

# スラブ湿潤状態評価技術の開発

## —光学センサと自律走行式ロボットによる自動評価システムの構築—

### Development of an Evaluation Method of Wet Conditions on Concrete Slabs

#### -Building a System Incorporating Optical Sensors and Autonomous Mobile Robots -

増田貴之\* 赤星博仁\*\*

#### 要 旨

スラブコンクリートの施工において、コンクリート打設後にスラブ表面の湿潤状態を適切に維持することは品質管理上大変重要である。しかしながら、金罫仕上げ後の湿潤養生開始時期の判断や酷暑期における湿潤状態の管理は難しく、その湿潤状態の評価は管理者の目視判断に拠るため、定量的かつ適切な判断がなされているとは言い難い。また、湿潤状態を維持するためには、作業面においても多くの労力を要する。そこで湿潤状態を定量的に評価できるセンシング技術の開発に着手した。まず、円偏光として照射する近赤外光に着目した光学ユニットを提案し、その有効性を室内実験により確認した。さらに、本センシング技術を搭載した自律走行式ロボットを用いて、スラブ表面の湿潤状態を自動的に判定しマッピング表示するシステムの構築を行い、その現場適用を試みた。その結果、現場実装への可能性を確認した。

キーワード：スラブ、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. まえがき

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はコンクリートの直床仕上げの場合が多く、表面が露出した状態となるため、打設後の湿潤養生は大変重要な作業である。コンクリートには普通ポルトランドセメントが用いられることが多く、概ね5日以上の湿潤養生期間が求められている。

所要の高品質を得るべく、適切な湿潤状態を維持するために散水後のスラブ表面を養生マットで覆うなどして管理が行われている。また、人的管理が主流であるため、一定のスキルを有する人材の確保や管理コストの負担が増えるといった問題がある。現在、そうした養生管理の負担を軽減するために、スラブと養生マットの間に湿潤状態を検知するセンサを配置して、湿潤養生を管理する技術が提案されている<sup>1)</sup>。しかし、スラブ面積が大きい場合、多くのセンサを設置する必要があり、やはり人材確保および管理コストの負担が発生している。

こうした人的負担を軽減するために、配置型の測定端子を用いることなく、スラブ表面の湿潤状態を自動的に管理できる技術や装置の開発が強く望まれている。こうした中で、コンクリートの水分量を測定するものとして、乾燥したコンクリートに水を散布したのち、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照射して、水分の吸収度合いを測定する装置が提案されている<sup>2)</sup>。しかし、これは近赤外分光法を用いたものであり、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汎用性に欠ける。また、スラブのような大きな面積に対して湿潤状態を管理する用途には、運用・機能・取得データ処理方法・費用などの観点から種々の問題がある。

そこで今回、スラブ表面の湿潤状態を非接触でかつ簡単な機構で評価できるセンサの開発を行った。加えて管理業務の省人化を図るために、自動で湿潤状態を計測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シング技術の概要、そのセンシング技術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を用いてスラブ湿潤状態を自動でマッピング表示するシステムを試行した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シング技術の概要

スラブ表面の湿潤状態を評価するために、光の性質に着目した。光を鏡に照射した場合、反射されることは周知であり、その鏡はスラブ上の湿潤養生がなされている状態で再現することができる。この現象は水面に太陽光

\* 土木本部 土木工務部 \*\* 技術本部 技術研究所 建築研究グループ

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、光が円偏光状態で水膜に照射された場合、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 波の位相差がない状態を直線偏光と呼び、伝搬方向に直線的に運動する。これに対し、P 波と S 波の位相差が 90 度の状態を円偏光と呼び、伝搬方向に螺旋的に運動する。図-1 に示す通り、円偏光は伝搬方向において回転運動しながら進むため、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。これは、水切りという遊びから現象が確認できるように、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。この現象と円偏光の反射現象は似ているため、光の形状を円偏光として開発することとした。

上記の現象は、光が水膜に対して垂直に照射した場合に確認できる。一方、垂直でない場合、光の一部は反射されずに水膜内に侵入することになる。そこで、水の吸光特性を利用することで、スラブ表面の湿潤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、例えば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-2 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  $\lambda=2,900\text{nm}$  や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。しかし、これら近赤外光を用いた技術はあるものの、先に課題として挙げている通り、スラブ表面の湿潤状態の評価には利用できない。また、波長が長くなるにつれ、その光源やセンサは一般に技術難易度が高く、コストが高くなるといったデメリットが挙げられる。そこで本技術では、技術難易度とコストのバランスを鑑みて、 $\lambda=1,450\text{nm}$  を用いたセンシング技術を開発することとした。

スラブ表面には多少の凹凸が存在するため、図-3 のように模式図として表現することができる。スラブ表面が湿潤している状態、すなわち水が表面の凹凸を被覆している場合には、レーザから照射された光が水面で全反射され、照射光はほぼ全て帰還することになる。一方、スラブ表面が乾燥過程にある状態、すなわち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出现する。この出現時にレーザを照射した場合、凹凸によって拡散反射されることになり、湿潤時よりも帰還する光量が減少する。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。その結果、光が吸光特性により水に

吸収されて、帰還する光量は減少する。したがって、湿潤状態ではレーザ光の反射量が大きく、乾燥状態ではレーザ光の反射量が小さくなるのが分かる。

この関係性を、3 章で言及する室内実験で確認し、スラブ表面の湿潤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-4 に示す通り、光学センサを開発した。センサ内では、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。

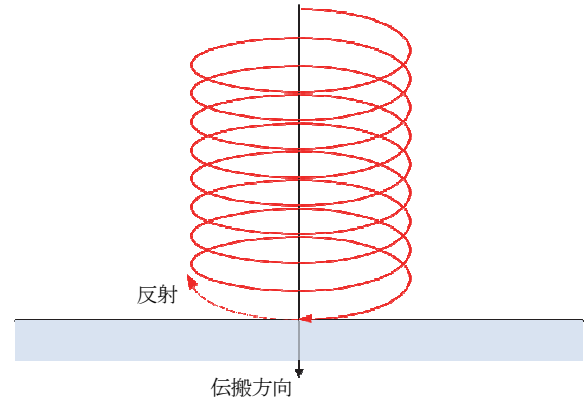


図-1 円偏光の反射現象

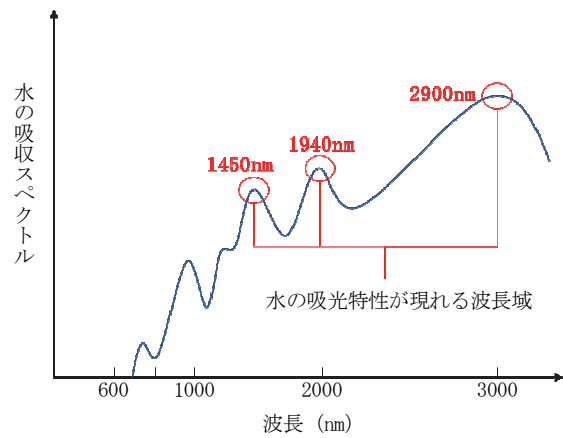


図-2 水の吸光特性

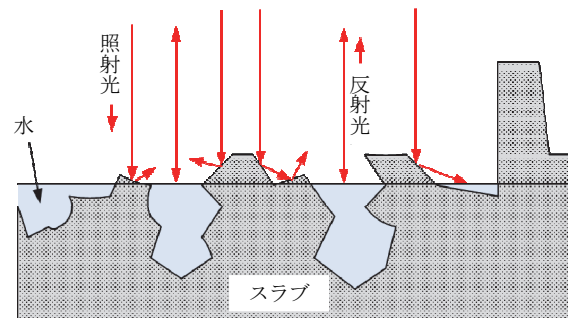


図-3 スラブ表面の湿潤状態と光の反射状態を表す模式図

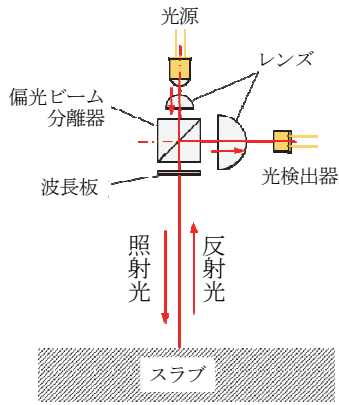


図-4 光学センサの内部機構

### 3. 室内実験

#### 3.1 実験概要

開発したセンシング技術の有効性を検証するため、コンクリートの湿潤状態と受光計測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、平面100×100mm、高さ50mm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（電圧値）を求めた。湿潤状態の変化については、ビデオ撮影による表面状態の目視観察と水の質量変化を電子天秤により測定した。実験状況を図-5に示す。なお、測定環境条件は、湿度条件を40～50%とし、気温条件を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、 $\lambda=1,300\text{nm}$ の光での計測も行った。 $\lambda=1,300\text{nm}$ は、図-2でも確認できる通り、水の吸光特性が認められない波長である。2つの波長での光を用いて計測することで、それらに相対的な違いが確認できると考えたためである。

#### 3.2 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)とする。なお、図の中では、青線でLD1を、赤線でLD2を、緑線でコンクリート質量(g)を表現している。どちらの光もスラブ表面の経時変化に応じて計測値が変化することが認められるが、LD1は計測値の大小関係が逆転していることから湿潤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、LD2すなわち $\lambda=1,450\text{nm}$ 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精度的に困難なため、電子天秤で計測した質量から水位を換算した。

まず、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、有効性と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1,750mV付近と2,200mV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大きな理由は、気温による影響であることが分かるが、気温による計測値の違いがあったとしても、計測値の大小関係が逆転していないことから、湿潤状態を評価することに影響はないと判断した。

最後に、スラブ表面の湿潤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状態を「湿潤状態」、スラブ表面の一部の凹凸が水面より露出した状態を「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状態を「乾燥状態」と分類した。これら3つの状態は計測値の大小関係に従っており、「湿潤状態」は計測値が1,200mV以上、「乾燥状態」は100mV以下、「半乾燥状態」は100mV～1,200mV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湿潤状態を定量的に定義するためには、計測値による閾値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、スラブ表面の湿潤状態を評価する技術として、近赤外光である $\lambda=1,450\text{nm}$ のレーザを用いることにした。また、それによる計測値が湿潤状態を定量的に判断できる根拠であることを確認した。

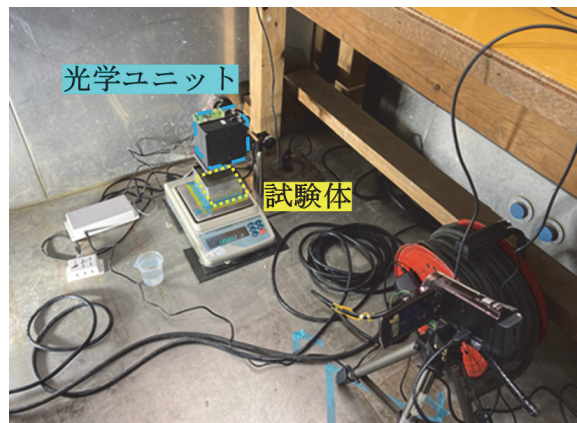
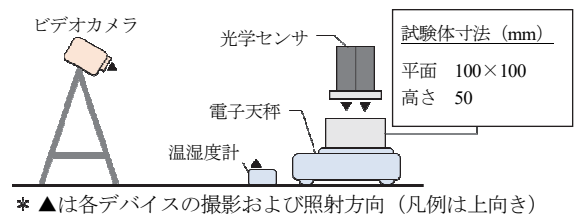


図-5 室内実験状況

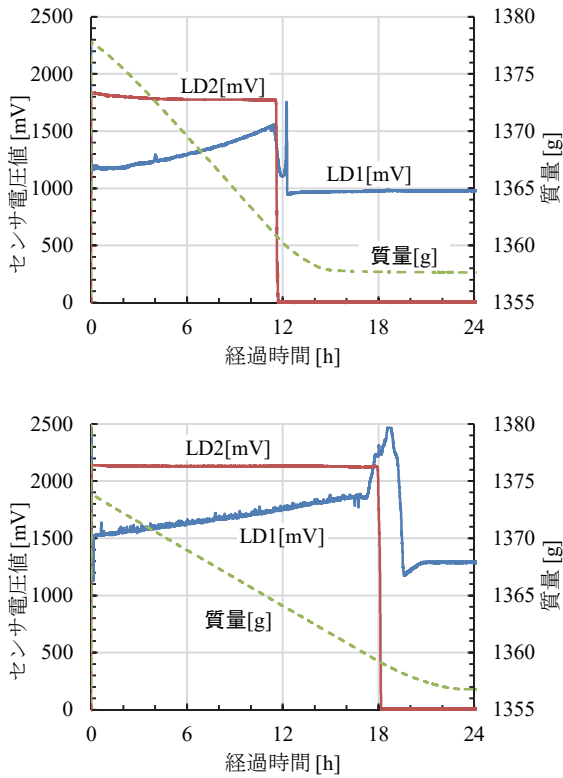


図-6 LD1, LD2 および質量の計測結果  
 (上) 湿度 50%、気温 40°C  
 (下) 湿度 50%、気温 23°C

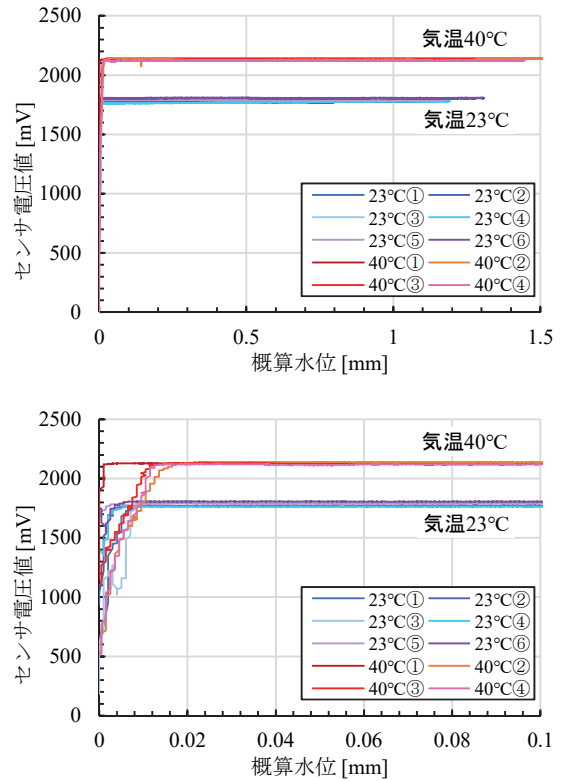


図-8 LD2 計測結果と水位の関係 (全 10 水準)  
 下段は上段の水位 0.1mm 以下における拡大表示

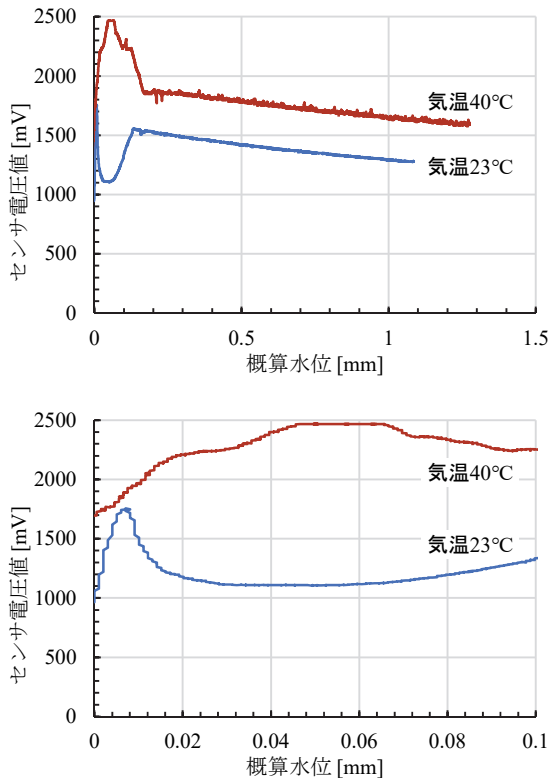


図-7 LD1 計測結果と水位の関係 (2 水準)  
 下段は上段の水位 0.1mm 以下における拡大表示

#### 4. 現場適用実験

##### 4.1 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湿潤状態を評価管理するためには、先に挙げた電極センサを配置する方法でも可能だが、配置のための労力が発生することから、省力化の目的を達成できていない。そこで、実現場への適用性と省力化の観点から、自律走行式ロボットにより評価管理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ものである。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)と呼ばれる技術が基本となっている。SLAM とは、ロボット周囲の環境を計測するセンサを用いて、地図を生成しながら、同時に自己位置を同定するものである。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低コストを優先し、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、移動しながらスラブ表面の湿潤状態を評価し、

評価結果をログに残す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-9に示す。諸元として、サイズは全長 1,400mm、全幅 750mm、全高 780mm、質量は 85kg、最高走行速度は時速 2.0km、最小回転半径は 2.0m 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 およびスラブ表面の湿潤状態を評価するセンサを実装した。2D LiDAR とは、レーザを使用して周囲の物体を検出するセンサの一種で、2次元の平面に対してレーザを放射し、反射した光を検出して、物体の位置、距離、形状などの情報を取得するものである。

#### 4.2 実験概要

開発したセンサとロボットの実用性を確認するために、1,000m<sup>2</sup> 級のスラブ面積を有する工事現場での現場適用実験を行った。選定した工事現場の概要を図-10に示す。実験に用いた対象スラブ面積は約 860m<sup>2</sup> である。今回は広範囲のスラブに対する自動計測の実用性を確認することが目的であるため、コンクリート打設から 30 日後のスラブに対して、一様に散水し、その後の湿潤状態を計測することとした。実験時期は冬期で、気温は 0.4℃、湿度は 78%の環境であった。なお、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による操作で対象スラブ上をなるべく隈なく走行させる。この時、自律走行式ロボットに搭載している 2D LiDAR により周辺環境を点群として計測し、ロボットが走行する地図を作成する。作成した地図は、任意の範囲でグリッド化でき、今回は 1m 四方をグリッド化した。次に、作成した地図情報とロボット情報を照合して、走行経路を算出する。作成した地図と算出された走行経路により、ロボットへ走行開始の信号を送ることで、自律走行が開始する。この際、搭載している湿潤状態評価センサにより、1m 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、システム上で表現した。なお、ロボットの走行速度と測定頻度の関係上、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。それは、計測値が小さいほど、「乾燥状態」に近いことを表し、湿潤養生の管理上、安全側の判定とするためである。

#### 4.3 実験結果と考察

時間経過に伴う表面状態の変化について、湿潤評価結果と目視結果を比較したものを図-11に、各計測時間における計測点の湿潤評価結果の一覧を表-1に示す。スラブ面積 860m<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、スラブ面積全体の約 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 2.0m であり、特に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-11に示す評価結果のうち、黄色の丸に着目すると、目視で確認できる通り、センサによる評価と概ね一致していることが確認できる。そして、表-1に示す湿潤状態を計測したデータの「乾燥状態」と「湿潤状態」について着目すると、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ことを確認できる。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、スラブ表面の湿潤状態を評価する指標として提案できる可能性がある。



図-9 センサ搭載型自律走行式ロボット

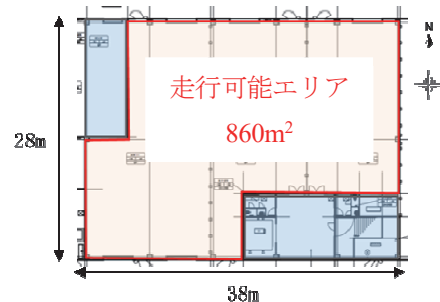


図-10 現場適用実験の概況

5. まとめ

物流施設をはじめとした、スラブ面積 1,000m<sup>2</sup> 級のコンクリート表面を対象にした湿潤状態を評価する技術として、近赤外光を用いたセンシング技術を提案した。本報では、当該技術の有効性の確認を目的とした室内実験と、スラブ表面自動評価システムの実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波長 1,450nm の近赤外光を用いたセンサにより、スラブ表面の湿潤状態の判定が可能である
- ii. 自律走行式ロボットを用いて、面積 860m<sup>2</sup> のスラブ面を約 20 分で計測できる
- iii. 開発した湿潤状態のマッピングシステムにより、時間とともに変化するスラブ面全体の湿潤状態の把握が可能である

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    |

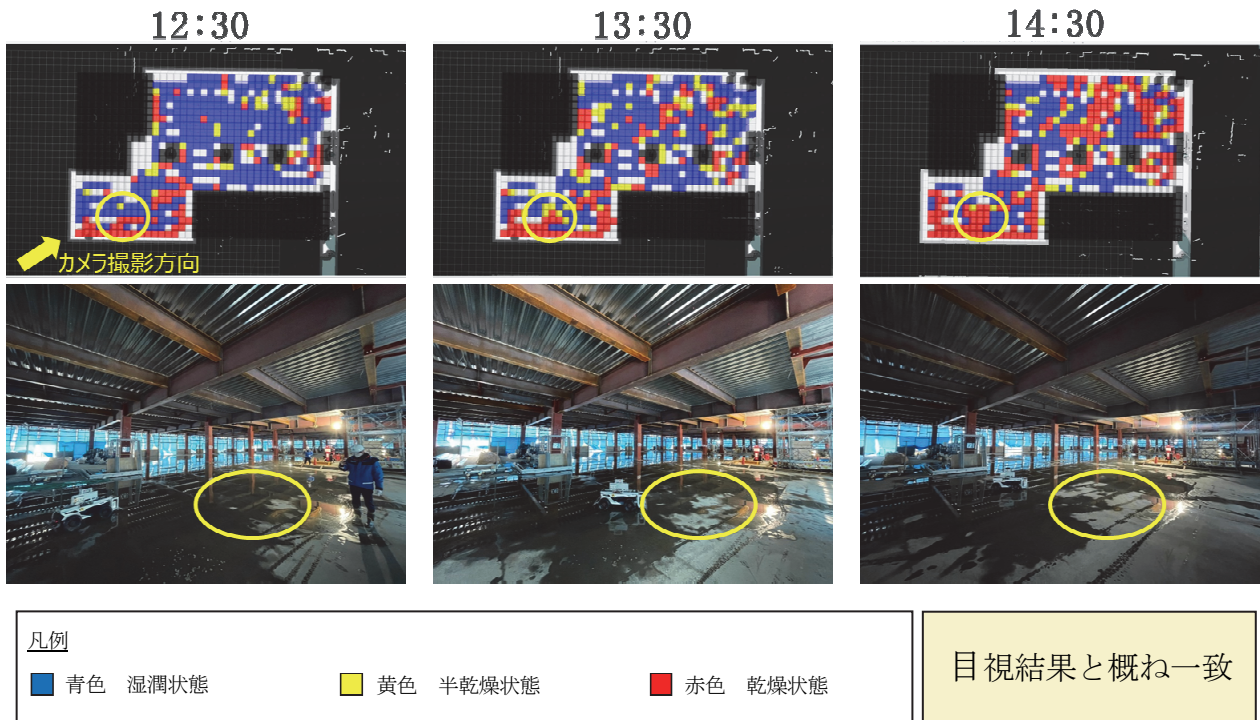
6. あとがき

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す。得られたスラブ表面の湿潤状態の評価結果を、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。その結果、従来の湿潤養生に要した労務を無人で行えることから、施工現場の省力化に寄与できる。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。

最後に、本開発はユアサ商事株式会社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ロボットの量産化も目指していく。

【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



図－11 湿潤評価結果と目視結果の比較