

出雲平野東部から採取した HK19 コアの堆積層と年代

瀬戸浩二¹・香月興太^{1*}・中西利典²・入月俊明³・
三浦伊織⁴・林田 明⁵・齋藤文紀^{1,6}

Sediment lithology and chronology of the HK19 core from the eastern part of the Izumo Plain, Shimane Prefecture, Japan

Koji Seto¹, Kota Katsuki^{1*}, Toshimichi Nakanishi², Toshiaki Irizuki³,
Iori Miura⁴, Akira Hayashida⁵, Yoshiki Saito^{1,6}

Abstract: Detailed lithology and tephra records in core sediment (Core HK19) from the eastern end of the Izumo Plain near the mouth of the Hii River in Shimane Prefecture revealed the formation history of the Izumo Plain and paleo-events of volcanic eruptions and great floods. Accelerator mass spectrometry (AMS) ¹⁴C dating indicates that sediment accumulation began about 10.1 cal. kyr BP under the low-salinity brackish condition. Once this site was under an open bay called Paleo-Shinji Bay, the bay had shifted to the semi-closed condition by sand bar development around 7.5 cal. kyr BP. After that, the laminated sediment started to be deposited in core HK19. Three tephra layers (K-Ah, S3-fa, and SOh) and a remarkable reworking of the K-Ah tephra layer were deposited in this laminated layer. The Sanbe (or Sambe) tephra units (S3-fa and SOh) occur as crypt-tephra layers, which were identified by soft X-ray and extremely high Sr content. The reworked K-Ah tephra was deposited around 6.86 cal. kyr BP. A correlative reworked layer was also found in the sediment layer of Paleo-Shinji Bay beneath the Shimane University campus east of Lake Shinji. This suggests that there was a huge flood in the Hii River basin at that time. The site of core HK19 was rapidly buried after 150 cal. yr BP under the progradation of the Hii River delta by the “kanna-nagashi” iron manufacturing activity.

Key words: Izumo Plain, Hii River, lithology, tephra, Holocene, Mt. Sanbe, Lake Shinji.

¹ 島根大学エスチュアリー研究センター・Estuary Research Center, Shimane University, Shimane, 690-8504, Japan.

² ふじのくに地球環境史ミュージアム・Museum of Natural and Environmental History, Shizuoka, 422-8017, Japan.

³ 島根大学総合理工学部・Interdisciplinary Faculty of Science and Engineering, Shimane University, Shimane, 690-8504, Japan.

⁴ 島根大学自然科学研究科・Graduate School of Natural Science and Technology, Shimane University, Shimane, 690-8504, Japan.

⁵ 同志社大学理工学部・Department of Environmental Systems Science, Doshisha University, Kyotanabe, Kyoto 610-0321, Japan.

⁶ 産業技術総合研究所地質調査総合センター・Geological Survey of Japan, AIST, Higashi 1-1-1, Tsukuba 305-8567, Japan.

* Corresponding Author

受付日：2023年4月10日，受理日：2023年7月10日，WEB掲載日：2023年9月30日

はじめに

島根県東部に位置する出雲平野は、島根半島と中国山地に挟まれた宍道湖西方に広がる山陰地方最大の沖積平野で、その広さは東西約 20 km、南北約 5 km である。簸川平野とも呼ばれる出雲平野は中国山地から流れ込む斐伊川と神戸川によって形成された平野である。斐伊川は平野中央部を北流した後、東へ大きく曲がり宍道湖に注ぎ、神戸川は平野西部の砂丘地帯を北西へ流れ日本海に注ぐ（図 1）。出雲平野は最終氷期に陸域であった宍道低地帯が完新世の海水準上昇に伴って水没した古宍道湾に、これら 2 本の河川のデルタが発達し形成された（徳岡ほか、1990；林、1991；高安克巳・出雲古代景観復元チーム、1998；中村、2006；山田・高安、2006；高安、2019）。これまでにも出雲平野では柱状堆積物が採取され、堆積構造や堆積物の化学組成の変遷から上記のような出雲平野の形成過程に関する知見が得られてきた。

出雲平野の発達形成史を復元する上で、重要な役割を果たしたのが火山灰層序である。出雲平野や宍道湖湖底、さらに宍道湖に連結した汽水湖沼である中海の堆積物中には複数のテフラ（火山灰層）が報告されている。更新世後期以降の堆積物より、始良 Tn (AT) テフラ、鬼界アカホヤ (K-Ah) テフラ、三瓶木次軽石 (SKP)、三瓶角井降下火山灰 (S2-fl)、三瓶大平山火砕流 (SOh) 起源の石英安山岩砂礫や降下火山灰層の存在が各所で確認された（例えば、正岡、1972；大西、1977；林、1991；中村・徳岡、1996；三瓶ほか、1996；渡辺・遠藤、1998；中村、2006；山田・高安、2006）。出雲平野の古環境研究では、これらのテフラ年代を基準として考察したものも多いが、テフラの同定が行われず、先行研究をもとにテフラが産出した堆積深度からどの噴火によるテフラか想定した例も多いため、再確認の必要性がある。本研究では、2019 年に出雲平野東部から採取された柱状堆積物試料 (HK19 コア) 中のテフラに関して放射性炭素年代を含む新たな知見が得られたため、堆積層序、年代層序、テフラの特徴、テフラの堆積物中の元素組成について議論を行う。

試料と方法

柱状堆積物試料 HK19 は、2019 年 1 月 19 日から 26 日に出雲平野東部の斐伊川河口南部 (35°25'33.8"N, 132°52'14.5"E, 標高 0.04 m, 図 1)

において、水圧式ピストンコアラールと打ち込み式コアパックを併用して掘削された。採取した試料は表土を除いた深度 1 m から 34.71 m の堆積物、計 43 本のコアである（図 2）。柱状堆積物試料は島根大学エスチュアリー研究センターに運搬し、打ち込み式の試料は塩ビ管から押し出し、また水圧式ピストンコアラールによる試料はシンウォールから押し出した後半割し、目視による層序の確認と記載と写真撮影を行った。半割した試料の片側で年代測定用のテフラ・植物片の採取を行った後、幅 5 cm、厚さ 1 cm、長さ 20 cm あるいは 25 cm の試料を連続で採取し、軟 X 線写真の撮影を行った。また、もう片側の試料には長さ 90 cm、幅 2 cm、高さ 2 cm の LL チャンネル (Nakagawa et al., 2012) および U チャンネルを押し込み、コアごとの連続試料を採取した。U チャンネル試料の残留磁化と磁気特性については林田ほか (2022) によってすでに報告されている。

年代測定

HK19 コアでは多数の植物片（葉、木片、木炭）が確認されており、そのうち状態の良い 16 点の試料について加速器質量分析法による ¹⁴C 年代測定を韓国地質資源研究院 (Hong et al., 2010a,b) で行い、3 試料を Beta Analytic Inc. で行った。得られた年代値は IntCal20 (Reimer et al., 2020) による年代補正 Calib8.2 (Stuiver et al., 2021) を用いて暦年較正した。また、HK コアに含まれる 4 層準の火山灰試料と 2 層準の白灰色堆積物試料を京都フィッシュントラック社で分析し、再堆積ではないと判断されたテフラ 3 層準を年代推定に用いた（表 1, 図 3）。

XRF コアスキャン

HK19 コアのテフラ層準とその前後の層準に関して、高知大学海洋コア総合研究センターが所有する ITRAX XRF コアスキャナーを用いて LL チャンネル試料の元素分析を行った。分析間隔は 0.2 mm、電圧 60 kV、電流 40 mA、各層準の X 線照射時間は 100 ms で分析を行った。得られた元素の結果は相対的なカウント数で表している。

結果

HK19 コアの堆積相

HK19 の堆積相について、コア底部より順に述べる（図 2-4）。コア底部の深度 34.71–34.04 m（図 2, Core 43）では淡灰色の角礫・砂・シルトの淘汰

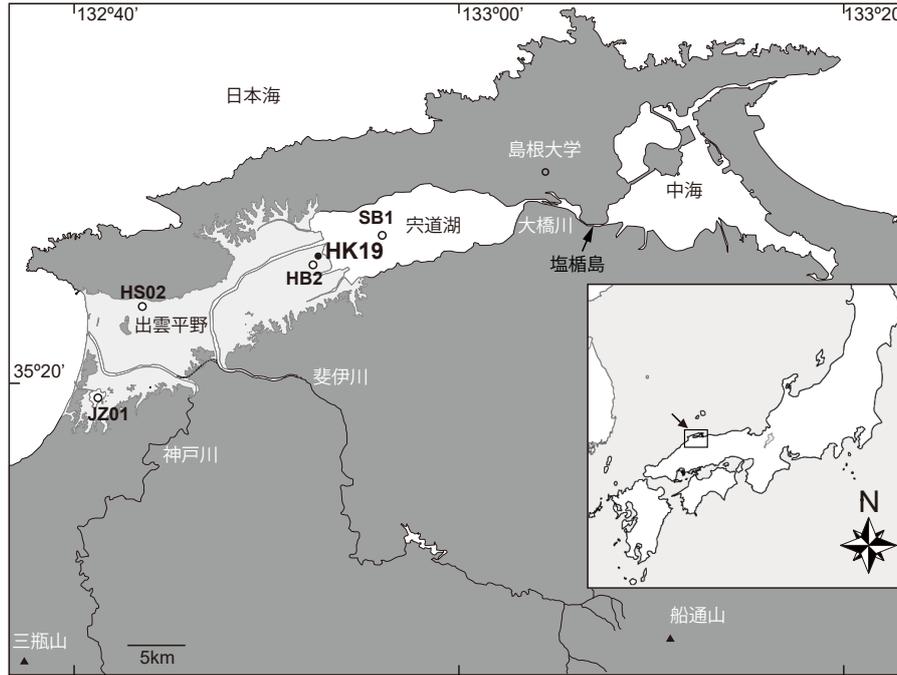


図1 島根県東部の地図. HK19 コアならびに先行研究のコア試料採取地点を示す (HB2 コア:中村・徳岡, 1996, HS02, JZ01 コア:山田・高安, 2006, SB1 コア:水野ほか, 1972, 中村・徳岡, 1996). 白灰色は出雲平野 (標高 20m 以下) を示す.
Fig. 1 Map of the studied area with core locations of HK19 and previous studies (HB2 core: Nakamura and Tokuoka, 1996; HS2 and JZ01cores: Yamada and Takayasu, 2006, SB1 core: Mizuno et al., 1972, Nakamura and Tokuoka, 1996). Solid circle indicates the coring site of HK19. Open circles indicate the coring sites in the previous papers. Light gray area shows the Izumo Plain (under 20m altitude).

の悪い堆積物からなる。深度 34.03–33.20 m (Core 42-41) では灰緑色の、深度 33.20–32.76 m (Core 41) では黒灰色の風化土壌が狭在し、黒灰色層基底は侵食面であった。深度 32.73–23.03 m (Cores 40-30) は暗灰色の塊状泥質堆積物からなり、最下部にはヤマトシジミ (*Corbicula japonica*) の合弁がみられた。また下部から中部にかけて複数の顕著な白灰色層が確認された (例えば、図 2, Core 39, 36)。これらの白灰色層は上下の層と比較してやや高密度であり (図 4 e), 特に顕著であった層 (Core 36: 28.68–28.71 m) には粒上の高密度塊が含まれていた。塊状泥質堆積層の上部では、軟 X 線写真内に生物の痕跡がみられるようになった (図 4 d)。23.03–12.69 m (Core 29-18) は暗灰色の縞状泥質堆積物からなる (図 4c)。深度 22.51–22.49 m (Core 29) では粗粒の火山灰層、深度 21.36–21.34 m (Core 28) では白灰色の細粒の火山灰層が狭在した。この火山灰層は下部層との境界が明瞭であり、最下部が

最も高密度であった。上部に向かうにつれ段階的に低密度化し、上部の境界は波打っていた。同様に、深度 18.635–18.63 m (Core 24) と 16.245–16.23 m (Core 22) には白みがかかった層準があり、軟 X 線写真では粗粒の堆積物からなる層が確認された。深度 16.68–16.62 m (Core 22) では縞状構造をさえぎり、層厚約 6 cm の黒灰色塊状泥質層が確認された。深度 12.72–10.34 m (Core 17-14) では灰色から暗灰色の泥質堆積物が堆積しており、下部では不明瞭な縞状構造が、上部では塊状構造が見られた。両者の境界は不明瞭で漸移する。深度 10.34 m (Core 14) に侵食面があり、深度 10.34–9.49 m (Core 14-13) は生痕を含むこげ茶色か暗灰色の塊状泥質堆積物からなる (図 4b)。深度 9.49 m 以浅 (Core 12-1) には砂泥互層が堆積し、上位へ向け砂層が厚く粗粒堆積物からなる (図 4a)。この互層の下部には粗粒な白灰色層がみられた (Core 12: 深度 9.02 m)。

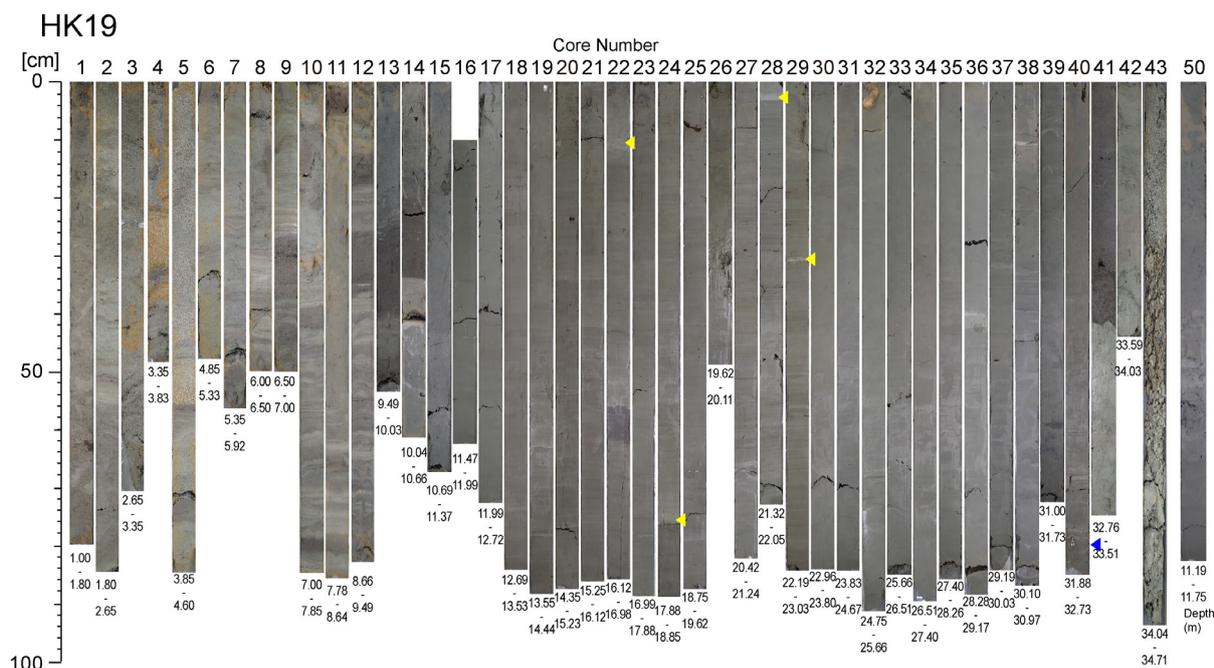


図2 HK19 コアのコア写真. 写真下の数字はコア写真の深度 (m). 写真右側の黄色三角はテフラを示す. 青三角は産出したヤマトシジミを指す. Core 50 は副孔堆積物でコア深度 11.92-11.75m. Core 15 下部からと Core 16 上部およびその間の堆積物にあたる.

Fig. 2 Photos of the core HK19. The numbers under the photo show the composite depth of cores (m). Yellow and Blue triangles indicate tephra layers and *Corbicula japonica*, respectively. Core 50 was obtained from sub-hole, its depth overlaps between the lower part of core 15 and upper part of core 16.

火山灰層準および火山灰の再堆積層

HK19 コアの縞状泥質堆積層中には3層のテフラと1層の再堆積層が見られた. 縞状泥質堆積層底部に位置する 22.50–22.49 m (図2: Core 29) には粗粒の白灰色層は3層構造であり, 軟X線写真では最下部に薄い高密度層, 中部に薄い低密度層, 上部に厚い中密度層が認められ (図5a), 上方への細粒化を示す. これらの層には珪長質肉薄 bw (バブルウォール) > pm (軽石) 型の火山ガラスが多量に含まれており, その平均屈折率は 1.5124 であった. 火山ガラスの形態は H (扁平) > T (多孔質), C (中間型) であり, 水和層厚はおよそ 5 μm であった. 少量のスコリアガラスを含み, スコリアガラスの屈折率は平均 1.5324 であった. この層準には少量の軽鉱物 (斜長石: pl) と重鉱物 (Opx: 斜方輝石, Cpx: 単斜輝石, Oqp: 不透明鉱物, Ap: アバタイト > GHb: 緑色角閃石) が含まれている. これらの

特徴からこの層は鬼界アカホヤ (K-Ah; 町田・新井, 2003) テフラであると同定できる.

深度 21.36–21.34 m (図2: Core 28 上部) では非常に明瞭な細粒で均質な白灰色層が認められた. この層準は軟X線写真では上下の層準と比較して密度が高い (図5b). この層準は軽鉱物 (Qz: 石英・Kf: カリ長石・pl) が主体で, 石質岩片と火山ガラスも含まれていた. 火山ガラスの形態は珪長質肉薄 bw > pm 型であり, 平均屈折率は 1.5118 であった. この層準の重鉱物は Ghb, Opq, Bt (黒雲母) を主体とした. このため, K-Ah テフラの再堆積層であると推測される.

深度 18.65–18.63 m (図2: Core 24 下部) ではやや白みを帯びる堆積層が確認された. 肉眼での識別は難しいが, 軟X線写真から高密度の粗粒堆積物が容易に確認できた (図6a). 軽鉱物 (pl, Qz) が主体で, ガラス質の岩片を含む. 産出した重鉱物は

表 1 HK19 コアの堆積年代. (a) ¹⁴C 年代, (b) テフラ年代. Main 2 Sigma は補正した際にもっとも Probability が高かった 2 sigma の年代範囲を示す.

Table 1 Dating results and tephra layers of core HK19, (a) ¹⁴C dating results, (b) tephra layers. Main 2 Sigma indicates the interval of the highest probability age.

Median Depth (m)	Core Num.	Depth in core (cm)	Material	Lab. Code	¹⁴ C age (BP)	std	δ ¹³ C (‰)	std	Calibration data set	Calibrated ¹⁴ C age (cal. yr BP)	Main 2 sigma
5	6	15	plant	KGM-Owd200004	196	26	-29.6	0.6	IntCal 20	183	141 - 222
10.36	14	32	coal	KGM-Owd200005	155	25	-22.7	1.1	IntCal 20	152	167 - 230
11.385	50	10.5	wood	Beta-647442	640	30	-27.62	-	IntCal 20	599	554 - 614
11.42	50	64	wood	Beta-647703	820	30	-26.37	-	IntCal 20	717	677 - 775
13.19	18	52	plant	KGM-Owd210081	2428	44	-34.8	0.98	IntCal 20	2480	2,351 - 2,543
16.5	22	38	leaf	KGM-Owd210082	3853	38	-32.85	0.57	IntCal 20	4275	4,221 - 4,408
18.5	24	62	leaf	KGM-Owd200006	4725	32	-30.6	0.7	IntCal 20	5463	5,325 - 5,409
20.63	27	21	plant	KGM-Owd200007	5807	36	-30.69	0.48	IntCal 20	6610	6,496 - 6,676
22.4875	29	29.75	plant	KGM-Owd200008	6497	34	-11.39	1.19	IntCal 20	7377	7,322 - 7,433
22.74	29	59	leaf	KGM-Owd200009	7001	48	-36.51	1.48	IntCal 20	7834	7,709 - 7,934
23.1775	30	21.75	leaf	KGM-Owd210084	6635	39	-29.01	0.6	IntCal 20	7517	7,461 - 7,575
25.16	32	41	leaf	KGM-Owd200010	7189	35	-13.1	0.6	IntCal 20	7993	7,934 - 8,039
25.4175	32	66.75	plant	KGM-Owd200011	8549	39	-25.77	2.01	IntCal 20	9525	9,479 - 9,549
26.995	34	48.5	leaf	KGM-Owd210085	7826	76	-33.25	1.73	IntCal 20	8625	6,839 - 6,474
27.97	36	47	plant	KGM-Owd210086	8146	75	-32.89	2.02	IntCal 20	9102	7,369 - 7,026
32.555	41	13.75	wood	KGM-Owd200012	8867	43	-28.9	0.9	IntCal 20	10001	8,975 - 9,318
32.8975	41	48	plant	KGM-Owd200013	9017	39	-29.5	1	IntCal 20	10205	10,144 - 10,246
33.8	42	21	wood	KGM-Owd200014	8956	38	-30.5	1.7	IntCal 20	10119	10,113 - 10,225

(b) tephra layers

Bottom Depth (m)	Core Num.	Depth in core (cm)	Material	Deposit	(Symbol)	Calibrated ¹⁴ C age (cal. yr BP)	std	Reference
16.245	22	12.5	Ash	Sanbe Taiheizan pyroclastic deposit Sanbe-Oohirayama fall deposit	(Th-Pd, SOh)	4036 ± 32	Albert et al. (2018), Maruyama et al. (2021)	
18.635	24	75	Ash	Tsunoi-Ash fall deposit	(S3-fa)	5501 ± 20	Fukuoka & Matsui (2002), Albert et al. (2018), Maruyama et al. (2020, 2021)	
21.36	28	4	Rework Ash		-	-		
22.51	29	32	Ash	Kikai-Akahoya	(K-Ah)	7253 ± 46	Machida and Arai (2003), Maruyama et al. (2019)	

GHb, Bt, Opq が主体であった。産出する火山ガラスは珪長質 It (不規則), pm 型で珪長質 microlite が含まれていた。火山ガラスの平均屈折率は 1.49963 で、形態は It, T > C, H であった。以上より三瓶角井降下火山灰 (S3-fa: 福岡・松井, 2022; Maruyama et al., 2021) である可能性が高い。

深度 16.245–16.23 m (図 2: Core 29 上部) にもやや白みを帯びた堆積層が確認された。火山灰層であることは肉眼識別では難しいが、軟 X 線写真では高密度の粗粒堆積物が容易に確認できた (図 6b)。この層も軽鉱物 (pl, Qz) が主体で、ガラス質の岩片を含む。産出した重鉱物は GHb, Opq, Bt が主体であった。産出した火山ガラスは珪長質 It で microlite を含む岩片質ガラスが主体であった。平均屈折率は 1.4974, 形態は It > H, C, T で、三瓶大平山降下火山灰 (Th-pd: Albert et al., 2018; SOh: Maruyama et al., 2021) であると推測される。

これら 3 層の火山灰層準には、U チャネル試料の

初磁化率測定の結果でもピークが認められた (林田ほか, 2022)。また、K-Ah テフラの再堆積層を含めたこれら 4 層すべてに少量の AT テフラの火山ガラスが含まれていた。縞状堆積物層上下の層準で見られた白灰色層 (深度 9.02 m および 28.68–28.71 m) においても少量の AT テフラの火山ガラスが確認された。

放射性炭素年代

HK19 コアで得られた ¹⁴C 暦年較正年代を表 1 および図 3 に示した。コア底部付近の風化土壌層から産出した 2 試料 (深度 33.80, 32.90 m) の年代は 10,119 cal. yr BP と 10,205 cal. yr BP を示した。風化土壌層の上部に堆積する暗灰色の塊状泥質堆積物層では、最下部付近 (深度 32.56 m) で 10,001 cal. yr BP を示し、上部 (深度 23.18 m) の 7,517 cal. yr BP にかけて、明らかに上下の層準より古い年代を示した 1 試料を除くと、ほぼ一様の堆積速度 (0.26

HK19: Elevation, 0.04m

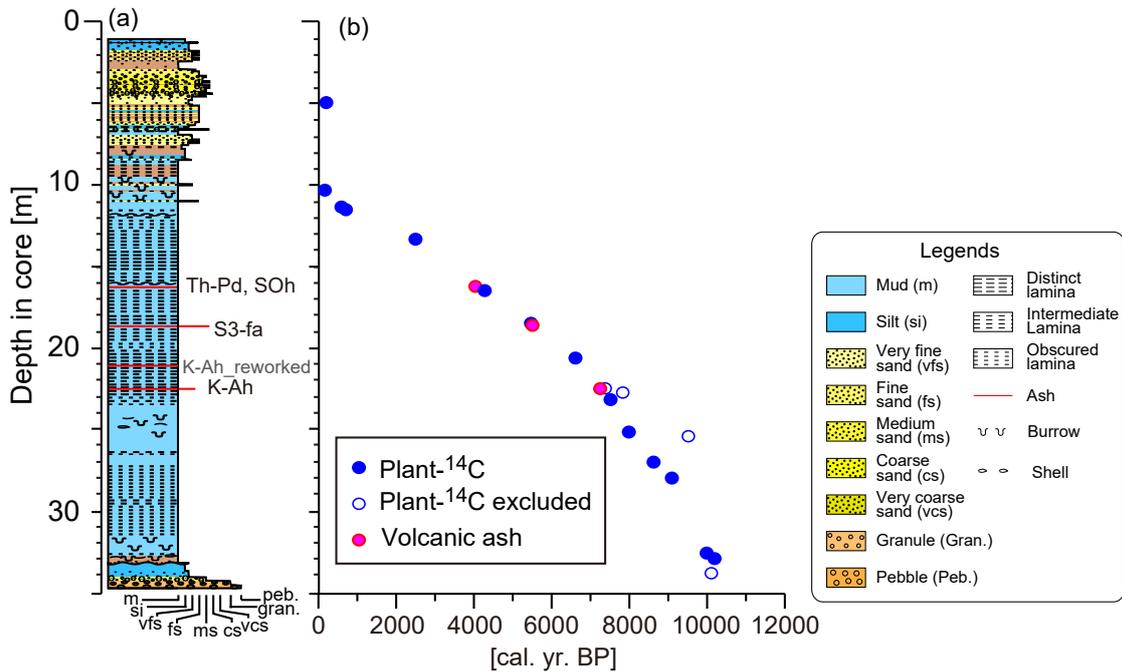


図3 HK19 コアの層序と堆積年代。(a) 深度ごとの層序を示す。粒径は細かい方から順に、泥・シルト・極細粒砂・細粒砂・中粒砂・粗粒砂・極粗粒砂・細礫・小礫の9段階とした。(b) 堆積物中の¹⁴Cならびに火山灰による堆積年代

Fig. 3 Lithology and age of HK19 core. (a) Depth plot of the core lithology. Horizon axis show the grain size (med, silt, very fine sand, fine sand, middle sand, coarse sand, very coarse sand, granule, and pebble). (b) The depositional age of HK19 core based on ¹⁴C and tephra layers.

cm yr⁻¹) を示した。暗灰色の縞状泥質堆積物には上述の3層の火山灰層が含まれていた。縞状泥質堆積物層上部(深度13.19 m)から得られた較正年代は2,480 cal. yr BPを示した。K-Ah テフラと深度13.19 m間の堆積速度は0.20 cm yr⁻¹、上部層でやや堆積速度が低下するものの比較的一様であった。深度12.72–10.34 mでは灰色から暗灰色の泥質堆積物が堆積しており、下部の不明瞭な縞状構造から上部の塊状構造へ堆積構造の変化が見られたが、境界にあたる堆積物がコア15–16間で欠落していたため(図2)、副孔から採取したコア50(深度10.92–11.78 m)を用いて、11.42 mおよび11.385 mの木片からそれぞれ717および599 cal. yr BPの年代を得た。コア最上部の砂泥互層直下(深度10.36 m)と砂泥互層内(深度5.00 m)の堆積年代はそれぞれ、152 cal. yr BPと183 cal. yr BPを示した。

テフラ層準の元素組成

K-Ah テフラを含む上下20 cmの元素組成を図4aに示す。K-Ah テフラ層準では、Si, K, Mnが上下層より明らかに多く含まれている。Ca, Srも多いが下部層にさらに多い層準が確認された。一方で、Ti, Feが少なく、特にFeは顕著であった。ZrはK-Ah テフラ下部で少なく、上部で多かった。K-Ah テフラの再堆積層では、K-Ah テフラ同様Si, Kが上下層より多くFeが少ない(図4b)。しかしながら、K-Ah テフラの再堆積層ではK-Ah テフラとは逆に、Tiが多く、Ca, Mn, Srが少なく産出した。Zrは再堆積層全般で高かった。

三瓶角井降下火山灰と三瓶大平山降下火山灰の元素組成を図5a, bに示した。三瓶角井降下火山灰にはSi, Ca, Srが多く含まれ、特にSrが顕著であった。これらの元素は火山灰層の上部5 cmほどで多く含まれ、上部に上がるにしたがって少なくなった。また、Ti, Fe, Mnは火山灰層で少なく、TiはSi, Ca, Sr

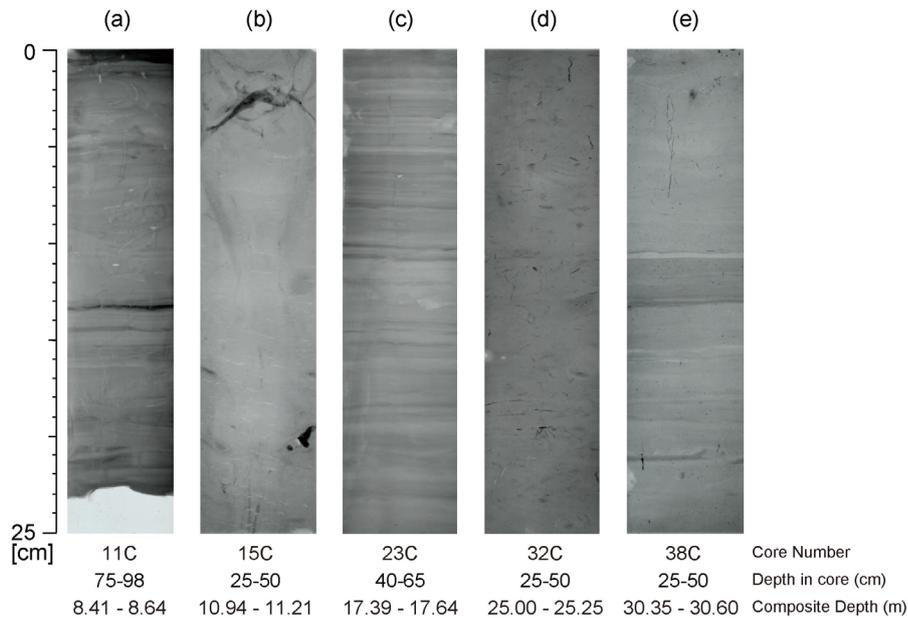


図4 HK19 コアの代表的な層準の軟 X 線写真。コア下部から (e) 顕著な白灰色層を含む暗灰色の塊状泥質堆積物, (d) 暗灰色の塊状泥質堆積物, (c) 暗灰色の縞状泥質堆積物, (b) 暗灰色の塊状泥質堆積物, (a) 砂泥互層, を示す。

Fig. 4 Typical sedimentary structures of HK19 core by Soft X-ray radiographs. From the core bottom, (e) dark gray massive mud deposit with clear white layers, (d) dark gray massive mud deposit, (c) dark gray laminated mud deposit, (d) dark gray massive mud deposit, and (a) interbedded mud and sand.

とは逆に火山灰層の上部 5 cm ほどで少なく, 上部に上がるにしたがって多くなった。三瓶大平山降下火山灰においても Si, Ca, Sr が多く含まれ, 特に Sr が顕著であった。一方でその他の元素に顕著な変動は見られなかった。

考 察

HK19 コアの堆積層序

現在の宍道湖や出雲平野には最終氷期最盛期に形成された谷地形が埋もれている (徳岡ほか, 1990; 中村, 2006; 高安, 2019)。約 11,000 年前の宍道低地帯は, 北側である島根半島の南方に谷地形があったとされている。当時の海面は -35 m 付近にあり, 現在島根県松江市を流れる大橋川にある塩楯島付近を分水嶺とし, 西流する古宍道川が宍道低地帯を流れ, 谷地形に小さな淡水域が形成された。HK19 コア最下部の礫・砂・シルト混合堆積物の年代は得られてないが, その上部の風化土壌の木片から約 10,100 cal. yr BP の年代が得られており, 風化

土壌層上部の塊状泥質堆積物の最下部の木片からは約 10,000 cal. yr BP の年代が得られている (表 1, 図 3)。HK19 コアが採取された出雲平野東端部では, 約 10,000 cal. yr BP に湖沼に覆われたと考えられる。塊状泥質堆積物の最下層 (深度 32.70 m) からはヤマトシジミの合弁が見つかっており (図 2, Core 40), この湖沼は低鹹汽水湖であったと言える。塊状泥質堆積物が堆積し始めた層準が, コア深度 32.73 m (標高 -32.69 m) であり, 汽水湖であることから, 約 10,000 cal. yr BP の最大潮位面は -32.69 m より浅かったと考えられる。出雲平野北西部で採取された HS02 コアではヤマトシジミが標高 -37.38 m から見つかっており, その堆積年代は 10,510 cal. yr BP である (山田・高安, 2006)。同様に出雲平野南西部の神西湖から採取された JZ01 コアでは基底礫層直上の標高 -25.06 m から 9,530 cal. yr BP のヤマトシジミが得られている (山田・高安, 2006)。これら出雲平野西部のコア試料から想定される約 10,000 cal. yr の縞状泥質堆積物ヤマトシジミの生息水深の誤差, 地層の厚密沈下を考えると大きな差異はない。

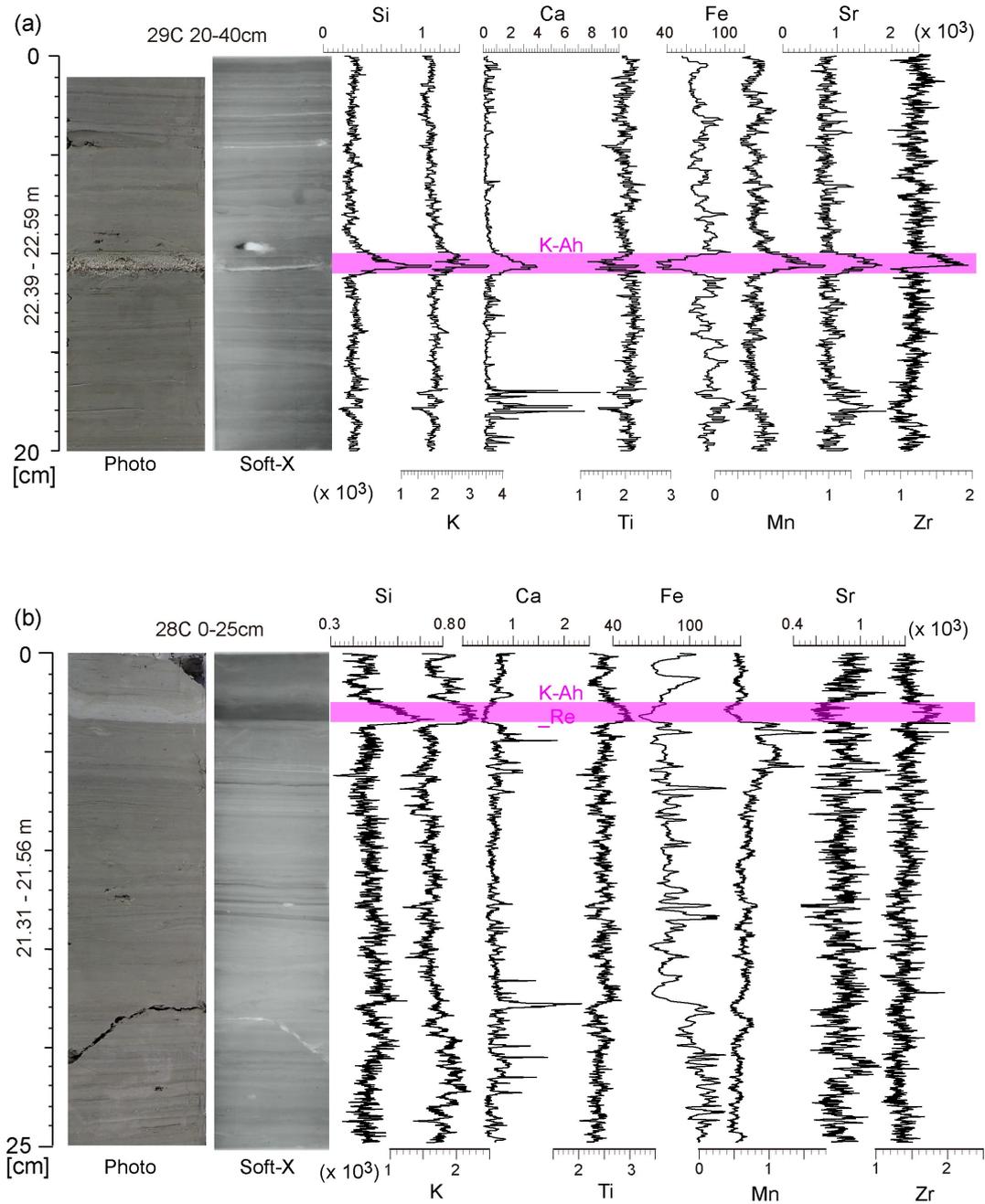


図5 (a) K-Ah テフラおよび (b) その再堆積層周辺の写真(左), 軟 X 線写真(中央)と元素変動(右). 写真上の数字はコア番号および軟 X 線写真のコア内深度を示す.

Fig. 5 Photo (left), soft x-ray radiograph (center), and major mineral components (right) around (a) K-Ah tephra and (b) K-Ah reworked deposits. The number on images suggests the core number and depth in core of the soft-X images.

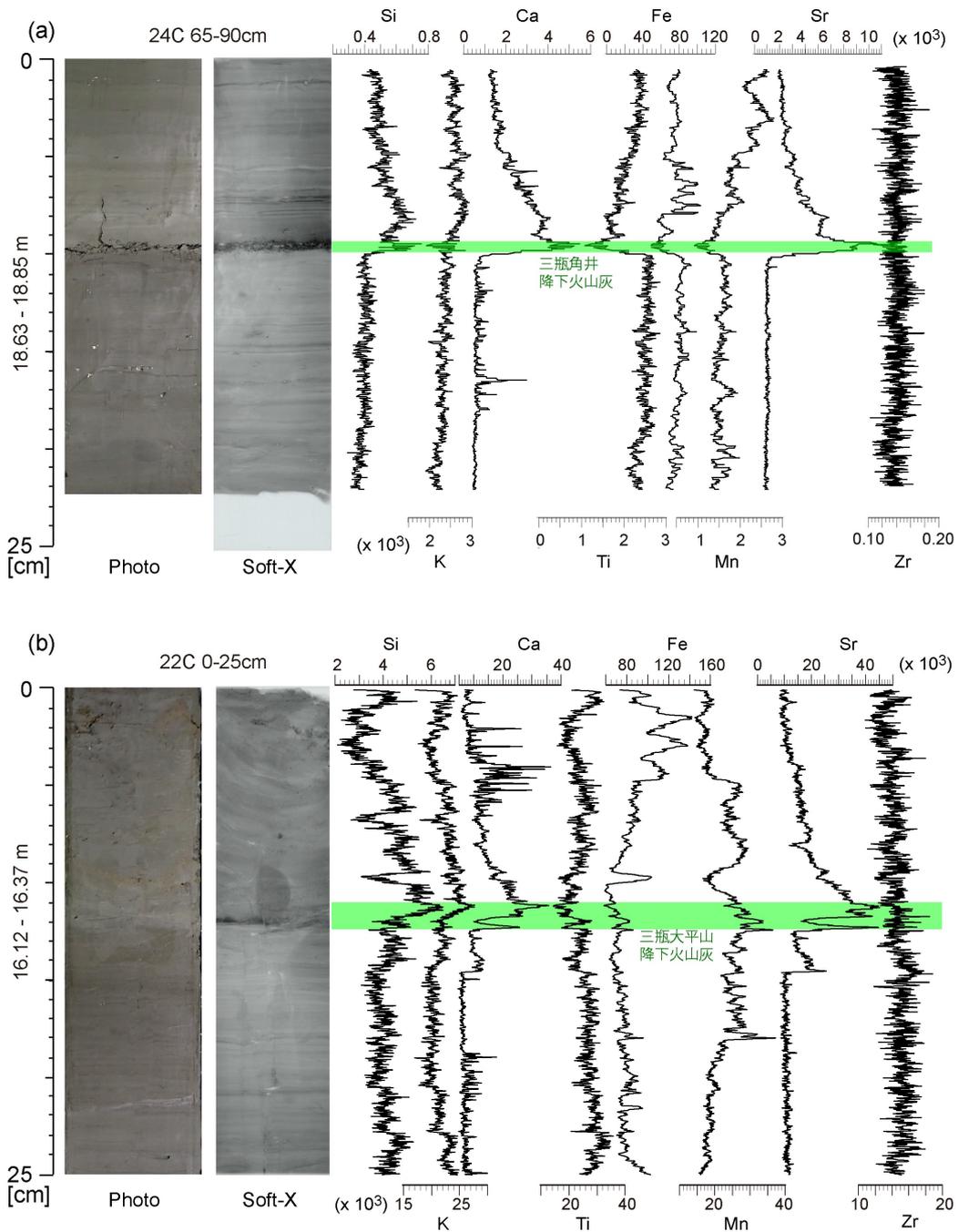


図 6 (a) 三瓶角井降下火山灰層および (b) と三瓶大平山降下火山灰層周辺の写真 (左), 軟 X 線写真 (中央) と元素変動 (右). 写真上の数字はコア番号および軟 X 線写真のコア内深度を示す.

Fig. 6 Photo (left), soft x-ray radiograph (center), and major mineral components (right) around (a) Shigaku-Ash fall deposit layer and (b) Sanbe-Taiheizan pd layer. The number on images suggests the core number and depth in core of the soft-X images.

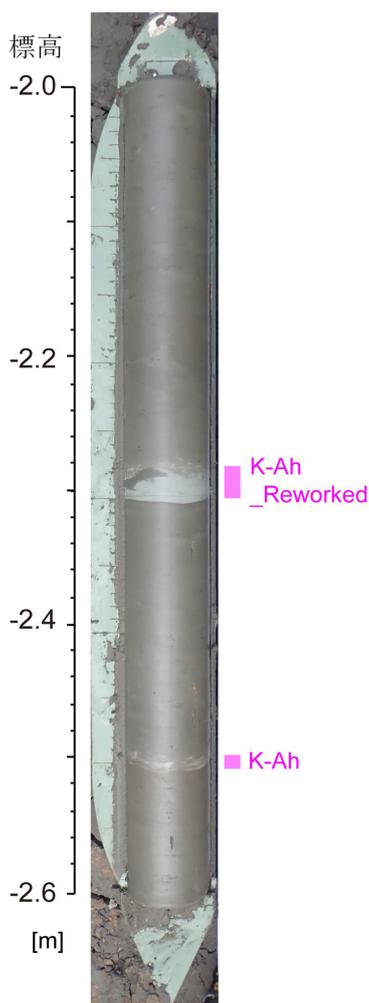


図7 島根大学地下からロシア式ピートサンプラーで採取されたアカホヤ火山灰層およびその再堆積層。

Fig. 7 K-Ah tephra and K-Ah reworked deposits obtained from the open pit in Shimane University by Russian peat sampler.

HK19 コアはコア深度 23.03 m で塊状堆積物から暗灰色の縞状泥質堆積物へと堆積相が変わる (図 3)。縞状泥質堆積物は厚さ数 mm 程度の高密度層と低密度層が繰り返し堆積した葉理層であり (図 3, 4), このような微細な堆積構造が残されていることは, 生物擾乱などにより湖底 (海底) が攪拌されなかったことを示している。このような堆積構造は水底が攪拌されないほど深く, 水温躍層などが発達する湖水底層への酸素供給が乏しく底層の溶存酸素が少ない湖沼で形成されやすい (福沢, 1995)。縞状泥質堆積物の堆積開始年代は約 7,460 cal. yr BP であ

り, HK19 コアの採取地点である出雲平野東端部は, この時急激に湖底 (海底) が貧酸素水塊に覆われたことを示している。約 8,000 年前の海水準は -6.5 m であり, 急激な海水準の上昇に伴い, 古穴道湾と呼ばれる内湾が中国山地と島根半島間に形成されていた (高安, 2019)。HK19 コアはこの古穴道湾の中央部にあたる。HK19 コアにおいても深度 23.03 m で初磁化率がやや低下するが (林田ほか, 2022), 約 7,500 年前から 7,400 年前にかけて出雲平野西部のコアでは初磁化率が急減し, 穴道湖湖心でもわずかに減少する。高安 (2019) はこれらの変化を古穴道湾の湾口にあたる西側で出雲長浜砂州が発達し, 古穴道湾の閉鎖水域化が始まったためだと推測しているが, HK19 コアの結果も閉鎖水域化を裏付けるものである。K-Ah テフラおよびその再堆積層, 三瓶角井降下火山灰と三瓶大平山降下火山灰の 4 層は, この縞状泥質堆積層内に含まれており (図 3), 半閉鎖環境の古穴道湾下で堆積している。

HK19 コアの縞状構造は深度 12.69 m まで堆積し, およそ深度 12 m にかけて次第に不明瞭となり, やがて塊状構造となる (図 3)。すなわち, 深度 12.69 m の堆積年代, 約 2,100 cal. yr BP まで底層が貧酸素化する閉鎖的汽水環境が継続し, その後次第に底層の貧酸素化が解消されている。塊状堆積物層は深度 10.36 m, 約 150 cal. yr BP まで堆積するが, 深度 11.47 m から 11.37 m の間 (図 2, Core 15 と 16 の間) において堆積物の色の変化が確認できる。この深度を境界に堆積物中の初磁化率および非履歴性磁化率が急激に増加しており, 細粒マグネタイトの流入量が急増したことが示唆される (林田ほか, 2022)。すなわちかつて出雲平野を西流していた斐伊川が, 東方へ流れを変え, 穴道湖にそそぐようになった斐伊川東流イベント (徳岡ほか, 1990; 高安ほか, 2000; 瀬戸ほか, 2006; 中村 2006; 山田・高安, 2006) がこの間に起きたと考えられる。副孔の HK19-50 コア (深度 10.92-11.78 m) の下部で磁化率の顕著な変化が確認されており, その直上 (深度 11.42 m) の 14C 暦年較正年代が 1,175 - 1,273 cal. AD (775 - 677 yr BP) となっていることから, 西暦 1200 年代に大きな環境変化があったことが示唆される。HK19 コア上部の深度 10.36 m 以浅では, デルタ堆積物と思われる上方粗粒化する砂泥互層が堆積しているが, この層準は 150 cal. yr BP 以降に急激に堆積している (図 2, 3)。西暦 1700 年代後半から 1800 年代にかけて, 斐伊川流域ではかんな流しが盛行し, その間穴道湖沿岸を含む斐伊川下流では

たびたび洪水が発生している（大矢，2010）. HK19 コアの上層はかな流しにより増加した多量の土砂が斐伊川デルタを前進させたことにより堆積した層準であると言える.

火山灰層の年代対比

HK19 コアの縞状泥質堆積物内の3つの火山灰層、深度 22.51–22.49 m の K-Ah テフラ、深度 18.635–18.63 m の三瓶角井降下火山灰、深度 16.245–16.23 m の三瓶大平山降下火山灰は、水月湖で確認された火山灰層（Albert et al., 2018; Maruyama et al., 2019, 2020, 2021）との年代対比を行った. HK19 コアにおける K-Ah テフラの直上 22.488 m で採取された木片は K-Ah テフラの年代（7,253 cal. yr BP）と比較しておよそ 100 年古い年代値（7,377 cal. yr BP）を示した（表 1）. 一方で、水月湖の三瓶山火山灰層の年代は HK19 コアの火山灰層付近の炭素年代はほぼ一致した（表 1, 図 3）. 水月湖の堆積物中に見られた三瓶山火山灰層の名称は、Albert et al. (2018) と Maruyama et al. (2019, 2020) 間で混乱が見られるが、本稿では Maruyama et al. (2021) の見解に従い、下部の三瓶山火山灰層を角井降下火山灰、上部の三瓶山テフラ層を大平山降下火山灰とした. 角井降下火山灰の記号は福岡・松井（2002）で示されたもの（S3-fa）を使用し、大平山降下火山灰はこれらの論文で示されたものを併記した（表 1）. 水月湖における角井降下火山灰の堆積年代は 5,501 cal. yr BP、大平山降下火山灰の年代は 4,036 cal. yr BP である（Albert et al., 2018; Maruyama et al., 2019, 2020, 2021）. HK19 コアでは角井降下火山灰層上部より 13 cm 上部で採取された葉の年代が 5,463 cal yr BP、大平山降下火山灰より 25cm 下部で採取された葉の年代が 4,275 cal yr BP であった（表 1）. このため、HK19 コアで見られた三瓶山起源の火山灰層は水月湖で確認された火山灰層と同一のものであり、角井降下火山灰および大平山降下火山灰は広域テフラであることが伺える.

元素を用いた三瓶山起源の火山灰同定

HK19 コアで見られた三瓶山テフラの特徴の一つとして、肉眼での同定が難しいことが挙げられる（図 2, 6）. これはおそらく出雲平野東部の堆積物に共通した特徴であり、出雲平野東部から宍道湖・中海にかけて、K-Ah テフラの報告例は多いが（例えば、中村・徳岡，1996；三瓶ほか，1996；山田・高安，2006；中村，2006）、三瓶山テフラの報告は限定的

である（正岡，1972；三浦・林，1991）. HK19 コアで見られた2層の三瓶山を起源とするテフラ層は Sr 含有量が顕著に高い. HK19 コアの縞状堆積層では三瓶山起源のテフラ層以外の Sr のカウント数が 1,000 前後で安定しており、三瓶角井降下火山灰層の 10,000 以上と三瓶大平山降下火山灰層の 4,000 以上の Sr カウント数は明瞭な特徴である（図 6）. 一方で、K-Ah テフラの Sr カウント数は火山灰以外の層準よりは高いが、その値は 2,000 弱で三瓶山起源のテフラと比べて明らかに低い（図 5）. 三瓶山の溶岩ドームはアダカイトに分類される岩石で構成され、高い Sr/Y 比と低い Y 濃度を持っている（浅野ほか，2018）. これは異常高温状態のプレートが部分融解してマグマを形成している三瓶山アダカイトマグマの特徴である. そのため、三瓶山のアダカイトマグマから噴出したテフラは高い Sr 濃度をもつと考えられる. 出雲平野に堆積する三瓶山起源のテフラは堆積物中の Sr 含有量から容易に見分けることが可能だと言える.

アカホヤ再堆積層の堆積年代と分布

HK19 コアの 21.36–21.34 m でみられる K-Ah テフラの再堆積層は、均質な白灰色層が特徴的な識別が容易な層準である（図 2, 5）. HK19 コアで見られる K-Ah テフラは鳥取県の東郷池や福井県の水月湖でも見られる広域テフラであるが（加藤ほか，1998；Albert et al., 2018; Maruyama et al., 2019, 2020, 2021）、K-Ah テフラの再堆積層は他地域からの報告がないことから出雲地方の局地的なイベント層であると考えられる. HK19 コアの植物 ¹⁴C 年代より推測される K-Ah テフラ再堆積層の堆積年代は約 6,860 cal. yr BP である（表 1, 図 3）. K-Ah テフラ再堆積層は松江市島根大学（図 1）の構内遺跡の発掘現場においても報告されている（図 7）. 島根大学の構内遺跡（現次世代たたら協創センター地下）では、標高 -2.5 m 地点に K-Ah テフラが堆積しており、その上位標高 -2.3 m に K-Ah テフラ再堆積層が確認されている（川原ほか，2022）. K-Ah テフラ再堆積層が堆積した当時は、現在出雲平野がある地域は当時古宍道湾と呼ばれ西方が日本海に開いた内湾であった（徳岡ほか，1990；中村，2006；高安，2019）. 古宍道湾南部には斐伊川と神戸川の河口からなるデルタが発達していた. HK19 コアが採取された地点は古宍道湾の中央部にあたり、島根大学は古宍道湾の東端部にあたる. K-Ah テフラ再堆積層では他の火山灰層と異なり、陸源元素である Ti のカウント数が高いこ

とを考慮すると（図 5, 6）, 約 6,860 cal. yr BP に中国山地の斐伊川と神戸川一帯に堆積していた K-Ah 火山灰が, おそらくは豪雨・洪水によって古宍道湾に流入し, 湾内全域に堆積する巨大イベントが発生したのではないかと考えられる. K-Ah テフラ再堆積層は, 下部層が薄くやや高密度であるもの全体として均質で粗粒な堆積物は見られない（図 5, 7）. これは当時の斐伊川や神戸川の河口が島根大学や HK19 コアが採取された地点より遠く粗粒な堆積物は届かなかったのが原因だと推測できる.

一方で, これまで出雲平野や宍道湖の堆積物を扱った先行研究において, K-Ah テフラ再堆積層が報告された事例は存在しない. しかしながら, 宍道湖・中海の湖底堆積物を扱った水野ほか（1972）は, 宍道湖西部で得られた試料 SB1 において, コア深度 10.3 m, 9.8 m, 9.3 m に 3 層のテフラ（火山灰層準）が含まれると報告した. 水野ほか（1972）はこれらのテフラを三瓶山 5 期の噴出物ではないかと推測したが, その後コア深度 10.3 m のテフラは中村・徳岡（1996）により検討され, K-Ah テフラであることが確認された. 残念なことに中村・徳岡（1996）による分析時には 9.8 m と 9.3 m のテフラは失われており, これらのテフラがなんであるのか不明であるが, コア深度から考えると K-Ah テフラ再堆積層を含んでいる可能性は十分にある. また, 中村・徳岡（1996）では SB1 コアにおける K-Ah テフラ付近の花粉帯が, それまで宍道湖・中海地域全体で報告されてきた花粉帯と異なっており, 同じ宍道湖内の宍道湖湖心から得られた BP1 コアとも異なっていることを明らかにしている. 同じ湖沼内において同じテフラを含む花粉帯が異なることはまずあり得ないため, 中村・徳岡（1996）は花粉帯境界の再検討が必要だと報告しているが, HK19 コアや島根大学で見られた K-Ah テフラ再堆積層は層が厚く下層が明瞭であるため特徴的であり, K-Ah テフラ以上に認識しやすいことを考えると（図 2,7）, BP1 コアを含む先行研究の堆積物のいくつかは K-Ah テフラ再堆積層を K-Ah テフラと認識していた可能性が考えられる.

出雲平野や宍道湖で報告される堆積物研究において K-Ah テフラであると推定される層準が, 多くの地点で 1 層準である原因として, 本研究を含む出雲・宍道湖地域の掘削研究のほとんどが一つの穴で掘削をおこなっているため, コアパイプ間の堆積物欠損が避けられないことが挙げられるのではないかと考えられる. 実際に完新統全体を回収している柱状堆

積物試料においても K-Ah テフラが見つかっていない事例も報告されている（例えば, HB2 コア; 中村・徳岡, 1996 や HS02 コア; 山田・高安, 2006）. 出雲平野における正確な堆積構造・火山灰層序を把握するためには, 連続的なボーリング試料の採取が不可欠であり, 同一地点において複数のボーリング孔による柱状堆積物の比較が必須となると思われる.

ま と め

斐伊川河口近くの出雲平野東端部において長さ 34.71 m の柱状堆積物試料 HK19 コアを 2019 年 1 月に採取し, 堆積層序とテフラの確認を行った. 堆積層序は半割試料および軟 X 線写真を用いて確認し, 堆積年代は植物片の ^{14}C 年代および火山灰を用いて決定した. ボーリング地点の出雲平野東端部の完新統堆積物は約 10,100 年前に汽水環境下で堆積を開始した. 7,560 年前から 2,100 年前にかけて閉鎖的な汽水環境下で湖底（海底）には縞状構造が発達し, 縞状堆積物内には再堆積層 1 つを含む 3 層のテフラと 1 層のテフラの再堆積層が確認された. 約 7,250 年前に K-Ah テフラが堆積し, 約 6,860 年前に大洪水による K-Ah 再堆積層が堆積したと考えられる. また, 三瓶山を起源とする三瓶角井降下火山灰層と三瓶大平山降下火山灰層が約 5,500 年前と 4,063 年前とそれぞれ堆積した. これらの三瓶山を起源とする火山灰層は肉眼では識別しにくい, Sr を多く含有するため, Sr による識別が可能である. また, 粗粒であるため, 軟 X 線写真では火山灰層を確認することができる.

謝 辞

本研究では, コア分割にあたり島根大学総合理工学部入月研究室の学生らに助力いただいた. 韓国地質資源研究院での年代測定ではホンワンセンター長にお世話になりました. 本研究には, 島根大学エスチュアリー研究センターのプロジェクト経費ならびに文部科学省科学研究費補助金（基盤 A, 研究代表者: 齋藤文紀, 課題番号: 21H045221C; 基盤 C, 研究代表者: 香月興太, 課題番号: 19K039951A; 基盤 B, 研究代表者: 中西利典, 課題番号: 18H01310）の一部を使用させていただいた. また, 元素分析は高知大学海洋コア総合研究センターの全国共同利用（採択番号: 21A041）として行われました. 元素分析には高知大学の村山教授に許可をい

ただいた。また、松崎技術職員、岡林技術補佐員には分析を行っていただき、補佐員の方々に手伝っていただいた。軟 X 線写真は島根大学エスチュアリー研究センターの船来技術職員に撮影していただいた。ここに記して謝意を表します。

引用文献

- Albert, P.G., Smith, V.C., Suzuki, T., Tomlinson, E.L., Nakagawa, T., McLean, D., Yamada, M., Staff, R.A., Schlolaut, G., Takemura, K., Nagahashi, Y., Kimura, J., and Suigetsu 2006 Project Members (2018) Constraints on the frequency and dispersal of explosive eruptions at Sanbe and Daisen volcanoes (South-West Japan Arc) from the distal Lake Suigetsu record (SG06 core). *Earth-Science Reviews*, 185: 1004–1028.
- 浅野一平・五井健登、清杉孝司・鈴木桂子・巽好幸 (2018) 三瓶火山溶岩ドームの形成過程. *火山*, 63: 19–32.
- 福岡 孝・松井整司 (2002) AT 降灰以降の三瓶火山噴出物の層序. *地球科学*, 56: 105–122.
- 福沢仁之 (1995) 天然の「時計」・「環境変動検出計」としての湖沼の年縞堆積物. *第四紀研究*, 34: 135–149.
- 林 正久 (1991) 出雲平野の地形発達. *地理学評論*, 64(A): 26–46.
- 林田 明・齋藤文紀・瀬戸浩二・香月興太・服部真也・八木涼太 (2022) 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. *LAGUNA (汽水域研究)*, 29: 75–86.
- Hong, W., Park, J.H., Kim, K.J., Woo, H.J., Kim, J.K., Choi, H.K., and Kim, G.D. (2010a) Establishment of chemical preparation methods and development of an automated reduction system for AMS sample preparation at KIGAM. *Radiocarbon*, 52(3): 1277–1287.
- Hong, W., Park, J.H., Sung, K.S., Woo, H.J., Kim, J.K., Choi, H.W., and Kim, G.D. (2010b) A new 1MV AMS facility at KIGAM. *Radiocarbon*, 52: 243–251.
- 川原範子・入月俊明・会下和宏・瀬戸浩二・齋藤文紀・香月興太・田中智久・David L. Dettman (2022) 島根大学松江キャンパスにおける完新世の古環境 — 第 22 次発掘調査研究報告 —. *LAGUNA (汽水域研究)*, 29: 115–132.
- 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.
- 町田 洋・新井房夫 (2003) 新編火山灰アトラス. 東京大学出版会, 336p.
- Maruyama, S., Takemura, K., Hirata, T., Yamashita, T., and Danhara, T. (2019) Petrographic properties of visible tephra layers in SG93 and SG06 drill core samples from Lake Suigetsu, central Japan. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, 128: 879–903.
- Maruyama, S., Takemura, K., Hirata, T., Yamashita, T., and Danhara, T. (2020) Major and trace element abundances in volcanic glass shards in visible tephra layers in SG93 and SG06 drillcore samples from Lake Suigetsu, central Japan, obtained using femtosecond LA-ICP-MS. *Journal of Quaternary Science*, 35: 66–80.
- Maruyama, S., Yamashita, T., Hirata, T., and Danhara, T. (2021) Geochemical Variations in Eruptive Products of Sambe Volcano, Southwest Japan, Based on Correlations of Tephra Layers in Drill Cores from Lake Suigetsu. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)* 130: 429–443.
- 正岡栄治 (1972) 重鉍物組成からみた中海・宍道湖湖底下の第四紀火山灰. *第四紀研究*, 11: 61–69.
- 三浦 清・林 正久 (1991) 中国・四国地方の第四紀テフラ研究 — 広域テフラを中心として —. *第四紀研究*, 30: 339–351.
- 水野篤行・大嶋和雄・中尾征三・野口寧世・正岡栄治 (1972) 中海・宍道湖の形成過程とその問題点. *地質学論集*, 7: 113–124.
- Nakagawa T., Gotanda K., Haraguchi T., Danhara, Yonenobu H., Brauer A., Yokoyama Y., Tada R., Takemura K., Staff R.A., Payne R., Ramsey C.B., Bryant C., Brock F., Schlolaut G., Marshall M., Tarasov P., Lamb H., Suigetsu 2006 Project Members (2012) SG06, a fully continuous and varved sediment core from Lake Suigetsu, Japan: stratigraphy and potential for improving the radiocarbon calibration model and understanding of late Quaternary climate changes. *Quaternary Science Reviews* 36, 164–176.
- 中村唯史・徳岡隆夫 (1996) 宍道湖ボーリング SB1 から発見されたアカホヤ火山灰と完新世の古地理変遷についての再検討. *島根大学地球資源環境学研究報告*, 15: 35–40.
- 中村唯史 (2006) 神戸川デルタの地形発達. *島根県立三瓶自然館研究報告*, 4: 25–29.

- 大西郁夫(1977) 出雲海岸平野下第四紀堆積物の花粉分析. 地質学雑誌, 83: 606–616.
- 大矢幸雄(2010) 斐伊川治水の歴史と水郷松江. 水利科学, 313: 1–18.
- Reimer, P.J., Austin, W.E.N., Bard, E., Bayliss, A., Blackwell, P.G., Bronk Ramsey, C., Butzin, M., Cheng, H., Edwards, R.L., Friedrich, M., Grootes, P.M., Guilderson, T.P., Hajdas, I., Heaton, T.J., Hogg, A.G., Hughen, K.A., Kromer, B., Manning, S.W., Muscheler, R., Palmer, J.G., Pearson, C., van der Plicht, J., Reimer, R.W., Richards, D.A., Scott, E.M., Southon, J.R., Turney, C.S.M., Wacker, L., Adolphi, F., Buntgen, U., Capano, M., Fahrni, S.M., Fogtmann-Schulz, A., Friedrich, R., Kohler, P., Kudsk, S., Miyake, F., Olsen, J., Reinig, F., Sakamoto, M., Sookdeo, A., Talamo, S. (2020) The IntCal20 northern hemisphere radiocarbon age calibration curve (0-55 cal kBP). Radiocarbon, 62: 725–757.
- 三瓶良和・松本英二・徳岡隆夫・井上大栄(1996) 中海における過去 8,000 年間の有機炭素埋積速度 -Carbon sink としての汽水域堆積物 -. 第四紀研究, 35: 113–124.
- 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.
- Stuiver, M., Reimer, P.J., and Reimer, R.W. (2021) CALIB 8.2 [WWW program] at <http://calib.org>.
- 高安克己(2019) 穴道湖・中海地域の完新世海水準変動と古地理変遷. 松江市史 史料編 1「自然環境」電子版附録, 松江市史編集委員会編, 松江市. 12p.
- 高安克己・出雲古代景観復元チーム(1998) コア SJ96 の概要と穴道湖の古環境変遷. LAGUNA (汽水域研究), 5: 1–13.
- 高安克己・田中秀典・佐藤慎一(2000) 穴道湖コア SJ96 に見られるヌマコダキガイ密集層の古環境的意味: サンフランシスコ湾の例との比較から. 島根大学地球資源環境学研究報告, 19: 37–45.
- 徳岡隆夫・大西郁夫・高安克己・三梨 昂(1990) 中海・穴道湖の地史と環境変化. 地質学論集, 36: 15–34.
- 渡辺正巳・遠藤正樹(1998) 出雲平野中央部小山遺跡における地質層序と古環境. LAGUNA (汽水域研究), 5: 215–223.
- 山田和芳・高安克己(2006) 出雲平野 - 穴道湖地域における完新世の古環境変動—ボーリングコア解析による検討—. 第四紀研究, 45: 391–405.