

## 〔資料〕 陰圧ブースを活用した作品のカビのクリーニングと ATP ふき取り検査（A3法）による有効性評価

渡辺 祐基\*・奥島 希子\*・和泉田 絢子\*\*・  
鳴原 由美\*・志賀 智史\*・木川 りか\*

### 1. はじめに

紙や布などの有機物で構成される作品が高湿度環境下に置かれた場合や、自然災害や事故などによって水損した場合、カビが発生するリスクが極めて高くなる。作品にカビが発生した場合、従来は化学薬剤を使用した殺菌燻蒸によってカビを死滅させたいと、クリーニングを行うことが一般的であった。殺菌燻蒸を行うと、アレルギーやマイコトキシン（カビ毒）による中毒のリスクは残るものの、病原性のカビによる健康被害のリスクは大幅に低減できる。しかし、2025年3月末で、酸化エチレンを主成分とした文化財用燻蒸剤（エキヒューム S、日本液炭株式会社）が販売停止となったことから、地域によってはカビの殺菌燻蒸を行うことが不可能となった。したがって、カビの活性の高い作品であっても、人体に健康被害を及ぼさないように安全対策を講じたうえで、クリーニングを行うことが必要となる。

筆者らの所属する九州国立博物館では、カビを拡散させることなくクリーニングを行うための設備として、安全キャビネットおよび陰圧ブースを導入した。安全キャビネット（図1）は、High-efficiency particulate air filter（HEPA フィルター）を取り付けた排気設備によって箱状の作業空間内を陰圧に保つことで、カビなどのバイオハザードを封じ込める機器である。作業者は手のみを作業空間内に入れてクリーニングを行うため、作業者のカビへの暴露を防ぐことができる。一方で、安全キャビネットに収めることのできない大型の作品に対応するため、陰圧ブースも導入した（図2）。陰圧ブースは、医療現場にてウイルスを外部に拡散させずに感染

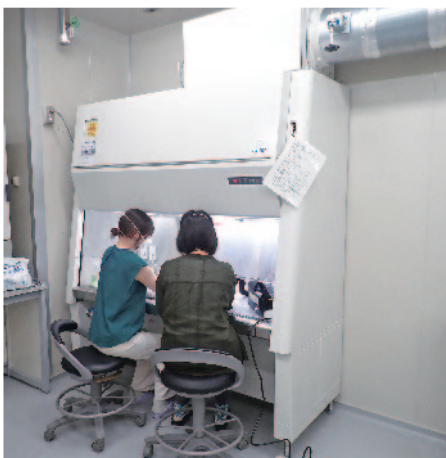


図1 安全キャビネット



図2 陰圧ブース。養生完了後の状態

症患者を隔離するためなどに使われる装置である。作業者は全身を防護しブース内で作業を行う必要はあるものの、HEPA フィルターを通じた排気によってカビの外部への排出を防ぐことができる。これまでに、当館では陰圧ブース内で複数の軸装の絵画のカビのクリーニングを実施した。本稿では、当館で採用している陰圧ブースを用いたカビのクリーニングの手順について解説する。また、アデノシン三リン酸（ATP）ふき取り検査（A3法）によって、クリーニングの前後における作品上のカビの汚れの付着量を評価し、クリーニングの効果について検討したため、その結果についても報告する。

## 2. 方法

### 2-1. 陰圧ブースの設置およびクリーニングの事前準備

導入した陰圧ブース（CL-905-A、ホーザン株式会社）（寸法：幅2.0 m、奥行き0.85～2.5 m、高さ1.9 mまたは2.2 m）は、上面にHEPA フィルター付きのファンフィルターユニットが備わり、汚染物質をブース外に排気しないようになっている。他の部屋と独立した換気設備を有する部屋にて、床面に吸水防水シート（フロアシート1180 mm×40 m、004-42244、イワツキ株式会社）を敷き、その上に陰圧ブースを設置した。また、陰圧ブースのフレームは方向によっては伸縮可能であるが、部屋の広さの関係上、奥行き1.8 m、高さ2.2 mで固定した。

クリーニングの事前準備として、まず陰圧ブース内部を養生した。コロナ処理（コロナ放電照射による表面処理）されたマスク（長尺マスクPカットタイプ204121 2100、大塚刷毛製造株式会社）で、ブース内の吸気を妨げないよう内部壁面を覆い（図3）、床面は既に敷いてある吸水防水シートの上にさらに同じ吸水防水シートを1枚重ねた。また、作品を載せる作業台（幅1.8 m、奥行き0.9 m、高さ0.8 m）もコロナ処理された養生シート（TPES-9010-W、トラスコ中山株式会社）で養生し、その上に吸取紙を敷いた。

### 2-2. 対象作品とクリーニング

今回クリーニングおよびATPふき取り検査（A3法）の対象とした作品は、借用などに伴い九州国立博物館に搬入された6幅の掛軸（掛軸1～6）である。これらの掛軸には、搬入前にカビによる汚れが確認されていた。掛軸の材質、寸法および作業・調査実施日を表1に示す。



図3 陰圧ブース内部の壁面にマスクを貼る様子

**表 1** クリーニングおよび ATP ふき取り検査（A3法）を行った掛軸の材質、寸法、および作業・調査実施日

作品番号	材質	本紙寸法（縦、横） （cm）	制作年代	クリーニング・ふき取り検査実施日
掛軸1 掛軸2 掛軸3	絹本着色 絹本着色 絹本着色	約130、約60 約130、約60 約130、約60	15～16世紀 15～16世紀 15～16世紀	2025年4月16日
掛軸4 掛軸5 掛軸6	絹本紺地金泥 絹本着色 絹本着色	約40、約30 約110、約50 約130、約70	19世紀 17世紀 19世紀	2025年9月17日

クリーニングを行う際は、後片付けを含む一連の作業が完了するまで部屋の排気設備および陰圧ブースの排気ファンを常に稼働させた。陰圧ブースの排気風量は $12.8 \text{ m}^3/\text{min}$ とした。

掛軸のクリーニングは装漬分野の修理技術者に依頼して実施した。作業にあたり、防塵マスク（DS2あるいはN95以上の防塵性能を有するもの）、タイベック<sup>®</sup>製の防護服、シューズカバーを着用してもらった。クリーニングは修理技術者2人体制で実施し、1人は刷毛や筆を用いてカビなどの汚れを払い、もう1人が小型掃除機（小型ミュージアムクリーナー04-6-1、株式会社パレット）を使用して汚れを吸引した（図4、5）。絵画の画面が脆弱な場合には、ノズルの先端に布を被せ、万一にも微小な断片が吸引されないようにした。なお、掃除機には内蔵のHEPA フィルターに加え、排気口に医療グレード排気エアフィルター（PH-705、株式会社パレット）を装着した（図4）。

陰圧ブースの後片付けは以下の手順で行った。必要に応じて作業者は防塵マスク、ニトリル手袋、シューズカバーを着用した。まず作業台の吸取紙と養生シートを周囲にカビが拡散しないよう静かに、表面を巻き込むようにして剥がし、ゴミ袋に密閉して廃棄した。作業台を陰圧ブース外へ移動させた後、壁面のマスキングを静かに剥がし、続いて床面上層の吸水防水シートを剥がして、同様に廃棄した。また、陰圧ブース内で使用した椅子は消毒用エタノールで消毒した。



**図 4** HEPA フィルター付き小型掃除機（小型ミュージアムクリーナー）。排気エアフィルター（白丸）を装着して使用する



図5 修理技術者による刷毛および小型掃除機を用いたクリーニングの様子

### 2-3. ATP ふき取り検査

カビの付着量を評価するための ATP ふき取り検査 (A3法) には、綿棒・ATP 抽出試薬・発光試薬を含む一体型の検査試薬 (ルシパック A3 Surface (乾燥綿棒)、キッコーマンバイオケミファ株式会社) およびポータブル式ルミノメーター (ルミテスター Smart、同社) (図6) を使用した。ATP ふき取り検査とは、対象物の表面に付着する生物由来の ATP 量を、専用の綿棒でふき取って測定する手法である。ATP 量は、酵素 (ルシフェラーゼ) の存在下でルシフェリンが ATP および酸素と反応する際の発光量 (Relative Light Unit; RLU) として定量化され、この発光量が高いほどカビ等の生物の活性が高いと判断される。ATP は生物細胞が死滅するなど活性が低下すると、アデノシン二リン酸 (ADP) およびアデノシン一リン酸 (AMP) に加水分解されて消失するため、ATP のみを検出するタイプのふき取り調査では、カビ等の生死を判断できる。一方、本調査で使用した検査試薬・測定器は、食品製造や医療等の現場において生物由来の汚れを検出するために、ADP および AMP を ATP に変換したうえで発光量を測定する A3法を採用している。そのため、カビの活性が低い場合でもカビ由来の汚れを検出できる反面、カビの生死については厳密には判断できない手法となっている。A3法によるふき取り検査は、短時間で簡易に調査可能であることから、博物館の収蔵庫内の清浄度調査<sup>1)</sup>などにも使用されており、現在、東京文化財研究所より、本手法による環境カビ調査に基づく文化財収蔵庫内の施設環境管理指針も提案されている<sup>2)</sup>。

本調査では、掛軸1幅につき、カビが顕著に確認できる部分を2箇所 (カビあり1~2)、目視ではカビが確認できない部分を1箇所 (カビなし) 選定し、まずクリーニングを行う前にふき取り検査を行った (都合上、掛軸5では、カビが確認できない部分の検査は実施しなかった)。ふき取りは修理技



図6 ATP ふき取り検査 (A3法) 用の検査試薬 (ルシパック A3 Surface (乾燥綿棒)) とポータブル式ルミノメーター (ルミテスター Smart)

術者に依頼して行い、付属の綿棒を濡らさず、綿棒の先端で検査箇所の表面を、作品に影響のないよう10～15回程度軽く撫でるようにふき取った（図7）。ふき取る範囲については厳密に指定しなかったが、概ね、直径5 mm 内外の円に収まる範囲であった。ふき取り後、綿棒は速やかに抽出試薬・発光試薬と反応させ、ルミノメーターによって発光量を測定した。

クリーニング後にも同一箇所のふき取り検査を行い、クリーニングの効果を評価した。また、調査を実施した両日に各1本、ブランクとして、何も採取しない綿棒の発光量も測定した。



図7 綿棒で画面をふき取る様子

### 3. 結果および考察

陰圧ブース内でのクリーニングの作業性については、担当した修理技術者によると、特段問題はなかったとのことであった。ただし、陰圧ブースを設置した屋内および付近に冷房設備がなかったため、9月に実施した際は少し暑かったとのことであった。また、事前準備や後片付けの手順については、事前にマニュアル化しておくことで円滑に実施できた。

ATP ふき取り検査（A3法）の結果を表2に示す。ブランク値は $10^0$  RLU のオーダーであった。掛軸1～3については、綿棒で触れると容易に落ちる状態の、比較的新しいと思われるカビの汚れが確認された。この場合、カビが確認できた部分における発光量は比較的高く、クリーニング前は $10^3$  RLU～ $10^5$  RLU のオーダーであったが、クリーニング後は $10^1$  RLU～ $10^2$  RLU のオーダーにまで減少した。また、目視でカビが確認できなかった部分の発光量は、クリーニング前は $10^1$  RLU～ $10^3$  RLU のオーダーであったものが、クリーニング後は $10^1$  RLU～ $10^2$  RLU のオーダーになり、数値が高い場合は減少していたが、もともと $10^1$  RLU のオーダーであった場合はほとんど変化がなかった。

掛軸4～6で確認されたカビはかなり古いと思われ、絵画に強固にカビの汚れが付着し、綿棒で触れても容易に汚れが落ちない状態にあった。この場合、全般に発光量は低く、目視によるカビの確認の有無に伴う発光量の明確な差異はなかった。いずれも、クリーニング前では $10^0$  RLU～ $10^2$  RLU のオーダーであったものがクリーニング後には $10^1$  RLU のオーダーとなった。すなわち、 $10^2$  RLU のオーダーであったものは $10^1$  RLU のオーダーに減少し、 $10^0$  RLU～ $10^1$  RLU のオーダーであったものにはほとんど変化がなかった。

ATP ふき取り検査（A3法）の結果から掛軸1～6におけるカビの活性とクリーニングの効果

表2 掛軸の ATP ふき取り検査 (A3法) の結果

作品番号	測定箇所 の目視所見	発光量 (RLU)		測定日
		クリーニング前	クリーニング後	
ブランク		6		2025年4月16日
掛軸1	カビあり1	112871	418	
	カビあり2	16179	93	
	カビなし	3454	132	
掛軸2	カビあり1	12248	307	
	カビあり2	8199	385	
	カビなし	47	51	
掛軸3	カビあり1	17445	396	
	カビあり2	6045	218	
	カビなし	242	35	
ブランク		4		2025年9月17日
掛軸4	カビあり1	24	18	
	カビあり2	136	37	
	カビなし	38	27	
掛軸5	カビあり1	16	13	
	カビあり2	9	12	
掛軸6	カビあり1	34	19	
	カビあり2	113	50	
	カビなし	102	19	

を評価するために、間測らの報告<sup>3)</sup>を参照した。それによると、カビ様の汚損について ATP ふき取り検査 (ここでは A3法ではない、すなわち ADP、AMP は検出されない) を行った場合、大まかな目安として、ATP 発光量が $10^4$  RLU/cm<sup>2</sup>以上のオーダーであればカビの活性が高く、 $10^3$  RLU/cm<sup>2</sup>のオーダーであれば活性は低い、 $10^2$  RLU/cm<sup>2</sup>以下であればカビは死滅、または汚損はカビではない可能性が高いとされている<sup>3)</sup>。

これらの間測らの目安と本調査の結果を比較するにあたり、以下の点を考慮することとした。まず、間測らの調査では、培地で培養したカビをふき取っている<sup>3)</sup>が、本調査では、作品への影響がないように画面を軽くふき取ったのみであるため、発光量の測定値は過小評価されている可能性も考えられる。また、間測らの目安は平方センチメートルあたりの発光量となっている。今回の調査におけるふき取りの範囲は、正確な面積は測定できなかったものの $10^{-1}$  cm<sup>2</sup>のオーダーであると推定され、平方センチメートルあたりに換算した場合、発光量が大きくなると考えられる。さらに、本調査では A3法を採用しているため、死滅したカビを検出し、間測らの調査<sup>3)</sup>よりも数値が高くなっている可能性もある。

上記の前提を踏まえ、やや乱暴ではあるが、表2の数値をそのまま間測らの目安に当てはめて考察する。掛軸1~3については、少なくとも比較的最近カビが活発に生育して画面を汚損し、目視でカビが確認できない部分 (例えば、掛軸1-カビなし) にも胞子が付着していたところ、クリーニングによってカビとしての活性は低いあるいは検出できないレベルまで除去できたと考えられる。掛軸4~6については、以前カビは発生したものの、活性は高くはなく、また、除去可能な状態で画面に付着していたカビの汚れはクリーニングによりさらに減少したと考えられる。以上より、掛軸1~3のようにカビが活性のある状態で顕著に付着していた作品であっても、効果的にカビを除去できたことが示唆された。

エキヒューム S による文化財の殺菌燻蒸が実施不可能となったことから、カビの活性が高い文化財の処理や修理を行う機会は今後さらに増加すると考えられる。陰圧ブース内でのカビのクリーニングは、元来燻蒸設備を備えていない小規模な文化財関連施設や、被災した文化財を管理する一時保管場所などの様々な現場においても、比較的容易に適用可能と考えられる。また、クリーニングの効果判定や、クリーニング後のカビのモニタリングには、ATP ふき取り検査（A3法）も有効と考えられる。

なお、参考までに、屋内にある身の回りの物品や場所について、同一機器を用いて同様の方法で ATP ふき取り検査（A3法）を行った結果を表3に示す。この場合、カビのみならず常在菌などの細菌などに由来する ATP・AMP・ADP を検出していることにはなるが、発光量が  $10^2$  RLU 程度のオーダーであれば、日常的に触れている物品と同等の清浄度であることが分かる。

**表3** 参考：身の回りの物品や場所における ATP ふき取り検査（A3法）の発光量（2025年10月30日測定）

サンプル	発光量 (RLU)
会議室窓枠	8158
会議室窓枠の汚れ	295682
会議室ドアノブ	127
延長コード	114
スマートフォン・携帯電話	11~671
スマートフォンのケース	556
靴の裏面	5156
腕時計の裏面	1631

## 4. まとめ

カビによる汚れが認められる掛軸6幅について、殺菌燻蒸ができないことから、陰圧ブースを用いて安全対策を講じたうえでクリーニングを実施した。陰圧ブース内部では壁面・床面を養生し、作業後に簡単に清浄化できるよう工夫を施した。修理技術者には、防塵マスク・防護服・シューズカバーを着用した状態で、刷毛や筆および HEPA フィルター付きの小型掃除機を使用してクリーニングしてもらった。クリーニングの前後で、ATP ふき取り検査（A3法）により画面上のカビの付着量を評価したところ、カビが顕著に発生していた掛軸において、クリーニング後のカビの検出量は大幅に減少した。したがって、陰圧ブース内におけるクリーニングは、カビの活性が高い作品に対しても、施設内を汚染せず効果的にカビを除去できる手法であることが示唆された。

## 謝辞

陰圧ブースの導入および掛軸のクリーニングにご協力いただいた、修理工房宰匠株式会社 of 竹上幸宏氏、上田豊氏、清水綾子氏および九州国立博物館の清水名奈江氏、穴井恵理氏、桑原紀久美氏に謝意を表します。

### 参考文献

- 1) 高橋佳久：ATP ふき取り検査による北海道博物館収蔵庫内の清浄度調査、北海道博物館研究紀要、10、103-108 (2025)
- 2) <https://www.tobunken.go.jp/ccr/pest-search/2025forum/pdf/文化財保存公開施設でのATP測定による環境カビ調査.pdf> (2025年10月10日参照)
- 3) 間瀬 創、佐藤嘉則：博物館等におけるATP拭き取り検査によるカビ集落の活性評価について、保存科学、60、41-49 (2021)

キーワード：陰圧ブース (negative pressure booth)；カビ (mold)；クリーニング (cleaning)；ATP拭き取り検査 (ATP swab test)

## Cleaning of Moldy Hanging Scrolls in a Negative Pressure Booth and Evaluation of Efficacy Using ATP Swab Testing (A3 Method)

WATANABE Hiroki<sup>\*</sup>, OKUSHIMA Kiko<sup>\*</sup>, IZUMITA Ayako<sup>\*\*</sup>,  
SHIGIHARA Yumi<sup>\*</sup>, SHIGA Satoshi<sup>\*</sup> and KIGAWA Rika<sup>\*</sup>

Fumigation of cultural properties for mold remediation has become more difficult in Japan since the discontinuation of a major ethylene oxide-based fumigant in March 2025. At Kyushu National Museum, a negative pressure booth was installed to clean moldy, unfumigated objects while preventing the spread of mold contamination. To date, six hanging scrolls featuring Asian paintings have been cleaned in the booth. This paper describes the cleaning procedures employed in the negative pressure booth at Kyushu National Museum, as well as the results of ATP swab tests (A3 method) conducted to evaluate the efficacy of the cleaning.

Before cleaning, the inner walls of the booth were covered with masking film, and the floor was protected with two layers of waterproof sheeting. Two professional restorers, wearing protective masks, clothing, and shoe covers, worked in pairs to clean the hanging scrolls. One restorer carefully brushed mold from the surface of the paintings, while the other used a compact vacuum cleaner equipped with a HEPA filter to remove the mold colonies. After cleaning, the masking film and the top layer of the waterproof sheeting in the booth were carefully removed and disposed of.

Mold activity on the surface of the hanging scrolls before and after cleaning was measured using ATP swab test (A3 method) kits and a portable luminometer. The RLU values on the mold spots, even those with high mold activity, decreased significantly after cleaning, indicating that the mold was effectively removed during the cleaning process in the booth.

---

<sup>\*</sup>Kyushu National Museum

<sup>\*\*</sup>Cultural Heritage Disaster Risk Management Center/Kyushu National Museum