

〔報告〕 キトラ古墳の微生物調査結果と 微生物対策について (2009)

木川 りか・佐野 千絵・喜友名 朝彦*・立里 臨*・杉山 純多*²・
高島 浩介*³・久米田 裕子*⁴・森井 順之・早川 典子・川野邊 渉

1. はじめに

キトラ古墳は、高松塚と同時代の壁画を有する古墳であり、2002年に文化庁により調査のための覆い屋が建設され、2004年に石室の発掘が行われた。その後、壁画の取り外し・保護作業が進められ、2008年には目視で確認される範囲の側壁の絵画部分、また天井の星宿図の取り外し作業が完了した。現在は、余白漆喰の取り外しが継続されている。本報告では、2009年の状況と新たな微生物対策の取り組みについて報告する。

2. 2004年から現在までの概要

2004年1月末から開始された石室内の調査、発掘、壁画の取り出し・保護作業に伴い、2004年3月以降、小前室や石室内にカビが継続的に発生している^{1~5)}。2008年までは、月数回の取り外し作業に伴って、作業のないときはおよそ週1~2回のカビ等の点検・殺菌作業が行われてきたが、相対湿度が100%に近い高湿度の石室内で2005年夏以降には、バクテリアを主体とした、ねばねばしたゲル状の物質(バイオフィルム)が壁面を覆うように発生し、それを基盤としてカビなどの菌類も繁殖しやすい状況となった^{2,3)}。また、2005年に石室内の漆喰のところどころに穴が生じ、拡大していく現象が確認された^{2,3)}。また、石室内に残っている漆喰の色も、繰り返し微生物等が発生することによって、年々着色が進み、漆喰そのものの堅牢性にも影響がでるようになった⁴⁾。また、そのような漆喰の穴などから、酢酸を産生して漆喰を溶解させるおそれのある酢酸菌が検出された⁵⁾。

2008年に目視で確認される範囲の側壁の絵画部分、また天井の星宿図の取り外し作業が完了したことを受け、2009年以降は、取り外し作業の日程の組み方や微生物対策について従来とは異なる方法が採用された。取り外しについては、従来継続的に行われていた作業を、年に2回の集中作業に変更し、また人が入らない間の微生物対策については、目にみえる絵画部分がすでないことを受け、紫外線殺菌灯を間欠的に照射する方式に切り替えられた。

3. 新たな微生物対策—紫外線照射

2008年に目視で確認される絵画部分の取り外しが完了したことを受け、新たな微生物対策への切り替えが行われた。これまでは、色材への影響を考慮し、アルコール系の殺菌剤と、止むを得ない場合は部分的にイソチアゾリン系の抗菌剤(ケーソン)が使用され、また、絵のない床部分にはホルマリン溶液を使用することもあったが、これらの有機系の殺菌剤、抗菌剤は、うすまったり、壊れたりすることによって、微生物の栄養源となる危険性もある⁶⁾。

このため、有機物を残留させない方法である、殺菌灯による紫外線(UV)の間欠的照射と、カビなどを物理的に除去する際には低濃度(1000ppm程度)の次亜塩素酸ナトリウム溶液を使用する方法が、平成21年3月9日の古墳壁画保存活用検討会(第4回)にて、ワーキンググ

* (株) テクノスルガ・ラボ

*² (株) テクノスルガ・ラボ千葉分室

*³ NPO 法人カビ相談センター

*⁴ 大阪府立公衆衛生研究所

ループから検討会へ提案され、了承された。以下がそのときの資料⁷⁾の要約である。((注)は、筆者が加筆)。

石室内壁画を生物被害から保護しつつ、早期の全面剥ぎ取りを実現する方策として、新たな微生物対策の方法と期間集中的な剥ぎ取り方法を併用していくことが望ましい。

[1] キトラ古墳における新たな微生物対策について

(1) 紫外線 (UV) 照射による生物制御

人が頻繁に出入りすることによる石室内環境の変化が指摘されていながら、これまで絵のある部分を保護するために止むを得ず繰り返してきた石室内の定期点検に代えて、他の文化財における使用例とその実効性に鑑み、紫外線 (UV) 照射による生物制御を行う。

(2) 次亜塩素酸ナトリウム溶液による殺菌

主な殺菌用の薬剤として、カビの栄養源となる可能性などが指摘されていながらこれまで止むを得ず使用してきたエタノールに代えて、高松塚古墳壁画 ((注) 解体後の修復過程) における ((注) 余白部での) 使用実績と高い殺菌効果に鑑み、((注) 低濃度の) 次亜塩素酸ナトリウム溶液による殺菌を行う。

[2] キトラ古墳壁画の集中的な剥ぎ取りの実施について

(1) 生物被害が大きい高温の時期には点検も含めて人の出入りを避け、石室内環境が比較的落ち着いている期間、連続的に剥ぎ取りを行うことにより、早期の壁画全面 (床面を除く) 剥ぎ取りが可能となる。

(2) 連続する剥ぎ取り作業の期間は1ヶ月程度とし、年間2回程度設ける。
集中的な剥ぎ取り後は、1時間程度、紫外線照射による生物制御を行う。

[3] 石室内点検方法の変更について

(1) 石室の蓋に新たに透明窓を設け、石室内に人が出入りしない状況で窓越しに石室内の様子を観察するに留める。

(2) 石室内に異常が確認された場合は、現場の判断による随時必要な措置を行う。

*上記の点検方法の変更により、石室内に人が入らない期間を確保することができる。

この際、表1に示すキトラ古墳の主要な微生物分離株に対する紫外線照射による殺菌評価結果 (表2) が平成21年3月9日の古墳壁画保存活用検討会保存技術ワーキンググループ (第3回) の参考資料として提示され⁸⁾、当面の照射時間はそれをもとに決定された。

また、同ワーキンググループにおける審議の際には、石室内に殺菌灯を設置した場合の石室内温湿度への影響の検討結果⁹⁾、さまざまな種類の代表的なカビに対する次亜塩素酸の殺カビ効果についての資料¹⁰⁾、殺菌灯を用いた紫外線照射による漆喰の影響について¹¹⁾ などがあわせて提出された。なお、紫外線照射による生物制御の実際の例としては、白杵の磨崖仏の例などがある¹²⁾。

2009年の間欠的紫外線照射は、三脚に紫外線殺菌灯 (GL-10) を装着したもの (写真1) をさまざまな角度に調整して石室内に6本設置し、タイマーによって、1日に30分の照射を2回行う形で実施された。

次亜塩素酸0.1% (1000ppm) の場合のさまざまな生活環境 (住環境) 由来のカビに対する殺カビ効果についてのデータを参考文献¹⁰⁾ より引用する (表3)。胞子を保護するような子囊殻のような構造をもっているようなカビは次亜塩素酸への耐性が強いが、通常のカビは、およそ2分で殺カビ効果が認められている (表3)。

表1 UV照射殺菌評価試験 供試菌株リスト

種名	菌株番号 ^{*1}	分離源
カビ <i>Penicillium paneum</i> ^{**2} <i>Fusarium</i> sp. (FSSC クレード) ^{**3, **4} <i>Trichoderma</i> sp. 1-b <i>Acremonium</i> (sect. <i>Gliomastix</i>) sp. 2	K5916-7-1 K5225-19-3 K5916-7-3 K7511-1	キトラ古墳 石室内 北壁 玄武下 キトラ古墳 石室内 西 漆喰剥落片 キトラ古墳 石室内 北壁 玄武下 キトラ古墳 石室内 北壁 東側 上方 黒ススカビ
酵母 <i>Candida</i> sp. (新種) <i>Pichia guilliermondii</i>	K5916-7-4 K7724-2-2	キトラ古墳 石室内 北壁 玄武下 キトラ古墳 石室内 天井 赤い着色ゲル
細菌 <i>Gluconacetobacter</i> sp. 1 (新種) <i>Stenotrophomonas</i> sp. (<i>S. rhizophila</i> に近縁) <i>Bacillus simplex</i>	K5929-2-1b K5916-3-1b K6203-10-3b	キトラ古墳 石室内 西寄り天井 漆喰にあいた穴③ No. 4 中身の黒色 キトラ古墳 石室内 南壁 朱雀上のカビ キトラ古墳 石室内南壁 下方 ゲル上の塊多数 (高松塚のものに酷似)

※1 K: キトラ古墳分離株, ※2 An *et al.* (2009),

※3 *Fusarium* sp. (FSSC クレード): *Fusarium solani* species complex クレードに含まれる *Fusarium* sp.,

※4 Kiyuna *et al.* (2008)

表2 キトラ古墳石室内から分離された微生物に対する UV照射殺菌評価

菌種名	菌株番号*	UV 強度 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	処理前**	UV 照射時間**					
				30秒	45秒	1分	1分30秒	2分	3分
<i>Gluconacetobacter</i> sp. 1 (新種)	K5929-2-1b	11.2 -12.7	10^5	<10	<10	<10	<10	<10	<10
<i>Stenotrophomonas</i> sp.	K5916-3-1b	11.2 -12.7	10^5	10^3	10^2	<10	<10	<10	<10
<i>Bacillus</i> sp.	K6203-10-3b	11.2 -12.7	10^5	10^3	10^1	10^1	<10	<10	<10

菌種名	菌株番号*	UV 強度 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	処理前**	UV 照射時間**				
				30秒	1分	2分	3分	5分
<i>Candida</i> sp. (新種)	K5916-7-4	11.5 -13.4	10^5	10^4	10^3	10^2	<10	<10
<i>Pichia guilliermondii</i>	K7724-2-2	11.5 -13.4	10^5	10^4	10^3	10^2	<10	<10

菌種名	菌株番号*	UV 強度 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	処理前**	UV 照射時間**					
				5分	10分	20分	30分	40分	60分
<i>Penicillium paneum</i>	K5916-7-1	10.2 -13.4	10^5	10^4	10^2	10^1	<10	<10	<10
<i>Fusarium solani</i>	K5225-19-3	10.2 -13.4	10^5	10^4	10^2	<10	<10	<10	<10
<i>Trichoderma</i> sp.	K5916-7-3	10.4 -14.6	10^5	10^4	10^1	10^1	<10	<10	<10
<i>Acremonium</i> sect. <i>Gliomastix</i> sp.	K7511-1	11.3 -13.5	10^5	10^3	10^2	10^2	10^1	10^1	<10

※処理前: 初発菌数 ※※ UV照射時間後: 生残菌数を示す

*供試菌株は(株)テクノスルガ・ラボで分離・同定した。

表3 生活環境（住環境）由来のカビの次亜塩素酸ナトリウム（NaClO）0.1%（有効酸素 約70ppm）による殺カビ効果

供試カビ および 菌株番号		15°	30°	45°	60°	90°	120°	180°	240°	300°
絶対好湿性	<i>Trichoderma</i> OUT042	+++	+++	+++	+++	+++	++	-	-	-
	<i>Rhizopus stolonifer</i> OUT058	+++	+++	+++	+++	-	-	-	-	-
	<i>Rhodotorula</i> sp. OUT078	+++	++	-	-	-	-	-	-	-
好湿性	<i>Cladosporium sphaerospermum</i> OUT031	+++	+	+	+/-	-	-	-	-	-
	<i>Fusarium graminearum</i> OUT121	+++	++	++	-	-	-	-	-	-
	<i>Chaetomium globosum</i> OUT101	+++	+++	+++	+++	+++	++	++	++	++
耐乾性	<i>Aspergillus niger</i> OUT047	+++	+++	+++	+++	+++	+++	-	-	-
	<i>Paecilomyces lilacinus</i> OUT080	++	++	++	++	-	-	-	-	-
	<i>Aspergillus ochraceus</i> OUT143	+++	+++	+++	+++	++	-	-	-	-
	<i>Aspergillus versicolor</i> OUT082	+++	+++	+++	+++	+++	++	-	-	-
好顕性	<i>Aspergillus restrictus</i> OUT033	+++	+++	+++	-	-	-	-	-	-
	<i>Eurotium repens</i> OUT040	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
	<i>Wallemia sebi</i> OUT066	+++	-	-	-	-	-	-	-	-

孢子産生著しい… +++ 孢子産生… ++ 菌糸発育… + わずかに菌糸発育… ± 発育なし… -

4. 石室内の状況および微生物調査結果

2009年3月以降、石室内の微生物制御法を紫外線照射、および必要な場合に低濃度の次亜塩素酸ナトリウム溶液を用いる物理的除去に切り替えてのち、石室内で白いカビの菌糸の発生はほとんどみられなくなった。ただし、2009年5月11日～6月5日（4週間）および、2009年10月19日～12月4日（6週間、1週間の中断を含む）の集中的剥ぎ取り作業中における点検では、“黒粒カビ”，いわゆる小型菌核をつくる黒色のアナモルフ菌類（担子菌類の系統）*Burgoa* 属のカビが目視で確認されており、このカビは菌核を作る構造的特徴の点でも黒色の色素を有する点でも、紫外線に強い菌種と考えられた。しかし、全体的にみれば、カビなどの発生は、石室が高温になる時期においてもかなり抑制されていたといえる。

2009年度の微生物調査は、2009年4月3日、7月3日、9月25日の3回にわたって実施された。2009年7月までの菌類の調査結果を表4に、細菌の調査結果を表5に示す。

分離結果は、点検の際目視で主に認識された微生物コロニーの種類よりも分離株の種多様性が高い傾向が認められた（表4、5）。この理由としては、紫外線の効果は、光があたるごく表面にのみ発揮されるので、穴や亀裂、ゲルの厚みの下などから採取した試料では、殺菌されずに残ったさまざまな菌種が生残している可能性が考えられる。

また、生物由来と考えられた一部の試料は、無機物の針状の結晶様構造や、無機物の粉状の物質である場合もあった。このような物質は、おそらくカルシウムを含むと考えられるものの、量的にも少なく、物質の同定は困難であった。



写真1 紫外線照射装置

表4 キトラ古墳石室内 (2009年2月~7月採取15試料) からの菌類 (カビ・酵母) の分離結果*

菌種名	試料採取年月日															分離株数
	2009.2.18					2009.3.15					2009.7.3					
	試料No.	1	2	3	4	試料No.	1	2	3	4	試料No.	1	2	3	4	
<i>Penicillium paneum</i>	西壁 次亜塩素酸 100ppm (黄色)	東壁 泥の上	東壁 右側の段差の ところ	東壁 南側 下石の 面の上	東壁 石の上	南壁 石の上	南壁 石の上	東壁 石の上 (中央部前側)	東壁 石の上 (中央部上)	東壁 石の上 (中央部3の下)	東壁 漆喰上 (北側上部)	北壁 漆喰の黒い 穴の中心	天井壁 天井壁 (北面) 2番目	天井壁 天井壁 (北面) 2番目	西壁 漆喰上 (北側中央)	
<i>Fusarium cf. solani</i> (FSSC)																
<i>Trichoderma</i> sp.																
<i>Acremonium massei</i> (sect. <i>Gliomastix</i>)																
<i>Acremonium murorum</i> (sect. <i>Gliomastix</i>)																
<i>Burgoa</i> sp.																
<i>Acremonium cf. strictum</i>																
<i>Acremonium</i> sp. 1 (yellow)																
<i>Acremonium</i> sp. 2 (white)																
<i>Acremonium</i> sp. 3																
<i>Acremonium</i> sp. white1																
<i>Acremonium</i> sp. white2																
<i>Acremonium</i> sp. white3																
<i>Cladosporium</i> sp.																
<i>Gliomastix</i> sp. (<i>Gliocladium</i>)																
<i>Cylindrocarpum</i> sp.																
<i>Ophiostoma</i> (<i>Leptographium</i>) sp.																
<i>Paeclomyces cf. lilacinus</i>																
<i>Penicillium</i> sp. a (yellowish red)																
<i>Penicillium</i> sp. b (reddish yellow)																
<i>Penicillium</i> sp. c																
<i>Phialophora</i> sp. 1																
<i>Phialophora</i> sp. 2 濃褐色																
<i>Sporobolium</i> sp.																
Sterile mycelium spp.																
Unidentified sp. 1																
Unidentified sp. 2																
Unidentified sp. 3																
Unidentified sp. 4																
Unidentified pseudozyma - like																
Yeast sp. 1																
Yeast sp. 2 菌糸状 (表面粉末)																
Yeast sp. 3 1.5μm 状																
Yeast sp. 4 粘性																
Yeast sp.																

*: 各試料から当該菌種が分離されたことを示す
 ●: 検出菌種が分離・同定した結果である。

表5 キト古墳石室内 (2009年2月~7月採取15試料) からの細菌分離結果*

試料採取年月日 試料No.	K9403			K9515			K9703											
	1	2	3	東壁 南側 泥の上 左	東壁 泥の上 右側 差のある ところ	東壁 南側 下方 石の面の 上	天井 南側 西寄	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
西壁 (多重培養 100bpmでとる)	黄色粒			黒色ゲル	黒色ゲル	黒色ゲル	黒粒	茶色ゲル	赤粒 (ゲル)	白濁ゲル	白い粉状	黄色粒状 (塊)	赤いゲル 粒	漆喰上 (北側上部)	漆喰の黒い 穴の中心	天井壁 (北から2番 目/東側) 穴の中	天井壁 (西側/北か ら2番目)	西壁
グループ名																		
グラム陰性桿菌1 (クリーム色)	●																	
グラム陰性桿菌2 (黄色)	●																	
グラム陰性桿菌3 (半透明、粘性)	●	●																
グラム陰性桿菌4 (黄色)	●	●																
グラム陰性桿菌5 (クリーム色)					●													
グラム陰性桿菌6 (半透明)					●													
グラム陰性桿菌7 (黄色)					●													
グラム陰性桿菌8 (クリーム色)					●													
グラム陰性桿菌1 (黄色)						●												
グラム陽性桿菌2 (黄色)							●											
グラム陽性桿菌2 (黄色)								●										
グラム陰性桿菌1 (粘稠性あり)									●									
グラム陰性桿菌2 (粘稠性あり)									●									
グラム陰性桿菌3 (粘稠性あり)									●									
グラム陰性桿菌4									●									
グラム陰性桿菌5									●									
グラム陰性桿菌6 (粘稠性あり)										●								
グラム陰性桿菌7 (粘稠性あり)													●					
グラム陰性桿菌8													●					
グラム陰性桿菌9 (粘稠性あり)													●					
グラム陰性桿菌10 (粘稠性あり)													●					
有芽胞桿菌 <i>Bacillus</i> 属																		
放線菌1 (黄色)																		●
放線菌2 (黄色)																		●
放線菌3 (紫色)																		●
分離株数	2	2	4	0	3	2	0	2	4	3	2	3	2	3	2	0	2	

●：各試料から当該菌種が分離されたことを示す
 ※ (稀)アクトノルガ、ラボで分離・同定した結果である。

5. 石室の状況と微生物調査結果を受けての調査と対策について

5-1. アナモルフ菌類（担子菌類の系統）*Burgoa* sp. の紫外線照射試験結果について

石室内で紫外線照射を実施したあとも、黒色の小型菌核を形成するアナモルフ菌類（担子菌類の系統）*Burgoa* sp. が石室内点検時に観察されていることから、このカビについて、紫外線照射の効果を検討した。

方法、および結果は以下の通りである。

供試黒粒カビ

Burgoa sp. K9515-1

（分離源：キトラ古墳石室内天井南側西寄り 2009年5月15日）

Burgoa sp. K7316-1-1

（分離源：キトラ古墳石室内天井石壁面天文図（北斗付近1） 2007年3月16日）

これらの2株は、(株)テクノスルガ・ラボで分離・同定されたものである。

菌液調製

供試黒粒カビをポテト・デキストロース（PD）寒天培地で25℃、3週間前培養した。本菌は胞子液調製不可であったため、菌液は現場で確認される同形態の小型菌核および菌糸として調製した。小型菌核は、均一になるよう単一小型菌核に分離し、個々の小型菌核を試験に用いた。また、菌糸は小型菌核周辺の菌糸を集め、超音波処理を行い、顕微鏡下で菌糸片を確認したのち試験に用いた。

紫外線照射法

UVランプ（波長254nm）6Wを取り付けたアズワン社製試験装置（SLUV-6）を用いた。

UV照射による黒粒カビ *Burgoa* sp. の小型菌核の不活化試験

90mmシャーレに被検小型菌核を接種し、UV照射装置に入れ所定時間照射した。照射後、PD寒天平板（90mm）培地に1平板あたり5小型菌核を接種し、25℃で10日間培養して判定した。なお、各試験には2平板10小型菌核を用いた。

UV照射による黒粒カビ *Burgoa* sp. の菌糸の不活化試験

PD寒天平板（90mm）培地に約100菌糸片を接種し、UV照射装置に入れ所定時間照射した。照射後、平板培地を25℃で1週間培養して判定した。なお、菌糸片は顕微鏡下で確認し、1平板あたり60～100菌糸片の範囲で接種した。

結果および考察

<UV照射による黒粒カビ *Burgoa* sp. の小型菌核に対する不活化>

紫外線照射による黒粒カビ *Burgoa* sp. の2株10小型菌核に対する不活化試験を行った。UVを6時間から6日まで照射したところ、照射6日後には多少暗色から灰白色に小核菌株の色調が変わってきたが、いずれも最長6日間照射でも不活化されることはなかった（表6）。

結果からわかるように、試験した黒粒カビ *Burgoa* sp. の小型菌核は、UV照射6日間後でも生残し、これまでに実施した他のキトラ古墳由来菌株と比較しても、極めて紫外線に抵抗性が高いことが分かった。なお、照射時間がかなり長い場合には多少活性が鈍ってくるようであったが、このような連続した長時間照射は、現実的でないと思われる。

表6 黒粒カビ *Burgoa* sp. の小型菌核に紫外線を照射したのちの生存数

菌株番号	$\mu\text{W}/\text{cm}^2$	処理前	6時間	1日	2日	3日	5日	6日
K9515-1	13.2	10*	10	10	10	10	10	10
K7316-1-1	13.2	10	10	10	10	10	10	10
K9515-1	無処理	10	10	10	10	10	10	10
K7316-1-1	無処理	10	10	10	10	10	10	10

*：共試した10小型菌核のうち、生存していた数を表示

<UV照射による黒粒カビ *Burgoa* sp. の菌糸に対する不活化>

次に小型菌核を構成する菌糸に対する不活化試験を行ったところ、2株のうち、1株においては30分の照射でほとんど不活化され、残りの1株では60分照射で菌糸の生残が認められなかった(表7)。

表7 黒粒カビ *Burgoa* sp. の菌糸に紫外線を照射したのちの生存数

菌株番号	$\mu\text{W}/\text{cm}^2$	処理前	30分	60分	120分
K9515-1	12.5	43*	5	0	0
K7316-1-1	11.5	39	12	2	0
K9515-1	無処理	37	30	42	28
K7316-1-1	無処理	41	29	38	46

*：生残していた菌糸片数を表示

以上のことから、黒粒カビ *Burgoa* sp. の2株では、紫外線照射試験の結果、菌糸の塊状組織である小型菌核は著しい活性を有していたが、菌糸は多くの真菌同様、容易に不活化されることがわかった。小型菌核はこの結果より、*Burgoa* sp. の小型菌核については、必要に応じて適宜物理的な除去を併用し、菌糸については、従来通り紫外線で不活化することが汚染拡大を防ぐ対策になり得る。

5-2. 次亜塩素酸の殺菌効果試験結果について

また、上記の *Burgoa* sp. の2株に加えて、キトラ古墳で近年主要にみられていた微生物について、次亜塩素酸の殺菌効果を調べた。

一般細菌は nutrient agar (Oxoid, Hampshire, England) で、酢酸菌 *Gluconacetobacter* sp. 1 (新種) は GYC 寒天培地 (組成 g/L : Yeast 10g, D-glucose 50g, CaCO₃ 30g, Agar 25g) で 30℃ で 48 時間前培養した。カビ、酵母は、ポテトデキストロース寒天培地「ダイゴ」(日本製薬) で 25℃、1 週間前培養した。

前培養した各菌株を培地ごと 8 片 (約 1.5cm²) 切り出し、さまざまな次亜塩素酸ナトリウム濃度の溶液に浸して、所定時間、直接接触させた。陰性対照の処理は、滅菌水に浸した。薬剤接触後、細菌の場合を除いて、寒天片を滅菌水で洗い流し、それぞれ前培養をした培地と同様の寒天培地に植菌して生育の有無を確認した(表8)。

その結果、酵母や細菌については、1000ppm の次亜塩素酸ナトリウム溶液に浸したところ、1 分で殺菌されたが、*Penicillium paneum*、*Phialocephala phycomyces* のほか、暗色系の *Acremonium* (sect. *Gliomastix*) sp. や担子菌類の *Burgoa* sp. のいずれも、かなり次亜塩素酸に耐性が強いことがわかった(表8)。

表8 キトラ古墳石室内から分離された微生物分離株に対する次亜塩素酸^{*}効果試験結果^{**}

種名および菌株番号 ^{**}	濃度		10ppm (0.001%)			100ppm (0.01%)			1000ppm (0.1%)			2000ppm (0.2%)			10000ppm (1%)				
	接触時間 (秒)		10s	30s	60	10s	30s	60	10s	30s	60	10s	30s	60	10s	30s	60	300	
	10s	30s	60	300	10s	30s	60	300	10s	30s	60	300	10s	30s	60	300	10s	30s	
カビ																			
<i>Acromonium</i> (sect. <i>Gliomastix</i>) sp. K7511-1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-
<i>Penicillium paneum</i> K5916-7-1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+w
<i>Burgoo</i> sp. K7316-1-1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+w/-
<i>Burgoo</i> sp. K9515-1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-
<i>Phialocephala phycomyces</i> K5906-1-1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-
酵母																			
<i>Candida</i> sp. (新種) K5916-7-4	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-
細菌																			
<i>Bacillus simplex</i> K6203-10-3b	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-
<i>Stenotrophomonas</i> sp. K5916-3-1b	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-
<i>Gluconacetobacter</i> sp.1 (新種) K5929-2-1b	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-

【凡例】 + : 生育あり, + w : 弱いながらも生育あり, - : 生育なし

* 次亜塩素酸ナトリウム溶液 (有効塩素濃度 : 5%)

** カビ・酵母はPDA培地で1週間、25℃培養、細菌はNutrient Agar培地 (Gluconacetobacter sp. 1のみGYC寒天培地) で48時間、30℃培養時の試験結果を示す。

**※ (株) テクノスルガ・ラボで分離・同定した菌株である。

5-3. 今後の対策について

現在のところ、カビなどの大発生にはいたっておらず、おおむね石室内は良好な状況にはあるが、以上のようなことから、紫外線や次亜塩素酸にも耐性の強い *Burgoa* sp. の菌などの繁殖が目立ってくるような場合は、物理的な除去も併用する必要があると考えられる。

6. まとめ

2008年に目視で確認される範囲の側壁の絵画部分、また天井の星宿図の取り外し作業が完了したのち、新たな保存方針として、2009年3月以降、集中剥ぎ取り作業に加えて、紫外線殺菌灯の間欠照射による微生物制御を行っている。その結果、現在のところ、カビなどの発生はかなり抑制されている。しかし、一部、黒色色素を産生し、菌核様構造などを作る *Burgoa* sp. のようなカビの場合は、紫外線にも強い傾向がみられており、そのような菌種には適宜、物理的な除去の併用が必要と考えられる。

謝辞

紫外線照射による微生物制御や、次亜塩素酸による殺菌の方針決定にあたりましては、古墳壁画保存活用検討会委員の高麗寛紀先生、古墳壁画保存活用検討会保存技術ワーキンググループ委員の古田太郎先生、および森永力先生に貴重なご助言を賜りました。記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 木川りか, 佐野千絵, 間渕創, 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, 44,165-171 (2005)
- 2) 木川りか, 間渕創, 佐野千絵, 三浦定俊: キトラ古墳における菌類等生物調査報告(2), 保存科学, 45,93-105 (2006)
- 3) 木川りか, 佐野千絵, 間渕創, 三浦定俊: キトラ古墳における菌類等生物調査報告(3), 保存科学, 46,227-233 (2007)
- 4) 木川りか, 間渕創, 佐野千絵, 三浦定俊: キトラ古墳の微生物等の状況報告(2007), 保存科学, 47,129-134 (2008)
- 5) 木川りか, 佐野千絵, 間渕創, 喜友名朝彦, 立里臨, 西島美由紀, 杉山純多: キトラ古墳の微生物等の状況報告(2008), 保存科学, 48,167-174. (2009)
- 6) 古墳壁画保存活用検討会(第4回), 資料3, および参考資料1, 平成21年3月9日, 文化庁
- 7) 古墳壁画保存活用検討会保存技術ワーキンググループ(第3回), 資料4-1, 川野邊渉, 木川りか, キトラ古墳壁画の新たな保存措置方法について, 平成21年3月9日, 文化庁
- 8) 古墳壁画保存活用検討会保存技術ワーキンググループ(第3回), 資料4-1, 参考資料1, 高島浩介, 久米田裕子, 古墳由来微生物に対するUV照射殺菌評価, 平成21年3月9日, 文化庁
- 9) 古墳壁画保存活用検討会保存技術ワーキンググループ(第3回), 資料4-1, 参考資料2, キトラ古墳の石室内殺菌灯設置による石室内温湿度への影響の検討, 小椋大輔, 銚井修一, 平成21年3月9日, 文化庁
- 10) 古墳壁画保存活用検討会保存技術ワーキンググループ(第3回), 資料4-1, 参考資料3, 次亜塩素酸の殺カビ効果について, 高島浩介, 久米田裕子, 木村千暁, 水ト桂子, 高橋淳子,

平成21年3月9日, 文化庁

- 11) 古墳壁画保存活用検討会保存技術ワーキンググループ (第3回), 資料4-1, 参考, 殺菌灯を用いた紫外線照射による漆喰の影響について, 平成21年3月9日, 文化庁
- 12) 森井順之, 川野邊渉, 山路康弘, 柏谷博之: 紫外線照射装置を用いた磨崖仏着生生物の除去, 保存科学, 48, 21-31 (2009)

キーワード: 古墳 (tumulus); 生物劣化 (biodegradation); 菌類 (fungi); カビ (molds);
細菌 (bacteria); 紫外線 (ultraviolet rays); 次亜塩素酸ナトリウム
(sodium hypochlorite)

New Measure to Control Microorganisms in Kitora Tumulus: Effects of Intermittent UV Irradiation (2009)

Rika KIGAWA, Chie SANO , Tomohiko KIYUNA * , Nozomi TAZATO * ,
Junta SUGIYAMA *², Kosuke TAKATORI *³, Yuko KUMEDA *⁴,
Masayuki MORII, Noriko HAYAKAWA and Wataru KAWANOBE

In January 2004, excavation of Kitora Tumulus took place and the relocation of the paintings started. However, after people began to go into the tumulus, we started to see fungal growth. Para-formaldehyde fumigation and ethanol were used to control and remove fungal colonies. In early 2005, viscous gel appeared on the walls. In the fall of 2005, small holes with black substances inside became obvious on the plaster walls. Such holes might have been caused by the activity of microbes, especially by an acetic acid bacterium, *Gluconacetobacter* sp.

Chemicals to treat microbes in Kitora Tumulus had been selected from consideration of their efficacy on microbes, possible adverse effects on paintings and toxicity to human. Mainly, ethanol, isopropanol, formalin and isothiazolones (Kathon CG) have been used, depending on the conditions of the plaster or the stones and purposes. Some chemicals might be carbon sources to encourage growth of some microbes or secretion of acids by them. Special caution to such side effects is necessary.

In 2008, almost all of the paintings on the side walls and the star charts on the ceiling were relocated, except for those which might have been hidden by a thin layer of mud on the walls. Therefore, other controlling measures such as UV irradiation can be applied to control microorganisms on the plaster. The effect of Ultraviolet ray (UV) (254nm) irradiation was tested with major isolates of fungi, yeasts and bacteria. It was shown that most of the microbes were killed in 30 minutes of irradiation. From March 2009, intermittent UV irradiation was started in the stone chamber of Kitora Tumulus, in the interval periods of relocation works of the plaster walls without paintings. Growth of most of the fungal mycelia was suppressed effectively. But a black basidiomycetous fungus *Burgoa* sp. was sometimes observed in the stone chamber. *Burgoa* sp. was shown to be very resistant to UV irradiation. Therefore, occasional physical removal of such species is necessary together with UV irradiation.

* TechnoSuruga Laboratory Co., Ltd.

*² Chiba Office, TechnoSuruga Laboratory Co., Ltd.

*³ NPO Center for Fungal Consultation

*⁴ Osaka Prefectural Institute of Public Health