

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 1 日現在

機関番号：11301  
 研究種目：挑戦的萌芽研究  
 研究期間：2009～2011  
 課題番号：21656029  
 研究課題名（和文） 極限環境における水素燃料インジェクター用材料システムの  
 圧電メゾ破壊・疲労特性解明  
 研究課題名（英文） Understanding of Piezo Mesoscopic Fracture and Fatigue Properties  
 of Material Systems for Hydrogen Fuel Injectors under Severe Environments  
 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、環境にやさしい高性能クリーン燃料噴射装置（インジェクター）の設計法及び信頼性・耐久性評価法開発を目的に、クリーンエネルギー車・ロケット等に用いられる水素エンジンの燃料インジェクター用材料システム（多層圧電アクチュエータ等）を取り上げ、微視構造や局所分極回転・分域壁移動等の影響を考慮して、極限環境における圧電力学特性やメゾ破壊・疲労特性を理論・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 eco-friendly hydrogen fuel injectors for clean energy cars and rocket engines, we investigated the effects of microstructures, localized domain switching, domain wall motion etc. on the electromechanical properties and mesoscopic fracture/fatigue properties of piezoelectric material systems (e.g. multilayer piezoelectric actuators) under severe environments theoretically and experimentally.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,100,000	0	1,100,000
2010 年度	900,000	0	900,000
2011 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	330,000	3,430,000

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，電気破壊・疲労，水素燃料インジェクター，クリーンエネルギー自動車

1. 研究開始当初の背景

最近，地球環境・エネルギー問題を背景に，

水素を燃料とする自動車の開発が国内外で盛んに進められている。また，水素燃料は，

ロケット分野においても重要な役割を果たしている。上記水素エネルギー技術に関連し、水素燃料インジェクターが作製され、簡単な計測による性能評価が行われているが、その学術的解釈は不十分である。また、燃料インジェクターは、極限環境で使用され、噴射スピード・タイミング・圧力等の制御には、圧電素子の利用が注目されており、燃料インジェクター用材料システムの極限環境における電気力学特性解明も重要となる。さらに、水素燃料インジェクターの高性能・長寿命化のためには、燃料インジェクター用材料システムの極限環境性能評価法（微視構造考慮）を確立し、圧電メゾ破壊・疲労特性を解明・制御することが肝要となる。これについては、これまで全く研究例が無いようである。

研究代表者は、これまで、電磁メゾ材料・破壊力学的研究を行い、電磁材料力学やメゾ・ナノ力学に関する国際シンポジウムを多数主催して、国際雑誌特集号等も編集・発刊しており、これらの研究は、国際的にも多くの研究者から注目を集めている。また、極低温用構造材料の設計・開発・評価及び試験方法標準化(JIS化・ISO化)に資することを目的に、クライオメカニクス・強磁場破壊力学に関する基礎研究を国際的標準化活動である Versailles Project on Advanced Materials and Standards (VAMAS)との強い連携のもとに行い、極低温用構造材料の統合的な知的基盤整備を推進している。さらに最近では、先端電磁材料システムの破壊・変形挙動を内部微視構造を考慮して解明し、国際会議において招待講演等を行っている。圧電材料システムのメゾ強度・機能特性に関する研究は、これまで研究代表者らにより非線形数値シミュレーション・実験が行われてきたが、極限環境における圧電材料システムを対象とした数値シミュレーション・実験につい

ては全く未開発の状況にある。従って、これまでの研究成果を進展させ、極限環境における燃料インジェクター用材料システムの圧電メゾ破壊・疲労特性に関する研究を行い、その役割を明確にして次世代クリーン燃料インジェクター設計に資することが肝要であり、これが本研究の着想に至った経緯である。

## 2. 研究の目的

本研究は、クリーンエネルギー車・ロケット等に用いられる水素エンジンの燃料インジェクター用材料システムを取り上げ、微視構造の影響を考慮して、極限環境（極低温等）における圧電メゾ破壊・疲労特性を理論・実験両面から解明するものである。また、極限環境燃料インジェクター設計のための数値シミュレーション・試験法を開発・応用し、圧電メゾ破壊・疲労特性を解明・制御して、高性能・長寿命化を図ることを目的としている。

## 3. 研究の方法

本研究は、極限環境における燃料インジェクター用材料システムの圧電メゾ破壊・疲労特性を理論・実験両面から解明するものである。具体的には、水素燃料インジェクターを構成する多層圧電薄膜アクチュエータ等のモデリングを行い、極限環境におけるメゾ破壊・疲労特性に関する数値シミュレーション（原子・分子構造、結晶構造・組織、分極・分極、マイクロクラック等考慮）を実施する。また、燃料インジェクター用材料システムの極限環境における性能試験を行い、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、極限環境の圧電メゾ破壊・疲労特性を解明・制御し、燃料インジェクター用材料システムの高性能

能・長寿命化を図る。

#### 4. 研究成果

(1) ① 電場下における多層圧電アクチュエータの極低温電気力学応答を理論・実験両面から解明した。実験は、クライオスタット内の圧電試験片にヘリウムガスを連続的に供給して行い、電場による試験片表面の伸びひずみを計測した。また、圧電定数・抗電場の温度依存性をジルコン酸チタン酸鉛(PZT)の自由エネルギー・分域壁エネルギーを利用して求め、電場誘起ひずみに関する有限要素解析を行って、ひずみ計測結果に理論的検討を加えた。さらに、極低温における電極端近傍の電気力学場集中および局所分極回転を解明・考察し、電極構造設計に関する有用な結果を得た。

② 交流電場下における多層圧電アクチュエータの極低温動的電気力学応答を解明した。実験は、クライオスタット内の極低温下で行い、交流電場誘起ひずみを計測した。また、有限要素解析は、圧電定数・抗電場の温度依存性および分域壁移動を考慮して行い、交流電場誘起ひずみを求めて、実験結果に理論的検討を加えた。さらに、電極端近傍における極低温動的電気力学場集中を解明・考察し、インジェクター設計上有益な結果を得た。

(2) ① 電場下における片側縁き裂を有するPZT系圧電セラミックスを取り上げ、極低温における3点曲げ破壊試験を行って、破壊荷重・き裂進展量を測定した。圧電分極・電場は、き裂面に垂直な試験片長さ方向の場合を考えた。また、走査型電子顕微鏡による破面観察およびエネルギー解放率の有限要素解析(圧電定数・抗電場の温度依存性考慮)を行い、理論・実験両面から検討・考察を加えた。

② 片側縁き裂を有するPZT系圧電セラミックスの極低温破壊・疲労特性に及ぼす交流電場の影響に関する基礎的検討を行い、興味ある結果を得た。

#### 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4件)

- ① Yasuhide Shindo, Takayoshi Sasakura and Fumio Narita, Dynamic Electromechanical Response of Multilayered Piezoelectric Composites from Room to Cryogenic Temperatures for Fuel Injector Applications, ASME Journal of Engineering Materials and Technology, 査読有り, in press.
- ② Yasuhide Shindo, Fumio Narita and Takayoshi Sasakura, Cryogenic Electromechanical Behavior of Multilayer Piezo-Actuators for Fuel Injector Applications, Journal of Applied Physics, 査読有り, Vol.110, 2011, p. 084510.

[学会発表] (計4件)

国際会議

- ① Yasuhide Shindo, Fumio Narita, Koji Sato and Takayoshi Sasakura, Electromechanical Response of Multilayer Piezoelectric Actuators for Fuel Injectors from Room to Cryogenic Temperatures, 3rd International Conference on Heterogeneous Material Mechanics (基調講演), 2011.5.25, Bao

Dao resort, ChongMing Island,  
Shanghai, China

国内学会

- ② 進藤裕英, 成田史生, 燃料インジェクター用多層圧電アクチュエータの極低温電気力学応答, 第24回「電磁力関連のダイナミックス」, 2012.5.16, 富山国際会議場
- ③ 成田史生, 進藤裕英, 極低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動的電気力学応答, 第61回理論応用力学講演会, 2012.3.8, 東京大学生産技術研究所
- ④ 笹倉崇義, 進藤裕英, 成田史生, 極低温環境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&M2011 材料力学カンファレンス, 2011.7.17, 九州工業大学

[図書] (計1件)

- ① Yasuhide Shindo, Fumio Narita, InTech Publishing Company, Piezomechanics in PZT Stack Actuators for Cryogenic Fuel Injectors, Smart Actuation and Sensing Systems - Recent Advances and Future Challenges, 2012, in press.

[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

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：