

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 7 月 9 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03141

研究課題名(和文) 超高圧縮応力を内包した金属基圧電複合材料の機能発現メカニズム解明

研究課題名(英文) Studies on the mechanisms of functional properties of the metal-based piezocomposites having extremely high compressive residual stress

研究代表者

浅沼 博 (ASANUMA, HIROSHI)

千葉大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：40167888

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,900,000円

研究成果の概要(和文)：金属コア圧電ファイバ/アルミニウム複合材料は、複合化時に生じる高い残留圧縮応力下でも圧電性を発現する他に類の無い圧電複合材料であるが、応力状態やこの応力下での機能発現に関して不明な点が多い。本課題では、その圧縮応力場の解析とその応力による機械的性向上効果の評価のため調査を行い下記の知見を得た。1) FEM解析による圧電ファイバに生じる圧縮残留応力は界面で約1 GPaとなり実験結果と一致した。このことから、圧電ファイバに生じる応力状態を予測することが可能となった。2) 圧縮応力は三軸応力であり、長手方向に卓越している。この残留応力により圧電セラミックスの破壊応力は約1.6倍まで向上する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

圧電セラミックスは非常に脆弱であり、また圧縮応力を加えると特性が低下するという性質を持っている。金属コア圧電ファイバ/アルミニウム複合材料において極めて高い圧縮応力が三軸応力状態で圧電ファイバに作用するが、このような応力状態においても機能が発現することが確認されている。この応力状態における圧電セラミックス機能発現のメカニズム解明において、本研究で得られた特異な応力状態を予測できる手法は学術的に非常に価値が高い。また工学的にも、圧縮応力により圧電セラミックスの破壊応力が約1.6倍に向上したことは、圧電セラミックスの使用範囲が大幅に拡大するという、極めて価値の高いものであると言える。

研究成果の概要(英文)：The metal-core piezoelectric fiber/aluminum composite is a unique piezoelectric composite that exhibits piezoelectricity even under the high compressive residual stress that occurs during embedding, however it is unknown about the stress state and the piezoelectric and mechanical characteristics under this stress. In this study, we conducted a survey to analyze the compressive stress field and evaluate the effect of improving the mechanical properties due to the stress, and obtained the following findings. 1) The compressive residual stress generated in the piezoelectric fiber by FEM analysis was about 1 GPa at the interface of the fiber, which was in agreement with the experimental results. From this result, it became possible to predict the stress state occurring in the piezoelectric fiber. 2) Compressive stress is triaxial stress, which is predominant in the longitudinal direction. This residual stress improves the fracture stress of piezoelectric ceramics up to about 1.6 times.

研究分野：知的材料・構造システム

キーワード：知的材料 スマート材料 圧電複合材料 金属基複合材料

様式 C-19, F-19-1, Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

圧電セラミックスは優れた機能により、センサ、アクチュエータ、エネルギーハーベスト材料として広く実用化しており、近年各国が研究を推進する IoT (Internet of Things) 技術においても、その高い機械-電気エネルギー変換効率からセンサおよび発電材料として依然注目を浴びる機能性材料である。この IoT 技術研究において、各国が開発プログラム、政策などを策定するなか、圧電セラミックスにはより高い機械的、圧電特性に加え、構造材料への融合が求められている。なかでも、圧電材料の耐久性向上への要請が高まり「高負荷環境下における圧電材料の特性評価方法に関する国際標準化」(日本ファインセラミックス協会、平成 26 年度)が実施される等、圧電材料の高負荷環境下挙動に注目が集まっている。しかしながら、圧電セラミックスはその脆弱さ、高負荷下での機能喪失等、特性面での致命的問題に加え、構造材料への適用も接着等、信頼性の低い手法に限られている。

申請者はこれらの欠点を克服できる画期的手法「界面層形成・接合法」を発明、本材料系に適用し、金属コア圧電ファイバ(白金コアチタン酸ジルコン酸鉛ファイバ、破断伸び 0.16%)を強度、信頼性に優れたアルミニウムへの複合化に成功し(Piezo-Al と略称)、本複合材料が材料構造や複合化プロセスに由来する独創性により、その圧電ファイバが GPa オーダーの極めて高い圧縮応力状態にあることを既に定量的に明らかにしており、圧縮応力による圧電ファイバ破断伸びの顕著な向上、約 20% という非常に高いひずみ領域においてもセンサ機能の保持、出力電圧の高い線形性と異方性等の知見を得ている。

このような状況下で、Piezo-Al のような金属基圧電複合材料に関する研究は皆無であり、僅か 0.5mm 程度の金属構造材料中に複合化された圧電セラミックスへの静水圧的な高圧縮応力負荷と、そこでの機能発現は従来の圧電セラミックスにおいては未知の領域である。

2. 研究の目的

上記のような高い圧縮応力下にある圧電セラミックスの圧電特性および機械的特性を明らかにしていくことで、未知領域での挙動を解明する。加えて、高圧縮応力環境下にある圧電セラミックスに高ひずみを印加した際の挙動を調査し、圧電複合材料の特性を支配する因子を明らかにし、従来成しえなかった超高性能を誇る圧電材料の開発の糸口を見出すことを目的とした。

3. 研究の方法

1) 圧電ファイバに生じる超高压縮応力状態の評価とその際の圧電定数の変化予測

アルミニウム中への複合化により圧電ファイバは極めて高い圧縮応力が付加されることが先行研究により明らかになっている。しかしながら、先行研究では圧電ファイバを除去し、その際のアルミニウムマトリックスの変形から圧縮応力を求めていたため、圧電ファイバ界面に生じる応力しか評価できず、圧電ファイバ内部の応力状態は不明であった。このため有限要素解析を用いて界面の応力がおおよそ一致すれば内部の応力状態も再現できるとし、有限要素解析を行った。併せて、圧縮応力が圧電定数に及ぼす影響を明らかとするため、まずペレット形状の圧電材料を作製し、材料物性値を圧縮応力下で計測することで圧縮応力が各種物性値に及ぼす影響を評価した。

2) 圧縮応力による圧電セラミックスの機械的特性向上

複合化された圧電ファイバは圧縮応力により破断強度が向上する可能性が示唆されている。この圧縮応力による機械的特性向上を評価するため複雑な構造を持つ Piezo-Al ではなく、単純構造を持つ圧電セラミックス/アルミニウム複合材料を作製し、3 点曲げ試験により圧電セラミックスの強度を確認し、ワイブル解析による統計的な処理を行った。また、3 点曲げ試験においては、複合化したセラミックスの破壊したタイミングを確定するために AE センサを用いた。得られたデータを圧電セラミックス単体のデータと比較し、複合化による機械的特性向上効果を評価した。

4. 研究成果

1) 圧電ファイバに生じる超高压縮応力状態の評価とその際の圧電定数の変化予測

有限要素解析の結果、界面では先行研究で得られた圧縮応力とほぼ同等の値を得ることができた。これにより有限要素解析による残留圧縮応力の分布の有効性が確認できた。加えて、ペレット形状の圧電セラミックスに圧縮応力を加え、その際の P-E ループおよびバタフライカーブを測定した結果、分極軸と並行に圧縮応力を加えることで、圧電材料の抗電界は低くなり、残留分極が低下した。これに対し、分極軸と垂直に圧縮応力を加えると抗電界は増加し、残留分極は低下するものの分極軸と並行に圧縮応力を加えた際と比較すると変化は低いものとなった。これは、分極軸と平行となる圧縮応力下では自発分極が分極方向に圧縮されるため、分極反転が容易になり抗電界が減少し、90°の強弾性ドメインスイッチングが起きるため残留分極が減少するものと考えられる。一方、分極軸と平行となる圧縮応力下では自発分極が分極方向に対し垂直方向に圧縮されるのでポアソン効果により分極方向に伸張する。よって分極反転が困難となり抗電界が増加するものと考えられる。これらのことより圧縮応力による圧電ファイバの性能低下につながる要因を明確とした。

2) 圧縮応力による圧電セラミックスの機械的特性向上

図1に3点曲げ試験結果のワイブルプロットを示す。同図より複合化により形状母数は4.3から6.1へ、尺度母数は102 MPaから178 MPaへそれぞれ向上しており、定量的に圧縮応力が機械的特性に及ぼす影響が確認できた。これは圧縮応力により圧電セラミックスに存在していたき裂が閉口した効果による。圧電セラミックスの破壊靱性値は約 $1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ (IF法により測定) であり、この値から破壊応力を用いてき裂長さを算出すると約 $30 \text{ }\mu\text{m}$ から約 $10 \text{ }\mu\text{m}$ までき裂が閉口していることがわかる。加えて図1において、複合化した試料においては高破壊応力側と低破壊応力側で傾きが異なるように見える。高破壊応力と低破壊応力での荷重-ストローク線図を図2に示す。同図より低破壊応力では荷重が急速に低下する点、すなわち内部の圧電セラミックスが破断した点まで線形的に荷重が増える脆性的な破壊形態である。これに対し高破壊応力ではマトリックスの塑性変形が生じた後に圧電セラミックスが破壊していることがわかる。しかしながら、評価した試験片が10個程度と統計的には少ない試料数であったため、試行回数を増加させ、ワイブル解析の精度を向上させる必要がある。

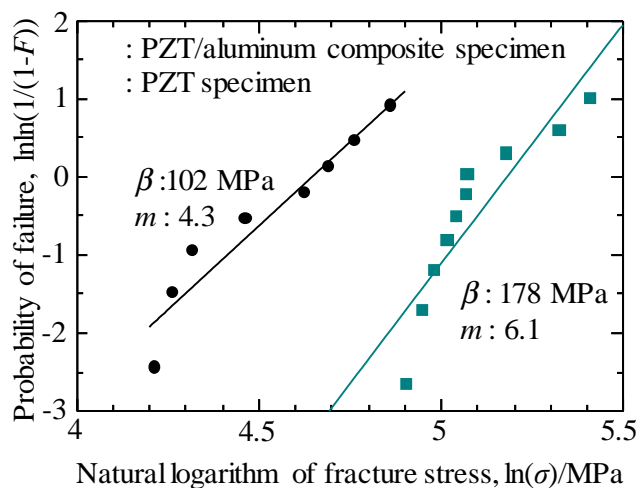


図1 PZT および PZT/Al 複合材料における破壊応力のワイブルプロット。

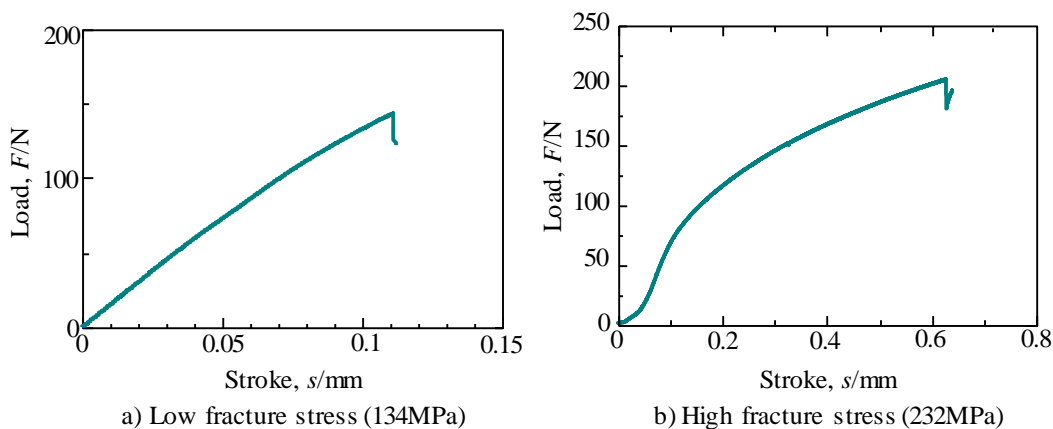


図2 低破壊応力と高破壊応力の際の3点曲げ試験における荷重-ストローク線図。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Sontipee Aimmanee, Hiroshi Asanuma	4. 巻 X
2. 論文標題 Micromechanics-based predictions of effective properties of a 1-3 piezocomposite reinforced with hollow piezoelectric fibers	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Mechanics of Advanced Materials and Structures	6. 最初と最後の頁 X
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/15376494.2018.1529842	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 該当する
1. 著者名 Tetsuro Yanaseko, Hiroshi Sato, Isao Kuboki, Karla Mossi, Hiroshi Asanuma	4. 巻 12
2. 論文標題 Vibration Viscosity Sensor for Engine Oil Monitoring Using Metal Matrix Piezoelectric Composite	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Materials	6. 最初と最後の頁 X
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/ma12203415	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 該当する
1. 著者名 Tetsuro YANASEKO, Hiroshi SATO, Isao KUBOKI, Hiroshi ASANUMA	4. 巻 5
2. 論文標題 Effect of Microstructure of Metal-core Piezoelectric Fiber/Aluminum Composites on Output Voltage Characteristics	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Mechanical Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 17-00565-00565
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/mej.17-00565	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 Tetsuro Yanaseko, Hiroshi Sato, Fumio Narita, Isao Kuboki, Hiroshi Asanuma	4. 巻 21
2. 論文標題 Improvement Estimation Accuracy of Impact Detection Using Metal-core Piezoelectric Fiber/Aluminum Composites	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Advanced Engineering Materials	6. 最初と最後の頁 x
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/adem.201900550	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 1件）

1. 発表者名 柳迫徹郎, 堀切一輝, 久保木功, 佐藤宏司, 浅沼博
2. 発表標題 金属中に複合化した圧電セラミックスの破壊挙動
3. 学会等名 2018年度日本機械学会年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 柳迫徹郎, 久保木 功, 佐藤宏司, 成田史生, 浅沼博
2. 発表標題 金属基圧電複合材料の高ひずみ領域における出力特性
3. 学会等名 日本機械学会M&M2018材料力学カンファレンス
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tetsuro Yanaseko, Hiroshi Asanuma, Hiroshi Sato
2. 発表標題 Fracture Behavior of Piezoelectric Ceramics Embedded in Aluminum Matrix
3. 学会等名 The ASME 2018 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems (SMASIS2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 柳迫徹郎, 佐藤宏司, 浅沼博
2. 発表標題 ロバスト金属基圧電複合材料の高ひずみ領域におけるセンサ特性
3. 学会等名 2017年度日本機械学会年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 浅沼博, 柳迫徹郎
2. 発表標題 知的材料・構造システム分野における研究開発動向
3. 学会等名 2017年度日本機械学会年次大会
4. 発表年 2017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
研究分担者	成田 史生 (NARITA FUMIO) (10312604)	東北大学・工学研究科・教授 (11301)	
研究分担者	佐藤 宏司 (SATO HIROSHI) (70344166)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・主任研究員 (82626)	
研究分担者	柳迫 徹郎 (YANASEKO TETSURO) (80784628)	工学院大学・工学部・助教 (32613)	