

平成 30 年 9 月 5 日現在

機関番号：32422

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26420648

研究課題名(和文) 先端材料と伝統材料を融合させた歴史的建造物等修復技術の新たな開発

研究課題名(英文) New Development of Restoration Technology for Historic Buildings etc. Combining Advanced Materials and Traditional Materials

研究代表者

横山 晋一 (YOKOYAMA, SHINICHI)

ものづくり大学・技能工学学部・教授

研究者番号：20406614

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：歴史的建造物の近代的修理手法として「先端材料」と「伝統材料」の組合せが近年模索されるようになったが、伝統材料のうち外部塗装材となる膠接着塗料についてその耐久性を把握するための実験的研究を行った。その結果、外部環境における劣化因子の複合作用の影響を受けることが明らかとなったが、この新たな修理手法をより合理的で耐久性に優れたものとして位置付けるためには、その地域特有の個別環境差異を把握し、建物のライフサイクルを構築することで、その見通しが得られるものとなった。

研究成果の概要(英文)：A combination of "advanced materials" and "traditional materials" has been explored in recent years as a modern repair method of historical buildings, and we carried out experimental studies to grasp the durability of glue adhesion paint as an external coating material among traditional materials. As a result, it became clear that the durability is affected by the combined effect of degradation factors in the external environment. In order to demonstrate that this new repair method is more rational and excels in durability, its perspective should be obtained by grasping the region-specific environmental differences, and constructing a life-cycle of the building.

研究分野：日本建築史、保存修復学

キーワード：歴史的建造物 保存修復 塗装劣化調査 伝統材料 先端材料

1. 研究開始当初の背景

我国に所在する歴史的建造物は古来よりその多くが主たる構造を木造とし、経験的な積み重ねによって解体修理などが定期的に行われ、現在に継承されてきた。しかし、近代に入ってからには西欧の新たな建築技術が導入され、新たな地震力に対向する検討が行われ、明治期に行われた国宝唐招提寺金堂（奈良県奈良市）の修理では小屋組見え隠れに鉄骨トラスが加わるなど、新たな建築技術が歴史的建造物の修理にも付加されるようになった。そして近年では、重要文化財二荒山神社神橋（栃木県日光市）の脚桁修理で、その見え掛り化粧部を炭素繊維材にて巻き、伝統的な漆塗装で仕上げるといった新たな試みも実験的に行われ始めた。すなわち、腐朽破損する当初材の取替えを可能な限り少なくする近代的修理手法であるが、「先端材料」と「伝統材料」の組合せによる保存修理法は未だ確立されてはならず、また、特に伝統材料となる漆や膠による塗装材はその環境条件により、劣化様相にも違いが生じる。このため、この新たな保存修理手法の検証を進めるため、まずは伝統材料となる国産塗料を科学的見地から複合的に、その特性を詳細に分析することが望まれていた。

2. 研究の目的

「先端材料と伝統材料を融合させた歴史的建造物等修復技術の新たな開発」が本研究テーマとなるが、伝統塗料を融合させるための基礎的研究は今日まで殆ど行われていないことから、今研究では膠を接着剤とする丹塗りを基準として、使用環境条件によって異なる構造的劣化や表層剥離などでの変退色発生現象の検証を行い、その特性を明らかにすることを研究目的とした。このため、各環境下における伝統的塗料の耐候特性を詳細に分析し、特定の要因に着目した耐候性について、その相関性と膠塗料の劣化メカニズムを検討することが重要と言える。

3. 研究の方法

本研究では歴史的建造物の外装塗装の耐久性を把握するため、以下の長期耐候性に関する基礎的な分析並びに評価を実施するものとした。

(1) 複合サイクル腐食試験により、水分・塩分による塗装面劣化による比較検討を実施した。なお、試験体は歴史的建造物の主材として多用される杉材・桧材を用い、これを膠・カゼイン・アクリルで個別に塗装仕上げたもので比較試験を行った。また、試験方法は JIS K5600-7-9 の「サイクル D」に準拠した。

(2) 促進耐光試験により、紫外線による塗装表面劣化による比較検討を実施した。なお、試験体は歴史的建造物の主材として多用される桧材を用い、これを膠・カゼイン・アクリルで個別に塗装仕上げたもので比較試験を行った。

また、試験方法は JIS K5600-7-7、K5600-7-9 の「サイクル A」に準拠した。

4. 研究成果

(1) 複合サイクル腐食試験

① 試験体

木造の歴史的建造物外部塗装面を想定した試験体として、膠を接着剤とする丹塗りを基準とし、その比較のため溶剤接着剤のカゼイン・アクリル塗料を塗布した試験体を製作した。なお、この試験体の材質は杉材及び桧材を用い、試験体形状は試験機の設置状況を考慮して、長さ 150 mm×幅 70 mm×厚さ 10mm の形状とした。

表 1 試験体一覧

木材	表面塗装材	試験体 (真水噴霧)	試験体 (塩水噴霧)
杉材	膠	S-1	S-4
	カゼイン	S-2	S-5
	アクリル	S-3	S-6
桧材	膠	H-1	H-4
	カゼイン	H-2	H-5
	アクリル	H-3	H-6

②試験方法

試験方法は JIS K5600-7-9 (塗膜の長期耐久性-第9節: サイクル腐食試験方法) の「サイクル D」に準拠するものとした。この他、塩分の影響を検討するため、真水噴霧及び塩水噴霧試験により比較を行った。なお、具体的試験工程は以下の通りである。

- 1) サイクル工程: 塩水 (真水) 噴霧 0.5 時間 → 湿潤 1.5 時間 → 乾燥① 2 時間 → 乾燥② 2 時間 → 塩水 (真水) 噴霧へ
- 2) 真水噴霧: 槽内温度: $30 \pm 2^\circ\text{C}$, 噴霧溶液組成: 純水・塩水噴霧: 槽内温度: $30 \pm 2^\circ\text{C}$, 噴霧溶液組成: 純水に NaCl 5mass%, PH6.5
- 3) 湿潤: 槽内温度: $30 \pm 2^\circ\text{C}$, 相対湿度 $95 \pm 3\%$
- 4) 乾燥①: 槽内温度: $50 \pm 2^\circ\text{C}$
- 5) 乾燥②: 槽内温度: $30 \pm 2^\circ\text{C}$

試験体は 28 サイクル (168h) 毎に試験機から取り出し、色差測定・光沢度測定及び外観検査・写真撮影を行った。なお、試験実施時間は 504 時間 (168h×3) に設定した。

③試験結果

主な試験結果を図1～図12に示すものとする。色差測定の結果、膠の場合のみ塩水と真水噴霧の相違点が見られた。また、色差塩水噴霧時間が増えるのに伴って色差 ΔE は増加し、塗装表面にやや白色化した箇所が確認できた。光沢に関して、膠の試験体は塩水噴霧時間の増加に伴い、保持率が減少した。白色化の現象は膠塗料に含まれていた顔料の影響によるものか否かに関しては、今後更に詳細な検討が必要と考えられるが、以下に今回の試験で明らかとなった現状での知見を示すものとする。なお、色差・光沢ともに桧材と杉材の材質による大きな相違点は見られなかった。

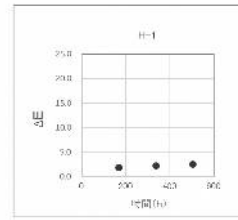


図1 色差測定結果 (真水 H-1)

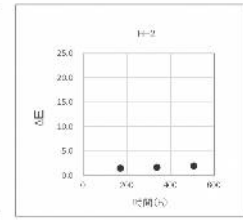


図2 色差測定結果 (真水 H-2)

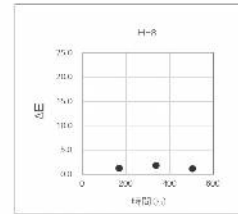


図3 色差測定結果 (真水 H-3)

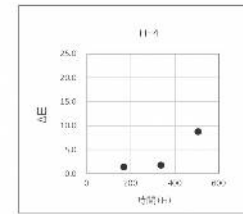


図4 色差測定結果 (塩水 H-4)

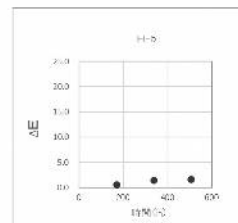


図5 色差測定結果 (塩水 H-5)

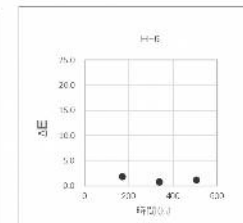


図6 色差測定結果 (塩水 H-6)

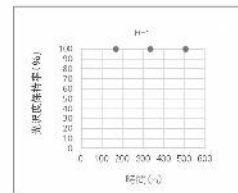


図7 光沢測定結果 (真水 H-1)

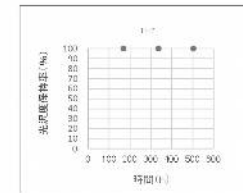


図8 光沢測定結果 (真水 H-2)

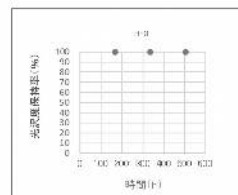


図9 光沢測定結果 (真水 H-3)

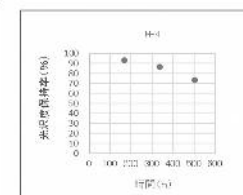


図10 光沢測定結果 (塩水 H-4)

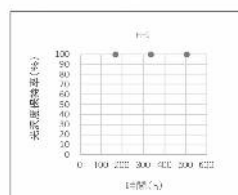


図11 光沢測定結果 (塩水 H-5)

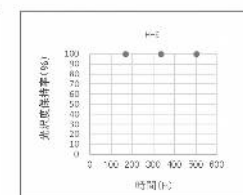


図12 光沢測定結果 (塩水 H-6)

白色化の現象に関しては恐らく接着剤となる膠だけの問題ではなく、顔料（鉛丹）の方にもその影響を及ぼす可能性があると考えられ、以下のような要因もその一因ではないかと推測することができる。

建物の継続的な維持保全のため、鉛丹塗装を定期的に施している厳島神社社殿（広島県廿日市市）において、海水面に接する部位となる木柱変色部より、鉛白（ $2\text{PbCO}_3 \cdot \text{Pb}(\text{OH})_2$ ）とラウリオナイト（ $\text{PbCl}(\text{OH})$ ）が検出されたとの既往研究（東京文化財研究所〔保存科学 No. 36〕）がある。そこで CCT 試験下により、鉛丹が変質する機構を推測してみる。

鉛丹の主成分は Pb_3O_4 だが、10～25%の PbO を含んでいる。今回の CCT の噴霧試験水（真水、塩水）はいずれも、弱酸性（真水は空気に晒されると CO_2 を溶かして酸性になる、塩水噴霧では $\text{pH}=5.5$ に設定）であるため、湿潤下で $\text{PbO}(\text{s}) + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Pb}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{OH}^{-}(\text{aq})$ の平衡が成り立ち、大気中の CO_2 が噴霧液に溶け込んで生成した炭酸イオン（ CO_3^{2-} ）や噴霧液中の OH^{-} イオンが Pb^{2+} イオンと反応し、鉛白が沈殿するものと考えられることができる。

また、真水噴霧より塩水噴霧の方が表面白色化を進行させた理由として、ラウリオナイトが生成され、鉛白とは異なって水に溶け易い性質であることから、水に溶けて移動し易く、塗膜表面に次から次へと因子が出現したためではないかと推測できる。なお、 Cl^{-} イオンが共存するとラウリオナイトも生成するという根拠については、参考文献2の実験結果にて、「 Cl^{-} 濃度が Pb^{2+} 濃度と同等以上の場合、鉛白は生成せず、ラウリオナイトが生成した」ことが示されることによる。

厳島神社社殿の木柱変色部については、弱アルカリ性の海水面に接する位置にその部材が存在していたが、弱酸性の噴霧塩水を用いる今回のような CCT では、色の経時変化は十分に再現できないことも明らかとなった。

今回、CCT 試験を実施する切掛けともなっ

た日御碕神社日沈宮拝殿（島根県出雲市）の建物外部化粧材の色褪せと白色化の検証に関しては、境内に接する海岸よりどの程度の海塩粒子が到来しているかを詳細に調べる必要があり、これを前提条件に加えることが望ましいと判断される。すなわち、海塩粒子が付着した塗装面の pH と噴霧液の pH を同一値に合わせて、CCT による再現試験を試みることにより、塗装部材の色褪せや白色化の原因となる劣化因子を、更に詳細に特定することができるものと判断される。

(2) 促進耐光試験

① 試験体

木造の歴史的建造物となる社寺建築の外部塗装面を想定した試験体として、膠を接着剤とした丹塗、また、その比較のためのカゼイン・アクリル塗料を塗布した試験体を製作した。試験体の材質は桧を用い、試験体形状は試験機の状況を考慮し、長さは 150 mm × 幅 70 mm × 厚さ 10mm の形状とした。

表 2 試験体一覧

番号	仕様	備考
No. 1	膠①	h29
No. 2	膠②	h30
No. 3	カゼイン	h31
No. 4	アクリル	h32

② 試験方法

屋外暴露状態の湿潤・乾燥影響を分析するため、乾燥状態（降雨無し）と湿潤状態（降雨あり）の2種類の条件下のもと、促進耐光性試験を行った。なお、耐光性試験方法は JIS K5600-7-7（塗膜の長期耐久性-第9節：サイクル腐食試験方法の「促進耐候性及び促進耐光性（キセノンランプ法）」に準拠した。

- 1) 温度制御：BPT ($63 \pm 3^\circ\text{C}$)
- 2) 照射照度： $60\text{W}/\text{m}^2$ (300～400nm)
- 3) 相対湿度： $50 \pm 5\%$
- 4) 内側フィルタ：石英
- 5) 外側フィルタ：デイライトフィルタ

また、湿潤・乾燥の試験方法は JIS K5600-7-9（塗膜の長期耐久性-第9節：サイクル腐食試験方法）の「サイクルA」に準拠し、真水を噴霧した。なお、暴露時間は1,000時間継続し、200時間毎に色彩測定・鏡面光沢度測定を行った。

表3 試験サイクル

段階	内容	温度 (°C)	時間
①	真水噴霧	25	2
②	乾燥 20-30 %RH	60	4
③	湿潤 95 %RH 及びそれ以上	50	2

④試験結果

試験結果を図13～図28に示す。総論として膠に比して、カゼイン・アクリル樹脂がすべての条件に対して良好な耐候性を示したことは当初から予想されたことではあったが、湿潤乾燥と紫外線照射をそれぞれ単独で試験したものは、一般的な湿潤乾燥と紫外線照射を周期的に課す促進劣化試験に比し、変化が少ない有意な傾向を確認することが出来た。また、塗装材の耐候性は塗料の仕様の違いによる結果が明瞭であり、樹種の違いが及ぼす影響は極めて少ないものであることも明らかとなった。

膠は動物の皮や骨を原料とし、水を加えて加熱して抽出するたんぱく質であるため湿潤環境では溶解し、塗膜の減少に繋がるものとなる。自然環境下における湿潤・乾燥のサイクルや時間が促進試験環境下とは異なるため、これを安易に評価することは出来ないが、今回実施した真水での噴霧試験の結果、予想以上に塗膜の剥落に至る変化が生じていなかった。また、紫外線照射のみの試験においても膠が分解されているであろうにも関わらず、所定時間内における塗膜の剥落までには至らず、複合促進劣化試験に比して有意な差異が見られる結果を得られた。

一方、これに対する複合促進劣化試験においては、400時間を過ぎた頃から膠液の濃度に関わらず塗膜の剥離が顕著に発生し始め、外部塗装における一般的な膠塗膜の劣化様相を呈し始めた。これらの事象から、膠塗膜の劣化は雨水などによる湿潤と紫外線照射が複合的に作用し始めることで、塗膜の剥離現象に繋がっていくものと推察することができる。

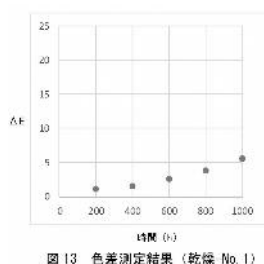


図13 色差測定結果 (乾燥 No.1)

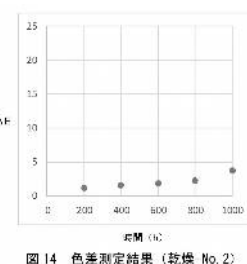


図14 色差測定結果 (乾燥 No.2)

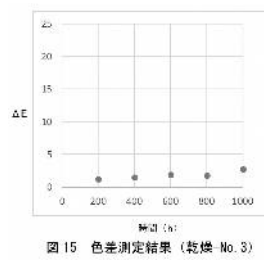


図15 色差測定結果 (乾燥 No.3)

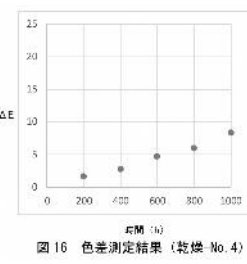


図16 色差測定結果 (乾燥 No.4)

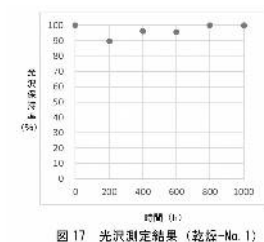


図17 光沢測定結果 (乾燥-No.1)

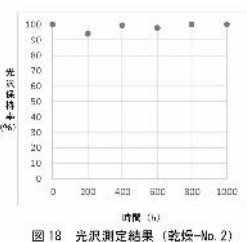


図18 光沢測定結果 (乾燥-No.2)

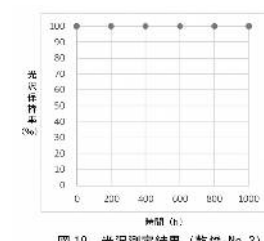


図19 光沢測定結果 (乾燥 No.3)

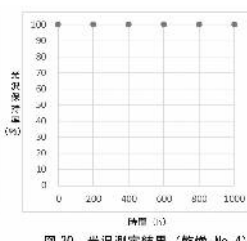


図20 光沢測定結果 (乾燥 No.4)

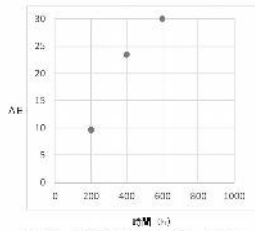


図21 色差測定結果(湿潤・乾燥-No.1)

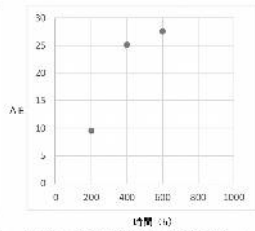


図22 色差測定結果(湿潤・乾燥-No.2)

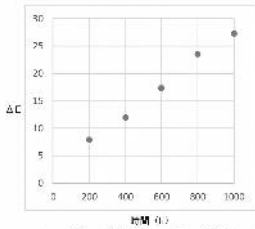


図23 色差測定結果(湿潤・乾燥-No.3)

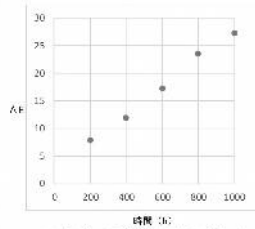


図24 色差測定結果(湿潤・乾燥-No.4)

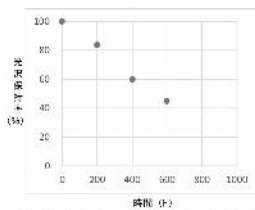


図25 光沢測定結果(湿潤・乾燥-No.1)

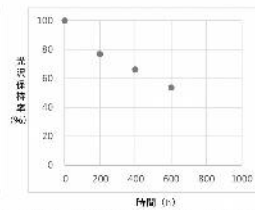


図26 光沢測定結果(湿潤・乾燥-No.2)

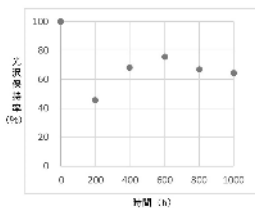


図27 光沢測定結果(湿潤・乾燥-No.3)

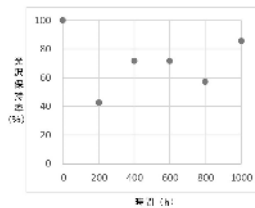


図28 光沢測定結果(湿潤・乾燥-No.4)

(3) まとめ

古代・中世・近世と建物の外装に漆や彩色塗装を施す我国の木造歴史的建造物の表層塗膜は、その地域特有の温度・湿度・紫外線、また、海水塩分に晒されるなどの環境差異により、経験的にその劣化様相に違いが生じることは凡そ推測されるものであった。しかし今回、その劣化因子として代表的な真水と塩水、そして湿潤乾燥状態における紫外線暴露実験をそれぞれ個別で実施した結果、既知の劣化様相とは異なる成果が得られたことで、外部環境における劣化因子の複合作用の大きさが浮き彫りとなった。このため、破損劣

化が進行するまで建物を放置するのではなく、個々の地域特性に適した維持保全計画を速やかに企て、建物のライフサイクルを構築することの重要性について、科学的な根拠を持って明らかにすることができた。

現在、全国で実施されている文化財建造物保存修理事業の基本方針は、可能な限り当初材再用と伝統的技法・材料の踏襲を骨子とし、これに大地震に対応した構造補強を加味する方針で修理が行われている。このような状況下にあつて、先端材料となる炭素繊維材などによる補強は、文化財を未来に安定的に継承する新たな手法として期待されているが、それには伝統塗料との融合が欠かせない。脆弱な伝統塗料の特性を理解し、合理的で耐久性に優れたものとするためには、文化財建造物修理の世界では恐らく未だ皆無に近いと思われる建物個々の維持保全計画をしっかりと企てることが重要で、それによって近代的修理手法の確立も見通せるものとなる。

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 2 件)

横山晋一、北條哲男：歴史的建造物の修復技術に関する基礎的研究—伝統的塗装材を用いた塗装面の耐候性—、日本建築学会、2016
北條哲男、横山晋一：伝統的塗装材を用いた塗装面の耐候性に関する研究、マテリアルライフ学会、2016

6. 研究組織

(1) 研究代表者

横山 晋一 (YOKOYAMA, Shinichi)

ものづくり大学・技能工芸学部・教授

(研究者番号：20406614)

(2) 研究分担者

北條 哲男 (HOJO, Tetsuo)

ものづくり大学・技能工芸学部・特別客員研究教授 (研究者番号：30348346)

(3) 研究協力者

岩本 元 (IWAMOTO, Hajime)

小西美術工芸社・常務取締役