

堆積物の放射性核種・磁化特性・物理特性に基づく 過去の洪水イベント推定の試み

落合 伸也¹⁾、酒井 英男²⁾、柏谷 健二¹⁾、長尾 誠也¹⁾、丹保 俊哉³⁾、飯田 肇³⁾

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、³⁾立山カルデラ砂防博物館

1. はじめに

河川流域を構成する碎屑物・有機物等を含む土砂の侵食・運搬作用は、流域の地形発達や土砂災害等に深く関与し、流域での降水量等の水文環境変化は、これらの作用に大きな影響を及ぼす。近年、河川が関係する土砂災害が数多く発生しており、今後の予測のために過去の災害の履歴を探る有効な研究法の開発が望まれている。

湖沼・貯水池・閉鎖性海域（湾）には流域から流出する土砂が堆積物として蓄積する。そのため、これらの堆積物は過去の土砂流出イベントのアーカイブとして利用可能である。著者らはこれまで、湖沼・貯水池堆積物の物理特性、安定・放射性同位体等を環境指標やトレーサーとした、近年の流域環境変動の復元および、湖沼—流域系での土砂侵食の観測を行っている（Ochiai *et al.*, 2015；落合・糸野、2019）。また、堆積物に含まれる大気由来放射性核種と、物理特性である粒径、磁化特性（帯磁率、残留磁化など）を組み合わせるにより詳細な土砂流出イベント層の検出手法を検討し、流域における過去数十年～百数十年間の土砂流出イベントの復元する研究を進めている。

本稿では北陸地域の貯水池、湖沼での観測、および模型を用いた堆積実験等でこれまで得られている知見を整理することにより、より詳細な土砂流出イベント層の検出手法を検討し、より古い時代の堆積物コアを用いた気象観測開始以前の土砂流出イベント履歴の復元について展望する。

2. 堆積物による過去の洪水イベント層検出

2.1. 大気由来放射性核種²¹⁰Pbを用いたイベント層検出

湖沼・貯水池・湾には流域から流出する土砂が堆積物として蓄積するので、これらの堆積物は過去の洪水イベントのアーカイブとして利用できる。堆積層中のイベント層の検出には様々な手法が考えられ

るが、特に堆積速度の変動としてイベント層を検出可能な大気由来放射性核種²¹⁰Pbの利用が有効である。鉛の放射性同位体²¹⁰Pbは、地殻中の²²⁶Raの壊変で生成して大気へ放出される²²²Rnに由来する天然放射性核種で、地表への沈着後に土砂へと強く吸着し、最終的に湖沼堆積物中に蓄積する。堆積物には²²⁶Raを由来とする²¹⁰Pbが元々含まれ、これと区別して大気由来の²¹⁰Pbはexcess ²¹⁰Pb(²¹⁰Pb_{ex})と呼ばれる。この²¹⁰Pb_{ex}成分は半減期22.3年で減衰し、過去数十年～百数十年の堆積物の年代測定に利用できる（Krishnaswamy *et al.*, 1971; Appleby and Oldfield, 1983）。また、定常的な堆積環境では²¹⁰Pb_{ex}濃度は下方へ指数関数的に減少するが、一方で急激な土砂流入時には濃度の異常層（一定層、逆転層）が形成される。この特性を用いて、イベント層の検出も可能となる（Taishi *et al.*, 1991）。

著者らは、石川県能登半島に位置する農業用貯水池において堆積物を採取し、過去数十年間の流域での植生変化と水文環境変動に起因する土砂流出変動の研究を行っている。ここでは能登半島中部の七尾市に位置する貯水池（ビシャグソ池、図1a）にて、流域からの土砂流出イベントを求めた例を示す（Ochiai *et al.*, 2015）。同地域では1970年代頃に広葉樹林の伐採とスギ植林が行われており、この大規模な植生変化が流域からの土砂侵食に大きな影響を与えた可能性が考えられていた。図2はビシャグソ池より2011年に採取した堆積物コア（B11-3コア）で計測された²¹⁰Pb_{ex}濃度の鉛直分布をまとめている。縦軸を²¹⁰Pb_{ex}濃度の自然対数で示しており、堆積速度が一定であれば右下がりの直線上にプロットされ、その直線の傾きは堆積速度を示す。このデータでは全体的として右下がりの傾向を示すが、所々で直線の傾きが変化しており、複数回の堆積速度の変化があったことが分かる。

図の堆積速度をもとにコアの年代を推定した結果、重量深度5.7g/cm³（深度35cm）付近で1941年頃と推定

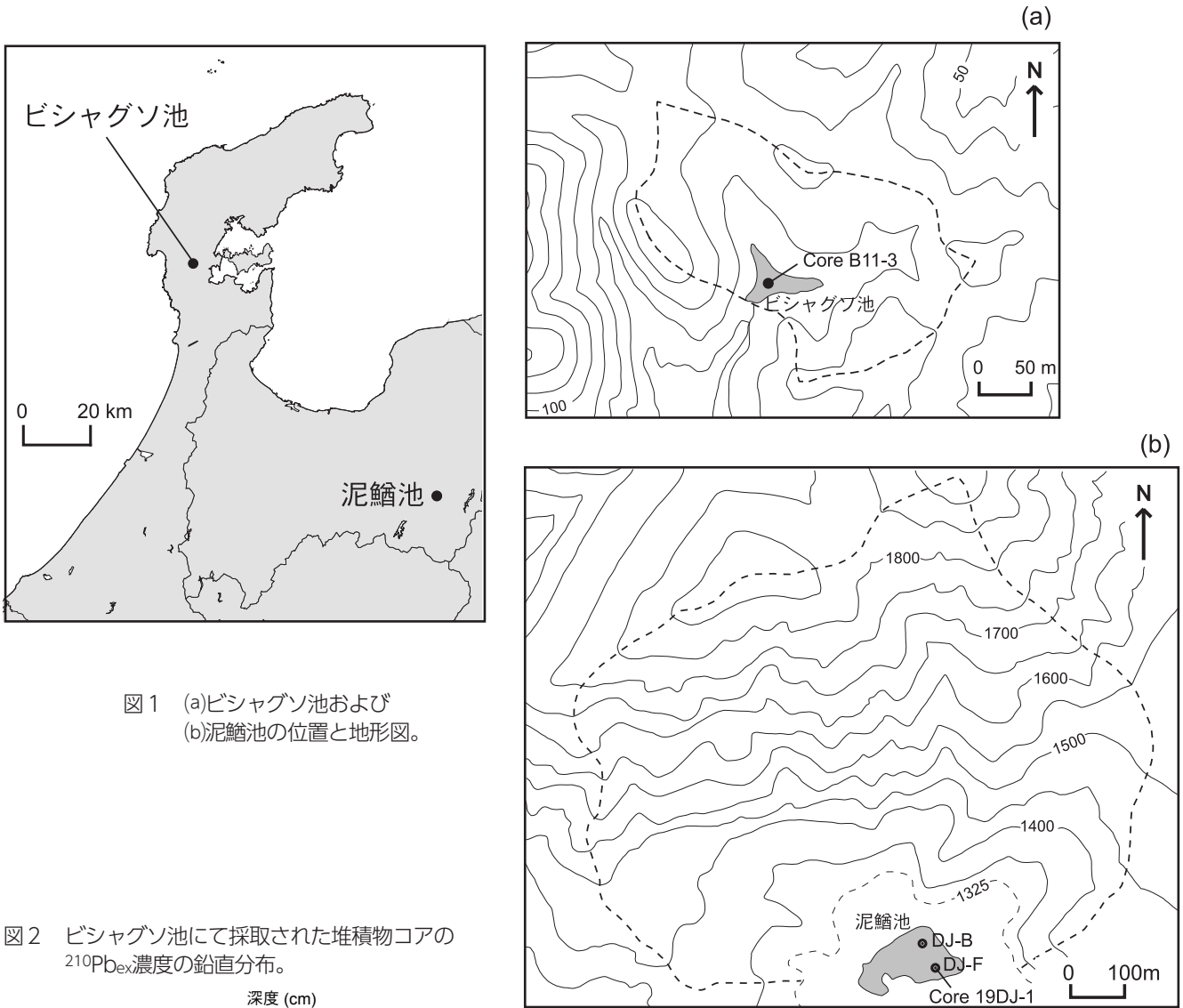
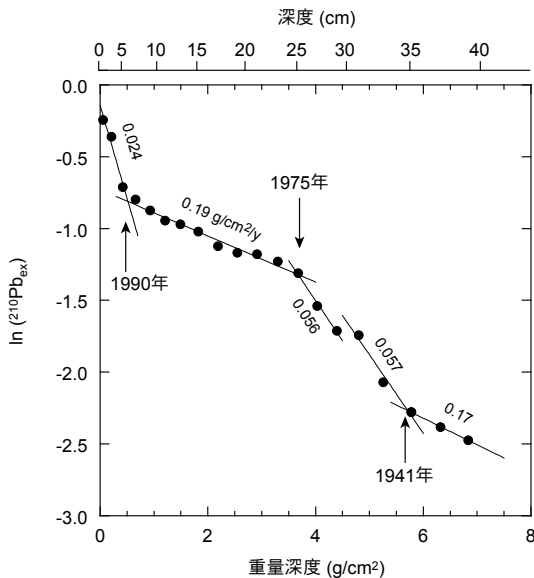


図1 (a)ビシャグソ池および
(b)泥鱈池の位置と地形図。

図2 ビシャグソ池にて採取された堆積物コアの $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 濃度の鉛直分布。



された。その後、1975年頃までは堆積速度は $0.056\text{g}/\text{cm}^2/\text{y}$ 程度であったが、伐採植林が行われた直後の1975年頃から1990年頃にかけて $0.19\text{g}/\text{cm}^2/\text{y}$ に急増している。その後堆積速度はほぼ以前のレベル以下まで減少して現在に至っている。この1975年頃

から1990年頃にかかる堆積速度の急増は、伐採により流域が裸地化し、土砂侵食が促進されて貯水池への土砂流入が増加したことを反映していると考えられる。この例のように、堆積物コアの $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 濃度の鉛直分布を測定することにより、年代の推定と同時にイベント層を検討できることは、 ^{210}Pb 年代測定法の大きな利点である。

2.2. 磁化特性・粒径を用いたイベント層検出

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。そのため、堆積物の粒径等の物理特性は流速などを反映してその記録となる。また、物理特性と独立な物性である磁化特性(帯磁率など)も、堆積物中の磁性鉱物の量・種類を通して、堆積構造や堆積時の流水状況の記録となっている。著者らは人工水路を用いて流水中にて細粒の堆積物を作成し、物理特性や磁化特性が流

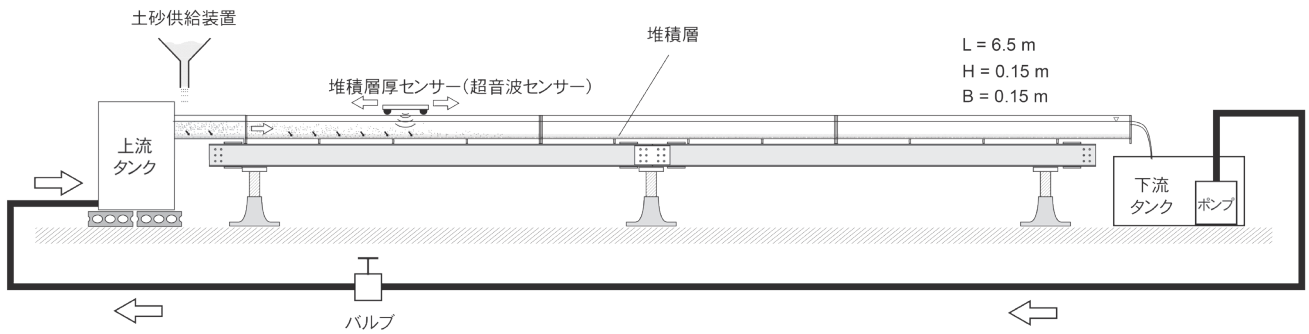


図3 堆積実験に用いた実験水路。

水状況・水文環境の変化の記録となるかを検討する実験を行っている。落合ほか(2011)にて、一部の結果を報告している。ここでは、本稿の目的である堆積物から洪水イベントを検出する研究について、人工水路での実験結果より、イベント時の流速変化に対する堆積物の物理・磁化特性の応答性を検討し、これらの堆積物パラメータの洪水イベント層の検出での有用性を探ることとした。

人工水路の実験は、図3に示す幅15cm、長さ6.5 mの亚克力製の開水路を用いて行った。堆積物は水路内の水深を10cmに固定し、平均流速12cm/s、16cm/s、19cm/sの3通りの条件で実験を行った。これらの条件下で上流端から珪砂8号(粒径70-200 μm)を一定速度で供給し堆積層を作成した。そして得られた堆積層の層厚、粒径、帯磁率の流路方向での分布

を調べた。これらの実験の詳細は落合ほか(2011)を参照されたい。

図4では3つの流速条件で形成した堆積物について、水路に沿った堆積速度、粒径(中央粒径)、帯磁率の分布を示している。図4a、bを見ると、堆積速度は上流ほど大きく、下流に行くほど減少し、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。また、粒径は上流ほど大きく、下流に行くほど小さくなっており、各地点の粒径は流速が大きくなるほど粗粒化している。以上の結果から、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ており、流速の増加に応じて、各地点の粒径・堆積速度は増加していると判明した。

図4cは同様の試料において測定された帯磁率の分布を示している。最も流速の遅い実験(12cm/s)では、帯磁率は200cmから400cmの範囲で高く、それより下流では低い値を示した。これは磁性鉱物がすべての粒径に一樣に含まれるわけではなく、この距離範囲に堆積した130~110 μm の粒径に多く含まれるためと考えられる。流速が大きくなるにつれ、帯磁率のピークは下流側へシフトしていきように見える。これは流速の増加により、磁性鉱物がより遠くまで運搬され、下流側の帯磁率が上昇したと解釈される。以上のように、土砂中の磁性鉱物の粒径の影響があるものの、堆積物の帯磁率は粒径と同様に流水条件に対して敏感に反応することが分かる。堆積物での帯磁率等の磁化研究の有用性についてはSakai et al.(2001)、伊藤・酒井(2008)等でも検討されている。

以上の結果は、単純化された実験系によるものであるが、洪水イベントに伴う流水条件の変化を堆積物の堆積速度、粒径、帯磁率から検出可能であることを示している。磁化特性は試料の測定にかかる時間が短く、解像度の高いデータを得ることができる利点がある。 ^{210}Pb 法は堆積速度の変化から直接的

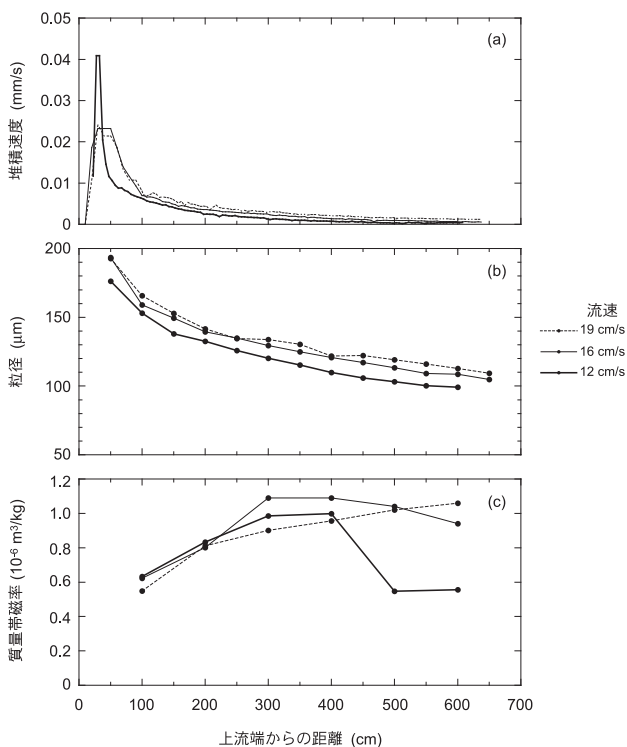


図4 堆積実験の各地点の(a)堆積速度、(b)中央粒径、(c)帯磁率の分布。

にイベント層を識別できる有用な方法であるが、測定に時間を要し、高分解能測定は容易ではない。そこで、短時間で高分解能の測定が可能な帯磁率や粒径の研究と組み合わせることで、効率よく確実にイベント層の識別が可能となると考えられる。

2.3. 泥鱒池での土砂流出イベントの観測記録

泥鱒池は富山県の常願寺川源流部の立山カルデラ内に位置し、1858年の飛越地震の際に発生した鳶崩れによって形成された堰止湖の名残と言われている(図1b)。金沢大学の水文地形環境学グループ(当時)は、2001年から2013年にかけて泥鱒池にセディメントトラップを設置し、流域からの土砂流出の観測と侵食・運搬プロセスの研究を行っていた(西地ほか, 2004; 犬飼ほか, 2007)。ここでは、当時の観測期間中に発生した土砂流出イベントについてのデータを検証する。

セディメントトラップは泥鱒池内の2か所に設置され(図1b)、夏季には約1か月毎に、カルデラ内への立入が規制される冬季(概ね11~6月)にはその期間を1つの試料として採取を行った。図5aは南側に設置されていたトラップ(DJ-F)による2001年から2007年までの堆積速度の変動を示している。堆積速度は2001年から2003年冬季までは $0.0016\text{--}0.015\text{kg}/\text{m}^2/\text{day}$ 程度であったが、2004年7月には豪雨に起因すると見られる土砂流出イベントが起こり、急激な堆積速度の上昇($>1.25\text{kg}/\text{m}^2/\text{day}$)が見られた。この際、設置していた高さ10cmのトラップがほぼ埋没す

るほどの堆積が観測された。このトラップの設置期間(2004年6月17日~7月22日)の7月18日には、 $54\text{mm}/\text{h}$ の日最大時間雨量が観測されており(図5b)、観測期間で最大規模の土砂流出イベントであったことが分かる。その後、約1年間にわたって堆積速度が以前よりも高い状態が続き、崩壊等により生産された土砂が流域に滞留し、土砂が流出しやすい環境であったことが示唆される。

図5a中の折れ線はこのイベント前後のトラップ(DJ-F)によって採取された堆積物の帯磁率の変動を示している。イベントが起こる以前では帯磁率は概ね $1.0 \times 10^{-6}\text{m}^3/\text{kg}$ 程度であったが、2004年7月の土砂流出イベント時に $2.5 \times 10^{-6}\text{m}^3/\text{kg}$ へ急激に増加している。その後、帯磁率は次第に減少しているが、2007年においても以前より高い値を示している。また、帯磁率の変動は夏季期間の堆積速度の変動と対応しているように見える。前述の模型実験の結果から、これらの帯磁率の変動は水文環境の変化を反映していると思われる。これらのことから、泥鱒池にて実際に観測された土砂流出イベントにおいて、堆積物の帯磁率は非常に敏感に応答していることを示している。

3. 泥鱒池での過去の土砂流出イベントの推定に向けて

上述のように、泥鱒池は土砂流出が顕著な立山カルデラ内に位置するという特徴、また実際に過去の観測により2004年の土砂流出イベントの記録があることなどから、本研究の目指す放射性核種 ^{210}Pb と磁化特性、物理特性を組み合わせたイベント層検出手法の検証、さらに過去のイベントの復元を行うにあたり非常に適した対象地である。こうした背景から、2019年10月に泥鱒池にて堆積物コアを採取し、上記の手法を組み合わせ研究を進めている段階である。

図6は2019年に採取された堆積物コア(19DJ-1コア)の含水率の鉛直変動を示している。含水率は堆積物中の空隙率を反映し、圧密や粒径等の影響を推定可能なパラメータである。含水率は圧密の影響により下方へ向かって減少しているが、深度10-20cm、26-38cm付近に特異的に含水率が低くなる層準が見られ、少なくとも2回の何らかの堆積環境の変化が起こっていることが示唆される。これらの層準がセ

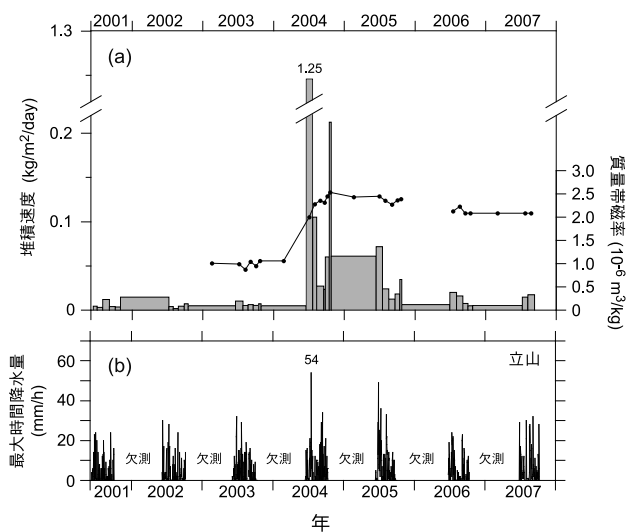


図5 (a)泥鱒池におけるセディメントトラップによって観測された堆積速度と帯磁率の経時変動。(b)日最大時間降水量の経時変動(立山、気象庁)。

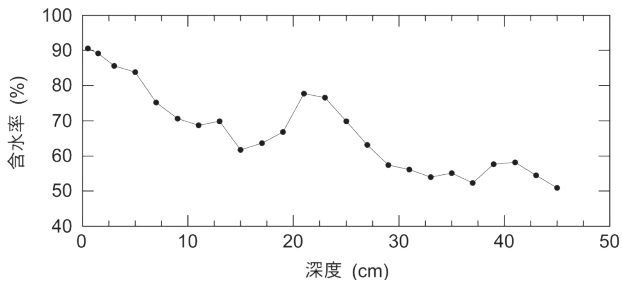


図6 泥鱒池にて採取された堆積物コア(19DJ-1)の含水率の鉛直変動。

ディメントトラップにて観測された2004年の土砂流出イベントに対応するかどうかは現時点では不明だが、泥鱒池の堆積物が過去のイベントを反映している可能性が高いことが示された。今後 ^{210}Pb による年代測定、磁化特性、物理特性の測定を行い、検出手法の検証、さらに過去のイベントの復元を進めて行く予定である。

4. まとめ

本稿ではこれまで北陸地域の貯水池、湖沼での観測、および模型を用いた堆積実験等で得られている知見を整理し、堆積物中の大気由来放射性核種 ^{210}Pb と、粒径、磁化特性を組み合わせることにより詳細な過去の洪水イベント層の検出手法を検討した。

石川県七尾市に位置するビシャグソ池にて採取された堆積物コアの $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 濃度の測定からは、1970年代に行われた流域での伐採植林に起因する貯水池への土砂流入の増加が推定され、 ^{210}Pb の応用により年代の推定とともに、堆積速度の変動としてイベント層の検出ができることが示された。また、人工水路を用いた堆積実験により、湖内の流速変化に対する堆積物の堆積速度・粒径・帯磁率の応答性を検討した結果、帯磁率および粒径は流水条件に対して敏感に反応する可能性が示唆された。さらに、実際に立山カルデラ内の泥鱒池に設置されたセディメントトラップにて2004年7月に観測された土砂流出イベント時の堆積物では帯磁率に明確な変動が見られ、堆積物の帯磁率が非常に敏感に反応していることが示された。

以上のことから、堆積速度変化として直接的に洪水イベント層を識別できる ^{210}Pb の測定と、短時間で高分解能の測定が可能な帯磁率、粒径と組み合わせることにより、より確実にイベント層として識別

可能となると思われる。今後はこれらの手法を立山カルデラの泥鱒池において採取された堆積物コアに応用し、洪水イベントの検出手法の検証、さらに過去のイベント履歴の復元を行う予定である。こうして得られる知見は、当地域のみならず、近年増加している極端気象現象による土砂災害に対する適切な流域管理、防災計画の策定にも資すると考えられる。

5. 謝辞

本研究を進めるにあたり、金沢大学水文地形環境学グループおよび低レベル放射能実験施設の皆様からご助力、ご助言を頂いた。ここに感謝の意を表す。本研究の一部はJSPS 科研費 JP19K04965の助成を受けて行われた。

参考文献

- Appleby P. G. and Oldfield F.(1983): The assessment of ^{210}Pb data from sites with varying sediment accumulation rates, *Hydrobiologia* **103**, 29-35.
- Krishnaswamy S., Lal D., Martin J. M. and Meybeck M.(1971): Geochronology of lake sediments. *Earth Planet. Sci. Lett.* **11**, 407-414.
- 犬飼将成・柏谷健二・米谷正広・室井克則・松岡玉衣(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5号、1-8.
- 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、第61巻、第1号、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.
- 落合伸也・酒井英男・柏谷健二(2011): 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、立山カルデラ博物館研究紀要、第12号、11-15.
- Ochiai S., Nagao S., Yonebayashi K., Fukuyama T., Suzuki T., Yamamoto M., Kashiwaya, K. and Nakamura, K.(2015): Effect of deforestation on the transport of particulate organic matter inferred from the geochemical properties of reservoir sediments in the Noto Peninsula,

Japan, *Geochemical Journal*, **49**, 513-522.

落合伸也・糸野妙子(2019)：大沼湖沼堆積物に基づく近年の堆積・流域環境変動の推定、地形、40-1, 45-56.

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*, vol.42, No.1, 339-347.

Taishi H., Okuda S., Shiki M. and Kashiwaya K.(1991): A sedimentary anomaly and the related sedimentation process. *Zeitschrift fur Geomorphologie, Sup.* **82**, 241-249.

要旨

堆積物の放射性核種・磁化特性・物理特性に基づく過去の詳細な洪水イベントの推定を目指し、これまで北陸地域の貯水池・湖沼での観測、および模型を用いた堆積実験等で得られている知見を整理した。その結果、堆積物中の大気由来放射性核種 ^{210}Pb 、粒径、磁化特性は土砂の流入イベントに対して明瞭な応答を示すことが示された。これらのことから、堆積速度変化として直接的に洪水イベント層を識別できる ^{210}Pb の測定と、短時間で高分解能の測定が可能な帯磁率、粒径と組み合わせることにより、より確実にイベント層として識別可能となると思われる。