

令和 6 年 6 月 18 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04703

研究課題名（和文）機能性材料の分極疲労特性を利用した構造物の余寿命診断センサに関する研究

研究課題名（英文）Research on fatigue diagnosis of structures using the polarization fatigue characteristics of piezoelectric materials

研究代表者

佐藤 宏司（Sato, Hiroshi）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・主任研究員

研究者番号：70344166

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：機械要素へ余寿命判断デバイスを応用するために、スラスト型転動試験機で駆動用圧電素子の出力検出試験を行った。ボールベアリング等の機械要素には直接駆動用圧電素子を設置することが困難なため、試験機周辺に駆動用の圧電材を取り付けたが、出力される信号は記録用のセンサを分極反転させるには極めて微弱であり、余寿命判断センサ自体の再設計が必要になった。またノイズが極めて高く、正確な振動履歴を記録することが困難なため、パッシブフィルタを駆動用圧電素子と記録用センサの間に加えた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

強誘電性薄膜の厚み、センササイズ、分極電圧、分極周波数等の様々なパラメータを変化させた場合の残留分極の疲労状況を評価し、データマップの作成を行った。このデータマップを利用することにより、強誘電体薄膜センサの分極反転疲労状況から、構造体にこれまで加わった振動履歴を同定することができ、算出した振動履歴から、構造体の余寿命を判断することが可能となる。

研究成果の概要（英文）：To apply a remaining life judgment device to mechanical components, a test was conducted to detect the output of the driving piezoelectric element using a thrust-type rolling test machine. Since it was difficult to directly install the driving piezoelectric element on mechanical components such as ball bearings, a piezoelectric material for driving was attached around the test machine. However, the signal output was extremely weak for polarizing the recording sensor, necessitating a redesign of the remaining life judgment sensor itself. Additionally, due to extremely high noise, it was difficult to record accurate vibration histories, so a passive filter was added between the driving piezoelectric element and the recording sensor.

研究分野：センサ、アクチュエータ、エネルギーハーベスト

キーワード：圧電 分極反転疲労 エネルギーハーベスト

1. 研究開始当初の背景

2011年3月11日に我が国を襲った東日本大震災は、これまで想定していなかった規模の地震や津波により建築物が倒壊し多くの一次被害を出した。しかし余震はいまだに続いており、倒壊を免れた建築物にも、いずれ繰り返し疲労による破壊の危険性がある。このような疲労破壊による事故を未然に防ぐために、これまでは定期的に見視、金槌で叩き反射音による検査、X線や超音波による直接的な診断が行われている。しかし見視では内部構造までは診断は行えず、反射音による検査は人の耳に頼るため検査を行う人間の熟練度によって正確さや作業効率が大きく変わってしまう。またX線や超音波診断を用いて内部の疲労による損傷個所の診断を行なう手段では、メンテナンスコストが上がるため原子力発電所やトンネル、橋や陸橋等の公共の大型建造物にしか利用されていない。特に一般家屋はこのような定期的な診断はこれまでほとんど行われていない。

2. 研究の目的

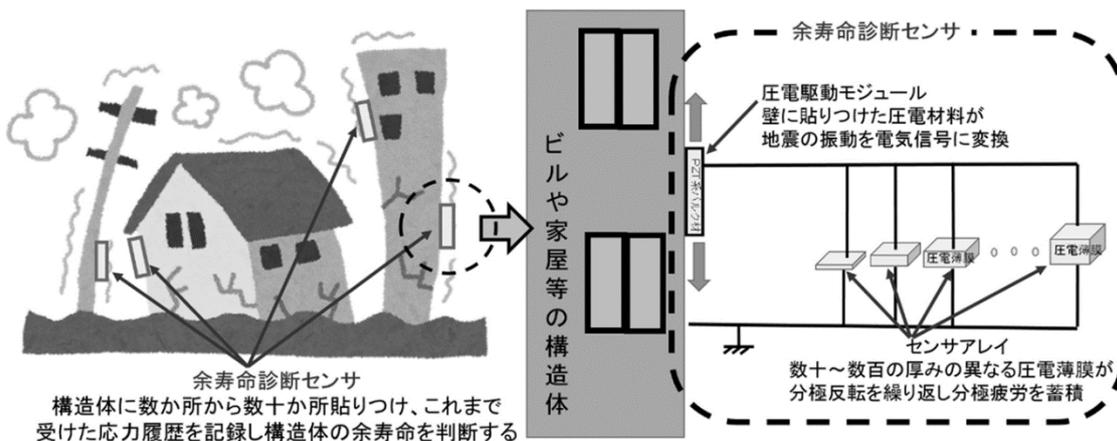


図1 余寿命診断センサの概念図

より手軽に構造体の疲労を診断する方法として、我々は構造物に加わった疲労の蓄積を数年から数十年というような長期間にわたって定量的に記録し、その構造体の余寿命判断の指標となる余寿命判断センサの研究を行ってきた。図1に示すように構造に加わった機械的な歪みの変化を圧電デバイスで電圧の変化に変換し、その歪から変換された電圧を利用して強誘電性材料の分極を繰り返し反転させるだけの構造であり、外部からのエネルギー供給無しに、半永久的に分極反転を繰り返し、分極反転の疲労特性として記録続けることが可能である。この余寿命判断センサを構造物の様々な個所に取り付け、定期的に分極反転疲労を評価を行えば、これまで構造体の「どの箇所」が、「どのような大きさの歪み」を、「どの程度の回数受けてきたか」の情報が蓄積され、それらの情報をもとに構造物の損傷個所の予測が可能となる。同じ構造物であっても立地場所やこれまでの環境により必ずしも同じ個所が破損するとは限らず、個々の構造物の各箇所の定量的な疲労蓄積データは余寿命判断のための情報として極めて有効である。

強誘電体メモリのFRAM (Ferroelectric Random Access Memory) は、高速動作の特長をもつ不揮発性メモリで、データ保持にバッテリーバックアップが不要で、EEPROM やフラッシュメモリなどの不揮発性メモリと比較して、高速書込み、高書換え回数、低消費電力の点で優位性があり、現在様々なところで利用されている。強誘電体のヒステリシス (履歴効果) に因る正負の残留分極 (自発分極) をデジタルデータの1と0に対応させ記録をしている。強誘電体膜内部の結晶粒界や結晶欠陥に起因する分極反転疲労により書き換え回数は有限 (10の12乗程度) であり、この疲労を抑制する研究が国内外で積極的に進められているが、逆に我々はこの強誘電体メモリ等に利用されているPZT系圧電薄膜の分極疲労現象を積極的に数取機 (カウンター) として利用できることを示した (特許3731049号「圧電振動エネルギーセンサ」佐藤 宏司, 飯島 高志)。Siウエハ上に作製した様々な厚みと大きさのPZT薄膜を作製し、分極疲労特性を評価を行った。同じPZT薄膜でも厚みや電極の大きさを変化させ様々な疲労特性を得ることに成功した。

一方で、圧電材料を利用したエナジーハーベスト (環境発電) は東京駅の改札口で実証実験が行われた発電床や首都高速道路の五色桜大橋での振動発電などさまざまなところで実用化を目指した実験が行われているが、実用化には至っていない。この原因として、圧電材料から出力される電力はインピーダンスが極めて高いため、インピーダンスの低いコンデンサーやバッテリー等へ充電を行うにはロスが大きいことが原因である。我々が今回提案を行っている余寿命診断センサでも圧電材料を利用し、構造体に加わる歪や振動エネルギーから電気エネルギーに変換しているが、得られた電気エネルギーを二次電池等に充電して利用するのではなく、図1に示す

ように直接インピーダンスの高い強誘電性薄膜コンデンサーに加え、薄膜の分極反転に利用しているため、電氣的なインピーダンスのミスマッチが起こらず、歪や振動エネルギーから変換された電気エネルギーをインピーダンス変換を行わずにすべて強誘電性薄膜の分極反転に利用することが可能である。

従来の歪み検出センサとその計測システムとは異なり、歪みエネルギーを電気エネルギーに変換する圧電デバイスと、変換された電気エネルギーを用いて分極反転を繰り返し、残留分極の疲労情報として振動の回数を記録する振動記録デバイス（強誘電性薄膜）から成り立っており、外部から電気エネルギー供給無しに動作する。分極反転疲労情報を用いることにより10の5～10乗回といった膨大な歪み回数を記録可能であり、構造物がこれまで受けてきた疲労の蓄積を定量的に示し、余寿命を評価するときの指標に利用可能である。本デバイスは正しい余寿命判断を行うための技術であり、安全安心な社会構築に有効である。

### 3. 研究の方法

今回、3年間の研究期間内に大きく3つの研究項目を行い、分極疲労現象の解明、およびさまざまな条件における分極疲労を調べ、本システムが有効であることを示す。

- ①様々な強誘電性材料を用いて、薄膜センサアレイの厚みや電極面積、疲労させる電圧等のパラメータを変化させる場合の残留分極の疲労に関するデータマップの構築を行う。材料や用いる環境により分極反転疲労のスピードは異なっているため、様々な分極疲労特性を持つ強誘電性薄膜をセンサとして利用すれば、より高精度の数取機（カウンター）が作製できる。
- ②歪みを電気エネルギー変換する圧電駆動モジュールの最適設計、及び試作・評価を行う。構造体に生じた歪みから各種条件の異なるセンサを多く駆動させるために必要な電気エネルギーを効率良く得るための最適な形状の探索、及び変換できる電気エネルギーの評価を行う
- ③強誘電性薄膜センサアレイと圧電駆動モジュールを組み合わせた疲労記録システムとしての評価を行い本システムが有効であることを示す。疲労精度を向上させるにはセンサの面積を大きく（残留分極の変化を大きく）、厚みの異なるセンサを多く（様々な歪み量に対応できるセンサの数を多く）、同じ形状のセンサを複数用いて変化量の平均化を行うことが有効である。しかしそのためには圧電駆動モジュール側に大きな負担がかかるためモジュールを大きくする必要がある。疲労精度とサイズとのトレードオフを考慮したシステムを試作し本システムが有効であることを示す。

### 4. 研究成果

分極疲労特性の評価を自動測定するシステム開発を行い、300℃近辺（キューリー一点前後での分極の影響、温度が上昇した場合、温度が下降した場合等、様々な条件で自動測定が可能なシステムの開発を行った。本システムを用いて、残留分極疲労に関するデータマップを作成した。強誘電性薄膜の厚み、センササイズ、分極電圧、分極周波数を変化させた場合の残留分極の疲労状況を測定し、データマップを作成し、センサの分極反転疲労状況から、構造体の振動疲労状況を求めることが可能となった。

また歪みを電気エネルギー変換する圧電駆動モジュールを試作し、構造体に発生する振動からセンサ側の残留分極反転をさせることに成功し、本システムが有効に機能していることを示した。

また欧州を中心に機械要素のCE（サーキュラーエコノミー）化が進められているのに対応し、本研究では機械要素のCE化のための信頼性担保を履歴管理により行う余寿命判断デバイスの開発を行った。スラスト型転動試験機を用いて、機械要素の代表例としてボールベアリングの振動、疲労監視を駆動用圧電素子で行い、その出力電圧、出力周波数の評価を行った。

ボールベアリング等の機械要素には直接駆動用圧電素子を設置することが困難なため、試験機周辺に駆動用の圧電材を取り付けたが、出力される信号は記録用のセンサを分極反転させるには極めて微弱であったため、余寿命判断センサ自体を従来の水熱合成法から、より薄く緻密な強誘電性薄膜を作成することのできるゾルゲル法による作製を行った。シリコンウエハ上にPZT前駆体溶液をスピニングで塗布し、焼結処理を行うことにより、膜厚が0.05μm～0.2μmの様々な厚みの強誘電性薄膜を作成し、機械要素による微弱な振動でも分極疲労が可能な膜の作成に成功した。またノイズが極めて高く、正確な振動履歴を記録することが困難なため、パッシブフィルタを駆動用圧電素子と記録用センサの間に加え、ボールベアリングの駆動振動（5Hz）、傷による振動（200Hz）を分けて積算し記録を行い、より精度の高い余寿命の判断を行うことのできる余寿命判断デバイスを作成した。

本デバイスを利用することにより、これまでの使用履歴を正確に記録することができるため、機械要素の信頼性を保証することが可能となる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------