

宍道湖西岸で採取された完新世堆積物 (HK19 コア) の 残留磁化と磁気特性：汽水域の古環境復元への示唆

林田 明^{1*}・齋藤文紀^{2,3}・瀬戸浩二²・香月興太²・服部真也¹・八木涼太¹

Remanent magnetization and magnetic properties of the Holocene sediment (HK19 core) recovered on the west shore of Lake Shinji: implication for the paleoenvironmental reconstruction of estuary areas

Akira Hayashida^{1*}, Yoshiki Saito^{2,3}, Koji Seto², Kota Katsuki²,
Shin'ya Hattori¹ and Ryota Yagi¹

Abstract: In order to investigate Holocene environmental changes in Lake Shinji and surrounding areas, a sediment core sequence of 34.8 m long (HK19 core) was recovered from the western shore near the mouth of the Hii River, Shimane Prefecture. We made pass-through measurements of low-field magnetic susceptibility, remanent magnetization, and anhysteretic remanent magnetization (ARM) of 42 u-channel samples from the HK19 core. Alternating field demagnetization up to 60 or 80 mT revealed preservation of characteristic magnetic components at most intervals of silty-clay sediments, while the coarse-grained sediments above 7 m and below 33 m showed unstable behavior during the stepwise demagnetization. Maximum angular deviations (MADs) of the principal component analysis are especially small at 7.2–11.4 m and 24.0–33.0 m. Although relative declination data of several samples were seemingly affected by core twisting, the inclination variation of the lower interval is correlative to the standard paleomagnetic secular variation record from Lake Biwa, referring to the occurrence of the Kikai-Akahoya tephra layer in the HK19 core. The magnetic susceptibility and ARM susceptibility data showed that magnetic mineral concentration at 11.4–24.0 m is significantly decreased compared to the upper and lower intervals, suggesting diagenetic modification of magnetic minerals and degrading of paleomagnetic signals under anoxic water conditions in a brackish environment.

Key words: Lake Shinji, Hii River, paleomagnetism, paleosecular variation, environmental magnetism

¹ 同志社大学理工学部環境システム学科・Department of Environmental Systems Science, Doshisha University, Kyotanabe, Kyoto 610-0321, Japan.

² 島根大学エスチュアリー研究センター・Estuary Research Center, Shimane University, 1060 Nishikawatsucho, Matsue 690-8504, Japan.

³ 産業技術総合研究所地質調査総合センター・Geological Survey of Japan, AIST, Tsukuba 305-8567, Japan.

* Corresponding Author

受付日：2021年9月28日，受理日：2022年2月10日，WEB掲載日：2022年3月31日

はじめに

宍道湖は中国山地と島根半島間の宍道地溝帯に位置し、西岸から斐伊川が流入するとともに、東側の大橋川から中海を経て美保湾に通じ海水が浸入する汽水湖となっている。この地域の古環境は完新世の相対的海水準変動や海岸地形の発達、河川による堆積物の供給などの影響を受けており、宍道湖の湖底ピストンコアや出雲平野（簸川平野）で掘削されたコア試料の分析を通してその変遷が研究されてきた（瀬戸ほか, 2006; 山田・高安, 2006 など）。さらに本地域の堆積物から得られる古環境の指標は、東アジア・モンスーンの活動など、広域の気候変動の研究にも寄与することが期待される。このような状況を背景とし、2019年1月に宍道湖西岸の斐伊川河口付近（図1）においてコア試料（HK19 コア）の掘削が行われ、一部に汽水成年縞と考えられる層相を含む完新世堆積物が採取された。このコア試料の概要は瀬戸ほか（準備中）に述べられる予定であり、岩層相序や元素分析、微化石群集解析、放射性炭素年代と広域火山灰の年代に基づく年代モデルなどの検討が行われている。我々は、古地磁気永年変化に基づく編年を目指して残留磁化の測定を行い、合わせて堆積環境や供給源の変化と堆積物の磁気特性の変化との対応を調べる環境磁気学の研究を進めている。

様々な時間スケールの地球磁場の変動のうち、地層の対比や編年に広く用いられる現象は主磁場の極性逆転（ $> 10^4$ 年）であるが、同一極性の期間においても地球磁場の強度変化（ $\sim 10^4$ 年）、あるいは地球磁場の偏角と伏角の変動（古地磁気永年変化、 $10^2 \sim 10^3$ 年）の記録を得ることにより、堆積物や火山岩の年代を高精度に決定できる可能性がある（Korte et al., 2019）。たとえば Kanamatsu et al. (2017, 2022) は、炭酸塩補償深度を越えるために放射性炭素年代を得ることのできない日本海溝の完新世堆積物コアの残留磁化を測定し、琵琶湖の湖底堆積物から報告された古地磁気永年変化曲線（Ali et al., 1999; Hayashida et al., 2007）等と対比することによって高精度の年代決定を成し遂げた。HK19 コアについては、樹木の葉片や小枝などの植物化石を対象に放射性炭素年代を求めることができるが、その結果を補完するために古地磁気永年変化の記録が有効である。

一方、汽水域の有機物に富む堆積物においては還元的初期続成作用のために磁性鉱物に変質して

いる可能性があり（たとえば Mohamed et al., 2011）、1992年に掘削された鳥取県東郷池のコア試料（加藤ほか, 1998; Kato et al., 2003）でも汽水環境で形成された年縞の卓越する層準において磁性鉱物含有量や保磁力の指標が変化することが示されている（Inoue et al., 2004）。また、淡水湖沼においても還元環境下で藍鉄鉱（vivianite）や菱鉄鉱（siderite）が形成されることが知られている（山田, 2003; Minyuk et al., 2012 など）。これらは常温で強い磁性を示さないが酸化や加熱によって強磁性鉱物に変化するため、堆積物の残留磁化に影響を与える可能性がある（Frederichs et al., 2003）。

このように堆積物の磁気特性の解析は、古地磁気永年変化の記録の信頼性を検証するために重要であるとともに、堆積物の供給源の変化や初期続成作用の影響を示す指標を提供する。本稿ではHK コアの残留磁化方位と琵琶湖の古地磁気永年変化曲線との対比を検討し、堆積物の磁気特性の指標として重要な初磁化率と非履歴性残留磁化（ARM）の変動から示唆される堆積環境の変遷について議論する。

試料および方法

HK19 コアは、島根県出雲市斐川町坂田碓下（北緯 $35^{\circ}25'35.0''$ 、東経 $132^{\circ}52'27.1''$ 、海拔 0.04 m）の水田において、地表から 1.00–34.80 m の深度で主として水圧式シンウォール・サンプラー（一部は打ち込み式サンプラー）を用いて採取されたものであり、直径約 75 mm、長さ 44–91 cm のコア 43 本（HK19-1 to 43）からなる。主孔の掘削後、打ち込み式サンプラーが用いられた層準を含む副孔の深度 6.0–11.78 m から 7 本のシンウォール・コア（HK19-44 to 51）が採取されたが、今回の報告は主孔のコアから得たデータに基づくものである。

HK19 コアのうち深度約 10–32 m の主要岩相はシルト質粘土であり、32–33 m が完新世の海成層の基底に当たると考えられる。また、深度約 13–23 m には年縞の可能性のある葉理が観察され、閉鎖的な汽水域の環境が示唆される。深度 10 m より上位の特に 4–7 m には砂層が卓越し、「斐伊川東流イベント」（高安, 2001; 瀬戸ほか, 2006）の後のデルタ堆積物と見做すことができる（瀬戸ほか, 準備中）。

HK19 コアの堆積年代を推定する手がかりとして、深度 16.24–16.26 m（HK19-22, 12–14 cm）、18.62–18.65 m（HK19-24, 74–77 cm）、22.50 m（HK19-29, 31 cm）の 3 層準に火山灰層が認められ、

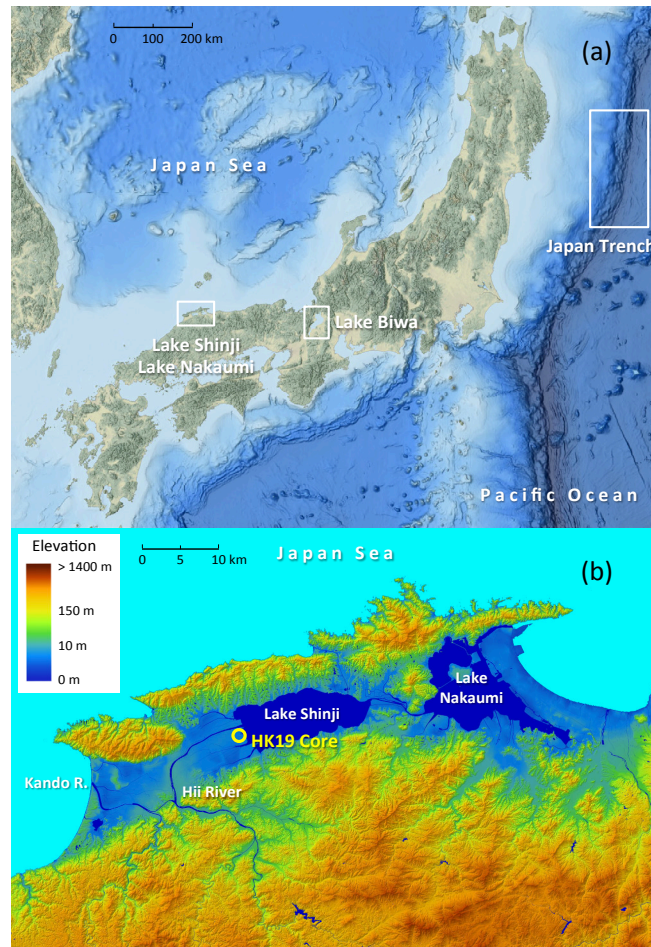


図1 試料採取地点の位置. (a) 中海 - 宍道湖水系の他, 本文で参照した日本海溝と琵琶湖の位置を示す. (b) 宍道湖西岸の HK19 コアの採取地点. (a) には NOAA Bathymetric Viewer (<https://www.ncei.noaa.gov/maps/bathymetry/>), (b) には国土地理院 (<https://maps.gsi.go.jp/>) のデジタル標高地形図 (島根県 2019 年 6 月) を用いた。

Fig. 1 Location of the HK19 core. (a) Index map for the Nakaumi and Lake Shinji area. Location of the Japan Trench and Lake Biwa are also shown. (b) Location of the HK19 drilling site on the western shore of Lake Shinji. Base maps of (a) and (b) are from NOAA NCEI visualization of the General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO_2020, <https://www.ncei.noaa.gov/maps/bathymetry/>) and the digital elevation map (Shimane Prefecture, June 2019) published by Geospatial Information Authority of Japan (<https://maps.gsi.go.jp/>), respectively.

最下位のものは鬼界アカホヤ (K-Ah) 火山灰 (7,253 ± 46 cal years BP; Albert et al., 2018; 2019) に対比される (瀬戸ほか, 準備中). 上位の 2 枚の火山灰は三瓶火山系のテフラと考えられ, 三瓶大平山 (SOh) あるいは三瓶志学火砕流または三瓶角井火山灰に相当する可能性がある. さらに本コアから得られた植物片試料について中西ほか (準備中) によって AMS 放射性炭素年代が得られており, その結果は

先行研究 (山田・高安, 2006 など) で推定された宍道湖水域における後氷期の海面上昇の過程や上述の広域テフラの対比と調和的である.

本研究で用いた磁化測定のための試料は, 礫質の HK19-43 を除く 42 本のコア (HK19-1 ~ 42) の半割面に断面 2.0 cm × 2.0 cm, 長さ約 100 cm のプラスチック容器 (U チャンネル) を押し込むことによって得た. これらの試料について, 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を用い, 1 cm 間隔で初磁化率の測定を行った. 残留磁化の測定にはパススルー型超伝導磁力計 (2G Enterprises Model 755R, 室温ボア径 4.2 cm) を用い, やはり 1 cm 間隔で自然残留磁化 (NRM) を測定するとともに, 5 mT または 10 mT 間隔で 60 mT まで, 磁化強度によっては 80 mT まで段階的交流消磁の実験を行った. その結果に対し, パススルー測定 of データ処理に適したソフトウェア (Upmag; Xuan and Channell, 2009) を利用して主成分解析を行い, 直線的に原点に収束する磁化成分の方位 (Uチャネルを押し込んだ方向を基準とする相対的偏角および伏角) と最大角分散 (Maximum Angular Deviation: MAD) の値を求めた. さらに, Uチャネル試料に 0.1 mT の直流磁場をかけながらピーク値 100 mT の交流磁場中を通過させることによって ARM を獲得させ, その測定結果を非履歴性磁化率 (ARM 磁化率) の値として示した.

パススルー型磁力計で Uチャネル試料を測定する場合, センサーが測定する磁気モーメントにはコイルの中心部だけでなく, その両側にある堆積物の磁化が寄与することになる. その寄与を表すグラフはセンサーの感度曲線あるいは応答曲線と呼ばれ, 本研究で用いた装置の場合はセンサーの中心から両側に約 5 cm の感度幅を持つ (Oda et al., 2016 など). 本稿で示す磁化方位と強度はこの応答曲線に応じた重み付けを伴って平均化された値であるが, 初磁化率測定用のループセンサーもこれに近い感度幅を持つため, 初磁化率と残留磁化の変動を同程度の解像度で比較することができる. なお, HK19-32 (深度 24.75–25.66 m) と HK19-33 (深度 25.66–26.51 m) の 2 本の Uチャネルについては超伝導磁力計の保守上の都合によりパススルー測定ができなかったため, Uチャネル試料から 10 cm 間隔で作成したキューブ試料に ARM を付加し, スピナー磁力計 (夏原技研 SMD-88) を用いて磁化測定を行った.

結果

自然残留磁化の段階交流消磁の結果, ほとんどの層準において原点に向かって減衰する磁化成分が見出された (図 2). 7 m 以浅 (図 2a) および 33 m 以深 (図 2h) の粗粒堆積物の消磁結果の直交面投影には不規則な変化が見られたが, その間のシルト質粘土からなる試料の磁化の減衰には高い直線性が認

められた (図 2b–g). そこで, Uチャネル試料ごとに Upmag で描いた直交面投影図を確認した後, 直線のと判定した 5–15 mT 以上 50 mT までの間の消磁結果 (8–10 点) について, 原点へのアンカーは行わずに最小二乗近似 (Kirschvink, 1980) を適用し, 特徴的磁化成分の方位を決定した.

図 3 に消磁前の交流消磁前の NRM の強度 (図 3a), NRM 強度を 2 分の 1 にする交流磁場の値 (Median Destructive Field: MDF, 図 3b), 消磁データの直線性の目安として用いられる最大角偏差 (MAD, 図 3c), さらに相対的偏角と伏角の値 (MAD < 15° の結果のみ, 図 3d, e) を示した. NRM 強度には深度約 11.4 m (HK19-15 と HK19-16 の間) および深度 23.9 m 付近 (HK19-31 の最上部 0–20 cm) で顕著な差異が見られ, MDF と MAD の結果にもこれらと対応する変化が認められる. 深度 11.4 m より上位および 23.9 m より下位において比較的 MDF が大きく MAD が小さいことは, 消磁結果のベクトル投影図 (図 2b, c および図 2f, g) から伺える. 図 3 に示したように深度 7.2–11.4 m と 24.0–33.0 m の範囲では特に MAD の値が小さく, 精度の高い磁化方位が得られた.

前述のとおり, ここに示した偏角はコアの切断面に Uチャネルを押し込んだ方向を基準とした相対値であり, その変動は一つのコアの中では古地磁気永年変化の範囲 (ほぼ ± 20° 以内; Ali et al., 1999) に収まることが期待される. しかし, HK19 コアの上部には, シンウォールと打ち込み式のコアにかかわらず, 一本の Uチャネル試料の中で 90° 以上の相対的偏角の系統的な変化を示す例が多数認められた (図 3d). このような変化は, コア採取時あるいはサンプラーからの試料の押し出しで生じたコアのねじれに起因する可能性が高い. 一本の Uチャネル試料内での伏角の変動は古地磁気永年変化の範囲 (約 40–60°; Ali et al., 1999) に重なるものが多かったが, 打ち込み式コアラーの試料, あるいはシンウォール・コアの上端部で大きな変化が認められた. 一方, 特に MAD の小さい層準では比較的滑らかな伏角の変動が見られた. 図 3 に示した伏角の平均値は 42.4° (標準偏差 9.4°) であり, ほとんどの層準でコア採取地点の現在の地磁気伏角 (50.7°) や地軸方向の地心双極子磁場の伏角 (54.9°) に比べて小さい値であった.

NRM の段階交流消磁の結果, 65% 以上のデータから 5° 未満の MAD が得られた (図 3). 一般には MAD が 10° 未満の方位を古地磁気学の研究に用い

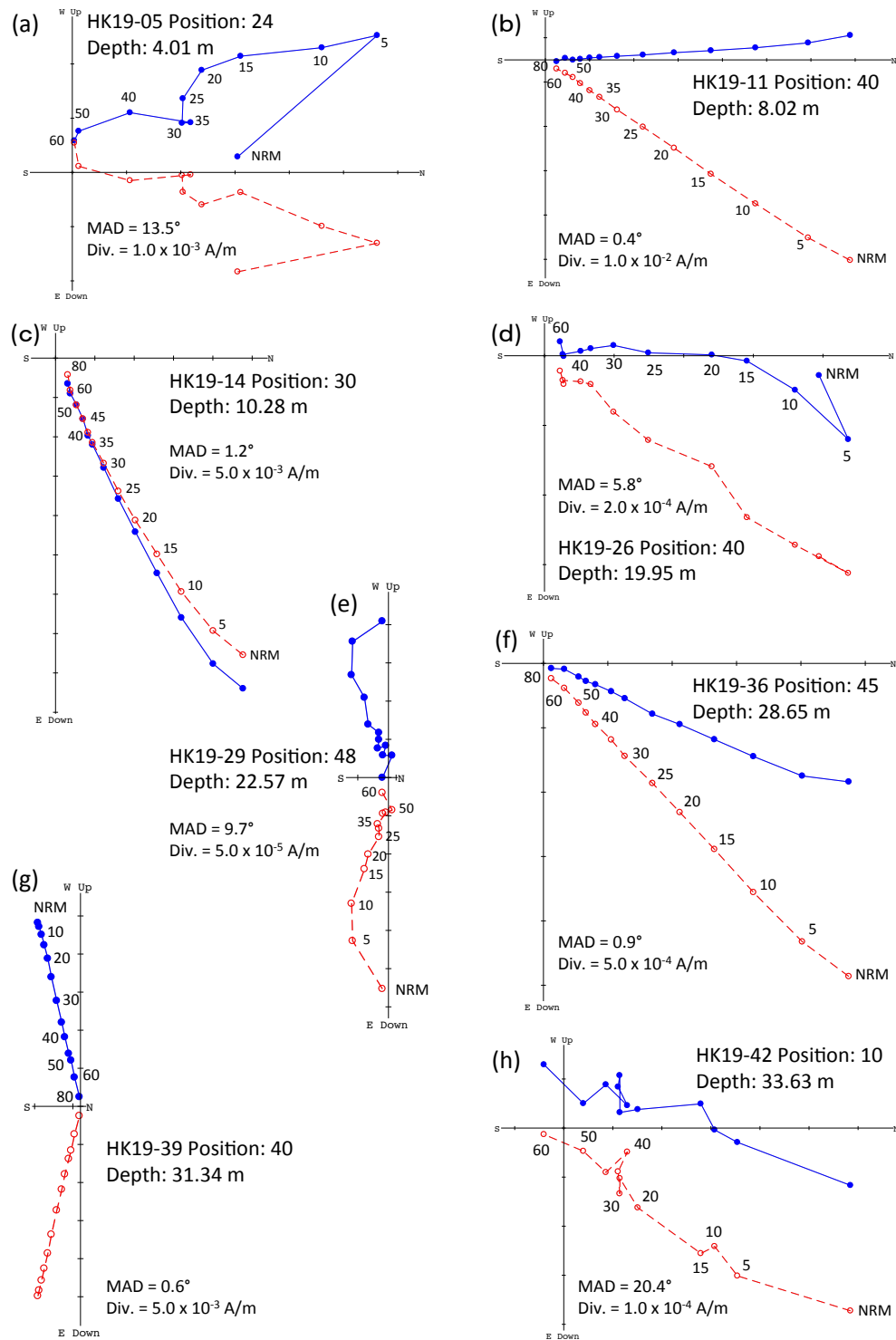


図2 自然残留磁化の段階交流消磁の代表的な結果. 赤点(破線)と青点(実線)のグラフはそれぞれ垂直成分と水平成分を表し, 数字は交流磁場のピーク値(単位は mT)を示す. カラー版は Laguna のウェブページの pdf 版で見ることができる.

Fig. 2 Representative results of stepwise alternating field (AF) demagnetization of the NRM. Open (red) and closed (blue) symbols indicate vertical and horizontal components, respectively, with peak AF levels (mT) for selected steps. The color figure is available in the pdf version from the web site.

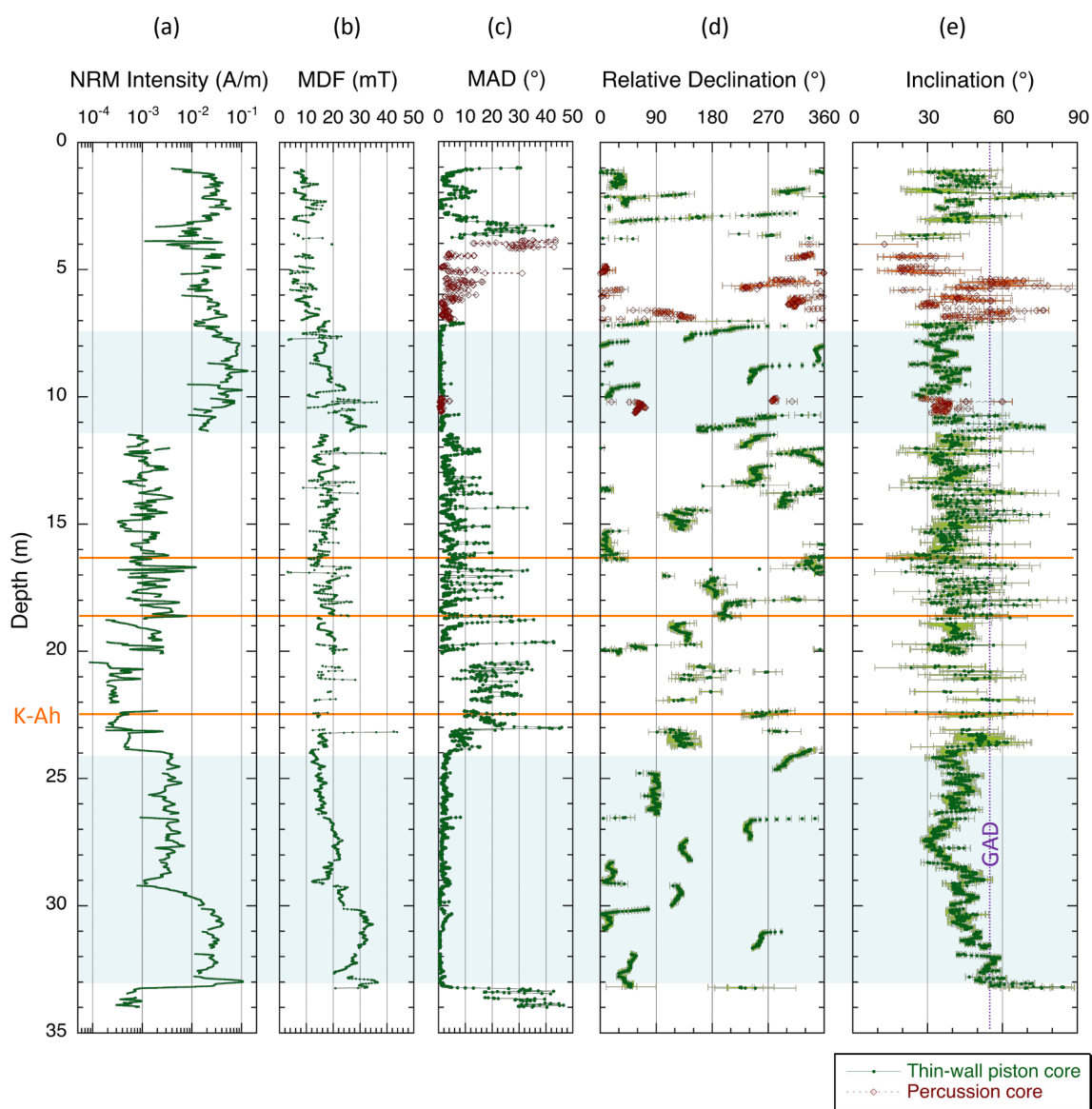


図3 古地磁気方位に関するデータ。(a) 自然残留磁化 (NRM) の強度, (b) NRM 強度を2分の1にする交流磁場の値 (MDF), (c) 特徴的磁化成分の最大角偏差 (MAD), (d) MADが15°未満の相対的偏角および (e) 伏角の深度プロット。(c) ~ (e) のグラフにはシンウォール・コアラーと打ち込み式のコアラーによって採取された試料の区別を示した。また, MADが特に小さい深度区間と鬼界アカホヤ(K-Ah)を含む3枚の火山灰の層準を示し, (e) に試料採取地点で期待される地軸方向の地心双極子磁場 (GAD) の伏角の値 (54.9°) を記入した。カラー版は Laguna のウェブページの pdf 版で見ることができる。

Fig. 3 Results of paleomagnetic analysis. Depth plots of (a) Intensity of natural remanent magnetization (NRM), (b) Median destructive field (MDF) of the NRM, (c) Maximum angular deviation (MAD) for the characteristic magnetic component, (d) relative declination and (e) inclination of the characteristic component with the MAD less than 15°. Also shown are intervals of extremely small MADs, horizons of three tephra layers including Kikai-Akahoya (K-Ah) tephra, and the inclination of the geocentric axial dipole (GAD) field (54.9°) at the drilling site. The color figure is available in the pdf version from the web site.

ることが多いが、信頼性の高い古地磁気方位を得るために $MAD < 5^\circ$ が採用基準とされることもある (Heslop and Roberts, 2016). この基準からも、HK19 コアの半数以上の層準で安定な残留磁化成分の方位を求めることができたといえる。磁性鉱物含有量が大きく MDF が 15 mT を上回る深度 7.2–11.4 m と 24.0–33.0 m の試料では特に MAD の値が小さく、比較的滑らかな伏角の変動が認められた (図 3). ただし、このうち深度 7.2–11.4 m の試料については、一本の U チャンネル試料の中で相対的偏角の大きな変化が見られ、コア採取時あるいは試料の押し出し時にねじれが生じた可能性が示唆される。

初磁化率と ARM 磁化率の値 (図 4) は、NRM 強度 (図 3) と同様に深度約 11.4 m と深度 23.9 m 付近で顕著な変化を示した。深度約 10–32 m のシルト質粘土 (図 4d) のうち、深度 11.4–23.9 m では、火山灰層あるいは砂質の薄層に対応すると思われるピークを除いて初磁化率の値が 10^{-4} (SI) を下回っている。ARM 磁化率もこれと調和的な低い値を示し、MAD の小さい上下の層準 (深度 7.2–11.4 m と 24.0–33.0 m) に比べ、磁性鉱物含有量が小さいことが明らかになった。深度約 11.4 m では ARM 磁化率に顕著な段差を伴う増加が見られるが、それに比べて初磁化率の増加は漸移的である。また深度 29.5 m 付近 (HK19-37) の ARM 磁化率には、初磁化率のグラフには見られない顕著な変化が存在する。ARM 磁化率と初磁化率の変動が調和的でない箇所は両者の比の深度プロット (図 4) に明瞭に表れており、単に磁性鉱物含有量が変化するのではなく、鉱物種の違いや磁性粒子のサイズの差の存在が示唆される。

議 論

前述のように主成分分析で求めた伏角の多くはコア採取地点の現在の地磁気伏角や地軸方向の地心双極子磁場の伏角に比べて有意に小さい値を示した (図 3). コアのねじれの影響を受けた可能性があるデータを除くため、MAD が 5° 未満の磁化方位について連続した 11 点の磁化ベクトルの移動平均を計算し、その角標準偏差 (Angular Standard Deviation: ASD) が 5° を下回るデータを図 5 に示したが、やはり HK-19 コアから得られた伏角は琵琶湖から報告された古地磁気永年変化曲線 (Ali et al., 1999) と比較して 10° 程度小さい値で変動することが確かめられた。堆積物が獲得する残留磁化の伏角が外部磁

場よりも浅くなる現象は伏角浅化あるいは伏角誤差と呼ばれ、実験室内での堆積実験で確かめられるとともに、残留磁化を担う粒子が扁平な形状を持つ場合に特に顕著になることが知られている (Tauxe and Kent, 1984; Li and Kodama, 2016 など). また、完新世の湖沼堆積物を用いた古地磁気永年変化の研究では、堆積物の圧密によって 10° 以上の伏角浅化が起こった可能性が示唆されている (Turner et al., 2015). HK19 コアの伏角の値についても、今後、磁化率異方性や磁性鉱物の同定などの研究を通じて検討する必要がある。

伏角の深度プロットの 24.0–33.0 m の区間には、深度 27.5 m 付近の極小値を含む連続的な変動が認められ、琵琶湖の古地磁気永年変化曲線のうち約 7.5–9.5 ka (10^3 cal years BP, 以下同じ) の伏角の記録と類似性が見られる。琵琶湖の記録ではこの区間の伏角の変動が約 $45 \sim 55^\circ$ の範囲にあるのに対して HK19 コアでは $30 \sim 50^\circ$ の値となっているが、琵琶湖の古地磁気永年変化曲線の年代決定の基準とされた K-Ah 火山灰 ($7,253 \pm 46$ cal years BP) が HK19 コアの深度約 22.5 m に挟在することから、これらは同時期の地磁気永年変化を反映した結果と考えることができる。また、宍道湖東部の海成堆積物の基底は約 9.2 ka と推定されており (山田・高安, 2006 など), これまでに鬱陵隠岐火山灰 (U-Oki; 10,177–10,255 cal years BP; Smith et al., 2013) は発見されていない。琵琶湖の湖底堆積物では、Ali et al. (1999) が古地磁気永年変化の記録を得たピストンコアは U-Oki の深度まで達していないが、別地点のコア (BIW95-4) で古地磁気永年変化の伏角が増加する期間 (10.5–10.1 ka) に U-Oki が含まれることが示されている (Hayashida et al., 2007, 図 5). HK19 コアの伏角の記録からは HK19 コアの海成層の基底が U-Oki の直上に当たる可能性が示唆されるが、この地点が内湾環境になった年代については放射性炭素年代の測定結果を含めてさらに検討する必要がある。

HK19 コアの深度 24 m より上位からは連続的な古地磁気永年変化の記録を得ることができなかった。図 4 に示したように深度 11.4–23.9 m の堆積物では初磁化率と ARM 磁化率の値が格段に小さいことから、初期続成作用によって磁性鉱物が溶解あるいは変質し、残留磁化の記録に影響が及んだ可能性が考えられる。還元的な環境では磁性鉱物中の Fe^{3+} が Fe^{2+} に還元されて溶出し硫化鉄などの自生に到ることが知られており (Roberts, 2015 など), 有

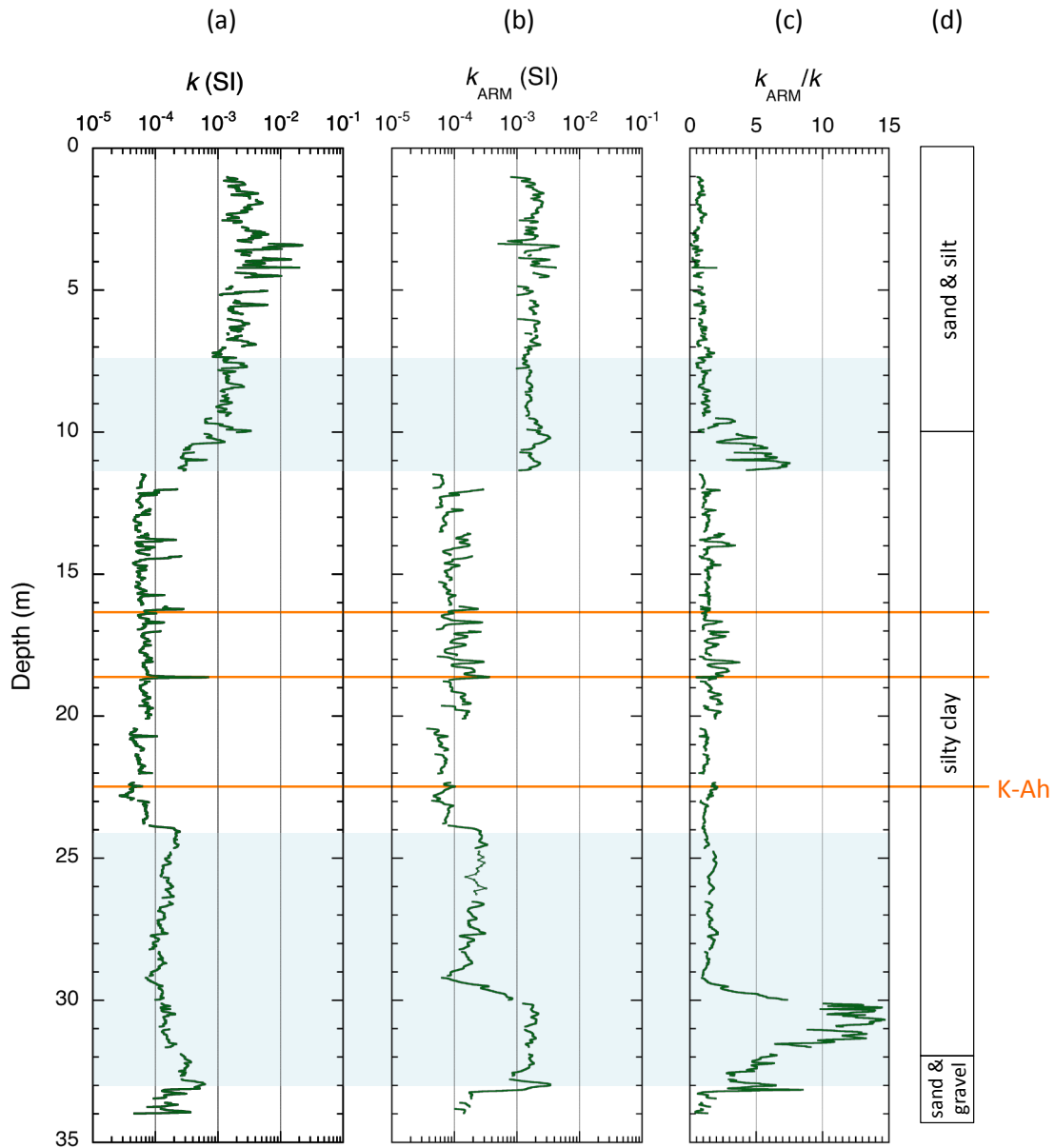


図4 磁性鉱物含有量に関するデータ。(a) 初磁化率 (k), (b) 非履歴性磁化率 (k_{ARM}), (c) k_{ARM} と k の比の深度プロット。図3と同様に, MAD が特に小さい深度区間と K-Ah を含む3枚の火山灰の層準, および (d) 簡略化した岩相図を示した。カラー版は Laguna のウェブページの pdf 版で見ることができる。

Fig. 4 Depth plots of magnetic mineral concentrations: (a) low-field magnetic susceptibility (k), (b) anhysteretic susceptibility (k_{ARM}), and (c) ratio of k_{ARM} and k . Intervals of extremely small MADs and horizons of three tephra layers including Kikai-Akahoya (K-Ah) tephra, and (d) a simplified lithologic column are also shown. The color figure is available in the pdf version from the web site.

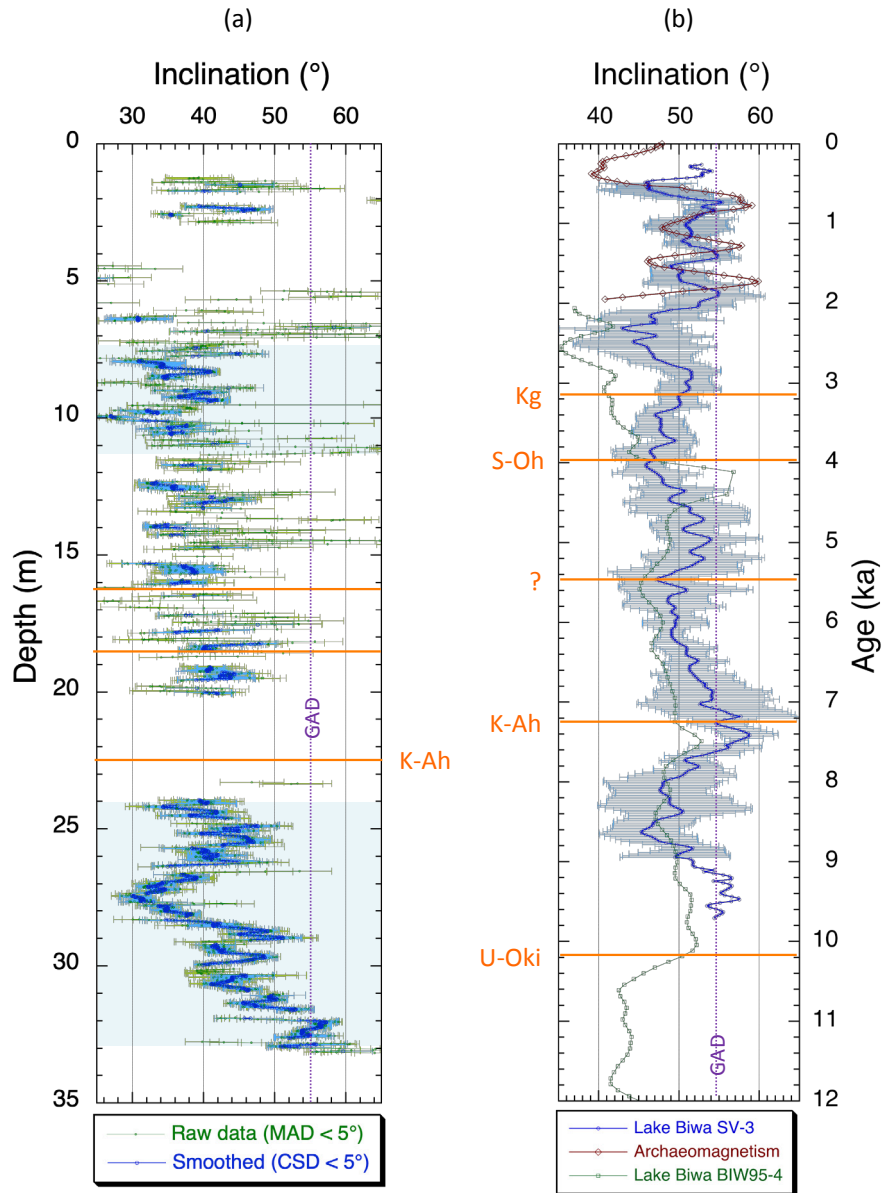


図5 HK19 コアの残留磁化方位と日本の標準的な古地磁気永年変化曲線の比較. (a) HK19 コアから得られた MAD が 5° 未満の伏角値, および平滑化とフィルタリングを行ったデータの深度プロット. (b) 琵琶湖の古地磁気永年変化曲線 (Lake Biwa SV-3, Ali et al., 1999; Lake Biwa BIW95-4, Hayashida et al., 2007) と考古地磁気データの伏角の記録. (a) には図 3, 4 と同様に MAD が特に小さい深度区間と K-Ah を含む 3 枚の火山灰の層準を示し, (b) には琵琶湖のピストンコアに含まれる火山灰層 (Kg: 天城カワゴ平, SOh: 三瓶大平山, ?: 未同定, K-Ah: 鬼界アカホヤ, U-Oki: Ulreung-Oki) を示した. カラー版は Laguna のウェブページの pdf 版で見ることができる.

Fig. 5 Comparison of the remanent magnetization directions of the HK19 core and standard paleosecular variation curves in Japan. (a) Depth plots of inclination of the characteristic component with the MAD less than 5° and data after smoothing and filtering. (b) Inclination records of the paleosecular variation curve from Lake Biwa (Lake Biwa SV-3, Ali et al., 1999; Lake Biwa BIW95-4, Hayashida et al., 2007) and archaeomagnetic data. Intervals of extremely small MADs and horizons of three tephra layers including Kikai-Akahoya (K-Ah) tephra (a) and tephra layers (Kg: Amagi-Kawagodaira, SOh: Sanbe-Oohirayama, ?: not identified, K-Ah: Kikai-Akahoya, U-Oki: Ulreung-Oki) in the Lake Biwa piston cores (b) are also shown. The color figure is available in the pdf version from the web site.

機物に富む沿岸域の堆積物や汽水性湖沼の堆積物などから多くの事例が報告されている（たとえば Mohamed et al., 2011; Hayashida et al., 2015）。宍道湖の湖底から採取されたピストンコアの研究（瀬戸ほか, 2006）によって、「斐伊川東流イベント」以前の堆積物の全硫黄濃度や全有機炭素量が大きく、貧酸素から無酸素環境の底層水塊が卓越する還元的な汽水環境にあったことが明らかにされており、HK19 コアの深度 11.4–23.9 m の堆積物がこのユニットに相当すると考えられる。

HK コア上部に見られる磁性鉱物含有量の変化には、ARM 磁化率が深度 11.4 m で急激に増加するのに対し、初磁化率の値は約 9 m の深度まで漸移的に増加するという違いが見られる（図 4）。磁性鉱物の総量を示す初磁化率に比べ、ARM 磁化率は極細粒のフェリ磁性粒子の含有量を反映するという特徴がある。このことから、汽水環境から淡水域への変化に伴って還元的続成作用の影響がなくなるとともに細粒マグネタイトの流入量が急増し、その後、粗粒碎屑物の供給が次第に増加していったことが示唆される。深度 7.2–11.4 m の堆積物に安定な残留磁化が保存されていることから、淡水環境への変化の後も静水域での細粒堆積物の堆積が継続していたと考えることができる。このような変化は「斐伊川東流イベント」に伴う現象である可能性があるが、具体的な堆積環境の変遷過程を明らかにするためには高精度の年代測定を含めた詳細な検討を行う必要がある。

結 論

HK コアから採取した U チャンネル試料について自然残留磁化の測定と段階交流消磁、および初磁化率と ARM 磁化率の測定を行った結果、比較的磁性鉱物含有量が大きい深度で安定な磁化成分が見出された。主成分分析によって求めた磁化方位は約 10° の伏角浅化を示したが、深度 24.0–33.0 m の伏角の変動には、琵琶湖の古地磁気永年変化曲線のうち約 7.5–9.5 ka の伏角の記録との類似性が認められた。この対応は K-Ah 火山灰の層準（7.25 ka）と調和的であり、HK19 コアの海成堆積物の基底の年代を推定するための制約を与えるものである。一方、深度 11.4–23.9 m の試料から連続的な古地磁気永年変化の記録が得られなかった原因として、汽水環境における還元的初期続成作用によって磁性鉱物が溶解あるいは変質した可能性が示唆された。また、汽水環

境から淡水の河口域への変化に対応して磁性鉱物含有量や粒子サイズが大きく変化したことが推定された。

謝 辞

本稿の執筆に当たり、ふじのくに地球環境史ミュージアムの中西利典准教授から HK19 コアの放射性炭素年代測定について情報をいただいた。また二名の匿名査読者の指摘によって原稿を改善することができた。HK19 コアの掘削は島根大学エスチュアリー研究センターの機能強化戦略予算によって実施されたものであり、本研究の一部に日本学術振興会科学研究費 基盤研究 (A) 「汽水成年縞堆積物と年輪試料の複合解析による完新世の気候変化と高分解能編年の研究」(課題番号: 21H04521, 代表者: 齋藤文紀) および基盤研究 (B) 「完新世における日本周辺地域の地磁気変化の標準曲線を確立する」(課題番号: 21H01171, 代表者: 山本裕二)を使用した。ここに記して謝意を表す。

引 用 文 献

- Albert, P.G., Smith, V.C., Suzuki, T., Tomlinson, E.L., Nakagawa, T., McLean, D., Yamada, M., Staff, R.A., Scholaut, G., Takemura, K., Nagahashi, Y., Kimura, J. and Suigetsu 2006 Project Members (2018) Constraints on the frequency and dispersal of explosive eruptions at Sambe and Daisen volcanoes (South-West Japan Arc) from the distal Lake Suigetsu record (SG06 core). *Earth-Science Reviews*, 185: 100–1028, doi: 10.1016/j.earscirev.2018.07.003.
- Albert, P.G., Smith, V.C., Suzuki, T., McLean, D., Tomlinson, E.L., Miyabuchi, Y., Kitaba, I., Mark, D.F., Moriwaki, H., SG06 Project Members and Nakagawa, T. (2019) Geochemical characterisation of the Late Quaternary widespread Japanese tephrostratigraphic markers and correlations to the Lake Suigetsu sedimentary archive (SG06 core). *Quaternary Geochronology*, 52: 103–131, doi: 10.1016/j.quageo.2019.01.005.
- Ali, M., Oda, H., Hayashida, A., Takemura, K. and Torii M. (1999) Holocene paleomagnetic secular variation from Lake Biwa, *Geophysical Journal International*, 136: 218–228.
- Frederichs, T., von Dobeneck, T., Bleil, U. and Dekkers, M.J. (2003) Towards the identification of siderite,

- rhodochrosite, and vivianite in sediments by their low-temperature magnetic properties. *Physics and Chemistry of the Earth*, 28: 669–679, doi:10.1016/S1474-7065(03)00121-9.
- Hayashida, A., Ali, M., Kuniko, Y., Kitagawa, H., Torii, M. and Takemura, K. (2007) Environmental magnetic record and paleosecular variation data for the last 40 kyrs from the Lake Biwa sediments, Central Japan. *Earth, Planets and Space*, 59: 807–814, doi:10.1186/BF03352743.
- Hayashida, A., Nakano, R., Nagashima, A., Seto, K., Yamada, K. and Yonenobu, H. (2015) Magnetic properties of surficial sediments in Lake Ogawara on the Pacific coast of northeastern Japan: spatial variability and correlation with brackish water stratification. *Earth Planet and Space*, 67: 171, doi:10.1186/s40623-015-0343-7.
- Heslop, D. and Roberts, A.P. (2016) Analyzing paleomagnetic data: To anchor or not to anchor? *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 121:7742–7753, doi:10.1002/2016JB013387.
- Inoue, S., Hayashida, A., Kato, M., Fukusawa, H. and Yasuda, Y. (2004) Environmental magnetism of brackish-water sediments from Lake Tougou-ike on the Japan Sea coast. *Quaternary International*, 123–125: 35–41.
- Kanamatsu, T., Usami, K., McHugh, C.M.G., and Ikehara, K. (2017) High-resolution chronology of sediment below CCD based on Holocene paleomagnetic secular variations in the Tohoku-oki earthquake rupture zone. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 18: 2990–3002, doi:10.1002/2017GC006878.
- 加藤めぐみ・福澤仁之・安田喜憲・藤原 治 (1998) 鳥取県東郷池湖底堆積物の層序と年縞. *LAGUNA(汽水域研究)*, 5:27–37.
- Kato, M., Fukusawa, H. and Yasuda, Y. (2003) Varved lacustrine sediments of Lake Tougou-ike, Western Japan, with reference to Holocene sea-level changes in Japan. *Quaternary International*, 105: 33–37.
- Kirschvink, J.L. (1980) The least-squares line and plane and the analysis of palaeomagnetic data. *Geophysical Journal of Royal Astronomical Society*, 62: 699–718.
- Korte, M., Brown, M.C., Gunnarson, S.R., Nilsson, A., Panovska, S., Wardinski, I. and Constable, C.G. (2019) Refining Holocene geochronologies using palaeomagnetic records. *Quaternary Geochronology*, 50: 47–74.
- Li Y.X. and Kodama K.P. (2016) Detecting and Correcting for Paleomagnetic Inclination Shallowing of Sedimentary Rocks: A Review. *Frontiers in Earth Science*, 4:7, doi: 10.3389/feart.2016.00007.
- Minyuk, P.S., Goryachev, N.A. and Subbotnikova, T.V. (2012) Magnetic and thermomagnetic properties of vivianite nodules of sediments in Lake El'gygytgyn. *Doklady Earth Sciences*, 447: 1266–1268, https://doi.org/10.1134/S1028334X12110050.
- Mohamed, K.J., Rey, D., Rubio, B., Dekkers, M.J., Roberts, A.P. and Vilas, F. (2011) Onshore-off-shore gradient in reductive early diagenesis in coastal marine sediments of the Ria de Vigo, Northwest Iberian Peninsula. *Continental Shelf Research*, 31: 433–447.
- Oda, H., Xuan, C. and Yamamoto, Y. (2016) Toward robust deconvolution of pass-through paleomagnetic measurements: new tool to estimate magnetometer sensor response and laser interferometry of sample positioning accuracy. *Earth Planet and Space*, 68: 109, https://doi.org/10.1186/s40623-016-0493-2.
- Roberts, A. (2015) Magnetic mineral diagenesis. *Earth-Science Reviews*, 151: 1–47.
- 瀬戸浩二・中武 誠・佐藤高晴・香月興太 (2006) 斐伊川の東流イベントとそれが及ぼす堆積環境への影響. *第四紀研究*, 45: 375–390.
- Smith, V.C., Staff, R.A., Blockley, S.P.E., Bronk Ramsey, C., Nakagawa, T., Mark, D.F., Takemura, K., Danhara, T. and Suigetsu 2006 Project Members (2013) Identification and correlation of visible tephras in the Lake Suigetsu SG06 sedimentary archive, Japan: Chronostratigraphic markers for synchronizing of east Asian/west Pacific palaeoclimatic records across the last 150 ka. *Quaternary Science Reviews*, 67: 121–137.
- 高安克己 (2001) 汽水域をつくる地形とその生い立ち. 高安克己編「汽水域の科学」pp. 1–9. たたら書房.
- Tauxe, L. and Kent, D.V. (1984) Properties of a detrital remanence carried by hematite from study of modern river deposits and laboratory redeposition experiments. *Geophysical Journal of Royal Astronomical Society*, 76: 543–561.
- Turner, G.M., Howarth, J.D., de Gelder, G.I.N.O. and Fitzsimons, S.J. (2015) A new high-resolution record of Holocene geomagnetic secular variation from New Zealand. *Earth and Planetary Science Letters*, 430: 296–307.

Xuan, C. and Channell, J.E.T. (2009) UPmag: MATLAB software for viewing and processing u channel or other pass-through paleomagnetic data. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 10: Q10Y07, doi:10.1029/2009GC002584.

山田和芳 (2003) 中国雲南省エルハイ湖堆積物中の藍鉄鉱濃集とその形成環境. *堆積学研究*, 57: 1-12.

山田和芳・高安克己 (2006) 出雲平野 - 宍道湖地域における完新世の古環境変動—ボーリング解析による検討—. *第四紀研究*, 45: 391-405.