

# コンクリート構造体の長寿命化のための全プロセス モニタリング実現への挑戦

新潟大学工学部機械システムプログラム  
安部 隆

## 1. はじめに

現在、高度経済期に造成された道路、橋、トンネルなどのコンクリート構造物の劣化が急務の課題となっている。社会インフラの整備のために、コンクリート構造物が早期に構築された先進国では、すでに大きな課題になっており、例えば、2021年にアメリカ議会で2兆ドル超の予算を今後10年間にわたり、社会インフラの整備への投資が決定されるなど、国内外で対策が急務である。我が国でも、インフラ超寿命化基本計画を策定し、計画的な維持管理、更新を進めている<sup>1)</sup>。コンクリート構造体の長寿命化は製造で大量に二酸化炭素が発生するために脱炭素の観点でも重要である。

申請者は、構造物の劣化や液体材料内の微視的な変化を非接触で数値化できるセンサを考案し、その技術によるフレッシュコンクリート（生コン）製造から建設後の劣化点検に至る全モニタリング技術の実現に向けた研究を進めている。セメント系材料は、セメントだけでなく、水、砂や砂利などの骨材からなり、複雑な組成を有している。その状態を、現場で、機械的および化学的に数値化するのには困難が予想される。しかし、完全自動化を目指すためには、超えなくてはならない壁である。

本研究では、全プロセスにおける品質管理を、現場で、一貫して評価可能なセンシング技術開発に挑戦し、技術的に可能かどうかの見極めを実施する。

## 2. コンクリート構造物の何を評価するか？

コンクリート構造の建設プロセスは、設計、材料選定、施工および維持管理からなる。建設では法面に吹き付けるモルタルから、橋梁に使用されるコンクリートまで、用途に応じて様々なセメント系材料が使用されている（図1）。材料ごとに、施工および劣化を統一的に管理することは困難が予想される。現在は、外観で劣化過程をグレード分けする手法<sup>2)</sup>が用いられており、より詳しい分析は、試料を円柱状にくり抜いた供試体を用意して分析室で評価する

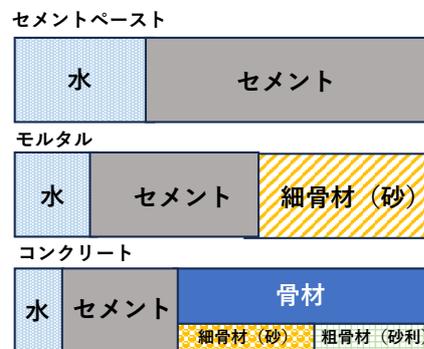


図1 セメント系材料の組成

手法が使われている。可能ならば、同一のセンサで、現場で統一的に管理できれば望ましい。当初計画でターゲットとしたのは、施工および劣化のモニタリングであるが、全体像の把握のために、まず、現場での供試体の採取、評価を実施してきた。劣化による多孔質化の進展が測定可能だが、構造物が設置された箇所における年間の気候などの予想される因子だけでなく、製造プロセスに問題があるようなケースも見られた。つまり、材料選定段階から品質管理をしていかないと個々の現場におけるコンクリートの劣化状態の数値化は不可能なことがわかった。そこで、まず、フレッシュコンクリートの製造時の品質モニタリングを行い、次に、硬化プロセスのモニタリングを実施した。維持管理については、最終的には、耐久性へ影響を及ぼすと考えられる塩害や凍結劣化などによる劣化状況を数値化することが目標である。以下に、各々のプロセスにおける研究項目をまとめる。なお、紙面の都合で一部の報告は割愛した。

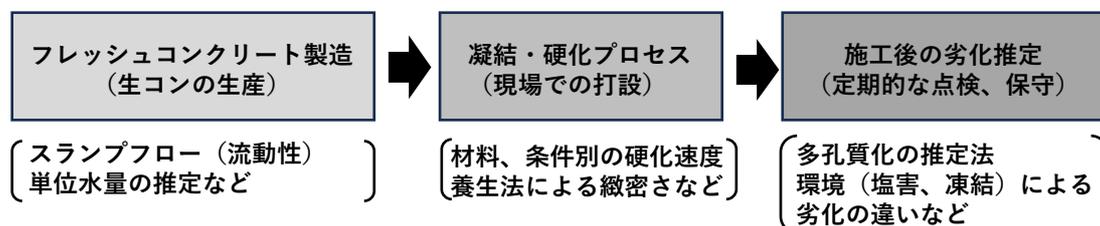


図2 全コンクリート工に対応したセンシング技術の検討フロー

### 3. 実験方法

#### 3.1 センシングの原理

図3に水晶複素容量センサの等価回路図と検出原理を示す<sup>3)</sup>。検出部の電極はその幾何形状をリング形状とすること、さらに、遮蔽電極の配置により、局所的なセンシングやイメージングへの対応が可能である。図4にイメージングした例を示す。MHz帯でコンクリート内部をスキャンし、非破壊で、コンクリート内部の鉄骨の場所の特定が可能である。本センサは複素容量を測定するため、測定結果に影響を及ぼす鉄骨の位置を把握し、純粋にセメント系材料の反応や劣化状態だけを評価するためには、空間分解能の向上が重要である。

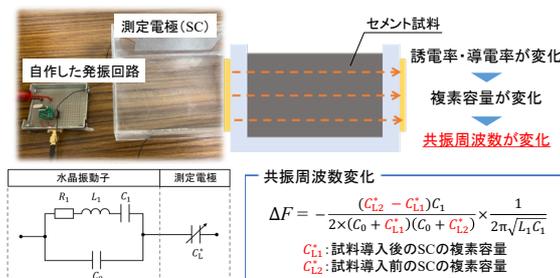


図3 水晶複素容量センサシステム

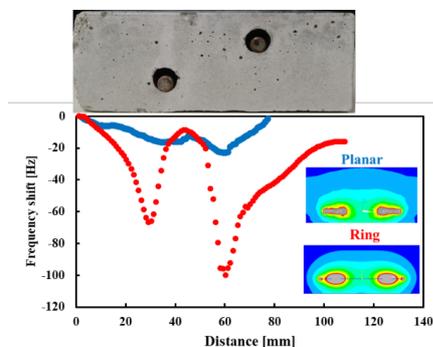


図4 コンクリート内部のスキャン結果<sup>4)</sup>

また、背面電極により電界の侵入長を調整可能であり、表層と深部の違いを評価できる。本センサの性能に重要な役割を果たすのが水晶振動子である。検出電極の容量に対応した共振周波数、サイズの水晶振動子を使用し、必要に応じて、振動子の自作もしている。

### 3.2 フレッシュコンクリート製造の評価方法

セメントに水を付与し練り混ぜるとしばらくは可塑状態にあるが、水和反応の進捗に従って、次第に流動性を失っていくことが知られている。表1に示すように、凝結・硬化反応は5つの過程からなる<sup>5)</sup>。最初の数時間は、セ

表1 セメント系材料の凝結・硬化プロセス<sup>5)</sup>

反応段階	反応速度論		反応機構	物性との関連
1 加水分解	反応律速	反応速度 高	イオン溶出	
2 誘導期	核生成律速	反応速度 低	イオン溶出	凝結の始点
3 加速期	反応律速	反応速度 低	水和物生成	凝結の終点、硬化開始
4 減速期	反応律速から 拡散律速へ	反応速度 低	水和物生成	初期の強度発現
5 定常状態	拡散律速	反応速度 低	水和物生成 (緩やか)	長期の強度発現

メント粒子表面を覆っていた水和物が接近して緻密化していく「凝結」が進行する、「凝結」によって「硬化」が進行し定常状態になっていくが、その期間は数ヶ月にわたる。コンクリートの強度に関わるので、最初の流動性、水和反応の速度の評価が品質管理のために重要である。

本研究では、スランプフローにおける流動性の評価方法を探るために、セメント系材料の投下用の漏斗とシャッターを有する評価用容器を作製し、投下後の流動による数値化を試みた。一般的に、スランプフローによる評価では、流動による高さ変化を評価している。本研究室のセンサは、試料の空間分布の経時変化を測定できるため、その変化速度から流動性を評価できる。

### 3.3 凝結・硬化プロセスの評価

次に、凝結・硬化プロセスの評価のために、容器中に投入後の周波数変化（複素容量変化）を長期間にわたって計測をした。打設現場における水和反応に影響を及ぼす因子と想定される温度、組成、添加物などの因子を変えて、周波数変化との相関を評価した。また、養生法を変えた場合の違いが観察されるかについても試験した。具体的には、そのまま環境に暴露して硬化する場合と、乾燥防止のためにラップした場合と、水中で養生した場合での保水性の違いを評価した。

### 3.4 劣化の評価

セメント系材料は、鉄骨の膨張や内部の水分の凍結膨張などにより、ミクロレベルでの多孔質化が進展し、最終的には、可視化可能なマクロサイズにおける亀裂が発生し、破壊する流れで劣化が進展する。劣化による破壊の予測と保守計画の立案のためには可視化する前の多孔質化段階での評価が望ましい。

本研究では、暴露環境による多孔質化の進展の評価（凍結、塩害など）を行う方法として、散水法を考案した。この手法の特徴は、コンクリート素材の誘電率が、打設直後でも10~20で、硬化後では6~8と低いため、劣化による発生した空隙に水が侵入すると、空隙の誘電率1に対して、水は約80と高いため、増幅して検出可能な点にある。また、経時変化を見ることによって、深さ方向の状態や、さらに、蒸発速度により、塩害などの評価も期待される。なぜならば、塩分が多く含まれるとラウールの法則により蒸発速度が遅くなるためである。

## 4. 実験結果と考察

### 4.1 フレッシュコンクリート製造の評価

図 5 にセメントに水を付与し練り混ぜる時間とセンサの応答時間を示す。前述のように、練り混ぜ後に、水和反応の進捗に従って、次第に流動性を失っていくことが知られているが、水和反応は練り混ぜにより促進し水和反応物が生成することが知られている。本センサの計測では、4~5 分で収束していることがわかる。この時間は、経験的に知られている時間と一致している。

図 6 にスランプフローした際のセンサの応答結果を示す。投入は瞬時に行われるが、その後、周波数が緩やかに減少する。これは流動によるものであり、この周波数変化速度がスランプフローにおける高さの評価に対応する数値データである。

単位水量の試験は、恒温炉で乾燥させた場合と電子レンジ（マイクロ波）で加熱した場合の質量変化を比較評価した。炉で加熱した場合は評価時間が長い課題があるが正確な単位水量となった。マイクロ波で加熱した場合は、短時間で評価できるが、試料表面の水分除去はされるが内部は残留していることがわかった。換算式を用いれば解決できると考えられる。

本研究遂行時に周波数変化の絶対値に大きな違いが見られることがあった。原因として水和反応が進行している可能性がある。現場でのセメント系材料の保管管理は容器に蓋をして保管する程度である。それでも大きな問題とされていない。念のために、室内、屋外で 24 時間放置したものと開封後にすぐに使用したもので比較した。図 7 にその結果を示す。屋外に保管したものは周波数変化が小さかった。

屋外では、温湿度が管理されていないために、吸湿によって一部のセメントの水和反応が進んでいると考えられる。未反応のセメントの水和反応の経時変化については、同じような時系列で進むと考えられる。

品質管理の徹底のためには、センサの導入により、製造段階から施工後まで、長期間にわたる追跡が重要であると考えられる。

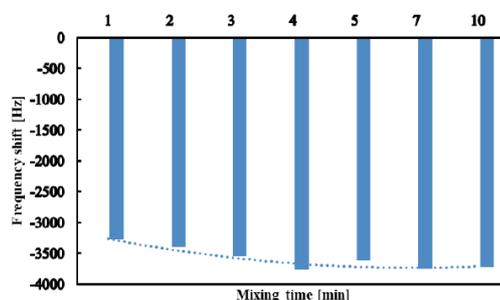


図 5 練り混ぜ時間と周波数応答

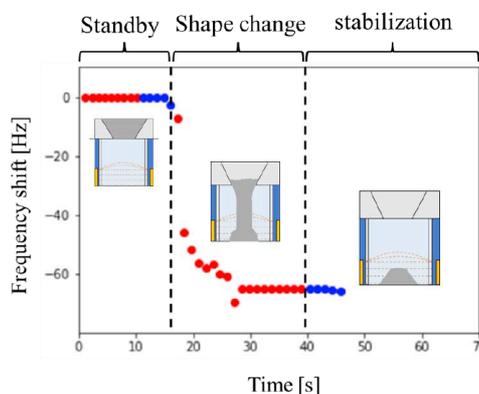


図 6 流動性評価試験の例

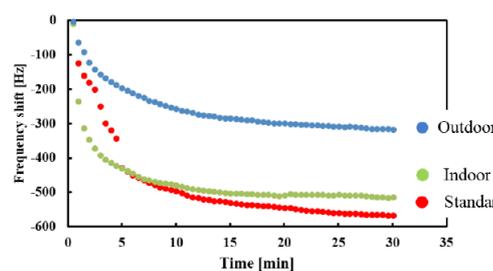


図 7 保管条件の違いによる水和反応初期の周波数応答の違い

## 4.2 凝結・硬化プロセスの評価

本センサの原理は、複素容量を検出するものであり、検出対象の化学反応に適した周波数の選定が重要である。複素誘電率は周波数依存性があり、第1項の静的誘電率だけでなく、周波数に依存する導電率や分極に関わる第2項以上の項も重要である。この点において、一般の容量型センサとは異なる特徴を有する。

実際に、凝結・硬化プロセスを測定すると、図8に示すように特徴的な周波数依存性が見られる<sup>6)</sup>。16 MHzでは、水和や乾燥に関わる誘電的变化、2 MHzではイオンの溶出に関わる導電性変化が見られ、LCRメーターによる計測結果とほぼ一致している。本研究では、複素容量の特徴が明確に見られる16 MHzを測定周波数として選定した。

凝結・硬化プロセスでは、反応プロセスに対応した反応熱が発生する。内部の温度を熱電対などを挿入して計測すれば、反応の進展状況の評価が可能である。本センサは原理的に、イオンの溶出、水和の進行が測れるため、反応熱と対応した周波数変化が得られると予測される。

図9に測定結果の比較を示す。定性的な変化は一致しているように見えるが、ピークの位置のずれが見られる。

反応が先に進行し、発熱の結果が、試料全体に伝熱するまでに時間差があるためと考えられる。反応熱で測定する評価と比較し、早い段階で判断ができる(図の場合は1時間程度)、非破壊で評価できるなど、総合的に、本手法が優れている。

本研究では、セメントの材種の違い、水分量、骨材の分量の違いなど、多項目の因子を変えた実験を実施したが、紙面の都合もあり、材種の違いによる結果について報告する。

図9は普通ポルトランドセメント、中庸熱ポルトランドセメントおよびフラッシュセメントを用いた凝結・硬化プロセスの結果を示す。最小値のピークの位置が反応速度を示す目安となる。

中庸熱ポルトランドセメントおよびフラッシュセメントは普通ポルトランドセメントよりも1時間ほど遅延することが知られているが、それに対応した結果となっている。

現在は、JIS A 1147で規定された貫入抵抗試験をすることで凝結の進行を数値化するが、本センサを導入すると、破壊試験に要する8から10時間を不要とし、その場で非破壊で判定することができる。

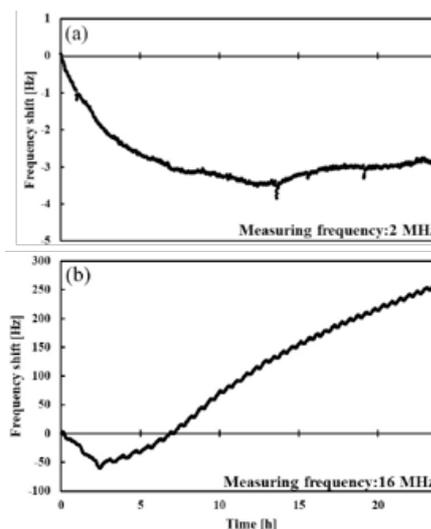


図8 凝結・硬化プロセスの測定例 (a) 2 MHz (b) 16 MHz

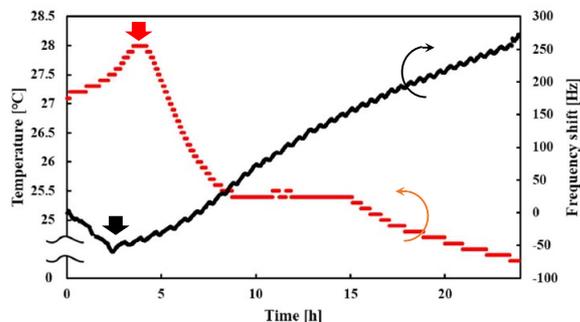


図9 凝結・硬化プロセスにおける反応熱と周波数変化の関係

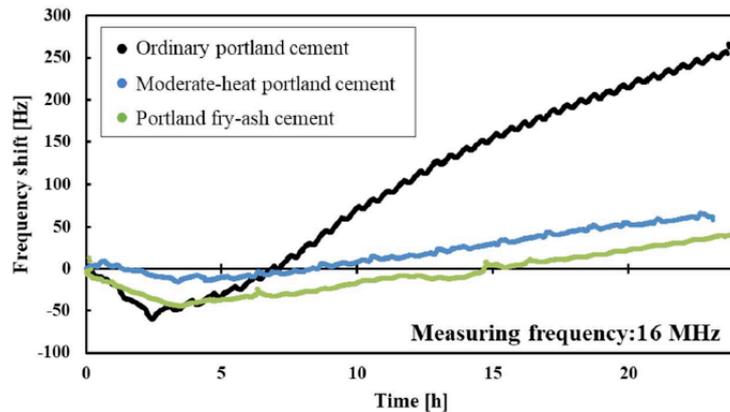


図 10 本センサを用いたセメントの材種の違いによる反応速度の違いの測定結果

凝結・硬化プロセスは、イオンの溶出、水和反応の進展によるものであるため、水和反応の促進のための水分補給の状況の影響を強く受ける。そこで、実際に養生の条件を変えたものについて緻密性を評価した。

図 11 に養生法の異なるモルタルの保水性の違いを示す<sup>7)</sup>。養生なしの場合は、周波数の単調増加が観察された。これは乾燥によるものである。一方、湿度を維持したものと水中養生したものは緩やかに変化した。構造体の緻密性の違いによるものと考えられる。湿度維持の場合は表面付近の水和が不完全で多孔質となり、水中養生は、内部まで緻密性が高く、乾燥による変化が見られないことを示している。

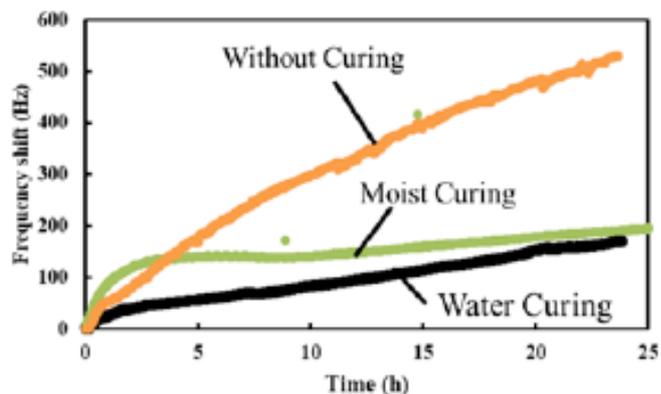


図 11 養生法の違いによる保水性の違い<sup>6)</sup>

### 4.3 劣化の評価

コンクリート構造物の劣化は、外観によりグレードが定義されている<sup>2)</sup>。グレードⅠ、Ⅱまでは内部で多孔質化が進行しているが、外観では可視化できない劣化の段階である。外観による劣化判定が可能な段階（グレードⅢ以上）では、後戻りが不可能な段階まで劣化が進む可能性があり、保全を実施するにしてもすぐに作業に取り掛かれるとは限らない。すなわち、保全計画の助けとなる予測に資するセンサが必要である。

そこで、まず、多孔質化の状況（多孔質度）が異なる試料を調整し、散水のより、その多孔質状態の違いが見れるかを評価した。前述のように、散水により、空隙部に注水されることにより、誘電率は約 80 倍になり、大きな応答を得ることができる。

骨材サイズを変えた空隙の違いがある試料、混和剤で緻密にした試料を用意し、多孔質状態の違いがセンサ応答の違いとなるかを試験した。

図 12 にその結果を示す。空隙がある試料は、蒸発速度が早いため、誘電率の低下による周波数増加が見られた。一方、大きな骨材がない試料や混和剤投入で緻密な試料では周波数増加は緩やかであり、多孔質度が低いことがわかる<sup>7)</sup>。興味深い点は、時間依存性である点であり、早い段階での応答から表面付近の多孔質度の判断ができ、変化率を測定することで、深さ方向の状況も予測できる。

凍結融解サイクルを繰り返したモデル試料<sup>8)</sup>、屋外で長期間暴露した試料においても、多孔質化進展による周波数増加が見られており、本手法は有効である。

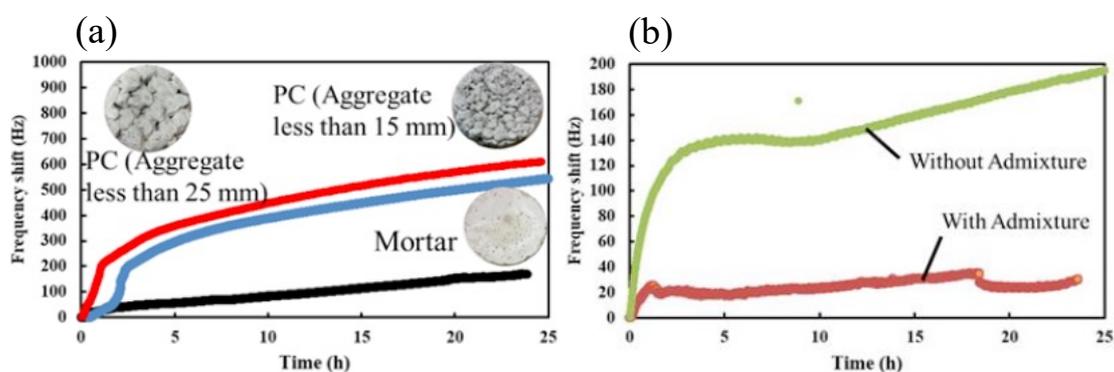


図 12 散水による多孔質部の応答を利用した緻密性の評価  
(a) 骨材サイズ依存性 (b) 混和剤の投入の有無による違い

## 5. まとめ

フレッシュコンクリートの製造から、凝結・硬化プロセス、さらには、劣化状態の判定まで、同一センサ・非破壊での測定の可能性を調査した。その結果、本センサの有効性と、製造段階から施工後に至るまでの一貫した品質管理を継続する必要性が見えてきた。

コンクリートは物であるが、人のように健康診断や治療に資する予防・保全のための仕組みが長寿命化のために重要であることがわかった。また、自動化、効率化追求の観点からは、センシングによる予測に基づいた保全計画の重要性も研究から見えており、組織的な研究ができれば大きく発展すると期待される。

## 謝辞

本研究の一部は、公益財団法人天野工業技術研究所の研究助成により実施された。また、本研究の実施にあたり、本学工学部の佐伯教授、新潟太平洋セメント様および住商セメント様から貴重なご助言と研究のお力添えをいただいた。この紙面をお借りして御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 経済産業省 「世界的なインフラの拡大」  
([https://www.meti.go.jp/report/tsuhaku2016/pdf/2016\\_01-03-03.pdf](https://www.meti.go.jp/report/tsuhaku2016/pdf/2016_01-03-03.pdf))
- 2) 日本土木学会 2013年制定 コンクリート標準示方書「維持管理編」
- 3) T.Susa, T.Watanabe, M. Sohgawa, T.Abe, "Contactless Liquid Sensing Technique Using a Quartz Oscillator", SENSORS AND MATERIALS, 28, 289-294(2016)
- 4) 横山 猛輝, 高橋 良輔, 岩本 啓吾, 寒川 雅之, 安部 隆, "水晶発振回路式複素容量センサによるRC構造体内部の非破壊センシング", IEEJ Transactions on Sensors and Micromachines, 144, 396-401 (2024)
- 5) 大門正機:「JME 材料科学 セメントの科学」内田老鶴圃, (1989)
- 6) 三浦太一, 岩本啓吾, 寒川雅之, 安部 隆, "水晶複素容量センサを用いたセメント水和反応と硬化プロセスの非破壊測定", 令和6年度電気学会E部門総合研究会 2024年7月
- 7) 切無沢 真大, 岩本 啓吾, 横山 猛輝, 寒川 雅之, 安部 隆, "水晶複素容量センサを用いたコンクリートの保水性・透水性測定技術の開発", 第41回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム 2024年11月
- 8) 岩本 啓吾, 王 鶴鳴, 寒川 雅之, 安部 隆, "水晶発振回路式複素容量センサによるセメント系材料の非破壊モニタリング技術の開発", 第39回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム 2022年11月