

# 木製遺物を包含する埋没環境の調査

## — 青谷上寺地遺跡の土壌と地下水 —

高妻 洋成<sup>1)</sup>・脇谷 草一郎<sup>1)</sup>・肥塚 隆保<sup>1)</sup>・家塚 英詞<sup>2)</sup>

●キーワード：出土木材 (archaeological waterlogged wood), 埋没環境 (burial environment), 地下水 (underground water), 腐朽 (decay), 土壌 (soil), 酸化還元電位 (oxidation-reduction potential)

### 1. はじめに

遺跡から出土する木製遺物の劣化程度は、樹種や木取りなどの木材本来の特性により、あるいはそれらの木製遺物が埋没していた環境により大きく異なることが知られている。日本においては、木製遺物の圧倒的多数は低湿地などの水で満たされた埋没環境から発見される。このような水が大きく関与した埋没環境下において発見される木製遺物の状態は、その埋没環境の pH と酸化還元電位により大きく異なることが指摘されている (Florian, 1987; Retallack, 1998)。

堰材や木樋などのように、木製遺物そのものが遺構を構成しているような場合、これらの木製遺物を遺構から取り外すという行為が遺跡の破壊につながるという判断から、そのまま地中に埋め戻されることがある。また、広大な遺跡に対しては、遺跡保存の観点から発掘調査は必要最小限にとどめられることが多く、土中に存在していることが十分に推定される木製遺物の多くは発掘されことなく地中において保存が図られることになる。このように土中において遺物を保存することは「現地保存」と呼ばれている。近年、遺跡に埋没している遺物とその環境については、この現地保存という観点から新たな研究が必要となってきた。諸外国においては、現地保存と埋没環境について多くの研究があり、現地保存に関する

対策も立てられつつあるが (Godfrey, 2009; Godfrey *et al.*, 2009; Gregory *et al.*, 2009; Peacock *et al.*, 2009; Richards *et al.*, 2009), 日本においては長期間にわたる詳細な埋没環境の調査がなされているのは平城宮跡のみである (鶴巻, 1995)。

本報では、木製遺物の現地保存という観点から、埋没環境として土壌と地下水に焦点を絞って調査した結果をまとめた。特に、季節変動が埋没環境にどのような変化を与えているのか等について知見を得たので報告する。

### 2. 調査および測定法

#### 2.1 調査対象遺跡の概要

調査をおこなった遺跡は鳥取県鳥取市青谷町青谷、吉川に所在する青谷上寺地遺跡である。この遺跡は弥生時代を中心とする集落遺跡であり、「地下の弥生博物館」と称されるほど多種多様な遺物出土する。鉄製品や青銅製品といった金属遺物の遺存状態が極めて良好であるばかりではなく、弥生人の脳、人骨、木製品、骨角器、繊維、動植物の遺存体など、有機質遺物の遺存状態も良好であることが当遺跡の土壌環境の特筆すべき点である。

遺跡の立地する青谷平野は沖積平野であり、縄文海進による内湾性の海成層とその後の海退による汽水成から陸水成に至るデルタ堆積物より成り立っている (図1)。すなわち海進時に青谷平野に存在した内湾が、河川等か

<sup>1)</sup> 独立行政法人 国立文化財機構 奈良文化財研究所 〒630-8577 奈良市二条町 2-9-1

<sup>2)</sup> 鳥取県埋蔵文化財センター 〒680-0151 鳥取県鳥取市国府町 1260 番地

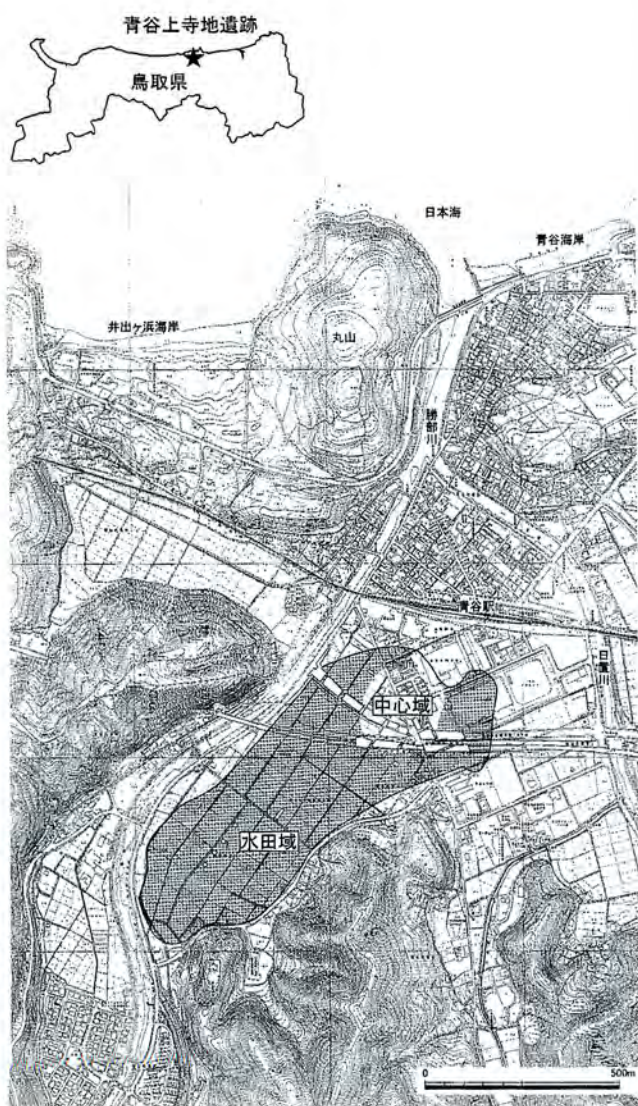


図1 青谷上寺地遺跡の立地

Fig. 1 Map of Aoya-Kamijichi archaeological site, Tottori prefecture

ら供給される砂礫によって埋積されることで沿岸線が前進し、陸域環境に変化したものであり、その堆積層は前面に分布する砂州によって外海と隔てられた閉鎖的水域（潟湖）の中で形成された。沿岸線の前進にともない水域の景観は、海水がほとんど流入してこない沼沢地あるいは湿地のような陸水域へと変化していったと想定される。その上層に泥炭や泥炭質堆積物が堆積してさらに陸化が進み、人間活動の場が形成されていった。

第8次および第9次調査でおこなったボーリング調査の地点と調査結果をそれぞれ図2および図3に示す（鳥取県埋蔵文化財センター，2009）。ボーリング・コアで検討した岩相層序は青谷層と定義されている（鳥取県埋蔵文化財センター 2009）。この青谷層は、大きく上部層、

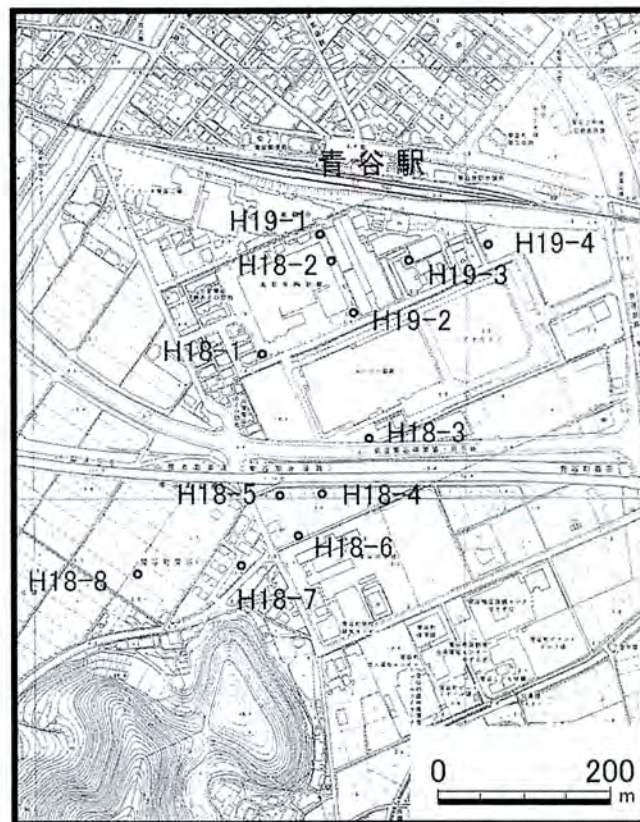


図2 ボーリング調査地点

Fig. 2 Boring places at Aoya-Kamijichi archaeological site

中部層、下部層の3層に分けられ、さらに上部層および中部層は、それぞれ3層に細分することができる。ボーリング調査の結果、堆積環境は①浅海（内湾～汽水）、②デルタ、③湿地・河川、④陸上侵食域へと時間の経過にともなって変化したことが推定される。①が下部層、②が中部層、③および④が上部層に相当する。

## 2.2 地下水の調査

地下水の調査は遺跡内4箇所7地点に観測孔を設定しておこなった（図4）。各観測孔の特徴を表1に示す。pHと酸化還元電位（ORP）は現地で測定した。溶存酸素（DO）の測定は鳥取県埋蔵文化財センターで、溶存イオンの定量分析は奈良文化財研究所においておこなった。

pHはガラス電極法で、ORPは白金電極を指示電極に、塩化銀電極を照合電極として測定した。なお、得られたORP値に226 mVを加えることにより、水溶液中における電極電位の基準である標準水素電極を照合電極とした値に換算した。

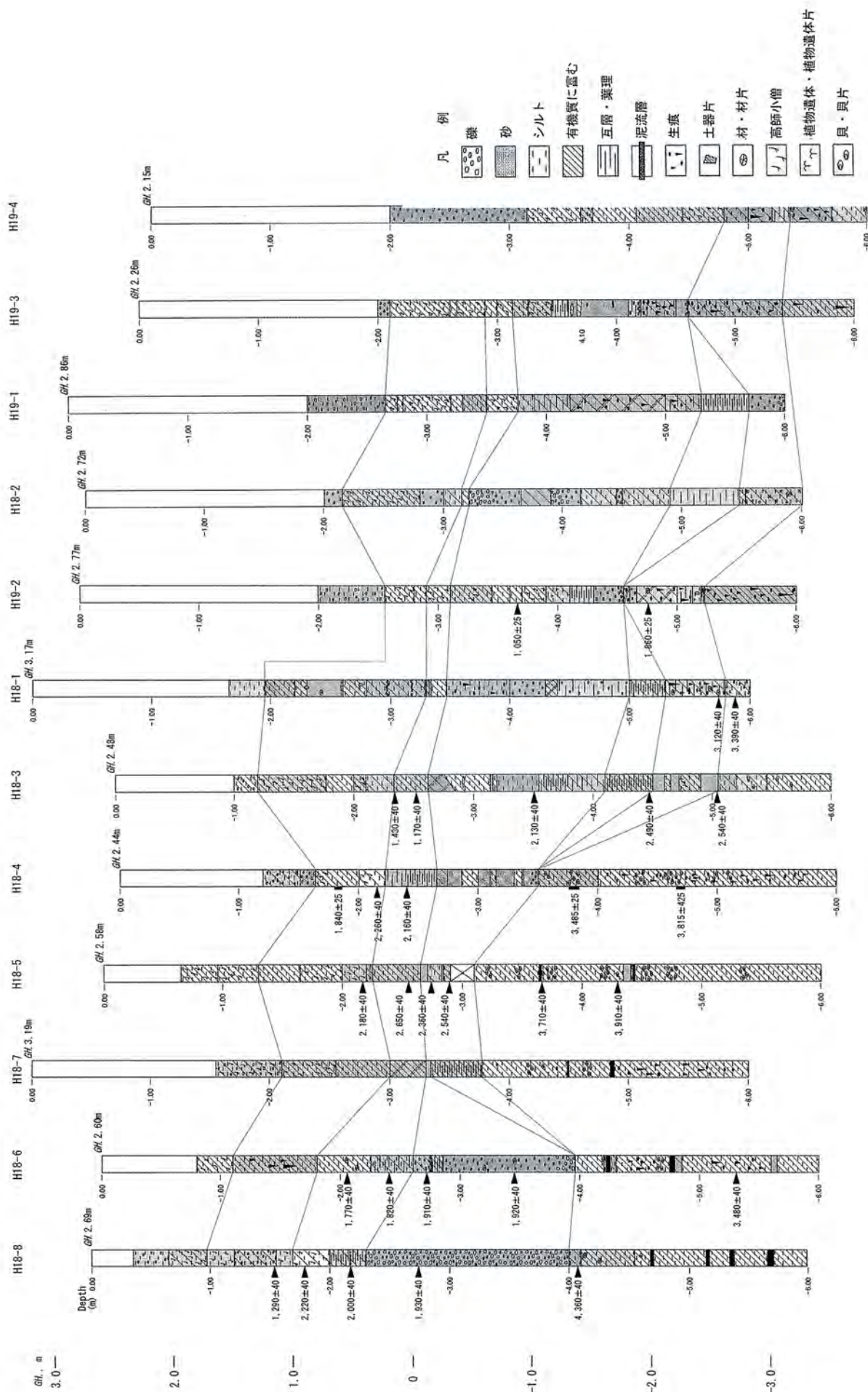


図3 青谷上寺地遺跡のボーリング柱状図  
Fig. 3 Columnar sections of Aoya-Kamijichi archaeological site

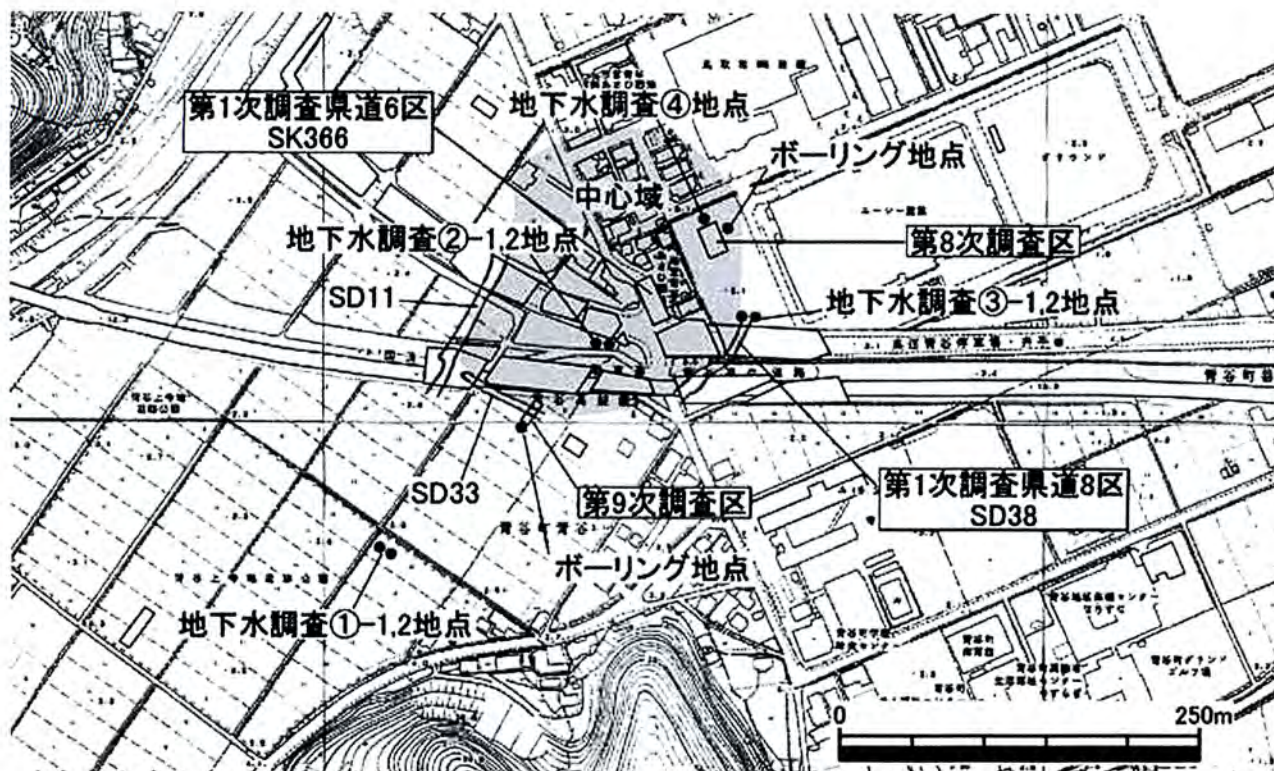


図4 地下水観測孔の位置

Fig.4 Places of wells for observation of underground water

表1 青谷上寺地遺跡における地下水観測孔の概要

Table 1 Summary of observation wells of underground water in Aoya-Kamijichi archaeological site

| 観測孔 | 標高<br>(m) | 深度<br>(m) | 特                                                                   | 徴 |
|-----|-----------|-----------|---------------------------------------------------------------------|---|
| ①-1 | 2.65      | 2.0       | 勝部川からの地下水の想定供給ルート上に観測孔を設定。粘性土層中の自由地下水を観測。                           |   |
| ①-2 | 2.65      | 1.5       | 勝部川からの地下水の想定供給ルート上に観測孔を設定。粘性土層中の自由地下水を観測。                           |   |
| ②-1 | 2.45      | 2.2       | 中心城の南端付近に設定。弥生時代後期推定地表面の下に達する。砂層中の被圧地下水を観測。spl.1                    |   |
| ②-2 | 2.45      | 2.0       | 中心城の南端付近に設定。弥生時代後期推定地表面付近。砂層中の被圧地下水を観測。                             |   |
| ③-1 | 2.90      | 4.5       | 中心城の東辺を区画する溝 SD38 の推定ライン上に設定。溝 SD38 の直下の包含層に相当。砂層下の砂混じり粘質土を観測。spl.2 |   |
| ③-2 | 2.90      | 4.0       | 中心城の東辺を区画する溝 SD38 の推定ライン上に設定。溝 SD38 の砂層の被圧地下水を観測。                   |   |
| ④   | 2.85      | 5.0       | 中心城に設定。砂質土を観測。spl.3                                                 |   |

溶存酸素 (DO) を測定するための試料水は、容器から溢れるまで静かに注ぎ入れて密閉し、酸素の溶け込みを防いだ。これらの密閉した試料水は実験室へ持ち帰り、

ウィンクラー-アジ化ナトリウム変法 (日本分析化学会北海道支部, 1994) により DO を測定した。これらの測定は 2004 年 8 月から 2008 年 12 月までほぼ毎月 1 回実

施した。

2007年9月から2008年11月までは上記のpH, ORPおよびDOの測定に加え、地下水中の溶存イオンをイオンクロマトグラフィにより定量分析した。地下水の採取にはテフロン製の採水容器を用いた。試料水は表1の②-1地点、③-1地点、および観測孔④において採取した。これらの試料水を以下それぞれspl.1, spl.2およびspl.3と表記することにする。採取した試料水はフッ素加工高密度ポリエチレン製のボトルに移し替え、冷蔵保管して輸送した。実験室に搬入後、速やかに孔径0.45  $\mu\text{m}$ のメンブレンフィルターでろ過をおこなった。得られたろ液はメスフラスコをもちいて超純水（電気抵抗率15M $\Omega \cdot \text{cm}$ 以上）により20倍に希釈して測定に供した。陽イオンの測定に供する試料水には10 mM硝酸酸性となるように超微量分析用の硝酸を添加して、鉄水酸化物の沈殿が生じないよう安定化をおこなった。硫酸イオン測定用試料は希釈後、速やかに測定を実施した。測定をおこなったイオンはナトリウムイオン ( $\text{Na}^+$ )、カリウムイオン ( $\text{K}^+$ )、マグネシウムイオン ( $\text{Mg}^{2+}$ )、カルシウムイオン ( $\text{Ca}^{2+}$ ) および硫酸イオン ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) である。分析にはイオンクロマトグラフ（日本ダイオネクス社製、ICS-1000）を用いた。

## 2.3 土壌調査

### 2.3.1 調査地点

土壌調査に係るボーリング試験、コアサンプルの採取および分析は専門業者に委託しておこなった<sup>(4)</sup>。土壌調査をおこなった地点（図4参照）および分析対象層位の概要は以下の通りである。なお、採取した木材試料はスギに限定した。これらの木材試料は用途不明ないしは自然木とみなされたものである。

**第8次調査区** 遺跡中心域の東端に位置する。弥生時代前期より湿地帯であったこの地では弥生時代後期後葉の段階で水田耕作が営まれるが、その後沼沢地と化す。水が引き、乾湿を繰り返す陸域へと環境が変わり、掘立柱建物をはじめとする遺構群が築かれる。風成砂の影響を強く被り、複数回にわたって海浜から運ばれてきた砂が厚く堆積する。木材及び土壌試料の採取層位は下位より、水田耕作以前の湿地環境の10-1層、水田耕作以降の

沼沢地環境の8層、中心域内の風成砂堆積の7層細砂②層、③層であり、堆積時期はいずれも弥生時代中期後葉である。8層からは木製品のほか、かご類や種実、獣骨などの有機質遺物が良好な状態で多量に出土している。  
**第9次調査区** 遺跡中心域の南端に位置する。調査区のほぼ中央付近で、中心域の南辺を区画する溝SD33を検出しており、この区画溝を境に南側（水田域）に向けて緩傾斜する微地形の状況を確認している。この地は弥生時代中期後葉までは湿地の環境であるが、後期から北側の陸域化が進む。南側は植物珪酸体分析の結果から水田域と推定される。

木材及び土壌試料の採取は調査区南側を対象とし、層位は湿地環境のII層（弥生時代中期後葉）、水田層のI-1層（古墳時代前期初頭～後期）である。遺物の種別を問わずI-1層からの出土遺物は少ないが、最下部から栓や田舟などの木器が地形の傾斜に沿って、まとまった状態で出土した。

### 2.3.2 土壌採取法および分析用試料の調製法

土壌試料のサンプリング方法は、基本的に圧入もしくは標準貫入試験用のドライブハンマーおよびノッキングヘッドなどを用いた打込み方法であり、中間部で大きな礫、木片等が存在する場合はコアチューブで切断し採取する方法とした。

採取長さは50～100 cmを基準とし、木片などがある場合は適宜採取可能な位置まで採取し過度な圧縮はかけないようにした。

採取したコア試料の保存は以下に示す手順で実施した。

- ①現場で採取したコアサンプルは現場で速やかにラッピングした。
- ②持ち帰ったコアサンプルはピアノ線を用いて鉛直方向に半裁した。
- ③半裁したコアサンプルの一方（コアA）はスケールを入れたデジタル写真撮影を行い、土色、土質、層序について解析を行った。
- ④層序解析後のコアサンプルは空気との接触を最小限にとどめるため、速やかに真空パックをおこなった。
- ⑤半裁したもう一方のコアサンプル（コアB）は、半裁後に速やかに真空パックをおこなった。

⑥コア B は層序解析後、木製遺物が出土する層位において土壌分析用試料を採取した。

得られた土壌サンプルは、含水比、pH、DO、ORP、硫化物、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、二価鉄 ( $\text{Fe}^{2+}$ )、全鉄、全有機炭素、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  および  $\text{Mg}^{2+}$  の分析に供した。

DO、ORP および pH の測定ならびに  $\text{SO}_4^{2-}$ 、鉄 (II) および全有機炭素の定量に供した試料は以下に示す手順で調製した。なお、作業は試料の酸化をなるべく防ぐことを目的に低酸素グローブボックス内で実施した。

①土壌 20 g に対して純水を 200 g 加えて混合し、振とう攪拌をおこなった。

②静置して固形物を沈降させた後、上澄み液を DO 測定及び ORP 測定に供した。

③上澄み液の残量を 0.45  $\mu\text{m}$  のメンブレンフィルターでろ過し、ろ液を、pH、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Fe}^{2+}$  及び全有機炭素測定に供した。

$\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  および  $\text{Mg}^{2+}$  の定量に供した試料は、別途コアサンプルから採取した試料を上記と同様の方法で調製した。

含水比、硫化物および全鉄の定量には、土壌をそのまま、又は乾燥させたものを供した。

### 2.3.3 土壌測定法

含水比は採取した土壌を 110  $^{\circ}\text{C}$  で乾燥し、その減量と乾燥重量から算出した。pH は調製した溶液を対象にガラス電極 pH 計で測定した。DO は調製した溶液を対象に DO 計で測定した。ORP は調製した溶液を対象に白金電極を指示電極とし、銀塩化銀電極を照合電極として測定した。なお、得られた ORP 値を前述のように、水溶液中における電極電位の基準である標準水素電極を照合電極とした値に換算した。

硫化物は蒸留分離ーメチレンブルー吸光光度法を用いて定量した。 $\text{SO}_4^{2-}$  は調製した溶液を対象にイオンクロマトグラフィで分析した。 $\text{Fe}^{2+}$  は調製した溶液を対象に吸光光度法によって定量をおこなった。全鉄は混酸で土壌から鉄イオンを溶解抽出し原子吸光法で定量した。全有機炭素は調製した溶液を対象に燃焼赤外線吸収法で定量した。 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  および  $\text{Mg}^{2+}$  はイオンクロマトグラフィにより測定した。

表 2 硫酸還元菌用培地

Table 2 Culture medium of sulfate-reducing bacteria

|             |                |     |    |
|-------------|----------------|-----|----|
| 溶<br>液<br>1 | 蒸留水            | 980 | ml |
|             | リン酸水素カリウム      | 0.5 | g  |
|             | 塩化アンモニウム       | 1.0 | g  |
|             | 硫酸ナトリウム        | 1.0 | g  |
|             | 塩化カルシウム 2 水和物  | 0.1 | g  |
|             | 硫酸マグネシウム 7 水和物 | 2.0 | g  |
|             | 乳酸ナトリウム (70%)  | 3.5 | g  |
|             | 酵母エキス          | 1.0 | g  |
| 溶<br>液<br>2 | 蒸留水            | 10  | ml |
|             | 硫酸鉄 7 水和物      | 0.5 | g  |
| 溶<br>液<br>3 | 蒸留水            | 10  | ml |
|             | アスコルビン酸        | 0.1 | g  |
|             | チオグリコール酸ナトリウム  | 0.1 | g  |

### 2.4 硫酸還元菌の確認

硫酸還元菌が存在すると、同菌が生成する硫化水素と培地中の鉄分とが反応して硫化鉄が生成し、培地が黒色を呈する。したがって一定期間の培養の後、培地が黒色を呈するか否かで硫酸還元菌の存在を確認することが可能となる (森, 1988)。

低酸素グローブボックス内で嫌気状態に維持した土壌試料約 5 g を滅菌水 20 ml の入ったバイアル瓶に無菌的に採取し、嫌気状態が維持できるように密栓をおこなった。このバイアル瓶に超音波を約 10 分間程度かけ、試料を十分分散させた後、これを土壌試料懸濁液とした。

硫酸還元菌用培地は表 2 に示す組成の溶液 1 ~ 3 を混合し、50 ml ずつバイアル瓶に分注後、窒素ガス 500 ml/min で各バイアル瓶を数分間パージし、ゴム栓で密栓後、オートクレーブ (121  $^{\circ}\text{C}$ , 10 min) で滅菌をおこなった。このバイアル瓶に上記の土壌試料懸濁液 1 ml を接種し、30  $^{\circ}\text{C}$  で 14 日間静置培養をおこなった。また、培地に土壌試料懸濁液を接種した直後に、オートクレーブにより滅菌処置をおこなったものを 14 日間培養後の試料との比較試料とした。

## 2.5 出土木材の最大含水率の推定

最大含水率の推定値を求めた試料は、表3に示した層位から得られたもので、樹種はスギであり、形状などからその用途を特定できない、いわゆる用途不明木製品である。これらの出土木材を繊維方向が約1 cm となるように切り出し、測定に用いた。なお、半径方向および接線方向の寸法は2～5 cm 程度で一定ではなかった

木材が水浸状態で腐朽していくという現象は、細胞壁を構成している主要な成分、すなわちセルロース、ヘミセルロースおよびリグニンが腐朽菌によって分解されるということである。しかしながら、遺跡から発見される木製遺物は、著しく腐朽しているものでもオリジナルの大きさを保っているものと思われる。したがって、細胞壁を構成する成分が腐朽菌により分解され消失することにより、細胞壁中に新たに空隙が生じ、その空隙に水が浸入していくと考えることができる。したがって、腐朽が進行しているものほど、細胞壁の実質重量が減少し、空隙が増加しており、結果として最大含水率が増加することになる。最大含水率は出土木材の劣化の尺度としてよく用いられている。

出土木材の最大含水率は、飽水状態の重量と絶乾状態の重量から求めることができる。しかしながら、出土木材を一旦乾燥してしまうと、なんらかの化学的変化により成分組成の分析に影響を及ぼす可能性がある。そのため、細胞壁の密度を1.5 g/cm<sup>3</sup>と仮定し、全ての空隙が水で満たされているという仮定の下で、浮力法により最大含水率を推定した。測定の手順は以下の通りであった。

- ①出土木材試料をバンドソーを用いて、繊維方向がほぼ1 cm となるように切り下ろした。
- ②200 ml 容のプラスチックボトルに蒸留水を入れ、そこに切り下ろした試片を投入した。
- ③真空デシケータ中で、アスピレータを用いて時々減圧にし、試片の脱気をおこなった。
- ④減圧にした際に試片から気泡が出なくなった時点脱気の終点とした。
- ⑤飽水状態になった試片の飽水重量 ( $m_w$ ) と水中重量 ( $m_w'$ ) ならびに水温を測定した。
- ⑥最大含水率の推定値 ( $u_{\max}$ ) は、次式により求めた。

$$u_{\max}(\%) = \left( \frac{R - \delta}{R} \times \frac{m_w}{m_w'} \right) \times 100$$

ここで、 $R$  は細胞壁の密度、 $\delta$  は測定時水温での水の密度である。

## 3. 調査結果

### 3.1 地下水の水質

2004年11月から2008年12月までに実施した地下水の水質調査の結果を図5に示す。いずれの試料のORP値も毎年概ね10月頃に上昇し、12月から3月にかけて最高値を示し、その後3月頃から下降して6月から10月にかけて最低値を示すという季節変動が認められた。DOについてもORPとほぼ同様の傾向が認められた。一般に、地中温度が高い季節には生物活動が活発となり、酸素が消費されるため、結果としてDOの減少、ORPの低下が生じる。一方、地中温度が低い季節には生物活動が低下するため、大気からの酸素の供給が消費量を上

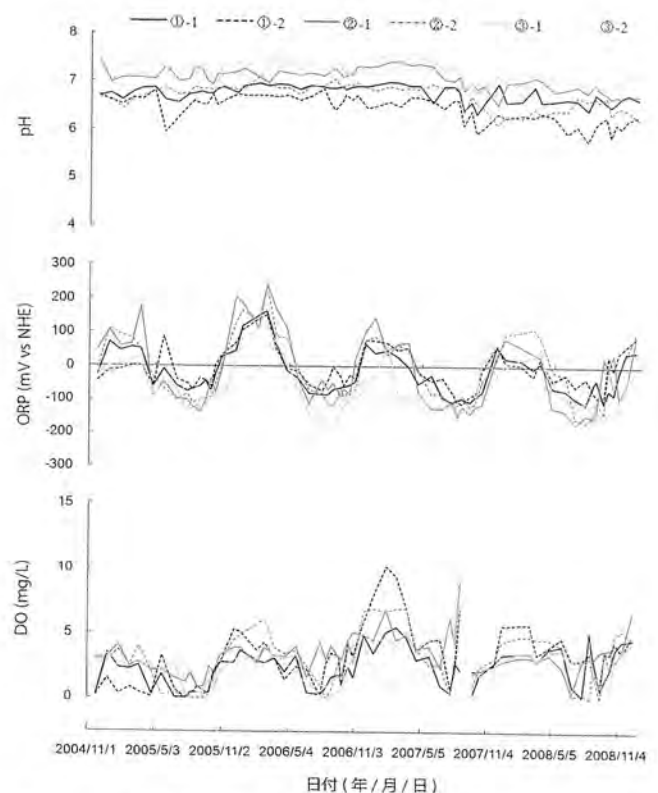


図5 2004年11月から2008年12月までの地下水のpH、酸化還元電位(ORP)および溶存酸素(DO)の変動(観測孔の概要については表1を参照)

Fig.5 Changes of pH, oxidation-reduction potential (ORP) and dissolved oxygen (DO) of underground water from November of 2004 to December of 2008. See Table 1 for information of each observation well.

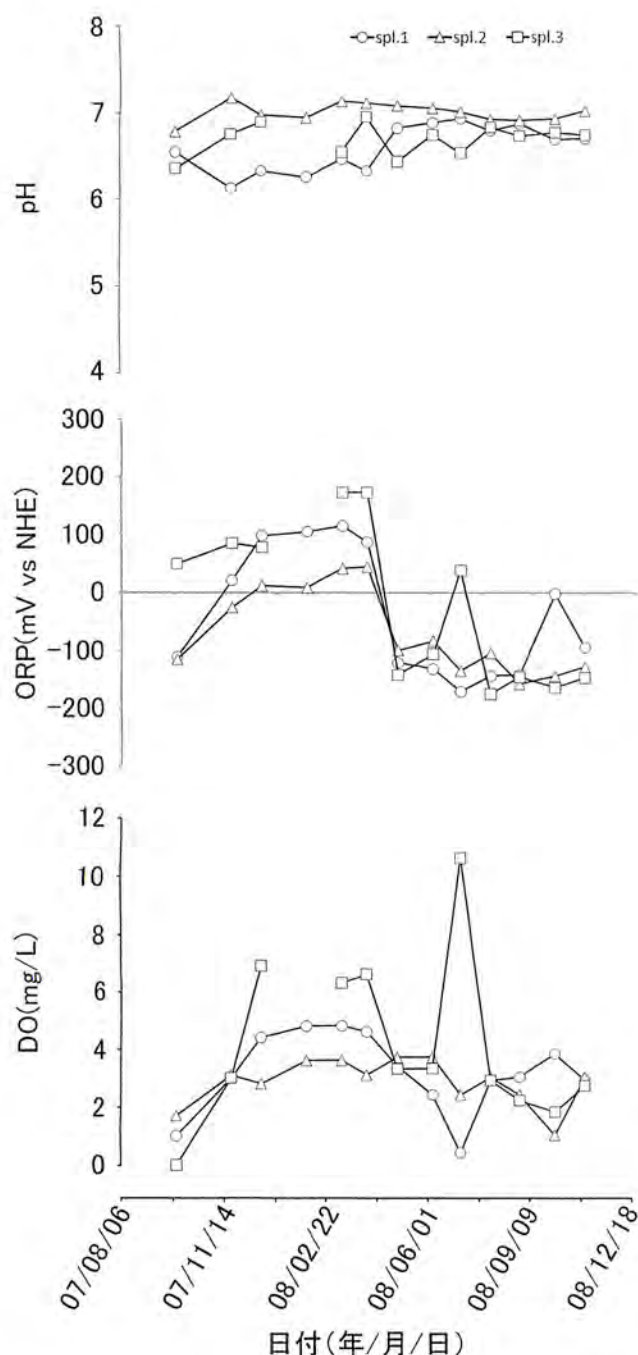


図6 2007年9月から2008年までの溶存イオンを測定した地下水のpH、酸化還元電位(ORP)および溶存酸素(DO)の変動

spl.1: 観測孔②-1の試料水, spl.2: 観測孔③-1の試料水, spl.3: 観測孔④-1の試料水(観測孔の概要については表1を参照)

Fig.6 Changes of pH, oxidation-reduction potential (ORP) and dissolved oxygen (DO) of underground water that dissolved ions concentrations were measured from September of 2007 to December of 2008

spl.1: Sample water from observation well ②-1, spl.2: from ③-1, spl.3: from ④-1. See Table 1 for information of each observation well.

回るため、DOとORPが増加する。

pHは、調査地点によってわずかに異なるものの、概

ね中性付近で変動していることが認められた。またこれらのpHの変動には明確な季節変動は認められなかった。

さらに2007年9月から2008年12月までの間に溶存イオンの定量分析をおこなった試料水のpH、ORPおよびDOの変動を図6に、溶存イオンの定量分析結果を図7に示す。陽イオンの溶存量の絶対値は、元素によって大きく異なるものの、いずれにおいても季節変動が認められた。すなわち2007年11月から2008年4月頃までは溶存量が減少する傾向を示し、その2008年5月頃から溶存量は増加して同年11月頃に最大値を示す傾向が認められた。特にこの傾向はspl.1およびspl.3において顕著に認められたが、spl.2ではその変化量が小さく、年間を通して溶存量が比較的大きな値を示した。またspl.3では、spl.1およびspl.2と比較していずれの元素においても溶存量が小さな値を示した。 $\text{SO}_4^{2-}$ は、陽イオンとは異なり、冬期において溶存量が増大し、夏期に溶存量が減少するという季節変動を示した。また陽イオン同様にspl.3の $\text{SO}_4^{2-}$ 溶存量は他の2つの試料と比べて小さな値を示した。

### 3.2 土壌の性質

#### 3.2.1 土壌の含水比、pH、ORPおよびDO

表3に土壌の含水比、pH、ORPおよびDOの測定結果を示す。第8次調査で得られた土壌試料の含水比は細砂層である7層(細砂①~②)、7層(細砂③)で32.6~45.1%と低かった。一方、シルトからなる第8次調査で得られた8層、9-2層および10-1層では95.5~129%、第9次調査で得られた土壌試料の含水比は82.2~88.1%とやや高い結果となった。これは、シルト、粘土は間隙が大きく、保水性が高いためである。

一般的に日本の土壌は酸性である。強酸性土壌の目安としては $\text{pH} < 4.0$ となるが、今回の土壌のpHは4.1~6.2といずれの土壌も弱酸性条件であった。ただし、第9次調査のI-1層およびI-1層下部がそれぞれ6.0および6.2であるのに対し、II層が4.1と極端に低くなっていた。

鉄のpH-電位図(図8)より、ORPは141~532 mV(vs NHE)で、鉄が $\text{Fe}_2\text{O}_3$ (Fe(III))として存在している酸化領域にあることがわかる。第8次調査と第9次

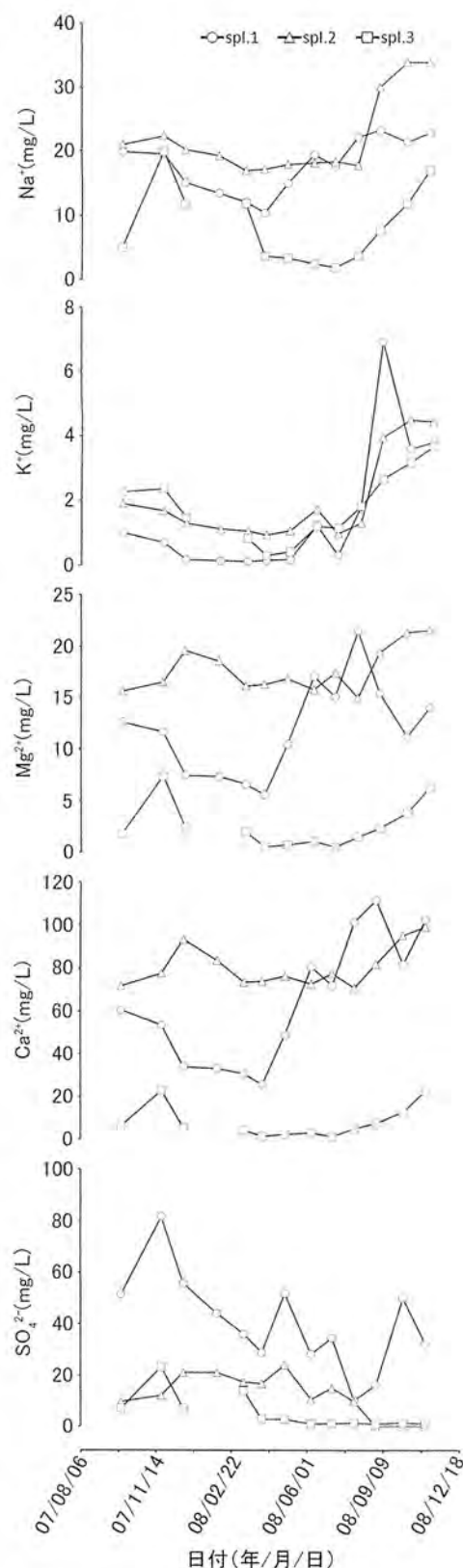


図7 2007年9月から2008年までの溶存イオンの変動  
spl.1: 観測孔②-1の試料水, spl.2: 観測孔③-1の試料水, spl.3: 観測孔④-1の試料水 (観測孔の概要については表1を参照)

Fig.7 Changes of dissolved ions concentrations in underground water from September of 2007 to December of 2008

spl.1: Sample water from observation well ②-1, spl.2: from ③-1, spl.3: from ④-1. See Table 1 for information of each observation well.

表3 土壌の性質と出土木材の最大含水率

Table 3 Characteristics of soil and maximum moisture content of archaeological water logged woods of Aoya-Kamijichi archaeological site

| 試料 No.         | 土質  | 含水比<br>% | pH  | DO<br>mg/L | ORP<br>mV | S <sup>2-</sup><br>mg/kg-dry | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup><br>mg/L | Fe <sup>2+</sup><br>mg/L | 全鉄<br>g/kg-dry | OC <sup>1)</sup><br>mg/L | Na <sup>+</sup><br>mg/L | K <sup>+</sup><br>mg/L | Ca <sup>2+</sup><br>mg/L | Mg <sup>2+</sup><br>mg/L | SRB <sup>2)</sup><br>% | MMC <sup>3)</sup><br>% |
|----------------|-----|----------|-----|------------|-----------|------------------------------|---------------------------------------|--------------------------|----------------|--------------------------|-------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------|------------------------|
| 第8次調査7層(細砂①~②) | 細砂  | 32.6     | 6.2 | <0.5       | 442       | <0.5                         | 25                                    | <1                       | 16.6           | 1.4                      | 4.0                     | 1.6                    | 44                       | 20                       | +                      | 705±90                 |
| 第8次調査7層(細砂③)   | 細砂  | 45.1     | 4.7 | <0.5       | 532       | <0.5                         | 180                                   | 2                        | 16.8           | 0.7                      | 2.9                     | <0.1                   | 70                       | 16                       | +                      | 571±152                |
| 第8次調査8層        | シルト | 129      | 5.5 | <0.5       | 463       | 20.5                         | 280                                   | 4                        | 39.0           | 1.8                      | 5.5                     | 0.2                    | 85                       | 28                       | +                      | 496±76                 |
| 第8次調査9-2層      | —   | 96.4     | 5.7 | <0.5       | 398       | 53.8                         | 90                                    | <1                       | 49.7           | 5.9                      | 6.3                     | 2.6                    | 66                       | 20                       | +                      | —                      |
| 第8次調査10-1層     | シルト | 95.5     | 5.2 | <0.5       | 457       | 16.4                         | 140                                   | 1                        | 40.1           | 3.2                      | 6.2                     | 2.0                    | 34                       | 12                       | +                      | 313±13                 |
| 第9次調査1-1層      | シルト | 88.1     | 6.0 | <0.5       | 164       | 1.55                         | 15                                    | <1                       | 49.0           | 2.5                      | 8.0                     | 2.1                    | 14                       | 6.2                      | +                      | 415±32                 |
| 第9次調査1-1層下部    | シルト | 88.1     | 6.2 | <0.5       | 141       | 16.6                         | 16                                    | <1                       | 39.6           | 3.1                      | 8.8                     | 2.4                    | 10                       | 4.9                      | -                      | 467±49                 |
| 第9次調査II層       | シルト | 82.2     | 4.1 | <0.5       | 278       | 3.22                         | 130                                   | 7                        | 38.0           | 0.9                      | 16.0                    | 5.2                    | 81                       | 27                       | -                      | 550±117                |

\*1: 全有機炭素(Organic Carbon), \*2: 硫酸還元菌の有無(Sulfate Reducing bacteria), \*3: 出土木材の最大含水率(Maximum Moisture Content)

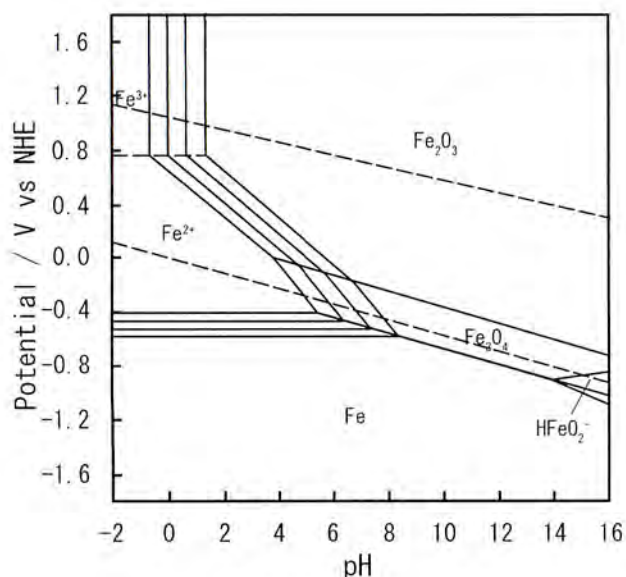


図8 25°Cにおける鉄のpH-電位図  
Fig. 8 pH-Eh diagram of iron at 25°C

調査を比較すると、第9次調査の土壌試料の酸化還元電位が若干低く、特に第9次調査のⅡ層が $\text{Fe}^{2+}$ の領域に近づいていることがわかる。

DO はいずれも検出下限値以下であった。

### 3.2.2 土壌成分

土壌成分の分析結果を表3に示す。 $\text{S}^{2-}$ は、第8次調査の土壌試料において、7層では計測されず、8、9、10層でわずかに見られる程度であった。第9次調査では、いずれの試料にも含有されるが、Ⅰ-1層下部で多くⅠ-1層およびⅡ層と比較して10~5倍の含有量となった。

$\text{SO}_4^{2-}$ 濃度は第8次調査の土壌試料では280 mg/l以下で、7層≒(9層および10層)<8層の順となった。第9次調査の土壌試料では $\text{SO}_4^{2-}$ はいずれの試料にも含有されるが、Ⅰ-1層およびⅠ-1層下部において15~16 mg/lであるのに対し、Ⅱ層で130 mg/lと特に多かった。

$\text{Fe}^{2+}$ はいずれの層でもごくわずかである。第9次調査Ⅱ層では7 mg/lとなるがごくわずかである。これらの結果は酸化還元電位の結果とも整合するものである。

全有機炭素量は、5.9 mg/l以下と非常に少なかった。

$\text{Na}^+$ および $\text{K}^+$ は第9次調査Ⅱ層でそれぞれ16 mg/lおよび5.2 mg/lと他の層よりも多く含まれてい

る。それに対し、 $\text{Ca}^{2+}$ と $\text{Mg}^{2+}$ は第9次調査Ⅰ-1層およびⅠ-1層下部で少なかった。

### 3.2.3 硫酸還元菌

第8次調査の土壌試料では、硫酸還元菌はいずれの層でも検出された。硫化物イオン-が少なく、有機炭素も少ないことから、硫酸還元菌は存在しても繁殖しやすい条件とはなっていないと考えられる。一方、第9次調査の場合、硫酸還元菌はⅠ-1層のみで検出されているが、硫化物イオンが少なく、有機炭素も少ないことから、硫酸還元菌は存在しても繁殖しやすい条件とはなっていないと考えられる。

## 4. 考察

### 4.1 地下水の水質の季節変動

地下水分析を実施した期間において、pHは殆ど季節変動せず一定値を示すにもかかわらず、溶存イオンの溶存量は季節変動を示した。このことから、陽イオン溶存量の季節変動の主な要因は、pH変化に伴う塩類の溶解によるものではないと考えることができる。同期間のORPは顕著な季節変動を示し、特にspl.1およびspl.3において顕著であった。これに対し、spl.2のORPは同様の変化を示すものの、比較的低い値で推移した。

地下水中に一般的に含まれ、かつORP値の変化に対して鋭敏に化学種を変化させる元素として鉄が挙げられる。鉄のpH-電位図(図8)より、青谷上寺地遺跡の地下水中の鉄は冬季には3価の水酸化物( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ )として沈殿あるいは懸濁して存在し、また夏季には2価の鉄イオン( $\text{Fe}^{2+}$ )として溶存状態で存在していると考えることができる。今回の調査では、採取された地下水の色調を観察し、試料水中の沈殿・懸濁の有無から溶存する鉄の季節変動を推定することにした。その結果、spl.1とspl.3においては3月頃に採取した試料水のORPが最大値を示し、試料水中には殆ど沈殿・懸濁は認められなかった。したがって、この季節では地下水は酸化的环境になっているため、鉄は土壌中で3価の水酸化物として沈殿し、地下水から除去されているものと思われる。一方、ORP値が最小値を示した8月頃に採取された試料水中には黄褐色ないし橙色の沈殿が認めら

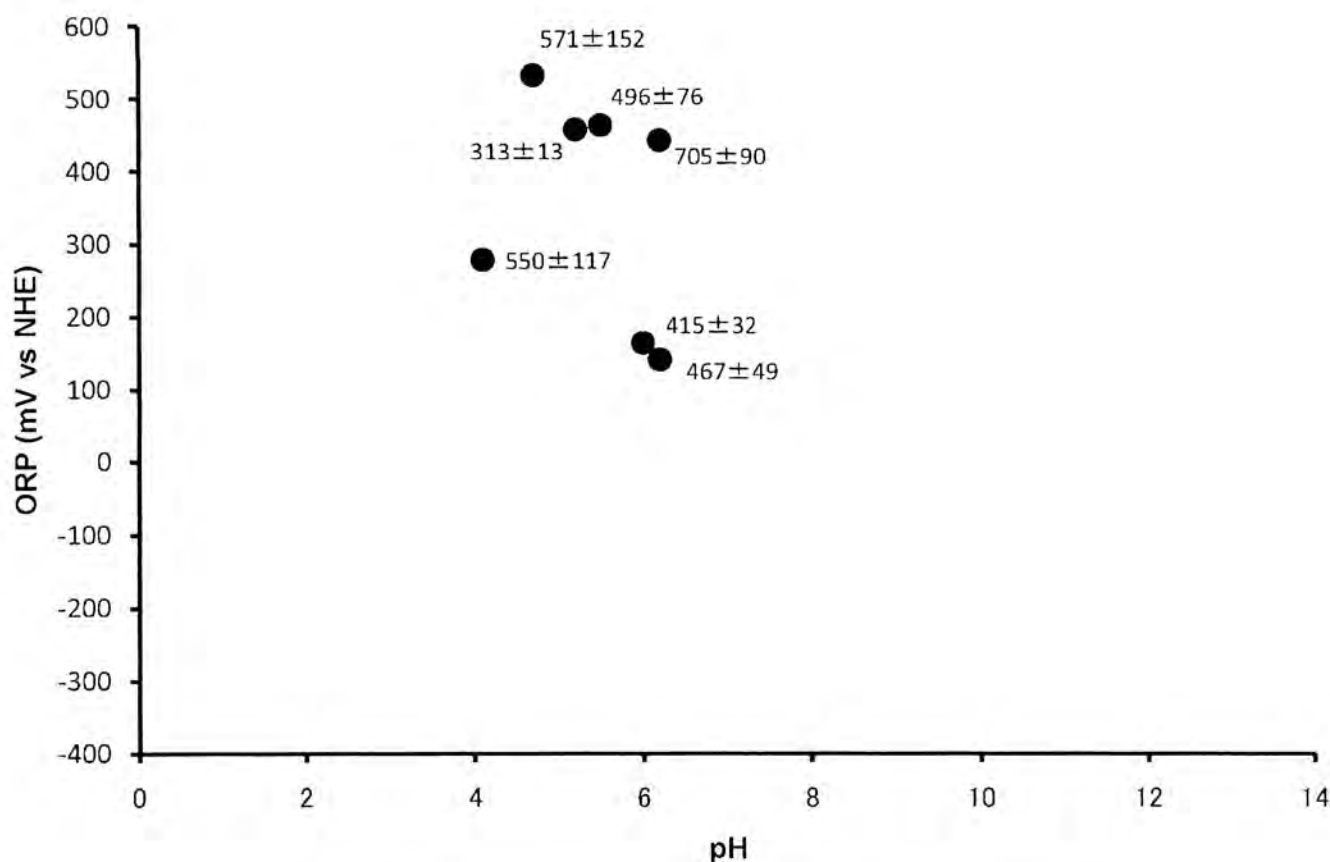


図9 木材が出土した土層の pH、酸化還元電位および出土木材の最大含水率

Fig.9 pH and oxidation-reduction potential of soil layers including archaeological waterlogged wood and maximum moisture content of these woods.

れた。この季節では地下水は還元的な環境となっているため、鉄は2価のイオンとして地下水中に溶存して存在していると思われる。観測孔内において酸化剤である酸素が大気から地下水へ供給され、さらに地下水中では多量に溶け込んでいる炭酸が大気中に気体として放出されて pH が上昇する。したがって溶存していた鉄は観測孔内において水酸化物として沈殿し、黄褐色ないし橙色の沈殿として観察されたものと推察される。

水中で生成する鉄水酸化物は一般的に非晶質であり大きな比表面積を有する（片岡ら、1975）。そのため様々な陽イオンを表面に吸着する能力を有する。したがって ORP が高い値を示す季節では上記の機構によって地下水中に沈殿、生成した鉄水酸化物表面に各陽イオンが吸着されるため、地下水中の濃度が低下したものと考えることができる。また ORP が低下する季節では生成した鉄水酸化物の一部は再び溶解するため、吸着されていた各陽イオンは再び地下水中へ溶存すると思われる。これらの結果、spl. 1 および spl. 3 では ORP の季節変

動に伴い、上記の季節変動を示したものと推察される。

これに対し、spl. 2 においては、常に還元的な環境であるため、鉄の水酸化物沈殿が生じにくい環境にあり、他の試料に比べて各イオン濃度の季節変動が小さくなったものであろう。

地下水中において、硫黄は還元されると硫化物イオンとして、また酸化されると硫酸イオンとして存在する。したがって ORP が高い値を示す季節では硫黄が酸化されて硫酸イオンが生成される、あるいは硫酸イオンが安定に存在するため、各試料中の硫酸イオン濃度は相対的に高い値を示したものと考えられる。また ORP が低い値を示す還元的な環境下において、無機的な過程および硫酸還元菌の作用により硫酸は硫化物に還元される。したがって ORP が低い値を示す季節では硫酸は還元されて硫化物として存在しており、各試料中の硫酸イオン濃度は相対的に低い値を示したものと考えることができる。

以上の結果から、spl. 1 と spl. 3 を採取した②-1 地点および④地点の付近では ORP は季節変動を示し、秋

から春にかけて酸化的に、春から秋にかけて還元的となることが示唆された。spl.2を採取した③-1地点では季節変動を示すものの、ORPは常に低い値の範囲で変動しており、常にやや還元的な環境であることが示唆された。

#### 4.2 青谷上寺地遺跡の土壌の特徴

以上の土壌分析の結果から、今回分析を実施した土壌は弱酸性土壌であり、酸化還元反応では酸化性領域になる。有機物の分解という観点では硫酸還元菌が活発に活動するのは嫌気状態で還元領域であるため、硫酸還元菌の活動は少ない土壌と考えられるが、第9次調査Ⅱ層については酸化還元電位が低く、 $\text{Fe}^{2+}$ が極少量確認されたことから、やや嫌気段階に近づいている可能性がある。

しかしながら、2ヵ年度にわたってボーリング調査をおこなったが、それぞれ9月と12月の作業であったこととあわせ、地下水の季節変動を考慮に入れるならば、この土壌分析の結果はむしろ年間の季節変動においてある時期の状況を反映したものである可能性がある。

#### 4.3 ORP、DOと出土木材の劣化状態の関連性

地中においては酸性で酸化的な環境下において木材の腐朽が進行する。したがって、より酸性でより酸化的な環境で出土する木材の最大含水率は大きくなる傾向を示すものと思われる。第9次調査区に注目すると、Ⅱ層から出土した木材の最大含水率が550%と最も高かった。Ⅰ-1層およびⅠ-1層下部については、それぞれpHが6.2および6.0であり、ORPが164および141であるのに対し、Ⅱ層はpHが4.1、ORPが278とより酸性で酸化性を示している。それぞれの層位で出土した木材の最大含水率は、前者が415%および467%であり、後者が550%となっており、後者のより酸性でかつ酸化的な環境で出土した木材の腐朽が大きい結果となった。また、硫酸還元菌は検出されていないが、Ⅱ層は硫化物イオンが少なく、硫酸イオンと二価鉄が多いという結果から、嫌気的な微生物分解である硫酸発酵が卓越している可能性を否定できない。

図9に木材が出土した層別にpHに対してORPをプロットし、各層において出土した木材の含水率を数値で

示す。冒頭で述べたように、一般には、pHが中性から弱アルカリ性でORPが低い土壌からは、木製遺物が良好な状態で出土し、逆に、pHが酸性でORPが高い土壌では、木製遺物の保存状態はよくないことが多い。しかしながら、今回、測定した木材の含水率をみると、必ずしも整合性のよい事象であるとは言い難い。酒井らは、木材の埋没過程について、埋没後の好気的な微生物の一時的な活動により酸化還元電位の低下が生じ、木材の周辺が還元状態になり、さらにその還元状態が継続することが木材の残存に必要であると述べている（酒井ら、1994）。しかしながら、埋没する以前にも木材が紫外線や褐色腐朽および白色腐朽を受けて劣化している程度は異なっており、発掘された時の土壌環境が還元状態であったとしても、その劣化程度に差が生じる可能性がある。また、測定したpHとORPはあくまでも現在のものであり、必ずしも木材が埋没して以降、一貫して同じ環境であったわけではない。このことは、地下水位の変動や前述したような地下水のORPの季節変動などからも十分に考えることができる。透水層を移動する地下水は酸素を含んでおり、地下水位よりも下層に木材があったとしても好気的な腐朽が起こることも十分に考えられる。このようなことから、図9のpHとORPに対して木材の劣化程度が整合性を示さなかったものと考えられる。

#### 4. まとめと今後の課題

青谷上寺地遺跡の第8次調査区および第9次調査区においてボーリング調査と得られたコアサンプルの土壌分析、および年間を通じた地下水調査を実施した。また、層序別にサンプリングした出土木材の最大含水率を測定し、埋蔵環境との関連性を検討した。

今回の地下水の分析結果からはORP、DOおよび溶存するイオン濃度に明瞭な季節変動が認められた。また、非常に近接した地点での採水にもかかわらず、地下水の状況は異なっており、場所により土壌中の酸化還元環境が異なる可能性が示唆された。土壌分析の結果は、埋蔵環境が弱酸性で酸化性領域にあるという結果を得た。

木材が砂層でしかも上位層にある場合、腐朽が進行しやすいこと、シルトなどが緻密で酸素の供給が迅速に行われず、含水比が高い層においては嫌気的な硫酸発酵が

- Richards, V. and Macloed, I. 2009 Reburial and analyses of archaeological remains – The RAAR project. Project status and cultural heritage management implications based on the first preliminary results, *Proceedings of the 10<sup>th</sup> ICOM Group on Wet Organic Archaeological Materials Conference*, Amsterdam 2007, Amersfoort, pp.169-196
- Gregory, D., Ringgard, R. and Dencker, J., 2009 The use of sediment transport to facilitate the in-situ stabilization of shipwreck sites: a preliminary report, *Proceedings of the 10<sup>th</sup> ICOM Group on Wet Organic Archaeological Materials Conference*, Amsterdam 2007, Amersfoort, pp.161-168
- Peacock, E. E. and Turner-Walker, G. 2009 Reburial and Analyses of Archaeological Remains (RAAR) : Investigation of the Effects of Burial on Non-wood Organic Materials. Preliminary Results, *Proceedings of the 10<sup>th</sup> ICOM Group on Wet Organic Archaeological Materials Conference*, Amsterdam 2007, Amersfoort, pp.197-213
- Retallack, G. J. 1998 Fossil soils and completeness of the rock and fossil record, *The Adequacy of the Fossil Record*, Wiley, pp.131-162
- Richards, V., Godfrey, I., Blanchette, R., Held, B., Gregory, D. and Reed, E. 2009 In-situ Monitoring and Stabilisation of the James Matthews Shipwreck Site, *Proceedings of the 10<sup>th</sup> ICOM Group on Wet Organic Archaeological Materials Conference*, Amsterdam 2007, Amersfoort, pp.113-159

(2009年12月11日受付, 2010年3月19日受理)

おこっている可能性があることが推察された。

地下水に関して得られる情報はその地点の地表から観測井戸底部までの平均的なものである。したがって遺跡全体にわたり面的に地下水の情報を得ることにより、木材の腐朽の季節変動を推定することができる可能性がある。一方、土壌分析はその層序などを検討することで、木材の腐朽が進行しやすい層位などを推定できるということが出来る。

地下水の季節変動は明らかとなったが、土壌の pH、ORP および DO などの季節変動についてはまだ明らかとなっていない。青谷上寺地遺跡においてボーリング調査と地下水調査用の観測井を設置し、面的に埋蔵環境の変化をモニタリングし、各地点でのボーリングコアについて層序解析と土壌分析を行うことでその地点での鉛直方向の土壌の特性を把握することも重要な課題である。また、これらのフィールドにおける調査とあわせ、様々な埋蔵環境に関する基礎研究も必要となってくる。これらの課題を解決していくことにより、青谷上寺地遺跡に埋蔵されている木材の腐朽状態をある程度推測すること

が可能となっていくものと期待される。

遺跡の保存という観点から、現在、必要以上の発掘調査は制限されており、必須、多くの木製遺物は埋蔵環境において現地保存されることになる。本研究では、埋蔵環境における木製遺物の現地保存について、ORP および DO の季節変動が生じることから、必ずしも地下水で満たされているだけで木製遺物の腐朽が抑制されているわけではないことを明らかにした。今後、さらに詳細な埋蔵環境の調査およびモニタリング法の研究をおこなうことにより、木製遺物の現地保存が可能かどうか、可能とすればどのような環境を作り出すことが必要なのかを検討していく必要がある。

#### 註

平成 18 年度および平成 19 年度に実施したボーリング調査は株式会社ウエスコに、土壌試料の分析は株式会社コベルコ科研による。また、平成 20 年度に実施した土壌試料の成分分析は応用地質株式会社による。

#### 引用文献

- 片岡一郎・香川恭子・北村哲朗 1975「合成酸化鉄およびオキシ水酸化鉄の表面積、結晶子粒度および酸に対する溶解度」『高知大学学術研究報告 第 24 巻 自然科学 第 8 号』pp.67-79
- 酒井温子・今津節生・仁王以智夫 1994「水浸出土木材の埋没環境」『考古学と自然科学』第 30 号 pp.1-10
- 鶴巻道二 1995「平城宮跡の地下水の水質調査」『保存科学研究集会 95』pp.10-13
- 鳥取県埋蔵文化財センター 2009「青谷上寺地遺跡における景観復元のための平成 18・19 年度ボーリングおよび関連調査」『鳥取県埋蔵文化財センター調査報告書 27 青谷上寺地遺跡 10 第 9 次調査報告書』pp.86-144
- 日本分析化学会北海道支部 1994「ウインクラー法—アジ化ナトリウム変法」『水の分析第 4 版』pp.221-226
- 森 忠洋 1988「硫酸還元菌」『環境微生物実験法』pp.120-130
- Florian, M-L. E. 1987 Dynamic process of diagenesis, Conservation of Marine Archaeological Objects, Butterworths, pp.9-11
- Godfrey, I. N. 2009 Reburial and Analyses of Archaeological Remains (RAAR). Investigation of the effects of burial on materials used at archaeological excavations to separate and mark objects, *Proceedings of the 10<sup>th</sup> ICOM Group on Wet Organic Archaeological Materials Conference*, Amsterdam 2007, Amersfoort, pp.215-251
- Godfrey, I. N., Bergstrand, T., Bjordal, C. G., Nilsson, T., Bohm, C., Gregory, D., Peacock, E. E.,

# Buried Environment of Archaeological Waterlogged Wood: Characteristics of Soil and Underground Water of Aoya-Kamijichi Archaeological Site

---

Yohsei KOHDZUMA<sup>1)</sup>, Soichiro WAKIYA<sup>1)</sup>, Takayasu KOEZUKA<sup>1)</sup>  
and Eiji IETSUKA<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Nara National Research Institute for cultural properties, 2-9-1, Nijyo-cho, Nara 630-8577

<sup>2)</sup> Tottori Prefectural Archaeological Center, 1260, Miyashita, Kokufu-cho, Tottori 680-0151

---

In order to investigate in-situ conservation of archaeological wooden objects, core samples of soil, underground water and wood samples obtained from several points of Aoya-Kamijichi archaeological site were analyzed. From the results of underground water analyses, oxidation-reduction potential (ORP), dissolved oxygen (DO) and concentration of ions varied periodically through a year, i.e. ORP, DO and concentration of cations were higher in winter and lower in summer. ORP of soils even from the neighbouring boring points were different. The soil layers that included wooden archaeological objects were subacidity and oxidative. The woods in the upper sand layer were decayed severely. In the silt layer of high water content which oxygen is not supplied sufficiently, it is considered that woods were deteriorated anaerobically. The characteristics of underground water, i.e. ORP, DO, concentration of dissolved ions and so on, are the average values from the surface to the bottom of well at the given place. If the information of underground water would be obtained all over the archaeological site, the periodical variation of wood decay could be presumed. On the other hand, a horizon in which wood deterioration are progressed easily could be found out from the analysis of stratigraphic succession.