

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04345

研究課題名（和文）カーボンナノチューブ混和コンクリートの圧電特性を利用した応力センシング技術

研究課題名（英文）Stress sensing technology utilizing the piezoelectric characteristics of carbon nanotube-mixed concrete

研究代表者

福山 智子（FUKUYAMA, Tomoko）

立命館大学・理工学部・准教授

研究者番号：60587947

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：現在、カーボンナノチューブ（CNT）を混和したセメント系材料（CNTCM）の活用が期待されている。本研究の目的は、CNTCMを圧電センサとして利用するために、セメントペーストの導電特性を最大化するCNT量の検討、圧電機構の把握である。実験結果から、CNT量が増えるとインピーダンスが低下し、パーコレーション閾値が存在することが確認された。また、CNT量が増えるほど乾燥収縮量が増加する結果も得られた。さらに、セメントペーストの圧電特性の検討では、圧縮ひずみの増減と電圧変動の間に相関が見られ、ひび割れ発生時の電圧波形から破砕帯電の寄与が示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、カーボンナノチューブ混和セメント系材料（CNTCM）への適用における圧電効果と導電特性のメカニズムを解明し、CNTの適切な混和量を特定することを目的としている。本研究の成果により、CNTCMの圧電センサとしての利用可能性を評価し、応力や力学的性能に関するセンサ性能の向上をはかることができる。また、建築および土木分野におけるCNTCMの実用化を大きく進展させる可能性があり、CNTを利用したコンクリートのひび割れ低減や強度増進、構造物の自己診断および交通モニタリングのセンサとしての利用が期待される。これにより、インフラの長寿命化、安全性の向上、維持管理コストの削減の可能性が考えられる。

研究成果の概要（英文）：Using cement-based materials mixed with carbon nanotubes (CNTCM) holds promise for maintainance of infrastructures. This study aims to employ CNTCM as a piezoelectric sensor, with objectives including (1) determining the optimal CNT amount to maximize the conductivity of cement paste, and (2) elucidating the piezoelectric mechanism. Our experimental results indicate that impedance decreases as CNT content increases, confirming the existence of a percolation threshold. Additionally, increased CNT content was associated with more significant drying shrinkage. Analysis of the piezoelectric properties indicated a correlation between compressive strain variations and voltage fluctuations. Notably, voltage spikes during crack formation suggest that fracture charge generation contributes to voltage waves.

研究分野：建築材料

キーワード：圧電効果 カーボンナノチューブ ひび割れ 乾燥収縮 インピーダンス パーコレーション閾値

## 様式 C-19、F-19-1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

カーボンナノチューブ (以下、CNT) は優れた強度や導電性、耐熱性などを有するため様々な分野への利用が期待されており、セメント系分野においては、CNT によるコンクリートのひび割れ低減や強度増進のほか構造物の自己診断や交通モニタリングのセンサとしての活用が試みられている。

しかし、複数の既往研究を参考に申請者が作製した CNT を混和したセメント系材料 (以下、CNTCM) 10 調合では、ブリーディングや凝結遅延、流動性低下が生じる事例が見られた。このことから、CNTCM に関する研究では、CNTCM の実用的な調合設計やフレッシュ性状よりも CNT による機能改善が優先されている場合があると推察される。

また、CNTCM のセンサ利用に関する研究は圧電効果に関する事例が多いが、CNTCM の圧電性能については、実験による現象の記述に留まりメカニズムに関する言及が少ない。センサとしての性能向上を考えた場合には、圧電メカニズムの解明が必須である。

圧電効果は、物質に機械的な力を加えた際に、結晶構造の非対称性に起因して応力に比例する起電力が生じる現象である。セメント系材料についても既往研究で圧電性について確認されており、申請者も含水状態が異なるコンクリートに載荷し、電流・電位応答を観測している。また、既往研究から、含水率の高いセメントペーストでは、帯電した細孔/溶液中イオンの界面に生じる電気二重層の拡散層にストリーミング電流が発生・分極して、応力に比例する電場が形成され電位差が生じる (=圧電効果) とされている。

CNTCM の含水状態は環境温度・湿度などによって変動するため、CNTCM の圧電センサ利用を想定した場合、細孔溶液のストリーミング電流ではなく CNT による分極が卓越すれば、安定した応力センシングを期待できると考えた。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、構造物が受ける応力や力学的性能を測定する圧電センサとしての CNTCM 利用を念頭においた、①セメントペーストの導電特性を最大化する CNT 混和量に関する検討、②セメントペーストの圧電メカニズムの把握である。なお、CNTCM のフレッシュ性状に関する検討は非掲載とする。

### 3. 研究の方法

CNT 混和セメントペースト (以下、CNTCP) の導電特性として、インピーダンス測定を行った。その際に、調湿した環境下 (11~98%で 11 水準) にて硬化 CNTCP の乾燥収縮特性についても測定した。

セメントペーストの圧電特性については、石材を埋設したセメントペースト試験体を対象に繰返し載荷と電圧変動の測定を行った。また、同時に画像相関法によるひずみ分布も時系列データとして取得した。

### 4. 研究成果

材齢 14 日目のインピーダンスの測定結果 (図 1) から、CNT 混和量はインピーダンスに対して影響を及ぼすこと、CNT の混和量増加に伴いインピーダンスが低下していく様子が確認できる。

位相差 (図 2) については、CNT 混和量が多いほど 0 に近づき抵抗性挙動を示していることがわかる。また、インピーダンスの周波数に応じて CNT、粒内、粒界面、電極界面の順に挙動が反映されると考えられることから、高周波領域のインピーダンスは CNT 挙動を反映していると考えられる。

以上を考慮してインピーダンスを検討すると、図 1 (b) の 2.15Hz のグラフでは、CNT30 から CNT60 にかけてインピーダンスが大きく低下し、図 2 (b) でも位相角も大きく変化していることが確認できる。従って、その間の CNT 混和量にパーコレーション閾値があると推測される。また、図 1 (b) で 2150Hz 時での CNT60 と CNT120 のインピーダンスに差が見られないが、これは CNT60 では CNT が十分に分散できたことで CNTCP の導電性が向上したのに対し、CNT120 では CNT 凝集の可能性があると推測できる。

乾燥収縮特性 (図は非掲載) については、CNT 混和量が増えるほど収縮量も増加し、質量減少率も大きくなった。これについては、CNT 凝集体が疑似空隙を形成したためと考えられるが、追加の検証が必要である。

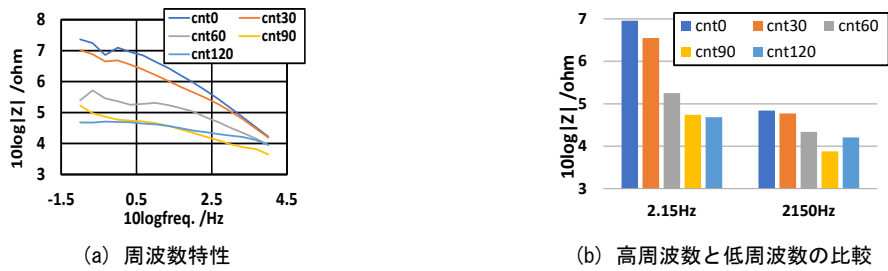


図1 インピーダンスへのCNT量の影響（材齢14日）

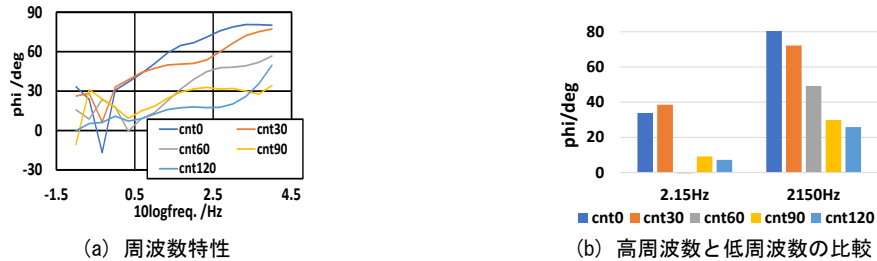


図2 位相差へのCNT量の影響（材齢14日）

セメントペーストの载荷に伴う電圧変動(ここでは、圧電効果として扱う)に関する検討では、圧縮ひずみの増減と電圧変動との間に相関がみられた(図3)。電圧変動はひずみ波形と完全には一致しない。この要因(圧電メカニズム)について2つの仮説が得られた。

1つはセメントペーストの表面にひび割れや剥離が生じた際にスパイク状の電圧波形が得られることから(図は非掲載)、破碎帯電が圧電特性に寄与していること、2つ目はひずみ波形と電圧波形は一致しないにもかかわらず電圧波形上の微小な変動に周期性がみられることから、破壊界面での摩擦による帯電が圧電特性に寄与していることである。

DICの画像を含めた検討の結果、今回の実験手法の範囲では、電圧波形からひび割れ発生時点の指摘は可能であったが、ひび割れの進展については把握が困難であった。

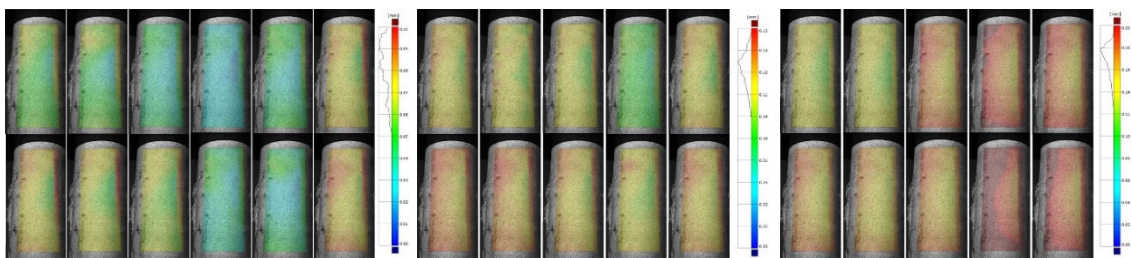
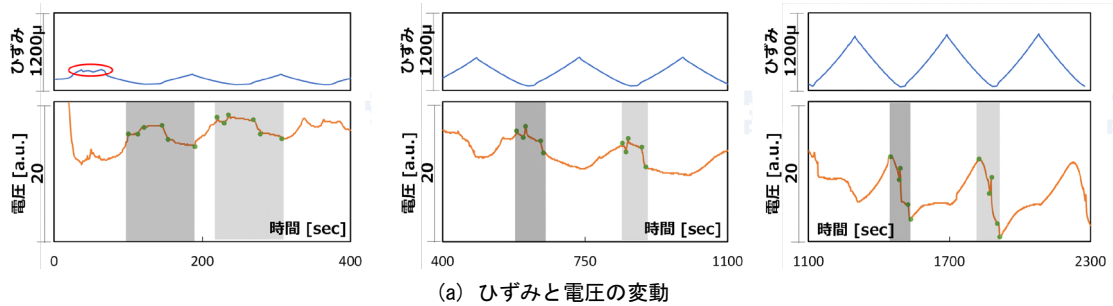


図3 载荷に伴う各種指標の時系列変化(石材四角, 左:サイクル1, 中:サイクル2, 右:サイクル3)

参考文献

- [1]平山達也, 福山智子: カーボンナノチューブ混和セメントペーストに関するパーコレーション閾値の決定, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 投稿済み, 2024
- [2]SHAO Yang, 福山智子: セメントペーストのひび割れが電圧変動に及ぼす影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 投稿済み, 2024

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 6件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 福山 智子, 金 侖美, 生野 孝	4. 巻 76
2. 論文標題 導電性の異なるセメントペースト複合体における繰返し載荷に対する発電応答	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 セメント・コンクリート論文集	6. 最初と最後の頁 220-228
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14250/cement.76.220	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 福山 智子, 金 侖美, 生野 孝	4. 巻 76
2. 論文標題 セメント系材料の載荷に伴う発電現象に対する遷移帯の影響	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 セメント・コンクリート論文集	6. 最初と最後の頁 229-237
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14250/cement.76.229	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 金侖美, 福山智子	4. 巻 44
2. 論文標題 導電性セメント硬化体の一軸繰返し載荷によるひずみ変化と電気的応答特性	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本コンクリート工学会年次論文集	6. 最初と最後の頁 1306-1311
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 福山 智子, 金 侖美, 山田 悠二, 田中 章夫	4. 巻 895
2. 論文標題 カーボンナノチューブを混和したセメント系材料の建設材料としての適用可能性	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 セメント・コンクリート	6. 最初と最後の頁 2-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ma Jiachen, 福山智子, 金侖美	4. 巻 15
2. 論文標題 炭素繊維を混和したセメントペーストの圧電特性に関する基礎的検討	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 歴史都市防災論文集	6. 最初と最後の頁 45-50
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.34382/00014974	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 出口侑弥, 金侖美, 福山智子	4. 巻 15
2. 論文標題 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	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 歴史都市防災論文集	6. 最初と最後の頁 51-56
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.34382/00014975	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 福山智子, 金侖美, 山田悠二, 田中章夫	4. 巻 15
2. 論文標題 カーボンナノチューブのセメントペースト中への分散状況の定量評価に関する検討	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 歴史都市防災論文集	6. 最初と最後の頁 63-68
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.34382/00014977	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計5件(うち招待講演 0件/うち国際学会 0件)

1. 発表者名 金 侖美, 福山 智子
2. 発表標題 炭素繊維含有量および含水状態がセメントペーストの一軸繰返し試験による圧電挙動に及ぼす影響
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 MA Jiachen, 福山智子, KIM Yunmi
2. 発表標題 炭素繊維を混入したセメントペーストの圧電効果によるRC構造物セルフモニタリングの可能性に関する検討
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 出口侑弥, KIM Yunmi, 福山智子
2. 発表標題 含水状態がモルタルの圧電効果に及ぼす影響
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 平山達也, 福山智子
2. 発表標題 カーボンナノチューブ混和セメントペーストに関するパーコレーション閾値の決定
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 SHAO Yang, 福山智子
2. 発表標題 セメントペーストのひび割れが電圧変動に及ぼす影響
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------