

〔報告〕 霧島神宮における塗装劣化要因の解明と その対策の検討

森井 順之・佐藤 嘉則・間瀬 創*・木川 りか・太田 英一*²・
中別府 良啓*³・中山 俊介・川野邊 渉

1. はじめに

現在、霧島神宮では重要文化財保存修理工事が行われている。霧島神宮は霧島山の麓にあるため、冬場の厳しい冷え込みにより漆や彩色の塗装に支障がでること、森林内で湿気が多くカビ等発生リスクが高いことが問題である。

特にカビは、今回の保存修理工事でも拝殿西側の黄土塗装及び渡廊下、登廊下の内側の胡粉塗装において工事後数カ月で発生、塗直しが必要な状態である。ここでカビ発生要因の解明を行うことは、今後同様の環境下で万が一カビが発生した場合、その拡大を最小限にする方法の開発に役立つ。

そこで筆者らは、保存修理工事中の環境把握のためあらかじめ各所に設置された温湿度データロガーの測定結果から、カビ繁殖と周辺環境の相関について把握を行った。また、現地曝露試験による現在の塗装仕様に関する評価、より防カビ性能を持つ材料・仕様の検討を行った。

2. 霧島神宮の周辺環境について

塗装工事中の環境把握を目的に、霧島神宮では2010年2月から現在までデータロガーを設置し温湿度の長期連続測定を行っている(測定箇所は図1に示す通り)。屋外では本殿背後の山林に2点、本殿外縁部に13点(北西面・北東面・西面は天井部・壁板絵部・床面、南面について



写真1 霧島神宮渡廊下(内側の白色塗装部にてカビ発生がみられる)

*三重県立博物館

*²文化財建造物保存技術協会

*³霧島神宮

は天井部・壁板絵部、弊殿巻柱に各1点)とした(計15点)。なお、データロガーはおんどとり Jr. (株式会社ティアンドデイ) を使用し、測定間隔は1時間に設定した。

各地点における測定期間中の温湿度平均値は表1に示す通りである(屋外に関しては2地点とも同様であったため、代表して本殿西側の測定値を掲載した)。本殿の壁板絵は雨戸により守られているが、気温は屋外と本殿外縁部で大きな違いはなく、湿度は本殿外縁部のほうが高いことがわかった。また各面の比較では、北東面の湿度がほかの面に比べてより高いことがわかった。鉛直方向では、床面のほうが気温は低く、相対湿度が高い傾向が各面でみられた。

図2は観測期間(2010年3月から2011年2月まで)の北西面の温度変化である。グラフの各点は月平均値、エラーバーは標準偏差を表す。グラフからは、夏は屋外に比べ雨戸が閉じた状態の廊下のほうが平均気温が高く、天井・壁板絵部・床面で差が出ていること、冬場にはその傾向が見られなくなることがわかった。また、標準偏差を見ると月ごとの違いはあるものの、内外で大きく違わないことがわかった。

図3は観測期間中最も平均相対湿度が高かった北東面の相対湿度変化である(月平均値)。グラフからは、通常「天井」=「壁板絵」<「床」の関係が見られるが、9~11月のみ天井の相対湿度が最も高かった。その理由として、9~11月の霧島神宮周辺は雨が多く、降雨の影響が天井部に出たものと推察される。

これより、霧島神宮周辺は日光の社寺¹⁾などと同様、年中高い湿度であること、建物内、とくに壁板絵のある外縁部(雨戸により閉鎖されている部分)では、気温は外部と同様に変化し、相対湿度は外に比べて高めに推移することがわかった。

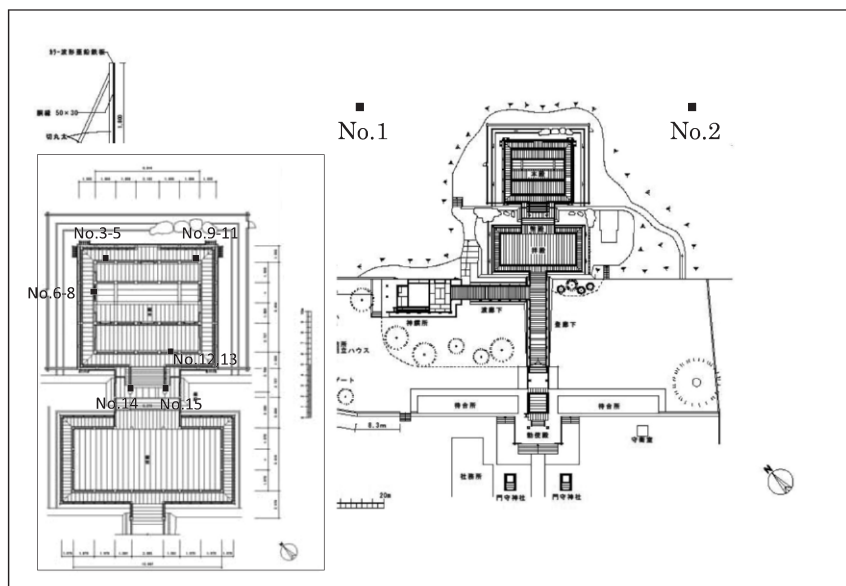


図1 温湿度データロガー配置図

表1 温湿度測定結果 (2010年3月～2011年2月までの平均値)

測定地点		平均気温(°C)	平均湿度(%)
屋外 (本殿西側)		14.43	64.34
本殿北西	天井部	15.03	71.62
	壁板絵部	14.79	71.55
	床面	14.61	73.08
本殿西	天井部	15.01	72.36
	壁板絵部	14.96	72.50
	床面	14.76	73.44
本殿北東	天井部	14.88	73.89
	壁板絵部	14.88	73.35
	床面	14.65	75.21
本殿南	天井部	15.40	71.66
	壁板絵部	15.32	70.94
幣殿巻柱	西側	15.04	71.79
	東側	15.03	72.46

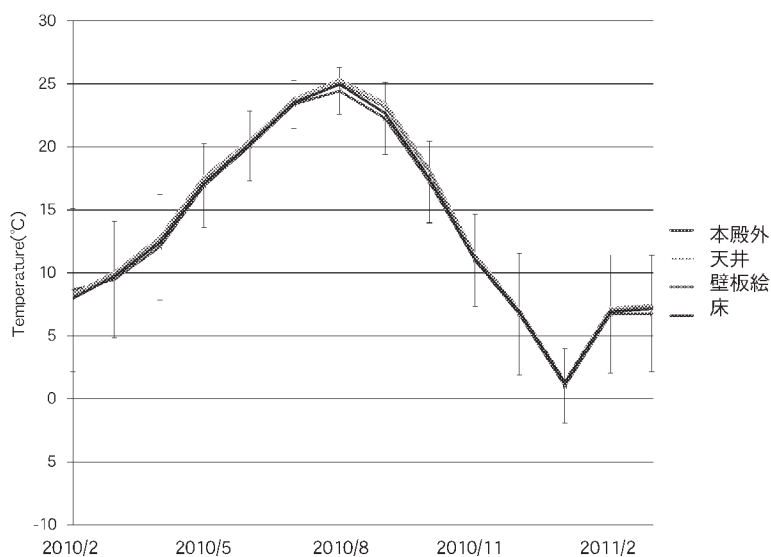


図2 温度変化 (本殿北西部, 月平均, エラーバーは標準偏差)

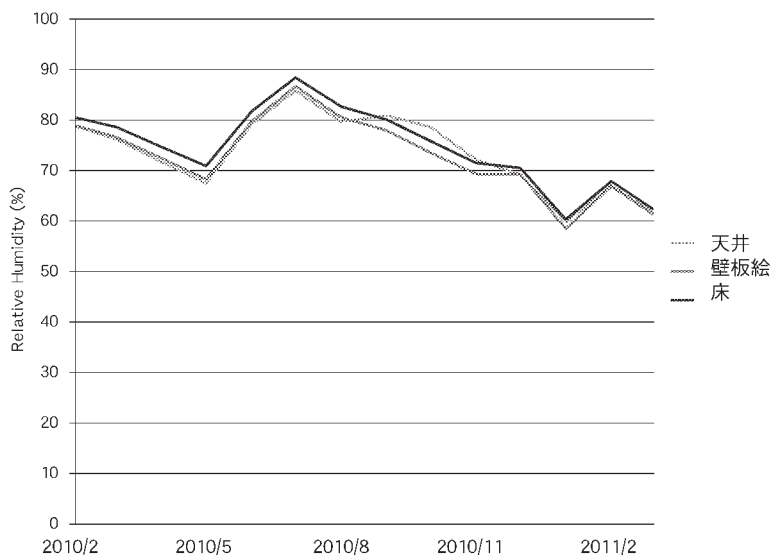


図3 相対湿度変化（本殿北東部，月平均）

3. 高湿度環境下でのカビ対策について

3-1. 曝露試験

曝露試験は、拝殿および渡廊下、登廊下のカビ被害が起きた環境を試験的に再現するため、霧島神宮境内の一区画を設けて行った(以下、試験地点と記載する)。試験地点には、風雨からの直接的な曝露を避けるため、側面が解放されているテントを設営して、テント下のスペースにステンレス製エレクターを置き、その上に曝露試験片を固定して曝露を行った(図4、写真2)。曝露試験片は、カビ接種の有無・塗装色(胡粉/黄土)・コートサイドH添加の有無・防カビ剤の種類で分け、合計64片を作成した(表2)。なお、塗装後に塗布する防カビ剤の選定は、高湿度環境下で行われた間瀬ら³⁾の報告を参考にした。

曝露試験に用いた試験片の仕様は図4に示した。ここでは、胡粉および黄土塗装にカビが発生した要因を明確化し、後から塗布する防カビ剤の試験を行うため、試験片の滅菌処理は特におこなっていない。その後、表2で示した各種防カビ剤を塗布して乾燥させた後、カビの接種を行った。なお防カビ剤は、各メーカーの推奨する濃度で塗布した。

接種したカビは、霧島神宮の渡廊下、登廊下および拝殿西壁から分離された菌株で、分離株数の多さと汚染部分で観察されたカビに形態が似ている株の基準で5株選定した。なお、各菌株の分離方法や系統学的・生理学的解析の結果は佐藤ら²⁾を参照されたい。以下、選定した5株の形態学的な特徴を記載する：

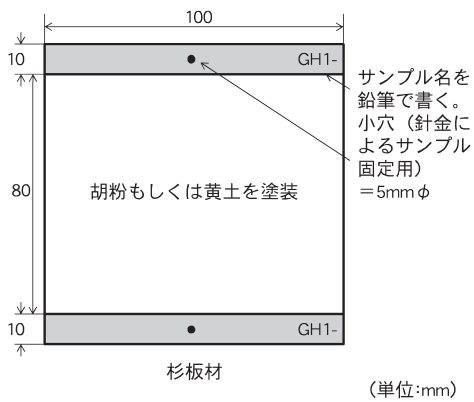
1. G4-C33株：灰色綿状の菌集落，黒色の色素を産生。正円形。増殖は極めて速い。
2. G4-C34株：白-淡橙色，ピロード状，綿状の菌集落，正円形，中心部に薄い橙の色素産生。
3. G4-P8株：濃緑色から黒色綿状の菌集落。
4. O2-P4株：濃緑色，綿状の菌集落。
5. G4-P7株：濃緑色，ピロード状，菌集落。

試験片に塗布した孢子懸濁液は、あらかじめ三角フラスコに100mlの麦芽エキス培地を添加

して、各菌株をそれぞれ接種して23°Cで1週間培養した後、フラスコから孢子を回収して作成した。それぞれの菌株で孢子数が 10^3 cfu/mlになるよう調整し、これを混合した後、試験片1枚に対して3ml添加した。なお、孢子数(cfu/ml)は平板培地でのコロニー数から算出した。



写真2 屋外曝露試験の概観



A

B

図4 曝露試験片の仕様(A)および実物写真(B)

表2 防カビ効果評価のための曝露試験片の処理

曝露台1) カビ未接種(無)

塗装色		胡粉+三千本膠 (G)		黄土+三千本膠 (O)	
コートサイドH		添加 (H)	無添加 (C)	添加 (H)	無添加 (C)
防カビ剤*	1	GH1-	GC1-	OH1-	OC1-
	2	GH2-	GC2-	OH2-	OC2-
	3	GH3-	GC3-	OH3-	OC3-
	4	GH4-	GC4-	OH4-	OC4-
	5	GH5-	GC5-	OH5-	OC5-
	6	GH6-	GC6-	OH6-	OC6-
	7	GH7-	GC7-	OH7-	OC7-
	8	GH8-	GC8-	OH8-	OC8-

曝露台2) カビ接種(有)

塗装色		胡粉+三千本膠 (G)		黄土+三千本膠 (O)	
コートサイドH		添加 (H)	無添加 (C)	添加 (H)	無添加 (C)
防カビ剤*	1	GH1+	GC1+	OH1+	OC1+
	2	GH2+	GC2+	OH2+	OC2+
	3	GH3+	GC3+	OH3+	OC3+
	4	GH4+	GC4+	OH4+	OC4+
	5	GH5+	GC5+	OH5+	OC5+
	6	GH6+	GC6+	OH6+	OC6+
	7	GH7+	GC7+	OH7+	OC7+
	8	GH8+	GC8+	OH8+	OC8+

*防カビ剤の種類は、1：なし、2：水性キシラモン3W(乳剤)、3：キシラモントラッド(油性剤)、4：ミラクルローレルBAM(乳剤)、5：ミラクルローレルBIC(乳剤)、6：オプティガード20EC(乳剤)、7：モクポーベネザーブ(水性剤)、8：カチオンDDC(水性剤)である。

3-2. 曝露試験結果

曝露試験は、カビの生育にとって好適であると考えられる梅雨入り前(2011年5月)から秋まで(2011年10月)の5か月間行い、カビ被害の発生等を目視にて観察した。5か月経過後の目視観察結果を表3、写真3に示す。曝露試験での観察項目には、カビの発生被害だけでなく塗装顔料と防カビ剤との化学反応による色彩の変化も観察した。

薬剤塗布なしの試験片では、分離したカビを塗布した対象で非常に旺盛なカビの増殖が観察された。また、カビを接種していない場合でも非常に多くのカビの増殖が観察された。これは、霧島神宮拝殿および渡廊下、登廊下で塗装施工後すぐに大規模なカビ被害が起こった状況を試験的に再現できたと考えられる。塗装仕様には、あらかじめ防カビ剤の1つとしてコートサイドHを添加してある対象と添加していない対象を設けたが、両方でカビ発生に大きな差異は認

められなかったことから、霧島神宮周辺に分布するカビおよび分離したカビにはコートサイド H に対して何らかの耐性機構が存在することが示唆された。防カビ剤で効果が認められたのは、水性キシラモン 3 W, ミラクルローレル BAM, ミラクルローレル BIC, カチオン DDC であった。一方、キシラモントラッド, オプティガード 20EC, モクポーペネザーブは、胡粉と化学的

表 3 曝露試験の目視観察結果 (20011.10の観察：曝露試験 5 か月経過時点)

試験板片名	薬剤塗布	塗料落ち・変色	糸状菌(カビ)発生	糸状菌(カビ)発生程度	備考
GH1+	なし	-	+	多い・全面・複数種	
GH1-		-	+	極わずか・部分・単種	
GC1+		-	+	非常に多い・全面・複数種	
GC1-		-	+	多い・全面・複数種	
OH1+		-	+	多い・全面・複数種	
OH1-		-	+	極わずか・全面・単種	
OC1+		-	+	非常に多い・全面・複数種	
OC1-		-	+	多い・全面・複数種	
GH2+		水性キシラモン 3 W	-	-	-
GH2-	-		-	-	
GC2+	少し脱色		-	-	
GC2-	-		-	-	
OH2+	-		-	-	
OH2-	-		-	-	
OC2+	-		-	-	
OC2-	-		-	-	
GH3+	キシラモントラッド	大きく脱色	+	極わずか・部分的・単種	
GH3-		大きく脱色	+	極わずか・部分的・単種	
GC3+		大きく脱色	+	多い・全面・複数種	
GC3-		大きく脱色	+	多い・全面・複数種	
OH3+		変色	+	極わずか・部分的・単種	
OH3-		変色・光沢化	+	極わずか・部分的・単種	
OC3+		変色	-	-	
OC3-		変色・光沢化	+	極わずか・全面・単種	
GH4+	ミラクルローレル BAM	-	-	-	
GH4-		-	-	-	
GC4+		-	-	-	
GC4-		-	-	-	虫の死骸上にわずかにカビ(除去)
OH4+		-	-	-	
OH4-		-	-	-	
OC4+		-	-	-	
OC4-		-	-	-	
GH5+	ミラクルローレル BIC	-	-	-	
GH5-		-	+	極わずか・部分的・単種	
GC5+		-	-	-	
GC5-		-	-	-	
OH5+		-	-	-	
OH5-		-	+	極わずか・部分的・単種	
OC5+		-	-	-	ゴキブリのような食痕あり
OC5-		-	+	極わずか・部分的・単種	

GH6+	オブティガード20EC	少し脱色	+	わずか・部分的・複数種	一度は溶解した胡粉が再結晶したため見かけ上は脱色・変色が少ない	
GH6-		-	-	-		
GC6+		-	+	多い・全面・複数種		
GC6-		-	+	極わずか・部分的・単種		
OH6+		白色変色	+	わずか・部分的・複数種		胡粉が溶解して黄土表面で再結晶
OH6-		白色変色	-	-		胡粉が溶解して黄土表面で再結晶
OC6+		白色変色	+	多い・全面・複数種		胡粉が溶解して黄土表面で再結晶
OC6-		白色変色	+	極わずか・部分的・単種		胡粉が溶解して黄土表面で再結晶
GH7+	モクホーベネザープ	-	-	-	一度は溶解した胡粉が再結晶したため見かけ上は脱色・変色が少ない	
GH7-		-	-	-		
GC7+		-	+	極わずか・部分的・単種		
GC7-		-	-	-		
OH7+		白色変色	-	-		胡粉が溶解して黄土表面で再結晶
OH7-		白色変色	-	-		胡粉が溶解して黄土表面で再結晶
OC7+		白色変色	+	極わずか・部分的・単種		胡粉が溶解して黄土表面で再結晶
OC7-		白色変色	+	極わずか・部分的・単種		胡粉が溶解して黄土表面で再結晶
GH8+	カチオン DDC	-	-	-		
GH8-		少し脱色	+	極わずか・全面・単種		
GC8+		-	-	-		
GC8-		-	-	-		
OH8+		-	-	-		
OH8-		-	-	-		
OC8+		-	-	-		
OC8-		-	-	-		

に反応して色彩に著しい変化を与えた。

4. おわりに

本報告では、塗装工事後すぐに発生するおそれのあるカビ類に対して、まずは対象となる建造物周辺の環境を測定し生育環境を把握した。そのうえで、カビが発生した場所と類似した環境下で現地曝露試験を行い、顔料・膠・防カビ剤を混合して塗布した当初の仕様でカビの発生を確認するとともに、その対策として施工後に防カビ剤を塗布する方法を検討した。

環境計測の結果、対象である霧島神宮は山の麓にあるため、気温は平地より低く、相対湿度は約70%と比較的高いことが把握でき、通常土中にある常在菌であれば容易に発生しやすい環境であることが明らかとなった。また、対象となった建物内は外気温変化と同様に変化するとともに、湿度に関してはより高くなることが確認された。このことより建物内は、特に雨戸を閉めた状態ではカビ発生のリスクが高くなる⁴⁾ことが考えられ、何らかの対策を講ずる必要があることがわかった。

また、防カビ剤を塗布した塗装サンプルの現地曝露試験では、霧島神宮のなかでも最もカビが生えやすい場所を選定し、当初仕様にてカビ発生の再現を試みるとともに、あらたに防カビ剤を塗布する方法の評価を行った。その結果、今回発生したカビは当初防カビ剤として塗装材料に添付したものに対して耐性があることが明らかとなるとともに、出来上がった塗装に対し水性キシラモン 3W, ミラクルローレル BAM, ミラクルローレル BIC, カチオン DDC を塗布することで有効な防カビ対策になることが確認された。しかしながら、他の防カビ剤の一部は胡粉と化学反応を起こすため、使用には細心の注意が必要であることがわかった。

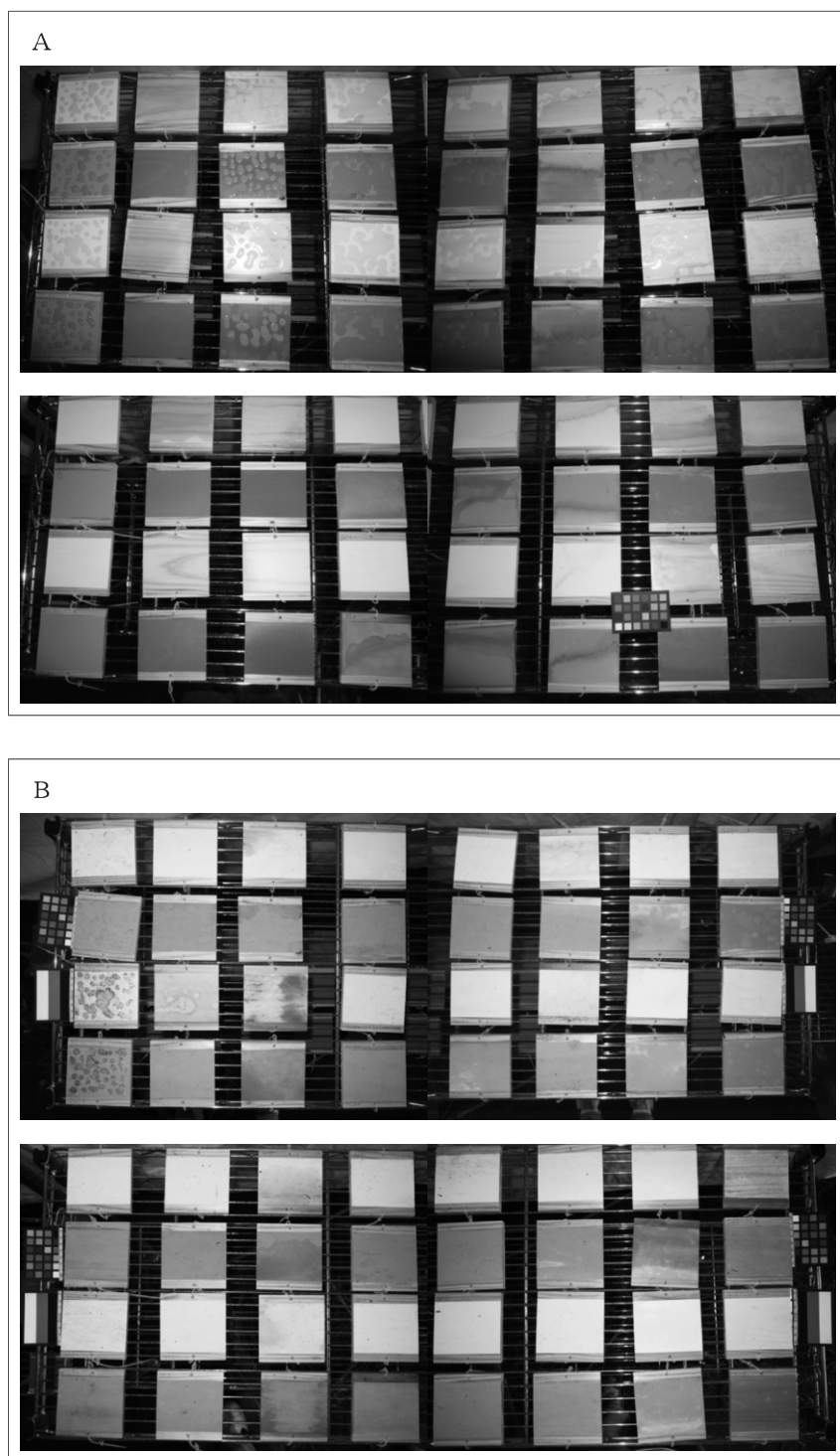


写真3 曝露試験片の設置後 (A) と5か月経過後 (B) の観察写真

謝辞

屋外曝露試験の試験片作成は(株)小西美術工芸社、定期的な観察は国宝修理装演師連盟の多大なる協力を得た。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 森井順之, 早川典子, 川野邊渉: 国宝・重文日光社寺建造物群保存修復のための温湿度計測, 日本気象学会2003年度春季大会講演予稿集, pp.341, 2003
- 2) 佐藤嘉則, 森井順之, 木川りか, 太田 英一, 中別府良啓, 中山俊介, 川野邊渉: 霧島神宮の塗装部位から分離された糸状菌の諸性質, 保存科学, 51, 47-58 (2012)
- 3) 間瀬創・佐野千絵・木川りか: 古墳等の高湿度作業環境下での使用を想定した木材保存剤のかび抵抗性試験と TVOC 測定, 保存科学, 48, 175-182 (2009)
- 4) 森井順之, 犬塚将英, 佐野千絵, 石崎武志: キトラ古墳保護覆屋内の環境について(4)一周辺風環境の解析および覆屋内環境監視一, 保存科学, 48, 159-166 (2009)

キーワード: 木造建造物 (wooden building); 塗装劣化要因 (deterioration factor of painting); カビ (fungi); 防カビ剤 (fungicide); 湿度 (humidity); 曝露試験 (exposure test)

Research on the Biodeterioration Factors and Countermeasures for Coating Layers in the Restoration of Kirishima Shrine

Masayuki MORII, Yoshinori SATO, Hajime MABUCHI*, Rika KIGAWA,
Ei'ichi OTA*², Yoshihiro NAKABEPPU*³, Shunsuke NAKAYAMA
and Wataru KAWANOBE

In the process of restoration of traditional coating layers on the buildings of Kirishima Shrine, significant deterioration of the newly coated layers by fungi was observed, especially during humid and hot seasons, from June to August. By measuring temperature and relative humidity around and inside the buildings, it was confirmed that relative humidity was very high (between 80 to 90% RH) especially during the hot seasons. Though fungicide had been applied to the materials for the coating, significant fungal growth was observed on the coated layer, probably because of animal glue in the layer and very humid condition of the location, on a mountain side. Some other fungicides were tested on newly coated layers of *gofun* and of *odo*. As a result, a few kinds of fungicides were found to be effective in preventing fungal growth for at least one hot season. However, careful consideration is necessary to ensure longer effects by such treatments.

*Mie Prefectural Museum

*²The Japanese Association for Conservation of Architectural Monuments

*³Kirishima Shrine