

令和 3 年 6 月 18 日現在

機関番号：12102

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2019～2020

課題番号：19K23100

研究課題名（和文）AE法による壁画の劣化予知に関する研究

研究課題名（英文）Study on degradation prediction of mural painting by AE method

研究代表者

周 怡杉（ZHOU, YISHAN）

筑波大学・芸術系・研究員

研究者番号：20849252

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,400,000円

研究成果の概要（和文）：AE(Acoustic Emission)技術は非破壊的に対象物内部の変化を捉えるため、文化遺産における劣化予知・診断手段として応用する可能性が示唆される。本研究は壁画試料のモニタリングを切り口として、文化遺産本体のモニタリング技術とするAE技術の適用性を高め、実際の応用における設備設置とデータ解析問題の解決の情報提供を目指す。本研究は環境温度だけを变量にして、壁画試料の変化のモニタリングをAE計測法で試み、その変化に応じて発生するAE信号の特徴解析を行った。多様な解析手法を結び付け、AE信号の特徴をより多角的に表現することを通し、実際の応用においてデータ解析手法の参考をあげる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

歴史に関わる情報を伝える貴重な資料かつ芸術品である壁画の多くは保存環境の制御が困難である石窟寺院か歴史的建造物で現地保管や活用されている。壁画の劣化は温度、湿度、塩類、生物、風雨などの保存環境の条件によって誘発され、構造や材質など壁画が内包する要素に従って進行する。劣化要因を解明し、それらを制御することで、劣化を未然に防ぐことは文化遺産の保存において理想とする予防的保存である。劣化進行を予知し早急に対策を講じられるシステムの構築においてAE技術は劣化予知・診断手段として期待された。本研究により壁画試料の温度変化に応じて発生するAE信号の特徴解析で得られた成果はAE技術の応用において参考となる。

研究成果の概要（英文）：Acoustic emission (AE) technology is a non-destructive method of detecting changes in the interior of an object, and has the potential to be applied as a means of predicting and diagnosing deterioration in cultural heritage. This study aims to improve the applicability of AE technology as a monitoring technique for cultural heritage, using the monitoring of wall painting samples as a starting point, and to provide information on how to solve the problems of equipment installation and data analysis in practical applications. In this study, we have tried to monitor the changes in the wall painting samples using the AE measurement method, under temperature changes as the only one environmental variable, and analyzed the characteristics of the AE signals generated in response to. By combining various analysis methods, the characteristics of the AE signal are described in a more diverse way, thus providing a reference for data analysis methods in practical applications.

研究分野：文化財保存科学

キーワード：Acoustic Emission 温度変化 壁画 模擬試験 信号解析

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

古代社会に関わる情報を伝える貴重な資料と芸術品である文化遺産の壁画の多くは保存環境の制御が困難である石窟寺院(例:中国敦煌莫高窟)か歴史的建造物(例:日本の法隆寺金堂壁画)で現地保管や活用されている。

壁画の劣化は温度や湿度の変化、大気汚染、塩類の析出、微生物や虫、人為活動、自然災害、日射や風雨などの保存環境の条件によって誘発され、構造や材質など壁画が内包する要素に従って進行する。劣化の要因を解明し、それらを制御することで、劣化を未然に防ぐことは文化遺産の保存において理想とする予防的保存である。近年、予防的保存の対策として温度、湿度、大気汚染など文化遺産の保存環境の変化、または文化遺産表面に観察できる劣化現象(き裂、欠損など)の進捗をモニタリングするシステムがひろく用いられるようになった。しかし現状のシステムでは、定期的にサンプリングや現地計測を行う調査分析を通し、各時期の劣化状態を評価と比較することで、劣化の変化経緯をモニタリングする。故に、劣化が発生した後に劣化要因を特定し、劣化の進行を制御する対策が施されることしかできない。劣化の発生以前から、保存環境の各要素に応じて文化遺産本体に発生する変化をリアルタイムにモニタリングする手法はまだ確立されていない。

AEは材料変形やき裂の成長や変化が発生する際に放出される弾性波である^{1,2}。AE法は非破壊的に対象物内部の変化を捉えるため、文化遺産における劣化予知・診断手段として応用する可能性が示唆され、関わる研究を展開されてきた。例えば、保存環境の温度変化が発生する際にまたは解体・運搬する際に石造文化遺産内部のき裂のモニタリング³、木造建築物内部の生物劣化の診断などがあげられる⁴。

一方、壁画を対象としてAE法を応用する事例が日本国内外ともにわずかしかない。壁画の予防的保存の一環として、壁画の劣化が顕在化する前に、保存環境の各要素が引き起こす壁画内部の微細的な変化を把握することで劣化予知の体制を構築することを目指して「劣化とつながる壁画内部の微細的な変化はどのようなAEで反映できるか。それらAEを捉えるため、どのような測定手法を用いるべきか」と問いかける。

2. 研究の目的

AE技術のメリットと特性を活かすことにより、壁画本体の劣化過程を表現する手法を発展し、現状の文化遺産本体のモニタリングシステムの限界を超えることを目標として、本研究は壁画試料のモニタリングを切り口として、文化遺産本体のモニタリング技術とするAE技術の適用性を高め、実際の応用における設備設置とデータ解析問題の解決の基礎情報提供を目指す。

温湿度変化による材質の膨張収縮は、壁画の劣化を誘発する要因の一つである。本研究は環境温度だけを変量にして、壁画試料がその影響の下でどのような変化を引き起こすのかのモニタリングをAE計測法で試み、その変化に応じて発生するAE信号の特徴解析を行った。AEパラメータ解析、周波数解析など多様な解析手法を結び付け、AE信号の特徴をより多角的に表現すること、そしてそれに基づき性質が異なる計測対象のAE信号を特徴づけることを通し、実際の応用においてデータ解析手法の参考をあげる。

3. 研究の方法

壁画は通常、土下地層、漆喰下地層、顔料層からなる多層構造である。土下地層は、土に植物の繊維(麻や麦わら)を混ぜたものが多い。繊維を添加することで、土下地層の体積収縮や変形を抑制し、強度を高めることができると考えられている。本研究では、繊維なしの土と繊維入りの土で2種類の試料(繊維なし試料と繊維入り試料)を作成し、同じ温度変化条件に暴露されて、AEモニタリングを行い、それぞれのAE信号の特徴を比較した。

本研究は中国遼寧省義県にある奉国寺大雄殿内壁に残存した元代壁画(中国全国重点文物保护单位、世界遺産暫定リスト記載)を参考対象として壁画材質と環境情報に基づき模擬暴露試験を行った。シルト(粒径0.075mm以下)と砂(粒径0.15-0.85mm)を4:1の割合で混合土を作成した。混合土に小麦わら3%か麻繊維1%を混入してわら混合土か麻混合土を作成した。各種の混合土は蒸留水と10:3の割合で混ぜて20℃、相対湿度RH20-40%の室内環境で自然乾燥させて繊維なし土下地層かわら土下地層か麻土下地層を作成した。炭酸カルシウム粉末とニカワ溶液(濃度7.41%)を5:2の割合で混合し、乾燥できた土下地層の上に均一に塗り付け、石灰層を作った。繊維なし試料の構成は(図2):繊維なし土下地層(厚さ約20mm)→石灰層(厚さ約1mm)。繊維入り試料の構成は:わら土下地層(厚さ約15mm)→麻土下地層(厚さ約5mm)→石灰層(厚さ約1mm)。

奉国寺大雄殿内の2019年の環境モニタリングデータにより、温度の年中最大日格差は10.83-4.89℃(11月中旬、月平均湿度RH43%)である。本研究は恒温恒湿機を用いて

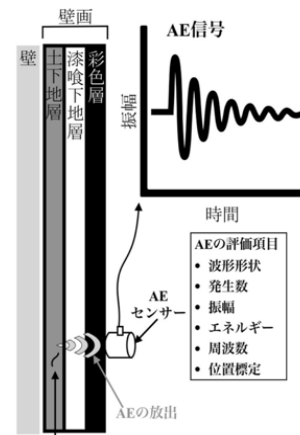


図1 壁画のAE計測モード図。

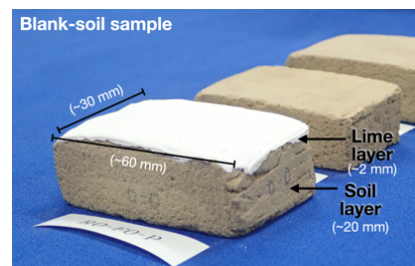


図2 繊維なし試料

(ESPEC 社製、SH-221) で湿度を RH40% に一定し、温度勾配を 6 時間ごとに 11°C と 6°C 間に変化するように設定した。USB AE Node (MISTRAS 社製) システムにより AE モニタリングを行った。サンプリング条件は、周波数範囲 20K-1M Hz、サンプリング間隔 1 μ s、閾値 23dB (図 3)。ホットボンドで AE センサーを試料の上部で固定された。

2 種類の試料それぞれの 21 時間暴露期間中に採集された AE 信号を以下のパラメータで解析・考察した。(1) 1 時間あたりの累積カウント数と平均 RMS (二乗平均平方根)、(2) 最高温度時前と後の 1 時間中記録された AE 信号からそれぞれヒット 10 個を選んで FFT (高速フーリエ変換) 分析で周波数解析を行い、各ヒットの FFT 結果から最も顕著な周波数 3 つと対応する振幅を記録した。最低温度時のデータに対しても同じ解析を行った。

4. 研究成果

累積カウント数/hr と平均 RMS/hr により、繊維なし試料場合は繊維入り試料の方よりも顕著であり、特に温度が最低値から上昇する段階で高い値がより集中的に現れる。一方、繊維入り試料の場合では、これら 2 つのパラメータの高い値は主に温度最低時ごろに現れるが、低い値は温度最高時ごろに現れる (図 4)。

FFT 分析の結果により、本研究において採集された AE 信号の周波数範囲は 20K-500K Hz である。図 5 が示すように、繊維なし試料の AE 信号の中にはより高い振幅と低い周波数 (20K Hz) の特性を持つ信号を含む。それに対して繊維入り試料の AE 信号は主に 150k-350K Hz 範囲の周波数を示す。

カウント数は AE 活動の総数と頻度を反映する。RMS は連続型 AE 信号のエネルギーを測定できる。振幅は、材料に AE 事件を発生させる音源の強度に関係する。上記の信号解析結果により 2 種類の試料の AE 信号は違う特性を示す。最も顕著な違いは繊維なし試料では、より高いエネルギーを持つ AE 活動が発生することがわかる。環境温度の変化に伴い、構造体内 (壁画試験片) 隣接する膨張収縮率の異なる材料に引張応力または圧縮応力が発生し、微小変形や摩擦を引き起こすことが AE 信号発生の原因となっていると考えられる。繊維の混入により土下地層の温度変化に対する膨張収縮の応答が弱くなることでその AE 事件の発生が制限されると推測される。

本研究により AE 計測は環境温度変化に伴う壁画試験片の応答、または構成とその特性の異なる壁画試験片の個々の応答特性を反映できることを証明した。複数の AE 信号解析手法を結び付け、モニタリングデータを考察することはそれが反映する計測対象の状態変化をより多角的に認識することを探索した。AE 技術を文化財・文化遺産本体の長期的モニタリングに適用する試みに参考となる知見を提供した。

現段階では、壁画本体モニタリングに適用する「AE モニタリングと信号解析システム」の構築までにはまだ多くの研究を展開し続けるべきと考えられる。まず、壁画の代表的な風化種類 (例えば、塩類風化、凍結融解風化など) について、AE 信号の特徴と風化種類の相関関係を確立するため基礎データ収集とする研究が必要である。また、壁画風化の進行に伴う AE 信号の発生源、特性、変化をまとめ、AE 信号の特性と砂岩の風化度の相関関係を確立することも不可欠である。

<引用文献>

- 1 大津政康. アコースティック・エミッションの特性と理論 (第 2 版). 森北出版, 2005.
- 2 Lukomski, M., Bratasz, L., Hagan, E., Strojceki, M., & Beltran, V. L. (2020). Acoustic Emission Monitoring for Cultural Heritage. The Getty Conservation Institute.
- 3 高妻洋成, 降幡順子, ほか. 石造文化財へのアコースティックエミッション法の応用. 日本文化財科学会第 24 回 大会研究発表要旨集, 2007, 330-331.
- 4 築瀬佳之, 森拓郎, ほか. アコースティック・エミッションおよびマイクロ波によるアメリカカンザイシロアリ食害の非破壊検出. 環動昆, 29(2), 2018, 41-48.

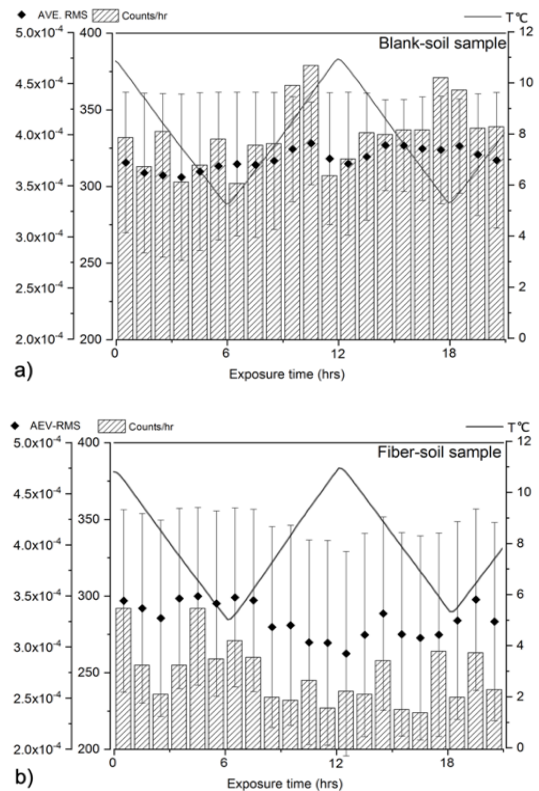


図 4 1 時間あたりの累積カウント数と平均 RMS (二乗平均平方根) a) 繊維なし試料、b) 繊維入り試料。

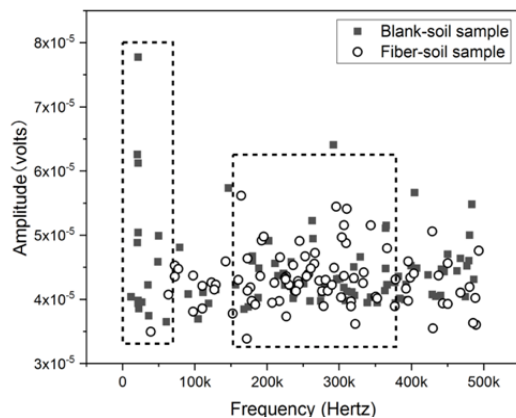


図 5 周波数と対応する振幅。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 周怡杉, 松井敏也, 劉成, 王飛, 孫劍
2. 発表標題 Basic study on prediction of deterioration of mural painting by AE method: feature analysis of AE signal generated in response to temperature change
3. 学会等名 日本文化財科学会第37回大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------