

# 含水状態や載荷条件がモルタルの圧電効果に及ぼす影響

Effect of Water Content and Loading Conditions on Piezoelectric Properties of Mortar

出口侑弥<sup>1</sup>・金侖美<sup>2</sup>・福山智子<sup>3</sup>

Yuya Deguchi, Yunmi Kim and Tomoko Fukuyama

<sup>1</sup>立命館大学 理工学部建築都市デザイン学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Undergraduate Student, Department of Architecture and Urban Design, Ritsumeikan University

<sup>2</sup>立命館大学助教 総合科学技術研究機構 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Assistant Professor, Research Organization of Science and Technology, Ritsumeikan University

<sup>3</sup>立命館大学准教授 理工学部建築都市デザイン学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Associate Professor, Department of Architecture and Urban Design, Ritsumeikan University

In recent years, piezoelectric materials have been attracting attention for diagnosing structures. However, conventional piezoelectric sensors are expensive and have durability limitations. Therefore, the authors consider concrete itself as piezoelectric sensor and examine the possibility of performing maintenance without damaging historic buildings. This paper aims to figure out how water content and loading speed affect piezoelectric characteristics of mortar. The results reveal that water content and loading speed play important roles in charge transfer and piezoelectric electricity generation.

**Keywords:** Piezoelectric effect, Electric double layer, Streaming current, Wavelet

## 1. はじめに

日本に鉄筋コンクリート造（以下、RC造）の建築物が登場してから、すでに100年以上が経過した。RC造の建築物の中にも日本工業倶楽部会館（1920年竣工）のような法に基づく文化財として扱われるものもあり、年々その数が増加しつつある。これらの文化財について、従来の点検方法ではコンクリート内部の損傷状況を非破壊で診断することは難しく、文化財としてのオーセンティシティ（Authenticity）を担保した効率的な維持管理には課題が多い。

近年、構造物の健全性診断のために圧電材料が注目されている。圧電材料とは機械エネルギーを電気エネルギーに、またはその逆に変換することのできるいわゆる圧電効果を持つ強誘電体の材料のことである。従来の圧電センサは高価で耐久性に限界があり、構造物自体の機械的特性の劣化を引き起こす可能性を持つ<sup>1)</sup>。そこで、著者らはコンクリート構造物自体を圧電センサとして用いることによって非破壊で構造物の劣化診断を行い、歴史的建造物の歴史的・文化的価値を損なうことなく維持管理を行うことを目的として検討を開始した。

現状ではセメント系材料の変形量と圧電起電力との相関については定量的な知見が少ないことから、本研究ではセメント系材料を圧電センサとして用いるために、まずは健全なモルタルの圧電効果について検討する。本報では、含水状態や載荷時の速度パターンが圧電特性にもたらす影響を把握することが目的である。これは、測定時のコンクリート構造物の含水状態は環境条件に依存するためであり、また載荷速度を変化させることにより発生する電位変動の時系列データから、構造物を構成するセメント硬化体や骨材、水などの変位応答に関する時間スケールを把握し、最終的には材料の機械的性質を推定することを期待している。こ

これらの影響を明らかにすることによって、圧電効果による非破壊の維持管理や補修ができるようになり、歴史的建造物の保存に役立つことになると考える。

## 2. 含水状態がモルタルの圧電効果に及ぼす影響

### (1) ストリーミング電流について

圧電効果は、結晶構造を持つ材料において、荷重に伴う結晶構造変化により極性が偏り電圧を生じる現象である。この原理により、電流電圧を計測することでひずみ変化の応答測定が可能であるため、様々な分野で注目されている<sup>2,3)</sup>。

ここで、セメント系硬化体においては、空隙壁面は負に帯電しており、その表面には水分中の正イオンの一部が引き寄せられて吸着し（固定層）、残りの正イオンは液体中に拡散している（拡散層）。これらをまとめて電気二重層という。セメント硬化体に荷重すると、空隙中の水が移動するとともに、拡散層の正イオンが移動する。このイオンの移動により発生する電流をストリーミング電流とよぶ<sup>4)</sup>。このストリーミング電流の大きさ、つまり硬化体の含水状態がセメント系材料の圧電効果に影響すると考えられる<sup>5)</sup>ことから、本報では含水状態をパラメータとした検討を行う。

### (2) 実験概要

表1にモルタル試験体の調合を示す。試験体寸法はΦ5×10[cm]とし、空隙量を変えるために、水セメント比(W/C)を50%、60%とした。打ち込み後1日で脱型し7日間水中養生を行った。試験体表面を研磨後、90日間20℃・80%の養生室で気中養生をした後、表2に示す環境下で2日間気中養生を行うことで、異なる含水率の試験体を作成し、式(1)に基づき試験体の質量含水率を算出した。

$$\text{式(1) 質量含水率} = (\text{測定時の質量} - \text{絶乾状態の質量}) / \text{測定時の質量} \times 100$$

図1に示すように試験体にパイ型変位計を貼付し、導線を銅テープで貼り付けた銅板で試験体を挟み、さらに絶縁板で挟んで荷重による変位と電位・電流変動の測定を周期1秒で行った。図2に示すように、荷重時の試験体の変位は0.1[mm]から0.3[mm]、荷重速度0.5[mm/min]で繰り返し荷重とした。

表1 試験体調合

W/C[%]	S/C[%]	単位質量 [kg/m <sup>3</sup> ]			ヤング係数 [kN/mm <sup>2</sup> ]
		W	C	S	
50	210	336	672	1188	23.8
60	240	359	600	1188	20.7

W: 単位水量, C: セメント(密度: 3.14[g/cm<sup>3</sup>]),  
S: 細骨材(表乾密度: 2.64[g/cm<sup>3</sup>])

表2 実験計画

試験体の養生条件		測定項目
含水状態調整方法	含水率	
30℃ R. H. 85%	6.5%	圧縮強度 変位 電流、電圧
20℃ R. H. 60%	8.7%	
20℃ R. H. 80%	9.6%	

R.H.は相対湿度(Relative Humidity)を表す。

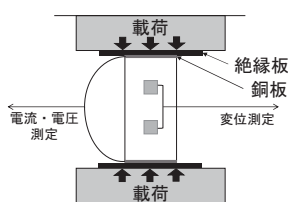


図1 測定概要

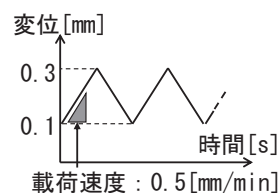


図2 荷重サイクル

### (3) 解析概要

図3は電流・電圧変動の測定データの一例を示したもので、W/C50%と60%を比較する際の視認性向上のために電流の範囲は3から-3としている。荷重により周期性を示しているが、セメント系材料の圧電効果には様々なパラメータが関係するため取得したデータも不規則な波形や周波数の異なる波形が組み合わさっていると考えられる。よって、本研究では離散ウェーブレット変換を用いて、時系列波形を分解する。

入力した信号はDetail coefficient（詳細係数、高周波成分）とApproximation coefficient（近似係数、低周波成分）に分解される<sup>6)</sup>。本研究ではドビュッシーウェーブレットを用いて波形を高周波成分D1~D4、低周波成分A1~A4に分解し（数字が大きいほど周波数は低い）、分解した波形の比較から定性的な解析を行う。また、入力する信号は、明確な周期性を示す2-9周期目のデータを用いる。

#### (4) 実験結果とその考察

##### a) 含水率の影響

W/C50%と60%の傾向が類似しており、本論文では紙面の関係上図4にW/C50%の詳細係数の例のみを示す。試験体の含水率の違いが圧電効果に及ぼす影響を検討した。周期性が無く変動の多い波形をノイズと見なすと、含水率が高いほど電流のD1~D4のノイズが減る傾向があり、電圧のD1~D4には周期的変動が表れた。これは、空隙内の自由水増加によりストリーミング電流が流れやすくなった結果、電流のノイズが減ったと考えられる。ストリーミング電流による電荷の移動に伴い測定系は分極し電位差が生じるが、含水率が高いほど細孔溶液中の電荷は多く分極量が大きい。また、電荷移動が容易であるため分極の解消が迅速に行われ、周期性が明確になったと考えられる。これに対し、含水率が低い場合は可動電荷量が相対的に少ないため分極量つまりは電位変動が小さくなり、また分極の解消に時間を要するため微小ノイズが重畳して周期性が不明確になったと考えられる。また含水率が高いほど、電圧変動に時間遅れが生じた場合があったが、セメントペーストは絶縁性多孔質マトリクスであることからコンデンサーのような機能を持つ<sup>7)</sup>ためと考えられる。

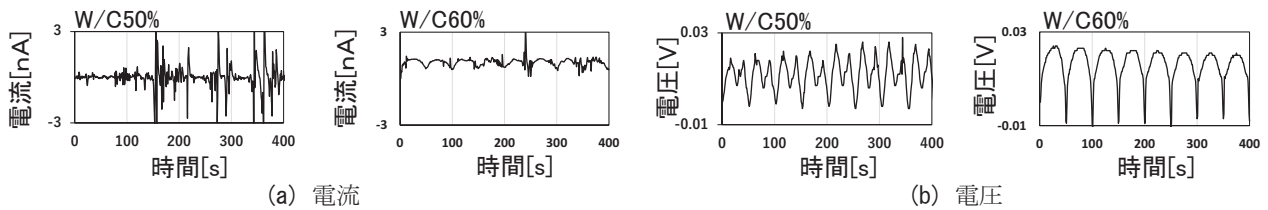


図3 荷重により生じた電流・電位変動の例

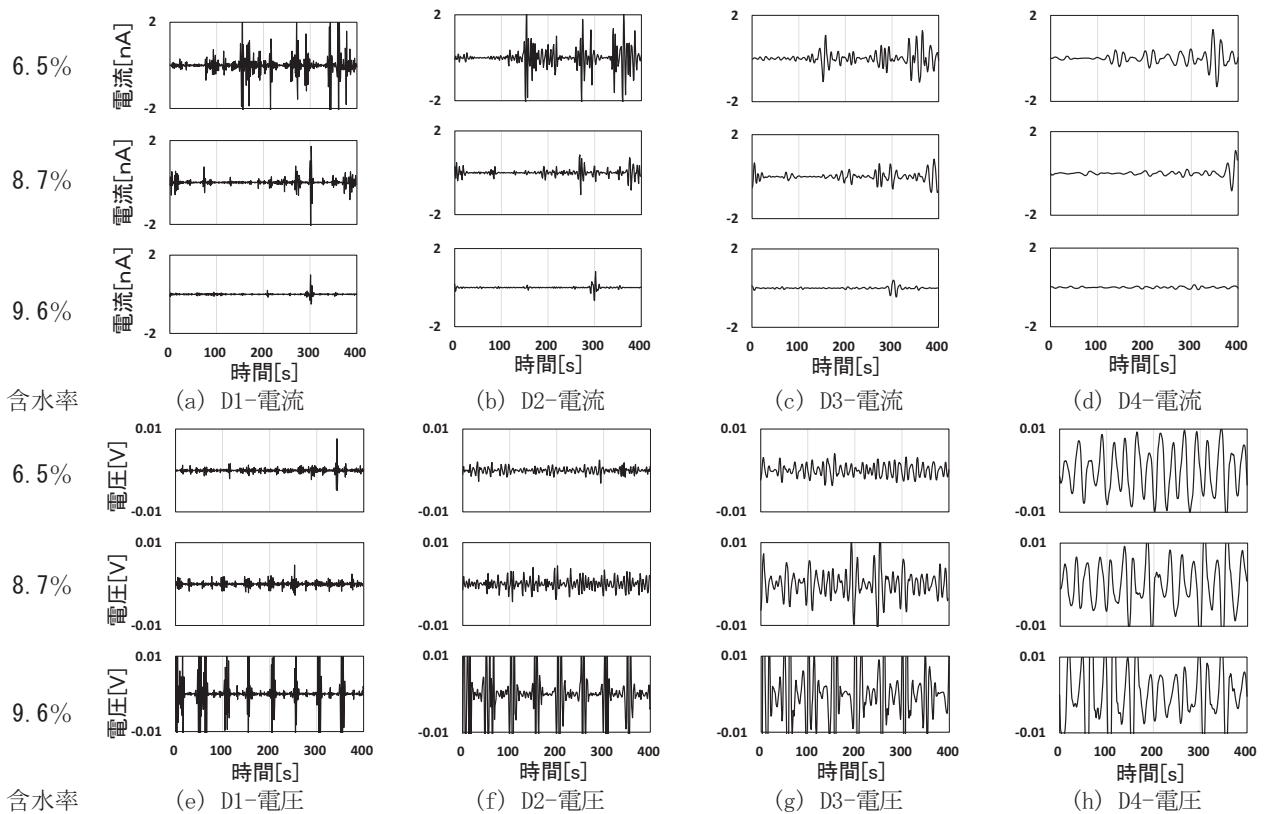


図4 詳細係数に含水率が及ぼす影響

##### b) 水セメント比の影響

図5は含水率6.5%の近似係数の例を示したものであり、W/Cの比較から、空隙量、ヤング係数が圧電効果に及ぼす影響を検討した。電流のA1~A4、電圧のA1~A4はW/C60%の方が不規則な波形の変動が小さく、波形の周期性が明確な傾向があった。これは、水セメント比が大きいと余剰水が多くなるために連続性のある空隙量が増加し<sup>8)</sup>、それに伴って水隙に存在する自由水の移動時の抵抗が小さくなったためより多くのストリーミング電流が生じ、それに伴う分極が容易になったためと考えられる。

また、ヤング係数が圧電効果に及ぼす影響について明確には確認できなかった。

なお、载荷に伴う電流電圧変動については上記のような傾向が得られたが、試験体ごとに最大電流量、最大電圧、グラフの波形にはばらつきがあり、傾向に当てはまらないものも存在した。その原因として、複合材料であるモルタルの内部構造のばらつき、油圧式の万能試験機による载荷変位のばらつきといった圧電機構以外の原因が考えられるが、本実験の検討の範囲ではその影響は明確ではない。

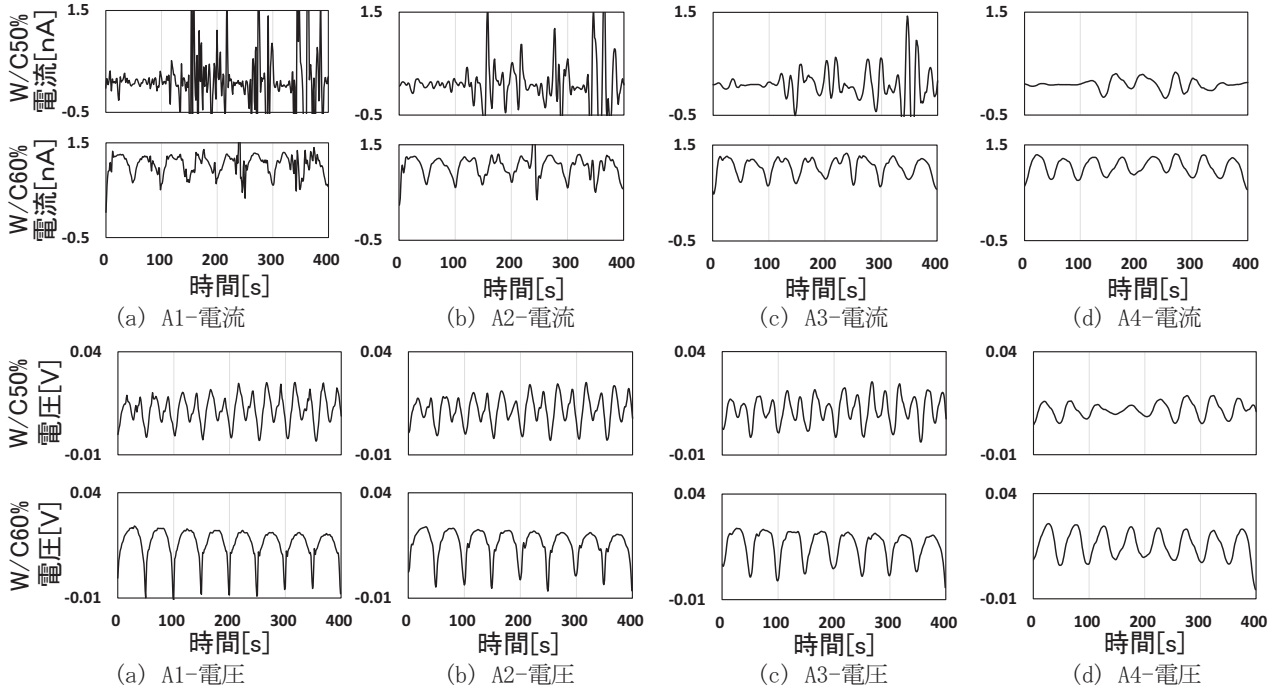


図5 近似係数に水セメント比が及ぼす影響

### 3. 载荷条件がモルタルの圧電効果に及ぼす影響

#### (1) 実験概要

実験計画を表3に、モルタルの調合を表4に示す。実験にはΦ100×200[mm]のモルタル試験体を用いた。W/Cを40%と50%とし、S/Cを2、2.4、3とした。乾燥試験体は材齢1日で脱型し、70℃の乾燥炉で41日間乾燥、飽水試験体は材齢1日で脱型し、試験体にパイゲージを設置する際に使用したエポキシの硬化を妨げないように試験体の半分を水に浸した状態で封緘して55日間養生した。

測定概要を図1と同じである。万能試験機と試験体の間に銅線を繋いだ銅板と絶縁版を挟んで一軸圧縮による繰返し载荷での電流・電圧変動および変位を測定した。载荷サイクルを図6に示す。圧電効果はひずみに比例して起電力を生じるが、この現象には図7のように微分特性があることから、外力の印加がある場合には起電力が発生し、外力の変化がない静荷重時には測定で得られる起電力は0になる<sup>9,10</sup>と考えられる。従って、材料構成のほか、载荷速度の違いによっても圧電起電力の差が生まれると考えられる。荷重維持と载荷速度による影響を測定するため、表3の制御方法のように速度1.0[mm/min]と0.5[mm/min]、荷重維持10秒と30秒を組み合わせるとし、最大変位を0.6[mm]、最低変位を0.1[mm]として3回繰返した。

表3 実験計画

検討項目	内容	
W/C-S/C	50-2、50-2.4、50-3	
含水条件	絶乾状態、飽水状態	
载荷条件	载荷変位	0.1-0.6 [mm]
	载荷サイクル	3回
	制御方法	①SPD1.0[mm/min]、HOLD30[秒]
	速度	②SPD1.0[mm/min]、HOLD10[秒]
荷重維持	③SPD0.5[mm/min]、HOLD10[秒]	
測定項目	一軸圧縮による電流電圧、変位量	

表4 モルタルの調合

試験体名	W/C[%]	S/C[%]	W[kg]	C[kg]	S[kg]
50-2	50	200	317	635	1269
50-2.4	50	240	287	574	1403
50-3	50	300	256	512	1535

※C：セメント（密度：3.14g/cm<sup>3</sup>）  
S：細骨材（表乾密度：2.62g/cm<sup>3</sup>）

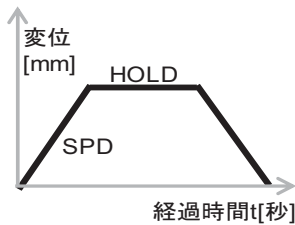


図6 荷重サイクル

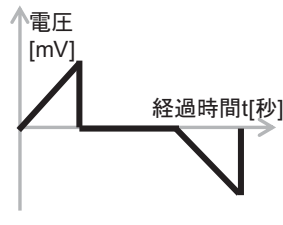


図7 圧電の微分特性

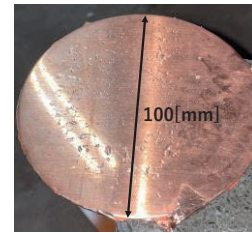


図8 銅板に付着した水分

## (2) 実験結果と考察

### a) 水分の影響

図8は試験終了時の銅板の様子、図9は50-2.4試験体の飽水、絶乾状態の電圧測定データである。電圧の絶対値を比較すると図9(a)の飽水状態では荷重サイクルが進むほど、またSPD1→SPD3の順に減少している。セメント系材料の圧電起電力は「各材料の圧縮に伴う起電力の合成」と「水移動に伴うイオン移動により発生する電流」の2つの要因が考えられる。本実験では、試験終了時に試験体から水分が滲み出て銅板に付着していた（図8）ことから、荷重により試験体内の水分（細孔溶液）が試験体外に移動したことを意味するといえる。また、本実験では同一の試験体を対象に連続して試験を行ったため、次第に水分が減少し起電力が低下したと考えられる。

これに対し、図9(b)のように絶乾状態ではデータの振動が大きい。これは水移動に伴うイオン移動が僅少であるため明確な分極状態を維持できなかったためと考える。乾燥状態での水分は非常に少ないため、起電力の大部分を各構成材料の圧電特性が担っているが、異なる形状をした構成材料間の応力伝達方向にばらつきがあるため様々な向きの電荷移動が生じたものと考えられる。また、図9(a)と(b)を比較すると初期電圧に大きな違いはあるが荷重に対する電圧変化量に大差はない。一方で、荷重の周期性に対する応答の現れ方に大きな違いがあるためこれらを明らかにすることが今後の課題と考える。

### b) 荷重条件の影響

図10は荷重による変位と電位変動の関係を示したものである。SPD1では、120、240、360秒近傍の電位にスパイクが生じていることからのみ周期性を認識できる。これに対し、SPD2と3では荷重に対して明確な周期性を示している。特に荷重速度1.0[mm/min.]のSPD2と0.5[mm/min.]のSPD3では、SPD2のほうが電位変動の立ち上がりが急であることから、荷重速度に対して相関がみられる。ただし、各電位波形は荷重に対する明確な応答以外の波形が重畳しており、その発現機構に関しては今後の検討が必要である。

圧電理論では静荷重時には微分特性により起電力が0になると考えられるが、図10(a)などから読み取れるように、静的荷重中（hold）いずれの試験体の電圧も徐々に低下し変動している。これは、試験体内の間隙が飽和状態でつながることにより、間隙水自体の移動が無い状態でもイオン移動が生じ起電力が生じたものと考えられる。つまり、静的荷重ではモルタル構成材料の圧電特性による新しい起電力は発生せず、一方で静荷重に切り替わっても水移動に伴うイオン移動は生じておりこのイオンの移動により電圧が0にならず起電力が徐々に下がったと考える。

## (3) ウェーブレット変換による起電力要因分解の検討

図11は、荷重サイクルに伴う明確な周期性がみられた飽水状態W/C50、S/C2.4試験体の荷重条件SPD3での測定データにドビッシューウェーブレットを用いてレベル5の離散ウェーブレット変換を行ったものである。変換による波形は各5つの低周波成分(Approximation)と高周波成分(Detail)に分解される。図11(b)は信号の主成分であり、図11(c)、(d)は詳細成分となる。図11(c)のD1は測定データから雑音を抽出したものであり、D1からD5に向かうほどより低解像度の雑音を抽出できる。分解周波数帯はA1が0~0.25[Hz]、D1が0.25~1[Hz]、D5が0.015625~0.03125[Hz]である<sup>11)</sup>。

図11(b)は図11(c)の高周波成分(D1)を元の測定データから除去したものである。D1の振幅は最大でも0.3[mV]程度であるので図11(a)と図11(b)では形状にほとんど違いがみられない。図11(c)は周期性を有しており、この特徴は2章図4における高含水率試験体に類似していることから、ストリーミング電流によるものだと考えられる。

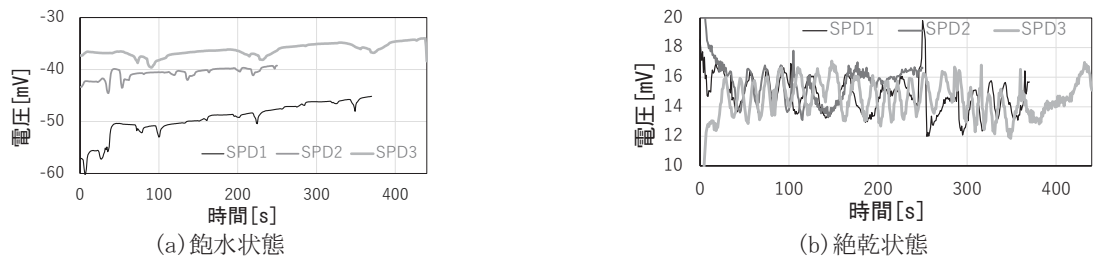


図9 含水状態および荷条件の影響 (W/C50、S/C2.4 試験体)

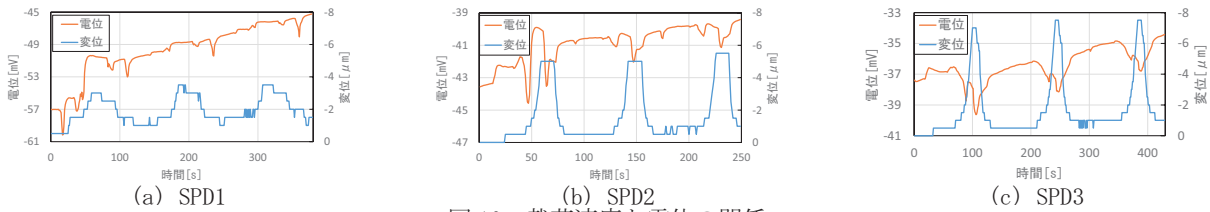


図10 荷速度と電位の関係

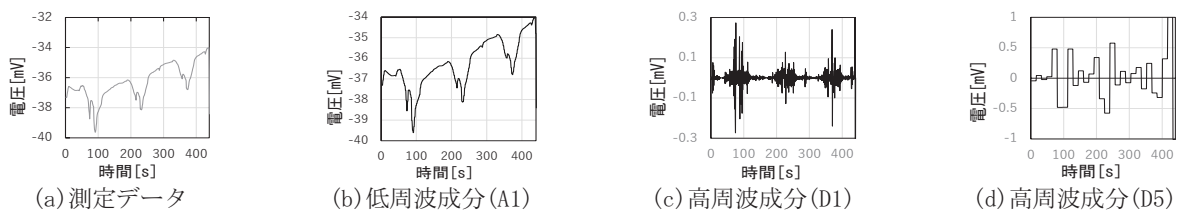


図11 周波数帯ごとの波形の分解 (飽水状態 W/C50、S/C2.4、SPD3)

#### 4. まとめ

本研究の検討により、以下の成果を得た。

- 1) 含水率が高くなると荷により発生した電流のノイズが減る傾向があり、電圧には周期的変動が表れた。しかし、水分の少ない乾燥状態での安定した測定は難しい。
- 2) W/Cが大きくなると空隙増加に伴い含水率が増大し電流と電圧両方の近似係数のノイズが小さくなる。
- 3) 同一条件の試験体間におけるばらつきの原因を明らかにするためには、空隙量の把握、正確な変位制御、電極の接続方法の再検討が必要である。
- 4) 荷速度と圧電起電力の間には相関があり、セメント系材料のような含水した複合体では静荷重時にも起電力を生じる。純粋な強誘電体に比べ、複合材料であるコンクリートは圧電特性の変動要因が多く存在するので、個々の材料が及ぼす圧電挙動に及ぼす影響が解明されれば実用の可能性が高まると考えられる。

**謝辞:** 本研究は、稲盛財団の助成を受けて実施されました。また実験の実施に際し、立命館大学の福井明子氏・田中勘太氏に協力をいただきました。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) M. Sun et al.: Piezoelectric effect of hardened cement paste, *Cement and Concrete Composites*, Vol.26, pp.717-720, 2004.
- 2) 森田剛: 圧電現象, 森北出版, 2017.
- 3) 塩寄忠: 圧電材料の基礎と最新応用, シーエムシー出版, 2008.
- 4) M. Sun et al.: Electrical emission in mortar under low compressive loading, *Cement and Concrete Research*, Vol.32, pp.47-50, 2002.
- 5) 松下哲郎他: セメント硬化体の応力荷による電気的性質の変化に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.447-448, 2004.
- 6) 一条博: MATLAB/SCILABによるウェーブレット信号解析入門, 秀和システム, 2012.
- 7) M. Sun et al.: A study of piezoelectric properties of carbon fiber reinforced concrete and plain cement paste during dynamic loading, *Cement and Concrete Research*, Vol.30, pp.1593-1595, 2000.
- 8) 松沢晃一他: 異なる温度養生の影響を受けたモルタルの細孔構造からの強度推定式の検討, *コンクリート工学年次論文集*, .33(1), 2011.
- 9) 高岡大造他: 圧電素子を用いた電子部品実装装置用力センサの開発, *精密工学会誌*, Vol.63, No.5, 1997.
- 10) 大嶋和彦・石黒稜人・尾形和哉: 圧電素子の正・逆圧電効果を利用した静荷重センサの開発, *日本 AEM 学会誌*, Vol27, No.4, 2019.
- 11) 菅間敦・瀬尾明彦: ウェーブレット変換による操作力波形平滑化, *人間工学誌*, Vol49, No.6, 2013.