

要旨

本稿はトレハロース含浸処理法（以下、「トレハロース法」）の有効性を明らかにするために、まず、先行する糖アルコール法（以下、「ラクチトール法」）の概要を記し、両者の方法・手法、研究成果について述べた。

トレハロース法は、結晶化によって対象資料の固化を図る基本的な方法から、低濃度含浸の可能性、非晶質状態の利用などへの展開と、自然エネルギーを利用した太陽熱集熱含浸処理システム、廃液の再生利用、滴下による含浸、そして、現在進行している鉄への腐食抑止効果など、主剤であるトレハロースの特性を活かした研究を行ない、実用化を図っている。

第1章 序論

気候風土の異なる地域で出土する多様な水浸有機遺物の状態・条件を概観し、取り巻く保存処理の現状と課題に触れた。

糖類含浸処理法の開発・実用化への導入として、世界的に最も研究され実施されてきたポリエチレングリコール法（以下、「PEG法」）からラクチトール法へ、そしてトレハロース法の研究に至った経緯の概略を記した。

第2章 ラクチトール法

世界で最も研究され実施されてきたPEG法を概観し、解消すべき問題点を明らかにした。1990年頃、大阪市文化財協会が直面していた「PEG法が必要とする長期にわたる処理期間」という問題を解決すべく糖類含浸法を選択した理由を記した。

主剤であるラクチトールの結晶性や吸湿性などの基本的な性状と、保存処理方法や問題点について述べた。特に多くの問題を起こした三水和物結晶の生成について触れ、問題を解決し保存処理方法としての精度を高めるために行なった様々な実験から例を挙げて概説した。

第3章 トレハロース法の確立

今津節生氏が糖類含浸法の主剤として最初に検討したのはトレハロースであった。しかし、当時のトレハロースは天然に存在するものを抽出するしかなく、1 kg数万円するような希少な糖であった。よって文化財への使用は見送られ、代わってラクチトールを使用することになった。1995年頃、トレハロースを人工的に生産することに成功し、価格は100分の1程度まで下がった。2008年頃、ラクチトールの供給が不安定になったことから、方法は踏襲して主剤をトレハロースへ転換することを試みた。

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二糖類に属し、分子量は342である。二水和物の結晶をつくり、融点 97°C、95%RH 以下では吸湿せず、耐酸・耐熱性に優れている。このような特性が保存科学分野での利用を有効にしている。

トレハロース法で用いているのは「トレハ」であり、双方の違いを理解する必要がある。また、糖の濃度測定にはBrix計（屈折率計）を用いてきた。屈折率計は短時間のうちに測定結果が得られることから含浸処理の濃度管理に使用してきた。屈折率計はトレハロース水溶液中の固形分の屈折率を、同じ屈折率の蔗糖の濃度に当てはめた値を示している。含有しているトレハロースの濃度を知るためには換算する必要がある。

トレハロース水溶液から得られる固化物の状態は結晶と非晶質（Amorphous）の2つに大別できる。更に結晶は二水和物結晶と無水物結晶に、非晶質はガラスとラバーに分けられる。これらの固化物が水溶液から得られる条件とそれぞれの遷移条件について、水溶液から二水和物結晶に向かうフロー図を用いて概説した。

ラクチトールとの比較から、その優位性を概観した。トレハロースの二水和物結晶とラクチトールの一水和物結晶の臨界比湿度から、保存処理後の展示環境、保管環境の許容を比較した。また、結晶化のスピード、安定する結晶の生成など保存処理作業における優位性を記した。

初期に行なった二つの実験から対象資料の変形を抑止する効果を検討し、寸法安定性を左右する含浸された固形分の量に着目した。他分野では多用されているトレハロースの結晶・ガラスの特性が、文化財分野での使用においても有効であることが判った。また、この特性を十分に引き出す為には風乾することが重要である。

4 トレハロース法～基礎編

トレハロース法は従来の方法の概念とは異なる。

トレハロース法を実施するに際して、「水溶液-飽和-過飽和」というトレハロース水溶液の遷移を理解し、「結晶」・「非晶質」・「固形分」・「固化物」・「固化」という状態を明確に捉え、区別して関連づけることが必要である。

トレハロース水溶液からトレハロースの固化を図るための方法は、「加熱法」・「冷却法」・「常温法」の3つがある。これらはいずれもトレハロース水溶液を過飽和にするための基本的な方法である。そして、いずれも場合も含浸後に行なう風乾が重要である。前述の5つのキーワードを踏まえて、この3つの方法から選択、もしくは組み合わせて保存処理を実施することで、広範におよぶ対象資料の多様な素材、条件に対応することができる。

5. トレハロース法～応用編

トレハロースの性状と基礎的な保存処理手法を十分に理解し、様々な工夫をすることによって広範囲の条件に対応することができる。

対象資料の条件によっては加熱できる温度が限られる場合があり、これによって含浸できるトレハ水溶液の最終濃度も制約を受ける。55℃程度までしか加熱できない漆製品は、2段階の含浸を行なうことで高濃度含浸の効果に近づけることができる。

トレハロースガラスはガラス転移温度が高いため、他の二糖類と比べて安定している。しかし、主な使用目的は食品なので短時間での消費が前提となっており、長期間の変化について調べられていなかった。トレハロースガラスは吸湿によってトレハロースラバーとなり、最終的には二水和物結晶となって安定する。この遷移自体に問題はないが、文化財へ適用する場合、白色化することが懸念された。トレハロースガラスから二水和物結晶に至る遷移の条件やプロセスを研究したところ、トレハロースガラスが特徴的な吸湿挙動を示すことが明らかとなり、望ましい保管環境も分かった。トレハロースガラスを利用する手法として3つの事例を挙げた。

6. トレハロース法の展開

近年、水中考古学という分野が確立して海底での調査が進むにつれて沈船が発見されるケースが多くなってきた。沈船を引き揚げて保存処理した例としてバーサ号やメリーローズ号などが知られている。その保存処理は長期に及び、経費は非常に高額で、処理後の状態も十分なものではない。トレハロースを用いることでこれらの問題を緩和、解決すべく次のような研究を行なっている。

電気エネルギーの使用を可能な限り抑えるために太陽熱集熱含浸処理装置を設計・製作し、長崎県松浦市鷹島埋蔵文化財センターに設置して試験稼働している。併せて、高額な大型含浸処理槽の製作を回避すべく、滴下による含浸手法の検討を進めている。また、トレハロースが耐酸性・耐熱性に優れていることに着目して、黒色化した使用済みトレハロース水溶液を中空糸膜フィルターで液分離して、再利用可能な溶液を抽出することに成功した。

糖類を含浸するラクチール法・トレハロース法で保存処理した木鉄複合材は、処理後に問題は生じていない。事由はいくつも考えられ、それらの相互作用によって効果が得られていると思われる。筆者は糖類が非電解質であることに着目し実験を行なった。基礎的な実験ではあるが、鉄の腐食を抑制する効果を持つ可能性が高いことが判った。

7. 総括

ラクチトール法の有効性は実資料への保存処理で確認されていたが、その科学的な根拠が不十分であるとされ、また、三水和物によるトラブルへの不安感から評価は低かった。しかし、トレハロースは学際的な研究が蓄積されており、他分野での先行する科学研究から多くの知見を得ることができている。我々が行なっている文化財保存に特化した研究においても、その有効性を裏付ける科学的なデータが蓄積されてきている。トレハロース法を取り巻く現在の動向などから、今後の期待について述べた。