

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 6 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289192

研究課題名(和文) 材料の濡れモニタリングによる建築外壁部材の劣化防止技術の確立に関する研究

研究課題名(英文) Study on establishment of deterioration prevention technology of building outer wall member by monitoring of materials wetness

研究代表者

大久保 孝昭 (OHKUBO, TAKAAKI)

広島大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：60185220

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、建築外壁に関し、濡れや乾湿繰返しなど、部材内部の水分移動をモニタリングし、部材の物理的劣化や居住性の低下をより早期に防止するための診断技術を確立することを目的として実施した。まず、ICタグを活用したNFC技術によって携帯電話等でデータを取り込むシステムを構築した。この計測システムを用いて、実際の建築部材を想定した模擬部材や実際の建築物で様々な実験を行った。その結果、本研究により、建築物における濡れモニタリングシステムの基盤を構築することができた。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to establish a diagnostic technique to prevent physical deterioration of members and deterioration of habitability more quickly by monitoring moisture movement inside the members, such as wetting and dry/wet repetition, concerning the outer wall of the building. First of all, we constructed a system that captures data by mobile phone by NFC technology utilizing IC tag. Using this measurement system, various experiments were conducted with simulated members assuming actual building materials and actual buildings. As a result, this research enabled us to build the foundation of the wetness monitoring system in the buildings.

研究分野：建築材料学

キーワード：保全技術 建築外壁 濡れセンサ 計測システム モニタリング 劣化

## 1. 研究開始当初の背景

### ① 研究の学術的背景

将来の建築物は、人の健康診断や人間ドックと同様に、簡易な常時モニタリングや高度な検査技術を組み合わせた診断により、安全安心な居住空間、快適な居住環境が構築されていることを担保すべきである。特に、構造物の不具合や欠陥を早期に検知する技術を活用した維持保全は、建築物の長寿命化や快適な居住性を保つためには極めて重要といえる。

本研究では、材料の劣化因子や居住性低下の大きな要因である「濡れ、乾湿繰返しおよび水分移動（以下、「濡れ」と記す）」を対象として検討を行う。濡れは人が確認できない積層部材内部、屋根小屋組み、床下などで発生しやすく、気づいたときには大きな被害として現れることが多い。

まず、住宅リフォーム・紛争処理支援センターの公表データに基づく住宅の不具合事象に対する相談件数を調査した。その結果、相談件数の上位を占める不具合は濡れに起因するものが多いことが明らかとなった。すなわち、建築材料において「濡れ」を管理することは居住者の満足度や建築物の耐久性向上にきわめて有効ということが分かる。

## 2. 研究の目的

本研究では、建築外壁に関し、「濡れ」や「乾湿繰返し」など、部材内部の水分移動をモニタリングし、部材の物理的劣化や居住性の低下をより早期に防止するための診断技術を確認することを目的とした。

建築物の供用・維持管理段階における水は、建築材料の経年劣化や居住性の低下を引き起こす物質となる。特に人が目視で確認できない建築部材内部の濡れは、無機系建築材料ではひび割れ・剥離、木質系材料では腐食・反り・割れ、鋼材では腐食などの劣化現象を引き起こす。併せて、水は当たり前の居住性能を損なう「雨漏り」や「断熱性低下」を発生させ、ときにはカビの発生を促進し居住者に健康被害をもたらすこともある。

## 3. 研究の方法

本研究では、静電容量式のセンサを用いて、濡れセンサ計測システムのプロトタイプを構築して実験検討を行う。その上で、まず各種外壁材料の濡れの程度と静電容量計測値との相関を定量的に明らかにし、センサ精度や実際の建築外壁におけるセンサの設置方法、データ収録方法提案のための実験を行う。さらにひび割れ部、剥離部あるいはパネル隙間などの欠陥部を再現した「模擬試験体」を作製し、試験体内部に発生する濡れと不具合との相関を分析する。これらの試験結果に実建築物で計測した結果を合わせて、「濡れモニタリングを基盤とする外壁の劣化・不具合診断手法（補修の要否の判断手法）」を提案する。

## 4. 研究成果

### (1) 実験概要

本実験は、建築外壁に関し、濡れや乾湿繰返しなど、部材内部の水分移動をモニタリングし、部材の物理的劣化や居住性の低下をより早期に防止するための診断技術を確認することを目的として実施した。本報告では、下記の項目に分けて成果の概要を示す。

- (a) 濡れセンサ計測システムの構築
- (b) 計測システムの活用方策の検討
- (c) 濡れセンサの活用による防水新技術の提案

### (2) 濡れセンサ計測システムの構築

筆者らがセンサ技術者と共同で開発した濡れセンサシステムプロトタイプの外観を写真1に示す。このシステムは同写真の上部に示すセンサ計測部（以下、タグセンサ子機）と写真の下部に示すセンサ出力部（以下、タグセンサ親機）からなる。タグセンサ子機を建築物において計測したい場所に設置してモニタリング計測を行い、計測データは定期的に無線通信によりタグセンサ親機に送られて保管される。住民はタブレット端末を用いて、居室に設置されたタグセンサ親機から計測値を入手する仕組みである。なおタブレット端末は、スマートフォンに置き換えることも可能である。

センサ部は、静電容量型のセンサであり、楕形の回路部分の静電容量の変化を捉えることで「濡れ」を検知する。本報では200pF程度までの静電容量の変化を計測し、制御部のAD変換等により12bit符号なし整数（0～4095）で出力し、センサ出力値としている。

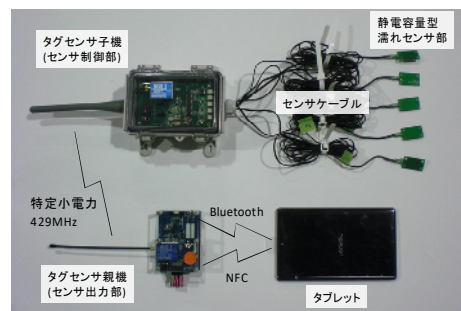


写真1 試作した濡れセンサ無線計測システム

### (3) 計測システムの活用方策の検討

#### ① 実験の対象

センサの基本性能試験結果より、本研究で構築したモニタリングシステムにおけるセンサにより水の有無を判断できることは明らかとなった。ただし、温度や水分中に含まれる成分によりセンサの出力値が大きく変動するため、実際の建築物において濡れの程度を判断することは困難と判断される。この計測性能の範囲において、実建築物での活用方策について実験検討をおこなった。

本研究では、居住者や使用者が濡れを目視で発見することが困難な建築部材内部の濡れ

の検知について検討を実施した。ただし、ここで作製した試験体は、濡れが発生するように故意に欠陥部を設けている。

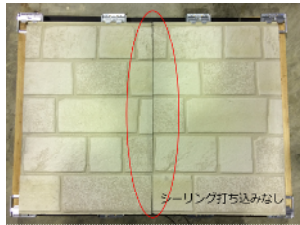
## ②降雨による建築材料の濡れ検知に関する実験

### (a) 試験体

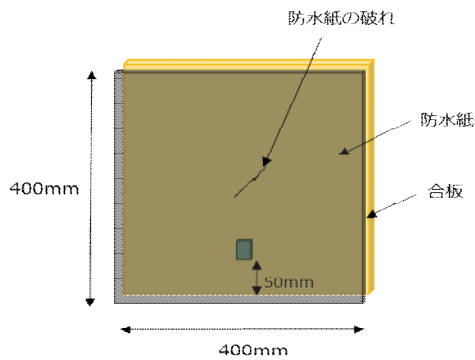
ここでは外気に接する建築部材について、降雨による濡れのモニタリング実験をおこなった結果を示す。作製した試験体を図1(a)~(c)に示す。各試験体には同図の各試験体に示す位置に欠陥を故意に生じさせており、センサは試験体内部に予め設置した。

図1(a)に示す試験体1は木造住宅や軽量鉄骨造住宅におけるサイディング外壁試験体である。この試験体ではサイディング材間のシーリング劣化を模擬し、試験体の一部にシーリング材を施工していない。この箇所はサイディング間が0.2~0.3mm程度の隙間が生じている。

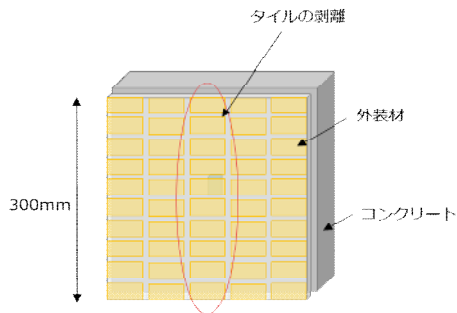
試験体2(図1(b))は木造住宅におけるラスモルタル外壁試験体である。この試験体で



(a) 試験体1:シーリング材の切れを模擬したサイディング外壁試験体



(b) 試験体2:ラスモルタルのひび割れを模擬した木造外壁試験体



(c) 試験体3:タイルの剥離を模擬したRC壁面試験体

図1 降雨による濡れモニタリング用の試験体

は、モルタル部分に幅0.1mm程度で長さ30mm程度のひび割れと防水紙の一部に長さ30mm程度の破れを設けている。

試験体3(図1(c))はタイル張りのRC外壁試験体である。この試験体では、下地コンクリートと張付けモルタルの間に剥離部と一部の目地に長さ30mmの目地ひび割れを欠陥として設けた。

### (b) 実験方法

実験は、図2に示す散水装置を有する二層式環境再現試験装置において気温20℃、相対湿度60%の環境下に24時間静置した試験体に、外気環境側から毎分200mLの散水を1時間与えた。なお、実験において試験体の周囲4面は防水テープでシールして、試験体小口面からの水分の侵入は生じないようにした。

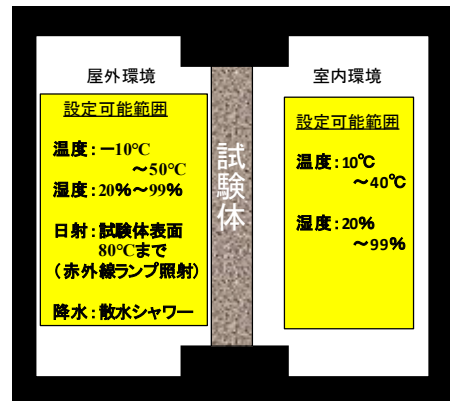


図2 二層式環境再現装置の概要

### (c) モニタリング結果

各試験体の測定結果を図3(a)~(c)に示す。同図(a)に示すようにシーリングの劣化を模擬した試験体1では、散水開始直後にサイディング裏面のセンサの出力値が急上昇し、散水を停止するとセンサ出力値は急激に低下している。ラスモルタル壁面の劣化を想定した試験体2(同図(b))では、散水後5分程度してから防水紙裏面のセンサの出力値が上昇し、散水途中から出力値が低下を始めた。また、タイルの剥離しているRC壁面試験体では、散水と同時に目地ひび割れ部から水分が侵入し、剥離部に設置したセンサの出力値が急上昇した。ただしこの試験体3では散水を停止した後も出力値は下がらず、剥離部には水分が停留していることがわかる。

## ③屋外環境と屋内環境との相違による濡れ検知に関する実験

### (a) 試験体

ここでは外気接する建築部材について、屋外環境と屋内環境の相違によって生じる部材内部の濡れモニタリングを試みた。検討した2種類の試験体を図4(a),(b)に示す。

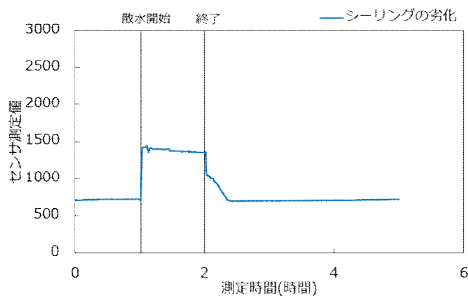
同図(a)に示す試験体4は木造住宅や軽量鉄骨造住宅における断熱外壁を模擬した試験体である。この試験体は通気層を有しておらず、部材内部での結露が発生しやすい仕様である。センサは試験体内部の位置に設置している。同図(b)に示す試験体5は戸建て住宅における1階風呂場脱衣所の床を模擬した試験体である。一般の木造住宅に使われる根太、合板、フローリングを用いて一般的な木床を作製しているが、この試験体では、フローリングの継ぎ目に接着不良の欠陥を設けている。

(b) 実験方法

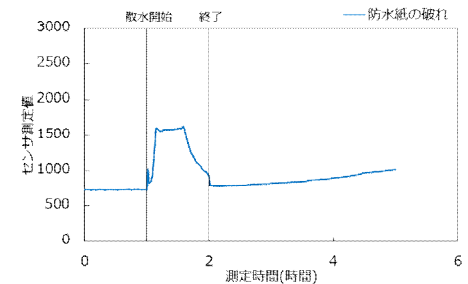
実験は、先の図2に示す二層式環境再現試験装置において、気温 20℃、相対湿度 60%の環境下で24時間静置した試験体について、屋内側は気温 30℃、相対湿度 85%、屋外側は気温 5℃、相対湿度 45%に環境を変化させて、試験体内部の濡れをモニタリングした。これは冬期における結露発生を想定した実験環境である。

(c) モニタリング結果

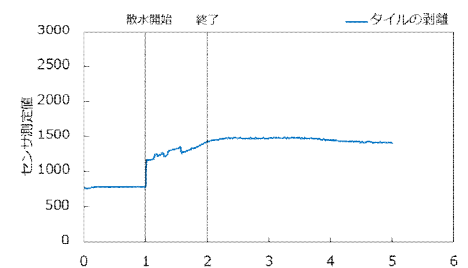
図5(a), (b)にセンサ出力値の経時変化を示す。同図(a)は屋内外の環境変化を2回生じさせたときの試験結果である。同図に示すように、断熱材と屋内のせっこうボード間に設置したセンサの出力値が上昇することが分かる。この結果からこの試験体では、せっこう



(a) 試験体1:シーリング材の切れを模擬したサイディング外壁試験体

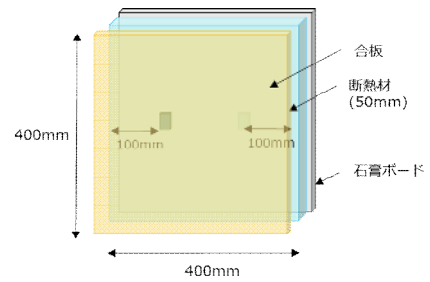


(b) 試験体2:ラスモルタルのひび割れを模擬した木造外壁試験体

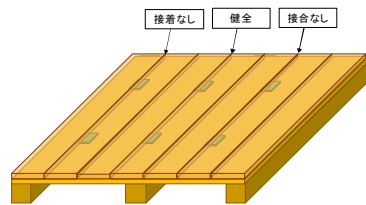


(c) 試験体3:タイルの剥離を模擬したRC壁面試験体

図3 降雨による濡れモニタリング試験結果

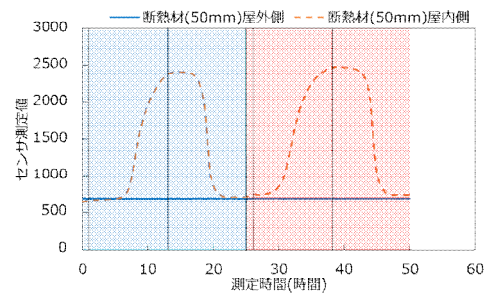


(a) 試験体4:通気層のない断熱外壁試験体

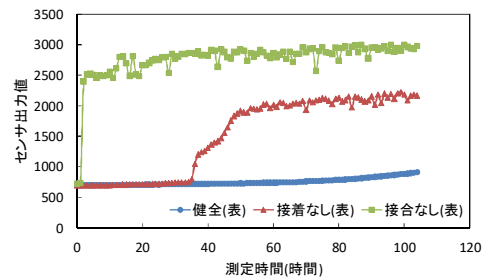


(b) 試験体5:風呂場脱衣所1階床試験体

図4 外気環境と室内環境との相違による濡れモニタリング試験体



(a) 試験体4:通気層のない断熱外壁試験体



(b) 試験体5:風呂場脱衣所1階床試験体

図5 外気環境と室内環境との相違による濡れモニタリング試験結果

ボード裏面に内部結露が生じやすい仕様であることが分かる。

図5(b)に示した木床の試験体では、屋内環境と屋外環境の変化を与えるとすぐに、フローリングの「さね」がない箇所では濡れが発生していることが分かる。また、「さね」の接着接合を施していない箇所では実験開始後約35分を経過してからセンサ出力値が上昇し始めた。また、健全に施工した部位ではセンサの出力値の変化が認められなかった。以上のことから木造のフローリング床において、外

部環境と内部環境との相違による部材の濡れ防止には部材の「さね」の施工品質確保が重要であることが分かる。また、本濡れセンサシステムにより木床の劣化の検知が可能であることが確認された。

#### ④実建築物におけるモニタリング実験

実際の建築物(住宅)においても本システムにより、外壁内部等の目視で確認できない部材内部のモニタリングが可能であるかについて検討を行った。また計測は、つくばにある国立研究開発法人建築研究所の暴露試験用模擬構造物実験住宅で行った。

##### (a)計測対象および計測概要

今回計測を行った対象は茨城県つくば市にある建築研究所敷地内に2010年に建てられた暴露試験用模擬構造物実験住宅である。写真2に実験住宅の外観を示す。また、図6に示すように、実験住宅の外壁、屋根裏、床下に計5つのセンサを設置し、2016年12月6日午後12時から2017年1月10日午前9時までの約1ヶ月間の計測を行った。この実験住宅は劣化を模擬したサイディング材のひび割れ、シーリング材の劣化、部材内部の結露等に伴う濡れの検知を試みたものである。



写真2 実建築物(模擬住宅)の外観

##### (b)モニタリング結果

図7に計測期間中のセンサ出力値の経時変化を示す。同図上部に示す降水量は気象庁の計測データによるつくば市の降水量を示している。同図に示すように、降雨のたびにサイディング材の室内側に濡れが発生していることが分かる。この箇所はサイディング材にひび割れが発生している箇所である。また、大引き周辺の出力値も僅かに上昇して時期があることも分かる。大引き周辺には通気口からの湿気の流入があるため、何らかの原因で濡れが発生した可能性がある。約1か月間の各センサの値を細かく見てみると、各センサで値が微量ながら上下に激しく変化していることが確認された。これは湿度による影響であると考えられる。

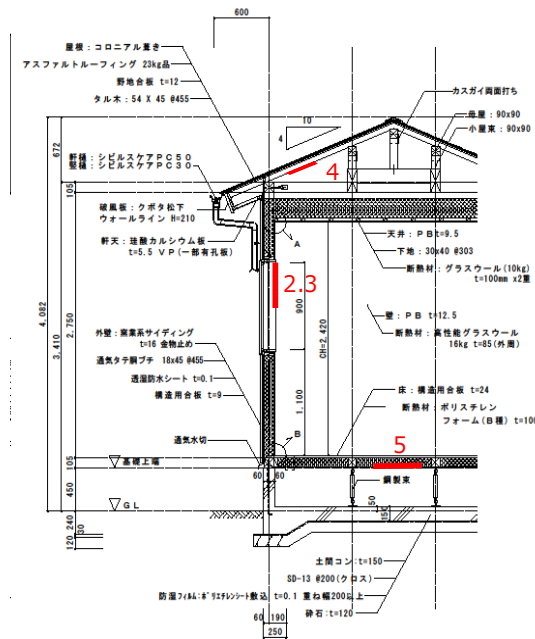
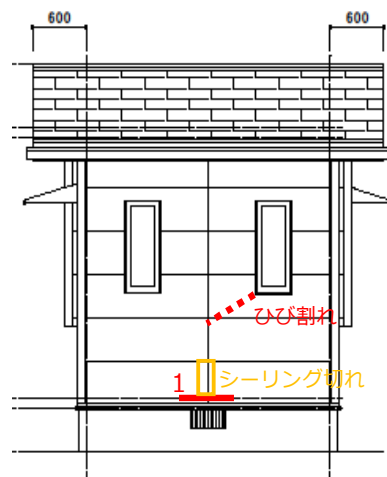


図6 実建築物(模擬住宅)におけるセンサ設置位置

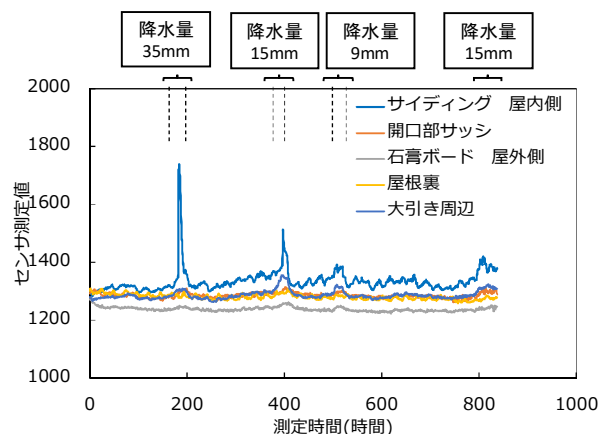


図7 実建築物(模擬住宅)における濡れモニタリング結果

#### (4)濡れセンサの活用による防水新技術の提案

木造建築物の外壁仕上げのひとつであるラス下地モルタル塗り仕上げ(ラスモルタル外壁)は多くの住宅に用いられており、美観

性などの仕上げ材としての機能だけでなく、木部分に対する防水や防火材料としての役割も担う。しかし、過去の地震時に大面積で剥落が生じたケースが報告されており、剥落したモルタルによる人への危害だけでなく防火材としての機能を失う恐れもある。ラスモルタルの剥落の原因としては、経年に伴うモルタルのひび割れ、メタルラス、ステーブルの腐食や、木製下地材の腐朽による固定度の低下などが挙げられる。したがって、地震時にラスモルタルの剥落を防止するために、経年劣化に対する耐久性や固定度などの性能を向上させることは重要である。

本研究では、地震時のラスモルタルの剥落防止および経年劣化に対する耐久性向上を目的に、弾性・粘着性を有する新規防水紙(以下、「粘着型防水紙」)の活用を提案し各性能を実験的に検討した。実験の結果、ラスモルタル外壁に粘着型防水紙を活用することで、ステーブルの防錆性やラス下地板とモルタルとの面外方向に対する接着一体性を向上に効果があることを明らかにした。また、濡れセンサシステムを用いた実験から、防水性能が優れていることも検証できた。

#### 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 11 件)

- 1) 西村和真, 大久保孝昭, 寺本篤史, 横田裕司, 流田靖博, 杉原大祐, 屈斐斐, 外壁複合改修構工法を想定した仕上げ層の透湿性評価, 日本建築学会中国支部研究報告集 第 40 巻, 査読無, PP37-40, 2017.3
- 2) 石橋宏平, 大久保孝昭, 寺本篤史, 松浦辰彦, 森健太郎, 濡れによる建築部材の劣化の予防のためのモニタリングに関する研究, 日本建築学会中国支部研究報告集 第 40 巻, 査読無, PP5-8, 2017.3
- 3) 西村和真, 大久保孝昭, 寺本篤史, 横田裕司, 外壁複合改修構工法を想定した仕上げ層の透湿性評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), 日本建築学会, 査読無, PP1281-1282, 2016.8
- 4) 石橋宏平, 大久保孝昭, 寺本篤史, 松本慎也, 佐藤航平, 材料の濡れモニタリング技術の確立に関する研究 その 1 センサの基本性能試験と屋内環境に対する活用法の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), 日本建築学会, 査読無, PP1233-1234, 2016.8
- 5) 佐藤航平, 松本慎也, 石橋宏平, 大久保孝昭, 寺本篤史, 材料の濡れモニタリング技術の確立に関する研究 その 2 屋外環境に対する基礎実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), 日本建築学会, 査読無, PP1235-1236, 2016.8
- 6) 佐藤航平, 松本慎也, 石橋宏平, 大久保孝昭, 寺本篤史, 松浦辰彦, 無線センサシステムを用いた材料の濡れモニタリング技術

- に関する研究 その 1 屋外環境に対する基礎的実験, 日本建築学会中国支部研究報告集 第39巻, 査読無, PP69-72, 2016.3
- 7) 石橋宏平, 大久保孝昭, 寺本篤史, 野崎有美, 松本慎也, 松浦辰彦, 無線センサシステムを用いた材料の濡れモニタリング技術に関する研究 その 2 センサ性能の把握と屋内環境に対する活用法の検討, 日本建築学会中国支部研究報告集 第39巻, 査読無, PP73-76, 2016.3
  - 8) 毛利聡, 大久保孝昭, 李亮, 高橋芳徳, 根元央希, 流田靖博, 粘着型防水紙の活用による木造ラスモルタル外壁の品質向上の検討, 日本建築学会構造系論文集 第 81 巻 第 721 号, 査読有, pp415-423, 2016 年 3 月
  - 9) 石橋宏平, 大久保孝昭, 寺本篤史, 無線濡れセンサを用いた建築部材の濡れモニタリングシステムの開発と検証実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), 日本建築学会, 査読無, PP393-394, 2015.9

〔学会発表〕(計 5 件)

- 1) 大久保孝昭, 旧陸軍被服支廠倉庫の経年劣化調査と診断結果, 旧陸軍被服支廠倉庫シンポジウム, アーキウオーク広島, 2016 年 11 月 20 日, 広島県立美術館ホール
- 2) 大久保孝昭, コンクリートの品質管理における IC タグの活用技術とコンクリートのひび割れ補修技術に関する実験研究の紹介, 日本コンクリート工学会中国支部, 平成 28 年 12 月 9 日, 広島工業大学広島校舎「わかりやすいコンクリート」講習会
- 3) 大久保孝昭, コンクリートの品質管理における IC タグの活用技術とコンクリートのひび割れ補修技術に関する実験研究の紹介, 日本コンクリート工学会中国支部, 平成 27 年 12 月 11 日, 海峡メッセ下関 801 大会議室, 「わかりやすいコンクリート」講習会

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

大久保 孝昭 (OHKUBO TAKA AKI)  
広島大学・大学院工学研究院・教授  
研究者番号: 60185220

##### (2) 研究分担者

寺本 篤史 (TERAMOTO ATSUSHI)  
広島大学・大学院工学研究院・助教  
研究者番号: 30735254

##### (3) 研究分担者

松本 慎也 (MATSUMOTO SHINYA)  
近畿大学・工学部・准教授  
研究者番号: 30325154