

博物館施設におけるゾーニングへのバイオエアロゾル測定の利用

間 創・佐藤 嘉則

独立行政法人国立文化財機構
東京文化財研究所

保存科学 第56号 別刷

平成28年度

〔報告〕 博物館施設におけるゾーニングへの バイオエアロゾル測定を活用

間 瀨 創*・佐藤 嘉則

1. はじめに

博物館施設等では、IPM (Integrated Pest Management: 総合的有害生物管理) によって文化財害虫や微生物 (主にカビ) 等による生物被害リスクの低減を図っている。カビについては、温湿度管理により大規模発生させないことを基本とし、IPM の5段階のコントロール¹⁾に沿って、施設の清掃、資料の点検・クリーニング、浮遊菌・付着菌の調査、酸化エチレン等の薬剤による殺菌処理などを合理的に組み合わせて IPM を実施している。これらのうち浮遊菌の調査については、博物館施設内の各区画についてモニタリングを行い、この結果をもとに博物館施設内の区画を分類しゾーニングを行うことがある。

ゾーニングを行うための浮遊菌の調査では、浮遊菌サンブラと培地を用いた多点的・継続的な浮遊菌測定を行う。浮遊菌サンブラにより一定量の空気をサンプリングし、培地に吹き付け、この培地を数日間培養した後、コロニー数の計数と菌種同定を行う²⁾。各区画の季節ごとあるいは年間を通じた測定により、浮遊菌濃度の推移と菌叢が同様の区画に分類しゾーニングする³⁾。具体的には、外気の影響を受けやすい区画や来館者の影響が大きい区画、独立した清浄区画といった分類となる。また浮遊菌濃度の高低の比較から、カビの発生源や館内での拡散方向も推定できるため³⁾、季節や区画の特徴に応じて、区画の維持・管理にも適用できる。なおこのモニタリングで対象とするのは、文化財等の資料や施設・什器で生育し、直接被害を与える可能性のある「カビの生菌」(本稿ではこれを浮遊菌と表記する。)である。またこのモニタリングの欠点として、浮遊菌の培養が必要なため一回の測定結果を得るまでに数日以上を要するとともに、モニタリングには年に数回以上の測定が必要となることや、微生物操作に伴う専門性や設備が必要となることが挙げられる。

近年、空気中を浮遊する微生物粒子(本稿ではこれをバイオエアロゾルと表記する。)の濃度を測定する機器が開発されてきている⁴⁻⁶⁾。この手法はバイオエアロゾルに含まれる物質の自家蛍光や、処理により生成される蛍光を検出し、この強度を一定の係数により菌数に換算するものである。この生体蛍光を用いたバイオエアロゾル測定による微生物モニタリングは、衛生学の分野や、食品・医薬品の製造現場などにおいて、HACCP (Hazard Analysis and Critical Control Point: 危害分析重要管理点) や GMP (Good Manufacturing Practice: 適正製造規範) といった品質管理の一環として用いられ始めている。培養を必要としないため前述浮遊菌測定の欠点を補うことができ、またリアルタイムの自動連続計測が可能であることや、短時間のバイオエアロゾル濃度の変化・異常を検出できるといった利点もある。

これまでこのバイオエアロゾル測定を博物館施設で活用する方法について、基礎的な研究を行い、以下のような知見を得ている。

現時点で利用できるバイオエアロゾル測定器はいずれも高い清浄度が求められる環境(ク

*東京文化財研究所、三重県総合博物館

リーナールームの規格 ISO 14644-1 Cleanroom Standards において ISO Class 8以上) での異常検知を目的としたモニタリングを想定して開発されている。そのため測定の実害要因となる浮遊微粒子が非常に多い博物館施設のような環境 (ISO Class 9) での測定は保証されていないが、これまでの研究で用いたバイオエアロゾル測定器 (微生物センサ BM-300C, シャープ社製) については、博物館施設内において年間を通じたバイオエアロゾル測定が可能であった⁷⁾。

また培地を用いた浮遊菌測定と生体蛍光を利用したバイオエアロゾル測定では、検出される微生物の範囲が異なる。バイオエアロゾル測定で検出されるのは、生物被害を生じる浮遊菌だけでなく、博物館等の環境において文化財や資料の基質上で生育すると考えにくい細菌・酵母も含まれる。また浮遊菌測定では検出されない、培地上での生育が困難な培養不能菌・損傷菌・死菌なども含まれる。先行研究では同一の測定区画内での浮遊菌濃度とバイオエアロゾルを含む $5\ \mu\text{m}$ 以上の浮遊微粒子濃度に相関があるとの報告^{8,9)}や、バイオエアロゾル測定器の機種によっては同一区画であれば単一菌種の浮遊菌濃度と機器センサ出力値に相関があるとの報告⁴⁾があり、また博物館施設内で行った上記機種を用いた測定においても、同一区画内ではバイオエアロゾル測定による単位体積あたりの蛍光強度 ($\text{V}/\text{sec}/\text{m}^3$) と浮遊菌濃度 (CFU/m^3) は比例した。また短時間の環境の変化の検出においてバイオエアロゾル測定は浮遊菌測定よりも有利であった⁷⁾。しかし博物館施設では諸区画のバイオエアロゾルに含まれる浮遊菌とその他の微生物粒子の存在比が大きく異なることから、バイオエアロゾル測定の蛍光強度から文化財を加害する可能性のある浮遊菌の多寡について、区画を超えて比較することはできなかった⁷⁾。

以上の先行研究をふまえ、このバイオエアロゾル測定を博物館施設におけるゾーニングへ活用することについて以下のように考えられる。

(1) 複数台のバイオエアロゾル測定器を用い、異なる区画において同時に測定を行い、得られた蛍光強度推移の相関を見ることで区画を分類できる可能性がある。

(2) バイオエアロゾルの連続測定によって、一日のうちの環境変化を検出することにより、実際の博物館運用における区画の特徴を把握できることが期待できる。

そこで本研究では、実際の博物館施設の代表的な区画において、上記 (1) (2) について試験を行い、バイオエアロゾル測定の博物館施設におけるゾーニングへの活用について検討を行った。

2. 実験

2-1. バイオエアロゾル測定について

外気や博物館施設内はバイオエアロゾル測定における蛍光検出の実害・干渉・偽陽性を示す可能性のある塵埃等の非生体微粒子が多い。このことから本研究では、先行研究で外気や博物館施設内で測定が可能であった前述のバイオエアロゾル測定器、微生物センサ BM-300C を用いた。すべての測定は三重県総合博物館において2016年11月に行った。

2-2. 同時測定による区画の分類

博物館において代表的な2つの区画分類を想定して測定を行った。外気の影響を受けやすい区画のモデルとして①外気、②トラックヤード、③荷解室(図1)、独立した清浄区画とその周辺の区画のモデルとして④エントランス、⑤学習交流スペース、⑥企画展示室(図2)において測定を行った。

外気の影響を受けやすい区画のモデルである①外気、②トラックヤード、③荷解室は、過去の年間を通じた浮遊菌測定(ミドリ安全社製 BIOSAMP BMS-1000, ポテトデキストロース寒

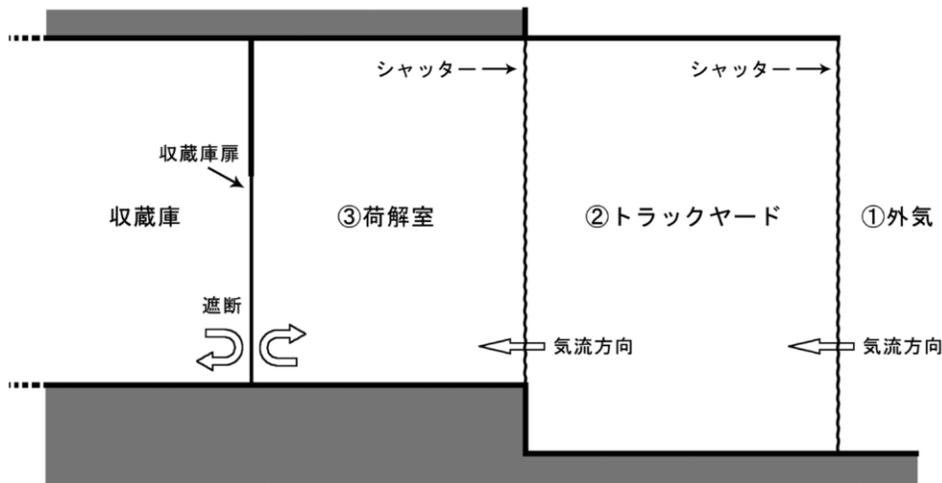


図1 外気の影響を受けやすい区画の概要図（断面図）

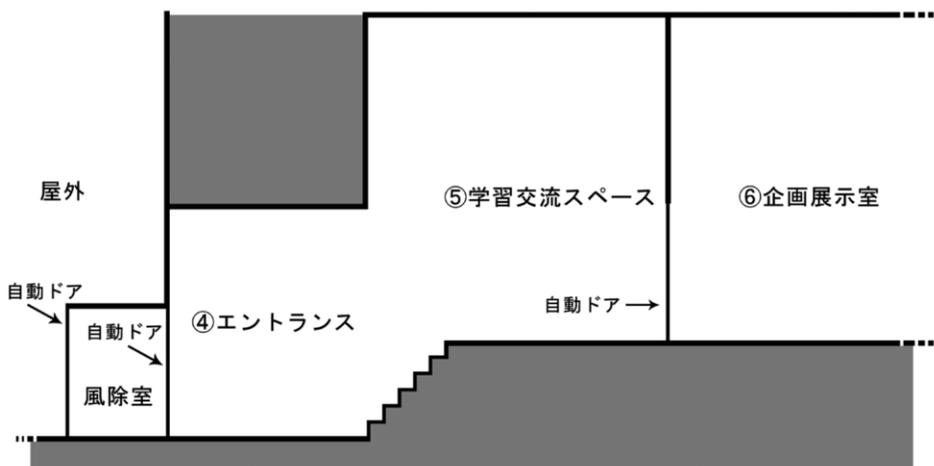


図2 企画展示室及びその周辺の概要図（断面図）

天培地（PDA）使用）や風向・風量測定により、外気が施設内に吹き込み、季節によって増大する外気由来の浮遊菌の影響を受けることが分かっている¹⁰⁾。この浮遊菌測定をもとに算出したそれぞれの区画の浮遊菌濃度（CFU/m³）の相関係数（ r ）は、①外気と②トラックヤードで $r=0.96$ （0.99）（ $N=12$ ）、②トラックヤードと③荷解室で0.88（0.94）（ $N=12$ ）、直接隣り合わない①外気と③荷解室で0.85（0.88）（ $N=12$ ）となっており、非常に強い相関がみられる（（ ）内の数値は *Cladosporium* sp.を外気由来浮遊菌の指標菌として抜き出して計算した場合）。ゾーニングにおいては②トラックヤードと③荷解室はいずれも外気の影響を受けやすく、季節的にカビ被害が発生しやすい区画として分類されている。

独立した清浄区画とその周辺区画のモデルである④エントランス、⑤学習交流スペース、⑥企画展示室は来館者導線であり、屋外から企画展示室は3枚の自動ドアによって区切られている。環境管理の一環として行った過去の浮遊菌測定により、④エントランスは外気接点であり、

外気の影響を受けやすい区画, ⑤学習交流スペースは緩衝区画, ⑥企画展示室は陽圧管理され, 浮遊菌濃度が低い独立した清浄区画としてゾーニングしている。

それぞれのモデルにおいて, 3台のバイオエアロゾル測定器により同時に測定を行い, その蛍光強度の推移の相関について考察し, 区画を分類できるか試みた。なおいずれの測定も床からおよそ60cmの高さで行い, 空気サンプリング時間は①②③について10min(20L/min), ④⑤⑥は2倍の20min(20L/min)で行った。

2-3. 日内変動の評価

④エントランス, ⑤学習交流スペース, ⑥企画展示室は, 開館時(9:00~19:00)に来館者がある。また今回測定を行った期間, これらの区画は8:30から19:30までのあいだ空調が稼働している(休館日11月14日・21日を除く)。空調稼働時は屋外からエントランスへ外気が吹き込む現象が見られるが, 企画展示室は陽圧管理により学習交流スペースへ吹き出す気流が確認されている。閉館時にはいずれの自動ドアも閉じた状態で, 空調や館内すべての換気扇, 外調機は停止し, 静置状態となっている。バイオエアロゾル測定により得られた蛍光強度の推移を比較して, 開館時と閉館時の来館者の往来や空調稼働の有無といった博物館の運用による環境の変化を検出し, 区画の特徴を把握できるか検証した。

3. 結果と考察

3-1. 外気の影響を受けやすい区画

①外気, ②トラックヤード, ③荷解室おける測定結果を図3に示す。横軸が測定日時, 縦軸がバイオエアロゾル測定による蛍光強度(V/sec)である。またこの測定結果について, 蛍光強度の相関を見るために, 各区画の単位体積あたりの蛍光強度(V/sec/m³)の相関を調べた結果を図4に示す。なお図3の蛍光強度の推移においては, 機器が表示する検出限界以下(N.D.)を0としてプロットしているが, 図4の蛍光強度の相関ではN.D.を除してプロットし相関係数を計算している。

①外気と②トラックヤードの相関係数(r)は0.77(N=110), ②トラックヤードと③荷解室で0.88(N=108)となり, 隣り合った区画においてr=0.7以上の強い相関がみられた。また①

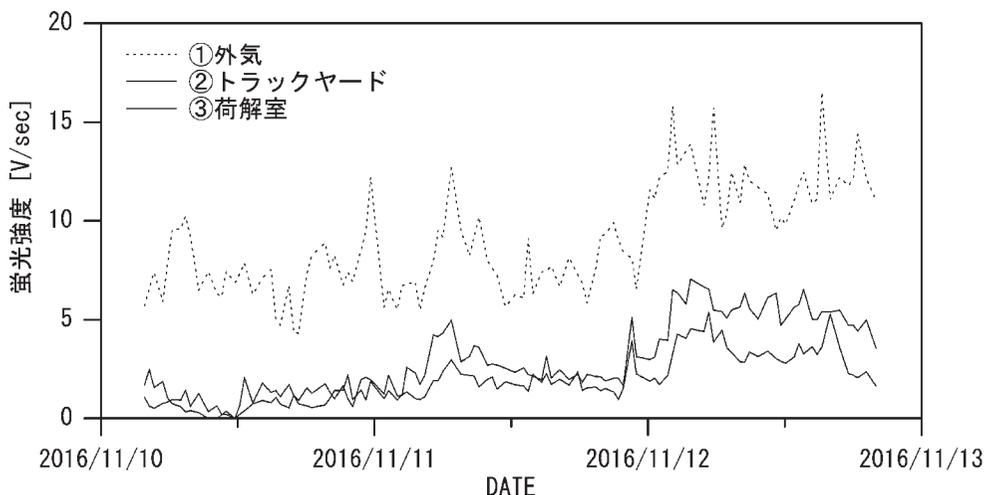


図3 外気の影響を受けやすい区画の蛍光強度推移

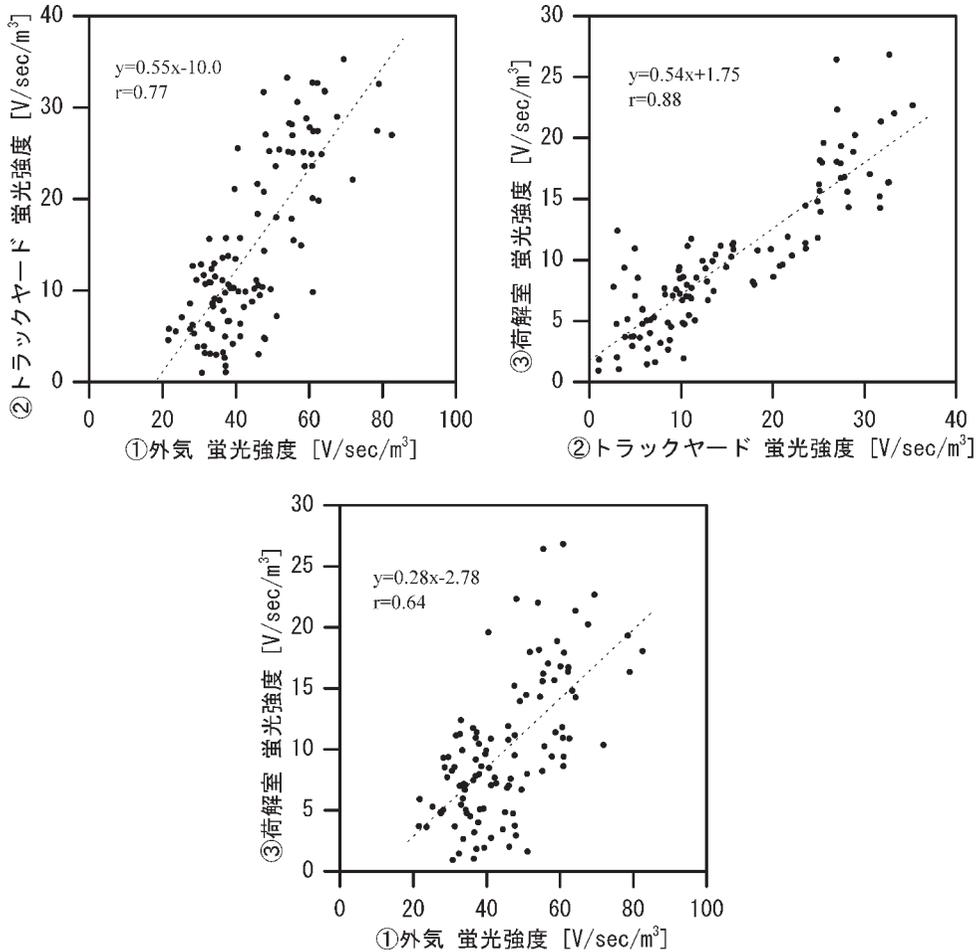


図4 外気の影響を受けやすい区画の蛍光強度相関

外気と直接隣り合わない③荷解室においても0.64 (N=108) となり相関が見られた。過去の浮遊菌測定と比較すると相関の強度は低いものの、バイオエアロゾルの同時測定によっても外気とこれらの区画の相関を検出することができた。

3-2. 独立した清浄区画とその周辺の区画

④エントランス、⑤学習交流スペース、⑥企画展示室における測定結果を図5に示す。横軸が測定日時、左縦軸がバイオエアロゾル測定による蛍光強度 (V/sec)、右縦軸は当日一日の企画展示室観覧者数を、もっとも観覧者数が増える15:00にプロットしたものである。なお11月20日~22日は未測定である。またこの測定結果について、蛍光強度の推移の相関を見るために、それぞれの区画の閉館時(空調停止)と開館時(空調稼働・来館者あり)にわたるうえで、各区画の単位体積あたりの蛍光強度 (V/sec/m³) の相関を調べた結果を図6、7に示す。なおN.D.の取り扱いは上記と同じである。

図5からは開館時、特に来館者が増える昼過ぎ頃に蛍光強度がピークとなり、夜間に低下する傾向が見られる。来館者による隣接区画からの空気の流入・拡散、又は塵埃等の持ち込み・

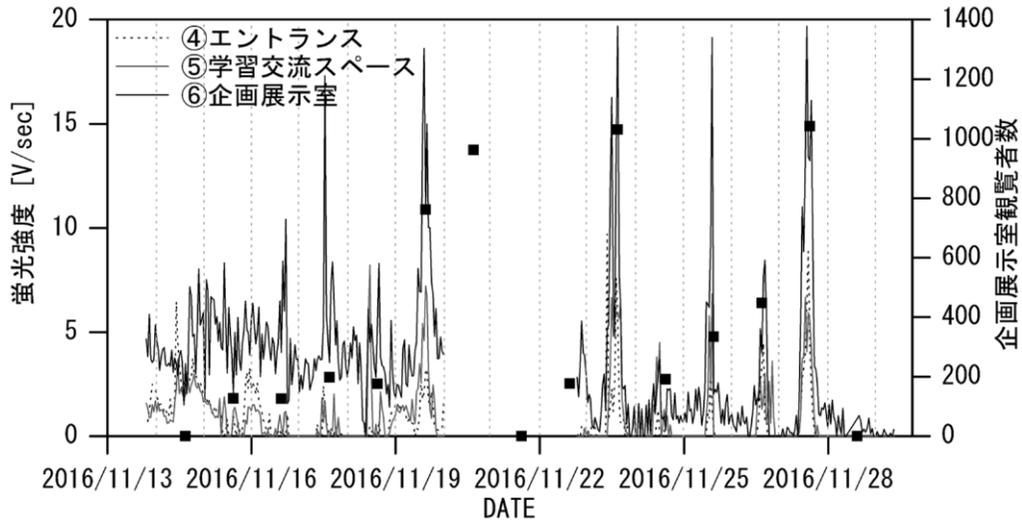


図5 企画展示室及びその周辺の蛍光強度推移

縦軸右は当日の企画展示室の観覧者数 (■) を15:00にプロットしたもので、縦点線グリッドは各日0:00を示す。

攪乱・巻き上げ等の影響を受け、一時的にバイオエアロゾルが高くなり、夜間に沈降するためであると推測される。

図6から、静置状態である閉館時間帯には、④エントランスと⑤学習交流スペースの相関係数は0.73 (N=85)、⑤学習交流スペースと⑥企画展示室では0.11 (N=87)、④エントランスと⑥企画展示室では0.19 (N=101) となった。④エントランスと⑤学習交流スペースにおいて強い相関がみられたのに対し、⑥企画展示室は他の区画と相関が低く、独立した区画であることが分かる。自動ドアが閉められ、空調が停止した状況では、隣接区画との空気の流入・交換が無いことが分かる。

これに対し空調が稼働し、来館者が訪れる開館時間帯の図7では、④エントランスと⑤学習交流スペースで0.49 (N=65)、⑤学習交流スペースと⑥企画展示室で0.60 (N=89)、また④エントランスと⑥企画展示室においても0.50 (N=73) となった。空調稼働しておらず、来館者のいない静置状態では⑥企画展示室が独立した環境の区画であったが、開館時にはいずれの区画同士にもある程度の相関が見られた。⑥企画展示室を含め、開館時には来館者の影響が大きい区画であると判断できる。ただしこの相関の理由が、隣接区画の空気流入による相互関係的なものなのか、来館者による塵埃等の巻き上げによる区画単独の事象であるかまでは明確に判断できない。また床清掃日との整合についても検討したが、明確な関連は見られなかった。

以上からバイオエアロゾル測定により、⑥企画展示室はその周辺から独立した区画であること分類でき、また開館時間と閉館時間の一日の環境変化を検出することにより、来館者の影響を大きく受ける特徴を把握することができた。

なお11月27日の閉館後は特別に空調を停止せず29日朝まで連続運転した。28日は閉館日であったため、この期間は来館者が無い状態で空調を稼働している条件となる。空調は床吹き出しであるが、④エントランス、⑤学習交流スペース、⑥企画展示室ともに塵埃等の巻き上げ等による蛍光強度の上昇は見られなかった。このことから、床塵埃等の巻き上げについては、空

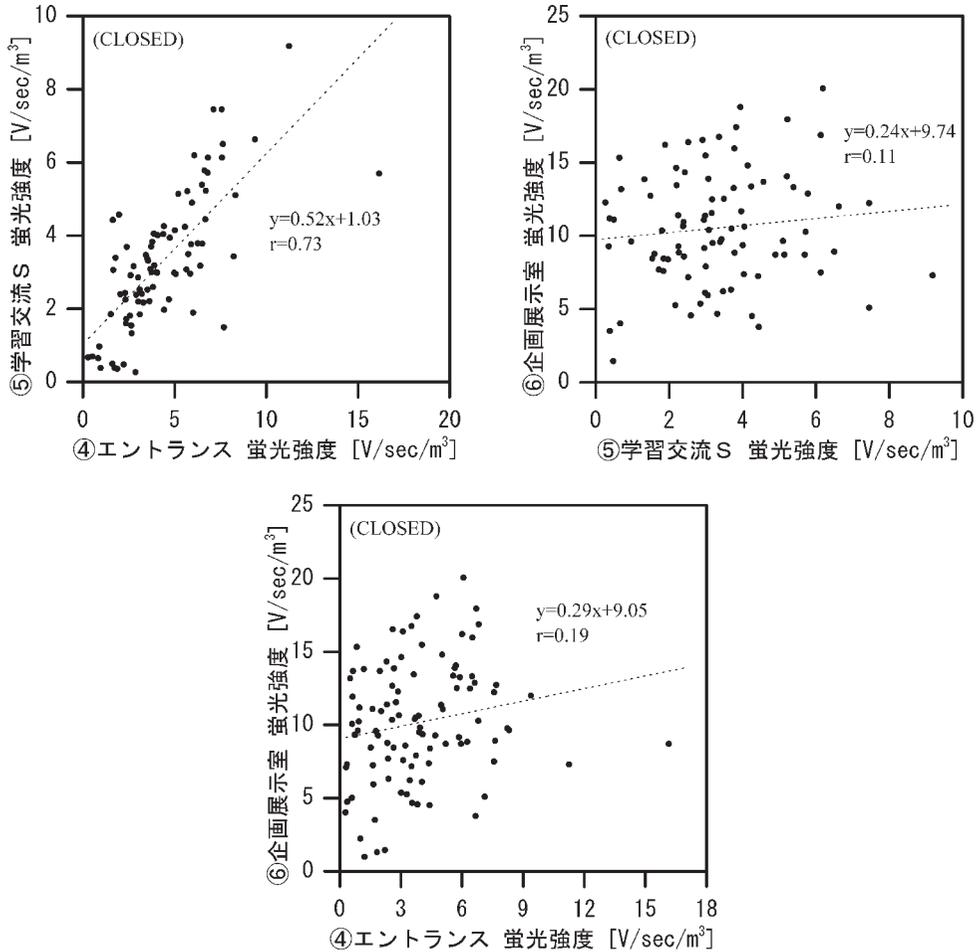


図6 閉館時間における企画展示室及びその周辺の蛍光強度相関

調床吹き出しよりも、来館者によるものの影響が強いものと考えられる。

また参考のため空調が稼働しておらず、来館者のいない静置状態で浮遊菌測定（ミドリ安全社製 BIOSAMP BMS-1000, PDA 使用）を行った結果、⑤学習交流スペースで 96 ± 10 (CFU/m³) (N=3)、⑥企画展示室で 25 ± 14 (CFU/m³) (N=3) となった。バイオエアロゾル測定の蛍光強度は平均的に⑥企画展示室において高い傾向が見られるが、浮遊菌濃度は逆に低い結果となった。⑥企画展示室で検出されたバイオエアロゾルの蛍光のうち、PDA で生育する浮遊菌によるものの割合が低いことを示している。このことから静置状態においては、⑤学習交流スペースと⑥企画展示室の環境が異なることが分かる。なお PDA で生育する浮遊菌以外の蛍光としては、(1) PDA で生育しない菌種、(2) 細菌・酵母、(3) 培地上で生育しない培養不能菌・損傷菌・死菌等、(4) 花粉やダニ等の死骸・糞、人の皮膚片など還元糖やアミノ化合物を含む物質によるものの4つが可能性として考えられる。ただし(4)については、通常 $10\mu\text{m}$ 以上の粒径があり、本測定器のサイクロン機構によって蛍光検出前に除去されることから⁴⁾、これらがさらに微細化した $10\mu\text{m}$ 以下の小片のみが対象となる。

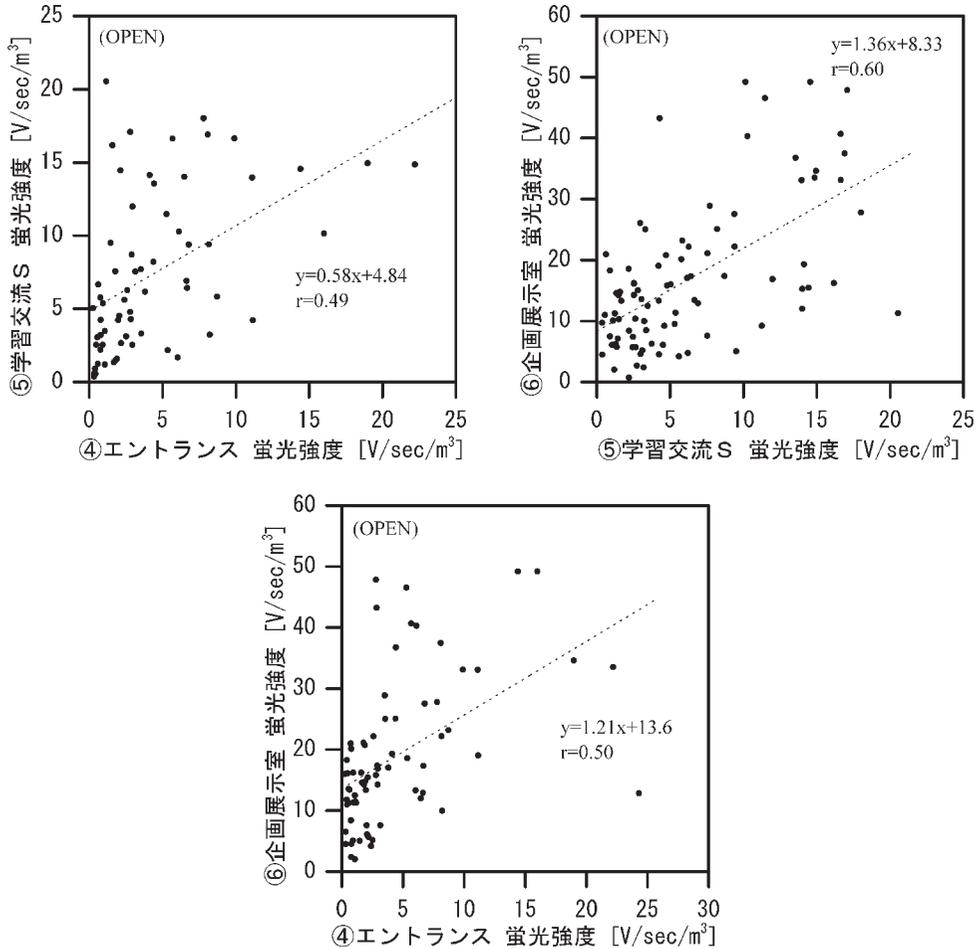


図7 開館時間における企画展示室及びその周辺の蛍光強度相関

4. まとめ

三重県総合博物館における、外気の影響を受けやすい区画のモデルと独立した清浄区画及びその周辺区画のモデルで、バイオエアロゾルの同時測定により区画の分類ができた。また開館時・閉館時の一日のうちの環境変化の検出と区画の特徴把握が可能であった。

従来よりもゾーニングが簡易に行えることは非常に有用であり、また浮遊菌測定では非常に労力のかかる一日のうちの実際の博物館運用による環境変化が検出できたことは特に有意である。従来の用途として想定される収蔵庫等の清浄区画又は重要区画における異常検出・清浄度モニタリングへの利用だけでなく、本試験によりIPMに向けたゾーニングへもバイオエアロゾル測定が活用できることを示すことができた。

今後、他施設等での測定事例を増やしていくこと等により、汎用性やゾーニングの精度についてさらに検証していきたい。

謝辞

本研究は、平成28年度 学術研究助成基金助成金 若手研究(B)「リアルタイム浮遊菌測定を用いた自然共生型博物館におけるゾーニングについての研究」(課題番号:15K16277)による成果の一部である。

参考文献

- 1) 木川りか、長屋菜津子、園田直子、日高真吾、Tom Strang: 博物館・美術館・図書館等における IPM、文化財保存修復学会誌、47、76-102 (2003)
- 2) 山崎省二編: 環境生物の測定と評価、オーム社 (2001)
- 3) 間渕創: 文化財公開施設等における微生物の予防と制御に関する研究、学位論文、東京芸術大学大学院文化財保存学専攻保存科学領域 (2011)
- 4) 藤岡一志、山田翔太、富永大河: 微生物センサ BM-300C を用いた空中浮遊菌の迅速測定、日本防菌防黴学会誌、43(11)、557-562 (2015)
- 5) TSI Inc.: BIOTRAK(R) REAL-TIME VIABLE PARTICLE COUNTER PRINCIPLE OF OPERATION, APPLICATION NOTE CC-101 (2012)
- 6) 入江香成美: 微生物迅速測定 空中浮遊菌のリアルタイム検出装置とそのバリデーション、PHARM TECH JAPAN、30(4)、645-649 (2014)
- 7) 間渕創、佐藤嘉則: 博物館施設におけるバイオエアロゾル測定の利用について、保存科学、55、103-113 (2016)
- 8) NHB5340.2, NASA Standards for Clean Rooms and Work Stations for The Microbially Controlled Environment (1976)
- 9) 松長正見、角田智良、城斗志夫、伊東章、渡辺敦夫: 浮遊微生物と浮遊微粒子の濃度相関に関する考察、日本食品工学会誌、6(3)、197-204 (2005)
- 10) 間渕創: 自然共生型博物館における野外由来微生物の浮遊真菌濃度予測に関する研究、科学研究費助成事業研究成果報告書 (2014)

キーワード: カビ (mold); 浮遊菌 (air-born mold); バイオエアロゾル (bioaerosol); 生体蛍光 (biofluorescence); 博物館 (museum)

Application of Bioaerosol Measurement for IPM Zoning in Museums

Hajime MABUCHI* and Yoshinori SATO

Microbial air measurement for IPM zoning in museums is usually conducted by airborne mold samplers and agars to detect the presence of viable mold that directly poses risks for mold growth on cultural properties. Recently, bioaerosol measuring devices that detect biofluorescence have been developed. These devices provide results immediately with easy operation than if airborne mold samplers were to be used because there is no need for cultivation. In the present study, the availability of bioaerosol measurement for IPM zoning in a museum facility was tested.

The results of measurement using a bioaerosol measuring device (Microbe Sensor BM-300C, Sharp Manufacturing Systems) at the truck yard and unpacking space in Mie Prefectural Museum as well as outside showed that biofluorescence detected at each area shifted in parallel with each other and had strong correlation coefficients. The truck yard and unpacking space could be classified as the same zone which is affected by outside air containing a huge number of viable airborne mold in summer.

When measured at the entrance, public space and temporary exhibition room, which are next to each other and are partitioned with automatic doors, it was found that during the hours when the museum is closed, biofluorescence detected at the entrance and public space had strong correlation coefficient, while that in the temporary exhibition room had no relationship. From the result, the temporary exhibition room could be classified as an isolated zone. On the other hand, during open hours, correlation coefficients between each area became almost comparable because visitors mix the air among these areas.

In conclusion it may be said that since bioaerosol measurement can classify areas in museum facility and evaluate environment change in a period of a day, microbial air measuring method can be applied for IPM zoning in museums immediately and with more ease than airborne mold measurement.

*Tokyo National Research Institute for Cultural Properties, Mie Prefectural Museum