

流路実験装置で作成した堆積物の構造を帯磁率異方性から探る

酒井 英男、小山 沙由紀、岸田 徹¹⁾、堀井 雅恵²⁾、
澤田 豊明³⁾、飯田 肇⁴⁾

1. はじめに

水中の堆積物や、水と混合して下方へ移動する堆積物は、給源からの運搬・堆積の過程を堆積構造として残している。つまり堆積物の構造は、堆積環境の変遷を研究するための化石として利用できる。

堆積構造を微視的にみると、構成する粒子の配向が基になっている。微視的な構造の研究には顕微鏡観察が有効であるが、得られるのは二次元としての情報が主となり、堆積環境を探るために必要な三次元の解析は容易でない。

本稿では、目視では難しい堆積物の微視的構造の研究に有効な、磁化特性を利用する方法を検討する。海、湖や川あるいは陸上の堆積物には、一般に重量で数%の鉄の酸化鉱物が含まれており、磁石になる性質がある。最近、この磁性粒子(鉱物)に注目して堆積物の構造を探る調査法が利用されている。堆積物が堆積に至る過程で受けた過去の環境をブロック試料により三次元で調査でき、研磨面を作らなくても良い非破壊の調査法でもある。

本稿の具体的な研究内容は、立山カルデラ博物館の流路実験装置を利用して、水と混合して下方へ移動する堆積物を試験的に作り、磁性鉱物から堆積構造を調べることである。研究方法の有効性を探ることが第一の目的であり、更に簡便に堆積状況を復元できる方法ができれば、土石流や砂防の調査分野でも有用な手法となるとの考えも持って、本稿の研究を実施した。

2. 堆積過程における土壌粒子の配向と堆積構造

2. 1. 堆積構造

土壌粒子が水中を沈降しながら堆積する際、静かな環境で有れば、堆積物は層状構造をなすと考えられる。その要因の一つとして、図1 aの様に、重力による選別を受けて重い粒子と軽い粒子は沈降中に分かれて堆積することが挙げられる。また、堆積物を構成する粒

子の配向も要因となる。堆積物中の粒子として、長軸と短軸を持つ楕円体、或いは円盤の形状を想定すると、そうした粒子が水中を沈降する時には、長軸や円盤面が水平面の方になる様に堆積すると推測される。

堆積環境が静かで有れば、以上の堆積過程を反映して粒子の配向には層状の構造が生じ、その結果、堆積物には層構造(層状異方性)が現れると考えられる。

もし(水の流れ)の中で堆積する場合には、粒子はその影響を受けて流れに沿った配向をし易い。そのため、堆積物中には、図1 bの様な軸方向に異方性を持つ堆積構造(針状異方性)が生じると推測される。

また、堆積過程が乱される場合、例えば崩壊物が一気に水中に搬入される様な状況でできた堆積層(水中での地すべりや地震に伴うタービダイト、土石流など)には、上下の地層とは異なる異方性も予想される。

以上の様な堆積過程と関連する粒子の配列について、本研究では磁性粒子の磁化特性から調査を行い考察する。

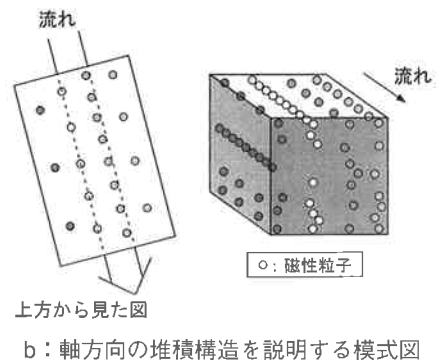
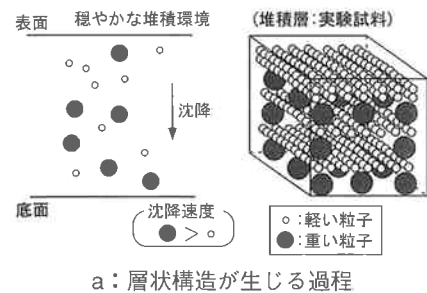


図1 堆積物の層状構造および軸方向の堆積構造の説明。

¹⁾富山大学理学部、²⁾富山医科薬科大学、³⁾京都大学防災研究所、⁴⁾立山カルデラ砂防博物館

2. 2. 堆積物の帯磁率異方性

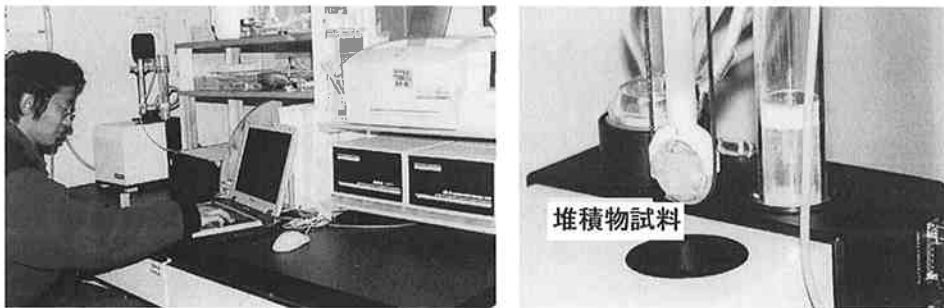
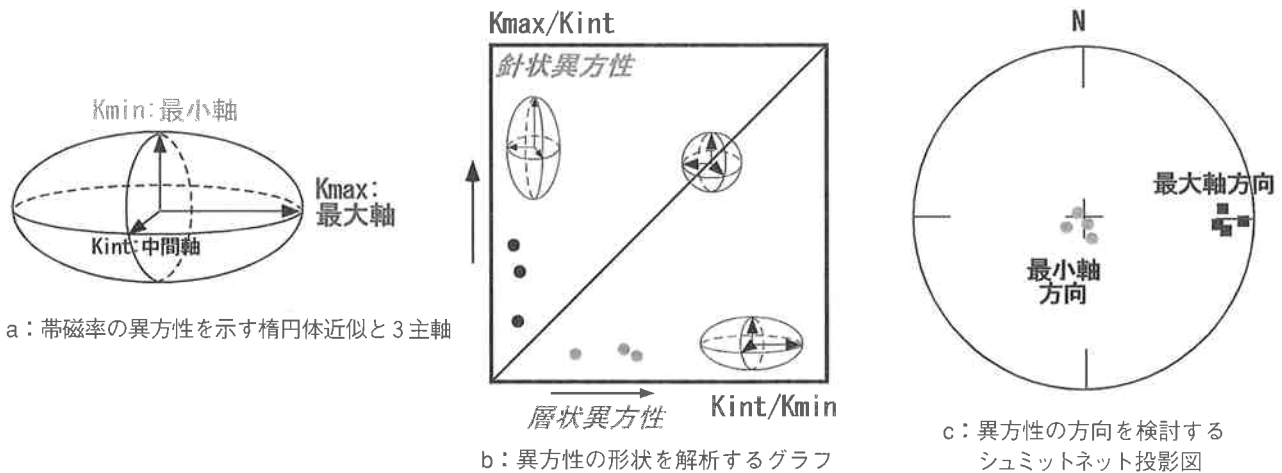
磁性粒子の配向を調べるための物性として帯磁率(magnetic susceptibility)を利用する。帯磁率は、磁化のし易さの指標であり、対象試料に弱い磁場をかけて誘導される磁化を測定して求めることができる。誘導磁化 J と磁場 H の比例関係から、 $J=kH$ (k : 帯磁率)と表現される。

実験試料は次章でも述べるが、1辺2cmの立方体のプラスチックケースを使用し、堆積構造を乱さないように堆積物をケース内に納めてブロック試料として準備する。こうした立方体形状の堆積物において、粒子が一様に分布している場合には、立方体の6面から調べる物性に差異は無い。しかし粒子の分布に特徴がある場合は、それを反映して物性値の方向依存性が生じる。帯磁率の場合には、磁化し易い方向と磁化し難い方向が存在し、これを帯磁率異方性と称している(Tarling and Hroudá, 1993)。この帯磁率の異方性を用いて、ブロック試料内部での、磁性粒子の三次元配列を探ることができる。

図2 aは、帯磁率の方向依存性を楕円体で近似している。楕円体の3つの主軸は、最大軸(K_{max})、中間

軸(K_{int})、最小軸(K_{min})で表されている。図2 bには異方性の形状を、縦軸に(K_{max}/K_{int})、横軸に(K_{int}/K_{min})を取ったグラフ(Flinn, 1962)で検討している。帯磁率の異方性は大きく分けると、層状異方性(平面方向に磁化しやすく、厚さ方向に磁化しにくい)と針状異方性(長軸方向に磁化しやすい)があり、これは図1に示した堆積構造の層状と針状の異方性に対応する。このグラフ上で、帯磁率異方性の測定結果を検討することにより、試料に含まれる磁性粒子の配列が層状であるか、針状の形状であるかがわかるのである。

図2 cには、帯磁率異方性の方向をシュミットネット投影図に示している。磁化を示すプロットの円の中心からの方向は、磁化方位に対応する。また、磁化の水平面からの傾き(伏角値)は、円周部が水平方向(伏角値がゼロ)の磁化を表し、円の中心部は鉛直方向(伏角値は90度)の磁化に対応して表現されている。つまり、磁化方向が円の中心に近い点としてプロットされるほど、伏角値が大きいことになる。図2 cの例は、帯磁率の最小軸(磁化し難い方向)が鉛直方向にあり、最大軸と中間軸は水平面に分布するという層状異方性の場合である。



d: 帯磁率異方性の測定装置

図2 帯磁率の異方性とその測定装置。

3. 実験方法

帯磁率異方性の測定は、富山大学理学部にあるチェコ AGICO社製のKappabridge KLY-3Sを用いて行った。同装置では、試料に地球磁場程度の弱磁場(0.05mT)を任意方向に加えて帯磁率を測定し、その解析により、帯磁率異方性の最大軸と最小軸(および中間軸)を求めることができる。図2 dには帯磁率異方性の測定装置を示している。

土壌の堆積実験には、立山カルデラ博物館の流路実験装置(図3)を利用した。装置の上部に注水口があり、そこから流れる水が下に設けた土山を崩す。水と混合した土壌は斜面(斜度は約8.9°)を下っていき、水はそのまま抜ける様に設計されている。今回は、水と土の混合体が流下する際にあまり分散しないよう、発泡スチロール製の補助具を作って用いた。

同装置は博物館において、山地からの土砂の流出と

流れを堆積物の磁気異方性から探る

○実験

砂鉄に富む海砂を使用し、水と混ぜて上から流して堆積させた

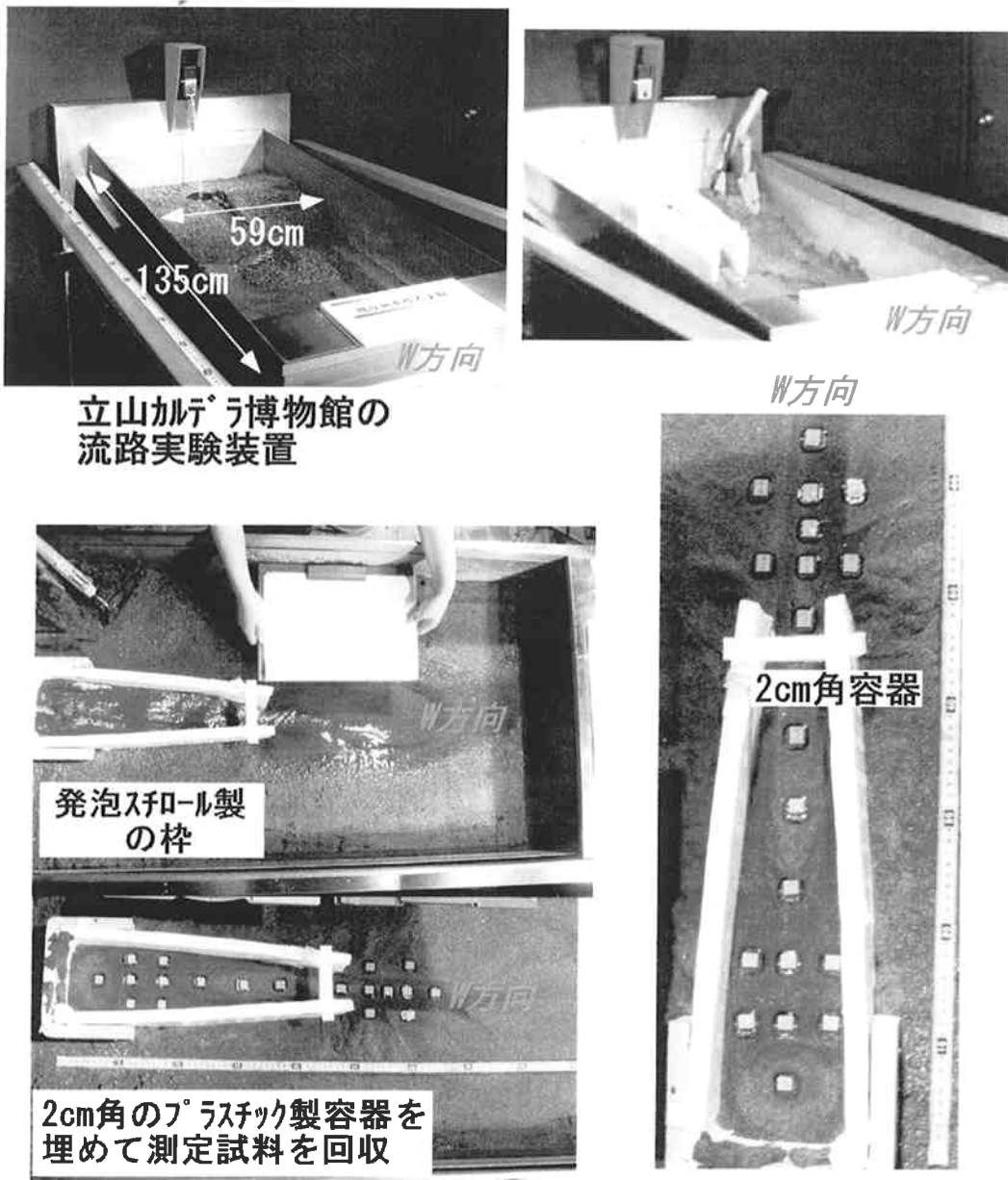


図3 堆積実験に用いた立山カルデラ博物館の流路実験装置。堆積層にプラスチックケースを埋め込んだ状況も示している。

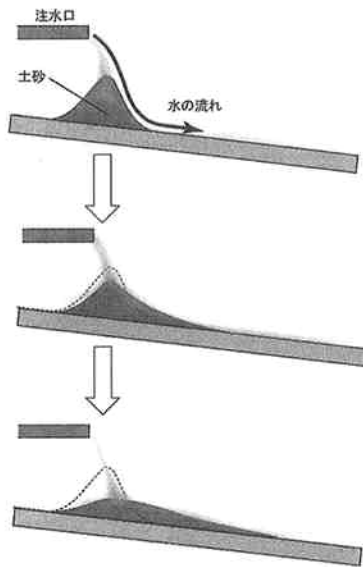


図4 土と水の混合体が斜面に沿って移動し下方に堆積する模式図。

下流での堆積を模倣する展示用実験に使用されている。土山が上から流れ込む水で崩れ、図4の様に土と水の混合体が斜面に沿って移動し下方に堆積する過程は、土石流や水中での堆積物の形成モデルとなる。

土壌試料として、富山湾に面した富山市浜黒崎の海岸地域から砂鉄に富んだ砂を採集した。砂の試料は、そのままの使用の他、篩いにより、粒度を、 $300\mu\text{m}$ 以下、および $300\sim 600\mu\text{m}$ に揃えた試料も準備した。含まれる磁性鉱物は、帯磁率の温度変化から 580°C のキュリー一点が示されたのでマグネタイトと推定できた。帯磁率により堆積状況を探る実験において、マグネタイトを多く含むこの砂は試料として適している。実験試料の作成手順は、以下の通りである。

- ①土壌を土砂流出装置の斜面に土山状に積む。
- ②水を流して、土壌を下流域に堆積させる。
- ③堆積層を約 2cm 角のプラスチックケースにて採集する。

堆積層にプラスチックケースを埋め込む際、方位が重要であるので、斜面方向(W方向)をケース面に記しておいた。そして、堆積物を採取した定方位のケースを抜き取り、蓋をして実験試料とした。図3の様に、上流から下流までの約 80cm の堆積範囲から、ケースによるブロック試料を10数個採集し、実験室にてそれらの帯磁率異方性を測定した。

また数個の試料については、異方性を測定後、十分に乾燥させ、浸透性に富む瞬間接着剤で固めた試料を準備し、研磨面の顕微鏡観察を行った。

4. 結果と考察

図5には、各試料から得た帯磁率異方性の形状を検討している。異方性は針状構造の傾向が強かった。この結果は、図1bの様に流れを受けて堆積物中の磁性粒子が配向したことを示している。次に粒子の配向方向を求めるため、異方性の最大軸を検討した。図6には、各試料の異方性最大軸の方向をシュミットネットに投影し、試料の採集点に示している。堆積物の粒度の影響も検討するため、海砂をそのまま使用する他、粒度を $300\mu\text{m}$ 以下と $300\sim 600\mu\text{m}$ に篩った砂による実験結果も、同じ図にまとめた。

図6の各図において、多くの試料の最大軸は円周の付近にプロットされている。斜面を水平面として作図しており、円周付近のプロットは、磁性粒子が斜面と平行な層状分布をしていることを示している。さらに、最大軸はW方向と定めた傾斜方向に揃っている。つまり流れの方向に揃っており、磁性粒子は堆積時の流れの方向を確かに記憶していたと言える。粒度を変えた3種類の結果の比較では、今回扱った粒度の範囲においては、磁化特性から得られる磁性粒子の配向に明瞭な違いは現れていない。

注目すべき結果として、流れの中心軸から外れた堆積領域より採集した試料(図6のH12、14、16、18等)では、異方性最大軸が斜面の軸方向から側面へずれた方位を示している点がある。この結果は、下流側では上流域に比べて流れは分散しており、いわゆる扇状地を作る様な流れが生じていることを示唆する。堆積物の粒子配向から、こうした側面への流れの変化も十分に検討できることを示している。

さらに、帯磁率異方性の強さを予察的に解析した所、上流から中流の堆積領域より採集した試料の異方性が強い傾向にあった。

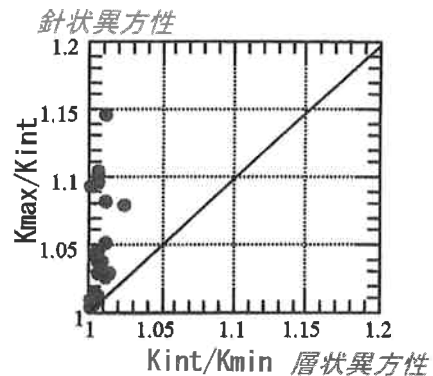


図5 帯磁率異方性の形状をグラフ上で解析した。

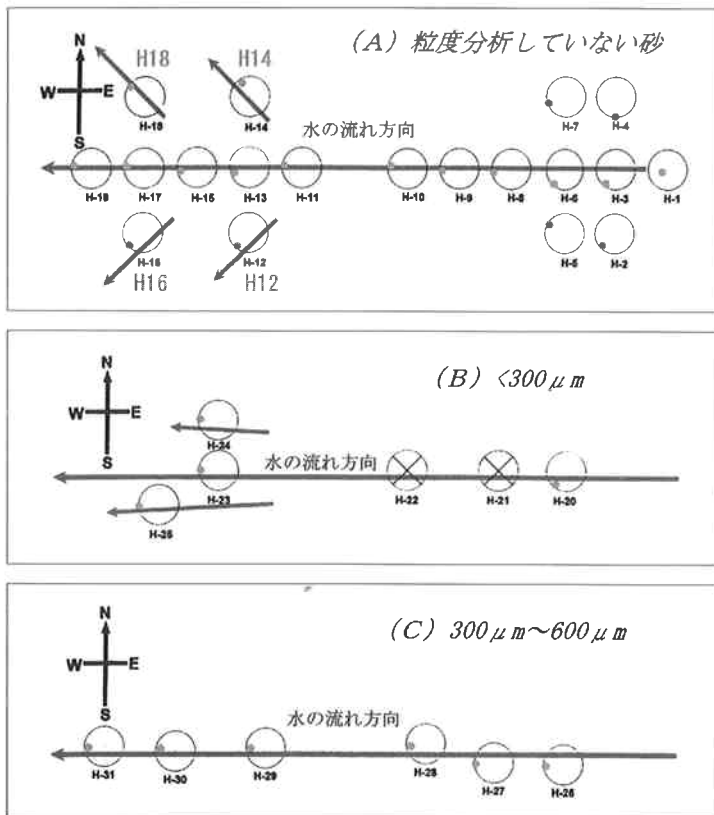


図6 帯磁率異方性の最大軸方向をシュミットネットに投影した。各ネットの赤丸が最大軸方向を示している。

以上の結果、帯磁率異方性は、堆積過程において粒子が受けた流れの方向と強さを確かに記憶しており、堆積過程の復元の研究における有用性が確認されたと結論する。

次に、幾つかの試料について研磨面を作り、反射顕微鏡の観察を行った。その結果、観察で確認された磁性粒子は殆どがマグネタイトであり、キュリー点の測定結果とも調和的であった。図7には、試料のb面(流れ方向に平行な堆積層の側面)を研磨して、調べた反射顕微鏡の写真を示している。粒子の分布には、図1の様な配列傾向が示されており、帯磁率異方性から得た結論とも良く合う結果であった。

5. まとめ

立山カルデラ砂防博物館の流路実験装置を用いて、砂山を流水で崩し、水と共に斜面を下る堆積層を作り、その堆積構造を帯磁率異方性により研究した。約80cmの堆積範囲から、2cm角ブロックとして採集された各試料の帯磁率異方性は、異方性最大軸が堆積物の流動方向(水とともに流れた方向)に良く揃う傾向を示した。この結果は、目視では認めにくい堆積物の微細な構造を帯磁率異方性から調べる方法が有効であ

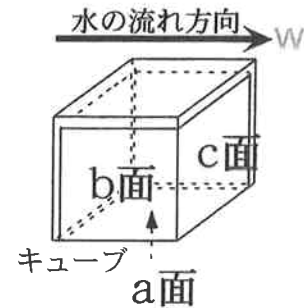
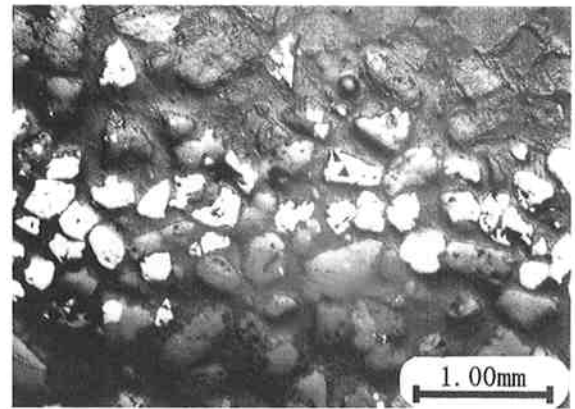


図7 堆積物の流れ方向に平行な側面(b面)の反射顕微鏡写真。

り、また、本研究の様なモデル実験が堆積構造の研究に有用であることを示している。

堆積物の粒子配向と構造は、堆積物の形成後に地殻変動などを受けなければ長期間残っている。この堆積過程の化石を、帯磁率異方性の非破壊調査から探る方法は、様々な分野で利用できる。我々は、琵琶湖やバイカル湖のボーリングコアを用いた湖成堆積物の研究において、帯磁率異方性から、湖内や流入河川に伴うデルタ地域での底層流の復元に成功した(酒井他、1988; Sakai et al., 2001)。また、山地での崩壊堆積物や噴出物の研究にも帯磁率異方性を導入しており、最近では、磐梯山の岩屑なだれの斜面移動・堆積過程を調べる研究に異方性の調査が活用できた段階である(酒井ほか、2003)。

今後は、本稿の様なモデル実験から得られる基礎資料を併せて考察することにより、帯磁率異方性の研究はさらに精度が上がり、適用範囲を広げることができると考える。堆積物の内部構造、特に深さ方向の変化の微細調査に適用できれば、流動速度の履歴も研究対象となる。また、土石流堆積物の流動のシミュレーションやハザードマップ作成に役立つ情報として、帯磁率研究を活用することも期待でき、立山カルデラの崩壊堆積物の調査においても、同方法を利用したいと考えている。

方法論の開発においては、磁性粒子の粒径を変えた実験も課題であり、顕微鏡観察と帯磁率異方性を併せた実験と研究をさらに行なうことが望まれる。

参考文献

- Flinn, D. (1962) : On folding during three dimensional progressive deformation. Q.J. Geol. Soc. Lond., 118, 384-428.
- 酒井英男・堀井雅恵・中村俊夫(1998) : 湖底堆積物の古地磁気による年代測定法, 「地球環境変動とバイカル湖」, 松本源喜他編, 古今書院, 30-46.
- Sakai, H., S. Nomura, M. Horii, S. Araki, K. Kashiwaya, Y. Tani, Y. Shibata, T. Kawai., V. Kravchinsky., J. Peck and J. King (2001) : Magnetic susceptibility studies on surface sediments of Lake Baikal and Lake Biwa, Russian Geology and Geophysics (Geologiya i Geofizika), vol.42, No.1, 339-347.
- 酒井英男, 渡辺勝也, 井口 隆(2003) : 磐梯火山のボーリングコアを用いた岩屑なだれ堆積物の岩石磁気学的研究, 防災科学技術研究所研究報告, 第64号, 19-31.
- Tarling, D.H. and Hrouda, F. (1993) : The magnetic anisotropy of rocks, Chapman & Hall, London, pp.217.

【要 旨】

水中の堆積物や、水と混合して下方へ移動する堆積物は、給源から運搬・堆積の過程を堆積構造として残しており、堆積物の構造は、堆積環境の変遷を研究するための化石として利用できる。本稿では、目視では難しい堆積物の微視的構造を、磁性鉱物の配向から探る帯磁率異方性の研究方法の有効性を検討した。実験試料は立山カルデラ砂防博物館の流路実験装置を利用して作成した。同装置により、水と混合して下方へ移動する堆積物を作り、その堆積物から2 cm立方体のブロック試料として採集した試料を研究に使用した。

上流から下流までの60cmの範囲から採集した10数個のブロック試料は全て、堆積物の流動方向に、帯磁率異方性の最大軸が向いた、つまり、帯磁率異方性から流れの方向が明確に捉えられ、同測定法は、堆積構造を調べる有効な方法であることが確かめられた。また、反射顕微鏡で堆積面を検討した結果、帯磁率異方性から判断された構造と調和的であった。