

博物館における ATP 測定の実用とその特徴

独立行政法人国立文化財機構 文化財活用センター
間 潤 創

1. はじめに

化学薬剤による殺菌燻蒸処理は博物館等でカビ対策を検討する際の選択肢の一つである。薬剤ガスが収蔵庫や資料内部へ拡散、浸透し、数日の処理でカビや害虫を一旦ゼロリセットする。ただし処理による殺菌効果判定は80%以上で合格であることや、残効性がないのでカビ被害の予防とはならないことから、そもそも殺菌燻蒸だけでカビ被害をコントロールできるわけではない点には留意する必要がある。

さてこの殺菌燻蒸については、文化財虫菌害研究所の認定薬剤であるエキヒューム S が令和 7 (2025) 年 3 月をもって販売終了となった。現在殺菌燻蒸が可能な認定薬剤にはアルプ（酸化プロピレン・アルゴン希釈）があるが、施工は一部地域に限定されるのが実際である。またエキヒューム S の代替薬剤や新薬の開発、登録は未定であることや、環境負荷などの理由からそもそも薬剤燻蒸という処理自体について将来的な見通しが不透明である。現実的には、一部地域を除きカビ対策として殺菌燻蒸という選択肢がなくなったことになる。

従って日本国内の多くの博物館等では、少なくとも当面は、望む望まないにかかわらず、IPM によるカビ対策を強化・厳格化することで対応するしかない。

2. IPM によるカビ対策の強化・厳格化

IPM によるカビ対策の強化としては、カビが発生しにくい環境の構築と維持、つまり環境制御が挙げられる。本稿では詳細は省くが、カビは相対湿度 60% 以下の環境であれば生育できず、また 60% を超えても直ちにカビが生育するわけではない¹⁾。例えば通年での湿度を一定に管理することが難しい施設であっても、温湿

度モニタリングにより一年のうち相対湿度 70% を超えるような高湿となる期間を把握し、期間を絞って集中的に除湿を行うことでカビ被害リスクを低減できる。また塵埃はカビの栄養源となるとともに、多くのカビ胞子等が付着しておりカビの発生源ともなる。塵埃が堆積しないよう定期清掃の見直しや最適化を図ることが重要となる。環境制御によりそもそもカビ被害が発生しにくい環境を構築、維持することが IPM によるカビ対策の基礎である。

IPM によるカビ対策の厳格化の視点からは、カビ調査による客観的な状況把握と、それを基にした合理的な対処が挙げられる。従来は念のため、安心のために、無条件に殺菌燻蒸を行っていた施設もあったのではないと思われる。しかしその中には本来殺菌燻蒸が不要であった場合も含まれていた可能性もある。IPM の 5 段階のコントロール²⁾では、害虫やカビの調査を行いその結果をもとに、その環境を維持するのかが、問題に対して対処が必要なかを判断するとされている。

博物館等において行われるカビについての調査は大きく 2 つに分けられる。一つは空間に浮遊しているカビの測定（浮遊菌測定）で、空気の流れにより自然落下してくるカビを培地で捕集する落下菌法や、浮遊菌サンプラーで空気を培地に吹付けて捕集する慣性衝突法などがある。これらの測定は、測定時の空間にどのようなカビがどの程度存在しているかを把握するものである。特に浮遊菌サンプラーによる測定を施設内各区画で行いデータを蓄積することで、その類似性からカビの発生源や拡散方向、季節的なリスク評価、ゾーニングの明確化に活かすことができる。もう一つの調査は資料や床・壁・天井・棚などの表面に存在しているカビの

測定(付着菌測定)で、滅菌綿棒で対象表面をサンプリングし培地に塗り付け培養する培地接種法や、生物の存在を示すATPを検出することによるATP測定などがある。これらの測定は、対象表面にどの程度カビが存在、堆積しているかを把握するものであり、表面の生物汚染度やカビの活性評価、除菌効果判定などに活かすことができる。本稿ではこれらのうちATP測定について解説する。

3. ATP測定について

ATP (Adenosine triphosphate, アデノシン三リン酸)(図1)は、細胞内でリン酸1分子、またはリン酸2分子が離れたり結合したりする事でエネルギーの放出・貯蔵を行う。生命活動のエネルギー源としてすべての真核生物に存在し、細胞の活動状態によりその量が増減する。細胞死により合成が停止し速やかに消失するため、ATPの検出は生きた細胞が存在することを示す。

ATPは生物発光を利用した測定によって検出することができる。ATPは酵素であるルシフェラーゼ存在下でルシフェリンと反応させることで発光し(図2)、この発光をフォトダイ

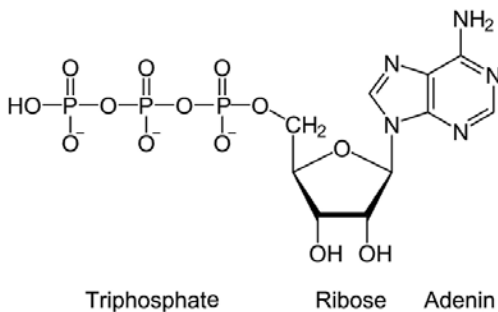


図1 アデノシン三リン酸 (Adenosine triphosphate, ATP)³⁾



図2 ルシフェリンを用いたATP発光原理

1. 細胞を抽出試薬で溶解しATP溶出させる, 2. ホタルルシフェラーゼ存在下, ATPとルシフェリンが反応し, AMPと励起状態のオキシルシフェリンなどが生成される, 3. 励起状態のオキシルシフェリンが基底状態に戻る際, 緑色から黄色(550~570 nm)の蛍光を発する。

オードで検出する。ATP量が多いほど発光量(Relative Light Unit, RLU)も増す。

この生物発光を利用したATPの検出は外食産業や医療機関などにおいて、器具の汚染調査、清浄度調査として広く利用されている。なおこの検査方法は、厚生労働省監修の「食品衛生検査指針 微生物編 2004」⁴⁾にも掲載されている。これらの分野においては、簡易なATP測定として「ATPふき取り検査」が利用されている。試薬一体型のふき取りスワブと専用の測定器で構成される測定方法で(図3)、数十秒でATP発光量が数値で得られるため、その結果をもとにその場で必要な対処ができる。培地接種法と比較すると、培地選択や培養条件の設定が必要なく手順が簡易であり、また生物実験用の特別な設備が不要なため、生物分野を専門としない人でも測定ができるといった利点もある。ただし細胞内ATP(及び遊離ATP)を抽出して検出するため、サンプリング面にどのような微生物が存在していたのかといった菌種の同定はできない。

4. 博物館におけるATPふき取り検査

4-1. サンプリング方法

博物館の収蔵庫や展示室などの日常的な管理として床・壁・天井・棚などの表面の微生物汚染度を評価する場合には、例えば10cm×10cmをふき取り、単位面積当たりの発光量(RLU/100cm²)として評価する(図4)。棚板や桐箱表面などにおいて、ふき取り面積が十分に確保できない場合には10cm×10cmよりも小さい面積をサンプリングしRLU/100cm²に換算することも可能である。ただし実際の対象表面の微生物分布には偏りがあるため、あまり小面積のサンプリングだと測定対象全体を代表しないこともあるので、出来るだけ大面積をサン



図3 ATPふき取り検査機器

スワブを抜き出し一定面積をサンプリングしたのちにチューブに戻し、上段抽出試薬で細胞内ATPを抽出後、下段の発光試薬と混合して発光させた状態で専用機器に差し込み発光量を測定する。

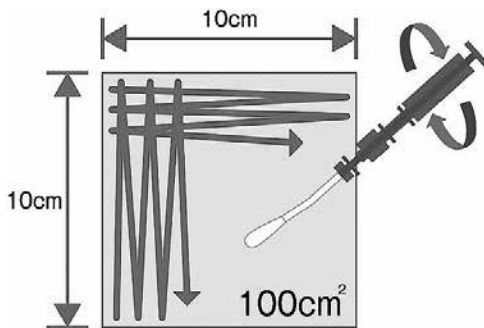


図4 日常的管理におけるATPふき取り検査のサンプリング方法⁵⁾

リングできると良い。

既に発生してしまったカビの活性評価やカビ様の汚れが本当にカビかどうかを判定する場合には、 1cm^2 程度かそれ以下をサンプリングして単位面積当たりの発光量 (RLU/cm^2) に換算して評価する。これは、カビ集落全体をサンプリングすると大量の有色孢子などにより抽出液が濁ってしまい、正確な発光量を測定できないためである。なお資料・作品上に発生したカビについては、測定すること自体の可否を学芸員

に指示を仰ぐ必要がある。またサンプリング時にカビを塗り広げない、強くこすりつけないといったことにも注意が必要である。

4-2. 評価の例

日常的な管理としての微生物汚染度の評価では、各館で測定結果を蓄積し自館の特徴に合わせて発光量の基準を設け、清掃頻度を定める際の根拠や清掃効果の判定などに活かす。例えば表1に示すいくつかの博物館収蔵庫でのATPふき取り検査 (A3法、後述) では、概ね清浄な状況では 10^2 RLU/ 100cm^2 程度、特に清掃後は 10^1 RLU/ 100cm^2 など発光量が小さい。未清掃や目視で埃が見えるような状況では 10^3 RLU/ 100cm^2 以上、カビが発生しているような状況では 10^4 RLU/ 100cm^2 など発光量が多い。

東京文化財研究所保存科学研究センター生物科学研究室では、A3法による施設環境管理指針として試案⁶⁾を示している (表2)。ここでは収蔵庫の床・棚・壁について微生物汚染度を「清潔」「準清潔」「汚染」の3段階で表し、それぞれのATP発光量の数値範囲を示すとともに、汚染度ごとの対応策も例示している。また実際の運用にあたっては、各館でA3法によるATPふき取り検査を行い、施設の実情に即した数値や対応策を設定することが望ましいとしている⁶⁾。

またATPふき取り検査を収蔵庫等で面的に行うことで、微生物汚染の分布を知ることも出来る。図5に示す事例ではカビ被害の発生した収蔵庫入口付近の棚で 10^4 RLU/ 100cm^2 と高い発光量であったが、収蔵庫奥に行くに従って発光量は減少傾向にあった。カビ被害は入り口付近に限定されていることや、空調設備と合わせて考えると空気の淀みがカビ発生の原因であることなどが推定できた。この測定結果をもとに空気の淀みを解消する対策が必要であることや、除湿器、サーキュレータの設置場所の検討に活かすことができた。

カビ集落の活性評価については、培地上のカビ集落のATP測定による実験事例があ

表1 収蔵庫でのATPふき取り検査の事例
すべてキッコーマンバイオケミファ A3法による測定結果

場所	部位	状況	RLU/100 cm ²
収蔵庫 A	棚板		790 (7.9 × 10 ²)
	棚板		2,745 (2.7 × 10 ³)
	棚板	過去にカビ発生した収蔵庫の棚板	1,893 (1.9 × 10 ³)
収蔵庫 B	棚板	清掃後	53 (5.3 × 10 ¹)
	棚板	清掃洩れ箇所含む	602 (6.0 × 10 ²)
	資料	清掃なし	1,557 (1.6 × 10 ³)
収蔵庫 C	棚板	清掃なし, 目視埃あり	4,072 (4.1 × 10 ³)
収蔵庫 D	棚板	書架	4,499 (4.5 × 10 ³)
	棚板	書架	2,597 (2.6 × 10 ³)
	棚上	木製引き出し棚上面, 未清掃	17,192 (1.7 × 10 ⁴)
前室 E	窓枠	水平面	328 (3.3 × 10 ²)
	壁	垂直面	118 (1.2 × 10 ²)
収蔵庫 E	棚板	近傍カビ発生	29,088 (2.9 × 10 ⁴)
	棚板	近傍カビ発生	20,020 (2.0 × 10 ⁴)
収蔵庫 F	棚板		843 (8.4 × 10 ²)
	棚板		539 (5.4 × 10 ²)

表2 A3法による施設環境管理指針 (東京文化財研究所試案) 転載

場所の区分	汚染度を表す用語		
	清潔(合格)	準清潔(要注意)	汚染(不合格)
収蔵庫 床	≤ 1000 RLU/50cm ²	1001 - 2000 RLU/50cm ²	>2000 RLU/50cm ²
収蔵庫 棚	≤ 1000 RLU/50cm ²	1001 - 2000 RLU/50cm ²	>2000 RLU/50cm ²
収蔵庫 壁	≤ 500 RLU/50cm ²	501 - 1000 RLU/50cm ²	>1000 RLU/50cm ²

収蔵庫内の清浄度ごとの対応策

清潔(合格)	現在の日常管理を維持
準清潔(要注意)	清掃の質と頻度の改善, 除塵清掃の実施
汚染(不合格)	徹底した除塵清掃の実施, 汚染原因の調査

る⁷⁾。この実験条件では、カビの増殖曲線から10⁴RLU/cm²以上でカビの活性が高いとし、カビ被害が拡大・拡散する可能性があるため隔離や殺菌処置が必要としている。また10³ RLU/cm²の範囲ではカビは死滅期にあり活性が低いとし除菌クリーニングと環境管理で対応、10³ RLU/cm²未満でカビ死滅している、またはカビではない(塵埃の塊など)とし、ドライクリーニングで対応するといった例を提示している。

表3に実際の博物館での測定事例を示す。ATPのほかAMP, ADPも検出してしまうA3法による測定ではあるが、活性の高いカビ集落は10⁴ RLU/cm²以上と高い発光量を示すのに

対して、カビ跡や目視でカビ集落のない場所では10²程度と低い値を示しており、一定の活性評価ができるものと考えられる。表中Aで示した展示室タイルカーペット下地ベニアに発生したカビ(図6)は目視での感覚とは異なり、10³ RLU/cm²程度と活性はあまり高くない結果となった。ベニア撤去の際にはカビ拡散防止や撤去後周囲の除菌清掃が必要にはなるが、緊急的な殺菌燻蒸や殺菌処理が必須とまでは言えないといった処置を検討する際の判断材料になった。また表中Bで示した収蔵庫壁の汚損部分(図7)は、近傍の汚れのない場所と同等の10¹ RLU/cm²程度となった。死滅したカビか、そもそもカビではないため、消毒用エタノールな

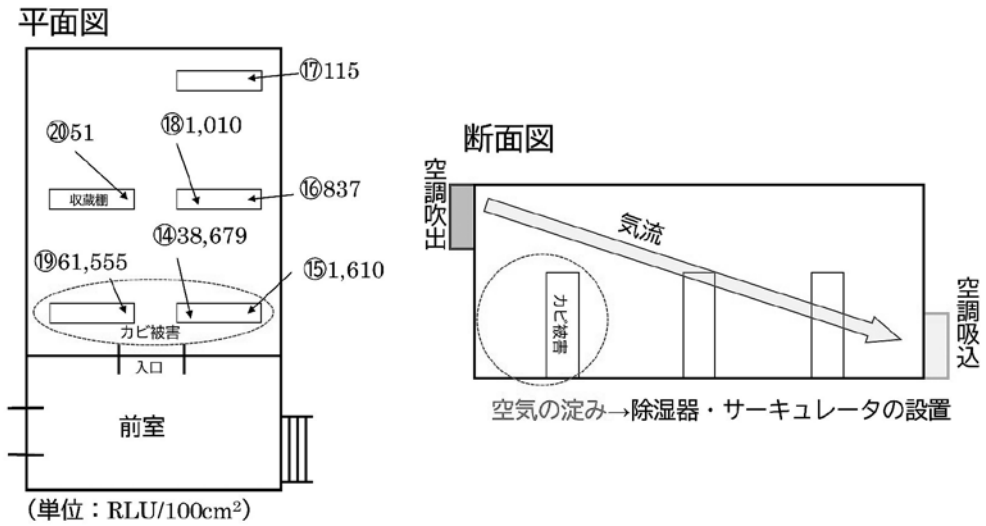


図5 収蔵庫における面的なATPふき取り検査の例

表3 カビ集落の活性評価・カビか汚れかの判定についての事例
すべてキッコーマンバイオケミファ A3法による測定結果

場所	部位	状況	RLU/cm ²
収蔵庫	床下	漏水履歴あり、カビ跡(古)	565 (5.7 × 10 ²)
収蔵庫	床下	漏水履歴あり、カビ	19,270 (1.9 × 10 ⁴)
収蔵庫	資料	目視でカビ集落なし部分	661 (6.6 × 10 ²)
収蔵庫	資料	カビ集落	301,179 (3.0 × 10 ⁵)
A	展示室	床	156 (1.6 × 10 ²)
	展示室	床	3,940 (3.9 × 10 ³)
B	収蔵庫	壁	32 (3.2 × 10 ¹)
	収蔵庫	壁	62 (6.2 × 10 ¹)



図6 タイルカーペット下地ベニアに発生したカビ (表3 A)



図7 収蔵庫壁面のカビ様の汚れ (表3 B)

表4 除菌効果の評価事例

すべてキッコーマンバイオケミファ A3法による測定結果

場所	部位	状況	RLU/cm ²
資料	藁	カビ集落	40,548 (4.1 × 10 ⁴)
資料	板面	洗浄前, 目視で集落がない部分	17,173 (1.7 × 10 ⁴)
資料	板面	水洗浄後	48 (4.8 × 10 ¹)
資料	板面	エタノール処置後	63 (6.3 × 10 ¹)

ど収蔵庫壁材に染み込んでしまうような処置ではなく、換気しながらのドライクリーニングで対応できるといった判断ができた。

また除菌処理による効果判定の事例を表4に示す。災害で水損した木製民俗資料において、目視でカビ集落が確認できない場所でも10⁴ RLU/cm²程度であったのに対して、水洗やエタノール処置後には10¹程度となり、処置前後を測定することで効果の判定ができ、除菌・クリーニング方法や処理条件などの検討に活かすことができた。

5. ATP測定を活用したIPMによるカビ対策の考え方

①カビ被害リスクへの対策：従来はカビ被害が疑われる借用資料や寄贈資料を施設内に搬入する際や、収蔵庫などの床・壁・天井・棚でカビ様の汚れが見つかった場合には、わざわざカビについての調査は行わずに殺菌燻蒸を行ってきたのではないだろうか。そもそも博物館でのIPMにおいては「カビによる目に見える被害がないこと」⁸⁾が目標であり、浮遊菌や付着菌がゼロ（無菌状態）の環境を目指すわけではない。殺菌燻蒸が選択できない施設であっても、ATPふき取り検査を活用し、微生物汚染度や活性評価、カビか汚れかの判定を行い、カビによる汚損ではない、またはカビではあるが活性が十分に低い場合には、そもそも殺菌燻蒸は不要と判断できドライクリーニングや温湿度管理で対応することができる。調査によってカビの活性が高い場合にのみ、除菌清掃やカビの除去・除菌クリーニングを行えば良いということになる。調査によってカビの状況を把握し、適切な処置を選択することが重要となる。

②既に発生しているカビ被害への対応：従来は殺菌燻蒸とクリーニングという選択肢があったが、薬剤燻蒸が選択できない施設においては、床・壁・天井・棚等であればエタノールなどによる除菌清掃、博物館資料であればカビ除去と除菌クリーニング等に置き換える必要がある。除菌清掃は主にPCOが施工、博物館資料への処置は修理技術者が行うのが原則であるが、少量のカビであったり、博物館資料の種類によっては職員自ら行うことも可能ではあるので状況によって判断する必要がある。この際ただ処理を行うだけでなく、ATPふき取り検査を活用し、カビの活性は高いのか、収蔵庫内にどこまでカビが拡大しているのか、どの範囲まで除菌清掃が必要なのか、きちんと除菌ができていないのかといったATP測定による客観的な調査結果をもとに、処置を選択、実施することがIPMによるカビ対策の厳格化において重要となる。なお博物館資料に発生したカビへの処置については、従来の殺菌燻蒸よりも処置を含めた対応に時間を要するので、資料の借用や寄贈にあたってはスケジュール確保も重要となる。資料や作品の寄贈や借用にあたっての資料調査、状態調査の一環として、あらかじめATPふき取り検査を組み込んでおくことも良いかもしれない。

なおエキヒュームSが殺菌及び殺虫燻蒸剤であったため、本剤を殺菌濃度で使用していた施設ではカビ被害と虫害を区別する必要がなかった。虫害の懸念があるのであれば、現状でも文化財虫菌害研究所認定の燻蒸剤や防殺虫剤、二酸化炭素殺虫処置を選択することができる。また資料種別や状況によっては低温殺虫法や低酸素殺虫法などを採用することも出来る。カビと

文化財害虫への処置が異なることをよく認識する必要がある。

6. 博物館でのATPふき取り検査における注意点

6-1. ATPふき取り検査機器について

現在、多くのメーカーからATPふき取り検査機器や専用の試薬付きスワブが販売されている。機種や試薬構成によってATP発光の検出感度に違いがあることから、異なる機種による測定で得られた発光量は直接比較できない。その施設において測定結果を蓄積する場合には同一機種での測定が必要になる。なお機器メーカーや環境測定会社によっては測定機器を有償で貸し出している場合もあるので、測定頻度が少ないようであれば測定の都度レンタルすることも可能である。

試薬付きスワブには乾式と湿式の2種類がある。湿式のスワブにはバイオフィームを除去するための界面活性剤や細胞からATPを抽出するための薬剤が含浸されていることもある。壁・床・天井・棚などでの測定は湿式スワブでも構わない場合もあるが、博物館資料や美術作品を測定する場合には必ず乾式のスワブを使用する必要がある。ただ2025年現在、国内で購入できる乾式スワブを使用したATPふき取り検査は後述するA3法の機種のみとなっている。

6-2. A3法について

A3法とはキッコーマンバイオケミファ社のATPふき取り検査方法である。ATPだけでなく、ATPからリン酸が離脱した分解生成物のAMP (Adenosine monophosphate) やADP (Adenosine diphosphate) を酵素によりATPに再変換して発光させることで、高感度で「生物由来の汚れ」を検出する測定方法である。カビの状態によっては、実際にはATPが減少していても、つまりカビの活性が低くても、AMP、ADPからの発光が検出される場合もある。カビ活性評価をATPのみの測定とA3法とで比較した実験では⁹⁾、A3法は発光効率率は総じて高いが菌種やカビの状態によっては、実際にはカビが死滅期にあっても発光量の減少が緩や

かな場合もあった。そのためA3法はカビ集落の活性が「高い」ことを評価するには向いていないが、逆にA3法で発光量が少ない場合にはATP、ADP、AMPのいずれもが分解されると判断できるのでカビの活性が「低い」と評価することはできる。

6-3. 消毒剤による影響について

消毒剤の中にはATP発光を阻害するものもある。また消毒剤の作用機序によっては瞬間的にカビの細胞膜が変性・溶解されることで、実際には細胞が死滅していても、ATPが消費、分解されるまもなく細胞外へ溶出してしまうことがある(遊離ATP)。消毒、除菌に最もよく使用されるエタノールもこれにあたる¹⁰⁾。除菌の効果判定においては、必ず消毒剤や遊離ATPが残留しないように拭き掃除してから測定する必要がある。消毒剤を噴霧し拭き掃除をしないような処置は、除菌効果が薄く余分な水分を付加するだけでなく、ATPふき取り検査での効果判定にも支障をきたす。

7. まとめ

- ① 殺菌燻蒸を実施できない地域においては、IPMによるカビ対策を強化・厳格化することで対応するしかない。温湿度管理や定期清掃の強化とともに、ATP測定などによりカビの状況を把握し適切で合理的な処置を選択する必要がある。
- ② ATPふき取り検査は表面の微生物汚染度、カビ集落の活性評価、カビか汚れかの判定、除菌クリーニング評価などが、その場で迅速に行うことができる。
- ③ 微生物汚染度の評価では、各施設で測定結果を蓄積し、収蔵庫清掃などの日常的な管理や新規収蔵資料への対処に活かす。
- ④ カビ集落の活性評価、カビか汚れかの判定を行い、殺菌・除菌処置が必要か、ドライクリーニングだけでよいかなどの判断に活かす。
- ⑤ 除菌クリーニング評価によって、除菌効

果の判定や処置方法・条件などの検討に活かす。

なお本稿は、通常の資料管理におけるカビ対策について解説してきたが、その範疇外となる場合もある（緊急性が高い、大規模な被害、人への健康被害が懸念されるなど）。IPMによる対策を原則とし、特殊な状況での対策は例外として別途検討していく必要がある。

参考文献

- 1) 佐藤嘉則：文化財IPMとカビの制御，文化財の虫菌害，78，16-24（2019）
- 2) Canadian Conservation Institute: Framework for preservation of museum collections (1994)
- 3) WIKIPEDIA “Adenosine triphosphate”, NEUROtiker - Own work, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1866101>
- 4) 厚生労働省監修『食品衛生検査指針 微生物編 2004』，日本食品衛生協会（2004）
- 5) キッコーマンバイオケミファ株式会社『ATPふき取り検査（A3法）運用マニュアル』，<https://biochemifa.kikkoman.co.jp/kit/atp/method/guide/>（2025/10/09参照）
- 6) 東京文化財研究所 保存科学研究センター 生物科学研究室HP『文化財保存公開施設でのATP測定による環境カビ調査』（2025年5月1日更新）
- 7) 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）
- 8) 三浦定俊編『文化財IPMの手引き』，文化財虫菌害研究所（2014）
- 9) 間瀬創・佐藤嘉則：博物館等におけるATP拭き取り検査—カビ集落の活性評価と機器の特徴について—，文化財保存修復学会第43回大会研究発表集，（2021）
- 10) 間瀬創・木川りか・佐野千絵：文化財公開施設等におけるATP拭き取り検査の活用について，保存科学49，1-11（2010）