

古建築の外装塗装の物性に関する研究 (Ⅲ)

—丹色塗装の屋外曝露試験(2)—

西浦 忠輝・岡部 昌子*・川野邊 渉

1. はじめに

社寺等木造古建築の外装塗装は、漆塗装を除けば、ほとんどの場合天然顔料を膠水で溶いたものが伝統的に用いられてきている。膠は耐水性に劣るものであり、膠による塗装は風雨に曝される屋外条件下では耐久性(耐候性)が低く、環境条件の厳しい地域では頻繁な塗替えが必要である。しかし、伝統材料、伝統技術による塗装を短期間毎に行うのは容易なことではなく、より耐久性に優れた材料がかなり応用されてきている¹⁾。そこで筆者らは、これらの塗装材料の物性についてのシステムチックな研究を行うべく、最初に古建築の代表的な外装塗装である丹色塗装の耐久性についての実験的研究を開始した。その第1報として、伝統材料である〈膠+鉛丹〉と、近年開発された耐久性の高い建築外装用塗料(主に有機顔料で着色された合成樹脂塗料)、およびこれら合成樹脂塗料のクリヤー(顔料を含まない無色塗料)に鉛丹を混ぜたものについて、ウェザオメーターによる人工劣化促進処理試験の結果を報告した²⁾。続いて第2報として、同じ種類の試験片について、東京国立文化財研究所屋上(東京都台東区上野公園)で1年7カ月にわたり屋外曝露し、その耐久性と劣化形態について検討、考察した結果を報告した³⁾。この屋外曝露試験は継続中であり、本報は曝露4年10カ月後の結果について報告するものである。

2. 実 験

2-1. 実験方法

2-1-1. 試験材料

1) 基材(木材)

ヒノキ古材(約100年前)の柁目材を150×65×5mmの手板にカットし、表面をサンドペーパーで平滑にしたものを塗装試験片用の基材とした。木材は平均年輪幅約1.5mmの細密な均質材で、ヤニ等の全く無い良質材である。

2) 塗料

塗料は〈膠+鉛丹〉の他に、アクリル系、シリコン系、フッ素系、アクリルウレタン系、ポリエステル系の規格品調色合成樹脂塗料、およびこれら合成樹脂塗料のクリヤー(無色塗料)に鉛丹を混ぜたもので、表1に示す17種類である。これらのうち水性のものは膠とポリエステル系の2種だけでその他はすべて油性(溶剤タイプ)である。

3) プライマー

プライマーは規格品を用いたが、その主成分は表1に示す通りである。

2-1-2. 試験片の作成

塗装は手板の片面にのみ行ったが、図1に示すように、まず半面にプライマーを刷毛塗り(1回塗)した。そして、プライマーの指触乾燥の後、塗料を刷毛塗りした。

塗布量は、基材手板の木目が見えなくなり、かつ塗膜面が平滑になるまでとした。したがって、塗布回数は各塗料の粘度などによって異なり、2~5回であった。塗装後は実験室内に

*文化財修復家

表1 塗装試験片一覧

| 記号 | 塗料 | プライマー |
|--------|---------------------|---------------|
| G・T | 膠*1+丹 | ブタジエンゴム系 |
| A-I | アクリル系調色塗料 (I) | エポキシ系 |
| A-II | アクリル系調色塗料 (II) | アクリル系 |
| A・T-I | アクリル系無色塗料 (I)+丹 | エポキシ系 |
| A・T-II | アクリル系無色塗料 (II)+丹 | アクリル系 |
| S-I | シリコーン系調色塗料 (I) | シリコーン系 |
| S'-I | シリコーン系調色塗料 (I) <艶消> | なし |
| S-II | シリコーン系調色塗料 (II) | エポキシ系 |
| S・T-I | シリコーン系無色塗料 (I)+丹 | シリコーン系 |
| S・T-II | シリコーン系無色塗料 (II)+丹 | エポキシ系 |
| F-I | フッソ系調色塗料 (I) | フッソ系 |
| F'-I | フッソ系調色塗料 (I) <艶消> | なし |
| F-II | フッソ系調色塗料 (II)*2 | ブタジエン・ウレタン系*3 |
| F・T-I | フッソ系無色塗料 (I)+丹 | フッソ系 |
| AW | アクリルウレタン系調色塗料 | アクリルウレタン系 |
| AW・T | アクリルウレタン系無色塗料+丹 | アクリルウレタン系 |
| P・T | ポリエステル系無色塗料<艶消>*1+丹 | ポリエステル系 |

*1 水性, 他は全て油性

*2 スプレー塗装

*3 全面プライマー処理

において常温で1ヶ月以上乾燥させた。尚, F'-I, S'-Iについてはプライマー処理をしていない。また, F-IIの場合は全面プライマー処理で塗料はスプレー塗装である(表1参照)。

塗装手板試験片は各塗料について10片ずつ作成し, そのうちの4片ずつを試験に供した。残りの各6片のうち2片はコントロール(無処理・比較対照用)として, 冷暗所に保存しており, 他の4片はすでにウェザオメーターによる人工劣化促進試験に供した²⁾。

2-1-3. 屋外曝露試験

1990年2月, 東京国立文化財研究所(東京都台東区上野公園内)の屋上に設置した曝露台に, 試験片を針金で固定してセットした(写真1, 2)。曝露台は, <JIS K 5400 塗料一般試験方法: 耐候性>に則って, 南向き, 塗面と水平面との作る角度を当地の緯度マイナス5度(東京の場合30度)として設置されている⁴⁾。1991年9月に取り外して詳細に調査, 1992年1月に再び曝露台にセットした。そして1995年4月に再び取り外して詳細に調査した後, 同年9月, 三たび曝露台にセットした。曝露期間は通算4年10カ月であるが, その間に, 雨が多く日射の強い夏季を5回経ている。

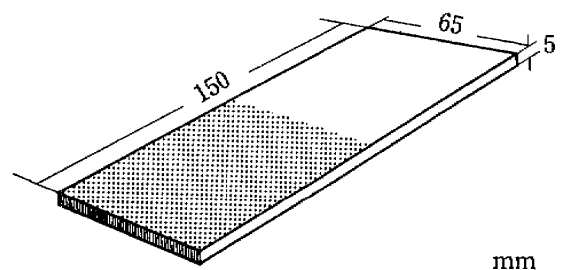


図1 試験用木材手板とプライマー処理



写真1 屋外曝露試験状況



写真2 曝露台上に固定された試験片

2-2. 実験結果

2-2-1. 屋外曝露試験結果

各試験片とも表面（塗装面）が煤煙等で汚れ、色変化などの判断に若干の困難をきたした。そこで、曝露1年7カ月後の段階で行ったと同じく、水で濡らした脱脂綿で塗装面の汚れを軽く拭き取った。ただし剥落が危惧される場合や、脆弱化した部分については行わなかった。

各試験片の曝露1年7カ月後と4年10カ月後の状態を並べて表2に、また4年10カ月後の状態を写真3、写真4に示す。尚、同種試験片4片の間での状態のバラツキは小さかった。

表2から明らかなように、屋外曝露4年10カ月後の段階で、耐候性に最も優れているのはS-Iであり、S-IIおよびS・T-IIのプライマー処理した部分も良好である。S'-I、F-I、F'-I、AW・T、およびS-IIのプライマー処理なしの部分がこれに次ぐ。一方、特に耐候性に劣るのは、曝露1年7カ月後の段階で完全に剥落していたG・T、P・T（この2種のみが水性）であるが、4年10カ月後の段階では、A-II、A・T-IIが殆ど剥落している。

劣化形態別にその特徴を挙げれば次の通りである。（表2、写真3、写真4参照）。

(1) 剥落

目視観察で剥落、浮離、亀裂等が見られないのはS-I、S・T-I、F'-I、F-II、F・T-I、およびS-II、S・T-II、F-Iのプライマー処理部分である。S'-I、AW・Tがこれに次ぐ。S'-Iは一見したところ変化が見られないが、観察の前に汚れを取るため、極く軽く脱脂綿で水拭きした際、脱脂綿に薄く赤色がついた。AW・Tでは小さな円形の亀裂が見られる。これに対し殆ど剥落したのはA-II、A・T-IIおよびA-I、A・T-Iのプライマー処理なしの部分である（G・T、P・Tは曝露1年7カ月後の調査時、既に完全剥落）。AWは全体に木目方向の亀裂が著しく、特にプライマー処理なしの部分では剥落も進行している。A-I、A・T-Iのプライマー処理した部分とS-II、S・T-IIのプライマー処理なしの部分では、亀裂および一部剥落が見られる。またS-II、AWでは木目方向の亀裂以外にも、小さな円形の亀裂および剥離が見られる。剥離形態の特徴として、AWでは塗膜の表面側が収縮し反り返る形で剥離している。一方、S-II、S・T-IIでは塗膜の木地と接する側が収縮し盛り上がり、お椀を伏せたような形で剥離している。A-I、A・T-IではAWおよびS-II、S・T-IIで見られる程収縮が顕著ではない。またF-Iのプライマーなしの部分では、一見して変色かと思われる色むらがあるが、実は目痩せによる微細な剥離による劣化である。

今回は顕微鏡による観察も行った。その結果肉眼では判り難い微細な劣化の状態が観察された（25倍～175倍）。S-Iでは細かいクレーター様の劣化や、円形或不規則方向の亀裂が見られ、

表2 屋外曝露による劣化の形態と程度

| 試験片 | (1年7カ月後) | | | | (4年10カ月後) | | | |
|--------|----------|----|----|----|-----------|----|----|----|
| | *1 | 剥落 | 変色 | 褪色 | *1 | 剥落 | 変色 | 褪色 |
| G・T | P | × | — | — | P | × | — | — |
| | C | × | — | — | C | × | — | — |
| A-I | P | ○ | ◎ | ◎ | P | ▲ | ◎ | ○ |
| | C | × | ◎ | ◎ | C | × | — | — |
| A-II | P | ▲ | ◎ | ▲ | P | × | — | — |
| | C | × | ◎ | ▲ | C | × | — | — |
| A・T-I | P | ○ | ○ | ◎ | P | ▲ | ○ | ○ |
| | C | ▲ | ○ | ◎ | C | × | — | — |
| A・T-II | P | ▲ | ▲ | ◎ | P | × | — | — |
| | C | × | ▲ | ◎ | C | × | — | — |
| S-I | P | ◎ | ○ | ◎ | P | ◎ | ○ | ○ |
| | C | ◎ | ○ | ◎ | C | ◎ | ○ | ○ |
| S'-I | P | | | | P | | | |
| | C | ◎ | ○ | ◎ | C | ○ | ○ | ○ |
| S-II | P | ◎ | ◎ | ◎ | P | ◎ | ◎ | ◎ |
| | C | ◎ | ◎ | ◎ | C | ▲ | ◎ | ◎ |
| S・T-I | P | ◎ | × | ◎ | P | ◎ | × | ▲ |
| | C | ◎ | × | ◎ | C | ◎ | × | ▲ |
| S・T-II | P | ◎ | ○ | ◎ | P | ◎ | ○ | ○ |
| | C | ◎ | ○ | ◎ | C | ▲ | ▲ | ○ |
| F-I | P | ◎ | ○ | ◎ | P | ◎ | ○ | ○ |
| | C | ◎ | ○ | ◎ | C | ▲ | ○ | ○ |
| F'-I | P | | | | P | | | |
| | C | ◎ | ▲ | ○ | C | ◎ | ▲ | ○ |
| F-II | P | ◎ | ◎ | × | P | ◎ | ◎ | × |
| | C | | | | C | | | |
| F・T-I | P | ◎ | × | ◎ | P | ◎ | × | ▲ |
| | C | ◎ | × | ◎ | C | ◎ | × | ▲ |
| AW | P | ○ | ◎ | ○ | P | ▲ | ◎ | ▲ |
| | C | ▲ | ◎ | ○ | C | × | ◎ | ▲ |
| AW・T | P | ◎ | ○ | ◎ | P | ○ | ▲ | ○ |
| | C | ◎ | ○ | ◎ | C | ○ | ▲ | ○ |
| P・T | P | × | — | — | P | × | — | — |
| | C | × | — | — | C | × | — | — |

*1 P:プライマー処理, C:無処理

◎:ほぼ変化なし

○:軽微な変化

▲:明白な変化

×:顕著な変化

—:観察不能か無意味

S'-I, S・T-I, F'-I, F-II, F・T-Iにもそれぞれ細かい亀裂またはその予兆かと思われる細い筋状のものが認められる。

(2) 変色

曝露1年7カ月後と変わらずA-I (プライマー処理なしの部分は剥落), S-II, F-II, AWについては殆ど変化が認められない (但しF-IIは褪色著しい)。変色が著しいのはS・T-I, F・T-Iであり全体に黒っぽく変色している。S・T-IIのプライマー処理なしの部分およびF'-I, AW・Tの黒変もやや進行している。またS・T-I, F・T-Iで白い米粒大の斑点が随所に見られ, A・T-Iでも一部亀裂部分に小さな白化が見られる。

(3) 褪色

殆ど変化が認められないのはS-IIである。それに対し著しく褪色が進行したのはF-IIであり, AWがそれに次ぐ。S・T-I, F・T-Iについては部分的に脱色したようなムラな褪色の状態を呈している。その他のものでは比較的軽微な褪色である。

(4) 光沢

本来の膠による丹塗 (G・T) は光沢のないものであるが, 光沢のある合成樹脂塗料に関しては, 光沢の残存度合も耐候性考察の一つのファクターとなり得る (S'-I, F'-I, P・Tはもともと艶消しの塗料であり除外)。

曝露4年10カ月後の段階で光沢を残しているのはA-I, A・T-I, S-II, S・T-II, AW・Tであり, F・T-Iもやや残している。F-Iではプライマー処理した部分に光沢が残存している。その他のものは既に光沢を失っている。

曝露4年10カ月を経てプライマー処理の有無により有意な差が生じたのは, A-I, A・T-I, S-II, S・T-II, F-I, AWにおける剥落現象およびS・T-IIにおける変色の度合である。特にA-I, A・T-Iにおいては, プライマー処理なしの部分では殆ど剥落し木地が露出しているが, プライマー処理の部分では剥落は少なく, その差は顕著である。S-II, S・T-IIにおいてもプライマー処理なしの部分では亀裂や剥落が目立つが, プライマー処理部分では殆ど変化が見られない。

2-2-2. 屋外曝露1年7カ月後の試験結果との比較

屋外曝露1年7カ月後と4年10カ月後の試験結果を比較してみると, 表2からも分かるように, 1年7カ月後の段階で見られた劣化は3年余の間に, より大きな劣化へと徐々に進行している。また前回殆ど変化が見られなかったものの中に僅かな変化が現れたものもある。その中でS-II, S・T-II, F-Iのプライマー処理なしの部分における剥落, およびS・T-I, F・T-Iにおける褪色については, 1年7カ月後の段階では殆ど変化が見られなかったのに対し4年10カ月後では明らかな劣化状態を呈しておりその進行が顕著である。

2-2-3. ウェザオメーター試験結果との比較

既に3000時間にわたるウェザオメーター処理 (温度42°C, 湿度60%, 60分間に12分間のスプレー) 試験結果について報告した²⁾が, 本条件でのウェザオメーター処理216時間が, 日本の標準気候下での屋外曝露1年間に相当するとされている。

そこで, 今回の4年10カ月の屋外曝露 (夏季を5回含む) と一応比較, 検討し得るデータとして, 先のウェザオメーター処理試験の1000時間後の結果 (表3) を取り上げ, 今回の屋外曝露試験結果 (表2) とを比較してみることにする。

A-I, A・T-IIのプライマー処理部分, S-II, F-Iのプライマー処理なしの部分およびS・T-I, F-II, F・T-I, AWでは屋外曝露の方が劣化が大きく, 特にAWにおける剥落, F-IIにおける褪色が顕著である。その他のものでは, ほぼ近似した結果と見て良いであ

ろう。

3. 考 察

近年種々の耐候性に優れた建築物外装用合成樹脂塗料が開発され応用されている。しかし、これらの塗料は専らコンクリートや金属に用いられることを前提につくられており、木材に塗られた場合、実際どの程度の耐久性があるのかについての実験例はほとんどなかった。そこで、ウェザオメーターによる長時間の人工的劣化促進処理試験を行った結果、これら塗料は、木材に塗られた場合でも、高い（膠に比べればはるかに高い）耐久性を持っていることが明らかとなった²⁾。しかし、ウェザオメーター処理試験はあくまでもシミュレーション実験であり、実際の耐候性を評価するためには、屋外曝露試験結果の方が正しいことは言うまでもない。しかし、屋外曝露試験は長期間を要するので、ウェザオメーター処理による人工劣化促進試験は実際上極めて有効な手段である。従って、同一サンプルによる両試験結果の比較は貴重なデータであり、屋外曝露一定期間毎の両者の比較を今後も続けて行く予定である。

さて、現在までの5年弱の屋外曝露により、＜膠水+丹＞と＜ポリエステル系水性塗料+丹＞は完璧に剥落し、また、アクリル系塗料の剥落も著しい。これらが実際の建物に塗装された場合、通常これ程の剥落が起こるとは考えられず、本曝露試験条件は実際の条件よりもかなり厳しいものと言うことができる。これは、試験片が小さな手板に塗装されたものであるために、木口からの水の浸透の影響が大きいこと、また、塗装面が真南を向き、かつ太陽に正対しているために、日射量が多いこと、さらに、雨に垂直に近い状態で曝されていることなどによると考えられる。従って、本試験は、シミュレーションではない実際的な劣化促進比較試験と見るべきで、今後、曝露期間が長くなるに従い、更に新たな知見が得られるものと期待される。

東京国立文化財研究所における屋外曝露試験と並行して、島根県簸川郡大社町日御碕にある重要文化財・日御碕神社近くで、12×50×1 cmのヒノキ、スギおよびケヤキ手板に塗装したものを試験片として、屋外曝露試験を行った（1989年12月～1994年7月）。当地は岬の突端に位置し、海風が直接吹き付ける自然環境の極めて厳しい特殊な場

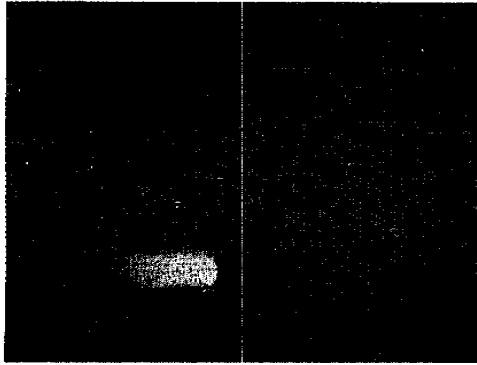
表3 ウェザオメーター処理による劣化度

| 試験片*1 | 処理時間 1000(hrs) | |
|--------|-------------------|---|
| G・T | P | × |
| | C | × |
| A-I | P | ◎ |
| | C | × |
| A-II | P | × |
| | C | × |
| A・T-I | P | ▲ |
| | C | × |
| A・T-II | P | ▲ |
| | C | × |
| S-I | P | ○ |
| | C | ○ |
| S'-I | P | |
| | C | ◎ |
| S-II | P | ◎ |
| | C | ◎ |
| S・T-I | P | ▲ |
| | C | ▲ |
| S・T-II | P | ◎ |
| | C | ▲ |
| F-I | P | ○ |
| | C | ○ |
| F'-I | P | |
| | C | ○ |
| F-II | P | ○ |
| | C | |
| F・T-I | P | ▲ |
| | C | ▲ |
| AW | P | ○ |
| | C | ○ |
| AW・T | P | ▲ |
| | C | ▲ |
| P・T | P | × |
| | C | × |

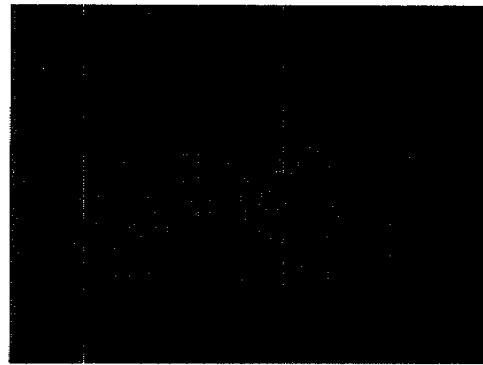
*1 P：プライマー処理，C：無処理

◎：ほぼ変化なし ○：軽微な変化

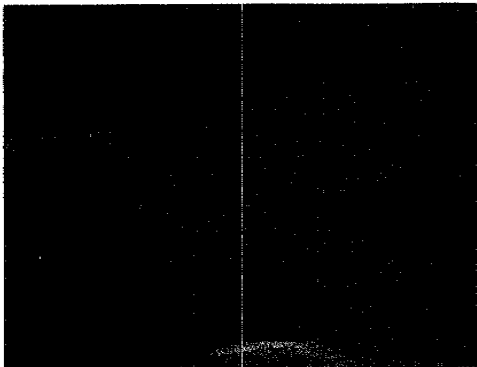
▲：明白な変化 ×：顕著な変化



A-I
木目に添った亀裂
(左側木地露出部分はプライマー無処理)



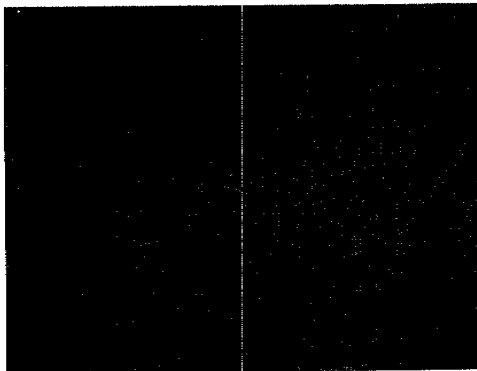
AW
円形の亀裂



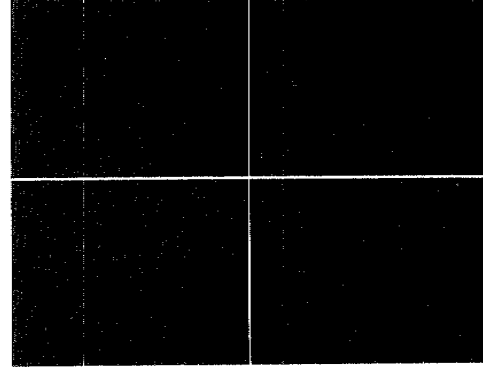
AW
塗膜の表面側が収縮し反り返った形での剝離



S·T-II
塗膜の木地側が収縮し内向きに反った形での剝離

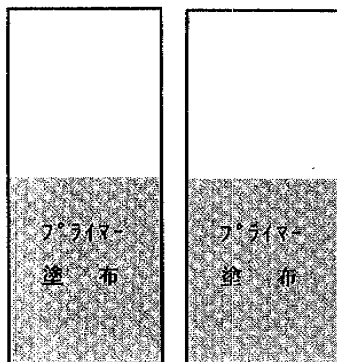


F-I
目痩せによる微細な剝離
(右半分はプライマー処理)

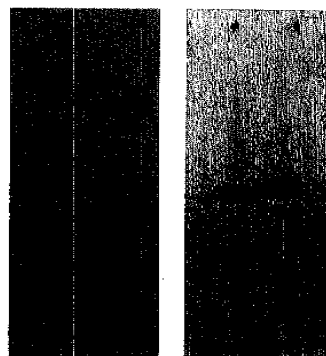


S-I
肉眼では判り難い微細な劣化
(左上は無処理片)

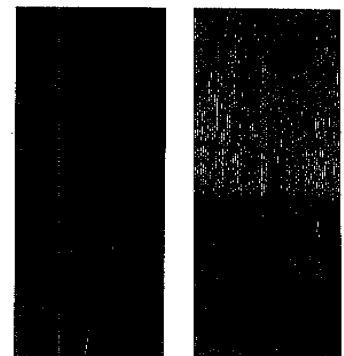
写真3 劣化形態の顕微鏡写真による観察



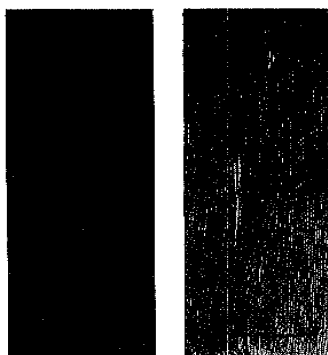
コントロール 屋外曝露後



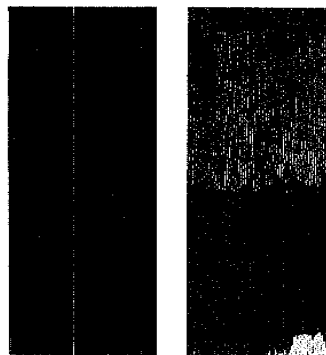
G・T



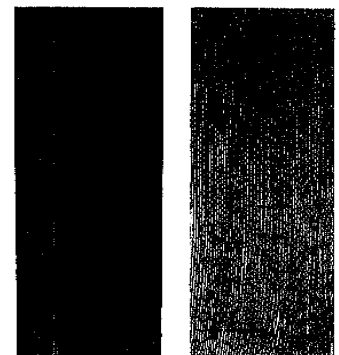
A-I



A-II



A・T-I



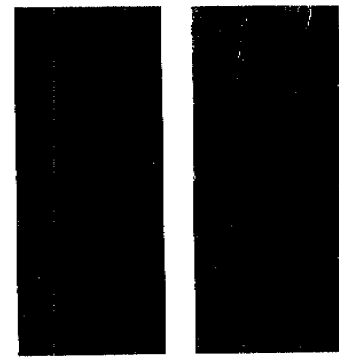
A・T-II



S-I



S-I
(プライマーなし)

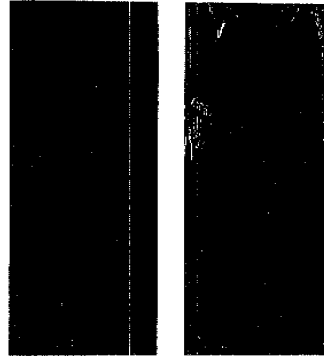


S-II

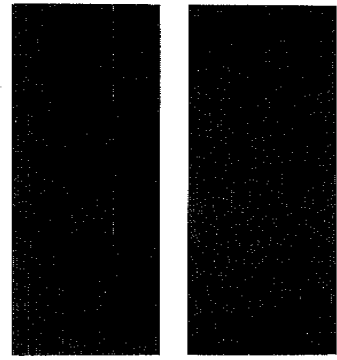
写真4(a) 屋外曝露4年10ヵ月後の状態



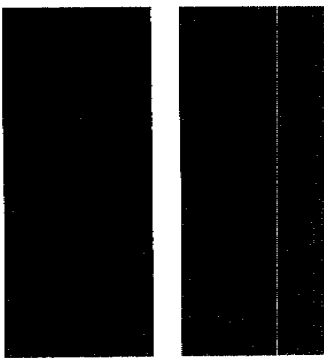
S・T-I



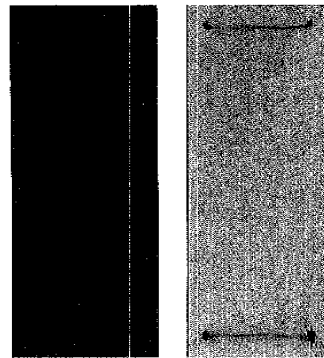
S・T-II



F-I



F-I
(プライマーなし)



F-II
(全面プライマー処理)



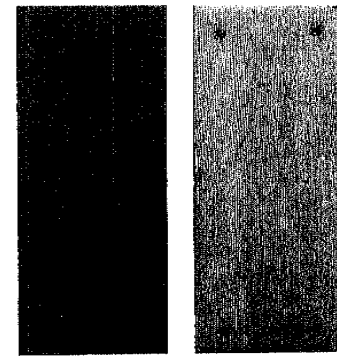
F・T-I



AW



AW・T



P・T

写真4(b) 屋外曝露4年10カ月後の状態

所であり、東京での曝露試験とはまた異なった結果が得られた。この曝露試験結果については、東京の屋外曝露試験結果およびウェザオメーター処理試験結果と併せ解析し、次報で報告する予定である。

参 考 文 献

- 1) 西川杏太郎, 樋口清治, 西浦忠輝ほか:「丹塗り塗装の耐久性」『考古学, 美術史の自然科学的研究』日本学術振興会, 568-570 (1980)
- 2) 西浦忠輝, 川野邊渉, 岡部昌子:「古建築の外装塗装の物性に関する研究 (I) -丹色塗装の人工劣化促進試験-」保存科学, **30**, 21-30 (1991)
- 3) 西浦忠輝, 川野邊渉, 岡部昌子:「古建築の外装塗装の物性に関する研究 (II) -丹色塗装の屋外曝露試験<1>-」保存科学, **31**, 69-77 (1992)
- 4) 色材協会編『色材工学ハンドブック』朝倉書店, 751-752 (1967)

Studies on the Characteristics of Exterior Paintings on a Historic Wooden Building (III)

—Exposure Test of Minium-color Painting <2>—

Tadateru NISHIURA, Masako OKABE* and Wataru KAWANOBE

In many cases, the exterior of historic wooden temples and shrines is painted in minium color. Traditionally the paint is a mixture of minium (red lead) and animal glue. Because of low durability of animal glue as a binder, the buildings should be repainted quite often, especially in the case of a severe environmental condition. Thus substitutions of a more durable material for animal glue have been considered and are actually used to some extent. However, there are few systematic studies on the characteristics of such new paintings. Therefore, an experimental test was carried out on the durability of minium-color paintings on wood.

Seventeen kinds of paints, which are divided into three types, were tested. Those types are a mixture of animal glue and minium, a mixture of synthetic resin and minium, and a mixture of synthetic resin and pigments other than minium. They were painted on wood pieces (15×6.5×0.5 cm). The test pieces have been exposed on the roof of the Tokyo National Research Institute of Cultural Properties since February, 1990. After four years and ten months' exposure, the following findings were obtained by the test.

- Paint layer which consists of animal glue and minium, and one which consists of polyester type resin and minium, exfoliated completely.
Acrylic resin coating also exfoliated badly, though they showed better durability when painted after primal coating.
- Organo-silicone type resins and fluorine-containing type resin showed very high durability as binder of paint.
- Acrylic resin paints showed good durability in case they were painted after primal coating ; otherwise they showed exfoliation to quite a great extent.
- Paintings which consist of synthetic resins and minium showed blackening to some extent.
- Test results agreed quite well with the results of 1000 hours' weather-ometer test.

This exposure test will be continued for a long time. Another exposure test has been carrying out using some of the same kinds of test pieces at the sea side where environmental condition is very serious. Therefore better consideration will be made in the near future by analyzing the results of these tests.

* Private Restorer