

(ご記入日)令和 5 年 4 月 18 日

公益信託NEXCO関係会社高速道路防災対策等に関する支援基金  
受託者 三菱UFJ信託銀行株式会社 宛

## 研究概要書

研究課題: 橋梁の損傷検出と補強が同時に可能な高靱性圧電複合材料・デバイスの創製

研究代表者: 東北大学 大学院環境科学研究科 助教 栗田大樹

共同研究者: 東北大学 大学院環境科学研究科 教授 成田史生

株式会社 IHI エアロスペース

久保田勇希

### はじめに

Wang らは、環境発電材料を開発するために、炭素繊維強化プラスチック(CFRP)と圧電ポリマーをラミネートするコンセプトを提案した<sup>[1]</sup>。この圧電 CFRP 複合材料は、構造ヘルスマonitoring (SHM)における自己発電型センサとして使用することができる。圧電複合材料における CFRP の利用は進んでいるが、出力電圧が低い、抵抗が高いなど、まだ解決しなければならない問題が多く存在する。また、出力電圧の信号処理を改善する方法を検討することも重要である。高速フーリエ変換(FFT)やウェーブレット変換(WT)などの技術を活用することで、ノイズの干渉を最小限に抑え、情報抽出の精度を向上させることが試みられている<sup>[2]</sup>。

本研究では、センサの機械的強度を高め、電気伝導を実現するために、鉛フリーのニオブ酸カリウムナトリウム(KNN)ナノ粒子充填エポキシ樹脂(EP)板と CFRP を含む組み合わせを提案する。圧電積層梁理論を用いて、繰返し三点曲げ試験による電気機械特性を計算した。この試験では、構造物の動的応答変化に基づく構造物のプレクラックモニタリングと運動エネルギー生成を評価した。その結果、CFRP 電極を用いた KNN-EP 層は、プレクラックの進展や損傷挙動に敏感に反応しながら、出力性能を大きく向上させたことがわかった。本材料を橋梁に貼り付けることでクラックの進展や損傷挙動を遠隔で常時把握できることが期待される。

### 1. 実験方法

KNN-ナノ粒子充填エポキシ樹脂(KNN-EP)プレートは、以下の工程(図1)で作製した。(i) KNN ナノ粒子を充填したビスフェノール F(EP 樹脂)遊星ミキサーで 60 分間混合した。(ii) 次に硬化剤を加えて 10 分間混合した。(iii) 未硬化樹脂を 0.5mm の金型を使用してブレードコーティング法に基づいて均一に塗布した。(iv) その後、真空オーブンで 80°C、3 時間加熱して、樹脂を硬化させ、KNN-EP プレートを作製した。次に、高温高圧による脱分極を避けるため、CFRP 成形終了後にポーリング処理を行った。(i) 無極性の KNN-EP プレートと CFRP プリプレグを積層し、硬化させた。(ii) CFRP 電極を備えた KNN-EP プレートに分極処理を施した。

三点曲げ試験は、万能試験機を用いて実施した。また、この圧電複合体の出力信号を、電位計とデータロガーシステムを用いて、繰返し曲げの条件で求めた。

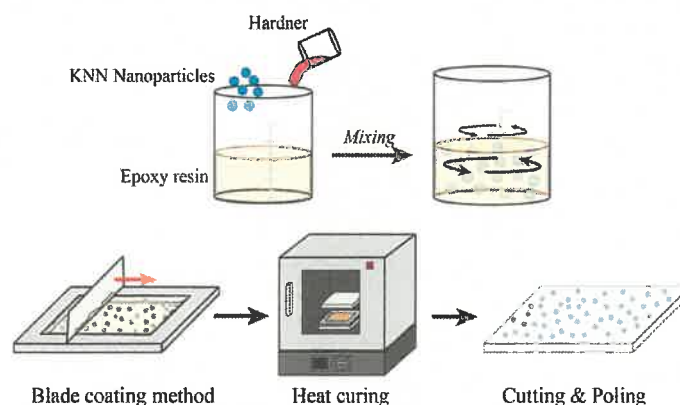


図1 - KNN ナノ粒子充填エポキシ樹脂プレート作製

## 2. 結果と考察

図 2a に単調曲げ試験の結果を示す。CFRP はコンクリート橋の補強に、下部に配置されることで使用される。そのため、橋に外的な変形力が加わると、3 点曲げと同じような状況になる。このような状況では、CFRP の内部剥離や界面接着など、破壊モード II が注目される。ここで、損傷挙動をクラックした圧電複合材料の曲げ応力で論じることは困難であるため、仮想クラック

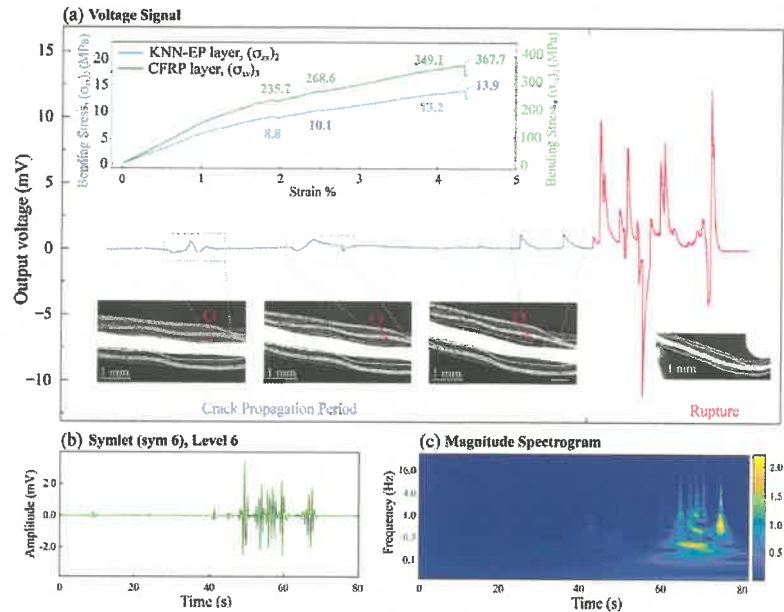


図 2 - 単調曲げ試験の結果

面に作用する曲げ応力と最大曲げ応力を用いた。電圧信号は、クラックがない状態で作用する最大曲げ応力が 235.7MPa に増加し、荷重速度 0.1mm/s で仮想クラック面の曲げ応力が 8.8MPa となると初めてセンサーにフィードバック(ピーク)が生じることを示す。き裂先端でき裂の進展が検出できた。電気信号のフィードバックもクラック成長と一致した。荷重点のたわみがさらに大きくなると、初期クラック先端付近の曲げ応力とせん断応力が臨界値を超える。この段階は、発生した電圧信号のピークに対応した(図 2b)。最後に、CFRP/KNN-EP に連続的に破壊が発生した際(図 2c)に複数の電圧信号ピークが検出された。注目すべきは、CFRP 層が CFRP/KNN-EP センサの適用力範囲を大きく改善したことである。さらに、KNN-EP 層が中立面にあるにもかかわらず、高感度なセンシング機能を維持することができた。

### まとめ、今研究で得られた成果、今後の課題等

KNN ナノ粒子充填 EP プレートを開発し、高度な CFRP 電極と組み合わせることで、機械的特性と圧電特性が向上した複合材料を得た。CFRP 電極は複合材料の最大曲げ応力を大幅に増加させた。き裂の進展とモード II 層間損傷の挙動は、ピーク値、周波数、分割ピークなどの出力電圧信号に対応しており、これらはき裂の進展を証明し、破断が迫っていることを示すものであることが示されました。全体として、本研究は、炭素繊維強化材と圧電ポリマーを組み合わせることで、優れた機械的特性と損傷検出のための高い検出感度を得るための新しい戦略を提案しました。本研究成果は、査読つき英語学術論文(Y. Yu et al., Carbon Fiber-Reinforced Piezoelectric Nanocomposites: Design, Fabrication and Evaluation for Damage Detection and Energy Harvesting, Composite Part A, in press)に掲載が決定した。

### 参考文献

- [1] Wang Z, Kurita H, Nagaoka H, Narita F. Potassium sodium niobate lead-free piezoelectric nanocomposite generators based on carbon-fiber-reinforced polymer electrodes for energy-harvesting structures. *Compos Sci Technol* 2020;199. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2020.108331>.
- [2] Chen B, Jia Y, Narita F, Wang C, Shi Y. Multifunctional cellular sandwich structures with optimised core topologies for improved mechanical properties and energy harvesting performance. *Compos B Eng* 2022;238.