

隠岐諸島島後，女池における過去約千年間の水環境変化

福本 侑¹・香月興太¹・中西利典²・北川浩之³・汪 良奇⁴

Paleoenvironmental changes of Meike-Pond, Oki Islands for the last millennium

Yu Fukumoto¹, Kota Katsuki¹, Toshimichi Nakanishi²,
Hiroyuki Kitagawa³, Liang-Chi Wang⁴

Abstract: Diatom, elemental (organic carbon and nitrogen) and stable carbon isotope analyses were carried out on a sediment core from Meike-Pond in the Oki Islands, western Japan, to reconstruct past environments. Five radiocarbon dating results show that the 148 cm long sediments of homogeneous organic mud were deposited in the last millennium. The main diatom floras were Fragilarioid taxa (e.g. *Staurosira*, *Pseudostaurosira*) and the genus *Aulacoseira*, with their species and variety showing different trends in relative abundance. The limnetic environment in the lower half of the core (980–1450 CE) was characterized by lower trophic level probably due to growths of aquatic plants and weaker water mixing. A warmer climate with high aquatic productivity was also inferred for the period 980–1140 CE. Inflow of mineral particles that would reflect temporal increases in rainfall were observed at 1110 CE and 1450–1550 CE. Basin sedimentation and the subsequent lowering of water level promoted water mixing and eutrophication especially from 1550 CE. During periods presumably from the mid-20th century, the diatom flora changed markedly indicating water acidification and oligotrophication. Compared with previous research, we inferred that the deposition of artificial airborne ash particles and acid rain caused this. This water acidification has continued to the near present, as acidic indicators have increased towards the top of the core.

Key words: Oki Islands, paleoenvironment of the last millennium, freshwater lake sediment, diatom fossils

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 名古屋大学宇宙地球環境研究所・Institute for Space–Earth Environmental Research, Nagoya University, Nagoya, 464-8601, Japan

⁴ 国立中正大学地球環境科学系・Department of Earth and Environmental Sciences, National Chung Cheng University, Chiayi, 621301, Taiwan

はじめに

島根県、隠岐諸島島後の南東岸には、男池、女池という自然淡水湖があり、二つあわせて津井の池と呼ばれる。どちらも円磨された礫で構成される、高さ 5 m 以上の浜堤を挟んで日本海に接しており（西郷都市計画区域図, 2014）、海跡湖を想起させる内陸側に湾入した地形をしている。女池は面積が約 2 ha で、湖面形状からは南と北の湖盆に分かれ、南側の湖盆の中心部では水深 3.8 m ほどである。集水域は約 34 ha で、標高 100–150 m の山地から小河川が流れ込んでいる。少なくとも地上の目視では、流出河川はないため準閉鎖湖と考えられる。

女池のような流出河川のない湖沼では、流入した物質が滞留しやすい。そのため、周辺の人間活動や気候変動による水文環境の変化が堆積物に記録されている可能性がある。また、陸域・沿岸域の堆積物のほうが、遠洋域のそれに比べて一般に堆積速度が大きく、大気中の二酸化炭素を直接取り込んだ陸源の植物遺体が多く保存されるため、より高い年代精度をもつ古環境記録の取得が期待できる。そのため、隠岐諸島でも数少ない自然湖からのデータは、日本海域における気候変動データを補うものとして貴重である。男池ではすでにコア試料が採取され、化石燃料の使用などで飛来した重金属や炭化粒子などが、20 世紀から現在まで堆積し続けていることが明らかにされた（山崎ほか, 2004; Murakami and Yoshikawa, 2007）。また、日本海と接する立地のため、過去に襲来した高潮や津波の発生時期の復元も期待できる。例えば 1983 年の日本海中部地震では松江市で高さ約 3 m まで津波の遡上が観測された（松江地方気象台, 2024）ため、それ以上の規模の津波が襲来すれば、イベント堆積物として痕跡が残される可能性がある。

本研究では過去の湖水環境や古気候の復元、イベント堆積物の特定を目的として、女池で採取されたボーリング試料の放射性炭素年代測定、珪藻分析、CN 元素分析および炭素同位体比分析を行った。結果、過去約千年間に水深や水質、水中の生物相などが大きく変化してきたことが明らかとなり、気候変動とも関連付けられた。また、近年の大気汚染物質の飛来が、珪藻のような水圏における基礎生産者にも大きな影響を与えてきた可能性が示された。

試料と分析方法

試料

南北二つの湖盆のうち南東側の、浜堤に比較的近い地点（北緯 36 度 12 分 17 秒 49、東経 133 度 21 分 46 秒 33; 水深 3.8 m; 図 1）において、コアパイプがアルミ合金製で半割できる押込式ピストンコアラ（香月ほか, 2019）を用いて、長さ 148 cm のコア試料（21ME01）を 2021 年に採取した。コア試料は、島根大学エスチュアリー研究センター中海分室に持ち帰り、半割したのち各種分析試料を分取した。コア試料は、全層でシルトを主体とする有機質泥で、深度 127 cm では厚さ約 1 cm の白色シルト層、深度 68 cm では白色シルトが薄いパッチ状で観察された。深度 127 cm のシルト層で火山ガラスが見られたため、テフラ層準の判定と供給源の特定ため、（株）京都フィッシュン・トラックにテフラ分析を依頼した。

年代測定

深度 57–58.5 cm, 59–60 cm, 102–106 cm, 132–133 cm, 144–147 cm から得られた 5 点の植物片試料について、放射線炭素年代測定を名古屋大学宇宙地球環境研究所の加速器質量分析装置（Nakamura et al., 2000）で行った。植物片は、堆積物を目開き 125 μm のふるいにかけて残ったもの採取した。二次的な外来炭素を除くため、試料に酸・アルカリ・酸処理を行い、Kitagawa et al. (1993) に従いグラフアイトを生成した。得られた放射性炭素年代の暦年較正は、Intcal20（Reimer et al., 2020）キャリブレーションデータセットをもとに、年代較正ソフトの Oxcal 4.4（Bronk Ramsey, 2021）を用いて行い、2 標準偏差の年代範囲を求めた。各測定試料間の年代モデルは、ベイズ統計を基に、各深度の年代確率分布を計算するフリーソフトの rBacon（Blaauw and Christen, 2011）を用いて作成した。

珪藻分析

コア試料の深度 1 cm から 147 cm まで、2 cm 間隔で約 1 ml の試料を計 74 サンプル採取し、珪藻分析を行った。試料に 15% 過酸化水素水を加え、70°C で 3 時間湯煎して有機物を分解したのち、遠心分離機で上澄みを除去した。蒸留水で希釈したのち、カバーガラスに適量滴下して室温で乾燥させ、マウントメディア（富士フイルム和光純薬）を用いてスライドガラスに封入した。光学顕微鏡（倍率：



図1 隠岐諸島島後、女池の位置と 21ME01 コア採取地点 (丸印)。右の地形図は国土地理院の電子地形図 (タイル; ズームレベル 15) を引用した。池周辺の破線は集水域を示す。

Fig. 1 Location of Meike-pond in Oki-Island, Togo and the coring point of 21ME01 core (Circle mark). The map on the right is retrieved from digital topographic basic map published by Geospatial Information Authority of Japan. Dashed line surrounding the pond denotes watershed area.

1000 倍) を用いて 300 殻以上の珪藻化石を同定・計数し、各種の割合を算出した。また、計数中にみられた黄金色藻の孢子数も記録し、珪藻化石の合計数を基に割合を算出した。種の同定には Eloranta (1986), Krammer and Lange-Bertalot (1986, 1991), 渡辺 (2005) の図表を参照した。各種の割合のダイアグラムを作成するとともに、クラスター分析の結果を参考に珪藻群集の分帯を行った。クラスター分析は、CONISS (Grimm, 1987) を用いて平方和増量法により行った。また、計数したカバーガラス上の視野面積と試料の希釈率をもとに、湿潤試料 1 ml あたりの殻数を算出した。

CN 元素・同位体比分析

珪藻分析と同層準の試料について、全有機炭素濃度 (TOC), 全窒素濃度 (TN) および炭素同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$) を台湾・国立中正大学所有の元素分析/同位体比質量分析計 (EA-IRMS) を用いて測定した。乾燥試料 0.3 g を計りとり、2 N 塩酸を加えて炭酸塩を除去、遠心分離機 (3500 rpm/5 分) により最低 3 回洗浄を行い、上澄み液の pH が中性なのを確認した。その後、凍結乾燥させ、試料をメノウ乳鉢で磨砕したのち、約 3 mg をスズ容器に封入した。試料を燃焼、ガス化させ、元素分析計 (Flash 2000,

Thermo Scientific) で TOC と TN を測定した。そして、元素分析計に接続された質量分析計 (Delta V Plus advantage Thermo) を用いて ^{13}C と ^{12}C を測定し、標準物質 (VPDB: Vienna Pee Dee Belemnite) との千分偏差 ($\delta^{13}\text{C}$: 単位 ‰) を求めた。TOC と $\delta^{13}\text{C}$ 値の分析精度はそれぞれ <10%, 0.1‰ である。また、TOC と TN から TOC/TN (C/N) の重量比を算出した。

結 果

年代測定・テフラ分析

放射性炭素年代測定の結果を表 1 に、年代モデル (深度 - 年代図) を図 2 に示す。最下部の試料 (深度 144—147 cm) の較正年代は 892—1156 cal yr CE であった。年代値どうしの明らかな上下の逆転はなく、表層部は後述する珪藻分析結果から、コア採取年に近い堆積物を保存していると考えられるため、20ME01 コアはおよそ過去約千年間の連続的な堆積物といえる。今後、各深度の年代値は年代モデルの中央値を西暦 (CE または世紀) で表す。ただ、いずれの深度も 200 年前後の誤差 ($\pm 2\sigma$) が算出された。年代モデルによる 145 cm の中央値の年代 (993 CE) をさらに下位に外挿すると、最下部の深度 147 cm は 981 CE であった。最上部の測定深度 (57—58.5

表 1 21ME01 コアの放射性炭素年代測定結果.

Table 1 Radiocarbon dating results of plant remains from 21ME01 core. Radiocarbon dates were calibrated to calendar years using the program Oxcal 4.4 (Bronk Ramsey, 2021) based on IntCal20 calibration dataset (Reimer et al., 2020).

Depth (cm)	^{14}C BP $\pm 1\sigma$	cal CE within 2σ error	Material	Code
57-58.5	179 $\pm$ 46	1649-modern	plant fragments	NUTA2- 29116
59-60	352 $\pm$ 51	1452-1642	leaves	NUTA2- 29119
102-106	802 $\pm$ 47	1160-1285	plant fragments	NUTA2- 29120
132-133	835 $\pm$ 49	1047-1280	plant fragments	NUTA2- 29121
144-147	1031 $\pm$ 48	892-1156	plant fragments	NUTA2- 29122

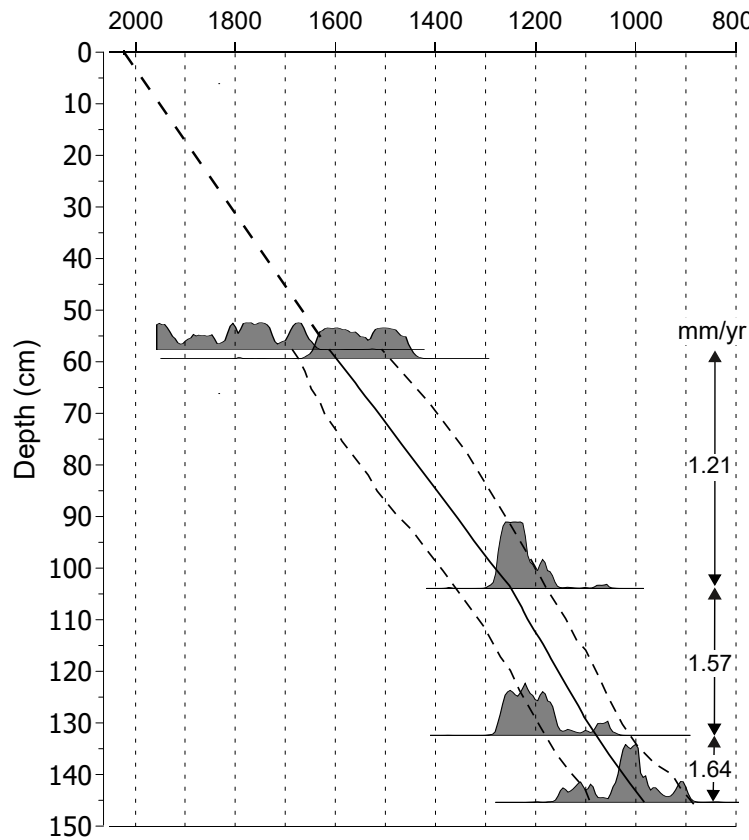


図 2 21ME01 コアの年代モデル. 破線で囲まれた部位は、算出した年代モデルの 2 標準偏差の信頼区間を示し、実線はその中央値を示す. 表層から深度 58 cm にかけての年代は、直線で結んで求めた(破線). 右側に平均堆積速度を示した.

Fig. 2 Age-depth model of 21ME01 core. Age-depth model deeper than 58 cm depth was produced by software program rBacon (Blaauw and Christen, 2011). The area enclosed by dashed line denote the 2σ probability age ranges of the age-depth model, and solid line indicates their median ages. Ages for depths shallower than 58 cm were obtained by connecting linearly between surface age (2021 CE) and the median age of 58 cm depth (1630 CE). Sedimentation rate is noted on the right.

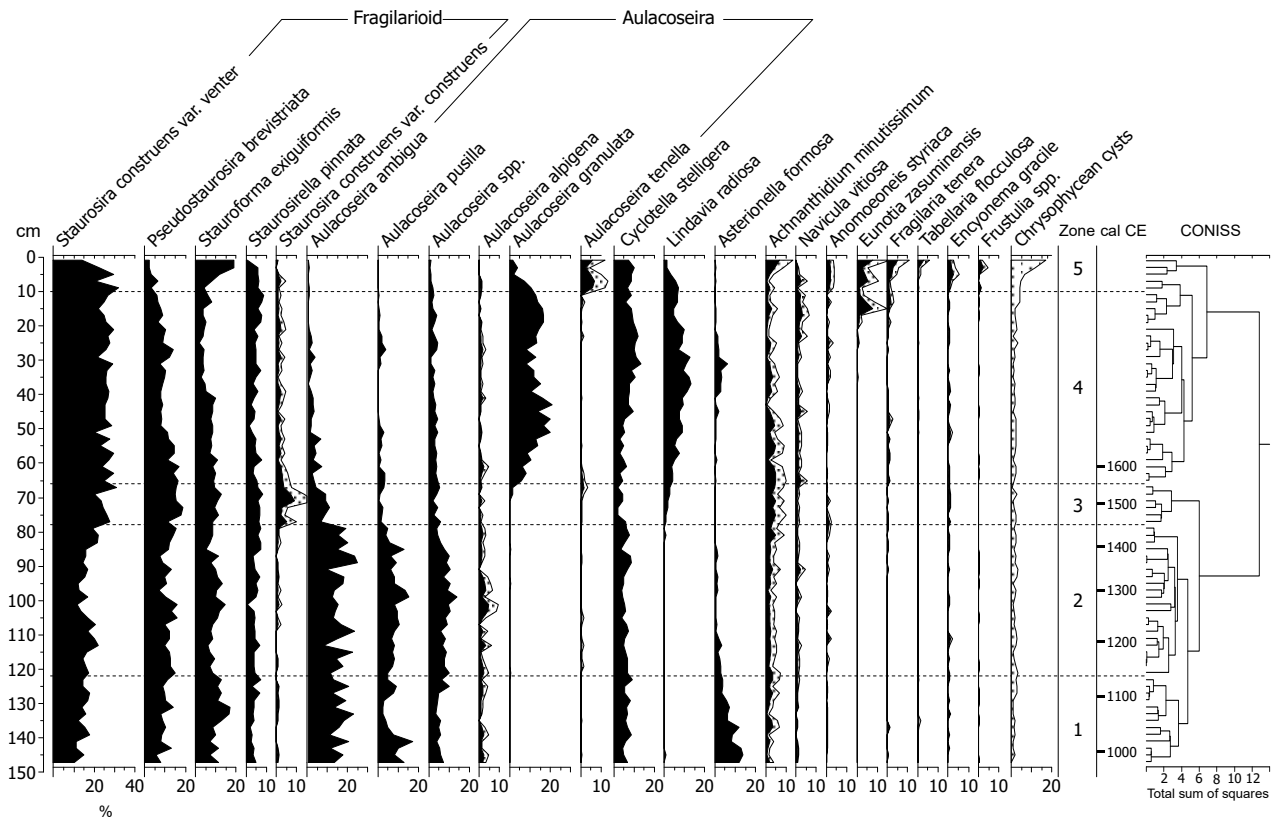


図3 21ME01 コアの珪藻化石ダイアグラム。最大量が10%に満たない種は強調するために二倍量に網掛けをしている。黄金色藻胞子の相対量とクラスター分析の結果も示した。

Fig. 3 Fossil diatom diagram of 21ME01 core. Graphs of taxa with maximum occurrence of less than 10% are exaggerated two times by hatching. The percentage of chrysophycean cysts relative to diatom valve numbers and the results of cluster analysis are also shown.

cm) からコア表層までの年代モデルは求められなかったため、表層をコア採取時の年代 (2021 CE) と仮定し、深度 58 cm の年代 (1630 CE) との間を直線で結んでこの区間における年代を求めた。年代測定試料間の平均堆積速度は、深度 58—104 cm で約 1.2 mm/yr、それ以深では 1.6 mm/yr 前後であった。

テフラ分析の結果、深度 127 cm のシルト層における全鉱物組成中の火山ガラスの含有率は約 1% で、軽鉱物と岩片が主であった。そのためテフラ層準とは認められなかった。火山ガラスは始良 Tn 火山灰由来の可能性が示唆されたため、池周辺の古い時代の堆積物が再堆積したものと考えられた。

珪藻分析

各珪藻種、分類群の産出頻度のダイアグラムを図 3 に示す。少なくとも一層準で 2% 以上産出した主要種について表示した。また、クラスター分

析の結果を参考に、下位から ME1 ~ ME5 の 5 つの珪藻帯に区分した。最も多く産出したのは、かつて *Fragilaria* 属に分類されていた無縦溝羽状類の *Staurosira*, *Pseudostaurosira* および *Staurosirella* 属などの分類群である (旧 *Fragilaria* 属: ダイアグラムでは *Fragilarioid* と表示)。次に *Aulacoseira ambigua* や *Aulacoseira granulata*, *Cyclotella stelligera* などが多く見られた。また、旧 *Fragilaria* 属と *Aulacoseira* 属それぞれの合計の割合と、湿潤試料 1 ml あたりの殻数 (常用対数) のダイアグラムを図 4 に示した。なお、*Fragilaria tenera* については他の旧 *Fragilaria* 属とは殻の形や生態が大きく異なると考えられるため、今回は旧 *Fragilaria* 属には分類しなかった (図 3)。以下に珪藻帯ごとの結果を示す。

ME 1 (147—122 cm : 980—1140 CE) と ME 2 (122—78 cm : 1140—1450 CE) では、いずれも *Staurosira construens* var. *venter*, *Aulacoseira ambigua*

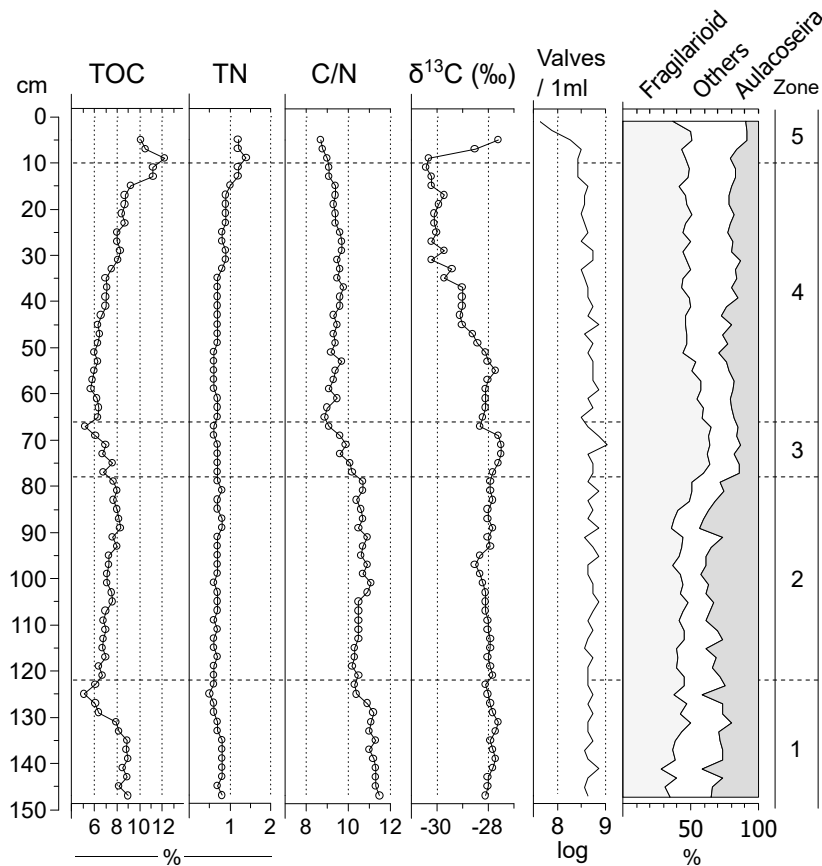


図4 TOC, TN, C/N 比および $\delta^{13}\text{C}$ の鉛直変化. 旧 *Fragilaria* 属 (Fragilarioid) と *Aulacoseira* 属およびそれ以外の分類群の割合と, 湿潤試料 1ml あたりの殻数 (常用対数) のグラフも示した.

Fig. 4 Vertical variations of TOC, TN, C/N ratios and $\delta^{13}\text{C}$. Diagrams of the cumulative abundance of Fragilarioid taxa, genus *Aulacoseira* and other taxa, and the calculated diatom valve numbers in 1ml of wet sediments (expressed by common logarithm) are also shown.

および *Aulacoseira pusilla* が優占したが, 前者では *Asterionella formosa* が特徴的に出現し, 10% 以上に達した. ME2 では, *A. formosa* が見られなくなるとともに *Aulacoseira* spp. が若干の増加を示した. ME3 (78–66 cm : 1450–1550 CE) では, それまでみられた *Aulacoseira* の各種が減少し, *Staurosira construens* var. *construens* が特徴的に 5% 近くまで産出した. *Staurosira construens* var. *venter* もこの珪藻帯から増加し, 以降常に 20% 以上出現するようになった. ME4 (66–10 cm : 1550–1950 CE) では, *Aulacoseira* 属は, およそ *A. granulata* のみがみられるようになり 20% 以上産出した. *Lindavia radiosa* や *Cyclotella stelligera* も特徴的に出現, 漸増し, 10% 以上に達した. *Pseudostaurosira brevistriata* はゆるやかな減少傾向を示した. ME5 (10 cm :

1950 CE—) では, 少量であるが多くの種が出現した. *Eunotia zasuminensis* や *Aulacoseira tenella* が 5% 以上出現し, *Anomoeoneis styriaca* や *Encyonema gracile*, *Fragilaria tenera* も連続的に出現した. 最上部では, *Stauroforma exiguiiformis* と黄金色藻胞子が珪藻殻数に対して 20% 近くまで増加し, *Tabellaria flocculosa* や *Frustulia* sp. も上部で 2% 以上出現した. 旧 *Fragilaria* 属の割合は, ME1 下部の約 40% から徐々に増加し, ME3 で 60% 以上に達した. ME4 からは若干減少したが, ME1 や 2 より高い割合で推移した. *Aulacoseira* 属はこれらとはおよそ反対の傾向を示した. 湿潤試料 1 ml あたりの殻数については, ME1 から ME4 までは 10^8 から 10^9 殻の範囲にあり, 大きな変化は見られなかったが, ME5 では 10^7 殻近くまで急減した.

CN 元素・同位体比分析

TOC, TN, C/N 比および $\delta^{13}\text{C}$ の測定結果を図 4 に示す。いずれの指標も、珪藻帯の区分に同調した増減傾向を示した。TOC は、最下部 (147 cm) から深度 133 cm まで 8% 以上の高い値を示したのち減少し、深度 125 cm では 5.1% まで低下した。その後 7–8% で推移するが、深度 81 cm より低下し、深度 67 cm で 5.2% となった。以降は 6% から 9% まで漸増したのち、深度 15 cm より急増して深度 9 cm で 12.2% に達した。その後 10% 近くまで減少した。TN は、最下部から深度 15 cm まで 0.6–1.0% の範囲で安定して推移し、その後最大 1.4% まで増加した。C/N 比は最下層の 11.5 から最上層の 8.7 まで、全層にかけて減少傾向が見られた。しかし深度 127–75 cm では 10–11、深度 63–9 cm では 9–10 の範囲内で一定であった。深度 129–125 cm と深度 79–65 cm では、それぞれ約 11 から 10、約 10 から 9 への階段状の急な減少が見られた。 $\delta^{13}\text{C}$ は、最下部から深度 55 cm にかけて -28‰ 程度で一定であった。深度 55 cm から徐々に低下し、深度約 30 cm で底を打った後は -30‰ で一定の値を示した。しかし深度 9 cm より、-30‰ から -28‰ 以上まで急増した。

考 察

珪藻化石および各種指標のコア全体の傾向

21ME01 コア分析の結果、珪藻化石群集はおもに旧 *Fragilaria* 属や *Aulacoseira* 属の優占で特徴づけられ、コア上部の ME3 以浅では、前者が特に優勢となった (図 4)。また、1 ml 試料中の珪藻殻数の変化は小さい (図 4) ことから、両分類群の実際の生育量も、割合と同様に増減したと考えられる。一般に旧 *Fragilaria* 属は付着性、*Aulacoseira* 属は浮遊性の生態をもつとされるが、ともに水流に乗って湖底と湖水中の間を移動することを生活環の一部とするため、半浮遊性の性格を強く持つ。そのため両者ともに出現する環境は湖水の循環、かく乱が非常に強いとみられ (Gasse, 1987; Tibby et al., 2012)、海洋に面した女池も、風による湖水のかく乱が常時起こる環境と考えられる。他の付着性種、特に縦溝羽状類の産出が非常に少なかったのも、おそらく湖岸の細粒物質の巻き上げが頻繁に起こることで、安定した付着基質が存在しにくいためと考えられる。旧 *Fragilaria* 属は幅広い水質の環境に出現し (Sayer, 2001)、*Aulacoseira* 属よりも深い場所に出現するという報告もある (McCausland et al., 2002; Hall

et al., 2004)。しかし一般的には、付着性である旧 *Fragilaria* 属の増加傾向は、水深の低下を示すと考えられる。これは、湖底の埋積が徐々に進んだ結果と推測される。平均堆積速度がコア最下部から上方に向かって低下するのも (図 2)、水深が浅くなって、池周辺からの堆積物の流れ込みが徐々に減ったことを示唆する。

CN 元素の測定結果では、C/N 比は全層で 8 から 12 の範囲であった。C/N 比は主に堆積物中の有機物の起源を知る指標となり、一般に水中の植物プランクトンは 10 以下、沈水植物は 10–20、陸上植物は 20 以上と測定されている (Meyers, 1994; Whitmore et al., 2020)。そのため、有機物の起源は過去約千年間にわたり、陸域からよりも水中の植物プランクトンや水草が多かったとみられる。しかし、コア全体にわたる C/N 比の減少傾向は、有機物中の植物プランクトンの割合が徐々に多くなったことを示す。この原因として、水深や湖水面積の増加が考えられる。しかし、女池のような水深が浜堤に強く規制されている浅い水環境では、約千年間にわたって継続して水深増加が起こる可能性は低い。同様に、一般的な湖盆形状においては、堆積の進行とともに湖水面積が増大することも考えにくい。そのため水質の富栄養化が、植物プランクトンの増加した原因として挙げられる。C/N 比は、白色シルト層のみられる ME1 の上部と ME3 において階段状に減少するため、両時期の環境変化が、続く珪藻帯 ME2 および ME4 の環境を形成したとみられる。なお、1 ml 試料中の珪藻殻数に大きな変化はないものの、コア下部 (主に ME1) では堆積速度が比較的速かった。そのため、年当たりの珪藻の生産量は、ME1 で若干高かったと推測される。

炭素同位体比の測定結果は、 $\delta^{13}\text{C}$ 値は ME1 から ME4 の下部まではおよそ一定であったが、それ以浅で顕著な変動が見られた。 $\delta^{13}\text{C}$ 値も C/N 比同様に有機物を合成した生物分類群を反映し、生態系の栄養段階や湖底堆積後における変動は比較的小さい (Meyers et al., 1995; Yamada et al., 1998)。一方、水質、水温や二酸化炭素濃度など、有機物が合成された時の周辺環境因子が値に影響する (Wada, 2009)。そのため、ME4 の上部 (およそ 18 世紀以降) に環境変化があったとみられる。次節では、以上の予察をふまえて古環境変遷の考察を行う。なお、森林伐採や居住など、集水域における人間活動で C/N 比は急増することが多い (廣瀬ほか, 2020) が、コア全体でそのような増加傾向は認められなかった。

女池の古環境変遷

ME1 および 2 (980–1450 CE) では、*Aulacoseira ambigua* や *Aulacoseira pusilla* など、複数の *Aulacoseira* 属が出現し、*Aulacoseira granulata* のみが優占するコア上部とは大きく異なっていた。*A. ambigua* は *A. granulata* よりも栄養度が低く (田中, 2022)、湖水の懸濁が少ない環境に出現する (Rioual et al., 2007)。*A. pusilla* も他の *Aulacoseira* 属の種に比べて、貧栄養で透明度の高い水環境を好むとされる (Denys et al., 2003; Garzon and Saros, 2022)。さらに *A. ambigua* や *A. pusilla* は、*A. granulata* に比べてより浅く水草の繁茂する環境に生育するとされる (千葉・澤井, 2014)。水草の多くは湖底堆積物の浮遊、懸濁を抑え、湖水中の栄養塩を吸収、貯蓄する性質がある (Madsen et al., 2001; Zhu et al., 2015)。そのため、10–15 世紀の女池には水草が多く繁茂し、水中の懸濁と栄養塩の増加が比較的抑えられた環境があったと推測される。このような環境下では懸濁環境を好む旧 *Fragilaria* 属の生育量は抑えられ、水草に由来する有機物の堆積で、高い C/N 比や TOC が維持されたと考えられる。

ME1 (980–1140 CE) で特徴的に増加した *Asterionella formosa* は、すべての淡水珪藻種中でも特に浮遊性の生活を好む種であり (Gushulak et al., 2017)、他の藻類との競合がなければ、夏季の温度成層が発達した水中に生育する (Davey and Heaney, 1989)。したがって、この種の増加は気候が温暖だったことを示唆し、当時比較的高かった珪藻生産量や、高い TOC もこれを支持する。このような温暖傾向は、いわゆる中世の温暖期を反映している可能性がある。この温暖期の国内における期間や程度については、まだ不明点が多く、堆積物記録に認められないこともある (Kawahata et al., 2017)。ただ、主に本州中部の年輪のセルロース酸素同位体比から得られた、高解像度の寒暖記録では 10–11 世紀にかけて温暖傾向が示されている (Nakatsuka et al., 2020)。本研究では、*A. formosa* がコア最下部で最多となっていることから、隠岐諸島周辺で最も温暖だった時期は、980 CE よりも前にさかのぼる可能性を指摘できる。

深度 127 cm (1110 CE) でみられた白色シルト層は、有機物の含有が少ないため、一時的な碎屑物の流入を示し、TOC の低下は、その際の希釈効果によるものと考えられる。一方、この層準の C/N 比は低下し、珪藻群集では目立った変化は認められなかった。この解釈として、降水量の増加などにより、水面下で局所的に浸食作用や地すべりが起こり、碎屑

物が堆積したものと思われる。そのため、C/N 比の増加や珪藻群集に変化をもたらすような、湖岸や陸域からの流入、堆積はほとんどなかったと推測される。

ME3 (1450–1550 CE) では、おもに *Staurosira construens* var. *venter* をはじめとする旧 *Fragilaria* 属が増加したため、水深が低下したと考えられる。また *Staurosira construens* var. *construens* が特徴的に出現した。一般に旧 *Fragilaria* 属の種群はいずれも同じような出現パターンを示すことが多い (Sayer, 2001) ため、種間の生態の違いが議論されることは少ない。しかし、*S. construens* var. *construens* は他の旧 *Fragilaria* 属に比べて、より腐植質の多い環境 (加藤ほか, 2004; Fluin et al., 2007) や、水深の浅い環境 (Tingstad et al., 2011; Kattel et al., 2017) に多く生育する傾向がみられる。そのため、浅い湖岸域に繁茂していた *S. construens* var. *construens* が、遠洋まで運搬される機会が増えたと考えられる。深度 68 cm に挟在するパッチ状の白色シルトも、湖岸域からの碎屑物の流れ込みを反映する。これらは一時的な降水量の増加が起こったことを示唆する。一方で、C/N 比は明瞭な減少傾向であることや、ME3 付近の平均堆積速度は比較的遅い (図 2) ことから、深度 127 cm の白色シルト層と同様、陸域からの大規模な流入、堆積はなかったと見られる。しかし、当珪藻帯における湖底の埋積と水深低下が、続く ME4 の環境を形成したと考えられる。

ME4 (1550–1950 CE) では、C/N 比は常に 10 以下となり、旧 *Fragilaria* 属の種群が引き続き卓越して産出した。この珪藻帯で優占した *Aulacoseira granulata* は、ME3 までに見られた他の *Aulacoseira* 属に比べてより富栄養な水質を好む。また大きな殻を持ち、湖底に沈みやすいため、湖底まで湖水が循環するような水深の浅い環境に適応すると考えられる (Pouličková, 2003)。そのため、当珪藻帯では、湖底の堆積によって水深低下が進んだことで、湖盆全体が風でかく乱されやすくなったと考えられる。湖水のかく乱と懸濁が強くなると、水中の光量が抑えられて水草が繁茂しにくくなり、一般に水質の富栄養化が進む (Sayer et al., 2010; Zhu et al., 2015)。そして、水草よりも植物プランクトンからの有機物の寄与が増えたことで、C/N 比が低下したと考えられる。なお、このような環境下でみられた *Pseudostaurosira brevistriata* の減少傾向は、この種が他の旧 *Fragilaria* 種群よりも水深の深い環境を好んで生育する生態を示唆するかもしれない。

ME4 における富栄養化は、TOC の漸増傾向が示

すように、湖内の生物生産量を増加させたと考えられる。しかし、珪藻殻数には増加傾向は認められないため（図4）、珪藻以外の藻類が増加したと考えられる。 $\delta^{13}\text{C}$ 値の -28‰ から -30‰ への顕著な低下も、富栄養化によりラン藻が珪藻に比べて優勢になったことを示唆する (Whitmore et al. 2020)。一方、この $\delta^{13}\text{C}$ 値の低下には、生物生産量と有機物の堆積が増えたことで湖底に貧酸素層ができやすくなったことも寄与していると考えられる。夏季を中心に発生する貧酸素層では、有機物が分解されてできる ^{12}C に富む溶存態無機炭素やリンが蓄積する。それらは湖水の循環期に表層へ拡散され、植物プランクトンに取り込まれることで、有機物の $\delta^{13}\text{C}$ 値が低下する (瀬戸ほか, 2000)。また、この循環期の栄養塩の急増が、当珪藻帯で *A. granulata* が増加した一因と考えられる。

ME4 で特徴的に出現した *Lindavia radiosa* は、分類学的に複数種の集まりの可能性があることから、広汎な水環境で観察される (Krammer and Lange-Bertalot, 1991)。ただ、水温躍層中などの湖水のかく乱と栄養塩が比較的少ない環境におおよそ出現し (Saros et al., 2014)、*Cyclotella stelligera* も同様の生態をもつ (Tyler et al., 2015)。これらは *A. granulata* とは対照的な生態であるため、それぞれ異なる時期に繁殖していたと想定できる。すなわち、湖水が強かく乱されて、栄養が急増する時期に、*A. granulata* が増殖して短期間で湖底に沈む。その後、強い水温躍層が形成される夏季などにおいて、*L. radiosa* や *C. stelligera* が有利に増殖したと考えられる。

20 世紀頃から現在に相当する ME5 では、多くの新しい珪藻種が出現し、黄金色藻胞子や $\delta^{13}\text{C}$ 値が急増した。一般に黄金色藻胞子は、珪藻に比べて貧栄養で酸性の水域で多く発生し (Zeeb and Smol, 2001)、*Aulacoseira tenella* も ME4 で優占した *A. granulata* とは対照的に、貧栄養で酸性の水域にみられる (Camburn and Charles, 2000; Bicudo et al., 2016)。*Stauroforma exiguiiformis* も他の旧 *Fragilaria* 属に比べて酸性の水域を好む (Schmidt et al., 2004)。その他、*Eunotia zasuminensis* や *Frustulia* spp., *Anomoeoneis styriaca*, *Encyonema gracile* など同様の有機酸性水域で普通にみられる (Eloranta, 1986; van Dam et al., 1994; 渡辺, 2005)。以上より ME5 では、水質が顕著に酸性化または貧栄養化したと考えられる。前節で述べたように、風による湖水のかく乱が活発な当池では、付着性の縦溝羽状類などの産出がコア全体で少なかったが、当珪藻帯では *Frustulia*

spp. や *Encyonema gracile* などが比較的多く出現した。おそらく、これまで優占した種群が衰退し、付着基質に大きな空きができたため、酸性環境を好む種が適応、生育できるようになったと考えられる。しかし、当珪藻帯の試料中の珪藻殻数は、10 分の 1 近くまで減少したため（図4）、当池の強いかく乱環境に適応できた個体数は少数とみられる。

ME5 における湖水の酸性化、貧栄養化の原因として、湖盆の堆積による水深低下や、集水域の森林伐採が考えられるが、C/N 比は低下傾向であるため、それらの可能性は低い。そのため、工業生産活動による大気汚染物質や酸性雨の降下が考えられる。女池の東に隣接する男池では、コア試料中の重金属と、飛来性の炭化および灰粒子（フライアッシュ粒子）の量が測定されている。その結果、水銀と鉛はそれぞれ 1920 年代と 30 年代から増加し続け（山崎ほか, 2004）、フライアッシュ粒子も遅くとも 50 年代から増加することが明らかとなった (Murakami and Yoshikawa, 2007)。これらは中国などの大陸方面から偏西風に乗って飛来したと推定されている。そのため窒素・硫酸化物などの酸性物質も飛来、降下して湖水を酸性化させたことが考えられ、全窒素 (TN) の増加傾向もこれを支持する。欧米においても、重金属と酸性雨の降下により、湖水の酸性化と貧栄養化が進んだことは広く知られている (Olsson and Pettersson, 1993)。そして本研究と同様に *Stauroforma exiguiiformis*, *Eunotia zasuminensis*, *Tabellaria flocculosa* などが工業地帯に近い湖のコア試料の表層近くで増加し、酸性雨の降下と関連付けられている (Faulkenham et al., 2003; Battarbee et al., 2014)。*Stauroforma exiguiiformis* と、珪藻殻数に対する黄金色藻胞子の割合はともに 20% 近くまで急増し、最表層（深度 1 cm）で高止まりしている。このことは、コア採取時点（2021 年）でも湖水の酸性状態は続いていることを示唆し、集水域からの酸性物質の流れ込みによる影響 (Engstrom and Rose, 2013) が考えられる。 $\delta^{13}\text{C}$ 値の急な上昇も、石炭の燃焼により発生するフライアッシュ粒子の高い $\delta^{13}\text{C}$ 値 (-25 から -23.5‰ ; 森ほか, 2021) が寄与していると考えられる。また、気温の上昇で生物生産が盛んになると、より多くの大気中の二酸化炭素 ($\delta^{13}\text{C} \approx -7\text{‰}$) が水中に取り込まれて $\delta^{13}\text{C}$ 値が増加する (Wolfe et al., 2001)。そのため近年の地球温暖化を反映している可能性もある。

以上のように女池では、過去千年間の堆積作用により、徐々に水深が浅くなったと考えられる。そ

の中で、1110 CE と ME3 (1450—1550 CE) では碎屑物や附着性珪藻の流入増加がみられた。これらは、水面下での物質移動が主な現象だったと推測されたため、降水量の増加などの気候変動を直接指標するのではなく、偶発的な湖盆内の地滑りによる堆積を表している可能性もある。珪藻群集は、同じ湖盆内でもごく局所的な水環境に大きく影響される (Szczerba et al., 2023)。そのため、女池の北側の湖盆や、隣接する男池からもコア採取と分析を行うことで、以上の不明点を含め新たな知見が得られると考えられる。また今回、全層で汽水～海水生の珪藻種は出現しなかったため、少なくとも過去千年間に浜堤を超えて遡上するような高潮、津波はなかったと考えられる。しかし、硫黄成分や粒度変化など、海水の浸入を示す指標を用いることで、イベント層準が見いだされる余地も残されている。

ま と め

隠岐諸島島後、女池のボーリングコア試料について珪藻分析、CN 元素および $\delta^{13}\text{C}$ 分析を行い、過去約千年間の環境変化の復元を行った。コア試料の層相はおよそ一様であったが、これらの指標には大きな変動があり、環境変化への高い応答性が示された。以下のような知見が得られた。

1. 980 CE (コア最下部) から 1140 CE までの湖水環境は、水温と生物生産量が比較的高かったと推定された。1110 CE と 1450—1550 CE に、主に碎屑物の流入増加があり、降水量の一時的な増加が示唆された。これらの湖底の堆積作用で水深が低下していき、湖水のかく乱、懸濁が強くなることで、特に 1550 CE 以降は湖水が富栄養化した。なお、森林伐採など集水域における人間活動や、津波や高潮の当池への浸入を示す明確な痕跡は全層で見られなかった。
2. およそ 20 世紀半ばから特徴的な珪藻種が多く出現し、湖水が顕著に酸性、貧栄養化したと考えられた。隣接する男池の堆積物では、大気汚染によって飛来、蓄積した重金属やフライアッシュ粒子が多く見いだされているため、酸性雨が原因と推定される。この酸性化の藻類への影響は、少なくともコア採取時点 (2021 年) まで続いていると見られる。
3. 本研究で多く出現した旧 *Fragilaria* 属の種群は、一般に幅広い水環境に出現する上、小型であるため分類が難しい。そのため古環境指標として用いられることは少ない。しかし今回、*Staurosira construens*

var. *construens* の増加など、種または亜種間で増減に違いが見られた。そのため先行研究 (例えば、辻ほか, 1999) によって指摘されているように、それぞれ異なる環境指標性を持つ可能性があり、珪藻分析の際にはまとめずに分類、同定して計数することが望ましいと考えられる。

謝 辞

本研究に用いた堆積物試料の採取にあたっては、群馬大学の佐々木聡史助教および島根大学エスチュアリー研究センターの学生鎌田唯斗氏に尽力いただいた。調査に当たっては、中国四国地方環境事務所の許可をいただいた。また、本原稿は二名の査読者のコメントによって大幅に改善された。以上の方々に深く感謝いたします。本研究には JSPS 科研費 (基盤 C : 19K03995, 研究代表者 : 香月) を使用した。

引 用 文 献

- Battarbee, R.W., Simpson, G.L., Shilland, E.M., Flower, R.J., Kreiser, A., Yang, H. and Clarke, G. (2014) Recovery of UK lakes from acidification: An assessment using combined palaeoecological and contemporary diatom assemblage data. *Ecological Indicators*, 37:365-380.
- Bicudo, D.C., Tremarin, P.I., Almeida, P.D., Zorzal-Almeida, S., Wengrat, S., Faustino, S.B., Costa, L.F., Bartozek, E.C.R., Rocha, A.C.R., Bicudo, C.E.M. and Morales, E.A. (2016) Ecology and distribution of *Aulacoseira* species (Bacillariophyta) in tropical reservoirs from Brazil. *Diatom Research*, 31:199-215.
- Blaauw, M. and Christen, J.A. (2011) Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process. *Bayesian Analysis*, 6:457-474.
- Bronk Ramsey, C. (2021) OxCal 4.4. Electronic document. <https://c14.arch.ox.ac.uk/oxcal.html>. (2024 年 6 月時点).
- Camburn, K.E. and Charles, D.F. (2000) Diatoms of low-alkalinity lakes in the northeastern United States. *Academy of Natural Sciences of Philadelphia*, 18:1-152.
- 千葉崇・澤井祐紀 (2014) 環境指標種群の再検討と更新. *Diatom*, 30:17-30.
- Davey, M.C. and Heaney, S.I. (1989) The control of sub-surface maxima of diatoms in a stratified lake by

- physical, chemical and biological factors. *Journal of Plankton Research*, 11:1185-1199.
- Denys, L., Muylaert, K., Krammer, K., Joosten, T., Reid, M. and Rioual, P. (2003) *Aulacoseira subborealis* stat. nov. (Bacillariophyceae): a common but neglected plankton diatom. *Nova Hedwigia*, 77:407-427.
- Eloranta, P. (1986) *Melosira distans* var. *tenella* and *Eunotia zasuminensis*, two poorly known planktonic diatoms in Finnish lakes. *Nordic Journal of Botany*, 6(1):99-103.
- Engstrom, D.R. and Rose, N.L. (2013) A whole-basin, mass-balance approach to paleolimnology. *Journal of Paleolimnology*, 49:333-347.
- Faulkenham, S.E., Hall, R.I., Dillon, P.J. and Karst-Riddoch, T. (2003) Effects of drought-induced acidification on diatom communities in acid-sensitive Ontario lakes. *Limnology Oceanography*, 48:1662-1673.
- Fluin, J., Gell, P., Haynes, D., Tibby, J. and Hancock, G. (2007) Palaeolimnological evidence for the independent evolution of neighbouring terminal lakes, the Murray Darling Basin, Australia. *Hydrobiologia*, 591:117-134.
- Garzon, E.L.P. and Saros, J.E. (2022) Ecology of the diatom *Aulacoseira pusilla* in oligotrophic mountain lakes, with implications for paleoclimate reconstructions. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 54(1):147-162.
- Gasse, F. (1987) Diatoms for reconstructing palaeoenvironments and paleohydrology in tropical semi-arid zones. *Hydrobiologia*, 154:127-163.
- Grimm, E. (1987) A FORTRAN 77 program for stratigraphically constrained cluster analysis by the methods of incremental sum of squares. *Computers & Geoscience*, 13:13-15.
- Gushulak, C.A.C., Laird, K.R., Bennett, J.R. and Cumming, B.F. (2017) Water depth is a strong driver of intra-lake diatom distributions in a small boreal lake. *Journal of Paleolimnology*, 58:231-241.
- Hall, R.I., Wolfe, B.B. and Edwards, T.W.D. (2004) A multi-century flood, climatic, and ecological history of the Peace-Athabasca Delta, northern Alberta, Canada. Report for BC Hydro. Burnaby, Canada, 163p.
- 廣瀬孝太郎・瀬戸浩二・辻本彰・中村英人・安藤卓人・入月俊明・香村一夫 (2020) 中海 Nk-3C 地点における湖底表層堆積物層序および過去約 600 年間の地球化学的環境の変化. *Laguna* (汽水域研究), 27:41-57.
- 加藤和弘・章冬琴・一ノ瀬友博 (2004) 淡路島のため池における付着珪藻群集の種組成に關与する要因. *ランドスケープ研究*, 67(5):511-514.
- 香月興太・瀬戸浩二・菅沼悠介・Yang, D.Y. (2019) 湖底堆積物調査における携帯型採泥器具の種類と特徴について. *地学雑誌*, 128:359-376.
- Kattel, G., Gell, P., Zawadzki, A. and Barry, L. (2017) Palaeoecological evidence for sustained change in a shallow Murray River (Australia) floodplain lake: regime shift or press response? *Hydrobiologia*, 787:269-290.
- Kawahata, H., Matsuoka, M., Togami, A., Harada, N., Murayama, M., Yokoyama, Y., Miyairi, Y., Matsuzaki, H. and Tanaka, Y. (2017) Climatic change and its influence on human society in western Japan during the Holocene. *Quaternary International*, 440:102-117.
- Kitagawa, H., Masuzawa, T., Makamura, T. and Matsumoto, E. (1993) A batch preparation method for graphite targets with low background for AMS ¹⁴C measurements. *Radiocarbon*, 35:295-300.
- Krammer, K. and Lange-Bertalot, H. (1986) Bacillariophyceae, Teil: Naviculaceae. *Süßwasserflora von Mitteleuropa*, Band 2/1. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, 876p. (in German)
- Krammer, K. and Lange-Bertalot, H. (1991) Bacillariophyceae, Teil: Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae, *Süßwasserflora von Mitteleuropa*, Band 2/3. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, 576p. (in German)
- Madsen, J.D., Chambers P.A., James, W.F., Koch, E.W. and Westlake, D.F. (2001) The interaction between water movement, sediment dynamics and submersed macrophytes. *Hydrobiologia*, 444:71-84.
- 松江地方気象台 (2024) 島根県の地震 令和6 (2024) 年1月, <https://www.jma-net.go.jp/matsue/mission/earthquake/bulletin/202401.pdf> (2024 年 8 月時点).
- McCausland, M.A., Thompson, P.A. and Blackburn, S.I. (2002) The effect of changes in light availability cause by mixing on the growth of *Anabaena circinalis* (Nostocales, Cyanobacteria) and *Aulacoseira* sp. (Centrales, Bacillariophyceae). *Phycologia*, 40:530-541.
- Meyers, P.A. (1994) Preservation of elemental and

- isotopic source identification of sedimentary organic matter. *Chemical Geology*, 114:289-302.
- Meyers, P.A., Leenheer, M.J. and Bourbonniere, R.A. (1995) Diagenesis of vascular plant organic matter components during burial in lake sediments. *Aquatic Geochemistry*, 1:35-52.
- Nakatsuka, T., Sano, M., Li, Z., Xu, C., Tsushima, A., Shigeoka, Y., Sho, K., Ohnishi, K., Sakamoto, M., Ozaki, H., Higami, N., Nakao, N., Yokoyama, M., and Mitsutani, T. (2020) A 2600-year summer climate reconstruction in central Japan by integrating tree-ring stable oxygen and hydrogen isotopes, *Climate of the Past*, 16:2153-2172.
- 森岳人・長沼宏・川島洋人 (2021) 炭素安定同位体比を用いた未燃炭素量予測方法. 第 58 回石炭科学会議 石炭科学会議発表論文集, p.44.
- Murakami, A. and Yoshikawa, S. (2007) Record for long-range transport of Fly-ash particles during past 100 years in the pond sediments in Oki Islands, Japan sea. *The Quaternary Research*, 46:275-281.
- Nakamura, T., Niu, E., Oda, H., Ikeda, A., Minami, M., Takahashi, H., Adachi, M., Pals, L., Gott dang, A. and Suya, N. (2000) The HVEE Tandetron AMS system at Nagoya University. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 172:52-57.
- Olsson, H. and Pettersson, A (1993) Oligotrophication of acidified lakes: A review of hypotheses. *Ambio*, 22:312-317.
- Pouřicková, A. (2003) Morphological variability of natural populations of *Aulacoseira granulata* (EHR.) Simons (Bacillariophyceae). *Czech Phycology*, Olomouc, 3:125-140.
- 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., Büntgen, U., Capano, M., Fahrni, S., Fogtmann-Schulz, A., Friedrich, R., Köhler, P., Kudsk, S., Miyake, F., Olsen, J., Reinig, F., Sakamoto, M., Sookdeo, A. and Talamo, S. (2020) The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0-55 cal kBP). *Radiocarbon*, 62:725-757.
- Rioual, P., Andrieu-Ponel, V., de Beaulieu, J.L., Reille, M., Svobodova, H. and Battarbee, R.W. (2007) Diatom responses to limnological and climatic changes at Ribains Maar (French Massif Central) during the Eemian and Early Würm. *Quaternary Science Reviews*, 26:1557-1609.
- 西郷都市計画区域図 (2014) 隠岐の島町の都市計画について | 隠岐の島町 資料: <https://www.town.okinoshima.shimane.jp/www/sp/contents/1001000000170/index.html> (2024 年 10 月時点)
- Saros, J.E., Strock, K.E., McCue, J., Hogan, E. and Anderson, N.J. (2014) Response of *Cyclotella* species to nutrients and incubation depth in Arctic lakes. *Journal of Plankton Research*, 36:450-460.
- Sayer, C.D. (2001) Problems with the application of diatom-total phosphorus transfer functions: examples from a shallow English lake. *Freshwater Biology*, 46:743-757.
- Sayer, C.D., Davidson, T.A. and Jones, J.I. (2010) Seasonal dynamics of macrophytes and phytoplankton in shallow lakes: a eutrophication-driven pathway from plants to plankton? *Freshwater Biology*, 55:500-513.
- Schmidt, R., Kamenik, C., Lange-Bertalot, H. and Klee, R. (2004) *Fragilaria* and *Staurosira* (Bacillariophyceae) from sediment surfaces of 40 lakes in the Austrian Alps in relation to environmental variables, and their potential for palaeoclimatology. *Journal of Limnology*, 63:171-189.
- 瀬戸浩二・中山大介・田中秀典・山口啓子 (2000) 宍道湖におけるアオコの発生とその地球化学的特徴. *Laguna (汽水域研究)*, 7:61-69.
- Szczerba, A., Rzedkiewicz, M. and Tylmann, W. (2023) Modern diatom assemblages and their association with meteorological conditions in two lakes in northeastern Poland. *Ecological Indicators*, 147:110028.
- 田中正明 (2022) 日本淡水産動植物プランクトン図鑑 [第 2 版]. 名古屋大学出版会, 772p.
- Tibby, J., Penny, D., Leahy, P. and Peter Kershaw, A. (2012) Vegetation and water quality responses to Holocene climate variability in Lake Purrumbete, western Victoria. In: *Peopled Landscapes: Archaeological and Biogeographic Approaches to Landscapes*, (eds.) Haberle, S. and David, B. pp.359-374. ANU Press, Australia.

- Tingstad, A.H., Moser, K.A., MacDonald, G.M. and Munroe, J.S. (2011) A ~13,000-year paleolimnological record from the Uinta Mountains, Utah, inferred from diatoms and loss-on-ignition analysis. *Quaternary International*, 235:48-56.
- 辻彰洋・唐崎千春・神松幸弘・山本敏哉・村山恵子・野崎健太郎 (1999) 中池見湿地 (福井県敦賀市) における水質環境と生物群集. *陸水学雑誌*, 60:201-213.
- Tyler, J.J., Mills, K., Barr, C., Sniderman, J.M.K., Gell, P.A. and Karoly, D.J. (2015) Identifying coherent patterns of environmental change between multiple, multivariate records: an application to four 1000-year diatom records from Victoria, Australia. *Quaternary Science Reviews*, 119:94-105.
- van Dam, H., Mertens, A. and Sinkeldam, J. (1994) A coded checklist and ecological indicator values of freshwater diatoms from the Netherlands. *Netherlands Journal of Aquatic Ecology*, 28:117-133.
- Wada, E. (2009) Stable $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ isotope ratios in aquatic ecosystems. *Proceedings of the Japan Academy, Series B*, 85:98-107.
- 渡辺仁治 (2005) 淡水珪藻生態図鑑：群集解析に基づく汚濁指数 DAIPo, pH 耐性能. 内田老鶴圃, 東京, 300p.
- Whitmore, T.J., Riedinger-Whitmore, M.A., Reed, Z.E., Curtis, J.H., Yang, H., Evans, D.E., Cropper, N.R., Alvarado, K.S., Lauterman, F.M., Scott, A., Leonard, C.R. and Franklin, D.L. (2020) Paleolimnological Assessment of Six Lakes on the Kissimmee Chain, with Implications for Restoration of the Kissimmee–Okeechobee–Everglades system, Florida, USA. *Lake and Reservoir Management*, DOI: 10.1080/10402381.2020.1785064
- Wolfe, B.B., Edwards, T.W.D., Elgood, R.J. and Beuning, K.R.M. (2001) Carbon and oxygen isotope analysis of lake sediment cellulose: Methods and applications. In: *Tracking environmental changes using lake sediments*. Volume 2, (eds.) Last, W.M. and Smol, J.P. pp.373-400. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands.
- Yamada, Y., Ueda, T., Koitabashi, T. and Wada, E. (1998) Horizontal and vertical isotopic model of Lake Biwa ecosystem. *Japanese Journal of Limnology*, 59:409-427.
- 山崎秀夫・吉川周作・稲野伸哉 (2004) 隠岐男池堆積物に記録された重金属汚染の歴史トレンドの解析. *分析化学*, 53:1419-1425.
- Zeeb, B.A. and Smol, J.P. (2001) Chrysophyte scales and cysts. In: *Tracking environmental change using lake sediments*. Volume 3, (eds.) Smol, J.P., Birks, H.J.B. and Last, W.M. pp.203-223. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands.
- Zhu, M., Zhu, G., Nurminen, L., Wu, T., Deng, J. and Zhang, Y. (2015) The Influence of Macrophytes on Sediment Resuspension and the Effect of Associated Nutrients in a Shallow and Large Lake (Lake Taihu, China). *PLoS ONE* 10(6):e0127915. doi:10.1371/journal.pone.0127915