

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 26 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360041

研究課題名(和文) スマート圧電材料・薄膜システムのメゾ力学設計・開発と高効率・環境負荷低減化

研究課題名(英文) Mesomechanical design/development and efficiency/environmental load improvement of smart piezoelectric material and thin-film systems

研究代表者

進藤 裕英 (Shindo, Yasuhide)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：90111252

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、次世代環境配慮型スマートデバイスのメゾ力学設計指針・開発思想を提供することを目的に、圧電材料・薄膜システムの検知・応答機能及び破壊・疲労挙動をマルチフィジックス数値シミュレーション(電場・力学場相互干渉、マイクロ・ナノ構造、化学組成・添加元素、焼成・蒸着の時間・温度等を考慮)・実験両面から解明したものである。また、得られた結果を総合的に検討し、スマート圧電材料・薄膜システムのメゾ強度・機能評価を行って、学問体系の確立と応用に寄与している。

研究成果の概要(英文)：In order to provide meso-mechanical design criteria and development technique of novel eco-friendly smart devices, we investigated the detection/response characteristics and fracture/fatigue behavior of piezoelectric material and thin-film systems from both a theoretical and experimental point of view using multi-physics approach. Electromechanical interactions, micro- and nano-structures, chemical composition, additive element, and fabrication time/temperature were considered. As a result, a study on the meso-strength and function evaluations of the smart piezoelectric material and thin-film systems was established.

研究分野：材料システム設計学

キーワード：圧電メゾ力学 数値シミュレーション 材料試験 圧電材料・薄膜システム 電場・力学場相互干渉
スマートデバイス マイクロ・ナノシステム 環境発電

1. 研究開始当初の背景

近年、地球環境問題への対応として、温室効果ガス (CO₂ 等) 排出量の削減、化石燃料依存からの脱却が求められ、自然界環境に広く存在するエネルギーから電力を取り出す環境発電が注目を集めており、例えば、振動による出力電力のワイヤレスセンサ・環境ヘルスマニタリングシステムへの給電可能性が示唆されている。また、圧電材料・薄膜システムの自己発電化は、デバイスのメンテナンスフリー (バッテリー (重金属・電解質液) 交換・充電不要) を可能とし、エネルギー供給や配線が難しい体内埋め込みバイオ・医療デバイス (心臓ペースメーカー、人口内耳、薬剤注入ポンプ、人工筋肉) 等への応用が期待されている他、スマートグリッド (次世代送電網) を構成する分散型電源 (小型振動発電機) や自然災害時における非常用電源としての使用も検討されている。さらに、電子デバイスの省電力・小型軽量・長寿命化を可能とする高性能 PZT 系圧電材料・薄膜システムは、有害物質 (鉛) を有し、代替品がないため特定有害物質制限 (RoHS) から除外されているが、鉛を排除する動きは強まっている。

これら先端圧電材料・薄膜システムは、直射日光下の太陽光発電に比べ出力エネルギー密度が低く、特に環境への配慮から無鉛化を図るとエネルギー変換効率が悪くなるのが現状である。また、様々な外的負荷、共振駆動により内部損傷・はく離が生じ、性能低下が問題となる場合が多い。このため、圧電材料・薄膜システムの材料・構造制御による高性能化が要望されているが、そのマクロ挙動は、マイクロ・ナノ構造 (分域・分極、結晶構造等) に依存するため、スケール間の相互干渉を考慮して電気力学的挙動を解明する必要があり、膜厚が nm オーダの場合には、薄膜表面における原子配列パターン (化学組成・添加元素、蒸着の時間・温度等に依存) の考慮も肝要となる。

マクロ構造の電気力学的挙動を評価するため、マイクロ・ナノ構造からボトムアップ的に解析する場合、膨大な計算量になることが予測される。また、マクロ構造に注目し、連続体力学に基づき解析する場合には、平均の結果しか得られず、実際の電気力学的挙動を説明できない場合も多い。これらの問題点を解決すべく、マクロスケール現象を支配するマイクロ・ナノスケール因子 (例えば、分域構造変化、結晶粒配向、結晶方位・電子構造変化、結晶組成境界移動、欠陥化学反応) をマルチフィジックス数値シミュレーション・実験両面から特定し、それらを制御して圧電材料・薄膜システムの高性能化を図る予定であるが、このような観点での研究はこれまでほとんど行なわれていないようである。

2. 研究の目的

本研究は、自己給電式メンテナンスフリーのスマート圧電材料・薄膜システムを取り上げ、微視 (マイクロ・ナノ) 構造、化学組成・

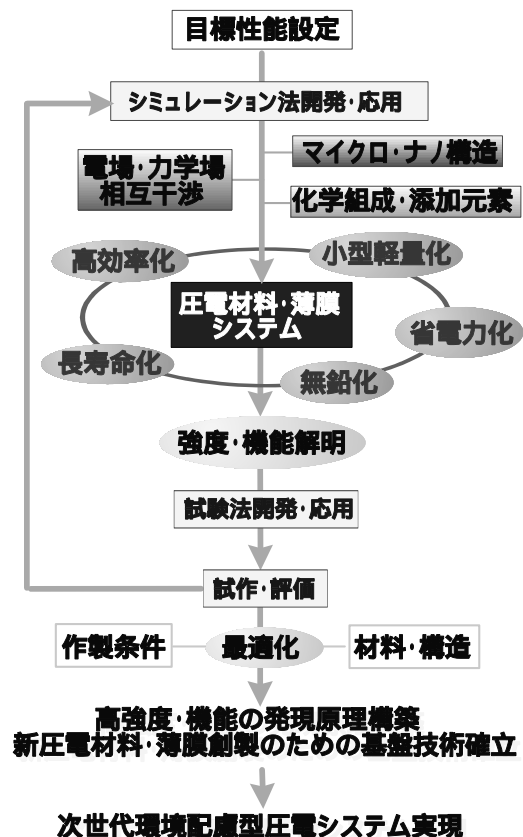


図1 圧電メソ強度・機能評価技術

添加元素，焼成・蒸着の時間・温度等の影響を考慮したマルチフィジックス数値シミュレーション・試験法を開発・応用して，メゾ力学設計指針・開発思想を提供するものである（図1）．また，新しい圧電材料・薄膜システムを試作・評価し，メゾ強度・機能に及ぼす材料・構造の影響を解明・制御して，最適作製条件探索と高効率・環境負荷低減化を図る．すなわち，最適な材料・構造を学術的に見出し，(1) エネルギー変換効率がよく，(2) 省電力・小型軽量・長寿命で，(3) 環境有害元素を含まない『次世代環境配慮型スマート圧電材料・薄膜システム』の実現を図ることを目的としている．

3．研究の方法

本研究は，自己給電式スマート圧電材料・薄膜システムのメゾ強度・機能を数値シミュレーション・実験両面から解明し，高効率で環境に優しい材料システムの力学設計指針・開発思想を提供するものである．具体的には，圧電積層システム，圧電ワイヤコンポジットシステムのモデリングを行い，検知・応答機能及び破壊・疲労挙動に関するマルチフィジックス数値シミュレーション（電場・力学場相互干渉，マイクロ・ナノ構造，化学組成・添加元素，焼成・蒸着の時間・温度等を考慮）を実施する．また，機能計測及び破壊・疲労試験を行い，数値シミュレーション結果と比較して，解析モデルの妥当性・合理性を検証する．さらに，スマート圧電材料・薄膜システムの試作・評価を行い，材料・構造最適化に関する検討を行って，次世代システムの高効率・環境負荷低減化を図る．

4．研究成果

得られた成果を要約すると以下の通りである．

- (1) 片側縁き裂を有するソフト・ハード系圧電セラミックスを取り上げ，交流電場

下における三点曲げ静疲労試験及び有限要素解析を行い，破断時間のエネルギー解放率依存性に及ぼす交流電場の影響を解明・考察した．

交流電場下における片側縁き裂を有するソフト・ハード系圧電セラミックスの三点曲げ動疲労試験及び有限要素解析を行い，破壊荷重や臨界エネルギー解放率に及ぼす交流電場の影響を解明・考察した．

片側縁き裂を有する圧電セラミックスを取り上げ，直流電場下における三点曲げ繰返し疲労試験及び有限要素解析を行い，破断繰返し数（疲労寿命）やエネルギー解放率に及ぼす電場・分極回転の影響を解明・考察した．また，圧電セラミックスの繰返し疲労挙動に及ぼす交流電場・分域壁移動の影響についても同様に解明・考察した．

電場下におけるき裂を有する圧電セラミックスの極低温三点曲げ破壊試験及び有限要素解析を行い，破壊荷重及びエネルギー解放率の電場・温度依存性を解明・考察した．

- (2) S字型圧電バイモルフハーベスタの振動試験及び有限要素解析を行い，動的曲げ・ねじりによる出力電圧・電力及び応力のうねり比・先端質量・負荷抵抗依存性を解明・考察した．また，繰返し集中荷重を受けるS字型圧電ハーベスタの電気力学応答に関する試験・有限要素解析を行い，出力電圧・電力を解明・考察した．
- (3) 圧電層とカーボンナノチューブ(CNT)分散ポリカーボネート層からなる圧電/CNT分散ポリカーボネート積層材料を取り上げ，静的・繰返し集中荷重による両端単純支持三点曲げ試験を行い，たわみ及び出力電圧・電力のCNT体積含有率・振動

数依存性を解明・考察した。

- (4) 非鉛系圧電材料・薄膜システムの電気力学応答に関するフェーズフィールド解析プログラムを開発・応用し、分極状態や圧電・誘電特性に及ぼすマイクロ・ナノ構造（分域・分極、結晶粒径等）、添加元素（酸素空孔・欠陥等）、温度等の影響を解明・考察した。
- (5) 直流・交流電場下における水素燃料インジェクター用多層圧電アクチュエータの高温電気力学応答に関する数値シミュレーション・実験を行い、高温における電場誘起ストローク及び電極端近傍電気力学場集中を解明・考察した。
- (6) 傾斜機能圧電デバイスのたわみ・音圧・出力電圧及び内部電気力学場に及ぼす交流電圧及び傾斜組成分布の影響を解明・考察した。

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9件）

F. Narita, R. Hasegawa and Y. Shindo, Electromechanical Response of Multilayer Piezoelectric Actuators for Fuel Injectors at High Temperatures, Journal of Applied Physics, 査読有, 115, 2014, 184103

DOI 10.1063/1.4875487

Y. Shindo and F. Narita, Dynamic Bending/Torsion and Output Power of S-Shaped Piezoelectric Energy Harvesters, International Journal of Mechanics and Materials in Design, 査読有, 10, 2014, 305-311

DOI 10.1007/s10999-014-9247-0

Y. Shindo, F. Narita, S. Okura, T. Takeda and C. Fu, Electromechanical Bending Response

of PZT/CNT-based Polymer Laminates Subjected to Concentrated Load, International Journal of Mechanics and Materials in Design, 査読有, 10, 2014, 193-197

DOI 10.1007/s10999-014-9240-7

Y. Shindo and F. Narita, Cryogenic Fracture of Cracked Piezoelectric Ceramics in Three-Point Bending under Electric Fields, Acta Mechanica, 査読有, 225, 2014, 1313-1321

DOI 10.1007/s00707-013-1047-3

F. Narita, Y. Shindo and M. Sato, Fatigue Behavior of Cracked Piezoelectric Ceramics in Cyclic Three-Point Bending under AC Electric Fields, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, 査読有, 7, 2013, 530-539

Y. Shindo, F. Narita and M. Sato, Effects of Electric Field and Poling on the Mode I Energy Release Rate in Cracked Piezoelectric Ceramics at Cryogenic Temperatures, Acta Mechanica, 査読有, 224, 2013, 2547-2558

DOI 10.1007/s00707-013-0949-4

Y. Shindo, M. Sato and F. Narita, Effects of Electric Field and Poling on the Fatigue of Cracked Piezoelectric Ceramics in Cyclic Three-Point Bending, Journal of Electroceramics, 査読有, 31, 2013, 8-14

DOI 10.1007/s10832-013-9798-8

Y. Shindo and F. Narita, Fracture and Fatigue Behavior of Cracked Piezoelectric Ceramics under Electric Fields, AES Technical Reviews Journals, PART C, 査読有, 1, 2012, 13-20

F. Narita, Y. Morikawa, Y. Shindo and M. Sato, Dynamic Fatigue Behavior of Cracked Piezoelectric Ceramics in Three-Point Bending under AC Electric Fields, Journal of

the European Ceramic Society, 査読有, 32,
2012,3759-3766
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2012.05.033>

[学会発表](計 14 件)

成田史生, 進藤裕英, 交流電場下における燃料インジェクター用多層圧電アクチュエータの高温電気力学応答, 日本機械学会 2015 年度年次大会, 2015 年 9 月 13 日-16 日, 北海道大学工学部 (北海道・札幌市)

成田史生, 大倉宗, 進藤裕英, 竹田智, 繰返し曲げ負荷を受ける PZT/CNT 分散ポリマー積層材料の電気力学的応答, 日本機械学会東北支部第 50 期総会・講演会, 2015 年 3 月 13 日, 東北大学工学研究科・工学部 (宮城県・仙台市)

成田史生, 進藤裕英, 曲げ・ねじり振動による S 字型圧電バイモルフハーベスターの出力電力と電気力学場, 第 58 回日本学術会議材料工学連合講演会, 2014 年 10 月 27 日-28 日, 京都テルサ (京都府・京都市)

F. Narita and Y. Shindo, Cyclic Fatigue Behavior of Cracked Piezoelectric Ceramics in Three-Point Bending under Electric Fields, AES-ATEMA' 2014 18th International Convention on Advances and Trends in Engineering Materials and their Applications, August 11-15, 2014, Tronto (Canada)

長谷川遼平, 進藤裕英, 成田史生, 高温における燃料インジェクター用多層圧電アクチュエータの電気力学応答, 日本機械学会 M&M2014 材料力学カンファレンス, 2014 年 7 月 18 日-21 日, 福島大学金谷川キャンパス (福島県・福島市)

成田史生, 進藤裕英, 傾斜機能圧電バイモルフの非線形検知・応答特性と動的電

気力学場, 第 25 回新構造・機能制御と傾斜機能材料シンポジウム, 2014 年 7 月 10 日-11 日, 郡山ユラックス熱海 (福島県・郡山市)

進藤裕英, 成田史生, S 字型圧電バイモルフハーベスターの動的曲げ・ねじりと出力電力, 第 26 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, 2014 年 5 月 21 日-23 日, アイーナ いわて県民情報交流センター (岩手県・盛岡市)

Y. Shindo and F. Narita, Cryogenic Fracture of Cracked Piezoelectric Ceramics in Three-Point Bending under Electric Fields, SES 50th Annual Technical Meeting and ASME-AMD Annual Summer Meeting, July 28-31, 2013, Providence, Rhode Island (U.S.A.)

Y. Shindo, F. Narita and M. Sato, Effects of Electric Field and Poling on the Cyclic Bending Fatigue in Cracked Piezoceramics, The 13th International Conference on Fracture, June 16-21, 2013, Beijing (China)

F. Narita and Y. Shindo, Fatigue Response of Cracked Piezoceramics in Three-Point Bending under Sinusoidal Mechanical Loads and AC Electric Fields, The Thirteenth Pan-American Congress of Applied Mechanics, May 22-24, 2013, Huston, Texas (U.S.A.)

Y. Shindo and F. Narita, Cryogenic Electromechanical Response of Multilayer $PbZr_{1-x}Ti_xO_3$ Actuators under DC and AC Electric Fields in Hydrogen Fuel Injection Systems, 4th International Conference on Computational Methods, November 25-28, 2012, Gold Coast (Australia)

Y. Shindo and F. Narita, Static and Dynamic Fatigue of Cracked Piezoelectric Ceramics in Three-Point Bending under AC Electric Fields, 23rd International Congress of

Theoretical and Applied Mechanics, August 20-24, 2012, Beijing (China)

Y. Shindo and F. Narita, Fracture and Fatigue Behavior of Cracked Piezoelectric Ceramics under Electric Fields, AES-ATEMA' 2012 Eleventh International Convention on Advances and Trends in Engineering Materials and their Applications, August 6-10, 2012, Toronto (Canada)

Y. Shindo, F. Narita and Y. Morikawa, Dynamic Fatigue of Three-Point Bending PZT Ceramics with a Crack under AC Electric Fields, 8th European Solid Mechanics Conference, July 9-13, 2012, Graz (Austria)

〔図書〕(計2件)

Y. Shindo 他, Pan Stanford Publishing Co., Handbook on Micromechanics and Nanomechanics, 2013, 255-272

Y. Shindo 他, InTech Publishing Company, Smart Actuation and Sensing Systems - Recent Advances and Future Challenges, 2012, 639-656

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

進藤 裕英 (SHINDO, Yasuhide)
東北大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 90111252

(2) 研究分担者

成田史生 (NARITA, Fumio)
東北大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 10312604

竹田 智 (TAKEDA, Tomo)
宇宙航空研究開発機構・航空技術部門・研究員

研究者番号: 70451531
(平成26年度より辞退)