

# RC 建築物の施工および維持管理における センサモニタリング要素技術の提案

(Proposal for underlying technology for sensor monitoring in  
construction and maintenance of RC buildings)

2021 年 3 月

広島大学大学院工学研究科 建築学専攻

蘇 振東

# RC 建築物の施工および維持管理におけるセンサモニタリング要素技術の提案

## 目次

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| 第1章 序論                            | 1  |
| 1.1 はじめに                          | 1  |
| 1.2 研究の目的                         | 1  |
| 1.3 論文の構成                         | 3  |
| 第1章参考文献                           | 5  |
| 第2章 建設分野におけるセンサ技術活用の調査            | 6  |
| 2.1 概説                            | 6  |
| 2.2 コンクリートの施工管理に関するセンサ技術の活用事例の調査  | 9  |
| 2.3 維持管理における加速度センサの活用事例の調査        | 11 |
| 第2章参考文献                           | 13 |
| 第3章 本研究で用いたセンサおよび計測システム           | 17 |
| 3.1 帯状濡れセンサシステムと基礎実験結果            | 17 |
| 3.1.1 帯状濡れセンサシステムの概要              | 17 |
| 3.1.2 コンクリートのイオン濃度・温度が濡れセンサに及ぼす影響 | 21 |
| 3.1.3 気温・相対湿度が濡れセンサに及ぼす影響         | 23 |
| 3.1.4 センサ計測値の表示方法                 | 24 |
| 3.2 振動モニタリングシステムと基礎実験結果           | 25 |
| 3.2.1 振動モニタリングシステムの概要             | 25 |
| 3.2.2 加速度の計測値から速度・変位に換算する手法の妥当性検証 | 28 |
| 3.2.3 その他の機能の概要                   | 31 |
| 3.3 本章のまとめ                        | 35 |
| 第3章参考文献                           | 36 |
| 第4章 濡れセンサによるコンクリートの施工管理・維持管理手法    | 37 |
| 4.1 コンクリートの充填検知に関する実験             | 39 |
| 4.1.1 実験概要                        | 39 |
| 4.1.2 予備実験（型枠への注水実験）              | 40 |
| 4.1.3 無配筋の型枠へのコンクリートの打込み実験        | 41 |
| 4.1.4 配筋を有する型枠へのコンクリート打込み実験       | 51 |
| 4.2 コンクリート表面の豆板の検知に関する実験          | 55 |
| 4.2.1 実験概要                        | 55 |
| 4.2.2 実験結果および考察                   | 56 |

|            |                                     |           |
|------------|-------------------------------------|-----------|
| 4.3        | セメント水和熱モニタリングに関する実験                 | 58        |
| 4.3.1      | 実験概要                                | 58        |
| 4.3.2      | 実験結果および考察                           | 59        |
| 4.4        | 結露モニタリングに関する実験                      | 60        |
| 4.4.1      | 実験概要                                | 60        |
| 4.4.2      | 実験結果および考察                           | 62        |
| 4.5        | 本章のまとめ                              | 65        |
|            | 第4章参考文献                             | 66        |
| <b>第5章</b> | <b>振動モニタリングによるPCa トールゲートの維持管理手法</b> | <b>67</b> |
| 5.1        | 対象建築物                               | 68        |
| 5.2        | 予備計測およびFEM解析                        | 69        |
| 5.3        | 長期モニタリングシステムの構築                     | 73        |
| 5.4        | 長期モニタリング結果および考察                     | 75        |
| 5.4.1      | 屋根スラブに生じる加速度                        | 75        |
| 5.4.2      | 屋根スラブの振動リサージュ                       | 77        |
| 5.4.3      | 屋根スラブの固有振動数の経時変化                    | 81        |
| 5.4.4      | 屋根スラブの剛性の経時変化                       | 82        |
| 5.4.5      | 屋根スラブの角度の経時変化                       | 85        |
| 5.4.6      | 気温の影響                               | 87        |
| 5.5        | 本章のまとめ                              | 90        |
|            | 第5章参考文献                             | 91        |
| <b>第6章</b> | <b>結論</b>                           | <b>92</b> |
|            | 関係論文リスト                             | 96        |

謝辞

## 第1章 序論

### 1.1 はじめに

この十数年間、建築物、橋および道路等の社会インフラ施設のライフサイクル管理は、建設・解体を繰り返すスクラップ&ビルドから、ストック&リノベーションへ転換しつつある。重要な社会資産が長期的に使用（蓄積）されるように、「コンクリート構造物の長寿命化」の実現を目的として、設計・施工・維持管理における様々な取組みが検討されており、設計、施工そして維持管理の有機的な連携と品質管理が重要である。本研究は、RC建築物の施工時および維持管理において、センサ技術を活用した品質管理手法を高度化するための技術に取り組んだ。本論文では、濡れセンサと加速度センサに的を絞り、RC建築物の施工管理および維持管理に活用するための要素技術を提案した。

### 1.2 研究の目的

本研究では、無線技術をキーワードとし、濡れセンサシステムおよび振動モニタリングシステムに的を絞り、鉄筋コンクリート(RC)造建築物の施工管理および維持管理の高度化に活用できるモニタリング技術の検討を行い、センサモニタリングの要素技術を提案することを目的として実施した。

濡れセンサシステムは、施工管理において、コンクリートの充填管理を行うとともにセメントの水和熱管理、さらには維持管理にも活用できるモニタリング技術の確立を目指した。

振動モニタリングシステムについては、高速道路のトールゲートを対象として、健全性（劣化進行）の長期モニタリングと地震発生時の安全性確認を合理化するための要素技術の提案を目指した。

それぞれ、具体的な研究目的は以下の通りである。

#### ◆ 濡れセンサシステムについて

##### 1. 少数のセンサで広範囲のフレッシュコンクリートの打込み状態をまとめて監視する

既往の研究の多くは、コンクリートの打込み状態をモニタリングするために、センサを複数設置して on/off による点計測する手法であり、センサの設置や配線の作業に手間がかかることは否めない。センサの設置作業の効率化を達成するために、可能な限り少数のセンサで広範囲をまとめて監視できる手法が必要と考えた。

また、コンクリートの打込み状態をモニタリングするには、コンクリートの高さ、振動締固めを行った後の密実性の確認、すなわち締固め不足によるコンクリート表面に生じる豆板の検知は重要であり、濡れセンサシステムを用いてこれらの状態を確認できる手法の提案を研究目的の1つとした。

##### 2. 養生期間におけるセメント水和熱を管理する

水和反応の進行状況を監視するや、養生期間のコンクリートの温度履歴を管理するために、マスコンクリートや暑中コンクリート等において、埋込み型の小型温度センサが多用さ

れる。本研究では、温度センサを装備している濡れセンサシステムより、養生期間における水和熱の管理手法の提案を研究目的の1つとした。

### 3. 結露等によって仕上げ材に発生した「内部濡れ」を検知できる維持管理手法の提案

結露や漏水等、水の移動で積層部材内部、天井裏および床下で発生しやすい「建築部材の濡れ」は、人が容易に確認できないため、コンクリート躯体の仕上げ材の劣化現象が蓄積し、ある時に大きな不具合として現れるリスクがある。この「濡れ」や「乾湿繰返し」等の部材内部の水分をモニタリングし、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予防保全技術を確立することは維持管理に有益である。そこで、コンクリートの充填検知に用いた濡れセンサをコンクリート部材の表面に残し、維持管理段階において濡れセンサを活用してコンクリート部材と仕上げ材や断熱材との間に生じる結露や漏水を検知できる手法の提案は研究目的の1つと設定した。

#### ◆ 振動モニタリングシステムについて

##### 1. 長期にわたる交通振動による振動モニタリングのデータの蓄積

構造ヘルスマニタリングは、大地震・強風によって対象構造物に生じた強振動や、風・常時微動による対象構造物の微小振動から構造物の振動特性等を推定し、その経時・経年変化等を考慮して構造物の損傷・劣化の有無・箇所・度合い等を評価することが一般的である<sup>2)</sup>。高速道路の入口に位置するトールゲートは、日々車両の通行による振動が生じており、一般の建物より振動を受ける頻度は遙かに高いにもかかわらず、トールゲートを対象とした研究は少ない。また、屋外に設置した加速度センサを用い、長期間の振動計測を行った研究事例も少なく、振動モニタリングの手法を確立するためのデータの蓄積は必要であり、研究目的の1つと設定した。

##### 2. 二次部材である屋根スラブの振動性状を明らかにする

既往の研究では、床スラブや屋根スラブをモニタリングし、その振動特性を示す研究は少ない。1列の柱によってスラブの中央が支持され、片持ち構造であるRC造トールゲートの屋根スラブは梁からの拘束が少ないため、その振動は一般のスラブより卓越する可能性がある。トールゲートの屋根スラブの振動性状を明らかにするのは研究目的の1つと設定した。

##### 3. 屋根スラブ維持管理のために、モニタリング部位・項目を抽出する

2年にわたる長期の振動計測によって得られたデータを整理・分析し、高速道路のトールゲートの屋根スラブを対象として、今後の合理的な維持管理の実現を目的としたモニタリング技術確立に向け、どの部位にセンサを設置するのは有効かや、どの項目をモニタリング指標として設定するかを検討して抽出することを研究目的の1つとした。

### 1.3 論文の構成

本論文は、前述したように、「RC 建築物の施工および維持管理におけるセンサモニタリング要素技術の提案」を表題とし、図 1-1 に示すように 6 章で構成される。

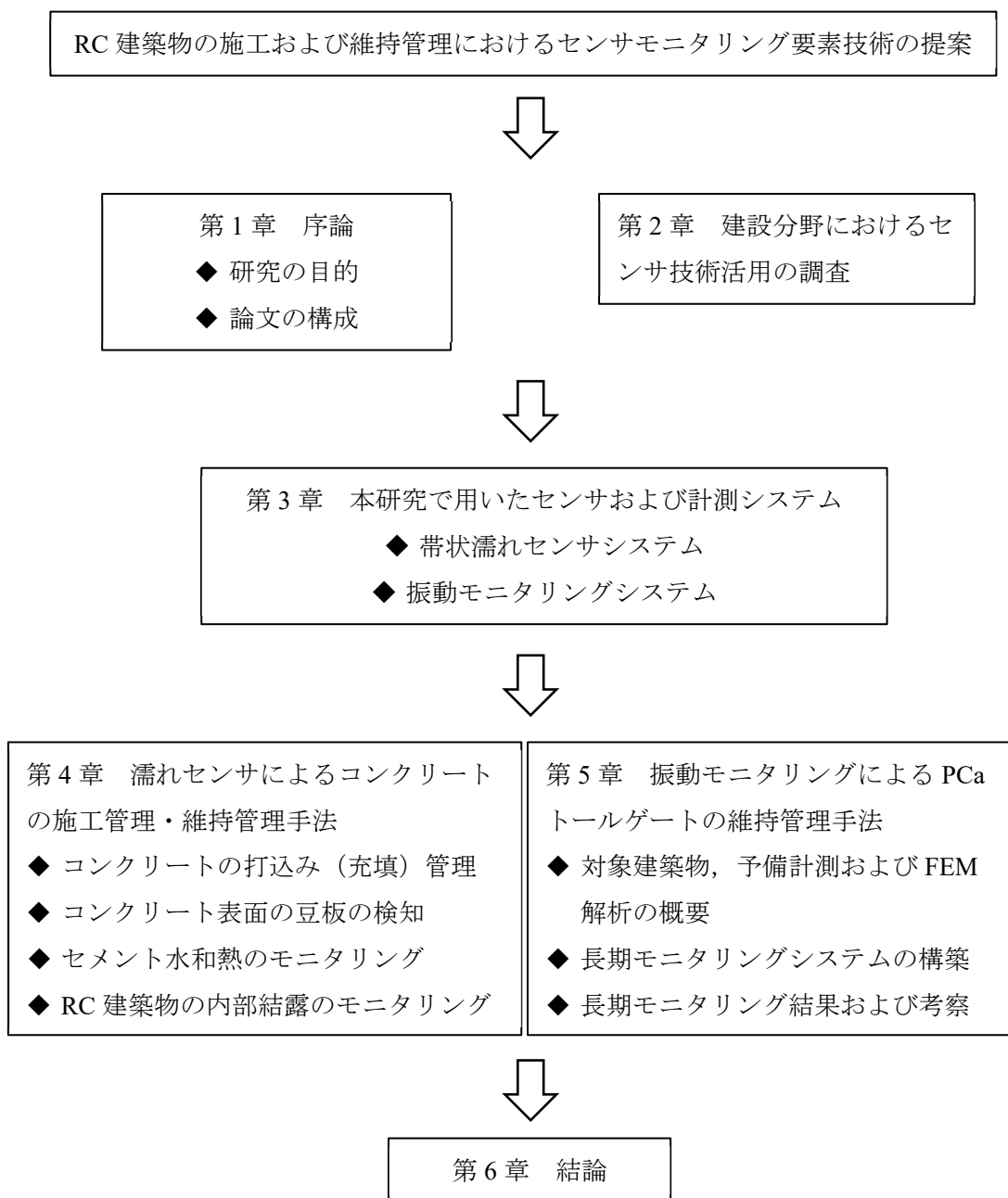


図 1-1 論文の構成

第1章では、研究の目的、論文の構成を序論として述べ、本研究の概要を示した。

第2章では、濡れセンサと加速度センサに的を絞って、建築・土木の生産および維持管理分野において、活用が検討されてきたセンサ技術を調査し、コンクリート構造物の施工管

理・維持管理に存在している課題を抽出した。

第3章では、本研究で用いた帯状濡れセンサシステムおよび振動モニタリングシステムを示した。帯状濡れセンサシステムについては、本研究で提案した仕様を中心とし、計測システムの特長、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 水溶液の濃度等の計測環境がセンサに及ぼす影響、センサの計測精度を検討し、濡れセンサの基礎的な試験結果を示した。振動モニタリングシステムについては、加速度センサを用いたセンサモニタリングシステムの構成や解析技術の機能を紹介し、センサ精度検証実験の結果を示し、センサおよびデータ解析手法の信頼性を明らかにしている。

第4章では、まず濡れセンサの活用フローを示し、コンクリートの施工管理と維持管理段階におけるセンサの活用手法を提案した。コンクリートの施工管理においては、アクリル板で作製した透明な型枠にコンクリートを打ち込む実験により、センサがフレッシュコンクリートの充填性を検知することに加え、棒状バイブレータによる振動締固めの効果をリアルタイムで監視する手法を提案した。また、骨材過多のモルタルとコンクリートを用いた模擬の豆板試験体の打込み実験から、濡れセンサによって試験体の表面に生じる豆板を検知できることも明らかにした。

さらに養生期間のセメント水和熱のモニタリング手法を提案するために、濡れセンサに付属する温度センサと熱電対を使った簡易断熱温度上昇実験から、温度センサは熱電対と同等な精度を有することを検証している。

型枠を解体した後、濡れセンサをそのままコンクリート部材の表面に残して断熱材や仕上げ材で覆うことを想定し、模擬のコンクリート壁試験体を二層式試験装置に設置して結露の検知手法を検討した。その実験結果から、結露や漏水等、水の移動で積層部材内部、天井裏および床下等で発生する容易に確認できない「建築部材の濡れ」を濡れセンサによって検知する維持管理の一手法を示した。

第5章では、高速道路のRC造トールゲートを対象建築物とし、合理的な維持管理の実現を目的としたモニタリング技術確立に向け、無線振動計測システムを用い、プレキャスト(PCa)のプレストレスト(PC)屋根スラブをモニタリング対象として2年間の交通振動計測を行った。まず、対象建築物の概要と予備計測およびFEM解析の結果を示した。さらに、長期振動モニタリングシステムの構成について述べ、長期間で計測された加速度履歴データを分析・検討し、交通振動による屋根スラブの振動特性を明らかにしている。また、変位リサージュ、1次固有振動数、剛性、角度が監視項目として有益であることを明らかにし、今後の維持管理のためのモニタリングシステムの構築手法を提案した。

第6章では、本論文で得られた成果を取りまとめて結論とした。

第1章の参考文献

- 1) コンクリート工学編集委員会, 他: コンクリート構造物の長寿命化～長持ちさせる取り組み～, コンクリート工学, Vol.57, No.5, pp.301-408, 2019.5, doi.org/10.3151/coj.57.5\_301
- 2) 国土技術政策総合研究所: 多世代利用住宅の維持管理・流通を支える構造ヘルスマニタリング技術の利用ガイドライン (案), 2011  
(<http://www.nilim.go.jp/lab/ieg/tasedai/seika/shmguideline.pdf>, 2020年12月11日確認)



## 第2章 建設分野におけるセンサ技術活用の調査

本章では、建築・土木の生産および維持管理分野において、活用が検討されてきたセンサ技術を調査した。2.1 節では、これまで検討された主なセンサおよびその活用方法を示す。2.2 および 2.3 節では、本研究の対象であるコンクリートの充填管理のためのセンサと、加速度センサに的を絞って、コンクリートの施工管理および構造物の維持管理におけるセンサモニタリング技術をまとめて示す。

### 2.1 概説

表 2-1 に施工管理から維持管理まで活用が検討された主なセンサおよびその活用方法を示す。同表中、北垣らはコンクリート工事管理の効率化を目的とし、型枠に搭載された小型のモジュールに加速度センサ、静電容量センサ、温度センサを設置し、センサ表面が型枠内壁に段差なく接する仕様のセンサ搭載型枠を開発している<sup>1)</sup>。新田らは天井面下に設置された複数の温度センサから得られた温度情報に基づいて火点を検知する手法を提案している<sup>2)</sup>。谷口らは感湿素子である高分子膜の吸湿・脱湿による静電容量型湿度センサをコンクリートに直接埋め込み、コンクリート中の水分の状態を把握する手法について検討している<sup>3)</sup>。同様の目的で、湯浅らは吸・放水性の優れたセラミックを基材とした含水率測定センサをコンクリートに埋め込み、セラミックの電気抵抗や、静電容量の変化から、非破壊でコンクリートの内部含水率を打設初期から長期にわたり測定する方法を提案している<sup>4)</sup>。

鬼塚らは建築部材の劣化因子や居住性低下の大きな要因である「材料の濡れや部材への水の浸入」を対象とし、静電容量型濡れセンサによって日常点検が可能な建築部材の濡れモニタリングシステムを構築している<sup>5)</sup>。藤本らは小屋裏における液水の発生を想定し、センサを用いた液水の発生・流動の短期モニタリング測定を行い、雨漏りや結露等の原因を推定・診断するシステムの開発を行っている<sup>6)</sup>。

山本らは MEMS 型加速度センサを複数の階に設置し、一般向けユーザインターフェイス (UI) を実装した振動モニタリングシステムに基づく地震後の建物健全性評価に関する技術を提案している<sup>7)</sup>。山下らはシートを貼るだけで亀裂等の損傷のひずみ分布測定を簡単に行える圧電ひずみセンサシートの開発を行い<sup>8)</sup>、同センサを鋼橋に貼り付けて橋梁の動ひずみ評価手法を検討している<sup>9)</sup>。柴山らは鉄筋とコンクリート間の付着挙動の解明を目的とし、分布型光ファイバセンサを用いて、鉄筋への実装方法と計測精度および RC 部材への適用性に関する検討・提案をしている<sup>10)</sup>。岩城らは長大 PC 斜張橋の施工時から供用時を通じた一貫計測、すなわち長期モニタリングの実現を目指し、分布型光ファイバセンサによる温度の計測手法を提案している<sup>11)</sup>。三田らは建築土木構造物の構造ヘルスマニタリングシステムに適した FBG (Fiber Bragg Grating : ブラッグ格子型光ファイバ) 加速度センサの機構を提案し、センサの最適設計手法と耐久性について検討している<sup>12)</sup>。畑田らは地震時の建物の層間変位を計測するために、光位置検出素子を用いた変位センサと、フォトランジスタアレイを用いたセンサの二種類の非接触型の変位計測装置を開発し、層間変位計測システム

を提案している<sup>13)</sup>。西川らは高精度傾斜センサによる振動測定装置を試作し、常時微動による加速度フーリエスペクトルから建物の振動特性を評価する手法を検討している<sup>14)</sup>。鈴木らは、構造物の剛体的な運動に着目し、角運動を計測することでセンサの観測点数を大幅に減らせることを明らかにし、ジャイロセンサを用いた構造物の振動計測の有効性に関する検討を行っている<sup>15)</sup>。

表 2-1 主なセンサの種類およびその活用方法

| センサの種類                     | 活用方法・事例   |
|----------------------------|---|
| 温度センサ, 熱電対                 | 水和熱 <sup>1)</sup> , 火点検知 <sup>2)</sup> , 室内温度の管理・制御                     |
| 湿度センサ                      | コンクリート含水状態 <sup>3)</sup> , 室内湿度の管理・制御                                   |
| 含水率センサ                     | コンクリート部材内部の含水率 <sup>4)</sup>  |
| 濡れセンサ                      | 部材の濡れ <sup>5)</sup> , 漏水 <sup>6)</sup>                                  |
| 加速度センサ (振動センサ)             | 地震観測, 地震時の応答観測, 常時微動の観測, 応答観測に基づく損傷判定・健全度評価 <sup>7)</sup>               |
| ひずみセンサ (ひずみゲージ)            | 損傷検知 <sup>8)</sup> , 荷重検知 <sup>9)</sup>                                 |
| 光ファイバセンサ                   | 変形計測, ひずみ計測 <sup>10)</sup> , 温度計測 <sup>11)</sup> , 加速度計測 <sup>12)</sup> |
| 変位センサ                      | 損傷検知 <sup>13)</sup>   |
| レーザセンサ                     | 変位計測, 距離測定  |
| 傾斜センサ (加速度センサ)             | 傾斜検知 (変形), 振動測定 <sup>14)</sup>  |
| ジャイロセンサ                    | 傾斜検知 (変形), 地震観測 <sup>15)</sup>  |
| 熱流センサ                      | 断熱材, 塗装材等の断熱性能評価  |
| 圧力センサ                      | 給水等の設備の圧力管理   |
| 負荷センサ                      | エレベーター制御  |
| 光電センサ                      | ドアの開閉 (安全) 管理   |
| 照度センサ, 光センサ                | 自動調光, 合わせて消費電力管理 <sup>16)</sup>   |
| においセンサ                     | シックハウス対策  |
| エアクオリティセンサ                 | CO, CO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , 温度, 湿度等を総合的に計測する <sup>16)</sup>  |
| ガスセンサ                      | 有毒ガスや可燃性ガス, CO <sub>2</sub> 濃度の測定                                       |
| 赤外線センサ                     | 防犯  |
| pH センサ                     | 水質管理  |
| 画像センサ                      | 被災建築の内部調査 <sup>7)</sup> , ドローンによる調査 <sup>7)</sup>                       |
| AE (Acoustic Emission) センサ | ひび割れ検知  |
| 磁気センサ                      | 交通量計測 <sup>17)</sup> , 外ケーブルの張力推定 <sup>18)</sup>                        |

空調や電気等の設備を自動的に制御し、建物内に情報通信ネットワークを備えている高度情報化建築物（スマートビル）の建設を目指し、照度センサによる自動調光およびその消費電力管理や、エアクオリティセンサによる室内の空気環境を自動で制御できるシステムの構築は検討されている<sup>16)</sup>。また、移動ロボットにカメラと三次元レーザスキャナーを搭載し、地震被害を受けた建築物の内部調査手法<sup>7)</sup>、磁気センサを使って、携帯型交通量計測装置の開発<sup>17)</sup>、PC 桁外ケーブル張力の推定手法<sup>18)</sup>等も検討されている。

一方、同じセンサであっても、その活用方法が多様であり、計測対象や目的の違いによって様々な検討が必要である。例えば加速度センサに計測された加速度履歴データを時間領域または周波数領域で処理・積分し、速度と変位データが得られる。金子らは加速度センサを型枠内に設置し、コンクリートの打込みおよび締固めが行われるときに生じる振動状態の変化からコンクリートの充填検知手法を提案している<sup>19)</sup>。西澤らは光ファイバセンサを用いて、柱の軸の静的および動的変形を建設時から竣工までの継続的な計測を行っている<sup>20)</sup>。従って、光ファイバで取得された変位データに時間の要素を加え、時系列、すなわち振動の変位履歴データと見直してFFT (Fast Fourier Transform) 解析を行って周波数領域での情報も得られる。画像センサを使い、西川らは複数の赤外線画像を用いた二次処理を行って外装仕上げモルタルやタイルの剥離診断手法を検討している<sup>21)</sup>。車谷らは市販のデジタルカメラで撮られた画像のもとに、画像相関法による画像解析からコンクリート圧縮試験の供試体ひずみ、ひび割れを精度よく計測し、鮮明に可視化する手法を提案している<sup>22)</sup>。

センサ自体の活用に関する検討のみではなく、センサに関する研究は異分野融合研究であり、ネットワークの構築やデータ解析のアルゴリズムについても重要な研究内容である。有線式や無線式のセンサにかかわらず、ネットワークのトポロジーを選定する際に消費電力や、冗長性等の要素を考慮する必要がある<sup>23)</sup>。Brinckerらは多点で計測された建築物の応答から周波数ごとにパワースペクトル行列を求め、各周波数で得られた行列の特異値分解 (Singular Value Decomposition, SVD)を行なってモード特性（固有振動数、固有モード、減衰定数）を簡単に同定する手法を提案している<sup>24)</sup>。このように、データ解析について、加速度履歴データや画像等の計測データから役立つ情報を抽出するために、短時間内で高精度の解析を行えるアルゴリズムに関する研究も不可欠である。

しかしながら、既往の研究で検討されてきたセンサ技術は、センサに計測されたデータを処理・分析を行うサーバに転送するために、同軸ケーブルが多くに使用される。この有線式のセンサネットワークを建設するための工事費が高い<sup>23)</sup>。また、目隠すために仕上げ材や構造物の躯体に埋め込んだケーブルは断線するリスクがあり、断線の復旧が容易ではない問題点も無視できない。

## 2.2 コンクリートの施工管理に関するセンサ技術の活用事例の調査

コンクリート構造物は、発注仕様に応じて生コン工場で調合して出荷されるフレッシュコンクリートを工事現場に運び、打ち込んでから所要の強度を得るまで養生して最終に成形する。適正な強度や耐久性を有しているか否かが判明するのは硬化後である。そこでトレーサビリティを確認するために、現場搬入時にコンクリート中にICタグを埋め込み、製造工場名・日付、調合計画や運搬時間、品質管理試験等の重要な履歴情報を記録・保存する手法が提案されている<sup>25)</sup>。

コンクリートの充填状態を監視するためには、フレッシュコンクリートの打込み時に、型枠に監視用開口を設けたり透視型枠を採用したりする目視検査の手法が提案されているが、特に確認の必要性が高いSRC造の鉄骨下面やCFT構造には適用しにくい問題点が挙げられている<sup>26)</sup>。

このコンクリート充填性管理に、センサ計測を活用した技術に関して、阿部らは電気伝導性を利用してセンサである電極間に微弱電圧を印加し、この電極間にフレッシュコンクリートが触れると電気回路が形成され電流が流れ、その電流の大きさ、すなわちフレッシュコンクリートの抵抗値の変化から充填状況を判定する手法を提案している<sup>26)</sup>。平田らは、フレッシュコンクリート中に多数のイオンが存在するため、低電圧の電極を挿入すると電極間は充電され、充電を停止すると電極間に蓄積された電荷が放電されることを利用し、放電の過程からイオン濃度や粘度等の材料の固有特性を評価できることから、充・放電に伴う物質中の電圧変化を利用して電圧印加方式の充填管理手法を提案している<sup>27)</sup>。瀬古らは直径50 mmの円筒形の高周波静電容量センサを開発し、センサ先端の電極とセンサ内部の電極間で高周波電流を印加したときに、測定対象の高周波静電容量の多少に従って正弦波出力信号の周期が変化する特性を利用して非接触方式でコンクリート充填状態を判定する手法を検討している<sup>28)</sup>。金子らは圧電セラミックスで作製した加速度センサを型枠内に設置し、コンクリートの打込みおよび締固めが行われるときに生じる振動の特性を検出してコンクリートの状態を判定できる充填検知システムを開発した<sup>19)</sup>。これらの研究はコンクリートが打ち込まれたことを点計測するセンサを複数設置する手法であり、センサの設置や配線の作業に手間がかかることは否めない。

そこで、センサの設置作業の効率化を達成するために、可能な限り少数のセンサで広範囲をまとめて監視できる静電容量式のケーブル状センサシステムが藤倉らによって提案されている<sup>29)</sup>。この手法は、センサーケーブルを型枠内に設置し、型枠内に打ち込まれるコンクリートの充填に伴って変化する静電容量を連続的に計測することで、コンクリートの打込み高さを把握するとともに、その後にも静電容量の変化を測定することで硬化過程または乾燥による水分量の変化を把握しようとするものである。山田らは厚さ0.1 mm程度のシート状基材の片面に電極を配置する充填検知部と、その反面に圧電材料をスプレーする締固め検知部を有するシート状センサを開発した<sup>30)</sup>。このセンサは、文献26と同様に、フレッシュコンクリートの電気伝導性を利用してコンクリートの充填を把握するとともに、反面

の圧電材料で締固めによる振動を捉えて締固め状態を判定する仕組みである。これらの研究では、センサの検知範囲がより広いが、コンクリートの充填欠陥である豆板等の空洞を検知することは言及されなかった。

渡部らは赤外線カメラを使って、コンクリート打込み時の型枠外面の熱画像を計測することによって、型枠内部のコンクリートの打上がり高さや締固め不良、材料分離によって生じる空隙や豆板等の欠陥をリアルタイムで検出する方法を提案している<sup>31)</sup>。同研究には型枠に直射日光が当たっている場合に提案方法の適用性を明らかにしたが、複雑な天候による影響は言及されなかった。

一方、コンクリートの打込み直後からの温度変化を計測して、温度ひび割れ等をモニタリングするために、温度センサを埋め込む方法が多用である。また、梶田らは温度センサでコンクリート試験体の温度変化および外気温を測定し、温度履歴に基づく積算温度または有効材齢を用いてコンクリート強度を推定する強度管理方法を提案している<sup>32)</sup>。Dongらは圧電セラミックスとセメントの複合材料をセンサとして用い、コンクリート凝結のモニタリング手法を提案している<sup>33)</sup>。AEセンサを使って、超音波法によりコンクリートの凝結時間の推定手法・脱型時期の推定手法も提案されている<sup>34)</sup>。

本研究では、このような現状を鑑み、現地計測の簡便化、特にケーブルの配線作業を容易にできる無線通信方式モニタリング技術はコンクリート充填性管理を容易に行え、点計測するセンサを複数設置する手法より、可能な限り少数のセンサで広範囲をまとめて監視できる技術はセンサの設置作業の効率化を達成できると考えている。また、コンクリートの打込み時に、充填欠陥である豆板等の空洞の検知に関する検討は少ない現状である。

### 2.3 維持管理における加速度センサの活用事例の調査

表 2-1 に紹介したセンサの多くは、その活用方法・事例に示したように維持管理の合理化のために活用されている。ここでは、本論文の研究対象の1つである加速度センサに的を絞って、維持管理における既往の研究を調査した。

服部ら<sup>35)</sup>、前田ら<sup>36)</sup>はコンクリート表面に物理的な衝撃（ハンマ、鋼球、励磁コイル等による）を与えて発生させた弾性波を、高感度かつ広帯域（数 Hz～数 10 kHz）で計測できる圧電型加速度センサによって受信する「衝撃弾性波法」を用いて、PC (prestressed concrete) 部材のグラウト充填不良の検出について検討している。同様の加速度センサを活用して、林本らは接着系あと施工アンカー固着部の接着剤の充填状況の評価可能性について検討している<sup>37)</sup>、中山らは道路橋 RC 床版の水平ひび割れの評価手法について検討している<sup>38)</sup>。

関屋らは、10 種類の加速度センサを用いて、橋梁の維持管理において活荷重に対する橋梁全体や部材ごとの変位応答の計測について検討している<sup>39)</sup>。さらに、MEMS 加速度センサを用いて可搬型の車両重量推定システム (Portable-Weigh-In-Motion システム) を開発した<sup>40)</sup>。李らは、MEMS 無線加速度計測システムが老朽化した RC ゲルバー橋の振動性状計測に適用することを検討し、道路や橋梁の振動性状の簡易調査手法としての提案手法は有効な技術となる見通しを得ている<sup>41)</sup>。

土木構造物や建築物の主要構造部である柱・梁・壁を対象として、地震や常時微動による応答データをセンサで直接計測し、計測データから構造物の振動特性等を推定してその経時変化等を考慮して構造物の損傷や劣化の有無・位置・程度等を評価する構造ヘルスマニタリング (SHM: Structural Health Monitoring) は多く検討されている<sup>42)</sup>。倉田らは地震時の建築構造物の損傷検知や建築物の被災度判定等を目的として、局所的な損傷を正確に検知・評価するためには、超高密度な構造モニタリング、すなわち「ユビキタス構造モニタリング」が有効であると指摘し、「ユビキタス構造モニタリング」用の加速度センサモジュールを開発した<sup>42)</sup>。しかし、設置しなければならないセンサの台数が多いことがモニタリングの普及を妨げていると考察している。岡田らはセンサの設置台数を減らすために、RC 造 6 層建物の大型振動台実験より、モード合成による手法を用いて、少数センサから全層の最大加速度、最大層間変形角等を推定する健全性評価システムを開発した<sup>44)</sup>。同じ理由で、品川らは建物全体の応答を把握することを目的とし、1 台の加速度センサのみを用いた建築構造物の振動応答推定手法を提案している<sup>45)</sup>。また、コストを低減するために、圓らは AE (Acoustic Emission) センサを用いて建築物の局所的損傷を検出するローカルモニタリングと、スマート加速度センサを用いて構造物全体の損傷状態を監視するグローバルモニタリングを組み合わせたシステムを提案している<sup>46)</sup>。

濱本らは MEMS 加速度センサを用いて、SRC 造オフィスビル<sup>47)</sup>、6 階建て木造枠組壁工法実験棟<sup>48)</sup>を計測対象として振動計測を行い、環境振動に対する居住性等について検討している。李らは無線振動計測システムにより、常時微動計測によって得られた振動特性値を用いて耐震補強前後の比較を行い、耐震補強前後の振動性状の変化の評価に関する手法を

提案している<sup>49)</sup>。崔らは杭をモニタリング対象として、少数の加速度センサを上部構造に配置する間接ヘルスマニタリングと、すべての杭の複数点にひずみセンサを貼付する直接ヘルスマニタリングを併用することにより、強震動を受けた後の杭の損傷を検出できる統合した杭基礎の総合的健全性評価を行う方法を提案している<sup>50)</sup>。

これらの研究の多くは橋梁等の土木構造物または建築物の主要構造部である柱・梁を対象としたものである。しかし、過去に起きた地震の被災状況から、吊り天井の脱落によって深刻な被害を受ける危険性が高く<sup>51)</sup>、天井脱落対策にかかわる技術基準告示『国土交通省平成25年告示第771号』が2014年に施行された。天井のほか、地震時に外壁タイルの落下防止対策、目視検査で確認できない部材の内部濡れ等、二次部材や仕上げ材を対象としたモニタリング技術に関する検討はまだ少ないのが現状である。また、これらの研究の多くは、専門家・技術者が活用することを想定した研究であり、建物の所有者、管理者または一般ユーザにとって理解しにくい箇所が存在し、彼らに分かりやすく説明・提示する必要性は指摘されている<sup>52)</sup>。センサを用いたモニタリングに一般のユーザが参加できるように、計測システムの操作の容易さや観測の意義を理解できる検討・提案は少ない現状である。

維持管理のための加速度センサに関する研究で、データ解析のアルゴリズムについても重要な分野である。構造健全性を評価するために、固有周波数、固有モード、および減衰定数を抽出するモード解析は重要視されている。モード解析は、加速度センサで計測された時系列データをそのまま時間領域での解析と、フーリエ変換を行って周波数領域での解析と分類できる。時間領域での解析として、自己回帰移動平均モデル (Autoregressive Moving Average Model, ARMA) に基づく手法<sup>53)</sup>、確率的部分空間同定法 (Stochastic Subspace Identification, SSI) に基づく手法<sup>54)</sup>が発表されている。周波数領域では高速フーリエ変換 (FFT) に基づく FDD (Frequency Domain Decomposition) 法が提案されている<sup>24)</sup>。また、時間および振動数の両方の領域で局在化の程度の良い関数を積分核として用いるウェーブレット変換も重要な解析手法である<sup>55)</sup>。

このような現状を鑑み、二次部材や非構造部材は重要なモニタリング対象であるが、それに関する提案が少なく、さらに交通振動による屋根スラブの長期振動計測についての実績はほとんどないのが現状である。また、本研究では、一般のユーザに対して操作が簡単、結果が分かりやすい日常点検手法の提案は維持管理に重要であると考えている。

第2章の参考文献

- 1) 北垣亮馬：センサ搭載型枠によるコンクリート工事管理の効率化，コンクリート工学，Vol.55，No.9，pp.796–799，2017.9，doi.org/10.3151/coj.55.9\_796
- 2) 新田孝太郎，山口純一，岡泰資，村岡宏：天井面下の熱気流温度に基づく火点検知手法に関する実験的研究，日本建築学会環境系論文集，Vol.72，No.615，pp.1–8，2007.5，doi.org/10.3130/aije.72.1\_5
- 3) 谷口円，桂修：湿度センサーを利用したコンクリート含水状態の視覚化，コンクリート工学，Vol.53，No.5，pp.406–410，2015.5，doi.org/10.3151/coj.53.406
- 4) 湯浅昇，笠井芳夫，松井勇：埋め込みセラミックセンサの電気的特性によるコンクリートの含水率測定方法の提案，日本建築学会構造系論文集，Vol.62，No.498，pp.13–20，1997.8，doi.org/10.3130/aijs.62.13\_1
- 5) 鬼塚雅嗣，大久保孝昭，寺本篤史，上原誠，松本賢二郎：住民・建築ユーザによる日常点検が可能な建築部材の濡れモニタリングシステムの開発，日本建築学会技術報告集，Vol.25，No.59，pp.33–38，2019.2，doi.org/10.3130/aijt.25.33
- 6) 藤本郷史，大久保孝昭，小宮奏恵：静電容量式小型ぬれセンサシステムの開発および雨漏りや結露を想定した水膜の流動状態の判別，日本建築学会技術報告集，Vol.20，No.45，pp.477–482，2014.6，doi.org/10.3130/aijt.20.477
- 7) コンクリート工学編集委員会，他：コンクリート構造物の点検・モニタリングの現状と最新技術，コンクリート工学，Vol.56，No.1，pp.3–117，2018.1，doi.org/10.3151/coj.56.1\_3
- 8) 山下崇博，小林健，伊藤寿浩：道路インフラ状態モニタリング用センサシートの開発，精密工学会学術講演会講演論文集，2015年度精密工学会春季大会，pp.329–330，2015，doi.org/10.11522/pscjspe.2015S.0\_329
- 9) 山下崇博，高松誠一，岡田浩尚，伊藤寿浩，小林健：圧電ひずみセンサアレイシートを用いた橋梁の動ひずみ評価，エレクトロニクス実装学術講演大会講演論文集，第31回エレクトロニクス実装学術講演大会，pp.437–438，2017，doi.org/10.11486/ejisso.31.0\_437
- 10) 柴山淳：分布型光ファイバセンサを用いたRC部材の準連続的なひずみ計測法，日本建築学会技術報告集，Vol.26，No.63，pp.543–548，2020.6，doi.org/10.3130/aijt.26.543
- 11) 岩城英朗，田村和夫：長大PC斜張橋の長期モニタリングに向けた分布型光ファイバセンサの適用性に関する研究，構造工学論文集A，Vol.62A，pp.585–594，2016.3，doi.org/10.11532/structcivil.62A.585
- 12) 三田彰，長井望：構造ヘルスマニタリング用のFBG加速度センサの最適設計と寿命推定，日本建築学会技術報告集，Vol.7，No.14，pp.79–82，2001.12，doi.org/10.3130/aijt.7.79\_2
- 13) 畑田朋彦，高橋元一，鈴木康嗣，松谷巖，金川清，仁田佳宏，西谷章：起振機加振試験による非接触型センサを利用した実建物の層間変位計測，日本建築学会構造系論文集，Vol.75，No.653，pp.1257–1264，2010.7，doi.org/10.3130/aijs.75.1257
- 14) 西川隼人，高谷富也，釣健孝，福井繁雄，宮島昌克：高精度傾斜センサを用いた振動測定装置の試作，土木学会論文集A1（構造・地震工学），Vol.71，No.4，pp.I\_995–I\_1003，2015，doi.org/10.2208/jscejsee.71.I\_995
- 15) 鈴木崇伸，堀宗朗，壁谷澤寿海：ジャイロセンサを用いた地震観測の有効性に関する考察，応用力学論文集，Vol.9，pp.701–708，2006.8，doi.org/10.2208/journalam.9.701



- 16) A. Kumar, A. Singh, A. Kumar, M. K. Singh, P. Mahanta and S. C. Mukhopadhyay: "Sensing Technologies for Monitoring Intelligent Buildings: A Review," IEEE Sensors Journal, vol.18, No.12, pp.4847–4860, 2018.6, doi.org/10.1109/JSEN.2018.2829268
- 17) 東俊孝, 高田知典, 井坪慎二, 内田淳: 道路交通センサのための次世代情報収集システムの開発, 土木情報利用技術論文集, Vol.15, pp.103–110, 2006, doi.org/10.2208/journalac2003.15.0\_103
- 18) 荒木茂, 河村睦, 内田慎哉, 栗原秀夫, 松橋貫次, 湊利行: PC鋼材に生じる張力の非破壊評価のための正帰還自己発振回路を有する磁気センサーに関する研究, 平成27年度全国大会 土木学会第70回年次学術講演会, 第V部門, pp.863–864, 2015
- 19) 金子稔, 安田正雪, 末岡英二, 坂井孝: 締固め検知機能を付加したコンクリートの充填検知システムの開発, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.31, No.1, pp2077–2082, 2009
- 20) 西澤崇雄, 大野富男, 飛田潤, 福和伸夫: 設計から竣工後までの長期的な品質確保のための光ファイバセンサによる高層建物の構造性能把握に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.75, No.658, pp.2247–2255, 2010.12, doi.org/10.3130/aijs.75.2247
- 21) 西川忠, 平野彰彦, 鎌田英治: 赤外線法による外壁剥離診断における減算処理による診断精度向上に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.65, No.528, pp. 27–32, 2000.3, doi.org/10.3130/aijs.65.27\_2
- 22) 車谷麻緒, 邊見哲一, 小坪祐輔, 橋口和哉: コンクリート供試体の圧縮試験に対するデジタル画像相関法の計測精度に関する基礎的検討, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.73, No.2, pp.I\_447–I\_454, 2017, doi.org/10.2208/jscejam.73.I\_447
- 23) Jerome P. Lynch, Kenneth J. Loh: A Summary Review of Wireless Sensors and Sensor Networks for Structural Health Monitoring, The Shock and Vibration Digest, Vol. 38, No. 2, pp.91–128, 2006.3, DOI: 10.1177/0583102406061499
- 24) Rune Brincker, Lingmi Zhang, Palle Andersen: Modal Identification of Output-Only Systems using Frequency Domain Decomposition, Smart Materials and Structures, Vol.10, No.3, pp.441–445, 2001.6, DOI: 10.1088/0964-1726/10/3/303
- 25) 杉山央, 角倉英明, 江里口玲: ICタグを活用したコンクリートのトレーサビリティ確保技術, 日本建築学会構造系論文集, Vol.78, No.688, pp.1045–1053, 2013.6, doi.org/10.3130/aijs.78.1045
- 26) 阿部保彦, 平井淳一, 柿崎正義: 電気伝導性を利用したコンクリート充填検知システムの開発, 日本建築学会技術報告集, Vol.3, No.4, pp.15–18, 1997.3, doi.org/10.3130/aijt.3.15
- 27) 平田隆祥, 十河茂幸: 電圧印加方式によるコンクリートの充填感知に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.1, pp69–74, 1996
- 28) 瀬古繁喜, 三井健郎, 結城秀恭, 中川裕巳: 型枠面での高周波静電容量測定によるコンクリート充填状態の判定に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.29, No.2, pp697–702, 2007
- 29) 藤倉裕介: 静電容量の変化によるコンクリートの打込みから硬化過程の水分量評価と施工時の品質管理手法に関する検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.34, No.1, pp1336–1341, 2012

- 30) 山田勉, 二宮伸二, 海野雄士, 桑田拓弥: コンクリートの充填・締固めを検知する超薄型シート状センサの開発, 戸田建設技術研究報告, Vol.44, pp14-1~14-5, 2018.11
- 31) 渡部正, 魚本健人: 型わく面の熱画像解析によるコンクリート打込み時の欠陥検出法に関する研究, 土木学会論文集, Vol.1993, No.478, pp.51-59, 1993.11, doi.org/10.2208/jscej.1993.478\_51
- 32) 梶田佳寛ほか: 各種結合材を用いた構造体コンクリートの圧縮強度管理の基準に関する検討(その1~17), 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東) 材料施工分冊, pp.141-174, 2015.9
- 33) Biqin Dong, Zongjin Li: Cement-based piezoelectric ceramic smart composites, Composites Science and Technology, Vol.65, Issue 9, pp.1363-1371, 2005.7, doi.org/10.1016/j.compscitech.2004.12.006
- 34) Toshiro Kamada, Shinya Uchida, Keitetsu Rokugo: Nondestructive Evaluation of Setting and Hardening of Cement Paste Based on Ultrasonic Propagation Characteristics, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.3, Issue 3, pp.343-353, 2005.10, doi.org/10.3151/jact.3.343
- 35) 服部晋一, 鎌田敏郎, 内田慎哉, 朝倉響, 寺澤広基: 弾性波の入力方法とPCグラウト未充填部の検出能力との関係に関する基礎的研究, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol.73, No.2, pp.239-250, 2017, doi.org/10.2208/jscejmcs.73.239
- 36) 前田洋祐, 内田慎哉, 鎌田敏郎, 李興洙, 西上康平: PCグラウト充填評価のためのインパクトエコー法の適用範囲に関する研究, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.13, pp.229-236, 2013
- 37) 林本和也, 内田慎哉, 鎌田敏郎, 宮田弘和: アンカーボルト打撃時の応答特性に着目した接着材充填状況の非破壊評価手法, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.1861-1866, 2015
- 38) 中山和也, 鎌田敏郎, 内田慎哉, 西弘志: 衝撃弾性波法による道路橋RC床版の水平ひび割れの評価手法に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.2113-2118, 2009
- 39) 関屋英彦, 木村健太郎, 丸山收, 三木千壽: 橋梁の活荷重応答計測に必要なS/N比に関する研究, 構造工学論文集A, Vol.62A, pp.174-184, 2016.3, doi.org/10.11532/structcivil.62A.174
- 40) 関屋英彦, 小西拓洋, 木ノ本剛, 三木千壽: MEMS加速度センサを用いた変位計測に基づくPortable-Weigh-In-Motionシステムの提案, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.2, No.3, pp.364-379, 2016, doi.org/10.2208/jscejsee.72.364
- 41) 李亮, 大久保孝昭, 松本慎也, 宮本文穂: 無線加速度センサを用いた振動計測システムの老朽橋梁への適用と有効性, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.2, pp.1309-1314, 2014
- 42) 国土技術政策総合研究所: 多世代利用住宅の維持管理・流通を支える構造ヘルスマニタリング技術の利用ガイドライン(案), 2011  
(<http://www.nilim.go.jp/lab/ieg/tasedai/seika/shmguideline.pdf>, 2020年12月11日確認)
- 43) 倉田成人: センサネットワークによる構造モニタリング, 計測と制御, Vol.46, No.2, pp.137-140, 2007.2, doi.org/10.11499/sicej11962.46.137

- 44) 岡田敬一, 白石理人, 森井雄史, 佐川隆之: 少数の加速度センサを用いた地震直後の建物健全性評価法: RC造6層建物の大型振動台実験での検証事例, コンクリート工学, Vol.55, No.2, pp.138-145, 2017.2, doi.org/10.3151/coj.55.2\_138
- 45) 品川祐志, 三田彰, 1台の加速度センサのみを用いた建築構造物の振動応答推定手法, 日本建築学会技術報告集, Vol.19, No.42, pp.461-464, 2013.6, doi.org/10.3130/aijt.19.461
- 46) 圓幸史朗, 池ヶ谷靖, 中村充, 柳瀬高仁: スマートセンサと無線ネットワークを用いた構造ヘルスマニタリングシステムの開発, 日本地震工学会論文集, Vol.7, No.6, pp.17-30, 2007, doi.org/10.5610/jaee.7.6\_17
- 47) 濱本卓司, 崔井圭, 富岡昭浩: MEMS加速度センサによるSRC造オフィスビルの振動計測, 日本建築学会技術報告集, Vol.25, No.60, pp.731-734, 2019.6, doi.org/10.3130/aijt.25.731
- 48) 濱本卓司, 国松直, 平尾善裕, 小林正純: 周囲振動に対する6階建て木造枠組壁工法実験棟の振動計測, 日本建築学会技術報告集, Vol.25, No.59, pp.215-218, 2019.2, doi.org/10.3130/aijt.25.215
- 49) 李亮, 松本慎也, 大久保孝昭: 建築物の耐震補強前後の常時微動の比較計測への無線計測システムの適用実験, 日本建築学会技術報告集, Vol.22, No.51, pp.435-440, 2016.6, doi.org/10.3130/aijt.22.435
- 50) 崔井圭, 濱本卓司, 小豆畑達哉, 野口和也, 森田高市, 飯場正紀: 杭基礎の間接/直接統合ヘルスマニタリングに関する振動台実験, 日本建築学会構造系論文集, Vol.76, No.661, pp.471-480, 2011.3, doi.org/10.3130/aijs.76.471
- 51) 脇山善夫, 石原直, 元結正次郎, 清家剛, 坂本功, 大宮幸, 沖佑典: 東日本大震災における地震被害を踏まえた吊り天井の基準の整備に資する検討, 国立研究開発法人建築研究所, 建築研究資料 No.193号, 2019.3
- 52) 大久保孝昭: 無線情報技術による維持管理の高度化, コンクリート工学, Vol.48, No.5, pp.141-144, 2010.5, doi.org/10.3151/coj.48.5\_141
- 53) 金澤健司, 松井徹哉: ARMAMAモデルによるスペクトル解析と振動モード同定, 日本建築学会構造系論文集, Vol.67, No.554, pp.71-78, 2002.4, doi.org/10.3130/aijs.67.71\_1
- 54) 西川貴文, 松田浩, 田中敦海, 河村太紀, 清水誠人: 3次元形状計測と実振動計測に基づくFEモデル精緻化のための橋梁振動特性の高精度推定手法, 実験力学, Vol.18, No.1, pp.50-56, 2018.3, doi.org/10.11395/jjsem.18.50
- 55) 佐々木文夫, 前田達哉: データ解析におけるウェーブレット変換の基本的性状の検討, 日本建築学会構造系論文報告集, No.453, pp.197-206, 1993.11, doi.org/10.3130/aijsx.453.0\_197

## 第3章 本研究で用いたセンサおよび計測システム

第2章で示したように、建設分野では施工品質管理や維持管理において、様々なセンサや計測システムの活用が検討され、実用化された技術は多いである。しかし既往の技術は、データを安全・安定に転送するために、同軸ケーブルが使用されることが多いため、ケーブル自体のコストと、配線設置のための人件費が高く、設置個所の増加に従って計測システムの構築には全体コストが非線形に増えてしまうことが報告されている<sup>1)</sup>。

本研究では、無線技術をキーワードとし、帯状濡れセンサシステムおよび振動モニタリングシステムを用い、鉄筋コンクリート建築物の施工品質管理や維持管理に活用する要素技術の検討を行った。この二つの計測システムは広島大学建築材料学研究室が地域・産学連携センターにおいて民間企業と共同開発を進めているシステムである。

これらの技術提案は無線通信方式を採用したため、現地計測の簡便化、特にケーブルの配線作業を容易にできる。このことは、既往の研究<sup>2)</sup>で、耐震補強工事が行われた建物においてビフォーアフターの振動計測を行って耐震補強の効果を評価するとき、センサを設置するための作業量とかかる時間は大幅に削減できることを明らかにしている。

本章では、本研究に用いた帯状濡れセンサシステムおよび加速度センサを用いた振動モニタリングシステムの概要とそれぞれの活用目的に応じた基本事項について、実験室レベルで実施した基礎実験の結果を3.1節の「帯状濡れセンサシステム」と3.2節の「振動モニタリングシステム」に示す。

### 3.1 帯状濡れセンサシステムと基礎実験結果

#### 3.1.1 帯状濡れセンサシステムの概要

帯状濡れセンサは電極間の静電容量を測定し、計測対象の比誘電率（静電容量）の変化から「水」を検知して、センサに接するフレッシュコンクリートや結露、漏水の状態をモニタリングする。濡れセンサの片面外形を図3-1(a)に示す。同図に示すように、幅が18mm、長さが480mmの計測回路を有する帯状濡れセンサ（基板の厚みは1.5mm）とした。図3-1(b)には、濡れセンサの一部を拡大して、静電容量を計測するための櫛目状の配線を示す。同図の青線は送信電極の配線、黒線（右側の図に）は受信電極の配線であり、これらは長さ480mmの濡れセンサ全体に渡ってそれぞれ1本の線で構成されている。受信電極は基板の内部に埋め込まれ、送信電極（青線）と受信電極（黒線）の間の静電容量を計測する仕組みである。

また、図3-1(b)に、赤色の線で示す遮蔽電極は全長480mmの濡れセンサの計測範囲を区分するためであり、60mmを1基のセンサとして、1つの計測値を出すこととなる。すなわち、図3-1(a)に№1～№8が示すように、帯状濡れセンサは、長さ60mm単位の8基のセンサから構成されていることとなる。また、櫛目状に配置した1つの電極の幅は1mmで、送信電極と遮蔽電極の間隔は1mmで、長さが60mmのセンサ1基は4mm間隔の15箇所

静電容量を計測し、計測値の合計を1つの出力値とする仕様とした。

1基のセンサを徐々に水中に浸漬したときの出力値と、水没されたセンサの長さ（濡れ深さ）との関係を図3-2に示す。同図に示すように、1基のセンサにおいて濡れる深さが増えると出力値が上昇し、60 mm 全部が濡れたときに最大の出力値を示す仕様とした。なお、提案の仕様では、出力値は濡れ深さの増加に伴って直線的に増加するものとしていたが、本研究で用いたセンサ仕様ではこれが達成されておらず、これは今後の課題としている。また、本濡れセンサには、図3-1(a)に示したセンサの2基毎に遮蔽電極の端部に温度センサを付加し、片面で合計4箇所（No.1～No.8）の温度も計測できる仕様とした。

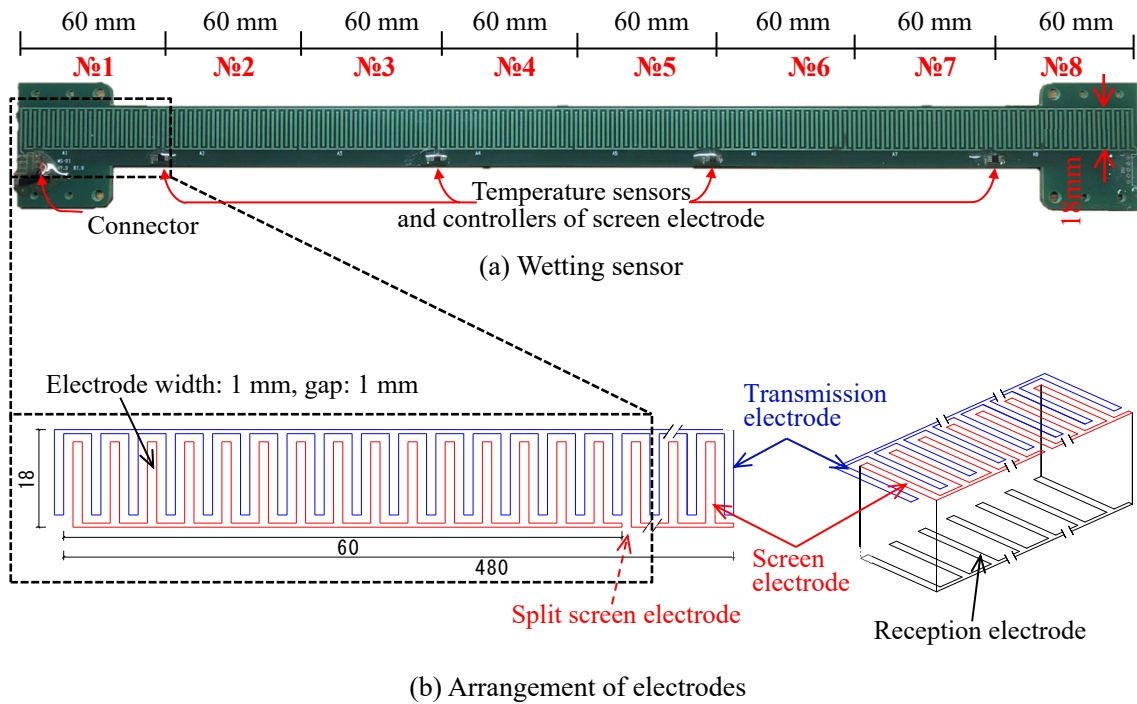


図 3-1 帯状濡れセンサの構成

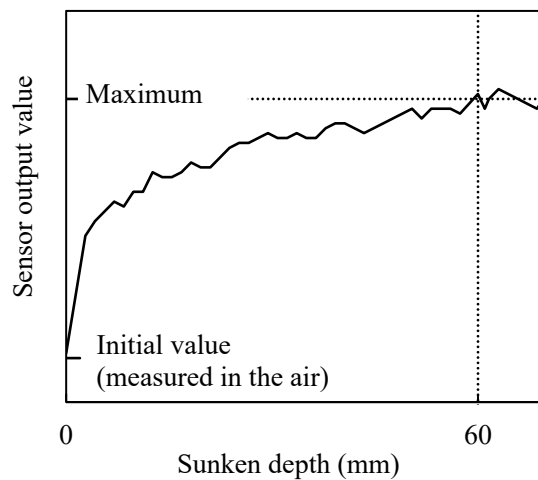


図 3-2 1基のセンサにおける出力値と濡れ深さとの関係

計測システムの構成を写真 3-1 に示す。同写真に示すように、計測システムは帯状濡れセンサ、小型データロガーおよびパソコン（またはスマートフォン）からなる。帯状濡れセンサは計測範囲に応じてセンサ同士を連結する延長計測が可能な仕様とした（写真 3-1 に 2 本のセンサを連結した状態を示している）。PC・スマートフォンは Bluetooth によってデータロガーに無線接続し、ホストとして計測の制御とデータ保存を行う。

データロガーの基本仕様を表 3-1 に示す。同表に示すように、小型データロガーは充電式リチウムイオン電池と記憶メモリ（ストレージ）が内蔵され、計測のサンプリング間隔を設定することで、モニタリング端末との通信を停止してスタンドアロンで使用することもできる。このとき、帯状濡れセンサ 1 本において両面合計で 16 チャンネルの濡れ値、8 チャンネルの温度値を 1 つのデータセットとして、1024 データセット分までの計測値は記憶メモリに保存でき、計測の終了後に読み取られる。

また、データロガーは Wi-Fi を経由してネットワークにある PC につなげ、計測された濡れ・温度データを定期に送信する機能も備えている。つまり、計測対象に濡れセンサとデータロガーを一度設置した後、使用者は遠隔操作でモニタリング結果を取得できる仕様とした。

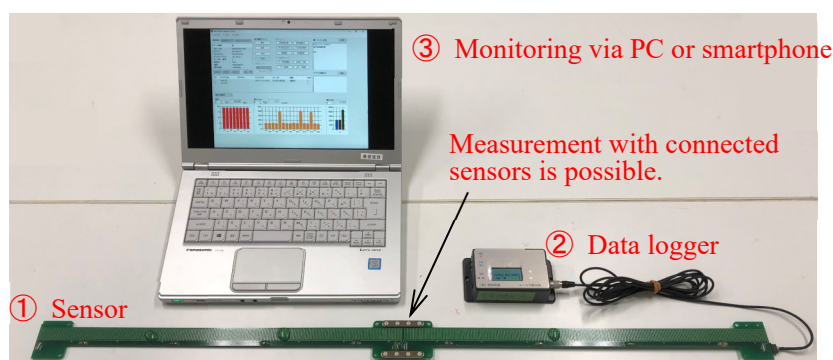


写真 3-1 計測システムの構成

表 3-1 データロガーの基本仕様

|          |                     |   |
|----------|---------------------|---|
| 消費電力     | 1 Watt 以下           |   |
| 外形寸法, 重量 | 125×70×36 mm, 170 g |   |
| 基本性能     | 温度センサ               | -40 °C~+85 °C, 分解能 : 0.125 °C                           |
|          | 濡れセンサ               | 0~65535, 分解能 : 16 bit                                   |
|          | 通信機能およびサンプリング間隔     | サーバ接続(via Wi-Fi): 10 秒~99 時間<br>Bluetooth 接続: 1 秒~99 時間 |
|          | メモリ容量               | 1024 データセット分  |
|          | 使用温度範囲              | -20 °C~+85 °C, 結露なきこと                                   |

図 3-3 に濡れセンサは Bluetooth で PC と接続しているとき、モニターの表示画面を示す。赤色の枠で囲まれる部分では計測設定を行い、青色の枠で囲まれる部分では感覚的に判断できるように、計測結果を簡易な棒グラフで表すこととした。棒グラフの左上にあるプルダウンメニューから濡れセンサの A 面か B 面か AB 両面かを選択して棒グラフの表示範囲を調整できる。また、緑色の枠で囲まれる部分では濡れセンサや温度センサのチャンネル番号を設定し、それぞれの計測値をリアルタイムで確認できる。図 3-3 は 1 本の帯状濡れセンサの№5 と№7 のみに水滴を付けたときのモニタリング画面である。この画面から、ユーザはセンサ№5 と№7 の位置が濡れていること（コンクリートが充填されていること、または結露・漏水が生じていること）は一瞬で分かる。

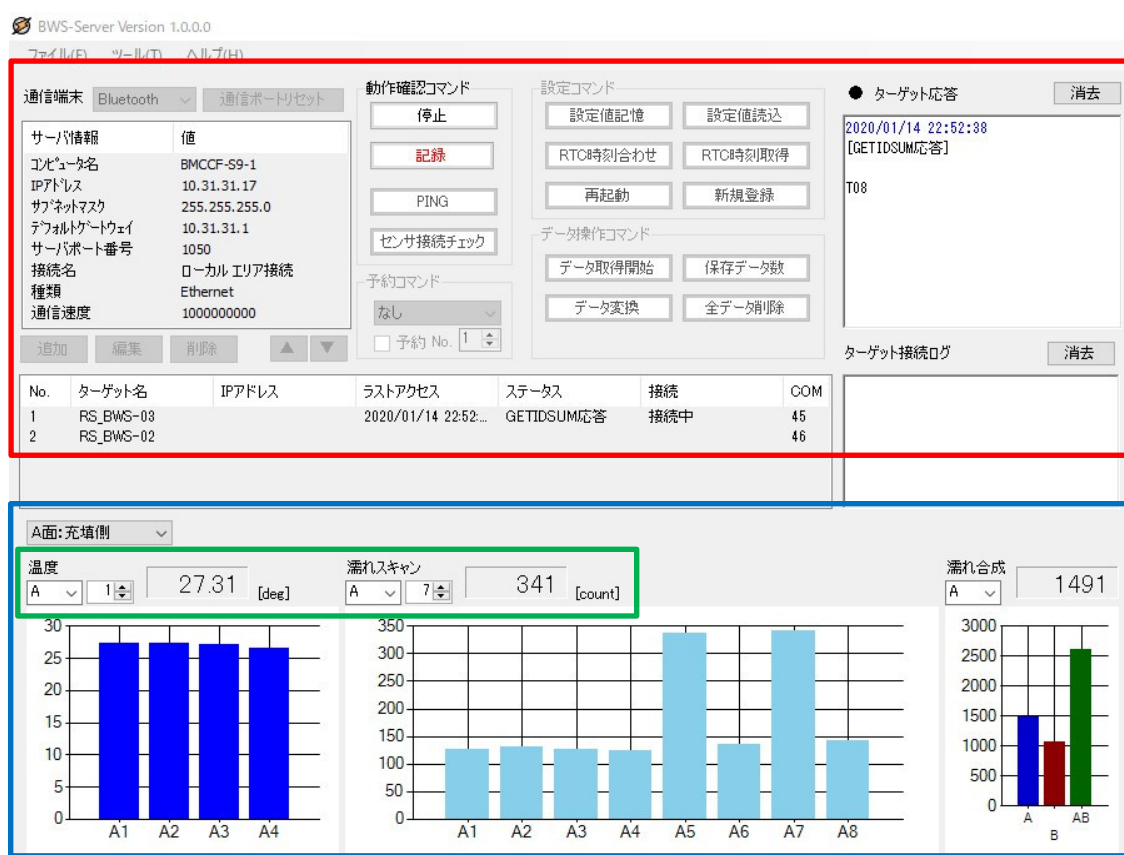


図 3-3 PC での表示画面

スマートフォンでの表示画面を図3-4に示す。スクリーンのサイズの制限で、棒グラフの真上に該当チャンネルの計測値をリアルタイムで表示する仕様とした。また、同図に示すように「AB両面」の表示範囲を選択するとき、濡れは（温度も）A1→A8→B1→B8の順に、A面を先にしてAB両面を合わせて表示する仕様とした。



図3-4 スマートフォンでの表示画面

### 3.1.2 コンクリートのイオン濃度・温度が濡れセンサに及ぼす影響

フレッシュコンクリートの比誘電率はそのイオン濃度が影響すると考えられる<sup>3)</sup>。フレッシュコンクリート中の代表的な溶液イオンである  $\text{Ca}^{2+}$  と  $\text{OH}^-$  が比誘電率に与える影響を検討するために、図3-5に示すように濃度が異なる  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  水溶液に濡れセンサを浸漬し、イオン濃度がセンサの出力値に与える影響を検討した。

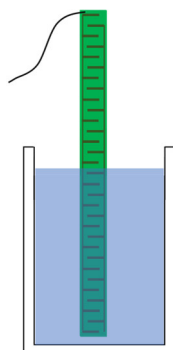


図3-5 基本性能試験



20°C時に  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  の飽和溶液の濃度（溶解度）を 100%として溶液濃度とセンサ出力値の関係を図 3-6 に示す。図中のセンサ出力値は、1 基のセンサの 60 mm 全体が溶液に浸漬されたときの計測値である。なお、フレッシュコンクリートを計測対象とする場合に、硬化したコンクリートから帯状濡れセンサの取外しを容易にするために、センサ表面をポリ塩化ビニリデンの薄膜（食品包装用ラップフィルム、以下ラップフィルムと記す）で覆って保護することを想定しているため、この試験においてもラップフィルムを覆って検討を行った。

図 3-6 に、黒線（■）はセンサを保護せずに溶液に浸漬したとき、赤線（●）はラップフィルムでセンサを保護して浸漬したときの試験結果である。溶液中に浸漬する前、空气中に暴露しているセンサの出力値は 144 ほどであり、溶液中に浸漬することにより出力値は 300 程度まで急上昇した。同図に示すように、本実験用いた帯状濡れセンサは、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$  水溶液濃度の影響をほとんど受けないことが分かる。また、ラップフィルムでセンサを保護して計測した場合の濡れ出力値は保護しない場合より約 9%低下していた。これはラップフィルム自体の電気抵抗の影響を受けるためと考えられるが、センサをラップフィルムで覆って計測しても濡れの状況は十分に計測できることが明らかとなった。

なお、コンクリートを打ち込む前に、型枠への散水の影響を検討した予備実験では、水は重力の影響で上から下へ流れ、散水による水滴がわずかにラップフィルムに付着するため、センサ出力値は散水を行う前、すなわち空气中での出力値と同程度であった。また、帯状濡れセンサに撥水加工を施したため、散水による水滴はほとんど付着しないことも分かった。

既往の研究で静電容量型のセンサは計測環境の温度の影響を受けることが分かっている<sup>4)</sup>。そこで、予め温度が本帯状濡れセンサの出力値に及ぼす影響を検討した。先の図 3-5 と同じ試験方法でセンサを水中に浸漬し、水温がセンサ出力値に及ぼす影響を調べた。水温を 10°Cから 70°Cまで緩やかに変動させたときに、温度とセンサ出力値の関係を図 3-7 に示す。保護していないときも、ラップフィルムでセンサを覆ったときも、水温の上昇に伴ってセンサ出力値は大きくなる傾向にあるが、最も低い 10°Cの出力値を基準として、その最大の変動幅は 20 程度で、70°C時に出力値は約 7%上昇した。

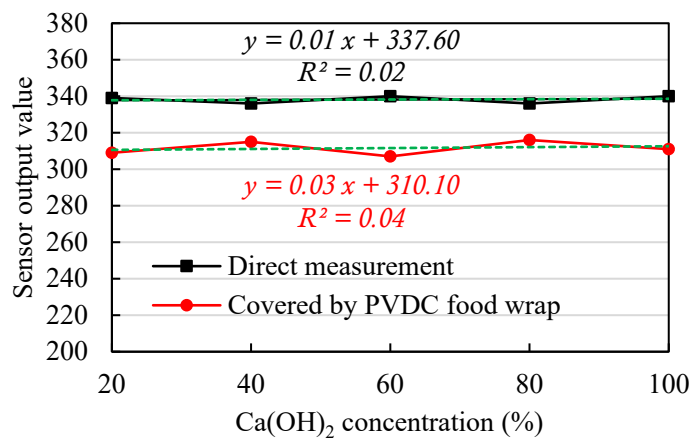


図 3-6 濃度の影響 ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$  溶液中)

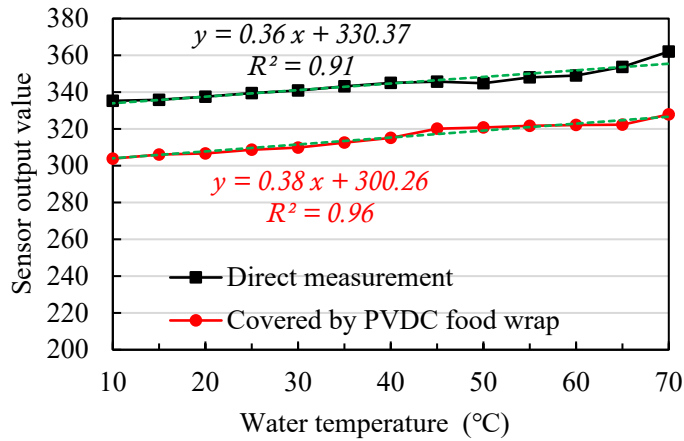


図 3-7 温度の影響（水中）

### 3.1.3 気温・相対湿度が濡れセンサに及ぼす影響

コンクリートの施工管理と同様に、本センサを建築物の維持管理で使用する場合には、センサが暴露する環境の温度・湿度によって計測値が変化するか否かを検討した。環境の温度・相対湿度を調整できる試験装置に濡れセンサを設置し、センサ表面に結露が生じないことを条件として濡れの計測を行った。

図 3-8 に相対湿度が一定で、温度が変化するとき、図 3-9 に相対湿度が一定で、湿度が変化するときのセンサ出力値を示す。図 3-8 にセンサの出力値は初期値である約 144 を中心にわずかに変動したが、気温の変化による変動幅は無視できるほど小さかった。図 3-9 に空気温度の増加に伴って出力値が増加する傾向がわずかに認められたが、前掲した水中での出力値、すなわち濡れたときの出力値に比べて変動幅も極小さかった。従って、結露や漏水をモニタリング対象とする場合に、本濡れセンサは空気の温度・相対湿度の変化による影響をほとんど受けないであると判断した。

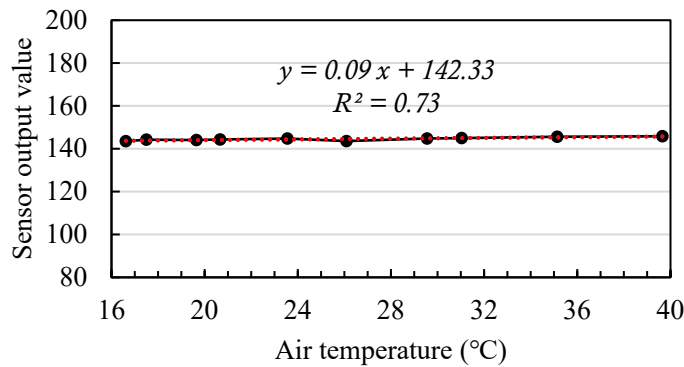


図 3-8 気温の影響

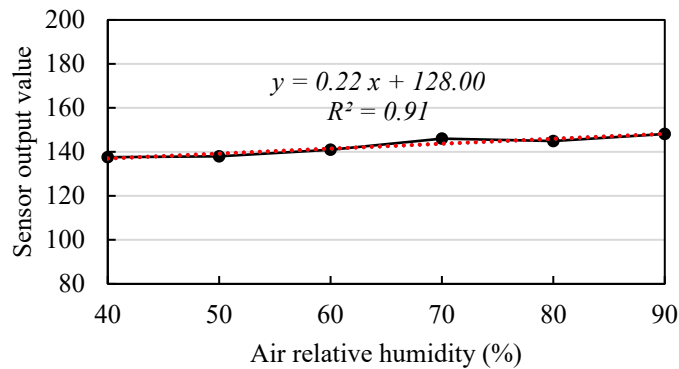


図 3-9 空気湿度の影響

### 3.1.4 センサ計測値の表示方法

濡れセンサに計測された静電容量のアナログ信号をデジタル信号に変換してセンサ出力値が表示される。このセンサ出力値（絶対値）は、先に示した電極の長さ，幅，間隔等によって変化するため，コンクリート工学上の意味はない。

ここでは，既往の研究<sup>4)</sup>と同様に，図 3-7 に赤線で示したセンサをラップフィルムで覆う時に，20℃の水中における計測値を基準値として，1 基のセンサの計測結果を式 3(1)に示すセンサ出力率(%)で表示することとした。つまり，センサ出力率が 100%，または 100%以上になることは 1 基のセンサが 20℃の水中に完全に水没している状態を意味する。なお，センサの計測特性のために，センサが全く濡れていないときも出力値を有するため，センサが空気中におかれた場合にセンサ出力率は 48%程度の値を示すこととなる。後述するが，この 48%を濡れセンサの初期値として，この初期値と比較することで，またはセンサ各基の間で比較することで，センサ出力率の変化からコンクリートの充填状態，豆板の有無，部材内部の濡れ状態を判定できる。従って，この初期値を 0%となるように補正する方法を検討したが，本論文ではこの補正は行わないこととした。

$$\text{センサ出力率 (\%)} = \frac{\text{各時点でのセンサ出力値}}{\text{20℃水中での計測値 (ラップフィルムで覆うとき)}} \times 100 \quad 3(1)$$

### 3.2 振動モニタリングシステムと基礎実験結果

#### 3.2.1 振動モニタリングシステムの概要

振動モニタリングシステムの構成を写真 3-2 に示す。市販の加速度センサとそれに接続する信号処理ユニット（写真 3-2(a)），またはサーボ型 MEMS 加速度センサが内蔵されるセンサユニット（写真 3-2(b)）を計測対象に固定し，計測された加速度の時刻歴データを Bluetooth によって計測の設定・制御とデータ受信兼用の PC（写真 3-2(c)）に転送する仕組みで，専用の解析ソフトを使ってセンサから転送されてきたデータを記録・保存する無線振動計測システムである。後述するが，写真 3-2(a)に示した計測セットや，写真 3-2(b)に示したセンサユニットを両面テープで計測対象に固定することで，本計測システムは有線タイプの計測システムに比べてより短時間で設置でき，設置場所の制限等の不利な影響を受けにくいメリットがある<sup>5)</sup>。また，写真 3-2(c)に示した PC と加速度センサ間の最大通信距離は 100 m ほどであり，加速度は最大 8 箇所まで同時に計測できる。

写真 3-2 (b) に示す一体式の加速度センサの基本仕様を表 3-2 に示す。一体式の加速度センサは信号処理ユニットと同様に，約 111×58×39 mm の小型サイズで，リチウムイオンバッテリーが内蔵され，鉛直 1 軸および水平 2 軸の 3 方向の加速度を約 15 時間連続で計測できる仕様とした。また，3 軸のうち 1 軸をトリガとしてトリガ計測は可能である。加速度センサの分解能は 24 bit (1/2<sup>24</sup>)であり，5G の強震から 5.96×10<sup>-8</sup>G の常時微動まで構造物に生じる振動の計測が行われる（1 G=9.80665 m/s<sup>2</sup>）。



(a) Accelerometer and wireless signal processing unit (right)

(b) Wireless sensor unit (build-in accelerometer)

(c) Host PC with analysis software

写真 3-2 振動モニタリングシステムの構成

表 3-2 加速度センサの基本仕様

|          |   |  |
|----------|---|--|
| 使用電源     | 充電式リチウムイオンバッテリー内蔵：連続動作は約 15 時間、<br>もしくは 5V・AC アダプター |  |
| 消費電力     | 0.5 Watt 以下   |  |
| 外形寸法, 重量 | 111 × 58 × 39 mm (スイッチ等の突起部除く), 135 g               |  |
| 基本性能     | 測定方向  | 3 軸：鉛直 1 軸および水平 2 軸                    |
|          | サンプリング速度  | 100, 200, 500, 1k [SPS]                |
|          | アンチエイリアス<br>FIR フィルタ                                | 512Tap Kaiser フィルター<br>サンプリング速度により自動可変 |
|          | サンプリング精度  | ±1 ppm                                 |
|          | 周波数安定性  | ±0.28 ppm @-40~+85 °C                  |
|          | 時間同期精度  | ±1 ms 以下 (Bluetooth、USB)               |
|          | 測定振動数範囲   | DC~500 Hz (FIR フィルタで制限される範囲)           |
|          | 測定レンジ   | ±5 G (±4900 gal)                       |
|          | 分解能   | 24 bit (最小 0.06 μG)                    |
| 機能       | 通信方式  | Bluetooth, USB                         |
|          | データ保存容量   | 256 MB : 100sps 時約 60 時間分データ記録可能       |
|          | トリガ   | 3 軸のうち 1 軸をトリガとして使用                    |
|          | プリトリガ   | トリガ前データの保存機能, 最大 60 秒                  |
|          | 使用温度範囲  | -20~+85 °C 結露なきこと                      |

専用の解析ソフトの仕様の概要を表 3-3 に示す。この解析ソフトは計測された加速度データから速度、変位を算出し、それぞれの周波数領域でのスペクトルを表示する機能に加え、リサージュ図、ウェブレット解析、計測時のビデオ録画、GPS 情報の記録等の機能も装備されており、建築材料学研究室の既往の研究で開発されたものである。

表 3-3 振動解析ソフトの仕様

|           |   |  |
|-----------|---|--|
| 通信方式      | Bluetooth, USB, LAN   |  |
| サンプリング周波数 | 100, 200, 500, 1k, 2k SPS                                       |  |
| 同時接続数     | 最大 8 台センサ (24 チャンネル)  |  |
| 機能        | 解析機能  | 加速度, 速度, 変位, FFT, リサージュ, ウェブレット, ピークホールド, バーグラフ, スムージング, 振動レベル, 計測震度相当値等 |
|           | フィルタ機能  | FIR フィルタ, FFT フィルタ   |
|           | ビデオ録画機能   | 同期録画・再生, 再生スピード可変, カーソル追従再生機能, スチル撮影                                     |
|           | トリガ機能   | オート, ノーマル, シングル, プリトリガ, 測定時間自動延長機能(測定終了時の加速度レベルにより判定)                    |
|           | GPS 機能  | GPS による PC の時刻合わせ, 経度・緯度等の情報取得   |
|           | 音源再生機能  | PC オーディオ機能による波形の再生が可能  |
|           | メール機能   | 遠隔操作, データ取得メッセージの自動配信  |
|           | 3D 表示機能   | 360°全方位視認可能  |
|           | データベース  | プロジェクトファイルをデータベースで管理   |
| 演算機能      | FFT 波形スムージング, FFT ピーク検出, フーリエスペクトル, パワースペクトル, 振幅, 位相, 伝達関数 etc. |  |

### 3.2.2 加速度の計測値から速度・変位に換算する手法の妥当性検証

本振動モニタリングシステムでは、図 3-10 に示すように、計測された加速度データに基線補正を行い、高速フーリエ変換 (fast Fourier transform, FFT) を施して周波数領域での時刻歴の積分を行う上で、逆高速フーリエ変換 (inverse fast Fourier transform, IFFT) から速度、変位データを算出する手法<sup>9)</sup>を採用している。また、加速度データにハイパスフィルタ (High-pass filter, HPF) をかけて低周波成分 (長周期成分) を除去することで積分演算の正確さを高める手法も採用されている。

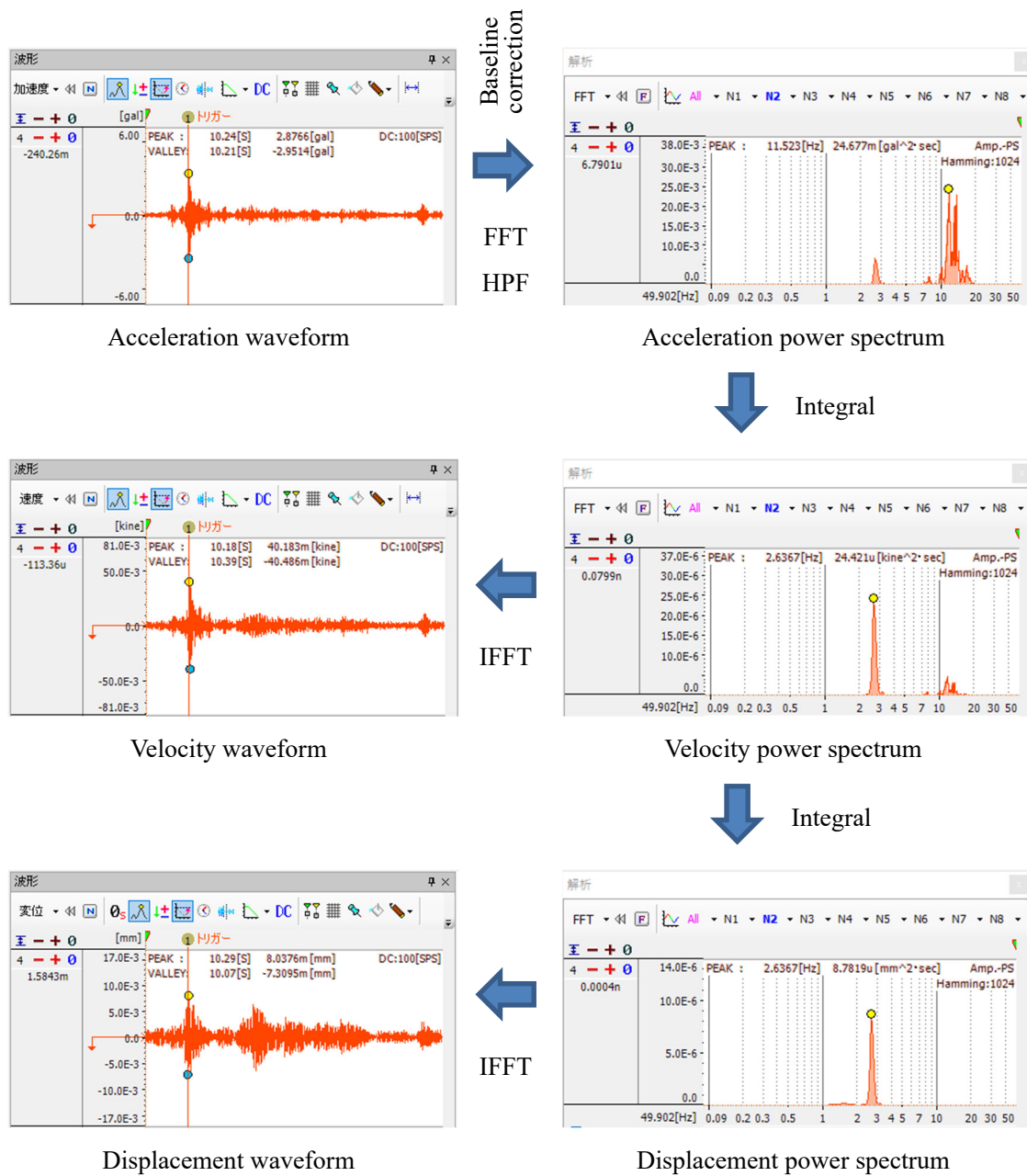


図 3-10 速度・変位を求める方法

振動モニタリングの実施において、計測位置での変位の算定は重要となる。前記の算定手法の適用性を検討するために、実験室レベルにおいて検証実験を行った。図 3-11 に示すように、振動計測に用いた加速度センサを振動台に固定し、後述する計測対象となるトルゲートの固有振動数と加速度振幅の範囲を考慮した上、周波数領域および加速度領域で振動を再現して加速度を測定し、計測値から変位（速度）を求めた。

このとき、振動台の変位の経時変化をレーザ変位計で測定し、これを正解値とした。トルゲートの予備計測で得られた振動（2 Hz～20 Hz，1 gal～200 gal）を永久磁石式一軸方向の振動台で再現して種々解析した結果、基線補正に加え、低周波のノイズを除去するために 1.0 Hz のハイパスフィルタ（HPF）を積分時に適用することで、以下に示すように加速度センサの計測値から変位への算定値は、正解値とほぼ一致することが分かった。

まず、センサの固定方法として両面テープ止めとビス止めとの比較を行った。結果の一部を図 3-12 に示す。左側の図に示すように、20 Hz，400 gal の場合には、固定方法によって変位波形にわずかな時間のずれが生じたが、最大変位も周波数も同じ値を示した。右側の図から、10 Hz，200 gal の場合には算出した変位波形に両止め方の間に差がなく、まったく一致していることが分かった。つまり、両面テープ止めもビス止めも、固定方法は変位の計測精度に影響しない。ビス止めより現地で設置しやすい両面テープ止めは、センサを設置するための作業時間を短縮でき、精度も保障できる。振動レベルがこれより小さい計測条件の 2 Hz～20 Hz，1 gal～200 gal の範囲において、変位の計測値には固定方法による差が生じないことも確認した。

図 3-13 に再現の振動を繰り返したとき、振動モニタリングシステムによる変位の計測値と正解値を比較して示す。図中、実線がレーザ変位計による計測値（正解値），破線が計測された加速度波形から算定した変位であるが、いずれの場合において、加速度センサの計測結果から求めた変位は正解値とほぼ一致することが分かる。

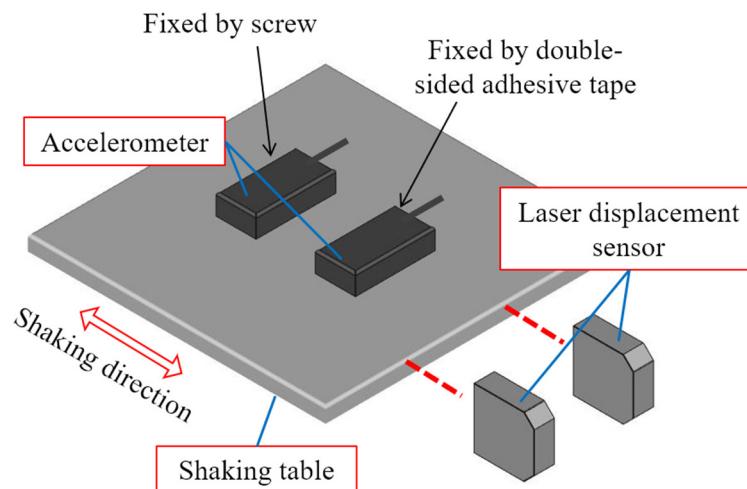


図 3-11 変位計算と精度の検証実験



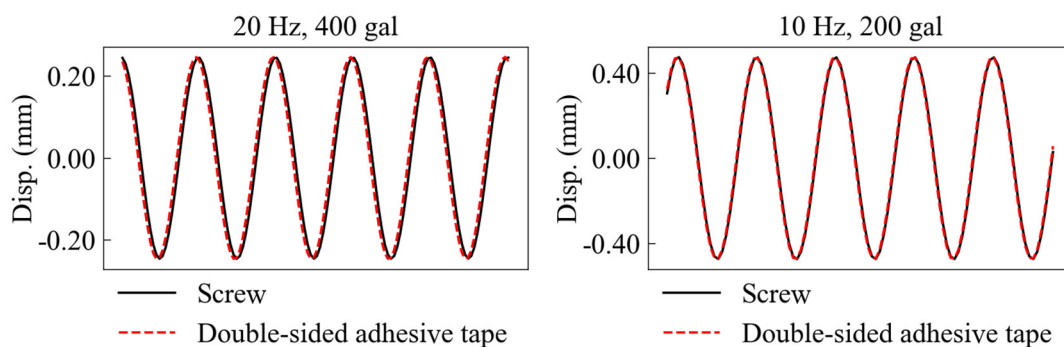


図 3-12 センサ固定方法の比較 (HPF:1.0 Hz)

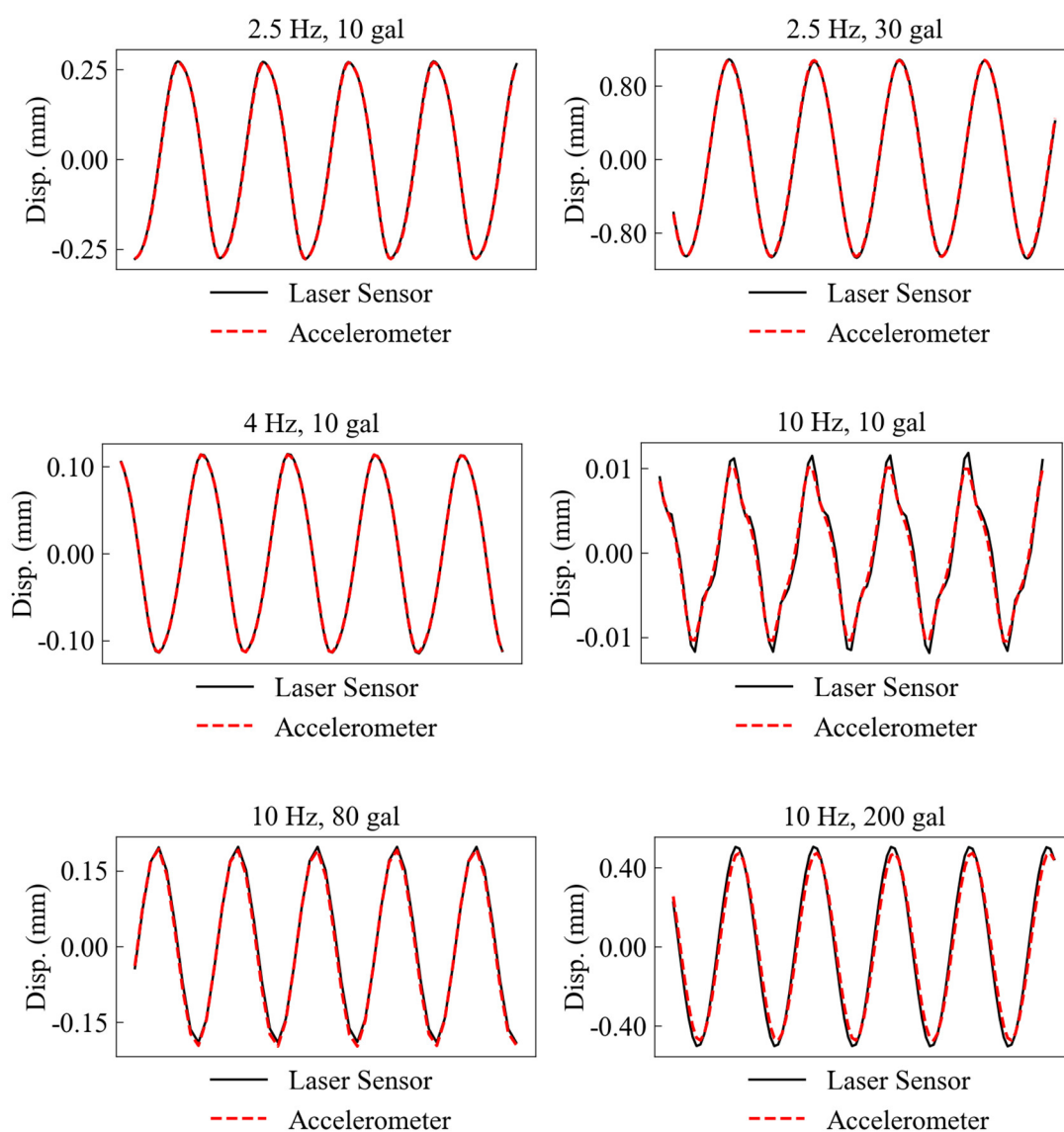


図 3-13 変位換算精度の検証実験の結果 (HPF:1.0 Hz)

以上の結果から、対象構造物のモニタリングにおいて、計測された加速度データから速度および変位を算定する場合、加速度の時刻歴波形の基線補正を行い、計測対象に応じたハイパスフィルタ（HPF）を積分時に適用することとした。

### 3.2.3 その他の機能の概要

#### ①リサーチ描写

複数のセンサ間の相対距離を比例関係で設定することで、センサの位置での振動様子を3Dのリサーチ図で観測・再現できる。図3-14に示す変位リサーチ図は、2本の柱の柱頭と柱脚、および柱が支持する屋根スラブの四隅にセンサを設置するときのトールゲートの振動様子を再現するものである。この変位リサーチ図から、柱より屋根スラブの振動が卓越することが分かる。また、帯域通過フィルタ（BPF）を施し、すなわち調べたい周波数の範囲を設定すれば、計測対象の固有振動数およびその振動数での固有モードも再現でき、専門の知識がないユーザに対しても、視覚的な効果で計測結果が分かりやすくなる。

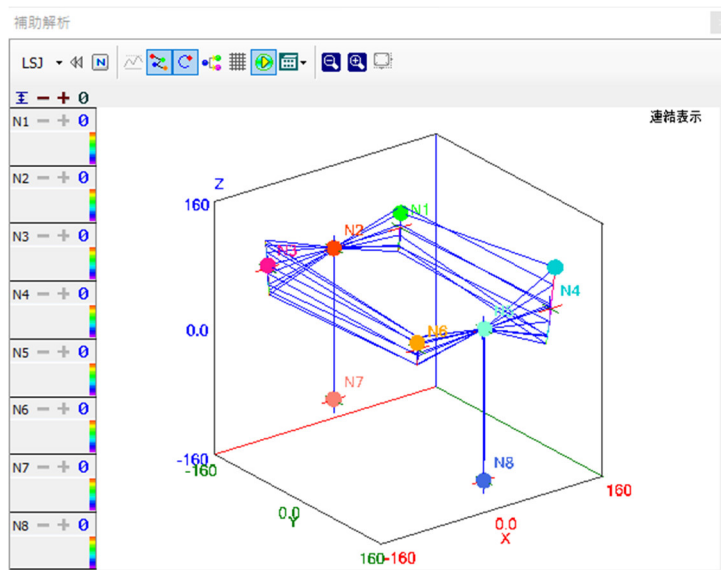


図 3-14 3D リサーチ図

②部材角度

振動計測システムにおいて、AC 加速度，または DC 加速度（AC+重力加速度）のいずれかを計測できる。DC 加速度を計測するとき，XYZ の3方向の加速度の合成ベクトルは鉛直方向（重力方向）に対して一定となる。図 3-15(a)に示すように，初期時には X 軸と Y 軸で 0 G，Z 軸で 1 G とであったが，例えば図 3-15(b)に示すように X 軸を中心に YZ 平面内で回転が生じた場合に，合成ベクトル(1 G)と Y 軸，Z 軸の加速値から三角関数で回転の角度，すなわちセンサの傾きを算出できる。XYZ の各軸において，加速度センサの回転角度は式 3(2)によって算出し，図 3-16 に示すように，振動の計測期間において角度の時刻歴データはセンサの方向ごとに保存できる。

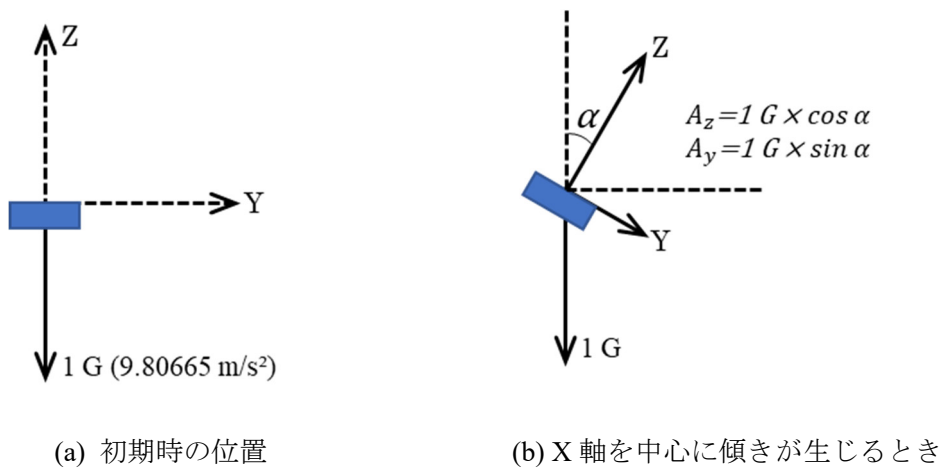


図 3-15 角度の算出方法

$$\left. \begin{aligned}
 \theta_x &= \tan^{-1} \left( \frac{A_x}{\sqrt{A_y^2 + A_z^2}} \right) \\
 \theta_y &= \tan^{-1} \left( \frac{A_y}{\sqrt{A_x^2 + A_z^2}} \right) \\
 \theta_z &= \tan^{-1} \left( \frac{\sqrt{A_x^2 + A_y^2}}{A_z} \right)
 \end{aligned} \right\} 3(2)$$

$\theta_x, \theta_y, \theta_z$ は各軸に対するセンサの回転角度  
 $A_x, A_y, A_z$ は計測された各軸の DC 加速度

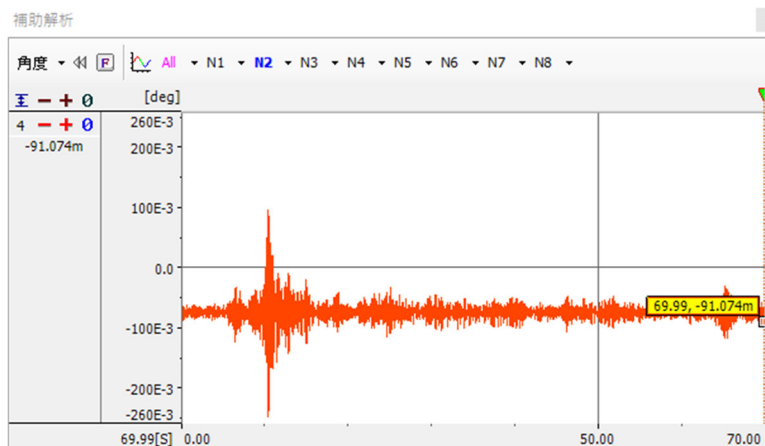


図 3-16 角度の時刻歴データ

### ③ウェレット解析

図 3-10 に FFT 解析の結果としてパワースペクトルを示した。これらのスペクトルには周波数領域での振幅が分かるが、FFT 解析の特性のため、各ピークが現れる位置等の時間領域における情報を失ってしまう。この欠点を改善するために、本振動計測システムでは図 3-17 に示す Wavelet 解析の機能を装備し、時間領域および周波数領域で両方の情報は確認できる。

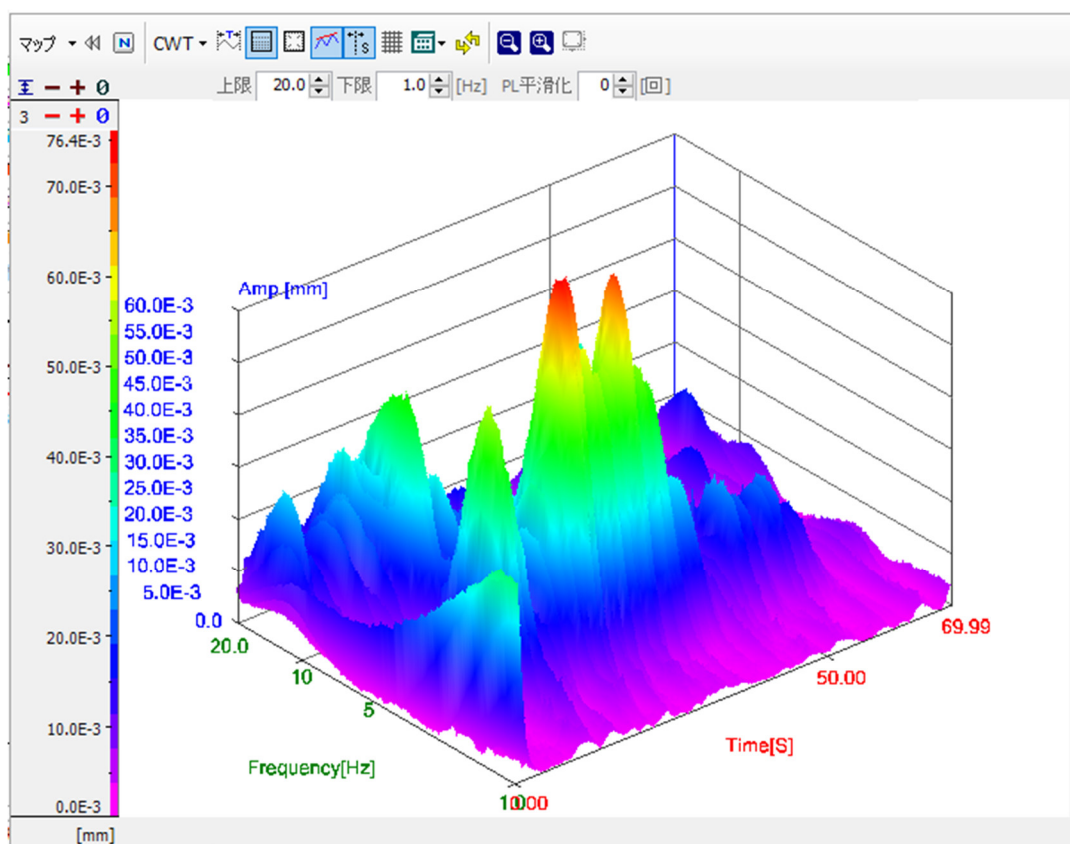


図 3-17 図 3-10 に示すデータの Wavelet 解析

④震度レベル（相当値）

加速度波形から気象庁の計測震度計算方法<sup>7)</sup>によって相当震度を算出する機能も備えている。近傍に地震計が設置されない計測対象において、地震時の震度や常時微動によって生じた振動の相当震度は、図 3-18 に示す震度の値を出力する棒グラフで、または図 3-19 に示す時刻歴の波形で表示できる。

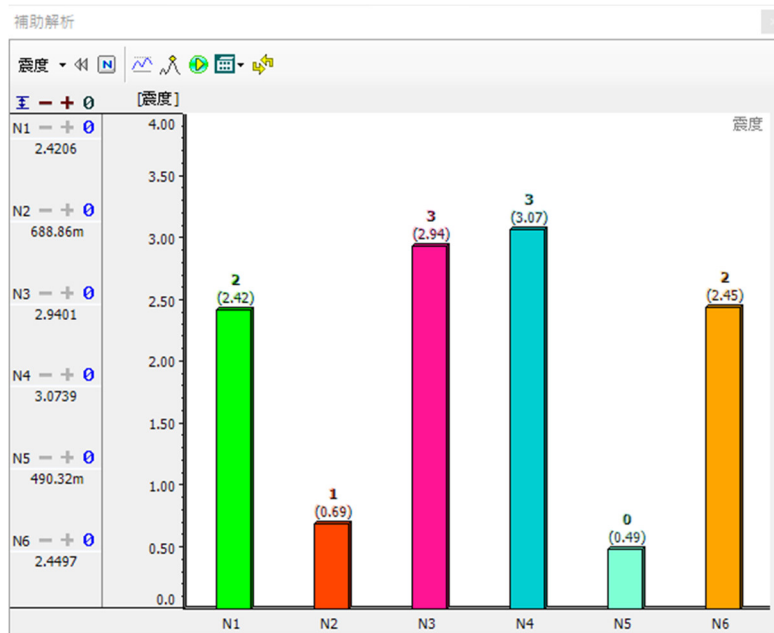


図 3-18 相当震度の棒グラフ（ある時刻の値）

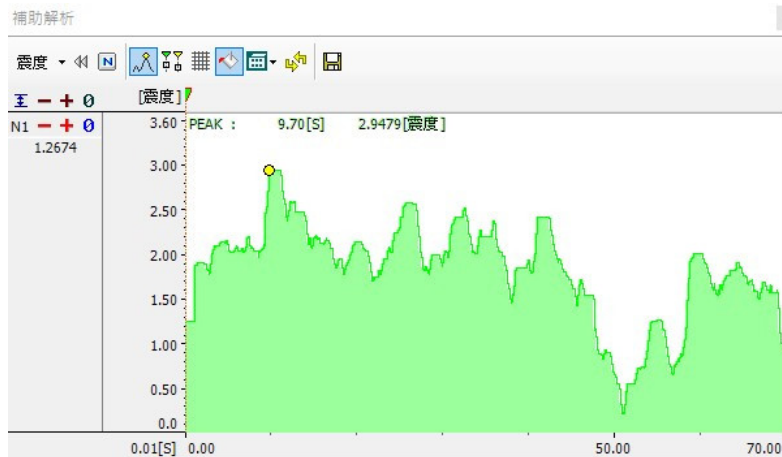


図 3-19 相当震度の波形

### 3.3 本章のまとめ

本章では、本研究に使う無線通信技術を駆使した濡れモニタリングシステムと振動モニタリングシステムの計測原理と構成、データの解析手法と精度を示した。以下に実験室レベルの基礎実験で得られた知見を示す。

#### ◆ 濡れモニタリングシステムについて

- 1 長い電極線を楕円状に配置した仕様の帯状濡れセンサは、計測対象の比誘電率の変化から水分を検知して濡れの具合を推定できる。一定の長さで分割したセンサユニットを1基のセンサとして1つの計測値を出力し、その出力値がセンサの濡れ深さの増加に伴って上昇し、全部が濡れたときに最大の出力値を示す仕様は、振動締固め効果の確認とともに、コンクリートの表面に生じる豆板の検知できる見通しを得た。
- 2  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  水溶液での計測結果から、溶液の濃度の変化は出力値に与える影響が小さく、フレッシュコンクリートに対しても本センサが活用できる。水中での計測結果から、計測対象や水溶液の温度は、濡れ判断に影響しないほど小さいことを明らかにし、センサをラップフィルムで覆うことで、センサを保護しながら濡れの計測はできる。
- 3 センサが空気中におかれた場合、気温、相対湿度による計測値の変動は無視できるほど小さい。また、センサの出力値は電極の長さや幅、間隔に依存するため、コンクリート工学上には意味がなく、計測値と初期値との比較、センサ各基間の比較が濡れ状況の計測に重要である。

#### ◆ 振動モニタリングシステムについて

- 1 振動モニタリングシステムに用いた加速度センサは、計測値の時刻歴波形の基線補正を行い、周波数領域で積分を行う際にハイパスフィルタを適用することで、計測された加速度データから速度および変位を精度良く算出できる。
- 2 本研究で対象とする構造物の計測におけるセンサの固定方法を検討した結果、本研究で選定した両面テープ止めはビス等による機械的固定方法と同等の計測結果が得られ、変位の計測精度に影響しない。

第3章の参考文献

- 1) Jerome P. Lynch, Kenneth J. Loh: A Summary Review of Wireless Sensors and Sensor Networks for Structural Health Monitoring, The Shock and Vibration Digest, Vol. 38, No. 2, pp.91–128, 2006.3, DOI: 10.1177/0583102406061499
- 2) 李亮：無線 MEMS 加速度センサを活用した既存構造物の診断技術の確立に関する研究, 広島大学博士学位論文, 2016.7
- 3) 日本化学会編：化学便覧 基礎編Ⅱ(改訂5版), 丸善, pp.619–622, 2004
- 4) 鬼塚雅嗣, 大久保孝昭, 寺本篤史, 上原誠, 松本賢二郎：住民・建築ユーザによる日常点検が可能な建築部材の濡れモニタリングシステムの開発, 日本建築学会技術報告集, Vol.25, No.59, pp. 33–38, 2019.2, doi.org/10.3130/aijt.25.33
- 5) 李亮, 松本慎也, 大久保孝昭：建築物の耐震補強前後の常時微動の比較計測への無線計測システムの適用実験, 日本建築学会技術報告集, Vol.22, No.51, pp.435–440, 2016.6, doi.org/10.3130/aijt.22.435
- 6) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, 1994.5
- 7) 気象庁：計測震度の算出方法,  
[https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/kaisetsu/calc\\_sindo.htm](https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/kaisetsu/calc_sindo.htm) (2020年12月5日確認)

## 第4章 濡れセンサによるコンクリートの施工管理・維持管理手法

鉄筋コンクリート構造物に要求される強度、耐久性等、所要の品質を実現するためには、型枠内に均質なフレッシュコンクリートを密実に充填することが必須である。コンクリートの充填状況の監視に加えて、コンクリート表面の「豆板の有無」をモニタリングする技術、すなわち「コンクリートの充填および表面の仕上がり」に的を絞って、打込み時にコンクリートが密実に打ち込まれているか否かをリアルタイムで確認できる技術を確立することはコンクリート工事の施工管理に有益である。

一方、結露や漏水等、水の移動で積層部材内部、天井裏および床下で発生しやすい「建築物部材の濡れ」は、人が容易に確認できないため、腐食等の劣化現象が蓄積し、ある時に大きな不具合として現れるリスクがある。RC造建築物において、部材の「濡れ」や「乾湿繰返し」等の部材内部の水分をモニタリングし、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予防保全技術を確立することは維持管理に有益である。

本章では、これらの検知・モニタリング技術を実建築物に活用することを想定し、3章で示した帯状濡れセンサを活用した検討を行った。帯状濡れセンサの運用手法として、図4-1(b)~(d)の活用フローに示すモニタリング技術を提案した。コンクリートを打ち込む段階では、まず、図4-1(b)に示すように、せき板内側に濡れセンサを設置し、近くでコンクリートの打込み時に、小型データロガーを介してフレッシュコンクリートの充填状態をリアルタイムでモニタリングすることでコンクリートの打込み管理を行う。このとき、コンクリート表面に帯状濡れセンサの痕跡を残さないために、図4-2に示すようにせき板に溝を掘り、センサをラップフィルムで覆ってせき板内に仕込む方法となる。その後、図4-1(c)に示すように、濡れセンサに付属する温度センサによって養生期間におけるセメント水和熱を計測し、脱型までにコンクリートの温度履歴管理を行う。さらに、図4-1(d)に示すように、脱型時に帯状濡れセンサを取り外さず、コンクリート部材の表面に残して、維持管理段階においてコンクリート部材と仕上げ材や断熱材との間に生じる結露や漏水の検知に活用する。

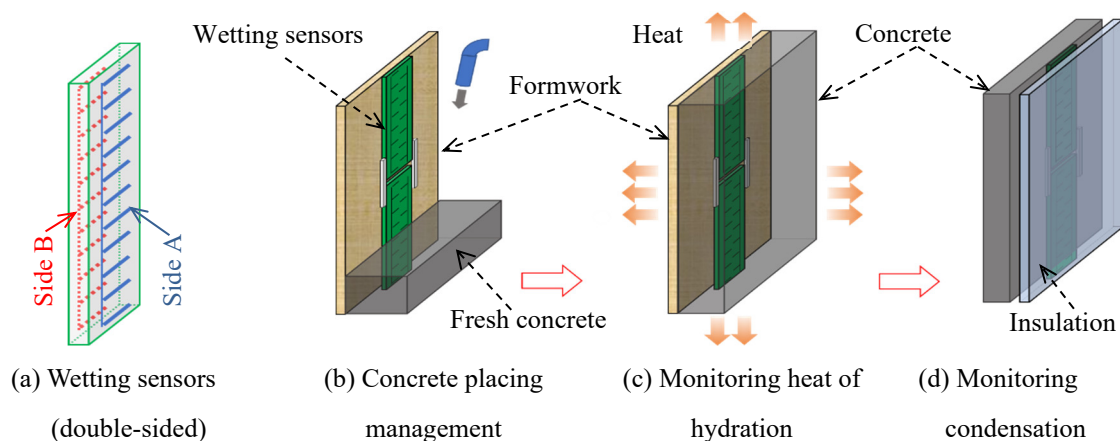


図4-1 濡れセンサおよびその活用フロー



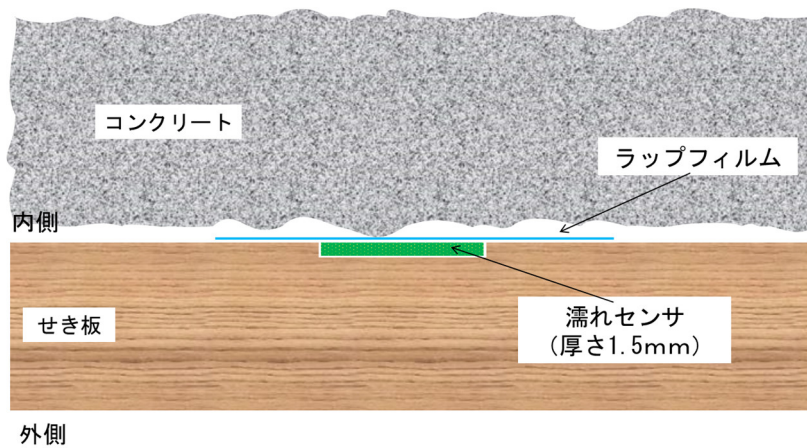


図 4-2 センサを仕込む方法

なお、図 4-1(b)の工程では、3.1 節の図 3-2 に示したように 1 基のセンサの濡れ深さが増えると、センサの出力値は上昇し、そのセンサの長さ 60 mm 全体が濡れたときに最大の出力値を示す仕様が、打設時にコンクリートの表面に生じる豆板等の空洞の検知を可能とすると考えた。また、図 4-1(d)の維持管理における活用手法について、濡れセンサを断熱材や仕上げ材で覆い、配線のみを室内に出して小型データロガーに接続し、「内部の濡れ」を計測して使用者に提示することを想定している。

本章では、帯状濡れセンサを活用し、上記の活用フローに示した施工管理・維持管理を高度化する提案は実建築物に適用できるか否かを検討するために、実験室レベルで行った検証実験の内容と結果を示す。検証実験は、4.1 節の「コンクリートの充填検知」、4.2 節の「コンクリート表面の豆板検知」、4.3 節の「セメント水和熱モニタリング」、4.4 節の「結露のモニタリング」からなる。

#### 4.1 コンクリートの充填検知に関する実験

##### 4.1.1 実験概要

実験は図 4-3(a)に示すように、厚さ 10 mm の透明アクリル板を用いて内寸法が 150×150×600 mm の柱状の型枠（せき板）を作製し、その上部からコンクリートを打ち込んだ。ラップフィルムで表面を保護した帯状濡れセンサは、1 枚のせき板の内側に鉛直方向に設置した。コンクリートの打込み実験は、この型枠に無筋の状態で行った場合と、図 4-3 (b)に示すように、D10 の鉄筋を用いてかぶり厚さを 20 mm、帯筋の間隔を 50 mm とした模擬鉄筋を型枠に設置した状態で実験を行った。なお、本実験に用いた濡れセンサは、第 3 章に示した 1 基 60 mm のセンサ 8 基（№1～№8）からなる全長 480 mm の帯状濡れセンサであり、№8 のセンサが試験体の最下部となるように設置した。コンクリートが 1 層打ちで打ち込まれた後に、棒状バイブレータ（φ: 28 mm, L: 475 mm, Frequency: 200 Hz～240 Hz）を用いて約 5 秒間の振動を与えて型枠内のコンクリートを締め固めた。

実験に供したコンクリートの基本調合を表 4-1 に示す。基本調合のスランプは 22 cm であったが、流動性が異なるコンクリートで実験を行うために、スランプが 5 cm, 10 cm, 14 cm, 18 cm となるように、表 4-1 に示す単位水量および AE 減水剤の量を最大値として、表 4-2 に示すように水（AE 減水剤を含む）の量を低減したコンクリートも調合した。なお、この打込み実験では、帯状濡れセンサはラップフィルムで保護し、また練上がり時のコンクリート温度は 20°C前後となるように調整したため、第 3 章の式 3(1)に示したセンサ出力率の算定式を採用して計測結果をまとめることとした。

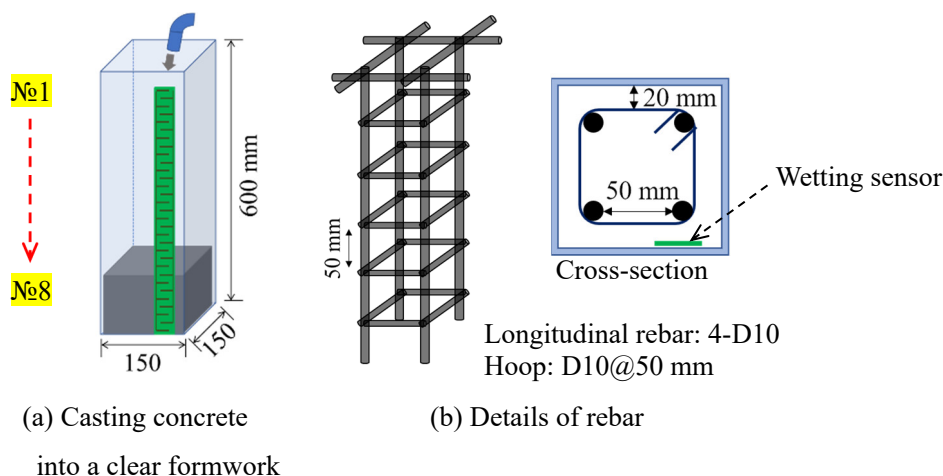


図 4-3 打込み実験の概要

表 4-1 コンクリートの基本調合

| W/C(%) | s/a(%) | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |     |     |
|--------|--------|--------------------------|-----|-----|-----|-----|
|        |        | W                        | C   | S   | G   | Ad. |
| 61     | 50     | 177                      | 295 | 897 | 882 | 3.0 |

表 4-2 水を低減したコンクリートの調合 (kg)

| W/C(%) | s/a(%) | W   | C   | S   | G   | Ad. |
|--------|--------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 55     | 50     | 159 | 295 | 897 | 882 | 2.7 |
| 50     |        | 146 |     |     |     | 2.5 |
| 45     |        | 131 |     |     |     | 2.2 |
| 41     |        | 118 |     |     |     | 2.0 |

#### 4.1.2 予備実験 (型枠への注水実験)

コンクリートを用いた打込み実験に先立ち、型枠内に注水して帯状濡れセンサの出力率と濡れ深さとの関係を確認した。図 4-4 に濡れセンサの№3 の一部の高さまで注水したときのセンサ出力率を示す。同図に示すように、№4～№8 のセンサ出力率が 100%程度を示し、№3 のセンサが約 85%を示している。この結果から、№3 のセンサの一部とその下側のセンサがすべて濡れたことは分かる。また、№1 と№2 のセンサ出力率は初期値、つまり空気中の計測値である 48%ほどとなり、この部分のセンサが全く濡れていないことを意味する。

図 4-5 に濡れ深さ(注水の深さ)とセンサ出力率との関係を示す。注水量が増えるに伴い、最下端のセンサ(№8)から出力率が順次に上昇し、型枠最上部まで注水が進むと、すべてのセンサの出力率が約 100%の値を示し、注水が型枠内に完了したことが分かる。

なお、図 4-5 において、下側のセンサ№8、№7 が一旦 100%以上の出力率を示している。これは、下端から 2 番目のセンサ(№7)の計測値が上昇し始めた時点で最下端(№8)のセンサがすべて充填されたと判断する計測アルゴリズムを採用したためである。これは最下端のセンサで測定された静電容量を基準値として上部のセンサの濡れ具合を割出すこと、すなわち、充填される物質の比誘電率の差異によらず濡れの状態を測定できるような仕様としたためである。この実験結果は、各センサの出力率を観測することで、コンクリートの打込み高さを推定できることを示している。

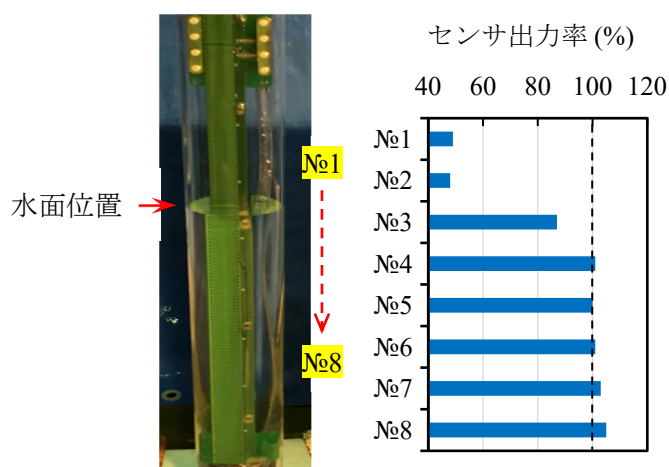


図 4-4 №3 が一部水没される出力率

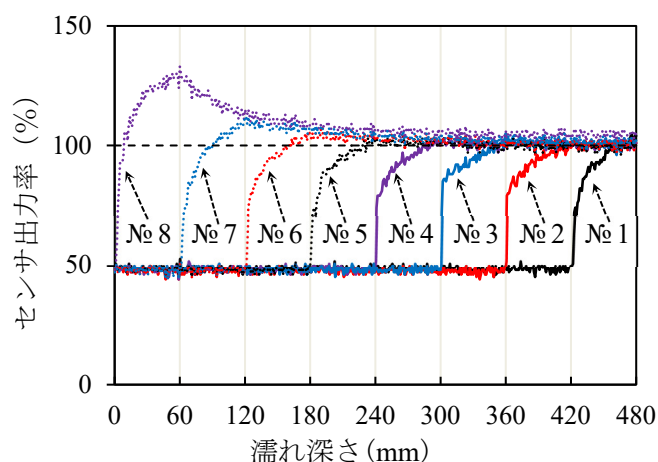


図 4-5 濡れ深さとセンサ出力率との関係

#### 4.1.3 無配筋の型枠へのコンクリートの打込み実験

スランプ 5 cm のコンクリートを打ち込んだときの実験結果を図 4-6 に示す。各図において、左側の写真はコンクリートの充填状況を示し、右側の棒グラフはそのときのセンサ出力率を示す。

図 4-6(a)はコンクリートをセンサ最下端から約 180 mm の高さまで（以下、打込み高さとして記す）、同図(b)は型枠上部まで打ち込んだとき、さらに同図(c)は棒状バイブレータでコンクリートの締固めを行った後の測定結果を示している。図 4-6(a)では、試験体下部のセンサ№6, №7, №8 の位置までコンクリートが打ち込まれたことが分かるが、センサ出力率は 100%に達していなかった。(b)では、№1～№8 の全てのセンサの出力率が上昇して 80%以上となったが、その値はばらついていたことが分かる。これは帯状濡れセンサと接するコンクリートが均質ではないためと推察される。この状態のコンクリートに、棒状バイブレータを用いて振動締固めを行ったときの結果が同図(c)である。この状態に示されるように、フレッシュコンクリートがセンサと密実な状態で接すると、すなわちコンクリートが振動締固めによって型枠内に均質に充填されると、センサ出力率がほぼ一様に 100%を示すようになることが分かる。

№2, №4 および№8 のセンサについて、この打込み実験の間のセンサ出力率の変化を図 4-7 に示す。同図より、打込み高さが上昇するに従って、コンクリートと接触した下側のセンサから各センサの出力率が上昇した。打込みが完了し打込み高さが 480 mm に達した時点では、センサ出力率は異なる値を示しているが、棒状バイブレータで振動締固めを実施した直後には、各センサの出力率のばらつきが小さくなることが分かる。なお、№2 のセンサは№4 より先行して出力率が上昇した原因は、コンクリートが打ち込まれる過程で、センサ№2 の一部にコンクリートが付着したためと考えている。

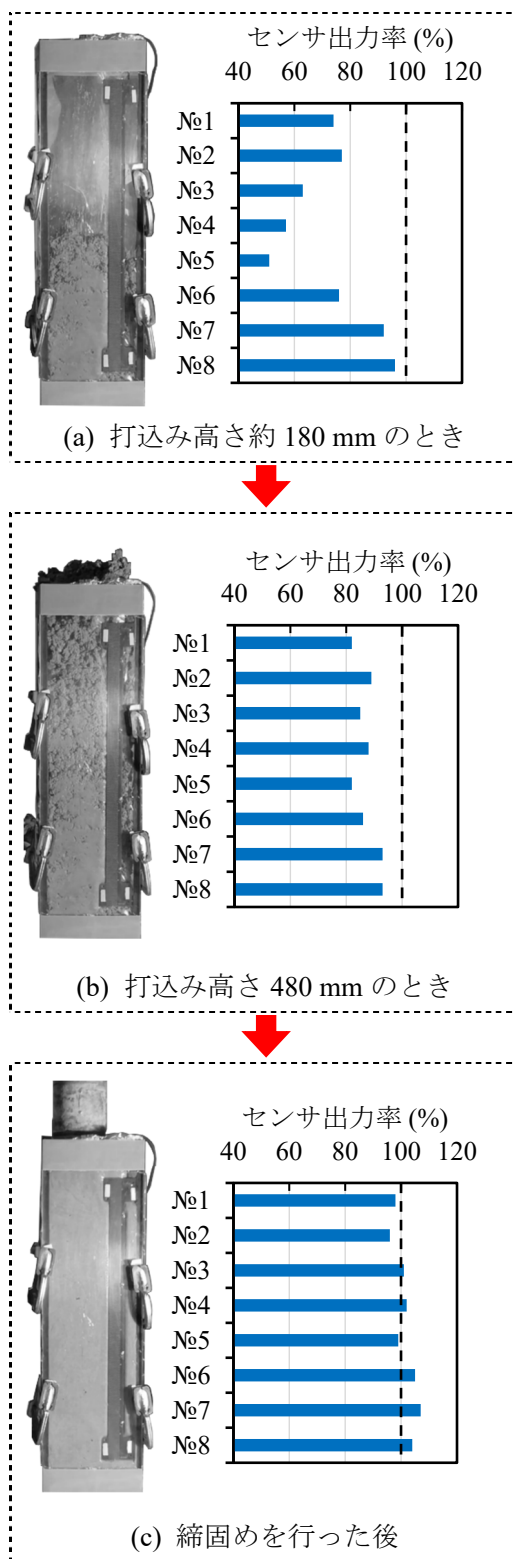


図 4-6 充填状態のモニタリング  
(無筋, SL=5 cm)

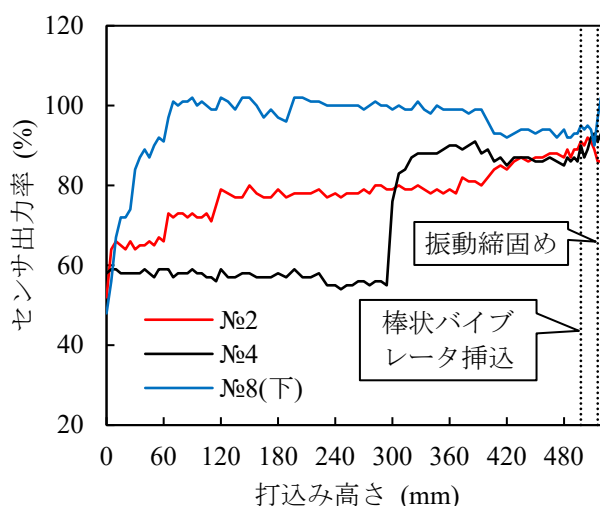


図 4-7 打込み高さでセンサ出力率との関係（無筋，SL=5 cm）

次に、スランプ 10 cm のコンクリートを打ち込んだときの実験結果を図 4-8 に示す。図 4-8(a)は打込み高さ約 180 mm とき、同図(b)は型枠上部まで打ち込んだとき、さらに同図(c)は締めを行った後の結果である。図 4-8(a)では、センサ出力率の上昇より、試験体下部に位置するセンサ№6、№7、№8 の位置までコンクリートが打ち込まれたことが分かる。同図(b)では、№1～№8 の全てのセンサの出力率が上昇したが、その値は大きくばらついている。特に、上側の№1、№2 はコンクリートとの隙間が広く、出力率が小さかった。図(b)から、この時に濡れセンサと接するコンクリートが均質ではないことが確認できる。この状態のコンクリートを締めめた後の結果が図(c)の写真であり、フレッシュコンクリートが密実な状態を示している。右側の棒グラフには、締め後のセンサ出力率が 100%を超えていなかったが、各センサ出力率が収束してほぼ一樣になったため、コンクリートがすでに密実になったものと判断した。

№1、№4 および№7 のセンサについて、この打込み実験の間に、センサ出力率の変化を図 4-9 に示す。同図より、打込み高さが上昇するに従って、下部に位置するセンサから各センサの出力率が順次に上昇し、打込みが完了時、つまり打込み高さが 480 mm に達した時点では、各センサの出力率は異なる値を示していた。この時のコンクリートに棒状バイブレータで振動締めを実施した直後には、センサ出力率が一気に上昇し、ほぼ一樣の値となっていたことが分かる。

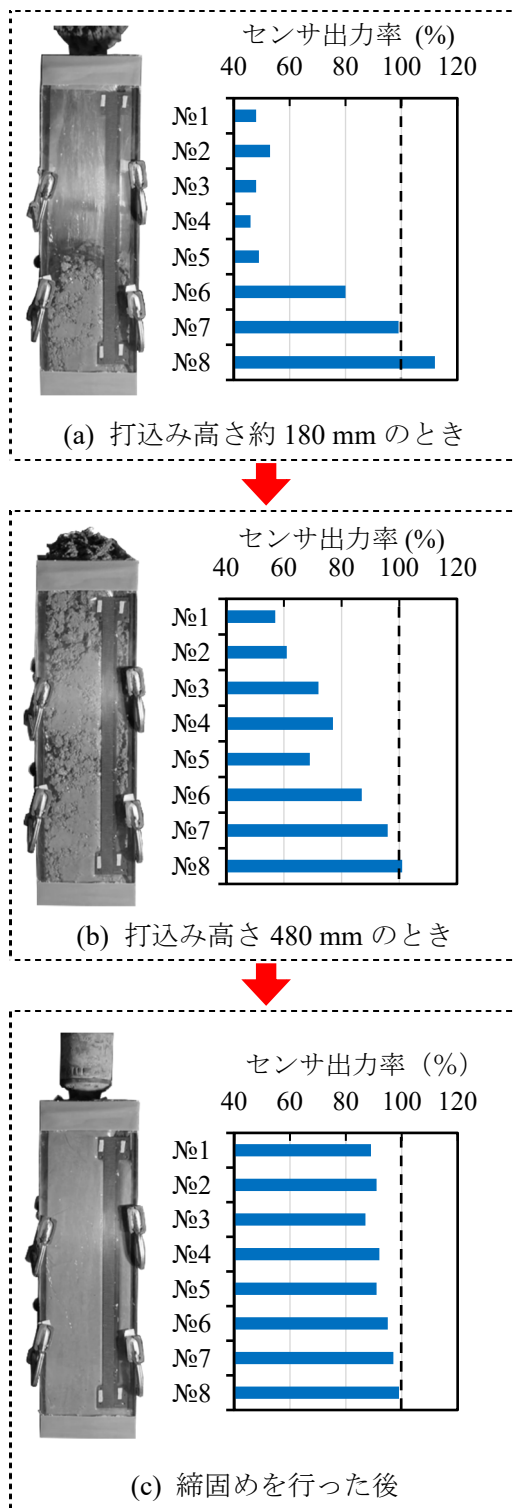


図 4-8 充填状態のモニタリング  
(無筋, SL=10 cm)

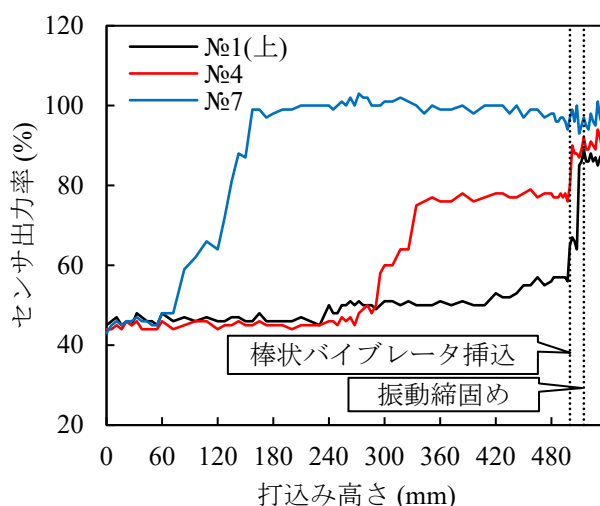


図 4-9 打込み高さでセンサ出力率との関係（無筋，SL=10 cm）

スランブ 14 cm のコンクリートを打ち込んだときの実験結果を図 4-10 に示す。図 4-10(a) は打込み高さ約 180 mm とき、同図(b)は型枠上部まで打ち込んだとき、さらに同図(c)は棒状バイブレータでコンクリートの締固めを行った後の結果である。図 4-10(a)では、試験体下部のセンサ№7、№8 の位置までコンクリートが打ち込まれたことが分かるが、センサ出力率は 100%に達していない。図 4-10(b)では、№1～№8 の全てのセンサの出力率が上昇しているが、その値はセンサ間でばらついていることが分かる。これは帯状濡れセンサと接するコンクリートが均質ではないためと推察される。この状態のコンクリートに棒状バイブレータで振動締固めを行った後の結果を同図(c)に示す。同図に示されるように、フレッシュコンクリートがセンサと密実な状態で接すると、センサ出力率がほぼ一様に 100%を示していることが分かる。

№1、№6 および№8 のセンサについて、この打込み実験の間に、コンクリートの打込み高さの増加とともに、センサ出力率の変化を図 4-11 に示す。同図より、打込み高さが上昇するに従って、下から上まで(№8→№6→№1)の順にセンサ出力率が上昇し、打込みが完了し打込み高さが 480 mm に達した時点では、センサ出力率はそれぞれ異なる値を示していた。その後、棒状バイブレータで振動締固めを実施した直後には、センサ出力率が一気にほぼ 100% になったことが分かる。



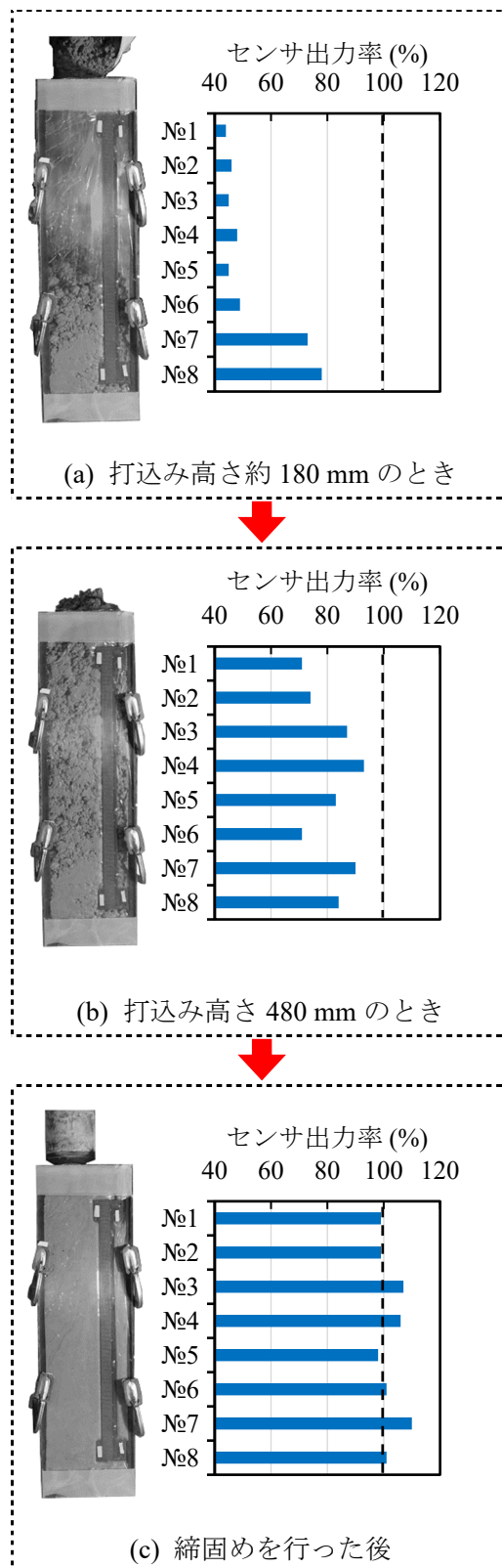


図 4-10 充填状態のモニタリング  
(無筋, SL=14 cm)

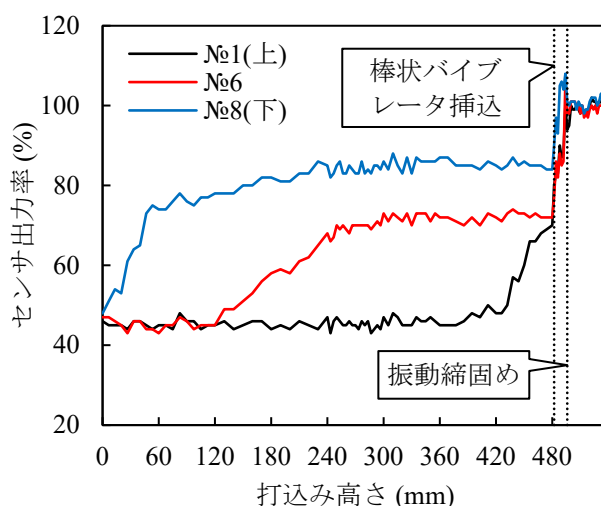


図 4-11 打込み高さでセンサ出力率との関係（無筋，SL=14 cm）

スランブ 18 cm のコンクリートを打ち込んだときの実験結果を図 4-12 に示す。図 4-12(a) は打込み高さ約 180 mm とき、同図(b)は型枠上部まで打ち込んだとき、さらに同図(c)は棒状バイブレータでコンクリートの締固めを行った後の結果である。図 4-12(a)では、試験体下部のセンサ№6, №7 と№8 の位置までコンクリートが打ち込まれたことが分かるが、№6, №7 センサ出力率は 100%に達していない。同図の(b)では、№1～№8 のすべてのセンサ出力率が上昇したが、その値は大きくばらついている。図(b)から、この時に濡れセンサと接するコンクリートが均質ではないことが確認できる。この状態のコンクリートを締め固めた後の結果を同図(c)に示す。同図に示されるように、フレッシュコンクリートがセンサと密実な状態で接すると、センサ出力率が一様に収束していくことが分かる。

№2, №4 および№8 のセンサについて、この打込み実験の間に、センサ出力率の変化を図 4-13 に示す。同図より、打込み高さが上昇するに従って、下部のセンサから出力率が上昇し、打込みが完了し打込み高さが 480 mm に達した時点では、センサ出力率は異なる値を示していた。この時のコンクリートに棒状バイブレータで振動締固めを実施した直後には、センサ出力率が一気に上昇し、ほぼ一様の値となっていたことが分かる。

なお、図 4-13 において、下部のセンサ№8 が 100%以上の出力率を示している。これは、先の予備実験（図 4-5）に示したように、充填される物質の比誘電率の差異によらず濡れの状態を測定できるような仕様としたためと考えている。また、打込み高さが約 180 mm 時点で、センサ№2 の出力率は先に上昇し、№4 を上回った原因は、コンクリートが打ち込まれる過程で、センサ№2 の一部にコンクリートが付着したためと考えている。

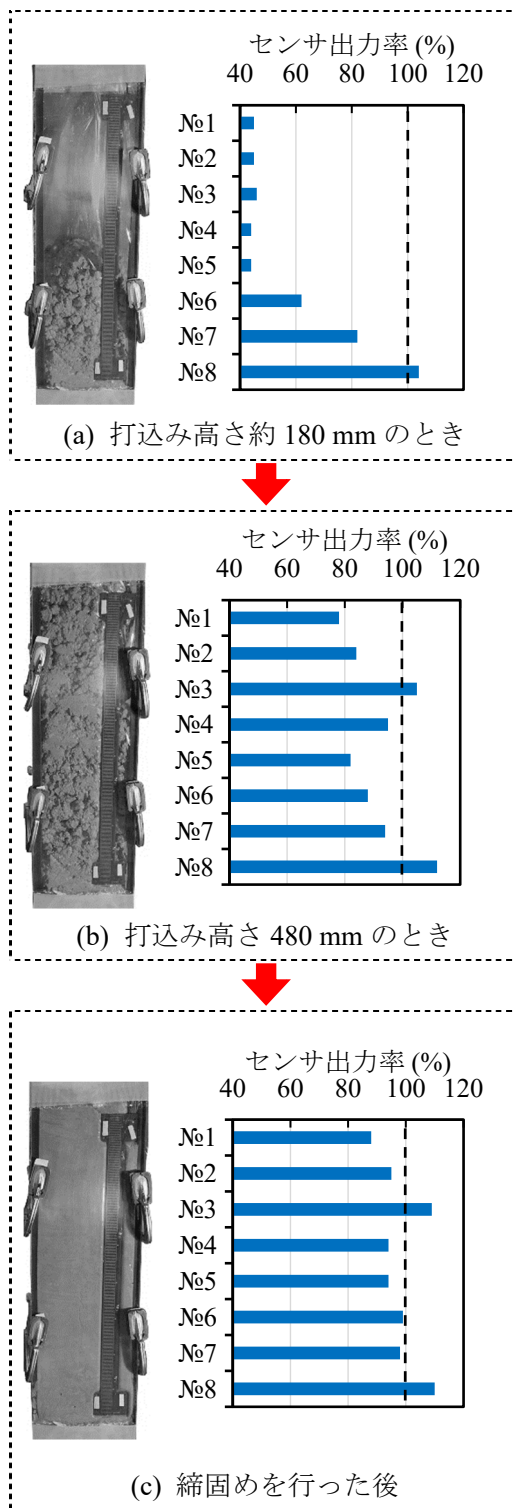


図 4-12 充填状態のモニタリング  
(無筋, SL=18 cm)

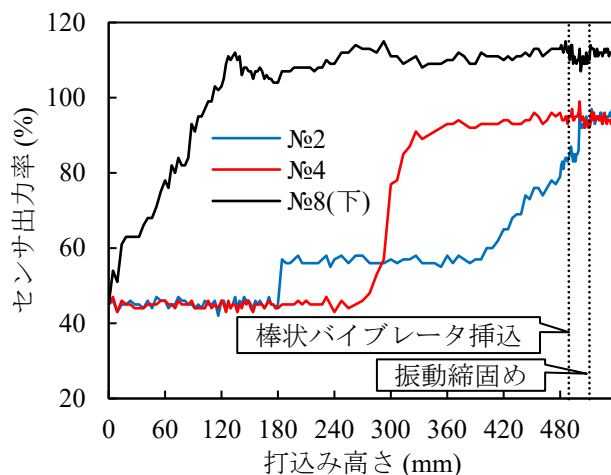


図 4-13 打込み高さ と センサ出力率 と の 関 係 (無筋, SL=18 cm)

スランプ 22 cm のコンクリートを打ち込んだときの実験結果を図 4-14 に示す。図 4-14(a) は打込み高さ約 180 mm とき、同図(b)は型枠上部まで打ち込んだとき、さらに同図(c)はコンクリートの締め固めを行った後の結果である。図 4-14(a)では、試験体下側のセンサ№6, №7, №8 の位置までコンクリートが打ち込まれ、センサ出力率は 100%に達した。これは、スランプ 22 cm のフレッシュコンクリートは流動性が高く、コンクリートの中に水分が多いためである。同図の(b)(c)も同様に、締め固めの有無にかかわらず、各センサの出力率がほぼ同じ値を示している。

№1, №4 および№7 のセンサについて、打設中、センサ出力率の変化を図 4-15 に示す。同図より、打込み高さが上昇するに従って、下部のセンサから出力率が順次に上昇し、打込み高さが 480 mm に達した時点では、出力率がほぼ 100%であった。このセンサ出力率の変化は図 4-5 に示した注水実験の結果とほぼ一致し、スランプ 22 cm のコンクリートに水分が多いためと考えている。

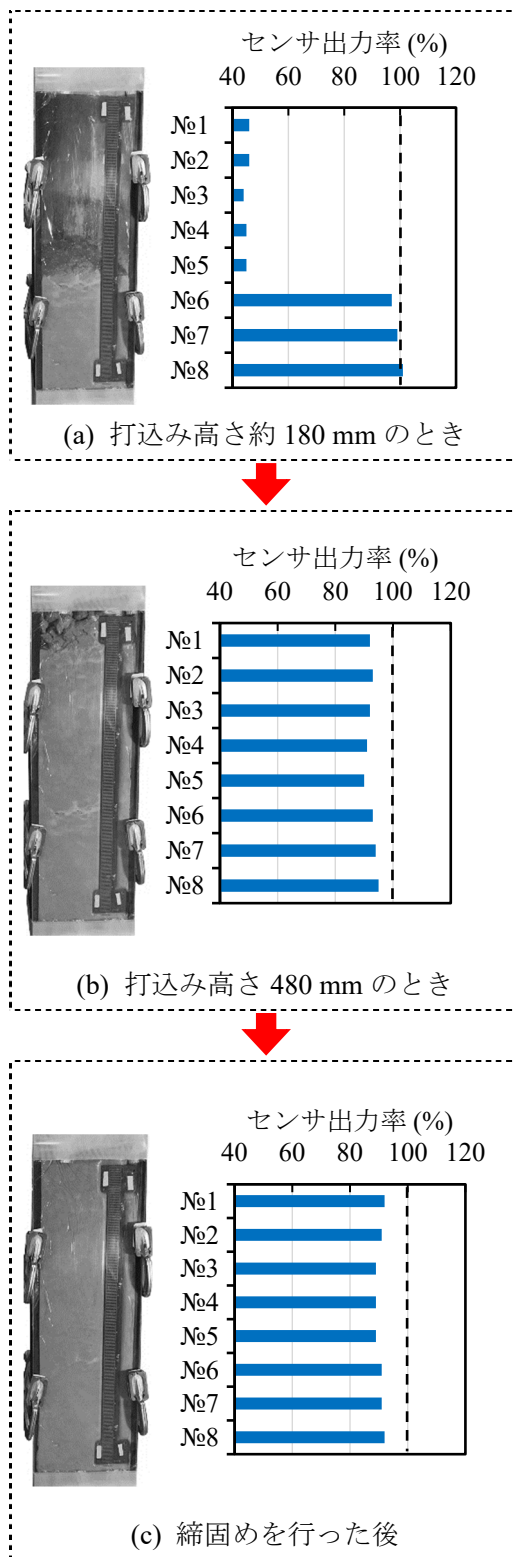


図 4-14 充填状態のモニタリング  
(無筋, SL=22 cm)

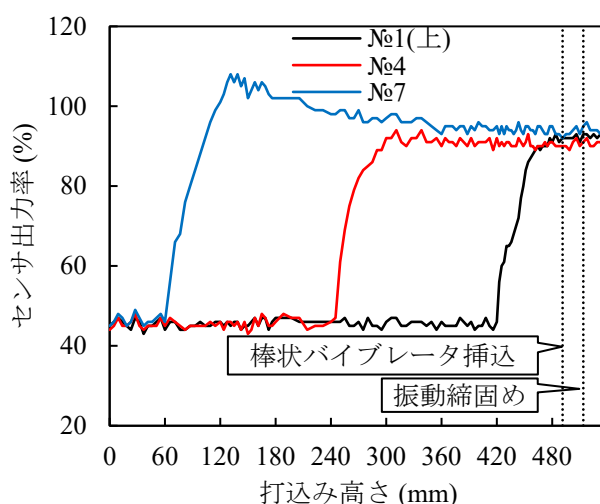


図 4-15 打込み高さとセンサ出力率との関係（無筋，SL=22 cm）

以上に示した，各スランプのコンクリートの打設実験の結果は，電極線を楕円状に配置した仕様の帯状濡れセンサにより，下記の判断ができる可能性を示している。

- 1) 初期値と比較することで，センサ出力率の変化（上昇）により，その位置にコンクリートが達したことが分かる。
- 2) 棒状バイブレータを用いて振動締めを行ったことによって，複数設置したセンサの出力率のばらつきが少なくなり，すべてが同じ値（約 100%）に収束する。この出力率の収束は，各位置でのコンクリートが密実な状態になったことを意味する。

#### 4.1.4 配筋を有する型枠へのコンクリートの打込み実験

型枠に模擬鉄筋を設置し，スランプ 15 cm のコンクリートを打ち込んだときの実験の結果を図 4-16 に示す。各図において，左側の写真はコンクリートの充填状況を示し，右側の棒グラフはそのときのセンサ出力率を示す。

図 4-16(a)に型枠上部までコンクリートを打ち込んだときの結果を示す。これは，コンクリートを上部から流し込んだだけの状態であり，骨材が鉄筋やかぶり厚さ部分に詰まっているため，各センサの出力率は大きくばらついており，No.7 のみはセンサ出力率が約 80%に達した。同図の(b)は，(a)の状態のコンクリートに棒状バイブレータで締めを行った後の結果である。コンクリートが降下して下部のコンクリートが締め固められ，No.5～No.8 のセンサ出力率は約 100%に達した。さらに同図の(c)(d)は，コンクリートの降下によって生じた未充填の部分にコンクリートを打ち重ねて，再度，振動締めを行った後の結果である。これらの結果から，バイブレータによる振動締めめの繰返しにより，すべてのセンサ出力率が 100%に達していき，収束することが分かる。出力率の収束は，コンクリートが振動締めめによって型枠内に均質に充填されたためである。

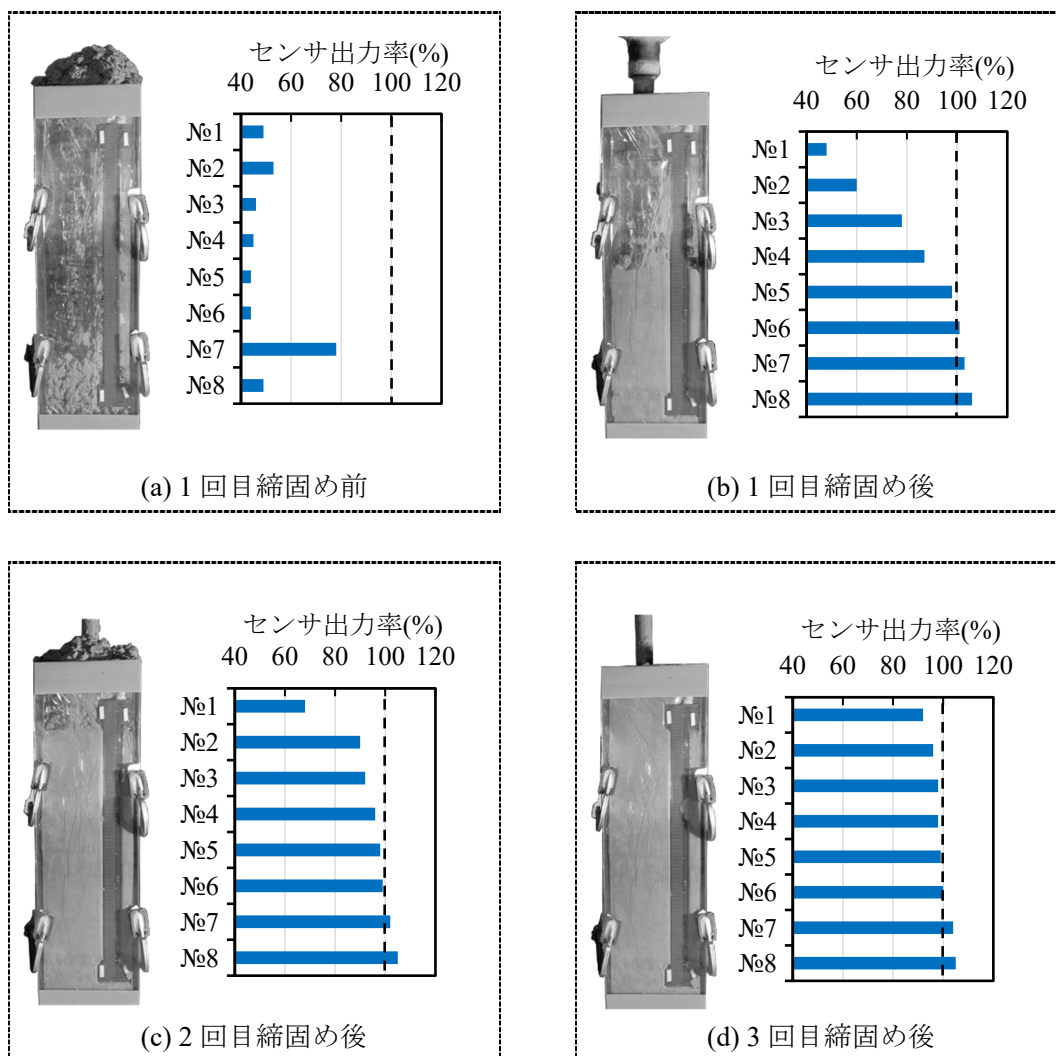


図 4-16 充填状態のモニタリング (有筋, SL=15 cm)

№2, №3 および№6 のセンサについて、この打込み実験の間に、コンクリートの打込み高さの増加に従ってセンサ出力率の変化を図 4-17 に示す。図中、コンクリートが打ち込まれる過程で、コンクリートが鉄筋やセンサの表面に付着し、上側のセンサ№3 は№6 より先行して出力率が上昇し、約 75%を示す。その後、1 回目の振動締固めを行った後に、コンクリートがセンサ№6 までに密実に充填されたため、№6 の出力率が 100%に上昇した。未充填の部分にコンクリートを打ち重ねて、2 回目、3 回目の振動締固めより、各センサの出力率が一致になるように収束し、最終には約 100%になったことが分かる。

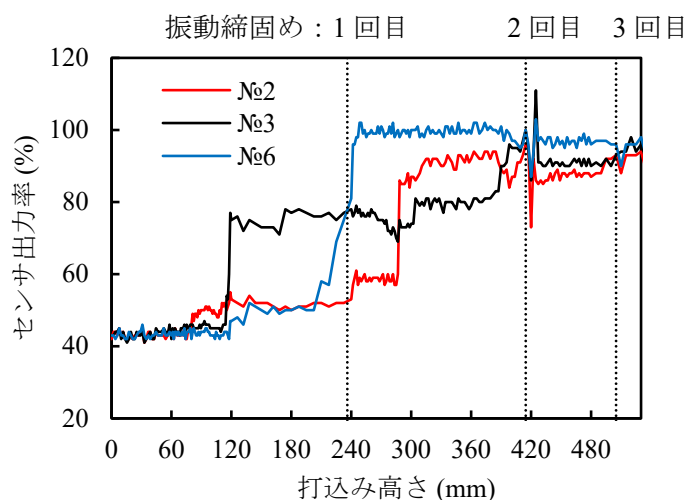


図 4-17 打込み高さとセンサ出力率との関係（有筋，SL=15 cm）

型枠に模擬鉄筋を設置し、スランプ 21 cm のコンクリートを打ち込んだときの実験結果を図 4-18 に示す。コンクリートの流動性が高いため、1 層打ちで、コンクリートを打込み高さが 480 mm まで打ち込んだ。図 4-18(a)は打込み高さ約 180 mm とき、同図(b)は型枠上部まで打ち込んだとき、さらに同図(c)は締固めを行った後の結果である。図(a)から、下側のセンサ№6, №7, №8 の位置までコンクリートが打ち込まれたことが分かる。打込み高さが上昇するに従って、各センサの出力率が上昇し、打込みが完了し打込み高さが 480 mm に達した時点では、図 4-18(b)に示すように、№1～№8 の全てのセンサの出力率が上昇しているが、模擬鉄筋の影響を受けて帯状濡れセンサと接するコンクリートが均質ではないため、その値は大きくばらついている。この状態のコンクリートに振動締固めを行った直後の結果を図 4-18(c)に示す。フレッシュコンクリートがセンサと密実な状態で接すると、すなわちコンクリートが振動締固めによって型枠内に均質に充填されると、センサ出力率がほぼ一様に 100%を示すようになることが分かる。



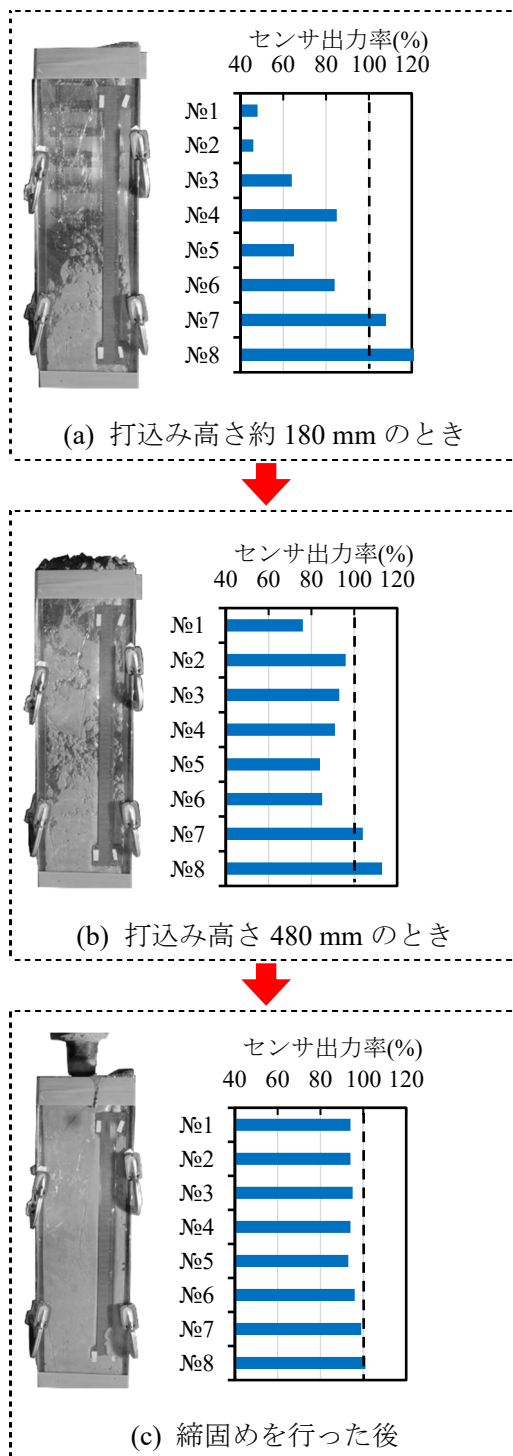


図 4-18 充填状態のモニタリング  
(有筋, SL=21 cm)

## 4.2 コンクリート表面の豆板の検知に関する実験

### 4.2.1 実験概要

図 3-2 に示したように、帯状濡れセンサの 1 基は、その長さ 60 mm 全体が濡れたことを検知したときに 100% の出力率を示す仕様としている。このことがコンクリート打込みの充填性を確認できる可能性を導き出している。本実験では、帯状濡れセンサがコンクリート表面に生じる豆板（振動締め不足）を検知する可能性について、骨材過多のコンクリートとモルタルを用いて検討を行った。

表 4-3 に本実験で用いたコンクリートとモルタルの調合を示す。同表に示すセメントペースト（記号：P）、モルタル（記号：M）およびコンクリート（記号：C）は、それぞれ流動性が高い調合である。これらを基本調合として、粗骨材過多による豆板を模擬する調合としてコンクリート（C）の粗骨材量を 3 倍、5 倍とした C-g3 および C-g5、細骨材過多による豆板を模擬する調合としてモルタル（M）の細骨材量を 2 倍、3 倍とした M-s2 と M-s3 の調合で試験体の練り混ぜを行った。これらの試験体を、帯状濡れセンサを内側に取り付けた内寸法 75×75×132 mm の透明な型枠に打ち込み、突き棒で締め固めた後にセンサ出力率を記録した。この濡れ計測を行う時に、せき板に沿った余剰水の上昇は観察されなかった。その後、すべての試験体は、材齢 7 日までシートを覆って乾燥の影響を防いだ状態で養生し 7 日以降は温度 20 °C、相対湿度 60% の恒温恒湿室で 28 日間の気中養生とした。

養生後、試験体の圧縮強度および空隙率の測定を行った。豆板を模擬した試験体の圧縮強度は豆板部分のみの強度を表す。空隙率 A(%) は、日本コンクリート工学会によるポーラスコンクリートの製造・施工指針（案）を参考し、試験体の気中質量 W1 および体積 V、その試験体を 20 °C の水中に 24 時間放置した後の水中質量 W2 および 20 °C 時水の密度 ρ に基づき、式 4(1) より算出した。また、体積 V は試験体の上中下 3 箇所の変長の平均値より計算した。

表 4-3 実験対象の調合

| 検討対象   | 記号   | 計画調合                              |
|--------|------|-----------------------------------|
| ペースト   | P    | w:c=0.61:1                        |
| コンクリート | C    | w:c:s:g=0.61:1:3:3                |
|        | C-g3 | w:c:s:g=0.61:1:3:9 （粗骨材量を 3 倍使用）  |
|        | C-g5 | w:c:s:g=0.61:1:3:15 （粗骨材量を 5 倍使用） |
| モルタル   | M    | w:c:s=0.61:1:3                    |
|        | M-s2 | w:c:s=0.61:1:6 （細骨材量を 2 倍使用）      |
|        | M-s3 | w:c:s=0.61:1:9 （細骨材量を 3 倍使用）      |

$$A(\%) = \left(1 - \frac{(W1 - W2)/\rho}{V}\right) \times 100 \quad 4(1)$$

4.2.2 実験結果および考察

表 4-3 に示した各試験体の材齢 28 日における圧縮強度および空隙率を図 4-19 に、型枠（せき板）と接していた試験体の表面性状を写真 4-1 に示す。本実験で、帯状濡れセンサはラップフィルムで保護し、コンクリートとモルタルの練上がり時の温度は 20°C前後であったため、センサ出力率は第 3 章の式 3(1)によって算出し、図 4-19 の横軸とした。同図に示すように、基本調合としたセメントペースト（記号：P）、モルタル（記号：M）およびコンクリート（記号：C）は、圧縮強度は 23 N/mm<sup>2</sup>以上の値を示し、空隙率も 8%程度と低い値を示した。また、コンクリート(C)、モルタル(M)の表面性状は写真 4-1 の(a), (b)に示すように、平滑で密実な状態であった。

これに対して、粗骨材過多のコンクリート C-g3 および C-g5 は写真 4-1 (c), (e)に示すように、外観は豆板のようなポーラスな状態であり、圧縮強度は 5 N/mm<sup>2</sup>よりも低く、空隙率は 39%以上であった。細骨材量過多のモルタル M-s2, M-s3 についても、外観は砂が多い凹凸の表面であり(写真 4-1 (d), (f)), 圧縮強度が 8 N/mm<sup>2</sup>の以下であり、ポーラスな打込み欠陥の状態であった。

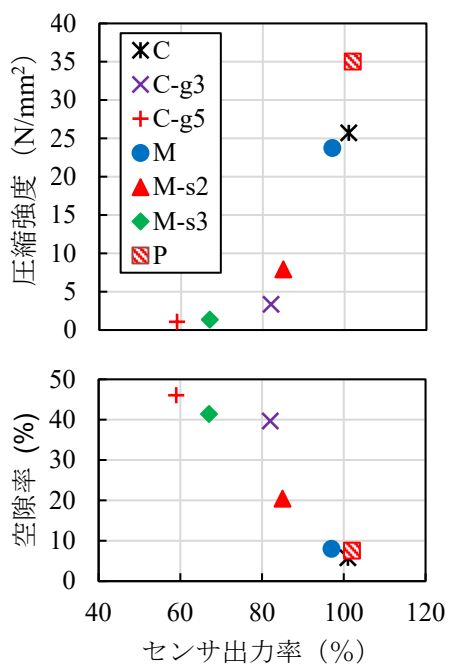


図 4-19 空隙率および圧縮強度とセンサ出力率との関係

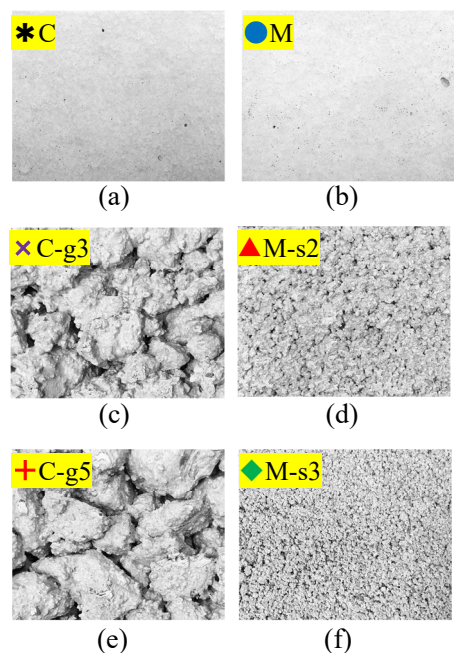


写真 4-1 試験体の表面性状

すべての試験体について、打ち込んで締固めを行った直後に、帯状濡れセンサによって計測したセンサ出力率を図4-20に一括して示す。圧縮強度が23 N/mm<sup>2</sup>以上で、表面が平滑な状態のセメントペースト(P)、コンクリート(C)およびモルタル(M)は約100%のセンサ出力率であった。これに対して、粗骨材過多のコンクリート C-g3、C-g5 の出力率は、82%および59%と低い値を示した。同様に細骨材過多のモルタル M-s2 および M-s3 については85%および67%のセンサ出力率であった。この結果は、試験体の打込み時点で、センサ出力率の低下により、写真4-1の(c)~(f)に示すようなコンクリート表面の豆板等の発生を帯状濡れセンサによって検知できることを示している。図3-3、図3-4に示したモニター画面の棒グラフにより、空洞がある個所をリアルタイムで把握できることは明らかである。

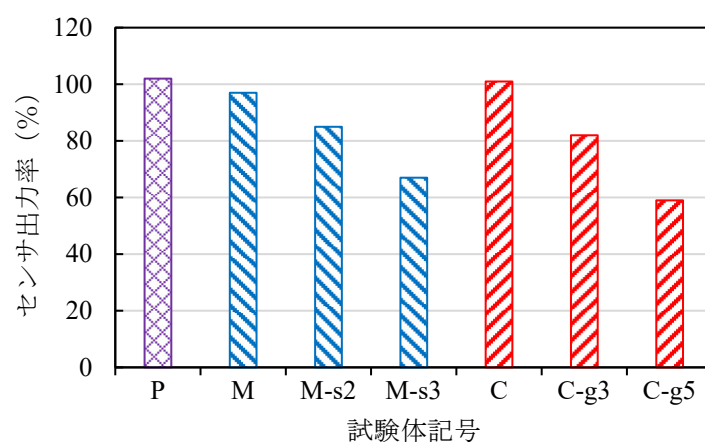


図4-20 各計測対象のセンサ出力率

### 4.3 セメント水和熱モニタリングに関する実験

#### 4.3.1 実験概要

帯状濡れセンサは両面で合計8基の温度センサを有するため、図4-1(c)に示した暑中コンクリートやマスコンクリート等を計測対象として養生期間の温度管理も行える。200×100×80mmの小型モルタル試験体を用い、簡易断熱温度上昇試験<sup>1)</sup>を行って温度センサの性能を検証した。ここで言った簡易断熱温度上昇試験とは、図4-21に示すように厚さ10mmのスタイロフォームで製作した型枠の内表面に熱電対と濡れセンサを設置し、型枠にモルタルを密実に打ち込んでから断熱を施すことで試験体の表面で温度履歴を計測する実験とする。なお、計測期間の養生環境は、温度30℃、相対湿度60%の恒温恒湿の気中としていた。表4-4に本実験で用いたモルタルの調合を示す。水セメント比が40%の試験体では施工性を確保するために高性能AE減水剤を使用した。

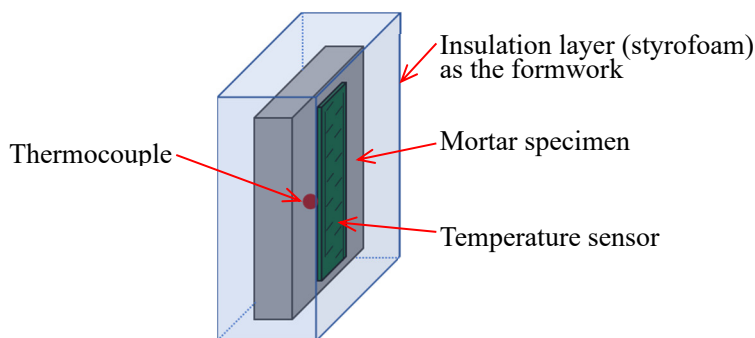


図4-21 簡易断熱温度上昇試験の概要

表4-4 モルタルの調合

| 記号                    | 計画調合   |
|-----------------------|--|
| W/C = 40%<br>(水セメント比) | w:c:s = 0.4:1:3<br>(高性能AE減水剤の使用量 : c × 0.4%) |
| W/C = 50%             | w:c:s = 0.5:1:3                              |
| W/C = 60%             | w:c:s = 0.6:1:3                              |

4.3.2 実験結果および考察

簡易断熱温度上昇試験で各試験体の表面において計測された7日間の温度履歴を図4-22に示す。図中、黒色の破線は熱電対、赤色の実線は温度センサの計測結果である。打込み完了から各試験体の温度が急に上昇し、およそ半日間を経過して表面温度は最大値を示した。水セメント比40%、50%、60%の試験体において、それぞれの最高温度は53.2℃、49.5℃、45.9℃（熱電対の計測値）であった。その後、試験体の表面温度が緩やかに低下し、およそ打込み完了から3日間後に30℃ほどになった。

図4-22より、モルタルの各調合において温度センサの計測値は熱電対の計測値と一致することは分かる。図4-23に、各試験体において温度センサの計測値と熱電対の計測値の関係を表す散布図を示す。図中、横軸は温度センサの計測値、縦軸は熱電対の計測値である。いずれの水セメント比においても、両者の相関関係は直線的であり、その勾配は約1.02である。温度センサと熱電対との相関係数および決定係数は共に1.000である結果から、温度センサが熱電対と同程度の精度を有することが分かった。

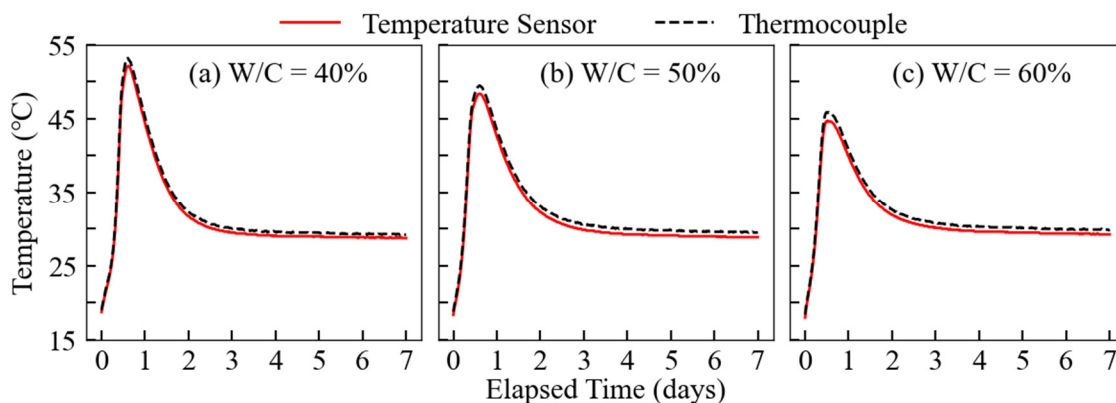


図4-22 7日間の温度履歴

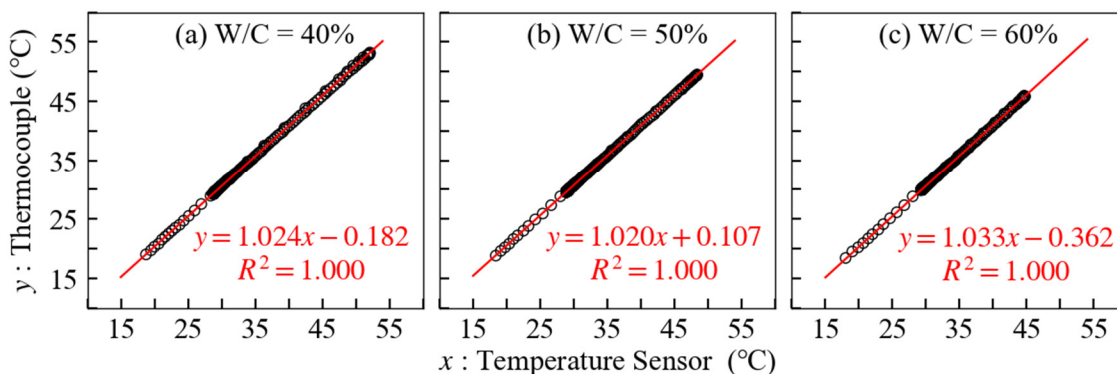


図4-23 温度センサの精度

#### 4.4 結露モニタリングに関する実験

##### 4.4.1 実験概要

帯状濡れセンサの1基は、その長さ60mm全体が濡れたことを検知したときに100%の出力率を示す仕様としている。この仕様が計測対象の表面に生じる濡れの位置や状態を本濡れセンサによって確認できる可能性を示している。すなわち、濡れセンサの出力率が空気中（初期値）の46%を上回ることは、濡れが生じることを意味し、出力率が上昇したセンサの位置に結露又は漏水が発生したと判断できる。

図4-1(d)に示したように、コンクリートの施工管理に用いた帯状濡れセンサをコンクリート部材の表面に残したことを想定して、予防保全の一手法として部材間の内部結露の発生を計測するモニタリング実験を行った。試験体は図4-24に示すように、コンクリート部材に厚さ45mmの断熱材を覆い、その間に隙間が生じないように両面テープで確実に密着させ、完全な断熱を施した壁を模擬する試験体(W1)、断熱に欠陥がある壁を（定性的な）模擬するために断熱材をコンクリートに軽く固定した試験体(W2)、断熱材がないコンクリート打放しの壁を模擬する試験体(W3)とした。これらのコンクリート壁を図4-25に示す二層式環境再現装置の屋外と室内環境との境界に設置し、冬期における建築外壁の環境条件を再現した。

図4-26に示すように、予め試験体を温度15℃、相対湿度60%の環境に1時間静置した後、速やかに室内側の温度を25℃までに上昇させた同時に、屋外側の温度を1℃（または10℃）までに低下させた。室内側の相対湿度も同時に調整し、表4-5に示す各温度・湿度の設定に従って合計10時間の濡れ状況を計測し、冬期におけるRC建築物の外壁の結露検知に関するモニタリング実験を行った。

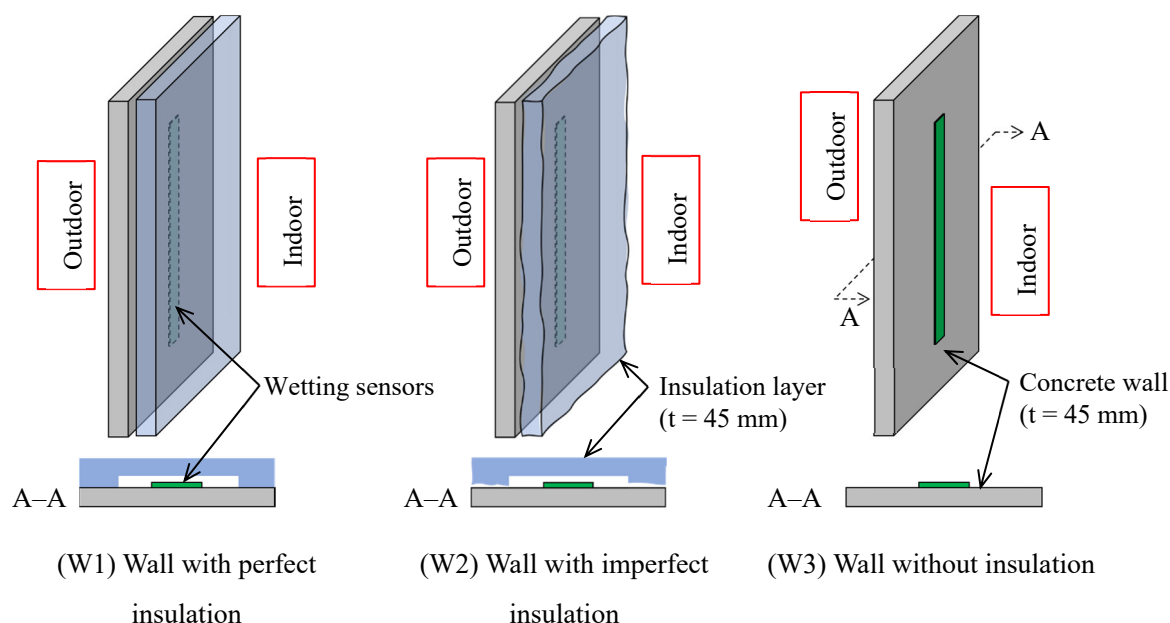


図4-24 結露モニタリング実験に用いた試験体

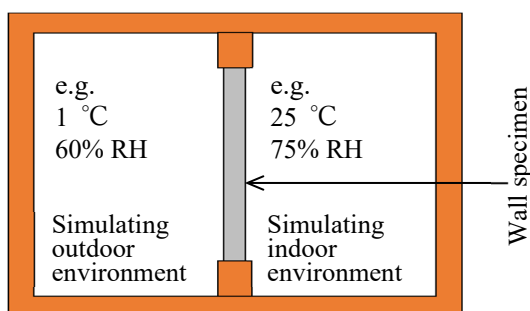


図 4-25 二層式試験装置および試験体の設置方法

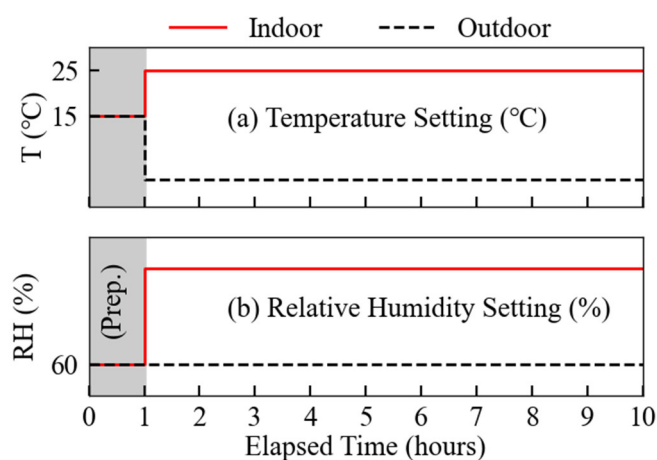


図 4-26 二層式試験装置の温度・湿度の制御

表 4-5 試験体および計測環境の設定

| コンクリート壁試験体の種類     | 記号  | 室内側 (Indoor) |           | 室外側 (Outdoor) |           |
|-------------------|-----|--------------|-----------|---------------|-----------|
|                   |     | 温度           | 相対湿度 (RH) | 温度            | 相対湿度 (RH) |
| 試験体 W1 (完全断熱)     | W1a | 25 °C        | 60%       | 1 °C          | 60%       |
|                   | W1b | 25 °C        | 75%       | 10 °C         | 60%       |
| 試験体 W2 (断熱に欠陥がある) | W2  | 25 °C        | 90%       | 1 °C          | 60%       |
| 試験体 W3 (断熱なし)     | W3a | 25 °C        | 90%       | 1 °C          | 60%       |
|                   | W3b | 25 °C        | 75%       | 1 °C          | 60%       |
|                   | W3c | 25 °C        | 60%       | 1 °C          | 60%       |
|                   | W3d | 25 °C        | 75%       | 10 °C         | 60%       |



#### 4.4.2 実験結果および考察

完全な断熱を施した試験体 W1 における濡れセンサの出力率を図 4-27 に示す。同図に、濡れセンサ出力率が約 48%であり、空気中の計測値（初期値）と同じ程度であった。測定期間中に、出力率に大きな変動は観測されなかった、温度・相対湿度が違う環境条件（W1a, W1b）による差も観測されなかった。この結果は、完全な断熱を行った試験体には、壁面に結露が生じなかったことを意味する。比較するために、断熱材の施工不良を（定性的に）模擬した試験体 W2 におけるセンサの出力率を図 4-28 に示す。実験開始後 3 時間から濡れセンサの出力率が上昇し、実験終了まで約 120%を示していた。この結果から、試験体に内部結露が生じていたことは分かる。

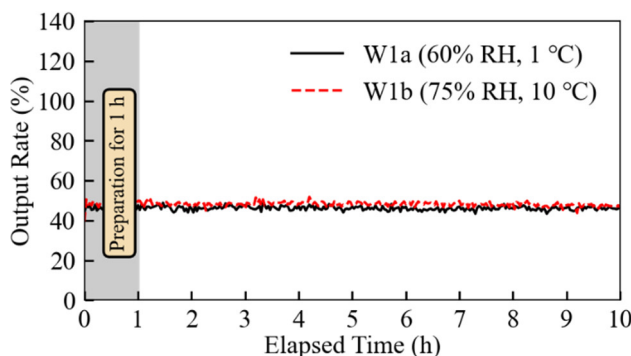


図 4-27 完全断熱を施した壁面におけるセンサ出力率

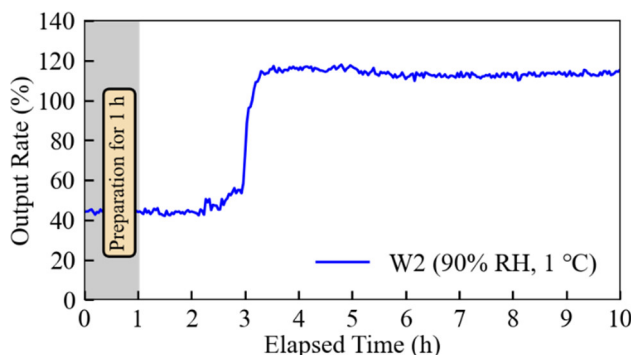


図 4-28 断熱に欠陥がある壁面におけるセンサ出力率

断熱材がない試験体 W3 について、室内側の相対湿度の影響を検討するためのセンサ出力率の経時変化を図 4-29 に示す。同図より、計測時間、すなわち試験体が冬期を模擬した環境に置かれる時間の増加に従って、センサの出力率が上昇し、最終に約 120%の値を示していた。また、RH90% (W3a) →RH75% (W3b) →RH60% (W3c) の順に、室内側の相対湿度が高いほど、センサ出力率の上昇時刻が早かった。これは、温度が一定で、相対湿度が高い室内環境において水分の供給が多く、結露が生じやすいためである。

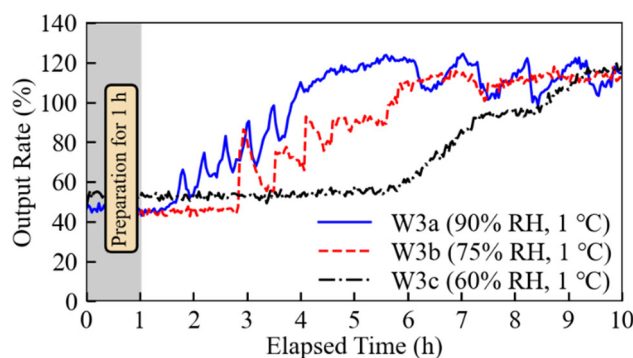


図 4-29 室内側の湿度がセンサ出力率に及ぼす影響（断熱無し試験体）

断熱材がない試験体について、室内側の気温の影響を図 4-30 に示す。室内の気温が低いほど（1 °C, W3b）、センサ出力率の上昇時刻が早かった。最終には約 120%に達してから一定な値を示していた。この結果は、相対湿度が同じの室内環境で、温度が低いときに結露が生じやすいことを意味する。

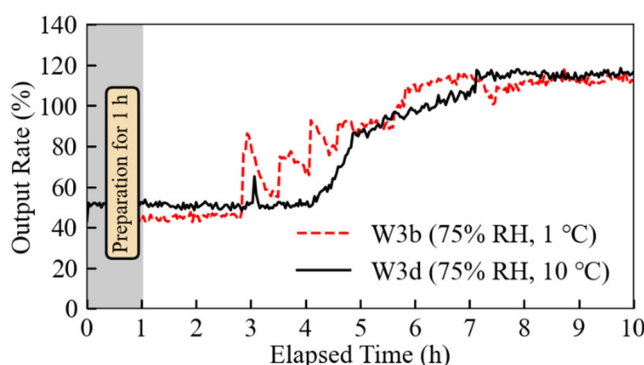
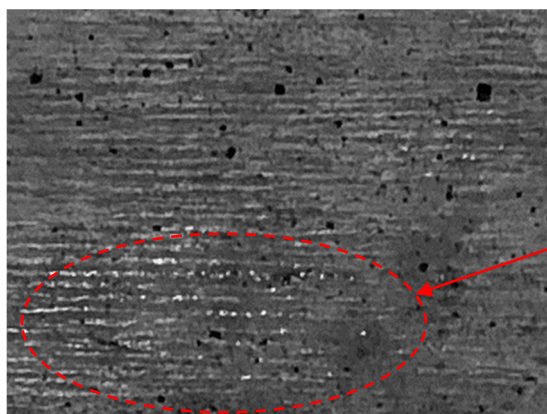


図 4-30 室内側の温度がセンサ出力率に及ぼす影響（断熱無し試験体）

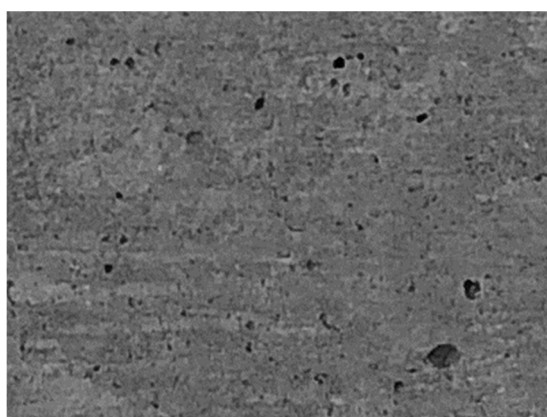
なお、本結露モニタリング実験では、帯状濡れセンサにラップフィルムを覆わなかったが、式 3(1)に基づいてセンサ出力率を算出するため、内部濡れ（結露）が生じたときの計測結果（図 4-28、図 4-29 と図 4-30）においてセンサ出力率が 100%を超えてしまう現象があった。しかし、約 120%を示すことは結露の有無の判断に影響しないため、120%を 100%になるような補正は行われなかった。

モニタリング実験が終わった後に、模擬壁試験体の室内側の表面の様子を写真 4-2 に示す。断熱を施さない壁面には結露によって水が溜まり、全体に濡れた状態となった。断熱に欠陥がある壁面は、多くの水分がコンクリートに浸入したため、断熱を施さない壁面とほぼ同じ色を示した。この 2 つの結果に対して、断熱を十分に行う壁面は乾燥のまま、結露が生じないことは明らかである。

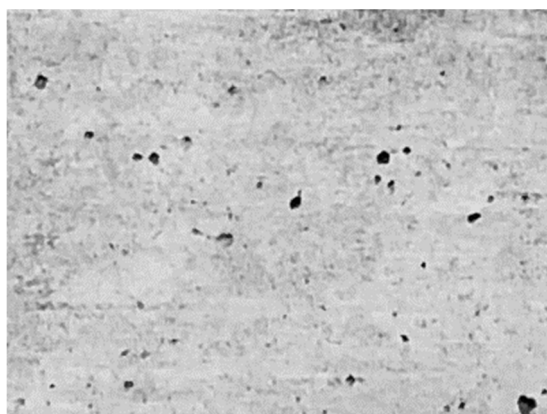


結露による  
水溜まり

試験体 W3 (断熱なし)



試験体 W2 (断熱に欠陥がある)



試験体 W1 (完全断熱)

写真 4-2 実験終了時の模擬壁試験体の様子 (室内側の表面)

#### 4.5 本章のまとめ

本章では、コンクリートの施工管理および維持管理の高度化を実現するために、試験室レベルにおいて、コンクリートの打込み実験、豆板を模擬するコンクリートとモルタルの打込み実験、簡易断熱温度上昇試験によるセメント水和熱モニタリング実験、模擬コンクリート壁を用いた結露モニタリング実験を行い、帯状濡れセンサを用いてコンクリートの施工管理手法、およびコンクリート造建築物における部材内部の濡れ計測の予防保全手法を検討した。以下の知見を得た。

##### 1 コンクリートの打込み（充填）管理について：

初期値と比較することで、センサ出力率の上昇により、その位置にコンクリートが達したことが分かる。棒状パイプレータを用いて振動締固めを行ったことにより、複数設置したセンサの出力率間のばらつきが小さくなり、すべての出力率は同じ値（100%ほど）に収束していく。この収束は、コンクリートが密実に充填されたことを検知できること意味する。また、振動締固めを行った後に、センサ出力率が他の箇所よりも低い部分は、豆板によりコンクリートがポーラスになっている箇所と推定できる。以上の結果は、この濡れ計測システムが、コンクリートの打込み時にリアルタイムで充填性・密実性の判断をできることを示している。

##### 2 セメント水和熱管理について：

簡易断熱温度上昇試験の計測結果より、帯状濡れセンサに付属する温度センサの計測値は熱電対の計測値と一致し、温度センサが熱電対と同程度の精度を有することが分かった。本センサはコンクリートの温度履歴を高精度で計測できる。

##### 3 維持管理（結露検知）について：

硬化後のコンクリート部材の表面に濡れセンサを存置し、完全な断熱を施した場合に、濡れ出力率は空気中の計測値（初期値）と同じ程度であり、出力率に大きな変動が生じない。この結果に対して、断熱材に（定性的な）欠陥が生じた場合に、その部材と断熱材（仕上げ材）との間に結露が生じると濡れセンサの出力率が上昇する。従って、建築部材間に発生した「内部濡れ」の発生は本濡れ計測システムによって推定できる。

今後、実験室レベルで検討した打込み（充填）管理手法を実構造物に適用し、帯状濡れセンサの設置間隔等の課題を明らかにする予定である。また、結露検知手法の実用化に向け、内部結露の発生要因であるコンクリートの貫通ひび割れ幅、断熱材同士の隙間の幅等を定量的に検討し、濡れセンサによって「内部濡れ」を検知できる範囲を明らかにする予定である。

第4章の参考文献

- 1) 浅野勇, 向後雄二, 林田 洋一: 簡易断熱試験装置によるコンクリートの断熱温度上昇曲線の推定, 農業土木学会論文集, Vol.2002, No.218, pp.275-281,  
[doi.org/10.11408/jsidre1965.2002.275](https://doi.org/10.11408/jsidre1965.2002.275)

## 第5章 振動モニタリングによる PCa トールゲートの維持管理手法

高速自動車国道（以下、高速道路と略称する）は道路網の中で最も重要な部分であり、インフラ施設として健全な機能を維持することは経済成長につながる。経済や我々の日常生活のみならず、高速道路は災害発生時にも重要な役割を担う。地震等の災害の直後、避難や救助、物資供給・運輸等の応急活動を円滑に行われるために、高速道路は緊急輸送道路と指定され、建設・整備されつつある。

日本では、1963年に最初の高速道路が開通してから既に57年が経った。2018年4月まで、図5-1に示すようにNEXCOグループが管理する高速道路の供用延長の8,923 kmの中に、供用年数が30年以上の道路は4,407 kmとなり、全体の約49.4%を占める<sup>1)</sup>。また、阪神高速、首都高速においても供用年数が30年を超える道路は約5割に及ぶ<sup>2)</sup>。高速道路では、大型車の通行量が一般道の10倍以上であり、過酷な使用状況に置かれ、高架橋、トンネル等の構造物の損傷や劣化が進行しやすいことが指摘されている<sup>3)</sup>。高速道路の入口に位置するトールゲート（料金所上屋）も同様で、日々車両の通行による振動が生じており、一般の建物より振動を受ける頻度は遙かに高い。特に、1列の柱がPCa屋根スラブ中央を支える形式のトールゲートの屋根スラブは\*、片持ち構造であり、通行車両による上下振動の繰返しによる疲労劣化は維持管理において重要な対象となっている。しかし、従来のトールゲートの点検は検査員による目視観察が主であり、定期的な点検を行うための労力は非常に大きい<sup>4)</sup>。また、目視観察は部材内部の劣化や損傷を確認できず、より簡便かつ信頼性が高い点検方法または予防的な定期検査方法は維持管理に重要であると言える。

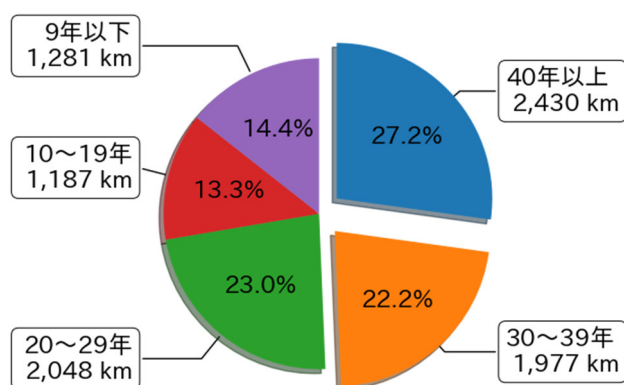


図 5-1 高速道路の供用年数および比率

\* この屋根スラブは、プレキャスト(PCa)のプレストレスト(PC)部材であるが、本研究では“PCa 屋根スラブ”と記す。

高速道路の PCa トールゲート屋根スラブを対象として、合理的な維持管理の実現を目的としたモニタリング技術確立に向け、約 2 年にわたり、屋根スラブの交通振動計測を行った。本章では、5.1 節に対象建築物の概要、5.2 節に予備計測および FEM 解析、5.3 節に長期振動モニタリングシステムの構成について述べ、5.4 節に 2 年間の計測結果の報告および考察を行い、振動モニタリングによる今後の維持管理の一手法を提案する。

### 5.1 対象建築物

対象建築物は 1968 年に建てられた神奈川県川崎市の東名高速道路のトールゲートである。写真 5-1 に示すような、幅 10 m で長さが 124.2 m の長大な建築物であり、構造的にはエキスパンションジョイントで A 棟～C 棟の 3 つの RC 造ゲートと鉄骨造の増築部に分離されている。長期振動計測は図 5-2 に赤色点線で囲まれる A 棟の屋根スラブを対象として行った。この屋根スラブは、ポストテンション方式で、図 5-3 の標準構造図に示す 10×1.71 m のプレキャスト部材にプレストレスを導入して建設された。屋根スラブは中央に 1 列の柱（図 5-2 の 1・4・7 軸）によって支持され、片持ち構造である。なお、1996 年に震災対策としてコンクリート充填鋼管構造の柱（図 5-2 の 2・6 軸）が増設されている。

後述するが、スラブの短辺方向（車輛の通行方向）を X 方向、長辺方向を Y 方向、鉛直方向を Z 方向と設定した。なお、図 5-2 に示す記号 N1～N8 は長期モニタリングのための加速度センサを表す。N1・N3・N4・N6 は屋根スラブの端部に、N2・N5 は柱頭に、N7・N8 は柱脚に設置された加速度センサである。



写真 5-1 対象建築物

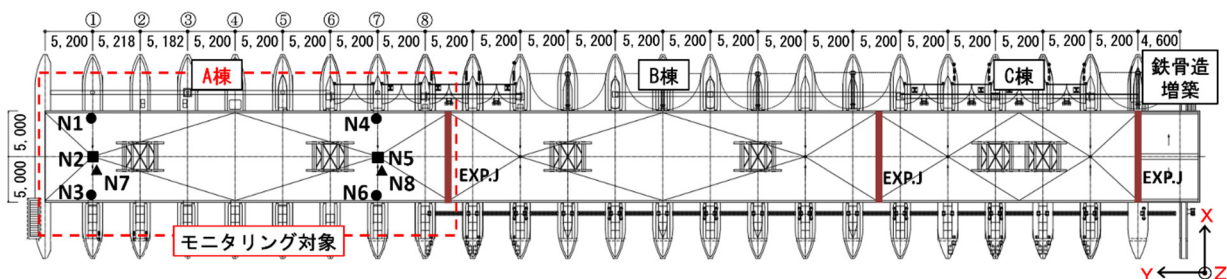


図 5-2 対象建築物の屋根伏図

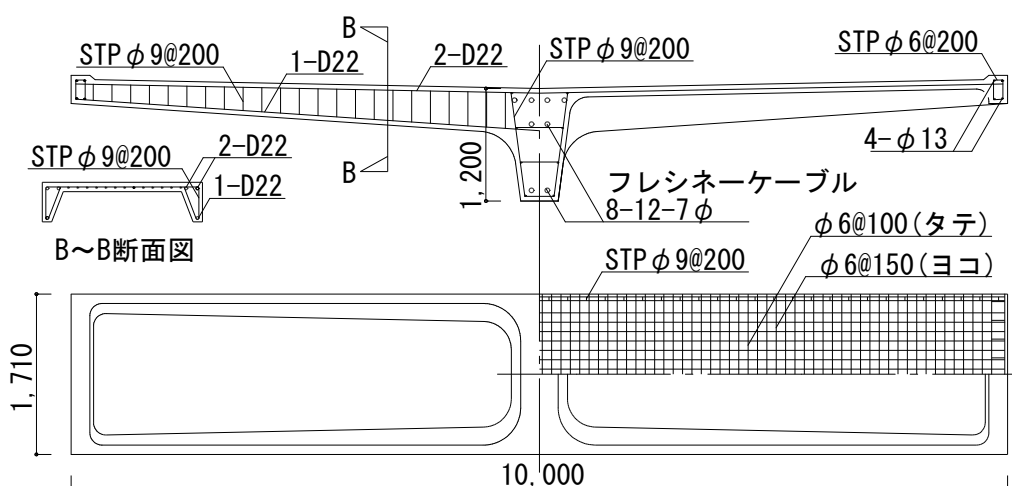


図 5-3 屋根スラブの標準構造図

## 5.2 予備計測および FEM 解析

長期モニタリングを行うためのセンサ配置について検討するために、予備計測を実施し、スラブの振動特性を把握した<sup>5)</sup>。予備計測では、加速度センサが先の図 5-2 に示した N1～N8 の位置に設置された。つまり、屋根スラブの先端に 4 箇所、柱頭に 2 箇所、柱脚に 2 箇所、の合計 8 箇所、で振動計測を実施した。図 5-4 に示すように屋根スラブ先端で、人がジャンプして上下方向の人力加振を行った後の自由振動時のフーリエ解析結果を図 5-5 に示す。11.5 Hz に明確なピークが求められる。このときの変位リサージュを図 5-6 に示す。変位は、第 3 章に示したように、計測された加速度の時刻歴波形に基線補正を施した上で、1.0 Hz のハイパスフィルタを適用し、周波数領域で積分することで算出された。また、この変位リサージュは 11.5 Hz を中心とするバンドパスフィルタ(BPF)のフィルタ処理を行わない計測結果である。変位リサージュから、1 列の柱で支持された片持ちの屋根スラブはそれぞれが上下に単調に振動しており、11.5 Hz がこの屋根スラブの 1 次固有振動数であることが明らかである。



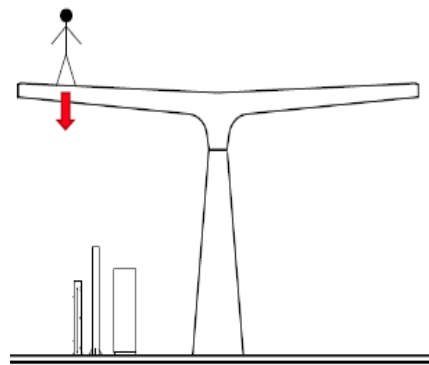


図 5-4 予備計測における人力加振<sup>5)</sup>

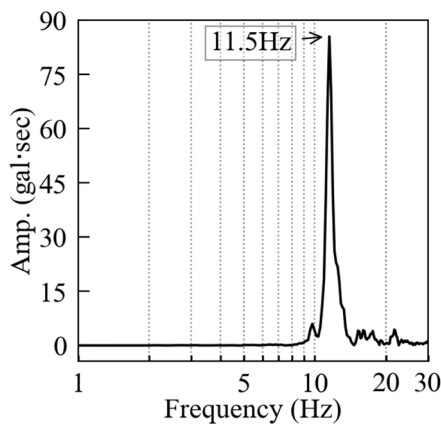


図 5-5 フーリエスペクトル（自由振動時）

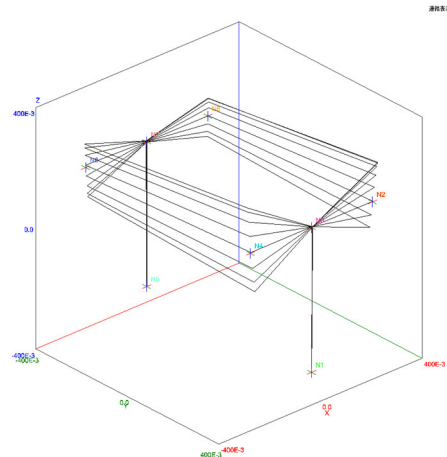


図 5-6 変位リサージュ（自由振動時）

1次固有振動数の変動から、屋根スラブの経年劣化（交通振動の繰り返しによる劣化）を検知する可能性を確認するために、FEM 解析ソフトを用いて固有値解析を行った。先の図 5-3 に示した標準構造図を参考に、写真 5-2 の点線が囲む部分、つまり 1.71 m 間隔の小梁で分けられた PCa 片持ちスラブ部材を対象として解析を行った。この解析対象は図 5-7 に示すように屋根スラブ 1 辺が大梁に弾性固定され、片持スラブの両側を小梁が支持しているモデルとした。隣接スラブの重量等の影響を考慮し、図 5-8 に示すように、スラブ両側の片持ち小梁の全長にわたる線拘束をバネ（9 kN/cm/m）として仮定した。この解析モデルに劣化が生じていない健全状態の 1 次固有振動時のリサージュを図 5-9(a) に示す。同図に示すように屋根スラブの先端が上下に単調に振動し、その周波数は 11.7 Hz と求められ、先の図 5-5 と図 5-6 に示した予備計測結果とほぼ一致した。図 5-8 に示す解析モデルについて、以下の 3 種類の貫通ひび割れが生じたものと仮定して同様の固有値解析を行った。

- (b) 屋根スラブ両側の小梁の支持部（大梁との接合部）に貫通ひび割れが生じている。
- (c) 屋根スラブ両側の小梁の中央部に貫通ひび割れが生じている。
- (d) 屋根スラブ片側の小梁の支持部、およびスラブの支持部（図 5-7 の赤色点線で示す

範囲) に貫通ひび割れが生じている。

(b)～(d)の劣化状態になった屋根スラブの固有値解析の結果をそれぞれ図 5-9(b)～(d)に示す。同図(a)に示す健全時の解析結果に比べて模擬な劣化が生じた場合にリサージュが明らかに変化した。また、1次固有振動数は、(b)の貫通ひび割れが生じたとき 9.8 Hz に、同様に(c)は 10.6 Hz に、(d)は 10.4 Hz に減少し、健全状態に比べて1～2 Hz ほど減少した。

以上の FEM 解析結果は、屋根スラブの1次固有振動数の変化および変位リサージュを長期モニタリングで監視することは屋根スラブの劣化発生のモニタリングに有効であることを示している。これを受けて、対象構造物の長期モニタリングでは屋根スラブの上下振動の周波数と変位リサージュを計測対象と設定した。



写真 5-2 屋根スラブ

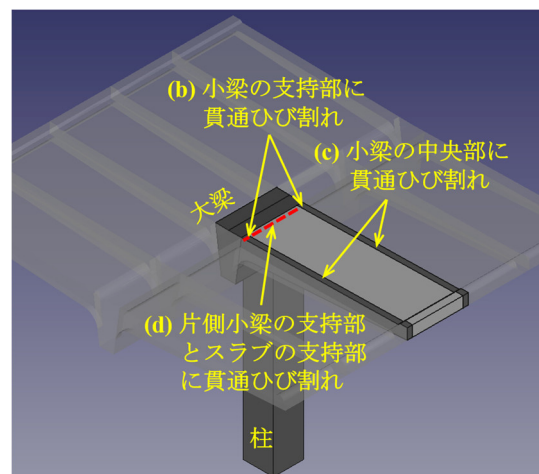


図 5-7 解析概要

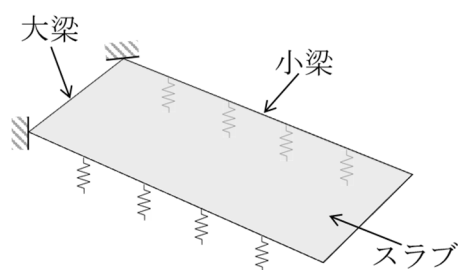
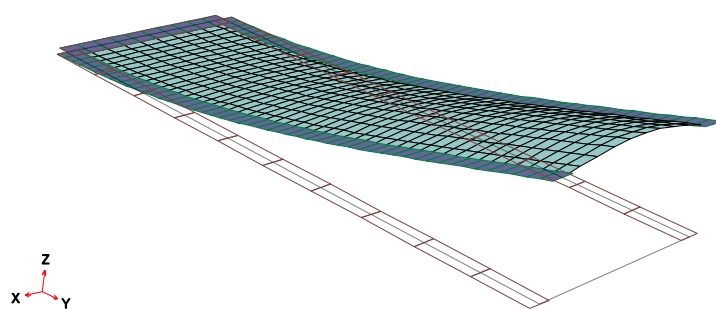
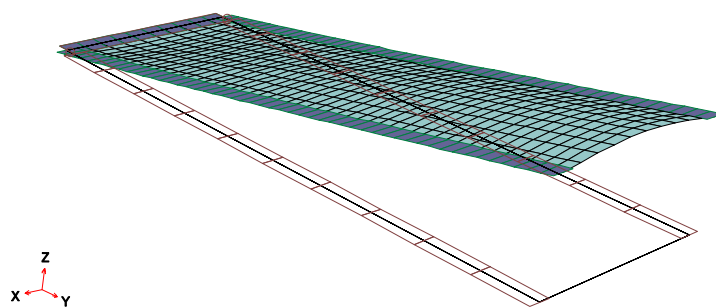


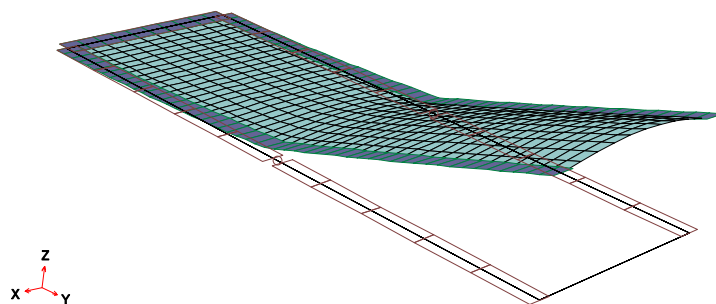
図 5-8 解析対象のモデル化



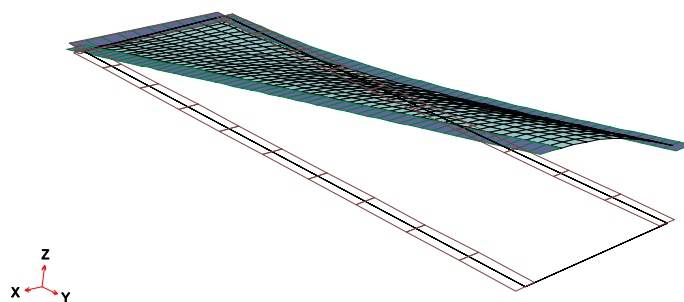
(a) 健全時 : 11.7 Hz



(b) 小梁端部に貫通ひび割れ : 9.8 Hz



(c) 小梁中央に貫通ひび割れ : 10.6 Hz



(d) スラブおよび手前側の小梁に貫通ひび割れ : 10.4 Hz

図 5-9 1次固有振動時の変位リサージュおよび周波数

### 5.3 長期モニタリングシステムの構築

前節の予備計測と FEM 解析結果をもとに、A 棟の屋根スラブ振動の長期モニタリングでは、予備計測と同様、先の図 5-2 に示す屋根伏図において、車輛の通行方向（短辺方向）のスラブ端部の N1, N3, N4, N6 の位置に加速度センサを設置することとした<sup>6)</sup>。なお、同図のように N2 と N5 を柱頭に設置し、屋根スラブ支持部の加速度を計測した。また、それらの柱脚部にも加速度センサを設置した (N7, N8)。以上のように、合計 8 台の 3 軸加速度センサを設置して 2016 年 3 月から 2018 年 4 月まで約 2 年にわたって長期の振動計測を行った。

振動計測は写真 5-3 に示す市販の加速度センサと信号処理ユニットによって行った。使用した MEMS 3 軸加速度センサの基本仕様は第 3 章の表 3-2 に示したものと同等である。なお、計測における加速度センサの方向は、予備計測と同様に、屋根スラブの短辺方向（車の進行方向）を X 軸、スラブの長辺方向を Y 軸、鉛直方向を Z 軸とした。すなわち、本研究で対象とする通行車両による屋根スラブの上下振動の繰返しによる劣化の進行を管理する対象は「Z 軸の加速度」が重要である。

長期モニタリングシステムの構成を図 5-10 に示す。加速度センサと信号処理ユニットを防水・防塵のボックス内に設置し、LAN ケーブルでハブを介して、データ保存と計測制御を行う PC に接続する計測システムである。この PC からインターネットを介して、施設管理者が遠隔地で計測データを取得し、対象建築物に発生した振動をリモートで監視できる。

データの採取は、柱頭部に位置する N2 のセンサの Y 方向の加速度が 1.5 gal を越えた時に各センサで計測された加速度の履歴データが自動保存されるトリガ計測とした。また、計測のサンプリング周波数は 100 Hz とし、プリトリガ時間は 10 秒、計測時間は 60 秒として合計 70 秒間の加速度データが自動で保存される。なお、データ記録の途中で別の振動入力が生じ、N2 のセンサの Y 方向の応答加速度が再びトリガレベル (1.5 gal) に至った場合は、計測システムがその時点から再度 60 秒間を延長して加速度の履歴データを記録する手法としていた。

高速フーリエ変換 (FFT) を行って固有振動数を求めるためには、計測された 1 件の全加速度データ (70 秒またはそれ以上) を対象として、Hamming 窓関数 (窓長: 2,048 点) を使用し、20.48 秒の小区間を切り出してそれぞれを 50% オーバーラップさせて解析した。

また、長期モニタリングにおいて、計測された加速度データから速度および変位を算定するには、予備計測と同様で、時刻歴波形の基線補正を行い、1.0 Hz のハイパスフィルタを積分時に適用することとした。

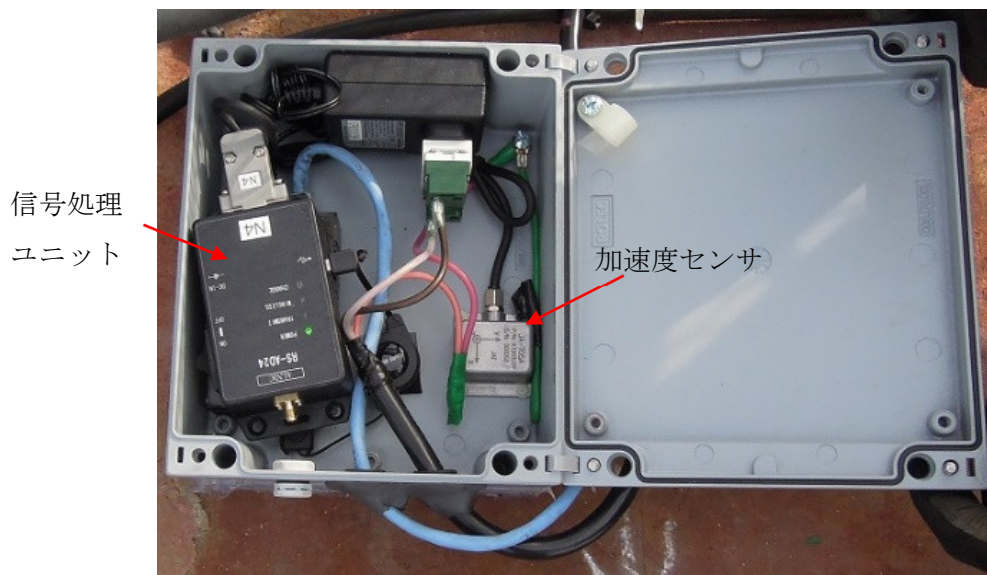


写真 5-3 防水・防塵のボックス内に内蔵されたセンサと信号処理ユニット

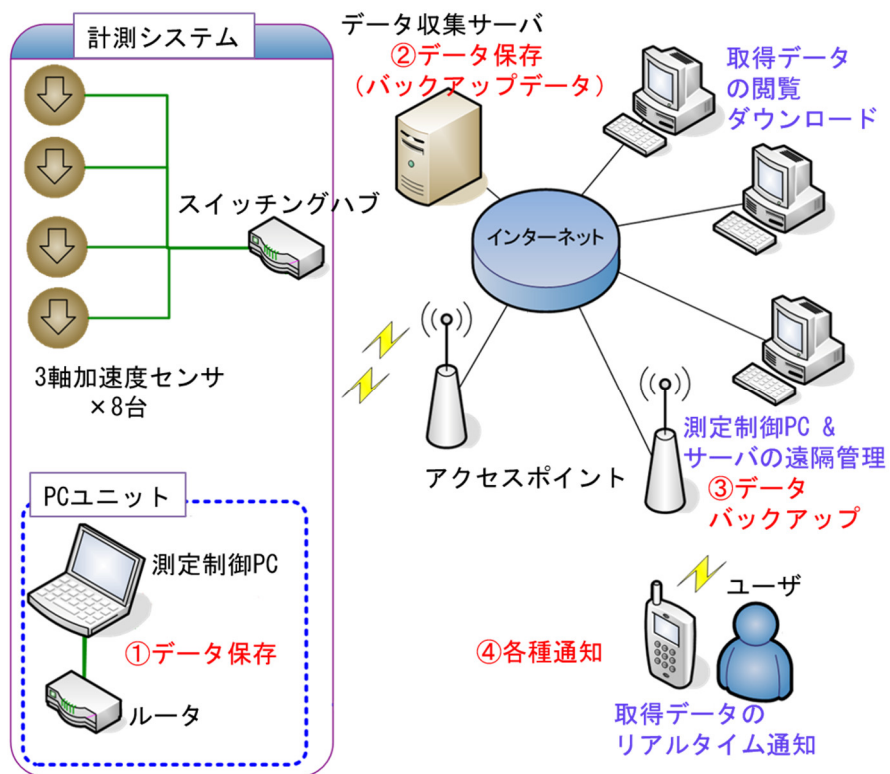


図 5-10 長期モニタリングシステムの構成

#### 5.4 長期モニタリング結果および考察

先に示した長期モニタリングシステムで2016年3月から2018年4月まで約2年にわたって長期の振動計測を行い、トリガ計測によって112,585件の加速度履歴データを得た。レイアウトの制限ですべてのデータを表示することが不可能なので、ここでは112,585件のデータから1週間ごとに1つのデータ(8チャンネルで3方向、合計24チャンネル)を抽出して代表値とする方法で計測データを整理することとした。また、本計測が交通振動に基づく構造物の振動であることから、昼間(6時~18時)と夜間(18時~翌日6時)に分けて抽出することとした。昼間の代表値は金曜日12時に、夜間の代表値は火曜日の0時に、又はそれに最も近い時刻に計測された加速度データとした。なお、計測データ数は昼間が33,800件、夜間が78,785件と夜間の計測数が多かったが、代表値は昼間と夜間で抽出したそれぞれの112個データをもとに考察している。以下のデータは、すべてこの代表値について示している。

##### 5.4.1 屋根スラブに生じる加速度

約2年間の計測において、交通振動による屋根スラブに生じる加速度(Z方向)の絶対値の最大値を図5-11に示す。N1・N3は路肩部に寄る位置の屋根スラブの先端部に、N4・N6は道路の中央線に寄る位置のスラブの先端部に設置した加速度センサを意味する(図5-2に示した)。

図5-11より、計測期間中、各計測位置での最大加速度(絶対値)は20.5gal~236.8galで変動し、それぞれの平均値はN1が57.7gal、N3が71.6gal、N4が106.3gal、N6が110.8galであった。N1、N3に比べて、N4、N6に生じた最大加速度が大きいことが分かる。なお、図示はしていないが、屋根スラブの水平方向(X、Y方向)に生じる最大加速度は、平均で6.8gal程度であり、鉛直方向(Z方向)のたわみ振動に比べて小さいため、屋根スラブの経年劣化には影響しないと判断した。ここでは示していないが現地で震度4の地震によって生じたスラブのZ方向の加速度の最大値は157.5galであったことに比べ、N4、N6で加速度の最大値が150gal程度の振動が多く計測され、200galを超えたケースもあった。このことは通常交通振動によって、屋根スラブに厳しい振動が生じていることが分かる。

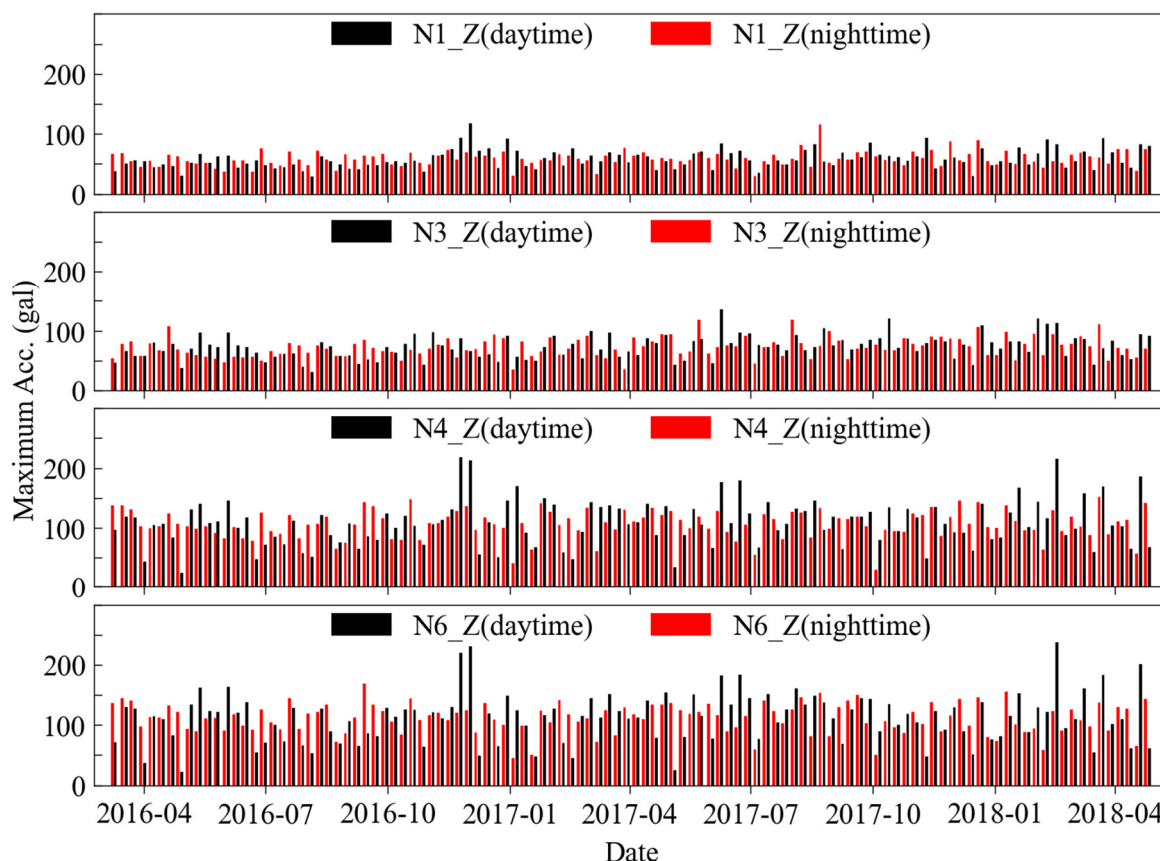


図 5-11 上下振動（Z方向）の最大加速度

比較のため、図 5-12 に柱頭（センサ N2, N5）の Z 方向の加速度の最大値（絶対値）の経時変化を棒グラフで示す。柱頭の振動はスラブに対する入力振動と見なすことができるが、N5 に比べて N2 の加速度は小さな値を示した。これは N2 側がトールゲートの路肩部に近く、道路中心線に近い N5 に比べて、車両が曲がる必要があるためその通過速度が遅く、通行量も少ないためである。図 5-11 において N1, N3 の応答加速度が N4, N6 に比べて小さかったのもこのためと推測される。

図 5-12 には点線で、柱頭部に対する屋根スラブ先端の Z 方向の加速度の割合を示している。この割合は柱頭に計測された加速度を入力と見なすとき、スラブ端部に生じる振動の増幅倍率を意味する。N1 のセンサにおいて増幅率は 3.3~29.3 倍の範囲で変動し、その平均値は 11.4 倍である。N3 では 3.6~22.5 倍の範囲で、平均値は 14.0 倍、N4 で 3.1~14.6 倍、平均値は 6.7 倍、N6 で 2.8~13.7 倍、平均は 7.0 倍であった。N1, N3 の増幅率の変動範囲が大きく、その平均値は道路中央線に近い N4, N6 のおよそ 2 倍であった。つまり、柱頭に生じた入力振動が小さいが、それに対する屋根スラブの振動が大幅に増幅していた。これは、片持ち構造の屋根スラブにおいて車両の通行によって激しい振動が生じる以外、その振動が位置によって異なり、複雑な状態となることを意味する。

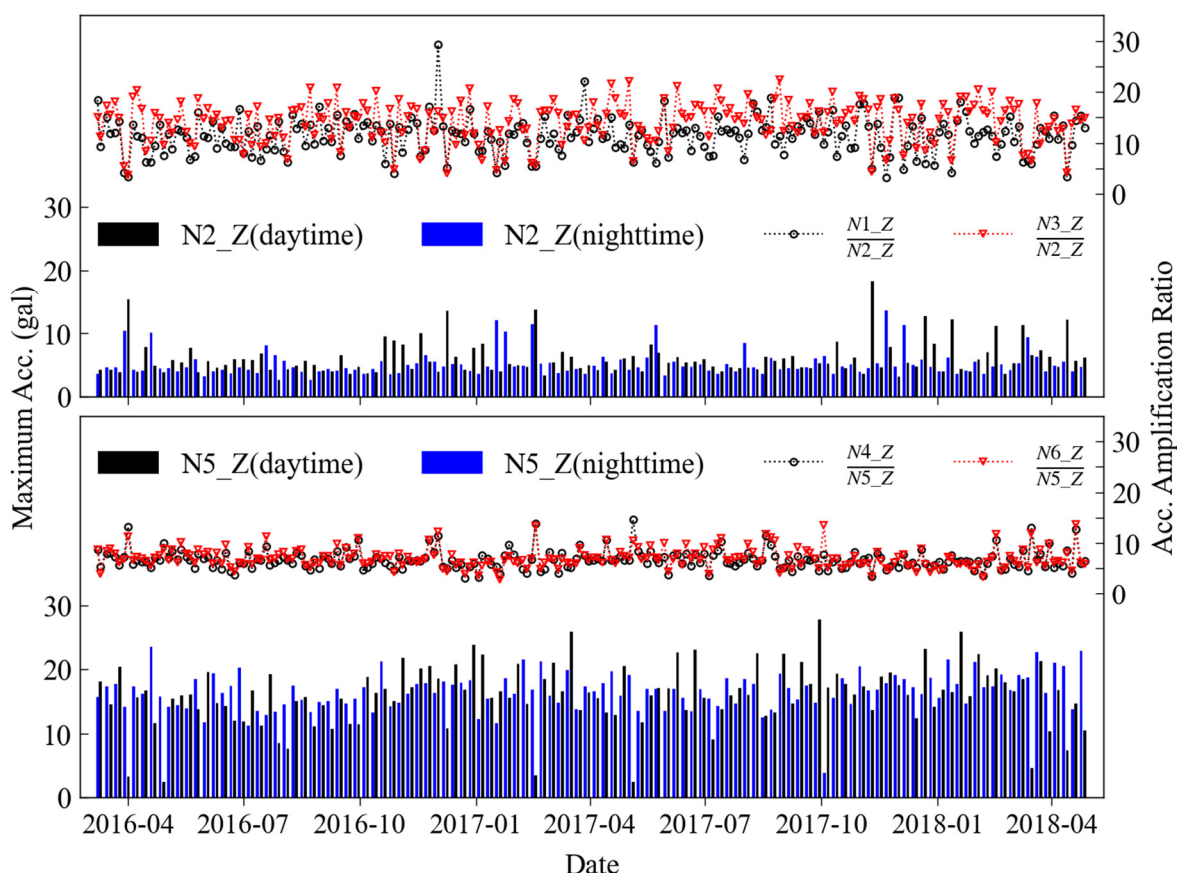


図 5-12 柱頭の最大加速度（Z 方向）および増幅率の経時変化

#### 5.4.2 屋根スラブの振動リサーチ

交通振動時の代表的な計測データから抽出したスラブの変位リサーチを図 5-13 に示す。同図(a)~(h)は 70 秒間の計測値の中で、屋根スラブの加速度をはじめ、速度や変位の振動状態が経時変化をしていることを示す。

図 5-13 から、前掲した図 5-6 に示した人が屋根スラブにジャンプして加振を施し、1 次固有振動時の変位リサーチと異なる振動が生じていることは分かる。すなわち、図 5-13(a)では N1 と N4 は同じ向きに振動しているが、N3 と N6 は上下が逆に変位し、N3~N6 間でねじれが生じている。その後、同図の(b)(c)では、N1 および N4、N3 とともに反対方向に変位し、両側の屋根スラブ共にねじれているような振動性状を示した。その後、(e)の時期では、N1、N4 側の屋根スラブはほぼ静止し、N3、N6 は再びねじれの変形性状を示している。さらに(f)~(g)に示すように N4・N6 側、N1・N3 側は順次にほぼ静止状態に変わり、(h)に示す反対方向である N3、N4 が静止する、N1 と N6 が単調振動するような振動性状に変化している。

このように、1 つの計測データにおいても、スラブの振動性状は時間とともに変化していくことが分かる。この間のセンサ N1 の Z 方向の加速度のフーリエ解析結果を図 5-14 に示



す。10 Hz～15 Hz の間にフーリエ振幅の極値が複数現れており、この間の振動性状が複雑な振動の重ね合わせであることが分かる。図 5-15 にこの振動データを対象にウェット解析を行った結果を示す。時間の経過とともに、その時期に卓越する振動数が増加していることが分かる。

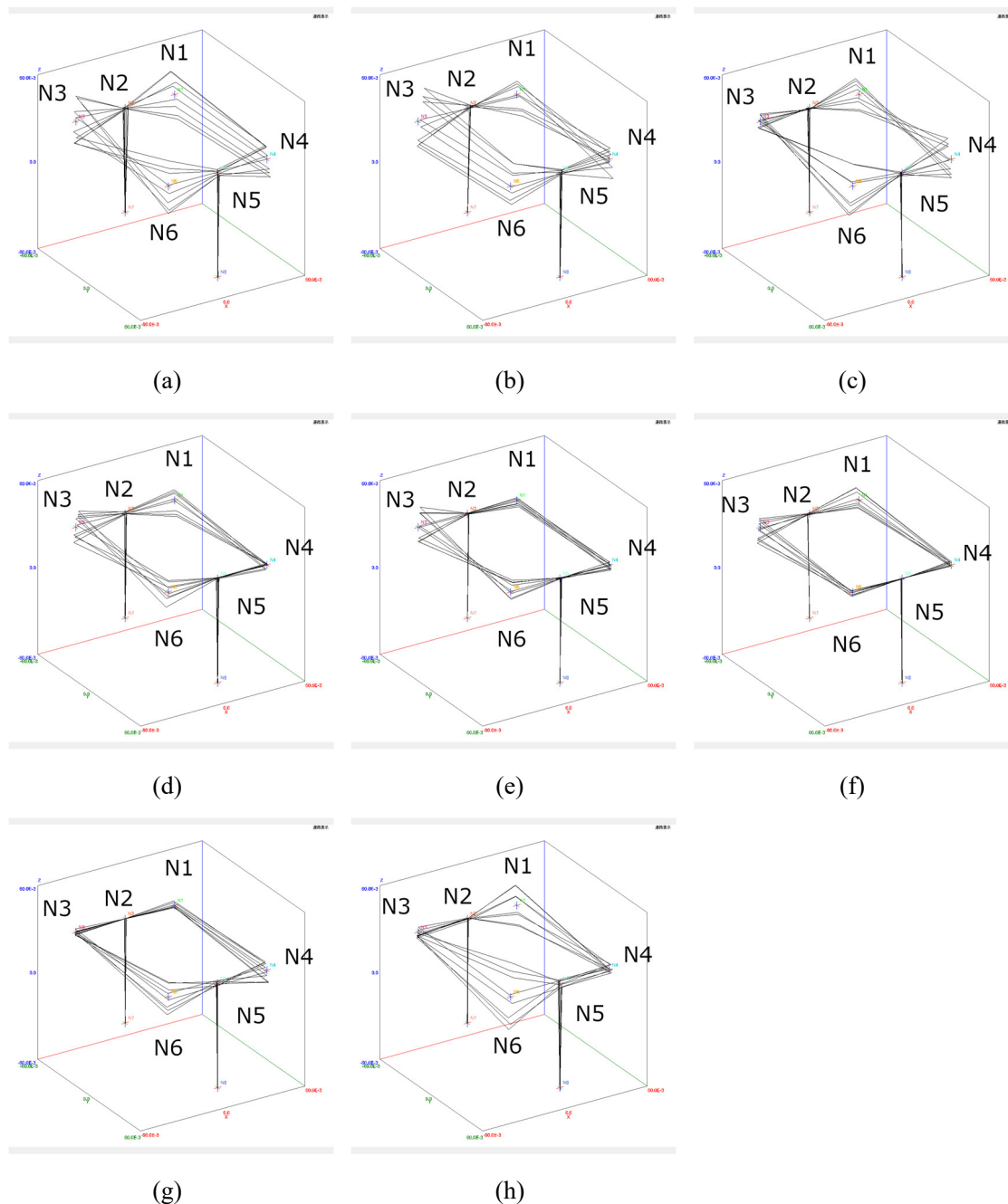


図 5-13 屋根スラブの変位リサージュのパターン

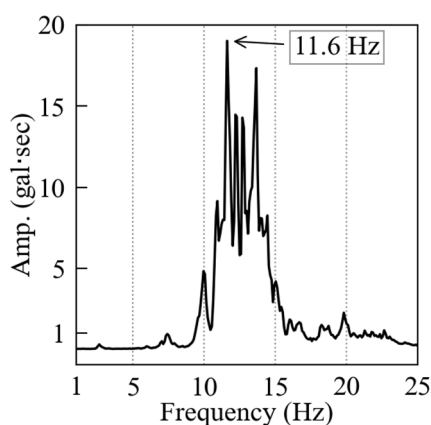


図 5-14 FFT 解析結果の例

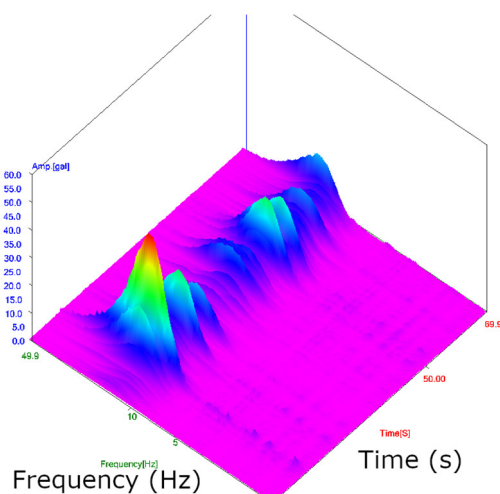


図 5-15 ウェブレット解析結果の例

また、図 5-16 に屋根スラブに人力加振を行ったときに、各センサの変位の解析結果を示す。加振位置である N6 は最大変位を示した後、振動が屋根スラブの短辺方向 (X 方向) に沿って反対側の N4 に伝達し、N4 は最大変位を示した。その後、振動が屋根スラブの長辺方向に沿ってトールゲート端部の N1 と N3 に伝達するように屋根スラブ全体が上下の単調振動をする経過が分かる。従って、先の屋根スラブの変位リサーチが示した複雑な振動は、屋根スラブは片持ち構造で、かつスラブ中央部の柱を中心に対称する配置であることから、振動は最初に生じる位置から固有振動数が同じである他の位置に伝達し、互いに刺激となって共振するためと考えている。すなわち、入力振動を 1 度受けて応答振動が互いに反射することで減衰がしにくく、異なる位置での応答振動が互いに刺激して増幅したものと推測される。

以上のことから、屋根スラブは交通振動を受けて複雑な上下振動を長時間に繰り返していることが明らかである。振動リサーチは屋根スラブに生じた複雑な振動を見得る化し、重要なモニタリング対象と判断した。

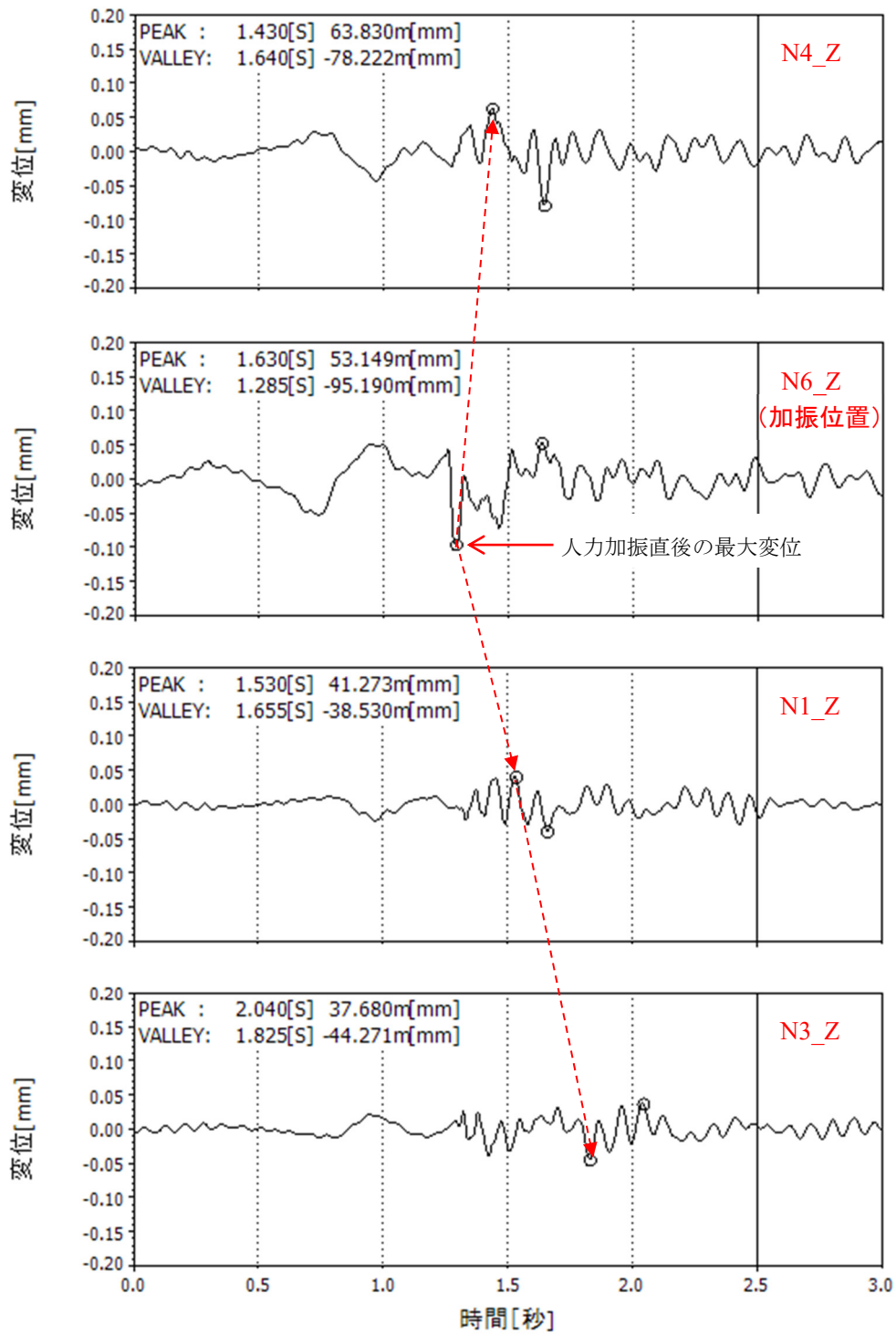


図 5-16 スラブの振動の伝達 (人力加振時)

### 5.4.3 屋根スラブの固有振動数の経時変化

5.3 節の FEM 解析で示したように、屋根スラブに貫通ひび割れ等の大きな劣化が生じると、屋根スラブの 1 次固有振動数は変化すると推定されるため、Z 方向の 1 次固有振動数は重要な監視対象と考える。FFT 解析結果の一例を先の図 5-14 に示したが、Z 方向の加速度を対象としたフーリエスペクトルには、フーリエ振幅はピークが複数ある。ここでは、FFT 解析で求められた最も大きいフーリエ振幅を示す周波数を機械的に 1 次固有振動数とした。

この方法で求めた各センサの 1 次固有振動数の経時変化を図 5-17 に示す。N4 と N6 の位置については、予備計測で同定した 1 次固有振動数（11.5 Hz）が約 2 年間継続していることが分かる。N1 については、約 60%の計測値が 11.5 Hz を示したが、残りはそれよりも大きな周波数が固有振動数と求められた。これは先の変位リサージュに示したように、振動性状が変化したことによるものと推定されるが、連続的に周波数が低下していることはない。1 次固有振動数は 11.5 Hz から変化していないと判断している。この傾向は、東名川崎 IC や浜松 IC 等、他のトールゲートの屋根スラブも同様であることを確認している。このように、1 次固有振動数の変化から劣化の発生を検知するためには、データの連続性も考慮することが必要と考える。また、N3 において多くの計測値は 13.5 Hz ほどを示したが、あるときに約 12 Hz までに減少した。しかし、その最小値は同定した 1 次固有振動数（11.5 Hz）を上回り、劣化や損傷による固有振動数の低下と言えない。N1、N3 では、前述したように柱頭から Z 方向の振動入力に対する増幅率の変動幅が大きく、N4 と N6 よりさらに複雑な振動をしていたと考えている。

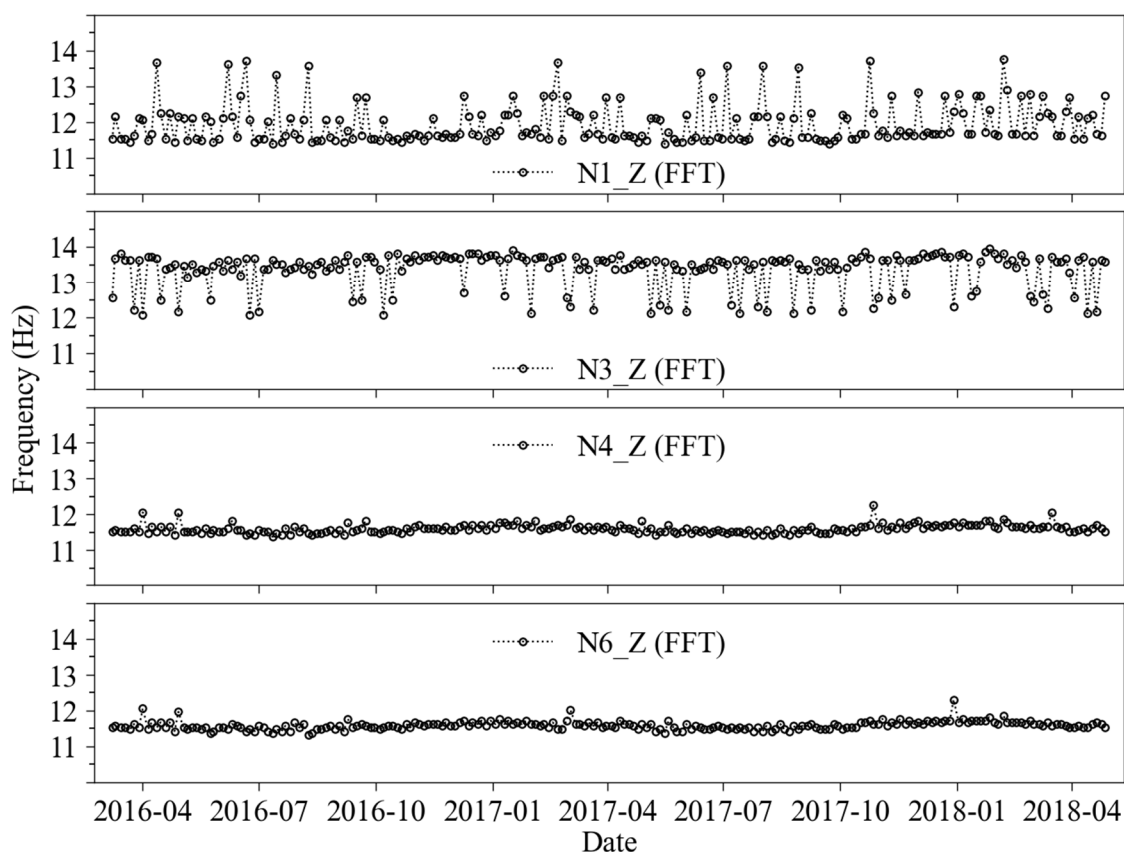


図 5-17 1次固有振動数の経時変化

#### 5.4.4 屋根スラブの剛性の経時変化

計測対象の屋根スラブは中央の大梁に支持された片持ちの状態です上下振動する。スラブの上下振動は連続系の振動となるが、1質点系モデルとみなして減衰項を無視すれば、加速度と変位との関係を示す式 5(1)によって剛性  $k$  が評価できる。

$$k/m = -\ddot{y}/y \quad (5.1)$$

本長期計測において屋根スラブの質量変化はないため、剛性に相当する  $k/m$  が低下すれば、劣化等の原因によりスラブの剛性が低下することを意味する。屋根スラブの上下振動の変位  $y$  の算定において、柱頭に生じる短辺方向 (X 方向) の変位が大きい場合には、スラブが柱頭を追従して変位  $y$  が大きくなり誤差が生じるため、柱頭の X 方向の変位が小さい時のデータを抽出して行った。代表的な算定例を図 5-18 に示す。図中の黒い点は 1 つの計測データから抽出した Z 方向の加速度と変位をプロットしたものであり、赤色実線は、加速度と変位との関係を表す散布図の回帰直線である。この回帰直線の勾配から  $-\ddot{y}/y$  ( $k/m$  に相当) が求められる。N1~N4 のそれぞれは約 5,323 (単位:  $1/s^2$ )、6,543、5,081、5,652 であった。

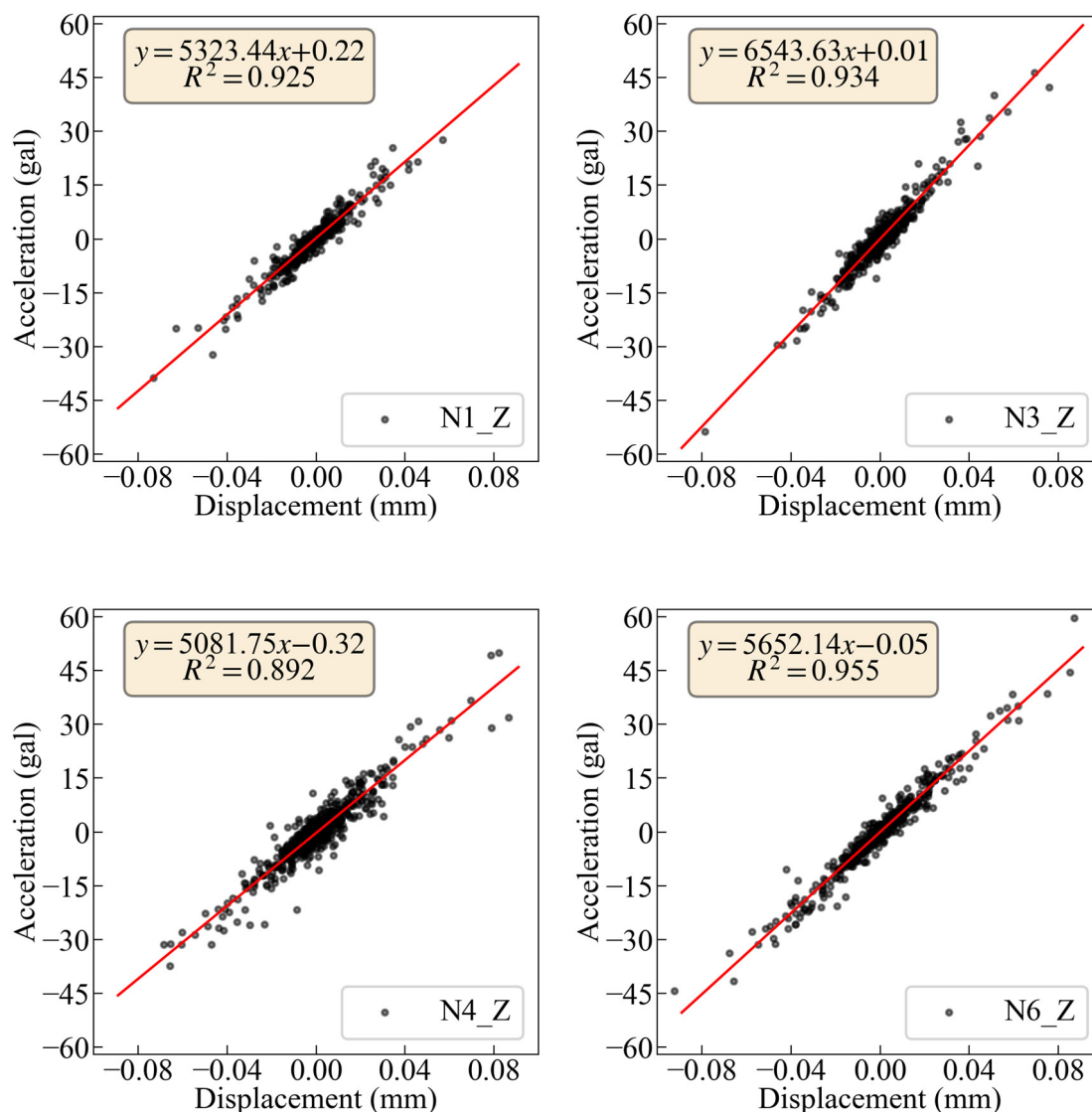


図 5-18 加速度と変位との関係 ( $-y/\ddot{y}$ )

推定した剛性を検証するために、剛性を意味する回帰直線の勾配を式 5(2)によって等価 1 次固有振動数に換算すると、N1 は約 11.6 Hz, N3 は約 12.9 Hz, N4 は約 11.3 Hz, N6 は約 12.0 Hz であり、前掲した 1 次固有振動数の計測値とほぼ一致する。2 年間の振動計測において式 5(2)で換算した等価 1 次固有振動数の経時変化を図 5-19 に示す。これは図 5-17 に示した固有振動数の経時変化と同様に、いずれの計測位置においても明確な低下がなかったため、劣化生じないと判断した。また、N1 と N3 について等価 1 次固有振動数の変動幅が小さく、より安定な値を示した。従って、計測された加速度と変位との関係によるスラブ剛性の推定手法は有効であり、推定した剛性はモニタリング項目になると判断した。

$$f_{eq} = \sqrt{-\ddot{y}/y} / (2\pi) \quad 5(2)$$

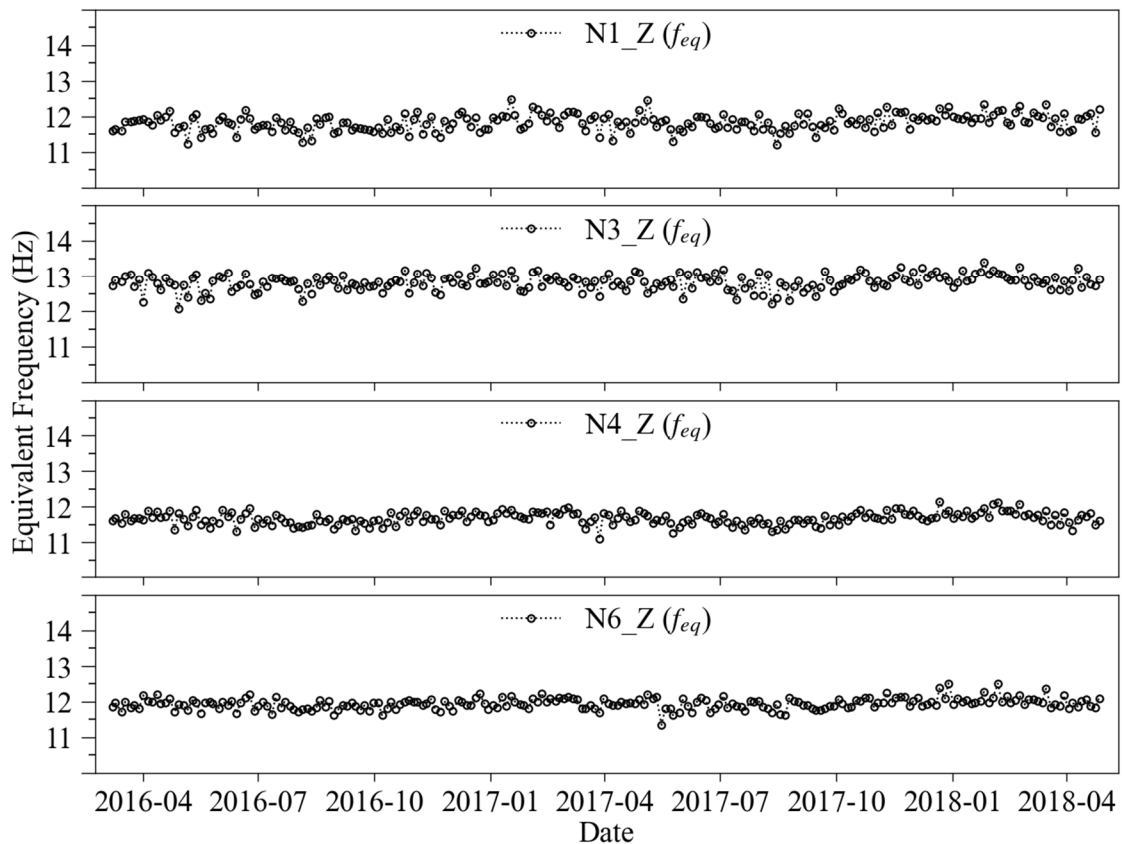


図 5-19 等価 1 次固有振動数の経時変化

RD (Random Decrement)法<sup>7)</sup>で屋根スラブの減衰を算出して試みたが、常時微動計測でよく使われている RD 法は適用できない結果となった。以下の原因と考えられる。

- 1) 本モニタリングで計測された屋根スラブの振動は通行車両が直下を走行することによって生じ、その振動レベルは人力加振等の強制振動より小さいが、一般的な常時微動（交通振動）より大きい。つまり、RD 法で重要となるランダム成分は少ない可能性がある
- 2) トリガ計測の最初の 10 秒間の振動は常時微動と考えられるが、計測サンプリング周波数は 100 Hz なので、10 秒間で計測された加速度（変位）のデータ数が RD 法に要求される必要な数より少ない。
- 3) 屋根スラブの上下方向の振動変位は柱頭に発生する短辺方向の変位に追従してしまうため、先の剛性算定と同じように柱頭の変位が小さいときのデータを抽出する必要がある。抽出したデータでは時間的な連続性がなくなり、データのランダム性を損なうと考えられる。

また、図 5-14 の FFT 解析結果に示したように、周波数領域では複数のピークが存在し、

はっきりした単峰特性を持っていないため、半値幅法も適用できない。屋根スラブの減衰を算出して維持管理の1つ指標として監視することは今後の課題である。

#### 5.4.5 屋根スラブの角度の経時変化

第3章に示したように、3軸の加速度データから合成したベクトルは鉛直方向(重力方向)に対して一定となり、この合成ベクトルを構成する X, Y, Z 軸それぞれの大きさの割合により加速度センサの鉛直方向に対する角度を検出できる。

本計測では、プリトリガ時間の10秒間は計測位置の交通振動が極めて小さいため、屋根スラブは静止状態と想定して、この間のセンサ角度、すなわちセンサが取り付けられる屋根スラブの先端の角度を算出した。計測期間中の角度の経時変化を図5-20に示す。同図は加速度センサのZ方向の角度(水平線に対する角度)を示しているが、いずれの位置でもほぼ一定で変動していないことが分かる。この結果は、計測期間に屋根スラブにおいて劣化が進行しなかったことを表す。この傾向は、現在モニタリングを実施している他のトールゲートでも同様であることを確認している。このように、部材に固定した3軸加速度センサの角度変化は上下振動のたわみ変形をモニタリングでき、今後のモニタリングにおいて重要な監視対象と判断される。

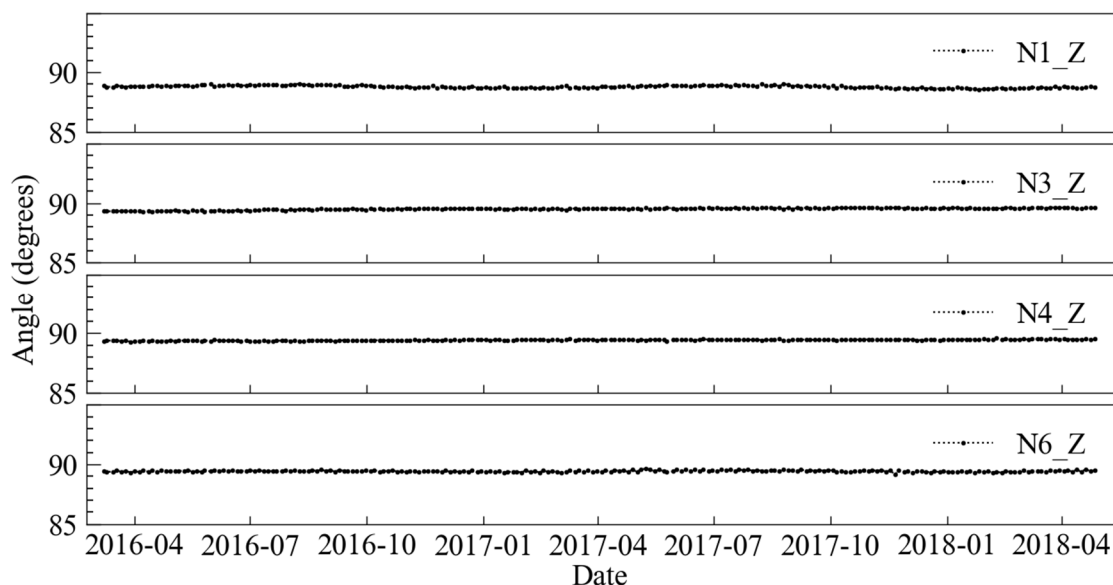


図 5-20 Z軸の角度の経時変化

また、図5-21に地震荷重を受けた屋根スラブのZ方向の角度の経時変化を示す。同図の角度値は、ゼロセットを行たため90°付近ではなく0°を中心に変動するが、計測の開始および終了時刻の角度値がほぼ同じであることが分かる。すなわち、スラブが健全のとき、その上下方向の振動は弾性的な変形であり、振動入力を受ける前後にスラブは角度の変化がない。逆に、1つの振動計測データでは、開始・終了時刻に計測された角度に差が発生すれ



ば、塑性変形、つまりある箇所に損傷や破壊が生じたことを意味する。この1つの計測データの範囲内での角度の比較は屋根スラブの健全度評価指標となりうる。

2年間の計測期間中、計測前後のZ方向の角度の差の経時変化を図5-22に示す。N1～N4のいずれにおいて差がないことが明らかである。スラブは弾性的な振動をしており、この間に屋根スラブにおいて劣化が進行しなかったことを表す。また、地震等激しい振動が発生する場合に、この角度の差によって被害の有無は即時に確認でき、維持管理のためのモニタリングにおいて重要な監視対象と判断される。

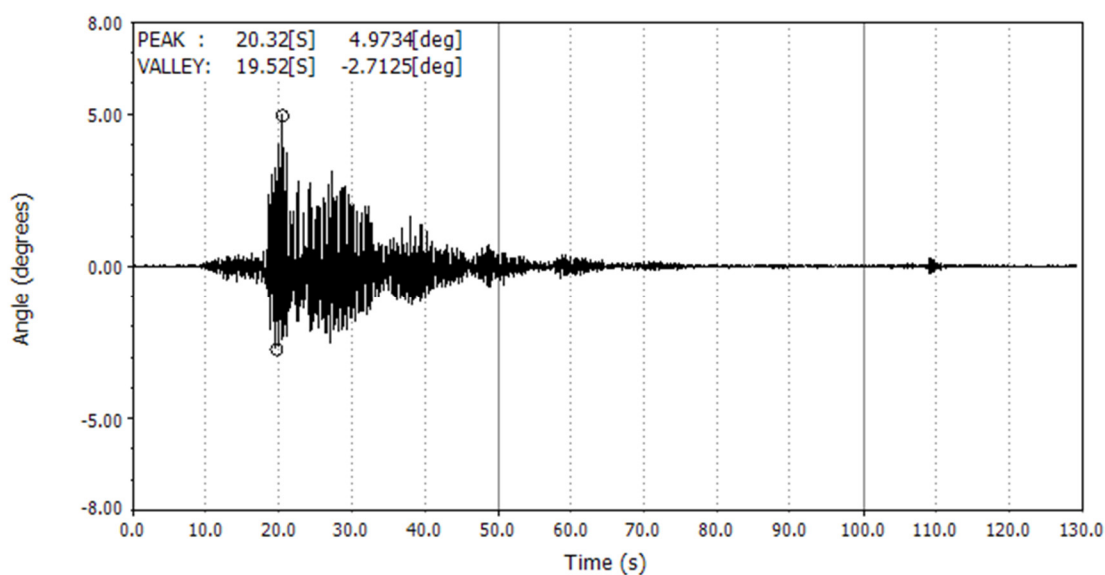


図 5-21 地震による角度の経時変化

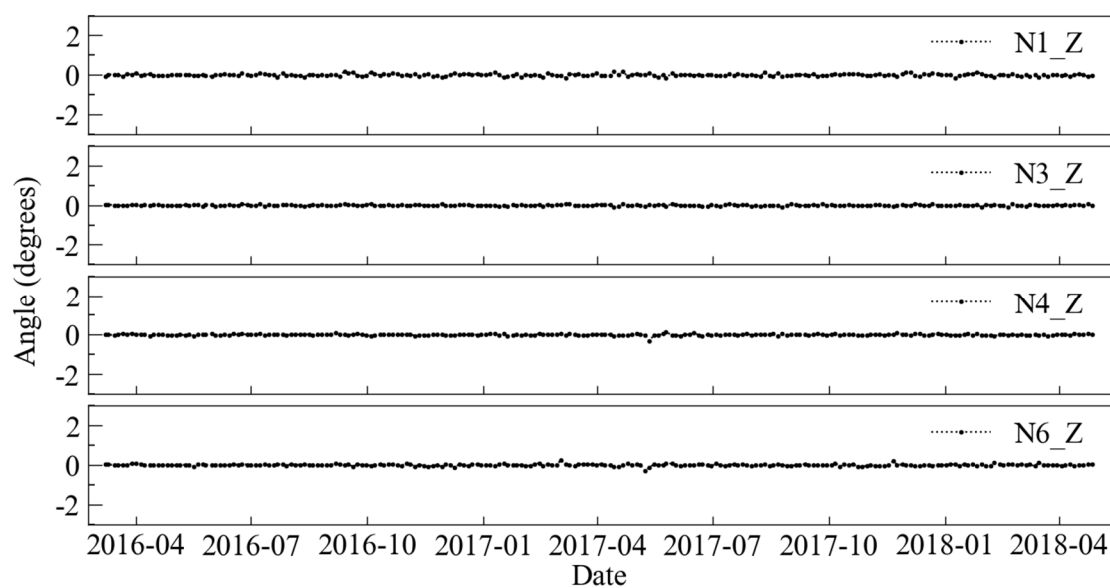


図 5-22 角度の差の経時変化

### 5.4.6 気温の影響

既往の研究では 1 次固有振動数は外気温等の温度変化による影響を受けて変動すると報告されている<sup>8)</sup>。本長期モニタリングにおいてもこの外気温変化の影響を検討した。温度計測は屋根スラブの近傍に設置するデータロガーの中で行われた。センサ N4 と N6 の位置において、気温が先に同定した 1 次固有振動数に与える影響を図 5-23 に示す。温度の上昇に伴い、1 次固有振動数が低下する傾向を示しており、気温の年間変動幅は 26.8 °C (8.5 ~ 35.3 °C) であることを考慮して 1 次固有振動数の年間変動幅は 0.21 Hz であった。

気温がスラブの剛性から式 5(2)で換算した等価 1 次固有振動数に及ぼす影響、気温がブリトリガ時間の 10 秒間のスラブの Z 方向の角度に与える影響をそれぞれ図 5-24 と図 5-25 に示す。いずれも 1 次固有振動数の検討結果と同様であり、気温の年間変動幅を考慮して等価 1 次固有振動数および Z 方向の角度に変動が生じた。これらの結果から、今後のモニタリングシステムの構築において、季節の影響を考慮してモニタリング項目(1 次固有振動数・剛性・角度)の閾値の設定を変更する必要がある。

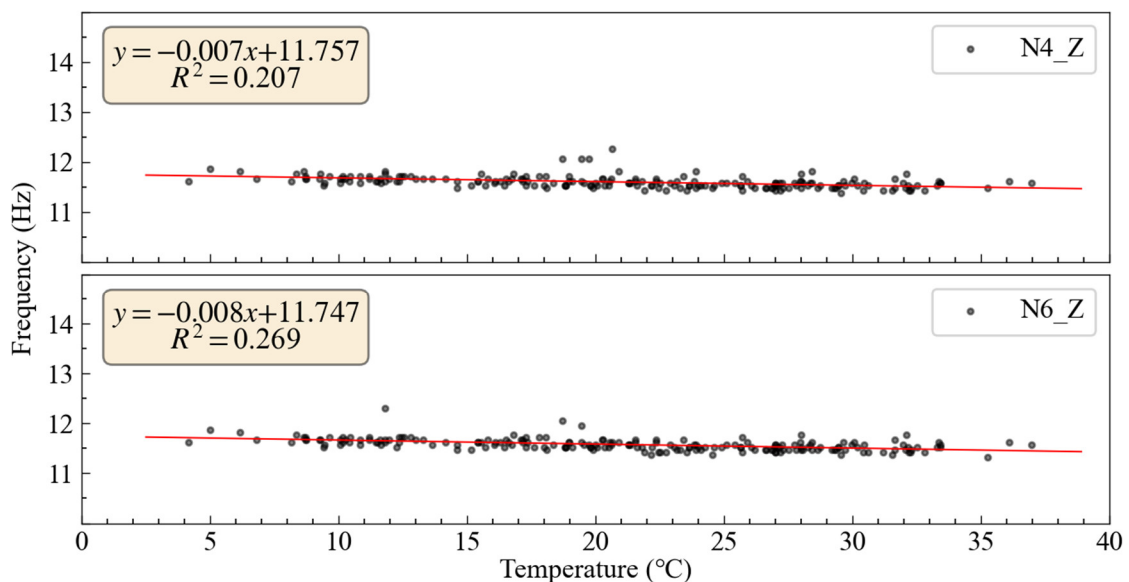


図 5-23 気温が 1 次固有振動数に及ぼす影響

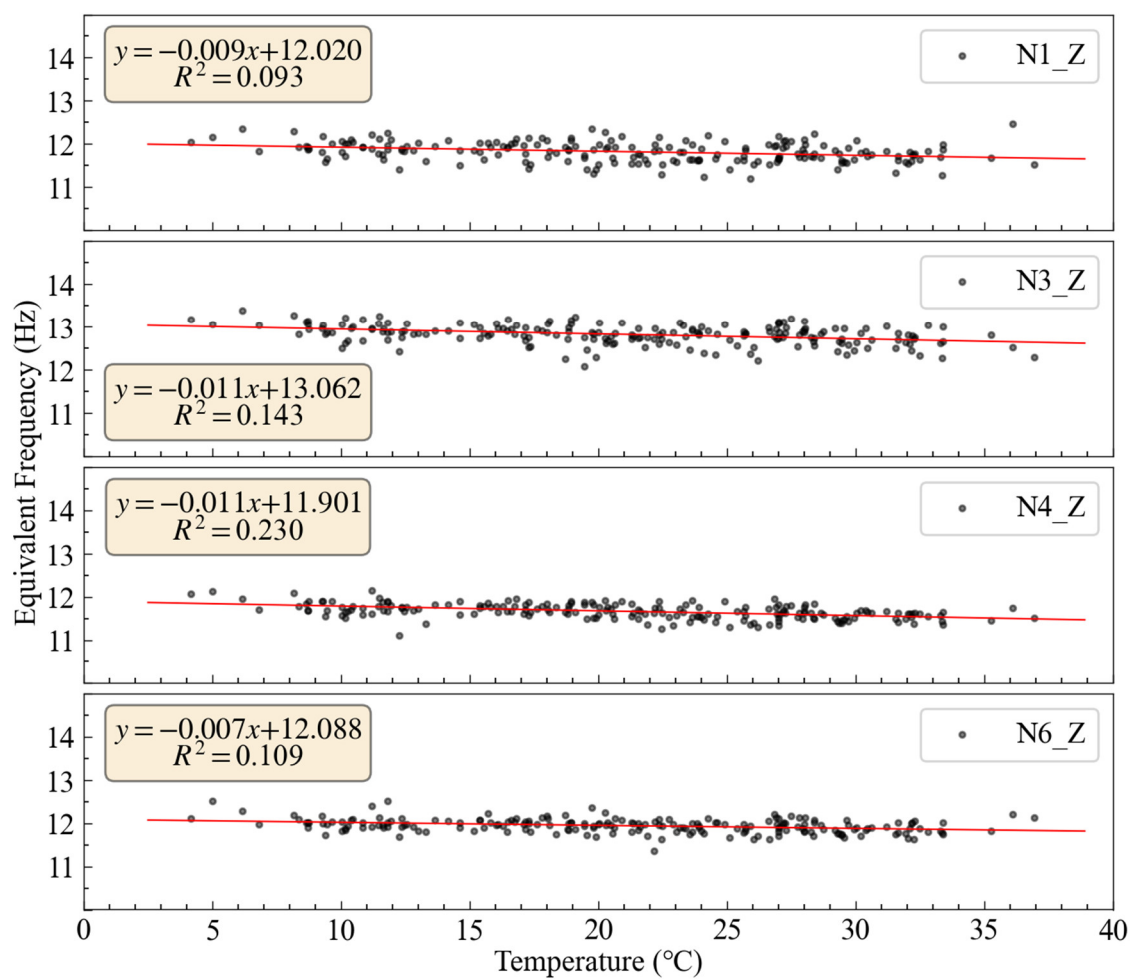


図 5-24 気温が等価 1 次固有振動数（剛性）に及ぼす影響

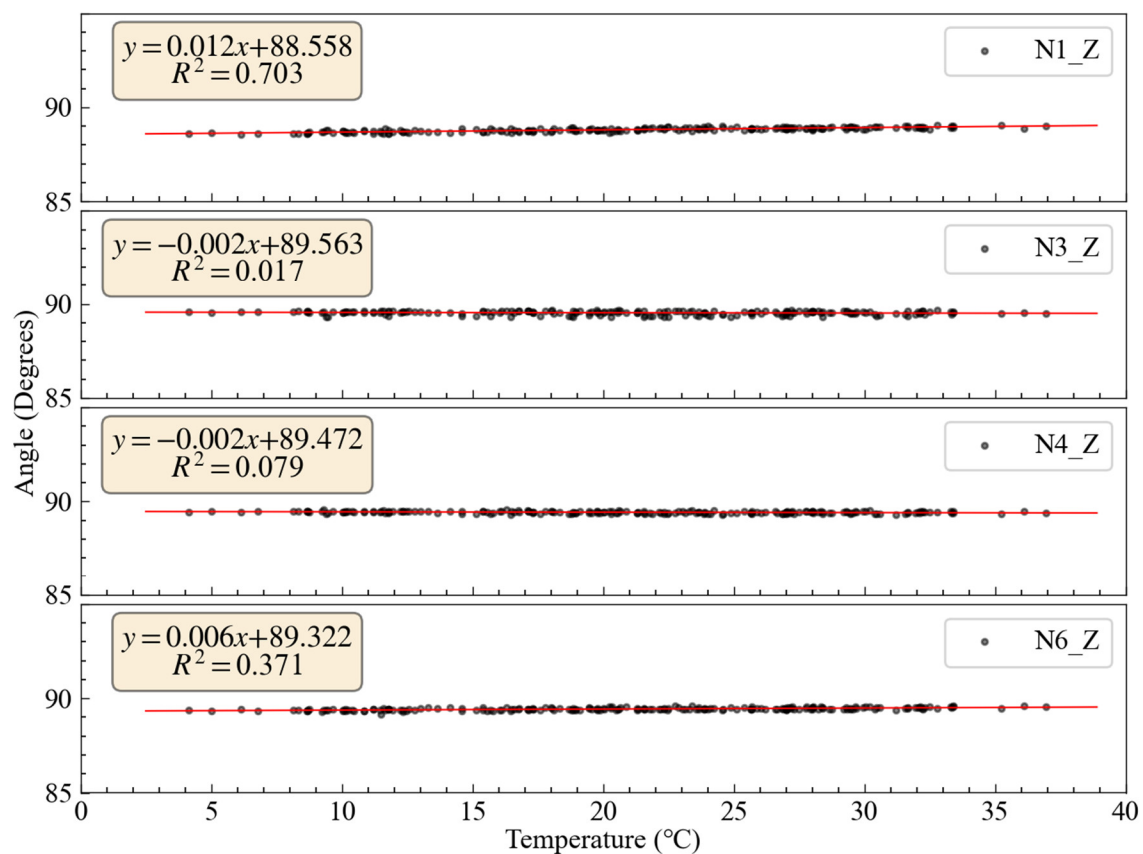


図 5-25 気温が角度に及ぼす影響

### 5.5 本章のまとめ

本章では、高速道路の PCa トールゲート屋根スラブを対象として、合理的な維持管理の実現を目的としたモニタリング技術確立に向け、約 2 年にわたって振動計測とその検証を行った。3 軸加速度センサを用いたトールゲートのモニタリングにおいて、下記の知見を得た。

- 1 屋根スラブは、交通振動により、常時、大きくかつ複雑な上下振動を繰り返していることを明らかにした。この振動性状は振動（変位）リサージュで可視的な監視が可能であり、このリサージュは屋根スラブの管理に重要なモニタリング対象である。
- 2 1 次固有振動数の変動から貫通ひび割れに伴うスラブの剛性低下の検知が可能であることを FEM 解析から確認した。しかし、交通振動に伴う屋根スラブの繰返し上下振動は複雑であり、計測された加速度のフーリエスペクトルのピーク値のみから機械的に求める 1 次固有振動数はばらつくことがある。このばらつきによる影響を抑えるためには、1 次固有振動数の連続的なモニタリングを行った上での判断が重要である。
- 3 屋根スラブを 1 質点系モデルとみなし、加速度と変位との関係から直線回帰でスラブの剛性が算出できる。剛性から換算した等価 1 次固有振動数はばらついたものの、同定した 1 次固有振動数と一致し、より安定な値を示したため、剛性の算定手法の有効性を明らかにした。屋根スラブの剛性をモニタリング対象となる。
- 4 プリトリガの 10 秒間において、3 軸の加速度の合成ベクトルを用いてセンサ位置の屋根スラブの角度を求めた。この角度により屋根のたわみ角の変化を感知できるため、屋根スラブの劣化検知に角度のモニタリングは極めて重要と考えられる。また、地震発生時において、地震前に計測された角度と地震後に計測された角度と比較することは屋根スラブの安全性評価指標となりうる。
- 5 気温の年変動は 1 次固有振動数、スラブ剛性、角度のモニタリングに影響を与えることを明らかにした。今後のモニタリングシステムの構築において、季節の影響を考慮してモニタリング項目の閾値の設定を変更する必要がある。

第5章の参考文献

- 1) 国土交通省：道路統計年報 2019
- 2) 国土交通省：社会資本整備審議会道路分科会 第1回国土幹線道路部会 配布資料3「諮問の背景」, 2012.11 (<https://www.mlit.go.jp/common/000996075.pdf>, 2020年10月26日確認)
- 3) 古川浩太郎：高速道路の老朽化と財源対策：米国の事例を参考に，国立国会図書館，レファレンス，No.765，pp.75-91，2014.10，[doi.org/10.11501/8779803](https://doi.org/10.11501/8779803)
- 4) 加藤建夫，泉徳秀，伊藤佑治，山本浩司，西谷章，大久保孝昭，江尻憲泰，高尾秀幸，保井美敏：加速度センサーを用いた PCa 造トールゲートの点検手法に関する研究 その1 振動計測によるトールゲートの健全度評価，日本建築学会大会学術講演梗概集（九州）構造Ⅱ分冊，pp.947-948，2016.8
- 5) 李亮，柴戸啓太，寺本篤史，泉徳秀，伊藤佑治，山本浩司，西谷章，大久保孝昭，江尻憲泰：加速度センサーを用いた PCa 造トールゲートの点検手法に関する研究 その4 計測された加速度による基礎的検討，日本建築学会大会学術講演梗概集（九州）構造Ⅱ分冊，pp.953-954，2016.8
- 6) 高尾秀幸，泉徳秀，伊藤佑治，山本浩司，加藤建夫，西谷章，大久保孝昭，江尻憲泰，保井美敏：加速度センサーを用いた PCa 造トールゲートの点検手法に関する研究 その3 長期モニタリング手法の検討，日本建築学会大会学術講演梗概集（九州）構造Ⅱ分冊，pp.951-952，2016.8
- 7) Cole, H. A.: "On-line Failure Detection and Damping Measurements of Aerospace Structures by Random Decrement Signature", NASA CR-2205, 1973
- 8) 畠山智貴，王欣，大野晋，源栄正人：長期連続観測記録に基づく低層建物の通常時と地震時の固有振動数の変動，日本地震工学会論文集，Vol.17, No.4, pp.4\_1-4\_12, 2017.8, [doi.org/10.5610/jaee.17.4\\_1](https://doi.org/10.5610/jaee.17.4_1)

## 第6章 結論

本論文では、RC造建築物において合理的な施工管理と維持管理の実現に向け、容易に設置・計測できる無線技術を活用した濡れセンサシステムおよび振動モニタリングシステムに的を絞って技術開発を行った。具体的には、フレッシュコンクリートの打込み状態、セメント水和熱、「濡れ」や「乾湿繰返し」等による部材内部の水分を監視する技術、並びにトールゲートの屋根スラブの点検・診断技術を基盤とし、RC造建築物の施工および維持管理におけるセンサモニタリング要素技術の提案を行った。各章で得られた知見を以下に示す。

第1章では、RC建築物の長寿命化の実現に向けて、センサモニタリング技術の要素技術開発に的を絞った本研究の目的、論文の構成を示した。

第2章では、建築・土木の生産および維持管理分野において、活用が検討されてきたセンサ技術を調査した。現地計測の簡便化、特にケーブルの配線作業を容易にできる無線通信方式を採用したセンサモニタリング技術は重要であることを明らかにした。本研究に関連する内容として、下記の2点を示した。

1. コンクリートの施工管理における既往の研究では、点計測するセンサを複数設置する手法より、可能な限り少数のセンサで広範囲をまとめて監視できる技術はセンサの設置作業の効率化を達成できる。しかし、コンクリートの打込み時に、充填欠陥である豆板等の空洞の検知に関する検討は少ない現状である。
2. RC建築物の維持管理における既往の研究では、二次部材や非構造部材は重要なモニタリング対象であるが、それに関する提案が少なく、さらに交通振動によるトールゲートの屋根スラブの長期振動計測についての実績はほとんどないのが現状である。また、一般のユーザに対して操作が簡単、結果が分かりやすい日常点検手法の提案は維持管理に重要である。

第3章では、本研究で用いたセンサ計測システムを示した。この計測システムは無線通信技術を駆使し、広島大学建築材料学研究室が地域・産学連携センターにおいて民間企業と共同開発を進めている濡れモニタリングシステムと振動モニタリングシステムである。本章ではそれらの計測原理、その構成と機能の概要を説明するとともに、実験室レベルで実施した基礎実験の結果のもとに、モニタリングシステムの計測精度を明らかにした。

### ◆ 帯状濡れセンサシステムについて

1. 長い電極線を楕円状に配置した仕様の帯状濡れセンサは、計測対象の比誘電率の変化から水分を検知して濡れの具合を推定できる。一定の長さで分割したセンサユニットを1基のセンサとして1つの計測値を出力し、その出力値がセンサの濡れ深さの増加に伴って上昇し、全部が濡れたときに最大の出力値を示す仕様は、振動締固め効果の確

認とともに、コンクリートの表面に生じる豆板の検知できる見通しを得た。

2.  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  水溶液での計測結果から、溶液の濃度の変化は出力値に与える影響が小さいことを明らかにし、フレッシュコンクリートに対しても本センサが活用できることを示した。水中での計測結果から、計測対象や水溶液の温度は、濡れ判断に影響しないほど小さいことを明らかに、センサにラップフィルムを覆うことで、センサを保護しながら濡れの計測できることを明らかにした。
3. センサが空気中におかれた場合、気温、相対湿度による計測値の変動は無視できるほど小さい。また、センサの出力値は電極の長さや幅、間隔に依存するため、コンクリート工学上には意味がなく、計測値と初期値との比較、センサ各基間の比較が濡れ状況の計測に重要であることを指摘した。

◆ 振動モニタリングシステムについて

1. 本研究における計測システムに用いた加速度センサは、計測値の時刻歴波形の基線補正を行い、周波数領域で積分を行う際にハイパスフィルタを適用することで、計測された加速度データから速度および変位を精度良く算出できることを示した。
2. 本研究で対象とする構造物の計測におけるセンサの固定方法を検討した結果、本研究で選定した両面テープ止めはビス等による機械的固定方法と同等の計測結果が得られ、変位の計測精度に影響しないことを明らかにした。

第4章では、コンクリートの施工管理および建築物の維持管理を高度化するために、帯状濡れセンサシステムを用いたモニタリング手法を提案した。コンクリートの打込み実験、模擬の豆板の検知実験、水和熱モニタリング実験、模擬コンクリート壁での結露モニタリング実験を試験室レベルで行い、提案手法は実建築物に適用できる見通しを得た。

1 コンクリートの打込み（充填）管理について：

初期値を基準として、センサ出力率の上昇により、その位置にコンクリートが達したことが分かる。棒状バイブレータを用いて振動締固めを行ったことによって、複数設置したセンサの出力率間のばらつきが小さくなり、すべての出力率は同じ値（100%ほど）に収束していく。この収束は、コンクリートが密実に充填されたことを検知できること意味する。また、振動締固めを行った後に、センサ出力率が他の箇所よりも低い部分は、豆板によりコンクリートがポーラスになっている箇所と推定できることを明らかにした。以上の結果は、この濡れ計測システムが、コンクリートの打込み時にリアルタイムで充填性・密実性の判断をできることを示している。

2 セメント水和熱管理について：

簡易断熱温度上昇試験の計測結果より、帯状濡れセンサに付属する温度センサの計測値は熱電対の計測値と一致し、温度センサが熱電対と同程度の精度を有することが分かった。すなわち、本センサはコンクリートの温度履歴を高精度で計測できることを明らかにした。



## 3 維持管理（結露検知）について：

硬化後のコンクリート部材の表面に濡れセンサを存置することにより、供用期間、すなわち維持管理において、建築部材間に発生した結露や漏水を検知することが可能なことを、実験室レベルの検証実験によって確認した。

第5章では、高速道路の入口に位置するトールゲートの屋根スラブを対象として、合理的な維持管理の実現を目的としたモニタリング技術確立に向け、約2年にわたる長期の振動計測の結果からモニタリング項目を抽出してその有効性を明らかにした。そして、振動モニタリングシステム用いた今後モニタリングの一手法を提案した。

- 1 屋根スラブは、交通振動により、常時、大きくかつ複雑な上下振動を繰り返していることを明らかにした。この振動性状は振動（変位）リサージュで可視的な監視が可能であり、このリサージュは屋根スラブの管理に重要なモニタリング対象であることを示した。
- 2 1次固有振動数の変動から貫通ひび割れに伴うスラブの剛性低下の検知が可能であることをFEM解析から確認した。しかし、交通振動に伴う屋根スラブの繰返し上下振動は複雑であり、計測された加速度のフーリエスペクトルのピーク値のみから機械的に求める1次固有振動数はばらつくことがある。このばらつきによる影響を抑えるためには、1次固有振動数の連続的なモニタリングを行った上での判断が重要である。
- 3 屋根スラブを1質点系モデルとみなし、加速度と変位との関係から直線回帰でスラブの剛性が算出できる。剛性から換算した等価1次固有振動数はばらついたものの、同定した1次固有振動数と一致し、より安定な値を示したため、屋根スラブの剛性をモニタリング対象となることを指摘した。
- 4 プリトリガの10秒間において、3軸の加速度の合成ベクトルを用いてセンサ位置の屋根スラブの角度を求めた。この角度により屋根のたわみ角の変化を感知できるため、屋根スラブの劣化検知に角度のモニタリングは極めて重要と考えられる。また、地震発生時において、地震前に計測された角度と地震後に計測された角度と比較することは屋根スラブの安全性評価指標となりうる。
- 5 気温の年変動は1次固有振動数、スラブ剛性、角度のモニタリングに影響を与えることを明らかにした。今後のモニタリングシステムの構築において、季節の影響を考慮してモニタリング項目の閾値の設定を変更する必要がある。

第6章では本論文の各章で得られた結果と結論の総括を示した。

以上のように、本論文では、濡れ計測システムと振動モニタリングシステムを用いて、無線通信技術を活用したRC建築物の施工管理・維持管理を高度化する手法の要素技術の提案を行った。帯状濡れセンサの仕様は、出力値は濡れ深さの増加に伴って直線的に増加するも

のとしていたが、本研究で用いたセンサ仕様ではこれが達成されておらず、これは今後の課題としている。振動モニタリングシステムの検討において、屋根スラブの振動特性より、減衰を算出することは不可能であった。交通振動による屋根スラブの減衰に関する検討は今後の課題としている。しかし、課題が存在するものの、本研究で示した各々の検討結果から、無線技術を用いたセンサモニタリングシステムは「コンクリート構造物の長寿命化」の実現に有益であることを確信している。

## 関係論文リスト

### I. 論文発表（査読付き）

- [1] **蘇振東**, 大久保孝昭, 寺本篤史, 伊藤佑治, 西谷章, 江尻憲泰, 高尾秀幸: 鉄筋コンクリート造 PCa トールゲート屋根スラブの交通振動による劣化のモニタリングに関する技術提案, 日本建築学会技術報告集, Vol.26, No.63, pp.449–454, 2020.6, doi.org/10.3130/aijt.26.449
- [2] **蘇振東**, 大久保孝昭, 寺本篤史, 鬼塚雅嗣, 松本賢二郎, 上原誠: コンクリートの充填と表面に生じる豆板を検知できる帯状濡れセンサシステムの開発, 日本建築学会技術報告集, Vol.26, No.64, pp.851–856, 2020.10, doi.org/10.3130/aijt.26.851

### II. 国際会議論文（査読付き）

- [1] **Zhendong SU**, Takaaki OHKUBO, Atsushi TERAMOTO, Masatsugu KIZUKA, Kenjiro MATSUMOTO, Makoto UEHARA: PROPOSAL ON RATIONALIZATION OF CONSTRUCTION MANAGEMENT AND MAINTENANCE OF RC EXTERIOR WALLS USING WETTING AND TEMPERATURE SENSORS, Proceedings of the *fib* Symposium 2020 (in Shanghai), pp.2070–2078, 2020.11

### III. 口頭発表（筆頭者が口頭発表者）

- [1] 蔡誠, 大久保孝昭, 寺本篤史, **蘇振東**: 無線センサシステムを用いた建築部材の濡れモニタリング技術の開発に関する基礎的研究, 日本建築学会学術講演梗概集(中国) 材料施工分冊, pp.587–588, 2017.7
- [2] **蘇振東**, 大久保孝昭, 寺本篤史, 秋山大地, 松原大祐, 伊藤佑治, 西谷章, 江尻憲泰, 高尾秀幸: 加速度センサーを用いた PCa 造トールゲートの点検手法に関する研究 その5 長期モニタリングの結果の概要, 日本建築学会学術講演梗概集(東北) 構造 II 分冊, pp.131–132, 2018.7
- [3] 秋山大地, 大久保孝昭, 寺本篤史, **蘇振東**, 松原大祐, 伊藤佑治, 西谷章, 江尻憲泰, 高尾秀幸: 加速度センサーを用いた PCa 造トールゲートの点検手法に関する研究 その6 今後の長期モニタリング概要, 日本建築学会学術講演梗概集(東北) 構造 II 分冊, pp.133–134, 2018.7
- [4] **蘇振東**, 大久保孝昭, 寺本篤史, 秋山大地, 松原大祐, 伊藤佑治, 西谷章, 江尻憲泰, 高尾秀幸: 長期振動モニタリングの結果に基づく PCa 造トールゲートのヘルスマニタリング手法に関する研究, 日本建築学会中国支部研究報告集, Vol.42, pp.151–154, 2019.3

## 謝辞

本論文は、広島大学大学院工学研究科建築学専攻博士課程後期に在籍する期間の研究成果をまとめたものです。研究の遂行および論文の執筆にあたり、数多くの方々からご指導、ご協力、ならびにご支援を賜りました。

ここに記して、深甚なる感謝の意を表します。

本論文審査の主査を務めていただいた恩師の大久保孝昭教授には、本研究に携わる機会を与えていただき、研究活動全般にわたり終始暖かいご助言とご指導を賜りました。ご多忙にもかかわらず、大久保先生には、いつも私が書いた下手な文章やスライドを念入りに添削していただき、日本語の使い方から日常生活、研究活動まで私自身の行動・考えを正す機会を賜りまして、言い表すことができないほど感謝しております。博士課程前期から素晴らしい先生と出会って、先生に教えていただいたことを、誇りに思っています。今後ともご指導・ご鞭撻のほどよろしくお願い申し上げます。

本論文審査の副査を務めていただいた広島大学大学院工学研究科（現 先進理工系科学研究科）田川浩先生、河合研至先生、三浦弘之先生には貴重な時間を割いていただき、本論文のご精読および貴重なご教示を賜りました。深くお礼を申し上げます。また、研究に対する考え方・進み方について、助教の寺本篤史先生からも多くのご意見とご指摘を頂き、誠にありがとうございました。

留学期間において、ご支援を頂いた公益財団法人ロータリー米山記念奨学会（カウンセラーの柱野真実様および呉東ロータリークラブの方々）、独立行政法人日本学生支援機構、公益財団法人ひろしま国際センター（協力会社 株式会社ウッドワン）のお陰様で学業に専念でき、大変助かりました。心より感謝申し上げます。

また、研究を進めるにあたり、ご支援・ご協力・ご相談を頂いた同窓生たちをはじめ、ここにお名前を記すことが出来なかった多くの方々には感謝申し上げます。最後に、どのような状況においても支えてくれた両親、妻に心から感謝します。ありがとうございました。

2021年（令和三年）2月