

# 出土木製遺物の水中保管時における劣化を抑制する方策の検討

## — 酸素供給の抑制による還元環境の維持 —

松田 和貴<sup>1</sup>・脇谷 草一郎<sup>1</sup>・高妻 洋成<sup>1</sup>

●キーワード：出土木材 (archaeological waterlogged wood) , 一時保管 (temporary storage) , 溶存酸素 (dissolved oxygen) , 嫌気的環境 (anaerobic environment) , 腐朽 (decay)

### 1. はじめに

低湿地の遺跡から出土する木製遺物は、埋蔵環境下で木材細胞壁を構成する成分の多くを失って脆弱化し、内部に多量の水分を含んだ状態となっている。一般にこうした水浸状態の木製遺物は、なんらの保存処理も施されないまま乾燥されると、著しい収縮、変形を生じる。そのため、木製遺物は保存処理が実施されるまでのあいだ、水中で一時的に保管される。

一方、水中では木製遺物の劣化が緩慢ながらも進行することが経験的に知られている。木製遺物の保存処理においては、安定化のための各種薬剤の含浸工程をはじめとして相当の時間を要することから、一定期間に処理可能な遺物の数量には限界がある。そのため、木製遺物の水中保管は本来「一時的」な処置であるにもかかわらず、その期間が数カ月から数年程度にまで長期化する例が多い。出土後の木製遺物を長期間水中で保管することにより、遺物表面の加工痕や墨書など学術的に重要な情報が失われ、文化財としての価値が損なわれることが懸念される。

水中における木材の劣化は、おもに菌類や細菌類などの微生物が木材の構成成分を栄養源として分解することにより進行する (長島ら：1989)。こうした木材の腐朽を抑制するため、水中への各種防腐薬剤の添加が検討されてきた。欧米では1980年代までにこうした防腐剤の有効性に関する研究があり (Dawson *et al.* :

1982)、我が国においてもホルマリンやホウ酸・ホウ砂などが有効であるとされてきた (沢田ら：1978)。一方で、人体や環境への負荷が比較的小さいとされる薬剤の効果は限定的であり、比較的低濃度で高い有効性が認められるイソチアゾリン系防腐剤などを使用した場合でも、定期的な水の交換や薬剤の再添加が必要とされている (酒井ら：1993および1997)。

含水状態にある木製遺物では、酸素の存在が遺物の腐朽に大きな影響を及ぼす。たとえば、低湿地における木製遺物の埋蔵環境に関する調査では、酸化還元電位が高く、溶存酸素が存在すると考えられる層位において、木製遺物の劣化が比較的進行していることが示されている (酒井ら：1994)。さらに、長島らは池の中に木材試料を一定期間保持した結果、水深によって異なる分解様式をもつ微生物が木材細胞壁内に観察されたと報告している (長島ら：1988および1990)。これらの微生物はそれぞれ酸素の要求性が異なるが (Kim *et al.* : 2000)、一般に好気条件下では嫌気条件下に比して有機物の酸化におけるエネルギー獲得効率が顕著に高い (柳田：1980)。したがって、木製遺物の水中保管時における劣化を抑制するためには、好気性微生物のエネルギー代謝に必要な溶存酸素を低減させることが有効と考えられる。

実際に、新井らは出土遺物の保管環境における酸素を低減するため、ガス透過性が極めて低いBO-PVAフィルムに遺物を密封する実験をおこない、良好な結

<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

果が得られたと報告している(新井ら:1983)。その後、食品の真空パック技術を応用した簡便な手法が紹介された(岡田:1989)ことが契機となり、比較的小型の木製遺物の一時保管では、こうした不透過性フィルムに密封する方法が全国的に普及した。

一方、担当者数や施設規模および予算などの制約から、とくに大型あるいは大量の木製遺物の一時保管では、依然として水を張った大小の容器や屋内外の水槽が用いられてきているのも現実である。また、先に述べた防腐薬剤の使用量は、木製遺物の保管に用いる水量に比例する。そのため、大容積の水槽を必要とする場合には、環境負荷への懸念などから、防腐薬剤が導入されない例もある。

こうした比較的大容積の水槽においては、ポリエチレンなどのシートで水面を被覆することで、酸素供給を制限し、遺物の劣化の抑制が試みられている例もあるが、その効果について継続的な溶存酸素量の調査による検討はおこなわれてこなかった。そこで、本研究では溶存酸素の多寡が水中における木製遺物の劣化に及ぼす影響を定量的に検討することを目的に、屋外に設置された木製遺物保管水槽における環境調査を実施するとともに、木材試料をもちいた腐朽実験をおこなった。

本稿では、まず出土木製遺物の水中保管環境における溶存酸素の分布と挙動に関する調査結果をまとめ、また同時におこなった木材試料の腐朽実験から、溶存酸素の多寡が木材の劣化程度に及ぼす影響について考察をおこなった。次いで、溶存酸素の低減のために検討した具体策と、その評価のためにおこなった実地試験の結果を示すことにする<sup>1)</sup>。

## 2. 環境調査および木材腐朽実験

### 2.1 調査対象とした保管水槽の概要

調査は、奈良文化財研究所の出土木製遺物保管用の屋外水槽(図1)において実施した。水槽は幅10 m、奥行5 mで、水深は雨水の流入や水の蒸発により多少変動するが、概ね底部から100 cmの高さまで貯水され、おもに柱根や井戸枠など大型の木製遺物が保管されている。なお、貯水された水は一般の水道水で、

防腐のための薬剤は添加されていない。また、保管遺物への日射の直達を防ぐため、水面に黒色の農業用寒冷紗がかけられている。

本水槽では水温が比較的高い夏季に、緑色の藻類をはじめとした微生物が繁茂することから、毎年8月にこれらを取り除くための清掃作業がおこなわれている。作業時には水槽内の水がすべて排出され、ブラシやスポンジなどで遺物表面や水槽の内壁に付着した藻類や、微生物により形成される構造体であるバイオフィームが除去されたのち、元の水位まで水道水が貯められる。

## 2.2 調査および実験方法

### 2.2.1 溶存酸素の分布と挙動の調査

水槽底面から100 cmの高さを水深0 cmの基準として、水深30 cm、60 cmおよび100 cmの位置にデータロガー(Onset Computer社製U26-001)を水槽上部からナイロン製のロープで吊り下げて設置し、水温と溶存酸素量を30分間隔で測定した。測定は2013年7月3日に開始し、2014年8月5日までおこなった。ただし、2013年8月8日から同月10日にかけて、前述の水槽の清掃作業が実施されたため、清掃作業中は測定を中断し、水槽への貯水作業が完了した直後より再開した。

なお、酸素の水に対する溶解度は、水温、気圧、および塩分濃度等により影響され、例えば水温が低いほ



図1 調査を実施した出土木製遺物保管水槽  
Fig.1 Storage water tank for waterlogged

ど溶解度は増大し、逆であれば減少する（日本分析化学会北海道支部：2005）。そこで、データロガ付属のソフトウェア（HOBOWare Pro Version 3.4.1）により、飽和溶存酸素量に対する測定値の百分率を算出し、溶存酸素飽和度を評価した。ここで、海面気圧は標準大気圧である 101.3 kPa で一定、標高は奈良地方気象台と同一の 104 m、塩分濃度 0% とした。また、本水槽は屋外にあるため、気温の変化や雨水の流入により、溶存酸素量が増加することが推測される。これらの気象条件が及ぼす影響を把握するため、気象庁奈良地方気象台発表の気象統計情報（気象庁）と本水槽の水温や溶存酸素飽和度を比較検討した。

## 2.2.2 木材試料の腐朽実験

腐朽実験には、ケヤキ (*Zelkova serrata*) 現生材の心材部からバンドソーで 30 mm（接線方向）× 17 mm（放射方向）× 10 mm（繊維方向）の寸法に調製したものを 30 個供試した。なお、できる限り均質な試料とするため、試料はすべて同一の木材から得た。試料はそれぞれ恒温乾燥機をもちいて 105℃ にて 6 時間乾燥し、デシケータ内で放冷後、絶乾重量 ( $m_0$ ) を測定した。その後、試料を蒸留水に浸漬し、循環アスピレータをもちいて減圧脱気をおこなった。減圧および復圧を適宜おこない、試料から微細な泡が生じなくなった時点を飽水状態とし、飽水重量 ( $m_w$ ) を測定した。以上の測定結果から、各試料について次式により最大含水率 ( $u_{\max}$ ) を求めた。

$$u_{\max}(\%) = \frac{m_w - m_0}{m_0} \times 100$$

これらの試料を、平均の最大含水率が同程度となるよう、10 個ずつ 3 組に分け、飽水状態を維持してポリエチレン製の網袋に梱包した。各網袋を先述のデータロガと同様に水槽内の水深 30 cm、60 cm および 100 cm の位置に設置した。設置期間は清掃作業後の 2013 年 8 月 10 日～2014 年 8 月 5 日であった。

各試料は回収後、表面に付着した藻やバイオフィルムを除去したのち、飽水重量 ( $m_w'$ ) を測定し、設置前と同様に絶乾重量 ( $m_0'$ ) を測定し、最大含水

率 ( $u_{\max}'$ ) を求めた。さらに、設置前後の絶乾重量から、次式により各水深における試料の絶乾重量残存率を求めた。

$$\text{絶乾重量残存率}(\%) = \frac{m_0'}{m_0} \times 100$$

また、同じ水深に設置した 10 個の試料をまとめて電動ミルにより粉碎し、40 メッシュのふるいを通して 100 メッシュのふるいに残る画分を、主要成分分析に供した。主要成分分析は以下のとおりであった。はじめにソックスレー抽出器をもちいて、エタノールとベンゼン (1:2 v/v) の混合溶媒による脱脂をおこない、亜塩素酸ナトリウム法によりホロセルロースを、硫酸法により酸不溶性リグニンを定量した。各分析値は試料を水槽に設置する前の絶乾重量に対する割合として算出した。また、試料を水槽へ設置しなかった場合の参考値とするため、本実験の試料を調達したケヤキ材についても同様に分析をおこなった。なお、以上の分析は『木質科学実験マニュアル』（日本木材学会：2000）にしたがった。

## 2.3 結果

### 2.3.1 溶存酸素量、水温および外気温

水槽内の各水深における溶存酸素量および水温の測定結果を図 2 に、溶存酸素飽和度を図 3 に示す。また、測定期間中の奈良市の日降水量および日平均外気温を図 4 に示す。清掃作業の実施以前には、水深が深いほど溶存酸素量が少ない傾向が認められた。とくに、水槽の底部にあたる水深 100 cm では、溶存酸素量の測定値は 0 mg/L を維持した。この期間、降雨が観測されていない期間においては、図 5 に示すように、夜間に溶存酸素量が急激に増加し、以降翌日の深夜まで徐々に減少する傾向が水深 30 cm で認められた。こうした溶存酸素量の周期的な増減は、水温の日変化と対応していた。すなわち、夜間に水温が低下し、これにやや遅れて溶存酸素量が急激に増加する傾向が認められた。また図 6 に示すように、夕立などの比較的少量の降雨時にも、急激な水温の低下と、それともなう溶存酸素量の増加が認められた。水深 60 cm

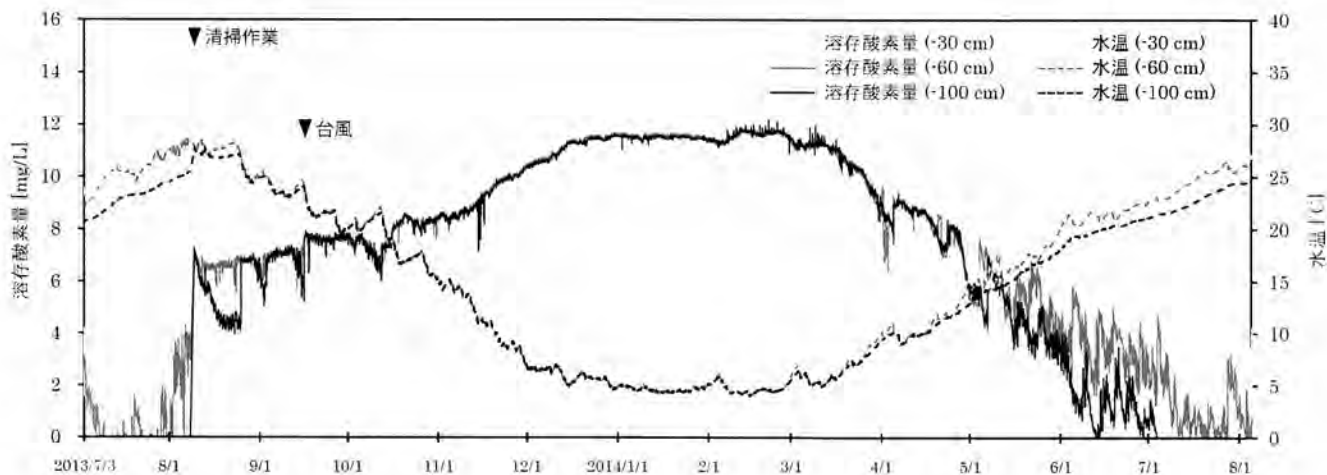


図2 各水深における溶存酸素量と水温の推移 (2013年7月～2014年8月)

Fig. 2 Changes in dissolved oxygen and water temperature at each depth in the water tank from July 2013 to August 2014

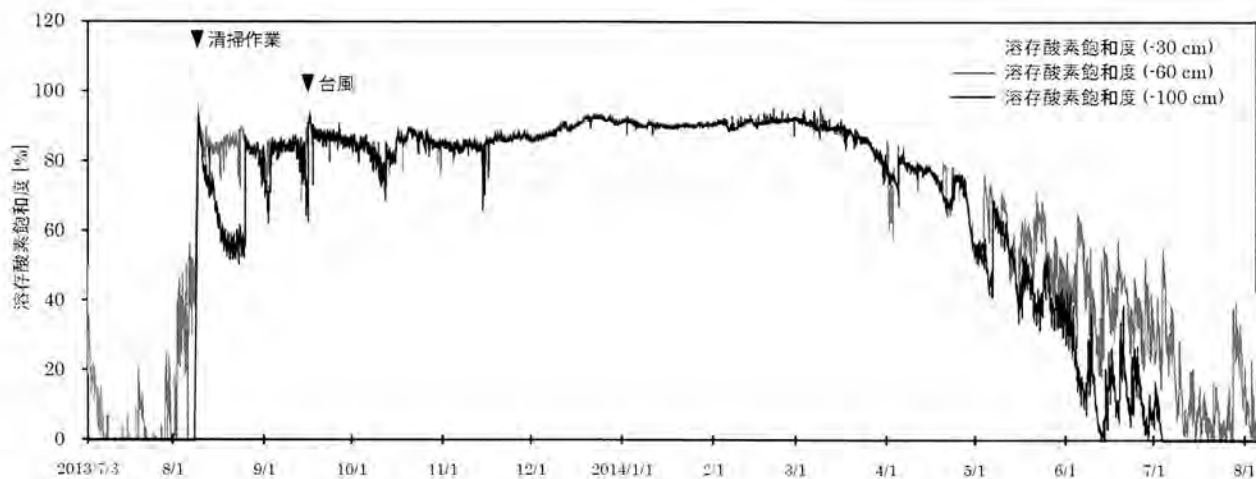


図3 各水深における溶存酸素飽和度の推移 (2013年7月～2014年8月)

Fig. 3 Changes in dissolved oxygen, estimated as percent saturation, at each depth of the water tank from July 2013 to August 2014

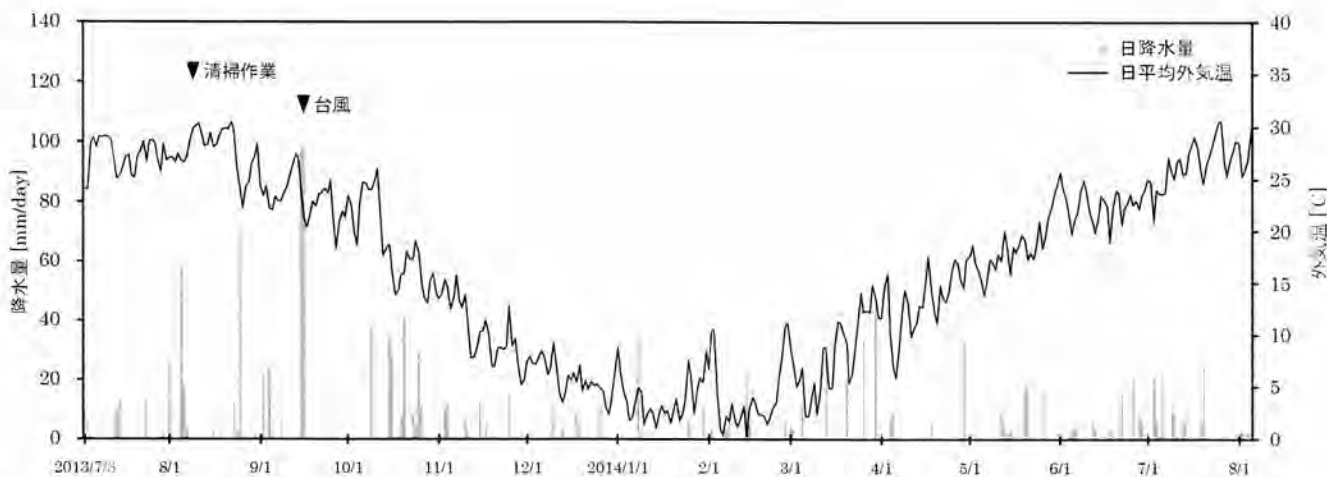


図4 奈良市日降水量および日平均外気温 (2013年7月～2014年8月)

Fig. 4 Daily total precipitation and daily average temperature in Nara city from July 2013 to August 2014

における水温と溶存酸素量の挙動は、溶存酸素量の下限値が0 mg/Lとなるほかは、以上と同様の傾向を示した。2013年8月8日から同月10日にかけておこなわれた水槽の清掃および貯水作業により、各水深とも溶存酸素が大幅に増加した。この直後より、水深100 cmでは溶存酸素量は徐々に減少する傾向が認められたが、台風や夕立などの荒天時に急激かつ大幅に増加した。これに対して、水深30 cmと60 cmにおいては、溶存酸素量が大きく減少する傾向は認められず、また降雨などによる測定値への顕著な影響も認められなかった。

10月下旬から12月後半にかけては、各水深とも溶存酸素量が緩やかに増加したが、その一方で、溶存酸素飽和度は翌年3月まで90%前後を維持していた。

なお、3月以降は水温が上昇し、各水深とも溶存酸素量および溶存酸素飽和度が低下したが、水深が深いほど溶存酸素がより速やかに減少する傾向がみられた。7月以降は、とくに水深100 cmにおいて溶存酸素が枯渇した状態となるなど、各水深とも前年の同時期と概ね同様の測定結果となった。

### 2.3.2 木材試料の劣化程度

図7に各水深に設置した10試料の重量残存率の平均値を示す。また同図には、試料を設置した水深により重量残存率に差が生じたか否かについて、有意水準を5% ( $p < 0.05$ ) としたt検定により検討した結果を示す。水深60 cmおよび100 cmに設置した試料の重量残存率は、30 cmに設置したものに対して有意に高かった。主要成分分析の結果を表1に示す。ホロセルロース含有率には水深の違いによる差がほとんどなく、水槽に設置していないものとも明確な差が認められなかった。一方、酸不溶性リグニン含有率は、水深30 cmおよび60 cmの試料に比べて、水深100 cmの試料の方で残存率が高く、また水槽に設置していない試料の分析値により近くなっていた。

## 2.4 考察

### 2.4.1 溶存酸素の分布と挙動

以上の結果から、本水槽では好気性微生物の呼吸により溶存酸素が消費される一方、種々の現象により酸

素が供給されることが明らかとなった。

水面を介して大気から酸素が移動する現象により、水槽内へ酸素が供給されるが、図2および図3の清掃作業以前の期間で顕著なように、比較的水温が高い時期においては、好気性微生物の活動が活発化し、酸素消費量が増大するため、鉛直方向に溶存酸素量の差が生じたものと考えられる。また同時期には、鉛直方向における水温差による成層構造が発達していたため、鉛直方向の水の混合とそれともなう表層からの溶存酸素の移流が抑制されたと考えられる。その結果、水

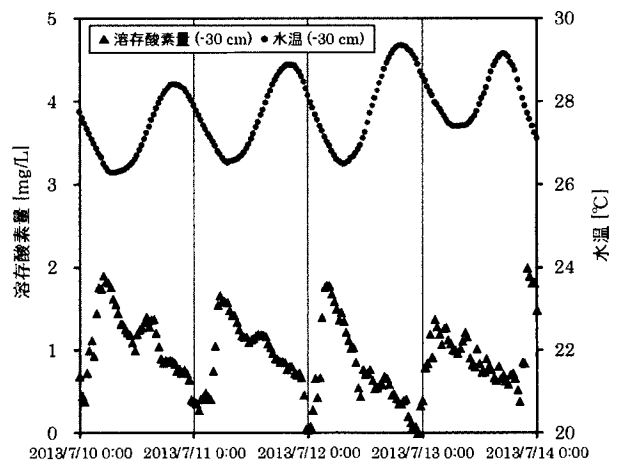


図5 溶存酸素量と水温の日変化（晴天時）  
Fig. 5 Changes in dissolved oxygen and water temperature in the water tank in mild weather

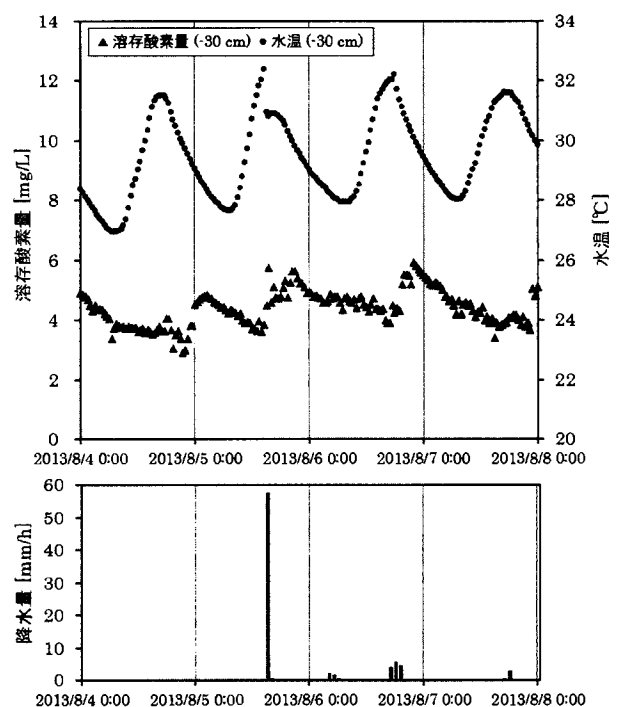


図6 溶存酸素量と水温の日変化（降雨時）  
Fig. 6 Changes in dissolved oxygen and water temperature in the water tank during rainy weather



深が深いほど溶存酸素が少なくなり、とくに水槽の底部では溶存酸素の極めて少ない還元的な環境へ移行したものと考えられる。

一方、図2および図3中に示した9月半ばの台風接近時のように、温度躍層が形成された状態で、外気温の低下や降雨などにより表層の水温が大きく低下すると、溶存酸素を比較的多く含む表層水がより水深の深い領域へ沈み込む動きが生じる。このように、水槽内において水の鉛直混合が生じることにより、水槽底部において溶存酸素量が急激に増加したものと考えられる。また、台風などにともなう強風によって、水槽の水が攪拌されることも、溶存酸素の移流が生じる大きな要因の一つとなると考えられる。したがって、表層水温の低下をもたらす外気温の変化や降雨および風などの気象現象は、溶存酸素量を増加させる要因であるといえる。とくに、降雨は雨滴が水面を局所的に攪拌することで大気からの酸素の供給を促進するため、溶存酸素量増加への寄与がより大きいと考えられる。

なお、本水槽では緑色の色素を有する藻類などの繁

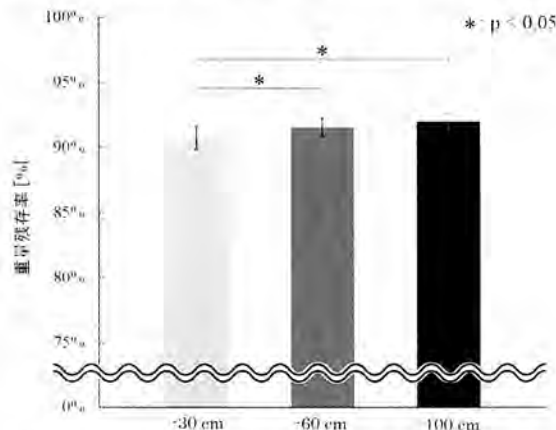


図7 各水深に設置した木材試料の絶乾重量残存率(平均値 + 標準誤差)

Fig. 7 Average absolute dry weight remaining for wood samples at each depth

表1 木材試料の主要成分分析結果

Table 1 Summary of the results of chemical analyses of wood samples

設置深度	ホロセルロース	酸不溶性リグニン
cm	%	%
-30	69.59	16.07
-60	70.75	16.31
-100	68.82	23.15
(未設置)	71.62	24.17

殖が認められた。水面には網状の寒冷紗が設置されていたが、完全な遮光性能はなく、藻類などをはじめとした光合成生物の繁殖を十分に抑制できなかったものと考えられる。こうした藻類などの光合成によっても、水槽内で酸素が発生すると考えられるが、図5に示されるように、水深30 cmにおいては、晴天日の正午過ぎに溶存酸素量がわずかに増加する場合があるものの、全体的な傾向として、日中は溶存酸素量が徐々に減少していた。こうした傾向は水深60 cmにおいても認められており、本水槽では水温の比較的高い時期において、光合成による酸素の供給より、好気性微生物による消費が卓越していたものと考えられる。

一方、冬季は各水深とも溶存酸素量が増加したが、これは水温が低下したことで好気性微生物の呼吸による酸素消費が緩慢になり、大気からの酸素移動と藻類などの光合成による酸素の供給が支配的となったためであると考えられる。なお、図2および図3に示されるように、10月下旬から12月後半にかけて、各水深とも溶存酸素量が緩やかに増加する一方で、溶存酸素飽和度はほぼ一定の高い水準を維持したことについては、水温の低下がおもな要因であると考えられる。前述の通り、水に対する酸素の溶解度は温度が低いほど大きくなるため、水温の低下にともなって、水槽内の溶存酸素の絶対量が増大したものと考えられる。

春以降は各水深とも溶存酸素飽和度が低下したが、これは水温の上昇により好気性微生物の活動が活発化したためと考えられる。ただし、測定期間中に溶存酸素が枯渇した状態が維持されたのは水深100 cmにおいてのみであった。すなわち、測定終了前の約1カ月間は、水槽底部とより水深の浅い領域との間で溶存酸素の有無の差が生じており、この期間において水槽底部では好気性微生物による酸素消費が、拡散等による溶存酸素の供給を上回っていたといえる。

## 2.4.2 溶存酸素の多寡と木材の劣化程度の関係

図7に示したように、水深30 cmに設置された木材試料に比して、水深60 cmおよび100 cmに設置された試料では、有意に絶乾重量残存率が高くなっていた。これは、後者の2水深では、微生物の活動

により溶存酸素が消費される一方、深層ほど酸素の供給が乏しく、木材細胞壁を積極的に分解する好気性微生物の活動が抑制されたためであると考えられる。

一方、木材細胞壁中のリグニンは、複雑な構造を有する天然高分子であり、嫌気条件における微生物による分解は極めて遅いとされている (Fenchel *et al.*: 2012)。したがって、水深が深いほど酸不溶性リグニンの残存率が高くなったことは、溶存酸素の測定結果とも調和的であるといえる。

ただし、微生物による木材の腐朽では、一般にセルロースやヘミセルロースが優先して分解される (酒井: 1991) のに対し、本実験ではホロセルロースの残存率について、水深の違いによる明確な差は認められなかった。

### 2.4.3 紫外線による木材試料の劣化への影響

溶存酸素量の違いが木材試料の劣化に影響を及ぼした可能性が考えられる一方で、酸不溶性リグニンの劣化には紫外線が影響を及ぼした可能性も考えられる。屋外で露出した木材が銀灰色に劣化する現象は広く知られているが、これは日光に含まれる紫外線によってリグニンの一部が低分子化して水溶性の成分を生じ、雨水により溶脱することによって生じる (屋我ら: 1997)。本水槽で使用された寒冷紗には完全な遮光性能がなく、紫外線を含む日光の一部が水槽内へ入射する状態であった。紫外線は水によって吸収されることから、水深が深いほど紫外線の影響が緩和され、酸不溶性リグニンの定量値が高くなった可能性が考えられる。

一般に出土木製遺物では、健全な木材に比して埋蔵中の劣化によりリグニンの割合が相対的に高くなっていることから、紫外線は水中保管中の木製遺物の劣化に大きな影響を及ぼす恐れがあるといえる。したがって、光合成により水中に酸素を供給する藻類やシアノバクテリアなどの生育を抑制するうえでも、木製遺物の一時保管環境においては十分に遮光する必要があるといえる。

## 3. 酸素供給を抑制する方策の検討

### 3.1 酸素供給抑制のための具体策

先述したように、木製遺物を保管する水槽内では、好気性微生物により溶存酸素が消費される一方、おもに次の現象によって溶存酸素量が増加することが明らかとなった。

- (1) 気液界面における気相からの酸素移動
- (2) 水の鉛直混合
- (3) 光合成による酸素の発生

したがって、水槽内の溶存酸素を低減するためには、これらの現象を抑制する必要がある。とくに、水温が比較的高く、微生物の活動が活発化する時季には、可能な限り溶存酸素を低減することが望ましいと考えられる。そこで、上記現象を抑制するための具体策を検討した。気相からの酸素移動を抑制するためには、水と大気が接触する面積を低減することが有効であると考えられる。水の鉛直混合の抑制には、表層水の水温の低下を抑制する必要がある。とくに、微生物活動が活発になり、また温度躍層が形成される夏季にあつては、表層水温の急激な低下を抑えることが望ましいといえる。さらに、藻類などの光合成を抑制するためには、時季を問わず水槽内へ入射する光を可能な限り遮る必要がある。そこで、これらの要件を満たし、かつ比較的簡便に適用可能なものとして、以下の具体策を考案し、その効果の評価を後述の試験により試みた。

- ① 気相からの酸素移動を抑制するための酸素不透過性シートによる水面の被覆
- ② 表層の水温変化を緩和するためのシート上への断熱材の設置
- ③ 遮光および雨水の流入を防止するための覆屋の設置

①ではアルミ箔層を有する極めて酸素透過性が低いポリエチレンなどを主材とする積層シートを採用した (図 8 b)。このアルミ箔層は十分な遮光性能を有することから、光合成を抑制する効果も同時に期待できる。設置にあたっては、複数のシートの端を熱溶着によって接続し、水面全体を隙間なく被覆できるものとした。

②の断熱材には建築用発泡ポリスチレン製ボード (厚さ 20 mm) を採用し、①のシート上に隙間なく敷設した (図 8 c)。③の覆屋では建築足場用鋼管で骨組を構築し (図 8 d)、遮光および防水性能を確保するため、①で採用したシートを葺き材にもちいた (図 8 e)。

## 3.2 実地試験による酸素供給抑制法の評価

### 3.2.1 試験方法

試験は先の環境調査および木材腐朽実験に引き続いて、同一の水槽にて実施した。前年（以下、1年目とする）の調査と同様にデータロガを3水深に設置し、水温と溶存酸素量を30分間隔で測定した。測定は2014年8月18日から2015年9月11日までおこなった（本試験を2年目とする）。途中、上記①～③の施工作業（以下、シート等設置作業と称す）を、2014年9月19日に実施した。また、本試験では一連の作業による表層水温への影響を把握するため、水面（水深0 cm）に小型データロガ（Onset Computer社製UA-002-64）を2014年9月5日に設置し、水温を10分間隔で測定した。

なお試験に先立ち、2014年8月7日に遺物表面と水槽の清掃および水の入れ替えが1年目と同様に実施された。

### 3.2.2 結果

#### 3.2.2.1 溶存酸素量および水温

各水深における溶存酸素飽和度の推移を図9に、水温の推移を図10に示す。また、2年目の試験期間中における奈良市の日降水量および日平均外気温を図11に示す。

シート等設置作業までの期間における溶存酸素飽和度の推移は、各水深とも1年目の同時期とほぼ同様であった。すなわち、水深が深いほど溶存酸素飽和度が低い傾向があり、また各水深とも時間の経過とともに溶存酸素飽和度が低下する一方、降雨などによる表層水温の低下にともなって溶存酸素飽和度が急激に上昇する様子が認められた。

こうした溶存酸素飽和度と水温の挙動は、シート等設置作業により大きく変化した。一連の作業の直後より各水深とも溶存酸素飽和度が一貫して低下するようになり、10月の末頃には0%となった。また、とくに水面において水温の日較差が大幅に縮小した。

なお、実験をおこなった奈良市においては、シート等設置作業以降にも台風などによる激しい降雨が観測されているが、水槽内の溶存酸素量や水温の挙動への顕著な影響は認められなかった。

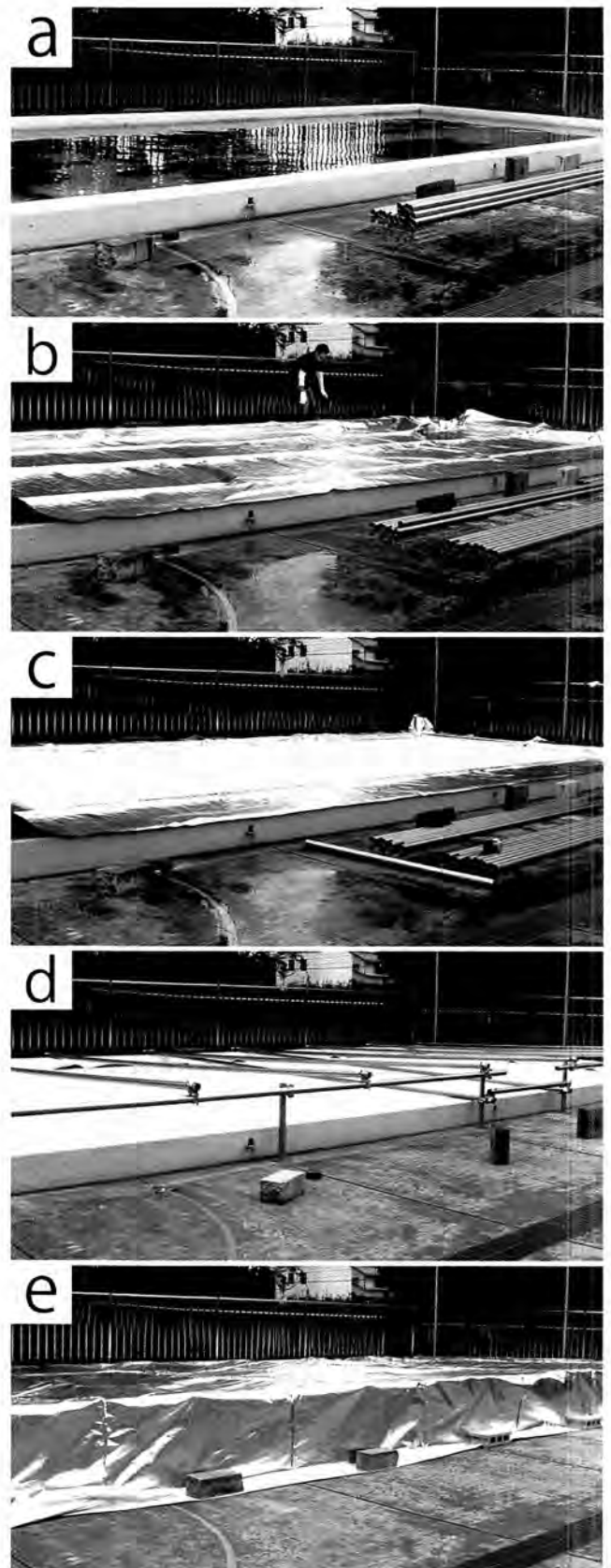


図8 シート等設置作業の実施状況 (a: 作業前, b: 酸素不透過性シートの設置, c: 断熱材の設置, d: 覆屋骨組の構築, e: 作業後)

Fig. 8 Process of the installation of sheets, etc. (a: before work; b: installation of oxygen-impermeable sheet; c: installation of heat insulation material; d: construction of roof framework; e: after work)



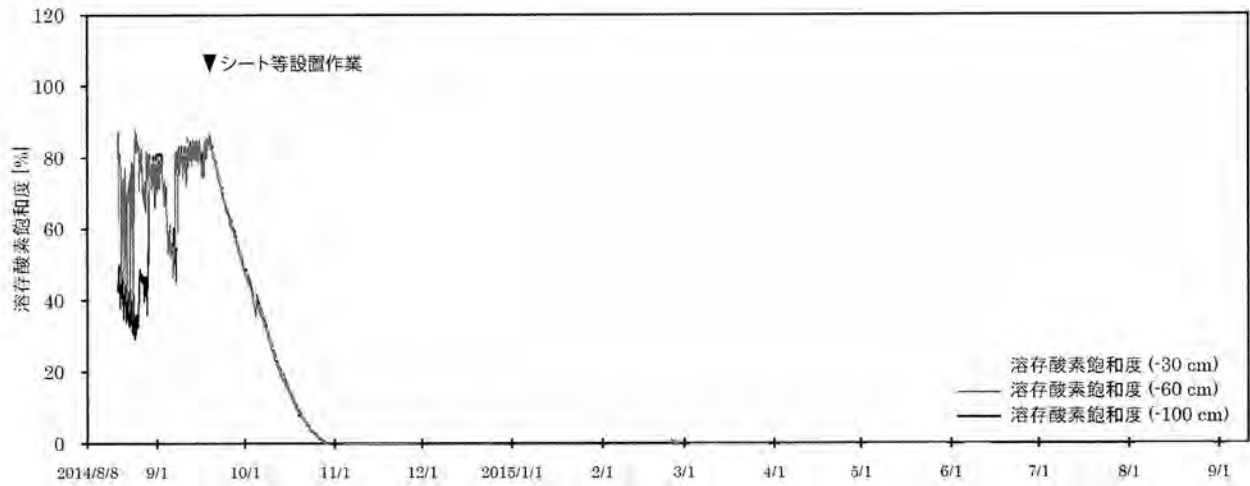


図 9 各水深における溶存酸素飽和度の推移 (2014年8月～2015年9月)  
 Fig. 9 Changes in dissolved oxygen at each depth in the water tank from August 2014 to September 2015

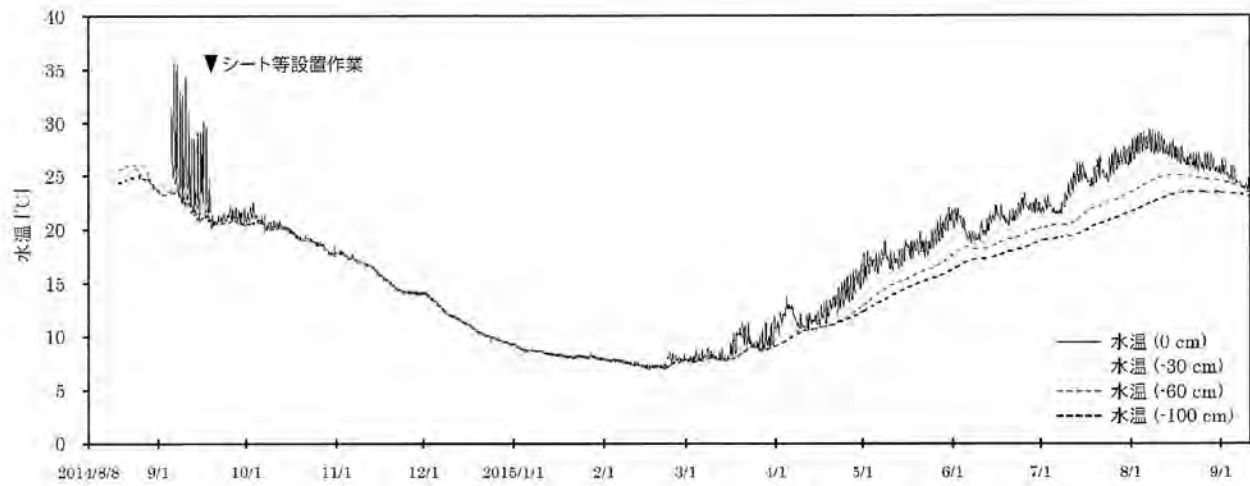


図 10 各水深における水温の推移 (2014年8月～2015年9月)  
 Fig. 10 Changes in the water temperature at each depth in the water tank from August 2014 to September 2015

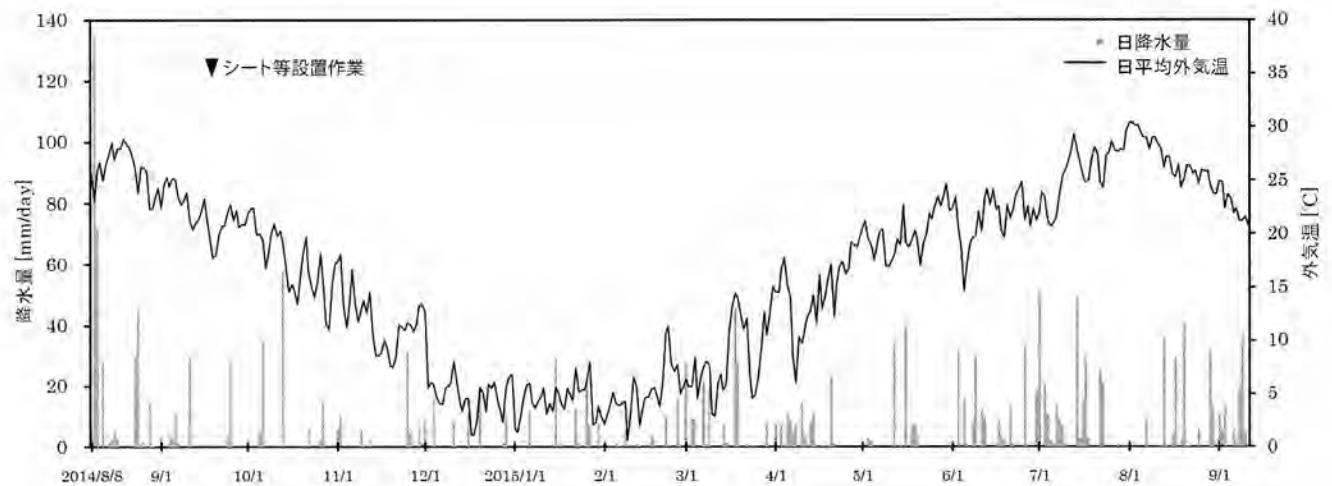


図 11 奈良市日降水量および日平均外気温 (2014年8月～2015年9月)  
 Fig. 11 Daily total precipitation and daily average temperature in Nara city from August 2014 to September 2015

### 3.2.2.2 光合成生物の繁殖抑制効果

1年目には、水温が比較的高い夏季に木製遺物表面や水槽底部に緑色の光合成生物が繁茂する様子が肉眼で観察されたが(図12 a)、2年目ではシート等設置作業から約1年経過した後においても、水槽内や遺物表面にこうした光合成生物の目立った生育は認められなかった(図12 b)。

### 3.2.2.3 硫化水素臭の発生

溶存酸素飽和度が0%を記録した数週間後より、水槽内からいわゆる腐卵臭が発生していることを確認した。試験期間中、随時水面付近で携帯型ガス検知器をもちいて測定をおこなったところ、最大で3 ppm程度の微量の硫化水素が検出される場合があった。

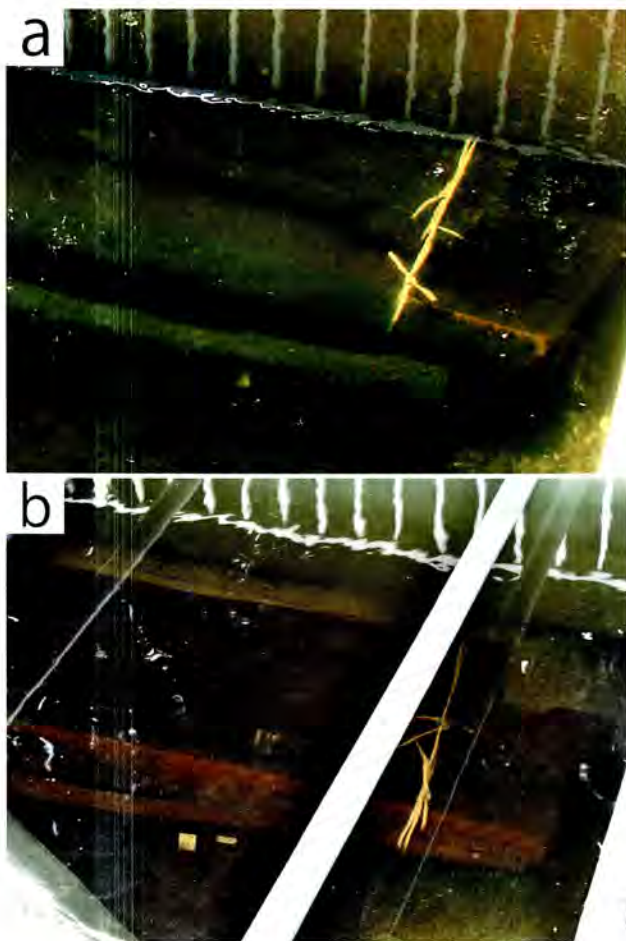


図12 シート等設置作業による藻類の繁殖抑制効果 (a: 清掃前(2014年8月5日)、b: 清掃の約1年後(2015年9月11日))

Fig. 12 Suppression of algal growth by installation of a sheet. (a. before cleaning the water tank; b. 1 year after installation)

### 3.2.3 考察

本試験では、シート等設置作業の直後から水槽内の溶存酸素量が一貫して減少し、最終的に溶存酸素の枯渇した還元的な環境が創出された。この溶存酸素の減少は、おもに水槽内の好気性微生物の呼吸によるものと考えられる。

一方、1年目の調査では冬季に水槽内の溶存酸素飽和度が高い水準となっていたが、これは水温の低下にともなって微生物による酸素の消費が緩慢になり、大気から水槽内への酸素供給が支配的となったためと考えられる。2年目では冬季以降も溶存酸素飽和度が下限値を維持していたことから、酸素不透過性シートで水面を被覆することにより、大気からの酸素供給を極めて効果的に抑制することができたといえる。シートにより水の蒸発も抑えられるため、一時保管中の木製遺物の乾燥防止にも効果があるといえよう。

なお、シートの設置以降、溶存酸素が減少する過程においては、好気性微生物による木製遺物を含む有機物の分解が進行していると考えられる。最終的に溶存酸素が枯渇すると、その活動が大きく制限されるようになるといえる。先述の通り、微生物によるリグニンの分解効率は嫌気条件下において大きく低下する。現生材に比してリグニン含有割合の高い出土木材の水中保管では、嫌気的な環境を維持することが望ましく、したがって本試験では溶存酸素量について、良好な条件を維持することができたものといえる。

ただし、酸素不透過性シートと水槽の内壁のあいだにはわずかながら隙間が生じるため、大気から表層水への酸素移動を完全に防止することは困難である。本試験では、シート上に断熱材を敷設することにより、とくに温度躍層が形成される夏季において、水の鉛直混合を生起する表層水温の低下が大幅に抑制された。これにより、表層からより水深の深い領域への、移流による溶存酸素の供給を低減できたと考えられる。さらに、水槽全体に覆屋を設けたことにより、酸素供給の一因となる雨水の流入や雨滴による水面の攪拌も防止することができたといえる。シートや覆屋により遮光されたことで、水槽内での藻類などの繁殖を極めて効果的に抑制することができた。これにより、光合成

による水槽内での酸素の発生も大幅に抑制されたものと考えられる。したがって、慣習的におこなわれることの多い清掃や水の交換作業については、保管遺物を損傷するリスクを軽減する観点からも、頻繁な実施が不要となるといえる。

以上のように、今回試験した各方策については、当初に期待された効果を概ね得ることができたと考えられる。酒井らは、水を多く含む土壌中の木材の劣化について、好気性微生物によって酸素が消費され、木材およびその周辺の酸化還元電位が低下し、その還元的な環境が維持されることが、木材の残存に必要であると述べている（酒井ら：1994）。以上の方策の適用により創出された環境は、水分が十分に存在し、かつ酸素の供給が大きく制限され、さらに紫外線の影響もないという、木製遺物が長期間遺存しやすい埋蔵環境に非常に近いものであったと考えることができよう。なお高妻らは、木製遺物を包含する埋蔵環境では、地下水の移動などの影響があることから、必ずしも木材の劣化程度と pH や酸化還元電位などの測定値が相関関係を示さないと報告している（高妻ら：2010）。水槽などをもちいた一般的な木製遺物の水中保管環境では、実際の埋蔵環境のように複雑な水の出入りがないことから、安定した環境が維持されやすいと考えられる。

なお、本水槽では溶存酸素が枯渇した後に硫化水素が生じたが、これは嫌気性微生物である硫酸塩還元菌の活動によるものであると考えられる。一般に、硫酸塩還元菌は土中に広く存在し、硫酸塩を還元して硫化水素を生じることが知られている。本水槽においては、おもに木製遺物が埋蔵されていた土壌に由来すると考えられるイオウ分が硫化水素の起源となったとみられる。

#### 4. まとめと今後の課題

1年目には、出土木製遺物の水中保管環境における溶存酸素の分布と挙動に関する調査を実施し、気象データとの比較から種々の環境因子が溶存酸素の挙動に及ぼす影響を検討した。また、同時におこなった木材試料の腐朽実験から、溶存酸素の多寡が木材の劣化

程度に及ぼす影響について考察した。以上の実験から、木製遺物の水中保管環境における溶存酸素を低減するための具体的な方策を検討するとともに、2年目に実地試験による評価をおこなった。

その結果、出土木製遺物の水中保管環境では、酸素不透過性素材をもちいて水面を被覆することにより、大気からの酸素供給を大幅に制限できることが明らかとなった。

また、水面に断熱材を設置することで、表層水温の急激な変化が抑制され、酸素の移流をもたらず鉛直混合が生じにくくなることも示された。ただし、大気からの酸素の供給が十分抑制されていれば、鉛直混合による溶存酸素量への影響は比較的小さいと考えられる。一方、一般に微生物活性は温度が低いほど低下する（Kirchman：2012）ため、水中における木製遺物の劣化を抑制するうえでは温度を低く維持することが望ましく、断熱材には日射などによる水温上昇を抑制する効果が期待できるといえよう。ただし、気温が低下する秋から春の時期においては、断熱材が水温の低下を抑制すると考えられる。断熱材の設置による遺物の劣化抑制への正味の影響については、今後の検討課題である。

屋外では、溶存酸素を増加させる要因となる風雨や日射の影響を緩和するため、水槽全体に覆屋を設けることも有効である。覆屋などで遮光することで、光合成により酸素を発生する藻類などの繁殖を効果的に抑制できることも示された。

先に述べたとおり、全国の埋蔵文化財保管施設においては、設備や予算など様々な制約から、出土木製遺物の一時保管のために、水を張った大小の容器や屋内外の水槽が用いられている。本研究で検討した以上の手法を適用することにより、出土木製遺物のより良好な一時保管環境を、比較的簡便かつ安価に整備できる可能性が示されたといえよう。なお、酸素不透過性シートの効果については、出土遺物の整理にもちいられるプラスチックコンテナなどの小型容器をもちいた実験でも確認しており（松田ら：2016）、遺物の寸法や数量に応じた任意の大きさの容器において適用が可能であるといえる。

2年目の試験中に生じた硫化水素は微量であったが、温度や栄養源の存在など硫酸塩還元菌の生育条件が満たされれば、発生量が増大すると考えられる。そのため、とくに海底から引き揚げられた木材など、硫酸イオンをはじめとしたイオン成分を多く含有する遺物を保管する場合、以上の方策の適用には注意を要する。

一方、硫酸塩還元菌は嫌気性微生物であるため、溶存酸素の存在によりその生育が阻害される。実際に片岡は木製遺物を一時保管する水中で曝気をおこなうことで、硫化水素による腐卵臭の発生が低減されることを示している（片岡：2016）。ただし、片岡も指摘しているように、水中に酸素を供給することで、短期的には作業環境の改善が図られるが、中長期的には好気性微生物による木製遺物の劣化が懸念されるといえる。

出土木製遺物の水中保管はあくまで一時的な措置であり、原則として恒久的な保管方法とはならない。有限の期間における水中での遺物の劣化を十分に抑制することが肝要であるといえる。1年目の木材試料の腐朽実験では、溶存酸素量と木材の劣化程度との関係を十分に把握できていないため、室内実験などから、より詳細に検討をおこなうことが今後の課題である。また、溶存酸素量のほか、pHや酸化還元電位など種々の環境因子が水中における木製遺物の劣化に及ぼす影響についても定量的に検討していく必要がある。

註

1) 本論文の一部は、日本文化財科学会第31回大会、第32回大会および第66回日本木材学会大会にて報告したものである。

## 引用文献

- 新井英夫・見城敏子・森八郎 1983「文化財の長期保存に関する研究（第2報）出土遺物等の保存へのBO-PVA フィルムの応用」『保存科学』第22号 pp.39-45
- 岡田文男 1989「仮パックによる出土木製品の保管と省力化について —ポリエチレンフィルムを利用して—」『日本文化財科学会第6回大会研究発表要旨集』pp.56-57
- 片岡太郎 2016「水浸出土木材の水中保管における腐敗臭発生の低減について」『第66回日本木材学会大会研究発表要旨集』p.140
- 気象庁 HP「過去のデータ検索」<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>
- 高妻洋成・脇谷草一郎・肥塚隆保・家塚英詞 2010「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」『考古学と自然科学』第61号 pp.27-41
- 酒井温子 1991「出土木材の劣化過程」『木材学会誌』第37号 pp.363-369
- 酒井温子・今津節生 1993「出土木製品の水中保管時の腐朽とその防止（Ⅰ）—基礎的な検討として、試験管で6か月間保管した場合—」『考古学と自然科学』第28号 pp.65-76
- 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
- 酒井温子・今津節生 1997「出土木製品の水中保管時の腐朽とその防止（Ⅱ）—実用的な検討として、広口容器、コンテナおよび真空パックで保管した場合—」『考古学と自然科学』第35号 pp.19-39
- 沢田正昭・秋山隆保 1978「考古遺物の保存法」『考古学と自然科学』第11号 pp.111-126
- 長島陽子・福田清春・原口隆英 1988「細菌による木材細胞壁と木材構成成分の分解について」『木材学会誌』第34号 pp. 1012-1020
- 長島陽子・福田清春・原口隆英 1989「水中条件下の細菌による木材細胞壁の分解について」『木材学会誌』第35号 pp. 839-844

- 長島陽子・福田清春・佐藤茂・諸星紀幸・原口隆英 1990「同一木材細胞壁中での微小菌類と細菌による腐朽の共存」『木材学会誌』第36号 pp.480-486
- 日本分析化学会北海道支部 編 2005『水の分析 第5版』化学同人 p.462
- 日本木材学会 編 2000「主成分分析」『木質科学実験マニュアル』文永堂出版 pp.92-97
- 松田和貴・脇谷草一郎・高妻洋成 2016「出土木製遺物の一時保管容器における水質の推移」『日本文化財科学会第33回大会研究発表要旨集』 pp.54-55
- 屋我嗣良・河内進策・今村祐嗣 編 1997「木材の風化」『木材科学講座 12 保存・耐久性』海青社 pp.165-169
- 柳田友道 1980『微生物科学 1』学会出版センター pp.117-119
- D. L. Kirchman, 2012 "Processes in Microbial Ecology" Oxford University Press 永田俊 (訳) 2016『微生物生態学 ゲノム解析からエコシステムまで』京都大学学術出版会 pp.67-74
- J.E. Dawson, R. Ravinda, R.H. Lafontaine, 1982 "A review of storage methods for waterlogged wood." ICOM-WWWG Proceedings (Ottawa) pp.227-235
- T. Fenchel, G. M. King, T. H. Blackburn, 2012 "Bacterial Biogeochemistry: The Ecophysiology of Mineral Cycling Third Edition" Elsevier Ltd. 大田寛行・難波謙二・諏訪裕一・片山葉子 (訳) 2015『微生物の地球化学—元素循環をめぐる微生物学』東海大学出版部 pp.39-41
- Y.S. Kim, A.P. Singh, 2000 "Micromorphological characteristics of wood biodegradation in wet environments: a review" IAWA Journal 21 (2) pp.135-155

(2018年2月6日受付, 2018年4月10日受理)



# Measures to suppress deterioration of archaeological waterlogged wood stored in an underwater environment: Maintenance of the anaerobic environment by oxygen suppression

---

Kazutaka MATSUDA<sup>1)</sup>, Soichiro WAKIYA<sup>1)</sup>, and Yohsei KOHDZUMA<sup>1)</sup>

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

---

To investigate ways to suppress the microbial deterioration of excavated archaeological waterlogged wood stored underwater, an environmental survey of water temperature and dissolved oxygen as well as decay experiments using modern wood specimens was conducted in an outdoor storage water tank for 1 year. While the dissolved oxygen concentration was relatively high under the low temperatures of winter, aerobic microorganisms actively consumed dissolved oxygen to maintain an anaerobic environment temporarily at the bottom of the tank in the summer. Since the wood specimens stored at a greater depth exhibited less weight loss, a reduction of dissolved oxygen would be necessary to suppress the deterioration of wood in the underwater environment. Dissolved oxygen comes from atmospheric oxygen, the photosynthesis of algae, and vertical mixing of water, and these phenomena are promoted by solar radiation, rainfall, and changes in surface water temperature. Specific measures to suppress these phenomena were investigated, and the effects were evaluated experimentally. By covering the water surface with an oxygen-impermeable sheet, the dissolution of atmospheric oxygen was effectively restricted. By installing a thermal insulating material on the sheet, changes in the surface water temperature that cause the vertical mixing of water were suppressed. By installing a shelter over the tank, the growth of photosynthetic organisms was suppressed and the influence of rainfall was removed. Using these simple treatments, the dissolved oxygen concentration in the tank was easily maintained at an extremely low level across all depths.