

〔報告〕 壁画断片とマウントの接着方法と接着強度の検討

藤澤 明・島津 美子・佐藤 由季・松岡 秋子

1. 背景と目的

タジキスタン国立古代博物館には、国内で発見された壁画断片が収蔵されているが、その多くは適切な修復処置がなされないまま収蔵庫に保管されている。文化遺産国際協力センターでは、タジキスタンの若手保存修復家とともにこれらの壁画断片の保存修復を行い、安全な保存および展示を目指している。古代博物館が所蔵する壁画断片の多くは、タジキスタン北西部、カライ・カフカハI遺跡宮殿跡から出土している。宮殿は火災により崩壊したため、壁画は断片化しており、また、火を受けて部分的に焼き締められている¹⁾。2009年度に、この遺跡から出土した壁画断片群の一部を修復し、安全な保管や移送、さらには展示のため、断片背面に断片を支持するマウントを取り付けた(図1)。必要であればマウントを取り外せるように、マウントと断片の間に、有機溶剤に溶解するアクリル樹脂の薄膜を隔離層として設けた。しかしながら、マウントは断片裏面に面接着で固定されているため、溶剤が内部まで浸入しにくくマウントと断片の分離は容易でないことが予想された。そこで、十分な接着強度があり、溶剤により容易に分離ができる接着方法を検討することとした。本稿では、新たに考案した壁画断片とマウントの接着方法とその接着強度試験の結果を報告する。

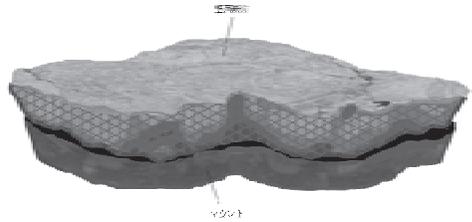


図1 マウント処置した壁画断片の模式図

2. 壁画断片とマウントの接着方法

壁画断片に取り付けるマウントには、エポキシ樹脂とフェノールマイクロバルーンからなる心材をエポキシ樹脂で固めた炭素繊維布(表面材)2枚で挟むサンドイッチ構造を採用した。断片背面と接着する面は、断片背面の凹凸に合わせて成形されている。壁画断片には、接合の補強と構造の安定化のために、レーヨン製三軸織物とアクリルエマルジョンであるプレキシトル B500を用いた裏打ちがなされている。

2009年度の接着方法では、マウント側にパラロイド B67 を隔離層として塗布し、断片とマウントの固定にはプレキシトル B500 を用いて密着固定する(図2)。この方法では、イソプロピルアルコールが選択的にパラロイド B67 を溶解することを利用し^{2,3)} マウントと断片の

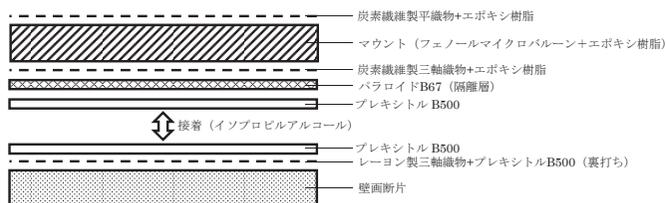


図2 従来の隔離層の構造と接着方法

分離を可能としている。しかしながら、面接着であるため内部まで溶剤を浸入させることが困難である。

新たな接着方法の検討にあたり、東京芸術大学大学院保存修復油画研究室が行ったバーミヤーン壁画断片のマウント方法^{4,5)}を参考にした。この方法は、断片の裏打ちにパラロイド B72 を用い、その上に隔離層としてプレキシゾルを塗布し、断片とマウントをシリコーンボンドで点接着している。これは面ではなく点で接着することで、溶剤が接着面に浸入しやすく分離を容易にする工夫である。カライ・カフカハ I 遺跡出土の壁画断片にも同様の方法を採用することで、マウントと断片の分離が容易になると考えられた。また、保存修復油画研究室で修復された壁画断片は、隔離層の溶解による分離だけでなくマウントを削り取るなど複合的な方法が考案されている。しかし、それらの壁画断片は最大で約 2kg であるのに対して、タジキスタンで展示予定の壁画断片は最大で 10kg と重く、点接着でも十分な接着強度が得られるかが懸念された。そこで、隔離層とする材料の再検討を行い、合わせて点接着による接着強度試験を行った。

3. 隔離層と溶剤の検討

シリコーンボンドにより断片とマウントを接着する場合、シリコーンボンドと裏打ちの接着を防ぐため、断片とシリコーンボンドの接着部分にも隔離層を設ける必要がある。隔離層の条件は、裏打ちのプレキシトル B500 が、マウントを分離する際に使用する溶剤に溶解しないことである。

Rohm and Haas 社の提供しているパラロイド溶剤選択性データより、パラロイド B67 はイソブチルメタクリレート、パラロイド B44 はメタクリル酸メチルとエポキシアクリレートが主成分であり、両者は成分が異なるためアルコール類に対する溶解性が異なる。そこで、溶剤に対する溶解率の測定を行った。約 3g の樹脂をアセトンで溶解し、ガラス瓶内でアセトンを完全に気化させた。これに、20ml のエチルアルコール (C_2H_5OH , 試薬特級, 和光純薬)、イソプロピルアルコール ($(CH_3)_2CHOH$, 試薬特級, 和光純薬)、1-ペンタノール ($CH_3(CH_2)_3CH_2OH$, 試薬特級, 和光純薬) をそれぞれ入れ密封し、54時間保持する。次に、樹脂が溶解した溶剤を取り除き、完全に乾燥させ、残存した樹脂の重量減少量より溶解率を求めた。その結果を表 1 に示す。パラロイド B44 はどの溶剤に対してもパラロイド B67 よりも溶解率が低い。検討を行った溶剤の中でパラロイド B44 と B67 に対して最も溶解率の差が大きい溶剤は 1-ペンタノールであった。

次に、実際に模擬壁画断片を作製しマウントの分離実験を行った。約 220×280mm の壁画断片をエポキシ樹脂で再現し、①壁画断片裏面にパラロイド B44 を塗布しマウント側にパラロイド B67 を塗布する構造、②壁画断片側とマウント側の両方にパラロイド B67 を塗布する構造について検討を行った。試験片の構造を図 3 に示す。それぞれのアクリル樹脂は 20wt% アセトン溶液とし、3回塗布した。また、裏打ちに溶剤の影響があるか検討するため、レーヨン製

表 1 各溶剤に対する溶解率 (%)

| 溶剤 | 樹脂 | |
|-------------|-----|------|
| | B44 | B67 |
| エチルアルコール | 0.8 | 10.1 |
| イソプロピルアルコール | 3.7 | 12.0 |
| 1-ペンタノール | 6.4 | 16.3 |

三軸織物に塗布するプレキシトル B500 (Lascaux Colours & Restauro 社製) にはアリザリンケルミン (ZECCHI 製) を混合し赤色に着色したものを使用した。接合面に1-ペンタノールを30ml 注入し、ビニールパック内で約1時間保持した。その後、スパチュラを接合面に入れ分離した。分離後の接合面の写真を図4に示す。全体にシリコンボンドはマウント側に多く残存した。①の構造を有する下部分を観察すると、シリコンボンドの剥離した面に赤色のプレキシトル B500 が付着しており、裏打ちの接着剤が溶剤により溶解していることを示している。一方で、パラロイド B67 を塗布し②の構造を有する上部分では、プレキシトル B500 の剥離は観察されず、裏打ちに影響なく分離ができていたことを示している。溶解率の試験では、パラロイド B44 が低い溶解性を示したが、実際にマウントの分離を行ったところ、シリコンボンドとともに剥離してしまう結果となった。これは、パラロイド B44 が溶解しないため脆弱なプレキシトル B500 の部分から剥離すること、あるいはパラロイド B44 が膨潤し軟化するため裏打ちの保護膜としての作用が低いことが考えられる。

以上の検討の結果、隔離層はパラロイド B67 を壁画断片裏面とマウントの両方に塗布する構造②とし、マウントを分離する際の溶剤には1-ペンタノールを使用する。

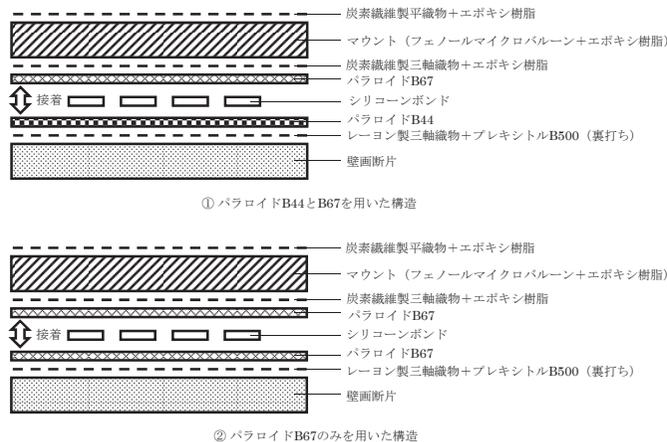


図3 新たに検討を行った隔離層の構造

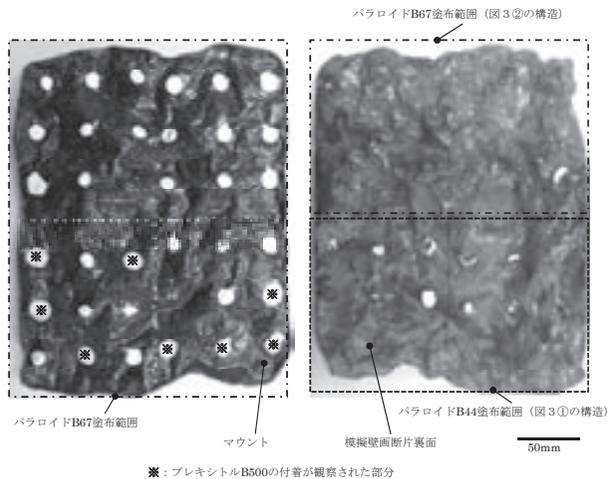


図4 分離後の模擬壁画断片とマウントの接合面

4. シリコンボンドの広がり量

4-1. 実験方法

シリコンボンドを用いて点接着とする場合、広がり量を考慮して塗布間隔を調整する必要がある。広がり量より狭い間隔でシリコンボンドを塗布すると、シリコンボンド同士が繋がりがり、溶剤が浸入しにくくなる。そこで、まず、シリコンボンドの広がり量と荷重の関係を検討した。シリコンボンドには信越化学工業株式会社製 KE45W を用いた。これは、空気中の水分と反応して硬化する縮合タイプ（脱オキシム型）の接着剤であり、ペースト状のため液垂れしにくく作業性が良好である。また、一箇所の塗布量は、作業効率の点から $0.3 \pm 0.01\text{g}$ とした。アクリル板上にシリコンボンドを塗布し、さらに上部からアクリル板を被せ、重りにより荷重をかけた。印加した圧力は、 $0.8\text{g}/\text{cm}^2$ 、 $1.5\text{g}/\text{cm}^2$ 、 $3.0\text{g}/\text{cm}^2$ である。ここで、 $0.8\text{g}/\text{cm}^2$ は水平に壁画断片を置いた場合、標準的なサイズ¹⁾ のマウントの自重により印加される圧力である。

4-2. 実験結果と考察

約1週間乾燥させたシリコンボンドの形状を図5に示す。いずれの荷重であってもほぼ円状に広がっている。印加した荷重とシリコンボンドの直径の関係を図6に示す。印加荷重とシリコンボンドはほぼ一次線形の関係があり、その近似式は式(1)で示される。

$$r = 1.6 \times p + 13.2 \quad \text{式(1)}$$

r : シリコンボンドの直径 (mm) p : 印加荷重 (g/cm^2)

一方、シリコンボンドの厚さを測定した結果を図7に示す。シリコンボンドの体積はほぼ一定であると仮定すると、その厚さは直径の二乗に反比例する。このことから近似式を求めると式(2)となる。

$$t = 1952 / (13 \times p^2 + 211 \times p + 871) \quad \text{式(2)}$$

t : シリコンボンドの厚さ (mm)

シリコンボンドの形状と印加荷重には以上のような関係があることが分かった。実際に壁画断片に印加する荷重は、極端には大きくできないため、 $1.5\text{g}/\text{cm}^2$ とする。これは作製したマ

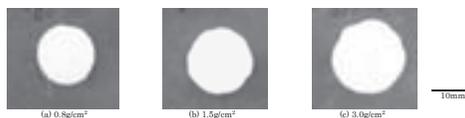


図5 シリコンボンドの広がり形状

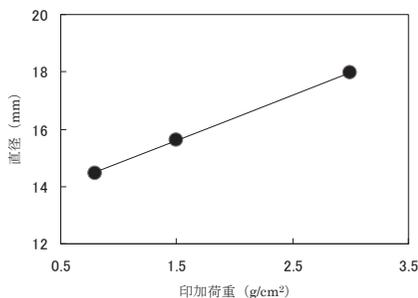


図6 印加荷重とシリコンボンドの直径の関係

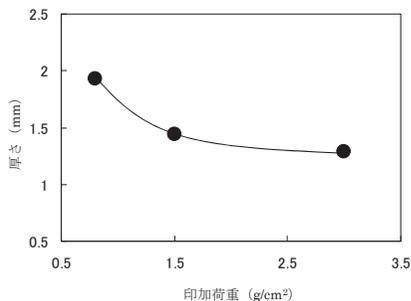


図7 印加荷重とシリコンボンドの厚さの関係

ウントとほぼ同じ重量の重りを載せて乾燥させることを意味する。その場合、直径は約16mmとなり厚さは約1.5mmになる。この結果より、シリコンボンドを塗布する間隔は、16mm以上離すことでボンド同士が接触することはない。

5. シリコンボンドの強度試験

5-1. 実験方法

5-1-1. シリコンボンドの接着強度

メーカーにより一部の材料に対する接着強度はカタログに示されているが、本実験では、修復処置で用いる材料との接着強度を明らかにするために強度試験を行った。試験は、壁画断片を壁面に掛けて展示することを想定し、引張せん断接着強さ試験 (JIS K6850, ASTM D3163) とした。島津製作所製オートグラフ AGS-5kN に同社製ロードセル SBL-5kN を使用し、引張速度は、2mm/min に設定した。実際に修復処置に用いる材料を使用して壁画断片とマウントの間隙を再現した。試験片の形状を図8に示す。被着材には3mm厚の亚克力板を使用した。壁画断片の裏面を模擬し、プレキシトル B500 を刷毛塗りしたレーヨン製三軸織物 (サカセアドテック社製) をエポキシ樹脂で亚克力板に接着した。反対側はマウントを模擬し、炭素繊維製三軸織物 (サカセアドテック社製) にエポキシ樹脂を刷毛塗りし接着した。これらを (a) プレキシトル B500 で接着する従来の方法と (b) シリコンボンドで接着する方法で試験片を作製し、比較した。接着部の詳細を図9に示す。方法 (a) では炭素繊維製三軸織物の上にパラロイド B67 (Rohm and Haas 社製) の10wt%アセトン溶液を3回塗布した後、プレキシトル B500 を2回塗布した。レーヨン製三軸織物側には、プレキシトル B500 を塗布し一度乾燥させた。その後、接着面にイソプロピルアルコールを噴霧して接着剤を緩ませ2枚の亚克力

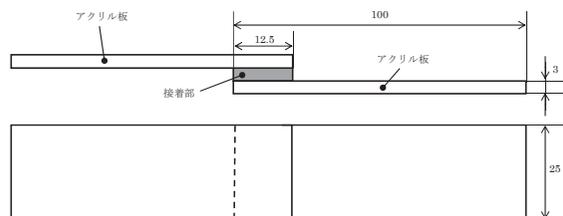


図8 引張せん断接着強さ試験片の形状

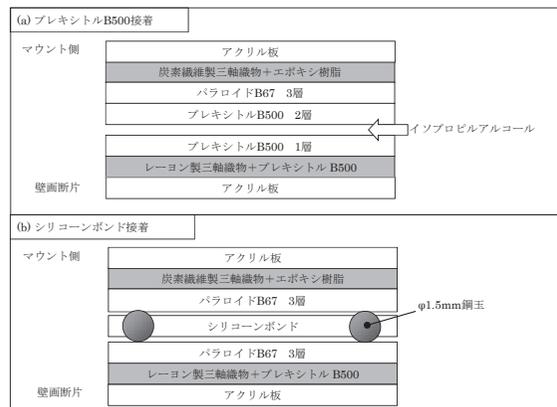


図9 引張せん断接着強さ試験片の接着部の構造

ル板を接着した。方法 (b) では炭素繊維製三軸織物側，レーヨン製三軸織物側ともにパラロイド B67 の 20wt% アセトン溶液を 3 回塗布した。2 枚の亚克力板をシリコンボン드로接着する際，四隅に $\phi 1.5\text{mm}$ の鋼球を挟み込むことでシリコンボンドの厚さを 1.5mm とした。

5-1-2. シリコンボンドの接着箇所数の検討

実際の接着では，シリコンボンドは，点状に塗布され，接着時の加圧により円柱形状になる。一箇所の塗布量は $0.3 \pm 0.01\text{g}$ であり，前項の試験からシリコンボンドの厚さを 1.5mm の円柱形状とした場合の接着強さを測定した。試験方法は 5-1-1 と同様である。また，接着箇所数と強さとの関係についても検討した。試験片の構造は図 9 (b) と同様であるが，シリコンボンドを複数箇所塗布できるよう，亚克力板の寸法を大きくして作製した。試験片形状を図 10 に示す。シリコンボンドの広がり量を考慮し，接着間隔は 20mm とした。

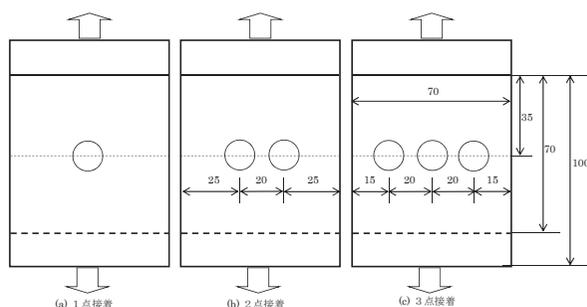


図10 接着箇所数の検討に用いた試験片の形状

5-2. 実験結果と考察

5-2-1. シリコンボンドの接着強度

試験後の試験片の写真を図 11 に示す。図 11 (a) の剥離部表面を指触したところ炭素繊維製三軸織物側およびレーヨン製三軸織物側の両面に粘着性があり，プレキシトル B500 の部分で剥離していると考えられる。図 11 (b) のシリコンボンドで接着した試験片では，シリコンボンドはレーヨン製三軸織物側で剥離し，炭素繊維製三軸織物側に残存している。すべての試験片で同様の剥離がみられた。シリコンボンドで接着する場合，炭素繊維製三軸織物側およびレーヨン製三軸織物側ともにシリコンボンドに接触しているのはパラロイド B67 である。このように剥離が一方だけで起こることから，レーヨン製三軸織物とパラロイド B67 の間で剥離が生じていると推測される。

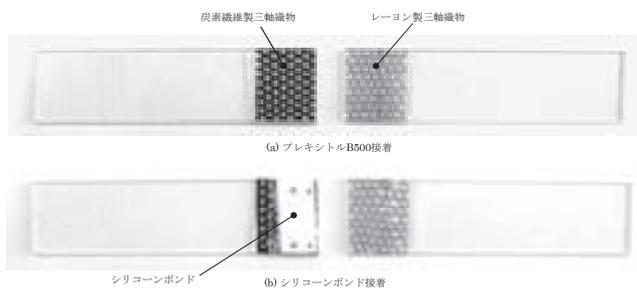


図11 試験後の試験片の剥離面

表2 各接着方式の接着強度と最大変位量

| | 接着強度 (N/mm ²) | 最大変位量 (mm) |
|---------------|---------------------------|------------|
| (a) プレキシトル接着 | 0.09 | 0.9 |
| (b) シリコンボンド接着 | 0.29 | 2.4 |

試験の結果、得られた接着強度および最大変位量を表2に示す。この結果より、シリコンボンドを使用して接着した場合、プレキシトル B500 で接着した場合に比べ約3倍の強度を持つことが明らかとなった。それに伴い、最大変位量も大きくなっている。また、代表的な荷重－変位曲線を図12に示す。プレキシトル B500 で接着した場合、荷重が最大に達した後、徐々に荷重が低下している。部分的に剥離が生じて、剥離部分が徐々に拡大していくことを示している。一方、シリコンボンドで接着した場合は、最大荷重に到達後急激に荷重が減少している。最大荷重において比較的全面で剥離が生じることを示している。

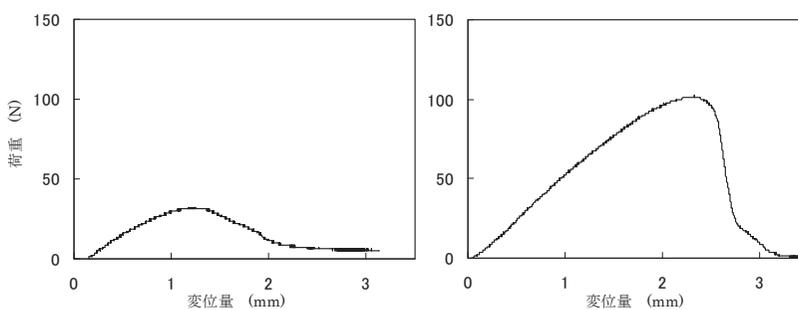


図12 各接着方式における荷重－変位曲線

5-2-2. シリコンボンドの接着箇所数の検討

試験後の試験片は図11 (b) と同様にシリコンボンドはレーヨン製三軸織物側で剥離し、炭素繊維製三軸織物側に残存した。上述したように、レーヨン製三軸織物とパラロイド B67 の間で剥離が生じていると推測される。引っ張りせん断接着強さ試験の結果を表3に示す。この結果、1点での接着強さは約66Nである。また、接着箇所が増加すると、接着強さも応じて増加している。しかしながら、最大変位量は大きく変化していない。これは、一定の変位量でシリコンボンドの剥離が開始することを示唆しており、一定の変位量に達するまでの荷重が増加していると考えられる。接着箇所数と接着強さの関係を図13に示す。接着箇所数の増加に伴い接着強さはほぼ一次線形の関係を示している。その最小二乗法による近似直線は、式(3)で与えられる。

$$f_{max} = 74.2 \times bp - 5.3 \quad \text{式(3)}$$

f_{max} : 接着強さ (N) bp : 接着箇所数

表3 接着箇所数を変化させた試料の接着強さと最大変位量

| | 接着強さ(N) | 最大変位量 (mm) |
|------|---------|------------|
| 1点接着 | 66.0 | 3.1 |
| 2点接着 | 149.0 | 4.4 |
| 3点接着 | 214.4 | 4.8 |

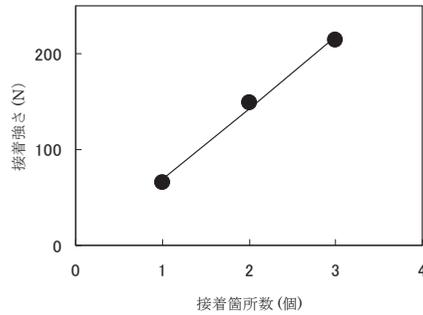


図13 接着箇所数による接着強さの変化

以上の結果より、シリコンボンドを点状に $0.3 \pm 0.01\text{g}$ 塗布し、約 $1.5\text{g}/\text{cm}^2$ の圧力で接着した場合の接着強さ（破断荷重）が求められる。ここで、接着強さから耐荷重を求めるのに必要なのは安全率である。強度設計に用いられる安全率は経験的に定められることが多い。しかし概念的には材料強度のばらつきと実働環境のばらつきを考慮したものである⁶⁾。以前は、Unwinの安全率⁷⁾が経験的に用いられてきた。これによると、静荷重の場合、鋼は3、鋳鉄は4、木材は7などの値が示されている。これは、材料強度のばらつきを考慮した値である。一方、繰返し荷重がかかる場合や衝撃荷重が加わる場合は、さらに大きな安全率が設定される。これは、実働環境のばらつきを考慮するためである。本試験の結果、接着強さの平均値に対する標準偏差は約10%であり、安全率を低く設定することも可能であるが、温度変化、吸水などの環境の影響を考慮するとより高くとる必要がある。一般的に常温硬化接着剤の場合、安全率を5～10⁸⁾とすることが経験的に行われる。そこで、材料強度のばらつきを考慮した安全率を10とする。また、長期の保管や展示を考えた場合、実働環境のばらつきを完全に見積もることは難しい。通常、耐久性や疲労を考慮する安全率は4～5⁸⁾が一般的であるが、工業製品よりも長期間の使用を考慮して、実働環境のばらつきを考慮した安全率を10とする。以上から、必要な最小接着箇所数を得る式（4）を提案する。

$$bp_{min} = (M \times 10 \times 10 \times 9.8 + 5.3) / 74.2 \quad \text{式(4)}$$

bp_{min} ：最小接着箇所数　M：壁画断片荷重 (kg)

実際の壁画断片の形状に対して式（4）を用い、最小接着箇所数とそれに必要な最小接着面積を算出した。その結果を表4に示す。ここで、接着面積とはシリコンボンドを20mm間隔で塗布することとし、一点の専有面積を 400mm^2 とした場合の接着面積である。この結果、表面積に対して最小接着面積は10%以下となり、十分な接着面積が得られることが確認された。

表4 壁画断片の例と接着箇所数

| 壁画断片番号 | 重量 (kg) | 表面積 (mm^2) | 最小接着箇所数 | 最小接着面積 (mm^2) |
|----------|---------|-----------------------|---------|--------------------------|
| KH19-8-1 | 2.485 | 172200 | 33 | 13200 |
| KH50-1 | 2.730 | 225600 | 37 | 14800 |
| KH75 | 4.325 | 450600 | 58 | 23200 |

6. まとめ

カライ・カフカハI遺跡出土の壁画断片の保存修復では、壁掛け展示を想定し、背面の支持としてマウントを接着している。このマウントの接着には、十分な強度があるだけでなく必要に応じて分離できることが望ましい。そこで、壁画断片の裏打ちに影響することなく、マウントを容易に分離できる構造を検討した。

その結果、壁画断片裏面とマウントの接合面に隔離層としてパラロイド B67 を塗布し、その間をシリコーンボンドで点接着する構造とした。また、タジキスタンで展示予定の壁画断片は最大で 10kg と重く、点接着でも十分な接着強度が得られるかが懸念された。そこで、合わせて点接着による接着強度試験を行った。その結果、シリコーンボンドの接着剤としての強度は、プレキシトル B500 で密着固定する方法の約 3 倍であった。また、塗布量を $0.3 \pm 0.01\text{g}$ とし、シリコーンボンドの厚さを 1.5mm の円柱形状とした場合の接着強さは、1 点で約 66N である。この強さより安全率を考慮して、最小接着箇所数を算出する式を提案した。実際の壁画断片の寸法と重量を検討した結果、シリコーンボンドによる点接着で十分な強度が得られることが明らかとなった。

本稿で検討したマウント処置の構造を今後の壁画断片の保存修復に採用することとした。

本報告は、文化庁の委託事業である「文化遺産国際協力拠点交流事業」の一環として、2008 年度よりタジキスタン共和国科学アカデミー歴史・考古・民族研究所と東京文化財研究所の合意の下に行われている「タジキスタン国立古代博物館が所蔵する壁画断片の保存修復」事業での活動を含むものである。

文献

- 1) 松岡秋子, 島津美子, 邊牟木尚美, 影山悦子, 山内和也: タジキスタン国立古代博物館が所蔵するソグディアナ出土壁画の保存修復—カライ・カフカハ遺跡出土壁画 KH7-1 の事例—, 保存科学, 49, 265-274 (2009)
- 2) C.V.Horie: “Materials for conservation”, Butterworth-Heinemann, 204 (1990)
- 3) R.Howells, A.Burnstock, G.Hedley and S.Hackney: Polymer Dispersion Artificially Aged, Adhesives and Consolidants Paris Congress, 36-43 (1984)
- 4) 木島隆康: 平成21年度「アフガニスタン流出文化財壁画断片の保存修復」事業報告, 東京芸術大学大学院美術研究科 文化財保存学専攻保存修復油画研究室 内部資料 (2009)
- 5) 木島隆康, 佐藤一郎, 工藤晴也, 増田久美, 鈴鴨富士子, 谷口陽子, 中右恵理子, 武田恵理, 椎葉聡子, 酒井良次: アフガニスタン流出仏教壁画断片の調査と修復, 文化財保存修復学会第31回大会研究発表要旨集, 138-139 (2009)
- 6) 日本機械学会編: 『機械工学便覧 材料力学』, 136 (1997)
- 7) 奥村敦史: 『材料力学 (増補版)』, 43 (1997)
- 8) 接着技術便覧編集委員会編: 『接着技術便覧』, 52-53 302-303 (1962)

キーワード: 中央アジア (Central Asia); 壁画 (wall painting); シリコーンボンド (silicon adhesive); 引張せん断強さ試験 (tensile lap-shear strength test)

Examination of Bonding Method and Adhesive Strength between Wall Painting Fragments and Mount

Akira FUJISAWA, Yoshiko SHIMADZU, Yuki SATO and Akiko MATSUOKA

The National Research Institute for Cultural Properties, Tokyo and the Institute of History, Archaeology and Ethnography, Academy of Science, Tajikistan have been conducting a conservation project of the wall painting fragments which are part of the collection of the National Museum of Antiquities of Tajikistan.

As a part of the project, in 2009, a group of painting fragments excavated in the Kala-i Kakhkakh site was mounted for safe handling and display on the wall of the museum after conservation treatment. An isolation layer made of a solvent-soluble resin, Paraloid B67, was installed between the mount and the painting fragment in order to remove the mount when necessary in future. However, it turned out that removal of this mount would not be easy since there was hardly any space that a solvent could go into between the mount and the painting fragments. In this article, a new structure and mounting method which will make it easy to separate the mount from the fragments without damaging the backing of painting fragments are explored.

An alternative method was chosen to examine its effectiveness to achieve the aims. In this method, Paraloid B67 is applied on both the back of the painting fragments and the bonding surface of the mount as isolation layers. Then, the painting fragment and the mount are bonded by spot application using silicon adhesive. We examined tensile shear strength of the silicon adhesive in this application. The adhesion strength of silicon bonding is about three times as large as by the previous method. The silicon adhesive (0.3 ± 0.01 g weight, 1.5mm thickness) can endure the application of about 66N force per place. The number of minimum bonding spots is calculated from the measured strength in consideration of safety. The result shows that partial bonding with the strength of silicon adhesive is large enough to hold the weight of painting fragments.