

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 3 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360043

研究課題名(和文) 減災分野等極限環境用口バスト圧電センサ・アクチュエータの創製

研究課題名(英文) Fabrication of robust piezoelectric sensors and actuators for extreme environment such as disaster

研究代表者

浅沼 博 (Asanuma, Hiroshi)

千葉大学・工学(系)研究科(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) 14,500,000円

研究成果の概要(和文)：圧電セラミックスはセンサやアクチュエータとして広く利用されているが脆弱という問題がある。浅沼らはこの問題を解決するためアルミニウムにそれを複合化するという画期的試みに成功した。本研究ではその複合体(Piezo-Al)が災害時にも機能する革新的デバイス創製を可能にするという位置付けのもと、高性能Piezo-Al創製のメカニズムとそれにより発現出来る諸特性を明らかにした。またデバイス創製の低コスト化、高性能化、さらにPiezo-Alの特性を利用した衝撃検知システムの構築にも成功した。

研究成果の概要(英文)：Piezoelectric ceramics are widely used as sensors and actuators, however they have problems due to their brittleness. In order to solve them, Asanuma et al. successfully embedded piezoelectric ceramics in aluminum matrices. In this study, as the product (Piezo-Al) is regarded as robust enough to be used for devices working under disaster, the mechanism to enable its fabrication and the generated performances were clarified. In addition, lower cost fabrication, enabling higher performance and fabrication of an impact detection system using its characteristics were successfully realized.

研究分野：工学

キーワード：機械材料・材料力学 構造・機能材料 複合材料・物性 先端機能デバイス 知的材料・構造システム  
センサ アクチュエータ 圧電セラミックス

## 1. 研究開始当初の背景

圧電セラミックスはその優れた機能により、振動検出・制御、音響素子、超音波モータ、精密位置決め等の各種センサ、アクチュエータ材料として広く実用化しているが、脆弱であるがために災害時等、極限環境下での使用は困難である。また、通常はデバイス化に際し、高分子材料系のパッケージングがなされているため、剛性が低く、応答性も損なわれる。その特性、信頼性向上等に大変有用な展開として、浅沼らは自ら開発した「界面層形成・接合法」(IF/B法と略称、図1参照)により、脆弱な金属コア圧電ファイバ(引張強さ 47 Pa, 破断伸び 0.16%)のアルミニウムへの直接複合化に世界で初めて成功した。

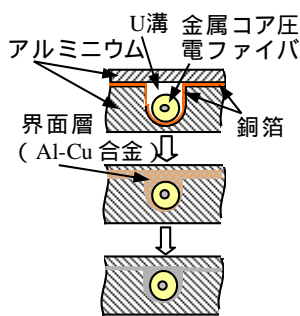


図1 界面層形成・接合 (IF/B) 法。共晶反応を利用することで脆弱な繊維を埋め込むことが可能な画期的接合法。

## 2. 研究の目的

本研究では、極めて脆弱ながら大変有用な圧電セラミックスを、申請者が発明した IF/B法により、アルミニウムに複合化することに成功した圧電ファイバ/アルミニウム複合材料をベースに、災害時等にも機能できるロバストかつ高性能な圧電デバイスを創製することを目的とした。

## 3. 研究の方法

既述の圧電ファイバ/アルミニウム複合材料 (Piezo-Al と略称) をベースにした画期的なロバスト圧電センサ・アクチュエータデバイスの創製、評価および応用について、以下の方法により研究を遂行した。

### (1) IF/B法による Piezo-Al 創製プロセスの詳細説明

申請者が考案した IF/B 法は、液相を利用した低圧接合、繊維周りへの合金のマイクロキャスト、半溶融あるいはマトリクスの軟化を利用した低圧下での緻密化等、脆性繊維を構造材料に効率的に埋め込むための複数の要因を巧みに重畳させた画期的保護プロセス

であり、その詳細を説明する必要がある。本実験には、既設の大型低真空ホットプレス装置を用いた。

### (2) 中空ファイバを用いた低コストデバイスの創製・評価

白金コア圧電ファイバの約 1/10 の価格で入手可能な市販の中空圧電ファイバを出発材料とし、アルミニウムへの埋め込みと同時に金属コアを形成するという簡便かつ画期的な創製法がほぼ確立しているため、本研究ではその実用化に向け、デバイス創製、評価を行った。

### (3) 量産・低コスト化のための超小型ホットプレス装置開発とそれによる大気中創製・量産の可能性検討

ホットプレス装置の加圧系から油圧ユニットや複雑な機構を排した超小型ホットプレス装置を用い、大気中で量産することの可能性を検討した。

### (4) Piezo-Al の破断ひずみ・出力電圧の顕著な向上のメカニズム解明と最適デバイス化

圧電ファイバに負荷されている圧縮応力が複合材料の特性に及ぼす影響を明らかにすると共に、それを最適化するための複合化条件を検討した。

特に、既に明らかにしている破断ひずみの著しい向上と高電圧出力化は画期的であり、それに及ぼす静水圧的高圧力の効果等について詳細に検討し、更なる特性向上を図った。

また、上記のほぼ最適化した試料を各種の基本的試験に供試するための各種デバイス化を行った。

## 4. 研究成果

### (1) Piezo-Al 創製プロセスの解明

申請者が考案した IF/B 法の詳細解明の一環として、圧電ファイバに負荷される圧縮熱残留応力を評価した。軸方向の応力は、その代りに FBG (Fiber Bragg Grating) センサを埋め込むことにより得られた値を用いて評価し、径方向の応力は電子線モアレ法により評価した。その結果、径方向、軸方向とも、1 GPa を越える高い圧縮応力が負荷されていることが明らかになり、また、それらはほぼ同等であることから、繊維は静水圧的な応力状態にあることがわかった。

### (2) 中空ファイバ利用による低コスト創製プロセスの確立とその解明

中空圧電ファイバの中空部に充填された Al-Cu 合金の銅濃度を評価することにより、その充填が昇温時に共晶温度直上に達した時と温度保持中の 2 段階に分かれて起こること等を明らかにした。

### (3) 量産・低コスト化のための小型ホットプレス装置開発と大気中創製・量産の可能性検討

小型ホットプレス装置による大気中での圧電デバイス創製に向けて、まずは光ファイバを用いてモデル実験を行い、その結果、光ファイバに機械的・化学的損傷を与えることなくそれをアルミニウム中に複合化可能な条件を見出した。さらに、従来型ホットプレス装置で作製した試料と接合強さを比較し、同等レベルの接合強さ（約 50 MPa）が得られることを明らかにした。実際の圧電ファイバにも適用し、大気中創製が可能であることを最終的に確認できた。

### (4) IF/B 法による Piezo-Al の破断ひずみ・出力電圧の顕著な向上のメカニズム解明と最適デバイス化

IF/B 法を用いることにより、圧電ファイバには高い圧縮応力が作用することが明らかとなっている。これが出力電圧に及ぼす影響を検討するために、熱処理および機械加工による圧縮応力の緩和を試み、圧縮応力の緩和が出力電圧特性に及ぼす影響を明らかにした（図 2 参照）。

また、報告例が極めて少ない圧電セラミックスに対する EBSD (Electron Back Scatter Diffraction patterns) 法を用いた結晶方位解析とその Piezo-Al への適用に成功し（図 3 参照）、その結果、分極と圧縮残留応力との関係および熱処理による出力電圧向上のメカニズムを明らかにした。

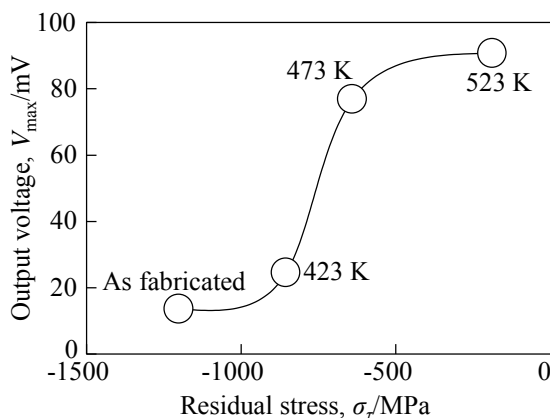


図 2 各熱処理温度における出力電圧と圧縮応力の関係。熱処理により圧縮応力を緩和するほど出力電圧は向上している。

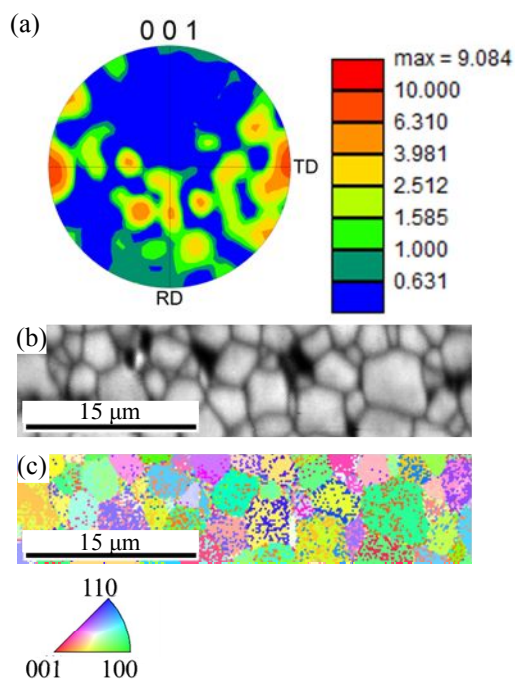


図 3 金属コア圧電ファイバの結晶方位解析結果。(a) 極点図、(b) IQ マップ、(c) IPF マップ。適用例が少ない圧電セラミックスについての結晶方位解析を行った。

### (5) マトリックス材変更および高繊維体積率化による特性向上検討

マトリックスを純アルミニウムから超ジュラルミンへ変更し、圧電ファイバに機械的・化学的損傷を与えることなく複合化することに成功した。また、この際の引張強度は 400 MPa 弱と鋼材とほぼ同レベルの強度を実現した。さらに出発材料との比較により、複合化した界面が強度に悪影響を及ぼしていないことを確認した。エネルギーハーベストデバイスの開発に向け、圧電ファイバの高体積率化について、界面層形成・接合法の条件範囲が一致する光ファイバを用いてモデル実験を行った。この結果、体積率は 0.55% から 17% へ向上する目処が立ち、この際の出力電力を計算により見積ると、ワイヤレス通信モジュールを駆動させ得る数十 mW を確保できる。

### (6) 出力異方性解析および衝撃検知システム構築

Piezo-Al の出力電圧には、先行研究における振動試験、衝撃試験の結果から、ひずみ方向性依存があることが示され、このような有益な特性は Piezo-Al 特有の電極構造に起因するものであることを、有限要素解析により示した。また、Piezo-Al の出力の距離減衰は、幾何減衰モデルで表すことが可能で、衝撃エネルギーの平方根に比例し、ひずみ方向に依存し位相が変化することが明らかになった。さらに、この出力電圧異方性を利用して衝撃検知システムの構築を試み、その結果、測定精度を維持しつつ従来型よりセンサ数を低

減した衝撃検知システムの構築に成功した。また、ウェーブレット変換を用い推定誤差を5 mm 以下にすることに成功した。

#### (7) エネルギーハーベスターのための出力電力評価およびワイヤレス化と小型動ひずみワイヤレスセンサの開発

エネルギーハーベスターとしての能力を明らかにするため、Piezo-Al の出力電力の評価を行った。振動試験や圧縮振動試験を行い、出力電力は、ひずみの2乗と振動周波数の何れにも比例し増加すること、および外部抵抗と内部抵抗の値が一致する点で最大となることを示した。これにより最大3.4 mW の出力電力が得られることを試算できた(図4参照)。また、弘前大学との共同研究によりワイヤレスタイヤセンサの開発を行った。これは、本圧電デバイスの出力電圧の異方性を利用し、タイヤの状態を監視するセンサである。現段階では、本圧電デバイスのみによる電力供給では不十分であるため、弘前大学で開発した磁歪素子により電力供給を行った。

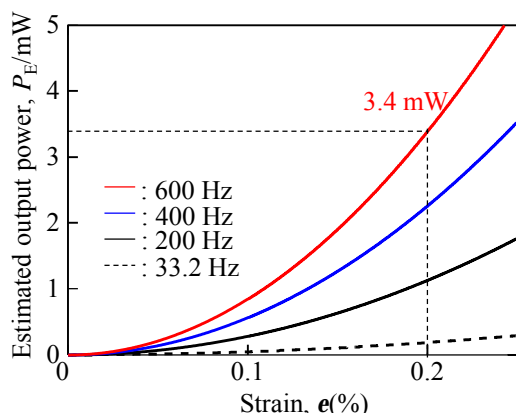


図4 出力電圧の試算値。600 Hz, 0.2%のひずみが印加される場合、最大で3.4 mW の出力電力が得られる。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 4 件)

H. Asanuma, Suprianto, T. Yanaseko, J. Kunikata, T. Chiba, K. Mizuuxhi H. Sato, Fabrication of an aluminum matrix piezocomposite using hollow piezoelectric fiber, *Mechanical Engineering Journal*, Vol. 2, No. 2(2015), No. 14-00372, 査読有, DOI: 10.1299/mej.14-00372

T. Yanaseko, H. Asanuma, H. Sato, Characterization of a metal-core piezoelectric ceramics fiber/aluminum composite, *Mechanical Engineering Journal*, Vol. 2, No. 2(2015), No. 14-00357, 査読有, DOI: 10.1299/mej.14-00357

T. Yanaseko, H. Asanuma, H. Sato, Fabrication and characterization of piezoelectric ceramic fiber/aluminum alloy composites, *Advances in Materials*, Vol. 3, No. 4(2014), pp. 22-26, 査読有, DOI: 10.11648/j.am.20140304.11

T. Yanaseko, H. Asanuma, T. Chiba, N. Takeda, H. Sato, Output Voltage Characteristics of Piezoelectric Fiber/Aluminum Composites Fabricated by Interphase Forming/Bonding Method, *Transactions of the Materials Research Society of Japan*, Vol. 39, No. 3(2014), pp. 325-329, 査読有, DOI: 10.14723/tmrj.39.325

[学会発表](計 31 件)

J. Su, H. Asanuma, Applications of piezoelectric polymers in electrical power generation using ocean waves, *SPIE Smart Structures/NDE 2015*, March 12, 2015, San Diego (U.S.A) (Invited)

H. Asanuma, Y. Furuya, T. Yanaseko, Proposal of Disaster Mitigation And Sustainable Engineering, *ASME conference on Smart Materials, Adapting Structure and Intelligent Systems 2014*, September 10, 2014, Newport (U.S.A)

浅沼博, 減災・サステナブル工学の今後の展望, 2014 年度機械学会年次大会ワークショップ, 2014 年 9 月 8 日, 東京電気大学(東京都・足立区)

浅沼博, 古屋泰文, 柳迫徹郎, 大嶋一輝, 知的材料・構造に基づく減災・サステナブル工学, 第 23 回 MRS-J 年次大会, 2013 年 12 月 9 日, 万国橋会議センター(神奈川県・横浜市)(基調講演)

浅沼博, 知的材料・構造システムとその減災・サステナブル工学への展開, 2013 年度機械学会年次大会, 2013 年 9 月 8 日, 岡山大学(岡山県・岡山市)(基調講演)

浅沼博, 柳迫徹郎, 田中学, 革新的多機能機械材料システム創製, 第 56 回材料強度と破壊総合シンポジウム, 2013 年 4 月 10 日, 東京大学(東京都・文京区)

H. Asanuma, Development of Smart Mechanical Material Systems, *Scientific Symposium of the CRC/TR 39 "PT-PIESA"*, March 26, 2013, Nuremberg (Germany) (Keynote)

浅沼博, 知的材料の現状, 展望と減災・サステナブル工学への展開, 第 50 回塑性加工技術フォーラム, 2013 年 2 月 28 日, 東京都立産業技術高等専門学校(東京都・品川区)

H. Asanuma, T. Yanaseko, H. Sato and S. Kishimoto, *Smart and Robust Composites Design, Fabrication and Application*, IWPMA 2012, April 24, 2012,

Hirosaki Culture Center (Aomori ・  
Hirosaki) (Invited)

〔図書〕(計 1 件)

浅沼博, 柳迫徹郎, 技術情報会, エレク  
トロニクス用コンポジット材料・部品におけ  
る分散・界面制御と機能性付与(圧電ファイ  
バ/アルミニウム複合材料の創製と特性),  
2013, 5

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
取得年月日:  
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

浅沼 博 (ASANUMA, Hiroshi)

千葉大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 40167888