

アンコール遺跡の保存修復と微生物劣化

東京農工大学 大学院

農学研究院 物質循環環境科学部門

教授 片山葉子

はじめに

コークス廃液に含まれる硫黄化合物の微生物分解に着手して以来、筆者は硫黄酸化細菌を研究の対象としてきた。硫黄酸化細菌は硫黄化合物の酸化によってエネルギーを得る時に硫酸を産生する。この硫酸が岩石の成分を溶出させ、その結果、石材の劣化をもたらす可能性があるということで、当時発足して4年目であった日本国政府アンコール遺跡救済チーム (JSA) に加わる機会を得た。ここではカンボジア王国アンコール遺跡のアンコール・ワットとバイヨン寺院の保存修復と、そこに生息する微生物についての調査結果を紹介する。

カンボジアの国土

カンボジアは日本の国土の約半分の面積で、そこにはおよそ 1500 万人の人々が暮らす。ここは、かつて東南アジア一帯に大きな勢力を及ぼしていたクメール王朝発祥の地で、古代インドの影響を強く受けつつ、9 世紀初頭に独自のクメール文明を開花させ、最盛期の勢力範囲は現在のタイ、ベトナム、ラオスにおよんでいたといわれる。アンコール遺跡は現在のカンボジアを中心とする地域に、アンコール朝が 802 年に建国され、1432 年にタイのアユタヤ朝に滅ぼされるまでの 630 年間に造られた石造遺跡群である。

カンボジアはインドシナ大地の安定な地塊の上であり、3 方を高原に囲まれた中央盆地と、メコンデルタにつながるメコン河とその支流の地域からなる。中央盆地には東南アジア最大の淡水湖であるトンレサップ湖があり、延長 120 km のトンレサップ川を通じて、プノンペン市内でメコン河に合流している。カンボジアは熱帯モンスーン気候帯に位置し、トンレサップ湖は乾季には水深 1 m にまで干上がり、面積もおよそ

3000 km² にまで縮小する。一方、雨季にはメコン河の増水により水が逆流し、その面積を 5 倍から年によってはそれ以上にも拡大させる (図 1)。このようにトンレサップ湖は農業、水利、水産資源などにおいてカンボジアの人々の生活と密接に関わっているが、それはクメール王朝の時代も同様であり、メコン河とこの湖の水を巧く治めることのできた王の存在は、その時代の国の繁栄に強く結びついていたといえる。アンコール王朝の遺跡群は、このトンレサップ湖の北にあるシェムリアップ市郊外を中心に点在している。

アンコール遺跡とは

カンボジアの広大で肥沃な大地は多くの支配者によって複雑に統治されてきた。グーグル・マップの写真でシェムリアップ市北部の周辺を見ると、直線で囲まれた明らかに人工的な巨大な池を容易に見つけることができる。また、水は涸れてしまっているが、その跡と判るものも目に入る。さらに、これまで考えられていたものよりもずっと大規模で緻密な古代都市の遺構が、今も密林の中に埋もれたままになっていることが、7 カ国 8 機関の共同調査で為された航空レーザー計測でも明らかになっている (Evans et al., PNAS, in press)。

永く熱帯林の奥深くに埋もれていたアンコール遺跡群は、19 世紀半ばに再び発見され、その後フランスによる修復作業が行なわれた。1970 年代には内戦に見舞われ、1992 年にユネスコの世界遺産リストと同時に「危機にさらされている遺跡」のリストに登録された時期もあった。クメール美術を伝える貴重な文化財を守るために、近年は保存・修復のための調整機関のもと、国際的な支援が行なわれている。日本政府は 1994

年に日本国政府アンコール遺跡救済チーム (Japanese Government team for Safeguarding Angkor, JSA) をユネスコ文化遺産保存日本信託基金によるプロジェクトとして結成し、アンコール・ワット、プラサート・スー・プラ、バイヨン寺院において修復工事を実施しつつ技術移転と人材育成を行い、現在は遺跡の管理機構である APSARA と協同で JASA として、バイヨン寺院の保存修復作業を行なっている (<http://angkor-jsa.org>)。

アンコール遺跡で見られる石材の劣化

アンコール遺跡でつかわれている石材はラテライトと砂岩で、回廊の壁面には浅浮き彫りが彫られている (図2)。アンコール・ワットの外回廊には二列に砂岩の柱が並んでいるが、屋内側は床面に接する部分の剥離が深刻で、比較的良好な屋外側の列柱に比べその違いは著しい。同様の剥離は中回廊前十字回廊の列柱や中回廊中庭の女神像などにも見られる (図3)。これは雨水に溶解した塩類が毛細管現象によって砂岩表面を浸透し、石材に含まれるカルシウムなどと反応して結晶が析出する際の応力などによる塩類風化と考えられている。この塩類の起源は砂岩由来のものや石材表面の付着生物由来など複数の可能性が考えられるが、硫黄についてはコウモリであることが安定同位体比の測定結果から明らかとなっている。以前は回廊の床などにコウモリの排泄物が堆積していたことから、表面の好気的環境と内部の嫌気的環境間に形成された硫黄循環の過程で放出された硫酸が、砂岩の剥離に寄与した可能性が考えられる。

石材表面の微生物

カンボジアの国旗にも描かれているアンコール・ワットは、12世紀前半に造られた均整のとれた美しい建物で、浮き彫りも含めて保存状態は良好といわれている。アンコール・ワットの砂岩表面は、多くの部分が暗紫色から黒色のバイオフィルムによって覆われ、独特の景観を醸している。類似のバイオフィルムは、バイヨン寺院やその他の寺院でもごく普通に見られるが、このような場所からはシアノバクテリアに限ってみると *Gloeocapsa*, *Scytonema*, *Stigonema*,

Tolypothrix 属といった種類が報告されている。

アンコール・ワットのすぐ北に位置するアンコール・トムはクメール帝国の王都で、その中心にバイヨン寺院がある。この寺院は12世紀後半に建立されたにも拘らず、建物の倒壊と浮き彫りの劣化が著しく、アンコール遺跡の他の多くの建造物と同様、その修復は急務とされている。アンコール・ワットの建物は敷地内に整然と配置されているのに対し、バイヨン寺院は複雑に入り組んだ構造をしており、2重の回廊の壁には神話、歴史、人々の生活などをテーマにした精緻な浅浮き彫りが彫られている。多くの場所で発生している石材の緩みや亀裂のために、雨季のスコール時にはそれらの隙間から雨水が滲み出し、浮き彫りの表面に暗紫色、暗緑色、緑色、黒色、赤色など様々な付着生物 (バイオフィルム) の生育を許している (図4)。

貴重な文化財である浮き彫りにダメージを与えることなく微量の試料を回収するために、滅菌処理済みの粘着テープを用い、バイヨン寺院の浮き彫り表面上のバイオフィルムを採取した。そこからDNAを抽出後、リボゾームRNA遺伝子の部分配列のPCR増幅を経て、DGGE法による微生物叢の解析を行なった。その結果、赤色系バイオフィルムではカロチノイド系色素を含み放射線、紫外線、乾燥、好塩性などの性質のあることが知られる *Rubrobacter* 属や *Roseomonas* 属に近縁な細菌が検出された。暗紫色系のバイオフィルムでは、シアノバクテリアの *Oscillatoriales* 科や *Chloroflexi* 門に近縁の細菌が、黒色系のバイオフィルムでは *Truepera* 属、*Rubrobacter* 属などの細菌が検出された。粘着シートを順次新しいものに交換しながら、位置を変えることなく同じ場所のバイオフィルムを採取することで、表層から石材に向かって立体的にサンプリングすることも可能であり、太陽光線を用いて光合成を行なうシアノバクテリアはバイオフィルムの表面付近に、有機物を利用して生育する従属栄養性の微生物はその内側に分布する、といった石材表面のバイオフィルムの姿がみえてきた。また、カロチノイド系色素を含有することで強い日差しの影響を回避することが可能な細菌もバイオフィルム表面に多いことが確認され、熱帯地域特有の微生物の生態が明らかになってきた (図5)。

剥離によって既に浮き彫りが失われてしまっている部分の石材をごく僅か採取し、無機塩培地に粉末状硫黄を添加したもの、即ち有機物を全く含まない培地を用いて培養することで、硫黄酸化能を持つ微生物を調べた。その結果、硫黄酸化微生物は1グラム(乾燥重量)の石材に換算して 10^2 – 10^6 MPNの範囲で計数でき、それぞれの寺院の管理状況や立地条件などによって菌密度に違いは見られるものの、劣化した石材には単体硫黄を硫酸に酸化する微生物が広く生息することが確認された。このような試料からは様々な微生物が分離されて来ている。*Mycobacterium* 属といえば結核菌が有名であるが、それとは別系統の *Mycobacterium* が分離され、これらは硫黄の粒子上で生育し、増殖に伴い硫酸を生成した(図6)。このグループの細菌には無機物を酸化してエネルギーを得る能力についてこれまで報告がなく、硫黄酸化細菌としてよく知られた *Thiobacillus* などのスペシャリスト的なものよりは、従属栄養性の性質も兼ね備えたこのような細菌の方が、石材表面での硫黄酸化に関与しやすい可能性がある。

単体硫黄を酸化してエネルギーを獲得する微生物は、これまでの研究によればもっぱら細菌とアーキアに限られると考えられている。しかしながら、劣化した石材について硫黄酸化によるpH低下を調べてみると、その培養液には細菌の他にも、しばしば糸状の微生物の増殖が確認され、これらを純粋分離したところ、*Aspergillus* 属、*Penicillium* 属、*Paecilomyces* 属、*Bipolaris* 属、*Pleosporales* 属などの菌類が複数株得られた。菌類の培養によく用いられる有機物を豊富に含む培地に比べると、硫黄の培地での生育は明らかに劣り、培養にも数倍の日数を要するが、無機塩培地に単体硫黄を添加しただけの培地で菌糸の明らかな伸長と硫酸生成に伴うpH低下が見られる。これらの菌株の中から *Fusarium solani* と同定された THIF01 株を選び、硫黄培地での生育と代謝を調べたところ、硫黄の酸化に伴いまずチオ硫酸イオン、続いて硫酸イオンが検出され、培地のpHは初期値5.0から4.0にまで低下することも確認された。一方、菌を接種していない硫黄培地ではpHの低下もなく、チオ硫酸イオンや硫酸イオンも全く検出されなかった。

菌類が無機物質を酸化してエネルギーを獲得すると

いう事実は予想外なことであり、今後さらにデーターを積み重ねる必要がある。しかしながら、石材表面から分離された硫黄酸化を行なえる菌類は、利用可能なエネルギー源や炭素源の変化に応じて、有機化合物を潤沢に利用できるときには従属栄養性に、それほど有機物は利用できず、代わりにわずかな硫黄があればその生存を繋げることができる。遺跡の岩石表面という厳しい環境下において、このような微生物は細胞の代謝様式を柔軟に変化させることで生き残りを可能とし、そのことが遺跡の石材の風化にも少なからぬ影響を及ぼしているのではないかと予想される。

遺伝情報をもとに解析する事で、遺跡の表面に形成されたバイオフィルムの微生物叢がどのようなものであるか、徐々にその姿が見えてきた。一方、もし培養に基づく方法で硫黄酸化細菌を調べたことをしなければ、*Mycobacterium* 属の細菌やさまざまな菌類による硫黄酸化は気付く事も無く終わってしまったかも知れない。最先端の技術の利用はこれまで不可能であったことを次々に可能にしてきているが、それと同時に培養法という微生物学の基本的手法ももっと改善を重ね、生き物としてのデーターベースを充実させて行く事の重要性を改めて認識する機会となった。

おわりに

アンコール遺跡の保存・修復はこれまで建築、土木、岩石等の専門家が中心となり精力的な活動を行なって来た結果、その成果は目に見えるものとなりつつある。一方、この地域には世界から多くの観光客が訪れるようになり、車の増加などによる大気汚染やトンレサップ湖の水質汚濁など、新しい問題も顕在化しつつある。アンコール遺跡は後世に伝えるべき人類共通の遺産であると同時に、不幸な時代を経験したカンボジアの人々にとっては心の拠り所でもある。環境の変化にも配慮しつつ、この遺跡を少しでもよい状態で後の時代に伝える事ができればと思う。

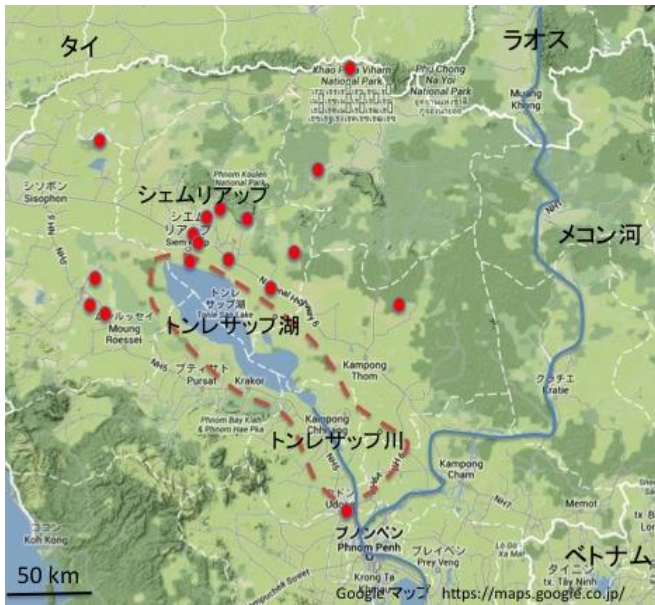


図1 カンボジア北西部 赤丸はよく知られた遺跡のある場所を示す。



図2 バイヨン寺院 外回廊壁面の浅浮き彫り



図3 アンコール・ワット中回廊前十字回廊の柱に見られる塩類風化



図4 バイヨン寺院内回廊壁面の浮き彫りに発生したバイオフィーム

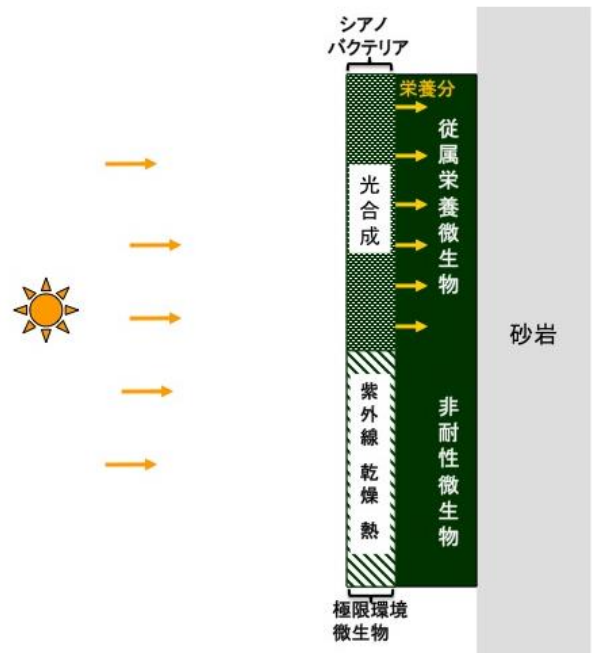


図5 砂岩表面に形成されたバイオフィームの微生物

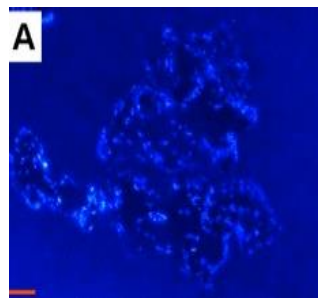


図6 硫黄の表面に生育する *Mycobacterium* sp.