

研究種目：基盤研究(B)  
 研究期間：2006 ～ 2009  
 課題番号：18360052  
 研究課題名（和文） 先端圧電材料・薄膜システムのデバイスメゾ設計と強度・機能評価  
 研究課題名（英文） Meso-scale device design and strength/functional evaluation of advanced piezoelectric material and thin-film systems  
 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

研究成果の概要（和文）：本研究は、次世代知的電子システム、高性能マイクロ・ナノデバイス等の設計法及び信頼性・耐久性評価法を開発することを目的に、先端圧電材料・薄膜システムの電気力学特性及び破壊・疲労特性等に及ぼす電場及び分域壁移動・分極回転の影響を理論・実験両面から解明したものである。

研究成果の概要（英文）：In order to develop design criteria to ensure the reliability and long-life capability of novel smart electronic systems, high performance micro/nano devices, etc., we investigated the effects of electric fields, domain wall motion and polarization switching on the electromechanical and fracture/fatigue properties of advanced piezoelectric material and thin-film systems theoretically and experimentally.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	9,000,000	2,700,000	11,700,000
2007 年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2008 年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2009 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
総計	15,000,000	4,500,000	19,500,000

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：圧電材料力学，メゾ強度・機能学，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，知的・電子材料システム，  
 マイクロ・ナノデバイス

## 1. 研究開始当初の背景

次世代電子デバイスの設計・開発・評価には、メゾ電気材料力学に基づく圧電材料・薄膜システムの強度・機能特性の解明が肝要である。また、圧電材料・薄膜システムでは、応力・電場がある臨界値を超えると結晶粒内の分極が回転し、き裂・電極端近傍の応力・電場集中領域において、分極回転に起因するヒステリシス特性が示されるため、圧電材料・薄膜システムの破壊過程理解のためには、き裂・電極端近傍における分極回転を考慮した非線形破壊・力学特性の定量的評価が重要となる。さらに、小型・薄型電子デバイスの高直流・交流電場駆動に伴い、分極処理で揃えきれなかった  $90^\circ$  分域の回転（分域壁移動）による非線形現象も問題となり、その解明が要望されている。マクロ構造の電気力学及び破壊・疲労特性を解明するためマイクロ構造まで分解して解析する場合、膨大な計算量になることが予測され、また、マクロ構造の観点から解析する場合には、平均の結果しか得られず、実際の電気力学及び破壊・疲労特性を説明できない場合も多い。

## 2. 研究の目的

本研究は、先端圧電材料・薄膜システムの電気力学及び破壊・疲労特性等を、マイクロ・ナノ構造を考慮したメゾ電気材料力学に基づき解明するもので、環境適合型次世代知能電子システム、高性能マイクロ・ナノデバイス等の設計法及び信頼性・耐久性評価法を開発することを目的としている。

## 3. 研究の方法

(1) 圧電材料・薄膜システムのメゾ構造領域（き裂・電極端近傍における分域・結晶粒の

集合体、マイクロボイド・クラック及び不純物等がある程度集合した構造）をモデル化し、電気力学特性に及ぼす微視構造（結晶構造・組織）の影響を明らかにして、メゾ特性を予測する。また、得られた結果を考察し、メゾ構造に関する上記モデルの有効性・合理性を検証する。さらに、メゾ構造領域を有する圧電材料・薄膜システムのマクロ電気力学特性に関する数値シミュレーションを行い、圧電特性（電場誘起ひずみ・応力誘起電荷）・インピーダンス測定結果と比較して、解析モデルの妥当性検証及びモデル修正を行う。そして、メゾ強度・機能特性評価のための数値シミュレーション技術を確立し、デバイス特性評価に応用する。

(2) 圧電材料・薄膜システムのき裂・電極メゾ特性に関する数値シミュレーション・実験を行い、き裂・電極特性に及ぼす分域壁移動・分極回転及び負荷電場（直流・交流）の影響を解明する。また、マイクロボイド・クラック及び不純物等の集団現象についても検討を加えてデバイスメゾ設計に資する。

(3) 圧電材料・薄膜システムの電気破壊・疲労試験及び数値シミュレーションを行い、メゾ構造を考慮して破壊・疲労特性に及ぼす負荷電場の影響を解明する。

(4) 圧電材料・薄膜システムのメゾ強度・機能特性に及ぼす材料組成、点欠陥（空孔・添加元素・イオン等）及び焼成・分極条件等の影響を解明し、新しいデバイス材料・構造提案に資する。

## 4. 研究成果

(1) き裂を有する圧電材料システムの電気破壊力学的挙動を理論的に解明した。また、エネルギー解放率等の破壊力学パラメータを求

める際問題となっているき裂面電氣的境界条件 (Permeable, Discharging, Open 及び Impermeable き裂) についても考察を加えた。

(2) 電場下における片側縁き裂を有する圧電セラミックスの三点曲げによる破壊・疲労挙動を解明・考察した。①遅れ破壊試験・有限要素解析を行い、エネルギー解放率 (局所分極回転の影響考慮) 及び破断時間に及ぼす電場の影響を解明した。②繰返し疲労き裂進展試験及び有限要素解析を行い、き裂進展速度-最大エネルギー解放率曲線を求めて、電場の影響を解明した。③動疲労 (定負荷速度) 試験を行い、破壊荷重及びき裂長さに及ぼす電場の影響を解明した。また、エネルギー解放率の有限要素解析を行い、き裂進展速度との関連を明らかにして、実験結果に理論的検討を加えた。

(3) 圧電トランスの周波数特性評価に関する実験・有限要素解析を行い、動的電気力学場に及ぼす印加交流電圧・周波数及び抵抗・静電容量の影響を解明した。

(4) 傾斜機能圧電アクチュエータ・センサの曲げ試験及び有限要素解析を行い、感知・応答特性に及ぼす電気力学的負荷及び分隔壁移動の影響を明らかにした。

(5) ①完全・部分分極積層圧電アクチュエータの応答特性に関する実験・非線形有限要素解析を行い、出力変位及び表面・内部電極端近傍電気力学場集中に及ぼす電場・分極回転の影響を解明した。②円形電極を有する圧電複合アクチュエータの電極端近傍における電気力学場集中を解明した。

## 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 15 件)

1. F. Narita, Y. Shindo and M. Hirama, Electric Delayed Fracture and Localized Polarization Switching of Cracked Piezoelectric Ceramics in Three-Point Bending, International Journal of Damage Mechanics, 査読有, 19 (2010), 285-300.
2. Y. Shindo, F. Narita and M. Hirama, Fatigue Crack Propagation in Three-Point Bending Piezoceramics under Electromechanical Loading, AES Technical Reviews Journals, Part B: International Journal of Advances in Mechanics and Applications of Industrial Materials, 査読有, 1-1 (2009), 11-21.
3. Y. Shindo, F. Narita and J. Nakagawa, Nonlinear Dynamic Bending and Self-Sensing of Clamped-Clamped Functionally Graded Piezoelectric Transducers under AC Voltage, Mechanics of Advanced Materials and Structures, 査読有, 16-7 (2009), 536-541.
4. Y. Shindo, F. Narita and M. Hirama, Electromechanical Field Concentrations near the Electrode Tip in Partially Poled Multilayer Piezo-Film Actuators, Smart Materials and Structures, 査読有, 18 (2009), 085020 (7 pages).
5. Y. Shindo, F. Narita and M. Hirama, Dynamic Fatigue of Cracked Piezoelectric Ceramics under Electromechanical Loading: Three-Point Bending Test and Finite Element Analysis, Journal of Mechanics of Materials and Structures, 査読有, 4-4 (2009) 719-729.
6. Y. Shindo, F. Narita and M. Hirama, Effect of the Electrical Boundary Condition at the Crack Face on the Mode I Energy Release

- Rate in Piezoelectric Ceramics, Applied Physics Letters, 査読有, 94 (2009) 081902 (3 pages).
7. Y. Shindo, F. Narita and J. Nakagawa, Dynamic Electromechanical Response and Self-Sensing of Functionally Graded Piezoelectric Cantilever Transducers, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 査読有, 20-1 (2009) 119-126.
  8. Y. Shindo, F. Narita and F. Saito, Electroelastic Intensification and Domain Switching near Plane Strain Crack in Rectangular Piezoelectric Material, Journal of Mechanics of Materials and Structures, 査読有, 2-8 (2007) 1525-1540.
  9. Y. Shindo, F. Narita and J. Nakagawa, Nonlinear Bending Characteristics and Sound Pressure Level of Functionally Graded Piezoelectric Actuators by AC Electric Fields: Simulation and Experiment, Smart Materials and Structures, 査読有, 16 (2007) 2296-2301.
  10. Y. Shindo, F. Narita, J. Nakagawa and Y. Mito, Characteristics of Detection and Response in Functionally Graded Piezoelectric Sensors and Actuators, AES Technical Reviews Journals, Part B: International Journal of Advances in Mechanics and Applications of Industrial Materials, 査読有, 1- 1 (2007) 79-86.
  11. F. Narita, Y. Shindo and F. Saito, Cyclic Fatigue Crack Growth in Three-Point Bending PZT Ceramics under Electromechanical Loading, Journal of the American Ceramic Society, 査読有, 90-8 (2007) 2517-2524.
  12. F. Narita, Y. Shindo and M. Mikami, Electroelastic Field Concentrations and Polarization Switching Induced by Circular Electrode at the Interface of Piezoelectric Disk Composites, European Journal of Mechanics, A/Solids, 査読有, 26-3 (2007) 394-404.
  13. F. Narita, Y. Shindo and S. Lin, Axially Poled Solid Cylinder under Tension with a Flat Annular Crack, Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik, 査読有, 87-4 (2007) 278-289.
  14. Y. Shindo, F. Narita and F. Saito, Static Fatigue Behavior of Cracked Piezoelectric Ceramics in Three-Point Bending under Electric Fields, Journal of the European Ceramic Society, 査読有, 27-10 (2007) 3135-3140.
  15. F. Narita, Y. Shindo, F. Saito and M. Mikami, Testing and Analysis of High Frequency Electroelastic Characteristics of Piezoelectric Transformers, Archives of Mechanics, 査読有, 59-2 (2007) 119-131.
- [学会発表] (計 18 件)
- 国際会議
1. Y. Shindo and F. Narita, Effects of Electric Field and Poling on Fatigue Behavior of PZT Ceramics with Single-Edge Crack by Three-Point Bending (Invited), IUTAM Symposium, Multiscale Modelling of Fatigue, Damage, and Fracture in Smart Materials Systems, September 1-4, 2009, TU Bergakademie Freiberg, Germany.
  2. Y. Shindo, F. Narita and M. Hiram, Delayed Fracture of Cracked Piezoelectric Ceramics under Electromechanical Loading in Three-Point Bending (Keynote), The 12th International Conference on Fracture, July

- 12-17, 2009, Ottawa, Canada.
3. Y. Shindo and F. Narita, Mode I Energy Release Rate in Cracked Piezoelectric Ceramics under Electric Fields (Kyenote), Third International Conference on Advances and Trends in Engineering Materials and their Applications, July 6-10, 2009, Montreal, Canada.
  4. Y. Shindo and F. Narita, Electromechanical Response and Polarization Switching of Electroded Piezoelectric Material Systems (Invited), The Third Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Applications, December 5-8, 2008, Nanjing, China.
  5. Y. Shindo, F. Narita and M. Hirama, Fatigue Crack Propagation in Three-Point Bending Piezoceramics under Electromechanical Loading (Kyenote), International Conference on Advances and Trends in Engineering Materials and their Applications, September 1-5, 2008, Cesena, Italy.
  6. Y. Shindo, Mechanical Behavior of Electroded Piezoelectric Material Systems for Smart Device Applications (Plenary), International Conference on Advances and Trends in Engineering Materials and their Applications, September 1-5, 2008, Cesena, Italy.
  7. Y. Shindo, F. Narita and M. Hirama, Dynamic Fatigue Behavior of Cracked Piezoelectric Ceramics in Three-Point Bending under Electromechanical Loading, 22<sup>st</sup> International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, August 24-29, 2008, Adelaide, Australia.
  8. F. Narita, J. Nakagawa and Y. Shindo, Nonlinear Dynamic Response and Self-Sensing of Functionally Graded Piezoelectric Transducers, 22<sup>st</sup> International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, August 24-29, 2008, Adelaide, Australia.
  9. Y. Shindo, F. Narita and M. Hirama, Effects of Electric Field and Poling on the Response of Multilayer Piezoelectric Film Actuators with Partial Electrodes, SPIE 15th Annual International Symposium on Smart Structures/NDE, March 9-13, 2008, San Diego, CA, U.S.A.
  10. Y. Shindo, F. Narita, J. Nakagawa and Y. Mito, Characteristics of Detection and Response in Functionally Graded Piezoelectric Sensors and Actuators (Kyenote), International Conference on Advances and Trends in Engineering Materials and their Applications, August 6-10, 2007, Montreal, Canada.
  11. Y. Shindo, F. Narita and J. Nakagawa, Nonlinear Dynamic Deflection and Sound Level in Functionally Graded Piezoelectric Actuators under AC Electric Fields (Invited), Fifth International Conference on Nonlinear Mechanics, Mini-Symposium on the Mechanics of Electromagnetic Materials and Structures, June 11-14, 2007, Shanghai, China.

#### 国内学会

1. 進藤裕英, 成田史生, 片側縁き裂を有する圧電セラミックスの三点曲げ疲労挙動に及ぼす電場・分極の影響, 第14回破壊力学シンポジウム, 2009.10.23-24, 大濱信泉記念館.
2. 成田史生, 進藤裕英, 電場下におけるき

裂を有する圧電セラミックスの三点曲げによる遅れ破壊・局所分極回転, 日本機械学会M&M2009 材料力学カンファレンス, 2009.7.24-26, 札幌コンベンションセンター “SORA”.

3. 成田史生, 進藤裕英, 傾斜機能圧電カンチレバーの非線形動的応答特性と自己センシング, 日本金属学会 2009 年春期 (第 144 回) 大会, 2009.3.28-30, 東京工業大学大岡山キャンパス.
4. 成田史生, 進藤裕英, 平間 充, 部分電極を有する多層圧電薄膜アクチュエータの応答特性に及ぼす電場・分極の影響, 日本機械学会M&M2008 材料力学カンファレンス, 2008.9.16-18, 立命館大学 びわこ・くさつキャンパス.
5. 平間 充, 進藤裕英, 成田史生, 電場下におけるき裂を有する圧電セラミックスの三点曲げによる動疲労挙動, 第 20 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, 2008.5.21-23, 別府ビーコンプラザ.
6. 成田史生, 進藤裕英, 電場下における圧電セラミックスの三点曲げによる繰返し疲労き裂進展, 日本機械学会M&M2007 材料力学カンファレンス, 2007.10.24-26, 東京大学 生産技術研究所.
7. 中川 淳, 成田史生, 進藤裕英, 水戸裕也, 傾斜機能圧電センサ・アクチュエータの感知・応答特性, 第 19 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, 2007.5.16-18, 早稲田大学 国際会議場.

〔図書〕 (計 1 件)

Yasuhide Shindo, Springer, Special Topics in the Theory of Piezoelectricity, Yang, Jiashi (Ed.), 4 Fracture and Crack Mechanics, 2009, pp. 81-135.

〔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:  
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

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

##### (3) 連携研究者

( )

研究者番号: