

令和 6 年 9 月 19 日現在

機関番号：13101

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K18395

研究課題名（和文）帯磁率異方性と連続化学組成分析による湖沼堆積物からの地震イベント層抽出法の開発

研究課題名（英文）Identification of earthquake-triggered turbidites in lacustrine sedimentary sequences using anisotropy of magnetic susceptibility and micro-XRF analyses

研究代表者

片岡 香子（Kataoka, Kyoko）

新潟大学・災害・復興科学研究所・教授

研究者番号：00378548

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：湖沼堆積物の解析に基づく強震動履歴解明には、地震時の湖底斜面崩壊に伴う混濁流堆積物の抽出が必要であるが、湖外から流入する洪水性のイベント層と明確に区別する手法が未だ確立されていない。そこで本研究は、福島県猪苗代湖の湖底堆積物に見られる2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震時の混濁流堆積物と1888年磐梯山噴火時の岩屑なだれを起源とした火山泥流が湖に流入したことにより発生した湖底密度流堆積物を対象とし、それらの層相・粒度組成・連続化学組成・帯磁率異方性による特徴化を試みた。その結果、両者は明瞭に区別できることが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

内陸における強震動の地層中の記録は、過去の海溝型巨大地震や内陸直下型地震の震源・規模の解明に重要である。従来の研究では、湖沼堆積物を用いた強震動に由来するイベント堆積物の抽出はあまりなされてこなかった。本研究では、福島県猪苗代湖底堆積物に見られる2011年3月の地震時に形成された混濁流堆積物と1888年磐梯山噴火時の火山泥流が湖に流入したことにより発生した湖底密度流堆積物の、層相・粒度組成・連続化学組成・帯磁率異方性による特徴化を試みた。その結果、両者は明瞭に区別できることが明らかとなった。本手法を応用すれば、湖沼イベント堆積物の解析による内陸強震動の発生履歴解明や活動度評価が可能となる。

研究成果の概要（英文）：Elucidating a history of strong ground motions induced by earthquakes based on the analysis of lacustrine sediments requires the characterization of turbidites associated with lake slope failure. However, there is few clear criteria to distinguish earthquake-triggered turbidites from lake bottom hyperpynites sourced from outside the lake via floods and lahars. Therefore, this study compared the turbidite resulted from the 11 March 2011 earthquake event with the subaqueous lahar-runout deposits (i.e. hyperpynite) from the 1888 eruption-induced debris avalanche and lahar in the lacustrine sediments of Lake Inawashiro, Fukushima Prefecture, northeast Japan. Based on the sedimentary facies, grainsize, chemical composition, and anisotropy of magnetic susceptibility of these event deposits, earthquake-triggered turbidites and hyperpynites can be clearly distinguished.

研究分野：第四紀地質学，堆積学，火山堆積学，自然災害科学

キーワード：タービダイト ハイパーピクナイト 帯磁率異方性 マイクロXRF 強震動 湖沼堆積物 猪苗代湖 磐梯山

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

内陸における強震動の地層中の記録は、過去の海溝型巨大地震や内陸直下型地震の震源・規模の解明、また活動度や地域の災害リスク評価にとって重要である。これまで国内では、湖沼堆積物を用いた強震動に由来するイベント堆積物の抽出はあまりなされてこなかった。琵琶湖や水月湖からは歴史地震と対比される地震イベント層の報告があるものの、その研究は20年以上前に遡るため、時間分解能や堆積物の解析技術は現在とは大きく異なり、定性的な理解にとどまる。さらに、日本のような湿潤地域においては、大規模な洪水も多く、特に湖沼堆積物の解析では、湖外から河川を通じて流入する洪水や火山泥流などのイベント層と、地震時の湖底斜面崩壊に伴う混濁流堆積物との区別が必要である。しかし海域とは異なり、湖沼では地震性混濁流の観測・実測も皆無であり、流れや堆積物の実体については不明な点も多く、両者を明確に区別する手法が未だ確立されていない。

2. 研究の目的

本研究では、福島県猪苗代湖（最大水深 93.5 m）の湖底堆積物に見られる 2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震時の混濁流堆積物（タービダイト）と 1888 年磐梯山噴火時の岩屑なだれを起源とした火山泥流が湖に流入したことにより発生した湖底密度流堆積物（ハイパーピクナイト）を対象とした。この堆積物は、層序関係および柱状堆積物における放射性セシウムの鉛直濃度プロファイルと堆積速度換算から、堆積年代が決定されている（Kataoka and Nagahashi, 2019；長橋ほか, 2022）。この 2011 年および 1888 年のイベント堆積物の層相・粒度組成・連続化学組成を明らかにし、さらに帯磁率異方性による古流向解析を行うことで「地震起因の湖底イベント層」と「湖外から流入した磐梯山 1888 年に伴う火山泥流イベント層」の特徴化を行い、それぞれの差異を明確にすることを目的とする。

3. 研究の方法

猪苗代湖における湖底堆積物の柱状試料の定方位採取は、水深 80 m 以深の 17 地点で、2021 年～2023 年に行った（図 1）。採取には比較的小型の重力式コアラー（離合社製 HR 型不攪乱柱状採泥器：重量 20 kg 程度）を用いた。この採泥器には、取り外し可能なアクリル製の円筒状の採泥管（内径 11 cm×長さ 50 cm）を取り付ける。本研究では、この採泥管の内径よりわずかに小さい外径の円筒アクリルパイプを縦に半割した形状のものを用意し、それら 2 つを組み合わせ、テープで貼り合わせたものを採泥管の内側に入れ、その上で採取した。

また、採泥器の錘の取っ手部分に小型のコンパスロガー（Star Oddi 社製 DST compass magnetic：径 15mm×長さ 46 mm）を、プラスチックの専用固定ケースの中に入れて、装着した。このロガーは温度・水深・3 軸傾斜・方位の連続データ記録し、湖底に採泥器が着地した際の水深・方位・姿勢のデータを得ることができる（図 2：水平時の方位精度は $\pm 15^\circ$ ）。なお、データ記録は 1 秒間隔で行った。

2021 年と 2022 年の調査では、水中カメラを採泥器に装着した。採泥器の錘の取っ手部分から L 字型のステンレス金具を取り付け、そこに小型カメラ（GoPro 社 Hero8）を水中用防水カメラハウジング（エヌティエフ社製、耐水圧 3 MPa（水深 300 m））に入れ、防水機能のある水中ラ

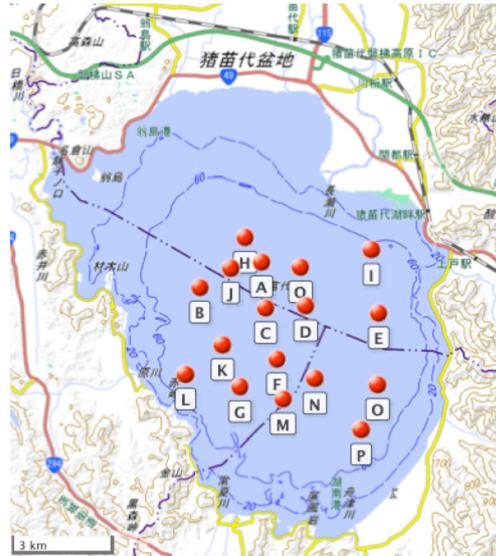


図 1. 猪苗代湖での湖底堆積物採取地点（A～Q）。



51J1629DAT

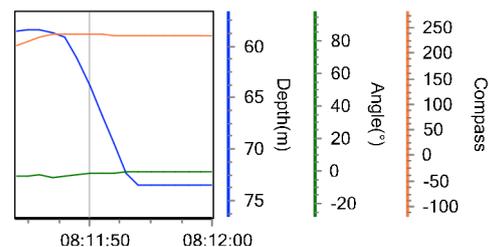


図 2. 採泥器にアルミ製の羽根を装着した状態（上）。コンパスロガーに記録された落下から着底までの間の水深・ピッチ・方位データ（下）。

イト（エヌティエフ社製，RML-18650）を取り付けた。それにより，採取の過程，採取時の底質および採泥器の姿勢について，動画撮影を行った。2023年度の調査では，水中カメラは装着せずに，採泥器の錘の部分にアルミ製の大型の羽根を取り付ける加工を行った（図2）。

上記の付属装置を装着した採泥器をロープに取り付けた状態で，動力付きの小型ボートから1) 湖面に降ろし一旦静止させ，2) そこから湖底面より15 m程上位の位置までゆっくりと降下させ，3) 再度静止させた。その後4) ロープを緩め自由落下させ，5) 採泥器を湖底に着底させる。6) しばらく静止したあと，7) ロープを巻き上げる，ことで湖底堆積物の極表層部分を採取した。

水温・水深・3軸傾斜・方位のデータについては，採泥器が湖底に着底している区間，ほぼ一定の値を示し，着底中は採泥器が静止していたことが確認できた。また着底時の方位とその直前の方位は概ね調和的な値を示した。さらに，動画記録では，採泥器の落下中の状態（垂直落下・左または右旋回）が読み取れ，コンパスロガーに記録された落下中の方位の変化とも整合的であった。また，羽根の装着により，採泥に至るまでのコアラーの姿勢がより安定した（図2）。

4. 研究成果

イベント堆積物の層相

猪苗代湖底の極表層50 cm程度までには，2011年地震性タービダイトとそれより下位にある1888年磐梯山噴火起源ハイパーピクナイトの2つのイベント堆積物が見られることが多い。

2011年地震性タービダイトは，暗オリーブ灰から灰色を呈する塊状シルト質堆積物である。堆積物は基底部分数 cm が極細粒砂～細粒砂である場合や，基底部に極細粒砂～細粒砂の数ミリの薄層を挟む場合があり，砂質シルトから粘土質シルトへと上方へ弱く細粒化する特徴がある（図3）。

1888年磐梯山噴火起源ハイパーピクナイトは，茶灰色を呈する塊状粘土質堆積物を主体とし，2011年タービダイトに比べ粘土含有量が高い傾向がある（図3）。堆積物は，1) 正級化あるいは無級化の，淘汰の良いシルトから粘土質シルト，2) 最下部の数 mm から1.5 cm厚が粘土質で，その上位にやや粗いシルトから粘土質シルトへ正級化するもの，がある。

イベント堆積物の層厚

本研究で調査した17地点以外にもこれまで，著者らが猪苗代湖で採取したHRコア・ピストンコア・ボーリングコアデータも含め，イベント堆積物の層厚を検討した。2011年地震性タービダイトは特に湖深部で厚く堆積する特徴がある（図4）。層厚は湖心部（水深92.5 m以深）で23～27 cm，湖心部から東-南東-南南東斜面の水深70 m以深で数 cm～14 cm，南西斜面の水深75 mの地点で10 cmである。1888年磐梯山噴火起源ハイパーピクナイトは，長瀬川河口部から湖心部の軸方向に堆積が集中し，湖南部に向けて，薄層化する傾向がある。2011年タービダイトに比べ，薄く広く分布するのが特徴である。層厚は，長瀬川河口に近い北部で10 cmを超え，湖心部で7～7.8 cm，北側斜面では水深60 m地点で層厚1 cm，水深85 m地点で4.2 cm，水深90

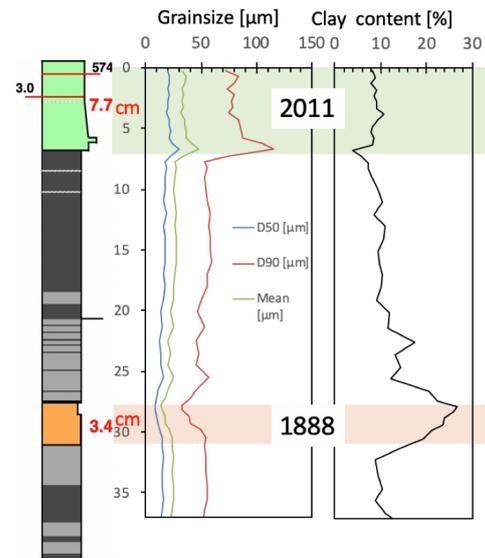


図3. 猪苗代湖底極表層堆積物に挟まる2011年地震性タービダイトと1888年噴火に伴うハイパーピクナイトの層序・粒径および粘土含有量の鉛直変化。

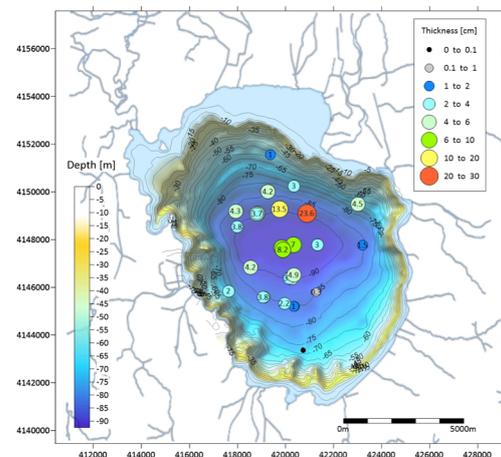
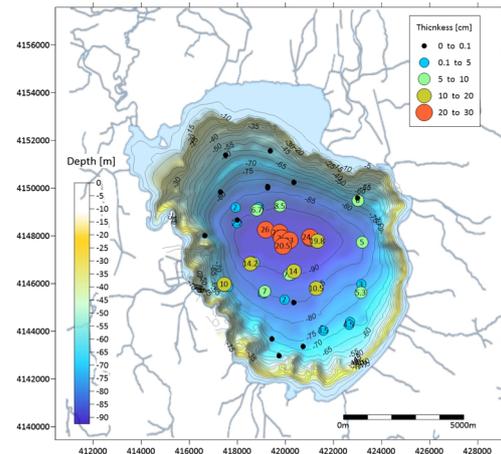


図4. 2011年地震性タービダイト（上）と1888年磐梯山噴火に伴うハイパーピクナイト（下）の層厚分布。これまで著者らによって猪苗代湖で採取されたピストンコア，ボーリングコアデータを含む。

m 地点で 5.5 cm, 南側斜面では水深 90 m 地点で 3.4~4.9 cm, 水深 85 m 地点では 0.3~3.8 cm となる。

イベント堆積物の連続化学組成分析の特徴

2011 年地震性タービダイトと、1888 年磐梯山噴火起源ハイパーピクナイトについて、福島大学現有の走査型 X 線分析顕微鏡 (SXAM: (株)堀場製作所製 XGT-7200V) を用いて、主成分および微量成分の連続化学組成分析を行った (図 5)。2011 年地震性タービダイトは、基底の砂質部で、 SiO_2 含有量が高く、その上位の泥質部では、正級化構造に調和的に若干減少する。また泥質部ではいくつかの元素で含有量が一定となる傾向がある。1888 年磐梯山噴火起源ハイパーピクナイトでは、 Fe_2O_3 含有量が正級化構造に調和的に減少し、硫黄含有量が上下のバックグラウンド堆積物に比べ、少ないことが特徴である。

イベント堆積物の帯磁率の特徴

2011 年地震性タービダイトと、1888 年磐梯山噴火起源ハイパーピクナイト、およびそれ以外の通常の湖底堆積物 (バックグラウンド堆積物) について、それぞれ 1cc キューブと 7cc キューブを用いて帯磁率異方性測定用の試料を分取した。2011 年タービダイトと 1888 年ハイパーピクナイト、さらにバックグラウンド堆積物の帯磁率異方性は、新潟大学災害・復興科学研究所所有の Kappabridge (Agico 社製) を用いて測定した (図 6)。

2011 年と 1888 年イベント堆積物はバックグラウンド堆積物に比べ帯磁率が高いことから、イベント堆積物の抽出には、帯磁率は一つの指標になり得る。2011 年と 1888 年イベント堆積物を比較すると、2011 年地震性タービダイトは、帯磁率が低く、帯磁率異方性高い特徴があり、1888 年磐梯山噴火起源ハイパーピクナイトは、帯磁率が特に高いが異方性低い傾向にある。この理由は、1888 年イベント堆積物が火山性の物質を多く含むためと考えられる。

イベント堆積物の帯磁率異方性の特徴と磁性ファブリック

バックグラウンド堆積物の帯磁率異方性は、地点や層準により様々であり、ステレオネット投影図上のプロットが集中せず、傾向が見られない (図 7: ランダム配列)。一方で、2011 年・1888 年イベント堆積物は、帯磁率異方性の 3 軸 (K_{\max} , K_{int} , K_{\min}) がある特定の所に集中することから、磁性ファブリックは堆積物中の粒子配列を示すと考えられる (図 7)。また地点 K では、同一コア中の 2011 年地震性タービダイトと 1888 年磐梯山噴火起源ハイパーピクナイトの磁性ファブリックが明瞭に異なる。 K_{\min} から推測される古流向が、前者では北向き~東向きで、後者は南西向きである。湖底地形を考えれば、この地点での 2011 年地震性タービダイトは、南西斜面から

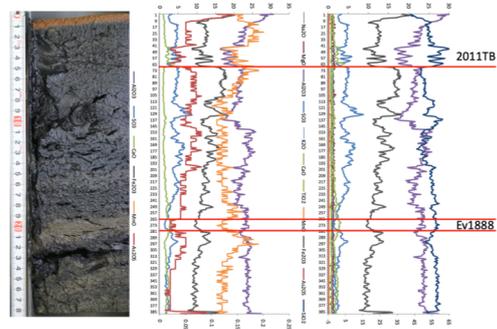


図 5. 猪苗代湖底極表層堆積物に挟まる 2011 年地震性タービダイトと 1888 年噴火に伴うハイパーピクナイトの化学組成の鉛直変化。

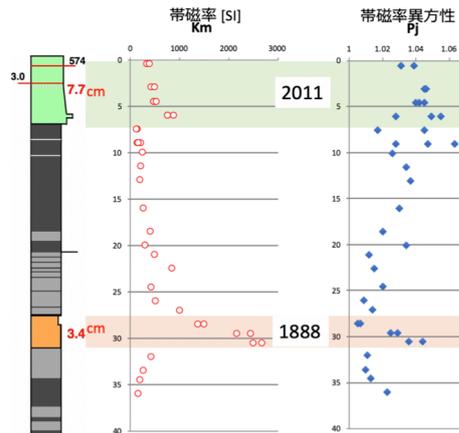


図 6. 猪苗代湖底極表層堆積物の帯磁率 (Km) と帯磁率異方性 (Pj) の鉛直変化。

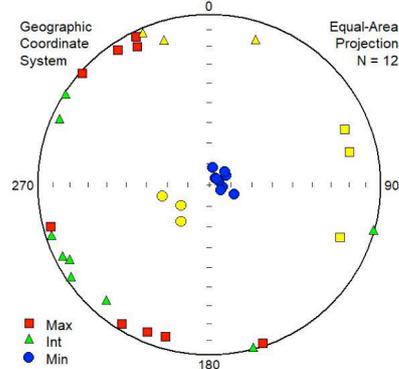
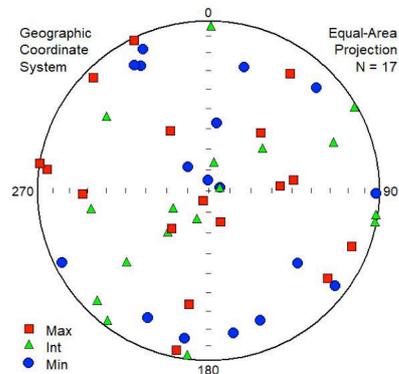


図 7. 地点 D におけるバックグラウンド堆積物 (上) と、地点 K における、2011 年地震性タービダイトと 1888 年噴火に伴うハイパーピクナイトの帯磁率異方性の K_{\max} (□), K_{int} (△), K_{\min} (○) プロット (下)。黄色は 1888 年ハイパーピクナイトで、それ以外が 2011 年タービダイト。

堆積物が供給されたことを示し、1888年噴火起源ハイパーピクナイトは、長瀬川の河口から湖心部を通り、この地点まで到達したと調和的である。

このように各地点で、定方位採取したコア試料中のイベント堆積物について、帯磁率異方性から、古流向解析を行うことで(図8)、地震性タービダイトがどの斜面に由来するのか、あるいは湖外からの洪水や火山泥流などに由来するハイパーピクナイトかどうかを識別することができ、さらには、湖内における密度流の動態を堆積物から復元できる。

まとめ

本研究では、2011年地震性タービダイトと1888年磐梯山噴火起源ハイパーピクナイトについて、層相・粒度組成・連続化学組成・帯磁率異方性による特徴化を試みた。その結果、両者は明瞭に区別できることが明らかとなった。

- 1) 2011年地震性タービダイトは単純な上方細粒化を示し、1888年ハイパーピクナイトは、地点により堆積パターンが異なる。また、1888年ハイパーピクナイトは、粘土含有量が高いことが特徴である。
- 2) 2011年地震性タービダイトは湖心部で厚層化する。一方、1888年ハイパーピクナイトは河口部から湖心にかけての軸部で厚く堆積し、そこから離れると薄層化する。
- 3) 地震性タービダイトの平均化学組成は、イベント層を除いたバックグラウンド湖底堆積物の平均化学組成に類似することが知られており(Kataoka and Nagahashi, 2019)、湖内物質に由来する。一方で、1888年ハイパーピクナイトは湖外物質に由来する。
- 4) 2011年と1888年イベント堆積物はバックグラウンド堆積物に比べ帯磁率が高い。
- 5) イベント堆積物の帯磁率異方性測定による磁気ファブリックは、粒子の定向配列を示し、流れによるせん断の影響を示唆する。また、2011年地震性タービダイトと1888年磐梯山噴火起源ハイパーピクナイトの磁気ファブリックは、明瞭に区別できる。

<引用文献>

Kataoka, K. S. and Nagahashi, Y. (2019) From sink to volcanic source: Unravelling missing terrestrial eruption records by characterization and high-resolution chronology of lacustrine volcanic density flow deposits, Lake Inawashiro-ko, Fukushima, Japan. *Sedimentology*, 66, 2784-2827.

長橋良隆, 片岡香子, 難波謙二 (2022) 猪苗代湖の湖底堆積物に記録された放射性セシウムの鉛直プロファイルに基づく福島第一原子力発電所事故由来の放射性セシウムの将来予測. *地学雑誌* 131(3) 339-363.

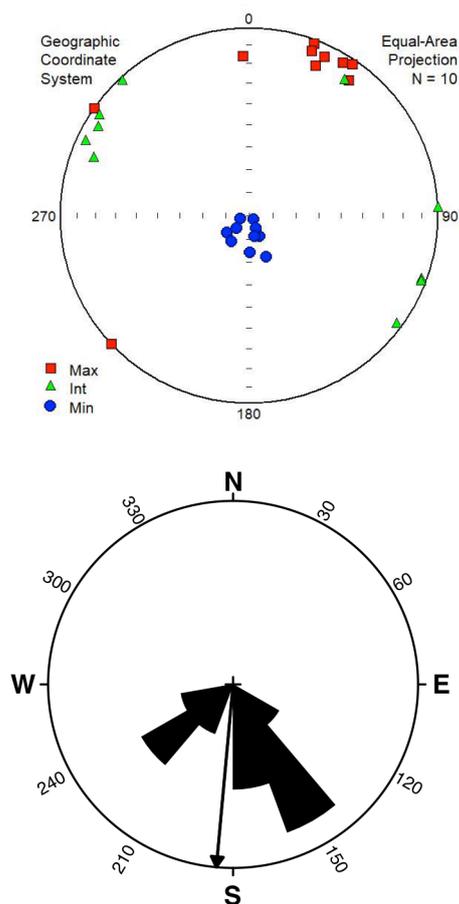


図8. 地点Hに1888年噴火に伴うハイパーピクナイトの帯磁率異方性 K_{max} (□), K_{int} (△), K_{min} (○) プロット (上) と K_{min} から求めた古流向 (下)。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kataoka, K.S.	4. 巻 520
2. 論文標題 From 'source to sink' to 'sink to source': a review of volcanic fluvial and lacustrine successions in Japan	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Geological Society, London, Special Publication	6. 最初と最後の頁 393-416
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1144/SP520-2022-171	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 長橋良隆・片岡香子・難波謙二	4. 巻 131
2. 論文標題 猪苗代湖の湖底堆積物に記録された放射性セシウムの鉛直プロファイルに基づく福島第一原子力発電所事故由来の放射性セシウムの将来予測	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 地学雑誌	6. 最初と最後の頁 355-369
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5026/jgeography.131.339	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 2件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Kataoka, K.S.
2. 発表標題 Volcanic Source to Sink: From Subaerial Eruptions to Deep-water Turbidity Currents
3. 学会等名 The 21st International Sedimentological Congress（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kataoka, K., Urabe, A., Nagahashi, Y.
2. 発表標題 Unraveling small-scale eruptions and lahar events by high-resolution stratigraphy of lacustrine deposits: Adatara and Bandai volcanoes and Lake Inawashiro, Japan
3. 学会等名 IAVCEI 2023 Scientific Assembly（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kataoka, K., Nagahashi, Y., Urabe, A.
2. 発表標題 Cascading process of debris avalanche, lahar, and sub-lacustrine density current associated with the AD1888 eruption of Bandai volcano, Japan
3. 学会等名 IAVCEI 2023 Scientific Assembly (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 片岡香子・長橋良隆・卜部厚志
2. 発表標題 磐梯山1888年噴火に関わる湖底密度流堆積物：岩屑なだれ・ラハールとの関連性
3. 学会等名 日本火山学会2022年度秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 片岡香子・長橋良隆・卜部厚志
2. 発表標題 猪苗代湖底，極表層堆積物に見られる 2011 年地震性タービダイトと1888 年磐梯山噴火起源ハイパーピクナイトの特徴
3. 学会等名 日本堆積学会2022年オンライン大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 片岡香子
2. 発表標題 火山噴火に伴う流域攪乱と下流域への広域な伝播作用：沼沢火山 5400 年前噴火の事例
3. 学会等名 日本山の科学会2022年秋季研究大会・公開シンポジウム「平野の土砂は山からどのようにやって来るか？ - 積雪流域の自然災害 -」（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高清水康博・大屋那津子・阿部悠介・菅原大助・卜部厚志・石澤堯史・青田享也・平野史佳
2. 発表標題 南相馬市小高区塚原地区の沖積層に狭在するイベント層の粒子特性
3. 学会等名 日本堆積学会2022年オンライン大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 飯田雅貴・菅原大助・高清水康博・卜部厚志・貞包健良・平野史佳
2. 発表標題 佐渡島南部の古津波堆積物と津波波源に関する検討
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 長橋良隆・片岡香子・難波謙二
2. 発表標題 猪苗代湖の湖底堆積物に記録された大気圏内核実験と福島第一原子力発電所事故由来の放射性セシウム濃度の鉛直プロファイル
3. 学会等名 日本第四紀学会2021年大会（オンライン - 大阪）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 平野 史佳・卜部 厚志
2. 発表標題 青森県西部・十三湖におけるイベント堆積物
3. 学会等名 地球惑星科学連合2021大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	長橋 良隆 (Nagahashi Yoshitaka) (10292450)	福島大学・共生システム理工学類・教授 (11601)	
研究 分担者	卜部 厚志 (Urabe Atsushi) (20281173)	新潟大学・災害・復興科学研究所・教授 (13101)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------