

水路実験に基づく湖沼堆積物の磁化特性・粒径変動の検討

落合 伸也¹⁾, 酒井 英男²⁾, 柏谷 健二¹⁾

1. はじめに

近年、豪雨や地震にともなう土砂災害が多発しており、今後の気候変動予測は大きな関心事となっている。適切な気候変動予測のためには、これまでの気候の変動傾向・周期性の検討が重要であるが、近代の気象観測記録は過去 100 年程度に限定されており、それ以前の水文環境変動に関する知見は非常に限られているのが現状である。こうした点に関して、陸域に存在する湖沼堆積物は、人間活動に密接に関わる陸域の水文環境変動の記録媒体として非常に適している。流域を構成する土砂など地表物質は、降水により侵食され、河川を運搬されて湖底に堆積し、湖沼堆積物となる。こうして形成された湖沼堆積物の堆積構造や粒径特性は、土砂が流域から湖底に到達するまでに受ける流水環境を反映していると考えられるので、流域・湖沼内における水文環境を復元する手掛かりとして用いることができる。こうした考えに基づいて、湖沼堆積物の粒径特性に基づいた長期から短期の環境変動を復元する試みが行われてきている。立山カルデラ内の泥鰯池においても過去数十年から現在の水文環境が議論されている（西地ほか, 2004; 犬飼ほか, 2007）。

一方、細粒な粒子からなる湖沼堆積物の堆積構造を直接観察することは、一般的に困難が伴う。しかしながら、近年、堆積物中の磁性鉱物の配向に起因す

る帯磁率異方性から堆積構造を推定する手法が開発され、例えば、琵琶湖やバイカル湖の堆積物コア試料について、帯磁率異方性による堆積時の流向の復元が行われている（Sakai et al., 2001）。また、帯磁率異方性による研究手法の、堆積実験を用いた検討や、溪流堆積物への応用が進められている（酒井ほか, 2003; 伊藤・酒井, 2008 など）。

しかしながら、これまでの帯磁率異方性の有効性を検証する研究は、粗粒な粒子の比較的速い水流中での堆積（河川堆積物、海浜砂など）に関するものが主流であった。また、湖底堆積物などの細粒な堆積物について、実験によって獲得過程を議論した研究はあまりない。そこで本研究では、人工水路を用いて流水中にて人工的に作成した比較的細粒な堆積物の磁化特性（帯磁率異方性・残留磁化）および粒径特性の測定を行い、水文環境復元に対する湖沼堆積物の磁化特性・粒径特性の有用性を検討した。

2. 実験方法

堆積実験は幅 15cm、長さ 6.5m のアクリル製の開水路を用いて行った（図 1、2）。この水路は上流端に水流を安定させる整流用タンクがあり、そこから導入された水は水路を通過し、水路下流端の堰から下方の貯水タンクへ流出する。下流タンクの水をポンプで上流タンクに送水することで、水を循環させ、一定条

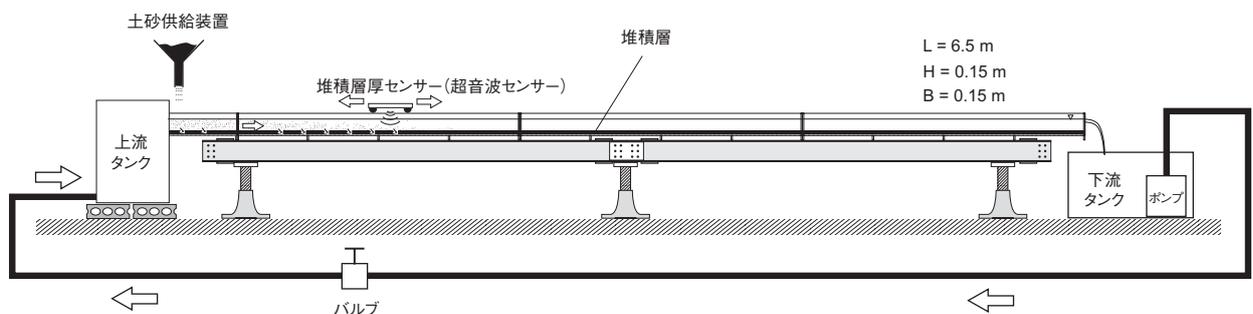


図 1 堆積実験に用いた実験水路

1) 金沢大学環日本海域環境研究センター, 2) 富山大学理学部

件の水流を継続的に維持することができる。この水路を用いて堆積層を作成し、磁化特性・粒径を調べる実験をそれぞれ行った。これらの実験条件については表1に示すとともに以下に記す。

磁化特性の堆積実験（実験1）では、以下の条件で実験を行った。水路内の水深を10cm、流量1.9L/s、平均流速を13cm/sで通水した。通水を開始して水流安定後、上流端において砂を5g/sの一定速度で供給し、底面に堆積させた後、堆積構造を擾乱しないよう水路内の水を抜き、堆積層を作成した。実験に用いた砂は、珪砂8号をふるいで106-125 μm に揃えたものを使用した。堆積層の作成後、超音波距離センサーを用いて、堆積層厚の流路方向の分布を測定した。磁化特性測定用試料は、厚さ2cm以上の堆積層がある、上流端より60cmから140cmまで20cm毎に採取した。一辺2.2cmの立方体形状のプラスチックケースを埋め込み、堆積構造を保ったまま採取した。このとき、各地点において水路の中央および左右端においてそれぞれ試料を採取した（図2c）。また、各地点の水路中央において、クリノメーターを用いて採取地点の磁場の方向を測定した。水路を支える鋼鉄製のレールが磁気を帯びているため、場所によって方向が異なる。

粒径の堆積実験では、以下の条件で実験を行った。水路内の水深は10cmとし、平均流速12cm/s、16cm/s、19cm/sの3通りの条件（実験2、3、4）で実験を行った。磁化特性と同様に、各実験条件下で砂を5g/sの

	水位 (cm)	流量 (L/s)	流速 (cm/s)	給砂粒径 (μm)	給砂速度 (g/s)
実験1	10	1.9	13	106 - 125	5
実験2	10	1.7	12	70 - 200	5
実験3	10	2.4	16	70 - 200	5
実験4	10	2.9	19	70 - 200	5
実験5	10	1.5, 2.4	10, 16	70 - 200	5

表1 実験条件

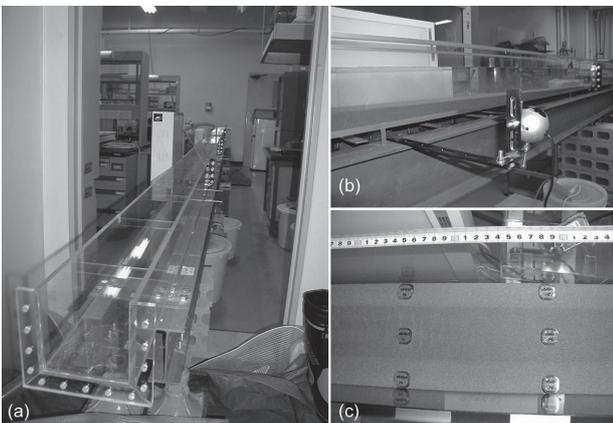


図2 (a) 実験水路 (b) 堆積実験の様子 (c) 磁化特性測定用試料の採取の様子

速度で供給し、堆積層を作成した。実験に用いた砂は、珪砂8号（粒径70-200 μm ）を使用した。堆積層厚の測定後、粒径測定用試料を水路に沿って50cm毎に水路中央において採取した。また、水路内の水深を10cmに保ったまま、流速を約10分間隔で10cm/sと16cm/sに交互に時間変化させた実験も行った（実験5）。給砂速度は他の実験と同じ5g/sで行った。堆積層作成後、上流から100cm、150cmの地点で、内径4.3cmの塩ビパイプを押しこみ、柱状試料を採取した。粒径の鉛直変化を測定するため、試料は1mm間隔でスライスし、それぞれを粒径測定用の試料とした。

上述の方法によって採取した試料について、帯磁率異方性、残留磁化および粒径を測定した。帯磁率異方性はAGICO社製KLY-3Sにて測定を行った。残留磁化の測定はパススルー型超電導磁力計（760R、2G Enterprise社製）によって行った。粒径はレーザー回折粒度分布測定装置（SALD-2200、島津製作所製）によって測定した。

3. 実験結果

3.1. 帯磁率異方性

堆積物の帯磁率異方性は、堆積物に含まれる磁性鉱物の分布（方向性や配列）によって生じる、方向による帯磁率の差異である。堆積物中の磁性鉱物の配向を反映する帯磁率異方性から、堆積時の流水環境を推定する試みが行われている。ここでは、堆積実験によって得られた試料の帯磁率異方性と流水環境の関連について検討した。図3は磁化特性についての堆積実験（実験1）時の堆積層厚の分布を示している。横軸は水路の上流端からの距離を表し、縦軸は超音波センサーで計測した堆積層の厚さを示している。堆積層厚は砂の供給地点に近い上流ほど厚く、離れるに従って薄くなっている。60cmより上流付近では堆積層厚の測定値が激しく上下しているが、これは砂面に形成されたリップルのために超音波が乱反射されたためと考えられる。磁化特性用の試料はこれより下流側で採取した。図中の矢印は試料の採取地点を表している。

図4は堆積実験によって得られた試料の帯磁率異方性の形状を示している。縦軸は帯磁率異方性の最大軸/中間軸比（ $K_{\text{max}}/K_{\text{int}}$ ）、横軸は中間軸/最小軸比（ $K_{\text{int}}/K_{\text{min}}$ ）を表している。縦軸の値が大きいほど針状異方性が大きく、横軸の値が大きいほど層状異方性が大きいことを示している。堆積実験による試

料はほとんど横軸に沿って分布しており、層状異方性をもつことを示している。このことは、これらの堆積物が磁化しやすい平面をもつ層状構造からなることを示唆している。

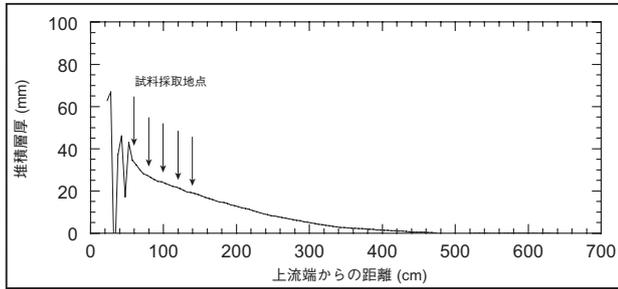


図3 堆積実験（実験1）の堆積層厚の分布
図中の矢印は試料採取地点を表している

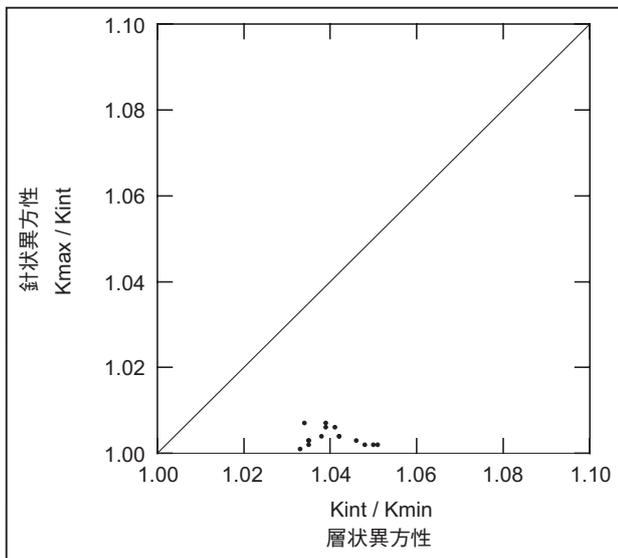


図4 堆積実験によって得られた試料の帯磁率異方性の形状

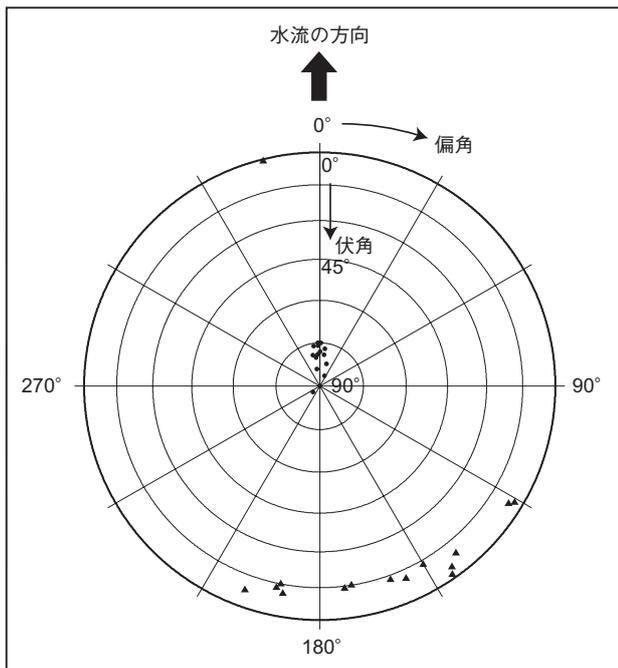


図5 各試料の帯磁率異方性の最大軸および最小軸のシュミット投影図

次に、帯磁率異方性の方向と流れの向きとの関連を検討する。図5は各試料の帯磁率異方性の最大軸および最小軸をシュミット投影したものである。円周方向の目盛りは方位を示し、グラフ上方向0度が水路の下流方向を示している。直径方向の目盛りは伏角を示しており、円周0度が水平、中心90度が真下を表している。図中の丸印は各試料の帯磁率異方性の最小軸の方向を示し、三角印は最大軸の方向を示している。異方性の最小軸は流れの方向である偏角0度、伏角75～90度に分布し、最大軸は偏角がややばらつくものの流れの反対方向に伏角0～15度程度で傾斜している。このことは、層状異方性を持つこれらの試料の磁化しやすい平面は水平に対して流れの上流側に傾斜していることを示している。これは粒子が上流側に傾斜して重なるインプリケーションを示していることを示唆しており、帯磁率異方性を用いて堆積物の堆積当時の流向を推定できることが示された。

3.2. 残留磁化

堆積物の残留磁化は、土砂に含まれる磁性鉱物が堆積過程で地球磁場（地磁気）の方向に配向することによって獲得され、堆積当時の地磁気の方角と強度を記録する。この特性を用いて、堆積物の残留磁化から過去の地磁気変動が復元され、地磁気極性の逆転やその逆転史に基づく古地磁気年代研究などが実施されている。今回の堆積実験によって得られた試料の残留磁化を検討した。水路中央で採取した試料の残留磁化の測定結果を図6に示す。横軸は水路の上流端からの距離、縦軸は磁化の水路の下流方向からの偏角を示す。また、試料採取地点の磁場の偏角を合わせて表示している。水路を支える鋼鉄製のレールが磁気を帯びているため、場所によって磁化方向が異なるが、堆積物に記録された残留磁化の方向と試料採取地点の磁場方向は非常に良く一致している。この結果は、堆積物は水流がある中でも堆積時の磁場方向を記録することを示している。

3.3. 粒径

流域から湖へ土砂粒子が運搬される際、水流が強いほどより大きな粒子が運搬されることから、堆積物の粒径は当時の流速などを反映すると考えられているパラメータである。ここでは、堆積物の粒径と流速の関係を堆積実験で検討した。図7は粒径についての

堆積実験（実験2、3、4）時の堆積層厚の分布から計算した堆積速度分布を示している。横軸は上流端からの距離、縦軸は各地点の堆積速度を示す。堆積速度は上流ほど大きく、下流に行くほど減少している。また、各地点の堆積速度は流速が速くなるほど大きくなっている。図8は水路に沿った各地点の粒径（中央粒径）を示している。粒径は上流ほど大きく、下流に行くほど小さくなっている。また、各地点の粒径は流速が大きくなるほど粗粒化している。水流が強いほどより大きな粒子がより遠くまで運搬されることから、流速の増加に応じて各地点の粒径・堆積速度の増加が起こったと考えられる。以上のことから、各地点の堆積速度、粒径は湖内の流速を反映して変動し、堆積層の粒径・堆積速度の鉛直変化から過去の流速変動を復元できると考えられる。

上述の実験に加えて、流速を10cm/sと16cm/sに交互に変動させ、湖内の流速の経時変化が、堆積物の粒径の深度方向の変化として記録されるかどうかを検討した。図9は上流から100 cm、150 cmの地点で採取したコア試料の粒径の鉛直変化を示している。100cm地点、150cm地点ともに粒径は、下層から順に細粒・粗粒と交互に変動しており、この変動は流速の時間変化と対応している。以上のことから、堆積層の粒径変動から過去の流速変動を連続的に復元できることが検証された。

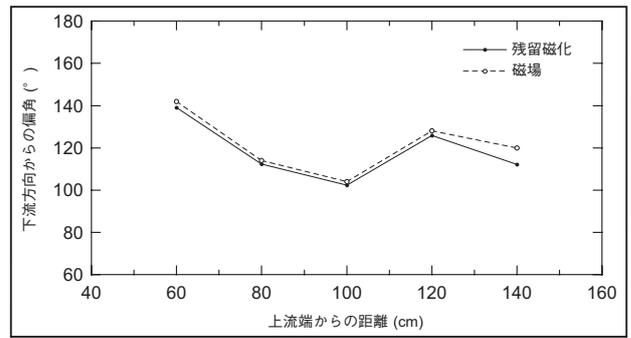


図6 残留磁化の測定結果。実線は堆積物の残留磁化、破線は試料採取地点の磁場の偏角を表す

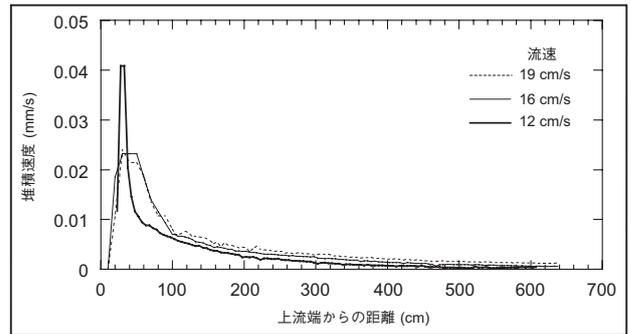


図7 堆積実験（実験2、3、4）の各地点の堆積速度

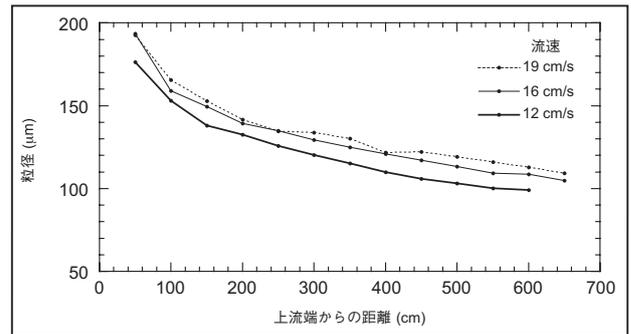


図8 堆積実験（実験2、3、4）の各地点の粒径

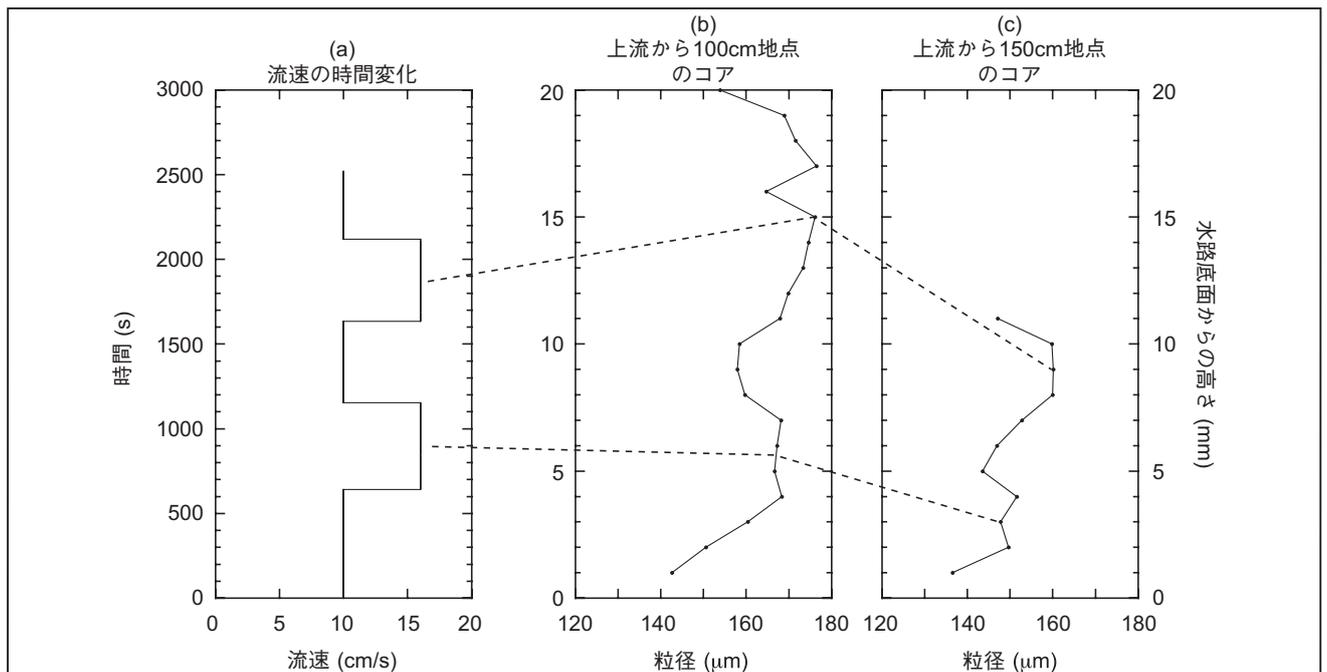


図9 流速を時間変動させた実験（実験5）の(a)流速の時間変化 (b)上流から100cm地点、(c)上流から150cm地点のコアの粒径の深度変化

4. まとめ

人工水路を用いて作成した堆積物の磁化特性（帯磁率異方性・残留磁化）および粒径特性の測定を行い、水文環境復元に対するこれらのパラメータの有用性を検討した。実験で得られた試料の帯磁率は層状異方性を示し、磁化し易い平面は水平に対して流れの上流側に傾斜していた。これは砂粒子が上流側に傾斜して重なるインブリケーションを示していることを示唆しており、帯磁率異方性を用いて堆積物の堆積当時の流向を推定できることが示された。また、堆積物の残留磁化を合わせて測定したところ、堆積地点の磁場の方向とほぼ一致しており、堆積物は水流がある中でも堆積時の磁場方向を記録することが分かった。

一方、同様の実験によって作成された堆積物の粒径は流速が大きくなるほど粗粒化する傾向が見られ、湖沼堆積物の粒径は堆積時の流速を反映する可能性があることが示された。流速を時間変動させた実験において、堆積層の粒径の鉛直変化は流速の変化と対応しており、過去の流速変動を連続的に復元できることが示された。

以上のことから、湖沼堆積物の磁化と粒径の二つの物性を鉛直方向に測定することによって、過去の流速や流向などの水文環境の復元に利用できることが検証された。今後は、帯磁率異方性の研究においては、異方性から推測される粒子配向と実際の堆積構造を対比する実験が必要であろうと思われる。また、磁化特性、粒径の実験においても、土砂の粒径や濃度の違い、より複雑な流水環境下での実験・検討が必要であると考えられる。さらに、実験装置の中だけでなく、実際の湖沼での磁化特性・粒径特性の獲得過程の観測などを合わせて行うことで、より高精度な水文環境の復元を行うことが可能になると考えられる。

5. 謝辞

本研究を進めるにあたり、金沢大学柏谷研究室の皆様にご協力頂いた。また、堆積物試料の磁化特性の測定については富山大学酒井研究室の田中恵氏と伊藤孝氏からご助力、ご助言を頂いた。ここに感謝の意を表す。本研究の一部は日本学術振興会科学研究費（特別研究員）、金沢大学 21 世紀 COE プログラムの助成を受けて行っている。

参考文献

- 犬飼将成・柏谷健二・米谷正広・室井克則・松岡衣衣 (2007) : 立山カルデラ内の堆積物試料から見る泥鱒池流域環境の変化, 立山カルデラ博物館研究紀要, 第 8 号, 11-14.
- 伊藤孝・酒井英男 (2008) : 簡易土砂流出実験による堆積物と実際の溪流堆積物の帯磁率異方性に関する研究, 砂防学会誌, 61, 29-34.
- 西地和貴・柏谷健二・室井克則・國香正稔 (2004) : 立山カルデラ内の泥鱒池における堆積物試料の調査・分析報告, 立山カルデラ博物館研究紀要, 第 5 号, 1-8.
- Sakai H., Nomura S., Horii M., Araki S., Kashiwaya K., Tani Y., Shibata Y., Kawai. T., Kravchinsky V., Peck J. and King J. (2001) : Magnetic susceptibility studies on surface sediments of Lake Baikal and Lake Biwa, Russian Geology and Geophysics (Geologiya i Geofizika) , Vol.42, No.1, p.339-347.
- 酒井英男・小山沙由紀・岸田徹・堀井雅恵・澤田豊明・飯田肇 (2003) : 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, 立山カルデラ博物館研究紀要, 第 4 号, 1-6.

【要 旨】

人工水路を用いて作成した堆積物の磁化特性（帯磁率異方性・残留磁化）および粒径特性の測定を行い、水文環境復元に対するこれらのパラメータの有用性を検討した。実験で得られた試料の帯磁率は層状異方性を示し、磁化しやすい平面は水平に対して流れの上流側に傾斜していた。これは砂粒子が上流側に傾斜して重なるインブリケーションを示していることを示唆しており、帯磁率異方性を用いて堆積物の堆積当時の流向を推定できることが示された。また、堆積物の残留磁化を合わせて測定したところ、堆積地点の磁場の方向とほぼ一致しており、堆積物は水流がある中でも堆積時の磁場方向を記録することが分かった。一方、同様の実験によって作成された堆積物の粒径は流速が大きくなるほど粗粒化する傾向が見られ、湖沼堆積物の粒径は堆積時の流速を反映する可能性があることが示された。