

# 文化財のカビ汚染防止策としてのアルコールと放射線利用のためのモデル実験研究

土戸哲明<sup>\*,\*\*,\*</sup> 坂元 仁<sup>\*\*</sup> 古田雅一<sup>\*,\*\*,\*</sup> 高鳥浩介<sup>\*,\*\*,\*</sup>

## Experimental Studies in Model Systems for the Protection of Cultural Properties from Mold Contamination by Uses of Alkanols and Irradiation

Tetsuaki TSUCHIDO<sup>\*,\*\*,\*</sup> Jin SAKAMOTO<sup>\*\*</sup>  
Masakazu FURUTA<sup>\*,\*\*,\*</sup> Kosuke TAKATORI<sup>\*,\*\*,\*</sup>

### 1 研究の背景と経緯

カビと人間との係わりは人類発祥の時代から続いており、現代にあっては有用なカビは麹を用いた醸造食品やペニシリンに代表される医薬品製造などで人類の生活や活動に寄与する一方で、有害なものは家庭や食品、住環境などで被害をもたらす、あるものはヒトに疾病をもたらす [高鳥・久米田 (編) 2013]。カビなど微生物汚染の問題は文化財においても深刻であり、数多くの報告 [新井2008; Toishi *et al.* 1993; Nugari *et al.* 1999; Ciferri 1999; Warscheid and Braams 2000; Jurado *et al.* 2008; Mitchell and McNamara 2010; Sterflinger 2010他] にみられるように、その歴史的価値を著しく損なわれることが保存科学や文化遺産の分野だけでなく広く社会的な問題ともなっている。古代壁画を例にとっても、我が国では奈良県の高松塚古墳壁画のカビ汚染が広く知られている [Ishizaki and Kigawa 2009; Kiyuna *et al.* 2008; Kiyuna *et al.* 2011] が、諸外国でも、エジプトの王家の谷にあるツタンカーメン王墓の壁画のカビ汚染が話題 [Wong 2013] となった。

著者らは、文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業の関西大学文化財保存修復 (ICP) 研究拠

点 (2008~2012年度) およびその継承の同大学国際文化財・文化研究センターにおける研究 (CHC) プロジェクト (2013~2017年度) に参画してカビ汚染対策のための基礎研究を行ってきた。これらのプロジェクトでは広く国際的協力による文化財保存修復研究が対象となるが、基盤的な研究上のミッションは、エジプトのサッカラにある約4,600年前の王妃イドゥート地下埋葬室内にある壁画の保存・修復事業である。この壁画は一般には未公開であるが、将来構想されている一般公開によって観光客が出入りすれば必然的にカビ汚染が発生することが懸念されており、事前に有効な防止対策を確立することが要望されている。

文化財をカビや細菌による文化財の微生物汚染から守る技術の開発は、これまで低温や低湿度の維持、薬剤の使用などがとられてきている [高鳥 2007; 川上・杉山 2009] が、いずれも長所・短所があり、決定的に有効とされる方法がないのが実情である。実際にはそれらの点を考慮しつつ適当と思われる方法が用いられてきている。本研究では、とくにアルコールと放射線の利用を想定したモデル実験を行い、壁画など文化財のカビ汚染防止策としての可能性について検討を行った。

\* 関西大学国際文化財・文化研究センター (Center for the Global Study of Cultural Heritage and Culture, Kansai University, Japan)

\*\* 大阪府立大学研究推進機構21世紀科学研究所微生物制御研究センター (Research Center of Microorganism Control, Research Center for the 21st Century, The Organization for Research Promotion, Osaka Prefecture University, Japan)

\*\*\* 大阪府立大学大学院工学研究科量子放射線系専攻 (Department of Quantum Radiation Engineering, Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University, Japan)

\*\*\*\* NPO 法人カビ相談センター (Center for Fungal Consultation, Japan)

エチルアルコール（エタノール、以下 EtOH）は古くから殺菌消毒に用いられ、細菌胞子に対しての効果は期待できないが、カビ・酵母や細菌の栄養細胞には殺菌作用を示す [Ali *et al.* 2001]。EtOH の抗カビ性については古くから知られており、食品や医療、諸環境での有効性が認められている [Ali *et al.* 2001; Dao and Dantigny 2011; Ingram and Buttke 1984; 山下 2008; Seiler and Russll 1991]。ただその一方で、一部のカビはこれを資化する能力をもつものがあり [内藤 2001; 木川他 2009]、高松塚などから分離されたカビにもエタノールの資化性が認められている [木川他 2009]。EtOH 以外のアルカノールについての抗カビ性は知られている [Gershon and Shanks 1980; Fujita *et al.* 2008] が、資化能についての詳細な報告例は見当たらない。

一方、放射線の殺菌作用も古くから知られ、ガンマ線、X 線、電子線、紫外線などが候補に挙げられる。ガンマ線については、高線量では対象文化財の材質変化や照射施設などの問題があるが、低線量では適用可能である。その文化財への照射効果については、これまでに水系 [Abdel-Halim *et al.* 2013]、紙類 [Gonzalez *et al.* 2002; Magaouda 2004; de Silva *et al.* 2006; Choi *et al.* 2012; Moise *et al.* 2012]、絵画 [Manea *et al.* 2012; Rizzo *et al.* 2002]、石造物 [Cennamo *et al.* 2013] などでカビに対する抑制効果が報告されている。国際原子力機関 (IAEA) から文化財への放射線利用の出版物 [Int. Atomic Energy Agency 2017] が出されており、そのカビ撲滅の目的では最大線量 10kGy までの照射を推奨している。

本稿は、関西大学国際文化・文化財研究センターの研究事業の最終成果報告として、この 5 年間に行った古代壁画など文化財のカビによる汚染防止と制御のためのアルカノールと放射線利用のモデル実験の成果をまとめたものである。その内容の記述にあたっては、本プロジェクトの成果 [廣池他 2013; 廣池他 2015; 原田他 2016; 原田他 2017] が全体の研究の経緯と背景の中で流れが理解しやすいよう、先行プロジェクト研究の成果 [岡本他 2009; 涌田他 2010; 岡本他 2011; 廣池他 2012] の関連部分を含めて概説する。

## 2 寒天平板系でのアルカノールによるカビの抑制<sup>1)</sup>

初期の研究において、エジプト現地での文化財や文化遺産から試料を採取し、生息しているカビを分離・同定するとともにその分布状況を調査した結果、好乾性カビである *Aspergillus restrictus* が最も多く、次いで *Aspergillus* (旧名 *Eurotium*) *amstelodami* が見出された。以後、これら分離株と同属同種のカビを独立行政法人製品評価技術基盤機構・バイオテクノロジーセンターから入手 (NBRC 番号はそれぞれ、7101 と 4028) して用い、培養用培地は M40Y とした。またこれら好乾性カビの対照となる耐乾性カビとして、*Aspergillus brasiliensis* (以前は *niger* に含まれていた) NBRC6341 と *Penicillium funiculosum* NBRC6345 も用い、これらは PDA (Potato Dextrose Agar) 平板上で培養した。

またカビの薬剤制御法として *n*-アルカノールを選

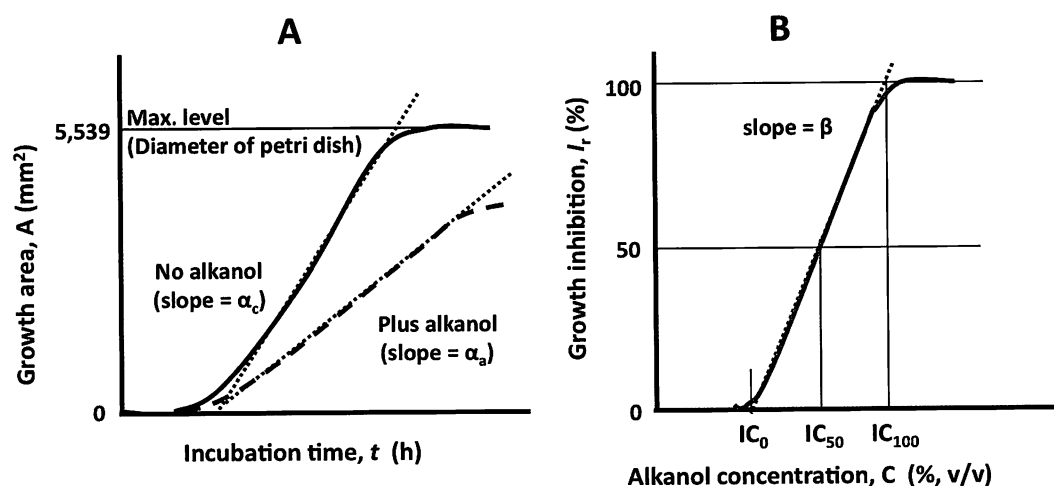


Fig. 1 A schematic growth curve of a fungus in the presence (solid line) and absence (broken line) of alkanol (A) and the dependency of its growth inhibition on the concentration of alkanol (B). From the linear portion of the curve in each figure the slope was calculated.

1) 岡本他 2009; 涌田他 2010; 岡本他 2011; 廣池他 2012; 廣池他 2013; 廣池他 2015

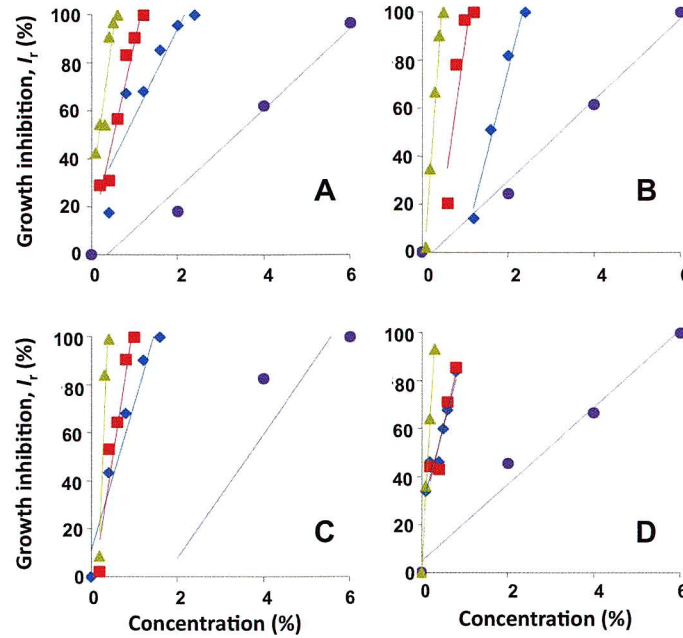


Fig. 2 Relationship between the percentage of growth inhibition and the concentrations of EtOH (●), *n*-PrOH (◆), *n*-BuOH (■) and *n*-PeOH (▲). A, *A. niger*; B, *P. funiculosum*; C, *A. restrictus*; D, *E. amstelodami*.

Table 1 The  $\beta$  values of growth inhibition of fungi by *n*-alkanols in the agar gel phase

Alkanol	<i>A. niger</i>	<i>P. funiculosum</i>	<i>A. restrictus</i>	<i>A. amstelodami</i>
EtOH	16.7*	16.9	25.9	16.1
<i>n</i> -PrOH	36.7	72.3	61.7	68.1
<i>n</i> -BuOH	80.0	129	117	76.6
<i>n</i> -PeOH	129	251	453	308

Each data was the average of results obtained with three plates.\* %/%%.

Table 2 Concentration indices of growth inhibition for fungi by *n*-alkanols in the agar gel phase

A) IC0 value (%)

Alkanol	<i>A. niger</i>	<i>P. funiculosum</i>	<i>A. restrictus</i>	<i>E. amstelodami</i>
EtOH	1.00	0.728	1.70	-1.20
<i>n</i> -PrOH	-0.571	0.947	-0.177	-0.388
<i>n</i> -BuOH	-0.114	0.328	0.0683	-0.303
<i>n</i> -PeOH	-0.215	0.0663	0.159	-0.00712

B) IC50 value (%)

Alkanol	<i>A. niger</i>	<i>P. funiculosum</i>	<i>A. restrictus</i>	<i>E. amstelodami</i>
EtOH	3.55	3.37	3.63	2.48
<i>n</i> -PrOH	0.791	1.64	0.632	0.345
<i>n</i> -BuOH	0.511	0.716	0.497	0.354
<i>n</i> -PeOH	0.172	0.265	0.269	0.155

C) IC100 value (%)

Alkanol	<i>A. niger</i>	<i>P. funiculosum</i>	<i>A. restrictus</i>	<i>E. amstelodami</i>
EtOH	6.10	6.01	5.56	6.15
<i>n</i> -PrOH	2.15	2.33	1.44	1.08
<i>n</i> -BuOH	1.14	1.10	0.925	1.01
<i>n</i> -PeOH	0.559	0.464	0.380	0.318

Each data was the average of results obtained with three plates.

択し、EtOHのほか市販の*n*-プロパノール (PrOH)、*n*-ブタノール (BuOH)、*n*-ペンタノール (PeOH) を用いた (先行プロジェクトではメタノール、MeOH、も用いた)。それらの寒天平板上での発育阻害特性の解析手法について予備的に検討した結果、平板上で形成されるカビコロニーの面積が培養時間とともに Fig. 1 A のような曲線で示され、その直線部分から無添加の場合を対照とした傾き  $\alpha$  (それぞれ  $\alpha_a$ 、 $\alpha_c$  とする,  $\text{mm}^2/\text{day}$ ) をもとに、次式から発育速度の阻害率  $I_r$  (%) を求めた。

$$I_r = [(\alpha_c - \alpha_a) / \alpha_c] \times 100 \quad (1)$$

さらに、アルカノールの各濃度で  $I_r$  を求め、濃度に対してプロットするとほぼ直線関係が得られたことから、その直線の勾配を  $\beta$  (単位は、阻害率% / 濃度%) と定義してこれを求めた。この値は阻害の薬剤濃度依存性の指標として捉え、薬剤濃度の変化に対する阻害の強度変化の程度を表わす。またこのプロットをもとに、IC0 (阻害効果が出始める濃度)、IC50 (50%阻害濃度)、IC100 (100%阻害の最小濃度) を定義し、それらも抗菌作用の濃度依存性の指標とした (Fig. 1 B)。

これら 4 株のカビ胞子の 25°C での発育に対する各種アルカノールの影響を検討し、そのコロニー面積増加速度に低下データから上記のアルカノール濃度に対する  $I_r$  のプロットを Fig. 2 に示す。さらに、得られた各近似直線によって  $\beta$  を計算するとともに、IC0、IC50、IC100の値を求め、それぞれ、Table 1 と 2 に示した。

その結果、*A. brasiliensis* と *P. funiculosum* の間では発育速度が異なり、前者の方が速いが、アルカノール感受性にはあまり差はなく、ここでは割愛するが別途検討した 30°C の結果と比較すると阻害率が低温側で低い傾向にあった。調べた 4 種のカビの間では、耐乾性と好乾性の相違よりも菌種間で異なっていた。IC0、IC50、IC100の各値については、アルカノールの炭素鎖長が長くなるほど、すなわち薬剤分子の疎水性が増すほど低濃度側に移行し、これ

らについても耐乾性と好乾性の相違よりも菌種間での差が大で、*A. amstelodami* における値が低い傾向にあった。これらの結果から、調べた中では *n*-PeOH の抑制作用が最大であった。

同様の手法で *n*-PeOH の異性体で沸点、密度、分配係数 (*n*-オクタノール/水) の異なる、2-PrOH、2-BuOH、*t*-BuOH、2-PeOH、3-PeOH、*t*-アミルアルコール (*t*-AmOH) についても検討したところ、全体的に異性体は直鎖のものより抗カビ性が劣る傾向がみられ、調べたすべてのアルカノールの中ではやはり *n*-PeOH が最強であった。

カビによる *n*-アルカノールの資化試験も行い、データは割愛するが、やはり低濃度での分解が少ない *n*-PeOH の優位性が指摘できた。

### 3 彩色石片系でのアルカノールによるカビの抑制<sup>2)</sup>

壁画のモデル材料として彩色石片を作製し、その上でのカビの発育に対するアルカノールの抑制試験を行った。エジプト産石灰石を割断・整形した 4.5 × 4.5 × 2.0 cm の石片を基材とした。彩色石片は、石灰石のみとそれにプラスター (石膏) を塗布したもの (白色)、彩色として酸化鉄系の赤色、褐色、黄色および黒色 (炭素) の顔料をそれぞれ 1 枚ずつ全面に塗布したものを使用した (Fig. 3)。接着剤はアラビアゴムを使用した (なお、先行の ICP プロジェクトで作製した彩色石片は、基材サイズを 9.5 × 9.5 × 2.0 cm とし、上記の色以外に銅酸化物系の青色と緑色の顔料も使用した。また接着剤として膠も使っており、各顔料は 1 枚の石片上に帯状に塗布している)。

上記のように作製した彩色石片 1 枚について中央から 4 隅方向の間に円形ろ紙をそれぞれ 4 枚置き、透明のスチロールケースに入れた。内部の相対湿度は塩化カリウムの飽和溶液で 84.3% (実測値は 88%) に調節した。寒天平板の実験と同様に M40Y 液体培

Table 3 Effect of *n*-PeOH vapor on the fungal growth on the painted stone chips

<i>n</i> -PeOH* ( $\mu$ l)	Color					
	Red	Brown	Yellow	Black	White	Lime
0	+	+	+	+	+	-
30	+	+	+	+	+	-
60	+	-	-	+	-	-
90	-	-	-	-	-	-

\**n*-PeOH was added as liquid before the treatment. +, Growth; -, no growth.

2) 浦田他 2010; 廣池他 2012; 廣池他 2013

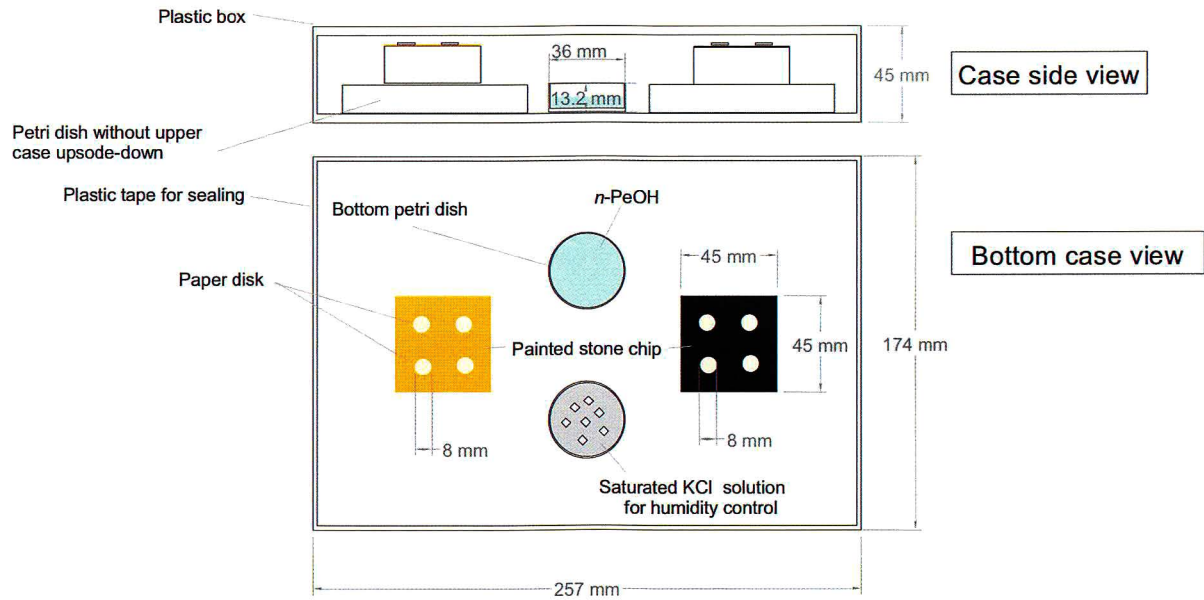


Fig. 3 Schematic diagram of setting of the treatment of painted stone chips with *n*-pentanol in the sealed plastic box.

の実験結果は、Table 3 に示すように、60  $\mu$  L では赤色と黒色で発育が生じたものの、褐色、黄色、石膏のみ、石灰石のみの試料では発育しなかった。90  $\mu$  L ではすべての色で発育が抑制された。この場合は全量揮発に数日を要し、この間にカビは発芽して成長する可能性があるが、今回検討した湿度条件（88%）ではカビの発育が遅く、3週間目でもろ紙外に菌糸成長がみられなかったことから、十分 *n*-PeOH の蒸気は定常の濃度に達した後に発育阻害作用をもたらしたものと推察される。また、カビによる *n*-PeOH 資化も、その間に有効濃度に達するので防止できるとみられる。先行プロジェクトで検討した青色や緑色

顔料はここでは未検討であるが、既報結果からアルコールの阻害作用が強くなる可能性を期待できよう。石灰石だけの抑制は水酸化カルシウムの溶出による pH の上昇によるためと推察される。

得られた結果から、文化財としての壁画へのアルコールの適用法の1つとして、*n*-PeOH の揮発蒸気によってカビ汚染防止を図る方法が考えられる。ただし、実用においては揮発蒸気の有効濃度維持や壁画の見学者からの遮断の必要性、アルコール臭気、素材への化学的影響など技術上の課題が想定される。

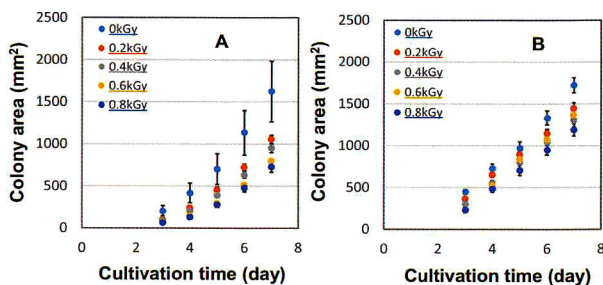


Fig. 4 Time courses of fungal growth at 25°C from spores during the subculture after irradiation at doses of 0.2, 0.4, 0.6 and 0.8 kGy. A, *A. restrictus*; B, *A. brasiliensis*.

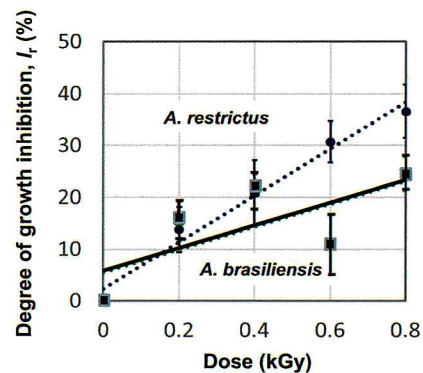


Fig. 5 The relationship between the degree of the inhibition of fungal growth from spores and the dose at the irradiation. Symbols: square, *A. brasiliensis*; circle, *A. restrictus*.

Table 4 Color change of pigments and materials after gamma irradiation at a dose of 8 kGy

Color or material	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$\Delta E$
Yellow	69.42 / 70.54	6.84 / 7.27	49.93 / 51.40	1.90
Red	37.13 / 39.22	28.34 / 30.91	20.76 / 24.89	5.30
Blue	48.53 / 47.91	4.59 / 4.66	-34.09 / -34.45	0.72
Green	65.03 / 66.18	-18.65 / -18.26	6.30 / 5.70	1.35
Plaster	94.72 / 94.52	-0.39 / -0.24	0.69 / 0.66	0.25
Lime	93.25 / 93.00	-0.34 / -0.19	0.62 / 0.58	0.29

Values are the averages of data obtained with three samples in the measurement. Numbers in each column for  $L^*$ ,  $a^*$  and  $b^*$  indicate data of unirradiated / irradiated samples

#### 4 寒天平板系での放射線によるカビの抑制と顔料への照射の影響<sup>3)</sup>

著者らは次に、放射線による文化財保存を想定してのカビ汚染防止効果について調べた。本研究では、モデル系として寒天培地平板上でのガンマ線照射によるカビ発育の抑制効果を形成コロニーの面積増加の速度によって評価した。

未照射胞子の場合、*A. restrictus*では黄緑色の菌糸マットが発達し、*A. brasiliensis*では黒色の胞子を含む菌糸塊が観察された。ガンマ線照射後、7日培養においては、両株とも比較的低線量の1 kGyでも全くカビ胞子の発育がみられなかった。一方、0～0.8kGyの吸収線量の範囲では、線量の増加に伴ってコロニー面積の増加速度が低下する傾向が認められた (Fig. 4)。対照の未処理胞子では両株ともほぼ2日間の発育誘導期の後、直線的に発育した。ガンマ線照射では意外なことに、別研究で報告 [原田他 2015] している加熱処理で観察されるような発育遅延作用は見られず、発育誘導期以降の発育速度を低下させる作用をもつことが判明した。また、照射後の直線的発育期における発育速度を計算し、対照のそれに対する阻害率で表すと、Fig. 5に示すような阻害曲線が得られた。この結果から、*A. restrictus*の方が*A. brasiliensis*よりもガンマ線照射にやや感受性であることが認められた。ガンマ線照射による発育速度低下の要因は、カビ特有のDNAの放射線損傷およびその修復機構にあると推察される。

ガンマ線の文化財への実用化においても問題があり、照射施設への被照射試料の搬入、装置の安全管理や処理操作の特殊性、それに顔料や接着剤の照射による化学変化の可能性が指摘される。多くの研究報告 [Abdel-Halim *et al.* 2013; Moise *et al.* 2012; Manea *et al.* 2012; Manea *et al.* 2012; Negut *et al.* 2012] によれば、顔料自体や絵画、紙類を対象とし

た適度な線量照射では色や接着剤にほとんど影響を与えないと述べられている。ルーマニアの研究グループ [Manea *et al.* 2012; Negut *et al.* 2012] は、テンペラ絵画の実験モデル系におけるガンマ線11kGyの照射による構造変化をFTIR (フーリエ変換赤外分光) とラマン分光により分析し、高線量率では卵黄タンパク質酸化と脂質分解産物の増加を示すスペクトル変化がみられたが、低線量率では軽微な変化であったとしている。また彼らは、反射分光法と電子スピン共鳴法による分析結果から26kGyの線量では22種類の歴史的顔料のうち大理石粉を除いて色調に変化なく、あるいは少しの変化でも可逆的であることを報告している。

本研究でも顔料のガンマ線照射による色度変化について検討した。使用顔料は、黄色、赤色、青色、緑色の4色と石膏および石灰であり、適用した吸収線量は8 kGyである。測定項目は、 $L^*$  (明度)、 $a^*$  と  $b^*$  (色度座標値) および  $\Delta E$  (色差) である。その結果、Table 4に示すように、全体的に色の変化はほとんどないといえるが、赤色顔料については、有意の変化が認められた。この結果は、顔料の一部には比較的高い線量では照射の影響が起こりうることを示しており、実用上留意すべき点である。

さらに、他の放射線として紫外線照射では照射装置が簡単で容易に移動できるが、ガンマ線の場合には移動可能な文化財には適用できても壁画のような固定物への照射は不可能である。近年、技術的、装置的な進歩が認められている低エネルギー電子線やX線など他の放射線の適用性についても検討が期待される。

#### 5 結語

壁画など文化財のカビ汚染防止対策のモデル基礎研究として、本研究では寒天培地平板系および彩色

3) 原田他 2016; 原田他 2017



石片系を使用し、アルコールとガンマ線による発育防止・殺カビの検討を行った。それぞれの実験系と処理法の効果は、薬剤の種類・濃度、吸収線量、カビの種類などの因子によって影響を受けることが判明した。適用にあたっては、これらのカビ防止効果の特徴の理解とともに、文化財の材質への影響についても十分な配慮が必要である。

## 謝辞

本研究における実験に協力いただいた、関西大学大学院理工学研究科学生の廣池晋治、大阪府立大学大学院工学研究科学生の原田真美の両氏に謝意を表す。また関連して本研究の先行プロジェクトにおいて協力いただいた、関西大学工学研究科学生の岡本光由、同学生の浦田恭兵の両氏にもこの機会を借りてお礼を申し上げる。さらに、彩色石片の作製およびその手法を指導いただいた、エジプトカイロ大学考古学部のアフメド・シュエイブ教授、エジプト国立研究所のアーデル・アカリシュ教授、研究プロジェクトの推進の過程で本研究の進展にご支援、ご鞭撻いただいた関西大学文学部吹田浩教授、関西大学国際文化財・文化研究センター非常勤研究員の吹田真里子氏に深く感謝申し上げます。またカビ汚染の情報を提供いただいたNPO法人かび相談センターの久米田裕子氏、照射顔料の色変化を計測いただいた三栄源エフ・エフ・アイ株式会社の皆様に厚くお礼を申し上げます。

## 参考文献

Abdel-Haliem, M. E. F., M. F. Ali, M. F. Ghaly and A. A. Sakr 2013. "Efficiency of Antibiotics and Gamma Irradiation in Eliminating *Streptomyces* Strains Isolated from Paintings of Ancient Egyptian Tombs," *J. Cult. Herit.* 14, 45-50.

Ali, Y., M. J. Dolan, E. Fendler and E. L. Larson 2001. Alcohols. In *Disinfection, Sterilization, and Preservation*, 5<sup>th</sup> ed. (Block, S. S., ed.), pp. 229-254, Lippincott Williams and Wilkins.

Cennamo, P., P. Caputo, A. Giorgio, A. Moretti, and N. Pasquino 2013 "Biofilms on Tuff Stones at Historical Sites. Identification and Removal by Nonthermal Effects of Radiofrequencies," *Microb. Ecol.* 66, 659-668.

Choi, J. -il, Chung, Y. J., Kang, D. I., Lee, K. S. and J. W. Lee 2012. "Effect of Radiation on Disinfection and Mechanical Properties of Korean Traditional Paper," *Hanji. Rad. Phys. Chem.* 81, 1051-1054.

Ciferri, O. 1999. "Microbial Degradation of Paintings," *Appl. Environ. Microbiol.* 65, 879-885.

Dao, T. and P. Dantigny "Control of Food Spoilage Fungi by Ethanol," *Food Control* 22, 360-368.

de Silva, M., A. M. L. Moraes, M. M. Nishikawa, M. J. A. Gatti and M. A. V. de Alencar 2006. "Inactivation of Fungi from Deteriorated Paper Materials by Radiation," *Int. Biodeter. Biodegrad.* 57, 163-167.

Fujita, K., T. Fujita and I. Kubo 2008. "Antifungal Activity of Alkanols Against *Zygosaccharomyces Bailii* and their Effects on Fungal Plasma Membrane," *Phytother. Res.* 32, 1349-1355.

Gershon, H. and L. Shanks 1980. "Antifungal Properties of n-alkanols,  $\alpha$ ,  $\omega$ -n-alkanediols, and  $\omega$ -chloro- $\alpha$ -alkanols," *J. Pharm. Sci.* 69, 381-384.

Gonzalez, M. E., A. M. Calvo and E. Kairiyama 2002. "Gamma Radiation for Preservation of Biologically Damaged Paper," *Rad. Phys. Chem.* 63, 263-265.

Ingram, L. O. and T. M. Buttke 1984. "Effects of Alcohols on Microorganisms," *Adv. Microb. Physiol.* 25, 253-300.

Int. Atomic Energy Agency 2017. *Uses of Ionizing Radiation for Tangible Cultural Heritage Conservation*. IAEA.

Ishizaki, T. and R. Kigawa 2009. "Conservation of Mural Paintings of Takamatsuzuka and Kitora Tumuli in Japan." *Proc. Symp. Lascaux*. February 26-27, 2009.

Jurado, V., S. Sanchez-Moral, and C. Saiz-Jimenez 2008. "Entomogenous Fungi and the Conservation of the Cultural Heritage: a Review," *Int. Biodeterior. Biodegrad.* 62, 325-330.

Kiyuna, T., K.-D. An, R. Kigawa, C. Sano, S. Miura, and J. Sugiyama 2008. "Mycobiota of the Takamatsuzuka and Kitora Tumuli in Japan, Focusing on the Molecular Phylogenetic Diversity of *Fusarium* and *Trichoderma*," *Mycoscience* 49, 298-311.

Kiyuna, T., K.-D. An, R. Kigawa, C. Sano, S. Miura, and J. Sugiyama 2011. "Molecular Assessment of Fungi in "Black Spots" that Deface Murals in the Takamatsuzuka and Kitora Tumuli in Japan: *Acremonium* Sect. *Gliomastix* Including *Acremonium Tumulicola* sp. Nov. and *Acremonium Felinum* Comb. Nov.," *Mycoscience*

- 52, 1-17.
- Magaudda, G. 2004. "The Recovery of Biodeteriorated Books and Archive Documents through Gamma Radiation. Some Considerations on the Results Achieved," *J. Cult. Herit.* 5, 113-118.
- Manea, M. M., I. V. Moise, M. Virgolici, C. D. Negut, O.-H. Barbu, M. Cutrubinis, V. Fugaru, I. R. Stanculescu and C. C. Ponta 2012. "Spectroscopic Evaluation of Painted Layer Structural Changes Induced by Gamma Radiation in Experimental Models," *Rad. Phys. Chem.* 81, 160-167.
- Manea, M. M., C. D. Negut, I. R. Stanculescu and C. C. Ponta 2012. "Irradiation Effects on Canvas Oil Painting. Spectroscopic Observations," *Rad. Phys. Chem.* 81, 1595-1599.
- Mitchell, R. and C. J. McNamara (eds.) 2010. *Cultural Heritage Microbiology. Fundamental Studies in Conservation Science*. ASM Press., Washington, D. C..
- Moise, I. V., M. Virgolici, C. D. Negut, M. Manea, M. Alexandru, L. Trandafir, F. L. Zorila, C. M. Talasman, D. Manea, S. Nisipeanu, M. Haiducu and Z. Balan 2012. "Establishing the irradiation dose for paper decontamination," *Rad. Phys. Chem.* 81, 1045-1050.
- Negut, C. D., V. Bercu and O. G. Dului 2012. "Defects Induced by Gamma Irradiation in Historical Pigments," *J. Cult. Herit.* 13, 397-403.
- Nugari, M. P., M. Realini, and A. Roccardi 1993. "Contamination of Mural Paintings by Indoor Airborne Fungal Spores," *Aerobiologia* 9, 131-139.
- Rizzo, M. M., L. D. B. Machado, S. J. Borrelly, M. H. O. Sampa, P. R. Rela, J. P. S. Farah and R. I. Schumacher 2002. "Effect of gamma rays on a restored painting from the XVIIth century," *Rad. Phys. Chem.* 63, 259-262.
- Seiler, D. and N. J. Russell 1991. "Ethanol as a Food Preservative" in Russell, N. J. and Gould, G. W. (eds.) *Food Preservatives*, Blackie and Sons, Ltd, pp. 153-171
- Sterflinger, K. 2010. "Fungi. Their Role in Deterioration and of Cultural Heritage," *Fungal Biol. Rev.* 24, 47-55.
- Toishi, K., H. Arai, T. Kenjyo, and K. Yamano(eds.) 1993. *Biodeterioration of Cultural Property 2* (Proc. 2<sup>nd</sup> Int. Conf., October 5-8, Yokohama, Japan, Int. Commun. Specialists, Inc., Tokyo.
- Warscheid, Th. and J. Braams 2000. "Biodeterioration of Stone. A Review.," *Int. Biodeter. Biodegrad.* 46, 343-368.
- Wong, L. (ed.) 2013. *The Conservation and Management of the Tomb of Tutankhamen (KV62). A Project Bibliography*. pp. 29-43. The Getty Conserv. Inst., Los Angeles, U.S.A..
- 新井英夫 2008「文化遺産と微生物」、『微生物の事典』（渡邊信ら編）、朝倉書店、pp. 634-641。
- 岡本光由、坂元仁、高鳥浩介、土戸哲明 2009「エジプト文化財から分離したカビの発育特性と *n*-アルカノール抵抗性」、『Semawy Menu (関西大学文化財保存修復研究拠点紀要)』1、103-110。
- 岡本光由、坂元仁、久米田裕子、高鳥浩介、土戸哲明 2011「壁画のカビ汚染防止への *n*-アルカノール適用の可能性——寒天ゲルでの抗カビ特性」、『Semawy Menu (関西大学文化財保存修復研究拠点紀要)』3、91-100。
- 川上裕司・杉山真紀子 2009『博物館・美術館の生物学 カビ・害虫対策のための IPM の実践』、雄山閣。
- 木川りか、佐野千絵、喜友名朝彦、立里臨、杉山純多 2009「高松塚古墳・キトラ古墳石室内の微生物分離株のアルコール系殺菌剤資化性試験」、『保存科学』49、231-238。
- 高鳥浩介 2007「高松塚古墳石室のカビ問題を考える」、『防菌防黴』35、655-666。
- 高鳥浩介、久米田裕子 (編) 2013『カビのはなし—ミクロな隣人のサイエンス』、朝倉書店。
- 内藤茂三 2001「オゾン」、『食品の非加熱殺菌応用ハンドブック』（一色賢司、松田敏生編）、サイエンスフォーラム、pp. 142-161。
- 原田真美、堀切茂俊、坂元仁、福永健治、土戸哲明、古田雅一 2015「カビ胞子の熱死滅評価へのマイクロプレートリーダーによる発育遅延解析法の適用性」、『日本防菌防黴学会大会要旨集』、p.229。
- 原田真美、坂元仁、古田雅一、高鳥浩介、土戸哲明 2016「文化財汚染にみられる好乾性および耐乾性カビに対するガンマ線照射の発育抑制効果の解析」、『The Journal of Center for the Global Study of Cultural Heritage and Culture (関西大学国際文化財・文化研究センター紀要)』第3巻、73-81。
- 原田真美、坂元仁、古田雅一、高鳥浩介、土戸哲明 2017「液体培地と固体培地表面におけるカビ胞子の発育に対する電離放射線の抑制効果の評価」、『The Journal of Center for the Global Study of



*Cultural Heritage and Culture* ( 関西大学国際文化財・文化研究センター紀要)』第4巻、85-99。  
 廣池晋治、坂元仁、久米田裕子、高鳥浩介、Shoeib, A. S.、吹田真里子、吹田浩、土戸哲明 2012「寒天平板および彩色石片上でのカビの発育に対する  $n$ -アルコールの阻害効果」、『Semawy Menu (関西大学文化財保存修復研究拠点紀要)』4、181-193。  
 廣池晋治、坂元仁、Shoeib, A. S.、吹田真里子、吹田浩、高鳥浩介、土戸哲明 2013「気相系シャーレおよび彩色石片上での  $n$ -アルコールの抗カビ活性」『The Journal of Center for the Global Study of Cultural Heritage and Culture ( 関西大学国際文化財・文化研究センター紀要)』第1巻、135-145。  
 廣池晋治、原田真美、坂元仁、古田雅一、高鳥浩介、土戸哲明 2015「寒天ゲル相系でのアルコール異性体の抗カビ活性とその阻害作用における疎水性相互作用の役割」『The Journal of Center for the

*Global Study of Cultural Heritage and Culture* ( 関西大学国際文化財・文化研究センター紀要)』第2巻、201-214。  
 山下勝 2008「エチルアルコールによる微生物の増殖阻害と殺菌」、『防菌防黴』36、241-262。  
 涌田恭兵、岡本光由、久米田裕子、高鳥浩介、Shoeib, A. S.、Akarish, A. I.、吹田真里子、吹田浩、土戸哲明 2010「エジプト文化財汚染カビの同定と壁画モデルとしての彩色石片上でのカビの発育挙動」、『Semawy Menu (関西大学文化財保存修復研究拠点紀要)』2、91-101。

## Abstract

Microbial contamination in cultural properties has been reported worldwide as a serious problem and any effective measures for its solution have been required. In this study, using the agar medium plates and painted stone chips as model systems of cultural properties, especially mural paintings for the latter, the possibilities of application of alkanols in both model systems and gamma-ray irradiation in only the former for the decontamination of mold were evaluated. The inhibitory effects on the development from spores of saturated and branched alkanols having carbon numbers of 1 to 5 in the molecule were examined against xerophilic and xerotolerant molds. As a result,  $n$ -pentanol was found to be the most effective. The inhibitory activities of those alkanols were characterized in a solubilized form by immersion into the agar media and in a gas form on the surface of a stone chip. Gamma-ray irradiation also suppressed the development from spores of used molds at a dose of 1 kGy. The effect of the growth suppression was due to the reduction in the growth rate after the lag phase of growth. From the results obtained several possible problems in practical use of alkanol treatment and gamma-ray irradiation were discussed.

## 要旨

カビや細菌などの有害微生物による文化財の汚染は世界的に問題化しており、その有効な対策が求められている。本研究ではモデル実験系の寒天培地平板系と壁画を想定した彩色石片系を用い、アルコールではそれら両系で、放射線では前者の系でその利用の可能性を検討した。1~5の炭素数をもつ直鎖・分枝アルコールの好乾性および耐乾性のカビ胞子に対する発育抑制効果を調べた。その結果から、 $n$ -ペンタノールが最も強い抗カビ効果を示すとともに、寒天平板への混釈系と彩色石片での気相系におけるそれらの作用特性を明らかにした。寒天平板系でのガンマ線照射処理では、用いたカビ胞子の発育は1 kGyで抑制された。照射によって観察された発育阻害効果は、発育誘導期後の発育速度抑制に起因した。得られた結果をもとに、アルコール処理と放射線照射の実用上の課題を論じた。