

〔報告〕 水浸出土木製遺物の保存処理における 溶媒蒸発を用いた薬剤含浸の効率化の可能性

松田 和貴*・脇谷 草一郎*・高妻 洋成*

1. はじめに

水浸状態で出土する木製遺物の保存処理では、1850年代にデンマークで適用されたカリウムミョウバン法¹⁾以来、ポリエチレングリコール（PEG）法²⁾や高級アルコール法³⁾、糖アルコール法⁴⁾およびその発展形であるトレハロース法⁵⁾など、さまざまな手法が実用化されてきた。これらの保存処理法は原則として、遺物中の水分の一部または全部を常温で固体となる薬剤に置換する含浸工程と、その薬剤の固化により遺物を安定化させる固化工程の2工程からなる。含浸工程では、一般に比較的低濃度に調製した薬剤の溶液中に遺物を浸漬し、溶質の濃度を徐々に上昇させることで、遺物内部の水分と溶液中の溶質との置換が図られる。これは、遺物内部と溶液の間に生じる溶質の濃度勾配によって溶質が移動する拡散現象を利用したものである。一方、このときの濃度勾配が過大になると、浸透圧の差によって遺物からの脱水による収縮が生じる恐れがあるため、溶液濃度の拙速な上昇は厳禁とされる。このように、従来の保存処理法における含浸工程は、原理的に長い期間を要するものであることから、その効率化が重要な研究課題とされてきた。

日本における木製遺物の保存処理の短縮化に関する初期の研究には、出土木材の繊維方向に圧力差を生じさせることで、薬剤の浸透の促進を図ったものがある⁶⁾。しかしながら、その後は木製遺物に薬剤を含浸させる手法の改良ではなく、木製遺物内部への浸透性や寸法安定効果などの面で、より優位な薬剤を模索することに注力されてきた側面が大きいといえる。たとえば、PEG法より後に考案された高級アルコール法やトレハロース法では、分子量のより小さい薬剤を用いることで、遺物内部への浸透性の向上が実現されている。一方、こうした比較的小分子量の小さな薬剤の溶液を用いても、クスノキやクリ、アカガシ亜属などのいわゆる難含浸性の樹種からなる遺物、あるいは建築部材などの大型の木製遺物への含浸には相応の時間を要するだけでなく、良好な寸法安定効果を得ることが困難である場合も多い。木製遺物の保存処理技術のさらなる向上のためには、拡散だけでなく、より能動的に木製遺物内部へ溶質を移動させる現象を用いた薬剤含浸法の開発が不可欠であるといえる。

そこで、筆者らは既往の研究を参考に、含浸工程において溶媒蒸発を利用して遺物内部に溶液の流れを生じさせ、効率よく溶質を導入する手法の開発に着手した。本報では、その実現性を検討した予備的な実験の結果を速報として報告する。

2. 溶媒蒸発を用いた薬剤含浸法の検討

木材のように細孔構造を有し、かつ親水性が高い材料は、毛細管現象によって材料外部の液水を吸収する性質がある。こうした毛細管現象による液体の流れを利用して水溶性の薬剤などを木材中へ導入する手法に、工業分野における立木注入法⁷⁾がある。立木注入法では、生立木

*奈良文化財研究所

もしくは伐採直後の樹木の根元から、樹木の蒸散作用や樹液流動を利用して各種の溶液の浸透が図られる。飯田らは小径木の染色加工および寸法安定化処理における立木注入法の有効性を検討し、伐採直後の直径10 cm 程度のスギ材を直立させた状態で、PEG 水溶液を元口から48 時間浸透させた実験において、高さ約2.8 m まで寸法安定性付与の効果が認められたと報告している⁸⁾。

出土木製遺物は埋蔵中に劣化が進行しており、その化学的性質や細胞壁の物理的強度などは現生材と大きく異なるものの、光学顕微鏡による薄切片の観察によって樹種同定が可能な程度に組織構造を残したものも多い。したがって、出土木製遺物においても立木注入法のように、不揮発性の薬剤を溶質とする溶液に遺物の一部を浸漬し、他の部位から溶媒のみを蒸発させることで、遺物内部に負圧を生じさせ、液絡部から遺物外部の溶液を吸収させられる可能性があると考えられる。これは、溶液の流れにともなう遺物内部への溶質の移動、すなわち移流を利用して能動的に薬剤を含浸させる手法であるといえる。さらに、木製遺物の表面だけでなく、遺物を浸漬する溶液の液面からも溶媒を蒸発させることで、遺物の内外において溶液の濃度を上昇させることができると考えられる。最終的に溶質濃度を100%まで上昇させる場合においても、溶質の融点より高い温度に維持することで、含浸工程における溶液の凝固を防ぐことが可能となる。また、溶質にPEG などの水溶性の薬剤を用いる場合、遺物に含浸させる溶液は水溶液とすることができるため、もとより遺物に含まれる水分も溶媒として扱える。

なお、PEG の水溶液の粘度は、温度と濃度に依存することが経験的に知られている。参考のため、日本における木製遺物の保存処理で広く使用されているPEG4000の水溶液について、その粘度と濃度の関係を温度ごとに図1に示す。本図の作成にあたっては、あらかじめ85℃の恒温槽内で保温した各濃度のPEG（三洋化成工業製 PEG4000BCP）水溶液を実験室内で冷却しながら、その粘度の変化を音叉振動式粘度計（株式会社エー・アンド・デイ製 SV-10）

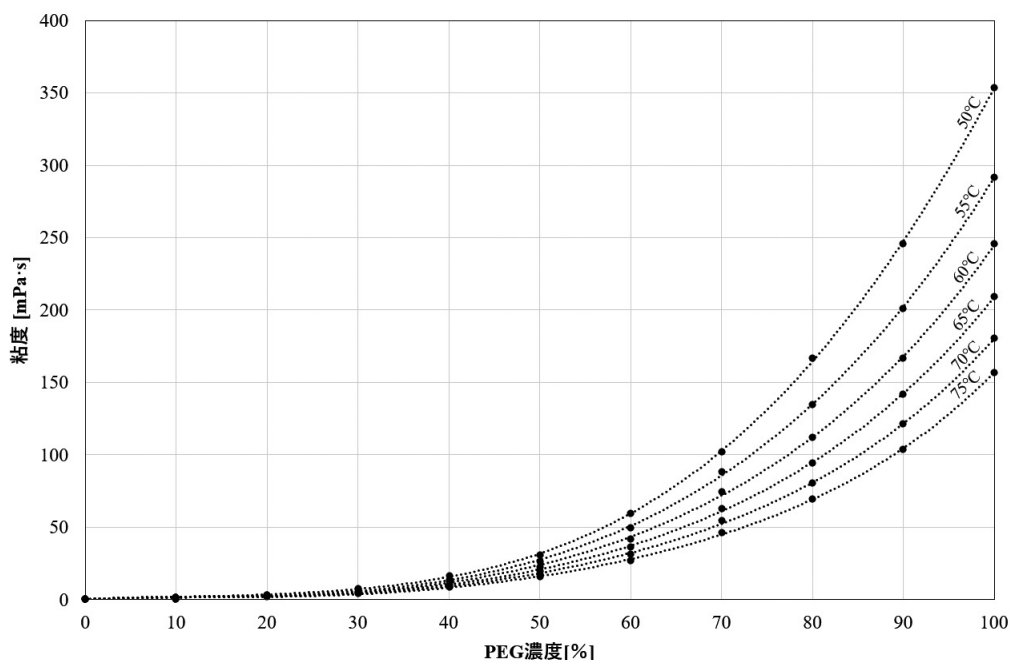


図1 一定の温度におけるPEG水溶液の粘度と濃度の関係

によって測定したデータを用いた。なお、本機で測定される液体の粘度値は測定原理上、粘度と密度の積となることから、測定値をPEGの密度(1.21 g/cm³ (25℃))で除した値を用いた。ただし、ここでは温度による水およびPEGの密度の変化は考慮していない。同図から明らかなように、PEG水溶液は、温度の低下ならびに濃度の上昇によって粘度が増大する。そのため、上記のように溶媒である水を蒸発させると、PEG水溶液の木材内部への浸透性は低下すると考えられる。そのうえ、蒸発によって木製遺物から水分が過度に失われると、回復困難な収縮を生じる恐れがある。これを防ぐためには、遺物表面から溶媒が蒸発する速度を、遺物内部へ溶液が吸収される速度を上回らないよう適切に制御する必要があるといえる。具体的には、図2に示すように、適当な温度に保温した半密閉容器に、比較的低濃度に調製した溶液をいれて木製遺物の一部が露出するよう浸漬し、溶媒の蒸気圧を調整した空気を吹き込んで置換することで、溶液からの溶媒の蒸発速度を制御することが可能になると考えられる。

以上のような、溶媒蒸発を利用して能動的に木製遺物内部へ薬剤を含浸させる手法(以下、溶媒蒸発法と称す)の実現性を検証するため、出土木材とPEG水溶液を用いた予備的な実験をおこなった。

3. 実験

3-1. 試料

発掘調査現場より提供を受けた直径13 cm程度のモモ(*Prunus persica* (L.) Batsch)の出土材(最大含水率:350~650%程度)から、バンドソーを用いて20 mm(接線方向)×20 mm(放射方向)×80 mm(繊維方向)の寸法としたものを4個作製し、試料とした。これらのうち、上記の溶媒蒸発法を検討するための実験に用いるものを試料1とし、その対照実験として乾燥のみを実施するものを試料2とした。さらに、比較のために従来の薬剤含浸法を適用するものを試料Aおよび試料Bとした。実験前後における各試料の接線方向、放射方向および繊維方向の寸法変化を測定するため、図3に示す点の位置を基準として、ステンレス製のピンを計10本打ち込み、ノギスで表1に示す2点間の寸法を9箇所測定した。ここでは、実験時の試料の向

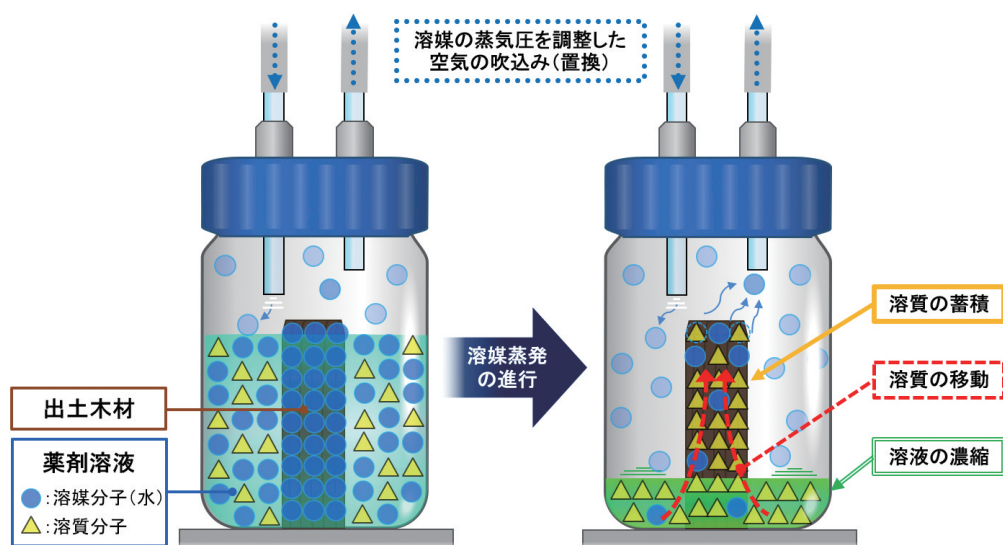


図2 溶媒蒸発を利用した薬剤含浸の模式図

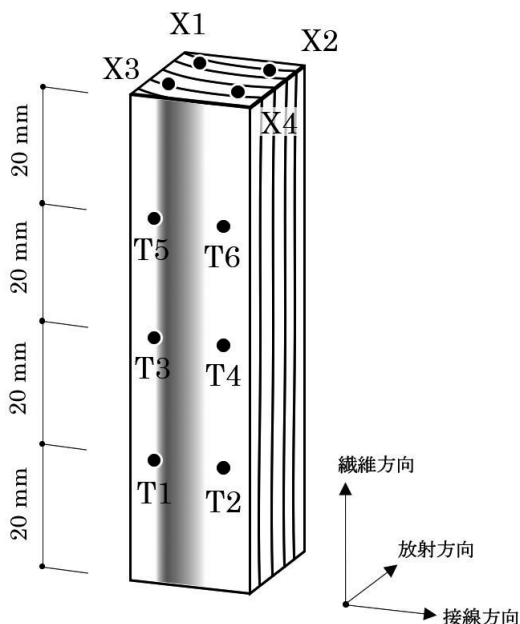


図3 試料の寸法測定用ピンの打ち込み位置

表1 試料の寸法測定箇所

測定箇所	測定の方法	底面からの高さ
X1-X2	接線方向	80 mm
X3-X4	接線方向	80 mm
X1-X3	放射方向	80 mm
X2-X4	放射方向	80 mm
T1-T2	接線方向	20 mm
T3-T4	接線方向	40 mm
T5-T6	接線方向	60 mm
T1-T5	繊維方向	-
T2-T6	繊維方向	-

きを念頭に、木口面の一つを底面とし、その対面および木表側の板目面にピンを打ち込むこととした。なお試料調達の都合上、試料Bでは木取りが四方柵に近いものとなったが、すべての試料において、上部木口面の X1と X2および X3と X4の各2点が同一年輪上に並ぶようにピンの打ち込み位置を調整した。

3-2. 方法

3-2-1. 溶媒蒸発法

半密閉容器に試料と PEG（三洋化成工業製 PEG4000BCP，以下同じ）の水溶液を入れ、この容器に任意の水蒸気圧を持つ空気を吹き込むことで、溶媒である水を制御的に蒸発させることができるよう、図4に示す装置を構築した。本装置は、試料と含浸溶液をいれるガラス製の

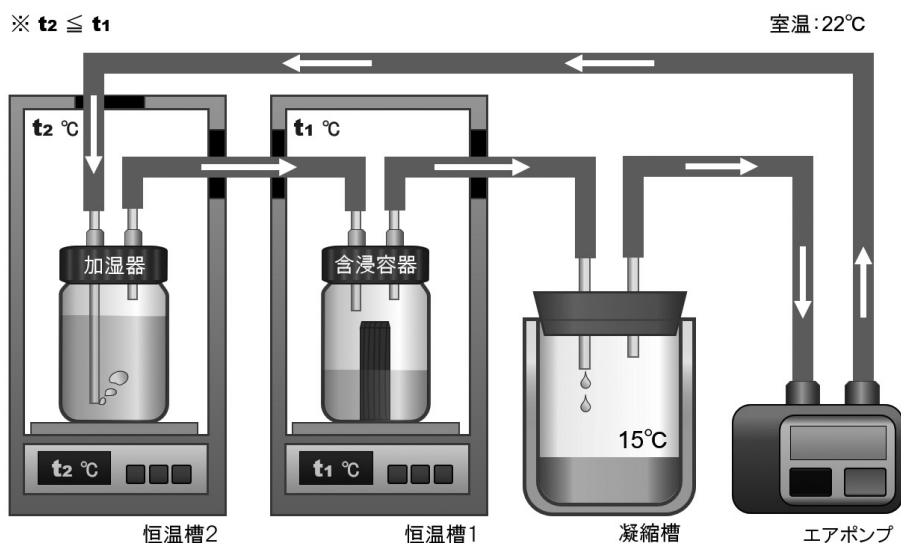


図4 溶媒蒸発法の実験に用いた装置の模式図

含浸容器（恒温槽1内に設置）と、ガラス容器に蒸留水をいれた加湿器（恒温槽2内に設置）、ガラス容器による凝縮槽（恒温水槽により15℃に保温）、ならびにエアポンプから構成される。これらを図4に示すようにウレタントubeで接続し、エアポンプによって図中の矢印の方向に空気が循環できるよう流路を形成した。以上の装置は室温22℃の実験室内に設置し、恒温槽1の温度はPEGの融点（約56℃）より高い70℃で一定、恒温槽2の温度は室温以上かつ70℃以下で任意に設定可能とした。なお、ウレタントube内での結露を防ぐため、必要に応じてチューブの周囲を断熱材で被覆した。

エアポンプを一定の流量設定にて稼働させることにより、含浸容器内でPEG水溶液から蒸発した水分を含む空気が凝縮槽に移動し、15℃における飽和水蒸気量まで除湿される。凝縮槽を通過した空気は、加湿器内で恒温槽2の任意に設定した温度における飽和水蒸気量まで加湿される。さらにこの空気は、含浸容器に戻る際に恒温槽1の設定温度まで加熱されることにより、その相対湿度が低下する。そのため、本装置では含浸容器内で継続的に水分を蒸発させることができ、さらに加湿器を保温する恒温槽2の温度を変化させることによって、その速度を制御することが可能となっている。

以上の実験装置の含浸容器にPEG水溶液をいれ、ピンのない木口面を下に試料1を浸漬した。ここでPEG水溶液は、試料と同等の体積に相当する重量のPEGを溶質とし、内径約9.2 cmの含浸容器内で試料上部が液面よりわずかに露出する溶液量となるよう、8%計500 gとした（PEG：40 g、蒸留水：460 g）。試料の設置後、エアポンプを稼働させ、PEG水溶液の濃縮と試料への含浸を図った。溶液の減少が十分進行して停滞した時点を含浸工程の終点とした。なお、試料にPEGを含浸させない条件を検討するため、試料2ではPEG水溶液の代わりに蒸留水500 gを用いて同様の操作をおこない、水分蒸発による乾燥のみを実施した。各試料とPEG水溶液、および蒸留水は、あらかじめ恒温槽1に静置し、温度を調整したうえで用いた。

なお、試料1の実験では、含浸容器内と加湿器内に無線式のデータロガー（Onset Computer Corporation 製 MX2302）を設置して、それぞれの温度と相対湿度を1分間隔で測定、記録し

た。先述の通り、溶液の PEG 濃度が上昇すると、その粘度が増大し、木材中への溶液の浸透性が低下すると考えられる。本実験では、試料の収縮をできるだけ抑制するために、溶液の濃度上昇に合わせて、含浸容器での水分蒸発速度を低くするよう、恒温槽 2 の温度を段階的に上昇させた。目視観察や温湿度の推移から、PEG 水溶液の減少が停滞したと判断された場合には、含浸容器の相対湿度を徐々に低下させるよう、恒温槽 2 の温度を降下させた。なお、実験開始305時間後に、あらかじめ恒温槽 2 内で保温した蒸留水を加湿器に補充した。各試料の実験条件を表 2 に示す。

試料 1 は薬剤含浸の後、実験室内で静置して冷却固化させた。試料 2 は含浸容器内における水分蒸発の完了後、同様に実験室内で放冷した。実験前と同様に固化後の試料の寸法を測定し、次式により各測定箇所の気乾状態の収縮率を求めた。

$$\text{収縮率}[\%] = \frac{(\text{実験前の寸法}) - (\text{実験後の寸法})}{(\text{実験前の寸法})} \times 100$$

3-2-2. 従来の薬剤含浸法

試料 A および試料 B では、含浸溶液—木材間の溶質の濃度勾配による拡散を利用して木材内部へ溶質を移動させる従来の薬剤含浸法を踏襲するため、それぞれ試料全体を PEG 水溶液に浸漬し、順次その濃度を上昇させることで、PEG の含浸を図った。なお、試料 A は最終的に含浸溶液の濃度を 100% まで上昇させたのちに冷却固化させ、試料 B では 40% の濃度まで含浸させたのち、固化工程で真空凍結乾燥を実施することとした。

含浸工程において、試料 A では容量 500 ml のガラスびんに PEG の 20% 水溶液を 500 g 入れて試料を浸漬し、70℃の恒温槽内で保温した。約 10 日が経過するごとにガラスびん内の PEG 水溶液を、別途用意した PEG 水溶液と入れかえ、水溶液の濃度を 20% ずつ上昇させた。最終的に濃度 100% の PEG に 10 日間浸漬したのち、冷却による固化工程に移行した。試料 B では、試料 A と同様に PEG の 20% 水溶液に浸漬し、11 日後に 40% 水溶液への入れ替えをおこない、さらに 10 日間浸漬し、真空凍結乾燥による固化工程に移行した。なお、各濃度の PEG 水溶液は、すべて溶液量が 500 g となるよう調製した。試料 A および試料 B の含浸工程における PEG 濃度と浸漬日数を表 3 に示す。

表 2 試料 1 と試料 2 の実験条件

試料名	恒温槽 1 温度	恒温槽 2 温度 (日数)	エアポンプ流量
試料 1	70℃	40℃(3 日) → 60℃(1 日) → 65℃(1 日) → 69℃(8 日) → 67℃(4 日) → 65℃(3 日) → 60℃(1 日) → 40℃(3 日)	500 ml/min
試料 2	70℃	40℃(5 日)	500 ml/min

表 3 試料 A と試料 B の含浸工程における PEG 水溶液の濃度と浸漬日数

試料名	PEG 水溶液の濃度 (W/W%) と浸漬日数
試料 A	20% 11 日間 ⇒ 40% 10 日間 ⇒ 60% 12 日間 ⇒ 80% 10 日間 ⇒ 100% 10 日間
試料 B	20% 11 日間 ⇒ 40% 10 日間

固化工程では、試料Aは含浸容器から取り出して、表面に付着した余分なPEGをペーパータオルで拭き取ったのち、22℃の実験室内で静置して冷却し、PEGを固化させた。試料Bは、同様に表面のPEG水溶液をペーパータオルで拭き取ったのち、あらかじめ-40℃に冷却した真空凍結乾燥機の庫内に移し、予備凍結として12時間静置した。予備凍結後、庫内を減圧したうえで加熱することにより、試料の水分の除去を図った。この減圧乾燥を7日間おこなったのち、庫内を室温と同等になるまで昇温し、試料を取り出して22℃の実験室内で静置した。固化後の各試料の寸法を試料1、2と同様に測定し、各測定箇所の気乾状態の収縮率を求めた。

3-3-3. X線CTによる内部構造解析

固化後の各試料について、収縮の程度や亀裂の有無、PEGの分布などを観察するため、X線CT（島津製作所製 SMX-100CTD）による撮像をおこなった。撮像にあたっては、ウレタンフォームブロックの土台に試料上部木口面のピンを突き刺し、試料を倒立させた状態で保持した。撮像後、画像をSV3PostRecon.Ink（島津製作所）により再構成するとともに、MultiConeBindMFC 1.002（同社）をもちいて積層データ化した。積層データはExFact2.1（日本ビジュアル・サイエンス）をもちいてレンダリングし、三次元画像として可視化した。積層撮像条件およびレンダリング解像度を表4に示す。なお、表中のFOV（Field of view：有効視野）の値は、X線管と検出器、および試料の距離関係より、xy平面とz軸それぞれにおける撮像範囲として算出した。また、撮像精度はFOVより算出される1ボクセルの1辺の値である。レンダリング精度は立体画像構成時の1ボクセルの1辺の値であり、撮像精度から定まる。

4. 結果

4-1. 実験の経過と試料の外観

4-1-1. 試料1および試料2

試料1および試料2の含浸工程の状況を図5に示す。試料1では含浸容器内のPEG水溶液の液面が徐々に低下した。加湿器を設置した恒温槽2の温度の上昇にともない、液面の低下速度は減少した。また、試料の液面より露出した部分は、常に濡れ色を保ち、形状にも大きな変化は認められなかった。PEG水溶液の減少が完全に停滞した時点では、含浸容器の底部にわずかに溶液が残存していた。以上の工程には24日を要した。

試料1の含浸工程における含浸容器内と加湿器内の温度および相対湿度の測定結果を図6に示す。含浸容器内の温度は、含浸工程中70℃前後で安定して推移した。また、加湿器を設置した恒温槽2の温度を表2に示す通り変化させたことにともない、加湿器内の温度も変化した。加湿器内の相対湿度は、当初100%程度で推移したが、温度の上昇にともなって、95%程度ま

表4 X線CTによる撮像条件および三次元解析精度の条件

試料名	電圧 (kV)	電流 (μ A)	FOV (xy) (mm)	FOV (z) (mm)	撮像精度 (μ m)	レンダリング精度 (μ m)
試料1	65	153	35.748584	12.288576	17.4554	34.9108
試料2	65	153	35.371355	12.297073	17.2712	34.5424
試料A	65	153	35.371355	12.297073	17.2712	34.5424
試料B	65	153	34.858885	12.118909	17.0209	34.0418

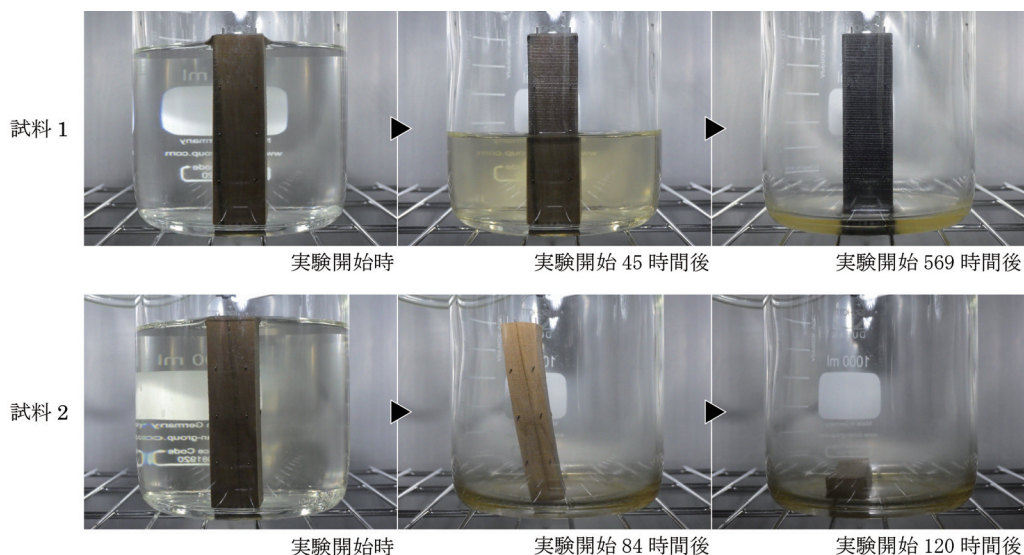


図5 溶媒蒸発法による含浸工程の様子

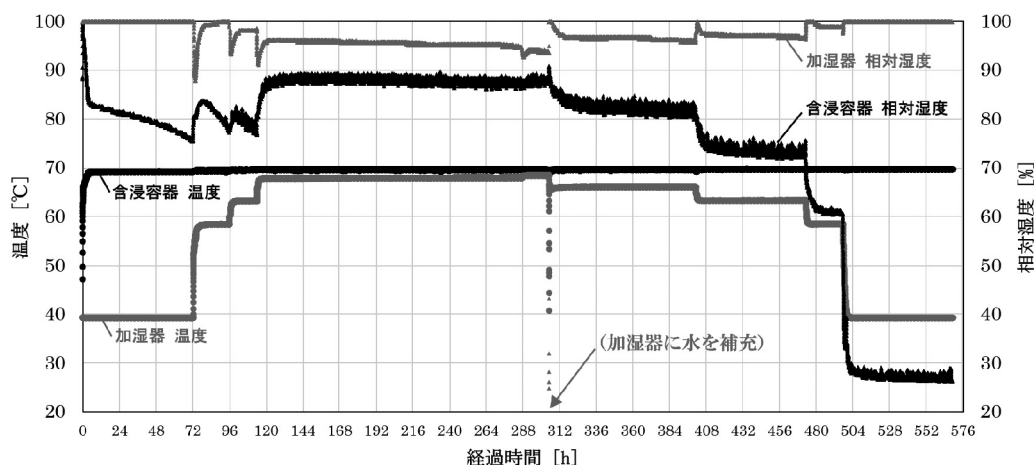


図6 試料1の含浸工程における含浸容器および加湿器の温度と相対湿度の推移

で低下した。含浸工程後半に加湿器内の温度を低下させると、相対湿度は上昇した。なお、加湿器の温度を上昇させた場合には、含浸容器内の相対湿度は上昇し、加湿器の温度を降下させた場合には、含浸容器内の相対湿度も降下した。PEG を含浸させない試料2においても、実験開始後は含浸容器内の蒸留水の液面が徐々に低下したが、液面が容器底面に達するまで試料の外観に大きな変化は認められなかった。一方、容器内に液面がなくなると同時に、試料の色調が明るくなり、接線方向の顕著な収縮が生じた。図5では、乾燥終了時点で試料2が転倒しているが、これはこうした収縮によるものである。

以上の含浸工程後に実験室内で放冷した試料1では、試料表面の色調が含浸工程直後に比べ、やや明るくなった。試料2については、実験室内での冷却による外観上の顕著な変化は認められなかった。実験後の各試料の様子を図7に示す。

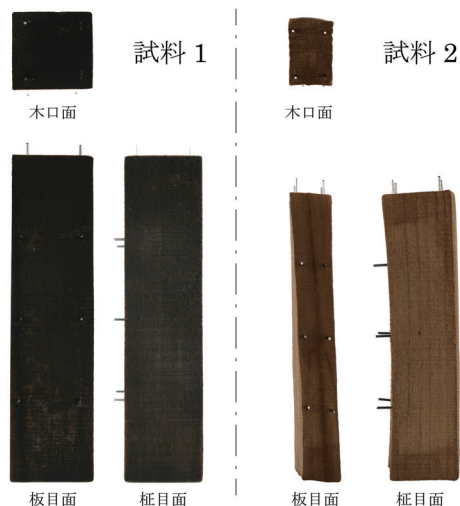


図7 実験後の試料1および試料2の様子

4-1-2. 試料Aおよび試料B

試料Aおよび試料Bともに、含浸工程においては、外観上の顕著な変化は認められなかった。実験後の各試料の様子を図8に示す。同図に明らかなように、固化工程後は試料Aの表面がやや暗い濡れ色となったのに対し、真空凍結乾燥を実施した試料Bの表面は明るい色調となった。また、試料Aでは実験前に正方形であった木口面の形状がやや歪み、その他の面にも肉眼で判別可能な程度の変形が生じた。試料Bでは、2つの木口面において、年輪に直交する亀裂が複数生じるとともに、PEGで表面が白く覆われた状態となった。さらに木口面以外の4面において、試料の内側方向への凹みが生じた。

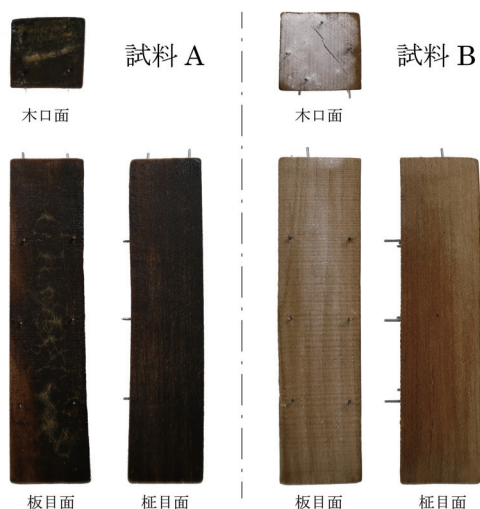


図8 実験後の試料Aおよび試料Bの様子

4-2. 試料の収縮率

全4試料の寸法測定箇所における気乾状態の収縮率を表5に示す。PEGを含浸させていない試料2では、接線方向の収縮率が35～45%程度と大きく、放射方向、繊維方向においても10%程度の収縮率を示した。一方、溶媒蒸発法によってPEG含浸をおこなった試料1では、各部の収縮率が±1%未満であった。

従来の薬剤含浸法を適用した試料AおよびBでは、各部の収縮率は0～5%程度であり、上部木口面における収縮率は試料Aより試料Bでおおむね大きかった。一方、板目面における接線方向の収縮率は、試料Aより試料Bで小さかった。

4-3. 試料内部の状態

X線CTにより得られた各試料の断層画像を試料1, 2, A, Bの順にそれぞれ図9, 図10, 図11, 図12に示す。各図には実験前の試料の形状を基準として、それぞれの断層画像を取得したおよその位置を図示した。また、各図には木表となる面の方向を記し、木口断面の画像は、

表5 各試料の収縮率

試料名	薬剤含浸法	収縮率 (気乾状態) (%)								
		X1-X2	X3-X4	X1-X3	X2-X4	T1-T2	T3-T4	T5-T6	T1-T5	T2-T6
試料1	溶媒蒸発法	-0.29	0.51	0.72	0.00	0.52	-0.13	-0.07	0.47	0.76
試料2	含浸なし	34.57	38.74	10.23	12.28	44.07	42.70	44.58	12.37	12.09
試料A	従来法	1.82	1.55	1.04	0.27	2.64	2.25	2.33	0.86	0.91
試料B	従来法	3.69	1.32	4.61	2.89	-0.07	0.47	0.00	1.19	1.82

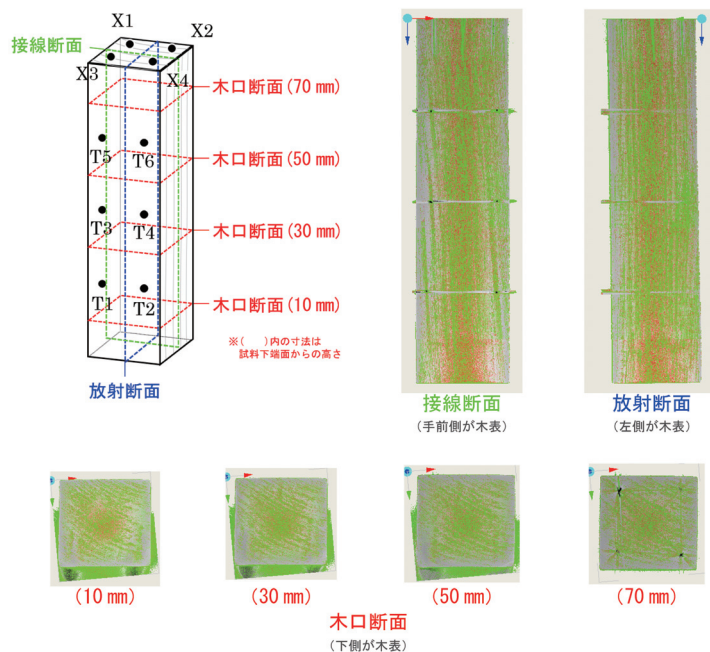


図9 試料1の断層画像

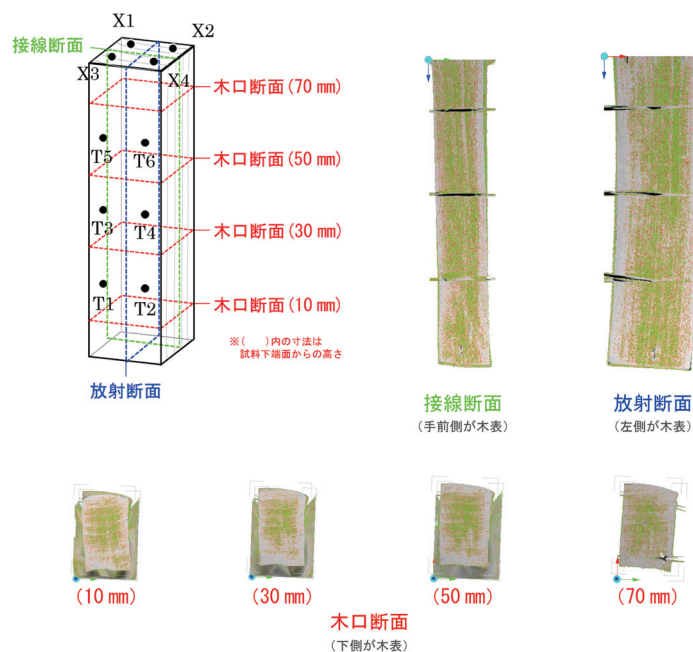


図10 試料2の断層画像

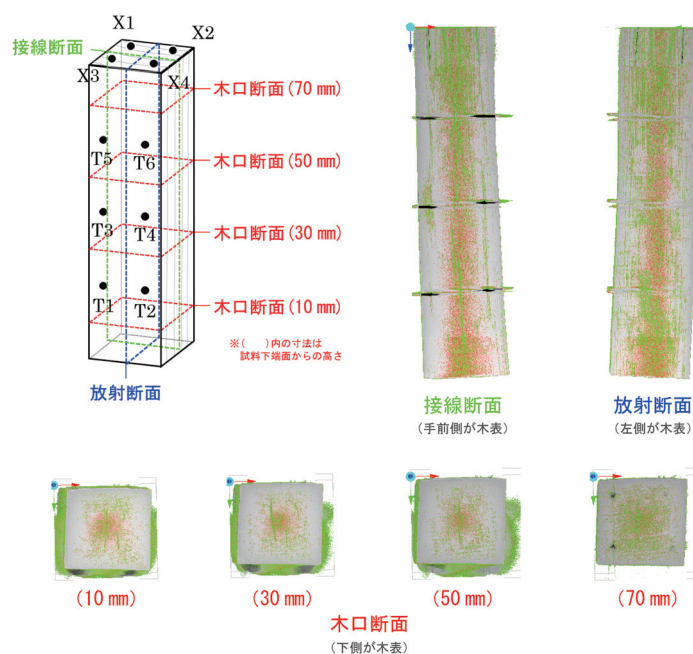


図11 試料Aの断層画像

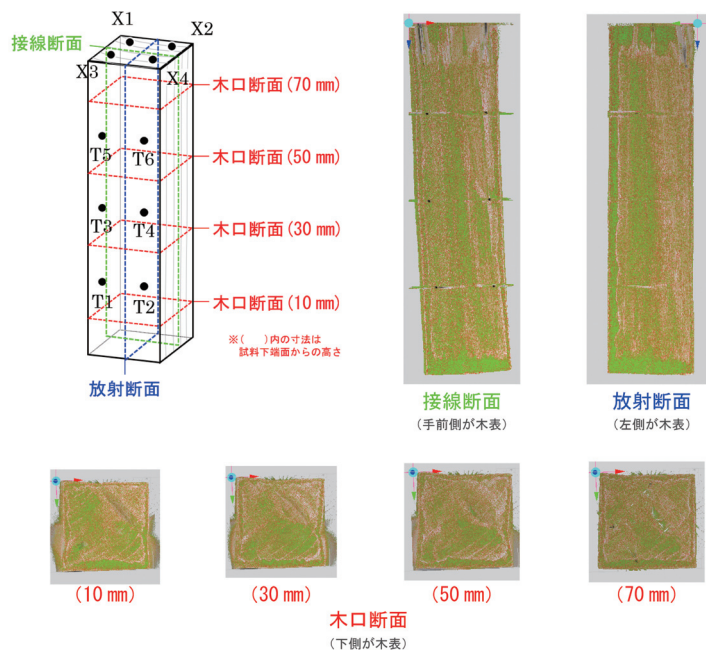


図12 試料Bの断層画像

試料上部から観察した向きとした。空隙部分を強調させるために、断層画像の空気と近似したCT値の領域を黄緑で表現した。さらに視認性を向上させるため、この領域に隣接する木材部分との境界面に相当するCT値の領域を赤で表現した。なお木材細胞壁とPEGの区別は困難であったため、それぞれに相当すると考えられるCT値の領域をともに灰色で表現した。なお、図中には寸法測定用のステンレスのピンによるメタルアーチファクトである直線的なノイズが現れている。

試料1では、試料の全体に空隙を示す黄緑色の領域が分布するが、これはおおむね道管の位置に対応しており、その他に亀裂や大きな空洞などは認められなかった。PEGを含浸させていない試料2においても、内部に目立った亀裂は認められなかった。試料Aでは、試料の外周部にほとんど空隙は認められないものの、試料の中心部には空隙が多く分布し、年輪に直交する比較的大きな亀裂が多数認められた。試料Bにおいても、外周部に比べて試料内部の空隙が多い傾向が認められた。また、年輪に直交する亀裂も認められたが、試料Aに比べてより細かい亀裂が生じていた。

5. 考察

溶媒蒸発法を適用した試料1では、含浸工程において経時的に溶液量が減少する一方で、元の形状が維持されていたことから、試料表面において蒸発する水分に相当する量の溶液が、液絡部から試料へ吸収されたものと考えられる。すなわち、試料表面からの水分蒸発にともなって試料内部に生じた負圧を駆動力として、移流による溶質の移動が引き起こされたといえる。また、含浸容器内部の相対湿度をモニタリングし、その変化を細かく制御したことにより、試料表面から水が蒸発する速度を、試料内部への溶液の供給速度以下に抑制し得たと考えられる。ただし、本実験では加湿器内の相対湿度が100%に維持されることを想定していたが、実際に

は温度の上昇にともなって、95%程度まで低下した。エアポンプの流量は一定としていたことから、温度の上昇によって加湿器内の飽和水蒸気量が増加した結果、蒸留水からの水分蒸発速度が不足し、加湿器内の相対湿度が想定より低下したものと考えられる。

試料1では、収縮などによる外観の明らかな異常は認められず、各部位の収縮率も極めて小さかった。さらに、X線CTによる撮像の結果から、試料内部にも亀裂や異常な収縮が生じていないことが示されており、試料1では溶媒蒸発法によって、PEGを全体におおむね均一に導入し、元の形状を極めて良好に維持することができたといえる。PEGを含浸させていない試料2において、乾燥にともなう顕著な収縮が生じていたことから、溶媒蒸発法によって出土木材への薬剤含浸ならびに一定程度の寸法安定効果の付与が可能であることが示されているといえる。ただし、溶媒蒸発法による含浸工程におけるPEGの濃度分布やその経時的な変化については、以上の実験のみでは十分な考察が困難である。

溶媒蒸発法との比較を目的に、従来の拡散による薬剤含浸法を適用した試料AとBにおいても、各部の収縮率はともに数%程度であり、一定程度の寸法安定効果が得られたといえる。ただし、両試料とも肉眼で判別可能な程度の歪みが生じており、さらにX線CTによる観察から、内部に多数の亀裂が認められた。なお、試料Bでは上部木口面における接線方向の寸法測定の基準としたピンの間に複数の亀裂が生じたため、収縮率が実際より低く計算されていると考えられる。

試料A、試料Bともに含浸工程終了直後の肉眼観察では、外観に明らかな異常は認められなかったことから、こうした変形はおもに固化工程において生じたとみられる。本実験の含浸工程では、PEG水溶液の濃度を約2週間ごとに20%上昇させたが、試料内部に溶質を十分浸透させることは原理的に困難であったと推測される。そのため、含浸させるPEG水溶液の濃度を最終的に100%とした試料Aにおいても、内部には水分が一定量残存していたと考えられる。試料Aでは、この水分が固化工程において蒸発したことにより、亀裂が生じた可能性が高いと考えられる。また、試料Bに収縮や亀裂が生じたことについても、同様にPEG水溶液を試料全体に均一に浸透させることができなかったことによる影響が大きいと考えられる。ただし、試料Bでは真空凍結乾燥における予備凍結が不十分であった可能性も考えられる。

以上の実験において、溶媒蒸発法を適用した試料1の薬剤含浸の期間は24日間であった。従来法を適用した試料では、含浸工程を試料Aで53日間、試料Bでは21日間実施した。さらに試料Bでは、含浸工程に続く真空凍結乾燥に予備凍結を含めて8日間要したことから、保存処理の期間は計29日であった。試料1では、冷却による固化工程を含めた保存処理の期間が試料Aおよび試料Bに比べて大幅に短いにもかかわらず、PEGの含浸の程度および寸法安定性の面において良好な結果を示したといえる。ただし、試料Aおよび試料Bの含浸工程における溶液濃度の上昇は、やや拙速なものであり、従来の保存処理法において必ずしも一般的なものではない。本実験では、試料数が限られていることなどから、各試料の条件や結果の単純な比較には難があるものの、効率性や寸法安定性などの観点から、溶媒蒸発法が木製遺物への薬剤含浸法として大いに有用性をもつ可能性が示唆されているといえる。

6. まとめと今後の課題

本報では、出土木製遺物の保存処理において、溶媒の蒸発を利用して遺物内部に溶液の流れを生じさせ、効率よく溶質を導入する手法を溶媒蒸発法として検討した。出土木材試料とPEG水溶液を用いた予備的な実験の結果、比較的低濃度の溶液に木製遺物の一部を露出させた状態で浸漬し、温度と溶媒の蒸発速度の制御下におくことで、移流によって木材内部へ溶質

を能動的に導入させられる可能性があることを示した。さらに、以上の溶媒蒸発法を適用した実験では、溶質を試料全体におおむね均一に蓄積させ、良好な寸法安定効果を得ることができた。ただし、本実験では木材内における液体の移動性が繊維方向で高い性質を利用するため、木口面が常に溶液に接するよう、試料の繊維方向を鉛直に含浸容器内に設置した。一方、出土木製遺物の形状や寸法は多様であり、薬剤含浸時における遺物の配置や向きに制約がある場合も多い。さらに、木材内部における溶液の浸透性には、こうした木材の異方性や劣化程度などの材質の特徴や溶液の粘度などが影響を及ぼすと考えられる。そのため、溶媒蒸発法による薬剤含浸の実用化のためには、これら相互の関係について、今後定量的に検討を進める必要がある。

また、溶媒蒸発法による木製遺物の保存処理には、種々の薬剤を溶質や溶媒として利用することが可能であると考えられる。さらに、含浸工程に続く固化工程についても、溶質や溶媒の種類に応じて、冷却や自然乾燥、真空凍結乾燥など様々な手法が適用可能であるといえる。これらを適切に選択することで、保存処理の効率をより向上させられる可能性があると考えられる。

従来の拡散をおもに利用する薬剤含浸法では、木製遺物全体を浸漬可能な量の溶液を、相応の大きさの容器内に調製する必要があった。くわえて、その溶液の濃度を上昇させるため、定期的に溶質を追加する、あるいは異なる濃度の溶液を別途調製する必要があった。溶媒蒸発法では、こうした溶液の濃度管理に関する作業負担を大幅に軽減することが可能となるといえる。さらに、はじめに調製する溶液の溶質とする薬剤の必要量は、遺物内部の全空隙に相当する量のみであるため、保存処理後の廃液量が大幅に削減される。このように、溶媒蒸発法は木製遺物の保存処理の効率を大きく向上させるだけでなく、環境負荷ならびに経済的負担を大幅に軽減させる可能性を有していると考えられる。緻密で硬質な樹種からなる遺物や、建築部材をはじめとした大型の木製遺物など、従来の保存処理法では中心部まで十分に薬剤を含浸させることが困難であった遺物への溶媒蒸発法の適用可能性についても、今後検討を進めていきたい。

【謝辞】

試料に用いた出土材の樹種同定にあたり、株式会社古生態研究所の高橋敦氏、奈良文化財研究所の星野安治氏にご協力いただきました。また、実験試料のX線CT撮像に関し、奈良文化財研究所の村田泰輔氏にご協力いただきました。記して深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) Herbst, C.F. : Om Bevaring af Oldsager af Traefundet Tørfemøser, Antiquarisk Tidsskrift, København, 1858-1860 (1861)
- 2) B.B. Christensen : The Conservation of Waterlogged Wood in the National Museum of Denmark (1970)
- 3) 岡田文男、肥塚隆康、沢田正昭、吉田秀男 : 高級アルコール法による出土木材の保存処理、古文化財の科学、37、12-20 (1992)
- 4) 今津節生 : 糖アルコールを用いた水浸出土木製品の保存 (I) 糖類含浸法とPEG含浸法の比較研究、考古学と自然科学、28、77-95 (1993)
- 5) 伊藤幸司、藤田浩明、今津節生 : 糖アルコール含浸法からの新たな展開 ―トレハロースを主剤とする出土木材保存法へ―、日本文化財科学会第27回大会研究発表要旨集、152-153 (2010)

- 6) 増澤文武：出土木材の保存処理の短縮化、古文化財に関する保存科学と人文・自然科学 総括報告書、100-109 (1984)
- 7) 日本木材保存協会編：木材保存学、242-243 (1982)
- 8) 飯田生穂、野村隆哉、森岡茂勝：樹液流を利用した材の染色と寸法安定化処理、京都府立大学 学術報告 農学、41、64-70 (1989)

キーワード：水浸木材 (waterlogged wood)；含浸 (impregnation)；ポリエチレングリコール (polyethylene glycol)；溶媒蒸発 (solvent evaporation)；毛細管現象 (capillary action)

Possibility of Solute Impregnation Method for Waterlogged Wood by Controlling Solvent Evaporation

MATSUDA Kazutaka*, WAKIYA Soichiro* and KOHDZUMA Yohsei*

In the conservation treatment of waterlogged wood, impregnation of a solute into wood for stabilization can be processed by immersing the whole wood in a chemical solution. However, since the penetration of solutes by diffusion is generally very slow, the efficiency of the process is severely limited. Though various types of chemicals have been proposed so far as impregnant for waterlogged wood in order to improve the efficiency of the impregnation process, the principle of impregnation itself has not changed significantly. In the present study, the efficient method of impregnating chemical into waterlogged wood was examined based on the principle which was different from the conventional one. As a result of the preliminary experiment with PEG for impregnant, it is suggested that permeation and accumulation of solutes by advection can be efficiently progressed by immersing the waterlogged wood in the solution with the upper part of it exposed to the air and controlling temperature and evaporation rate of the solvent. Also, the dimensional stability of the wooden sample after solidification of PEG was excellent. The experiment also suggested that there is the necessity of controlling the solvent evaporation rate properly so as not to exceed the rate at which the solution is absorbed into the wood. It is considered that the permeability of the solution inside wood is affected by the structure of wood, the degree of deterioration of wood and the viscosity of solution.

*Nara National Research Institute for Cultural Properties