

〔報文〕 浮遊真菌調査を用いた動的な室内環境評価法の検討 —特別史跡キトラ古墳仮設保護覆屋をモデルとして—

間渕 創・佐野 千絵

1. はじめに

文化財の予防的保存において、館内の真菌を主とする微生物環境の把握は予見される生物被害のリスク評価を目的に行われ、これまでも文化財そのものやこれらを取り巻く保存環境中の菌種や真菌レベル等に関して浮遊真菌調査を含め、多くの報告がされている^{1)~27)}。また館によっては施設内環境調査としてアンダーセンサンプラー等の大型測定機器を用いたコロニー形成単位(Colony Forming Unit, 以下ではCFUと省略)の測定や検出された菌種の同定が行われている。これらは文化財展示施設において近年取り入れられているIPM(総合的有害生物管理)に対して重要な情報を提供するものと考えられる。また文化財公開施設における室内環境には、収蔵庫・展示室・バックヤード・エントランス等、各エリア別の利用目的に適した環境設定と維持管理方針が必要であり、従って環境管理基準の違うエリア間の空気の移動・流入を把握することは、施設内環境の維持管理、すなわち文化財に対する温湿度・化学物質・微生物等による全体的な劣化リスクのコントロールにおいて重要であると考えられる。

通常行われる施設内浮遊真菌調査は各測定箇所における真菌汚染リスクの評価を目的とするものである。アンダーセンサンプラーやスリットサンプラーなどにより粒径や時間帯別にアクティブサンプリングを行い、住宅やオフィス、工場等の空気清浄度の指標値などと比較することによって室内微生物環境の評価を行うことが多い。作業性や予算面において多少大掛かりではあるが、個別エリア単体に関する精細な調査として優れており、各測定箇所におけるCFUと菌種についての知見が得られる。しかし通常単発的に行われるこれらの浮遊真菌調査は、各測定箇所(収蔵庫や展示室など)についてのリスク評価はされるものの、エリア間、ひいては空調設備を含めた施設全体の空気環境の構造的・季節的な特性とそれに伴う問題点へ言及することは少ない。実際の施設環境の把握と改善や対処策の検討、或いは問題点の改善後の評価と維持管理方針の決定にいかにして結び付けていくかというところに課題があるように思われる。

これまで携帯型サンプラーの性能や使用する培地の比較等を行うことにより、これらによる室内浮遊真菌測定法が簡易且つ有効であることを明かにしてきた²⁸⁾。本研究では携帯型サンプラーを用いて継続的な浮遊真菌調査を行ってきた特別史跡キトラ古墳仮設保護覆屋をモデルとして、浮遊真菌調査を応用することで個別エリア単体のリスク評価にとどまらず、文化財公開施設内のCFU分布の相互関係や気流を考慮した、すなわち動的な空気環境評価と実際の運用における施設特徴の把握が可能であることを検証したので報告する。

2. 手法

特別史跡キトラ古墳仮設保護覆屋の施設概要図を図1に示す。石室、小前室、前室、通路、作業室、準備室及び外気について、各エリアの中央地点において測定を行った。空調系は測定期間中一時停止させた2006年2月と天災等による停電を除き、常時稼動していた(表1)。施設の定常的な室内環境を把握するため浮遊真菌、落下真菌ともキトラ古墳壁画点検作業開始時に測定を行い、原則として測定エリアには一人のみ入室とした。石室(約幅1 m長さ2.6 m高さ1.3

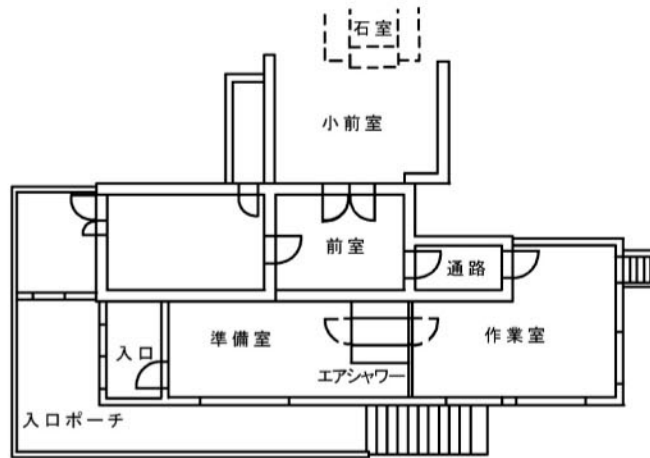


図1 特別史跡キトラ古墳仮設保護覆屋2階の施設概要図

表1 空調系設定温度変更履歴

2004. 11. 12	15℃設定にて，空調系連続運転開始
2004. 11. 26	14℃に設定変更
2004. 12. 17	12℃に設定変更
2005. 01. 07	空調系停止
2005. 02. 18	11℃に設定変更
2005. 03. 24	10℃に設定変更
2005. 05. 12	11℃に設定変更，空調系連続運転開始
2005. 05. 17	13℃に設定変更
2005. 06. 24	14℃に設定変更
2005. 07. 15	13℃に設定変更
2005. 12. 02	12℃に設定変更
2005. 12. 16	空調系一時停止（年末年始に向けての試験）
2005. 12. 22	11℃に設定変更，空調系連続運転，換気ファン連続運転，作業室エアコン連続運転，準備室エアコン連続運転，通路内への空調系パスを封鎖（作業室の結露対策のため）
2006. 01. 20	10℃に設定変更
2006. 02. 03	空調系連続運転中止
2006. 02. 28	空調系連続運転開始
2006. 03. 30	通路内への空調系パスを開放，換気ファン連続運転

m)は作業環境が整わず浮遊真菌が採取できないため，石室内及び小前室(対照)において落下真菌を測定した。また石室内の落下真菌は空気の攪乱を防ぐため石室に入室せず，侵入口からサンプリングシャーレを導入・回収した。

2-1. 浮遊真菌

機器：BIO SAMP MBS-1000

培地：MA/PDA

採取：φ9cmシャーレに20～30CFU程度となるよう，季節や測定箇所により10～100Lをサンプリングし，約25℃で4日間培養後にCFUを計数しCFU/m³を求めた。

2-2. 落下真菌

機器：φ9cmシャーレ

培地：MA/PDA

採取：10分間静置。約25°Cで4日間培養後にCFUを計数した。

3. 結果と考察

3-1. 外気・準備室と作業室

外気のCFUは季節的な周期変化を示し、夏季に増加し冬季に減少する(図2)。準備室のCFUは比較的少なく一定ではあるが、外気のCFU季節変動にある程度影響を受ける。また準備室内のエアコンの稼動状況の影響を受ける。これに対し作業室は外気・準備室とCFU推移の相関が見られない。菌種に関して、外気では*Cladosporium* sp.をはじめ*Arthrinium* sp., *Fusarium* sp.等が主に検出された。準備室で検出される菌種は外気の菌種とほぼ一致することに対して、作業室では*Penicillium* sp.が多く検出され、準備室と作業室の間に主要菌種の違いが見られた(写真1)。

以上のことから準備室エリアは外気流入の影響を受けるが、作業室エリアにおいて作業室-準備室間のエアシャワーが外気からの遮断として有効に機能していることがわかる。

準備室エリアは流入外気由来の微生物・粉塵等の影響があり、一定レベル以上の清浄度の向上努力は無効と考えられ、この準備室までをオープンエリア或いは施設内への緩衝エリアとして捉え(汚染区画)、管理・運用していくことが適切であると考えられる。現在も作業者の防塵服装着や搬入資材の消毒はここで行われ、作業室エリアへ真菌発生源となるようなものを出来るだけ持ち込まないようにしており、今後も同様の運用が望ましいと考えられる。

3-2. 作業室・通路と前室

作業室と通路のCFU推移に相関が見られた(図3)。小前室からの陽圧による空気の流れの通

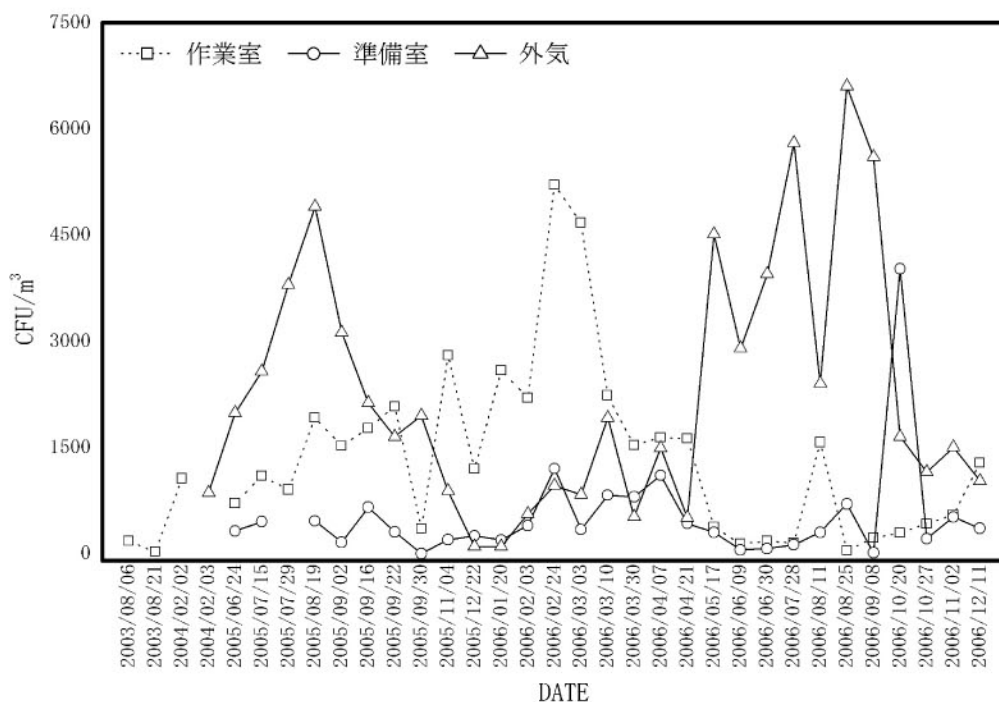


図2 外気・準備室と作業室における浮遊真菌CFU推移の比較

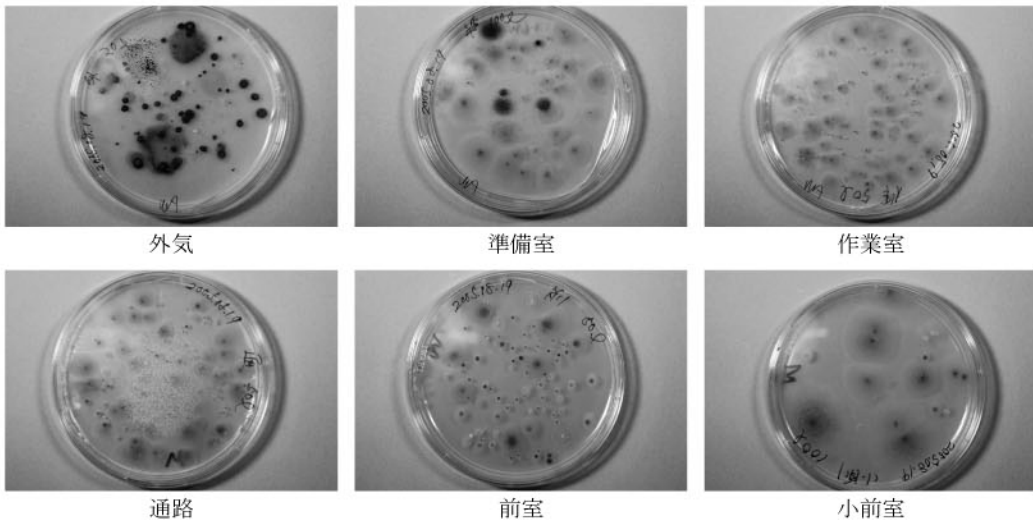


写真1 特別史跡キトラ古墳仮設保護覆屋内で採取される各測定場所における浮遊真菌例

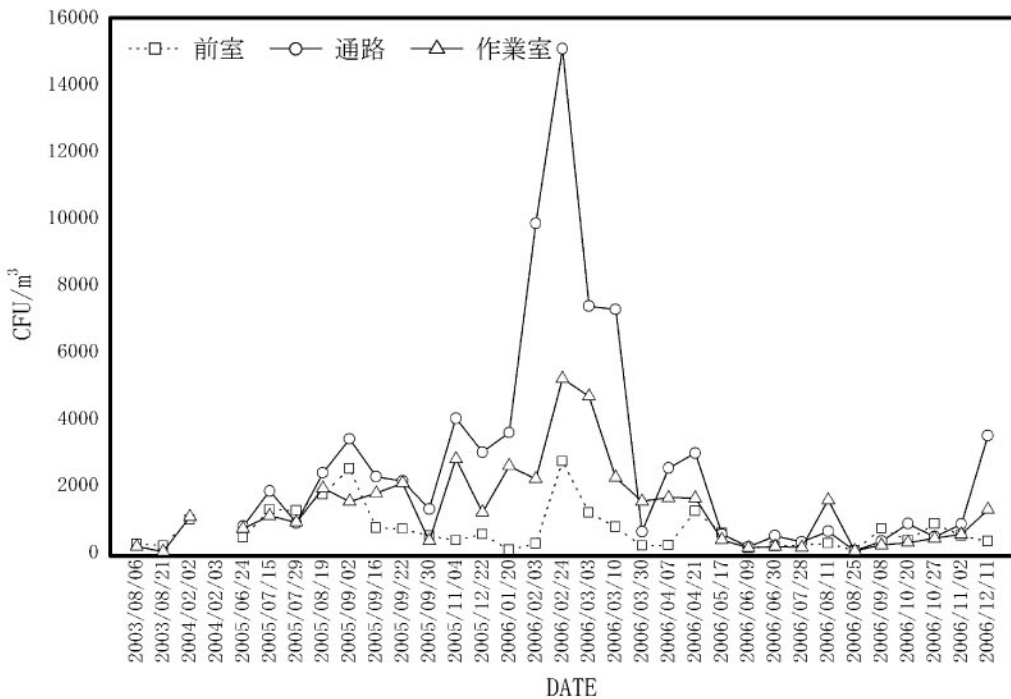


図3 作業室・通路と前室における浮遊真菌CFU推移の比較

りに通路のCFUの増減が作業室に反映されている。また2006年2月の通路で起こった真菌量増大（空調系の停止及び通路におけるパスの閉鎖によって通路エリアの換気が低下したことによると推定している。）は、作業室及び前室の双方向に汚染が拡大していることが分かる。また

通路CFU減衰に対する作業室CFUの減衰応答が遅く、逆に前室は早いことが分かる。気流は基本的に前室→通路→作業室方向であることから、通常は通路から前室へ汚染が拡大することはないが、人や物の移動に伴う空気の攪乱及び土・粉塵等の拡散によって通路の真菌汚染が前室にも拡大したことを示している。

小前室から、前室、通路、作業室に至るエリアで浮遊真菌として採取される真菌は、ほとんどが数種類の*Penicillium* sp.であった(写真1)。

作業室エリアに関しては冬季に非常口や窓枠など外部に通じる箇所の一部に結露が見られることもあるが、温湿度環境は概ね一般居室と変わらず、現在までのところ天井・床・壁面や設置物等での真菌発生は確認されていない。エアコン稼動状況と温度設定により、ある程度の温湿度の管理は可能ではないかと考えられる。また最終的には非常口や窓枠など外部に通じる箇所の結露対策として断熱施工が有効であると考えられる。作業室から石室方向への真菌汚染拡大の懸念は少なく、また温湿度環境が比較的安定していることから、通路からの高真菌レベル空気流入を要因とした作業室内の真菌汚染発生によるリスクと対処の緊急性は低く、現在の運用法のみで許容範囲内と判断できる。通路からの空調系パスの閉鎖、及び空気清浄機の常時運転等による清浄度の向上のための措置は特に必要ではないと考えられる。

古墳壁画の保護のため、石室、小前室、前室及び通路の各エリアは高い相対湿度で管理されており、小前室、前室、通路エリアの壁体は剥き出しのコンクリートであることから、冬季に天井・壁面において結露し易い。またこれらのエリアは、天井付近にダクト類が設置されていることから清掃・消毒は容易ではなく、従って通路エリアの真菌汚染発生のリスクは常に高く、また何らかの対策によってリスクを低減させ、これを維持していくことは難しいと判断される。ただ前述の通り、気流による作業室方向への汚染拡大は、現在の作業室エリアの運用法により対処の必要がないと考えられることから、考慮すべきは前室エリア方向への汚染拡大に関する対策であると考えられる。主な汚染拡大要因は作業者の往来による土や粉塵の移動・拡散であると考えられるため、塩化ベンザルコニウムや99%エタノール等の薬剤による床面の清掃、消毒の徹底や作業靴の消毒・管理方法の改善が有効であり、これにより前室エリアの真菌汚染リスクを低減させることができると考えられる。

3-3. 前室と小前室

前室と小前室のCFU推移はほぼ同じ挙動を示す(図4)。2005年7月の一連の壁画取り外し作業時や2006年4月の前室結露時に前室のCFUは一時増加しているが、小前室にはその影響は見られない。このことから基本的には空調設計通り小前室の陽圧が保たれており、気流は小前室から前室という方向に流れていることが確認でき、またこれに従って真菌汚染が拡大すると推測される。これに対し2006年2月の通路エリアにおける真菌汚染は、小前室の減衰応答が前室よりも速いことから気流とは逆方向の前室から小前室へという方向に拡大しており、人・物の移動に伴って前室の真菌汚染が小前室にも拡大したことを示している。小前室、前室の温湿度環境は空調系とパネル系の2系統により管理されているが、2006年2月28日の空調系の常時運転により(表1)、2006年3月3日の時点で小前室のCFUが減少し、汚染発生のリスクが低減されることが分かった。CFUの減少は空調系の運転による高CFU空気の排気、小前室空気の送風・攪拌による付着真菌の抑制、或いはこれらの相互作用など様々な要因が考えられるが、現在のところ明確な判断はついていない。

小前室、前室は高湿度で管理され、特に小前室はコンクリートの施設躯体と墳丘の版築によって構成されており、版築への抗菌性も考慮した樹脂処置^{23,29)}が施されているとはいえ殺菌や除

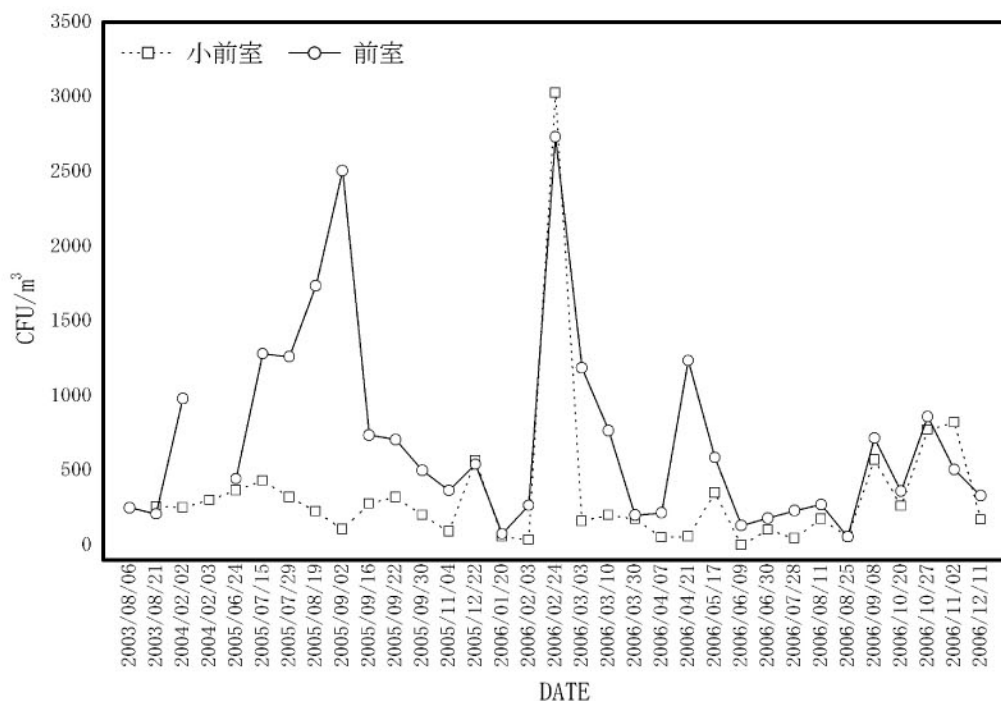


図4 前室と小前室における浮遊真菌CFU推移の比較

菌消毒処理といった処置を完全に行うことは困難である。従って前室，小前室は通路エリアと同様，エリア自体の真菌汚染リスク低減は難しいと考えられ，他エリアへの拡大防止策を優先的に考慮する必要があると考えられる。また結露対策により副次的に起こった通路の真菌レベル増大が結果として石室内落下真菌量にまで影響した事例があることから，石室，小前室，前室，通路の各エリアの環境設定及び管理は一体的に考慮していく必要があると考えられる。他エリアに対する気流による真菌汚染拡大については，空調系及び換気ファンの常時運転と通路・作業室への空調系パスの確保が運用上適切であると考えられる。気流以外の汚染拡散に関して，通路エリアから前室エリアへの汚染拡大のリスク削減対策は前述の通りであるが，前室エリアから小前室エリアへも同様に前室床面の清掃・消毒が有効であると考えられる。また小前室への入室前に，前室において作業靴裏面の消毒用エタノール等による殺菌を行うことは汚染拡散リスクの低減につながると考えられる。

3-4. 小前室と石室

落下真菌測定は気流等の要因による大きな誤差範囲を含み，また石室内の空気はほぼ停滞しているの対し，小前室は空調系稼動により空気の対流があることから，定量的なCFU比較は難しい。従って落下真菌測定のみによる考察や断定的な判断はできなが，原則的に石室は小前室に比べ真菌レベルが高く，また進入口および石間隙を通じた空気の交換に伴い小前室の影響をある程度受けているように見られる(図5)。落下真菌測定で採取される菌種はほとんどが *Penicillium* sp. であった。

空調系の温度設定や換気ファンの常時運転等により小前室エリアの真菌汚染リスクのコント

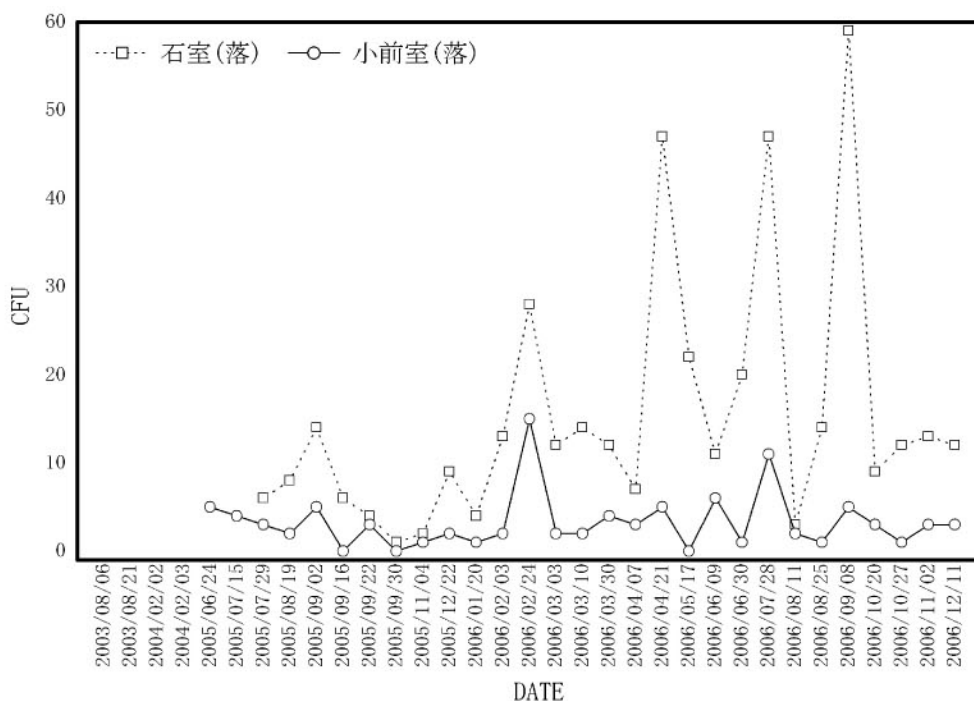


図5 小前室と石室の落下真菌CFU推移の比較

ロールはある程度の範囲で可能であるかもしれない。しかし間隙を通じたある程度の通気が想像されることと、南面閉塞石は小前室側に露出していることから地温—石室(石材)—小前室の間で熱交換がおこると考えられることなどから、石室内の温度勾配や湿度・含水率の分布の偏りを考慮に入れた温度設定が必要である。

現在石室へ進入する際は作業靴を脱ぎ、防塵服足裏の消毒、進入口付近の点検と進入補助ステンレス版の消毒用アルコールによる消毒等、石室内への真菌源を持ち込まないよう細心の配慮がなされている。しかし石室内部及び壁画面近傍の相対湿度はほぼ100%RHであり、漆喰自体の含水率も高い状態にあり、また点検等作業時以外はある程度密閉されているため換気量はあまり多くはないと考えられる。長期にわたってこのような環境下におかれている壁画面の付着真菌や有機物レベルは常時高い状態であると推定される。石室内部は真菌が発芽・成長するためのこうした諸条件が整っていると考えられるため、小前室陽圧空気が作業時や間隙から浮遊真菌とともに石室に流入した場合、あるいは汚染源を他のエリアから持ち込んでしまった場合、真菌汚染の影響は小前室よりも大きくなる可能性がある。ただし現在のところ石室内真菌レベルの増減と壁画面点検による壁画面上での真菌発生との関連は明確ではない。

これまで小前室エリア内の施設躯体コンクリートや版築上の真菌を完全に抑制できたことは無く、殺菌等の対処も限界がある。従って小前室エリア単体の管理方針の設定ではなく、通路、前室、小前室、石室エリアを一体的に捉え管理することによって、真菌汚染リスクの増大を抑制する以外に方法は無いように思われる。通路及び前室の床・壁面の殺菌・消毒の徹底による清浄度の向上と空調系の適切な設定管理方法の検討が重要であり、これらエリアのトータルなリスク管理によって最終的に石室エリアの真菌汚染リスクが低減されるものと考えられる。

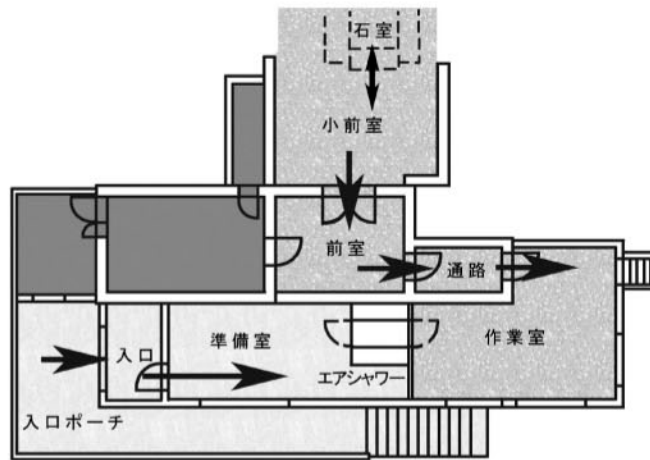


図6 特別史跡キトラ古墳仮設保護覆屋2階の動的空気環境概要図

3-5. 施設全体の動的な室内環境

仮設保護覆屋内の動的な空気環境は図6のようになると考えられる。

菌種の比較から外気・準備室は*Cladosporium* sp. が多く検出され、これに対して石室から準備室までが*Penicillium* sp. が主たる菌種であった。このことから準備室と作業室の間にあるエアシャワーが有効に機能しており、石室への外気由来の真菌汚染は確実に遮断されていることがわかった。

空気の移動は空調設計通り、石室⇄小前室(陽圧)⇒前室⇒通路⇒作業室となっていることがわかる。したがって原則的にこの空気の流れに沿って汚染が拡大する。しかし各エリア個別の真菌汚染リスクの低減が困難な場合が多く、気流の経路中で汚染が発生した場合、人・物の移動によって空気の流れ方向以外にも拡大する可能性がある。

石室と小前室の真菌レベルの関係は今のところ明らかではないが、小前室等周囲の経路からの汚染拡散は石室内の真菌レベルに大きな影響を与える可能性がある。

以上の施設特徴を考えた場合、施設環境管理方針としての注目点は外気等の外的要因よりも施設内を移動する人・物であることが分かる。個別エリアのリスク低減が困難な場合であっても、点検者の作業環境や床・壁面の殺菌・消毒等が可能な範囲の管理を徹底することで、各エリア間の真菌汚染拡大を抑制し、総合的に真菌汚染リスクを低減させることが出来ると考えられる。

4. まとめ

年間を通じた施設内の浮遊真菌調査を行うことで施設内の気流を含めた動的な空気環境と実際の運用面における施設の特徴を把握することができた。特に実際の運用において、施設設計通りの換気経路であったにもかかわらず逆方向へ真菌汚染が拡大したことなど、実際の運用に対する検討課題の指摘とその改善策に至るまでのプロセスを一体的に示唆することが出来た。こうした取り組みは施設全体の温湿度分布や気流測定などをもとに、より正確にまた確実に理解できると考えられるが、施設全体の3次元的な測定は実際には難しく、運用や設定の変更による実際の環境変化の検証や菌種の同定から将来起こりうる被害を直接的に把握・推定が容易にできるところに浮遊真菌測定を用いることの利点があると考えられる。

謝辞

本研究に際し、特別史跡キトラ古墳の保存に関わる多くの方々のご理解とご協力を頂いたことに謝意を表します。

参考文献

- 1) 江本義数：奈良正倉院構内及びその付近の空中微生物，殊に糸状菌に就いて，保存科学，第1号，12-27(1964)
- 2) 江本義数：日光東照宮等二社一寺建造物の黴害とその防除，保存科学，第2号，1-15(1966)
- 3) 江本義数：国宝中尊寺金色堂に発生した黴と建築用材，保存科学，第3号，40-54(1967)
- 4) 江本義数：法隆寺金堂焼損壁体の黒斑と黴，保存科学，第5号，21-33(1969)
- 5) 江本義数：法隆寺壁画再現パネルの防黴，保存科学，第7号，99-106(1971)
- 6) 江本義数：広島県立美術館内の空中菌，保存科学，第7号，107-111(1971)
- 7) 江本義数：寺院収蔵庫内の空中菌，保存科学，第8号，73-79(1972)
- 8) 江本義数：奈良国立博物館内の空中微生物，保存科学，第8号，81-86(1972)
- 9) 江本義数：日本万国博覧会美術館内の空中微生物，保存科学，第9号，43-50(1972)
- 10) 江本義数：神奈川県伊勢原市宝城坊の薬師三尊の防黴，保存科学，第9号，51-53(1972)
- 11) 江本義数，江本義理：装飾古墳内の微生物調査 福岡県王塚古墳，熊本県チブサン古墳，保存科学，第12号，95-101(1974)
- 12) 新井英夫：建築彩色に発生する糸状菌の防除法，保存科学，第18号，27-34(1979)
- 13) 新井英夫，森八郎，門倉武夫：レオナルド・ダビンチ展における生物劣化防除，保存科学，第18号，35-39(1979)
- 14) 新井英夫，森八郎：新設博物館における生物的問題，保存科学，第19号，1-7(1980)
- 15) 新井英夫：木造建造物に発生した変形菌について—明治村・北里研究所本館—，保存科学，第21号，41-45(1982)
- 16) 新井英夫：紙質類文化財の保存に関する微生物学的研究(第1報) 紙の褐色斑(foxing)から糸状菌の分離，保存科学，第23号，33-39(1984)
- 17) 新井英夫：紙質類文化財の保存に関する微生物学的研究(第5報)，保存科学，第26号，43-52(1987)
- 18) 木川りか，新井英夫：各種文化財などの糸状菌同定報告，保存科学，第34号，8-12(1995)
- 19) 佐野千絵，三浦定俊，木川りか：東京都美術館「法隆寺金堂壁画展」に関する保存環境調査，66-73(1996)
- 20) 佐野千絵，志多伯峰子，佐藤一博，浅井真帆，早川仁英，能見勝利，木川りか，三浦定俊：図書資料のカビ対策：三康図書館の事例，保存科学，第42号，87-100(2003)
- 21) 木川りか，佐野千絵，三浦定俊：高松塚古墳の微生物調査の歴史と方法，79-85(2004)
- 22) 佐野千絵，間瀬創，三浦定俊：国宝・高松塚古墳壁画保存のための微生物対策に関わる基礎資料—パラホルムアルデヒドの実空間濃度と浮遊菌・付着菌から見た微生物制御—，保存科学，第43号，95-105(2004)
- 23) 木川りか，佐野千絵，間瀬創，三浦定俊：キトラ古墳の前室および石室における菌類調査報告，保存科学，第44号，165-172(2005)
- 24) 新井英夫：障壁画保存環境の微生物，保存科学，第12号，35-38(1974)
- 25) 江本義理，門倉武夫，見城敏子，新井英夫：史跡虎塚古墳彩色壁画保存に関する調査研究(受託研究報告第51号)，保存科学，第22号，121-146(1983)

- 26) 新井英夫: ネフェルタリ王妃墓の微生物について, 保存科学, 第27号, 13-20(1988)
- 27) 佐野千絵, 間瀬創, 三浦定俊: キトラ古墳開封前の石室内空気環境調査報告, 保存科学, 第44号, 157-164(2005)
- 28) 間瀬創, 小鷲悠, 篠原史彦, 岩田利枝, 木川りか, 佐野千絵: 文化財公開施設内生物調査における浮遊菌測定手法の検討, 保存科学, 第45号, 195-204(2006)
- 29) 木川りか, 早川典子, 山本記子, 川野邊渉, 佐野千絵, 青木繁夫: 遺跡等で使用する樹脂のカビへの抵抗性について, 保存科学, 第44号, 149-156(2005)

キーワード: 真菌 (Mold); 浮遊真菌 (Airborne mold); 室内環境 (Indoor environment); 総合的有害生物管理 (Integrated pest management); 予防的保存 (Preventive conservation)

Investigation for Evaluation of Dynamic Indoor Environment in Terms of Airborne Mold Measurement -A Model Case at the Conservation Facility of Kitora Tumulus-

Hajime MABUCHI and Chie SANO

It is necessary to establish proper environment for each zone in museums such as storage, exhibition rooms, truck yard or entrance, which is used for various purposes and regulated at different environmental security levels. Therefore, understanding the air flow and transfer between zones is important in managing the risk of damages to cultural properties caused by climate changes, chemical pollutions and microorganism attacks.

In terms of applying airborne mold measurement, we verified the possibility of evaluating dynamic indoor environment and characterizing peculiarities of conservation facilities, with Kitora Tumulus as a model case. As a result, problems related to the practical use of the facility and its improvement plans were suggested.

Measurement of airborne mold has advantages over other methods in understanding environmental characteristics of a facility, because it enables easier clarification of practical operation, environmental changes through alteration of utility setting and relationship between all the zones in the facility. In addition, identification of molds will enable understanding and direct prediction of considerable mold infections in the future.