

## 学 位 論 文 要 旨

### アンコール遺跡石造文化財の微生物劣化

### Microbial deterioration of stone monuments in Angkor site

環境資源共生科学専攻 環境保全学大講座

久住 朝子

文化財である歴史的な石造建築物において，表面に微生物が生育することによる石材の劣化が深刻な問題となっている。アンコール遺跡は 9 世紀から 13 世紀にかけて建造された石造遺跡群であり，石材の劣化が顕著であることからその保存と修復が急務となっている。本論文では，石材劣化のうち剥離劣化と着色劣化に着目し，その劣化に関与する微生物を明らかにし，遺跡の保護に役立つ情報を得ることを目的とした。

先行研究により，剥離劣化の要因として，硫酸を生成するイオウ酸化微生物が要因の一つとして指摘されており，剥離劣化石材試料からイオウ酸化細菌と真菌が分離された。真菌については系統やイオウ酸化能が調べられていたものの，細菌については未着手であった。また，バイオフィームについては，その一部について微生物叢が調べられているものの，様々な色調のバイオフィームの微生物叢の比較は行われていない。

以上のことから，本論文では，アンコール遺跡の剥離劣化，および着色劣化に関与する微生物の解明を目的とし，剥離劣化への寄与が疑われるイオウ酸化細菌の特徴の解明（第二章）と，バイオフィームの細菌叢解析（第三章），およびバイオフィームの陽イオン，陰イオン測定（第四章）を行った。

第二章では，剥離劣化石材試料から分離された細菌 5 株の特徴を調べた。分離菌 5 株は，無機イオウに依存する独立栄養的な性質と，糖の資化による従属栄養的な性質を有していた。これら 5 株はすべて *Mycobacterium* 属に属する細菌に最も相同性が高かった。これらことから，分離菌 5 株は既知のイオウ酸化細菌の系統とは異なり，*Actinobacteria* 門に属することが明らかになった。

分離菌 5 株のうち、代表として選抜した THI503 株を、単体イオウを添加した無機塩培地で培養した結果、硫酸およびチオ硫酸の生成と、菌数の増加が確認された。以上の結果より、5 株の分離菌は砂岩壁面において、利用しやすい有機物がある場合にはそれを炭素源に用い、有機物がない場合には無機イオウを酸化して ATP を生成する、というように環境に合わせて代謝を切り替えている可能性が考えられた。このように代謝をスイッチできる特徴は、栄養が少ない砂岩上での生育に有利となる可能性がある。

第三章では、アンコール遺跡バイオンの砂岩壁面から採取したバイオフィルムの細菌叢の解析を行った。バイオフィルムの細菌叢は、周辺空気中の細菌叢と比較して多様性が高く、既知の細菌とは相同性が低い新規の細菌種から構成されていた。また、バイオフィルムの色調は、壁面の状況により特徴があった。すなわち、赤色、緑色、暗緑色のバイオフィルムは屋根で覆われた部分の砂岩壁面で観察されることが多かった。一方、紫色のバイオフィルムは、屋根が崩落して日射や降雨が直接降り注ぐ壁面で観察されることが多く、黒色のバイオフィルムは、屋根で覆われた部分と崩落した部分の両方で観察された。

バイオフィルムの色調ごとの細菌叢解析の結果、赤色のバイオフィルムには *Rubrobacter* 属に近縁な細菌が優先しており、黒色、紫色、黒色、暗緑色のバイオフィルムには、*Cyanobacteria* 門に最も近縁な細菌が優占していた。

これら 5 色のバイオフィルムのうち、バイオフィルムが厚く、その下の石材の劣化が顕著であった暗緑色のバイオフィルムについて、バイオフィルムの層ごとに細菌叢を解析した。その結果、バイオフィルムの表層には *Cyanobacteria* 門、石材に近い部分には *Chloroflexi* 門がそれぞれ分布していた。また、表層から石材付近にかけては *Deinococcus-Thermus* 門と *Rubrobacter* 属に最も近縁な細菌が分布していた。

第四章では、バイオフィルムの各種陽イオン、陰イオンを測定した。暗緑色のバイオフィルムを含む、屋根で覆われている砂岩壁面から採取されたバイオフィルムでは、屋根が崩落している砂岩壁面のバイオフィルムに比べて高濃度の硝酸イオン、ナトリウムイオン、マグネシウムイオン、カルシウムイオンが蓄積されていた。このことから、暗緑色のバイオフィルムにおいて高濃度の硝酸が蓄積し、砂岩中の陽イオン種が溶脱している可能性が示された。

本研究では、剥離劣化の原因微生物の一つとして分離されたイオウ酸化細菌が、還元型イオウを酸化して ATP を生成する独立栄養的な代謝と従属栄養的な代謝の両方を有することを明らかにした。また、着色劣化に関与する細菌は色調によって異なり、特に赤色着色劣化と *Rubrobacter* 属の細菌との関与を明らかにした。砂岩の劣化が顕著な暗緑色のバイオフィルムでは、高濃度の硝酸イオンと金属イオンの蓄積が確認されたことから、高濃度の硝酸により砂岩中の金属イオンが溶脱されることで、石材の劣化が促進される可能性が示された。