

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 2 日現在

機関番号：34603

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K18515

研究課題名（和文）沈没船の保存・展示のための革新的技術開発

研究課題名（英文）Innovative technology development for conservation and exhibition of sinking ships

研究代表者

今津 節生（IMAZU, SETSUO）

奈良大学・文学部・教授

研究者番号：50250379

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、沈没船など木材と金属の複合遺物に対して、防錆、塩類の安定化、高湿度環境での安定性について糖類を用いた含浸処理を中心に検討した。

その結果、ラクチトールやトレハロースは金属の錆化を防止し、塩類の潮解性を改善し、高湿度環境でも安定することが判明した。この研究成果は海底から発見された沈没船などの木材と金属の複合遺物の保存に極めて有効である。本研究の成果は、長崎県鷹島海底遺跡の元寇沈没船をはじめ、東アジア諸国で発見された沈没船の保存と保存施設の環境維持にとって画期的な保存技術となることが期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

海底から発見される沈没船は、“海のタイムカプセル”と言われる。スウェーデンのパーサ号や英国のメリーローズ号のように、展示効果は極めて大きいが見つかの保存問題が指摘されている。日本でも長崎県松浦市鷹島海底から元寇沈没船が2隻発見されている。沈没船の保存方法は1970年代からヨーロッパで発展したが、保存期間の長期化、膨大な経費、保存処理後の劣化など多くの問題を抱え、2009年に発効したユネスコ水中文化遺産保護条約でも保存方法が問題になっている。私達は、糖類の一種であるトレハロースを使い、この問題を解決しながら、沈没船の新しい保存方法の開発に挑戦している。

研究成果の概要（英文）：This study examined the effects of saccharide-impregnation on rust prevention, saline stabilization, and stability-under-high-humidity in the timber and metal composites found among sunken shipwrecks. The results indicated that lactitol and trehalose prevented the metal from rusting, improved salt deliquescence, and ensured the material's stability even under highly humid conditions. These findings demonstrate that the above saccharides are extremely effective in preserving timber and metal composites in shipwrecks discovered on the seabed. The study offers valuable insight regarding Mongolian vessels shipwrecked off the coast of Takashima Island and Nagasaki Prefecture, as well as other shipwrecks in East Asia; namely, the findings may lead to groundbreaking techniques for preserving these shipwrecks and maintaining the environments of their preservation facilities.

研究分野：文化財科学

キーワード：糖類 ラクチトール トレハロース 沈没船 防錆 保存処理 沈没船

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

海底から発見された沈没船は“海のタイムカプセル”とも呼ばれる。財宝の発見ばかりでなく積み荷や生活を探る貴重な文化財が手つかずの状態に腐らずに船内に残されており、地上や地下の文化財にはない一括資料として重要である。また、船体も造船や航海技術を知るために重要であると共に、博物館では当時の姿を伝える迫力ある展示物として人気がある。しかし、沈没船の保存・展示には大きな問題がある。

スウェーデンのストックホルム湾で発見された VASA 号の保存処理は 1965 年から 25 年間続き、国家事業として膨大な予算がつぎ込まれた。幾多の困難を経て保存処理は成功し、1990 年に開館した VASA 号博物館はストックホルム随一の入場者を誇り観光名所となっている。しかし、保存処理を終えた船体は船板を固定した鉄釘付近から変色し、水分を吸収して劣化する現象が今も続いている。

同様の問題は英国の Mary Rose 号や韓国の新安沈船、長崎県鷹島海底遺跡発見の碇でも起こっている。このような事例が根拠となって、2009 年に発効したユネスコ水中文化遺産保護条約では、船体の引き上げや保存処理は推奨せず、海底での現地保存を原則としている。しかし、海底から沈没船などの貴重な水中文化遺産が発見された場合には、引き上げ・保存・展示を望む声は大きい。特に近年、中国・タイなど東アジア各地で海底から沈没船の発見が相次いでいる。日本でもモンゴル軍の日本侵略の際に沈んだ元寇船が 2013 年と 2015 年に松浦市鷹島沖海底から発見されており、引き上げ・保存・展示を望む声が地元を中心に上がっている。

2. 研究の目的

海底から引き上げられた沈没船等の水中文化遺産の保存は、3つの深刻な問題を抱えている。深刻な問題とは、保存期間が長期間になること、設備や運営に莫大な費用がかかること、保存処理後に高湿度環境で船体の劣化が進むことである。

本研究の目的は上記の問題を解決して水中文化遺産の保存・展示のための革新的な技術を開発することである。特に本研究課題では、世界各国で深刻な問題になっている保存処理後に高湿度環境で船体の劣化が進む現象の解決に焦点を当てる。

3. 研究の方法

本研究はヨーロッパを中心に長期にわたって研究されてきた沈没船の保存に伴う問題点に学びながら、保存と展示を中心に実験的研究を行う。特に、東アジアの高温多湿環境にも適用できる保存方法の開発を目指す。本研究課題では沈没船の保存に関する世界共通の問題を解決するために、ヨーロッパ・アジアの研究者が協力して実施する国際共同研究として実施する。

4. 研究成果

長崎県松浦市の鷹島海底遺跡では 1990 年代から PEG (1step, 2step) 法、高級アルコール法、糖アルコール法、トレハロース法などの保存処理を実施してきたが、保存処理した一部の遺物に白い析出物の発生と強酸性化に伴う pH 低下が観察された。木材と金属の複合遺物で発生するこの劣化現象は「硫黄問題」と呼ばれ、出土木材の保存における世界的な課題となっている。私達は鷹島海底遺跡から発見された木材と金属の複合遺物に関する劣化現象と保存処理後の経過を 10 年以上にわたって観察してきた。その結果、糖アルコールやトレハロース法に「硫黄問題」の解決の糸口を見いだすことができた。スウェーデンのヴァーサ号博物館では 2000 年の夏から秋にかけて降った雨の影響で展示室の湿度が 70%RH を超えた時に、船体内部に黄白色の析出物が発見された。調査の結果、この析出物は鉄と硫黄と水分によって引き起こされることが判明した。海底での埋蔵期間中の還元雰囲気の中で鉄バクテリアが周囲の硫黄を集めて鉄の還元硫黄化合物である硫化鉄(Pyrite)を蓄積する。この硫化鉄が保存処理後に吸湿して酸化して硫酸鉄などの水和硫酸塩や硫酸を生成する。水和硫酸塩は体積膨張して木材細胞を破壊しながら黄色や白色の析出物となり木材の表面に染み出す。酸化によって生成した硫酸は木材の pH を下げてセルロースの加水分解を引き起こす。さらに、出土木材の含浸強化に用いた PEG は鉄が触媒となって分解を促進する。PEG の分解によって生じた吸湿性の高い物質が水分を呼び、水和硫酸塩や硫酸の生成を早める。

トレハロースで保存処理した木材と鉄の複合遺物は高湿度環境でも安定しており、硫化鉄のような還元硫黄化合物から硫酸鉄などの水和硫酸塩への酸化を防止する効果もある。鷹島海底遺跡では 1990 年代から PEG 法、高級アルコール法、糖アルコール(ラクチトールとトレハロースの混合)法、トレハロース法などによる保存処理を実施してきた。大型木製錨と錨に関連する遺物は 60%RH (±5%) に維持された特別収蔵庫に保管され、その他の遺物は一般収蔵庫に保管されてきた。海岸に近い松浦市立鷹島埋蔵文化財センターでは梅雨期には 70%RH を超える高温多湿の環境に置かれる場合がある。

PEG 法、高級アルコール法では体積膨張による白い析出物の噴出と強酸性化に伴う pH 低

下が観察された。鉄錆が浸透して黄白色に変色した箇所からはX線回折分析の結果、硫酸鉄および硫化鉄が検出された。これに対して、ラクチトールやトレハロースで保存処理した木材の色調変化や体積変化はなく、析出物の発生も見られず pH6 の弱酸性を保っている。X線回折分析の結果、トレハロースで保存処理した木材からは硫化鉄のみが検出された。つまり、硫化鉄から硫酸鉄への酸化が起こっていないことになる。このように、PEG法などで発生した硫化鉄が保存処理後に吸湿・酸化して硫酸鉄などの水和硫酸塩や硫酸を生成する「硫黄問題」はトレハロース法では起こっていないことが判明した。

「硫黄問題」は、保存処理後に発生する白い析出物の発生と強酸性化に伴う木材組織の破壊という深刻な問題となっており、欧米を中心に様々な解決方法が模索されている。しかし、この問題を根本的に解決する方法はまだ無く、ヴァーサ号ではアルカリ溶液を浸した湿布で酸性化した部分を中和する応急的な作業を実施している。また、鉄の酸化を抑制するために2004年に新しい空調システムを設置し、広大な展示室の環境を20、55%RHに制御している。オーストラリアのバタバ号でも鉄の酸化や吸湿を減らすために展示室を47~57%RHに制御している。PEG法などで発生した硫化鉄が保存処理後に吸湿・酸化して硫酸鉄などの水和硫酸塩や硫酸を生成する「硫黄問題」はトレハロースでは起こっていない。トレハロースは世界的に問題となっている保存処理後の「硫黄問題」を解決する方法として期待される。

本研究では、沈没船の板材に打ち込まれた鉄釘の防錆、塩類の安定化、高湿度環境での安定性についてトレハロース含浸処理を中心に検討した。その結果、トレハロースは金属の錆化を防ぎ、塩類の潮解性を改善し、高湿度環境でも安定することが判明した。

トレハロースは低分子材料であるために木材細胞に速やかに含浸すること、食品にも使われる安全な素材であることから設備面でも大きなメリットが期待できる。

この研究成果は海底から発見された沈没船などの木材と金属の複合遺物の保存に極めて有効である。本研究の成果は、長崎県鷹島海底遺跡の元寇沈没船をはじめ、東アジア諸国で発見された沈没船の保存と保存施設の環境維持にとって画期的な保存技術となることが期待される。

	Volume expansion of sulfate oxidation products on crystallization (related to pyrite) (from Table 1.)	Methods and objects			
		Trehalose	Cetyl alcohol	PEG two-step	PEGone-step
		Rib fragment with nail	Fixing crosslinking boards with iron nails	Large anchor with iron nails	Rib fragments with iron nails
Years passed after conservation and drying		8	13	7	2
pH of wood surface at efflorescence ^{esp}		6	3	3.5	3
Crystalline compounds found by XRD		Concentration (mass%)			
Pyrite (Fe ²⁺ S ₂ ⁻²)	1x	100%	-	12%	18%
Rozenite(Fe ²⁺ SO ₄ ·4H ₂ O)	~8x	-	40%	50%	-
Melanterite (Fe ²⁺ SO ₄ ·7H ₂ O)	~12x	-	40%	-	75%
Crystalline elemental sulfur (orthorhombic S8)	-	-	1%	-	-
Mohrite (Mohr salt)(Fe ²⁺ (NH ₄) ₂ (SO ₄) ₆ ·6H ₂ O)	~8.8x	-	-	25%	-
Gypsum (CaSO ₄ ·2H ₂ O)	~6.2x	-	-	3%	-
Quartz (originates probably from seabed)(SiO ₂)	-	-	5%	-	1%

Table 1. Crystalline compounds found by XRD in the surface efflorescence around the solid iron parts of the conserved and dried woods

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Setsuo Imazu, Koji Ito, Aizawa & Andras Morgos	4. 巻 1
2. 論文標題 The pre-conservation issues in the conservation of the wrecked ships and remains of the Mongol fleet from 1281	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 WET ORGANIC ARCHAEOLOGICAL MATERIALS CONFERENCE (May 16th-21th, 2016, Chioistro del Maglio - Florence Italy),	6. 最初と最後の頁 242-248
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Koji Ito, Hiroaki Fujita, Setsuo Imazu & Andras Morgos	4. 巻 1
2. 論文標題 Resource saving by the help of an impregnation hybrid system based on solar thermal collectors aided by traditional electrical energy and by recycling of the trehalose impregnation solution in the long-term conservation of large waterlogged wooden finds	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 WET ORGANIC ARCHAEOLOGICAL MATERIALS CONFERENCE (May 16th-21th, 2016, Chioistro del Maglio - Florence Italy),	6. 最初と最後の頁 311-314
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 M.Oyuuntulga, Ito koji, Imazu Setsuo	4. 巻 1
2. 論文標題 Conservation study of organic excavated in Mongolia -Adaptation of trehalose method	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 X International Scientific Conference, "Ancient Cultures of Mongolia, Baikal Siberia and Northern China	6. 最初と最後の頁 169-171
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 今津節生	4. 巻 0
2. 論文標題 水中遺跡の調査・保存の技術的課題	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 水中遺跡の歴史学	6. 最初と最後の頁 227-241
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sopit Panyakhan, Saneh Mahaphol, Setsuo Imazu	4. 巻 0
2. 論文標題 Conservation of Artefacts from Excavation at the Phanom-Surin Shipweck	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Study of Phanom-Surin Shipwreck	6. 最初と最後の頁 132-138
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 今津節生	4. 巻 735
2. 論文標題 水中遺跡から発見された沈没船の保存処理技術	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 考古学ジャーナル	6. 最初と最後の頁 20-22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Setsuo IMAZU	4. 巻 -
2. 論文標題 Research on conservation of Mongolian battleships discovered from the sea floor off the coast of Takashima, Setsuo IMAZU, Nagasaki prefecture, Japan	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Symposium on Maritime Silk road : Conservation Science of Maritime Objects and Shinan Shipwreck, National Reserch of maritime Cultural heritage KORIA	6. 最初と最後の頁 201-219
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Setsuo IMAZU	4. 巻 -
2. 論文標題 Waterlogged wood's conservation method adapted to the harsh environment of Asia.- 10 features of the Trehalose method	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Symposium of Conservation of Cultural Heritage in East Asia in Koria, 2019	6. 最初と最後の頁 309-314
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 今津節生、ソピット・パヤカーン、サネ・マハポール、伊藤幸司
2. 発表標題 タイ国パノム・スリン沈没船出土遺物の保存
3. 学会等名 日本文化財科学会第35回大会研究発表要旨集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 今津節生
2. 発表標題 トレハロース含浸法によるアジアの出土木材保存に向けた3つの取り組み
3. 学会等名 韓国文化財保存科学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 立石翔大、今津節生
2. 発表標題 水浸出土木材保存処理における含浸時間の短縮化
3. 学会等名 日本文化財科学会第35回大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 伊藤幸司、藤田浩明、片多雅樹、小林 啓、稗田優生、メンドバザル・オユントルガ、今津節生
2. 発表標題 モンゴルで出土する有機遺物の保存に向けた研究
3. 学会等名 日本文化財科学会第35回大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 伊藤幸司、藤田浩明、北村良輔、今津節生
2. 発表標題 出土木製品保存処理の省コスト・省エネルギー化に向けた研究(その4)－太陽熱集熱含浸処理装置の製作と稼動－
3. 学会等名 日本文化財科学会第34回大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Setsuo IMAZU, Sopit PANYAKHAN, Saneh MAHAPHOL, Koji ITO and Andrs MORGOS
2. 発表標題 Preliminary Trehalose Conservation Study of Materials from the 9th c. Phanom-Surin Shipwreck Site, Thailand,
3. 学会等名 WET ORGANIC ARCHAEOLOGICAL MATERIALS CONFERENCE (ICOM-WOAM)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 今津節生	4. 発行年 2020年
2. 出版社 共同精版印刷	5. 総ページ数 1-82
3. 書名 沈没船の保存・展示のための革新的技術開発	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考