

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月29日現在

機関番号： 12501  
 研究種目： 基盤研究(B)  
 研究期間： 2009～2011  
 課題番号： 21360047  
 研究課題名（和文） 圧電ファイバ／金属複合材料をベースにした革新的機械材料システム創製

研究課題名（英文） Development of innovative mechanical material systems based on piezoelectric fiber/metal matrix composites

研究代表者

浅沼 博 (ASANUMA HIROSHI)

国立大学法人千葉大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号： 40167888

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をベースにした画期的な高性能圧電センサ・アクチュエータデバイスの創製，さらにはそれ自身を構造材料として利用する革新的圧電機械材料システムの創製を検討し，それらの優れた特性を明らかにした．

研究成果の概要（英文）： High performance piezoelectric sensor/actuator devices and innovative piezoelectric mechanical material systems have been successfully developed by using metal-core piezoelectric fiber/aluminum composites, and their performances were clearly characterized.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	8,700,000	2,610,000	11,310,000
2010年度	3,000,000	900,000	3,900,000
2011年度	2,300,000	690,000	2,990,000
総計	14,000,000	4,200,000	18,200,000

研究分野： 工学

科研費の分科・細目： 機械工学・機械材料・材料力学

キーワード： (A) 材料設計・プロセス・物性・評価

### 1. 研究開始当初の背景

独創的「界面層形成・接合法」により創製に成功し機械的性質にも優れる白金コアチタン酸ジルコン酸鉛 (PZT) 圧電ファイバ／アルミニウム複合材料をベースにした画期的圧電センサ・アクチュエータデバイス・システムの構築を目指し，その達成のための要素となる各種特性を明確にする必要性があった．

### 2. 研究の目的

本研究においては，圧電ファイバ／金属基複合材料を基にしたスマート機械材料システムを創製するため，以下の3項目を明確化することを目的とした．

(1) 圧縮残留応力の影響

(2) 各種応用化に向けた特性評価

(3) 粘度センサとしての特性評価

### 3. 研究の方法

(1) 圧縮残留応力の影響

① 圧縮残留応力が出力電圧に及ぼす影響

作製した試料の残留応力を，熱処理温度 ( $T_1$ ) 423, 473 および 523 K における熱処理により緩和し，出力電圧を図 1, 2 に示す振動試験および衝撃試験で評価した．振動試験は一端を固定したアルミニウム板に試料を接着し，アルミニウム板を電磁加振させ，試料から発生する出力電圧をオシロスコープを用いて測定した．衝撃試験は，試料を接着した面が下向きになるようにアルミニウム板を自由支持し，その中央部にステンレス鋼製ボルトを高さ  $h_1$  の位置から自由落下させて衝撃を

与え、試料から発生する出力電圧をオシロスコープを用いて測定した。また、試料表面およびアルミニウム板表面にひずみゲージを貼り付け、両者のひずみを測定することで試料内部の繊維に生じるひずみを求めた。

## ② 圧縮残留応力が残留分極に及ぼす影響

圧電特性に及ぼす圧縮残留応力の影響について検討するため、試料の金属コアとアルミニウムマトリックスの間に交流電圧  $V$  を印加し、その時に発生した電荷量  $Q$  を測定、 $Q$ - $V$  ヒステリシスループを求め、圧電特性の評価を行った。誘電体の特性評価には、強誘電体特性評価システムを用いた。測定条件は、圧電ファイバの形状・寸法より、電極面積  $7.85 \text{ mm}^2$ 、PZT 層厚さ  $0.075 \text{ mm}$  とした。印加電圧は、 $50 \text{ V}$  から  $250 \text{ V}$  まで  $50 \text{ V}$  毎に変化させた。熱処理による圧縮残留応力の緩和は、上記試験と同様に行い、圧電特性の評価を行った。

## (2) 各種応用に向けた特性評価

### ① 高ひずみ領域での出力電圧特性

(1)-①項と同様の衝撃試験システムを用い、高ひずみ領域における出力電圧特性を評価した。

### ② エネルギー回収のための出力電力特性

試料から得られる電力は、それを取り出す回路によって変化する。一般に外部抵抗値（検出器のインピーダンス）を高くすると得られる出力電圧は大きくなるが、その分電流が小さくなるため、試料から最も効率良く電力を得るには、外部抵抗値の最適化を行う必要がある。そこで、振動試験において、可変抵抗器の抵抗値を変化させることで出力電力に及ぼす外部抵抗の影響を調べた。また、

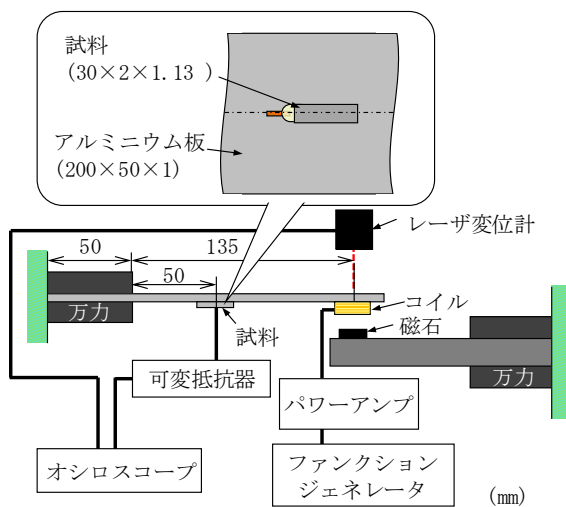


図1 振動試験装置

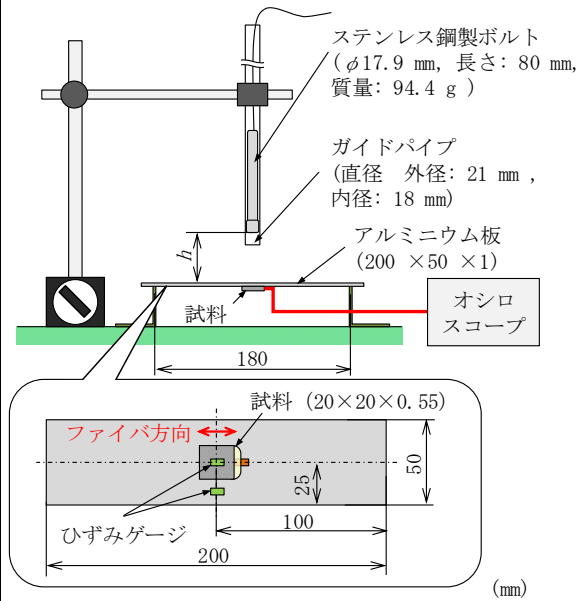


図2 衝撃試験装置

出力電力の外部抵抗依存性の評価と同様の試験システムを用い、振動板の振幅を変化させることで出力電力に及ぼす圧電ファイバのひずみの影響を調べた。さらに、出力電力の周波数依存性を図3に示す圧縮振動試験にて調査した。振動板を用いて各周波数に対する出力電力を測定する場合、周波数によって振動板の振動モードが変化し、試料に与えるひずみを一定とすることができないため、出力電力の周波数依存性を正しく評価することができない。そこで、市販の積層型圧電アクチュエータを用い、試料の繊維軸方向に一定のひずみを与えた際の周波数を変化させることで、出力電力に及ぼす周波数の影響を調べた。

### ③ 分布型センサとしての特性評価

ピッチ  $1 \text{ mm}$  で  $5$  本の圧電ファイバが埋め込まれた繊維複数本埋め試料（図4）を用い、作用点の位置を変化させながら衝撃荷重を与えることで、本試料の分布型センサとしての特性評価を行った。本衝撃試験の測定システムを図5に示す。試料に負荷する衝撃荷重の方向は、同図に示す  $x, y, z$  の3方向とし、各衝撃方向における圧電ファイバから発生する出力電圧を測定した。

### (3) 粘度センサとしての特性評価

#### ① アクティブ型センサの特性評価

圧電ファイバを2本利用した粘度測定方法をアクティブ型粘度測定とし、粘度測定の評価試験を行った。アクティブ型粘度測定は試料を図6のように加工後、複合化した2本の圧電ファイバを利用することで、中央に配置した圧電ファイバを用いて試料を振動させ、

もう一方の圧電ファイバからの出力電圧を読み取ることで試料の共振周波数および最大出力電圧と粘度の関係性を測定する方式である。測定用の溶液は、粘度測定用のモデル溶液として一般的なグリセリン水溶液および純水を用いた。試験システムを図7に示す。

②パッシブ型センサの特性評価

パッシブ型粘度測定は複合化した中央の圧電ファイバを用いて、外部から加わった振動エネルギーを利用し、試料を共振周波数で振動させ、その出力電圧を測定し、共振周波数と粘度の関係性を求める方式である。本試料の中央に配置した圧電ファイバを用いて、外部から得られる振動エネルギーを利用し試料を振動させ、得られる出力電圧から共振周波数と粘度の関係性を調べた。アクティブ型粘度測定試験と同様に粘度測定の評価を行った。

4. 研究成果

(1)圧縮残留応力の影響

①圧縮残留応力が出力電圧に及ぼす影響

熱処理温度  $T_h$  を 423, 473 および 523 K と変化させ熱処理を行った各試料と未熱処理の試料について、振動試験により印加した最大ひずみとその時に発生した出力電圧の関係性を図8に示す。同図より、熱処理を行って残留応力を緩和した試料においては、得られる出力電圧はひずみとの比例関係を保ち

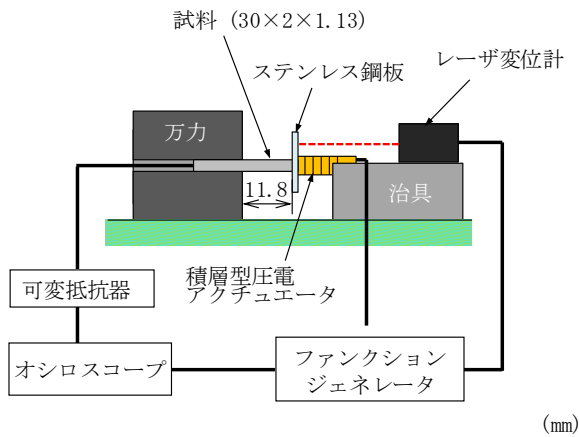


図3 圧縮振動試験装置

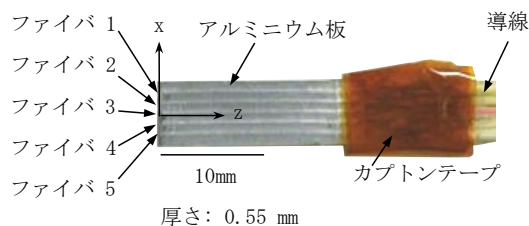


図4 複数本埋め試料

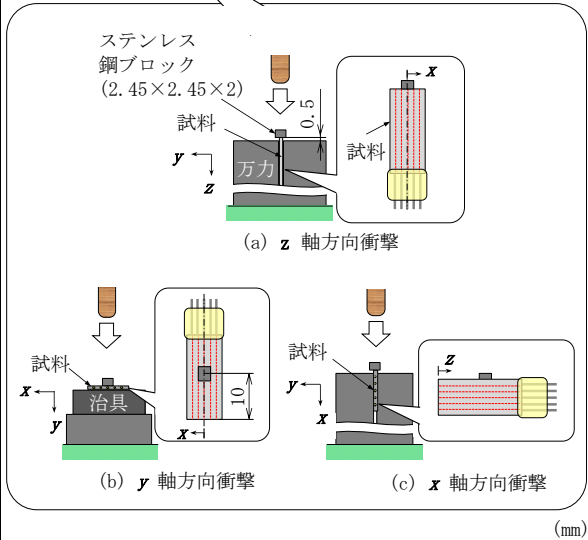
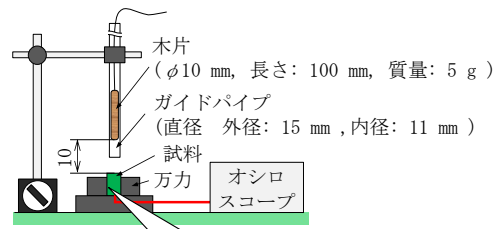


図5 衝撃試験装置

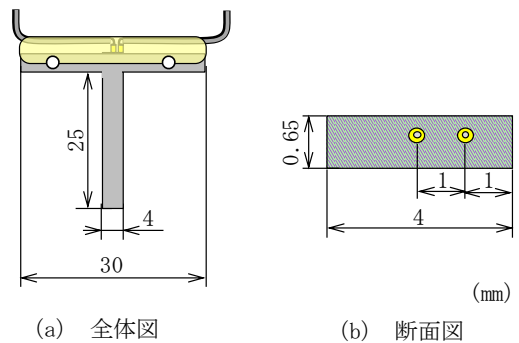


図6 アクティブ型粘度測定試験片

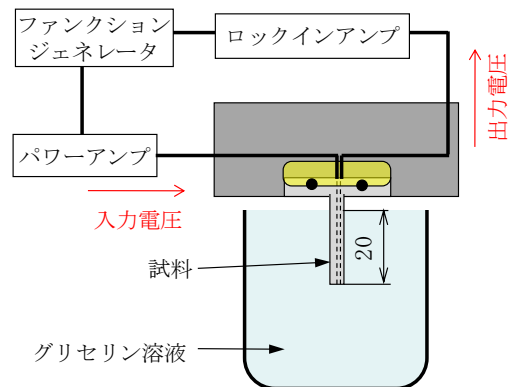


図7 粘度測定装置

ながら増加することがわかり、その増加は、熱処理温度を高め、残留応力をより緩和させた場合において、促進されるという傾向を示している。また、圧縮残留応力を緩和した試料においても、加えたひずみと圧電ファイバから発生する出力電圧には周期のずれが生じていないことがわかり、応答性の低下は確認されず、センサ性能の低下はないと考えられる。衝撃試験の結果も、振動試験と同様の傾向を示している。

## ②圧縮残留応力が残留分極に及ぼす影響

熱処理温度  $T_h$  を 423, 473 および 523 K と変化させ、熱処理を行った各試料と未熱処理試料の P-E ヒステリシスループを測定した結果、熱処理を行うことで、各電圧を印加した場合に圧電ファイバから発生する電荷は減少することがわかった。これは圧電セラミックスが熱処理により熱疲労を起こしたことによると考えられる。

### (2)各種応用に向けた特性評価

#### ①高ひずみ領域での出力電圧特性

図 9 に示すように、圧電ファイバ単体の破断ひずみ (0.14~0.17%) を超える高ひずみ領域 (0.2%) まで出力電圧がひずみに対し線形に増加することが明らかになり、高ひずみ領域でも正常に機能することが確認された。これは、試料作製時に導入される高い圧縮残留応力により破断ひずみが向上しているためである。

#### ②エネルギー回収のための出力電力特性

図 10 に出力電力のひずみ依存性を示す。同図より、出力電力はひずみの 2 乗に比例することがわかる。これは、ひずみエネルギーがひずみの 2 乗に比例することとよく一致している。また、本実験範囲では最大電力  $0.64 \mu\text{W}$  であるが、これは印加ひずみが小さいためであり、現在確認された最大使用範囲の 0.2% までひずみを印加すると  $0.2 \text{ mW}$  の電

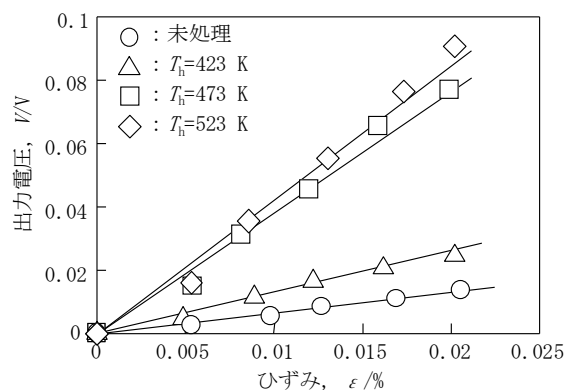


図 8 熱処理温度が出力電圧とひずみの関係に及ぼす影響

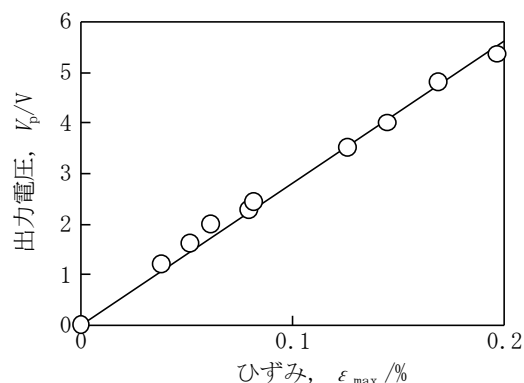


図 9 出力電圧とひずみの関係

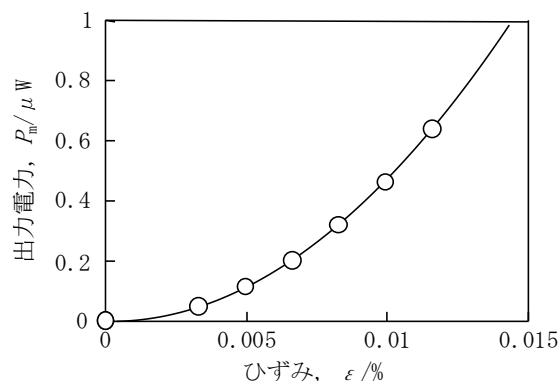


図 10 出力電力のひずみ依存性

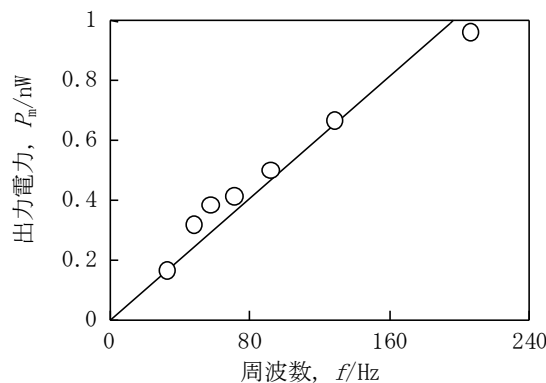


図 11 出力電力の周波数依存性

力が得られることが期待できる。外部抵抗依存性については、外部抵抗  $R_E=4.4 \text{ M}\Omega$  の時インピーダンス整合が取り、最大電力が得られることがわかった。さらに、図 11 に出力電力の周波数依存性を示す。同図より、出力電力は周波数の増加に伴い線形に増加する結果が得られた。これは、ひずみ一定の際に周波数が増加すると 1 秒当たりの変形回数が線形に増加し、1 回変形して得られる電力は変わらないため、結果として出力電力と周波数が比例すると考えられる。

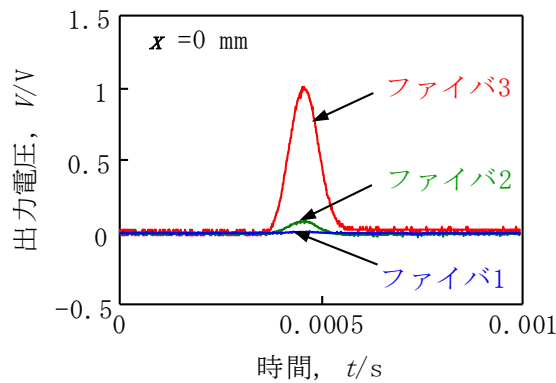


図 12 衝撃位置による出力電圧への影響

### ③分布型センサとしての特性評価

図 12 に、衝撃位置  $x=0$  mm において  $y$  軸方向に衝撃を印加した際の各圧電ファイバからの出力電圧波形を示す。衝撃位置からの距離が増加するほど圧電ファイバからの出力電圧が低下していることがわかる。この結果より、圧電ファイバを複数本複合化した試料が分布型ひずみセンサとして機能することが明らかとなり、衝撃位置のモニタリングなどに応用が可能であると考えられる。

### (3)粘度センサとしての特性評価

#### ①アクティブ型センサの特性評価

グリセリン水溶液の静粘度と試料の共振周波数および最大出力電圧との関係をまとめた結果を図 13 に示す。同図より、測定するグリセリン水溶液の濃度が高くなるに従い、本デバイスから得られる出力電圧は小さくなることが分かる。また同時に、最大出力電圧が発生する時の周波数は低い方にシフトすることが分かる。

#### ②パッシブ型センサの特性評価

図 14 に、パッシブ型粘度測定によるグリセリン水溶液の静粘度と出力電圧から求まる共振周波数の関係を示す。同図より、共振周波数は、グリセリン水溶液の粘度が大きくなるに従い低くなることがわかる。粘度測定に関してアクティブ型粘度測定と比較すると、同じ粘度測定範囲においては、共振周波数の変化幅はアクティブ型粘度測定において 470~510 Hz、パッシブ型粘度測定において 466~505 Hz であり、変化の度合いに差は生じなかった。しかし、アクティブ型粘度測定においてはグリセリン水溶液の濃度が 80~85%である静粘度 42.2~70.7 Pa·s·kg/m<sup>3</sup>の高粘度域における測定が可能であるが、一方、パッシブ型粘度測定では不可能である。これは、圧電ファイバによって任意の周波数の振動を発生させ、その出力電圧を読み取ることが可能なアクティブ型粘度測定に対し、

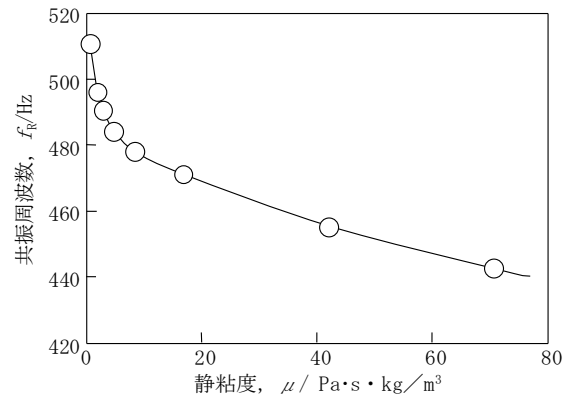


図 13 アクティブ型センサのグリセリン溶液中での静粘度と共振周波数の関係

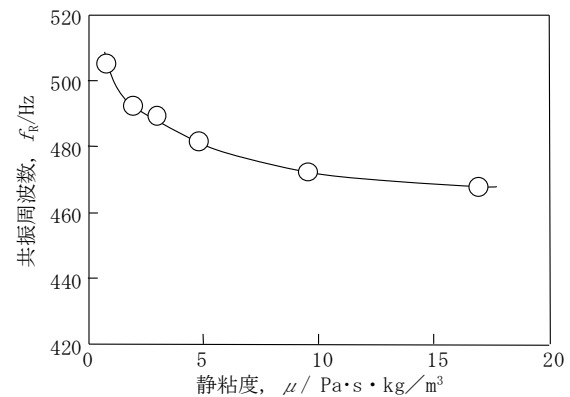


図 14 パッシブ型センサのグリセリン溶液中での静粘度と共振周波数の関係

パッシブ型粘度測定システムでは、外部からの与えられた振動エネルギーにより多様な周波数の振動がセンサに加えられることが原因している。即ち、センサの共振周波数以外の振動数の振動は減衰が早いいため、減衰波の中から共振周波数を読み取ることができ、測定溶液の静粘度が高い場合は、共振周波数においても測定水溶液から受ける減衰の影響が大きく、出力電圧の減衰が大きいため原因であると考えられる。上記より、本センサの共振周波数および最大出力電圧は、グリセリン水溶液の粘度の増加に従い、単調に減少するため、粘度センサとしての利用が可能である。また、高粘度領域を測定する場合は、共振周波数の変化を利用することで、より測定精度の高い測定が可能である。低粘度域においては外部からのエネルギーを利用した、より簡便な粘度測定も可能である。

5. 主な発表論文等  
(研究代表者, 研究分担者に下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① S. Kishimoto, H. Asanuma, Y. Tanaka and Y. Kagawa, Measurement of strain distribution in smart materials by electron Moiré method, Smart Structures and Materials & Nondestructive Evaluation and Health Monitoring, 査読有, SPIE Vol. 8341, 834152, 2012, 1-9.
- ② M. Richeson, U. Erturun, R. Waxman, K. Mossi, J. Kunikata and H. Asanuma, Characterization of a Pt-core PZT fiber/Al matrix composite, Smart Structures and Materials & Nondestructive Evaluation and Health Monitoring, 査読有, SPIE Vol. 7644, 764429, 2010, 1-11.

[学会発表] (計 19 件)

- ① H. Asanuma, Development of smart mechanical material systems, 2011 MRS International Materials Research Congress, August 17, 2011, CasaMagna Marriott Cancun Resort (Cancun, Mexico).
- ② R. Matthew, E. Ugur, W. Rachel, M. Karla, T. Suzuki, J. Kunikata, H. Asanuma, Characterization of a Pt-core PZT Fiber/Al matrix composite, 日本機械学会 2010 年度年次大会, 2010 年 9 月 8 日名古屋工業大学 (名古屋市).
- ③ H. Asanuma, J. Kunikata, T. Suzuki, Fabrication of aluminum-based multifunctional material systems by the IF/B method, ASME SMASIS 2009, September 22, 2009, Embassy Suites Mandalay Beach Resort (Oxnard, USA).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

浅沼 博 (ASANUMA HIROSHI)  
国立大学法人 千葉大学・大学院工学研究  
科・教授  
研究者番号: 4 0 1 6 7 8 8 8

(2) 研究分担者

岸本 哲 (KISHIMOTO SATOSHI)  
独立行政法人 物質・材料研究機構・コー  
ディング・複合材料センター・主任研究員  
研究者番号: 1 0 3 5 4 1 6 9