

平成 30 年 6 月 22 日現在

機関番号：37112

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05702

研究課題名(和文) 誘電エラストマー基複合材料の構造設計による革新的アクチュエーターの開発

研究課題名(英文) Development of Innovative Actuator by Structural Design of Dielectric Elastomer Based Composite

研究代表者

朱 世杰 (Zhu, Shijie)

福岡工業大学・工学部・教授

研究者番号：60283032

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：誘電エラストマーアクチュエーターの粘弾性と応答性を改善するため、ナイロン繊維を利用して複合エラストマーシートを開発した。カーボングリス内のカーボンブラック含有率は40wt%の場合、変形量と絶縁耐力を両立できる。繊維などの強化材間隔を狭くすることで拘束力を増加することができ、変形方向の制御および最大変形量の増加を行うことが出来た。また、強化材太さを変えることで拘束力を増加させ、曲げ変形を制御できた。さらに、繊維の間隔や方向による影響を評価するため、異方性を考慮した非圧縮超弾性材料モデルを導入し、有限要素法により誘電エラストマーにおける電気・力学連成挙動の解析手法を構築した。

研究成果の概要(英文)：The effects of reinforcements, layered structures, pre-strain, compliant electrode on electro-mechanical behavior were investigated by both experiments and finite element analysis. The bending deformation can be controlled by the nylon fibers due to their constraining the deformation in fiber axial direction. Moreover, the fibers can increase creep and fatigue life of the dielectric elastomer actuator. It was found that the optimum amount of carbon black powders in the carbon grease is 40% for the electro-mechanical evaluation experiments. The prediction of bending deformation was made by a composite model and finite element method.

研究分野：機械材料

キーワード：誘電エラストマー材料 アクチュエーター 複合材料 電気-力学特性

1. 研究開始当初の背景 (1) 世界人口の増加, 化石エネルギー需要の伸び等, 地球温暖化の進行を増長させる要因が多い. これらの問題を解決するべく, 駆動装置の小型化や省エネルギー化が求められている. また少子高齢化に伴い, 介護や動作補助に使用されるロボットの需要が拡大すると考えられ, それに使用するアクチュエータにおいては, 軽量・静音かつ筋肉に近い動きをするものが理想とされている. これらの要求を満たすアクチュエータ材料として, 誘電性エラストマーが注目されている. 従来のアクチュエータ (電磁モータなど) と比べ, シンプルな構造で, 高速 (数 Hz 以上) で大変形 (380%以上) を発生させ, 静音性や人体に近い動きなど, 優れた特性を示す.

(2) この分野では, 米国の SRI インターナショナルの研究が電場応答高分子を用いた新しいタイプの人工筋肉を開発している. 誘電エラストマーと呼ぶタイプの高分子について, アクチュエータとして使える性能を達成した. 現状において, 誘電エラストマーの面方向への膨張により曲げ変形などの駆動はできているが, 変形方向の制御ができないことや時間依存する粘弾性と低弾性率という問題がある. 最近, ハーバード大学の研究グループは, 並列の繊維を使用することによって, 単一指向性電圧誘起の大きな変位を実現した. 本研究では, 誘電エラストマーアクチュエータ (DEA) の曲率を予測するために, 材料力学による予測モデルを作成し, 実験値との比較を行った. また, 長時間駆動における変形挙動を調べ, 粘弾性モデルによるクリープ予測を行った. さらに, DEA に使用する電極材料の比較実験を行い, 求められる特性を調査した.

2. 研究の目的 (1) アクリル系誘電エラストマーアクチュエータの粘弾性と応答性を改善するため, 高分子繊維および炭素繊維を利用して複合エラストマーシートを開発する. カーボンナノチューブ電極を用いてユニモルフアクチュエータを作製する. 繊維の間隔や方向などを変えて電界誘起曲げ変形の曲率と電界強度の関係を調査する.

(2) 非圧縮異方性超弾性体材料モデルを導入し, 電界誘起大変形に対する非線形解析手法を構築して, 解析結果と試験結果との比較により新しい誘電エラストマー材料の開発および革新的誘電エラストマーアクチュエータの性能向上を実現する.

3. 研究の方法 (1) アクリル系誘電エラストマーを用い, 高分子繊維および炭素繊維を利用して複合エラストマーシートを作製す

るため, 試験装置および計測システムを立ち上げる. 繊維の間隔や方向などを変えて電界誘起曲げ変形の曲率と電界強度の関係を調査した.

(2) 非圧縮異方性超弾性材料モデルを導入し, 誘電エラストマーにおける電気・力学連成挙動の解析手法を構築して解析結果と試験結果との比較により新しい誘電エラストマー材料の開発および誘電エラストマーアクチュエータの性能向上を実現した.

4. 研究成果 (1) 2層片持ち梁誘電エラストマーアクチュエータ (DEA) の変形層もしくは制御層を複合化することで, 変形量を向上させ, 変形方向を制御することが出来た. また強化材間隔により, 変形量の増加が見られ, 変形層の複合化は変形の制御に優れ, 制御層の複合化では変形がより大きくなった.

(2) 2層片持ち梁 DEA の変形層を多層化することで, 変形量は4倍, 発生力は3倍も向上させることが出来た (図1と図2). また応答速度については, 多層化に関わらず, すべての DEA に電圧の増加とほぼ同時 (0.4秒) に力の発生が見られた.

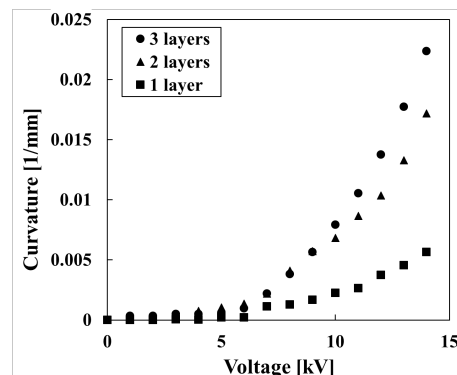


図1 変形の曲率に及ぼす多層化の影響

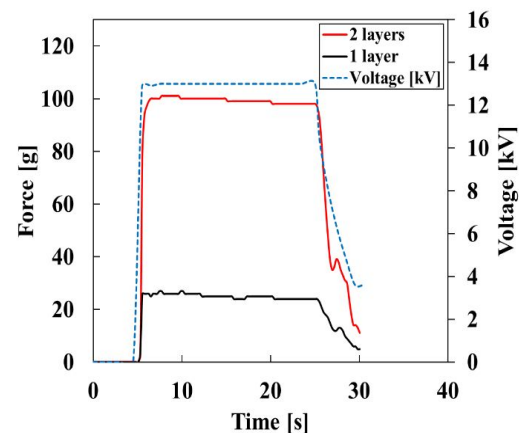


図2 多層型 DEA の発生力と電圧

(3) 初期ひずみを与えたエラストマーにより、ジャッキ型 DEA を開発した。また、変位および発生力、応答速度を測定した。変位に関しては、初期ひずみを与えた単層 DEA のみと比べ、初期ひずみ量の増加に伴う変位の増加は大きかった。また、発生力は初期ひずみ量の増加に伴い大きくなっており、応答速度も電圧の印加とともに発生力が検出されることから、良好であるといえる。このことから、構造による DEA の特性向上を達成することが出来た。

(4) 2 層片持ち梁 DEA において、強化材間隔を狭くすることで拘束力を増加することができ、変形方向の制御および最大変形量の増加を行うことが出来た。また、強化材太さを変えることで拘束力を増加させ、曲げ変形量を減少させる原因となる内側に巻く変形を制御できた。

(5) DEA に継続的な負荷を与えたときの電気-力学特性を測定し、評価した。DEA は時間の経過に伴い、変形量が増加しており、クリープ挙動を示した。実験結果から時間の増加に伴い、曲率が上昇していることがわかる。また、実験結果とシミュレーション結果は精度よく一致しており、クリープ粘弾塑性を表現できている。しかし、12kV 印加した際の破壊は 7~8 時間の間で起きている。これは変形に伴い、変形層厚さが薄くなり、電極間の静電引力がエラストマーの反発弾性力を上回ることで、電極同士がくっつく Pull-in 現象が発生し、ショートしたためだと考えられる。そのため、破壊が起こるまでの最小変形層厚さは曲率 0.06~0.065 の間であることが予測される。カーブフィッティングより得た各係数を式(8)に代入し、100 時間までのシミュレーションを行った。11kV 印加した際の破壊が起こる時間を、100 時間のシミュレーション結果から予測すると、65 時間前後で起こることが予測することが出来る。また強化材が太いほど、曲率の増加が大きく、スチレン棒 C においては加速クリープ段階のような挙動が見られることがわかった。

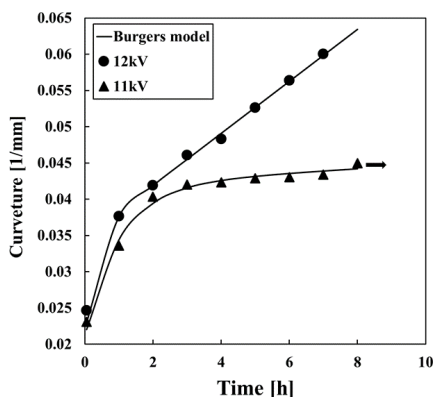


図3 クリープ変形と Burgers モデル予測

(6) DEA に繰り返し負荷を与えたときの電気-力学特性を測定し、評価した。DEA は繰り返し数の増加に伴い、変形量が増加した。また、DEA の変形は、破壊直前を除いてスチレン棒 B のほうが大きくなっている。このことから、高周波数帯における瞬間的な変形を得るためには、強化材の重量を考慮する必要があることがわかった。

(7) 複合化 DEA の曲率予測を行うために、数式モデルを開発した。このモデルでは、変形層を複合化した場合、4kV までならば精度よく予測することができ、制御層を複合化させた場合、8kV までは精度よく予測することが出来た。また、Burgers モデルを使用してクリープ粘弾塑性の解析を行い、複合化により弾性ひずみ・粘弾性ひずみ・粘塑性ひずみは増加することがわかった。

(8) 3 種類の電極材料(カーボングリス(CG), カーボンブラック(CB), 金箔(Au))を使用して、それぞれの比較を行った。図4より、カーボングリスのみの DEA が最も曲率が大きく、金箔のみの DEA は曲率が小さい。最も導電率が高い金箔の曲率が小さい原因として、膜状である金箔が DEA の変形を阻害していると考えた。柔軟電極に必要な、変形追従性はカーボンブラック>カーボングリス>金箔の順である。これは、カーボンブラックは粒子のみであるため変形を阻害せず、カーボングリスは柔軟な溶剤にカーボンブラックが混合されているため柔軟性が高いためである。また、カーボンブラックの曲率がカーボングリスより小さくなった原因として、カーボンブラックは DEA の変形により粒子間距離が拡大するため、導電パスが切れ、抵抗値が急激に増大し、ほとんど通電がなされない状態となることが考えられる。電極材料は柔軟性と、電極面積が拡大しても、電極となる充填剤が一定以上の比率を保てるものが最適だとわかった。

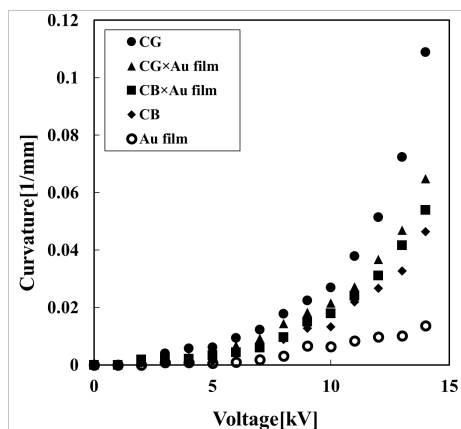


図4 3種類の電極材料の比較

## 5 . 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計3件)

M. Waki, S.A. Chiba, K. Ohyama, S. Zhu, et al., "Development of Wave Generation Module for Small Ships Using Dielectric Elastomer," Journal of Material Science and Engineering 査読有、B7 (7-8), 2017, 171-177.

S. Chiba, K. Hasegawa, M. Waki, K. Fujita, K. Ohyama, and S. Zhu, "Innovative Elastomer Transducer Driven by Karman Vortices in Water Flow", Journal of Material Science and Engineering 査読有、A7 (5-6), 2017: 121-135.

M. Waki, S.A. Chiba, Z. Song, S. Zhu and K. Ohyama, "Experimental Investigation on the Power Generation Performance of Dielectric Elastomer Wave Power Generator Mounted on a Square Type Floating Body", Journal of Material Science and Engineering 査読有、B7 (9-10), 2017, 179-186.

### 〔学会発表〕(計9件)

大西航助, 朱世杰: 繊維により補強された誘電性エラストマーアクチュエータの特性評価, 防食腐食学会, 第62回材料と環境討論会 E - 206 (2015)

大西航助, 朱世杰: 誘電性エラストマーアクチュエータの開発に関する研究, 一般社団法人日本機械学会 M&M2015 材料力学カンファレンス GS0704 - 206 (2015)

Kosuke Onishi, Shijie ZHU: Electro-mechanical Performance of Strengthened Elastomer Actuator, The 1<sup>st</sup> FIT - ME Symposium (2016) Excellent Poster Award

大西航助, 朱世杰: 複合型誘電性エラストマーアクチュエータの開発及び特性評価, 一般社団法人日本機械学会 M&M2016 材料力学カンファレンス GS - 32 (2016)

李偉, 朱世杰, "誘電性エラストマーによる発電に関する研究", 一般社団法人日本機械学会 M&M2016 材料力学カンファレンス GS - 37 (2016).

李偉, 朱世杰, "誘電性エラストマーの力学特性および粘弾性", 一般社団法人日本機械学会 M&M2017 材料力学カンファレンス GS0302 (2017).

呂龍舟, 朱世杰, "誘電性エラストマーアクチュエータの電気-力学挙動の有限要素法解析", 一般社団法人日本機械学会, M&M2017 材料力学カンファレンス, GS0307 (2017).

Longzhou LYU and Shijie ZHU, "The Electromechanical Behavior of Dielectric Elastomer Actuator Stiffened by Fiber", The 8th International Conference on Advanced Materials Research Jan. 20-22, 2018 Fukuoka, Japan

S.Chiba, M.Waki, K.Fujita, Z.Q. Song, K. Ohyama, S.Zhu, "Recent Progress on Soft Transducers for Sensor Networks", EcoDesign 2017 International Symposium-10<sup>th</sup> International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, November 29-December 1, 2017, Tainan City, Taiwan

## 6 . 研究組織

### (1) 研究代表者

朱世杰 (ZHU Shijie) 福岡工業大学・工学部・教授  
研究者番号: 60283032

### (2) 研究分担者

陳献 (CHEN Xian) 山口大学・工学部・教授  
研究者番号: 70313012