

# Deconvolution of Magnetic Susceptibility Data from Pass-Through Measurement of U-Channel Samples

Ryo YASUDA\* and Akira HAYASHIDA\*\*

(Received January 21, 2019)

Pass-through measurement of remanent magnetization and magnetic susceptibility of U-channel samples is now widely used in paleomagnetic and environmental magnetic studies of marine and lacustrine sediments. Since the output from pass-through measurement is inevitably smoothed and distorted by the response function of the sensors, deconvolution of the measurement result is necessary to obtain accurate signals of the sediment. Methods of deconvolution have been improved by modeling the remanent magnetization as a smoothly changing function by minimizing Akaike's Bayesian information criterion. In this study, we developed deconvolution programs for pass-through magnetic susceptibility data based on the same algorithm, first by using a single smoothness parameter for the entire sample and then introducing an additional parameter for the interval with a strong susceptibility peak. Applying these programs to U-channel samples from Lake Tazawa, Akita Prefecture, it was confirmed that results of the deconvolution well correspond with susceptibility of the discrete samples. However, the interval with a sharp susceptibility peak produced noisy erroneous variation, suggesting that further improvement is necessary for deconvolution of the samples including tephra or event layers.

**Key words** : deconvolution, pass-through measurement, magnetic susceptibility, sediment core, environmental magnetism

**キーワード** : デコンボリューション, パススルー測定, 初磁化率, 堆積物コア, 環境磁気学

## Uチャネル試料のパススルー測定によって得られた初磁化率データの デコンボリューション

安田 涼, 林田 明

### 1. はじめに

地球表層の岩石や堆積物には微量の強磁性鉱物が含まれており, それらが保持する残留磁化や他の磁気特性は地球磁場やテクトニクス, 地球環境などの研究を行う古地磁気学や環境磁気学の分野で広く利用されている. 海底や湖底の堆積物を対象とした研究では, 連続的な解析を行うためにピストンコアな

どの円柱状試料を採取し, それらのコアを半割した面から, 体積 7~10 cm<sup>3</sup> 程度の立方体カプセル (キューブ), あるいは約 4 cm<sup>2</sup> の正方形の断面を持つ長さ 100~150 cm のプラスチック製 Uチャネル<sup>1, 2)</sup> に堆積物を分取して磁気測定を行うことが一般的である. 近年は, 柱状試料の磁化を連続的に測定できる超伝導磁力計や各種のコアロギング装置が普及し

\*Graduate School of Science and Engineering, Doshisha University, Kyo-tanabe, Kyoto

\*\*Department of Environmental Systems Science, Doshisha University, Kyo-tanabe, Kyoto 610-0321

Telephone: +81-774-65-6680, E-mail: ahay@mail.doshisha.ac.jp

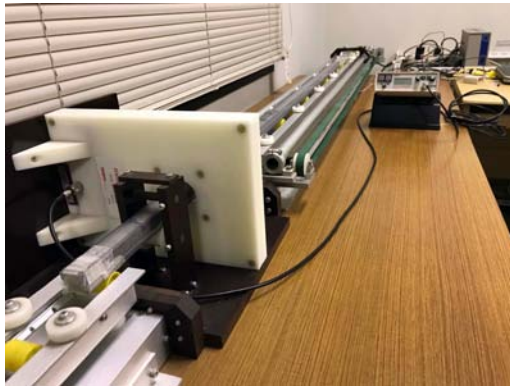


Fig. 1. Magnetic susceptibility measurement system for U-channel samples with a core-logging sensor (MS2C).

たことにより、Uチャネル試料が広く利用されるようになって<sup>3)</sup>。

Uチャネル試料を用いると、個別試料に比べて試料の採取と測定を連続的に、また迅速に行うことが容易になる。ただし、その測定は試料がセンサーコイルを通過するパススルー方式によって行われるため、磁力計の出力は、試料の磁化がセンサー固有の応答曲線（レスポンスカーブ）によって畳み込まれた（コンボリューションされた）値となる。例えば 2G Enterprises 社のパススルー型磁力計（Model 755R；室温ボア径 4.2 cm）のセンサーはその中心から両側に約 5 cm の感度幅を持ち、厚さ 10 cm 程度の堆積物の磁化が応答曲線による重み付けによって平均化される。さらに 3 軸のセンサーのうち、特に Uチャネルの長軸方向（z 成分）のセンサーが他の 2 軸（x, y 成分）と異なる形状の応答曲線を持つため、残留磁化の方位に虚偽の偏りが生じる可能性もある。このため、1 cm 間隔でパススルー測定を行っても、その解像度で残留磁化の変動を検出することが困難であるだけでなく、Uチャネルの両端を含め、測定結果の解釈には十分な注意が必要である。このような問題を解消するため、パススルー測定の結果のデコンボリューション（逆畳み込み）について多くの研究が行われてきた<sup>4, 5)</sup>。パススルー磁力計の出力にデコンボリューションを適用する際に問題になるのは、試料の位置決定の誤差や水平方向の磁化の不均質性、応答曲線の不正確さなどに由来するノイズ

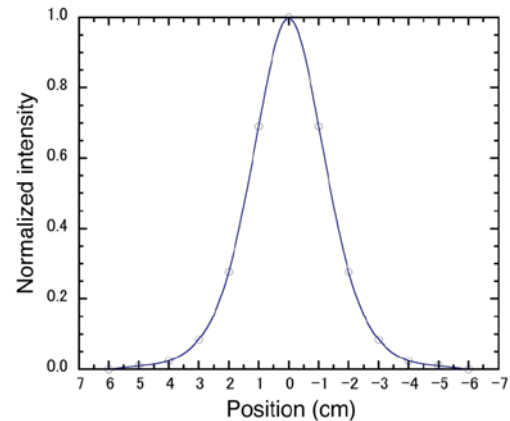


Fig. 2. Response curve of the core-logging sensor (Bartington MS2C).

が増幅されることである。これに対処するために、Constable and Parker (1991)<sup>6)</sup>は堆積物の磁化の変化が平滑であるという制約を導入した計算を試み、さらに Oda and Shibuya (1994, 1996)<sup>7, 8)</sup>は赤池ベイ情報量規準（ABIC）を最小化することによって最適な平滑化の条件を得る手法を提唱した。この手法は Oda and Xuan (2014)<sup>9)</sup>によってさらに改良され、そのアルゴリズムを実装したデコンボリューション最適化ソフトウェア UDECONE が Xuan and Oda (2015)<sup>10)</sup>によって公開された。今後、この手法が多くの研究に適用されると考えられる。

上述したパススルー測定の結果の解釈に関する課題の一部は、1 軸のコアロギング用のループセンサーを用いて初磁化率を測定する場合にも存在する。Bartington 社の磁化率計（Model MS2）とループセンサー（MS2C；内径 40 mm）、Uチャネル試料の搬送装置を組み合わせた測定システム（Fig. 1）の場合、ループセンサーの応答曲線は 2G 755R に近い感度幅を持つため、初磁化率と残留磁化の変動について同程度の解像度で比較検討を行うことができる。しかし、二つのデータに対して同様の手法でデコンボリューションを適用した上で議論を行うことが望ましいことは当然である。本研究では、パススルー測定による初磁化率データに対し、Oda and Shibuya (1994)<sup>7)</sup>が提案した方法に従ってデコンボリューションを行うプログラムを構築した。また、これを実際の堆積物試料（秋田県田沢湖から採取された湖底

堆積物の U チャンネル試料) に適用し、同一のコアから採取したキューブ試料の測定結果と比較した。さらに、1 本の U チャンネル試料の中で磁性鉱物含有量が急激に変化する場合を考慮し、試料の一部に別の平滑度を設定することを可能にした Oda and Shibuya (1998)<sup>11)</sup> の手法を取り入れたプログラムを作成し、その有効性を検討した。

## 2. 方法

本研究で用いた試料は、秋田県田沢湖で採取されたピストンコア (TZW15-1; 全長 350 cm) の堆積物である。主に年縞を伴うシルトからなり、深度約 40 cm に厚さ約 3 cm の白頭山苦小牧テフラ (B-Tm) が認められる他、数枚の砂質イベント層が含まれていた。磁気測定用の試料としては、フローインの状態であった下部 90 cm を除き、長さ約 1 m に切断された 3 本のセクション (TZW15-1-1, TZW15-1-2 および TZW15-1-3) の半断面から U チャンネル試料を採取した。さらに、U チャンネルと平行に 7 cm<sup>3</sup> のキューブ試料を連続的に採取した。

キューブ試料の初磁化率は、MS2 と個別試料用の MS2B センサー (駆動周波数 0.47 kHz) を用いて測定した。各試料につき 3 回の測定を行って平均値を得た後、空のキューブの初磁化率を補正し、Fukuma and Torii (2011)<sup>12)</sup> によって提案された希土類酸化物を標準試料として用いる較正方法にしたがって質量磁化率と体積磁化率への換算を行った。

U チャンネル試料の初磁化率測定には前述のシステム (Fig. 1) を用い、試料の前後 4 cm を含めて 1 cm 間隔でデータを取得した。また、U チャンネル容器の磁化率の補正とバックグラウンド値のドリフト補正も行った。さらに、個別測定とパススルー測定の結果を比較するため、Yamamoto et al. (2018)<sup>13)</sup> の手法に倣って 40 個 (TZW15-1-1) ないし 44 個 (TZW15-1-2) のキューブ試料を連結した模擬試料を準備し、U チャンネル試料と同様のパススルー測定を行った。MS2C センサーの出力は Bartington 社から提供される円柱状の標準試料によって較正されるが、U チャンネル試料とは断面の形状と大きさが異なっている。そこで、U チャンネル試料の断面に適合し厚さ 1 cm の試料

を市販のビデオテープを重ねて作成し、応答曲線の計測に用いた。この試料の体積磁化率は AGICO 社のカップブリッジ (KLY-3) で測定した。

初磁化率のパススルー測定の結果にデコンボリューション処理を施すために作成したプログラム (mono-decon) は、最適な平滑化の条件として ABIC の最小化を指標とする Oda and Shibuya (1994)<sup>7)</sup> のアルゴリズムをスカラー量に適用できる形に変更したものである。このモデルでは、試料全体に単一の平滑度が設定されるため、たとえば磁性鉱物含有量が急激に変化するような層準では適切な結果が得られない可能性がある。Oda and Shibuya (1998)<sup>11)</sup> は、1 本の U チャンネル試料の中で残留磁化の極性が反転する層準や磁化強度の大きいテクタイト層を含む事例に対して、そのような不均一な部分に異なる平滑度を設定して最適化を図るという改善方法を考案した。そこで、この手法を取り入れたプログラム (dual-decon) も作成した。どちらも Python 3.7 を使って記述した。

## 3. 結果

ビデオテープを重ねた厚さ 1 cm の試料を 1 cm 間隔で移動させて計測することによって得られた MS2C センサーの応答曲線を Fig. 2 に示す。この結果から、均質な磁化率を持つ U チャンネル試料の場合、MS2C センサーの出力は長さ 3.17 cm の堆積物に応答したものと見なせることがわかった。応答曲線のピーク値は 2080 であり、カップブリッジを用いて測定したこの試料の体積磁化率は 0.0153 SI であることから、堆積物が均質であると仮定して MS2C の出力を体積磁化率に換算することができる。この換算を行った数値をパススルー測定の結果としてデコンボリューションの計算に用いた。

TZW15-1-1 と TZW15-1-2 のキューブ試料を連結した模擬試料について行ったパススルー測定 (pass-through data) とデコンボリューション (mono-decon および dual-decon) の結果を示し、個別測定によって求めたキューブ試料の初磁化率と比較した (Fig. 3)。TZW15-1-1 のうち、39.8 cm と 42.0 cm のキューブ試料には火山灰 (B-Tm) が含まれてお

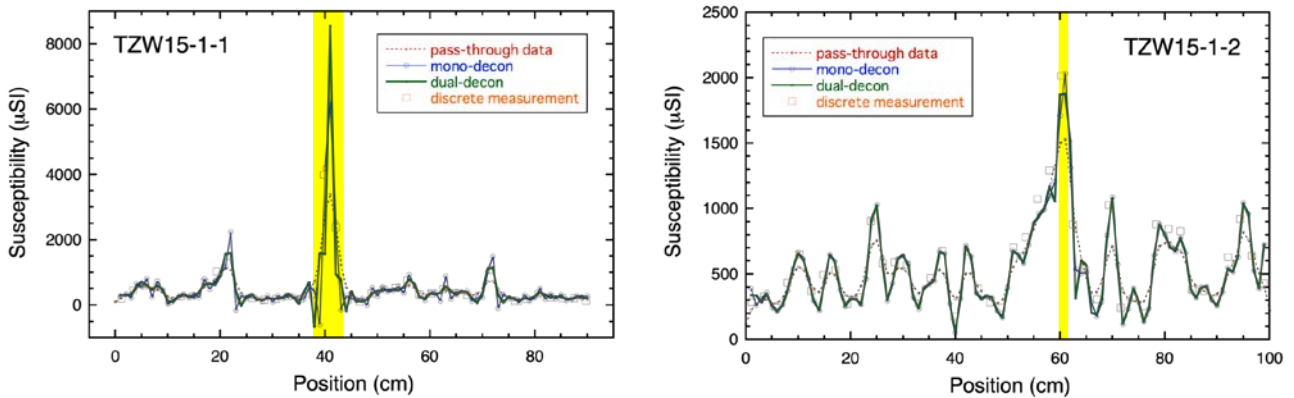


Fig. 3. Magnetic susceptibility of the simulated continuous samples made by connecting discrete cubic samples of TZW15-1-1 and TZW15-1-2. Susceptibility data obtained by pass-through measurement, deconvolution (mono-decon and dual-decon) and discrete measurement are shown. The yellow bands indicate the intervals with significant peaks where the second hyperparameter was assumed in dual-decon.

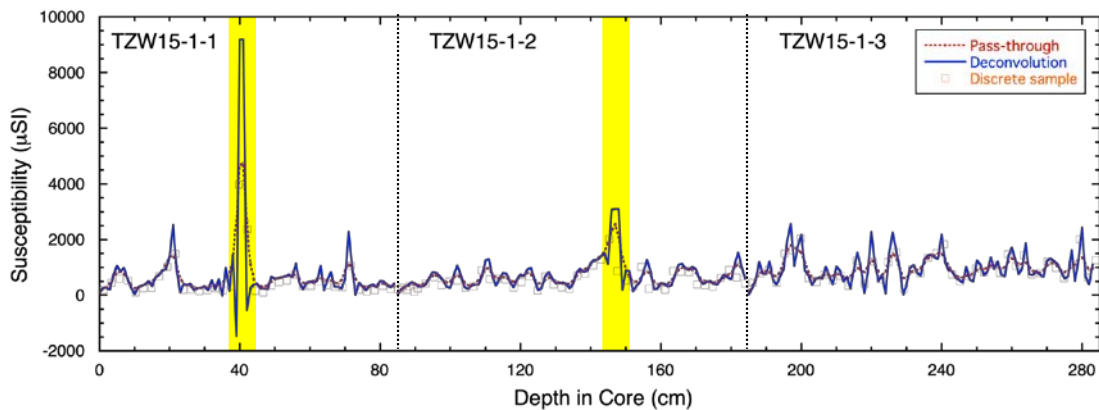


Fig. 4. Magnetic susceptibility of the U-channel samples of TZW15-1 core. Susceptibility data obtained by pass-through measurement, deconvolution (dual-decon for TZW15-1-1 and TZW15-1-2, mono-decon for TZW15-1-3) and discrete measurements are shown. The yellow bands indicate the intervals with significant peaks where the second hyperparameter was assumed in dual-decon.

り、パススルー測定でも顕著なピークが表れたため、この層準を分離して dual-decon を適用した。TZW15-1-2 については、砂質イベント層に起因する初磁化率のピークを示した 60 cm 付近を分離して dual-decon を適用した。それぞれ、別の平滑度を設定する領域を 2 cm から 11 cm の範囲で変化させ、ABIC が最小となった結果を Fig. 3 に示した。

別の平滑度を設定した層準付近を除き、mono-decon と dual-decon の結果はよく一致しており、共にパススルー測定の移動平均によって隠されていた数 cm より短いスケールの変動を再現してい

る。デコンボリューションによって得られた初磁化率の値はキューブ試料の結果と調和的であり、少なくともキューブ試料の配列間隔 (約 2.3 cm) に匹敵する解像度で初磁化率のデータが得られることが確認できた。ただし、急激な磁化率の変動が見られた層準では mono-decon と dual-decon の結果に差が認められ、特に TZW15-1-1 の B-Tm 火山灰の上下には負の値が現れた。カルサイト ( $\text{CaCO}_3$ ) などの反磁性の鉱物を含む試料が負の初磁化率を示すこともあるが、今回の結果はデコンボリューションの計算で生じた人為的誤差と考えられる。この誤差は dual-decon の

適用によっても十分軽減することはできなかったが、B-Tm火山灰付近を分離して別の平滑度を設定した場合、他の層準の結果には若干の改善が見られた。

TZW15-1の3本のUチャンネルを統合したコア全体の初磁化率の変動とキューブ試料の測定結果をFig. 4に示す。模擬試料の場合 (Fig. 3) と同様に、実際のUチャンネル試料でもパススルー測定で平均化された変動がデコンボリューションによって再現され、キューブ試料と調和的な結果が得られた。Uチャンネル試料とキューブ試料は隣接して採取されたものであり、Uチャンネル試料のパススルー測定とデコンボリューションを行うことにより、連続して採取したキューブ試料の間隔 (約2.3 cm) に相当する解像度で堆積物の初磁化率が再現されたと考えられる。

#### 4. 議論および結論

連続的に採取したキューブ試料を連結して模擬試料を作成する手法は、Yamamoto et al. (2018)<sup>13)</sup>が残留磁化のデコンボリューションのためのUDECON<sup>10)</sup>の性能を検証するために用いたものである。同様の手法は、今回作成した初磁化率用のプログラムの検証にも有用であり、デコンボリューションの結果が個別測定によって得た値とよく一致することを確認できた。キューブ試料と平行に採取されたUチャンネル試料からもキューブ試料と調和的な結果が得られ、Oda and Shibuya (1994)<sup>7)</sup>が提案したアルゴリズムがパススルー測定による初磁化率のデコンボリューションにも有効であることが示された。ただし、火山灰層のように急激に初磁化率が増加する層準では適切な結果が得られず、急激に残留磁化が変化する箇所に異なる平滑度を設定するOda and Shibuya (1998)<sup>11)</sup>の手法を適用しても、顕著な改善は認められなかった。UDECON<sup>10)</sup>を含め、残留磁化のデコンボリューションにおいても同様の問題が残されており、特に磁性鉱物の含有量が大きく変化する堆積物に関して、パススルー測定結果の解析方法についてさらに改良を進める必要がある。

パススルー測定の間隔よりも大きいスケールの変動については今回の手法で再現可能であり、大量のキューブ試料を採取することなく、Uチャンネル試料

から高解像度の初磁化率データを取得することが可能になった。初磁化率のデータは、相対的古地球磁場強度を推定するための堆積物の自然残留磁化の規格化、非履歴性残留磁化との比較による磁性粒子の種類や粒径の検討に用いられる。初磁化率と残留磁化の変動を同一試料について同一解像度で比較検討を行うためにも、本研究の成果の適用が期待される。

本研究は、同志社大学ハリス理化学研究所第8期部門研究 (2017~2018年度) 第4部門「遺跡堆積環境評価と景観構造に関する研究」、およびJSPS科研費JP15K05321の助成を受けて行ったものである。ここに記して謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) E.A. Nagy, J.-P. Valet, "New Advances for Paleomagnetic Studies of Sediment Cores Using U-channels", *Geophysical Research Letters*, **20**, 671-674 (1993).
- 2) R. Weeks, C. Laj, L. Endignoux, M.D. Fuller, A.P. Roberts, R. Manganne, E. Blanchard, W. Goree, "Improvements in Long Core Measurement Techniques: Applications in Palaeomagnetism and Palaeoceanography", *Geophysical Journal International*, **114**, 651-662 (1993).
- 3) A.P. Roberts, "High-Resolution Magnetic Analysis of Sediment Cores: Strengths, Limitations and Strategies for Maximizing the Value of Long-Core Magnetic Data", *Physics of Earth and Planetary Interiors*, **156**, 162-178 (2006).
- 4) Y. Guyodo, J.E.T. Channell, R.G. Thomas, "Deconvolution of U-Channel Paleomagnetic Data near Geomagnetic Reversals and Short Events", *Geophysical Research Letters*, **29**, doi: 10.1029/2002GL014927 (2002).
- 5) M. Jackson, J.A. Bowles, I. Lascu, P. Solheid, "Deconvolution of U Channel Magnetometer Data: Experimental Study of Accuracy, Resolution, and Stability of Different Inversion Methods", *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **11**, Q07Y10, doi:10.1029/2009GC002991 (2010).
- 6) C. Constable, R. Parker, "Deconvolution of Longcore Palaeomagnetic Measurements—Spline Therapy for the Linear Problem", *Geophysical Journal International*, **104**, 453-468, doi:10.1111/j.1365-246X.1991.tb05693.x (1991).
- 7) H. Oda, H. Shibuya, "Deconvolution of Whole-Core Magnetic Remanence Data by ABIC Minimization", *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, **46**, 613-628 (1994).

- 8) H. Oda, H. Shibuya, “Deconvolution of Long-Core Paleomagnetic Data of Ocean Drilling Program by Akaike’s Bayesian Information Criterion Minimization”, *Journal of Geophysical Research*, **101**, 2815-2834 (1996).
- 9) H. Oda, C. Xuan, “Deconvolution of Continuous Paleomagnetic Data from Pass-Through Magnetometer: A New Algorithm to Restore Geomagnetic and Environmental Information Based on Realistic Optimization”, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **15**, 3907-3924, doi:10.1002/2014GC005513 (2014).
- 10) C. Xuan, H. Oda, “UDECON: Deconvolution Optimization Software for Restoring High-Resolution Records from Pass-Through Paleomagnetic Measurements”, *Earth, Planets and Space*, **67** [183], doi:10.1186/s40623-0150332-x (2015).
- 11) H. Oda, H. Shibuya, “An Improvement Deconvolution for Continuously Measured Magnetic Remanence Data”, *Earth Planets and Space*, **50**, 15-22, doi.org/10.1186/BF03352082 (1998).
- 12) K. Fukuma, M. Torii, “Absolute Calibration of Low- and High-Field Magnetic Susceptibilities Using Rare Earth Oxides”, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **12**, Q07Z28, doi:10.1029/2011GC003694 (2011).
- 13) Y. Yamamoto, T. Yamazaki, T. Kanamatsu, “An Initial Case Study to Deconvolve Natural Remanent Magnetization of a Continuous Paleomagnetic Sample Using the Software UDECON”, *Earth Planets and Space*, **70** [160], doi.org/10.1186/s40623-018-0931-4 (2018).