留磁化の影響が大きく、直線成分を取り出すことが困難となる。

Fig. 7 Equal-area projections of the NRM directions for 8 specimens from one whole round core sample. Black solid circles show lower hemisphere projection and open circles show upper hemisphere projection. Gray circles (solid and open) show the specimens which are not used for averaging. Triangles show the averaged direction using the results from specimens except for gray ones. Dotted circles show the 95% confidence area. (a) The result of Core-1 (rank A), (b) the result of Core-6 (rank B), (c) the result of Core-4 (rank C).

Fig. 6 Ziderveld projections of NRM obtained from (a) Core-1, (b) Core-6, (c) Core-4. The numbers show those of the specimens (see Fig. 3(b)).

6.3 ランク C

本ケースの代表例(Core-4)の測定結果をFig. 6(c), Fig. 7(c)に示す。このタイプの試料は、中心部分を含めて、試料全体が掘削時に強磁性材料である鋼鉄製のパイプなどの影響を受けてしまい、初生残留磁化成分自体が攪乱されてしまうため、初生残留磁化成分を表す直線成分の抽出が可能な小試料が存在しない。このタイプの試料では岩石残留磁化を用いた定方位化手法は適用できない。

このように、同一の掘削において異なる3種類の結果が得られる原因としては、掘削ビットの帯磁度合いの違い、試料自体の保磁力の違いなどが考えられる。

7 結 言

本論文では、掘削コア試料の定方位化を行うための手法の一つである岩石残留磁化による方法を、南海トラフにおいて掘削された半遠洋性堆積軟岩試料に対して適用し、掘削による二次的残留磁化の影響を議論した。掘削試料の定方位化には、岩石に記録されている初生残留磁化を抽出する必要がある。岩石は、初生残留磁化を獲得後も二次的残留磁化を獲得することがあるため、定方位化を行うためには二次的残留磁化を選択的に消磁する必要がある。掘削試料に対して残留磁化を用いた定方位化法を適用する際に重要なことは、掘削による二次的残留磁化の影響を評価することである。本研究では、掘削の影響が少ないと考えられる中心小試料と影響を強く受けていると考えられる周囲の小試料を比較することでその影響評価を行った。本論文で報告した3つのケースの内、すべての小試料において、Ziderveld 投影図上の互いに一致する直線成分が明瞭に表れる場合(ランク A)および、中心小試料と周囲のいくつかの小試料において、Ziderveld 投影図上の直線成分が明瞭に表れる場合(ランク B)は、岩石残留磁化による定方位化が可能である。残された課題の一つとして、それぞれのコアの平均方位を求める際の加重平均の方法に関する問題が挙げられる。一般に中心小試料の測定結果の方が周辺小試料の結果と比べて信頼性が高いと考えられる。この事実をどのような形で平均計算に含めるかは今後の課題としたい。本研究で提案した試料の準備方法ならびにデータの品質評価は、特にIODP等の大深度掘削のような掘削コア試料が貴重な場合など、高い参考価値を有するものと期待される。

本研究では、国際深海科学掘削計画第370次航海において採取された試料を使用させていただいた。試料の準備に際しては、海洋研究開発機構高知コア研究所の廣瀬丈洋氏、マリンワークジャパンの多田井修氏から多大な協力をいただいた。また、京都大学工学研究科の村田澄彦氏からは研究の遂行に際し多大の示唆をいただいた。本研究は高知大学海洋コア総合研究センター共同利用・共同研究(随時分16C002)のもとで実施された。ここに深い感謝の意を申し上げる。

参 考 文 献

- 1) N. Shigematsu, M. Otsubo, K. Fujimoto and N. Tanaka, "Orienting drill core using borehole-wall image correlation analysis". *Journal of Structural Geology*, Vol. 67, pp. 293–299 (2014).
- 2) M. Tamaki, K. Suzuki and T. Fujii, "Paleocurrent analysis of Pleistocene turbidite sediments in the forearc basin inferred from anisotropy of magnetic susceptibility and paleomagnetic data at the gas hydrate production test site in the eastern Nankai Trough". *Marine and Petroleum Geology*, Vol. 66, pp. 404–417 (2015).
- 3) R.A. Nelson, L.C. Lenox and B.J. Ward Jr, "Oriented core: its use, error, and uncertainty". *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, Vol. 71, pp. 357–367 (1987).
- 4) T. Byrne, W. Lin, A. Tsutsumi, Y. Yamamoto, J. C. Lewis, K. Kanagawa, Y. Kitamura, A. Yamaguchi and G. Kimura, "Anelastic strain recovery reveals extension across SW Japan subduction zone". *Geophysical Research Letters*, L23310 (2009).
- 5) Y. Yamamoto, W. Lin, H. Oda, T. Byrne and Y. Yamamoto, "Stress states at the subduction input site, Nankai Subduction Zone, using anelastic strain recovery (ASR) data in the basement basalt and overlying sediments". *Tectonophysics*, Vol. 600, pp. 91–98 (2013).
- 6) Y. Nagano, W. Lin and K. Yamamoto, "In-situ stress analysis using the anelastic strain recovery (ASR) method at the first offshore gas production test site in the eastern Nankai Trough, Japan". *Marine and Petroleum Geology*, Vol. 66, pp. 418–424 (2015).
- 7) J. M. Parés, A. M. Schleicher, B. A. van der Pluijm and S. Hickman, "Paleomagnetic reorientation of San Andreas Fault Observatory at Depth (SAFOD) core". *Geophysical Research Letters*, L02306 (2008).
- 8) J. Chunsheng and L. Qingsong, "Reliability of the natural remanent magnetization recorded in Chinese loess". *Journal of Geophysical Research*, Vol. 115, No. B4, pp. 1–15 (2010).
- 9) R. F. Butler, "Paleomagnetism: Magnetic Domains to Geologic Terranes" (1992) Blackwell Science Inc.
- 10) K. Kodama, "Paleomagnetism" (1999) University of Tokyo Press.
- 11) P. L. McFadden and M. McElhinny, "The combined analysis of remagnetisation circles and direct observation in palaeomagnetism". *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 87, pp. 161–172 (1988).
- 12) J. L. Kirschvink, "The least-square line and plane and the analysis of paleomagnetic data". *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, Vol. 62, pp. 699–718 (1980).
- 13) V. B. Heuer, F. Inagaki, Y. Morono, Y. Kubo, L. Maeda, S. Bowden, M. Cramm, S. Henkel, T. Hirose, K. Homola, K. T. Hoshino, A. Ijiri, H. Imachi, N. Kamiya, M. Kaneko, L. Lagostina, H. Manners, H. L. McClelland, K. Metcalfe, N. Okutsu, D. Pan, M. J. Raudsepp, J. Sauvage, F. Schubotz, A. Spivack, S. Tonai, T. Treude, M. Y. Tsang, B. Viehweger, D. T. Wang, E. Whitaker, Y. Yamamoto and K. Yang, "Expedition 370 summary". *Proceedings of the International Ocean Discovery Program*, Vol. 370, pp. 1–20 (2017).