

特集 インテリジェント材料の新展開**高性能圧電素子****High-Performance Piezoelectric Actuators**

裘 進浩 (東北大学) 正員

Jinhao QIU

Tohoku University

Member

Piezoelectric actuators are the most widely used actuators in smart structural systems. Development of high-performance actuator materials and devices has become an important subject because the performance of actuators is crucial for many of their future applications. This article introduces the research on development of piezoelectric fibers without a core, piezoelectric fibers with a metal core, functionally graded piezoelectric actuators and ceramic composite consisting of single crystals in a ceramic matrix. The piezoelectric fibers without a core fabricated from a sol-powder mixture exhibit higher performance than those fabricated using a traditional process. A new process for fabrication of piezoelectric fibers with a metal core and the properties of the fabricated fibers are also introduced. The functionally graded piezoelectric actuators have the same function of actuation as the traditional bimorph actuators, but exhibit much higher durability. The output force of the piezoelectric composite, consisting of single crystals and a ceramic matrix and fabricated using a hybrid process of microwave heating and hot-process, is 3 three higher than that of the ceramic actuator under the same voltage.

Keywords Piezoelectric Actuator, PZT, Piezoelectric Fiber, Sol-Gel, Functionally Graded Actuator, Ceramic Composite.

1 緒言

スマート構造物は、強度を保つための従来の構造にセンサ、アクチュエータ、コントローラなどを一体化させることによって、振動制御、騒音制御、ヘルスマニタリングなどの機能を実現する[1]。スマート構造物へ応用するときは、母構造と一体化しやすい形態を有するセンサとアクチュエータ素子が望ましい。スマート構造物のセンサとアクチュエータの材料として、圧電材料、形状記憶合金、電歪材料、超磁歪材料などが研究されているが、圧電アクチュエータは、その応答性がよく、発生力も比較的大きいことから、最も注目されている。圧電材料は高い応答性を持ち、振動や騒音制御に適し、形状記憶合金は高いエネルギー密度を持ち、形状制御などに適している。高性能なアクチュエータの開発はスマート構造の発展にとって重要な課題である。

東北大学では、圧電材料・素子の高性能化及び母構造と一体化しやすい形態を持つアクチュエータ素子の作製を中心に研究開発を行っている。前者については、材料成分の最適化による高性能化、マイクロ波とホットプレスを組み合わせたハイブリッド焼結法による高性能化、材料成分の傾斜化による高性能化、及び単結

晶とセラミックスのコンポジット化による高性能化などの方法を用いた。後者については、圧電セラミックスのシートの開発、コアなしの圧電ファイバーの開発、コア入りファイバーの開発などを行った。ここでは、傾斜型圧電素子、単結晶とセラミックスのコンポジット、コアなしの圧電ファイバー、コア入りファイバーを紹介する。

2 コアなしの圧電ファイバーの作製

コアなしの PZT ファイバーは 1990 年代の前半に開発され、振動や騒音制御に実用化されているが[3]、本プロジェクトでは新しいプロセスとして粉末とゾルの混合体を押し出してコアなしの圧電ファイバーを作製する方法を提案し、それを用いて直径 200-250 μm のコアなしのファイバーを作製した[2,4,5,6]。粘度を調整したゾルを一般の有機物結合剤の代わりに使用した場合、粉末に優れた成形性を付与することができ、また焼結中にゲルが目的とするセラミックスに結晶化するため除去過程を行う必要がなく、逆にゾルが粉末間で結晶化することにより緻密化を促進することが期待される。そこで、圧電セラミックファイバーの作製に関する研究ではゾルを結合剤として使用し、粉末とゾルの混合体を押し出しにより PZT 系セラミックファイバーの作製を試みた。

連絡先 裘 進浩, 〒980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1, 東北大学流体科学研究所, e-mail: qiu@ifs.tohoku.ac.jp

ゾルに適切な粘度を持たせるための調製条件として水と酢酸の添加量, 反応を進行させる温度について調べた。次に押し出しに用いる PZT ゾルと PZT 粉末の混合体の調製条件として, ゾルと粉末の混合比, ゾルと粉末の混合状態, 粉末の粒度, ゾルの粘度, 添加剤の種類, 添加剤の量などについて調べ, 混合物の成形性, 押し出し力, ファイバーのマイクロ組織に及ぼす影響について検討した。混合物の押し出しには直径 $300\mu\text{m}$ を有する口金を取り付けた押し出し装置を用いて行った。ゾルと粉末の混合比 (モル比) が 1:5~8 の場合は混合物は粘土状になり, Fig. 1 に示すように, 安定して数メートルのファイバーが切れることなく押し出すことができた。また, 作製されたファイバーの断面は直径 $200\text{--}250\mu\text{m}$ の円形であった。

また, 同様な方法を用いて PNN-PZT ファイバーも作製した。Fig. 2 は作製した PNN-PZT ファイバーを示す。Fig. 3 に示すように, 作製したファイバーを樹脂に埋め込み, 1-3 型の結合を有する複合材料を作製し, ファイバーの軸方向に電圧を印加して PNN-PZT ファイバーの圧電特性を測定した。また, 性能比較のため粉末と有機バインダの混合物から同様な方法で PNN-PZT ファイバーを作製し, 同じ寸法の 1-3 型複合材料で発生歪を測定した。その結果を Fig. 4 に示す。歪-電界曲線は圧電材料の典型的なバタフライ型ヒステリシスを示すことが分かる。また, ゾルと粉末の混合物を用いたファイバーは圧電歪の発生領域で最大 24.6% の特性向上がみられた。

3 金属コアを有する圧電ファイバーの作製

前節で紹介したコアなしのファイバーは, ファイバーコンポジットの形で振動や騒音制御用のアクチュエータとして利用されているが[3], ファイバー単体での利用が難しい。そこで, このプロジェクトでは, PNN-PZT 系のコア入りファイバーを開発した[5,7,8]。コア入りファイバーのコアを一方の電極として使えるので, 表面にもう一方の電極を付けることによって, ファイバー単体がセンサやアクチュエータとしての利用が可能になる。また, 電極をファイバー表面の全面につけるか, 半面につけるかによって, 異なるモードの変形が発生できる。

コア入りファイバーは粉末の合成, 押し出し原料の調整, 押し出し, 焼結の過程を経て作製される。調整した原料を Fig. 5 に示す構造の押し出し装置により押し出し,

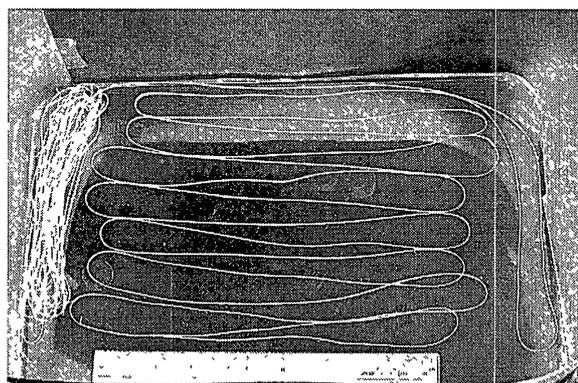


Fig. 1 PZT green fibers formed by extrusion.

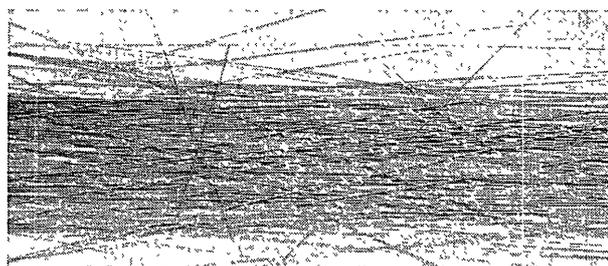


Fig. 2 PNN-PZT fibers after sintering.

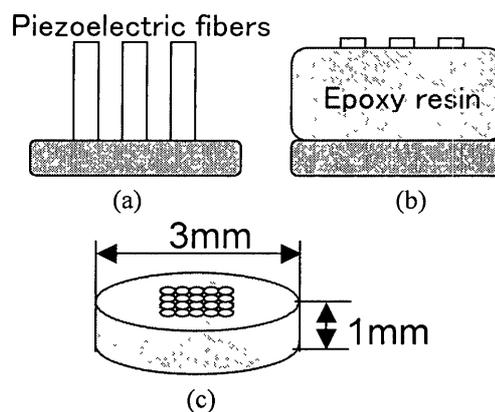


Fig. 3 1-3 composite with 78 piezoelectric fibers.

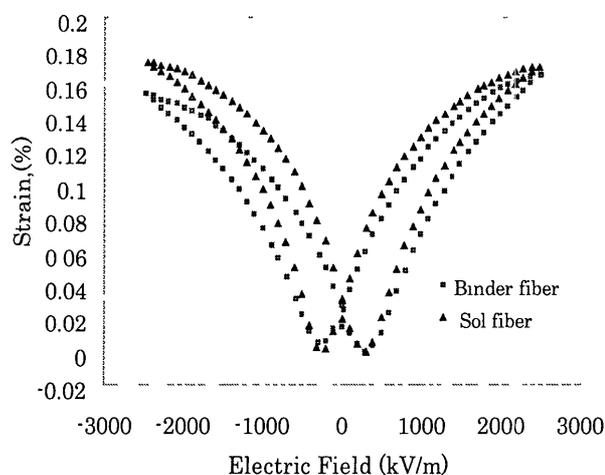


Fig. 4 Strain of 1-3 composites with different fibers.

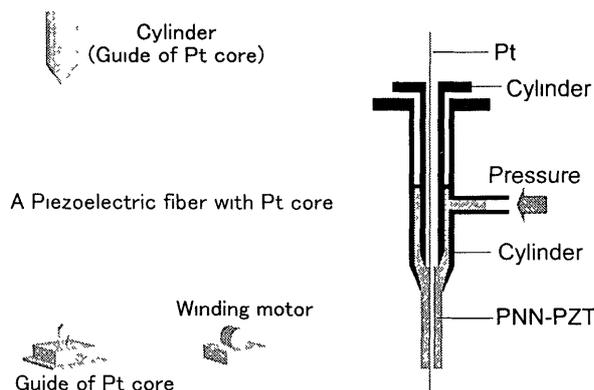
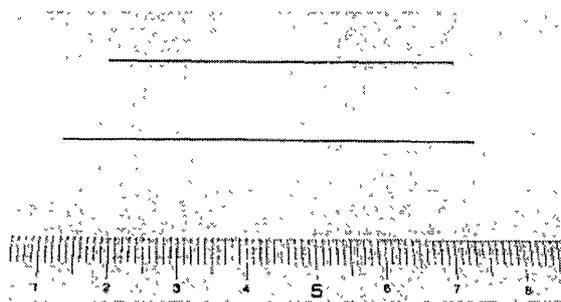


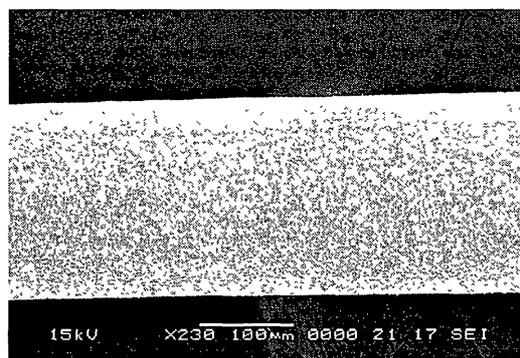
Fig. 5 Apparatus for extrusion of cored fibers.

ファイバーに成形した。押し出し装置はシリンダーの 2 重構造から成っており、内部シリンダーが白金線のガイド、外部シリンダーが原料に圧力を加える仕組みになっている。白金線と原料は、押し出される際の摩擦力で一体化される。白金線は $\phi 50\mu\text{m}$ で、内部シリンダーの先端には原料の流入を防ぐ目的で、 $\phi 100\mu\text{m}$ の穴を有する口金に取り付けられている。白金線はシリンダーの真下からモータで引っ張ることができる。原料は外部シリンダーにつけられた、 $\phi 300\mu\text{m}$ の穴を有する口金から押し出され、ファイバーに成形される。押し出したファイバーは 80°C で24時間乾燥した後、 500°C で2時間保持し、添加剤の除去を行った。その後、 1200°C で2時間保持の条件で焼結することで、世界初のコア入り圧電セラミックファイバーを作製した。作製したファイバー全体の写真、表面の SEM 写真、及び断面の SEM 写真を Fig. 6 に示す。コアがファイバーの中心に入っていることが分かる。

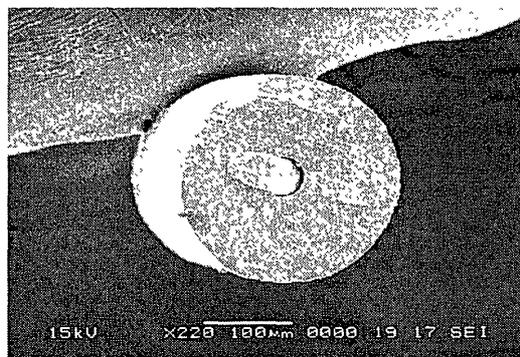
コア入りファイバーのセンサ、アクチュエータとしての機能を調べた。Fig. 7 にコア入りファイバーを取り付けた梁の写真を示す。梁は幅20mm、長さ100mm、厚さ2mmで、コア入りファイバーは20mmの長さの物を3本直列に接続して用いた。センサとしての機能を調べるため、梁に振動を与え、コア入りファイバーに生じた電圧と梁先端の変位を測定した。変位の測定にはレーザー変位計を用いた。測定結果を Fig. 8 に示す。縦軸の電圧、変位ともにそれぞれの最大値で割って、規格化したものである。次に、コア入りファイバーのアクチュエータとしての機能を調べるために、試験片の共振周波数である35Hzでファイバーに50Vの交流電圧を加え、梁先端の変位をレーザー変位計で測定した。その結果、 $18.6\mu\text{m}$ の最大変位を得ることができた。印加電圧と変位の関係を Fig. 9 に示す。



(a) Photos of fibers



(b) SEM photos of fiber surface



(c) SEM photos of cross-section

Fig. 6 Photos of fabricated fibers.

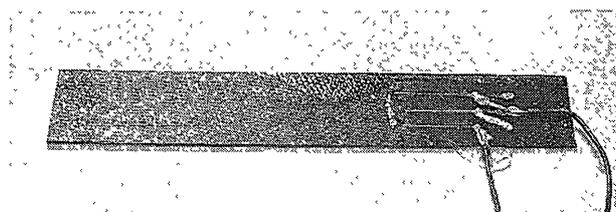


Fig. 7 Composite beam bonded with 3 fibers.

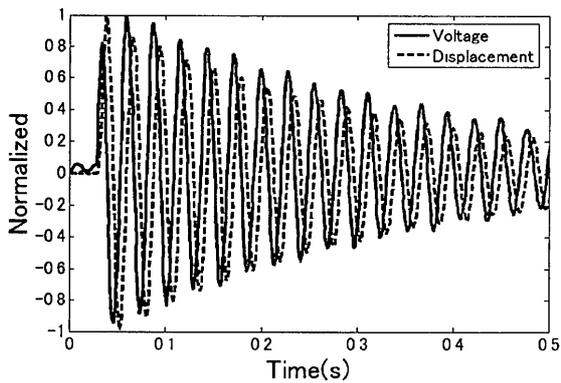


Fig. 8 Sensor function of the fibers.

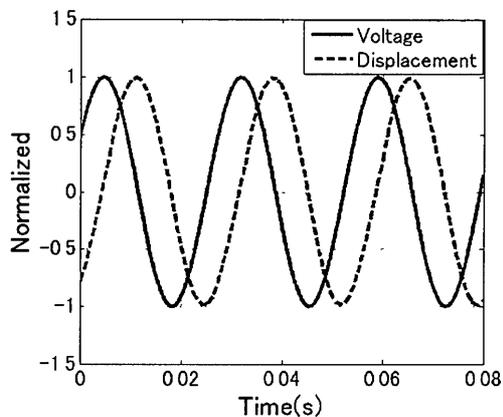


Fig. 9 Actuator function of the fibers.

4 傾斜型圧電素子の開発

従来の屈曲型圧電素子として、バイモルフ圧電素子やユニモルフ圧電素子などがあるが、これらの素子は圧電材料の層と金属のシム層を接着して作製される。圧電材料の層と金属のシム層の材料特性が大きく異なるため、変形時接着面に大きな応力集中が発生する。また、接着剤の強度も低いことから、従来の屈曲型圧電素子の耐久性が低い。大学連携プロジェクトでは、内部応力を緩和できる傾斜型圧電素子を提案し、試作を行った[4,5,9]。Fig. 10には傾斜型圧電素子の原理を示す。傾斜によって応力の集中が小さくなり、一体焼結によって層間強度も高くなるため、高い耐久性が期待される。試作では、特性が異なるA, B, C, Dの4つの材料を用いた。材料A~Dのシートを押し出し成型法により作製してA, D, C, Bの順(圧電定数が大きいものから小さいものへの順)にシートを積層した

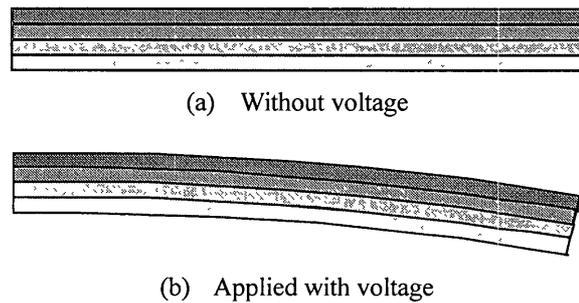


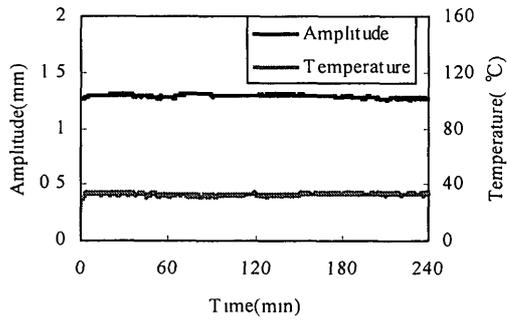
Fig. 10 Principle of functionally graded actuators.

後、熱盤プレスにより成型した。電気炉で脱バインダ、焼成を行った後、電極付け、分極を行った。性能の比較に用いたバイモルフは、特性の高い材料Aを用いて作製した。接着剤は市販品と同様に耐熱120°Cのものを用いた。

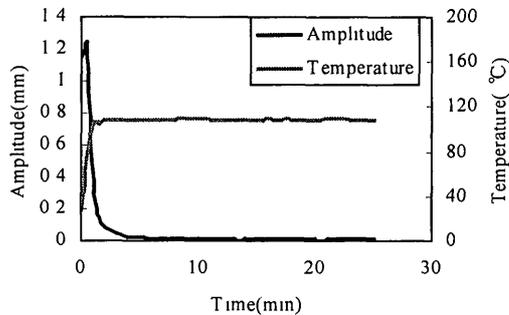
傾斜型圧電素子とバイモルフの耐久性は、アクチュエータの振幅と表面の温度を測定し、破壊が起こるまでの時間を比べることで評価した。両アクチュエータの発生振幅が同じになるように印加電圧を調整した。低周波での比較実験の結果、バイモルフは駆動周波数20Hzの場合に平均146時間で、100Hzの場合に平均34時間で亀裂が生じたのに対し、傾斜型圧電素子はそれぞれ300時間と100時間駆動させても、亀裂および表面の温度上昇は見られなかった。一次共振周波数での比較実験の結果をFig. 11に示す。バイモルフは駆動開始直後に温度が上昇し、減極が起こり振幅が低下している。表面温度は110°Cを維持したまま駆動を続け、平均で24分後にシムと圧電材料が剥離した。傾斜型圧電素子は駆動開始後、約33°Cまで温度が上昇したが、240分間駆動させても、亀裂および表面の温度上昇は見られなかった。さまざまな実験を行った結果、バイモルフの発熱の原因は接着面のせん断摩擦が引き起こす構造減衰による損失であると考えられる。傾斜型圧電素子には接着面が存在しないため、発熱が小さい。

5 圧電セラミックコンポジットの作製

圧電の単結晶は高い特性を持つが、大きな単結晶を作製するのは高価かつ困難である[10]。一方、圧電多結晶セラミックスは安価ではあるが、単結晶より性能が低い。そこで、小さい単結晶を圧電セラミック粉末のマトリックスに埋め込み、一体焼結することによって、高性能な圧電セラミックコンポジットを作製することを試みた[11]。セラミックのマトリックスには成分が0.5PNN-0.15PZ-0.35PTのものを用いた。単結晶



(a) FG actuators



(b) Traditional actuators

Fig. 11 Variation of amplitude and temperature when excited at resonance frequency.

の作製はフラックス法で行い、白金坩堝に 0.71PNN-0.29PT の組成原料を入れ PbO と B_2O_3 をフラックスとして 1150°C で 5 時間保持し $1.5^\circ\text{C}/\text{時間}$ でゆっくり冷却した。その後 1N の酢酸で余分なフラックスを溶かして得られた単結晶を(100)面に $2 \times 2\text{mm}$ 厚さ 1mm の小さな四角に切断した。

直径 17mm の金型に PNN-PZ-PT 粉末を入れ、中心部に四角に切断した PNN-PT 単結晶を並べ、更に上から粉末を充填し、100MPa で一軸成型した。成型した試料の底に直径 5mm、深さ 1.5mm の穴をあけ、白金の熱電対を直接接触させ温度誤差を $\pm 5^\circ\text{C}$ 以内に制御した。ハイブリッド焼結の焼結スケジュールは室温から $30^\circ\text{C}/\text{時間}$ で昇温させ最高温度で 30 分保持し、その後昇温速度と同じ割合で冷却させた。焼結温度は 1150°C 、ホットプレスの圧力は 20MPa で行い、最高温度になった時 30 分保持した。焼結した試料を単結晶が見えるまで上下面を研磨し、厚さ 0.5mm にした。

ハイブリッド焼結を利用して作製した PNN-PZ-PT セラミックス粉末と PNN-PT 単結晶のコンポジット試料の写真を Fig. 12 に示す。単結晶は割れることなくセラミックスと一体化している。作製した圧電セラミックコンポジットの特性を評価するために、円盤型試料の両側に電極を付け、電圧を印加したときの発生力を測定した。また、比較のため、コンポジットの試料と同じ寸法を持ち、マトリックスと同じ成分の圧電セラミックスの試料を作製し、その発生力を測定した。測定結果を Fig. 13 に示す。Fig. 13 の結果は、同じ印加電圧で圧電セラミックコンポジットの発生力は、セラミックスの発生力の 3 倍以上であることを示す。即ち、コンポジット化することによって、圧電素子の発生力が大幅に向上することが明らかになった。

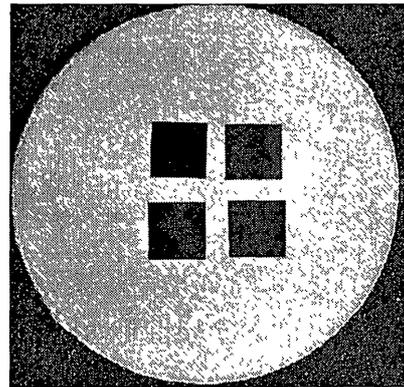


Fig. 12 Fabricated ceramic composite (Diameter of the disk is 14mm).

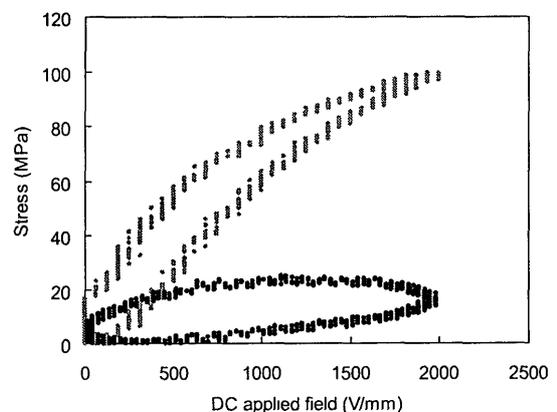


Fig. 13 Comparison of output forces from ceramic composite and traditional ceramic actuator.

6 結言

大学連携プロジェクト「知的材料・構造システム」の一部として行われた高性能アクチュエータ材料・素子の研究成果を紹介した。高性能化について、マイクロ波とホットプレスを組み合わせたハイブリッド焼結プロセスを提案し、それをPZTとPNN-PZTへ応用することによって最大約40%性能向上が得られた。材料成分を傾斜して作製した屈曲型圧電素子は共振周波数において従来のバイモルフアクチュエータより10倍以上の耐久性を持つことを示した。また、セラミックのマトリックスに単結晶を配置させることによって、セラミックより3倍以上の発生力を有する圧電セラミックコンポジットを作製した。また、コアなしの圧電ファイバーを作製し、ファイバーコンポジットでその特性を確認した。更に、世界初のコア入りファイバーを作製し、センサとアクチュエータとしての機能を確認した。

参考文献

- [1] 谷順二, 他 5 名, 知的複合材料と知的適応構造物, 日本機械学会編, 養賢堂, 1996.
- [2] 谷順二, 裘進浩, アクチュエータ材料素子の高性能化(1), 第 1 回「知的材料・構造システム」シンポジウム講演集, pp.69-72, 1999.
- [3] N. W. Hagood and A. A. Bent, Development of Piezoelectric Fiber Composites for Structural Actuation, AIAA Paper no. 93-1717, Proceedings of the 34th AIAA/ASME/ASCE/AHS Structures, *Structural Dynamics and Materials Conference*, La Jolla, CA, 1993.
- [4] 谷順二, 裘進浩, 他 3 名, アクチュエータ材料素子の高性能化, 第 2 回「知的材料・構造システム」シンポジウム講演集, pp.95-100, 2000.
- [5] 谷順二, 裘進浩, 他 3 名, アクチュエータ材料素子の高性能化, 第 3 回「知的材料・構造システム」シンポジウム講演集, pp.119-124, 2002.
- [6] J. Qiu, J. Tani, Y. Kobayashi, T. Young Um and H. Takahashi, Fabrication of Piezoelectric Ceramic Fibers by Extrusion of $Pb(Zr, Ti)O_3$ Powder and $Pb(Zr, Ti)O_3$ Sol Mixture, *Journal of Smart Materials and Structures*, Vol 12, pp.331-337, 2003.
- [7] 谷順二, 裘進浩, 他 3 名, アクチュエータ材料素子の高性能化, 第 4 回「知的材料・構造システム」シンポジウム講演集, pp.123-129, 2003.
- [8] J. Qiu, J. Tani, N. Yamada and H. Takahashi, Fabrication of piezoelectric fibers with metal core, *Active Materials: Behavior and Mechanics, Proceedings of SPIE*, Vol. 5053, pp.5053-60, 2003.
- [9] J. Qiu, J. Tani, T. Ueno, T. Morita, H. Takahashi and H. Du, Fabrication and high durability of functionally graded piezoelectric bending actuators, *Journal of Smart Materials and Structures*, Vol 12, pp.115-121, 2003
- [10] 鋤柄宣, 大歪みアクチュエータの開発, 第 1 回「知的材料・構造システム」シンポジウム講演集, pp 47-50, 1999.
- [11] 高橋弘文, 加藤和昭, マイクロ波焼結とホットプレスのハイブリッド焼結を利用した高性能な圧電アクチュエータの作製, 第 4 回「知的材料・構造システム」シンポジウム講演集, pp.131-136, 2003.