

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 1 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24650590

研究課題名(和文)文化財保存のための環境観測用スマートダストの開発

研究課題名(英文) Development of a practicable environmental monitoring system by WSN for conservation of cultural property

研究代表者

小泉 圭吾 (Koizumi, Keigo)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：10362667

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：短期的、長期的な文化財の劣化過程を理解することはそれらを保存する上で重要である。本研究は文化財の展示期間中の温度、湿度の変動を評価し、保存科学の専門的知識が無くても劣化の可能性を推定することが可能なリアルタイム環境観測システムを開発を行った。この結果、学芸員によって運用されるこの環境観測システムは、屋内展示における環境状態を管理するための有益な情報を提供できることが示唆された。また、Webサーバー上で24時間いつでも現況を監視することが可能な屋外用環境観測システムを開発した。このシステムは臼杵石仏群の冬場の凍結による被害緩和のための覆屋根とカーテンの効果を評価するために現地に設置された。

研究成果の概要(英文)：Knowing the processes of degradation of cultural properties in short-term and long-term are important to understand the conservation condition of them. The purpose of this study is to develop a real-time monitoring system to evaluate the behaviors of temperature and relative humidity during a public exhibition and to estimate the factors of some degradation without the special knowledge of conservation science. As the results, it was suggested that the environmental monitoring system operated by curators in a museum provides useful information for themselves to manage environmental state in an indoor public exhibition. An outdoor environmental monitoring system which can monitor the present condition at all hours of the day and night on a web server was developed. And the system was set up in the Usuki Stone Buddha Statues to evaluate effectiveness of the protective roof and curtain for the freezing damage in winter season.

研究分野：保存科学

キーワード：センサネットワーク 環境モニタリング 保存科学 温湿度 リアルタイム計測 石仏 Webサーバー

1. 研究開始当初の背景

文化財の保存環境を正しく知ることは、短期的および長期的な文化財の劣化、損傷の過程を知るうえで重要である。短期的な劣化、損傷については、文化財を移動する際の衝撃や、展示期間中の温湿度の急激な変化による負荷などが一例として挙げられる<sup>1),2)</sup>。一方、長期的な環境変化に伴う劣化、損傷の要因については、それがあつた特定の期間に生じたものか、あるいは長い年月を経て生じたものかなど、具体的にどの事象によって劣化、損傷が生じたのかを判別することは難しい。したがって、文化財がどのような環境下で保存あるいは展示されてきたのかを継続的に観測しておくことは、劣化、損傷の原因究明とその対策を行う際に、必要不可欠な情報となる<sup>3),4)</sup>。

これに対し屋内文化財については、温湿度記録計などを使った観測とそのデータの蓄積が行われているが、保存科学の専門家を有する博物館、美術館を除き、学芸員が、本業とは別に、これらのデータ回収などに従事しなければならないケースが少なくない。実際に行うべき作業としては、定期的なデータの回収やデータ整理などが挙げられるが、本来の目的は、展示期間中にこれらのデータがどのような挙動を示していたのかを解析し、短期的あるいは長期的な展示環境のあり方を検討することである。そこで、これらの煩雑な作業を簡便化するためにも、過去のデータに加えて、現在の状況までもを常時閲覧、観測できるシステムの構築が望まれている。

一方、屋外文化財において、乾湿繰返し、凍結融解などによる風化、劣化問題を抱える石造文化財では、記録計による過去の環境分析だけでなく、現在の状況をリアルタイムに観測し、その対策を検討できる観測システムが必要になる場合が少なくない。

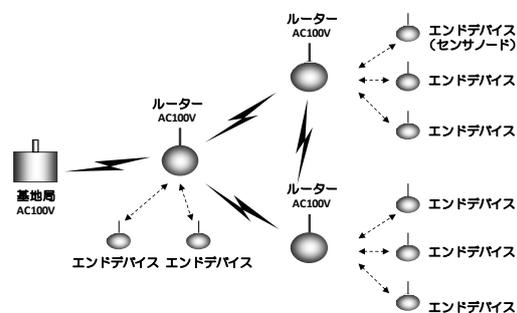
そこで、本研究ではこの課題を解決するために、無線センサネットワーク技術による、文化財保存のための環境観測用スマートダストを開発することとした。

2. 研究の目的

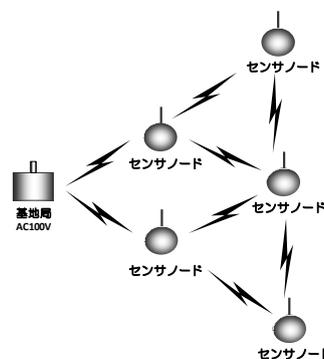
ここではスマートダストと呼ばれる塵のような微小なセンサが相互に無線通信できるネットワークを構築し、小型バッテリーや自然エネルギーで長期間駆動することで、誰もがいつでもどこからでも必要な情報を入力できる技術を応用する。当該研究者は先行研究として、メッシュ型の無線センサネットワークを用いた屋内温湿度環境観測システムの開発を進めてきた。無線センサネットワークというと一般に ZigBee が挙げられる。ZigBee は図 1(a)に示すように、コーディネーター、ルータ、エンドデバイスで構成されている。一般にルータは相互通信が可能であるが、消費電力が大きいので、小型バッテリーでの長期駆動が難しい。一方、エンドデバイスは、小型電池で長期間の稼働が可能であ

るという特長を有しているが、ルータへのデータ送信は可能であるが、エンドデバイス同士の相互通信が出来ないという特徴がある。従って、屋外、或いは屋内でも電源確保が難しい現場において、このシステム構成を有効に活かすことは難しい。これに対し、図 1(b)に示すメッシュネットワークの場合、センサノード同士が相互通信を行うことができ、それらは電池で駆動する。従って、電源確保が難しく、基地局と末端のセンサノードの距離が遠く離れた場合でも、末端のセンサノードは、その間のセンサノードを中継して、データを基地局へ送信することが可能となる。このメッシュネットワークを応用することで、各現場において自由度の高い環境観測システムを構築することができる。

一方、当該研究者が使用してきた既往のメッシュ型無線モジュールの出力は 1mW と低消費であるため、長期間の観測には向いているものの、屋外での観測を考えた場合に、通信距離が十分でないという課題が挙げられた。また、屋内文化財の温湿度環境観測に対する課題として、電波環境によるデータ欠損が挙げられる。そこで本研究では、従来の温湿度データロガーと同様、無線環境によってデータ欠損が発生せず、かつ、屋外環境下においても無線の通信距離および安定性を確保できる、全く新たなスマートダストによる無線式リアルタイム温湿度計測装置およびそれを運用するための観測システムの開発を行うこととした。



(a) ZigBee



(b)メッシュネットワーク

図 1 無線センサネットワークの通信方式

### 3. 研究の方法

(1) データロガー機能を有するリアルタイム温湿度計測装置および観測システムの開発

ここでは下記の3項目に重点をおいて開発を行った。

- ① 屋外文化財の現場においても効率的なネットワークを構築するために、従来よりも出力の高い無線センサユニットを開発する。
- ② メッシュネットワークによるリアルタイム観測機能に加え、ロガー機能を実装することでデータ欠損を回避した計測装置へと改良する。

(2) 臼杵石仏群を対象とした冬場の凍結破砕に対する覆屋の評価を目的としたリアルタイム環境観測システムの開発

ここでは下記の手順で観測システムの構築とその評価を行った。

- ① 新規開発システムの性能を評価するために、先行的に開発したリアルタイム環境監視システムのプロトタイプを臼杵石仏群の観測用に改良してシステムを構築した。
- ② 観測データから覆屋の効果を評価した。
- ③ (1)で開発した新規観測システムを導入し、従来型と比較することでその性能向上に対する評価を行った。
- ④ 複数の機関によって保存修復が行われている現場において、複数の関係者が遠隔からでも同時に温湿度のリアルタイム観測が可能なWEB観測システムを開発する。

### 4. 研究成果

(1) データロガー機能を有するリアルタイム温湿度計測装置および観測システムの開発

表1は開発したセンサノードのプロトタイプと改良型の仕様を示した表である。温湿度センサはMEMSタイプの静電容量式温湿度センサを採用した。無線モジュールについては、出力を向上させることで、屋外文化財を対象とした観測においても十分な性能が得られるように改良を行った。これにより、見通しのある環境下での通信距離は100mから300mへと改善された。出力向上に対する電池寿命の劣化速度を防ぐために単三型リチウムから単一型リチウム電池への変更を行った。また、無線通信によるデータ欠損率を低減するために、プロトタイプにはなかったリトライ数を最大10回まで繰り返すことができる機能を追加し、合わせてバックアップ機能としてメモリを実装することで、データロガー機能を追加実装した。図2に改良型センサノードの構成を示す。

(2) 臼杵石仏群を対象とした冬場の凍結破砕に対する覆屋の評価を目的としたリアルタイム環境観測システムの開発

臼杵石仏群は半径70m程度の範囲内に4か所に分かれて分布しているため、各地点の温湿

表1 開発したセンサノードのプロトタイプと改良型の仕様比較

	センサノード プロトタイプ	センサノード 改良型
センサ精度	温度±0.3℃(5℃~40℃) 湿度(RH)±2.0%(10%~90%)	温度±0.3℃(5℃~40℃) 湿度(RH)±2.0%(10%~90%)
センサ分解能	温度0.01℃, 湿度(RH)0.1%	温度0.01℃, 湿度(RH)0.1%
サンプリングレート	1分~任意 (デフォルト:10分)	1分~任意 (デフォルト:10分)
無線周波数帯域	2.4GHz	2.4GHz
出力	1mW	10mW
通信方式	メッシュ型ネットワーク	メッシュ型ネットワーク
通信距離 (見通し)	約100m ※実測値	約300m ※実測値
電源	単三型リチウム×1	単一型リチウム×1
データバックアップ機能	なし	メモリ機能

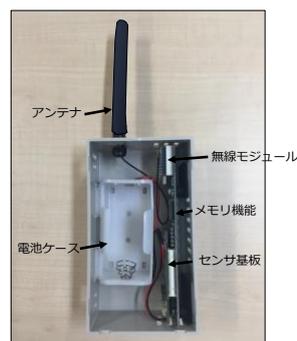


図2 改良型センサノード



図3 センサノードのプロトタイプ

度情報を一か所に集約し、リアルタイム観測を行うことは難しい。そこで先行的に開発したメッシュネットワークと3G回線を組み合わせたリアルタイム観測が可能なシステムのプロトタイプを構築した。図3に示す無線式温湿度計測機(センサノード)は温湿度センサ、無線モジュールおよびバッテリーで構成されており、10分間隔で1年の計測が可能である。図4は対象エリアにおけるセンサノードおよび観測ステーションの設置関係を示した図である。工事により、現在、山王山石仏におけるセンサノードは撤去したが、古園石仏、ホキ石仏第一群、ホキ石仏第二群にはそれぞれ、覆屋内に1ないしは2台のセンサノードを設置した。また、図中、No.1、No.2およびNo.5は覆屋外の温湿度計測と無線通信のための中継器の役割を兼任するセンサノードとして設置した。各計測データは無線ネットワークにより観測ステーションに伝



図4 先行開発によるセンサノードの配置図

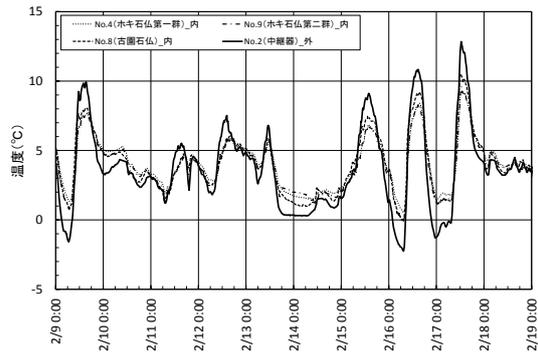


図5 各観測地点の気温変化（2014年2月9日～18日）

送され、インターネットを介して、リアルタイム監視できるシステムを構築した。

図5は2014年2月9日～18日の主な観測地点の気温変化を示した図である。図より、①覆屋外（No. 2）と比べ覆屋内（No. 4, No. 9, No. 8）の日変動が小さいことが確認された。②覆屋外で最低気温が0℃を下回った際にも、覆屋内では0℃を上回っており、この間の気温差は最大で2℃程度になることが確認された。このことから覆屋およびロールカーテンが気温低下の抑制に効果があることを確認した。③インターネットを介して、観測ステーションにアクセスすることで、上述のような気温低下時の覆屋内の環境をリアルタイムに監視できることを確認した。

次にこの結果を基に、プロトタイプを改良した新規観測システムを導入し、その性能向上に対する評価を行った。図6は新型センサノードの配置状況を示した図である。通信性能の向上により中継器の数を3台から1台に減らした場合においても、安定した通信ネットワークを構築できることが確認された。

また、プロトタイプではインターネットを介して、遠隔から観測ステーションにリモートアクセスすることで、現在の観測状況を確認できるシステムを構築したが、このシステムの場合、複数人が同時に観測ステーションにアクセスできないという課題があった。そこで、この課題を解決するために、図7に示すWEB上での観測システムを構築した。このシステムは、各センサノードから観測ステーションに無線送信されたデータが基地局PCを介してクラウド上にアップされる。アップされたデータはWEBベースで開発した閲覧画面に表示することで、IDとパスワードを介して、複数の関係者がリアルタイムに観測結果を確認することができる。また、図8、図9に示すように、データのダウンロード機能、グラフ閲覧機能を持たせると共に、図10に示すように、凍結破砕の危険性が高まる気温に近づいた場合、複数の指定した関係者にメール通知できる機能を新たに追加した。



図6 新型センサノードの配置図



図7 WEBベースの観測データ閲覧画面



図8 CSV形式のファイルダウンロード機能

ションに無線送信されたデータが基地局PCを介してクラウド上にアップされる。アップされたデータはWEBベースで開発した閲覧画面に表示することで、IDとパスワードを介して、複数の関係者がリアルタイムに観測結果を確認することができる。また、図8、図9に示すように、データのダウンロード機能、グラフ閲覧機能を持たせると共に、図10に示すように、凍結破砕の危険性が高まる気温に近づいた場合、複数の指定した関係者にメール通知できる機能を新たに追加した。

参考文献

1) 神庭信幸, 和田浩, 高木雅広, 今北憲, 星野裕昭: 文化財梱包に用いる緩衝材の適切な

- 使用法の検討-ワイヤーロープの振動特性,  
「文化財修復学会」, 33<sup>th</sup>, pp. 34-35, 2011
- 2) 西藤清秀, 谷本親伯, 橋本裕行, 菅原文則,  
藤田行茂: 奈良・西安往復路における文化財  
移送時の振動特性, 「日本文化財科学学会大会  
研究発表要旨集」, 29<sup>th</sup>, pp. 78-79, 2012
- 3) 神庭信幸: 東京国立博物館の保存環境の管理,  
「文化財の虫菌害」, Vol. 61, 3-9, 2011
- 4) 成瀬正和: 短報 正倉院の温湿度環境調査,  
「正倉院紀要」, Vol. 23, pp. 61-66, 2001.



図9 グラフ閲覧機能

図10 基準値設定およびアラートメール送信機能

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

- 1) M. ITO, K. Koizumi, K. Oda, T. Miyawaki, C. Piao, C. Tanimoto, Y. Iwasaki, X. Wang, Q. Guo, S. Yang.: Estimation of moisture condition with salinity in the ground behind the Dunhuang Mogao Grottoes using the electrical resistivity method. Proceeding on Geotechnical Engineering for the Preservation of Monuments and Historic Sites. 447-453, 2013.

- 2) 伊藤三彩恵, 小泉圭吾, 小田和広, 宮脇知美, 朴春澤, 谷本親伯, 郭青林, 王旭東: 電気探査を用いた敦煌莫高窟崖背面地盤の水分環境に関する研究, 地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム 2012 論文集, pp.105-110, 2012. 11
- 3) 小泉圭吾, 石崎武志, 小椋大輔, 佐々木淑美, 日高健一郎: ハギアソ・ソフィア大聖堂における無線式常時環境計測システムの開発, 保存科学, No. 51, pp. 293-302. 2012. 3.

[学会発表] (計5件)

- 1) 小泉圭吾: 無線センサネットワークを用いた文化財展示環境のリアルタイム観測システム, 保存科学研究集会 2013「文化財の収蔵・展示環境」, 奈良文化財研究所 平城宮跡資料館講堂, 2014. 2.
- 2) 小泉圭吾, 森井順之: 屋内・屋外文化財保存と公開に関する管理手法の一例, 第44回熱シンポジウム「役に立つ湿気研究」, 2014. 11.
- 3) 小泉圭吾, 森井順之, 神田高士, 伊藤広宣: 冬場の白杵石仏における覆屋の有効性評価のためのリアルタイム環境観測システム, 日本文化財科学学会第31回大会, P-081, 2014. 7
- 4) 伊藤三彩恵, 小泉圭吾, 小田和広, 朴春澤, 谷本親伯, 岩崎好規, 楊善龍, 郭青林: 敦煌莫高窟第108窟における電気探査を用いた水分環境に関する研究, 第48回地盤工学研究発表会発表講演集, 2014.
- 5) 小田和広, 小泉圭吾, 伊藤三彩恵, 朴春澤, 谷本親伯, 岩崎好規, 楊善龍, 郭青林: 敦煌莫高窟・石窟周辺地盤における水蒸気移動に関する研究, 第48回地盤工学研究発表会発表講演集, 2014.

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

なし

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

小泉 圭吾 (Koizumi Keigo)  
大阪大学・工学研究科・助教  
研究者番号: 10362667

(2) 研究協力者

藤田 行茂 (Fujita Yukisihige)  
地球観測株式会社・モニタリング事業室・代表取締役