

# コンクリート湿潤養生

## 自動認識ロボットの開発

増田 貴之・中村 裕介

スラブコンクリートの施工において、打設後にスラブ表面の湿潤状態を維持することは、コンクリートの品質確保の上で大変重要である。しかしながら、湿潤状態については人間の目視判断による定性的な管理が通例となっており、定量的な管理手法が確立されていないなどの課題があった。そこで、スラブ表面の乾湿状態を定量的に評価できるセンサの開発に着手し、その有効性を確認した。さらに、そのセンサを自律走行式ロボットに搭載し、コンクリートの乾湿状態を自動で評価してマッピング表示するシステムの構築を行った。本報では、システム一式の実用化に向けて行った実証試験に関する結果を報告する。

キーワード：スラブ、湿潤養生、近赤外光、円偏光、水の吸光特性、自律走行式ロボット、省力化

### 1. はじめに

近年、EC サイトなどの増加を受け、大量の配送物を保管できる物流施設が増加している。そうした物流施設のスラブコンクリートは直床仕上げの場合が多く、表面が露出しているため、コンクリートの品質確保において打設後の湿潤養生は大変重要である。

湿潤養生として、散水後のスラブ表面を養生マットで覆うなどして、その後湿潤状態を保つ必要がある。これらは人間による作業が主であるため、一定の知見を有する人材の確保をはじめ、一定のコストや時間が掛かるといった負担がある。そうした負担を軽減するために、スラブと養生マットの間に乾湿状態を検知するセンサを配置する技術が提案されている<sup>1)</sup>。しかし、適切な品質管理を行うためには、スラブ面積に応じた十分な個数のセンサを配置する必要があり、それらの管理が煩雑になるなどの課題が発生している。

課題を解決するためには、配置型のセンサを用いて管理を行うのではなく、スラブ表面の乾湿状態を自動的に計測できる技術の開発が求められた。例えば、コンクリートの水分量を測定するものとして、水分吸収率の高い波長域の光と低い波長域の光の2つの波長の近赤外光を使用して測定する装置が提案されている<sup>2)</sup>。しかし、この装置は水分量を正確に測定することが目的であるため、装置が比較的大きくなるなど汎用性に欠ける面がある。また、スラブのような大きな面積に対して管理する用途には、運用・機能・取得データの処理方法・費用などの面も課題として挙げられる。

そこで今回、非接触かつ簡単な機構でスラブ表面の乾湿状態を評価できるセンサの開発を行った。加えて品質管理業務の省力化を図るために、大きな面積を有するスラブ上を走行しながら乾湿状態を評価できるロボットの開発を行った。本報では、同状態を定量的に評価できる近赤外光を用いたセンサの概要、そのセンサの有効性を確認した室内実験、およびセンサを搭載した自律走行式ロボットの現場適用実験について報告する。

### 2. 近赤外光を用いたセンサの概要

スラブ表面の乾湿状態を評価するために光の性質に着目した。光を鏡に照射した際の反射に着目し、湿潤養生のスラブ表面でも同現象を再現できると考えた(図-1)。この現象は水面で太陽光が反射される光景からも理解でき、光の物理的な特性である偏光状態が作用したものである。具体的には、光が円形状の偏光

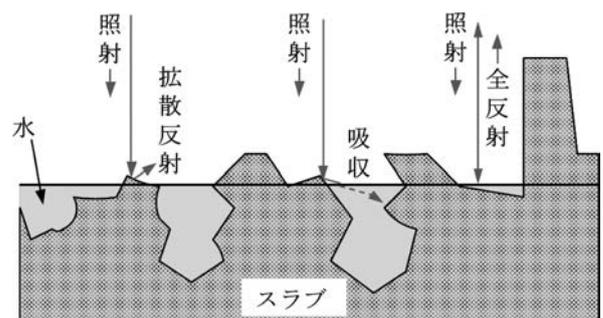


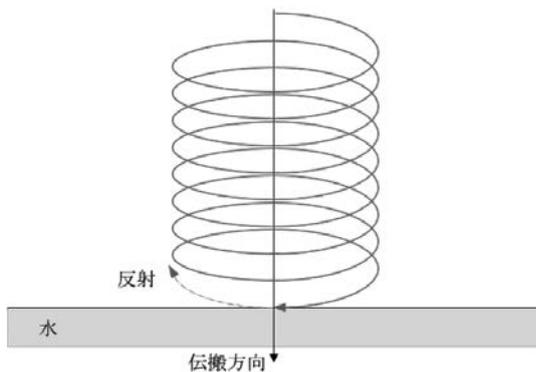
図-1 スラブ表面の乾湿状態と光の反射状態を表す模式図

として膜に照射された場合、その光は全反射を起こすという現象である。

光は、P波（Parallel波）およびS波（Senkrecht波）に分解可能な二つの直行する電磁波である。そして、P波とS波の位相差がないものを直線偏光と呼び、光は伝搬方向に対して直線的に運動する。これに対し、P波とS波の位相差が90度のものを円偏光と呼び、光は伝搬方向に対して螺旋的に運動する。円偏光は反射面に対して浅い角度で照射されることになり、同じ回転運動を保ったまま水膜により反射されることになる（図一2）。これは、水面に対して回転させながら石を投げた場合、水面に対して浅い角度であればあるほど石は飛び跳ねることと同様である。この現象と円偏光の反射現象は似ており、水膜を検知する手段として円偏光は適していると判断した。

次に、スラブ表面が乾燥過程にある場合、すなわちコンクリート表面の一部が露出し始めると、表面に存在する凹凸が水から突出して空気中に出現する。この場合、スラブ表面に照射された円偏光は全反射されずに拡散反射されることになるため、湿潤時よりも帰還する光量が減少すると考えられる。また、凹凸に微細な水分が含まれている場合は、表面張力によって覆われた水膜に対し、照射光は角度を有して照射されるため、一部の光が水に侵入する。この侵入した光を水に吸収させることで、すなわち水の吸光特性を用いることでスラブ表面の乾湿状態をより厳密に評価できると考えた。

吸光特性とは、物体が特定の波長の光を吸収する特性のことで、水は近赤外光である $\lambda = 700 \text{ nm}$ より長い波長の光を吸収する特性がある。特に、図一3に示す通り、水の分子構造のうちO-Hの伸縮振動と変角振動による吸収帯である $\lambda = 1,940 \text{ nm}$ や、H-O-Hの伸縮振動による吸収帯である $\lambda = 2,900 \text{ nm}$ 、その半分の波長である $\lambda = 1,450 \text{ nm}$ に大きな吸収が認められている。波長が長くなるにつれ、その光源やセンサ



図一2 円偏光の反射現象

は一般に技術難易度とコストが高くなるといったデメリットが挙げられる。そこで、技術難易度とコストのバランスを鑑みて、 $\lambda = 1,450 \text{ nm}$ の近赤外光を用いたセンサを開発することとした。

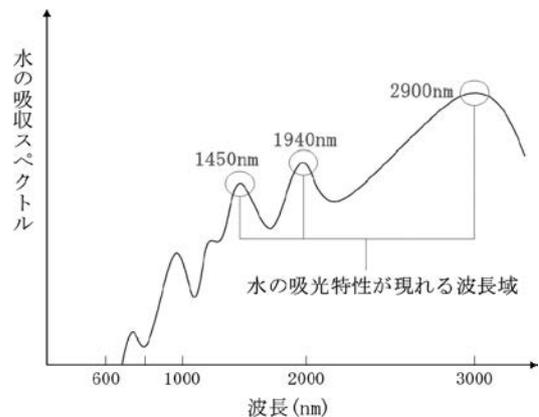
以上のように、 $\lambda = 1,450 \text{ nm}$ の近赤外光を円偏光としてスラブ表面に照射することで、湿潤状態では光の反射量が大きく、乾燥状態では光の反射量が小さくなるという関係性が成り立つと仮定できた。

この関係性を、3章で言及する室内実験で確認し、スラブ表面の乾湿状態を評価できる基礎技術とした。この基礎技術を応用し、図一4に示すような光学センサを開発した。なお、同センサでは円偏光のみの受光量を計測できるように内部で制御しており、光検出器において受光量を電圧に増幅変換する仕様としている。

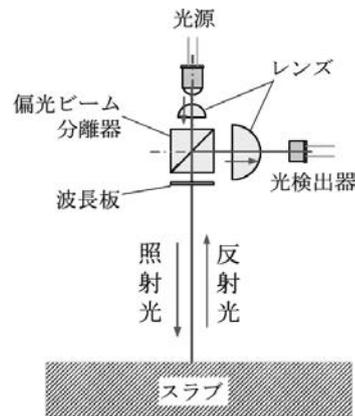
### 3. 室内実験

#### (1) 実験概要

開発したセンサの有効性を検証するため、コンクリートの乾湿状態と計測値（電圧値）との関係を室内実験により確認した。試験体としたコンクリートは、



図一3 水の吸光特性



図一4 光学センサの内部機構

平面 100×100 mm, 高さ 50 mm で, 表面に水膜を張り, その直上にセンサを配置して, 計測値を求めた。同状態の変化については, ビデオ撮影による表面変化の目視観察と水の質量変化を電子天秤により測定した。室内実験状況を図-5に示す。なお, 測定環境条件は, 湿度 40~50%とし, 気温 40℃で6回, 23℃で4回の計10回実施した。

計測にあたり,  $\lambda = 1,450 \text{ nm}$  の光に加え, 水の吸光特性が認められない  $\lambda = 1,300 \text{ nm}$  での計測も同時に行い, 相対的な違いを確認することとした。

(2) 実験結果と考察

2つの波長の光での計測結果の一例を図-6に示す。ここで,  $\lambda = 1,300 \text{ nm}$  での計測値を LD1 [mV],  $\lambda = 1,450 \text{ nm}$  での計測値を LD2 [mV] とした。どちらの光もスラブ表面の経時変化に応じた計測値の変化が認められるが, LD1 は計測値の大小関係が逆転しているため, 乾湿状態を絶対的に評価することが難しいことが分かる。一方で, LD2 は, 計測値の大小関係が逆転せず絶対評価が可能である。したがって,  $\lambda = 1,450 \text{ nm}$  の光の有効性が確認できた。

次に2つの波長の光での計測において, 再現性を検証するために, 各水準の表面に対して, 計測値と水の厚さ(水位)の関係を確認した。なお, 水位を継続して直接計測することは困難であることから, 電子天秤で計測した質量から水位を換算した。LD1 での計測結果と水位の関係の一例を図-7に示す。LD1 での計測値は, 大小関係が逆転しており, さらに実験条件からの規則性が認められないことから, 再現性の確認

には至らないことが分かる。

次に, LD2での計測結果と水位の関係を図-8に示す。LD2での計測値は, 全水準において大小関係

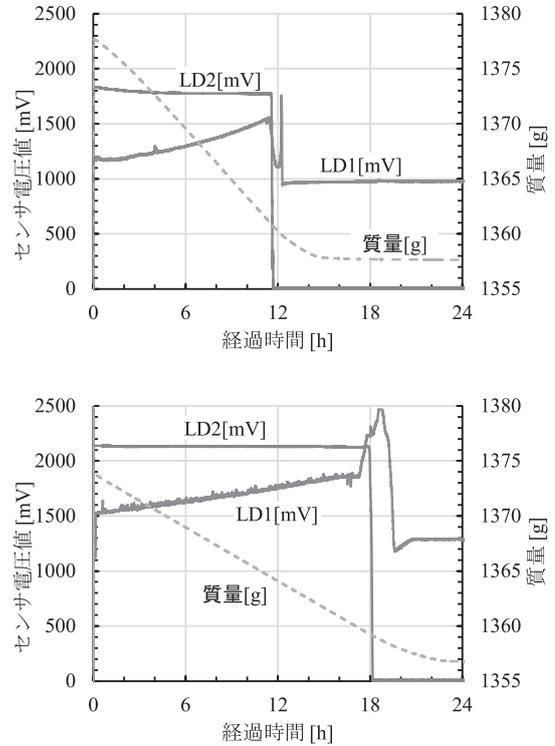
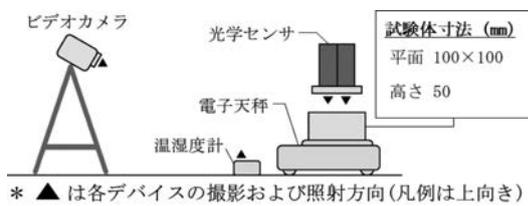


図-6 LD1, LD2 および質量の計測結果 (上) 湿度 50%, 気温 40℃ (下) 湿度 50%, 気温 23℃



\* ▲ は各デバイスの撮影および照射方向(凡例は上向き)



図-5 室内実験状況

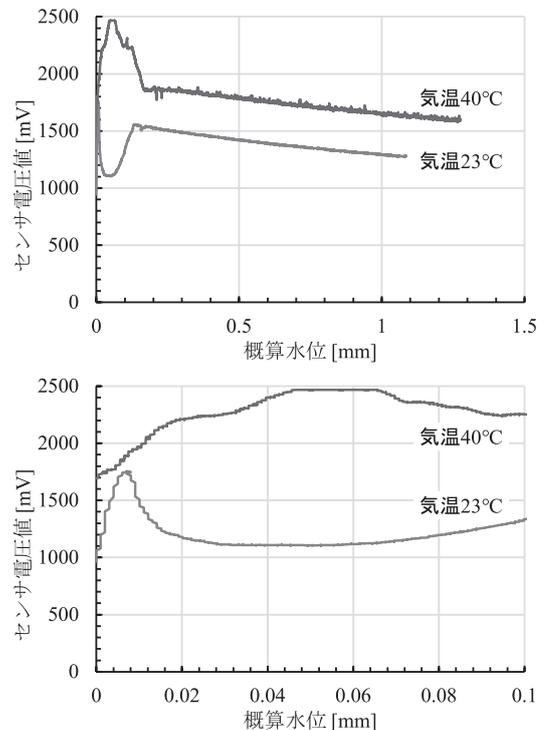
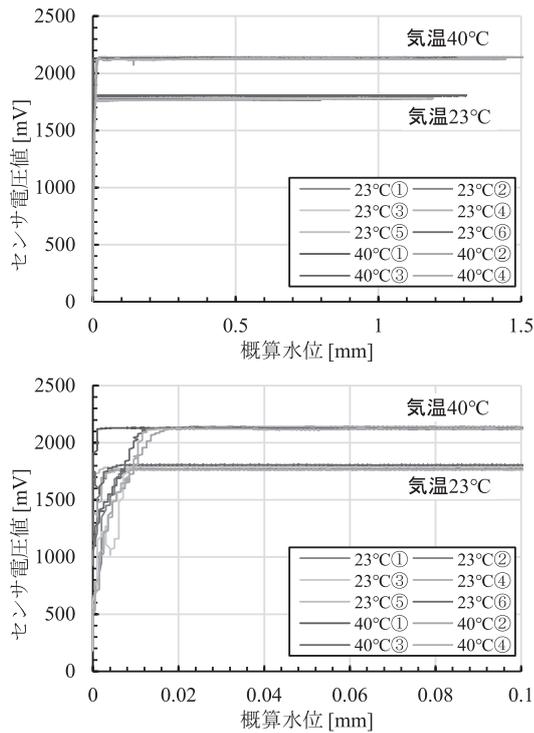


図-7 LD1 計測結果と水位の関係(2水準) 下段は上段の水位 0.1mm 以下における拡大表示



図一八 LD2 計測結果と水位の関係 (全 10 水準)  
下段は上段の水位 0.1mm 以下における拡大表示

が逆転していないことが分かる。さらに、実験に用いた全水準での計測値が 1,750 mV 付近と 2,200 mV 付近の 2 つの範囲に集約されており、概ね良好な再現性を確認できる。2 つの範囲に分かれた主な理由として、気温による影響が考えられるが、計測値の大小関係が逆転していないことから、乾湿状態の評価に影響はないと判断した。

最後に、スラブ表面の乾湿状態と計測値の関係について考察する。スラブ表面の凹凸が水面に露出していない「湿潤状態」、スラブ表面の一部の凹凸が水面より露出した「半乾燥状態」、スラブ表面の多くの凹凸が水面より露出した「乾燥状態」と分類した。「湿潤状態」は計測値が 1,200 mV 以上、「乾燥状態」は 100 mV 以下、「半乾燥状態」は 100 mV～1,200 mV の範囲に収まることを複数の実験結果により確認した。その結果、それぞれのスラブ表面の乾湿状態を定量的に定義するためには、計測値による基準を設定することで工学的に可能であると考察した。

上記の結果と考察から、スラブ表面の乾湿状態を評価する技術として、 $\lambda = 1,450 \text{ nm}$  の近赤外光を用いることとした。また、それによる計測値が同状態を定量的に判断できる根拠であることを確認できた。

## 4. センサ搭載型自律走行式ロボットの現場適用実験

### (1) 自律走行式ロボットの概要

実現場におけるスラブ表面の乾湿状態を評価するために、従来は電極センサを配置する方法が採用されているが、配置手間が発生することが課題であった。そこで、省力化や現場への適用化の観点から、自律走行式ロボットにより評価することが最適と判断した。

自律走行式ロボットとは、走行ロボットが移動する周囲の環境に誘導装置を設置することなく、ロボット本体に搭載したセンサ類により自己位置、あるいは走行路を検出して走行するロボットのことである。現在実用化されている主な自律走行方式には、2次元 SLAM 方式、画像処理・3D モデル比較方式、および 3次元 SLAM 方式があり、いずれも SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) と呼ばれるロボット周囲の環境を計測し、地図を生成しながら、同時に自己位置を同定する技術が基本となっている。今回開発した自律走行式ロボットは、省力化と高い汎用性を考慮した結果、メンテナンスのしやすさとコストを考慮し、2次元 SLAM 方式を採用した。

そして、2章で開発したセンサを自律走行式ロボットに搭載した上で、移動しながらスラブ表面の乾湿状態を評価し、評価結果をマッピング表示するシステム一式の開発を行った。センサを搭載した自律走行式ロボットの外観を図一九に示す。諸元として、サイズは全長 1,400 mm、全幅 750 mm、全高 780 mm、質量は 85 kg、最高走行速度は時速 2.0 km、最小回転半径は 2.0 m である。また、自律走行式ロボットには、ロボ駆動をはじめとした各種操作を制御するパソコンなどの制御部、ロボットの周囲環境を計測する 2D LiDAR およびスラブ表面を評価するセンサを実装した。



図一九 センサ搭載型自律走行式ロボット

(2) 実験概要

開発したセンサとロボットをはじめとするシステム一式の適用性を確認するために、約 860 m<sup>2</sup> のスラブ面積を有する工事現場での適用実験を行った。対象のスラブに対して一様に散水し、その後の湿潤養生の経時変化を評価することとした。計測回数は3回で、12:30, 13:30, 14:30 の1時間ごととした。

実験手順として、まず自律走行式ロボットを人間による操作で対象スラブ上を隈なく走行させる。この時、自律走行式ロボットに搭載している 2D LiDAR により周辺環境を計測し、ロボットが走行するための地図を作成する。作成した地図は、任意の範囲でグリッド化でき、今回は 1 m 四方をグリッド化した。次に、作成した地図とロボットの自己位置を照合して、走行経路を算出する。そして、ロボットへ走行開始の信号を送ることで、自律走行が開始される。この際、搭載しているセンサにより、1 m 四方のグリッドに応じた自動評価も開始する。また、評価結果を目視結果と比較しやすくするために、3.2 節で定義した、「湿潤状態」を青色、「半乾燥状態」を黄色、「乾燥状態」を赤色として、システム上でマッピング表示できるようにした。なお、ロボットの走行速度と計測頻度の関係上、同じグリッド上で複数回の計測が連続して発生する。その場合、計測値のうち小さいものを評価結果として採用した。計測値が小さいほど、「乾燥状態」に近いことを表し、湿潤養生の品質管理上において安全側の判定とするためである。

(3) 実験結果と考察

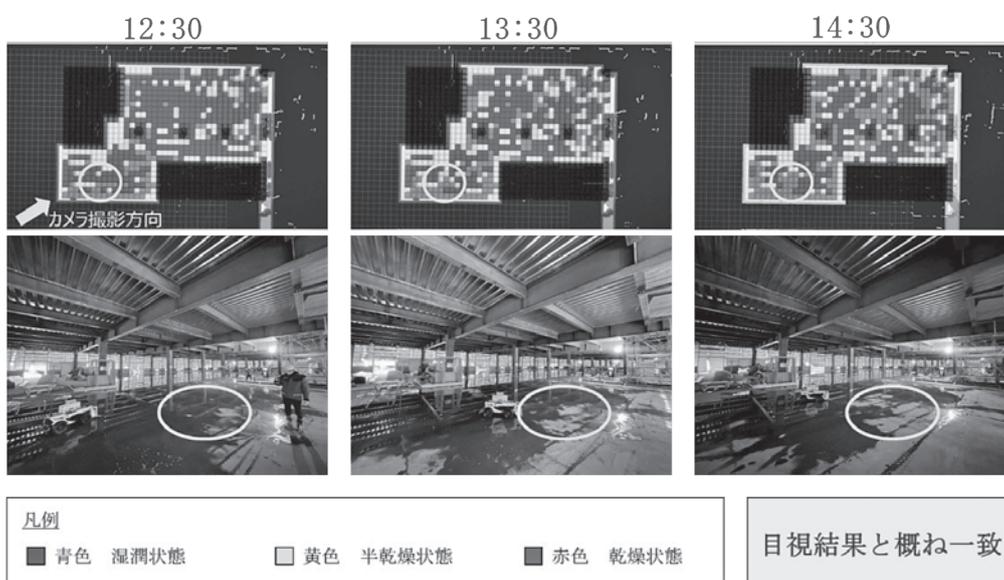
スラブ表面の経時変化について、センサによる評価

結果と目視結果を比較したものを図—10に、各計測時間における評価結果の一覧を表—1に示す。スラブ面積 860 m<sup>2</sup> の計測範囲に対して、1回あたりの計測に要した時間は約 20 分で、スラブ全体の約 80% の面積を計測することができた。80% 程度の計測面積となった主たる理由は、今回開発したロボットの最小回転半径が 2.0 m であり、測定対象範囲とした外周部分においてロボットが走行できないエリアが発生したためである。

図—10に示す評価結果について、丸印の箇所のように、センサによる評価結果と目視結果が概ね一致していることが確認できる。そして、表—1に示す「乾燥状態」と「湿潤状態」に着目すると、時間経過とともに、それぞれが相反しながら推移しており、評価結果に矛盾が生じていない。また、この確認を容易にするために、「湿潤割合」という指標を設けた。「湿潤割合」とは、評価可能点全てに対し、「湿潤状態」として評価する点の割合と定義した。「湿潤割合」が時間経過とともに一律的に低下していくことが確認できたため、スラブ表面の経時変化を評価できる定量的指標として提案できる可能性がある。

表—1 湿潤評価結果の一覧

計測時間	計測点数		
	12:30	13:30	14:30
乾燥状態	90	118	192
半乾燥状態	35	64	40
湿潤状態	317	261	210
未計測	123	122	123
湿潤割合 (%)	72	59	47



図—10 湿潤評価結果と目視結果の比較

## 5. おわりに

物流施設をはじめとした、スラブ面積 860 m<sup>2</sup> のコンクリート表面を対象にした乾湿状態を評価する技術として、近赤外光を照射するセンサを提案した。本報では、センサの有効性の確認を目的とした室内実験と、センサを搭載したロボットをはじめとするシステム一式の適用性の確認を目的とした現場適用実験により、以下に示す事項を確認した。

- i. 光の形状を円偏光にし、水の吸光特性が卓越する  $\lambda = 1,450 \text{ nm}$  の近赤外光を用いたセンサにより、スラブ表面の乾湿状態の評価が可能である
- ii. 自律走行式ロボットを用いて、面積 860 m<sup>2</sup> のスラブ面を約 20 分間で評価できる
- iii. 開発したシステムにより、経時変化するスラブ面全体の乾湿状態をマッピング表示できる

## 6. 今後の展開

建設現場への実装適用に向けて、散水設備との連携を目指している。得られたスラブ表面の乾湿状態の評価結果を散水設備に連携することで、より高品質な湿潤養生が可能になると考える。加えて、従来の湿潤養生に要した労務の省力化にも寄与できる。その他にも、水を垂れ流しにした従来の散水養生などに比べ

て、必要十分な散水養生が可能となるため、水の省資源化にも寄与することが可能である。

なお、本開発はユアサ商事(株)と共同で実施しているものであり、建設現場への実装適用に向けてブラッシュアップ中である。2023 年度中に散水設備との連携ならびにシステム一式のプロトタイプ開発を完了し、2024 年度中の販売を予定している。

JCMIA

### 《参考文献》

- 1) NETIS KK-160022-VE, コンクリート養生管理に用いる無線温湿度測定装置, <https://www.netis.mlit.go.jp/netis/pubsearch/details?regNo=KK-160022%20> (2023 年 4 月 19 日確認)
- 2) 郡 政人, 「近赤外分光法によるコンクリート表層部の物性評価に関する研究」, 土木学会年次学術講演会梗概集, pp.7-8, 2012.9

### 【筆者紹介】

増田 貴之 (ますだ たかゆき)  
 (株)奥村組  
 土木本部 土木工務部 土木企画課  
 主任



中村 裕介 (なかむら ゆうすけ)  
 (株)奥村組  
 ICT 統括センター イノベーション部  
 BIM 推進グループ  
 グループ長

