

ラクチトールからトレハロースへ ー糖類含浸法の新展開ー

伊藤 幸司¹⁾・藤田 浩明¹⁾・今津 節生²⁾

●キーワード：水浸出土木材 (waterlogged wood), トレハロース (trehalose), ラクチトール (lactitol), 糖アルコール含浸法 (sugar alcohol method), 臨界比湿度 (critical relative humidity)

1. はじめに

遺跡の中から木製の船や農具・漆器などの有機遺物が、水漬けの状態で見られることがある。通常ならば朽ち果ててしまう有機遺物が奇跡的に残るのは、海底や地下の特殊な環境の中で、飽水状態と酸素欠乏状態が長期にわたって継続した場合に、有機物を分解する腐朽菌やバクテリアなどの微生物が活動を停止するからである。埋蔵環境にある木材は微生物によって細胞壁が破壊され、細胞まで水が浸入して飽水状態になった後に酸素欠乏状態で安定する。このような特殊な環境で見られた木材を、水浸出土木材あるいは出土木材 (Water logged Wood, 以下「出土木材」と呼んでいる。飽水状態で発見された出土木材は、細胞壁が破壊されて強度が著しく低下している。さらに、細胞内まで入り込んだ水が蒸発する時に激しく収縮する。発掘した出土木材は乾燥すると一夜のうちに収縮するので、初期には水漬けで保管されるが、長期に水漬けで保管すると再び微生物による木材細胞の破壊が進んで脆弱化する。そこで、水分を除去しながら木材細胞を強化するために、適切な保存処理を実施しなければならない。

出土木材の保存方法は、水に可溶性の物質を用い、浸透圧を利用して木材細胞に高濃度まで含浸することによって、木材細胞を強化すると共に乾燥する方法が主として開発されてきた。木材を強化含浸する材料として、

19世紀から20世紀前半頃まで北欧を中心にカリ明礬 (Potassium alum) が使用され、1960年代からはデンマーク・スウェーデンなどを中心に高分子材料の水溶性ワックスであるポリエチレングリコール (Polyethylene glycol: PEG) が利用された。1980年代からはヨーロッパを中心に蔗糖 (Sucrose) などの糖類を含浸して、劣化した木材細胞を安全で安価に強化する方法が実施されている。

我々は、1994年から糖アルコールの一種であるラクチトール (Lactitol) を主剤とする処理方法を開発し、実用化を進めてきた (糖アルコール含浸法: Sugar Alcohol Method)。その後、糖アルコール含浸法は国内各地に普及し、発表された論文・研究は国内外で70件以上に達している。このうち、海外での研究発表を記載すると、1996年には英国のヨークで開催された水浸考古遺物保存の会議 (WOAM: ICOM Group on Wet Organic Archeological Materials) で初めて発表し、1998年のWOAMでは下池山古墳出土の巨大な木棺の加熱含浸保存を、1999年にはフランスのリヨンで開催されたICOM-CC (ICOM Committee for Conservation) では南郷大東遺跡出土の大形木槨の常温含浸保存を発表した。さらに、2001年にはラクチトールとトレハロース (Trehalose) の混合含浸法を発表し、今日に至っている。また、海外における保存実施例としては、2002年にブラジルのリオデジャネイロで開催されたICOM-

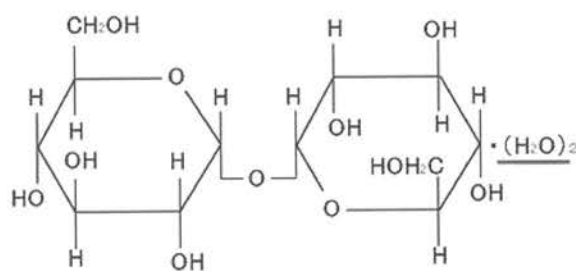
¹⁾ (公財) 大阪市博物館協会大阪文化財研究所 〒540-0004 大阪市中央区法円坂 1-1-35 アネックスパル法円坂 6F

²⁾ 九州国立博物館 〒818-0118 福岡県太宰府市石坂 4-7-2

CCにおいて、メキシコのピラミッドから発見された彩色を施した仮面の保存、2007年にオランダのアムステルダムで開催されたWOAMで、中国泗水王陵文物の保存を発表している。2008年にはインドのニューデリーで開催されたICOM-CCで、15年に及ぶ研究開発と保存処理事例について発表している。しかし、近年ラクトールの価格高騰や地球温暖化防止に向けた省エネルギー政策の強化をきっかけとして、従来よりも更にエネルギーを使わない安全で安価な保存方法の必要性を痛感するに至った。そこで、糖アルコール含浸法で補助剤として使用してきたトレハロースを単独で使用した結果、従来よりも安価で安全に短時間で保存処理を行える可能性を見いだすことができた。

2. 含浸強化を目的としたトレハロースの特質

トレハロースは、グルコースが2個結合した非還元性の糖質である。二糖類に属し（分子量：342）、常温（以下15℃～25℃を想定）では2分子の水と結合して2水和物（dihydrate 分子量：378）の結晶を作る（図1）。



Molecular mass: 342.3 (anhydrous)
378.3 (dihydrate)
Melting point: 97 °C (dihydrate)
Deliquescence point: >95% RH at 25°C

図1 トレハロース2水和物の化学構造式

Fig. 1 Chemical structural formula of trehalose dihydrate

表1 ラクトール・トレハロース・蔗糖の耐熱安定性比較

Table 1 Heat resistance stability of lactitol, trehalose and sucrose

Disaccharide sugar type	Heating parameters and decomposition rate	
	100°C,pH4-180 min.	120°C,pH4-30 min.
Lactitol	0.6%	0.6%
Trehalose	0%	0.1%
Sugar(Sucrose)	66.4%	82.4%

この2水和物の結晶は融点が97℃であり、95%RH（相対湿度）以下では吸湿しない特徴がある。

トレハロースは動植物界に広範囲にわたって存在する自然の糖であるが、かつては大量生産が困難で数万円/kgを超える高価な糖であった。しかし、1995年頃、デンブンから直接トレハロースを作る大量生産が可能になり、数百円/kgまでコストダウンして食品用途にも使用可能になった。

トレハロース水溶液は酸性環境下でも安定性に優れており、木材から発生する酸などの影響によって酸性化した溶液中でも分解しない（図2）。また、溶液を加熱した状況の中でも安定した状態を保っている。たとえば、出土木材の含浸に用いられている蔗糖や、これまで糖アルコール含浸法の主剤として使用してきたラクトールと比較しても、加熱による分解は無く極めて安定である（表1）。

このように埋蔵環境下で劣化した木材細胞の細部に至

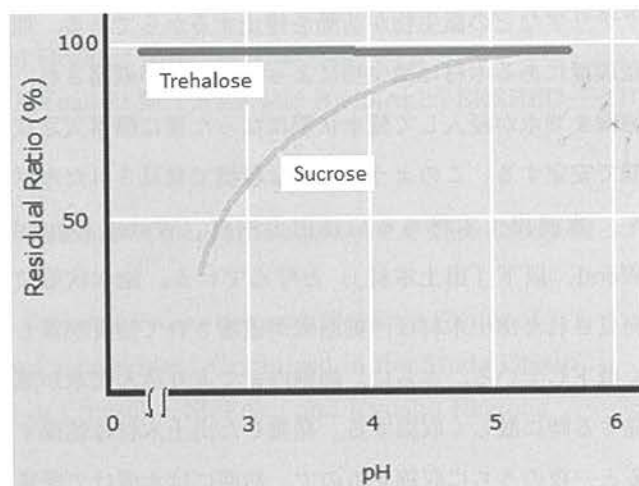


図2 蔗糖とトレハロースの耐酸性比較（100℃, 30分）

Fig. 1 Heat and acid resistance of trehalose and sucrose (100°C,30min)

表2 高湿度環境におけるトレハロースの安定性

Table 2 Stability of trehalose in high humidity condition
臨界比湿度：ある湿度以上で吸湿平衡曲線が急激に上昇し、その湿度以下では吸湿量に大きな変化が見られない湿度。
Critical relative humidity: the hygroscopic parallel curve increases rapidly at certain humidity, and significant changes are not seen below that humidity.

Category	Critical relative humidity		
	37°C	30°C	25°C
Lactitol (monohydrate)	85%	85%	85%
Trehalose (dihydrate)	95%	-	-

るまで長期間かけて加熱含浸する場合、使用するトレハロースの熱や酸に対する安定性は極めて重要な要素である。

さらに、結晶化したトレハロース（2水和物）は、高湿度環境でも吸湿しない特質がある。ある湿度以上で吸湿平衡曲線が急激に上昇し、その湿度以下では吸湿量に大きな変化が見られない湿度である臨界比湿度（Critical Relative Humidity, CRH）を比較すると、トレハロースは95%RHまで吸湿しない（表2）。

この値は、高温多湿の環境が繰り返す東アジアの環境にあっても、おおむね吸湿による変化が無いことを示している。実際に、湿度の低いヨーロッパで使用されている蔗糖の臨界比湿度が83%RHであり、これまで糖アルコール含浸法の主剤として使用してきたラクチトール（1水和物）の臨界比湿度が85%RHであることと比較しても、臨界比湿度が95%RHに達するトレハロース（2水和物）が高湿度環境下でも極めて優れた安定性を持つことがわかる（図3）。

実際に、トレハロースで保存処理した出土木材の高湿度環境（85%RH、25℃に2週間放置）における吸湿性を比較しても、トレハロースを多く浸した木材ほど吸湿による重量変化が少ないことがわかる（図4）。また、トレハロース2水和物の結晶は、85%RH、25℃の環境でも全く吸湿しなかった。

このように、トレハロースは出土木材の含浸強化剤として、次のような優れた特徴と多様な可能性を備えている。

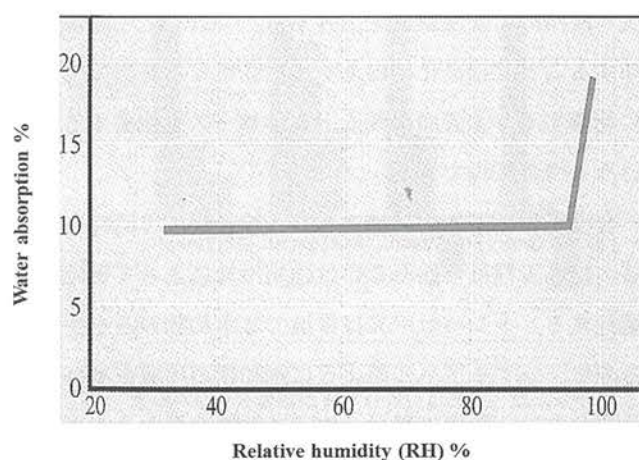


図3 トレハロースの吸湿曲線
Fig. 3 Hygroscopic curve of trehalose

- ① 熱に対する安定性はPEGや蔗糖よりも高く、高温でも分解しない。
- ② 高湿度環境における安定性はPEGや蔗糖やラクチトールよりも高い。
- ③ ラクチトールよりも常温で安定した結晶（2水和物）を作る。
- ④ ラクチトールよりも安価である。
- ⑤ 低温含浸、非加熱含浸を目指すことで、使用する電力などのエネルギー削減効果が期待できる。

1994年頃の糖アルコール含浸法開発の時期には、トレハロースは稀少糖の一種として極めて高価な糖類であるために、出土木材の保存のために大量に使用することは現実的ではなかった。その後、1995年にデンプンからの安価な大量生産技術が岡山県の（株）林原によって確立され、さまざまな用途に用いられた。我々も1998年頃から実験に取り組み、2000年にはラクチトールとトレハロースの混合含浸法を提案し、2010年にはトレハロース単独の含浸強化方法を提案するに至っている（伊藤ら：2010）。

かつて希少糖であったトレハロースは日本の国産技術によって量産化が進み、現在では大量生産の技術が確立して蔗糖の代替品として広く活用されている。今では世界各国にも供給できる体制が整い、価格も蔗糖に次ぐ安さで安定供給されている。

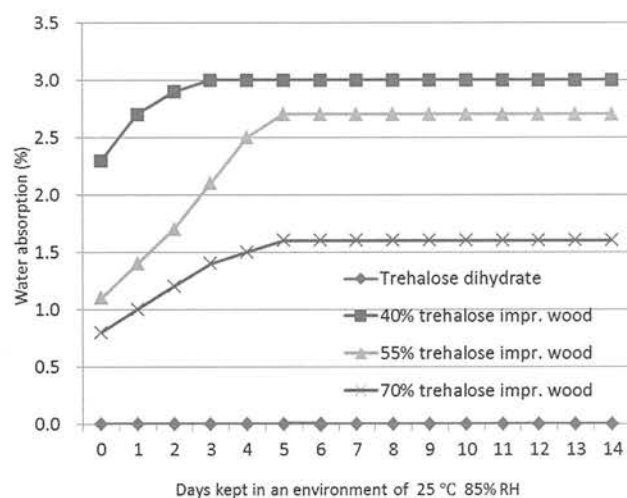


図4 保存処理木材の高湿度環境における吸湿性
（85%RH 25℃に2週間放置）

Fig. 4 Hygroscopicity of trehalose and trehalose-conserved wood kept in RH 85% at 25℃ for 2 weeks

3. トレハロース含浸法の誕生

3.1 溶解度と結晶性の活用

前述のように、トレハロースは水浸出土木材の含浸強化材料として理想的な特徴を備えている。この特徴を利用したトレハロース含浸法は、含浸期間や保管環境での安定性、作業性、高い寸法安定性において、従来のPEGや蔗糖、糖アルコール含浸法と同等以上の性能が期待できる。しかし、これまで主剤として用いなかったのは、溶解度の低さにあった。60℃程度の高温を維持すれば水と任意に混合するPEGとは異なり、結晶性の高い糖類は温度と溶解度によって含浸濃度が決まる。たとえば、蔗糖は常温で65%まで含浸できるが、加熱しても75%以上に含浸することはできないので、日本出土の劣化した広葉樹を安定的に保存処理するためには不十分と考えていた。糖アルコール含浸法の主剤であるラクチトールであっても、高温に加熱しながら約80%の高濃度溶液に含浸する必要があった。一方、トレハロースの溶解度は低温で低く(20℃で41%)、高温でもラクチトールに及ばない(80℃で78.5%) (図5)。

このようなことから、トレハロースは高濃度含浸には限界があるので、劣化した木材の保存処理には適用できないだろうと考えていたのである。

しかし、欠点と思えたトレハロースの性質も、利点に変えることができることが判明した。図5のように、トレハロースは蔗糖やラクチトールと比較して、高温で溶解度曲線の勾配が上がる。この性質は結晶性の良さを示しており、温度変化による迅速な結晶化は、含浸後の寸法安定性に寄与することが予想される。

この性質を利用すれば、温度変化を利用して木材内部まで含浸したトレハロース水溶液から、急速に結晶を析出できる。劣化した木材細胞の空隙を埋めるように析出した結晶は、木材組織を強化して乾燥による木材の収縮を防ぐことが期待される。しかも、トレハロースは図1で示したように、周囲の水分を約10%取り込んで水分保持力の強い安定した2水和物の結晶をつくるので、見かけの溶解度よりも約10%多い固形物となり木材組織を補強する。

このように、木材内部で効率的に結晶を生成すること

によって、木材組織の収縮を最小限に止めながら乾燥することが期待される。すなわち、トレハロース含浸法の基本は、含浸工程から結晶工程を経て、乾燥工程、仕上工程に至る各工程を認識して作業を段階的に進めることにある。

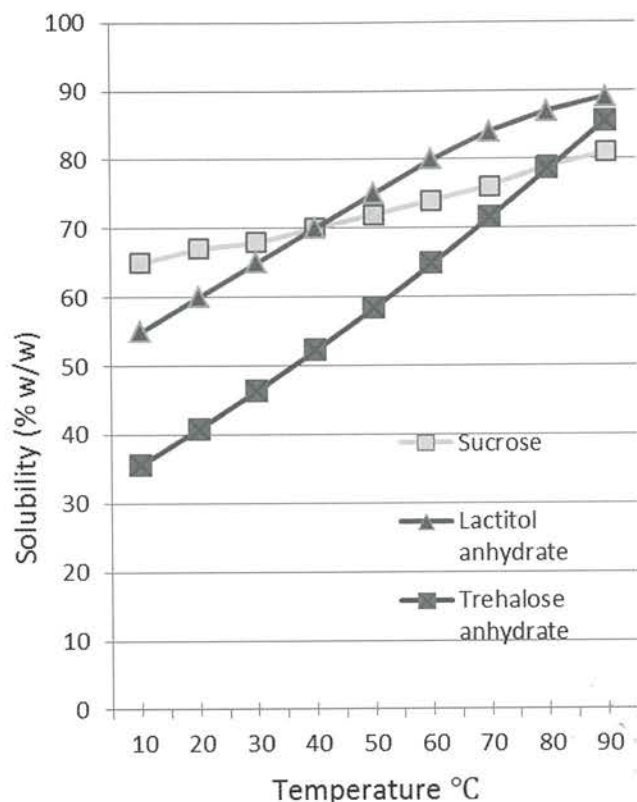


図5 蔗糖・ラクチトール・トレハロースの水に対する溶解度の温度依存性

Fig.5 Water solubility of sucrose, lactitol anhydrate and trehalose anhydrate depending on temperature

3.2 ラクチトールとトレハロースの寸法安定性比較

トレハロース含浸法の基本工程は、①低濃度から高濃度へ段階的に含浸濃度を上昇する。②取り上げ直後に冷却することで結晶化を促進する。③風などを当てて均一に乾燥する。④表面に残るトレハロースを除去する、という4つの工程である。

含浸工程は基本的に糖アルコール含浸法と同様に進める。結晶工程は自然あるいは強制冷却によって短時間に進行する。トレハロースは常温で2水和物のみを生成するので、ラクチトールのように水和物の生成を制御する必要がない。乾燥工程は、均一に乾燥が進むように風を当てるのが良い。仕上工程は表面に付着しているトレハロースの結晶を除去する(詳しくは4章の含浸・結晶・

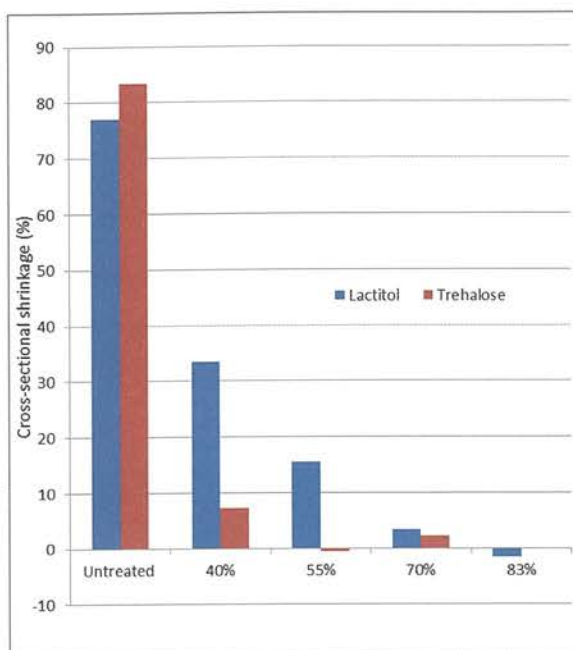


図6 ラクチトール含浸とトレハロース含浸による出土木材の木口面収縮率の比較(実験材:ケヤキ Umax:600%)

Fig.6 Cross-sectional shrinkage of archaeological Zelkova wood (Umax=600%) treated with lactitol and trehalose in different final impregnation concentrations of 40% at 20°C, 55% at 50°C, 70% at 70°C and 83% at 80°C (only for lactitol). Concentrations are given for anhydrous lactitol and trehalose.

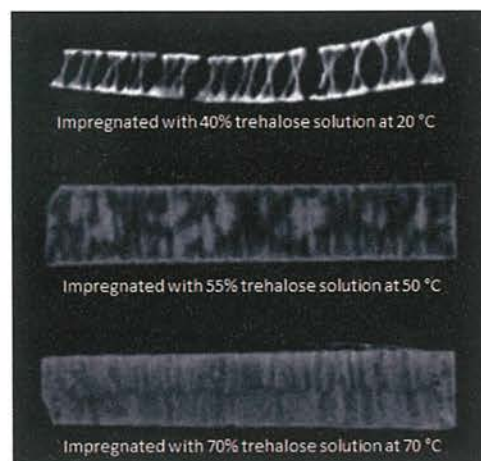


図7 トレハロース含浸強化後の出土木材(ケヤキ, Umax=600%)の断面 X 線 CT スキャナによる断面比較(上から 40%, 55%, 70%含浸)

Fig.7 X-ray computed tomography scans showing the cross-sections of archaeological Zelkova wood samples (Umax=600%) conserved with trehalose and air-dried. Impregnation degrees are 40%, 55% and 70%, in descending order.

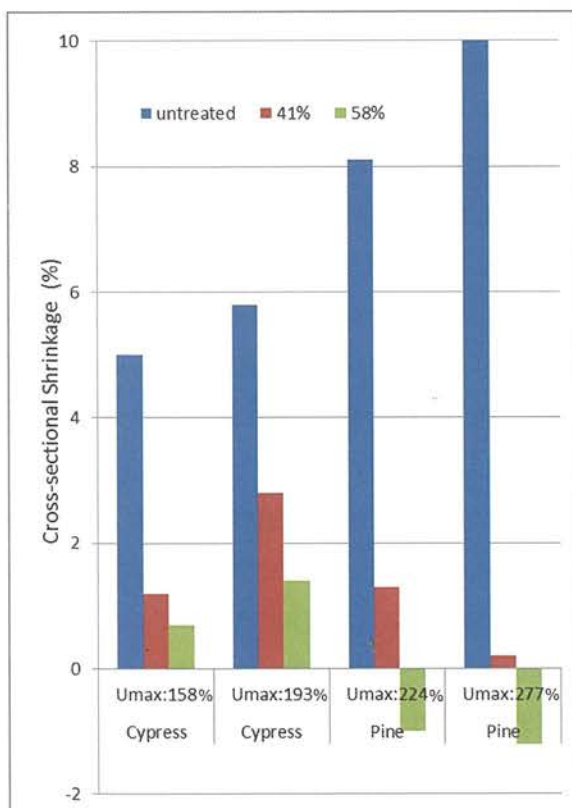


図8 トレハロース含浸における含浸濃度と寸法安定性(針葉樹の場合)

Fig.8 Final trehalose impregnation concentrations (41% at 20°C, 58% at 50°C) and dimensional stabilization for needle-leaved trees

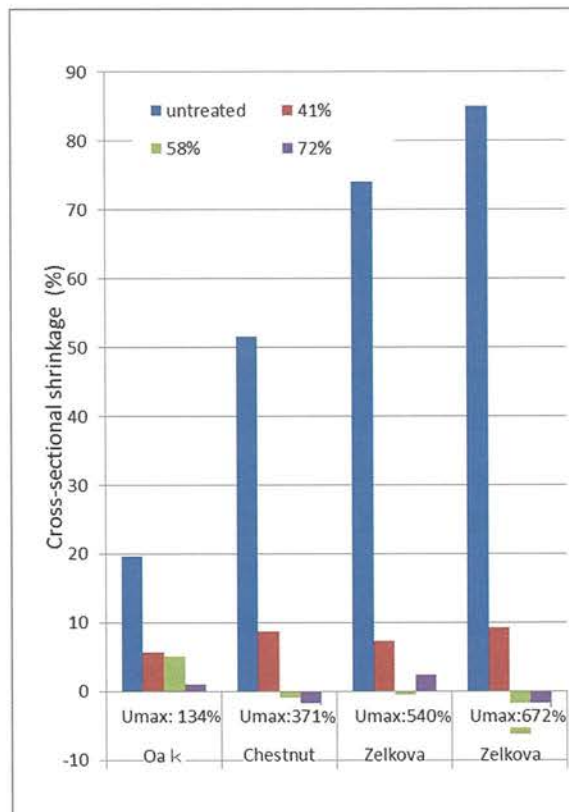


図9 トレハロース含浸における含浸濃度と寸法安定性(広葉樹の場合)

Fig.9 Final trehalose impregnation concentrations (41% at 20°C, 58% at 50°C, 72% at 70°C) and dimensional stabilization for broad-leaved trees

乾燥の基本工程を参照)。

上記のような作業工程を経て、従来の糖アルコール含浸法(ラクチトール)とトレハロース含浸法による寸法安定性の比較実験を行った。実験材は、劣化の激しい広葉樹のケヤキ(最大含水率: U_{max} 600%前後)である。実験では、5日ごとに溶液の濃度を約10%上昇させながら50–70℃で含浸した。その後、温度低下に伴う結晶化を経て、風通しの良い環境で乾燥した。その結果、トレハロース含浸法では、含浸濃度が40%含浸では7%の収縮であったが、55%含浸では0.5%、70%含浸では2.2%の木口面収縮率に達した(図6)。

いずれも、従来のラクチトール含浸と比較して、大幅に寸法安定性が向上している。ただし、保存処理木材の内部をX線CTで観察したところ、40%含浸では内部に大きな亀裂が発生していた。55%含浸でも、僅かに内部亀裂を確認した。これに対して、70%含浸では内部亀裂もなく均一な結晶がみられた(図7)。このような観察結果から、劣化した広葉樹(ケヤキ、 U_{max} : 600%)に対して、70%含浸で必要十分な寸法安定性が得られ、55%含浸では僅かに不足していることがわかる。

このように従来の方法では、2%前後の木口面収縮率を得るために、ラクチトールで80%を超える高濃度含浸を必要としたのに対して、トレハロースでは70%の溶液に含浸させることで同程度の寸法安定性を得られることが判明した。

3.3 劣化状態の違いによる寸法安定性比較

劣化状態の異なる針葉樹と広葉樹を用いてトレハロース含浸実験を行い、保存処理後の寸法安定性を比較した。それぞれの最終含浸濃度は20℃、50℃、70℃における飽和溶液とした(20℃: 41%、50℃: 58%、70℃: 72%)。

含水率の異なる4種類の針葉樹について比較すると、いずれも41%含浸あるいは58%含浸処理で、木口面収縮率が±2%前後の安定した状態に達する(図8)。

一方、広葉樹は41%含浸でも見かけ上の寸法安定性を発揮する。含水率が低ければ、低濃度含浸による保存処理も可能になる可能性が高い。しかし、低濃度含浸では、劣化した木材ほど木材内部に亀裂を生じることが懸念される。したがって、劣化した木材では58%含浸で

も不足の場合があり、現時点では安全性を考慮して72%含浸が妥当と判断している(図9)。

4. 含浸・結晶・乾燥の基本工程

4.1 トレハロース含浸法的基本概念

トレハロース含浸法の基本は、含浸したトレハロース水溶液を迅速に結晶化させることで、乾燥に伴う木器の変形を抑制し、安定化することである。その実作業で重要なポイントが2つある。

第一のポイントは、温度と濃度の管理である。保存処理の成否を大きく左右するのが結晶化の工程であることは言うまでもないが、より効果的に結晶化を図るために温度と濃度を意図的に操作(調整)することが肝要である。このように記すと管理が難しいように思えるかもしれないが、端的に言えば木器に含浸したトレハロース水溶液を過飽和状態にすることで結晶化を促進する「スイッチ」を押すのである。実作業においてその方法を大別すると3つのパターンがある。

① 加熱法

常温から加熱することにより濃度を上げて含浸した木器を取り上げ、常温に戻すことにより過飽和状態にして結晶化を促進する。

② 冷却法

常温で必要濃度(通常は飽和濃度)まで含浸した後に取り上げ、温度を下げることで結晶化を促進する。この状態で常温に戻すと結晶が再溶解するため、低温下で水分を必要量除去した後、常温に戻す。

③ 常温法

常温で必要濃度(通常は飽和濃度)まで含浸した後、水分を必要量除去することで結晶化を促進する。

資料の状況によって①～③を選択・組み合わせて行う。最も確実な方法は①であるが、加熱装置を必要とする。しかし、どの程度まで濃度を上げなければならないのかを資料状態から判断することにより、加熱期間を従来よりも大幅に短縮できる。

②については温度を下げる機器を必要とすると共に、水分を除去するための方策を持っていなければならない。

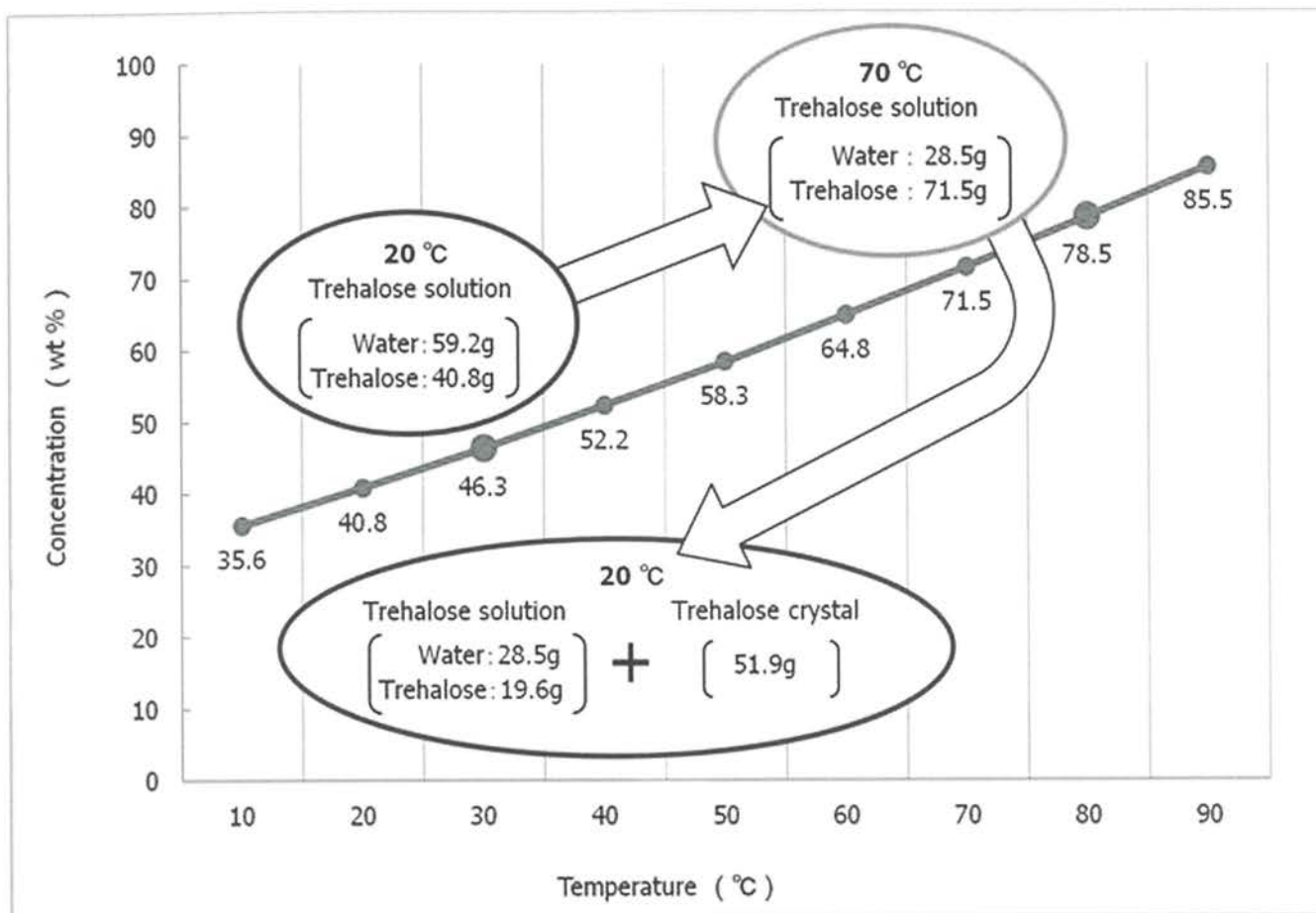


図10 トレハロース含浸・結晶化工程の概念図
Fig. 10 Conceptual diagram of trehalose impregnation/crystallization process

木器処理の理想形ともいえる「常温含浸で処理終了」という姿に最も近いのが③である。しかし、水分を除去する方策を講ずるとともに、水分の減少に伴ってしか結晶化が進行しないので、その期間の木器の管理に細心の注意が必要となる。

第二のポイントは、「風乾」である。これは第一のポイントに挙げた3つのパターンに共通して行うべき重要な作業で、含浸液から取り出した直後から扇風機などの送風装置を使って木器に風を当て「風乾」するのである。木器に風を当てることでその表面から熱や水分を奪い、いち早く表層部に結晶を生成する効果が得られるのである。また、大型品になるほど内部までの結晶化の進行に時間を要するわけだが、その間に天地返しを行うとともに、継続して送風、風乾することで安定した成果を得ることができる。

ここでは①のパターンを例に挙げ、その実作業を紹介する。また、①のパターンの基本工程を、トレハロース

の溶解度曲線と合わせて概念図として示す(図10)。

4.2 トレハロース含浸法の主な流れ

<一般的な木器>

- ①前処理：洗浄と脱色処理をおこなう(写真1)。
- ②含浸処理：木器内の水分とトレハロースを置換するため、トレハロースを温水に溶かし、木器を浸す(写真2)。濃度は約20~30%から開始、時間をかけてトレハロースの濃度を徐々に上げる。最終濃度は72%前後(70℃の飽和濃度)。
- ③取り上げ：木器表層部のトレハロース水溶液の濃度が下がるのを防ぐため、湯を用いた洗浄はおこなわない(写真3・4)。
- ④結晶化：結晶化のスイッチを入れるために木器の温度を下げる。急激な乾燥を防ぐために覆いをかけながら、扇風機やスポットクーラーで風を当て冷却する(写真5)。大型木器の場合、芯まで温度が下がるの

に時間を要するため、冷蔵庫（大阪文化財研究所では農産物低温貯蔵庫を使用，設定温度は5℃）に半日ほど入れ強制的に冷却している（写真6）。

⑤風乾：木器内部に残っている水分を乾燥させ，さらに結晶化を促進するために，扇風機などで木器に風を当てて均一に乾燥させる（写真7）。

乾燥が進む段階で木器の表面に細かい亀裂が入り始めたときには，直ちにその箇所に高濃度のトレハロース水溶液（約50～70%）を筆などで塗布し，トレハロースを補う。

⑥表面処理：表面に付着しているトレハロース結晶を除去する。この際，できるだけ水分が木器内部に浸み

込まないようにするため，濡れた部分はしっかりと拭き取りながら作業をおこなう。スチームバキュームクリーナーを用いると作業効率が良い（写真8）。その後，再度風を当てて乾燥する（写真9）。

〈漆器〉

これまで，熟練を要した漆器の保存処理についてもトレハロースの特徴を生かした保存処理が可能になった。

①前処理：表面の洗浄のみおこなう。

②含浸処理：＜一般的な木器＞②と同じであるが，加熱温度を上げすぎると漆膜が脱落する恐れがあるので温度上限は55℃とする（写真10）。最終濃度は55℃の飽和濃度とし，資料の状況から更に加熱が可



写真1 一般的な木器①，前処理（洗浄）
Photo.1 Wooden object ①, before treatment (cleaning)



写真2 一般的な木器②，含浸処理
Photo.2 Wooden object ②, impregnation



写真3 一般的な木器③，取り上げ-1
Photo.3 Wooden object ③, take up from liquid-1



写真4 一般的な木器③，取り上げ-2
Photo.4 Wooden object ③, take up from liquid-2



写真5 一般的な木器④, 結晶化-1
Photo. 5 Wooden object ④, crystallization-1



写真6 一般的な木器④, 結晶化-2
Photo. 6 Wooden object ④, crystallization-2



写真7 一般的な木器⑤, 風乾
Photo. 7 Wooden object ⑤, air drying



写真8 一般的な木器⑥, 表面処理-1
Photo. 8 Wooden object ⑥, surface treatment-1



写真9 一般的な木器⑥, 表面処理-2
Photo. 9 Wooden object ⑥, surface treatment-2



写真10 漆器②, 含浸処理
Photo. 10 Lacquerware ②, impregnation



写真 11 漆器③, 取り上げ-1
Photo. 11 Lacquerware ③, take up from liquid-1



写真 12 漆器③, 取り上げ-2 (ディッピング)
Photo. 12 Lacquerware ③, take up from liquid-2 (dipping)



写真 13 漆器④, 結晶化
Photo. 13 Lacquerware ④, crystallization

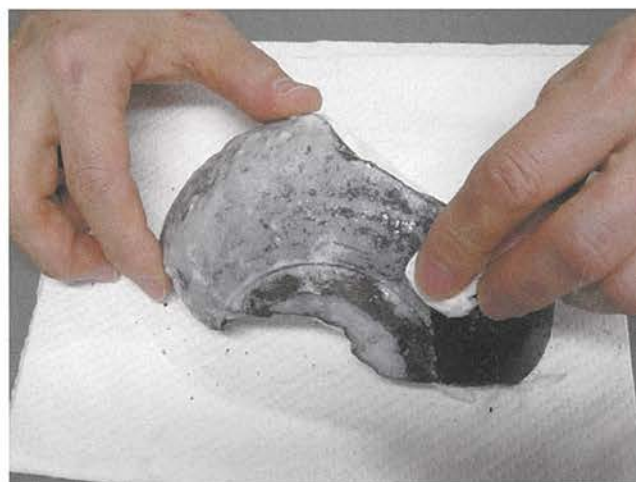


写真 14 漆器⑥, 表面処理-1
Photo. 14 Lacquerware ⑥, surface treatment-1



写真 15 漆器⑥, 表面処理-2
Photo. 15 Lacquerware ⑥, surface treatment-2



写真 16 漆器⑥, 表面処理-3 (漆膜の固着)
Photo. 16 Lacquerware ⑥, surface treatment-3 (press down of lacquer film)

能な場合は濃度アップする。

③取り上げ：最終含浸濃度が低いので、表層部へトレハロースを補う処理、「ディッピング」をおこなう。ディッピングは、高濃度トレハロース水溶液（70%前後）に漆器を10秒ほど浸す（写真11・12）。

④結晶化：＜一般的な木器＞④と同じ（写真13）。

⑤風乾：＜一般的な木器＞⑤と同じ。

⑥表面処理：＜一般的な木器＞⑥と同じ（写真14）。

小型のスチームクリーナーを用いると作業効率が良い（写真15）。剥離しそうな漆膜については、押さえて固着する（写真16）。その後再度風乾する。

●結晶化・乾燥工程を終える判断については、取り上げ後資料の重量測定をおこない、重量が恒量に達するのを目途とする（伊藤ら：2012）。

5. まとめ

我々は安価・安全・短時間で保存処理を行える可能性のある素材として、トレハロースを用いた保存処理方法を提案した。トレハロースの水溶液は酸・熱に対して極めて安定しており、蔗糖で起こるような分解はない。また、飽和溶液から温度差を利用して、容易に結晶を析出することができる。このトレハロースの結晶は、約10%の水を取り込んで安定した2水和物となる。この2水和物結晶は高湿度環境（95% RH以下）でも吸湿しない特質があるので、高湿度になりやすい東アジアの環境でも安定的に維持することができる。

実際の作業において、ラクチトールを主剤とする糖アルコール含浸法では、含浸処理工程の短縮や適用範囲の拡大等、多くの利点があった。反面、トラブルの原因となる3水和物の生成を避けるための制約もあった。しかし、トレハロースには、3水和物に相当する結晶は存在しない。これにより結晶工程でのトラブルが激減すると

ともに、対象木器の条件に合わせた低濃度含浸、ひいては常温含浸（非加熱）への道を開いた。また、結晶性が高いことにより作業性・寸法安定性が飛躍的に向上した。具体的には、加熱含浸後に取り上げた木器の表面がごく短時間のうちに固化し、変形を抑える。この結晶化のスピードは、作業の際に手に付着したトレハロース水溶液が見る見るうちに白色の粉末に結晶することからも体感できる。

このような特徴を生かしたトレハロース含浸法は、糖アルコール含浸法と同等以上の性能が期待できる。しかも、加熱含浸期間を短縮し加熱温度を低く押さえることによってエネルギー削減効果も期待できる。

トレハロース含浸法は、まだ研究の途についたばかりであるが、今回紹介した処理工程以外の手順や、これまでとは視点を変えた方法など、改良と工夫を重ねることによって安全で精度の高い保存処理方法になる可能性を秘めている。トレハロース含浸法をより多くの方に実践していただきながら改善や改良を進め、情報を共有しながら発展と普及を目指していきたい。

謝 辞

本研究では、株式会社 林原生物化学研究所（現 株式会社 林原）に資料を提供して頂いた。高妻洋成氏（奈良文化財研究所）、Andras Morgos氏（ハンガリー国立博物館）にご指導・ご助言を頂いた。また本稿をまとめるにあたって東郷加奈子氏にはご助力を賜った。記して感謝し御礼申し上げます。

なお、本研究の一部は、平成23年度公益財団法人福武財団（旧財団法人福武学術文化振興財団）研究助成、および科学研究費助成事業（研究代表者：伊藤幸司 基盤研究C 24501262）の成果の一部を含んでいる。ここに深謝いたします。

引用文献

- 伊藤幸司・藤田浩明・今津節生 2010「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 回大会発表要旨集 pp.280-281
- 伊藤幸司・藤田浩明・金原正子・今津節生 2011「トレハロース含浸処理法の実用化—漆製品への有効性について—」日本文化財科学会第 28 回大会発表要旨集 pp.288-289
- 伊藤幸司・藤田浩明・東郷加奈子・澤田正明 2012「トレハロース含浸処理法の実用化 2—広葉樹材の処理事例—」日本文化財科学会第 29 回大会発表要旨集 pp.276-277
- 今津節生・田上勇一郎・西澤千絵里 2011「トレハロース含浸法における結晶化と乾燥法の検討」日本文化財科学会第 28 回大会発表要旨集 pp.286-287
- 今津節生・伊藤幸司・アンドラス モルゴス 2011「出土木材保存のためのトレハロース含浸法の開発—ラクチトールからトレハロースへ、糖類含浸法の新展開—」日本文化財科学会第 28 回大会発表要旨集 pp.264-265
- 今津節生・中田敦之・高妻洋成・伊藤幸司・藤田浩明・小林啓 2012「鷹島沖海底遺跡出土木製品へのトレハロース含浸法の適応—基礎的な実験結果について—」日本文化財科学会第 29 回大会発表要旨集 pp.296-297
- 今津節生 2012「遺跡から発見された木製遺物の保存におけるトレハロースの効果」第 16 回トレハロースシンポジウム要旨集（株）林原 日本応用糖質科学会 pp.14-17
- 岡田勝秀・杉本利行 1995「トレハロースの開発と利用」食品と開発 Vol.30 No.9 pp.49-52
- 小林啓・渡邊淑恵 2012「トレハロース含浸法による出土木製品の保存処理—東北諸機関における事例報告—」日本文化財科学会第 29 回大会発表要旨集 pp.284-285
- ※糖アルコール含浸法に関する主な文献については、以下の文献に収録したので参考にされたい。
- 今津節生 1999「出土木製品の保存科学的研究」橿原考古学研究所研究成果 第 1 冊 pp.1-246
- 今津節生 2009「水浸木製文物の保存科学的研究」九州国立博物館 pp.1-336

（2013 年 2 月 7 日受付，2013 年 6 月 24 日受理）

Development of a Novel Trehalose Conservation Method

Kouji ITO¹⁾, Hiroaki FUJITA¹⁾ and Setsuo IMAZU²⁾

¹⁾ Osaka City Cultural Properties Association, 1-1-35 Houenzaka, Chuou-ku, Osaka 540-0004, Japan

²⁾ Kyushu National Museum, 4-7-2 Ishizaka, Dazaifu, Fukuoka 818-0118, Japan

Since the 1980s, an inexpensive method for conserving degraded wood with sugars such as sucrose has been conducted mainly in Europe. Around the middle of the 1990s, we developed a lactitol, followed by a lactitol + 10% trehalose, and most recently a new trehalose method for the conservation of archaeological wood. The lactitol method required drying after impregnation at 50 °C to avoid the formation of lactitol trihydrate, which undergoes high volumetric expansion upon crystallization and may damage highly degraded, weak archaeological wooden artifacts. In the lactitol + 10% trehalose method, trihydrate formation can be avoided by adding a small amount of trehalose to the lactitol impregnation solution. As a result, heat drying can be replaced by air-drying, which is simpler and more economical. Trehalose crystallizes as a stable dihydrate and exhibits an intensive and fast crystallization behavior. Because of its low molecular weight, the penetration of trehalose into wood structures is rapid, and trehalose can also penetrate plant cell walls. Trehalose can be extracted easily from treated wood by water, making the conservation treatment reversible if necessary. Recently, however, strengthening energy conservation policies and the rising price of lactitol compelled us to develop the new trehalose conservation process, which uses as little energy as possible and is faster, safer, and less expensive than previous treatments.

An aqueous solution of trehalose is extremely stable against acid and heat and does not decompose like sucrose. In addition, precipitation of trehalose can be easily controlled by varying the temperature of a saturated solution. Trehalose crystal becomes a stable dihydrate at about 10% water uptake. Trehalose dihydrate does not absorb moisture in a high-humidity environment (relative humidity <95%), which makes it suitable for use in environments prone to high humidity in East Asia. The expected performance of trehalose impregnation is at least equal to, but likely better than, that of sugar alcohol impregnation in terms of stability, workability, and the high-dimensional stability of the impregnation or storage environment. Moreover, energy savings due to the reduced heating impregnation period and lower temperatures can be expected.